

文章编号: 1671-7848(2007)04-0430-04

一种基于 SystemC 的 Job Shop 调度问题建模方法

张晓平, 刘全利, 王伟

(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)



摘 要: 考虑 SystemC 解决大规模集成电路硬件建模问题的优势, 运用事件驱动下进程交互仿真策略, 提出了一种基于 SystemC 仿真平台的生产调度问题建模方法, 并将该方法应用于求解经典的 Job Shop 调度问题。仿真实例表明基于 SystemC 的仿真建模方法对于求解 Job Shop 调度问题可以达到令人满意的效果, 从而验证该方法应用于实际生产调度问题建模的可行性。

关键词: SystemC; Job Shop 调度; 生产调度; 离散事件仿真

中图分类号: TP 273 **文献标识码:** A

A Modeling Method of Job Shop Scheduling Problem Based on SystemC

ZHANG Xiao-ping, LIU Quan-li, WANG Wei

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Considering the advantages of SystemC in solving the hardware modeling of large-scale integrated circuits, a production scheduling modeling method based on SystemC simulation platform is proposed and an event-driving process interaction simulation strategy is adopted. This proposed method is used to solve the classical Job Shop scheduling problems. A simulation example shows that this modeling method based on SystemC can gain the satisfactory result and can be applied to the practical production scheduling.

Key words: SystemC; Job Shop scheduling; production scheduling; discrete event simulation

1 引言

调度问题的核心是模型和算法, 对它的研究最初采用数学规划、简单规则^[1]等方法, 这些方法对简单问题得到的调度结果比较理想, 但难以解决复杂的问题。近年来, 国内外学者提出了一些新的优化方法, 如遗传算法、模拟退火、禁忌搜索、蚁群算法、神经网络等^[2-7]。这些方法在建立调度问题模型时, 都对问题进行了一些简化处理, 不能真实反映实际的调度问题。随着生产系统越来越复杂, 调度问题已很难用一个精确的解析模型来描述和分析。极大极小数建模法^[8]、Petri 网^[9]、Multi-Agent 技术^[10]在建立调度模型时, 有一定的优越性, 可是建模过程比较繁琐。另一方面, 传统的离散事件仿真技术^[11]可以有效地避开调度问题计算和理论分析的困难, 侧重于对系统运行逻辑关系的描述, 不会出现无解的情况。所建的模型为保证系统的正常运行需要维护大量的事件表, 从而使得仿真时间加长, 不能在规定时间内给出合理的调度结果。因

此, 有必要探索新的建模求解方法来提高上述方法的准确性和效率。SystemC^[12, 13]运用到调度问题建模仿真中, 目前国内外还没有学者提及, 基于 SystemC 建立的调度模型能很好地处理生产调度问题中的层次性、事件的时序性和生产过程的并发性, 从而对生产调度系统作出完整准确的描述和模拟。另外, 此建模平台能够把生产中的调度规则结合到模型中, 在模拟生产调度过程中动态选择规则来获得最优的调度方案。

本文分析了 SystemC 应用于生产调度建模问题的可行性, 提出了基于 SystemC 的平台映射建模方法, 并采用事件驱动下进程交互仿真策略完成模型的仿真。

2 基于 SystemC 的生产调度问题建模方法

1) SystemC 应用于生产调度问题的可行性 生产调度问题是一个混合型的复杂决策问题。其复杂型表现在: 系统的多层次性、事件的突发性及时序性、串并行生产过程同时存在。这样就使得调度模

收稿日期: 2007-04-06; 收修定稿日期: 2007-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60604026, 60474058)

作者简介: 张晓平(1980-), 女, 山东淄博人, 博士, 主要研究方向为复杂系统建模及分析、生产调度及其优化、智能算法等; 王伟(1955-), 男(满族)教授, 博士生导师。

型的建立和求解变得非常困难。

SystemC 是一种新的系统级建模平台,由 OSCI (Open SystemC Initiative)^[10]组织制定和维护,其主旨是用于解决超大规模集成电路(VLSI)硬件系统级设计而提出的。其优势在于 SystemC 仿真建模平台将模块、事件和进程的概念,引入到系统建模当中,使得该平台具有如下特点:

①模块(SC_MODULE)是 SystemC 中最基本的结构单元,可以内嵌其他模块和进程,它使设计者将复杂的系统分解成简单的子模块进行层次化设计,模块的概念体现了 SystemC 对系统分层次建模的支持。

