



清华大学技术专著

---

# 制造信息学

---

张伯鹏 著

---



清华大学出版社

清华大学学术专著

---

---

# 制造信息学

---

张伯鹏 著

---



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

北京

## 内 容 简 介

制造信息学是制造工程中的一门新学科,是制造业信息化和先进制造技术的工程科学基础之一。基于不确定推理的制造信息度量与合成是制造信息学的出发点和基础,其特点是不仅看到信念会产生信息,重要的是信息还会改变信念。本书主要阐述有关制造信息的有效表述、合理配置和运作的规律性内容。全书由制造信息学的工程背景、工程科学基础、工程应用和与制造工程科学的关系等4篇共21章组成,主体是第2篇共有10章,从本质和属性、全面质量管理、制造的信息原理、制造信息的度量、物化、自组织、制造信息差、系统与信息、技能信息、制造信息的合成等10个方面阐述了制造信息学的工程科学基础。本书可供从事先进制造技术、制造业信息化与制造工程技术研究、开发与应用的工程科技人员参考,也可以作为高等院校有关专业的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

制造信息学/张伯鹏著. —北京:清华大学出版社,2003

(清华大学学术专著)

ISBN 7-302-06288-9

I. 制… II. 张… III. 机械制造—信息学 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007720 号

出 版 者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

[http:// www.tup.com.cn](http://www.tup.com.cn)

责任编辑:张秋玲

版式设计:韩爱君

印 刷 者:清华大学印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:25.5 字数:417 千字

版 次:2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-06288-9/TH·108

印 数:0001~2000

定 价:79.00 元



## 作者简介

---

张伯鹏 清华大学教授、博士生导师。研究方向为制造工程与科学。多年从事制造信息学、数字信息化制造、制造工程系统、制造原理、机器人学和人机智能控制系统等领域的研究工作，是我国第一代数控机床研究开发主要技术负责人之一。率先将控制和智能控制融入机械工程，较早从事加工刀具监控技术的研究开发，在国内较早倡议并从事步行机器人、装配机器人和机器人化机床的研究开发。先后首创大型数控机床新型四足步行进给系统、直线和平面绝对零位系统设计和制备新方法、自适应地形变化的双三足步行装置、机器人化装配加工中心等。持有多项国家发明专利。承担过大型工程项目。获国家级奖励3项和部委级奖励多项。

# 国家自然科学基金资助重大项目

(资助号 59990471)

# Preface

Manufacturing Informatics is a new discipline of manufacturing engineering, and is one of the engineering scientific foundation of the application of manufacturing information technology and advanced manufacturing technology. The starting point and the foundation of manufacturing informatics are measure and combination of manufacturing information based on undetermined deduction, the distinguishing feature is not only belief can produce information should be noticed, but more important is information could reform belief also. Fundamental contents concerning effective description, rational disposal and operation of manufacturing information are explained in this monograph. This monograph consists of 4 parts with 21 chapters, including engineering background, engineering scientific foundation, engineering application and relation to manufacturing engineering science. The second part is the main part of the monograph which includes 10 chapters, in this part engineering scientific foundations of manufacturing informatics are explained from 10 aspects including essence and attribute, total quality control, information principal of manufacturing, measure of manufacturing information, materialization, self-organization, difference of manufacturing information, system and information, skill information, combination of manufacturing information etc. This monograph could be used as reference for experts engaged in research, development and application of advanced manufacturing technology, application of manufacturing information technology and manufacturing engineering technology, and also could be used as reference book in the related discipline for universities and institutes.

# 前 言

制造是需求与效益驱动的社会性人为产出活动。

有目的的行为称为活动,制造活动是以需求和经济、社会效益为目的的社会性人为生产行为。制造系统是实施制造活动的组织基础,在制造系统中配置和流动着劳务、资金、物料、装备、信息、能量、技术、时间、组织和制度等资源,其中制造信息既是支配性的使能量又是事物本体和认知主体的表述,它在制造活动中的作用至关重要。

