

doi: 10.3969/j.issn.1000-7695.2013.24.050

基于进化曲线的大科学工程可靠性数据管理模型与成熟度研究

陈光宇^{1,2}, 孙志平¹, 郑万国², 郑舒扬¹

(1. 电子科技大学经济与管理学院, 四川成都 610054;
2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘要: 借鉴系统工程建模和技术进化思想, 从系统理论和组织理论角度建立大科学工程可靠性数据管理模型, 运用对象维、视图维和阶段维分别阐述可靠性数据管理的主要内容及相关共性。以此提出管理模型的成熟度曲线分析方法, 运用 S 进化曲线分析大科学工程可靠性数据管理存在的跨装置差异性。并在神光系列装置建设中加以验证, 实现可靠性工程管理的规范化和效率的有效改善。

关键词: 霍尔三维结构; 技术进化; 数据管理; S 进化曲线

中图分类号: C933

文献标识码: A

文章编号: 1000-7695 (2013) 24-0227-06

Research on Reliability Data Management Model and Maturity of Large Science Projects Based on Evolution Curves

CHEN Guangyu^{1,2}, SUN Zhiping¹, ZHENG Wanguo², ZHENG Shuyang¹

(1. Economics and Management School, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper draws on systems engineering modeling and evolutionary of technology, from the perspective of systems theory and organizational theory to establish the reliability data management model of large science projects. We elaborate the main content and features of the reliability data management model by object-dimension, view-dimension and stage-dimension. According to this, we propose analytical method of maturity curve in management model and analyze the reliability data management of large science projects cross-device differences by S evolution curve. Finally, the model is verified in SG Series device construction and achieves the standardization and efficiency improvement in reliability engineering management.

Key words: Hall three-dimensional structure; technology evolution; data management; S evolution curve

1 前言

“大科学工程”又称“大科学装置建设工程”, 它是指经过较大规模的投入和工程建设, 目的在建成一种能够长期稳定运行并能持续进行科学技术活动的设施, 从而实现重要科学技术目标的大型基础设施建设工程^[1-2]。大科学工程通常是系列装置建设工程, 比如我国在建的“神光系列高功率激光装置”^[3]以及“神舟系列和天宫系列的载人航天工程”。我们在这种系列装置建设过程中发现: 系列装置的管理模型继承性和工程数据共享性存在巨大潜力可挖, 这类工程管理问题不断完善将有助于工程

质量管理体系的持续改进以及工程效率的有效提升。

大科学工程具有鲜明的科研和工程双重属性。其科研性体现在工程所承担的大量尖端科学试验, 任务对装置的可靠性要求越来越高, 可靠性水平不但直接影响到试验任务的成败也成为衡量大科学工程建设成效的重要指标之一。其工程性体现在投资巨、规模大, 建设和运行周期长等特点^[4], 而且对管理模型的成熟性要求也越来越高。因此, 我们认为应当重视大科学工程的可靠性工程管理问题研究, 特别是可靠性数据管理模型的研究, 将有助于解决目前工程中存在的跨装置管理模型继承性和工程数据共享性不足等问题。

收稿日期: 2012-11-29, 修回日期: 2013-03-11

基金项目: 国防科技基础研究基金项目; 国家自然科学基金项目“企业协同与创新网络演化的交互模型研究”(71172095); 科技部创新方法工作专项基金项目“四川省创新方法应用与示范推广服务平台建设”(2011IM020100)

目前,侧重于对某一特定系统的多阶段、多层次、全生命周期的信息管理进行的研究较多,如王长峰,王化兰^[5]针对重大研发项目过程管理构建的时空体系结构,高长元、祁凯^[6]对面向制造业 ERP 的企业建模研究,朱启超、陈英武^[7]建立的复杂项目界面风险管理模型,陈光宇、但莹莹^[8]信息系统流程分析等。但在系列装置中跨装置的数据管理方面研究较少。本文从数据管理建模角度分析跨装置的可靠性数据管理的共性和差异,借鉴系统工程建模思想,将霍尔三维结构、企业建模方法和 TRIZ 中的技术进化理论相结合,建立大科学与工程可靠性数据管理模型。针对单个装置的可靠性数据从阶段、视图、对象三个维度构建通用管理模型,同时引入 S 进化曲线对不同装置的管理模型成熟度的差异进行研究。该模型在神光系列激光装置建设中得以应用。

