



21世纪交通版高等学校教材
系列教材

机场道面测试技术

Measuring and Testing Techniques on Airport Pavement

翁兴中 编 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

21世纪交通版高等学校教材
机场工程系列教材

机场道面测试技术

翁兴中 编著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是机场工程系列教材之一,主要介绍机场道面的测试方法和技术。内容包括:绪论,道面结构的电阻应变测量技术,道面非破损测试技术,道面摩擦和纹理的测试技术,道面平整度测试技术以及温度测量技术等。

本书可作为机场工程专业本科生教材,也可作为公路工程、城市道路工程等相关专业的选修教材,并可供机场工程专业研究、设计、施工和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

机场道面测试技术 / 翁兴中编著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.8

21 世纪交通版高等学校教材. 机场工程系列教材

ISBN 978-7-114-13565-1

I. ①机… II. ①翁… III. ①飞机跑道—路面施工—测试技术—高等学校—教材 IV. ①V351.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 000795 号

21世纪交通版高等学校教材

机 场 工 程 系 列 教 材

书 名: 机场道面测试技术

著 作 者: 翁兴中

责任编辑: 李 喆

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 7.75

字 数: 169 千

版 次: 2017 年 8 月 第 1 版

印 次: 2017 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13565-1

定 价: 30.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

出版说明

随着近些年来我国经济的快速发展和全球经济一体化趋势的进一步加强,科技对经济增长的作用日益显著,教育在科技兴国战略和国家经济与社会发展中占有重要地位。特别是民航强国战略的提出和“十二五”综合交通运输体系发展规划的编制,使航空运输在未来交通运输领域的地位和作用愈加显著。机场工程作为航空运输体系中重要的基础设施之一,发挥着至关重要的作用。据不完全统计,我国“十二五”期间规划的民用改扩建机场达110余座,迁建和新建机场达80余座,开展规划和前期研究建设机场数十座,通用航空也迎来大发展的机遇,我国机场工程建设到了一个新的发展阶段。

国内最早的机场工程本科专业于1953年始建于解放军军事工程学院,设置的主要专业课程有:机场总体设计、机场道面设计、机场地势设计、机场排水设计和机场施工。随着近年机场工程的发展,开设机场工程专业方向的高校数量不断增多,但是在机场工程专业人才培养过程中也出现了一些问题和不足。首先,专业人才数量不能满足社会需求。机场工程专业人才培养主要集中在少数院校,实际人才数量不能满足机场工程建设的需求。其次,专业设置不完备,人才培养质量有待提高。目前很多院校在土木工程专业和交通工程专业下设置了机场工程专业方向,限于专业设置时间短、师资力量不足、培养计划不完善、缺乏航空专业背景支撑等各种原因,培养人才的专业素质难以达到要求。此外,我国目前机场工程专业教材总体数量少、体系不完善、教材更新速度慢等因素,也在一定程度上阻碍了机场工程专业的发展。为了更好地服务国家机场建设、推动机场工程专业在国内的发展,总结机场工程教学的经验,编写一套体系完善,质量水平高的机场工程教材就显得很有必要。

教材建设是教学的重要环节之一,全面做好教材建设工作是提高教学质量的重要保证。我国机场工程教材最初使用俄文原版教材,经过几年的教学实践,结合我国实际情况,以俄文原版教材为基础,编写了我国第一版机场工程教材。这批教材是国内机场工程专业教材的基础,期间经历了内部印刷使用、零星编写出版、核心课程集中编写出版等阶段。在历次机场工程教材编写工作的基础上,空军工程大学精心组织,选择了理论基础扎实、工程实践经验丰富、研究成果丰硕的专家组成编写组,保证了教材编写的质量。编写者经过认真规划,拟定编写提纲、遴选编写内容、确定了编写纲目,形成了较为完整的机场工程教材体系。本套教材共计14本,涵盖了机场工程的勘察、规划、设计、施工、管理等内容,覆盖了机场工程专业的全部专业课程。在编写过程中突出了内容的规范性和教材的特点,注意吸收了新技术和新规范的内容,不仅对在校学生,同时对于工程技术人员也具有很好的参考价值。

本套教材编写周期近三年,出版时适逢我国机场工程建设大发展的黄金期,希望该套教材的出版能为我国机场工程专业的人才培养、技术发展有一些推动,为我国航空运输事业的发展做出贡献。

编写组

2014年于西安

前 言

“机场道面测试技术”是高等学校机场工程专业的必修课,也是公路工程、城市道路工程专业的选修课。

改革开放以来,我国的航空事业得到迅猛发展,促进了机场工程领域的飞速进步,逐步形成了具有我国特色的机场工程理论、方法和技术。为了适应我国机场工程建设和管理的需要,完善我国机场工程专业的教材体系,根据作者在机场工程专业的多年教学经验,结合国内外在机场道面测试方面取得的新技术,借鉴公路工程等相关专业的有关成果,首次编写了本书。

