

文章编号: 1672-2892(2012)02-0225-06

高功率激光装置集中控制系统关键技术

虢仲平, 姚导箭, 赵 强, 刘 金, 唐 钟

(中国工程物理研究院 计算机应用研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 高功率激光装置集中控制系统在研制过程中遇到了从系统构架设计到软件模拟等不同层面上的技术问题, 经过多年的研究和测试, 解决了控制系统研制中的关键技术, 达到了装置对控制系统的性能指标要求, 保证了控制系统的稳定可靠运行, 并为未来同类装置的控制系统的研制提供了重要的技术保障。

关键词: 控制系统; 高功率激光装置; 控制集成; 模拟测试

中图分类号: TN247

文献标识码: A

Key technologies of integrated control system for high power laser facility

GUO Zhong-ping, YAO Dao-jian, ZHAO Qiang, LIU Jin, TANG Zhong

(Southwest Computing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: There are many problems about computer application and physical equipment diagnosis in the research of the integrated control system for high power laser facility, including system design and software simulation etc. By research and tests for many years, key techniques in the control system are fulfilled, and the specifications of equipment are achieved. The reliability of the control system can be guaranteed. This work provides important reference for similar research in the future.

Key words: control system; high power laser facility; control integration; simulation testing

研制的高功率激光装置计算机集中控制系统, 采用了分层分布式控制结构, 是国内第 1 套运用在这种大型科学装置上的计算机控制系统。目前开展了多项关键技术的研究^[1], 已完成了系统分布式构架设计、系统模拟控制设计、系统单元技术研究、系统安全联锁设计与系统可靠性设计等工作^[2], 这些研制成果为该控制系统的工程实施提供了可靠的技术保障。

1 关键技术

1.1 系统框架设计

结合高功率驱动器的控制要求, 对集中控制系统结构进行详细分析, 将驱动器控制系统设计成分层分布式的系统框架结构。计算机集中控制系统主要实现单元及高功率激光装置总体的控制, 完成数据采集、处理、传输和管理。主要功能有: 各子系统的集中控制和管理; 装置集中控制、检测以及对环境的监测, 实现打靶控制; 物理方案、实验参数定义; 打靶实验数据的采集、入库; 打靶实验数据的分析处理; 打靶数据管理, 系统用户管理; 电源管理; 诊断测试; 系统安全联锁及报警等。

为满足高功率驱动器装置需求, 对控制系统进行功能、单元划分设计, 将其划分为 5 大支撑系统(如图 1 所示), 分别为计算机系统、集中控制软件系统、精密同步系统、前置控制系统及辅助控制系统。各系统由实体控制单元或功能部分组成, 涉及的控制设备种类较多, 控制参数和控制动作复杂。设备及控制对象等组件包括网络设备、计算机(工控机)、服务器、数据存储、各单元组件(如脉冲基准组件等)、电源开关机以及各类传感器等, 它们构成了一个复杂精密的控制硬件系统。在硬件设备上运行着大量的应用软件、工具软件及系统软件, 涉及操

作系统、开发平台、数据库、软件设计分析、软件配置管理、网络管理配置和应用软件等，这些构成了一个非常庞大的运行控制组织。因此，高功率驱动器装置控制的软硬件组成是多类型应用、多设备控制、多系统平台的、分析和设计支持异构平台的集成框架^[3]，如对计算机平台、操作系统及程序语言的支持。在分析了目前的分布式应用技术，如 COM,DCOM, Java 等，以及目前在同类装置上应用的控制系统架构，如 Tango,EPICS(Experimental Physical and Industrial Control System)等的基础上^[4]，确定本装置采用通用物件请求代理

