



高等学校电子与电气工程
及自动化专业“十三五”规划教材

工程测试与过程 控制系统

主编 王 新 王书茂 杨为民
主审 邬齐斌

E. & E. E. & E.



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

工程测试与过程控制系统

主 编	王 新	王书茂	杨为民
副主编	潘娜娜	李爱钦	李 花
参 编	朱霄霄	袁丰田	修 霞
主 审	邬齐斌		

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书结合过程生产工业特点,综合应用工程测试、控制理论以及自动化仪表和计算机等控制工程知识,全面反映了传统的和近二十年来出现的各类过程控制系统与工程测试技术,重点讲述它们的工作原理、结构特点、设计方法和应用中的技术问题。全书分为工程测试技术、简单控制系统、常用复杂控制系统、先进控制系统和过程控制系统的应用等五部分。本书内容丰富、取材新颖、结构严谨、系统性强,且充分体现了理论和实际密切联系、重在应用的原则。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化、测控技术与仪器、机电一体化、机械电子工程、过程装备与控制工程、化学工程以及相近专业的教材。书中内容以模块化形式展现,兼顾了研究生、本科生等不同层次学生学习的要求。本书亦可作为相关专业的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程测试与过程控制系统/王新,王书茂,杨为民主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.9
ISBN 978-7-5606-4559-9

I. ①工… II. ①王… ②王… ③杨… III. ①工程测试 ②过程控制 IV. ①TB22 ②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 111768 号

策 划 毛红兵

责任编辑 王 静 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 20

字 数 475千字

印 数 1~3000册

定 价 45.00元

ISBN 978-7-5606-4559-9/TB

XDUP 4851001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

“工程测试与过程控制系统”是自动化类专业一门密切联系生产实际的技术性课程，是综合性、应用性很强的一门主干课程。在工程技术领域，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能实验等，都离不开测试技术。特别是近代，自动控制技术已越来越多地运用测试技术、测试装置，工程测试已成为控制系统的重要组成部分。

在自动控制领域中，过程控制现在已经由一个相对独立的学科向机械工程、物联网工程、航天航空等学科渗透，因此本书在保留《过程控制系统与工程》(西安电子科技大学出版社，杨为民、邬齐斌主编)一书中的过程控制方案的分析、设计等主要章节(第2~5章)内容的基础上，增加了工程测试(第1章)的内容。这部分内容除了介绍过程控制测量技术外，还从工程测试的传感器技术、信号调理技术的基本原理入手，将工程测试技术向机械工程、电子信息工程方向进行扩展。这一方面是测控技术发展的要求，另一方面也为各学科间的融合提供了一个相互学习的通道。

在工程技术中，广泛应用的自动控制技术也和测试技术有着密切的关系。测试装置是自动控制系统中的感觉器官和信息来源。测试技术是进行各种科学实验研究和生产过程参数检测等必不可少的手段，通过测试可以揭示事物的内在联系和发展规律，从而推动科学技术的发展。科学技术的发展历史表明，科学上的很多新发现和突破都是以测试为基础的。过程控制技术的发展与工程测试技术密切相关，对确保自动化系统的正常运行起着重要作用。

在自动控制领域中，工程测试技术、控制技术、计算机技术是该领域科技发展的基石。要想在一本书中把这些内容全包括进去是不现实的，因此，本书的定位是介绍基本的工程测试技术与控制方案设计、分析。本书的基础是自动控制理论、工程测试、自动化仪表和计算机控制技术等方面的知识。

本书第1章主要介绍如何提高测量精度和测量的自动化程度，以便于信息的传输、记录、分析和处理，以及各种常见物理量测量传感器的工作原理和工程应用。

第2章和第3章为常规控制系统，它们是过程控制的基础，也是应用最广泛的系统，着重叙述了过程特性、控制系统结构和工作原理、PID控制规律、控制系统的整定和投运以及各类过程控制的方案设计和分析方法。

第4章介绍了近三十年来开发出来的已趋成熟、经济效益显著、应用前景看好的先进的控制系统，包括状态反馈控制、内模控制、简化模型预测控制、预测控制和多变量解耦控制，着重介绍了它们的工作原理、控制算法、关键技术和应用实例。此部分内容丰富、取材新颖、结构严谨、系统性强，且充分体现了现代控制理论和实际工程应用的密切联系。此部分可单独作为“现代控制理论”的研究生课程。

第5章以三个典型控制系统为例，介绍如何结合过程本身的特点，正确、合理地制定控制方案，其内容是前4章的综合应用。

本书深入浅出，既讲清基本概念，又力求反映近年来测控领域的新发展。由于书中内

容较多，我们采用模块化的编写方式。在讲授本课程时，可以按章来组合，例如：第 1 章“工程测试技术”，可作为机电、信息工程类专业学生重点学习的测控知识；第 3 章“常用复杂控制系统”可以单独构成“先进控制技术”课，作为研究生课程单独开设。

