

第一章

绪 论

XULUN

第一节 桥梁试验的意义与分类

在科学技术的发展过程中，科学试验起着非常重要的作用。从土木工程设计计算理论的演变历史来看，每一种理论体系的建立和发展，一般都和大量的科学试验、生产实践密切联系。试验研究对于推动和发展结构设计计算理论、解决生产实践中出现的疑难问题往往起到了重要的作用。

在桥梁工程的发展中，桥梁试验也起到了同样重要的作用。大量的试验研究，成为促进桥梁结构设计计算理论、设计方法不断发展的重要因素之一。桥梁试验是对桥梁原型结构或桥梁模型结构直接进行的科学试验工作，包括试验准备、理论计算、现场试验、分析整理等内容的一系列工作。桥梁原型试验也称之为桥梁检测，其目的是通过试验，掌握桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态，判定桥梁结构的承载能力和使用条件，检验设计与施工质量；桥梁模型试验的目的是研究结构的受力行为，探索结构应力、应变的内在规律，为设计施工服务。随着交通事业的蓬勃发展，新结构、新材料、新工艺的不断涌现，桥梁工程的试验技术日益受到人们的重视，并不断得到发展和提高。桥梁试验的任务主要包括以下几个方面。

1. 确定新建桥梁结构的承载能力和使用条件。对于重要的桥梁结构在建成竣工后，通过桥梁试验考察该桥的施工质量与结构性能，判定桥梁结构的实际承载能力，为竣工验收、投入运营提供科学的依据。对于新型或复杂的桥梁结构，通过系统的桥梁试验，可以掌握结构在荷载作用下的实际受力状态，探索结构受力行为的一般规律，为充实和发展桥梁结构的设计计算理论积累科学的资料。

2. 评估既有桥梁的使用性能与承载能力。对于既有桥梁结构在运营期间，因受水害、地震等自然灾害而损伤，或因设计施工不当而产生严重缺陷，或因使用荷载大幅度增长而严重超过设计荷载等级，通常通过桥梁试验来评估既有桥梁的使用性能与承载能力，为既有桥梁养护、加固、改建或限载对策提供科学的依据。这对于缺乏完整技术资料的既有桥梁更为必要。

3. 研究结构（构件）的受力行为，总结结构受力行为的一般规律。随着桥梁工程的不断发展，新结构、新材料、新工艺的推广应用，原有的规范、规程往往不能适应工程实践的要求。为了修改、完善既有的规范、规程，指导设计与施工工作，就需要进行大量的研究性试验。

在实际工作中，桥梁试验的种类很多，按照试验的目的与要求分类，可分为科学研究性试验和生产鉴定性试验。研究性试验的目的是为了建立或验证结构设计计算理论和经验公式，

或验证某一结构理论体系中的科学假设判断的可靠性。研究性试验一般把对结构或构件的主要影响因素作为试验参数，试验结构的设计与数量均应按照具体研究目的的需要确定。根据实际情况，试验可在原型结构上进行，也可在模型结构上进行。研究性试验一般多采用模型结构在专门的试验室内进行，利用特定的加载装置以消除或减少外界因素的干扰影响，同时突出所要研究的主要因素。通过系统的模型试验，对测试资料数据加以分析论证，从而揭示出具有普遍意义的规律。生产鉴定性试验具有直接服务于生产实践的意义，一般以原型结构作为试验对象，在现场进行试验。根据一定的规范、标准的要求，按照有关设计文件，通过试验来确定结构的实际承载能力、使用性能和使用条件，检验设计施工质量，提出桥梁养护、加固、改建、限载对策，有效地保证桥梁结构的安全使用。生产鉴定性试验也称之为桥梁检测，包括静载试验、动载试验、无损检测与长期监控测试四个方面。在桥梁试验中，原型试验存在费用高、期限长、测试环境多变等不利的影响因素，如对一些大型桥梁进行多因素的研究性试验，有时是难以实现的。因此，结合原型桥梁进行模型试验往往成为科技工作者的一种有效手段，可以更为方便全面地研究主要影响因素之间的关系，探索结构行为的普遍规律，推动新结构、新材料、新工艺的发展与应用。

根据试验荷载作用的性质，桥梁试验可分为静荷载试验和动荷载试验。桥梁静载试验是将静止的荷载作用在桥梁上的指定位置而测试结构的静力位移、静力应变、裂缝等参量的试验项目，从而推断桥梁结构在荷载作用下的工作性能及使用能力。动载试验是利用某种激振方法激起桥梁结构的振动，测定桥梁结构的固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数、行车响应等参量的试验项目，从而判断桥梁结构的整体刚度、行车性能。静载试验与动载试验虽然在试验目的、测试内容等方面不同，是两种性质的试验，但对于全面分析掌握桥梁结构的工作性能是同等重要的。

就试验对结构产生的后果来说，桥梁试验可分为破坏性试验和非破坏性试验。一般情况下，鉴定性试验多为非破坏性试验。但在某些情况下为了达到预定的试验目的，往往需要进行破坏性试验，以掌握试验结构由弹性阶段进入塑性阶段甚至破坏阶段时的结构行为、破坏形态等试验资料。实际上，原型结构的破坏试验，不论在费用上还是在方法上都存在一些具体的问题，特别是在结构进入破坏阶段后试验是比较困难的。因此，破坏试验一般均以模型结构为对象，在实验室内进行，以便能够较为方便可行地进行加载、控制、量测、分析，从而总结出具有普遍意义的规律，推广应用于原型结构。

按试验持续时间的长短，可分为长期试验和短期试验。鉴定性试验与一般性的研究试验多采用短期试验方法，只有那些必须进行长期观测的现象，如混凝土结构的收缩和徐变性能、桥梁基础的沉降等，才采用长期试验方法。此外，对于大型桥梁结构或新型桥梁结构常常采用长期观测或组织定期的检测，以积累这些结构长期使用性能的资料。

总之，结合具体的试验目的及要求，可选用一种或几种试验方法。在选择时应讲求经济成本，一般能用模型代替的就不搞大规模的原型试验，通过非破坏性试验可以达到试验目的的，就不做破坏性试验。

第二节 桥梁检测的工作内容

桥梁检测的工作内容比较多，涉及到很多方面。从方法上来讲，分为静载试验、动载试验和无损检测；从时间上来看，分为短期试验和长期试验；从进行时期来看，分为成桥试验和施工

