

文章编号: 2095-4980(2018)04-0703-06

ICF 微靶数字化制造设计与实现

栗 强, 杨存榜*, 张 涛, 蒋柏斌, 杨 洪

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 惯性约束聚变(ICF)微靶(靶丸)是惯性约束聚变物理设计思想的直接体现, 其制备过程有着非常明显的特点: 精确度要求高; 工件尺度小且跨度大; 面向的材料范围广; 靶型多, 批量小, 且数量多; 结构形状复杂且多种多样; 传统方式制备工艺繁琐且制备周期长。利用先进信息技术建立完备的数字化微靶制备能力, 解决关键工艺数据流程和精确度控制技术问题, 是提高微靶质量和效率的重要手段。本文通过描述数字化靶制备系统的设计目标和思想, 重点阐述了系统的制造过程和体系结构设计、技术特点、实现方法以及实施和部署方式, 并在此基础上, 展示了系统成功实施后的部分运行效果与良好的应用前景。

关键词: 惯性约束聚变(ICF); 靶制备; 数字化制造; 信息技术

中图分类号: TN05; TP319

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0703

ICF target design and implementation of digitized manufacturing

SU Qiang, YANG Cunbang*, ZHANG Tao, JIANG Bobing, YANG Hong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Target of Inertial Confinement Fusion(ICF) is the design expression of physics of ICF, and its fabrication is characterized by high precision, small scale and large span, wide range of materials, large amount of target types, small sub-lots, complex and varied structures. The traditional fabrication method is tedious with a long period. It is an important way to improve the quality and efficiency of target by using advanced information technology to establish a complete digital target fabrication capability, and to solve the problems of key process data flow and precision control technology. Based on related digital target fabrication system design goal, the manufacturing process and implementation method of the system structural design, the technical characteristics, the way of implementation and deployment are introduced in detail. The successful operation of part of the system is demonstrated and good application prospects are expected.

Keywords: Inertial Confinement Fusion(ICF); target fabrication; digitized manufacturing; information technology

随着精密物理实验的深入和多个大型驱动器装置(神光-III原型、神光-II、星光装置、神光-III主机装置、超短超强激光装置(200 TW 级)等)投入物理实验, 实验对制靶提出了更高要求, 即必须具备高效、快速、可靠的反应能力。但微靶制造过程是典型的精密、超精密加工过程, 惯性约束聚变(ICF)靶具备小批量、多品种的鲜明特点^[1-2], 难以实现大批量、流水线生产, 同时相关的装备制造技术和关键工艺技术在国内还处于起步发展的阶段, 与美国、欧洲等国外从事 ICF 研究的国家相比还有非常大的差距^[3], 特别是数字化工程化应用水平。对 ICF 靶采取数字化并行设计与并行制造是有效的解决办法, 即在设计阶段利用仿真技术对诊断方式、瞄靶及打靶方式、靶结构与功能等进行并行设计, 在短时间内形成部分确定性的靶结构功能部件, 靶生产单元利用网络共享技术获取该部分部件相关的制造信息, 在靶的设计阶段即投入生产, 在纵向上建立设计与生产的并行模式, 在横向上建立各生产单元的并行制造模式, 以缩短 ICF 靶的设计与生产周期, 提升快速反应能力。

