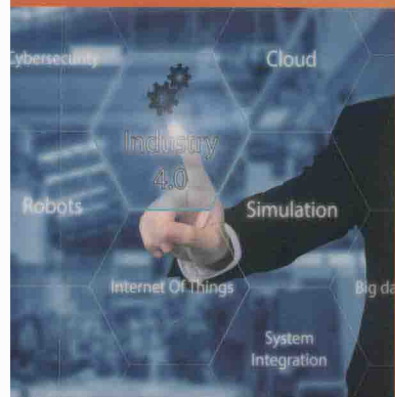


“十三五”国家重点出版物出版规划项目



Modeling and Simulation of Manufacturing System

制造系统建模与仿真

第③版

苏 春 编著



赠电子课件

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

制造系统建模与仿真

第3版

苏 春 编著
李小宁 主审

机械工业出版社

系统建模与仿真是利用模型来分析、评价和优化系统性能的相关技术的总称。目前,该技术已经广泛应用于企业选址、车间布局、系统规划设计、新产品研发与性能分析、生产计划与调度、物流系统设计、供应链管理等领域。

本书以机械制造系统、物流系统等作为主要研究对象,在分析系统和制造系统定义、组成与特点的基础上,介绍系统建模与仿真的概念和原理,阐述制造系统建模与仿真的模型元素、建模方法及其应用步骤,分析系统建模与仿真中的关键技术,介绍主流仿真软件的功能、特点及其使用流程。书中提供了多个制造(生产)系统建模与仿真的研究案例,并配有丰富的思考题和习题。

本书系统地阐述了系统建模与仿真的概念、原理与方法,通过案例展现了系统建模与仿真技术的功能及其应用。本书可以作为机械工程、工业工程、物流工程、系统工程以及管理工程等专业本科生及研究生教材,也可供制造系统设计、新产品研发、企业运营管理、设施规划等领域的技术人员和管理人员参考。

本书入选“十三五”国家重点出版物出版规划项目(现代机械工程系列精品教材)。

图书在版编目(CIP)数据

制造系统建模与仿真/苏春编著.—3版.—北京:机械工业出版社,2019.3

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-62084-6

I. ①制… II. ①苏… III. ①机械制造—系统建模—高等学校—教材②机械制造—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第034636号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:裴 泱 责任编辑:裴 泱 李 乐 刘丽敏

责任校对:张晓蓉 封面设计:张 静

责任印制:张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年5月第3版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·477千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62084-6

定价:44.90元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

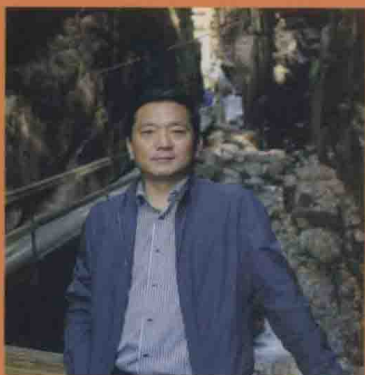
服务咨询热线:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com



苏春

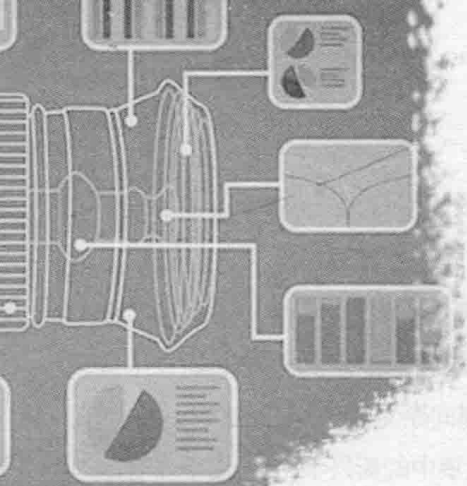
东南大学教授、博士生导师。

1992年毕业于中国石油大学（华东）；1995年、2001年分别毕业于东南大学机械学、机械制造及其自动化专业，获得硕士和博士学位；1995~1998年在南京航空航天大学机电学院工作；2001年至今在东南大学机械工程学院工作。

