

海量信息存储测评技术研究与服务平台建设

阳小珊^{1,2}, 罗洪元¹

YANG Xiaoshan^{1,2}, LUO Hongyuan¹

1. 中国电子科技集团公司第十五研究所 国家电子计算机质量监督检验中心, 北京 100083

2. 中国传媒大学 计算机学院, 北京 100024

1. National Computer Quality Supervising & Testing Center, 15th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100083, China

2. College of Computer, Communication University of China, Beijing 100024, China

YANG Xiaoshan, LUO Hongyuan. Construction of service platform and research of technology for massive information storage system test and evaluation. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(17): 47-52.

Abstract: With the rapid development of IT, a new generation of information technology which is one of national strategic new industries has been widely used, such as cloud computing, the Internet of things, triple-play, and so on. At the same time, massive information and users are growing explosively, which give rise to many kinds of IT problems, for example, poor performance and scalability, low reliability, poor availability of data, huge power consumption, and poor compatibility, difficulty in mass information management, products and system evaluation, etc. Therefore, under the support of the national 863 plan major projects subject, it establishes a massive information storage test public service platform, formulates a comprehensive evaluation index system and evaluation solutions which can test and evaluate the massive information storage system from multiple dimensions comprehensively and therefore solves the massive information storage problems for users.

Key words: information storage; storage test; massive information; performance test; new generation of information technology

摘 要: 信息技术飞速发展, 作为国家战略型新兴产业的云计算、物联网、三网融合等新一代信息技术已得到广泛应用, 海量信息和用户出现爆炸式增长。信息量和用户量的剧增导致信息存储技术面临多种难题, 如性能低、扩展性差、可靠性不高、数据可用性差、功耗巨大、兼容性差、海量信息管理困难、产品和系统评估困难等。为此, 在国家 863 计划重大专项课题的支持下, 建立了海量信息存储测评公共服务平台, 制定了全面的测评指标体系和测评方案, 满足从多个维度对海量信息存储系统进行综合测评, 为用户解决海量信息存储问题提供了解决方案。

关键词: 信息存储; 存储测评; 海量信息; 性能测评; 新一代信息技术

文献标志码: A **中图分类号:** TP311 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1204-0623

1 序言

随着信息技术在国民经济建设中影响力的加大, 国家把包括云计算、物联网等新一代信息技术作为国家战略型新兴产业重点发展。新信息技术和产品的广泛应用导致海量信息爆炸式增长。

而信息是企业的宝贵资产, 是人民的重要财富, 更是国家高速发展的动力。作为信息的归宿地, 存储产品和系统的重要性已不言而喻。目前, 随着信息量和用户量的暴增, 传统的存储技术和产品已无法满足新的应用需求, 出现了诸多技术难题, 如: 信息系统建设是否有标准可依的问题; 信息系统建设的标准符合性问题; 用户量的剧增导

致系统性能急剧下降问题; 存储容量和性能等无法按需扩展问题; 复杂的系统结构导致系统可靠性不高问题; 系统难以满足长时间不间断服务需求问题; 资源管理不当而造成电力浪费严重问题; 海量存储系统的部件及系统兼容性差问题; 海量信息和用户的管理困难问题; 缺乏评估导致企业盲目投资等浪费问题; 信息存取和储存的安全问题等。

为此, “十一五”期间, 科技部设立了国家 863 计划重大专项课题“存储产品及系统测试评价平台”, 要求建立海量信息存储测评公共服务平台来解决目前信息存储技术发展所面临的问题。

国家电子计算机质量监督检验中心作为项目的主要

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)重大专项(No.2009AA01A405)。

作者简介: 阳小珊(1984—), 男, 工程师, 研究领域为信息系统测评、存储系统测评; 罗洪元(1955—), 男, 研究员, 研究方向为计算机体系结构、信息存储及评测。E-mail: yangxs@nctc.org.cn

收稿日期: 2012-05-03 **修回日期:** 2012-06-18 **文章编号:** 1002-8331(2013)17-0047-06

执行单位,在项目的支持下,建立了具有“国家计算机质检中心存储测评中心”和“国家金卡工程信息存储系统测评中心”测评资质的海量信息存储测评公共服务平台,目的是解决目前国内存储测评技术缺乏和测评机构空白等问题,为政府、企业和用户提供测评、咨询和培训服务,促进存储产业及相关信息技术行业的发展。

2 相关现状分析

2.1 存储技术发展现状

网络的快速发展和信息终端的广泛使用促使信息爆炸式增长,据 IDC 统计,2011 年全球信息总量超过 1.8 ZB,并且在未来 10 年全球信息总量将增长 75 倍。信息的急剧膨胀催生了海量信息存储的存储时代。近年,随着存储问题的凸显和大家的高度重视,存储技术各方面正在加快发展,主要表现在以下三方面:

体系结构方面:存储技术的发展经历了基于总线的存储体系结构(如直连附加存储 DAS)和基于网络的存储体系结构(如网络附加存储 NAS 和存储区域网络 SAN 等)的过程,目前已步入了基于混合结构的云存储时代。

存储设备方面:新型存储介质正在研制,如 NOR 型与 NAND 型闪存、相变随机存储器、超高密度的 STT-MRAM 和高密度半导体电阻型存储器等。常规存储介质目前还是以 SATA、SAS 和 FC 等硬盘为主,单块硬盘容量已达到 TB 级,而磁带库和光盘塔的使用率开始下降。存储系统方面以 TB 级的磁盘阵列为主,在大的数据中心则主要是 PB 级甚至 EB 级的海量存储系统。

存储软件方面:网络存储技术已从 SCSI 发展到现在的 iSCSI、FC、IB 和 FCoE 等多协议并举的时代,其性能已发展到了万兆每秒甚至更高。相应的存储技术也快速发展,包括虚拟化、连续数据保护(CDP)、快照与镜像、灾备和分布式存储等技术。

新型存储架构、存储设备和存储软件及系统的快速发展和出现,使原有的存储产品无法满足实际需求,原有的测评技术也无法满足新的要求,从而催生了对海量存储测评的巨大需求。

2.2 存储测评技术现状

存储测评技术是促进存储技术发展必不可少的部分,目前对存储测评技术的研究主要偏向于性能测试,在可靠性和功耗测评等方面有所涉及,缺少在功能、应用以及综合测评方面的研究。

性能测评方面,TPC(Transaction Processing Council)制定了应用基准程序的标准规范,其 TPC-C^[1]基准可以测量数据库和存储系统的 I/O 性能;SPC^[2](Storage Performance Council)在 2001 年创建了基于随机和连续 I/O 应用环境的存储性能和价格度量基准 SPC-1/1C 和 SPC-2/2C,制定了用于评估数据备份和恢复等应用的 SPC-3 基准草案;SPEC(Standard Performance Evaluation Corporation)

制定的 SPECsfs2008^[3]基准主要用来测试网络文件系统 NFSv3 和 CIFS 的性能。

然而,由于上述测评基准的特殊性,它们无法满足众多的应用测评需求。因此,出现了其他测评基准,如 Iometer^[4]、Iozone^[5]、Postmark^[6] 和 Bonnie++^[7]等,其中 Iometer 可以测试块设备的 I/O 性能,在 windows 环境下比较常用。Iozone、Bonnie++ 主要用于对文件系统进行 I/O 性能测试。Postmark 则主要是用于应用模拟测试,如电子邮件和 web 商务应用等。

系统可靠性测评方面,目前尚无成熟的测试方案和基准测试程序。Rholand 大学对存储系统的控制器、网络和硬盘的故障注入进行了研究^[8];Berkeley 大学对故障注入及可用性评估方法进行了研究,并研发了测试程序^[9];SUN 公司也开发了用于测试系统恢复特性的测试程序 SRB,用来比较不同系统处于相同故障条件下的恢复速度。

功耗测评方面,SPEC 于 2007 年发布了 SPECpower_ssj2008^[10]服务器功耗测评基准,通过性能与功耗的关联来评价系统的性能;SPC 于 2009 年发布了 SPC-E 存储系统功耗测试基准;2010 年,存储网络工业协会(SNIA)出台了“绿色存储能源测量规范”^[11],规范了存储技术和存储系统的分类方法。

随着测评需求的多维化发展,国内外已开始从性能、功能、可用性、可靠性、功耗及应用等多方面的测评技术进行研究。

2.3 我国存储产业的发展

在国外,存储技术飞速发展,一些大型跨国企业的技术和市场等诸多方面都在全球处于垄断地位,而国内情况比较堪忧。据 IDC 统计,欧美各大存储厂商在中国市场大约占有数字存储销售额的 80%,同时它们基本垄断了如电信、金融、电力等高端存储领域,而国内虽然也有大量存储厂商,但多数由于缺少核心技术及产品可靠性不过关等原因,其产品只能用于视频监控等对质量要求不高的领域。为此,在“云物时代”,国家和行业开始重视海量存储技术的发展,工信部、科技部、发改委等部门先后设立了众多相关重大科研支持项目,如 863 计划、核高基、电子发展基金等,同时也成立很多产业化项目,如云计算、物联网、三网融合等。

为了加快存储技术的发展,国家成立了多个相关组织和社会团体,如“中国存储产业技术创新战略联盟”、“中国电子标准化协会海量存储标准工作委员会”、“中国电子标准化协会移动存储标准工作委员会”、“中国计算机学会信息存储专业委员会”等,在中国电子工业标准化技术协会体系的 10 个标准工作委员会里存储标准工作委员会占 2 个,这充分说明了信息存储在电子工业发展中的重要性。

