

DC

中华人民共和国国家标准



GB 50790 – 2013

---

# $\pm 800\text{kV}$ 直流架空输电线路设计规范

Code for designing of  $\pm 800\text{kV}$  DC overhead transmission line

2012 – 12 – 25 发布

2013 – 05 – 01 实施

---

中华人民共和国住房和城乡建设部  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

# ±800kV 直流架空输电线路设计规范

Code for designing of ±800kV DC overhead transmission line

**GB 50790 - 2013**

主编部门:中国电力企业联合会

批准部门:中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期:2013年5月1日

中国计划出版社

**2013 北 京**

中华人民共和国国家标准  
**±800kV 直流架空输电线路设计规范**  
GB 50790-2013

☆

中国计划出版社出版

网址: [www.jhpress.com](http://www.jhpress.com)

地址: 北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 4 层

邮政编码: 100038 电话: (010) 63906433 (发行部)

新华书店北京发行所发行

北京世知印务有限公司印刷

---

850mm×1168mm 1/32 5.75 印张 143 千字

2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷

☆

统一书号: 1580242 · 017

定价: 35.00 元

版权所有 侵权必究

侵权举报电话: (010) 63906404

如有印装质量问题, 请寄本社出版部调换

# 中华人民共和国住房和城乡建设部公告

第 1595 号

## 住房城乡建设部关于发布国家标准 《±800kV 直流架空输电线路设计规范》的公告

现批准《±800kV 直流架空输电线路设计规范》为国家标准，编号为 GB 50790—2013，自 2013 年 5 月 1 日起实施。其中，第 5.0.2、5.0.3、5.0.8、6.0.4、13.0.2、13.0.3、13.0.9（1）条（款）为强制性条文，必须严格执行。

本规范由我部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2012 年 12 月 25 日

## 前 言

本规范是根据住房和城乡建设部《关于印发〈2008 年工程建设标准规范制订、修订计划(第二批)〉的通知》(建标〔2008〕105 号)的要求,由中国电力企业联合会、中国电力工程顾问集团公司、中国南方电网有限责任公司会同有关单位编制而成。

本规范在编制过程中,编制组进行了深入的调查研究,认真总结了实践经验,并广泛征求了意见。

本规范共分 16 章 5 个附录,主要内容包括:总则,术语和符号,路径,气象条件,导线和地线,绝缘子和金具,绝缘配合、防雷和接地,导线布置,杆塔型式,杆塔荷载及材料,杆塔结构,基础,对地距离及交叉跨越,环境保护,劳动安全和工业卫生,附属设施。

本规范中以黑体字标志的条文为强制性条文,必须严格执行。

本规范由住房和城乡建设部负责管理和对强制性条文的解释,由中国电力企业联合会负责日常管理,由中国电力工程顾问集团公司负责具体技术内容的解释。执行过程如有意见或建议,请寄送中国电力工程顾问集团公司(地址:北京市西城区安德路 65 号,邮政编码:100120)。

**本 规 范 主 编 单 位:**中国电力企业联合会

中国电力工程顾问集团公司

中国南方电网有限责任公司

**本 规 范 参 编 单 位:**国家电网公司

中国电力工程顾问集团西南电力设计院

中国电力工程顾问集团中南电力设计院

中国电力工程顾问集团华东电力设计院

中国电力工程顾问集团东北电力设计院  
中国电力工程顾问集团西北电力设计院  
中国电力工程顾问集团华北电力设计院  
工程有限公司  
广东省电力设计研究院

本规范主要起草人员:于 刚 刘泽洪 李品清 梁政平  
李勇伟 李喜来 俞 彦 余 军  
王 强 李永双 段松涛 周 康  
胡红春 刘仲全 王景朝 赵胜计  
朱永平 张国良 赵全江 龚永光  
曹玉杰 廖宗高 江卫华 廖 毅  
李 力 肖洪伟 薛春林 庄志伟  
王虎长 李 晋 侯中伟 高福军  
孙 波 夏 波 苗桂良 徐 力  
干 非 张红志 万建成 寻 凯  
王 洪

本规范主要审查人员:郭跃明 马志坚 赵江涛 杨崇儒  
宿志一 陆家榆 谷定燮 潘春平  
吴文刚 纪新元 杨元春 赵全江  
高志林 刘长征 王作民

# 目 次

1	总 则 .....	( 1 )
2	术语和符号 .....	( 2 )
2.1	术语 .....	( 2 )
2.2	符号 .....	( 4 )
3	路 径 .....	( 7 )
4	气象条件 .....	( 8 )
5	导线和地线 .....	(10)
6	绝缘子和金具 .....	(14)
7	绝缘配合、防雷和接地 .....	(16)
8	导线布置 .....	(19)
9	杆塔型式 .....	(20)
10	杆塔荷载及材料 .....	(21)
10.1	杆塔荷载 .....	(21)
10.2	结构材料 .....	(28)
11	杆塔结构 .....	(31)
11.1	基本计算规定 .....	(31)
11.2	承载能力和正常使用极限状态计算表达式 .....	(31)
11.3	杆塔结构基本规定 .....	(33)
12	基 础 .....	(35)
13	对地距离及交叉跨越 .....	(37)
14	环境保护 .....	(42)
15	劳动安全和工业卫生 .....	(43)
16	附属设施 .....	(44)
附录 A	导线表面最大电位梯度计算 .....	(45)

附录 B 电晕无线电干扰场强计算 .....	(47)
附录 C 电晕可听噪声计算 .....	(48)
附录 D 弱电线路等级 .....	(49)
附录 E 公路等级 .....	(50)
本规范用词说明 .....	(51)
引用标准名录 .....	(52)
附:条文说明 .....	(53)



# Contents

1	General provisions .....	( 1 )
2	Terms and symbols .....	( 2 )
2.1	Terms .....	( 2 )
2.2	Symbols .....	( 4 )
3	Routing .....	( 7 )
4	Meteorological conditions .....	( 8 )
5	Conductor and earth wire .....	(10)
6	Insulators and fittings .....	(14)
7	Insulation coordination, lightning protection and grounding .....	(16)
8	Conductor arrangement .....	(19)
9	Tower type .....	(20)
10	Tower load and materials .....	(21)
10.1	Tower load .....	(21)
10.2	Structural material .....	(28)
11	Tower structural .....	(31)
11.1	General calculating stipulation .....	(31)
11.2	Ultimate state expression for carrying capacity and serviceability .....	(31)
11.3	General stipulation for structure .....	(33)
12	Foundation .....	(35)
13	Clearance to ground and crossing .....	(37)
14	Environmental protection .....	(42)
15	Labor safety and industrial sanitation .....	(43)

16	Accessories .....	( 44 )
Appendix A	Calculation of the maximum voltage gradient on conductor surface .....	( 45 )
Appendix B	Calculation of the field strength of corona radio interference .....	( 47 )
Appendix C	Calculation of the corona audible noise .....	( 48 )
Appendix D	Weak current line grade .....	( 49 )
Appendix E	Road grade .....	( 50 )
	Explanation of wording in this code .....	( 51 )
	List of quoted standards .....	( 52 )
	Addition; Explanation of provisions .....	( 53 )

# 1 总 则

**1.0.1** 为在 $\pm 800\text{kV}$  直流架空输电线路(以下简称 $\pm 800\text{kV}$  线路)设计中贯彻国家的基本建设方针和技术经济政策,做到安全可靠、先进适用、经济合理、资源节约、环境友好,制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于单回 $\pm 800\text{kV}$  线路的设计。

**1.0.3**  $\pm 800\text{kV}$  线路设计应从实际出发,结合地区特点,积极采用成熟的新技术、新材料、新工艺,推广采用节能、降耗、环保的先进技术和产品。

**1.0.4**  $\pm 800\text{kV}$  线路设计除应符合本规范外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

**2.1.1**  $\pm 800\text{kV}$  直流架空输电线路  $\pm 800\text{kV}$  DC overhead transmission line

标称电压为 $\pm 800\text{kV}$ 直流架空输电线路。

**2.1.2** 地面合成场强 total field strength above ground

由导线所带电荷产生的静电场和由空间电荷产生的电场合成的地面场强。

**2.1.3** 离子流密度 ion current density

在电场的作用下,空间电荷不断向地面移动,地面单位面积所接收到的电流称为离子流密度。

**2.1.4** 弱电线路 telecommunication line

泛指各种电信号通信线路。

**2.1.5** 轻、中、重冰区 light/medium/heavy icing area

设计覆冰厚度  $10\text{mm}$  及以下地区为轻冰区,设计冰厚大于  $10\text{mm}$  小于  $20\text{mm}$  地区为中冰区, $20\text{mm}$  及以上地区为重冰区。

**2.1.6** 基本风速 reference wind speed

一般按当地空旷平坦地面上  $10\text{m}$  高度处  $10\text{min}$  时距,平均的年最大风速观测数据,经概率统计得出  $100$  年一遇最大值后确定的风速。

**2.1.7** 稀有风速、稀有覆冰 rare wind speed、rare ice thickness

根据历史上记录存在,并显著地超过历年记录频率曲线的严重大风、覆冰。

**2.1.8** 耐张段 section

两耐张杆塔间的线路部分。

**2.1.9 平均运行张力** everyday tension

年平均气温情况下,弧垂最低点的导线或地线张力。

**2.1.10 等值附盐密度** equivalent salt deposit density (ESDD)

溶解后具有与从给定绝缘子的绝缘体表面清洗的自然沉积物溶解后相同电导率的氯化钠总量除以表面积,简称等值盐密。

**2.1.11 不溶物密度** non-soluble deposit density (NSDD)

从给定绝缘子的绝缘体表面清洗的非可溶性残留物总量除以表面积,简称灰密。

**2.1.12 轻、中、重污区** light/medium/heavy contamination area

地区等值盐密小于或等于  $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$  为轻污区,等值盐密为小于或等于  $0.08\text{mg}/\text{cm}^2$  大于  $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$  为中污区,等值盐密小于或等于  $0.15\text{mg}/\text{cm}^2$  大于  $0.08\text{mg}/\text{cm}^2$  为重污区。

**2.1.13 居民区** residential area

工业企业地区、港口、码头、火车站、城镇等人口密集区。

**2.1.14 非居民区** non-residential area

居民区以外地区。

**2.1.15 交通困难地区** difficult transport area

车辆、农业机械不能到达的地区。

**2.1.16 间隙** electrical clearance

线路任何带电部分与接地部分的最小距离。

**2.1.17 对地距离** ground clearance

在规定条件下,任何带电部分与地面之间的最小距离。

**2.1.18 保护角** shielding angle

通过地线的垂直平面与地线和被保护受雷击的外侧子导线的平面之间的夹角。

**2.1.19 采动影响区** mining affected area

受矿产开采扰动影响的区域。

## 2.1.20 大跨越 large crossing

线路跨越通航大江河、湖泊或海峡等,因档距较大或铁塔较高,导线选型或铁塔设计需特殊考虑,且发生故障时严重影响航运或修复特别困难的耐张段。

## 2.2 符 号

### 2.2.1 作用与作用效应:

$C$ ——结构或构件的裂缝宽度或变形的规定限值;

$f_a$ ——修正后的地基承载力特征值;

$P$ ——基础底面处的平均压应力设计值;

$P_{\max}$ ——基础底面边缘的最大压应力设计值;

$R$ ——结构构件的抗力设计值;

$S_{\text{Ehk}}$ ——水平地震作用标准值的效应;

$S_{\text{EQK}}$ ——导、地线张力可变荷载的代表值效应;

$S_{\text{EVK}}$ ——竖向地震作用标准值的效应;

$S_{\text{GE}}$ ——永久荷载代表值的效应;

$S_{\text{GK}}$ ——永久荷载标准值的效应;

$S_{\text{QiK}}$ ——第  $i$  项可变荷载标准值的效应;

$S_{\text{wk}}$ ——风荷载标准值的效应;

$T$ ——绝缘子承受的最大使用荷载、验算荷载、断线荷载、断联荷载或常年荷载;

$T_{\text{E}}$ ——基础上拔或倾覆外力设计值;

$T_{\max}$ ——导、地线在弧垂最低点的最大张力;

$T_{\text{p}}$ ——导、地线的拉断力;

$T_{\text{R}}$ ——绝缘子的额定机械破坏负荷;

$V$ ——基准高度为 10m 的风速;

$W_1$ ——绝缘子串风荷载标准值;

$W_0$ ——基准风压标准值;

$W_s$ ——杆塔风荷载标准值；

$W_x$ ——垂直于导线及地线方向的水平风荷载标准值；

$\gamma_s$ ——土的重度设计值；

$\gamma_c$ ——混凝土的重度设计值。

### 2.2.2 电工：

$n$ ——海拔 1000m 时每联绝缘子所需片数；

$n_H$ ——高海拔下每串绝缘子所需片数；

$U$ ——系统标称电压；

$U_m$ ——系统最高电压；

$\lambda$ ——爬电比距。

### 2.2.3 计算系数：

$B_1$ ——导线、地线及绝缘子覆冰后风荷载增大系数；

$B_2$ ——构件覆冰后风荷载增大系数；

$K_a$ ——空气间隙放电电压海拔修正系数；

$K_c$ ——导、地线的设计安全系数；

$k_i$ ——悬垂绝缘子串系数；

$K_I$ ——绝缘子机械强度的安全系数；

$K_e$ ——单片绝缘子的爬电距离有效系数；

$m$ ——海拔修正因子；

$m_1$ ——特征指数；

$\alpha$ ——风压不均匀系数；

$\beta_c$ ——导线及地线风荷载调整系数；

$\beta_z$ ——杆塔风荷载调整系数；

$\mu_s$ ——构件的体型系数；

$\mu_{sc}$ ——导线或地线的体型系数；

$\mu_z$ ——风压高度变化系数；

$\psi$ ——可变荷载组合系数；

$\psi_{we}$ ——抗震基本组合中的风荷载组合系数；

$\gamma_o$ ——杆塔结构重要性系数；

$\gamma_{\text{EH}}$ ——水平地震作用分项系数；  
 $\gamma_{\text{EV}}$ ——竖向地震作用分项系数；  
 $\gamma_{\text{EQ}}$ ——导、地线张力可变荷载的分项综合系数；  
 $\gamma_{\text{f}}$ ——基础的附加分项系数；  
 $\gamma_{\text{G}}$ ——永久荷载分项系数；  
 $\gamma_{\text{Qi}}$ ——第  $i$  项可变荷载的分项系数；  
 $\gamma_{\text{RE}}$ ——承载力抗震调整系数；  
 $\gamma_{\text{rf}}$ ——地基承载力调整系数。

#### 2.2.4 几何参数：

$A_{\text{I}}$ ——绝缘子串承受风压面积计算值；  
 $A_{\text{S}}$ ——构件承受风压投影面积计算值；  
 $D$ ——导线水平线间距离；  
 $d$ ——导线或地线的外径或覆冰时的计算外径；分裂导线取所有子导线外径的总和；  
 $f_{\text{c}}$ ——导线最大弧垂；  
 $H$ ——海拔高度；  
 $L$ ——档距；  
 $L_{\text{k}}$ ——悬垂绝缘子串长度；  
 $L_{01}$ ——单片绝缘子的几何爬电距离，或构件计算长度；  
 $L_{\text{p}}$ ——杆塔的水平档距；  
 $L_{\text{S}}$ ——单片绝缘子的有效爬电距离；  
 $S$ ——导线与地线间的距离；  
 $\theta$ ——风向与导线或地线方向之间的夹角；  
 $\gamma_{\text{k}}$ ——几何参数的标准值。



### 3 路 径

**3.0.1** 路径选择宜采用卫片、航片、全数字摄影测量系统和红外测量等新技术;在滑坡、泥石流、崩塌等不良地质发育地区,路径选择宜采用地质遥感技术;路径选择应综合考虑线路长度、地形地貌、地质、冰区、交通、施工、运行及地方规划等因素,进行多方案技术经济比较,做到安全可靠、环境友好、经济合理。

**3.0.2** 路径选择应避开军事设施、大型工矿企业等重要设施,并应符合城镇规划,当无法避开时应取得相关协议,必要时采取适当措施。

**3.0.3** 路径选择宜避开自然保护区、风景名胜区等,当无法避开时应做好评估、报批工作。

**3.0.4** 路径选择宜避开不良地质地带和采动影响区,宜避开重冰区、易舞动区及影响安全运行的其他地区,当无法避让时,应采取必要的措施。

**3.0.5** 路径选择应考虑线路与电台、机场、弱电线路等邻近设施的相互影响。

**3.0.6** 轻、中、重冰区的耐张段长度分别不宜大于 10km、5km、3km。当耐张段长度较长时应采取防串倒措施。在高差或档距相差悬殊的山区或重冰区等运行条件较差的地段,耐张段长度应适当缩短。输电线路与主干铁路、高速公路交叉时,应采用独立耐张段。

**3.0.7** 路径选择宜靠近现有国道、省道、县道及乡镇公路,应充分利用现有的交通条件,方便施工和运行。

**3.0.8** 山区线路在选择路径和定位时,应避免出现杆塔两侧大小悬殊的档距,当无法避免时应采取必要的措施,提高安全度。

**3.0.9** 有大跨越的输电线路路径应结合跨越点,通过综合技术经济比较确定。

## 4 气 象 条 件

**4.0.1** 设计气象条件,应根据沿线气象资料的数理统计结果及附近已有线路的运行经验确定,基本风速、设计冰厚重现期应按 100 年考虑。

**4.0.2** 确定基本风速时,应按当地气象台、站 10min 时距平均的年最大风速为样本,并宜采用极值 I 型分布作为概率模型。统计风速的高度应符合下列规定:

1 一般输电线路应取离地面 10m。

2 大跨越应取离历年大风季节平均最低水位 10m。

**4.0.3** 山区输电线路,宜采用统计分析和对比观测等方法,由邻近地区气象台、站的气象资料推算山区的基本风速,并结合实际运行经验确定。当无可靠资料时,宜将附近平原地区的统计值提高 10% 选用。

**4.0.4** 基本风速不宜低于 27m/s,必要时还宜按稀有风速条件进行验算。

**4.0.5** 轻冰区宜按无冰、5mm、10mm 设计,中冰区宜按 15mm、20mm 设计,重冰区宜按 20mm、30mm、40mm、50mm 等设计。必要时还宜按稀有覆冰条件进行验算。

**4.0.6** 地线设计冰厚,除无冰区段外,应较导线增加 5mm。

**4.0.7** 设计时应加强对沿线已建线路设计、运行情况调查,设计时应充分考虑微地形、微气象条件、导线易舞动地区等影响。

**4.0.8** 大跨越基本风速,当无可靠资料时,宜将附近陆上输电线路的风速统计值换算到跨越处历年大风季节平均最低水位以上 10m 处,并增加 10%,然后考虑水面影响再增加 10% 后选用。大跨越基本风速不应低于相连接的陆上输电线路的基本风速。

**4.0.9** 大跨越设计冰厚,除无冰区段外,宜较附近一般输电线路的设计冰厚增加 5mm。

**4.0.10** 设计用年平均气温,应按下列方法确定:

1 当地区年平均气温在  $3^{\circ}\text{C} \sim 17^{\circ}\text{C}$  之内,应取与年平均气温值邻近的 5 的倍数值。

2 当地区年平均气温小于  $3^{\circ}\text{C}$  和大于  $17^{\circ}\text{C}$  时,分别按年平均气温减少  $3^{\circ}\text{C}$  和  $5^{\circ}\text{C}$  后,取与此数邻近的 5 的倍数值。

**4.0.11** 安装工况风速应采用  $10\text{m/s}$ ,覆冰厚度应采用无冰,同时,气温宜符合下列规定:

1 最低气温为  $-40^{\circ}\text{C}$  和  $-30^{\circ}\text{C}$  的地区,宜采用  $-15^{\circ}\text{C}$ 。

2 最低气温为  $-20^{\circ}\text{C}$  的地区,宜采用  $-10^{\circ}\text{C}$ 。

3 最低气温为  $-10^{\circ}\text{C}$  的地区,宜采用  $-5^{\circ}\text{C}$ 。

4 最低气温为  $0^{\circ}\text{C}$  的地区,宜采用  $5^{\circ}\text{C}$ 。

**4.0.12** 雷电过电压工况的气温宜采用  $15^{\circ}\text{C}$ ,当基本风速折算到导线平均高度处的值大于或等于  $35\text{m/s}$  时,雷电过电压工况的风速宜取  $15\text{m/s}$ ,否则宜取  $10\text{m/s}$ ;校验导线与地线之间的距离时,风速应采用无风,覆冰厚度应采用无冰。

**4.0.13** 操作过电压工况的气温可采用年平均气温,风速宜取基本风速折算到导线平均高度处风速值的 50%,但不宜低于  $15\text{m/s}$ ,覆冰厚度应采用无冰。

**4.0.14** 带电作业工况的风速可采用  $10\text{m/s}$ ,气温可采用  $15^{\circ}\text{C}$ ,覆冰厚度应采用无冰。

**4.0.15** 覆冰工况的风速宜采用  $10\text{m/s}$ ,气温宜采用  $-5^{\circ}\text{C}$ 。

## 5 导线和地线

**5.0.1** 输电线路的导线截面和分裂形式,宜根据系统需要按照经济电流密度选择;也可根据系统输送容量,结合不同导线的材料结构进行电气和机械特性等比选,并应满足可听噪声和无线电干扰等技术条件的要求,通过年费用最小法进行综合技术经济比较后确定。其中导线表面最大电位梯度的计算方法可按照附录 A 的公式计算。电晕无线电干扰场强可按照附录 B 的公式计算。电晕可听噪声可按照附录 C 的公式计算。

**5.0.2** 在海拔 1000m 及以下地区,距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处,80%时间,80%置信度,0.5MHz 频率的无线电干扰不应超过 58dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ )。

**5.0.3** 在海拔 1000m 及以下地区,距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处,由电晕产生的可听噪声( $L_{50}$ )不应超过 45dB(A);在海拔高度大于 1000m 且线路经过人烟稀少地区时,由电晕产生的可听噪声应控制在 50dB(A)以下。

**5.0.4** 当晴天时,直流线路下地面合成电场强度和离子流密度限值不应超过表 5.0.4 的规定。

表 5.0.4 地面合成电场强度和离子流密度限值

区 域	合成电场强度(kV/m)	离子流密度(nA/m <sup>2</sup> )
居民区	25	80
一般非居民区	30	100

**5.0.5** 直流线路大跨越的导线截面宜按允许载流量选择,并应与陆上线路允许的最大输送电流相配合,通过综合技术经济比较后确定。

**5.0.6** 验算导线载流量时,应符合下列要求:

1 流过线路导线的直流电流,应取换流站整流阀在冷却设备投运时可允许的最大过负荷电流。在无可靠系统资料情况下,流过线路导线的最大过负荷电流可取 1.1 倍的额定电流。

2 钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线的允许温度可采用  $70^{\circ}\text{C}$  (大跨越不得超过  $90^{\circ}\text{C}$ ), 钢芯铝包钢绞线(包括铝包钢绞线)的允许温度可采用  $80^{\circ}\text{C}$  (大跨越不得超过  $100^{\circ}\text{C}$ ), 钢绞线的允许温度可采用  $125^{\circ}\text{C}$ 。

3 环境气温应采用最热月平均最高温度,并应考虑太阳辐射的影响。太阳辐射功率密度应采用  $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ , 相应风速应为  $0.5\text{m}/\text{s}$  (大跨越风速应为  $0.6\text{m}/\text{s}$ )。

5.0.7 地线(包括光纤复合架空地线)应满足短路电流热容量要求,且表面最大场强不宜大于  $18\text{kV}/\text{cm}$ 。

5.0.8 导、地线在弧垂最低点的设计安全系数不应小于 2.5,悬挂点的设计安全系数不应小于 2.25。地线、光纤复合架空地线(OPGW)的设计安全系数不应小于导线的设计安全系数。

5.0.9 导、地线在弧垂最低点的最大张力,应按下式计算:

$$T_{\max} \leq \frac{T_p}{K_c} \quad (5.0.9)$$

式中:  $T_{\max}$ ——导、地线在弧垂最低点的最大张力(N);

$T_p$ ——导、地线的拉断力(N);

$K_c$ ——导、地线的设计安全系数。

5.0.10 在稀有风速或稀有覆冰气象条件时,弧垂最低点的最大张力,不应超过导、地线拉断力的 60%。悬挂点的最大张力,不应超过导、地线拉断力的 66%。

5.0.11 地线(包括光纤复合架空地线)应满足电气和机械使用条件要求,可选用钢绞线或复合型绞线。光纤复合架空地线结构选型应考虑耐雷击性能,其最外层单线直径不应小于  $3.0\text{mm}$ 。验算短路热稳定时,计算时间和相应的短路电流值应根据系统条件决定,地线的允许温度宜按下列规定取值:

1 钢(铝包钢)芯铝绞线和钢(铝包钢)芯铝合金绞线可采用 200℃。

2 镀锌钢绞线可采用 400℃。

3 铝包钢绞线可采用 300℃。

4 光纤复合架空地线的允许温度应采用产品试验保证值。

#### 5.0.12 导地线防振措施应按下列条件设计：

1 铝钢截面比不小于 4.29 的钢芯铝绞线的平均应力，不应超过拉断力的 25%。分裂导线采用阻尼间隔棒时，档距在 600m 及以下可不再采用其他防振措施；档距在 600m 以上可采用防振锤(阻尼线)或另加护线条防振。阻尼间隔棒宜不等距、不对称布置。

2 镀锌钢绞线或铝包钢绞线地线平均运行张力的上限和相应的防振措施，应符合表 5.0.12 的要求。

表 5.0.12 地线平均运行张力的上限和相应的防振措施

情 况	平均运行张力的上限 (拉断力的百分数)(%)	防振措施
档距不超过 600m 的开阔地区	12	不需要
档距不超过 600m 的非开阔地区	18	不需要
档距不超过 120m	18	不需要
不论档距大小	25	防振锤(阻尼线) 或另加护线条

5.0.13 导、地线架设后的塑性伸长，应按制造厂提供的数据或通过试验确定，塑性伸长对弧垂的影响宜采用降温法补偿。如无资料，镀锌钢绞线塑性伸长可采用  $1 \times 10^{-4}$ ，可降低温度 10℃ 补偿，铝包钢绞线的降温值可较镀锌钢绞线适当提高；钢芯铝绞线的塑性伸长及降温值可采用表 5.0.13 所列数值。

表 5.0.13 钢芯铝绞线塑性伸长及降温值

铝钢截面比	塑性伸长	降温值(°C)
4.29~4.38	$3 \times 10^{-4}$	15
5.05~6.16	$3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$	15~20
7.71~7.91	$4 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$	20~25
11.34~14.46	$5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	25(或根据试验数据确定)

注: 对大铝钢截面比的钢芯铝绞线或钢芯铝合金绞线, 应由制造厂家提供塑性伸长值或降温值。

**5.0.14** 线路经过易舞动地区时应采取防舞动措施, 对经过可能发生舞动的地区, 应预留防舞动措施。

## 6 绝缘子和金具

**6.0.1** 绝缘子机械强度最小安全系数应符合表 6.0.1 的规定。双联及多联绝缘子串应验算断一联后的机械强度,荷载及安全系数应按断联情况考虑。

表 6.0.1 绝缘子机械强度最小安全系数

情 况	最大使用荷载		常年荷载	验算荷载	断线	断联
	盘型绝缘子	棒型绝缘子				
安全系数	2.7	3.0	4.0	1.8	1.8	1.5

注:1 常年荷载是指年平均气温条件下绝缘子所承受的荷载。验算荷载是指验算条件下绝缘子所承受的荷载。

2 断线、断联的气象条件应为无风、有冰、-5℃。

3 棒型绝缘子应包括复合绝缘子和瓷棒绝缘子。

**6.0.2** 绝缘子承受的各种荷载应按下式计算:

$$T \geq T_R / K_1 \quad (6.0.2)$$

式中:  $T_R$ ——绝缘子的额定机械破坏负荷(kN);

$T$ ——分别取绝缘子承受的最大使用荷载、验算荷载、断线荷载、断联荷载或常年荷载(kN);

$K_1$ ——绝缘子机械强度的安全系数。

**6.0.3** 采用黑色金属制造的金具表面应热镀锌或采取其他相应的防腐措施。

**6.0.4** 金具强度的安全系数应符合下列规定:

1 最大使用荷载情况不应小于 2.5。

2 断线、断联、验算情况不应小于 1.5。

**6.0.5** 绝缘子串及金具应考虑均压和防电晕措施。有特殊要求需要另行研制或采用非标准金具时,应经试验合格后方可使用。



**6.0.6** 当线路与直流输电工程接地极距离小于 5km 时,地线(含光纤复合架空地线)应绝缘;当线路与直流输电工程接地极距离大于或等于 5km 时,应通过计算确定地线(含光纤复合架空地线)是否绝缘。地线绝缘时,地线金具串宜使用双联绝缘子串。

**6.0.7** 与横担连接的第一个金具应回转灵活且受力合理,其强度应高于串内其他金具强度。

**6.0.8** 在线路设计中,悬垂 V 型绝缘子串两肢之间的夹角的一半,可比最大风偏角小  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ,或可通过试验确定。

**6.0.9** 线路经过易舞动区应适当提高金具和绝缘子串的机械强度。

**6.0.10** 在易发生严重覆冰地区,宜增加绝缘子串长或采用 V 型串、八字串。

**6.0.11** 耐张塔跳线宜采用刚性跳线。

## 7 绝缘配合、防雷和接地

**7.0.1** ±800kV 线路的绝缘配合,应使线路能在工作电压、操作过电压和雷电过电压等各种条件下安全可靠地运行。

**7.0.2** ±800kV 线路绝缘子片数的确定应采用污耐压法,对无可靠污耐压特性参数的绝缘子,宜采用爬电比距法。当采用爬电比距法时,绝缘子片数应按下列公式计算:

$$n \geq \frac{\lambda U}{L_s} \quad (7.0.2-1)$$

$$L_s = K_e L_{01} \quad (7.0.2-2)$$

式中:  $n$ ——海拔 1000m 时每联绝缘子所需片数;

$\lambda$ ——爬电比距(cm/kV);

$U$ ——系统标称电压(kV);

$L_s$ ——单片绝缘子的有效爬电距离(cm);

$K_e$ ——单片绝缘子的爬电距离有效系数;

$L_{01}$ ——单片绝缘子的几何爬电距离(cm)。

**7.0.3** 在海拔高度 1000m 以下地区,轻污区  $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$  盐密时工作电压要求的悬垂 V 型绝缘子串绝缘子片数(钟罩型)不宜小于表 7.0.3 的数值。

**表 7.0.3 轻污区  $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$  盐密时工作电压要求的悬垂 V 型绝缘子串片数(钟罩型)**

标称电压(kV)	±800
单片绝缘子的高度(mm)	170(195)
爬距(mm)	545(635)
绝缘子片数(片)	60(56)

7.0.4 耐张绝缘子串的绝缘子片数可取悬垂串同样的数值。在中、重污区,爬电比距可根据运行经验较悬垂绝缘子串适当减少。

7.0.5 复合绝缘子在轻、中、重污区其爬电比距不宜小于盘型绝缘子最小要求值的 3/4。复合绝缘子两端均应加装均压环,其有效绝缘长度应满足雷电过电压和操作过电压的要求。

7.0.6 在海拔高度超过 1000m 的地区,绝缘子的片数应进行修正,可按下式计算:

$$n_H = n e^{m_1 (H-1000)/8150} \quad (7.0.6)$$

式中:  $n_H$ ——高海拔地区每联绝缘子所需片数;

$H$ ——海拔高度(m);

$m_1$ ——特征指数,它反映气压对于污闪电压的影响程度,由试验确定。

7.0.7  $\pm 800\text{kV}$  线路在相应风偏条件下,带电部分与杆塔构件的最小间隙应符合表 7.0.7 所列数值。

表 7.0.7 带电部分与杆塔构件的最小间隙(m)

标称电压(kV)	$\pm 800$		
海拔(m)	500	1000	2000
工作电压	2.1	2.3	2.5
操作过电压(1.6 p. u.)	4.9	5.3	5.9
雷电过电压	—		
带电作业	—		

7.0.8 空气间隙放电电压海拔修正系数  $K_a$  可按下式计算:

$$K_a = e^{\frac{mH}{8150}} \quad (7.0.8)$$

式中:  $K_a$ ——空气间隙放电电压海拔修正系数;

$H$ ——海拔高度(m);

$m$ ——海拔修正因子,工作电压、雷电过电压海拔修正因子应取 1.0;操作过电压海拔修正因子与电压的关系按图 7.0.8 中的曲线 a(极对地绝缘)取值。

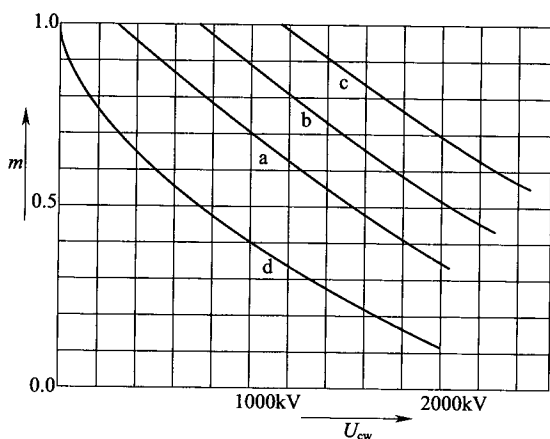


图 7.0.8 海拔修正因子  $m$  与电压的关系

**7.0.9** 应结合当地已有的运行经验、地区雷电活动的强弱特点、地形地貌特点及土壤电阻率高低等因素进行 $\pm 800\text{kV}$ 线路防雷设计；在计算耐雷水平后，应通过技术经济比较，采用合理的防雷方式。

**7.0.10**  $\pm 800\text{kV}$ 线路应沿全线架设双地线。杆塔上地线对导线宜采用负保护角，在山区不宜大于 $-10^\circ$ 。

**7.0.11** 档距中央导线与地线之间的距离宜用数值计算的方法确定。

**7.0.12** 雷季干燥时每基杆塔不连地线的工频接地电阻不应大于表 7.0.12 所列数值。当土壤电阻率超过  $2000\Omega \cdot \text{m}$ ，接地电阻很难降到  $30\Omega$  时，可采用 6 根 $\sim$ 8 根总长不超过 500m 的放射形接地体或连续伸长接地体，其接地电阻可不受限制。

表 7.0.12 雷季干燥时每基杆塔不连地线的工频接地电阻

土壤电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	100 及 以下	100 以上 至 500	500 以上 至 1000	1000 以上 至 2000	2000 以上
工频接地电阻( $\Omega$ )	10	15	20	25	30

**7.0.13** 通过耕地的直流输电线路的接地体应埋设在耕作深度以下；位于居民区和水田的接地体应敷设成环形。

## 8 导线布置

8.0.1 导线的线间距离应符合下列规定：

1 水平线间距离宜按下式计算：

$$D = k_i L_k + \sqrt{2} \times U / 110 + k_f \sqrt{f_c} + A \quad (8.0.1)$$

式中： $D$ ——导线水平线间距离(m)；

$k_i$ ——悬垂绝缘子串系数，可按表 8.0.1 的规定确定；

$L_k$ ——悬垂绝缘子串长度(m)；

$U$ ——系统标称电压(kV)；

$f_c$ ——导线最大弧垂(m)；

$k_f$ ——系数，1000m 以下档距取 0.65，1000m ~ 2000m 取 0.8 ~ 1.0；

$A$ ——增大系数，对 10mm ~ 15mm 覆冰， $A = 0$ ；20mm ~ 30mm 覆冰， $A = 0.5$ ；40mm 及以上覆冰， $A = 1.0$ 。

