



# 中华人民共和国能源行业标准

NB/T 41008—2017

---

## 交流电弧炉供电技术导则 电能质量评估

Power supply technical guidelines for AC electric arc furnace—  
Power quality assessment

2017-08-02 发布

2017-12-01 实施

---

国家能源局 发布

# 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 评估指标 .....	2
5 电能质量评估通用要求 .....	2
6 预评估 .....	3
7 监测评估 .....	4
附录 A (规范性附录) 交流电弧炉供电基本模型 .....	6
附录 B (规范性附录) 功率冲击预估方法 .....	8
附录 C (资料性附录) 交流电弧炉谐波电流经验数据 .....	9
附录 D (规范性附录) 谐波电压计算方法 .....	10
附录 E (资料性附录) 交流电弧炉运行对供电频率的影响 .....	11
附录 F (规范性附录) 现场测试电能质量评估报告要求 .....	13
附录 G (资料性附录) 交流电弧炉生产工艺过程简介 .....	16

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国电压电流等级和频率标准化技术委员会提出并归口。

本标准起草单位：西安博宇电气有限公司、中机生产力促进中心、国网江苏省电力公司电力科学研究院、中国电力科学研究院、马鞍山钢铁股份有限公司、上海电力通信公司、北京博电新能电力科技有限公司、威胜能源产业技术有限公司、国网宁夏电力公司电力科学研究院、国网山西省电力公司电力科学研究院、安徽大学教育部电能质量工程研究中心。

本标准主要起草人：刘军成、张苹、袁晓冬、林海雪、苏国友、董瑞安、齐泽锋、金维宇、黄永宁、王金浩、李令冬。

# 交流电弧炉供电技术导则

## 电能质量评估

### 1 范围

本标准规定了交流电弧炉正常运行工况下电能质量评估的基本要求及其方法。

本标准适用于针对 PCC 点对交流电弧炉用电电能质量进行评估;对 PCC 点与交流电弧炉供电环节之间的其他节点的用电电能质量评估可参考本标准执行。

### 2 规范性引用文件

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。

GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差

GB/T 12326 电能质量 电压波动和闪变

GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波

GB/T 15543 电能质量 三相电压不平衡

GB/T 15945—2008 电能质量 电力系统频率偏差

GB/T 17626.30 电磁兼容 试验和测量技术 电能质量测量方法

GB/T 17626(所有部分) 电磁兼容 试验和测量技术

GB/T 19862 电能质量监测设备通用要求

GB/T 24337 电能质量 公用电网间谐波

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**改善率 improvement ratio**

用以描述电能质量控制设备或技术措施的综合补偿效果。其值等于控制设备投运前后或技术措施实施前后在待评估节点测量到的电能质量指标的相对变化率,见式(1)。

$$K = \frac{x_o - x_t}{x_o} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$K$  ——改善率;

$x_o$  ——控制设备运行前电能质量指标的评估值;

$x_t$  ——控制设备运行后电能质量指标的评估值。

#### 3.2

**监测评估 monitoring assessment**

将实测数据与允许限值比较,对各项电能质量参数进行的评价。

[GB/T 32507—2016,定义 3.19]

## NB/T 41008—2017

### 3.3

#### 预评估 predicted assessment

对评估对象建立模型,通过计算获得的预先估计数据,对各项电能质量参数进行的评价。

[GB/T 32507—2016,定义 3.20]

### 3.4

#### 公共连接点 point of common coupling;PCC

电力系统中一个以上用户的连接处。

[GB/T 32507—2016,定义 2.1.19]

## 4 评估指标

交流电弧炉用电电能质量评估的主要指标如下:

- a) 频率偏差;
- b) 电压偏差;
- c) 电压变化;
- d) 闪变;
- e) 谐波;
- f) 间谐波;
- g) 三相不平衡度。

注 1: 评估参数可在上述指标中选取部分或全部指标;频率偏差的评估主要针对大型电弧炉。

注 2: 评估指标还可能包括其他相关方关心的电气量,例如功率冲击、用电效率、功率因数、负序电流等。

## 5 电能质量评估通用要求

### 5.1 评估适用范围

#### 5.1.1 预评估

预评估主要适用于交流电弧炉供电系统规划、设计,或投产运行接入系统前阶段。

#### 5.1.2 监测评估

监测评估主要适用于交流电弧炉投产运行阶段和电能质量控制设备治理效果或技术措施实施效果评估。

### 5.2 适用的标准及其指标分配

#### 5.2.1 PCC 点电能质量评估

针对 PCC 点的电能质量评估(包括限值分配)应依据国家、行业电能质量标准进行。

#### 5.2.2 PCC 点下游用电电能质量评估

针对交流电弧炉供电企业内部的用电电能质量评估及其限值分配,应依据 GB/T 17626(所有部分)进行。

### 5.3 评估点选择原则

交流电弧炉电能质量评估点选择的原则为:

- a) 原则上,交流电弧炉用电电能质量评估要求在 PCC 点进行;
- b) 若有必要,可选择对交流电弧炉企业内部用电环节相关节点进行用电电能质量评估。

#### 5.4 设计或实测数据

评估需要的设计或实测参数,包括:

- a) 待评估点运行短路容量、正常运行最大短路容量、正常运行最小短路容量;
- b) 供电设备容量;
- c) 电弧炉供电系统一次接线图,包括电气设备参数,例如所涉及的变压器铭牌参数、线路(电缆)型号及长度、回路串联电抗器铭牌参数等;
- d) 交流电弧炉设计参数及运行参数,包括引线及其电极参数、短网(大电流系统)阻抗、熔化期功率因数、精炼期功率因数、电弧炉额定铭牌参数、工艺参数等;
- e) 无功变化量范围、设计谐波发生量;
- f) 所有无功补偿设备铭牌参数;
- g) 自备电厂包括发电机在内的设备参数;
- h) 电动机铭牌参数。

### 6 预评估

#### 6.1 预评估采用的电路模型

预评估推荐采用的交流电弧炉电路模型如附录 A 所示。

#### 6.2 电能质量干扰计算方法

##### 6.2.1 假设条件

电能质量指标及其他电气量的预评估计算在下述假设条件下进行:

- a) 三相供电电压对称,且为纯正弦波;
- b) 系统供电电气参数对称;
- c) 电弧炉及其用电电气参数对称。

##### 6.2.2 功率冲击及其对应电压变化预估

###### 6.2.2.1 计算方法

交流电弧炉运行过程中的无功功率冲击及其对应电压变化预估方法如附录 B 所示。

###### 6.2.2.2 电压变化评估方法

应依据 GB/T 12326 进行电压变化评估。

##### 6.2.3 三相不平衡度预评估

###### 6.2.3.1 计算方法

本标准推荐采用对称分量法计算交流电弧炉运行过程中引起的不平衡水平;可采用成熟的短路电流计算程序。

###### 6.2.3.2 计算工况

设评估点运行在额定电压下,针对单极悬空、两相短路运行工况,计算其引起的序电流及其序电压。

## NB/T 41008—2017

依据 GB/T 15543,取严重者作为最终评估结果。

### 6.2.3.3 评估方法

依据 GB/T 15543 进行。

### 6.2.4 谐波预评估

#### 6.2.4.1 电弧炉谐波电流水平的确定

应基于电弧炉的设计或相关设计手册确定谐波电流发生量。附录 C 为部分类型电弧炉谐波水平的经验值。

#### 6.2.4.2 谐波计算

宜采用节点谐波电流注入法计算评估点谐波电压畸变水平。节点谐波电流注入法参见附录 D。

#### 6.2.4.3 评估方法

应依据 GB/T 14549 进行。

### 6.2.5 供电频率影响评估

6.2.5.1 交流电弧炉运行过程中,有功冲击会对电网运行频率产生影响。有关交流电弧炉运行对供电频率影响的内容可参考附录 E。

6.2.5.2 当需要对供电频率影响进行评估时,可考虑应用附录 E 中的式(E.1)进行计算评估。

## 6.3 评估报告及结论

评估报告应包含下述内容:

- a) 背景及工艺描述;
- b) 设计或实测数据;
- c) 假设条件;
- d) 依据标准及其限值指标;
- e) 评估采用的电路模型;
- f) 有功、无功、视在功率、功率因数随电弧电流变化的仿真曲线;
- g) 无功功率波动水平及其电压变化水平;
- h) 电压变化评价结论;
- i) 谐波评价结论;
- j) 三相不平衡度评价结论;
- k) 其他评估指标。

## 7 监测评估

### 7.1 测试仪器技术要求

测试仪器应满足:

- a) GB/T 19862 电能质量监测设备通用要求;
- b) GB/T 17626.30 电磁兼容 试验和测量技术 电能质量测量方法。

## 7.2 评估依据标准

评估方法应遵循下述国家标准：

- a) GB/T 12325；
- b) GB/T 15945；
- c) GB/T 15543；
- d) GB/T 14549；
- e) GB/T 24337；
- f) GB/T 12326。

## 7.3 测试周期

测试周期的确定应考虑下述要求：

- a) 应涵盖交流电弧炉可能的所有运行工况组合,包括填料、起弧、氧化、还原等；
- b) 最小测试周期:正常运行工况下连续 24 h 测试；
- c) 若有无功补偿、电能质量控制设备,这些设备均应正常投入运行。

注:对电能质量控制设备效果进行评估时,其测试周期应包括:待评估设备未运行情况下,测试最小周期 24 h;待评估设备正常运行情况下,测试最小周期 24 h。

## 7.4 评估方法

7.4.1 依据对应的国家标准,对下述电能质量指标给出具体评估结果,并给出超标与否的结论,提供 24 h 变化曲线:

- a) 电压偏差；
- b) 频率偏差；
- c) 闪变；
- d) 谐波电压、电流；
- e) 间谐波电压；
- f) 三相不平衡度。

7.4.2 给出下述电参量的平均值,并给出变化曲线:

- a) 有功功率；
- b) 无功功率；
- c) 功率因数；
- d) 基波功率因数。

注:电能质量控制设备效果评估应在下述情况下进行:

- a) 在电能质量控制设备未运行情况下,依据 7.4 要求进行评估；
- b) 在电能质量控制设备运行情况下,依据 7.4 要求重新进行评估；
- c) 对比上述两种情况评估结果,给出设备治理效果的最终评价,主要包括:补偿设备投运前后所关注指标量值的变化、改善率、是否超标等内容。

