

8366/2202

第29篇 电 加 热

主 编	市 川 真 人	(豊田工業高等)
	安 藤 政 夫	(チッソエンジニアリング)
执 笔 者	市 川 真 人	(豊田工業高等)
	岩 崎 善 藏	(富士電機製造)
	江 口 勇	(大同特殊鋼)
	久 場 英 治	(電力中央研究所)
	河 本 康 太 郎	(東京芝浦電気)
	上 滝 致 孝	(住友重機械工業)
	神 宮 司 武 雄	(電力中央研究所)
	須 永 寿 夫	(日本金属工業)
	菅 田 栄 治	(大阪府立工業)
	菅 沼 春 幸	(技術研究所)
	杉 原 栄 次 郎	(高周波熱錬)
	炭 竈 貞 夫	(千葉大学)
	田 口 堅	(昭和電工)
	田 中 幸 男	(三菱電機)
	長 沖 通	(国際電工)
	長 島 秀 夫	(日本カーボン)
	南 條 敏 夫	(東芝セラミックス)
	古 橋 治 義	(石川島播磨重工業)
	宮 内 栄	(大同特殊鋼)
	百 田 恒 夫	(日本電子)
	森 島 省 三	(日本産業技術)
	山 口 寛	(振興協会)
	吉 野 実	(島津製作所)
	吉 山 鉄 一	(ミドリ安全工業)
		(東京芝浦電気)
		(日本重化学工業)

译 者	刘 长 城
校 者	蒋 聪 吉

目 录

第1章 电加热基础 29-1	5.4 热加工中感应加热的特性.....29-43
1.1 加热方式..... 29-1	5.5 感应加热装置.....29-44
1.2 热系统计算法..... 29-2	第6章 介质加热29-45
1.3 大电流母线..... 29-7	6.1 原理和概述.....29-45
1.4 温度的测量和调节.....29-11	6.2 高频功率振荡器.....29-45
1.5 热流测量.....29-15	6.3 电极装置及其调整.....29-46
第2章 电加热用材料29-16	6.4 应用.....29-46
2.1 金属加热元件.....29-16	5.5 电波干扰.....29-46
2.2 非金属加热元件.....29-18	第7章 红外线加热29-47
2.3 隔热耐火材料和耐热材料.....29-19	7.1 概述.....29-47
2.4 碳素电极.....29-21	7.2 红外线辐射源.....29-47
第3章 电阻加热29-22	7.3 红外线加热装置的设计.....29-49
3.1 概述、电阻炉的分类和应用.....29-22	7.4 远红外线加热.....29-49
3.2 均热和温度控制.....29-24	第8章 电子束加热29-50
3.3 炉气控制.....29-24	8.1 概述和原理.....29-50
3.4 直接加热式电阻炉.....29-25	8.2 电子枪.....29-51
3.5 特殊的电阻加热.....29-26	8.3 应用和电子束加热炉.....26-51
第4章 电弧和等离子加热29-28	第9章 电焊29-52
4.1 炼钢电弧炉和矿热炉.....29-28	9.1 电焊的分类.....29-52
4.2 三相电弧炉回路特性.....29-30	9.2 电弧焊.....29-52
4.3 炉用电气设备.....29-31	9.3 电渣焊.....29-54
4.4 炼钢电弧炉的自动操作.....29-33	9.4 电子束焊接.....29-54
4.5 闪变和电力系统.....29-34	9.5 光束焊接.....29-54
4.6 特殊熔炼炉.....29-37	9.6 等离子电弧焊.....29-54
第5章 感应加热29-39	9.7 电阻焊.....29-55
5.1 感应加热原理.....29-39	9.8 储能焊.....29-55
5.2 电源形式.....29-41	第10章 电加热应用装置性能一览表29-55
5.3 感应炉.....29-41	参考文献29-60

第1章 电加热基础

1.1 加热方式

1.1.1 电加热的特点 与石油、煤气等其他热源相比,电加热的特点可列举如下。

(1) 能得到高温 使用一般燃料,工业方面以 1500°C 左右为限,若用电弧或直接通电加热,加热到 2000°C 以上也是可能的。

(2) 能进行内部加热 电加热由于能在被加热物体内部直接产生热,所以能进行高温、高热效率加热,此外还有能提高升温速度、容易根据要求实现均匀加热或局部加热等优点。

(3) 容易实现炉气控制和真空加热 在电加热中,既能抽真空,又能自由选择炉气成分,还能在高气压下加热。

(4) 温度容易控制 用电加热比较容易按需要保持一定的温度分布,也容易实现精密温度控制、自动控制、远距离控制等。

(5) 没有燃烧排出的废气和残余物等 电加热时由于没有排出废气等带走的热量,热效率高,还因为在炉内不产生废气和尘埃,所以能保持被加热物体非常清洁。

由于电加热有上述特点,所以在制造铁合金和人造石墨,以及钢的表面淬火,半导体工业中制造单晶和晶体管等时,必须用电作为热源。在其它加热领域内,往往选择煤、石油、煤气和电中的任何一种都可以,但也要从节省资源和能源的立场考虑,不要选错热源。

1.1.2 加热方式分类⁽¹⁾ 若对一般使用的电加热方式进行分类,则可分为电阻加热、电弧加热、感应加热、介质加热,以及几种方式组合的加热等。

(a) 电阻加热 直接接到电源的导体,由于焦耳效应产生的热用以进行加热的方式,又分直接加热式和间接加热式。

(1) 直接电阻加热 给被加热物体通电进行加热的电阻加热。

(2) 间接电阻加热 给特殊的发热导体通

电,将该导体中产生的热通过辐射、传导、对流等方式传到被加热物体的电阻加热,用金属加热元件、非金属加热元件、熔融盐、流动碳粒子等作发热导体。

(b) 电弧加热 主要用电弧产生的热进行加热,有直接式和间接式。

(1) 直接电弧加热 电弧电流通过被加热物体的电弧加热,被加热物体本身至少是电弧的一个极或是媒质。

(2) 间接电弧加热 电弧电流不通过被加热物体的电弧加热,电弧热量主要通过辐射传给被加热物体。

(c) 感应加热 加热电流是由电磁感应产生的电加热,由于置于交变磁场中的导体内产生的涡流损失或磁滞损失而加热。

(d) 介质加热 主要由交变电场中电介质的介质损失进行的电加热。

(e) 红外线加热 主要通过红外线辐射而传递热能的加热。在原理上这是间接电阻加热的一种,但往往作为独立的加热方式来对待。

(f) 其它特殊加热法

(1) 微波加热 用 $300\sim 300000\text{ MHz}$ 的微波进行非导体加热的方法。

(2) 电子束加热 在真空中利用电子束轰击被加热物体产生的热进行加热的方法。

(3) 等离子加热 利用离子化气体的热、电性质进行加热的方法。

1.1.3 各加热方式特点

(a) 直接电阻加热 因为是使被加热物体自身通电发热的,所以被加热物体必须是具有适当电阻率的导体。常温下即使电阻较大,而高温下能导电的物质,例如熔融盐、玻璃等,若开始用适当方法预热或者通电(例如电弧加热),将能直接加热。而水一类电阻率比较高的物质,则在高电压下加热(电锅炉)。电阻率很低的金属和石墨等的加热,则利用低电压、大电流。电流通过被加热物体,能在加热的同时产生电化学反应(如铝的电解)。直接电

阻加热是内部加热,因此有可能加热到被加热物体的最高温度,即到周围耐火材料耐火度以上的高温(例如石墨化电炉),并且,加热效率也高。

电阻焊虽然采取直接电阻加热的形式,但是在这种情况下发热的主体是接触电阻。

(b) 间接电阻加热 这种方式需要专用的发热元件作为热源。由于与其它加热方式不同,对被加热物体的种类没有限制,也最简便,所以用途广。真空加热、炉气控制也容易进行。

(c) 电弧加热 电弧虽是高温热解离(热分解)产生等离子状态气体中的导电现象,但导电的主体是电子。电弧柱的温度为3000~6000K的高温,因此能够进行高温加热。由于电弧的电压-电流特性为下降特性,为了保持电弧电流稳定,往往将稳定电阻、稳定电抗等串入电源回路。并且,交流电弧的电压、电流波形常常发生畸变。

直接电弧加热的例子有,电弧柱本身成为被加热物体的、用来固定空中氮的舍恩赫炉、被加热物体作为电极的炼钢电弧炉、电弧焊等。间接电弧加热的合适例子有用于熔化铜铝合金等的回转电弧炉。

还有要注意的是,碳化钙炉和铁合金炉等电炉,虽然发热的主要方式往往是电阻发热,但由于其构造等同炼钢电弧炉相似,国际上规定把它归入电弧炉的范围中。

(d) 感应加热 也有使被加热物体本身发热的直接式和使碳素坩埚一类导电坩埚发热,再将热传给被加热物体的间接式两种。前者包括像在金属、合金等熔化和热处理时那样把被加热物体整体大致均匀加热的场合,以及像在钢的表面淬火时那样只把金属表面瞬时加热的场合。在被加热物体是强磁性体时,除涡流损失外还加上磁滞损失。

