

学术前沿研究

案例推理原理及其 在钢铁生产动态调度中的应用

常春光◎著

A

NLITUILIYUANLIJIQIZAIGANGTIE
SHENGCHANDONGTAIDIAODUZHONGDEYINGYONG



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

学术前沿研究

辽宁省教育厅高校科技专著出版基金资助

案例推理原理及其 在钢铁生产动态调度中的应用

常春光◎著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

案例推理原理及其在钢铁生产动态调度中的应用 / 常春光
著. —北京: 北京师范大学出版社, 2010.12

ISBN 978-7-303-11699-7

I. ①案… II. ①常… III. ①钢铁工业—生产调度—研究
IV. ①F407.362

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 211881 号

营销中心电话 010-58802181 58808006
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电子信箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn
北京新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印刷: 北京京师印务有限公司
装订: 三河万利装订厂
经销: 全国新华书店
开本: 155 mm × 235 mm
印张: 8.5
字数: 132 千字
版次: 2010 年 12 月第 1 版
印次: 2010 年 12 月第 1 次印刷
定价: 20.00 元

策划编辑: 范林 责任编辑: 范林
美术编辑: 毛佳 装帧设计: 毛佳
责任校对: 李茵 责任印制: 李啸

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

前 言

案例推理(Case-Based Reasoning, CBR)作为一种新推理机制,在很大程度上克服了规则推理(Rule-Based Reasoning, RBR)遇到的制约人工智能系统进一步发展的诸多难题。例如,知识获取瓶颈突出、耗费人力与时间过多、推理运行速度较慢、处理大规模信息能力脆弱、系统维护困难等。针对 CBR 的原理,结合复杂的应用背景(如钢铁生产动态调度问题),进行系统化阐述与应用验证具有重要的学术研究及实践应用价值。本书内容对于进一步推广 CBR 理论的深入研究,拓展 CBR 在相关领域甚至其他领域的应用具有一定的推动作用。

为使读者对 CBR 的原理与应用方法有更为明确的了解,本书以复杂的钢铁生产动态调度系统为背景加以介绍,实现理论与实际的紧密结合。随着全球钢铁行业日趋激烈的竞争,竞争的焦点落在如何有效实现多品种小批量生产、质优价廉、准时交货上面,以适应钢铁市场复杂多变的需求。所有这些都与钢铁生产的动态调度密切相关,因此加强动态调度已经成为钢铁企业提高竞争力的重要途径。钢铁生产工艺复杂、生产设备多、物流纵横交错,同时,不仅要考虑钢水到达时间偏差,设备故障,而且要考虑钢水成分不合格、温度补偿等动态扰动事件。显然,作为钢铁企业制造执行系统(MES)的重要组成部分,动态调度对于协调工艺流程,加快工艺节奏,提高企业经济效益具有重要意义。

根据钢铁生产动态调度的特点,以 CBR 方法为研究主线,引入粗糙集理论,将神经网络、遗传算法等优化方法结合到案例推理中,研究了基于 CBR 的动态调度系统的相关理论。在此基础上,提出了动态调度的整体框架与实现方法,并将其运用到某炼钢厂一炼钢分厂的动态调

度系统开发中。

本书主要内容如下：

为了更进一步研究有效的动态调度方案，归纳了钢铁生产的动态调度问题的种类、特点；从理论与实践应用方面分析了该领域的研究方法，具体介绍了基于模型、智能、人机交互方法，并分析了各种方法间交叉组合的方式；进而研究工程实现模式，提出钢铁生产动态调度的三位一体综合集成模式。

归纳了 CBR 方法的基本理论，在传统的一级 CBR 系统的基础上，提出两级 CBR 系统实现系统的稳定性。研究了如何采用框架结构描述钢铁生产动态调度的案例；引入决策树的思想实现案例聚类，运用最邻近法实现案例匹配；运用调整规则集调整案例，并探讨了案例维护的基本方式。

提出了基于多 BP 网的案例匹配技术，描述了 BP 网的拓扑结构与实现步骤；提出了一种基于改进的德尔菲法的算法来确定输出样本集；给出了基于多 BP 网的案例匹配技术框架。

