



李怀祖 韩新民 主编
李宗斌 编著

先进制造管理丛书

先进制造中多色集合理论 的研究及应用



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

知识产权出版社
www.cnipr.com

先进制造管理丛书

先进制造中多色集合理论 的研究及应用

李怀祖 韩新民 主编

李宗斌 编著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
知识产权出版社
www.cnipr.com



内容提要

多色集合理论是近年来国际上提出的新的系统理论工具。本书系统地阐述了多色集合的基本理论、基本方法及其在先进制造领域的应用。

本书的读者为从事制造系统规划设计、产品设计、企业管理、企业信息化工程等工作的管理人员和工程技术人员,高等院校机械工程、工业工程、管理工程等专业的教师、研究生。本书适合作为博士生和硕士生的教学参考书。

选题策划: 阳 森 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip.sina.com; z_baolin@263.net

责任编辑: 阳 森 张宝林

文字编辑: 周 媛

图书在版编目 (CIP) 数据

先进制造中多色集合理论的研究及应用/李宗斌编著.

北京: 中国水利水电出版社: 知识产权出版社, 2005

(先进制造管理丛书/李怀祖, 韩新民主编)

ISBN 7-5084-3296-7

I. 先... II. 李... III. 系统理论—应用—机械制
造工艺 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 110836 号

先进制造管理丛书

先进制造中多色集合理论的研究及应用

李宗斌 编著

中国水利水电出版社 出版、发行 (北京市西城区三里河路 6 号; 电话: 010-68331835 68357319)
知 识 产 权 出 版 社 (北京市海淀区马甸南村 1 号; 电话、传真: 010-82000893)

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

北京市兴怀印刷厂印刷

787mm×1092mm 16 开 22.5 印张 466 千字

2005 年 11 月第 1 版 2005 年 11 月第 1 次印刷

印数: 0001—3100 册

定价: 39.00 元

ISBN 7-5084-3296-7

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题, 可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044, 电子邮件: sales@waterpub.com.cn)

总序

20 世纪后 20 年，消费者的价值观发生了结构性变化，呈现出日趋主体化、个性化和多样化的特点，不仅要求购置高质量、低成本和高性能的产品，而且希望产品（包括服务）具有满足其个人感受的性能。这使以产品为中心、以规模经济为竞争优势的大量生产方式遇到了新的挑战。而且，伴随着计算机技术，特别是网络化数字技术的发展，为制造系统的硬件、软件和脑件（人）的系统集成提供了生长环境，一种集基础制造、电子信息、新材料、新能源、环境与系统工程为一体的集成制造技术应运而生，通称为当代的先进制造技术。

先进制造技术，作为一项支持企业创新和时间竞争战略的关键技术，不断冲破旧系统的羁绊，正以一种崇尚技术创新和系统集成的价值理念，孕育着新的生产模式、生产系统和新技术体系。

溯源先进制造模式和系统的发展过程，20 世纪 70 年代的柔性制造，表现的重点是设备和技术的柔性；80 年代提出的计算机集成制造系统（CIMS）和后来发展的智能制造系统（IMS），以集成化和智能化为主要特征，体现自动化技术应用的广度和深度。目前该技术的集成化达及企业各个环节的综合自动化，包括生产管理、财务管理和人事管理等，柔性范畴则既涉及技术，又有管理。J. P. 活麦克在《改变世界的机器》一书中总结的精益生产模式，突出了“准时化”管理和人因的发挥，旨在努力消除一切浪费以获得最好的效益，增强员工的自主精神和责任感，使柔性范畴扩大到人员。被称为美国 21 世纪制造业竞争战略的“灵捷制造”，创造性地构建了企业动态

联盟——虚拟公司，灵活快速地对市场变化做出积极的响应，强调了组织的柔性，期望整个制造生产系统无论在技术、管理或是人员、组织上，都具备充分的柔性。至于全球网络化制造的新模式，则是通过网络的协调和动作，将遍布世界的制造厂和销售网点连成一体，合作竞争，建立起全球范围的生产和经营网络联盟，其柔性扩展到市场经营和供货环节，以此应对不确定的市场环境。