收稿日期: 2017-05-03; 修回日期: 2017-06-26

*通信作者: 杨存榜 email:yxcb@caep.cn

• three major new ICF facilities

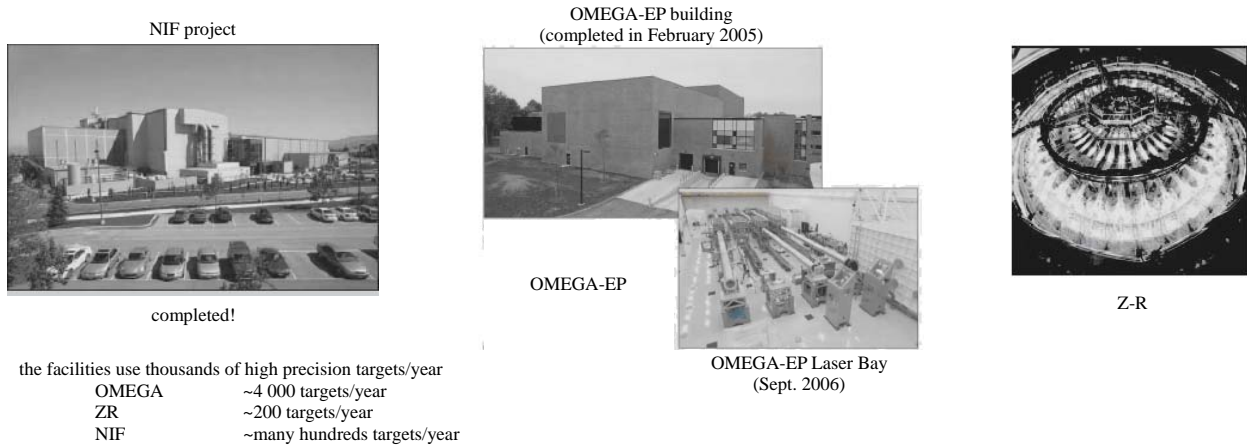


Fig.1 Three ICF experimental devices and the annual use of the target
图 1 美国三大 ICF 实验装置及靶的年使用情况

目前美国通用原子能公司(GA)是全球最大的各类物理实验用靶制备专业厂家,其所生产的靶产品供应覆盖全球最重要的各大 ICF 研究装置实验室,这其中也包括美国国家点火设施(National Ignition Facility, NIF)和美国罗切斯特大学(University of Rochester, UR)的 OMEGA 装置^[4],如图 1 所示。为提高效率和质量,GA 公司在其内部建立了先进的信息技术辅助制造管理系统^[5-6],其核心在于各类数据的融合、共用和共享,其中微细加工与信息集成系统,在基于网络的环境下,将微靶设计、分析、工艺规划、生产和质量管理等方面产生的各种信息融合集成在一起,利用先进强大的数据库系统,建立了综合分析处理软件,对微靶全生命周期内的数据进行统一管理和分析处理,允许所有与零部件制造整个工艺流程相关的人依照各自的权限在整个信息生命周期中有针对性地共享与各零部件相关的信息,并使分布在各个部门各工序及在各个应用过程中运行的所有数据得以高度集成、协调、共享,实现了整个微靶制备加工过程的智能化、数字化,如图 2 所示。