在存储技术受到国家、企业和用户的广泛关注的背景下,我国信息存储技术将会得到快速的发展,存储产品及系统的测评技术、测评标准和测评服务体系将应运而生。

3 存储测评技术研究

为了满足广大用户对海量信息存储测评的巨大需求,对存储产品的性能、功能、可靠性、可管理性测评等多方面进行了大量研究,积累了大量技术经验,取得了众多成果,为公共服务平台的建设提供了存储测评技术基础保障。

3.1 性能测评

针对PB级海量信息存储系统,研发了分布式测试平台(如图1)。针对海量信息系统制定了对聚合带宽、并发访问量、元数据吞吐率、应用性能(如视频点播、文件服务器、科学计算、卫星资源应用、地质勘探应用等)的测评指标和方法;针对磁盘阵列制定了IOPS和MBPS等性能测评指标和方法;针对网络交换设备(如GE、FC、IB交换机和适

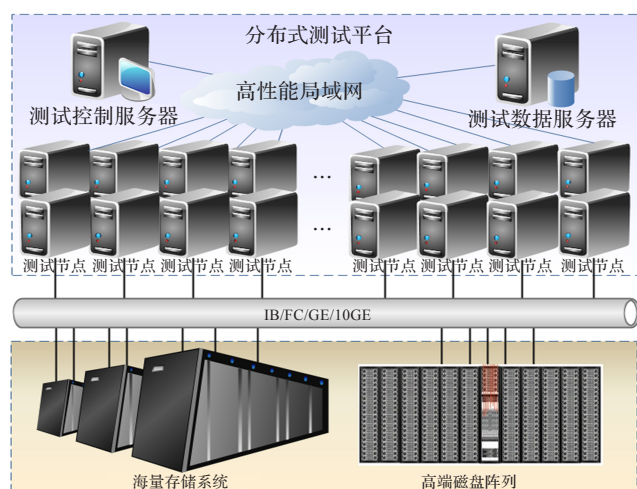


图1 海量信息存储系统性能测试平台

配器)制定了网络吞吐率、端口速率等测评指标和方法;针对数据备份和恢复软件、数据保护软件等存储软件制定了性能影响因子、备份和恢复速率等测评指标和方法。

为了更好地评测系统的应用性能,研制了文件级和块级的I/OTrace收集和回放工具,设计了基于总控制台和收集与回放代理的分布式测试系统,通过分析系统的应用I/O行为,制定负载参数,提高性能测试的真实性与可靠性。

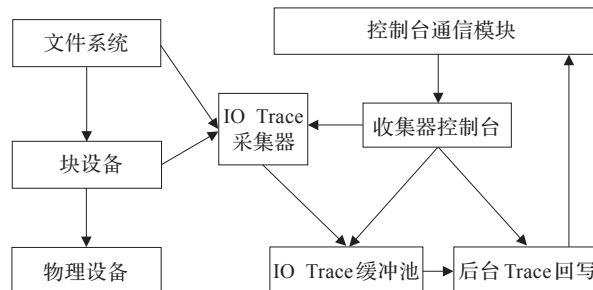


图2 I/OTrace收集系统架构图

3.2 功能测评

对多类存储产品和系统的功能测评进行了大量实验和研究,如RAID、卷管理、扩容、数据迁移、快照回滚、复制、多控制器支持(负载均衡、内存镜像、切换);对协议的支持,如iSCSI、FCP等;对SCSI/SAS/IB接口的支持;容量扩展性、产品兼容性、协议一致性、网络通信管理、虚拟化、在线备份等,制定了测评指标体系和测评方案,研发了相应的测评软件与管理系统。