先进制造技术是一项系统集成技术。它从概念上超越了传统制造技术所限定的工厂、车间和生产过程边界，包括了市场需求、创新设计、工艺和过程、生产计划管理和监控、市场供给和服务等全过程，如面向装配的设计技术、产品全寿命维护技术都呈现系统的特点。同时又突出了过程集成，用信息和数字技术将设计、制造和物流进行过程综合，表现为 CAD/CAPP/CAM 以及 CRM、ERP、SCM 等技术的无缝集成趋势。

先进制造技术将工程技术与管理集成，重组了学科的架构。例如并行制造技术突出产品全过程同步规划和实施，强调了组织的团队结构以及设计制造的交互。又如虚拟制造突出了三维虚拟现实和多媒体技术结合，崇尚虚实制造空间的集成，将建模、仿真及工艺过程整合为一体，以减少产品创新过程中原型机实现的周期并节约其研发成本。先进制造技术还是一项有利于环保的技术。例如绿色设计技术，突出了在产品生产过程考虑产品全生命周期无污染、资源低耗和可回收、重新利用等特点。

我国尚处在一个工业化进程中，发展和应用先进制造技术是实现新型工业化道路的重要举措，已渐成共识。毫无疑问，我国发展和应用先进制造技术需要继承和创新，几年来，一批学者结合国情，努力探索，颇有成效。为此，欣喜地将他们的研究成果编撰并成册出版，愿能为我国制造业的可持续发展尽微薄之力。

李怀祖 韩新民

2005 年 8 月

前言

前 苏联从 20 世纪 60 年代开始,在工艺设计自动化领域,在研究描绘对象的递阶系统的过程中,取得了重要的理论及实践成果。在 20 多年工作的基础上,1988 年,俄罗斯著名的飞行器设计与制造专家巴甫洛夫教授 (V. V. Pavlov) 提出了多色图的概念,1995 年提出了多色集合的概念,2002 年提出了多色集合理论 (Theory of Polychromatic Sets, 简称 TPS) 的体系结构。

多色集合理论和方法在前苏联和俄罗斯企业界,特别在航空、航天企业中获得了广泛应用。俄罗斯的最新实践和研究表明,基于多色集合理论建立的产品全寿命周期工程系统的数学模拟方法可以显著提高装备制造业的生产效率和质量。

目前,俄罗斯专家正在努力将多色集合理论应用于 CALS (Continuous Acquisition and Life-cycle Support) 系统之中,使之成为俄罗斯 CALS 技术的重要基础理论之一。

多色集合理论是一种新的信息处理数学工具。目前欧美国家的学者对这一理论了解较少。

对我国来说,多色集合理论既是新的,又是非常有发展前途的信息处理数学工具。由于诞生时间不长,进一步研究和应用的空间很大。

多色集合理论具有很多独有的特点。可以预计的是,多色集合的理论、方法、思想将会在复杂系统的建模和分析研究中提供新的思路,会在并行工程和虚拟制造的产品建模、过程建模、性能分析、过程优化等关键技术中发挥重要作用,也会在计算机科学、人工智

能、经济学、管理科学等学科得到重要的应用。

巴甫洛夫教授曾多次应邀来华讲学，作者与巴甫洛夫教授建立了良好的合作关系。

从1999年开始至今，在国家自然科学基金资助下，我们已对多色集合的理论和方法，对多色集合理论在制造系统建模、机械加工工艺规划系统建模和算法、机械装配工艺规划建模和算法、板材冲压工艺建模和算法、机械产品概念设计信息建模和推理算法、公差信息建模和算法、工作流建模和算法、UML+TPS等方面的应用进行了研究，取得了理论和应用上的一批创新成果，有了较好的工作积累。

让更多的人了解和研究多色集合理论，作者写了这本书，希望能引起大家对多色集合理论研究和应用的兴趣。

本书涉及的有关研究工作，得到国家自然科学基金资助，在此表示衷心感谢。

作者十分感谢李怀祖教授。没有李教授的指导、帮助和鼓励，本书是难以顺利完成的。

研究生宋宸、唐凤鸣、戴文娣、高峰、李重午、刘伟、唐永刚、刘君、李善仓、张洪涛和本科生冯辉、李敏、赵苏晋、张宁超对多色集合理论的研究及其应用做了大量的工作。他们的研究工作成果在本书中得到了体现。