## 7.5 评估报告要求

见附录 F。

附 录 A  
(规范性附录)  
交流电弧炉供电基本模型

A.1 交流电弧炉预评估模型

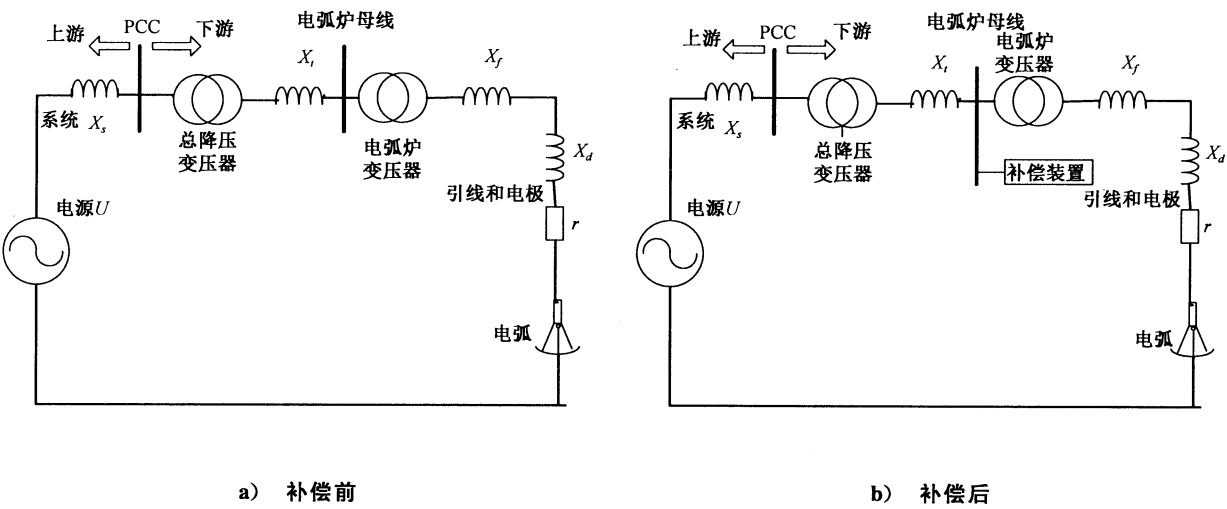


图 A.1 交流电弧炉预评估模型

图 A.1 中 PCC 点上游为供电系统,  $U$  为电源电压,  $X_s$  为系统感抗; PCC 点下游为电弧炉供电内部接线,  $X_t$  为钢厂总降压变压器或降压变压器(简称:总降)短路阻抗,  $X_f$  为电弧炉变压器(简称:炉变)短路阻抗,  $X_d$ 、 $r$  为引线和电极的感抗及电阻。补偿装置可为阻抗改变型(例如 SVC)或有源型(例如 SVG)。

A.2 简化分析电路

图 A.1 的简化分析电路如图 A.2 所示。

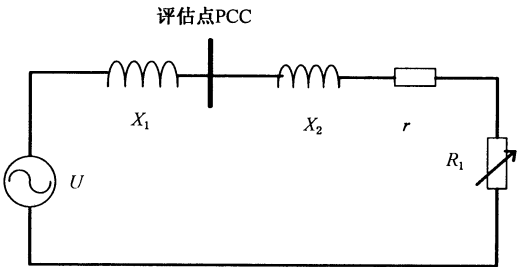


图 A.2 图 A.1 简化电路

图 A.2 中  $U$  为电源供电电压(相电压),  $X = X_1 + X_2$ , 其中  $X_1$  为评估点向上游看进去的综合阻抗(计及补偿装置的影响),  $X_2$  为评估点向下游看进去的综合阻抗(计及补偿装置的影响), 电弧用一可变电阻  $R_1$  表示, 并设:  $R = R_1 + r$ 。则根据电工理论, 有式(A.1)~式(A.7)成立:

流过评估点电流有效值:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R^2 + X^2)}} \dots\dots\dots (A.1)$$

评估点功率因数:

$$\cos(\phi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \dots\dots\dots (A.2)$$

视在功率:

$$S = 3 \times UI \dots\dots\dots (A.3)$$

有功功率:

$$P = 3 \times U \times I \times \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \dots\dots\dots (A.4)$$

电弧功率:

$$P_d = 3 \times U \times I \times \frac{R_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \dots\dots\dots (A.5)$$

电效率:

$$\eta = \frac{P_d}{P} \times 100\% \dots\dots\dots (A.6)$$

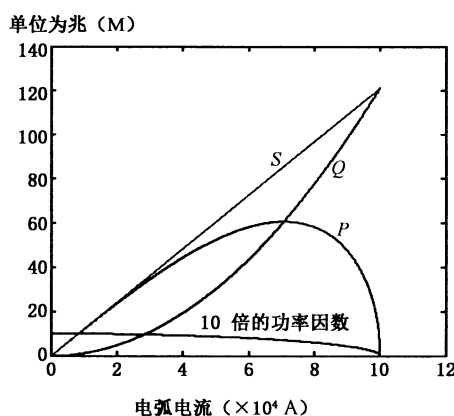
无功功率:

$$Q = 3 \times U \times I \times \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \dots\dots\dots (A.7)$$

通过上述公式分析可知:只有当  $X = R$  时,电弧炉功率最大,此时功率因数为 0.707。

### A.3 交流电弧炉预评估计算举例

设评估点为电弧炉供电母线,其线电压为 700 V,电弧炉设计额定功率为 60 MW,  $X = 4.04 \text{ m}\Omega$ ,假设  $r = 0$ 。则根据 A.2 中的公式得到的各电气参数随电弧电流(弧阻)的变化曲线见图 A.3。可见:当电弧电流过大时,其中无功电流成分占主要部分,功率因数很低。



说明:

$P$  ——有功功率,单位为瓦(W);

$Q$  ——无功功率,单位为乏(Var);

$S$  ——视在功率,单位为伏安(V·A)。

图 A.3 举例电弧炉电气参数随电弧电流变化仿真示意图

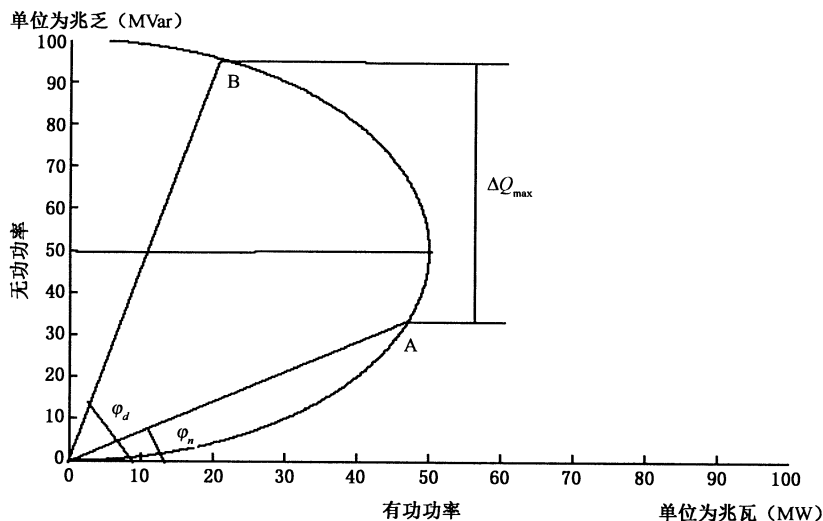
**附 录 B**  
(规范性附录)  
**功率冲击预估方法**

### B.1 功率冲击预估方法

本方法仍采用图 A.2 电路模型。

设  $S_d = 3 \times U_{pcc}^2 / X_2$  ( $S_d$  指电弧炉的短路容量,  $U_{pcc}$  为 PCC 点相电压), 则理论上, 电弧炉吸收的有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  满足式(B.1), 如图 B.1 所示:

$$P^2 + (Q - S_d/2)^2 = (S_d/2)^2 \quad \dots\dots\dots (B.1)$$



**图 B.1 电弧炉的有功无功关系曲线**

设电弧炉短网设计功率因数为  $\cos\varphi_d$  (图 B.1 中 B 点), 额定设计功率因数为  $\cos\varphi_n$  (图 B.1 中 A 点), 则图 B.1 中 A、B 之间的纵向距离表示电弧炉运行过程中可能产生的最大无功功率冲击:

$$\Delta Q_{\max} = S_d (\sin^2 \varphi_d - \sin^2 \varphi_n) \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

