

电桥理论与计算

〔苏联〕 К. Б. 卡兰捷耶夫著



哈尔滨工业大学电测教研室清华大学基本电工教研组译

3.1639
70
.2

电桥理论与计算

(电桥测量法)

〔苏联〕K. B. 卡兰捷耶夫 著

哈尔滨工业大学电测教研室
清华大学基本电工教研组 译

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书討論电桥綫路的理論与計算問題,对交流及直流电桥的綫路分析和分类有較詳細的介紹,对直流平衡电桥的計算和設計以及交流电桥的平衡过程等也作了深入的論述,书后并由譯者补充了交流平衡电桥的設計資料。

本书供已有一定电工測量知識的电工仪器設計及製造的工程技术人員、計量工作者及高等学校測量技术与仪器制造专业师生参考。

МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИИ

К. Б. Карандеев

Гостехиздат «УССР» 1953

电 桥 理 論 与 計 算 (电 桥 測 量 法)

哈尔滨工业大学电测教研室 譯
清华大学基本电工教研組

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业许可証出 093 号

上海市印刷五厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/32 印張 8 18/32 插頁 1 排版字數 209,000

1964 年 6 月第 1 版 1964 年 6 月第 1 次印刷

印數 1—8,000

統一書号 15119·103 定价(十二) 1.25 元

譯 者 序

电桥测量法是电工技术中用得最广泛与准确度較高的测量方法，它不但是电磁测量的重要組成部分，而且也广泛地在非电量的电测法中应用。

本书作者对电桥测量法的理論有相当的贡献，并且有自己的独特見解。本书原名《电桥测量法》，出版日期虽較早（1953年），但今天看来，仍不失为一本重要的参考文献。

本书介紹电桥綫路的理論与計算以及有关問題，也介紹一些使用电桥綫路的工作方法。它可供我国从事电工仪器設計制造的技术人員、計量工作者和大专学校中测量技术与仪器制造专业的师生参考。

全书由哈尔滨工业大学电测教研室彭康强、方辰、尤德斐、王在元、赵新民、郭傳鋁、刘嗣賢、王傳賢、黎克、黄丽嫻以及清华大学基本电工教研組量計組唐統一、陈嘉瑞、閻平凡、陆瑤海等翻譯与校对，书末所补充的文献由清华大学电工学教研組周礼杲翻譯。最后由唐统一总校。

全书在翻譯过程中得到水利电力部技术改进局張叔涵同志的帮助，特此致謝。

譯者們限于水平，难免有翻譯欠妥与錯誤之处，书中所用某些名詞术语，也未尽妥当，欢迎讀者批評指正。

譯 者 1963年6月

前 言

电桥测量法目前在电工技术中是应用最广的、也是最重要的测量方法。近年来,随着非电量的电测法与生产过程自动检测和自动控制技术等等的发展,电桥测量法具有更为重要的意义。在这个领域中,很多问题可以用电桥来有效地解决。这就注定了为什么电桥能超出直接测量技术的范围,而受到普遍的重视。

电桥测量法已有一百多年的历史。在这段时期内,自然也进行了许多阐明其性能的工作。但是其中的大多数只是说明某些个别的问题,很少有综合性的评述,即使有一些,也都不够全面。本书正是为了在某种程度上完成上述任务的一个尝试。

