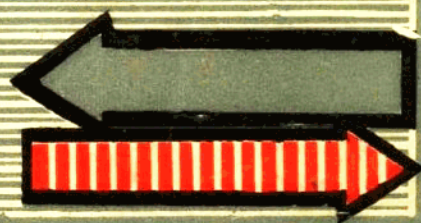
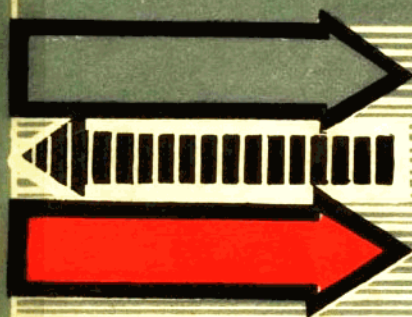


测试与传感技术

杜润祥 编著

华南理工大学出版社



测试与传感技术

杜润祥 编著

华南理工大学出版社

内 容 提 要

本书论述电阻应变测试技术；机械参数及热工参数测试与传感技术；记录显示装置；微型计算机在测试与自控系统中的应用；误差分析与数据处理及测试大纲编制示例。

全书以信息的传感、转换、处理、显示、记录为中心，着重分析各类传感器、仪表、记录装置的工作原理，结构特点，技术性能及适用场合；扼要介绍非电量测试系统的组成，特点及各环节之间的关系；通过典型实例，论述微机在测试与自控系统中的应用。对误差分析与数据处理作了实用性论述。书中适当收集了具有实用价值的图表；附录有测试大纲编制示例及作业、复习、思考题。

本书可作高等院校机电、交通、机械、冶金、船舶、化工及自动控制类各专业本科教材，亦可供从事计量、测试与自动化工作的教师、工程技术人员、技术管理干部及研究生参考。

测 试 与 传 感 技 术

杜润祥 编著

责任编辑 希 昂

*

华南理工大学出版社出版发行

(广州 五山)

长沙铁道学院印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张13.75 字数400千字

1991年1月第1版 1991年1月第1次印刷

印数 1—3 000

ISBN 7—5623—0234—0/TB·22

定价7.80元

前 言

本书综合了我国高等理工科“测试技术”与“传感器原理”教学大纲精神和理工科大学毕业生毕业后在科研、生产部门工作的可能需要，编者积数十年教学、科研之经验，广泛参考了国内外同类教材及专著精选编写而成。自1984年开始，一直为机电工程系各专业所采用，深受读者好评。最近，作者根据机电一体化精神及测试与传感技术的发展状况，对原书进行了一次全面修订。删去了部分较陈旧的内容，补充了作者个人及测试与传感技术领域同行新取得的科研成果。增写了“微型计算机在测试与自控系统中的应用”，把测试与传感技术和微机应用有机结合起来，使本书更具科学性、系统性、新颖性和实用性。

科学技术越发达，测试与传感技术在科学研究和生产实践中的作用就更突出。许多传统的测试方法，随着电子技术的飞速发展，逐渐为电测法所代替。在整个测试科学范畴内，非电量电测法占有更大的比重，因此，它是本书的主要研究内容。

测试与传感技术涉及面非常广泛。为了使读者能够获得一个比较系统而完整的概念，本书以信息的传感、转换、处理、显示记录为中心，从基本物理概念入手，着重分析各种传感器、仪表及记录装置的工作原理，结构特点，技术性能及适用场合。扼要介绍测试系统的组成、特点及各环节之间的相互关系。通过生产实践中的典型实例，阐明微机在测试与自控系统中的应用技术。对误差分析与数据处理作了实用性论述。力求做到系统性与完整性的统一，又有一定深度和广度。附录对我国传感器、仪器仪表部分厂家及产品作了介绍，供读者参考与选用。实验大纲编制示例及作业、复习思考题，有利于教学和自学。

全书分六篇共十七章，各篇既有一定联系，又可相对独立，自成体系。本书可作高等理工院校机电类本科各专业的教材，供80学时讲授，40—50学时也可选讲采用。还可供从事计量、测试、仪器、仪表、机电、化工、冶金、热工、动力、工程机械、自控及自动化技术的教师、工程技术人员及技术管理干部和研究生参考。

国防科学技术大学张彭教授和长沙铁道学院行治民教授对书稿进行了评审并给予高度评价；本书参考文献的作者对测试与传感技术的理论和实践论述得那样精辟严谨，编者直接引用了他们的部分论述；在本书出版工作中，得到了华东电子仪器厂、成都科学仪器厂、国营水青示波器厂、常州自动化仪表厂的大力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢！

由于编著者水平有限，而书中所涉及的知识面又极为广阔，因此，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

杜润祥

1990.10.于长沙铁道学院

目 录

机械工业出版社出版 第八版

用 户 中 心 加 工 量 程 电 测 电 控 技 术 第 二 版

绪 论

- 0.1 测试与传感技术在现代科学技术领域中的作用 1
- 0.2 测试与传感技术的性质、任务及与其他学科的联系 2
- 0.3 非电量电测系统的组成及各单元的作用 2
- 0.4 测试与传感技术的发展方向 3

第一篇 电阻应变测试技术

第一章 电阻应变计及应变胶

- 1.1 应变测试技术的产生和发展 4
- 1.2 应变计的转换原理 4
- 1.3 应变计的结构及分类 6
- 1.4 应变计测试的优点 8
- 1.5 应变计的规格及型号命名规则 9
- 1.6 应变计的工作过程 10
- 1.7 应变计的常温工作特征 10
- 1.8 应变计的选用及检验 14
- 1.9 应变计的精贴工艺与防护措施 15
- 1.10 应变计基底材料及应变胶 16
- 1.11 应变胶使用技术 19

