



电磁测量与仪表丛书

交流电桥

唐统一 顾景福 方之稹 编著
张钟华 王怀亮

机械工业出版社

本书主要介绍从工频到音频正弦电源供电的交流电桥的原理和有关问题。全书共五章，它们分别是：交流标准元件；经典电桥；感应耦合比例臂电桥；有源电桥；交流电桥的附属设备。

各章的编写人：绪论，唐统一；第一、五章，顾景福；第二章，方之稷；第三章，张钟华；第四章，王怀亮。最后由陆文骏审校。

本书可供从事电磁测量工作的工程技术人员及有关的科研工作者阅读，也可供高等院校相应专业的师生参考。

交 流 电 桥

唐统一 顾景福 方之稷 编著
张钟华 王怀亮

*

责任编辑：秦起佑

*

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）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1138^{1/32}$ · 印张 $10^{1/4}$ · 字数 266 千字

1988年4月北京第一版·1988年4月北京第一次印刷

印数 0,001—3,500 · 定价：3.10 元

*

ISBN 7-111-00506-6/TM·76

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、

IV

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

符 号 表

B	导纳或磁感应强度
C	电容量
C_p	电容器等效并联电容
D	电容器损耗因数
E	电动势
f	频率
G	电导
G_p	电容器等效并联电导
k	比例值
K	放大倍数
L	自感量
M	互感量
P	功率
$Q (Q_x)$	线圈的品质因数
Q_i	电荷量
R, r	电阻
S	灵敏度, 铁芯截面
W	绕组匝数
Z	阻抗
Y	导纳
α	比差
β	角差
γ	波形失真系数、交角
δ	误差、电容损耗角
$\operatorname{tg} \delta$	电容损耗角的正切
Δ	误差
η	铁芯截面的有效系数
ξ	指零仪读数

X

θ	辐角、阻抗辐角的差值
φ	相位或阻抗辐角
ε	相对增量
τ	电阻时间常数
ρ	电阻率
μ	磁导率
μ_0	真空磁导率
μ_r	材料相对磁导率
ω	角频率

目 录

符号表

绪论	1
第一章 交流标准元件	8
一、交流标准电阻	8
1. 概述	8
2. 交流标准电阻的时间常数和频率特性	8
3. 减少残余电感和电容的原理和方法	10
4. 线绕式交流标准电阻的计算和制作	15
5. 十进位电阻箱	20
二、标准电容器	26
1. 概述	26
2. 标准电容器的串联和并联等值电路	28
3. 空气和其他气体介质电容器	29
4. 电容箱	38
5. 高压标准电容器	44
6. 标准电容器的分布电容影响	46
7. 固体介质标准电容器	47
8. 熔融石英标准电容器	49
三、标准电感线圈和互感线圈	50
1. 概述	50
2. 标准电感线圈	51
3. 标准互感线圈	59
4. 可变电感线圈和可变互感线圈	60
第二章 经典电桥	70
一、经典电桥的结构和主要部件	70
二、经典电桥的基本原理和分类	72
1. 四臂电桥的基本原理和平衡条件	72
2. 四臂电桥的分类	77
3. 四臂电桥平衡过程中的不平衡电压变化规律	84

4. 多臂电桥线路的简介	87
三、经典电桥实用上的几个重要问题	91
1. 电桥的平衡收敛性	91
2. 电桥的分别平衡和分别读数	98
3. 电桥的灵敏度	105
4. 电桥的准确度、误差和防护问题	112
四、电桥平衡技巧简介	131
五、一些经典电桥线路及其特点	134
1. 含有电阻和电感的桥路	135
2. 含有电阻和电容的桥路	136
3. 含有电阻、电感和电容的桥路	141
4. 含有电阻、电感和互感的桥路	146
5. 含有电阻、电感、互感和电容的桥路	149
第三章 感应耦合比例臂电桥	155
一、概述	155
二、感应耦合比例器件	160
1. 感应分压器和隔离式感应分压器	160
2. 感应分流器及电流比较仪	173
三、用感应耦合比例臂构成的各种电桥	176
1. 电压比式	176
2. 电流比式	178
3. 混合式	180
4. 直角电桥	181
5. 补偿器式电桥	185
四、感应耦合比例臂电桥的平衡调节	187
1. 元件的调节	187
2. 比例臂的调节	191
3. 用补偿器供给可调电压	193
4. 角差调节	195
五、引线误差的消除	197
1. 变压器双电桥	197
2. 补偿器法	199
3. 隔离绕组法	200