首先,本书将阐明电桥线路的基本理论与计算问题,并部分地介绍一些利用电桥线路的工作方法。至于现代电桥的结构,在本书中不拟加以研究。

由于篇幅所限,在本书中也不叙述电桥装置的某些组件如振荡器、指示器及范型量具等等。

本书的读者对象是已具有一定的电工测量知识的电桥设计者或使用者。而对于仪器制造专业的高年级学生也将有所裨益。

目 录

譯者序

前 言

緒 論1

第一章 电桥測量的一般原理和綫路的分类3

1-1 电桥法和电桥綫路的概念及其基本元件3

1-2 直流电桥及其分类6

1-3 交流电桥綫路的特点及其平衡10

1-4 交流电桥的分类14

第二章 平衡电桥綫路計算和理論的基本問題26

2-1 电桥綫路的輸入和輸出电阻26

2-2 平衡条件和測量对角綫中的电流29

2-3 在电桥綫路的各臂中电流的分配38

2-4 双电桥的平衡条件40

第三章 电桥綫路的灵敏度50

3-1 关于灵敏度的一般介紹50

3-2 电桥綫路的电流灵敏度56

3-3 电桥綫路的功率灵敏度66

3-4 电源接入点的选择75

3-5 交流电桥的灵敏度77

第四章 直流平衡电桥的計算和設計基础93

4-1 概述93

4-2 电桥綫路的选择93

4-3 单电桥和双电桥的誤差94

4-4 对實驗室型平衡电桥的結構要求98

4-5 比較臂十进盘数目及其阻值的确定99

[2] 目 录

4-6	比例臂电阻值的确定	104
4-7	确定容許誤差及選擇电阻的調定公差	106
4-8	电阻元件的結構設計	110
第五章	交流电桥的平衡过程和設計基础	116
5-1	电桥平衡过程及其位形图	116
5-2	收斂性的綫性理論	121
5-3	平衡过程的圓图	123
5-4	交流电桥的分別平衡	130
5-5	分別讀数	135
5-6	交流电桥設計的基础	138
第六章	交流电桥的基本綫路	148
6-1	交流四臂电桥	148
6-2	交流多臂电桥	155
6-3	交流多臂电桥綫路的平衡条件	162
第七章	特殊类型的电桥	165
7-1	概述	165
7-2	不平衡电桥的特性及应用范围	166
7-3	复合补偿——电桥綫路	178
7-4	測量电阻的自动电桥	188
7-5	測量阻抗的自动电桥	192
7-6	百分比电桥	197
第八章	消除誤差的方法及电桥裝置的防护	201
8-1	消除誤差的特殊方法	201
8-2	直流电桥裝置的防护	203
8-3	交流电桥裝置的防护	205
附 录		215
I	基本数据表	215
II	交流电桥綫路的圓图圓心坐标及圓心綫的決定	229
参考文献		242
补充文献	交流平衡电桥的設計	248
应用符号		264

緒 論

一般电工、无綫电技术中，对电路进行試驗或研究时，常常需要測定不同的固定或可变的电阻、电容与电感。近年来广泛推广的非电量电测方法中的基本环节是一些一次敏感元件——即所謂变送器或傳感器，这种变送器也常常是一些可变的电阻、电容或电感，它們是被測非电参数的量度。

对上述統称为电路参数的諸量进行完善的測量，是一个十分迫切的問題。很难設想，在一个电工實驗室中会沒有这种必要的測量设备。

現代的电工測量技术是拥有測量电路参数的各种方法与仪表的宝庫。其中，最著名和使用最广的是电桥測量法，本书的中心內容就是討論电桥測量法的理論与特点。

由于电桥測量法非常灵活和相当完善，应用这种方法既能制出誤差仅为十万分之几的實驗室装置，也能制出十分簡單方便的、誤差約为 $0.1 \sim 0.2\%$ 的工业用便携式仪器。这种方法既可用在直流电路中，也可用在不同頻率甚至極高頻的交流电路中。利用这些方法可以对电阻、电容、电感、互感、頻率等进行最准确的測量。此外，电桥法也很适合用来直接測量复数量，例如介质的損耗角、电感綫圈的品质因数，电阻的时间常数、磁性材料的損耗角（尤其在高频）等。

一般說來，電橋測量法所用的裝置是屬於需要調整的儀器這一範疇的，即在測量時需要作某些調節手續（所謂電橋的平衡或均衡）的儀器。但是，近年來已廣泛地使用自動電橋，這種電橋的平衡過程不是手動的，而是用專門的自動裝置來實現的。這些電橋時常裝上記錄機構而成為自動記錄電橋。在需要測量的僅是相對其額定值的某一個很小的偏差量（例如，用電阻溫度計測量溫度，或在工廠條件下檢驗一批相同的零件）的情況下，就可不必每次都使綫路平衡，而是根據綫路的平衡指示器（檢流計）的指示來確定待求的偏差量。這種裝置稱為不平衡電橋。無論是自動電橋還是不平衡電橋，目前只在直流方面使用較廣。