设 PCC 点短路容量为  $S_N$ , 则对应该无功冲击的电压变化( $\Delta V$ )为:

$$\Delta V = \Delta Q_{\max} / S_N \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

## 附录 C

(资料性附录)

## 交流电弧炉谐波电流经验数据

## C.1 超高功率交流电弧炉谐波电流经验值

不同公司采用的 EAF 谐波电流计算汇总表见表 C.1。

表 C.1 不同公司采用的 EAF 谐波电流计算汇总表

谐波次数 h	谐波电流含有率(HRI <sub>h</sub> ) %							
	美国	西欧(BBC)	日本 (日新电机)	英国	苏联	ABB	上海宝钢安大	
							max	95%
2	5.6	4~9(最大 30)	9~12	10	5.1~9.5	5.0	17.40	4.21
3	6.5	6~10(最大 20)	15~20	11	4.4~11.2	6.0	20.15	6.69
4	3.3	2~6(最大 15)	5~7	3	2.0~4.8	3.0	6.48	2.58
5	6.4	2~10(最大 12)	4~6	9	2.6~8.9	4.0	10.63	6.84
6	1.7	2~3(最大 10)		1		1.5	4.31	1.36
7	2.5	3~6(最大 8)	2~3	4	0.7~5.7	2.0	5.05	3.40
8				1		1.0	1.47	0.63
9				1	0.3~1.4	1.0	2.16	0.82
10 及以上				<1		<1	<1.24	<1
注：此表为超高功率交流电弧炉熔化期经验数据。								

## C.2 LF 谐波电流经验值

LF 谐波电流经验值见表 C.2。

表 C.2 LF 谐波电流计算

谐波次数 h	2	3	4	5	6	7	8	9	11、13	10、12、14~25
第 h 次谐波电流 含有率(HRI <sub>h</sub> ) %	4.0	7.0	3.0	3.5	1.0	1.5	1.0	0.8	0.4	0.2

**附 录 D**  
(规范性附录)  
**谐波电压计算方法**

对于一个  $N$  节点的网络,在获取了各元件谐波阻抗及其拓扑关系后,对于某  $n$  次谐波其谐波导纳矩阵为:

$$Y_n = \begin{bmatrix} Y_{n11} & \cdots & Y_{n1i} & \cdots & Y_{n1N} \\ \vdots & & & & \\ Y_{ni1} & \cdots & Y_{nii} & \cdots & Y_{niN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{nN1} & \cdots & Y_{nNi} & \cdots & Y_{nNN} \end{bmatrix}$$

式中,  $n \in H$ ,  $H$  为最高谐波分析次数。

对于待评估节点  $i$ ,注入谐波电流  $I_n$  从而获取该节点的谐波电压:

$$I_n = Y_n U_n \quad n \in H$$

其中  $I_n$  为:  $I_n = \underbrace{[0 \quad \cdots \quad i_n \quad 0 \quad 0]^T}_N$ ,  $i_n$  所处的位置为第  $i$  个。

反复上述过程  $H$  次,可获取对应节点  $i$  的各次谐波电压。

## 附录 E (资料性附录)

### 交流电弧炉运行对供电频率的影响

电弧炉的有功功率变化将引起供电网的频率变化。GB/T 15945—2008 规定：“用户冲击负荷引起的系统频率变动一般不得超过 $\pm 0.2$  Hz。在保证近区电网、发电机组的安全、稳定运行和用户正常供电的情况下，可以根据冲击负荷的性质和大小以及系统的条件适当变动限值。”上述规定意味着电弧炉有功冲击功率对供电频率影响的评估有两方面内容：一方面需评估有功冲击功率对整个系统造成的频率偏差；另一方面主要评估对近区局部电网中旋转设备，特别是发电机组的安全稳定及其寿命产生的危害。下面分别论述评估方法：

#### E.1 对整个系统造成的频率偏差估算

因为电弧炉有功功率变动周期短，供电网承受这种冲击时可以足够精确地利用其功率-频率静态特性及频率的一次调整作用（即不考虑发电机组的频率调整器作用），有功功率冲击引起的频率波动可按式(E.1)计算：

$$\Delta f = f_N \frac{\Delta P}{S_G} \times \frac{1}{\rho K_G + K_L} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

$\Delta f$  ——有功功率冲击引起的频率波动，单位为赫兹(Hz)；

$f_N$  ——系统频率标称值，单位为赫兹(Hz)， $f_N = 50$  Hz；

$\Delta P$  ——冲击有功功率，单位为兆瓦(MW)；

$S_G$  ——系统发电总容量，单位为兆瓦(MW)；

$\rho$  ——备用容量系数， $\rho$  等于  $S_G$  与系统总有功负荷之比；

$K_G$  ——发电机的功率-频率静态特征系数：

汽轮发电机组  $K_G = 16.6 \sim 25$  (标么值)；

水轮发电机组  $K_G = 25 \sim 50$  (标么值)；

$K_L$  ——系统负荷的频率调节效应系数， $K_L = 1 \sim 3$  (标么值)。

一般情况下  $\rho > 1$ ，表明系统有备用容量，若当发电机均已满载或原动机无调速器装置时， $K_G = 0$ ；在考虑电弧炉有功冲击影响时，按保守估计，可令  $K_G = 0$ ，这样由式(E.1)可知，冲击有功负荷对频率的影响只与冲击负荷占系统发电总容量以及负荷的频率调节效应系数  $K_L$  有关。在实际系统中  $K_L$  需要经过试验或根据负荷资料分析估算求得。利用式(E.1)，在最严重情况下令  $K_L = 1$ ， $K_G = 0$ ，则当有功冲击负荷不超过系统发电总容量的 0.4% 时就能保证频率变动不超过 0.2 Hz，这可以作为工程预评估的实用参考判据。

