

柔性制造系统和柔性供应链 ——建模、决策与优化

华中生 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

在衡量企业与供应链竞争力的指标中柔性是与成本、质量和交货期同等重要的。柔性这一竞争力指标不仅涉及其实现过程的技术问题，还涉及企业与供应链运作管理中的决策与协调问题，进而成为企业与供应链战略管理的一个重要内容。目前，制造型企业中有关柔性制造系统管理与决策的原则与方法，有向服务型企业管理和运作管理之外的其他管理领域拓展的趋势。

本书从柔性改善的建模方法、决策问题与优化的角度介绍柔性制造系统和柔性供应链管理的相关理论与方法，侧重说明管理与决策在改善柔性方面的作用、柔性的有关新思想和新方法，并试图建立从企业到供应链柔性改善方法的桥梁。本书对各种层次的柔性及其相关决策与优化问题进行了系统地介绍，而对于柔性制造系统硬件结构和底层控制方面等属于技术范畴的内容只进行简略介绍。

本书可作为运作管理、管理工程和工业工程等专业研究生教材，也可供企业和供应链管理的实践者和高层管理者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

柔性制造系统和柔性供应链：建模、决策与优化/华中生编著. —北京：科学出版社，2007

ISBN 978-7-03-018424-5

I. 柔… II. 华… III. ①柔性制造系统 ②工业企业管理；供销管理
IV. TH165 F405

中国版本图书馆CIP数据核字 (2007) 第 002510 号

责任编辑：吴凡洁 于宏丽/责任校对：张 琪
责任印制：安春生/封面设计：耕者工作室

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年1月第一版 开本：B5 (720×1000)

2007年1月第一次印刷 印张：20 1/4

印数：1—3 000 字数：383 000

定价：48.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈路通〉)

前 言

柔性制造系统 (flexible manufacturing system, FMS) 是一个与自动化技术和信息技术密切关联的先进制造技术。目前已有的有关柔性制造系统方面的专著, 大多是从技术的视觉去研究柔性制造系统的构成与性能改善等问题。从这种先进制造技术应用的角度看, 有关的管理和决策问题尤为重要。本书就是从建模、决策与优化的角度研究柔性制造系统应用的尝试。鉴于柔性已成为企业与供应链的一个重要竞争力指标, 本书介绍了柔性供应链管理的概念及其管理决策的有关内容, 并试图架起柔性制造系统和柔性供应链决策的桥梁, 为柔性供应链管理这一前沿研究领域的发展提供参考和支持。

本书的内容共 15 章, 可以分为 3 个部分, 即柔性制造系统的基础与建模方法 (第 2~6 章), 柔性制造系统的决策问题及其求解方法 (第 7~11 章), 柔性制造系统的研究成果向人力资源管理与供应链管理拓展 (第 12~15 章)。

第 1 章属于导论性质, 其目的在于说明柔性成为企业与供应链重要竞争力指标的背景和柔性的主要作用, 并从管理与决策的角度分析说明从柔性制造系统到柔性供应链发展的必要性和需要克服的主要障碍。

在柔性制造系统的基础与建模方法部分, 第 2 章总结了柔性制造系统的发展过程, 不同类型的柔性定义和相互关系, 并对柔性制造系统的发展趋势进行了展望。第 3 章介绍柔性制造系统的总体结构和分层结构, 以及柔性制造系统中软硬件之间的关系, 为全面地理解柔性制造系统的管理与决策问题提供技术与硬件方面的支持。第 4 章描述柔性制造系统的常用建模方法, 包括离散事件动态系统 (含马尔可夫链模型、排队论和 Petri 网模型)、多代理系统和数学规划建模方法等。第 5 章概括了柔性制造系统中的各种决策问题的主要内涵及其层次关系, 其目的在于明确建模、优化与决策问题在柔性制造系统中的定位和作用。第 6 章介绍柔性制造系统的优化与控制问题, 如装载、调度以及死锁控制。这类问题的特点是: 只涉及设备层的优化, 一般时间跨度较短, 且大部分问题具有动态性与实时性。

在柔性制造系统的决策问题及其求解方法部分, 第 7 章给出考虑产品结构约束的柔性制造系统能力决策模型, 并介绍在能力决策模型中风险的描述方法。第 8 章描述确定需求下柔性制造系统的能力决策问题的求解方法, 包括基于分解协调的能力决策问题求解方法和基于分组遗传算法的求解方法。第 9 章总结了随机需求下柔性制造系统能力决策问题的解决方法。第 10 章首先介绍过程柔性的概

念和目前两种主要的柔性测度方法，然后以“链规则”为核心介绍生产系统柔性的结构特性及其在生产系统柔性改善和能力决策中的应用。第 11 章研究了在不同生产情形下考虑产品结构约束时柔性制造系统的过程柔性及其测度；总结了不同生产情形下达到高柔性的生产系统结构特征；提出了给定不同的产品结构与生产线布局时改善过程柔性的规则与方法，应用这些规则可以不必求解复杂的优化问题而给出高质量的生产系统布局调整的建议。第 10 章和第 11 章的内容为柔性制造系统的研究成果向人员柔性和供应链柔性拓展提供了基础。

在柔性制造系统研究成果的拓展部分，第 12 章首先将设备柔性的有关研究成果拓展到员工柔性的研究上，给出了员工功能柔性的定义，并介绍了应用员工功能柔性的方式及员工技能的协调策略。第 13 章将企业柔性的有关研究成果拓展到供应链运作管理中，给出了供应链柔性的定义，描述了供应链效率的测度方法，分析了供应链柔性 with 供应链效率的关系，并用仿真方法说明了供应链柔性的作用。第 14 章介绍考虑柔性的供应链能力决策模型，并给出了随机需求下模型的求解方法。第 15 章总结了基于 DEA (data envelopment analysis, 数据包络分析) 的供应链绩效评价与改善方法，并提出了基于 DEA 的柔性供应链建模方法构想。

本书的内容主要来自于作者在柔性制造系统和柔性供应链方面的长期研究，部分内容是作者对研究过程中所涉及文献内容的综述和归纳。作者的博士生黄飞华、王昱、何平、杨杰、张斌、吴三平和查迎春参与了本书初稿的部分编写工作。

本书涉及的有关研究工作，得到了国家自然科学基金 (70571073) 和教育部博士学科点专项科研基金 (20050358002) 的资助，在此表示衷心的感谢。

由于柔性制造系统和柔性供应链是处在迅速发展中的学科，编写本书是一项新的尝试。因此，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者
2006 年 11 月

目 录

前言	
第 1 章 引言	1
1.1 柔性的作用	1
1.2 柔性 with 范围经济	3
1.3 柔性 with 不确定性	6
1.4 从柔性制造系统到柔性供应链	9
1.5 本书的特点	12
参考文献	14
第 2 章 柔性制造系统的发展	18
2.1 柔性制造系统的发展过程	18
2.2 柔性的种类及其相互关系	22
2.3 柔性制造系统发展的趋势	27
2.4 本章总结	30
参考文献	30
第 3 章 柔性制造系统的结构	33
3.1 柔性制造系统的总体结构	33
3.2 柔性制造系统的分层结构	35
3.3 软硬件关系	42
3.4 本章总结	48
参考文献	48
第 4 章 柔性制造系统的建模方法	50
4.1 离散事件动态系统建模方法	50
4.2 基于多代理系统的建模方法	68
4.3 基于数学规划的建模方法	73
4.4 本章总结	76
参考文献	77
第 5 章 柔性制造系统的决策问题	80
5.1 FMS 中决策问题的层次框架	80
5.2 FMS 的综合能力规划问题	81
5.3 FMS 系统设计决策问题	87

5.4	FM S 生产计划决策问题	90
5.5	FM S 调度决策问题	92
5.6	本章总结	95
	参考文献	95
第6章	柔性制造系统的优化与控制	97
6.1	优化与控制概述	97
6.2	FM S 中的装载问题	98
6.3	FM S 中的调度问题	101
6.4	FM S 的死锁控制	107
6.5	本章总结	110
	参考文献	111
第7章	考虑产品结构约束的柔性制造系统能力决策模型	115
7.1	应用 SM T 的 PW B 生产过程	115
7.2	应用 SM T 技术的 PW B 生产线简介	116
7.3	应用 SM T 技术的 PW B 生产线能力规划问题	117
7.4	能力决策中的风险问题	121
7.5	本章总结	132
	参考文献	132
第8章	确定需求下柔性制造系统的能力决策	134
8.1	确定需求无外包条件下 SM T 生产线能力规划问题及其求解	134
8.2	确定需求有外包条件下的能力决策问题	154
8.3	求解大规模整数规划的分组遗传算法	170
8.4	基于结构特性的分组遗传算法在求解 FM S 能力决策问题中的应用	177
8.5	本章总结	182
	参考文献	182
第9章	随机需求下柔性制造系统的能力决策	184
9.1	随机需求下 SM T 生产线的能力扩张模型	184
9.2	单阶段随机需求下略集的确方法	186
9.3	多阶段随机需求下增装略集的确方法	195
9.4	搜索略集的适应性遗传算法	198
9.5	仿真实验	201
9.6	本章总结	209
	参考文献	210