2003~2004年，公派赴瑞士日内瓦大学、欧洲核物理研究所工作，访问学者；2014~2015年，公派赴美国罗格斯大学，访问学者。主要研究方向为可靠性工程、生产系统工程、数字化设计与制造、制造系统建模与仿真等。主持完成国家自然科学基金项目3项，完成多项江苏省科技厅、江苏省教育厅、江苏省人力资源和社会保障厅、国防技术基础科研和企业委托项目；发表论文140余篇，其中SCI收录20余篇、EI收录60余篇，主编出版规划教材7本。



Modeling and Simulation of Manufacturing System



前言

制造业是国民经济的支柱产业，而制造系统是制造业的基本构成单元。在制造系统数量、从业人员数量以及产业规模等层面，我国已经成为世界制造业大国。但是，由于在制造系统的规划设计、性能参数设置以及运营管理等方面存在诸多问题，众多制造系统的运行效率低下、经济效益不高，在经济全球化环境下缺乏足够的竞争力。近年来，实现从“制造大国”向“制造强国”转变成为各级政府、企业和学术界共同关注的话题。

仿真是一种基于模型的活动，它通过对系统模型的试验达到分析与研究系统的目的。建模与仿真技术可以再现系统动态行为、分析系统配置及参数是否合理、预测瓶颈工位、判断系统性能是否满足规定要求，为制造系统的设计和运行提供决策支持。目前，系统建模与仿真技术已经广泛用于企业选址、制造系统设计、产品研发与性能优化、生产计划与调度、供应链管理等领域，成为提升制造系统性能的有效手段。

本书以机械制造系统、物流系统和服务系统等离散事件系统为研究对象，在分析系统定义和特征的基础上，阐述系统建模与仿真的概念、原理和方法，介绍主流系统建模与仿真软件的功能、特点及其应用。本书既提供了完整的系统建模与仿真体系架构，也注重理论方法与工程应用的结合。在相关章节，分别以制造系统、物流系统以及服务系统为对象，给出了多个仿真研究案例。

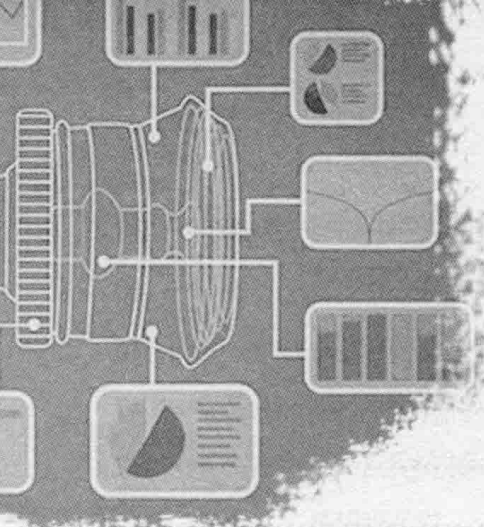
全书共分为七章。第1章介绍系统与制造系统的定义、组成与特点，系统建模与仿真的相关概念，并给出系统建模与仿真应用案例。第2章讨论离散事件系统建模与仿真中的共性问题，分析离散事件系统的模型分类、元素组成以及仿真模型结构，阐述系统建模中常用的思维方法。第3章介绍系统建模与仿真中随机变量、随机分布、随机分布的数字特征等概念，论述随机数和随机变量的生成原理。第4章以制造系统为对象，介绍系统建模的主要方法，包括马尔可夫过程、Petri网建模理论、排队系统模型以及库存系统模型等，并给出系统建模与分析案例。第5章分析仿真程序和仿真软件架构，介绍常用的仿真调度策略和仿真时钟推进机制，阐述蒙特卡洛仿真和系统动力学仿真的基本原理，给出仿真应用案例。第6章简要介绍系统建模与仿真的校核、验证与确认的概念和基本方法。第7章阐述仿真语言和仿真软件的分类及其发展历程，介绍主流系统建模与仿真软件的功能、特点及其应用领域；以ProModel软件为重点，分析软件的模型元素和建模、仿真流程，并以板材加工柔性制造系统、汽车发动机再制造生产线、柔性作业车间生产调度、再制造系统动态瓶颈分析为例，给出多个制造系统建模、仿真与优化研究案例。