基于网络存储系统和海量存储系统的基本功能和重要功能的分析研究,建立功能测试用例和测试集,根据测

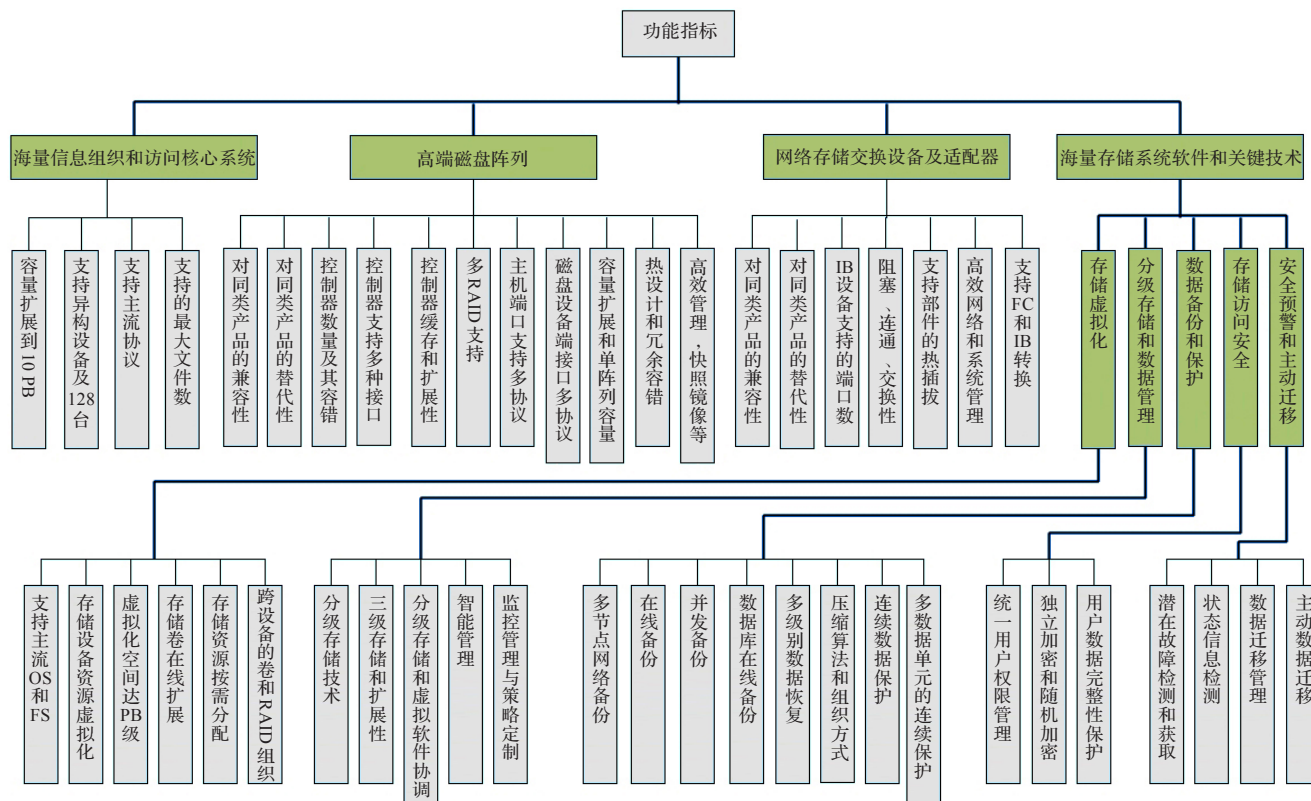


图3 存储产品及系统功能测评指标体系

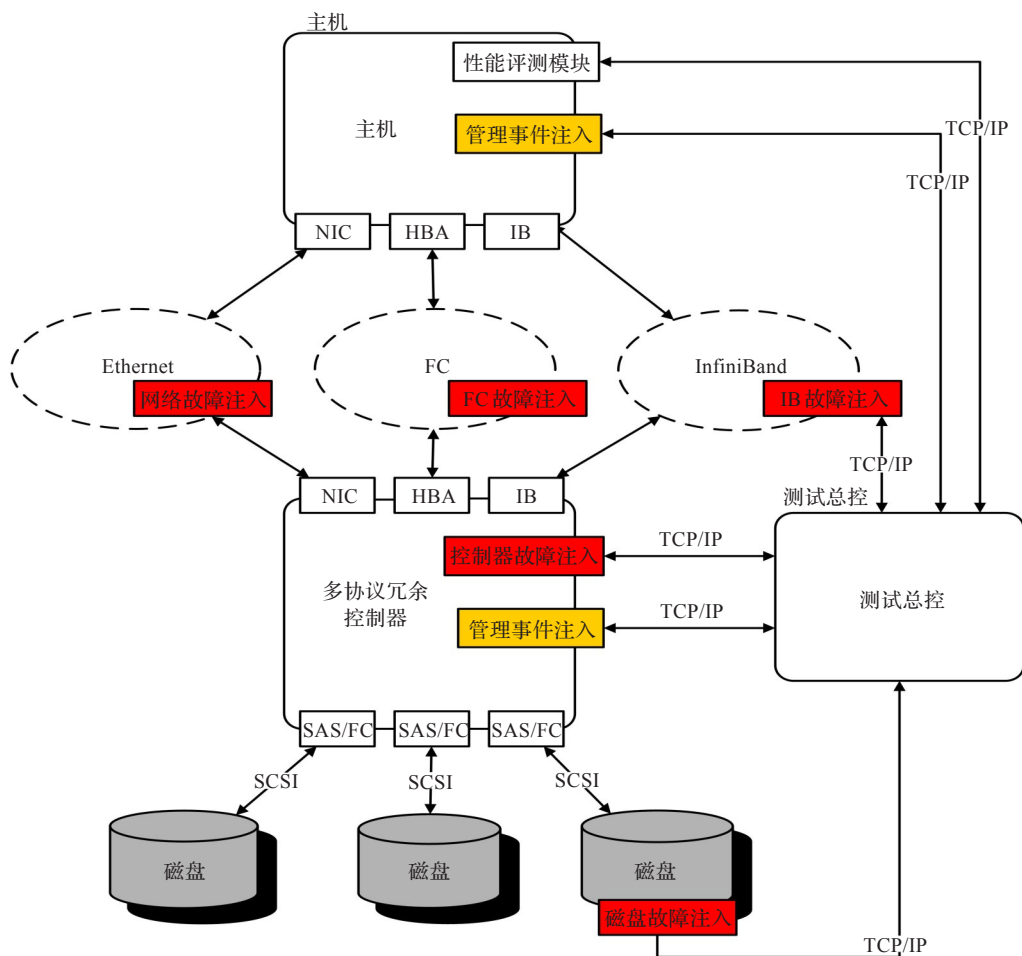


图4 可靠性测试的故障注入方法

试用例对存储系统的各功能进行验证。测试集是以最基本的测试事件序列的形式,详细定义了测试系统和协议实体的行为,从而做出测试“通过”或“失败”的判决,测试集有如下的层次结构:测试集→测试组→测试例→测试步→测试事件。

3.3 可靠性测评

目前,系统级的可靠性测评技术在国际上尚无有效参考成果。从部件、整机和系统等多方面分别定量和定性地对可用性进行了大量实验研究,并着重研究了基于故障注入和事件注入的可用性测试技术,建立了可靠性评测指标体系;研制了基于马尔科夫模型和基于蒙特卡罗模型的可靠性测评建模方法和评估准则,研发了可靠性测试工具。

针对海量信息存储系统研制了72小时测试方法和管理系统,能通过静态和动态测试结合的方式测试出系统的MTTR、MTBF、MTTDL、BER和AFR等常用指标。

3.4 可管理性测评

由于海量信息系统部件多、结构复杂,因此如何对其进行高效测评是件非常困难的事情。研发了海量信息存储测试监控和管理系统,利用分布式测试技术,实现对大量测试节点的动态管理与性能监控,同时通过调用测试基准程序对被测系统进行大规模压力测试,在测试时间精准的条件下实现测试过程的可管理性测试。

