



新疆特色的轨道交通类专业教学体系研究课题成果

传感器及检测技术

主 编◎叶剑锋 陆莲芳

副主编◎孙 亮[乌鲁木齐市城市综合交通项目研究中心]

刘焕海

主 审◎张福华[乌鲁木齐城市轨道交通集团有限公司]

吴 民[新疆交通职业技术学院]



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

新疆特色的轨道交通类专业教学体系研究课题成果

Chuanganganqi ji Jiance Jishu 传感器及检测技术

主 编 叶剑锋 陆莲芳

副主编 孙 亮[乌鲁木齐市城市综合交通项目研究中心]
刘焕海

主 审 张福华[乌鲁木齐城市轨道集团有限公司]
吴 民[新疆交通职业技术学院]



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

内 容 提 要

本书分为七大部分,一个基础模块,选取应用最为广泛的电阻式传感器等六类传感器,分别从原理、电路解析、实验验证、案例、行动计划等几个方面入手,在教学过程中,可根据实际调整案例、扩充内容、加强任务实施。

本书可作为高等职业院校机电一体化、城市轨道交通机电技术、智能交通技术运用、汽车电子技术、电气化铁道技术、电气自动化等专业教材,也可作为相关专业的培训教材及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器及检测技术 / 叶剑锋, 陆莲芳主编. —北京:
人民交通出版社股份有限公司, 2016. 8

新疆特色的轨道交通类专业教学体系研究课题成果
ISBN 978-7-114-13221-6

I. ①传… II. ①叶… ②陆… III. ①传感器—检测
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 169585 号

新疆特色的轨道交通类专业教学体系研究课题成果

书 名: 传感器及检测技术

著 作 者: 叶剑锋 陆莲芳

责任编辑: 任雪莲 李学会

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: 7.5

字 数: 176 千

版 次: 2016 年 8 月 第 1 版

印 次: 2016 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13221-6

定 价: 22.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



序

PREFACE



2011年11月26日,乌鲁木齐地铁正式得到国家发展改革委的批复,乌鲁木齐市步入轨道交通时代,掀起了地铁建设的热潮。为了适应市场需求,新疆交通职业技术学院于2008年申报开办电气化铁道技术专业,经过多年努力,形成了集轨道交通工程、机电、信号、运营为一体的技能型人才培养格局,与乌鲁木齐城市轨道交通集团有限公司签订订单培养300多人,在各地铁路部门就业200余人,轨道交通人才培养呈现良好的发展态势。

新专业的开办面临的是人才培养方案的修订、师资队伍的培养、实验实训条件的建设等一系列专业建设问题。为解决好这些问题,本人带领轨道交通专业教学团队,向新疆维吾尔自治区交通运输厅申报了《新疆特色的轨道交通类专业教学体系研究》科技重点课题,在自治区交通运输厅的大力支持下,于2013年7月正式开展相关研究。研究团队先后前往北京地铁、南京地铁、广州地铁等企业进行调研,在广东交通职业技术学院、北京交通运输职业学院、南京铁道职业技术学院等兄弟院校进行了人才培养方案论证和师资培养交流,进而形成了专业人才培养方案和课程标准,以期指导专业建设,同时形成了《轨道交通信号系统维护》等部分特色教材,用于相关专业的教学。现将相关成果进行集中出版,以期能够在更广的范围内获得应用,更是启发后续相关专业建设的关键。

课题研究得到了乌鲁木齐城市轨道交通集团有限公司的大力支持以及相关企业和兄弟院校的帮助,在此表示诚挚感谢。南京铁道职业技术学院林瑜筠教授,北京交通大学毛宝华教授,广东交通职业技术学院王劲松教授、吴晶教授、黎新华教授,乌鲁木齐城市轨道交通集团有限公司的徐平、邓超等专家给予了指导和支持,人民交通出版社股份有限公司相关编辑、课题团队成员为系列成果出版做了大量工作,在此一并致谢。

段同社

二〇一六年五月

前言

FOREWORD

传感器及检测技术是新疆交通职业技术学院精品课程,是机电一体化、城市轨道交通机电技术、智能交通技术运用、汽车电子技术、电气化铁道技术、电气自动化等专业的必修课,也是机电类专业的重要基础课程之一,理论性较强,同时又兼具实践性。为了加强课程建设和突出课程的实践性,符合职业教育的理念,在编写时,几次易稿,最终确定本书的大纲,既保留了原有的重要知识点,又突出了对学生技能和创新意识的培养。

