

直流大电流测量

[苏]C. A. 斯佩克托尔

揭秉信 周予为 译

计量出版社

1985·北京

内 容 提 要

本书介绍了直流大电流的测量方法和测量设备、测量准确度的评定和误差的修正方法,以及现代直流大电流测量设备的结构原理、计量特性和研究结果。首次详细研究了利用核磁共振为基础的、新的测量方法和设备。全书共分五章:第一章,用电阻量具测量直流大电流;第二章,直流互感器;第三章,电流磁性比较仪;第四章,用核磁共振法测量直流大电流;第五章,用电磁变换器测量直流大电流。

本书可作为从事直流大电流测量,以及测量设备的研究和应用方面的计量、工程技术、科研人员及仪器制造专业的教师和学生参考书。

直流大电流测量

〔苏〕C. A. 斯佩克托尔 著

揭秉信 周予为 译

责任编辑 王明植

—*

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 787×1092 1/32 印张 5 1/8

字数 113 千字 印数 1—11000

1985年 9 月第一版 1985年 9 月第一次印刷

统一书号 15210·458

定价 1.15 元

目 录

序 言	(i)
第一章 用电阻量具测量直流大电流	(1)
1-1 测量方法的理论基础	(1)
1-2 用单个电阻量具测量直流大电流	(3)
1-3 电阻量具测量直流大电流的误差	(6)
1-4 用分支电流总和法测量直流大电流	(17)
第二章 直流互感器	(20)
2-1 直流互感器的工作原理与变换方程式	(20)
2-2 次级绕组串联的直流互感器的误差	(26)
2-3 次级绕组并联的直流互感器	(31)
2-4 直流互感器的技术特性与结构	(35)
第三章 电流磁性比较仪	(38)
3-1 电流磁性比较仪的工作原理	(38)
3-2 铁心闭合的电流磁性比较仪	(41)
3-3 铁心有屏蔽的电流磁性比较仪	(45)
3-4 不完全平衡电流磁性比较仪	(52)
3-5 供测量特大直流用的电流磁性比较仪	(56)
第四章 用核磁共振法测量直流大电流	(61)
4-1 核磁共振法的理论基础	(61)
4-2 核磁共振法	(63)
4-3 一次变换器	(68)
4-4 计算单汇流排一次变换器参数的基本理论	(79)
4-5 核磁共振测量装置	(90)
4-6 核磁共振变换器	(97)
4-7 用核磁共振法测量直流大电流的误差	(103)

第五章 用电磁变换器测量直流大电流	(126)
5-1 用电磁变换器测量直流大电流设备的结构原理	(126)
5-2 霍尔变换器	(128)
5-3 非磁性积分回路千安表	(137)
5-4 带有一次铁磁变换器的千安表	(144)
参考文献	(151)

第一章 用电阻量具测量

直流大电流

1-1 测量方法的理论基础

这里所研究的方法是以被测电流通过已知电阻，测量该电阻上电压降为基础的。

人们采用由锰铜合金制成的低欧姆四端电阻作为测量直流大电流的电阻量具，该电阻量具可以做成供测量用的电阻器^①或分流器。这种量具的电流端钮接入被测电路，而电压降则由电位端钮引出。

供直流大电流用的电阻量具是具有分布参数的无源四端元件。电阻量具的主要技术特性为额定输入电流 I_{1H} 、额定输出电压 U_{2H} 和量具电阻，该电阻为四端元件的互有电阻，当输出电流 $I_2 = 0$ 时，它定义为 $R_M = U_2 / I_1$ 。

若电位端钮之间的电压降用补偿法测定，则被测电流由下式决定

$$I_1 = \frac{U_2}{R_M}$$

当用具有有限值电阻 R_B 的毫安表测量电压时，被测电流应由下式决定

①供直流大电流用的、阻值在 $10^{-2}\Omega$ 以下的电阻量具，它的电阻元件不是做成绕组的形式，而是由锰铜片制成的，因此对于这种电阻量具现在采用“测量电阻绕组”（ГОСТ 6864—69）的术语是不恰当的。

$$I_1 = \frac{U_B}{R_M} \left(1 + \frac{R_{\text{输出}}}{R_B} \right) \quad (1-1)$$

