

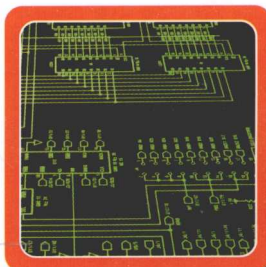
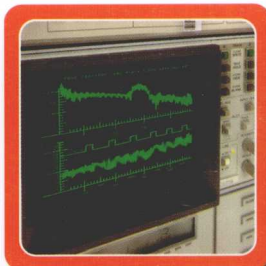


全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

测试系统设计 原理及应用

◎ 靳 鸿 主编

◎ 王 燕 副主编



奉献——作者多年教学经验和科研成果

详解——测试系统构建方法和设计步骤

实践——电路原理图的设计和实现方法



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

测试系统设计原理及应用

靳 鸿 主 编

王 燕 副主编

裴东兴 郭斯羽 张艳兵 参 编
孟令军 沈大伟 崔 敏★ 藏书 ★
图书馆

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1652840

TP274-43
49

01308180

内 容 简 介

本书以具体的系统设计为例,比较全面地介绍了测试系统的基本分析方法、设计原则和设计方法。以系统设计步骤为序,介绍了系统的方案设计、模块设计方法、电路的设计和仿真验证;以系统实现和实践为主,着重讲述了电路原理图、版图设计、仿真及可编程逻辑器件设计、仿真方法;以应用为辅,通过几个不同参数的测试系统设计、应用实例,对之前的内容进行补充和扩展。本书内容丰富,实践性强,对测试系统设计有一定的指导和参考作用。

全书共14章,第1~4章是测试系统设计的基础理论,第5~11章是系统设计流程和实现方法,第12~14章是系统设计方法的具体应用。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、机械工程及自动化等专业的本科生和研究生教材,也可供从事电子仪器设计和调试工作的相关工程技术人员自学和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容
版权所有,侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

测试系统设计原理及应用/靳鸿主编. —北京:电子工业出版社,2013.6

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-20382-4

I. ①测… II. ①靳… III. ①自动检测系统—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第098697号

策划编辑:郭穗娟

责任编辑:刘凡 文字编辑:桑 昀

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:20 字数:510千字

印 次:2013年6月第1次印刷

定 价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

测试技术是工科专业的一门技术基础课，测试系统是实施测试的必备条件，是实现测试的关键。随着人类活动规模、深度的不断扩大和深入，人类已不可能通过自己的感觉、思维和体能器官直接观测和操作工具使之达到既定目标，测试系统是扩展人类感知的途径之一。测试系统的设计和实现是实践性非常强的技术，本书以瞬态波形记录仪的设计为例，将此仪器的设计、实现与测试系统设计、实现的基础理论相结合，重点培养实践能力。

本书以具体例子为主线，结合瞬态波形记录仪的设计，详细介绍了测试系统的设计方法、设计步骤。结合系统性能及特性给出了电路原理图的设计和实现方法，以及印制电路板(PCB)的设计和实现方法，并针对控制模块介绍了可编程逻辑器件的设计方法。

本书是作者从事测试技术及仪器专业 10 多年教学经验的积累和科研结果的体现，内容实践性强；知识点与实际科研项目相结合；采用先建立知识框架再进行内容填充的介绍方式，便于读者的学习和理解。希望通过本书，有助于读者建立正确的系统概念，明确系统设计的步骤和基本方法，对实践起到一定的指导作用。

本书共 14 章。第 1 章是绪论；第 2~4 章是对系统研究对象——信号及系统组成、特性的分析，按照信息流的顺序着重介绍了一般系统的主要组成环节，以及系统设计原则；第 5 章以瞬态波形记录仪的指标要求为例，介绍了系统的总体设计和模块设计思想；第 6~8 章是各模块的电路原理图设计方法、仿真验证及版图设计方法；第 9~10 章是瞬态波形记录仪控制模块的设计，包括可编程逻辑器件的设计方法和仿真验证；第 11 章是关于测试数据误差分析的基础理论；第 12~14 章是测试系统设计方法在几个不同参量的测试系统设计中的应用实例，是对瞬态波形记录仪设计方法的补充和知识点的强化。

本书在编写过程中，参阅了大量文献，在此向这些文献的作者表示衷心的感谢。中北大学的祖静教授、马铁华教授、郑宾教授、郝晓剑教授对本书的编写工作给予了大力帮助和支持，特向他们表示诚挚的感谢。

