

基于调度长路径的复杂产品综合调度算法

谢志强^{1,2} 张 磊¹ 杨 静²

(哈尔滨理工大学计算机学院 哈尔滨 150080)¹ (哈尔滨工程大学计算机学院 哈尔滨 150001)²

摘 要 针对目前复杂产品加工和装配综合调度算法中考虑纵横双向调度优化时以横向为主,而忽略产品工序内在纵向约束对制造效率产生主要影响的问题,提出了以关键路径为主的纵横双向调度优化算法——基于调度长路径的复杂产品调度算法。该算法考虑了复杂产品树状工艺结构,根据优先级策略并结合调度长路径和长用时等策略来确定工序的调度次序。采用优先级策略可以兼顾其他分支上的同层工序;采用调度长路径策略是在兼顾其他分支的同时优先考虑了关键路径上工序对总加工时间的影响;采用长用时策略可以优先调度对加工时间影响大的工序。对已定调度次序的工序采用工序尽早加工的原则确定开始加工时间。实例表明,提出的调度策略简便可行且调度结果更优。

关键词 复杂产品调度,关键路径,优先级策略,调度长路径策略,长用时策略

中图分类号 TP278 **文献标识码** A

Integrated Scheduling Algorithm of Complex Product Based on Scheduling Long-path

XIE Zhi-qiang^{1,2} ZHANG Lei¹ YANG Jing²

(College of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)¹

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)²

Abstract Aiming at the problem that the current integrated scheduling algorithm of complex products processing and assembling mainly considers horizontal optimization in vertical and horizontal scheduling optimization and it neglects the effect of vertical restraints inherent in product operation to manufacture efficiency, a vertical and horizontal scheduling optimization algorithm based on critical path was proposed, namely scheduling algorithm of complex product based on scheduling long path. This algorithm considers the structure of complex product processing tree and confirms the scheduling order of operations by the priority strategy, scheduling long-path strategy and long-time strategy. The priority strategy can take into account operations on the same level of other branches. Scheduling long-path strategy can take into account the other branches and consider the effect of operations in critical path on the total processing time first. Long-time strategy can first schedule operations that have big influence on the processing time. The starting processing time of the operations which have been determined scheduling order is confirmed according to a dispatching rule (Earliest Due Date, EDD). Analysis and examples validate that the scheduling strategies proposed are simple and convenient feasible, and they gain the better scheduling result.

Keywords Complex product scheduling, Critical path, Priority strategy, Scheduling long-path strategy, Long-time strategy

现有的产品加工是将产品的制造过程分为产品加工及产品装配两个阶段,分别考虑了加工任务调度算法和装配任务调度算法,这种方式比较适用于大批量产品加工调度。随着社会的进步,对产品多元化的需求促使产品生产趋向多品种小批量,当制造产品复杂单一,制造过程包括工件间有约束的加工与装配时,如果分别考虑加工任务调度算法和装配任务调度算法必然要割裂单一产品内在的加工与装配的并行关系,因此有必要进行复杂产品加工与装配综合调度优化研究。

由于传统车间调度研究的对象是工件间无约束的,因此经典的车间调度方法,如分支定界法、人工神经网络、遗传算法和局部搜索法等^[1-6],不能综合解决复杂产品调度问题。目

前考虑的复杂产品综合调度算法中,拟关键路径法^[7]只侧重复杂产品纵向工艺关系对调度结果的影响,忽略了横向;文献[8]提出的策略包含考虑了横向工序的优先按层调度的优先级策略、优先调度加工时间短工序的短用时策略和优先调度从根节点到该节点路径上工序的加工时间和最长工序的长路径策略,这3种策略虽提高了调度工序纵横双向优化及选择的效率,但忽略了关键路径上工序对总加工时间的主要影响。本文针对上述问题提出了采用优先级策略、调度长路径策略和长用时策略等多种策略相结合的方式来确定工序调度次序,该方法在考虑优先级策略的情况下优先调度对整体加工时间影响较大的关键路径上的工序和长用时工序,实现了以