全书共六章,主要介绍机场道面结构参数和表面特性方面的测试技术,以及道面结构和材料的应变测试技术。内容体现了机场道面自身特点,强调了理论与实践结合。在教学过程中除了课堂教学外,还应进行与教学内容相配套的有关实验课,通过实验课加深理解道面测试技术的理论和方法,充分掌握道面测试技术。

全书由翁兴中编著。本书可作为机场工程专业本科生教材,也可作为公路工程、城市道路工程等相关专业的选修教材,并可供机场工程专业研究、设计、施工和管理人员参考使用。

鉴于编著者的水平有限,错漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

2017年5月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 道面测试的目的和意义	1
第二节 道面测试的内容	2
第三节 道面测试的方法	3
思考题与习题	3
第二章 道面结构的电阻应变测量技术	4
第一节 应变片的常温工作特性	4
第二节 应变片的种类和选用	8
第三节 应变仪	10
第四节 测量电桥设计	12
第五节 路面材料收缩系数测定方法	20
第六节 材料弹性模量测定方法	25
思考题与习题	26
第三章 道面非破损测试技术	28
第一节 非破损试验过程	28
第二节 非破损试验设备	30
第三节 试验方法	34
第四节 试验程序	36
第五节 水泥混凝土道面接缝分析	49
第六节 水泥混凝土道面板脱空分析	50
第七节 承载板道面弯沉测试方法	51
第八节 我国民用机场道面结构参数反演分析方法	55
思考题与习题	63
第四章 道面摩擦和纹理的测试技术	64
第一节 概述	64
第二节 摩擦	64
第三节 纹理	65
第四节 测量设备概述	66
第五节 摩擦指数	71
第六节 纹理深度测试方法	75
第七节 摩擦系数测试方法	78
思考题与习题	82

第五章 道面平整度测试技术	83
第一节 概述	83
第二节 国际平整度指数(IRI)	84
第三节 平整度测试方法	86
第四节 车载式颠簸累积仪法	90
第五节 车载式激光平整度仪法	93
思考题与习题	97
第六章 温度测量技术	98
第一节 电阻温度计及其特性	98
第二节 热电阻的选择	102
第三节 测量电路	104
第四节 使用注意事项和测量误差	107
第五节 红外测温	111
思考题与习题	113
参考文献	114

第一章 绪 论

机场道面的作用是保证飞机在地面的各种运动,包括飞机的起飞、着陆、滑行和停放等。为了保证飞机在地面安全运行,道面结构除满足飞机使用要求外,道面表面性能还需要符合飞机的使用要求。同时,道面长期裸露在自然环境中,环境中的各种因素会对道面产生影响,使道面的性能发生变化。具体表现在道面的各种参数发生改变,导致道面结构性能的衰减,最后无法保证飞机安全、正常使用。因此,需要对道面参数进行测试,获取道面结构的参数值,对道面性能进行评定,确定道面结构的性能,作出对满足道面的使用要求的处理意见。

第一节 道面测试的目的和意义

道面结构是由土基、基层(包括垫层)、面层等多层结构组成的复合体,且各种材料大部分取自当地材料,易受自然环境的影响,其表征材料特性的参数易发生变化,直接影响道面结构的使用性能。准确、快速、及时地掌握道面结构的各种参数,是进行道面设计、施工和管理的前提和依据。因此,道面测试在道面结构设计、施工和管理中具有重要作用。

道面测试按其用途,可分为研究型测试和工程型测试。

研究型测试主要是在道面结构研究中,测定道面结构中的位移、应变和应力等随着飞机荷载和环境条件(主要是温度)作用发生变化的变量,为道面结构设计理论和方法的建立提供理论依据,为新型道面的研究和应用提供试验测试手段。

工程型测试主要是对现有的道面结构进行测试,获取道面各层结构的参数和表面性能数据,运用有关理论分析方法,得到道面结构使用性能和技术参数,为道面的使用管理提供科学决策的依据。同时,为现有道面的维修、翻修方案提供依据,并为设计提供参数取值,使道面设计获得最佳方案。

此外,施工过程中各种试验和检测技术主要是保证道面结构施工过程中质量达到设计和规范的要求。通过试验和检测能充分利用当地材料,迅速推广应用新材料、新技术和新工艺;能用定量的方法科学评定各种材料和构件的质量;能合理地控制和科学地评定质量。因此,施工中的试验和检测工作对提高工程质量、加快工程进度、降低工程造价、推动施工技术进步具有重要意义。