本书由东南大学苏春编著，由南京理工大学李小宁教授主审。教材的编写工作得到了东南大学教务处立项支持，并入选国家新闻出版广电总局“十三五”国家重点出版物出版规划项目。部分研究内容受到国家自然科学基金项目和江苏省“六大人才高峰”项目资助，研究生沈戈、王圣金、黄苗、卢山、邹小勇、王胜友、安政、曹白雪、许爱娟、付叶群、施杨梅等在制造系统建模与仿真案例研究中做出了贡献，在此谨表感谢。在教材编写过程中参考了大量文献，在此谨向原文献作者表示感谢。

系统建模与仿真研究领域宽广、研究内容丰富，并且是一门快速发展中的新兴学科。由于作者水平有限，书中难免有不足和错误之处，敬请读者批评指正。

苏 春



目 录

前 言

第1章 绪论	1
1.1 系统与制造系统	1
1.1.1 系统的定义	1
1.1.2 制造系统及其组成	3
1.2 系统、模型与仿真	5
1.3 系统建模与仿真的步骤	10
1.4 制造系统建模与仿真概述	12
1.4.1 制造系统的特征分析	12
1.4.2 制造系统建模与仿真的功用	14
1.5 制造系统建模与仿真案例	17
思考题及习题	21
第2章 离散事件系统建模与仿真的基本原理	24
2.1 系统与系统模型分类	24
2.2 离散事件系统的建模元素	25
2.3 离散事件系统仿真程序的结构	27
2.4 系统建模的常用方法	28
2.4.1 分析与综合	29
2.4.2 抽象与概括	30
2.4.3 归纳与总结	32
2.4.4 演绎与推理	33
2.4.5 比较与类比	34
2.4.6 概率统计法	35

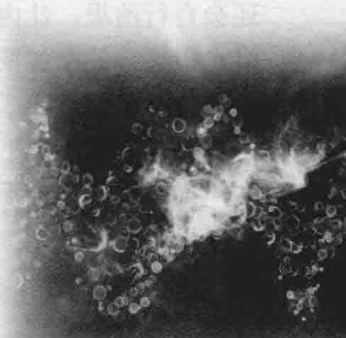


2.4.7 层次分析法	37
2.4.8 模糊综合评价	40
思考题及习题	46
第3章 随机变量和随机分布	47
3.1 随机变量和随机分布概述	47
3.1.1 离散型随机变量	47
3.1.2 连续型随机变量	50
3.1.3 随机变量的数字特征	52
3.1.4 常用随机分布类型及其特性	55
3.1.5 随机变量的经验分布	68
3.1.6 随机分布的参数估计	71
3.1.7 随机分布的假设检验	76
3.2 随机数生成方法	77
3.2.1 随机数的特性	77
3.2.2 随机数发生器的设计	78
3.3 随机数发生器的检验	81
思考题及习题	84
第4章 制造系统的建模方法	89
4.1 系统建模方法概述	89
4.2 马尔可夫过程	90
4.3 Petri 网建模理论	92
4.3.1 Petri 网的基本概念	93
4.3.2 Petri 网的扩展形式	96
4.3.3 Petri 网中的事件关系	104
4.3.4 基于 Petri 网的系统性能分析	107
4.3.5 案例研究: 基于 Petri 网的液压系统可靠性建模与评估	114
4.4 排队系统模型	121
4.4.1 排队系统概述	121
4.4.2 排队系统的分类符号	126
4.4.3 排队系统的性能指标	126

4.4.4 顾客到达时间间隔和服务时间分布	129
4.4.5 案例研究：基于排队论的制造系统建模与手工仿真	133
4.5 库存系统模型	136
4.5.1 库存及库存系统的定义与功能	136
4.5.2 库存系统模型	138
4.5.3 案例研究：汽车4S店库存系统建模与仿真	142
思考题及习题	145
第5章 制造系统的仿真方法	150
5.1 系统仿真的调度策略	150
5.1.1 事件调度法	151
5.1.2 活动扫描法	152
5.1.3 进程交互法	155
5.1.4 消息驱动法	158
5.2 仿真时钟推进机制	160
5.3 蒙特卡洛仿真	163
5.3.1 蒙特卡洛仿真的基本概念	163
5.3.2 案例研究：基于蒙特卡洛仿真的系统动态可靠性评估	166
5.4 系统动力学仿真	181
5.4.1 系统动力学仿真的基本概念	181
5.4.2 系统动力学仿真的应用步骤	182
5.4.3 案例研究：基于系统动力学仿真的供应链库存优化	183
思考题及习题	191
第6章 系统建模与仿真的校核、验证与确认	193
6.1 校核、验证与确认概述	193
6.1.1 校核、验证与确认的基本概念	194
6.1.2 校核、验证与确认的基本原则	195
6.1.3 校核、验证与确认的实施过程	196
6.2 建模与仿真校核、验证的基本方法	197
6.2.1 建模与仿真的校核与验证技术	197
6.2.2 模型验证的常用方法	201