全书共分17章。

第1章介绍多色集合的研究概况，以及本书章节安排。

第2章介绍了先进制造技术的发展趋势和建模技术的概况。

第3~6章对本书的基本理论进行了系统地阐述。第7~13章介绍了多色集合理论在先进制造领域中的应用成果。

第14章阐述了几种设计方案评估的方法。

第15章和第16章介绍了虚拟现实技术在加工中心概念设计和工业机械手概念设计中的应用。

第17章介绍了UML和统一建模方法，指出UML和多色集合理论相结合会使二者都获得发展。这是一个很有前景的研究方向。

本书力求易读，对于某些难理解的概念、方法和结果，尽力做

出直观的解释，并配以图形说明。

本书的读者对象为制造企业从事制造系统规划设计、产品设计、企业管理、企业信息化工程等工作的管理人员和工程技术人员，高等院校机械工程、工业工程、管理工程等专业的教师、研究生，从事相关研究的科技人员。本书也适合作为上述专业的博士生和硕士生的教材。

制造系统工程是一门正在迅速发展的综合性交叉学科。制造系统属于复杂系统，它的建模、性能分析和优化涉及面广，技术难度大，限于作者水平，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

李宗斌于西安交通大学逸夫科学馆

2005 年 9 月

目 录

总序

前言

第1章	绪论	1
第2章	先进制造系统的建模技术	5
2.1	建模技术研究的背景 /	5
2.2	建模技术研究的应用 /	6
2.3	建模技术研究的现状 /	8
2.4	建模的目的和方法 /	9
2.4.1	建立系统模型的目的 /	9
2.4.2	数学模型的优点 /	9
2.4.3	制造系统建模 /	10
2.5	多色集合理论研究简介 /	11
2.6	本章小结 /	11
第3章	多色集合理论	12
3.1	多色集合的概念 /	12
3.2	个人着色和统一着色 /	12
3.3	个人颜色和统一颜色的关系 /	13
3.4	多色集合的数学表达式 /	14
3.5	在多色集合中着色的逻辑运算 /	14
3.6	统一颜色的存在和个人颜色之间的关系 /	14
3.7	析取多色集合 /	15
3.8	合取多色集合 /	16
3.9	示例分析 /	16
3.10	本章小结 /	17

第 4 章	多色图	18
4.1	多色图的概念	/ 18
4.2	多色图的组成	/ 18
4.3	多色图中的运算	/ 19
4.3.1	在联系的析取形式时多色图中路径的运算	/ 20
4.3.2	在联系的合取形式时多色图中路径的运算	/ 21
4.4	示例分析	/ 21
4.5	本章小结	/ 23
第 5 章	多色集合模糊数学模型的研究及其在机械产品概念设计中的应用	24
5.1	多色集合模糊数学模型的研究	/ 24
5.1.1	模糊数学模型的建立	/ 26
5.1.2	贴近度函数的建立	/ 27
5.2	方案搜索算法	/ 28
5.2.1	设计的准则和原理	/ 28
5.2.2	在多色图 $G = (P, C)$ 中计算顺序路径 μ_i	/ 28
5.2.3	在联系的析取形式时多色图路径的运算	/ 29
5.2.4	在联系的合取形式时多色图路径的运算	/ 30
5.3	方案选择算法	/ 30
5.4	寻求合理产品设计方案的步骤	/ 31
5.5	示例分析	/ 32
5.6	本章小结	/ 32
第 6 章	多色集合理论在机械制造工艺系统建模分析中的应用	34
6.1	对象模型的建立	/ 34
6.1.1	围道的概念	/ 34
6.1.2	PS 元素的逻辑表示方法	/ 36
6.1.3	对象模型的建立	/ 37
6.2	加工系统模型的应用	/ 40
6.2.1	应用领域	/ 40
6.2.2	示例分析	/ 41
6.3	产品的加工仿真	/ 44
6.3.1	析取多色集合 $P \vee S$ 及析取多色图 $P \vee G$ 模型	/ 44
6.3.2	合取多色集合 $P \wedge S$ 及合取多色图 $P \wedge G$ 模型	/ 46
6.3.3	企业加工的可能性	/ 47

