



从校园到职场

# 机电系统测试与控制

## 从入门到精通

王志刚 卜雄洙 李剑峰 党玲 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

0101 100 0101010

0101 01 1

10 1 10 01 0101 0101 01

从校园到职场

# 机电系统测试与控制

## 从入门到精通

王志刚 卜雄洙 李剑峰 党玲 编著



机械工业出版社

本书针对机电工程相关专业的本科毕业生的专业知识背景, 首先在第1篇以机电工程测试技术中, 对感测技术与参数测试、信号调理与数据传输技术、现代测试技术与系统集成、数据分析与处理技术, 以及标定与校准技术等内容进行介绍。在第2篇机电控制技术中, 介绍了机电控制技术基础、机电工程驱动技术与执行装置、测控总线技术等内容。在第3篇工程实践与案例分析中, 通过大量的案例, 进一步阐述机电工程测试与控制技术在实际工程中的应用。本书以系统设计和工程应用为重点, 而理论部分的内容尽量简练, 帮助读者在了解机电工程测试与控制实用技术的基础上, 提高将专业课程中所学到的知识应用到具体工程实践中的能力。

本书可供机电工程及其相关专业的本科毕业生和工程技术人员学习参考, 也可作为测试技术、信息获取和机电控制等领域的培训教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机电系统测试与控制从入门到精通/王志刚等编著. —北京: 机械工业出版社, 2011.3

(从校园到职场)

ISBN 978-7-111-32976-3

I. ①机… II. ①王… III. ①机电工程—测试—基本知识②机电工程—控制系统—基本知识 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 000368 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 舒雯 责任编辑: 舒雯 曾红

版式设计: 张世琴 责任校对: 刘志文

封面设计: 陈沛 责任印制: 乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011年5月第1版第1次印刷

169mm × 239mm · 22.75 印张 · 439 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-32976-3

定价: 46.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

测试和控制技术是人类认识自然、改造自然的重要工具和手段。测试是人们借以认识客观对象的本质，并掌握其内在联系和变化规律的一种科学方法，通过测试实现对客观对象的认识、了解。此外，要实现对客观世界中被控对象的控制，必须首先获取被控对象的特性信息和运行状态；反之，对被控对象特性测试的目的是为了加深对其认识，进而实现控制和利用。在自动控制系统中要实现闭环控制，必须有检测反馈环节，即使最简单的开环控制系统，也需要获取被控对象的状态信息，所以测试与控制技术是密不可分的。

测试与控制技术的水平与发展状况充分反映了人类认识、改造以及与客观世界和谐相处的能力和程度。现代科学技术的不断发展，极大地推动了不同学科的交叉与渗透，导致了工程领域的技术革命。在机械工程领域，由于微电子技术和计算机技术的迅速发展及其向机械工业的渗透所形成的机电一体化，使机械工业的技术结构、产品机构、功能与构成、生产方式及管理体系发生了巨大变化。

机电一体化是指在机构的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能上引进电子技术，将机械装置与电子化设计及软件结合起来所构成的系统的总称，但其基本特征可概括为：机电一体化是从系统的观点出发，综合运用机械技术、电子技术、自动控制技术、计算机技术、信息技术、传感器技术、电力电子技术、接口技术及软件编程技术等群体技术，根据系统功能目标和优化组织目标，合理配置与布局各功能单元，在多功能、高质量、高可靠性、低能耗的意义上实现特定功能价值，并使整个系统最优化的系统工程技术，由此而产生的功能系统，则成为一个机电一体化系统或机电一体化产品。

本书针对机电工程相关专业的本科毕业生的专业知识背景，首先以第1篇机电工程测试技术为主线，对感测技术与参数测试、信号调理与数据传输技术、现代测试技术与系统集成、数据分析与处理技术，以及标定与校准技术等内容进行介绍。在第2篇机电控制技术中，介绍了机电控制技术基础、机电工程驱动技术与执行装置、测控总线技术等内容。在第3篇工程实践与案例分析中通过大量的案例，进一步阐述机电工程测试与控制技术在实际工程中的应用。本书以系统设计和工程应用为重点，而理论部分的内容尽量精练，帮助读者在了解机电工程测试与控制实用技术的基础上，提高将专业课程中所学到的知识应用到具体工程实践中的能力。

