

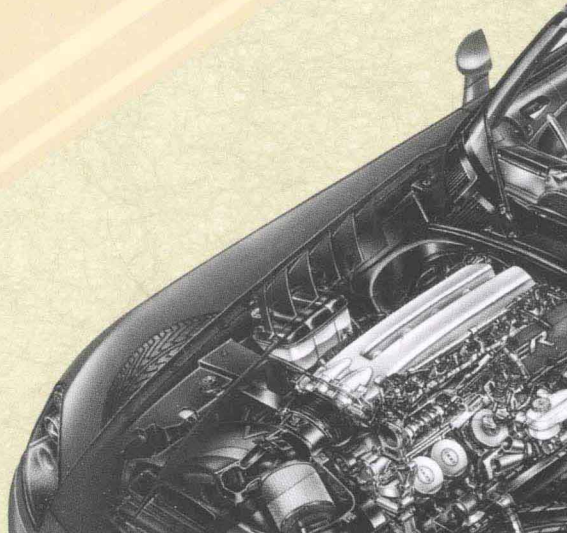
汽车零部件生产线 建模与仿真技术

Auto Parts Production Line Modeling
and Simulation Technology

王红军 著



科学出版社



汽车零部件生产线 建模与仿真技术

**Auto Parts Production Line Modeling
and Simulation Technology**

王红军 著

科学出版社

内 容 简 介

汽车零部件生产线的性能对企业的市场竞争力具有重要影响。生产线的建模与仿真优化技术是实现可预测制造的关键技术。本书全面系统地阐述了汽车零部件生产线建模仿真技术的新进展、新理论、新方法及新技术,包括数字化生产线设计建模方法、生产线布局规划、生产线制造性能仿真、装配线平衡方法、生产线的状态监测与维修策略等。

本书可作为高等院校机械工程、工业工程以及相关专业高年级本科生和研究生的教材或参考书,也可供从事制造系统建模与仿真、生产线规划等相关领域研究工作的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车零部件生产线建模与仿真技术 = Auto Parts Production Line Modeling and Simulation Technology / 王红军著. —北京: 科学出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-03-039365-4

I. ①汽… II. ①王… III. ①汽车-零部件-流水线-生产管理
IV. ①F407.471.62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 308599 号

责任编辑: 陈 婕 / 责任校对: 李 影
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http: //www. sciencep. com

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 280 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



序

汽车及所属零部件制造业是我国国民经济的支柱产业，其发展水平与先进制造装备技术、信息化技术的发展有着密切关系，同时也对相关产业产生明显的影响和拉动效应。汽车制造业从“大批量、刚性”的生产模式向“多品种、变批量”的模式转型，零部件制造生产线从初期规划到实际运行都存在复杂的决策问题。这些决策问题包含众多影响因素，因素之间的关系错综复杂，传统数学优化方法已无法解决。数字化制造技术的关键是建模和仿真技术。在数字化制造过程中，利用建模技术建立与物理过程相似的数字化模型，通过对该模型进行仿真、实验和优化，实现正确生产决策、优化设计和生产，缩短原型制造以及试验的周期，降低费用，快速响应市场需求。建模和仿真分析技术是企业实现可预测制造的新方法，其独特的优化方法和强大的建模能力能真实有效地反映生产实际，使用户在设计规划阶段就可以对生产线的静、动态性能进行充分的预测分析，并对可能的扰动提出合理的解决方案，构建出具有工艺先进性、经济适宜性、性能高效性、精度稳定性、运行可靠性的生产系统。因此对生产线建模与仿真技术进行研究具有重要意义。

该书作者及其研究团队在汽车零部件生产线的虚拟设计与分析技术研究领域开展了十多年的研究工作，主持和承担了国家科技重大专项项目、北京市自然科学基金项目、北京市科技计划、北京市留学回国人员择优资助项目以及面向企业的科研项目，研发了面向工程实际的生产线设计与分析系统，获得了多项国家专利，在汽车零部件生产线建模与仿真等研究方面取得的研究成果具有明显的经济效益和社会效益。该书是对作者及其研究团队在汽车零部件生产线数字化技术领域近十年来完成的各类重要研究课题成果的总结、归纳和凝练。