本书第 1 章由中北大学裴东兴编写；第 2 章由中北大学张艳兵编写；第 3、13 章由中北大学孟令军编写；第 4、5、12 章由中北大学靳鸿编写；第 6、7、8、10 章由中北大学王燕编写；第 9 章由中北大学崔敏编写；第 11 章由湖南大学郭斯羽编写；第 14 章由中北大学沈大为编写。靳鸿负责统稿。

全体编者在此书的编写过程中都尽心尽力，但因水平有限，书中难免存在不足或疏漏之处，恳请广大读者批评指正，不胜感激。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测试系统概述	1
1.1.1 测试系统的基本组成环节	1
1.1.2 测试系统设计的一般要求	4
1.1.3 存储测试系统	4
1.2 测试技术发展历史、现状与趋势	5
1.3 测试系统设计工具	7
本章小结	9
思考与练习题	9
第 2 章 测试技术及设计软件基础	10
2.1 测试及相关概念	10
2.2 传感器转换原理	10
2.2.1 电阻应变式传感器	10
2.2.2 电容式传感器	12
2.2.3 压电式传感器	14
2.2.4 热电式传感器	15
2.3 Protel 99SE 软件设计方法	16
2.3.1 Protel 99SE 主要功能模块	16
2.3.2 Protel 99SE 设计环境	17
2.3.3 Protel 99SE 设计环境的基础操作	18
2.4 电路原理图编辑环境设置	21
2.4.1 原理图工具栏的设置	21
2.4.2 图纸设置	22
2.4.3 设置文件信息	24
2.4.4 设置光标和网格	24
2.4.5 电路原理图的设计步骤	24
2.5 印制电路板设计基础	25
2.5.1 PCB 设计流程	25
2.5.2 PCB 编辑器	26
本章小结	29
思考与练习题	29
第 3 章 测试系统的基本组成	30
3.1 非电量电测系统及其基本组成	30



3.2	传感器	31
3.2.1	传感器的组成及其输出信号的特点	31
3.2.2	传感器的分类与常用技术指标	32
3.3	信息转换	33
3.3.1	信号的放大	33
3.3.2	滤波器	36
3.3.3	A/D 转换器	39
3.4	信息的存储、显示和处理	45
3.4.1	数据存储	45
3.4.2	数据显示	48
3.4.3	信息处理	49
3.5	接口与总线	51
3.5.1	接口	51
3.5.2	总线	53
3.6	控制模块	56
	本章小结	56
	思考与练习题	57
第 4 章	测试系统设计方法及特性分析	58
4.1	测试系统设计的前期准备	58
4.1.1	使用要求	58
4.1.2	参数预估	58
4.2	测试系统的设计原则	59
4.2.1	总体设计原则	59
4.2.2	灵敏度分配和误差分配原则	60
4.2.3	系统总体设计的一般步骤	61
4.3	测试系统各环节设计	62
4.3.1	传感器选用原则	62
4.3.2	放大及滤波环节设计	64
4.3.3	采样策略	65
4.3.4	控制模块设计	68
4.4	测试系统的状态设计方法	69
4.4.1	状态图及其组成	69
4.4.2	等容量随机间隔采样策略状态图设计	69
4.5	测试系统的基本特性	70
4.5.1	测试系统的静态特性	70
4.5.2	测试系统的动态特性	75
	本章小结	83
	思考与练习题	84

第 5 章 测试方案确定及参数分析	85
5.1 功能、指标要求及总体方案	85
5.1.1 功能要求	85
5.1.2 性能指标	86
5.1.3 总体方案设计	86
5.2 模拟板模块设计及参数分析	87
5.2.1 模拟板主要模块功能设计	87
5.2.2 放大衰减模块设计及主要参数分析	87
5.2.3 滤波模块及主要参数分析	90
5.3 数字板模块设计及参数分析	92
5.3.1 数字板模块设计	92
5.3.2 采样及存储模块主要参数分析	93
5.4 基板模块设计及主要参数分析	96
5.4.1 基板的主要模块设计	96
5.4.2 通道读出控制	96
5.5 控制板设计	98
5.5.1 控制板整体功能设计	98
5.5.2 采样策略的状态图设计	98
5.6 虚拟软面板设计	99
5.6.1 虚拟软面板设计的基本原则	99
5.6.2 数据处理方法	100
5.6.3 数据处理软件	101
5.6.4 瞬态波形记录仪软面板设计	103
本章小结	104
思考与练习题	105
第 6 章 电路原理图设计	106
6.1 瞬态波形记录仪的层次式电路设计	106
6.2 瞬态波形记录仪的主电路图设计	107
6.2.1 绘制方块电路图	107
6.2.2 放置方块电路端口	108
6.2.3 连接各方块电路	108
6.3 模拟板子电路图设计	110
6.3.1 模拟板子电路原理图的建立	110
6.3.2 放大衰减电路的绘制	111
6.3.3 滤波电路的绘制	124
6.4 数字板子电路图设计	126
6.4.1 模数转换电路的绘制	126
6.4.2 负延迟电路的绘制	127