可管理性测评系统在测试过程中监控测试节点的资源利用率,发现异常节点时自动报警,对测试基准得出的测试结果进行及时动态的收集与报告,并生成相应的图表返回给用户。

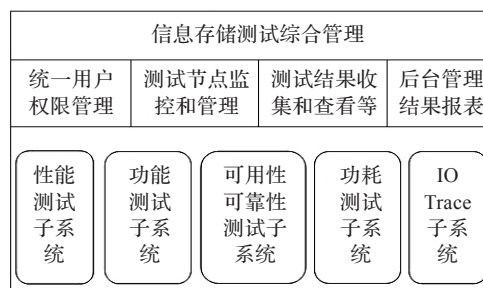


图5 可管理测评系统结构

3.5 功耗测评

对部件多、应用广、系统复杂的海量信息系统进行功耗测评非常困难,由于系统负载压力直接影响系统功耗,因此评估系统在典型应用时的功耗比较复杂。通过参考已有的对部件、整机的测评技术,同时结合国内外最新的研究成果,制定了海量信息存储系统及产品的功耗等级测评规范,通过模拟典型应用对磁盘、服务器、磁盘阵列、网络交换设备、信息系统等对象进行空载、满负载和多种负载压力下的功耗测试。

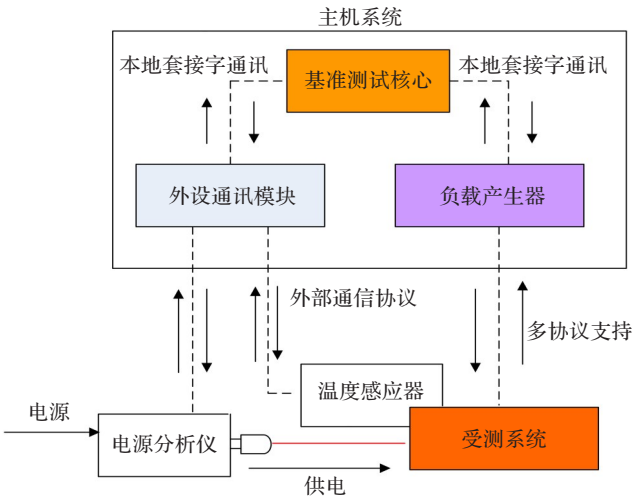


图6 海量信息存储系统功耗测试技术框架

3.6 综合测评

目前,业内偏向于性能评测,对可靠性、功能、可管理性、功耗等方面的研究较少,而随着用户对系统要求的提高,全面综合评测系统是非常必要的。通过对典型应用进行统计分析,同时结合I/OTrace收集与回放工具,制定了典型应用的仿真测试方案,通过模仿真实的应用环境对系统进行综合评测。同时,海量信息存储系统是多协议、多应用的复杂系统,因此,对多协议、多应用同时测试技术进行了研究。如对云计算系统,可能同时存在文件共享、视频服务和网站服务等操作,由于它们的存储空间、访问协议、占用资源等不尽相同,因此,要综合评测此云计算系统,需模仿系统在各种应用的操作下进行计算和性能检测。