6.3.4	示例分析	/ 48
6.4	本章小结	/ 50
第7章	CAPP系统信息建模与工艺决策方法研究	…… 51
7.1	概述	/ 51
7.1.1	研究背景及意义	/ 51
7.1.2	CAPP研究概况	/ 53
7.1.3	本章的主要内容	/ 54
7.2	零件信息模型与资源信息模型研究	/ 54
7.2.1	EER模型概述	/ 55
7.2.2	零件信息EER模型	/ 56
7.2.3	制造资源信息EER模型	/ 60
7.3	基于多色集合理论和模糊评判的加工工序方案规划	/ 62
7.3.1	基于多色集合理论的零件加工工序方案的确定	/ 62
7.3.2	加工工序方案模糊优选	/ 66
7.4	基于遗传算法的零件加工工艺路线决策	/ 70
7.4.1	工艺路线决策的现状和问题	/ 71
7.4.2	遗传算法概述	/ 72
7.4.3	排序遗传算法的相关问题	/ 73
7.4.4	排序遗传算法的作用过程	/ 74
7.4.5	示例分析	/ 75
7.4.6	排序遗传算法总结	/ 80
7.5	系统设计与实现	/ 81
7.5.1	系统体系结构和工作流程	/ 81
7.5.2	系统信息模型	/ 82
7.5.3	系统实现的软硬件平台	/ 84
7.5.4	系统主要功能模块演示	/ 84
7.5.5	工艺过程输出	/ 88
7.6	本章小结	/ 89
第8章	基于多色集合理论的产品装配序列规划系统的研究与开发	…… 91
8.1	概述	/ 91
8.1.1	装配序列规划研究现状及不足	/ 92
8.1.2	研究的目的及意义	/ 94
8.1.3	本章的主要内容	/ 94

8.2	基于多色集合的产品装配信息建模	/ 95
8.2.1	产品装配信息模型	/ 95
8.2.2	现有的几种装配模型	/ 97
8.2.3	基于多色集合理论的产品装配信息模型	/ 98
8.2.4	装配关系中的约束问题	/ 101
8.3	产品拆分图和组装图的研制	/ 103
8.3.1	产品拆分图与组装图的概念	/ 103
8.3.2	拆分图和组装图的生成	/ 104
8.3.3	研制组装图的意义	/ 112
8.4	系统设计与实现	/ 114
8.4.1	系统功能模型	/ 114
8.4.2	系统算法流程图	/ 115
8.4.3	系统信息模型	/ 115
8.4.4	系统实现	/ 115
8.5	本章小结	/ 118

第9章 基于多色集合理论的冲压工艺过程建模

研究		120
9.1	概述	/ 120
9.1.1	冲压工艺系统 CAPP 研究的现状	/ 120
9.1.2	研究的目的及意义	/ 121
9.1.3	本章的主要内容	/ 121
9.2	冲压工艺简介	/ 122
9.2.1	冲压工艺概述	/ 122
9.2.2	冲裁	/ 124
9.2.3	弯曲	/ 126
9.2.4	拉深	/ 127
9.2.5	成形	/ 127
9.2.6	辅助加工	/ 128
9.2.7	冲压用材料	/ 129
9.2.8	工艺性分析	/ 130
9.3	基于多色集合的冲压工艺建模	/ 130
9.3.1	冲压工艺的信息模型	/ 130
9.3.2	基于多色集合的冲压工艺建模	/ 131
9.4	系统设计	/ 133
9.4.1	系统实现步骤	/ 133

