

# 信息物理系统资源能力建模

王小乐 黄宏斌 邓 苏 陈丽娜

(国防科学技术大学信息工程重点实验室 长沙 410073)

**摘要** 信息物理系统是一种自知系统,系统中存在大量具有信息物理紧密融合特征的异构资源,这给资源管理带来了巨大的挑战。能力模型是消除异构带来高复杂性的最佳资源描述模型。本文通过分析信息物理系统中的资源特征,借鉴人们处理日常事务的思维方式,给出了资源能力的概念,提出了基于哈希表的“任务类型-能力”的资源能力描述方法和基于历史信息的资源能力计算公式,并建立了资源能力组合模型。最后,通过火灾监控信息物理系统的资源能力建模案例来说明了该资源能力建模方法。

**关键词** 信息物理系统,资源能力,建模

中图分类号 TP301 文献标识码 A

## Resources Capabilities Modeling for Cyber-Physical Systems

WANG Xiao-le HUANG Hong-bin DENG Su CHEN Li-na

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Cyber-physical system is a self-aware system. There are lots of cyber-physical heterogeneous components interacting in the system. This introduces intractable challenges to managing the resources. However, capability model is an excellent method to eliminate the complexity which is led by heterogeneity. This paper analyzed the characteristics of the CPS resources, gave the concept of the CPS resources, proposed an hash table based “TaskType-Capability” resource capability description and historical information based capability computing method, built an resource combination model. At last, it gave a firefight CPS resources capability modeling case.

**Keywords** Cyber-physical system, Resource capability, Modeling

## 1 引言

信息物理系统<sup>[1]</sup>(Cyber-Physical System, CPS)是一种关于系统的系统(System of Systems),它可以在任意时间和空间尺度上存在。如一个月球车可以构成一个小规模 CPS,智能电网系统可以构成一个中等规模的 CPS,而连接世界上的所有设备可以构成一个大规模 CPS“智慧地球”。CPS 至少包括 4 种资源:计算资源、通信资源、感知资源和执行资源,每种资源又包括多种资源实例(实体设备),CPS 的正常运转是靠众多资源进行合理的调度实现的,一旦调度过程出现故障,那么系统就可能停止工作。而绝大部分 CPS 系统其安全都是至关重要的,需要提供 7/24 不停机式的服务,如火星探路者号在执行任务时,有近一周的时间地面人员无法控制,后来通过研究发现,由于任务调度时出现优先级逆转引起了死锁现象,因此也促使了后来的优先级继承协议的发明<sup>[2]</sup>。CPS 是一种自知(self-aware)系统,在进行任务调度时,必须知道哪些资源具有完成该任务的能力,只有根据能力和任务的实时性要求才能实施任务分配和调度。

人类在日常活动中实施任务分配和调度时,并不关心资

源的外在表现,只关心资源当前状态是否具备完成任务的能力以及是否有意愿去执行任务。本文借鉴这一思想,假设 CPS 中的资源都是无私的(无感情因素),首次提出了 CPS 资源能力模型的概念来对 CPS 的资源能力进行建模分析,为 CPS 任务调度提供了依据。CPS 的极端异构性导致了资源管理的复杂性,能力模型是消除因异构性带来复杂性的最佳资源描述模型,同时能力也是对资源实施有效调度的最好的粘合剂和度量手段,对资源能力的建模是 CPS 实施高效资源管理的基础。本文通过分析 CPS 资源的特征,借鉴人们处理日常事务中的思维方式,首次提出了 CPS 资源能力模型。本文第 2 节简单地介绍了 CPS 及其资源的概念,陈述了能力模型的研究现状;第 3 节界定了能力的含义、分类,提出了基于哈希表的资源能力描述方法和资源能力组合规则;第 4 节通过对火灾监控 CPS 的资源能力建模分析,实例化了该资源能力建模方法。