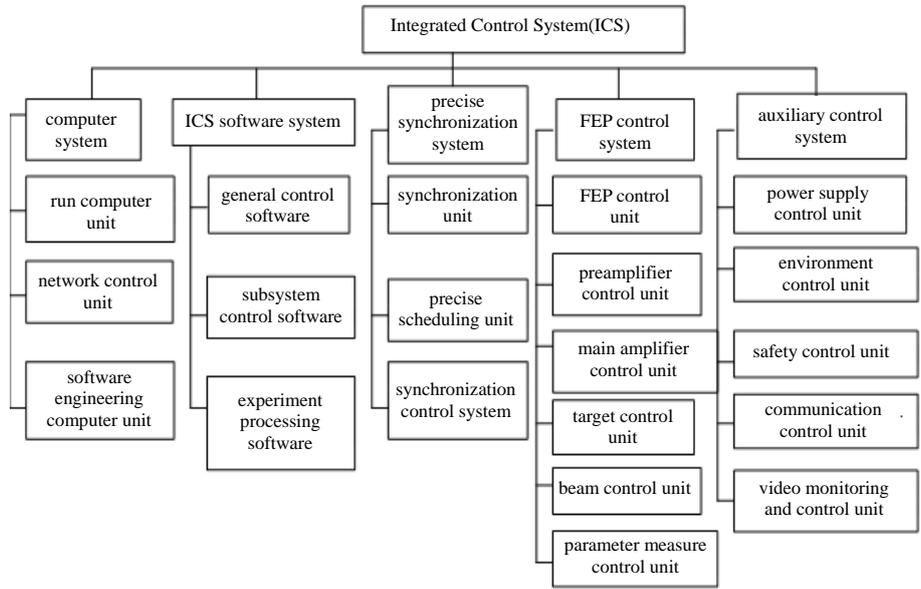


Fig.1 Architecture of control system
图 1 控制系统单元结构

理架构(Common Object Request Broker Architecture, CORBA)中间件技术。CORBA 是 OMG(Object Management Goup) 1992 年提出的采用对象技术用于分布式应用的开源框架。分布式应用采用 C/S 架构，它的框架有几个显著特点，可以很好地应用于本装置的控制中：1) 对象请求代理(Object Request Broker)，使用远程过程调用的模式提供平台独立的进程间通信，它是 CORBA 规范的基础，可以跨平台通信应用；2) 接口定义语言(Interface Definition Language)，它独立于编程语言的功能描述语言，负责完成 CORBA 服务对象方法的说明，并利用语言映射工具，将 IDL 定义的 CORBA 对象方法说明翻译成高级编程语言的接口说明，编程语言根据接口说明编写对象实现程序；3) Stub 和 Skeleton：客户对象的 Stub 和服务对象的 Skeleton 是 IDL 与对象实现语言之间的桥梁；4) 其他的重要性能，如提供了事件/通知服务和命名服务框架等。通过 CORBA 技术，装置控制软件系统实现了系统的本地控制、远程控制功能，控制系统分布式框架见图 2。

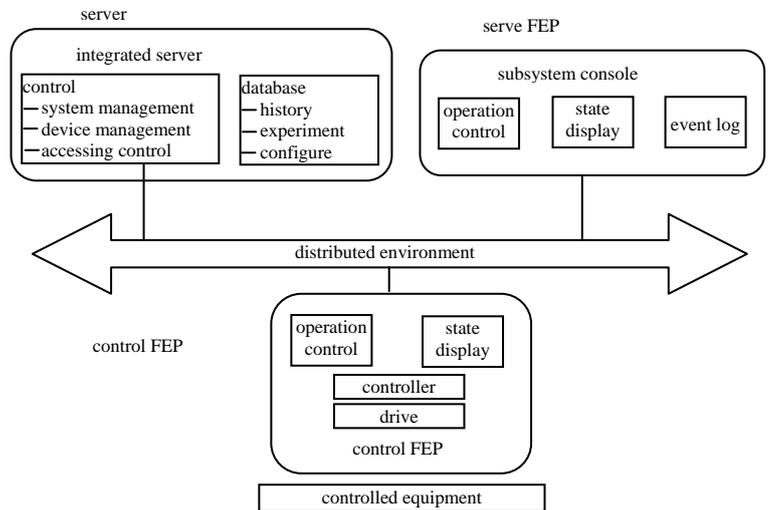


Fig.2 Distributed frame of control system
图 2 控制系统分布式框架

通过系统测试与试运行验证，分层分布式控制结构适合装置控制系统自底向上逐步实施和各子系统分步集成的需要，其开放性架构提高了系统的可扩充和升级维护能力，满足装置长周期的运行维护需求。

