

重庆市教委科学技术研究项目：生产单元换线决策的神经网络专家系统研究
(KJ 1503006)

高等职业教育创新发展行动计划 (2015—2018 年) - 工业工程技术虚拟仿真实
训中心建设 (XM- 07_H45_X12609)

人-机交互仿真的生产单元 换线决策专家系统设计与应用

陈 进 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

前 言

随着经济全球化趋势的不断加强，产业结构调整步伐不断加快，制造企业面临的市场环境发生了巨大变化，客户对产品的个性化、对产品交货期的时效性、对产品生命周期的短暂性等要求越来越苛刻。有鉴于此，众多发达国家积极抢占技术发展的制高点，制造业成为各国自主创新的主战场：美国提出“制造业复兴计划”，调整传统制造业结构，提升制造业竞争力，发展高新技术产业；欧盟提出了“增强型工业革命”；日本提出了“制造业再兴计划”。2012年10月，德国产业经济研究联盟及其“工业4.0”工作小组提交了他们的最终报告草案《确保德国未来的工业基地地位——未来计划“工业4.0”实施建议》。2014年11月李克强总理访问德国期间，中德双方发表了《中德合作行动纲要：共塑创新》，宣布两国将开展“工业4.0”合作。面对欧美等制造业强国“再工业化”加速发展与低端制造向东南亚等国家转移的双重压力，从制造大国向制造强国的转变成为当前我国经济发展的紧迫任务。同时，经济发展也需要培育新的增长点，注入新的发展动力，在富国强民“中国梦”的指引下，我国也适时提出了《中国制造2025》战略规划。

2015年10月30日，中华人民共和国工业和信息化部正式发布《〈中国制造2025〉重点领域技术路线图（2015年版）》，明确了新材料产业等10大领域以及23个重点发展方向。《中国制造2025》围绕经济社会发展和国家安全重大需求，选择10大优势和战略产业作为突破点，力争到2025年达到国际领先地位或

国际先进水平。为贯彻落实全国机械职业教育教学指导委员会（简称机械行指委）2016年主任委员扩大会议精神，切实发挥行业的整体优势和职能作用，主动适应《中国制造2025》战略和产业智能升级需求，深化产教融合与校企合作，提高智能制造技术领域专业人才培养质量，提升机械行业职业教育服务和支撑制造强国战略的能力，本书作者几经思考和总结，撰写了《人机交互仿真的生产单元换线决策专家系统设计与应用》一书。本书不仅为生产单元智能换线决策提供了一种可行的方法，还为《中国制造2025》重点方向中智能制造核心信息设备的关键共性技术（人工智能技术、制造信息互联互通标准与接口技术、增强现实技术）的研究提供了思路和借鉴。

生产单元由于可将生产过程组织为协调高效的物流，因此可显著缩短制造周期，节约生产面积，避免库存积压，提高设备利用率，在离散制造业、冶金、造船等多个行业有着广泛应用。而在实际生产中，由于经常性的临时插单、零部件种类繁多、产品结构复杂、工艺路线和设备配置非常灵活，生产单元换线频繁。同时，由于换线决策具有复杂性、动态随机性和多目标性等特点，采用以经验丰富的工程师人工决策为主的传统换线决策方式已无法满足日渐复杂的生产环境的要求，而换线决策的优劣直接影响着产品质量、生产周期和生产单元柔性等。如何客观和准确地反映生产换线决策的上述特点，合理进行生产单元换线决策，成为学术界和企业面临的重大课题。

目前，由于生产单元自身的自治性、演化性、复杂性，以及人在生产单元中工作方式、任务流程和行为表现的不确定性和动态性，单纯基于数学优化模型的换线决策分析存在如下问题：第一，生产单元日益显现出动态化、多目标化等特征，单纯的数学建模很难满足全局最优和高可行性的生产要求；第二，受产品需求的多样、临时插单、紧急跟单和产品交货期等因素

