

# INTELLIGENT MANUFACTURING

Key Technologies and Applications

# 智能制造

## 关键技术与企业应用

谭建荣 刘振宇 等◎著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

INTELLIGENT  
MANUFACTURING

Key Technologies and Applications

智能制造

关键技术与企业应用

谭建荣 刘振宇 等◎著

在国家 973 计划、国家自然科学基金项目、中国工程院发展战略咨询项目等项目的资助下，作者所在团队在智能设计与制造领域做了一系列研究与应用工作，取得了一系列理论与应用研究成果，并在多个企业的产品设计与制造中获得成功应用。

本书融合了作者所在科研团队多年对智能制造关键技术研究的归纳与总结，从智能设计、智能加工、智能装配、智能服务这四个方面较为系统地介绍了智能制造的关键技术及其企业应用，包括设计方案的智能决策、设计模型的智能求解、加工工艺的智能优化、加工过程的智能监控、加工质量的智能检测、装配定位的智能导航、装配工艺的智能规划、装配质量的智能分析以及装备服役的智能服务等。

本书供从事智能设计与智能制造、数字化设计与制造、产品设计与开发的研究与工程技术人员参考，也可作为高等院校相关专业教师、研究生、高年级本科生的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

智能制造：关键技术与企业应用/谭建荣等著. —北京：机械工业出版社，2017.5

ISBN 978-7-111-56186-6

I. ①智… II. ①谭… III. ①智能制造系统-制造业-研究-中国  
IV. ①F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 039350 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：丁昕祯 责任编辑：丁昕祯 张丹丹 刘丽敏

责任校对：刘 岚 责任印制：常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.75 印张·476 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-56186-6

定价：58.00 元



凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

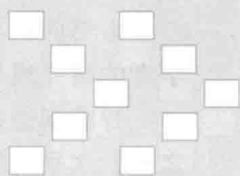
机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前言



制造业是国民经济和国防建设的重要基础，是立国之本、兴国之器、强国之基。没有强大的制造业，就没有国民经济的可持续发展，更不可能支撑强大的国防事业。

目前，全球制造业格局正面临重大调整，新一代信息技术与制造业不断交叉与融合，引领了以网络化和智能化为特征的制造业变革浪潮。为走出经济发展困境，美国、德国、日本等工业发达国家纷纷提出了“再工业化”发展战略，力图掌控新一轮技术革命的主导权，重振制造业，推进产业升级，营造经济新时代。

在国际制造业新一轮竞争中，我国制造业规模虽跃居世界第一位，却面临着大而不强的困境。一方面，制造产业对外依存度高，高端装备和产品核心技术匮乏，高端制造业发展滞后，对国家重大工程建设与国防安全造成严重威胁；另一方面，自主创新能力弱，产品档次不高，缺乏世界知名品牌，资源能源利用效率低，环境污染问题较为突出，产业结构不合理，为此，调整结构、转型升级、提质增效刻不容缓。

智能制造是当前制造技术的核心发展方向。智能制造通过制造技术、信息技术和人工智能技术的集成和深度融合，借助计算机收集、存储、模拟人类专家的制造智能，进行制造各环节的分析、判断、推理、构思和决策，取代或延伸制造环境中人的部分脑力劳动，实现制造过程、制造系统与制造装备的智能感知、智能学习、智能决策、智能控制与智能执行。

智能制造给复杂装备的设计制造方式以及核心装备技术创新带来了一系列的变革，例如，美国通过采用智能化柔性装配技术，将战斗机的生产周期缩短了 $2/3$ ，成本降低了50%；采用智能控制技术使得大型工程机械的燃油消耗降低15%以上，大幅提高了作业效率和质量。如何全方位提升装备设计制造的智能化水平，已成为学术界、产业界高度关注的重大科学技术问题。为此，“德国工业4.0”“美国工业互联网”“美国制造业振兴计划”和“中国制造2025”等国家科技规划都把设计、制造和装备的智能化列为优先发展方向，引发了智能制造的研发热潮。

近年来，在国家973计划、国家自然科学基金项目、中国工程院发展战略咨询项目等的资助下，作者所在团队在智能设计与制造领域做了一系列研究与应用工作，取得了一系列理论与应用研究成果，并在多个企业的产品设计与制造中获得成功应用。本书融合了作者所在科研团队多年对智能制造关键技术研究的归纳与总结，从智能设计、智能加工、智能装配、智能服务这四个方面较为系统地介绍了智能制造的关键技术及其工程应用。

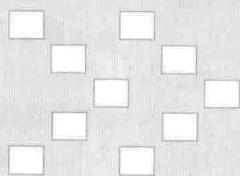
本书撰写过程中，得到作者所在团队同事和研究生的大力支持，具体撰写分工为：第1章（谭建荣、刘振宇）、第2章（冯毅雄、谭建荣）、第3章（徐敬华、刘振宇、彭翔）、第4章（程锦、刘振宇）、第5章（谭建荣、伊国栋）、第6章（谭建荣、何再兴）、第7章（刘振宇、裘迪）、第8章（刘振宇、段桂芳）、第9章（刘振宇、段桂芳）、第10章（谭建

