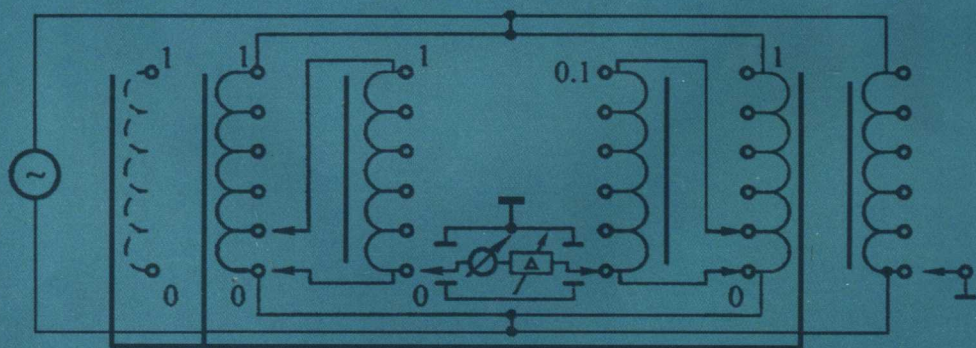


新型电桥

——电桥的探索与创新

张功铭 赵复真 著



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

新型电桥

——电桥的探索与创新

张功铭 赵复真 著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新型电桥: 电桥的探索与创新/张功铭, 赵复真著. —北京: 中国计量出版社, 2007. 11

ISBN 978-7-5026-2755-3

I. 新… II. ①张…②赵… III. 电桥—研究 IV. TM938.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 168518 号

内 容 提 要

本书介绍了作者创建的一系列新型电桥的结构原理、电路、功能及特点。这些电桥在准确度和功能方面优于传统的电桥, 是作者几十年研究、创新的成果。本书还介绍了作者提出的更为科学合理的电桥定义、电桥分类准则及方法。对学术界争论不休的有关电桥的某些重要问题, 本书也做出了有说服力的判断。

本书介绍的内容都有扎实的实验依据, 许多已投入应用并取得了令人瞩目的效果。本书可供计量行业、科研单位从事电测量的技术人员及大专院校相关专业的师生参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市媛明印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787mm×1092mm 16 开本 印张 17 字数 405 千字

2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷

*

印数 1—1 500 定价: 42.00 元

前 言

作者从事现代计量工作五十余年^[A24],大部分时间从事电桥的系统研究。从直流电桥到交流电桥,从古典的阻抗电桥到现代的阻抗电桥。发现了电桥结构的比率臂特性;发现了电桥是一种有源的、有测差能力的具有两端口复合比率网络特点的、具有精密测量阻抗和比率能力的、测量结果与电源的幅值无关的精密测量电路^[A3]。这些发现促使作者研究了复合比率网络理论,发现可以把两个独立的比率网络复合成一个新型的比率网络^[A1];进一步发现了一种具有平衡方程为双曲线函数的复合比率网络电桥^[A2]。为此,又研究了电桥的定义^[A3]和分类。

作者在十分困难的工作环境下从事电桥的科研工作,经过几十年的努力,建立了我国独有的电桥:(1)双曲线函数电桥系列;(2)阻抗增量比率臂电桥系列;(3)双 IVD(感应分压器的国际通称)比率电桥系列;(4)全息衰减比率电桥系列;(5)同轴比率臂电桥^[A8]系列。其中双曲线函数电桥系列包括:电阻型双曲线函数电桥,平衡方程为 $R_x R_s = R^2$,具有超宽量程^[A4];电容增量比率臂电桥^[A5]。阻抗增量比率臂电桥系列包括:正、负阻抗增量比率臂差动电桥及电阻中和测量电桥^[A7]。双 IVD 比率电桥系列包括 IVD 绝对和相对检定电桥^{[A13][A8]}。同轴比率臂电桥系列包括测功电桥和大电容比较电桥^[A9]。通过这些研究,建立了我国独有的 IVD 比率标准及电桥^[A16],我国独有的应变模拟量标定电桥以及我国独有的桥式全息衰减比率标准^[A2]。这些计量标准历时几十年,依然处于国际先进行列,这不能不归功于电桥的创新性研究。