第二章 电阻应变仪

- 2.1 应变仪的分类、结构及特性 22
- 2.2 电桥测量电路 24
- 2.3 应变仪使用中需要注意的问题 35
- 2.4 数字应变仪, 超动态应变仪及遥测应变仪简介 38

第二篇 机械参数测试与传感技术

第三章 力参数的传感与测试

- 3.1 概述 40
- 3.2 电阻应变式测力传感器的基本原理与结构 40

- 3.3 电阻应变式测力传感器弹性元件基本形式及主要参数的计算分析 41
- 3.4 电阻应变式测力传感器的主要技术性能 48
- 3.5 弹性元件的材料及加工工艺要求 49
- 3.6 弹性元件的设计与计算 52
- 3.7 应变计的布置及组桥方式 54
- 3.8 压磁式测力传感器原理与结构 55

第四章 传动轴扭矩的传感与测试

- 4.1 扭矩测量的理论依据和基本方法 57
- 4.2 电阻应变式扭矩仪 57
- 4.3 相位差扭矩仪 61

第五章 位移的传感与测试

- 5.1 电阻式位移计 64
- 5.2 电感式位移计 65
- 5.3 差动变压器位移计 69
- 5.4 模拟式光电位移传感器 71
- 5.5 电涡流式位移传感器 72
- 5.6 组合式位移传感器 74
- 5.7 光纤位移传感器 74
- 5.8 光栅位移传感器 75
- 5.9 激光测距传感器 76

第六章 转速的传感与测试

- 6.1 转速测试方法及分类 77
- 6.2 光电式转速计的原理与结构 77
- 6.3 磁电式转速计 79

第七章 机械振动的传感与测试

- 7.1 概述 80
- 7.2 机械振动规律的描述 80
- 7.3 振动的类型及其特征参数 81
- 7.4 振动测量的分类 83
- 7.5 测振用传感器 84
- 7.6 测振用放大器 96

7.7 机械阻抗的测试101

13.3 振子的结构特性和选用164

第三篇 热工参数测试与传感技术

第五篇 微型计算机在测试与自控系统中的应用

第八章 流体压力的传感与测试

8.1 弹性式压力敏感元件105

8.2 常用压力传感器107

5.3 压力变送器109

第九章 流量的传感与测试

9.1 节流式流量计112

9.2 转子式流量计114

9.3 涡轮式流量计115

9.4 容积式流量计116

9.5 热电阻式流量计117

第十章 温度的传感与测试

10.1 概述118

10.2 温度标准及基本测温方法118

10.3 接触式测温120

10.4 非接触式测温139

10.5 瞬时温度的测试143

第十一章 红外线轴温探测器

11.1 概述144

11.2 红外线轴温探测器的原理144

11.3 红外线轴温探测器的结构与安装145

11.4 红外探头146

11.5 红外线轴温探测器的工作原理与工作过程149

11.6 数字式红外线轴温探测器简介153

第四篇 显示和记录装置

第十二章 磁带记录器

12.1 概述154

12.2 磁带记录器的构造及工作原理154

12.3 磁带记录器的记录方式156

12.4 磁带记录器的应用158

12.5 磁带记录器的特性参数159

第十三章 光线示波器

13.1 光线示波器的构造和工作原理161

13.2 光线示波器的分类164

第十四章 微型计算机在流量测试中的应用

14.1 概述178

14.2 角接取压标准孔板测量天然气流量179

14.3 微型计算机接口电路180

14.4 应用软件设计及程序示例183

第十五章 单片机在测试与自控系统中的应用

15.1 单片机在称重中的应用188

15.2 单片机在交通信号灯自动控制系统中的应用190

第十六章 单板计算机在铁路货车重量、超载、偏载动态检测系统中的应用

16.1 概述195

16.2 车型鉴别原理与方法195

16.3 传感器简介197

16.4 硬件电路及其与计算机的连接198

16.5 系统软件结构设计与分析199

第六篇 误差分析与数据处理

第十七章 误差分析与数据处理概要

17.1 误差公理203

17.2 误差的分类与定义203

17.3 等精度多次测量的误差估计204

17.4 间接测试的误差传递204

17.5 测试误差的粗略估计205

附录

附录 I、测试大纲编制示例207

附录 II、我国部分传感器、仪器仪表厂家及产品简介210

附录 III、作业、复习、思考题212

参考文献

绪 论

0.1 测试与传感技术在现代科学技术领域中的作用

人们认识自然规律的基本方法大致可归纳为三类，即观察、推理和测试。“春蚕到死丝方尽，蜡烛成灰泪始干”这两句诗是诗人对春蚕生命始末及蜡烛燃烧过程的真实写照。“旭日东升”、“日落西山”这两句成语则正确反映了太阳和地球相对运动的规律。这些都是人们通过对自然现象的长期观察而获得的认识。在数学、物理等科学领域中，人们发现和建立了许许多多的定律和定理，从这些定律和定理中又进一步推论出了反映这一领域中的很多特定规律，深化了对这些科学的研究和认识。大家知道，在数学“极限概念”一章中有这样一条定理：“有界变量与无穷小的乘积是无穷小”。人们根据这条定理推论出“常量与无穷小的乘积，有限的函数与无穷小的乘积，无穷小量与无穷小量的乘积都是无穷小”。这便是通过推理认识自然规律的例子。然而，自然界有着更多的规律是无法从观察和推理中找到正确答案的。诸如某台发电机究竟能输出多高电压和多大功率？动力机械的转速和扭矩大小，管道中液体压力和温度的高低，这就只有通过相应的仪器设备进行测试才能获得。任何一种新型机电产品的技术性能，必须通过测试才能对它作出评价。各种物质的三态温度，也只有通过测试方能获得确切的数字。因此，测试是人们获得关于认识自然规律的基本方法之一。