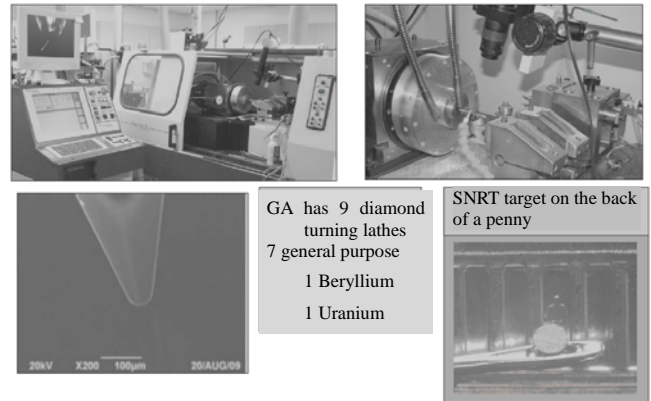


Fig.2 Digital microprocessing and testing of target component
图 2 靶元件数字化微加工与检测图

同时在美国 UR 和 NIF 在其相关项目建设中也通过大量应用先进微细加工辅助制造技术与信息集成技术,开展靶相关的研究、设计、制造和管理工作,并使其研究和开发的效率和质量大幅提高^[7]。在制造信息基础结构、虚拟企业组建与运行技术、网络化协同产品开发技术、网络化产品数据管理(Product Data Management, PDM)、敏捷供应链等多方面取得了大量的研究进展和成果。如:由 APAR SISTO 资助 Stanford 大学 CDR,EIT 及 SIMA 合作开发的 SHARE 项目,支持设计人员或小组通过计算机网络进行组织和交流设计信息,以此建立对设计开发过程的共享理解(Shared Understanding)。Matra Datavision 公司宣布的最新一代 CAD/CAM/CAE 软件 EUCLID QUANTUM 将具备在 Internet 进行设计工作的功能。美国 SDRC(Structure Dynamics Research Corp.)公司则在 I-DEAS Master 系列 CAD/CAM/CAE 软件的基础上,增加支持基于 Team 的产品设计的功能。最近 MicroStation 等几家公司开始开发基于网络的产品设计软件 Engineering BaseOffice,可用于广域范围内的工程设计平台和数据库以及其他企业信息系统的集成。同时国内也开展了基于各类数据分析和处理技术的应用研究工作,其中包括基于大数据的关键数据分析和提取技术等^[8]。

由此可见先进制造技术是提高产品研制、生产的快速响应能力的关键技术。先进制造技术以计算机技术、网络技术和仿真技术为工具,从产品物理设计开始,研究产品的加工、装配和使用维护的全过程,以减少直到消灭设计变更和信息传递中的错误,缩短研制周期和降低研制费用,先进制造技术是将物理设计的设想尽快变为实用产品的快速可靠途径。

目前中国工程物理研究院激光聚变研究中心已建立了精密微加工、靶材料合成、微球制备、高压充气、金属及聚合物薄膜成型、微靶装配及靶参数测量等相关靶制备技术与工艺,并已具备年产数千发 ICF 靶的制备能

力,但由于传统的管理方式和技术手段更倾向于生产资源的分配和项目进程的控制,而相对忽略了靶制备生产与科研管理紧密相连的信息属性,以致生产中产生的工艺参数以及测试数据等无法通过有效的数据采集和数据共享实现科学的分析和处理,而科研试验中取得的数据由于缺乏先进信息处理手段导致无法直接应用于工艺优化。这种信息割裂的状况导致了 ICF 靶制备能力不能得到充分的发挥,靶制备的效率和质量也有待进一步的提高,而通过传统方式再进一步提升和优化靶制备能力已显得力不从心,急需应用先进的技术手段实现靶制备过程中数据流和信息流的有序畅通和共用共享。

1 数字化靶制备系统设计

1.1 设计目标

系统基于网络互联互通的基础上,实现数据流和零件流的有序畅通,靶制造全过程的信息流动和数字化控制,通过数据的收集、存储、分析和共享,达到工艺调度的无纸化,微细加工的数字化,项目管理的科学化,以及数据采集的智能化,分析平台的先进化的目的。为靶应用的数据反馈和系统优化提供高效、快捷的手段,从而提高靶制备产品全寿命周期的可维护性和可控性。较大幅度地提高制靶系统的快速反应能力,增强制备流程中的可控性及分析处理能力。

1.2 设计思想

支持微靶设计制造一体化能力,获取并管理多样化的产品开发与知识。在标准化流程的驱动下,访问并利用这些知识,以便从容应对科研生产管理需求,改善产品创新能力,缩短研发周期和降低成本。主要实现以下几个方面。

1) 保障产品数据的完整和准确性

在数字化研制模式,为保证各部门之间畅通无阻地协同工作,必须保障在生命周期内各阶段的产品数据的唯一性、完整性、准确性、及时性。

2) 建立符合管理程序文件要求的靶制备信息体系,控制靶制备的全过程

利用信息技术,支撑靶制备建立一个规范化、合乎要求的数字化管理体系。在这个体系下,按照标准程序文件的要求,合理规划靶制备全过程的数据流、人力资源的分配、工艺进度等。通过直接管理各阶段的工艺数据,实时了解工艺进度,并根据情况做出适当、及时的调整。从系统积累的原始数据中,可对每个人和工位的情况进行分析统计,做出客观的、量化的评价,保证整体团队的积极性。