的影响，对制造系统柔性的要求越来越高，生产单元出现复杂巨系统趋势，数学建模很难全面和准确地反映实际的生产情况；第三，部分影响人的决策的因素很难量化，单纯的数学建模方法无法体现这些因素的作用。针对传统换线决策研究的局限性和当前基于神经网络专家系统的不足（如知识收集手段的欠缺、生产换线专家系统规则抽取手段的缺失、应用模式的狭窄等），本书提出了人-机交互仿真的生产单元换线决策专家系统，并对其设计与应用进行阐述。

全书共分 7 章：

第 1 章为绪论。本章首先阐述了本书的研究背景，综合分析了当前国内外研究现状和在生产单元换线决策专家系统研究上的不足；其次阐述了本书的研究目的和意义，明确研究重点，最后简要介绍了本书的章节安排、技术内容、技术路线和创新点。

第 2 章为生产单元换线决策专家系统的总体技术方案。本章说明了生产单元换线决策专家系统的实现原理和技术路线，旨在构建交互仿真模型，然后运用交互仿真技术获取专家知识。本章利用混合神经网络并行计算的能力和神经网络训练构建推理机模拟专家思维进行决策，结合决策树和文本预置技术构建解释机制解释推理过程，最后采用微软组件技术对生产换线决策专家系统进行封装，以 Web 服务作为应用生产换线决策专家系统的技术。

第 3 章为人机交互仿真的生产单元专家知识获取。本章简要介绍了生产单元的特点，专家知识获取概述和方法，以及交互仿真用于对生产单元换线领域的知识获取。

第 4 章为生产单元换线决策专家系统推理机设计。针对目前的生产换线决策专家系统规则抽取的局限性，本章介绍了混合神经网络的原理、混合神经网络的类型和推理策略，采用混

合神经网络实现了生产单元换线专家系统的推理机设计。

第 5 章为生产单元换线决策专家系统解释机制实现。本章采用 ROC 曲线技术、IER-Trepan 算法、CART 算法等技术对专家换线推理机的解释机制进行了实现。

第 6 章以某摩托车企业生产单元换线决策专家系统为例进行应用研究。本章介绍了生产单元换线决策专家系统的应用模式，分析了基于网络化应用模式的生产换线专家系统具备的作用，并给出了一个基于 Web 服务技术的应用模式原型系统。本章以某摩托车企业发动机生产线为例，具体阐述了生产换线决策专家系统推理机的实现、解释机制的实现、程序封装以及网络化应用模式的完整实例。实例的结果证明建立生产换线决策专家系统具备较高的可操作性和可行性。

第 7 章为结论与展望。

本书的研究得到了重庆市教委科学技术研究项目(KJ1503006) 高等职业教育创新发展行动计划(2015—2018 年)——工业工程技术虚拟仿真实训中心建设(XM-07_H45_X12609) 研究项目资金的大力支持，没有这些研究项目的支持，是不可能有些研究成果的，在此深表感谢。

由于时间和水平的限制，本书可能存在不少缺点、错误和欠考虑之处，希望广大读者、朋友和专家不吝赐教，给予批评指正。

作者于重庆电子工程职业学院

2018 年 6 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	3
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 生产换线相关研究	6
1.2.2 基于神经网络的专家系统的相关研究	8
1.2.3 交互仿真的相关研究	12
1.2.4 国内外相关研究总结	15
1.3 本书的研究目的、研究内容和技术路线	17
1.3.1 本书研究目的	17
1.3.2 本书研究内容	18
1.3.3 本书研究技术路线	18
1.4 本书的创新点	20
1.5 本章小结	21
2 生产单元换线决策专家系统的总体技术方案	23
2.1 生产单元换线决策专家系统的实现原理	25
2.1.1 专家系统结构	25
2.1.2 神经网络专家系统结构	30
2.1.3 生产单元换线决策专家系统的实现原理	32
2.2 生产单元换线决策专家系统实现的技术路线	35
2.3 生产单元换线决策专家系统的应用形式	37
2.3.1 生产单元换线专家系统的工作过程	38
2.3.2 生产单元换线决策专家系统的封装形式	38
2.3.3 生产单元换线决策专家系统的应用模式	40