在编写本书的过程中，得到了邬齐斌教授的指导和关心，他认真审阅了全书，提出了详细修改意见，陈为等老师为本书的编写也做了大量的工作，在此向他们表示诚挚的感谢。为了方便教学，本书配有电子教案，需要者可发电子邮件(yangweimina@.163.com)来索取。

由于作者水平有限，缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者
2017 年 6 月

目 录

绪论	1
第 1 章 工程测试技术	3
1.1 测试技术的基本概念及应用	3
1.1.1 测试技术的基本概念	3
1.1.2 工程测试技术的工程应用	6
1.2 测试系统的基本特性	8
1.2.1 测量过程与测量误差	8
1.2.2 测量装置的性能指标	9
1.2.3 误差的分类	10
1.2.4 误差的估计和处理	11
1.3 传感器及工程应用	14
1.3.1 电阻式传感器	14
1.3.2 电感式传感器	18
1.3.3 电容式传感器	20
1.3.4 磁电式传感器	22
1.3.5 压电式传感器	24
1.3.6 光电式传感器	26
1.3.7 半导体式传感器	26
1.3.8 机械工程测试技术应用	29
1.4 信号调理技术	40
1.4.1 电桥电路	40
1.4.2 信号放大	42
1.4.3 信号调制与解调	46
1.4.4 信号变换与滤波	50
1.5 过程控制测量技术	54
1.5.1 温度测量	54
1.5.2 压力测量	62
1.5.3 流量测量	69
1.5.4 液位测量	79
1.5.5 成分测量	86
思考题与习题	93
第 2 章 简单控制系统	97
2.1 简单控制系统结构组成及控制指标	97
2.1.1 简单控制系统结构组成	97
2.1.2 简单控制系统的控制指标	98
2.2 典型受控过程的数学模型	100

2.2.1 纯滞后过程的建模	100
2.2.2 单容过程的建模	101
2.2.3 多容过程的建模	103
2.2.4 具有反向响应的过程	106
2.2.5 不稳定过程	107
2.3 被控变量与操纵变量的选择	108
2.3.1 被控变量的选择	108
2.3.2 操纵变量的选择	109
2.4 过程可控程度分析	109
2.4.1 度量过程可控程度(简称可控性)的指标 $k_m\omega_c$ 的导出	110
2.4.2 广义对象时间常数 T 和纯滞后 τ 对可控程度 $k_m\omega_c$ 的影响	111
2.5 广义对象各环节对可控程度的影响	113
2.5.1 干扰通道特性 $G_f(s)$ 对控制质量的影响	113
2.5.2 调节通道特性 $G_p(s)$ 对控制质量的影响	116
2.6 检测变送环节	119
2.7 执行器环节	120
2.7.1 执行器概述	120
2.7.2 气动执行器	121
2.7.3 调节阀流量特性和阀门增益	124
2.7.4 电/气转换器和电/气阀门定位器	126
2.7.5 电动执行器	128
2.8 连续 PID 控制及其调节过程	130
2.8.1 基本概念	130
2.8.2 比例调节	131
2.8.3 比例积分调节	134
2.8.4 比例微分调节	138
2.8.5 比例积分微分调节	139
2.8.6 控制规律的选择	140
2.9 控制器参数整定和控制系统投运	140
2.9.1 控制系统的投运	141
2.9.2 控制系统的工程整定方法	141
思考题与习题	143
第 3 章 常用复杂控制系统	146
3.1 串级控制系统	146
3.1.1 串级控制系统基本概念	146
3.1.2 串级控制系统分析	148
3.1.3 串级控制系统设计	152
3.1.4 串级控制系统投运及参数整定	155
3.2 均匀控制系统	155
3.2.1 均匀控制系统的由来和目的	155
3.2.2 均匀控制系统的特点	156
3.2.3 均匀控制方案	156