荣、徐敬华)。

本书的撰写得到了国内外许多同行专家的鼓励、支持与帮助，也参考了国内外许多专家学者的研究成果，在此表示衷心的感谢。

智能制造技术目前仍处于发展阶段，许多理论、方法与技术还在不断地发展与完善，加之作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请各位专家与读者给予批评和指正。

# 目 录



前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 智能制造的内涵与特点	1
1.1.1 智能制造的技术内涵	1
1.1.2 数字制造与智能制造的联系与区别	2
1.1.3 智能制造的主要特点	3
1.2 智能制造的十项技术基础	4
1.3 智能制造的关键环节	10
1.3.1 智能设计	10
1.3.2 智能加工	11
1.3.3 智能装配	12
1.3.4 智能服务	13
1.4 国内外智能制造的国家战略及应用现状	13
1.4.1 德国工业 4.0	13
1.4.2 美国先进制造业国家战略计划	15
1.4.3 日本物联网升级制造模式	15
1.4.4 中国制造 2025	16
1.4.5 企业智能制造应用现状	17
1.5 从数字制造到智能制造发展的技术途径	19
1.5.1 从数字制造到智能制造的三大模式	19
1.5.2 从数字制造到智能制造的具体途径	20
1.6 本章小结	22
参考文献	23
第 2 章 智能设计：设计方案的映射与决策	24
2.1 引言	24
2.1.1 设计方案的生成	25
2.1.2 方案的评价与决策	25
2.2 基于物元分析的产品设计知识获取建模	26
2.2.1 产品设计实例物元模型的建立	26
2.2.2 产品设计事物元	31
2.2.3 产品设计实例关联信息的建立	35
2.2.4 实例分析	36
2.3 基于演化博弈的产品方案设计功构映射	39
2.3.1 需求满足驱动的产品设计特性获取	39
2.3.2 产品方案设计的功能功构多域映射	42
2.3.3 产品方案设计的演化博弈综合映射	44
2.3.4 实例分析	48
2.4 基于量词约束满足的产品设计方案稳健分析	51
2.4.1 产品设计方案的量词约束满足建模	52
2.4.2 产品设计方案的可行区间搜索映射	54
2.4.3 产品设计方案的信息熵稳健决策	55
2.4.4 实例分析	57
2.5 基于直觉模糊集的产品设计方案多属性决策	61
2.5.1 产品设计方案优化决策的混合建模	62
2.5.2 产品设计方案的决策试验评价分析	63
2.5.3 产品设计方案的多准则妥协解排序	64
2.5.4 实例分析	67
2.6 本章小结	71
参考文献	71