本书由王志刚、卜雄洙、李剑峰、党玲、王兆鲁、樊江滨等编著，参与本书

#### IV

工作及参加有关案例工作的同志还有郭书彪、宋美球、王信程、郭贵福、刘文齐、邓高寿、杨慧宇等。本书由王志刚编写大纲并进行统稿。

本书可供机电工程及其相关专业的本科毕业生和工程技术人员学习参考，也可作为测试技术、信息获取和机电控制等领域的培训教材。

在此，编者向在本书编写过程中提供帮助和支持的有关单位和个人致谢，特别向书后的参考文献的作者致以深情谢意，正是这些参考文献作者的辛勤劳动和非常有价值的成果，促就了本书的成稿。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请各位专家和读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言

## 第 1 篇 机电工程测试技术

第 1 章 概述	1
1.1 测试的基本概念	1
1.2 测试技术的应用	1
1.3 测试的分类与特点	2
1.4 测试系统的基本构成	3
1.5 测试技术的发展	4
第 2 章 感测技术与参数测试	5
2.1 传感器的概念	5
2.2 传感器的分类	5
2.3 传感器的性能指标	5
2.4 机电工程常用参数测试与测试传感器	8
2.4.1 温度传感器与温度参数测试	8
2.4.2 压力传感器与压力测试	15
2.4.3 应力/应变测试	16
2.4.4 力传感器与力的测试	17
2.4.5 力矩参数测量	18
2.4.6 机械振动参数测量	20
2.4.7 转速(速度)传感器	24
2.4.8 角/线位移传感器	27
2.4.9 接近式传感器	32
2.4.10 光电编码器	33
2.4.11 陀螺传感器	36
2.5 机电工程常用传感器的选用程式及原则	37
2.6 传感器的发展趋势	40

<b>第3章 信号调理与数据传输技术</b> .....	42
3.1 信号调理技术 .....	42
3.1.1 信号调理的概念 .....	42
3.1.2 信号调理在机电测控系统中的作用 .....	42
3.1.3 对信号调理系统的要求 .....	56
3.1.4 信号调理技术的发展 .....	56
3.2 数据传输技术 .....	58
3.2.1 电压传输 .....	58
3.2.2 电流传输 .....	58
3.2.3 电压/频率变换与传输 .....	58
3.2.4 总线传输模式 .....	59
3.2.5 无线传输 .....	59
<b>第4章 现代测试技术与系统集成</b> .....	60
4.1 测试系统的基本组成 .....	60
4.1.1 线性系统的特性 .....	61
4.1.2 测试系统的静态特性 .....	62
4.1.3 测试系统的动态特性 .....	65
4.1.4 无失真测试条件 .....	68
4.1.5 测试装置的负载特性和抗干扰性 .....	69
4.2 测试系统常见的体系结构 .....	70
4.3 虚拟仪器测试技术 .....	73
4.3.1 虚拟仪器的发展 .....	73
4.3.2 虚拟仪器现状及应用 .....	74
4.3.3 虚拟仪器构成 .....	74
4.3.4 LabVIEW 虚拟仪器应用——四路测控系统虚拟仪器面板的设计 .....	75
4.4 测试系统总体方案的集成设计 .....	77
<b>第5章 数据分析与处理技术</b> .....	80
5.1 概述 .....	80
5.2 实际工程中常用的数据分析与处理方法 .....	80
5.2.1 时域分析 .....	80
5.2.2 信号的幅值域分析 .....	81
5.2.3 频域分析 .....	83
5.2.4 信号的倒频谱分析 .....	90