表 8.0.1 悬垂绝缘子串系数  $k_i$

悬垂串型式	I—I 串	I—V 串	V—V 串
$k_i$	0.4	0.4	0

2 导线垂直排列的垂直线间距离，宜采用公式 8.0.1 计算结果的 75%。

8.0.2 覆冰地区导线和地线间的水平偏移应满足导线和地线在不均匀覆冰、不同期脱冰时静态和动态接近的电气间隙要求。

## 9 杆塔型式

**9.0.1** 杆塔可按其受力性质分为悬垂型、耐张型杆塔。悬垂型杆塔可分为悬垂直线和悬垂转角杆塔；耐张型杆塔分为耐张直线、耐张转角和终端杆塔。

**9.0.2** 单回路杆塔导线既可水平排列，也可垂直排列，必要时可考虑水平和垂直组合方式排列。

**9.0.3** 杆塔的外形规划与构件布置应按照导线和地线排列方式，以结构简单、受力均衡、传力清晰、外形美观为原则，同时应结合占地范围、杆塔材料、运行维护、施工方法、制造工艺等因素在充分进行设计优化的基础上选取技术先进、经济合理的设计方案。

**9.0.4** 杆塔使用宜遵守以下原则：

1 不同类型杆塔的选用应依据线路路径特点，应按安全可靠、经济合理、维护方便和有利于环境保护的原则进行。

2 山区线路杆塔应依据地形特点，配合不等高基础，采用全方位长短腿结构型式。

3 在走廊拥挤地带，可采用导线垂直排列的杆塔。

4 当悬垂直线杆塔兼小角度转角时，其转角度数不宜大于 $3^{\circ}$ 。悬垂转角杆塔的转角度数不宜大于 $20^{\circ}$ 。

## 10 杆塔荷载及材料

### 10.1 杆塔荷载

#### 10.1.1 荷载分类应符合下列要求:

1 永久荷载应包括导线及地线、绝缘子及其附件、杆塔结构构件、杆塔上各种固定设备、基础以及土体等的重力荷载,土压力及预应力等荷载。

2 可变荷载应包括风和冰(雪)荷载,导线、地线及拉线的张力,安装检修的各种附加荷载,结构变形引起的次生荷载以及各种振动动力荷载。

#### 10.1.2 杆塔的作用荷载宜分解为横向荷载、纵向荷载和垂直荷载。

10.1.3 各类杆塔均应计算线路正常运行情况、断线(含纵向不平衡张力)情况、不均匀覆冰情况和安装情况下的荷载组合,必要时尚应验算地震等稀有情况。

#### 10.1.4 各类杆塔的运行情况,应计算下列荷载组合:

1 基本风速、无冰、未断线(包括最小垂直荷载和最大横向荷载组合)。

2 设计覆冰、相应风速及气温、未断线。

3 最低气温、无冰、无风、未断线(适用于终端和转角杆塔)。

10.1.5 悬垂型杆塔(不含大跨越悬垂型杆塔)的断线(含纵向不平衡张力)情况,应按 $-5^{\circ}\text{C}$ 、有冰、无风的气象条件计算下列荷载组合:

1 任意一极导线有纵向不平衡张力,地线未断。

2 断任意一根地线,导线无纵向不平衡张力。

10.1.6 耐张型杆塔的断线(含纵向不平衡张力)情况应按 $-5^{\circ}\text{C}$ 、

有冰、无风的气象条件,并应按同一档内,断任意一根地线,任意一极导线有纵向不平衡张力进行荷载计算。

**10.1.7** 10mm 及以下冰区导线、地线最小断线张力(含纵向不平衡张力)的取值应符合表 10.1.7 规定的导、地线最大使用张力的百分数,垂直冰荷载应取 100%设计覆冰荷载。

**表 10.1.7 10mm 及以下冰区导线、地线最小断线张力**  
(含纵向不平衡张力)(%)

地 形	地 线	悬垂塔导线	耐张塔导线
平丘	100	20	70
山地	100	25	70

**10.1.8** 10mm 冰区不均匀覆冰的导、地线最小不平衡张力取值应符合表 10.1.8 的规定。无冰区段和 5mm 冰区段可不计算由不均匀覆冰情况引起的不平衡张力。垂直冰荷载宜取 75%设计覆冰荷载,同时应按  $-5^{\circ}\text{C}$ 、10m/s 风速的气象条件计算。

**表 10.1.8 不均匀覆冰的导、地线最小不平衡张力 (%)**

悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
导线	地线	导线	地线
10	20	30	40

**10.1.9** 各类杆塔均应计算所有导、地线同时同向有不均匀覆冰的不平衡张力。

**10.1.10** 各类杆塔在断线情况下的断线张力(含纵向不平衡张力),以及不均匀覆冰情况下的不平衡张力均应按静态荷载计算。

**10.1.11** 防串倒的加强型悬垂型塔,除按常规悬垂型塔工况计算外,还应按所有导地线同侧有断线张力(含纵向不平衡张力)计算。

**10.1.12** 各类杆塔的验算覆冰荷载情况,应按验算冰厚、 $-5^{\circ}\text{C}$ 、10m/s 风速,所有导、地线同时同向有不平衡张力考虑。

**10.1.13** 各类杆塔的安装情况,应按 10m/s 风速、无冰、相应气温的气象条件计算荷载组合,并应符合下列规定:

1 悬垂型杆塔的安装荷载应符合下列规定:



- 1) 提升导线、地线及其附件时的作用荷载,应包括提升导、地线、绝缘子和金具等重力荷载(导线按 1.5 倍计算,地线按 2.0 倍计算)、安装工人和工具的附加荷载,动力系数宜采用 1.1,附加荷载标准值可按表 10.1.13 的规定确定。

表 10.1.13 附加荷载标准值(kN)

导 线		地 线		跳线
悬垂型杆塔	耐张型杆塔	悬垂型杆塔	耐张型杆塔	
8.0	12.0	4.0	4.0	6.0

- 2) 计算导线及地线锚线作业时的作用荷载时,锚线对地夹角不宜大于  $20^{\circ}$ ,正在锚线相的张力宜采用动力系数 1.1。挂线点垂直荷载取锚线张力的垂直分量和导、地线重力和附加荷载之和,纵向不平衡张力应分别取导、地线张力与锚线张力纵向分量之差。

## 2 耐张型杆塔的安装荷载应符合下列规定:

- 1) 锚塔在锚地线时,相邻档内的导线及地线应均未架设;锚导线时,在同档内的地线应已架设。紧线塔在紧地线时,相邻档内的地线可已架设或未架设,同档内的导线应均未架设;紧导线时,同档内的地线应已架设,相邻档内的导线可已架设或未架设。
- 2) 锚塔和紧线塔均应允许考虑临时拉线的作用,临时拉线对地夹角不应大于  $45^{\circ}$ ,其方向应与导、地线方向一致,临时拉线按平衡导线张力标准值宜按 40kN 考虑,地线临时拉线按平衡地线张力标准值宜按 10kN 考虑。
- 3) 紧线牵引绳对地夹角宜按不大于  $20^{\circ}$  考虑,计算紧线张力时应考虑导、地线的初伸长、施工误差和过牵引的影响。
- 4) 安装时的附加荷载标准值可按表 10.1.13 取值。

## 3 导、地线的架设宜先架设地线再架设导线。

4 与水平面夹角不大于  $30^\circ$ 、可以上人的铁塔构件,应能承受设计值 1000N 的人重荷载,此时,不应与其他荷载组合。

10.1.14 终端杆塔应考虑换流站一侧导线及地线已架设或未架设的情况。

10.1.15 计算曲线型铁塔时,应考虑沿高度方向不同时出现最大风速的不利情况。

10.1.16 位于地震烈度为 9 度及以上地区的各类杆塔均应进行抗震验算。

10.1.17 外壁坡度小于 2% 的圆筒形结构或圆管构件,应根据雷诺数  $Re$  的不同情况进行横风向风振(旋涡脱落)校核。

10.1.18 导线及地线的水平风荷载的标准值和基准风压标准值,应按下列公式计算:

$$W_x = \alpha \cdot W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_{sc} \cdot \beta_c \cdot d \cdot L_p \cdot B_1 \cdot \sin^2 \theta \quad (10.1.18-1)$$

$$W_0 = V^2 / 1600 \quad (10.1.18-2)$$

式中:  $W_x$ ——垂直于导线及地线方向的水平风荷载标准值(kN);

$\alpha$ ——风压不均匀系数,应符合表 10.1.18-1 的规定;校验杆塔大风工况电气间隙时,应符合表 10.1.18-2 的规定;

$\beta_c$ ——导线、地线风荷载调整系数,应符合表 10.1.18-1 的规定,仅用于计算作用于杆塔上的导线及地线风荷载(不含导线及地线张力弧垂计算和风偏角计算);

$\mu_z$ ——风压高度变化系数,基准高度为 10m 的风压高度变化系数应符合表 10.1.23 的规定;

$\mu_{sc}$ ——导线或地线的体型系数:当覆冰时,导线或地线的体型系数  $\mu_{sc}$  应取 1.2;当无冰且线径小于 17mm 时,导线或地线的体型系数  $\mu_{sc}$  应取 1.2;当无冰且线径大于或等于 17mm 时,导线或地线的体型系数  $\mu_{sc}$  应取 1.1;

$d$ ——导线或地线的外径或覆冰时的计算外径；分裂导线取所有子导线外径的总和(m)；

$L_p$ ——杆塔的水平档距(m)；

$B_1$ ——导线、地线及绝缘子覆冰后风荷载增大系数，5mm 冰区宜取 1.1，10mm 冰区宜取 1.2，15mm 冰区宜取 1.3，20mm 及以上冰区宜取 1.5~2.0；

$\theta$ ——风向与导线或地线方向之间的夹角(°)；

$W_0$ ——基准风压标准值(kN/m<sup>2</sup>)；

$V$ ——基准高度为 10m 的风速(m/s)。

表 10.1.18-1 风压不均匀系数  $\alpha$  和导地线风载调整系数  $\beta_c$

基本风速 $V$ (m/s)		$\leq 20$	$20 \leq V < 27$	$27 \leq V < 31.5$	$\geq 31.5$
$\alpha$	杆塔荷载计算	1.00	0.85	0.75	0.70
	塔头设计摇摆角计算	1.00	0.75	0.61	0.61
$\beta_c$	杆塔荷载计算	1.00	1.10	1.20	1.30

注：对跳线  $\alpha$  宜取 1.2。

表 10.1.18-2 校验杆塔大风工况电气间隙时的风压不均匀系数  $\alpha$

档距(m)	$\leq 200$	250	300	350	400	450	500	$\geq 550$
$\alpha$	0.80	0.74	0.70	0.67	0.65	0.63	0.62	0.61

10.1.19 杆塔风荷载的标准值应按下式计算：

$$W_s = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot \beta_z \cdot B_2 \cdot A_s \quad (10.1.19)$$

式中： $W_s$ ——杆塔风荷载标准值(kN)；

$\mu_s$ ——构件的体型系数；

$B_2$ ——构件覆冰后风荷载增大系数，5mm 冰区取 1.1；10mm 冰区取 1.2；15mm 冰区取 1.6；20mm 冰区取 1.8；20mm 以上冰区取 2.0~2.5；

$A_s$ ——构件承受风压投影面积计算值(m<sup>2</sup>)；

$\beta_z$ ——杆塔风荷载调整系数，应按本规范第 10.1.21 条的规定选用。

10.1.20 构件的体型系数  $\mu_s$ 应符合下列规定：

1 角钢塔体型系数  $\mu_s$  应取  $1.3(1+\eta)$ , 塔架背风面风载降低系数  $\eta$  应符合表 10.1.20 的规定,  $\eta$  中间值可按线性插入法计算。

表 10.1.20 塔架背风面风载降低系数  $\eta$

$\begin{matrix} A_s/A \\ b/a \end{matrix}$	$\leq 0.1$	0.2	0.3	0.4	0.5	$\geq 0.6$
$\leq 1$	1.0	0.85	0.66	0.50	0.33	0.15
2	1.0	0.90	0.75	0.60	0.45	0.30

注:  $A$  为塔架轮廓面积;  $a$  为塔架迎风面宽度;  $b$  为塔架迎风面与背风面之间距离。

2 钢管塔体型系数  $\mu_s$  应按下列规定取值:

- 1) 当  $\mu_z \cdot W_0 \cdot d^2 \leq 0.003$  时,  $\mu_s$  值应按角钢塔架的  $\mu_s$  值乘 0.8 采用,  $d$  为钢管直径(m)。
- 2) 当  $\mu_z \cdot W_0 \cdot d^2 \geq 0.021$  时,  $\mu_s$  值应按角钢塔架的  $\mu_s$  值乘 0.6 采用。
- 3) 当  $0.003 < \mu_z \cdot W_0 \cdot d^2 < 0.021$  时,  $\mu_s$  值应按插入法计算。

3 当铁塔为钢管和角钢等不同类型截面组成的混合结构时, 应按不同类型杆件迎风面积分别计算或按照杆塔迎风面积加权平均计算  $\mu_s$  值。

10.1.21 杆塔风荷载调整系数  $\beta_z$  应符合下列规定:

1 杆塔设计时, 当杆塔全高不超过 60m 时, 杆塔风荷载调整系数  $\beta_z$  (用于杆塔本身) 应按表 10.1.21 对全高采用一个系数; 当杆塔全高超过 60m 时, 杆塔风荷载调整系数  $\beta_z$  应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定采用由下到上逐段增大的数值, 但其加权平均值不应小于 1.6。

表 10.1.21 杆塔风荷载调整系数  $\beta_z$

铁塔全高(m)	40	50	60
$\beta_z$	1.35	1.50	1.60

注: 1 杆塔风荷载调整系数  $\beta_z$  中间值应按插入法计算。

2 对自立式铁塔, 表中数值适用于高度与根开之比为 4~6。

2 基础设计时,当杆塔全高不超过 60m 时,杆塔风荷载调整系数  $\beta_z$  应取 1.0;当杆塔全高超过 60m 时,杆塔风荷载调整系数  $\beta_z$  宜采用由下到上逐段增大的数值,但其加权平均值不应小于 1.3。

10.1.22 绝缘子串风荷载的标准值应按下式计算:

$$W_1 = W_0 \cdot \mu_z \cdot B_1 \cdot A_1 \quad (10.1.22)$$

式中:  $W_1$ ——绝缘子串风荷载标准值(kN);

$A_1$ ——绝缘子串承受风压面积计算值( $m^2$ )。

10.1.23 对于平坦或稍有起伏的地形,风压高度变化系数  $\mu_z$  应符合表 10.1.23 的规定。

表 10.1.23 风压高度变化系数  $\mu_z$

离地面或 海平面高度(m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.17	1.00	0.74	0.62
10	1.38	1.00	0.74	0.62
15	1.52	1.14	0.74	0.62
20	1.63	1.25	0.84	0.62
30	1.80	1.42	1.00	0.62
40	1.92	1.56	1.13	0.73
50	2.03	1.67	1.25	0.84
60	2.12	1.77	1.35	0.93
70	2.20	1.86	1.45	1.02
80	2.27	1.95	1.54	1.11
90	2.34	2.02	1.62	1.19
100	2.40	2.09	1.70	1.27
150	2.64	2.38	2.03	1.61

续表 10.1.23

离地面或 海平面高度(m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
200	2.83	2.61	2.30	1.92
250	2.99	2.80	2.54	2.19
300	3.12	2.97	2.75	2.45
350	3.12	3.12	2.94	2.68
400	3.12	3.12	3.12	2.91
≥450	3.12	3.12	3.12	3.12

注:地面粗糙度类别可分为:A类指近海面 and 海岛、海岸、湖岸及沙漠地区;B类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区;C类指有密集建筑群的城市市区;D类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。

## 10.2 结 构 材 料

**10.2.1** 钢材的材质应根据结构的重要性、结构形式、连接方式、钢材厚度和结构所处的环境及气温等条件进行合理选择。钢材等级宜采用 Q235、Q345、Q390 和 Q420,有条件时也可采用 Q460。钢材的质量应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的有关规定。

**10.2.2** 所有杆塔结构的钢材均应满足不低于 B 级钢的质量要求。当采用 40mm 及以上厚度的钢板焊接时,应采取防止钢材层状撕裂的措施。

**10.2.3** 结构连接宜采用 4.8、5.8、6.8、8.8 级热浸镀锌螺栓,有条件时也可使用 10.9 级螺栓,其材质和机械特性应分别符合现行国家标准《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1 和《紧固件机械性能 螺母 粗牙螺纹》GB/T 3098.2 的有关规定。

**10.2.4** 钢材、螺栓和锚栓的强度设计值应符合表 10.2.4 的规定。

表 10.2.4 钢材、螺栓和锚栓的强度设计值 ( $N/mm^2$ )

类别 材料		厚度或直径 (mm)	抗拉	抗压和 抗弯	抗剪	孔壁承压	
钢材	Q235	$\leq 16$	215	215	125	370	
		$>16\sim 40$	205	205	120		
		$>40\sim 60$	200	200	115		
		$>60\sim 100$	190	190	110		
	Q345	$\leq 16$	310	310	180	510	
		$>16\sim 35$	295	295	170	490	
		$>35\sim 50$	265	265	155	440	
		$>50\sim 100$	250	250	145	415	
	Q390	$\leq 16$	350	350	205	530	
		$>16\sim 35$	335	335	190	510	
		$>35\sim 50$	315	315	180	480	
		$>50\sim 100$	295	295	170	450	
	Q420	$\leq 16$	380	380	220	560	
		$>16\sim 35$	360	360	210	535	
		$>35\sim 50$	340	340	195	510	
		$>50\sim 100$	325	325	185	480	
	Q460	$\leq 16$	415	415	240	595	
		$>16\sim 35$	395	395	230	575	
		$>35\sim 50$	380	380	220	560	
		$>50\sim 100$	360	360	210	535	
镀锌 粗制 螺栓 (C级)	4.8级	标称直径 $D\leq 39$	200	—	170	螺 杆 承 压	420
	5.8级	标称直径 $D\leq 39$	240	—	210		520
	6.8级	标称直径 $D\leq 39$	300	—	240		600
	8.8级	标称直径 $D\leq 39$	400	—	300		800
	10.9级	标称直径 $D\leq 39$	500	—	380		900

续表 10.2.4

类别 材料		厚度或直径 (mm)	抗拉	抗压和 抗弯	抗剪	孔壁承压
锚栓	Q235 钢	外径 $\geq 16$	160	—	—	—
	Q345 钢	外径 $\geq 16$	205	—	—	—
	35 号优质 碳素钢	外径 $\geq 16$	190	—	—	—
	45 号优质 碳素钢	外径 $\geq 16$	215	—	—	—

注:1 孔壁承压用于螺栓端距大于或等于  $1.5D_B$  ( $D_B$  螺栓直径) 的构件。

2 8.8 级高强度螺栓应具有 A 类(塑性性能)和 B 类(强度)试验项目的合格证明。



# 11 杆塔结构

## 11.1 基本计算规定

**11.1.1** 杆塔结构设计应采用以概率理论为基础的极限状态设计法,结构构件的可靠度应采用可靠指标度量,极限状态设计表达式应采用荷载标准值、材料性能标准值、几何参数标准值以及各种分项系数等表达。

**11.1.2** 结构的极限状态应满足线路安全运行的临界状态。极限状态分可为承载力极限状态和正常使用极限状态,并应符合下列规定:

1 承载力极限状态应为结构或构件达到最大承载力或不能继续承载的变形。

2 正常使用极限状态应为结构或构件的变形或裂缝等达到正常使用或耐久性能的规定限值。

**11.1.3** 结构或构件的强度、稳定和连接强度应按承载力极限状态的要求,采用荷载的设计值和材料强度的设计值进行计算;结构或构件的变形或裂缝应按正常使用极限状态的要求,采用荷载的标准值和正常使用规定限值进行计算。

## 11.2 承载能力和正常使用极限状态计算表达式

**11.2.1** 结构或构件的承载力极限状态,应按下式计算:

$$\gamma_0(\gamma_G \cdot S_{GK} + \psi \sum \gamma_{Qi} \cdot S_{Qik}) \leq R \quad (11.2.1)$$

式中: $\gamma_0$ ——杆塔结构重要性系数,各类杆塔除安装工况取 1.0 外,其他工况不应小于 1.1;

$\gamma_G$ ——永久荷载分项系数,对结构受力有利时不大于 1.0,不利时宜取 1.2;

$\gamma_{Qi}$ ——第  $i$  项可变荷载的分项系数,宜取 1.4;

$S_{GK}$ ——永久荷载标准值的效应；

$S_{QiK}$ ——第  $i$  项可变荷载标准值的效应；

$\psi$ ——可变荷载组合系数，正常运行情况宜取 1.0，断线情况、安装情况和不均匀覆冰情况宜取 0.9，验算情况宜取 0.75；

$R$ ——结构构件的抗力设计值。

**11.2.2** 结构或构件的正常使用极限状态，应按下式计算：

$$S_{GK} + \psi \sum S_{QiK} \leq C \quad (11.2.2)$$

式中： $C$ ——结构或构件的裂缝宽度或变形的规定限值(mm)。

**11.2.3** 结构或构件承载力的抗震验算，应按下式计算：

$$\gamma_G \cdot S_{GE} + \gamma_{Eh} \cdot S_{Ehk} + \gamma_{EV} \cdot S_{EVK} + \gamma_{EQ} \cdot S_{EQK} + \psi_{wE} \cdot S_{wk} \leq R/\gamma_{RE} \quad (11.2.3)$$

式中： $\gamma_G$ ——永久荷载分项系数，对结构受力有利时宜取 1.0，不利时宜取 1.2，验算结构抗倾覆或抗滑移时取 0.9；

$\gamma_{Eh}, \gamma_{EV}$ ——水平、竖向地震作用分项系数，应符合表 11.2.3-1 的规定；

$\gamma_{EQ}$ ——导、地线张力可变荷载的分项综合系数，宜取 0.5；

$S_{GE}$ ——永久荷载代表值的效应；

$S_{Ehk}$ ——水平地震作用标准值的效应；

$S_{EVK}$ ——竖向地震作用标准值的效应；

$S_{EQK}$ ——导、地线张力可变荷载的代表值效应；

$S_{wk}$ ——风荷载标准值的效应；

$\psi_{wE}$ ——抗震基本组合中的风荷载组合系数，可取 0.3；

$\gamma_{RE}$ ——承载力抗震调整系数，应符合表 11.2.3-2 的规定。

**表 11.2.3-1 地震作用分项系数**

地震作用		$\gamma_{Eh}$	$\gamma_{EV}$
仅计算水平地震作用		1.3	0
仅计算竖向地震作用		0	1.3
同时计算水平与 竖向地震作用	水平地震作用为主时	1.3	0.5
	竖向地震作用为主时	0.5	1.3

表 11.2.3-2 承载力抗震调整系数

材 料	结构构件	承载力抗震调整系数
钢	跨越塔	0.85
	除跨越塔以外的其他铁塔	0.80
	焊缝和螺栓	1.00

### 11.3 杆塔结构基本规定

**11.3.1** 长期荷载效应组合(覆冰厚度为无冰、风速 5m/s 及年平均气温)情况,杆塔的计算挠度(不包括基础预偏)应符合表 11.3.1 的规定。

表 11.3.1 杆塔的计算挠度(不包括基础预偏)

项 目	杆塔的计算挠度限值
悬垂直线自立式铁塔	$3h/1000$
悬垂转角自立式铁塔	$5h/1000$
耐张塔及终端自立式铁塔	$7h/1000$

注:1  $h$  为杆塔最长腿基础顶面起至计算点的高度。

2 设计时应根据杆塔的特点提出施工预偏的要求。

**11.3.2** 钢结构构件允许最大长细比应符合表 11.3.2 的规定。

表 11.3.2 钢结构构件允许最大长细比

项 目	钢结构构件允许最大长细比
受压主材	150
受压材	200
辅助材	250
受拉材(预拉力的拉杆可不受长细比限制)	400

**11.3.3** 杆塔铁件应采用热浸镀锌防腐,也可采用其他等效的防腐措施。

**11.3.4** 受剪螺栓的螺纹不应进入剪切面。当无法避免螺纹进入

剪切面时,应按净面积进行剪切强度验算。

**11.3.5** 全塔所有螺栓应采取防松措施。受拉螺栓及位于横担、顶架等易振动部位的螺栓宜采取双帽防松措施。靠近地面的塔腿上的连接螺栓宜采取防卸措施。

## 12 基 础

**12.0.1** 基础形式的选择应结合线路沿线地质、施工条件和杆塔的特点综合考虑,并应符合下列要求:

1 当有条件时,应优先采用原状土基础。

2 一般地区可选用现浇钢筋混凝土基础或混凝土基础,岩石地区可采用锚筋基础或岩石嵌固基础;软土地基可采用大板基础、桩基础或沉井基础;运输或浇制混凝土有困难的地区,可采用装配式基础。

3 山区线路应采用全方位长短腿铁塔和不等高基础配合使用的方案。

**12.0.2** 基础稳定、基础承载力应采用荷载的设计值进行计算;地基的不均匀沉降、基础位移等应采用荷载的标准值进行计算。

**12.0.3** 基础的上拔和倾覆稳定,应采用下式计算:

$$\gamma_f \cdot T_E \leq A(\gamma_k, \gamma_s, \gamma_c \dots) \quad (12.0.3)$$

式中:  $\gamma_f$ ——基础附加分项系数,应符合表 12.0.3 的规定;

$T_E$ ——基础上拔或倾覆外力设计值;

$A(\gamma_k, \gamma_s, \gamma_c)$ ——基础上拔或倾覆的承载力函数;

$\gamma_k$ ——几何参数的标准值;

$\gamma_s, \gamma_c$ ——土及混凝土的重度设计值(取土及混凝土的实际重度)。

表 12.0.3 基础附加分项系数

杆 塔 类 型	上拔稳定		倾覆稳定
	重力式基础	其他各种 类型基础	各类型基础
悬垂直线杆塔	0.90	1.10	1.10

续表 12.0.3

杆 塔 类 型	上拔稳定		倾覆稳定
	重力式基础	其他各种 类型基础	各类型基础
耐张直线(0°转角) 及悬垂转角杆塔	0.95	1.30	1.30
耐张转角、终端及大跨越杆塔	1.10	1.60	1.60

12.0.4 基础底面压应力,应符合下列规定:

1 当轴心荷载作用时,应按下式计算:

$$P \leq \frac{f_a}{\gamma_{rf}} \quad (12.0.4-1)$$

式中:  $P$ ——基础底面处的平均压应力设计值(kPa);

$f_a$ ——修正后的地基承载力特征值(kPa);

$\gamma_{rf}$ ——地基承载力调整系数,宜取 0.75。

2 当偏心荷载作用时,除应按公式(12.0.4-1)计算外,还应按下式计算:

$$P_{\max} \leq \frac{1.2f_a}{\gamma_{rf}} \quad (12.0.4-2)$$

式中:  $P_{\max}$ ——基础底面边缘的最大压应力设计值(kPa)。

12.0.5 基础混凝土强度等级不应低于 C20 级。

12.0.6 岩石基础的地基应逐基鉴定。

12.0.7 基础的埋深应大于 0.5m。冻土地区的基础埋深应遵照现行行业标准《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118 的有关要求确定。

12.0.8 跨越河流或位于洪泛区的基础,应收集水文地质资料,必要时应对冲刷作用和漂浮物的撞击影响采取相应的防护措施。

12.0.9 当位于地震烈度为 7 度及以上的地区,且场地为饱和砂土和饱和粉土时,应考虑地基液化的可能性,并采取必要的稳定地基或基础的抗震措施。

12.0.10 转角塔、终端塔的基础应采取预偏措施。

## 13 对地距离及交叉跨越

**13.0.1** 导线与地面、建筑物、树木、铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路的距离应符合下列要求：

1 垂直距离应根据导线运行温度  $40^{\circ}\text{C}$  或覆冰无风情况求得的最大弧垂计算。

2 风偏净空距离应根据最大风情况或覆冰情况求得的最大风偏进行校验。

3 大跨越的导线弧垂应按导线实际能够达到的最高温度计算。

4 输电线路与铁路、高速公路及一级公路交叉时，如交叉档距超过  $200\text{m}$ ，最大弧垂应按导线允许温度计算，导线的允许温度可取  $70^{\circ}\text{C}$ 。

5 重覆冰区的线路应计算导线不均匀覆冰和验算覆冰工况下的弧垂增大值。

**13.0.2** 导线与地面的最小距离，以及与山坡、峭壁、岩石之间的最小净空距离应符合下列规定：

1 在最大计算弧垂情况下，导线与地面的最小距离应符合表 13.0.2-1 规定的数值。

表 13.0.2-1 导线与地面的最小距离 (m)

地区 \ 串型	绝缘子串布置		备 注
	水平 V 串	水平 II 串	
居民区	21.0	21.5	—
非居民区	18.0	18.5	农业耕作区
	16.0	17.0	人烟稀少的非农业耕作区
交通困难地区	15.5		—

注：在灰尘严重和气候干燥地区，宜适当增加极导线对地距离。

2 在最大计算风偏情况下,导线与山坡、峭壁、岩石之间的最小净空距离,应符合表 13.0.2-2 规定的数值。

表 13.0.2-2 导线与山坡、峭壁、岩石之间的最小净空距离(m)

线路经过地区	最小净空距离
步行可以到达的山坡	13
步行不能到达的山坡、峭壁和岩石	11

13.0.3 当线路邻近民房时,在湿导线情况下房屋所在地面的未畸变合成电场不得超过  $15\text{kV/m}$ 。

13.0.4 线路不应跨越经常有人居住的建筑物以及屋顶为燃烧材料危及线路安全的建筑物。导线与建筑物之间的距离应符合下列规定:

1 在最大计算弧垂情况下,导线与建筑物之间的最小垂直距离应符合表 13.0.4-1 的规定。

表 13.0.4-1 导线与建筑物之间的最小垂直距离

标称电压(kV)	$\pm 800$
垂直距离(m)	16

2 在最大计算风偏情况下,线路边导线与建筑物之间的最小净空距离应符合表 13.0.4-2 的规定。

表 13.0.4-2 导线与建筑物之间的最小净空距离

标称电压(kV)	$\pm 800$
净空距离(m)	15.5

3 在无风时,线路边导线与建筑物之间的最小水平距离应符合表 13.0.4-3 的规定。

表 13.0.4-3 边导线与建筑物之间的最小水平距离

标称电压(kV)	$\pm 800$
水平距离(m)	7

13.0.5 线路经过经济作物和集中林区时,宜采用加高杆塔跨越林木不砍通道的方案,并应符合下列规定:



1 当跨越时,导线与树木(考虑自然生长高度)之间的最小垂直距离应符合表 13.0.5-1 的规定。

表 13.0.5-1 导线与树木(考虑自然生长高度)之间的最小垂直距离

标称电压(kV)	±800
垂直距离(m)	13.5

2 当砍伐通道时,通道净宽度不应小于线路宽度加林区主要树种自然生长高度的 2 倍。通道附近超过主要树种自然生长高度的非主要树种树木应砍伐。

3 线路通过公园、绿化区或防护林带,在最大计算风偏情况下,导线与树木之间的最小净空距离应符合表 13.0.5-2 的规定。

表 13.0.5-2 导线与树木之间的最小净空距离

标称电压(kV)	±800
净空距离(m)	10.5

4 线路通过果树、经济作物林或城市灌木林不应砍伐通道。导线与果树、经济作物、城市绿化灌木以及街道行道树木之间的最小垂直距离应符合表 13.0.5-3 的规定。

表 13.0.5-3 导线与果树、经济作物、城市绿化灌木及街道树木之间的最小垂直距离

标称电压(kV)	±800
垂直距离(m)	15

13.0.6 ±800kV 线路与弱电线路(不包括光缆和埋地电缆)的交叉角应符合表 13.0.6 的规定,弱电线路等级分类宜按本规范附录 D 执行。

表 13.0.6 ±800kV 线路与弱电线路的交叉角

弱电线路等级	一级	二级	三级
交叉角	≥45°	≥30°	不限制

**13.0.7**  $\pm 800\text{kV}$  线路与甲类火灾危险性的生产厂房、甲类物品库房、易燃易爆材料堆场以及可燃或易燃易爆液(气)体储罐的防火间距,不应小于杆塔全高加 3m,还应符合其他的相关要求。

**13.0.8** 线路与地埋输油、输气管道的平行接近距离,应根据线路和管道的具体参数计算确定。

**13.0.9**  $\pm 800\text{kV}$  线路与铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近的要求,应符合下列规定:

**1**  $\pm 800\text{kV}$  线路与铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉最小垂直距离应符合表 13.0.9-1 的规定。

表 13.0.9-1  $\pm 800\text{kV}$  线路与铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉最小垂直距离

项 目		垂直距离(m)
铁路	至轨顶	21.5
	至承力索或接触线	15.0
公路	至路面	21.5
通航河流	至五年一遇洪水位	15.0
	至最高航行水位桅顶	10.5
不通航河流	百年一遇洪水位	12.5
	冬季至冰面	18.5
弱电线	至被跨越物	17.0
电力线	至被跨越物(杆顶)	10.5(15.0)
特殊管道、索道	至管道任何部分	管道 17.0
		索道 10.5

注:垂直距离中括号内的数值用于跨杆(塔)顶。

**2**  $\pm 800\text{kV}$  线路与铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路水平接近距离不应小于表 13.0.9-2 规定的数值。

**表 13.0.9-2  ±800kV 线路与铁路、道路、河流、管道、  
索道及各种架空线路水平接近距离的要求**

项 目				最小水平距离(m)
铁路	杆塔外缘至轨道中心			交叉:塔高加 3.1m, 无法满足要求时可适当 减小,但不得小于 40m 平行:最高塔高加 3.1m, 困难时双方协商确定
公路	交叉	杆塔外缘至路基边缘		15.0 或按协议取值
	平行	边导线至 路基边缘	开阔地区	最高塔高
			路径受限制地区	12.0 或按协议取值
通航河流	边导线至斜坡上缘(线路与拉纤小路平行)			最高塔高
不通航河流				
弱电线	与边导线间(平行)		开阔地区	最高塔高
			路径受限制地区 (最大风偏情况下)	13
电力线	与边导线间(平行)		开阔地区	最高塔高
			路径受限制地区 (最大风偏情况下)	边导线间 20, 导线风偏至邻塔 13
特殊 管道、索道	边导线至管、 索道任何部分		开阔地区	交叉
				平行
			路径受限制地区 (最大风偏情况下)	天然气、石油(非埋地 管道):最高塔高+3m  风偏时 15