感应加热的特点是:例如在熔炼金属时不需要电极,不必担心污染,有搅拌作用等,还有用感应加热一般能得到较高的加热功率密度,改变加热线圈的形状能进行任意的局部加热,若提高加热频率能进行表面加热等。

但是,除了工频加热外,感应加热需要特殊的加热用电源。一般,被加热物体的外形越小,电阻率越高,越需要频率高的电源,小容量场合使用电子式振荡器,大容量场合使用电动发电机。

(e) 介质加热 感应加热以导电的被加热物

体为对象,与此对应,介质加热用于直接加热绝缘体(电介质)。介质加热中,如果介质均匀,加热电场相同,则被加热物体将被均匀加热。再者,电介质的导热性能也差,用从外部加热的方法均匀加热到被加热物体的内部,需要很长时间,而且往往要担心表面过热,若用介质加热方法,在极短的时间内就能达到加热目的。介质加热采用不致引起放电的强电场,频率用1~300MHz的高频。在高频感应加热及这种介质加热中,因为使用频率和通信用频率重叠,所以必须注意电波干扰。

(f) 红外线加热 采用红外线发热元件以加热、干燥物体表面或进行热处理等。由于是以辐射方式直接把热供给被加热物体表面,所以对涂漆面干燥等很有效。其特点是,加热器构造简单,能实现传送带式连续加热和加热中无时间滞后等。

1.2 热系统计算法

1.2.1 单位制(见表1)

1.2.2 热传导基本公式 某热传导物质的导热系数 λ ,是用一维稳定热传导状态下,每单位长度上该物质在单位温差下产生的热流密度 q 定义的。

在三维热传导问题的场合,设温度为 $\theta(x, y, z, t)$,则能用傅里叶定律给出 x 方向的热流密度分量 $q_x(x, y, z, t)$,即

$$q_x = -\lambda \partial \theta / \partial x \quad (1)$$

由上式可知,在稳定热传导的情况下,决定温度空间分布的传导物质参量仅仅为 λ 。

非稳定热传导,从傅里叶热传导偏微分方程

$$\partial \theta / \partial t = (\lambda / \rho c) (\partial^2 \theta / \partial x^2 + \partial^2 \theta / \partial y^2 + \partial^2 \theta / \partial z^2) \quad (2)$$

可知,决定温度空间分布和时间分布的传导物质参量是导温系数 $a (= \lambda / \rho c)$ 。式中, ρ 为传导物质的密度, c 为其比热,假定 λ 不是温度的函数。式(1)和(2)给出了解非稳定热传导问题的基本公式。表2示 λ 的概值^[2],但通常 λ 随温度而变,特别在工业用隔热材料、耐火材料和合金中,有显著受温度影响的。

1.2.3 热系统和电系统的相似性 热传导和导电非常相似,若以温度为电压,热流为电流,就能在热传导的计算中应用电路的计算公式。在热计算中,如果避免单位制的混淆,使用同一单位制(表1),就能方便地直接应用和电系统相同的数学

表1 热学单位换算表(温度的SI单位为K和°C)

单位制	SI制	(kcal)制	(cal)制
热 量	J 4.186×10^3 4.186 1	(kcal) 1 10^{-3} 0.2389×10^{-3}	(cal) 10^3 1 0.2389
热 流	W 1.163 4.186 1	(kcal/h) 1 3.6 0.86	(cal/s) 0.2778 1 0.2389
热流密度	W/m^2 1.163 4.186×10^4 1	(kcal/m ² ·h) 1 3.6×10^4 0.86	(cal/cm ² ·s) 0.2778×10^{-4} 1 0.2389×10^{-4}
导热系数	$W/(m \cdot K)$, $W/(m \cdot ^\circ C)$ 1.163 4.186×10^2 1	(kcal/m·h·deg) 1 360 0.86	(cal/cm·s·deg) 0.2778×10^{-2} 1 0.2389×10^{-2}
{ 热 阻 率 }	$m \cdot K/W$, $m \cdot ^\circ C/W$ 0.86 0.2389×10^{-2} 1	(m·h·deg/kcal) 1 0.2778×10^{-2} 1.163	(cm·s·deg/cal) 360 1 4.186×10^2
传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 1.163 4.186×10^4 1	(kcal/m ² ·h·deg) 1 3.6×10^4 0.86	(cal/cm ² ·s·deg) 0.2778×10^{-4} 1 0.2389×10^{-4}
{ 表 面 热 阻 率 }	$m^2 \cdot K/W$, $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 0.86 0.2389×10^{-4} 1	(m ² ·h·deg/kcal) 1 0.2778×10^{-4} 1.163	(cm ² ·s·deg/cal) 3.6×10^4 1 4.186×10^4
比 热	$J/(kg \cdot K)$, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 4.186×10^3 1	(kcal/kg·deg) 1 0.2389×10^{-3}	(cal/g·deg) 1 0.2389×10^{-3}
{ 体 积 比 热 }	$J/(m^3 \cdot K)$, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$ 4.186×10^3 4.186×10^6 1	(kcal/m ³ ·deg) 1 10^3 0.2389×10^{-3}	(cal/cm ³ ·deg) 10^{-3} 1 0.2389×10^{-6}
导温系数	m^2/s 0.2778×10^{-3} 10^{-4} 1	(m ² /h) 1 0.36 0.36×10^4	(cm ² /s) 0.2778×10 1 10^4
热 容 量	J/K, J/°C 4.186 4.186×10^3 1	(kcal/deg) 10^{-3} 1 0.2389×10^{-3}	(cal/deg) 1 10^3 0.2389

使用实例：导热系数用 (cal/cm·s·deg) 表示时，换算成SI要乘以 4.186×10^2 ，换算成 kcal/m·h·deg要乘以360。

银的导热系数为 1 (cal/cm·s·deg)，418.6 W/(m·°C)，360 (kcal/m·h·deg)。

1 kWh = 860 kcal，1 BTU = 0.252 kcal (见第1篇第2章)。

表2 常温下导热系数λ的概值W/(m·°C)或(kcal/m·h·deg)

气体(1个大气压下)	液 体	玻 璃	冰	金 属
0.02(空气)~0.2(氢)	0.1(油)~0.5(水)	0.6~2	2	20(水银)~400(银)

公式(见 1.2.4 节例 1)。

(a) 热学欧姆定律 在稳定热传导的情况下, 单位时间内流过截面积 S 、长 l 的导热体的热量, 即热流 Q , 设两截面的温度差为 θ , 并适当考虑 Q 、 θ 的符号, 可从式(1)求得:

$$Q = (\lambda S / l) \theta$$

$1/(\lambda S / l)$ 相当于电阻, 称为热阻, $1/\lambda$ 为热阻率。因此, 能用和求电阻同样的方法求热阻。

例 图 1 在轴向单位长度上从内面向外面稳定热传导的热阻

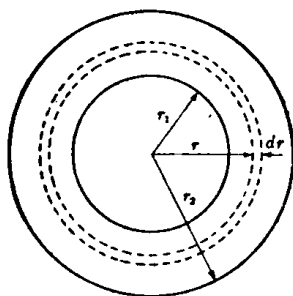


图 1 中空圆筒热阻计算图

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{S \times 1} = \frac{1}{\lambda} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2\pi r} = \frac{1}{2\pi\lambda} \log_e \frac{r_2}{r_1}$$

(b) 固体面和流体间的传热 温度 θ_1 的固体壁面(面积 S)和温度 θ_2 的流体间的传热一般通过辐射、传导和对流的方式进行, 称为表面传热。设所传递的热流为 Q , 实验得出

$$Q = hS(\theta_1 - \theta_2)$$

h 叫作传热系数, 其值主要随流体物质和流速而显著变化, 也还受 $(\theta_1 - \theta_2)$ 的影响⁽³⁾(见表 3)。 $1/h$ 相当于表面热阻率, 可以认为对应于每单位面积的接触电阻。

表 3 传热系数 h 的概值 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
或 $(kcal/cm^2 \cdot h \cdot deg)^{(2)}$

静止空气	流动空气	流动油	流动水	沸腾水
1~20	10~250	50~1500	250~5000	1500~45000

(c) 热系统和电系统的对应关系 处理非稳定热传导现象(包括周期性变化的热现象)时, 除热阻外需要考虑热容量, 这相当电系统的静电容量。

例如, 热在均匀的导热体(每单位体积的热容

量, 即体积比热为 $c\rho$, 导热系数为 λ) 中向一个方向流动时, 可用与单位长度电阻 r ($\propto 1/\lambda$) 和静电容量 C_e ($\propto c\rho$) 的 $r-C_e$ 分布参数线路电现象完全相同的数学公式来处理。

归纳上面两个系统的对应关系, 可得到表 4。但是在电系统中不存在对应于由温度辐射产生的传热项目。

表 4 热系统和电系统对应表

热学量	电学量	热学量	电学量
温度(θ)	电位	传热系数(h)	表面电阻率的倒数
温度差(θ)	电压	热阻(R_{th})	电阻
热量(H)	电荷	体积比热($c\rho$)	静电容量
热流(Q)	电流	热容量(C_h)	静电容量
热流密度(q)	电流密度	导热系数(α)	电容、电阻时间常数的倒数
导热系数(λ)	电阻率的倒数		