5.2.5	信号的相关分析	93
5.2.6	时频域分析	99
5.3	误差的定义及分类	110
5.3.1	误差的定义及表示法	110
5.3.2	误差分类	111
5.3.3	传统精度的表示方式	112
5.3.4	测量不确定度	113
5.4	随机误差	116
5.5	系统误差	124
5.6	粗大误差	130
5.7	测量结果的表达	133
<b>第6章</b>	<b>标定与校准技术</b>	<b>136</b>
6.1	概述	136
6.2	校准的分类	136
6.3	校准需遵循的原则	138
6.4	校准工作程序	139
6.5	压力传感器(测试系统)校准	141
6.5.1	压力传感器(测试系统)静态校准	141
6.5.2	压力传感器(测试系统)动态校准	142
6.6	振动传感器(测试系统)校准	145
6.6.1	校准原理	145
6.6.2	绝对校准法	145
6.6.3	相对校准法	147
6.6.4	便携式振动校准器	148
6.6.5	加速度传感器横向灵敏度的测定	149
6.6.6	振动校准详细流程	150
6.7	扭矩校准	152
6.7.1	直接校准	152
6.7.2	间接校准	153
6.8	流量校准	155
6.9	温度校准	157
6.10	校准数据处理	158
6.10.1	校准曲线	158

6.10.2	测试系统的静态指标	159
6.10.3	测试系统的动态指标	161

## 第 2 篇 机电控制技术

<b>第 7 章</b>	<b>机电控制技术总论</b>	163
7.1	概述	163
7.2	机电控制系统关键技术	164
7.2.1	机械技术	164
7.2.2	计算机与信息处理技术	164
7.2.3	系统总体技术	166
7.2.4	自动控制技术	166
7.2.5	传感检测技术	166
7.2.6	伺服驱动与执行机构技术	167
7.3	机电控制的典型应用	168
7.3.1	逻辑控制	168
7.3.2	运动控制	168
<b>第 8 章</b>	<b>机电控制技术基础</b>	170
8.1	概述	170
8.1.1	机电系统的控制形式	170
8.1.2	对控制系统的基本要求	172
8.2	机电系统数学模型的建立	172
8.2.1	机电控制系统的数学模型	173
8.2.2	控制系统的时域分析	176
8.2.3	控制系统的频域分析	181
8.2.4	开环频域性能指标	182
8.2.5	控制系统的校正	184
8.2.6	PID 校正与 PID 控制技术	190
<b>第 9 章</b>	<b>机电工程驱动技术与执行装置</b>	199
9.1	概述	199
9.2	执行元件分类及优缺点	200
9.2.1	电动执行装置	200
9.2.2	液压执行装置	201
9.2.3	气动执行装置	201

9.3 载荷及其分析 .....	201
9.3.1 典型载荷分析 .....	201
9.3.2 载荷的分析计算 .....	203
9.4 伺服电动机及其驱动技术 .....	206
9.4.1 伺服电动机概念与特性 .....	206
9.4.2 各类伺服电动机及其驱动技术 .....	207
9.5 伺服传动与执行机构 .....	227
9.5.1 机电系统伺服传动与执行机构及其基本要求 .....	227
9.5.2 常用伺服传动装置 .....	228
<b>第 10 章 测控总线技术 .....</b>	<b>238</b>
10.1 测控总线概念 .....	238
10.2 机电测控系统采用总线的优点 .....	238
10.3 机电测控系统中常用的总线技术 .....	239
10.3.1 USB 总线 .....	239
10.3.2 嵌入式 PC/104 总线 .....	239
10.3.3 RS422/RS485/RS232 .....	240
10.3.4 现场总线 .....	240

