



中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1572.2 — 2016 / IEC 61660-2: 1997

变电站和发电厂直流辅助 电源系统短路电流 第2部分: 效应计算

Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations
in power plants and substations
Part 2: Calculation of effects

(IEC 61660-2: 1997, IDT)

2016-02-05 发布

2016-07-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 概述	1
1.1 适用范围	1
1.2 引用标准	1
1.3 符号和单位	2
1.4 定义	4
2 刚性导体的电磁效应	5
2.1 概述	5
2.2 电磁力计算	6
2.3 刚性导体上的应力和支架受力的计算	9
2.4 柱式绝缘子及其支架和连接器的设计载荷	19
3 裸导体和电器设备的热效应	20
3.1 概述	20
3.2 温升计算	20
附录 A (资料性附录) 图表中的计算公式	23
参考文献	27

前 言

DL/T 1572《变电站和发电厂直流辅助电源系统短路电流》分为3个部分：

——第1部分：短路电流计算（IEC 61660-1: 1997，IDT）；

——第2部分：效应计算（IEC 61660-2: 1997，IDT）；

——第3部分：算例（IEC 61660-3: 2000，IDT）。

本部分为DL/T 1572的第2部分。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由全国短路电流计算标准化技术委员会归口。

本标准主要起草单位：广东电网公司电力科学研究院、中国电力科学研究院、西安交通大学。

本标准主要起草人：陈迅、汤涌、卜广全、梅成林、张彦涛、李明节、刘玮、印永华、肖惕、关平、林树胜。

本部分在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

变电站和发电厂直流辅助电源系统短路电流

第 2 部分：效应计算

1 概述

1.1 适用范围

本部分提供了变电站和发电厂直流辅助电源系统短路电流对刚性导体所产生的机械力和热效应的计算方法。直流辅助系统中可能包含有如下设备成为提供短路电流的电源：

- a) 50Hz 三相交流桥式整流器；
- b) 固定型铅酸蓄电池；
- c) 平波电容器；
- d) 他励直流电动机。

本部分提供的方法有普遍的适用性且结果足够精确。本章的计算方法是基于替换函数的算法。采用替换函数可以近似地计算出导体上所产生的最大应力以及支架上所产生的实际电磁力。

第 2 章和第 3 章的标准计算步骤适用于刚性导体电磁效应和裸导体或电器设备热效应的计算。

本部分仅适用于变电站和发电厂的直流辅助设备。

应特别注意以下几点：

- a) 短路电流的计算应基于 DL/T 1572.1。
- b) 本标准中所使用的短路持续时间基于保护理念，短路持续时间在该理念下考虑。
- c) 这些标准化的计算步骤根据实际需求做了调整，同时在偏于安全的情况下做了简化。
- d) 在本标准的第 2 章，只计算了短路电流产生的应力，此外还有其他的如固定载荷、操作或地震等产生的应力。相关标准或规程（如安装规程）应将这些应力与短路电流所产生的应力作为其中的一部分。

1.2 引用标准

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

DL/T 1572.1—2016 变电站和发电厂直流辅助电源系统短路电流 第 1 部分：短路电流计算（IEC 61660-1: 1997, IDT）

IEC 60865-1:1993 短路电流效应计算 第 1 部分：定义和计算方法（Short-circuit current-Calculation of effects-Part 1:Definitions and calculation methods）

IEC 60865-2: 1994 短路电流效应计算 第 2 部分：计算实例（Short-circuit current-Calculation of effects – Part 2: Examples of calculation）

IEC 60949: 1988 考虑非绝热效应的允许短路电流计算（Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects）

IEC 60986: 1989 额定电压 1.8/3 (3.6) kV 至 18/30 (36) kV 电缆的允许短路温度导则（Guide to the short-circuit temperature limits of electric cables with a rated voltage from 1.8/3 (3.6) kV to 18/30 (36) kV）

1.3 符号和单位

本标准使用的所有公式都是量值公式，即用量值符号表示物理量的大小及其单位。
下面给出了本标准中使用的符号及其国际单位。

1.3.1 第2章中的电磁效应符号

A_1	确定矩形替换函数参数的动量	A^2s
A_s	一根导体的截面积	m^2
a	导体间轴线距离	m
a_m	相邻主导体间的有效距离	m
a_s	子导体间的有效距离	m
a_{1n}	子导体 1 和子导体 n 间的轴线距离	m
a_{1s}	子导体间轴线距离	m
b	垂直于受力方向的子导体尺寸	m
b_m	垂直于受力方向的主导体尺寸	m
c	连接件影响因子	1
D	管形导体的外直径	m
d	受力方向的子导体尺寸	m
d_m	受力方向的主导体尺寸	m
E	杨式模量	N/m^2
F	短路时作用于两平行长导体间的力	N
F_R	由矩形替换函数求得的作用于主导体间的力	N
F_{Rs}	由矩形替换函数求得的作用于子导体间的力	N
F_d	支架上的受力（峰值）	N
F_m	短路时主导体间的力（峰值）	N
F_s	短路时子导体间的力	N
f_c	主导体相关自然频率	Hz
f_{cs}	子导体相关自然频率	Hz
g_n	重力加速度	m/s^2
I_g	确定矩形替换函数参数的值	A^2s^3
I_R	计算主导体间作用力的矩形替换函数电流	A
I_{Rs}	计算子导体间作用力的矩形替换函数电流	A
I_k	准稳态短路电流	A
i_p	短路电流峰值	A
i_1, i_2	标准近似函数导体中的电流瞬时值	A
i_{L1}, i_{L2}	导体 L1 和导体 L2 的电流瞬时值	A
J	主导体的二次面积矩	m^4
J_s	子导体的二次面积矩	m^4
k	垫片或加固片的个数	1
k_{1n}	子导体 1 和子导体 n 间的有效导体距离系数	1
k_{1s}	有效导体距离系数	1
l	支架间轴线距离	m
l_s	连接件间轴线距离	m

m'	主导体单位长度质量	kg/m
m'_s	子导体单位长度质量	kg/m
m_z	一套连接件的总质量	kg
m_{g1}, m_{g2}		
m_{lg1}, m_{lg2}	确定矩形替换函数参数的系数	1
$m_{\theta 1}, m_{\theta 2}$		
n	一根主导体的子导体个数	1
p	I_k/I_p 比例	1
q	弹性系数	1
$R_{p0.2}$	屈服点应力	N/m ²
s	管壁厚度	m
T_k	短路持续时间	s
T_{me}	主导体的振动周期	s
T_{mes}	子导体的振动周期	s
t_p	到达峰值时间	s
t_R	计算主导体间作用力的矩形替换函数的时间	s
t_{RS}	计算子导体间作用力的矩形替换函数的时间	s
V_F	支架上动态力和静态力之比	1
V_σ	主导体上动态力和静态力之比	1
$V_{\sigma s}$	子导体上动态力和静态力之比	1
Z	主导体截面模量	m ³
Z_s	子导体截面模量	m ³
α	支架受力系数	1
β	主导体应力系数	1
γ	相关自然频率系数的期望值	1
μ_0	真空磁导率	H/m
σ_m	由主导体间的作用力产生的弯曲应力	N/m ²
σ_s	由子导体间的作用力产生的弯曲应力	N/m ²
σ_{tot}	导体合成应力	N/m ²
τ_1	上升时间常数	s
τ_2	衰减时间常数	s

1.3.2 第3章中的热效应符号

A	主导体截面积	m ²
A_i	确定矩形替换函数参数的动量	A ² s
I_{th}	热等效短时电流（有效值）	A
I_{thr}	额定短时耐受电流（有效值）	A
K	计算 S_{thr} 的系数	As ^{0.5} /m ²
S_{th}	热等效短时电流密度（有效值）	A/m ²
S_{thr}	额定短时耐受电流密度（有效值）	A/m ²

T_k	短路持续时间	s
T_{kr}	额定短路持续时间	s
t_p	到达峰值时间	s
θ_0	短路初始时导体温度	℃
θ_e	短路结束时导体温度	℃

1.4 定义

1.4.1 第2章电磁效应的定义

1.4.1.1 主导体 main conductor

全电流流经的导体（或由一系列导体组成的导体）。

1.4.1.2 子导体 subconductor

总电流一部分流经的单导体，是主导体的一部分。

1.4.1.3 固定支架 fixed support

在支撑点导体无法转动的导体支架。

1.4.1.4 简单支架 simple support

在支撑点导体可以转动的支架。

1.4.1.5 连接件 connecting piece

在一个支撑距内不属于单一导体材料的附属物。包括垫片、母线交叠条和分支等。

1.4.1.5.1 垫片 spacer

安装于子导体间的机械元件，用来保持子导体之间的间隙。

1.4.1.5.2 加固垫片 stiffening element

用来降低机械应力的特殊垫片。

1.4.1.6 短路持续时间 short-circuit duration

T_k
从短路初始到短路电流开断的时间。

1.4.1.7 标准近似函数 standard approximation function

根据 DL/T 1572.1—2016，用来计算的曲线。它描述了短路电流瞬时值随时间的变化，包括上升时间常数 τ_1 、衰减时间常数 τ_2 、短路电流持续时间 T_k 和到达峰值的时间 t_p 。