科学技术的发展和测试技术的发展密切相关，在当代除了极个别学科外，现代科学技术都离不开测试工作。桥梁和各种机械构件的强度，动力机的性能，金属热处理和冶炼过程的自动控制，原子弹的爆炸威力，火箭导弹试验中各部份工作状态等等，都需要进行大量的测试。可见，测试技术是科学研究和现代化生产必不可少的手段。

现代测试方法和测试装置的出现固然是科学技术发展的结果，然而，精确的测试又是促成科学技术新发现和新进展的强有力工具。1898年12月居里夫人从沥青矿渣中发现了一种放射性极强的新元素—镭，当时很多权威学者质问居里夫人镭的原子量是多少？居里夫人说尚不知道。那些权威学者便说：“没有镭的原子量就没有镭”。居里夫人这一新发现就这样被推迟了四年，直到1903年测试出镭的原子量后，那些反对者们才目瞪口呆，居里夫人这一新的发现才被世人所公认。美籍华人杨振宁、李政道、牛满江等著名科学家，他们在高能物理学和生物学方面的杰出贡献，与他们实验室拥有当今世界第一流的科学仪器和实验设备借以为他们的研究对象提供准确的测试是分不开的。

传感器是直接向被测对象索取情报信息的一次仪表，是测试系统的侦察兵。其质量的优劣决定着测试的成败。没有优质的传感器便没有精确的测试。传感技术是测试技术的关键技术，传感技术与测试技术又是不可分割的统一体。

实践证明，一个国家测试与传感技术的发展状况和是否拥有先进的测试设备是衡量该国国家科学技术发展的重要标志。没有现代测试与传感技术的发展，现代科学技术的进一步发展将是困难的。

0.2 测试与传感技术的性质、任务及与其他学科的联系

测试与传感技术是一门边缘科学，所涉及的范围十分广泛。因此，它必须借助于数学、物理学、材料力学、金属工艺、仪表材料、电子技术和计算机科学等诸方面的理论和成果，来研究各种物理量的传感原理和测试方法，设计并制造出先进的传感器及测试仪器设备，合理地组成测试系统，以完成各种物理量的测试任务。

测试技术又是一门实践性很强的应用科学，离开了实验，就不能真正学好这门功课。只有通过实验，才能进一步理解和掌握各种物理量的测试原理和方法，学会正确使用一般测试仪器设备并将它们组成能满足具体测试要求的测试系统。也只有通过实验，才能做到理论联系实际，培养学生独立编制测试大纲，完成具体测试任务的技能。

不仅如此，由于测试结果与被测量的真值总是存在着一定偏差，这就要求借助概率论和数理统计的有关知识，对测试获得的数据进行科学的数据处理和误差分析，得到正确反映被测量的测试结果，对机电产品作出合理评价，为科研人员验证现有理论和建立新理论，为设计人员进行最优设计，为工艺人员改进生产工艺等提供实验依据。在自动控制系统中，几乎都是借助于测试所获得的信息再通过“反馈控制原理”把生产过程或工作状态调整和控制人们预期的状态，以保证产品的优质和性能的稳定。

除某些几何参数有时可采用机械量具直接测量外，绝大多数物理参数广泛采用电测法。因为电测法便于连续、自动和遥测。便于直接与计算机联机，实现实时、快速、准确和智能化的测试与控制。

在电测法中，又分为电量电测法和非电量电测法两类。前者属于电工测量范畴，它可以直接利用二次仪表将被测量的大小测量出来。如用安培计测量电流和用伏特计测量电压。后者一般不能直接用二次仪表完成测试任务，通常必须采用具有某一特定物理效应的传感器将被测非电量转换成电量，然后再利用电测法进行测量。例如将应变计（一种敏感应力或应变的传感器）粘贴在某一受力试件上，应变计敏感试件的应变并将该应变量转换成电阻的变化，再通过测量电桥转换成电量（电压或电流），然后通过应变仪将试件的应变值或受力的大小测试出来。非电量电测法在科学研究和生产实践中更具有广阔的领域，本书将把它作为中心内容介绍给读者。

如前所述，测试技术是一门边缘科学，因此，要求读者具有较好的数学、物理学、电工原理、电子技术、材料力学和计算机科学基础，才能学好这门功课。

0.3 非电量电测系统的组成及各单元的作用

经典的非电量测试系统乃是一次仪表与二次仪表的组合。一次仪表即传感器，二次仪表即指示器。

现代非电量测试系统一般包括信息获得装置；信息放大变换装置；信息采集处理装置和信息显示记录装置。现代非电量测试系统原理方框图如图 0-1 所示。

传感器通常由敏感元件及测量线路组成。其作用是将被测非电量转换成电量。传感器是现代非电量测试系统的侦察兵，是获得信息的装置。传感器在现代非电量电测系统中占有极

其重要的地位，其质量的优劣，即获得信息的正确与否，关系到整个测试系统的精度，决定着测试工作的成败。

较早的书籍文献把传感器称为变送器、发送器、变换器、换能器，现在测试仪表中统一称为传感器（Transducer），而把输出为标准信号的传感器称为变送器（Transmitter），

