

## 基于数据的复杂制造过程调度

吴启迪<sup>1</sup> 乔非<sup>1</sup> 李莉<sup>1</sup> 吴莹<sup>1</sup>

**摘要** 现代制造企业规模庞大、过程复杂等特征给制造过程的调度决策带来了极大的挑战。一方面,使用传统方法建立指导生产过程调度的精确数学模型变得越来越困难;另一方面,因缺乏准确、及时的模型参数而往往导致低下的模型使用效果。在此情况下,基于数据-信息-知识-决策的信息提炼轨迹,有必要探寻新的基于数据的复杂制造过程的调度理论与方法。在综述国内外相关研究的基础上,提出了由数据层与模型层构成的基于数据的复杂制造过程调度架构,并对该结构框架下的相关理论、方法及实施技术进行了探讨。

**关键词** 基于数据, 调度, 复杂制造过程, 调度框架, 调度模型  
**中图分类号** TP278

## Data-based Scheduling for Complex Manufacturing Processes

WU Qi-Di<sup>1</sup> QIAO Fei<sup>1</sup> LI Li<sup>1</sup> WU Ying<sup>1</sup>

**Abstract** Large manufacturing scale and process complexity of modern manufacturing companies are posing great challenges to production scheduling. On the one hand, it becomes more and more difficult to build accurate mathematical scheduling models for manufacturing processes based on conventional methods; on the other hand, the lack of accurate and real-time parameters of scheduling models may lead to low effectiveness of these models. Therefore, following the information-extraction path of data-information-knowledge-decision, it is necessary to explore innovative theories and methodologies of data-based scheduling for complex manufacturing processes. In this paper, based on systematic research of related works worldwide, a data-based scheduling framework composed of a data layer and a model layer for complex manufacturing processes is proposed. Related theories, methodologies, and technologies for this scheduling framework are discussed as well.

**Key words** Data-based, scheduling, complex manufacturing processes, scheduling framework, scheduling model

现代科学技术特别是信息科学技术的快速发展,为现代制造企业带来了一系列的变化。不仅制造规模日益庞大,制造过程越加复杂,而且制造环节间的耦合度不断提高,制造过程中的动态不确定因素发生概率也随之逐渐增加。所有这些给复杂制造过程的调度带来了极大的挑战。主要表现为:

1) 沿用传统的基于模型的制造过程调度策略,往往因制造过程复杂度的提高而难以建立精确的数学模型;

2) 通常在基于假设条件下建立起来的模型,又因人为假设降低了实际复杂度,而难以保证所建模型的精度;

3) 缺乏准确、及时的模型参数,进一步造成通过模型获得的调度方案可靠性较低,很难直接指导

实际生产;

4) 僵化的模型不能对生产现场中的动态不确定因素做出快速有效的反应,难以保证调度的柔性。

上述物理层面的变化与挑战反映到调度管理层面,就体现为技术与现实的矛盾。一方面,制造业的自动化程度不断提高,企业资源计划(Enterprise resource planning, ERP)、高级技术与调度系统(Advanced planning and scheduling, APS)、先进过程控制(Advanced process control, APC)、制造执行系统(Manufacturing execution system, MES)等系统不断在企业中得以运用,产生并存储了大量与制造过程相关的离线和在线数据和知识;另一方面,由于自动化单元系统之间的关联随着自动化程度的提高呈现的相对减少的态势,致使企业自动化程度的提高与企业制造性能的提高并不完全成正比。因此,如何有效集成已有的自动化系统,充分利用企业中的相关数据,以提高调度水平;如何从大量离线和在线数据中提取有用的知识规则,以提高调度质量等问题已成为当今复杂制造企业所面临的新的迫切需要解决的问题。

本文在综述国内外基于数据的复杂制造过程调度研究成果的基础上,提出由数据层和模型层构成的复杂制造过程调度架构,并对该结构框架下的相

收稿日期 2009-01-04 收修改稿日期 2009-03-08  
Received January 4, 2009; in revised form March 8, 2009  
国家自然科学基金重点项目(70531020), 国家教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0622), 教育部博士点基金新教师课题(20070247007) 资助  
Supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (70531020), Program for New Century Excellent Talents (NCET-07-0622), and New Scholars Program of Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20070247007)  
1. 同济大学电子与信息工程学院 上海 200092  
1. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00807