3.2.4 均匀控制系统的理论分析	159
3.3 比值控制系统	163
3.3.1 比值控制问题的由来	163
3.3.2 比值控制方案	164
3.3.3 比值控制系统的实施	167
3.3.4 比值控制系统的投运及整定	170
3.3.5 比值调节系统实施的若干问题	170
3.4 前馈控制系统	173
3.4.1 前馈控制系统的基本原理	173
3.4.2 前馈控制系统的几种结构形式	175
3.4.3 前馈控制规律的实施	179
3.5 分程控制系统	180
3.5.1 分程控制系统的基本概念	180
3.5.2 分程控制系统的方案实施	183
3.5.3 阀位控制系统	184
3.6 选择性控制系统	185
3.6.1 概述	185
3.6.2 超驰控制设计应用	185
3.6.3 关于防积分饱和的方法	187
3.6.4 其他选择控制系统	188
3.7 按计算指标进行控制的控制系统	189
思考题与习题	192
第4章 先进控制系统	198
4.1 状态反馈控制	198
4.1.1 状态反馈和极点配置原理	198
4.1.2 状态反馈控制系统设计和应用中的问题	202
4.2 内模控制	205
4.2.1 内模控制的基本原理	205
4.2.2 内模控制在 PID 控制参数整定中的应用	214
4.3 简化模型预测控制	220
4.3.1 单输入-单输出 SMPC	220
4.3.2 多输入-多输出 SMPC	228
4.4 预测控制	233
4.4.1 预测控制基本原理	234
4.4.2 预测控制的基本算法	235
4.4.3 预测控制系统的性能分析	243
4.4.4 预测控制的工业应用	247
4.5 多变量解耦控制	252
4.5.1 控制回路间的关联和相对增益矩阵	252
4.5.2 关联系统的控制器的整定	266
4.5.3 多变量解耦控制系统	270
思考题与习题	275

第 5 章 过程控制系统的应用	280
5.1 离心泵控制系统	280
5.1.1 离心泵的工作原理及主要部件	281
5.1.2 离心泵的工作特性	283
5.1.3 离心泵的控制方案	284
5.1.4 容积式泵的控制方案	286
5.2 离心压缩机防喘振控制	286
5.2.1 离心压缩机的喘振	286
5.2.2 离心压缩机防喘振控制系统的设计	288
5.2.3 测量出口流量的可变极限流量防喘振控制	290
5.2.4 离心压缩机串/并联时的防喘振控制	291
5.3 锅炉设备的控制	293
5.3.1 工艺流程简介	293
5.3.2 锅炉汽包水位的控制	295
5.3.3 锅炉燃烧控制系统	301
5.3.4 蒸汽过热系统的控制	306
5.3.5 采用可编程控制器的锅炉控制实例	307
思考题与习题	310
参考文献	312

绪 论

一、工程测试与过程控制概述

在科学实验和工业生产过程中,为及时了解工艺过程、生产过程的情况,需要对反映实验或生产对象特征的压力、力矩、应变、位移、速度、加速度、温度、流量、液位、浓度、重量等物理量进行测量。近代自动控制技术已越来越多地运用测试技术,测试装置已成为控制系统的重要组成部分。

过程工业包括炼油、化工、冶金、电力、轻工、医药、核能等工业部门,是国民经济的支柱产业。过程工业加工的物料一般是不可数的连续介质,其加工方式也多是连续的工艺过程。控制的任务就是要实现生产过程的自动化,这对于过程的平稳操作和高效生产起着不可估量的作用,同时它也是改善操作人员的工作条件和保护环境的重要手段。

与其他控制系统相比较,过程控制有以下特点:

(1) 控制对象(即过程)往往具有非线性、时变、分布参数、时滞、变量相互关联和不确定性等特点,数学模型较复杂。

(2) 干扰较多。不仅有来自环境的外部干扰,也有来自对象内部的负荷干扰,甚至还有测量和控制装置的噪声干扰等。

(3) 控制方案具有多样性。同一被控过程因所受扰动不同,可能有完全不同的方案,而同一方案又可能适用于不同的过程。

从以上特点看,过程控制是一门研究前景广阔、富有挑战性的科学。

二、过程控制的发展简史

纵向来看,过程控制技术进步源于三大动力:一是控制理论的进展,新的理论和概念的创新为应用技术打下了坚实的基础;二是过程工艺技术的进步,它为过程控制的发展提出了新的挑战;三是工程测试、自动化仪表和控制装置不断地更新完善,使过程控制技术获得了强有力的硬件支持。

早在 20 世纪 40 年代前后,过程控制尚处于黑箱时期,人们对过程本身知之甚少,仅根据生产工业的需要选配仪表和凭经验进行控制,那时的过程控制与其说是一门科学不如说是一门技艺,我们把这一阶段称为仪表化阶段。

20 世纪四五十年代,以频率法和根轨迹法为核心的经典控制理论引入过程控制工程,人们开始认识到过程控制的关键是要了解被控对象,于是一门研究过程动态行为的过程动力学开始兴起。由于当时工业生产过程的操作与管理相对简单,因而普遍将测量与控制功能合在一起,对所谓基地式仪表实行按岗位的分散操作,主要关心的是控制系统的闭环稳定性问题。