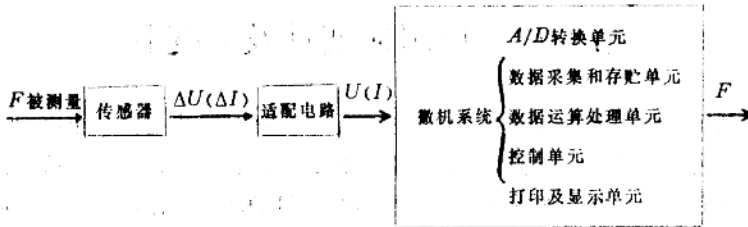


图0-1 现代非电量电测系统原理方框图

如压力变送器。在生物学、医学及超声仪器中，仍称它为换能器或探头。

适配电路属信息放大变换装置。因为传感器输出的电信号一般很微弱，不能满足计算机采样要求，也难以推动记录指示装置动作，因此必须将传感器输出的微弱电信号进行放大，有时还需进一步调制、解调、变频、整形、滤波等。总之，适配电路是传感器与计算机或记录显示器之间的中间环节，是传感器输出信息有效馈送给计算机或记录显示器的桥梁。它的作用是将传感器输出的微弱电信号不失真地放大变换成满足计算机或记录指示器要求的电信号。

微机系统包括 A/D 转换单元，数据采集、存贮单元，数据运算、处理单元，控制单元，打印记录单元和显示单元，完成信息的处理、记录和显示。因此，微机系统是一个智能化的信息采集处理装置和记录显示装置。

微机系统在应用程序（软件）的控制下，完成对适配电路送来的电信号进行采样、存贮、运算和处理，最后将处理好的数据即测试结果打印记录和显示出来，以供测量者使用。

由此可见，非电量电测系统由于引进了微机系统，才使得经典的非电量电测系统发展成现代非电量电测系统。也正是由于使用了计算机，测试工作才得以实现实时、准确和智能化。

0.4 测试与传感技术的发展方向

随着科学技术和国民经济的不断发展，对测试与传感技术提出了更高的要求。单功能的检测仪器设备远远不能适应大型成套项目中对多种多样动、静态参数的测试与调控，因此，加速我国测试队伍的建设；加强对传感装置和仪器仪表新材料及新工艺的研究试验；加速新型传感器如数字式传感器及仿生学传感器的研究试验；设计制造出灵敏度高、直线度好、反映速度快、频响特性好、适应环境能力强、滞后和蠕变小、使用寿命长、稳定可靠性好的小型和微型化传感器；充分采用大规模和专用集成电路、尽快实现“材料、器件、电路、系统一体化”的新型仪表；加强对无接触测试技术的研究，在测试与传感技术供城普及微机应用并充分发挥计算机的智能，设计制造智能化综合测试系统并着手进行智能材料的研究，这就是测试与传感技术的发展方向。

未来的科学家和工程师——今天在各类高等学校奋发攻读科技的大学生——在学校花较多时间和精力学好测试与传感技术这门课并把握住它的精髓，必将获得永久性裨益。

第一篇 电阻应变测试技术

第一章 电阻应变计及应变胶

科学技术的飞速进步和现代化生产的迅猛发展,对测试技术提出了更高要求,诸如航空、航天、航海、公路、铁路、机械制造、工程建筑、水电、采矿、冶金、纺织、地质勘探、石油化工、原子科学、生物、医疗等方面都要进行大量的测试工作,这些几乎都借助于电测技术。其中应用最广的要数电阻应变测试技术。

电阻应变计又称应变片,是电阻应变测试技术中的关键元件。实用中,将应变计通过应变胶(亦称粘结剂)粘贴在试件表面上,配合相应的测量仪器,就可测出试件的应变或与应变有关的其他物理量。尤其是在非电量电测中,经常需要大量使用各种应变计和应变胶,因此,本章对它们作比较详细的介绍,以便需要时能正确选择和使用。

1.1 应变测试技术的产生和发展

科学的产生和发展,都是来源于生产实践或科学实验。应变计的基本原理是英国物理学家W.Thomson最先发现的。他在指导敷设大西洋海底电缆时,发现金属材料在受到压力或其他外力作用时,电阻值会发生变化。利用这一原理他测得了海洋深度,并于1856年在英国皇家协会发表了题为“金属的电动力学性质”的论文,在世界上首次提出了“金属丝在机械应变作用下会发生电阻变化”的原理,为应变测试技术奠定了理论基础。

伴随着技术的进步,1923年,美国P.W.布里奇曼再次证实了汤姆森的实验,并根据这一原理制成了测量水压的压力计。

1930年,美国R.W.卡洛恩采用钢丝作应变敏感元件绕在绝缘棒上,制成了测量混凝土结构应变的卡洛恩电阻应变计。

1936—1938年,美国E.Simmons和A.Ruge分别制成了丝绕粘贴式电阻应变计,并在1940年由工厂正式生产,使电阻应变测试技术达到实用阶段。

1950年,照相腐蚀法开始应用于生产实践,1952年,英国P.Jackson利用这一工艺首先制成金属箔式应变计,使应变测试技术发生了一场深刻的变革。

1954年,C.S.Smith发现了锗和硅的压电效应,1957年美国率先制成了半导体应变计。

我国从五十年代才开始研制应变计和应变仪,目前直接从事应变计和应变仪的研究生产单位多达百余家,如华东电子仪器厂和成都科学仪器厂,都是国家仪器仪表重点企业,已定型生产各种规格质量很好的应变计和应变仪。

