

铁路轨道动力 测试技术

曾树谷 编

中国铁道出版社

1988·北京

目 录

绪 言	1
第 1 章 电阻应变测试	3
§ 1—1 电阻应变片的选择和粘贴	3
§ 1—2 组 桥	12
§ 1—3 振子的选择	24
§ 1—4 测定应变波形的标定和结果的修正	28
第 2 章 轮轨相互作用荷载的测试	40
§ 2—1 车轮作用到钢轨上的垂直力 P_1 、 P_2 的测试	41
§ 2—2 车轮作用到钢轨上的水平力 H 的测试	68
§ 2—3 车轮作用到钢轨上的水平纵向力 L 的 测试	85
第 3 章 轨道各部件动力效应的测试	89
§ 3—1 钢轨作用在轨枕上的垂直压力 R 、水 平推力 F 和纵向力 i 的测试	89
§ 3—2 轨道各部件位移的测定	104
§ 3—3 道床应变和基面应力的测试	127
第 4 章 轨道振动的测试	145
§ 4—1 轨道振动加速度与轨道破坏	145
§ 4—2 加速度传感器	148
§ 4—3 轨道测试中加速度传感器的选择	170
§ 4—4 加速度传感器的安装	178
§ 4—5 轨道振动测量用的放大、记录和分析 设备	180

第 5 章 轨道基本参数的测试	182
§ 5—1 道床系数 C 和道床变形模量 M	182
§ 5—2 轨道刚度 β 及钢轨基础弹性系数 u 的 测试	187
§ 5—3 轨道振动阻尼换算质量及动弹性模量 的测试	195
§ 5—4 道床密实度的测定	214
第 6 章 测试数据的整理和分析	221
§ 6—1 数据判读和采样方法	221
§ 6—2 异常数据的取舍	231
§ 6—3 概率密度函数	236
§ 6—4 高斯 (正态) 分布	240
§ 6—5 测量误差、测试数据的统计特征及参 量最大可能值的估计	245
§ 6—6 差异检验 [73]	251
§ 6—7 相关分析	254
§ 6—8 实验公式的建立 [73]	257
参考文献	269

绪 言

铁路轨道是一个长大工程结构。其基本的物理力学参数如道床密实度、道床脏污率、道床变形模量、道床阻力、道床阻尼、钢轨基础弹性系数、轨道横向刚度、钢轨支点弹性系数等，都因受轨道使用年限、地质情况、气候条件及线路养护水平等多种因素的影响而因时、因地而易，对于某种给定的轨道类型来说各参数值总是在一定的范围内变化。作用在轨道上的荷载，也因受机车车辆的结构、车辆装载、司机操作水平、行车速度、车轮圆顺程度、轨面平顺性及轨下基础弹性的均匀性等多种因素的影响而带有强烈的随机性。因此在列车作用下，在轨道中所引起的各种动力效应(*Dynamic Response*)，包括轮轨之间及轨道各部件之间的相互作用荷载，轨道各部件的位移、应力、应变、振动等也是随机的。轨道结构的各种计算理论，都是以一定的力学模型及给定的荷载参数和轨道参数为前提，其计算结果只能反映一定的轨道结构在给定的运营条件下，各轨道动力效应值的大致水平和量级，不可能给出某次行车在某个轨道断面上的真实值，这往往给许多实际工程问题的解决，带来一定的困难。

近年来，随着试验技术及电测技术的发展，国内外广泛采用现场测试的办法，直接求得各有关参数及动力效应的数值，从而为轨道技术的发展起到了推动的作用。

轨道的基本物理力学参数直接表征了轨道所处的状态及轨道承受列车荷载的能力。而行车的安全、轨道的失效或破

坏，又总是和一种或几种动力效应有关。因此通过测试，就可能为估算轨道的承载能力，挖掘运输潜力；检验轨道的工况，保证行车安全；了解轨道所处的状态，合理安排轨道修理，实现轨道全面质量管理提供第一手资料。