### 第3章 智能设计：基于知识的协同

#### 求解方法 ..... 73

3.1 引言 ..... 73

3.2 智能设计中的等效设计求解 ..... 73

3.2.1 相似组合模型的参数摄动等效  
简化技术 ..... 74

3.2.2 参数不确定性分析的模型等效  
求解技术 ..... 79

3.3 几何结构变异设计的智能求解 ..... 85

3.3.1 二维图元结构剪取与贴合的基准  
融合求解方法 ..... 85

3.3.2 三维几何结构移植的产品结构  
变异设计求解 ..... 97

3.4 产品模块配置设计的智能求解 ..... 108

3.4.1 产品模块与配置规则的多域属性  
池构建方法 ..... 108

3.4.2 产品族配置模板的动态再生重构与  
智能进化求解 ..... 113

3.5 应用实例 ..... 115

3.6 本章小结 ..... 118

参考文献 ..... 118

### 第4章 智能加工：加工工艺的智能

#### 优化 ..... 120

4.1 加工工艺的智能规划 ..... 123

4.1.1 加工工艺数据知识发现的一般  
流程 ..... 123

4.1.2 加工工艺数据挖掘与知识发现  
技术 ..... 124

4.1.3 基于工艺知识库的工艺知识智能  
推理 ..... 127

4.2 加工性能的智能预测 ..... 130

4.2.1 基于加工过程仿真的产品工艺  
性能可视化预测 ..... 130

4.2.2 基于近似响应面模型的产品工艺  
性能智能预测 ..... 132

4.2.3 基于模糊变权法的产品工艺性能  
智能综合评价 ..... 134

4.3 加工参数的智能优选 ..... 141

4.3.1 基于变粒度的加工工艺参数多  
目标优化模型构建 ..... 141

4.3.2 基于信噪比与TOPSIS的加工参数  
多目标稳健设计 ..... 143

4.3.3 基于多智能计算技术融合的加工

工艺参数快速寻优 ..... 149

4.4 本章小结 ..... 154

参考文献 ..... 154

### 第5章 智能加工：加工过程的智能

#### 监控 ..... 157

5.1 引言 ..... 157

5.2 加工过程的机器视觉检测 ..... 158

5.2.1 概述 ..... 158

5.2.2 机器视觉检测方法步骤 ..... 158

5.2.3 机器视觉检测系统 ..... 159

5.2.4 微型钻头磨损状态的机器视觉  
检测 ..... 160

5.3 加工过程的热特性检测与辨识 ..... 162

5.3.1 概述 ..... 162

5.3.2 机床热特性检测 ..... 163

5.3.3 机床主轴热特性快速辨识 ..... 165

5.4 加工动态综合误差建模与补偿 ..... 167

5.4.1 概述 ..... 167

5.4.2 机床动态综合误差建模 ..... 168

5.4.3 机床动态综合误差补偿 ..... 170

5.5 本章小结 ..... 171

参考文献 ..... 172

### 第6章 智能加工：加工质量的智能

#### 检测 ..... 173

6.1 引言 ..... 173

6.2 基于可见光成像形状特征的零件  
表面缺陷检测 ..... 175

6.2.1 潜在缺陷区域分割技术 ..... 175

6.2.2 块状与线形缺陷区域的形状特征  
提取 ..... 176

6.2.3 块状与线形缺陷的分类识别 ..... 181

6.3 基于射线成像山峰定位的零件内部  
缺陷检测 ..... 185

6.3.1 基于山峰定位的内部缺陷区域  
定位 ..... 186

6.3.2 基于种子填充的内部缺陷精确  
检测 ..... 190

6.4 基于红外成像稀疏表示的零件动态  
缺陷检测 ..... 193

6.4.1 红外动态缺陷检测原理 ..... 194

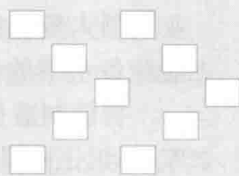
6.4.2 基于稀疏表示的动态缺陷检测 ... 197

6.5 本章小结 .....	205	8.4.1 基于尺寸变动度的装配序列评价 准则建立 .....	235
参考文献 .....	205	8.4.2 基于变动关系矩阵的传递模型 构建 .....	237
<b>第7章 智能装配：基于智能导航的 装配精确定位技术</b> .....	208	8.4.3 基于偏差传递模型的装配精度 智能计算 .....	241
7.1 引言 .....	208	8.5 基于配合精度波动控制的装配分组 定向优化 .....	246
7.2 基于AGV的装配物料精确定位 技术 .....	210	8.5.1 基于装配件敏感度分析的选配 基准提取 .....	246
7.2.1 AGV定位方法分类 .....	210	8.5.2 基于中心定位的自适应分组 方案构建 .....	248
7.2.2 物料物流系统建模方法 .....	212	8.5.3 基于分组稳定性分析的分组边界 变动控制 .....	252
7.2.3 多传感器多AGV协同定位 技术 .....	213	8.5.4 基于定向进化算法的分组方案 优化 .....	253
7.2.4 装配物料定位精度分析 .....	214	8.6 本章小结 .....	255
7.3 装配工装夹具精确定位技术 .....	215	参考文献 .....	256
7.3.1 空间曲面多点定位理论 .....	215	<b>第9章 智能装配：装配预紧力与装配 质量智能分析技术</b> .....	258
7.3.2 装配工装夹持顺序优化设计 .....	215	9.1 引言 .....	258
7.3.3 柔性夹持工装运动性能分析 .....	217	9.2 装配预紧力测量与控制 .....	259
7.3.4 装配夹具定位方案定位质量 分析 .....	218	9.2.1 装配预紧力测量方法 .....	259
7.4 装配机器人精确装配操作技术 .....	219	9.2.2 装配预紧力控制方法 .....	262
7.4.1 基于连续接触模型的含间隙机器 人动力学建模 .....	219	9.3 基于不完备样本多准则修正的装配 性能预测 .....	266
7.4.2 基于轨迹规划的含间隙运动副反 力的动态响应谱 .....	220	9.3.1 基于测量数据拓扑距离的特征 参数粗大误差处理 .....	267
7.4.3 机器人运动副元素接触状况 分析 .....	221	9.3.2 基于灰熵关联分析的影响性能 因素筛选 .....	268
7.5 本章小结 .....	226	9.3.3 基于几何变动有限元模拟的特征 参数修正 .....	269
参考文献 .....	226	9.3.4 物理模型与神经网络相结合的 装配性能预测修正 .....	272
<b>第8章 智能装配：装配序列与装配 分组的智能规划技术</b> .....	229	9.4 本章小结 .....	275
8.1 引言 .....	229	参考文献 .....	276
8.2 智能计算驱动的装配序列规划 .....	230	<b>第10章 智能服务：挖掘客户隐式 需求的智能服务技术</b> .....	278
8.2.1 基于遗传算法的装配序列计算 .....	230	10.1 引言 .....	278
8.2.2 基于蚁群算法的装配序列计算 .....	230	10.2 面向装备设计的需求获取与智能知识 服务 .....	282
8.2.3 基于粒子群算法的装配序列 计算 .....	232	10.2.1 基于多色集合的客户需求域层	
8.2.4 基于神经网络的装配序列计算 .....	232		
8.3 智能计算驱动的装配路径规划 .....	232		
8.3.1 智能化虚拟装配碰撞检测 .....	233		
8.3.2 基于空间扫略的装配路径规划 .....	234		
8.3.3 基于遗传算法的装配路径优化 .....	234		
8.4 基于装配序列偏差传递模型的装配 精度分析 .....	234		