②事件(SC_EVENT)是 SystemC 中最基本的同步对象,事件可以激活所有等待这个事件的进程,系统在事件驱动方式下按照事件的发生顺序触发各个进程从而模拟系统各个时刻的行为和状态。

③进程(SC_THREAD)包含在模块中,用于描述系统的功能,其开始可由各类事件触发运行。并且各个进程间可以串并行相互影响和独立。SystemC 提供了三种不同的进程类型(Method Process, Thread Process 和 Clocked Thread Process)。Method Process 被触发运行后不能被挂起,直至运行完毕,而 Thread Process 支持进程执行过程中被挂起和再次被激活。进程的概念使 SystemC 仿真平台很好地支持了系统中的并发性。

以上 SystemC 仿真平台的 3 个主要建模特点完全对应于前面提到的生产调度问题中的 3 个特性:即系统的多层次性,事件的时序性和过程的并发性,这使得将 SystemC 仿真建模方式用于解决生产调度问题具备了可行性。

2) 基于 SystemC 平台的映射建模方法 SystemC 最初是针对片上系统的,描述的系统是微观的,而现实的生产调度系统是宏观上的大系统。本文采取了映射的方式,将微观上的建模思想用在复杂的生产调度系统上,针对调度问题的特点,提出了基于 SystemC 的平台映射建模方法,参照片上系统设计步骤,此方法由仿真模型描述和调度规则设计两步骤来完成,仿真过程中采用了事件驱动下进程交互仿真策略。方法步骤如下:

①建立映射仿真模型 首先将 SystemC 中模块、事件、进程的概念和调度系统中设备、工件工序事件、并发行为建立映射关系。然后把调度系统以设备为界线分为多个子系统,每个子系统(即每个设备)用 SystemC 中的模块(SC_MODULE)来描述,每个模块中定义了设备的状态(忙、闲、故障、检修等)和设备处理的各种工件事件具有的行为。系统中存在各种事件(如工件到达事件、结束加工事件、机器故障突发事件等)可以映射为 SystemC 中的事件类

(SC_EVENT),各事件的发生由事件类中的成员函数 notify(time)函数在 time 时刻先后触发。由事件引起的设备行为与 SystemC 中的进程类(SC_THREAD)相互对应,同一个进程可以在不同的时刻被多个事件触发或挂起,一般来说有处理工件到达进程、加工工件进程和处理工件离开进程等。

②设置调度规则 实际调度问题中存在许多来自加工经验的调度规则,这些规则的介入能够明显提高整个调度系统的性能。本文提出的建模方法把各种调度规则用 C 语言编写的规则函数来表示,并独立封装成一个规则库,在仿真运行过程中,当有加工进程被触发时,根据系统当前的状态和期望的调度指标,通过推理选择合适的优先规则来确定工件的加工顺序。

通过以上步骤,一个调度系统的完整的 SystemC 仿真系统如图 1 所示。

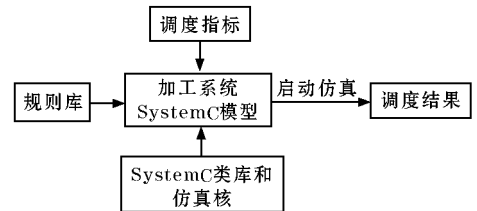


图 1 基于 SystemC 的仿真调度系统

Fig.1 Simulation scheduling system based on SystemC

构建的仿真系统把模型建立和规则设置分为独立而又相互联系的两部分,方便了模型扩充和后续规则的添加。结合 SystemC 仿真核自身具有的运行机制即事件驱动下进程交互仿真策略,启动仿真,调度模型在仿真核的支持下调用规则库里的各种调度规则,模拟实际调度系统并给出调度结果。

3 Job Shop 问题的 SystemC 建模

1) 问题描述 实际生产中许多调度问题可以归结为 Job Shop 调度问题(Job Shop Scheduling Problem JSS),此问题一般可以描述为: n 个工件在 m 台机器上加工,各工件在各机器上的加工时间已知,在 m 台机器上的加工次序也已知,调度目标就是确定各机器上所有工件的加工顺序及各工件加工开始时间,使某些加工性能指标达到最优(如作业完成时间最短、设备利用率最高、按时交货率最高等)。为了与实际调度问题相符合,本文对 Job Shop 调度问题做了如下假设:

①从加工过程开始,工件就可被加工,即初始工件集为所要调度的工件集。

②每一个加工操作只能由一台机器加工,在同一时刻每台机器只能做一种加工操作。

③每一加工操作允许等待,但是加工一旦开始

不会被其他加工操作所中断直至完成。

④每类工件依照各自的加工次序，事先规定加工顺序，并且每道加工工序的加工时间事先给定。

⑤加工过程开始后，所有机器均处于有效状态，不会被损坏。

2) Jop Shop 问题的 SystemC 建模 参照上节中提出的建模方法步骤和仿真系统框架，下面来设计 Job Shop 调度问题的 SystemC 仿真系统。

①建立加工系统的 SystemC 模型 鉴于上面 Job Shop 问题的描述，机器的台数为 m ，则该模型由 m 个模块组成，分别用 $SC_MODULE(machine_i)$ ($i = 1, 2 \dots m$) 来定义， $machine_i$ 指各模块的名字，工件依次通过这 m 个模块完成加工过程。定义模块里的局部变量 $flag_i$ 来表示每个设备在加工过程中的状态， $flag_i$ 为 1 表示正在加工工件，为 2 空闲，为 3 说明设备处于检修状态。设备的这些状态是由系统的各类事件引起的，对事件的存储不再采用离散事件仿真中的事件表，而用 SystemC 提供的事件类 SC_EVENT 定义和处理。系统的事件分为两类：常规事件和突发事件。常规事件有工序到达事件、工序离开事件，它们依附于各工件，个数为 $2 * n * m$ 个，在工件结构体 $work$ 中声明为 $arrive[m]$ 和 $leave[m]$ 。此外 $work$ 中还定义了各工件在每个设备到达时刻 $arrivetime[m]$ 加工时间 $worktime[m]$ 和离开时刻 $leavetime[m]$ 这里已知到达第一个设备的时间和每个设备上的加工时间，其他的在加工过程中推算得出。突发事件为机器故障事件，此事件在各个模块中定义为 $machine_failurei$ 。各个事件由事件类的 $notify(time)$ 函数在 $time$ 时刻按先后顺序触发，触发后的事件通知系统中存在的各种行为。系统具有的行为用 SystemC 中的 SC_THREAD 进程来定义，这些行为的产生来自设备并包含在每个设备模块中，表示为到达进程、加工进程、离开进程和故障进程，各进程分别有敏感表对对应的事件敏感，进程被激活后完成相应的功能。每个模块的到达进程被工序到达事件激活后，完成读取工序的加工时间、输出工序到达时刻和调用规则确定加工顺序等功能；工序队列中的工序离开事件激活离开进程和上一工序的加工进程，离开进程中输出工序的离开时刻并统计工序的等待时间，加工进程启动时先被挂起 $worktime[i]$ 时间，时间到了通知工序离开事件发生并接受加工队列中下一工件，完成加工操作。机器故障事件激活故障进程，在本文中假设机器在仿真期间是正常运行的。

②规则的收集和选择机制 规则的实现由多个 $rulej$ ($j = 0, 2 \dots 7$) 函数来实现，并单独封装在规则库中。结合实际调度经验，规则库中包含的规则

见表 1。

表 1 规则表
Table 1 Rule table

类型	规则名称
0	先到达者优先
1	后到达者优先
2	订单交货期最早者优先
3	当前工序集中加工时间最短者优先
4	当前工序集中加工时间最长者优先
5	后续工序集中加工时间最短者优先
6	后续工序中剩余最少者优先
7	剩余工序的加工时间和最小者优先

由于调度规则是影响整个仿真结果的主要因素，因此对它选择十分重要。加工系统 SystemC 仿真模型启动仿真后，对规则的调用是动态的，在到达进程每次决定工件的加工顺序时，根据调度人员给定的调度指标和系统的当前加工状态，自动选择合适的规则，获得满意的加工次序。这种动态的规则选择能够提高整个加工系统的生产性能。

4 仿真实例

为了验证本文提出的基于 SystemC 平台的映射建模方法，下面以一个典型的仿真实例来表明此方法的有效性。此加工系统是由 2 台加工设备组成，工件数为 8 个，各工件被加工的设备类型及加工时间分配见表 2。调度目标为最小化工件的最大完成时间和最大化设备利用率。

表 2 工件加工数据表

Table 2 The machining data of workpiece

工件号	设备号	加工时间	工件号	设备号	加工时间
1	1	4	1	2	6
2	1	8	2	2	3
3	1	7	3	2	6
4	1	8	4	2	4
5	1	2	5	2	6
6	1	1	6	2	5
7	1	3	7	2	7
8	1	9	8	2	3