本书分为七大部分,其中一个基础模块。选取应用最为广泛的电阻式传感器等六类传感器,分别从原理、电路解析、实验验证、案例、行动计划等几个方面入手,在教学过程中,可根据实际调整案例、扩充内容、加强任务实施。建议在教学中将班级学生分成几个小组,每个小组在完成规定的学习内容之外,选取其中最感兴趣的一个项目进行重点学习研究,最终完成作品,同时将作品作为评定课程成绩的最重要参考。

学习本课程应不拘泥于课程本身,本课程的学习应将单片机、PLC、C 语言等课程和知识高度结合起来,应用到系统的设计和制作当中,同时加以创新。广泛收集和阅读材料,是提升知识技能的重要手段,也是项目顺利实施的重要保证。

由于时间仓促、水平有限,书中难免有些错误和缺陷,欢迎广大教师、学生批评指正。本书仅仅作为课程的参考材料之一,更多的资料可登陆精品课程网阅读下载(新疆交通职业技术学院官网/精品课程/传感器及检测技术 <http://www.xjjtedu.com/jpk/Indexshow.jsp?Flagvalue=cgq>)。

作者

二〇一六年五月

目录

CONTENTS

课程导学	1
储备知识 传感器及检测技术基础	3
储备知识一 传感器基础	3
储备知识二 检测技术基础	11
项目一 电子秤设计与制作	17
任务一 电子秤电路设计	17
任务二 电阻应变片实验验证	30
任务三 行动计划书	32
项目二 角位移测量仪设计与制作	33
任务一 角位移测量仪电路设计	33
任务二 电容式传感器实验验证	41
任务三 行动计划书	44
项目三 振动测量仪设计与制作	45
任务一 振动测量仪电路设计	45
任务二 磁电式传感器实验验证	56
任务三 行动计划书	59
项目四 转速表设计与制作	60
任务一 转速表电路设计	60
任务二 “霍尔效应”实验验证	74
任务三 行动计划书	76
项目五 “声光双控”廊灯设计与制作	77
任务一 “声光双控”廊灯电路设计	77
任务二 “光电效应”实验验证	94
任务三 行动计划书	96
项目六 温度控制系统设计与制作	97
任务一 温度控制系统电路设计	97
任务二 热电偶传感器实验验证	109
任务三 行动计划书	111
参考文献	112

课程导学

传感器是获取信息的工具。传感器技术是关于传感器设计、制造及应用的综合技术,它是信息技术(传感与控制技术、通信技术和计算机技术)的三大支柱之一。

由于传感器技术的重要性,日本把传感器技术列为 20 世纪 80 年代十大技术之首,美国把传感器技术列为 20 世纪 90 年代 22 项关键技术之一,英国传感器销售额 1990 年比 1980 年增长 2000 倍。采用先进的传感器可以大大提高装置的技术水平,提高市场竞争力,因此有这样的说法:“谁掌握和支配了传感器技术,谁就能够支配新时代。”

随着电子计算机、生产自动化、现代信息、军事、交通、化学、环保、能源、海洋开发、遥感、宇航等科学技术的发展,对传感器的需求量与日俱增,其应用的领域已渗入国民经济的各个部门以及人们的日常生活之中。现就传感器在一些主要领域中的应用进行简要介绍。

1. 自动检测与自动控制系统

在电力、冶金、石化、化工等流程工业中,生产线上设备运行状态关系到整个生产线流程。通常建立 24h 在线监测系统。测量参数包括润滑油温度、冷却液温度、燃油压力及发动机转速等。

2. 汽车与传感器

高级轿车需要用传感器对温度、压力、位置、距离、转速、加速度、湿度、电磁、光电、振动等进行实时准确的测量,即便是普通轿车,一般也需要 30 ~ 100 种传感器。

3. 传感器与家用电器

涉及传感器的家用电器有:自动电饭锅、吸尘器、空调、电子热水器、风干器、电熨斗、电风扇、洗衣机、洗碗机、照相机、电冰箱、电视机、录像机、家庭影院。

全自动洗衣机中的传感器包括:衣物重量传感器,衣质传感器,水温传感器,水质传感器,透光率光传感器(洗净度),液位传感器,电阻传感器(衣物烘干检测)。

4. 楼宇控制与安全防护

为保证我们生活、工作的建筑物安全、健康、舒适、温馨,并能保证系统运行的经济性和管理的智能化,在楼宇中应用了许多测试技术,如闯入监测、空气监测、温度监测、电梯运行状况监测等。