1.2 计算机应用系统的集成技术

该集成的关键技术包括控制集成、数据集成和功能集成^[5]。在集中与分布相结合的、层次化的控制体系架构下，开展了对分布式控制软件系统的开发、集成研究^[6]，通过对多种中间件技术进行分析、比较和试验验证，选择了基于 CORBA 的软件总线技术作为控制软件的中间件，并针对 CORBA 的设计、开发和应用开展了针对性的研究。设计出基于 CORBA 的分布式控制系统结构，实现控制系统本地控制、集中控制和总控的 3 层控制；设计和实现了适合分布式控制结构下的功能模块和数据库，很好地解决了控制系统多方设计开发、逐步集成、逐步完善和跨平台集成等相关问题。

集中控制软件系统采用分层集成方式，按照软件层次设计，自底向上逐步集成，如图 3 所示。现场控制层对

现场单元设备的控制进行集成，完成现场单元设备的集中监控，并为中间层提供服务；中间层完成现场控制层的集成，并为集中控制层提供满足控制流程要求的高集成度服务；集中控制层(包括总控管理软件、分系统集中控制软件)利用中间层提供的服务，实现全系统的集中监控。

集中控制系统的软件系统主要包括 4 种类型接口：基于 CORBA 的调用接口，基于内存的调用接口，基于数据库的数据交换接口及基于文件的数据交换接口。其中，基于 CORBA 调用的接口主要应用于部署不同机器上的模块数据交换；基于内存的接口调用主要用于同一台机器的数据交换；基于数据库和文件的数据交换接口可用于各类部署程序的数据交换。总控软件的集成只与中间层有接口调用关系，其调用关系如图 4 所示。

总控管理软件控制命令通过总控的客户服务模块与集中控制系统中间层服务模块实现信息交互；通过中间层完成与各分系统现场控制单元 CORBA servant 程序的信息交互，实现各种控制、监视、状态查询等功能。

中间层 CORBA 接口服务模块负责接受总控客户信息，并转发给中间层的 CORBA 接口客户模块，该客户模块将信息进一步转发给各分系统现场控制单元

CORBA servant 程序，实现对总控下发信息的解释和执行。

总控通过客户服务下发各种控制命令，控制命令不带参数，中间层 CORBA 接口服务模块通过数据存取模块完成对控制命令参数的读取，然后通过中间层 CORBA 接口客户模块将参数传给各分系统现场控制单元 CORBA servant 程序。

中间层 CORBA 接口客户模块将从各分系统现场控制单元 CORBA servant 程序得到的实验结果数据传给数据库访问模块，由其实现数据的写入。

分系统现场控制单元 CORBA servant 部署在各分系统现场控制单元上，由各分系统负责完成。分系统中间层也由各分系统完成，并提交满足接口规范要求的各种监视、控制接口。

1.3 计算机控制系统的控制技术

在控制技术的研究中，主要解决装置中的单元控制技术和在总控层面上的全局控制技术^[7]。在全局控制技术上，通过对装置的控制流程和控制过程的详细分析，先后设计了多种不同的控制模式，结合本系统的控制要求和分布式体系架构，确定了控制流程设计，即在各子系统中将控制模块和监测模块分开，定义各控制功能的接口；在整体控制中解决了控制流程的可任意配置技术。建立了控制流程专家库，制定相应的控制策略，可根据用户提供的前置条件，自动完成控制流程的配置，自动进行打靶操作^[8]。

对装置各种打靶参数按类别进行分析管理，建立参数专家库，实现根据能量等条件自动配置运行所需的参数。为应对打靶及调试过程中出现的可预见和不可预见的故障问题，按照专家经验对问题进行分类，建立了相应的问题解决策略：对可预见问题按专家经验处理；对不可预见的故障问题采用模糊控制方法进行处理。