2.4	本章小结	40
3	基于交互仿真的生产单元专家知识获取	43
3.1	生产单元的定义和特点	45
3.2	专家系统知识获取概述	46
3.3	制造过程仿真软件简介	48
3.4	构建制造系统仿真模型	50
3.5	交互仿真模型的构建	53
3.6	交互仿真的实现	54
3.6.1	交互仿真实现技术内容	54
3.6.2	交互仿真实现算法	55
3.7	本章小结	58
4	生产单元换线决策专家系统推理机设计	59
4.1	混合神经网络	61
4.1.1	小波神经网络	61
4.1.2	模糊神经网络	62
4.1.3	遗传神经网络	65
4.2	推理机的构建	68
4.2.1	推理控制策略	68
4.2.2	推理策略选择方法	75
4.2.3	神经网络权值学习的遗传算法	77
4.2.4	主成分分析	82
4.2.5	基于主成分分析和遗传神经网络的推理机构建	84
4.3	本章小结	86
5	解释机制的实现	87
5.1	解释机制设计原理和规则抽取的评价标准	89
5.2	ROC 曲线技术	90
5.3	Trepan 算法	90
5.4	随机森林	93

5.5	CART 算法	94
5.6	生产换线决策专家系统解释机制算法	96
5.7	预置文本技术	99
5.8	生产换线决策专家系统的程序实现	100
5.8.1	ADO 技术	100
5.8.2	生产换线决策专家系统的程序	102
5.9	本章小结	103
6	应用研究：某摩托车企业生产单元换线决策专家系统	105
6.1	基于 Web 服务的网络化应用模式	107
6.2	某摩托车企业发动机生产单元换线决策专家系统构建	109
6.2.1	数据处理方法	109
6.2.2	基于 RFID 技术的发动机生产现场 数据采集和处理	111
6.2.3	某摩托车发动机生产单元换线决策专家系统 交互仿真知识获取	114
6.2.4	某摩托车发动机生产单元换线决策专家系统 推理机的构建	127
6.2.5	某摩托车发动机生产单元换线决策专家系统 解释机制的构建	130
6.2.6	生产换线决策专家系统程序的实现	139
6.3	本章小结	145
7	结论与展望	147
	参考文献	151

1 绪 论

- 1.1 研究背景及意义
- 1.2 国内外研究现状
- 1.3 本书的研究目的、研究内容和技术路线
- 1.4 本书的创新点
- 1.5 本章小结

1.1 研究背景及意义

随着科学技术的日新月异，社会信息化和经济全球化趋势的不断加强，产业结构调整步伐不断加快，制造业逐渐从依靠密集的劳动力转变为依靠先进科技来提高生产率，形成了以先进制造技术为手段、先进制造模式为指导的现代制造业。近年来，制造企业面临的市场环境发生巨大变化，客户对产品的个性化、对产品交货期的时效性、对产品生命周期的短暂性等要求越来越苛刻，企业面临着越来越严峻的挑战。基于此，企业迫切需要以多品种、小批量为主的柔性制造模式快速响应市场，从而提高企业的市场竞争力。针对这一问题，近几年大量关于先进单元制造模式的研究（如自治生产单元、精益生产单元、大规模定制的原子式组织、可重组制造的工作胞单元等）涌现，这些单元制造模式在提高生产设备制造柔性的同时，通过高素质的生产人员和灵活的组织模式达到提高组织柔性的目的，进而提高生产系统的整体绩效^[1-5]。

生产单元是组织规划零部件或产品的工艺流程的一类新型的制造系统。由于生产单元能把生产过程组织为协调高效的物流，因此能够避免库存积压、节约生产面积、压缩制造周期、提高设备利用率。生产单元的基本原理是在一定的生产面积上按照产品工艺流程的顺序和要求对加工设备进行布置，由一个高素质的制造团队负责完成从原材料准备、半成品加工到成品产出的一系列生产与管理的过程。生产单元的制造模式被提出后，在离散制造业、冶金、造船等多个行业得到了迅速推广，并在提升企业制造能力方面发挥了重要作用。经调查，在机械加工生产过程中，物料在机床上的时间（即准备时间与加工时间之和）仅占生产周期的5%~10%，另外90%左右的时间消耗在加工前后的等待、搬运、存储和设备故障检修等方面^[6]；相对传统制造模