因施工过程中的试验和检测方法已在机场工程或相近工程的规范中进行了详细的说明和规定,因此,本书主要介绍其他两类测试原理和方法。

第二节 道面测试的内容

机场道面按其力学特性可分为刚性道面和柔性道面,刚性道面主要是水泥混凝土道面;柔性道面主要是沥青类道面和各类土质道面等。此外,目前还被广泛使用的一种道面是在原水泥混凝土道面上加铺沥青面层,形成下刚上柔的道面结构形式,一般称为复合道面。

由于各类道面结构的力学特性不同,其表征力学特性的参数也不尽相同,如水泥混凝土道面的土基强度参数的表示方法目前广泛采用土基回弹模量和反应模量;沥青混凝土道面结构中的土基强度可用土基回弹模量和加州承载比(CBR)来表示。因此,力学参数的不同决定其测试方法的不同。

目前,机场道面主要由水泥混凝土道面和沥青混凝土道面组成。此外,还包括水上机场、装配式道面机场和土质道面机场。

机场水泥混凝土道面结构主要由面层、基层(垫层)和土基组成(图 1-1)。沥青道面由面层(上面层、中面层和下面层)、基层(上基层、下基层)、底基层(上底基层、下底基层)和土基等组成。水泥混凝土道面由水泥混凝土板、基层(或者有底基层)和土基等组成。由于水泥混凝土面层是由一块一块道面板组成的,板与板之间的接缝传荷能力直接影响道面的结构性能。

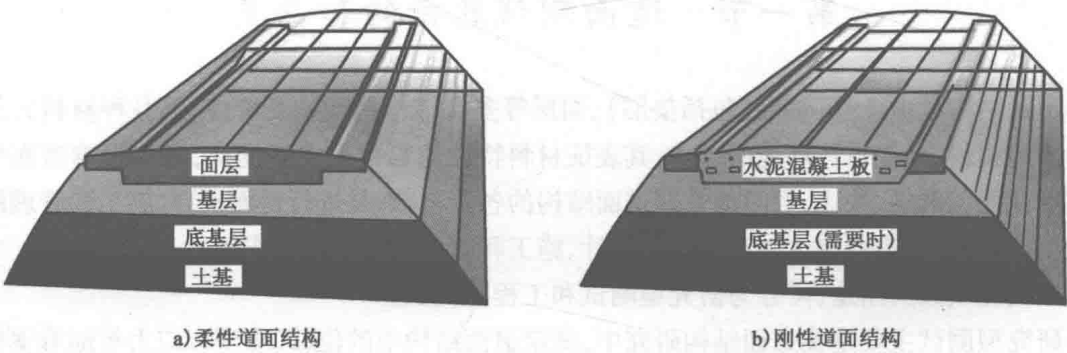


图 1-1 道面结构图

一、道面测试的内容

道面测试的内容主要包括现有道面结构的参数的测试。道面结构的参数主要有土基强度或模量,垫层强度、模量和厚度,基层强度、模量和厚度,面层强度、模量和厚度以及道面结构中各层的接触状况(或支承状况)。此外,还包括道面的表面功能特性,即道面表面的平整度、摩擦力(摩擦系数)等。

道面结构上作用的荷载特性和环境特性(主要是温度和湿度),道面结构的变形特性和受力状况,也是道面测试的重要内容。这部分内容对道面结构设计理论和方法的建立具有重要意义。

二、道面测试的用途

现有道面测试的用途主要是:

- (1) 现有道面承载能力评定。
- (2) 提供原有道面结构层材料的性能,用于维修、盖被等。
- (3) 道面各部分相互比较,找出结构最好和最差地段。
- (4) 提供结构性能数据,补充机场管理的维护系统中的道面条件指数,如 PCI、道面破损指数等。

第三节 道面测试的方法

根据测试过程中道面结构损坏状况,可分为破损性试验(Destructive Testing)和非破损性试验(Nondestructive Testing)。

破损性试验是指在试验过程中需要对材料进行破损后才能得到所需试验结果。典型的试验方法是各类材料的强度试验,即需要对材料进行破坏后才能得到其有关参数值。另外,对一些隐蔽的结构层,如道面结构中的基层和土基,需要破除面层后进行有关试验得到基层连同土基顶面的综合模量。由于破损试验对道面结构和材料会产生破坏,对道面的正常使用产生影响,其测试的方法在道面结构试验中的使用范围越来越窄。

非破损性试验(NDT)是指在测试过程中不需要对道面结构和材料进行破坏,就可以得到所需的测试结果。由于非破损性试验(NDT)对道面结构和材料的性能不产生影响,被广泛应用在道面测试中,成为目前道面测试的主要手段,其最典型的测试方法是落锤式弯沉仪。它是通过落锤作用在道面后,测得不同位置产生的弯沉,经过理论分析后计算出道面各层的弹性模量。因此,非破损性试验(NDT)是道面测试技术的发展方向,在道面测试中实现了高效的目的。

道面测试按照荷载作用的方式,可分为静态加载方式和动态加载方式。静态加载方式是指施加在道面结构和材料上的荷载的稳定状态是不随时间发生变化的;动态加载方式是指施加在道面结构和材料上的荷载是随时间发生变化的,主要分为振动荷载和冲击荷载。

思考题与习题

1. 道面测试的目的是什么?
2. 破损性试验和非破损性试验有哪些区别?