阶段监测控制。一般情况下，桥梁现场检测可分为三个阶段，即准备规划阶段、加载与观测阶段和分析总结阶段。

准备规划阶段是桥梁检测顺利进行的必要条件。该阶段工作包括桥梁设计文件、施工记录、监理记录、原试验资料、桥梁养护与维修记录等桥梁技术资料的收集。桥梁现状如桥面系、承重结构构件、支座、基础等部位的表观检查、设计内力计算、加载方案制定、量测方案制定、仪器仪表选用等方面，也包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试等现场准备工作。可以说，检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节。这一阶段的工作是在各项准备工作就绪的基础上，按照预定的试验方案与试验程序，利用适宜的加载设备进行加载，运用各种测试仪器，观测试验结构受力后的各项性能指标如挠度、应变、裂缝宽度、加速度等，并采用人工记录或仪器自动记录手段记录各种观测数据和资料。有时，为了使某一加载、观测方案更为完善，可先进行试探性试验，以便更完满地达到原定的试验目的。需要强调的是，对于静载试验，应根据当前所测得的各种技术数据与理论计算结果进行现场分析比较，以判断受力后结构行为是否正常，是否可以进行下一级加载，以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全。这对于存在病害的既有桥梁结构进行试验时尤为重要。

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程。原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料，受各种因素的影响，一般显得缺乏条理性与规律性，未必能深刻揭示试验结构的内在行为规律。因此，应对它们进行科学的分析处理，去伪存真、去粗取精，综合分析比较，从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号，有时还需按照数理统计的方法进行分析，或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理，或按照有关规程的方法进行计算。这一阶段的工作，直接反映整个检测工作的质量。测试数据经分析处理后，按照相关规范、规程以及检测的目的要求，对检测对象做出科学的判断与评价。全部检测工作体现在最后提交的试验研究报告中。

混凝土无损检测技术是桥梁检测技术中一项重要的内容。所谓混凝土无损检测技术，是在不破坏混凝土内部结构和使用性能的情况下，利用声、光、热、电、磁和射线等方法，测定有关混凝土性能的物理量，推定混凝土的强度、缺陷等的测试技术。混凝土无损检测技术与破坏试验方法相比，具有不破坏结构的构件、不影响其使用性能、可以探测结构内部的缺陷、可以连续测试和重复测试等特点。应用混凝土无损检测技术，可以检测混凝土的强度、弹性模量、裂缝的深度和宽度，可以检查钢筋的直径、位置和保护层厚度，并可以探知混凝土的碳化程度、钢筋的锈蚀程度和混凝土构件的尺寸等参数。混凝土无损检测技术，对于进行施工质量检查与管理，进行既有结构的养护维修管理，评定既有混凝土结构的强度、耐久性及损伤程度是非常重要的。

对于大跨度桥梁，由于施工周期长，外界因素变化较大，为了确保施工能够较准确地实现设计意图，避免一些随机因素如温度、湿度、材料参数、施工误差对桥梁施工过程和成桥后状态造成过大的影响，就需要在施工过程中对每一施工阶段桥梁的线形、应力、内力等参数进行实时在线监测控制，逐阶段与设计目标值进行比较，并预测下一施工阶段这些参量的变化态势，以便必要时修正设计计算参数，采取控制调整措施，以逼近设计目标值，这就是施工控制。施工控制对于大跨度桥梁的建造具有非常重要的意义。

混凝土桥梁的一些时效因素如收缩、徐变、基础沉降、温度变化，往往使桥梁结构产生附加

内力，可能造成桥面线形不平顺，严重时危及桥梁结构的安全运营。为了能够及时准确地掌握这些时效因素对结构的影响程度，了解这些时效因素对结构影响的变化趋势，就需要在一个相对较长的时期内定期测量桥梁结构的线形、应变、内力、裂缝等参量，并对这些参量进行综合分析，以判断桥梁结构的实际状态，这类测试我们称之为长期监控测试。除此之外，对于一些重要桥梁或新型桥梁结构也常常采用定期检测的方法来积累这些结构长期使用性能的资料，以使规范更臻完善。

综上所述，桥梁检测是一门直接服务于工程实践的技术学科，涉及到桥梁的设计计算理论、试验测试技术、仪器仪表性能、数理统计分析、现场试验组织等方面，具有较强的综合性、应用性和复杂性。近 20 年来，随着桥梁工程的飞速发展，新结构、新材料、新工艺的不断涌现，桥梁荷载的不断趋于增大，以及大批既有桥梁结构进入老化期，因此桥梁检测工作就愈显重要，并对其提出了更高、更全面的要求；同时，随着自动化技术的不断发展及计算机的普及应用，使得测试技术、分析手段也取得了长足的进步。完全可以相信，桥梁检测将进一步地推动桥梁建设事业的发展，为确保桥梁安全运营、进行科学养护起到更加重要的作用。

第二章

桥梁结构试验的量测技术

QIAOLIANGJIEGOUSHIYANDELIANGCCEJISHU

第一节 概述

量测技术、仪器设备、测试元件是桥梁结构试验的重要技术保障。量测技术的科学性、准确性直接关系到桥梁结构试验能否达到预期的目的。在桥梁静载、动载试验中，测试的内容一般包括以下几个方面。

1. 作用力的大小 包括试验荷载的大小、一些构件的内力、支座反力、推力等的大小。
2. 结构截面上各种应力的分布状态及其大小。
3. 结构的各种静态变形 包括水平位移、竖向挠度、相对滑移、转角等。
4. 结构局部的损坏现象如裂缝的分布及其宽度、深度等。
5. 在动荷载作用下 要测定结构的动应力 或测定结构的自振特性、动挠度、加速度、衰减特性等。

为了测定上述的各项数据，在进行桥梁结构试验时需要使用相应的检测仪器，并要掌握量测仪器的基本性能和测量方法。

一、检测仪器的分类

测试仪器的分类方法很多，较为常用的分类方法有以下几种。

1. 按仪器的工作原理 分为机械式测试仪器、电测仪器、光学仪器、声学仪器、复合式仪器、伺服式仪器等。
2. 按仪器的用途 分为测力计、应变计、位移计、倾角仪、测振仪等。
3. 按测定的方法：分为平衡式和非平衡式。
4. 按结果的显示与记录方式 分为直读式、自动记录式、模拟式、数字式。
5. 按照仪器与结构的相对关系 分为附着式、接触式、手持式、遥测式等。

一般地，桥梁结构检测常用的仪器有电测仪器、光学仪器和机械式测试仪器。光学仪器如精密水准仪、全站仪等在测量学里已经详细地介绍了，本章主要介绍电测仪器和机械式测试仪器。