式，生产单元可减少 67%~90%的物料传送距离，压缩 50%~90%的库存，并显著加快在制品的流动^[7-9]。

对生产单元生产管理的研究大多集中在计划、调度方面，对生产单元换线的研究还鲜有公开。在实际生产中，由于受经常性的临时插单、零部件种类繁多、产品结构复杂、工艺路线和设备配置灵活等因素影响，生产单元换线频繁。换线决策的优劣直接影响产品质量、生产周期和生产单元柔性等生产过程中的重要因素。

对生产单元作业进行合理换线决策是提高设备利用率、避免库存积压和提高组织柔性的关键。有效的换线决策能够提高生产单元的生产设备的利用率和操作工人的工作效率，使得制造资金减少到最低限度，保证生产秩序正常进行。

对生产单元进行合理换线的重要意义主要体现在以下几个方面：

- (1) 减少库存，甚至达到零库存；
- (2) 减少报废和返修，甚至达到零缺陷；
- (3) 减少生产批量，适应顾客多品种的生产需求；
- (4) 平衡生产线，易于均衡作业运行；
- (5) 提高设备利用率和稼动率。

然而，生产单元在混流产品变化、生产批量变化和瓶颈变化方面存在柔性不足、反应较慢以及对生产异常情况的应付能力较差的问题，一直是制约其应用的主要难题^[7-9]。由于生产单元自身的自治性、演化性、复杂性及人在生产单元中工作方式、任务流程和行为表现的不确定性和动态性，纯粹依赖于数学优化模型的换线决策研究分析存在以下问题：

(1) 生产单元日益凸显出多目标化和动态化的特征，仅凭数学建模难以满足高可行性的生产要求和全局最优解；

(2) 由于紧急跟单、临时插单、产品需求多样化和产品交货期紧急等因素的影响，对复杂生产制造系统柔性的要求也越来越高。同时，生产单元呈现出复杂巨系统组合爆炸趋势，因此一般的数学建模很难准确和全面地反映实际生产单元的情况；

(3) 一般的数学建模方法无法体现出部分影响人的决策的因素

(这些因素很难被量化)的作用。

基于上述原因,结合实际生产过程中生产单元大部分的换线决策还是以人工决策为主的现状(主要是一部分操作人员经验丰富,他们不仅可以对常用的生产目标提出切合实际的换线策略,还能够凭借自己的经验在不同的计划期内,针对不同的生产目标提出动态的换线策略),国内外的相关学者针对这种现象进行了广泛的研究,利用专家知识进行换线的理论(Knowledge Based on Changeover, KBC)应运而生。KBC系统主要以专家的知识 and 经验解决实际遇到的困难和问题,将该领域的知识和现场的各种约束表示在知识库中,然后结合实际情况从知识库中生成换线策略,并对意外状况采取相应的策略。

有鉴于此,基于交互仿真及混合神经网络的专家换线决策为解决生产制造系统中的制造资源和人力资源分配、作业计划安排、人机协作分工以及其他不确定的因素(如生产故障、缺料等)等一系列 NP 问题提供了一个可行方案。

因此,如何利用换线领域专家的知识 and 经验进行生产换线决策,进而提高生产效率,是目前亟需解决的问题。为实现这一研究目标,开展生产单元换线决策专家系统的研究具有重要的实用价值和理论意义。

(1) 在获得生产单元决策信息的基础上,遴选最佳启发式规则;

(2) 在进行换线决策时,结合定性和定量的知识分析综合考虑得出可靠方案;

(3) 利用混合神经网络的数字特性,协助专家系统处理非线性和不确定性的复杂信息,提高推理效率;

(4) 可动态地获得信息之间的复杂关系,采用混合神经网络大规模模拟并行处理,模拟人类专家的思维方式进行推理以处理复杂的关系,进而得到生产决策方案。

本书从生产单元换线领域专家知识的收集手段、神经网络规则抽取方法和网络化应用模式等技术出发,开展了基于交互仿真及混合神经网络的生产单元换线决策专家系统及其实现技术的研究。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 生产换线相关研究