4. 引线压降补偿法	201
六、感应耦合比例臂电桥中的屏蔽防护问题	202
1. 辅助支路的接法	202
2. 同轴线与扼流圈	205
3. 三端元件及两端对元件	209
4. 四端对元件	213
5. 漏磁问题	214
七、典型桥路介绍	214
1. 国产CO-11型电容电桥	214
2. 英国文克尔公司的B 331型多用途交流电桥	220
八、感应耦合比例器件的其它应用	222
1. 谐振电桥	223
2. 电容传感器	223
3. 测温和控温中的感应分压器	226
第四章 有源电桥	228
一、概述	228
二、有源元件	230
1. 有源电容器	231
2. 有源电感器	234
3. 有源可调元件	236
三、有源真桥	241
1. 数字反馈平衡式电桥	242
2. 模拟反馈平衡式电桥	255
四、伪桥	259
1. 从经典电桥到伪桥的演化过程	259
2. 伪桥的稳定性	261
3. 放大器的直流偏置对桥路配置的要求	262
4. 伪桥的灵敏度	262
五、半桥	264
1. 半桥的基本原理	265
2. 相量电压比测量	268
3. 半桥的误差分析	276
4. 半桥的其它形式	281

六、内含微处理器的有源电桥	283
1. 自由轴法	284
2. 微处理器电桥的工作原理	287
3. 微处理器电桥的主要功能	292
4. 微处理器电桥典型的主程序流程图	294
5. 微处理器电桥的主要误差源及其校正措施	296
6. 微处理器电桥的发展动态	300
第五章 交流电桥的附属设备	303
一、桥用屏蔽隔离变压器	303
1. 信号源隔离变压器	303
2. 指零仪隔离变压器	305
二、交流指零仪	307
三、交流电桥信号源	316

绪 论

在电磁测量技术中，为得到准确的测量结果，常采用将被测元件与标准元件相比较的方法，即比较法。电桥法是比较法的一种。所谓电桥法就是将被测元件与标准元件接入桥式电路，在其内进行比较。

早在 1833 年克里斯泰 (S. H. Christie) 首先提出桥式电路，但未引起注意。1843 年惠斯登 (C. Wheatstone) 第一个使用这一桥路成功地实现直流电阻的比较 (测量)。由于他的名望和成绩，人们称其为惠斯登电桥。

这种电桥采取四臂形式如图 0-1 所示。一对顶点 a 和 b 间连接直流电源，另一对顶点 c 和 d 间连接指零仪 D 。当时的平衡检测器用的是检流计。电桥平衡时，检流计指零，表示其中电流为零。由图 0-1 可见，连接 D 的支路好像在两顶点 c 和 d 之间搭了一座桥。“电桥”原

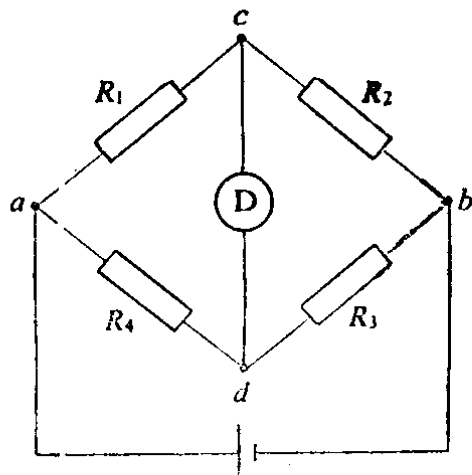


图0-1 惠斯登电桥

来是指这一支路，但以后为一些人误解为泛指整个电路，并且被很多科技工作者所接受了。本书也采用这一习惯叫法。如果希望有所区别，可称整个桥式电路为电桥网络。

此外，我们时常将电桥网络的四个臂称做桥路本体，而将连接在两对顶点间的电源和指零仪称做电桥辅助设备。

电工技术的发展要求寻找准确测量电感、互感、电容等电参数的方法。很自然地会想到惠斯登电桥。但这一电桥是由直流电源供电，而且工作在直流稳态情况下。在这种条件下，电路中即使存在有电感、电容，也不会对电路有影响。只有当电路所加电