轨道是一个复杂的超静定结构。列车作用下的各种动力效应，不单和轮轨相互作用的动力过程有关，而且还和轨道的结构状态及维修状态有关，因此在作测试时，尽量不要改变轨道原有的状态。如果因埋设、安装测试元件而必须破坏原有的轨道状态时，则这些工作必须提前进行。提前的时间视线路的行车条件而定，要求在正式测试之前，通过列车的运行和轨道作业，使轨道恢复到原有的状态。如果要求在某种人为的行车条件或轨道条件下进行轨道动力效应的测试，则在这种人为条件以外的轨道条件也应尽量保持原状。

前面已经指出，轨道基本物理力学参数及轨道动力效应的数值，都因受多种因素的影响而有一定的离散性，因此每个参数的测试，都要求沿轨道布置一定数量的测点，并且每个测点都要求有一定数量的观测次数，最后求得该参数值的统计特征，以避免测定结果的片面性和局限性。

此外，轨道测试的各项标定工作最好是在轨道、元件、仪器完全保持测试状态的条件下在现场进行。如果必须在室内进行标定，也应保持元件、仪器的工况与现场测试时尽量一致。这些都是进行轨道测试所必须遵守的一些基本要求。

第 1 章 电阻应变测试

在轨道测试中，电阻应变测试技术应用极为广泛。钢轨应力、扣件应力、轨枕应力等参数的测试，是最普通的电阻应变测试。轨枕压力测试垫板，道床应变盒，基面应力盒，电阻式加速度计均为电阻应变式传感器。以钢轨作为传感元件，进行轮轨垂直力，轮轨水平力，轨枕压力的测试时，也是利用应变仪的桥臂特性，通过不同的贴片和组桥方式，使用应变仪进行测定的。电阻应变测试技术是轨道测试技术的支柱之一，因此在介绍轨道基本物理力学参数及轨道动力效应的测试技术之前，有必要把电阻应变测试的一些基本环节，作一简要说明。

§ 1—1 电阻应变片的选择和粘贴

电阻应变测试是以应变片作为传感元件，所以应变片的合理选择和粘贴，会直接影响测试的结果。

一、应变片的选择

目前在轨道测试中常用的应变片就基底材料分，有纸基和胶基两种。按敏感栅的形式分有丝式应变片（图 1—1—1）、箔式应变片（图 1—1—2）和专门用途的应变片（图 1—1—3）及应变花（图 1—1—4）等。按栅丝端头的联结方式分，有回绕式和短接式两种。根据不同的使用要求，应变片一般按下述原则进行选择。

（一）基底材料

轨道测试一般是在常温下进行，所以可采用纸基片。它

的优点是易于粘贴，价格比较便宜。特别是当被测物体粘贴表面为弧形时，由于纸基片的基底薄，由贴片时应变片的初始弯曲所造成的应变片阻值的变化小，易于在各桥臂电阻之间选择、配对。因此在弹条扣件、接头螺栓孔内壁、钢轨上

