

设备协同技术及其系统软件研究综述

陈 峰, 荣晓慧, 邓 攀, 马世龙

(北京航空航天大学软件开发环境国家重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 设备协同技术是大规模区域管理、物联网等领域的支撑技术,对设备协同技术及其系统软件进行研究具有重要意义.本文首先总结设备协同技术的发展阶段,指出大规模设备协同技术是目前的关键研究问题,主要研究如何支持设备协同的大规模性、控制的快捷性和协同的安全性.之后,归纳了大规模设备协同系统软件的体系结构,并分析了大规模设备协同中的三个关键技术.通过分析若干设备协同典型应用系统以及采用的技术方案,指出了目前研究的特点、优势和不足.同时本文分析了基础网络方案对设备协同系统软件的影响.最后指出了进一步的发展方向.

关键词: 设备协同; 大规模设备协同; 协同流程建模语言; 协同执行机制

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 02-0440-08

A Survey of Device Collaboration Technology and System Software

CHEN Feng, RONG Xiao-hui, DENG Pan, MA Shi-long

(State Key Laboratory of Software Development Environment, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Device collaboration technology is the supporting technology of the large-scale area management and “the Internet of things”, so it is of great significance to research device collaboration technology and its system software. First, the stage of device collaboration technology is summarized. Large-scale device collaboration technology is considered as the key issue. How to support large-scale device collaboration, rapid control speed and collaboration security needs to be investigated. Then the software architecture of device collaboration system is summed up, and three key technologies of large-scale device collaboration are analyzed. By analyzing a number of device collaboration applications and the technology scheme, the characteristics, advantages and shortcomings of the present researches are pointed out. The impact of network infrastructure is analyzed. Finally, the future research topics are discussed.

Key words: device collaboration; large-scale device collaboration; device collaboration process model language; device collaboration execution mechanism

1 引言

伴随着传感器的广泛应用,物联网^[1]技术受到了越来越多的关注,例如2008年IBM提出了智慧的地球^[2]的概念,并成为2009年2月的IBM论坛的主题^[3].国内也开展了物联网的相关研究^[4],特别是2009年8月国务院总理温家宝考察无锡时提出,加快传感网产业发展,将在无锡建设“感知中国”中心,更加促进了物联网在中国的发展.设备协同技术作为物联网的支撑技术,成为研究热点.

本文作者及研究组参与了若干设备协同相关技术的项目,例如地震前兆观测网络系统项目^[5]实现了全国30多个省局、300多个台站范围的近千部60余种地震前兆设备的协同.奥运中心区景观照明项目^[6]实现了奥运中心区近500台照明设备的统一接入和管理,支持照

明设备在97公顷地理范围内的有效协同工作,产生具有艺术性的照明效果.在上海世博公园区域管理系统设计中,设备协同工作称为“联动”,通过周界报警、视频监控以及广播等多个子系统的设备联动,实现大范围内区域管理.

在下文中,将首先给出设备协同系统的分类,然后分析设备协同系统的关键技术,并总结典型设备协同系统中的技术方案,同时通过分析比较指出目前研究的特点、优势和不足,之后讨论不同网络方案下系统软件设计需要考虑的问题,最后对全文进行总结.

2 设备协同系统的分类

设备协同系统可分为设备远程访问、设备共享支持的用户协作和设备间协同三类,下面将逐一介绍这些研究的特点及其代表性项目.

2.1 设备远程访问

在物理、地理等相关领域的研究需要使用一些价格昂贵的设备资源,这些设备资源为多个技术机构共同使用,为了充分利用设备资源,这类设备协同系统主要致力于设备的远程共享,属于时延敏感型应用.代表性研究是 CIMA 项目^[7]和文献^[5,8,9]中的相关研究.

2.2 设备共享支持的用户协作

在 e-Science 等领域,随着实验复杂程度的提高,一次实验需要多个工作人员协同进行,工作人员之间通过音频视频协作实验过程,并在试验过程中频繁的交换实验数据.由于实验流程相对固定,这类系统不支持动态流程建模,称为设备共享支持的用户协作,属于时延敏感型和用户协作频繁型应用.代表性研究为 NEESGrid 项目^[10]和 XPort 项目^[11,12].

2.3 设备间协同

设备间协同研究主要集中在大规模区域管理、应急救援和物联网等领域,在这些领域设备协同流程日趋复杂,采用手动方式进行设备协同难以实现设备间高效协同,需要利用建模工具实现设备协同流程的定义,通过协同机制实现设备间协同的自动化.根据应用中参与协同的设备规模的大小,设备间协同又分为常规设备协同和大规模设备协同.

2.3.1 常规设备协同

在常规设备协同的典型应用中,一次设备协同过程中使用的设备数量不多,但是协同的复杂性较高,设备之间协同频繁,常规设备协同系统主要是保证控制快捷性,并降低协同的复杂性.常规设备协同系统属于时延敏感型和设备协同密集型应用,代表性研究是 GRIDCC^[13,14]项目和 iOpeNet 研究^[15].