另外,为了能评测系统的综合质量,建立了评估模型,通过对性能、功能、可靠性、可用性、功耗及应用性能6方面对测试和分析,得出各方面对整个系统质量 Q 的贡献率(百分比),分别如下:性能为 $R1$,功能为 $R2$,可靠性为 $R3$,可用性为 $R4$,功耗为 $R5$,应用性能(通过I/OTrace等工具测试出)为 $R6$ 。计算模型为:

$$Q = P \times R1 + F \times R2 + R \times R3 + A \times R4 + E \times R5 + S \times R6$$

其中 $0 \leq P, F, R, A, E, S \leq 100, R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6 = 1$ 。
 P, F, R, A, E 和 S 分别为性能、功能、可靠性、可用性、功耗和应用性能等测试的加权测评结果。

4 测评服务平台建设

4.1 质量管理体系建设

作为第三方测评服务机构,公平和公正性是用户关注的焦点。为了保证第三方测评的公正和权威性,国家认证认可监督管理委员会建立了CNAS-CL01《检测和校准实验室认可准则》,对检测机构的质量方针、质量目标、质量承诺等做了严格的规定,测试机构需要通过此准则要求才能从事相关检测工作和出具权威的测评报告。

国家电子计算机质量监督检验中心和国家金卡工程信息存储系统测评中心按照CNAS的要求,建立了质量手册、程序文件、作业指导书及相关规范性说明,建立了完善的质量管理体系,为公共测评服务平台的建设建立了良好的管理体系基础。

4.2 测评指标体系建设

指标是衡量和评价的依据,存储产品的测评也需建立完善的指标体系。根据目前的现状,针对存储器件、存储软件、磁盘阵列、网络交换设备和文件系统,从文档质量、性能、功能、可靠性等多方面建立了测评指标体系。另外,针对每个测评对象的测评目标,制定了详细的测试指标,由于篇幅有限,这里不详细论述各个指标。

4.3 测评技术规范制定

由于新的产品和存储架构的出现,传统的测试方法已无法满足目前的测评需求,为此,需要针对不同的产品和不同的质量特性制定测评技术规范,以便指导测试工作的高效进行,确保测试结果的真实性和可重复性。

目前,已针对磁盘阵列、网络存储交换机、典型的存储软件、分布式文件系统及存储器件等制定了测评规范。作

表1 测评指标体系涵盖范围

测评对象	编号	测评目标										
		文档测评	性能测评	功能测评	系统可靠性	可用性测评	功耗测评	电源适应性	电磁兼容测试	安全性测试	环境适应性测试	设备可靠性
编号		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
信息组织与访问核心系统	A	Y ¹⁾	Y	Y	Y	Y	Y	— ²⁾	—	—	—	—
高端磁盘阵列	B	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
IB交换机	C	Y	Y	Y	—	—	Y	Y	Y	Y	Y	Y
HCA卡	D	Y	Y	Y	—	—	—	Y	Y	Y	Y	Y
存储虚拟化软件	E	Y	—	Y	—	—	—	—	—	—	—	—
分级存储和数据管理软件	F	Y	Y	Y	—	—	—	—	—	—	—	—
数据备份与数据保护软件	G	Y	Y	Y	—	—	—	—	—	—	—	—
存储访问安全软件	H	Y	—	Y	—	—	—	—	—	—	—	—
安全预警与主动迁移软件	I	Y	—	Y	—	—	—	—	—	—	—	—
新型存储器件	J	Y	Y	Y	—	—	—	Y	Y	Y	Y	Y

注:1)Y代表需要执行测试;2)—代表不执行测试

为海量存储标准委员会的成员单位,正在推进相关国家存储测评标准建设,从而解决目前测评没有标准可依的问题。

4.4 测评工具研制

目前的存储软件功能日新月异、磁盘阵列容量和规模迅猛扩大、文件系统朝着大型分布式方向发展,因此,传统的测评工具已无法满足海量存储系统的测试。

通过研究传统的测评基准和测评工具,研制了大量分布式测评工具及管理系统,如并发数性能测试工具、IOTrace 收集与回放工具、分布式磁盘阵列测试工具、应用性能测试工具等,目前已经基本能满足常见产品的测评需求。

