

Self-organizing Operation and Adaptive Control
of Bio-inspired Manufacturing System :
Theory, Model and Methodology

**类生物化制造系统
自组织运作与自适应控制：
理论、模型与方法**

唐敦兵 著



科学出版社

类生物化制造系统自组织运作 与自适应控制：理论、模型与方法

唐敦兵 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从制造系统、控制系统、生物系统学科交叉的角度,系统、详细地介绍了如何利用生物有机体的神经—体液—免疫自适应调控机制和规律来解决智能制造系统的自适应、自组织和全局优化控制等问题。全书共9章,主要内容包括:智能制造系统研究进展,类生物化制造系统模型,基于内分泌调节机制的改进型车间调度优化算法,基于神经内分泌协调机制的Job Shop动态重调度,基于激素反应扩散原理的制造系统动态协调机制,基于激素调节原理的多AGV自组织运作,基于激素调控机制的生产控制模型与方法,基于人工免疫的制造系统监控技术,原型系统仿真平台设计与开发。

本书可作为高等学校机械类本科生、研究生的辅助教材,也可作为企业工程师的参考资料,还可供科学研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

类生物化制造系统自组织运作与自适应控制:理论、模型与方法/唐敦兵著. —北京:科学出版社, 2015. 6

ISBN 978-7-03-043558-3

I. ①类… II. ①唐… III. ①自适应控制—自动制造系统 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 045367 号

责任编辑:李涪汁 周 丹/责任校对:张怡君

责任印制:肖 兴/封面设计:许 瑞

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:287 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着嵌入式计算机技术、信息网络技术和物联网技术等快速发展,当前国际制造业迎来了新的发展趋势,国际制造业大国纷纷提出了自己的先进制造业发展规划,如德国的“工业 4.0”战略计划、美国的“先进制造业伙伴关系”(AMP)和“先进制造业国家战略”计划、英国的“高价值制造战略”和中国的“中国制造 2025”战略等,未来工业制造业无疑将向着高度信息化、自动化、智能化的方向发展,智能制造系统的概念、模式和实施手段也在不断地延伸和变化。

随着以全球化、动态化和用户驱动为显著特征的市场竞争的加剧,制造业不仅面临着技术进步带来的机遇,同时还面临着世界范围内日益激烈的产品竞争的挑战。产品生命周期日益缩短,生产批量越来越小(甚至是一类一件),更新速度日益加快,使得制造企业的生产方式已由面向产品的生产逐渐转变为面向顾客的生产,制造系统的运行环境也越来越充满了不确定性。尤其对于复杂产品(如大型飞机)的生产过程,其规模大(加工设备数量达千台),生产中带有可重入和复杂的工艺及资源约束,多目标、不确定性事件频繁发生,且经常伴有持续变化而又不可预知的任务(生产任务的变化、紧急任务等)和事件(机床故障、等待某个制造资源等),生产负荷基本上呈动态性与非线性。如何快速有效地应对制造环境中出现的各种不确定性因素是现代智能制造系统必须考虑的关键问题。

值得注意的是,在当前制造系统的研究中,生物制造与仿生制造日益受到重视。将生物有机体和制造系统进行类比,可以发现二者之间有类似之处,如神经细胞有兴奋、抑制等生理调节功能,车间控制器有对生产订单、加工任务进行控制和调节的功能。生物系统经过几十亿年的进化,优化了生命系统的结构和功能,其系统结构、功能及其调控机制的多样性、复杂性、可靠性、适应性和高效性等确实值得我们在研究智能制造系统时进行借鉴和参考。国家自然科学基金委员会在《机械工程学科发展战略报告(2011~2020)》中明确将生物制造与仿生制造科学列为 11 重大研究领域之一,并指出如何将受控的生物行为集成到制造系统中是生物制造中的一个重要研究方向。在生物制造与仿生制造科学的背景下,传统制造系统的原理、技术和目标需要得到进一步延伸。因此,借鉴生物系统的基础研究成果和神经—体液—免疫调控机制的相关知识,将自组织与自适应视为制造系统的生命特征,将制造系统视为一个有生命的有机体,本书提出了类生物化制造系统的概念,从制造系统、控制系统、生物系统学科交叉的角度,具体研究了如何利用生物有机体的神经—体液—免疫自适应调控机制和规律来解决智能制

