

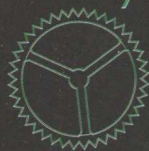


Reconfigurable  
Manufacturing System



# 可重构制造系统

齐继阳 唐文献 宁善平 © 著



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 可重构制造系统

齐继阳 唐文献 宁善平 著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

未来制造系统的核心能力是随着顾客需求的变化能快速重构本身,可重构制造系统将是制造系统发展的必然选择。可重构制造系统依据可重构理论而提出,是以适应产品市场的需求变化为目标,根据所需加工零部件族群的结构特点,以加工设备和工艺流程的可重构为基础,以功能部件模块化为设计思想,以适应多品种和大批量生产为主要特征的新型可动态组态的自动化制造系统。本书论述了可重构制造系统重构过程中设备选择、可重构设备布局、可重构制造系统可靠性建模与预测、可重构系统控制结构、设备故障诊断和可重构数控系统等一系列使能技术,对促使可重构制造系统走向实际应用,具有重要的意义。

本书适用于现代制造科学领域从事研究、开发、管理的各类人员,可以作为机械制造及其自动化、机械电子工程、计算机应用等相关专业高年级本科生的选修教材及硕士、博士研究生的参考教材。本书也可作为企业管理及工程技术人才了解未来制造模式和技术发展趋势及制定对策的参考用书。

版权专有 侵权必究

### 图书在版编目(CIP)数据

可重构制造系统/齐继阳,唐文献,宁善平著. —北京:北京理工大学出版社, 2018. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 5183 - 9

I. ①可… II. ①齐…②唐…③宁… III. ①自动制造系统 - 研究 IV. ①TH164

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第003066号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市天利华印刷装订有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 8

字 数 / 190 千字

版 次 / 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 40.00 元

责任编辑 / 杜春英

文案编辑 / 党选丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 施胜娟

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 前言

Qianyan

随着全球经济竞争的日趋激烈，企业的生存环境在剧烈地和不可预测地变化着。为适应这种变化，制造企业必须提高其制造系统的适应能力，以应变变。可重构制造系统正是在这一背景下提出的，它能够以较低的成本提高企业对外界环境变化的响应能力，满足顾客对产品个性化的需求。

制造系统的重构可以在系统层和设备层两个层次上进行，其使能技术问题也涉及两个层次。对于系统层重构，本书研究了制造系统重构过程中设备选择、制造系统设备布局与三维可视化仿真模型、可重构制造系统可靠性指标体系及可靠性模型、可重构制造系统可靠性建模与预测分析、可重构制造系统的可靠性综合评价等方面的问题；对于设备层重构，本书研究了设备故障诊断、数控系统的重构等方面的内容。

本书共分9章，第1章可重构制造系统概述，介绍了可重构制造系统产生的背景，可重构制造系统的定义与特征，可重构制造系统的支撑技术以及发展现状；第2章为制造系统可重构过程中设备选择模型，根据生产任务选择制造资源是制造系统进行重构的前提，书中首先介绍设备选择指标体系的建立，然后介绍评价指标的权重系数的确定，再介绍备选设备各项指标值的确定，最后通过实例说明制造系统重组过程中设备选择方法；第3章为制造系统设备布局与三维可视化仿真模型，介绍设备布局的常用类型，考虑到设备布局问题属于NP完全问题，介绍设备布局的启发式算法，通过实例演示启发式算法在设备布局问题求解中的应用，为评估系统重组方案的优劣，将计算机仿真技术运用于制造系统的设计中，分析制造系统仿真模型的特征，介绍制造系统仿真模型的设计方法，最后以DELMIA-QUEST为开发平台演示如何建立制造系统仿真模型；第4章为可重构制造系统可靠性模型，介绍可重构制造系统可靠性的基本概念，可靠性基本度量指标体系，常用可靠性模型；第5章为可重构制造系统可靠性建模与预测分析，介绍Petri网、随机Petri网、马尔科夫链及其在可靠性分析中的应用，模糊集理论基本概念，基于模糊随机Petri网的可重构制造系统可靠性建模与预测分析，通过实例演示了可重构制造系统可靠性建模与预测分析；第6章为可重构制造系统的可靠性综合评价，介绍可靠性综合评价的原则和现状，可靠性评价指标，可靠性综合评价的方法，通过实例演示可靠性综合评价方法；第7章为可重构制造系统合弄控制结构，介绍控制系统控制结构的演变，合弄控制结构；第8章为设备故障诊断方法，介绍设备故障诊断的方法，分析模糊聚类、灰色系统理论、粗糙集理论应用于设备故障诊断过程中存在的一些缺陷，考虑到这些理论的互补性，将它们结合起来，建立模糊c均值聚类—粗糙集—灰色系统的设备故障诊断模型，通过实例演示设备故障诊断方法；第9章为基于USB总线的可重构数控系统，分析数控系

