

CPS 资源服务模型和资源调度研究

徐久强 郭雪静 王进法 李鹤群 赵 海

(东北大学计算机科学与工程学院 沈阳 110169)

摘 要 信息物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS)融合了信息世界与物理世界,作为工业互联网与智能制造等重要领域的关键技术引起了越来越多的关注. 与 WEB 服务相比, CPS 系统中资源种类繁多、数量庞大、资源之间的异构性强,并且具有大量重复的物理实体,不同物理实体所处的物理环境不同且具有不同的执行性能(QoS),导致在对具体任务进行资源调用时存在多种调度方案,该文针对该问题展开研究. 首先,鉴于 CPS 系统结构复杂的特点,该文综合分析现有的 CPS 建模研究成果,采用面向服务的体系架构(Service-Oriented Architecture, SOA)的思想研究 CPS 的体系结构,在此基础上研究了 CPS 与 WEB 服务之间的异同点,确定了面向服务 CPS 资源服务模型研究的可行性,提出了 CPS 系统中资源、物理实体、虚拟物理实体、虚拟资源的划分. 同时,基于此划分提出了一种 OWL(Web Ontology Language)和 XML(Extensible Markup Language)混合式的 CPS 资源服务模型,该模型采用 OWL 分别对虚拟物理实体、物理实体提供的服务、CPS 上层任务进行描述,并采用 XML 对真实物理实体的 QoS 参数进行描述. 其次,在 CPS 资源服务模型的基础上,提出了基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度机制,该机制主要确定满足任务需要的多个候选资源集,该候选资源集组成资源的初始调度序列. 然后,该文根据资源的 QoS 要求建立了多目标线性规划的资源选择数学模型并对多目标遗传算法的关键步骤进行创新,提出了以基于多目标遗传算法的资源选择算法求解该模型的方法,所得最优解即为资源候选集中满足整体 QoS 最优的资源调度序列. 最后,以智能电网为例,验证了该文提出的基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度机制和基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择方法的有效性.

关键词 信息物理融合系统(CPS);面向服务的体系架构(SOA);资源服务模型;智能规划;资源调度;资源选择
中图法分类号 TP301 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2018.02330

Research on CPS Resource Service Model and Resource Scheduling

XU Jiu-Qiang GUO Xue-Jing WANG Jin-Fa LI He-Qun ZHAO Hai

(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169)

Abstract Cyber-Physical Systems(CPS) combines the cyber space and the physical world. As the key technology of some important areas like Industrial-Internet and Intelligent-Manufacturing, it has attracted more and more attentions. There are more varieties of resources among which strong heterogeneities are introduced in CPS system than in WEB system. Due to the existence of a large number of duplicate physical entities which have different physical environments and different Quality of Service(QoS) respectively, multiple selectable schemes exist in the scheduling of task resources and this thesis deals with this problem. Firstly, in term of the complex structures of CPS system, this thesis comprehensively analyzes the existing research results of CPS modeling and adopts the idea of Service-Oriented Architecture (SOA) to study the CPS architecture. On the basis, this thesis also studies the similarities and differences between CPS and WEB service, confirms the research feasibility of service-oriented CPS resource service model and proposes the

收稿日期:2017-10-15;在线出版日期:2018-04-24. 本课题得到国家科技支撑计划(2012BAH82F04)资助. 徐久强,男,1966年生,博士,教授,主要研究方向为信息物理融合系统、计算机体系结构、计算机网络、复杂网络、嵌入式系统. E-mail: xujq@mail.neu.edu.cn. 郭雪静,女,1991年生,硕士研究生,研究方向为信息物理融合系统、计算机体系结构. 王进法,男,1988年生,博士研究生,主要研究方向为复杂网络、异常检测. 李鹤群,男,1989年生,博士研究生,主要研究方向为计算机网络、SDN. 赵 海,男,1959年生,教授,博士生导师,主要研究领域为嵌入式系统、普式计算、复杂网络.

divisions of resources, physical entities, virtual physical entities and virtual resources in CPS. Resources are representations in cyber space of the service provided by entities in CPS. Physical entities correspond to the concrete resources in CPS. Multiple physical entities of the same type which have the same or similar functions, the different physical environment information and different QoS parameters can be described by virtual physical entities in order to reduce the number of physical entities in the model for faster search speed. Virtual resources are equivalent to virtual physical entities and a virtual resource corresponds to one resource or more in cyber space. Meanwhile, based on the divisions of resources, physical entities, virtual physical entities and virtual resources in CPS, a hybrid CPS resource service model of OWL and XML was proposed. This model uses OWL to describe the services provided by virtual physical entities, physical entities, and CPS upper-layer tasks respectively. And it uses XML to describe the QoS parameters of real physical entities. The model description method proposed by this thesis combines descriptions of the cyber space and the physical world, links up the both, connects the discrete part in cyber space and the continuous part in physical space, reflecting the logic of the cyber space and the reality of the physical world. Secondly, on the basis of CPS resource service model, a CPS task-virtual resource scheduling mechanism based on intelligent planning was proposed. This mechanism identifies multiple candidate resource sets that meet the needs of the task which comprise the initial scheduling sequence of resources. Thirdly, according to the QoS requirements, this thesis builds the resource selection mathematic model based on multi-objective linear programming and makes improvements on the critical steps of multi-objective genetic algorithm. And a method to solve the model was proposed, which is based on multi-objective genetic algorithm for resource selection algorithm. The optimal solution obtained through this method is the resource scheduling sequence that meets the overall QoS optimization in candidate resource sets. Finally, take smart grid for example, the effectiveness of CPS task-virtual resource scheduling mechanism based on intelligent planning and CPS resource selection based on multi-objective genetic algorithm was verified.

Keywords Cyber-Physical Systems (CPS); Service-Oriented Architecture (SOA); resource service model; intelligent planning; resource scheduling; resource selection

1 引 言

计算机与互联网正在改变人们的信息管理方式和生活方式,在人类社会中逐渐形成了一个虚拟的信息世界^[1].传统的计算系统主要关注于信息世界中信息的表示、存储和理解,而物理系统主要关注事物的物理属性和空间属性,这导致了信息世界(Cyber Space)和物理世界(Physical World)的分离^[2],这种分离导致集合信息世界与物理世界的复杂系统对物理环境信息采集困难、资源浪费严重等问题.为了解决上述问题,伴随着物联网(Internet of Things),信息物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS)进入人们的视野.

CPS 技术主要目的是构建具有一定智能性的

复杂系统. CPS 技术是在对物理世界信息进行感知的基础上,通过深度融合计算技术、通信技术和控制技术,实现信息世界和物理世界的交互和融合,完成对物理世界资源的优化调度和配置. CPS 的人、机、物融合能力,将使人类能够在能源、工业控制等领域实现无所不在的信息监视和精确控制,真正实现人类对复杂系统的全面管理.