5. 传感器在机器人上的应用

应用于机器人的传感器有:转动/移动位置传感器、力传感器、视觉传感器、听觉传感器、接近距离传感器、触觉传感器、热觉传感器、嗅觉传感器。

2003 年 9 月,全球现场直播埃及金字塔世界最古老石棺的考古挖掘进程,为了揭开古埃及金字塔内部结构之谜,使一个小机器人通过了埃及最大的金字塔内一条狭窄的通道,试图揭开 4600 年前的秘密。它的探秘之行以发现了又一道封闭的石门而告终。

6. 传感器在生物医学上的应用

对人体的健康状况进行诊断需要进行多种生理参数的测量。国内已经成功地开发出了用于测量近红外组织血氧参数的检测仪器。人类基因组计划的研究也大大促进了对酶、免

疫、微生物、细胞、DNA、RNA、蛋白质、嗅觉、味觉和体液组分以及血气、血压、血流量、脉搏等传感器的研究。

7. 传感器与环境保护

保护环境和生态平衡,实现可持续发展,必须进行大气监测和江河湖海水质检测,因此需要大量用于污水流量、pH 值、电导、浊度、COD、BOD、TP、TN、矿物油、氰化物、氨氮、总氮、总磷、金属离子浓度(特别是重金属离子浓度)以及风向、风速、温度、湿度、工业粉尘、烟尘、烟气、SO₂、NO、O₃、CO 等参数测量的传感器,这些传感器中大多数亟待开发。

8. 军事领域

先进的科学技术总是最先被应用于战争。

以坦克、飞机、军舰为标志的作战平台是传统的主要作战武器,各类传感器不过是配属的保障设施。而当前由信息技术发展推动的军事革命把重点从作战平台转向如何观察战场、怎样传递所观察到的战场情况、怎样运用那些性能优越的精确武器的问题上来,从重视军舰、坦克和飞机转为重视信息获取技术和信息获取装置的作用,传感器、通信以及精确制导武器等已在战争中起着至关重要的作用。

海湾战争中,伊拉克在科威特战区部署了 4280 辆坦克,多国部队只有 3800 辆坦克,但结果是伊拉克的坦克 89% 被毁,而多国部队的坦克仅损失 20 辆。这种悬殊的损毁比,正是由于双方信息优势及精确制导武器方面的明显差距造成的。由近期的几场高技术条件下的局部战争可以看到,随着新军事革命浪潮的到来,高度信息化的武器平台已经开始发挥战场主导作用。数字化战争需要利用全方位、多手段的传感器系统感知和收集战场各种信息,对这些信息进行判读、分析、综合与管理,实现“传感器—控制器—武器”一体化。

战场生物传感器不但能准确识别各种生化战剂,而且可与计算机配合,及时提出最佳防护和治疗方案,还可通过测定炸药、火箭推进剂的降解情况来发现敌人库存弹药的数量和位置,成为侦察的有效手段。

在未来战争中,新一代精确化和智能化的常规武器和电子武器可能在实质上取代核武器的位置。智能武器“把巨大的杀伤力和极高的精确性相结合,将会使军事机构思考未来战争的方式发生革命”。高技术常规武器成为比核武器更可靠的手段,“打了不用管”的制导炮弹能像导弹那样捕捉和跟踪目标,射程远,威力大,价格低,命中率高,具有子母弹的打击能力,以及破甲弹、动能弹的攻击方式。

9. 传感器与农业

21 世纪的农业将是知识密集、技术密集的产业,设施农业可以有效提高农业生产效益和增强抗灾能力,借助温室及其配套装置来调节和控制作物生产环境条件,摆脱自然制约,以达到高产、高效、优质。

信息获取手段是实现高水平设施农业的关键技术之一,设施农业用传感器的品种较多,主要用于温度、湿度、土壤干燥度、CO₂、光照度、土壤养分等参数的测量。信息获取技术还在农田和果园生产、农业生物学研究、农药残留量检测等方面得到了广泛的应用。

在本课程的学习中,要加强对相关元器件的认识和电路的识图,尤其要注重对问题和项目的理解,多观察市场,多动手,激发创意和想法,这是本课程的核心。

储备知识 传感器及检测技术基础

储备知识一 传感器基础

一、传感器的定义及分类

根据国家标准的规定,传感器的定义为:能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。这一定义与美国仪表学会(ISA)的定义相类似,是比较确切的。