1.2 应变计的转换原理

应变计的作用是将试件表面的应变转换成应变计电阻的变化。

以金属材料为敏感栅的应变计，测量试件应变的原理是基于金属丝的“应变电阻效应”。它是金属丝的电阻随其变形而改变的一种物理特性。下面分析一下单根金属丝在产生应变电阻效应时，其电阻变化与应变之间的函数关系。

设有一根横截面积为 A 的金属丝（图1-1），其原始电阻

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

式中 ρ —金属丝的电阻率，
 l —金属丝的长度，
 A —金属丝的截面积。

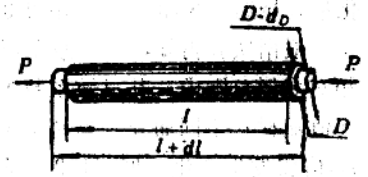


图1-1 金属丝拉伸后的情况

且 $A = \pi D^2/4$
 其中 D 为金属丝的直径。由式 (1-1) 知，金属丝电阻值与其几何尺寸及电阻率有关。当金属丝伸长 dl ，面积缩小 dA ，由于晶格扭歪等原因使其电阻率发生的变化为 $d\rho$ 时，电阻必然变化 dR ，根据微分学知，求 dR 之值可对式 (1-1) 进行微分。

对式 (1-1) 两边取对数

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln A \quad (1-2)$$

对式 (1-2) 两边取微分

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (1-3)$$

因为

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

$$= \frac{D^2 - 2DdD + dD^2 - D^2}{D^2} \quad (1-4)$$

略去高阶微量 dD^2 后，式 (1-4) 变成

$$\frac{dA}{A} = -2 \frac{dD}{D}$$

$$= -2\mu \epsilon \quad (1-5)$$

式中 μ —金属丝材料的泊松比，

ϵ —金属丝轴向应变。

将式 (1-5) 代入式 (1-3) 得

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

或

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

令

$$K_s = \frac{dR/R}{\epsilon} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} \quad (1-6)$$

即

$$\frac{dR}{R} = K_s \epsilon \quad (1-7)$$

根据微分的性质：当自变量趋于无穷小时，函数的微分即等于函数的增量。因此，式 (1-7) 又可用增量表示：即

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (1-8)$$

可见，当用电测仪器测得应变计的电阻变化量后，就可求得被测试件应变的大小。式中 K ，称为单根金属丝的灵敏系数。说明金属丝产生单位应变 ε 时所引起金属丝电阻值的相对变化量。显然， K 越大，灵敏度越高。

根据实验得知，大多数金属丝在一定的相对变形范围内，其灵敏系数 K 是个常数，其值随材料不同而异。当超出某一范围时， K 值将发生变化。见图 1-2。因此，当测得 $\Delta R/R$ 并已知 K 后，根据式 (1-8) 即可求得金属丝的应变值。

从式 (1-6) 可知，单根金属丝的灵敏系数 K 受两个因素的影响：第一个因素是金属丝受力后材料的电阻率发生变化所引起的，即 $\frac{d\rho}{\rho}/\varepsilon$ 项。如没有后一因素的影响，对于一般金属（泊松比 $\mu = 0.3-0.4$ ），其灵敏系数 $K_s = 1.4-1.8$ ，但对许多金属的实验，得出 $K_s = -12-+4$ 。由于对电阻随金属变形而变化的规律目前还不够清楚，所以无法按式 (1-8) 从理论上求出 K_s 值，而只能通过实验求得。

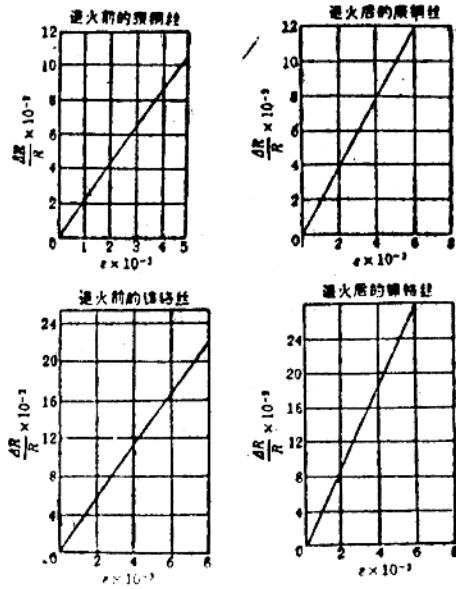


图 1-2 应变与电阻变化率的关系

单根金属丝的灵敏系数 K_s 与相同材料做成的应变计的灵敏系数 K 是不相同的，因为影响应变计灵敏系数的因素更为复杂。因此，对应变计来说，当它随试件变形时，其电阻变化率 $\Delta R/R$ 与应变 ε 的关系式为

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$$

上式中的 K 为应变计的灵敏系数，由实验求得。 ε 为试件的应变，它是无量纲的量，在应变测试中常用微应变 $\mu\varepsilon$ 表示。一微应变相当于长度为 1 米的试件，其变形为一微米时的相对变形量 ($1\mu\varepsilon = 1 \times 10^{-6} \text{mm}$)。

1.3 应变计的结构及分类

1.3.1 应变计的结构

图 1-3 是目前常用的电阻丝式应变计的结构示意图。在金属电阻丝绕成的敏感栅两端焊有较粗的金属引出线，将它们用应变胶粘贴在基底上，上面再贴上覆盖层。应变计种类繁多，形式各异，但其基本结构，都由三部分组成。