1.2.4 非稳定热传导现象的数学解法 在边界条件复杂的多维的场合, 求热传导基本公式(1)、(2)的解析, 一般是非常困难的。在一维的场合, 已给出了各种形式的解作为式(1)、(2)的一般解⁽⁴⁾, 在恒温边界条件的场合, 往往确定了积分常数, 就能得到解(例 1)。但是, 在恒热流边界条件的场合, 一般必须采取别的解法(例 2)。

例 1 将充分厚的平面壁的一面保持在一定温度加热时, 壁内各点、各时刻的温度和热流, 可以作为把一定电压(一定温度) θ_0 加到无限长 $r-C_e$ 分布参数电路一端时的电压、电流问题来考虑, 离加热端 x 的点在时刻 t 的电压(温度) θ , 电流(热流密度) q 为:

$$\theta = \theta_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{rC_e}{4t}} x \right) \right\},$$

$$q = \theta_0 \sqrt{\frac{C_e}{\pi r t}} e^{-\frac{TC_e}{4t} x^2}$$

式中 误差函数 $\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-z^2) dz$

例如把混凝土墙 ($\lambda = 1.10 kcal/m \cdot h \cdot deg$, $c = 0.211 kcal/kg \cdot deg$, $\rho = 2.270 kg/m^3$) 外面保持在 $1000^\circ C$ 时, 深 $10cm$ 处 1 小时后的温度

已知 $r = 1/1.10 m \cdot h \cdot deg/kcal$, $C_e = 0.211 \times 2270 kcal/m^3 \cdot deg$, $x = 0.1 m$, $t = 1 h$, 则

$\sqrt{rC_c/4t} \cdot x = 1.04$, 由数表查得 $\text{erf}(1.04) = 0.858$, 所以 $\theta = 1000(1 - 0.858) = 142^\circ\text{C}$ 。

例2⁽⁵⁾ 设对初始温度为 θ_0 、厚为 l 的无限大耐火墙的一面, 在 $t = 0$ 以后, 供给一定的加热线流密度 q_r , 另一面理想地绝热, 若把式(1)、(2)用拉普拉斯变换求解, 将解展开成级数, 逐项反变换, 并取到第2项, 则加热面温度 θ 可用下式给出。

$$\begin{aligned} \phi - \phi_0 &\cong 2 \left[\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} + 2 \left\{ \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} e^{-1/\tau} - \left(1 - \text{erf} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \right) \right\} \right] \\ &\cong 2 \left\{ \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} + 0.6 \tau \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} e^{-1/\tau} \right\} \quad \tau \leq 1 \end{aligned}$$

式中 $\tau = t/t_r$, $t_r = c\rho l^2/\lambda$, $\phi = \theta/\theta_r$, $\theta_r = q_r l/\lambda$, $\phi_0 = \theta_0/\theta_r$, λ 、 c 和 ρ 为耐火墙的热常数。

在热传导问题上, 通过这样适当地引入无量纲量 (温度 ϕ 、热流密度 $i = q/q_r$ 、时间 τ 、坐标 $u = x/l$), 能将基本公式(1)、(2)无量纲化求解, 得到某个一般性解。即使 λ 具有温度系数, 在 $\lambda = \lambda_0(1 + \alpha\theta)$ 的场合, 如果引入无量纲的导热系数温度系数 $\gamma = \alpha\theta_r$, 则 $\lambda = \lambda_0(1 + \gamma\phi)$, 同样可将基本公式(1)、(2)无量纲化。其中, 设(2)式右边 $= (1/\rho c) \text{div} \lambda \text{grad} \theta$ 。

设上例中耐火墙材料是标准熟耐火粘土砖 ($\lambda = 0.84 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$ 、 $c = 0.24 \text{ kcal/kg} \cdot \text{deg}$ 、 $\rho = 2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $l = 0.115 \text{ m}$), $q_r = 20 \text{ kW/m}^2 \times 860 \text{ kcal/kWh}$, 若基准时间 $t_r = 7.56 \text{ h}$, 基准温度 $\theta_r = 2360^\circ\text{C}$, $t \leq 7.5 \text{ h}$, 就能用上式正确计算。

另外, 作为其它解法, 可以不展开拉普拉斯变换解, 而根据余数计算求反变换解, 得到别的形式解⁽⁶⁾。

1.2.5 非稳定热传导现象的计算机解法

(a) 模拟方法 例如对一维热传导现象, 把式(2)无量纲化, 得

$$\partial \phi(\tau, u) / \partial \tau = \partial^2 \phi(\tau, u) / \partial u^2$$

若将右边的2阶偏微分系数用差分商近似, 可得到差分常微分方程式 (其中, 假设 l 为问题给出的一维的一定长度, 则无量纲坐标 $u = x/l = 0, \Delta u, 2\Delta u, \dots, i\Delta u, \dots, N\Delta u = 1$)。

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial \tau} = \frac{d\phi(\tau, i\Delta u)}{d\tau}$$

$$= \frac{1}{\Delta u} \left\{ \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta u} - \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{\Delta u} \right\} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{\Delta u^2} (\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}) \quad (4)$$

若在图2的RC回路网络中选任意的基准电压 v_r 和基准时间 t_r , 引入无量纲电压 $\phi (= v/v_r)$ 和无量纲时间 $\tau (= t/t_r)$, 则

$$\frac{d\phi_i}{d\tau} = \frac{1}{CR/t_r} (\phi_{i-1} - 2\phi_i + \phi_{i+1})$$

设 $CR/t_r = \Delta u^2$, 就和式(4)一致。测定这种RC回路网络电压和电流作热传导分析的直接相似计算装置叫做博依肯 (Beuken) 模型⁽⁷⁾ (电压通过静电方式或缓冲放大器测量), 有最大调整值 $C \cong 100 \mu\text{F}$ 、 $R = 1 \text{ M}\Omega$ 左右的低速型和 $C \cong 1000 \text{ pF}$ 、 $R = 10 \text{ k}\Omega$ 左右的重复型。

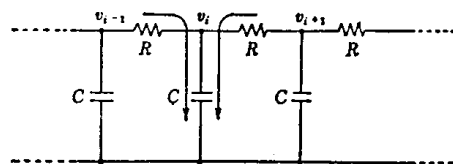


图2 RC回路网络

博依肯模型不仅能很经济地建立, 而且系数值 (R 和 C 值) 的误差对解的误差的影响不随分割数 N 而积累, 在理论方面也优越⁽⁸⁾。但是, 可以认为, 博依肯模型实际只适用到空间二维问题。

另外, 虽然用通用模拟计算机也能求解⁽⁸⁾, 但所要求运算器的数量太大, 所以其适用范围一般认为实用上到空间一维问题。此外, 还有通过仅由电阻元件组成的回路网络求解的特殊方法 [李普曼 (Liebmann) 模型⁽⁹⁾]。

(b) 使用数字计算机的方法 线性系统, 即各热常数 (λ 、 $c\rho$) 一定的一次直角坐标系热传导方程式, 从式(1)、(2)得

$$\partial \theta / \partial t = a \cdot \partial^2 \theta / \partial x^2 \quad (5)$$

式中 a (导温系数) $= \lambda / (c\rho)$ 。

这里将两边分别差分⁽¹⁰⁾, 设 $x = i \cdot \Delta x$, $t = j \cdot \Delta t$,

⊖ 原文误为 $R = 1 \text{ MG}$ 。——译者注

$$\left. \begin{aligned}
 \partial\theta/\partial t &= (\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j})/\Delta t + 0(\Delta t) \\
 &\quad (\text{前进差分}) \\
 &= (\theta_{i,j} - \theta_{i,j-1})/\Delta t + 0(\Delta t) \\
 &\quad (\text{后退差分}) \\
 &= (\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j-1})/2\Delta t + 0(\Delta t^2) \\
 &\quad (\text{中心差分})
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 \partial^2\theta/\partial x^2 &= (\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j})/\Delta x^2 \\
 &\quad + 0(\Delta x^2) \quad (7)
 \end{aligned}$$

从式(5)~(7)可得

(1) 显(Explicit)型差分方程式

$$\frac{\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}}{\Delta t} = \frac{a}{\Delta x^2} (\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}) + 0(\Delta t, \Delta x^2)$$

(2) 隐(Implicit)型差分方程式

$$\frac{\theta_{i,j} - \theta_{i,j-1}}{\Delta t} = \frac{a}{\Delta x^2} (\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}) + 0(\Delta t, \Delta x^2)$$

(3) 克朗克-尼科尔逊(Crank-Nicolson)

差分方程式⁽¹¹⁾ (将上述两者组合, 是变形的式(2))

$$\begin{aligned}
 \frac{\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}}{\Delta t} &= \frac{a}{2\Delta x^2} (\theta_{i+1,j+1} - 2\theta_{i,j+1} \\
 &\quad + \theta_{i-1,j+1}) + \frac{a}{2\Delta x^2} (\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} \\
 &\quad + \theta_{i-1,j}) + 0(\Delta t^2, \Delta x^2)
 \end{aligned}$$

(4) 常微分型差分方程式

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \frac{a}{\Delta x^2} (\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1}) + 0(\Delta x^2)$$