关理论、方法及应用技术加以探讨。

## 1 数据与调度

复杂制造系统(过程)积累了大量数据,按其性质不同,可以分为生产过程数据、资源数据、市场数据。

生产过程数据,是指复杂制造生产过程中,与产品在整条生产线上的加工操作过程或过程单元相关的数据。包括工件加工时间、产量指标及每一个加工步骤的操作信息等。

资源数据,是指制造过程中与物理设备及生产环境相关的数据。包括系统资源(包括了国家标准及手册中的工艺数据,用户可以对系统资源进行维护)、用户资源(记录企业特定的工艺资源)和通用资源(对企业已有的工艺资源进行利用)。

市场数据,是指与制造系统外围环境因素,如市场、客户等相关的数据。包括产品需求量、所需产品种类、交货时间等。通常该类数据会与顾客个体、地理区域、时间范围、营销策略等直接相关。

所有这些复杂制造过程中积累的数据蕴含大量经验、规则、知识,一般都建有相应的数据库或数据仓库。其中数据库面向生产过程的数据分析与处理;而数据仓库则针对所存储的海量数据的组织管理,并结合某些分析工具,挖掘出隐含在数据中的经验、知识及规则等,再进一步应用到生产过程的优化与管理中。从数据与调度的行为关系来看,两者是相辅相成的(如图1所示)。

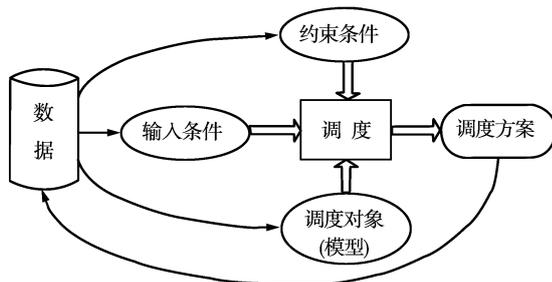


图1 数据与调度的关系  
Fig.1 Data and scheduling

首先,数据是调度的驱动和结果。调度的实施需要面向调度对象(或对象模型),按照输入条件,考虑相关约束,采取相应的决策方法,来获取以数据形式表达和存储的调度方案;同时,调度行为又为复杂制造系统生成了大量的数据,如调度决策信息,调度行为引起的设备、工件等状态的变化信息等。其次,数据的质量直接决定着调度的质量。如果模型不准确或者考虑的因素不充分,输入条件与约束定义不恰当,都会影响调度方案的可靠性与可用性。因此,基

于数据能够有效改进调度的水平。如果能够从复杂制造系统的大量离线和在线数据中获取有用的知识,作为调度的输入条件与约束条件,甚至定义调度模型,将对调度的性能改进具有重要意义。

## 2 国内外研究现状

自20世纪60年代物料需求计划(Material requirement planning, MRP)出现以来,人们就已开始使用系统中的数据支持制造过程的调度行为。在20世纪60年代到80年代之间,主要表现在根据相关工艺文件(如物料清单(Bill of material, BOM)、配方等)确定工件在制造系统内的加工流向;根据工艺参数确定工件在设备上的加工时间等调度基础数据;基于这些数据,建立调度模型;使用相应的优化方法,获得调度方案。

20世纪90年代后,随着科学技术特别是信息科学技术的发展,以及制造过程的设备复杂性和工艺复杂性的提高,相应地,调度决策的难度也不断增加。主要体现在:

1) 设备数目多,工艺流程复杂且可能出现临时更改,直接建立调度模型困难,调度模型的不确定性增加;

2) 设备复杂性高,例如,在一台设备上可以完成多个工艺,在不同工艺之间切换可能会导致不确定的设备整定时间;需要对设备进行维护保养以保证产品质量;设备出现意外故障的可能性增加。因此,给调度问题的参数输入造成了一定困难,并且在形成调度方案的过程中必须考虑尽可能多的参数,以保证调度方案的有效性;

3) 设备与设备之间的耦合度增加,上游设备的加工性能可能会对下游设备的加工参数(如加工时间等)造成影响,也会大大增加调度问题求解的复杂性。

面对上述挑战,仅仅使用某一特定的数据文件或者特定信息的范围,已经难以达到支持调度求解的目标。因此,如何从系统的大量数据中提取有用信息,进一步支持调度行为得到了许多专家学者的关注。从查阅到的文献看,相关的工作主要从以下五个方面展开: 1) 基于多个数据源共同支撑调度决策; 2) 基于数据的制造过程调度建模; 3) 基于数据的调度参数设置; 4) 基于数据的调度方法研究; 5) 基于数据的复杂制造过程调度机制。