机电一体化系统中所用传感器种类繁多,同一被测量可以用不同原理的传感器测量,同一原理的传感器也可以测量不同的被测量。材料科学的发展和固体物理效应的新发现,将不断提供更多的新型传感器。了解传感器的分类,可加深对其共性和特点的理解,以便正确选用传感器。

1. 传感器的分类

(1)按被测对象(输入量)分,有位移、速度、加速度、力、压力、扭矩、时间、温度传感器等。

(2)按工作原理分,有电感式传感器等,见表 0-1。

传感器的分类 表 0-1

传感器分类		转 换 原 理	传感器名称	典 型 应 用
转换形式	中间参量			
电参数	电阻	移动电位器触点改变电阻	电位器传感器	位移
		改变电阻丝或电阻片的尺寸	电阻丝应变传感器、半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应(电阻温度系数)	热丝传感器	气流速度、液体流量
			电阻温度传感器	温度、热辐射
			热敏电阻传感器	温度
		利用电阻的光敏效应	光敏电阻传感器	光强
		利用电阻的湿度效应	湿敏电阻	湿度
	电容	改变电容的几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量
	电感	改变磁路的几何尺寸、导磁体位置	电感传感器	位移
		涡流去磁效应	涡流传感器	位移、厚度、硬度
		利用压磁效应	压磁传感器	力、压力、扭矩

传感器分类		转 换 原 理	传感器名称	典 型 应 用
转换形式	中间参量			
电参数	电感	改变互感	差动变压器	位移
			自整角机	位移
			旋转变压器	位移
	频率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振传感器	力、温度等
	计数	利用莫尔条纹	光栅	大角位移、大直线位移
		改变互感	感应同步器	
		利用拾磁信号	磁栅	
	数字	利用数字编码	角度编码器	大角位移
电参数	电动势	温差电动势	热电偶	温度、热流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流、压力
		电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
		光电效应	光电池	光强
	电荷	辐射电离	电离室	离子计数、放射性强度
		压电效应	压电传感器	动态力、加速度

- (3)按传感器的能量源分为有源型和无源型。
- (4)按传感器的结构参数在信号变换过程中是否发生变化分为结构型和物性型。
- (5)按输出信号的性质分为开关型(二值型)、模拟型和数字型。
- (6)按机电一体化系统中测量的目的分为内部信息传感器和外部信息传感器。

为了便于用户选用,传感器的名称通常是(1)和(2)的综合,如应变式力传感器、电涡流式位移传感器、压电式加速度传感器等。

2. 基本量与派生量、间接测量量的关系

了解基本量与派生量的关系,对根据检测对象选择传感器的类型很有帮助。因为,表面上被测量五花八门,但本质上许多非电量是从基本量派生出来的,如表面粗糙度、腐蚀度等可以认为是从基本量“位移”派生而来,因此可用位移传感器测量。了解基本量与派生量的关系,能发挥传感器的使用效能。另一方面,有些物理量可通过测量基本量而间接测量,如力或压力等可以通过弹性元件转变为位移,因此,位移传感器也可间接测量力或压力等。了解基本量与间接测量量的关系,有助于理解传感器的工作原理。

二、传感器的发展方向

由于传感技术所涉及的技术非常广泛,几乎渗透到各个学科领域,因此对传感器新理论的探讨、新技术的应用、新材料和新工艺的研究是传感器的发展方向。

1. 努力实现传感器新特性

以确保自动化生产检测和控制的准确性。

2. 确保传感器的可靠性,延长其使用寿命

传感器具有较长的使用寿命,能在恶劣环境下工作并具有失效保险功能等。

3. 提高传感器集成化及功能化的程度

传感器集成化是实现传感器小型化、智能化和多功能的重要保证。现在已能将敏感元件、温度补偿电路、信号放大电路、电压调制电路和基准电压等单元电路集成在同一芯片上。根据需要,今后将会把超大规模集成电路、执行机构与多种传感器集成在单个芯片上,以实现传感器功能与信息处理功能的一体化。

4. 传感器微型化

微机电系统(又称 MEMS)是一种轮廓尺寸在毫米量级、组成元件尺寸在微米量级的可运动的微型机电装置。如微型电机、继电器、泵、齿轮等。

5. 新型功能材料的开发

传感器技术的发展与新材料的研究开发紧密结合,各种新型传感器孕育在新材料之中。随着材料科学的进步,在制造各种材料时,人们可以任意控制它的成分,从而可以设计并制造出各种用于传感器的功能材料。

