



存储测试系统的设计理论 及其应用

Design Method of Storage Measurement and Its Application

张文栋



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



717274
225

存储测试系统的设计理论 及其应用

Design Method of Storage Measurement and Its Application

张文栋



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

存储测试系统的设计理论及其应用/张文栋.
—北京:高等教育出版社,2002.11
ISBN 7-04-010432-6

I.存... II.张... III.①信息存贮②信号检测—
自动检测系统 IV.TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 079862 号

存储测试系统的设计理论及其应用
张文栋

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本	787×960 1/16	版 次	2002 年 11 月第 1 版
印 张	11.5	印 次	2002 年 11 月第 1 次印刷
字 数	200 000	定 价	18.90 元
插 页	1		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书是在 2000 年全国优秀博士论文“存储测试系统的设计理论及其在导弹动态数据测试中的实现”的基础上撰写的。主要内容来自于作者的博士学位论文以及作者在北京理工大学攻读博士期间的科研成果,并增加了作者在清华大学博士后流动站和美国加州伯克利大学工作和研究期间的部分研究成果。这些成果目前已经在航天、航空领域和许多重点武器研制和民用测试领域获得了成功应用,取得了良好的社会和经济效益。

本书的出版首先要感谢马宝华教授和祖静教授,两位导师不论是在我攻读博士学位期间还是在目前的工作中,都给予了极大的帮助。感谢清华大学周兆英教授对我的关怀和指导。在本书整理和出版过程中,得到了许多同志的支持和帮助。在此向北京理工大学机电控制教研室和华北工学院微米纳米技术研究中心的全体老师和同学们表示衷心感谢,本书的许多观点和实验是在他们的参与下形成和完成的。借此机会对作者在清华大学精密系博士后流动站工作期间以及加州伯克利大学客座研究期间的所有老师、同学在工作和生活上的帮助表示感谢。感谢高等教育出版社理工部的编辑同志为本书出版付出的辛勤的劳动。感谢华北工学院微米纳米技术研究中心的董海峰同志和文丰同志对本书做了认真的校对和整理工作,华北工学院出版部的林捷同志完成了本书的录入工作。向所有对本书撰写和出版给予支持和帮助的同志表示诚挚的谢意。在此我还要特别感谢我的夫人白艳萍女士和我的亲人对我工作的长期支持、帮助和鼓励。

作者

2001 年 2 月

摘 要

本书系统地研究了存储测试系统及其设计理论,提出了存储测试系统包括的基本要素。在综合分析研究多种存储测试系统设计规律基础上,提出了存储测试系统宏观设计原理和系统状态设计理论。

本书把存储测试系统作为信息传输系统,建立了存储测试系统的信息传输模型,提出了存储测试通道设计有效性准则。研究了连续模拟信号的最佳测试通道,建立了存储测试通道信息传输与信号能量之间的关系方程以及测试通道的抗干扰容限方程式。在测试通道设计中,引入信息失真和信息率失真函数概念。将数字测试通道综合成“Z”信道和二元对称有扰信道的组合,提出了指令测试通道和数据测试通道的信道容量及最佳通道布局。

本书提出了适用于存储测试的四种采样策略,给出了零阶预测自适应采样和一阶预测自适应采样算法。研究了采样信号的两种量化器,建立了均匀量化器的信息率失真函数与信噪比算法,研究了最佳量化器设计方法,研究了多路信息测试原理,提出了 ADC 和多路转换器的选择原则。

本书提出了信息存储有效性准则,在研究信息压缩存储原理的基础上,提出并系统地研究了有限间距误差限算法,计算机仿真表明,该算法在实时信息压缩存储方面是非常有效的。本书提出了提高瞬态单次信号测试可靠性的双环存储测试原理和方法。提出并研究了实现存储测试的主要关键技术。

书中详细介绍了智能导弹黑匣子等存储测试系统的研制与应用情况。

关键词:测试技术;存储测试;信息压缩;数据采集;导弹测试;引信技术;自适应采样。

ABSTRACT

The book researches about Stored Testing and Measuring System (STMS) and its design theories, and proposes the basic elements of the STMS. Based on studying the design method of many kinds of STMS's and the writer's design experience in practice, the book puts forward the macroscopic design principle and the state design theory of the STMS.