2 理论和方法基础

2.1 霍尔三维结构理论

霍尔三维结构是美国系统工程专家 A. D hall 在 1969 年提出的以时间维、逻辑维、知识维组成的立体空间结构,为解决大型复杂系统的规划、组织、管理问题提供了一种统一的思想方法^[9],在企业建模中和风险分析^[10-11]中得到广泛应用。国内外学者通过重新设计三个维度提出了多种具有多层次、多视图和多阶段的建模方法,如 CIMOSA、ARIS、GRAI、GERA 及集成化企业建模等方法。霍尔三维结构是一个通用性的三维体系结构,具有清晰地表达系统工程的各阶段、各步骤以及所涉及的知识范围的功能,时间维表示系统工程的工作阶段或进程,逻辑维是指系统工程每阶段工作所应遵从的逻辑顺序和工作步骤,知识维表征从事系统工程师所需的知识。我们将针对单一装置从三个维度进行统一地划分,即从时间、逻辑和知识角度分析整个装置,目的是剖析系列装置建设管理中存在的共性。

2.2 TRIZ 理论 S 曲线进化法则

TRIZ 技术进化理论由前苏联学者 Genrich S. Altshuller 及研究人员经过分析世界大量的发明专利基础上于 20 世纪七八十年代提出,九十年代中国大陆开始接触和了解 TRIZ,该理论认为不同领域中技术进化过程的规律相同,都存在产生、成长、成熟、衰老、灭亡的过程^[12-15]。在 TRIZ 技术进化理论中将技术的进化分为婴儿期、成长期、成熟期和衰退期四个阶段,各阶段对应的技术成熟度呈现 S 形趋势^[16]。S 进化曲线在各阶段具有不同的特征详见

表 1^[17-19]。

表 1 TRIZ 技术进化四阶段特征

阶段	特征
婴儿期	性能低下,效率低,相应的人、物、财力投入不足,系统发展缓慢。
成长期	性能明显提升,投入增加,效率提高,系统高速发展,价值潜力显现。
成熟期	性能达到最佳,新成果较少且水平较低,开始研发新技术,新一轮 S 进化曲线诞生,其性能在前期会低于前一轮 S 进化曲线。
衰退期	性能达到极限,现有技术将逐步被新技术替代;代表新技术的新一轮 S 进化曲线从低水平向高水平过渡。

所有实现某个功能的事物可称为技术系统,技术系统的进化可通过 S 曲线进行描述^[20]。S 曲线包含技术系统进化的四个阶段,每个阶段的性能特征各不相同,S 曲线不仅能对各阶段特征的差异性进行分别描述,还能预测技术的发展趋势及可能达到的状态。实际上,大科学与工程也是一个由众多子装置构成的复杂技术系统,多个子装置共同构成大科学与工程完整的进化路径。不同装置在不同阶段的可靠性数据管理也存在差异,本文结合 S 曲线将很好地对大科学与工程在各阶段的可靠性数据管理的差异性进行描述。

3 可靠性数据管理通用模型的构建

本文通过将系统工程中的霍尔三维结构和企业建模方法进行整合建立了可靠性数据管理通用模型详见图 1,该模型是一个包括对象维、视图维和阶段维的三维体系结构。该三维体系结构,可以将大科学工程中可靠性工程建设所涉及的所有功能、资源、组织等数据信息构架在一起,形成一个完整的管理体系。