式中 $R_{\text{输出}} = U_2/I_2$ ——量具的输出电阻，它的数值在 $I_1 = 0$ 的条件下测定。

若 (1-1) 式不考虑 $R_{\text{输出}}/R_B$ 这一项，则产生方法误差

$$\delta = -R_{\text{输出}}/R_B \approx -R_M/R_B$$

若测量仪器与该电阻量具一起用电流单位分度，则可排除这种误差。

用这个方法测量直流大电流的误差决定于测量电阻量具上电压降的误差和量具本身的误差。通常测量几十毫伏电压的误差十分小，例如采用电位差计或数字毫伏表。因此，电阻量具的准确度和在各种不同因素作用下电阻的稳定性对直流大电流测量的误差起着主要的作用。如下所述，实际电阻量具的计量特性确定了方法误差和它的应用范围。

这个测量直流大电流的方法有许多缺点，使得它的应用受到限制。其中一个缺点是接入电阻量具必须断开被测电路，这在安装的电阻量具是许多汇流排时就会出现特殊的困难。因为这种测量设备与被测电路必须发生电的直接联系，所以也就不能应用这种方法来测量高压电路里的电流。此外，电阻量具消耗相当大的功率，会引起本身发热从而出现附加误差。

尽管存在上述缺点，但是这个方法不论在计量实践中，还是在生产条件下，对于直流大电流的测量都得到了普遍应用。这是因为所用的测量设备简单，一般不需要辅助电源，并且它是外磁场实际上对测量准确度毫无影响的唯一方法。在文献[62]中指出，磁场对锰铜电阻的影响甚至在最精确测量的时候也可以忽略。

1-2 用单个电阻量具测量直流大电流

测量5—10kA以下的电流普遍使用做成分流器形式的单个电阻量具，而较少采用测量电阻器。通常制作的这种测量电阻器工作电流不大于1—3kA。这种量具的电阻元件常常放在充有变压器油的外壳内，油被流动的水冷却。这种恒温方法在所有电流下，一直到额定电流都能保证它的温度变化很小。

容许通过电阻量具的最大电流由下式决定

$$I_{\text{最大}} = \sqrt{P_{\text{H}}/R_{\text{M}}}$$

式中 P_{H} ——最大容许消耗功率；

R_{M} ——量具的电阻。

按照ГОСТ6864—69，额定电阻为 $10^{-4}\Omega$ 和 $10^{-5}\Omega$ 的测量电阻器的最大容许消耗功率为100W。供直流大电流用的电阻量具的实际数值可以用误差为0.002—0.005%的比较法来测定。但是，由于温度和时间的不稳定性，利用这种量具测量直流大电流的误差，甚至在考虑到量具电阻与温度的依赖关系并进行了修正的情况下也会超过一个数量级。在温度为 t 时，测量电阻器的实际电阻数值由下式决定

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$$

式中 R_{20} ——在20℃时测量电阻器的实际电阻数值；

α 和 β ——温度系数，这些系数在每个电阻器出厂时就已测定并在证书上标出。

图1-1为额定电阻 $10^{-4}\Omega$ 、0.05级、供1000A以下电流用的P323型测量电阻器。电阻元件放在油槽1内，油槽充满了变压器油，油用搅拌机搅动，并用流动的水冷却，电阻元件的温度由温度计测定，温度计经过孔2插入上盖板。当电流由300A变到1000A时，在发热状态下电阻器电阻变化不