源随时间变化时，电路中电感、电容的作用才会体现出来。

麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 解决了这一问题，他是第一个采用电桥来测量电感 (L) 和电容 (C) 的物理学家。1865 年他提出如图 0-2 所示的冲击四臂桥式电路，用以测量电感 L 。这里电源虽然仍然是直流，但串接一个电键 K 。利用不断接通和断开电键 K 的方式可使加到电桥本体的电压得以随时间变化。这时指零仪是冲击检流计。当指零仪静止时，表示通过该指零仪的平均电量为零，于是可求得待测电感 L 与电桥其它各臂电阻值的关系。几年后，于 1873 年麦克斯韦又提出其它几种电桥网络，如测 C 的电桥，比较 L 与 C 的电桥等，都是采用冲击供电方式。

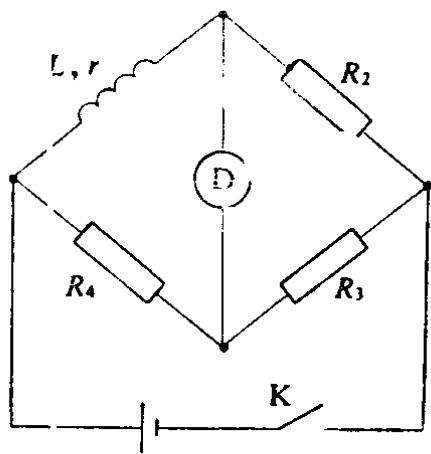


图 0-2 测 L 的冲击电桥

用正弦交流电源供电的交流电桥诞生于 1891 年。文氏 (M. Wien) 是将周期正弦交流加到麦克斯韦电桥的创始人。当时已有了音叉振动发生器可以产生接近正弦波形电压的电源，同时文氏本人又发明了光学听筒[⊖]，解决了对正弦交流信号的检测问题。他不但提出了由直流电桥转化为交流电桥的原则，还提出了一批新的交流桥路，例如比较 C 的电桥，比较 L 的电桥，由电阻 R 和频率 f 测定 L 的电桥等。

四臂电桥是基本的桥路形式。在电桥的发展过程中也出现多于四臂形式的电桥，如六臂的安德生 (Anderson) 电桥和双比电桥等。但这些桥路经变换后一般都可以简化为四臂形式，因此本书主要介绍具有四臂形式的电桥。

⊖ 光学听筒类似于今天的听筒结构，在振动膜片上装有反射镜。膜片振动时，光线被反射镜反射到标尺上形成光带，无信号时，膜片不振，标尺上呈现窄光束或静止光点。

随着电桥的发展，不断出现利用新原理、新技术制成的具有更良好性能的交流指零仪。

利用交流电桥测量 R 、 L 、 M 、 C 元件参数时，一般是将被测元件接在电桥的一个桥臂内，电桥其它各臂由已知数值的固定及可变交流 R 、 L 、 M 、 C 标准元件组成。属于这类结构形式的电桥称做经典电桥。

关于标准元件的原理、结构和性能将于第一章内介绍。

对于测量问题，在解决了测量可能性以后，进一步就要考虑提高准确度问题；而着手处理后一问题时，必然先要分析一下影响准确度的各种因素，也就是存在有哪些误差以及产生各项误差的原因。

交流电桥中产生测量误差的主要原因与直流电桥有很大不同。有些在直流电桥中引起误差的因素如热电势、接触电势等。在交流电桥中已无需考虑。反之，基于交流的特点，又产生了更多的新问题。例如：1) 标准元件的残量问题；2) 组成桥臂的元件对地及相互间的杂散电容问题；3) 元件间及线路间的磁耦合问题；4) 电源波形问题等。这些因素在不同程度上影响着交流电桥测量结果的准确度。以下对这些问题做一些简单说明。