仿真模型在 VC6.0 开发环境中用 SystemC 类库编写，仿真模式为 SystemC 仿真核内置的仿真机制，采用了表 1 中规定的规则。仿真后得到的详细仿真调度结果如图 2 所示。

它包括了工件在各设备上的加工开始、完成时间，所有工件的加工完成时间及各台设备的空闲时间，从图中看出各加工设备的闲置时间分别为 0, 4 (min)，工件的最后完成时间为 45 min。利用离散事件仿真技术得到的结果，如图 3 所示。

相应的各加工单元的闲置时间变成了为 0, 5 (min)，完成时间变成了 46 min。

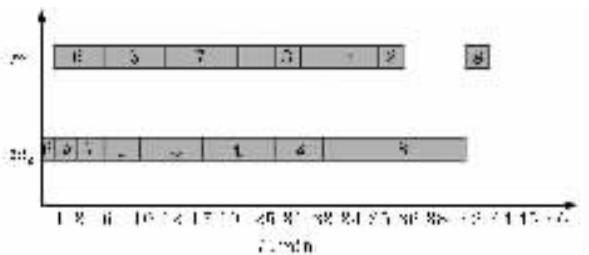


图 2 SystemC 仿真调度甘特图

Fig.2 SystemC simulation scheduling gantt chart

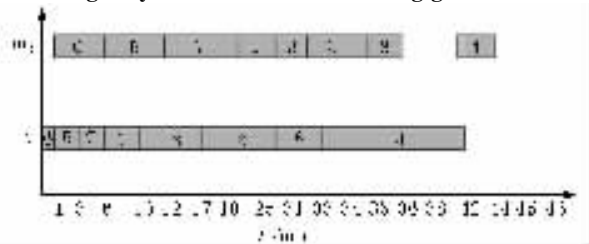


图 3 离散事件仿真调度甘特图

Fig.3 Discrete-event simulation scheduling gantt chart

对比两种仿真方法的结果，可以明显看出本文提出的基于 SystemC 建模仿真方法在工件准时完成率和设备利用率上明显高于传统的离散事件建模方法。特别是在仿真过程中由于本文方法省去了传统方法扫描事件表的繁琐步骤，使得仿真时间大大减少，运行 10 次的平均仿真时间仅为 190 ms，比传统方法快了仅一半时间，从而保证了在合理的时间得出最优的调度方案。

5 结语

解决生产调度问题，首要的是建立模型，这样基于模型的各种算法和规则才能行之有效。本文针对生产调度问题的特点和复杂性，分析了 SystemC 仿真平台在生产调度问题建模上的可行性，运用平台映射的思想提出了一种基于 SystemC 平台的生产调度问题建模新方法，并给出了系统框架和具体实现步骤。该方法建模步骤简单，能准确自然地描述复杂的调度问题，并将调度规则嵌入模型中来优化调度结果。利用此方法建立了典型 Job Shop 问题的 SystemC 模型，并对一个实际加工系统进行了建模

(上接第 415 页)

控制系统模型建立后和设备模型连接，构成完整的仿真模型。联盘运行仿真机模型，通过操作员站控制各仿真机组的运行，满足培训要求。在仿真机运行的各个标准工况，调整控制器的参数，使控制系统的品质达到一定指标，满足其运行要求。

4 结语

仿真算法的灵活、完备与否，影响仿真机的开发、运行，因此，在充分了解原型机组的控制系统组态逻辑及模块功能、了解操作员站的功能及操作方式的基础上，选择或编写合适的算法。这样才会提高仿真机的开发效率，提高仿真机运行的可靠性，

仿真，仿真结果表明基于本文建模方法所建立模型能快速正确地模拟实际系统，得出的调度结果令人满意，可以应用于更加复杂的调度问题。

参考文献 (References) :