電橋法的應用，無論在理論上與結構上，都有非常大的可能性。它是一種最重要、最完善和最準確的電工測量方法。

用來測量電阻的最簡單的和使用最廣的直流四臂電橋，常稱為惠斯登電橋，雖然它的真正的創造者並不是惠斯登。1833年，克里斯泰(Christie)就已描述過這個綫路^[92]。

現在各種電橋綫路的數目（主要是交流電橋）已多達幾十個。但是必須指出，這些綫路相互之間並沒有什麼原則上的區別；它們只是同一個一般的電橋測量法（更準確來說——測差法^①）的各種不同的個別情況而已。所有這些綫路，儘管初看來似乎相互之間是有所區別的，但都可以化為基本的四臂電橋綫路。因此，這就有可能來研究電橋綫路的共同理論，和確定它們工作時的共同原則，這些共同理論和原則，將適用於一切個別情況的綫路。

電橋綫路理論的一般問題和個別問題以及它們的計算與分析方法，已有很多的文獻加以闡述。儘管如此，至今很多問題還不夠明確。僅在最近的二十多年中，大量的基本問題才獲得解決。

① 原文為 Дифференциальный метод.——譯注

第一章

电桥测量的一般原理 和线路的分类

1-1 电桥法和电桥线路的概念及其基本元件

电桥线路是电工测量中的测差法在实际应用中的最重要与最有效的一种^[23、26]。

将两个量通过一个与测量对象无关的辅助参数互相联系起来,然后测量这两个量之间的差值(或使此差值变为零),这种测量方法称之为测差法。这个差值的形成和测量,都是在线路内部通过接在这两个比较电路中的专用测差指示器进行的。

这种指示器可以用测差检流计和测差变压器为例。在测差变压器中,根据有关的磁通来确定被比较的电流(及其差值)。

但是,也可以用另一种方法来解决这一课题,就是制成一种不需要经过任何变换,就能使被比较电流(或电压)的差值直接在线路的某一部分内形成,并以一般的指示器(检流计)进行测量的测差指示器。在这种情况下,对于其中形成被测差值的那段线路和检流计合在一起的装置,称为线路型测差指示器。它的实际应用就是大家知道的电桥线路。

测差法在技术性能上的标志是只有一个能源(线路的电源^①),

① 由于这个原因,使得测差法仅仅适用于测量电路的参数。用它们来测量电压或电流是不可能的(详细说明见文献[24、26])。——原注

并且测量结果与这个能源的情况无关(用零值方案时)。电桥线路完全具有这些性质。由于电桥线路在电测技术中具有特殊重要的意义,我们应当对这种作为测差法的一个独立部门,通称为电工测量的电桥法(交流的或直流的电桥法)作专门的研究。

到目前为止,在电桥法的领域内,还没有完全确定了的、并且为大家共同采用的术语和标志。因此,为了避免混淆起见,首先来讨论一下与这些线路有关的基本概念和所采用的某些(一般说来,是假定的)术语,以及准备以后坚持使用的标志系统。

经典的电桥线路是由联接成为环形的四个电阻所组成的(图1)。在电阻的两个相对的联结点 a 与 b 上接电源,而在另外两个相对点 c 与 d 间接线路平衡指示仪表(指示器)。电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 ,称为桥臂,而接电源与指示器的电路称作对角线; ab 电路将称为电源对角线(或发电机对角线),而 cd 电路称为指示器(或测量)对角线。在 a 与 b 两点间的两个并联电路—— R_1+R_2 电路与 R_3+R_4 电路——称为电桥线路的支路。

四个电阻的联结点,即 a 、 b 、 c 与 d 点称为电桥的顶点。两对角线将相对的两个顶点连通起来,就好像在它们之间架起了一座桥。尤其是指示器对角线更具有这种意义。在过去人们就曾称称之为桥。后来,电桥这一术语实质上已被毫无根据地推广到整个线路。这样才产生了电桥线路这一概念^①。考虑到历史上已经形成了的传统习惯,我们往后将把电桥这一术语理解为整个线路,而不是指示器对角线,把电桥作为电桥线路这一概念的简称。

