

发电厂变电所 电气部分的计算和接线

翟东群等 编译



45

水利电力出版社

内 容 提 要

本书共分十一章，主要内容有：正常状态下导体与电器的发热；导体与电器的热稳定；导体间的电动力作用；母线结构及电器的电动力稳定；断路器极上恢复电压的计算；选择电器和导体的计算条件；限制电力系统短路电流的方法；接地装置；电气装置的电气接线图、设计及技术经济分析；配电装置的电气接线图；控制系统等。

本书内容丰富，附有不少计算例题，可作为高等院校“电力系统及其自动化”等专业师生参考书，也可供从事电力生产、设计、科研的工程技术人员参考。

Под Редакцией А. А. Василюва
Электрическая часть станций
и подстанций
Москва • « энергия » • 1980

发电厂变电所电气部分的计算和接线

翟东群等 编译

*

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行 • 各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 8.5印张 186千字

1987年8月第一版 1987年8月北京第一次印刷

印数0001—9830册 定价2.05元

书号15143·6377



前 言

本书是根据苏联动力出版社1980年出版的A.A.瓦西里耶夫主编的《发电厂和变电所的电气部分》一书编译的。该书系经苏联高等及中等专业教育部审定的高等学校“发电厂”专业的教材。原书分两篇共三十二章，内容比较全面而丰富，与以前出版的同名教材相比，增加了不少新内容，特别是在理论阐述及计算方法上显得更加深入和充实。它反映了苏联近年来的科技成果和实践经验。由于原书篇幅过大，而且其中电气设备部分与我国产品在结构和参数上都有较大差异，故经征求有关方面意见后将原书编译成十一章。选择的内容主要是理论分析和设计计算部分以及电气一次和二次接线部分。本书可供从事电力教学、科研、设计和生产的工程技术人员参考，也可作为高等学校电力类各专业的教学参考书。

本书第一~六章由翟东群同志翻译；第七章和第十一章由张玉诸同志翻译；第八章由南志远同志翻译；第九、十章由吕宗耀同志翻译。全书由张玉诸同志统稿。译稿承蒙华北电力学院北京研究生部戴克健同志审校，他对译稿提出了许多宝贵意见，在此表示衷心地感谢。

由于水平所限，错译或不妥之处，恳请广大读者批评指正。

译 者

目 录

前 言

第一章	正常状态下导体与电器的发热	1
1-1	发热理论总述	1
1-2	非绝缘导体的发热	6
1-3	绝缘导体和电缆的发热	13
1-4	电器的发热	18
1-5	短时工况下电气设备各元件温度的确定	19
第二章	导体与电器的热稳定	23
2-1	短路时发热过程的特性	23
2-2	均匀导体的热稳定	24
2-3	短路电流平方冲量的确定	29
2-4	电器的热稳定	36
第三章	导体间的电动力作用	43
3-1	电动力的确定方法	43
3-2	导体在三相系统短路时的电动力	50
第四章	母线结构及电器的电动力稳定	62
4-1	母线结构的电动力稳定	62
4-2	具有固定支座的母线结构计算	62
4-3	自由振动频率等于或高于200Hz时, 具有固定支座的母线结构的简化计算	75
4-4	具有弹性支座的母线结构的计算	86
4-5	电器的电动力稳定	92
第五章	断路器极上恢复电压的计算	94
5-1	断路器极上的电压恢复过程	94
5-2	恢复电压的标准特性	100

5-3	恢复电压的计算	103
5-4	恢复电压的特征状态	109
第六章	选择电器和导体的计算条件	125
6-1	原始条件、计算程序	125
6-2	计算工作电流	125
6-3	计算短路电流	128
6-4	断路器极上恢复电压速度的计算	135
6-5	电压高于1000V时电器的选择	139
6-6	导体选择的总要求	140
6-7	母线和多股导线的选择	141
6-8	6~10kV电缆的选择	142
第七章	限制电力系统短路电流的方法	150
7-1	问题的提出	150
7-2	短路电流的水平 and 开关电器的参数	150
7-3	限制短路电流的方法之一——合理地选择发电厂 和电网的接线图	152
7-4	采用分裂绕组变压器和分段电抗器限制短路电流	154
7-5	采用线路电抗器限制短路电流	155
第八章	接地装置	167
8-1	接地装置的用途	167
8-2	接触接地物体的危险性 and 容许电压的标准	168
8-3	确保安全的方法及接地装置的结构	174
8-4	土壤的特性	181
8-5	接地装置的规定标准	188
8-6	设计接地装置时计算电流的确定	189
8-7	接地体的计算方法	193
8-8	1000V以下电网的接地	210
第九章	电气装置的电气接线图、设计 及技术经济分析	215