三、传感器的静态特性

传感器的静态特性是指在稳态条件下(传感器无暂态分量)用分析或实验方法所确定的输入—输出关系。这种关系可依不同情况,用函数或曲线表示,有时也可用数据表格来表示。表征传感器静态特性的主要指标有线性度、灵敏度、迟滞、重复性。

1. 线性度

传感器的理想输入—输出特性应是线性的,如图 0-1 所示。

理想直线可由最小点($x_{\min}, y_{\min}$)和最大点($x_{\max}, y_{\max}$)确定。

$$y - y_{\min} = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}(x - x_{\min})$$

或者 $y = kx + a$

其中:

$$k = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}; a = y_{\min} - kx_{\min}$$

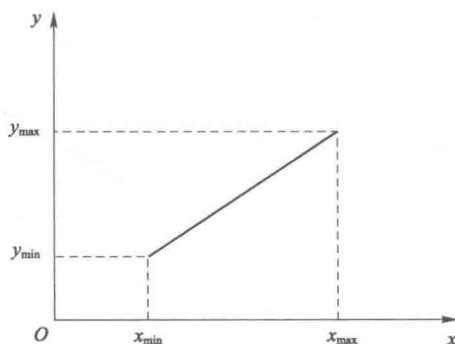


图 0-1 理想变换特性曲线

而实际上,许多传感器并非具有线性的输入—输出特性,在一定程度上存在着非线性。若不考虑迟滞及蠕变效应,表示传感器输入—输出特性的公式为:

$$y = f(x) + a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

式中: x ——被测非电量;

y ——输出电量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——理想直线斜率;

a_i ——非线性系数($i=2,3,\cdots,n$)。

线性度是以一定的拟合直线作基准与校准曲线作比较,以其不一致的最大偏差与理论满量程输出值的百分比来进行计算:

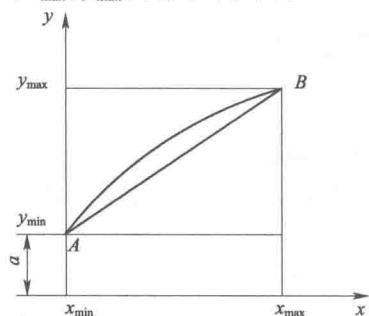
$$\delta_L = \pm \frac{|\Delta L_{\max}|}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中: Y_{FS} ——满量程输出值, $Y_{FS} = y_{\max} - y_{\min}$ 。

对于非理想直线特性的传感器,需要进行非线性校正,常采用以下方法。

(1) 端点法

传感器实际特性上分别对应于测量下限 $x_{\min}$ 和测量上限 $x_{\max}$ 的点 A 和 B 的连线,称为端点拟合直线,如图 0-2 所示。设拟合的直线为 $y = kx + a$,将校准的两个端点数据 $(x_{\min}, y_{\min})$ 、 $(x_{\max}, y_{\max})$ 代入可求出:



$$\begin{cases} y_{\min} = kx_{\min} + a \\ y_{\max} = kx_{\max} + a \end{cases}$$

$$k = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

$$a = y_{\min} - kx_{\min}$$

拟合方程为:

$$y = y_{\min} + \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}(x - x_{\min})$$

图 0-2 端点拟合直线

端点法方法简单,但由于数据依据不充分,且计算的线性度值往往偏大,因此不能充分发挥传感器的精度潜力。

(2) 平均选点法

把传感器全量程内的所有校准数据,前后分成两组,分别求出两组的点系中心,这两个点系中心的连线,就是平均选点法的拟合直线。

前半部点系中心坐标为:

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} x_i \\ \bar{y}_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} y_i \end{cases}$$

后半部点系中心坐标为:

$$\begin{cases} \bar{x}_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n x_i \\ \bar{y}_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n y_i \end{cases}$$

因此通过两个点系中心 $(\bar{x}_1, \bar{y}_1)$ 和 $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ 的直线斜率为:

$$k = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}$$

直线在 y 轴上的截距为 $a = \bar{y}_1 - k\bar{x}_1$ 或 $a = \bar{y}_2 - k\bar{x}_2$ 。

把斜率和截距代入 $y = a + kx$,即得到平均选点法拟合直线方程。

平均选点法的特点为:拟合精度较高,实验点在拟合直线两侧分布,数据处理不复杂。

(3) 最小二乘法

把所有校准点数据都标在坐标图上,用最小二乘法拟合直线 $y = a + kx$,其校准点与对应的拟合直线的点之间的残差平方和为最小。

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 &= \sum_{i=1}^n [y_i - (a + kx_i)]^2 \\ &= (y_1 - a - kx_1)^2 + (y_2 - a - kx_2)^2 + \cdots + (y_n - a - kx_n)^2\end{aligned}$$