6.4.3 多通道设计	128
6.5 基板及控制板子电路图设计	128
6.5.1 电源管理电路的绘制	128
6.5.2 接口及控制电路的绘制	129
6.6 报表文件	130
6.6.1 ERC	130
6.6.2 网络表文件	132
6.6.3 生成层次项目组织列表	133
本章小结	133
思考与练习题	134
第 7 章 原理图仿真实验	135
7.1 电路仿真功能概述	135
7.2 电路仿真步骤	135
7.3 电源和仿真激励源	137
7.4 仿真分析类型说明	142
7.5 仿真实例	148
本章小结	153
思考与练习题	153
第 8 章 印制电路板设计	154
8.1 瞬态波形记录仪的印制电路板设计	154
8.1.1 瞬态波形记录仪印制电路板总体设计方案	154
8.1.2 规划电路板和电气定义	155
8.1.3 设置电路板工作层	159
8.1.4 PCB 工作参数设置	162
8.1.5 载入元件封装及网络表	166
8.2 记录仪 PCB 图的布局设计	171
8.2.1 设置布局设计规则	171
8.2.2 自动布局	173
8.2.3 手工调整元件布局	174
8.3 记录仪 PCB 图的布线设计	174
8.3.1 设置自动布线规则	175
8.3.2 运行自动布线	177
8.3.3 手工调整布线	178
本章小结	179
思考与练习题	180
第 9 章 可编程逻辑器件的设计方法与流程	182
9.1 可编程逻辑器件设计的基本方法	182

9.2 图形输入设计方法	182
9.2.1 图形输入设计的文件组成	183
9.2.2 图形输入的元件	184
9.2.3 元件特点	185
9.3 文本输入设计方法	187
9.4 设计流程	188
9.4.1 设计输入	189
9.4.2 项目编译	192
9.4.3 设计校验	194
9.4.4 编程与配置	195
本章小结	196
思考与练习题	196
第 10 章 控制模块的 VHDL 设计及仿真	197
10.1 瞬态波形记录仪控制模块的功能	197
10.2 VHDL 的特点及程序结构	197
10.2.1 VHDL 的特点	197
10.2.2 VHDL 程序结构	198
10.3 顺序语句及并行语句	200
10.3.1 顺序语句	200
10.3.2 并行语句	205
10.4 采样策略的设计实现	210
10.4.1 定频率采样策略	210
10.4.2 变频率采样策略	213
10.5 内触发类型的判断与触发	215
10.6 基板的数据转换模块	216
本章小结	217
思考与练习题	217
第 11 章 误差分析及数据处理	218
11.1 实验数据的表示	218
11.1.1 表示方法	218
11.1.2 数据修约与有效数字	220
11.2 误差的定义与表示方法	221
11.2.1 误差的定义	221
11.2.2 误差的基本表示方法	222
11.3 测量误差的来源	223
11.4 测量误差的分类	224
11.4.1 系统误差	224
11.4.2 粗大误差	226



11.4.3 随机误差	227
11.5 测量数据处理	231
11.5.1 算术平均值原理	231
11.5.2 测量标准差及其估计	231
11.5.3 算术平均值与实验标准差的标准差	233
11.5.4 测量不确定度的基本概念	233
11.5.5 最小二乘法	234
11.5.6 回归分析	238
本章小结	239
思考与练习题	239
第 12 章 基于 SoC 的系统设计	241
12.1 测试系统的微型化	241
12.2 模、数及混合集成技术	242
12.2.1 高集成度数字器件	242
12.2.2 模拟集成技术的发展	243
12.2.3 混合集成技术	246
12.3 SoC 概述	246
12.3.1 SoC 及其 IP 特点	247
12.3.2 SoC 单片机与 DSP 系统级集成电路	249
12.4 系统设计方法与对象的变化	250
12.4.1 系统设计方法的变化	250
12.4.2 系统设计对象的变化	251
12.5 SoC 的设计流程与步骤	252
12.5.1 传统的 SoC 设计流程	252
12.5.2 基于 IP 模块的 SoC 设计流程	252
12.5.3 软硬件协同设计流程	253
12.5.4 SoC 单片机的设计流程	254
12.6 设计举例	255
12.6.1 基于 ispPAC20 的放大模块设计	255
12.6.2 基于 SoC 单片机的应变测试仪设计	257
本章小结	265
思考与练习题	265
第 13 章 双通道数据记录仪的设计与实现	266
13.1 系统总体设计	266
13.1.1 主要技术指标	266
13.1.2 系统组成分析	266
13.2 供电单元设计	267
13.2.1 供电电路设计	268

