



电磁测量与仪表丛书

大电流测量

揭秉信 编著

5.2

机械工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了直流、交流和脉冲大电流的各种测量方法和测量装置,其中重点介绍直流大电流和脉冲大电流测量中的各种变换器和测量装置的结构、基本原理和校验方法以及大电流测量的有关技术问题。

本书可供从事大电流测量的工程技术人员、科学工作者和大专院校电磁测量专业师生参考。

大 电 流 测 量

揭秉信 编著

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张 7 3/8 ·字数 187千字

1987年1月重庆第一版·1987年1月重庆第一次印刷

印数 0.001—2.850·定价1.90元

*

统一书号: 15033·6172

编辑说明

电磁测量技术的应用非常广泛,在工农业生产及科学实验中起着极为重要的作用。用于电磁测量的仪表种类繁多,发展迅速。建国以来,我国各有关部门从事电磁测量和仪表方面工作的科技人员迅速增加。为了总结电磁测量及仪表方面的经验,普及有关电磁测量及仪表知识,中国计量测试学会电磁专业委员会和中国仪器仪表学会电磁测量信息处理仪器学会联合成立了《电磁测量与仪表丛书》编委会,组织编写了这套丛书。编委会成员是:

主编:唐统一

副主编:郭志坚 丁银云 张钟华

编委(以姓氏笔划为序):

尤德斐 王 镒 叶妙元 陈印琪 何振瀛 李显扬

李修治 庞仲予 沈平子 杨华山 余鹤栋 张叔涵

张润康 张德实 林瑞昌 费正生 赵修民 赵新民

秦起佑 翁瑞琪 梅文余 袁 楠 彭时雄 程世镐

雷枫桐

本丛书各分册为:《电磁量的单位制和单位的复现与传递》、《误差理论在电磁测量中的应用》、《电磁测量线路与仪器的屏蔽防护》、《感应分压器与电流比较仪》、《交流电桥》、《测量用互感器》、《大电流测量》、《微处理器在电测技术中的应用》、《运算放大器在电测技术中的应用》、《数字电压表的电气性能测试》、《电磁测量数字化及其应用》、《磁测量基础》、《磁场的产生》、《磁场的测量》、《动态磁性测量》、《硅钢磁性测量》等。将陆续出版。

本丛书为中级科技读物,其内容主要介绍电磁测量与仪表的基本原理,但更侧重介绍实际应用方面的知识,例如实验技术、仪表的设计计算、仪表的使用及有关的数据、资料等。对国内外

最新成就及发展方向也有一定的反映。

本丛书力求深入浅出，通俗易懂。希望能为读者在电磁测量与仪表方面提供有益的知识。但由于水平所限，书中一定存在不少缺点，甚至错误，欢迎读者批评指正。

《电磁测量与仪表丛书》编委会

常用符号表

B —磁感应强度	n —匝比、电子浓度
B_m —磁感应强度幅值	P —功率、单位面积所受的力
B_s —饱和磁感应强度	R —电阻
b —宽度	R_H —霍尔系数
C —电容	R_m —复磁阻
C_o —寄生电容	S —灵敏度、面积
D —直径	T —周期
d —直径、厚度	t —时间
E —电势	t_d —脉冲电流持续时间
e —瞬时电势、电子电荷	t_r —脉冲电流上升时间
F —磁通势	r —电阻、半径
f —频率	U —电压
G —电导、电压增益	U_{av} —电压平均值
G_m —磁导	U_m —电压幅值
H —磁场强度	u —电压瞬时值
H_m —磁场强度幅值	V —体积
I —电流	w —匝数
I_{max} —电流最大值	z —复阻抗
I_n —额定电流	Z_m —激磁阻抗
i —电流瞬时值	α —角度、电阻温度系数
K —变换系数、变比	β —反馈系数、角度、电阻温度系数
K_n —额定变比	γ —原子核磁回旋比、角误差
K_ϕ —磁通表常数	Δ —厚度、改变量、偏差值
L —自感系数	
l —长度	
M —互感系数	