我国的电桥生产系列中,早年产品是仿造外国的,近期产品大多仿造英、德、美、加等国。在科研单位中除了少量移植和仿造以外,大多购买国际上的尖端产品。例如加拿大出品的电流比较仪测温电桥、电位差计,英国变压器比率臂电桥和自动测温电桥等等。中国计量科学研究院曾建立了直流电阻基准比较电桥、大电阻测量电桥、变压器比率臂 C—C 电桥、变压器比率臂 C—G 电桥、谐振电桥、电容损耗测量电桥、电阻时间常数电桥、IVD 检定电桥、应变模拟仪检定电桥等等,在工作中起到很大作用,在电桥研究中迈出了一步。遗憾的是没有继续研究下去,更有甚者,最近听说原有的电桥大部分已不存在了。希望有识之士力挽狂澜,改变这种局面。

弘扬科学技术,振兴中华,人人有责。作者虽老牛破车,仍努力向前。作者分别于 1991 年、2005 年和 2006 年出版了《电阻应变仪检定技术》、《新型阻抗比率测量电路》和《新型传感器传感器检测新技术》三部著作(均由中国计量出版社出版),本书是第四部。这四部著作概括了作者 50 余年来对比率计量的研究。从单个比率器件开始研究其比率特性、优点和用途,进一步研究了复合比率网络的优点和用途,进一步研究了复合比率网络的优点和用途,又研究了阻抗增量比率网络的理论和应用。从这些研究成果中都导出了新型电桥电路。由此可见,电桥是比率技术的核心。作者最近提出的同轴比率臂电桥获得了良好的频率特性,促使变压器比率臂电桥向高频发展,顺应了电桥的发展方向。

上述这四部书的理论基础都是比率计量理论。书中包含了近 30 项理论与技术的创新成果。最后,作者谨对中国计量出版社和刘汉钧编辑表示衷心的感谢。

作者的联系电话:010-64293099

张功铭
2007 年 2 月

编辑的话

电桥是一种常用的精密电测量装置。在产生后的一百多年里,电桥取得了巨大的发展,产生了许多不同种类、不同用途的电桥。象惠斯登电桥、开文电桥、变压器电桥等,无一例外,都是外国科学家的发明创造。

感谢本书的两位作者,他们通过本书呈献给读者的五大系列、几十种新型电桥,全是他们自己的发明。这些电桥在电路结构上有别于传统的电桥,或填补了以往电桥功能上的空白,或在测量的准确度上胜过以往电桥。这是一个奇迹。在电桥发展的历史上,第一次有了中国人的建树。无怪乎作者自豪地称这些电桥为“中国电桥”。现代电测量,特别是在高精尖的计量领域,增添了新的、强有力的手段。这绝非虚言,作者不止一次地用这些电桥解决了高精尖的测量难题,取得了骄人的成就。

作者是技术专家,除了一系列技术创新外,难能可贵的是在学术理论上也没有停止他们探索的脚步。电桥的定义和分类是他们另一探究的对象。这些探索不是学究式的咬文嚼字,而是有着深刻技术背景的真知灼见。这个定义关系着电桥今后的发展道路。当然,作者提出的新定义,包括作者提出的“电磁桥”的概念,可能会引起学术界的争论,这是必然的。科学上的定义之争从来都牵扯到广泛的理论之争,并有力地推动科学理论的发展。正像现时有关冥王星地位引发的行星定义的争论一样,绝非是几个好事的天文学家的无聊之举。

作者的成就不是依靠一时的奇思妙想,而是得益于在长期的工作实践和科学实验中探索的积累,特别是从比率计量的观点进行的研究(参见本书的“后记”)。新型电桥的创建综合了作者的多种技术的和理论的创新,既有电路的,也有工艺的创新。这些创新的成果在本书和作者已出版的三部书中有详细介绍。

作者探索的脚步并没有停留在电桥这一专题上。就在本书的出版过程中,作者的研究工作又有了新的进展:

正在进行三角形夹角电容(见作者的《新型传感器及传感器检测新技术》一书)的理论计算,最终将建立三电极(优于传统的四电极、五电极)计算电容,实现对阻抗的绝对测量;

N 个孪生IVD(即感应分压器)的结构模型已经建立,进而可实现等电位梯度的屏蔽空间,大大削弱分布电容的影响。这是有关屏蔽理论的创新;

提出了同轴超导绕组的互感线圈的设想,以实现在超导态下对电阻、电容和电感的绝对测定,建立我国自主的阻抗标准。

这些进展虽不是电桥领域的,但它们的最终成果将对电桥的发展产生直接的影响。值得注意的是,作者的成就都是围绕着“比率计量学”这个中心的。“比率计量学”是作者首倡的,并首先由作者丰富了它的内涵。它是作者的思想源泉,也给计量学的发展指示了一个新的方向。我们期待着作者新的成就,更寄希望于年轻的工程师和科学家们。令人欣慰的是,作者的某些研究成果已引起了一些人的重视,并正在付诸实践。

科学的成功,永远属于那些勇于探索的人们!