注：详情请参见 DL/T 1572.1—2016。

1.4.1.8 二次标准近似函数 squared standard approximation function

表示标准近似函数二次方瞬时值的曲线，描述了短路电流产生的电磁力瞬时值的曲线形状，也是焦耳积分的包络线。

注：详情请参见参考文献 [1] 中的图 8，表明 $i^2(t)$ 乘上系数 $\frac{\rho_0}{2\pi a}$ 得到 $F'(t)$ 。

1.4.1.9 矩形替换函数 **substitute rectangular function**

以矩形形式表示电流的函数，它可以产生同二次标准近似函数一样的机械应力和作用力。

注：详情请参见参考文献 [1] 中的图 8，表明 I_R^2 乘上系数 $\frac{\mu_0}{2\pi a}$ 得到 F'_R 。

1.4.2 第 3 章热效应中的定义

1.4.2.1 热等效短时电流 **thermal equivalent short-time current**

I_{th}

和实际短路电流具有相同热效应及持续时间的电流的有效值。

1.4.2.2 额定短时耐受电流 **rated short-time withstand current**

I_{thr}

在指定的使用条件或运行方式下，电气设备额定短路时间内所能承受的电流的有效值。

注 1：可以指定几组额定短时耐受电流和额定短时间，多数 IEC 规范中，热效应用 1s 作为额定短路时间。

注 2：额定短时耐受电流以及对应的额定短时都由设备制造商来标明。

1.4.2.3 热等效短时电流密度 **thermal equivalent short-time current density**

S_{th}

热等效短时电流的额定值与导体横截面积之比。

1.4.2.4 额定短时耐受电流密度 **rated short-time withstand current density**

S_{thr}

在额定短时间内导体可耐受的电流密度有效值。

注：额定短时耐受电流密度参考 3.2 进行确定。

1.4.2.5 短路持续时间 **short-circuit duration**

T_k

从短路初始到短路电流开断的时间。

1.4.2.6 额定短时 **rated short-time**

T_{kr}

指如下两种情况的持续时间：

- a) 电气设备在其额定短时耐受电流下能够耐受的时间。
- b) 导体在其额定短时耐受电流密度下能够耐受的时间。

2 刚性导体的电磁效应

2.1 概述

直流辅助设备短路电流中的不同分量具有不同的时间常数。DL/T 1572.1—2016 中用 6 个参数

i_p 、 I_k 、 t_p 、 τ_1 、 τ_2 和 T_k [见图 4 a)] 定义了标准近似函数。任意参数的变化都会造成应力的变化。在实际应用中为电流平方的特性引入矩形替换函数进行电磁力计算, 用这种方法计算出的机械应力和作用力与实际短路电流产生的结果一样。图 4 b) 是短路电流的二次标准近似函数和它的矩形替换函数。它是用 I_R^2 和 t_R 两个参数来定义的。

利用本章的计算方法可以估算:

- a) 刚性导体的应力。
- b) 作用于绝缘子和底座使其发生弯曲、拉伸、压缩的力。

当电流流经导体时会产生电磁力, 平行导体间则会产生相互作用力, 对于直流辅助设备必须考虑这种应力。因此:

- a) 平行导体间的受力将在后面章节中叙述。
- b) 作用在弯曲或交叉导体上的电磁力分量在通常情况下可略去不计。

若平行导体 L1、L2 本身的长度远远大于它们之间的间距, 导体的受力会沿导体平均分布, 可以由式 (1) 表示:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{L1} i_{L2} \frac{l}{a} \quad (1)$$

式中:

- i_{L1} 和 i_{L2} ——导体 L1 和 L2 中电流瞬时值;
- l ——支架间的轴心距离;
- a ——导体间的轴心距离。

在计算最大可能的短路电流时, 若其他 IEC 标准中存在使应力减小的情况, 应给予考虑。

2.2 电磁力计算

2.2.1 主导体间受力峰值的计算

最大力为

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

式中:

- i_p ——短路电流峰值;
- l ——支架间的最大轴心距离;
- a_m ——主导体间的有效距离, 参见 2.2.3。

2.2.2 同一平面内子导体间受力峰值的计算

最大受力是由子导体中的电流作用于外部子导体产生的。相邻连接件间的最大受力为

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (3)$$

式中:

- n ——子导体的数目;
- l_s ——相邻连接件间存在的最大轴心距离;
- a_s ——子导体间的有效距离, 参见 2.2.3。

2.2.3 主导体间和子导体间的有效距离

短路电流流经的导体与导体之间的力, 受导体的几何形状和截面影响。因此, 在 2.2.1 中引入了主

导体间的有效距离 a_m ；在 2.2.2 中引入了子导体间的有效距离 a_s 。它们可由下述方法得到。

令轴线距离为 a 的共面主导体间的有效距离为 a_m ，则

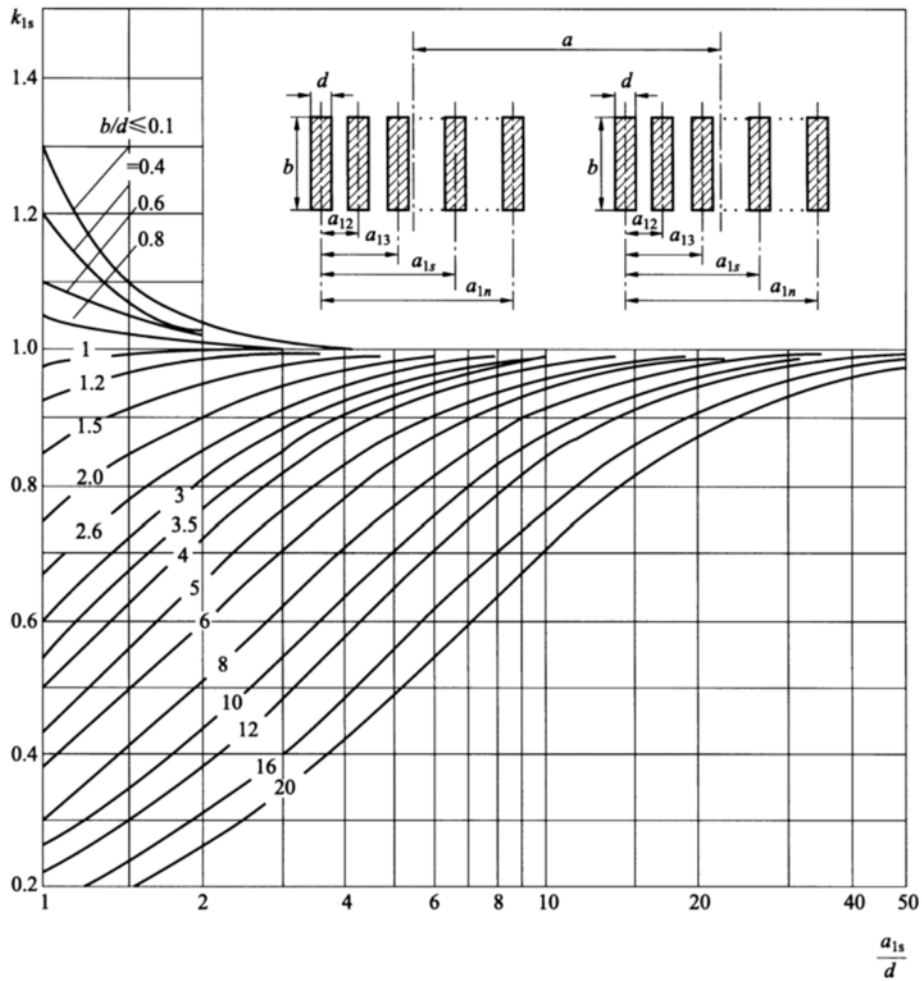
a) 当主导体由单个圆形截面构成时：

$$a_m = a \quad (4)$$

b) 当主导体由单个矩形截面或由多个矩形截面的子导体构成时：

$$a_m = \frac{a}{k_{1s}} \quad (5)$$

k_{1s} 可从图 1 中查得，依照图 2， $a_{1s}=a$ ， $b=b_m$ ， $d=d_m$ 。



注：附录 A 中给出了用于程序计算的公式。

图 1 计算导体等效距离的系数 k_{1s}

令一个主导体的 n 个共面子导体间的有效距离为 a_s ，则

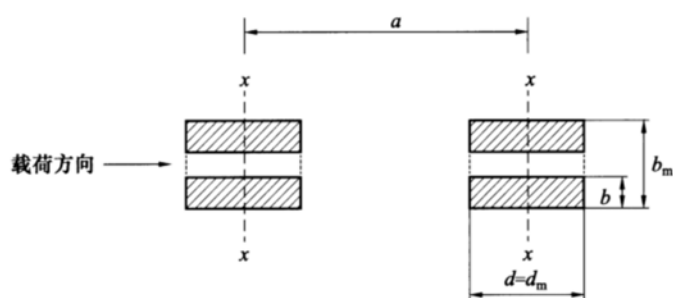
a) 圆形截面的子导体：

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (6)$$

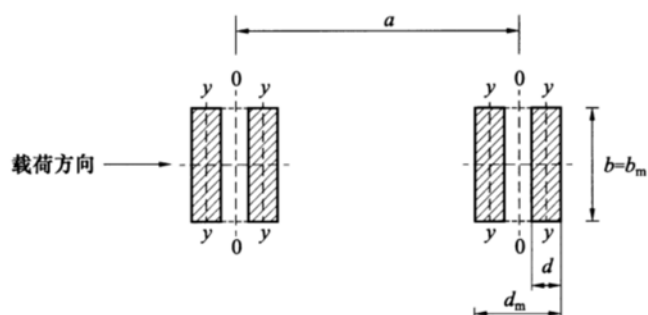
b) 矩形截面的子导体：

可从表 1 中查得部分 a_s 值，其他距离和子导体的尺寸可用式 (7) 计算

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (7)$$



a) 水平载荷方向



b) 垂直载荷方向

图2 多重导体排列的载荷方向和弯曲轴

k_{12} 、 \dots 、 k_{1n} 可从图 1 中查得。

表 1 不同矩形截面尺寸其子导体间的有效距离 a_s

单位: m

矩形截面	$d \backslash b$	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16	0.20
	0.005	0.020	0.024	0.027	0.033	0.040	—	—	—
	0.010	0.028	0.031	0.034	0.041	0.047	0.054	0.067	0.080
	0.005	—	0.013	0.015	0.018	0.022	—	—	—
	0.010	0.017	0.019	0.020	0.023	0.027	0.030	0.037	0.043
	0.005	—	—	—	—	—	—	—	—
	0.010	0.014	0.015	0.016	0.018	0.020	0.022	0.026	0.031
	0.005	—	0.014	0.015	0.018	0.020	—	—	—
	0.010	0.017	0.018	0.020	0.022	0.025	0.027	0.032	—

2.3 刚性导体上的应力和支架受力的计算

2.3.1 概述

支撑导体有不同的方式，可用固定支架或简单支架，也可以是二者的结合。由于支架的类型和数目不同，即使是流过相同的电流，导体上的应力和支架受力也会有所差别。给出的公式已考虑了支架弹性。

导体上的应力和支架受力也会受到机械系统的自然频率和短路持续时间的影响。

2.3.2 刚性导体应力的计算

导体为刚性的假设意味着忽略轴向力。在这一假设下，作用力为弯曲力。主导体间的力所产生的弯曲应力的通用公式为

$$\sigma_m = V_\sigma \beta \frac{F_m l}{8Z}$$

(8)


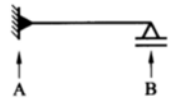
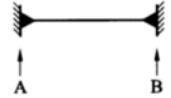
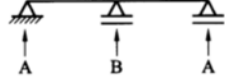
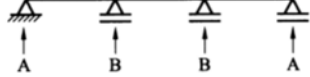
- 式中：
- F_m ——依照式（2）计算；
 - Z ——主导体的截面模量，应根据主导体间受力方向来计算；
 - V_σ ——考虑动态现象的系数，其可能的最大值可从表 2 中查得；
 - β ——根据支架不同类型和数目而确定的系数，可从表 3 中查得。

表 2 V_σ 、 $V_{\sigma s}$ 和 V_F 的可能最大值

$V_\sigma, V_{\sigma s}$	V_F		范围
1.0	2.0	对于 $\frac{\sigma_{tot}}{0.8R_{p0.2}} \leq 0.5$	①
	$\frac{0.8R_{p0.2}}{\sigma_{tot}}$	对于 $0.5 < \frac{\sigma_{tot}}{0.8R_{p0.2}} \leq 1.0$	②
	1.0	对于 $1.0 < \frac{\sigma_{tot}}{0.8R_{p0.2}}$	③

The graph shows the relationship between the dynamic coefficient V_F and the normalized total stress $\frac{\sigma_{tot}}{0.8R_{p0.2}}$. The y-axis represents V_F with values 0, 1, and 2. The x-axis represents the normalized stress with values 0, 0.5, 1, and 2. The curve starts at $V_F = 2$ for $x \leq 0.5$ (Region 1), then decreases to $V_F = 1$ at $x = 1$ (Region 2), and remains constant at $V_F = 1$ for $x > 1$ (Region 3). Vertical dashed lines are drawn at $x = 0.5$ and $x = 1$, and a horizontal dashed line is drawn at $y = 1$.

表 3 不同母线支架排列的系数 α 、 β 和 γ

梁和支架类型			系数 α	系数 β	系数 γ
单跨距梁	A 和 B: 简单支架		A: 0.5 B: 0.5	1.0	1.57
	A: 固定支架 B: 简单支架		A: 0.625 B: 0.375	0.73	2.45
	A 和 B: 固定支架		A: 0.5 B: 0.5	0.5	3.56
带等距简单支架的连续梁	两跨度		A: 0.375 B: 1.25	0.73	2.45
	三个或三个以上跨度		A: 0.4 B: 1.1	0.73	3.56

* 含弹性效应。

子导体间的力所产生的弯曲应力为




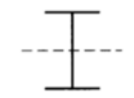

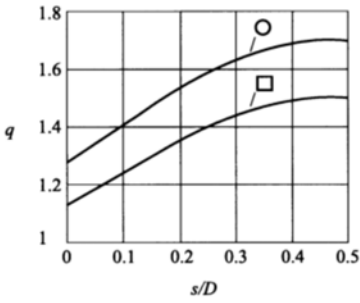
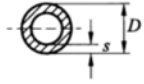
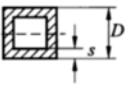
$$\sigma_s = V_{os} \frac{F_{ss} l}{16Z_s} \tag{9}$$

式中：

- F_s ——依照式 (3) 计算；
- Z_s ——子导体的截面模量，应根据子导体间受力方向来计算；
- V_{os} ——考虑动态现象的系数，其可能的最大值可从表 2 中查得。

注：对于表 3 中的梁（简单支架的单跨距梁除外），实际的最大载荷由表 3 中的 β 和表 4 中的系数 q 来计算。

表 4 系 数 q

截 面		截 面	
	$q=1.5$		$q=1.83$
			$q=1.19$
	$q=1.7$		
	$q=1.7 \frac{1-(1-2s/D)^3}{1-(1-2s/D)^4}$		
	$q=1.5 \frac{1-(1-2s/D)^3}{1-(1-2s/D)^4}$		

注： q 在点标注的弯曲轴上有效。垂直受力。

对于非均一跨度的连续梁处理,为使计算具有足够的精确度,可以假设都为均一跨度,并取最大跨度作为统一的跨度。因此:

- a) 端部支架受的应力不大于内部支架所受应力。
 - b) 应避免跨度长度小于相邻跨度的 20%。若不可行,应在支架上用柔性接头隔离导体。若在一个跨接内有柔性接头,则其跨度应小于相邻跨度的 70%。
- 若未知是支撑梁还是固定梁,应当按最坏情况来考虑。
详情请参见 2.3.6。

2.3.3 由子导体组成的主导体的截面模量和系数 q

弯曲应力决定导体应能承受的机械强度,其大小取决于截面模量。

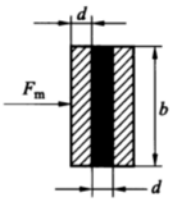
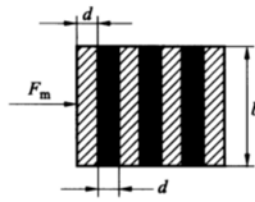
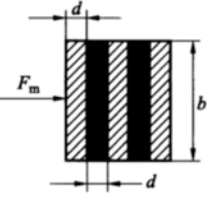
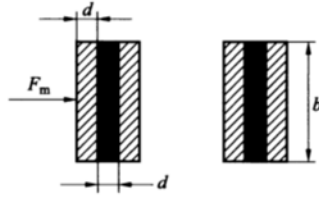
对于图 2 a) 中产生的弯曲应力,截面模量 Z 不受连接件数目的影响,它等于子导体截面模量 Z_s 之和 (x - x 轴上的 Z_s)。矩形横截面的系数 q 为 1.5, U 形和 I 形截面的系数为 1.19。

对于图 2 b) 中产生的弯曲应力,若支撑距离内只有一个加固垫片或没有加固垫片,截面模量 Z 等于子导体截面模量 Z_s 之和 (y - y 轴上的 Z_s)。矩形横截面的系数 q 为 1.5, U 形和 I 形截面的系数为 1.83。

若支撑距离内有两个或两个以上的加固垫片,可用更高大的截面模量:

- a) 对于由矩形截面子导体组成的主导体,两子导体间的间隙等于导体的厚度。表 5 给出了截面系数。
- b) U 形和 I 形截面的子导体组,可用 50% 的 (0-0 轴) 截面模数,类似于图 2。
- c) 矩形横截面的系数 q 为 1.5, U 形和 I 形截面的系数为 1.83。

表 5 相邻支架上带两个或两个以上加固垫片的主导体截面系数 Z

矩形截面	Z	矩形截面	Z
	$0.867 d^2 b$		$3.48 d^2 b$
	$1.98 d^2 b$		$1.73 d^2 b$
注: 黑块为加固垫片。			

2.3.4 导体允许应力

当短路产生的应力满足式 (10) 时,则可认为单导体可以耐受

$$\sigma_m \leq q R_{p0.2} \quad (10)$$

式中:

$R_{p0.2}$ ——相应屈服点的应力。

系数 q 可从表 4 得到 (参见 2.3.3)。

当主导体由两个或两个以上的子导体组成时, 导体的全应力为

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s \quad (11)$$

注: 对于矩形截面, σ_{tot} 是 σ_m 和 σ_s 的代数和, 与载荷方向无关 (见图 2)。

当短路产生的应力满足式 (12) 时, 则可认为单导体可以耐受

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0.2} \quad (12)$$

为确保短路电流不会对子导体间的距离产生太大的影响, 建议使

$$\sigma_s \leq R_{p0.2} \quad (13)$$

表 4 给出了对于不同截面, q 的最高可接受值。当 $\sigma_m = q R_{p0.2}$ 或 $\sigma_{\text{tot}} = q R_{p0.2}$ 时, 可能会有微小的永久变形产生, 根据表 4 的 q 值, 这个微小变形近似为支架距离的 1%, 但只要不超过主导体间或主导体与接地结构间允许的最小间隙, 是不会危及到运行安全的。

注: 对于导体材料的屈服点 $R_{p0.2}$, 通常的标准都会指明其最小值到最大值的范围。若仅知极值而不知实际数值, 在 2.3.4 中应当用最小值, 在表 2 中用最大值。

2.3.5 刚性导体支架受力计算

由式 (14) 计算动态力 F_d 为

$$F_d = V_F \alpha F_m \quad (14)$$

式中:

F_m ——由式 (2) 计算得到;

V_F ——系数, 其最大允许值可从表 2 中查得;

α ——系数, 由支架的类型和数目决定, 可从表 3 中查得。

有关柱式绝缘子和连接器的设计载荷参见 2.4。

详情请参见 2.3.6。

2.3.6 有关导体振动计算

2.3.2 和 2.3.5 中含有系数 V_σ 、 V_{os} 、 V_F 的公式考虑了应力和作用力的振动特性。

表 2 中给出了这些系数的上限。用这些上限来进行计算所得的结果较为安全。若是依照本节 2.3.6 确定的, 允许使用稍小于上限的值。基于此, 应计算相关的自然频率 f_c 和 f_{cs} , 并考虑数据的准确性和矩形替换函数的参数。

2.3.6.1 相关自然频率的计算

导体相关自然频率为

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (15)$$

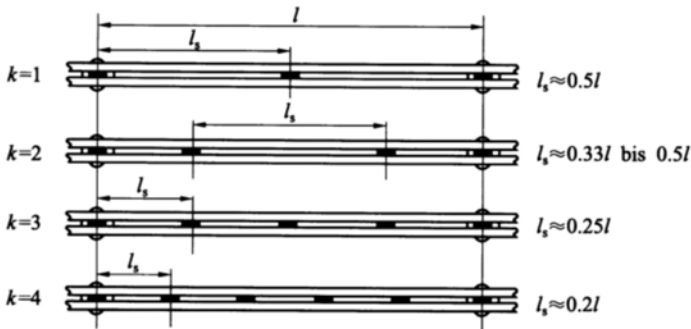
式 (15) 直接适用于单一截面主导体。

系数 γ 由支架的类型和数目决定, 可从表 3 中查得。

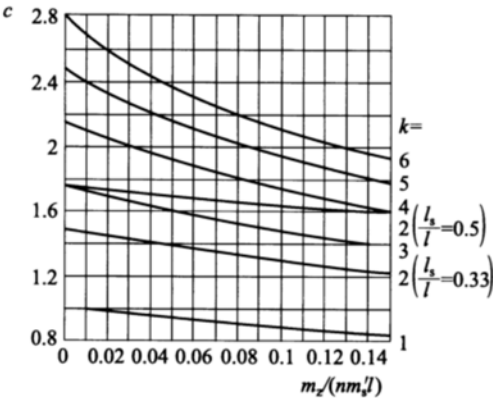
若主导体是由矩形截面的子导体构成的, 主导体的相关自然频率为

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (16)$$

系数 c 可从图 3 b) 和图 3 c) 中查得。若没有连接件, 则 $c=1$ 。

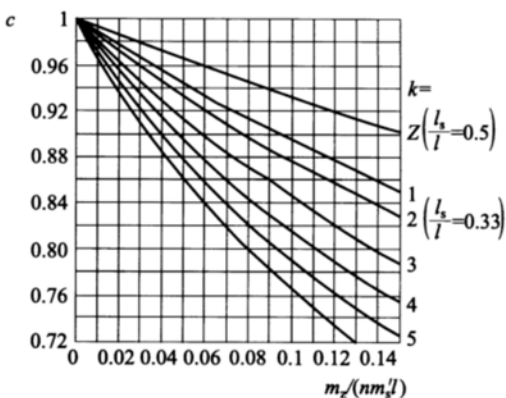


a) 跨距内连接件的排列



b) 加固垫片构成的连接件

系数 c 应从图 3 b) 和图 3 c) 中查出:



c) 垫片构成的连接件, 或用作垫片的连接件

振动方向	跨距内有 k 个加固垫片	跨距内有 k 个垫片
振动方向垂直于导体表面 	图 3 b) 中的系数 c	图 3 c) 中的系数 c
振动方向沿导体表面 	图 3 c) 中的系数 c	图 3 c) 中的系数 c

注: 附录 A 中给出了用于程序计算的公式。

图 3 式 (16) 中受连接件影响的系数 c

频率 f_c 对应的周期为

$$T_{mc} = \frac{1}{f_c} \quad (17)$$

若主导体由截面为 U 形或 I 形的子导体构成, 可用式 (15) 计算 f_c , J 和 m' 应当用在主导体的设计之中。

在计算子导体应力时, 需考虑相关自然频率, 可用公式

$$f_{cs} = \frac{3.56}{l_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (18)$$

频率 f_{cs} 对应的周期为

$$T_{mes} = \frac{1}{f_{cs}} \quad (19)$$

注：二次面积矩 J 和 J_s 是依照图 2 a) 和图 2 b) 计算得到的。

2.3.6.2 矩形替换函数参数的计算

图 4 a) 为在 DL/T 1572.1—2016 中定义的标准近似函数，图 4 b) 为标准近似函数的平方特性，以式 (20) 给出

$$i_1^2(t) = i_p^2 \frac{(1 - e^{-t/\tau_1})^2}{(1 - e^{-t_p/\tau_1})^2} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (20a)$$

$$i_1^2(t) = i_p^2 [(1 - p)e^{-(t-t_p)/\tau_2} + p]^2 \quad t > t_p \quad (20b)$$

$$p = \frac{I_k}{i_p} \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (20c)$$

式中：

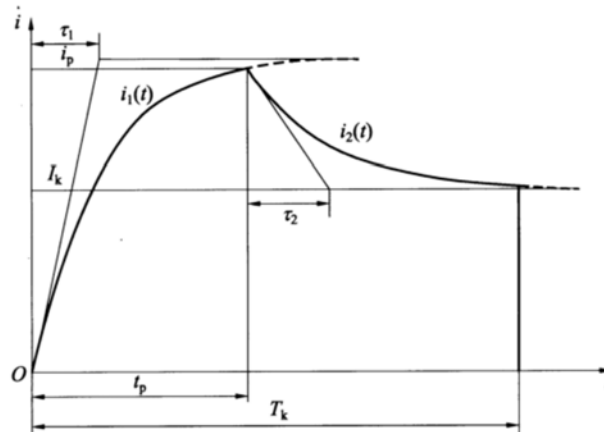
i_p —— 短路电流峰值；

I_k —— 准稳态短路电流；

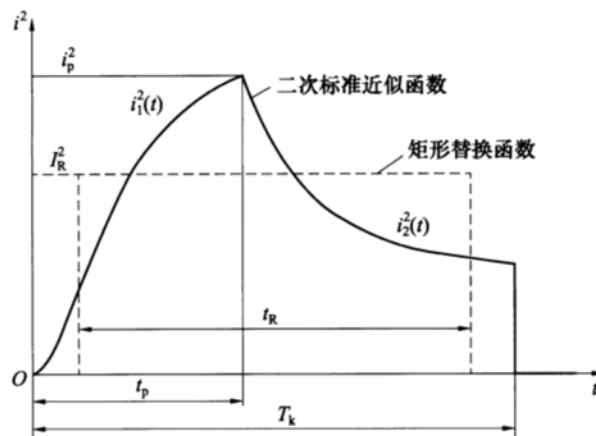
τ_1 —— 上升时间常数；

τ_2 —— 衰减时间常数；

t_p —— 到达峰值时间。



a) DL/T 1572.1定义的标准近似函数



b) 定义的电流的二次标准近似函数和矩形替换函数

图 4 定义的电流的标准近似函数和矩形替换函数

而作用力的标准近似函数为

$$F_1(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1^2(t) \frac{l}{a} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (21a)$$

$$F_2(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i_2^2(t) \frac{l}{a} \quad t > t_p \quad (21b)$$