### 2.1 基于多个数据源的数据共同支撑调度决策

IBM公司的Bergamaschi等于1997年指出,调度的主要问题是控制和数据的分离,他们以大规模设计任务调度为背景,指出已有的很多任务调度算法只提供面向数据层或是面向控制层的调度解决

方案, 虽然简化了问题, 然而, 却导致了很多算法不能有效地应用于带有复杂控制和复杂数据的大规模任务调度, 建立综合运用基于控制流的调度与基于数据流的调度的自适应调度系统是求解该类问题的有效途径<sup>[1]</sup>. 德州仪器公司的 Patel 针对半导体制造行业, 提出了用于改进过程控制的工件分配策略框架, 该工件分配策略在进行工件分配决策时考虑了来自过程控制系统的数据<sup>[2]</sup>. 以上研究已认识到使用多种类型数据支持调度决策的重要性, 然而, 其研究还停留在简单地使用部分控制数据辅助调度决策的层面上 (例如文献[1]) 或者使用调度来改进过程控制效果 (例如文献[2]) 的层面上, 没有进一步分析各类数据对调度效果的影响, 没有形成完整的使用不同数据源的数据支撑调度决策的体系框架.

## 2.2 基于数据建立制造过程的调度模型

斯洛文尼亚卢布尔雅那大学 (University of Ljubljana) 的 Gradisar 等根据生产数据管理系统中的数据, 获得生产设备结构的相关信息以及能够生产的产品信息. 利用这些数据建立赋时 Petri 网调度模型, 使用启发式方法, 获得多种产品生产过程的改进<sup>[3-4]</sup>. 该研究的不足是只使用了数据库中的静态信息来建立系统的静态模型, 未考虑动态信息的有效利用, 在高度不确定制造环境下, 基于该模型获得的调度方案可能与实际偏差较大, 精度较差. 东北大学张延华等针对中厚钢板轧制中精轧工序的负荷优化问题, 提出了一种基于在线信息处理技术的新方法来控制轧制过程. 该方法使用反向传播 (Back propagation, BP) 网络模型挖掘轧制过程数据库中的数据, 在线使用调度模型与知识模型, 并和数学模型相结合以改进原有调度模型, 从而得到更加优化的负荷方案<sup>[5]</sup>. 该研究的不足是没有使用多种数据挖掘方法比较其优劣, 以获得更好的方案.

## 2.3 基于数据的调度参数设置以及调度行为改进

这方面的工作主要体现为调度基础数据预测, 包括对工件加工时间、平均设备故障发生间隔时间 (Mean time between failure, MTBF) 和平均设备故障修复时间 (Mean time to Recovery, MTTR) 等调度参数的预测. 具体采取的方法包括统计分析、数据挖掘、聚类分析、神经网络等方法. 例如, 美国乔治亚理工学院的 Baker 等使用反向传播神经网络 (Back-propagation neural network, BPNN) 在线预测硅片在离散刻蚀机上的刻蚀时间<sup>[6]</sup>; 日本 Matsushita 电气公司的 Hosoe 等将加工模型、工具加工的时间分类等加以结合, 提出了工具加工时间预测方法<sup>[7]</sup>; 日本 Renesas 技术公司的 Kikuta 等将历史数据、人的经验等相关数据整合到知识管理系统中, 以分析半导体制造设备的平均故障修复时间,

从而提高维修效率<sup>[8]</sup>; 我国吉林工业大学的郑玉华等对 CNC 车床的维修性、有效度以及维修时间和停机时间的对数正态分布模型进行统计分析, 用来得出国产 CNC 车床的平均修复时间<sup>[9]</sup>; 墨西哥物料研究公司的 Cheang-Martinez 等提出了基于神经网络的锌工厂电解柱预防维护周期预测方法<sup>[10]</sup>; 印度国家铸造技术研究所的 Shukla 等将基于报价的多智能体系统 (Multi-agent system, MAS) 用于求解集成过程规划与调度问题中, 提出了考虑动态工具成本的新模型, 使用数据挖掘技术预测工具修复成本与工具故障概率之间的关系, 并使用禁忌搜索模拟退火混合算法来获得更加优化的决策方案<sup>[11]</sup>. 台湾中国文化大学的 Yao 等面向流水车间, 基于其工件精确加工时间不可知、但采样数据可以获得的这一特点, 将统计学方法和模糊集理论相结合, 使用区间值模糊数字代表未知的工件的加工时间, 将传统流水车间排序问题扩展到基于统计数据建立的模糊流水车间排序模型<sup>[12]</sup>. 以上研究根据待解决问题的特点, 采用合适的方法预测调度模型中使用的数据信息, 从而提高调度的有效性. 其不足是只关注调度某方面的信息, 如加工时间、维护周期、故障周期等, 而未能对多方面的信息综合加以考虑.