13.2.2 RS-422 数据接收单元设计	269
13.3 LVDS 数据接收单元设计	269
13.3.1 LVDS 接口设计	270
13.3.2 LVDS 数据接收	271
13.3.3 片内 FIFO 设计	272
13.4 Flash 存储器高速存储技术	274
13.4.1 存储介质选择	274
13.4.2 内部寻址方式	275
13.4.3 交叉双平面操作时的无效块检测	275
13.4.4 交叉双平面页编程	277
13.4.5 Flash 存储器数据读取	278
13.4.6 Flash 存储器高速擦除	279
13.5 PCB 布局布线设计	280
13.5.1 PCB 设计的一般原则	280
13.5.2 信号完整性	281
13.5.3 PCB 设计	282
13.6 上位机软件	283
本章小结	284
思考与练习题	284
第 14 章 压力测试系统的设计	285
14.1 压力与压力测量	285
14.1.1 基于压力测量的传感器技术	285
14.1.2 压力传感器简介	286
14.2 压力测试系统设计	287
14.2.1 基于压电式压力传感器的压力信号采集的实现	287
14.2.2 基于压阻式压力传感器的压力信号采集的实现	297
本章小结	304
思考与练习题	304
参考文献	305

第1章 绪论

测试是人类认识和改造世界的一种手段。非电量测试系统通过采集、控制、传输、处理等环节实现物理、化学、生物等非电量参数的测试，得到数据、曲线、图像等可显现参数，为科研、生产、生活提供观察、监测、验证、定性或定量分析的依据。

测试中所采用的原理、方法和技术措施称为测试技术。基于某种测试技术，由电子器件和线路技术组成，用于测试各种被测对象的装置，称为电子测试仪器。习惯上，将为完成某项测试任务而按某种规则有机连接起来的一套测试仪器（设备）称为测试系统，这是狭义的测试系统。广义的测试系统还应包括测试者（人员）、测试对象和测试环境。

1.1 测试系统概述

仪器仪表作为对信息进行采集、测量、处理和控制的重要手段和设备，已成为推动科学技术和国民经济高速发展的关键技术之一。著名战略科学家王大珩院士指出：“在当今以信息技术带动工业化发展的时代，仪器仪表与测试技术是信息科学技术重要的组成部分”。科学是从测量开始的，作为测量和测试技术集中体现的仪器科学与技术学科，在当今我国国民经济和科学技术发展中的作用日益显现。

测试技术以信息的获取为主要任务，并综合了信息的传输、处理和控制等基础知识及应用。在当今的信息化社会，测试技术将与计算机技术、通信技术共同组成现代信息科学技术，它们是信息科学技术的三大支柱。

1.1.1 测试系统的基本组成环节

测控技术与仪器专业属于仪器仪表领域，仪器仪表主要体现在测量和控制两个方面。测试系统是一种能够将被测参数转换成可直接观测指示或等效信息的测试设备。一般情况下，测试系统采用非电量电测法，通过传感器将非电量（温度、湿度、压力、加速度、气体浓度等参数）转换为电量，采用机、电、光、计算机等手段，将获取的被检测对象运动或变化的信息经过一定的处理，转换为易于存储、显示的信号，或者提供给自动化系统，达到测试的目的。测试是为了获取有用信息，而信息是以信号的形式表现的，即测试与测试系统、信息、信号密切相关。信息、信号、测试系统之间的关系可表述为：获取信息是测试的目的，信号是信息的载体，测试是得到被测参数信息的技术手段。