式 (20c) 将用于本标准的计算, 而式 (20a)、式 (20b) 和式 (21) 仅供参考。

图 4b) 同样展示了矩形替换函数, 矩形替换函数在短路持续时间 $T_k \leq 0.5T_{me}$ 时, 与原始函数有着相同的动态效应, T_{me} 可由式 (17) 得出。对于导体的应力, 矩形替换函数在短路持续时间 $T_k \leq 0.5T_{mes}$ 内有效, T_{mes} 可由式 (19) 得出。

矩形替换函数的参数有:

$$t_R = 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{I_g}{A_1}} = 3.464 \sqrt{\frac{I_g}{A_1}} \quad (22)$$

$$I_R^2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{A_1^3}{I_g}} = 0.2887 \sqrt{\frac{A_1^3}{I_g}} \quad (23)$$

其中,

$$A_1 = i_p^2 [t_p m_{\theta 1} + (T_k - t_p) m_{\theta 2}] \quad (24)$$

$$I_g = i_p^2 \left\{ \frac{t_p^3}{12} m_{lg1} + \frac{(T_k - t_p)^3}{12} m_{lg2} + m_{\theta 1} t_p (t_g - m_{lg1} t_p)^2 + m_{\theta 2} (T_k - t_p) [t_p + m_{g2} (T_k - t_p) - t_g]^2 \right\} \quad (25)$$

其中,

$$t_g = \frac{m_{\theta 1} m_{lg1} t_p^2 + m_{\theta 2} (T_k - t_p) [t_p + m_{g2} (T_k - t_p)]}{m_{\theta 1} t_p + m_{\theta 2} (T_k - t_p)} \quad (26)$$

可从图 5 中查得系数 $m_{\theta 1}$ 、 $m_{\theta 2}$; 从图 6 中查得 m_{lg1} 、 m_{lg2} ; 从图 7 中查得 m_{lg1} 、 m_{lg2} 。

当电流特性可以用单一指数上升的函数来表述时, 表明 $T_k = t_p$, 参数 t_R 和 I_R^2 应从图 8 中直接查得。

● 计算参数 t_R 和 I_R^2 时, 需注意以下几点:

- 如果短路持续时间 $T_k \leq 0.5T_{me}$, 矩形替换函数应由短路持续时间 T_k 决定。
- 如果短路持续时间 $T_k > 0.5T_{me}$, 矩形替换函数应由等效短路持续时间 T_{ke} 决定, 其中, $T_{ke} < T_k$, 这种情况下, $T_{ke} = \max\{0.5T_{me}, 1.5t_p\}$ 。
- 若短路电流时间函数是单调上升的, 即 $T_k = t_p$, 矩形替换函数由短路持续时间 T_k 决定, 与 $\frac{T_k}{0.5T_{me}}$ 无关。

d) 在估计导体间受力的矩形替换函数时, 以上情况中的 T_{me} 应换为 T_{mes} 。

● 矩形替换函数产生的力为:

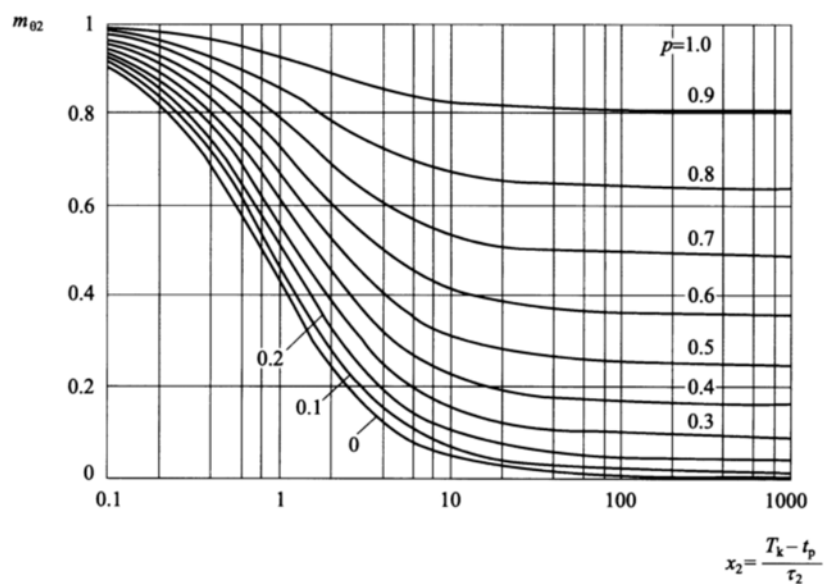
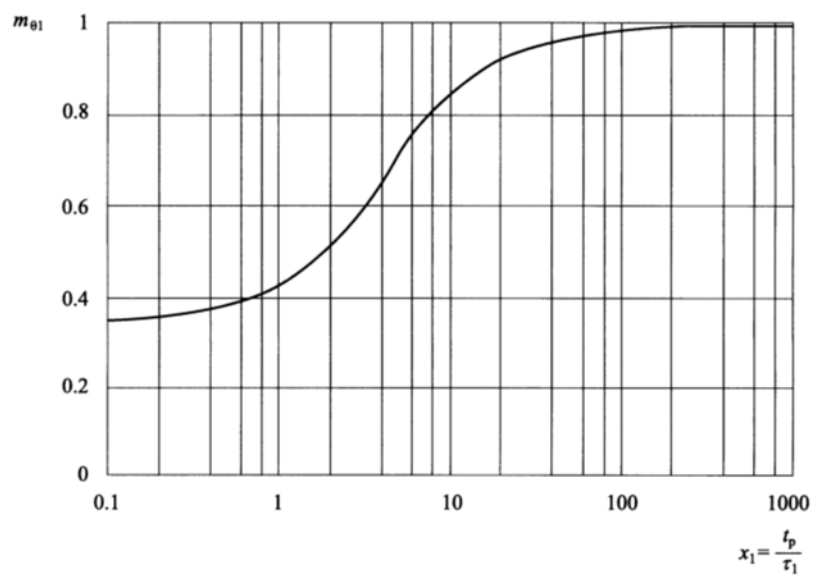
a) 主导体间:

$$F_R = \frac{\mu_0}{2\pi} I_R^2 \frac{l}{a_m} \quad (27)$$

b) 子导体间:

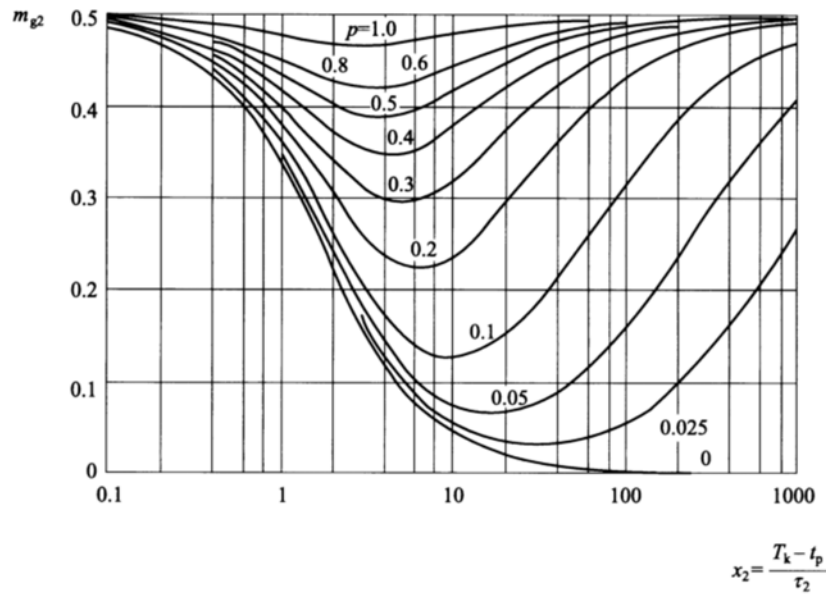
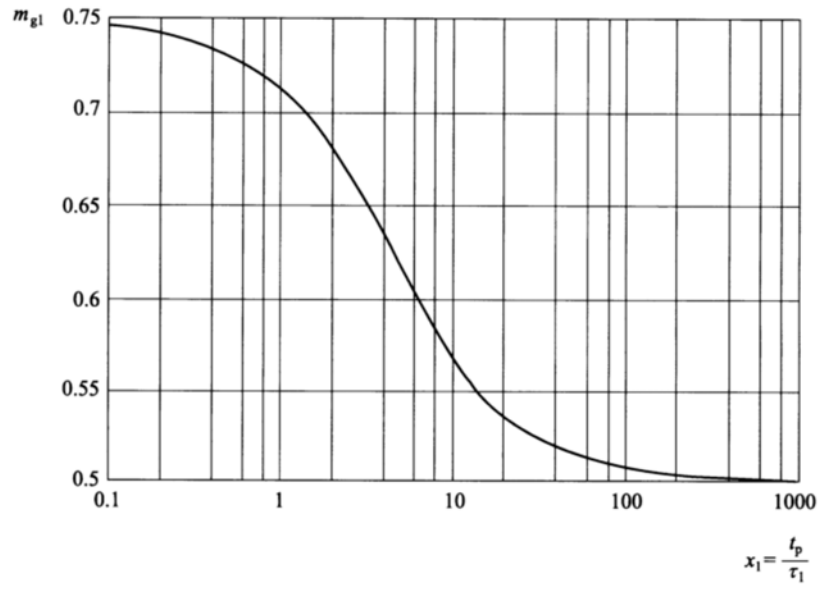
$$F_{Rs} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_{Rs}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (28)$$

