

# 基于 ADL 的物理信息系统的建模与分析

柳求金, 张立臣

(广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

**摘 要:**当前分析和设计物理信息系统的模型和方法通常是线性分离的,且由不同的数学形式化方法和工程与计算机科学中的不同方法定义。为便于处理,对关注点分离是必要的,但这种分析方式由于在系统设计时过早地将系统信息特征与物理特征分离,导致很难评估直接与这两个领域进行交互的可替换元素的影响和协调性。文中对围绕组成 CPS 系统的所有范围的元素的架构描述进行扩展,最终目的是能够建立一个可扩展的框架,包括一套可被创建的综合设计工具。由此文中提出这种物理信息系统建模方法并通过一个简单应用实例对方法进行说明。

**关键词:**体系结构描述语言;物理信息系统;有限状态进程;线性混合自动机

中图分类号:TP311.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)04-0104-04

## Modeling and Analysis of Cyber Physical Systems Based on ADL

LIU Qiu-jin, ZHANG Li-chen

(College of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Today's models and methods for analysis and design of cyber-physical systems (CPS) are typically fragmented along lines defined by disparate mathematical formalisms and dissimilar methodologies in engineering and computer science. While separation of concerns is needed for tractability, such analytical approaches often impose an early separation between the cyber and physical features of the system design, making it difficult to assess the impacts and tradeoffs of alternatives that cut across the boundaries between these domains. It presents extensions to software architectural descriptions to encompass the full range of elements that comprise cyber-physical systems. The ultimate goal is to create an extensible framework within which a comprehensive set of design tools can be created. So a CPS architectural style was presented in this way and then it was illustrated with a simple example.

**Key words:** architecture description languages; cyber-physical systems; finite state processes; linear hybrid automata

## 0 引言

ADL<sup>[1,2]</sup>不仅是形式化描述软件体系结构的基本工具,也是对软件体系结构进行求精、验证、演化和分析的前提和基础。它吸取了传统程序设计中语义严格、精确的特点,并针对软件体系结构的整体性和抽象性,定义和确定了适合于软件体系结构表达与描述的有关抽象元素,从而能精确、无歧义地描述软件体系结构,更好地支持对软件体系结构求精、验证、演化和分析。常见的体系结构描述语言包括 Acme<sup>[3]</sup>、Wright、C2等<sup>[4]</sup>。现以 Acme 为例,阐述如何对系统进行建模。

Acme 及其开发工具包 AcmeLib 提供了一个通用的、可扩展的基础框架,用于表述、表示、生成和分析系统的软件体系结构。Acme 的主要特点是采用七种基本设计元素作为体系结构的本体,采用灵活的标注机制,支持使用外部语言定义的非结构化信息,使用类型机制对常见的可复用的软件体系结构俗语和风格进行抽象描述,使用开放的语义框架对体系结构描述进行推理。这七种基本元素为:

**构件:**描述系统中的计算元素和数据存储元素,也就是线框图中的框。如:客户端、服务器、数据库等。

**连接器:**描述构件之间的交互,也就是线框图中的线。典型的连接器有过程调用、客户和服务器之间的协议等。

**系统:**构件和连接子的配置。

**端口:**构件通过端口与外界发生交互,一个构件可以有多个不同类型的端口,每个端口都是一个接口的集合,例如一系列需要以特定顺序调用的过程。

**角色:**连接器通过角色与外界发生交互。角色定义了构件之间相交互的参与者。

收稿日期:2011-08-28;修回日期:2011-12-01

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(90818008);国家自然科学基金项目(60774095,60474072Z);广东省自然科学基金项目(07001774,04009465)

作者简介:柳求金(1986-),男,江西九江人,硕士研究生,研究方向为分布式实时系统;张立臣,教授,博士生导师,研究方向为并行处理、分布式实时系统。

表示:构件或者自连接内部结构的表述。通过“表示”这个概念,系统的体系结构就具有了层次结构。同时,“表示”这个概念可以用于描述体系结构实体的多个视图。

表示的映射:将构件或者连接子的内部“表示”与外部接口进行映射。

在这七种类型里,最基本的体系结构描述元素是构件、连接子和系统之间的关系。

## 1 CPS 的建模

“关注点分离”<sup>[5]</sup>一直都是软件开发的一个重要目标和原则,由于 CPS<sup>[6]</sup>涉及信息和物理领域,所以考虑对其物理特征和信息特征分离建模是必要的。Acme 中,一个模型可以用遵守某个协议的元素类型族表示。一个通用族通过新增元素和协议规则扩展为某个特定的应用族。

因此对 CPS 建模首先需定义三个通用族,分别为信息族、物理族和信息物理族,然后根据系统中构件所属领域分别在这三个通用族上通过新增元素和协议即可<sup>[7,8]</sup>。