## 2 相关研究

### 2.1 关于 CPS 的研究

CPS 先驱 Edward A. Lee 认为 CPS 是计算和物理过程的

到稿日期:2011-03-26 返修日期:2011-06-03 本文受国家自然科学基金(71071160)资助。

王小乐(1983-),男,博士生,CCF 会员,主要研究方向为 CPS 资源调度;黄宏斌(1975-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为信息系统与智能决策;邓 苏(1963-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为 CPS 资源管理与智能决策;陈丽娜(1983-),女,博士生,主要研究方向为 CPS 自主决策。

紧密融合,系统中嵌入计算机和网络,对物理过程进行实时地监视与控制<sup>[3,4]</sup>。CPS在物理设备和程序控制下,无缝地集成了传感器、网络、计算单元和控制单元,它作为计算过程和物理过程的统一体,是集成计算、通讯与控制于一体的下一代智能系统。何积丰院士认为CPS强调“3C”融合,即计算(computation)、通讯(communication)和控制(control)的深度融合。首先,通过嵌入式计算把物理实体都计算机化,使其具有智能;其次,把嵌入式的无处不在的、能力有限的孤岛连成网络;最后,将信息域的决策转化为行动来控制执行器,影响和改变物理环境。图1给出了CPS的概念图,其中黑色粗线框中的部分处于物理环境,其他部分均处于信息世界。

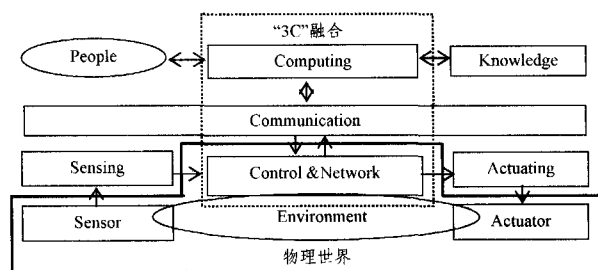


图1 CPS概念框图

CPS的研究得到了充分的重视,2006年2月发布的《美国竞争力计划》将CPS列为重要的研究项目。2007年7月,美国总统科学技术顾问委员会(PCAST)在题为《挑战下的领先——竞争世界中的信息技术研发》的报告中列出了8大关键的信息技术,CPS居首位。美国多个机构:NSF,DOD/DARPA,DOE,NASA,NSA,NIH等都对CPS的研究给予支持。除美国外,欧洲,日本和韩国等也在从事类似研究<sup>[5]</sup>,如欧共体启动的ARTEMIS(2007-2013)和EPoSS项目就旨在取得智能电子系统的国际领先地位,这些项目虽然没有明确提出CPS的概念,但已说明他们意识到相关理论和应用的重要性,并已开展有关研究。韩国的KIPA项目是通过研究智能嵌入式系统来获取CPS相关技术。

目前,很多国际会议都开设了CPS专题,2010举办了CPS第一届国际会议ICCPs。在国内,CPS得到众多专家学者的重视,中科院多位院士在一些学术报告中多次提到CPS相关研究,科技部把CPS的研究列入了863和973指南,最近两年,国家自然科学基金也对CPS的研究予以了资助。CPS的提出是源于嵌入式系统和传感器网络的发展,其研究目前尚处于初始阶段,很多亟待解决的问题都没有得到很好地解决,包括CPS体系结构、CPS中数据管理、CPS资源管理、CPS控制技术、CPS安全和可靠性等。

CPS的研究和发展是应用需求推进的,在不久的将来,CPS将逐渐改变人们的生活、工作环境,其应用领域非常广泛,包括智能电网系统、智能交通系统、航空航天电子系统、智能医疗系统、信息家电系统、环境监测、智能建筑、工业控制、国防系统、武器系统等<sup>[3]</sup>,将成为推动新技术革命的重要动力和信息的经济增长点。

## 2.2 CPS资源概念

CPS的构成包括用于采集信息的感知设备、用于信息加工处理的存储设备、用于信息传输的网络设备、用于智能决策的计算设备、用于控制的控制器和用于执行的机电设备等,构成CPS的任何设备都应该至少包括计算单元和通信单元,二

者缺一不可。在文献[6,7]中给出了一种CPS的体系架构,定义了CPS的节点和节点单元,此处不再赘述。CPS是一种典型的分布式异构实时系统,CPS中包含了大量的节点<sup>[6,7]</sup>资源,借鉴文献[8]中所提到的分布式资源的概念,本文给出CPS中资源的概念。