**13.0.10** 当线路跨越铁路、高速公路、一级公路、电车道、一二级通航河流、110kV 及以上电力线、特殊管道、索道时,导、地线不得接头。公路等级分类宜按本规范附录 E 执行。

**13.0.11** 当跨越 220kV 及以上线路、铁路、高速公路、一级公路、一二级通航河流及特殊管道等时,悬垂绝缘子串宜采用双挂点、双联“I”串或“V”串型式。

## 14 环 境 保 护

**14.0.1** 输电线路设计应符合环境保护和水土保持国家现行有关标准的要求。

**14.0.2** 输电线路的设计中应对电磁干扰、噪声等污染因子采取必要的防治措施,减少其对周围环境的影响。

**14.0.3** 输电线路无线电干扰、可听噪声、合成场强、离子流密度应符合本规范第 5.0.2 条、第 5.0.3 条和第 5.0.4 条的规定。

**14.0.4** 对沿线相关的弱电线路和无线电设施应进行通信保护设计,并采取相应处理措施。

**14.0.5** 山区线路应采用全方位长短腿加不等高基础配合使用。

**14.0.6** 线路经过经济作物或林区时,宜采取跨越设计。

## 15 劳动安全和工业卫生

**15.0.1** 输电线路设计应满足有关防火、防爆、防尘、防毒及劳动安全与卫生等方面国家现行有关标准的要求。

**15.0.2** 杆塔设计应设有高空作业人员的安全保护措施。

**15.0.3** 施工时应针对邻近输电线路可能产生的感应电压采取安全保护措施。

**15.0.4** 当对平行和交叉的其他输电线路、通信线等邻近线路存在感应电压影响时,邻近线路在施工、运行和维修时应做好安全措施。

## 16 附 属 设 施

**16.0.1** 当新建输电线路在交通困难地区设巡线站时,其维护半径可取 40km~50km,如沿线交通方便或该地区已有生产运行机构,也可不设巡检站。巡检站应配备必要的备品备件、检修材料、维护检修工器具以及交通工具。

**16.0.2** 杆塔上的固定标志,应符合下列要求:

- 1 所有杆塔均应标明线路的名称、代号和杆塔号。
- 2 所有耐张型杆塔、分支杆塔和换位杆塔前后各一基杆塔上,均应有明显的极性标志。
- 3 在多回路杆塔上或在同一走廊内的平行线路的杆塔上,均应标明每一线路的名称和代号。
- 4 高杆塔应按航空部门的规定装设航空障碍标志。
- 5 杆塔上固定标志的尺寸、颜色和内容还应符合运行部门的要求。
- 6 跨越铁路时杆塔处应设置标志牌。

**16.0.3** 新建输电线路宜根据现有运行条件配备适当的通信设施。

**16.0.4** 一般线路杆塔登高设施可选用脚钉或直爬梯,并可设置简易的检修人员休息平台。大跨越线路杆塔应设置旋转爬梯,必要时可增设攀爬机或电梯等设施。

**16.0.5** 杆塔可安装高空作业人员的防坠落装置。

## 附录 A 导线表面最大电位梯度计算

**A.0.1** 导线表面最大电位梯度按国际大电网会议第 36 分委会推荐方法计算,应符合下列规定:

1 分裂导线的等效直径应按下列式计算:

$$d = D \sqrt[n]{nd} \quad (\text{A.0.1-1})$$

式中:  $D$ ——通过  $n$  根次导线中心的圆周直径(cm);

$n$ ——次导线的根数;

$d$ ——次导线的直径(cm)。

2 用麦克斯威电位系数法决定每极导线的等效总电荷  $Q$  应按下列式计算:

$$[V] = [P][Q] \quad (\text{A.0.1-2})$$

式中:  $[V]$ ——极导线电位矩阵(kV);

$[P]$ ——电位系数矩阵(m/F);

$[Q]$ ——等效电荷矩阵(C/m)。

3 导线的平均表面电位梯度应按下列式计算:

$$g = Q / (\pi \epsilon_0 d n) \quad (\text{A.0.1-3})$$

式中:  $g$ ——电位梯度(kV/cm);

$\epsilon_0$ ——空气介电常数;

$Q$ ——等效电荷(C/m)。

4 导线表面最大电位梯度应按下列式计算:

$$g_{\max} = g[1 + (n-1)(d/D)] \quad (\text{A.0.1-4})$$

5 对于双极直流线路可按下式用每千伏梯度的梯度因子  $g'$  (kV/cm/kV) 来近似计算导线表面电位梯度:

$$g' = \frac{1 + (n-1) \frac{r}{R}}{n \cdot r \cdot \ln \left[ \frac{2H}{(n \cdot r \cdot R^{n-1})^{\frac{1}{n}} \sqrt{\frac{4H^2}{S^2} + 1}} \right]} \quad (\text{A. 0. 1-5})$$

式中:  $g$ ——导线表面电位梯度,  $g = Vg'$  (kV/cm);

$r$ ——次导线半径(cm);

$R$ ——通过  $n$  根次导线中心圆周的半径(cm);

$H$ ——导线的平均高度(导线对地最小高度加 1/3 弧垂)  
(cm);

$S$ ——正极与负极导线之间的距离(cm);

$n$ ——次导线数(分裂导线分裂数)。



## 附录 B 电晕无线电干扰场强计算

**B. 0.1** 国际无线电干扰特别委员会(CISPR)推荐的电晕无线电干扰场强应按下式计算:

$$E = 38 + 1.6(g_{\max} - 24) + 46\log(r) + 5\log(n) + \Delta E_f + 33\lg \frac{20}{D} + \Delta E_w \quad (\text{B. 0. 1})$$

式中:  $E$ ——电晕无线电干扰场强, (dB) 或 ( $\mu\text{V}/\text{m}$ );

$g_{\max}$ ——导线表面最大场强 ( $\text{kV}/\text{cm}$ );

$r$ ——子导线半径 ( $\text{cm}$ );

$n$ ——为分裂导线数;

$D$ ——为距正极性导线的距离 (适用于  $D < 100\text{m}$ );

$\Delta E_w$ ——气象修正项;

$\Delta E_f$ ——干扰频率修正项。

注: 海拔 500m 以上需进行海拔修正。

## 附录 C 电晕可听噪声计算

**C. 0.1** 电晕可听噪声  $AN$  可按下列两款规定的其中一种进行计算。

1 电晕可听噪声可按下式计算：

$$AN = -133.4 + 86 \lg g_{\max} + 40 \lg d_{\text{eq}} - 11.4 \lg D \quad (\text{C. 0. 1-1})$$

式中： $g_{\max}$ ——为导线表面最大电场强度(kV/cm)；

$d_{\text{eq}}$ ——导线等效直径(mm)， $0.66n^{0.64}d$  ( $n > 2$ )；

$d$ ——子导线直径(mm)；

$n$ ——子导线根数；

$D$ ——离正极导线的距离(m)。

上式为春秋季节好天气的  $L_{50}$  值，对夏、冬季节相应增加或减少 2dB(A)；对坏天气可减少 6dB(A)~11dB(A)。

2 电晕可听噪声也可按下式计算：

$$AN = 56.9 + 124 \lg(E/25) + 25 \lg(d/4.45) + 18 \lg(n/2) - 10 \lg(D_r) - 0.02 D_r + K_n \quad (\text{C. 0. 1-2})$$

式中： $E$ ——导线表面最大电场强度(kV/cm)；

$n$ ——分裂导线数；

$d$ ——子导线直径(cm)；

$D_r$ ——计算点至正极导线距离(m)；

$K_n$ ——与分裂根数有关，当  $n \geq 3$  时， $K_n = 0$ ；当  $n = 2$  时，

$K_n = 2.6$ ；当  $n = 1$  时， $K_n = 7.5$ 。

## 附录 D 弱电线路等级

**D.0.1** 一级弱电线路应为首都与各省(市)、自治区所在地及其相互间联系的主要线路,包括首都至各重要工矿城市、海港的线路以及由首都通达国外的国际线路,由原邮电部指定的其他国际线路和国防线路,原铁道部与各铁路局及各铁路局之间联系用的线路,以及铁路信号自动闭塞装置专用线路。

**D.0.2** 二级弱电线路应为各省(市)、自治区所在地与各地(市)、县及其相互间的通信线路,包括相邻两省(自治区)各地(市)、县相互间的通信线路,一般市内电话线路,铁路局与各站、段及站段相互间的线路,以及铁路信号闭塞装置的线路。

**D.0.3** 三级弱电线路应为县至区、乡的县内线路和两对以下的城郊线路,包括铁路的地区线路及有线广播线路。

## 附录 E 公路等级

**E.0.1** 高速公路应为专供汽车分向、分车道行驶并应全部控制出入的多车道公路,应符合下列规定:

1 四车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 25000 辆~55000 辆。

2 六车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 45000 辆~85000 辆。

3 八车道高速公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 60000 辆~100000 辆。

**E.0.2** 一级公路应为供汽车分向、分车道行驶,并可根据需要控制出入的多车道公路,应符合下列规定:

1 四车道一级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 15000 辆~30000 辆。

2 六车道一级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 25000 辆~55000 辆。

**E.0.3** 二级公路应为供汽车行驶的双车道公路,双车道二级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 5000 辆~15000 辆。

**E.0.4** 三级公路应为主要供汽车行驶的双车道公路,双车道三级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 2000 辆~6000 辆。

**E.0.5** 四级公路应为主要供汽车行驶的双车道或单车道公路,应符合下列规定:

1 双车道四级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 2000 辆以下。

2 单车道四级公路应能适应将各种汽车折合成小客车的年平均日交通量 400 辆以下。

## 本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

4)表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

《建筑结构荷载规范》GB 50009

《碳素结构钢》GB/T 700

《低合金高强度结构钢》GB/T 1591

《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1

《紧固件机械性能 螺母 粗牙螺纹》GB/T 3098.2

《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118

中华人民共和国国家标准

# ±800kV 直流架空输电线路设计规范

**GB 50790 - 2013**

条文说明

## 制 订 说 明

《±800kV 直流架空输电线路设计规范》GB 50790—2013,经住房和城乡建设部 2012 年 12 月 25 日以第 1595 号公告批准发布。

本规范制定过程中,编制组贯彻国家法律、法规和电力建设政策;坚持科学发展,广泛深入调研;吸取电力建设工程实践经验,以±800kV 云南—广东特高压直流输电工程,±800kV 向家坝—上海直流特高压示范工程和±800kV 锦屏—苏南直流特高压工程关键技术研究、设计研究成果为基础,广泛征求相关单位意见。保证特高压输电线路的安全可靠、经济合理;总结国内外特高压的科研成果,并采纳了现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 的有关条文;考虑 2008 年初冰灾影响,规范还针对 2008 年初我国南方地区电网覆冰灾害经验教训进行了认真仔细的研究和分析,调整了现有规程冰区的划分,适当提高了电网抗冰设防的要求。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定,编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明,对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明,还着重对强制性条文的强制性理由做了解释。但是,本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。



# 目 次

1 总 则 .....	(59)
2 术语和符号 .....	(60)
2.1 术语 .....	(60)
3 路 径 .....	(61)
4 气象条件 .....	(63)
5 导线和地线 .....	(66)
6 绝缘子和金具 .....	(96)
7 绝缘配合、防雷和接地 .....	(99)
8 导线布置 .....	(124)
9 杆塔型式 .....	(127)
10 杆塔荷载及材料 .....	(129)
10.1 杆塔荷载 .....	(129)
10.2 结构材料 .....	(134)
11 杆塔结构 .....	(137)
11.1 基本计算规定 .....	(137)
11.2 承载能力和正常使用极限状态计算表达式 .....	(137)
11.3 杆塔结构基本规定 .....	(139)
12 基 础 .....	(140)
13 对地距离及交叉跨越 .....	(142)
14 环境保护 .....	(168)
15 劳动安全和工业卫生 .....	(169)
16 附属设施 .....	(170)

# 1 总 则

**1.0.1** 本条提出了 $\pm 800\text{kV}$  线路设计工作的基本原则,要求协调好各方面的相互关系,如安全与经济、基本建设与生产运行、近期需要和远景规划、线路建设和周围环境等,目的是以合理的投资使设计的输电线路能获得最佳的综合效益。

**1.0.2** 本条规定了本规范的适用范围。

**1.0.3** 根据电网建设的发展,本条明确了依靠技术进步,合理利用资源,达到降低消耗,提高资源利用效率的要求。

## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

为正确理解特定的名词术语含义,本节列出输电线路设计中常用的术语,便于执行条文规定时查找使用。

**2.1.12** 等值盐密大于  $0.15\text{mg}/\text{cm}^2$  的情况,在工程中按实际情况进行处理。

**2.1.18** 杆塔处的保护角指不考虑风偏,地线对水平面的垂线和地线与最外侧子导线的连线之间的夹角。

### 3 路 径

**3.0.1** 随着新技术手段的发展,±800kV 输电线路路径选择使用卫片、航片、全数字摄影测量系统等新技术,在滑坡、泥石流、崩塌等不良地质发育地区宜采用地质遥感技术等。

**3.0.2** 为了使新建特高压工程与地方发展和规划相协调,明确路径选择原则,要求尽量减少对军事设施和地方经济发展的影响。

**3.0.4** 根据多年的线路运行经验的总结,选择线路要尽量避免不良地质地带、采动影响区(地下矿产开采区、采空区)等可能引起杆塔倾斜、沉陷的地段;当无法避让时,要开展详细的地质、矿产分布、开采情况、塌陷情况的专项调查,要开展塔位稳定性评估。根据运行经验增加了路径选择尽量避免导线易舞动区等内容并加以明确,东北的鞍山、丹东、锦州一带,湖北的荆门、荆州、武汉一带是全国范围内输电线路发生舞动较多地区,导线舞动对线路安全运行所造成的危害十分重大,诸如线路频繁跳闸与停电、导线的磨损、烧伤与断线、金具及有关部件的损坏等,都会造成重大的经济损失与社会影响,因此舞动多发区要尽量避让。当无法避让时,要对铁塔、金具等采取适当加强,并安装防舞装置等措施。

**3.0.5** 为使新建特高压线路与沿线相关设施的相互协调,以求和谐共存,明确在选择路径时要考虑对临近设施如电台、机场、弱电线路等的影响。

**3.0.6** 耐张段长度由线路的设计、运行、施工条件和施工方法确定,吸取 2008 年初冰灾运行经验,轻、中、重冰区的耐张段长度分别不宜大于 10km、5km、3km,当耐张段长度较长时,设计中要采取措施防止串倒,例如轻冰区每隔 7 基~8 基(中冰区每隔 4 基~5 基)设置一基纵向强度较大的加强型直线塔,防串倒的加强型直

线塔其设计条件除按常规直线塔工况计算外,还要按所有导地线同侧有断线张力(含纵向不平衡张力)计算。

**3.0.8** 为了预防灾害性事故的发生,山区输电线路选择路径和定位时,要注意限制使用档距和相应的高差,避免出现杆塔两侧大小悬殊的档距,当无法避免时要采取必要的措施,提高安全度。

**3.0.9** 大跨越的基建投资大,运行维护复杂,施工工艺要求高,故一般要尽量减少或避免。因此,选线中遇有大跨越要结合整个路径方案综合考虑。往往有这样的情况,某个方案路径长度虽增加了几公里,但避免了大跨越或减少跨越档距降低了造价,从全局看是合理的,这一点要引起足够重视。

## 4 气象条件

**4.0.1** 考虑到 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路的重要性,风荷载基本值重现期较现行国家标准《 $110\text{kV}\sim 750\text{kV}$ 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010中规定的 $500\text{kV}\sim 750\text{kV}$ 线路50年一遇提高为100年一遇,风速值提高约6%,风压值提高了12%左右,比原来对杆塔的抗风能力提高了很多,但不会造成工程量较大的增加。

**4.0.2** 统计风速样本的基准高度,统一取离地面(或水面)10m,保持与荷载规范一致,可简化资料换算及便于与其他行业比较。

**4.0.3** 线路通过山区时,除一些狭谷、高峰等处受微地形影响,风速值有所增大外,对于整个山区,从宏观上看摩擦阻力大风速值不一定比平地大,所以,在如无可靠资料的情况下,对于通过山区的线路,从安全的角度出发,参考现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009规定,设计风速按附近平地风速资料增大10%;至于山区的微地形影响,除个别大跨越为提高其安全度可考虑增大风速外,在一般地区不予增加。至于一般山区虽有狭管等效应,考虑到架空输电线路有档距不均匀系数的影响,因此,从总的方面山区风速较平地增大了10%以后,已经能够反映狭管效应等情况。

**4.0.4** 在现行国家标准《 $110\text{kV}\sim 750\text{kV}$ 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010中, $500\text{kV}\sim 750\text{kV}$ 输电线路设计时,将对地20m高的最大设计风速的最小值不能低于 $30\text{m/s}$ 归算到10m基准高时不能低于 $26.85\text{m/s}$ 。 $500\text{kV}\sim 750\text{kV}$ 架空输电线路计算导、地线的张力、荷载以及杆塔荷载时,基本风速不应低于 $27\text{m/s}$ 。本规范仍沿用此最低风速限制。

**4.0.5** 根据2008年初我国南方地区覆冰灾害情况分析结果,对

输电线路基本覆冰划分为轻、中、重三个等级,采用不同的设计标准。

**4.0.6** 根据 2008 年初我国南方地区覆冰灾害情况调查分析,在同样条件下,地线上的覆冰厚度较导线大,故在新建线路设计时,地线设计冰厚要较导线增加 5mm。

地线设计冰厚增加 5mm,其主要目的是增加地线支架的机械强度。向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV 直流特高压输电线路设计时的计算分析表明,对轻冰区,由于特高压直流线路导线绝缘子串较长,地线覆冰按增加 5mm 设计(包括导地线配合)时,地线与导线配合时对地线支架高度的影响不大,故这两个工程在轻冰区地线按增加 5mm 设计,包括导、地线配合。而对于重冰区,如地线按增加 5mm 进行导、地线不同期脱冰进行支架配合,将使地线支架高度和工程投资增加较大,因此,在重冰区增加 5mm 可仅按增加地线支架强度设计。

地线覆冰取值较导线增加 5mm 后,地线的荷载取值对应的冰区(如不均匀覆冰的不平衡张力取值等)应与导线的冰区相同。

**4.0.7** 根据我国输电线路的运行经验,本条强调加强沿线已建线路设计、运行情况的调查,并对调查结果予以论述(风灾、冰灾、雷害、污闪、地质灾害、鸟害等)。

加强气象、地质及鸟害的观测主要是根据我国输电线路运行经验要求规定而执行的。输电线路运行经验要求:线路要避免重冰区及易发生导线舞动的地区。路径必须通过重冰区或导线易舞动地区时,要进行相应的防冰害或防舞动设计,适当提高线路的机械强度,局部易舞区段在线路建设时安装防舞装置等措施。输电线路位于河岸、湖岸、山峰以及山谷口等容易产生强风的地带时,其基本风速应较附近一般地区适当增大。对易覆冰、风口、高差大的地段,宜缩短耐张段长度,杆塔使用条件要适当留有裕度。对于相对高耸、山区风道、垭口、抬升气流的迎风坡、较易覆冰等微地形区段,以及相对高差较大、连续上下山等局部地段的线路要加强抗

风、冰灾害能力。

**4.0.8** 输电线路的大跨越段,一般跨越档距在 1000m 以上,跨越塔高在 130m 以上。跨越重要通航河流和海面,若发生事故,影响面广,修复困难。为确保大跨越的安全运行,设计标准要予以提高。根据我国几处大跨越的设计运行经验,如当地无可靠资料,设计风速可较附近平地线路气象资料增大 10% 设计。关于江面风速的问题,根据我国沿长江几处重大跨越的设计资料,一般认为江面风速比陆地略大一级,取为 10%。

**4.0.9** 对于大跨越的设计条件规定较高的安全标准还是必要的,考虑到覆冰资料大多数地区比较缺乏,目前气象部门尚提不出覆冰资料及其随高度变化的规律,根据现有工程的经验,多采用附近线路的设计覆冰增加 5mm 作为大跨越的设计覆冰厚度。

验算条件,要按稀有气象条件进行,当无可靠资料时,可结合各地的情况确定验算风速和覆冰厚度。

**4.0.10** 本条文是根据以往设计经验而选定,基本符合输电线路实际情况,运行中未发现问题。

**4.0.11** 本条明确了安装工况的气象条件。

**4.0.12、4.0.13** 这两条明确了雷电过电压、操作过电压等工况的气象条件。雷电过电压、操作过电压工况的风速与折算到导线平均高度处的基本风速有关。云南—广州、向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV 直流特高压输电线路导线平均高度按 28m 进行设计。不同工程的导线平均高度可根据工程情况进行取值。

**4.0.14** 本条明确了带电作业工况的气象条件。



## 5 导线和地线

**5.0.1** 架空输电线路的导线,对于不同电压等级,其选择判据是不相同的。但总体上看,都要归结为技术性和经济性两个方面。

从技术性来看,导线作为输电线路最主要的部件之一,首先需满足输送电能的要求,同时能保证安全可靠地运行,对特高压输电线路还要求满足环境保护的要求,而且在经济上是合理的。因此,对特高压线路导线在电气和机械两方面都提出了严格的要求。

在特高压直流线路导线选择中,要充分考虑导线的电气和机械特性,在电气特性方面,特高压线路由于电压的升高,导线电晕而引起的各种问题,特别是环境保护问题将比超高压线路本体问题更加突出,从国内外的实验研究和工程实践情况看,一般要求所选导线要满足线路电压降、导线发热、无线电干扰、可听噪声、合成电场及粒子电流密度、地面磁场强度等多项要求;对于导线的机械特性,要使特高压输电线路能安全可靠的运行,要求导线具有优良的机械性能和一定的安全度,特别是线路经过高山大岭(大档距和大高差)及严重覆冰地区。

就经济性而言,国内以往一般要求导线截面按照经济电流密度选择。表1和表2分别列出了前苏联和我国的标准经济电流密度。

表1 前苏联标准经济电流密度(A/mm<sup>2</sup>)

线路通过地区	最大负荷利用小时数(h)		
	1000~3000	3000~5000	5000 以上
欧洲部分、外高加索、 外贝尔加、远东	1.30	1.10	1.00
中西伯利亚、哈萨克斯坦、中亚	1.50	1.40	1.30

表 2 我国规定的经济电流密度 ( $A/mm^2$ )

导 线 材 料	最大负荷利用小时数(h)		
	3000 以下	3000~5000	5000 以上
铝	1.65	1.15	0.90
铜	3.00	2.25	1.75

表 1 所列的前苏联标准经济电流密度,是总结了大量的输电线路设计经验而得出的,能够反映数据提出当时的导线选用经济性,这种方法可以简化工作,并在特定的研究对象和研究时间具有准确性。从表 2 数据可以看出,对于我国架空输电线路所采用的钢芯铝绞线,经济电流密度只与最大负荷利用小时数有关。而数据的来源,基本上是参考了前苏联的经验,从 20 世纪 50 年代至今,一直没有变化。

国内外几个大型直流输电线路的电流密度参见表 3。

表 3 已建直流输电线路的实际电流密度

工 程 名 称		导 线 型 号	导线截面积 ( $mm^2$ )	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	电流密度 ( $A/mm^2$ )
葛上线		$4 \times LGJQ - 300$	1200	$\pm 500$	1200	1.000
天广线		$4 \times LGJ - 400$	1600	$\pm 500$	1800	1.125
三常线		$4 \times LGJ - 720$	2880	$\pm 500$	3000	1.042
贵广线		$4 \times LGJ - 720$	2880	$\pm 500$	3000	1.042
太平洋 联络线	最初投运	$2 \times ACSR1272$	2328	$\pm 400$	1800	0.733
	升压增容			$\pm 500$	3100	1.332
巴西伊泰普		$4 \times ACSR1272$	2578	$\pm 600$	2610	1.012
加拿大纳尔逊		$2 \times ACSR1843$	1868	$\pm 450$	1800	0.964

众所周知,线路工程建设费用,在不同时期是不同的,其随材料费和人工费的变化而变化。而线路运行费用也要随电力部门人工费用以及销售电价的变化而改变。

前苏联文献指出,“随着线路额定电压的提高,电晕损耗和限

制导线电晕无线电干扰水平的要求,对输电技术经济指标的影响越来越大。早在选择 330kV 线路上的相导线最佳结构时,上述条件就可能是决定性的因素。随着线路电压的提高,按经济电流密度所求得的相导线截面和在合理的相间距离下按电晕及无线电干扰条件所确定的截面,这二者之间会更加不协调。因此就超高压线路而言,关于经济电流密度的概念实际上已不采用,而相导线截面及其参数的选择,则要根据不同方案的技术经济比较来确定。”

另外,北美也有研究报告专门论述导线及其组合方案经济分析的方法。

对特高压直流线路的导线,虽然经济电流密度已经不是确定导线截面的决定因素,但其实际的电流密度应该在经济电流密度附近,因此,经济电流密度仍然可以作为初步选取导线截面的参考。

目前,为选定导线截面,一般分为两步:首先根据系统输送容量选择几种规格导线截面进行经济分析比较,以确定最佳截面;然后从电气性能上考虑导线表面电位梯度、无线电干扰、可听噪声等因素,以求对环境的影响控制在允许范围内。

综合上述因素,本条款增加了根据年费用最小法进行经济分析的内容。

在正常输送功率条件下,±800kV 输电线路导线选择主要决定于电晕条件以及电晕派生效应无线电干扰和可听噪声,其中无线电干扰和可听噪声是导线最小截面选择的主要控制条件。

**5.0.2** 本条为强制性条文,必须严格执行。分以下三点进行说明。

(1)输电线路无线电干扰特性。输电线路的无线电干扰主要是由导线、绝缘子或线路金具等的电晕放电产生,电晕形成的电流脉冲注入导线,并沿导线向注入点两边流动。从而在导线周围产生电磁场,即无线电干扰场。由于高压架空输电线的导线上沿线“均匀地”出现电晕放电和电流注入点,考虑其合成效应,导线中形成了一种脉冲重复率很高的“稳态”电流,所以架空输电线周围就

形成了脉冲重复率很高的“稳态”无线电干扰场。

电晕放电产生的无线电干扰具有白色频谱特性,其频率基本上在 30MHz 以内。同时,由于电晕放电会因天气的变化而强弱变化,晴天和雨天,甚至春夏秋冬季节线路电晕放电都有明显变化,所以输电线路的无线电干扰电平会随天气变化而有很宽范围的变化,因此通常采用具有统计意义的值来表示线路的无线电干扰水平,如好天气平均值或 50% 概率。坏天气条件下的无线电干扰水平低于好天气,这是直流不同于交流线路的最大特点。

(2) 国内外标准情况。关于直流输电线路的无线电干扰限值,到目前也没有国际标准,限值标准与当地的信号场强有关,如果信号电平比干扰电平大到 20dB 以上,可认为干扰电平对此信号接收并无多少影响。国内外对无线电干扰的评判仍着重于调幅广播频带(535kHz~1605kHz)的干扰上。一旦知道了电信接受设备处的信号电平,就可以决定允许的干扰电平。

加拿大国家标准规定的无线电干扰限值是以 0.5MHz 为参考频率,距边相导线投影 15m 为参考距离的,具体取值如表 4,明显地无线电干扰限值是随电压升高而增大。加拿大标准还规定,进入城区的输电线路,无线电干扰限值允许放宽,因为城市的电台信号会增强。

表 4 加拿大国家标准

交流电压 (kV)	无线电干扰限值		备 注
	15m 处(dB)	20m 处(dB)	
70~200	49	45.1	110kV 路线高度按 6m 计
200~300	53	49.5	220kV 路线高度按 6.5m 计
300~400	56	52.6	330kV 路线高度按 8m 计
400~600	60	57.2	500kV 路线高度按 8m 计
600~800	63	55.0~58.0	750kV 路线建议值

注:表中的导线投影 20m 处是折算到我国的情况,以便对比。

目前国内外关于无线电干扰限值要求列表如表 5。

表 5 无线电干扰限值

标 准	无线电干扰限值 0.5MHz		无线电干扰限值 1.0MHz		备 注
	15m 处(dB)	20m 处(dB)	15m 处(dB)	20m 处(dB)	
《高压架空送 电线路无线电干 扰计算方法》 DL/T 691—1999 《高压交流架 空送电线 无线 电干 扰 限 值》 GB 15707—1995	57	55	52	50	500kV
IEEE 导则	61	59	56	54	—
美国规范	—	—	53~58	—	—
加拿大标准	60	57.2	55	52.2	500kV 线高 8m
泰西蒙咨询葛 上线采用标准	65	63	60	58	±500kV
《750kV 架空 送电线路设计暂 行技术规定》Q/ GDW 102—2003	63	55~58	58	50~53	750kV

注:按照现行国家标准《高压交流架空送电线无线电干扰限值》GB 15707—1995 以及计算可知,0.5 MHz 无线电干扰比相同条件 1.0MHz 无线电干扰高 5dB。

现行国家标准《高压交流架空送电线无线电干扰限值》GB 15707—1995规定的限值(0.5MHz)如表 6 所列,限值的参考距离是距边相导线投影 20m(图 1)。我国的标准无线电干扰限值也是随电压升高而增大,750kV 交流线路无线电干扰限值为 55dB~58dB。

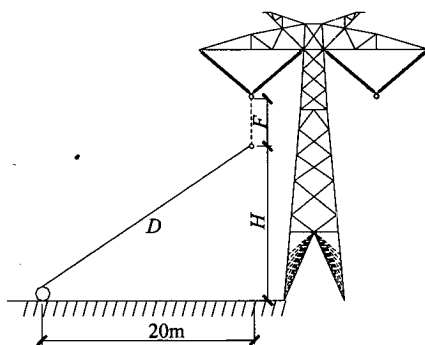


图 1 无线电干扰限值的参考距离( $x=20\text{m}$ )

表 6 我国无线电干扰限值

电压(kV)	110	220~330	500	750
限值(dB)	46	53	55	58

(3)推荐的无线电干扰限值。鉴于交流电晕产生的无线电干扰与直流电晕产生的无线电干扰具有相似的特性,过去我国 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路的无线电干扰允许值一直参照 $500\text{kV}$ 交流线路的标准执行,即 $20\text{m}$ 处 $0.5\text{MHz}$ 无线电干扰场强在 $80\%$ 时间、具有 $80\%$ 置信度(双 $80\%$ )值不超过 $55\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$ ,运行中尚未发生任何投诉,说明取值是可行的。事实上直流线路的RI生理干扰要小于交流的,故国外的直流线路允许RI电平较交流高 $2\text{dB}$ 即 $58\text{dB}$ 。

按国家环保总局批文〔2006〕199号,云南至广东 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的无线电干扰控制指标为:距极导线影外 $20\text{m}$ 处为 $55\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$ 。

采用国际无线电干扰特别委员会 CISPR 推荐的无线电干扰场强计算公式,对多种导线组合的无线电干扰水平值进行的估算结果列于表 7。

表 7 无线电干扰计算结果(dB)或( $\mu\text{V}/\text{m}$ )

序号	导线型号	导线表面 最大场强 ( $\text{kV}/\text{cm}$ )	无线电干扰(dB)				
			海拔 0	海拔 1000m	海拔 2000m	海拔 3000m	海拔 3650m
1	4×JL/G1A-1120/90	24.100	50.63	53.96	57.29	60.63	62.79
2	4×JL/G3A-1000/45	25.529	51.45	54.78	58.12	61.45	63.62
3	5×JL/G1A-1120/90	20.861	45.93	49.26	52.59	55.93	58.09
4	5×JL/G3A-1000/45	22.089	46.43	49.76	53.10	56.43	58.60
5	5×JL/G3A-900/40	23.046	46.89	50.22	53.55	56.89	59.05
6	6×JL/G3A-1000/45	19.547	42.76	46.09	49.43	52.76	54.93
7	6×JL/G3A-900/40	20.375	43.01	46.34	49.68	53.01	55.18
8	6×LGJ-900/75	20.102	42.92	46.25	49.59	52.89	55.06
9	6×LGJ-800/55	20.993	43.23	46.57	49.90	53.23	55.40
10	6×ACSR-720/50	21.991	43.65	46.99	50.32	53.65	55.82
11	6×LGJ-630/45	23.710	43.95	47.25	50.55	53.86	56.03
12	7×LGJ-800/55	18.956	40.31	43.64	46.98	50.31	52.48
13	7×ACSR-720/50	19.855	40.57	43.90	47.24	50.57	52.74
14	7×LGJ-630/45	21.067	41.02	44.35	47.69	51.02	53.19
15	8×ACSR-720/50	18.076	38.01	41.35	44.68	48.01	50.18
16	8×LGJ-630/45	19.155	38.25	41.58	44.92	48.25	50.42
17	8×JL/G1A-560/40	20.004	38.51	41.84	45.18	48.51	50.68
18	8×JL/G2A-500/35	20.898	38.84	42.17	45.51	48.84	51.01

注:表中为好天气,50%概率,0.5MHz,距正极性导线 20m 处无线电干扰电平。导线平均高度 23m。极间距 22m。

直流输电线路无线电干扰双 80%值与 50%值的差 3dB,由计算结果可以得出,距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处晴天时 0.5MHz 无线电干扰场强双 80%值,我国±800kV 特高压直流输电工程的导线组合均能满足 58dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ )的限值要求,与晴天时频率 0.5MHz 时的无线电干扰值几乎一致。

据此,推荐±800kV 特高压直流输电线路的无线电干扰限值为:距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 晴天时

0.5MHz 无线电干扰场强双 80% 值,一般地区不超过 58dB;对于海拔超过 1000m 的线路,其无线电干扰限值要进行高海拔修正。修正因数为:以 1000m 为基准,海拔高度每增加 300m,无线电干扰限值增加 1dB。

导线选择还要符合环境保护部门提出的限值及计量标准要求,±800kV 特高压直流输电工程的导线组合均能满足环境保护部门提出的限值标准要求。

**5.0.3** 本条为强制性条文,必须严格执行。分以下五点进行说明。

(1)根据国外超高压和特高压线路的研究经验,随着电压的升高和导线分裂根数的增加,输电线路的电晕可听噪声问题越显突出,对于±500kV 以上线路,电晕可听噪声干扰已超越无线电干扰成为选择导线的控制条件。由于直流线路的特点是好天气条件下,其所产生的可听噪声较雨、雾天高,因此,好天气条件下的可听噪声水平是衡量直流线路整体噪声水平的一个特征量,其限制标准将对导线截面和分裂方式的选取产生较大影响。

(2)对国外情况的调查。针对输电线路的可听噪声,各国的情况各不相同。以下是一些国家的电晕噪声标准,因电晕可听噪声的投诉或抱怨、相对解决措施等几方面的情况。

意大利电力公司(ENEL)目前的最高电压等级为 400kV 输电线路,多年运行下来无电晕噪声问题的投诉或抱怨。该公司建设有 20km 长的 1050kV 交流试验线路,导线为  $8 \times \phi 31.5\text{mm}$ ,在该线路上测量的电晕可听噪声  $L_{50}$  为 52dB(A)~53dB(A)。

法国电力公司(EDF)输电线路建设之前进行的噪声预测认为没有问题,但是实际运行的线路中,有因导线存在防锈油脂而产生噪声引起的投诉,在此情况下处理掉油脂,并对此进行说明和解释。

英国中央电力局(CEGB)400kV 线路采用 2 分裂导线,在下雨时存在因电晕噪声引起的投诉,处理对策是将 2 分裂导线更换为 4 分裂导线以降低噪声。由此可见,增加分裂导线数是降低噪



声的有效方法。

瑞典电力局(SSPB)运行有 9000km 左右的 400kV 交流线路,无投诉或抱怨。规划建设交流 800kV 输电线路,计划采用  $4 \times \phi 40\text{mm}$  的导线,将可听噪声限制到 56dB(A)。