研究了基于粗糙集理论的案例属性约简技术，以核为出发点，提出了一种改进的基于分辨矩阵的属性最小约简方法；针对连续属性，提出了一种基于逼近精度敏感性的离散化算法。该技术用于消除冗余信息，提高案例匹配的效率。

归纳了 CBR 中主要案例调整方法，以模糊集理论为出发点，提出并论证了主要案例调整方式的适用条件；在此基础上，设计了案例调整算法，并给出一个通用的案例调整框架；介绍了诱导调整方式中调整模型的建立、线性转换与求解过程；使用上述案例调整技术，对钢铁生产的动态调度实例进行了求解，验证该技术在解决复杂的案例调整问题上的有效性和柔性。

以某炼钢厂一炼钢分厂为背景，基于本书所提出的动态调度框架与实现的具体方法，提出了钢铁生产动态调度系统的设计目标、设计思想和总体设计方案；针对系统开发中的关键技术，开发了相应的原型系统，将其结果与现场实际调度方法进行比较，验证该技术的有效性和实用性。为将来的系统开发，以及调度理论与生产实际相结合打下了基础。

本书的编著由作者自攻读博士学位以来长期的、大量的辛苦工作凝结而成。近几年，几易其稿，多次与国内外有关专家学者及实践工作者交流探讨，完善该学科知识体系。本书是作者根据多年的 CBR、动态调度相关的科研成果编写而成。力求把 CBR 相关的基本含义、基本理

论、基本方法与技能以及系统开发技术融为一体，全面加以介绍。

本书的出版得到了辽宁省教育厅的资助，在此深表感谢！

另外，与本书相关的科研项目还包括如下项目：

(1)国家自然科学基金项目：基于软计算的企业集团供应链计划的建模与优化方法(60084003)；

(2)国家“863”高科技计划 CIMS 领域资助项目：冶金工业 MES 架构和关键技术与示范应用(2002AA412010)；

(3)教育部人文社会科学研究一般项目(规划项目)：基于案例推理的城镇灾害应急调度机制与方法研究(09YJA630102)。

本书的部分研究成果得到了以上项目的资助，在此表示感谢！

本书的撰写得到作者的博士生导师东北大学汪定伟教授、作者的博士后合作导师中国科学院沈阳自动化所朱云龙研究员的悉心指导，并得到中国科学院沈阳自动化所博士生导师胡琨元研究员、东北大学崔建江教授的无私帮助。同时，本书的撰写与出版得到了沈阳建筑大学方方面面的大力支持，得到沈阳建筑大学宋晓宇教授的有力帮助，在此，向他们一并表示衷心的感谢！

沈阳建筑大学

常春光

2010 年 8 月

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 钢铁生产动态调度现状分析与案例推理方法的引出	(4)
1.1 动态调度的相关理论	(4)
1.1.1 动态调度的起源及相关概念	(4)
1.1.2 动态调度问题种类界定	(5)
1.2 国内外钢铁生产动态调度理论研究现状	(6)
1.2.1 基于模型的方法	(7)
1.2.2 基于智能的方法	(8)
1.2.3 基于人机交互的方法	(10)
1.2.4 基于多种方法组合的研究方法	(10)
1.3 国内外钢铁生产动态调度工程实现模式的现状	(11)
1.4 钢铁生产动态调度的发展新趋势与前景分析	(14)
1.5 本章小结	(16)
第 2 章 案例推理基本原理	(17)
2.1 案例推理的起源及其认知基础	(17)
2.2 案例推理的特点与分类	(19)
2.2.1 案例推理的特点	(19)
2.2.2 案例推理的分类	(20)
2.3 案例推理的实现流程	(20)
2.4 案例推理的基本环节	(22)