二、仪器的性能指标

仪器的性能指标一般包括以下几个方面。

1.量程（测量范围）：仪器的最大测量范围叫做量程。如百分表的量程一般有 5cm 和 10cm 千分表的量程有 3mm 和 5mm。

2.最小分度值（最小刻度）：仪器指示装置的每一最小刻度所代表的数值叫做最小刻度。百分表的最小刻度为 0.01mm 千分表的最小刻度为 0.001mm。

3.灵敏度：被测结构的单位变化所引起仪器指示装置的变化数值叫做灵敏度。灵敏度与最小刻度互为倒数。

4.准确度（精度）仪器指示的数值与被测对象的真实值相符合的程度叫做准确度。

5.误差：仪器指示的数值与被测值之差叫做仪器的绝对误差。仪器的误差与仪器的准确度恰好相反。

6.滞后：在恒定的条件和量程下，对同一输入值给出不同输出值的特性。

三、桥梁检测对仪器的要求

桥梁检测对仪器的要求包括以下几个方面。

1.仪器的量程、准确度、灵敏度要根据检测的要求合理选用，仪器工作性能要稳定，抗干扰能力良好，在野外检测时这一点显得尤为重要。

2.仪器使用方便 安装快捷 适应性强。

3.仪器结构简单，经久耐用，无论是外包装还是仪器本身结构，都应具有良好的防护装置，便于运输 不易损坏。

4.仪器轻巧 自重轻、体积小 便于野外桥梁检测时携带。

5.仪器的多用途，所使用的仪器应具有多种用途。如应变仪，既可单点测量，也可多点测量，既可测应变也可测位移。

6.使用安全。包括仪器本身不易损坏，不会危及操作人员的人身安全。

量测仪器的某些性能之间经常是互相矛盾的，如精度高的仪器，其量程较小；灵敏度高的，其适应性较差。因此在选用仪器时，应避繁就简，根据试验的要求来选用合适的仪器，灵活运用。目前应用于结构试验中的仪器，以电测类仪器较多，机械式仪器仪表已不能满足多点量测和数据自动采集的要求，从发展的角度看，数字化和集成化量测仪器的应用日益广泛，给量测和数据处理带来了方便。

四、仪器的计量标定

为了保证检测的数据准确性，在检测过程中使用的仪器设备必须对其进行计量标定。标定是统一量值确保计量器具准确的重要措施 是进行标准传递的重要形式 是为生产、科研、生活等提供计量保证的重要条件；也是实行国家监督的一种手段。通过计量标定，对仪器的性能进行评定，确定其是否合格，从而保证所用于量测的计量标准、检测仪表的量值在规定的误差范围内与国家计量基准的量值保持一致，达到统一量值的目的。仪器的标定可以分为强制标定和非强制标定两类。强制标定的仪器仪表实行定点、定期标定，非强制标定的仪器仪表可由使用单位依法自主选定定期标定。计量标定具有以下特点。

1.标定的目的是确保量值的统一，主要是评定量测仪器的计量性能，确定仪器的误差大小、准确程度、使用寿命、安全性能等。

2.标定的结论是要确定仪器是否合格，是否可以继续正常使用，是否达到国家计量标准。

3.标定具有法制性，标定证书在社会上具有法律效力，标定的本身是国家对量测的一种监

督，标定结果具有法律地位和效力。

在桥梁检测中，以下常用仪器仪表应定期进行标定。

机械仪器的标定 如百分表、千分表、测力计的标定 回弹仪的率定。

电子仪器的标定 超声波仪超声时间的标定 应变仪、应变计(应变片)的标定 荷载传感器的标定。

光学仪器的标定 如精密水准仪、测距仪、激光挠度仪、倾角仪、读数显微镜等。

第二节 应变电测技术

结构在外力的作用下，内部会产生应力，而直接测定结构截面的应力比较困难，目前还没有较好的方法，一般的方法是测定应变，通过应力与应变的关系 $\sigma = E\epsilon$ 间接测定应力。在应变测量中，应用最广泛的是应变电测技术。应变电测技术是凭借安装在试件上的应变片将力学量(如应变、位移等)转换成电阻变化并用专门的仪器使其转换为电压、电流或功率输出从而获得应变读数的测试方法，通常简称为电测技术或电测法。其转换过程如图 2-1 所示。

与其他测试方法比较，应变电测技术具有以下优点。

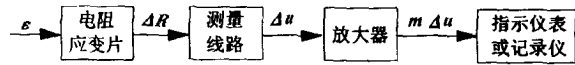


图 2-1 用电阻应变片测量应变的过程

(1)灵敏度高 测量速度快 测量结果精确、可靠。目前常用的应变仪和应变片可测得 1×10^{-6} 应变 有的甚至可精确到 0.5×10^{-6} 应变。

(2)易于实现测试过程中的全自动化数据采集、多点同步测量、远距离测量和遥控检测。

(3)应变片标距小、粘贴方便。测试时可不改变结构的原有应力状态，可以测量其他仪表(如机械式应变计)无法安装的部位处的应变或结构某个局部的应力。制成大标距时可以测量混凝土结构的应变。

(4)质量轻。可在动态应力分析方面发挥作用，能用于模型实验，也能直接用于运行中的机械和实体结构各部位的静、动态和瞬态应变测量 可测频带宽。

(5)适用范围广。可在高温($100 \sim 800^\circ\text{C}$)、低温($-100 \sim -70^\circ\text{C}$)、高压、高速、旋转和具有核辐射干扰等特殊条件下成功量测。

(6)使用广泛。根据应变原理可以制成不同形式的传感器，用于各种物理、力学参数的量测，易于实现整个测试系统的自动化和电气化。

(7)操作方便 测试方法易于掌握。

应变的电测方法虽然有很多优点 但也存在不足之处 如贴片工作量大 使用的导线多 易受温度和电磁场等的影响，特别是野外测量时对仪器的抗干扰性能要求高，应变片不能重复使用等。

一、电阻应变片

电阻应变片简称应变片或应变计。是电阻应变测试中，将应变转换为电阻变化的传感元件。它借助具有一定特性的粘结剂胶粘成型，并安装到所需测试的材料或结构上用以测量应变。电阻应变片除用于测量应变、温度、压力、裂纹等外 还大量用于制造各种用途的传感器。

1. 电阻应变片的工作原理

应变片测量应变的工作原理是基于金属丝的电阻随其机械变形而变化的一种物理特性。

如图 2-2 所示。取长度为 L 直径为 D 截面积为 A 电阻率为 ρ 的金属丝，则其电阻 R 为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-1)$$

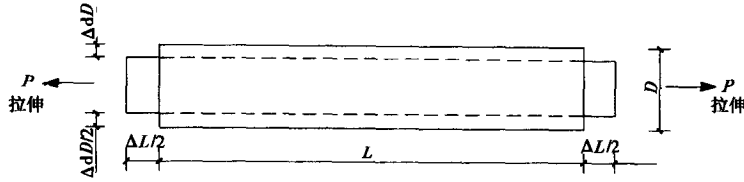


图 2-2 金属丝的应变原理

当金属丝受拉而伸长 ΔL 则电阻的变化率为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2-2)$$

而

$$\frac{dA}{A} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 - \frac{\pi}{4} (D - \Delta D)^2}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

