

工程测试技术丛书

电阻应变仪



人民铁道出版社

工程测试技术丛书

电 阻 应 变 仪

铁道部科学研究院铁道建筑研究所编

人民铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{2}$ 印张: 6.375 插页: 5 字数: 141 千

1978年6月 第1版

1978年6月 第1次印刷

统一书号: 15Q43·6118 定价: 0.66 元

内 容 提 要

全书除概述外共分五章。第一章叙述交直流应变电桥。第二章介绍电阻应变仪的基本电路。三、四两章介绍静动态电阻应变仪。第五章介绍静动态应变的测量。

本书供从事科学研究试验工作人员参考。

前 言

目前在铁路桥梁、隧道、房屋建筑等工程结构的研究、设计、建造和使用当中，为了验证设计理论，选定设计方案，鉴定工程质量和分析使用中产生的问题等，往往需要对工程结构进行静态或动态试验。测试技术，特别是电测技术，乃是获得各种试验数据的基本手段。此外，电测技术在机车、车辆、飞机、船舶和各种机械设备的研究试验工作中，也得到了广泛应用。

随着我国社会主义革命和社会主义建设事业的迅速发展、国防、工农业生产和科学研究部门，需要进行工程结构的试验日益增多，测试技术本身也相应地向前发展。为了便于有关从事工程结构测试人员初步掌握测试技术，并不断总结和提高测试技术水平，我们根据各兄弟单位的宝贵经验和有关资料，同时加上自己在实际工作中的粗浅体会，编写了这套工程测试技术丛书。内容主要有：电阻应变片、电阻应变仪、光线示波器、振动、压力等力学参数的测量。重点介绍测试技术中的基本知识、传感器及测量仪器的原理、使用方法和一般的维修技术。

由于我们水平有限、难免有错误和不当之处，请读者批评指正。

编 者

目 录

概述.....	1
第一章 交、直流应变电桥.....	3
第一节 直流电桥的基本特性.....	4
第二节 电桥的非线性误差.....	9
第三节 电桥的电阻平衡.....	14
第四节 交流电源供电的应变电桥.....	19
第五节 交流应变电桥的电容平衡.....	22
第二章 电阻应变仪的基本电路.....	29
第一节 晶体管交流放大器.....	29
第二节 晶体管直流放大器.....	43
第三节 相敏检波器及低通滤波器.....	52
第四节 晶体管振荡器.....	60
第五节 晶体管直流稳压电源.....	69
第三章 静态电阻应变仪.....	78
第一节 静态电阻应变仪的分类及其特点.....	78
第二节 YJ-5 型静态电阻应变仪	82
第三节 多点应变测量和预调平衡箱.....	93
第四节 静态电阻应变仪的校验与故障维修.....	96
第五节 YJS-8 型静态数字应变仪与 ZP100-3 型自动平衡转换箱简介	106
第四章 动态电阻应变仪.....	124
第一节 动态电阻应变仪的分类及其特点.....	124
第二节 交流电桥动态电阻应变仪.....	127
第三节 直流电桥电阻应变仪.....	139

第四节	动态电阻应变仪的校验·····	151
第五节	动态电阻应变仪的故障和维修·····	155
第五章	静、动态应变的测量·····	159
第一节	静、动态应变测量的一般步骤·····	159
第二节	动态应变测量中的标定·····	165
第三节	应变测量中的几个问题·····	178
第四节	干扰及其抑制方法·····	185

