

新概念动态测试

New Concept Dynamic Test

© 祖 静 马铁华 裴东兴 范锦彪 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国防科技图书出版基金

新概念动态测试

New Concept Dynamic Test

祖 静 马铁华 裴东兴 范锦彪 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

新概念动态测试/祖静等著. —北京:国防工业出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-118-10775-3

I. ①新… II. ①祖… III. ①武器—动态测试 IV.
①TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 070259 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售



*

开本 710×1000 1/16 印张 29 $\frac{1}{4}$ 字数 595 千字

2016 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 169.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的

创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

序

我国兵器技术及其他国防科学技术长期存在仿制和“画、加、打”的落后局面,发展远远落后于西方发达国家,是我国武器技术发展的瓶颈。改革开放以后党中央提出独立创新发展国防科技,彻底改变“画、加、打”的落后局面。其中重要一条就是要发展现代动态测试技术。发达国家对我国长期技术封锁,某国曾对我国转让炮射导弹、末制导炮弹等生产技术,但是不转让测试技术。西方发达国家更是把可用于国防事业的科学仪器列为禁运之首。武器系统工作条件极为恶劣,高温、高压、高振动、高动态和瞬态性、恶劣电磁环境、高运动性等使武器系统的实时实况动态测试成为高难课题。

祖静教授和他所在的科研团队所提出的“新概念动态测试”就是针对恶劣环境下的信息获取问题,走我国独立自主发展国防科技的道路,总结出一套独特的在武器系统运动过程的恶劣环境中直接测取被测对象运动规律、在同样恶劣环境下进行溯源性校准、仪器系统在恶劣环境下可靠生存等理论和技术体系。提出了一种恶劣环境下的信息获取科学,研制出大量具有微体积、微功耗、微噪声、高适应性及实时性、高精度、高可靠性、高存活性、低的试验测试费用的测试仪器系统,广泛应用在武器系统的研制、生产验收、勤务、故障判别等动态测试的各个方面,对我国武器系统的创新发展起了重要作用。

本书是该团队近30年从事武器动态测试工作的理论总结,立足我国实际,具有独特特色,未见国内外有相同或相似的文献。本书所提出的理论和技术将进一步对我国的国防事业的发展起推进的作用。



2015年6月13日 于北京

序

我从 1993 年起就关注祖静教授领导的科研团队所进行的独创性的研究工作,1990 年祖静把他们应用在炮膛内直接测取火炮发射的膛压曲线以及放置到发射中的弹丸上直接测取其动态参数这一类技术定名为“存储测试技术”,形成一个独特的理论体系,成为我国存储测试技术的奠基人。他的助手、学生张文栋在十多年实践的基础上,以《存储测试系统的设计理论及其应用》为题完成博士学位论文,论文以完整的理论体系、丰富的实践内容、前瞻的科学前景及对国防科技的贡献,获得 1997 年全国百篇优秀博士学位论文的荣誉。虽然我的研究领域不是测试技术,但我对他在科学研究中展露的科学思想很感兴趣。我曾把他们对电子测压蛋的研究的过程写入我先后发表的著作《科学研究的途径——一个指导教师的札记》和《藏绿斋札记(一)走近科学》中,作为技术研究途径的一个范例。祖静教授及其团队从实际需求出发,深入研究各种矛盾,上升到理论,创造性解决了存储测试的技术难题,形成了具有我国自己特色的体系。

进入 21 世纪,祖静和他的团队进一步深化对恶劣环境下动态信息获取科学的研究,对各种被测对象的运动规律的特点,测取这类动态信息的仪器必须具有的特性及其设计方法,极端恶劣的环境力对植入其中的测试仪器特性的影响,在模拟实际应用的恶劣环境中进行测试仪器的溯源性校准、测试仪器动态特性的溯源性校准及环境因子校准,测试仪器在恶劣环境下的存活性,以及测试仪器的微型化、微功耗、微噪声、高精度、高适应性、高存活性等独特的研究归结为一个新的命题——“新概念动态测试”,成为恶劣环境下的信息获取的科学,并付之于实践,为国防建设做了大量的有关测试技术的工作,做出了杰出的贡献。