1. 敏感栅 它是应变计的核心部分，其作用是感受试件的变形，并将机械应变转换成电阻的变化。敏感栅的材料是金属电阻丝（箔）或半导体。国产应变计的敏感栅材料多用康

铜、镍铬合金和P型单晶硅等，其中以康铜应用最广。

敏感栅纵轴方向的长度称栅长或标距，用 l 表示。有圆弧端的敏感栅，栅长是圆弧内侧间的距离；有横栅的敏感栅，栅长是横栅内侧间的距离。在垂直于纵轴的方向上，敏感栅外侧之间的距离称栅宽，用 b 表示。栅长和栅宽是应变计的基本参数。

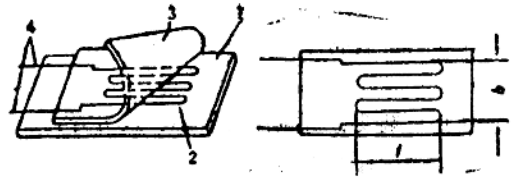


图1-3 金属丝式应变计的结构

1—基底；2—敏感栅；3—复盖层；4—引出线。

2. 基底和复盖层 它们的作用是固定和保护敏感栅。当应变计粘贴在试件上后，与应变胶一起把试件表面的变形传给敏感栅；使敏感栅与试件绝缘。其材料主要有纸和有机聚合物两类。用纸作基底的应变计称为纸基应变计，除了热稳定性和抗潮性稍差外，其他性能均满足使用要求。故目前在70℃以下的测试中多使用它。用有机聚合物（如酚醛树脂、环氧树脂和聚酰亚胺等）作基底的应变计称为胶基应变计，能较好地满足各种使用要求，可用于工作温度较高、湿度很大（甚至水下）或长期测试中。粘贴时应尽量使用与基底材料类型相同的应变胶，否则一定要预先进行试验，决定其可否使用。在高温下工作的应变计，则采用石棉、无碱玻璃布或金属薄片等作基底。

3. 引出线 其作用是从敏感栅引出电信号，并与测量导线连接。

1.3.2 应变计的分类

应变计种类虽然很多，但我国目前应用最广的主要有丝绕式应变计、箔式应变计和应变花三种。而薄膜应变计及半导体应变计尚在发展过程中，现分别介绍如下。

1. 丝绕式应变计

(1) 回绕式应变计 这种应变计是把敏感栅丝直接回绕在各种绝缘基底上而成。见图1-4。基底很薄，一般为0.03mm左右，因而粘贴性能好，能保证有效地传递试件的变形，稳定性好。当采用不同基底材料，特殊合金敏感栅和应变胶时，应变计能适用于高温、超低温、高压液体、强磁场、核辐射等各种特殊环境。

(2) 短接式应变计 这种应变计是把敏感栅平行安置在各种不同的绝缘基底上，两端用直径比栅丝大5—10倍的镀银金属丝短接起来而成，见图1-5。其突出优点是克服了回绕式应变计的横向效应。但由于焊点多，在冲击、振动和动态测试时，易在焊点处出现疲劳破坏。制作时工艺要求高，否则不易保证质量。

2. 箔式应变计 系利用照相制版或光刻腐蚀的方法，将电阻箔材在绝缘基底上制成各种图形而成所需的应变计。它具有许多优点，应用日益广泛，在常温条件下，已逐步取代了丝绕式应变计。它的优点是：

(1) 敏感栅截面为矩形，其表面积对截面积之比远较圆断面为大，故粘合力大；

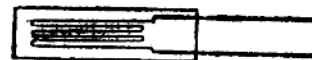


图1-4 回绕式应变计

- (2) 敏感栅薄而宽，粘结情况较好，传递试件变形的性能较丝式敏感栅为好；
- (3) 具有较大的散热能力，允许工作电流大，灵敏度较高；

(4) 敏感栅弯头横向部分较宽，因而横向效应可忽略；

(5) 易制成特殊形状的应变计和应变花；

(6) 蠕变、机械滞后较小、疲劳寿命长。

箔式应变计常见的几种构造形式见图 1-6，其中图 (c) 可用以测扭轴主应力及作为应力计使用。



图1-5 焊接式应变计

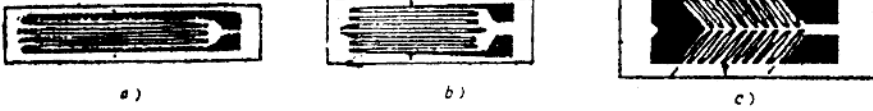


图1-6 箔式应变计

3. 应变花 在平面应力场中，经常需要测量某一点上两个或三个方向的应变，这就要求组成应变花。应变花有两种基本形式，即互成 45° 的直角形应变花和互成 60° 的等角形应变花。去掉直角形应变花的 45° 方向应变计即成二向直角形应变花。图 1-7 示出了几种不同用途的应变花。

4. 薄膜应变计 随着薄膜技术的发展，近几年不少厂家采用真空蒸镀技术或真空溅射技术将金属电阻材料直接蒸镀或溅射在薄的绝缘基底上形成极薄的敏感栅，最后加上保护复盖层而成。其优点是应变灵敏系数高，允许电流密度大，工作温度范围广，可达 $-197^\circ\text{C} - +317^\circ\text{C}$ 。

5. 半导体应变计 它是利用锗、硅等半导体制成。优点是灵敏度很高，可测微小应变。滞后小，横向效应小，体积小。缺点是温度稳定性差，灵敏度的直线度差。使用时必须采用温度和直线度补偿措施。目前仅用在要求不高的测试中。