**定义1** CPS资源是将具有特定能力的、包括计算单元和网络通讯模块的、能够被远程调用的CPS组成软、硬件实体,称为资源。这些资源包括:(1)传感器;(2)处理器,包括具有计算能力的模块,此处的计算泛指任何形式的数据或信息处理;(3)执行器,也称激励器(actuator),包括控制单元和机电模块;(4)软件程序模块,包括软件、模型和知识,这些信息域资源也是具有计算和通信能力的实体;(5)以上资源的混合体,如机器人、具有独立功能的CPS单元<sup>[7]</sup>等。传统的计算机系统资源主要指CPU和系统带宽和存储空间,P2P和网络系统中的资源是指计算资源,但是CPS资源不仅包括计算资源,还包括感知资源和执行资源。

目前,CPS中资源管理技术尚未得到深入研究,CPS的资源管理具有重要研究意义和挑战。虽然,P2P和网络系统中的资源管理技术已经比较成熟,但是,CPS中的资源不同于只具有纯计算资源的P2P或网格系统,CPS具有比网格和P2P更加复杂的环境,CPS网络是实现从传感到传感和传动混合的转变。CPS中的任务不仅仅包含了计算任务、还包括了感知任务、执行控制任务、消息传递任务等一系列复杂任务,同时,CPS中单个资源可能包含了多种能力,如既能作为传感器感知信息,又能够作为通讯节点传递信息,甚至具有一定的控制执行能力等。在这种具有任务复杂性和能力多样性的资源面前,如何将任务和资源进行有效的匹配,实现灵活按需调度是今后的研究内容,本文就是根据上述需求,力求对资源的能力建立良好的描述模型,为后续研究提供支撑。

## 2.3 关于能力模型的研究

在CPS任务执行时,系统关心的并非资源的物理形态,而是资源当前能否完成该任务的能力。任何资源都具有特定的能力,在任务调度过程中需要进行资源分配,为了保证能够根据能力准确地匹配资源和任务,需要建立完备的资源能力模型。目前,关于实体能力模型的研究尚不成熟,能力模型主要出现在Agent系统中对Agent能力进行描述和推理<sup>[9]</sup>、制造业中制造资源的能力模型<sup>[10,11]</sup>和基于能力的软件组合问题<sup>[12]</sup>。

文献[13]在Agent的BGI(Beliefs, Goals, Intentions)框架中增加能力的形式化,并指出了能力是如何影响Agent推理及其意图的,作者认为能力就是能够根据特定目标做出合理行动以达到该目标的本领,文中还定义了一种能够根据自身能力的变化修改目标和意图的自知(self-aware)的Agent。文献[14]结合本体理论,提出了Agent能力描述和能力匹配方法,该本体提供统一词语描述信息和服务。Agent完成目标有两种能力推理:符号逻辑推理和定量推理。文献[15]给出了定义Agents完成任务集的能力的一般数学模型,文中将能力定义为在静态或动态环境中,在条件约束下是否存在一种可行的能够完成任务的调度。

除Agent中引入能力概念外,在制造业和企业的过程管理中也引入资源的能力模型。文献[16]通过分析不同工序之间的关系及其支持资源,提出了一种基于支持资源能力的优

化模型,通过合理地分配资源到不同工序,折中了时间、成本和工序质量要求。文献[17]在分析和优化企业工序的背景下,提出了一种基于行动的资源能力建模方法,将资源能力定义为输入对象、行动和输出对象。文献[18]提出了一种支持松弛时间的资源能力预留机制,文中认为资源能力是对网络资源功能性指标的一种抽象,不同类型的资源可以具有相互独立的多种资源能力。文献[19]中通过对武器装备体系能力的分析,从能力的个体、能力的关系、能力的系统3个层面对武器装备体系的能力空间进行了描述。本文对CPS中资源实体能力进行研究,主要解决在任务执行中资源匹配和调度的问题,为资源匹配和调度提供基础支持。