3) 建立标准化的工作流程

建立以文档为中心的流程管理,实施以文档为中心的标准化和制度化的工作流程。通过实施标准化的工作流程,各相关部门可以及时获取完整、准确的知识信息,缩短产品研发周期,提高效率。基于统一的标准工作流程,可使部门之间的相关人员参与进来,及时有效地响应靶产品的不断改进,以优化数据,改进工作流程。

4) 确保变更管理有效、及时响应到各相关部门

变更管理在任何制造企业中都是一个重要的流程,它也是经验数据、知识积累的一个重要过程。系统支持的工程变更流程,将确保工程变更所涉及到的产品和业务领域都能得到有效规划、沟通、审查、批准、执行和发放,最大限度地降低变更所带来的影响。无论变更开始于哪个部门,系统将提供的变更流程都将把该变更的信息,及时地传递给所涉及到的部门和人员。

5) 协同化的工作环境

建立一个数字化的协同工作环境。通过这种工作环境,分散的团队能同时参与进来,洞悉产品的全部关键信息,在产品开始生产之前,就做出关键决策。基于这种工作环境,更可以协调产品生命周期各阶段的数据,并把数据及其所在的工作环境的信息,传递给各部门有权限的人员,各参与者通过基于自己的权限查看最新的数据,并对数据作出快速响应。

2 研制与实现

2.1 制造过程分层设计

靶制备阶段如图3所示,系统设计了3个层次内容:第一层是“加工、检测的控制与信息融合层”,包括加工过程中的计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)控制、检测控制和各种信息采集与融

合；第二层是“工艺规划与执行控制层”，主要包括工艺检索、工艺规划、执行控制；第三层是“业务管理层”，包括整个数字化设计加工过程中的各种业务信息管理。为了解决靶制备全流程应用的信息“断点”、“孤点”等问题，实现应用集成与全流程的信息流动和共享，避免靶制备信息的孤立应用，使之发挥出最大的效应，数字化业务流程如图 4 所示。在总体设计时，增加了总控制层，通过总控制层，实现了业务应用层与工艺规划、执行控制层的有机集成。