总之,在电桥线路中接入了四个基本电阻——桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 。假定以后总是从左上角的桥臂开始,沿着顺时针方向来编号(如图1所示)。图1的线路称为四臂电桥线路或简称为四臂电桥。这是一个基本线路,因为一切其他的电桥线路的变态形式通

① 应该注意,电桥线路这一术语比线路本身出现得晚。奇怪的是,这些仪器最初就完全正确地被称为测差装置。——原注

过相应的变换之后, 最终都可导致四臂电桥的形式。剩下的两个电阻——对角线 R_y 与 R_0 是辅助性的: 它们的数值(在零值法时)对测量结果不发生影响。四臂电桥可同样成功地用在交流电路和直流电路中。用在交流电路时, 全部或某几个臂(不少于两个)是电抗性或复数的。

自然, 在四个桥臂之中, 有一个是被测对象。在剩下的三个之中有一个可以看成是比较对象(范型量具), 而另两个则与检流计共同组成测差指示器, 用来形成被测量的电流或电压差值。一般说来, 桥臂在线路中的布置(他们的位置)是非常任意的。唯一不被采用的方式是——在直流电桥中将测量对象与范型臂放在相对的位置上(例如 R_1 和 R_3); 相反地, 总是使它们有一个共同的联接点(大多数情况下是电源对角线上的顶点 a 或 b)。

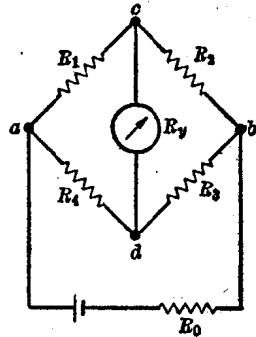


图 1

应用电桥的测量过程是使电桥各臂电阻间形成确定的关系(称为平衡条件), 即

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad \text{或} \quad R_1 R_3 = R_2 R_4$$

这时, 在指示器对角线顶点 (c 与 d) 间的电位差等于零^①。于是, 如果调节相应的桥臂电阻而达到了指示器中的电流完全消失(“平衡”电桥的动作), 那么, 就有可能利用平衡条件根据三个已知的桥臂来确定待测桥臂的阻值。具有这种获取读数方法的电桥称为平衡(零值的)电桥。但是, 有时却不是利用平衡状态而是根据测量对角线中的电流值(即指示器的指示值)来确定测量结果, 按照这个原理工作的电桥装置称为不平衡电桥。

为了达到平衡, 线路中的电阻一般是由进行测量的人用手来

① 关于平衡条件的更详细情况见第二章。——原注

調节的。但是同样也可能用专门的自动装置。因此，按使用方法可将电桥分为手控的或自动控制的两类。

为了平衡电桥线路，必须有一个或几个可变的桥臂。在现代的直流电桥中，一般的总是将比较臂做成均匀可变的（即做成范型电阻箱的形式）。另外两个所谓的比例臂仅作跳跃式的变化。这个比例的变化相当于由一个量程转换到另一个量程。而在每一个量程之中，可以认为受到调节的只有一个参数——范型比较臂。对于交流电桥，被调参数的数目增多了；它们的分布是由具体线路的特点来决定的，因而在一般情况下无法预先确定。

以后我们假定在四臂线路中的测量对象总是放在第一臂中（ R_1 或 Z_1 ）。这样一来，在直流中被调节的比较臂，对于绝大多数情况，将是第四臂。在很多交流线路中同样也只是第四臂可调，不过仍将遇到调节参数作其他分布的情况。

我们已经分析了构成四臂电桥线路的一般问题，和确立了我們以后准备保持的基本术语和标记。这种四臂电桥应用得特别广泛。但是在某些特殊情况下（主要是当测量小数值时），也可能遇到另外两种桥臂数目大于四的变态电桥线路。如在直流中用于测量非常小电阻的双桥线路^①和某些应用得较少的（以后将加以详细分析）所谓多臂（大多数是六臂）交流电桥。这两种线路都可用星-三角形变换法变成四臂电桥。这样就简化了对电桥线路性能上的一般分析。因此，可以将一般分析主要地限制在以后将广泛使用的基本四臂电桥上。