在上述4式中, 若设 $D = (\Delta t/\Delta x^2) \cdot a$, 忽略 $0()$, 可得成为程序设计基础的下述四个式子。

$$(1) \theta_{i,j+1} = \theta_{i,j} + D(\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}) \quad (\text{逐次解})$$

$$(2) \theta_{i,j-1} = \theta_{i,j} - D(\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}) \quad (\text{联立方程式解})$$

$$\begin{aligned}
 (3) \theta_{i,j} + (D/2)(\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}) \\
 = \theta_{i,j+1} - (D/2)(\theta_{i+1,j+1} - 2\theta_{i,j+1} \\
 + \theta_{i-1,j+1}) \quad (\text{联立方程式解})
 \end{aligned}$$

$$(4) d\theta_i/dt = (a/\Delta x^2) (\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1})$$

[根据隆格-库达(Runge-kutta)或隆格-库达-吉尔(Runge-kutta-Gill)法的解]

若把(4)除外, 取相同的 Δx 、 Δt 时, 一般来说程序设计依(1), (2), (3)的顺序而复杂化, 需要的计算时间和存储容量按此顺序加长或增大。还有, 就解的稳定性而言, (1)在 $D \leq 1/2$ 稳定, (2)、(3)稳定, (4)的稳定条件比(1)多少不严格一些。此外, 解的精度可从截止误差项, $0()$ 的等级推定。

在热传导计算中广泛采用: (1)显型法, (3)克朗克-尼科尔逊法, (5)有限元法⁽¹²⁾。(5)的特点是能任意选择空间分割解析对象的网孔形状, 然而计算所需的时间长、存储量大, 还要求稳定条件, 程序设计也往往较麻烦。

在适用于非线性问题这一点上, (1)容易做到, (3)和(5)在每一计算时间间隔中, 要同时决定依赖于热常数的系数的行列式解, 为此需要进行反复计算。

在非线性 $\{\lambda(\theta), c\rho(\theta)\}$ 的场合, 基础方程式用下式给出

$$c\rho \cdot \partial\theta/\partial t = (\partial/\partial x) \cdot (\lambda \cdot \partial\theta/\partial x) \quad (8)$$

例如用(1)法时可根据下式算出

$$\begin{aligned}
 c\rho(\theta_{i,j})(\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}) &= \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left\{ \frac{\lambda_{i-1,j} + \lambda_{i,j}}{2} \right. \\
 &\quad \cdot (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}) + \frac{\lambda_{i+1,j} + \lambda_{i,j}}{2} \cdot (\theta_{i+1,j} - \theta_{i,j}) \left. \right\}
 \end{aligned}$$

此外也有能用扰动法将非线性问题线性化而求解的例子⁽¹³⁾。

二维、三维问题也能同样解得, 以直角坐标系二维为例, 设 $x = i \cdot \Delta x$, $y = j \cdot \Delta y$, $t = k \cdot \Delta t$, 用(1)显型法, 可从二维化式(8)相对应的公式提示得到差分式, 在线性系统的场合则简化成下式⁽¹⁴⁾。

$$\begin{aligned}
 \theta_{i,j,k+1} &= \theta_{i,j,k} + D_x(\theta_{i+1,j,k} - 2\theta_{i,j,k} + \theta_{i-1,j,k}) \\
 &\quad + D_y(\theta_{i,j+1,k} - 2\theta_{i,j,k} + \theta_{i,j-1,k}) \quad (\text{逐次解})
 \end{aligned}$$

式中 $D_x = a \cdot \Delta t / \Delta x^2$, $D_y = a \cdot \Delta t / \Delta y^2$

$$\text{稳定条件} \quad 1 - 2D_x - 2D_y \geq 0$$

1.2.6 由温度辐射形成的传热 在表面积 S_1 、 S_2 , 绝对温度 T_1 、 T_2 , 黑度 ϵ_1 、 ϵ_2 的完全扩散性灰体两个面之间, 由温度辐射(也叫热辐射)传递的热流 Q , 理论上由下式给出。

$$Q = \sigma S_1 \mathcal{F}_{12} (T_1^4 - T_2^4)$$

$$= \sigma S_2 \mathcal{F}_{21} (T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

式中, 斯特凡-玻尔兹曼常数 $\sigma = 4.9 \times 10^{-8} (\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$ 。 $\mathcal{F}$ 叫做辐射交换系数⁽¹⁾⁽⁵⁾ (Radiant exchange factor 或 Hottel's coeff), 为无量纲的量, 在上述只有两个面的场合, 仅由两个面的黑度, 几何形状和相互间的位置决定, 可由下式求得, 且 $S_1 \mathcal{F}_{12} = S_2 \mathcal{F}_{21}$ 。

$$\mathcal{F}_{12} = 1 / \{ 1/F_{12} + (1/\varepsilon_1 - 1) + (S_1/S_2)(1/\varepsilon_2 - 1) \} \quad (10)$$

这里, F_{12} 是表面 1 对表面 2 的形态系数 (Geometrical viewfactor; 在有关角的术语和机械工程学等领域使用)。在图 3 中 1、2 面的场合, F_{12} 可用下式算出。当 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ 时, 即相当于黑体场合辐射交换系数的量。

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \frac{1}{\pi} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{D^2} dS_2 dS_1$$

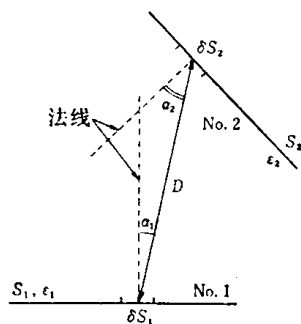


图3 形态系数 F_{12} 的计算

F 与 $\mathcal{F}$ 不同, 仅由该两个面的几何形状和相互位置确定。从定义可知 $S_1 F_{12} = S_2 F_{21}$, F_{12} 是表示每单位面积 1 面观察 2 面的大小的量。

2 面把 1 面完全包围, 而且比 1 面大时, $F_{12} \cong 1$, $\mathcal{F}_{12}$ 被简化。还有 $S_1 \ll S_2$ 时, 式(10) 简化如下。

$$\mathcal{F}_{12} \cong \varepsilon_1$$

在有多数封闭的相互反射面时, 如图 4 所示, 若 $\mathcal{F}_{12}$, $\mathcal{F}_{13}$, $\mathcal{F}_{23}$ ……可预先由已知的 F 计算求得⁽¹⁾⁽⁵⁾, 则与式(9) 相同的关係在每两个面之间成立, 辐射传热的热计算即可进行。但是, 在计算 $\mathcal{F}$ 很麻烦的场合, 则要根据已知的 F 用电子计算机用辐射法按以下所述算出 Q 。

设入射到 i 面的热流为 H_i , 从 i 面流出的热流为 B_i , 黑度为 $\varepsilon_i (= \text{吸收率 } \alpha_i)$, 反射率为 r_i

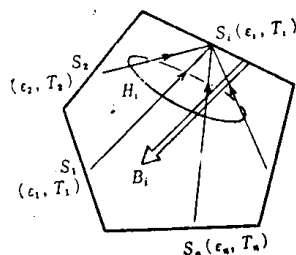


图4 封闭的相互反射面 ($B_i = r_i H_i + \sigma \varepsilon_i S_i T_i^4$)

$$(\varepsilon_i + r_i = 1), \text{ 由于 } H_i = \sum_{k=1}^n S_k F_{ki} B_k = S_i \times$$

$$\sum_{k=1}^n F_{ik} B_k, \text{ 所以 } H_i/S_i = \sum_{k=1}^n F_{ik} B_k, \text{ 而 } B_i$$

$= (r_i H_i/S_i + \sigma \varepsilon_i T_i^4) S_i$, 将 H_i/S_i 代入得 B_i/S_i 。所以从 i 面流出的净辐射热流 Q_i 可用 B_i/S_i 用下式求出。

$$Q_i (= \sigma S_i \varepsilon_i T_i^4 - \alpha_i H_i) = B_i - H_i \\ = (\varepsilon_i/r_i) \cdot (\sigma T_i^4 - B_i/S_i) S_i$$

包含辐射传热的计算机计算, 都是温度四次方之差的运算, 无论时间划分过长, 还是按照舍入误差划分过细, 都会得到错误的结果, 所以需要特别注意适当地划分时间。

1.3 大电流母线

1.3.1 母线的有效电阻⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

(a) 母线的集肤效应系数 图 5 和 6 示各种母线的集肤效应系数 (交流电阻 R_{ac} /直流电阻 R_{dc})。根据这两张图可求 R_{dc} 已知的母线的有效电阻 (交流电阻)。