Considering the STMS as an information transmission system, the book sets up its information transmission model and advances the validity design rules of the STMS' measuring channels. The book studies the optimal measuring channel for analogue signals and determines the relation equation between the information transmission rate and signal power, as well as the anti-interference capacity equation. In the design of the measuring channels, the concepts of information distortion and information rate distortion functions are introduced. Decomposing the digital channels into "Z" channel and the channel of bi-symmetric disturbed information, the paper proposes the capacity of instructions test channel and digital channel as well as their optimal layout.

The four kinds of sampling strategies suitable for the STMS are put forward. The algorithm of zero step and one step forecasting self-adaptive sampling tactics are introduced in detail. Two kinds of quantifiers are also presented by the author. The algorithm of the relation of information rate distortion function and signal-to-noise ratio is provided. Furthermore, the book studies the multichannel information measuring principles to select ADC and multichannel change-overs are also given.

The book advances validity criterion for information storage. Based on the information compression principle, the paper creates the data algorithm of limited error and fixed step. The effectiveness of the algorithm in real-time data acquisition is proved by means of computer simulation. In this book, the two-loop recording principle for improving the reliability in measuring transient signals is mentioned. The key technologies of the STMS are discussed in detail.

As an application example of the design theories of the STMS, the book completely describes the design and test of the intelligent missile black-box.

Key words: test and measurement technology, stored testing and measuring

technology, information compression, data acquisition, missile measurement, fuse technology, self-adaptive sampling.

作者简介



张文栋, 1962年生, 河南人。1996年在北京理工大学获得工学博士学位, 1998年完成清华大学博士后研究, 1999年结束在美国加州大学伯克利的访问研究回国。现任华北工学院院长、教授、博士生导师、美国 IEEE 学会高级会员。

自 1982 年以来, 一直从事动态测试技术、智能仪器和微型机电系统 (MEMS) 的教学与科研工作, 先后完成国家杰出青年基金、国防重点预研项目等国家和省部级科研项目 30 多项, 获国家发明二等奖和三等奖各一项, 国家教育部科技进步一等奖一项和其他省部级科技进步二等奖四项。在 IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement、兵工学报、测试技术学报等发表学术论文 102 篇, 其中有 57 篇被 SCI、EI 等国际检索机构收录, 出版译著一部。在瞬态大跨度信号测试、智能微型仪器、集成测量系统等方面建立了系统的设计理论, 并形成了明显的技术特色, 在国防和国民经济建设中发挥了重要作用。

1997 年获得第五届中国青年科技奖, 被授予国家有突出贡献的中青年专家, 1998 年获得全国“五一”劳动奖章。

导师简介



马宝华, 1934 年 10 月生, 祖籍河南夏邑, 国家有突出贡献的科技专家, 北京理工大学教授, 博士生导师, 北京理工大学首席专家, 兵器科学与技术一级学科主讲教授, 武器系统与运用工程博士点首席教授, 总装备部科学技术委员会委员, 机电工程与控制国家级重点实验室学术委员会主任。1957 年毕业于北京工业学院, 留校任教至今。长期从事探测与控制装备的教学和科学研究工作, 主要研究领域为武器系统分析和机电系统优化与仿真。20 世纪 70 年代率先在我国开展引信优化设计研究, 80 年代开辟相关装备的系统分析与总体设计规律研究方向, 参与主持相关装备技术“七五”、“八五”、“九五”和“十五”预先研究计划指南的制定, 90 年代以来作为总设计师主持多项装备型号的研制, 在我国首次实现了相关装备的通用化、系列化和组合化。曾获国家科技进步二等奖、国家发明三等奖、国家优秀教材奖、部级科技进步特等奖各 1 项, 部级科技进步一等奖 2 项, 二等奖 3 项。著有《引信构造与作用》、《飞航导弹战斗部与引信》等。