第二章 道面结构的电阻应变测量技术

道面结构的电阻应变测量是以应变片为传感器件,用于测量应变、应力、弯矩、扭矩、收缩系数等众多物理量,具有如下优点:

- (1)灵敏度高,测量误差小,性能稳定,价格较低。
- (2)适应性强,可用于不同对象和不同条件下的测量。
- (3)容易实现多点同步测量、远距离测量和遥测,并且与数据处理装置配合,容易实现测量过程和数据处理过程自动化。

因而,电阻应变测量技术在工程结构测试中仍占有相当的地位,其应用领域仍在不断扩展。

第一节 应变片的常温工作特性

一、应变片的工作情况

图 2-1 为贴在试件上的应变片纵剖面示意图(图中假定敏感栅为一根金属丝)。当试件受力变形时,由于试件 1、黏结剂 2、基底 3、黏结剂 4 都是面接触,故试件的变形能有效地传递。而在黏结剂 4 与金属丝 5 之间,虽然金属丝很细,但它的表面积较大,故变形仍能有效传递。同时,敏感栅(金属丝 5)与试件表面间的距离很近,所以敏感栅的变形也基本上与试件变形一致。

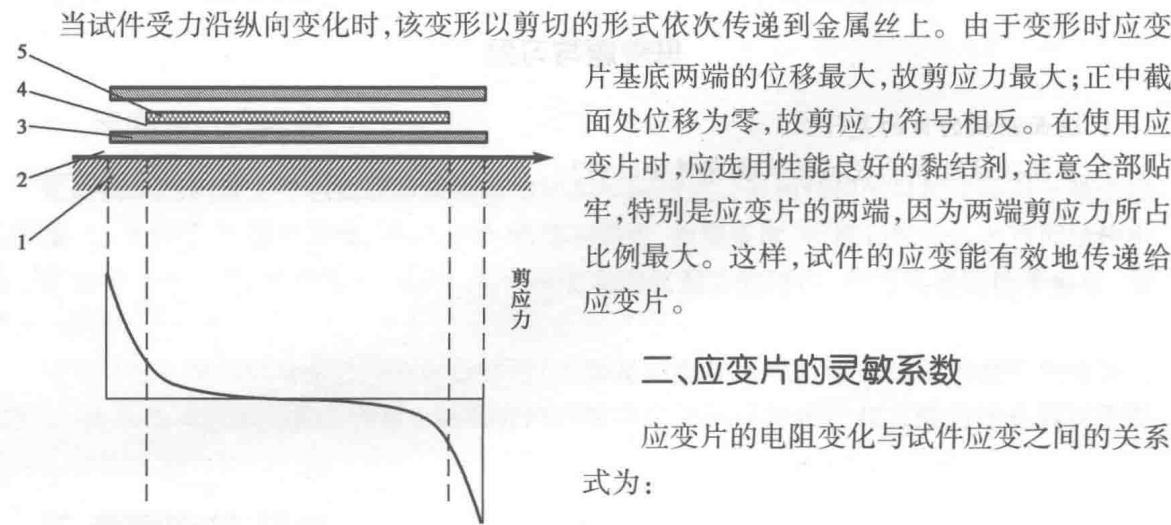


图 2-1 试件上应变片示意图
1-试件;2-黏结剂;3-基底;5-金属丝

二、应变片的灵敏系数

应变片的电阻变化与试件应变之间的关系式为:

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

式中引入了应变片灵敏系数 K 。由于影响应变片 K 值的因素很复杂,故目前无法用理论方法推导得出,而只能用实测来确定。为了统一测定条件,应变片的灵敏系数规定为在沿应变片纵轴线方向的单向应力作用下,应变片的电阻变化率与试件表面上应变片粘贴区域内的轴向应变的比值 $(\Delta R/R)/\varepsilon$ 。测定 K 值时,规定所用试件材料的泊松比 $\mu_0 = 0.285$ 。