本书责任编辑 刘汉钧

2007年11月

目 录

绪论	(1)
第1章 电桥领域中若干问题的探讨	(10)
1.1 电桥的基本概念	(10)
1.2 电桥研究的现实意义	(12)
1.3 电桥的发展简史	(12)
1.4 典型电桥介绍	(14)
1.5 电桥定义的探讨	(62)
1.6 关于电桥定义的比较和分析	(68)
1.7 张-赵氏电桥定义的补充说明	(70)
1.8 电桥的辨别和分析	(76)
第2章 检定 IVD 的双感应比率臂电桥	(77)
2.1 双 IVD 比率臂	(77)
2.2 IVD 比较检定电桥	(79)
2.3 双 IVD 比率臂电桥的特点	(80)
2.4 单盘 IVD 绝对检定电桥	(84)
2.5 单盘及多盘 IVD 比率臂的设计	(89)
2.6 互检法双 IVD 比率臂电桥	(92)
2.7 对互检法双 IVD 比率臂电桥准确度的旁证	(96)
2.8 互检法在 21 世纪的开拓	(100)
第3章 同轴感应比率臂电桥	(104)
3.1 概论	(104)
3.2 IVD 的比率误差的基本概念	(104)
3.3 IVD 误差的基本分析	(106)
3.4 IVD 高频误差及其消除方法	(108)
3.5 同轴感应比率臂大电容测量电桥	(120)
3.6 测量阻抗等效电路的同轴感应比率臂电桥	(121)
3.7 同轴 IVD 比率自校电桥	(121)
3.8 同轴 IVD 比率臂测互感电桥	(122)
3.9 同轴 IVD 万用比率臂微电阻测量电桥	(125)
第4章 电阻增量比率臂电桥	(128)
4.1 电阻量化和线性化理论	(128)
4.2 负值电阻增量比率网络	(129)
4.3 十进制负值电阻增量比率网络	(133)
4.4 负值电阻增量箱的最佳设计	(138)

4.5	电阻中和原理及其应用	(139)
4.6	采用电阻中和原理的电阻应变计标定电桥	(142)
4.7	正值电阻增量箱结构原理	(144)
4.8	差动型电阻增量比率臂电桥	(146)
4.9	电阻增量比率臂电桥的检定	(148)
第5章	电容增量比率臂电桥	(154)
5.1	电容量化和线性化的理论	(154)
5.2	负值电容增量比率网络	(155)
5.3	十进制负值电容增量箱	(157)
5.4	负值电容增量箱的最佳设计	(159)
5.5	电容中和原理及其应用	(161)
5.6	采用电容中和原理的电容传感器标定电桥	(164)
5.7	正值电容增量箱结构原理	(164)
5.8	差动型电容增量比率臂电桥	(166)
5.9	差动电容增量比率臂电桥的检定	(167)
5.10	电容增量比率臂 Bridged-T 测自感电桥	(167)
5.11	小结	(168)
第6章	复合阻抗比率臂电桥	(169)
6.1	复合阻抗的概念	(169)
6.2	复合阻抗的并联电路	(170)
6.3	复合阻抗的整体并联	(171)
6.4	第Ⅰ类双曲线函数电桥	(173)
6.5	电阻型第Ⅱ类双曲线函数电桥	(175)
6.6	电容型第Ⅱ类双曲线函数电桥	(181)
6.7	复合电容比率臂电压互感器测量电桥	(185)
6.8	双曲线函数电桥的计量学意义	(186)
第7章	环形复合阻抗比率臂电桥	(188)
7.1	复合阻抗的概念	(188)
7.2	环形复合阻抗比率网络	(189)
7.3	环形复合阻抗比率臂的比率分析	(190)
7.4	环形复合比率臂电桥	(191)
7.5	环形复合阻抗比率臂电桥的等功率特性	(193)
7.6	第Ⅲ类双曲线函数电桥的结构型式	(195)
7.7	第Ⅲ类双曲线函数电桥的意义	(196)
7.8	第Ⅳ类双曲线函数电桥	(198)
第8章	带负载两变量环形复合比率臂电桥	(201)
8.1	电阻型全息比率臂衰减测量电桥	(201)
8.2	电容型全息衰减比率臂衰减测量电桥	(204)
8.3	带负载全息衰减比率臂的检定方法	(207)