CPS 具有广阔的应用领域,包括国防^[3]、智能电网^[4]、智能交通^[5-6]、智能医疗^[7]、航空航天^[8]等.由于 CPS 应用于这些安全攸关的领域,使目前对现有智能系统的性能需求不再局限于各种功能的扩充与集成,而是对系统资源的优化配置与合理的调度、实时准确可靠节能的任务执行等提出了更高的要求.但是 CPS 中资源种类繁多、数量庞大、资源之间的异构性强,并且具有大量重复的物理实体,不同物

理实体所处的物理环境不同且具有不同的执行性能(QoS),因此在实现针对具体任务的资源调用时存在多种调度方案。CPS 要解决复杂的资源调度问题,面临着巨大的挑战,资源调度是影响 CPS 性能的关键因素之一^[9-10]。

为了更好地解决复杂的资源调度问题,CPS 研究的一项重要内容是对 CPS 进行建模,抽象的模型是管理日益复杂的系统设计的重要工具^[11-12]。模型是对系统的刻画,并反映系统的特性,通过模型可以更好地理解、刻画、设计和实现满足特定需求的 CPS 系统。

本文重点研究 CPS 资源服务模型的构建和资源调度机制的建立:提出一种面向虚拟资源基于网络本体语言(Web Ontology Language,OWL)和可扩展标记语言(Extensible Markup Language,XML)的物理实体混合式 CPS 资源服务模型,以提升对 CPS 资源服务描述的能力及准确性;在该资源服务模型基础上,为能从多种资源调度方案中寻求最优解,对基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度机制及基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择方法的求解进行了相关研究。

本文第 2 节通过分析现有的 CPS 建模和调度方法,提出本文研究的出发点、思路和本文的主要工作;第 3 节详细介绍基于 OWL 和 XML 混合的 CPS 资源服务模型的构建方法;第 4 节详细介绍基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度机制和基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择的方法;第 5 节通过结合具体实例验证本文研究的有效性;最后第 6 节对全文工作进行总结。

2 相关研究及本文主要工作

CPS 已经引起国内外学术界和工业界的极大关注,虽然 CPS 系统建模的研究还处于初始阶段,但已有不少国内外学者进行了相关研究并取得了研究成果。文献[13]提出基于着色时空 Petri 网(CSTPN)的形式化建模方法,并对交通信息物理系统(T-CPS)进行设计和建模。文献[14]提出了一种基于数据驱动的 CPS 建模方法,从离散数据出发建立系统的连续模型,通过反馈控制实现了物理事件与计算系统之间的深度融合。该方法解决了传统的建模方法一般需事先估计在复杂的 CPS 环境中难以预测的系统要经历的状态及状态转换时间的问题,不解决该问题就不能从真正意义上实现计算系统与物理事件

之间交互。文献[15]针对 CPS 的特点及其对系统建模技术的挑战,基于多异构实体的建模框架,提出了一种 CPS 系统结构与动态行为的协同建模方法,该方法是对 CPS 系统动态行为建模方面的改进。Lee 等人^[3]通过深入地探讨 CPS 的概念,提出必须对 CPS 中的物理资源进行抽象,使其能够正确地在信息空间中按照机器能够理解的方式进行表示。文献[16]提出了一种以资源为中心的 CPS 模型,该模型考虑了资源所在物理空间信息、资源的类型和定义、资源的效用、资源的约束和资源与服务的映射关系,但该模型还没有对其结合具体的应用场景进行实现,也没有对服务层进行建模。Karsai 等人^[17]分析了 CPS 系统的特点和面临的诸多挑战,着重解决构建 CPS 系统时由于构建过程的高度异构引起的不可预见交互的集成问题,提出了一个基于模型集成的开发方法。文献[18-19]提出了面向服务架构 CPS 中资源的层次划分,分别是物理层、逻辑层和过程层,并给出了以资源为中心的面向服务 CPS 架构的资源的确切语义描述。Huang 和 Yen 等人^[20-23]采用本体描述语言重构并扩展了传统 SOA 模型,提出了基于本体的上下文敏感的 CPS 服务模型,并研究了对服务进行组合的解决办法。由于越来越多的物理实体被整合到信息世界,动态地发现和整合信息实体和物理实体对提高 CPS 性能非常重要,Zhu 等^[24]通过扩展 OWL-S 本体语言和其他服务模型,构建 PT-SOA 模型解决了这个问题。文献[25]提出了一种新的定义物理实体的服务规范和 CPS 系统状态的建模方法,提高了 CPS 系统的服务组合能力。文献[26]以“物端”为中心的物联网系统为研究对象,对面向服务的物联网软件体系参考模型进行了比较分析,指出不同的软件构件类型、不同设计原则及其所具有的结构属性适用于不同规模和不同应用需求的物联网应用系统的构建,同时指出 CPS 建模研究的主要热点在于如何将信息空间的离散部分与物理空间的连续部分进行统一描述。

资源调度问题是在各种条件约束下的资源的分配、优化组合及合理使用问题,它属于 NP 难^[27](Non-deterministic Polynomial, NP)问题。现有的资源调度方法主要分为数学规划和启发式方法两大类,比较常用的算法有遗传算法、退火算法等。文献[28]提出一种多处理器平台上基于数据质量的实时更新事务全局调度算法,算法通过合理地预分配各事务执行所需处理器资源以及动态控制更新实例的接纳和执行,使系统数据质量最大化,多处理器平台上的实

时调度算法除全局方法外,还包括基于任务分派的方法与混合方法,如何将这两类方法进行数据质量的维护有待于进一步的研究.文献[9]通过实验和理论估计证明了针对资源调度的贪婪序贯选择算法的有效性,但是在进行传感器选择过程中仅从单个传感器的角度考虑,并没有综合传感器观测模型之间的相关关系.文献[29]提出了时间戳不确定的复杂事件调度算法,通过对 CPS 中的读写事件进行合理调度,实现将正确的时间执行顺序反馈给 CPS 系统.文献[30]从用户间干扰抑制、敏感数据隐私保护、资源受限实时通信、混合关键实时任务调度和概率性响应时间分析多个角度对医疗 CPS 的高效数据传输和调度进行了研究,并且对提出的各种方法进行了性能评估,不足之处是文中缺乏在实际平台中对各种方法进行集成实现,还未通过构建系统级应用实例对多种方法集成的整体效应进行评估.Koubaa 等人^[31]给出了一种保障时隙的分配和共享算法,该算法可以保证数据传输的实时性和可靠性,不足之处是文中只考虑了低速率数据流的情况.Xia 等人^[32-33]提出了一种基于数据优先级和基于速率优先级的动态优先级的分配策略,从而保证数据传输实时性和可靠性的条件下优化网络带宽利用率.

通过对各种建模、调度方法的深入研究和分析可知,基于服务的建模方法有良好的灵活性和可扩展性.目前很多研究从不同角度完成了 CPS 模型的设计,但整体来说对 CPS 系统提供的服务缺乏完整、准确清晰的描述,研究主要是针对某一具体问题.CPS 系统中包括很多相同或相似的物理实体,如果对物理实体提供的服务及服务能力描述的不准确,则难以保证服务的可用性.本文提出了一种 CPS 资源服务模型,基于该模型提出了基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度机制以及基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择方法,在提升了 CPS 资源服务描述的能力及准确性的同时,能够从多种资源调度方案中寻求最优解.

本文主要贡献如下:

(1) 提出了资源、物理实体、虚拟物理实体、虚拟资源的划分:资源可以认为是 CPS 中实体能提供的服务在信息世界的表述;物理实体对应 CPS 中的具体资源;对于具有相同或相似功能、不同的物理环境信息、不同 QoS 参数的多个同类物理实体,使用虚拟物理实体来描述,以减少模型中物理实体的规模以加快查找速度;虚拟资源等同于虚拟物理实体,在信息世界中一个虚拟资源对应一个或多个资源.

(2) 基于资源、物理实体、虚拟物理实体、虚拟资源的划分建立了 OWL 和 XML 混合式的 CPS 资源服务模型,该模型采用 OWL 对虚拟物理实体、物理实体提供的服务和 CPS 上层任务进行描述,采用 XML 对真实物理实体的 QoS 参数进行描述.本文模型的描述方法兼顾了信息世界和物理世界的描述,较好地沟通了信息世界和物理世界,连接了信息空间的离散部分与物理空间的连续部分,既体现了信息世界的逻辑性,同时也考虑了物理世界的真实性.本文提出的模型描述方法是对当前 CPS 系统模型描述的热点:“将信息空间的离散部分与物理空间的连续部分进行统一描述”的一种有效的探索、尝试和解决方法.