该书着重阐述了汽车零部件生产线规划建模与仿真分析技术，提出了数字化生产线设计的 IDEF0 功能建模方法；提供了汽车零部件生产线车间布局与生产线规划方法，给出了系列化、多品种发展需求的柔性生产线规划模型；介绍了汽车零部件生产线制造性能的分析评价

指标,给出了生产线制造性能的分析评估仿真方法,进行了生产瓶颈问题的预测与评估,并预测了生产线的能力,提供了最优的组线方案、设备选型和生产线的调度策略;介绍了基于遗传的装配线平衡技术和基于状态监测的汽车零部件生产线设备维修策略的关键技术等。该书介绍的有关新方法和新技术在工程实际中应用成效明显,为实现数字化工厂和生产线智能维护提供了技术支持。

该书所介绍的研究内容有利于企业优化生产布局、预测制造系统性能、优化企业人力资源配置,确定生产周期,为企业提供最优的组线方案、设备选型和生产线调度策略,提高运行效益和经济效益,降低成本。所介绍的新方法在保障设备安全运行、延长维修周期、提高设备利用率、节约能源消耗以及提高设备管理水平等方面发挥着重要作用,在汽车制造业以及相关行业推广应用前景广阔。

中国工程院院士



前 言

汽车及所属零部件制造业是我国国民经济的支柱产业。生产系统仿真和生产过程优化是先进制造领域的研究热点之一。随着汽车行业竞争的加剧,提高企业效率,降低生产成本成为关键。仿真优化技术是实现传统制造向可预测制造、科学制造转变的关键技术。仿真技术为生产的合理进行、成本的降低提供了有力的手段。

汽车先进制造技术经过几十年的高速发展,已经从提高单台设备加工效率和使用性能向通过应用信息化手段整合全部生产线设备提升生产线效能的方向发展。生产线仿真是生产线设计规划中全面分析系统的有效和不可缺少的重要工具。生产线设计规划、生产调度、仿真与优化技术可以确保在生产线设计规划阶段就对生产线的静、动态性能进行充分的预测、比较和论证,并对出现的问题提出合理的解决方案,从而确实有效地协调生产线从设计规划到实际运行各个阶段的关系。

本书针对汽车零部件生产线的规划布局、制造性能及绩效评价、关键设备的安全运行,较系统地介绍了相关研究的新进展及新技术,主要包括如下内容:

第1章阐明了汽车零部件数字化生产线建模与仿真分析的研究意义,介绍了相关的研究进展、研究现状和发展趋势。

第2章分析了传统的生产线设计方法和流程,介绍了 IDEF0 的基本概念,给出了基于 IDEF0 的数字化生产线设计模型,提出了基于 IDEF0 的敏捷制造检验信息模型。

第3章阐述了汽车零部件生产线的特点和组成,提供了汽车零部件生产线布局规划技术,给出了基于仿真的凸轮轴生产线布局的数字化模型和分析结果、某变速器装配线布局的数字化模型和分析评价、某重卡装配生产线的数字化布局模型与分析结果等。

第4章深入阐述汽车零部件生产线制造性能的分析评价指标,给出了生产线制造性能的分析与仿真方法,提供了某凸轮轴生产线的制造性能仿真优化分析、某变速器输出轴生产线的仿真分析、基于 Petri

和离散系统仿真的仿真优化实例。

第5章分析了生产线不平衡现象及产生原因,给出基于平衡的混流生产线排产、发动机装配作业均衡编排算法与实现方式以及发动机装配线平衡的相关技术,并给出了变速器装配线作业平衡等应用实例。

第6章研究了汽车零部件生产线关键设备的故障间隔分析方法,给出了基于故障模式的生产线关键设备运行状态分析技术和汽车零部件生产线设备的选择性维修决策技术;研究了基于RBF神经网络的生产线关键设备故障预测方法和基于遗传算法优化神经网络的生产线关键设备故障预测方法;给出了基于网络的生产线服役状态监测与预测系统框架、系统功能模块、系统实现的关键技术和具体应用。