式中: y ——校准点;

k ——拟合直线的斜率。

将上式分别对 a 和 k 取偏导数,得:

$$\frac{\partial \sum \Delta_i^2}{\partial a} = -2(y_1 - a - kx_1) - 2(y_2 - a - kx_2) - \cdots - 2(y_n - a - kx_n)$$

$$\frac{\partial \sum \Delta_i^2}{\partial k} = -2x_1(y_1 - a - kx_1) - 2x_2(y_2 - a - kx_2) - \cdots - 2x_n(y_n - a - kx_n)$$

为满足残差为最小,使 $\frac{\partial \sum \Delta_i^2}{\partial a} = 0$, $\frac{\partial \sum \Delta_i^2}{\partial k} = 0$,则有:

$$(y_1 - a - kx_1) + (y_2 - a - kx_2) + \cdots + (y_n - a - kx_n) = 0$$

$$x_1(y_1 - a - kx_1) + x_2(y_2 - a - kx_2) + \cdots + x_n(y_n - a - kx_n) = 0$$

各项相加后得:

$$\sum y_i - na - k \sum x_i = 0$$

$$\sum x_i y_i - a \sum x_i - k \sum x_i^2 = 0$$

亦即:

$$\begin{cases} na + (\sum x_i)k = \sum y_i \\ (\sum x_i)a + (\sum x_i^2)k = \sum x_i y_i \end{cases}$$

由上式可得:

$$\begin{aligned}a &= \frac{(\sum x_i y_i) \cdot \sum x_i - \sum y_i \cdot \sum x_i^2}{(\sum x_i)^2 - n \cdot \sum x_i^2} \\ k &= \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}\end{aligned}$$

最小二乘法的特点为:拟合精度高,计算复杂。

注:除拟合直线法外,还有其他一些方法,如分段线性插值、反函数补偿、查表等。

2. 迟滞

迟滞特性说明传感器加载(输入量增大)和卸载(输入量减小)输入—输出特性曲线不重合的程度。也就是说,达到同样大小的输入量,但所采用的行程方向不同时,尽管输入量相同,输出信号大小却不相等。

迟滞大小一般用实验方法确定,用最大输出差值 $\Delta_{\max}$ 与满量程输出 y_m 的百分比来表示,如图 0-3 所示。

$$\gamma = \pm \frac{\Delta_{\max}}{2y_m} \times 100\%$$

迟滞的产生主要是由于传感器机械部分存在的不可避免的缺陷造成的,如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料内摩擦、积尘等。

3. 重复性

重复性是指传感器输入按同一方向作全程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度,如图 0-4 所示。

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_m} \times 100\%$$

式中: γ_R ——重复性;

$\Delta_{\max}$ —— $\Delta_{\max_1}$ 与 $\Delta_{\max_2}$ 中的大者;

Y_m ——满量程输出值。

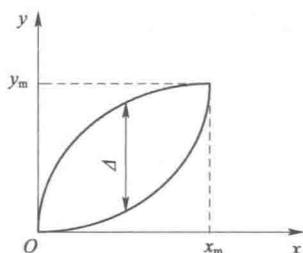


图 0-3 迟滞特性

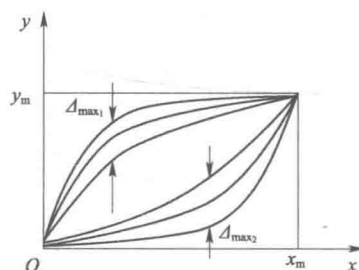


图 0-4 重复性

4. 灵敏度

传感器输出变化量 Δy 与引起该变化量的输入变化量 Δx 之比为静态灵敏度, $k = \Delta y / \Delta x$ (拟合直线即为斜率)。

5. 分辨力

分辨力是指传感器可能检测出被测信号的最小增量。

另外,传感器的静态特性还有其他一些指标,如测量范围、过载、温度稳定性等,这里不作介绍。

四、传感器的动态特性

1. 概述

在测量静态信号时,线性传感器的输出—输入特性是一条直线,二者之间有一一对应的关系,而且因为被测信号不随时间变化,测量和记录过程不受时间限制。而在实际测试工作中,大量的被测信号是动态信号,传感器对动态信号的测量任务不仅需要精确地测量信号幅值的大小,而且需要测量和记录动态信号变换过程的波形,这就要求传感器能迅速准确地测出信号幅值的大小和无失真的再现被测信号随时间变化的波形。