## 2.4 基于数据的调度方法研究

湖南工程学院的张细政等提出将基于遗传算法的数据挖掘方法用于在大量优化调度方案中探索调度操作数据的产生模式, 进而得到基于规则集的调度器, 这些规则可以重现优化的性能, 并且比简单调度规则性能更为优越. 仿真结果表明, 该方法在解的质量与计算速度方面都具有较好的性能<sup>[13]</sup>. 该研究提供了一种新的求解调度问题的思路, 不足是目前只用该方法解决了非常简单的调度问题, 该方法在大规模调度问题求解中的有效性有待进一步探讨.

## 2.5 基于数据的复杂制造过程调度机制

大连理工大学王万雷等提出了基于数据的复杂制造过程的调度机制<sup>[14]</sup>. 该调度机制的工作过程是: 通过生产任务管理模块提取所要求的生产任务, 建立所要调度的对象; 数据挖掘模块将生产过程中的在线数据作为该复杂制造过程调度问题求解的输入量及约束条件, 利用各种数据挖掘技术查找知识库中的有关知识、经验、规则等; 调度决策模块对数据挖掘后的结果结合调度算法进行分析, 建立调度模型, 确定各任务的权重系数, 建立调度问题的优化目标, 进行调度优化, 经过对调度结果的评价, 分析调度结果的有效性, 确定调度方案, 并将调度指令下达到作业现场; 现场数据监控模块通过对现场数据的实时监控, 根据现场的变化向调度决策模块提供现场的实时数据, 以保证调度的准确性; 数据分析管理

模块把从现场采集的信息反馈给上层计划部门, 作为计划部门制定和修改作业计划的依据. 该研究提供了很好的基于数据的调度问题求解框架, 不足是尚未对此框架中涉及的关键技术给出具体的理论与技术方法.

上述五个方面从面向问题的角度展开对基于数据的制造过程调度研究, 均不可避免地涉及到数据挖掘、特别是异构数据处理等相关技术, 对此, 也已经有不少国内外的研究人员进行过研究和探索. 例如: 英国牛津布鲁克大学的 Bloodsworth 等提出了基于 MAS 的基于动态异构数据的分布式实时调度的通用模型<sup>[15]</sup>; 暨南大学的刘波等将蚁群优化算法用于数据挖掘技术, 从而实现对分布式数据库的数据的分析处理<sup>[16]</sup>; 西安交通大学 Pan 等提出了一种通讯机制, 通过本体服务将领域知识与连续数据挖掘过程结合, 减少人工干预<sup>[17]</sup>. 华中科技大学谭支鹏等研究了工作流过程的概念和定义, 并且给出了一种方法, 在数据仓库中, 将数据的提取-变换-存储过程 workflow 建模为一个称作 workflow 图表的有向图表, 设计了两种调度算法, 并指出并行调度是实现数

据的提取-变换-存储过程的最好方式之一<sup>[18]</sup>. 尽管以上研究获得了一定的研究成果, 但均未直接应用于调度研究领域, 有待进一步展开应用研究.

综上所述, 从国际范围看, 基于数据的复杂制造过程调度已经开始受到关注, 并在过去十多年中取得了一些研究成果. 但总的来说, 还没有形成良好的框架和较系统的理论. 而现代企业的变化与挑战又要求充分利用企业中的大量离线和在线数据获得相应的知识规则, 以有效提高制造性能. 因此, 以复杂制造过程为背景, 展开对基于数据的复杂制造过程调度及相关理论与方法的研究就显得十分必要而迫切.