从2002年开始,本书作者以引进国外数字化工厂先进技术为起点,着重开展了对汽车零部件生产线规划建模仿真分析技术的研究。近年来,作者得到相关基金项目、专项和计划项目的大力支持,促进了研究工作的深入开展。这些支持项目包括:国家科技重大专项项目(2009ZX04014-101)、北京市自然科学基金项目(3083019)、北京市科技计划(D09010400700901、D121100004112001)、北京市自然科学基金重点项目和北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201211232039)、北京市属高等学校人才强教深化计划资助项目(PHR201106132)、国家外国专家局国际交流项目(WJ2002189)、北京市留学回国人员择优资助项目(040317)和北京市优秀人才项目(20061D0500600162)等。本书是在这些研究项目和研究成果的基础上提炼而成的。

在本书撰写过程中,作者参考了一些专家学者的资料,并已尽可能在参考文献中列出,在此,对这些专家学者表示衷心的感谢!

同时,感谢北京市自然科学基金、北京市科技计划等相关基金、专项和计划的资助!感谢北京市生产力中心的大力支持!感谢研究项目的合作单位北京工研精机股份有限公司、北京北内发动机零部件有限公司、烟台上海汽车变速器有限公司、烟台通用动力总成有限公司等为本研究的开展提供的许多支持!衷心感谢北京生产力促进中心高谦副主任、中心制造服务部陈国英部长、北京北内发动机零部件有限公司田安民总经理和张鸿潭部长、上海汽车变速器有限公司唐宝忠高级工程师、北京机床研究所刘伟高级工程师等汽车行业专家学者对研究工作的支持!

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 汽车零部件生产线建模与仿真的目的	1
1.2 汽车零部件生产线建模与仿真技术的研究与进展	5
参考文献	10
第 2 章 数字化生产线设计的 IDEF0 功能建模	13
2.1 传统的生产线设计方法及流程	13
2.2 基于 IDEF0 的数字化生产线设计模型	13
2.2.1 IDEF0 的基本概念	13
2.2.2 数字化生产线设计流程模型	21
2.2.3 生产线设计流程模型分析	30
2.3 基于 IDEF0 的敏捷制造检验信息模型	31
2.3.1 检验信息模型的意义	32
2.3.2 检验信息模型的 IDEF0 模型	33
参考文献	36
第 3 章 汽车零部件生产线布局规划技术	37
3.1 概述	37
3.2 汽车零部件生产线的布局规划	37
3.2.1 生产线布局规划设计方法	38
3.2.2 基于系统化布置设计的生产线布局规划	42
3.2.3 基于粒度的生产线设备选型	45
3.3 汽车装配线生产线的布局规划	47
3.4 汽车发动机凸轮轴生产线的布局规划实例	49
3.4.1 基于 SLP 的凸轮轴生产线布局与规划	49
3.4.2 生产线布局的数字化建模	56
3.4.3 生产线物流分析	57
3.4.4 其他方案的结果分析	62
3.5 基于仿真的变速器装配线布局规划实例	64
3.5.1 变速器装配线	65

3.5.2	变速器装配线的数字化模型构建	65
3.5.3	变速器车间初始平面布局方案的优化	67
3.5.4	加权因素法优化	72
3.6	某重卡装配线生产线布局规划实例	74
3.6.1	工艺原则与流程	74
3.6.2	设备选择	75
3.6.3	总装车间平面布置	76
3.6.4	物流模型构建	76
3.7	柔性变批量生产线计算机辅助布局规划	78
3.7.1	计算机辅助规划系统框架	78
3.7.2	计算机辅助规划系统的主要功能	78
3.7.3	系统总体设计	80
	参考文献	81
第4章	汽车零部件生产线制造性能的分析与仿真	83
4.1	概述	83
4.2	生产线制造性能的分析与仿真	83
4.2.1	生产线仿真解决的问题	83
4.2.2	基于单元的制造系统建模	84
4.2.3	基于离散系统仿真软件的性能分析与仿真模型	86
4.2.4	基于解析模型和仿真模型混合的性能分析与仿真	86
4.3	某凸轮轴生产线的制造性能分析与仿真	88
4.3.1	某凸轮轴生产线运行状态数据采集	88
4.3.2	某凸轮轴生产线状况仿真模型构建	89
4.3.3	某凸轮轴生产线系统运行约束条件	89
4.3.4	某凸轮轴生产线实际生产状况仿真与优化分析	91
4.3.5	某凸轮轴生产线人员规划与优化分析	93
4.4	某变速器输出轴热前加工生产线分析与仿真	103
4.4.1	输出轴热前加工线的生产特点	103
4.4.2	生产线数字化模型的基础数据采集	103
4.4.3	生产线数字化模型的建立	105
4.4.4	生产线三维模型的建立过程	110
4.4.5	生产线的仿真运行实验与结果分析	110
4.4.6	基于仿真的生产线优化分析	118
4.5	基于 Petri 的生产线仿真模型	118
4.5.1	基于 Petri 的仿真模型	118