统的发展趋势，提出基于 USB 的可重构数控系统，并提出一种硬件和软件的设计方法，建立可重构数控系统的原型系统。

在本书的写作过程中，参考了大量的文献，在此，对这些作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在错误与不妥之处，恳请读者给予批评指正。

著者

2017年8月

第 1 章 可重构制造系统概述	001
1.1 可重构制造系统产生的背景	001
1.2 可重构制造系统的定义与特征	003
1.2.1 可重构制造系统的定义	003
1.2.2 可重构制造系统的特征	003
1.3 可重构制造系统的支撑技术	004
1.3.1 可重构制造系统设备层重构支撑技术	005
1.3.2 可重构制造系统系统层重构支撑技术	006
1.4 可重构制造系统发展现状	007
第 2 章 制造系统可重构过程中设备选择模型	013
2.1 设备选择指标体系的建立	014
2.2 评价指标权重系数的确定	015
2.3 备选设备各项指标值的确定	018
2.4 备选设备的综合评价	020
2.5 应用实例分析	021
第 3 章 制造系统设备布局与三维可视化仿真模型	025
3.1 设备布局的类型	026
3.2 布局问题的求解算法	027
3.2.1 常用的启发式算法概述	028
3.2.2 混合算法	030
3.3 设备布局设计应用实例	033
3.3.1 问题的描述	033
3.3.2 算法的设计	034
3.3.3 运算结果	036
3.4 制造系统仿真模型的特性	036
3.5 制造系统仿真模型的设计方法	038
3.5.1 制造系统建模的任务	038

# 目 录

# Contents

3.5.2 制造系统建模的工具 .....	039
3.6 应用实例 .....	040
<b>第4章 可重构制造系统可靠性模型 .....</b>	<b>043</b>
4.1 可重构制造系统可靠性的基本概念 .....	043
4.2 可重构制造系统可靠性的基本度量指标体系 .....	044
4.2.1 无故障性指标参数 .....	044
4.2.2 维修性指标参数 .....	045
4.2.3 其他性能指标参数 .....	045
4.3 常用系统的可靠性模型 .....	046
4.3.1 可靠性建模的目的与作用 .....	046
4.3.2 可靠性框图 .....	047
4.3.3 常用系统可靠性模型的可靠度计算 .....	047
<b>第5章 可重构制造系统可靠性建模与预测分析 .....</b>	<b>050</b>
5.1 Petri 网及其在可靠性分析中的应用 .....	050
5.1.1 Petri 网的基本概念 .....	050
5.1.2 Petri 网的图形表示 .....	051
5.1.3 Petri 网在可靠性分析中的应用 .....	052
5.2 随机 Petri 网及其在可靠性分析中的应用 .....	053
5.2.1 随机 Petri 网的定义 .....	053
5.2.2 随机 Petri 网在可靠性分析中的应用 .....	053
5.3 马尔科夫链分析法 .....	056
5.3.1 马尔科夫过程 .....	056
5.3.2 马尔科夫过程可修系统的一般模型 .....	057
5.3.3 马尔科夫对复杂系统的性能分析 .....	059
5.4 模糊集理论的基本概念和代数运算 .....	060
5.4.1 模糊集理论的基本概念 .....	060
5.4.2 模糊集的代数运算 .....	060
5.5 基于模糊随机 Petri 网的 RMS 可靠性建模与预测分析 .....	061

