

## 晶闸管特性曲线计算指南

## 1 主题内容与适用范围

本标准给出了功耗与电流、壳温与电流和浪涌电流与周波数等特性曲线的技术要求、计算公式和方法。

本标准适用于反向阻断三极晶闸管，也适用于整流二极管。对应特性曲线的一般技术要求和计算方法也适用于双向三极晶闸管和逆导三极晶闸管。

## 2 引用标准及参数符号

## 2.1 引用标准

- GB 2900.32 电工名词术语 电力半导体器件  
 GB 3859 半导体电力变流器  
 GB 4024 半导体器件 反向阻断三极晶闸管测试方法  
 GB 4939 普通整流管  
 GB 4940 普通晶闸管

## 2.2 参数符号

- $I_{T(AV)}$ ——通态平均电流，A；  
 $I_{T(RMS)}$ ——通态方均根（有效值）电流，A；  
 $I_{TM}$ ——通态峰值电流，A；  
 $I_m(I_{TSM})$ ——通态浪涌电流，A；  
 $V_{TM}$ ——通态峰值电压，V；  
 $V_{TO}$ ——门槛电压，V；  
 $P_{T(AV)}$ ——通态平均功率，W；  
 $P_m$ ——浪涌电流的峰值功率，W；  
 $T_i$ ——晶闸管的结温，℃；  
 $T_{im}$ ——晶闸管的最高工作结温，℃；  
 $\Delta T_i$ ——结对规定基准点的结温升，℃；  
 $T_c$ ——晶闸管的壳温，℃；  
 $t_w$ ——一个正弦半波的底宽，ms；  
 $t_p$ ——等效一个正弦半波的矩形波底宽，ms；  
 $T$ ——50Hz频率的周期，ms；  
 $R_{th}$ ——晶闸管的（稳态）热阻，℃/W；  
 $R_{jc}$ ——晶闸管的直流结壳热阻，℃/W；  
 $Z_{th}$ 、 $Z(t)$ ——晶闸管的瞬态热阻抗，℃/W；  
 $Z_{jc}$ ——晶闸管的结壳瞬态热阻抗，℃/W；  
 $\Delta r$ ——相对于直流热阻增加的附加热阻，℃/W；  
 $r_T$ ——通态特性曲线的微分电阻，Ω；

注:  $r_T$  的单位, 在数据表或标准中通常以  $m\Omega$  给出。

$F$ ——波形因数;

$n$ ——正弦波的周波数;

$\phi$ ——导通角。

### 3 特性曲线的一般技术要求

#### 3.1 特性曲线的属性

晶闸管的基本特性曲线按其由来, 可分为由试验得到的曲线和由计算产生的曲线两类。通态伏安特性曲线和瞬态热阻抗特性曲线应是试验曲线。功耗与电流、壳温与电流、浪涌电流与周波数等特性曲线一般是计算曲线。计算曲线应与试验验证结果一致。

#### 3.2 计算曲线的前提条件

计算曲线是在一定的原理条件下, 由有关的试验曲线经过计算求得。功耗与电流、壳温与电流等稳态特性曲线是由通态伏安特性试验曲线求得, 浪涌电流与周波数、 $I^2 t$  与时间等瞬态特性曲线是瞬态热阻抗特性和高工作点伏安特性两条试验曲线求得。计算各特性曲线必须通过试验先得到正确的有关试验曲线。

#### 3.3 计算公式和计算工具

计算曲线时应正确选用数学公式, 并正确理解公式中每个符号的意义、单位和量值区间。

为提高计算的效率和准确性, 应尽可能使用带程序的计算器或计算机。

#### 3.4 特性曲线的座标

晶闸管特性曲线的函数、变量及其座标应按通用的选取, 按量值范围选用算术、单对数或双对数座标。合适地选取座标是正确表达曲线宏观形状和方便于使用查阅曲线的需要。

此外, 在曲线图上应标出参变量和必要的条件。

### 4 试验曲线的技术要求

#### 4.1 通态伏安特性曲线 ( $I_{TM} \sim V_{TM}$ )

a. 通态伏安特性曲线的测试方法应符合 GB 4024 的 3.3 条的规定。

b. 应在  $25^\circ\text{C}$  和  $T_{im}$  等温条件下给出两条通态伏安特性曲线, 如给出一条, 则应给出  $T_{im}$  的。