祖静, 华北工学院教授, 北京理工大学博士生导师, 中国兵工学会常务理事, IEEE 高级会员。学科方向“动态测试与智能仪器”, 提出“在被测体实际运动的过程中实时实况地测取其动态参数”的动态测试的概念; 提出“存储测试技术”的概念, 把经微型化强固化的信号调理电路、波形记录电路、接口及传感器、电池缩微封装成一个微小的测试装置, 放置到被测体或被测环境中, 实时实况地测取被测体的实际动态参数。组织学生及课题组成员实现了火炮膛压测试、各种弹丸及导弹实际发射及终点过程的多环境动态参数测试、石油井下动态参数测试、爆炸冲击波场测试、坦克发动机及传动轴等运动及隐蔽零件的动态参数测试等动态过程参数测试, 得到广泛应用。提出: 因测试装置承受与被测体相同的环境力作用的“动态测试环境因子理论”, “存储测试原理”, “存储测试技术的采样策略及其集成电路实现”等理论。在该领域获国家发明二等奖一项、国家发明三等奖一项、兵器工业科技进步二等奖两项。

目 录

第 1 章 综述	1
1.1 存储测试与存储测试系统	1
1.1.1 存储测试	1
1.1.2 存储测试系统	1
1.1.3 存储测试的特点及其应用领域	2
1.2 国内外相关研究情况及发展趋势	3
1.3 作者在存储测试领域的实践	4
1.4 本书在存储测试系统设计理论上的贡献	7
第 2 章 系统设计理论	9
2.1 概述	9
2.2 系统构成	10
2.3 宏观设计原理	12
2.3.1 设计哲学	12
2.3.2 宏观设计原则	12
2.4 设计程式	19
2.5 状态设计理论	20
2.5.1 基本概念	20
2.5.2 状态集合	20
2.5.3 状态网络设计	22
2.5.4 系统状态及其转换的数学描述	25
2.5.5 功耗时间因子	25
第 3 章 测试通道设计理论	27
3.1 引论	27
3.1.1 存储测试系统信息传输模型	27
3.1.2 存储测试系统与 Shannon 通信系统	30

3.1.3	被测信号的信息度量	30
3.1.4	信息传输有效性准则	33
3.2	模拟信号测试通道	34
3.2.1	信道容量	34
3.2.2	抗干扰容限	36
3.2.3	信息传输率与信号能量之间的关系	37
3.2.4	最佳模拟信号测试通道	38
3.2.5	测试通道失真与信息传输率	40
3.3	数字信号测试通道	43
3.3.1	数字信号传输通道	43
3.3.2	指令信息测试通道	48
3.3.3	数字量信息测试通道	48
第 4 章	采样策略与量化理论	50
4.1	采样策略	50
4.1.1	采样设计面临的问题	50
4.1.2	采样策略	51
4.1.3	采样误差	54
4.2	量化理论	57
4.2.1	概述	57
4.2.2	均匀量化器	58
4.2.3	非均匀量化器	61
4.3	多路转换与信息编码	63
4.3.1	信号容量	63
4.3.2	ADC 及多路转换器的选择原则	63
4.3.3	信息编码	66
第 5 章	信息存储、压缩及容错设计	67
5.1	信息存储	67
5.1.1	信息存储子系统	67
5.1.2	存储控制	69
5.1.3	信息存储有效性准则	70
5.2	信息压缩存储	70
5.2.1	信息不失真压缩编码原理与冗余度	70
5.2.2	信息压缩存储算法	71
5.3	容错技术与冗余设计	78
5.3.1	容错技术	78