x

δ —电流密度

ε —相对误差、电流互感器
比率误差

ε —电流互感器复误差

θ —霍尔角

λ —传热系数

μ —磁导率

μ_0 —真空磁导率

$\bar{\mu}$ —复磁导率

ρ —电阻率

σ —电导率

τ —时间常数

ϕ —磁通

ϕ_s —饱和磁通

φ —电位、相位差角

ψ —磁链

ψ_m —磁链幅值

ψ_s —饱和磁链

ω —角频率

ω_0 —自然谐振角频率

前 言

本书是作者搜集国内外资料，结合我国大电流测量科研的实际情况而编写的，书中比较全面地介绍了大电流测量用的各种传感器结构、性能和基本原理。全书共分十章，其中第一～六章为直流，第七、八两章为交流；第九、十两章为脉冲大电流测量。本书根据当前生产实际需要，着重对直流和脉冲大电流测量作了比较详细的论述，书中力求从基本概念入手，分析透澈，使读者对大电流测量技术有一比较全面了解。此外读者也可以根据自己需要，选读有关章节。

本书在编写过程中，李修治、杨秉炎两同志详细审阅了本书手稿，提出了很多宝贵意见，此外何振瀛、林茂津两同志也给予不少帮助，在此表示衷心感谢。

由于本人水平有限，书中难免出现一些缺点和错误，希望读者批评指正。

编 者

1986年7月于武汉

目 录

编辑说明

前言

常用符号表

绪论	1
第一章 用电阻量具测量直流大电流	6
一、概述	6
二、用单个电阻量具测量直流大电流	7
三、用单个电阻量具测量直流大电流的误差	9
四、用多个并联电阻量具测量特大的直流电流	12
第二章 直流电流互感器	22
一、概述	22
二、副绕组串联直流互感器作用原理	23
三、副绕组串联直流互感器的误差	32
四、补偿式直流互感器	39
五、副绕组并联直流互感器	43
六、直流互感器技术特性	47
七、直流互感器的校验方法	50
第三章 直流比较仪	54
一、概述	54
二、偶次谐波磁调制器原理	56
三、自动和半自动直流比较仪	62
四、全补偿式直流互感器	71
五、调宽式磁调制器	74
第四章 用霍尔变换器测量直流大电流	81
一、概述	81
二、霍尔变换器	82
三、非磁性积分回路霍尔千安表	87
四、带有一次铁磁变换器的霍尔千安表	89
五、霍尔检零式直流比较仪	95

第五章 用磁位计测量直流大电流	101
一、概述	101
二、磁位计的基本原理、结构和校验方法	102
三、用磁位计测量直流大电流	107
四、用磁位计测量整流系统中的直流大电流	109
第六章 用核磁共振法测量直流大电流	119
一、概述	119
二、基本方法	119
三、一次变换器	120
四、核磁共振变换器和测量装置	124
五、一次变换器材料和参数的选择	126
六、用核磁共振法测量直流大电流的误差	128
七、校验方法	130
第七章 电流互感器	132
一、概述	132
二、电流互感器的一般情况	133
三、电流互感器的基本原理	134
四、提高电流互感器准确度的一些方法	136
五、技术特性	140
六、校验方法	141
第八章 电流比较仪	146
一、概述	146
二、补偿式电流比较仪的结构	147
三、用补偿式电流比较仪校验电流互感器	148
四、误差来源及其消除方法	149
五、用补偿式电流比较仪校验大电流互感器	151
六、零磁通电流互感器	154
第九章 用分流器测量脉冲大电流	158
一、概述	158
二、低感分流器的结构	159
三、理论分析	161
四、分流器尺寸的决定	174
五、分流器上所受的力	175

六、设计举例	176
七、减小波形畸变的一些补偿措施	178
八、用分流器测量脉冲大电流有关的其他技术问题	179
第十章 用磁位计测量脉冲大电流	181
一、概述	181
二、磁位计的两种可能工作状态	181
三、磁位计工作在自积分状态下测量电路的频响特 性和瞬变过程	183
四、磁位计工作在微分状态下测量电路的频响特性 和瞬变过程	192
五、磁位计工作在两种不同状态下测量电路电气性 能的比较	202
六、设计举例	204
七、校验方法	206
八、用磁位计测量脉冲大电流的实际接线图	208
九、用磁位计测量脉冲大电流有关的其他技术问题	210
附录 1 磁调制器理论公式的证明	212
附录 2 我国生产的锗、铋化铟和砷化铟霍尔 元件主要参数	217
附录 3 我国生产的硅和磷砷化铟霍尔元件主要参数	218
参考文献	219