### 1.1 信息族

CPS 信息领域模块可采用传统的软件建模方式。以下各构件和连接子支持标准实时监控方面的应用。

类型如下:

存储类构件:这类构件用于存储系统计算时的数据。一些简单的系统中,这些构件可以仅是被访问的内存块。而较复杂的系统则会访问这类存储构件的构件有更详细的规定。

计算类构件:计算构件对数据进行操作和更新,并把结果存入相应的存储构件。其包括过滤构件、状态评估构件以及控制构件。

接口类构件:这类构件完成或实现对物理世界的感控。如处理原始传感数据的智能传感器软件。除了软件的计算性能,分析其对整个系统的物理行为的影响及如何表示各构件之间的通信也很重要。这里采用两种主要的信息连接子表示构件间的通信进行,一种为发送回应类型(call return)连接子,用来实现一对一通信,一种为广播订阅类型(publish subscribe)连接子,用来实现一对多通信。且它们都可根据某个特定通信协议和网络特性进一步扩展。

### 1.2 物理族

由于建模时不能完全掌握系统物理行为的各个细节,因此对 CPS 物理领域模块的建模面临一些困难。比如如何使物理构件和连接子根据物理信号做相应反应。为处理这一问题,此处采用一类基于物理系统能量图的构件和连接子,它们可以独立处理物理构件间

的交互及功能属性的表示等问题。这种表示方法有些类似于图形论和拉格朗日力学中采用共轭变量的方式,通过采用共轭变量(能和流)表示能量源、能量储存构件和能量消耗构件之间的信号流。这种构件类型如下:

能量源构件:它是一种能源提供部件,只有一个输出端口。

能量存储构件:能量存储构件类似动力系统或储能子系统。如电力系统中带电容性和电感性的部件。

能量转换构件:这类构件可以实现对不同类型物理构件间交互时的能量转换。它在跨领域建模中特别有用,如能对电气和机械领域的能量进行转换的机电设备。

连接子类型如下:

能量流连接子:能量流连接子实现物理构件间双向交互,使各构件间动态耦合。

共享变量连接子:它规定交互双方变量类型一致,是一种无向的连接子。

度量连接子:这种连接子指定某个物理构件的变量作为另一个物理构件的输入。因此,这类连接子是有向的,如仿真模型中的信号线。

### 1.3 信息物理接口族

由于 CPS 系统中需要实现信息领域和物理领域的交互,因此必须对这种交互进行建模。信息物理接口族继承信息族和物理族中的性质,并新增了信息与物理领域交互的功能。为了实现这种交互功能,对于一些简单的交互接口,可采用两种有向连接子,分别为 P2C(physical-to-cyber)和 C2P(cyber-to-physical)。简单的传感器可用作 P2C 连接子,简单的驱动器可作为 C2P 连接子。而对于较为复杂的接口,需采用 P2C 转换器构件和 C2P 转换器构件,这类构件一端可连接信息构件的连接子,另一端可连接物理构件的连接子。如智能传感器设备。

## 2 实例的应用

以下结合实例说明这种 CPS 建模方法。

图 1 为一个温度控制系统。F1, F2 分别表示房间 1、房间 2, T1 和 T2 分别表示两个房间的温度,周围环境温度用 Ta 表示,房间内保持的热量分别用热容量 C1, C2 表示,散失的热量分别用热耗率 R1, R2 表示。F1 通过一面公共的隔墙以热耗率 Rw 给 F2 加热。F1 内装有一台控温器,它可以读取 F1 的温度。图中加热炉可手动开启或关闭,当加热炉开启,控温器可以控制其对 F1 加热,并相应地控制开启吹风机将热流吹向 F1。通过对 F1 加热从而使房间温度接近控温器设定温度值。