(3) 提出基于智能规划的 CPS 虚拟资源调度机制,该机制主要确定满足任务需要的多个候选资源集,由多个候选资源集组成资源的初始调度序列.

(4) 根据资源的 QoS 要求建立了多目标线性规划的资源选择数学模型,提出了以基于多目标遗传算法的资源选择算法求解该模型的方法,所得最优解即为资源候选集中满足整体 QoS 最优调度序列.与传统的和现有研究中的多目标遗传算法不同,本文对多目标遗传算法关键步骤中的相关内容进行了改进.

本文研究提出了一个面向服务的 CPS 资源描述及调度方法,可以提供从抽象服务到资源调度的整体解决方案.

3 CPS 资源服务模型

3.1 面向服务的 CPS 体系结构

面向服务的体系架构(Service-Oriented Architecture, SOA)是在分布式的环境中将各种功能以服务的形式提供给最终用户或者其它服务,比如 WEB 服务,其思想是将各种软件资源封装成服务并部署到互联网上,从而实现异构系统的组合复用和互操作.本文借鉴 WEB 服务的思想来研究面向服务 CPS 体系结构问题.

CPS 中存在很多资源(对应不同物理实体或实体集合),在借鉴 SOA 思想构建的面向服务的 CPS 体系结构中将 CPS 分为四层^[34],从下到上依次为节点层、网络层、资源层和服务层:

(1) 节点层:由物理世界中的真实物理实体(具体各传感器、执行器等)构成;

(2) 网络层:为 CPS 资源共享和数据传输提供

支持;

(3)资源层:实现对位于 CPS 中节点层的物理实体的物理属性的抽象描述;

(4)服务层:是面向服务的 CPS 体系结构的最直接体现.

无论采用何种架构或思想,CPS 中的任务或 CPS 提供的服务最终都需要由各种 CPS 资源(即 CPS 中物理实体或实体集合)来完成,只有合理地建立面向服务的 CPS 资源模型才能够有效地利用现代技术组织和管理 CPS 系统.

3.2 基于 OWL 和 XML 混合的 CPS 资源服务模型构建

3.2.1 CPS 资源服务模型

OWL 是 W3C 开发的一种网络本体语言,用于对本体^[35]进行语义描述.本体主要是对所研究的问题中的各种对象进行抽象描述,主要描述对象的特征和存在于它们之间的关系.在计算机中,本体被称为领域模型(Domain Model)或概念模型(Conceptual Model).

语义 WEB 服务 OWL-S 本体描述语言能构建以服务为中心的(service-centric)的软件服务模型,而 CPS 的服务最终要由大量的物理实体完成,CPS 能提供服务时不仅要考虑服务的逻辑属性,同时也受限于提供服务的物理实体的物理世界的属性,无法只用抽象的服务来表示,因此 OWL-S 不能对 CPS 进行资源服务建模.本文研究基于 OWL 和 XML 混合的 CPS 资源服务建模.由于 CPS 具有大规模性及应用广泛性,因此该模型不可能涉及全部的应用细节,而是只考虑大部分应用的共同点.以下为面向服务 CPS 资源服务模型的逻辑模型.

本文使用 s 、 e 、 c 、 t 、 q 分别来表示物理实体提供的服务、物理实体、物理实体状态(包括前提、效果)、CPS 上层任务和物理实体服务执行性能(QoS).一个物理实体 e_i 供一个服务集合,可以表示如下:

$$e_i \xrightarrow{\text{provides}} \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \tag{1}$$

对于每一个服务 s_i ,它都有相应的服务提供者、服务消费者、服务执行的前提条件和服务所产生的效果,分别描述如下:

$$s_i \xrightarrow{\text{hasProvider}} \{e_1, e_2, \dots, e_k\} \tag{2}$$

$$s_i \xrightarrow{\text{hasPrecondition}} \{c_1, c_2, \dots, c_m\} \tag{3}$$

$$s_i \xrightarrow{\text{hasEffect}} \{c_1, c_2, \dots, c_m\} \tag{4}$$

在 CPS 系统中,服务是由物理实体提供的,每

个服务在执行之前需要物理实体具有相应的上下文执行环境,同时服务在执行之后会对物理实体的上下文环境造成影响,具体描述如下所示:

$$s_i \xrightarrow{\text{hasContextPrecondition}} \{c_{cp1}, c_{cp2}, \dots, c_{cpm}\} \tag{5}$$

$$s_i \xrightarrow{\text{hasContextEffect}} \{c_{ce1}, c_{ce2}, \dots, c_{cem}\} \tag{6}$$

对于 CPS 系统中的上层任务 t_i ,描述如下所示:

$$t_i \xrightarrow{\text{hasParticipant}} \{e_1, e_2, \dots, e_f\} \tag{7}$$

$$t_i \xrightarrow{\text{hasGoal}} \{c_1, c_2, \dots, c_x\} \tag{8}$$

$\{e_1, e_2, \dots, e_f\}$ 表示完成上层任务 t_i 时,系统需要调用的物理世界中的相关物理实体, $\{c_1, c_2, \dots, c_x\}$ 使用三元组进行描述,每一个 c_i 由主谓宾三个元素构成,即:

$$c_i \xrightarrow{\text{includes}} \{sub(c_i), pre(c_i), obj(c_i)\} \tag{9}$$

CPS 系统中的每个物理实体都提供一个或多个可调用的服务,每个服务在执行特定的任务时都具有特定的服务性能 q ,因此每个物理实体具有多个服务性能 q .具体描述如下所示:

$$e_i^{sj} \xrightarrow{\text{hasQoS}} \{q_i^{sj}\} \tag{10}$$

$$e_i \xrightarrow{\text{hasQoS}} \{q_i^{s1}, q_i^{s2}, \dots, q_i^{sn}\} \tag{11}$$

好的描述、管理和调度 CPS 中的物理实体,以期能以最优的资源分配和调度来执行 CPS 上层任务,本文提出了基于 OWL 和 XML 混合的 CPS 资源服务模型.该模型采用 OWL 对 CPS 中的物理实体的物理属性、物理实体提供的服务和 CPS 上层任务进行描述,并同时采用 XML 对物理实体的 QoS 参数进行描述.该模型主要包括四个部分,分别是:基于 OWL 的 CPS 虚拟物理实体设计、基于 XML 的 CPS 物理实体 QoS 参数设计、基于 OWL 的服务设计和基于 OWL 的 CPS 上层任务设计.该模型的结构层次如图 1 所示.

基于 OWL 的 CPS 上层任务	服务层
基于 OWL 的 CPS 服务	
基于 XML 的 CPS 物理实体 QoS 参数	资源层
基于 OWL 的 CPS 虚拟物理实体	

图 1 CPS 资源服务模型层次结构

3.2.2 基于 OWL 的 CPS 虚拟物理实体设计

CPS 中的服务是由物理实体提供的,某个物理实体在某一时间只能为某一个任务提供服务.根据应用的场景,CPS 中可以存在多个具有相同功能的物理实体,并且在 CPS 应用中,上层任务在调用物

理实体提供的服务时需要确定提供相应服务的物理实体当时的物理状态. CPS 中的服务能否成功被调度不仅与是否有实体提供相关的服务有关, 还与提供服务的物理实体的物理状态和参数等相关.

在进行设计之前, 需明确以下概念.