1950年,日本现场改善专家新乡重夫(Shigeo Shingo)先生在对Toyo Industries的一次现场改进研究中,将现场生产准备操作分为内部换模(Internal Exchange of Die, IED)即操作只能在机器停止时进行的操作和外部换模(External Exchange of Die, OED)即操作可以在机器工作时进行两种类型。1957年,新乡重夫应用此理念对三菱重工公司柴油发动机生产设备加工换模进行了改进,结果使得生产率提高了40%。1969年,新乡重夫提出了快速换线(Single Minutes of Exchange Dies, SMED)概念,包含区分内外(将换线作业分为内部作业和外部作业)、由内转外(将内部作业转为外部作业)和优化内外(缩短内部作业的时间和外部作业的时间)三大基本要点,降低了丰田汽车公司单机床的换线时间,提高了生产效率,成为换线作业研究及实践的基础^[10-11]。

1976年6月,丰田生产方式的创始人之一——大野耐一(Taiichi Ohno)开始在生产中采用快速换线的方法。实践表明,这种方法可以使小批量生产的冲压件比大批量生产的成本还要低。应用SMED使得丰田公司在1975年到1985年期间,平均的加工准备时间减少为原来的2.5%,相当于40倍的改善^[12]。

此外,英国巴斯大学Richard McIntosh教授通过设置两种换线机制扩展了新乡重夫先生提出的快速换线方法^[13]。

印地安那大学James D. Blocher教授和普渡大学Suresh Chand教授在处理有限能力资源的多产品调度问题中,以总换线调度成本最小化为目标,采用前向分支搜索算法实现了总换线调度^[14]。

里尔中央理工学校的C. Gicquel教授以库存持有成本和换线成本最小化为目标,解决了离散批量调度问题DLSP^[15](Discrete Lot-sizing

and Scheduling Problem)。

土耳其九月九大学的 Mehmet Cakmakci 教授研究了快速换线方法和设备设计之间的关系，结果表明，快速换线方法不仅适用于制造的持续改进还适用于产品的研发设计^[16]。

施纪红阐述了导致生产换线时间过长的原因，提出了换线频繁对生产效率的影响问题，并将换线简单定义为前一机种和后一机种的转换，将换线时间描述为前一机种最后一个（台）产品流出到后一机种首个（台）产品流出之间的时间间隔，同时将换线时间分为外部时间和内部时间两部分，其中内部时间是指停机过程中仍应该继续的作业时间（如取放工具），而外部时间是指机器仍在运转过程中或是刚刚重启之后可以进行的作业时间（如第一次检测）^[17]。

夏欣跃将快速换线的原理划分为区分内部和外部换线、内部换线外部化、缩短内部换线时间和改进外部换线时间、缩短总时间四个阶段，并将其运用于生产线转换过程中以缩短换线时间^[18]。

施纪红根据 SMED 思想，详细描述了如何通过了解产品的特性、了解新旧产品的差异、提前作业和线外作业来压缩整个的 SMT 换线时间的详细实施步骤，并介绍取得的经验^[19]。

贾庆东等介绍了高速铁路列控系统仿真平台的整体结构，探讨进行多线路仿真自动换线的必要性，针对 CTC 子系统多线路仿真和自动换线技术进行深入研究，提出采用代理的思想实现 CTC 子系统在仿真平台中自动换线的方法^[20]。

杨焱等应用快速换线的原理对某企业的生产过程进行分析，通过内部换线和外部换线分离、缩短内部换线时间、缩短外部时间等步骤，使换线时间由原来的 20 分钟减少为 5 分钟，企业日产能提升 20%^[21]。

王炳刚等为实现混流装配线的部件消耗平顺化和加工线总的切换时间最小化的目标，提出了一种多目标遗传算法来解决由一条混流装配线和一条柔性部件加工线组成的拉式生产系统的优化排序问题^[22]。