### 3 CPS资源能力模型

#### 3.1 CPS资源能力的含义

正如人们在日常事务处理过程中并不关心实体的外在形态和内部参数,而只需要关心当前实体的能力一样,CPS任务执行时,也不必关心资源的具体参数和状态,而只需关心资源的能力大小。但是,资源的能力与状态是密切相关的,这里的状态包括时空状态、资源能量状态、资源的功能、资源的空闲状态等一系列能够影响资源能力发挥的因素。根据上述思想,将能力定义如下。

能力(capability)是指资源在所处环境和状态下,能够完成指定任务的本领。将能力的概念引入到CPS资源管理中可以简化CPS资源分配和资源调度,使得人们在进行资源分配或调度时不必关心资源的自身状态,只要知道资源在当前的状态下能否完成指定的任务即可。将资源空间映射到信息空间,用不同的资源能力包来描述资源,当然每个资源的能力是不同的,并且其随着资源自身的状态而不断变化。

CPS的基础资源包括4种最基本的的能力,即感知能力、执行能力、计算能力和通信能力。感知能力负责从物理环境中获取信息,具有感知能力的资源包括各种传感器、摄像头、红外扫描等,某些资源(如机器人)包含了多重感知能力;执行能力主要是CPS用于影响物理世界的部分,就如人的手一样,执行能力主要是通过向物理世界传递能量的方式来改变物理环境;计算能力是CPS的灵魂,负责处理CPS中的信息和知识,并做出决策,指挥控制执行部件;通信能力是信息传递与共享的基础,也是CPS存在的基础。图2描述了CPS中的资源能力分类。

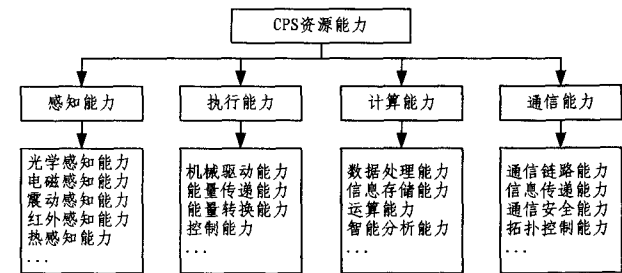


图2 CPS中的资源能力分类

资源能力是针对待处理的任务而提出的,因此资源的能力是不能够脱离任务而独立存在的,说资源具有某种能力也就是说它具有完成某种任务的能力,任务类型是考量资源能力的基准。资源能力建模是将资源空间、状态空间和任务空间映射到能力空间的过程。

$$Capability\_modeling: \{R, S, T\} \rightarrow C$$

影响资源能力的因素主要是资源的状态、资源当前的位置、自身性能情况、能维持当前状态持续时间等,决定资源能力的因素主要是资源的功能,如果一个资源不能完成某种任务,则它的能力只能为零。任务是资源能力描述的前提,图3表示出了资源能力模型体系的关系。

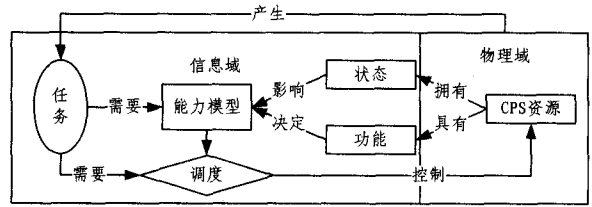


图3 资源能力模型体系

#### 3.2 资源能力模型描述

定义2(资源能力, Resource Capability, RC) 资源在所处环境和状态下,能够完成各种任务的本领。关于资源的能力描述有多种形式,包括本体描述方法<sup>[20]</sup>、矩阵描述方法、描述逻辑方法和面向对象的描述方法。本文描述能力的目的在于为资源调度提供简便依据,因此采用基于向量的描述方法,资源能力是任务类型和资源状态到能力空间上的映射,文中能力通过一个哈希表描述。