美国纽约州电力局(PASNY)对于 765kV 输电线路的电晕噪声,距离线路中心 38m 外噪声的设计控制值: $L_5 = 56\text{dB(A)}$ ;  $L_{50} = 53\text{dB(A)}$ 。噪声的投诉情况是:345kV 线路完全无投诉,765kV 线路曾经有 36 起投诉,根据居民的要求,给予搬迁或赔偿。

美国邦维尔电管局(BPA)1978 年开始制定噪声限制标准。该地区俄亥俄州规定,在路权边上噪声标准: $L_{50} = (53 \pm 2)\text{dB(A)}$ ,早期的 500kV 线路采用  $\phi 63.5\text{mm}$  的单导线,有噪声的投诉。处理的措施是将  $\phi 63.5\text{mm}$  的单导线更换为  $3 \times \phi 30.5\text{mm}$  的 3 分裂导线(民房多的地区),或者在档距中将单导线上套上  $\phi 101.6\text{mm}$  的管(档内有个别民房时)。

图 2 是国外研究中心随机抽样的统计反应,对交流线路具有代表性,对直流线路尚缺乏统计数据。

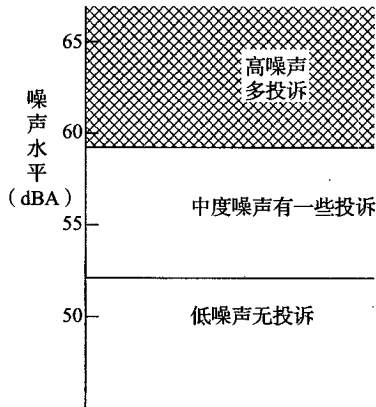


图 2 噪声水平与人们投诉的情况

(3)世界各国特高压交流输电线路的电晕噪声情况。到目前为止,世界各国均未正式制定直流特高压线路可听噪声的限制标

准,而只是在各自交流特高压线路设计规范中提出了一个限值,见表 8。

表 8 世界各国特高压交流线路的可听噪声的设计限值

国家		日本	前苏联	美 国			意大利	韩国	加拿大
公司(机构)名称		东京电力	动力电气化部	BPA	AEP	AEP	NENL	—	魁北克水电局
电压	额定值(kV)	1000	1150	1100	1500	765	1000	765	735
	最高值(kV)	1100	1200	1200	1600	775	1050	—	750
导线分裂方式	分裂数	8	8	8	8	4	8	6	4
	子导线直径(cm)	3.84	2.41	4.1	3.3	2.96	3.15	3.04	3.50
	子导线间距(cm)	40	40	41	38	45.7	45	48.3	45.7
可听噪声	雨天 50% 的预测值[dB(A)]	50	55	50	55	57.5	56	50	50.4
	测量地点(m)	边线下	边线下	距边线 15	距边线 30	运行线路距边线 15.2	距边线 15	距边线 15	运行线路距边线 15.2

注: BPA 公司电晕噪声设计值, 由于测量仪器(麦克风)规格不同, 会有约 3dB(A) 的差别。

我国对输电线路的可听噪声也未制定有相关标准, 在 500kV 交、直流线路设计时由于采用 4 分裂导线, 可听噪声水平很低, 一般在 40dB(A) 以下, 不起控制作用。

日本在进行 1000kV 特高压交流线路设计时, 对世界上一些国家已经架设的输电线路的电晕噪声的实际情况进行了调查, 其调查结果见表 9。

表 9 已经架设的输电线路的电晕可听噪声的调查

电力公司	线路电压 (kV)	导体方式 (cm)	噪声电平 dB(A)	有无抱怨
BPA	500	1×6.4	58	有
PASNY	765	4×3.5	53	
AEP	765	4×3.0	56	无
AEP	765	4×3.5	53	
HQ	735	4×3.0	52	
东京电力(中东京干线)	275	1×3.4	53	
东京电力(双叶线)	500	4×2.9	50	

由上述资料看,特高压交流线路的可听噪声设计目标值,基本上在 50dB(A)~58dB(A)之间。

(4)有关环境噪声标准。虽然世界上很多国家(包括中国)对输电线路的可听噪声没有限制标准,但各国政府环保部门均制定有环境噪声的限制标准,输电线路属于整个环境中的一部分,其可听噪声的限值按当地的环境噪声限制标准,表 10 是日本的环境噪声标准。

表 10 日本环境噪声标准

地域类型	时 间 段		
	昼 间	朝 夕	夜 间
AA	45dB(A)以下	40dB(A)以下	35dB(A)以下
A	50dB(A)以下	45dB(A)以下	40dB(A)以下
B	60dB(A)以下	55dB(A)以下	50dB(A)以下

注:1 AA 地域为特别需要安静的地方,如疗养院。

2 A 地域为一般的安静地方,如居住环境。

3 B 地域为一般性地区,为居住、商业和少量工业混合区。

在我国,相应的环境噪声标准有《声环境质量标准》GB 3096,《工业企业厂界环境噪声排放标准》GB 12348,《建筑施工场界环

境噪声排放标准》GB 12523, 城市区域环境噪声和工业企业厂界噪声这两个标准, 都划分了不同标准以适用于不同的区域, 见表 11。

表 11 中国噪声标准[dB(A)]

类 别	昼 间	夜 间
0	50	40
1	55	45
2	60	50
3	65	55
4	70	55

注: 1 0类适用于疗养区、高级别墅区、高级宾馆区等特别需要安静的区域(工业企业厂界噪声无此类标准)。

2 1类适用于以居住、文教机关为主的区域。乡村居住环境可参照执行该类标准。

3 2类适用于居住、商业、工业混杂区。

4 3类适用于工业区。

5 4类适用于城市中的道路交通干线道路两侧区域, 穿越城区的内河航道两侧区域。

由表 10、表 11 可以看出, 我国环境噪声标准的划分与日本基本类似, 但日本的标准稍严。美国直流线路的可听噪音的设计标准为 45dB(A)。

(5) 推荐的可听噪声限值。我国特高压输电线路的建设, 其路径主要通过荒山、林地或农业耕作地区等非居住环境地区, 参考我国环境噪声的限制标准为 2 类地区。特高压交流输电线路的可听噪声  $L_s$  不宜超过 55dB(A), 已被国家环保总局认可。

按国家环保总局批文〔2006〕199 号, 云南至广东 ±800kV 特高压直流输电工程的可听噪声控制指标为: 按当地功能区划的声环境标准执行, 无功能区划的地区按现行国家标准《声环境质量标准》GB 3096—2008 的相关规定评价。

采用美国 BPA 公司推荐的电晕可听噪声计算公式, 对多种导

线组合的无线电干扰水平值进行估算,各导线组合方案 and 不同海拔下的电晕可听噪声值见表 12。

表 12 电晕可听噪声计算结果[dB(A)]

序号	导线型号	导线表面 最大场强 (kV/cm)	电晕可听噪声				
			海拔 0m	海拔 1000m	海拔 2000m	海拔 3000m	海拔 3650m
1	4×JL/G1A-1120/90	24.100	43.60	46.94	50.27	53.60	55.77
2	4×JL/G3A-1000/45	25.529	45.91	49.25	52.58	55.91	58.08
3	5×JL/G1A-1120/90	20.861	37.58	40.91	44.24	47.58	49.74
4	5×JL/G3A-1000/45	22.089	39.86	43.20	46.53	49.86	52.03
5	5×JL/G3A-900/40	23.046	41.56	44.90	48.23	51.56	53.73
6	6×JL/G3A-1000/45	19.547	34.70	38.04	41.37	44.70	46.87
7	6×JL/G3A-900/40	20.375	36.36	39.69	43.02	46.36	48.52
8	6×LGJ-900/75	20.102	35.82	39.15	42.48	45.78	47.94
9	6×LGJ-800/55	20.993	37.55	40.88	44.22	47.55	49.72
10	6×ACSR-720/50	21.991	39.41	42.74	46.07	49.41	51.57
11	6×LGJ-630/45	23.710	39.65	42.95	46.25	49.55	51.73
12	7×LGJ-800/55	18.956	33.26	36.59	39.92	43.26	45.42
13	7×ACSR-720/50	19.855	35.11	38.45	41.78	45.11	47.28
14	7×LGJ-630/45	21.067	37.49	40.83	44.16	47.49	49.66
15	8×ACSR-720/50	18.076	31.10	34.43	37.77	41.10	43.27
16	8×LGJ-630/45	19.155	33.41	36.75	40.08	43.41	45.58
17	8×JL/G1A-560/40	20.004	35.15	38.48	41.82	45.15	47.32
18	8×JL/G2A-500/35	20.898	36.91	40.24	43.57	46.91	49.07

注:导线平均高度 23m,极间距 22m。

以表 12 的计算结果,各导线组合方案在 45dB(A)和 50dB(A)限值下的海拔高程见表 13。

表 13 各导线组合方案在不同噪声限值下的海拔高程(m)

序号	导线型号	45dB(A)控制的海拔	50dB(A)控制的海拔
1	4×JL/G1A-1120/90	415	1917
2	4×JL/G3A-1000/45	-278	1224
3	5×JL/G1A-1120/90	2225	3727
4	5×JL/G3A-1000/45	1539	3040
5	5×JL/G3A-900/40	1028	2530
6	6×JL/G3A-1000/45	3088	4589
7	6×JL/G3A-900/40	2592	4094
8	6×LGJ-900/75	2755	4257
9	6×LGJ-800/55	2234	3735
10	6×ACSR-720/50	1675	3177
11	6×LGJ-630/45	1600	3015
12	7×LGJ-800/55	3522	5024
13	7×ACSR-720/50	2965	4467
14	7×LGJ-630/45	2250	3752
15	8×ACSR-720/50	4170	5671
16	8×LGJ-630/45	3476	4977
17	8×JL/G1A-560/40	2954	4455
18	8×JL/G2A-500/35	2426	3927

由表 13 可见,我国±800kV 特高压直流输电工程的导线组合均能满足 45dB(A)~50dB(A)的限值要求。

交流的 55dB(A)是指在小雨、潮湿导线情况下,年出现概率值为 5%的可听噪声值,若换算到好天气 50%概率的可听噪声值要减去 7dB(A)~10dB(A)。因此建议特高压直流线路可听噪声限值(好天气 50%概率的可听噪声值)参照交流线路可听噪声限值选取,即为 45dB(A)~50dB(A)。换算到年出现概率值为 5%的可听噪声值为 51dB(A)~56dB(A)( $L_5 = L_{50} + 6$ ),低于交流线路。故一般线路地区可听噪声限值取 50dB(A),在人口稠密地区

按 45dB(A)校核。

经计算分析,可听噪声随极间距离的增大逐渐减小,平均变化陡度约 $-0.3\text{dB/m}$ 。可听噪声随导线平均高度增加而降低,平均变化陡度约 $-0.2\text{dB/m}$ 。因此,为降低可听噪声,可采取加大极间距离、提高导线平均高度等措施。

据此,推荐 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路的电晕可听噪声限值为 $45\text{dB(A)}\sim 50\text{dB(A)}$ 。

对人口稠密地区,要满足 $45\text{dB(A)}$ 的可听噪声限值要求,因此线路需远离1类居住区,要采用加高塔等措施进行校验,要求不大于 $45\text{dB(A)}$ 。对于人烟稀少的高海拔地区,其噪声限值要进行高海拔修正可适当放宽,满足 $50\text{dB(A)}$ 的可听噪声限值要求。

对于海拔超过 $1000\text{m}$ 的线路,其噪声限值要进行高海拔修正。修正因数为:以 $1000\text{m}$ 为基准,海拔高度每增加 $300\text{m}$ ,噪声限值增加 $1\text{dB}$ 。

导线选择还要符合环境保护部门提出的限值及计量标准要求, $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的导线组合均能满足环境保护部门提出的限值标准要求。

**5.0.4** 制定合理的场强标准,可使线路既满足生物效应的要求,同时避免不必要的增加线路建设的投资,使输电线路的造价控制在合理的水平。

直流输电线路电场强度的限值通常用两种方式表示:①在一定数量空间电荷下合成场强的限值;②标称场强和离子流密度的限值。目前,对直流输电线路下电场强度的限值一般根据人体感受试验确定。

(1)各国电场和离子流密度的限值。

美国:在直流输电线路下可能有人员活动的地方,地面合成场强限值为 $30\text{kV/m}$ 。美国政府工业协会1995年推荐,直流电场强度职业暴露限值为 $25\text{kV/m}$ ;在电场强度超过 $15\text{kV/m}$ 的场合工

作,需要接触不接地的物体时,要求采取防护措施,如戴绝缘手套等。

加拿大:规定直流输电线路下最大合成场强为  $25\text{kV/m}$ ;走廊边沿的标称电场不超过  $2\text{kV/m}$ ;线下离子流密度限值为  $100\text{nA/m}^2$ 。

巴西:伊泰普工程输电线路地面最大合成场强取  $40\text{kV/m}$ 。

前苏联:在设计 $\pm 750\text{kV}$ 输电线路时规定了不同情况下的地面最大合成场强,无人居住时取  $25\text{kV/m}$ ,有人居住时取  $10\text{kV/m}$ 。

中国:现行行业标准《高压直流架空送电线路技术导则》DL/T 436—2005规定: $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路下地面的合成场强限值取为  $30\text{kV/m}$ ;线下最大离子流密度限值为  $100\text{nA/m}^2$ 。

表 14 列出了各国对于直流线路电场强度的限值情况。

表 14 各国直流线路电场强度限值情况

规范及标准	限值内容	备注
美国规范	线下最大允许合成场强 $E_s$ 为 $30\text{kV/m}$	—
日本环境部规范	线下最大允许标称场强 $E_c$ 为 $9\text{kV/m}$	—
加拿大规范	线下最大 $E_s = 25\text{kV/m}$ ; $J = 100\text{nA/m}^2$ ,走廊边缘标称 $E_c = 2\text{kV/m}$	—
巴西规范	地面最大合成场强 $E_s = 40\text{kV/m}$	伊泰普
前苏联规范	线下 $E_s = 15\text{kV/m}$ , $J = 20\text{nA/m}^2$	8h
	线下 $E_s = 15\text{kV/m} \sim 20\text{kV/m}$ , $J = 25\text{nA/m}^2$	5h
	线下 $E_m = 60\text{kV/m}$	1h
	无人居住 $E_s = 25\text{kV/m}$ ;有人居住 $E_s = 10\text{kV/m}$	$\pm 750\text{kV}$
泰西蒙咨询 葛上线标准	线下 5% 概率的合成电场 $E_s$ 为 $30\text{kV/m}$	—
《高压直流架空送 电线路技术导则》 DL/T 436—1991	线下 $E_s = 30\text{kV/m}$ , $J = 100\text{nA/m}^2$ ,民房 $E_c = 3\text{kV/m}$	—
龙政、三广线标准	线下 $E_s = 30\text{kV/m}$ , $J = 100\text{nA/m}^2$ ,民房 $E_c = 5\text{kV/m}$	—

注: $E_s$ 为合成电场; $E_c$ 为标称场强。



表 15 列出了国内外已建直流线路工程的场强情况。

表 15 国内外已建直流线路工程的场强

工程名称	国家	电压 (kV)	导线结构 ( $n \times \text{mm}$ )	表面场强 (kV/cm)	地面场强 (kV/m)	合成场强 (kV/m)	离子流密度 ( $\text{nA/m}^2$ )
太平洋联络线	美国	$\pm 400$	$2 \times 45.8$	20.56	11.57	20.82	72.14
太平洋联络线	美国	$\pm 500$	$2 \times 45.8$	25.97	14.46	26.02	90.17
CU 工程	美国	$\pm 400$	$2 \times 38.2$	24.14	5.10	17.00 *	26.00 *
纳尔逊河	加拿大	$\pm 450$	$2 \times 40.7$	25.87	9.00	20.00 *	55.00 *
伏尔加格勒— 顿巴斯	俄罗斯	$\pm 400$	$2 \times 33.0$	28.96	—	—	—
天广线	中国	$\pm 500$	$4 \times 26.8$	25.89	12.36	27.11	62.08
三常线	中国	$\pm 500$	$4 \times 36.2$	20.35	15.00	23.66	71.99
三广线	中国	$\pm 500$	$4 \times 36.2$	19.20	15.12	22.23	61.77

注:1 表面场强、地面场强、合成场强及离子流密度均表示最大值。

2 带 \* 的项目为实测值。

(2)  $\pm 800\text{kV}$  直流线路电场限值。直流线路下雨天时的合成电场比晴天时的大,在确定导线对地最小高度时,要考虑雨天情况。泰西蒙在对葛上直流工程咨询时即按此原则给出的建议,按雨天时导线的起晕场强分析,提出导线对地最小高度为 14m。当时我国研究人员以晴天时导线的起晕场强计算,确定导线对地最小距离为 12.5m。对于葛上  $\pm 500\text{kV}$  直流输电线路,若将晴天时的地面最大合成电场控制在  $30\text{kV/m}$ ,雨天时也只有不到  $35\text{kV/m}$ ,实际运行经验表明,这是可以接受的。

据此,推荐直流输电线路下方地面最大合成电场强度为  $30\text{kV/m}$ ,邻近民房的地面最大合成场强为  $25\text{kV/m}$ (晴天),同时满足 80% 测量值不超过  $15\text{kV/m}$  为控制指标。最大离子流密度限值晴天不超过  $80\text{nA/m}^2$ ,雨天不超过  $100\text{nA/m}^2$ 。这与我国  $\pm 500\text{kV}$  直流输电线路基本相同,在世界上处于中等水平。

5.0.5 大跨越段在输电线路中只占较小的一部分,导线引起的发

热损耗(电阻损耗),对整个输电线路损耗所占比例很小,导线选择主要考虑要有较高的机械强度以及对杆塔、基础的各种荷载(水平荷载、垂直荷载、断线张力)较小,因此,导线截面不是按经济电流密度选择,而是按允许载流量选择。

但此时要注意电网的总体配合,对导线制造的各处接点均需要特殊考虑,交叉跨越距离也要按导线实际能够达到的温度计算最大弧垂。

**5.0.6 控制导线允许载流量的主要依据是导线的最高允许温度,**后者主要由导线经长期运行后的强度损失和联接金具的发热而定。《电机工程手册》(试用本)(机械工业出版社,1979年)电线电缆第26篇提出当工作温度愈高,运行时间愈长,则导线的强度损失愈大,对54/7的钢芯铝绞线的强度损失见表16。

表 16 54/7 钢芯铝绞线强度损失值

工作温度(℃)	运行时间(h)	
	1000	10000
85	-1%	-1.4%
100	-2%	-3.0%

1980年国际大电网会议第22组前苏联代表等的报告中提出钢芯铝绞线的强度损失见表17。

表 17 钢芯铝绞线强度损失值

国家	前苏联		比利时			加拿大	
导线温度(℃)	110	150	90	100	150	125	150
时间(h)	3	3	24	24	24	1000	1
强度变化(%)	+15	+20	+10	+12	+15	0	0

表17中数据说明,钢芯铝绞线在90℃~150℃时强度并未损失,短时间受热强度反而提高,这可能是由于线股在受热后调整伸长和位移使受力条件得到改善,钢芯强度能更好利用的结果。报告认为仅从导线耐热的角度考虑,钢芯铝绞线可采用150℃,但为

了避免接头氧化而损坏,在连续运行时,它们的温度不得超过  $70^{\circ}\text{C}$ 。

我国输电线路钢芯铝绞线采用的电力金具,导线截面为  $240\text{mm}^2$  及以下的耐张线夹用螺栓型,跳线多用并沟线夹联接,运行中曾发生螺栓松动而将跳线烧红的情况。鉴此钢芯铝绞线的允许温度仍取以往设计规程采用值  $70^{\circ}\text{C}$  (大跨越可取  $90^{\circ}\text{C}$ );钢芯铝合绞线的允许温度采用值与钢芯铝绞线相同。钢芯铝包钢绞线(包括铝包钢绞线)的允许温度,按华东电力设计院设计的  $220\text{kV}$  南京南至燕子矶输电线路长江大跨越和湖南省电力勘测设计院设计的  $220\text{kV}$  湘江大跨越采用的数值,取  $100^{\circ}\text{C}$ ,此允许温度是通过单丝热强度损失试验确定的。考虑到长线路的连接点多,温升难以控制,对照钢芯铝绞线一般线路的允许温度较大跨越低  $20^{\circ}\text{C}$ ,故一般线路钢芯铝包钢绞线(包括铝包钢绞线)的允许温度采用  $80^{\circ}\text{C}$ ,镀锌钢绞线仍取  $125^{\circ}\text{C}$ 。工程设计中也可以进行单丝热强度损失试验,选择恰当的绞线允许温度。当按允许温度选择导线截面时,要对交叉跨越距离和对地距离进行相应的验算,并对导线连接点的发热问题作出相应考虑。

验算导线载流量时的环境温度采用最高气温月的最高平均气温,太阳辐射功率密度采用  $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ ,一般线路的计算风速采用  $0.5\text{m}/\text{s}$ ,大跨越由于导线平均高度在  $30\text{m}$  以上,风速要相应增加,故取  $0.6\text{m}/\text{s}$ 。

计算导线允许载流量可选用《电机工程手册》(试用本)第 26 篇所列公式(原公式符号略有变更):

$$I = \sqrt{(W_R + W_F - W_S)/R'_t} \quad (1)$$

式中:  $I$ ——允许载流量(A);

$W_R$ ——单位长度导线的辐射散热功率( $\text{W}/\text{m}$ );

$W_F$ ——单位长度导线的对流散热功率( $\text{W}/\text{m}$ );

$W_S$ ——单位长度导线的日照吸热功率( $\text{W}/\text{m}$ );

$R'_t$ ——允许温度时导线的直流电阻( $\Omega/\text{m}$ )。

辐射散热功率  $W_R$  的计算公式:

$$W_R = \pi D E_1 S_1 [(\theta + \theta_a + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (2)$$

式中:  $D$ ——导线外径(m);

$E_1$ ——导线表面的辐射散热系数, 光亮的新线为 0.23 ~ 0.43; 旧线或涂黑色防腐剂的线为 0.90 ~ 0.95;

$S_1$ ——斯特凡—包尔茨曼常数, 为  $5.67 \times 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2)$ ;

$\theta$ ——导线表面的平均温升( $^{\circ}\text{C}$ );

$\theta_a$ ——环境温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

对流散热功率  $W_F$  的计算公式:

$$W_F = 0.57 \pi \lambda_f \theta Re^{0.485} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_f$ ——导线表面空气层的传热系数( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ),  $\lambda_f = 2.42 \times 10^{-2} + 7(\theta_a + \theta/2) \times 10^{-5}$ ;

$Re$ ——雷诺数,  $Re = VD/\nu$ ;

$V$ ——垂直于导线的风速( $\text{m}/\text{s}$ );

$\nu$ ——导线表面空气层的运动粘度( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$$\nu = 1.32 \times 10^{-5} + 9.6(\theta_a + \theta/2) \times 10^{-8} \quad (4)$$

日照吸热功率  $W_s$  的计算公式:

$$W_s = \alpha_s J_s D \quad (5)$$

式中:  $\alpha_s$ ——导线表面的吸热系数, 光亮的新线为 0.35 ~ 0.46; 旧线或涂黑色防腐剂的线为 0.9 ~ 0.95;

$J_s$ ——日光对导线的日照强度( $\text{W}/\text{m}^2$ ); 当天晴、日光直射导线时, 可采用  $1000 \text{W}/\text{m}^2$ 。

钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线的允许温度为  $70^{\circ}\text{C}$ 。环境气温采用最热月平均最高温度, 指最热月每日最高温度的月平均值, 取多年平均值。

输电线路常用的导线为钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线和钢芯铝包钢绞线(包括铝包钢绞线), 现行国家标准《110kV ~ 750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 规定钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线的允许温度为  $70^{\circ}\text{C}$ , 钢芯铝包钢绞线(包括铝包钢绞

线)可采用 80℃。2001 年国家电力公司委托华东电力设计院进行《提高导线发热允许温度的实验研究》工作,根据实验研究数据,得出以下结论:

(1)对组成导线的线材。对镀锌钢绞线,在长期加热至 100℃,其抗拉强度不低于标准值;对经过热处理的铝合金线,温度不超过 80℃时,1000h 强度损失为 0.5%,10000h 强度损失为 8%;对硬铝线,加热 100℃,20000h 强度不低于标准值。

(2)对钢芯铝绞线。国内试验,钢芯铝绞线在 80℃时导线强度不低于计算拉断力;日本试验认为,钢芯铝绞线在 90℃时强度即使有所损失,也能满足工程的要求;前苏联、比利时和加拿大的试验表明,钢芯铝绞线的允许温度可以超过 90℃。

(3)对导线配套金具。国外试验,IEEE 资料《钢芯铝绞线金具的高温试验》的结论:只要导线温度不超过 200℃,线路金具就能够安全运行。国内试验证明,导线温度 80℃时,配套金具的温度不超过 67℃,金具温度在 80℃以下时,对导线的握力基本没有影响(仍在导线额定拉断力的 95%以上)。

(4)世界各国对钢芯铝绞线规定的允许温度(见表 18)。

表 18 各国对钢芯铝绞线规定的允许温度

温度(℃)	国 家
90	日本、美国
85	法国
80	德国、意大利、瑞士、荷兰、瑞典
75	比利时、印尼
70	中国、前苏联
50	英国

(5)由于温度提高,导线弧垂增加,对地及交叉跨越空气间隙距离减少,将影响线路对地及交叉跨越的安全裕度。

1)以往设计按经济电流密度选择导线截面,并以最高气温弧

垂来校验对地和交叉跨越的安全间距。鉴于导线达到允许温度的时间在全年运行中所占比重很小,一般不要求对允许温度弧垂校验安全距离。

对于特定的交叉跨越如 200m 以上档距跨越铁路、高速或一级公路,和按允许温度选择导线截面的大跨越或跨越电线等,规程规定按允许温度弧垂校验交叉跨越间距。

2)对于按发热条件选择导线截面的线路,由于常常处于其允许传输容量的运行状态,要按提高后的允许温度的弧垂来校验规定要求的安全距离。

**5.0.7** 地线除了满足机械强度要求外,一般还要满足短路电流热容量的要求。对于特高压直流线路,还要考虑地线电晕问题,即地线上的感应电荷较大,有可能在地线上产生很大的表面电场强度(其中不考虑离子流产生的电场),当超过起始电晕电场强度时,亦会产生电晕损失、无线电干扰和可听噪声干扰等,要予以限制。

目前只能计算导线无电晕时地线的表面电场强度值,当导线有电晕时计算非常复杂,国内外尚未深入研究。

据报道,有一条 $\pm 400\text{kV}$ 线路,2根地线,导线无电晕时地线表面电场强度值为 $29\text{kV/cm}$ 。

$\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程对3种主要导线组合方案情况下,导线无电晕时,地线表面电场强度与地线直径的关系进行了分析计算,结果列于表19。

**表 19 地线表面电场强度与地线直径关系表**

导线型号	地线直径/地线表面电场强度(kV/cm)				
	15mm	16 mm	17.5mm	18mm	19mm
6×LGJ-630/45	12.931	12.225	11.302	11.032	10.521
6×ACSR-720/50	13.394	12.657	11.703	11.418	10.891
6×JL/G3A-900/40	13.456	12.723	11.772	11.489	10.915

云广、向上和锦苏±800kV 特高压直流线路计算导线的起始电晕电场强度采用  $15\text{kV/cm}$ , 因为导线常处于电晕状态, 使地线上的表面电场强度有所增大(类似于导线的综合场强), 但增大多少尚在研究, 此外尚有高海拔的影响, 地线的表面电场强度不超过  $12\text{kV/cm}$ (海拔  $1000\text{m}$  及以下用), 因此, 上述工程地线直径取不小于  $18\text{mm}$ , 地线的最小截面不小于  $170\text{mm}^2$ 。

根据中国电科院提供的最新计算和现场测试结果表明, 地线的表面电场强度可以适当放宽, 建议地线的表面电场强度不超过  $18\text{kV/cm}$ 。按  $18\text{kV/cm}$  作为地线表面电场强度控制条件, 地线截面不小于  $150\text{mm}^2$  的表面电场强度均满足要求。溪浙和哈郑±800kV 特高压直流线路地线截面均取  $150\text{mm}^2$ 。

**5.0.8** 本条为强制性条文, 规定了导、地线设计的最小安全系数, 必须严格执行。

**5.0.10** 在稀有气象条件时, 相应的悬挂点最大张力不应超过拉断力的  $66\%$ 。

(1) 从已有的运行情况来看, 重覆冰线路出现的导线事故, 主要限于以下三个方面。

1) 由于冰凌过载, 即导线所覆冰重接近甚至超过导线本身最大抗冰能力, 从而出现过载性断股、断线事故。

2) 由于冰凌荷载大, 导线主拉张力高。这时, 如果在导线悬垂线夹处再施加一个很大的不平衡张力, 超过了线夹握着力, 将使线夹滑动, 从而使部分或全部铝股因随线平滑滑动伸长而出现非过载性断股事故。

3) 由于导线覆冰舞动或脱冰跳跃, 以致造成导线与导线之间, 或者导线与地线甚至杆塔结构之间出现闪络跳闸和烧伤导、地线事故。

上述导线事故, 与安全系数密切相关的主要是过载断线事故。

若设计中考虑了冰重过载系数  $1.6$ , 从理论上讲不应该出现灾难性的断线事故。

断线与否也不能作为安全运行的分界点,因为线路使用的导、地线是由弹性线材构成的,远在拉断之前会因超越弹性限度而出现显著的塑性伸长,这将给安全运行带来很多隐患。如对地、被交叉跨越物的安全间距减少,极导线或子导线间的弧垂不平衡等。故一般情况下要满足导线弧垂最低点的最大张力不超过其拉断力的 60%。然而,目前由于冰凌资料缺乏,实际情况往往是设计冰厚偏小,过载比值大于 1.6 甚至在 2.0 以上,从而造成严重的断线倒塔事故。为防止这类事故的重复出现,务必要求提高线路各部件的安全储备。所以,规定要求导、地线的最大验算冰荷载条件下,其弧垂最低点的最大张力不宜超过拉断力的 60%(导、地线悬挂点张力可较弧垂最低点张力提高 10%)。

(2)现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 规定,轻冰区导线安全系数取 2.5,即导线允许最大使用张力为拉断力的 40%,对导线最低点处允许的弹性限度 70%来讲,安全储备系数为 1.7。虽然过载比值可能在 1.7 以上,但鉴于导线张力增长与过载荷重增长是非线性的,导线张力增长较慢,且与档距大小有关。一般重冰线路档距都相对偏小,允许较大的过载冰重。据此认为,重冰区导线的设计安全系数采用 2.5 是合理的。

**5.0.11** 根据 2008 年初我国南方地区大面积冰灾的情况,受灾线路的地线由于不通电,致使地线覆冰严重,引起地线拉断及地线支架折断。因此,覆冰区加大地线截面及加强地线支架强度是提高线路抗冰能力的有效措施。

针对在输电线路上大量使用光纤复合架空地线(OPGW),增加了对光纤复合架空地线(OPGW)的选用要求;光纤复合架空地线(OPGW)的设计安全系数,宜大于导线的设计安全系数。OPGW 要满足电气和机械使用条件的要求,重点对短路电流热容量和耐雷击性能进行校验。

**5.0.12** 目前运行线路上的导、地线大多数采用我国老国标电线



产品,当其平均运行张力和相应的防振措施符合以往设计要求时,运行中未发现问题。导线型号和相应的铝钢截面比列入表 20。

表 20 运行线路导线型号和相应的铝钢截面比

导 线 型 号	铝钢截面比
LGJQ 型	8.01~8.07
LGJ 型	5.29~6.00
LGJJ 型	4.29~4.39

1 钢芯铝绞线的铝钢截面比愈小,则铝材部分的平均运行张力愈大。具有良好运行经验的钢芯铝绞线铝钢截面比最小值为 4.29,因此应采用现行国家标准中铝钢截面比不小于 4.29 的钢芯铝绞线。当采用镀锌钢绞线时,其平均运行张力上限仍可取以往设计规程规定值。如根据多年的运行经验证明所选用的年平均运行张力及相应的防振措施对导、地线的振动危险很小时,可不受规范规定值的限制。

2 导、地线的防振在特高压线路设计中是一项重要的内容,特高压线路由于档距较大,导、地线悬挂点较高,在地形平坦,地面粗糙度小的地区,高空层流风较稳定,输入给导、地线的能量增大。风速的增大,扩大了引起导线振动的风速的范围,增大了导、地线振动的相对时间,且微风振动幅度比较大,容易引起导、地线材料的疲劳,导致导、地线断股断线事故的发生。例如 500kV 中山口、金口大跨越地线在 1981 年至 1988 年期间多次发生振动故障,造成防振锤脱落,地线断股,金具损坏。在 500kV 荆门斗笠变附近,近年来也多次发生过舞动现象。由于特高压线路的重要性,因此,防止或减小特高压线路导、地线的微风振动、次档距振荡及舞动造成的危害就成为线路设计的一个重要问题。

3 微风振动及防锤安装数量。迄今国内外输电线路防止微风振动的措施,主要是采用防振锤或阻尼线的方式,一般工程宜采用改进斯托克布里奇型防振锤,即带大小锤头的覆盖 4 频率的 FR 型防振锤。

国内有多种防振锤,常见的有 F 型(对称)和 FR 型(不对称),其基本原理是一样的。由于 F 型防振锤是对称布置的。它有两种振型:一种是平动振型,即锤头质心上下振动;另一种是转动振型。由于 F 型防振锤两端对称,所以它只有 2 个自振频率;FR 型防振锤结构示意图见图 3,因其两端不对称,所以它有 4 个自振频率。

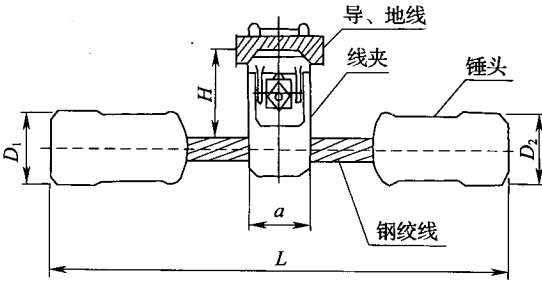


图 3 FR 型防振锤结构示意图

由于极导线结构形式的影响,使六分裂导线的微风振动强度较单导线或双分裂导线低。分裂导线安装间隔棒后具有一定的消振作用,使分裂导线组合体不易引起微风振动。借鉴以往 500kV 输电线路的运行经验及科研单位的研究成果,对六分裂导线安装间隔棒的线路,当导线平均运行张力不大于拉断力的 25% 时,600m 及以下档距可不另加防振措施,当档距大于 600m 时,安装 1 个 FR-4 防振锤。防振锤的安装数量见表 21。

表 21 分裂导线防振锤安装数量

地区条件			档距(m) 每档每子导线安装个数			
			0	1 个	2 个	4 个
每档 每端 安装 个数	A	泥沼、平地	$\leq 600$	600~800	800~1200	$> 1200$
	B	丘陵	$\leq 600$	600~800	800~1200	$> 1200$
	C	一般山地	$\leq 600$	600~900	900~1300	$> 1300$
	D	高山大岭	$\leq 600$	600~900	900~1300	$> 1300$