造系统的自适应、自组织和全局优化控制等问题，本书正是作者在此研究领域的多年研究成果的总结。

本书的学术特色和主要内容包括以下几点：

(1) 在对人体神经—内分泌—免疫系统的协调原理及其信息处理机制分析的基础上，建立了类生物化制造系统协调模型，并给出了其形式化定义和描述。

(2) 基于内分泌激素调节机制，研究了智能化车间调度的改进型遗传优化算法和自适应粒子群算法。

(3) 受神经内分泌调节机制的启发，设计了一种针对扰动的动态重调度方法，它可以快速地处理车间层的突发情况以优化任务和资源的分配。

(4) 基于内分泌系统中激素反应扩散机制，进一步设计了一种基于激素分泌调节原理的任务协调优化算法，以有针对性地应对车间层的各种突发事件。

(5) 将神经内分泌系统的分布式协调机制运用到多 AGV 系统的自组织运作研究中，设计了运输任务分配和多 AGV 自适应优化调度机制，很好地解决了多 AGV 防碰撞及防死锁问题。

(6) 根据神经内分泌闭环负反馈调节机制建立了制造系统在制品库存(WIP)与积压任务(backlog)自适应控制模型，同时依据激素分泌调节规律给出了控制器参数调整方法，研究了基于激素分泌调节机制的制造系统自适应控制策略。

(7) 在分析制造系统扰动的基础上，将生物免疫机制应用到类生物化制造系统的监控过程中，提出了相应的免疫监控模型及其运行机制。

希望本书的出版能对提升企业的智能制造水平具有一定的参考价值。同时，还希望对培养制造自动化领域的本科生、研究生有所帮助。

感谢国家自然科学基金(编号：51175262)及江苏省杰出青年基金(编号：BK2012032)对本书研究工作的支持。在撰写本书的过程中，得到了课题组研究生的帮助，其中郑堃、顾文斌参与了第 1、2 章的编写，顾文斌参与了第 3、5 章的编写，郑堃参与了第 4 章的编写，陆晓春、郑堃参与了第 6 章的编写，张海涛参与了第 7 章的编写，周建华参与了第 8 章的编写，顾文斌参与了第 9 章的编写。

由于作者学术水平有限，书中难免存在不足之处，恳请同行和读者批评指正。

唐敦兵

2015 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 智能制造系统研究进展	1
1.1 制造系统发展趋势	1
1.2 制造系统中的控制模式	2
1.2.1 制造系统控制模式的主要研究内容	3
1.2.2 制造系统控制模式分类	5
1.2.3 制造控制系统面临的问题	7
1.3 智能制造系统	8
1.3.1 多智能体制造系统	8
1.3.2 Holonic 制造系统	9
1.3.3 分形制造系统	11
1.3.4 生物型制造系统	11
1.3.5 智能制造系统模式综合分析	14
1.4 智能制造系统的协调机制	14
1.4.1 协调的基本概念	15
1.4.2 协调机制的分类	16
1.4.3 协调机制形式化描述方法	21
1.5 类生物化制造系统的概念	21
1.6 本章小结	24
参考文献	24
第 2 章 类生物化制造系统模型	31
2.1 引言	31
2.2 类生物化制造系统的生物学背景	31
2.2.1 人体神经系统	32
2.2.2 人体内分泌系统	33
2.2.3 人体免疫系统	35
2.2.4 人体神经—内分泌—免疫系统调节网络	36
2.3 类生物化制造系统协调控制模型	39
2.3.1 现代制造系统与有机生命系统之间的相似性	39
2.3.2 类生物化制造系统协调控制模型	40

2.3.3 类生物化制造系统协调控制模型的功能特点	44
2.4 类生物化制造系统模型的形式化描述	45
2.4.1 形式化描述的必要性	45
2.4.2 类生物化制造系统的形式化定义和描述	46
2.4.3 基于 π 演算的控制体系结构的形式化描述	47
2.5 本章小结	50
参考文献	51
第3章 基于内分泌调节机制的改进型车间调度优化算法	53
3.1 引言	53
3.2 车间调度问题	54
3.2.1 调度问题的描述及其分类	54
3.2.2 车间调度问题的特点	55
3.2.3 调度问题的研究方法	55
3.2.4 现有调度方法存在的问题	58
3.3 内分泌系统中激素调节规律	58
3.4 基于内分泌激素调节的自适应遗传算法	60
3.4.1 Job-Shop 调度模型	60
3.4.2 基本遗传算法求解车间调度问题	61
3.4.3 基于内分泌激素调节机制的自适应遗传算法	63
3.4.4 参数选择范围讨论	65
3.4.5 调度实例	65
3.4.6 对比实验研究	69
3.5 基于内分泌调节机制的 IAPSO 在 PFSP 调度问题中的应用研究 ..	70
3.5.1 研究现状	70
3.5.2 置换流水车间调度问题	72
3.5.3 求解 PFSP 的 IAPSO 算法	73
3.5.4 实验仿真与结果分析	76
3.6 本章小结	78
参考文献	79
第4章 基于神经内分泌协调机制的 Job Shop 动态重调度	82
4.1 引言	82
4.2 基于神经内分泌调节机制的动态重调度	82
4.2.1 类生物化制造系统的组成	82
4.2.2 动态重调度模型	83
4.3 基于内分泌调节的资源分配机制	86