思考题及习题	206
第7章 仿真技术发展与仿真案例研究	207
7.1 仿真技术起源及其发展现状	207
7.2 常用仿真软件简介	209
7.2.1 Arena	210
7.2.2 ProModel	212
7.2.3 Flexsim	213
7.2.4 Extend	214
7.2.5 Witness	216
7.2.6 AutoMod	217
7.2.7 SIMUL8	218
7.3 系统仿真软件的选用	219
7.4 ProModel 仿真软件及其使用步骤	220
7.4.1 ProModel 软件的建模元素	220
7.4.2 ProModel 软件的使用步骤	243
7.5 制造系统建模与仿真案例研究	244
7.5.1 板材加工柔性制造系统配置与参数的优化	244
7.5.2 汽车发动机再制造生产线瓶颈工序分析与性能优化	250
7.5.3 基于仿真和规则的多机并行作业车间生产调度	263
7.5.4 考虑质量不确定性的再制造系统动态瓶颈分析	267
7.5.5 基于分派规则和人工蜂群算法的再制造系统生产调度仿真	275
思考题及习题	285
参考文献	290

第1章 绪论



1.1 系统与制造系统

1.1.1 系统的定义

在与自然界的交往中，人类逐步认识到客观世界的系统性，并自发地产生了系统（System）的思想。古希腊哲学家德谟克利特（Democritus，约前460—前370）在其著作《世界大系统》中就有关于系统的论述：“任何事物都是在联系中显现出来的，都存在于系统中，系统联系规定了每一个事物，而每一个联系又能反映系统联系的总貌。”

中华文明源远流长，博大精深。我国古代也有不少朴素的系统思想，并为后人留下以系统观点认识生命规律和改造自然的宝贵财富。《黄帝内经》是中国古代关于天地万物和生命规律的百科全书，也是我国最早的医学典籍。《黄帝内经》系统地阐述了天体运行的阴阳规律、万物生成的五行规律，并将阴阳五行规律应用于人体。它以生命规律和医疗理法为中心，涵盖人体结构、生理、病理、诊断、治疗和药学等内容，强调以自然之法治人、自外而知内、从显而知微，秉承同类相似、整体与局部相似、宏观与微观相似、人与宇宙相似的广义相似律，集中体现了“因人而异，辨证施治”的系统思想，建立了阴阳五行、脉象、藏象、经络、病因、病机、病症、诊法、论治、养生、运气等中医学说，形成集自然、生物、心理和社会于一体的整体医学模式，成为中医学的元始经典。

系统工程思想在我国古代的工程项目建设中也得到了完美应用。都江堰水利工程就是系统思想的典型应用。公元前256年，蜀郡太守李冰父子组织建造都江堰工程，它主要由“鱼嘴”“宝瓶口”和“飞沙堰”等三部分组成（见图1-1）。“鱼嘴”因其形如鱼嘴而得名，它将汹涌的岷江分隔成外江和内江，是都江堰的分水工程。其中，外江为岷江主流，主要用于排洪；内江江水通过宝瓶口流入成都平原，主要用于灌溉。“宝瓶口”是在玉垒山上人工开凿的一个山口，因形状酷似瓶口而得名，它的功能是将岷江水引入成都平原并且控制进入内江的水量。“飞沙堰”具有泄洪和排沙功能。当内江水量超过宝瓶口流量的上限时，多余的水便从飞沙堰自行溢出；如遇特大洪水，飞沙堰



图1-1 都江堰水利工程的系统组成

还会自行溃堤,让内江的水回归到外江,即岷江主流。此外,当江水超过飞沙堰的顶部时,洪水中夹带的泥沙便会流入外江,以避免宝瓶口水道和内江的淤塞。都江堰工程巧妙地利用地形,科学地解决了江水自动分流、泥沙自动排除和进水量自动控制等难题,起到了“行水灌田,防洪抗灾”的功效。