- [1] Graves S C. A review of production scheduling[J]. Operation Research , 1981 ,29(4) :646-675.
- [2] 王凌,郑大钟.基于遗传算法的 Job Shop 调度研究进展[J].控制与决策,2001,16(s1):1-6.(Wang Ling ,Zheng Dazhong. Advanced in Job Shop scheduling based on genetic algorithm[J]. Control and Decision 2001 ,16(s1):1-6.)
- [3] 赵良辉,邓飞其.解决 Job Shop 调度问题的模拟退火算法改进[J].计算机工程,2006,32(1):38-40.(Zhao Lianghui ,Deng Feiqi. Improved simulated annealing algorithm for Job Shop schedule[J]. Computer Engineering 2006 32(1):38-40.)
- [4] 董刚,李光泉,刘宝坤.一种用于 Job Shop 调度问题的改进禁忌搜索算法[J].系统工程理论与实践,2001,9(4):48-52.[Tong Gang ,Li Guangquan ,Liu Baokun. A modified taboo search algorithm for the Job-Shop problem[J]. Systems Engineering Theory and Practice , 2001 ,9(4):48-52.)
- [5] 汪向利,王完良,许新黎.基于自适应蚁群算法的 Job Shop 调度方法及研究[J].系统仿真技术,2005,1(3):141-146.(Wang Xiangli ,Wang Wanliang ,Xu Xinli. The study of Job-Shop scheduling method based on adaptive ant colony algorithm and its simulations[J]. System Simulation Technology 2005 ,1(3):141-146.)
- [6] 张长水,阎平凡.解 Job Shop 调度问题的神经网络方法[J].自动化学报,1995,21(6):706-712.(Zhang Changshui ,Yan Pingfan. Neural network method of solving Job-Shop scheduling problem[J]. Acta Automatica Sinica ,1995 21(6):706-712.)
- [7] 陈进,刘淑红,宋广累,等.基于极大极小代数法的 Job Shop 生产线的建模方法[J].系统仿真学报,2005,17(2):310-312,326.(Chen Jin ,Liu Shuhong ,Song Guanglei ,et al. The modeling of Job Shop on maxmin and minimum algebra[J]. Journal of System Simulation , 2005 17(2):310-312,326.)
- [8] 饶运清,谢畅,李淑霞.基于多 Agent 的 Job Shop 调度方法研究[J].中国机械工程,2004,15(10):873-877.(Rao Yunqing ,Xie Chang ,Li Shuxia. Research on Multi-Agent-based scheduling approach for Job Shop scheduling[J]. China Mechanical Engineering ,2004 ,15(10):873-877.)
- [9] 周卫东,杨加敏,贾磊,等.一种 Petri 网结合遗传算法的优化方法及应用[J].山东大学学报,2005,35(4):59-63.(Zhou Weidong ,Yang Jiamin ,Ja Lei ,et al. An optimization method based on petri nets and genetic algorithm and its application[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science) 2005 35(4):59-63.)
- [10] 熊光楞,肖田元,张燕云.连续系统仿真与离散事件系统仿真[M].北京:清华大学出版社,1999.(Xiong Guangleng ,XIAO Tianyuan ,Zhang Yanyun. Simulation of continual system and simulation of discrete system[M]. Beijing :Tsinghua University Press ,1999.)
- [11] Joanne D ,Arun R ,Barkr Y. A design project for system design with system[A]. Microelectronic Systems Education[C]. Kobe Japan :Proceedings of the 2003 IEEE International Conference 2003 .
- [12] Vachoux A ,Grimm C ,Einwich K. Extending SystemC to support mixed discrete-continous system modeling and simulation[C]. IEEE International Symposium 2005 .
- [13] 肖有军,赵虹,李智. SystemC :一种新的系统建模语言[J].微电子学与计算机,2002,19(11):58-60.(Xiao Youjun ,Zhao Hong ,Li Zhi. SystemC :a new standard for system-level-design[J]. Microelectronics and Computers 2002 ,19(11):58-60.)

缩短仿真机的开发时间。

参考文献 (References) :

- [1] 王立志.基于仿真的培训模式[J].中国电力教育,2005,82(1):58-59.(Wang Lizhi. Training mode based on simulation[J]. Electric Power Education 2005 82(1):58-59.)
- [2] 张晓华.控制系统数字仿真与 CAD[M].北京:机械工业出版社,1999.(Zhang Xiaohua. Digital simulation of control system and CAD[M]. Beijing :Mechanical Industry Press ,1999.)
- [3] 印江,冯江涛.电厂分散控制系统[M].北京:中国电力出版社,2006.(Yin Jiang ,Feng Jiangtao. Distributed control system of power plant[M]. Beijing :China Power Press 2006.)
- [4] 韩富春,童国力.电力系统仿真支撑系统 Blink[J].太原理工大学学报,2004,34(4):448-451.(Han Fuchun ,Tong Guoli. Simulation support system of power system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology 2004 34(4):448-451.)