定义 1. 物理实体(physical entity). 指物理世界中的传感器、执行器等, 如发电机、配电设备、机器人、车辆、嵌入式计算机等, 是存在于现实世界中具有特定功能、能够完成特定任务的物理设施.

定义 2. 资源(resource). 资源的含义等同于物理实体. 在信息世界中习惯将各种物理实体称为资源.

定义 3. 虚拟物理实体(virtual physical entity).

是物理实体在信息世界中的表示形式, 只存在于信息世界中, 是对物理实体的抽象和概括. 在 CPS 中存在大量的物理实体, 而且可能存在完全相同或相似的物理实体, 因此上层任务在调度资源时, 存在多种资源调度方案. 对于功能、物理环境信息、QoS 等相同或相似的物理实体, 使用虚拟物理实体代替这些真实体的数量以加快资源查询的速度. 一个虚拟物理实体可对应一个或多个物理实体.

定义 4. 虚拟资源(virtual resource). 等同于虚拟物理实体. 在信息世界中一个虚拟资源对应一个或多个资源.

基于 OWL 的 CPS 虚拟物理实体的设计是构建 CPS 资源服务模型的第 1 层. 它的逻辑视图如图 2 所示.

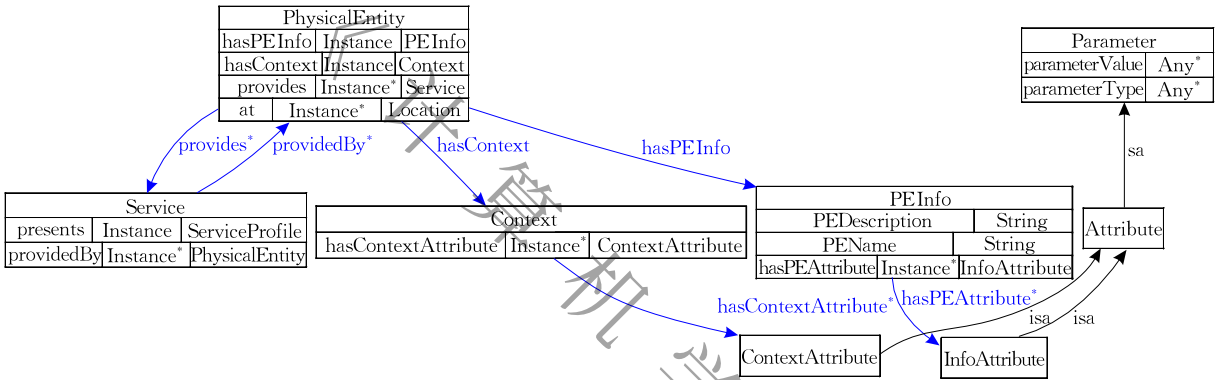


图 2 基于 OWL 的 CPS 虚拟物理实体设计的逻辑视图

由图 2 可知, 基于 OWL 的 CPS 虚拟物理实体设计主要包括 5 个类, 分别是: PhysicalEntity 类、Service 类、Context 类、PEInfo 类和 Parameter 类.

PhysicalEntity 类表示的是虚拟物理实体类. 在 CPS 资源服务模型中, 使用虚拟物理实体代替多个真实的物理实体.

Service 类表示物理实体提供的服务. 由于 CPS 资源服务模型中对相同的物理实体只用一个虚拟物理实体类来描述, 因此对于 CPS 中相同物理实体提供的多个相同的服务只需要一个 Service 类来描述.

Context 类表示物理实体所处的上下文环境. 由于 CPS 资源服务模型对相同的物理实体只用一个虚拟物理实体类来描述, 因此相同物理实体的上下文环境只需要一个 Context 类来描述.

PeInfo 类表示物理实体的信息. 由于 CPS 资源服务模型中对相同的物理实体只用一个虚拟物理实体类来描述, 因此对于 CPS 中相同的物理实体只需要一个 PEInfo 类来描述.

Parameter 类表示物理实体空间地理位置参数.

OWL 本体描述语言不仅能够定义各个实体的类型, 还能描述各个实体类型之间的关系. OWL 类型之间的关系有两种, 分别是对象属性 (Object-Property) 和数据类型属性 (DatatypeProperty).

由图 2 可知, PhysicalEntity 类通过 hasPEInfo、provides 和这三个对象属性分别与 PEInfo 类、Service 类和 Context 类建立关系.

3. 2. 3 基于 XML 的 CPS 物理实体 QoS 设计

CPS 中有大量的相同或相似的物理实体, 虚拟物理实体主要是代替 CPS 中重复的物理实体, 且在模型中只存在虚拟物理实体. 基于 OWL 的 CPS 虚拟物理实体设计只关注物理实体的服务、前提条件和上下文环境. 一个虚拟物理实体对应着一组功能、物理环境信息相同或相似的物理实体. 但是, 物理实体除了能够提供服务以外, 不同的物理实体在完成任务的服务性能上是不同的. 基于 XML 的 CPS 物理实体 QoS 参数设计主要是描述各物理实体的 QoS. 每个物理实体具有相应的 QoS 参数, QoS 参数是一组反应物理实体服务特性的数值, 本文使用可

别表示服务的前提条件、服务的上下文环境前提条件、服务的影响、服务的上下文环境影响, Parameter-List 指服务参数。

PEProfile 类是 ServiceProfile 类的子类, 每个 Service 类有且仅有一个 PEProfile 实例。

LogicLanguage 类表示语言类, 这里的描述语言是 PDDL。

以上类之间通过对象属性进行关联:

(1) PhysicalEntity 类通过对象属性 provides 与 Service 类进行关联, 通过该属性虚拟物理实体可以找到它所提供的服务。

(2) Service 类通过对象属性 providedBy 与 PhysicalEntity 类进行关联, 通过该属性可以找到对应的虚拟物理实体。

(3) Service 类通过对象属性 presents 与 Service-Profile 类进行关联, 通过该属性可以找到服务的描述信息。

(4) ServiceProfile 类通过对象属性 presentedBy 与 Service 类进行关联, 通过该属性可以由服务信息找到相应的服务。

(5) PEProfile 类通过对象属性 hasPrecondition 与 Precondition 类进行关联, 通过该属性可以找到服务的前提条件。

(6) PEProfile 类通过对象属性 hasEffect 与 Effect 类进行关联, 通过该属性可以得到服务执行后的效果。

(7) PEProfile 类通过对象属性 hasContext-Precondition 与 ContextPrecondition 类进行关联, 通过该属性可以找到服务的上下文环境前提条件。

(8) PEProfile 类通过对象属性 hasContext-Effect 与 ContextEffect 类进行关联, 通过该属性可以得到服务执行后的上下文环境效果。

(9) PEProfile 类通过对象属性 hasParameters 与 ParameterList 类进行关联, 通过该属性可以得到服务执行时需要的参数。

(10) Expression 类通过对象属性 expression-Language 与 LogicLanguage 类进行关联, 通过该属性可以得到表达式的逻辑描述语言。

3.2.5 基于 OWL 的 CPS 上层任务设计

在 WEB 服务中, 服务模型不包括对任务的描述框架, 而在面向服务 CPS 体系结构中包含属于服务层的任务描述, 服务层由上层任务来驱动, 因此 CPS 资源服务模型需要提供对应上层任务的描述框架。基于 OWL 的 CPS 上层任务设计主要是对

CPS 的上层任务描述框架进行设计。

基于 OWL 的 CPS 上层任务设计位于 CPS 资源服务模型的第 3 层, 逻辑视图如图 4 所示, 主要包括 Expression 和 Task 两个类, Task 类表示 CPS 上层任务, Task 类的两个子类 Goal 和 Context-Goal 分别表示任务的最终目标和上下文目标, 使用 PDDL 描述语言描述, Task 类分别通过属性 hasGoal 和 hasContextGoal 与 Goal 类和 ContextGoal 类建立联系, Expression 类的含义与基于 OWL 的 CPS 服务设计中的 Expression 类相同。