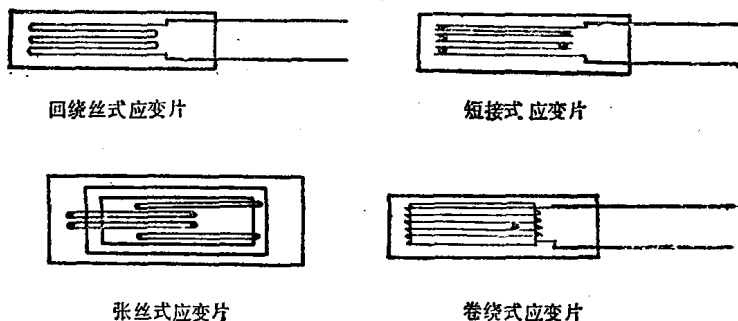


图 1-1-1

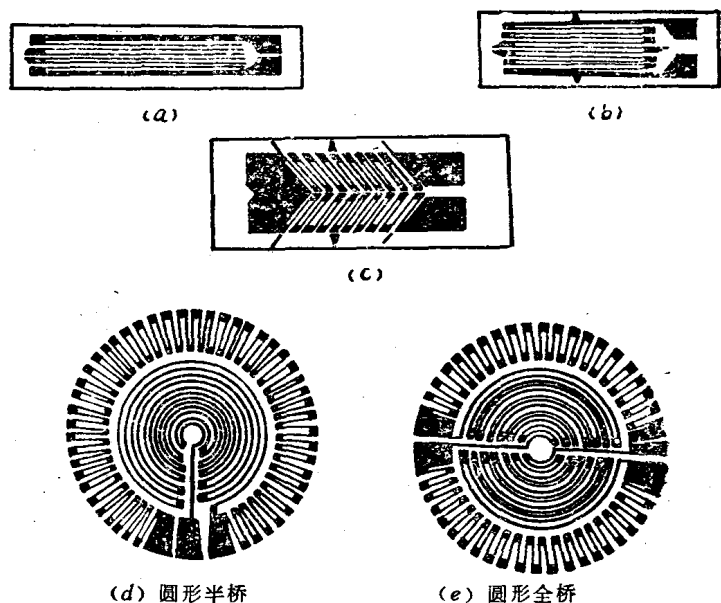


图 1-1-2 箔式应变片

下颚、道床应变盒的马蹄形弹簧等弧形表面贴片时，宜用纸基片。胶基片的热稳定性较好，又有较好的防潮性能，故在气候潮湿的地区以及对长期稳定性要求高的场合宜采用胶基片。

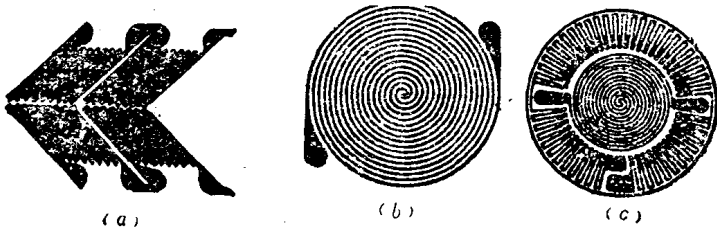


图 1—1—3 专门用途的电阻应变片

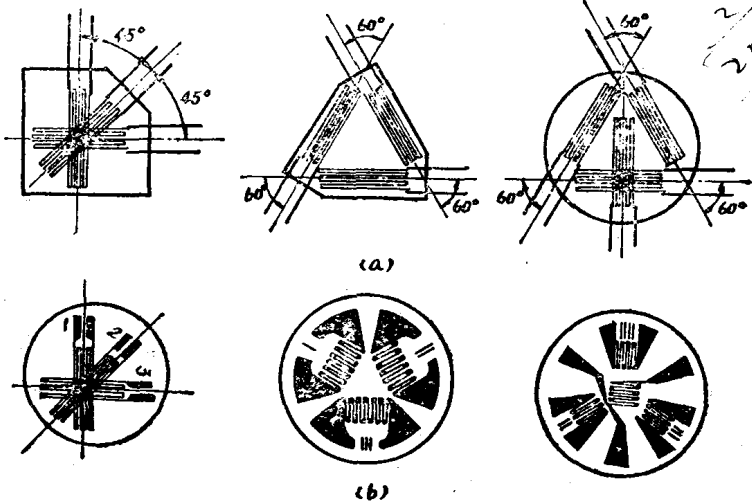


图 1—1—4 应变花

（二）栅丝的材料

在常温下，康铜丝的灵敏系数稳定，在弹性范围和塑性范围都保持不变，而且温度系数小，故在轨道测试中应用最广。

（三）敏感栅形式

1. 普通丝式

丝式应变片基底薄（一般在0.03mm左右），粘贴性能好，能保证有效地传递应变。同时稳定性也好，在轨道测试中使用相当广泛，宜于做成各种特殊用途的应变片（如电阻式加速度计中使用的张丝式应变计）。