资源能力模型具有3个要素:资源实体、资源状态和任务类型。资源的能力是由资源、状态和任务共同决定的。

$$RC = f(R, S, T)$$

式中,RC(Resource Capability)表示资源能力,R表示资源空间,S为资源的状态空间,T是任务类型空间(资源在执行任务时,在相同状态下对于同一类任务表现出来的能力是相等的)。在离散资源能力模型中可以将资源的能力投影到{0,1}上,即有

$$f: (R, S, T) \rightarrow \{0, 1\}$$

资源  $r_i$  能力映射函数  $f_{r_i}(s_j, t_k) = 1$  表示资源  $r_i$  在状态  $s_j$  下能够完成任务  $t_k$ , 否则说明其不能完成任务。在实际应用中仅通过0和1来描述资源是否具有完成任务的能力过于简单且不实用;信息世界与物理环境的紧密融合导致了CPS的不确定性提高,并非所有资源在未执行任务时都能够保证100%完成任务,系统只能给出资源可能完成任务的概率。此外,实际中的资源能力包含了资源完成任务的质量和效率因素,因此,本文通过将资源的能力映射到区间[0,1]上的一个随机数来表示资源的能力。即

$$f: (R, S, T) \rightarrow [0, 1]$$

概率越大说明资源对该任务的执行能力越强,概率越小说明资源的能力越小。 $f_{r_i}(s_j, t_k) = 0.8$  表示资源  $r_i$  在状态  $s_j$  下能够完成任务  $t_k$  的概率为0.8。

这种能力模型可以通过对资源执行任务的历史信息的统计来获得。

$$f_{r_i}(s_j, t_k) = succ\_t_k^i / total\_t_k^i \quad (1)$$

式中,  $succ\_t_k^i$  是资源  $r_i$  在状态  $s_j$  下成功完成任务  $t_k$  的次数,  $total\_t_k^i$  是资源  $r_i$  在状态  $s_j$  下执行任务  $t_k$  的总次数。CPS每个资源在完成任后,根据式(1)自动更新其能力。

CPS中资源的状态是一种资源外在表现和内在性能的综合体现,一般来说,CPS资源的状态都是有限的。资源的能力并非局限于处理一个任务,某些资源可以处理多种任务,因此

CPS资源的能力模型通过一个能力哈希表来存储,资源根据自身状态的变化实时更新能力哈希表。此处不用向量主要是考虑到CPS面临的任务种类繁多,而且CPS资源之间的高异构性导致了资源之间很少具有相似的能力向量,通过哈希表这种“键-值”结构能够减少存储空间简化运算,哈希表的键为任务类型,其对应的值存放能力值。

$$RC(S) = \langle \langle TaskType, Capability \rangle \rangle$$

式中,RC表示资源能力,S表示状态,TaskType为任务类型,Capability为能力。例如资源 $r_i$ 在状态 $s_j$ 时的能力模型为

$$RC_{r_i}(s_j) = \{ \langle tt_{a1}, cp_1 \rangle, \langle tt_{a2}, cp_2 \rangle, \dots, \langle tt_{am}, cp_m \rangle \}$$

当资源从一个状态转移到另外一个状态时,资源的能力哈希表也会自动更新,图4是能力随状态更新的示意图。

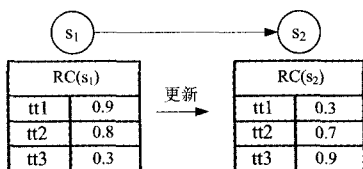


图4 状态转移导致资源能力哈希表更新

### 3.3 资源能力组合

CPS资源空间的资源以及资源之间的联系构成了一个系统,该系统具有涌现性,也就是两种资源的有效组合能够完成两者都不能完成的任务。例如人的任何一只眼睛都只能获得画面的平面信息而无法感觉深度信息,而两只眼睛分别处在不同的两个点就可以感知出画面的深度信息。假设RI为资源集合,且