8.4	带负载的环形复合比率臂高压测量电桥	(208)
8.5	电阻式桥式衰减器与 T 形电阻式衰减器的比较	(210)
8.6	阻抗匹配型感应比率臂衰减电桥	(212)
8.7	建立十进位全息比率衰减器的方案	(214)
8.8	全息比率衰减电桥的定义问题	(216)
第9章	电桥的辨析和分类法则	(218)
9.1	电桥的辨别与分析	(218)
9.2	用张-赵氏电桥定义对张-赵氏电桥的检验	(219)
9.3	关于 T 形网络的讨论	(221)
9.4	Atkinson 电路分析	(224)
9.5	“Pseudo 电桥”的讨论	(224)
9.6	运放器比率臂电桥的正名	(225)
9.7	电桥分类准则	(227)
9.8	对 Ferguson 电桥分类方法的讨论	(228)
9.9	张功铭和赵复真提出的电桥分类方案	(232)
第10章	电磁桥探索	(238)
10.1	电磁桥概念的形成	(238)
10.2	电磁桥的模型	(239)
10.3	电磁桥的实验	(243)
10.4	高频 IVD 的比率误差分布	(244)
10.5	高频 IVD 比率绝对测定方法的研究	(248)
10.6	高频十进盘 IVD 的设计问题	(249)
10.7	高频测差补偿器	(251)
10.8	张-赵氏电磁桥诞生的意义	(251)
附录:	电桥的时钟坐标系	(253)
参考文献		(256)
后记		(259)

绪 论

电桥是一种常用的电测量工具,自 1843 年诞生起,至今已有 160 多年历史。经过几代人的革新、创造,已发展成多种类、多用途的测量工具。进入 20 世纪 70 年代后期,随着新技术的不断涌现,人们对于它的发展不再关注了,一些人甚至认为它是一种过时的仪器,连一些专业人士也认为它已经定型,不再发展了。这是一种误解。在工业和科研领域,电桥仍然被广泛地使用着,这是人所共知的事实。但许多人不知道的是,电桥在现代电测量,特别是计量领域仍然发挥着巨大的、不可替代的作用。

国际计量局通告自 1990 年起,启用量子化自然基准,如量子化 Hall 电阻。量子化 Hall 电阻的数值为 $R_n = R_H/n$ (n 为自然数, $R_H = 12.906\text{k}\Omega$)。由于 R_H 是非整数,为实用起见,需要通过比率测量手段把 R_H 变成十进制,国际上采用超导态电流比较仪电桥来实现。超导态电流比较仪原理电桥是基于电流比率的电桥原理^[130],利用在超导态下超导材料的完全抗磁性 SQUID(超导量子干涉器的简称)器件的磁通检测技术来实现的。电桥对现代计量的重要作用可见一斑。再比如中国的直流电阻基准组的量值是通过 Warshawsky 电桥传递的。从计算电容的建立过程来看也可以肯定电桥的作用。计算电容是在静场中一种特殊的电容器,它的两个正交的结构电容

的平均值 $\bar{C}$ 仅与纵向电极长度有关,即 $\bar{C} = \frac{\epsilon}{\pi} \ln 2(L)$ (L 为纵向电极长度, ϵ 为电容的介质系数),

通过长度的数值可以计算出 $\bar{C}$ 电容的数值。可是,对 1m 长的电极,其 $\bar{C}$ 值仅为 $2 \times 10^{-7} \text{pF}$ 。这样一个微小数值的电容量本来是很难实用的,但通过现代的变压器比率臂电桥的作用,使这个微小的电容能够准确地扩大,转换为交流电阻值,再通过电阻的 AC/DC 技术把这个经过计算电容标定的交流电阻转变为直流电阻值,这样就可以对国家的欧姆基准进行绝对测量。其中使用的电桥就有准确度达 1×10^{-7} 的 C—C 电桥和 C—R 电桥。可见现代计量工作绝对离不开高精度的现代电桥,不断地探索和发现新型电桥是必要的。当然有了更科学更准确的电桥以后,有一些古典电桥就会被淘汰,例如就阻抗比率臂电桥而言,大部分都可用变压器比率臂电桥来代替。在 19 世纪末叶和 20 世纪初叶出现的大量频率电桥会被现代频率计量方法和设备所代替。这种淘汰是符合历史规律,但不能因为有某些阻抗比率臂测频电桥被淘汰便断言电桥是没有研究必要的。要知道现代电桥和古典电桥的原理仍然没有改变,只不过从比率臂的角度来说有相当的技术进步而已。用历史唯物论和辩证唯物论去研究电桥是必要的,而且是值得继续研究下去的。