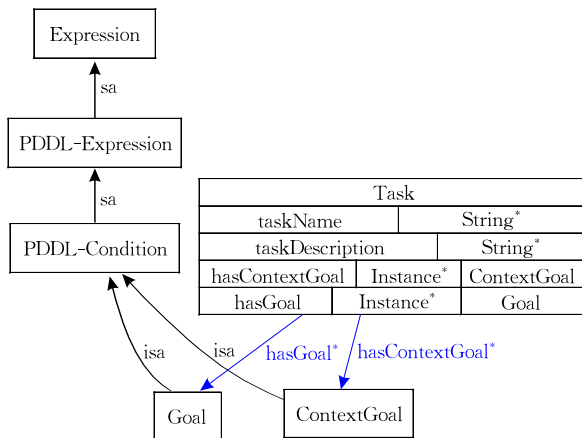


图 4 基于 OWL 的 CPS 上层任务设计逻辑视图

4 资源调度机制

4.1 基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度机制

智能规划 (Automated Planning) 是利用人工智能技术和自动化技术求出问题的规划及解决问题的步骤, 根据经典规划算法中图规划算法原理可以判断 CPS 系统中上层任务资源调度问题是一个智能规划问题, 所以基于智能规划实现 CPS 任务-虚拟资源调度在理论上是可行的。

在智能规划中, 规划问题需要使用规划语言 PDDL 进行描述, 由于本体描述语言 OWL 和智能规划描述语言 PDDL 具有相似性, 所以能够将 CPS 资源服务模型中采用 OWL 描述的部分转换成 PDDL 描述, 这样就能在 CPS 资源服务模型的基础上, 将上层任务对虚拟资源的调度问题转换成智能规划问题, 将转换后生的 PDDL 域文件和 PDDL 问题文件输入到规划器中就能够得到 CPS 任务-虚拟资源调度问题的虚拟资源的规划调度方案, 然后通过查询 CPS 资源服务模型中的基于 XML 的 CPS 物理实体 QoS 参数设计部分, 可以得到满足任务需求的多个候选资源集, 这是 CPS 资源调度的第 1 部分——基于

智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度完成的工作。

4.2 基于 QoS 的 CPS 资源选择数学模型

CPS 资源选择是指根据任务的执行流程从每个资源候选集的多个资源中选择一个资源来执行子任务,且只选择一个。这与整数规划相似,所以采用整数规划构建基于 QoS 的 CPS 资源选择数学模型。整数规划由目标函数和约束条件两个部分构成,所以需要首先构建它的目标函数,具体表示如下:

$$\begin{cases} \text{Min}(f_1), & f_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} t_{ij} \\ \text{Max}(f_2), & f_2 = \prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} r_{ij} \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, & i \in \{1, 2, \dots, n\} \end{cases} \quad (14)$$

其中, x_{ij} ($x_{ij} \in \{0, 1\}$) 表示第 i 个子任务对应的候选资源集中的第 j 个资源是否被选中,取值为 1 或 0;因为本文研究的 CPS 任务的执行流程只有顺序结构,因此系统的总体响应时间是从各个候选资源集中所选择的资源的响应时间的累加;系统总体的可靠性是从各个候选资源集中所选择的资源的可靠性的级乘,两者具体的定义形式如式(14)中的 f_1 和 f_2 所示: f_1 为系统总体响应时间目标函数, t_{ij} 表示资源 x_{ij} 的响应时间; f_2 为系统总体可靠性目标函数, r_{ij} 表示资源 x_{ij} 的可靠性。可以将 $\text{Max}(f_2)$ 表示为 $\text{Min}(-f_2)$, 这样, 式(14)可转变为

$$\begin{cases} \text{Min}[f_1, -f_2] \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i \in \{1, 2, \dots, n\}, x_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)是一个多目标整数规划模型,多目标规划问题一般具有多个解,这些解构成的集合被称作 Pareto 最优集。

4.3 基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择策略

基于 QoS 的 CPS 资源选择数学模型是一个多目标整数规划模型,通过求解该模型,可以得到最佳的 CPS 资源调度方案。求解多目标整数规划问题的算法有穷举法、分支界定法和智能算法。本文采用遗传算法求解该模型,提出了基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择算法。

基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择算法建立在遗传算法基础上,求解过程与遗传算法相似,不同点是基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择算法具有多个目标函数,简单遗传算法只有一个目标函数,基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择的适应度函数比简单遗传算法复杂。

基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择算法分为以下几个部分:

(1) 编码

编码是基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择算法的第 1 步,主要是根据问题的解空间确定算法的染色体的长度。本文的基因编码采用多进制数表示,每个候选资源集有多少个资源,相应的编码的每一位就用多少进制来表示。编码后的染色体的每一位编码位置的编码值是对应候选资源集中的资源编号,表示选中该资源。

(2) 适应度函数

适应度函数选择是基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择算法的第 2 步,适应度函数是对所选的染色体进行评价的函数。本文采用式(14)中 $\text{Min}(f_1)$ 和 $\text{Max}(f_2)$ 这两个目标函数作为本文的适应度函数。

(3) 选择

选择是基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择的第 3 步,该算法的 CPS 资源选择具有两个目标函数,且这两个目标函数均为适应度函数,本文采用并列选择法求得后代适应种群。其主要操作是在求适应度值时首先将每一代的基因种群平均分成两个部分,这样将前一部分用于 f_1 并求出它的适应度值的集合,后一部分应用于 f_2 并求出它的适应度值的集合;然后再分别在这两个集合中采用比例选择算子选择适应度高的个体组成两个后代适应种群;最后将这两个后代适应种群合并成一个集合,该集合即是完整的后代种群。

(4) 交叉和变异

交叉和变异是基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择的第 4 步。交叉和变异是通过模拟自然界进化思想对后代种群进行操作产生更新的后代种群。在对后代种群进行交叉和变异操作之前,需要确定交叉概率和变异概率。在实际操作过程中,交叉概率和变异概率一般是根据经验直接进行取值,它们分别取值为 0.245~1.0 和 0.001~0.1 之间。交叉概率和变异概率对 CPS 资源选择算法的影响很大,选取合适的交叉概率和变异概率能够有效防止算法陷入局部最优,并能够加快种群收敛速度。

在选择部分可以得到每一代的后代种群,交叉和变异是通过模拟自然界进化思想对后代种群进行操作产生更新的后代种群。在对后代种群进行交叉和变异操作之前,需要确定交叉概率和变异概率。由自适应遗传算法原理可知,交叉概率和变异概率由式(16)和式(17)分别确定。

$$P_m = \begin{cases} k_3 - (k_3 - k_4)(f - f_{avg}) / (f_{max} - f_{avg}), & f \geq f_{avg} \\ k_3, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (16)$$

$$P_c = \begin{cases} k_1 - (k_1 - k_2)(f_1 - f_{avg}) / (f_{max} - f_{avg}), & f_1 \geq f_{avg} \\ k_1, & f_1 < f_{avg} \end{cases} \quad (17)$$

其中, P_m 表示变异概率; P_c 表示交叉概率; f_{max} 表示最大适应度值; f_{avg} 表示平均适应度值; f_1 表示进行交叉操作的两个个体的较大的适应度值; f 表示将进行变异操作的个体的适应度值; k_1 、 k_2 、 k_3 及 k_4 均为常数。