对于振动严重地段及大跨越档距的架空线建议采用复合防振,以获得较好的防振效果。如护线条加防振锤、阻尼线加防振锤、护线条加阻尼线加防振锤等。

普通地线采用 LBGJ-180-20AC 铝包钢绞线防振锤采用 FR-2 型。根据有关课题承担单位采用能量平衡法微风振动计算程序,把档距从 100m 到 1000m 按每增加 50m 作为一种档距情况,每种档距情况又对安装不同数量的防振锤进行计算,并通过总结分析国内外的研究成果、设计经验,结合能量平衡法的数值计算结果,对防振锤安装数量建议如表 22。

表 22 的成果比我国“设计手册”上规定的防振锤安装数量(见表 23)要多,建议采用。

表 22 地线防振锤安装数量

地区条件			档距(m)每档安装个数						
			0	1个	2个	3个	4个	5个	6个
每档 每端 安装 个数	A	泥沼 平地	≤200	200~300	300~450	450~600	600~800	800~1000	>1000
	B	丘陵	≤200	200~300	300~450	450~600	600~800	800~1000	>1000
	C	一般 山地	≤300	300~400	400~600	600~800	800~1000	1000~1200	>1200
	D	高山 大岭	≤300	300~400	400~600	600~800	800~1000	1000~1200	>1200

表 23 “设计手册”规定的地线防振锤安装数量

档距范围 (m)	$L < 350$	$350 \leq L < 700$	$700 \leq L < 1000$	$\geq 1000$	LBGJ - 180 - 20AC 地线
每档每端 安装个数	1	2	3	4	

4 对于次档距振荡,分裂导线装设阻尼式间隔棒,并合理调整次档距距离,优化布置阻尼间隔棒,以加强对次档距振荡的防护。间隔棒的型式要结合防舞动措施一并考虑,以防止子导线鞭

击、吸合,次档距分裂导线翻转、金具磨损、间隔棒疲劳等故障发生。

根据原国网北京电力建设研究院《 $\pm 800\text{kV}$  级直流多分裂间隔棒及挂线金具研究》的结论。现对  $\pm 800\text{kV}$  直流特高压线路六分裂导线推荐线路最大次档距为  $66\text{m}$ , 平均次档距为  $50\text{m}\sim 55\text{m}$ , 端次档距为  $25\text{m}\sim 35\text{m}$  (在导线的分裂间距取  $450\text{mm}$  情况下); 当线路经过重冰区时, 平均次档距和端次档距都要适当减小。间隔棒采用不等距安装, 并避免对称布置。在最后的特高压工程的应用中, 导线最大次档距不大于  $66\text{m}$ , 平均次档距为  $50\text{m}\sim 60\text{m}$ , 端次档距宜控制在  $25\text{m}\sim 35\text{m}$ 。当线路经过重冰区时, 平均次档距和端次档距都要适当减小。

原国网北京电力建设研究院《大截面导线分裂间距及最大次档距的探讨》计算结果见表 24。

表 24 大截面导线间距比与次档距之间的关系

分裂间距 (mm)	LGJ-900/40			LGJ-900/75		
	最大次档距 (m)	平均次档距 (m)	N (个/km)	最大次档距 (m)	平均次档距 (m)	N (个/km)
400	50	40	25	53	42	24
450	55	44	23	58	46	22
500	60	48	21	64	51	20

需要注意的是, 计算时未考虑覆冰的影响, 日本特高压输电特别委员会指出覆冰会加剧次档距振荡, 此种地域下最大次档距比一般地域缩短  $5\text{m}\sim 10\text{m}$ 。

5 对于大跨越导地线防振技术要求, 目前国内大跨越导地线防振措施有: 纯防振锤防振方案、阻尼线防振方案、阻尼线加防振锤联合防振方案、交叉阻尼线加防振锤联合防振方案、圣诞树阻尼线防振方案等, 具体的大跨越导地线防振方案要根据运行经验或通过实验来确定。

6 由于各地发生导线微风振动事故很多, 危害也很大, 在运行规程中也要求一般线路每 5 年, 大跨越每 2 年测振 1 次, 但我国

导线微风振动许用动弯应变没有统一标准,结合国内外情况,参照电力建设研究所企业标准,提出各种导线的微风振动许用动弯应变值,供设计人员参考。悬垂线夹、间隔棒、防振锤等处导线上的动弯应变宜不大于表 25 所列值。

表 25 导线微风振动许用动弯应变表( $\mu\epsilon$ )

序号	导线类型	大跨越	普通档
1	钢芯铝绞线、铝包钢芯铝绞线	$\pm 100$	$\pm 150$
2	铝包钢绞线(导线)	$\pm 100$	$\pm 150$
3	铝包钢绞线(地线)	$\pm 150$	$\pm 200$
4	钢芯铝合金绞线	$\pm 120$	$\pm 150$
5	全铝合金绞线	$\pm 120$	$\pm 150$
6	镀锌钢绞线	$\pm 200$	$\pm 300$
7	OPGW(全铝合金线)	$\pm 120$	$\pm 150$
8	OPGW(铝合金和铝包钢混绞)	$\pm 120$	$\pm 150$
9	OPGW(全铝包钢线)	$\pm 150$	$\pm 200$

**5.0.13** 对未张拉过的导、地线受力后除产生弹性伸长和塑性伸长外,还随着受力的累积效应产生蠕变伸长。塑性伸长及蠕变伸长均为永久变形(以下简称塑性伸长)。为考虑塑性伸长对弧垂的影响,线路理想的施工工艺是按塑性伸长曲线(蠕变曲线)架设导、地线。我国电线制造厂家目前不提供塑性伸长曲线,对新国标的电线产品又无系统的塑性伸长资料,故导、地线的塑性伸长相应的降温值仍取现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545 的采用值,对钢芯铝绞线塑性伸长采用值见表 26。

表 26 《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010

钢芯铝绞线塑性伸长采用值

铝钢截面比	塑性伸长	降温值( $^{\circ}\text{C}$ )
4.29~4.38	$3 \times 10^{-4}$	15
5.05~6.10	$3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$	15~20
7.71~7.91	$4 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$	20~25
11.34~14.46	$5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	25(或根据试验确定)

对现行国家标准《圆线同心绞架空导线》GB 1179—1999 中铝钢截面比为 4.29~7.91 的,其长期运行后产生的塑性伸长取值参考表 27。

表 27 钢芯铝绞线塑性伸长采用值

铝钢截面比	塑性伸长取值
7.71~7.91	$4 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$
5.05~6.16	$3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$
4.29~4.38	$3 \times 10^{-4}$

目前,输电线路输送容量增大,输电线路中大量选用大铝钢截面比导线,如 630、720、800 导线,为此在钢芯铝绞线塑性伸长表及钢芯铝绞线降温值表中补充铝钢截面比 11.34~14.46 的内容,并提出对更大铝钢截面比的钢芯铝绞线或钢芯铝合金绞线要采用制造厂家提供的塑性伸长值或降温值。

**5.0.14** 输电线路通过导线易舞动地区时,要适当提高线路抗舞动能力,并预留导线防舞动措施安装孔位。东北的鞍山、丹东、锦州一带,湖北的荆门、荆州一带是全国范围内输电线路发生舞动较多的地区,导线舞动对线路安全运行所造成的危害十分重大,诸如线路频繁跳闸与停电、导线的磨损、烧伤、断线,金具及铁塔部件损坏等,可能导致重大的经济损失与社会影响。

现行的防舞动措施,概括起来大约可分为三大类:其一,从气象条件考虑,避开易于形成舞动的覆冰区域与线路走向;其二,从机械与电气的角度,提高线路系统抵抗舞动的能力;其三,从改变与调整导线系统的参数出发,采取加装各种防舞动装置与措施,抑制舞动的发生。

## 6 绝缘子和金具

**6.0.1** 我国自 20 世纪 80 年代末开始批量使用复合绝缘子,荷载设计安全系数大都为 3.0,至今运行情况良好,虽出现极个别串脆断,多属产品质量问题。故复合绝缘子最大使用荷载设计安全系数取 3.0 较为合适。20 世纪 90 年代开始使用瓷棒绝缘子,根据德国运行经验最大使用荷载设计安全系数取 3.0,运行情况良好。

以前的线路设计规程对瓷质盘型绝缘子有校验常年荷载安全系数的要求,是针对当时瓷绝缘子质量不稳定,发生事故较多而提出的,目前国产瓷绝缘子产品质量不断提高,在有条件择优选购的情况下,在限制常年荷载的问题上瓷质绝缘子和玻璃绝缘子可以等同看待;电力规划设计总院以电规总送(2002)73 号文,对华东电力设计院《关于盘型绝缘子常年荷载安全系数的复函》,已明确在择优采购的情况下,瓷和玻璃绝缘子在限制常年荷载问题上可以等同看待,其常年安全系数一般输电线路工程按不低于 4.0 考虑。常年荷载状态下安全系数不仅对绝缘子有影响,对金属件也有影响,电力行业标准要求所有绝缘子均通过微风振动的试验,因此常年荷载安全系数取 4.0 适用所有绝缘子。

设计悬垂串时导、地线张力可按本规范第 10.1 节的规定取值。

**6.0.4** 本条为强制性条文,规定了金具强度的安全系数。

**6.0.5** 绝缘子串及金具防止发生电晕的措施可采用均压环、屏蔽环及金具自身防晕等办法。防电晕的目的主要是控制无线电干扰,对于减少电能损耗及防止金具腐蚀也有作用。

一般认为绝缘子的无线电干扰是一恒定电流源产生,因此可取与试品串联的检测电阻的两端电压来进行度量,所测得的电压

称为无线电干扰电压(RIV),单位通常用 dB 表示,且取  $1\mu\text{V}$  为 0dB,一般每相绝缘子串干扰电压上限为 55dB。测量方法可按现行国家标准《电力金具试验方法 第 2 部分:电晕和无线电干扰试验》GB 2317.2 或参考美国全国电气制造商协会(NEMA)法、国际无线电干扰特别委员会(CISPR)法。

当金具用于海拔高于 1000m 地区时,位于低海拔地区的试验室要将试验电压乘以海拔修正系数  $k_H$  :

$$U_H = k_H \times U_0 \quad (6)$$

$$k_H = \frac{1}{1.1 - 0.1 \times H} \quad (7)$$

式中:  $H$ ——海拔高度(km)。

例如线路最高海拔为 1500m,因此对应的  $\pm 800\text{kV}$  线路悬垂线夹起晕电压不小于以下数值。

$$816 \times \frac{1}{1.1 - 0.1 \times 1.5} = 858.9\text{kV}$$

**6.0.6** 直流线路地线一般是直接接地的。如果直流线路在接地极附近通过,当直流系统以大地返回方式运行(特别是大电流运行时),由于大地电位升高,直流地电流可能通过杆塔和地线从一个杆塔流进,从另一个杆塔流出,从而导致杆塔和基础被腐蚀。

此外,如果直流(交流)线路与接地极很近,当直流系统以大地返回方式运行(特别是大电流运行时),地电流可能通过杆塔和地线返回到换流站(变电站)接地网,再通过接地网、中性点接地的变压器流入到交流系统中,从而导致变压器磁饱和。缓解或消除接地极地电流对杆塔的腐蚀影响和对换流站(变电站)变压器磁饱和和影响的方法比较简单,只要将靠近接地极的线路地线进行绝缘即可解决问题,离 5km 以外的地线是否绝缘要经过模拟计算确定。

**6.0.7** 绝缘子串与横担连接的第一个金具受力较复杂,国内早期运行经验已经证明这一金具不宜采用可锻铸铁制造的产品。1988 年发生在 500kV 大房线上的球头断裂事故证明:第一个金具不够灵活,不但本身易受磨损,还将引起相邻的其他金具受到损坏。因



此在选择第一个金具时,要从强度、材料、型式三方面考虑。国外对此金具也有特殊考虑的事例,加拿大 BC 省水电局是采取提高一个强度等级的措施;日本则通过疲劳、磨损等试验对各种金具型式进行选择;意大利设计了一种两个方向的回转轴心基本上在同一个平面上的金具,使得两个方向转动都较灵活。因此,对联塔第一个金具的选择,除了要求结构上灵活外,同时要求强度上提高一个等级。

**6.0.8** 在线路设计中,为了缩小走廊宽度,减少悬垂串的风偏摇摆,V 型串的使用日趋广泛,根据试验和设计研究成果,330kV 以上输电线路悬垂 V 串两肢间夹角的一半,可比最大风偏角小  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ,或通过试验确定。目前,发生了多起 V 型串大风情况下球、碗头脱落事故,因此,要采取控制球、碗头加工尺寸或新型金具方案。

**6.0.9** 在路径选择时要尽量避开易发生舞动地区,无法避让时,要采取提高线路的机械强度,并预留安装抑舞装置的措施。

**6.0.10** 根据 2008 年初我国南方地区覆冰灾害情况的教训,为防止或减少重要线路冰闪事故的发生,需采取增加绝缘子串长和采用 V 型串、八字串等措施。

## 7 绝缘配合、防雷和接地

**7.0.1**  $\pm 800\text{kV}$  线路直线杆塔上悬垂绝缘子串的绝缘子片数选择,一般需满足能够耐受长期工作电压的作用和操作过电压作用的要求,雷电过电压一般不作为选择绝缘子片数的决定条件,仅作为耐雷水平是否满足要求的校验条件。

**7.0.2**  $\pm 800\text{kV}$  直流输电线路的防污绝缘设计,要根据绝缘子的污耐压特性,参考审定的污区分布图和直交流积污比,结合现场实际污秽调查结果,选择合适的绝缘子型式和片数。对无可靠污耐压特性参数的绝缘子,也可参照污秽等级按爬电比距法选择合适的绝缘子型式和片数。

### (1)污耐压法。

污耐压法是根据试验得到绝缘子在不同污秽程度下的污秽耐受电压,使选定的绝缘子串的污秽耐受电压大于该线路的最大工作电压。该方法和实际绝缘子的污秽耐受能力直接联系在一起,是一种较好的绝缘子串长的确定方法,但人工污秽试验结果同自然污秽条件下的污耐压值存在等价性问题。

前苏联、美国、日本、我国的武汉高压研究所和中国电力科学研究院主要是以  $U_{50\%}$  进行污秽外绝缘设计。 $U_{50\%}$  以长串绝缘子试验来确定。

对于  $\pm 800\text{kV}$  直流输电线路,原则上要用此法。选择适合的试验室和试验方法,求出预选型号绝缘子的污闪电压数据。我国以前没有足够的试验数据,只凭日本 NGK 提供,从  $\pm 500\text{kV}$  葛上、天广、龙政、三广、贵广到三沪线无不如此。绝缘子盐密与耐压的关系采用 NGK 的直流绝缘子 CA-735EZ( $\phi 320 \times H170$ ) 的污耐压值进行计算。从表 28 可看出,其数据也存在较大分散性。

表 28 单片 CA-735EZ 绝缘子的污耐压值(kV)

等值盐密	ESDD(mg/cm <sup>2</sup> )				备 注
	0.03	0.05	0.08	0.15	
污耐压值	17.80	15.20	13.20	10.70	1988 年 NGK 提供葛上线设计用
	15.01	12.72	10.86	9.08	2000 年 NGK 提供龙政线设计用
	13.50	11.90	9.80	7.90	1986 年日本在 CIGRE 会上介绍

注:1 所有数据灰密为 0.1mg/cm<sup>2</sup>。

2 葛上数据为 Tonoko 土,按 4 次耐压法得出。

3 龙政数据为 Kaolin 土,按上下法求出  $U_{50\%}$ 。

表 28 反映了 NGK 自身数据的变化,我国的 ±500kV 线路工程除葛上线外都采用 NGK 提供的数据。

考虑到污秽导致放电的关键是污秽物溶于水造成的导电性,而不溶于水的成分起的作用是在潮湿气候条件下吸收水分,以保持污层潮湿促进导电性能的增长。因此,在等值盐密相同的情况下,绝缘子的污闪特性还受灰密的影响,根据有关试验结果,绝缘子的人工污耐压与灰密的一 0.12 次方成比例的降低。

自然污秽绝缘子每片上下表面、同一表面的不同部位及同一串绝缘子各片之间污秽量分布不一样,有时上下表面积污量相差 2 倍~10 倍,其污闪电压较均匀积污提高 10%~20%。根据美国电科院有关试验得出初步增大系数  $Y=1-0.38\lg(T/B)$ ,其中  $T/B$  为上下表面积污比。

在 ±500kV 三沪线设计中,各设计院统一了计算方法,特高压直流工程计算程序见表 29。

表 29 按绝缘子下表面盐密选择片数

污 秽 等 级	轻污区	中污区	重污区
盐密(mg/m <sup>2</sup> )	0.05	0.08	0.15
绝缘子上下表面积污比	1 : 5	1 : 8	1 : 10
灰密 $H_1$ (mg/cm <sup>2</sup> )	0.30	0.48	0.90
线路最高运行电压(kV)	816		

续表 29

污秽等级	轻污区	中污区	重污区
要求耐受电压 $V_{耐}$ (kV)	$816/(1-3 \times 0.07) = 1033$		
NGK 提供 $U'_{50\%}$ (kV) (灰密 $H_2 = 0.1 \text{ mg/cm}^2$ )	15.0	12.8	10.7
灰密修正系数 $K_1 = (H_1/H_2)^{-0.12}$	0.876	0.828	0.768
灰密校正后 $U''_{50\%} = U'_{50\%} \times K_1$ (kV)	13.14	10.60	8.22
上下表面积污比较系数 $K_2 = 1 - 0.38 \lg(T/B)$	1.266	1.343	1.380
积污比较正后 $U'''_{50\%} = K_2 \times U''_{50\%}$ (kV)	16.64	14.24	11.34
要求绝缘片数	62	73	91

以往我国  $\pm 500 \text{ kV}$  线路的绝缘配置,是按 NGK 公司推荐的方法和污耐压曲线进行的,与目前电科院采用方法的程序差别很大。 $\pm 800 \text{ kV}$  线路 V 型串绝缘子片数分别采用两种方法计算结果对比见表 30。

表 30 电科院和 NGK 污耐压法片数的比较

绝缘子型号	ESDD( $\text{mg/cm}^2$ )	$H=1000\text{m}$	$H=2000\text{m}$	$H=3000\text{m}$
CA-745	0.05	63 (64)	67 (68)	72 (73)
	0.08	77 (75)	82 (80)	88 (86)
	0.15	88 (91)	94 (97)	101 (104)
CA-774	0.05	59 (60)	61 (63)	64 (68)
	0.08	71 (70)	74 (74)	77 (80)
	0.15	83 (85)	86 (90)	90 (96)

注:( ) 括号中的值为按 NGK 的方法选定的绝缘子片数。

从表 30 可以看出,两种计算方法得到的结果差别不大,基本处于同一绝缘水平。

V 型串污耐压较单 I 串高,主要原因在以下几个方面:

1)V 型串的电弧较单 I 串易飘移,绝缘子串表面不易形成线状放电,与单 I 串紧贴绝缘子串的电弧短接形式不同。

2)V 型串特殊的布置方式改善了绝缘子串的对地电容,使容性电流对绝缘子串的影响减小,提高了其污闪电压。

3)在合理的污秽设计下,V 型串的积污特性要优于悬垂串,仅为悬垂串的 85%甚至更低。

推荐±800kV 级直流输电线路单 V 串所需各种伞型绝缘子的片数见表 31。

表 31 计算得出的绝缘子片数比较

绝缘子型号 \ 海拔高度(m)		1000	2000	3000	3700
EDSS=0.05	CA-745EZ(21 吨级)	65(67)	71(72)	78	86
	CA-756EZ(30 吨级)	56(58)	60(62)	64(67)	68(71)
	CA-765EY(40 吨级)	61	66	70	75
	CA-785EX(55 吨级)	52	56	60	63
EDSS=0.08	CA-745EZ	79	87	96	105
	CA-756EZ	70	75	80	86
	CA-765EY	74	79	85	90
	CA-785EX	66	70	75	80
EDSS=0.15	CA-745EZ	90	99	109	120
	CA-756EZ	82	87	93	98
	CA-765EY	81	87	93	98
	CA-785EX	76	81	87	92

## (2) 爬电比距法。

早在±500kV 葛上线路设计时,原电力部向泰西蒙公司便提出了我国电网 110kV~220kV 线路防污运行经验总结,见表 32。

表 32 交流电网的成功运行经验

电压等级 (kV)	等值盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	绝缘子		相电压情况下	额定电压情况下
		数量 (片)	爬距 (mm)	爬电比距 (cm/kV)	爬电比距 (mm/kV)
110	0.030	7	280	3.09	1.78
	0.145	7	410	4.52	2.60
220	0.025	13	280	2.87	1.65
	0.050	13	320	3.53	1.90
	0.074	13	410	4.20	2.40

当时泰西蒙公司并未按此执行,而是参照日本的交、直流积污比曲线给出直流线路的对应盐密,再按 NGK 公司提出的绝缘子污耐压数据进行绝缘子片数选择。线路投入运行后便出现污闪事故而运行调爬,运行证明其绝缘配置偏小。

通过对表 32 的分析可以得出,在导线对地电压情况下爬电比距与等值盐密的关系曲线及对数拟合表达式详见图 4 和公式 10。

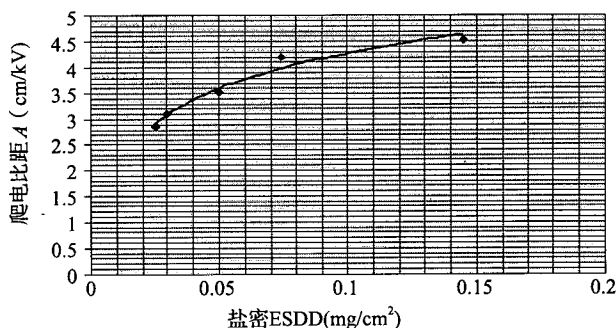


图 4 盐密与爬距关系曲线

$$L = 0.8891 \ln(ESDD) + 6.2606 \quad (8)$$

式中:  $L$ ——要求的爬电比距(cm/kV);

ESDD——等值盐密(mg/cm<sup>2</sup>)。

国内外对绝缘子的人工污耐压试验证明:在相同的盐密下,直

流条件下的污耐压值较之交流低 15%~20%。因此直流的爬电比距是交流的 2 倍以上( $\sqrt{3} \times 1.2 = 2.08$ ),按公式 10 计算出直流线路爬电比距要满足表 33 的要求。

表 33 按推算的爬电比距要求的绝缘子片数

直流等值盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	等效交流 等值盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	推算的直流线路要求 爬电比距 (cm/kV)	±800kV 要求的片数
0.05	0.10	4.32	63
0.08	0.16	4.82	71
0.15	0.30	5.49	80

注:CA735 绝缘子的有效爬距系数取 1.0。

(3) 按±500kV 线路的绝缘水平外推。

我国第一条±500kV 葛上线的绝缘配合设计,当时是参照交流线路爬距并由电力部邀请加拿大泰西蒙公司进行咨询设计,绝缘子有关污闪试验数据采用日本 NGK 公司的 CA735(160kN)瓷质绝缘子,其绝缘子选择片数见表 34。

表 34 ±500kV 葛上线悬垂绝缘子片数

等值盐密(mg/cm <sup>2</sup> )	0.03	0.05	0.07	0.10	0.25	备 注
设计最小片数	28	32	34	37	45	泰西蒙公司 咨询设计
杆塔间隙允许片数	32	36	39	43	52	
施工架线	30	32	34	36	44	
运行调爬	34	37	复合绝缘子			2000 年调爬

葛上线自 1989 年投运以来,虽降压运行,但污闪事故多次发生(因污闪导致的行波保护动作率为 0.17 次/百公里·年),迫使其多次调爬。

±500kV 龙政直流线路是 1999 年上半年完成技术设计的,当时葛上线的运行经验还未反馈到位,其绝缘子片数选择详见表 35。

表 35 士500kV 龙政线悬垂绝缘子片数

污秽等级	0	I	II	III
等值盐密(mg/cm <sup>2</sup> )	0.03	0.05	0.08	0.15
华中段初设配置	30	31	35	42
华东段初设配置	29	33	37	42
设计调爬	32	34	40	复合绝缘子

龙政线是 2002 年 12 月 21 日单极投运,2003 年 6 月 21 日双极投运,运行不到一年,从 2004 年 1 月到 2 月,相继发生 4 次污闪跳闸,尚有不少地点出现了不同程度的放电现象,严重影响系统的安全运行。2004 年 3 月,国网公司决定全线调爬,起点调至 37 片,中、重污区采用复合绝缘子。2005 年 3 月,又进行了局部调爬。

2003 年设计的士 500kV 三广和贵广直流线路的绝缘配合设计参照了已建葛上和龙政线调爬经验,其基本绝缘配置为:一般地区和轻污区采用 37 片瓷或玻璃绝缘子;中污区采用 44 片;重污区全部为复合绝缘子。自 2004 年投运以来,未发生过污闪事故。

在 2004 年设计的士 500kV 三沪线设计中,取消了 0 级污区,I 级污区采用不低于 40 片绝缘子(铁塔间隙按 42 片),绝缘配置水平较其他线路有较大提高,II 级污区及以上全部采用复合绝缘子。

2000 年日本开始建设的士 500kV 阿南纪北线,全长 50.9km,最高海拔 750m,采用 NGK 钟罩式直流绝缘子(结构高度 H170mm/盘径 320mm),全线分 6 个污区,选择的片数见表 36。

表 36 士500kV 阿南纪北线绝缘配置一览表

污秽等级	A'	A	B	C	D'	D
设计盐密(mg/cm <sup>2</sup> )	0.03	0.063	0.125	0.25	0.375	0.50
设计污耐压值(kV/片)	14.7	11.8	9.5	7.7	6.8	6.3
选择片数	34	43	53	65	74	80

注:上表内插求得盐密 0.05mg/cm<sup>2</sup>要求片数为 40。

目前的关键是 0.05mg/cm<sup>2</sup> 污区是 37 片或是 40 片,前者反映天广、贵广的运行情况,后者是今后的发展趋势,两者的差距是



8%。若假定绝缘子串的污耐压与串长成正比,推得 $\pm 800\text{kV}$ 线路要求的片数见表 37。

表 37  $\pm 800\text{kV}$  线路的绝缘配置

污秽等级	轻污区	中污区	重污区
等值盐密( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	0.05	0.08	0.15
按 37 片推算	60	70	83
按 40 片推算	64	75	91

注:绝缘子结构高度 170mm。

**7.0.3** 根据 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路上过电压研究,其操作过电压水平在 1.5p. u. ~1.8p. u.,最大操作过电压发生在线路中间。目前国内 $\pm 800\text{kV}$ 直流线路操作过电压水平计算结果在 1.6p. u. ~1.8p. u.。

由于绝缘子表面脏污时沿面放电过程是其表面干燥带的形成及局部电弧的发展过程。对污秽条件下绝缘子纯操作冲击强度存在不同看法,一种看法认为,污秽物使绝缘子操作冲击耐受强度降低;另一种看法认为,在中等程度污秽条件下,绝缘子的操作冲击耐受强度,将高于清洁湿耐受值,即使在重污秽下也很少下降或不下降,但均认为污秽绝缘子的操作冲击闪络电压都随污秽程度的增加而降低。根据美国 EPRI 试验验证,在同一污秽条件下,同型号的绝缘子的直流操作耐压为直流耐压的 2.2 倍~2.3 倍。大量试验研究证明,当预加直流电压时,其 50% 操作冲击电压是 50% 污闪运行电压的 1.7 倍~2.3 倍。因此,操作过电压对绝缘子片数的选择不起控制作用。由于污秽原因,直流线路的绝缘子片数(串长)较交流 1000kV 线路还多(长),其在雷电冲击电压下的绝缘裕度较大,反击雷电流超过 200kA,雷电过电压对绝缘子片数的选择不起控制作用。

条文中的数据是根据中国电科院在溪洛渡-浙西 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流线路工程中给出的钟罩型瓷绝缘子 XZP-210 和 CA-756EZ 在直流盐密  $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$  下的 V 型串片数。

耐张绝缘子串受力比悬垂绝缘子串大,容易产生零值绝缘子,

一般要求在悬垂串片数基础上增加绝缘子片数。但 $\pm 800\text{kV}$  线路直线杆塔悬垂绝缘子串的绝缘子片数选择主要取决于工作电压,且按工作电压选择的绝缘子串的操作冲击 50%放电电压远大于系统操作过电压,所以 $\pm 800\text{kV}$  线路耐张串绝缘子片数可不再增加。

北方地区直流特高压线路工程的绝缘子片数应根据当地的污秽特征和气候条件,并结合当地已运行线路的经验综合确定。

现行国家标准《 $110\text{kV} \sim 750\text{kV}$  架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 规定,为保持高杆塔的耐雷性能,全高超过 40m 有地线的杆塔,高度每增高 10m,绝缘子要增加 1 片。由于 $\pm 800\text{kV}$  线路按工作电压确定的绝缘子串长具有较高的耐雷电冲击绝缘水平,不再增加片数已能保证较高的耐雷水平和较低的雷击跳闸率水平。

**7.0.4** 在雨量充沛地区,耐张绝缘子串由于水平放置容易受雨水冲洗,因此其自洁性较悬垂绝缘子串要好, $110\text{kV} \sim 500\text{kV}$  运行经验表明,耐张绝缘子串很少污闪。因此在同一污区内,其爬电距离可较悬垂串减少。

**7.0.5** 国内外污闪试验结果(包括 STRI 试验)证实:同等污秽,即便在亲水性状态下,复合绝缘子污闪电压比瓷和玻璃绝缘子高 50%以上,因此,同样运行电压下,复合绝缘子爬距仅需要瓷和玻璃绝缘子爬距的  $2/3$  即可;按照目前  $\pm 500\text{kV}$  超高压直流输电线路绝缘配置,复合绝缘子爬距定为瓷绝缘子爬距的  $3/4$  以上已经有相当裕度。

2005 年底,南方电网技术研究中心、电科院和瑞典 STRI 联合完成了 $\pm 800\text{kV}$  直流复合绝缘子的研制和试验工作,试验的复合绝缘子的长度和爬距为 8.16m 和 28.32m。2007 年 8 月 22 日在北京召开的 $\pm 800\text{kV}$  直流线路绝缘选择讨论会议上,各方统一了工程设计原则,轻污区低海拔的复合绝缘子计算推荐最小长度和爬距为 8.8m 和 33.0m。由于铁塔塔头尺寸主要由极间距控制,为保证一定的极间距,导线 V 型悬垂串肢长需达到 13m 以上,所以工程上采用了较长规格的复合绝缘子。

云南—广东±800kV 直流线路工程采用的复合绝缘子及爬距配置见表 38。

表 38 云南—广东±800kV 直流线路复合绝缘子长度和爬距(m)

海拔高度(m) ESDD(mg/cm <sup>2</sup> )	1000	1500	2000	2300
0.05	10.2/38.25	10.6/39.75	10.6/39.75	10.6/39.75
0.08	10.6/39.75	10.6/39.75	10.6/39.75	10.6/39.75
0.15	10.6/39.75	12.0/45.00	12.0/45.00	12.0/45.00

向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV 直流线路工程推荐的复合绝缘子长度及爬距配置见表 39。

表 39 向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV 直流线路  
复合绝缘子长度和爬距(m)

海拔高度(m) ESDD(mg/cm <sup>2</sup> )	1000~1500	1500~2000	2000~2500	2500~3700
≤0.08	10.6/36.3	11.5/39.6		12.0/41.4
0.15	11.5/39.6	12.0/41.4	—	

溪洛渡—浙西、哈密—郑州±800kV 特高压直流线路工程进行了复合绝缘子长度的优化研究。考虑到在线路实际运行中复合绝缘子完全亲水性出现的可能性不大,因此按照弱憎水性的污闪特性推荐复合绝缘子长度,并考虑到绝缘配置裕度,溪浙线和哈郑线工程采用的复合绝缘子长度和爬距见表 40。

表 40 溪洛渡—浙西、哈密—郑州±800kV 直流线路  
复合绝缘子长度和爬距(m)

海拔高度(m) ESDD(mg/cm <sup>2</sup> )	1000	1500	2000	2300
0.05	9.6/36.96	9.6/36.96	10.6/40.81	10.6/40.81
0.08	9.6/36.96	10.6/40.81	10.6/40.81	10.6/40.81
0.15	10.6/40.81	11.0/42.35	11.8/45.43	11.8/45.43

**7.0.6 高海拔地区**,随着海拔升高或气压降低,污秽绝缘子的闪络电压随之降低,高海拔所需绝缘子片数按本规范公式 7.0.6 进行修正。

公式 7.0.6 中各种绝缘子的  $m_1$  值要根据实际试验数据确定。表 41 给出了部分形状绝缘子  $m_1$  值的参考值。

**表 41 部分形状绝缘子的  $m_1$  值的参考值**

绝缘子形式	普通型	双伞防污型	三伞防污型
$m$	0.5	0.38	0.31

中国电科院在文献“ $\pm 800\text{kV}$  直流绝缘子污秽放电特性及高海拔放电系数研究”报告中结论,在高海拔地区  $1000\text{m} \sim 4000\text{m}$  地区,线路绝缘子海拔修正系数为:海拔每升高  $1000\text{m}$ ,绝缘子的耐污闪能力就下降:钟罩型绝缘子为  $5.9\%$ ,外伞型绝缘子为  $3.9\%$ ,复合绝缘子下降  $6.4\%$ 。

根据以上计算原则及方法,云南—广东、向家坝—上海和锦屏—苏南  $\pm 800\text{kV}$  直流线路工程推荐的绝缘子 V 串片数配置见表 42、表 43。

**表 42 云南—广东  $\pm 800\text{kV}$  直流线路绝缘子串基本片数**  
(钟罩型盘式瓷绝缘子)

污区 海拔(m)		轻污区 ( $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ )	中污区 ( $0.08\text{mg}/\text{cm}^2$ )	重污区 ( $0.15\text{mg}/\text{cm}^2$ )
1000	210kN/170mm	64	—	—
	300kN/195mm	56	63	82
	400kN/205mm	64	75	95
	530kN/240mm	56	65	84
1500	210kN/170mm	66	—	—
	300kN/195mm	58	—	—
	400kN/205mm	66	75	95
	530kN/240mm	58	65	84

续表 42

污区 海拔(m)		轻污区 (0.05mg/cm <sup>2</sup> )	中污区 (0.08mg/cm <sup>2</sup> )	重污区 (0.15mg/cm <sup>2</sup> )
2000	210kN/170mm	68	—	—
	300kN/195mm	60	67	86
	400kN/205mm	68	77	97
	530kN/240mm	60	67	86
2500	210kN/170mm	71	—	—
	300kN/195mm	62	—	—
	400kN/205mm	69	79	99
	530kN/240mm	62	69	88

表 43 向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV 直流线路绝缘子串基本  
片数(钟罩型盘式瓷绝缘子)

海拔高度(m)		1000	2000	3000	3700
绝缘子型号					
EDSS=0.05	CA-745EZ	65(67)	71(72)	78	86
	CA-756EZ	56(58)	60(62)	64(67)	68(71)
	CA-765EY	61	66	70	75
	CA-785EX	52	56	60	63
EDSS=0.08	CA-745EZ	79	87	96	105
	CA-756EZ	70	75	80	86
	CA-765EY	74	79	85	90
	CA-785EX	66	70	75	80
EDSS=0.15	CA-745EZ	90	99	109	120
	CA-756EZ	82	87	93	98
	CA-765EY	81	87	93	98
	CA-785EX	76	81	87	92