应用自动控制技术，以协助完成各控制点的物理任务，如光学自适应系统的自适应控制技术^[9]、能源模块放电异常性的快速自动判断技术、预放重频光能量的自动平衡控制技术以及近场多层场图的重叠处理算法技术等。

控制系统总体设计为具有 3 个层次控制运行的能力，分别为总控运行、子系统集中控制运行和控制前端处理器(Front End Process, FEP)本地控制运行，控制关系见图 5。控制的优先级从上到下逐渐降低，当由于系统故障无法实现总控运行或子系统集中控制运行时，可以降级到控制 FEP 本地进行诊断、调试和维护。

控制系统数据库设计采用服务器数据库和控制 FEP 本地数据库的两级数据库方式^[10]，当服务器数据库出现故障时，可降级到控制 FEP 本地采用本地数据库应急运行。降级运行能力设计不但提高了系统的可用性，同时为系统维护、故障定位、排除以及系统逐步集成等提供了充足的手段。

在控制流程设计上，采用基于有向图的工作流模型，建立总控/分系统的控制来建模，建模过程如下：

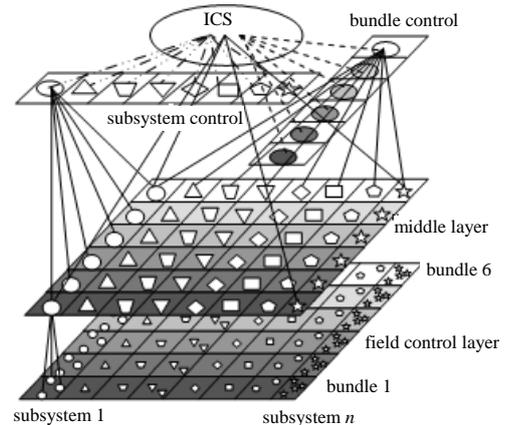


Fig.3 Integration process of control system

图 3 控制系统集成过程图

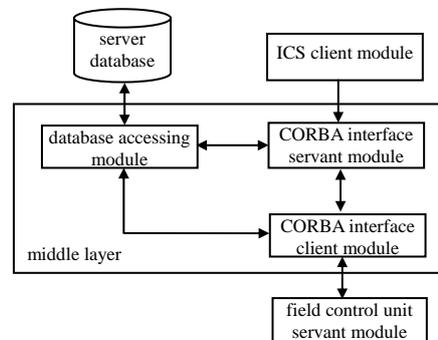


Fig.4 Diagram of relationship between integration layer and middle layer

图 4 总控与中间层接口模块关系示意图

首先, 建立流程活动节点: $T=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ (分系统具体的单元任务);

然后, 建立有向连接弧: $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 各控制任务 T 之间的依赖关系及流过程。

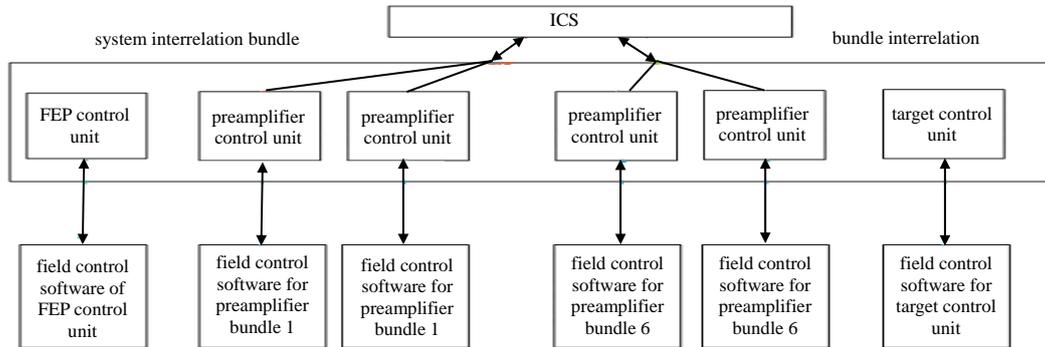


Fig.5 Control relationship in the control system

图 5 控制系统控制关系

当某项单元任务没有完成(如故障、报警等), 需要返回到上面某一活动节点, 则为流程回退的处理, 为实现回退机制, 定义“任务层”, 它代表控制处理的一个阶段, 每个节点都有 1 个“任务层”属性, 指示该节点所在的“层”, 即任务处理阶段。控制流程的流转逻辑都是发生在 2 个“任务层”之间, 不需要一步一步地依次按原路线退回。