测定应变片 K 值的装置,实际上就是一个加载后能产生已知应变的专用装置(多采用纯弯梁或等强度梁)。测定时,应变片贴在该装置上并予加载,应变片的电阻变化可用仪器测一次,无法逐只预先测定,所以对每批应变片采用抽样的方法来确定 K 值的平均值与标准差。 K 值误差的大小是衡量应变片质量的重要标志。理论分析和试验表明,影响应变片 K 值大小和精度的主要因素是金属电阻丝材料的性能,应变片(特别是敏感元件)的几何形状及尺寸,黏结剂和基底材料的性能和厚度,应变片的制造、粘贴等工艺过程,以及被测试件的材料和测点的应力状态等。

三、应变片的横向效应及引起的误差

1. 应变片的横向效应

为使应变片达到一定的电阻值,制作敏感栅的金属电阻丝必须有足够的长度。但是为了测量试件上接近于一点的应变值,又要求应变片尽量短些。于是,常将金属电阻丝绕成栅状。此时即使试件只受到单向拉伸,由于其表面仍为平面应变状态(轴向伸长和横向缩短),因而应变片敏感栅的横向部分将会感受横向应变,使其总的电阻变化减小。图 2-2 所示试件受拉力 P 的作用时,将沿受力方向 x 伸长,而垂直于 P 的 y 方向则将缩短。贴在试件上的直角电阻丝式应变片,其敏感栅的纵轴向部分(方向与力 P 一致,长度为 $4L$)将同时被拉伸,产生正应变 $+\varepsilon_x$,其电阻增量也为正;而其横向部分(方向与力 P 垂直,长度为 $3a$)将被压缩,产生负应变 $\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x$ (μ 为试件材料的泊松比),其电阻增量也为负。由于两者电阻增量的符号相反,综合的结果就使敏感栅总的电阻增量 ΔR 减小。而敏感栅的原始电阻 R 未变,故电阻变化率 $\Delta R/R$ 减小,从而降低了应变片的灵敏度。应变片由于感受横向应变而使电阻变化率减小并降低灵敏度的现象,称为应变片的横向效应。

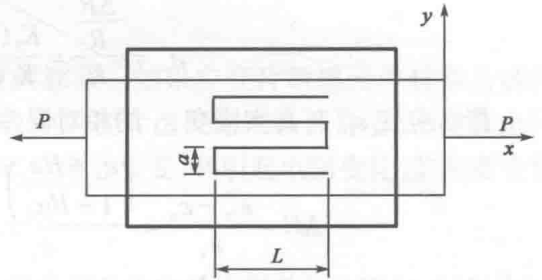


图 2-2 试件受拉时敏感栅的变形

常用的圆角电阻丝应变片的横向效应主要是由敏感栅的圆弧部分感受横向变形引起的,敏感栅的纵向部分几乎不受横向变形的影响。箔式应变片引起横向效应的因素则较复杂,除了敏感栅的横向部分受横向变形影响外,敏感栅的纵向部分因其宽度与厚度之比较大,也受到横向变形的影响。此外,箔材和基底的厚度、弹性模量以及其他因素都将影响横向效应的大小,甚至正负。

2. 应变片的横向灵敏度

应变片横向效应的大小可用横向灵敏度来表示。所谓应变片的横向灵敏度 H ,是指在同一单向应变作用下,垂直于单向应变方向粘贴的应变片的指示应变与平行于单向应变方向粘

贴的同批应变片的指示应变之比值(用百分数表示)。设应变片处在任意平面应变场中,则其电阻变化率:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x(\varepsilon_x + H\varepsilon_y) \quad (2-1)$$

式中: K_x ——应变片的轴向灵敏系数(在单向应变场中,当应变片沿单向应变方向粘贴时测得的灵敏系数);

ε_x ——沿应变片纵轴线方向的应变;

ε_y ——垂直于应变片纵轴线方向的应变;

H ——应变片的横向灵敏度。

3. 横向效应引起的测量误差

由式(2-1)可知,应变片电阻变化的大小除与纵向应变 ε_x 有关外,实际上还与横向灵敏度 H 及横向应变 ε_y 有关,因此横向效应的存在将给测量带来误差。

当按前述的统一测定条件来测定应变片的灵敏系数时,测点实际上为平面应变状态。设此时的纵向应变为 ε_x ,则横向应变为 $-\mu_0\varepsilon_x$,测出的 K 值实际上为:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon_x} = \frac{K_x(\varepsilon_x - H\mu_0\varepsilon_x)}{\varepsilon_x} = K_x(1 - H\mu_0) \quad (2-2)$$

因此,如果实测时的条件(如应力状态、材料的泊松比等)与前述 K 值测定条件一致,则不会引起测量误差;如果实测的条件与前述 K 值测定条件不一致,此时若仍用原来测定的 K 值来测量,则势必引起测量误差。设此时测点的真实应变为 ε_x 和 ε_y ,应变仪上的指示应变则变成 ε'_x ,按式(2-1)和式(2-2)得

$$\varepsilon'_x = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{K} = \frac{K_x(\varepsilon_x + H\varepsilon_y)}{K_x(1 - H\mu_0)} = \frac{\varepsilon_x + H\varepsilon_y}{1 - H\mu_0} \quad (2-3)$$