2.4.1	案例表达	(22)
2.4.2	案例匹配	(24)
2.4.3	案例调整	(26)
2.4.4	案例维护	(27)
2.5	案例推理的应用现状与研究方向	(27)
2.6	本章小结	(29)
第3章	两级案例推理在钢铁生产动态调度系统应用中的研究	(30)
3.1	钢铁生产主要流程与两级 CBR 的提出	(30)
3.2	基于两级 CBR 的动态调度技术路线与系统框架	(32)
3.3	两级案例推理实现的关键技术	(34)
3.3.1	两级案例表达	(34)
3.3.2	两级案例匹配	(40)
3.3.3	两级案例调整	(42)
3.3.4	两级案例维护	(45)
3.4	系统运行与结果	(46)
3.5	本章小结	(48)
第4章	基于多 BP 网的案例匹配技术研究	(49)
4.1	案例匹配 BP 网的提出	(49)
4.2	案例匹配 BP 网的设计	(50)
4.2.1	BP 网与 CBR 的关系	(50)
4.2.2	BP 网的拓扑结构	(50)
4.2.3	BP 网的实现步骤	(50)
4.2.4	训练样本集的预处理	(53)
4.3	多 BP 网案例匹配技术流程与时间复杂度分析	(54)
4.4	基于多 BP 网的案例匹配技术的应用实例	(56)
4.5	匹配结果比较分析	(61)
4.6	本章小结	(62)
第5章	基于粗糙集理论的案例属性约简技术研究	(63)
5.1	CBR 中的案例属性约简问题	(63)
5.2	粗糙集理论的基本概念	(64)

5.3	案例属性约简原理	(69)
5.3.1	离散属性的约简	(69)
5.3.2	连续属性的约简	(73)
5.4	案例属性约简应用实例	(74)
5.5	本章小结	(77)
第 6 章	案例调整技术研究	(78)
6.1	案例调整问题的提出	(78)
6.2	案例调整的相关定义与方式划分	(79)
6.3	单案例调整	(81)
6.3.1	空调整	(81)
6.3.2	转换调整	(82)
6.3.3	诱导调整	(84)
6.4	组合调整	(86)
6.5	诱导调整方式中的调整模型研究	(87)
6.5.1	调整模型与 CBR 的关系	(87)
6.5.2	调整模型的建立	(87)
6.5.3	调整模型的转化	(88)
6.5.4	调整模型的求解与计算实例	(89)
6.6	案例调整通用框架	(92)
6.7	案例调整仿真实例	(93)
6.8	本章小节	(98)
第 7 章	钢铁生产动态调度系统的总体设计	(99)
7.1	系统应用背景	(99)
7.1.1	现场动态调度现状	(100)
7.1.2	系统设计目标	(101)
7.1.3	系统设计思想	(102)
7.2	系统设计	(103)
7.2.1	动态调度系统的总体框架	(103)
7.2.2	功能设计	(103)
7.2.3	数据库设计	(105)
7.3	系统实现方案	(109)

4 | 案例推理原理及其在钢铁生产动态调度中的应用

7.3.1 系统运行环境 (109)

7.3.2 系统采用的网络结构 (109)

7.4 本章小结 (110)

第 8 章 结束语 (111)

参考文献 (114)

绪 论

1. 钢铁生产动态调度的地位与现实意义

企业生产过程可分为离散型生产和连续型生产两种形式。两者的生产过程之间存在着许多不同点。离散型生产过程的代表是机械制造业，特点是小批量、单件生产，工艺流程随时可变，其产品多变，物流为离散的、计件的零件等；连续型生产过程一般为大批量生产，工艺流程基本不变，上下道工序之间的物流连续，自动流动，产品也相对稳定，其代表是化工行业。钢铁企业生产是介于离散与连续流程行业之间的一种混杂生产方式，由于其考虑因素众多，且因素间存在复杂的相互关系，其动态调度问题一般要难于其他两者，同时由于钢水温度的限制，又具有极强的实时性要求。

在全球钢铁行业竞争日益激烈的情形下，人们开始将目光投向内部生产管理，重新审视钢铁集成制造系统内在结构体系。国内外学者逐渐意识到，“企业资源计划/制造执行系统/过程控制系统(Enterprise Resource Planning/Manufacture Execution System/Process Control System, ERP/MES/PCS)”三层结构符合现代企业生产管理结构“扁平化”的思想，与五层结构相比更易于集成和实现^[1]，是集成制造系统的未来发展趋势。制造执行系统 MES 是面向过程的生产活动与经营活动的桥梁和纽带，是现代集成制造系统的关键。钢铁生产工艺复杂、生产设备多、物流纵横交错。不仅要考虑钢水到达时间偏差，设备故障，而且还需考虑钢水成分不合格、钢水温度补偿等动态扰动事件。显然，作为 MES 的重要组成，动态调度是钢铁企业系统集成的重中之重。