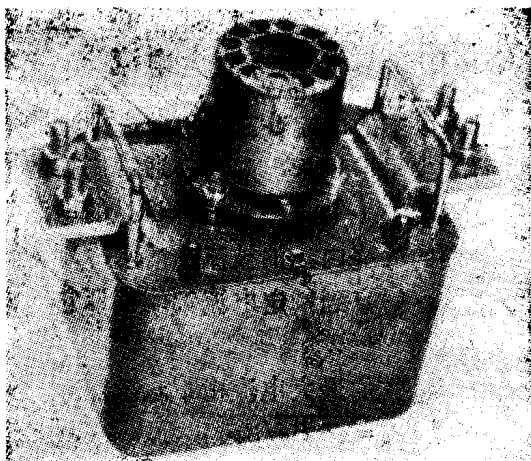


图 1-1 电流1000A以下的P323型测量电阻器

超过0.025%。电阻的时间不稳定性在一年之内变化不大于0.02%。

有油-水冷却系统的测量电阻器，由于结构复杂和使用不便，主要用在实验室条件下准确地测量直流大电流和检定直流大电流测量设备。

分流器是在生产条件下作为测量直流大电流的电阻量具。分流器（见图1-2）由两个大的铜接头1所组成，在这两个铜接头之间焊接了由锰铜合金制成的片状或棒状电阻元

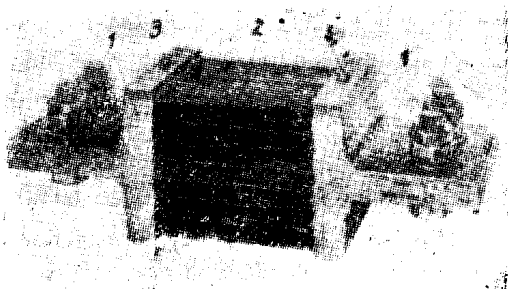


图 1-2 2000A III C型分流器

件 2. 分流器上的电压降由电位端钮 3 引出。

为了测量直流大电流，人们采用经校正的、可以相互替换的分流器，其额定电压降是规定了的。

按照 ГОСТ 8042—61，经过校正的分流器额定电压降应为 60mV 或 75mV。在有些情况下，为了与自动记录器一起工作，生产出一种额定电压降为 100、150 和 300mV 的分流器，经校正的分流器分为便携式 (IIIП) 和固定式 (IIIС) 两种。通常制作的便携式分流器供测量电流不大于 2kA 之用。分流器按照准确度可分为 0.02、0.05、0.1、0.2 和 0.5 几个等级。经校正的可以相互替换的分流器，其额定电流按如下数值选择

$$I_H = \alpha \times 10^n$$

式中 α ——1.0、1.5、2.0、2.5、4.0、5.0、6.0、7.5 等数字之一，

n ——任意整数或零。

为了测量经校正的分流器上的电压降，必须采用电流不大于 $0.003kI_H$ 的仪表，其中 k 表示仪表准确度等级。

实际上生产准确度等级更高的分流器会遇到一定的困难，因此固定式分流器只生产准确度 0.5 级的，只是在一些特殊情况下，采用独特的分流器结构和制造工艺才可以降低误差到 0.1—0.2%。

用分流器测量直流大电流，由于它的重量大，功率消耗大，结构笨重和安装复杂等原因会引起许多特殊困难。分流器的重量大概与被测电流的数值成比例地增长，所以大批量生产的分流器电流一般不大于 10kA。在测量直流大电流的实践中，已经知道了额定电流为 10kA 的单个分流器用法。这种分流器的发热温度靠人工冷却或减小分流器的额定电压降来降低。

1-3 电阻量具测量直流大电流的误差

文献[33, 48, 49, 60, 61]叙述了对直流大电流电阻量具其中包括分流器误差方面的研究工作, 研究影响用分流器测量直流大电流准确度的一些主要因素和减小这种测量误差主要部分的一些方法。