通过基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择求解, 所得解即为初始资源调度方案中满足整体 QoS 最优的资源调度方案。

5 实验与分析

智能电网集传感、通信、计算、决策和控制于一体, 是在传统电网基础上构建起来的综合数物复合系统。智能电网通过获取电网各层节点资源和设备的运行状态, 进行分层次的控制管理和电力调配, 实现能量流、信息流和业务流的高度一体化, 提高电力系统运行稳定性, 从而实现最大限度地提高设备的利用率, 提高安全可靠, 提高用户供电质量, 节能减排, 提高可再生资源的利用效率的目标。智能电网基于能量流的实时调控, 能够方便分布式新能源发电、分布式储能系统的接入和使用。智能电网的最终目标是降低能源消耗成本, 改善居民用电质量, 降低电力运行成本, 从而促进国民经济发展^[36]。智能电网是一个典型的信息物理融合系统, 随着分布式能源战略的逐步实施, 分布式供电的设计及集成方法在智能电网中得到了越来越广泛的应用。

CPS 系统具有鲜明的领域应用特点, 结合具体领域的特点及其实际应用场景, 可以深化信息物理融合系统建模与分析研究^[15]。本文通过一个分布式供电 CPS 系统来验证研究工作的有效性。该系统能够通过布在配电网中布置传感器与致动器, 以实现对电能的自动分配, 智能的组织供电任务。

本文通过 Protégé^[37] 和 PDDLGraphPlan 工具对 CPS 资源服务模型中各层进行相关设计并采用 Sheffield 遗传算法工具箱进行编程仿真, 主要验证本文提出的基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度和基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择的有效性。

5.1 基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度仿真

分布式供电系统主要由发电单元、储能装置(蓄电池、超级电容、飞轮等)以及各种负荷单元等三部分构成。在分布式供电系统中, 由发电单元及储能单元为就地负荷单元提供电能, 由于电能在配电网中传输时会产生一定消耗, 所以当给就地负荷单元传输电能时应该选择一条最优的传输路径。

首先, 本文对分布式供电系统中的各个物理实体采用本文提出的 CPS 资源服务模型进行建模。主要是对分布式供电系统中的发电单元、储能装置和负荷单元采用 OWL 进行设计。在分布式供电系统的 CPS 资源服务模型中, 采用虚拟发电单元、虚拟储能装置和虚拟负荷单元代替分布式供电系统中的发电单元、储能装置和负荷单元。对于分布式供电系统中的每个具体的物理实体, 本文采用 XML 描述分布式供电系统中的物理实体的 QoS 参数, 并用 XML 文件保存结果。然后采用 OWL 对分布式供电系统中的各个物理实体提供的服务进行设计。最后, 采用 OWL 对由 PDDL 描述语言所描述的分布式供电系统的任务进行设计。采用 PDDL 所描述的任务如表 2 所示。

表 2 采用 PDDL 所描述的任务

属性	属性值
taskName	task
taskDescription	发电单元向储能单元输送电能, 然后通过配电网将电能分配到位置 loc_h 处的负荷单元。
Goal	
ContextGoal	(at Octavia loc_e) (at TopKick loc_h)

图 5 是满足任务需求的分布式供电系统中的虚拟物理实体的执行序列。任务的执行过程是首先将分布式供电系统的 CPS 资源服务模型转换成使用 PDDL 语言描述的形式。经过该转换, 分布式供电系统中的任务转换成 PDDL 语言描述的智能规划问题。然后, 将智能规划问题的 PDDL 问题文件和 PDDL 域文件输入到规划器 CRIKEY 中, 经规划器处理得到如图 5 所示执行序列, 它表示为了完成任务, 分布式供电系统的 CPS 资源服务模型中的各个虚拟资源需要完成的动作, 即资源调度的动作序列。

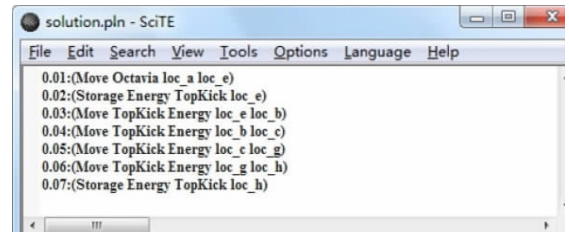


图 5 规划器生成的资源的动作序列

5.2 基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择仿真

表 3 中的数据是基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择仿真的用例数据. 表 3 中行表示完成特定子任务的候选资源集.

表 3 QoS 参数中的响应时间参数和可靠性参数的用例数据

候选资源集 编号	候选资源集中的各个物理实体的 QoS 参数 (响应时间/ms,可靠性)
候选资源集 1	(3,0.56)(1,0.54)(4,0.88)(2,0.81)(1,0.57) (6,0.94)(5,0.64)(8,0.73)(1,0.55)
候选资源集 2	(4,0.7)(4,0.7)(8,0.62)(4,0.57)(1,0.93) (3,0.65)(6,0.81)(5,0.73)(4,0.6)
候选资源集 3	(1,0.62)(4,0.64)(1,0.73)(10,0.83)(7,0.61) (3,0.65)(6,0.81)(5,0.73)(4,0.6)
候选资源集 4	(10,0.86)(8,0.9)(7,0.99)(7,0.92)(9,0.71) (4,0.56)(8,0.77)(10,0.92)(5,0.67)
候选资源集 5	(9,0.81)(6,0.74)(6,0.61)(5,0.57)(8,0.75) (3,0.59)(4,0.57)(9,0.76)(8,0.63)
候选资源集 6	(8,0.78)(9,0.82)(5,0.59)(6,0.71)(4,0.59) (7,0.68)(3,0.56)(4,0.55)(6,0.66)

由表 3 可知,完成 CPS 上层任务需要 6 类资源,这 6 类资源即是该任务的 6 个候选资源集. 每个候选资源集中含有 9 个具体的物理实体,每个物理实体的 QoS 参数(Qtime,Qreliability)的值如表所示. 这里不考虑 QoS 参数 Qavailability,因为它的值只是 1 或 0,在资源调度之前,本文利用该参数进行资源过滤,表中的每个候选资源集中的物理实体的 Qavailability 都为 1. 这样做的好处是:一方面保证了在候选资源集中的物理实体是可用的,另一方面简化了实验数据的表达方式,给实验带来了方便. 表 3 是资源过滤之后的各个候选资源集中的物理实体 QoS 参数值. 表 3 中的每一个单元格分别表示响应时间和可靠性,其中响应时间的单位为 ms,可靠性是一个比值.

图 6 和图 7 分别是迭代时各个目标函数的函数值和性能. 由图 6 可知,随着迭代次数的增加,尽管第 1 目标函数的函数值最短的响应时间在某些代的值不同,但是整体上第 1 目标函数的函数值最短的响应时间是收敛的,收敛值是 14.5 ms,这说明基于 QoS 的 CPS 资源选择数学模型的第 1 个目标函数是有最优解的.

由图 7 可知,随着迭代次数的增加,尽管第 2 目标函数的函数值最大的可靠性在某些代的值不同,但是整体上第 2 目标函数的函数值最大的可靠性是收敛的,收敛值是 0.228,这说明基于 QoS 的 CPS 资源选择数学模型的第 2 个目标函数是有最优解的.