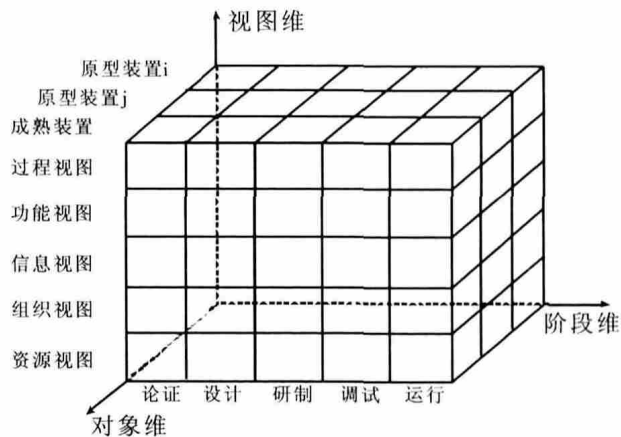


图 1 大科学与工程可靠性数据管理三维体系结构

3.1 对象维设计

对象维对应霍尔三维结构中的逻辑维,主要包

括原型 i、原型 j 和成熟装置三个基本要素，描述了大科学工程研发过程遵循的基本规律即由原型装置到成熟装置的技术进化规律。大科学工程的研发一般要经过从最初模型的不断演变，某一功能的不断完善到成熟装置的论证设计，即多个原型装置的不断演进最后形成成熟装置。在霍尔三维结构中逻辑维主要是面对问题求解的逻辑过程，本文的对象维描述大科学工程在演进过程中包含的多个原型装置，每一个原型装置都独立解决一个或多个技术问题，所以本文运用对象维代替逻辑维既描述了大科学工程中解决技术难题的逻辑过程也展示了其逐步演进的进化过程。本文建立对象维就是为了解决大科学工程中跨装置可靠性数据管理问题。

3.2 阶段维设计

阶段维对应霍尔三维结构中的时间维，以装置的完整生命周期为阶段坐标轴，包括论证、设计、研制、调试和运行五个阶段。这五个阶段划分由大科学工程的特点和装置的实际需求所决定，反映装置建设过程中经历的主要阶段。每个阶段都有其具体的可靠性建设要求，在进行可靠性建设过程中提供了大量的可靠性数据。所以建立数据管理模型必须覆盖工程的全生命周期，才能收集到真实、完整的可靠性数据。阶段维设置主要是为了收集和处理单个装置全生命周期中各阶段产生的可靠性数据信息。

3.3 视图维设计

视图维包括资源视图、组织视图、信息视图、功能视图和过程视图，分别从不同侧面描述数据管理模型的特征^[5-7]。

(1) 资源视图

资源视图描述了以装置全生命周期为核心的大科学工程资源的分类信息、资源的使用情况及项目干系人的资源利用关系，为可靠性工程管理提供了资源信息、资源共享等，用以支持可靠性工程建设的资源配置，同时也是项目干系人协同工作的基础。大科学工程中的资源包括组织性资源、材料性资源和管理性资源等，而本文中可靠性数据管理模型涉及的资源主要有可靠性资源、维修性资源和保障性资源。

(2) 组织视图

组织视图描述大科学工程的组织结构、角色信息及各组织之间的关系，为可靠性数据管理提供组织依据。组织视图由组织关联图和组织层次图构成，共同表征大科学工程中组织结构以及各组织单元之间的相互关系，详见图 2。组织视图主要围绕可靠

性数据管理的任务进行设计，如资源调度、报告故障、分析原因、纠正措施、验证及故障归零等。这些任务大多是跨组织进行的，为了促进任务顺利开展构建了故障审查组和工作小组，设计和集成单位、外协单位（承担建设的单位）来组织和协调这些跨单位的任务。图 3 展示了大科学工程可靠性数据管理组织金字塔结构。