9-1	对电气装置接线图的要求	215
9-2	发电厂、变电所电气接线图的设计 和技术经济分析	219
第十章	配电装置的电气接线图	223
10-1	概述	223
10-2	单母线制配电装置	224
10-3	双母线制配电装置	227
10-4	环形接线式配电装置	232
10-5	配电装置的简化接线	240
第十一章	控制系统	243
11-1	断路器的距离控制	243
11-2	控制盘上的信号系统	258

第一章 正常状态下导体与电器的发热

1-1 发热理论总述

在导体和电器中都存在着不同形式的能量与功率损耗，它包括：①在导体内与电流平方成正比的损耗；②在绝缘体内与电压平方成正比的损耗；③在变压器磁路和电磁元件中由于涡流和磁滞现象产生的损耗；④位于强磁场中的铁磁元件由于感性电流影响所产生的损耗。损耗的能量以热的形式分解出来，其中部分被导体和电器所吸收，部分传播到周围的介质——固体、液体或气体中去。

导体和电器部件的温度是与功率损耗、周围介质散热条件和工作状态有关。当我们研究正常情况下的发热问题时，通常都分为连续发热和短时发热。连续发热是指在某一恒定负荷下不受时间限制的工作状态，此时，我们所观察的设备部件、导体和电器处在稳定的热状态下。短时发热是指在恒定负荷下，导体和电器的温度在某有限时间内尚不足以达到稳定值的工作状态。众所周知，发电机、线路的负荷曲线在一昼夜内和一年内是阶梯式地变化的。各阶梯持续时间的长短及其对应的负荷是极不相同的。在多阶梯的负荷曲线图上各阶梯的热状态是属于连续发热还是短时发热取决于所观察的设备部件——电器或导体——的发热时间常数(参阅1-5)。

容许温度 在正常情况下，导体、电器部件的温度受以下因素限制：第一，要保证经济合理的绝缘使用寿命；第

二, 要保证接触部分可靠地工作; 第三, 不允许明显地降低金属的机械性能。在正常情况下根据绝缘的种类和电器设备的用途, 由第一项或第二项要求来确定其容许温度, 通常第三项要求被前两项所取代。例如, 绝缘导体与电缆的使用寿命和可靠性, 主要是决定于绝缘的质量和在工作条件, 而切换电器的工作可靠性则主要决定于接触系统的结构和灭弧装置。这些部件的容许温度就是根据这一要求来确定的。至于第三项对机械强度的要求, 则主要是针对短路情况下发热而提出的。

应该区别电机与电器的观察温度和最热点的温度。观察温度的概念应理解为可测量到的温度。它与最热点的温度的区别在于后者难于测量, 且其测量方法也不完善。根据测量方法和电器类型的不同, 两种温度差别大约为 $5\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。为方便起见, 在实际运行中通常把观察温度规范化。我们列出了各类绝缘材料的最热点的容许温度, 作为对电机、电器部件及绝缘导体的观察温度标准化的基础。各类绝缘材料(苏联国家标准ГОСТ8865-70)的容许温度是:

类别	Y	A	E	B	F	H	C
连续容许温度, $^{\circ}\text{C}$	90	105	120	130	155	180	180

注:

Y类——由纤维质和生丝制成的未浸过油和不置于油中的纤维状物质。

A类——由纤维质和生丝制成的浸过油和置于油中的纤维状物质。

E类——某些合成的有机薄膜。

B类——用有机物质粘合和浸透的云母、石棉及玻璃纤维等材料制成的。

F类——用人造物质粘合和浸透的云母、石棉及玻璃纤维等材料制成的。

H类——用硅有机物粘合和浸透的云母、石棉及玻璃纤维等材料制成的。

C类——无粘合物或用无机物或用硅有机物粘合的云母、陶瓷、玻璃和石英等材料制成的。

这样, 各主要类型的绝缘按其耐热度分为七类。根据一定的使用寿命, 对它们规定了容许温度, 但绝缘的耐热度并非确定绝缘导体、电缆和电器部件的容许温度定额的唯一标

志。譬如，对A类纸绝缘电缆（耐热度为105℃），则取用较低的容许温度（其范围为50℃到65℃），这是考虑到在较高温度时可能形成空气渗入（由于电缆温度是周期变化的）的缘故。但是，经验证明，对于A类绝缘其长期容许温度（105℃），在有限时间内是可以超过的。这时，由于电网或电气设备处于非正常工作条件下，为满足连续供电的要求，在经济上考虑绝缘加速老化是合理的。例如，具有A类绝缘的电力变压器和电缆就都属于这种情形。为保证接触部分工作可靠和防止绝缘部件过热，在屋内配电装置中，对未绝缘的铜和铝母线的容许温度取70℃（即取相对较低值）。各类电器接触部分的长期容许温度列于表1-1中。

表 1-1 高压（高于1000V以上）电气触头的长期容许温度（按ГОСТ8024-69）

电 器 部 件 名 称	最大容许温度 (°C)		周围空气温度为 35°C时的温升(°C)	
	在空气中	在油中	在空气中	在油中
接触连接:				
a) 为保证连接刚度而用螺栓、铆钉、螺钉和其它元件压接的铜及未镀银的铜合金触头	80	80	45	45
同上，但用弹簧压紧的	75	75	40	40
b) 铜及镀银的铜合金触头	85	85	50	50
в) 银或带有镀银薄膜附件的触头	100	90	65	55

- 注 1. 表中b)项所列镀银触头连接处的容许温度，条件是银膜不应在电弧作用下损坏；在根据标准要求，或者在没有标准的情况下根据各类电器的技术条件，对触头进行多次重复性开合机械强度试验时银膜不应被磨掉，否则，只能采用未镀银触头的容许温度。
2. 由粉末冶金及铝制成的触头连接，其容许温度在标准表中一般都有说明。对个别电器，若没有说明，可见其技术说明书。
3. 表中所列触头的最大容许温度是指电器在连续工作或重复性的短时工作情况下允许达到的温度。

从下面我们可以看出，对周围介质（空气、油、水、大地）的温度给出定额具有重要的意义。导体、电器的温度 ϑ 可列成下式

$$\vartheta = \vartheta_{\text{окр}} + \theta \quad (1-1)$$

式中 $\vartheta_{\text{окр}}$ —— 周围介质温度；

$\theta = \vartheta - \vartheta_{\text{окр}}$ —— 导体对周围介质的温升。

发热体表面向周围介质的散热是温升的函数，当周围介质温度在某一定范围内变化时，它与周围介质温度无关。所以当导体或电器的温度一定时，周围介质的温度升高，必然要使其容许温升降低，相当于该电器和导体中放出的热量和工作电流减少。

下面根据苏联国家标准ГОСТ8024-69和电气设备安装规程——76给出周围介质的额定温度， $^{\circ}\text{C}$ ：

空气，指导体(导线、母线、电缆)而言-----	+ 25
空气，指电器而言-----	+ 35
大地-----	+ 15
水-----	+ 15

热传递 在被观察的物体中，热从高温部位传到低温部位、或传到邻近物体和周围介质中的过程称为热传递。热传递有三种方式：即传导、对流和辐射。

热传导现象是对固体而言。傅立叶定律是热传导的基本定律，其数学表达式是

$$dQ = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} S dt$$

式中 Q —— 在 dt 时间间隔中沿法线方向通过等热面 S, m^2 的热量， $\text{W}\cdot\text{s}$ ；

$\partial \vartheta / \partial n$ —— 在法线方向的温度梯度；

λ ——由材料特性决定的导热系数, $W/m \cdot ^\circ C$ 。

等式两端皆被 dt 除, 即得在单位时间内通过面积 S 的热量或热流量, W

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} S \quad (1-2)$$

比值 Φ/S 是物体表面任何一点的热流密度, W/m^2

$$q = \frac{\Phi}{S} = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \quad (1-3)$$

上式中的负号表示热量沿着面积 S 法线方向传至温度减弱的方向。

当描述热量由固体的表面传至液体或气体时, 可利用对流的概念。这是更复杂的热传递过程, 其中既有热传导也有液体流或气体流的热转移。液体(气体)与发热面接触后被加热, 因密度减小而上升。在原有的地方由较冷的液体(气体)来补充。由此, 随着液流(气流)的运动就发生了热传递。若液体(气体)的运动, 仅仅是由于其冷、热表面层间的密度差别而引起的则称自由对流。若液体(气体)的运动是由于外力(由于位差和风力作用而产生的液体流动)或借助于人工泵(通风机)而产生的, 则称为强迫对流。此时, 散热将显著地增快。