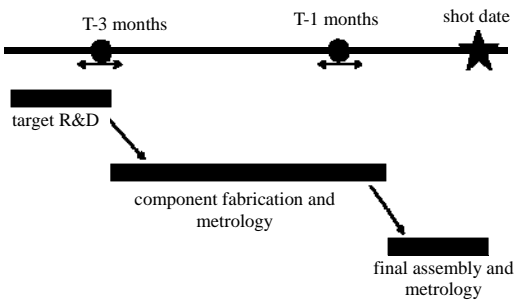


Fig.3 Phase diagram of target fabrication
图 3 靶制备阶段图

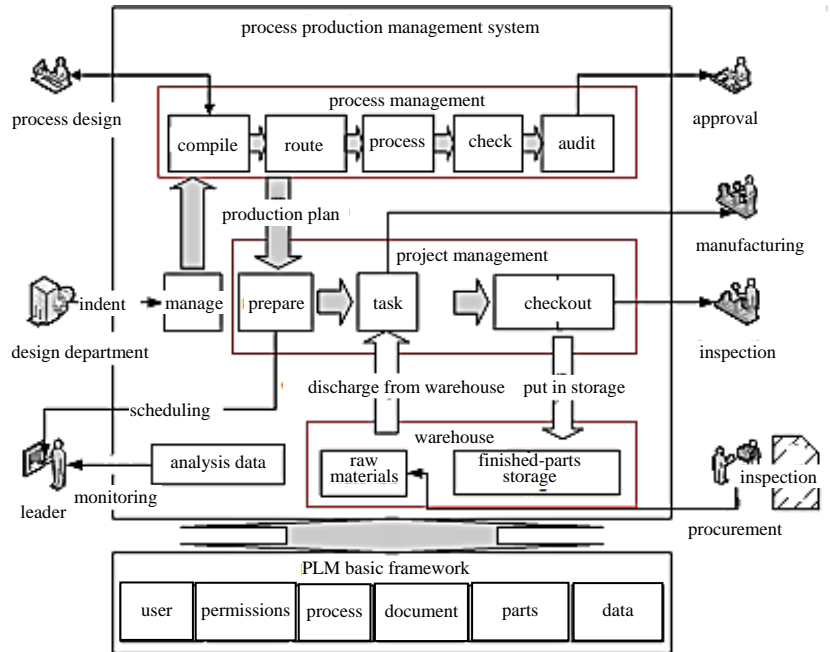


Fig.4 Flow chart of digital manufacturing process
图 4 数字化制造业务流程图

2.2 体系结构设计

为了满足系统的开放性、性能及可扩展性等方面的要求，系统采用了基于面向服务的体系结构(Service Oriented Architecture, SOA)的多层体系架构^[9](如图 5 所示)。系统底层是数据存储层，包括数据库服务器和电子数据仓，数据库服务器存放结构化数据以及数据间的联系，电子数据仓存放所有电子文档；中间层是事务服务器，是系统实现的关键，所有数据操纵对象都以组件方式运行在中间层服务器上，以满足各种数据访问服务的要求，客户端所有数据访问服务都通过事物服务器进行，这样可以提高系统的性能和可伸缩性；客户端使用传统的客户端软件，如二、三维计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Process Planning, CAPP)等各种应用和管理系统。

该分布式架构主要包含以下一些层次：数据访问层，包含数据访问组件和服务代理；业务逻辑层，包含业务组件，业务实体，业务工作流和服务接口，业务组件的作用是对业务进行逻辑处理，例如，新建文档时，业务组件会进行权限判断，将新建文档的数据保存到数据库和电子数据仓中等操作。系统体系结构如图 6 所示。