测试系统主要组成形式可以分为三类：基本型、标准接口型与闭环控制型。

1. 基本型

一般情况，非电量测试系统主要包含传感器、信号调理、数据采集卡、计算机等几个部分，实现信号调理、模数转换、信号传输与信号处理。被测对象是温度、压力、速度、流量、



液位、气体浓度等非电量。基本型测试系统的组成结构框图如图 1-1 所示。

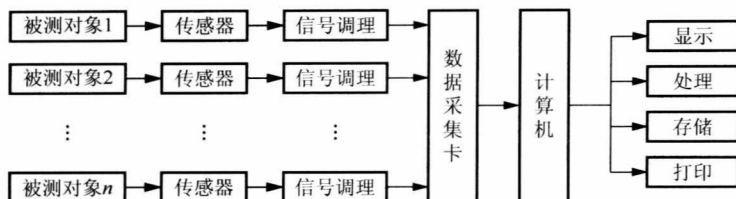


图 1-1 基本型测试系统的组成结构框图

随着微电子技术的发展，将传感器与信号调理电路集成为一体的芯片已经出现，甚至将传感器、信号调理电路、数据采集及微计算机或微处理器全部集成在一块芯片的产品也已面世。

2. 标准接口型

为了使数据采集系统的集成更方便，常采用通用标准接口总线的模块组成数据采集系统。各种仪器模块由数据总线通过标准接口卡组成大型测试系统，数据总线包括 GPIB (General Purpose Interface Bus)、PCI (Peripheral Component Interconnect)、PXI (PCI eXtensions for Instrumentation)、VXI (VMEbus eXtensions for Instrumentation)、USB (Universal Serial Bus)、RS-232 等总线。

数据采集模块完成信号的模数转换，然后通过标准总线将数据传输到计算机系统。标准通用接口型数据采集系统由模块（如台式仪器或插件板）组合而成，所有模块的对外接口都按规定标准设计。若模块是台式仪器，用标准的无源电缆将各模块连接起来就构成系统；若模块是插件板，只要将各插件板插入标准机箱即可。

组建标准接口型测试系统非常方便，虽然初期投资大，但有利于组建大、中型测试系统。标准接口型测试系统如图 1-2 所示。

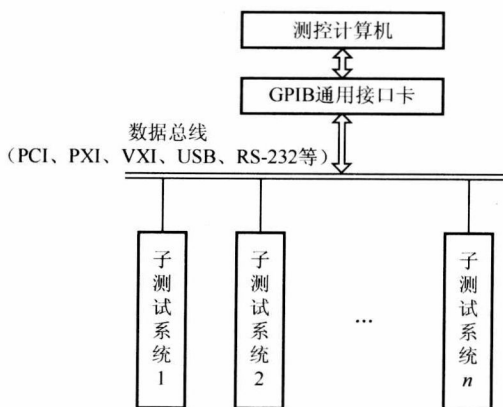


图 1-2 标准接口型测试系统

GPIB 是通用接口总线的简称，是美国 HP 公司拟制，为可编程仪表设计的，因此又称 HP-IB 总线。GPIB 总线是一种并行方式的外总线，包括 8 条数据线、5 条控制线、3 条挂钩

线和 8 条底线,采用比特并行、字节串行的双向异步通信方式。总线上传递消息的逻辑电平为负逻辑的 TTL 电平,数据传输速率一般为 250~500 kb/s,最高可达 1Mb/s。基于 GPIB 构建的通用接口测试系统,它是由一台 PC、一块 GPIB 接口卡和若干台 GPIB 仪器子系统组成。其中每个仪器子系统是一台带 GPIB 接口的单台仪器。该接口在功能上、电气上和机械接插件上都按国际标准设计,内含 16 条信号线,每条线都有特定的意义。即使不同厂家的产品也相互兼容,组建系统时非常方便,拆散后各仪器子系统又可作为单台仪表独立使用。

目前,VXI 总线已成为最好的虚拟仪器开发平台。以 VXI 总线技术为核心组建的自动测试系统已经在家用冰箱测试、铁路电机测试、环保测试、电力测试、集成电路封装测试、托卡马克等离子体物理试验、汽车燃油泵测试、电梯功能和安全测试等方面得到了较好的应用。在军用方面,以中国航天测控公司等为代表的 VXI 总线产品开发和系统集成厂商,已经有几十套 VXI 总线自动测试系统应用于导弹、飞船、运载火箭、发动机、飞机、雷达、鱼雷、轻武器、火炮、装甲车和制导炸弹等多个领域的测试中。

PXI 是 PCI 在仪器领域的扩展。它将 CPCI 规范定义的 PCI 总线技术发展成适合试验、测量与数据采集场合应用的机械、电气和软件规范,从而形成新的虚拟仪器体系结构。