进入 20 世纪 50 年代后,以状态空间方法和最优控制为标志的现代控制理论取得了长足的进步,而且在航空、航天和制导领域取得了辉煌的成就。代表性的成果有极大值原理、动态规划和随机滤波。但是在过程控制领域,这些成果并没有发挥出作用,倒是现代控制理论的一些思想,如状态的可控性、可观性等观念备受关注。这时期为适应车间级集中化

控制需要,单元组合仪表得到了充分应用。

20 世纪 70 年代开始,过程工业逐渐向大型化、单机组、精细化和追求高的经济效益方向发展,需要解决大规模复杂系统的控制,讲究分解和协调、多级递阶优化控制或分散控制的大系统理论已移植到过程控制,代替单元组合仪表和直接数字控制计算机的集散系统(DCS)和可编程控制器(PLC)已经广泛用于过程工业,同时在过程控制理论上也有了很大的突破,一些基于现代控制理论又符合过程特点的新型控制方法,如预测控制、推断控制、多变量解耦控制等先进控制策略被源源不断地开发出来,创造出了巨大的经济效益。

20 世纪 80 年代开始,过程控制技术向综合自动化方向发展,集计算机技术、显示技术、控制技术和通信技术(即 4C)于一身的计算机集成过程系统(CIPS)、计算机集成制造系统(CIMS)和现场总线技术,正逐步走向实用化。以市场需求为导向,以全局优化为目标,将常规控制、先进控制、过程优化、生产调度和经营决策等多种功能组合在一起的智能化系统,已成为主流发展方向,它必将极大地推动过程工业跃上新的巅峰。

进入 21 世纪后,科学技术的进步将人类社会推向了信息时代,测控技术的同步发展,渗透到社会的各行各业,在很大程度上反映着一个国家的经济和科学技术的发展水平。在工程技术领域中,工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能实验等,都离不开测控技术。广泛应用的自动控制技术也和测试技术有着密切的关系,测试装置是自动控制系统中的感觉器官和信息来源,对确保自动化系统的正常运行起着重要作用。

三、工程测试与过程控制课程设置的目的是和学习方法

工程测试与过程控制是一门密切联系生产实际的技术性课程,是综合性、应用性很强的课程,它的基础是自动控制理论、化工(热工)过程及装备、自动化仪表和计算机控制技术等知识。

通过本课程的学习,学生能应用控制理论和工程处理方法,学会和掌握过程控制系统控制方案的分析、设计和工程实施及工程测试技术的应用。

测试技术是进行各种科学研究和生产过程参数检测等的必不可少的手段。通过测试可以揭示事物的内在联系和发展规律,从而推动科学技术的发展。科学技术的发展历史表明,科学上很多新的发现和突破都是以测试为基础的,过程控制技术的发展与工业测试技术密切相关。

作为工程测试与过程控制的教材,本书的第 1 章主要介绍如何提高测量精度和测量的自动化程度,以便于信息的传输、记录、分析和处理,以及各种常见物理量测量传感器的工作原理和工程应用。第 2 章和第 3 章为常规控制系统,它们是过程控制的基础,也是应用最广泛的系统,着重叙述了过程特性、控制系统结构、工作原理、PID 控制规律、控制系统的整定和投运以及各类过程控制的方案设计和分析方法。由于自动化专业设置有计算机控制技术课程,计算机控制系统内容就不再引入。第 4 章重点介绍了近三十年来开发出来的先进的控制系统,包括状态反馈控制、内模控制、简化模型预测控制、预测控制和多变量解耦控制,着重介绍了它们的工作原理、控制算法、关键技术和应用实例。考虑到这些系统比较复杂,为方便学习和今后的应用,本书对其进行了较为详细的介绍。本书第 5 章以三个典型控制系统为例,介绍如何结合过程本身的特点,正确、合理地制定控制方案,其内容是前 4 章的综合应用。

作为一门工程技术性很强的专业课程,学生应当抓住课堂授课、实验教学、课程设计和生产实习这四个环节,努力做到理论联系实际,举一反三,提高自己的分析、设计和投运过程控制系统的能力。

第1章 工程测试技术

测试技术是进行各种科学实验研究和生产过程参数检测等的必不可少的手段，它起着类似人的感觉器官的作用。通过测试可以揭示事物的内在联系和发展规律，从而推动科学技术的发展。科学技术的发展历史表明，科学上很多新的发现和突破都是以测试为基础的。同时，其他领域科学技术的发展和进步又为测试提供了新的方法和装备，促进了测试技术的发展。