略去 ΔD^2 项 则

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{\Delta D}{D} = 2\epsilon' = -2\mu\epsilon \quad (2-3)$$

式中 ϵ' ——电阻丝的横向应变。

由材料力学可知 在一定范围内 $\epsilon' = -\mu\epsilon$ 将式 (2-3) 代入式 (2-2) 得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon + 2\mu\epsilon = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon$$

令

$$K_0 = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)$$

则

$$\frac{dR}{R} = K_0\epsilon \quad (2-4)$$

式中 μ ——电阻丝材料的泊松比；

K_0 ——单电阻丝的灵敏系数。

K_0 与两个因数有关，一个是电阻丝材料的泊松比 由电阻丝几何尺寸改变引起 当选定材料后，泊松比为常数；另一个是由电阻丝发生单位应变引起的电阻率的改变，对大多数电阻丝而言也是一个常量。因此可以认为 K_0 是一个常数 通常式 (2-4) 可写为

$$\frac{dR}{R} = K\epsilon \quad (2-5)$$

由此可见，应变片的电阻变化率与应变值成线性关系。 K 通常由一批产品中抽样检验确定 作为该批产品的灵敏系数。一般取 $K=2.0$ 左右。

2. 应变片的构造

应变片的种类繁多 形式各种各样 不过其基本结构则大同小异。图 2-3 所示是丝绕式电阻应变片的构造 由敏感栅、粘合剂、基底、覆盖层和引出线几个主要部分组成。

(1) 敏感栅：是将应变变换成电阻变化量的敏感元件，一般由金属或半导体材料如康铜、镍铬合金制成的单丝或栅状体。敏感栅的形状和尺寸直接影晌应变片的性能。栅长 L 和栅宽 B 即代表应变片的规格。

(2) 基底和覆盖层：主要起到定位和保护电阻丝的作用，同时使电阻丝与被测试件之间绝

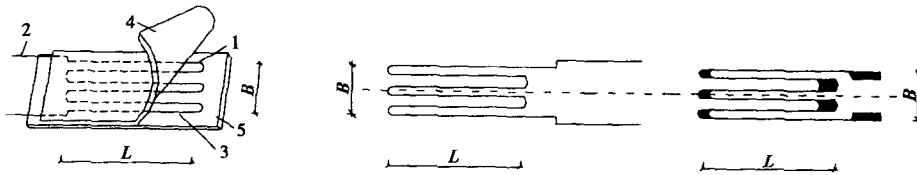


图 2-3 电阻应变片的构造

1-敏感栅;2-引出线;3-粘合剂;4-覆盖层;5-基底

缘。纸基常用厚度 0.015 ~ 0.02mm 高强度、绝缘性能良好的纸张制作。胶基用性能稳定、绝缘度高、耐腐蚀的聚合胶制作。

(3)粘合剂：它是一种具有一定绝缘性能的粘结材料，用于固定敏感栅在基底上或将应变片粘贴在试件上。

(4)引出线：一般采用镀银、镀锡或镀合金的软铜线制成。在制作应变片时与电阻丝焊接在一起。引出线通过测量导线接入应变仪。

3. 应变片的技术指标

(1)几何尺寸：栅长 L (mm) 是应变片电阻丝在其轴线方向的长度。栅宽 B 是应变片垂直于轴线方向的电阻丝栅外侧间的距离。

(2)电阻值 R ：是指在室温条件下不受外力作用时测得应变片的电阻值，单位为欧姆 (Ω)。应变片阻值应与测量电路相适应，一般取 120Ω 。

(3)灵敏系数 K 是指应变片安装于被测试件表面，在其轴线方向的单向应力作用下，应变片的电阻相对变化与试件表面上安装应变片区的轴向应变之间的比值。

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (2-6)$$

式中： K ——应变片灵敏系数；

$\Delta L/L$ ——试件上应变片安装区的轴向应变；

$\Delta R/R$ ——由 $\Delta L/L$ 所引起的应变片的电阻相对变化。

应变片包装上标出的灵敏系数是该批产品由抽样标定测得的平均值。

(4)应变极限 ϵ_j ：一般是指温度一定时，在特定材料上指示应变和真实应变的相对误差不超过 10% 的应变数值。

(5)绝缘电阻 R_m ：是指应变片引线与安装应变片的试件材料之间的电阻，单位为兆欧 ($M\Omega$)。

它是衡量应变片粘贴质量、粘贴剂性能及其固化程度的重要标志。一般情况下，绝缘电阻在 $200M\Omega$ 以上才能保证应变测量的正常进行以及量测的精度。

(6)最大允许电流 I_{max} ：允许通过应变片而不影响其工作特性的最大电流。一般静态测量时为 $25mA$ ，动态时为 $75 \sim 100mA$ 。

(7)温度效应：是指温度变化而引起的应变片阻值改变的现象。测试过程中，环境温度的变化，敏感栅通电发热，都能使应变片温度发生变化。消除温度效应的方法是用温度补偿法。

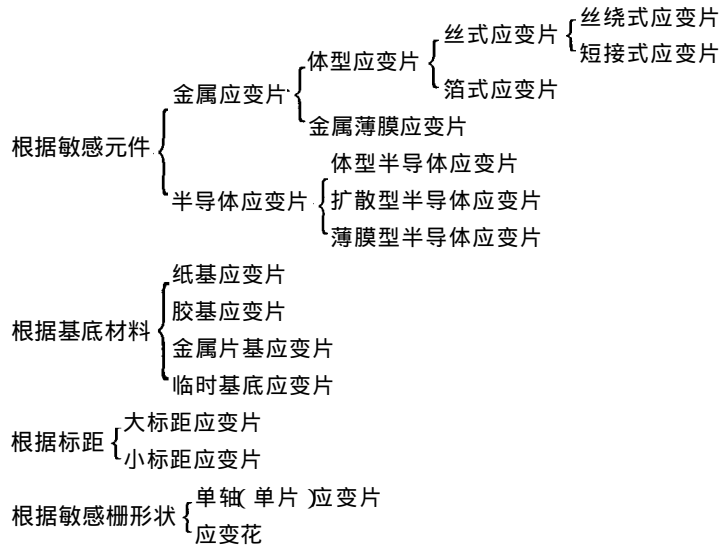
(8)零点漂移和蠕变：零点漂移又简称为零漂，是指已粘贴好的应变片，在温度不变而又无机械应变的条件下，指示应变随时间而变化，用 $\mu\epsilon/h$ 表示。引起的原因可能是粘结剂固化程度不良或环境气候变化引起绝缘电阻变化，或者是安装应变片的松弛等。蠕变是指已安装好