在对交流电桥进行理论分析时，我们认为组成桥臂的各标准元件都是“纯净”的。但实际上所有标准元件都同时包括有电阻、电感、电容。一个标准电阻元件不管对它的材料、结构作如何精心选择和考虑，总要残存一些很小量的电感和电容。同样，标准电容元件也要残存一些电感和代表介质等损耗的电阻（还有引线电阻）。标准电感除不可避免的存在导线电阻外，还存在匝间、层间分布电容（可近似等效为一并联电容）。对标准元件来讲，这些不希望的但又不可避免伴随存在着的量称做残量。这些残量使标准元件偏离理想情况，从而影响了电桥测量的准确度。处理的办法是在设计制造各标准元件时尽量减小残量，使其小到可忽略的程度。也可采取测量或计算的办法，来确定各标准元件残量具体数值，用以修正测量结果以及采用特殊的测量方法如替代法等以消除或减小测量线路的残量对测量结果的影响。

另一方面，当用交流电桥作为研究某些电介质、磁介质等的

性质以及一些由这类材料制成的电工装置的性能时，我们常通过测量上述所谓之残量来了解这些材料或装置的性质和性能。例如，我们正是通过测量伴随着电容器的电阻残量来了解电容器中介质材料的损耗 Θ 。可见对于某些具体测量对象，测量“残量”的重要程度至少不亚于测量 R 、 L 、 M 、 C 本身的重要程度。

因此交流电桥的测量对象除 R 、 L 、 M 、 C 等元件的量值外，常同时包括测量它们的残量。甚至有一些专用电桥就以测量“残量”为主要目的。

对于组成桥臂元件间及对地的杂散电容的处理，是采用屏蔽并赋予屏蔽以适当电位等措施来解决，目的在于使杂散电容即使存在也不起作用或使它的作用不致影响测量结果。

关于屏蔽问题和它的作用在以下各章中还要提到。事实上对屏蔽作用的理解和如何布置也有一个认识过程，随着对电桥准确度要求的提高，屏蔽的设置也由简单趋于复杂，进而采取有源的屏蔽措施，使它趋于更为完善。

按现有的工艺、材料和技术水平，精心设计制造的经典电桥最高准确度（以误差大小来表示）约为 10^{-5} 数量级。为实现如此高的准确度，要求很复杂的屏蔽系统以及一些其它的严格条件。

科学技术和生产的发展，一方面要求测量的准确度还得进一步提高；另一方面要求扩展测量范围即量值和频率范围，有些已不是经典电桥所能胜任的了。最重要的实例是在本世纪50年代后期出现了的计算电容，它的准确度比原来的计算电感基准约高两、三个数量级，达 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 。现已为国际公认，用来代替计算电感基准。但计算电容基准的电容量很小，低于 1pF ，而它的杂散和对地电容却远大于此值。显然，为了能精确测量和传递这一基准值，现存经典电桥无论如何无法满足要求。

于是自50年代后期起，感应耦合比例臂电桥脱颖而出，得到飞跃发展。这类电桥的原理早在20年代就曾有过介绍。但经典电桥的性能和准确度已足以满足当时要求，所以感应耦合比例臂电

Θ 不是用电阻值而是用所谓损耗角正切来表示介质损耗，见第一章。

桥没有引起人们的特殊注意。

这类电桥在 50 年代的飞速发展是电磁测量技术领域内的一件重大事件。这类电桥的四臂中的相邻两个臂是利用磁耦合原理构成的比例臂。如果是用来供给电压比值，就又称做变压器电桥。磁感应耦合电压比例臂的优点是：1) 采取一些有效措施后可以供给高准确、高稳定的电压比值。目前已能达到 10^{-9} 的数量级。2) 输入阻抗高、输出阻抗低，使此比值很少受引线阻抗和杂散电容的影响。这些优点正是精确测量和传递计算电容量值所必不可少的条件。

根据磁耦合原理构成的高准确电流比例臂是上述电压比例臂的互易形式。具有这种电流比例臂的交流电桥称做电流比较仪式电桥。它也具有与变压器电桥类似的优点。

关于具有感应耦合比例臂电桥的原理、具体电路、有关问题及应用将在第三章介绍。

由于这类电桥只需采取简单的措施就可以满足精密测量和工业测试的准确度要求，再加上其它优点，如高稳定度、对屏蔽要求低、可测很小的参数值等，从而将测量的下限延伸到很低的数值等，所以目前各国生产的精密电桥和工业测试用电桥，很多是采用感应耦合比例臂的原理。因此有关这类电桥的原理已是正确选择和使用精密电桥的科技工作者所不可缺少的基本知识。