(b) 圆形母线的邻近效应 如果使两根以上母线互相邻近, 由于邻近效应的影响, 与单一母线时相比, 有效电阻增大。图 7 表示圆形母线邻近效应的影响。

(c) 感应加热用母线的有效电阻⁽¹⁾⁽⁸⁾ 图 8 所示感应加热用矩形往复母线, 其单位长度的有效电阻 R 可用下式求出。

$$R = \frac{2\rho}{W\sigma} F$$

式中 ρ : 母线导体的电阻率; δ : 透入深度。

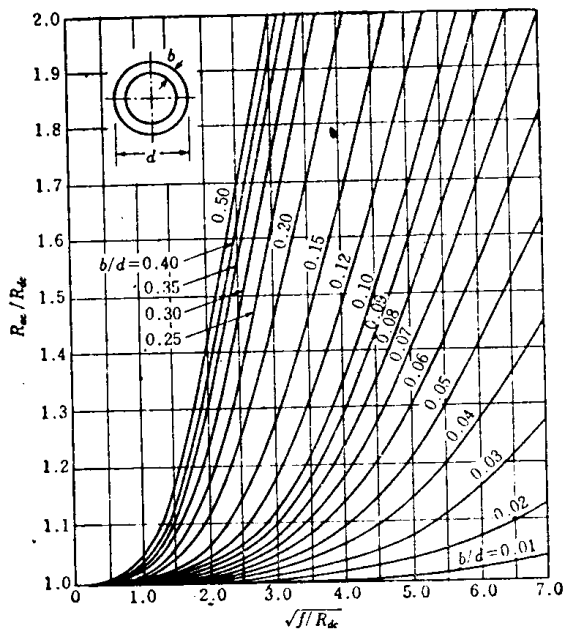


图5 圆形和圆管母线的集肤效应系数
f: 频率, R_{dc} : 每米的直流电阻($\mu\Omega$)

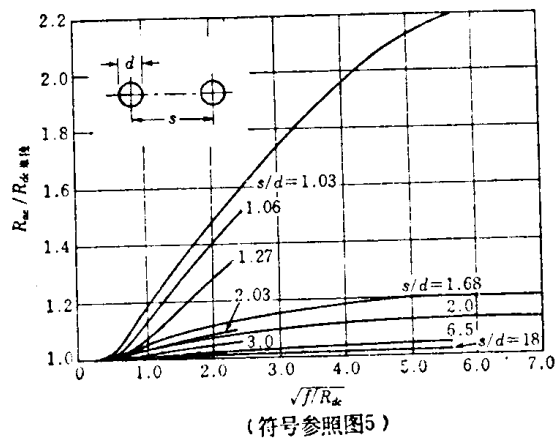


图7 圆形母线的邻近效应
(符号参照图5)

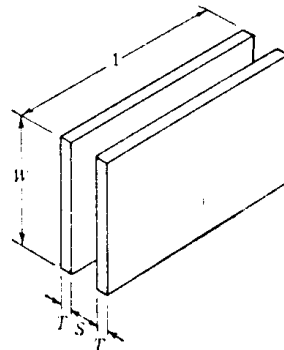


图8 矩形往复母线

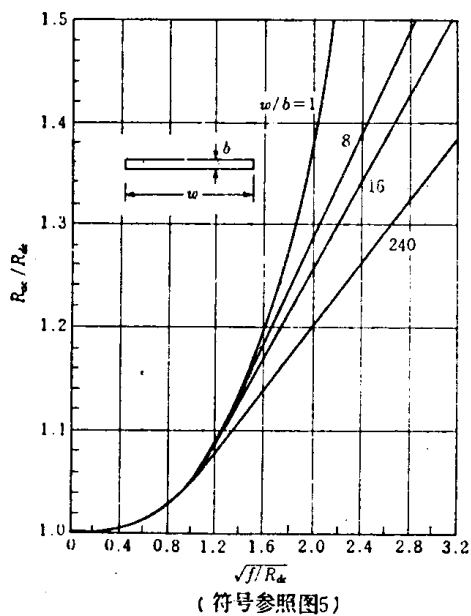


图6 矩形母线的集肤效应系数
(符号参照图5)

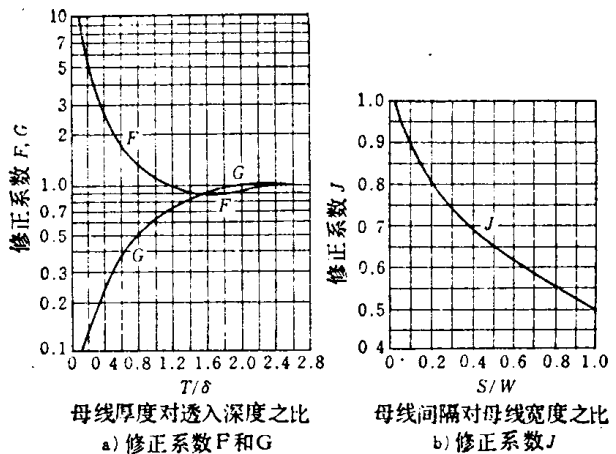


图9

式中 μ_r : 线材相对导磁率; μ_0 : 真空导磁率; F : 图9(a)给出的修正系数。

1.3.2 母线的电感^{(19)~(21)}

(a) 自感 母线的电感可用下式给出:

$$L = 2l \log_e \frac{2l}{R} - 1 + \frac{R}{l} \quad (\text{nH})$$

式中 l : 母线长(cm); R : 自几何均距(cm)。
自几何均距, 对矩形母线(图10)为

$$R = 0.2235(a+b) \frac{100}{100+\lambda}$$

其中 λ 可由图11求出。

圆形母线(图12)

$$R = 0.7788 a$$

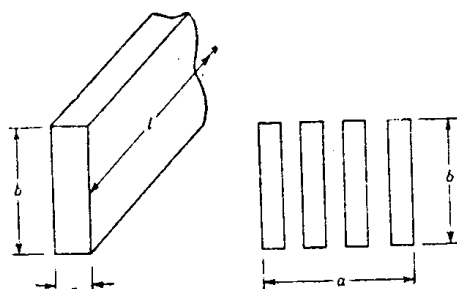


图10 矩形母线

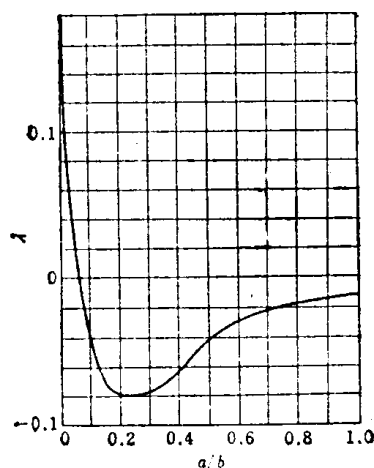


图11 求λ的曲线

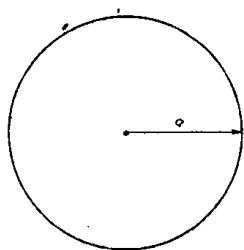


图12 圆形母线

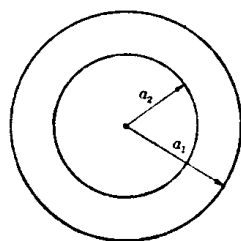


图13 圆管母线

圆管母线(图13)

$$\log_e R = \log_e a_1 - \frac{a_2^4}{(a_1^2 - a_2^2)^2} \log_e \frac{a_1}{a_2} + \frac{1}{4} \frac{3a_2^2 - a_1^2}{a_1^2 - a_2^2}$$

(b) 互感 母线间距离相当大时($l/r < 5$)的互感:

$$M = 2l \left(\log_e \frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r} - \frac{\sqrt{l^2 + r^2}}{l} + \frac{r}{l} \right) \quad (\text{nH})$$

式中 r : 母线中心距(图14), 长度单位为 cm。

相互靠近的母线($l/r > 5$)间的互感

$$M = 2l \left(\log_e \frac{2l}{D} - 1 + \frac{D}{l} \right) \quad (\text{nH})$$

这里, D 为互几何均距, 对圆形母线和圆管母线即为其中心距, 对矩形母线 D 用下式给出:

$$\log_e D = \frac{1}{2} \left(\frac{d' + 2a}{a} \right)^2 \log_e R_{d+2a'} - \left(\frac{d' + a}{a} \right)^2 \times \log_e R_{d+a'} + \frac{1}{2} \left(\frac{d'}{a} \right)^2 \log_e R_{d'}$$

式中 $R_{d+2a'}$: 矩形 $b \times (d' + 2a)$ 的自几何均距;
 $R_{d+a'}$: 矩形 $b \times (d' + a)$ 的自几何均距; $R_{d'}$: 矩形 $b \times d'$ 的自几何均距(见图15)

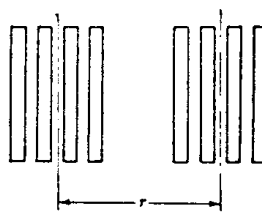


图14 母线中心距

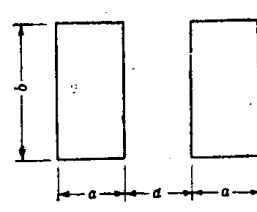


图15 矩形的互几何均距

(c) 往复母线的电感 平行往复母线单方向的有效电感, 根据上述 L 和 M 由下式计算:

$$L_{eff} = L - M$$

对图8所示大气中感应加热用往复母线, 用下式求得电抗值与实测值很好相符⁽¹⁸⁾。

$$X = \frac{2\rho}{W\delta} G + 2\pi f\mu_0 \frac{S}{W} J$$

式中 X : 往复部分的电抗; ρ : 母线导体的电阻率; f : 频率; μ_0 : 空气的导磁率; G 和 J : 图9给出的修正系数。 δ 是1.3.1节(c)中所述的透入深度。