2.3.2 大规模设备协同

在大规模设备协同的典型应用中,一次设备协同过程需要地理大范围内的大量设备共同完成,对设备协同过程的安全性、可靠性及通信的效率要求高,具有设备数量多,种类复杂,协同规模大、时延敏感、同步要求高等特点,主要研究如何支持设备协同的大规模性、控制的快捷性和协同的安全性.大规模设备协同系统属于设备密集型、时延敏感型和设备协同密集型应用.代表性的研究为本文作者及其研究小组参与的奥运照明设备协同系统项目 DCS(Large-scale lighting device collaborative system)、上海世博公园区域管理系统以及物联网应用.

目前大规模设备协同应用越来越广,成为研究的热点,故本文将重点讨论支持大规模设备协同的关键技术.

3 大规模设备协同关键技术

从一次大规模设备协同的生命周期来看,为实现设备的协同,首先需要建立设备模型,实现大量异构设

备的抽象与接入,在此基础上,通过设备协同流程建模语言实现协同流程建模,通过协同流程执行机制实现设备协同过程的自动化.下文首先分析设备协同系统软件的体系结构,之后综述设备协同生命周期中的主要技术.

3.1 设备协同系统软件体系结构

设备协同系统软件的功能组成包括设备协同流程定义子系统、执行子系统、评估子系统和仿真子系统,本文作者及研究小组根据参与的设备协同系统软件特点,提出了设备协同系统软件参考模型,如图 1 所示.

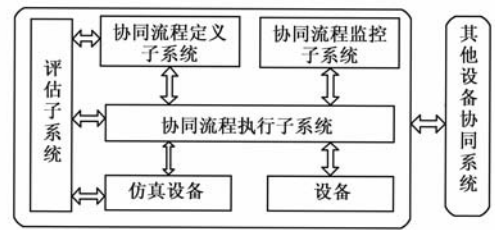


图1 系统软件参考模型

其中,设备协同流程定义子系统提供图形化的设备协同流程定义环境,支持用户使用设备协同流程建模语言创建一个设备协同流程定义.协同流程执行子系统负责设备协同流程定义的解释执行,维护每个协同流程定义执行的上下文环境,实现协同任务的调度,并接受执行监控子系统的控制和监视命令.协同流程监控子系统实现对设备协同任务执行过程的监视和控制.评估子系统通过对协同任务数据的分析,对设备协同系统的指标进行评估和验证.仿真设备和设备组成了设备协同系统的操作对象.不同设备协同系统之间可以互相交换数据实现多系统之间的交互.该模型已应用于 DCS 系统中.

目前的设备协同系统软件体系结构可以分为两类,第一类体系结构以中间件架构进行设计,该类系统架构具有耦合度低,扩展性灵活的特点,如图 2 所示.

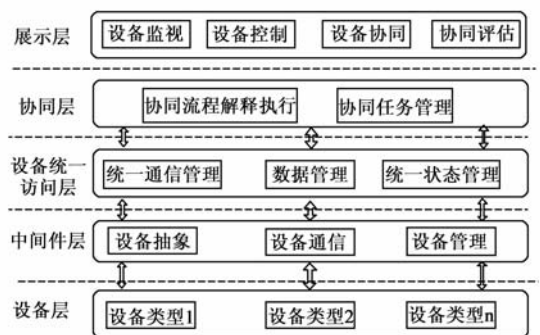


图2 基于中间件的体系结构

第二类体系结构以通用网格中间件为基础,通过开发新的网格服务的方式构建协同系统,其典型的体系结构如图 3 所示.

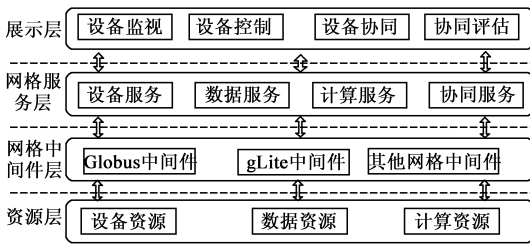


图3 基于网络的体系结构

3.2 设备抽象与统一访问

在大规模设备协同系统软件中,利用设备抽象与统一访问技术实现大量异构设备的统一封装和统一接入.设备抽象和接入的关键技术包括设备模型定义研究、设备封装方式研究以及设备统一通信的研究.

设备模型的定义方式可以分为基于自动机的统一设备模型定义^[6]、基于本体的统一设备模型定义^[16]和基于具体设备类型的设备模型定义^[10,13,17]等.其中,基于具体设备类型的模型定义方式由于和具体应用的设备类型相关,因而局限性较大,难以实现更多类型设备的抽象;基于自动机的模型定义方式脱离了具体的设备类型,具有一定的抽象能力,适用于描述具有有限状态的设备,在对具有较多状态的设备进行抽象时存在一定局限性;基于本体的设备模型定义方式由于采用了本体的方式描述设备,因而脱离了具体设备类型,可以实现多种不同类型设备的抽象.