4.3.1 生物的内分泌调节机制	86
4.3.2 类生物化制造系统的内分泌调节模型	86
4.3.3 类生物化制造系统的资源分配机制	87
4.4 类生物化制造系统的动态重调度	90
4.4.1 紧急订单的动态重调度	90
4.4.2 机床故障的动态重调度	91
4.4.3 生产延迟的动态重调度	92
4.5 案例分析	94
4.5.1 性能指标	95
4.5.2 结果分析	95
4.6 本章小结	97
参考文献	97
第5章 基于激素反应扩散原理的制造系统动态协调机制	99
5.1 引言	99
5.2 内分泌系统中激素反应扩散机制	99
5.2.1 内分泌系统中激素反应扩散过程	99
5.2.2 激素反应扩散机制模型	101
5.2.3 激素反应扩散过程中的隐式协调机制	102
5.3 制造系统中生产任务与资源协调优化模型	103
5.4 基于激素反应扩散机制的“任务—资源”动态协调算法	104
5.4.1 构建类生物化制造系统的激素信息	104
5.4.2 激素容留环境的建立	105
5.4.3 基于激素反应扩散机制的隐式协调算法	105
5.4.4 突发事件动态处理策略	108
5.5 应用分析	112
5.5.1 制造任务协调优化	112
5.5.2 突发事件动态协调	115
5.6 本章小结	117
参考文献	117
第6章 基于激素调节原理的多AGV自组织运作	119
6.1 引言	119
6.2 多AGV区域控制模型	120
6.3 基于DHMRCS的多AGV防碰撞及防死锁机制研究	121
6.3.1 多AGV碰撞类型	121
6.3.2 DHMRCS模型	122

6.3.3 基于 DHMRCs 的多 AGV 防碰撞及防死锁机制	123
6.4 基于激素调节原理的多 AGV 调度系统建模	126
6.4.1 激素调节规律	126
6.4.2 调度过程中的时间参数	128
6.4.3 基于激素调节原理的多 AGV 动态调度模型	129
6.4.4 基于激素调节机制的运输任务分配和 AGV 调度机制	133
6.5 仿真实验	134
6.5.1 实验描述	134
6.5.2 结果分析	135
6.6 本章小结	139
参考文献	139
第 7 章 基于激素调控机制的生产控制模型与方法	141
7.1 引言	141
7.2 研究背景	141
7.3 基于激素调控机制的类生物化制造系统自适应控制模型	143
7.3.1 神经内分泌激素的调节原理	143
7.3.2 激素调控理论	143
7.3.3 类生物化制造系统层次模型	144
7.3.4 基于控制理论的类生物化制造系统控制模型	145
7.3.5 类生物制造系统自适应控制器性能仿真分析	151
7.4 基于神经内分泌调节原理的在制品控制器优化设计	154
7.4.1 神经内分泌系统的调节原理	154
7.4.2 基于多重反馈机制的 WIP 库存优化控制模型	155
7.4.3 应用实例	159
7.5 本章小结	163
参考文献	163
第 8 章 基于人工免疫的制造系统监控技术	165
8.1 引言	165
8.2 监控系统与免疫系统的相似性	165
8.3 制造系统免疫监控模型的构建	166
8.3.1 制造系统的免疫监控模型	166
8.3.2 免疫监控模型的运行机制	168
8.3.3 免疫监控模型的算法实现流程	169
8.4 制造系统免疫监控的功能模块分析	170
8.4.1 制造系统扰动分析	170