经过 100 次迭代之后,种群中还有 16 个个体,将每个个体分别输入到无量纲化的第 1 目标函数和

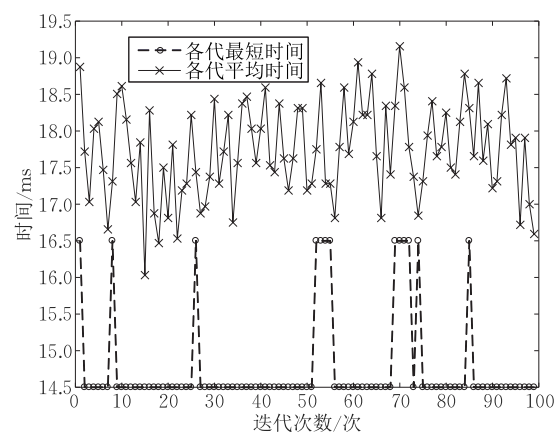


图 6 经过 100 次迭代后第 1 目标函数的函数值及性能跟踪

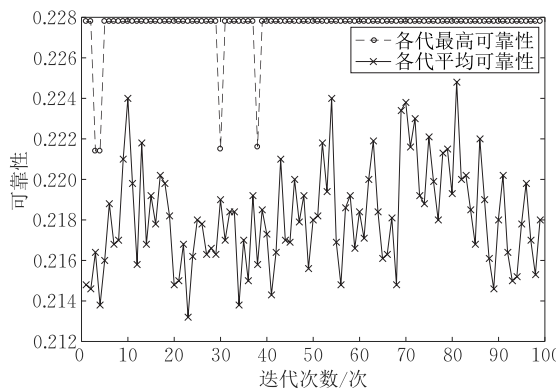


图 7 经过 100 次迭代后第 2 目标函数的函数值及性能跟踪

第 2 目标函数,它们的函数值如图 8 所示. 图 9 给出了图 8 中对应每个个体的两个函数值之差,由图 9 可知,取种群中的第 6 个、第 10 个、第 14 个和第 16 个个体时,无量纲的第 1 目标函数值与第 2 目标函数值之差的差值最小,这四个个体即是基于 QoS 的 CPS 资源选择数学模型的解,解码这四个个体中的任何一个所得的资源即是满足总体 QoS 最优的 CPS 资源选择结果.

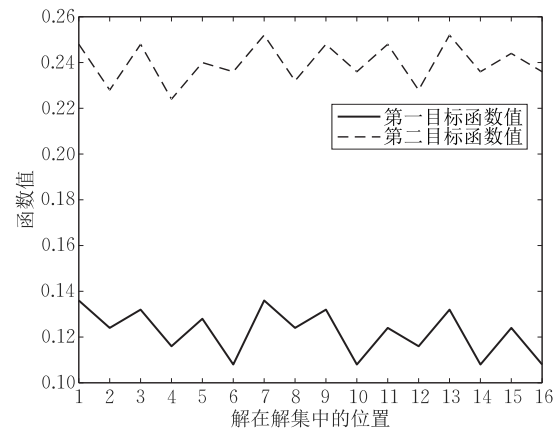


图 8 经过 100 次迭代后无量纲的第 1 目标函数值和第 2 目标函数值

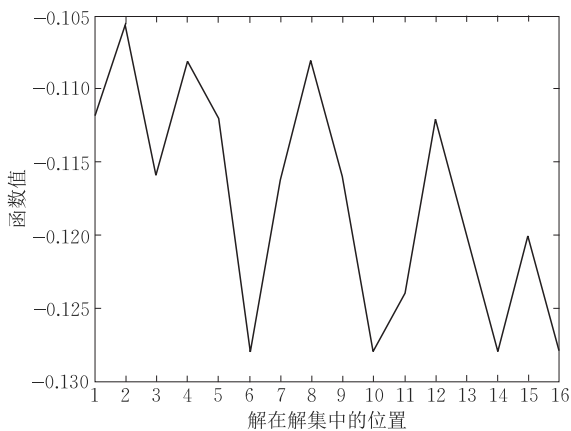


图9 经过100次迭代后无量纲的第1目标函数值与第2目标函数值之差

5 总 结

针对 CPS 系统中具有大量重复的物理实体,各个物理实体提供相应的功能,处在不同的物理环境中以及具有不同的执行性能(QoS)的这一特点之中,提出了基于 OWL 和 XML 混合的 CPS 资源服务模型;在 CPS 资源服务模型基础上,提出了基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度机制,并通过基于 QoS 的资源选择数学模型以及基于多目标遗传算法的资源选择算法进行求解.最后论文结合智能电网的特点,以智能电网为例,通过实验验证了本文提出的基于 OWL 和 XML 混合的 CPS 资源服务建模的可行性及基于智能规划的 CPS 任务-虚拟资源调度和基于多目标遗传算法的 CPS 资源选择策略的有效性.

参 考 文 献

- [1] Osawa H, Ishii K, Yanada S, Imai M. Grounding cyber information in the physical world with attachable social cues//Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications. Toyama, Japan, 2011: 41-47
- [2] Li Ren-Fa, Xie Yong, Li Rui, et al. Survey of cyber-physical systems. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(6): 1149-1161(in Chinese)
(李仁发, 谢勇, 李蕊等. 信息-物理融合系统若干关键问题综述. 计算研究与发展, 2012, 49(6): 1149-1161)
- [3] Lee E A. Cyber-physical systems—Are computing foundations adequate?//Proceedings of the NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap. Austin, USA, 2006: 1-9
- [4] Ilić M D, Xie L, Khan U A, et al. Modeling of future cyber-physical energy systems for distributed sensing and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 2010, 40(4): 825-838
- [5] Fallah Y P, Huang C, Sengupta R, et al. Design of cooperative vehicle safety systems based on tight coupling of communication, computing and physical vehicle dynamics//Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. Stockholm, Sweden, 2010: 159-167
- [6] Poff L K, McDonald M P, Gokhale A. Poster: A capacity planning framework for event brokers in intelligent transportation cyber physical systems//Proceedings of the 5th ACM International Conference on Distributed Event-Based System. New York, USA, 2011: 395-396
- [7] Lee I, Sokolsky O, Chen S, et al. Challenges and research directions in medical cyber-physical systems//Proceedings of the IEEE Invited Paper in Special Issue on Cyber-Physical Systems, 2012, 100(1): 75-90
- [8] Jamshidi M, Betancourt A S J, Gomez J. Cyber-physical control of unmanned aerial vehicles. Scientia Iranica D, 2011, 18(3): 663-668
- [9] Wang Xiao-Le. Research on Key Technologies of Resource Scheduling for Cyber-Physical System[Ph. D. dissertation]. National University of Defense Technology, Changsha, 2014 (in Chinese)
(王小乐. 信息物理融合系统资源调度关键技术研究[博士学位论文]. 国防科学技术大学, 长沙, 2014)
- [10] Chen Hai-Ming, Shi Hai-Long, et al. Service middle for Internet of Things: Challenges and approaches. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(8): 1725-1749(in Chinese)
(陈海明, 石海龙等. 物联网服务中间件: 挑战与研究进展. 计算机学报, 2017, 40(8): 1725-1749)
- [11] Attarzadeh-Niazi S H, Sander I. An extensible modeling methodology for embedded and cyber-physical system design. Simulation, 2016, 92(8): 771-794
- [12] Lee E A, Seshia S A edited. Li Shi-Ying et al, translated. Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach. Beijing: China Machine Press, 2012(in Chinese)
(〔美〕李(Lee E A), (〔美〕塞希阿(Seshia S A)著. 李实英等译. 嵌入式系统导论: CPS 方法. 北京: 机械工业出版社, 2012)
- [13] Zhao H, Sun D, Yue H, et al. Using colored spatio-temporal petri nets to model traffic control cyber-physical system. IET Software, 2017, 11(3): 116-125
- [14] Yang Fan, Liu Yan, Li Ren-Fa, et al. A modeling method research based on data in cyber-physical system. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(5): 961-972(in Chinese)
(杨帆, 刘彦, 李仁发等. 一种基于数据驱动的 CPS 建模方法研究. 计算机学报, 2016, 39(5): 961-972)
- [15] Zhou Xing-She, Yang Ya-Lei, Yang Gang. Modeling methods for dynamic behaviors of cyber-physical system. Chinese