稳定性误差 锰铜电阻的不稳定性以及在电阻元件与接头焊接处过渡电阻的变化, 尤其对有很多锰铜片的分流器而言是直流大电流量具电阻随时间变化的主要原因。

电阻元件中的机械应力是引起电阻在时间上不稳定的主要原因。这种机械应力产生于制作锰铜合金和分流器的过程中, 在安装分流器时由于汇流排和分流器本身重力的影响也会产生应力。电阻元件本身在发热和电流过载时发生的变形、各个分流器片本身之间电流的相互作用和电流与外磁场相互作用所引起的电磁力, 这些都可能产生相当大的机械应力。

根据高斯磁阻效应也可能产生可逆的电阻变化。

通常金属电阻在张力下增大, 在压力下减小, 可是锰铜在这方面则是例外。沿电流线方向不论是张力还是压力的作用, 锰铜的电阻总是增大的。在不超过弹性极限的机械应力 σ 的作用下, 锰铜电阻与机械应力之间存在线性关系

$$R_{\sigma} = R_0 (1 + a\sigma) \quad (1-2)$$

式中 R_{σ} ——在机械应力 σ 的作用下锰铜电阻器的电阻;

R_0 ——在 $\sigma = 0$ 时电阻器的电阻;

$a = (1/R)(dR/d\sigma)$ ——锰铜的应变电阻系数。

在沿电流线方向作用的应力为压力时, 这系数等于 $a_p = 2.36 \times 10^{-11} \text{Pa}$; 当这应力为张力时, $a_p = 0.6 \times 10^{-11} \text{Pa}$ 。

若机械应力的方向垂直于电流线, 则锰铜的电阻在压力

作用下增加,在张力作用下减小。对于这种情况,锰铜的应变电阻系数有以下数值:在压力作用下, $a_{e\perp} = 1.76 \times 10^{-11} \text{Pa}$;在张力作用下, $a_{p\perp} = -0.796 \times 10^{-11} \text{Pa}$ [86, 87]。

图 1-3 表示锰铜电阻变化与机械应力的关系。

要减小锰铜和电阻量具本身在制作过程中所产生的内部机械应力,电阻量具应进行人工老化。

分流器的结构、安装方法和使用条件应尽可能避免在锰铜合金中产生机械应力。

被刚性固定的锰铜

片由于温度变化所产生的机械应力决定于公式

$$\sigma = \alpha E \Delta T$$

式中 $\alpha = 18.7 \times 10^{-6} / \text{K}$ ——锰铜线膨胀系数;

$E = 1.36 \times 10^{11} \text{Pa}$ ——锰铜弹性模量;