的应变片，在温度一定并承受一定的机械应变时，指示应变随时间而变化。

(9)疲劳寿命：是指已安装好的应变片，在一定的机械应变，一定的温度下，可以连续工作而不会产生疲劳损坏的循环次数。

4.应变片的分类

应变片的种类繁多，分类方法有如下几种。



下面介绍几种常用的应变片。

(1) 丝绕式应变片

丝绕式应变片是把敏感栅丝直接绕在各种绝缘基底上制成，是较为常用的一种应变片，如图 2-4 所示。由于采用较薄的基底材料，因此粘贴性能好，能保证有效地传递变形，稳定性好。敏感栅丝的材料一般用康铜、镍铬合金和铂铱合金等。这种应变片的制造设备和技术都较为简单，价格也较低廉。

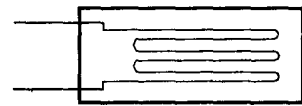


图 2-4 丝绕式应变片

(2) 箔式应变片

箔式应变片是利用照相制版或光刻腐蚀技术，将箔材料在绝缘基底上制成所需形状的应变片。它粘贴性能好，传递变形的性能较丝绕式应变片为好，容易制成各种形状的应变片或应变花，具有良好的散热能力，允许增大工作电压，蠕变小，疲劳寿命高，但制作工艺复杂。图 2-5 是几种常见箔式应变片的构造形式。

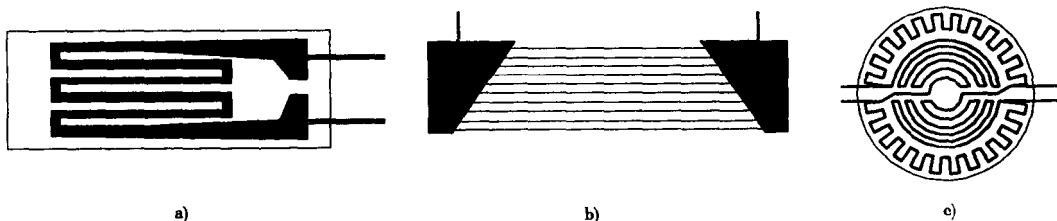


图 2-5 箔式应变片

(3) 半导体应变片

当半导体材料沿某一轴向受力产生变形时，电阻率会发生变化，这种电阻随应变变化的现

象称为压阻效应。根据这个原理制造出半导体应变片 图 2-6 是其构造图。半导体应变片的特点是尺寸小、灵敏系数大、频率响应好 但温度系数大 测量精度低。

(4)应变花

在平面应力场中，需要测出两个或三个方向的应变才可以求出该点的主应力大小及方向 这就要使用粘贴在一个公共基底上、按一定方向布置的 2~4 个敏感栅组成的应变花。有互为 45° 、 60° 、 90° 和 120° 等基本形式的应变花 如图 2-7 所示。

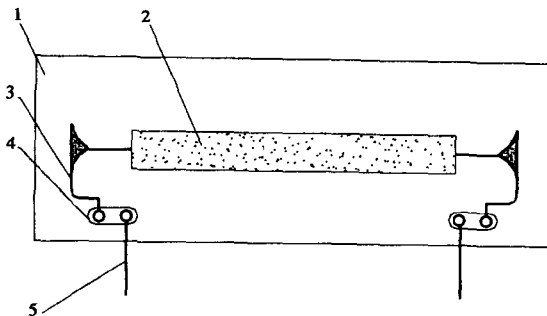


图 2-6 半导体应变片

1-胶膜衬底 ;2-P-Si片 ;3-内部引线 ;4-内部接线端子 ;5-外引线

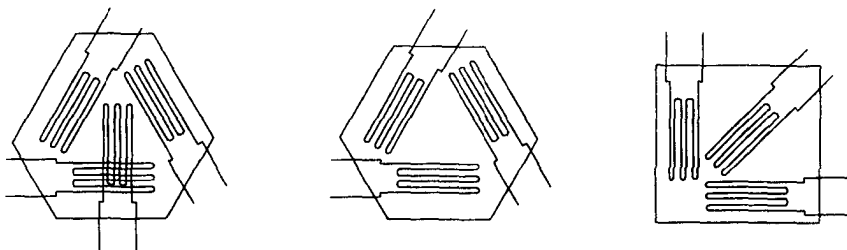


图 2-7 应变花的构造

5. 应变片的选用

应变片的品种规格很多，选用时应根据被测试件所处的环境条件，如温度、湿度、被测材料、结构特点、检测的性质和应变的范围等来确定并应在尽可能节省开支的同时满足测试要求。以下从七个方面介绍应变片的选用方法。

(1)标距：根据结构特点和材料，在应变场变化大及用于传感器上时，应选用小标距应变片 如钢材常用 $5 \sim 20\text{mm}$ 。在不均匀材料上选用大标距应变片 如混凝土常用 $80 \sim 150\text{mm}$ 。

(2)应变片电阻 目前大部分应变仪按 120Ω 应变片设计，选用时应注意与应变仪相一致，否则要按仪器的使用说明书予以修正。

(3)灵敏系数 常用的应变片灵敏系数在 $K = 2.0$ 左右，使用时必须调整应变仪的灵敏系数功能键 使之与应变片的灵敏系数一致 否则应对结果予以修正。

(4)基底种类：较为常用的有纸基和胶基两种。常温下的一般测试可用纸基应变片。对于野外试验及长期稳定性要求高的试验，宜用胶基应变片。

(5)敏感栅材料 康铜丝材的温度稳定性较好 适用于大应变测量。

(6)特殊环境或有特殊要求的 选用特种应变片 如低温应变片、高温应变片、裂纹扩展片、疲劳寿命片等。

6. 应变片的粘贴工艺

应变片的粘贴工艺包括粘结剂的选用、粘贴工艺与防护措施三方面。

粘结剂其主要的作用是传递变形。应变片的制作、传感器的生产、测试中应变片的粘贴等，都要使用不同性能的粘结剂。其性能将直接影响应变片的质量、传感器的精度和现场测试的成败。粘结剂一般采用快干胶或环氧树脂。501 快干胶和 502 快干胶是借助空气中微量水

分的催化作用而迅速聚合固化产生粘结强度的。该类胶的粘结强度能满足桥梁应变测试要求，但应注意胶水的生产日期和保存条件，避免使用过期或失效的胶水。环氧树脂胶是靠分子聚合反映而固化产生粘结强度的。它有较强的剪切强度和防水性能，电绝缘性能好。它的主要成分是环氧树脂，按一定的比例加入固化剂并充分搅拌，使环氧树脂变成浅乳白色后再使用。