#### E.2 对近区电网中发电机组危害的估算

当电力系统某处受到负荷(有功功率)扰动瞬间，由于冲击点母线电压相位突变，造成系统中所有机组对冲击点的功角有一个相同的角增量，各机组按其功角特性曲线初始运行点的斜率(整步功率)的大小分担冲击负荷。设有  $m$  台发电机的电力系统，在节点  $k$  处当  $t = 0^+$  时发生了有功功率扰动量  $\Delta P_L$ ，则可以证明第  $i$  台发电机受到的冲击功率：

$$\Delta P_i(0^+) = \left[ \frac{P_{sik}}{\sum_{i=1}^m P_{sik}} \right] \Delta P_L \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

$\Delta P_i(0^+)$ —— $t=0^+$ 时第  $i$  台发电机受到的冲击功率;

$P_{sik}$  —— $i$  和  $k$  点间的整步功率,即

$$P_{sik} = \left. \frac{\partial P_{ik}}{\partial \delta_{ik}} \right|_{\delta_{ik0}} = E'_i U_k B_{ik} \cos \delta_{ik0} \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

其中, $E'_i$ 为第  $i$  台发电机暂态电抗后的恒定电动势; $B_{ik}$ 为  $i$ 、 $k$  两点间的转移电纳; $\delta_{ik0}$ 为  $t=0$  时, $i$ 、 $k$  两点间电压相位差; $P_{ik}=E'_i U_k B_{ik} \sin \delta_{ik}$  为  $i$ 、 $k$  之间传输的有功功率。

由式(E.2)可知,在节点  $k$  处发生冲击瞬间,系统中发电机组将主要按各自电动势对节点  $k$  的电气距离(即  $B_{ik}$  为倒数),亦即按各自对  $k$  点的整步功率系数  $P_{sik} / \sum_{i=1}^m P_{sik}$  来分担负荷的扰动量  $\Delta P_L$ ,离  $k$  点电气距离越近则分担的冲击越大。这一过程是瞬时发生、迅速完成的。当发电机承受了扰动量后,突然改变了原有的电磁功率输出,而由于机械惯性关系,机械功率不可能突然改变,这时造成功率的不平衡,必然引起发电机转速的改变。转速改变的大小和发电机组的转动惯量、扰动大小以及整步功率系数有关。在这个暂态过程中机组之间将产生转速和功率振荡,在整步功率系数作用下,各发电机组趋向平均转速。可以证明,在平均转速下机组的功率将按转动惯量系数进行分配,即

$$\Delta P_i(t) = \left[ \frac{J_i}{\sum_{i=1}^m J_i} \right] \Delta P_L \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

式中:

$J_i$ ——第  $i$  台发电机组的转动惯量。

需指出,机组频率变化一旦越过调速器失灵区后(各机组失灵区不可能完全一致),机组调速器开始动作改变机械功率,企图把转速恢复到原来的数值,最后按照机组的综合调速特性决定系统的频率和各发电机组的功率,这个过程是相当复杂的。但在考虑电弧炉的冲击影响时,建议首先用式(E.2)粗略判断  $k$  点发生电弧炉有功冲击  $\Delta P_{\max}(=\Delta P_L)$  时相关发电机(主要是近区电网中小机组)受到的冲击功率。确定  $\Delta P_i(0^+)$  的主要工作是求出整步功率  $P_{sik}$  值。为此,需要对电弧炉近区电网做合理的简化,按电力系统潮流计算的要求建立数学模型,做稳态潮流计算,据此求出  $P_{sik}$  值。

发电机组承受有功冲击的限值至今没有统一的标准和规定。根据国内若干汽轮发电机组分析计算时所采用的限值(源自厂内运行规程或国外厂家资料),发电机组电磁功率允许变化速度约为每秒 5% 额定功率。由于有功冲击将引起机组轴扭矩变化,从而造成轴的疲劳损耗,根据发电机组大轴事故分析,有些专家认为,汽轮发电机组每年可以承受平均有功功率突变 10%~30% 的冲击 10 次~40 次。

## 附录 F

### (规范性附录)

#### 现场测试电能质量评估报告要求

电能质量监测评估报告应包含下述主要内容：

##### F.1 背景介绍

F.1.1 待评估系统一次接线图及其运行工况介绍。

F.1.2 待评估点运行短路容量、正常运行最大短路容量、正常运行最小短路容量。

F.1.3 待评估交流电弧炉设计运行参数。

##### F.2 评估目的

F.2.1 说明是接入评估还是治理效果评估。

F.2.2 主要评估哪些指标。

##### F.3 评估点选择及其测试接线

F.3.1 具体说明待评估节点，并图示。

F.3.2 具体接入电压、电流信号说明。

F.3.3 接入电流互感器(CT)、电压互感器(PT)变比。

##### F.4 依据标准及其限值分配

给出评估所依据的国家标准，并计算对应该电弧炉电能质量各评估指标的具体限值。

##### F.5 监测设备说明

说明采用什么型号的产品；该产品符合的标准以及监测设备的有效期。

##### F.6 测试时间周期及其系统运行介绍

F.6.1 注明具体测试时间段。

F.6.2 说明测试期间电弧炉所有运行工况组合，包括填料、起弧、氧化、还原等。

F.6.3 说明测试期间系统运行情况，包括有无补偿设备、是否投入等。

##### F.7 接入评估结果

F.7.1 依据对应的国家标准，对下述电能质量指标给出具体评估结果，并给出超标与否的结论，提供24 h变化曲线：

- a) 电压偏差；
- b) 频率偏差；
- c) 闪变；
- d) 谐波电压、电流；
- e) 间谐波电压；
- f) 三相不平衡度。

F.7.2 给出下述电参量的平均值,并给出变化曲线:

- a) 有功功率；
- b) 无功功率；
- c) 功率因数；
- d) 基波功率因数。

## F.8 治理效果评估

根据 7.4.2 要求给出如下评估结果:

- a) 控制设备未投入运行情况下,依据对应的国家标准,对下述电能质量指标给出具体评估结果,并给出超标与否的结论,提供 24 h 变化曲线:
  - 1) 电压偏差；
  - 2) 频率偏差；
  - 3) 闪变；
  - 4) 谐波电压、电流；
  - 5) 间谐波电压；
  - 6) 三相不平衡度；给出下述电气量的平均值,并给出变化曲线:
  - 7) 有功功率；
  - 8) 无功功率；
  - 9) 功率因数；
  - 10) 基波功率因数。
- b) 控制设备投入运行情况下,依据对应的国家标准,对下述电能质量指标给出具体评估结果,并给出超标与否的结论,提供 24 h 变化曲线:
  - 1) 电压偏差；
  - 2) 频率偏差；
  - 3) 闪变；
  - 4) 谐波电压、电流；
  - 5) 间谐波电压；
  - 6) 三相不平衡度；给出下述电气量的平均值,并给出变化曲线:
  - 7) 有功功率；
  - 8) 无功功率；
  - 9) 功率因数；

- 10) 基波功率因数。
- c) 对比控制设备投运与否两种情况评估结果,给出设备治理效果的最终评价,包括:
  - 1) 控制设备投运前后关注指标量值的变化;
  - 2) 改善率;
  - 3) 是否超标。

## 附 录 G

### (资料性附录)

#### 交流电弧炉生产工艺过程简介

##### G.1 电弧炉炼钢

电弧炉(简称 EAF)炼钢是以电能作为热源,通过电极和炉料间放电产生的电弧,使电能弧光中转变为热能,并借助电弧辐射和电弧的直接作用加热并熔化金属炉料和炉渣,冶炼出各种成分合格的钢和合金的一种炼钢方法。传统炼钢工艺分为熔化期、氧化期、还原期(三段工艺)。现代电弧炉炼钢工艺则分为熔化期、氧化期(二段工艺),还原期则移至炉外精炼。

##### G.2 电弧炉炼钢特点

电弧炉炼钢具有如下特点:

- a) 以电能为热源,具有清洁、高效、使用方便等优点,避免燃烧燃料对钢液的污染,热效率高,可达 65% 以上;易于实现熔池加热的自动化;
- b) 冶炼过程中熔池温度高且容易控制,满足冶炼不同钢种的要求;
- c) 电弧炉炼钢可以消纳废钢,是废旧钢铁资源的回收再利用,是一种处理污染的环保技术;
- d) 炼钢过程中的烟气污染和噪声污染容易控制;
- e) 设备简单,工艺流程短,占地少、投资省、建厂快,生产灵活。

##### G.3 原材料

###### G.3.1 钢铁料

废钢、生铁等。要求钢铁料化学成分明确、表面清洁无污染、不得混有有色金属、不得有封闭器皿及易爆炸物、块度要合适等。

###### G.3.2 脱氧剂及合金材料

锰铁(Fe-Mn)、硅铁(Fe-Si)、铝(Al)、硅锰合金(Mn-Si)等。用于调整钢液的化学成分(钢液的合金化)和用作炼钢过程的脱氧剂,用于除去钢水中的氧。

###### G.3.3 造渣材料

石灰石( $\text{CaCO}_3$ )、石灰( $\text{CaO}$ )、萤石( $\text{CaF}_2$ )和火砖块( $\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )等。用于减少钢中气体和夹杂,造渣、脱磷、脱硫。

###### G.3.4 氧化剂

氧气、铁矿石、氧化铁皮等。用于除去钢水中的硅锰磷及过量的碳等。

###### G.3.5 增碳剂

石墨、焦炭、电极粉、生铁块。用于造渣及增碳。

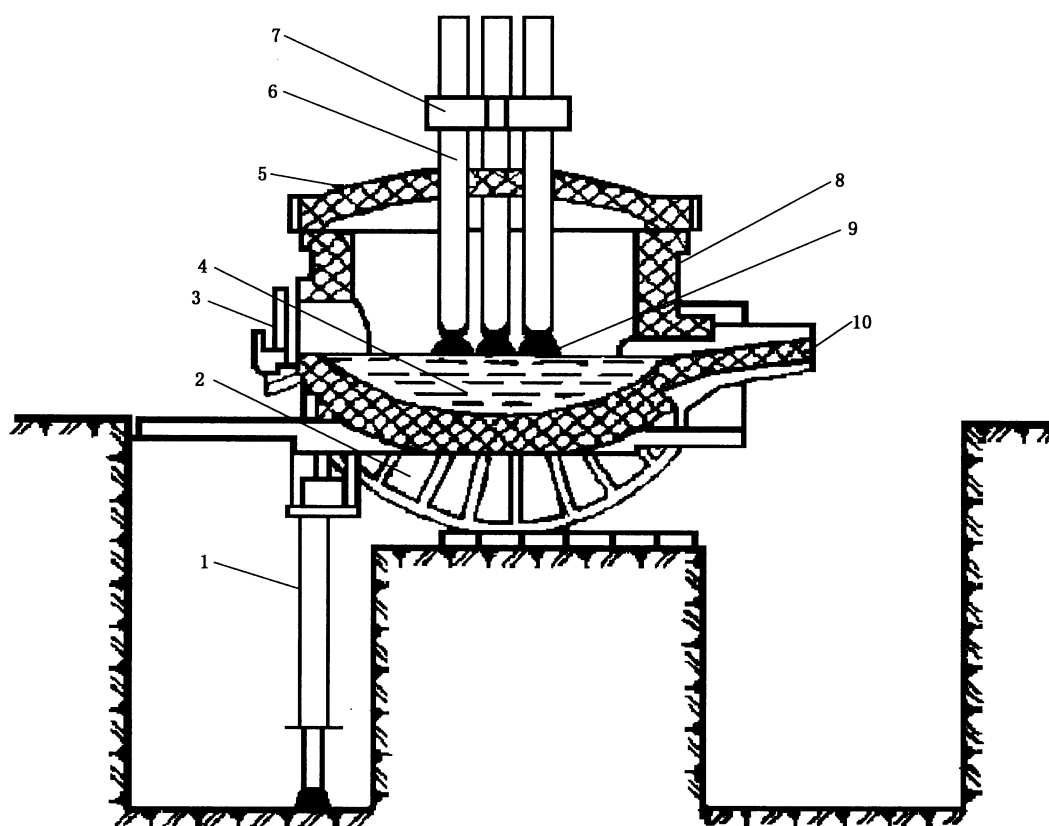
## G.4 电弧炉的构成

### G.4.1 电弧炉的主要机械设备

#### G.4.1.1 电弧炉的主要结构

电弧炉主要结构如图 G.1 所示,其主要机械设备包括:

- a) 炉体;
- b) 电极夹持器及升降装置;
- c) 炉体倾动装置;
- d) 炉盖及提升与旋转装置;
- e) 炉顶装料系统等。



说明:

- 1 ——倾炉用液压缸;
- 2 ——倾炉摇架;
- 3 ——炉门;
- 4 ——熔池;
- 5 ——炉盖;
- 6 ——电极;
- 7 ——电极夹持器(连接电极升降装置);
- 8 ——炉体;
- 9 ——电弧;
- 10 ——出钢槽。

图 G.1 炼钢电弧炉结构示意图

#### G.4.1.2 炉体

用来承载熔化废钢料和进行各种冶金反应,由金属炉壳和耐火材料砌成的炉衬构成,可承受 1 600 ℃ 左右的高温。

#### G.4.1.3 电极夹持器及升降自动调节装置

用来夹持电极,并接通由变压器、软电缆、导电铜管、电极和钢铁料等组成的导电回路,实现电能向热能的转换。通过电极升降自动调节装置获得冶炼时所需要的电流,并调整插入炉内的电极长度。

#### G.4.1.4 炉体倾动装置

承受炉体、炉料和炉渣等的重量。在出钢时需要向出钢方向倾动,使钢液从出钢口流出。扒渣时,炉体向炉门方向倾动,满足不同操作工艺的倾动要求。

#### G.4.1.5 炉盖提升及旋转装置

将炉盖提起并旋转,使炉膛露出上方空间,完成从炉子上方垂直加入炉料的工序(一般旋出角度: 72°~90°)。装料毕,复位,用于冶炼时电弧炉的密封。

#### G.4.1.6 炉顶加料装置

电弧炉通常采用料筐装料,具有炉料入炉速度快、热量损失小、节约电能的特点,能提高炉衬的使用寿命,还能充分利用熔炼室的空间。另外,料筐中的料可在原料跨间或贮料场上提前装好,若时间充裕、布料合理,装入炉内的炉料仍能保持它在料筐中的布料位置,如炉料质量好,一次即可完成装料。

### G.4.2 电弧炉的供电设备及控制装置

#### G.4.2.1 供电设备

主要有高压配电装置、电抗器(非必须)及电抗器短接开关、电炉变压器、短网(包括水冷电缆、导电铜管)和电极等组成,用于将电能转换为电弧热能,以熔化金属物料。

#### G.4.2.2 电极自动调节装置

用于快速调节电极的位置,保持恒定的电弧长度,以减少电流波动,维持电弧电压和电流比值的恒定,使输入功率维持在给定的设置上,从而缩短冶炼时间和减少电能消耗。

### G.4.3 辅助设备

#### G.4.3.1 主要设备

辅助设备主要包括:

- a) 水冷装置;
- b) 补炉机;
- c) 吹氧装置;
- d) 排烟除尘装置等。

#### G.4.3.2 水冷装置

用于冷却受高温影响的炉壁、炉盖、电极夹持器、电极密封圈、炉门盖、炉门框等电弧炉构件。

### G.4.3.3 补炉机

用于修补电弧炉在冶炼过程中受到高温作用而损坏的炉衬,延长电弧炉的使用寿命。

### G.4.3.4 吹氧装置

在冶炼过程中吹入氧气,加速废钢的熔化,缩短冶炼时间,降低电耗。

### G.4.3.5 排烟除尘装置

用于净化和排除电弧炉冶炼过程中产生的烟气,达到环保排放要求。

## G.5 电弧炉的生产工艺过程

### G.5.1 电弧炉炼钢工艺流程图

电弧炉炼钢工艺流程如图 G.2 所示。

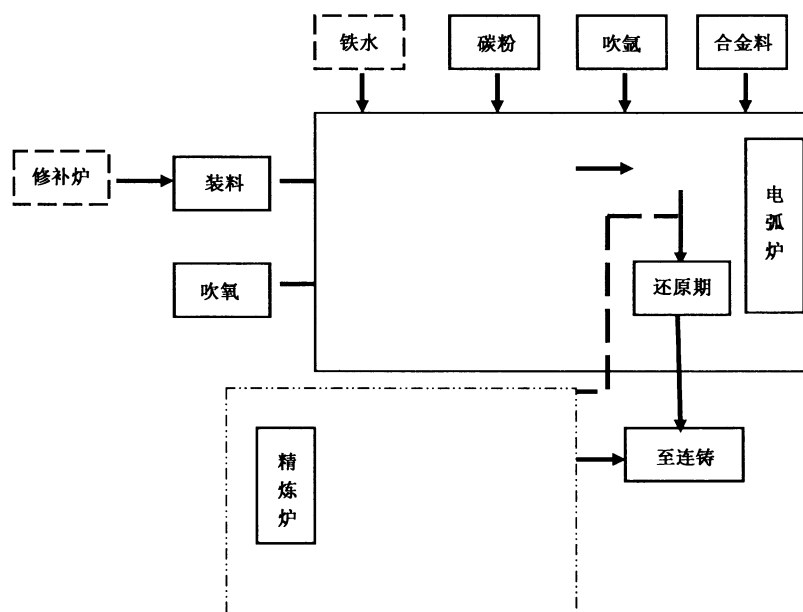


图 G.2 电弧炉炼钢工艺流程示意图

### G.5.2 烘炉

新筑的炉体通常要烘炉,以使炉体烧结和去除水分。烧结使炉衬具有足够的强度和耐火度。

### G.5.3 修补炉

电弧炉炉衬在炼钢过程中处于高温状态下,因不断地受到机械冲击和化学侵蚀作用,造成不同程度的损坏,为使炉衬保持一定的形状,保证正常冶炼和延长炉衬的使用寿命,每次出钢后应对受损的炉衬进行修补。