4.5.2 构建基于 Petri 的离散系统仿真模型	120
4.5.3 仿真结果分析与优化	126
4.5.4 参数化试验	129
参考文献	133
第 5 章 基于遗传的汽车生产线平衡技术	135
5.1 概述	135
5.1.1 生产线不平衡现象及产生原因分析	135
5.1.2 装配生产线平衡的国内外研究现状	136
5.2 基于平衡的混流生产线排产	137
5.2.1 混合流水生产线	137
5.2.2 混合流水生产系统的排产问题	137
5.2.3 平衡与排产设计对系统负荷的影响	139
5.2.4 混合型流水生产系统调整	141
5.2.5 基于仿真的装配线排产	143
5.3 汽车发动机装配线平衡技术	146
5.3.1 汽车发动机装配生产线概述	146
5.3.2 装配线作业时间	147
5.3.3 发动机装配线的约束问题	149
5.4 基于遗传的装配线平衡方法	151
5.4.1 作业编排的基本概念	151
5.4.2 装配线平衡的数学模型	153
5.4.3 装配线的平衡具体算法	155
5.4.4 算法流程	160
5.4.5 基于遗传的装配生产线平衡系统的实现	161
5.5 基于遗传的装配线平衡应用实例	162
5.5.1 基于遗传的某商用发动机装配线平衡	162
5.5.2 基于遗传的某变速箱装配线平衡	166
参考文献	170
第 6 章 汽车零部件生产线的状态监测与维修策略	172
6.1 研究的意义	172
6.2 汽车零部件生产线关键设备的故障间隔分析	172
6.2.1 生产线设备的故障间隔分析方法	173
6.2.2 某变速箱生产线关键设备的故障间隔时间分布模型的应用	180
6.3 基于故障模式的生产线关键设备运行状态分析	183
6.3.1 设备故障模式分析的基本原理	183

6.3.2	生产线设备的故障模式、影响分析	184
6.3.3	生产线关键设备的危害度分析	186
6.3.4	某凸轮轴生产线磨床子系统故障分析	187
6.3.5	某凸轮轴生产线磨床的致命度分析	189
6.4	汽车零部件生产线设备的选择性维修决策技术	192
6.4.1	可靠性维修理论	192
6.4.2	生产线可靠性维修方式决策模型	193
6.4.3	汽车零部件生产线的选择性维修决策	194
6.5	汽车零部件生产线关键设备的故障维修预测技术	199
6.5.1	基于 RBF 神经网络的生产线关键设备故障预测方法	199
6.5.2	基于 RBF 神经网络生产线关键设备故障预测应用	202
6.5.3	基于遗传算法优化神经网络的生产线关键设备故障预测方法	203
6.6	基于网络的生产线服役状态监测与预测	209
6.6.1	基于网络的生产线服役状态监测与预测系统框架	209
6.6.2	生产线设备的状况检测与信息获取	210
6.6.3	基于网络的生产线服役状态预测系统	212
6.6.4	系统实现	215
	参考文献	216

第 1 章 绪 论

1.1 汽车零部件生产线建模与仿真的目的

汽车及所属零部件制造业是我国国民经济的支柱产业。随着市场经济的快速发展,市场逐步演变为动态多变型市场,产品更新周期缩短,市场竞争日趋激烈。如何更好地加快我国汽车工业的发展步伐,增强企业的竞争实力,是汽车行业所面临的严峻任务。