绪 论

大电流测量技术对国民经济是十分重要的。目前不论在冶金、化工和电力等工业部门，还是在核物理、大功率电子学等学科领域都涉及到大电流测量问题。实际工作中遇到的测量对象，有直流、交流和脉冲大电流，它们的频率范围及量值各有不同，准确度等指标要求也不完全一致。目前大电流测量与高压测量一样，已成为电磁测量技术领域不可缺少的独立部分。

在大电流测量中，直流大电流测量是当前迫切需要解决的问题，它对节约能源有很大影响。由于冶金、化工和电力事业的发展，直流用电量越来越大。根据世界一些技术先进国家统计，直流用电量约占总用电量的20~40%。现在大冶炼厂电解整流系统的电流已经达到200千安，预计不久可以达到400千安；整流效率为96~97%，有的甚至更高，这就对测量仪器提出了更高要求。在直流大电流测量中，除了对仪表的一般要求（如稳定可靠，使用方便等）外，还要求测量仪器有足够的准确度，否则测量就失去意义。现在在工程上要求测量的准确度一般为0.5%，有的要求0.1~0.2%。

此外，根据直流大电流的特殊情况，在工程上要求测量仪器对外磁场有足够的抗干扰能力，并且希望在维修仪器时，不需要断开被测电路。

在脉冲大电流测量中，被测电流的特点是电流峰值很大，而且变化非常迅速。例如，在核物理中测量加速器阴极发射电流的峰值达到几兆安，上升时间为毫微秒级，这就要求测量仪器有很宽的频率特性和快速的时间响应。此外，在脉冲大电流测量中，电磁干扰特别严重，对测量仪器的屏蔽防护也是一个比较突出的问题。

最近几十年，虽然许多国家都在从事大电流测量仪器，特别

是一次变换器的研制工作，可是至今仍然没有研究出完全满足上述要求的测量方法和仪器。而且许多大电流测量仪器的检验问题也没有完全解决，脉冲大电流至今还没有一个公认的检测标准。

由于上述原因，许多国家都在探索新的测试方法和测量仪器，例如西德通用电气公司（AEG）从30年代起就从事研究和改进直流互感器；加拿大国家研究委员会（NRC）60年代研制出准确度比较高的电流比较仪；美国哈尔马（Halmar）电子有限公司60年代研制出霍尔检零式直流比较仪，而且这些早已闻名于世界。此外，现在还出现了以霍尔效应、磁光效应和核磁共振等物理效应为基础的一些测量方法和仪器。这些仪器就其工作原理大致可分为两大类。

1. 根据被测电流在已知电阻上的电压降来确定被测电流大小为基础的测量装置，如分流器；

2. 根据被测电流所建立磁场为基础的测量装置。

测量大电流原则上还可以利用电热效应和电化效应，但是这些方法由于度量特性差而没有获得实际应用。

在上述两类测量装置中，第二类测量装置在近几十年获得较快的发展。若根据被测电流所建立磁场的磁学量来分，这类测量装置又可分为以下三种：

（1）根据被测电流所建立的磁感应强度来确定被测电流大小的测量装置。例如，利用核磁共振和磁光效应的测量装置。它们是分别利用核磁共振和磁光效应测量被测电流所建立磁场的磁感应强度，间接来确定被测电流大小的。

（2）以被测电流在铁心中所产生的磁通为依据的测量装置，例如交流互感器和直流互感器。前者是利用被测电流所产生的交变磁通在副绕组中感应电势，从而在副电路里引起电流来反映被测电流大小的；后者是利用被测电流在铁心中所产生的恒定磁通，通过改变扼流线圈的感抗，间接改变辅助交流电路电流的平均值来反映被测电流大小的。

（3）根据被测电流所产生的磁通势来确定被测电流大小的

测量装置。例如，用磁位计和霍尔变换器直接测量的装置，就是分别利用磁位计和霍尔变换器测量被测电流所产生的磁通势来确定被测电流大小的。

以上所述各种测量装置均属直读式仪表范畴，测量准确度不高，一般为0.5%，最高才达到0.1~0.2%。目前直流和交流大电流测量装置都趋向于比较式，例如电流比较仪、磁调制器式直流比较仪和霍尔检零式直流比较仪，它们都是利用辅助电流所产生的磁通势平衡被测电流所产生的磁通势为基础的。