1.1 测试技术的基本概念及应用

测试技术是实验科学的一部分，主要研究各种物理量的测量原理和测量信号的分析处理方法。

在工程技术领域中，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能实验等，都离不开测试技术。在工程技术中，广泛应用的自动控制技术也和测试技术有着密切的关系。测试装置是自动控制系统中的感觉器官和信息来源，对确保自动化系统的正常运行起着重要作用。

测试技术几乎涉及任何一项工程领域，如生物、海洋、气象、地质、通信以及机械、电子等工程，都离不开测试与信息处理。

1.1.1 测试技术的基本概念

1. 测试系统组成

简单的测试系统可以只有一个模块，如图 1.1-1 所示的玻璃管温度计。它直接将被测对象温度的变化转化为温度计液面示值，这中间没有电量的转换和分析处理电路，很简单，但测量精度低，同时也很难实现测量自动化。

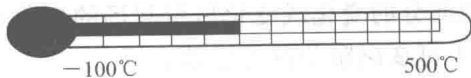


图 1.1-1 温度计

为提高测量精度，增加信号传输、处理、存储、显示的灵活性和提高测试系统的自动化程度，以利于和其他控制环节一起构成自动化测控系统，在测试中通常先将被测对象输出的物理量转换为电量，然后再根据需要对变换后的电信号进行处理，最后以适当的形式显示、输出，如图 1.1-2 所示。

一般来说，测试系统由传感器、中间变换装置和显示、记录装置三部分组成。测试过程中，传感器将反映被测对象特性的物理量(如压力、加速度、温度等)检出并转换为电量，

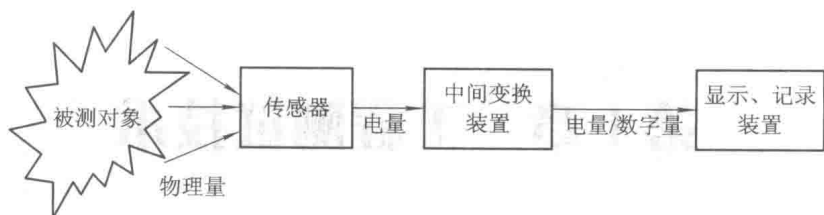


图 1.1-2 测量系统

然后传输给中间变换装置；中间变换装置对接收到的电信号用硬件电路进行分析处理或经 A/D 变换后用软件进行计算，再将处理结果以电信号或数字信号的方式传输给显示、记录装置；最后由显示、记录装置将测量结果显示出来，提供给观察者或其他自动控制装置。

根据测试任务复杂程度的不同，测试系统中传感器、中间变换装置和显示及记录装置等每个环节又可由多个模块组成。例如，图 1.1-3 所示的机床轴承故障监测系统中间变换装置就由带通滤波器、A/D 信号采集卡和计算机中的 FFT 分析软件三部分组成。测试系统中传感器为加速度计，它负责将机床轴承振动信号转换为电信号；带通滤波器用于滤除传感器测量信号中的高、低频干扰信号和对信号进行放大；A/D 信号采集卡用于对放大后的测量信号进行采样，将其转换为数字量；FFT（快速傅里叶变换）分析软件则对转换后的数字信号进行 FFT 变换，计算出信号的频谱；最后由计算机显示器对频谱进行显示。另外，测试系统的测量分析结果还可以和生产过程相连，当机床振动信号超标时发出报警信号，防止产生废品。

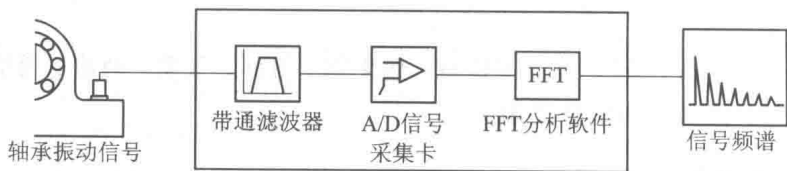


图 1.1-3 轴承振动信号测量

2. 传感器方面

传感器是测试、控制系统中对信息敏感的检测部件，它感受被测信息并输出与其成一定比例关系的物理量（信号），以满足系统对信息传输、处理、记录、显示和控制的要求。

早期发展的传感器是利用物理学的电场、磁场、力场等定律所构成的“结构型”传感器，其基本特征是以其结构部分的变化或变化后引起场的变化来反映待测量（力、位移等）的变化。如图 1.1-4 所示为可变磁阻位移传感器。