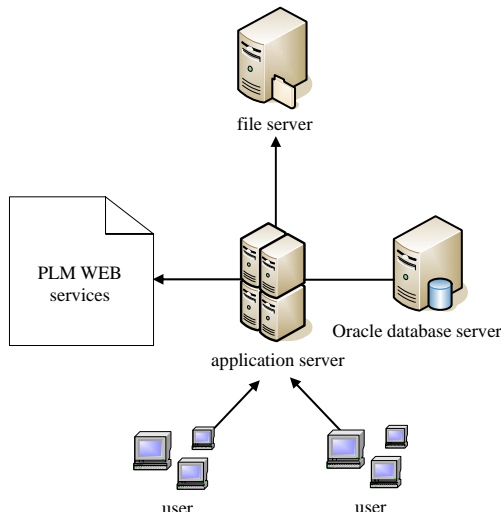


Fig.5 Working principle of SOA architecture
图 5 SOA 架构的工作原理

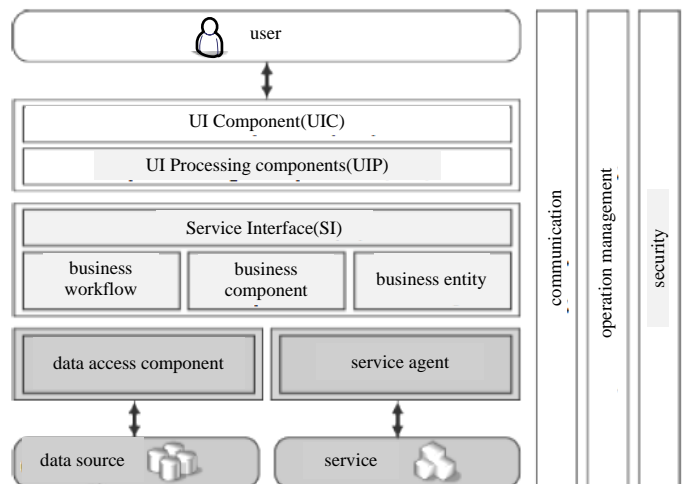


Fig.6 System architecture
图 6 系统体系结构

业务实体是数据容器。它们封装并隐藏特定数据表示格式的细节。例如，业务实体最初可能封装从关系数据库中获得的记录集。之后，可以修改该业务实体，以便在编写 XML 文档时尽量减少将对应用程序余下部分所产生的影响。

业务流程反映了业务执行的宏观级别的活动，这些业务流程由编排一个或多个业务组件以实现业务流程的业务工作流组件封装。

界面层：包含用户界面组件(User Interface, UI)和用户界面处理组件(User Interface Processing, UIP)。

基础服务：包含安全管理，运营管理和通信管理。

系统设计为免安装的，客户端程序的安装和对补丁更新的发布都是通过自动更新来完成，非常便于发布、升级和维护。系统开放所有服务接口，其他系统可直接调用；系统组件与组件之间、层与层之间的通信、功能模块的配置均以 XML 配置文件的方式设置，因而系统可以动态插拔、替换相应的组件和功能模块。

2.3 实施与部署

应用程序服务器上部署所有业务逻辑中间件，包括产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM) WEB Services、工作流队列服务、批量录入服务等组件；文件服务器上保存所有提交到 PLM 中管理的电子文件，包括各个版本的电子文件；Oracle 数据库服务器上保存所有结构化数据。

用户对系统的所有访问都通过应用程序服务器处理，即应用程序服务器处理用户连接、业务逻辑处理、从 Oracle 数据库中请求数据等，同时还需要处理工作流队列和文档批量录入等计算量很大的任务，因此应用程序服务器工作非常繁忙，压力很大，对 CPU 处理性能及内存要求较高。

文件服务器需要频繁读取电子文件，在用户数量和对文件读取操作很频繁的情况下，文件服务器的压力也会相应增大，因此对服务器的 I/O 性能、带宽和运算性能要求比较高。

Oracle 数据库作为所有数据存放中心，所有数据的操作都必须通过 Oracle 数据库服务器，其压力居于非常重要地位，用户计算量越大，并发访问量越高，这种压力也会越大，因此对 Oracle 数据库服务器的配置要求也比较高。

为保障系统具有较高性能的使用环境，系统配置了 3 台服务器，一台用于应用程序服务器，一台用于数据库服务器，一台用于文件服务器。另外，为防止由于意外事故造成存储设备损坏，还要考虑定期对备份后的数据库及数据仓文件进行异地备份保存。

3 运行与效果

系统目前已在中国工程物理研究院激光聚变研究中心顺利上线运行，运行 16 个多月来，取得了良好效果，达到了原定目标。

1) 打通信息流，使生产、控制信息的靶元件在全生命周期内共享和流通，解决信息“断点”问题，在技术上实现了加工和检测的控制与信息融合、工艺规划与执行控制以及业务管理分析与决策；

2) 围绕小批量、多品种生产的管理难点，建立起涵盖 CAPP、PLM 等关键业务的制靶信息化管理平台；

3) 系统涵盖常规生产、工艺验证、科研实验等生产和科研业务，已实现了全流程的数字化管理(工艺设计与在线审批、浏览、查询、任务交接、生产调度、统计分析等)；

4) 运行 16 个多月来，已产生了数万张工艺卡片、数百万个真实产品数据，近百万多条各类数据记录以及近万份设计文档。

4 结论

系统以靶制备工艺及生产为主线，以工艺图文档管理为重点，实现了靶制备研制过程协同目标，技术上基于统一的基础资源库、数据库、文件仓服务，可提供开放性的工具集成框架，方便集成各类设计和分析工具，系统采用轻量化客户端，易于部署，可快捷地进行客户端维护和升级服务。通过建立可持续发展的技术框架、模块化技术，支持面向岗位的功能配置，并可根据需求和业务增加进行便捷的扩展，满足了大规模并发用户的良好客户体验。随着系统的进一步完善和深入，在“十三五”期间将为激光装置物理实验用靶生产和研发提供有力支撑，极大地促进靶生产的标准化进程，有力地支撑微靶“精密化生产”管理要求。