a_m 和 a_s 是 2.2.3 中的有效距离。



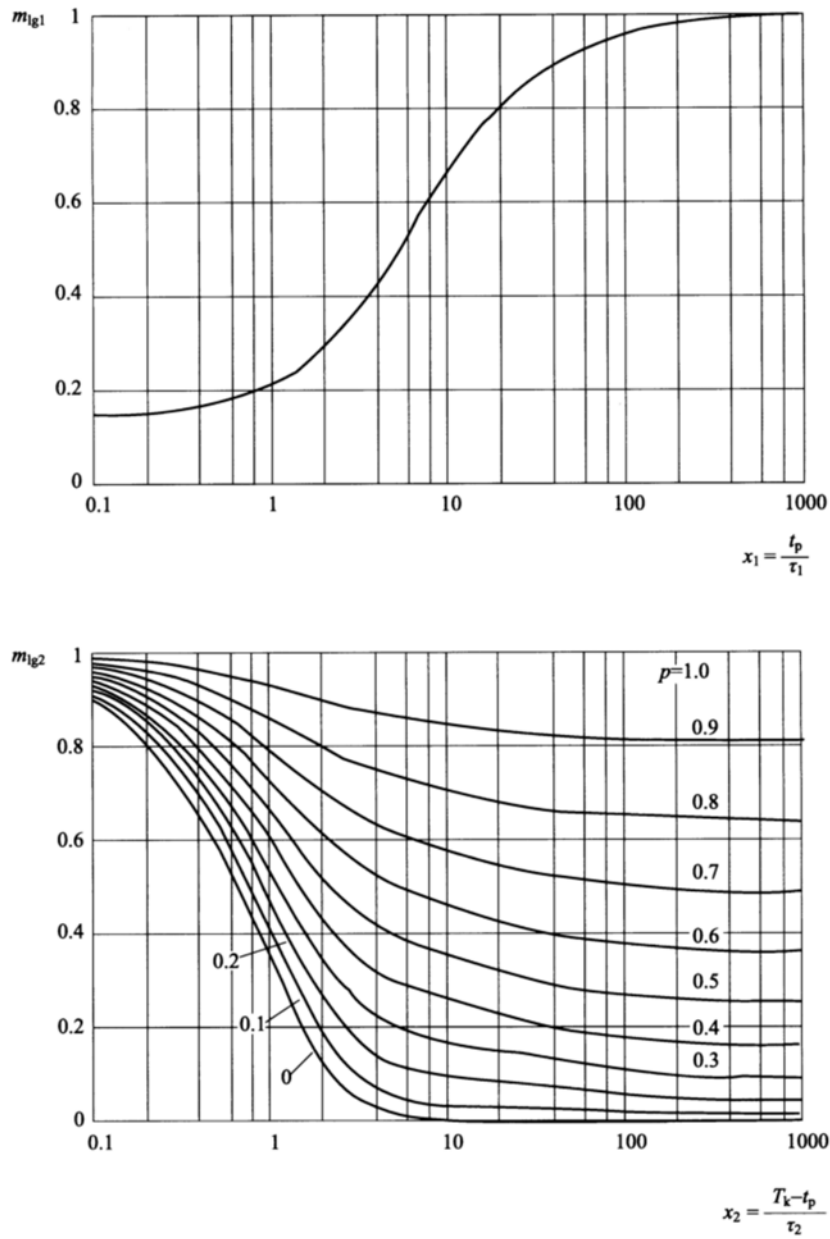
注：附录 A 中给出了用于程序计算的公式。

图 5 系数 $m_{\theta 1}$ 和 $m_{\theta 2}$



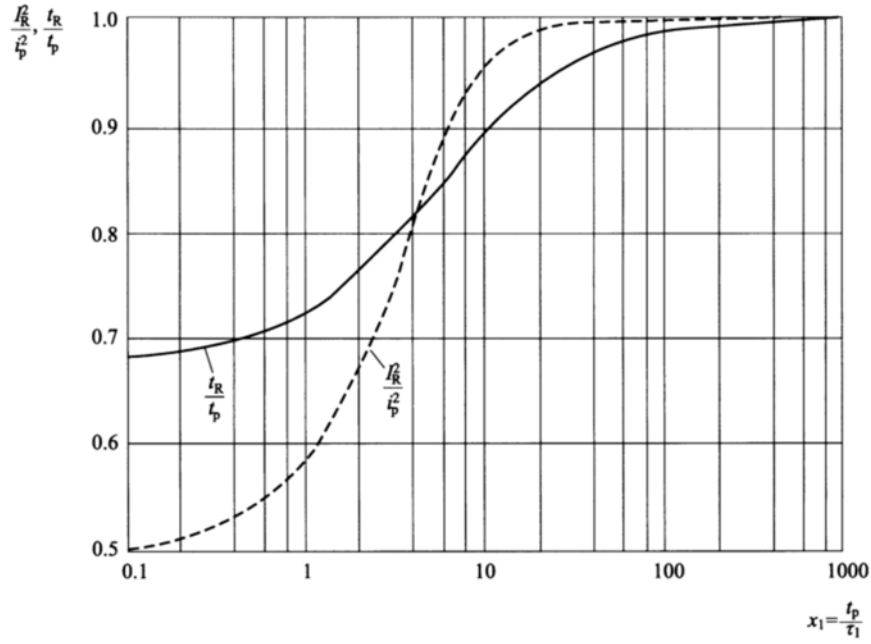
注：附录 A 中给出了用于程序计算的公式。

图 6 系数 m_{g1} 和 m_{g2}



注：附录 A 中给出了用于程序计算的公式。

图 7 系数 m_{1g1} 和 m_{1g2}



注：附录 A 中给出了用于程序计算的公式。

图 8 指数上升电流的平方的矩形替代函数的参数

2.3.6.3 刚性导体上应力和支架受力计算

计算主导体间的相互作用而产生的弯曲应力的式 (8)，应改为

$$\sigma_m = V_\sigma \beta \frac{F_R l}{8Z} \quad (29)$$

式中：

F_R ——由式 (27) 计算而得。

计算由子导体间的作用力所产生的弯曲应力的式 (9)，应改为

$$\sigma_s = V_\sigma \frac{F_{Rs} l}{16Z_s} \quad (30)$$

式中：

F_{Rs} ——由式 (28) 计算而得。

计算动态力 F_d 的式 (14)，应改为

$$F_d = V_F \alpha F_R \quad (31)$$

式中：

F_R ——由式 (27) 计算而得。

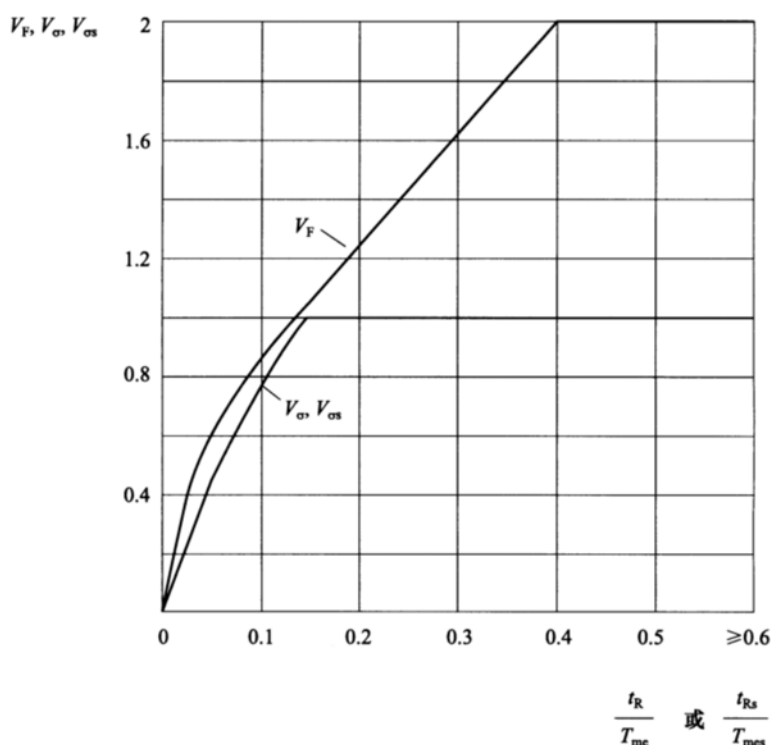
系数 V_F 、 V_σ 、 $V_{\sigma s}$ 是 t_R/T_{me} 和 t_{Rs}/T_{mes} 的函数，可从图 9 中查得。