到稿日期:2009-08-12 返修日期:2009-10-28 本文受国家自然科学基金(60873019),黑龙江省自然科学基金(F200608)和黑龙江省教育厅海外学人重点科研资助项目(1152hq08)资助。

谢志强 男,博士后,教授,CCF高级会员,主要研究方向为企业智能计算与调度优化、数据库与知识工程;张磊 女,硕士生,主要研究方向为企业智能计算;杨静 女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为CIMS、数据库与知识工程。

关键路径为主的纵横双向调度优化算法,并用实例验证了所提出的算法。

1 问题描述

给定一个产品和 m 台设备,此产品具有 n 道工序,设备 j 上工序 i 的连续加工时间 T_{ij} 和开始加工时间 S_{ij} ,其中 $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ 。需满足如下条件:①工序的顺序按产品树状工艺结构预先确定。②每道工序只能在一台设备上加工或装配,简称加工。③一台设备一次只能加工一道工序。④任何工序只能在其紧前工序加工完毕后,才能开始加工。⑤一台设备上,一个工序完成后,才能开始另一个工序的加工。

本文讨论的复杂产品综合调度问题是在满足上述的情况下,如何找到一种合适的排序,使每个工序在满足同设备紧前工序和工艺结构紧前工序的约束条件下,尽早开始加工,使得最晚完工的设备尽早结束,实现总的加工时间最小^[9]。目标函数如下:

$$T = \min\{\max\{T_{ij} + S_{ij}\}\}$$

$$s. t \min(S_{ij})$$

$$S_{(i+1)j} \geq S_{ij} + T_{ij}$$

$$S_{xy} \geq \max(S_{ij} + T_{ij})$$

其中, ij 是 $(i+1)j$ 同设备的紧前工序, xy 是 ij 工艺结构的紧前工序。

2 工序调度策略设计

2.1 优先级调度策略

为工序设置优先级,设加工树为 m 层,则将根节点工序的优先级设置为 1,其所有子节点工序的优先级设置为 2,依此类推。规定根节点工序的优先级最低, m 层上的优先级最高。优先调度优先级最高的工序^[8]。

2.2 调度长路径策略

定义 1(调度路径长度) 加工树上一节点,沿其子节点到叶子节点的所有路径中,工序加工时间和最大的路径长度为该节点的调度路径长度。如,有一个节点 n_i ,沿其子节点到叶子节点的序列为 n_i, n_{i-1}, \dots, n_k ,其中 k 为该节点子孙叶子节点数,设各节点上工序的加工时间分别是 t_i, t_{i-1}, \dots, t_k ,则 $\max(\sum_{j=1}^k t_j)$ 为 n_i 的调度路径长度。

根据调度路径长度定义,从根节点分析,调度长路径属于关键路径,因此优先调度长路径上的节点可最终实现优先调度关键路径上的节点。所以,当存在优先级相同的工序 $P_{1i}, P_{2i}, \dots, P_{mi}$ 时,通过分别计算节点 $P_{1i}, P_{2i}, \dots, P_{mi}$ 的调度路径长度,按调度路径长度降序排列,确定调度次序,体现关键路径上工序的加工时间对总加工时间有较大的影响^[7]。

2.3 长用时调度策略

当存在工序 $P_{1i}, P_{2i}, \dots, P_{mi}$,它们的优先级和调度路径长度都相同时,由于加工时间较长的工序对完工时间影响较大,为了将设备上的空闲时间段优先分配给长用时工序,应优先调度加工时间长的工序。于是将工序按加工时间降序排列,并依次调度。