祖静教授是我的师兄,他一生坎坷而辉煌的经历令我由衷钦佩,他对科学事业的执着和奋斗精神是我学习的榜样。“电子测压蛋”在 20 世纪 90 年代,就获得了国家发明二等奖的荣誉,但他从不满足于所取得的成就,和他的团队同志们一直不停在探索动态测试的新问题和新概念,《新概念动态测试》一书是他们近 30 年来研究工作的总结。我对他们勇于探索科学问题,敢于建立具有自己特色的学派体系表示钦佩和支持。祖静教授告诉我,他们的这本书的一些学术观点也许会引起学术界的争论,但我认为这是好事,科学真理愈辩愈明,将会

推动动态测试技术更大的发展。我深信,本书所涉及的研究对我国国防事业的发展将会起更大的推动作用。是为序。

周立伟

2015年6月8日

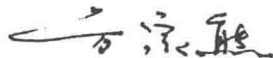
序

我近十几年担任电子测试技术国家级重点实验室的学术委员会主任之职,对重点实验室的工作深有了解。实验室中北大学分部的学术方向是动态测试技术,祖静教授是该方向的创始人,祖静领导的团队是其中的“恶劣环境下的信息获取科学”方向,新著《新概念动态测试》是该方向几十年研究工作的总结和凝练。

本书研究国防科技中必需的将测试仪器直接放入被测体内或被测环境中,在被测对象实际运动的过程中实时实况地高精度测取其动态参数,测试仪器需承受高温、高压、高冲击、恶劣电磁环境等极端恶劣环境力的作用等相关的科学命题。在测试系统动态特性设计和对恶劣环境的适应性设计、恶劣环境下应用的仪器系统的溯源性校准及动态特性的溯源性校准、恶劣环境下应用的仪器系统的存活性和可靠性等方面有独创性的论述。该团队研制出多种基于上述理论的独具特色的试验校准设备,并已付诸实用,成为该重点实验室的亮点。在火炮全弹道、爆炸冲击波及毁伤效果评估、硬目标侵彻、紧凑型运动机械、石油井下射孔压裂等多种恶劣环境下的动态测试领域、导弹、多种航天器的数据记录仪(黑匣子)等多方面得到广泛的应用,以测试精度高、记录信息可靠为特色。现已成为武器系统研制、生产验收、勤务等多方面不可或缺的技术,为我国国防科技突破发达国家封锁、创新发展做出了贡献,获多项国家级及省部级奖。

本书提出“动态测试仪器设计原理及环境适应性设计原理”、“测试技术是计量的延伸、动态测试是对运动着的对象的动态参数实时计量的过程”、“脉冲校准原理”、“恶劣环境下应用的仪器在模拟应用环境下的溯源性校准原理”、“仪器动态特性的准 δ 校准原理”、“恶劣环境下应用的仪器的存活性设计原理”,以及本书的命名《新概念动态测试》等学术观点供学术界讨论,是一种科学学风,将促进我国仪器科学与动态测试科学技术的发展。

本书立足我国国情,理论立足于指导实践,独具特色,是恶劣环境下的信息获取科学,未见国内外有相同或相近的文献报道。



2015年5月 于上海

自序

动态测试的概念源于国际计量局(BIPM)、国际电工委员会(IEC)、国际标准化组织(ISO)、国际法制计量组织(OIML)联合制定的《国际通用计量学基本名词》。其“动态测试”的定义是“量的瞬时值及其随时间变化的值的确定”。这个定义中没有限定“量的瞬时值及其随时间变化的值”是怎样获得的。目前所有有关动态测试的论述都是基于这个定义,并默认测试仪器放置在被测对象或环境之外来获取动态信息,只分析测试仪器对被测动态参量的响应,而不考虑动态环境参量对测试仪器的影响。

然而在现代武器系统测试实践中,必须经常把测试仪器系统放置到被测体内或被测场内,测试仪器系统将受到和被测对象相同的极其强烈的动态环境参量的作用,如高温(瞬时高温可达 2000°C 以上)、高压(可达 1000MPa)、高冲击加速度(可达 $200000g$)、高速(可达 2000m/s)。这些动态环境参量对仪器系统的影响不容忽略,甚至会造成仪器系统的损坏。被测过程经常是高瞬态性过程(全过程在毫秒、微秒量级,甚至至纳秒量级,有陡峭的前沿和复杂多变的过程)。并且,武器系统的研究对被测参量的测量精度要求甚高。