目前,生产线设计与规划面临许多挑战。例如,汽车制造业的零部件生产线投产时,需反复调试与试运行才能实现产能设计要求;多品种、大批量生产对生产计划调度与组织管理提出严格要求;在生产线运行过程中难以及时发现瓶颈问题;关键设备的运行状态不稳定严重影响设备利用率和生产线产能;汽车零部件生产线信息化和物流管理迫切需要规范化、科学化、可操作化,以保证生产的顺利进行和物流的畅通^[1]。

在现代大批量定制化生产中(订单式生产),物料供应成本和制造过程中的物流成本占总生产成本的 50% 以上,一个优良的生产系统对于增强企业的竞争力来说是至关重要的,其中布局是一个重要的工作,其包括新系统的形成和旧系统的改良。生产线的布局设计是生产系统设计的重要内容,直接决定着产品质量、生产率和经济效益。优化生产系统的设施规划与物流将直接提高系统的经济效益^[2]。

随着全球汽车生产竞争的加剧,缩短产品的上市时间日益成为企业追逐的目标,多功能性、高独立性都给生产系统的规划和设计提出了更高的要求,因此生产系统的规划是实现最优化生产的关键技术之一^[3]。

汽车先进制造技术经过几十年的高速发展,已经从提高单台设备加工效率和使用性能向通过应用信息化手段整合全部生产线设备提升生产线效能的方向发展。汽车零部件生产线的布局规划也是国家科技重大专项的重要研究内容之一,2013 年度“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题申报指南中将轿车发动机缸体、缸盖加工生产线制造单元等相关技术作为资助重点,自动化生产线建模方法、自动化生产线布局与规划优化、自动化生产线协同仿真、自动化物流系统集成设计、建立产品质量验收流程是其中的重要研究内容^[4]。生产车间设计规划与运行评估的关键技术的研究,可以解决目前国内的汽车零部件生产车间在投产之前的设计规划、运行调度、物流规划和评估优化等方面存在的各种问

题,可以形成整体解决方案,降低汽车制造成本,支撑汽车自主化制造。

传统生产线的规划设计过多地依靠经验和手工演算,缺少科学性,很难得到预期结果。采用先进的生产线规划与仿真技术,可以对规划设计的生产系统性能进行评价,在生产规划的早期对其系统进行优化与调整,以得到较高的生产率。生产线车间布局和规划是生产系统实现生产要求的关键环节,生产线布局和规划必须建立在科学合理的基础上。构建基于变批量的生产线仿真模型,利于企业进行投资决策、生产策略、生产纲领评估,能够为生产线的设计和优化提供技术依据,为企业进行工艺规划和生产布局提供有效的支持。若制造生产线布局合理,物流顺畅,将为企业带来巨大利润,并且可以减轻工人劳动强度,提高生产效率^[5]。

计算机仿真是利用计算机技术建立系统的模型,并在某些条件下对模型进行动态实验分析的一门综合性复杂技术^[6]。它具有安全、高效、受外部环境影响较小、改变时间尺度、快速完成实验仿真的优点。计算机仿真技术的优势主要体现在以下几方面:

(1) 经济性。分析系统时往往要对系统进行试验,而直接对系统特别是大型系统进行试验,成本昂贵,而采用仿真技术进行试验,可大大降低成本,且仿真设备可重复使用。

(2) 优化设计。对设计中的系统,可先设计出系统模型,用仿真方法反复进行试验,找出最优的系统结构和参数,实现对系统的优化设计。

(3) 安全性。对尚不可靠的系统或危险性较大的系统,采用仿真方法进行试验,可保证安全。

(4) 预测。对于非工程系统,无法直接进行试验,利用仿真方法可预测系统的发展过程和影响因素,从而制定控制策略。

(5) 训练和教育。

计算机仿真技术将仿真分为三个步骤^[7]:

(1) 模型建立。模型建立阶段的主要研究内容是根据研究的目的、系统的原理和数据建立系统模型,该模型和实际系统的符合程度对仿真结果有重大影响。只有建立符合实际系统的模型后,才能进行下一步工作。

(2) 模型变换。模型变换的主要研究内容是根据模型的形式、计算机的类型及仿真目的,将模型转换成适合计算机处理的形式,这一阶段的关键技术是仿真方法。

(3) 模型试验。该阶段的主要任务是设计好仿真试验方案,将模型装载到计算机上运行,按规定的规则输入数据,观察模型中变量的变化情况,对输出结果进行整理,这一阶段的关键技术是仿真软件技术。