第 10 章 过程柔性的结构特征	211
10.1 过程柔性的概念与测度方法	211
10.2 过程柔性的结构特性	218
10.3 根据链规则改善生产系统过程柔性的实例	220
10.4 本章总结	223
参考文献	223
第 11 章 考虑产品 BOM 的过程柔性改善方法	225
11.1 产品 BOM 对过程柔性的影响	225
11.2 考虑 BOM 的过程柔性	228
11.3 考虑 BOM 时改善过程柔性的规则	236
11.4 仿真实验	238
11.5 本章总结	241
参考文献	242
第 12 章 员工的功能柔性	243
12.1 员工功能柔性的概念	243
12.2 制造型企业的员工功能柔性	245
12.3 链式策略	253
12.4 服务型企业的员工功能柔性	257
12.5 本章总结	259
参考文献	260
第 13 章 供应链的过程柔性特征	263
13.1 供应链柔性的定义	263
13.2 柔性 with 供应链效率	264
13.3 供应链柔性的测度	269
13.4 供应链柔性作用的仿真分析	272
13.5 本章总结	275
参考文献	276
第 14 章 供应链的能力决策	277
14.1 供应链能力决策问题的基本假定	278
14.2 基于服务水平的供应链能力决策方法	278
14.3 基于期望短缺量的供应链能力决策方法	288
14.4 本章总结	296
参考文献	296
第 15 章 基于 DEA 的供应链绩效评价与改善方法	298
15.1 供应链绩效评价	298

15.2	供应链绩效指标的权衡与改善方法·····	304
15.3	基于DEA的柔性供应链设计框架·····	309
15.4	本章总结·····	311
	参考文献·····	312

第 1 章 引 言

柔性是与成本、质量和交货期同等重要的衡量企业与供应链竞争力的指标。柔性这一竞争力指标不仅涉及其实现过程中的技术问题，还涉及企业与供应链运作管理中的决策与协调问题，进而成为企业与供应链战略管理的一个重要内容。目前，制造型企业中有关柔性制造系统管理与决策的原则与方法有向服务型企业管理和运作管理之外的其他管理领域拓展的趋势。本章的目的在于说明柔性成为企业与供应链重要竞争力指标的背景、柔性的主要作用，并从管理与决策的角度分析说明从柔性制造系统到柔性供应链发展的必要性和需要克服的主要障碍。本章还对本书与目前主要柔性制造系统专著的区别进行了概括和总结。

1.1 柔性的作用

1.1.1 柔性是企业的重要竞争力指标

多样化的需求和动态不确定的环境是当前企业与供应链管理中面临的重要挑战。柔性反映了企业和供应链应对需求多样性和环境不确定性的能力，目前已受到理论界和产业界的广泛重视，并且已经成为与成本、质量和交货期同等重要的衡量企业与供应链绩效与竞争力的指标^[1]。

需求的多样化趋势已经广泛地为理论界和产业界所认知，其主要动力可以概括为三个方面：第一，随着经济的持续发展和人民生活水平的不断提高，人们不再满足于大规模生产方式下的单一品种，出现了需求多样化的趋势^[2]；其次，激烈的市场竞争要求企业根据不同消费群体的特点，更加细致地进行市场区隔并进行准确的细分市场定位。更细致的市场细分要求更多有差异的产品；其三，在同一个细分市场上，企业间的激烈竞争要求其不断推出新型号的产品以区别于其竞争对手的同类产品，产品的寿命周期越来越短。企业既要更快地推出新产品，又要满足老产品售后服务的要求，这就要求企业在同一时间横截面上生产的产品型号越来越多。

企业环境的不确定性包括企业外部环境的不确定性和内部环境（条件、状态）的不确定性。外部环境的不确定性主要指市场^[2]，包括原材料的供应、产品的需求量和价格等的不确定性。企业内部状态的不确定性主要指反映企业生产系统运行状态指标存在的不确定性，例如，生产周期、在制品库存水平和能力等的随机不确定性。这些状态指标作为反映生产系统状态的物理量，是一些随机变

量,本身具有自然的不确定性(或称之为变异性)。Hopp 和 Spearman^[3]定义变异性为同一类实体中不同个体之间存在的非一致性、不均匀性,并用相应随机变量的均值与均方差之比来衡量其大小。例如,某一台机器加工一个轴承的时间(生产周期),因为加工过程中一些无法说明的原因(如毛坯的细微差别)而存在的随机不确定性,称之为自然变异性。这种自然变异性将因设备的故障和设备的切换与调整而增大。

企业内部状态的不确定性程度和变异性的增大,导致其应对外部环境不确定性的能力和竞争力的降低。具体表现为以下几个方面:

(1) 面对企业销售市场需求量的不确定性,企业内部状态的不确定性将导致:一方面企业的生产能力无法充分利用,另一方面市场需求不能得到及时的满足。Hopp 和 Spearman 指出^[3],高的变异性将导致低的设备利用率。对于多种产品的需求,当每种产品的需求都存在不确定性时,生产能力的高度变异性导致其能满足的市场需求量可能远小于设备的额定生产能力。

(2) 导致更长的订购提前期和更低的服务水平。企业向其顾客承诺的订购提前期是其生产周期均值、标准差和服务水平的单调增函数^[4],且生产周期标准差对提前期的影响大于均值的影响。生产周期的变异性增大意味着其均方差的增加大于均值的增加,因此在相同的服务水平下订购提前期会更长。另一方面,生产周期变异性的增大意味着在相同订购提前期下服务水平的下降。

(3) 导致在制品库存和成本的增加。考虑到产品的生产通常包含多道工序和多个环节,不同的工序和生产环节需要协调一致才能高效率地生产出产品。企业内部状态高的不确定性将导致企业内部各环节、工序协调的困难,其结果是无效的在制品库存的增加,生产周期及其变异性的增加,有效产出的降低和成本的增加。

(4) 导致企业应对顾客需求模式变化的能力降低并制约企业的新产品开发。企业内部状态的不确定性导致其满足市场需求多样化能力的降低,而且这种需求多样化的程度越高(产品的品种越多),多产品产量组合的变动范围就越大,生产的协调就越困难,企业满足多样化需求的能力就越低,并最终会制约企业的新产品开发。

柔性就是可变通性、易适应性。企业制造系统的柔性,简单地说,包括两个方面的内涵^[2]:其一,是系统的加工范围。如果一个生产系统能呈现范围更宽的加工状态和行为(如生产的产品品种数,加工的零部件数),则其具有较大的柔性。其二,系统从一种加工状态转换到另一种加工状态的难易程度,又称之为设备调整的难易程度。这种系统(或设备)转换与调整的难易程度,可以用转换与调整所需要的时间和成本来度量。因此,高的柔性意味着企业制造系统有着对多样化不确定需求高的适应性,由此将表现出高的设备利用率、高的服务水平、更

短的订购提前期和更低的成本，因而使企业具有更强的竞争力。

1.1.2 柔性是供应链的重要竞争力指标

在竞争日益激烈的今天，无论是制造型企业、销售型企业还是物流服务企业，都面临着巨大的压力^[5]。服务于相同最终消费者的上下游企业作为同一供应链的成员，必须重整资源并建立起密切的相互协作关系，以最低的成本将产品与服务迅速地传递到顾客手中。供应链管理中的不确定性主要包括供应链成员企业内部的不确定性、企业之间关系的不确定性和市场的不确定性。如何尽可能地满足市场的多样化不确定需求以获取最大利润是供应链生产组织决策的关键问题^[6]。为此，国内外学者通过许多途径进行了研究，其中供应链柔性的研究是重要途径之一。供应链柔性是其适应市场需求变化的能力，通常表现为供应链上下游企业之间的关系在不确定性环境下所表现出的鲁棒性^[7]。面对市场需求的不确定性，增加柔性可以增加供应链产品的销量，提高供应链系统资源的利用率^[8]，从而提升整个供应链的竞争力。

以上分析试图从功能方面简要说明，改善柔性是提高企业和供应链应对需求多样性和环境不确定性能力的一种重要手段；柔性是与成本、质量和交货期同等重要的衡量企业与供应链竞争力的指标。

1.1.3 柔性的战略意义

事实上，已有一些学者从战略的高度来认识柔性的重要性。华中生等从大M制造（big M manufacturing）所涉及的各个领域，即从产品设计、工艺选择、能力规划、生产线配置、生产准备工作到操作排程与生产控制等，分析了柔性的作用和柔性制造/装配系统的特点^[9]。