9.4.2	系统算法流程图	/ 134
9.5	系统实现	/ 134
9.5.1	分析零件提出加工要求	/ 135
9.5.2	利用开发的软件系统逐步求得最终结果	/ 136
9.5.3	软件系统的一些其他说明	/ 139
9.6	本章小结	/ 139
第 10 章	基于多色集合理论的夹具概念设计过程	
	建模	141
10.1	概述	/ 141
10.1.1	研究背景	/ 141
10.1.2	研究的目的及意义	/ 142
10.1.3	本章的主要内容	/ 143
10.2	基于多色集合的工装概念设计建模	/ 143
10.2.1	建模思路	/ 143
10.2.2	工装概念设计模型	/ 143
10.3	基于多色集合理论的夹具设计	/ 144
10.3.1	确定图 $G = (B, C)$ 中的节点	/ 145
10.3.2	确定图 $G = (B, C)$ 中边关系并做出元素关联图	/ 145
10.3.3	建立围道矩阵和对应的逻辑矩阵	/ 146
10.3.4	为图 $G = (B, C)$ 中节点着色	/ 147
10.3.5	找出关联图中所有从头节点到尾节点的路径	/ 148
10.3.6	找出满足约束条件的所有路径	/ 149
10.3.7	确定所有的结构图元素组	/ 150
10.3.8	确定所有满足约束条件的结构图元素组	/ 150
10.3.9	确定最优解	/ 152
10.4	系统设计与实现	/ 152
10.4.1	算法流程	/ 152
10.4.2	系统实现	/ 155
10.5	本章小结	/ 162
第 11 章	基于多色集合理论的加工中心概念设计	
	方法研究	164
11.1	概述	/ 164
11.1.1	概念设计的概念	/ 164
11.1.2	概念设计的重要性	/ 164

11.1.3	概念设计的关键技术	/ 165
11.1.4	概念设计的关键步骤和存在的问题	/ 166
11.1.5	研究的目的是和意义	/ 168
11.2	基于多色集合理论的加工中心概念设计方法	/ 169
11.2.1	基本原理	/ 169
11.2.2	贴近度函数的建立	/ 170
11.2.3	概念设计的步骤	/ 171
11.2.4	钻铣镗类加工中心概念设计的方法	/ 171
11.3	系统实现	/ 177
11.3.1	系统的体系结构	/ 177
11.3.2	系统基础数据维护	/ 178
11.3.3	基于多色集合理论的加工中心概念设计方案求解	/ 181
11.4	系统应用示例	/ 182
11.4.1	主机方案设计	/ 182
11.4.2	换刀系统方案设计	/ 184
11.4.3	满足条件的加工中心概念设计方案	/ 184
11.4.4	方案评估	/ 184
11.5	本章小结	/ 184
第 12 章	工业机械手概念设计中的关键技术研究	186
12.1	概述	/ 186
12.1.1	概念设计中的新方案生成问题	/ 186
12.1.2	本章的主要内容	/ 186
12.2	基于 PS 的机械手概念设计建模及推理机制	/ 187
12.2.1	手部的信息建模和推理	/ 189
12.2.2	腕部的信息建模和推理	/ 192
12.2.3	臂部的信息建模和推理	/ 193
12.2.4	方案贴近度的建立	/ 193
12.2.5	工业机械手概念设计流程	/ 195
12.2.6	应用示例分析	/ 196
12.3	基于 TRIZ 理论的新方案生成方法研究	/ 197
12.3.1	TRIZ 理论概述	/ 197
12.3.2	TRIZ 理论解决冲突问题的思维过程	/ 198
12.3.3	TRIZ 理论解决冲突的相关技术	/ 198
12.3.4	工业机械手概念设计中新方案的生成	/ 201

- 12.3.5 示例分析 / 205
- 12.4 基于结构推理的方案元机构创新 / 207
 - 12.4.1 机构创新设计过程模型 / 207
 - 12.4.2 结构推理过程中的相关技术 / 208
 - 12.4.3 集成功能推理和结构推理的概念设计过程 / 211
 - 12.4.4 工业机械手方案元机构创新示例 / 212
- 12.5 系统实现 / 218
 - 12.5.1 系统功能结构 / 218
 - 12.5.2 系统基础信息维护 / 219
 - 12.5.3 概念设计方案求解 / 222
 - 12.5.4 创新设计 / 222
- 12.6 本章小结 / 224
- 附录 1: 标准冲突参数 / 225
- 附录 2: 发明原理 / 226