根据仿真研究的对象,仿真可以分为连续系统仿真和离散事件系统仿真^[8]。连续系统是指系统的状态随时间连续变化的系统,系统状态是时间的函数。离散

事件系统是指系统的状态是突发的，不是时间的函数，而且发生时刻往往是随机的，系统状态的变化是由随机事件驱动的。离散事件系统是指受事件驱动，系统状态跳跃式变化的动态系统，系统的迁移发生在离散时间点上。

离散事件系统大量存在于我们的周围，如车间的加工调度系统、等待加工的工件，都是在离散时刻发生的。这些系统是随机的，具有复杂的变化关系，难以用常规的方法来描述，一般只能用流图或网络图描述。仿真技术为解决该类问题提供了手段。利用仿真技术对生产系统进行研究分析，可以了解它们的动态运行规律，帮助人们合理地进行调度和安排工序。在离散事件系统仿真中，常用到实体、属性、活动、事件等一些基本概念。

在离散事件系统仿真中，实体是组成系统的各种要素，即系统的物理单元，如生产系统中的机床、工件和物料传送装置等。实体分为永久实体和临时实体。在系统中存在一段时间的实体是临时实体，这类实体由系统外部到达系统，通过系统，最终离开系统。系统的工作过程就是这类实体流动和接受加工、处理的过程，如加工系统中等待加工的工件等。永远存在于系统的实体是永久实体，如加工设备等。临时实体按照一定的规律不断到达，在永久实体的作用下通过系统，最后离开系统。系统状态的变化就是由实体的状态变化而产生。

实体的特性称为属性，它包括实体所具有的状态和参数，如某台加工中心的刀具的刀位数量。

使系统状态发生变化的过程或行为称为系统的活动。通常表示两个可以区分的事件之间的过程，标志着系统状态的转移。例如，物流系统中，工件到达至入库之间是排队活动，该活动引起队列长度的变化。

离散事件系统中的事件是指引起系统状态变化的行为，如把零件装夹在机床工作台上作为一个事件，则仅当工作台上零件加工才进行，即系统状态发生了变化。

进程由与某类实体相关的事件和若干活动组成，描述了这些事件和活动之间的相互逻辑关系和时序关系。例如，一个顾客到达系统，经过排队，接受服务，直到服务完毕后离去可以称为一个进程。

仿真时钟用于表示仿真时间的变化。离散事件动态系统的状态是在离散时间点上发生变化，引起状态发生变化的事件发生时间具有随机性，仿真时钟的步长完全是随机的。从一个事件发生时刻到下一事件发生时刻，仿真时钟可以跨越这些“不活动”周期。从一个事件发生时刻推进到下一个事件发生时刻，仿真时钟的推进呈现跳跃性，推进速度具有随机性。由于仿真实质上是对系统状态在一定时间序列的动态描述，因而仿真钟一般是仿真的主要自变量。仿真钟所显示的是系统仿真所花费的时间，而不是计算机运行仿真模型的时间。因此，仿真时间与真实时间成比例关系。像制造系统这样复杂的机电系统，仿真时间可比真实时间短得多。真实系统实际运行若干天、若干月，而用计算机仿真只需要几分钟。

统计计数器是仿真模型中的统计计数部件,用来统计系统中的有关变量。

计算机仿真实质上是一种软件工具,它包括方法、活动和资源。要成功地实现一个生产系统的仿真,从规划、采集基础数据到结果评价,需要做大量的工作。通常一个完整的生产系统仿真方案应包括以下步骤:

(1) 任务描述,明确仿真目的。首先要了解有关制造系统的许多基本信息;其次,模型提供的结果类型同样需要定义,如设备利用率、系统的输出和运行时间。此外,对于结果输出的形式也要求知道是表格方式还是图形输出方式等。

(2) 仿真实验规划。在调研的基础上,对所研究的系统有全面、深入的了解,并尽可能对其进行详细的描述。确定仿真目标和系统涉及的范围,定义仿真预期目标,进行多种仿真方案设计与选择。正确描述系统的实体、变量、参数、相互关系等。