作者纵观了 1843 年以来各个历史时期的电桥发展史,深刻领会到电桥的精华,但又发觉电桥定义的含糊与不统一。由此引起了作者对电桥若干问题的关注,特别是对电桥电路的分析方法,以及新型电桥的探索途径。

作者认为一个同源输入、差值输出指零的两端口复合比率网络便是电桥网络,简称为电桥。电桥具有 $U_{\text{出}}/U_{\text{入}}$ 的传输方程,它表征着比率网络中各阻抗元件的关系。当 $U_{\text{出}}/U_{\text{入}} = 0$ 时,电桥的工作状态称为平衡电桥。通过平衡方程可测出电桥内有关阻抗的数值和参量。作者在研究电桥定义的过程中,曾从两个方面入手,一方面是从电桥的结构原理来研究,即按古典电桥的电路分析法求平衡方程;另一方面从比率网络理论来研究。作者曾对两个分压器或两个分流器的复

合比率网络的比率特性进行分析,发现了被复合的比率网络是一种新型的比率网络^[A1]。通过对这种新型比率网络的异序比率网络的研究,最后发现了双曲线函数电桥^{[A4][A5][A6]}。通过这些研究成果,看到了电桥的比率特性和结构新原理,进一步明确了电桥的复合比率臂的概念,建立了按比率臂分析电桥的方法。用这个比率臂概念分析阻抗比率臂电桥、变压器比率臂电桥、双曲线函数电桥和同轴比率臂电桥,都普遍适用。也就是说把电桥定义为复合比率网络的概念是正确的。还有一个更有说服力的依据:电桥的基本特性之一是电桥的平衡方程不受电源幅值影响,复合比率网络也是不受电源幅值影响的。用比率臂分析方法,实质上是把电桥的桥臂两两组成比率器,包括分压器和分流器,测出两个分压(分流)抽头输出的差值 $\frac{U_{\text{出}}}{U_{\lambda}} = D_{F1} - D_{F2}$,并使 $\frac{U_{\text{出}}}{U_{\lambda}} = 0$ 便可获得相同的电桥平衡方程。同样,从比率臂分析而获得的这个平衡方程所测得的数值,也与电桥电源的幅值无关。证明了用比率臂分析方法研究电桥是很有前途的。

古典的电桥分析方法是按照电桥回路及节点电压去分析四个桥臂上阻抗之间的关系。这种分析方法对现代电桥不必要,因为现代电桥都采用变压器比率臂的结构,比率臂上的电压与绕组的匝数成比例,这是现代电桥的特征。当用桥臂阻抗分析方法时很容易造成用桥臂数量来定义电桥类型的概念(如四臂、五臂电桥等)。

关于电桥的详细分类,本应专门研究,但作者已无力完成此事,只提出几个分类准则供参考。

(1) 以应用目的为第一准则。例如先按直流电桥和交流电桥来分类,然后按电阻测量电桥、电感测量电桥、电容测量电桥和互感测量电桥等分类,方便用户对电桥的选择。

(2) 按电桥的比率臂结构分类。例如阻抗比率臂电桥、变压器比率臂电桥、同轴比率臂电桥及复合阻抗比率臂电桥等。从比率臂的结构可以看出古典电桥和现代电桥的差别,有益于电桥研究。

(3) 从测量方程来分类,所有电桥都具有相同的平衡方程 $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$ 。但不同结构的电桥却具有不同的测量方程(从复数平衡方程中,将实部和虚部分开后获得的方程),从测量方程的差异性可以区别出不同种类的电桥结构。例如 Wheatstone 电桥的平衡方程为 $R_1 R_3 = R_2 R_4$,双曲线函数电桥的平衡方程为 $R_x R_s = R^2$ 。从平衡方程的差异中可以区别出 Wheatstone 电桥和张-赵氏电桥(中国计量科学研究院张功铭和赵复真于 1991 年 IMEKO 会议上提出)。又如 Maxwell 电桥,它的平衡方程的 $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$,其测量方程为 $\frac{L}{C} = R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。

Schering 电桥的平衡方程为 $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$,其测量方程为 $C_1 R_2 = C_2 R_3$ 及 $C_2 R_1 = C_3 R_2$ 。从测量方程可以区别出 Maxwell 电桥和 Schering 电桥的差别。事实上测量方程是电桥精细结构的表达式,是作者提倡的分类方法的依据。