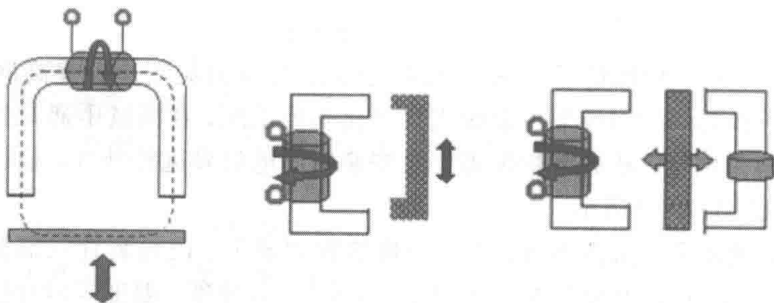


图 1.1-4 可变磁阻位移传感器

利用物质特性构成的传感器称为“物性型”传感器或“物性型”敏感元件。新的物理、化学、生物效应用于物性型传感器是传感技术的重要发展方向之一。每一种新的物理效应的应用,都会出现一种新型的敏感元件,能测量某种新的参数。例如,除常见的力敏、压敏、光敏、磁敏材料之外,还有声敏、湿敏、色敏、气敏、味敏、化学敏、射线敏材料等。新材料与新元件的应用,有力地推动了传感器的发展,因为物性型敏感元件依赖于敏感功能材料。被开发的敏感功能材料有半导体、电介质(晶体或陶瓷)、高分子合成材料、磁性材料、超导材料、光导纤维、液晶、生物功能材料、凝胶、稀土金属等,如图 1.1-5 所示是一种新型光纤温度传感器。

测试技术正在向多功能、集成化、智能化方向发展。进行快变参数动态测量是自动化过程控制系统中的重要一环,其主要支柱是微电子与计算机技术。传感器与微计算机结合,产生了智能传感器。智能传感器能自动选择量程和增益,自动校准与实时校准,进行非线性校正、漂移误差补偿和复杂的计算处理,完成自动故障监控和过载保护等。图 1.1-6 所示是 HP 公司生产的加速度信号测量传感器芯片。

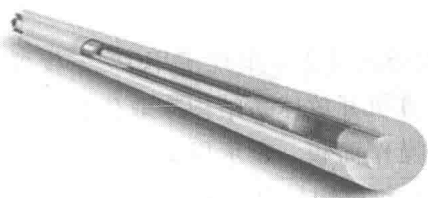


图 1.1-5 新型光纤温度传感器



图 1.1-6 HP 公司生产的加速度信号测量传感器芯片

3. 测量信号处理方面

20 世纪 50 年代以前,信号分析技术主要采用的是模拟分析方法,进入 20 世纪 50 年代,大型通用数字计算机在信号分析中有了实际应用。当时曾经争论过模拟与数字分析方法的优缺点,争论的焦点是运算速度、精度与经济性。

进入 20 世纪 60 年代,人造卫星、宇航探测及通信、雷达技术的发展,对信号分析的速度、分辨能力提出了更高的要求。1965 年,美国库利(J. W. Cooley)和图基(J. W. Tukey)提出了快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)计算方法,使计算离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的复数乘法次数从 N^2 减少到 $N \lg N$ 次,从而大大减少了计算量。这一方法促进了数字信号处理的发展,使其获得了更广泛的应用。因为卷积可以利用 DFT 来计算,故 FFT 算法也可用正比于 $N \lg N$ 的运算次数来计算卷积,而卷积运算在电子计算机科学和其他一些领域都有着广泛应用。

20 世纪 70 年代以后,大规模集成电路的发展以及微型机的应用,使信号分析技术具备了广阔的发展前景,许多新的算法不断出现。例如,1968 年美国雷德(C. M. Rader)提出数论变换 FFT 算法(Number theoretic transforms FFT, 简称 NFFT); 1976 年美国威诺格兰德(S. Winograd)提出了一种傅里叶变换算法(Winograd Fourier Transform Algorithm,

简称 WFTA), 用它计算 DFT 所需的乘法次数仅为 FFT 算法乘法次数的 $1/3$; 1977 年法国努斯鲍默 (H. J. Nussbaumer) 提出了一种多项式变换傅里叶变换算法 (Polynomial transform Fourier Transform Algorithm, 简称 PFTA), 结合使用 FFT 和 WFTA 方法, 在采样点数较大时, 较之 FFT 算法快 3 倍左右。上述几种方法与 DFT 方法比较: 当采样点 $N=1000$ 时, DFT 算法需计算乘法 200 万次; FFT 算法为 1.4 万次; NFFT 算法为 0.8 万次; WFTA 算法为 0.35 万次; PFTA 算法为 0.3 万次。

此外, 数字信号处理 (DSP) 芯片是近年来出现的一种用于快速处理信号的器件。它的出现, 简化了信号处理系统的结构, 提高了运算速度, 加快了信号处理的实时能力, 有很大影响。美国 Texas 公司 1986 年推出的 TMS320C25 芯片, 运算速度达 1000 万次每秒, 用其进行 1024 复数点 FFT 运算, 只需 14 ms 便可完成。这一进展, 在图像处理、语言处理、谱分析、振动噪声和生物医学信号的处理方面, 有很广泛的应用前景。