传感器的动态特性是指传感器对激励(输入)的响应(输出)特性。

一个动态特性好的传感器,其输出随时间变化的规律(变化曲线),能同时再现输入随时间变化的规律(变化曲线),即两者具有相同的时间函数。但实际上除了具有理想的比例特性环节外,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

研究动态特性可以从时域和频域两个方面,采用瞬态响应法和频率响应法来分析。一般而言,在时域内研究传感器的响应特性时,只研究几种特定输入时间函数,如阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等的响应特性,在频域内研究动态特性一般是采用正弦函数得到频率响应特性。

总而言之,传感器的动态特性是指传感器的输出对随时间变化的输入量的响应特性。例如用阶跃函数作为输入来研究其动态特性,这种方法称为阶跃响应法。表征阶跃响应特性的主要技术指标有:时间常数、延迟时间、上升时间、峰值时间、最大超调量、响应时间等。

传感器时域动态特性如图 0-5 所示。各指标定义如下:

- (1) 上升时间 t_r : 输出由稳态值的 10% 变化到稳态值的 90% 所用的时间。
- (2) 响应时间 t_s : 系统从阶跃输入开始到输出值进入稳态值所规定的范围内所需要的时间。
- (3) 峰值时间 t_p : 阶跃响应曲线达到第一个峰值所需的时间。
- (4) 超调量 σ : 传感器输出超过稳态值的最大值 ΔA , 常用相对于稳态值的百分比 σ 表示。

在研究传感器频域动态特性时,常用幅频特性和相频特性来描述传感器的动态特性,重要指标是频带宽度(带宽),即增益变化不超过某一规定分贝值的频率范围。

2. 频率特性及其与动态品质之间的关系

线性系统在正弦输入作用下的输出幅值与输入幅值的比值称为系统的幅频特性,以 $|H(j\omega)|$ 或 $A(\omega)$ 表示,两者统称为频率特性。

输出与输入之间随频率而变的相位特性称为相频特性,以 $\varphi(\omega)$ 表示。

在 $0 < \omega < \omega_1$ 区间,幅频特性是平坦形,而相频特性呈线性。由于幅频特性平坦,对所有落在此区间内的谐波输入都有相同的灵敏度,因而不产生幅值误差;而线性变化的相频特性,可以保证不出现相位误差,因而处在此区间的各种谐波所组成的任意波形都能被精确地复现。由此可以得出结论:

- (1) 频率特性的形状对评估动态误差有重要意义。
- (2) 从典型环节的频率特性,可以了解结构参数对它的影响及暂态响应之间的关系,如图 0-6 所示。

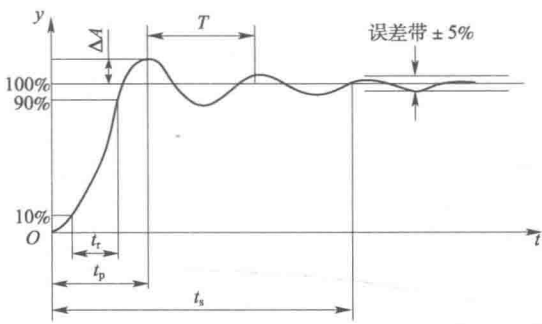


图 0-5 传感器时域动态特性

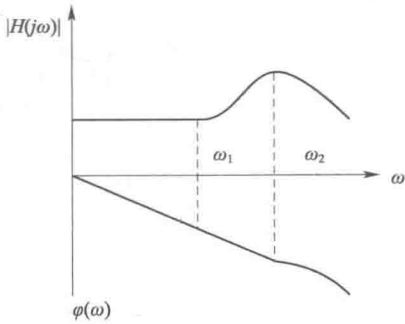


图 0-6 幅频和相频特性

3. 一阶传感器

具有简单能量变换的传感器,其动态性能多数可用一阶微分方程来描述。

在工程上,一般将式 $a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$ 视为一阶传感器的微分方程的通式,它可以改写为:

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t)$$

式中: $\frac{a_1}{a_0}$ ——传感器的时间常数, 具有时间的量纲, 记为 τ ;

$\frac{b_0}{a_0}$ ——传感器的灵敏度 S_n , 具有输出/输入的量纲。

这样可得到典型一阶传感器的频率特性 $H(j\omega)A/(1+j\omega\tau)$ (传递函数, 可由拉氏变换得到) 或 $A(\omega)$ 。

$$\begin{cases} |H(j\omega)| = \frac{A}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} & \text{幅频特性} \\ \varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) & \text{相频特性} \end{cases}$$