1-2 直流电桥及其分类

正如前面业经指出的，全部用于实践中的直流电桥装置的线路总共只有两个方案：单电桥（四臂的）与双电桥（六臂的）。由于

① 曾經試將双桥用于交流^[40]，但没有获得特别好的成绩，所以以后我們也就不再讲它了。——原注

直流电桥在綫路方面的变化較少，它們仅仅部分地按照結構特征来分类，而主要是按照所保証的測量准确度的等級分类。

我們不准备詳細地研究电桥結構方面的問題^①，只大体上探討一下其裝置的基本原則。

对于那些对电桥綫路提出了特別高要求的情况，照例这种电桥綫路要由个别經特別挑选的元件(有时直接由范型电阻綫圈)組成。显然，在这种个別的裝置上，一般說来是没有什么規範可遵循的，而且它們也实在很少遇到。在广闊的測量實踐中，用得最普遍的是工厂制造的成套电桥，他們的全部元件(常常还包括檢流計在內，但是电源除外)都装在一个共同的匣箱中。很显然，这种电桥从运用的观点来看，比起个别地組成的綫路方便得多。

从单电桥的計算公式

$$R_x = R_4 \frac{R_2}{R_3}$$

出发，可以看出有两种基本的平衡方法：(1) 調节一个电阻(一般是 R_4) 而保持另两个电阻間的比例不变；(2) 調节桥臂的比例而保持范型的比較电阻不变。这两种方法为电桥結構的两种基本型式打下了基础，即具有恒定的与可变的比例臂的結構。前一种称为电阻箱式，而后一种称作尺式或滑綫式电桥。

滑綫式电桥的基本結構是一根高电阻裸綫，其上有滑动的可动触头。整个电阻綫組成电桥的两个臂，它們的比例由滑动触头的所在位置来决定。理論上，这个比例是可以在零到无穷大之間变化的。第三个比較电阻一般是一个按照十进制(10、100、1000等等)作跳跃式变化的插塞式电阻箱。这类电桥的准确度很低，今天已經几乎不再使用，只要是稍微准确一些的測量都不用它。

現在应用得最广的是有恒定桥臂比例的电阻箱式电桥，它有

^① 关于直流电桥結構的詳細介紹和已生产的各型电桥的說明見文獻[14、23、73]。工业用电桥的一覽表和基本特性，以及它們的个别元件的特性見本书的附录 I。——原注

一个作为比较对象的范型电阻箱和两个恒定的桥臂电阻，后两者的比例已准确地知道，并在测量时不再去改变它。电桥靠调节比较电阻箱来平衡。

为了扩展电阻箱式电桥的量限，在电桥上装着不是两个，而是一套桥臂电阻，用它们可以调定所需的桥臂比例。这个比例的改变，一般是按照 10^n 倍的比例作跳跃式变化，也就是它们对于从比较电阻箱上读下的电阻值来说是一个简单的 10^n 的乘数项。

按照电桥转换开关的结构，可以分为十进盘式的和插塞式的电桥。近来一般认为复合结构——在电阻箱上用旋钥开关和为了改变桥臂比例用插塞开关是更为可取的。

实际上，一切近代的电桥都是以十进盘电阻箱作为其范型量具的，最常见的是五位的，较少（比较简单的和廉价的）是四位的，在高质量的特殊电桥上六位。最大十进盘的每一档一般为 1000 欧。比例臂通常由四个或五个电阻（从 1 至 1000 或 10000 欧）组成，这就有可能在 0.001~1000（较少地从 0.0001 至 10000）范围内改变比例值。

一些应用最广的四臂电桥的基本参数列于表 1。

至于双电桥的结构，变化就更少了。滑线式双电桥现在用得

表 1

电 桥 型 式	电 阻	
	比 较 臂 (十进盘)	比 例 臂 (欧)
四个十进盘式	$10^3 \times 9; 10^2 \times 9; 10 \times 9; 1 \times 10$	1000; 100; 10; 1
五个十进盘式	$10^3 \times 9; 10^2 \times 9; 10 \times 9; 1 \times 9; 0.1 \times 10$	1000; 100; 10; 1
五个十进盘式	$10^4 \times 9; 10^3 \times 9; 10^2 \times 9; 10 \times 9; 1 \times 10$	10000; 1000; 100; 10; 1
六个十进盘式	$10^4 \times 9; 10^3 \times 9; 10^2 \times 9; 10 \times 9; 1 \times 9; 0.1 \times 10$	10000; 1000; 100; 10; 1