### 3 基于数据的调度

针对复杂制造过程对基于数据的调度的需求, 我们可以一方面借助于各种调度理论、数据分析、数据挖掘和群体智能理论与技术, 在大量离线数据的基础上提炼出知识、经验和规则, 为调度决策提供准确、完整的参数条件, 支持更为科学有效的系统状

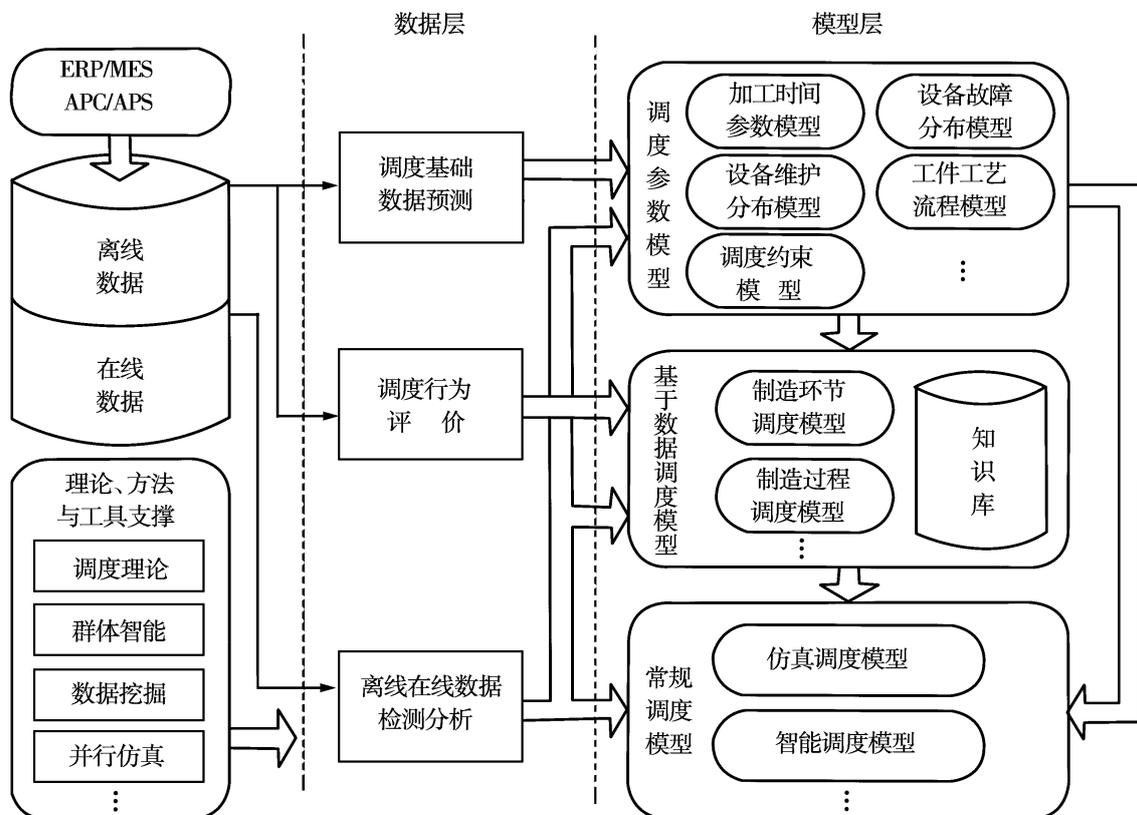


图2 基于数据的复杂制造过程调度架构

Fig. 2 Data-based scheduling framework for the complex manufacturing processes

态/行为预测与调度决策的评测评价;另一方面,通过实时采集的在线数据,跟踪反映实际生产过程的环境变化和约束变化,驱动调度方案、调度算法、甚至调度模型的调整,保证小时间尺度调度方案的可行性与有效性.为了完成上述功能,我们初步建立了由数据层及模型层构成的基于数据的复杂制造过程调度架构(如图2所示).

数据层主要完成三种功能:1)调度基础数据预测.通过建立调度参数模型,为生产调度模型提供准确、完整的参数条件(包括输入参数与约束参数);2)调度行为评价.根据系统的离线数据,评价针对不同的系统状态,采取不同的调度方案对系统的性能的影响,提炼出知识、经验和规则,存储在知识库中,为将来生成调度方案或基于在线数据对调度方案的调整提供依据;3)数据检测分析.即检测并分析离线和在线数据,作为系统性能预测或调度方案调整的驱动.