1.3.3 母线的容许电流 决定母线容许电流时应当考虑的主要因素有三个, 即母线材料的最高容许温度、容许电压降和容许功率损失(经济电流密度)。由于电压降可根据上述有限电阻和电感算出, 经济电流密度与在输电线的场合相同(见第21篇4.1.2节), 所以这里只说明根据最高容许温度决定电流的方法。

(a) 单一母线的容许电流⁽²¹⁾⁽²²⁾ 圆形和垂直安装的矩形单一母线的容许电流 I 可用下式求

⊖ 原文误为 $b + (d' + a)$ 。——译者注

得。

$$I = h p^{0.430} \sqrt{\frac{a \theta^{1.25}}{(1 + \alpha \theta) \rho S}} \quad (\text{A})$$

式中 p : 母线的周长(cm); a : 母线截面积(cm^2);
 ρ : 标准温度下的电阻率($\mu\Omega \cdot \text{cm}$); α : 电阻温度系数;
 θ : 母线的温升($^{\circ}\text{C}$); s : 集肤效应系数; h :
 由母线表面状态决定的常数[传热系数 $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$], 其值

表面仔细打毛除光涂黑漆时 27.0

表面一般涂黑漆时 24.3~24.8

表面不涂漆时 20.2~21.6

一根母线水平安装时, 容许电流约降低 9%。

由上式可知, 母线的环境温度和容许温升是决定容许电流的基础条件。一般发表的母线容许电流表, 通常规定环境温度 40°C , 温升 30°C 。

(b) 矩形多重母线的容许电流⁽²²⁾⁽²³⁾ 两根以上矩形母线并列起来的多重母线, 由于其传热系数减小, 而且集肤效应的影响大, 容许电流显著减少(图 16 的虚线)。但在多重往复母线的场合, 随着重合根数的增加, 容许电流几乎直线增加(图 16 的实线)。

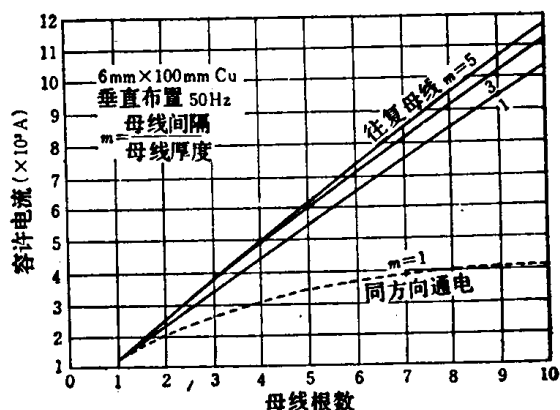


图16 母线根数和容许电流的关系

(c) 圆管母线的容许电流⁽²⁴⁾ 图 17 为圆管母线 60Hz 时的容许电流。从该图可知, 将壁厚增加到某一厚度(铜管约为 11mm, 铝管约为 17mm)以上, 就是浪费。

(d) 感应加热用往复母线的容许电流⁽¹⁸⁾

表 5 是图 8 所示中频感应炉用往复母线 10000Hz 时的容许电流(环境温度 35°C , 温升 50°C)。其它频

率[$f(\text{Hz})$]时的电流 I_f , 可以 10000Hz 的值为基础, 由下式求得。式中, R_f 为母线在频率 $f(\text{Hz})$ 时的有效电阻(往复部分)。

$$I_f = \sqrt{\frac{R_{10000} H_{10000}}{R_f}}$$

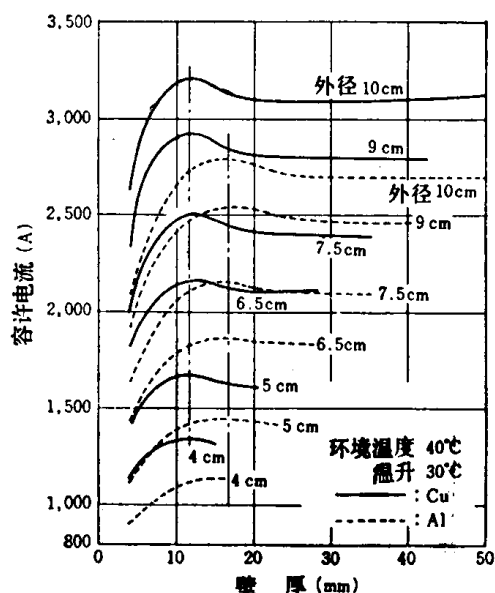


图17 圆管母线的容许电流

表 5 高频感应炉用往复铜母线的容许电流(普通氧化表面)

W (mm)	S (mm)	容许电流 (A)	W (mm)	S (mm)	容许电流 (A)
50.8	1.6	250	152.4	1.6	675
	12.7	345		12.7	840
	19.1	355		19.1	890
	25.4	355		25.4	980
76.2	1.6	360	152.4	38.1	1045
	12.7	500		1.6	860
	19.1	530		12.7	1060
	25.4	535		19.1	1145
101.6	1.6	485	152.4	25.4	1210
	12.7	625		38.1	1340
	19.1	685		50.8	1360
	25.4	710			

注: $T > 3.2\text{mm}$, 符号 W 、 S 和 T 的含义参见图 8。

1.4 温度的测量和调节

1.4.1 温度定点 温度这一概念常识上被解释为冷热的程度,但正确的含义要根据热力学的定义。因此,国际度量衡协会也在1968年大幅度修订了实用温度刻度,使之实质上与热力学温度刻度一致。作为用于测量等的实用温度刻度的标准,采用了再现性好的物质的沸点和凝固点,称之为定义定点或一次定点。1968年的决议值和前次1948年的修订值不同,如表6所示⁽²⁵⁾。因此,一切温度刻度1948年的和1968年的总相差一些。温度定点不仅再现性好,由于物质的潜热,对热量输入而言也很稳定。

温度定点仅仅用一次定点实用上不够方便,所以虽然再现性有所下降,人们也还采用表7所示的二次定点⁽²⁵⁾。

就金凝固点以上的温度来说,可从下式决定的黑体亮度的测定值算出温度 t 。即设温度为 $t(^{\circ}\text{C})$ 时黑体对波长 λ 的分光亮度为 R_t ,金凝固点的分光亮度为 R_{Au} ,则

$$\frac{R_t}{R_{Au}} = \frac{e^{C_2/\lambda(t_{Au}+T_0)} - 1}{e^{C_2/\lambda(t+T_0)} - 1}$$

式中 $C_2 = 14.388 \text{ mmK}$; $T_0 = 273.15 \text{ K}$; λ : 可见光线的一种波长。

表6 温度的一次定点

温度一次定点	$t_{08}(^{\circ}\text{C})$	$t_{48}(^{\circ}\text{C})$	$t_{08} - t_{48}(^{\circ}\text{C})$
氧的沸点	-182.962	-182.97	+0.008
锌的凝固点	419.58	419.505	+0.075
银的凝固点	961.93	960.8	+1.13
金的凝固点	1064.43	1063	+1.43
水的三重点	273.16K		
水的沸点	100		

t_{08} : 1968年修订的温度定点

t_{48} : 1948年规定的温度定点

1.4.2 温度计的种类和测量范围 温度测量分接触式和辐射式。前者把温度计的传感器部分装入被测物体内部或接触其表面,原则上使感温元件和被测物体温度相同而进行测量;后者把传感器部分远离被测物体,接受被测物体的辐射而进行测量。在电加热领域内最常使用的温度计中,接触式的有:(i)玻璃棒状温度计(俗称寒暑表), (ii)热电温度

表7 二次定点

二次定点	温度($^{\circ}\text{C}$)	二次定点	温度($^{\circ}\text{C}$)
氮的三重点	-248.589	铝的凝固点	660.46
氮的三重点	-210.004	铜的凝固点	1084.88
氮的沸点	-195.806	钴的凝固点	1495
氢的沸点	-185.856	氧化铝的凝固点	2054
水银的凝固点	-38.841	铋的凝固点	2447
铜-铝共晶点	548.26	钨的凝固点	2623
铈的凝固点	630.755	钨的凝固点	3422

计, (iii)电阻温度计; 辐射式的有: (i)光学高温计, (ii)辐射高温计等。

热电温度计利用热电偶的性质,即其热电势有规律地产生,而且几乎和热接点与冷接点间的温度差成比例,来测量与热接点温度相同的被测物体的温度。电阻温度计则是利用铂、铜、镍等纯金属,还有热敏电阻之类半导体的电阻率随温度有规律地变化的性质。表8表示JIS C 1602 (1974)规定的热电偶及其测量范围、容许误差等。表9表示其中PR和CA标准热电势表的一部分⁽²⁶⁾。

电阻温度计的测温电阻元件,以前采用铂和铜作为标准,但1974年JIS C 1604中只指定了铂。而且其 $t(^{\circ}\text{C})$ 和 $0(^{\circ}\text{C})$ 电阻值之比 R_t/R_0 的值,也和以前稍有不同,如表10所示⁽²⁷⁾。