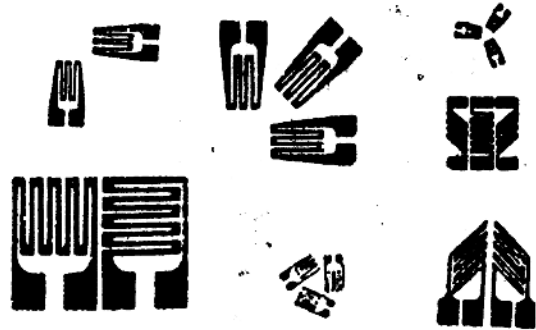


图1-7 各种不同用途的应变花

1.4 应变计测试的优点

以应变计为敏感元件，用于测试应变及与应变有关的其他物理量，优点是：

- (1) 安装维护容易，对试件应力场几乎没有影响；
- (2) 灵敏度高，测量范围广，测量误差小，性能稳定，价格低廉；
- (3) 适应性强，可用于不同对象和不同条件下的测试；
- (4) 与电桥测量线路配合，容易实现温度补偿和消除不必要的成份；
- (5) 容易实现多点同步测量、远距离测量和遥测。与数据处理装置配合，容易实现测试过程和数据处理过程自动化。

1.5 应变计的规格及型号命名规则

1.5.1 应变计的规格

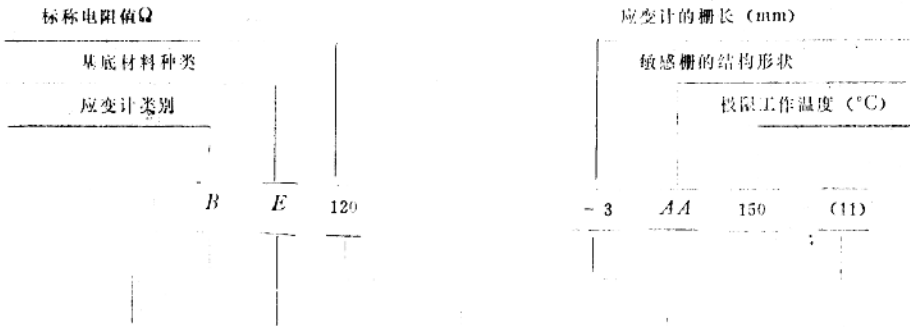
通常所说的应变计规格一般是指应变计敏感栅工作面积和电阻值。敏感栅面积为其长宽之乘积。长度是指敏感栅轴向有效工作长度即标距 L ，宽度是指敏感栅首末栅丝外侧距离即栅宽 B 。电阻值是指应变计未安装，不受任何外力和在室温条件下测得的电阻值。它包括单片阻值，平均名义阻值和标准名义阻值（或标称阻值）。

单片阻值是对每片应变计进行测量所得的数据。平均名义阻值是每组（每包）应变计的平均阻值。包装袋上大都标以平均名义阻值及公差。例如： $120 \pm 0.5\% \Omega$ ，或 $120 \pm 0.5 \Omega$ 。

标称阻值是指人为规定的电阻，如美国 NAS942 规定标准名义阻值为 60、120、240、350、500、1000 Ω 等。常用阻值为120 Ω 和240 Ω 。

1.5.2 应变计的型号命名规则

应变计的型号由汉语拼音字母和数字组成。



S—丝绕式	F—酚醛类	5	02	可温度自补偿材
D—短接式	B—玻璃纤维	60	03	料的线膨胀系数
	布浸胶	(90)	05	($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
B—箔式	H—环氧类	120	1	9—钛
	P—金属薄片	200	2	11—钢
T—特殊用途	G—聚乙烯醇	(250)	3	16—不锈钢
	缩甲醛	350	4	23—铝
	S—聚乙烯醇	500	5	27—镁
	缩丁醛	650	6	
	Q—纸浸胶	1000	7	
	J—树脂类		8	
	Y—有机树脂		10 40	
	A—聚酰亚胺		12 60	
	L—临时基底		15 80	
	Z—纸		20 100	

1.6 应变计的工作过程

在图 1-8 中, 当试件 5 在外力 P 作用下发生变形时, 变形以剪切形式传到基底 2 上。基底的变形又以剪切的方式传给敏感栅 1。图中 3、4 分别为复盖层和粘结剂。由于基底端部位移最大, 故剪应力最大, 正中截面处则因不发生位移, 故剪应力为零, 其两侧位移反向, 故剪应力反号, 如图 1-8a) 所示。其中 Q_1 表示基底所受剪力, Q_2 表示敏感栅所受剪力。由此可知, 敏感栅所受轴向力为沿轴向剪应力之和, 其分布如图 1-8b) 所示。

现从图 1-8 中取金属丝左半段为脱离体观察 (见图 1-8c), τ 为剪应力, 其大小以箭头长短表示, N 为轴向内力。由于正中截面处轴向力为剪应力之和, 故最大; 端部剪应力之和为零, 故轴向力为零。端部附近, 则因剪应力所占比例最大, 故轴向力按指数曲线递增, 当增至图 1-8 所示位置 1 及 1' 时, 已接近最大值 (试验指出 $a \approx 5D$)。基于端部这一传力过程的存在, 可知敏感栅的基长即使在应变均匀分布的情况下, 也要比原长度缩短 $2a$, 因而电阻变化 dR 也要相应减小。如 R 不变, dR/R 将变小, 这就导致了应变计灵敏度的降低。不过, 当敏感栅丝径越小, 胶和基底越薄, 应变胶的胶结力越强时, 其 a 值越小, 亦即应变计的灵敏度不致降低过大。