$$RI = \{ r_1, r_2, \dots, r_m \}$$

式中, $r_i \in R, RI \subseteq R$ ,假设 $r_i$ 的状态空间为

$$S(r_i) = \{ s_{k1}^i, s_{k2}^i, \dots, s_{kr_i}^i \}$$

也就是资源 $r_i$ 包含 $kr_i$ 个状态。如果资源之间是相互独立的,那么资源集合RI的状态空间就是它所包含的资源的状态空间的笛卡尔积,即

$$S(RI) = S(r_1) \times S(r_2) \times \dots \times S(r_m)$$

资源集合的能力哈希表既包含了单个资源的能力也包含了涌现的能力,同样其能力哈希表可以表示为

$$RC_{RI}(S_j) = \{ RC_{r_1}(s_1^j), RC_{r_2}(s_2^j), \dots, RC_{r_m}(s_m^j), RC_{RI}(E_{S_j}) \}$$

式中, $S_j = \langle s_1^j, s_2^j, \dots, s_m^j \rangle, RC_{RI}(E_{S_j})$ 代表资源集合在状态 $S_j$ 中涌现出的能力哈希表。

有了资源组合的能力模型,在调度时就可以处理复杂的任务,有些任务也不需要分解为单个资源能够处理的简单任务来处理。

表1 资源能力模型对比

能力模型	描述方法	单个资源 多种能力	复杂程度	使用方式
Agent能力模型	逻辑规则	是	复杂	推理
制造资源能力模型	元数据和XML语言	否	复杂	计算
软件能力模型	活动树、能力模板、能力类	是	中等	语意匹配
武器能力空间	代数学方法	是	复杂	集合运算
本文资源能力模型	“任务类型-能力”哈希表	是	简单	数学计算

本文中提出CPS中资源能力模型的主要出发点是为资

源调度提供方便,因此提出了定量的易于理解和计算的模型,比其他能力模型更适合资源调度。几种能力模型对比如表1所列。

### 3.4 基于资源能力模型的调度

CPS资源执行任务时,首先,对任务的类型进行判别,找出具有处理该任务的资源集合,然后,将资源和任务之间进行匹配。CPS是典型的分布式并行实时系统,如果某时刻需要处理的任务集合为 $T = \{ t_1, t_2, \dots, t_n \}$ ,不同任务具有不同可靠性要求,因此,任务必须对资源的能力有最低要求,假设任务的能力需求向量为 $rcp = \{ cp_1, cp_2, \dots, cp_n \}$ 。

定义3(支持资源, supporting resource)<sup>[16]</sup> 能够满足指定任务所需能力要求的资源集合。当前状态下,任务 $t_i$ 的支持资源可以形式化描述为

$$SR(t_i) = \{ r | RC_r(t_i, TaskType) \geq cp_i \}$$

整个任务集的支持资源是每个任务支持资源的并集,即

$$SR(T) = SR(t_1) \cup SR(t_2) \cup \dots \cup SR(t_n)$$

获得任务集的支持资源集之后,可以根据能力将任务和资源建立一个匹配矩阵,假设任务集T共有m个支持资源,那么

$$CAP = \{ cap_{ij} \}_{m \times n}$$

式中, $cap_{ij}$ 表示资源i处理任务j的能力,如果资源i不属于任务j支持的资源,那么 $cap_{ij} = 0$ 。

建立好资源任务匹配的能力矩阵之后,可根据调度的目标进行合理调度。

## 4 案例分析

为说明问题,本节采用一个简单的火灾监控CPS说明资源能力模型在任务调度过程中的应用。

### 4.1 火灾监控CPS系统组成

火灾监控系统由感知子系统、警报子系统、灭火子系统、救助子系统构成(见图5)。各个子系统之间通过高速无线或有线网络连接,这些散布在被监控区域的资源都连接到计算中心,假设监控区域为一间长方形的房间。每个子系统都包含了多种资源,资源功能和状态各不相同,资源之间通过无线通信网络相互连接,在监视区域构成一个紧密融入物理世界的信息系统,从而形成一个简单的CPS。