一般地，应变片的粘贴工艺可归纳如表 2-1 所示。

应变片的粘贴工艺

表 2-1

工作顺序	工作内容	操作方法	要求	
1	检查分选	外观检查	借助放大镜肉眼检查	无气泡、霉点、锈点、外观平整
		阻值检查	用 1% Ω 精度万用表检查	无短路、断路，同一测区应变片阻值相差不大于 0.5 Ω
2	测点检查	初步定位	确定测点的大致范围	比应变片周边宽 3 ~ 5cm 的测区
		测点检查	检查测点处的表面状况	平整、无缺陷、无裂缝
		打磨	磨光机或 1 号砂纸打磨	平整、无锈、无浮浆
		清洗	脱脂棉、纱布蘸丙酮或无水乙醇清洗	干燥时无污染
		准确定位	准确画出测点的纵横中心线	纵线应与主应变方向一致
3	粘贴	上胶	用合适的小灰刀在测点均匀涂上预先调制好的一层薄胶	应变片的定位标志应与十字中心线对准
		挤压	将应变片放在定位线上，盖上塑料薄膜，用手指沿一个方向挤压，挤出多余的胶	胶层应尽可能薄，挤压时注意保持应变片不滑移
		加压	根据粘胶特性，在应变片上稳压一段时间	应达到粘胶的初凝时间
		粘贴端子	接线端子靠近应变片引出线用贴片胶粘	胶达到强度后无松动、脱落
4	固化处理	自然干燥	根据自然条件和粘胶特性确定时间	粘胶强度达到要求
		人工固化	粘胶达到初凝时间后用红外线灯照射或电吹风吹热风	加热温度不超过 50 $^{\circ}\text{C}$ ，受热均匀
5	粘贴质量检查	外观检查	借助放大镜肉眼检查	位置准确、无气泡、粘贴牢固
		阻值检查	用万用表检查	无短路、断路
		绝缘检查	用万用表 200M Ω 档检查	应达到 50 M Ω 以上

工作顺序	工作内容	操作方法	要求
6	引出线绝缘	应变片引出线底下涂粘胶或贴胶布	引出线不能短路
	导线连接	用电烙铁、焊锡把应变片引出线和测量导线焊接在接线端子上	焊点应圆滑、无虚焊
	固定导线	用粘胶或胶布固定测量导线	轻微摇动导线不影响焊点
7	防潮防护	焊接完成,用万用表检查测量导线连接应变仪的一端,应略大于应变片阻值(含导线电阻)后,在应变片和接线端子上涂上防潮胶。	涂胶面积应大于应变片周边宽约 1cm。特殊环境还应增加防机械损伤的缓冲层

在完成应变片的粘贴后,把应变片的引线和导线焊接在接线端子上,然后应立即涂上防护层,以防止应变片受潮和机械损伤。因为应变片受潮后会影响到其正常工作,而且受潮的程度不易直接测量,所以防护技术是应变测量中的重要环节。通常用应变片和结构表面的绝缘电阻值来判断。高的绝缘电阻值可保证测量的精度,但要求过高会加大工作量和增加防护工作的难度。所以一般要求静态测量绝缘电阻大于 $200M\Omega$ 动态测量可以稍小于 $200M\Omega$ 对于长期检测和要求精度高的检测,绝缘电阻应大于 $500M\Omega$ 。图 2-8 给出了几种常用的防护措施;图 2-8a)、b)适用于一般潮湿条件,图 2-8c)适用于水中或极湿条件图 2-8d)适用于水中或混凝土浇筑场所。

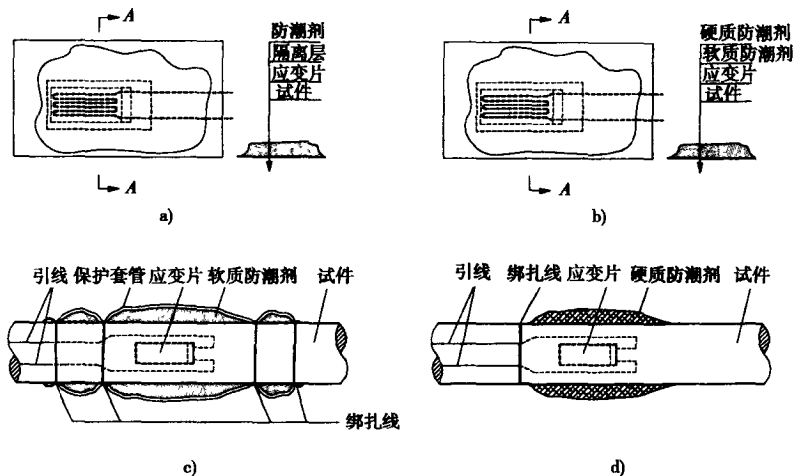


图 2-8 应变片防护示意图

二、电阻应变仪

前面已介绍过,结构的应变是由电阻转换为电阻变化率进行测量。而结构在弹性范围内的应变是很小的,如钢材料 $E = 2 \times 10^5 MPa$,测量时要求能分辨出 $20MPa$ 当应变片阻值为 120Ω , $K = 2.0$ 时, $\Delta R = RK\sigma/E = 0.024\Omega$ 。由此可见,测量电阻用的仪器必须能够分辨出 120Ω 和 120.024Ω 的电阻,这是一般常用测量电阻的仪表达不到的,必须借助专门的电子仪器进行测量和鉴别 这就是电阻应变仪(简称应变仪)

电阻应变仪根据测量应变的工作频率,可分为静态电阻应变仪、动态电阻应变仪和静动态

电阻应变仪。静态电阻应变仪用于测量静态应变，要求仪器的放大器具有良好的稳定性，尽可能减少零点漂移。配备平衡箱时可进行多点应变测量。动态电阻应变仪用于测量 500Hz 以下的动态应变，除要求其稳定性好以外，还需要有高的灵敏度和足够的功率输出，以及小的非线性失真，低的噪声和一定的频宽特性，以便对测量信号的各种频率或非正弦波信号均能如实放大。动态电阻应变仪一般做成多通道，同时采集多个动态信号。