c. 通态伏安特性曲线应是合格产品曲线范围的上限, 曲线上规定点的  $V_{TM}$  值应等于或略小于产品数据表中的  $V_{TM}$  值。

d. 通态特性曲线的  $I_{TM}$  值范围: 对于一般工作点, 由零至  $5I_{T(AV)}$  左右, 并应用算术座标描绘; 对于高工作点, 一般从  $6I_{T(AV)}$  至接近  $I_{TSM}$ , 并用单对数座标描绘。

e.  $V_{TO}$  和  $r_T$  应根据 GB 2900.32 的有关定义, 由  $T_{im}$  的通态特性近似直线求得。

#### 4.2 瞬态热阻抗特性曲线 ( $Z_{th} \sim t$ )

a. 瞬态热阻抗 ( $Z_{th}$ ) 的定义及其特性曲线的测试方法, 应分别符合 GB 2900.32 的 1.2.12 条和 GB 4024 的 2.3 条。

d. 瞬态热阻抗特性曲线用单对数座标描绘, 横座标 (对数) 给出的时间范围应从不低于  $10^{-3} \text{ s}$  至热稳态, 热稳态的  $Z_{th}$  应等于  $R_{th}$ 。

c. 瞬态热阻抗特性曲线分为结壳瞬态热阻抗 ( $Z_{th}$ ) 曲线、结散瞬态热阻抗 ( $Z_{th}$ ) 曲线和总瞬态热阻抗 ( $Z_{th}$ ) 曲线等多种。管壳额定晶闸管至少必须给出结壳瞬态热阻抗曲线。

d. 瞬态热阻抗曲线的时间 ( $t$ ) 座标单位通常用  $s$ , 为提高曲线前半段的精度, 可适当牺牲  $t$  的范围而用  $ms$ 。

注: 在查用瞬态热阻抗曲线时, 应特别注意对数尺度的关系。

## 5 计算曲线的技术要求和方法

### 5.1 功耗与电流的曲线 ( $P_{T(AV)} \sim I_{T(AV)}$ )

#### 5.1.1 技术要求

a. 功耗与电流的关系曲线应以电流波形和导通角作为参变量给出。通常给出正弦半波导通角  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$  和矩形波  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 、DC 的两个曲线图, 在曲线图上标明波形, 需要时还标出  $T_{im}$  值、 $f$  (频率) 值和负载性质等条件。对于整流管, 至少应给出六相、三相、单相和 DC 的四条曲线。

b. 各导通角的曲线的起点均是座标零点, 各曲线终点应按发热 (方均根电流) 相同决定, 不可随意计算和描绘。

c. 计算此曲线应已知通态伏安特性曲线 ( $V_{TO}$ 、 $r_T$ ) 和额定  $I_{T(AV)}$  或  $I_{T(RMS)}$ 。

d. 功耗与电流的关系曲线用算术座标描绘。

#### 5.1.2 计算公式和波形因数

a. 计算  $P_{T(AV)} \sim I_{T(AV)}$  的基本公式

$$P_{T(AV)} = V_{TO} I_{T(AV)} + F^2 r_T I_{T(AV)}^2 \dots\dots\dots (1)$$

b. 导通角为  $\phi$  的正弦波和矩形波的波形因数  $F$  分别按 (2) 式和 (3) 式计算。

$$F^2 = \frac{\pi(2\phi - \sin 2\phi)}{2(1 - \cos \phi)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$F^2 = \frac{2\pi}{\phi} \dots\dots\dots (3)$$

c. 正弦波和矩形波各常用导通角  $\phi$  的波形因数  $F$  值:

$\phi$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$180^\circ$	$270^\circ$	DC
正弦波 $F$	4.00	2.78	2.22	1.88	1.57		
矩形波 $F$	3.46	2.45	2.00	1.73	1.41	1.16	1.00