在人类漫长的历史发展中,使用工具、制造工具进行产品制造,一直是人类为了在自然界中求得生存和发展的基本生产活动之一,又是促进人类社会进步的关键性活动。

回顾历史,直到 18 世纪中叶产业革命以前,制造都是手工作业和作坊式的生产。

产业革命中诞生的能源机器(蒸汽机)、作业机器(纺织机)和工具机器(机床),为制造活动提供了新能源、新技术手段,并开拓了产品市场。此后,作坊式生产开始转向制造厂生产。经过 100 多年的技术累积和市场开拓,到 19 世纪末制造业已初步形成,主要生产方式是机械化加电气化的批量生产。20 世纪上半叶,以机械技术和机电自动化技术为基础的制造业的生产力取得了空前的发展,以大批大量生产为主的机械制造业则是制造业的主体。在整个上述历史阶段,由于缺乏信息活动自动化的手段,所有制造过程中的制造信息活动,包括制造信息的产生、获取、传递、存储、处理、转换、物化、知化、利用和管理等,都主要是由人和人在当时的技术手段辅助下承担的,市场和生产力发展水平以及技术手段的局限性,使得制造信息的重要性还没有被凸显出来。

20 世纪中叶在信息技术领域出现了两个重要事件,一是 1946 年诞生了用于信息处理自动化的计算机,一是 1948 年推出了不考虑语义的通信理论即信息论(Wiener 1948, Shannon 1949)。值得注意的是,这两个重要事件对制造业、制造技术和制造学科的影响是很不一样的。

首先是计算机诞生后仅 2 年左右,就在产业的迫切需求首先是飞机制造业对大型(如飞机蒙皮壁板)和异型(如飞机梁架)零件的小批量、多品种、

高效加工的迫切需求推动下,开始成功地用于控制制造装备,诞生了数字控制(NC)机床,开数字化制造之先河。在美国政府资助下,几年内 NC 就在飞机制造业得到推广应用。不久计算机又开始用于辅助编制数字控制机床的加工程序,推出了自动编程工具 APT。此后 CNC,DNC,FMC,FMS,CAX,MIS,MRP,MRPII,ERP,PDM,web-M 等数字化制造技术的开发研究陆续启动并得到应用。到 20 世纪末历经 50 年的发展,计算机和网络技术的应用已经给制造业、制造技术和制造学科带来了重大变革和巨大效益,数字化制造已逐渐成为主流制造技术。

与此截然不同的是在同一历史时期,信息论对制造业、制造技术和制造学科所产生的影响却很有限,究其原因可能要从信息论和制造活动两方面去找。

从信息论方面看,信息论包括工程信息论和数学信息论,是关于通信的基础理论。在不考虑语义的前提下,信息论用基于有穷概率场的熵定义了信息量,讨论了离散和连续信道的信道容量、编码和噪声等问题。信息论是通信技术的理论基础,它的诞生在通信领域具有里程碑意义。在此后若干年里,在自然科学领域对信息论的应用进行了较多的探讨(Brillouin 1956, 1957,Kochen 1958,Stanley-Jones 1960)。但是在制造工程领域,信息论的概念是有用的,但是囿于信息论方法的特点,所取得的成就则较为有限(Chang 1960,Suh 1990)。

从制造活动方面看,在信息论诞生后的 50 年里,特别是近 30 年来,制造业面对的是难以预测的市场变化和买方市场、迅速发展的信息技术、信息技术在制造业的应用迅速扩大、制造技术与信息技术不断融合,以及由此造成的制造信息的作用日益凸显。在产业/知识经济和数字化时代的大环境里,制造业界和学术界都日益认识到制造信息的重要性,都认为有必要从开发应用制造信息技术和研究制造信息基础理论两个互为支撑的方面开展工作。从 20 世纪 50 年代末到 90 年代初的 30 余年中,国内外多次探索了经典信息论方法在机械制造领域的应用(Jacobson 1959,张伯鹏 1982,1991,1994,师汉民 1993)。从这些研究结果可以明显看出,经典信息论以其固有的前提和方法,面对和认知主体密不可分且学科跨度很大的制造工程领域,所能解决的问题是有限的,需要扩大视野探索解决制造信息问题的其他有效途径。

到 20 世纪 90 年代初问题已经很清楚,那就是先进的制造信息技术应用和落后的制造信息基础理论并存的这种不相称现象,显著地制约着数字

化制造技术的进一步发展及其有效利用。

如上所述,尽管制造信息是配置和流动在制造系统中的众多资源之一,而且它是支配性的使能量,其作用十分关键。但是与此同时,迄今业界和学术界对制造信息的本质、属性、表述、配置和运作的基本规律却知之不多。在对制造活动中的物料、能量的配置、流动和利用进行了多年研究开发后,制造信息已成为当代制造工程学科中最具有挑战性的研究对象,迫切需要开展有关制造信息的基础性研究工作。