自由对流所放出的热量与液体(气体)的热传导、密度和粘度以及冷却表面的形状、尺寸和物体对周围介质的温升有关。为确定所放出的热量, 通常采用在近似条件下进行的实验法和模型法, 在此项研究的基础上所导出的相应的公式是符合于常见的大多数情况的(参见下面)。

热辐射(辐射) 以电磁波形式从高热面到低热面穿过分隔的气体介质的热传递称为热辐射。热射线被认为完全可

以穿透气体介质，但不能穿过液体和固体介质。

热辐射的基本定律是由斯蒂芬-玻尔兹曼提出的。热辐射密度， W/m^2 由下式确定

$$q_x = C\varepsilon\vartheta_K^4 \quad (1-4)$$

式中 C ——热辐射系数或称斯蒂芬-玻尔兹曼常数，其值等于 $5.7 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ ；

ε ——辐射面的黑度；

ϑ_K ——辐射面温度，以绝对温度表示($\vartheta_K = \vartheta + 273$)。

在1-2中所列的计算公式，一般用来确定屋内配电装置中母线表面的热辐射。

1-2 非绝缘导体的发热

母线和多股导线属于均匀导体，若忽略末端的影响，则沿全长在单位长度上的散热和放热是相同的。所以，沿导体全长的温度是恒定的，没有热传递；热传递仅从导体的表面以对流和辐射的形式进行。

热计算的目的是确定一定结构的导体截面在长期工作状态下的容许电流值，此值是对应于一定的（规范化的）导体温度和一定的空气温度。

在热稳定状态下，从导体中放出的全部热量都传递到介质中去，即

$$P = I^2 r_0 = \Phi$$

式中 Φ ——热流量， W 。

无论是 Φ 还是 r_0 都是温度的函数。从该公式可以确定对应于所取导体温度和空气温度的容许电流值， A 。

$$I = \sqrt{\frac{\Phi}{r_a}} \quad (1-5)$$

这样，热计算就转化为在给定的导体温度和空气温度下确定导体的有效电阻 r_a 和导体表面的热流量 Φ 问题。

导体的有效电阻是可以求得的，还必须把它归算到计算温度。温度在较大范围变化时，导体电阻与温度的关系是线性关系（图1-1）。若已知温度 ϑ_1 时的电阻 r_1 ，为求得某一温度 ϑ_2 时的电阻 r_2 可利用下式

$$r_2 = r_1 \frac{\tau + \vartheta_2}{\tau + \vartheta_1} = \frac{l\rho_1}{s} \frac{\tau + \vartheta_2}{\tau + \vartheta_1} \quad (1-6)$$

式中 l —— 导体长度，m；
 s —— 导体截面， m^2 ；
 ρ_1 —— 当温度为 ϑ_1 时的电阻率， $\Omega \cdot m$ ；
 τ —— 由图1-1 $r(\vartheta)$ 关系曲线确定的某一假定的温度常数，对不同的材料，其值可在较大范围内变动。对硬铜 $\tau_x = 242^\circ C$ ，软铜 $\tau = 234^\circ C$ ，铝 $\tau_a = 236^\circ C$ 。

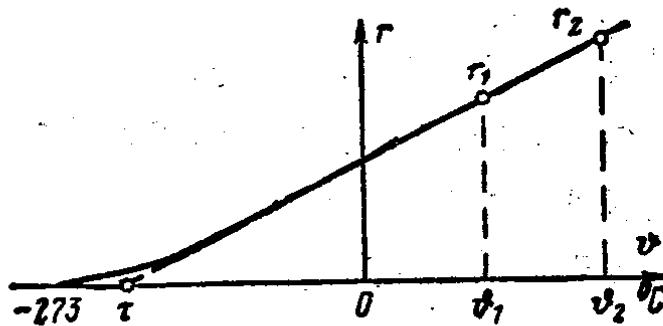


图 1-1 电阻与温度的关系

利用式(1-6)比用著名公式 $r_2 = r_1 [1 + \alpha(\vartheta_2 - \vartheta_1)]$ 更为方便，因为前式中 τ 与初始温度无关，而在后式中 α 是与初始温度有关的电阻率的温度系数。 τ 与 α 的关系是：