(3) 数据准备。根据仿真目标,对要仿真的系统进行分析和整理,主要是数据分析以及数据采集与处理,这是一件耗时而且费力的工作。在收集数据时,应考虑系统运行的环境和周期,并注意数据的完整性。

(4) 建立仿真模型。对仿真对象的仿真模型进行设计,并建立符合实际运行环境的系统模型。对所建立的模型进行检查,必要时可聘请有关专家参加和指导关键建模过程,反复修改,直到模型正确为止。

(5) 仿真模型的编程实现。针对仿真对象和环境,编制仿真系统软件或利用商品化的仿真系统实现系统仿真。仿真程序可用通用语言编写,如 FORTRAN、C++ 和 Pascal 等。另外,还可以用专门的仿真语言编写,如用于离散事件系统的仿真语言就有 GPSS、Simula、SIMAN 和 Witness 等。与通用高级语言相比,专用语言具有仿真程序编制简单、仿真效率高、仿真过程数据处理能力强等特点。

(6) 进行仿真实验。在编制好系统的程序后,选择并输入仿真所需要的全部数据,在计算机上运行仿真程序,进行仿真实验,以获得实验数据,并实时动态显示仿真结果。通常是以时间为序,按时间间隔计算出每个状态结果,显示在屏幕上,以便直观形象地观察实验的全过程。

(7) 仿真结果评价。对仿真得到的各种性能参数进行统计分析,对照设计要求和预期目标,综合评价仿真结果和仿真对象,如得到设备的利用率、所需的设备数量、系统的生产能力和产量等。

计算机仿真已成为生产系统设计、分析和运行的有力工具。在生产系统的设计中,可以通过某种模型来研究系统在不同物理配置情况下和不同运行策略控制下的特性,从而预先对系统进行分析、评价,以获得较佳的配置和控制策略。生产系统仿真可以通过模拟系统在不同作业计划输入下的运行情况,用以选择最优的作业计划,提高系统的运行效率。计算机仿真及优化研究的目的是在设计时就

可以在虚拟环境中看到将来真实车间的布局和运行状态,在所得的虚拟设计环境中对组成车间的主要元素进行统一的三维建模,在计算机上利用三维模型真实再现生产线、机床和物料传送设备、缓冲区设置等分析。通过仿真,对生产线可能存在的问题如系统瓶颈、布局规划、人力资源和制造资源配置等进行综合评估。给人以直观的、逼真的虚拟环境来感受未来生产线的动态规划、布局等,对可能出现的问题在设计阶段就及时修改,用户可通过仿真系统和软件进行人机交换,对其生产全过程进行三维动态仿真。

1.2 汽车零部件生产线建模与仿真技术的研究与进展

目前,生产系统规划设计和运行管理面临着许多问题,如由于系统本身的复杂性难以评估设计风险、系统适应性差、系统运行过程中生产调度困难等^[9]。据一份报道统计,国外已运行的复杂制造系统约有80%都没有完全达到设计要求,其中60%都是由于初期规划不合理或失误造成的。原因如下:

(1) 在新生产系统的设计过程中,业务流程缺乏有效的辅助设计与验证分析手段,系统内各业务部门,设计、库存、销售等各部门之间的关系以及各种决策过程对整个生产系统的影响缺乏定性与定量分析。

(2) 在制造单元设计过程中,对于初步设计方案缺少一个验证、分析和比较的工具,如生产能力和生产周期的测定、关键设备的数量和各种资源的分配与利用率计算以及物流情况的合理性分析等、设备故障对整个制造系统的影响等都需要事先的分析和比较。

(3) 在生产系统的运行过程中,生产计划和调度的合理性缺乏合理的验证手段,往往是决策和调度人员根据自身的经验进行决策,而结果往往导致决策缺乏科学性,为企业带来直接或者间接的经济损失,这个问题较为突出地反映在库存管理和生产调度问题上。