设备封装方式可以分为三种方法,第一种方法设备模型维护设备属性信息和状态信息,与设备的通信部分交由统一的通信组件完成^[6],这种方法称为“简单设备封装”;第二种方法在封装设备模型的基础上集成设备通信的组件,设备模型维护设备属性信息和状态信息并充当与设备通信的代理^[13,18],称为“集成通信的设备封装”;第三种方法使用一类设备组件封装多种设备,设备组件成为多类设备统一访问的入口^[17,19],称为“多类型设备集成封装”.

设备统一通信的研究目前可以分为两种方法,第一种方法通过提出元通信协议,从而实现异构设备的统一通信和异构通信消息的统一描述^[20],称为“逻辑设备级统一通信”.第二种方法通过提出新的通信协议,将设备通信的消息作为新通信协议传输的内容,研究目标是解决设备组件与上层应用的通信过程可靠性、实时性^[10,17],称为“组件级统一通信”.

3.3 设备协同流程建模语言

在设备间协同系统中,使用流程建模语言实现对设备协同流程的描述,并能够支持设备协同的自动化.目前的研究分为两类:第一类方法扩展现有流程建模语言,并将设备服务封装为 Web 服务^[21~23],利用 Web 服务的组合实现设备的协同,该类研究属于工作流语

言研究领域,代表性的研究有 BPEL^[24], WSFL^[25], YSWL^[26], GSFL^[27]等.第二类方法是开发新的面向设备协同领域的流程建模语言^[6,28],抽象出设备操作,给出设备操作的解释执行机制,并设计专门的时间操作语句,支持基于时间的设备协同.

3.4 设备协同流程执行机制

在设备协同系统中,使用不同的任务调度策略对设备资源、计算资源、存储资源等进行分配,实现多任务并行执行.在进行任务调度时,根据目标的不同,目前的调度策略可以分为以下几种:第一种调度的目标是保证在多任务并行执行情况下设备操作能够正确执行,例如保证设备协同任务的时序关系和同步关系^[29],并通过调整任务的执行时间、选择等价设备操作等实现冲突消解^[30~32].第二种调度的目标是优化协同任务的执行.例如提高任务的并发度^[33],实现负载均衡^[34,35],将性能、花费等非功能指标作为调度依据,实现任务调度^[36],或者活动的服务资源信息和时间信息,提高系统的执行效率等^[37].

4 典型设备协同系统

4.1 设备远程访问系统—CIMA

CIMA 体系结构^[18]如图 4 所示,其中远程访问模块(RA)通过调用通用设备访问接口为上层提供设备控制与管理服务;设备访问模块(IA)统一封装设备调用接口,将异构科学设备虚拟化;设备描述模块与设备访问模块配合对外提供统一访问接口.

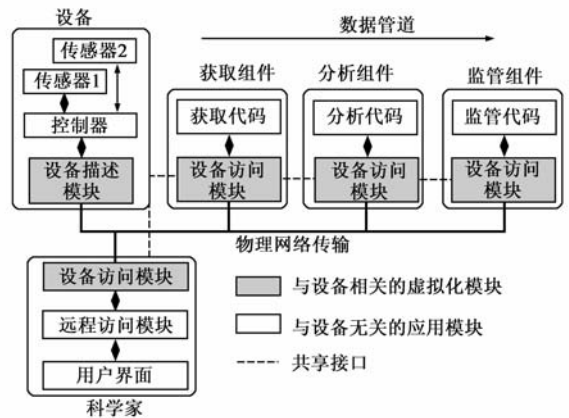


图4 CIMA 体系结构

CIMA 使用设备 (Instrument) 类型封装各类设备. CIMA 的设备模型如图 5 所示:一个设备由一个或多个传感器元件组成,设备对这些传感器的功能进行统一的封装和管理,数据使用者通过设备接口与传感器之间进行交互^[7],传感器与数据使用者之间通过通道进行通信.

4.2 设备共享支持的用户协作系统—NEESGrid

NEESGrid 建立 Globus 工具集之上,其体系结构^[10]

如图 6 所示.按照软件组件部署位置,可分为以下三部分:操作中心部署一系列全局服务,例如元数据采集、数据发现、副本管理和数据访问工具等;NEES 站点包括设备站点和资源站点,其中设备站点部署 NEESPoP 软件组件,资源站点部署一系列应用软件组件;客户端为用户提供了协同访问工具和 API.