2. 回绕丝式

回绕丝式应变片由于弯头的影响，横向效应较大，在测定钢轨等处于复杂应力情况下的应变时不宜采用。

3. 短接丝式

短接丝式应变片可以克服回绕丝式应变片横向效应大的缺点，但由于焊点多，在冲击、反复动应变条件下，寿命短，易在焊点处出现疲劳破坏。

4. 箔式

箔式应变片因敏感栅薄而宽，截面为矩形，故粘贴面积大，粘贴情况好，传递变形的性能较丝式为好。如：敏感栅弯头的横向部分较宽，因而横向效应可以忽略；有较大的散热能力，因而可提高桥压，增大桥路输出；蠕变，机械滞后较小；疲劳寿命高；容易做成特殊形状的应变片和应变花，因而有逐步取代丝式应变片的趋势，在轨道测试中应用越来越广。但是当箔式应变片敏感栅的腐蚀质量不高，因而带有缺口或毛刺时，则应变片的寿命将缩短，故在作长期高频应力测量时，最好使用机械强度较高，抗冲击能力和疲劳寿命较长，焊头经过特殊处理的胶基丝式应变片。

5. 应变花

应变花主要用于作两向或三向应变测量，这在我们作轮轨垂直力和水平力的测量中就会用到。

(四) 应变片的标距

应变片标距的选择一般取决于被测物体的材料特性、应力梯度及动应变传播特性等方面。

对于钢轨扣件及各种由金属制成的电阻应变式传感器，因被测体的弹性模量高且材质均匀，最好使用小标距的应变片，以便测到“点”应变（应变片反映的应变是应变片标距内的平均应变）。但应变片标距过短，不仅制作困难，粘贴不便，而且不易保证贴片的正确位置和方向，因此在一般情况下，钢轨扣件等金属部件上使用的应变片标距以5mm为宜。

对于混凝土轨枕、墩台等混凝土构件，由于材料的非匀质性，在外力作用下骨料的应变较小，但水泥砂浆的应变较大，如果应变片的标距过小，测出的仅是石子或砂浆的应变，这必将造成较大的误差，因此应当增大应变片的标距，以尽可能准确地测得其平均应变。但应变片过长，不仅制作和粘贴困难，而且会由于应力梯度的影响而导致测点应力的失真。实践表明，应变片标距 L 和混凝土骨料最大粒径 d_{max} 之间以满足下列关系时测试效果最好，

1. 对于一般中等骨料（指粒径 $d_{max}=20\sim40\text{mm}$ ）的混凝土， $L\geq 2d_{max}$ 。

2. 对于细骨料（指粒径 $d_{max}<20\text{mm}$ ）混凝土，为了更准确地反映其平均应变，常采用 $L\geq 4d_{max}$ 。

在混凝土轨枕应变的测试中，一般要求应变片的标距不小于40mm。

应力梯度是选择应变片标距时应当考虑的重要因素。在

测定钢轨螺栓孔周边，轨腰垂向等部位的应变时，由于这些部位的应力梯度很大，通常采用标距为2mm的应变片。在进行钢轨、扣件等部件的应力分布分析时，为了测得“点”应力，通常也使用这种小标距的应变片。

高频荷载作用下，结构内部的应变是以应变波的形式在弹性体内传播的，故应变片标距的选择将取决于应变波的波长。根据分析，应变片的标距越大，测量的误差也越大。当应变片的标距和应变波的波长相等时，测量误差可达100%。如果要求测量误差小于1%，则应变片标距和应变波波长之比应小于0.05。因为应变波的波长取决于波在弹性体内的传播速度和荷载作用的频率。根据测量误差小于1%的要求，在钢材和混凝土中荷载频率和应变片标距的对应关系列于表1—1—1。这一点在进行轨道接头部位或轨面有不平顺的钢轨、轨枕等部件的应力测试时，应加以考虑。