注:( )括号内值为重冰区采用值。

根据中国电科院在溪洛渡-浙西±800kV 特高压直流线路工程中的试验研究结论,以钟罩型绝缘子表面积污作为直流盐密,三伞型绝缘子表面积污为钟罩型绝缘子表面积污的 2/3,玻璃绝缘子的表面积污与钟罩型绝缘子的表面积污相同,V 型绝缘子串的长期积污取 I 型串的 3/4,溪洛渡-浙西±800kV 直流线路工程推荐的绝缘子串片数见表 44。

表 44 溪洛渡-浙西±800kV 直流线路绝缘子串基本片数配置  
(悬垂 V 串和耐张串)

伞形	型号	直流 盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	0m		1000m		2000m		3000m	
			片数 (片)	串长 (m)	片数 (片)	串长 (m)	片数 (片)	串长 (m)	片数 (片)	串长 (m)
210kN 钟罩	XZP-210	0.03	44	7.48	47	7.99	50	8.50	54	9.18
		0.05	56	9.52	60	10.20	64	10.88	68	11.56
		0.08	71	12.07	76	12.92	81	13.77	87	14.79
		0.15	82	13.94	87	14.79	93	15.81	99	16.83
300kN 钟罩	CA-756EZ	0.03	41	8.00	43	8.39	46	8.97	49	9.56
		0.05	53	10.34	56	10.92	60	11.70	64	12.48
		0.08	67	13.07	71	13.85	76	14.82	82	15.99
		0.15	78	15.21	83	16.19	88	17.16	94	18.33
300kN 玻璃 钟罩	FC-300	0.03	40	7.80	42	8.19	45	8.78	48	9.36
		0.05	53	10.34	56	10.92	60	11.70	64	12.48
		0.08	70	13.65	74	14.43	79	15.41	85	16.58
		0.15	83	16.19	88	17.16	94	18.33	100	19.50
400kN 钟罩	CA-765EZ	0.03	50	10.25	53	10.87	57	11.69	61	12.51
		0.05	61	12.51	65	13.33	70	14.35	74	15.17
		0.08	74	15.17	79	16.20	84	17.22	90	18.45
		0.15	81	16.61	86	17.63	92	18.86	98	20.09
530kN 钟罩	CA-785EZ	0.03	43	10.32	46	11.04	49	11.76	52	12.48
		0.05	52	12.48	54	13.44	59	14.16	64	15.36
		0.08	63	15.12	67	16.08	72	17.28	77	18.48
		0.15	70	16.80	74	17.76	79	18.96	85	20.40
760kN 钟罩	CA-791EZ	0.03	36	10.08	38	10.64	41	11.48	43	12.04
		0.05	46	12.88	49	13.72	52	14.56	56	15.68
		0.08	59	16.52	58	16.24	62	17.36	66	18.48
		0.15	68	19.04	68	19.04	72	20.16	77	21.56

续表 44

伞形	型号	直流 盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	0m		1000m		2000m		3000m	
			片数 (片)	串长 (m)	片数 (片)	串长 (m)	片数 (片)	串长 (m)	片数 (片)	串长 (m)
300kN 双伞	XZWP-300	0.03	33	6.44	34	6.63	35	6.83	37	7.22
		0.05	44	8.58	45	8.78	47	9.17	49	9.56
		0.08	57	11.12	60	11.70	62	12.09	65	12.68
		0.15	78	15.21	82	15.99	85	16.58	89	17.36
300kN 三伞	CA-776EZ	0.03	39	7.61	40	7.80	42	8.19	44	8.58
		0.05	50	9.75	52	10.14	55	10.73	57	11.12
		0.08	65	12.68	67	13.07	70	13.65	73	14.24
		0.15	85	16.58	89	17.36	92	17.94	96	18.72
400kN 三伞	CA-778EY	0.03	38	7.79	40	8.20	42	8.61	43	8.82
		0.05	46	9.43	48	9.84	50	10.25	52	10.66
		0.08	54	11.07	56	11.48	58	11.89	61	12.51
		0.15	62	12.71	65	13.33	67	13.74	70	14.35
530kN 三伞	CA-779EY	0.03	35	8.40	37	8.88	38	9.12	40	9.60
		0.05	44	10.56	46	11.04	48	11.52	50	12.00
		0.08	55	13.20	57	13.68	59	14.16	62	14.88
		0.15	64	15.36	69	16.56	74	17.76	78	18.72

中国电科院在高海拔地区进行了相关的试验和研究,在±800kV 直流架空线路绝缘子选择和杆塔塔头空气间隙冲击放电特性试验研究的最终报告中,对线路盘形绝缘子片数的海拔修正提出以下公式:

$$n_H = \frac{n_0}{1 - k_1(H/1000)} \quad (9)$$

式中:  $k_1$ ——海拔修正系数,参考值见表 45;

$n_0$ ——0m 海拔的绝缘子片数;

$n_H$ ——海拔  $H$ m 高度的绝缘子片数。

表 45  $k_1$  的参考值

序号	伞 型	型 号	$k_1$
1	钟罩型绝缘子	CA-756EZ	0.021
2	双伞型绝缘子	XZWP-300	0.039
3	三伞型绝缘子	CA-776EZ	0.039

**7.0.7 风偏后导线对杆塔构件的空气间隙**,要分别满足工作电压、操作过电压及雷电过电压的要求。

(1)工作电压空气间隙。

根据中国电力科学研究院试验结果,分裂导线对塔身间隙在直流正极性电压作用下的放电特性见图 5。将试验结果与棒-板间隙和棒-棒间隙的试验结果进行比较的结果表明,在正极性直流电压下,放电电压与间隙距离呈线性关系,并且与棒-棒、棒-板的试验结果很接近。在负极性直流电压下,电极形状对放电电压有一定的影响,分裂导线对塔身间隙的放电特性更接近棒-板的情况。可见直流电压要求的空气间隙距离远小于冲击电压要求的间隙距离,在杆塔间隙距离的设计中可不予考虑。

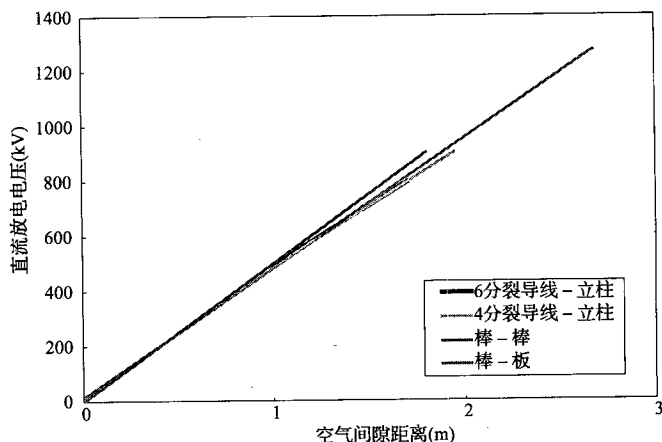


图 5 分裂导线对塔身间隙的正极性直流放电特性



参照电力行业标准《高压直流架空送电线路技术导则》DL/T 436—2005中的公式,导线对杆塔空气间隙的直流 50% 放电电压应符合公式 10 的要求。

$$U_{50\%N} = \frac{K_2 \cdot K_3}{(1 - 3\sigma_N) \cdot K_1} U_e \quad (10)$$

式中:  $U_e$ ——额定运行电压(kV);

$K_1, K_2$ ——直流电压下间隙放电电压的空气密度、湿度校正系数;

$K_3$ ——安全系数, 1.15;

$\sigma_N$ ——空气间隙直流放电电压的变异系数, 0.9 %。

如果最高运行电压取 816kV, 安全系数取 1.15, 空气间隙直流放电电压的变异系数取 0.9%, 则当导线对杆塔的净空距离为 2.1m 时, 即可满足  $\pm 800$ kV 直流电压对空气间隙的要求。

## (2) 操作过电压空气间隙。

直流线路的操作过电压, 其产生机理及出现的频度, 与交流系统有一定的不同, 主要波形为直流分量之上叠加一冲击波。当然交流操作波形更复杂, 虽千差万别, IEC 的统一试验标准操作波为 250/2500 $\mu$ s。目前尚无直流操作波形的规定, 试验也不多。国际上多引用瑞典试验数据, 尽管很不完善。它的试验波形为 120/4000 $\mu$ s, 叠加在直流分量之上。对于棒板间隙, 直流分量的叠加影响甚大, 其闪络电压可提高 10%, 少量的试验数据表明, 对于导线-塔身间隙, 直流分量的叠加影响甚微, 参见图 6。

图 6 上部曲线为棒-棒间隙, 下部曲线为棒-板间隙, 中间部分为直流电压叠加操作冲击电压试验数据, 拟和曲线为美国 BPA 后期采用, 与交流操作波间隙因数  $K=1.28$  非常接近。

美国高压部门一直未作直流操作波空气间隙放电试验, 早期的太平洋联络线是按照等效交流放电特性决定的,  $\pm 400$ kV 直流线路指 1.7 倍过电压, 30°风偏, 间隙取 2.35m。

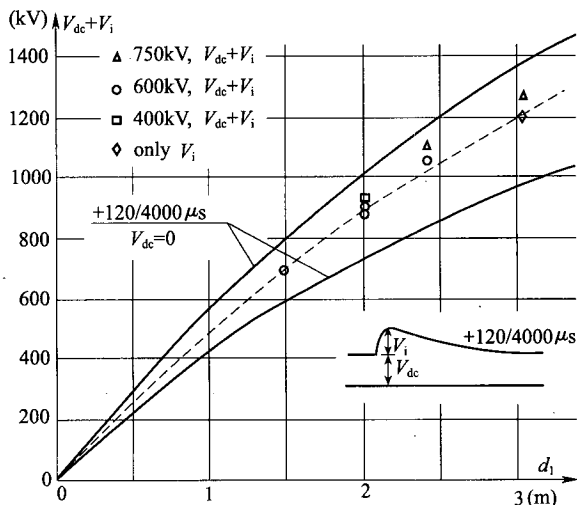
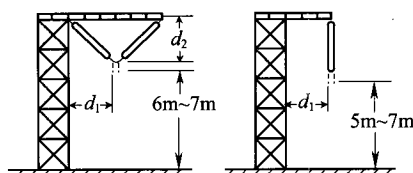


图 6 瑞典导线-塔身间隔放电特性

中国电科院在 $\pm 800\text{kV}$ 直流 V 型绝缘子串杆塔塔头空气间隙操作冲击放电特性试验中,通过对 V 型串塔头空气间隙进行的正极性 50% 操作冲击放电特性试验,获得了直流线路杆塔 V 型串空气间隙距离与正极性 50% 操作冲击放电电压的特性曲线,如图 7 所示。

作为对比,图 8 还给出了电科院 20 世纪 80 年代开展的 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路塔头空气间隙的 50% 正操作冲击放电电压试验的特性曲线。

参照现行行业标准《高压直流架空送电线路技术导则》DL/T 436—2005 的公式,直流杆塔空气间隙的正极性 50% 操作冲击放电电压要符合公式 11 的要求。

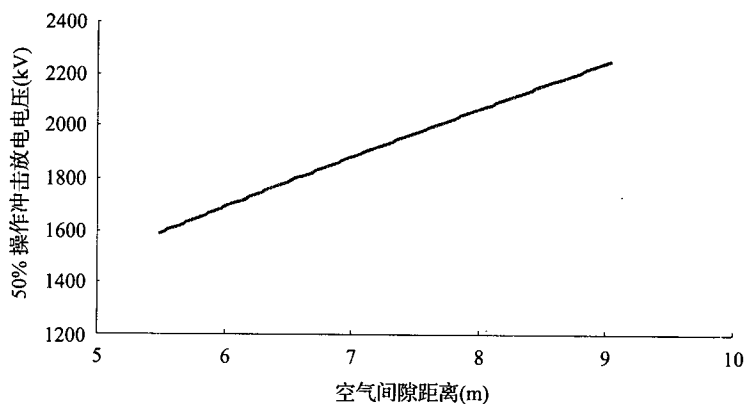


图 7 ±800kV 直流线路杆塔空气间隙操作冲击放电特性

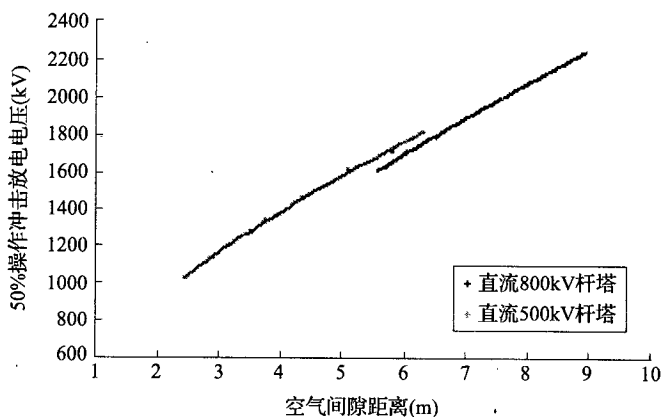


图 8 空气间隙操作冲击放电特性比较

$$U_{50\%s} = \frac{K'_2 \cdot K'_3}{(1 - 2\sigma_s) \cdot K'_1} U_m \quad (11)$$

式中:  $U_m$ ——系统最高电压(kV);

$K'_1, K'_2$ ——操作冲击电压下间隙放电电压的空气密度、湿度校正系数;

$K'_3$ ——操作过电压倍数;

$\sigma_s$ ——空气间隙在操作电压下放电电压的变异系数。根据《高压直流架空送电线路技术导则》DL/T 436—2005, 操作冲击对  $\sigma_s$  取 5%, 另外大电网会议于 2002 年出版的《HVDC CONVERTER STATIONS FOR VOLTAGES ABOVE  $\pm 600\text{kV}$ 》报告中对于操作的  $\sigma_s$  取 6%。

根据中国电科院系统所关于锦屏—苏南  $\pm 800\text{kV}$  直流线路内过电压研究报告, 如果不考虑直流线路逆变侧不投旁通对紧急停运时的故障形式, 则直流线路沿线最大暂态过电压出现在 0.1p. u. 功率下线路中点故障时非故障极线路中点, 过电压值为 1308kV。计算得到正极性 50% 操作冲击放电电压为 1486kV, 对应 0m 的操作冲击间隙距离为 5.1m。

近年来, 中国电力科学研究院在北京(海拔 55m)、宝鸡(海拔 900m)和青海硝湾(海拔 2200m)进行了大量 V 串塔头空气间隙的 50% 操作冲击放电特性试验, 根据这些最新的试验结果, 采用插值法得到 0m、500m、1000m、1500m 和 2000m 的 50% 操作冲击放电特性曲线见图 9。

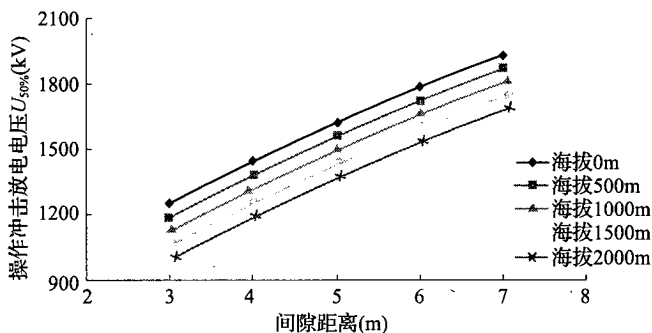


图 9  $\pm 800\text{kV}$  不同海拔高度空气间隙放电特性试验曲线

在溪洛渡—浙西  $\pm 800\text{kV}$  直流线路中, 绝缘子串风偏后导线对杆塔空气间隙的正极性 50% 操作冲击放电电压  $U_{50\%}$  采用下式计算:

$$U_{50\%} = \frac{K'_2 \cdot K'_3}{(1 - 3\sigma_s) \cdot K'_1} U_m \quad (12)$$

其中最高运行电压  $U_m$  为 816kV；操作过电压倍数  $K'_3$  取 1.60；空气间隙在操作冲击电压下放电电压的变异系数  $\sigma_s$  取 5%。计算得到正极性 50% 操作冲击放电电压为 1536kV，根据图 9 的曲线，得到在 0m 海拔下所需要的操作间隙为 4.5m。

如果采用双节复合绝缘子串，操作过电压间隙值需根据真型塔试验结果确定。

### (3) 雷电过电压要求的空气间隙。

在雷电过电压情况下，其空气间隙的正极性雷电冲击放电电压要与绝缘子串的 50% 雷电冲击放电电压相匹配。不必按绝缘子串的 50% 雷电冲击放电电压的 100% 确定间隙，只需按绝缘子串的 50% 雷电冲击放电电压的 80% 确定间隙（间隙按 0 级污秽要求的绝缘长度配合）或雷电过电压间隙不予规定。即按下式进行配合。

$$U'_{50\%} = 80\% \cdot U_{50\%} \quad (13)$$

式中： $U_{50\%}$ ——绝缘子串的 50% 雷电冲击放电电压(kV)，其数值可根据绝缘子串的雷电冲击试验获得或由绝缘长度求得。

对于直流线路，我国电力科学研究院曾在 500kV 塔头上进行了直流叠加雷电冲击波的绝缘子串闪络试验，其复合闪络电压 ( $V_i + V_{dc}$ ) 见表 46。

表 46 绝缘子串的雷电波闪络电压(kV)

直流电压(kV) 绝缘子片数	闪络电压 $V_i + V_{dc}$		
	10	20	30
$V_{dc} = 0$	961.4	1910.2	2881.1
$V_{dc} = 170$	969.7	1900.4	—
$V_{dc} = 330$	932.6	1921.7	2852.9
$V_{dc} = 500$	—	1902.0	2823.7

从表 46 可知,复合闪络电压与单独雷电冲击基本一致。因此,可以用单独施加雷电波时(如交流线路)的试验数据来进行防雷计算。目前规范中没有提出直流线路的雷电过电压的间隙要求。

由于直流线路串长大于交流线路,如按交流配合比选择大气过电压下的间隙值则明显偏大,而按操作过电压间隙值进行防雷计算,比较合理。较为合适的特高压直流线路的防雷计算新方法,科研单位正在进行研究。

对于高压直流线路而言,雷击跳闸主要是由绕击引起的。直流换流阀在直流线路遭受电击时,换流阀很快动作,由换流状态转换为逆变状态,对线路进行抽能和去空气游离电子作用,然后重新启动,时间极短,全过程不超过 100ms,基本不影响线路连续运行。塔头间隙设计时目前一般暂不考虑雷电过电压影响。

(4)前苏联的研究表明,导线距横担、导线距塔身的距离不同空气间隙的电气特性也不同,放电电压与对应导线位置的塔身宽  $B$  之间,可由下式确定:

$$U'_{50\%}(B) = U_{50\%}(1) \cdot (1.03 - 0.03B) \quad (14)$$

式中:  $U_{50\%}(1)$ ——塔身宽  $B$  为 1m 时的放电电压,  $B$  的取值范围为 0.02m~5m。

根据电科院所做复合绝缘子试验情况,在两支复合绝缘子串联使用时,两复合绝缘子间的联结金具上发生跳弧现象,因此复合绝缘子是否可以串联使用要进一步试验,在工程设计中宜采用单支复合绝缘子。电科院采用不同绝缘子串型式的  $\pm 800\text{kV}$  直线塔空气间隙冲击 50%击穿电压试验结果见表 47。

表 47  $\pm 800\text{kV}$  直线塔空气间隙冲击 50%击穿电压试验结果

绝缘子串形式	复合绝缘子		瓷绝缘子		
每联绝缘子支 (片)数	2 支串联	1 支	50 片	60 片	64 片
操作冲击电压 (kV)	1638	1776	1740	1950	2091

由表 47 可以看出,由 2 支串联复合绝缘子组成的 V 型绝缘子串,由于受中间均压环的影响,导线对铁塔 50% 操作冲击耐受电压最低,其次为玻璃绝缘子及整支复合绝缘子组成的 V 型绝缘子串。经折算,在操作冲击电压下,由 2 支串联复合绝缘子及玻璃绝缘子组成的 V 型绝缘子串所需的空气间隙,分别比由整支复合绝缘子组成的 V 型绝缘子串多 0.2m~0.8m。对于工作电压,由于其放电间隙距离相对于绝缘子串长要小很多,因此,在工作电压下由 2 支串联复合绝缘子组成的 V 型绝缘子串,电气间隙距离仅做适当调整。

综合云南—广东±800kV 特高压直流线路、向家坝—上海、锦屏—苏南以及溪洛渡—浙西、哈密—郑州±800kV 特高压直流线路的带电部分与杆塔构件的最小间隙值具体见表 48。

表 48 带电部分与杆塔构件的最小间隙(m)

标称电压(kV)		±800					备 注
海拔(m)		500	1000	2000	3000	3700	
操作过电压	1.6p. u.	5.30	5.70	6.40	7.10	7.60	锦苏线
	1.7p. u.	5.50	6.30	6.90	—	—	向上线
	1.7p. u.	5.50	5.55	6.20	—	—	云广线
	1.6p. u.	4.90	5.30	5.90	—	—	溪浙线、哈郑线
工作电压		2.10	2.30	2.50	2.85	3.10	向上线、锦苏线
		2.55	2.70	3.05	—	—	云广线
		2.10	2.30	2.50	—	—	溪浙线、哈郑线
雷电过电压		—					—

对于带电作业要求的空气间隙,在现行国家标准《带电作业工具基本技术要求与设计导则》GB/T 18037 中,规定可以接受的危险率水平为  $1.0 \times 10^{-5}$ 。

检修人员停留在线路上进行带电作业时,系统不可能发生合闸空载线路操作,并需退出重合闸。而单极接地分闸过电压是确定带电作业安全距离时要考虑的过电压。

以往超高压输电线路设计时,对需要带电作业的杆塔,要考虑带电作业所需的安全空气间隙距离。由于带电作业的方式是灵活多样的,根据多年的设计及运行经验,在一般情况下不会也不宜因考虑带电作业而增大塔头尺寸。不过,在设计中要尽可能从塔头结构及构件布置上为带电作业创造方便条件。

±800kV 线路带电检修研究已有中国电力科学研究院通过试验得到相关成果。根据分析和试验结果,计算出满足带电作业危险率小于  $1 \times 10^{-5}$  的最小安全距离如表 49 所示。

表 49 ±800kV 直流线路塔头空气间隙(m)

位 置	线路中点		线路起点	
	危险率( $1 \times 10^{-6}$ )	最小安全距离	危险率( $1 \times 10^{-6}$ )	最小安全距离
地电位作业	5.49	6.9	6.05	5.8
等电位作业	5.49	6.8	8.8	5.7
等电位作业	9.04	6.9	4.71	5.9

初步建议我国±800kV 直流输电工程带电作业最小间隙取值不宜小于 6.9m。采用双节复合绝缘子串的带电作业间隙值需根据真型塔试验结果适当增加。

**7.0.8** 在高海拔地区,直流线路带电部分对杆塔构件空气间隙放电电压要进行修正,用 0m 海拔的 50%放电电压乘以相应海拔高度下的空气放电电压海拔修正系数  $K_a$  就可以得到海拔为  $H$  时的 50%放电电压。条文中规定的海拔修正公式适用于 2000m 及以下地区,当海拔高度超过 2000m 时,宜通过试验研究确定,也可按照该公式进行修正。

**7.0.9** 本条根据现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 条文制定。

**7.0.10** 随着线路额定电压的提高,线路绝缘水平不断提高,雷电反击跳闸的概率愈来愈小,我国雷电定向定位仪记录的数据表明,我国 500kV 线路雷击跳闸的主要原因是绕击跳闸。

前苏联特高压线路的运行经验也表明,雷击跳闸是 1000kV



线路跳闸的主要原因。在 1985 年至 1994 年 10 年期间,特高压线路雷击跳闸高达 16 次,占其总跳闸次数的 84%,而雷击跳闸的原因是雷绕击导线。经分析,前苏联特高压线路的地线保护角过大是(大于  $20^\circ$ )造成了雷电绕击率过高的主要原因。日本特高压线路和其 500kV 线路一样,均采用负的地线保护角,雷电绕击率较低。

如采用两根地线,采用负保护角,则理论计算绕击事故率极低。其次就是降低工频接地电阻,提高反击时的耐雷水平。

电科院、清华大学根据向家坝-上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程塔型尺寸和间隙,计算 $\pm 800\text{kV}$ 反击耐雷水平如表 50、表 51。

表 50  $\pm 800\text{kV}$  直流线路反击雷电性能的计算(电科院计算)

工频接地电阻( $\Omega$ )	反击耐雷水平(kA)	反击闪络率(次/100km $\cdot$ ε)
30	136	0.845
20	174	0.311
15	204	0.095
10	249	0.030
5	327	0.004

表 51  $\pm 800\text{kV}$  直流线路反击雷电性能的计算(清华大学计算)

工频接地电阻( $\Omega$ )	反击耐雷水平(kA)	反击闪络率(次/100km $\cdot$ a)
30	218	0.1100
20	250	0.0475
15	270	0.0281
10	290	0.0167
5	316	0.0084

从以上两个表中可以看出, $\pm 800\text{kV}$ 直流线路反击耐雷水平明显高于交流 500kV 线路杆塔接地电阻在  $10\Omega \sim 15\Omega$  范围时的反击耐雷水平  $177\text{kA} \sim 125\text{kA}$ 。

根据国网电科院研究结果,一般档距的档距中央,导线与地线

的距离可按下式校验(气温 15℃,无风)。

$$S \geq 0.015L + U_m/500 + 2 \quad (15)$$

式中:  $S$ ——导线与地线间的距离(m);

$L$ ——档距(m);

$U_m$ ——系统最高电压(kV)。

**7.0.12、7.0.13** 这两条都根据现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 条文制订。

## 8 导线布置

**8.0.1** 本条基本沿用现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545—2010 第 8.0.1 条。增加了按不同串型,列表规定水平线间距离公式中的悬垂绝缘子串系数。

对于直流线路,导线-导线直流对称电极间隙其放电特性可视为与交流相同, $\pm 800\text{kV}$  线路电压可看作等效于交流线路电压峰值,其电压有效值为  $1600/\sqrt{2}=1131.4\text{kV}$ ,即和交流不同,公式中增加直流系数  $K_d=\sqrt{2}$ 。据此按公式求得相应于各档最小水平线距如表 52 (设计冰厚 10mm,串长取 12m)。

表 52 使用悬垂串杆塔的各档最小水平线距

档距(m)		300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400
弧垂(m)		6.86	12.20	19.06	27.45	37.36	48.80	61.76	76.25	109.8	149.45
线距 (m)	V-V	12.0	12.6	13.1	13.7	14.3	14.8	15.4	16.0	20.8	22.5
	I-I	16.8	17.4	17.9	18.5	19.1	19.6	20.2	20.8	25.6	27.3

对于档距在 1000m~2000m,将上式最后一项  $0.65\sqrt{f}$  改为  $0.8\sqrt{f} \sim 1.0\sqrt{f}$ 。

表 52 为电气安全控制的距离,由表 52 可知,档距在 1000m 以下,线距主要由间隙圆控制,档距在 1000m 以上要综合考虑,以确定合适的线距。另外,目前工程中确定线间距离时主要受电磁环境因素控制,对于  $6\times 630$  导线,导线极距不得小于 22m。

**8.0.2** 导地线的水平偏移主要取决于导线和地线覆冰不均匀以及覆冰脱落时的跳跃或舞动情况下导、地线间的工作间隙,特高压线路要按以上三种情况求得塔头上最小垂直距离和水平偏移的最佳组合。按导、地线覆冰不均匀以及覆冰脱落时的跳跃或舞动情

况下分别进行校验,得出结论。

根据实际工程经验,校验计算档距组合取为 Y—Y—Y—X—Y—Y—Y 连续上山,脱冰档 X 档距为 550m、高差为 33%,其余档 Y 档距为 400m、高差为 15%,导线悬垂串 10m、地线悬垂串 1m,计算结果总结如下:

(1)不均匀覆冰静态接近情况下要求的档中电气距离对塔头不起控制作用。

(2)脱冰跳跃动态接近情况下要求的档中电气距离对所要求的最小垂直距离和水平偏移见表 53。

表 53 脱冰跳跃动态接近时最小垂直距离和水平偏移

水平偏移(m)	覆冰 10mm 要求的垂直距离			
	100%脱冰	75%脱冰	50%脱冰	25%脱冰
0	7.9482	1.82188	-1.4064	-4.26847
1	7.9186726	1.775578	-1.47253	-4.37535
2	7.8297797	1.635464	-1.67451	-4.71195
3	7.680572	1.397744	-2.02413	-5.34112
4	7.4694105	1.0555	-2.54533	-6.47267
水平偏移(m)	覆冰 15mm 要求的垂直距离			
	100%脱冰	75%脱冰	50%脱冰	25%脱冰
0	14.95155	5.533445	0.463143	-3.85176
1	14.93067	5.499001	0.410158	-3.94981
2	14.8679	5.395174	0.249382	-4.25612
3	14.76293	5.220444	-0.02497	-4.81618
4	14.61518	4.972152	-0.42381	-5.75895

由上表看出,增大水平偏移对地线支架意义不大,因此特高压交直流示范工程水平偏移取大于 1m(10mm 冰区),具体由保护角控制水平偏移。

(3)导线舞动的情况下要求的档中电气距离对塔头的最小垂直距离和水平偏移不起控制作用。

(4)校验导线间和导线与地线间在不均匀脱冰情况下危险接近时,一般取验算档的上层导线或地线的冰重为 100%设计冰重,下层导线脱冰重量可取 50%~100%设计冰重。(覆冰厚度 5mm~10mm 时脱冰重量宜取 100%)。

跳跃接近要满足工作电压要求的最小空气间隙;静态接近要满足操作过电压要求的最小空气间隙。地线弧垂最低点不能低于导线弧垂最低点,上层导线弧垂最低点不能低于下层导线弧垂最低点。

## 9 杆塔型式

**9.0.1** 本条给出了杆塔类型的基本概念,使得杆塔类型的定义规范化和具体化。同时,便于区分悬垂型和耐张型两类杆塔的荷载组合。对于跨越杆塔以及其他特殊杆塔,可以按绝缘子与杆塔的连接方式分别归入悬垂型或耐张型。

**9.0.2** 水平排列方式可降低杆塔高度,垂直排列方式可减小线路走廊宽度,直流线路的两极可根据走廊情况,经技术经济比较后采用垂直排列方式。

**9.0.3** 能够满足使用要求(如电气参数等)的杆塔外型或型式可能有多种,要根据线路的具体特点来选择适合的杆塔外型。同一条线路,往往由于沿线所经地区环境、条件等不同,对塔型的要求也不同。设计时要在充分优化的基础上选择最佳塔型方案。

**9.0.4** 本条规定了杆塔的使用原则。

1 在杆塔选型时不仅要塔体本身进行技术经济比较,而且还要考虑到导线排列型式和塔体尺寸(如铁塔根开)对不同地质条件的基础造价的影响,进行综合技术经济比较。通常导线水平排列比垂直排列铁塔的基础作用力要小些;塔体尺寸大(铁塔根开大),基础作用力也要小些,基础材料耗量也相应比较小一些。但是对地质条件较好的山区,减小基础作用力,效果就不显著,塔体尺寸大(根开大),可能还会引起土方开挖量增加。

2 对山区铁塔需采用长短腿配合高低基础的结构型式,尽量适应塔位地形的要求,以减小基面开挖量和水土流失,将线路对沿线环境的影响降至最低程度。

3 走廊清理费是指线路走廊的房屋拆迁和青苗赔偿等费用。工程实践证明,当走廊清理费较大时,通过对铁塔、基础和走廊清

理费用进行综合经济比较,结果为当采用 V 型、Y 型和 L 型绝缘子串时,线路走廊会更窄,走廊清理费用也会更小。

4 悬垂型杆塔可带  $3^{\circ}$  转角设计,是根据国内的设计和运行经验提出的。由于悬垂型杆塔带转角只是少数情况,实际定位时,有些塔位的设计档距往往不会用足,因此,设计时采用将角度荷载折算成档距,在设计使用档距中扣除,杆塔仍以设计档距荷载计算,这样做比较经济合理。如果带转角较大,用缩小档距的办法,使悬垂型杆塔带转角就比较困难,同时悬垂串的偏角较大,塔头相应要放大,而且运行方面更换绝缘子也不方便。当带转角后要导致放大塔头尺寸时,宜做技术经济比较后确定。悬垂转角杆塔的允许角度也是根据国内的运行经验提出的。悬垂转角杆塔的角度较大时,通常需要在导线横担向下设置小支架来调整导线挂点位置以满足电气间隙要求。

## 10 杆塔荷载及材料

### 10.1 杆塔荷载

#### 10.1.1 本条规定了荷载的分类。

分类原则是根据现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001,结合输电结构的特点,为简化荷载分类,不列偶然荷载,将属这类性质的断线张力及安装荷载等也列入了可变荷载,将基础重力列入永久荷载,同时为与习惯称谓一致,不采用该标准中所用的“作用”术语,而仍用“荷载”来表述。

#### 10.1.2 本条规定了荷载的作用方向。

(1)一般情况,杆塔的横担轴线是垂直于线路方向中心线或线路转角的平分线。因此,横向荷载是沿横担轴线方向的荷载,纵向荷载是垂直于横担轴线方向的荷载,垂直荷载是垂直于地面方向的荷载。

(2)悬垂型杆塔基本风速工况,除了 $0^{\circ}$ 风向和 $90^{\circ}$ 风向的荷载工况外, $45^{\circ}$ 风向和 $60^{\circ}$ 风向对杆塔控制杆件产生的效应很接近。因此,通常计算 $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 及 $90^{\circ}$ 三种风向的荷载工况。但是,对塔身为矩形截面或者特别高的杆塔等结构,有时候可能由 $60^{\circ}$ 风向控制。耐张型杆塔的基本风速工况,一般情况由 $90^{\circ}$ 风向控制,但由于风速、塔高、塔型的影响, $45^{\circ}$ 风向有时也会控制塔身主材。对于耐张分支塔等特殊杆塔结构,还要根据实际情况判断其他风向控制构件的可能性。

(3)考虑到终端杆塔荷载的特点是不论转角范围大小,其前后档的张力一般相差较大。因此,规定终端杆塔还需计算基本风速的零度风向,其他风向( $90^{\circ}$ 或 $45^{\circ}$ )可根据实际塔位转角情况而定。



**10.1.3** 正常运行情况、断线(含导线的纵向不平衡张力)情况和安装情况的荷载组合是各类杆塔的基本荷载组合,不论线路工程处于何种气象区都要计算。当线路工程所处气象区有覆冰条件时,还要计算不均匀覆冰的情况。

**10.1.4** 基本风速、无冰、未断线的正常运行情况要分别考虑最大垂直荷载和最小垂直荷载两种组合。因为工程实践计算分析表明,铁塔的某些构件(例如部分 V 型串的横担构件或部分塔身侧面斜材)可能由最小垂直荷载组合控制。

**10.1.5、10.1.6** 断线(含导线的纵向不平衡张力)情况,当实际工程气象条件无冰时,要按最低气温、无冰、无风计算。断线工况均考虑同一档内断线(或导线有纵向不平衡张力)。

(1)对悬垂型杆塔,要分别考虑一极导线有纵向不平衡张力情况或断一根地线的情况。

(2)对耐张型杆塔,要分别考虑一极导线有纵向不平衡张力情况或同一档内断一根地线和一极导线有纵向不平衡张力的情况。

(3)对于终端杆塔,由于换流站侧导线的纵向不平衡张力很小,线路侧导线的纵向不平衡张力相对很大,在正常运行工况中已经考虑了线路侧未架的情况,因此对直流线路终端塔只需考虑线路侧地线断线或导线有纵向不平衡张力情况即可。