未来钢铁企业竞争的焦点是：多品种小批量产品、质优价廉、准时

交货。为适应钢铁市场复杂多变的需求,提高效益。从 20 世纪 70 年代开始,国外先进的钢铁企业就在设备级和过程级自动化的基础上,致力于建设集成化的计算机生产管理系统。进入 20 世纪 80 年代后,伴随着钢铁生产新工艺(炉外精炼、热装热送、直装直送等)的出现,国外各大钢铁企业尤其重视在操作方式、物流管理、信息流管理等方面进行重大革新,建立高效、集成在线的计算机生产管理系统,实现全厂(总厂或公司)各工序集中计划管理、分散控制,使各工序负荷保持均衡、物流生产紧密衔接,工序间的等待时间缩短,从部门工序的局部生产最优化扩大为全部工序的整体最优化,从而大大提高生产效率、产品质量和生产的灵活性,降低能源和材料的消耗。因此,建立一个炼钢生产动态调度系统,对于理顺工艺流程,加快工艺节奏,提高企业经济效益更有重要意义。

2. 基于案例推理的钢铁生产动态调度的实现思路

本书紧紧围绕 CBR 方法这一主线研究钢铁生产动态调度系统的实现,针对 CBR 中的案例表达、案例匹配、案例调整与案例维护四大环节进一步展开研究。本书研究了基于框架结构的案例表达方式,在粗糙集理论的基础上,研究了案例属性的约简问题,由此增强案例表达的合理性,进而又提高案例匹配的效率。在案例匹配环节中,对于一般的匹配问题,研究了最邻近法在钢铁生产动态调度系统中的实现;对于复杂问题的案例匹配环节中,尝试引入了神经网络作为案例匹配的一种手段,实现有效的案例匹配。在案例调整这一重要环节中,对于易于调整的案例采用了调整规则集的方式来实现;而对于复杂的调整问题,在粗糙集理论的基础上研究了各种案例调整方式的适用条件,必要时又引入遗传算法作为案例调整的一种途径。最后针对案例维护的各种情况,研究了案例维护相关的技术处理方法。

以上述技术路线为主线,研究了基于 CBR 的动态调度系统的相关理论。在此基础上,提出了动态调度的整体框架与实现方法,并将其运用到某炼钢厂一炼钢分厂的动态调度系统开发中,验证该技术的可行性。

3. 基于案例推理的钢铁生产动态调度的主要内容

动态调度是钢铁企业系统集成的重中之重。建立一个炼钢生产动态调度系统,对于理顺工艺流程、加快工艺节奏、提高企业经济效益更有重要意义。本书以钢铁企业生产动态调度为背景展开研究,主要研究工作包括:

(1)分析了钢铁生产的动态调度问题的种类与特点,从理论与实践

应用两方面归纳了该领域的主要研究方法 with 工程实现模式；介绍了国内外关于 CBR 的研究情况。

(2) 提出具有较高稳定性的两级 CBR 方法。研究了案例表达、案例匹配、案例调整与案例维护等关键技术在钢铁生产动态调度系统中的实现。

(3) 针对钢铁生产复杂系统中案例属性权重难以确定、存在着耦合和复杂的非线性关系的问题，进一步研究了 BP 网在案例匹配技术中的应用，给出了基于多 BP 网的案例匹配技术框架，与最邻近法相比，提高了案例匹配的质量。

(4) 为了提高 CBR 系统的案例匹配效率与案例表达合理性，在粗糙集理论的基础上，提出了一种改进的以核为出发点的基于分辨矩阵的属性最小约简方法；同时，针对连续属性，提出一种基于逼近精度敏感性的离散化算法。

(5) 以提高案例调整有效性为目的，从粗糙集理论出发，提出并论证了主要案例调整方式的适用条件；在此基础上，设计了案例调整算法，并给出一个通用的案例调整框架；针对诱导调整方式中的调整模型，进一步研究了调整模型的建立、线性转换与求解过程；通过钢铁生产的动态调度实例计算，验证了其在解决复杂的案例调整问题上的有效性和柔性。