分系统运行时的流程控制(即单个分系统流程控制流)模型定义为 $W(x)\{(T,D), J\}$, 其中: x 为分系统名称; (T,D) 为由控制任务集及依赖关系集组成的任务对; $J=\{j_1, j_2, \dots, j_n\}$, J 为 T 之间的顺序连接集, 即控制流程步骤集, 实验流程控制模块可以按照 D 的约束, 任意配置具体的流程控制步骤。

1.4 计算机控制系统的诊断测试技术

诊断测试技术是该装置控制系统的核心技术, 针对该装置的具体要求, 对多种执行单元和设备的诊断测试进行研究设计。在软件系统中设计和完成了系统不同层次上的自诊断功能, 在硬件中分别进行了对步进电机、各类传感器、DI/DO 设备等诊断测试研究, 逐步解决了装置中执行设备和单元的各种诊断需求, 为系统的控制提供了安全可靠的保障, 设计的离线测试系统层次结构见图 6。

每一层均设计诊断功能, 包括联机诊断和脱机诊断 2 种诊断方式。诊断内容包括通信、被控制设备的工作状态, 软件运行环境及安全连锁条件等。

控制 FEP 及现场被控制单元设计 2 种控制模式: 本地控制和远程控制。控制 FEP 及现场被控制单元既能独立实现控制功能, 又同时能在上一层的指挥控制下实现远程控制, 通过 2 种控制模式, 可以在系统出现故障后逐层排查, 找出故障的最终发生点。

控制 FEP 及现场被控制单元设计 2 种运行方式: 连续运行和单步运行。控制系统能按同步时序要求及其自身的工作流程连续运行, 是最终打靶实验要求所必须的。但是考虑到系统调试、诊断维护阶段的需求, 对每一个控制单元进行单步运行是必不可少的, 在确认某一控制单元故障后, 可以选用单步运行方式, 检查每一步运行的情况, 最终确定故障点, 进行维护和调试。

建立了离线和集成测试平台, 为控制软件测试提供部分物理设备支撑, 由测试服务器及网络子系统、现场通信子系统和控制器、传感器及执行子系统构成。

1.5 计算机控制系统的安全可靠性技术

安全可靠性技术是该分布式系统的另一关键技术^[11], 包括系统可靠性研究、系统数据安全和系统异常处理。

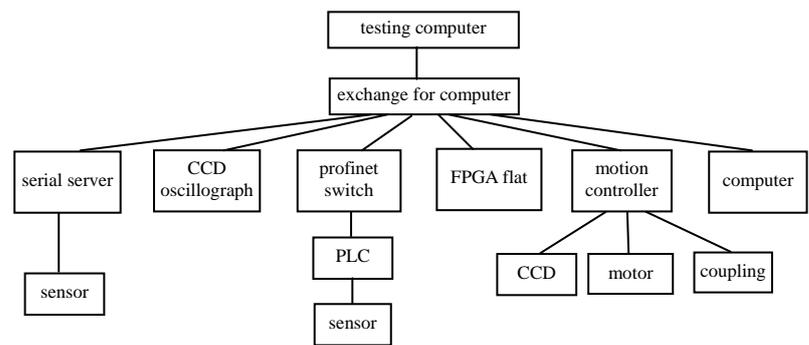


Fig.6 Layered structure of off-line test system

图 6 离线测试系统层次结构图

在系统可靠性设计中,结合装置的物理特性,利用光纤网络及底层嵌入式智能设备,并采用设备冗余及环网技术,解决了控制系统中的强电磁场干扰问题。

为保障驱动器控制系统降级运行及维护测试需要,通过分布式数据库应用技术,在分布式控制系统中设计多个数据库,对于所有数据库,需要确保在集中控制中各数据库的实验、参数数据的一致性和正确性。通过研究数据库的同步手段,设计出数据库定时、实时和手动同步3种方式,并结合应用程序、同步触发处理等技术解决了系统数据一致性问题。