8.4.2	系统的免疫识别模块	171
8.4.3	系统的免疫状态评估模块	172
8.4.4	系统的免疫应答模块	177
8.4.5	系统的免疫调节模块	182
8.5	制造系统免疫监控示例	182
8.5.1	免疫监控指标体系的构建	182
8.5.2	系统中抗原的免疫识别	184
8.5.3	系统的免疫状态评估	185
8.5.4	系统对抗原的学习与记忆	190
8.5.5	系统的免疫自适应调节	194
8.6	本章小结	194
	参考文献	194
第9章	原型系统仿真平台设计与开发	196
9.1	引言	196
9.2	原型系统硬件平台开发	197
9.2.1	原型系统硬件平台体系结构	197
9.2.2	原型系统类体液环境的设计	198
9.2.3	原型系统硬件仿真实验平台	204
9.3	原型系统软件系统开发	205
9.3.1	软件系统架构	205
9.3.2	软件系统功能组成	206
9.4	原型系统运行实例	207
9.4.1	类生物化制造系统调度实验	208
9.4.2	基于激素隐式协调机制的适应性试验	210
9.4.3	制造系统实验仿真平台的免疫监控	214
9.5	本章小结	217
	参考文献	217

第 1 章 智能制造系统研究进展

1.1 制造系统发展趋势

制造业是一个通过制造过程将物料、能源、设备、技术、资金、信息和劳动力等资源转化为社会所需产品的行业，它创造了各种物质财富，为国民经济各部门和科技进步提供物质手段和装备^[1]。制造业是一个国家国民经济的支柱和经济发展的动力源，它的发展程度将直接影响这个国家的国际竞争力。为了增强国家的经济实力、保持可持续发展国家战略目标实现，各国政府都将发展先进制造系统的理论知识和相应的科学技术基础作为政府工作的一项核心工作^[2-4]。

自从 20 世纪 90 年代以后，我国制造业进入了一个高速发展的阶段，在国民经济中所发挥的作用也更加重要。然而，随着信息技术发展的突飞猛进，经济全球化趋势的日趋明显，作为制造业驱动力的市场需求发生了重要的结构性变化^[5-7]。产品的生命周期日益缩短，产品的种类日趋个性化和多样化，制造业所面临的市场竞争变得更加激烈，且充满了日益频繁且无法预知的市场变化。这就使得制造系统的生产组织模式必须由单纯的面向产品生产转变为面向市场需求和客户服务，不仅要降低生产制造的各种成本、提高生产效率、保证产品质量，还需要能够针对外部动态多变的市场行情做出及时有效的快速响应。所以，未来制造业对于先进制造系统的要求主要包括以下几个方面^[8-10]：①对于制造过程中出现的不可预知随机干扰具有快速的反应能力；②对于复杂产品的加工具有较强的柔性和自适应性；③对于控制系统性能要求较高的鲁棒性和可靠性；④对于制造过程中出现的动态事件能够具有较强的自组织能力；⑤具有重构能力：制造系统作为一个复杂的大系统，它的开发与维护日趋变得异常困难，而重构不但可以提高任务的完成质量，而且可以节约系统的开发成本。因此，寻找一种合理有效的制造系统生产组织结构和控制协调方式来快速有效地应对当前制造环境中的各种不确定性因素及各种动态变化的要求，成为现代制造系统所必须面对的一个关键问题。

美国科学家 Dove 博士曾言“there is only one major constant-and that is change”，即如今的制造系统中只有“变化”才是永恒的主题^[11,12]。为此，国内外众多专家学者从各个不同的角度出发，提出了多种新的制造系统的生产控制和组织模式。如图 1.1 所示，将制造系统现有的一些模式进行了简单的分类，从四个层面进行了逐步解析^[13]。第一层面分析了当今制造系统的一些主体需求；第二

层面则对这些制造需求进行了分析，并提出了应对战略；第三层面则是针对不同的应对战略提出了相应的实现方法和可行的措施；最后一个层面则是将近年来一些先进制造理念和模式进行了分类，将其对应到相关的实现措施中。这些先进制造理念和模式都是针对不同的需求而采取的具体应对措施，有着各自的优缺点，但是现阶段它们都面临同样的问题，为了应对日益复杂的动态化制造环境，制造系统规模变得越来越庞大，且组成也更加复杂，系统的控制协调难度日益增加，如何实现图 1.1 中提出的各种先进的制造模式和理念，使其能够行之有效，成为摆在国内外专家学者面前的一道难题。