针对上述情况,本书提出“测试是计量的延伸,动态测试是对瞬态或动态过程变化参量进行实时计量的过程,新概念动态测试是对于这一实时计量过程的综合研究”的观点,并在以下5个方面进行了研究:①研究了针对瞬态量精确测量的测试系统静、动态特性设计原理,提出单纯以测试系统幅频特性的不平直度及其在频率域的宽度作为评价系统动态特性优劣的标准不够客观,而应当以该测试系统测量某类具体信号的动态不确定度估计为评价其动态特性的标准;②研究了测试系统(仪器)对被测对象、被测环境及被测过程的适应性设计原理;③研究了仪器系统静、动态特性校准的脉冲校准原理,恶劣环境下应用的仪器系统在模拟应用环境下的溯源性校准的原理和方法,及动态特性准 Δ 校准原理和方法,环境因子校准等理论和技术,实现了对应用在恶劣环境下的测试系统静、动态不确定度综合评定;④研究了仪器系统在恶劣环境下的存活性问题;⑤研究了多种具体应用场合的测试原理和技术。

本书的研究内容丰富了恶劣环境下信息获取科学,是有关动态测试的一种新概念。仅仅用表达测试仪器放置位置或方式的词(如植入式“*embedded*”或弹

载式“onboard”)不能表达其完整内涵。

本书定名为《新概念动态测试》,作为有关动态测试诸多著作的补充。希望在学界同仁中引起批评和争论,得到大家的批评指正,共同为我国动态测试技术的提高做出贡献。

20世纪80年代以来,北京航空航天大学黄俊钦在著作《测试系统动力学》中对测试系统的动力学特性进行了深入分析,南京理工大学朱明武等的两本教材《动态测量原理》、《测试信号处理与分析》,从原理上和信号处理角度对动态测试的基本理论进行了探讨,都对动态测试有指导性的意义。

本书是作者所在科研团队30余年从事武器系统动态测试技术实践与理论研究的总结。本书作者的科研团队从20世纪80年代初开始从事武器系统的动态测试工作,紧跟现代电子技术和微型计算机技术的发展,研究把测试仪器集成微型化为可放置到被测体或被测环境中,在被测对象实际运动的过程中直接测取和记录存储其动态参数的命题。研究了放置于炮膛内直接测取火炮膛压曲线的“电子测压蛋”(现定名为“放入式电子测压器”)和放置于发射过程中的弹丸上直接测取弹丸在全弹道动态参数的“引信膛内、飞行、终点环境测试技术”(后更名为“弹载全弹道动态参数快速存储测试装置”)等两个项目,获得了成功,分别于20世纪90年代获得国家发明二等奖和三等奖。20世纪80年代末期开展了“石油井下高能气体压裂过程动态参数($p-t$ 曲线)测试”和“导弹实射信息电子存储器——智能导弹黑匣子”技术研究工作。1990年祖静在中国电子学会主办的“第一届电子技术应用研讨会”上以《存储测试技术》为题发表公开论文,把这种利用电子存储器组成的、直接放置于被测体或被测环境中、在被测对象实际运动的过程中实时实况地测量和记录其动态参数的测试技术命名为“存储测试技术”。对它的组成原理、特性等进行了深入探讨,有关理论主要用于研究生和本科生的教学,也发表了一些论文。1995年,由北京理工大学马宝华教授担任导师、祖静教授担任副导师的张文栋(教授)完成了博士学位论文《存储测试系统的设计理论及其应用》,基于信息理论对存储测试系统的设计问题进行了深入分析,首次提出利用数据实时压缩技术实现自适应采样的想法,特别是对在战略导弹上的应用进行了论述,这篇论文获评为“1997年全国百篇优秀博士学位论文”,随后又撰写了同名的学术著作,在北京高等教育出版社出版发行。20世纪90年代,作者所在科研团队继续深入研究已经开展的科研课题,并开始探讨坦克装甲车辆等封闭体中关重部件动态参数的实时实况测试问题、战斗部爆炸冲击波场及毁伤威力测试问题以及其他一系列的应用课题。存储测试技术逐步在武器的动态测试领域得到广泛应用。