系统异常处理技术是确保控制系统安全稳定运行的基础,通过对装置的控制流程和控制要求的深入分析,确定了对系统异常处理的控制思路,即采用可配置的异常控制处理来解决系统在控制中发生的异常。使用这种异常处理技术,能解决目前控制系统所发生的各种异常情况。

系统总体可靠性设计和分析尽可能实现标准化、模块化、系列化、通用化,减少规格品种数。对主要干扰源采取严格的屏蔽措施,电源系统采取严格的稳压稳频和隔离措施。设备、器材的选择,按可靠性要求的标准,采用先进的避错、检错、容错技术。可靠性特别要求系统具有安全连锁功能,本控制系统安全连锁主要由3部分组成,并在3个层次上实现:对装置中所有设备进行检测和控制,尤其是对重要设备和关键部分的监控,如能源组件、前端设备、光学器件等;对打靶大厅中的所有公共设备进行监控管理;对打靶大厅中的人员进出和位置进行监控管理,确保人员的安全。

安全连锁的3个层次实现如下。总体级连锁:在出现系统异常并需进行总控立即处理的事件。该类事件的发生将启动总体级的连锁处理,必要时进行紧急停机处理。分系统级连锁:分系统出现的仅影响本系统控制的异常,将在分系统内进行处理。对有时序要求和同步要求的其他相关系统,将启动分系统级连锁处理,或引起总体级连锁。设备级连锁:在控制系统底层执行设备出现异常时的处理,根据异常情况,分别可发生该级别连锁、分系统级连锁或产生总体级连锁。如在充电过程中产生异常,则可同时引发该3个层次的异常。

1.6 计算机控制模拟技术

建立一套模拟高功率激光装置控制系统的控制平台,包括总控制台模拟系统、分控制台模拟系统、总控模拟服务器系统、指挥控制网络通信实验系统、控制 FEP 模拟系统、执行单元模拟系统、模拟运行工况设置系统;建立各个子系统 FEP 及总控系统上运行的控制、监控软件。

控制模拟系统主要实现激光驱动器控制流程、人机界面和数据管理的模拟演示,同时作为高功率激光装置控制软件系统的设计开发、优化和测试实验平台。通过它的设计和开发,对驱动器控制软件中的关键技术进行实验验证,如软件结构、软件功能、软件集成技术等。

软件总线作为高功率激光装置控制的基础平台之一,支撑整个系统的实时通信,采用面向对象的方法,将软件总线的基本框架设计为灵活、易用对象,隐藏有关 CORBA 的实现细节,以利于相关系统将它与自己的应用程序相结合,实现模块/系统的互操作。在分布式控制系统中,将整个系统分类和模块化,并设计出各个模块的接口,其模拟控制软件系统总体分布及总线示意图 7。