(6) 进行了软件开发与工业实验研究。基于本书所提出的动态调度框架与实现方法，设计并开发了相应的原型系统，将其与现场调度进行比较，缩短了调度的计算与控制周期，提高了调度质量，验证了该方法的有效性和实用性。

第 1 章

钢铁生产动态调度现状分析与 案例推理方法的引出

1.1 动态调度的相关理论

1.1.1 动态调度的起源及相关概念

生产调度是生产管理的核心内容，其任务是在企业车间有限的资源约束下，确定工件在相关设备上的加工顺序和加工时间，以保证所选定的生产目标最优。科学、有效、实用的调度方法和优化技术是实现生产高效率、高柔性和高可靠性的关键，这一领域的研究与应用已成为先进制造技术实践的基础。在理论研究中，生产调度问题常被称为排序问题或资源分配问题。

在全球钢铁行业竞争日益激烈的情形下，人们开始将目光投向内部生产管理，重新审视钢铁集成制造系统内在结构体系。国内外学者逐渐意识到，ERP/MES/PCS 三层结构符合现代企业生产管理结构“扁平化”的思想，与五层结构相比更易于集成和实现，是集成制造系统的未来发展趋势。制造执行系统 MES 是面向过程的生产活动与经营活动的桥梁和纽带，是现代集成制造系统的关键。

动态调度作为制造执行系统(MES)的重要组成，其概念最早由 Jackson 于 1957 年提出^[2]，是相对静态调度而言的，它强调实时性、在线性和自适应性，具有广阔的实际应用空间，但其难度也大大增加。钢

铁生产工艺复杂、生产设备多、物流纵横交错,不仅要考虑钢水到达时间偏差、设备故障,而且要考虑钢水成分不合格、钢水温度补偿等动态扰动事件。显然,动态调度是钢铁企业系统集成的重中之重。静态调度是指所有待安排加工的工作均处于待加工状态,因而进行一次调度后,各作业的加工被确定,在以后的加工过程中就不再改变;动态调度是指作业依次进入待加工状态,各种作业不断进入系统接受加工,同时完成加工的作业又不断离开,还要考虑作业环境中不断出现的动态扰动,如作业的加工超时、设备的损坏等。因此动态调度要根据系统中作业、设备等的状况,不断进行调度。实际调度的类型往往是动态的。

理论界对动态调度进行了大量研究,同时也涌现出许多与动态调度相关的概念,其中最具有代表性的相关概念包括:

(1)反应(反馈)调度:反应(反馈)调度是动态随机环境下的调度,但它强调环境变化时的响应能力,因此可以看成是动态调度的一种处理方式或响应机制。

(2)自适应调度:自适应调度是基于以下事实提出的:如果原调度有较好的调度效果和鲁棒性,则当扰动发生时,过于频繁的重调度不仅不必要而且容易造成系统不稳定,因而应减少重调度的次数以尽量恢复原有调度。自适应调度可以认为是动态调度的一种实现思想。

(3)实时调度:相对于批处理调度而言,实时调度强调在条件变化时能及时有效地做出反应。实时调度是典型的事件驱动方式。

(4)在线调度:相对于离线调度而言,在线调度要求在生产连续进行的情况下,对环境变化做出及时的决策。在线调度是一种连续调度方式。

直接导致动态调度的原因是动态事件,因此动态事件是动态调度研究中的一个重要概念。引起环境变化从而需要进行动态调整的事件称为动态事件。动态事件有多种,主要可分为以下四种:

(1)与工件相关的事件,包括工件随机到达、工件加工时间不确定、交货期变化、动态优先级和订单变化等。

(2)与机器相关的事件,包括机器损坏、负载有限、机器阻塞/死锁和生产能力冲突等。

(3)与工序相关的事件,包括工序延误、质量否决和产量不稳定等。

(4)其他事件,如操作人员操作失误、原材料拖期等。

1.1.2 动态调度问题种类界定

国内外学者对生产调度问题的划分方式主要有以下几种。

1. 按组织方式分类

根据调度问题的组织方式,可分为单机调度、并行机调度、流水车间调度(Flow Shop)、单件车间调度(Job Shop)、开放车间调度(Open Shop)和混合流水车间调度等。此分组方式是调度理论研究最有代表性的一种分法,在此基础上,很多学者研究了大量的调度模型及其算法,在很大程度上丰富了调度理论。在理论研究中,将钢铁生产的炼钢-连铸调度问题抽象为 Job Shop 问题、Flow Shop 问题和混合流水车间调度问题的较多。