4.5 测评环境建设

硬件方面,购买了大量测试服务器、交换机、网卡、磁盘阵列和测试仪器,如 HP 服务器、DELL 服务器、千兆以太网交换机、万兆以太网交换机、光纤交换机、Infiniband 交换机、NetApp 统一存储、MLTT 测试仪、功耗测试仪等。在此基础上,搭建了测试平台,基本能满足市场常见产品的研究和测试工作。同时,建立了网络平台,及时发布测评结果和技术成果,以便满足企业和用户的需求。

5 平台未来的发展方向

由于信息存储及其测评技术是高新技术,具有结构复杂、技术含量高和更新快等特点,因此,要建立满足现代信息技术发展需求的存储测评公共服务平台,还需从以下多方面发展。

5.1 突破测评关键核心技术

紧跟新技术的发展步伐,注重对新的重要技术的研究,如 SAN(存储区域网络)、NAS(网络附属存储)、CAS(固定内容存储)、云存储、数据备份与恢复、重复数据删除、容灾与备份、虚拟存储、分层存储、连续数据保护等技术。通过实验和分析制定对应的测评方案,突破关键核心测试技术,如分布式测试、应用仿真测试、I/O Trace 技术、可靠性/可用性测试、安全测试和能耗测试等技术,掌握核心竞争力。

5.2 完善云计算测评服务

虽然云计算概念已经落地,但其广泛实施还需用户的认可。目前,云计算已初步形成了体系结构,国家相关部门也在制定云标准体系框架和相关标准。由于云计算系统的复杂性,将从基础架构、平台、软件和应用四个层次建立测评方案和服务体系,从性能、功能、可靠性、可扩展性、安全、功耗等方面满足用户的评测需求,并为政府部门和用户提供咨询服务,如政府招标产品质量评测、用户采购产品及系统性能对比和系统建设与优化方案等。

5.3 积极制定测评标准

标准已成为当今产业竞争的一个新的制高点,标准的缺失已成为我国产业发展的一个痛处。存储已经成为信息化的必备基础,对其测试的标准化已显得特别重要。统一的测评标准更方便用户挑选到合适的存储产品,使存储

系统发挥到最大性能,为企业带来更大的利益。

由于我国存储技术发展起步晚,产业链尚不健全,对高新技术的研究还不够,在制定标准方面处于被动地位,将积极参与制定相关技术和测评标准,掌握行业主动权。

5.4 促进产学研用合作

产学研用单位的合作一直是国家倡导的产业发展模式,其原因很简单,研究院所拥有最先进的技术,企业拥有最好的生产环境,用户有最直接的需求,如果这些方面无法很好的合作,相应的产业发展势必不能顺利。海量信息存储系统测试平台作为公共服务平台,拥有大量与各产学研用交流与合作的机会,将利用这些机会促进相关方的合作,互利共赢,从而促进存储产业链的健全和快速发展。

5.5 扩大第三方测评服务

海量信息存储系统被广泛使用于各行各业,云计算、物联网、移动通信等新一代信息技术更是离不开海量信息存储,因此,扩大第三方测评服务能更大地发挥海量信息存储测评公共服务平台的作用,如电信、金融、交通、航空航天、医疗、科学、教育等领域。对这些领域的存储测评服务能促使其提高服务效率,节约资金,同时可以减少对国外技术和产品的依赖,提高国家信息安全水平,也可以促进我国存储技术与产品的发展和产业化。

5.6 提供咨询与培训服务

目前,由于用户对新的存储技术和产品不熟悉,因此大量用户经常盲目采购存储产品,盲目建设存储系统,导致企业资金的大量浪费和国家资源的重复建设。公共测评服务平台建立的目的之一就是要为用户提供咨询和培训服务,提高相关人员技术水平,避免资金浪费,提高资源利用率等,促进存储产业与相关信息技术产业的健康发展。

6 总结

本文分析了存储技术及其测评技术现状,介绍了存储测评技术研究的内容和方向,阐述了存储测评公共服务平台的组成与建设现状,最后分析了存储测评公共服务平台未来的发展方向。存储测评技术的研究和公共服务平台的建立有助于存储测评标准的建立和存储产业的健康发展,也有助于用户选购存储产品和建立信息存储系统,在某种程度上促进了相关信息技术的发展。

将在目前已有的基础上,加大对高新信息存储技术的研究,加快对测试环境和平台的完善,抓住发展契机,把平台建设成为公平、公正、科学和权威的第三方检测机构,为海量信息存储技术面临的问题提供切实可行的解决方案和技术手段。

参考文献:

- [1] TPC-C benchmark[EB/OL].[2010-09-17].<http://www.tpc.org/toe>.
- [2] SPC[EB/OL].[2010-09-17].<http://www.storageperformance.org/specs/>.