概 述

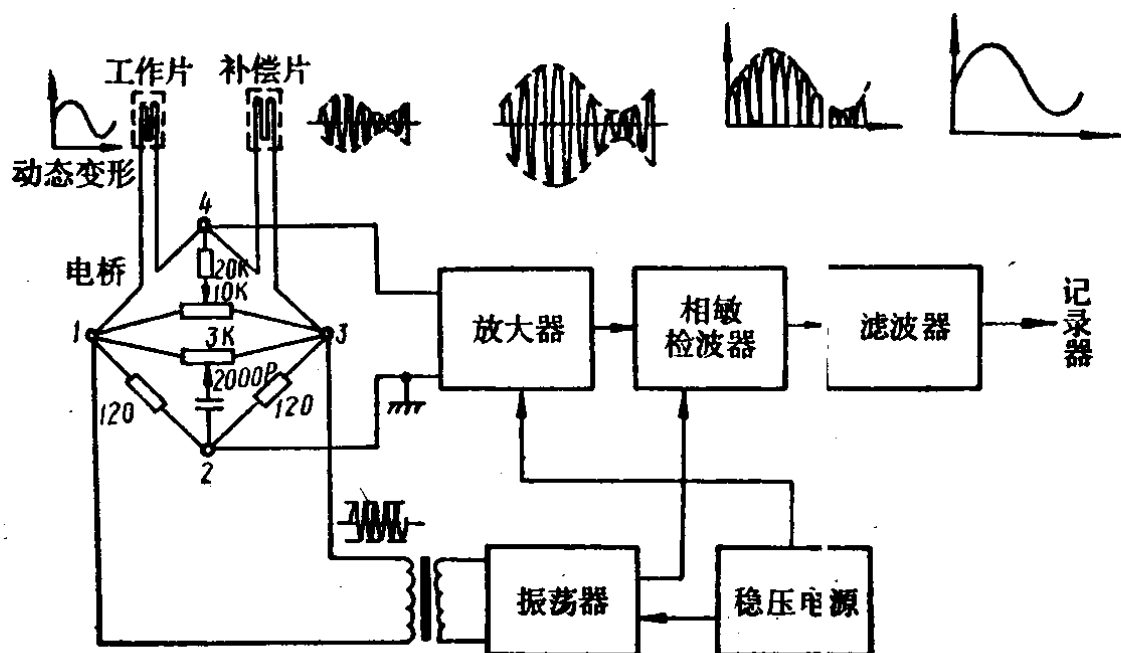
电阻应变仪是测量结构及材料在荷载作用下变形的应力分析仪器。它具有使用方便，灵敏度高，稳定性好，量测点数多，并能作远距离测量的优点，目前已成为各工矿企业、科研单位和大专院校广泛应用的非电量的电测仪器。随着科学技术的迅速发展，电阻应变仪性能日趋完善，种类也日益增多，为实验应力分析提供了可靠的工具，直接对验证设计理论、检验工程质量、确定设计方案、合理选用原材料等起着重要作用。目前已有不少种定型产品可供选用。电阻应变仪本身正朝着多点、高精度、自动化、数字化、数据自动处理的方向发展。

电阻应变仪按可测应变频率范围由低到高分为：静态电阻应变仪，动态电阻应变仪，超动态电阻应变仪。而静态应变仪又分调零式和数字显示式不同类型。动态应变仪分电桥直流供电，电桥交流供电，电桥脉冲供电等不同类型的。应变仪虽然类型多种，但结构基本相似，主要由电桥、放大器、相敏检波器、振荡器、电源等部分组成。

例如 Y6D-2 型动态电阻应变仪，它的组成方框图如图概-1，其工作原理如下：

贴在试件上的电阻应变片（工作片）和起温度补偿作用的电阻应变片（补偿片）与仪器电桥盒内的精密电阻组成电桥，振荡器供给电桥以 5 千赫的交流电压作载波电压。当工作片感受一个如图所示的动态变形时，电桥输出一个调幅波，调幅波的包络线与动态变形相似，经放大器放大后，由相敏检波器解调得包络线。再经滤波器滤去剩余载波及其高

次谐波而得到与所测动态变形相似的电压、电流波形。输出给记录器记录下动态变形的过程。



图概—1 Y6D-2 型动态电阻应变仪方框图

本书将对上述应变仪方框图中各部件分别进行介绍，并结合典型产品介绍静、动态应变仪的主要技术指标、结构原理和使用方法，对应变仪的检验和故障维修，以及实际使用中可能遇到的问题也作一些简单的说明。

第一章 交、直流应变电桥

电桥是电阻应变仪的重要组成部分之一，各种类型电阻应变仪都以电桥作为应变仪的输入部分。如图 1—1 所示， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为四个桥臂， u 为供桥电源， u_0 为电桥输出电压。

众所周知，电桥电路有平衡和不平衡两种状态。在电阻应变仪中电桥通常是四等臂电桥，（例如四臂全是电阻应变片）即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ；或者是两等臂电桥，（例如两臂为电阻应变片，两臂为精密电阻）即 $R_1 = R_3$ ， $R_2 = R_4$ 。根据