5.5.1 模糊随机 Petri 网的定义 .....	061
5.5.2 可重构制造系统的可靠性建模与预测分析 .....	062
5.6 实例分析 .....	063
5.6.1 实例 1 .....	063
5.6.1 实例 2 .....	064
<b>第 6 章 可重构制造系统的可靠性综合评价</b> .....	<b>072</b>
6.1 概述 .....	072
6.1.1 可靠性综合评价的原则 .....	072
6.1.2 可靠性综合评价的现状 .....	072
6.2 可靠性指标的选择与确定 .....	073
6.2.1 可靠性指标选择的依据与原则 .....	073
6.2.2 可靠性指标的确定 .....	074
6.3 可靠性综合评价的方法 .....	075
6.3.1 可靠性指标的层次分析比较 .....	075
6.3.2 基于模糊理论可靠性的综合评价法 .....	077
6.4 实例分析 .....	079
<b>第 7 章 可重构制造系统合弄控制结构</b> .....	<b>083</b>
7.1 概述 .....	083
7.2 制造系统控制结构的演变 .....	084
7.2.1 集中式控制结构 .....	084
7.2.2 递阶式控制结构和非严格递阶式控制结构 .....	085
7.2.3 分布式控制结构 .....	085
7.3 合弄控制结构 .....	086
7.3.1 合弄控制结构参考模型 .....	086
7.3.2 合弄控制结构中调度合弄的调度算法 .....	088
7.3.3 合弄控制结构中基本合弄间的协商机制 .....	094
<b>第 8 章 设备故障诊断方法</b> .....	<b>097</b>
8.1 概述 .....	097



# 第1章 可重构制造系统概述

## 1.1 可重构制造系统产生的背景

制造业为人类创造了巨大的社会财富，据统计，发达国家70%左右的社会财富是由制造业创造的，为保持制造业在国际上处于领先地位，各国政府都高度重视本国制造业的发展，都在积极探讨新的制造模式。美国在20世纪90年代提出了敏捷制造模式，并且成立了敏捷制造企业论坛，研讨敏捷制造的概念、理论和工程实践；日本联合欧洲、美国、加拿大、澳大利亚等工业国家和地区开展了智能制造研究计划，以提高制造系统的智能；德国提出了分形公司理论，目的是在德国社会价值观和文化的基础上，建立一种能凝聚德国优势的新型制造模式。

在过去的50年中，在不断变化的市场需求驱动下，制造系统经历了三次重大的变革，如图1-1所示。

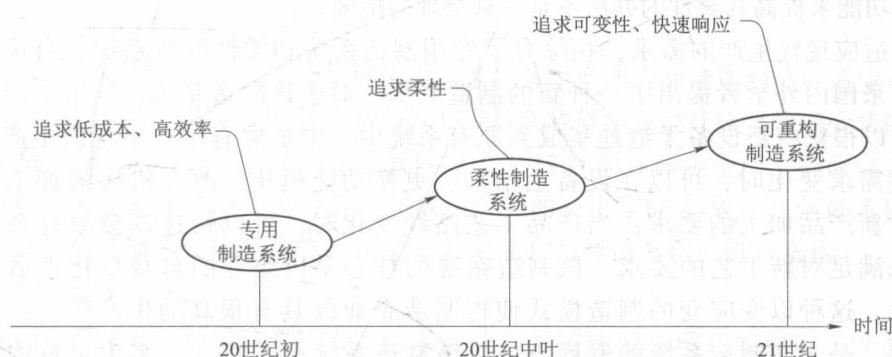


图1-1 制造系统的发展历程

20世纪初，由于生产能力远远落后于社会消费需求，各种制造业具有稳定的市场环境。企业的主要任务是：在有限生产能力的约束下，有效地生产产品，制造企业竞争的手段为扩大生产规模，降低生产成本。在这种环境下，制造企业通过引进大量的专用自动化生产设备取代原有的手工设备，遵循批量法则的“大批量生产模式”，将这些专用自动化生产设备通过物流系统连接起来形成刚性的、任务不可改变的机械式流水生产线，从而极大地提高了制造系统的生产率，降低了生产成本，满足了人类社会的基本消费需求。