至于那些用符号表示阻抗电桥结构的方法,既繁琐又不便普及,作者对此并不赞赏。

在计算机普及的时代,采用窗口显示和记录的方法是可取的,它尤适于信息检索和虚拟测量。

最后谈谈对电桥的辨识问题。Atkinson 阻抗测量电路被许多学者认为是电桥电路,其实它是两个有独立电源的阻抗比率臂电路,用电位比较法去获得平衡。由于它具有两个电源,测量结果必然与两个电源的幅值有关,违反了电桥的测量结果与电源幅值无关的特点。另一方面,它是采用电位差计测量原理,客观来说 Atkinson 电路介于电位差计电路与电桥电路之间,视电源的结构而定。另外,1975 年 Ildon guilherme 在 R. S. I. Vol. 46, No1. (杂志)提出的“Pseudo-bridge”,连该文作者也认为是一种假的电桥。在我国有人称之为“类电桥”。其实这种电桥完全符合张-赵氏电桥定义。它具有两个电阻比率臂,由同源供电,零值输出。其特殊

之处在桥臂上引入运放器的虚零技术。它的电桥传输方程为 $\frac{U_{\text{出}}}{U_{\text{入}}} = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_3 + Z_4) Z_1} \frac{1}{1 + A\beta^{-1}}$ 。

A, β 为回路增益, 当 $A\beta$ 很大时电桥有线性输出; 当 $U_{\text{出}}/U_{\text{入}} = 0$ 时, $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$ 。符合电桥的定义。作者认为这个“Pseudo 电桥”应当是真实的电桥。产生这种现象显然就是缺乏明确的电桥定义和分类准则所致。可见有关电桥的是非问题, 有赖于对电桥定义的研究。

在 20 世纪中叶曾出现过在一个比率臂中含有运放器的电路, 运放器在比率臂中起到阻抗匹配、隔离负载和移相运算作用, 并通过微机控制达到自动测量的目的。这类测量电路通过在 R_x 上和在 R_s 上复数电压的比较、运算, 自动显示测量结果。这类阻抗测量电路通称为 LCR 测量电路。但也有人把 LCR 测量电路看成 LCR 测量电桥。这个问题在电桥分类研究中有待明确。总之, 分类准确与否会影响到电桥的发展。

还有“Bridged T type Network”的正名问题。在许多翻译文本中把它译为“桥式 T 形网络”及“单 T 形电桥”。这样翻译是不够准确的。从技术上应当译成“旁路 T 形网络”或“分路式 T 形网络”。T 形网络不是电桥, 但在 T 形网络的电源高端和输出的高端加入一个分流阻抗, 组成一个有分流电路的 T 形网络后则成为“Bridged T type Network”, 即阻抗测量电桥。这究竟是语言问题, 还是技术问题? 不管是什么问题, 都应当给予解决。

本书就是对作者多年研究成果的总结。

本书第 1 章的重点是建立正确的电桥定义, 并以此弄清电桥的本质, 区别真假电桥。按电桥比率臂分析方法不仅是本章的一个重要内容, 更重要的是指出按电桥的比率臂分析可以准确定义一百余年来的各种电桥。对一个古典电桥例如 Wheatstone 电桥, 无论用分压器分析方法还是用分流器分析方法都可获得相同的结论。它与按电桥桥臂的分析方法在结果上是一致的。对 Maxwell 电桥用电桥比率臂分析和按桥臂阻抗分析的结果是一致的。对 Blumlein 变压器比率臂电桥, 用比率臂分析法比用桥臂阻抗分析法更为简单。

第 2 章较详细地阐述了一种新型现代电桥, 即双 IVD 比率臂电桥及互检法双 IVD 比率臂电桥^[A16]。这些电桥用于比率的精密的、全面的测量、具有桥臂的阻抗比率与本身的匝数比成正比性质。

第 3 章介绍作者最新的电桥研究成果, 即用同轴绕组 IVD 结构建立起交频 IVD 比率臂电桥, 测量阻抗功耗及其等效电路的电桥^[A9]。

第 4 章和第 5 章介绍电阻型和电容型阻抗增量比率臂电桥系列, 包括电阻中和测量电桥^[A4~A7]。

第 6 章和第 7 章介绍复合阻抗及环形复合阻抗比率臂电桥, 包括 $\langle Z_x + Z \rangle$ 和 $\langle Z_s + Z \rangle$ 复合比率臂取曲线函数电桥系列, 包括电阻型和电容型双曲线函数电桥系列, 即第 I, II, III 和 IV 类双曲线函数电桥^[A2]。