应变仪可直接用于应变量测，如配上相应的电阻应变式传感器，也可测量力、压力、扭矩、位移、振幅、速度、加速度等物理量的变化过程，是实验应力分析中常用的仪器。

电阻应变仪主要由供电电源、振荡器、测量桥路、放大器、相敏检波器、滤波器和指示记录器组成。图 2-9 是应变仪组成方框图。

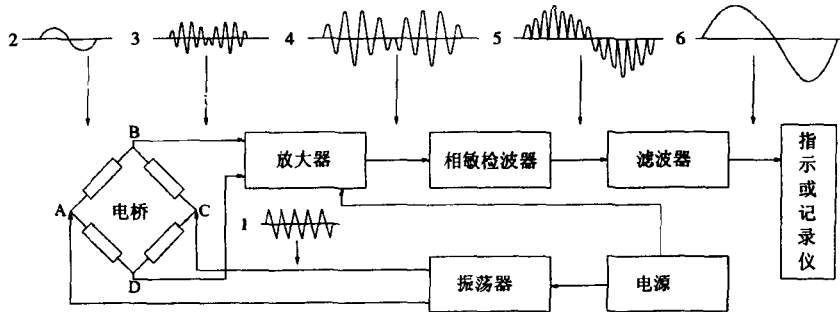


图 2-9 应变仪组成方框图

1-拱桥电源波形(载波);2-被测信号波形(调制波);3-电桥输出波形(已调制波);4-放大后波形 5-检波解调后波形;6-滤波后波形

1. 电桥原理

应变仪测量电路一般采用惠斯登电桥。如图 2-10 所示，A、B、C、D 四点称为电桥的顶点， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 称为电桥的臂，AC 之间接电源 U ，BD 之间接负载 U_{BD} 。由于电桥线性好，灵敏度高，测量范围宽，易于实现温度补偿，因此在电阻应变仪中得到广泛应用。电桥按供电性质可分为交流电桥和直流电桥。直流电桥的特点在于信号不受各元件和导线间分布电容及电感的影响，抗干扰能力强，必要时可用蓄电池或干电池供电，便于现场测试。为了便于讨论，以直流电桥为例作分析。若将 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 看成四个应变片，组成全桥接法，根据基尔霍夫定律可知， U_{BC} 、 U_{DC} 与 U 的关系有

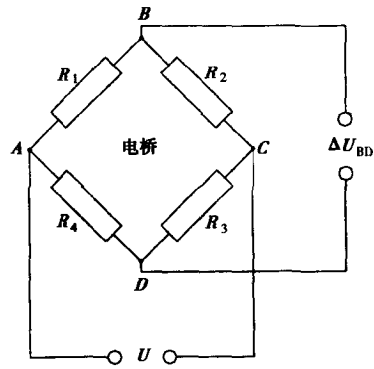


图 2-10 惠斯登电桥

$$U_{BC} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (2-7)$$

$$U_{DC} = -\frac{R_3}{R_3 + R_4} U \quad (2-8)$$

BD 间输出的电压为 $U_{BD} = U_{BC} + U_{DC}$ 即

$$U_{BD} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U - \frac{R_3}{R_3 + R_4} U = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (2-9)$$

当输出电压为零时 电桥处于平衡状态 则

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2-10)$$

当电桥接成 1/4 电桥时 即 R_1 受到应变后 阻值有微小增量 ΔR_1 ，这时电桥输出电压也有增量 ΔU_{BD}

$$\Delta U_{BD} = U \frac{R_2 R_4 - (R_1 + \Delta R_1) R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2-11)$$

当电桥接成全电桥时 即 R_1, R_2, R_3, R_4 受到应变后，阻值都有微小增量 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ ，这时电桥输出电压也有增量 ΔU_{BD}

$$\Delta U_{BD} = U \frac{R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-12)$$

在全等臂电桥情况下，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 且应变片的灵敏系数 $K = K_1 = K_2 = K_3 = K_4$ 并利用式 (2-5) 得到

$$\Delta U_{BD} = \frac{1}{4} UK(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (2-13)$$

由上式可知 电桥输出电压的增量 ΔU_{BD} 与桥臂电阻变化率 $\Delta R/R$ 或应变 ϵ 成正比例。输出电压与四个桥臂应变的代数和成线性关系，相邻桥臂的应变符号相反，相对桥臂的应变符号相同。利用这一特性，可以提高测量的灵敏度和解决温度补偿问题。

2. 平衡电桥原理

在实际测量中，应变片的阻值总是有偏差，接触电阻和导线的电阻也有差异，使电桥产生不平衡。为了满足实际测量的需求，应变仪都改用了平衡电桥。图 2-11 是平衡电桥原理图。在 R_3, R_4 之间加入滑线电阻 r ，触点 D 平分 r 。 R_1 为工作片， R_2 为贴在非受力构件的温度补偿片 且使桥路 $R_1 = R_2 = R'$ ， $R_3 = R_4 = R''$ 。根据惠斯登电桥 桥路处于平衡时有 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。

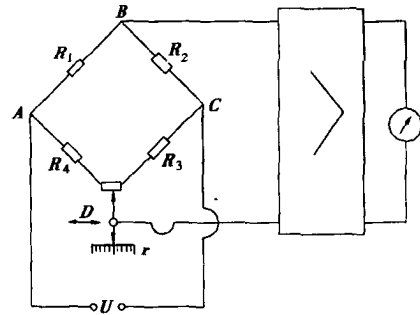


图 2-11 平衡电桥原理图

当构件受力变形后， R_1 有微小变量 ΔR_1 此时桥路失去平衡 调整触点 D 使桥路重新恢复平衡。新的平衡条件为

$$(R_1 + \Delta R_1)(R_3 - \Delta r) = R_2(R_4 + \Delta r) \quad (2-14)$$

$$R_1 R'' + \Delta R_1 R'' - R_1 \Delta r - R_1 \Delta r = R_1 R'' + R_1 \Delta r$$

整理得

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{3\Delta r}{R''}$$

即

$$\epsilon = \frac{3\Delta r}{KR''} \quad (2-15)$$

由此可见，滑线电阻的变化量可用以度量工作电阻的应变变量，此法称为零位测定法。

3. 温度补偿技术

用电阻应变片测量应变时，应变片除感受试件应变外，环境温度的变化同样通过应变片的感受引起应变仪示值的变化，这种变化称为温度效应。产生温度效应的原因有两个：一是电阻丝温度改变 Δt 电阻值将随之改变 二是电阻丝与试件材料的膨胀系数不相等 而两者粘合在

一起 当温度改变 Δt 时, 引起一个附加电阻变化 ΔR_t , 总的应变效应为两者之和。根据桥路原理有

$$\Delta U_{BD} = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_t}{R} = \frac{U}{4} K \epsilon_t \quad (2-16)$$

式中 ϵ_t 称为视值应变。

温度补偿的方法是在电桥的 BC 臂上接一个与测量片 R_1 完全一样的温度补偿应变片 R_2 。 R_1 贴在受力构件上, 既受应变作用又受温度作用, 电阻变化为 $\Delta R_1 + \Delta R_{t1}$ 。温度补偿片 R_2 在与试件材料相同并放置在与测试对象完全相同的环境中, 感受相同的温度变化, 但不受外力的影响 则其只有纯 ΔR_{t2} 的变化 如图 2-12 所示。由式 (2-11) 得

$$\Delta U_{BD} = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1 + \Delta R_{t1} - \Delta R_{t2}}{R} = \frac{U}{4} K \epsilon_1 \quad (2-17)$$