目前，在测量工频范围内的交流大电流时，一般采用电流互感器。它的特点是性能稳定可靠，准确度可以做得较高(1×10^{-4})，负载能力强，其技术特性基本上可满足实际需要，只是在超高压大电流测量方面，存在着绝缘问题。因此，目前的趋势是利用由磁光效应制作的所谓光电互感器。但是，这种光电互感器现在尚处于试验阶段。至于交流大电流测量装置的校验问题，自六十年代电流比较仪问世以后，问题已迎刃而解。现在采用电流比较仪已经可以校验100千安的电流互感器，它的准确度可达 10^{-7} 数量级。

在直流大电流测量中，分流器是最早采用的测量装置，它的特点是结构简单、准确可靠，但是只适宜测量1万安以下的电流。因此，对于测量1万安以上的电流，现在趋向采用多个分流器并联的方法来扩大测量的范围，这样既便于安装制造，在使用中又能保持原有的准确度。西欧一些国家，如英、法等国，至今仍有采用这种经典的方法测量数万安以上的直流大电流。

直流互感器是一种最常用的直流大电流测量装置。它自1936年在西德问世以来，经过不断改进，准确度也有所提高。现在采用一些补偿方法，对于100~200千安直流互感器，在50~110%的额定电流范围内，其准确度可达0.2%。这种测量装置的特点是性能稳定，功率消耗较小(与分流器相比)，能承受较大的负载，安装时可不断开被测电路；缺点是线性度差，在量程50%以下难以满足准确度的要求，故只适合于在工业测量中使用。

霍尔大电流测量装置也是测量直流大电流较普遍使用的测量仪器。这种测量装置是五十年代西德研制成功的，它是利用霍尔元件测量被测电流在铁心（围绕被测载流导体）气隙里的磁感应强度来判定被测电流大小的。它的特点是结构简单，安装时可以不断开被测电路；缺点是线性度稍差，易受周围温度和外磁场的影响。这种测量装置的准确度一般为2~0.5%，但是经精心设计和制作，对于数万安的这种测量装置，准确度可达到0.2%。这种测量装置西德西门子（Siemens）公司有系列产品，性能也较好。

在直流大电流测量方面，在六十到七十年代还出现了利用磁位计和核磁共振仪等直接测量的各种装置，这些装置各有优缺点，使用并不普遍，有的尚处于试验性阶段。

在直流大电流测量中，比较有发展前途的是霍尔检零式直流比较仪，它是美国六十年代哈尔马公司的一项专利。这种测量装置是利用霍尔变换器检测零磁通的自动调节直流比较仪，能直接用于工程上。它的特点是准确度较高(0.2%)，线性度好，受外界杂散磁场和温度的影响极小，而且使用时不需要断开被测电路。目前这种装置在西欧和日本被广泛地采用。

磁调制器式直流电流比较仪是六十年代加拿大科斯托尔斯（Kusters）首先研制成功的，它的准确度高达 1×10^{-6} 以上，现在世界各国已经采用这种直流电流比较仪作为直流电流比率标准。

在脉冲大电流测量方面，应用最普遍的方法是低感分流器和磁位计。低感分流器准确度较高，但是它只适用于测量电流数值比较小、变化不太快的脉冲大电流；对于数百千安的脉冲大电流，很难保证分流器动力和热力的稳定性；但如果增加分流器截面的尺寸，又势必影响分流器的时间响应。而磁位计则无上述缺点，它不存在动力和热力的稳定问题，而且被测电流几乎不受限制；但是由于磁位计本身准确度不高（对环状磁位计来说），所以它只适用于对准确度要求不太高的场合。对于脉冲大电流，特别是对于几兆安，甚至几百兆安、上升时间为毫微秒级的快速变化的脉冲