转换方法 .....	282	10.4 应用实例 .....	295
10.2.2 变权分层扩散激活的设计知识 智能服务 .....	285	10.4.1 挖掘客户需求的智能服务 系统 .....	295
10.3 面向装备服役的状态预警与工况 调节服务 .....	291	10.4.2 数控机床云资源设计服务 .....	296
10.3.1 装备服役数据时间序列分析的 状态诊断 .....	291	10.4.3 空分成套装备的智能服役 服务 .....	300
10.3.2 装备服役的状态预警与智能 工况调节 .....	293	10.5 本章小结 .....	303
		参考文献 .....	303

# → 第1章 ←



## 绪 论

### 1.1 智能制造的内涵与特点

#### 1.1.1 智能制造的技术内涵

制造是社会创造产品和物质活动的基础，包括设计、加工、装配及服务整个产品创新链和产业链，是国家综合实力、产业竞争力、安全和可持续发展能力的基石。没有先进的制造技术与强大的制造能力，就没有国民经济的可持续发展，就没有强大的国防。打造具有国际竞争力的制造业，是我国提升综合国力、保障国家安全、建设世界强国的必由之路。

目前，全球制造业格局正面临重大调整，新一代信息技术与制造业不断交叉与融合，引领了以智能化为特征的制造业变革浪潮。为走出经济发展困境，美国、德国、日本等工业发达国家纷纷提出了“再工业化”发展战略，力图掌控新一轮技术革命的主导权，重振装备制造业，推进产业升级，营造经济新时代。

在国际制造业新一轮竞争中，我国制造业规模虽跃居世界第一位，却面临着大而不强的困境。一方面，高端装备对外依存度高，装备核心技术匮乏，装备制造业发展滞后，对国家重大工程建设与国防安全造成严重威胁；另一方面，自主创新能力弱，产品档次不高，缺乏世界知名品牌，资源能源利用效率低，环境污染问题较为突出，产业结构不合理，调整结构、转型升级、提质增效刻不容缓。

智能制造是当前制造技术的重要发展方向，是先进制造技术与信息技术的深度融合。通过对产品全生命周期中设计、加工、装配及服务等环节的制造活动进行知识表达与学习、信息感知与分析、智能优化与决策、精准控制与执行，实现制造过程、制造系统与制造装备的知识推理、动态传感与自主决策。智能制造在制造各个环节中通过模拟人类专家的智能活动，进行分析、判断、推理、构思和决策，以取代或延伸制造环境中人的部分脑力劳动，将制造数字化、自动化扩展到制造柔性化、智能化和高度集成化，是世界各国抢占新一轮科技发展制高点的重要途径。

智能制造包括制造对象的智能化、制造过程的智能化、制造工具的智能化三个不同层面（见图 1-1）。制造对象的智能化，即制造出来的产品与装备是智能的，如制造出智能家电、智能汽车等智能化产品。制造过程的智能化，即要求产品的设计、加工、装配、

检测、服务等每个环节都具有智能特性。制造工具的智能化，即通过智能机床、智能工业机器人等智能制造工具，帮助实现制造过程自动化、精益化、智能化，进一步带动智能装备水平的提升。

智能制造包括知识库/知识工程、动态传感与自主决策三大核心，如图 1-2 所示。知识库/知识工程是智能制造的核心，智能制造系统能够在实践中不断地充实知识库，实现知识的获取、表达与求解，具有自学习功能。动态传感为智能制造提供了感知来源，通过动态精确测量与感知制造系统关键数据，能够准确实时监测智能制造系统的生产状态。自主决策通过复杂多变工况下智能制造系统的智能决策和自律执行，赋予产品制造在线学习和知识进化的能力，尽量减少人工干预，实现高品质制造。

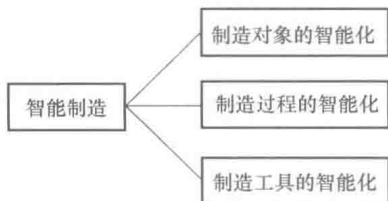


图 1-1 智能制造的三个层面

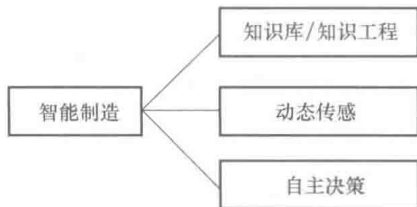


图 1-2 智能制造的三大核心

### 1.1.2 数字制造与智能制造的联系与区别

#### 1. 数字制造与智能制造的联系

数字制造与智能制造是两项密切关联又各具内涵的技术。数字制造是实现智能制造的基础与手段，而智能制造是数字制造的提升。

数字制造是智能制造的基础。数字制造采用数字化的手段对制造过程、制造系统与制造装备中复杂的物理现象和信息演变过程进行定量描述、精确计算、可视模拟与精确控制。数字制造是数字技术与制造技术不断融合和应用的结果。数据库技术、产品建模技术、曲面造型技术、模拟仿真技术等数字技术与产品设计、产品加工、产品装配、制造管理与制造服务技术等制造技术融合，就形成了产品数据管理、虚拟制造、快速成型、计算机辅助检测、数字控制等各种形式的数字制造技术，这些技术也是智能制造的基础技术。以机床为例，计算机与机床结合产生的数控机床，实现了程序化控制，这是数字化时代的产物。智能机床则需要动态传感器随时感知其工作状况、环境参数，需要控制软件实现加工工艺过程的智能控制与优化，即传感器、数控机床、智能控制三者共同构成智能机床。