5.3.2 冗余设计	80
第 6 章 可靠性分析与可靠性预计	83
6.1 失效机理分析与保证可靠性的措施	83
6.1.1 电子元器件的失效分析	83
6.1.2 元器件的选用	85
6.1.3 组装工艺造成的失效分析	88
6.2 可靠性模型与可靠性预计	91
6.2.1 可靠性预计的数学模型	91
6.2.2 可靠性预计	92
6.2.3 某战略导弹数据记录设备可靠性预计	95
6.3 故障树分析法(FTA)	97
6.3.1 故障树分析法	97
6.3.2 某战略导弹数据记录设备的 FTA	98
6.4 某战略导弹数据记录设备的 FMECA	101
第 7 章 存储测试的关键技术	103
7.1 建模与补偿技术	103
7.1.1 系统建模	103
7.1.2 动态性能补偿	106
7.2 三激技术	109
7.2.1 激型化技术	109
7.2.2 激功耗技术	112
7.2.3 激噪声技术	112
7.3 专用集成电路 TH9601	113
7.3.1 自适应采集算法	113
7.3.2 电路设计	113
7.3.3 专用集成电路	116
7.4 抗高过载技术	116
7.4.1 强化技术	117
7.4.2 缓冲技术	118
7.5 接口技术	118
7.5.1 与被测对象的接口技术	118
7.5.2 与计算机的接口设计	119
第 8 章 智能导弹黑匣子	121
8.1 研制背景及概况	121
8.1.1 研制背景	121

8.1.2	被测信号特点及测试要求	121
8.1.3	研制与应用情况	124
8.2	智能导弹黑匣子系统的设计	126
8.2.1	设计原则	126
8.2.2	系统组成	126
8.2.3	电路模块方案设计	127
8.3	硬件电路设计	139
8.3.1	启动控制电路设计	139
8.3.2	各记录通道设计	140
8.3.3	各通道记录方式确定及可行性分析	143
8.4	软件功能设计	145
8.4.1	系统软件设计	146
8.4.2	自检功能	146
8.4.3	采集功能	147
8.4.4	读数功能实现	149
8.4.5	部分采集数据的后处理	154
8.5	激光窄脉冲信号的记录	155
8.5.1	激光窄脉冲结果特征分析	155
8.5.2	窄脉冲信号的采集及记录方式	155
8.5.3	窄脉冲信号测试电路设计	156
8.5.4	硬件电路设计	157
8.5.5	激光窄脉冲信号软件设计	161
8.6	低温应用技术	161
8.7	落点指示器	162
8.8	导弹信号模拟发生器	162
8.9	智能导弹黑匣子测试试验	165
8.9.1	电路调试	165
8.9.2	地面联试	166
8.9.3	导弹实弹飞行实验数据测试试验	166
参考文献		167

第1章 综 述

1.1 存储测试与存储测试系统

1.1.1 存储测试

存储测试是指在对被测对象无影响或影响在允许范围的条件下,在被测体内置入微型存储测试仪器,现场实时完成信息快速采集与存储,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。实现动态参数存储测试的技术关键在于研制能够在被测环境内正常工作的,对被测对象工作无影响或影响在允许范围内的数据采集与存储测试系统。

1.1.2 存储测试系统

存储测试系统是为完成存储测试目的而设计的物理系统,它工作在高温、高压、强冲击振动、高过载等恶劣环境和紧凑设计条件下,自动完成被测信息的实时采集与存储记忆。例如,存储测试火炮膛压 $p-t$ 曲线和全弹道过程弹丸飞行过载信息的存储测试系统等。

作为一个系统,存储测试系统具有整体性、目的性、层次结构等一般系统的基本特征^[1]。它包含下列基本要素:

- (1) 转换被测参数,并最小限度影响被测对象的传感器或信号接口模块;
- (2) 快速数据采集与存储记忆器;
- (3) 长时间信息保持单元;
- (4) 与计算机交换信息的接口电路;

- (5) 保证电路系统正常工作的环境保护器;
- (6) 方便回收的位置指示器。

1.1.3 存储测试的特点及其应用领域

存储测试系统的主要特点是,独立自动地完成动态数据采集与存储记忆,特别是能在多种恶劣环境和紧凑设计条件下完成动态参数测试,在军用民用两大领域具有广阔的应用前景。目前,存储测试技术已经在许多重大武器型号的研究、研制、生产、验收和使用中得到成功应用,取得了一系列重要科研成果。例如,获得国家发明二等奖的电子测压蛋,就是一个典型的存储测试系统,图 1.1 是电子测压蛋的构成框图。