光学高温计作为简便而相当准确的高温计而得到广泛应用,工厂用它校验辐射高温计等。增减灯丝电流,使高温计内灯泡灯丝和被测物体的亮度一致,根据乍一看好象灯丝消失了时的灯丝电流或者电桥电路的电流值,就可知道被测物体的温度。图18是表示光学高温计构造的简图。近来,虽然通常望远镜部分和指示计部分都做成一体,但也有分离

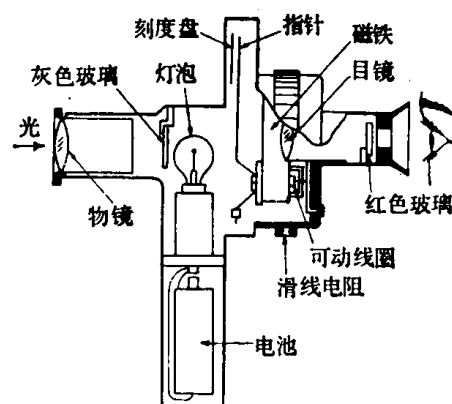


图18 光学高温计构造图

表 8 JIS C 1602(1974)中规定的热电偶

构成材料 符 号	测 量 温 度	等 级	容 许 误 差	构 成 材 料
PR	0~600℃	0.25级	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	+脚 含13%铈的铂铑合金
	600℃以上、过热使用限度以下	0.25级	测量温度的 $\pm 0.25\%$	-脚 铂
CA	0~400℃	0.4级	$\pm 1.6^{\circ}\text{C}$	+脚 镍和铬为主的合金
		0.75级	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	
	400℃以上、常用限度以下	0.4级	测量温度的 $\pm 0.4\%$	-脚 以镍为主的合金
		0.75级	测量温度的 $\pm 0.75\%$	
CRC	0~400℃	0.75级	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	+脚 镍和铬为主的合金
	400℃以上、常用限度以下	0.75级	测量温度的 $\pm 0.75\%$	-脚 铜和镍为主的合金
IC	0~400℃	0.75级	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	+脚 铁
		1.5级	$\pm 6^{\circ}\text{C}$	
	400℃以上、常用限度以下	0.75级	测量温度的 $\pm 0.75\%$	-脚 铜和镍为主的合金
		1.5级	测量温度的 $\pm 1.5\%$	
CC	0~200℃	0.75级	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	+脚 铜
	200℃以上、常用限度以下	0.75级	测量温度的 $\pm 0.75\%$	-脚 铜和镍为主的合金

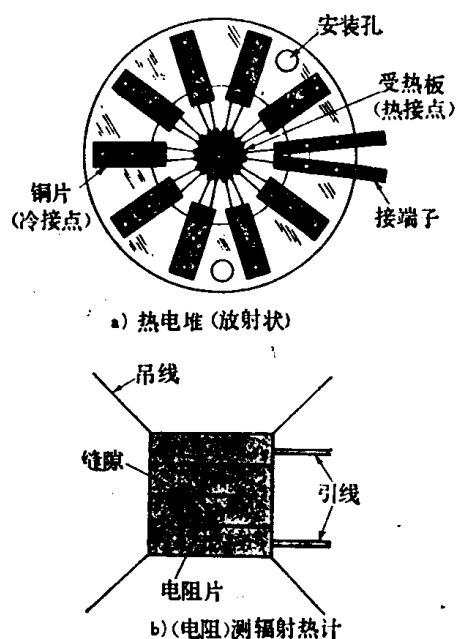


图19 热式辐射温度计的传感器

式的产品。光学高温计是通过观测者的视觉来测量温度的，是一种非自动显示式的测量仪表。近来上市的许多光电式辐射高温计，其原理基本上和光学高温计的相同，只是用光电管代替人眼，用适当的

电子电路代替人的判断，制成自动显示式的仪表。

辐射高温计中，图 19 那样的热电堆式和电阻测辐射热计式很早就有⁽²⁸⁾。这类温度计是把被测物体发出的全辐射能量收集到图示的受热板上，把温升转变成热电势或使电阻值改变而测量温度的。因此，从原理上说，也能测量相当低的温度，测温范围很广。

与之相应，使用硅、硫化铅、硫化镉等半导体的辐射高温计，利用这些材料的光电特性，具有相当明显的光谱特性。在这种意义上，可以说，与人的视见度性质相同，光学上的基本原理同前面所说的光学高温计的相似。由于其光谱特性在红外部显示最高值，所以能够测量到几百度(°C)，其测量范围也是很广的。

电气式温度计适用于测量比较高的温度。在测量从常温到400℃左右的温度时，除电阻温度计外，也使用水银温度计，双金属式温度计，液体膨胀式压力温度计和蒸汽压式压力温度计等。其中，压力温度计和双金属式温度计总称为金属温度计。这是由于感温部的热膨胀，波尔登管或双金属片产生机械变形，指示部分位置变化，从而指示出温度刻度

表 9

(a) PR 的标准热电势

(单位: mV)

温度(°C)	0	100	200	300	400	500	600	700	800
0	0.0000	0.6452	1.4643	2.3939	3.3974	4.4564	5.5635	6.7172	7.9180
20	0.1109	0.7976	1.6429	2.5895	3.6051	4.6740	5.7905	6.9536	8.1638
40	0.2316	0.9562	1.8255	2.7878	3.8149	4.8936	6.0194	7.1919	8.4115
60	0.3615	1.1206	2.0117	2.9886	4.0267	5.1150	6.2501	7.4320	8.6610
80	0.4996	1.2901	2.2012	3.1918	4.2406	5.3383	6.4828	7.6741	8.9125
温度(°C)	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
0	9.1657	10.458	11.792	13.158	14.549	15.952	17.353	18.736	20.081
20	9.4207	10.72	12.063	13.435	14.829	16.233	17.631	19.008	20.343
40	9.6776	10.987	12.335	13.712	15.109	16.513	17.909	19.280	20.602
60	9.9362	11.254	12.608	13.991	15.390	16.794	18.186	19.549	20.859
80	10.197	11.522	12.883	14.270	15.671	17.074	18.462	19.816	—

(b) CA 的标准热电势

(单位: mV)

温度(°C)	-100	-0	温度(°C)	0	100	200	300	400	500
-0	-3.553	0.000	0	0.000	4.095	8.137	12.207	16.395	20.610
-20	-4.138	-0.777	20	0.798	4.919	8.938	13.039	17.241	21.493
-40	-4.669	-1.527	40	1.611	5.733	9.745	13.874	18.088	22.346
-60	-5.141	-2.243	60	2.436	6.539	10.560	14.712	18.938	23.198
-80	-5.550	-2.920	80	3.266	7.338	11.381	15.552	19.788	24.050
温度(°C)	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	
-0	24.902	29.128	33.277	37.325	41.269	45.108	48.828	52.398	
-20	25.751	29.965	34.095	38.122	42.045	45.863	49.555	53.093	
-40	26.599	30.799	34.909	38.915	42.817	46.612	50.276	53.782	
-60	27.445	31.629	35.718	39.703	43.585	47.356	50.990	54.466	
-80	28.288	32.455	36.524	40.488	44.349	48.095	51.697	—	

表10 铂测温电阻元件的电阻变化

温度(°C)	R_t/R_0	温度(°C)	R_t/R_0	温度(°C)	R_t/R_0
-200	0.1714	100	1.3916	400	2.4956
-180	0.2580	120	1.4685	420	2.5655
-160	0.3442	140	1.5449	440	2.6349
-140	0.4291	160	1.6208	460	2.7038
-120	0.5129	180	1.6963	480	2.7722
-100	0.5957	200	1.7713	500	2.8402
-80	0.6777	220	1.8458	520	2.9077
-60	0.7591	240	1.9199	540	2.9747
-40	0.8399	260	1.9935	560	3.0412
-20	0.9202	280	2.0666	580	3.1072
0	1.0000	300	2.1393	600	3.1728
20	1.0793	320	2.2115	630	3.2702
40	1.1581	340	2.2832		
60	1.2364	360	2.3545		
80	1.3142	380	2.4253		