应变计贴于测点表面后, 我们希望敏感栅感受的变形和试件测点处的实际变形完全一致。由以上分析可知, 这一期求虽然不能绝对实现, 但实践证明只要我们使用的应变胶性能良好, 注意粘贴质量 (特别是应变计两端剪力较大处的粘贴质量, 这一点对于基长较短的应变计尤为重要), 力求做到胶层匀薄, 处处贴牢, 尽可能选用小直径的金属丝应变计或箔式应变计, 仍可非常准确地传递试件的变形, 从而获得较高的测试精度。

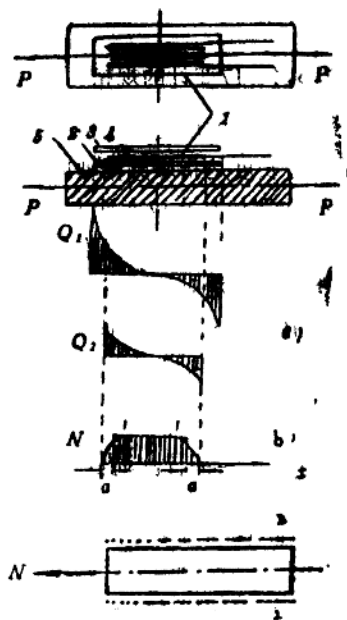


图 1-8 金属丝左半段脱离体

1.7 应变计的常温工作特性

1.7.1 许用电流

应变计通以电流后产生热量使应变计温度升高。当电流超过规定数值时, 由于温升可能使应变计烧毁, 因此须对应变计的工作电流加以限制。许用电流的大小与试件尺寸、材料的热传导系数, 应变计尺寸、应变胶种类以及精度要求等因素有关, 其值一般由制造厂提供, 使用时不应超过规定。

1.7.2 应变灵敏系数

安装在试件上的应变计在轴线方向的单向应力作用下, 应变计的电阻变化率与试件表面轴向应变的比值, 称为应变计的应变灵敏系数, 以 K 表示

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$$

应变灵敏系数是由制造厂在每批产品中抽取一定数量的应变计（箔式应变计抽1%，丝式应变计抽5%），在专门的标定设备上实测得到的。包装盒上一般用平均名义灵敏系数及相对均方根差来标注，如： $K = 2.23 \pm 1\%$ 。即说明该批应变计应变灵敏系数的平均值为2.23，其误差在 ± 0.0223 之间。箔式或丝式应变计， K 约为2左右，半导体应变计， K 可达30或更高。

1.7.3 直线性

粘贴于试件上的应变计受力后，其轴向应变和电阻变化率之间应是线性关系。若实测值和理想值之间存在偏差 δ ，此偏差值占测量范围的最大输出值 y_m 的百分比 δ/y_m 即表示应变计的直线性（图1-10）。直线性一般要求在0.05—0.01%以内。

康铜材料不仅在弹性区，甚至塑性区也有很好的线性。但在大变形条件下，由于电桥特性关系，也会呈现非线性（详见第二章2.2.1节）。

1.7.4 滞后

粘贴于试件上的应变计，在恒温条件下进行加载和卸载时，出现加载曲线和卸载曲线不重合的现象，称为滞后，如图1-11所示。滞后回线最大宽度 δ 与测量范围的最大输出值 y_m 的百分比叫滞后误差。

滞后的产生与试件材料性质、应变计及贴片工艺有关，如试件材料有缺陷、应变计粘贴不良、基底或应变胶厚薄不均以及吸潮后绝缘下降、加热聚合不充分等。若滞后仅是由应变计自身的原因引起时，则可通过对贴有应变计的试件预加载3—5次循环，可使其滞后现象减至最小。

1.7.5 蠕变

在温度恒定条件下，对粘贴应变计的试件施加恒定荷载，若发现有电阻值随时间而变化的现象，称为蠕变。蠕变量以一定时间内所发生的最大应变变化值来表示。如美国NAS942标准中规定：在室温下，敏感栅材料电阻率小于 $10^{-5}\Omega \cdot \text{cm}$ 的应变计，荷载为 $1000 \pm 100\mu\text{e}$ 作用下，一小时内所发生的最大应变变化值定为该应变计的蠕变值。

蠕变主要是由粘结层和基底引起的。如：应变胶选用不当或受潮、粘结层过厚或固化不充分以及在接近粘结层软化温度时进行测量等，均会产生或增大蠕变。

实验结果表明：一般纸基应变计蠕变大，经固化处理的胶基应变计蠕变小；同种材质时，小标距应变计蠕变大，大标距应变计蠕变小。

1.7.6 应变极限

指所能测量的最大应变值，一般把常温下应变计的指示应变大于机械应变的10%时的应变值定为该批应变计的应变极限。箔式或丝式应变计均可测量1—3%的机械相对变形。

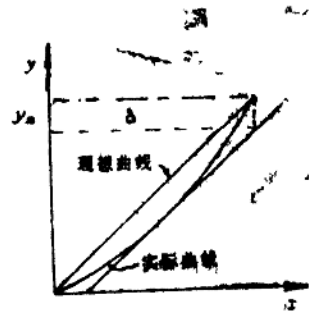


图1-9 直线性表示法插图

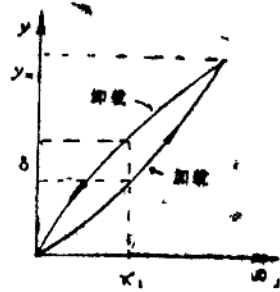


图1-10 滞后现象