然而专用制造系统是针对某一具体产品和固定生产能力而设计制造的，它虽然具有

高效率、低成本等一系列优点，但缺少柔性。在当今竞争日趋激烈、市场需求变化莫测、产品市场寿命周期逐渐缩短的情况下，专用制造系统缺乏柔性的弊端逐渐暴露出来，导致大批专用制造系统处于停产、半停产状态，造成极大的浪费。例如，1996年冬季，由于市场对豪华型轿车需求较少，美国通用汽车公司凯迪拉克生产线近一半处于停产状态；而在同一时期，市场对通用汽车公司的轻卡汽车的需求却超过其生产能力的20%，由于此生产线缺乏柔性，通用汽车公司只能眼看着大好的市场机遇白白错过。

20世纪下半叶以后，市场逐渐趋于饱和，制造企业的竞争焦点转移到如何提高生产柔性，快速向客户提供高质量、个性化的产品和服务。在这种情况下，人们提出了柔性制造系统。柔性制造系统是由计算机控制系统和物流系统连接起来的一系列自动化加工设备和辅助设备，是加工对象、工艺过程、工序内容和生产节拍等可自动调节的高度自动化制造系统。柔性制造系统由于所生产的产品品种、数量可变，能适应多品种、各种批量的自动化生产，所以能快速响应用户和技术发展对于产品品种、性能、数量的需求变化。例如，英国 Molins 公司于20世纪60年代在世界上首先建成了 System 24 柔性制造系统。该系统大量采用数控机床等自动化设备，制造系统的柔性通过数控设备的功能冗余来实现。

然而，柔性制造系统其加工零件的品种数量越多，则设备的结构越复杂，功能储备也越多，其柔性与制造系统的成本成正比，而面对市场需求的不确定性，这种做法必然会增加初次投资风险。德国斯图加特 H. Schulz 教授曾统计美国以及欧洲和亚洲的22个国家共370家批量生产厂，发现近80%的加工中心只利用了其20%的功能。显然，这种以扩大通用型数控机床的功能来提高其柔性的办法不是一种合理的措施。

为了适应现代生产的需求，在综合了专用制造系统和柔性制造系统各自优点的基础上，近年来国内外学者提出了一种新的制造系统。对于该制造系统，当市场产品需求增大时，可以很快将新设备无缝地集成到原有系统中，增加原有生产系统的生产能力；当产品种类需求变化时，可以在设备上增加、更换功能模块，改变机床的加工功能，从而满足对新产品加工的要求；当产品工艺路线变化时，可以快速调整原有系统的布局结构，来满足对新工艺的要求。该制造系统的核心是以企业的自身变化来适应环境的变化。这种以变应变的制造模式使得制造企业既具有很高的生产效率，又具有很好的柔性，是未来制造系统的发展方向。该制造系统有人将其命名为可重构制造系统 (Reconfigurable Manufacturing System, RMS)，也有学者称之为快速重组制造系统 (Rapidly Reconfigurable Manufacturing System, RRMS)。在本书中，则使用可重构制造系统这一说法。

可重构制造系统与专用制造系统、柔性制造系统之间的关系如图1-2所示。从图中可以看出，可重构制造系统的生产能力和生产功能不是固定不变的，而是能够根据需要增减和调整。可重构制造系统这种生产能力和生产功能的可变性取决于其可重构的软件和硬件，因此可重构制造系统既可以成为某种形式的专用制造系统，也可以成为某种形式的柔性制造系统，或者是二者结合的产物。