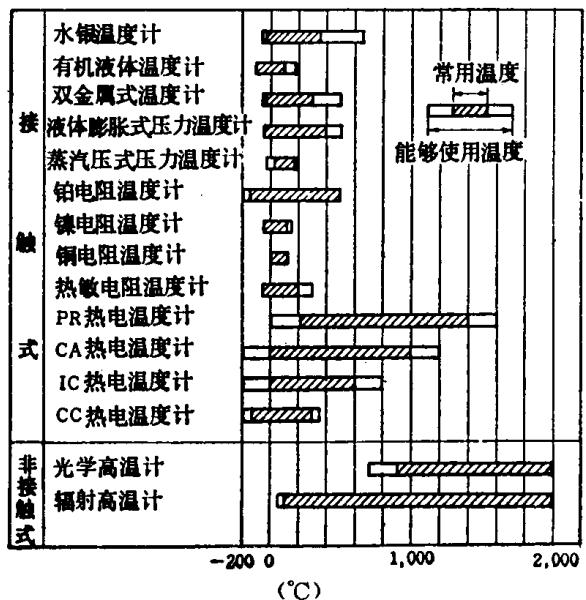


图20 各种温度计的使用范围

的。一般说来，它们结构简单，坚固耐用，价格较低，使用也方便，但精度低，不适用于测高温。图

20⁽²⁰⁾所示是一般使用的代表性温度计的测量范围。

1.4.3 黑体炉和光学高温计用标准 如图 21 所示, 辐射式温度计的温度指示值随测量对象的黑度而异⁽³⁰⁾, 因此要严格确定其刻度, 必须使用经很好调整的黑体炉。严格地说, 黑体炉, 如其黑体部分的温度和温度分布均匀性不能严格地测定和正确地保持, 则一般是不能实际使用的。因此有实用上与黑体炉效果相同, 能够简单地实现的所谓补偿型黑体炉。如图 22 所示, 补偿型黑体炉炉口附近的温度能自由升降, 作为辐射的补偿部分。将该处温度提得比辐射面的温度高一些, 以补偿辐射面的辐射, 有效地使黑度接近 1。这是一种很简单的方法。判断辐射面的黑度是否充分接近 1, 有各种各样的方法, 简单的有采用图 23 所示辐射面的方法。可在黑面用氧化铁, 白面用氧化镁。当黑体炉使用时, 增减炉子补偿部分的功率, 升降温度, 使图的形状消失到用肉眼看不见就可以了。这时补偿型黑体炉的黑度与理想黑体炉黑度的差, 就全辐射来说, 如图 24 所示。图中, H 为炉膛深度, r 为炉口半径, δ 为与理想黑体黑度的差, K 为空洞底面开口部分以外的壁面的形态因素 (与热计算方面的形态系数相同)。一般认为, 这种炉子, 同光学高温计一样, 在接近可见光波段上的黑度更接近于黑体的黑度。

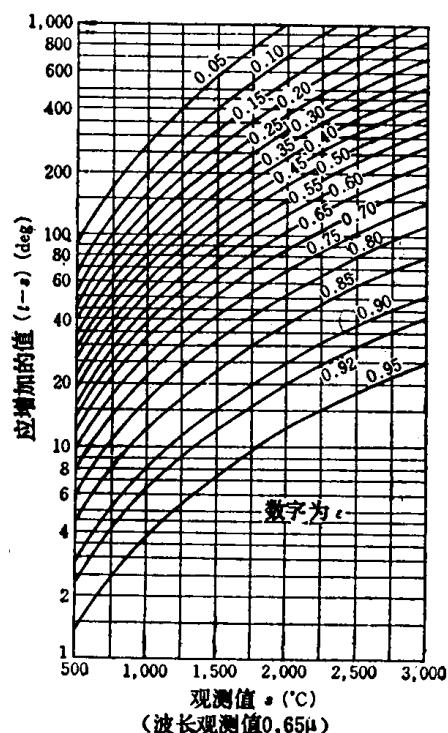


图21 单色黑度 ε ($\lambda = 0.65 \mu$) 和温度补偿值

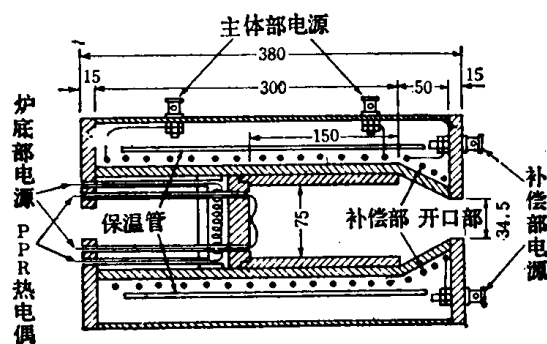


图22 补偿型黑体炉

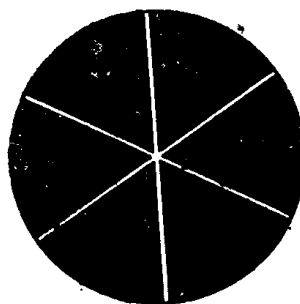


图23 炉底形状一例

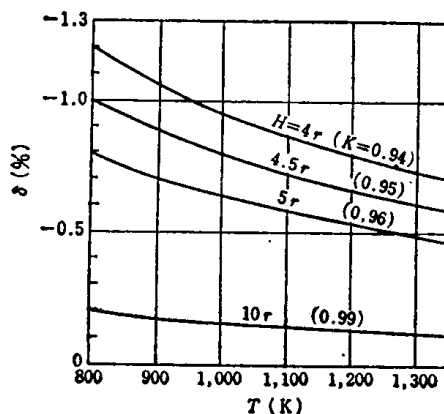


图24 根据亮度判别的黑度的精度 δ (%)

作为光学高温计的二次标准, 往往采用图25所示的标准灯泡。其种类和使用温度范围、点灯电流、电压示于表11。点灯电压、电流不同, 亮度会有变化, 所以要用充分稳定的电源, 但各个灯泡多少仍有差异。因此应由灯泡制造厂逐个附上电压、电流和温度数据出售。

根据全辐射测量温度, 由于物体的全辐射率实际上差别相当大, 所以精度很低。因此, 对于炉子,

⊖ 原文误为 E。——校者注

⊖ 原图“炉底部电源”和“PPR 热电偶”下面的两个箭头符号反了。——校者注

一般只用于连续测量炉顶温度等。

1.4.4 温度控制 除了家用电热器具中那种极简单的恒温器以外，温度控制通常也是由一般的过程控制和系统构成的。但是，采用自动温度调节器的电热装置，一般是小型的，采用加热元件的间接加热式电阻炉，其控制方式多采用通-断式。这另一方面还由于小型电阻炉等传输滞后和空耗滞后小，容量滞后大，用通-断控制就能进行满意的控制。需要精密温度控制的场合，则采用PID控制和PI控制；采用双重方式控制的场合也有，即偏差大时，采用通-断控制，偏差减小后，自动切换到连续控制。

用电阻炉等进行热处理时，往往需要随时间改变加热温度。这叫做温度的程序控制。在大型生产过程中，还有其它生产条件，不会只是自动地、进行温度程序控制，但小型电阻炉等往往只进行温度

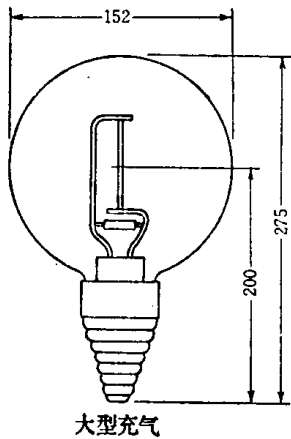


图25 确定光学高温计刻度
用标准灯泡的形状和尺寸

表11 光学高温计用标准灯泡的种类

种 类		使用温度范围 (°C)	电流(A)	电压(V)
大型	真空	700~1600	4~11	0.5~4
	充气	1000~2000	8~18	1~5
小型	真空	700~1500	0.9~2.5	0.4~3
	充气	1000~1800	2.5~4.5	1~3

的自动程序控制。这仅仅是用凸轮机构或滑动机构改变温度设定值，其具体构造因各制造厂而异，有各种各样的。但是在电气控制中，因为都要通过电位计等电气元件，所以极力减少机械运动转变为电信号处的接触不良，就成为提高可靠性的重点。最近，已能把过去作为计算机控制的一部分而进行的程序控制，用微处理机在设备旁简单地进行了。

作为温度控制的检测端，通常采用热电偶，测温电阻元件和光学传感器等显示式温度计的传感器，但上述双金属和压力式金属温度计的传感器，作为最简单的控制用传感器，也获得广泛应用。表12所示是一直用的几种双金属及其特性。双金属的缺点是稍有残余变形，所以不适用于精密温度控制。

表12 双金属

材 质		容许温度范围	常用温度范围	弯曲常数K	电阻率	电阻温度系数	比热	比重
高膨胀侧	低膨胀侧	(°C)	(°C)	(K × 10 ⁶ /°C)	(20°C) (μΩ·cm)	× 10 ³	{cal/ (g·°C)}	
Cu-Zn	Ni-Fe	-70~150	-20~150	14.0	12	1.5	0.12	8.25
Ni-Mn-Fe	Ni-Fe	-70~350	-20~150	14.2	82	1.2	0.12	8.10
Ni-Mo-Fe	Ni-Fe	-70~480	-20~350	11.0	72	1.7	0.12	8.25
Mn-Ni-Cu	Ni-Fe	-70~200	-20~200	19.0	110	0.9	0.12	7.8
Ni-Mn-Fe + 中间层	Ni-Fe	-70~350	-20~150	11.0	20	1.06	0.12	8.4

q (W/m²)可用下式表示:

$$q = \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T$$

1.5 热流测量

为了知道从电炉表面放散或通过其内部流过的热流值，利用能直接测量各部分热流密度的热流计是很方便的⁽³²⁾⁽³³⁾。

1.5.1 热流计的原理 如图26所示，把导热系数λ[W/(m·°C)]、厚度d(m)的薄热阻板设置在垂直于物体表面或内部热流方向的地方，若其表里两面间的温度差为ΔT(°C)，则该处的热流密度

因此，如果已知λ和d，就能用图27那样差接的多支热电偶，通过测量ΔT，求出q或者热流Q。

1.5.2 测量范围和热流计测量元件的选择 通常的温度和热流密度范围大致如表13所示，要根据使用条件和目的选择合适的测量元件。热阻板材