第 13 章 基于多色集合理论的概念设计产品信息

建模和方案推理技术的研究 231

- 13.1 概述 / 231
- 13.2 概念设计中的功能方法树模型改进和约束问题分析 / 232
 - 13.2.1 功能方法树模型的改进 / 232
 - 13.2.2 概念设计中的约束问题分析 / 235
- 13.3 产品信息模型的形式化描述 / 238
 - 13.3.1 多色集合递阶结构树 / 238
 - 13.3.2 约束问题在递阶结构树中的表达 / 239
 - 13.3.3 概念设计产品信息模型的形式化描述 / 239
 - 13.3.4 方案推理过程的实现 / 241
 - 13.3.5 基于多色集合的产品概念设计一般步骤 / 243
- 13.4 隔振系统概念设计 / 245
 - 13.4.1 隔振系统概述 / 245
 - 13.4.2 隔振系统概念设计过程 / 245
 - 13.4.3 方案元库 / 249
 - 13.4.4 求解示例 / 250
- 13.5 系统设计与实现 / 252
 - 13.5.1 系统体系结构 / 252
 - 13.5.2 系统信息模型 / 253

	13.5.3 系统实现 / 254	
	13.6 本章小结 / 258	
第 14 章	方案评估研究	260
	14.1 设计方案的一种综合评估方法 / 260	
	14.1.1 建模原理 / 260	
	14.1.2 模糊评判的基本要素 / 262	
	14.1.3 加工中心方案的评估 / 262	
	14.2 利用商用软件对概念设计方案进行综合评判 / 264	
	14.3 钻铣镗类加工中心的方案评估研究 / 270	
	14.3.1 方案评估和优选算法 / 270	
	14.3.2 基于模糊规则的神经网络的建立 / 272	
	14.3.3 应用示例 / 275	
	14.4 本章小结 / 278	
第 15 章	虚拟现实技术在加工中心概念设计中的应用	279
	15.1 概述 / 279	
	15.1.1 研究背景及意义 / 279	
	15.1.2 概念设计的研究现状 / 280	
	15.1.3 研究的主要内容 / 280	
	15.2 利用 3DS MAX 实现钻铣镗类虚拟方案 / 281	
	15.2.1 虚拟现实技术 / 281	
	15.2.2 3DS MAX 简介 / 282	
	15.2.3 基于 3DS MAX 的三维系统开发 / 283	
	15.3 钻铣镗类加工中心虚拟方案的实现 / 284	
	15.3.1 虚拟方案元库效果图的实现 / 284	
	15.3.2 虚拟方案元库元件的组合调用 / 285	
	15.4 本章小结 / 287	
第 16 章	虚拟现实技术在工业机械手概念设计中的应用	288
	16.1 概述 / 288	
	16.1.1 研究的目的及意义 / 288	
	16.1.2 本章的主要内容 / 288	
	16.2 概念设计 / 289	
	16.2.1 基本概念 / 289	
	16.2.2 概念设计的特性 / 289	

16.2.3	概念设计的方法	/ 289
16.3	虚拟现实技术在概念设计中的应用	/ 290
16.3.1	虚拟现实技术	/ 290
16.3.2	虚拟概念设计	/ 290
16.3.3	本章所采用的虚拟现实技术	/ 291
16.4	工业机械手概念设计的三维虚拟环境的选择	/ 292
16.4.1	SolidWorks 简介	/ 292
16.4.2	SolidWorks 和 3DS MAX 软件的配合使用	/ 294
16.5	工业机械手的三维虚拟环境概念设计	/ 295
16.5.1	工业机械手简介	/ 295
16.5.2	机械手方案元库的建模	/ 295
16.5.3	机械手虚拟方案元库	/ 305
16.6	本章小结	/ 310
第 17 章	UML 和多色集合理论	312
17.1	UML 概述	/ 312
17.1.1	面向对象建模方法	/ 312
17.1.2	应用 UML 的意义	/ 313
17.1.3	可视化建模工具 Rose	/ 314
17.1.4	UML 的建模过程	/ 315
17.2	运用 UML 进行库存管理系统模型设计	/ 317
17.2.1	库存管理系统需求模型的建立	/ 317
17.2.2	库存管理系统对象模型的建立	/ 322
17.3	多色集合和 UML 的结合	/ 327
17.4	本章小结	/ 330
参考文献		331
附录	英文缩写及主要符号释义对照表	342