作者多年从事制造工程中信息与控制的应用基础性研究工作,这项“制造信息学基础”研究工作经过专家论证于1998年被列入国家自然科学基金重大项目(项目编号:59990471)。本书是作者在数年预研基础上承担1999年至2003年为期4年的国家自然科学基金重大项目子课题研究工作的归纳和总结。

“制造信息学”作为制造工程领域的一门新学科,它关注的是有关制造信息的表述、配置和运作的规律性内容,它是制造业信息化和先进制造技术的科学基础之一。

制造信息学是一门工程科学,主要阐述制造信息的合理表述、优化配置及其有效运作等问题。经典信息论的出发点和基础是用基于有穷概率场的熵的减量来定义信息量。尽管制造信息学和经典信息论不同,面对的是需求和效益驱动的社会性人为产出型的制造工程领域,但是基于不确定性推理的制造信息度量与合成同样是制造信息学的出发点和基础,其特点是不仅要看到信念产生信息,更重要的是还要看到信息会改变信念。需要指出的是由于信念涉及认知主体,显然在大脑思维还远未被认识清楚以前,有关信念的定义只能是领域性的和阶段性的。

本书是一本工程科学著作,全书分4篇共有21章:

第1篇 制造信息学的工程背景

第2篇 制造信息学的工程科学基础

第3篇 制造信息学的工程应用

第4篇 制造工程科学与制造信息学

全书的主体是第2篇,由5~14章共10章组成,在这一篇前面介绍了制造信息学的工程背景,在其后则阐述了制造信息学的工程应用以及它与制造工程科学的关系。

本书第10章中图10-21仿真结果及其工业比对是由博士研究生赵大泉完成的。第13章13.4节制造技能传递过程中的学习、演练与实施研究

是张越姮完成的。第 13 章有关典型制造技能的 13.6.3 节中,车门 2 人装配案例研究是博士研究生赵奔作的。第 17 章 17.3 节基于网络的车削工艺参数规划实验系统研究工作是博士研究生杨小明完成的。第 18 章中绝对零位系统的计算机仿真是硕士研究生张越成完成的。参与第 19 章中机器人化加工中心样机研制的有徐家球、郑力和博士研究生孟威、赵大泉、舒苏东等。

在本项研究工作的论证、立项和研究过程中,得到华中科技大学熊有伦院士、李培根教授,西安交通大学汪应洛教授、谢友柏院士、孙林岩教授,中国机械工业联合会范宏才教授,北京理工大学宁汝新教授,南京航空航天大学朱剑英教授,清华大学金国藩院士、柳百成院士、田芊教授、郑力教授、段广洪教授、陈恩教授、郁鼎文副教授,北京机床研究所盛伯浩教授级高工,北方交通大学查建中教授,中国科学院沈阳自动化所薛劲松教授等的支持和帮助,谨在此表示衷心的感谢。

作者感谢国家自然科学基金重大项目的资助和国家自然科学基金委员会工程与材料科学部黎明副主任、机械学科雷源忠主任对本项研究工作的支持。

本书的出版获得清华大学出版基金的资助,在出版过程中得到清华大学出版社和理工第一编辑室主任张秋玲副教授等的支持,在此一并致谢。

制造信息学作为制造工程领域中的新学科,提出有待解决的问题远多于已经解决的问题,制造信息学的研究和应用对制造业界和学术界既是挑战又是机遇,本书只是这方面工作的初步尝试,目的是抛砖引玉。囿于作者的学术水平和能力,书中不妥之处在所难免,还望读者不吝指教。

## 参考文献

- Brillouin L. Science and Information Theory. New York: Academic Press, 1956
- Brillouin L. Mathematics, Physics, and Information. Information and Control, 1957, 1: 1~5
- Chang S S L. Shannon's Theory and Feedback Systems, Trans. ASME, J. Basic Engg., 1960, 3: 46~50
- Jacobson H. The Informational Content of Mechanisms and Circuits. Information and Control, 1959, 2(3): 285~296
- Kochen M, Galanter E H. The Acquisition and Utilization of Information in Problem Solving and Thinking, Information and Control, 1958, 1: 267~288