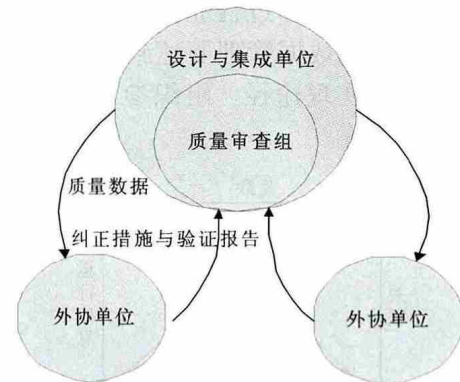


图2 大科学系统可靠性数据管理组织关联图

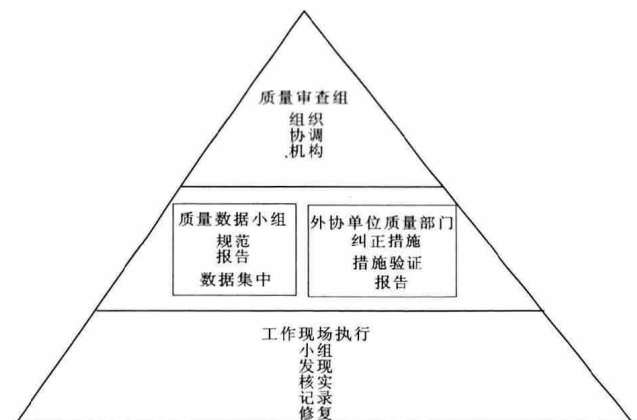


图3 大科学工程可靠性数据管理组织层次图

(3) 信息视图

信息视图描述了可靠性数据管理的信息对象，以及完成任务需要提供的信息及属性。信息视图不仅包括装置在研制过程中重点关注的“六性”信息，还包括由其它视图提供的资源、组织和功能信息共同构成信息视图。信息视图主要为了实现对“六性”信息中可靠性信息的收集、处理和保存工作，建立起从发现故障到故障归零的信息集中化管理模式，实现数据信息闭环管理。

(4) 功能视图

功能视图描述了可靠性数据管理的目标分解层次以及各个模块间存在的相互关系，处于最底层的单元是具体的活动目标单元，即可靠性数据管理主要承担的任务。可靠性数据管理的业务活动主要围绕故障报告、故障分析与纠正措施、验证与归零三

大目标进行，这些目标又一层层的向下展开，逐步分解出底层的活动单元。

(5) 过程视图

过程视图描述了组成过程的多个活动和这些活动之间逻辑关系，是连接其它视图的纽带，是整个视图维的核心。过程的本质是一系列前后逻辑关联的业务活动或操作集合，是功能视图在集合了资源、组织、信息后的对业务过程完整的描述，能够清晰地说明可靠性工程数据管理要达到的业务目标或性能指标、任务及实现途径、组织参与的单元、资源以及最终的结果等。

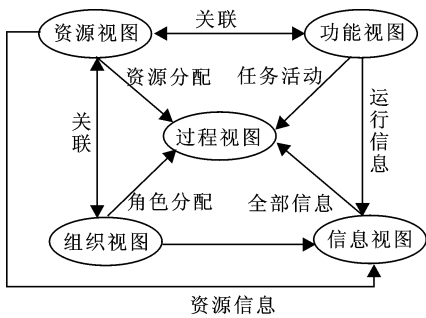


图4 视图维各视图之间关系

大科学与工程通常是为进行某项科学技术活动或解决系列重大技术难题而成立的，因此大科学与工程从建立之初就明确其应具备的功能和最终目标。本文首先建立资源视图，通过资源视图对数据管理模型涉及的资源信息进行分类和管理；其次在资源视图基础上构建组织视图来定义数据管理中涉及的组织结构信息，利用组织视图对资源进行合理地调度和分配；再根据资源视图和组织视图建立信息视图，通过信息视图来记录和反馈装置中的“六性”信息，同时信息视图也记录资源视图提供的资源信息和组织视图提供组织信息；然后结合资源视图、组织视图、信息视图建立功能视图来明确数据管理模型主要从事业务活动和功能目标；最后将功能、资源、组织、信息视图进行整合共同构成数据管理模型的过程视图，过程视图描述了可靠性数据管理中多个活动之间的逻辑关系。

4 可靠性数据管理模型成熟度的差异分析

通过S进化曲线描述技术系统在不同阶段的特征及发展趋势的直观性，并基于上述建立的可靠性数据管理模型，构建系列装置的跨装置管理模型的成熟度曲线，详见图5。图5是对图1中数据管理模型成熟度的完整描述，横轴表示从原型装置到成熟装置的进化路径，纵轴表示可靠性数据管理模型在对每个装置的可靠性数据进行管理时达到的管理成

熟度。S曲线簇展示了装置经历技术进化的n个完整进化周期，这n个周期共同构成装置的完整进化路径。在图5中每条S进化曲线不但对应一个装置还描述了装置经历的四个进化时期即婴儿期、成长期、成熟期和衰退期。