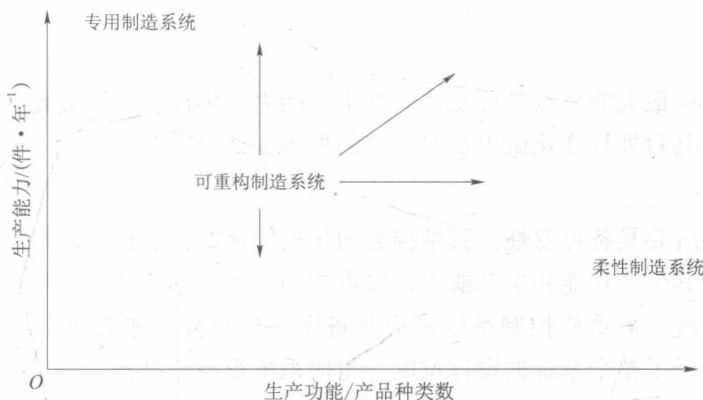


图 1-2 三种制造系统在生产功能-生产能力坐标系中的位置

## 1.2 可重构制造系统的定义与特征

### 1.2.1 可重构制造系统的定义

对于什么是可重构制造系统，学术界和工业界至今没有明确的定义。因为随着可重构制造系统研究的深入，这一概念的内涵和外延在不断地扩展。目前具有代表性的定义有以下两种。

#### 1. 第一种定义

可重构制造系统是指为了在一个零件族内快速调节生产能力和制造功能以适应市场需求或政府调节的突然变化，从一开始就将结构以及硬件和软件组元设计成可快速变化的制造系统。该定义是由 Michigan 大学的 Koren Y 教授等人于 1999 年在国际生产工程研究会年会上提出的，其特点为：① 将加工对象限定在按成组分类的一个零件族内；② 强调重构是由生产能力和制造功能的需求变化驱动的；③ 要求在可重构机床的基础上进行重构。

#### 2. 第二种定义

可重构制造系统是一种能够遵循市场需求变化、系统规划与设计的规定，以重排（重新组态）、重复利用和更新系统组态或子系统的方式，实现低的重构成本、短的系统研制周期和斜升时间、高的质量和投资效益，快速调整制造过程、生产功能和生产能力的可变制造系统。该定义是由清华大学的罗振璧教授等人于 2000 年提出的，其特点为：① 将加工对象定义在系统规划与设计的范围内；② 强调重构是由生产过程、生产功能和生产能力的的需求变化驱动的；③ 强调了制造系统的系统级重构，将重构层次由设备级扩展到系统级，即不一定等到研究开发出可重构机床后才能实现可重构制造系统。

### 1.2.2 可重构制造系统的特征

尽管在学术界和工业界对可重构制造系统没有明确的定义，但可重构制造系统具有以下

一些特征。

### 1. 可变性

可重构制造系统最大的特点是可变性，其生产能力和生产功能能够随着外界环境的变化而变化，可变性是其对外界变化做出及时响应的根本保证。

### 2. 模块化

可重构制造系统要具备可变性，其结构必须是模块化的，这样可以根据需要在原有系统中增减模块，改变其生产功能和生产能力。可重构制造系统的三个子系统——可重构加工系统、可重构物流系统、可重构控制系统都应具备模块化特性，才能使系统真正地具备可变性，同时模块化降低了整个系统的设计难度，也使系统更便于维护。

### 3. 标准化

只有各种模块具有标准的接口，才能保证各个模块的互换，否则模块化将失去任何意义。

### 4. 定制性

柔性制造系统走向死亡的原因是其尽可能地包含一切可能的功能，导致其前期购置费用和后期维护费用高昂，可重构制造系统的设计应该针对某一系列产品，而不是包含各种各样的产品。

### 5. 集成性

作为新一代制造系统，可重构制造系统应具备集成性，这样才能保证物质流、信息流、能量流在系统内部顺利流动。

### 6. 经济性

为避免柔性制造系统的覆辙，可重构制造系统重构时应充分考虑原有系统的利用，而不是推翻原有的制造系统，这样可以以较经济的手段达到新建全新系统的效果。

### 7. 可诊断性

可重构制造系统需要经常重构，缩短其斜升时间显得尤为重要，可重构制造系统需要对产品加工质量和可靠性进行识别和分析。

## 1.3 可重构制造系统的支撑技术

可重构制造系统是由客户需求和制造环境驱动，具有动态重构能力，能够通过调整系统配置来快速响应外界变化的制造系统，可重构制造系统最大的特点是能够根据外界的变化进行自身重构，可重构制造系统的重构按照重构粒度可以分为设备层的重构和系统层的重构，如图 1-3 所示。设备层的重构，即实现加工设备的动态变化能力，加工设备通过改变自身结构，灵活地完成多种任务；系统层的重构，即保证系统不产生较大扰动的前提下允许添加设备、移走设备或改变设备位置，以满足不同产品生产的需求。