目前信号分析技术的发展目标是:

- (1) 在线实时能力的进一步提高;
- (2) 分辨力和运算精度的提高;
- (3) 扩大和发展新的专用功能;
- (4) 专用机结构小型化, 性能标准化, 价格低廉。

进入 20 世纪 90 年代后, 随着个人计算机价格的大幅度降低, 出现了用 PC+ 仪器板卡+应用软件构成的计算机虚拟仪器。虚拟仪器采用计算机开放体系结构来取代传统的单机测量仪器, 将传统测量仪器中的公共部分 (如电源、操作面板、显示屏幕、通信总线和 CPU) 集中起来与计算机共享, 通过计算机仪器扩展板卡和应用软件在计算机上实现多种物理测量仪器。虚拟仪器的突出优点是与计算机技术结合, 仪器就是计算机, 主机供货渠道多、价格低、维修费用低, 并能进行升级换代; 虚拟仪器功能由软件确定, 不必担心仪器是否能永远保持出厂时既定的功能模式, 用户可以根据实际生产环境变化的需要, 通过更换应用软件来拓展虚拟仪器功能, 适应科研、生产的需要; 另外, 虚拟仪器能与计算机的文件存储、数据库、网络通信等功能相结合, 具有很大的灵活性和拓展空间。在现代网络化、计算机化的生产、制造环境中, 虚拟仪器更能适应现代制造业复杂、多变的应用需求, 能更迅速、更经济、更灵活地解决工业生产、新产品实验中的测试问题。

1.1.2 工程测试技术的工程应用

近代自动控制技术已越来越多地运用测试技术, 测试装置已成为控制系统的重要组成部分。下面介绍几个典型的应用领域。

1. 工业设备测试应用

在汽车、机床等设备和电机、发动机等零部件出厂时, 必须对其性能质量进行测量和出厂检验, 如图 1.1-7 所示。

图 1.1-8 是汽车制造厂发动机测试系统原理框图, 发动机测量参数包括润滑油温度、冷却水温度、润滑油压力、燃油压力以及每分钟的转速等。通过对抽取的发动机进行彻底的测试, 工程师可以了解产品的质量。

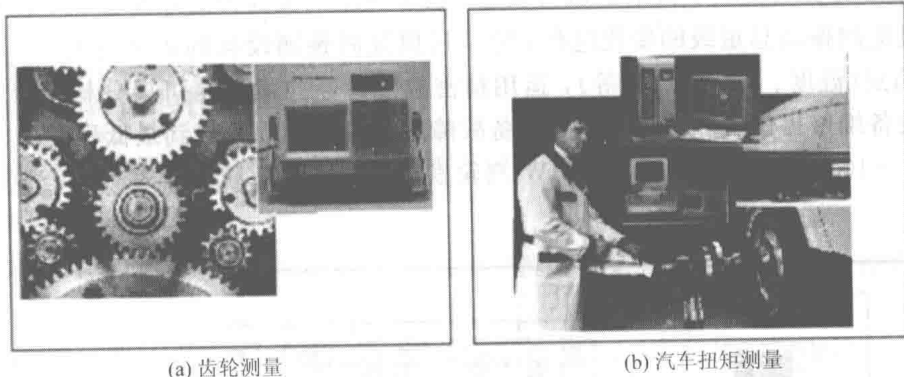


图 1.1-7 产品质量测量

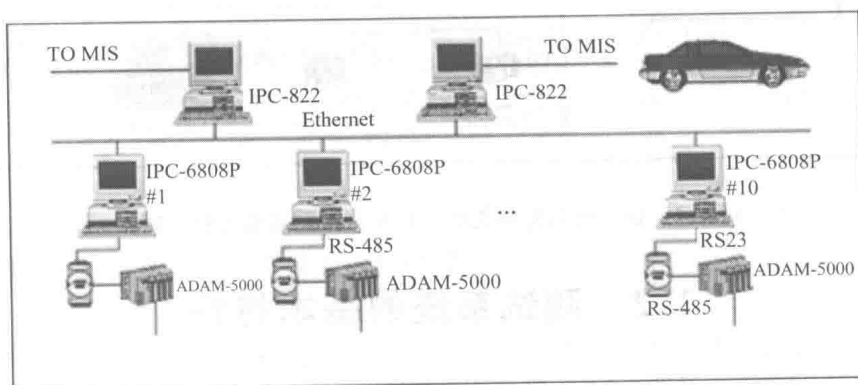


图 1.1-8 汽车发动机测试系统

2. 生产过程运行状态监控系统

在电力、冶金、石化、化工等众多行业中，某些关键设备的工作状态关系到整个生产线正常流程，如：汽轮机、燃气轮机、水轮机、发电机、电机、压缩机、风机、泵、变速箱等。对这些关键设备运行状态实施 24 小时实时动态监测，可以及时、准确地掌握它们的变化趋势，为工程技术人员提供详细、全面的机组信息，这也是实现设备事后维修或定期维修向预测维修转变的基础，如图 1.1-9 所示。国内外大量实践表明，机组某些重要测点的