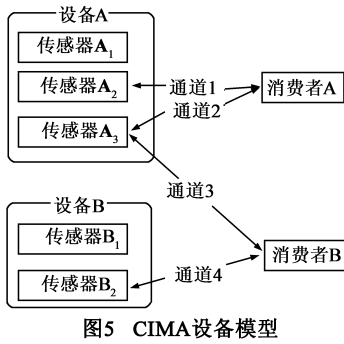


图5 CIMA设备模型

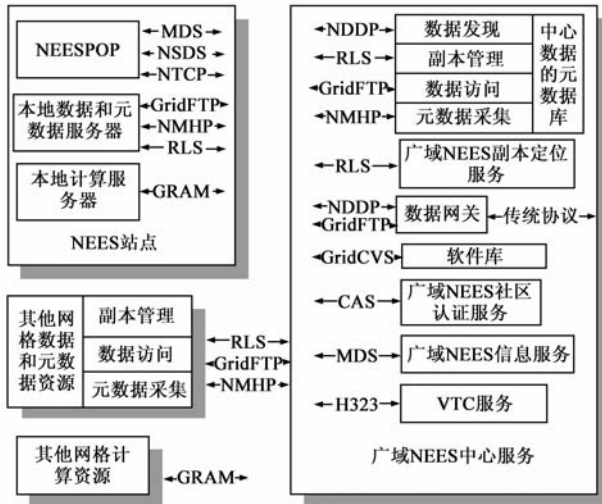


图6 NEESGrid 体系结构

操作中心与 NEES 站点之间使用 NEES 远程控制协议(NTCP)通信,使用全面合作框架(CHEF)访问和分析由各个 NEES 项目产生的大量文本、图表、视频和海量数据,并提供了一组建立在 CHEF 之上的标准协作服务.

4.3 常规设备协同系统—GRIDCC

GRIDCC 的体系结构^[13]如图 7 所示.

在 GRIDCC 体系结构中,用户通过虚拟控制室(VCR)与远程设备进行交互.同时,虚拟控制室还为用户提供了一个协作环境,如聊天、视频会议、电子记录等.设备元素(IE)描述了一组服务集,提供了对物理设备进行远程控制和观测的接口,并使用发布订阅系统实现观测数据的共享.计算元素(CE)和存储元素(SE)提供对计算和存储资源访问的通道.执行服务(Execution Service, ES)控制协同流程的执行,维持任务状态并支持高级资源预定.

GRIDCC 项目中的设备协同执行系统采用业务流程执行语言(BPEL4WS)^[24]中的工作流引擎,加入了安全委托,并在服务质量^[38]保证机制,选择最恰当的服务和资源.

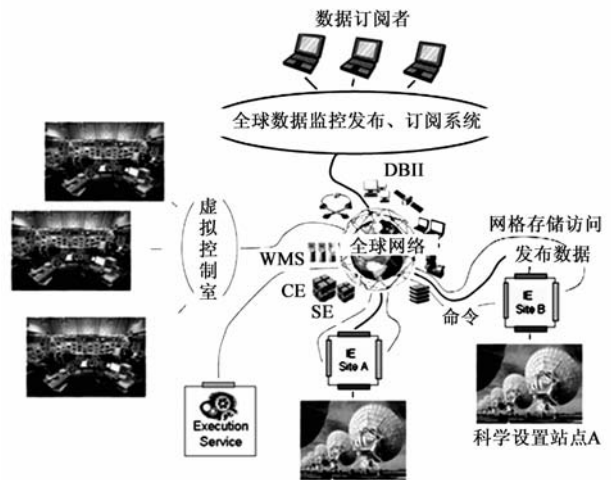


图7 GRIDCC 体系结构

4.4 大规模设备协同系统—DCS

根据设备协同系统软件参考模型,本文作者及研究小组设计了 DCS 体系结构,如图 8 所示.

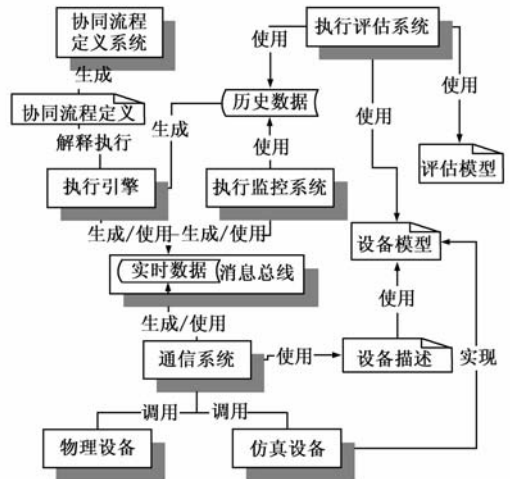


图8 设备协同系统体系结构

DCS 系统由协同流程定义系统(ASDE)、协同流程定义(ASS)、执行引擎(EE)、执行监控系统(EMS)、执行评估系统(EAS)、评估模型(SAM)、消息总线(MBus)、通信系统(CS)、物理设备、仿真设备(Simulator)、设备模型(LDM)构成.