在目前较为流行的总线标准中,VXI、CPCI 是专门针对数据采集系统的总线标准,具有抗干扰能力强、工作可靠的优点,但对应的采集模块和计算机系统价格较高;PCI 和 USB 总线是个人计算机的标准总线,并非为数据采集而设计,因此在性能上比 VXI 和 CPCI 差,但价格较低,因此应用广泛。由于受总线传输速度和操作系统软件的限制,通过总线方式集成的采集系统一般不具备实时采集的功能,为了完整地采集一段时间的信号,通常在采集模块上装配容量较大的存储器,采集到的数据先保存在缓冲存储器中,然后通过总线分批传送到计算机。

3. 闭环控制型

闭环控制型测试系统是指应用于闭环控制系统中的测试系统,如图 1-3 所示。生产工艺过程的自动控制是人们长期探索的生产方式,只有在计算机技术及现代测试技术突飞猛进的今天,才能达到高度控制水平。通过对关键参数实时在线检测,并控制这些参数按预定的规律变化,以达到维持生产正常进行和高产优质的目的。

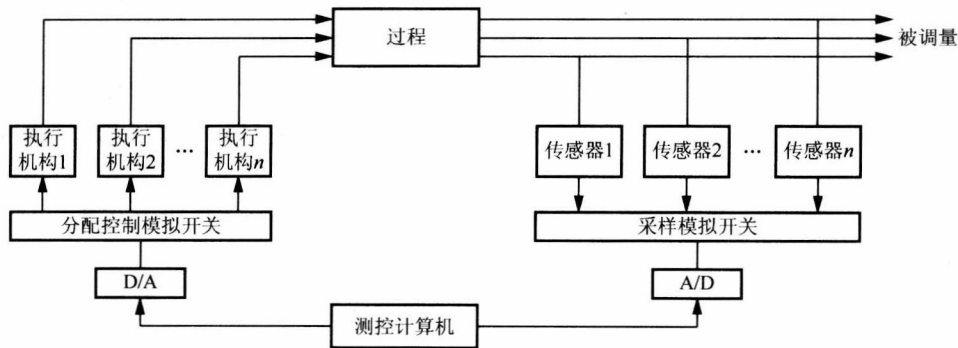


图 1-3 生产工艺过程闭环控制系统中的测试系统

在发电厂、化工、医药、食品加工等生产线的监测现场,大多是闭环控制型测试系统,在线监测并反馈控制,形成集测试与自动控制于一体的自动化测试网络。



1.1.2 测试系统设计的一般要求

测试系统测试的数据、曲线、图像等可见参数是对被测量的不可见参数的一种等价再现,因此,测试系统的设计要遵循一些基本要求。

(1) 精度要求。测试系统要满足一定的精度要求,例如,静态测量的灵敏度、线性度、示值误差等,以及动态测量的响应时间等。

(2) 可靠性要求。测试系统要满足一定的可靠性要求,在一定时间内、一定要求下出现故障的概率要低。例如,平均无故障工作时间(MTTR)就是一个仪器的可靠性要求。

(3) 环境适应性要求。测试系统要满足一定的环境适应性要求,要在被测环境中能够正常、可靠、准确地工作。例如,在高温、高压、高冲击、强电磁干扰环境下的环境适应能力要强。芯片的商业级、工业级、汽车级、军品级的划分,都是环境适应性要求的体现。

(4) 体积要求。测试系统要满足一定的体积要求,以保证能够适应被测对象的安装要求。特别是存储测试仪器,要保证存储测试仪器对被测对象无影响,或者影响在可接受范围内。若存储测试仪器采用电池供电,在满足体积要求的同时,还要满足功耗要求。

(5) 同步时间精度要求。构建网络化的测试系统要满足同步时间精度要求,要有统一的时基。

(6) 接口要求。测试系统的接口要满足总线以及接口的国标、军标要求。

(7) 其他要求。根据被测对象或者被测环境而制定的一些适应性要求。

1.1.3 存储测试系统

存储测试技术是测试计量技术的一个特色分支,是指在测试对被测对象无影响或者影响在允许范围之内的条件下,在被测体内置入微型存储测试仪器,现场实时完成信息采集与存储,事后回收记录仪,由计算机处理和再现被测信息的一种动态测试技术。存储测试系统的主要技术特点是,现场实时快速采集记忆,事后回收处理再现。