孙延丽针对某公司由于产品品种繁多、每次生产前都需要对 SMT 阶段各个生产设备的工艺数据进行修改导致的换线时间长的问题，利

用 5W1H 分析法, 结合成组技术, 提出产品式装配线布置和 TOC 约束理论, 对生产线持续改善^[23]。

上述这些关于生产换线的研究主要侧重于缩短换线时间、提高换线技能以达到换线成本最小的目的。而在生产单元实际加工过程中, 往往需要结合订单情况, 根据生产现场的实际生产状态和设备运行情况形成是否换线、换线快慢的决策。神经网络专家系统具有并行推理能力, 能够模仿人类专家的思维方式进行推理决策, 因此可以借助于智能专家系统生成换线决策。

1.2.2 基于神经网络的专家系统的相关研究

人工神经网络 (Artificial Neural Networks, ANNs), 也称神经网络 (NNs) 或连接模型 (Connection Model), 指研究者从工程的角度, 应用适当的算法将任务作为一种数学问题构造合适的神经网络。人工神经网络在工程应用研究方面已取得较大成功, 是人工智能学科研究的一个极其重要的领域。专家系统 (Expert System, ES) 是以知识库为核心进行问题求解的计算机程序, 即基于知识的智能系统。一般而言, 专家系统由知识库、数据库、推理机、解释机制和人机接口界面五个部分组成 (可以简单归结为运用知识, 进行推理), 在某一特定领域具有人类专家水平的解题能力^[24]。将神经网络专家系统应用于生产单元换线领域, 可以得到科学的决策依据, 达到事半功倍的效果。

与神经网络专家系统相关研究成果非常丰富:

JÓzefowska 等提出了一种短期生产计划的决策支持系统, 该系统由优化模块、专家系统模块和界面显示模块三部分构成, 其中专家系统模块和优化模块负责降低优化生产计划模块的搜索维数^[25]。

Soyuer 等结合特定的企业生产实际情况, 运用消除准则提出了一个基于生产知识的专家系统, 实现了决策专家系统^[26]。

Ozbayrak 等提出在柔性制造系统中使用一个三层结构的专家系

统（包括生产计划决策支持系统、机床管理决策支持系统和机床故障诊断决策系统）^[27]。

Looney 发现神经网络可以插值和外推一组离散相关的输入和输出向量使输出的决策空间是连续的，并应用神经网络实现了专家系统的高层决策功能^[28]。

Yehetal 建立了一个用于调试有限元程序输入数据的神经网络专家系统^[29]。

Davut Hanbay 等提出了一种基于小波分解和神经网络的专家系统用于混沌研究的蔡氏电路建模与仿真，测试结果表明，基于小波分解和神经网络的专家系统可以有效地用于非线性动力系统建模^[30]。

Kozo Osakada 利用神经网络的识别能力，采用三层神经网络和反向传播算法来训练网络，建立了一个基于神经网络的专家系统用于冷铸加工工艺计划编制^[31]。

Youngohc Yoon 等根据专家系统和神经网络的优势和不足开发了基于神经网络的专家系统，从而协助管理人员在预测股票价格的同时为提高管理决策提供支持^[32]。

在国内，同样出现了众多与神经网络专家系统相关的研究成果：

陈红伟等介绍了神经网络专家系统的基本概念及其特点，并对神经网络专家系统的知识学习和推理过程进行研究，采用面向对象的可视化语言（Visual C++ 6.0）编制了可视化的神经网络专家系统^[33]。

郭震说明了基于神经网络专家系统设计思想的系统结构的优缺点，提出了神经网络输入节点和隐层节点及其个数确定在神经网络专家系统集成技术开发的方向^[34]。

徐志强等将 BP（Back Propagation）神经网络以神经子网的形式嵌入到产生式规则中，提出了一种基于神经网络的专家系统构造方法，经仿真验证该方法具有良好的知识获取能力，并实现了根据用户要求直接生成基于产生式规则的专家系统^[35]。

李军等研究了一种表达知识的二元产生式规则及编码方法，通过编码将知识储存在人工神经网络的知识库中，同时设计了具有正向推理的推理机，并应用神经网络并行运算能力实现了并行推理^[36]。