20世纪90年代,出现了多种先进制造模式,如敏捷制造、可重构制造和大规模定制等。制造系统规模庞大、结构复杂。制造系统从初期规划(资源配置、布局规划)到实际运行(供求关系管理、生产计划与调度)阶段都存在复杂的决策问题。这些决策问题包含众多影响因素,因素之间关系错综复杂,传统数学优化方法已经无法解决这类问题,而仿真优化技术则以其独特的优化方法和强大的建模能力引起了科学界和企业界的广泛关注。近年来,仿真优化成为了国内外的研究热点,特别是自20世纪90年代中后期,随着智能优化算法和仿真建模技术的充分发展和应用,仿真优化已从单纯的理论研究走向了实际应用,渗透到各个领域。制造系统是其主要的研究对象之一,如制造资源配置、供应关系管理、生产计划与调度的研究等。

1998年,美国Bowden和Hall^[10]提出了“六域”集成的仿真优化框架。“六

域”涵盖了仿真优化的六个研究范畴,即问题域、算法域、分类域、策略域、智能域和界面域。“六域”构成了一个完整而有联系的理论框架,为仿真优化的集成问题指明了方向。Fontanili 等^[11]采用遗传算法和商业化仿真软件 Witness 开发了一个仿真优化系统,并通过 Microsoft OLE 自动化技术实现和仿真模型集成。Allaoui 和 Artiba^[12]利用仿真优化技术,研究了具有维修时间约束的混合流水车间的调度问题,建立了求解调度问题的仿真优化系统。Yang 等^[13]采用仿真优化技术对多层瓷介电容器生产车间调度问题进行了研究。Greenwood 等^[14]开始了一项仿真优化项目的研究,研究对象是 NGSS 的两个钣金加工车间,研究目标是建立仿真优化决策支持系统(DSS),用以减少仿真建模与系统分析的复杂性。潘燕春等^[15]对仿真与优化的集成问题进行了研究,基于贪婪随机自适应搜索算法(GRASP),并利用通用仿真软件 Arena 为平台,提出了一个面向生产调度的仿真优化系统集成框架。清华大学的刘民和吴澄^[16]开展了并行机调度问题的仿真优化研究;吴挺等^[17]基于仿真模型,采取遗传算法和系统仿真相结合的方法,对焊装生产线缓冲区容量的优化分配进行了研究。王书亭^[18]研究了生产线虚拟仿真系统的功能模型,提出了其模块化的体系结构并且利用 VC 和 OpenGL 开发出生产线虚拟仿真原型工具。王国新等^[19]提出了数据驱动与模块化控制模型相结合的仿真建模方法。该方法为生产线的设计以及快速可重组设计提供了有效的建模和分析工具。

传统的布局设计都要经历模型建立、算法求解两个阶段。制造系统属于复杂的离散事件动态系统,具有动态性和复杂性的特点,用数学优化模型描述的布局问题已做了大量简化,与实际问题相差甚远,得不到精确解;而建立的抽象数学模型不易根据实际变化及时调整,因此,许多学者研究了布局设计的仿真方法。郝理想等^[20]利用仿真分析软件 E-Factory 构建制造系统的数字化仿真模型,进行仿真分析,实现了对制造系统的布局优化。卢桂萍等^[21]在 Vega 环境下建立虚拟车间系统,在系统中进行布局实时浏览和生产过程的仿真。王红军^[22,23]、马玉敏^[24]等经过多方面研究,验证了选用 eM-Power 所建立的布局模型的高效性和合理性。樊树海^[25]、赵杰^[26]、马健萍^[27]、徐晓峰^[28]、周军^[29]等建立了基于 Den-eb/QUEST 的制造系统基本原则和方法;侯文皓等^[30]采用 Witness 软件仿真生产流程、运输系统、车间布局等。李普红^[31]等综合提出了变批量活塞软重构生产线设计中的多构性可重构活塞产品设计模型、活塞制造资源优化配置技术、布局规划与优化技术、人因优化技术、建模和仿真等关键技术。王俊^[32]在 Pro-Model 中实现了汽车总装车间的仿真模型,并以提高单位时间生产量和降低在制品库存为目的对模型进行了分析和改进。郑顺水^[33]使用生产线仿真软件 Plant Simulation 验证了生产线规划与布局的合理性及其调度方案的操作性,并对瓶颈设备与故障进行了分析及生产线能力的评估,为企业生产线规划和生产调度计划的制订提供了可靠的科学依据。