2. 按行业特点分类

根据调度问题的行业背景特点,分为离散制造行业调度问题、流程制造行业调度问题和混杂制造行业系统。钢铁生产的炼钢-连铸调度问题是一个较为复杂的混杂系统,实施起来难度更大。

3. 按对象属性分类

根据调度问题的对象不同,调度问题又有工件转移型调度与设备转移型调度之分。目前大部分钢铁企业调度的工件体积、质量相对生产设备来说比较小,此时工件移动起来较为方便,调度问题大多属于工件转移调度类型。

4. 按设备重要性分类

根据调度问题的重要性,调度问题可分为主体设备调度与辅助设备调度。在钢铁企业生产调度除了要考虑工件在转炉、精炼设备、连铸机和轧机等主体设备上的调度外,还要考虑天车、台车以及钢包等辅助设备上的调度。

1.2 国内外钢铁生产动态调度理论研究现状

钢铁企业生产调度与典型的离散行业和流程行业的调度问题相比,具有如下特点:

1. 识别干扰的困难性

在钢铁生产动态环境中,较难解决的一个问题便是干扰识别问题。面对各种干扰事件,如何将其快速有效地识别出来,是保证钢铁生产动态调度有效与否的前提条件。

2. 处理问题的广域性

钢铁生产包括炼铁、炼钢、精炼、连铸、连轧等主要环节,同时还有许多辅助环节,实际中要实现有效的调度,必须考虑多工序一体化的协调问题^[9]。

3. 处理问题动态性

在实际的生产调度系统中存在很多随机的和不确定的因素，比如作业到达时间的不确定性、作业的加工时间也有一定的随机性，而且生产系统中常出现一些突发偶然事件，如设备的损坏和修复、作业交货期的改变、钢水的成分不合格等。

4. 处理问题的多目标性

实际的钢铁生产动态调度首要考虑的目标是钢水成分、温度和时间三个命中率提高。此外，钢铁生产动态调度常用的目标还包括：有效利用资源、降低成本、满足顾客交货期等。不同的目标影响着解决调度的具体模式。

5. 处理问题的多约束性

钢铁生产工艺过程必须在铁水仍然熔化的状态下完成，每一炉次的等待时间应少于工艺限定的时间；为了使炼钢-连铸产量最大，连铸机尽量不断浇；一些设备需要定期维修，比如，转炉内的内层的更换，转炉与钢包水口的更换等。这些构成了调度问题的种种约束。

人们为了探求钢铁企业复杂生产环境下的动态调度问题的解，理论上关于钢铁生产动态调度的研究方法具体包括以下几种。

1.2.1 基于模型的方法

1. 精确模型

精确模型方法中，最为典型的是运筹学方法，它是将生产调度问题简化为数学规划、排队论、网络与图论等相应问题算法求解调度最优化或近优化问题，属于精确方法。例如 C. N. Redwine 等人^[4]考虑了在大集成钢铁企业每台设备上的面向订单的调度问题。建立了混合整数线性规划模型，并设计了一种分解算法来求解该模型。实现了包括 102 订单通过 10 个设备历时 6 周的大规模调度问题。

2. 近似模型

在钢铁生产过程中，系统仿真模型作为常见的近似模型之一，是真实钢铁生产过程或系统在整个时间内运行的模仿。它基于系统中运行逻辑关系的描述，不单纯追求系统的数学模型，能够对生产调度方案进行比较评价，分析系统的动态性能，并选择系统的动态结构参数。新日本制铁株式会社的佐腾修三等人^[5]以钢铁企业集成调度为背景，设计了一个能够进行策略选择的调度仿真器，从而成功地开发了一个以调度仿真器为核心的集成调度系统。该系统覆盖了大约 10 个生产工序对不同的产品（每月大约 25 000 个订单），能够在满足交货期的前提下，提高炼