指示应变 ε'_x 与真实应变 ε_x 的相对误差为:

$$\Delta H = \frac{\varepsilon'_x - \varepsilon_x}{\varepsilon_x} = \frac{\left(\frac{\varepsilon_x + H\varepsilon_y}{1 - H\mu_0}\right) - \varepsilon_x}{\varepsilon_x} = \frac{H}{1 - H\mu_0} \left(\mu_0 + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}\right) \times 100\% \quad (2-4)$$

式(2-4)即为计算横向效应误差的一般公式,其中横向灵敏度 H 由试验确定。从式(2-4)可知,在实际测量中可能有以下几种情况:

(1) 当试件为单向应力状态,应变片在主应力方向测量时,则不论试件为何种材料即材料的泊松比 μ 为何值,其横向效应的误差一般不会大于 1%,此时可不考虑横向效应的影响。例如,用在钢材上($\mu_0 = 0.28$)测出 K 值的应变片来测量有机玻璃($\mu_0 = 0.40$)的应变时,其横向效应误差(设 $H = 0.03$)为:

$$\Delta H = \frac{0.03}{1 - 0.03 \times 0.28} \times (0.28 - 0.40) = -0.004 = -0.4\%$$

(2) 当试件为单向应力状态,而应变片垂直于主应力方向测量时,则横向效应的误差最大。例如,其他条件与测定 K 应变片值时相同,应变片垂直于主应力方向测量时(设 $H = 0.03, \mu_0 = 0.28$),则有:

$$\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{1}{\mu_0}$$

$$\Delta H = -\frac{0.03}{1 - 0.03 \times 0.28} \times \left(0.28 - \frac{1}{0.28} \right) = -0.10 = -10\%$$

这时须对实测值加以修正。

(3) 当试件为平面应力状态时, 横向效应的误差一般也较大。例如, 测量双向拉伸的钢质试件时(设 $\varepsilon_y/\varepsilon_x = 1, H = 0.03$), 则有:

$$\Delta H = -\frac{0.03}{1 - 0.03 \times 0.28} \times (0.28 + 1) = 0.039 = 3.9\%$$

在这种情况下, 也应对实测值加以修正。

四、应变片的温度特性

粘贴在试件上的应变片, 当环境温度发生变化时(设此时试件未受外力作用, 并且可以自由伸缩), 其电阻也将随着发生变化。如果此时将应变片接入应变仪, 将会有应变输出。这种由于温度变化引起的应变输出称为热输出。使应变片产生热输出的原因有:

(1) 当温度变化时, 应变片敏感元件材料的电阻值将随温度的变化而变化。其电阻变化率为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_r = \alpha \Delta t \quad (2-5)$$

式中: α ——敏感元件材料的电阻温度系数;

Δt ——环境温度的变化量。

(2) 当温度变化时, 应变片与试件材料均产生线膨胀。如果应变片敏感元件材料与试件材料的线膨胀系数不同, 它们的伸缩量也将不同。但应变片已经贴牢在试件上, 不能自由伸缩, 只能跟试件一起变形, 从而使应变片敏感元件产生附加应变, 并引起电阻变化, 其电阻变化率为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_\beta = K(\beta_m - \beta_s) \Delta t \quad (2-6)$$

式中: β_m ——试件材料的线膨胀系数;

β_s ——敏感元件材料的线膨胀系数;

K ——应变片的灵敏系数。

因此, 应变片由温度变化所引起的总电阻变化率为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_t = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_r + \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_\beta = [\alpha + K(\beta_m + \beta_s)] \Delta t \quad (2-7)$$

应变片的热输出:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_t / K = \left[\frac{\alpha}{K} + (\beta_m - \beta_s) \right] \Delta t \quad (2-8)$$

或

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta t / K}{\alpha + K(\beta_m - \beta_s)}$$

(2-9)

由于温度变化而引起的热输出是比较大的,有时甚至会超过测量值,给测量带来较大的误差。例如贴在钢质试件上的康铜电阻丝式应变片,其 $K = 2.0, \alpha = 20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \beta_s = 15 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \beta_m = 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。当温度变化 $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ 时,应变片的热输出为:

$$\varepsilon_t = \left[\frac{20 \times 10^{-6}}{2} + (11 - 15) \times 10^{-6} \right] \times 10 = 60 \times 10^{-6} = 60 (\mu\varepsilon)$$