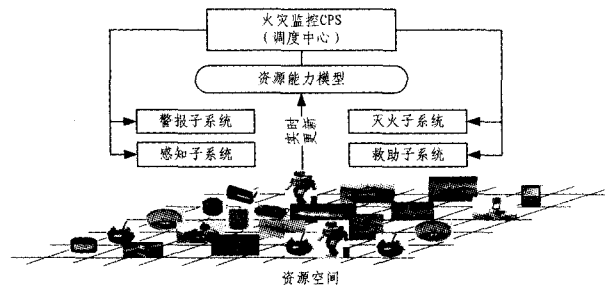


图5 火灾监控CPS系统构成

感知子系统包括4个传感器,资源标识分别为 $r_{sensor1}, r_{sensor2}, r_{sensor3}, r_{sensor4}$ ,这4个传感器能力和状态各不相同;警报子系统包括2个警报器,资源标识分别为 $r_{alarm1}$ 和 $r_{alarm2}$ ;灭火子系统包括2个灭火器,资源标识为 $r_{ext1}$ 和 $r_{ext2}$ 。救援子系统包括若干执行器(用于关闭门窗,隔离火源)用RI标识, $RI = \{ r_{actuator1}, r_{actuator2}, \dots, r_{actuatorm} \}$

## 4.2 资源能力模型

传感器节点一般都是靠电池提供能量,在火灾监控过程中,为了节电,正常情况下只开启其中一个传感器。在本案例中定期轮流开启4个传感器,执行轮询调度监控任务,并将获得数据发送给计算中心。如果出现异常,计算中心做出决策产生任务并根据资源的能力调度资源,执行任务。本案例中的任务类型包括环境感知、警报、灭火、隔离火源。用任务集  $T$  表示,则

$$T = \{t_s, t_a, t_e, t_u\}$$

式中,  $t_s, t_a, t_e$  和  $t_u$  分别表示环境感知、警报、灭火和隔离火源这4种任务。那么在每个时刻系统中的资源都维护一个能力哈希表,如表2所列。

表2 某时刻资源能力哈希表数据

资源标识	资源能力哈希表
$r_{\text{sensor}1}$	$\langle t_s, 0.98 \rangle$
$r_{\text{sensor}2}$	$\langle t_s, 0.05 \rangle$
$r_{\text{sensor}3}$	$\langle t_s, 1 \rangle$
$r_{\text{sensor}4}$	$\langle t_s, 0.97 \rangle$
$r_{\text{alarm}1}$	$\langle t_a, 1.0 \rangle$
$r_{\text{alarm}2}$	$\langle t_a, 0.93 \rangle$
$r_{\text{ext}1}$	$\langle t_e, 0.85 \rangle$
$r_{\text{ext}2}$	$\langle t_e, 0.69 \rangle$
RI	$\langle t_u, 0.83 \rangle \langle t_e, 0.5 \rangle \langle t_u, 1 \rangle$

表2中,传感器的能力哈希表中1,2和4的感知能力都比较高,而传感器2的能力非常弱,说明该传感器已经受到损坏,可能被烧毁。对于资源集合RI来说它是一些设备的集合,有可能包括机器人等,因此既包括了隔离火源任务的能力,又兼具一些灭火和警报能力。

另外,即使两个灭火器,由于其位置和灭火原理不同,在不同火势中灭火的功能也表现出不同的能力。如假设两个灭火器分别为喷水灭火器和干粉灭火器,资源集合中包含了机器人,那么在火势较小的情况下,机器人表现出的灭火能力高于前两者,这是因为无论喷水还是干粉都可能对房间的其他设备造成损害,而机器人只需要将小火盖灭即可;而当火势为中等时,喷水灭火器能力就高一些,此时机器人已经无法将火踩灭;当火为大火时,喷水已经不能灭火,只有干粉灭火器具有灭火的能力了。总之,资源的能力是由资源自身状态和环境状态双重决定的,建立资源能力模型能够为CPS资源调度提供重要依据。

**结束语** CPS中包含了丰富的资源,目前,CPS中资源管理技术尚未得到深入研究,CPS的资源管理具有重要研究意义和挑战。虽然,学术界对P2P和网格系统中的资源管理的研究已经比较成熟,但是,CPS中的资源不同于只具有纯计算资源的P2P或网格系统,CPS具有比网格和P2P更加复杂的环境。CPS是一种自知系统,当一种资源接入到系统时能够向系统中其它资源描述自己,告诉其它资源它具有什么样的能力,以便向其他资源提供完成特定的任务所需要的能力。