ΔT ——温度变化量。

考虑到 (1-2) 式,机械应力所引起的电阻变化决定于公式

$$R_e = R_0 (1 + \alpha \alpha E \Delta T) \quad (1-3)$$

由此求得在电流方向的压力作用下所引起的电阻变化

$$R_e = R_0 (1 + 6.0 \times 10^{-5} \Delta T)$$

从最后表达式得出,两边被固定的电阻元件在发热时所产生的机械应力引起锰铜电阻的变化比没有机械应力只是由

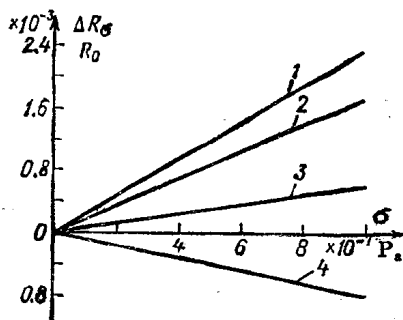


图 1-3 锰铜电阻变化与机械应力的关系

- 1——沿电流线的压力;
- 2——垂直于电流线的压力;
- 3——沿电流线的张力;
- 4——垂直于电流线的张力

于温度所引起的电阻变化要大好几倍。

由于温升引起导体膨胀，被刚性固定的分流器可能有更大的电阻变化。为了避免产生这种机械应力，应该用软导线将电流引到分流器其中的一个接头上，例如用铜箔软线。

在人工液体冷却的分流器中，由于液压以及电阻元件的温度梯度也能产生机械应力。这种与分流器结构有关的应力可能既存在切线分量又存在法线分量。

在电阻元件中电流所产生的磁场与该电流相互作用产生垂直于电流线的压力（夹紧效应）。

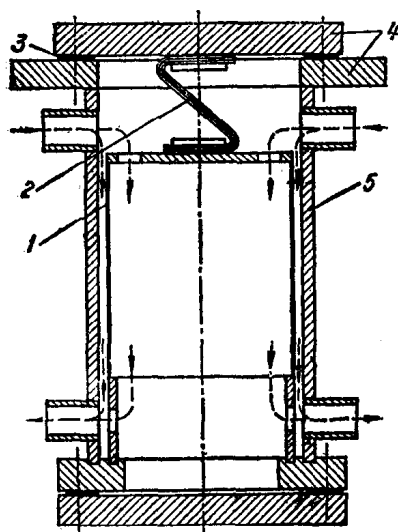


图 1-4 用液体冷却的
同轴分流器

- 1——由锰铜合金制成的圆筒形电阻元件；
- 2——软导线；
- 3——绝缘垫片；
- 4——铜导体；
- 5——外部铜圆筒

此外，在大分流器的一些平行连接薄片中的电流相互作用下，两边的薄片因产生的电磁力不能抵消，会出现机械应力。虽然这种机械应力远小于温度变形所产生的应力，但是在研制精密的电阻量具时必须考虑它的影响。

图 1-4 表示液体冷却的同轴分流器结构，在这种结构中，依靠上面的软导线和里面的锰铜圆筒两面进行冷却的办法来排除在电阻元件中产生机械应力的主要因素〔87〕。所研制的这种结构的分流器已用来测量美国 Argonne 国家实验室的同步稳相加

速器电磁铁的电流。在测量直流电流和 5 kHz 以下的交变电流时，误差不大于 0.01%。在 10kA 电流时，分流器上的电压降为 2V。

该分流器用去离子和去氧蒸馏水冷却。为了防止锰铜腐蚀，分流器有一层薄的 (0.05mm) 环氧酚树脂涂层。

电流分布不均匀的误差 在每个接头有几个电流端钮和许多锰铜片的分流器上，可以观察到电位端钮之间的电压降与安装质量有明显关系。这就牵涉到接头和锰铜片中电流的重新分布，而这电流分布又因为各个端钮上接触过渡情况不同而有所变化。因此，产生的误差与接头的形状、电流端钮和电位端钮的个数和布置情况以及分流器的安装质量有关。

按照 ГOCT8042—61 规定，分流器电压降的容许变化不应超过基本误差的一半。正如通过考察 6kA III C 型分流器和 Siemens & Halske 公司生产的分流器⁽⁴⁸⁾后所指出，由于电流端钮上接触状态被破坏所引起的、电流重新分布的误差可达 0.2—0.3%。这样大的误差是由于上述分流器电流端钮放在一个宽而短的接头上排成一排，而电位端钮又离电流端钮太近所引起的。

减小所研究误差的主要方法是避免电位端钮之间分流器局部范围内电流的重新分布。这可以采用增加接头的长度，减小宽度的方法来实现。但是这种方法会增加分流器的重量，使得分流器不便于安装在导线上，特别是当这导线是由宽大的铝汇流排组成时更是如此。目前多采用这种宽大的铝汇流排。

在某些类型的分流器中，例如 Hartman & Braun 公司所生产的分流器，用增加可以与宽度相比较的铜接头高度的方法来达到电位端钮远离电流端钮的目的。

减小电流重新分布而不涉及增加分流器尺寸和重量的最

合理方法是利用短的一段狭窄部分（见图 1-5 a）局部地减小电流端钮和电位端钮之间接头的截面积。这狭窄部分的截面积应该大约等于接头截面积的一半，但是这时必须考虑到对接头机械强度的要求。从这个观点出发，值得提到 Lids & Nortrup 公司所生产的、用作低电阻量具的分流器接头结构。在这种分流器中，为了减小电流的重新分布，有三个由槽构成的、位置对着电流端钮的狭窄部分。（见图 1-5b）。