刘益等^[10]指出，当前企业面临的市场环境正在发生激烈的变化，为了有效地适应这种环境的变化，我国企业不仅要提高现有战略的柔性程度，还要进一步培养和建立柔性战略，从而全面提升企业的适应能力和竞争能力。而他们定义的柔性战略，是指“企业为更有效地实现其目标，在动态的环境下，主动适应变化、利用变化和制造变化以提高自身竞争能力而制订的一组可择行动规则及相应方案。”其内涵包括战略柔性（主要指战略的调整）、资源柔性、能力柔性、组织柔性、生产柔性和文化柔性等。

1.2 柔性 with 范围经济

1.2.1 范围经济的概念

范围经济（economies of scope）是与规模经济（economies of scale）相对应的一个概念。为了解释多产品生产企业的经济性，Panzar 和 Willig 等提出范围

经济的概念^[11]。范围经济是将两种或两种以上产品集中在一个企业或生产系统中生产比分散在不同的企业或生产系统中生产所导致的平均成本降低。集中生产的产品可以是工艺相似的产品,也可以是不相关的产品。类似于张仁华等^[12]和谏述勇等^[13]的方法,这里给出如下范围经济的概念性说明。

设 $P = \{1, 2, \dots, p\}$ 是一个具有范围经济的多产品企业的产品集。令 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ (其中 $\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, M_i \neq \emptyset$) 是集合 P 的一个划分 ($2 \leq m \leq P$), 即满足

$$\bigcup_{i=1}^m M_i = P \quad (1.1)$$

$$\forall i \neq j, M_i \cap M_j = \emptyset \quad (1.2)$$

范围经济指让 m 个企业分别生产产品集 $M_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的单位平均成本比由一个企业集中生产所有 m 种产品的单位平均成本高。记 $y_P = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ 为给定的 p 个产品的产量组合, $C(y_P)$ 为产品集 P 中所有产品集中到一个企业或生产系统中生产的总成本函数, $\bar{C}(y_{M_i})$ 为产品集 $M_i (i=1, 2, \dots, m)$ 中的产品由第 i 个企业或生产系统单独生产时的成本函数。范围经济存在的前提是

$$C(y_P) < \sum_i \bar{C}(y_{M_i}) \quad (1.3)$$

式 (1.3) 成立的一个重要原因是, 将多个产品集中到一个企业或生产系统中生产相对于分散到不同企业或生产系统中生产可以导致固定成本的节约。这里, 固定成本主要是指生产准备成本 (时间) 或设备调整成本 (时间)^[14]。回顾本章前一节所介绍的柔性生产系统的内涵, 可以看出, 柔性制造系统是实现范围经济的一个重要手段。

柔性制造系统可以快速地、低成本地从一种产品的生产切换到另一种产品的生产。如果一个企业能用同一套设备生产多种不同的产品, 且设备能随着市场需求的变化适用于新产品 (型号) 的生产, 那么该企业就具备了动态地适应多样化需求的能力。企业设备动态适应的产品范围越大, 导致新企业进入其市场的障碍也越大, 多产品协同给企业带来的竞争优势也就越大。

我们说明生产多样化产品的柔性制造系统可能的好处, 并非要说明柔性技术 (flexible technology) 总是比传统的实现规模经济的刚性 (designated technology or dedicated technology) 或专用技术好。Norman^[14]运用博弈分析的方法, 总结了柔性技术适用的条件。他认为, 柔性技术是否适用主要取决于四个方面的因素: 范围经济性, 细分市场的距离, 细分市场的规模以及与技术选择无关的顾客保留价格。这四个因素涉及柔性的技术特性和市场的需求特性, 其中, 细分市场的距离被定义为“顾客评价一种柔性技术所生产的顾客化产品的价值与刚性技术生产的产品价值的差”, 又叫相关柔性技术产品和专用技术产品之间的可替代程

度。如果柔性技术的应用能获得较高的范围经济效益,如果细分市场的规模越大,或者如果顾客为其个性化产品付出代价的愿望越高,那么就越是应该采用柔性技术。

1.2.2 范围经济的测度方法

目前已有的范围经济的测度方法主要来源于其定义式(1.3)。根据式(1.3),范围收益指数或范围收益率(RSC)可以通过下式进行测度

$$RSC = \frac{\sum_i \bar{C}(y_{M_i}) - C(y_P)}{C(y_P)} \quad (1.4)$$

如果 $RSC > 0$ 则称为范围经济;反之,如果 $RSC < 0$,则称为范围不经济。

另外一种衡量方法通过任意两种产品成本间的互补性来判别^[15],即计算 $\frac{\partial^2 C(y_P)}{\partial y_i \partial y_j}$ ($i \neq j, i, j \in \{1, 2, \dots, p\}$)。如果 $\frac{\partial^2 C(y_P)}{\partial y_i \partial y_j} < 0$,则产品 i 和产品 j 之间存在成本互补,因而存在范围经济;否则,不存在范围经济。这种方法主要考察两种产品联合生产是否会导致成本的下降,并产生范围经济。多种产品应用某种柔性技术联合生产是否是范围经济的,可以用类似的方法进行判别和测度。

上述范围经济测度方法需要先确定成本函数。当投入与产出所有的或部分的价格参数未知时,这些方法无法应用。Morita 所提出的基于 DEA (data envelopment analysis, 数据包络分析)的方法可以用于价格参数未知时的范围经济测度^[16]。

应用 DEA 模型进行范围经济评估的思路是比较简单的^[16]。举例说来,对于 A、B 两种产品,有两种可能的方式来进行生产,即采用柔性技术将 A、B 两种产品集中在一起生产,或采用刚性技术将 A、B 两种产品分开在两个生产系统中生产。用 DEA 模型比较这两种方式的有效生产前沿面 (efficient frontiers): 如果集中生产方式的前沿面包含了分散生产的前沿面,则说明采用柔性技术的集中生产比采用刚性技术的分散生产更有效,因而集中生产是范围经济的;否则,如果有一种产品的分散生产的效率优于集中生产,则集中生产都可能是规模不经济的。当然,这种测度与判别方法也有缺陷。比如当产品的个数较多时,判别比较困难等。

1.2.3 柔性范围经济的实现

范围经济也可以通过企业的相关多样化战略(或相关多角化经营战略)来实现。正如 Hill 等^[17]所指出的,公司战略层面的相关多样化可以在相关业务单元间获得范围经济。其成本节约主要来自不同经营业务单元之间的知识共享。知识共享的范围经济是在不同用途的活动或过程中,或在不同的使用者之间可用知识

的共享。知识共享导致由知识总量增加的成本分摊而引起的共享成本下降。在这个意义上, 20 世纪 80~90 年代以来出现的企业合并浪潮也可以部分地理解为一种追求范围经济的行为^[18]。

集成的供应链网络系统也是实现范围经济的一种方式。供应链网络涵盖从原材料供应商、制造商、批发商、分销商、零售商到最终消费者的多个阶段的多种主体。供应链上不同阶段(上下游)企业之间的协作与整合, 能够实现生产率的提高, 浪费和成本的降低^[19], 从而产生范围经济。这种范围经济性能增加公司的价值, 改善公司的绩效, 提高投资者的回报, 并且能够帮助企业抵御市场风险^[20]。

目前已有的供应链设计与协调研究主要是以成本和快速提前期为导向的, 即所谓的效益型供应链和快速反应型供应链^[21]。以柔性为导向或目标之一的供应链设计与协调研究的结果较少见。供应链的柔性是其响应多样化不确定需求的能力。当供应链面临新的市场需求需要提供新的产品和服务时, 其实现方式包括: 第一, 可以建立全新的供应链来满足这些新需求; 第二, 改变供应链的结构, 通过结构的调整和供应链成员企业(可以调整供应商、制造商和分销商, 也可以调整物流服务企业)调整来满足多样化不确定的需求; 第三, 可以在供应链原有的结构下, 通过追加部分成员企业的设备和能力投资以改善供应链的柔性。这些实现方式的选择, 既取决于产品与服务“新”的程度, 也取决于不同方式利弊的权衡。

事实上, 多样化不确定需求的第一种实现方式是一种刚性的方式, 往往成本很高, 周期较长; 而第二、第三种实现方式可以看成是一种柔性的方式。由于建立新的供应链或对已有的供应链结构进行大的调整通常意味着高的成本(和长的时间), 柔性方式强调供应链结构面对多样化不确定需求的鲁棒性, 而其基本的动力来源于供应链范围经济性。换言之, 改善供应链柔性的目标是追求供应链的范围经济。供应链的范围经济可以采用类似于企业范围经济度量的方法进行测度, 只不过需要将一条柔性供应链的成本函数与若干刚性供应链的成本函数进行比较。

柔性供应链或面向柔性的供应链设计在理论上将要远比单个企业的柔性制造系统的设计复杂和困难, 因为它面临更多的选择, 涉及分布式多主体间的协调, 且在供应链结构与成员企业协作方式之间存在耦合等。