另一个促使电磁测量技术发生重大变化的因素就是引入了半导体技术。在未发明晶体管和集成电路以前，成套交流电桥中已经使用了各种用电子管组成的电子设备。例如，利用能产生不同频率的正弦波发生器作为交流电桥的电源；利用具有相敏性能或无相敏性能的放大器作为检测交流电桥输出信号的中间环节，以及利用阴极射线示波器作为指零仪[⊖]。它们都是交流电桥的重要辅助设备，对改进和提高交流电桥的性能起了重大作用。但这些电子设备始终只是分别接到交流电桥两对对角线之间，即处在电桥本体之外，并没有和桥臂结合。然而自 50 年代晶体管问世以

⊖ 第五章中将介绍一些常用的电源和指零仪。

来, 以及随后出现的集成电路, 大规模集成电路和具有各种功能的集成块等, 使得由半导体元件和组件组成的电子设备不但取代了原来由电子管组成的电桥辅助设备, 而且对桥臂的结构进行改造, 形成了所谓有源交流电桥。如将微处理器结合在内, 可进一步使其智能化。本书第四章将讨论有源电桥问题。

结合到桥臂中去的最重要的半导体器件是运算放大器以及由运算放大器组成的有源阻抗元件。桥臂结合运算放大器后可解决电源和指零仪的公共接地问题, 可大大降低对屏蔽的要求, 还有其它优点。

由改造后的桥臂所组成的有源电桥, 有一些还可以看出四臂的形貌, 有一些已变得面目皆非。但在基本原理和组成各种有源电桥的指导思想以及性能指标上与经典电桥仍有相通之处。

综上所述, 从 1891 年用正弦电源供电的交流电桥出现起, 到本世纪 50 年代止, 在这 60 余年期间是经典交流电桥的理论和线路发展的主要阶段。一方面有关电桥的问题如平衡条件、灵敏度、准确度、收敛性以及屏蔽、防护等都曾为各国的科学家做了深入细致的研究和分析, 逐渐形成了系统的电桥理论。另一方面由于科研生产的需求, 曾出现大量功能互有异同的交流桥路。但其中大部分逐渐被淘汰, 或为更新的线路(包括感应耦合比例臂电桥和有源电桥)所替代; 只有那些操作方便、结构简单、能不断适应新要求或在某一测量领域有突出优点的桥路才一直保留下来, 但为数已不甚多。可是也不排斥可能有些业已被遗忘的桥路在新的条件下重新受到重视。

50 年代以后, 飞跃发展的感应耦合比例臂电桥到目前已处于相对稳定阶段。至于有源电桥则仍居于发展阶段, 它将与电子技术进行更广泛和更紧密的结合, 以进一步提高电桥的性能, 增加功能, 使它智能化。对此, 本书将作简单介绍。

本书主要介绍用于平衡状态下以正弦电源供电的交流电桥。频率范围主要介于工频到较高音频之间。但从更广泛的意义来讲, 交流电桥所包括的内容远不止于此。例如: 1) 有些交流电

桥是用于不平衡状态下，常见于非电量的电测法领域中；2）有些电桥的供电频率超出上述范围向更低和更高的方向延伸。一般而论，在更高频率下的测量已属于无线电测量范畴。虽然它的部分基本原理与本书内容相同，却又有它本身的特殊问题。另一方面，超低频交流电桥目前主要用于研究绝缘介质性质，须做专题处理；3）还出现一些用非正弦周期波形，如方形脉冲、方形波、梯形波等供电的电桥，主要用于测量元件等值电路的各个参数和判断等值电路的连接方式等。这些内容，未包括在本书范围内。

总之，本书虽主要限于介绍正弦交流电桥的基本原理、主要线路和有关问题以及一些实用知识。但不希望读者的思路 and 眼界受到限制，事实上在交流电桥的范围内还有很宽广的知识领域有待发掘与探讨。

参 考 文 献

〔1〕 K. B. 卡兰捷耶夫，电桥理论与计算，上海科学技术出版社，1953。

〔2〕 B. Hague, A. C. Bridge Method, 5th. Edition, Sir. Isaac Pitman and Sons Ltd., 1957。

〔3〕 B. Hague, T. R. Foord, Alternating Current Bridges Methods, 6th. Edition, Pitman Press, 1971。