1. 存储测试系统的特点

存储测试系统是一个特殊的测试系统,它是为了解决高温、高压、强冲击等复合恶劣环境,或者狭小空间、高速旋转等场合信号难以获取、传输等问题而设计的专用测试系统。

存储测试系统具备测试系统的一般特征,同时具有微体积、微功耗、多种采样策略、复合智能控制模式、抗恶劣环境,以及现场采集存储,事后回收测试仪器再现、分析、处理数据的特点。典型的存储测试系统包含存储测试仪器和计算机读数软件两部分。其中存储测试仪器由传感器、信号调理模块、控制模块、A/D 模块、存储模块、接口模块、电源管理模块、电池、晶振等部分组成,通过灌封工艺,将上述模块封装在密闭的高强度壳体里,以适应恶劣环境。计算机读数软件完成回收存储测试装置后的数据处理与分析,以及测试曲线显示、打印、数据存盘等。

2. 存储测试系统的应用

存储测试系统是针对恶劣环境下的动态参数测试而设计的专用测试系统,具有抗恶劣环境(高温、高压、高冲击)、微体积、微功耗、高可靠性等特点。目前,存储测试系统已经广泛应用于兵器、航天、石油井下等动态参数测试领域。例如,火炮膛压测试、发动机活塞应

力场和温度场测试、弹箭飞行姿态测试、侵彻加速度测试、石油井下压力/温度等动态参数测试、煤层气抽采压裂过程压力/温度动态参数测试等。

火炮膛内动态压力参数是火炮在研发、设计和验收时的一个重要参数,对于火炮膛内强度的考核,炮弹外弹道初速的预测和发射性能的验证都有十分重要的意义。利用存储测试技术设计的微型化放入式电子测压器(体积微小,截面积比一角硬币稍大一点),置入火炮膛内实时实地地获取火炮膛内动态压力参数,事后回收并通过计算机处理、分析数据,得到火炮膛内动态压力-时间曲线,为火炮性能的改进和提升提供参考数据。火炮膛内压力测试仪器和测试曲线如图 1-4 所示。

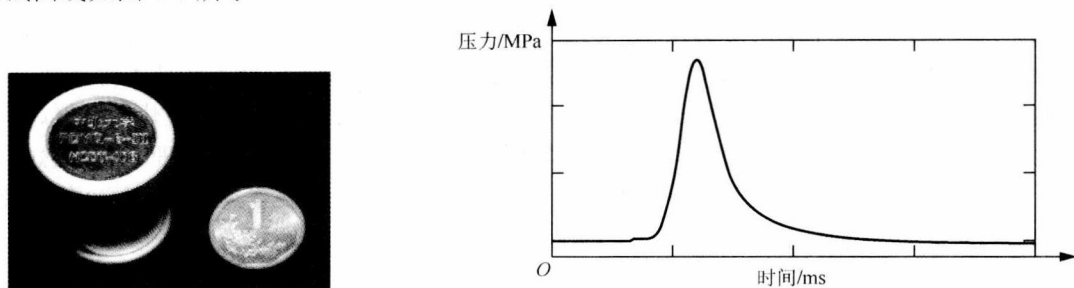


图 1-4 火炮膛内压力测试仪器和测试曲线

石油开采过程中,射孔、压裂及地层压力恢复过程的压力数据,对研究油气层特征、分析射孔压裂的完井效果、制订合理的施工工艺、为射孔枪的系统设计提供实验依据等都有重要的现实意义。要在 5000m 深的石油井下,实时实况测取射孔枪爆炸时的动态参数,仪器应能在 150℃ 环境温度下长期工作,可耐静压 50MPa,在 $\pm 50\,000g$ 的冲击加速度下可靠采样,使用电池供电,功耗尽量小,受井筒尺寸限制直径要小于 80mm。利用存储测试技术设计的专用石油井下多参数测试仪器具有耐高温、抗冲击、耐腐蚀的特点,已在我国大庆、辽河等油田获得成功应用。石油井下动态参数测试仪器和测试曲线如图 1-5 所示。