由于制造系统的重构涉及设备层和系统层两个层次，因此相关的研究也在两个层次中进行。在不同的层次中，所涉及的问题是不同的，如图 1-4 所示。

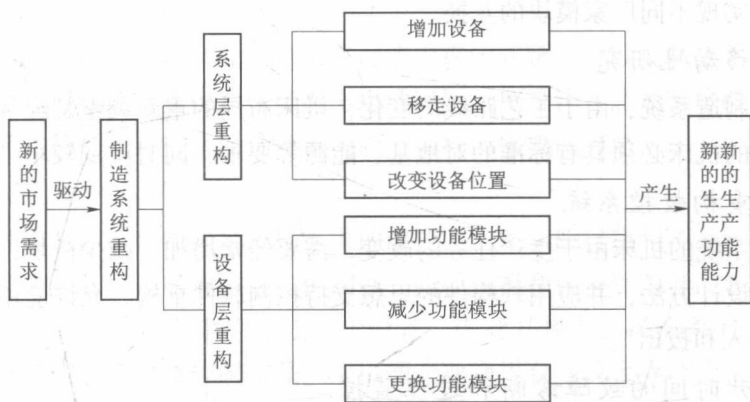


图 1-3 制造系统重构的类型

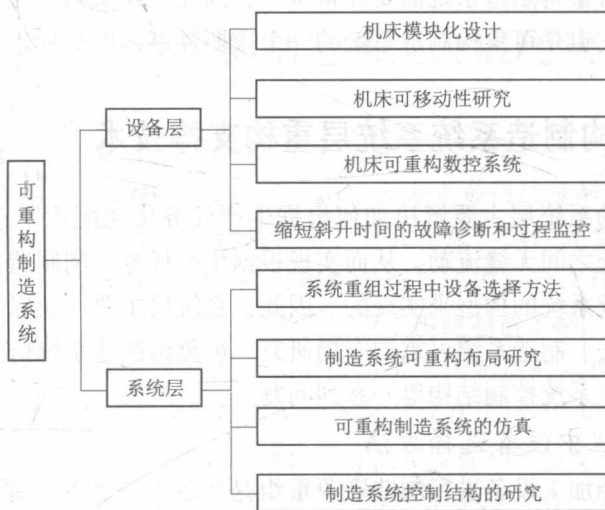


图 1-4 可重构制造系统的支撑技术

### 1.3.1 可重构制造系统设备层重构支撑技术

设备层主要涉及以下一些问题：机床模块化设计、机床可移动性研究、机床可重构数控系统以及缩短斜升时间的故障诊断和过程监控等。

#### 1. 机床模块化设计

设备的可重构性是整个制造系统可重构性的支柱，未来机床、工装夹具和机器人应该能够通过改变自身的结构而灵活地完成多种任务，因此，机床模块化设计是可重构制造系统中一个重要的问题。机床模块化设计涉及以下两个问题：功能模块的划分和功能模块的标准化。如何正确划分功能模块是可重构制造系统的关键技术之一。合理的模块划分可以简化设备的结构，降低设备的重构频率，提高模块之间的精度匹配。过小、过大的模块划分都是不合适的，过小的模块划分将导致重构频繁发生，过大的模块划分将使设备的柔性受到极大的限制。

功能模块的标准化是机床模块化设计的基础和前提。只有实现标准化，才能组织专业化

的大规模生产，实现不同厂家模块的互换。

## 2. 机床可移动性研究

对于可重构制造系统，由于工艺路线的变化，机床布局的重新调整是经常发生的，因此可重构制造系统的机床必须具有标准的对地基、能源等要求，同时质量较小，调试容易。

## 3. 机床可重构数控系统

可重构制造系统的机床由于生产任务的改变，需要经常增加、减少模块，其控制系统也应该用模块化的设计方法，并应用软件的思想支持控制软件重构，允许应用模块方便地在控制系统中“插入和拔出”。

## 4. 缩短斜升时间的故障诊断和过程监控

所谓斜升时间，是指新建或重组制造系统运行开始后，达到规划或设计规定的质量和成本的过渡时间。由于可重构制造系统需要经常重组，因此对缩短斜升时间的研究相对于其他制造系统更有必要，它也是可重构制造系统的一个重要性能测度指标。