3 调度算法描述

通过以上分析,所设计的算法步骤如下。

(1)输入机器及产品工序的数据,建立复杂产品的工艺树模型结构,计算并记录每个工序的调度路径长度。

(2)根据工艺树模型结构为加工树上工序所在的层设置优先级。

(3)如果无可调度工序,则结束。否则,根据优先级策略优先调度优先级高的工序。

(4)当优先级高的工序不唯一时,采用调度长路径策略进行选择,当调度长路径策略不能唯一确定调度工序时,采用长用时策略进行选择。

(5)调度选择的工序采用前沿贪心规则。前沿贪心规则指将工序调度到相应设备上时,在满足合理性的前提下,使其开工时间为最小值^[10]。

(6)将调度完的工序从加工树上删除,转到步骤(3)。算法流程图如图 1 所示。

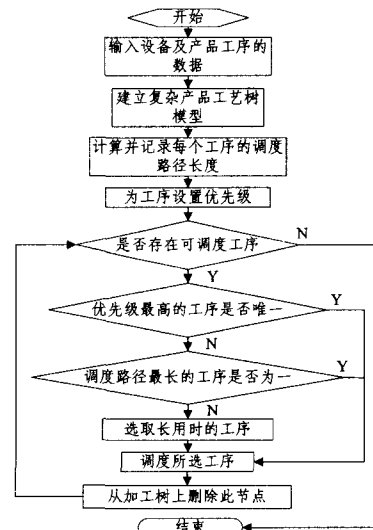


图 1 算法流程图

4 算法复杂性分析

设产品总工序数是 n ,设备数是 m 。

(1)工序的调度路径长度的比较

由于工序总数一般是 n ,各层上的工序数最多是 n ,比较工序调度路径长度,最坏的情况下是比较 $C_n^2 = n(n-1)/2$ 次,其复杂度是 $O(n^2)$ 。

(2)工序加工时间的比较

由于工序总数一般是 n ,各层上的工序数最多是 n ,比较工序的加工时间,最坏的情况下是比较 $C_n^2 = n(n-1)/2$ 次,其复杂度是 $O(n^2)$ 。

(3)工序插入到设备上的空闲时间的复杂度是 $O(n^2)$ ^[11]。

综合以上的分析,排序的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

5 调度实例和比较

当有产品 A 时^[12],其加工工艺图如图 2 所示,其中长方框内数字分别为:产品工序名/工序设备名/产品加工时间。按拟关键路径算法^[7]进行调度的次序是:A0A1A3A4A9A2A8A16A5A6A11A10A17A20A7A13A12A18A14A15A19A21A22。按文献[8]中的算法进行调度的次序是:A0A1A3A6A2A5A7A4A15A12A8A11A9A10A13A14A18A19A17A16A20A21A22;按本文提出的算法进行调度的次序是:A0A1A3A4A7A2A5A6A9A13A8A11A14A10A12A15A16A18A17A19A20A21A22。

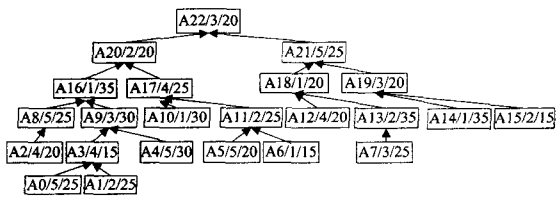


图2 产品A加工图

为了具体分析本文所提出的调度方法,并清楚地说明拟关键路径法、文献[8]中的算法与本文算法之间的区别,对产品A的部分调度过程进行了说明。

若采用拟关键路径法进行调度,首先调度关键路径上的工序,根据产品A的加工作业树可以看出关键路径是A0A3A9A16A20A22。关键路径上相关工序的开始加工时间必须大于其紧前工序的加工结束时间。因此调度到A20时,以A20为根的左子树上的工序已经全部调度完。欲调度A22时,应先调度以A21为根节点的右子树。以A21为根的右子树的关键路径是A7A13A18A21。当调度到A18时,以A18为根的左子树上的工序已经全部调度完。欲调度A21时,应先调度以A19为根的右子树上的工序。以A19为根的右子树的关键路径是A14A19,此时调度A14。因此A14在调度甘特图中的开始加工时间为120,如图3所示。图中横坐标代表时间,纵坐标代表设备,纵坐标上的 x, y 代表设备 x 中的第 y 台,图中工序上的 x, y 代表的是产品 x 的工序 y ,本文中产品1就代表产品A,加工产品A的设备共有5台,且每台设备的功能各不相同。文中其他图依此类推。