1.3 柔性性与不确定性

1.3.1 单个企业的柔性性与市场需求的不确定性

柔性不仅能带来范围经济收益, 还能够有效提高企业与供应链应对不确定市

场需求的能力。Lancaster^[22]较早探讨了企业产品多样化与需求不确定之间的关系,谿述勇和陈荣秋^[13]进而研究了企业柔性需求与需求不确定之间的关系。

根据 Lancaster 的观点^[22],产品是一系列诸如速度、可靠性、外观和舒适度等特征的集合体。记产品的特征向量为

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (1.5)$$

其中, $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为产品的第 i 个特征。对于一个特定的消费者,其所追求的产品或服务的特性,也可以用一个消费特征向量来表示,即

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (1.6)$$

其中, $w_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是消费者追求的第 i 个特征。

假定 w 和 a 在同一个 n 维空间。显然,如果 $a=w$,则消费者将购买此产品;如果 $a \neq w$,则消费者购买此产品的概率将小于 1,且具体概率值的大小取决于以下三个因素^[13]:

(1) $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$, a_i 与 w_i 相比的不足部分。

(2) 产品特征 i 与 j 相对于消费者而言的可替代性。

(3) 主要竞争对手的产品特征向量 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 与本企业产品特征向量间的差距。

特定消费者购买特定产品的概率是上述三个因素的随机函数,记为 $F(S)$

$$F(S) = F(\beta, \epsilon, \xi, e) \quad (1.7)$$

其中, $\beta = [m \ln((a_i - w_i), 0)]_{n \times 1}$; $\epsilon = [M U_i / M U_j]_{n \times n}$, $M U_i$ 为产品特征 i 的边际效用; $\xi = [m \ln((b_i - w_i), 0)]_{n \times 1}$; e 为随机误差项。对于理性的消费者有

$$\frac{\partial F(S)}{\partial \beta} < 0, \quad \frac{\partial F(S)}{\partial \epsilon} > 0, \quad \frac{\partial F(S)}{\partial \xi} > 0 \quad (1.8)$$

由于 ϵ 和 ξ 是企业所不能控制的,所以当企业改善 β 所带来的边际收入大于其边际成本时,企业将通过改善产品使 β 尽可能地小,从而实现利润的最大化。

由于不同的消费者有不同的消费特征向量,企业往往将特征相似的消费者看成是一个细分市场,然后向该细分市场提供相同的产品,即用一定的产品特征向量 a ,来满足该细分市场消费者的平均特征向量^[13]。

设某细分市场的规模为 M ,这里 M 可以看成是该细分市场的消费者个数,也可以是以每个消费者的相对需求量为权的消费者加权数量。该细分市场的平均特征向量为

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) = \left[\sum_{j=1}^M w_{ij} / M \right]_{1 \times n} \quad (1.9)$$

其中, $w_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, M)$ 为第 j 个消费者的第 i 个特征。企业通常通过减小 $\mu - a$ 来追求利润的最大化。但即使 $\mu = a$,企业仍面临产品销售的不确定性,因为每个消费者的特征向量与 a 之间仍然存在偏差。由式(1.8)可知,这个

偏差越大,该消费者的购买概率越低。为反映整个细分市场的平均购买概率,可以定义如下细分市场总体的特征偏差函数

$$\sigma_i = \left(\sum_{j=1}^M (w_{ij} - \mu_i)^2 / M \right)^{1/2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.10)$$

在消费者需求特征的变异性大致相同的条件下,细分市场的规模 M 越大,则 σ_i ($i=1, 2, \dots, n$) 也越大,特定消费者购买特定产品的概率就越小。另一方面,如果企业提供的产品种数越多, M 就会越小,特定消费者购买特定产品的概率就越大。从这个意义上讲,企业不断地推出多样化的新产品,将有助于提高企业应对消费者需求不确定性的能力,降低经营风险。而这种风险的降低,不是通过组合风险分散来实现的,而是通过使消费者的效用偏好与产品的特征集相符来实现的^[13]。

概括地说,如果企业提供多样化产品的边际收入大于其边际成本时,企业将通过提供更多的产品品种,以降低细分市场的规模,提高产品销售的概率,以有效地应对市场需求的不确定性。由于通常消费者群体在一定时间段上的需求总量是一定的,更多的产品品种和更小的细分市场规模意味着每种产品生产量的降低。这种要求与现代企业多品种小批量的生产战略是一致的。而要实现多品种小批量生产时产品品种数增加的边际收入大于其边际成本,就必须提高企业生产系统的柔性。生产系统柔性的改善和范围经济的获得正是企业实现产品品种数增加的边际收入大于其边际成本的前提,也是企业提高其应对消费者需求不确定性的能力的一个前提。

1.3.2 供应链柔性与环境的不确定性

供应链柔性与环境不确定性的关系要远比单个企业的复杂。尽管面向柔性的供应链设计与协调研究的成果较少,但柔性与不确定性关系的研究成果却比较丰富,而且一直处在不断的丰富与深化过程之中。Swamidass 和 Newell 认为^[23],增加柔性能改善系统的绩效,且是应对不确定性增加的有效方法。Page11 和 Krause^[24]在北美地区 91 份企业问卷和 30 个案例分析的基础上得出结论:不能证实环境的不确定性和操作柔性之间的因果关系,即环境不确定性的增加不一定会导致柔性的增加。他们还基于问卷分析和案例研究认为,改善柔性以适应环境的不确定性的增加不会导致竞争绩效指标的改善。Page11 和 Krause 后来在另一篇文章^[25]中解释了导致这种相互矛盾结论的原因:文献 [23] 和文献 [24] 中所采用的测度环境不确定性的 Duncan 指标体系是不适当的, Duncan 指标体系带有较强的主观性因而可能使由此得到的结论无效;文献 [23] 和文献 [24] 中的柔性定义不同,前者是战略柔性,后者研究操作柔性;另外,样本的选择也存在较大不同,文献 [23] 的样本主要来自机床制造业,而文献 [24] 的样本没有

明显的行业限制。文献 [25] 采用了客观的环境不确定性测度指标体系, 选择来自美国供应管理协会 (Institute of Supply Management) 成员企业填写的 168 份有效问卷, 通过假设检验分析, 得出结论: 增加柔性一般而言能增加系统的绩效; 但不能证实企业为应对环境不确定性而改善柔性的行为是否能够改善绩效。这里, 绩效指标包括: 相对于主要竞争对手的制造单价, 总成本, 产品质量, 交货速度, 交货可靠性和新产品导入市场的速度等。

Sawhney^[26]以对 10 家印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 制造企业的访谈为基础, 对供应链柔性和不确定性关系进行了研究。他将供应链上柔性的应用分为反应式 (reactive use) 和主动式 (proactive use) 两种。柔性的反应式应用属于一种传统的应用方法, 主要将柔性看成是一种应对组织内外环境不确定性的一种机制。内外环境方面的不确定性包括: 设备故障, 完成任务时间的变异性, 因排队等待导致的任务延迟, 员工的旷工和换班, 材料搬运错误, 需求波动, 产品混批的变化和主要竞争对手的一些竞争行为的影响等。柔性的主动式应用是 20 世纪 90 年代末人们才开始研究的一种应用方法^[27, 28]。这种应用方法的基本理念是, 主动地应用柔性可以创造竞争优势。即将柔性看成是供应链中可以主动开发的一种资源, 通过主动地利用这种资源来创造机会与更多的选择 (包括产品与服务), 从而获得持久的竞争优势。Dell 公司和 BMW 公司就是柔性主动式应用的成功案例。Sawhney 的研究发现, 柔性可以在供应链上下游企业间传递, 可以用来创造机会与更多的选择或者应对环境的不确定性。柔性的主动式应用可以创造机会与更多的选择从而赢得竞争优势, 而柔性的反应式应用主要应对环境的不确定性。柔性的反应式应用和主动式应用可以同时出现在一条供应链上。Sawhney^[26]认为, 这些结论不局限于 PCB 制造行业。

1.4 从柔性制造系统到柔性供应链

1.4.1 柔性制造系统的管理与决策研究

当前, 柔性制造系统 (flexible manufacturing systems, FMS) 已广泛应用于集成印刷电路板的制造、机械制造及汽车生产等工业行业。由于 FMS 通常具有生产过程柔性、产品寿命周期短及生产设备昂贵等特点, 生产能力规划和生产线设计问题在 FMS 的应用中具有特殊的重要性。过去 30 年来人们一直在思考半导体工业连续的价格性能比改进能持续多久的问题。大多数业者和理论研究者曾认为这将取决于技术方面的问题, 如芯片的几何尺寸的限制或散热极限等。然而近年来, 人们越来越多地关心半导体生产设备 (能力) 成本上升所造成的财务方面的困难, 并认为这是更为迫切的威胁^[29]。因此, 近 20 年来 FMS 能力决策与管理问题成为了一个热点的研究课题。国内对 FMS 相关主题的研究也取得了很