### **第 3 篇 工程实践与案例分析**

<b>第 11 章 信息获取工程实践 .....</b>	<b>243</b>
11.1 典型的信号调理电路设计 .....	243
11.1.1 断丝声光报警 K 型热电偶调理模块设计 .....	243
11.1.2 Pt100 热电阻传感器信号调理 .....	245
11.1.3 转速信号调理 .....	245
11.1.4 I/V 转换调理电路设计 .....	247
11.1.5 新型电荷放大器 .....	251
11.1.6 新型多功能 ICP 调理模块 .....	254
11.2 提高测试数据精确度的关键因素分析及其对策 .....	256
11.2.1 影响装甲车辆测试精确度的关键因素分析 .....	256
11.2.2 提高装甲车辆测试数据精确度的对策研究 .....	257
11.2.3 小结 .....	262
11.3 特殊环境下的信息获取技术 .....	262
11.3.1 装甲车辆实车环境下信息获取面临的挑战 .....	262

11.3.2	嵌入式信息获取技术	263
11.3.3	装甲车辆实车工况环境下信息获取重点突破的关键技术	264
11.3.4	小结	267
11.4	USB 接口及其应用	267
11.4.1	概述	267
11.4.2	USB 数据采集系统设计	268
<b>第 12 章</b>	<b>测控案例</b>	<b>280</b>
12.1	基于 ABB AC800M 的供热蒸汽锅炉恒压供水自动控制系统	280
12.1.1	概述	280
12.1.2	系统原理与构成	281
12.1.3	系统硬件设计与选型	283
12.1.4	系统软件设计	289
12.1.5	小结	302
12.2	月球车车轮土槽测控系统的设计与实现	303
12.2.1	概述	303
12.2.2	土槽模拟试验测控装置总体方案	303
12.2.3	轨道测试车安全运行保护装置	310
12.2.4	土槽测控软件设计	310
12.2.5	小结	313
<b>第 13 章</b>	<b>机电工程电磁兼容设计</b>	<b>314</b>
13.1	概述	314
13.2	电磁兼容 (EMC) 设计	314
13.2.1	干扰源分析	314
13.2.2	干扰的耦合方式	315
13.2.3	干扰的形态	317
13.2.4	干扰与噪声的抑制措施	318
<b>第 14 章</b>	<b>标定与校准试验装置</b>	<b>325</b>
14.1	准动态压力标定装置	325
14.2	准动态压力标定系统工作原理	325
14.3	峰值压力和压力脉宽理论计算公式	326
14.4	测压系统总体方案	327
14.5	系统的测控软件	328
14.6	标准测压系统测量值的不确定度的评定方法与实例	331

<b>第 15 章 建模仿真实例</b> .....	335
15.1 制动防抱死系统 .....	335
15.1.1 概述 .....	335
15.1.2 ABS 的控制原理 .....	335
15.1.3 ABS 的组成 .....	337
15.1.4 ABS 的主要部件 .....	337
15.2 汽车巡航控制系统 .....	340
15.2.1 概述 .....	340
15.2.2 汽车自适应巡航控制系统的原理与结构 .....	340
15.2.3 车辆纵向动力学模型 .....	341
<b>附录 校准点的选择原则</b> .....	346
<b>参考文献</b> .....	347



# 第 1 篇 机电工程测试技术

## 第 1 章 概 述

### 1.1 测试的基本概念

从广义的角度来讲，测试技术涉及试验设计、模型试验、信号的传输、信号采集与处理分析、误差理论、控制工程、系统辨识和参数估计等内容。从狭义的角度来讲，测试技术是指在特定的测试环境和选定的激励方式下，所进行的信号检测、变换、预处理、数据传输、存储、标定以及电量输出的数据处理工作，本篇将重点围绕以上几方面进行阐述。

### 1.2 测试技术的应用

在机电工程产品的研制开发过程中，测试发挥了重要的技术支撑作用。其作用有：①提供机电工程装备工作信息，起诊断作用；②判断机电工程各分系统间工作的协调性，验证总体设计方案；③提供各分系统和整机内部检测参数，验证设计的正确性；④机电测控系统的检测反馈参数，用于控制。