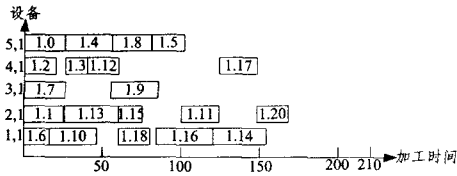


图3 采用拟关键路径法调度的部分甘特图

若采用文献[8]中的算法进行调度,当调度到优先级为4的工序时,根据短用时策略,A15的加工时间最短,为15个工时,因此优先调度A15。然后调度A12。其次由于A8与A11加工时间相同,采用短用时策略不能确定优先调度谁,根据长路径策略进行选择,A8的路径长度是从根节点到A8所经过工序A22,A20,A16,A8的加工时间的和100个工时,A11的路径长度是从根节点到A11所经过工序A22,A20,A17,A11的加工时间的和90个工时,A8的路径长度大于A11的路径长度,因此先调度A8再调度A11;再次由于A9与A10的加工时间也相同,根据长路径策略,A9的路径长度105大于A10的路径长度95,因此调度完A9再调度A10;最后A13和A14的加工时间相同,路径长度也相同,因此A13与A14优先调度谁都可以。此时A14在调度甘特图中开始加工的时间为45个工时,比拟关键路径法提前了75个工时,如图4所示。

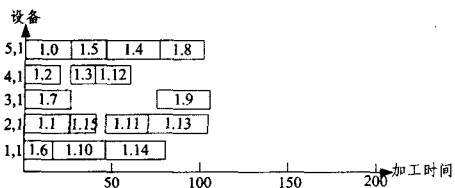


图4 采用文献[8]中的算法调度的部分甘特图

若采用本文算法进行调度时,调度到优先级为4的工序

时,采用调度长路径策略进行选择,A9的调度路径长度等于A0,A3,A9的加工时间的和70个工时,在同优先级的工序中A9的调度路径长度最长,因此优先调度A9。其次根据调度路径长度降序排序并依次调度A13A8A11A14,此时A14在调度甘特图中开始加工时间为15个工时,比动态关键路径法又提前了30个工时,调度甘特图如图5所示。

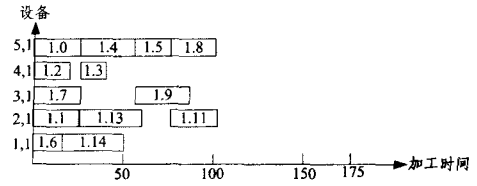


图5 采用本文算法进行调度的部分工序甘特图

当采用拟关键路径法^[7]产品A进行调度时,调度结果的甘特图如图6所示。当采用文献[8]提出的动态关键路径法对进行调度时,调度结果的甘特图如图7所示。当采用本文提出的基于调度长路径的算法进行调度时,调度结果的甘特图如图8所示。