多有价值的研究成果^[30, 31]。

FM S 能力决策与管理研究的主要特点是：第一，通常以收益（成本）或时间为决策的目标^[30~35]，从成本、制造周期、产出率的关联分析和多个目标综合平衡的角度考虑企业绩效改善的综合能力规划模型较少；第二，将能力需求用产出或设备的单位数表示^[32]。这种能力需求的表示方式不能反映机器柔性的个性化特征，或能力需求无法直接与市场需求相关联（即先确定设备需求的台套数或产出单位数，再选择设备）；第三，侧重在能力需求与主生产计划的关联^[32]、产品到生产线的指派^[33]等，对大 M 制造多个阶段的关联性考虑不足。本书作者在柔性能力描述方面经过研究取得了一些初步的成果^[34]，提出了将能力与产品结构、工艺过程相联系的能力描述方法和将能力规划与综合计划、生产作业计划集成为一体化能力规划模型，为不同层次柔性（机器的操作柔性——机器处理不同操作的能力，生产线的产品柔性——无需设备调整而能生产的产品的个数，制造系统的市场柔性——适应市场条件变化的能力）的关系分析打下了良好的基础；第四，侧重于完全柔性（能加工所有产品）的能力计划与生产计划，或完全柔性设备与专用设备的绩效比较^[35]，部分柔性（能加工全部产品的一部分）的能力决策方面的研究成果较少。完全柔性设备价格昂贵，部分柔性设备的合理组合在运作绩效指标的很多方面能逼近完全柔性设备，因而是应用更广、也更符合我国国情的一类柔性设备。

从 FM S 重要绩效指标如生产周期、成本、产出率、柔性等的相互关系入手，研究多种需求模式下 FM S 生产能力规划、生产线设计和生产计划一体化的决策与优化问题是柔性制造系统研究的一个重要的方向。这一研究方向的重点不在于提出复杂的优化问题模型及其求解方法，而在于柔性结构特征的分析与研究。

1.4.2 供应链柔性的研究

供应链柔性是其适应市场需求变化的能力，通常表现为供应链上下游企业之间的关系在不确定性环境下所表现出的鲁棒性^[37]。面对市场需求的不确定性，增加柔性可以增加供应链产品的销量，提高系统资源的利用率^[8]，从而提升整个供应链的竞争力。

目前，供应链柔性已有的研究成果可以概括为三个方面。第一方面主要是关于供应链柔性的概念、绩效评价、考虑柔性的供应链伙伴选择和柔性约束条件下的供应链生产决策优化等的研究。文献 [6]、[8]、[38] 认为供应链柔性是指供应链面对市场多样化的不确定需求而改变其产出水平的能力，并且采用供应链经营资源的富余能力来计量。文献 [37] 在此基础上将供应链柔性引申定义为对供应订单的批量和交货期施加较少的限制。文献 [39] 从柔性作为供应链绩效评价

指标的角度对供应链柔性作了描述性研究。文献 [40] 探讨了供应链柔性的内涵,并提出了研发、资源、制造、物流、信息和决策等 6 个柔性子系统模型及各子系统集成的框架模型。文献 [38] 提出了考虑成本、顾客服务水平和柔性等目标的供应链伙伴选择模型。文献 [6] 提出了考虑柔性约束条件的供应链生产决策优化模型。第二方面主要是将单个企业柔性系统方面的研究成果直接应用和拓展到供应链柔性系统上。如文献 [41] 按单个企业柔性的观点研究了供应链核心企业柔性与供应链绩效之间的关系。文献 [42] 将文献 [8] 的研究结果拓展到多产品多阶段的供应链系统,进而分析了供应链的客户服务水平和供应链柔性之间的关系。文献 [43] 提出用一种混合延迟策略设计鲁棒的供应链系统以应对需求的不确定性。第三方面是有关供应链建模方面的研究。供应链的建模方法近年来有从数学方法向多学科(如多 Agents 系统,复杂性科学等)交叉发展的趋势^[44],近期有不少学者应用多 Agents 技术研究供应链设计与协调问题^[44~48]。

1.4.3 从柔性制造系统到柔性供应链

在供应链柔性的定义、概念、测度方法和绩效评价研究方面,目前的研究还不够系统。具体表现在对供应链柔性的定义、分类和测度方法的不一致,缺少对供应链系统结构与柔性之间关系、供应链成员企业的柔性与供应链系统柔性关系的研究。

尽管单个企业的柔性生产技术经过几十年的发展已在集成印刷电路板的制造^[49]、机械制造^[30]及汽车生产^[50]等工业行业有了广泛的应用,但其实现方式主要是通过系统设计时所确定的设备与运输系统等硬件配置手段和生产管理中各种计划决策手段提高生产系统加工多种零部件、生产多样化产品的能力,最终实现企业的市场柔性。由于供应链系统柔性不仅取决于其自身的能力,还取决于其上下游企业及相关物流服务企业的柔性和能力,因此将单个企业的柔性改善方法直接推广到供应链中有以下几个方面的问题与困难:

(1) 单个企业的柔性取决于其设备和布局,而整个供应链的柔性取决于供应链的结构和成员企业的柔性。由于柔性设备的投资属于长期的战略决策且柔性制造设备通常都是昂贵的设备,而供应链中成员企业间的关系属于一种长期合作同盟关系且带有不确定性和变动性,因此,如何通过供应链结构与运作机制的设计改善供应链的柔性并提高企业在柔性方面投资的效率是供应链设计中的一个重要问题^[51]。

(2) 供应链的重要绩效指标包括:成本、柔性、交货提前期、质量、产出率和销售收入等。不同的供应链成员企业对这些指标的看法和要求可能不一致。

(3) 对于给定的供应链系统,其柔性的实现和有效运作要求整个系统计划与决策的整合与优化^[52,53],甚至包括与相关物流服务环节的整合与优化^[54]。这种

整合与优化是一个极其复杂的问题，不仅问题的规模大、环节多，且存在众多不确定因素的影响。

在有关供应链建模，尤其是基于多 A gents 建模的研究方面，已有的研究偏重于供应链网络的信息沟通和协调方面。将供应链上的企业进行封装构建的多 A gents 系统模型是描述和分析供应链成员企业间多主体、多目标动态复杂协作过程的一种有效的方法。目前关于多 A gents 之间的协作模型有很多，如合同网^[55]、部分全局规划（partial global planning, PGP）^[56]、通用局部全局规划（general partial global planning, GPGP）^[57]、分布式合作问题求解（cooperative distributed problem solving, CDPS）^[58]等。在供应链设计与协调过程中应用这些模型时需要考虑供应链成员企业之间协作关系的特点并对这些协作模型进行适当地修订；另外，与供应链结构相对应的多 A gents 结构设计与调整问题也是面向柔性的供应链设计与协调的一个重要课题。

在面向柔性的供应链设计和协调研究方面，我们在完成由摩托罗拉公司制造研究中心（The Motorola Corporate Manufacturing Research Center）和伊利诺伊大学机床系统研究中心（University of Illinois Center for Machine Tool Systems Research）资助的项目期间所提出的 ECSP（equipment changeover and selection problem）^[34,59]模型提供了较好的研究基础。与已有的能力规划模型（通常将能力需求用产出单位数或设备单位数来表示）不同，模型 ECSP 用产品的零部件类和设备的可操作集合来描述市场对能力的需求，这样可更好地反映市场需求与需求满足方式之间的联系。将 ECSP 模型拓展到供应链柔性系统的结构研究上，其结果将是包含物流服务在内的多企业多目标 ECSP 模型，模型的求解结果将为面向柔性的供应链结构设计及其多 A gents 建模提供支持。

1.5 本书的特点

目前国内外已有多种有关柔性制造系统的专著^[60~66]。与目前已有的专著相比，本书的特点可以概括为以下几个方面。

1.5.1 侧重说明管理与决策在改善柔性方面的作用

柔性制造系统主要由三个部分组成^[66]：一系列硬件设备（包括数控加工机床、物料搬运系统、自动刀具系统、控制系统和其他附加设备），计算机通信与控制系统（包括各种计算机、通信网络、计算机外设、系统软件和应用软件等）和决策与优化系统。决策与优化系统有两个层次的内涵，从狭义上讲，它指单套柔性制造系统中通常嵌入到应用软件中的一些生产调度、系统控制与维护方法（包括工件调度、刀具管理、小车调度、系统状态维护和故障诊断与处理等）；从

广义上讲,它涉及多套柔性制造系统或其中的部分硬件系统的布局设计、优化、协调与配合问题,其目的是达到整体运行效果最优。

已有的文献在介绍柔性制造系统时,往往只强调柔性制造系统三个组成部分的前两个部分和决策与优化系统的狭义内涵。正如刘飞等^[64]所指出的,决策与优化系统的广义内涵(运作管理问题)是规划设计 FMS 时与其硬件设备同样重要的问题,必须引起高度重视。从本书后面的有关章节中可以看到,多套较低柔性系统的正确配合能达到完全柔性系统的运行效果。因此,本书侧重在 FMS 的决策与系统优化的广义内涵的探讨上。