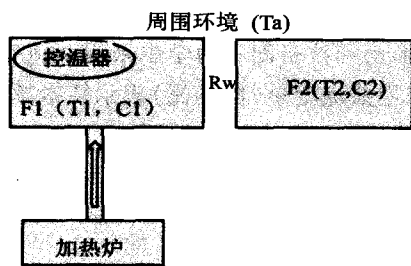


图1 热量变化说明

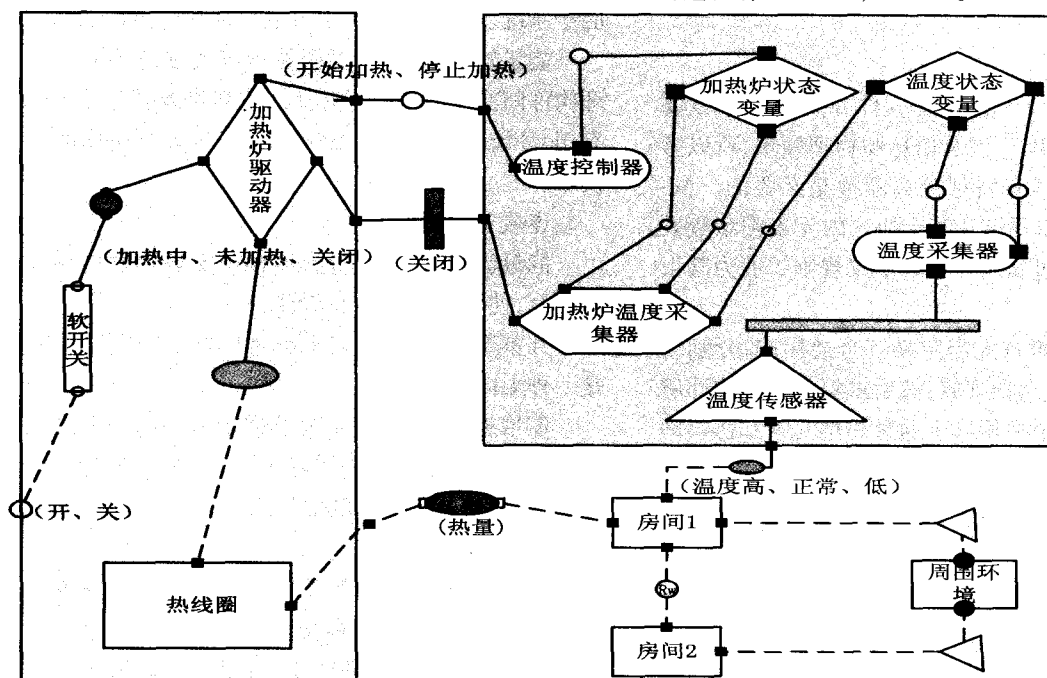


图2 采用信息物理族的温度控制系统的设计模型

图2为这种CPS模型的ADL描述。图中每个区域都可视为一种能量存储构件。外围环境温度相对房间内温度变化是独立的,所以可视为一种能源构件。图中右上角的封闭框可视为一个控温器,里面包含一个可采集F1温度信息并将其广播到通信通道的温度传感器。温度采集器采集到温度信息后修改温度状态变量,加热炉温度采集器获取到温度状态变量值后,修改加热炉状态变量,使加热炉状态变量处于需要开启加热或停止加热状态。温度控制器是捕捉加热炉加热状态变更软件的一部分。加热炉中有一个加热驱动器,温度控制器捕捉到加热炉状态变量后,向加热驱动器发送相应的指令,驱动器执行该指令,从而实现加热。最后,通过软切换器构件获取手动开关信号并传给加热炉驱动器,最终确定是否加热。

F1和F2作为能量储存构件,外界环境作为一个能量源,介于外界环境与房子之间的连接子是单向的,

而F1与F2之间的连接子是双向的,且有公共变量。

### 3 行为标注

模型元素描述的仅仅是系统的结构信息,为对系统行为做一些有意义的分析,必须为结构标注行为信息。在Acme的ADL建模的方法中,行为标注对应构件的属性信息。已经实现的对行为模型框架类型标注的途径有FSP<sup>[9,10]</sup>,LHA<sup>[11]</sup>。

采用FSP或LHA进行行为标注,可对其插件进行二次开发,使它可以根根据采集构件属性的行为信息生成相应可被分析的文件。因此,插件贯穿整个结构,采集分布在结构中的构件属性信息并生成分析文件。

件。

图3为分析流程原理图。图中采用了针对有限状态过程(FSP)开发的插件,它产生可被标签转换系统分析器(LTSA)<sup>[9]</sup>解析的文件。若采用针对LHA开发的插件,也可产生能被综合自动机校验器(PHAV-er)<sup>[12]</sup>解析的文件。

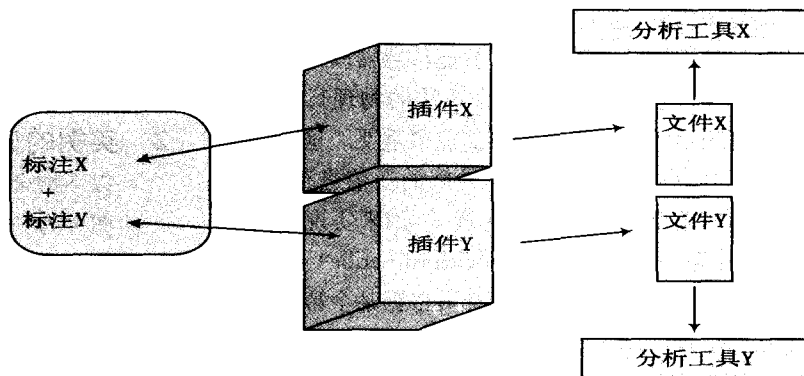


图3 采用插件的行为分析

### 4 行为验证

在第2部分的例子中,系统最终是要使F1的温度接近控温器设定点。加热炉会接收来自温控器或本地

的开关指令,并且只能处于关闭、开启(但未开始加热)和加热三种状态之一。设想控温器只向加热炉发送加热指令,而不再对加热炉是否有回应进行验证的情况。如果温控器向加热炉发送一个加热指令而此时加热炉处于关闭状态,那它就会漏掉该条指令。若它再被开启,它也只能按照默认开启状态运行而不会执行之前的加热指令除非收到下一条加热指令,而温控器并不会传送另一条指令因为之前发过,它会等待温度上升至设定点后发送一条停止加热指令。