都江堰工程渠道总长 1165km,共有 520 多条支渠、2200 多条分渠,灌溉农田面积达 300 多万亩。据《史记》记载,都江堰工程使成都平原“水旱从人,不知饥馑,时无荒年,天下谓之‘天府’也”。都江堰是系统工程思想的典型应用,使成都平原获得“天府之国”的美誉,成为世界水利工程史上的创举。

我国著名科学家、“工程控制论”创始人、系统科学重要奠基人钱学森(1911—2009)院士指出:系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合而成、具有特定功能的有机整体,而且这个有机整体又是它从属的更大系统的组成部分。系统具有以下特点:

1) 系统是由两个或两个以上要素组成的整体。需要指出的是,系统和要素是一组相对的概念,它取决于研究对象组成及其功能。

2) 系统构成要素之间具有一定的联系和内在关系,并且在系统内部形成特定的结构。结构(Structure)就是组成系统的诸要素之间相互关联的方式。

3) 系统具有边界(Boundary)。边界确定了系统的范围(Scope),并将系统与周围的环境(Environment)区别开来。系统与环境之间存在一定的物质、能量和信息交流。通常将环境对系统的作用称为系统的输入(Input),而将系统对环境的作用称为系统的输出(Output)。与系统和要素之间的关系相似,系统和环境也是两个相对的概念。

系统运行过程通常会受到外部环境中各种因素的影响。以制造企业为例,企业的采购计划、生产计划、运营调度、物料配送、产品营销等活动会受到国家政策、社会治安状况、极端天气、客户需求、原材料供应、季节等因素影响,存在一定的随机性和不确定性。

4) 系统具有特定的功能和具体的运作目标,有存在的价值和必要性。

图 1-2 所示为某汽车装配线的局部。汽车装配线是由零部件、装配工具、物流设备、信息、能源、技术人员、管理人员、操作工人、技术要领、操作规范等要素构成的复杂制造系统。各要素之间相互影响、相互制约、密切关联,共同服务于汽车装配这一目标。系统中任一参数或环境因素的变化都会改变装配线的状态和性能,某些要素故障甚至会导致整条装配线瘫痪,给企业带来重大的经济损失。要保证装配线高效运行,实现系统结构、参数或性能的优化,需要从系统层面科学地设定系统功能、确定系统的组成要素,统筹考虑系统对环境的要求和环境对系统性能的影响。



图 1-2 某汽车装配线的局部

1.1.2 制造系统及其组成

根据系统状态是否随时间变化而连续发生改变，可以将系统分为连续系统（Continuous System）和离散事件系统（Discrete Event System）。

连续系统是指系统状态和性能随时间发生连续性变化的一类系统。电力系统的用电需求、炼油厂和自来水厂单位时间产量等系统的状态具有连续性，此类系统为连续系统。图 1-3 所示为某地区的用电负荷变化曲线，显然电力生产属于一类连续系统。连续系统常用的定义方法包括常微分方程、偏微分方程、状态空间方程和脉冲响应函数等。

离散事件系统是指只有在某些时间点上发生事件（Event）发生时，系统状态（State）才会发生改变的一类系统。也就是说，系统状态的改变只发生在离散的时间点上，并且系统的一种状态通常会保持一段时间。通常，系统状态的变化也会引发新的事件。在机械制造系统中，毛坯到达、加工开始、设备故障、加工完成等都是会引起系统状态改变的事件。此外，超市、图书馆、理发店、餐厅、物流、仓储等服务系统也属于离散事件系统，顾客到达、服务开始、服务结束以及顾客离开等，均是此类系统中的事件。

在多数离散事件系统中，事件发生与否、何时发生存在一定的随机性，系统状态的变化具有明显的动态性和不确定性。因此，也常被称为离散事件动态系统（Discrete Event Dynamic System, DEDS）。根据事件类型及其发生次序不同，某一种系统状态可能会演变成多种不同的后续状态。通常，离散事件系统的状态难以用准确的函数加以描述，但是通过统计分析可以得到系统处于不同状态的概率等信息，获得系统状态和性能变化的内在规律。