大电流，用磁位计测量是一种可取的测试方法。

我国大电流测量技术过去较为落后，六十年代生产大电流测量装置的只有为数很少几家工厂，其产品有 10 千安以下、0.5 级分流器和 100 千安以下、0.5 级直流互感器，一直到七十年代以后，才获得较大发展。在近 10~20 年期间，先后相继研制出用精密磁位计和霍尔变换器取样的直流大电流测量装置；防磁式直流互感器以及各种型式直流大电流比较仪，电流量程有的达到 100 千安或 100 千安以上，精度一般在 0.5~0.1% 范围。这些仪器有的现在已经大批量生产用于工业实际。此外在建立交、直流大电流比率标准方面，也做出了可喜成绩，先后研制成功了 6 千安和 10 千安磁调制器式直流比较仪和 100 千安电流比较仪，其精度有的已经达到世界先进水平。

但是形势在不断发展，为了适应生产实际的需要，在大电流测量方面还有待我们不断完善和提高，特别是在测量的稳定性和可靠性方面。

第一章 用电阻量具测量直流大电流

一、概 述

利用电阻量具测量直流电压是人们最早采用的一种方法，它是根据被测电流通过已知电阻上的电压降来确定被测电流大小的。这种电阻量具一般由锰镍铜合金制成，它有四个端钮：两个电流端钮和两个电位端钮。电阻量具有两种形式，一种是标准电阻，另一种是分流器。前一种存放在实验室，作为校验直流大电流测量装置的标准，后一种用在生产条件下，作为测量直流大电流的电阻量具。

采用分流器测量直流大电流的特点是结构简单，准确可靠，但是它只适宜于测量几千安以下的直流。如果被测电流太大，则量具的体积会过分庞大，笨重，不仅在制作和安装方面带来比较大的困难，而且由于本身的重力影响，安装也很难保持原有的准确度。因此，目前国外对于测量10千安以上的直流大电流，都倾向于采用多个分流器并联的方法。例如，英国化学工业有限公司就是一直采用这种方法来测量直流大电流的^[2]。该公司将每个小型分流器标准化，其额定电流规定为1.5千安，额定电压降为7.5毫伏。采用这种并联分流器测量，不仅准确度高(0.1~0.5%)，消耗功率小，校验比较容易解决，而且稳定可靠，长期运行性能变化极小。该公司曾对32个小型分流器，在运行25年之后，进行了详细检验，结果表明其年变化率为0.003%。这确实是一种值得推广的方法。

本章除了介绍这两种电阻量具的结构和技术特性外，最后还着重介绍了用多个并联分流器测量特大直流电流的线路结构、基本原理以及它在测量中应遵循的条件。

二、用单个电阻量具测量直流大电流

1. 标准电阻

标准电阻通常放在有变压器油的金属壳内，其中变压器油有的又靠外面流动水冷却，以保证电阻在额定电流下温度变化极小。

标准电阻的额定电流一般在1~3千安以下。

标准电阻所能容许通过的最大电流由下式决定，即

$$I_{\max} = \sqrt{P/R_s} \quad (1-1)$$

式中 P 为最大容许功率； R_s 为标准电阻的电阻值。对于 10^{-4} 和 10^{-5} 欧姆数值的标准电阻，它的最大容许功率为 100 瓦^[1]。标准电阻由于温度变化所引起的不稳定性可以按下面公式予以修正：

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

式中 R_{20} 为 20℃ 时标准电阻的实际数值； α 、 β 为温度系数，它的数值在每个标准电阻铭牌上都已给出。

标准电阻的温度由插在油槽里的温度计测定。当电流在 300~1000 安范围内变化时，标准电阻的阻值变化不会超过 0.025%，电阻对时间的不稳定性每年变化不大于 0.02%。

用油-水冷却的电阻，由于结构复杂，在实际测量中使用极不方便，它主要应用在实验室条件下作精密测量和校验直流大电流测量仪器。

2. 分流器

分流器是用在工业上测量直流大电流的电阻量具。图 1-1 表示安装在汇流排上的大型分流器，它由高电阻系数、低温度系数的锰镍铜合金薄片 1 所组成，这些薄片的两端焊接到黄铜块的槽内，这铜块又与几根大铜排焊接在一起，作为电流接线端 2。电位接线端 3 靠近电阻元件。

为了测量直流大电流方便起见，人们通常希望所用的分流器能相互替换。根据我国规定，分流器的额定电压降为 75 毫伏。为了降低其损耗，现在额定电压也有 45 毫伏的。