智能制造是数字制造的提升。将数字制造技术与智能技术相结合，通过领域交叉、学科交叉、层次交叉、方法交叉等方式，形成了各种各样的智能制造技术。例如，从制造信息处理技术发展到了制造知识处理技术、从数值仿真技术发展到了虚拟现实数字样机技术、从快速原型技术发展到了三维打印技术、从在线测量技术发展到了工况感知技术、从数字控制技术发展到智能控制技术、从柔性制造技术发展到了精益生产技术、从数字装备技术发展到了智能装备技术，实现从数字化到智能化的技术提升。

#### 2. 数字制造与智能制造的区别

智能制造与数字制造有着本质的区别：

- 1) 数字制造处理的对象是数据, 而智能制造处理的对象是知识。
- 2) 数字制造过程以信息处理为核心, 而智能制造过程以智能学习与推理为核心。
- 3) 数字制造建模的数学方法是经典数学(微积分)方法, 智能制造建模的数学方法是智能计算方法。
- 4) 数字制造系统的性能在使用中是不断退化的, 而智能制造系统具有自优化功能, 其性能在使用中可以不断优化。
- 5) 数字制造系统在环境异常或使用错误时无法正常工作, 而智能制造系统则具有容错功能。

以机床加工为例, 数控机床按照程序规定的命令执行, 若加工过程中出现振动、主轴发热等问题, 机床自身是无法控制的。而智能机床则可以随时监测刀具是否出现磨损、主轴是否发热过多、振动是否加剧等, 并可随时干预加工过程, 改变运行参数, 降低转速, 减少进给速度, 或者停止运转等, 以达到保护机床或保证加工质量的效果。

### 1.1.3 智能制造的主要特点

智能制造集自动化、柔性化、集成化和智能化于一身, 具有实时感知、优化决策、动态执行三个方面的优点。具体地看, 智能制造在实际应用中具有以下特征:

#### 1. 自组织能力

智能制造中的各组成单元能够根据工作任务需要, 集结成一种超柔性最佳结构, 并按照最优方式运行。其柔性不仅表现在运行方式上, 也表现在结构组成上。例如, 在当前任务完成后, 该结构将自行解散, 以便在下一任务中能够组成新的结构。

#### 2. 自律能力

智能制造具有搜集与理解环境信息及自身信息并进行分析判断和规划自身行为的能力。强有力的知识库和基于知识的模型是自律能力的基础。智能制造系统能监测周围环境和自身作业状况并进行信息处理, 根据处理结果自行调整控制策略, 以采用最佳运行方案, 从而使整个制造系统具备抗干扰、自适应和容错等能力。

#### 3. 自学习和自维护能力

智能制造以原有的专家知识为基础, 在实践中不断进行学习, 完善系统知识库, 并剔除其中不适用的知识, 使知识库趋于合理化。与此同时, 它还能对系统故障进行自我诊断、排除和修复, 从而能够自我优化并适应各种复杂环境。

#### 4. 整个制造环境的智能集成

智能制造在强调各子系统智能化的同时, 更注重整个制造环境的智能集成, 这是它与面向制造过程中特定应用的“智能化孤岛”的根本区别。智能制造将各个子系统集成成为一个整体, 实现系统整体的智能化。

#### 5. 人机一体化

智能制造不单强调人工智能, 而且是一种人机一体化的智能模式, 是一种混合智能。人机一体化一方面突出了人在制造环境中的核心地位, 同时在智能机器的配合下, 更好地发挥了人的潜能, 使人机之间表现出一种平等共事、相互“理解”、相互协作的关系, 使两者在不同的层次上各显其能, 相辅相成。因此, 在智能制造中, 高素质、高智能的人将发挥更好的作用, 机器智能和人的智能将真正地集成在一起。

## 6. 虚拟现实

虚拟现实是实现高水平人机一体化的关键技术之一，人机结合的新一代智能界面，使得可用虚拟手段智能地表现现实，它是智能制造的一个显著特征。

## 1.2 智能制造的十项技术基础

要实现智能制造，必须在产品设计制造服役全过程实现信息的智能传感与测量、智能计算与分析、智能决策与控制，涉及射频识别技术、实时定位技术、无线传感网络技术、物联网与信息物理融合系统、大数据技术、云计算技术、人工智能技术、虚拟现实技术、3D 打印技术和机器人技术十项技术基础。