表1—1—1 应变片标距与荷载频率对照表

被测材料	传播速度 m/s	应变片标距 (mm)							
		1	2	5	10	15	30	100	200
		荷载频率 (kHz)							
钢 材	5000	250	125	50	25	16.6	8.3	2.5	1.3
混凝土	3000	150	75	30	15	10	5.0	1.5	0.8

此外，在某些电阻应变式传感器中，由于粘贴应变片处的位置受到限制，而必须采用小标距应变片。

(五) 应变片的阻值

国产应变片的阻值多在60~400Ω之间，以120Ω的最为常见，也有少数单位生产500和1000Ω的应变片。因为应变

仪电桥的桥臂电阻都是按 120Ω 设计的,所以无特殊要求时,最好使用 120Ω 的应变片。采用阻值较大的应变片,当电桥桥臂上的电抗分量较大时,有利于提高电桥的灵敏度;在被测物体散热性能较差时,有利于减小热漂移;在测量导线较长而所经途径的温度变化较大时,有利于减小由于导线而产生的零点漂移。而采用阻值较小的应变片(如 60Ω),则有利于减小由于应变片绝缘电阻下降而产生的零点漂移。这些都可具体情况加以考虑。当采用非 120Ω 的应变片,而又用仪器的内标定线路标定应变时,应该根据桥路的具体情况,考虑对测定值进行修正。

(六) 灵敏系数 K

动态电阻应变仪多按 $K=2$ 进行设计,所以一般应尽量采用 $K=2$ 的应变片,否则应考虑对测试结果进行修正。静态电阻应变仪有灵敏系数调整盘,只要把盘上的读数调整到应变片的灵敏系数,就可直接读出应变值而不需修正,所以对灵敏系数 K 值可以不加限制。

二、应变片的粘贴

粘贴应变片之前应对被测物体的表面作打磨、清洁处理。对于金属表面应先用细砂轮或角向磨光机作表面除锈和磨平,再用细砂布按与贴片成 45° 角的方向进行抛光,一般要求光洁度达 ∇_4 左右。打磨面的尺寸应考虑到涂敷防潮层及粘贴引线端子的要求,一般应在应变片四周多出 $40\sim 60\text{mm}$ 。对于混凝土表面,应先作表面清洁,用刷、洗等办法除去表面及孔眼中的浮浆和污物,待表面晾干后再用丙酮、酒精擦洗,以除去表面油污,然后再用环氧树脂砂浆将表面的凹坑及孔眼填平。环氧树脂砂浆的配合比应根据与混凝土弹性模量相等或相近的原则,按表1—1—2的要求配制。混凝土轨枕的弹性模量大体为 $3.5\times 10^4\text{MPa}$ 左右,故砂浆大体可

按环氧树脂:石英砂 = 1:5.0 配制。待填料干固后再用细砂布(纸)进行表面研磨,以达到表面连续、平整、光滑。研磨后的表面再用棉球浸丙酮或酒精揩洗,以除去浮在表面上的金刚砂及污物,待表面干燥后,再用环氧树脂涂刷防水层。通常防水层的厚度在0.1~0.2mm,不应超过0.3mm,否则会由于应变滞后,防水层不同深度处的变形不一致,而导致实测应变值减小。混凝土表面研磨和防水层的面积应比应变片四周大50~100mm。

表1—1—2 环氧树脂石英砂浆的弹性模量和泊松比

重量配合比 环氧树脂:石英砂	抗 压		抗 拉	
	弹性模量 (MPa)	泊 松 比	弹性模量 (MPa)	泊 松 比
1:0.0	0.412×10^4	0.5	0.337×10^4	0.429
1:1.5	0.818×10^4	0.334	0.970×10^4	0.289
1:2.0	0.870×10^4	0.303	1.160×10^4	0.280
1:4.0	1.240×10^4	0.231		
1:5.0	1.25×10^4			