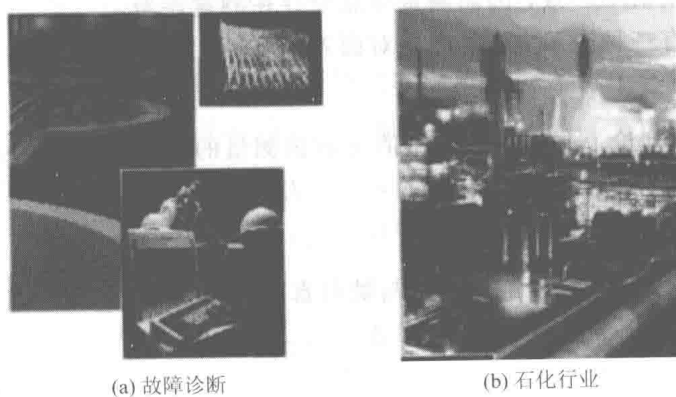


图 1.1-9 设备运行监控系统

振动信号非常真实地反映了机组的运行状态。由于机组绝大部分故障都有一个渐进发展的过程,通过监测振动总量级的变化过程,完全可以及时预测设备的故障的发生。结合其他综合监测信息(温度、压力、流量等),运用精密故障诊断技术甚至可以分析出故障发生的位置,为设备维修提供可靠依据,使因设备故障维修带来的损失降到最低程度。

图 1.1-10 是某火力发电厂 30 MW 汽轮发电机组的计算机设备运行状态监测系统原理框图。

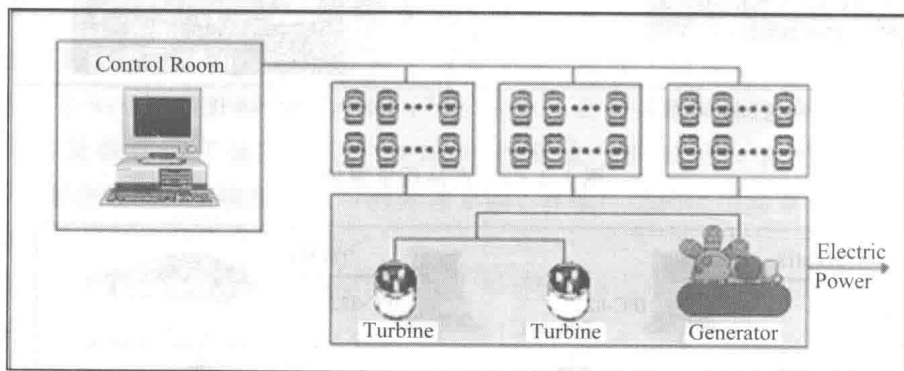


图 1.1-10 汽轮发电机组运行状态监测系统原理框图

1.2 测试系统的基本特性

在工业生产过程中,为了正确地指导生产操作,保证生产安全,提高产品质量和实现生产过程自动化,一项必不可少的工作是准确而及时地检测出生产过程中的各个参数。同时,对被测量进行测量时,测量的可靠性也是至关重要的,而且不同场合对测量结果可靠性的要求也不相同。本章将主要介绍有关测量过程的误差分析与测量装置的性能指标。

1.2.1 测量过程与测量误差

测量过程实质上是将被测参数与其相应的测量单位进行比较的过程。在测量过程中,由于所使用的测量工具本身不够准确,测量方法不十分完善,外界干扰的影响等,造成被测量的测得值与真实值不一致,因而测量中总是存在测量误差。

测量误差通常有三种表示方法,即绝对误差、相对误差与引用误差。

1. 绝对误差

绝对误差 Δ , 在理论上是指仪表指示值 x 和被测量的真值 L 之间的差值, 可表示为

$$\Delta = x - L \quad (1.2-1)$$

2. 相对误差

相对误差 y , 等于某一点的绝对误差与被测真值的百分比, 可表示为

$$y = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (1.2-2)$$

3. 引用误差

引用误差 γ , 等于测量装置的示值绝对误差与其测量量程的百分比, 可表示为