- Journal of Computers, 2014, 37(6): 1411-1423(in Chinese)
(周兴社, 杨亚磊, 杨刚. 信息-物理融合系统动态行为模型构建方法. 计算机学报, 2014, 37(6): 1411-1423)
- [16] Wan K Y, Alagar V. Resource modeling for cyber physical system//Proceedings of the 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012). Yantai, China, 2012: 2541-2546
- [17] Karsai G, Sztipanovits J. Model-Integrated development of cyber-physical systems//Proceedings of the SEUS. Seoul, Korea, 2008: 46-54
- [18] Wan K, Alagar V. A resource-centric architecture for service-oriented cyber physical system//Proceedings of the 8th International Conference on Grid and Pervasive Computing. Seoul, Korea, 2013: 686-693
- [19] Wan K, Alagar V. Modeling resource-centric services in cyber physical systems//Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2013, Lecture Notes in Engineering and Computer Science. Hong Kong, China, 2013: 13-15
- [20] Huang J, Bastani F, Yen I, Jeng J-J. Toward a smart Cyber-physical space: A context-sensitive resource-explicit service model//Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference. Seattle, USA, 2009: 122-127
- [21] Huang J, Bastani F, Yen I, et al. Extending service model to build an effective service composition framework for cyber-physical systems//Proceedings of the IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications. Taipei, China, 2009: 130-137
- [22] Huang J, Bastani F, Yen I, Zhang W. A framework for efficient service composition in cyber-physical systems//Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Service Oriented System Engineering. Nanjing, China, 2010: 291-298
- [23] Huang J, Zhang Y, Yen I, et al. Real-time service-oriented distributed governance//Proceedings of the 6th World Congress on Services. Miami, USA, 2010: 479-484
- [24] Zhu W, Zhou G, Yen I, et al. A PT-SOA model for CPS/IoT services//Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services. New York, USA, 2015: 647-654
- [25] Yen I, Zhu W, Bastani F, et al. Rapid service composition reasoning for agile cyber physical systems//Proceedings of the IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE). Oxford, UK, 2016: 442-449
- [26] Chen Hai-Ming, Cui Li. Design and model checking of service oriented software architecture for Internet of Things: A survey. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(5): 853-871(in Chinese)
(陈海明, 崔莉. 面向服务的物联网软件体系结构设计及模型检测. 计算机学报, 2016, 39(5): 853-871)
- [27] Rubin S H, Bouabanatebibel T, Hoadjli Y, et al. Reusing the NP-hard traveling-salesman problem to demonstrate that $P \sim NP$ (Invited Paper)//Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Information Reuse and Integration. PA, USA, 2016: 574-581
- [28] Bai Tian, Li Guo-Hui, Shen Li-Ping. Quality of data based scheduling for real-time update transactions on multiprocessor platforms. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9): 3066-3071(in Chinese)
(白天, 李国徽, 申丽平. 一种基于数据质量的多处理器平台实时更新事务调度算法. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3066-3071)
- [29] Li Fang-Fang, Liu Chong, Yu Ge. Scheduling algorithm of events with imprecise timestamps for CPS. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2017, 11(6): 887-896 (in Chinese)
(李芳芳, 刘冲, 于戈. 面向 CPS 的时间戳不确定事件调度算法. 计算机科学与探索, 2017, 11(6): 887-896)
- [30] Ren Jian-Kang. Efficient Data Delivery and Scheduling Mechanisms for Cyber-Physical Systems [Ph. D. dissertation]. Dalian University of Technology, Dalian, 2015(in Chinese)
(任健康. 信息物理系统高效数据传输和调度机制研究[博士学位论文]. 大连理工大学, 大连, 2015)
- [31] Koubaa A, Alves M, Tovar E. i-GAME: An implicit GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for timesensitive wireless sensor networks//Proceedings of the 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems. Dresden, Germany, 2006: 10-20
- [32] Xia F, Hao R, Cao Y, et al. ART-GAS: An adaptive and real-time GTS allocation scheme for IEEE 802.15.4//Proceedings of the 7th Asian Internet Engineering Conference. Bangkok, Thailand, 2011: 96-103
- [33] Xia F, Hao R, Li J, et al. Adaptive GTS allocation in IEEE 802.15.4 for real-time wireless sensor network. Journal of Systems Architecture, 2013, 59(10): 1231-1242
- [34] Wang Xiao-Le, Chen Li-Na, Huang Hong-Bin, Deng Su. A service-oriented architecture framework of cyber-physical systems. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(S2): 299-303(in Chinese)
(王小乐, 陈丽娜, 黄宏斌, 邓苏. 一种面向服务的 CPS 体系框架. 计算机研究与发展, 2010, 47(S2): 299-303)
- [35] Li Jian-Kang, Zhang Chun-Hui. Research and application development on ontology. Library Tribune, 2004, 24(6): 80-86(in Chinese)
(李健康, 张春辉. 本体研究及其应用进展. 图书馆论坛, 2004, 24(6): 80-86)
- [36] Cao Jun-Wei, Wan Yu-Xin, Tu Guo-Yu, et al. Information system architecture for smart grids. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 143-167(in Chinese)
(曹军威, 万宇鑫, 涂国煜等. 智能电网信息系统体系结构研究. 计算机学报, 2013, 36(1): 143-167)
- [37] Sanislav T, Mois G, Miclea L. An approach to model dependability of cyber-physical systems. Microprocessors & Microsystems, 2016, 41: 67-76



XU Jiu-Qiang, born in 1966, Ph.D., professor. His main research interests include cyber-physical systems, computer architecture, computer networks, complex network and embedded system.

GUO Xue-Jing, born in 1991, M.S. candidate. Her research interests include cyber-physical systems and

computer architecture.

WANG Jin-Fa, born in 1988, Ph.D. candidate. His main research interests include complex network and anomaly detection.

LI He-Qun, born in 1989, Ph.D. candidate. His main research interests include computer networks and SDN.

ZHAO Hai, born in 1959, professor, Ph.D. supervisor. His main research interests include embedded system, pervasive computing and complex network.

Background

This thesis focuses on the physical resource scheduling problem in Cyber-Physical Systems. It studies how to describe, manage and schedule physical entities in CPS, aiming to perform upper tasks in CPS with optimal allocation and scheduling. This thesis is part of the work on the resource scheduling and modeling in CPS. Resource description about CPS can promote service standardization and accelerate the popularization and application of CPS. There are a lot of workers engaged in the research of CPS modeling. They complete the design of the CPS model from different angles, but there is a lack of a clear description of the service provider. For a special CPS, it includes a lot of same or similar physical entities. It is difficult to guarantee the availability of services if the description of the physical entity that provides the

software service is not accurate. In this thesis, a CPS resource service model is proposed, and based on this model, a CPS task-resource scheduling mechanism is proposed.

The work described in this thesis belongs to the project of Research on Key Technologies of Resource Description and Service Modeling, the foundation of CPS modeling, which is supported by the National Science-technology Support Plan (No. 2012BAH82F04). This project aims to design the key technologies of resource description and service modeling as standard foundation of CPS, located in the resource layer, which studies the key technologies of CPS application from the perspective of CPS users and managers to solve the key problems of distributed service resource sharing and efficient cooperative work in CPS.