现代机电工程装备和产品，如复杂的武器系统、数控机床、车辆等，产品组成和功能十分复杂，有些问题至今还难以进行完整的理论分析和计算，必须依靠试验测试研究来解决实际问题。通过测试工作积累原始数据，是机电工程装备和产品设计研究中很艰巨的一项工作，也是很重要的基础性和不可或缺的技术手段。在工程技术领域中，工程研究、产品开发、质量控制和性能试验等，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，测试装置已成为控制系统测控反馈环节的重要组成部分，日常生活用具，如汽车、家用电器等方面也离不开测试技术，总之，测试技术已渗透到人类活动的各个领域。

## 1.3 测试的分类与特点

### 1. 按照被测信号的响应快慢来分类

(1) 静态测试 静态测试是指测试时，测试系统的输入、输出信号不随时间变化或变化很缓慢。通常用来描述静态测试特性的指标有：测量范围、灵敏度、分辨率、非线性度、回程误差等。一般用标定曲线来评定静态测试系统的静态特性，理想线性装置的标定曲线是直线，而实际系统的标定曲线并非如此。在实际工程中，通常按最小二乘法原理求出标定曲线的拟合直线。图 1-1 是应用电子表格 EXCEL 相关功能自动求出 Pt100 温度传感器标定曲线和相关系数。

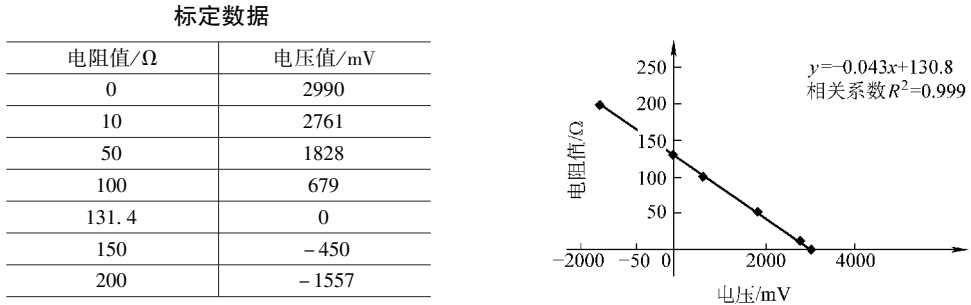


图 1-1 用 EXCEL 求出的 Pt100 标定曲线和相关系数

当被测信号的动态响应很慢，随时间或环境变化不是很大时，可采用静态测试方法对系统进行测试和分析。

(2) 动态测试 动态测试是指所测试信号的特点是瞬态信号，而非静态信号，因此要求所采用的动态测试系统能满足被测信号动态响应特性的要求，满足动态测试无失真的测试条件。在实际测试过程中，如果测试系统选用不当，输出量不能快速地追随输入量的变化，则会导致较大的测量误差。

### 2. 按照测试结果的获得方式分类

(1) 直接测试 直接测试是从仪表的读数直接获取测量结果的方法，如水温表测量温度。它的特点是测量过程简单迅速。

(2) 间接测试 间接测试是由仪表或仪器的读数，按照一定的函数关系（公式或算法）经计算而获取测量结果的方法。它一般应用在以下场合：直接测试不方便；间接测试比直接测试的结果更为准确；没有直接测试的仪表。现代测试技术的一大特点是采用电测量方法测量非电量参数。目前，非电量参数的电测量方法一般都属于间接测试方法，并可通过软件实现更复杂的算法。

(3) 组合测试 组合测试是在测试两个或两个以上相关的未知数时，通过

改变测试条件而获得一组含有可直接测量或可间接测量的已知数和不能或不便通过直接测量或间接测量获取的未知数构成的方程组，经求解而获取测试结果的方法。例如测试铂电阻的一次、二次温度系数的方法。