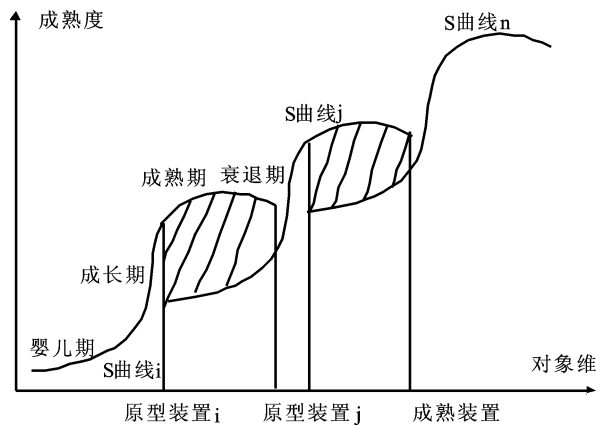


图5 跨装置管理模型成熟度曲线

可靠性数据管理模型在对各装置各时期的可靠性数据进行管理时达到的成熟度也各不相同。如图5所示两条S进化曲线之间存在交集即图中的阴影区域，这是因为后一轮的S进化曲线（ S_j ）开始于前一轮S进化曲线（ S_i ）的成熟期，两条S进化曲线之间的成熟度存在差异导致的。在阴影区域内， S_i 进化至成熟期，资源投入增加，资源充足度提高，组织经过一段时间的运作也能适应数据管理的需要，提供的信息完整性也较高，功能完备性和过程的满意度方面都大大提升。相对于 S_j 则处于婴儿期，新一轮的进化刚刚诞生，资源投入相对较高，但组织适应性、信息完整性、功能完备性和过程满意度方面都比较低，所以在图5阴影区域中 S_i 的成熟度高于 S_j 。在TRIZ进化理论的四个阶段中婴儿期的性能最低，成熟期的性能达到最佳，这两个阶段最能反应出数据管理模型的成熟度差异性。所以本文选择S进化曲线中的婴儿期和成熟期两个阶段为代表，分别从资源的充足度、组织的适应性、信息的完整性、功能的完备性和过程的满意度等五大方面进行对比分析可靠性数据管理模型的跨阶段成熟度的差异，详见表2。

表2 可靠性数据管理模型成熟度对比关系

S曲线	成熟度				
	资源充足度	组织适应性	信息完整性	功能完备性	过程满意度
S曲线i					
婴儿期	低	低	低	低	低
成熟期	高	高	高	高	高
S曲线j					
婴儿期	高	低	低	低	低
成熟期	更高	更高	更高	更高	更高

在工程建设中, 由于新装置建设需要投入更高的研发费用、更多的技术人员, 以保证 S_j 的诞生, 所以 S_j 对应的资源充足度较高。但是, 由于技术的更高要求和管理脱节、组织间磨合等原因, 所以整体成熟度还较低 (详见表 2)。图 5 和表 2 共同描述了对大科学工程跨装置、多阶段的可靠性数据进行管理时数据管理模型的成熟度特征。综合前文分析 S 进化曲线在本文中主要具有下两方面功能: 一方面用来描述可靠性数据管理模型在进行大科学工程跨装置、多阶段的可靠性数据进行管理时达到的管理成熟度; 另一方面用来描述整个装置的进化规律, 即从原型装置的论证到最终形成成熟装置的完整进化过程。在图 6 中 S 曲线簇描述了图 1 中通用模型对象维剖面中装置的进化规律, 每条 S 曲线都对应于阶段维中的五个阶段。