在 DCS 中,使用通讯系统实现与照明设备通信.为了实现奥运中心区异构照明设备统一控制和管理,在研究照明设备通信协议的基础上,提出了元通信协议MP^[20],使用该通信协议,实现了对照明系统中异构通信协议的描述,屏蔽了底层照明设备的通讯细节.在 DCS 系统中,基于自动机提出了照明设备模型^[6],在进行设备封装时,将一类设备封装为一个设备组件,与设备的通信部分由统一通信系统组件完成,并在照明设备模型基础上开发了仿真设备.

在 DCS 中,为了实现对大规模区域照明方案的抽象和照明设备抽象,本文作者及研究小组提出大规模照明设备协同语言,由常规语句、时间语句和照明设备声明与访问语句组成^[6,28].其中时间语句实现时间同步、等待等操作,支持照明设备基于时间的协同;照明设备声明和访问语句用于声明照明设备,并提供设备访问相关操作.

在 DCS 的协同任务管理通过使用资源原子分配机制、线程信息树管理、并行控制语句等,实现了多协同任务之间以及协同任务内部各个子任务之间的同步^[29].协同任务对设备具有独占性,多任务的并发执行会导致设备冲突,在 DCS 中,提出了一套基于时间预测的冲突检测消解机制,通过基于时间的设备预约和等价过程替换实现了对冲突预防,通过异常处理实现了冲突消解^[32].

4.5 设备协同系统比较分析

4.5.1 系统体系结构

在表 1 中,标记为 * 的部分表示该功能模块为系统必需的组成部分.例如大规模设备协同系统中,由于设备数量众多,使用设备模型可有效降低设备接入的复杂性,因而大规模设备协同系统必须使用设备模型描述设备,而对于常规设备协同系统该功能不是必需的.

表 1 设备协同系统的比较

所属分类	大规模设备协同系统	常规设备协同系统	设备共享支持的用户协作系统	设备远程访问系统
典型研究	DCS	GRIDCC	NEESGrid	CIMA
流程定义系统	ASDE*	VCR*	/	/
流程执行引擎	EE*	ES*	NEESGrid 系统	/
执行监控系统	EMS*	VCR*	NEESGrid 系统	用户界面
执行评估系统	EAS*	/	/	/
消息总线	MBus	发布订阅系统	/	RA
通信系统	CS*	IE*	NTCP*	IA*
协同流程定义	ASS*	BPEL*	/	/
评估模型	SAM*	/	/	/
设备模型	LDM*	IE 设备模型	NEESPoP 设备模型	设备类型及设备本体
物理设备	照明设备*	GRIDCC 设备*	地震设备*	各类设备*
仿真设备	Simulator*	GRIDCC Test bed	/	/

在典型的设备协同系统中,CIMA 和 DCS 系统采用中间件架构进行设计,GRIDCC 和 NEESGrid 采用以网格中间件为基础的方式构建系统.这两类系统架构的共同点是采用集中式任务管理方式,由中心计算结点根据设备协同流程,实现设备之间协同的自动化.

不同的设备协同系统针对的应用不同,系统的软件组件存在较大差异,例如,CIMA 项目使用本体描述设备^[16];GRIDCC 项目利用虚拟控制室实现设备的远程监视和控制以及设备协同流程建模,并使用发布订阅系统实现了数据全球范围的共享^[13];本文作者及研究小组提出了设备协同流程建模语言从而支持复杂的设备协同流程^[6],使用执行引擎实现协同流程建模语言的解释执行^[29],并提出了统一设备通信协议实现了设备的统一接入和统一访问^[20].

通过对比分析可以看出,目前设备协同系统对设备抽象的研究比较多,通过设备模型将物理设备不同程度地抽象为各种逻辑设备模型.对设备协同流程的研究不足,缺少对设备协同流程可编程性的支持,并且对执行系统协同性的评估讨论较少.目前 DCS 系统功能较为完善地实现了设备协同系统软件的功能模型,设备协同系统软件开发时可以参考 DCS 系统.

4.5.2 设备抽象和接入

典型设备协同系统的设备抽象与接入方式比较如表 2 所示.目前的设备协同系统由于应用需求的不同,实现时采用的技术方案往往是许多因素的综合考虑,例如 DCS 系统能够实现多种照明设备的统一接入,但是对于其他类型设备的抽象能力不足;GRIDCC 系统缺少对异构通信协议的描述能力;NEESGrid 系统耦合度高、对异构设备的统一接入支持较少但是适用于将已有系统集成到设备协同系统中;CIMA 系统缺乏对通信过程可靠性、实时性的考虑.