模型层包括三个组成部分:1)调度参数模型,主要包括加工时间参数模型、设备故障分布模型、设备维护分布模型、工件工艺流程模型(即工件应在哪些设备上完成哪些操作,以形成最终产品)与调度约束模型(例如工件加工的顺序约束、工序加工的时间约束、工序加工的设备约束等),这些模型为调度模型的运行提供了输入参数与约束条件,为调度决策的可靠性提供保证;2)基于数据的调度模型,可以依据调度对象、调度行为以及调度效果的关系,提取不同粒度的调度模型,这些模型根据调度参数模型提供的参数或在在线数据的驱动下,获得调度决策方案或进行系统状态/行为的预测,另外,该类模型的运行结果也可以作为常规生产调度模型决策时的约束或启发式因子;3)常规的生产调度模型,该模型用于根据调度参数模型提供的参数并在在线数据的驱动下,生成相应的调度决策方案,或调整已有的调度方案或进行系统状态/行为的预测.

图2所示的基于数据的调度架构不同于传统基于模型的调度,但也不是完全否定模型在制造调度中的作用,而是倡导一种数据和模型相互结合、相互促进的新型调度理念.通过数据的分析、处理与提炼,保证基于模型方法的准确性与有效性;通过模型的生成、参数调整与测评,保证基于数据方法的规范性与科学性.由于并不是用基于数据的方法完全取代基于模型的方法,所以在图2调度架构的实际运用过程中,许多在基于模型的调度研究中已探索并日益成熟的相关理论、方法与工具支撑技术,如:调度理论、群体智能、数据挖掘、统计分析与计算机并行仿真技术等,应该都还是能够被借鉴与采用的,但也有必要进一步深入研究.

#### 1) 调度理论

在制造过程变得越来越复杂的情况下,使用传统的调度方法往往会出现维数危机等问题.因此,有必要将传统的调度理论与智能调度及仿真调度相结合,快速获得有效的优化的调度方案.

#### 2) 群体智能理论

群体智能理论在组合优化问题求解中得到了成功的运用,具有解决大规模调度问题的潜力.如何使用群体智能理论描述相应的调度模型,快速获得求解方案也是研究的方向之一.

#### 3) 数据挖掘

数据挖掘的基本目标就是从大量的数据中提取隐藏的、潜在的、有用的知识和信息.在数据挖掘的处理过程中,数据挖掘方法是最为关键的.而目前数据挖掘的方法主要有:关联规则方法、分类和聚类方法、数据统计方法、机器学习方法、多层次数据汇总归纳、神经网络方法、决策树方法、序列模式分析方法、可视化技术等.在基于数据的复杂制造过程调度研究中,数据挖掘的研究方向应包括交互性、可视化、多源异构数据类型的挖掘和安全性等问题.

#### 4) 计算机并行仿真

计算机并行仿真是实现或验证上述方法的有效手段.如何加快大规模复杂模型的仿真速度、加快智能算法的求解速度,使用计算机并行仿真将是有效方法之一,因此有必要深入研究.

## 4 案例介绍

本节结合笔者近年来在上海某硅片制造生产线上进行的调度研究工作与体会,介绍基于数据的复杂制造过程调度思想的运用与实施.

最初的研究定位是生产线调度与仿真系统研发,主要以预测生产线的瓶颈以及生成派工方案为目的.而企业自有的一套生产线数据采集系统是研究工作的全部数据来源与依据.在项目初期,以企业数据采集系统提供的工艺文件与加工参数信息作为调度与仿真系统的基础数据,虽然运用了先进的调度思想、精心设计了调度算法并加以实现,但得到的仿真结果精度较差,难以指导实际的调度排产任务.分析之后,发现主要存在的问题为:

1) 产品加工流程在企业长期运行过程中发生的变化没有及时更新到数据系统中,导致数据系统给出的工艺流程数据与实际相差较大;

2) 企业数据系统提供的加工时间等数据只是工件在设备上的净加工时间,而在实际生产中,还需要由操作人员完成上、下片的工作,以及工件在设备之间的运输工作,这一类的数据不完备导致仿真的不完备;

3) 设备状态信息(如:正常可用、发生故障、维

护保养等)更新不及时且给定不完全准确等,导致仿真系统对在调度时段内是不可用的或部分时段是不可用的设备无法正确判断;

4) 由于设备老化等原因,有些原先可以完成的工艺目前已不能够完成,而相关的数据没有及时更新到企业数据系统之中,导致设备实际能够完成的工艺与工艺文件不符合,造成仿真系统排程错误。