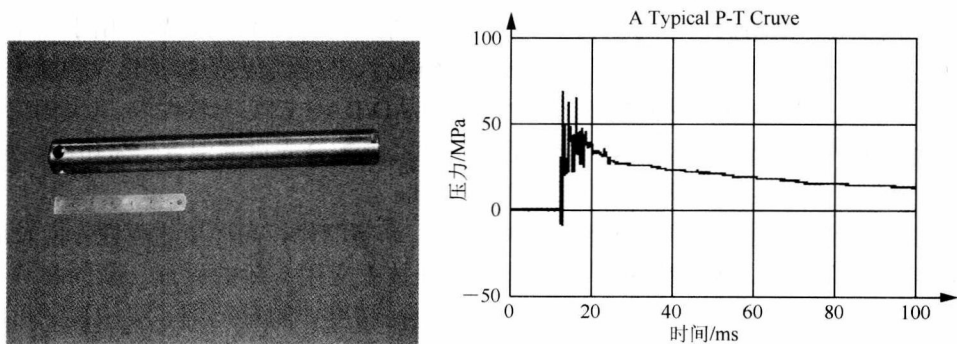


图 1-5 石油井下动态参数测试仪器和测试曲线

1.2 测试技术发展历史、现状与趋势

1. 发展历史

仪器仪表有着悠久的历史,古代的仪器在很长的历史时期内多数属于以定向、计时或供



度量衡为目的的简单仪器，如司南、机械钟、日晷、天体仪。中国古代度量衡与古代数学、物理、天文、建筑、冶炼等起着相互促进的作用。

在工业革命的浪潮中，科学技术的突飞猛进，各种新技术、新发明层出不穷，并被迅速应用于工业生产，大大促进了经济的发展，同时也推动了仪器仪表与测试计量技术的进步与发展；反过来，新的仪器仪表与测试计量技术也促进了工业生产的进步。特别是第二次工业革命后，电力的广泛应用极大地促进了电测仪器仪表和电测量技术的发展，如安培的电流计等。

2. 发展现状

仪器技术是信息技术中的源头技术，也是现代科技的前沿技术。进入 21 世纪以来，随着计算机网络技术、软件技术、微纳米技术、光学技术、微电子技术、嵌入式技术等高新技术的快速发展，测量控制与仪器技术出现了虚拟化、远程化、高度智能化、微型化的发展趋势。一方面，高新技术推动了测量控制与仪器技术的发展，出现了一批采用新原理、新概念、新技术、新材料和新工艺的新仪器、新装置；另一方面，新仪器、新装置具有高精度、智能化、微型化等特征，促进了航空、航天、汽车等工业的进步。

3. 发展趋势

随着电子技术、集成技术、计算机等技术的发展，测试技术出现了智能化、虚拟性、微型化、网络化的发展趋势。

(1) 测试系统向系统集成化方向发展，呈现微型化、多功能化、智能化、数字化的发展趋势。

微米/纳米技术、微电子技术、集成电路工艺的发展，极大地提高了芯片的性能，减小了芯片的体积、增加了芯片的功能等。例如，微机电系统（Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS）、系统芯片（System on Chip, SoC）、芯片实验室、生物芯片等，实现了功能的高度集成、体积的极大减小、可靠性的极大提升等。数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）技术和芯片的应用，使测试技术与仪器仪表呈现出智能化、数字化的趋势。由于微电子技术的进步，仪器仪表产品进一步与微处理器、PC 技术融合，仪器仪表的数字化、智能化水平不断得到提高。今后仪器可以归纳为一个公式“仪器=AD/DA+CPU+软件”，以美国德州仪器公司提出的“DSPS”概念为例，它以 DSP 芯片为核心，配合先进的混合信号电路、ASIC 电路、元件及开发工具等为整个应用系统提供解决方案。

(2) 测试仪器向高精度、高灵敏度、高可靠性、高智能化、高环境适应性方向发展。

新型传感器的发明、各种先进的数字信号处理技术应用、新的原理、新的材料与工艺促进了测试技术与仪器仪表的指标不断提高，体现在精度、测量范围、灵敏度、可靠性等方面。

(3) 自动化水平不断提高，逐步呈现自动补偿、自诊断、故障处理等智能化发展趋势。

随着测试仪器功能的不断提高和完善，与其相关的自动测试系统的组建与发展也经历了从台式仪器 ATS（Automatic Test System）系统到卡式仪器 ATS 系统，从卡式仪器 ATS 系统到卡式仪器与台式仪器混合的 ATS 系统的发展过程。到目前为止，VXI 结构的仪器（主要对于大通道数的数字信号测量）与 GPIB 标准的台式仪器（主要对于性能要求严格的射频/微波信号测量）相结合组建的 ATS 测试系统，已成为军用 ATS 测试系统普遍遵从的主流原则和典范。这与以美国为代表的军工用户在 20 世纪 90 年代提倡的采用 COTS（Commercial Off the