因此,为使系统能够捕捉这种错误并同时能给出一个补救提示,先单独对 FSP 做基础的分析。通过提出类似活跃度检查的方法来将问题推进。如果温控器发出一条加热指令,房间的温度最终会不会上升?在 LTSA 中很容易对活跃度进行分析,通过这种分析不仅能捕获上述错误,而且还能通过什么地方活跃度不达要求从而得出某种可能引起加热失败的原因。从而便可立刻就能发现这个错误,即原来是因为控温器未知加热炉的开关状态引起的,并很可能产生一个使加热炉向温控器汇报当前的状态的纠正措施。修正后的模型如图 2 所示,图中新增了一个加热炉与温控器之间的关闭命令连接子。

然而这种方案中如果加热炉是一个仅仅能接收指令而不能发送认证信号的哑装置就难以实现了。不过,还有另一个方法,这就是让温控器在某段时间(超时)间隙后检查房间温度是否上升到预期范围。如果温度没上升,就说明加热指令需要重发。因此,这种方案的成功依赖于对超时周期的选择,而这个周期可由加热和降温时的屋内温度变化率来确定。但时间和温度变化率都不能用纯离散的 FSP 模型表示。因此,可采用 LHA, LHA 中这二者都可以表示,用 LHA 中的 PHAVer 分析完后,通过加热或降温时温度变化率的大小范围就可以得到合适的超时周期的范围。

## 5 结束语

文中对 CPS 进行了分析并介绍了相关建模工具。通过这种建模方式,得出新的方案从而可以优化对系统行为特征建模。目前较多的研究集中在以不同视角对 CPS 进行建模,每种视角都对应某种数学抽象方法且不同视角的建模方式也会带来不同的系统性能。系

统建模方法和对应系统性能又产生了网络设计最优化问题,因为它们之间是通过公共变量和协议进行交互的。因此,只有研究出方法规范和解决这类互联设计问题,才能综合地对物理系统进行分析和设计。

## 参考文献:

- [1] 杨敬中,张广泉.面向方面的软件体系结构描述语言 AOP-ADL[J].计算机工程,2008,34(10):80-82.
- [2] 李长云,李赣生,何频捷.一种形式化的动态体系结构描述语言 D2ADL[J].软件学报,2006,17(6):1349-1359.
- [3] Garlan D, Monroe R T, Wile D. Acme: Architectural Description of Component-Based Systems[M]//Foundations of Component-Based Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 47-68.
- [4] 刘长林,张广泉,黄静.一种基于 ACME 的面向方面软件体系结构设计方法[J].苏州大学学报(工科版),2011(2):6-13.
- [5] 郑凤梅,常会友.面向方面的建模方法的设计与应用[D].广州:中山大学,2005.
- [6] 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[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [7] Dvorak D, Rasmussen R, Reeves G, et al. Software Architecture Themes in JPL's Mission Data System[C]//AIAA Space Technology Conference and Expo. Albuquerque, NM: [s. n.], 1999.
- [8] Rajhans A, Cheng Shangwen. An Architectural Approach to the Design and Analysis of Cyber-Physical Systems[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2009.
- [9] Magee J, Kramer J. Concurrency: State Models and Java Programming[M]. 2nd ed. [s. l.]: Wiley, 2006.
- [10] 顾庆,陈道蓄,谢立,等.基于有限状态进程的事件约束定义[J].软件学报,2002,13(11):2162-2167.
- [11] Henzinger T A. The theory of hybrid automata[C]//Proc of 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science, LICS'96. New Brunswick, New Jersey: IEEE Computer Society Press, 1996.
- [12] Frehse G. PHAVer: Algorithmic Verification of Hybrid Systems Past HyTech[C]//Proceedings of the Fifth International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC), Lecture Notes in Computer Science 3414. [s. l.]: Springer-Verlag, 2005.

(上接第 103 页)

- Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and PhD Forum. [s. l.]: [s. n.], 2011.
- [11] Zhang Yan, Zhang Li, Xing Guolin, et al. Predictive Control of Nonlinear System Based on MPSO-RBF Neural Network[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011

(2): 567-573.

- [12] Moguerza J M, Muñoz A, Psarakis S. Monitoring Nonlinear Profiles Using Support Vector Machines[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007(6): 574-583.