## 1.4 测试系统的基本构成

一个典型的测试系统可用如图 1-2 所示的原理框图来描述。

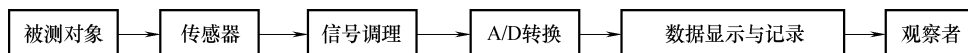


图 1-2 测试系统原理框图

传感器处于信息获取的最前端，用于从被测对象获取有用的信息，并将其转换为适合于测量的变量或信号，其输出信号有不同形式，如电压、电流、频率、脉冲等，以满足信息传输、处理、记录、显示、控制要求，是自动测试系统和自动控制系统中不可缺少的元件。

传感器承担着将可测量的物理量转变为电信号的作用。从传感器出来的信号除有用信号外还常夹杂有各种有害的干扰和噪声，信号调理部分就是对传感器所输出的信号做进一步的加工和处理，包括对信号的转换、放大、滤波及一些特殊的信号预处理。由于传感器的输出信号往往具有光、机、电等多种形式，而对信号的后续处理通常都采取电的方式和手段，因而有时必须把传感器的输出信号进一步转换为适宜于电路处理的电信号。通过信号的调理，最终可以获得便于信号采样、传输、显示和记录以及可做进一步处理的信号。

A/D 转换部分是将经调理后的模拟电信号转换成数字信号，可供计算机进行采样处理。

数据显示和记录部分是将信号用便于人们观察和分析的介质和手段进行记录或显示。

在实际应用中，因涉及的领域及被测参量的种类、性质和测试要求不同，对传感器和测试系统的体系结构要求是不同的，相应的测试仪器和装置千差万别，正确地选择和设计测试系统的体系结构是测试成败的关键。随着科学技术的发展和实际工程系统要求的不断提高，在速度、分辨率、精度、接口、软件设计及抗干扰能力等方面向测试系统提出了越来越高的要求。

从信号的传递过程来看，无论是什么样的测试集成系统，都包含了信号采集、信号转换、信号传输、信号处理等基本环节。这些环节构成了一个完整的信息获取系统。在测控系统中，信息获取系统可以为控制提供在线信息，并可以嵌入到控制系统中。

## 1.5 测试技术的发展

科学技术的飞速发展给测试技术注入了新的活力，现代电子技术，尤其是信息技术的发展更推动了测试技术的迅猛发展。同样，测试技术的发展又会促进新科技成果的不断出现和创新。

目前，测试技术的发展方向有以下几个方面：

### 1. 测试需求更加多样化

随着高新技术的发展和产品研制要求的不断提高，对传感器及测试技术的发展提出了更高的要求，要求传感器的测量范围更广、测试精度更高，测试系统的环境适应性更强。

### 2. 传感器向新型、微型、智能型发展

新材料，特别是新型半导体材料的发展及工艺性的革新，促进了力、热、光、磁等物理量或气体化学成分敏感器件的发展，精度高、灵敏度高且测量范围大及微型化、智能化成为传感器发展的重要方向。光导纤维不仅可用来传输信号，而且可作为物性型传感器。由于微电子技术和 MEMS（微机电系统）技术的发展，可以把某些电路乃至微处理器和传感测量部分做成一体，即传感器具有放大、校正、信号处理、判断、通信、自诊断等功能，组成智能传感器。

### 3. 测试系统向综合化多功能、自动化方向发展

在大型机电工程产品研制过程中，为了验证设计的正确性及产品性能，通常要进行综合性试验测试。这类综合测试，被测参数种类和数量多，要求高，以往传统的测试仪器设备，使用繁琐，效率低，精度低，已远远不能满足和适应机电工程产品研制的需要。以计算机为核心的现代自动化测试系统能够实现自动校准、故障诊断、信号调理、多路采集、网络通信和自动分析处理功能，使参数测试和数据处理工作实现了自动化、智能化，大大加快了产品研制的进程。此外，还出现了将微型测试系统置入被测体内，采用近场遥测或存储测试的方式提取被测对象的各种主要参数变化，从而有效地解决了特种环境下的信息提取难题。