第 8 章介绍 $\langle Z_x + Z_s \rangle$ 与 $\langle Z_s + Z_x \rangle$ 复合并带负载阻抗 Z_L 的全息衰减比率臂电桥系列, 即第 V 类双曲线函数电桥^[A2]。

第 9 章介绍电桥的辨析和分类准则。

第 10 章建立“电磁桥”的新概念。

以上各章表达了本书作者对电桥的探索与创新, 为电桥研究和计量学提供了新的资料。希望通过学术交流开发更多的电桥。

表 1 给出了张功铭、赵复真共同研究成功的电桥一览。

表 1 张-赵氏电桥一览表

序号	名称、用途和特点	电桥电路	平衡方程及测量方程
1	双向平衡法双 IVD 比率臂电桥。测单盘 IVD 的比率。可实现相对检定和绝对检定。其中一个 IVD 比率臂可自校		$\Delta D_x = \Delta D_s$
2	互检法双 IVD 比率臂电桥。测多盘 IVD 的比率。两个 IVD 比率臂相互绝对对检定,以后盘电压作参考电压		零平衡: $(E_x)_i - (E_s)_i = \Delta_{i,i}$ 段平衡: $(E_x)_{i+1} - (E_s)_i + E_{ref} = \Delta_{(i+1),i}$
3	电阻型第 I 类双曲线函数电桥。用于标定电阻应变片(计)。通过复合阻抗比率网络实现应变测量电路的 1/4 桥,避免非线性。		$R_x R_s = R^2$
4	电阻型第 II 类双曲线函数电桥。以正值电阻增量比率网络 $[R + f(\Delta R_0)]$ 代替复合阻抗 $(R + R_s)$ 。消除 R_s 的零位。提高标定应变片的准确度		$R_x R_s = R^2$
5	电容型第 I 类双曲线函数电桥。通过复合电容比率网络实现应变测量电路的 1/4 桥。标定电容型高温应变计,避免非线性		$C_x C_s = C^2$
6	电容型第 II 类双曲线函数电桥。以正值电容增量比率网络 $[C + f(\Delta C_0)]$ 代替复合阻抗 $(C + C_s)$ 。消除 C_s 的零位,提高标定电容型应变计的标定准确度		$C_x C_s = C^2$

续表

序号	名称、用途和特点	电桥电路	平衡方程及测量方程
7	电阻型第Ⅲ类双曲线函数电桥。有两个复合阻抗比率臂 $\langle R+R_x \rangle$ 和 $\langle R_s+R \rangle$ ，等功率、超宽量程。用于大电阻测量		$R_x R_s = R^2$
8	电容型第Ⅲ类双曲线函数电桥。有两个复合阻抗比率臂 $\langle C_x+C \rangle$ 和 $\langle C+C_s \rangle$ ，等功率、超宽量程。用于大电容测量		$C_x C_s = C^2$
9	第Ⅰ类电阻中和比率臂电桥。利用电阻中和原理测量电阻增量，避免热电势影响。用于电阻式传感器标定 (张、赵氏-Blumlein电桥)		$\Delta R_x = f(\Delta R_0)$
10	第Ⅰ类电容中和比率臂电桥。利用电容中和原理测量电容增量，适用于电容型传感器标定 (张、赵氏-Blumlein电桥)		$\Delta C_x = f(\Delta C_0)$
11	第Ⅱ类电阻中和同轴比率臂电桥。利用电阻中和原理测量电阻增量，避免热电势影响。用于电阻式传感器标定。电桥频响良好		$\Delta R_x = f(\Delta R_0)$ $D=0.5$
12	第Ⅱ类电容中和同轴比率臂电桥。利用电容中和原理测量电容增量，适用于电容式传感器的标定。电桥频响好		$\Delta C_x = f(\Delta C_0)$ $D=0.5$

续表

序号	名称、用途和特点	电桥电路	平衡方程及测量方程
13	阻抗匹配 IVD 比率臂差动电桥。可以测量差动应变变量模拟仪,静态和动态电阻应变仪。宽量程、高准确度、高分辨力		$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} D$
14	电阻型第Ⅳ类双曲线函数比率臂电桥。用负值电阻增量箱代替 R, 消除引线电阻影响, 保证在长引线场合的应变, 高温测量、准确度高, AC/DC适用		$R_x R_s = R^2$
15	同轴感应比率臂测功耗电桥, 同时也是测阻抗等效电路电桥。P_x 为耗电器, Z_s 为标准网络和标准等效电路, DVM (数字电压表) 用于测 U_s。当 P_x = P_s 时, 测出 U_s		$P_x = P_s = \frac{U_s^2}{Z_s}$ $D = 0.5$
16	同轴感应比率臂阻抗比较电桥。电桥比率为 1:1, 有等电位保护, 高频特性良好。特别适于大电容比较测量		$Z_x = Z_s$ $D = 0.5$
17	同轴感应比率臂谐振电桥。桥臂比率为 1:1, 等电位屏蔽保护, 高频特性良好。用于 L、C 的绝对测量		$\omega^2 LC = 1$ $D = 0.5$