机电产品制造系统、仓储和配送系统、公路交通系统、车站/机场/码头客流、电信网络系统中的电话流量、理发店/商店/餐厅等服务系统都属于离散事件系统。图 1-4 所示为某企业粗钢日产量的统计数据。显然，该企业钢产量具有明显的离散性和随机性。

制造业（Manufacturing Industry）是国民经济的支柱产业，它与工业生产以及人们的日常生活关系密切。科学技术进步和生产力水平的提高，使得制造的内涵和外延不断得到拓展。制造（Manufacturing）是指将物质、能量、信息等可用的资源转化为可供人们利用和使用的工业产品或生活消费品的过程。广义的制造不仅指具体的工艺过程，还包括市场分析、产品研发、零部件结构设计、加工工艺、装配、检验、销售、售后服务以及产品报废回收等全生命周期的相关环节。2011 年，国家统计局、国家质量监督检验检疫局、国家标准委员会第三次修订《国民经济行业分

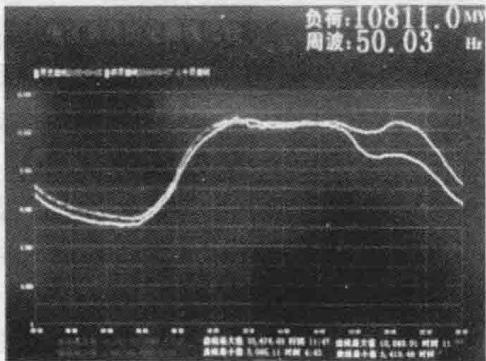


图 1-3 某地区的用电负荷变化曲线



图 1-4 某企业粗钢日产量的统计数据

类(GB/T4754—2011)》。该国家标准参照2008年联合国制定的《国际标准行业分类》，将制造业分为农副产品加工、食品加工、烟草、纺织、木材、家具、造纸、印刷、石化、医药、化纤、橡胶和塑料、非金属矿物、黑色金属、有色金属、金属制品、专用设备、汽车、铁路、船舶、航空航天、电气、计算机、通信和其他电子设备、仪器仪表等31个大类。实际上，制造业覆盖了除采掘业、建筑业之外所有的第二产业。

制造系统(Manufacturing System)是指以生产产品为目的，由产品制造过程中涉及的原材料、人员、能源、加工设备、物流设备、信息系统以及设计方法、加工工艺、生产计划与调度、系统维护、管理规范等要素组成的具有特定生产功能的一类系统。制造系统具有以下特点：

- 1) 制造系统是由与产品制造过程相关的软件、硬件和人员组成的有机整体。
- 2) 制造系统的输入为毛坯、原材料、能源、信息等资源，输出为零部件、半成品或产品。它是一个动态输入输出系统。
- 3) 制造系统涵盖产品制造的全过程以及产品全生命周期，包括市场分析、产品设计、工艺规划、加工制造、装配、包装、销售、售后服务以及回收再利用等环节。

科学技术进步、客户需求变化、竞争对手状况、原材料供应、制造系统状态、宏观经济环境、季节性因素、天气状况等因素都会影响制造系统性能。近年来，制造企业之间的竞争日趋激烈，产品质量、交货期、生产成本、服务水平等成为制造企业竞争力的重要体现，也对制造系统的规划、设计与运营提出了更高要求。

机械制造(Machinery Manufacturing)是制造业的重要组成部分。它是指利用机器制作或生产产品的过程。通常，机械制造系统包括机床、夹具、刀具、加工工艺、原材料、操作人员、管理人员、操作规范、技术要求等各类生产要素。单台加工设备(Machining Equipment)、制造单元(Manufacturing Cell)、生产车间(Manufacturing Shop)、生产线(Production Line)、装配线(Assembly Line)、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)、计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)以及制造企业(Manufacturing Enterprise)均可以视为不同层次、不同规模的机械制造系统。

机械制造业是国民经济的基础产业。它不仅为工业生产和人们生活提供产品，同时也为其他制造业提供各类装备。实际上，机械制造系统的技术与管理水平已经成为一个国家或地区工业化程度和综合竞争力的重要标志。美国、德国、日本、瑞士、法国等发达国家均拥有领先全球的机械制造业。本书的主要研究对象是机械制造系统，以下简称为制造系统。