其幅频特性和相频特性曲线请学生自学。

由此得到结论:

(1) 一阶频率特性具有最简单的形式, 其特征参数用 3dB 频率 ω_c 表示, 且 $\omega_c = 1/\tau$, τ 为传感器的时间常数。

(2) 时间常数 τ 越小, 则 3dB 频率 ω_c 越高, 具有较宽的工作频域和较好的动态响应。

(3) 一阶传感器的特征参数为 τ 。

4. 二阶传感器

典型二阶传感器的微分方程通式为:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = a_0 x(t) \quad (\text{取拉氏变换})$$

其频率特性:

$$H(j\omega) = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] + 2j\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}$$

幅频特性:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \text{ 或 } A(\omega)$$

相频特性:

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

式中: $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$, 传感器的固有角频率;

$\xi = a_{1/2} \sqrt{a_0 a_2}$, 传感器的阻尼比。

结论:

(1) 为减小动态误差和扩大频响范围, 一般是提高传感器的固有频率 ω_n [一般是通过减小传感运动部分质量和增加弹性敏感元件的刚度来达到 ($\omega_n = \sqrt{k/m}$), 但刚度增加, 必须使灵敏度按相应比例减小。在实际中, 要综合各种因素来确定传感器的各个特征参数]。

(2) 在确定的固有频率下, 当 $\xi = 0.707$ 时 (临界阻尼状态), 具有最宽的幅频特性平坦区。

储备知识二 检测技术基础

一、非电量与非电量测量

一切物质都处在永恒不停地运动之中。物质的运动形式很多,它们通过化学现象或物理现象表现出来。表征物质特性或其运动形式的参数很多,根据物质的电特性,可分为电量和非电量两类。电量一般是指物理学中的电学量,如电压、电流、电阻、电容、电感等;非电量则是指除电量之外的一些参数,如压力、流量、尺寸、位移量、质量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度、酸碱度等。

在众多的实际测量中,大多数是对非电量的测量。在早期,非电量的测量多采用非电的测量方法,例如用尺测量长度,用秤称质量,用水银温度计测温度等。但随着科学技术的发展,对测量的准确度、测量速度,尤其对被测量动态变化过程的测量和远距离的检测都提出了更高的要求,原有的非电量测量方法已无法适应这一需要。因此需要研究新的测量方法和技术。非电量的电测技术应运而生,这种技术就是用电测技术的方法去测量非电的物理量(或称把被测非电量转换成与非电量有一定关系的电量,再进行测量的方法)。

非电量电测技术的主要特点如下:

(1)应用了已经较为成熟和完善的电磁参数测量技术、理论和方法。因而,非电量电测技术中的关键技术是研究如何将非电量转换成电磁量的技术——传感技术。

(2)便于实现连续测量。连续测量对于某些参数的自动测量(例如地震监测等)是十分重要的,但用非电的方法连续测量大电量却难以实现。

(3)电信号容易传输(有线、无线)、转换(放大、衰减、调幅、调频、调相等)、记录、存储和处理,便于实现遥测、巡回检测、自动测量,并能以模拟或数字方式进行显示和记录测量结果。

(4)可在极宽的范围内以较快的速度对被测非电量进行准确的测量。

(5)与计算机相配合,可进行传感器输出非线性的校正和误差的计算与补偿,进而使仪器智能化。同时,也可实现某些参数的自动控制。

(6)可完成用非电量方法无法完成的检测任务(如温度场测量等)。

二、非电量电测系统

随着计算机技术的普及和应用,人们对传感技术的重要性有了进一步的认识,把传感器视为计算机的“五官”,推动了传感技术的发展。测量系统的功能说明如图 0-7 所示。

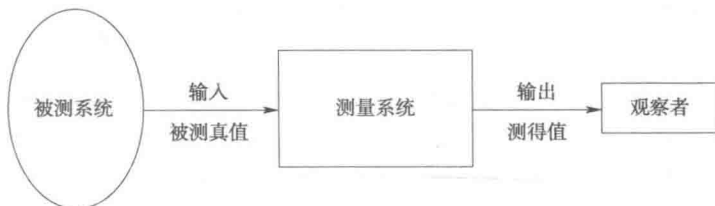


图 0-7 测量系统的功能说明

测量是人们使用专门仪器,通过实验的方法去获得被测参量数值的过程。一个非电量电测系统由四种元件组成,如图 0-8 所示。