#### 5.1.3 计算的一般步骤

a. 由  $T_{im}$  条件的通态伏安特性曲线, 按 GB 4024 的 2.2.2 条或解该曲线上两规定点的二元一次联立方程, 求出  $V_{TO}$  和  $r_T$  两规定点为  $1.5I_{T(AV)}$  和  $14.5I_{T(AV)}$ , 在偏差允许范围内该两点可适度变化, 如取  $I_{T(AV)}$  和  $3I_{T(AV)}$ 。

b. 按公式 (1) 和正弦波导通角  $30^\circ$  的  $F$  值, 计算  $I_{T(AV)}$  从零到允许的最大值各点 (一般取五点) 的  $P_{T(AV)}$  值。这样即可在双算术座标上描绘出正弦波导通角  $30^\circ$  的  $P_{T(AV)} \sim I_{T(AV)}$  曲线。

c. 改变导通角  $\phi$ , 依次以正弦波  $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $180^\circ$  的  $F$  值, 重复上述步骤, 即可得到正弦波各常用导通角的  $P_{T(AV)} \sim I_{T(AV)}$  曲线图。

d. 将矩形波的  $F$  值代入 (1) 式, 重复上述步骤, 即可得到矩形波各常用导通角的  $P_{T(AV)} \sim I_{T(AV)}$  曲线图。

注: 正弦波和矩形波各导通角允许的  $I_{T(AV)}$  均不同。

### 5.2 壳温与电流的曲线 ( $T_C \sim I_{T(AV)}$ )

#### 5.2.1 技术要求

a. 壳温与电流的关系曲线应以电流波形和导通角作为参变量给出, 一般应给出以正弦半波和矩形波各常用导通角为参变量的两个曲线图。各常用导通角的选取与  $P_{T(AV)} \sim I_{T(AV)}$  的一致。

b. 不同导通角各曲线的起点均是  $T_C$  和  $T_{im}$  值点; 各条曲线终点按发热相同原理确定。不可随意计算和描绘曲线的起点和终点。

c. 计算各导通角的 $T_C \sim I_{T(AV)}$ 必须用各自的 $R_{jc}$ , 不可一律采用数据表中的直流或正弦 $180^\circ$ 导通电流下的 $R_{jc}$ 。

注: GB 4939和GB 4940等产品标准中给出的 $R_{jc}$ 均是直流或正弦 $180^\circ$ 导通电流条件下的值。

d. 计算 $T_C \sim I_{T(AV)}$ 一般应已知:  $V_{TO}$ 、 $r_T$ 、 $T_{im}$ 、 $R_{jc}$ 、 $\Delta r$ 和额定 $I_{T(AV)}$ 。

e. 壳温与电流的关系曲线用双算术坐标描绘。

### 5.2.2 计算公式和附加热阻

a. 计算 $T_C \sim I_{T(AV)}$ 的基本公式

$$T_C = T_{im} - P_{T(AV)}(R_{jc} + \Delta r) \dots\dots\dots (4)$$

b. 正确计算 $T_C \sim I_{T(AV)}$ 的关键, 是通过试验或计算先得到各常用导通角的附加热阻 $\Delta r$ 。

$\Delta r$ 随导通角 $\phi$ 的减小而增加, 在直流至正弦 $180^\circ$ 导通角时增加不多, 一般不超过5%; 但在小导通角范围增加剧烈, 在 $30^\circ$ 导通角时大多 $\Delta r$ 超过 $0.5R_{jc}$ , 有的超过一倍 $R_{jc}$ 值。 $\Delta r$ 随 $\phi$ 减小而增加, 整流管比晶闸管要缓慢得多。