### 1.3.2 可重构制造系统系统层重构支撑技术

可重构制造系统的系统层主要解决如何根据生产任务优化配置制造资源，并保证物流、信息流在各子系统之间无缝流动，从而实现根据生产任务定制制造系统的生产功能和生产能力，这是通过更改系统的构型来实现的。因此，系统层主要涉及以下一些问题：系统重组过程中设备选择方法、制造系统可重构布局研究、可重构制造系统仿真以及适合可重构制造系统经常重构的制造系统控制结构等一系列问题。

#### 1. 系统重组过程中设备选择方法

根据生产任务选择加工设备进行制造资源重组是实现可重构制造系统的关键问题之一，由于设备的选择涉及多种因素，既有定量指标，又有定性指标，传统的依靠人工经验的方法显得力不从心。因此需要根据实际情况，建立设备选择评价指标体系，合理确定各评价指标的权重系数，运用适当的方法对评价指标进行综合评判，为可重构制造系统设备选择提供一套行之有效的方法。

#### 2. 制造系统可重构布局研究

制造系统布局指加工设备、物料运输系统、零件库等设施在车间的空间排列。据统计，因布局不合理所产生的运行费用占制造系统整体运行费用的20%~50%，因此制造系统的最优布局设计是一个十分重要而又很容易被忽视的问题，对于可重构制造系统，由于要经常进行设备布局的调整，对其设备优化布局的研究显得尤为重要。虽然目前人们提出了多种算法来优化设备布局，但是这些算法多集中于将给定的机床分配到相应的工位以保证运送加工材料的时间最短。由于可重构制造系统的设备布局不是推倒现有系统，而是尽可能利用现有的制造资源，对可重构制造系统设备布局的评价指标，除了运送加工材料的时间最短外，还需要考虑原有资源的充分利用、最短的斜升时间、产品质量等一系列要素。另外，在设备布局设计过程中，还要考虑一些定性因素，如布局的美观性、设备操作人员的工作舒适性及安全性等。

### 3. 可重构制造系统仿真

为减少根据生产任务重组后的制造系统可能出现的问题,可以在制造系统建立期间,通过仿真查看系统运行状况,及时发现可能出现的问题,使设计者能及时修改。如何建立制造系统仿真模型并进行仿真运行是设计可重构制造系统的重要内容之一。

### 4. 制造系统控制结构

制造系统的控制系统是在满足市场需求的前提下,对从原材料到产品转换过程中的所有制造活动进行协调,其决策职责包括工件调度、路径选择和设备资源分配等。由于可重构制造系统随着生产的变化需要经常添加或减少设备,因此其控制系统必须具有动态变化的能力。将合弄控制模式引入可重构制造系统可以使企业获得合弄及合弄结构,为生物组织和社会组织提供面临扰动的稳定性、面对变化的自适应性、灵活性以及有效地利用资源。

## 1.4 可重构制造系统发展现状

可重构制造系统概念的提出引起了学术界和工业界广泛的关注。美国国家研究院经过对世界上40位专家咨询后,在1998年提出了“2020年制造业挑战预测”,其中把可重构制造系统列为2020年前制造业面临的六大挑战之首,近几年来,国内外学者付出了大量的精力和时间对其进行研究。2001年5月第一届可重构制造系统国际会议在美国Michigan大学召开,美国、德国、意大利等14个国家的学者在会议上围绕制造策略、制造系统建模与分析、面向敏捷制造和可重构制造的新机器设计和敏捷与可重构制造的监控与控制等专题发表了35篇论文。2003年8月第二届可重构制造系统国际会议在美国Michigan大学召开,会议上围绕制造系统设计、系统控制、可重构机床设计、过程监控和故障诊断、费用和风险管理以及可重构装配和拆卸等主题发表了50多篇论文。2005年5月,第三届可重构制造系统国际会议再次在美国Michigan大学召开,来自美国、加拿大、法国、日本等20多个国家的学者在会议上围绕制造系统、故障诊断和检测、控制、应用和可重构机床等主题发表了80多篇论文。虽然到目前为止,整个研究工作还没有形成完整的体系,可重构制造系统的原型尚未制造出来,但是可重构制造系统的理论研究在某些方面还是取得了一定的进展,其中有代表性的工作包括:

1977年,日本启动了FMC(Flexible Manufacturing system Complex provided with laser)项目。该项目进行了任务驱动模块化装配研究。加工模块储藏在仓库里,一旦生产任务到来,就将这些模块组装成加工系统;等生产任务完成,又将这些加工模块拆分储藏在仓库里供下次使用。