Shannon C E. The Mathematical Theory of Communication. Urbana; The University of Illinois Press, 1949

Stanley-Jones D and K. The Kybernetics of Natural Systems. Oxford; Pergamon Press, 1960

Suh P Nam. The Principle of Design. New York; Oxford University Press, 1990

Wiener N. Cybernetics. New York; The Technology Press, 1948

师汉民,杨叔子等. 试论制造观的更新与变革. 机械科技,1993,10;3~7

张伯鹏. 控制工程基础. 北京:机械工业出版社,1982

张伯鹏. 机电智能控制工程. 北京:机械工业出版社,1991

张伯鹏. 制造系统中知识信息与人的作用. 机械工程学报,1994,30(5): 61~64

张伯鹏. 制造信息学基础研究. 课题1子课题3. 支持产品创新的先进制造技术中的若干基础研究项目(59990471). 国家自然科学基金重大项目任务书,1998年12月

# 目 录

|            |   |
|------------|---|
| 前言 .....   | 3 |
| 参考文献 ..... | 6 |

## 第 1 篇 制造信息学的工程背景

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1 绪论 .....                      | 3  |
| 2 制造与信息 .....                   | 9  |
| 2.1 制造物质活动 .....                | 10 |
| 2.2 制造信息活动 .....                | 12 |
| 2.3 制造控制活动 .....                | 14 |
| 2.4 制造活动的信息特征和制造信息学 .....       | 15 |
| 参考文献 .....                      | 18 |
| 3 制造工程中的信息技术 .....              | 19 |
| 3.1 NC/CNC/DNC 技术和工业机器人技术 ..... | 19 |
| 3.2 FMC/FMS 技术 .....            | 20 |
| 3.3 CAD/CAPP/CAM/CAE 技术 .....   | 20 |
| 3.4 面向制造的设计的信息特点 .....          | 22 |
| 3.5 产品信息交换规范化技术的研究开发及其应用 .....  | 23 |
| 3.6 管理信息系统和数据库 .....            | 24 |
| 3.7 制造资源计划——MRPII .....         | 24 |
| 3.8 集成制造和制造信息集成 .....           | 25 |
| 3.9 产品数据管理的信息特点 .....           | 26 |
| 3.10 网络化制造的信息特点 .....           | 27 |
| 参考文献 .....                      | 29 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 4 工程信息论方法用于制造信息研究      | 30 |
| 4.1 工程信息论在机械制造工程中的应用研究 | 31 |
| 4.1.1 产品设计信息的量化        | 31 |
| 4.1.2 工艺设计信息的量化        | 33 |
| 4.2 公理化设计中的信息公理        | 35 |
| 参考文献                   | 36 |

## 第2篇 制造信息学的工程科学基础

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 5 制造信息的本质和属性              | 41 |
| 5.1 制造信息的本质               | 41 |
| 5.1.1 制造信息的表述             | 43 |
| 5.1.2 制造信息是物质的基本属性        | 44 |
| 5.1.3 制造信息不等同于意识          | 44 |
| 5.1.4 制造信息难以有统一的量化标准      | 44 |
| 5.1.5 制造信息的支配性作用          | 44 |
| 5.1.6 实现制造信息支配性作用的中间环节    | 46 |
| 5.1.7 制造信息内容的不变与可变性       | 47 |
| 5.1.8 制造信息的产出             | 48 |
| 5.1.9 制造信息的流通和不流通         | 48 |
| 5.1.10 制造信息的可处理、可干扰性和传递递减 | 49 |
| 5.1.11 制造信息的累积和重复         | 50 |
| 5.1.12 制造信息的复制和复制递减       | 51 |
| 5.1.13 制造信息的时效性           | 51 |
| 5.1.14 制造信息的创新            | 52 |
| 5.1.15 信息、结构和组织           | 52 |
| 5.1.16 信息与控制在时间轴上的不对称性    | 53 |
| 5.2 制造信息的属性               | 53 |
| 5.2.1 制造信息的时空属性           | 53 |
| 5.2.2 制造是信息驱动的            | 54 |
| 5.2.3 制造信息是取之不尽的资源        | 54 |
| 5.2.4 制造信息是创造价值的源泉        | 54 |
| 5.2.5 制造信息是制造决策的依据和产出     | 55 |