### 1. 射频识别技术

射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）技术又称为无线射频识别，是一种无线通信技术，可以通过无线电信号识别特定目标并读写相关数据，无须识别系统与特定目标之间进行机械或光学接触。常用的无线射频有低频（125~134.2kHz）、高频（13.56MHz）和超高频三种。RFID 读写器分为移动式 and 固定式两种。射频识别通过将小型的无线设备贴在物件表面，并采用 RFID 阅读器进行自动的远距离读取，提供了一种精确、自动、快速地记录和收集目标的工具，其应用领域及效果见表 1-1<sup>[1]</sup>。

表 1-1 RFID 射频识别应用领域及效果

应用领域	效果
供应链管理	通过自动化数据收集和数据传输,降低劳动力成本
	减少发货错误、库存迷失和重复数据读取
	减少盗窃和物品丢失
	利用远程进行产品维护、保修和调用警报
在制品制造	减少返修,保证制造精度
	提高生产率,加快零部件的定位和正确检索
	降低生产成本,消除手动条形码读取
	实现自动化零件集成跟踪
	连续的零件库存通道减少了生产线中断
资产管理	提供快速公司资产识别
	确保传输点的安全跟踪
	减少盗窃和物品丢失
安全访问控制	确保个人、机密信息的安全,方便访问
	提供移动、动态更新的数据存储库
	减少盗窃、欺诈,减轻风险
消费应用	提高个人安全
	确保个人事务数据安全、方便访问
	增加用户获得商品和服务的便利
	降低欺诈和风险

射频识别技术已成为制造型企业业务流程精益化的关键之一，可以有效减少企业的生产库存，提高生产率和质量，从而提高制造企业的竞争力。早在 2000 年，空客公司就认识到

这种技术优势，应用 RFID 技术与各大航空公司进行工具租赁业务。到 2006 年，空客有 15 个项目的赢利都得益于 RFID 技术。之后，空客决定在全公司范围内使用零件序列化的自动识别技术（包括 RFID），增加飞机全生命周期的可视化，这被称为价值链可视化（VCV）计划，空客公司则称之为“空客业务雷达”。RFID 技术成为简化业务流程、降低库存和提高经营活动效率与质量的强大武器，大大提高了企业竞争优势。

## 2. 实时定位技术

在实际生产制造现场，需要对多种材料、零件、工具、设备等资产进行实时跟踪管理；在制造的某个阶段，材料、零件、工具等需要及时到位和撤离；生产过程中，需要监视在制品的位置行踪，以及材料、零件、工具的存放位置等。因此在生产系统中，需要建立一个实时定位网络系统，以完成生产全程中角色的实时位置跟踪。

实时定位系统（Real Time Location System, RTLS）由无线信号接收传感器和标签无线信号发射器等组成。RTLS 通常不包括 GPS、手机跟踪或只使用被动 RFID 跟踪的系统。RTLS 的物理层技术通常是某种形式的射频（RF）通信，但一些系统使用了光学（通常是红外）或声（通常是超声波）技术代替了无线射频。标签和固定参考点可以布置发射器和接收器，或两者兼而有之。

目前，室内实时定位系统通常采用超声、红外、超宽带（UWB）、窄频带等技术，在带宽、精度、墙体穿透性、抗干扰能力等方面存在各自的特点，其技术性能见表 1-2<sup>[1]</sup>。由于超宽带的综合性能较好，因此目前大多数制造企业都采用了基于超宽带的实时定位系统。

表 1-2 几种室内实时定位技术性能比较

分类		频率	带宽	精度	墙体穿透性	贴标签	抗回波干扰			
超声		非常高	非常高	非常高	不能	非常高	非常好			
红外		非常高	非常高	非常高	不能	非常高	非常好			
电磁	射频	超宽带		高	非常高	非常高	好	非常好		
		窄频带		中	低	差	优异	低	差	
	常规	扩展频谱		信号强度	中	中	差	优异	低	差
		达到时间		中	中	中	非常好	中	中	

## 3. 无线传感网络技术

现代化的工厂布置了越来越多的检测点，产生了大量的数据。通过创建网络化的检测环境，许多数据处理过程可以更加高效、柔性和低成本。小巧、低成本的无线传感器分布在生产工厂里，允许对象注册它们的环境和无线通信；通过光电、压力、温度和红外传感器等不同的传感器，能够实现对制造环境状态的测量与感知。

无线传感网络（Wireless Sensor Network, WSN）是由许多在空间分布的自动装置组成的一种无线通信计算机网络，这些装置使用传感器监控不同位置的物理或环境状况（如温度、声音、振动、压力、运动或污染物等）。无线传感网络的每个节点除配备一个或多个传感器之外，还装备了一个无线电收发器、一个很小的微控制器和一个能源（通常为电池）。表 1-3<sup>[1]</sup>对常用的无线局域网、蓝牙、无线个域网三种无线网络性能进行了对比。

表 1-3 三种常用的无线网络详细性能对比

特征	无线局域网	蓝牙	无线个域网
电源功耗	小时	天	年
复杂度	非常复杂	复杂	简单
可接入节点数	32	7	64000
等待时间/s	3	10	0.03
范围/m	100	10	10~100
扩展性	可以漫游	No	Yes
数据速率/(bit/s)	1G	1M	250k