详情参见 2.3.2、2.3.3、2.3.4 和 2.3.5。

2.4 柱式绝缘子及其支架和连接器的设计载荷

作用力 F_d 应不大于支架和绝缘子制造商所给的额定耐受值。绝缘子所承受弯曲应力的额定耐受值是施加在绝缘子头部的。当此力的作用点高于绝缘子头部的时候，应考虑使用一个比额定耐受值更小的耐受值，此结果取决于绝缘子截面最脆弱处所能承受的最大弯曲力矩。

刚性导体连接器应基于 F_d 来进行考虑。



注：附录 A 中给出了用于程序计算的公式。

图 9 计算动态绝缘子受力和导体应力的系数 V_F 、 V_σ 和 $V_{\sigma s}$

3 裸导体和电器设备的热效应

3.1 概述

本节给出了裸导体和电气设备热效应的计算方法。

由于短路电流在裸导体上产生的热量具有非线性特性，为了可以用数学方法进行逼近处理，必须对相关因素进行忽略或近似处理。

本节中需做以下假设：

- 忽略集肤效应（导体自身的电磁影响）和邻近效应（相邻平行导体的电磁影响）；
- 认为电阻温度特性是线性的；
- 绝热升温。

3.2 温升计算

3.2.1 概述

短路过程中导体损失的热量很少，可看作是绝热升温。本节都是基于绝热条件下进行计算的。

3.2.2 热等效短时电流计算

热等效短时电流为

$$I_{th} = \sqrt{\frac{A_i}{T_k}} \quad (32)$$

式中：

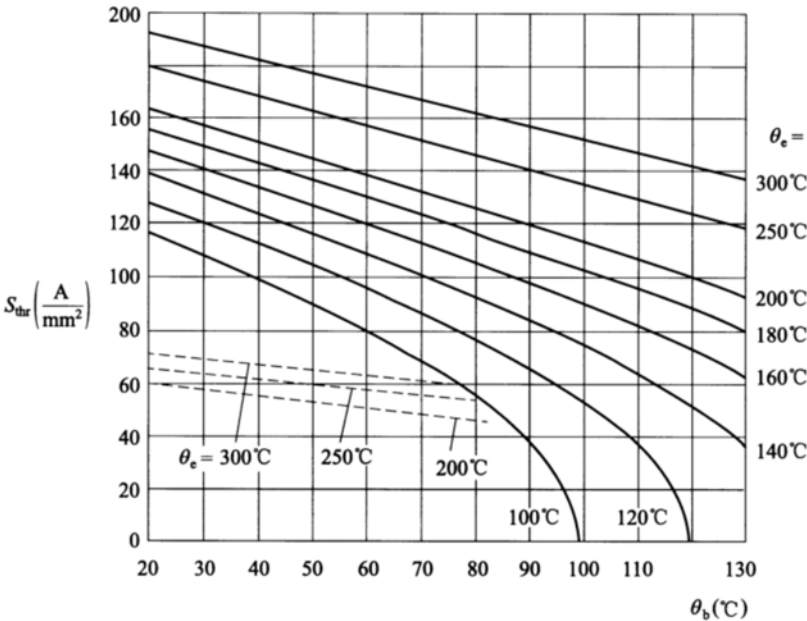
A_i ——应根据 2.3.6.2 中的短路持续时间 T_k 来计算。

对于限流设备，热等效短时电流 I_{th} 和相关的短路电流时间 T_k ，由制造商给出。
若能接受保守结果，则 I_{th} 的上限可用式 (33) 估算

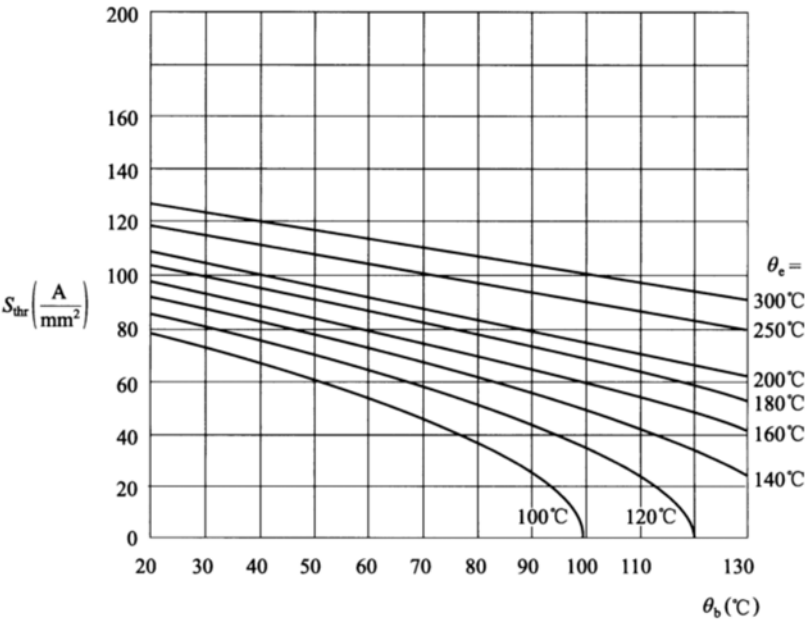
$$I_{th}=i_p \tag{33}$$

3.2.3 导体的温升和额定短时耐受电流密度的计算

短路产生的导体温升是短路电流持续时间、短时热等效电流和导体材料的函数。
利用图 10，在已知额定短时耐受电流密度时可计算出导体的温升。反之亦然。



实线：铜，虚线：低合金钢
a) 铜及低合金钢



b) 铝及铝合金

注：附录 A 中给出了用于程序计算的公式。

图 10 额定短时耐受电流密度和导体温度的关系 ($T_{kr}=1s$)

表 6 给出了不同导体的最高短时允许温度的推荐值。若导体达到这个温度，机械强度会轻微地降低，从经验上说这不会危及运行的安全。同时还需说明，由于热传导造成导体的紧固件或接头的温升，不能超过紧固件或接头的最高允许温度。

表 6 短路时考虑机械应力导体的建议最高温度

导体类型	短路时建议最高导体温度
裸导体、实心条：铜、铝或铝合金	200℃
裸导体、实心条：钢	300℃

3.2.4 热短路强度计算

3.2.4.1 电气设备

只要如下的热等效短时电流 I_{th} 关系能够被满足，电气设备就有足够的热短路强度。

$$I_{th} \leq I_{thr} \quad T_k \leq T_{kr} \quad (34a)$$

$$I_{th} \leq I_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad T_k \geq T_{kr} \quad (34b)$$

式中：

I_{thr} ——额定短时耐受电流；

T_{kr} ——额定短路时间。

3.2.4.2 导体

只要如下的热等效短时电流密度 S_{th} 关系能够被满足，裸导体就有足够的热短路强度。

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (\text{对于所有 } T_k \text{ 值}) \quad (35)$$