|          |                          |           |
|----------|--------------------------|-----------|
| 5.2.6    | 供决策用的制造信息要适量·····        | 55        |
| 5.2.7    | 制造信息投入可能不受收益递减原则的约束····· | 56        |
| 5.2.8    | 重要的是制造信息/资本转化机制·····     | 56        |
| 5.2.9    | 制造信息使制造企业进化加快·····       | 56        |
| 5.2.10   | 制造信息的复杂性·····            | 56        |
| 5.2.11   | 制造信息的物化和转化·····          | 57        |
| 5.2.12   | 制造信息的预置及其可重构·····        | 57        |
| 5.2.13   | 制造技能信息·····              | 59        |
| 5.3      | 制造信息的类型·····             | 61        |
|          | 参考文献·····                | 62        |
| <b>6</b> | <b>制造信息的全面质量管理·····</b>  | <b>64</b> |
| 6.1      | 制造信息的用途和制造信息的质量·····     | 66        |
| 6.2      | 制造信息的质量变量及其评估·····       | 69        |
| 6.2.1    | 制造信息本体的质量变量组·····        | 70        |
| 6.2.2    | 涉及用户目的和能力的制造信息质量变量·····  | 70        |
| 6.2.3    | 涉及信息运作环境的制造信息质量变量·····   | 71        |
| 6.3      | 制造决策质量和决策变量的质量·····      | 73        |
| 6.4      | 制造信息质量的现状和重要性·····       | 74        |
| 6.5      | 制造信息的全面质量管理·····         | 76        |
| 6.5.1    | 特点·····                  | 76        |
| 6.5.2    | 实施步骤·····                | 77        |
| 6.5.3    | 准备工作·····                | 78        |
| 6.6      | 高质量决策的信息条件·····          | 79        |
| 6.7      | 提高制造信息质量是改善企业竞争力的关键····· | 80        |
|          | 参考文献·····                | 80        |
| <b>7</b> | <b>制造的信息原理·····</b>      | <b>82</b> |
| 7.1      | 制造活动、系统与制造信息模型·····      | 82        |
| 7.2      | 制造信息和制造信息库·····          | 86        |
| 7.2.1    | 制造信息库·····               | 86        |
| 7.2.2    | 制造信息本身的特点·····           | 87        |
| 7.2.3    | 制造信息库的建立·····            | 88        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 7.2.4 基于语义的制造信息的检索        | 89  |
| 7.2.5 制造信息包的智能化           | 90  |
| 7.3 制造活动的信息性              | 90  |
| 7.4 制造系统的本体和主体二重属性        | 91  |
| 7.5 符号化制造信息的复制守恒性         | 92  |
| 7.5.1 任二 SMIS 的交集 $S_1$   | 93  |
| 7.5.2 任二 SMIS 的对称差集 $S_2$ | 93  |
| 7.5.3 任二 SMIS 的并集 $S_3$   | 93  |
| 7.6 制造信息量的创新增长            | 94  |
| 7.7 高质量制造决策的信息最大/最小性      | 95  |
| 7.8 制造信息的可获取性             | 98  |
| 7.8.1 线性定常动力学系统代数模型的可观测性  | 98  |
| 7.8.2 对象几何模型的可观测性         | 100 |
| 7.8.3 基于效益的制造信息的可获取性      | 101 |
| 7.9 制造信息的有效传递             | 102 |
| 7.10 制造信息的合理取、送           | 105 |
| 7.11 制造信息的转换              | 106 |
| 7.12 制造信息的交互              | 107 |
| 7.13 制造信息的时间不对称性          | 109 |
| 7.13.1 对过去事件作出补救          | 109 |
| 7.13.2 对未来信息作出推断          | 110 |
| 7.14 制造信息的评价              | 111 |
| 7.15 制造信息的守恒、不变和过载问题      | 112 |
| 7.16 制造目标信息的他组织和自组织       | 112 |
| 7.16.1 动力学系统输出目标信息的他定和自定  | 112 |
| 7.16.2 制造目标信息的他组织和自组织     | 113 |
| 参考文献                      | 114 |
| <b>8 制造信息的度量</b>          | 115 |
| 8.1 概率是客观的还是主观的           | 116 |
| 8.1.1 概率的大数定律             | 116 |
| 8.1.2 古典概型                | 117 |
| 8.1.3 几何概率                | 117 |