本文通过分析CPS资源的特征,借鉴人们处理日常事务中的思维方式,给出了资源能力的概念,提出了基于哈希表的“任务类型-能力”的资源能力描述方法和基于历史信息的资源能力计算公式,建立了资源能力组合模型。最后,通过火灾监控信息物理系统的资源能力建模案例说明了该资源能力建模方法。今后的研究重点将放在如何根据CPS资源的能力进行有效地资源管理,尤其是在任务调度时如何根据能力正确快速地进行资源匹配。

## 参考文献

- [1] 李建中,高宏,于博. 信息物理融合系统(CPS)的概念、特点、挑战和研究进展[R]. 北京:中国计算机学会,2010
- [2] Sha L, Rajkumar R, Lehoczyk J. Priority inheritance protocols: An approach to real-time synchronization[J]. IEEE Transaction on Computers, 1990, 39(9): 1175-1185
- [3] Lee E A. Cyber-physical systems-are computing Foundations adequate? [C] // Position Paper for NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap. Austin, TX: Cyber-Physical Systems Workshop, National Science Foundation, 2006
- [4] Lee E A. Cyber Physical Systems: Design Challenges[C] // Proceeding of 2008 11th ISORC. Orlando, FL: IEEE Computer Society press, 2008: 363-369
- [5] Krogh BH, Lee E A, Mok A, et al. Cyber-Physical Systems Executive Summary [EB/OL]. Washington D. C. : CPS Steering Group. <http://varma.ece.cmu.edu/Summit/CPS-Executive-Summary.pdf>, 2010-7-10
- [6] 王小乐,陈丽娜,黄宏斌,等. 一种面向服务的CPS体系框架[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(z2): 299-303
- [7] 陈丽娜,王小乐,黄宏斌,等. CPS体系结构设计[J]. 计算机科学, 2011, 38(5): 295-300
- [8] 钱徽,吴春明,朱森良. 基于可重构体系的多机器人共享模块剩余能力估计[J]. 电子学报, 2005, 33(11): 1969-1972
- [9] 张会,李思昆. 面向交互的主体能力描述和推理方法研究[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(8): 1439-1444
- [10] 贾东尧,唐任仲. 基于信息资源能力的集成链模型[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 835-839
- [11] 余强,张海盛,梁丽. 网络化制造环境下一种面向能力的制造资源模型[J]. 计算机工程, 2006, 32(15): 236-237
- [12] 冯珂. 基于能力模型的组件选择方法的研究与实现[D]. 南京:东南大学,2008
- [13] Padgham L, Lambrix P. Agent Capabilities: Extending BDI Theory[C] // Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence and Twelfth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence. AAAI Press, 2008: 259-265
- [14] Cassandra A, Chandrasekara D, Nodine M. Capability-based agent matchmaking[C] // Proceeding AGENTS '00 Proceedings of the Fourth International Conference on Autonomous Agents. New York, NY, USA ACM Press, 2000: 201-202
- [15] He Lin-li, Ioerger T. A Quantitative Model of Capabilities in Multi-Agent Systems[C] // International Conference on Artificial Intelligence (IC-AI 2003). Las Vegas, NV USA, 2003: 23-26
- [16] Sun Xue-dong, Xu Xiao-fei, Wang Gang, et al. Multi-objective optimization of process based on nsource capability[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2007, 14(4): 450-453
- [17] Cheng Shao-wu, Xu Xiao-fei, Wang Gang, et al. Activity-based resource capability modeling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2008, 15(3): 307-311
- [18] 胡春明,怀进鹏,沃天宇. 一种基于松弛时间的服务网格资源能力预留机制[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(1): 20-28
- [19] 赵青松,谭伟生,李孟军. 武器装备体系能力空间描述研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(1): 135-140
- [20] 董驰,王智学,曾广军. 基于能力规划CBP的能力本体的构建[J]. 南京工业职业技术学院学报, 2008, 8(2): 35-38