图 10 画出了 $T_{kr}=1s$ 时的热等效短时电流密度 S_{th} 。

一些国家会使用式 (36) (焦耳积分) 来代替式 (35)：

$$\int i^2 dt = I_{th}^2 T_k \leq K^2 A^2 \quad (36)$$

其中， I_{th} 可由式 (32) 和式 (33) 计算而得，而：

$$K = S_{thr} \sqrt{T_{kr}} \quad (37)$$

附 录 A
(资料性附录)
图表中的计算公式

A.1 符号

除 1.3.1 中的符号之外, 还用到了下列符号:

c	连接件加固垫片系数	1
ξ_m	连接件的质量对相关自然频率产生影响的系数	1
F_p	作用力峰值	N

除 1.3.2 中的符号之外, 还用到了下列符号:

c	比热容量	J/(kg · K)
α_{20}	温度系数	1/K
k_{20}	20℃下的单位导电率	1/(Ω · m)
ρ	密度	kg/m ³

A.2 图 1 中的计算

系数 k_{1s} 可由式 (38) 计算, 式中的 a 可换为 a_{1s} :

$$\begin{aligned}
 k_{1s} = & \left\{ - \left(\frac{(a/d)+1}{b/d} \right)^3 \ln \frac{[(a/d)+1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d)+1]^2} + 2 \left(\frac{a/d}{b/d} \right)^3 \ln \frac{(a/d)^2 + (b/d)^2}{(a/d)^2} - \right. \\
 & \left(\frac{(a/d)-1}{b/d} \right)^3 \ln \frac{[(a/d)-1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d)-1]^2} + 3 \left[\frac{a/d}{b/d} \ln \frac{[(a/d)+1]^2 + (b/d)^2}{(a/d)^2 + (b/d)^2} + \right. \\
 & \left. \frac{1}{b/d} \ln \frac{[(a/d)+1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d)-1]^2 + (b/d)^2} - \frac{a/d}{b/d} \ln \frac{(a/d)^2 + (b/d)^2}{[(a/d)-1]^2 + (b/d)^2} \right] + \\
 & 6 \left[\left(\frac{(a/d)+1}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{(a/d)+1} - 2 \left(\frac{a/d}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{a/d} + \left(\frac{(a/d)-1}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{(a/d)-1} \right] + \\
 & \left. 2 \left[\arctan \frac{(a/d)+1}{b/d} - 2 \arctan \frac{a/d}{b/d} + \arctan \frac{(a/d)-1}{b/d} \right] \right\} \frac{(a/d) \cdot (b/d)}{6}
 \end{aligned} \quad (38)$$

A.3 图 3 中的计算

系数 c 可由式 (39) 计算:

$$c = \frac{c_c}{\sqrt{1 + \xi_m \frac{m_z}{nm'_s l}}} \quad (39)$$

式中:

k	l_s/l	ξ_m	c_c	
			图 3 b)	图 3 c)
0	—	0.0	1.0	1.0
1	0.5	2.5	1.0	1.0

表 (续)

k	l_k/l	ξ_m	c_c	
			图 3 b)	图 3 c)
2	0.33	3.0	1.48	1.0
2	0.5	1.5	1.75	1.0
3	0.25	4.0	1.75	1.0
4	0.2	5.0	2.14	1.0
5	0.17	6.0	2.46	1.0
6	0.14	7.0	2.77	1.0

A.4 图 5 中的计算

系数 $m_{\theta 1}$ 和 $m_{\theta 2}$ 可由式 (40)、式 (41) 计算:

$$m_{\theta 1} = \frac{\int_0^{t_p} F_1(t) dt}{t_p F_p} = \frac{2x_1 - 3 + 4e^{-x_1} - e^{-2x_1}}{2x_1(1 - e^{-x_1})^2} \quad (40)$$

其中, $x_1 = \frac{t_p}{\tau_1}$ 。

$$m_{\theta 2} = \frac{\int_{t_p}^{T_k} F_2(t) dt}{(T_k - t_p) F_p} = \frac{1}{2x_2} [2p^2 x_2 + 1 + 2p - 3p^2 - 4p(1-p)e^{-x_2} - (1-p)^2 e^{-2x_2}] \quad (41)$$

其中, $x_2 = \frac{T_k - t_p}{\tau_2}$ 。

A.5 图 6 中的计算

系数 m_{g1} 和 m_{g2} 可由式 (42)、式 (43) 计算:

$$m_{g1} = \frac{\int_0^{t_p} F_1(t) dt}{m_{\theta 1} t_p^2 F_p} = \frac{2x_1^2 - 7 + 8(x_1 + 1)e^{-x_1} - (2x_1 + 1)e^{-2x_1}}{2x_1(2x_1 - 3 + 4e^{-x_1} - e^{-2x_1})} \quad (42)$$

其中, $x_1 = \frac{t_p}{\tau_1}$ 。

$$m_{g2} = \frac{\int_{t_p}^{T_k} F_2(t)(t - t_p) dt}{m_{\theta 2} (T_k - t_p)^2 F_p} = \frac{2p^2 x_2^2 + 1 + 6p - 7p^2 - 8p(1-p)(x_2 + 1)e^{-x_2} - (1-p)^2(2x_2 + 1)e^{-2x_2}}{2x_2[2p^2 x_2^2 + 1 + 2p - 3p^2 - 4p(1-p)e^{-x_2} - (1-p)^2 e^{-2x_2}]} \quad (43)$$

其中, $x_2 = \frac{T_k - t_p}{\tau_2}$ 。

A.6 图 7 中的计算

系数 m_{lg1} 和 m_{lg2} 可由式 (44)、式 (45) 计算:

$$m_{lg1} = \frac{\int_0^{t_p} F_1(t)t^2 dt - m_{\theta 1} m_{g1}^2 t_p^3 F_p}{F_p t_p^3 / 12} = \frac{1}{x_1^3 (1 - e^{-x_1})^2} \left\{ 4x_1^3 - 45 + 24(x_1^2 + 2x_1 + 2)e^{-x_1} - \right. \\ \left. 3(2x_1^2 + 2x_1 + 1)e^{-2x_1} - \frac{3[2x_1^2 - 7 + 8(x_1 + 1)e^{-x_1} - (2x_1 + 1)e^{-2x_1}]^2}{2(2x_1 - 3 + 4e^{-x_1} - e^{-2x_1})} \right\} \quad (44)$$

其中, $x_1 = \frac{t_p}{\tau_1}$ 。

$$m_{lg2} = \frac{\int_{t_p}^{T_k} F_2(t)(t - t_p)^2 dt - m_{\theta 2} m_{g2}^2 (T_k - t_p)^3 F_p}{F_p (T_k - t_p)^3 / 12} \\ = \frac{1}{x_2^3} \left\{ 4p^2 x_2^3 + 3 + 42p - 45p^2 - 24p(1-p)(x_2^2 + 2x_2 + 2)e^{-x_2} - 3(1-p)^2(2x_2^2 + 2x_2 + 1)e^{-2x_2} - \right. \\ \left. \frac{3[2p^2 x_2^2 + 1 + 6p - 7p^2 - 8p(1-p)(x_2 + 1)e^{-x_2} - (1-p)^2(2x_2 + 1)e^{-2x_2}]^2}{2[2p^2 x_2^2 + 1 + 2p - 3p^2 - 4p(1-p)e^{-x_2} - (1-p)^2 e^{-2x_2}]} \right\} \quad (45)$$

其中, $x_2 = \frac{T_k - t_p}{\tau_2}$ 。

A.7 图 8 中的计算

参数 t_R 和 I_R^2 可由式 (46)、式 (47) 计算:

$$t_R = t_p \sqrt{\frac{m_{lg1}}{m_{\theta 1}}} \quad (46)$$

$$I_R^2 = i_R^2 \sqrt{\frac{m_{\theta 1}^3}{m_{lg1}}} \quad (47)$$

其中, $m_{\theta 1}$ 在 A.4 中给出, m_{lg1} 在 A.6 中给出。

A.8 图 9 中的计算

系数 V_F 如下:

t_R / T_{me}	V_F
≤ 0.4	$3.75t_R / T_{me} + 0.50(1 - e^{-39t_R / T_{me}})$
> 0.4	2

系数 V_σ 和 V_{os} 如下:

t_R / T_{me} 或 t_{Rs} / T_{mes}	V_σ	V_{os}
≤ 0.1478	$3.75t_R / T_{me} + 0.50(1 - e^{-15t_R / T_{me}})$	$3.75t_R / T_{me} + 0.50(1 - e^{-15t_R / T_{me}})$
> 0.1478	1	1

A.9 图 10 中的计算

短时耐受电流密度 S_{thr} 可由式 (48) 计算:

$$S_{\text{thr}} = \frac{K}{\sqrt{T_{\text{kr}}}} \quad (48)$$

$$\text{其中, } K = \sqrt{\frac{\kappa_{20} c \rho}{\alpha_{20}} \ln \frac{1 + \alpha_{20}(\theta_{\text{e}} - 20^{\circ}\text{C})}{1 + \alpha_{20}(\theta_{\text{b}} - 20^{\circ}\text{C})}}。$$

材料数据为:

符号	国际单位	铜	铝合金	钢
c	J/ (kg · K)	390	910	480
ρ	kg/m ³	8900	2700	7850
κ_{20}	1/ (Ω · m)	56×10^6	34.8×10^6	7.25×10^6
α_{20}	1/K	0.003 9	0.004	0.004 5

若基准温度不是 20℃, 须更改 K 的公式。

参 考 文 献

- [1] Hoseman, G, Nietsch, Ch., Tsanakas, D.: Short-circuit stress in d.c. auxiliary systems, CIGRE Report 23-104 (1992).
-

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
变 电 站 和 发 电 厂 直 流 辅 助
电 源 系 统 短 路 电 流
第 2 部 分：效 应 计 算

DL/T 1572.2—2016/IEC 61660-2:1997

*

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京传奇佳彩数码印刷有限公司印刷

*

2017年10月第一版 2017年10月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 16开本 2印张 55千字

印数 001—200册

*

统一书号 155123·3243 定价 17.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换



中国电力出版社官方微信



掌上电力书屋



155123.3243