在生产系统中，针对当前生产任务的实时性、数据吞吐量大小、数据传输速率和可靠性等特点，选择不同的无线传感网络技术。例如，对于监督通信、分散过程控制、无线设备网络、故障信息报警、实时定位，可分别采用 WLAN、RFID、ZigBee/Bluetooth、GPRS、UWB 等无线传感网络技术。

#### 4. 物联网与信息物理融合系统

物联网 (The Internet of Things) 可以实现物品间的全面感知、可靠传输和智能处理，利用事先在物品或设施中嵌入的传感器与现代化数据采集设备，将客观世界中的物品信息最大程度地数据化，再利用物品识别技术与通信技术将数据化的物品信息连入互联网，形成一个物品与物品相互连接的巨大的分布式网络，然后再把这些信息传递到后台服务器上整理、加工、分析和处理，最后利用分析与处理的结果对客观世界中的物品进行管理和相应控制。

物联网技术实现了客观世界中的物物相连，它是继计算机、互联网之后，蓬勃兴起的世界信息技术的又一次革命，是人类社会以信息技术应用为核心的技术延展。物联网与传统产业的全面融合，将成为全球新一轮社会经济发展的主导力量。

与物联网类似，信息物理融合系统 (Cyber-Physical System, CPS)，也称为“虚拟网络-实体物理”生产系统，其目标是使物理系统具有计算、通信、精确控制、远程合作和自治等能力，通过互联网组成各种相应自治控制系统和信息服务系统，完成现实社会与虚拟空间的有机协调。与物联网相比，CPS 更强调循环反馈，要求系统能够在感知物理世界之后通过通信与计算再对物理世界起到反馈控制作用。在这样的系统中，一个工件就能算出自己需要哪些服务。通过数字化逐步升级现有生产设施，这样生产系统可以实现全新的体系结构。这意味着这一概念不仅可在全新的工厂得以实现，而且能在现有工厂的升级过程中得到改造。

CPS 是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统，通过 3C (Computation、Communication、Control) 技术的有机融合与深度协作，实现制造的实时感知、动态控制和信息服务。CPS 实现计算、通信与物理系统的一体化设计，可使系统更加可靠、高效、实时协同，具有重要而广泛的应用前景。CPS 系统把计算与通信深深地嵌入实物过程，使之与实物过程密切互动，从而给实物系统添加新的能力。

#### 5. 大数据技术

大数据 (Big Data) 一般指体量特别大，数据类别特别大的数据集，并且无法用传统数据库工具对其内容进行抓取、管理和处理。

大数据具有五个主要的技术特点，可以总结为 5V 特征。

1) 指数数据量 (Volumes) 大, 计量单位从 TB 级别上升到 PB、EB、ZB、YB 及以上级别。

2) 数据类别 (Variety) 大。数据来自多种数据源, 数据种类和格式日渐丰富, 既包含生产日志、图片、声音, 又包含动画、视频、位置等信息, 已冲破了以前所限定的结构化数据范畴, 囊括了半结构化和非结构化数据。

3) 数据处理速度 (Velocity) 快。在数据量非常庞大的情况下, 也能够做到数据的实时处理。

4) 价值密度 (Value) 低。随着物联网的广泛应用, 信息感知无处不在, 信息海量, 但存在大量不相关信息, 因此需要对未来趋势与模式做可预测分析, 利用机器学习、人工智能等进行深度复杂分析。

5) 数据真实性 (Veracity) 高。随着社交数据、企业内容、交易与应用数据等新数据源的兴起, 传统数据源的局限被打破, 企业愈发需要有效的信息之力, 以确保其真实性及安全性。

机器学习和数据挖掘是大数据的关键技术。机器学习最初的研究动机是让计算机系统具有人的学习能力, 以便实现人工智能, 目前被广泛采用的机器学习的定义是“利用经验来改善计算机系统自身的性能”。事实上, 由于“经验”在计算机系统中主要是以数据的形式存在的, 因此机器学习需要设法对数据进行分析, 这就使得它逐渐成为智能数据分析技术的创新源之一, 并且为此而受到越来越多的关注<sup>[2]</sup>。数据挖掘和知识发现通常被相提并论, 并在许多场合被认为是可以相互替代的术语。对数据挖掘有多种文字不同但含义接近的定义, 例如“识别出巨量数据中有效的、新颖的、潜在有用的、最终可理解的模式的非平凡过程”。顾名思义, 数据挖掘就是试图从海量数据中找出有用的知识<sup>[3]</sup>。数据挖掘可以视为机器学习和数据库的交叉, 它主要利用机器学习提供的技术来分析大数据和管理大数据。