设钢质试件的弹性模量 $E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 上述热输出相当于试件在应力 $\sigma = E\varepsilon_t = 120 \text{ kg/cm}^2$ 时的应变值。本例说明即使在常温下测量,也不能忽视温度的影响。特别是在现场实测时,环境温度很难保持恒定,必须采取温度补偿措施以减少或消除温度变化的影响。温度补偿的方法通常有两种:一种是桥路补偿法;一种是使用温度自补偿应变片。

第二节 应变片的种类和选用

一、应变片的种类

应变片的种类繁多,分类方法也各异。例如,根据敏感元件材料的不同,应变片可分为金属式和半导体式两类;根据基底材料的不同,应变片可分为纸基应变片、胶基应变片和金属基应变片等种类;根据安装方法的不同,应变片可分为粘贴式、焊接式、喷涂式和埋入式四类。此外,应变片还可以根据工作温度、敏感元件的几何形状等来分类。

下面根据其使用和发展情况,介绍一些主要类型的应变片。

1. 常规应变片

它是指电阻丝式和箔式两种应变片,在常规的应变测量和传感器制造中,应用最为普遍,如图 2-3 所示。

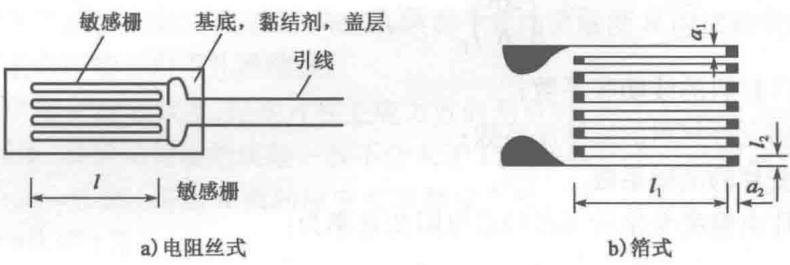


图 2-3 常规应变片

电阻丝式应变片的敏感元件是用高阻值的金属丝绕成栅状,这种应变片由于制造容易,目前在国内使用较普遍;其缺点是横向灵敏度大。为了减小横向效应的影响,还有短接式应变片和箔式应变片。

2. 特殊应变片

它包括半导体应变片、温度自补偿应变片及应变花。半导体应变片的优点是灵敏系数比金属式应变片高数十倍,输出大,因而可大大简化测量系统,机械滞后小,横向效应小,体积小;它的缺点是电阻和灵敏系数的热稳定性差,测量较大应变时非线性严重,灵敏系数离散程度大。温度自补偿应变片适用于高低温测量或测量精度要求高的场所,如图 2-4 所示。