进入21世纪,为更好地满足国防科技对动态测试的更高要求,作者所在科

研团队对恶劣环境下动态信息获取原理、恶劣环境下应用的仪器的校准原理、仪器在恶劣环境下的存活性,以及多种具体场合下的测试原理和技术进行了深入研究。在电子测试技术国家级重点实验室拓展提高基金支持下,研制了多种武器动态测试技术研究和校准设备,包括:为研究火炮膛压测试技术的模拟膛压发生器准静态溯源性校准系统;高压传感器动态特性的预加高压的准 δ 脉冲校准系统;为战斗部侵彻过程研究的空气炮试验校准系统,系列加速度传感器静、动态特性校准系统;爆炸冲击波测试装置研究和校准的激波管系统;油井测压器准静态校准的模拟油井准静态校准系统等。形成了独特的恶劣环境下应用的仪器系统校准理论和技术装备。基于以上研究,作者提出了“新概念动态测试”的概念。作者曾多次在国内外有关会议提出这些观点,并于2006年—2008年连续三年在美国国家标准局组织的测量科学研讨会(MSC)上发表关于新概念动态测试的论文,并主持该会议的动态参量校准分会场。广泛听取学界对这个名称的意见。本书所提论点都经由作者所在团队及博士研究生从理论上和实践上给以分析和论证。新概念动态测试理论和技术体系得以建立并不断完善,是仪器科学、电子科学、计算机科学、信息科学、兵器科学、力学及物理学等多学科综合发展的结果,是在武器系统极端恶劣环境下对有关动态测试理论的应用,是恶劣环境下的信息获取科学。

本书全部由作者团队和在某个方面有研究的博士编写而成。祖静教授30多年来从事武器动态测试技术研究,长期担任科研团队的学术带头人,提出了相关的学术命题,制定了本书的编写大纲。作者中大部分是祖静教授的学生,本书的自序由祖静教授和马铁华教授写成。

本书第一篇讲述新概念动态测试原理,绪论、第1章“新概念动态测试系统的组成原理”、第2章“新概念动态测试的适应性研究”、第3章“新概念动态测试的校准技术”由祖静教授执笔,第4章“高冲击条件下测试装置的存活性研究”由徐鹏博士(教授)执笔;第二篇讲述新概念动态测试应用,第5章“火炮发射膛压测试和弹底压力测试技术”由张瑜博士(副教授)执笔,第6章“飞行弹簧全弹道参数测试技术”由裴东兴博士(教授)和沈大为(博士研究生)执笔,第7章“高速碰撞侵彻过程测试技术”由范锦彪博士(教授)执笔,第8章“战斗部爆炸冲击波及其毁伤参数测试技术”由杜红棉博士(副教授)和尤文斌博士(副教授)执笔,第9章“石油井下动态参数测试技术”由崔春生博士、裴东兴博士(教授)执笔,第10章“运动机械测试技术”由靳鸿博士(教授)、谢锐博士执笔,第11章“弹载记录仪(黑匣子)技术”由李锦明博士(副教授)执笔。

马铁华博士(教授)现在是本科研团队的负责人,他统编了全书,对全书和每一章都提出了关键性的指导意见,对每一个具体测试项目都提出了有创见性

的意见。

承蒙朵英贤、周立伟、方家熊三位中国工程院院士为本书题写序言,从不同角度发出,高屋建瓴,指出书中的创意与不足,使本书增辉。本科研团队深受教益和鼓舞。在此向三位院士表示最崇高的敬意和最深切的谢意。

杜静

目 录

绪论	1
0.1 新概念动态测试产生的背景及历史沿革	1
0.2 新概念动态测试的定义、研究内容及与通常意义上的动态测试 的区别	3
0.3 新概念动态测试的主要测试对象和主要采用的测试技术	6
0.4 新概念动态测试面对的问题和主要研究课题及特点	7
0.5 本书的主要内容	9
0.6 新概念动态测试主要应用情况	9
参考文献	18