供应链系统涉及上下游企业间的协作与配合。由于供应链成员企业是相对独立的主体,考虑到建立和改善柔性制造系统所要求的投资较大,因此在提高供应链柔性的过程中,成员企业能力的选择、协调和优化配合比通过设备投资改善某些成员企业生产系统的柔性具有更高的可操作性和现实可能性。面向柔性的供应链设计决策与协调优化在改善供应链柔性方面具有更加突出的地位和作用。

1.5.2 试图建立从企业到供应链柔性改善方法的桥梁

供应链柔性的改善方法与单个企业有很多不同,将单个企业生产系统柔性改善的方法简单地推广到供应链上有很多困难。

华中生^[67]在其博士学位论文中提出的 ECSP 模型,通过在柔性制造系统能力规划问题中考虑产品结构约束,为建立柔性制造系统和柔性供应链中柔性改善方法之间的联系提供了桥梁,有关的后续研究也得到了一些有理论与应用价值的结果^[36,59,68]。本书的目的在于将这些结果及由其他学者近期完成的一些前沿研究成果进行系统地总结与概括。

本书的有关研究结果主要是以数学规划的建模方法为基础的。我们也对柔性制造系统的其他建模方法,如基于 Petri Net 的建模方法,基于 Multi-agent 的建模方法,基于离散时间动态系统的建模方法,进行了简单介绍和比较。其目的是为更好地描述供应链柔性提供支持。

1.5.3 侧重柔性研究有关新思想和新方法的介绍

由于本书强调管理与决策在柔性制造系统和柔性供应链中的作用,我们将不对柔性制造系统的硬件部分和单套柔性制造系统内部的通信、调度与控制机制做过多的介绍。从系统的角度看,本书涉及的柔性制造系统和柔性供应链系统的最小粒度为单套柔性制造系统或数控加工中心。为完整起见,本书将涉及硬件或单套柔性制造系统内部的控制和优化问题内容作为独立的章节编写,跳过这些章节将基本上不影响读者对本书主要内容的理解。

在柔性制造系统运行机制的研究方面,目前呈现出从有关生产管理的研究向非生产管理领域的研究(如人力资源管理和投资决策)渗透的趋势。为此,本书将以生产管理为背景,介绍有关柔性制造系统和柔性供应链管理的新思想和新方法。

为使读者能够对柔性的具体概念内涵有全面的了解,本书对各种层次的柔性及其相关决策与优化问题进行了系统地介绍,希望能对企业和供应链管理的研究者和实践者在改善系统柔性的方法方面提供较完整而系统的参考。

参 考 文 献

- [1] Chase R B, Aquilano N J, Jacobs F R. Operations Management for Competitive Advantage. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2001
- [2] 张仁华,黎志成,张金隆. 不确定性环境与生产系统柔性. 华中理工大学学报(社会科学版), 1995, 3(25): 51~55
- [3] Hopp W J, Spearman M L. Factory Physics: Foundation of Manufacturing Management. New York: McGraw Hill, 2000
- [4] 肖承忠. 生产系统工程. 北京: 机械工业出版社, 1987
- [5] 陈剑, 黄朔. 供应链结构研究进展. 系统工程学报, 2002, 17(3): 246~251
- [6] 潘景铭, 唐小我. 需求不确定条件下柔性供应链生产决策模型及优化. 控制与决策, 2004, 19(4): 341~344
- [7] Das S K, Abdelmalek L. Modeling the flexibility of order quantities and lead-times in supply chains. International Journal of Production Economics Volume, 2003, 85(2): 171~181
- [8] Jordan W C, Graves S C. Principles on the benefits of manufacturing process flexibility. Management Science, 1995, 41(4): 577~594
- [9] 华中生, 徐晓燕, 石琴. 柔性制造系统的柔性性与决策问题. 中国科学技术大学学报, 2000, 30(1): 99~107
- [10] 刘益, 李垣, 汪应洛. 柔性战略的理论、分析方法及其应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2005
- [11] Panzar J C, Willig R D. Economies of scope. American Economic Review, 1981, 71(2): 268~272
- [12] 张仁华, 席酉民, 冯仲仁. 分工、专业化与范围经济. 武汉工业大学学报, 1997, 19(3): 106~109
- [13] 谌述勇, 陈荣秋. 论种类经济与柔性生产. 华中理工大学学报(社会科学版), 1996, 4(32): 44~47
- [14] Norman G. The relative advantages of flexible versus designated manufacturing technologies. Regional Science and Urban Economics, 2002, 32(4): 419~445
- [15] 刘宗华, 邹新月. 中国银行业的规模经济和范围经济——基于广义超越对数成本函数的检验. 数量经济技术经济研究, 2004, 10: 5~15
- [16] Morita H. A analysis of economies of scope by data envelopment analysis: comparison of efficient frontiers. International Transactions in Operational Research, 2003, 10(4): 393~402
- [17] Hill M A, Ireland R D, Hoskisson R E. Strategic Management: Competitiveness and Globalization. 4th ed. Cincinnati, Ohio: South-Western College Publishing, 2001
- [18] Henderson R, Cockburn I. Scale, scope, and spillovers: the determinants of research productivity in drug discovery. RAND Journal of Economics, 1996
- [19] Shapiro J F. Modeling the Supply Chain. California, Pacific Grove: Duxbury, 2001

- [20] Hua Z S, Li S J, Liang L. Impacts of demand uncertainty on supply chain cooperation of single-period products. *International Journal of Production Economics*, 2006, 100(2): 268~284
- [21] 鲁其辉, 朱道立, 林正华. 带有快速反应策略供应链系统的补偿策略研究. *管理科学学报*, 2004, 7(4): 14~23
- [22] Lancaster K. *Variety and Efficiency*. New York: Columbia University Press, 1979: 16~33
- [23] Swamidass P M, Newell W T. Manufacturing strategy, environmental uncertainty, and performance: a path analytical model. *Management Science*, 1987, 33(4): 509~524
- [24] Page M, Krause D R. A multiple-method study of environmental uncertainty and manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 1999, 17(3): 307~325
- [25] Page M, Krause D R. Re-exploring the relationship between flexibility and the external environment. *Journal of Operations Management*, 2004, 21(6): 629~649
- [26] Sawhney R. Interplay between uncertainty and flexibility across the value-chain: towards a transformation model of manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 2006, 24(5): 476~493
- [27] Upton D M. Process range in manufacturing: an empirical study of flexibility. *Management Science*, 1997, 43(8): 1079~1092
- [28] Chang S, Yang C, Cheng H, et al. Manufacturing flexibility and business strategy: an empirical study of small and medium sized firms. *International Journal Production Economics*, 2003, 83(1): 13~26
- [29] Stix G. The wall. *Scientific American Magazine*, 1994: 96~98
- [30] 吴柞宝, 吴澄. 叶片FMS的规划设计. *机械工程学报*, 1997, 23(1): 66~73
- [31] 张宁. 设备故障次数与经济更新时间. *系统工程理论与实践*, 1999, 19(4): 22~26
- [32] Rajgopalan S. Capacity expansion and equipment replacement: a unified approach. *Operations Research*, 1998, 46(6): 846~857
- [33] Benjaafar S, Gupta D. Scope versus focus-issues of flexibility, capacity, and number of production facilities. *IIE Transactions*, 1998, 30(5): 413~425
- [34] Hua Z S, Banerjee P. Aggregate capacity planning and production line design/redesign in agile manufacturing//Gunasekaran A. *Agile Manufacturing: 21st Century Manufacturing Strategy*. Oxford: Elsevier Science Ltd., 2001
- [35] Aleda R, Gaimon C, Kravajski L. Optimal acquisition of FMS technology subject to technological progress. *Decision Sciences*, 1991, 22(2): 308~334
- [36] Hua Z S, Huang F H, Zhang B. Process flexibility considering bill of material. *International Journal of Production Research* (in press)
- [37] Das S K, Abdelmalek L. Modeling the flexibility of order quantities and lead-times in supply chains. *International Journal of Production Economics Volume*, 2003, 85(2): 171~181
- [38] Sabri E H, Beam B M. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 2000, 28(5): 581~598
- [39] Gunasekaran A, Patel C, Tirriroglu E. Performance measures and metrics in a supply chain environment. *International Journal of Operations & Production Management*, 2001, 21(1/2): 71~87
- [40] 张云波, 武振业, 杨成连. 供应链柔性系统集成模型. *西南交通大学学报*, 2004, 39(2): 244~247
- [41] Thonemann U W, Bradley J R. The effect of product variety on supply-chain performance. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(3): 548~569
- [42] Tomlin B T. Supply chain design: capacity, flexibility and wholesale price strategies. Ph.D. Thesis,

- Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [43] Mo Y. A robust supply chain design under demand uncertainty and hybrid postponement strategies: Issues in supply chain management. Ph.D. Thesis, the Pennsylvania State University, 2002
- [44] 周庆, 陈剑. 基于 Swarm 的供应链多主体聚集模型及其仿真. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 1308~1313
- [45] Nirupam J, Rajgopalan S, Karim i I. Agent-based supply chain management-1: framework. Computers and Chemical Engineering, 2002, 26(12): 1755~1769
- [46] Ahn H J, Lee H B, Park S J. A flexible agent system for change adaptation in supply chains. Expert Systems with Applications, 2003, 25(4): 603~618
- [47] Xue X L, Li X D, Shen Q P, et al. An agent-based framework for supply chain coordination in construction. Automation in Construction, 2005, 14(3): 413~430
- [48] 秦荪涛, 李承娟. 基于多智能体的供应链协同机制研究. 科学管理研究, 2004, 22(3): 60~63
- [49] Hood S J, Berm on S, Barahona F. Capacity planning under demand uncertainty for semiconductor manufacturing. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2003, 16(2): 273~280
- [50] Sabuncuoglu I, Lahmar M. An evaluative study of operation grouping policies in an FMS. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2003, 15(3): 217~239
- [51] 马士华, 胡剑阳, 林勇. 一种基于期权的供应商能力预订模型. 管理工程学报, 2004, 18(1): 8~11
- [52] 胡琨元, 陈文明, 汪定伟等. 考虑批量因素的成品匹配与生产计划联合优化. 系统工程理论方法应用, 2004, 13(3): 199~202
- [53] 王许斌, 田军, 朱道立等. 影响机械行业供应链多阶响应周期的关键因素分析. 中国软科学, 2004, 6: 67~71
- [54] Nozick L K, Turnquist M A. Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. European Journal of Operational Research, 2001, 129(2): 362~371
- [55] Smith R G. The contract net protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver. IEEE Transactions on Computers, 1980, C29(12): 1104~1113
- [56] Durfee E H, Lesser V R. Using partial global plans to coordinate distributed problem solvers. Proceedings of the 10th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1987. 875~883
- [57] Decker K S. Environment centered analysis and design of coordination mechanism s. Ph.D. Thesis, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, 1995
- [58] Wooldridge M, Jennings N R. The cooperative problem solving process. Journal of Logic and Computation, 1999, 9(4): 563~592
- [59] Hua Z S, Banerjoe P. Aggregate line capacity design for PWB assembly systems. International Journal of Production Research, 2000, 38(11): 2417~2441
- [60] 何健康, 陈加栋, 马海波. 柔性装配系统的设计与实现. 北京: 清华大学出版社, 2000
- [61] 张毅. 管理信息系统实用技术: 制造工业生产管理信息系统. 北京: 科学出版社, 1993
- [62] 史祥生, 吴春燕. 产品数字化与产品数据管理. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [63] 刘延林. 柔性制造自动化概论. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001
- [64] 刘飞. 制造系统工程. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [65] Tempelmeyer H, Kuhn H. Flexible Manufacturing Systems; Decision Support for Design and Operation. New York: Wiley, 1993

-
- [66] Luggen W W . Flexible Manufacturing Cells and Systems . Englewood Cliffs, N J: Prentice Hall, 1991
- [67] 华中生 . 一类柔性制造系统能力规划问题的研究 . 中国科学技术大学博士学位论文, 2000
- [68] Hua Z S, Huang F H . A hybrid heuristic for PWB capacity expansion problem . ICIC2006, LNCS 4113, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 : 802~811

第 2 章 柔性制造系统的发展

20 世纪有三件事影响着制造业的竞争^[1]。其一是盛行于 20 世纪之初的科学管理运动。自动生产线代替传统的专用机床,使得生产力到了快速的发展。其二是 20 世纪中叶开始的质量运动。通过车间生产代替一般通用机床,实现了产品的大规模、低成本生产;全面的质量管理与改善活动提高了产品的性能与质量。但这时人们却常常面临所谓的“功能悖论”,即质量、成本和交货速度之间存在冲突,很难同时改善这些指标。其三是从 20 世纪中后期开始流行的柔性制造系统。柔性制造系统可以有效降低生产多样化产品的时间和成本,是追求范围经济的有效手段。

从 20 世纪 70 年代开始,由于经济的全球化,市场竞争开始加剧,市场需求发生了巨大的变化:产品的生产周期缩短,更新加快,上市时间缩短,质量要求日益提高,成本要求日趋降低,售后服务要求日趋完善,传统的刚性制造系统已经不能适应这种多变的市场的实际需求,因此制造业迎来“柔性”的年代。本章介绍柔性制造系统的发展过程,不同类型的柔性定义和相互关系^[2,3],并对柔性制造系统的发展趋势进行简单展望。

2.1 柔性制造系统的发展过程

2.1.1 柔性制造系统产生的时代背景

第一次世界大战之后,工业化生产逐渐取代了传统的手工生产,使得生产力得到了空前的发展。美国福特汽车公司在 1910~1920 年建立了一条生产线,创造了 1 分钟生产一辆“T”型车的记录,使成本从刚推出时的 890 美元/辆,降到 1926 年的 290 美元/辆,从而使汽车从少数富翁的奢侈品变成了大众化的交通工具,开创了机械工业大规模生产的时代。到 20 世纪 30~50 年代,各种机械的、电气的、液压的自动化装置被发明,各种高效的专用自动化机床被设计出来。通过自动输送带将各单机联结成各种各样的自动化生产线,从而使单一品种、大批量生产的刚性自动化生产达到成熟阶段。

进入 20 世纪 60 年代以后,世界的市场需求发生了巨大的变化,用户对产品的功能与质量的要求越来越高,对产品的需求趋于个性化,用户的要求多样化,要求送货及时。经济全球化脚步加快,全球化生产给制造企业的生产经营带来了巨大的挑战:产品的生产周期缩短,产品更新速度加快,产品的生产由少品种大

批量向多品种小批量甚至是单件生产的生产类型过渡。产品上市时间缩短，产品质量要求日益提高，产品成本日趋降低，产品的售后服务日趋完善，传统的刚性制造系统已经不能适应这种多变的市场需求。这一切都迫使工业界努力寻找一种具有高柔性、高生产率、高质量和低成本，能够快速响应市场需求的产品零件加工制造系统，柔性制造系统正是在这种情况下产生的。

另一方面，一种新的生产方式的出现，必然要有新的技术的发展作为基础和依托。对机械制造业来说，影响最大的就是电子计算机的出现及其飞速发展和广泛应用。20世纪50年代数字化技术在机床上开始应用，开创了数控（NC）机床的时代。同时，开始了自动编程系统的研制，以摆脱手工编写数控程序的落后状态。1954年，美国麻省理工学院完成了第一个用于零件数控编程的工具，起名为自动编程工具（APT），从1965年起，美国又开始研制图形编程（即用图形验证数控加工程序），并于1967年初步完成并投入使用，从而解决了APT语言编程存在的基本问题。20世纪70年代，随着微处理机的应用，出现了计算机数控（CNC）机床，使中小批量的外形复杂零件的自动化加工问题得以很好解决。

2.1.2 柔性制造系统的起源及发展

柔性制造系统是指由数控加工设备、物料储运装置、计算机控制系统等组成的自动化制造系统。它包括多个柔性制造单元（FMC），能根据制造任务或生产的变化迅速进行调整，适用于多品种以及中、小批量生产。美国国家标准局将柔性制造系统定义^[4]为，“由一个传输系统联系起来的一些设备，传输设备把工件放在其他各加工设备上，使工件加工实现准确、迅速和自动化。中央计算机控制机床和传输系统，柔性系统有时可以同时加工几种不同的零件”。国际生产工程协会指出：“柔性制造系统是一个自动化的生产制造系统，在最少人的干预下，能够生产任何范围的产品族，系统的柔性通常受到系统设计时所考虑的产品族的限制”。中国国家军用标准有关武器柔性制造系统中的术语将其定义为“柔性制造是由数控加工设备、物料运输装置和计算机控制系统组成的自动化生产系统，它包括多个柔性制造单元，能够根据制造任务和生产环境的变化迅速进行调整，适用于多品种小批量生产”。一个典型的FMS^[5]如图2.1所示。

有关FMS的起源与发展，有众多的网络资料对其进行了较详细的介绍，如大科普网（<http://www.iikepu.com/index.htm>）、中国制造业信息化门户（<http://www.e-works.net.cn>）等。这里综合有关资料进行简要说明。FMS的概念诞生于20世纪60年代的伦敦，是由一位做研发工作的工程师大卫·威廉逊（David Williamson）提出的。当时他使用“flexible machining system”这个名称，并在一个机加工车间里安装了第一套FMS。它是在计算机控制下，每天工