---

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 8.1.4 概率的主观观点 .....                     | 118 |
| 8.2 信息论中信息的熵量度量 .....                   | 119 |
| 8.2.1 信息度量的数学表达式 .....                  | 119 |
| 8.2.2 用于信息度量的熵的基本性质 .....               | 122 |
| 8.3 制造信息与信念 .....                       | 124 |
| 8.4 信念及其变化的表示 .....                     | 125 |
| 8.4.1 信念及其变化的贝叶斯公式表示 .....              | 126 |
| 8.4.2 信念及其变化的自反似然比表示 .....              | 127 |
| 8.5 信念及其变化表示的应用 .....                   | 130 |
| 8.5.1 外供配套件质量保证中的信念及其变化 .....           | 130 |
| 8.5.2 生产设备状态预报中的信念及其变化 .....            | 133 |
| 8.6 基于信念及其变化表示的制造信息度量 .....             | 135 |
| 8.6.1 基于贝叶斯公式表示信念的制造信息度量 .....          | 135 |
| 8.6.2 基于自反似然比的表示信念的制造信息度量 .....         | 137 |
| 8.7 基于证据和基于不确定证据的不确定推理的<br>制造信息度量 ..... | 138 |
| 8.7.1 根据证据对假设的支持度量制造信息 .....            | 138 |
| 8.7.2 基于确信因子的制造信息度量 .....               | 139 |
| 8.7.3 基于不确定证据的不确定推理的制造信息度量 .....        | 139 |
| 8.8 讨论 .....                            | 140 |
| 参考文献 .....                              | 140 |
| <br>9 制造信息的物化 .....                     | 141 |
| 9.1 物化变换的信息特点和要求 .....                  | 142 |
| 9.2 物化变换中的信息与控制 .....                   | 144 |
| 9.3 物化变换与干扰 .....                       | 145 |
| 9.4 物化制造信息的预置和重构 .....                  | 146 |
| 9.4.1 预置制造信息的可重复利用方式 .....              | 148 |
| 9.4.2 预置制造信息的形式 .....                   | 148 |
| 9.4.3 预置制造信息的可重构性和平均利用率 .....           | 149 |
| 9.4.4 预置制造信息重构后状态正常的可判断性 .....          | 153 |
| 9.5 制造信息模型的预置 .....                     | 155 |
| 9.6 物化制造信息的实置 .....                     | 156 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 9.7 机械加工物化转换中的几何误差补偿                     | 157 |
| 9.7.1 问题的提出                              | 157 |
| 9.7.2 几何系统误差的表示                          | 158 |
| 9.7.3 几何系统误差的补偿                          | 159 |
| 9.8 物化制造信息的后置                            | 161 |
| 参考文献                                     | 162 |
| 10 制造信息的自组织                              | 163 |
| 10.1 制造目标的确定和组织达标                        | 164 |
| 10.2 机械加工精度目标信息的他确定                      | 164 |
| 10.3 机械加工精度目标信息的他组织物化达标                  | 165 |
| 10.3.1 开环精度目标信息传递                        | 165 |
| 10.3.2 闭环精度目标信息传递                        | 167 |
| 10.4 机械加工精度目标信息的自确定和自组织<br>物化达标原理        | 167 |
| 10.4.1 机械加工精度目标信息的自确定和<br>自组织物化达标        | 168 |
| 10.4.2 机械加工精度目标信息的自组织<br>物化达标原理          | 168 |
| 10.5 机械加工精度目标信息自组织物化达标原理<br>及其应用         | 172 |
| 10.5.1 基准平板平面目标精度的自组织物化达标                | 172 |
| 10.5.2 精密多齿分度台分度目标精度的<br>自组织物化达标         | 174 |
| 10.6 结论                                  | 182 |
| 参考文献                                     | 182 |
| 11 制造信息差                                 | 184 |
| 11.1 DMI 的分类编码                           | 185 |
| 11.2 DMI 的典型产因                           | 187 |
| 11.2.1 在不同环境里,同一对象产生 111 型<br>DMI 的原因    | 187 |
| 11.2.2 在不同和同一环境里,同一对象产生<br>112 型 DMI 的原因 | 188 |