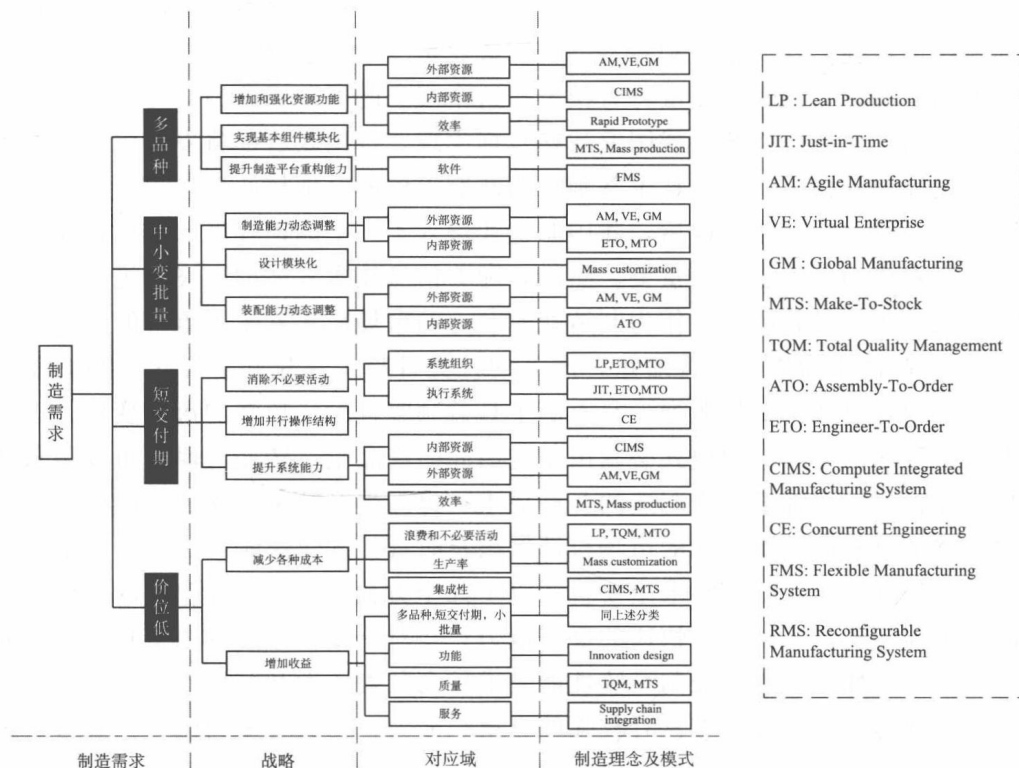


图 1.1 先进制造需求和制造模式

1.2 制造系统中的控制模式

在当今复杂的动态制造环境中，传统的基于劳动分工原则的静态递阶控制结构已经越来越无法满足制造企业的需求，因此，研究制造系统新的控制方式和组织模式显得更加重要。为了满足新形势下制造系统的控制要求，新的控制系统要求更加快速的响应性和系统运行的柔性，需要采用更为扁平的控制结构，能够通

过将控制决策权力转移下放,根据制造过程的实际需求动态地组织制造单元,并利用物流供应链将制造企业协调组织起来,通过协调配合赢得市场。

1.2.1 制造系统控制模式的主要研究内容

在制造系统的运行过程中,现代制造系统除了内部的市场销售和研究开发及工程设计等非制造性活动,主要都是根据市场需求发布生产任务,对制造系统底层的各种不同功能的制造资源进行管理和协调调度的“生产规划与控制”(production planning and control, PPC)活动^[14],结合图 1.2 不难看出,制造系统控制活动主要包括三个层次^[15,16]。