参考文献:

- [1] HAAN S W,SALMONSON J D,CLARK D S,et al. NIF ignition target requirements, margins, and uncertainties: status February 2010[J]. Fusion Science and Technology, 2011,59(1):1-7.
- [2] LINDLJ D,LANDEN O L,EDWARDS J,et al. Review of the national ignition campaign 2009-2012[J]. Physics of Plasmas, 2014(21):020501-1-020501-72.
- [3] RANDOLPH R B,OERTEL J A,SCHMIDT D W,et al. Process development and micro-machining of MARBLE foam-cored rexolite hemi-shell ablator capsules[J]. Fusion Science and Technology, 2016,70(2):230-235.
- [4] GENERAL ATOMICS. Inertial fusion target and components[R]. Inertial Fusion Technologies, 2015(11):1-2.
- [5] CARLSON L C,ALFONSO E L,HUANG H,et al. Automation of NIF target characterization and laser ablation of domes using the 4pi system[J]. Fusion Science and Technology, 2015,67(4):762-770.
- [6] CARLSON L C,HUANG H,ALEXANDER N,et al. Automation of NIF target fabrication[J]. Fusion Science and Technology, 2016,70(2):275-278.
- [7] Livermore National Laboratory(LLNL),Los Alamos National Laboratory(LANL),Sandia National Laboratories(SNL),et al. National ignition campaign program completion report[R]. National Nuclear Security Administration, 2012:69-95.
- [8] 章顺瑞,骆陈. 基于语义角色分析的事件抽取技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(2):279-284. (ZHANG Shunrui,LUO Chen. Event extraction technology by semantic role analysis[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):279-284.)
- [9] 毛新生. SOA 原理·方法·实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. (MAO Xincheng. SOA principles•methods•practices[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007.)

作者简介:



栗强(1969-),男,四川省武胜县人,学士,高级工程师,主要研究方向为数字化制造、软件工程、数据处理与分析.email:suq@caep.cn.

杨存榜(1965-),男,四川省三台县人,博士,研究员,主要研究方向为数字化制造、电子与信息、数据处理与分析、信息安全。

杨洪(1989-),男,云南省曲靖市人,硕士,工程师,主要研究方向为工艺设计、制造流程分析技术。

张涛(1990-),男,四川省广元市人,硕士,工程师,主要研究方向为数据处理与分析、软件工程技术。

蒋柏斌(1980-),男,四川省南充市人,硕士,副研究员,主要研究方向为制造工艺设计、结构分析技术。

(上接第 687 页)

- [20] KOCH G,KOLBIG K. The transmission coefficient of elliptical and rectangular apertures for electromagnetic waves[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1968,16(1):78-83.

作者简介:



欧阳婷(1993-),女,重庆市人,硕士,主要研究方向为电磁兼容.email:ouyang_ting@126.com.

刘强(1987-),男,重庆市人,助理研究员,主要研究方向为系统级电磁环境效应分析。

赵翔(1973-),女,四川省雅安市人,博士,教授,主要研究方向为电磁兼容分析与电磁效应评估。

闫丽萍(1972-),女,河北省张家口市人,博士,教授,主要研究方向为电磁兼容分析与电磁效应评估。

黄卡玛(1964-),男,重庆市人,博士,博士生导师,教授,主要研究方向为电磁场微波工程与微波化学研究。

周海京(1970-),男,江苏省盐城市人,博士,研究员,主要研究方向为高功率微波与计算电磁学研究。