$\Delta r$ 随 $\phi$ 减小而增加没有普遍适用的定量关系, 但对一个企业的定型产品有大致定量的关系。

### 5.2.3 计算的一般步骤

a. 按5.1.3的a项求出 $V_{TO}$ 。

b. 按5.1.3的b项, 算出正弦波导通角 $30^\circ$ 各点 $I_{T(AV)}$ 对应的 $P_{T(AV)}$ 。

如已有 $P_{T(AV)} \sim I_{T(AV)}$ 曲线图, 可直接查曲线, 则a、b项两步可省略。

c. 将b项各 $P_{T(AV)}$ 值和已知的 $T_{im}$ 、 $R_{jc}$ 、 $\Delta r$ ( $30^\circ$ 的)代入(4)式, 算出各 $T_C$ , 即可在双算术坐标上描绘出正弦波导通角 $30^\circ$ 的 $T_C \sim I_{T(AV)}$ ( $P_{T(AV)}$ )曲线。

d. 改变导通角, 重复上述步骤, 即可得到正弦波导通角 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 和 $180^\circ$ 的 $T_C \sim I_{T(AV)}$ 曲线图。

e. 按矩形波重复上述步骤, 即可得到矩形波各导通角的 $T_C \sim I_{T(AV)}$ 曲线图。

## 5.3 浪涌电流与周波数的曲线( $I_{TSM} \sim n$ )

### 5.3.1 技术要求

a. 浪涌电流的波形应基本上为正弦波形, 多周波浪涌电流应满足等幅、等底宽和等间距的条件。

b. 浪涌电流试验方法应符合GB 4024的4.2条。

c.  $I_{TSM} \sim n$ 曲线按从一个周波至最少15个周波给出, 最多至300个周波, 一般至50个周波。

d. 以一个周波浪涌电流的结温或结温升为基准温度, 二个和二个以上各多周波浪涌电流的最后一个周波结束时的结温或结温升不得超过基准温度。

e. 计算 $I_{TSM} \sim n$ 一般应已知:  $I_{TM} \sim V_{TM}$ 、 $Z_{th} \sim t$ 和 $t_w$ 。

f.  $I_{TSM} \sim n$ 在单对数坐标上描绘, 纵(对数)、横坐标分别表示 $I_{TSM}$ 和 $n$ 。曲线图上通常标出浪涌前结温和浪涌电流频率。

### 5.3.2 计算公式

a. 发热等效于正弦半波电流的矩形波电流的底宽计算公式

$$t_r = \frac{(2/\pi)V_{TO}I_{TSM} + 0.5r_T I_{TSM}^2}{V_{TO}I_{TSM} + r_T I_{TSM}^2} \cdot \frac{T}{2} \dots\dots\dots (5)$$

b. 计算浪涌电流的峰值功率的公式

$$P_r = V_{TO}I_{TSM} + r_T I_{TSM}^2 \dots\dots\dots (6)$$

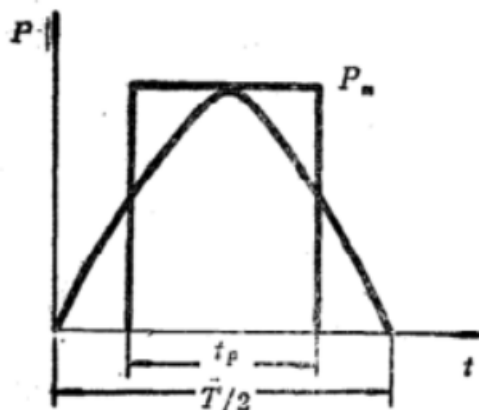
c. 计算浪涌电流产生的结温升的公式按GB 3859的附录F为:

$$\Delta T_1 = P_r \sum_{V=1}^n \{Z[(V-1)T + t_r] + Z[(V-1)T]\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{或 } \Delta T_1 = P_r Z(t) \dots\dots\dots (8)$$

d. 计算各周波的浪涌电流的公式

$$I_{TSM} = \frac{-V_{TO} \pm \sqrt{V_{TO}^2 + 4I_T \cdot \Delta T_1 / Z(t)}}{2r_T} \dots\dots\dots (9)$$