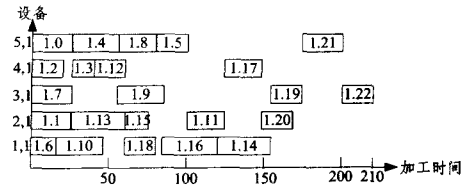


图6 采用拟关键路径法用时210个工时

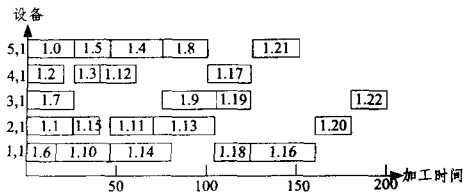


图7 采用文献[8]中算法用时200个工时

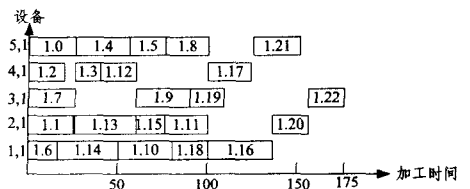


图8 采用本文算法用时175个工时

从产品调度甘特图可以看出,对于复杂产品调度问题,采用拟关键路径法对实例进行调度,产品的加工周期为210个工时。采用文献[8]中算法对实例进行调度,产品的加工周期为200个工时,比拟关键路径法缩短了4.8%。而采用本文算法进行调度,产品的加工周期为175个工时,比动态关键路径算法又缩短了12.5%。可见本文算法能更好地解决复杂产品调度问题。之所以本文的调度算法更优,对比图6和图8可以看出,由于考虑横向,图8中设备利用率得到提高;对比图7和图8可以看出,图8中关键路径上的工序A0A3A9A16A20A22除A0A3开始时间不变外,其他工序开始时间均提前,说明该算法在兼顾纵横双向优化调度时,优先考虑影响总加工时间的关键路径上工序的调度,使纵横双向优化调度更合理、更优化。

结束语 本文提出了一种解决复杂产品加工和装配综合调度优化的新方法,该方法是在考虑优先级策略的情况下优

先调度对整体加工时间影响较大的关键路径上的工序和长用时工序,使产品的调度效率得到提高。理论分析和实例表明,所提出的算法对解决复杂产品综合调度问题能获得令人满意的效果且算法复杂度不超过二次多项式,因此该算法简便可行,容易实现。该算法改进后可推广应用于存在相同设备的复杂产品综合调度问题。

参 考 文 献

[1] Croce F D, Ghirardi M, Tadei R. An improved branch-and-bound algorithm for the two machine total completion time flow shop problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 139:293-301

[2] El-Bouri A, Shah P. A neural network for dispatching rule selection in a job shop[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 31:342-349

[3] Gao Jie, Gen Mitsuo, Sun Linyan. Scheduling jobs and maintenances in flexible job shop with a hybrid genetic algorithm[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 17:493-507

[4] Amirthagadeswaran K S, Arunachalam V P. Improved solutions for job shop scheduling problems through genetic algorithm with a different method of schedule deduction[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 28:532-540

[5] Mattfeld D C, Bierwirth C, Kopfer H. A search space analysis of the Job Shop Scheduling problem[J]. *Annals of Operations Research*, 1999, 86:441-453

[6] Huang Wenqi, Kang Yan. A Short Note on a Simple Search Heuristic for the Diskspacking problem[J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 131:101-108

[7] 谢志强,刘胜辉,乔佩利.基于 ACPM 和 BFSM 的动态 Job-Shop 调度算法[J]. *计算机研究与发展*, 2003, 40(7):977-983

[8] 谢志强,周勇,杨光.动态生成优先工序集的多产品制造过程优化控制[J]. *电机与控制学报*, 2008, 12(6):734-738

[9] Wu Chih-Sen, Li Der-Chiang, Tsai Tung-I. Applying the Fuzzy Ranking Method to the Shifting Bottleneck Procedure to Solve Scheduling Problems of Uncertainty[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 31:98-106

[10] Xie Zhi-qiang, Ye Guang-jie, Zhang Da-li, et al. New Nonstandard Job Shop Scheduling Algorithm[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 21(4):97-100

[11] 谢志强,刘秋杉,丛景,等.基于缩短装配设备空闲时间的车间装配方法[J]. *黑龙江大学:自然科学学报*, 2007, 24(3):291-300

[12] Xie Zhi-qiang, Ye Guang-jie, Liu Yong, et al. Study on Job Shop Scheduling with Many Function-Same Machines[C]// *Proceedings of the 2007 IEEE international Conference on Mechatronics and Automation. ICMA2007. Harbin, 2007:1278-1282*