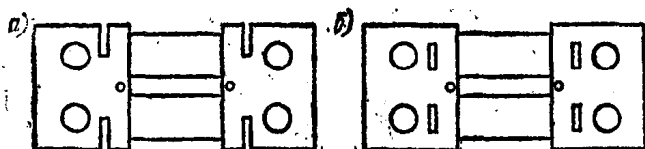


图 1-5 减小电流端钮与电位端钮之间接头截面的分流器

在每个电流接头上安装几个电位端钮，这些电位端钮通过均衡电阻 r 连接在一起，以达到明显减小分流器由于电流分布不均匀所引起的误差（见图 1-6）。这些电位端钮应成对地布置在分流器与轴对称的相同部分。这种方法可使所研究的误差降低到 0.05—0.1%。

为了减小分流器的误差，文献[77]建议将电位输出端布

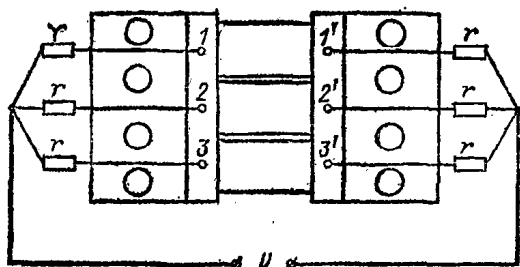


图 1-6 有三对电位端钮的分流器接线图

置在 T 形电流接头 1 内端面的表面上，而电阻元件 2 与轴对称地放在两个电流接头之间。电压降由两个斜对称放置的电位输出端 3 引出（见图 1-7a），或由连接在一起的两对电位输出端 3 引出（见图 1-7b）。

在 Compagnie des Compteurs 公司生产的分流器中，靠电阻元件每边所用的等电位过渡块达到大大降低电流分布不均匀所引起误差的目的。图 1-8 表示测量电流达到 60 kA 的 0.1 级分流器的外形^[78]。所生产的这种结构的分流器其额定电流为 15、30 或 60 kA，额定电压降为 25 mV 或 30 mV。这种

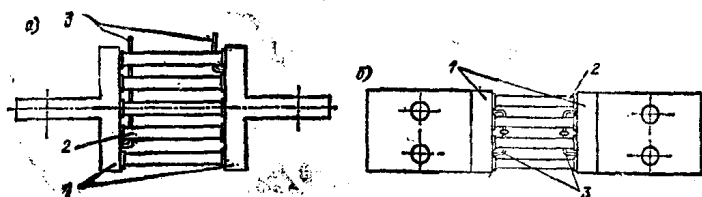


图 1-7 电位输出端斜对称放置的分流器

a——有一对电位端钮的分流器，

b——有两对接在一起的、电位端钮的分流器

分流器结构的特殊地方是电流接头为梳形结构，并且，在电流接头与分流器电阻元件之间放置有过渡段。这电流接头由许多垂直的铜汇流排 1 组成，过渡段由垂直的铜片 2 组成。分流器的电阻元件则由一些垂直安装的短锰铜片 4 制成。垂直的铜片靠用铸造的方法制成的铜板 5 和青铜板 6 与电流接头和电阻元件相连接。电位端钮 3 安装在铜架 7 上，它靠锰铜棒 8 与青铜板 6 相连接，该锰铜棒有均衡电阻的作用。因为铜架 7 的电阻与棒 8 的电阻相比较小到可以忽略的地步，所以铜架表面为一等位面，它的电位等于青铜板 6 周围电位的平均值，而与分流器锰铜片中电流分布情况的关系甚小。这样曲折地布置电流接头、过渡金属块和电阻元件，