20世纪90年代,欧洲委员会在《欧洲机床工业的现状和未来》中明确提出按自治功能单元划分模块进行模块化机床设计和制造,并开展模块生产的专业化协作。Hannover大学开展了“先进机床模块化综合”项目研究,明确按顾客规定的模块进行机床的重组。

美国Carnegie Mellon大学研制开发的可重构机器人包含大量的“可插拔式”模块,可以根据任务所需要的运动学和动力学性能组成各种接口。

1996年,美国在Michigan大学成立了可重构制造系统工程研究中心(Engineering

Research Center of Reconfigurable Manufacturing Systems, ERC/RMS), 该中心的课题研究获得了国家科学资金与工业界的支持, 进行了缩短可重构制作系统设计建造时间、可重构机床和可重构控制器的设计以及缩短系统重组后的斜升时间等方面的研究, 该中心的目标是发展成为制造系统重构的科学基地。

从1996年起, 中国科学院沈阳自动化研究所针对企业组织与过程的优化重构、可重构企业管理信息系统、可重构机器人开发等开展了研究, 2000年由王成恩教授等人编著的《可重构制造系统》是我国第一部全面系统地介绍可重构制造系统的专著, 它的出版标志着可重构制造系统的研究在我国进入了一个新的研究阶段。

1998年, 我国国家自然科学基金资助开展了快速重组制造系统(Rapidly Reconfigurable Manufacturing System, RRMS)的研究, 该研究项目由北京机床研究所和清华大学合作进行, 主要进行了制造系统重组的系统设计理论、可诊断性设计、基于随机过程理论的系统运行与布置理论、零件工艺驱动的系统规划布置理论, 组态式柔性制造单元的结构体系并利用CAD技术进行支撑工具的研究开发和产品创新设计的研究等。

2002年中国科学院自动化研究所在国家重大基础科学研究“973计划”的资助下开展了“生产制造系统重构过程的实时协调控制理论与方法研究”, 该课题主要研究基于智能制造单元的可重构系统的智能建模理论与优化方法和基于智能制造单元的可重构系统中多主体协调与控制的理论与方法等内容。

采用模型化对制造系统进行研究已经有很长的历史, 最开始学者们采用原始模型进行相关的研究, 后来发展到利用抽象的模型对其进行深入的研究。随着建模技术的不断发展, 现在的学者已经开始将制造系统通过适当的建模方法抽象表达出来, 对制造系统进行结构和性能的研究, 通过模型化的方法对制造系统进行相关可靠性综合分析, 对系统的重构、可靠性等方面进行综合的研究。

制造系统具有异步、同步、并行、事情驱动、设备的冲突以及死锁和资源冲突等明显的特征, 属于离散事件动态系统(Discrete Event Dynamic System, DEDS)。在制造系统的建模过程中, 既要清楚地表达模型的动态过程, 又要使模型简洁化, 传统的建模方法很难满足这一要求, 针对这一缺点, 结合国内外建模的方法, 主要有形式语言与自动机、算术与布尔函数、极大—加法代数、马尔科夫链、摄动分析以及Petri网这几种方法。研究不同的制造系统采用不同的建模方法, 本书主要针对几种主要的建模方法进行相关的阐述。

### 1. 形式语言与自动机建模方法

形式语言是用数学方法将符号语言抽象成一个数学系统, 对其进行严格的形式化定义, 并构建适当的描述模型, 发展相关的知识和理论, 使之在科学实践中具有良好的指导作用。自动机是通过组合字母根据一定的规则产生语言、建立模型, 对信号序列进行逻辑处理的装置。在自动控制领域内, 自动机是指离散数字系统的动态数学模型, 可定义为一种逻辑结构、一种算法或一种符号串交换。自动机能够与外界产生联系, 进行信息的交换, 通过交换来的信息改变自身的功能行为, 甚至可以改变其结构, 来适应外界的环境。自动机能够与外界产生联系, 进行信息的交换, 通过交换来的信息改变自身的功能行为, 甚至可以改变其结构, 以适应外界的环境。形式语言与自动机可定义为

$$A = (E, X, \Gamma, f, x_0)$$