(上接第 115 页)

最小权限,同时收回用户拥有的其他权力;如不能,拒绝用户的任务请求。然后,访问控制执行点 PEP 将执行结果回送给多策略决策器 MDM,作为下次用户访问的参考。MDM 再将决策结果返回给用户。

(4) Web 服务组合业务流程中每个任务由系统按一定的逻辑顺序自动执行^[10]。当轮到某个任务执行时,由系统自动标识,然后等待访问主体激活。如果任务被激活,任务此时的状态信息就写入任务信息库。此后任务的状态信息及其它相关信息都由系统自动记入任务信息库。一旦任务处于终止态或夭折态,系统在任务信息库中标志该任务已终止,启动后续任务准备执行。

(5)如果组合服务业务流程任务被激活,启动任务与自治 Web 服务成员之间的会话,自治服务成员收取组合服务引擎发送的用户身份信息与服务功能请求信息,并进行可信验证。然后到策略库中查找主体策略文件,从中析取访问权限信息并依此作出判决。如果是许可(permit),则将当前自治 Web 服务功能执行结果返回给组合服务引擎,同时根据需要调用属性更新模块对用户或者服务属性进行更新;如果是拒绝(deny),则将 deny 决策返回给组合服务引擎。

结束语 组合 Web 服务构建于分布式协同环境中,需要有效的安全机制保障,现有的组合 Web 服务安全机制并不能满足需求。本文提出了一种 4 层 Web 服务组合安全模型(HSM-WSC)。HSM-WSC 模型能够集成多种分布式异构安全机制,通过层次化的结构为组合 Web 服务从底层消息安全到多服务柔性安全的耦合奠定了基础。文中还给出了模型实施的原型系统。HSM-WSC 模型具有模块化、可伸缩性和灵活性等特性。多种异构访问控制机制的可信协同是组合 Web 服务访问控制安全的关键。下一步的工作将是设计出高效的多策略协同计算模型,准确、全面地刻画组合服务的动态安全行为,以更好地满足 Web 服务跨边界可信组合的实际

需求。

参 考 文 献

[1] Joachim B, Barbara C, et al. Towards Secure Execution Orders for Composite Web Services[C]// *Proc. of 2007 IEEE International Conference on Web Services*. 2007:489-496

[2] Carminati B, Ferrari E, et al. Security Conscious Web Service Composition with Semantic Web Support[C]// *Proc. of the First International Workshop on Security Technologies for Next Generation Collaborative Business Applications*. 2007:695-704

[3] 吴敏. Web Services 访问控制机制及其整合研究[D]. 上海:东华大学信息科学与技术学院, 2006:29-40

[4] Huang D. Semantic policy-based security framework for business processes [C] // *Proc. of the Semantic Web and Policy Workshop*. 2005:27-31

[5] Menzel M, Wolter C, Meinel C. Access Control for Cross-organisational Web Service Composition[J]. *Journal of Information Assurance and Security*, 2007, 2(2):155-160

[6] Charfi A, Mezini M. Using Aspects for Security Engineering of Web Service Compositions[C]// *Proc. of In Proc. of the IEEE International Conference on Web Services*. 2005:59-66

[7] 孔维梁,等.基于二维 QoS 模型的 Web 服务组合[J]. *计算机科学*, 2008, 35(11):131-13

[8] Anoop S, Theodore W, Karen S. NIST Special Publication 800-95[EB/OL]. Guide to secure web services. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. August 2007. <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-95/SP800-95.pdf>

[9] Chun S A, Atluri V, Adam N R. Using Semantics for Policy-based Web Services Composition[J]. *Journal of Distributed and Parallel Databases*, 2005, 18(1):37-64

[10] 陈凤珍,洪帆.基于任务的访问控制(TBAC)模型[J]. *小型微型计算机系统*, 2003, 24(3):621-624