### G.5.4 配料

配料是电弧炉炼钢工艺中不可缺少的组成部分,应按各种原材料的化学成分和计划消耗定额,根据

所炼钢种的技术标准及工艺要求进行配料。配料对钢水的各项技术经济指标都有影响。

### G.5.5 装料

合理的装料、布料,有利于减少对炉衬寿命的影响、缩短冶炼时间、降低电耗等。一般要求下致密、上疏松、中间高、四周低、炉门口无大料。

### G.5.6 熔化期

#### G.5.6.1 概述

在电弧炉炼钢工艺中,从通电开始到炉料全部熔清为止称为熔化期。传统冶炼工艺的熔化期占整个冶炼周期的 50%~70%,电耗占 70%~80%。所以,保证熔化期顺利进行,提高炉料熔化速度,缩短熔化时间,是改善电弧炉技术经济指标的重要环节。

熔化期的任务是将固体炉料熔化为具有一定温度的钢液,保证氧化期和还原期各种物化反应顺利进行,造渣并去除钢液中的大部分磷和其他杂质,减少或防止钢液吸气和金属挥发。

在炉料熔化期间,主要经历了起弧阶段、穿井阶段、电极回升阶段及熔化末期四个阶段。

在熔化期各阶段,要求合理供电、及时吹氧、提前造渣。

#### G.5.6.2 起弧阶段

送电后,随着电极的下降,当电极端部距炉料有一定的距离时,由于强电场的作用下,空气被电离,形成导电的电弧,随之产生大量的光和热。起弧阶段的时间较短,约 3 min~5 min,但常出现瞬时短路,造成对电网的冲击。因此,为了限制短路电流、稳定电弧,此阶段一般使用有电抗的电压级,待电弧较稳定后,及时地撤除电抗。同时,由于金属炉料突然受到电弧高温作用,起弧后的一段时间内会发出巨大的响声,通电 10 min~15 min 后,电弧趋于稳定,响声消失。

该期宜采用较低电压、较低电流的供电制度,以减少对炉顶的损坏,减少热量损失。

#### G.5.6.3 穿井阶段

起弧后,在电弧的作用下,电极下的炉料首先熔化。随着炉料的熔化,电极逐渐下降并到达它的最低位置,这就是穿井阶段。穿井阶段经常发生炉料倒塌,电流、电压极不稳定,操作台或配电柜上的电流、电压表指示剧烈摆动。此时由于电弧下钢液的蒸发(铁的沸点 2 857 ℃)并氧化,生成红褐色的烟尘微粒。

该期宜采取较大的电压、电流(或带电抗器的高电压)的供电制度,以增加穿井的直径与穿井的速度。

#### G.5.6.4 电极回升阶段

电极“穿井”到底开始回升时主熔化期开始。随着炉料的不断熔化,电极渐渐上升,这就是电极回升阶段。当炉料基本熔化(熔化率>80%),仅炉坡、渣线附近存在少量炉料,电弧开始暴露时主熔化期结束。主熔化期由于电弧埋入炉料中,电弧稳定、热效率高、传热条件好。此时,由于有一定的炉渣保护,金属蒸气显著地减少,烟尘的颜色由深褐色变为淡褐色。

该期宜采取最大功率供电制度,即采用高电压、最大电流的供电制度,以缩短熔化期,提高电弧炉的效率。主熔化期时间占整个熔化期的 70%。

#### G.5.6.5 熔化末期升温阶段

电极回升至电弧开始暴露给炉壁到炉料全部熔化时为熔化末期升温阶段。此阶段因炉壁暴露,尤

其是炉壁热点区的暴露受到电弧的强烈辐射,故应注意保护。此时电极下的高温区已连成一片,而远离电弧的低温区炉料尚未熔化,熔化末期主要是熔化这些部位的炉料。

该期宜采取低电压、大电流的供电制度或采取泡沫渣工艺,以减少电弧对炉壁的危害。

## G.6 氧化期

熔化期结束后即转入氧化期的操作,其主要任务是除磷、除碳、除去气体和夹杂物及钢液均匀加热升温,并调整钢液的碳含量。

氧化期的操作方法有以下三种:

### a) 矿石氧化法

矿石氧化法属于间接方式的供氧,它主要是利用铁矿石或其他金属化矿石中的氧通过扩散转移来实现钢液中的 C、Si、Mn 等元素及其他杂质的氧化。其特点是操作方便、不需要制氧设备、脱磷效果好,但是脱碳速度慢、氧化时间长,会降低熔池温度。

### b) 吹氧氧化法

氧气氧化法又称纯氧氧化法。它主要是利用氧气和钢中的 C、Si、Mn 等元素及其他杂质的直接作用来完成钢液的氧化。氧气氧化属于放热反应,有利于提高和均匀熔池温度从而减少电能消耗。但脱磷效果差,熔渣的流动性差。

### c) 综合氧化法(矿石-氧气联合氧化法)

该方法是矿石氧化法和吹氧氧化法在电弧炉生产过程中的交替穿插或同时并用,即综合氧化法。其特点是脱碳、升温速度快,既不影响钢液的脱磷,又能显著缩短冶炼时间。

## G.7 还原期

G.7.1 通常把氧化末期扒渣完毕到出钢这段时间称为还原期。

G.7.2 还原期的主要任务:脱氧、脱硫、去夹杂、合金化、调整钢液温度。

## G.8 出钢

钢液经氧化、还原后,当化学成分合格、温度符合要求、钢液脱氧良好、炉渣碱度与流动性合适时即可出钢,通常采用留钢操作(留钢量约 10%~15%)。因出钢过程中渣钢接触可进一步脱氧与脱硫,故一般采取“大口、深冲、渣钢混合”的出钢方式。

## G.9 精炼

现代电弧炉炼钢一般都使用了二段式炼钢工艺,即炉料在电弧炉内主要完成熔化和氧化,其还原期被移至精炼炉。该工艺可减小电弧炉的负荷,提高电弧炉的利用率和效率,缩短冶炼时间,提高钢的质量,降低生产成本。

炉外精炼:将来自电弧炉的初炼钢液在真空、惰性气体或还原性气氛的容器中进行脱气、脱氧、脱硫,去除夹杂物、合金化及升温操作等,以获得品质更加优异的钢液,当满足技术要求时,即可出钢。