較少；最常見到的是电阻箱式双电桥。在这种电桥中总是用范型电阻綫圈作为比較量具，因而就要均匀地改变参預比例臂的两个电阻之一来进行綫路的平衡。其另一个臂則按十进制作跳跃式改变。正如大家已知的，在双电桥中調节臂是成双的，因此，均匀改变的桥臂是由两个（一般是旋鈕式的）五位电阻箱組合而成，它們的旋臂之間有着机械联系，同时用一个公共的十进盘手柄来控制。作跳跃式变化的第二对电阻上則設有插塞式轉換开关。

近来愈来愈广泛应用的所謂万能电桥(例如 MBЛ-49、“Эталон”等)，它們有可能既按照双电桥綫路，又按照单电桥綫路工作。

这样，从結構观点来看，近代的直流电桥实质上是十分单一的。今天，我們认为具有跳跃式变化电桥比例和复合結構轉換开关的电阻箱式电桥得到最广泛的应用是有充分根据的。

按照容許測量誤差的电桥分类載于直流电桥的校驗規程中^[66]①。按照接在綫路中电阻的調定准确度，电桥可以分为五級：0.02、0.05、0.1、0.5 及 1.5。根据这个規程，均匀变化的比較臂（以欧表示）的容許誤差为

$$\pm (a \times 10^{-2} R + mb)$$

式中 R ——桥臂电阻；

$a \times 10^{-2} R$ ——桥臂电阻容許誤差的基本部分；

mb ——这个容許誤差的附加部分；

m ——指示值不等于零的十进盘数目。

系数 a 与 b 的数值如下：

电桥准确度	a (百分比)	b (欧)
0.02	0.02	0.001
0.05	0.05	0.001
0.1	0.1	0.002
0.5	0.5	0.01
1.5	1.5	0.02

① 关于我国的“測量用直流电桥技术条件”可見“电工专业标准”电 (D) 35~62。
——譯注

作阶梯式调节的比例臂的以欧表示的容许误差由式 $\pm a \times 10^{-2} R$ 来确定, 式中, a 与 R 同前.

这样, 等级指标就是一个桥臂以百分比所表示的容许测定误差^①. 考虑到在计算公式中有三个桥臂的电阻, 而误差的符号又可能是完全任意的, 在最坏的情况下, 可以这样确定整个测量的误差

$$\Delta_{np} = |\delta_2| + |\delta_3| + |\delta_4| = 3a$$

式中 δ_2, δ_3 及 δ_4 ——桥臂 R_2, R_3 及 R_4 的相对误差;

a ——等级指标.

显然, 这个式子是用于不考虑桥臂电阻的更正值而进行测量的情况, 即以“保证误差”来测量的情况. 如果电桥附有校验证明书, 则将必要的更正值引进后, 就能大大地降低测量误差^②.

这样, 将上述作一总结, 我们就得到了这样的结论, 即现代的直流电桥实际上可以按照下列标志来分类:

- (1) 按线路——单电桥和双电桥;
- (2) 按容许误差——0.02; 0.05; 0.1; 0.5 及 1.5 级^③;
- (3) 按结构——电阻箱式(旋臂式和插塞式)及尺式(滑线电阻式).

实际上不存在其他的重要区分标志^④.

1-3 交流电桥线路的特点及其平衡

我们假定以往分析过的电桥线路都是纯由电阻组成的, 并由直流电源供电的, 而作为指零仪器的则是磁电式检流计. 但是, 如果电桥线路由阻抗组成, 并用交流供电和以某一种合适的交流指示器(振动式检流计, 电话听筒, 电子管线路或其他)代替磁电式检

① 根据苏联近年来生产的直流电桥的技术条件, 等级指标均指电桥的综合误差, 即 Δ_{np} (我国也作同样规定).——译注

② 关于电桥误差更详细的叙述见 4-2 节.——原注

③ 我国定为——0.02; 0.05; 0.2; 0.5; 2; 5; 共六级.——译注

④ 仅是指工厂制造的电桥. 个别的线路在结构上可能是多种多样的.——原注