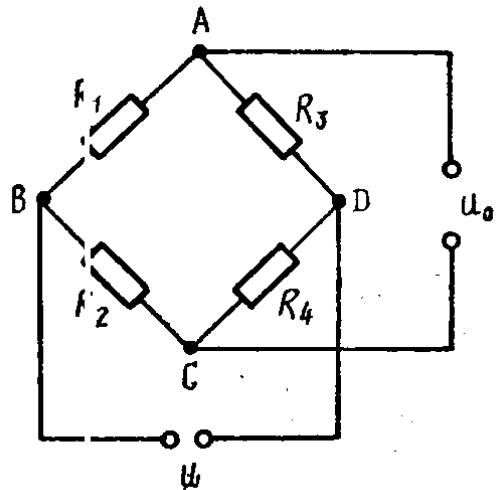


图 1—1 电桥

电桥的特性，在上述两种情况下只要等式成立电桥的输出电压 $u_0 = 0$ ，这时电桥就平衡了。但是同一标称值的电阻应变片，各片的阻值也不会绝对相等，因此在电桥中必须装有电阻调平衡电路才能保证测量之初使电桥调到平衡状态。对交流电桥还须有电容调平衡电路。

然而任何一臂的电阻应变片因变形而阻值变化时，电桥的平衡状态就被打破， $u_0 \neq 0$ ，这时电桥就不平衡了。电阻应变仪的原理就是利用测定 u_0 来测定应变。

下面将对电桥的各种调平衡电路的原理进行分析，并着重分析电桥不平衡状态时 u_0 与电阻应变片的应变，即 u_0 与桥臂电阻变化量之间的关系。因此说搞清电桥的作用原理是掌

握电阻应变仪的基础。

第一节 直流电桥的基本特性

电阻应变仪，供桥电压大部分是采用正弦交流电压，也有采用直流电压的。为了讨论方便起见，本节先讨论直流电桥的基本特性。

在本丛书电阻应变片一书中已详细介绍了电阻应变片感受的应变和它的电阻相对变化成线性关系。即 $\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$ 。从而将非电量——应变 ε ，转换成了电量——电阻值的相对变化 $\frac{\Delta R}{R}$ 。现在把电阻应变片接入电桥以后，就要进一步分析电阻应变片电阻值的相对变化与电桥的输出电压又有什么相应的关系。由于在一般的电阻应变仪中不用电桥的电流输出，所以只讨论电阻应变片的电阻值相对变化与电桥输出电压的关系。推导时，为了简化起见，假定电桥输出的负载电阻为无限大。下面分别计算单个桥臂和多个桥臂工作时的情况。

一、单个桥臂工作时，应变与电桥输出电压的关系

图 1—2 为单臂工作的直流应变电桥的原理图。 E 是供电桥的直流电压源。 u_0 是电桥的输出电压。

设 R_1 为随试件变形的电阻应变片（以下简称工作片）， ΔR 是工作片承受应变后引起的电阻增量。因应变有拉有压，所以 ΔR 也有正负之分。

由图 1—2 可见，电桥的输出电压 $u_0 = u_{BA} - u_{BC}$ 。

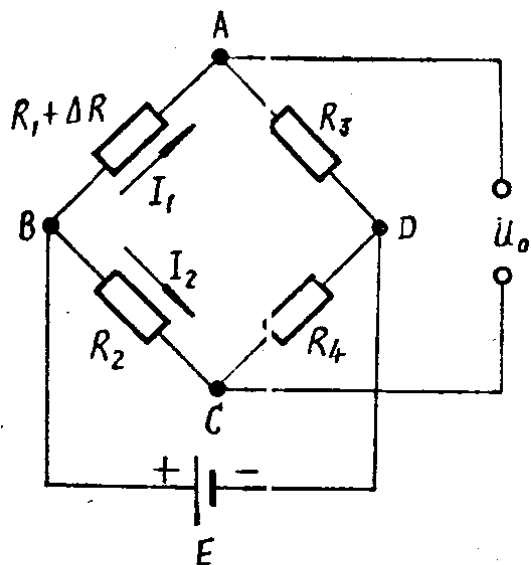


图 1—2 单臂工作的直流电桥

当工作片 R_1 产生电阻增量 ΔR 时, 则通过 R_1 和 R_3 两臂的电流 $I_1 = \frac{E}{R_1 + \Delta R + R_3}$, 而应变片 R_1 上的电压降即为 $u_{BA} = I_1 (R_1 + \Delta R)$ 。将 I_1 代入后得:

$$u_{BA} = \frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_3} \cdot E$$

通过 R_2 和 R_4 两臂的电流 $I_2 = \frac{E}{R_2 + R_4}$, 而 R_2 上的电压降即为 $u_{BC} = I_2 \cdot R_2$, 将 I_2 代入后得:

$$u_{BC} = \frac{R_2}{R_2 + R_4} \cdot E$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ 时,

$$\begin{aligned} u_0 &= u_{BA} - u_{BC} \\ &= \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} \cdot E - \frac{R_0}{2R_0} \cdot E \\ &= \frac{\Delta R}{2(2R_0 + \Delta R)} \cdot E \quad (1-1) \end{aligned}$$

一般 $R_0 \gg \Delta R$, 并已知 $\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$ (K 为电阻应变片的灵敏系数), (1-1) 式可简化为:

$$\begin{aligned} u_0 &\approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \cdot E \\ &= \frac{1}{4} E \cdot K \cdot \varepsilon \quad (1-2) \end{aligned}$$

式 (1-2) 是电阻应变仪中最常用的基本关系式, 它表明等臂电桥输出电压和应变在一定的应变范围内近似为线性关系。

现举例计算电桥输出电压 u_0 的数值。

设 $R_0 = 120$ 欧, $K = 2.00$, 供桥电压 $E = 2$ 伏, 在工程

测量中一般要求测量的最小应变为 5 微应变左右，这时电桥输出电压为：

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{1}{4} K \cdot E \cdot \varepsilon \\ &= \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \\ &= 5 \times 10^{-6} \text{ 伏} = 5 \text{ 微伏} \end{aligned}$$

工程测量中在弹性范围内的最大应变一般为 2000 微应变左右，这时的输出电压为：

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{1}{4} \cdot K \cdot E \cdot \varepsilon \\ &= \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2000 \times 10^{-6} \\ &= 2 \times 10^{-3} \text{ 伏} = 2 \text{ 毫伏} \end{aligned}$$

由上两例可见，电桥的输出电压仅为微伏至毫伏的数量级，难以直接用一般的电工仪表测量，必须进行放大后才能显示或记录。

二、多个桥臂同时工作时，应变与电桥输出电压的关系

图 1—3 为四个桥臂同时工作的情况。由图可见：

$$u_0 = u_{BA} - u_{BC}$$

$$\text{因为 } u_{BA} = I_1 \cdot R_1 = \frac{E}{R_1 + R_3} \cdot R_1$$

$$= \frac{R_1}{R_1 + R_3} \cdot E$$

$$u_{BC} = I_2 \cdot R_2 = \frac{E}{R_2 + R_4} \cdot R_2$$

$$= \frac{R_2}{R_2 + R_4} \cdot E$$

所以

$$u_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_3} \cdot E - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \cdot E$$

当四个桥臂电阻都发生变化时，上式变成：

$$u_0 = \frac{(R_1 + \Delta R_1) E}{R_1 + \Delta R_1 + R_3 + \Delta R_3} - \frac{(R_2 + \Delta R_2) E}{R_2 + \Delta R_2 + R_4 + \Delta R_4}$$

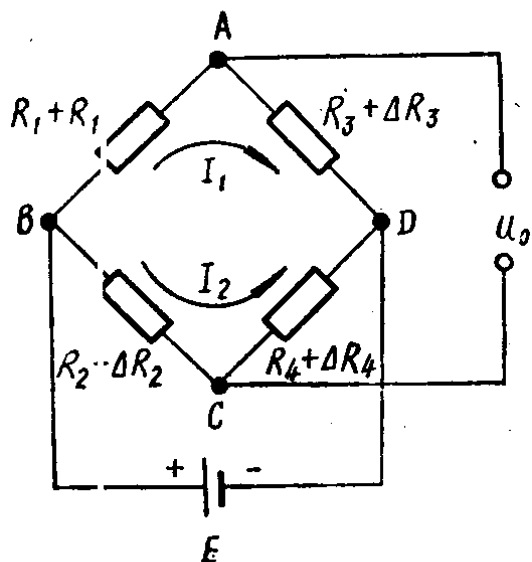


图 1—3 四个桥臂同时工作的直流电桥

对于这样的式子，只能用全微分的方法来分析。省去繁琐的数学推导后，可以得到当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 时输出电压与应变的关系为：

$$u_0 = \frac{1}{4} \cdot E \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (1-3)$$