由此可见, 测量结果仅为测试对象受力后产生的应变值 不受温度的影响 达到了温度补偿的目的。

4. 动态电阻应变仪

动态应变测量中, 应变值的变化速度比较快, 一般采用直读式电桥。其构造与静态应变仪的测量桥路基本一致。不同之处主要有以下几点。

动态应变仪多采用立式电桥, 以提高抗干扰能力。

对预调平衡要求高, 由于动态应变仪的供桥电压频率较高, 应变片和引线的分布电容对桥路平衡影响很大, 所以测量时除对电阻调平衡外, 还要调节电容平衡。进行多点测量时 各通道的平衡应大体一致 使显示尽可能指示“0”或靠近“0”位。

动态应变仪未设读数桥, 而是在桥路中附设了一套电标定电路, 以便对被测应变进行计量。

所谓“电标定”即是在工作桥臂上并联电阻 使应变仪上产生一已知的模拟标准应变 并把它记录下来, 然后再把被测物体的应变记录下来相对比, 以标准应变为准尺, 从而获得被测应变的大小。图 2-13 是动态电阻应变仪的电桥和标定线路。

当灵敏系数取 $K = 2.0$ 桥臂电阻取 120Ω 时 由图可知 假设标定电阻 r_1 通过开关 K_1 并联在 R_2 上为正应变 并联在 R_3 上为负应变 正负应变通过开关 K_2 切换。 $r_1 \sim r_6$ 采用精密金属膜电阻, 则其阻值由所产生的标准应变的大小确定。

5. 应变测量防干扰措施

在半桥测量中采用三心屏蔽导线, 全桥测量采用四心屏蔽导线。

尽量使测量导线和应变仪远离干扰源。

尽量缩短测量导线的长度, 根据测量距离, 合理选用导线面积。

屏蔽网接在应变仪外壳接地点, 接地点应良好接地, 对地的绝缘电阻应尽可能小, 这样可以有效抑制电磁波和静电干扰。

应变片与被测构件的绝缘电阻应符合要求。

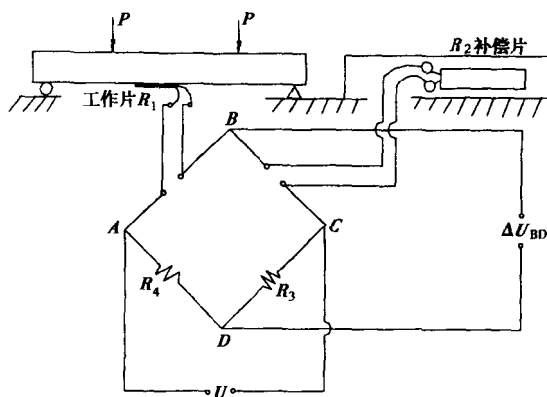


图 2-12 温度补偿原理

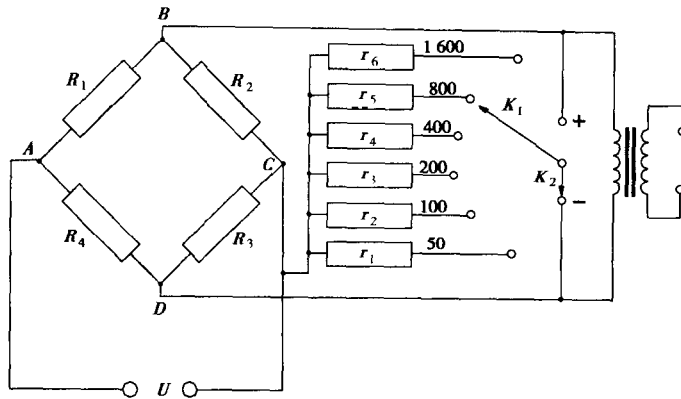


图 2-13 动态电阻应变仪电桥原理

三、应变测试方法

由于构件常处于复杂的应力状态，如受拉（压）的杆件很可能同时受到弯曲或扭转的作用。但实际测试中，有时又希望只测其中某一成分所产生的应力。为了达到此目的，在一些特定条件下，可借助电桥的特性，采用不同的接桥方法，以消除不需要测试的应力对测试应力的影响。

1. 测轴向应力

单向拉伸（或压缩）可分别采用如图 2-14a）、b）、c）所示的三种贴片和接桥方式。图 2-14a）、b）两种贴片和接桥方式分别适用于轴向拉伸（或压缩）和被测材料的泊松比 μ 已知的情况。实际上杆件往往由于偏心受力而产生不同程度的弯曲，为了消除弯矩的影响，采用图 2-14c）所示的贴片和接桥方式为宜。

当 $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 且 $\Delta R_{\Delta 1} = \Delta R_{\Delta 2}$ 时所采用贴片和接桥方式不同 应变仪读数 ϵ_m 与杆件真实应变 ϵ 之间的比例关系将随之发生变化。

对于图 2-14a 所采用贴片和接桥方式 可得

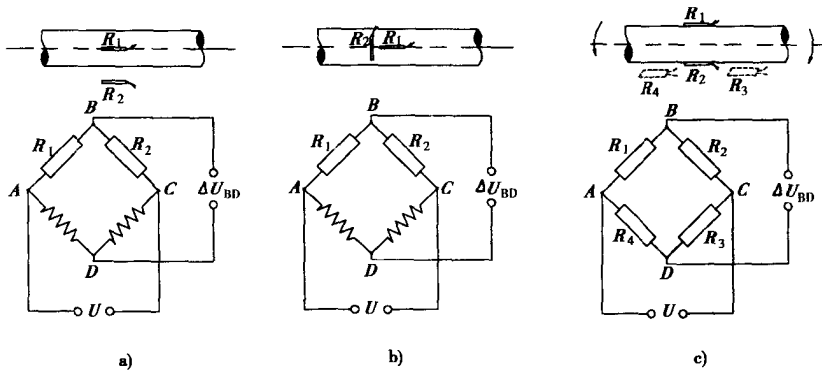


图 2-14 测轴力的贴片和接桥示意图

$$\Delta R = R_1 K \epsilon_m = \Delta R_1 - \Delta R_2 = KR_1(\epsilon_1 + \epsilon_{\Delta 1}) - KR_2 \epsilon_{\Delta 2} = KR \epsilon$$

故

$$\epsilon_m = \epsilon_1$$

(2-18)

对于图 2-14b) 所采用贴片和接桥方式，可得

$$\Delta R = R_1 K \epsilon_m = \Delta R_1 - \Delta R_2 = KR_1(\epsilon_1 + \epsilon_{\Delta 1}) - KR_2(-\mu \epsilon_1 + \epsilon_{\Delta 2}) = KR \epsilon_1(1 + \mu)$$