基于对上述问题的分析可知,复杂制造过程调度问题的实际求解仅有先进的调度理论与调度模型是不够的,还离不开有效的数据支持,而且越是复杂的制造系统与制造过程,其对数据支持的需求就越加迫切.基于数据达到有效支持调度行为的目的,必须解决好以下三方面问题:

1) 数据的选择.现代制造系统中的数据越来越呈现出海量特征,而规模庞大的制造数据中,并非都是与调度直接相关的,因此有必要根据所要解决的调度问题的范围、定位和精度等有所取舍。

2) 数据的净化.作为调度数据基础的企业数据系统往往由于更新不及时或维护不力等原因而在数据可靠性及完备性差的问题,为保证调度精度与质量,必须对与调度相关的数据加以认真核查、修补或检测。

3) 数据的提炼.调度模型或调度行为所需要的有些输入数据或参数设置数据有可能不能直接从企业数据系统中获得,如果排除维护管理等因素,则需要通过采用必要的数据分析处理技术,如:数据关联分析方法、数据预处理技术、数据挖掘方法等加以提炼。

将上述基于数据的调度思想结合到前文提到的硅片生产线调度的项目研究中,我们改进了调度解决方案,在企业原有的生产线数据采集系统基础上,综合运用数据的核查和补充、数据的统计分析、数据人工确认等方法,具体采取了以下措施:

1) 全面核查、更新企业数据系统中的产品加工流程及设备加工能力等数据,提高生产线仿真模型的准确性;

2) 基于企业原有数据系统中的历史数据,统计获得工件加工时间、设备维护保养间隔时间与维护保养持续时间等;

3) 以生产线在线数据驱动设备的状态更新、并相应设置不可用的时段,以保证设备状态的正确性;

4) 总结、提炼企业生产线管理人员的调度经验,作为调度算法的一部分,支持模型的运行。

通过实施上述改进措施,新开发的硅片生产线调度仿真系统的仿真精度达到 80% 以上,基本上可以达到预测瓶颈的目的.由此,我们也体会到,基于数据的调度将传统调度的优化导向与基于数据的实用导向相结合,有助于缩小研究与应用之间的差距。

## 5 结语

在复杂制造过程中,会涉及大量的数据及知识、经验和规则,如何从数据中获得有效的信息、知识与规则,以改善调度的模型、行为和决策是今后复杂制造过程调度研究的方向之一.基于数据的调度为复杂制造过程调度提供了新的求解思路,而基于数据的方法又是支撑复杂制造过程中相对独立的自动化系统逐步走向集成的有效途径之一.因此,基于数据的调度对进一步提高复杂制造过程的调度性能具有重要意义。

## References

- Bergamaschi R A, Raje S, Nair I, Trevillyan L. Control-flow versus data-flow-based scheduling: combining both approaches in an adaptive scheduling system. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 1997, **5**(1): 82–100
- Patel N S. Lot allocation and process control in semiconductor manufacturing—a dynamic game approach. In: *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*. Nassau, USA: IEEE, 2004. 4243–4248
- Gradisar D, Music G. Production-process modeling based on production-management data: a Petri-net approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2007, **20**(8): 794–810
- Gradisar D, Music G. Automated Petri-net modelling based on production management data. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2007, **13**(3): 267–290
- Zhang Yan-Hua, Liu Xiang-Hua, Wang Guo-Dong. Research on plate rolling load distribution based on data mining. *Iron and Steel*, 2005, **40**(4): 43–45  
(张延华, 刘相华, 王国栋. 基于数据挖掘的中厚钢板轧制负荷分配方法的研究. *钢铁*, 2005, **40**(4): 43–45)
- Baker M D, Himmel C D, May G S. In-situ prediction of reactive ion etch endpoint using neural networks. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A*, 1995, **18**(3): 478–483
- Hosoe H, Knamamori N, Yoshida K. The methods of data collection and tool processing time estimation in lot processing. In: *Proceedings of International Symposium on Semiconductor Manufacturing*. Santa Clara, USA: IEEE, 2007. 241–244
- Kikuta Y, Tsutahara K, Kinaga T, Suzuki A, Tanaka H, Hasegawa H. The knowledge management system for the equipment maintenance technology. In: *Proceedings of International Symposium on Semiconductor Manufacturing*. Santa Clara, USA: IEEE, 2007. 219–222
- Zheng Yu-Hua, Wang Yi-Qiang. Statistics and analysis of the maintenance data on the CNC lathe. *System Engineering – Theory and Practice*, 1999, **19**(8): 15–18  
(郑玉华, 王义强. CNC 车床维修性及其特征量的统计与分析. *系统工程理论与实践*, 1999, **19**(8): 15–18)
- Cheang-Martinez A, Acevedo-Davila J, Torres-Trevino L, Reyes V F A, Saldivar-Garcia A. Corrosion prediction and

annual maintenance improvement of concrete structural components using neural networks. In: Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. Cuernavaca, Mexico: IEEE, 2007. 202–206