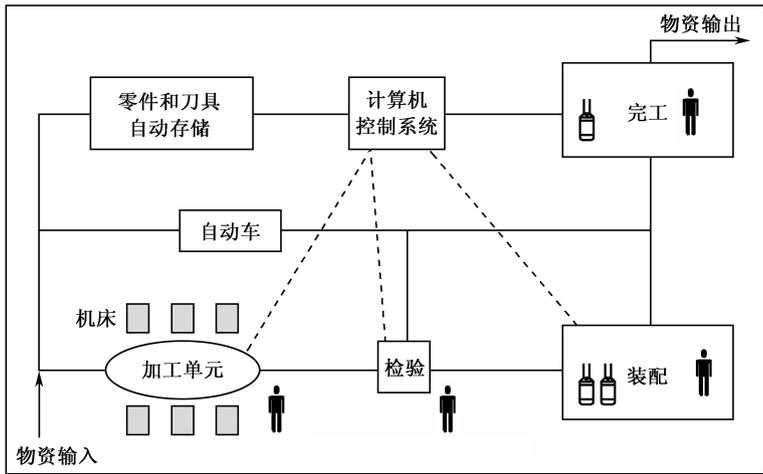


图 2.1 一个典型的 FMS

作 24h（实际上是在中班和晚班的 16h 内进行无人化加工），称之为“24 系统”，这就是 1967 年英国创建的最初的柔性加工系统（Molins system-24），由英国 Molins 公司将其公诸于世。Williamson 在该系统中用人工将工件装到托盘上，然后托盘被送到各机床处，并在需要的时候自动安装工件，用数控机床加工一系列不同的零件。每台机床配置一个刀库，系统从刀库中选用刀具进行各种不同的加工操作，整个过程还包括清除切屑和清理工件。这种用计算机分散控制机床加工和每天 24h 加工相结合的思想就是 FMS 的起源。

同年，美国的怀特·森斯特兰公司建成 Omniline I 系统，它由 8 台加工中心和 2 台多轴钻床组成，工件被装在托盘上的夹具中，按固定顺序以一定节拍在各机床间传送和进行加工。这种柔性自动化设备适于少数品种、大批量生产中使用，在形式上与传统的自动生产线相似，所以也叫柔性自动线。日本、苏联、德国等也都在 20 世纪 60 年代末至 70 年代初，先后开展了 FMS 的研制工作。

1976 年，日本 FANUC 公司提出了由加工中心和工业机器人组成的柔性制造单元（简称 FMC），为发展 FMS 提供了重要的设备形式。柔性制造单元（FMC）一般由 1~2 台数控机床与物料传送装置组成，有独立的工件存储站和单元控制系统，能在机床上自动装卸工件，甚至自动检测工件，可实现有限工序的连续生产，适于多品种、小批量生产应用。

20 世纪 70 年代末期，FMS 在技术上和数量上都有较大发展，20 世纪 80 年代初期已进入实用阶段，其中以由 3~5 台设备组成的 FMS 为最多，但也有规模更庞大的系统投入使用。

1982 年，日本 FANUC 公司建成自动化电机加工车间，由 60 个柔性制造单

元(包括50个工业机器人)和一个立体仓库组成,另有两台自动引导车传送毛坯和工件,此外还有一个无人化电机装配车间,它们都能连续24h运转。与此同时,还出现了若干仅具有FMS基本特征,但自动化程度不很完善的经济型FMS,使FMS的设计思想和技术成就得到普及应用。

20世纪70年代末到80年代初,计算机辅助管理、物料自动搬运、刀具管理、计算机网络、数据库的发展以及CAD/CAM技术的不断发展,更为FMS的发展提供了有力的支持。

20世纪80年代中期以后,随着计算机技术的不断进步,制造业自动化进入了一个崭新的年代,即计算机集成制造(CIMS)的时代,FMS已成为各国机械制造业发展的重点。此时,FMS已从实验阶段进入了实用阶段,而且已从起初单纯机械加工领域向焊接、装配、检验及无屑加工等综合领域发展。

计算机辅助设计、模糊控制技术、人工神经网络技术、人工智能、专家系统及智能传感器技术等为柔性制造系统的发展注入了新鲜的血液。与此同时,自动控制理论、制造工艺以及生产管理也都有了日新月异的变化,这些都为FMS的发展提供了必要的支持。

在此期间,FMS也得到积极推广应用,但主要集中在发达国家。据联合国统计,1985年全世界拥有350余套FMS,1990年达到1500套,主要分布在日本、美国、英国等工业发达国家。到1993年,仅日本就有175套完整的FMS,假如算上柔性制造单元(FMC)则共安装了400余套FMS,而且已建成4个自动化工厂。在1989~1992年的4年间,美国的FMS使用数目年增长率接近27%。德国、意大利和俄罗斯也都大力开发和应用FMS。

我国第一套FMS(JCS-FMS-1)是北京机床研究所于1985年从日本富士通的FANUC公司引进的。该套FMS主要用于旋转体加工,其加工对象是FB-15型、25型直流伺服电动机的轴类、法兰盘类、刷架体类和壳体类等四大类共14种零件。它由5台国产加工中心、日本富士电机公司的AGV及4台日本产的机器人组成,包括中央管理系统、物流控制系统、加工单元和监视摄像系统四大部分,见文献[6]。

1987年以后,我国又相继从当时的联邦德国引进了三套FMS,分别安装在湘潭江麓机械厂、郑州纺织机械厂和沈阳飞机制造厂,后来又从英国KTM公司引进了一套FMS安装在大连机床厂。1991年重庆大学与北京机床研究所联合研制了JCS-FMS-2实用型单元控制系统,通过了原机电部与863/CIMS专家组联合组织的鉴定。尽管由于种种原因,该FMS还有待进一步完善之处,但它是我国科技人员自行设计和开发的第一套FMS。

2.2 柔性的种类及其相互关系

由于柔性的多维特征和考虑的角度（如经济、战略、制定决策等）不同，柔性的定义千差万别。传统的观点认为：柔性是应对组织内外环境不确定性的一种机制^[7~9]。Slack^[10]将不同位置或不同状态假定下的系统生产量定义为柔性。Mandelbaum^[11]将柔性定义为有效应对环境变化的能力。随后，许多学者对柔性的概念进行了深入的探讨。从经济学的角度，Upton^[3]认为柔性是企业的时间、成本、执行等方面最小惩罚下的一种反应或转换能力。从流动性理论的角度，Jones和Ostroy^[12]认为柔性是物理位置之间转换的一种能力。有些学者将柔性看成是企业的内部资源，企业的一种竞争力^[13]，还有学者从组织衍变^[14]、人类生态学^[15]等角度对柔性的定义进行了研究。

从企业制造的角度，考虑制造系统的柔性，国外学者对制造柔性的定义包括：Sethi A K和Sethi S P^[2]认为制造柔性是指企业重组制造资源以便有效生产可接受质量的产品能力。Warnecke和Steinhilper^[16]将制造柔性描述为一个制造车间被用于不同生产任务的能力。Hayes和Wheelwright^[17]将制造柔性看成是企业交易的一种战略。Watts^[18]等认为制造柔性是指在企业内部运作环境中，以一种合理的成本及时地应对市场环境变化的能力。Ohliger^[19]则认为，在短期，制造柔性是指利用现有资源适应环境变化的能力；在长期，它意味着引入新产品，开发新资源和寻求新的生产方法并将这些新资源整合到现有生产系统中去的能力。Gupta Y和Gupta M^[20]定义制造柔性是企业有效的响应环境改变的能力^[21]。Swamidass^[22]将制造柔性定义为一个制造系统的生产能力，能够成功地适应环境的改变和加工的需要，主要是指生产系统处理由环境引起的不稳定性的能力，这与Slack对柔性的定义相类似。Benjaafar^[23]将制造柔性分为两类：与产品有关的柔性和与加工过程有关的柔性，他认为，与产品有关的柔性是与产品制造的各种选择相关联的柔性（如产品制造的一些备选加工计划等），而与加工有关的柔性是描述加工的一些特征，与加工能力有关，用来调整各种操作条件或呈现不同的功能（如多用途加工中心等）。

国内学者对制造柔性也进行了深入的探讨。袁红兵等^[24]认为制造柔性是指制造系统及系统元件对产品多样性和系统内外各种变化及不确定性的适应能力。系统内部的变化包括机床故障、动态变化的加工时间和工件队列长度、不同的产品混合比、加工废品和人员缺勤等，而外部不确定性包括原材料短缺、紧急订单、原材料和产品的价格波动、竞争对手的决策和客户喜好的变化，还包括技术进步和新的组织管理原则等。华中生等^[25]指出生产系统的柔性是指其加工多种零部件、生产多样化产品的能力。这种能力既取决于系统设计时所确定的设备与