表 2 设备抽象方式的比较

	DCS	GRIDCC	NEESGrid	CIMA
设备模型定义	基于自动机	基于具体设备类型	基于具体设备类型	基于本体
设备封装	简单设备封装	集成通信的设备封装	多类型设备集成封装	集成通信的设备封装
设备统一通信	逻辑设备级	组件级	组件级	组件级

4.5.3 设备协同流程建模语言

在典型的设备协同系统中,GRIDCC 项目和 DCS 中采用流程建模语言支持设备协同的自动化.其中 GRIDCC 在 BPEL 的基础上进行扩展,提高 BPEL 的服务质量和安全性,DCS 中设计了设备协同流程建模语言,并给出该语言的解释执行机制.本文作者认为,在通用的建模语言基础上进行扩展的研究方法,优势是具有更好的通用性,语言不仅可以支持设备协同,而且可以支持商业应用,将设备的控制监视等操作封装为 Web 服务,技术上较为容易实现,其缺点是缺乏对设备操作的解释执行机制的描述,而且缺乏对基于时间的设备协同的支持.开发新的面向设备协同领域的流程建模语言,

可以充分考虑设备协同领域特点,具有较好的针对性,实现了对设备操作的描述,并支持基于时间的设备协同.由于这种方法难度较大,目前采用该种方案的研究较少.

4.5.4 设备协同执行机制

典型的设备协同系统中,GRIDCC 系统的调度机制是以 QoS 为指标进行调度,在 DCS 中,任务调度考虑设备访问冲突和任务同步等待关系并以能耗作为考察指标,选择优化的设备.设备协同执行机制与具体的业务需求密切相关,下面列举在设备协同系统中主要考察的指标,例如任务并发度、任务执行时间等,给出不同类型的设备协同系统这些指标的要求.

表 3 设备协同机制的比较

指标/系统	设备远程访问	设备共享支持的用户协作	常规设备协同	大规模设备协同
任务并发度	迫切要求	一般要求	一般要求	迫切要求
任务执行时间	一般要求	一般要求	一般要求	迫切要求
系统负载均衡	一般要求	一般要求	一般要求	一般要求
设备访问冲突	一般要求	一般要求	一般要求	迫切要求
资源优化选择	一般要求	一般要求	一般要求	一般要求

由此可见,对于设备远程访问系统,研究的重点是提高任务的并发度,对于设备共享支持的用户协作系统更多的要考虑多指标之间的平衡,而对于普通规模设备协同系统,重点考虑权衡多 QoS 指标实现任务调度,大规模设备协同系统更多的要考虑提高任务的并发度、缩短任务执行时间并避免设备访问冲突.

5 基础网络方案对设备协同系统软件的影响

基础网络对设备协同系统的应用规模、性能以及可靠性具有极其重要的作用,当基础网络无法提供较好的支撑环境时,系统软件需要采用额外的策略.目前的设备协同系统在构建基础网络时,有两种方案:第一种方案是将应用部署于行业专用网络,专网与外部相对隔绝,一方面保证足够的地址空间,另一方面由于专网专用,容易获得较好的服务质量.因此,采用行业专用网络可以支持设备协同系统中设备的大规模性、控制的快捷性,能够降低系统软件的复杂性.第二种方案是将应用部署于公网环境下,该方案可以采用两种不同的网络层协议:IPv4 协议和 IPv6 协议.使用 IPv4 协议为系统提供大量独立的 IP 地址,中国 IPv4 地址匮乏,难以获得大量的公网 IPv4 地址,此外由于公网网络环境较为复杂,系统软件通常需要考虑如何在有限带宽下保证关键数据的传输效率以及如何降低网络拥塞带来数据传输超时问题和网络抖动问题. IPv6 协议相对于 IPv4 具有更丰富的地址空间,更快的网络速度和更高的安全性,因而使用 IPv6 协议可以降低系统软件的实

现复杂度,适合大规模设备协同系统中使用.

在 DCS 系统中,采用 IPv6 网络作为基础网络,实现大规模范围内照明设备的统一接入、统一管理和协同控制.

6 设备协同技术发展趋势

目前设备协同技术相关研究人员按照各自的技术路线开展了广泛的研究,但是由于缺乏统一的标准,设备协同系统之间难以实现互联互通,严重制约了设备协同技术的发展.因此下一步研究工作是提出设备协同系统的相关标准,包括设备描述标准、设备通信协议标准、协同流程标准和系统软件互操作标准.在设备协同系统软件的研究方面,统一设备模型、设备协同语言以及协同执行机制研究欠缺,是进一步的研究热点.目前设备协同技术主要应用于科学研究、实验等领域,在大规模区域管理等方面的应用尚处于起步阶段,随着设备协同技术不断完善发展,设备协同技术与物联网、普适计算等相关技术的进一步融合成为未来的发展趋势.

7 结论

大规模设备协同技术在区域管理、物联网和应急救援等领域日益发挥出其关键作用,成为重要的研究内容.本文总结设备协同系统的应用特点,将应用分为时延敏感型应用、设备密集型应用、用户协作密集型应用以及设备协同密集型应用,通过对现有设备协同典型系统的分析,将设备协同系统分为远程设备访问,设备支持的用户协作以及设备协同三大类,设备协同又分为普通规模设备协同和大规模设备协同两类,目前设备协同技术发展大规模设备协同阶段.