- 11 Shukla S K, Tiwari M K, Son Y J. Bidding-based multi-agent system for integrated process planning and scheduling: a data-mining and hybrid tabu-SA algorithm-oriented approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, **38**(1-2): 163–175
- 12 Yao J S, Lin F T. Constructing a fuzzy flow-shop sequencing model based on statistical data. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2002, **29**(3): 215–234
- 13 Zhang Xi-Zheng, Xing Li-Ning, Wu Qi. Data mining algorithm based on genetic algorithm and its application. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, **27**(z1): 384–388 (张细政, 邢立宁, 伍栖. 基于遗传算法的数据挖掘方法及应用. 哈尔滨工程大学学报, 2006, **27**(z1): 384–388)
- 14 Wang Wan-Lei, Liu Xiao-Bing. Research on scheduling modeling for multi-style product manufacturing workshop. *Journal of Dalian Nationalities University*, 2008, **10**(1): 35–37 (王万雷, 刘晓冰. 多型号混线生产车间作业调度模型研究. 大连民族学院学报, 2008, **10**(1): 35–37)
- 15 Bloodsworth P, Greenwood S, Nealon J. A generic model for distributed real-time scheduling based on dynamic heterogeneous data. In: Proceedings of the 6th Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents. Seoul, South Korea: Springer, 2003. 110–121
- 16 Liu Bo, Pan Jiu-Hui. Distributed data mining method based on swarm intelligence. *Computer Engineering*, 2005, **31**(8): 145–147 (刘波, 潘久辉. 基于群体智能的分布式数据挖掘方法. 计算机工程, 2005, **31**(8): 145–147)
- 17 Pan D, Shen J Y, Zhou M X. Incorporating domain knowledge into data mining process: an ontology based framework. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, **11**(1): 165–169
- 18 Tan Zhi-Peng, Feng Dan, Wu Yong-Ying, Peng Feng. Work flow-based extraction and transformation-loading of data. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2006, **34**(2): 61–63 (谭支鹏, 冯丹, 吴永英, 彭峰. 基于工作流的数据抽取转换加载. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(2): 61–63)



**吴启迪** 同济大学电子与信息工程学院教授. 主要研究方向为复杂制造系统调度, 系统工程, 管理工程和智能控制.

E-mail: wuqidi@moe.edu.cn

(**WU Qi-Di** Professor at the School of Electronics and Information Engineering, Tongji University. Her research interest covers complex systems scheduling, system engineering, management engineering, and intelligent control.)



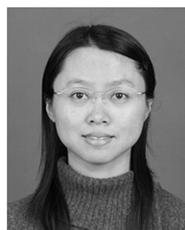
**乔非** 同济大学电子信息与工程学院研究员. 主要研究方向为复杂制造系统调度, 系统工程, 先进制造技术和管理工程. E-mail: fqiao@tongji.edu.cn

(**QIAO Fei** Professor at the School of Electronics and Information Engineering, Tongji University. Her research interest covers complex systems scheduling, system engineering, advanced manufacturing technology, and management engineering.)



**李莉** 同济大学副教授. 主要研究方向为复杂制造系统调度和智能自动化. 本文通信作者. E-mail: lili@tongji.edu.cn

(**LI Li** Associate professor at Tongji University. Her research interest covers scheduling of complex manufacturing systems and intelligent automation. Corresponding author of this paper.)



**吴莹** 同济大学电子信息与工程学院 CIMS 研究中心博士研究生. 主要研究方向为复杂制造系统调度.

E-mail: 7y@tongji.edu.cn

(**WU Ying** Ph.D. candidate at the CIMS Research Center, School of Electronics and Information Engineering, Tongji University. Her main research interest is scheduling problem of complex manufacturing systems.)