$\alpha = 1/(\tau + \theta_1)$, 其中 θ_1 为对应于 α 值时的初始温度。

母线的热计算 空气温度为 +25℃ 时, 屋内配电装置中的母线应取最大温度为 70℃。从母线表面以对流方式散到周围介质中的热量可用下述经验公式求得, 该式以发热体从垂直表面散出的热流的表面密度, W/m^2 , 来表示

$$q_k = 1.81\alpha\theta^{1.25} \quad (1-7)$$

式中, θ 为物体的温升, °C; α 为由散热面尺寸所决定的一个因数 (在所分析的情况下是母线板的高度); 其值如下:

散热面的高度, m	0.3	0.2	0.15	0.1	0.05
因数值 α , $W/(m^2 \cdot rad^{1.25})$	1.0	1.35	1.53	1.76	2.7

从式 (1-7) 可以看出, 热流密度与母线的温升及其横截面的高度有关。从水平面向上散热的热流密度要比用式 (1-7) 计算出的值约高 30%, 从水平面向下散热的热流密度要比用式 (1-7) 计算出的值约低 30%。若将式 (1-7) 算出的热流密度当做整个母线表面的平均密度时, 则长方形或圆形母线从表面上通过自由对流散出的热流量, W , 可以足够准确地由下式求出, 即

$$\Phi_k = F_k q_k$$

式中 F_k —— 单位长度上的母线表面积, m^2 。

对于组合导体 (图 1-2), 应分别计算母线的外表面 F_1 和内表面 F_2 的热流量。外表面指 2 → 1 → 8 → 7 和 3 → 4 → 5 → 6 的部分。内表面的热流量则对应于 2 → 7 和 3 → 6 部分。

内表面的热流密度 $q_{k.2}$ 的值可取为外表面的热流密度的 0.5~0.9 倍。更准确的值只能靠实验来确定。这样一来, 通过自由对流的热流量等于

$$\Phi_k = F_1 q_{k.1} + F_2 q_{k.2}$$

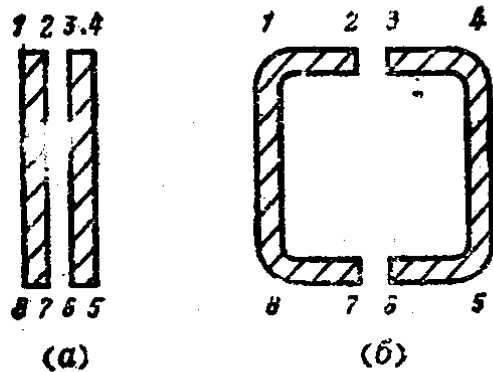


图 1-2 组合导体的热计算
(a)双扁条母线；(b)双槽形母线

若承受辐射热表面的温度等于空气温度 $\vartheta_{\kappa, \text{B}}$ 时，则从母线表面辐射的热流密度， W/m^2 ，可由下式确定

$$q_{\text{r}} = 5.7 \times 10^{-8} \varepsilon [(\vartheta_{\kappa}^4 - \vartheta_{\kappa, \text{B}}^4)]$$

$$= 5.7 \times 10^{-8} \varepsilon \left[\left(\frac{\vartheta_{\kappa}}{1000} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_{\kappa, \text{B}}}{1000} \right)^4 \right] \quad (1-8)$$

某些物体表面的黑度列于下面：

放射物体	ε
绝对黑体	1.0
氧化铝	0.11
磨光铝	0.04
涂瓷漆的铝	0.6~0.8

从上述数据中可以看到，母线涂上漆可增加散热，所以可提高其容许电流，实际上涂料的颜色并不影响散热。

母线的辐射热流量 W ，等于

$$\Phi_{\text{r}} = F_{\text{r}} q_{\text{r}}$$

式中 F_{r} ——单位长度上的辐射表面积， m^2 。

对于管状和实心截面的母线，其辐射表面积等于母线表面积。对于带有缝隙的组合导体，其辐射表面由包括缝隙在内的组合截面的周长来确定。例如，（图1-2，a）中由两扁

条组成的导体或是(图1-2, 6)中由两个槽形组成的导体, 其辐射表面应由周界 1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 1 来确定。