## 6. 云计算技术

云计算 (Cloud Computing) 由分布式计算、并行处理、网格计算发展而来, 是一种新兴的商业计算模型。目前, 云计算仍然缺乏普遍一致的定义。IBM 公司于 2007 年年底宣布了云计算计划, 在 IBM 的技术白皮书《Cloud Computing》中的云计算定义: “云计算一词用来同时描述一个系统平台或者一种类型的应用程序。一个云计算的平台按需进行动态地部署 (Provision)、配置 (Configuration)、重新配置 (Reconfigure) 以及取消服务 (Deprovision) 等。在云计算平台中的服务器可以是物理的服务器或者虚拟的服务器。高级的计算云通常包含一些其他的计算资源, 例如存储区域网络 (SANs)、网络设备、防火墙以及其他安全设备等。云计算在描述应用方面, 描述了一种可以通过互联网 Internet 进行访问的可扩展的应用程序。‘云应用’使用大规模的数据中心以及功能强劲的服务器来运行网络应用程序与网络服务。任何一个用户可以通过合适的互联网接入设备以及一个标准的浏览器就能够访问一个云计算应用程序。”

云计算将互联网上的应用服务以及在数据中心提供这些服务的软硬件设施进行统一的管理和协同合作。云计算将 IT 相关的能力以服务的方式提供给用户, 允许用户在不了解提供服务的技术、没有相关知识以及设备操作能力的情况下, 通过 Internet 获取需要的服务, 具有高可靠性、高扩展性、高可用性、支持虚拟技术、廉价以及服务多样性的特点。



## 7. 人工智能技术

人工智能 (Artificial Intelligence) 是研究用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门技术, 目标是让机器像 (单一) 个体一样思考和学习, 从而理解世界。

自从 1956 年斯坦福大学 John McCarthy 教授 (图灵奖获得者)、麻省理工学院 Marvin Lee Minsky 教授 (图灵奖获得者)、贝尔实验室的 Claude Elwood Shannon、IBM 公司的 Nathaniel Rochester 四位学者在美国达特蒙斯大学首次提出了“人工智能”这一术语以来, 人工智能迅速发展成为一门广受关注的交叉和前沿学科, 沿着“从符号主义走向连接主义”和“从逻辑走向知识”两个方向蓬勃发展, 在象棋博弈、机器证明和专家系统等方面取得了丰富成果, 并应用于机器人、语言识别、图像识别和自然语言处理等。

近年来, 随着深度学习算法、脑机接口技术进步, 使得人工智能基本理论和方法的研究开始出现新的变化, 特别是以 2016 年谷歌围棋人工智能 AlphaGo 以 4 : 1 战胜韩国棋手李世石为标志, 人工智能再次成为大众关注的热点。AlphaGo 技术本质是大数据+深度学习, AlphaGo 通过大量的训练数据 (包括以往的棋谱和自我对局), 训练了一个价值神经网络用以评估局面上的大量选点, 又训练了一个策略神经网络负责走子, 在蒙特卡洛树搜索中同时使用这两个网络。

## 8. 虚拟现实技术

虚拟现实 (Virtual Reality) 采用以计算机技术为核心的现代先进技术, 生成逼真的视觉、听觉、触觉一体化的虚拟环境, 用户可以通过必要的输入输出设备与虚拟环境中的物体进行交互, 相互影响, 进而获得身临其境的感受与体验。这种由计算机生成的虚拟环境可以是某一特定客观世界的再现, 也可以是纯粹虚构的世界<sup>[4]</sup>。

虚拟现实技术作为一种高新技术, 集计算机仿真技术、计算机辅助设计与图形学、多媒体技术、人工智能、网络技术、传感技术、实时计算技术以及心理行为学研究等多种先进技术为一体, 为人们探索宏观世界、微观世界以及由于种种原因不能直接观察的事物变化规律提供了极大的便利。在虚拟现实环境中, 参与者借助数据手套、三维鼠标、方位跟踪器、操纵杆、头盔式显示器、耳机及数据服等虚拟现实交互设备, 同虚拟环境中的对象相互作用, 虚拟现实中的物体能做出实时的反馈, 产生身临其境的交互式视景仿真和信息交流。

沉浸感、交互性和实时性是虚拟现实技术最重要的特点<sup>[5]</sup>;

(1) 沉浸感 虚拟环境中, 设计者通过具有深度感知的立体显示、精细的三维声音以及触觉反馈等多种感知途径, 观察和体验设计过程与设计结果。一方面, 虚拟环境中可视化的能力进一步增强, 借助于新的图形显示技术, 设计者可以得到实时、高质量、具有深度感知的立体视觉反馈; 另一方面, 虚拟环境中的三维声音使设计者能更为准确地感受物体所在的方位, 触觉反馈支持设计者在虚拟环境中抓取、移动物体时直接感受到物体的反作用力。在多感知形式的综合作用下, 用户能够完全“沉浸”在虚拟环境中, 多途径、多角度、真实地体验与感知虚拟世界。

(2) 交互性 虚拟现实系统中的人机交互是一种近乎自然的交互, 使用者通过自身的语言、身体运动或动作等自然技能, 就可以对虚拟环境中的对象进行操作。而计算机根据使用者的肢体动作及语言信息, 实时调整系统呈现的图像及声音。用户可以采用不同的交互手