续表

序号	名称、用途和特点	电桥电路	平衡方程及测量方程
18	测互感器比率的复合电容比率臂电桥。标准比率由电容复合比率网络给定。用电桥法测量互感器的比率,适于高压下测量比率		$\frac{U_H}{U_L} = \frac{U_\lambda}{U_s} [1 - j\omega r C_s]$
19	双 IVD 比率臂位移电桥。电桥具有两个 IVD 比率臂,一个正接的 IVD 接电源,另一个反接的 IVD 接相敏指零仪。准确度高、稳定性好		$\Delta L = f(\Delta M) = f(D)$ D 为 IVD 的比率
20	双 IVD 比率臂测力电桥。利用压磁原理测量力值,在压磁体内的交叉线圈按分压器电路连接。电桥具有双 IVD 比率臂。力 F 以比率 D 分度,准确而且稳定		$F = f(D)$
21	同轴 IVD 万用比率臂微电阻测量电桥。采用万用比率臂测量方法。R_s 为椭圆电阻器,频响良好。同轴 IVD 比率臂频响良好。适于测量开关接触电阻,金属和液体的电导		$\frac{V_x}{R_x} = \frac{V_s}{R_s}$
22	复合电容增量差动比率臂电桥。用来分度差动电容器,电容增量箱。有直接读数的优点,并可在高压下使用		$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{f(\Delta C_0)}{C}$

续表

序号	名称、用途和特点	电桥电路	平衡方程及测量方程
23	同轴 IVD 比率臂测互感电桥。 电桥比率为 1:1。在 S 开路时初级绕组电感为 L_P ，当 S 闭路时，初级绕组电感为 L'_P		$M^2 = L_s(L_P - L'_P)$ $D = 0.5$
24	电容增量比率臂“Bridged T”测电感电桥 (张、赵氏-Tuttle 电桥)		$R_x = \frac{1}{(\omega C)^2 R_s}$ $L_x = \frac{2}{\omega^2 C}$ $\Theta = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C R_s$ $C_1 = C_2 = C$
25	电阻型全息衰减比率臂电桥。 测量衰减量		$\frac{U_{出}}{U_{\lambda}} = D$ $A = -20 \lg D$ $R_x = \frac{1-D}{1+D} R_L$ $R_s = \frac{1+D}{1-D} R_L$
26	电容型全息比率衰减比率臂电桥。测量高电压		$A = -20 \lg D$ $\frac{U_{出}}{U_{\lambda}} = D$ $C_x = \frac{1+D}{1-D} C_L$ $C_s = \frac{1-D}{1+D} C_L$

续表

序号	名称、用途和特点	电桥电路	平衡方程及测量方程
27	电磁桥。具有电位梯度屏蔽空间的孪生 IVD 比率臂,可在高频下绝对测量 IVD 的比率,也可以实现 IVD 两向梯度平衡方法和互检法的相互比对。也可以测定阻抗		相对测定比率: $\Delta D_x = \Delta D_s$ 绝对测定比率: $\Delta D_i = \sum_{i=1}^i \delta_i$ $= \sum_{i=1}^i \left(\Delta_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i \right)$

关于张-赵氏电桥一览表说明如下:

- (1) 表中列出的 27 项电桥科研成果,是作者 40 年来在电学计量、力学计量,无线电计量和传感器计量等专业方面取得的创新成果并且是经过技术检定及长期考验成功的成果。
- (2) 27 项电桥成果分别属于双曲线函数电桥系列,阻抗电桥及阻抗中和电桥系列,双 IVD 比率臂电桥系列,全息比率臂衰减电桥系列,传感器电桥系列和同轴感应比率臂电桥系列,并且相互联系,是名符其实的中国电桥。
- (3) 以张-赵氏冠名于 27 种电桥的理由:首先是按国际惯例和尊重学者知识产权,弘扬民族文化。其次是对科学负责,进一步开展学术交流,推陈出新。最后,还可以作为科学检索的关键词。