**10.1.7** 为了提高地线支架的承载能力,对悬垂塔和耐张塔,地线断线张力取值均为 100%最大使用张力。

**10.1.8** 从历次冰灾事故情况来看,地线的覆冰厚度一般比导线要厚,故对于不均匀覆冰情况,地线的不平衡张力取值(占最大使用张力的百分数)比导线要大。无冰区和 5mm 冰区可不考虑不均匀覆冰情况引起的不平衡张力。

表 10.1.8 中不均匀覆冰的导、地线不平衡张力取值适用于档距 550m、高差不超过 15%的使用条件,超过该条件时要按实际情况进行计算。

**10.1.9** 不均匀覆冰荷载组合,要考虑纵向弯矩组合情况,以提高杆塔的纵向抗弯能力。

**10.1.10** 本规范规定的断线张力(或纵向不平衡张力)和不均匀覆冰情况下的不平衡张力值已考虑了动力影响,因此,应按静态荷载计算。

**10.1.11** 2008 年的严重冰灾在湖南、江西和浙江等省份均有发生串倒的现象,由于倒塔断线引起相邻档的铁塔被拉到的现象不少。为了有效控制冰灾事故的进一步扩大,对于较长的耐张段之间适当布置防串倒的加强型悬垂型杆塔,是非常有效的一种方法,国外的规范中也有类似的规定。加强型悬垂型杆塔除按常规悬垂型杆塔工况计算外,还应按所有导、地线同侧有断线张力(或纵向不平衡张力)计算,以提高该塔的纵向承载能力。

**10.1.12** 本条是根据以往实际工程设计经验确定的。验算覆冰荷载情况是作为正常设计情况之外的补充计算条件提出来的。主要在于弥补设计条件的不足,用以校验和提高线路在稀有的验算覆冰情况下的抗冰能力。它的荷载特点是在过载冰的运行情况下,同时存在较大的不平衡张力。这项不平衡张力是由于现场档距不等,在冰凌过载条件下产生的,导、地线具有同期同方向的特性,故只考虑正常运行和所有导、地线同时同向有不平衡张力,使杆塔承受最大弯矩情况。

鉴于验算覆冰荷载出现概率很小,故不再考虑断线和最大扭矩的组合情况。

**10.1.13** 本条规定了各类杆塔的安装荷载。

1 悬垂型杆塔提升导、地线及其附件时发生的荷载。其中,提升导、地线的荷载如果考虑避免安装荷载(包括检修荷载)控制杆件选材,起吊导、地线时采用转向滑轮(图 10)等措施,将起吊荷载控制在导、地线重量的 1.5 倍以内是可行的。以往线路已有工程经验,但是,要在设计文件中加以说明。

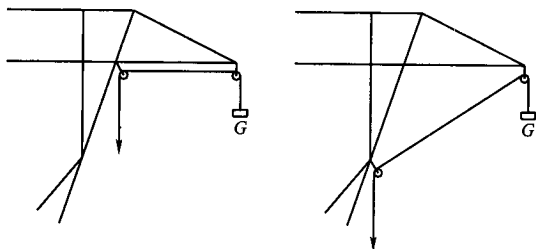


图 10 起吊导、地线时采用转向滑轮示意图

2 悬垂型杆塔,导线或地线锚线作业时,挂线点处的线条重力由于前后塔位高差对其影响较大,一般取垂直档距较大一侧的线条重力。即按塔位实际情况,一般取大于 50%垂直档距的线条重力。

3 导、地线的过牵引、施工误差和初伸长引起的张力增大系数由电气专业根据导、地线的特性确定。

4 水平和接近水平的杆件,单独校验承受 1000N 人重荷载,而不与其他荷载组合。是参照国外的设计经验和国内部分设计单位的实践经验,一般可将与水平面夹角不大于  $30^\circ$  的杆件视为接近水平的杆件。如果某些杆件不考虑上人,要在设计文件中说明。校验时,可将 1000N 作为集中荷载,杆件视为简支梁,其跨距取杆件的水平投影长度,杆件应力不能大于材料的强度设计值。

10.1.14 本条是根据以往实际工程设计经验确定的。

10.1.15 考虑阵风在高度方向的差异对曲线型铁塔斜材产生的不利影响,也称埃菲尔效应。

10.1.17 圆管构件在以往的工程中曾出现过激振现象,有的振动已引起杆件的破坏。虽然目前要精确地计算振动力尚有困难,有些参数不容易得到,一般可参照现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135 的有关规定。

10.1.18 导线、地线风荷载计算公式中风压调整系数  $\beta_c$ ,是考虑特高压线路因绝缘子串较长、子导线多,有发生动力放大作用的可能,且随风速增大而增大。此外,近年来 500kV 线路事故频率较高,适当提高导、地线荷载对降低线路的倒塔事故率也有一定帮

助。但对于电线本身的张力弧垂计算、风偏角计算和其他电压等级线路的荷载计算都不必考虑  $\beta_c$ ，即取  $\beta_c = 1.0$ 。

通过对各国风偏间隙校验用风压不均匀系数的分析，参照其中反映风压不均匀系数随档距变化规律的德国和日本系数曲线，结合我国运行经验，提出了风压不均匀系数的取值要求，即校验杆塔电气间隙时，档距不大于 200m 时取 0.8，档距不小于 550m 时取 0.61，档距在 200m~550m 之间风压不均匀系数  $\alpha$  按下式计算：

$$\alpha = 0.50 + \frac{60}{L_h} \tag{16}$$

式中： $L_h$ ——杆塔的水平档距(m)。

**10.1.19~10.1.21** 根据现行国家标准《高耸结构设计规范》GB 50135关于塔架结构体型系数取值的规定，由钢管构件组成的塔架整体计算时的  $\mu_s$ ，按角钢塔架的  $\mu_s$  乘以 0.6~0.8 采用。为计算方便，在以往 500kV 线路和大跨越钢管塔设计中采用的体型系数为  $0.82(1 + \eta)$ ，1000kV 淮南—上海(皖电东送)特高压交流线路工程钢管塔的体型系数为  $0.85(1 + \eta)$ 。

杆塔本身风压调整系数  $\beta_z$ ，主要是考虑脉动风振的影响。为便于设计，对一般高度的杆塔在全高度内采用单一系数。总高度超过 60m 的杆塔，特别是较高的大跨越杆塔，其  $\beta_z$  宜采用由下而上逐段增大的数值，可以参照现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定确定；对宽度较大或迎风面积增加较大的计算段(例如横担、微波天线等)要给予适当加大。单回路杆塔可参考表 54 取值，参照了 ±800kV 向家坝至上海特高压直流线路工程取值，并做了局部调整。

**表 54 单回路杆塔风荷载调整系数  $\beta_z$**

横担及地线支架高 (m)	$\leq 60$					$> 60$				
$\beta_z$	2.2					2.5				
身部分段高(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\beta_z$	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.80

当考虑杆件相互遮挡影响时,可按《建筑结构荷载规范》GB 50009的规定计算受风面积  $A_s$ 。

对基础的  $\beta_z$  值是参考化工塔架的设计经验,取对杆塔效应的 50%,即  $\beta_{基} = (\beta_{杆塔} - 1)/2 + 1$ ,考虑到使用上方便,取对 60m 以下杆塔为 1.0;对 60m 及以上杆塔为 1.3。

**10.1.22** 计算公式 10.1.22 是根据我国电力部门设计经验确定的。

以上导线、地线风荷载计算公式、杆塔风荷载计算公式和绝缘子串风荷载计算公式中均有系数  $B$ ,  $B$  为覆冰工况时,风荷载的增大系数,仅仅用于计算覆冰风荷载之用,计算其他工况的风荷载时,不考虑系数  $B$ 。

**10.1.23** 本条规定参考了现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2001 第 7.2.1 条文。

表 10.1.23 风压高度变化系数  $\mu_z$ ,按下列公式计算得出:

$$\mu_z^A = 1.379 \left( \frac{Z}{10} \right)^{0.24} \quad (17)$$

$$\mu_z^B = 1.000 \left( \frac{Z}{10} \right)^{0.32} \quad (18)$$

$$\mu_z^C = 0.616 \left( \frac{Z}{10} \right)^{0.44} \quad (19)$$

$$\mu_z^D = 0.318 \left( \frac{Z}{10} \right)^{0.60} \quad (20)$$

式中:  $Z$  ——对地高度(m)。

## 10.2 结 构 材 料

**10.2.1** 近年来,经过调研及铁塔试验等工作, Q420 高强度角钢在国内第一条 750kV 线路工程中得到了成功应用,在新建 500kV 输电线路工程上也有许多应用实例。我国首条 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压示范线路工程中也用到了 Q420 高强度角钢和钢板。华东院设计的 500kV 吴淞口大跨越工程中应用了 Q390 的

高强度钢板压制的钢管结构,并在 500kV 江阴大跨越工程中应用了 ASTM Gr65(屈服应力 450MPa)大规格角钢和厚钢板。因此,本规范将一般采用钢材等级提高到 Q420,此外,现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 已列入 Q460 高强度钢,有条件也可采用 Q460。

**10.2.2** 参考国家现行标准《钢结构设计规范》GB 50017、《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99,规定所有杆塔结构的钢材均要满足不低于 B 级钢的质量要求。

由于厚钢板在热轧过程中产生的缺陷,当钢板与其他构件焊接并在厚度方向承受拉力时,沿厚度方向可能会发生层状撕裂的问题,所以本规范规定厚钢板要考虑采取防止层状撕裂的措施,例如可采用 Z 向性能钢板、控制焊接应力、控制钢材的断面收缩率、控制材料杂质含量、控制焊接工艺等措施。

我国现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 规定:当焊接承重结构为防止钢材的层状撕裂而采用 Z 向钢时,其材质要符合现行国家标准《厚度方向性能钢板》GB/T 5313 的规定。

国家现行标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《建筑钢结构焊接技术规程》JGJ 81—2002/J 218—2002 对厚度不小于 40mm 的钢材,规定宜采用抗层状撕裂的 Z 向钢材。设计人员可根据结构的实际情况进行考虑。

**10.2.3** 8.8 级螺栓近年来在杆塔上应用较多,尤其是在大跨越塔结构和钢管塔的法兰上有一定的应用经验。但是 10.9 级螺栓在输电塔上应用还不多,螺栓的强度越高,硬度越高、脆性越大,尤其是氢脆的可能性就越大,在满足强度要求的前提下,要特别注意螺栓的塑性性能符合现行国家标准《紧固件机械性能》GB/T 3098 系列的要求。

**10.2.4** 各个性能等级螺栓的材料要满足最小抗拉应力  $f_u$ 、最小屈服应力  $f_y$  及一定的硬度值  $HR$ 。例如现行国家标准《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB 3098.1 的 4.8 级螺栓:  $f_u =$

400N/mm<sup>2</sup>、 $f_y = 320\text{N/mm}^2$  和  $HR = 70/95$ ; 5.8 级螺栓:  $f_u = 500\text{N/mm}^2$ 、 $f_y = 400\text{N/mm}^2$  和  $HR = 83/95$ ; 6.8 级螺栓:  $f_u = 600\text{N/mm}^2$ 、 $f_y = 480\text{N/mm}^2$  和  $HR = 89/99$  等。它们的保证应力分别是 310N/mm<sup>2</sup>、380N/mm<sup>2</sup> 和 440N/mm<sup>2</sup>。按照现行国家标准《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB 3098.1 的规定,螺栓的直径暂按照不大于 39mm 考虑,直径大于 39mm 的螺栓可参照采用。

钢材设计值参考现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017。

## 11 杆塔结构

### 11.1 基本计算规定

11.1.1~11.1.3 这三条规定根据现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 确定。

### 11.2 承载能力和正常使用极限状态计算表达式

11.2.1 承载力极限状态设计表达式是根据现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 规定的有关原则确定的。

现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 规定建筑结构设计时,要根据结构破坏可能产生的后果(危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等)的严重性,采用不同的安全等级。建筑结构安全等级的划分符合表 55 的要求,结构构件承载力极限状态的可靠指标不小于表 56 的规定。

表 55 建筑结构的安全等级

安全等级	破坏后果	建筑物类型
一级	很严重	重要的
二级	严重	一般的
三级	不严重	次要的

表 56 结构构件承载力极限状态的可靠指标

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2



基于最小设计风速  $30\text{m/s}$  (离地高  $20\text{m}$ ) 设计的  $500\text{kV}$  线路杆塔结构构件按当量正态化法(JC 法)计算的可靠度指标  $\beta \geq 3.2$ , 已满足现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 二级建筑物延性破坏可靠度指标的要求,  $500\text{kV}$  线路多年来的运行实践表明其可靠度是可接受的, 没有频繁地出现产生很大社会影响的杆塔失效事故。

$\pm 800\text{kV}$  线路规划用作跨区域联网的骨干网架, 其输送容量为  $500\text{kV}$  线路的 2 倍~3 倍, 若杆塔失效, 造成的经济损失、社会影响等都将很严重, 由此,  $\pm 800\text{kV}$  线路杆塔的安全等级要较  $500\text{kV}$  线路提高一个安全等级, 即要按一级安全等级考虑。

现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 规定结构重要性系数  $\gamma$ 。要按结构构件的安全等级、设计使用年限并考虑工程经验确定, 对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件, 不小于 1.1。

对日咨询可知, 日本特高压线路杆塔结构设计时构件强度留 10% 的裕度, 相当于重要性系数取 1.1。

结合国内已建线路倒塔事故发生的原因, 主要发生在运行情况下的风及覆冰超过设计值, 而对于安装情况发生倒塔事故的概率极小, 结构重要性系数取 1.1, 相当于将所有荷载提高 10%, 对于安装工况, 从国内的实际情况以及国内 6 万多公里线路的设计和施工经验来看, 没有必要进行再提高。因此,  $\pm 800\text{kV}$  线路各类杆塔除安装工况取  $\gamma_0 = 1.0$  外, 其他工况取  $\gamma_0 = 1.1$ 。

**11.2.2** 与正常使用极限状态有关的荷载效是根据荷载标准值确定的。

**11.2.3** 本条是根据现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 和《电力设施抗震设计规范》GB 50260 的有关规定和线路杆塔结构的特点制订的。  $S_{GE}$  为永久荷载代表值, 按照现行国家

标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 确定。

### 11.3 杆塔结构基本规定

**11.3.1** 杆塔挠度由荷载、施工和长期运行等原因产生,而从设计上只能控制由荷载引起的挠度值。计算挠度限值的确定原则是使常用的杆塔结构尺寸在荷载的长期效应组合作用下一般能满足要求。

**11.3.2** 本条是按我国杆塔设计经验并参照美国土木工程师学会标准《输电铁塔设计导则》ASCE 10—97 确定的。实际工程中塔身斜材长细比的较大时,由于刚度较弱会引起自重下垂变形,故参照 ASCE 10—97 将一般受压材的最大允许长细比定为 200。

**11.3.3** 大量工程实践证明,热浸镀锌工艺是铁塔构件防腐的有效措施。当选用其他防腐措施时,要有足够资料证明其防腐性能不低于热浸镀锌工艺方可采用。

**11.3.4** 铁塔的连接螺栓螺纹进入剪切面,不仅降低螺栓的承载力,而且大量螺栓进入剪切面还影响铁塔的变形。因此,设计时使螺纹不进入剪切面。

**11.3.5** 运行部门如无特殊要求,一般可在地面以上 8m 高度范围内的塔腿的连接螺栓采取防卸措施。

## 12 基 础

**12.0.1** 近年来,各单位的基础选用经验日益丰富,选用的基础形式也逐渐增多,但是原状土掏挖基础、现浇钢筋混凝土基础和混凝土基础仍然是主要的基础形式。

**1** 原状土基础能充分发挥原状土的承载性能,承载力大、变形小,用料省。目前,环保要求越来越高,原状土基础对环境的破坏较小,比较符合绿色工程的理念。现浇钢筋混凝土基础或混凝土基础具有较好的经济性和成熟的施工经验,使用范围也较广。近年来,斜掏挖基础和带翼板的掏挖基础也开始在工程中应用起来,并进行了现场试验,其应用前景值得关注。

**3** 工程中已经普遍采用了全方位长短腿铁塔,为了保护环境,基础设计时需要在基础形式和基面设计方面多做优化工作,尽量采用合理的基础形式,尽可能少开挖或不开挖基面。

**12.0.3** 公式 12.0.3 中的基础上拔或倾覆外力设计值  $T_E$ ,对可变荷载计入了荷载分项系数 1.4,对永久荷载计入了荷载分项系数 1.2 或者 1.0,土壤分类与现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 相一致。

**12.0.4** 根据杆塔的风荷载(可变荷载)为主的特点,经过测算,基础底面压力极限状态公式 12.0.4-1、公式 12.0.4-2 右端项需除以 0.75(相当于乘以 1.33)后才能保持基础下压按极限状态设计法设计的基础底面尺寸与按容许应力法设计基本上相衔接。仅根据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 将地基承载力设计值改为地基承载力特征值。

**12.0.5** 根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002 第 3.5.3 条和 4.1.2 条综合考虑制定。

**12.0.6** 线路沿线岩石地基的岩性和完整程度通常存在较大差异。由于在线路勘测期间工程地质人员野外对岩石地基的鉴别存在局限性,所以,对配置岩石基础的杆塔位,在基坑开挖后要进行鉴定。条文中强调了要对岩石逐基鉴定,保证设计的岩石基础安全、可靠,这也是对选择合适基础形式、正确取定计算参数的验证。

**12.0.7** 在季节性冻土地区,其标准冻结深度可由地质资料提出,除按条文中规定的标准确定外,也可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的规定确定。多年冻土地区所涉及的区域较少,这里不做详细规定。

**12.0.9** 根据以往工程实践经验提出。防治措施可参照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 和《电力设施抗震设计规范》GB 50260。

**12.0.10** 转角塔、终端塔的预偏要根据杆塔结构的变形和基础设计时地基出现的变形综合考虑确定,或根据工程设计、施工、运行经验确定。

## 13 对地距离及交叉跨越

**13.0.1** 导线与地面、建筑物、树木、铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路的垂直距离是按最高气温或覆冰情况求得的最大弧垂计算的。

(1)重覆冰区的线路,由于严重的冰过载或不均匀覆冰和验算覆冰使导线弧垂增大,对跨越物或地面的间距减小,造成人身触电伤亡,导线烧伤、线路跳闸等事故。为此,重覆冰区的线路还要计算导线不均匀覆冰和验算覆冰情况下的弧垂增大。

(2)为解决架线过程中,由于设计和施工的误差而引起导线对地距离的减少,一般采用在定位过程预留“裕度”的方法来补偿。

在输电线路的设计和施工过程中,由于技术上和设备工具上的原因,往往使计算所得的导线弧垂数值与竣工后的数值之间存在着一定的差距。其产生的原因有测量误差、定位误差和施工误差三种情况。因此,杆塔定位时要考虑“导线弧垂误差裕度”。

(3)大跨越的导线,其截面往往是按发热条件确定的。导线允许温度远大于本条规定的一般线路的数值,而且大跨越在线路中的地位又比较重要,因此为考虑电流过热引起弧垂增大的影响,故补充规定了在大跨越段,确定导线至地面、建筑物、树木、铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路的距离,按导线实际能够达到的最高温度计算最大弧垂。

验算覆冰条件、导线最高温度及导线覆冰不均匀情况下对被交叉跨越物的间隙距离按操作过电压间隙校验。

**13.0.2** 本条为强制性条文,必须严格执行。说明如下:

(1)电场和离子流密度的限值选择。控制高压直流线路的电场和离子流密度关系到线路附近居民的人身安全问题。同时也为了减小其生物效应,即对输电线下人体和牲畜的静电感应影响,以及可能出现的稳态电击和暂态电击现象。对于特高压直流线路,其电场效应问题更加突出。

按照第 5.0.4 条规定 $\pm 800\text{kV}$  直流输电线路地面合成电场在晴天时不超过  $30\text{kV/m}$ ,雨天时不超过  $36\text{kV/m}$ 。最大离子流密度限值晴天不超过  $100\text{nA/m}^2$ ,雨天不超过  $150\text{nA/m}^2$ 。

(2)邻近民房的地面场强。

对人的影响实质上是合成场强,标称场强只是其中的一部分,因此,直流线路电场对人的影响应该以合成场强衡量。从前苏联和我国直流线路的运行经验看,地面合成场强没有必要小于  $10\text{kV/m}$ ,从美国和前苏联的规定看,不应大于  $15\text{kV/m}$ 。我国在原行业标准《高压直流架空送电线路技术导则》DL/T 436—1991 (以下简称“原导则”)中规定“邻近民房的地面标称场强限值为  $3\text{kV/m}$ ”,而在新出版的《高压直流架空送电线路技术导则》DL/T 436—2005 中已改为“民房所在地面未畸变合成场强应不超过  $15\text{kV/m}$ (对应于湿导线)”。

原导则是在建设葛上直流工程时确定的,当时中国电力科学研究院对直流合成电场对人的影响进行过大量的试验研究,在晴天,当地面合成电场到达  $11\text{kV/m}$  时,人在该电场下打伞,手触摸金属柄,会感受到明显但比较轻微的暂态电击;在雨天,同一地点的地面合成电场达到约  $15\text{kV/m}$ ,暂态电击更强烈,具有刺痛感。随着电场增加,暂态电击程度也增加。为了防止人在民房所在地打伞时出现较强的暂态电击,民房所在地面的合成电场不超过  $15\text{kV/m}$ (对应于湿导线)。由于合成电场不好计算,而以合成电场对应的标称电场作为限值,便于设计,所以对应葛上直流线路采用的导线为  $4 \times 300\text{mm}^2$ ,取导线对地最小距离为  $12.5\text{m}$ ,晴天

11kV/m(或雨天 15kV/m)地面合成电场对应的标称电场约为 3kV/m。所以原导则对应当时的设计条件,取邻近民房的地面标称场强限值为 3kV/m 是合适的。

直流输电线路的合成电场与标称电场之间的量值关系与所采用的导线有关。如果导线电压、导线分裂数、分裂间距和导线对地距离一样,子导线直径越大,导线表面电场越小,空间电荷产生的电场在合成场强中占有的比例就较小,地面的合成电场也越小。当在以后的直流工程中,导线为  $4 \times 720\text{mm}^2$ ,导线对地距离为 12.5m 时,地面标称电场为 3kV/m 时,对应的合成电场只有 4.5kV/m $\sim$ 7kV/m,比葛上直流的合成场 11kV/m(或雨天 15kV/m)小很多。所以,对采用不同导线的直流线路,都采用同一量值的标称电场作为限值,并不能反映实际合成场的情况。对人的影响实际上是合成场强,标称场强只是合成场强的一部分,因此,直流输电线路的电场对人的影响原则要以合成电场衡量。

从前苏联的规定和我国直流线路运行经验看,直流线路临近民房时,地面合成场强不小于 10kV/m。同时我国为慎重确定直流线路临近民房所在地面的合成电场的限值,在 2005 年 7 月,中国电力科学研究院会同湖北超高压局武汉分局,组织了老中青男女人员,在直流输电线路下进行了感受试验。试验中人处在的地面合成场强的范围为 6.1kV/m $\sim$ 15.1kV/m。人体试验方式为:人触摸接地金属、人打伞触摸金属柄和人触摸架设在空中对地绝缘的 13m 长金属线时的感受。感受结果为:①穿普通鞋的人触摸接地金属体时无感觉;穿电工绝缘鞋的人触摸接地金属体时,在 15kV/m 的场强下时有明显但轻微的暂态电击感觉,在小于 12kV/m 的场强下无感觉。②人触摸架设在空中对地绝缘的 13m 长金属线时无感觉。③人打伞触摸金属柄,在地面合成电场小于 9.6kV/m 时无感觉;在地面合成电场为 11kV/m $\sim$ 13kV/m 时有明显但轻微的暂态电击感觉;在地面合成电场为 14.6kV/m $\sim$

15.1kV/m 时,放电很明显,放电声较大,有明显刺痛感,与人在干燥的地板上走动后再触摸水龙头的感觉类似。同时这与葛上直流工程时所做的感受试验一致。

目前在国家环保总局组织的专家评审中,经过多方分析讨论,专家认为要充分考虑减少电击对人造成的不适或不快感,按 80% 测量值不超过 15kV/m 考虑,这样符合一般合格评定的规则,与无线电干扰限值的意义也一致。本研究接受了专家的意见,修改合成场强为以 25kV/m(晴天)作为邻近民房的最大合成场强,同时满足 80% 测量值不超过 15kV/m 为控制指标。最大离子流密度限值晴天不超过  $100\text{nA/m}^2$ ,雨天不超过  $150\text{nA/m}^2$ 。

关于 80% 值和 50% 值,假设测量数据为 100 组,将测量结果按照由小到大的顺序排列,第 81(或 51)个数值,即 80%(或 50%) 测量值,此时小于或等于 15kV/m 为满足要求。对于因 80% 和 50% 的差距可能带来的问题,建议在监测方法中以规定风向和更小的风速来解决。

### (3) 对地最小间隙距离。

$\pm 800\text{kV}$  直流输电线路导线对地面的距离除要考虑正常的绝缘水平外,还应考虑静电场强、合成场强的影响。线路设计中采用的各种对地及交叉跨越间隙值,按其取值原则,可分为三大类:①由电场强度决定的距离;②由电气绝缘强度决定的距离;③由其他因素决定的距离。

第三类距离主要是为避免输电线路与其他部门设施之间的影响,如车辆行驶时电力线杆塔对司机视线的阻挡、电力线倒塔时对其他设施造成危害等,在现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545 中,其取值大多与电压等级无关,相关部门亦已认可,故基本上沿用该规范的值。个别与电压等级相关的距离,按各电压等级取值的级差递增取值。

#### 1) 居民区、非居民区最小对地距离取值。



±800kV 直流输电线路导线对地面的距离主要由电场效应决定,按公众及交通工具可能到达的频繁程度分类的。在不同的分类场所,有不同的场强要求和标准,还要注意到人们在线路走廊内从事农业劳动时,在各个地方停留的机会是均等的,不可能全部集中在高场强的地方。在考虑输电线下最大场强限值时要综合考虑最大地面场强出现的概率、设计时对地距离的裕度等因素。

根据国内外直流超高压、特高压输电线路下电场限制值的研究成果,确定直流特高压架空输电线路下地面处电场强度、离子流密度控制值取值如下:

①对于一般非居民地区(如跨越农田),合成场强限定在雨天 36kV/m,晴天 30kV/m,离子流密度限定在雨天 150nA/m<sup>2</sup>,晴天 100nA/m<sup>2</sup>。

②对于居民区,合成场强限定在雨天 30kV/m,晴天 25kV/m,离子流密度限定在雨天 100nA/m<sup>2</sup>,晴天 80nA/m<sup>2</sup>。

③对于人烟稀少的非农业耕作地区,合成场强限定在雨天 42kV/m,晴天 35kV/m,离子流密度限定在雨天 180nA/m<sup>2</sup>,晴天 150nA/m<sup>2</sup>。

根据上述原则,对云南—广东±800kV 直流线路导线最大表面电位梯度、静电场强、合成场强及离子流密度计算结果见表 57。

综合考虑以上各种因素,结合最小对地距离计算结果,确定的导线最小对地距离如表 58。

本规范由场强控制的对地及交叉跨越距离是按 630/45 导线计算确定的,当导线型号变化时,相关数值可根据计算结果调整。

当海拔高度超过 1000m,每增加 1000m 海拔高度,线路对地距离增加 6% 的距离。目前已建和在建工程均位于南方雨水充沛地区,如线路经过北方的灰尘严重地区时,线路对地距离还需至少增加 1m 以上,经过干燥地区时,线路对地距离还需适当增加。

表 57 云南—广东±800kV 直流线路导线最大表面电位梯度、静电场强、合成场强及离子流密度结果

项目	极间距 (m)	分裂间距 (cm)	离地高 (m)	电压 (kV)	起晕梯度 (kV/cm)	子导线直径 (cm)	分裂数	分裂导线直径 (cm)	等效直径 (cm)	最大表面电位梯度 $G_{max}$ (kV/m)	静电场强 $E_e$ (kV/m)	合成场强 $E(X)$ (kV/m)	离子流密度 $J(X)$ (nA/m <sup>2</sup> )	备注	导线型号
I 串	30	45.0	21.5	800.0	14.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	22.8531	-11.96	-28.763	-65.07	雨天	630/45
	30	45.0	18.5	800.0	14.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	23.1489	-15.20	-35.412	-116.98	雨天	630/45
	30	45.0	17.0	800.0	14.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	23.3451	-17.33	-40.129	-165.42	雨天	630/45
	30	45.0	21.5	800.0	18.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	22.8531	-11.96	-22.191	-41.77	晴天	630/45
	30	45.0	18.5	800.0	18.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	23.1489	-15.21	-27.713	-77.09	晴天	630/45
	30	45.0	17.0	800.0	18.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	23.3451	-17.33	-31.628	-108.24	晴天	630/45
V 串	22	45.0	21.0	800.0	14.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.1789	-10.81	-29.217	-72.59	雨天	630/45
	22	45.0	18.0	800.0	14.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.4053	-14.104	-35.48	-116.68	雨天	630/45
	22	45.0	16.0	800.0	14.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.622	-17.16	-41.357	-171.06	雨天	630/45
	22	45.0	21.0	800.0	18.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.1789	-10.81	-22.883	-50.13	晴天	630/45
	22	45.0	18.0	800.0	18.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.4603	-14.104	-28.33	-81.84	晴天	630/45
	22	45.0	16.0	800.0	18.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.622	-17.16	-33.482	-121.14	晴天	630/45

表 58 ±800kV 线路导线最小对地距离(m)

地区 \ 塔型	水平 V 串	水平 I 串
居民区	21	21.5
一般非居民地区(如跨越农田)	18.0	18.5
人烟稀少的非农业耕作地区	16	17

## 2) 交通困难地区最小对地距离。

超高压输电线路在交通困难地区、步行可达和不可达到山坡的最小对地距离均按操作过电压的放电间隙,再根据人体的高度、物体的高度,并考虑一定的裕度而决定。

交通困难地区是指车辆不能达到的地区,该类地区的超高压线路最小对地距离的确定是取人、畜及携带物总高加上操作过电压间隙和裕度。我国现行的线路设计技术规程中 500kV 和 750kV 线路,人、畜及携带物总高按 3.5m 考虑、裕度按 2.0m 考虑。500kV 线路操作过电压间隙取 3.0m,交通困难地区导线最小对地距离取 8.5m;750kV 线路操作过电压间隙取 4.7m,该项最小对地距离为 10.2m 取 11m(对地距离 11m 时,地面最大电场强度为 16.5kV/m)。

1000kV 特高压输电线路操作过电压间隙取 6.5m,交通困难地区最小对地距离仅为 12.0m,相应的地面最大电场强度将超过 20kV/m,显然,该项对地距离的选取应该进行电场强度校核。

前苏联规定交通困难地区的电场强度限制值为 20kV/m,我国超高压输电线路在此类地区没有规定场强限值。有资料显示,电场强度在 18kV/m~20kV/m 电场下时,湿润牧场放牧的奶牛并无反常行为;线路下和附近的乔木超过一定高度,树木端部会出现烧伤,引起植物端部烧伤的电场强度要在 20kV/m 以上,且这

种现象与电压等级并没有直接关系。

1000kV 特高压输电线路在交通困难地区,地面最大电场强度按 18kV/m 左右控制,对地距离约需 14.5m,推荐取 15m。

±800kV 直流输电线路最大操作过电压间隙取 7.5m,交通困难地区对地最小距离为 13m,地面最大静电场强也超过 20kV/m。±800kV 直流线路在交通困难地区地面最大场强取 20kV/m,地面合成场强取雨天 46kV/m,晴天 38kV/m,则 V 串情况下对地距离约为 15m,I 串情况下约为 15.5m,推荐取 15.5m。

我国超高压线路在经过步行可达到的山坡时,导线的净空距离是考虑人在放牧时挥鞭对导线的接近,再留有 2m 的裕度,取和交通困难地区相同的数值(500kV 线路取 8.5m,750kV 线路取 11m);对于步行不可达到的山坡、峭壁、岩石的净空距离,仅考虑操作过电压间隙加裕度,500kV 线路取 6.5m,750kV 线路取 8.5m。

1000kV 特高压输电线路仍按此原则考虑,对于步行可达到的山坡,导线风偏后的净空距离推荐 12m;对于步行不可达到的山坡、峭壁、岩石,导线风偏后的净空距离推荐 10m。

±800kV 特高压直流输电线路仍按此原则考虑,对于步行可达到的山坡,导线风偏后的净空距离推荐 13m;即操作过电压间隙 7.5m,加人、畜及携带物总高按 3.5m 考虑、加裕度 2.0m;对于步行不可达到的山坡、峭壁、岩石,导线风偏后的净空距离推荐 11m。

经初步估算,对于一般钢芯铝绞线,在基本气象条件(风速为 30m/s)下,导线的风偏角约为  $40^\circ$ ,当地面坡度为  $30^\circ$ ,导线风偏后的净空距离满足 11m 时,导线静止时对山坡的距离将大于 14m,垂直距离大于 15.5m,采用 V 串情况下,其地面静电场小于 20kV/m,地面最大合成电场强度雨天小于 46kV/m,晴天小于 38kV/m,采用 I 串情况下,其地面静电场小于 20kV/m,地面最大合成电场强度雨天小于 46kV/m,晴天小于 38kV/m。因此,取该

距离值应该是安全的,此对地距离值应用于云广工程中。具体取值见表 59。

**表 59    ±800kV 线路在交通困难地区、步行可达和不可达到  
山坡的最小对地距离(m)**

线路经过地区	最小(净空)距离	备 注
交通困难地区	15.5	最大弧垂
步行可以到达的山坡	13.0	最大风偏
步行不能到达的山坡、峭壁和岩石	11.0	最大风偏

而在向上、锦苏特高压直流工程中,对于±800kV 直流输电线路在交通困难地区,按操作过电压间隙控制的距离为 13m;对其电场效应即静电场强限定在 18kV/m,合成场强限定在雨天 42kV/m,晴天 35kV/m,则 V 串情况下,对地距离约需 16m,I 串情况下,对地距离约需 17m,推荐取 17m。对于向上、锦苏特高压直流工程实际应用中是按 17m 取值。

对于导线对交通困难地区的对地垂直距离控制值在不同工程中采用了不同值,主要是对地控制的静电场值不同,云广按 20kV/m、向上锦苏按 18kV/m 控制。但实际过程这些值均不控制。

**13.0.3** 本条为强制性条文,必须严格执行。线路邻近民房,民房所在地面湿导线情况下未畸变合成电场应不超过 15kV/m。

**13.0.4** 本条说明如下:

**1** 导线与建筑物之间的最小垂直距离。±800kV 线路不能跨越经常住人或屋顶为燃烧材料的建筑物,对于非长期住人的耐火屋顶的建筑物,在取得有关方面同意时可以跨越。导线与建筑物之间的最小垂直距离,从电场强度来看,可采用交通困难地区的标准。220kV~500kV 级线路均在交通困难地区对地距离的基础上再增加 0.5m,±800kV 线路在交通困难地区的对地距离为 15.5m,在此基础上再增加 0.5m,取为 16m。在向上、锦苏工程中