(下转 270 页)

文算法求解模型(7)的有效性以及模型(7)正确性。从图5~6可以看出,各关节角度变化曲线比较光滑,表明逆运动控制指令具有连续性,那么机械臂工作时不会因指令变化剧烈而影响使用寿命并保障使用安全。

7 结束语

本文利用D-H法建立机械臂正运动模型;通过正运动模型得到双目标优化逆运动控制模型式(6),本文采用罚函数方法求解模型(6),也就是说将式(6)等价转化为单目标逆运动控制模型(7),模型的最优解就是最优控制指令,该最优控制指令既保证控制精度又保证最优指令的转动幅达到最小。为求解模型(7),提出AMPDE算法。数值模拟表明算法可以有效求解机械臂逆运动学问题,基于本文模型与算法可以开发机械臂逆运动控制软件,并应用于生产实际。

参考文献:

- [1] 侯增广,谭明,徐德,等.先进机器人控制[M].北京:高等教育出版社,2007:40-46.
- [2] 姜宏超,刘士荣,张波涛.六自由度模块化机械臂的逆运动学分析[J].浙江大学学报:工学版,2010,44(7):11348-11353.
- [3] 孙亮,马江,阮晓钢.六自由度机械臂轨迹规划与仿真研究[J].控制工程,2010,17(3):387-392.
- [4] 刘松国,朱世强,王宣银.基于矩阵分解的一般6R机器人实时高

精度逆运动学算法[J].机械工程学报,2008,44(11):304-309.

- [5] 黄刚,李德华,杨捷.机械臂最优运动规划问题的混合粒子群算法[J].计算机科学,2009,36(11):232-234.
- [6] 王晓忠,孟正大.机器人运动路径规划方法研究[J].控制工程,2004,11(3):280-283.
- [7] Cai Z X, Peng Z H. Cooperative coevolutionary adaptive genetic algorithm in path planning of cooperative multi-mobile robot systems[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 33(4): 61-71.
- [8] Tian Lianfang, Collins C. An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm[J]. Mechatronics, 2004, 14: 455-470.
- [9] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[R]. [S.l.]: International Computer Science Institute, 1995 (8): 22-25.
- [10] 廖锋,高兴宝.多种群差分演化算法及其应用[J].计算机仿真,2011,28(1):230-233.
- [11] 吕振肃,侯志荣.自适应变异的粒子群优化算法[J].电子学报,2004,32(3):416-420.
- [12] Mezura M E, Coello C A, Tun M I. Simple feasibility rules and differential evolution for constrained optimization[C]// LNCS 2972: Proceedings of the 3rd Mexican International Conference on Artificial Intelligence. Heidelberg: Springer-Verlag, 2004: 707-716.

(上接52页)

- [3] SPECsfs2008[EB/OL]. [2010-09-17]. <http://www.spec.org/sfs2008/>.
- [4] Iometer[EB/OL]. [2010-09-17]. <http://www.iometer.org/>.
- [5] Iozone[EB/OL]. [2010-09-17]. <http://www.iozone.org>.
- [6] PostMark; a new file system benchmark[EB/OL]. [2010-09-17]. <http://communities.netapp.com/servlet/JiveServlet/download/2609-1551/Katcher97-postmark-netapp-tr3022.pdf>.
- [7] Bonnie++[EB/OL]. [2010-09-17]. <http://www.coker.com.au/bonnie++>.
- [8] He Xubin, Zhang Ming, Yang Qing. SPEK: a storage performance evaluation kernel module for block-level storage systems

under faulty conditions[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2005, 2(2): 138-149.

- [9] Mauro J, Zhu Ji, Pramanick I. The system recovery benchmark[C]// Proceedings of the 10th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC04), 2004: 271-280.
- [10] SPECpowerssj2008[EB/OL]. [2010-09-17]. <http://www.spec.org/benchmarks.html#power>.
- [11] SNIA green storage power measurement technical specification[EB/OL]. [2010-09-17]. http://www.snia.org/tech_activities/publicreview/GreenPower_v018.pdf.

(上接216页)

- [4] Hosainpour A, Komarizade M H, Mahmoudi A M, et al. High speed detection of potato and clod using an acoustic based intelligent system[J]. Expert System with Application, 2011: 1-6.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series and analysis[J]. Proceeding of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 1998, 454: 903-995.

- [6] 贾春花,郭敏.基于HHT方法的果蝇鸣声特征提取及分类[J].云南大学学报:自然科学版,2011,33(2):152-157.
- [7] 程林贵, Hilbert_Huang变换提取水轮机振动特征信息研究[J].水利水电技术,2010,41(11):63-66.
- [8] 王锋,尹力,朱明洪.基于Hilbert-Huang变换的水声信号特征提取及分类技术[J].应用声学,2007,26(4):223-230.
- [9] 于德介,张崑,程军圣,等.基于EMD的时频熵在齿轮故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2005,25(5):26-29.
- [10] 聂晓颖,郭敏,何建平.人工神经网络对果蝇鸣声的分类识别[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(12):201-204.