通过分析比较设备协同系统软件的主要研究内容,本文给出了设备协同系统软件的参考模型,目前 DCS 的系统结构较为完整地实现了该模型,具有一定的参考价值.在目前设备抽象及接入方式的研究中,设备封装的方式研究较为充分,设备模型的研究以及统一通信协议的研究尚无法实现大量异构设备的抽象和统一接入.在设备协同流程建模语言研究中,面向设备协同领域的流程建模语言相对于通用流程建模语言具有一定优势,进一步的研究应面向设备协同领域的流程建模语言.在设备协同执行机制研究方面,目前的研究在一定程度上解决了任务调度、设备冲突以及服务质量等问题,但是协同过程中的异常处理等问题讨论较少,可以作为进一步的研究内容.

为了进一步拓展设备协同技术在物联网、大规模区域管理等领域的应用,未来的研究应该提出设备协同系统的设备描述标准、设备通信协议标准、协同流程

标准和系统软件互操作标准.

参考文献:

- [1] Gershenfeld N, Krikorian R, Cohen D. The internet of things [J]. *Scientific American*, 2004, 291(4): 76 – 81.
- [2] Palmisano S. A Smarter planet: instrumented, interconnected, intelligent [OL]. http://www.ibm.com/ibm/ideasfromibm/us/smartplanet/20081117/sjp_speech.shtml, 2009-09-10.
- [3] IBM. IBM 论坛 2009 [OL]. <http://www-900.ibm.com/cn/forum2009/index.shtml>, 2009-11-10.
- [4] 宁焕生, 张瑜, 刘芳丽, 等. 中国物联网信息服务系统研究 [J]. *电子学报*, 2006, 34(12A): 2514 – 2517.
Ning H, Zhang Y, Liu F, et al. Research on china internet of things services and management [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(12): 2514 – 2517. (in Chinese)
- [5] 宫琦, 邓攀. 国家地震前兆设备开放互连及其应用研究 [J]. *计算机与数字工程*, 2008, 36(3): 107 – 110.
Gong Q, Deng P. Research and application on implement the open inter-connection of national earthquake auspice device [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2008, 36(3): 107 – 110. (in Chinese)
- [6] Chen F, Rong X, Deng P. The design of a large-scale area lighting scheme design language for Olympic park [A]. *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science* [C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009. 104 – 107.
- [7] Devadithya T, Chiu K, Huffman K, et al. The common instrument middleware architecture: overview of goals and implementation [A]. *Proceedings of the First International Conference on e-Science and Grid Computing* [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005. 578 – 585.
- [8] Graves M, Caldwell K. Telemedicine on the grid [OL]. <http://www.escience.cam.ac.uk/projects/telemed.html>, 2009-10-5.
- [9] 成尔京, 殷国富, 周丹晨, 等. 基于 Internet 的远程设备服务网研究 [J]. *计算机集成制造系统-CIMS*, 2004, 10(6): 629 – 634.
Cheng E J, Yin G F, Zhou D C, et al. Study on remote equipment service network based on internet technology [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(6): 629 – 634. (in Chinese)
- [10] Kesselman C, Butler R, Foster I, et al. NEESgrid System Architecture [OL]. <http://www.escience.cam.ac.uk/projects/telemed.html>, 2003.
- [11] Bramley R, McMullen D F R, Foster I, et al. The XPort Project [OL]. <http://www.cs.indiana.edu/ngi/>, 2009.
- [12] Legrand R. Xport 2.0 user guide [OL]. <http://www.charmedlabs.com/xport-user-guide.pdf>, 2003.
- [13] Gridcc Project report [OL]. http://www.gridcc.org/documents/GRIDCC-WP8-D8_3-20080201-06-INF-Final_Report.pdf, 2007.
- [14] MCGOUGH A S, AKRAM A, GUO L, et al. GRIDCC: Real-time workflow system [A]. *Proceedings of the 2nd workshop on Workflows in support of large-scale science* [C]. New York: ACM, 2007. 3 – 12.
- [15] 山本和幸, 福永雅一, 黄吉文, 等. IopeNet 及其目的 [J]. *智能建筑电气技术*, 2008, 2(4): 82 – 83.
Kazuyuki Y, Masaichi F, Jiwen H, et al. IopeNet and Its Goal [J]. *Electrical Technology of Intelligent Buildings*, 2008, 2(4): 82 – 83. (in Chinese)
- [16] McMullen D, Reichherzer T. Identity and functionality in the common instrument middleware architecture [OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.6907&rep=rep1&type=pdf>, 2009-3-6.
- [17] Spencer B, Finholt T, Foster I, et al. NEESgrid: A distributed collaboratory for advanced earthquake engineering experiment and simulation [OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.2.6552&rep=rep1&type=pdf>, 2009-3-8.
- [18] Chiu K, Bramley R, Huffman J C, et al. Instruments and Sensors as Web Services [OL]. http://www.cs.indiana.edu/~chiuk/pubs/CIMA_whitepaper.pdf, 2004-3-1.
- [19] Prudhomme T. NEESgrid system overview version 2.1 [OL]. http://neesgrid.org/documents/NEESSystemOverview2_1.pdf, 2002.
- [20] Deng P, Chen F, Rong X, et al. A meta communication protocol in support lighting device unified access of Olympic center [A]. *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science-Volume 02* [C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009. 48 – 52.
- [21] Yan Y, Liang Y, Du X. Distributed and collaborative environment for online experiment system using Web services [A]. *Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design* [C]. Coventry: Coventry University, 2005. 265 – 270.
- [22] Yan Y, Liang Y, Du X. Controlling remote instruments using Web services for online experiment systems [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services* [C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2005. 725 – 732.
- [23] Frizziero E, Gulmini M, Lelli F, et al. Instrument Element: a new grid component that enables the control of remote instrumentation [A]. *Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid Workshops* [C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2006. 8 – 52.
- [24] Andrews T, Curbera F, Dholakia H, et al. Business process execution language for web services [OL]. <http://www.ibm.com/developerworks/library/ws-bpel/>, 2003.
- [25] Leymann F. Web services flow language (WSFL 1.0) [OL]. <http://www4.ibm.com/software/solutions/webservices/pdf>