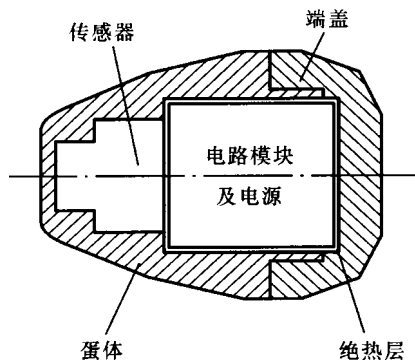


图 1.1 电子测压蛋构成框图

图中电子测压蛋的壳体由 18Ni 马氏体时效钢加工而成,可承受火炮发射过程膛内 400 MPa 的高压;它的隔温绝热层使得它置于燃烧火药 3 000 ℃ 的环境中,其蛋内温度小于 70 ℃,从而确保内部电路模块正常工作。包含电荷放大器、A/D 转换器、存储器、时钟电路、触发电路、中心控制器、接口电路和电源在内的电路模块的体积仅有 4 cm³,小于中大口径火炮药室容积的 1%,对发射过程的影响微乎其微,然而它却“集铜柱测压器放入式测量,使用操作简便和引线式电测法测压精度高,能获得 $p-t$ 曲线的优点于一身,为火炮验收基准向电测法过渡奠定了基础,是新一代火炮膛压测试设备。”^[2]

弹载波存仪是一种微型抗高过载弹载存储测试系统,它首创了一弹三环境多个动态参数的存储测试^[3],完成了弹丸侵彻硬目标过程数万个重力加速度(后文用 g 表示重力加速度)信号的准确测试^[4],实现了引信着地发火过程动态参数的存储测试^[5],使得过去无法解决的反机库、反跑道侵彻弹丸实弹侵彻过载测试的难题迎刃而解。

存储测试技术在民用领域也发挥着重要作用。例如,它应用于石油井压裂

技术领域,测取了数千米深处石油井高能气体压裂过程的 $p-t$ 曲线^[6],极大地促进了高能气体压裂技术的发展。此外,存储测试技术还在航空、航天、机械、电子等多个领域中得到应用^[7~8],解决了许多过去无法解决的重大测试难题,显示出了突出的优越性。

1.2 国内外相关研究情况及发展趋势

存储测试技术是与现代科学技术密切联系的现代测试技术,存储测试的思想来源于电子计算机的信息存储,现代微电子学迅速发展,出现了中大规模 CMOS 存储器,使存储测试得以实现。随着集成水平的提高,存储测试系统的性能不断完善,应用的范围越来越宽,发挥的作用也越来越大。现代控制理论与技术的发展以及人工智能的研究成果,为存储测试技术的发展注入新活力,使得存储测试系统的记录方式变得多样化,多通道、大容量、可编程,并出现了自适应和智能化的存储测试系统,使存储测试系统的可靠性和灵活方便性得到大大提高。起源于通信技术领域的信息理论,是信息存储测试的理论基础,现代信息论的应用将有利于促进存储测试技术的进一步完善和提高。

国外从 20 世纪 70 年代末期开始对存储测试技术进行研究,80 年代初渐有文献报道。Louis R. Szabo 提出的“应用于弹丸测试的先进的数字存储测试仪”概念,研究了存储测试的实现方法及可能面临的问题,并将存储测试仪与无线电遥测仪在性能特点上作了对比,指出存储测试仪具有结构简单、不需发射天线、微体积、低功耗、可重复使用等优点^[9~10]。他们研究了“A”,“B”,“C”三种存储测试仪:“A”型存储测试仪用于测试火炮弹丸膛内的 $a-t$ 曲线,抗过载 3 万个 g ,重复使用次数为 20 次;“B”型存储测试仪是一个多通道测试仪,它利用自带的加速度开关启动记录过程,测试内容包括引信零部件运动速度,全弹飞行时间以及其它一些时间参量;“C”型存储测试仪用于弹丸侵彻终点目标过程的过载波形记录,该记录仪在 ARRADCOM 空气炮上做了模拟测试。