综上所述，制造系统是一类复杂的离散事件动态系统。它的输入为各种制造资源(如毛坯、半成品、能源、人力、信息等)，输出为零件、部件或产品。此外，制造系统的运行过程始终伴随着物料流、能量流和信息流(见图1-5)。

(1) 物料流 在某种意义上，产品的制造过程就是物质在制造系统中流动并且状态不断发生改变的过程。通过加工、装配、检验等制造环节以及运输、存储、搬运、装夹、拆卸、包装、配送

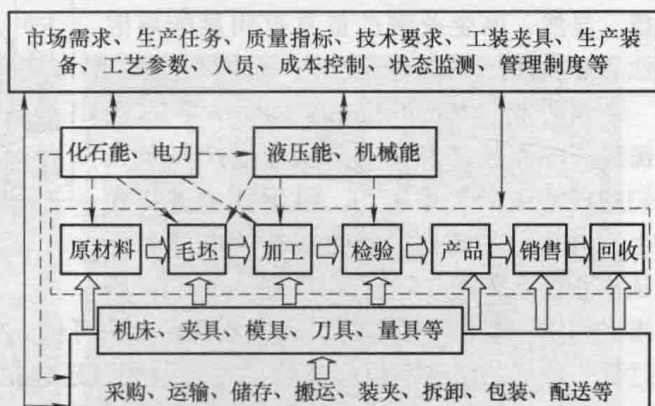


图 1-5 机械制造系统组成

等物流环节,输入系统的原材料、毛坯和零部件,被转换成半成品或成品从系统中输出,成为满足顾客需求的商品。除原材料、毛坯和半成品之外,物料流还包括机床、夹具、模具、刀具、量具以及物流设备等硬件设备。图1-5中以“ $\Rightarrow$ ”表示物料流。

(2) 能量流 能量是驱动机械制造系统运行的动力源。机械加工过程和物流系统都需要一定形式的能量来驱动。在某种意义上,机械制造系统也是一个能量转换系统。驱动机械加工系统运动最常用的原动力是电能,通过电动机将电能转化为机械能,完成切削加工动作,使原材料(或毛坯)改变其形状或状态;部分机械能再转化为液压能、气动等形式,以完成执行元件的特定动作。原动力的其他形式还包括化石能源(如煤、石油、天然气等)燃烧产生的化学能、太阳能、风能、动力电池等。图1-5中以“ $---\Rightarrow$ ”表示能量流。

(3) 信息流 信息是制造系统运行的前提和基本条件。要使机械制造系统低成本、高质量、高效率地完成产品加工活动,必须提供准确、及时和有效的信息,包括市场需求、生产任务、质量指标、技术要求、工艺参数、设备性能等。此外,机械制造系统运行过程中,各种信息参数是动态变化的,信息必须及时反馈和更新。与物料流和能量流有所不同,信息流通常是双向的。图1-5中以“ $\longleftrightarrow$ ”表示信息流。



1.2 系统、模型与仿真

在新系统开发过程中或者分析已有系统的性能指标时,通常需要开展试验(Experiment)研究。总体上,试验方法可以分为两类:一类是直接以实际系统为对象进行试验;另一类是先构造合适的系统模型,再通过对系统模型的试验来获得系统的性能指标。

与直接的实物试验相比,基于模型的试验(Model-based Experiment)具有以下优点:①当新系统还处于开发阶段,尚没有可供试验的真实系统,此时只能通过对模型的试验来分析、验证系统性能。例如:新型飞机、新款汽车、新型舰船等新产品的研制等。②对真实系统的试验可能会引起系统故障或造成严重破坏,给系统、环境、操作人员或用户等带来危害或造成重大经济损失,如新型火箭、卫星和载人飞船发射,电网、铁路机车和机场调度系统功能验证和员工操作培训等。③为得到系统真实的性能指标,往往需要进行多次试验,基于实物的试验周期长、成本高。④试验条件的一致性在保证试验结果准确性和可信性的重要条件,有时采用实物试验存在较大难度。