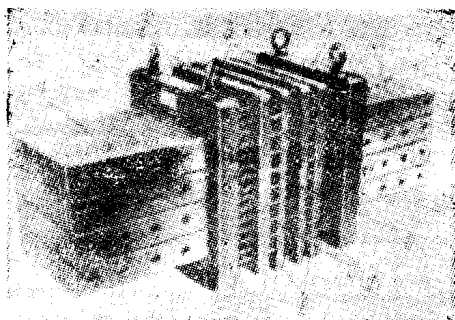


图 1-8 Compagnie des Compteurs公司生产的60kA分流器

同时又有等电位的铜架，可以保证电流分布不均匀所引起的误差很小，在所研究的分流器中，这种误差为一般结构分流器的 $1/20—1/30$ ^[78]。由于冷却表面很大，电压降很小（相应的功率损耗很小），在额定电流下，分流器过热的温度不超过 30°C 。当周围环境的温度变化由 20°C 到 40°C 时，分流器电阻的变化不超过 0.02% 。包括安培小时计和瓦特小时计的二次仪表，经过测量放大器接到分流器上。这种分流器的特点是有很大的重量和外形尺寸，对于额定电流为15、30和60kA的分流器，它们的重量分别为150、320和650 kg，外形尺寸分别为 $780 \times 290 \times 230$ 、 $1080 \times 380 \times 300$ 和 $1080 \times 490 \times 390\text{mm}^3$ 。

负载误差 研究分流器负载特性 $R = f(I)$ 表明，当电流变化由20%到100%额定电流时，分流器电阻的变化达到 0.2% ，分流器电阻随负载的变化情况可用锰铜电阻和电位端钮之间铜接头部分的电阻与温度的关系说明。各种不同类型分流器的负载特性曲线如图1-9所示^[48]。粗线表示电流为6kA III C型分流器的特性。这些负载特性不同是因为制作分流器的锰铜的温度系数存在差异，以及铜接头部分电阻在分

流器中占有一定比例，而铜接头部分的电阻又与分流器的结构以及电位端钮的布置有关的缘故。负载特性的极端情况发生在制造分流器的锰铜温度系数本身符号改变时的温度。

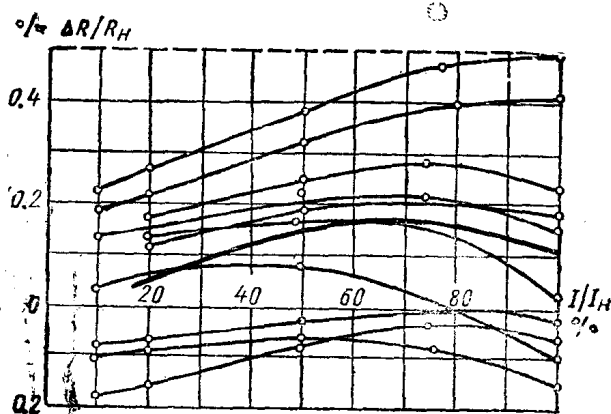


图 1-9 各种不同类型分流器的负载特性

各种分流器中铜接头部分的电阻为分流器总电阻的 0.5%—1%，而铜的电阻温度系数比锰铜温度系数大 100 倍以上。因为当温度超过 40—50℃ 时锰铜的温度系数为负的，所以适当选择锰铜的牌号和布置电位端钮的位置可以降低分流器总的温度系数。在额定电流下，分流器的温度达到 80—120℃，因此在整个范围内校正温度误差是困难的。甚至在专门研制的由温度系数很小的棒状锰铜制造的分流器中，负载误差也有 0.15%〔49〕。

文献〔30, 61〕研究了低电阻量具温度特性的计算问题。

由于电位导线连接方式不同所引起的误差。校正了的导线接头与分流器电位端钮相接触的地方在重新连接时可能位移几个毫米。当接点产生这样大的位移时，分流器上被测电压降就可能改变 0.04—0.06%〔48〕。将分流器接头上电位输出