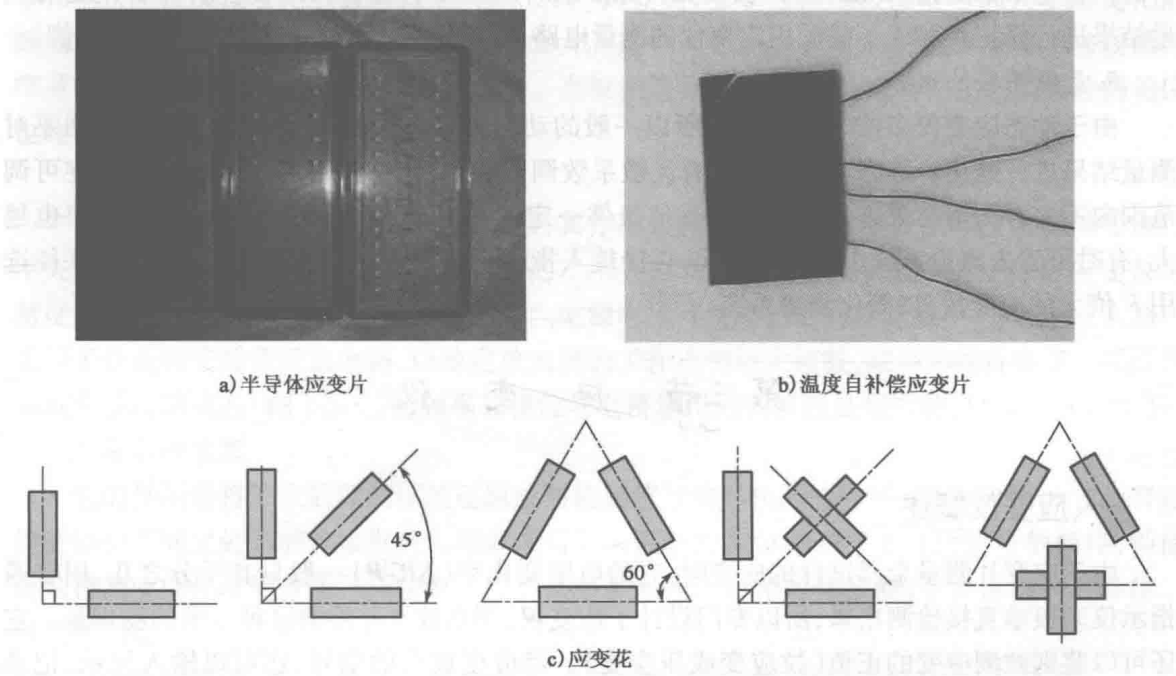


图 2-4 特殊应变片

二、应变片的选用

根据试件的材质及受力状态、测量精度要求及环境条件等,来选用合适的应变片。

1. 敏感元件材料的选用

由于康铜的灵敏系数稳定,在弹性范围和塑性范围都保持不变,而且电阻温度系数小,因而用得最多。但是康铜在 300℃ 时电阻温度系数急剧变化,故一般用于 200℃ 以下的测量。在高中温测量中,则常用镍铬合金、镍铬铝合金及铂钨合金等作为敏感元件材料。在制作体积小、输出大的传感器时,敏感元件宜用半导体材料。

2. 基底材料的选用

由于纸基能够满足大部分使用要求,易于粘贴,故在 70℃ 以下的常温测量中使用较普遍。有一种浸含酚醛树脂或聚酯树脂的纸基可提高其耐热和防潮性能,使用温度可达 180℃。用酚醛、聚酯、环氯和聚酰亚胺等有机材料制成的基底可用于环境温度较高(如聚酰亚胺基底使用温度范围为 -150 ~ +250℃)、湿度较大和测量时间较长的应变测量和传感器上。高温测量时多用金属、石棉、玻璃纤维布等作基底。

3. 栅长的选择

由于应变片测出的应变值实际上是该应变片的粘贴区域内应变的平均值,故当试件应变

梯度较大或用于传感器上时,应选择栅长小的应变片,使测出的应变接近测点的真实值。在测量瞬态或高频动应变时,也因其频率响应较好而尽量选择栅长小的应变片。而在测量材质不均匀(如木材、混凝土等)的试件时,则须使用栅长大的应变片,以便反映应变的平均水平。

4. 电阻值的选择

应变片的原始电阻值虽有 60Ω、90Ω、120Ω、200Ω、300Ω、500Ω、1000Ω 等,但因应变仪电桥的桥臂电阻都是按 120Ω 设计的,故无特殊要求时须选用电阻 120Ω 的应变片;否则要对测量结果进行修正。对于不需配用应变仪的测量电路,则可根据需要来选择应变片的电阻值。

5. 灵敏系数的选择

由于动态应变仪多按 $K=2$ 设计,所以一般的动态测量宜选用 $K=2$ 的应变片;否则要对测量结果进行修正。静态应变仪多设有灵敏系数调节装置,允许使用 $K\neq 2$ 的应变片,在可调范围内不需对测量结果进行修正。在其他条件一定的情况下,应变片的 K 值越大,输出也越大,有时可省去测量系统中的放大单元,直接接入指示记录仪表。故在制作传感器时,往往选用 K 值大的应变片,以简化测量系统。

第三节 应变仪

一、应变仪概述

由于应变片测量金属试件的应变时,它的电阻变化率($\Delta R/R$)一般只有千分之几,用普通指示仪表很难直接检测出来,所以专门设计了应变仪,用来放大并检测这种微弱的物理量。它还可以鉴别被测应变的正负(拉应变或压应变)。经应变放大的信号,还可以输入显示、记录仪表进行显示或记录。此外,应变仪与应变片式传感器配合使用,还可测量拉压力、荷重、扭矩及振动等机械参数。

二、应变仪的组成与工作原理

我国目前生产的应变仪大多是载波放大式应变仪,一般由电桥、放大器、相敏检波器、低通滤波器、振荡器和稳压电源 6 个单元组成,如图 2-5 所示。

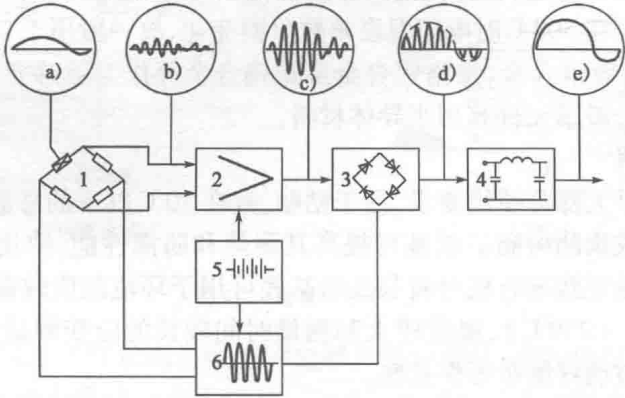


图 2-5 应变仪的波形和方框图
1-电桥;2-放大器;3-相敏检波器;4-低通滤波器;5-稳压电源;6-振荡器