再代入 $\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$ 的关系式得：

$$u_0 = \frac{1}{4} \cdot E \cdot K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (1-4)$$

上式表明：相邻桥臂的应变若极性一致（即同为拉应变或同为压应变）时，输出电压为两者之差；若极性不一致（即一为拉应变，一为压应变）时，输出电压为两者之和。而相对桥臂则相反，极性一致时输出电压为两者之和；极性不一致时为两者之差。

因此，在实际测量中，为了提高电桥的灵敏度，常常使

两片或四片电阻应变片同时工作。这样就必须根据上述特点有选择地安排在受拉区或受压区，才能达到增大输出电压的目的。

三、电阻应变片的串联或并联

将电阻应变片串联或并联后再接入桥臂，分析这时电桥的输出电压。

图 1—4 所示为两桥臂分别用两片电阻应变片串联组成，且单臂工作。此时 $R_1 = R + \Delta R$, $R_3 = R + \Delta R$, $\Delta R_1 = \Delta R + \Delta R$ 代入 (1—2) 式得：

$$u_0 = \frac{1}{4} E \left(\frac{\Delta R + \Delta R}{R + R} \right)$$

设两个 R 和 ΔR 都相等则

$$u_0 = \frac{1}{4} E \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

如两个 ΔR 不相等则

$$u_0 = \frac{1}{4} E \cdot \frac{\Delta R + \Delta' R}{2R}$$

由此看出，两应变片串联后接入一个桥臂，并不能使电桥输出电压增加，但能起到两应变片所测应变值取平均的效果。不过，由于电阻应变片串联后，阻值增加，通过的电流减小，相应发热量也减小了，因而也就有条件提高桥压，使电桥的输出电压增加。

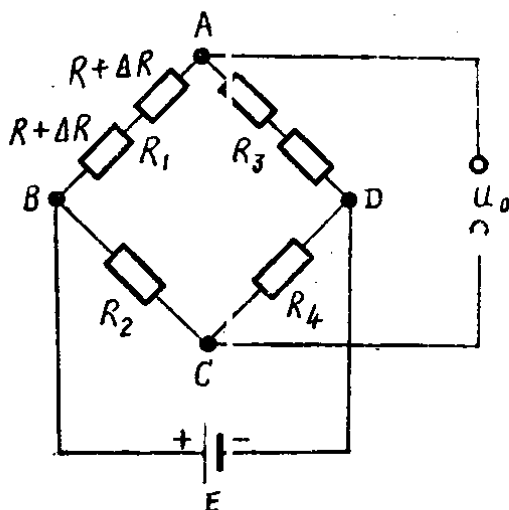


图 1—4 电阻应变片的串连

图 1—5 为两桥臂都用两片电阻应变片并联组成，且单臂工作的情况。

$$\text{这时:} \quad R_1 = \frac{1}{2} R \quad R_3 = \frac{1}{2} R$$

$$\Delta R_1 = \frac{(R + \Delta R)(R + \Delta R)}{R + \Delta R + R + \Delta R} - R_1$$

$$= \frac{(R + \Delta R)^2}{2(R + \Delta R)}$$

$$= \frac{1}{2} R$$

$$= \frac{1}{2} \Delta R$$

代入 (1—2) 式得:

$$u_0 = \frac{1}{4} E \left(\frac{\frac{1}{2} \Delta R}{\frac{1}{2} R} \right)$$

$$= \frac{1}{4} E \frac{\Delta R}{R}$$

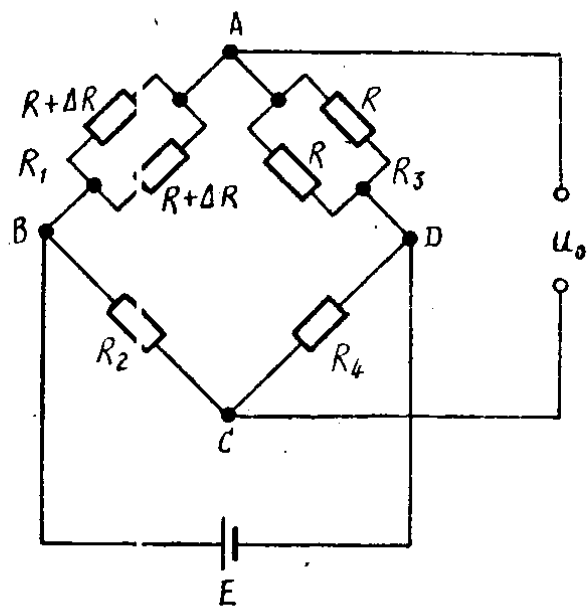


图 1—5 电阻应变片的并联

由此可见，并联也不能提高电桥的灵敏度和增加输出。并联后每个应变片的电压降不变，因而应变片通过的电流和发热情况均未改变，所以无法提高桥压，同时也起不到取平均的效果。因此一般不采用这种形式。

第二节 电桥的非线性误差

一、电阻应变片感受的应变与电阻值相对变化之间的非线性关系

一般认为，丝式和箔式应变片的应变与电阻值相对变化之间的关系是线性的。但这只是指在一定的应变范围内而言

的。当电阻应变片所感受的应变很大时，非线性关系就表现出来，而且应变越大，非线性就越严重。因此严格说来它们之间并不是线性关系，试分析如下：

对于单根电阻丝，其灵敏度系数的定义可用下式表示：

$$K = \frac{dR/R}{dl/l}$$

或：

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dl}{l}$$

式中 dl ——电阻丝长度 l 的微量变化；

dR ——电阻丝电阻 R 的微量变化。

当 l 的增量较大时，如为 Δl ，引起 R 的增量为 ΔR 。

将上述等式两边积分得：

$$\int_{R_0}^{R_0 + \Delta R} \frac{dR}{R} = K \int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} \frac{dl}{l}$$

$$l_n R \Big|_{R_0}^{R_0 + \Delta R} = K l_n l \Big|_{l_0}^{l_0 + \Delta l}$$

$$l_n (R_0 + \Delta R) - l_n R_0 = K [l_n (l_0 + \Delta l) - l_n l_0]$$

$$l_n \left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0} \right) = K l_n \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = l_n \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right)^K$$

$$1 + \frac{\Delta R}{R_0} = \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)^K$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)^K - 1 \quad (1-5)$$

根据牛顿二项式定理将 $\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)^K$ 展开：

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right)^K &= 1 + K \frac{\Delta l}{l_0} + \frac{K(K-1)}{2!} \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right)^2 \\ &+ \frac{K(K-1)(K-2)}{3!} \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right)^3 + \dots \end{aligned}$$

将上式代入式 (1-5), 整理后用 $\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon$ 代入后得,

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \varepsilon \left[1 + \frac{K-1}{2!} \varepsilon + \frac{(K-1)(K-2)}{3!} \varepsilon^2 + \dots \right] \quad (1-6)$$

从式 (1-6) 可以看出, $\frac{\Delta R}{R_0}$ 与 ε 呈非线性关系, 只有当右边括弧内第二项以后忽略不计时才可近似表示为:

$$\frac{\Delta R}{R_0} \approx K \varepsilon \quad (1-7)$$

比较式 (1-5) 和式 (1-6) 后, 得出非线性相对误差为:

$$\gamma = \frac{K-1}{2!} \varepsilon + \frac{(K-1)(K-2)}{3!} \varepsilon^2 + \dots \quad (1-8)$$

由于在金属材料塑性范围内的应变不过百分之几, 所以式 (1-8) 可略去高次项, 近似表示成:

$$\gamma = \frac{K-1}{2!} \varepsilon \quad (1-9)$$

现举例计算在满足非线性误差 γ 指标要求时, 所能测的应变范围。

例 1 如要求非线性误差 γ 小于 1%, 且 $K=2$ 则:

$$\frac{K-1}{2!} \varepsilon_{\max} < 1\%$$

$$\varepsilon_{\max} < \frac{2}{K-1} \cdot 1\%$$

$$\varepsilon_{\max} < 20,000 \text{ 微应变。}$$

例 2 如要求非线性相对误差 γ 小于 0.1%, $K=2$, 则:

$$\frac{K-1}{2!} \varepsilon_{\max} < 0.1\%$$