则按此原则计算,取 17.5m。若所跨越的建筑物为非长期住人建筑,尚应满足房屋所在位置地面处湿导线合成场强 15kV/m 控制要求。

2 导线在最大计算风偏时对建筑物的最小净空距离。前苏联规程规定,在导线最大风偏下,架空线路边导线至各建筑物及构筑物最近的突出部分的水平距离,750kV~1150kV 线路取值为 15m。

国内 500kV 及 750kV 最大风偏时净距按跨越建筑物时的垂直距离减去 0.5m。考虑导线的最大计算风偏仅是短时性的,1000kV 线路按此原则执行,按跨越时的垂直距离减去 0.5m,取为 15m,与前苏联规程基本一致。

±800kV 线路按此原则执行,按跨越时的垂直距离减去 0.5m,取为 15.5m。向上、锦苏工程按此原则计算则为 17m。

3 边导线与建筑物之间的水平距离。在无风情况下,边导线需对建筑物保持一定的水平间隔。参考现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》GB 50545 的规定,500kV 取值 5m,750kV 线路取为 6.5m。1000kV 线路取 7m。±800kV 线路按 1000kV 线路推荐取 7m。

**13.0.5** 随着社会环保意识的不断加强,±800kV 特高压线路在跨越林木、植被覆盖等方面,要采取高垮和砍伐相结合,更好的保护生态环境。

观察发现,植物和动物对线路下的电场有很大的适应能力。线路走廊中生长的农作物,受电场的刺激,一般生长得高大,果实数量与无电场作用地区没有差别,甚至有所提高。8kV/m~12kV/m 线路下生长的果树,受电场的作用使果实的质量提高。线路下和附近的乔木超过一定高度,树木端部会出现烧伤,测量表明,引起植物端部烧伤的电场强度在 20kV/m 以上,这种现象与电压等级并没有直接关系,美国、前苏联等国家均在 500kV、750(765)kV 线路走廊内观察到类似的植物端部烧伤的现象。

## 1 导线与林区树木之间的垂直距离。

我国 500kV 线路与树木的最小垂距,目前采用的数值大部分地区为 7.5m,华北地区多为 7m,广东地区多为 6.5m。线路与树木的净空距离,大部分地区 7m,华北、广东为 6.5m。线路与果树、经济作物的距离;大部分地区 6.5m,华北 8.5m,广东 6m。

加拿大安大略水电局《输电线路设计标准》规定:在导线最大弧垂或最大风偏时,导线与树木的任一部分之间的最小距离,对 345kV 和 500kV 线路为 4m~6m。

前苏联规定:在公园、自然保护区、绿化区、居民点四周、贵重林区,水域、铁路和公路的防护林带的线路通道宽度要按导线最大偏斜时到树冠的距离来确定。对 330kV~500kV 线路,水平距离不小于 5m;750kV 线路,水平距离不小于 6m;1150kV 和  $\pm 750$ kV 线路,水平距离不小于 8m。

日本《架空送电规程》规定:500kV 与植物的最小垂直距离为 7.28m。

考虑树木超高生长,若不能及时砍伐可能导致对地放电,导线与林区树木之间的垂直距离需有较大的裕度。110kV~330kV 线路一般取为最大过电压间隙加上约 3m 的裕度,早期 500kV 线路最大过电压间隙为 3.8m,按此计算并归整为 7m,在建设过程中,各地实际取值为 6.5m~7.5m,现行规程统一为在导线最大弧垂或最大风偏时,导线与树木(包括果树、经济作物林、城市行道树等)的最小距离为 7m。750kV 线路按最大过电压间隙加上 3.5m 裕度,取为 8.5m。

1000kV 线路按最大操作过电压间隙 7m 加上 3.5m 裕度,取为 10.5m 时,校核电场强度大于 20kV/m,容易引起树木端部烧伤,因此按场强 20kV/m 以下控制进行校核,1000kV 线路(单回路,以下同此)导线对树木最小垂直距离取值 14m。

$\pm 800$ kV 线路导线对树木最小垂直距离可按操作过电压间隙 7.5m 加上 3.5m 裕度,取为 11m。校核电场强度见表 60。

表 60 导线至树顶距离计算结果 (m)

场强 \ 塔型	水平 V 串	水平 I 串	备注
静电场强 18kV/m, 合成场强雨天 42kV/m、 晴天 35kV/m	16.0	17	导线 6×630 分裂间距 450mm
静电场强 22kV/m, 合成场强雨天 50kV/m、 晴天 42kV/m	14.0	15	
静电场强 27kV/m, 合成场强雨天 60kV/m、 晴天 52kV/m	12.5	13.5	

由表 60, 按合成场强雨天 60kV/m, 晴天 52kV/m 取值, ±800kV 线路导线对树木最小垂直距离取 13.5m。

3 导线最大风偏时与公园、绿化区、防护林带树木之间的净空距离。考虑最大风偏的短时性, 110kV~330kV 线路均在上述垂直距离的基础上减少 0.5m, 特高压线路由于原有导线与树木的垂直距离值较大, 考虑风偏的短时性, ±800kV 线路的该项距离取为 10.5m。

4 导线与果树、经济作物、城市绿化灌木及街道树之间的垂直距离。该类树木超高生长的可能性很少, 但考虑该类树木人接触的机会较多, 且大多采用跨越方案, 故在跨越一般树木的取值基础上适当增加安全裕度。1000kV 线路在跨越一般树木的取值基础 14m 上适当增加 2m 取为 16m。

±800kV 线路按静电场强 22kV/m, 合成场强雨天 50kV/m, 晴天 42kV/m 取值, 导线对果树、经济作物、城市绿化灌木及街道树之间最小垂直距离取 15m。

**13.0.6** 本条文是按《架空输电线路与弱电线路接近和交叉装置规程》中有关规定而编制的。

**13.0.7** 现行国家标准《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》



GB 50545—2010 规定输电线路与甲类火灾危险性的生产厂房、甲类物品库房、易燃、易爆材料堆场以及可燃或易燃、易爆液(气)体储罐的防火间距,不小于杆塔高度加 3m。根据现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 的要求,作以下补充和修改。

(1)散发可燃气体的甲类生产厂房如与明火接近,有可能发生燃烧或爆炸。考虑到输电线路运行过程有可能产生电弧或火花,为安全起见,参照《建筑设计防火规范》GB 50016 的要求,输电线路与散发可燃气体的甲类生产厂房的防火间距还应大于 30m 的要求。

(2)关于输电线路与爆炸物的接近距离,按照爆炸物的布置方式(开口布置或闭口布置)有不同的要求,设计时可参考有关专业规范。

以上规定,均是针对输电线路事故时不致危及接近的易燃易爆场所。但在输电线路设计中,往往还要考虑易燃易爆物事故时,不危及线路的安全运行。如果有此需要,可参照有关专业规范或与有关单位协商解决。

**13.0.8** 输电线路与管道在平行接近距离很长时,需要按线路的参数和管道的特性具体分析计算,确定是否需要采用特殊的防护措施。

**13.0.9** 输电线路对各种交叉跨越物的距离,其取值原则由电场强度、电气绝缘间隙以及其他因素决定。输电线路与交叉跨越物的水平距离主要是为了避免输电线路对其他部门设施产生影响,如车辆行驶时电力线杆塔对司机视线的阻挡、电力线倒塔时对其他设施造成危害等。在现行线路设计规程中,其取值大多与电压等级无关,相关部门亦已认可,个别与电压等级相关的距离,按各电压等级取值的级差递增取值。本条第 1 款为强制性条款,必须严格执行。

(1)导线对公路交叉跨越距离。

1)导线对公路路面的最小垂直距离。我国在第一批 500kV

线路设计时,控制地面场强小于  $9\text{kV/m}$ ,线下大型车辆感应的短路电流不超过  $5\text{mA}$ 。考虑以后车辆尺寸还可能增大,以及降低电击的影响,我国  $500\text{kV}$  线路跨越公路的场强标准控制在  $7\text{kV/m}$ 。前苏联的场强限值较高,场强标准控制在  $10\text{kV/m}$ ,但规定交叉公路处不允许运输车辆停留。美国则是控制人接触线下大型车辆时,通过人体的放电电流不超过  $5\text{mA}$ 。考虑我国的实际情况,很难限制运输车辆不在线下附近停留,故  $1000\text{kV}$  线路仍维持  $7\text{kV/m}$  的场强限值。各国不同电压等级对公路交叉垂直距离见表 61。

表 61 各国不同电压等级对公路交叉垂直距离

国别	额定电压(kV)	场所	场强限值(kV/m)	对地距离(m)
前苏联	1150	公路	—	21~22
前苏联	750	公路	10	16
前苏联	±750	公路	—	12.5
美国 AEP	765	一般公路	7	16.8
美国 AEP	765	高速公路	5~8	19.5
加拿大	735	公路	—	15.4
中国	500	公路	7	14
中国	750	公路	7	19.5
中国	1000	公路	7	27

±800kV 特高压直流输电线路跨越公路时导线对公路路面的距离,可按照居民区标准执行,即合成场强限定在雨天  $30\text{kV/m}$ ,晴天  $25\text{kV/m}$ ,离子流密度限定在雨天  $100\text{nA/m}^2$ ,晴天  $80\text{nA/m}^2$ 。水平 V 串导线对公路路面的距离为  $21\text{m}$ ,水平 I 串导线对公路路面的距离为  $21.5\text{m}$ ,推荐取值  $21.5\text{m}$ 。

因为直流输电线路最大负荷仅为额定负荷的  $110\%$ ,导线最大弧垂可按  $\pm 70^\circ\text{C}$  或按实际可能到达的温度计算。

2)交叉公路的最小水平距离。线路交叉一级及以下公路时,在开阔地区,铁塔基础外缘至路基边缘的最小水平距离现规程对

电压等级 110kV~500kV 均为 8m,750kV 线路取 10m。1000kV 特高压线路取 15m。 $\pm 800$ kV 特高压直流输电线路亦取值 15m。交叉高速公路时,最新公路法要求已大为提高,如广东、湖北等地要求 80m。因此, $\pm 800$ kV 特高压直流线路铁塔基础外缘至高速公路隔离栏的最小水平距离还需与公路部门协商,按协议要求取值。

3)与公路平行的水平距离。当线路与公路平行接近时,在开阔地区,电力线对公路的水平距离不小于最高杆塔高度。当线路位于路径受限制地区时,最小水平距离现行规程一般随电压等级升高而适当增大,1000kV 特高压线路按地面电场为 7kV/m,边导线至路基边缘最小水平距离取值为 15m 或按协议要求。

考虑到我国土地资源在经济发达地区的越发宝贵,电力线路杆塔外缘至路基边缘最小水平距离不宜太大。 $\pm 800$ kV 特高压直流输电线路,建议路径受限制地区边导线至路基边缘最小水平距离取 12m,则足以确保对行人及车辆的安全,或按协议要求。

## (2)导线对铁路交叉跨越距离。

1)导线至铁路轨顶的垂直距离。国外及我国 500kV 以上线路的规定见表 62。

表 62 各国不同电压等级对铁路交叉垂直距离

国别	电压等级 (kV)	至铁路轨顶的垂直距离 (m)	至接触网的垂直距离 (m)
前苏联	1150	17.5	14.5(网线、杆顶)
前苏联	750	12.0	10.0(网线、杆顶)
前苏联	$\pm 750$	13.0	10.5(网)、12.0(杆顶)
加拿大	735	13.7	—
中国	500	电气轨 16.0、标轨 14.0、窄轨 13.0	6.0(网)、8.5(杆顶)
中国	$\pm 500$	16.0	7.6(网)、8.5(杆顶)
中国	750	电气轨 21.5、标轨 19.5、窄轨 18.5	7.0(网)、10(杆顶)
中国	1000	电气轨及标轨 27.0、窄轨 26.0	16.0

考虑我国的实际情况,±800kV 线路至标准轨距铁路轨顶的最小垂直距离参照跨越公路即居民区的要求,合成场强限定在雨天 30kV/m,晴天 25kV/m,离子流密度限定在雨天 100nA/m<sup>2</sup>,晴天 80nA/m<sup>2</sup>。水平 V 串导线对标准轨距铁路轨顶的距离为 21m,水平 I 串导线对标准轨距铁路轨顶的距离为 21.5m,推荐取 21.5m。

导线至窄轨铁路轨顶的最小垂直距离比标准轨铁路可减少一些,我国现行线路设计规程中,一般均减少 1m。1000kV 特高压线路按相同取值,±800kV 线路也按相同取值。

跨越电气化铁路时,考虑其等级及重要性较高,500kV 线路的规定,导线至轨顶的最小垂直距离一般要求比非电气化铁路大一些,该项距离比标准轨铁路增加 2m。但±800kV 特高压直流线路跨越铁路时的对地距离由地面场强控制,最大电气间隙已有足够的安全裕度,因此不另外增加安全距离。

因此±800kV 特高压直流线路对标准轨距铁路及电气化铁路轨顶最小垂直距离取 21.5m,对窄轨铁路轨顶的最小垂直距离取 21.5m。

铁道部以铁建设函〔2009〕327 号文规定,导线至轨顶的垂直距离,非电气化铁路与电气化铁路取相同的标准,直流±800kV 不小于 21.5m,对于输电线路跨越拟建铁路处,有铁路架桥机作业情况发生时,直流±800kV 不小于 24m。

2)导线至电气化铁路承力索或接触线的垂直距离。电气化铁路供电电压约 30kV,铁路设计时,跨越铁路的天桥底部高度至接触线约 8m。即接触网的构造高度距轨面高度不超过 8m。±800kV 线路导线跨越电气化铁路承力索或接触线的垂直距离按最大电气间隙控制,操作过电压间隙取 7.5m,导线动态范围取 2m,裕度取 3m,推荐取 12.5m。

对于铁路承力索或接触线的塔顶最小垂直距离,为减少登杆维修人员受到的静电感应影响,降低杆塔顶的场强,需适当增大间

距。各电场强度下计算垂直距离见表 63。

表 63 导线至电气化铁路承力索或接触线杆塔顶的距离  
计算结果(m)

场强 \ 塔型	水平 V 串	水平 I 串	备注
静电场强 18kV/m, 合成场强 雨天 42kV/m、晴天 35kV/m	16.0	17.0	导线 6×630 分裂间距 450mm
静电场强 22kV/m, 合成场强 雨天 50kV/m、晴天 42kV/m	14.0	15.0	
静电场强 27kV/m, 合成场强 雨天 60kV/m、晴天 52kV/m	12.5	13.5	

由表 63 确定, ±800kV 对接触网塔顶的场强按合成场强雨天 50kV/m、晴天 42kV/m 控制, ±800kV 线路导线至电气化铁路承力索或接触线杆塔顶的垂直距离推荐取 15m。

3) 交叉铁路的最小水平距离。交叉铁路时, 铁塔基础外缘至轨道中心的最小水平距离现规程各级电压均为 30m, ±800kV 特高压直流线路因电压等级较高, 为提高安全运行可靠性建议最小水平距离提高到 40m 或按协议要求取值。

铁道部铁建设函〔2009〕327 号文规定, 线路交叉跨越铁路时, 杆塔外缘至轨道中心水平距离不小于塔高加 3.1m。当无法满足此要求时, 可适当减小距离, 但交流 1000kV 和直流 ±800kV 特高压线路不得小于 40m。

4) 与铁路平行的水平距离。铁道部铁建设函〔2009〕327 号文规定, 线路与铁路平行接近时, 杆塔外缘至轨道中心的水平距离不小于塔高加 3.1m, 困难时协商确定。

在路径受限制地段, 要控制 ±800kV 特高压直流线路与铁路的平行距离和长度, 并对每一交叉段和接近段进行验算, 以确定对铁路通信、信号和闭锁装置的干扰和危险影响。对电气化铁路, 要降低在铁路接触网的导线和承力索上所感应的电压。在导线最大

风偏情况下,架空线路的边导线至接触网导线的距离大于 45m,至非电气化铁路建筑物的距离大于 15m。

5)铁路其他规定。铁道部铁建设函〔2009〕327 号文规定,特高压输电线路跨越铁路处采取的加强措施有:

①基本风速、基本覆冰重现期按 100 年一遇设计。

②杆塔结构重要性系数取 1.1。

③跨越铁路时采用独立耐张段,跨越档导线、地线不得设置任何接头。

④一般情况下,不在铁路车站出站信号机以内跨越;当跨越拟建铁路桥梁地段,考虑铁路架桥机施工情况,不小于 24m。

⑤跨越时,交叉角不小于  $45^\circ$ 。困难情况下双方协商确定,但不得小于  $30^\circ$ 。

⑥为提高特高压线路的抗冰能力,跨越段需因地制宜,实行差异化设计。覆冰区段,导线最大设计验算覆冰厚度要比同区域常规线路增加 10mm,地线设计验算覆冰厚度增加 15mm。

⑦跨越段绝缘子串采用双挂点、双联“Ⅰ”串或“Ⅴ”串型式。

⑧导线最大弧垂温度按照相关国家标准执行,且不小于  $70^\circ\text{C}$ 。

⑨跨越铁路的特高压线路铁塔处要设置标志牌,标明电压等级、走廊宽度、轨顶的导线最低点高度、相对轨顶的设施限高、安全绝缘距离等信息。

(3)对电车道的交叉跨越距离。

1)与电车道路面及接触网的最小垂直距离。 $\pm 800\text{kV}$  特高压直流线路至电车道路面及接触网的最小垂直距离按照跨越电气化铁路的要求取值,即导线对电车道路面取 21.5m,导线对承力索或接触线杆塔顶取 15m。

2)交叉电车道的最小水平距离。线路交叉电车道时,在开阔地区,铁塔基础外缘至路基边缘的最小水平距离现规程对电压等级  $110\text{kV}\sim 500\text{kV}$  均为 8m,  $750\text{kV}$  线路取 10m,  $1000\text{kV}$  特高压交流线路和  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流线路均取 15m。

3)平行电车道的最小水平距离。当线路与电车道平行接近时,在开阔地区,电力线对电车道的水平距离不小于最高杆塔高度。当线路位于路径受限制地区时,最小水平距离现规程一般随电压等级升高而适当增大。 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路,按V串,对地18m时,离线路中心30m~40m处,地面合成场强晴天为 $16.73\text{kV/m} \sim 10.01\text{kV/m}$ ,雨天为 $21.6\text{kV/m} \sim 13.16\text{kV/m}$ ,考虑 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路杆塔根开在10m~18m,建议杆塔外缘至路基边缘最小水平距离取30m或按边导线至路基边缘最小水平距离取20m,并在导线最大风偏情况下,导线至电车道最近构件的距离不小于15m,以确保对行人及车辆的安全。

#### (4)导线对弱电线的交叉跨越距离。

1)导线对弱电线的最小垂直距离。由表13.0.9-1确定, $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流线路导线至弱电线的最小垂直距离可按合成场强雨天 $42\text{kV/m}$ 晴天 $35\text{kV/m}$ 控制,推荐取17m,较交叉铁路接触网杆顶的标准增加2m。

2)对弱电线的最小水平距离。现行国家标准《110kV~750kV架空输电线路设计规范》GB 50545规定110kV~750kV线路在开阔地区,线路与弱电线平行接近时,线路边导线至弱电线的最小水平距离不小于平行地段线路的最高杆塔高度。 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流线路暂建议照此执行。

现行国家标准《110kV~750kV架空输电线路设计规范》GB 50545规定在路径走廊受限制地区,边导线在最大风偏情况下对弱电线的水平距离,在500kV为8m,750kV取为10m。 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流线路取13m。

#### (5)导线对电力线的交叉跨越距离。

1)对电力线路导(地)线的最小垂直距离。前苏联规程规定,对环境空气温度为 $15^{\circ}\text{C}$ 时,1150kV、 $\pm 750\text{kV}$ 线路与电力线交叉跨越最小距离满足12m、11m要求时,被跨越档的电力线铁塔不需采用特殊防雷措施。

我国规程规定与电力线交叉跨越要根据最高气温情况或覆冰无风情况的最大弧垂进行校核,比前苏联规定更严格。

±800kV 特高压直流线路跨越电力线时,对导(地)线的最小垂直距离,按操作过电压间隙 7.5m,加上 3m 裕度,推荐取 10.5m (实际工程校核时,需另考虑导线动态范围)。

2)导线对电力线杆塔顶的垂直距离。±800kV 特高压直流线路导线对电力线杆塔顶的最小垂直距离可取交叉铁路接触网杆顶的标准及取值,推荐取 15m。

3)对电力线的最小水平距离。在开阔地区,线路电力线平行接近时,线路边导线至架空线边线最小水平距离不小于平行地段线路的最高杆塔高度。前苏联规定 1150kV 和 ±750kV 线路不小于 100m,主要是为降低停电检修线路的导线和地线上的感应电压,但这一问题可采取安全措施加以解决。

在路径受限制地区边导线在最大风偏情况下对其他电力线边线之间的水平距离,500kV 级为 13m,750kV 为 16m。1000kV 线路考虑相间过电压的差别,在 750kV 基础上增加 4m,取为 20m。±800kV 特高压直流线路导线在最大风偏情况下对其他电力线边线之间的水平距离取为 20m。

对路径狭窄地带,前苏联规定 1150kV 和 ±750kV 线路平行电力线在不偏斜时边导线之间距离不小于 30m,如果两线路杆塔位置交错排列,导线在最大风偏情况下,架空线路边导线至另一条平行的架空线路杆塔最近构件距离不小于 15m。±800kV 特高压直流线路对相邻线路杆塔在导线最大风偏情况下的最小水平距离取最大操作过电压间隙值,同时考虑杆塔在无风时上人检修,并留有适当预度,按步行可以到达山坡考虑,取 13m。

(6)对特殊管道的交叉跨越距离。

1)对特殊管道的最小垂直距离。特殊管道是架设在地面上输送易燃易爆物品的管道,导线对此类管道的最小垂直距离,前苏联 500kV 线路取值 6.5m,750kV 线路取值 12m,1150kV 取值



14.5m,  $\pm 750\text{kV}$  取值 10.5m; 我国 500kV 线路实际采用 7.5m 或按协议要求取值, 750kV 线路取为 9.5m 或按协议要求取值。1000kV 线路与跨越弱电线相同, 取为 18m。对于  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流线路, 建议与跨越弱电线相同, 取为 17m 或按协议要求取值。跨越索道可与跨越电力线相同, 取为 10.5m。

2) 对特殊管道的最小水平距离。前苏联的超特高压线路与地上天然气管道、石油管道、石油产品管道和载人索道交叉时的交叉角尽可能采取  $90^\circ$ 。金属管道和索道应该在同线路交叉的范围内接地, 而当 750kV 及以上架空线路同管道和索道平行架设和接近时, 在架空线路两侧距中心线各 100m 以内的地段也应该接地, 接地电阻不超过  $25\Omega$ 。

前苏联的超特高压线路与地上管道、索道交叉或接近距离见表 64, 与地下管道、索道交叉或接近距离见表 65。

表 64 前苏联的超特高压线路与地上管道、索道交叉或接近距离

交叉或接近特征	各级电压架空线路的最小距离(m)				
	330kV	500kV	750kV	1150kV	$\pm 750\text{kV}$
导线至管道、索道垂直距离	6.0	6.5	12.0	14.5	10.5
基础至管道、索道水平距离 (交叉、开阔地区)	杆塔高度				
基础至管道、索道水平距离 (交叉、受限地区)	6.0	6.5	15.0	15.0	15.0
接近时不偏斜边导线至主干 天然气管道水平距离	2 倍杆高, 但不能近于防护区边界				
同上, 至主干石油管道和石油 产品管道水平距离	50m, 但不小于杆塔高度				
同上, 至泥浆管道	30	30	40	40	40
同上, 在导线最大风偏时至其他 管道、索道任何部分	15	15	25	25	15

表 65 前苏联的超特高压线路与地下管道、索道交叉或接近距离

交叉或接近特征	各级电压架空线路的最小距离(m)				
	330kV	500kV	750kV	1150kV	±750kV
由不偏斜导线至压力在 1.2MPa 以上的主干天然气管道及石油管道的水平接近距离	30	30	40	55	55
同上,在路径受限地区,架空线路接地装置或基础至上述管道、索道的水平接近距离	15	15	25	25	25
架空线路接地装置或基础至压力在 1.2MPa 以下的主干天然气管道及主干天然气管道支线和主干石油管道及石油产品管道支线的水平距离	10	10	10*	10*	10*
同上,至各种不同用途管道	3.0	3.0	10*	10*	10*
架空线路中心线至安装在主干天然气管道上的排汽筏的距离	300	300	300	300	300

注:\* 只是在遇有交叉,且又同 750kV 及以上架空线路接近时,才要将管道敷设在防护区以外。

当直流超高压线路同地下管道接近时,要考虑对钢管道采取保护措施,以防止由于地中电流引起的腐蚀。预防地下管道腐蚀最有效的办法是采取阴极保护。

国内相关标准、规范主要内容如下:

① 中华人民共和国国家标准《城镇燃气设计规范》GB 50028—93(2002 年版)规定如下:

地下燃气管道与建、构筑物 and 相邻管道之间的水平净距大于 35kV 电杆(塔)的基础之间的水平净距不小于 5m。

地下燃气管道与交流电力线接地体的净距(m),220kV 铁塔或电杆接地体为 10m。

地下液态液化石油气管道与建、构筑物 and 相邻管道之间的水平净距,架空电力线(中心线)1 倍杆高(考虑倒杆影响),且不小于 10m(考虑电力线路运行时对液化石油气管道感应电位的影响)。

门站和储备站集中放散装置的放散管与站外建、构筑物的防火间距大于 380V 架空电力线 2.0 倍杆高。

液化石油气供应基地全压力式、全冷冻式储罐与基地外建、构筑物的防火间距,架空电力线(中心线)1.5 倍杆高,但 35kV 以上架空电力线要大于 40m。

②中华人民共和国国家标准《输油管道工程设计规范》GB 50253—2003 规定如下:

当埋地输油管道与架空电力线路平行敷设时,其距离要符合现行国家标准《66kV 及以下架空电力线路设计规范》GB 50061 及原行业标准《110 ~ 500kV 架空送电线路设计技术规程》DL/T 5092—1999 的规定。埋地液态液化石油气管道,其距离不小于上述标准中的规定外,且不小于 10m。

③中华人民共和国国家标准《石油和天然气工程设计防火规范》GB 50183—2004 规定如下:

石油天然气站场区域布置防火间距,35kV 以上架空电力线(中心线)1.5 倍杆高,且不小于 30m(液化石油气和天然气凝液站场不小于 40m)。

油气井与周围建(构)筑物、设施防火间距,35kV 以上及以下架空电力线(中心线)1.5 倍杆高。

埋地集输管道与其他地下管道、通信电缆、电力系统的各种接地装置等平行或交叉敷设时,其间距要符合现行国家标准《钢质管道及储罐腐蚀控制工程设计规范》SY 0007 的有关规定。

集输管道与架空输电线路平行敷设时,其安全距离要符合下列要求:

管道埋地敷设时,其安全距离不小于表 66 规定。

表 66

名 称	3kV 以下	3kV~10kV	35kV~66kV	110kV	220kV
开阔地区	最高杆(塔)高				
路径受限制地区(m)	1.5	2.0	4.0	4.0	5.0

注:1 表中距离为边导线至管道任何部分的水平距离。

2 对路径受限制地区的最小水平距离要求,需计及架空电力线路导线的最大风偏。

当管道地面敷设时,其间距不小于本段最高杆(塔)高度。

④《石油天然气管道保护条例》第 313 号国务院令规定如下:

第十五条 禁止任何单位和个人从事下列危及管道设施安全的活动:

(一)移动、拆除、损坏管道设施以及为保护管道设施安全而设置的标志、标识;

(二)在管道中心线两侧各 5 米范围内,取土、挖塘、修渠、修建养殖水场,排放腐蚀性物质,堆放大宗物资,采石、盖房、建温室、垒家畜棚圈、修筑其他建筑物、构筑物或者种植深根植物;

(三)在管道中心线两侧或者管道设施场区外各 50 米范围内,爆破、开山和修筑大型建筑物、构筑物工程;

(四)在埋地管道设施上方巡查便道上行驶机动车辆或者在地面管道设施、架空管道设施上行走;

(五)危害管道设施安全的其他行为。

第十六条 在管道中心线两侧各 50 米至 500 米范围内进行爆破的,应当事先征得管道企业同意,在采取安全保护措施后方可进行。

第二十三条 任何单位在管道设施安全保护范围内进行下列施工时,应当事先通知管道企业,并采取相应的保护措施:

(一)新建、改(扩)建铁路、公路、桥梁、河渠、架空电力线路;

(二)埋设地下电(光)缆;

(三)设置安全或者避雷接地体。

综合前苏联及我国相关规定,±800kV 直流架空线路对管道和索道交叉和接近距离规定如下:

在开阔地区,线路与特殊管道平行接近时,线路边导线至管道任何部分的最小水平距离不小于平行地段线路的最高杆塔高度。

在路径受限制地区,边导线在最大风偏情况下对特殊管道的水平距离,按步行可以到达山坡考虑并适当增加预度,取值为15m。

±800kV 直流架空线路对管道和索道最小水平距离见表 67。

表 67 ±800kV 直流架空线路对管道和索道最小水平距离

线路与管道和索道交叉或接近特征	最小(净空)距离(m)	备 注
交叉、开阔地区,基础至架空管道、索道水平距离	杆塔高度	
交叉、受限地区,基础至架空管道、索道水平距离	15.0	
平行,边导线至架空天然气管道	2 倍杆塔高度	无风时
平行,边导线至架空石油主管道	50,且不小于杆塔高度	无风时
平行,边导线至其他架空管道	15	最大风偏
平行,边导线至埋地油气主管道	55	无风时
平行或交叉,杆塔接地体或基础至埋地油气主管道	25	
线路中心线至天然气管道排气阀	300	

(7) 对河流的交叉跨越距离。

1)跨越河流的最小垂直距离。跨越河流时,我国 500kV 第一代线路设计标准:距通航河流 5 年一遇洪水位 10m;距最高船桅 6m。不通航河流:距 100 年一遇洪水位 7m;冬季至冰面 12m。目前第二代设计:全国大部分地区的设计距通航河流 5 年一遇洪水位 9.5m;距最高船桅:东北地区为 5.5m,其余地区多为 6m。对不通航河流距 100 年一遇洪水位,东北、华东地区为 6.5m;其余地区仍多为 7m。冬季至冰面:都按 11m 设计(三角排列铁塔取 10.5m)。

对通航河流日本规程未明确,但指出导线距水面的高度要保证船舶航行没有危险;苏联规程为 8m;加拿大规定取 8.85m。

根据上述情况,在跨越通航河流时,导线至五年一遇洪水水位的最小垂直距离参照我国 500kV 线路的要求首先考虑最大操作过电压间隙,考虑小型船只活动高度 3.5m,加裕度 3m,500kV 线路取 9.5m,750kV 线路取 11.5m。1000kV 线路考虑最大操作过电压 7m 加裕度 3m,取 10m,此时校核洪水面场强大于 20kV/m,为保证洪水面场强低于 20kV/m,最小交叉垂直距离要增加到 14m。

±800kV 特高压直流线路考虑最大操作过电压间隙 7.5m,考虑小型船只活动高度 3.5m,加裕度 3m,取 14m,此时校核洪水面场强静电场强—21.3kV/m,合成场强雨天—49.3kV/m 晴天—40.5kV/m。

±800kV 特高压直流线路导线对洪水面的场强按合成场强雨天 50kV/m 晴天 42kV/m 控制,推荐取为 15m。

导线至最高航行水位的最高船桅顶的最小垂直距离按导线最大操作过电压间隙 7.5m 加上 3m 裕度,取为 10.5m。

跨越不通航河流时,导线至百年一遇洪水水位的最小垂直距离 750kV 线路取为 8m,1000kV 取值 10m。±800kV 特高压直流线路考虑最大操作过电压间隙 7.5m,考虑漂浮物高度 2m,加裕度 3m,取值 12.5m。

冬季导线至冰面的最小垂直距离按非居民区的要求,导线水平 V 串排列取为 18.0m,导线水平 I 串排列取 18.5m。

最高洪水水位时,有抢险船只航行的河流,垂直距离要通过协商确定。

2)与河流平行的水平距离。当线路与沿河流的拉纤小路平行时,边导线至斜坡上缘的最小水平距离按现规程取为最高杆塔高度。

(8)±800kV 直流架空线路尽量远离低压用电线路和通信线路,必要时,通信线路要采取防护措施,受静电感应影响电压可能异常升高的人户低压线路需给予必要的处理。

(9)±800kV 直流架空线路走廊内受静电感应可能带电的金属物应予以接地。

## 14 环 境 保 护

**14.0.1~14.0.4** 本章条文要求输电线路设计要符合环境保护和水土保持国家现行有关标准的要求,强调对电磁干扰采取的防治措施,并对输电线路环境影响进行评价。

输电线路环境影响评价采用的手段与方法所涉及的标准和规范主要有:

(1)《声环境质量标准》GB 3096—2008 中对环境噪声测量方法的规定。

(2)《环境影响评价技术导则 声环境》HJ/T 2.4—2009。

(3)《环境影响评价技术导则 非污染生态影响》HJ/T 19—1997。

(4)《环境影响评价技术导则 生态影响》HJ 19—2011。

输电线路水土保持采用的手段与方法所涉及到的标准和规范主要有:

(1)《开发建设项目水土保持技术规范》GB 50433—2008。

(2)《开发建设项目水土流失防治标准》GB 50434—2008。

(3)《水土保持综合治理 技术规范 崩岗治理技术》GB/T 16453.6—2008。

(4)《水土保持综合治理 效益计算方法》GB/T 15774—2008。

(5)《水土保持工程质量评定规程》SL 336—2006。

(6)《开发建设项目水土保持设施验收技术规范》GB/T 22490—2008。

**14.0.5、14.0.6** 这两条强调对自然环境和水土保持采取的防治措施。

## 15 劳动安全和工业卫生

本章内容针对国家对劳动安全与工业卫生工作的要求,结合输电线路的具体特点,参照有关标准的相关内容编制。



## 16 附 属 设 施

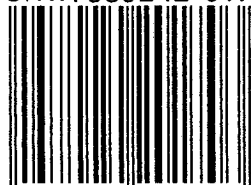
**16.0.1** 巡线站的设置与否跟沿线交通条件关系很大,在交通方便地区一般不需要设置巡线站。

**16.0.2** 按以往的惯例运行管理部门确有此需要,故一直沿用至今,根据近年来线路运行中发生的攀爬、触电事故,增加“设置高压危险,禁止攀爬杆塔和接近”,并增加“杆塔上固定标志的尺寸、颜色和内容还要符合运行部门的要求”。根据铁路部门的要求,跨越铁路时杆塔处要设置标志牌,标明电压等级、走廊宽度、轨顶的导线最低点高度、相对轨顶的设施限高、安全绝缘距离等信息。

**16.0.3** 根据现在的通信条件完全没有架设检修专用通信线路的必要,对于大山、大森林或荒原等通信困难地段,也要采用适当的先进通信手段而不宜架设专用通信线,宜根据现有运行条件配备适当的通信设施。

**16.0.4、16.0.5** 这两条规定是考虑运行维护过程中人员的安全增加的安全措施。

S/N:1580242•017



9 158024 201703 >



统一书号: 1580242•017

定 价: 35.00 元