随着科学技术进步和系统复杂性的增加,基于模型的试验受到重视,应用日趋广泛。建立系统模型是开展模型试验的前提条件,这一过程称为系统建模(System Modeling)。模型(Model)是对实际或设计中系统某种形式和一定程度的抽象、简化与描述。通过模型,可以分析系统结构、参数和动态行为,判断系统性能指标是否满足要求。总体上,系统模型可以分为物理模型、数学模型以及物理-数学模型等类型。

物理模型(Physical Model)是采用特定的材料和工艺、根据相似性原则按照一定比例制作的系统模型,可用于试验、评估系统某些方面性能。例如:研制新型飞机时,一般先要对按比例缩小的飞机模型开展风洞试验,验证飞机空气动力学性能、结构件强度等;开发新型轮船时,一般先要在水池中对缩小的轮船模型进行试验,评估轮船的动力学特性;建设水电站时通常要建立沙盘模型,评估项目在发电、防洪、生态、环境等方面的作用或效果;军事演习和战争中通常采用沙盘模型完成交战双方军事运筹的推演;制造企业选址和车间布局时,也可以通过建立相应的物理(沙盘)模型,开展多方案评估与论证,到优化设计方案。此

外,建筑模型、城市(区域)规划模型等也属于物理模型。

数学模型(Mathematical Model)是采用特定的符号、算式、方程或计算程序等方法构建的系统模型,用于描述系统的结构组成和要素之间的内在关系。通过对数学模型的试验,可以获得实际系统特定的性能特征和运行规律。例如:区域经济增长预测模型、火箭系统可靠性评估模型、汽车动力学仿真模型、客机机舱舱门运动学分析模型等。

除数学模型和物理模型外,还有物理-数学模型(Physical-mathematical Model),也称为半物理模型(Semi-physical Model)。物理-数学模型是一种混合模型,它集成了物理模型和数学模型的优点。例如:飞机仿真训练器(见图1-6、图1-7)、发电厂调度仿真训练器、高铁列车模拟驾驶舱(见图1-8)等。其中,图1-8所示是我国第一套自主研制的高铁列车模拟驾驶仿真培训系统,能够模拟动车的操纵环境、各类运行环境、运行条件与运行性能,实现列车驾驶实操的模拟训练,此外还可以开展故障应急处理、非正常行车处理和突发事件处理训练。



图1-6 波音787飞机全动模拟机 图1-7 波音787飞机飞行训练器 图1-8 高铁列车模拟驾驶舱

如前所述,建立系统模型的目的是通过模型来评估系统性能。仿真(Simulation)是通过对系统模型的试验,研究已存在的或设计中的系统性能的一类方法与技术。也就是说,仿真是一种基于模型的试验活动。

仿真可以再现系统状态、动态行为和性能特征,分析系统配置是否合理、性能能否满足要求,预测系统可能存在的缺陷,为系统设计提供决策支持和理论依据。根据仿真模型不同,仿真可以分为物理仿真(Physical Simulation)、数学仿真(Mathematical Simulation)和物理-数学仿真(Physical-mathematical Simulation)。物理仿真是通过对实际存在的物理模型的试验来研究系统性能,如飞机风洞试验、建筑模型抗震试验、汽车的碰撞试验等。数学仿真是利用系统的数学模型代替实际系统开展试验研究,获得现实系统的性能特征和运作规律,如基于有限元分析和虚拟现实技术开展汽车碰撞试验。物理-数学仿真是前两种仿真方法的有机结合。如果通过数学仿真可以研究实际系统性能,通常将可以显著降低模型试验的时间和成本。

图1-9所示为几种系统仿真案例。其中,图1-9a、e为物理仿真试验,图1-9b、c为物理-数学仿真试验,图1-9d、f为数学仿真试验。它们分别适用于不同的研究对象。

综上所述,系统、模型与仿真三者之间关系密切。其中,系统是研究的对象和目标,模型是系统在某种程度和层次上的抽象,而仿真是通过对系统模型的试验,以便分析、评价和优化系统。系统、模型与仿真三者之间的关系如图1-10所示。

随着计算机软硬件技术的发展、计算数学与计算力学等相关理论日趋成熟,人们越来越多地利用数学模型和计算机来分析系统性能、优化系统设计,由此形成计算机仿真(Computer Simulation)技术。计算机仿真属于数学仿真,它的实质是仿真过程的数字化,因而也称为数字化仿真(Digital Simulation)。