(1) 战略层:在市场销售结果的基础上预测企业的发展方向及需要研究开发的主要产品,并根据制造企业的实际生产能力进行相关规划。

(2) 战术层:通过对实际订单的处理,分解制订总的生产任务计划及相应的原材料采购、产品成本会计及库存控制等计划。

(3) 运行层:根据战术层分解的任务和安排的计划具体对各种底层的制造资源(加工机床、操作人员及物流设备等)进行管理、安排和控制协调的过程。

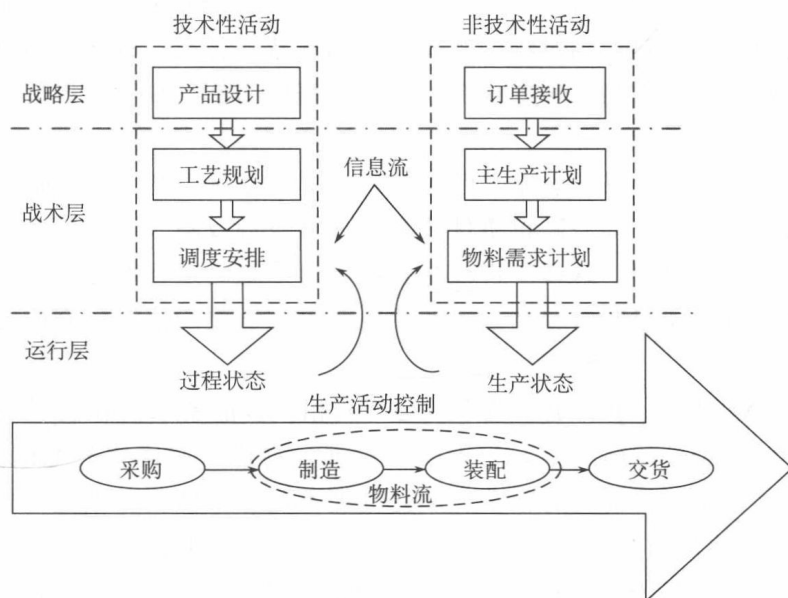


图 1.2 制造系统的生产流程

从控制系统的角度分析,与制造有关的功能和动作又可以分为与制造资源及任务分配协调相关的非技术性(logistic)活动和其他与加工制造过程直接关联的技术性(technological)活动,如图 1.2 中两个在垂直方向上相互独立的制造系统信息流。为了更加准确清晰地表述制造系统控制协调过程中的相关术语的具体含

义，现对有关概念做如下说明。

(1) 制造控制：企业将原材料加工成产品的制造过程中的所有协调控制活动，主要是在满足制造系统中各种约束的前提下对制造系统的某些性能进行优化的操作与控制，如加工任务与资源的协调分配、加工路径的优化选择、生产任务的规划与调度等^[17]。

(2) 制造系统控制结构：制造系统的控制体系及其结构主要是描述制造系统的各种控制决策功能是如何分解细化并被分配到各个基层控制实体中的，并对其控制数据信息交互的接口进行定义，规范其控制动作和信息交互的模式及其具体的协调机制。在控制系统中，决策性能的好坏往往是由决策职责分解的合理性及控制实体之间协调的效率性所直接决定的，因此，合理的控制结构对于制造系统运行的可靠性和高效性具有至关重要的作用。

(3) 生产活动控制(production activity control, PAC)：主要是指在制造系统运行层所进行的协调控制，接受上层控制系统的制造任务到完成这些加工任务所需要的所有规划、执行、监控和资源分配功能，包括针对加工任务的工艺规划、动态的车间调度、及时的数据采集和数控程序代码的实时下载等活动^[18,19]。如图 1.3 所示，PAC 系统主要是通过详细的生产工艺或路线的规划、制造加工过程的执行以及对物料流动过程的监控，利用制造中各种过程状态信息和生产加工中的各种加工状态信息，来实现车间生产过程中内部物料流与控制数据信息流的协调控制和有机集成。

(4) 系统扰动：在制造系统运行过程中，往往会遇到很多来自制造系统内外环境的各种不确定的动态随机事件或变化，如设备故障、紧急订单、加工人员缺岗和工艺路线变更等。这些事件往往会给制造系统的运行性能带来各种直接或间接的影响，这也使得制造控制系统的动态调度和敏捷的协调控制成为系统稳定运行的关键。

(5) 制造调度：为了满足制造系统运行的相关性能要求，在满足制造加工过程中的各种约束条件的前提下，为生产任务进行制造资源优化分配的决策过程。当前很多现代化车间往往拥有很多自动化程度不同、柔性程度也不尽相同的制造设备，如 CNC 机床、加工中心等，车间的加工柔性程度很高，然而没有合理的生产管理和调度控制手段，制造车间往往无法充分利用其拥有的制造资源。例如，我国是制造业大国，拥有接近 300 万台的各种加工机床，但相比于拥有不到 80 万台机床的日本，我国所能实现的制造能力仅为其 1/10 左右^[20]。因此，合理高效的调度方法和智能的优化算法是现代制造系统的技术基础和关键。

(6) 资源分配：与制造调度的概念紧密相关，它是指制造系统控制决策系统根据制造资源不同，在加工能力和不同工艺性约束的条件下，决定由具体的某个制造资源在何时负责加工制造哪个生产任务或操作。与制造调度强调优化不同，