第一篇 新概念动态测试原理

第1章 新概念动态测试系统的组成原理	19
1.1 测试系统的静态特性设计	19
1.2 动态测试系统的动态特性设计	20
1.2.1 动态设计模型	20
1.2.2 被测信号的频率特性估计及最高频率分量的确定	22
1.2.3 传感器的动态模型	25
1.2.4 基于运算放大器的放大器的动态模型	26
1.2.5 模拟滤波器的动态模型	33
1.2.6 ADC 的动态特性 ^[8]	40
1.2.7 系统的总体动态特性	45
1.2.8 动态测试系统的动态不确定度估计 ^[2]	46
1.2.9 举例 800MPa 放入式电子测压器的动态设计	49
1.2.10 附录	55
参考文献	62

第2章 新概念动态测试的适应性研究	63
2.1 宏观适应性研究	63
2.1.1 全局性思考——测试对象运动过程分析及对测试目的的具体要求的实现	63
2.1.2 宏观适应性设计举例,测试行为的布局和布设	65
2.1.3 信号的传输、同步与分离	73
2.2 采样策略及状态设计方法	76
2.2.1 触发及正负延迟的实现	77
2.2.2 采样策略与状态设计方法	80
2.2.3 采样频率的确定和自适应采样策略的实现	84
2.2.4 系统增益的自适应问题	86
2.3 电源控制策略	87
2.4 微体积、微功耗、微噪声研究	91
参考文献	93
第3章 新概念动态测试的校准技术	94
3.1 脉冲校准原理	96
3.1.1 准动态及动态校准的激励源	96
3.1.2 脉冲信号的特征	97
3.1.3 宽脉冲校准准则(准静态校准准则)	99
3.1.4 窄脉冲校准(准 δ 校准——动态校准)准则	106
3.2 模拟应用环境下的溯源性准静态校准	113
3.2.1 模拟应用环境下校准问题的提出	113
3.2.2 放入式电子测压器的模拟应用环境下的校准	113
3.2.3 高速撞击侵彻过程测试仪器的模拟应用环境下的校准	121
3.2.4 爆炸冲击波场测试仪器的校准问题	124
3.3 动态特性校准——准 δ 校准	124
3.4 环境因子校准	130
参考文献	132
第4章 高冲击条件下测试装置的存活性研究	133
4.1 冲击载荷作用下弹体内应力和加速度分布规律分析	133
4.2 高 g 值实测加速度信号的信息组成分析	137

4.3 高 g 值冲击下弹载测试电路系统的环境应力考核	141
4.3.1 弹载存储加速度测试电路常用芯片破坏性物理剖析	141
4.3.2 记录电路模块的抗高 g 值冲击分析	153
4.4 高 g 值冲击下电池的存活性研究	156
4.5 高 g 值冲击下弹载电子仪器的缓冲保护	161
参考文献	169

第二篇 新概念动态测试应用

第5章 火炮发射膛压测试和弹底压力测试技术	170
5.1 膛压测量的特点及方法	170
5.1.1 膛压测量的特点	170
5.1.2 膛压测量方法	170
5.2 膛压信号的时域和频域特征	172
5.2.1 典型膛压信号的时域特征	172
5.2.2 典型膛压信号的频域特征	173
5.3 放入式电子测压器设计	174
5.3.1 系统功能	174
5.3.2 22cm^3 放入式电子测压器的主要技术指标	175
5.3.3 组成及工作原理	175
5.3.4 放入式电子测压器的静、动态设计	178
5.4 模拟应用环境下的准静态校准技术	178
5.4.1 基于压力曲线上升沿的校准方法	178
5.4.2 校准方法的合理性论证	179
5.4.3 校准数据处理方法	183
5.4.4 校准数据分析	185
5.5 放入式电子测压器的动态特性校准	188
5.6 放入式电子测压器的可靠性试验	189
5.6.1 可靠性指标	189
5.6.2 倒置开关的可靠性试验	189
5.7 弹底压力测试问题	191
5.7.1 弹底压力测试系统的结构	191
5.7.2 压力传感器加速度灵敏度系数的校准	191
5.7.3 弹底压力数据的解算	192