单位长度的母线表面总热流量等于

$$\Phi = \Phi_k + \Phi_r$$

长期容许电流可由式(1-5)来确定。

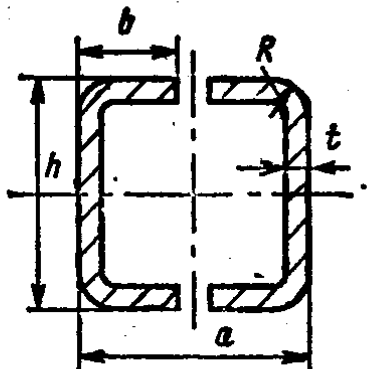
当设计配电装置时, 可查阅根据计算和试验结果编制的母线标准截面的容许(额定)电流表。但使用时应注意制表时所给出的条件。

当空气温度 ϑ_B 与额定值 $\vartheta_{B, \text{HOM}}$ 不同或者我们所采用的温度 ϑ 和温升 θ 与其相应的额定值 ϑ_{HOM} 和 θ_{HOM} 不同时, 假如散热与温升成正比, 则导体的电流、温度(温升)和空气温度之间的关系可用下列近似的等式表示

$$\left(\frac{I}{I_{\text{HOM}}}\right)^2 = \frac{\theta}{\theta_{\text{HOM}}} = \frac{\vartheta - \vartheta_B}{\vartheta_{\text{HOM}} - \vartheta_{B, \text{HOM}}} \quad (1-9)$$

由此
$$\vartheta = \vartheta_B + (\vartheta_{\text{HOM}} - \vartheta_{B, \text{HOM}}) \left(\frac{I}{I_{\text{HOM}}}\right)^2$$

和
$$I = I_{\text{HOM}} \sqrt{\frac{\vartheta - \vartheta_B}{\vartheta_{\text{HOM}} - \vartheta_{B, \text{HOM}}}}$$



例1-1的附图1 母线截面的基本形状

多股导线的热计算 对架空线路和屋外配电装置要进行多股导线的热计算, 它比屋内配电装置中母线的热计算更为复杂。导线表面的散热属于强制式对流散热, 和风速有关。这种热计算此处不再进行分析。当选择多股导线时, 要根

据电气设备安装规程中的容许（额定）电流表进行查找。

例 1-1 求导体的长期容许电流值。母线为铝制双槽形（见附图 1），空气温度为 +25℃。

导体截面尺寸为，cm：h=15；b=6.5；t=0.7；R=1.0。

截面积 $s=36.135\text{cm}^2$ 。

该导体单位长度（1cm）的外表面积 $F_1=54.28\text{cm}^2$ 。
内表面积 $F_2=49.88\text{cm}^2$ 。

20℃时材料的电阻率 $\rho_{20}=3.2\times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$

按照式（1-6）计算出导体在温度为 70℃ 时 1000m 长度的直流电阻

$$r_2 = \frac{\rho_{20}l}{s} \times \frac{\tau + \vartheta_2}{\tau + \vartheta_1}$$
$$= \frac{3.2 \times 10^{-8} \times 10^3}{36.135 \times 10^{-4}} \times \frac{(236 + 70)}{(236 + 20)} = 0.0106\Omega$$

$$\text{当 } \sqrt{\frac{f}{r}} = \sqrt{\frac{50}{0.0106}} = 68.7 \quad \text{和} \quad \frac{t}{h} = \frac{0.7}{15} = 0.0467$$

趋表效应系数 $k_{11} \approx 1.05$ （见附图 2）

按照式（1-7）计算出温升 $\theta=45^\circ\text{C}$ 时导体外表面由于对流产生的热流密度

$$q_{k,1} = 1.81 \times 10^{-4} a \theta^{1.25} = 1.81 \times 10^{-4} \times 1.53 \times 45^{1.25}$$
$$= 0.032\text{W}/\text{cm}^2$$

1cm 长的导体外表面由于对流所产生的热流量等于

$$\Phi_{r,1} = F_1 q_{k,1} = 54.28 \times 0.032 = 1.74\text{W}$$

而导体内表面的热流量

$$\Phi_{k',2} = F_2 q_{k',2} = 49.88 \times 0.5 \times 0.032 = 0.8\text{W}$$

按照式（1-8）求出当 $\epsilon=0.6$ 时由于辐射产生的热流