制造资源分配更多的是强调对资源加工能力和工艺性约束这两种约束的满足。

(7) 制造系统的实时控制：在复杂多变的动态制造环境中，制造控制系统需要快速地响应各种不确定性事件，并正确执行生产操作，其实质上是一个考虑制造系统实时状态并采用 FCFS(first come first serve)或 SPT(shortest processing time)原则的调度执行过程(schedule executing)。

1.2.2 制造系统控制模式分类

随着科学技术的发展，制造过程已经从 17 世纪的手工制作发展成了由诸多元素(如人员、机器、物料和计算机控制等)配合作用的复杂制造过程，其规模也由简单的小规模系统演变成了大规模复杂系统^[21]。日益激烈的全球化市场竞争迫使企业必须缩短产品的交货期、提高质量、控制生产成本和增强制造系统的柔性，这些都已成为制造控制系统迅猛发展的内在驱动力。近几十年中，制造控制系统的结构主要经历了集中式控制、递阶式控制、分布式控制和混合式控制等四种体系结构形式的变迁，如图 1.3 所示^[22,23]。从控制结构的发展趋势可以看出，随着系统规模的变大和复杂程度的增加，控制体系结构从集中式逐渐扁平化，各个控制实体的自治能力逐渐变强，相互之间的主从关系趋弱，更多地倾向于协同工作。另外，控制系统的优化目标也从最终的全局优化趋向于局部优化，试图通过对控制单元实体的自治性、智能性的加强及合理的分布与协调各个局部控制单元的决策职责，来实现开放、灵活和具有自组织特性的制造系统控制体系。

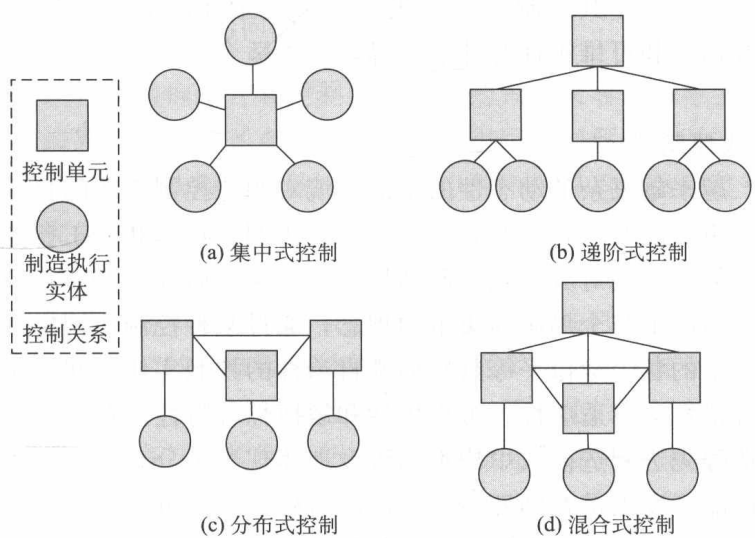


图 1.3 制造系统控制结构形式

1) 集中式控制

在早期制造系统控制结构中,由于其控制功能需求相对单一,且控制逻辑相对固定,通常采用一个中央总控制器对整个制造系统进行操作控制,其优势在于控制结构固定,系统性能稳定,全局优化性能较好,且可以满足一定的实时性要求。但是,集中式控制的缺点也很明显,一旦中央控制器出现故障,则会引起整个控制系统瘫痪,从而影响制造系统的总体性能,即控制系统的可靠性和容错性差。另外,由于系统的控制逻辑隐含在全局数据结构中,并通过固定的程序实现,从而导致如果生产设备发生改变进而导致制造单元发生变化,则集中式控制也很难被改动以适应变化,即系统的可扩展性和可修改性较差。因此,随着技术的发展,这种控制结构已经很少使用了。

2) 递阶式控制

为了实现对复杂制造系统的控制,克服集中式控制的缺点,进一步提高制造控制系统的柔性,人们提出了递阶式控制结构。递阶式控制结构是对制造系统采用由上到下分层式的“金字塔”状结构,每个控制层面均会包含几个有着自己特定功能和目标的控制实体,以便起到承上启下的控制协调作用,使得控制指令可以由上而下地得到执行,同时又可以实现上层控制器对下层活动的实时监控。递阶式控制结构由于采用的是分层控制模式,一方面,通过分层,降低了系统的复杂性从而简化了单个控制模块的功能和大小,使得系统的自适应性控制成为可能;另一方面,因为控制单元采用模块化设计思想,提高了控制软件的可重用性,进而增强了整个系统的制造柔性。但由于过于侧重上下层控制实体之间的主从关系,系统层次变多,尤其当制造系统规模非常复杂和庞大时,其反应速度比较慢,系统的容错性和可维护性等性能下降,不太适合经常发生变化的制造系统中的控制。