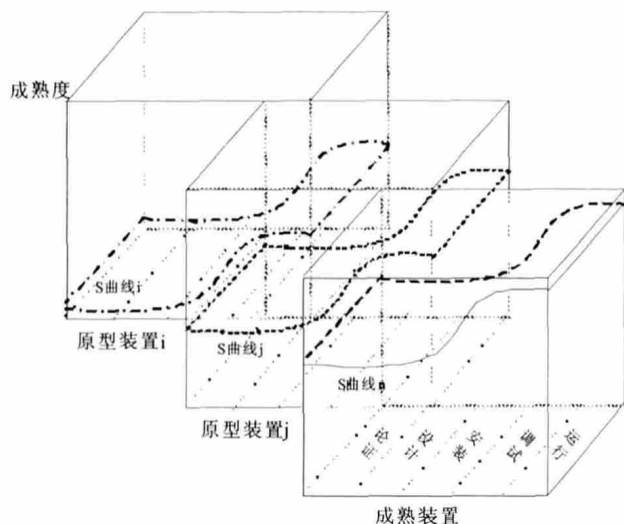


图 6 系列装置建设的可靠性数据管理模型成熟度的 S 曲线簇

神光系列激光装置都是由众多的光、机、电结合的综合系统构成, 包含了大量的类型不同的单元模块和设备的大型复杂系统。在神光-III 原型装置建设过程中暴露出可靠性数据管理模型研究明显不足, 数据规范不够、管理分散, 重用性不好等问题; 为解决这些问题, 在神光-III 主机装置建设中, 建立了完整的可靠性管理体系, 搭建了上述的可靠性数据管理模型并开始了模型的共性和差异的研究, 较全面的解决了系列装置间的管理模型继承性和数据共享性等工程管理问题。上述构建的大科学工程的可靠性数据管理模型应用于神光系列装置建设中并已取得显著的成效。包括运用阶段维对系列装置的各阶段产生的可靠性数据进行规范的收集和处理, 通过视图维分别从资源、组织、信息、功能和控制五个方面分别对装置建设过程的可靠性数据进行系

统化管理和控制, 并通过对象维实现跨装置间的数据共享性以及模型继承性。

5 结束语

面向工程和科研需求的可靠性数据管理模型和成熟度的研究是大科学工程建设中可靠性工作的重要基础。通过建立多层次、多视图、多阶段数据管理的通用模型把系列装置建设中涉及的可靠性数据管理的共性内容加以提炼, 从而实现可靠性工程管理体系的完善, 提高了工程管理整体水平。通过引入 S 进化曲线分析系列装置之间的可靠性数据管理模型的成熟度差异, 直观曲线簇综合描述可靠性工程管理的进化趋势, 从资源充足度、组织适应性、信息完整性、功能完备性和过程满意度等五大方面对比揭示管理进化的规律。

上述研究在神光系列装置建设中的有效验证表明: 大科学工程建设必须重视可靠性工程的管理规范化建设, 这是一条有效提升管理效率的可行路径。本文提出的管理模型和方法不仅有助于解决大科学工程当前建设中面临的管理矛盾, 也为大科学工程后续工程实施奠定了宝贵的经验和坚实的基础。

参考文献:

- [1] 唐素琴, 李志红. 我国大科学工程预制研究的特点及几点思考 [J]. 自然辩证法研究, 2008, 24, (1): 62-67
- [2] 李建明, 曾华锋. “大科学工程”的语义结构分析 [J]. 科学学研究, 2011, 29 (11): 1607-1612
- [3] 陈光宇, 张小民, 郑万国. 大型激光装置束间能量平衡能力综合分析方法 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23 (6): 1564-1568
- [4] 罗小安, 许健, 佟仁城. 大科学工程的风险管理研究 [J]. 管理评论, 2007, 19 (4): 43-48
- [5] 王长峰, 王化兰. 重大研发 (R&D) 项目过程管理综合集成体系结构研究 [J]. 科研管理, 2008, 29 (6): 165-177
- [6] 高长远, 祁凯. 面向制造业 ERP 的企业建模框架研究 [J]. 管理学报, 2010, 7 (9): 1380-1385
- [7] 朱启超, 陈英武, 匡兴华. 复杂项目界面风险管理模型研究 [J]. 科研管理, 2005, 26 (6): 149-156
- [8] 陈光宇, 但莹莹, 张小民. FRACAS 信息系统的流程与功能分析 [J]. 科学学与科学技术管理 (增刊), 2007, 28 (1): 72-75
- [9] HALL A D. Transactions on Systems Science and Cybernetics [J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1969, 5 (2): 156-160
- [10] 杨洋, 赵映超, 马有才. 基于霍尔三维结构的项目风险动态管理研究 [J]. 科技管理研究, 2010, (13): 280-282
- [11] 张子剑. 基于 5S 工作法的惯性系统项目研制风险管理 [J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16 (1): 113-118
- [12] ALTSHULLER G S. Creativity as an Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems [M]. The United Kingdom: Gordon and Breach Science Publishers Inc, London, 1984
- [13] 黄庆, 周贤永, 杨智懿. 技术进化理论及其应用研究评述与展