在正式贴片前要测量每一应变片的真实阻值,并据需要进行配对或组桥。名义阻值相同的一盒应变片其真实阻值有一定的离散性,如果不事先测量、配对,贴好后会因阻值不能平衡而前功尽弃。另外,贴片前要检查胶水有无浑浊、变稠、结块、沉淀和失去粘性等变质现象,必要时,要作贴片试验,以判明胶水质量的可靠性。

在上述准备工作完成之后,即可按下述步骤进行贴片:

1. 定位放线

用划针在处理好的表面按预定的贴片位置轻轻划出应变片的中心位置及贴片方向,同时,要在应变片上标出敏感栅

的中心位置和栅丝的方向（特别是在小标距应变片时）。

2. 清洗表面

用脱脂棉浸丙酮由里至外清洗贴片表面，直至棉球无污迹为止，再用棉球擦干。

3. 贴片

把胶水涂在应变片背面，并保证背面全部浸湿，待胶稍干而没有失去流动性之前，按划好的位置和方向，将应变片贴在被测物表面，先轻轻压平，再盖上一层塑料薄膜，用手指通过薄膜沿一个方向挤压，赶出多余的胶液和气泡，再用大拇指按在应变片上，均匀地施加压力，使应变片牢牢地粘着在被测物的表面。

4. 贴片胶的干固

随着所用胶液的不同，干固的条件各异。有的需要用红外线灯泡或其它方式加温至 $40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 才能干固（如丙酮胶），有的可在常温下干固而不需加温（如502胶）。干固的时间随胶液及环境温度的不同异差也大，因而不能作统一规定。应变片的绝缘电阻是鉴别胶液干化程度的指标。充分干固的常温粘结剂的绝缘电阻可达 $1000\text{M}\Omega$ 以上，因此实测中常以绝缘电阻 $1000\text{M}\Omega$ 作为判断胶液是否完全干固的标准。

5. 焊接引出线

不论是进行金属还是混凝土的应变测量，总是先在应变片引出线的方向粘上绝缘端子，再把应变片的引出线套上绝缘套管，焊在端子上，再由端子引出连接线，连接线应用金属片或胶布粘牢在被测物体上。

6. 贴片质量检查

贴片质量是保证测试质量的关键，如果出现“假粘”现象（粘贴不牢），就会使桥路的输出灵敏度降低。当利用电桥的加减特性进行测量时，会由于其中某些应变片的“假粘”

而达不到预期的加减效果，从而测不到预期的参量。

检查应变片“假粘”的办法是：把贴好的应变片按半桥或全桥接入静态电阻应变仪，并调节仪器的读数盘使指针居中。然后用大姆指按压应变片的栅丝部分，要求指针的偏转不得大于 $10\sim 15\mu\epsilon$ 。指针偏转太大，表示片子粘贴不牢，因而手指按压时，应变丝有很大的阻值变化。

7. 防潮处理

防潮处理是电阻应变测量中最重要的一环，它往往影响到整个测试的成败。应变片及其引出线，绝缘端子及邻近绝缘端子的部分连接线都要涂防水防潮剂，并保证周边密封，以保持应变片的绝缘电阻值。常用的防潮剂有：环氧树脂类防水涂料、橡胶类防水剂、脂类防水剂、石蜡类防水剂、火漆防水剂等。防水防潮剂的厚度应适当，太薄不易保证防潮效果，太厚则自重过大，特别是当测试面为垂直面或朝下的底面时，在列车荷载影响下容易脱落，所以厚度以 $2\sim 3\text{mm}$ 为宜。

§ 1—2 组 桥

贴好的应变片要按一定的方式组成测试桥路，接入应变仪。轮轨垂直力、轮轨水平力、轨枕压力的测试，就是应用应变仪桥路的桥臂特性来实现的。另外，当应变片的阻值不是标准值 120Ω 时，需要对测试结果进行修正，这些都需要对应变仪的电桥有一定的了解。