3) 分布式控制

近年来,越来越复杂的动态性的制造环境对制造控制系统的自适应性和快速响应性提出了更高的要求,分布式计算、计算机网络技术和人工智能等相关技术进一步发展,促使人们对分布式控制结构进行了深入研究。分布式控制结构更多地强调局部自治决策与全局协同决策的理念,通过某种控制协调机制,来实现分布在整个系统中的各个地位平等具有局部自治性的控制实体之间的相互协作,从而赋予系统容错性、自适应性、可重构性和敏捷性等特性。在并行工程、精益生产和敏捷制造等先进制造模式中均不同程度地体现出了分布式控制的思想。如并行工程要求产品开发人员在刚开始设计产品时必须全方位地考虑产品从概念设计到报废处理的所有需要考虑的因素,其采用的组织方式就是“扁平式”的分布式控制结构,然后将不同的专家人员组成各个研发小组,赋予各个小组很高的责任和权力,各组之间通过相互协商解决产品开发过程中的各种问题。而精益生产则

更多的是利用先进的信息技术将原有的树状管理结构进行“扁平化”压缩,充分发挥“项目组”的自治作用,简化开发流程,尽量降低产品成本,将非核心技术交予协作厂进行研发生产,通过在各协作厂之间进行协商来解决产品生产问题。敏捷制造则是将制造资源之间合作的概念由单个企业内部推广到了多个企业之间,在充分利用 Internet 技术的基础上,围绕某种核心产品,将多个企业组成“动态联盟”或“虚拟企业”的形式进行共同生产、共同获利。其实质上就是根据市场竞争的需求,按照协同自组织原理,将原本分散、混乱但又各具优势的多家制造企业通过相互之间的高效协作组合成有序度高的虚拟企业,以便提高企业的整体制造能力和综合市场竞争力。尽管如此,当制造系统规模变大,任务复杂时,分布所带来的各个控制实体间的巨量的信息通信量问题及过于强调自治所带来的局部优化与全局目标之间的冲突问题,目前尚未得到很好的解决,从而影响了分布式控制的进一步推广应用。

4) 混合式控制

合理的控制结构应该是递阶式与分布式控制的结合体,在总体上采用传统的递阶式的分层控制模式,而每一层中的控制实体则通过相互协商来实现分布式控制功能,各个层面的控制实体之间的协调则由上层控制实体来进行调控。在整个混合式控制结构中,上层对下层的控制作用仅是一种协调监督作用,层与层之间变现为一种松散的连接。这样的控制结构一方面可以保证传统的自下而上的信息反馈和自上而下的控制输出;另一方面也可以保证各个层面中的控制实体适当的智能性,通过在同一层中的交互协商,体现出控制系统的局部自治特性。

1.2.3 制造控制系统面临的问题

从制造系统控制结构设计和控制技术发展的角度来看,当今复杂多变的动态制造环境对制造系统提出的动态自适应性和自组织性问题也正是制造控制系统多年来所面临的问题。作为制造系统控制系统中的一项最重要的使能技术,控制结构及理论的研究对于现代制造系统尤为重要。

通过前面的分析可以看出,现代制造系统的规模日益庞大和复杂,其协调控制难度也更加困难。为了处理控制系统的复杂性和适应性,人们将最初的集中控制结构逐渐往“扁平化”的分布控制结构发展,更多地强调了控制系统功能的模块化、智能化与分布化。在稳定的运行环境或者有限变化的制造环境中,传统的递阶控制系统可以取得良好的控制性能,但当系统遇到各种不确定的偶发事件时,其刚性的系统结构将无法系统实时响应、快速重构的要求。而分布式控制由于控制实体往往具有较强的智能性和自治特性,在系统遇到各种偶发性事件时会表现出快速的响应性和良好的可靠性,但由于缺乏集中式优化的全局统筹决策,其全局优化目标和系统局部行为之间难以协调控制,因此,其系统的稳定性和可