/WSFL.pdf. 2001.

- [26] Van Der Aalst W, Aldred L, Dumas M, et al. Design and implementation of the YAWL system[A]. Proceedings of 16th International Conference on Advanced Information Systems Engineering[C]. Springer Berlin/Heidelberg, 2004. 142 – 159.
- [27] Krishnan S, Wagstrom P, Von Laszewski G. GSFL: A workflow framework for grid services[OL]. <http://www-unix.globus.org/cog/papers/gsfl-paper.pdf>. 2002.
- [28] Chen F, Rong X, Deng P. A large-scale device collaborative process design meta-model and case study[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineer[C]. New York: ASME, 2009. 601 – 608.
- [29] Rong X, Deng P, Chen F. The study of large-scale area lighting device cooperative system[A]. Proceedings of the 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science[C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009. 99 – 103.
- [30] 杜彦华, 范玉顺. 基于生成图的工作流多过程动态时序一致性验证方法[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2181 – 2186.
DU Yan-hu, FAN Yu-shun. A sprouting graph based approach to dynamic check the temporal consistency of workflow multi-process[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2181 – 2186. (in Chinese)
- [31] Rong X, Deng P, Chen F, et al. The study of large-scale area lighting device conflict detection mechanism[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Control[C]. USA: IEEE, 2010. 380 – 383.
- [32] Jin W, Chen F. Device cooperative conflict detection and resolution based on time estimate[A]. Proceedings of the 2009 International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems[C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009. 562 – 566.
- [33] Tretola G, Zimeo E. Activity pre-scheduling in grid workflows[A]. Proceedings of the 15th EUROMICRO International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing[C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2007. 63 – 71.
- [34] 戴毅, 曹健. 基于模糊控制的启发式工作流引擎负载均衡策略[J]. 通信学报, 2006, 27(11): 84 – 89.
- Dai Y C J. Fuzzy control-based heuristic algorithm for load balancing in workflow engine[J]. Journal on Communications, 2006, 27(11): 84 – 89. (in Chinese)
- [35] 孙雪冬, 徐晓飞, 王刚. 基于有向超图的工作流资源分配均衡优化方法[J]. 电子学报, 2005, 33(8): 1370 – 1374.
Sun X, Xu X, Wang G. Resource Allocation Balancing of Workflow Based on Directed Hypergraph[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(8): 1370 – 1374. (in Chinese)
- [36] 王勇, 姜正涛, 侯亚荣, 等. 一种服务质量感知的网格工作流引擎[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(2): 255 – 258.
Wang Y, Jiang Z, Hou Y, et al. QoS-aware grid workflow engine[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 30(2): 255 – 258. (in Chinese)
- [37] 苑迎春, 李小平, 王茜, 等. 基于优先级规则的网格工作流调度[J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1457 – 1464.
Yuan Y C, Li X P, Wang Q, et al. Grid workflows schedule based on priority rules[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1457 – 1464. (in Chinese)
- [38] Guo L, Mcgough A S, Akram A, et al. Enabling QoS for service-oriented workflow on GRID[A]. Proceedings of 7th IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT)[C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2007. 1077 – 1082.

作者简介:



陈 峰 男, 1981 年生于山东临沂. 北京航空航天大学软件开发环境国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向为网格、大规模设备协同和工作流.

E-mail: chenfeng@nlsde.buaa.edu.cn



荣晓慧 女, 1982 年生于山东威海. 北京航空航天大学软件开发环境国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向为网格、大规模设备协同和协同性能评估.

E-mail: rongxh@nlsde.buaa.edu.cn