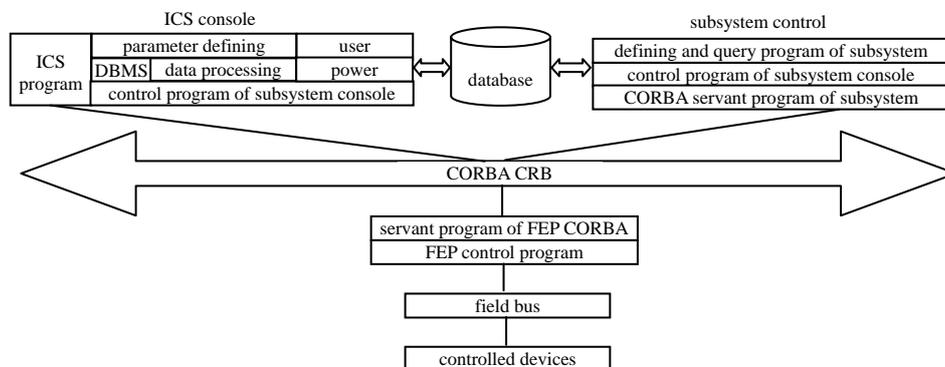


Fig.7 Architecture of simulated control software

图7 模拟控制软件结构图

在技术实现方式上,着重对控制流程及其变化的控制及系统在特殊运行环境下的安全运行模式进行研究。系统将流程分解为全系统开机准备、打靶运行、全系统关机。重点为打靶运行流程的研究,将各个子系统及控制对象操作进行针对流程变化的分解,同时针对整个及局部流程的变化提出相应的应对措施。

2 结论

高功率激光装置计算机集中控制系统是一个大型的控制系統,所涉及的关键技术已基本解决,并在高功率激光装置中得到很好的应用。同时,还需瞄准和跟踪国外大型装置的控制技术和水平,如美国已建成的国家点火装置、法国正在建的兆焦耳激光器等控制系统,它们代表了当今大型装置的最高控制水平,因此,结合国内装置实际控制需要,设计和研制如此大规模装置的控制系統,还有很多工作要做。

参考文献:

- [1] Arsdall P V, Reed B, Bettenhausen J R, et al. Integrated and Computer System[R]. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2001:198-213.
- [2] Aemstrong R, Chung A. POET(Parallel Object-oriented Environment and Toolkit) and frameworks for scientific distributed computing[C]// Proc. of the thirtieth Hawaii International Conference on Sys. Sci. 1997. Wailea, HI:[s.n.], 1997,1:54-63.
- [3] Atlas S, Banerjee S, Cummings J, et al. A High Performance Distributed Simulation Environment for Scientific Applications[C]// Proceedings of Supercomputing '95. San Diego, CA:[s.n.], 1995.
- [4] 王琼, 杜承烈. 中间件体系结构的集成研究[J]. 计算机工程, 2010,36(12):279-281. (WANG Qiong, DU Chenglie. Research on Integration of Middleware Architecture[J]. Computer Engineering, 2010,36(12):279-281.)
- [5] Kirby W F. Application software structures enable NIF operations[R]. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-143317, 2001.
- [6] 肖建, 李春茂. 网络化控制系统的研究进展与展望[J]. 信息与电子工程, 2008,6(5):321-332. (XIAO Jian, LI Chunmao. A Survey on the Research of Networked Control Systems[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(7):321-332.)
- [7] Lerche R A, Coutts G W, Lagin L J, et al. The NIF Integrated Timing system-Design and Performance[C]// 8th ICALEPCS 2001. San José, CA, USA:[s.n.], 2001:206-208.
- [8] Shaw M J, Sacks R A, Haynam C A, et al. Computational Modeling in Support of NIF Operations[C]// 8th ICALEPCS 2001. San José, CA, USA:[s.n.], 2001.
- [9] 谢阅, 唐钟, 魏仲平. 光路自动准直中腔镜及反射镜控制算法[J]. 信息与电子工程, 2010,8(1):111-113. (XIE Yue, TANG Zhong, GUO Zhongping. Control arithmetic for cavity mirror and reflector in beams automatic alignment system[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(1):111-113.)
- [10] Bryant R M, Carey R W, Claybourn R V, et al. NIF Control Network Design and Analysis[C]// 8th ICALEPCS 2001. San José, CA, USA:[s.n.], 2001:484-486.
- [11] Lawrence J D. Software Reliability and Safety in Nuclear Reactor Protection Systems[R]. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-114839, 1993.

作者简介:



魏仲平(1964-), 男, 北京市人, 研究员, 研究方向为嵌入式控制及计算机技术与应用等. email:zpg@caep.ac.cn.

姚导箭(1967-), 女, 四川省安岳县人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为计算机网络技术等.

赵强(1958-), 男, 四川省绵阳市人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为计算机应用及图像处理技术.

刘金(1979-), 男, 四川省中江县人, 高级工程师, 主要研究方向为自动控制技术.

唐钟(1979-), 男, 四川省绵阳市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为智能控制及计算机软件与应用等.