望 [J]. 科学学与科学技术管理, 2009 (4): 58-65

[14] 常爱华, 许静, 柳洲. TRIZ 在中国大陆传播的现状分析 [J]. 科学学与科学技术管理, 2010 (8): 79-112

[15] 陈光宇, 祁凌云, 万成龙, 等. 基于 TRIZ 方法的改造项目质量控制研究 [J]. 电子科技大学学报: 社科版, 2011, 13 (6): 48-52

[16] 罗以洪, 邵云飞. 基于 TRIZ 及 BSC 的企业信息系统规划架构设计研究 [J]. 管理科学学报, 2012, 15 (9): 20-34

[17] 祝凤金. TRIZ 技术系统进化法则在专利布局中的应用研究 [J]. 科技管理研究, 2010 (19): 148-151

[18] 付敏, 王述洋. TRIZ 进化理论在粉碎机创新安全设计中的应用 [J]. 中国安全科学学报, 2010 (4): 64-68

[19] 陈旭玲, 楼佩煌. 基于专利分析的技术预测与创新研究 [J]. 机械科学与技术, 2009, 28 (5): 596-600

[20] 沈世德. TRIZ 法简明教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 15-17

作者简介: 陈光宇 (1969—), 男, 四川成都人, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 主要研究质量管理与可靠性工程; 孙志平 (1986—), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 主要研究质量与可靠性工程; 郑万国 (1966—), 男, 湖北北京山人, 研究员, 博士生导师, 主要研究激光技术与工程; 郑舒扬 (1989—), 女, 四川西昌人, 硕士研究生, 主要研究质量与可靠性工程。

(上接第 218 页)

可以进行准确地分析历史、提供个性化服务和预测未来。

科技平台是科技管理的重要内容, 包括重大科研基地、科技条件平台和科技公共服务平台等。利用 SWOT 方法 (见图 2), 我们可以探知大数据技术在科技平台中的机遇与挑战。

优势 (S) - 科技资源丰富 - 信息化建设早 - 前期资金和人员投入多	不足 (W) - 条块分割严重, 资源共享率低 - 数据分析人才匮乏 - 标准规范缺失
机遇 (O) - 基础数据较齐全 - 大数据技术日益成熟 - 用户需求不断增长	威胁 (T) - 数据安全 - 开源系统的稳定性

图 2 科技平台中大数据技术应用的 SWOT 分析

5 结束语

数据被称为 21 世纪的“石油”, 它已经变成生产资料, 站到与硬资产和人力资源同等重要的位置^[9]。大数据能使我们更全面地认识世界, 更准确地预测未来。大数据将引发全球范围内的社会和商

业变革。知识时代, 我们只相信数据。

参考文献:

[1] 涂子沛. 大数据: 正在到来的数据革命 [M]. 广西: 广西师范大学出版社, 2012

[2] 叶成辉. 云计算、大数据变革浪潮继续高涨 [J]. 计算机世界, 2013 (1): 24-28

[3] 田溯宁. 2013, 大数据元年创新 [J]. 计算机世界, 2013 (1): 22-24

[4] 周艳, 龙思薇. 大数据时代的到来与思考 [J]. 广告大观: 媒介版, 2012 (9): 24-30

[5] 胡素青. 大数据 “铁三角” 牢不可破 [J]. 金融科技时代, 2012 (9): 22-24

[6] “3A5 步” 迎战大数据 [J]. 软件和信息服务业, 2012 (6): 77-80

[7] ORACLE. Hadoop and NoSQL Technologies and the Oracle Database [R/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/9823e494daef5ef7ba0d3cd2.html>, 2011

[8] MENGXIANG. NoSQL 综述 [R/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/4089d43731126edb6f1a1083.html>, 2012

[9] 胡素青. 大数据, 向巅峰出发 [J]. 金融科技时代, 2012 (9): 20-24

作者简介: 徐迪威 (1961—), 男, 广州人, 高级工程师, 亚洲商学院 MBA, 主要研究方向为科技管理和信息系统。