图

### 5.3.3 计算的一般步骤

- 一般用高工作点通态伏安特性曲线求出  $V_{TO}$  和  $r_T$ 。
- 按 (5) 式, 算出等效一个正弦半波浪涌电流的矩形波电流的底宽  $t_p$ , 并在  $Z(t) \sim t$  曲线上查出  $Z(t_p)$  值。
- 按 (6) 式, 算出一个正弦半波浪涌电流的峰值功率  $P_m$ 。
- 按 (7) 式或 (8) 式, 算出一个正弦半波浪涌电流的峰值结温升  $\Delta T_1$  (允许的最高值)。
- 按 (7) 式, 算出各多周波的  $Z(t)$  值, 并代入 (9) 式, 即可求出各多周波允许最大浪涌电流值, 对于 100 个周波范围的曲线, 建议取 1、3、5、10、30、50 和 100 周波七个计算点即可。
- 在单对数座标 ( $I_{TSM}$ ) 上描绘  $I_{TSM} \sim n$  曲线。

## 5.4 $I^2t \sim t$ 曲线

### 5.4.1 技术要求

- $I^2t$  实质是正弦半波底宽 ( $t_w$ ) 短于工频 50Hz 半周期的一种浪涌电流,  $t_w$  在 0.5~10ms 之间。 $I^2t$  中的  $I$  是方均根 (有效值) 电流。
- $I^2t$  的试验方法应符合 GB 4024 的 4.3 条。
- $I^2t \sim t$  是一条等温曲线, 通常以底宽 10ms 的正弦半波浪涌电流时的结温为基准。
- $I^2t \sim t$  曲线一般用双对数座标描绘, 通常在同一曲线图上给出对应的  $I_{TSM} \sim t$  曲线。
- 下述计算公式和方法, 据有关文献介绍仅适用于管芯硅片直径不大于 50mm 和电压不高于 3 kV 的晶闸管。对于更大容量的器件, 由于扩展损耗大,  $\Delta T_1$  增加, 使短于 4 ms 特别是 2 ms 以下的浪涌电流较 10 ms 时的增加很小。

### 5.4.2 计算公式

- 计算等效一个正弦半波能量的单一矩形波功率的底宽  $t_p$  的公式, 即 5.3.2 条的 (5) 式。
- 计算等效一个正弦半波峰值电流产生的峰值功率和峰值结温升的公式, 即 5.3.2 条的 (6) 式和 (8) 式。

当 (8) 式中的  $t < 1$  ms, 而  $Z(t) \sim t$  曲线又未给出 1 ms 以下的  $Z(t)$  值时, 可用 1 ms 的  $Z(1\text{ms})$  值, 按 (10) 式外推求出短于 1 ms 的  $Z(t)$  值。

$$Z(t) = (\sqrt{t} / \sqrt{1\text{ms}}) \cdot Z(1\text{ms}) \dots\dots\dots (10)$$

式中,  $t$  小于 1 ms, 大于晶闸管完全开通所需要的时间。对于大、中、小晶闸管, 完全开通最短一般分别需要 200  $\mu\text{s}$ 、20  $\mu\text{s}$  和 10  $\mu\text{s}$ 。

c. 计算  $I^2t$  的公式:

$$I^2t = \frac{t_w}{2} I_{TSM}^2 \dots \dots \dots (11)$$

#### 5.4.3 计算的一般步骤

- a. 按5.3.3的a~d项, 算出底宽 1 ms 的正弦半波浪涌电流的峰值结温升  $\Delta T_1$ 。
- b. 在 1 ~ 10 ms 间再取四个点, 如 1、3、5、7 ms, 按 (5) 式算出四个正弦半波底宽的各自矩形波底宽  $t_{Po}$ 。
- c. 根据等温原理, 按 (8) 式和 (9) 式算出 1、3、5、7 ms 的浪涌电流。
- d. 按 (11) 式, 计算各时间点上的  $I^2t$  值。
- e. 在双对数坐标同一图上描绘  $I^2t \sim t$  和  $I_{TSM} \sim t$ 。

#### 附加说明:

本标准由机械电子工业部西安电力电子技术研究所提出并归口。

本标准由机械电子工业部西安电力电子技术研究所负责起草。

本标准主要起草人秦贤满。