一、电桥变换原理

根据供桥桥压的性质，电桥可分为直流电桥和交流电桥，但其变换原理是一致的，故以直流电桥为例，介绍其变换原理。

(一) 电桥输出桥

应变仪中使用的电桥主要有两类，即电压桥（图1—2—1）和功率桥（图1—2—2）。电压桥的变换原理最简单，但它仅适合于负载为无限大的情况。我国生产的Y6D-2动态电阻应变仪，其桥路输出直接通过电容接到放大管的基极，故桥路负载和桥臂电阻相比，可视为无限大，即属此类。

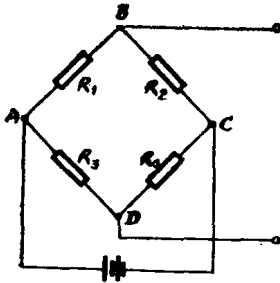


图1—2—1 电压桥线路

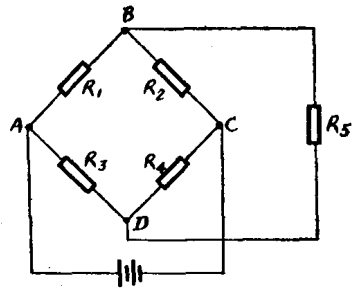


图1—2—2 功率桥线路

1. 电桥的平衡方程式

由图1—2—1可知，若忽略电源内阻，电桥负载上的电压降 u_{BD} 为：

$$\begin{aligned} u_{BD} &= u_{AB} - u_{AD} \\ &= E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \\ &= \frac{E(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1-2-1) \end{aligned}$$

若 $u_{BD} = 0$ ，则电桥处于平衡状态，称为平衡电桥。

$u_{BD} = 0$ 的必要条件是：

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

或

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (1-2-2)$$

由此可知，平衡电桥具有如下性质：

(1) 任意一臂之阻值可由其余三臂之阻值推算。

(2) 平衡等臂 (或对称) 电桥相邻臂的阻值发生等量的变化, 不会破坏电桥的平衡。正是利用这一性质来实现桥路的温度补偿。

(二) 电桥的输出电压

在电阻应变测量中, 必须考虑温度补偿, 因而测量电路只能采用等臂或对称型式。按照相邻臂匹配情况的不同, 其输出可以分以下三种情况:

1. 以输出为对称的电桥

由图 1-2-1 可知, 此时有 $R_1 = R_2 = R$, $R_3 = R_4 = R'$ 。当 $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R$, 且 $\Delta R \ll R$ 时, 由式 (1-2-1) 可得出输出电压 Δu 为

$$\Delta u = \frac{ER' \Delta R}{4RR' + 2R' \Delta R} = \frac{E \Delta R}{2(2R + \Delta R)}$$

因 $\Delta R \ll R$, 故可略去分母中的 ΔR 项, 得

$$\Delta u = \frac{E \cdot \Delta R}{4R} = \frac{E}{4} K \cdot \varepsilon \quad (1-2-3)$$

2. 以电源为对称的电桥

由图 1-2-1 可知, 此时有 $R_1 = R_3 = R$, $R_2 = R_4 = R'$, 当 $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R$, 且 $\Delta R \ll R$ 时, Δu 为:

$$\Delta u = \frac{E \cdot R' \cdot \Delta R}{(R + R')^2 + \Delta R(R + R')}$$

略去分母中的 ΔR 项, 得 Δu 为

$$\Delta u = \frac{E \cdot R' \cdot R}{(R + R')^2} K \cdot \varepsilon \quad (1-2-4)$$

3. 等臂电桥

由图 1-2-1 可知, 此时有 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 当 $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R$, 且 $\Delta R \ll R$ 时, Δu 为