随着微电子学技术和封装强化技术的发展,弹载存储测试仪的存储容量和抗过载能力得到大大提高,文献[11]提供了存储容量 128 KB,采样频率 2 MHz,测量范围达 10 万个 g ,体积仅有 $\phi 25.4 \times 57.4 \text{ mm}^3$ 的弹载存储测试系统。

国内在 1983 年开始研究引信数据的存储测试方法,刘致安、梁燕熙提出了存储遥测的概念^[12],预测了随着中大规模集成技术的发展,将出现以存储为主要特征的新型测试方法。华北工学院首次在国内应用存储测试技术获取火箭扫雷弹外弹道加速度曲线^[92]。作者在 1986 年对弹载数据采集与存储测试系统设计方法及其应用作了探索性的研究^[93]。1988 年作者提出了引信动态数据的存储测试概念,研制出了引信动态数据存储测试系统^[94]。1993 年祖静教授等全面

深入地研究了存储测试技术的若干理论问题及其实践^[13]。

“七五”、“八五”期间原国防科工委重点预研课题“电子测压蛋”、“引信膛内环境、飞行环境及终点环境参数的快速存储与再现技术”和“制导兵器专用测试技术”,使我国在存储测试理论与技术方面获得重大突破,取得了一系列科研成果,达到和部分超过了国际先进水平,处于国际领先地位。目前,我国存储测试仪器已成系列化,体积从 $4 \times 10^3 \text{ cm}^3 \sim 1 \times 10^3 \text{ cm}^3$,存储容量从 4 KB 到 100 MB,采样频率从 10 Hz~10 MHz 可编程,并能够实现实时自适应采样和压缩编码存储,抗过载能力也已达 10 万个 g 。并且,应用领域已从引信、炮弹、航弹、导弹、运载火箭等飞行体的动态数据测试,扩展到坦克车辆动力系统输出功率、发动机扭矩、活塞温度场、应力场等的存储测试^[14]以及石油井下压力测量^{[15],[95]}。对于齿轮啮合应力的测试^[16],还出现了采用存储测试原理的汽车黑匣子、火车黑匣子等。当前存储测试系统正向超大容量、模块化和智能化方向发展^[17]。

随着微型机电系统(MEMS)技术的出现和发展,存储测试技术步入新的发展阶段。集成化的微型传感器、单片集成测量系统和可自行走微型存储仪器将为存储测试技术开辟更广阔的应用领域。

综上所述,存储测试技术是在特殊环境条件下完成运动体工作状况参数测试的有效手段,其发展方兴未艾,应用前景广阔,它已经发展成为测试、计量技术与仪器学科的一个重要分支。

由于存储测试技术具有广阔的应用领域,因而其使用条件差异很大。研究设计满足多种需求的存储测试系统,就需要系统的设计理论做指导。在研制工作中,仅靠就事论事,依靠有经验的设计者设计,通过大量反复试验来完成的方法已不能满足需要,因为如此研制出的存储测试系统往往通用性差,只要测试要求稍有变化,就可能需要从头开始。因此,必须系统全面地研究存储测试系统设计理论。

1.3 作者在存储测试领域的实践

作者自 1984 年以来一直从事存储测试技术研究,在职攻读博士学位期间,由作者自行研究设计和主持研究完成了如下存储测试系统。

1. 智能导弹黑匣子

智能导弹黑匣子是为我国某重型反坦克导弹实弹飞行动态数据测试而研究设计的弹载存储测试系统。它能实时测试导弹弹上热电池电压、陀螺输出、激光指令、舵机指令、解码器数据和弹上计算机校正数据等 32 路动态参数,存储容量为 256 KB,在实弹飞行试验中获得了大量动态数据,为重弹研究和故障分析,提供了重要依据。