



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
工程训练系列教材

现代制造中的 机电系统应用

■ 王孙安 主编



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
工程训练系列教材

现代制造中的机电系统应用

主编 王孙安
参编 邸宏宇 陈乃建 张旭辉 袁明新
主审 傅水根 李天石



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书阐述了现代制造过程中机械电子工程的思想体现与机电系统的具体应用。在第一篇《产品的前期准备与设计》中,介绍了产品设计的概念、设计方法以及几种主流的设计软件;在第二篇《产品的生产加工》中,介绍了现代制造的环境、计算机辅助工艺过程设计与计算机辅助制造以及典型的加工方法。在第三篇《产品的装配》中,论述了装配公差、装配序列规划和虚拟装配的基本内容,并介绍了几种主要的装配自动化设备和测量技术;在第四篇《产品的生产管理与工业网络》中,介绍了产品生产管理的信息集成技术,并以自主研发的网络化开放式数控系统为例说明了设备自描述与制造系统动态集成技术、工业网络实时通信技术的实现方法。全书贯穿了机械电子工程将机械、电子、计算机技术紧密结合的思想,不仅讨论了机电产品设计、加工、装配、生产管理的全过程,也介绍了在相应过程中机电系统的具体应用方法。

本书是普通高等学校机电工程或机电一体化专业的高年级本科生或硕士研究生教材,也可供相关领域的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代制造中的机电系统应用/王孙安主编. —北京:机械工业出版社, 2011.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 工程训练系列教材

ISBN 978-7-111-34024-9

I. ①现… II. ①王… III. ①机电工程-高等学校-教材②机电系统-高等学校-教材 IV. ①TH②TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第058769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:王雅新 责任编辑:王雅新 张利萍 卢若薇

版式设计:张世琴 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20.75印张·509千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34024-9

定价:42.00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

策划编辑:(010) 88379778

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

现代制造是一个相对的、动态的概念，它所包含的内容是一个随着社会发展和技术进步不断演进的范畴。进入 21 世纪，现代制造更多的是指制造业不断地吸取机械工程、电子工程、计算机技术、通信技术、控制技术、管理技术、新能源技术等相关领域的成果，并将其综合应用于产品的设计、加工、装配、生产管理乃至销售、使用、服务、回收的全寿命过程，使得产品本身的结构优化、用材合理、美观实用、质量可靠、适应个性化需求，并实现产品制造过程的灵活高效、成本可控、节能、环境友好以及能够全面提高制造企业的核心竞争力的制造技术的总称。

从现代制造的概念和要求可以看出，这是一个涵盖了众多领域的综合技术，要全面介绍其内容是十分困难的。而机械电子工程自 20 世纪 60 年代逐渐成为一门新兴学科以来，已经逐渐将机械、电子、信息、控制、计算机技术综合于一体。该学科所涉及的技术恰好是现代制造中最基础和核心的技术内容。从机械电子工程的视角出发，来描述现代制造的相关知识，不失为一种有益的尝试。

本书是在参考国内外相关教材和文献的基础上，结合作者从事机械电子工程教学、研究成果和我国的实际情况，按照理论联系实际的原则编写而成的。全书分别从产品设计及其图形代码、加工代码的生成及运行、装配过程及物流，以及广域、局域及现场制造网络的组成 4 个方面阐述了机械电子工程的基本思想在现代制造中的实际应用。

本书结合作者从事机械电子工程和现代加工教学、科研的成果和经验体会，以产品制造为主线，按照产品的前期准备与设计、产品的生产加工、产品的装配、产品的生产管理与工业网络这一脉络来阐述现代制造中的相关知识，同时注意将机械电子工程的优化综合思想和具体实现技术方法贯穿其中。全书共分为 15 章，第 1 章讨论了产品初步设计的基本概念和方法；第 2 章介绍了机械电子产品详细设计的基本手段和一些设计软件工具 AutoCAD、SolidWorks、Pro/ENGINEER、Protel 的使用方法；第 3 章概述了产品的设计评价所涉及的基本考虑因素和评价体系；第 4 章介绍了现代制造的加工环境布局及其信息特征；第 5 章简述了计算机辅助工艺过程设计（CAPP）和计算机辅助制造（CAM）的基本概念，并以 CAM-Works 2003 为例介绍了 CAM 软件的使用方法；第 6 章和第 7 章分别概述了典型切削加工和成形加工的基本方法；第 8 章讨论了几种常见的特种加工技术；第 9 章概述了装配工艺过程中尺寸链的概念和公差分析的方法；第 10 章介绍了装配序列规划和虚拟装配技术的发展和应用；第 11 章和第 12 章分别介绍了现代装配过程中所使用的一些自动化设备和检测技术；第 13 章分析了现代制造系统中的信息流，并给出了信息无缝集成的方案框架；第 14 章介绍了自主研发的基于工业以太网的开放式数控系统以及制造系统动态集成的关键技术；第 15 章介绍了工业以太网实时通信的实现方法，并给出了实验结果。

本书原是“机械电子系统设计”讲义中的两章，1994 年以来作为西安交通大学本科生相关课程的教材已经使用多年；2000 年后结合学校工程训练的教学，增加了设计部分，形成了以本书的第一、二篇为主要内容的讲义，作为本科生“数控加工”课程教材；2004 年



后适当地增加了装配部分的内容，并自行研发了用于教学的设备，扩展了车间物流管理和网络的教学内容，逐渐形成了“以信息为主线、以工艺为基础”的教学思想，作为本科生“现代制造”学科课程的讲义，使用至今已有很多年。此次出版结合了作者近几年的科研和教学工作的经验和体会，又进行了较大的修改，此外还补充了第三篇和第四篇的内容，更完整地介绍了在现代制造各环节中机械电子工程的思想体现与具体应用。希望本书能够成为适合机械工程、能源动力工程以及自动化和管理等专业本科生或硕士研究生的教材。作者力求使学生通过本课程的学习，获得必要的现代制造的基本知识，掌握机电产品的设计加工的基本方法，为将来从事机械电子系统或现代制造系统的设计和研究工作奠定一定的基础。本书也可作为从事相关领域工作的工程技术人员参考读物。

本书由王孙安、陈乃建合作编写第一、二篇；王孙安、邸宏宇合作编写第三篇；王孙安、张旭辉、袁明新合作编写第四篇；全书由王孙安和邸宏宇统一审校和定稿。西安交通大学原副校长于德弘教授对本书作者给予了很大帮助。他与作者关于现代加工教学训练中“既要体现普及性，又要体现先进性”的要求进行了有益的探讨，并为作者在车间物流和网络管理等方面的研究提供了极大的帮助。吴晓冬多次与作者讨论本书的结构与框架，张进华收集了大量装配方面的资料。刘明侃、李新中、周嵘、王斌、李小虎、张育林、张文明、李昆鹏、袁明新、樊庆元、吴神丽、李静等参加了资料的收集、翻译和整理工作，林洋、张旭、封德华、仇之煜为本书绘制了一部分图表，周嵘参加了第6章的编写，张育林、李小虎参加了第7、8章的编写，在此一并表示感谢。作者感谢清华大学傅水根教授和西安交通大学李天石教授审阅了本书。另外，本书还受到西安交通大学“十一五”本科教材建设规划和机械工业出版社“十一五”国家级规划教材出版的资助。

现代制造的发展日新月异，涉及多个学科的广大领域，在一本书中介绍十分困难，而且由于编著者自身的水平有限，对其进行全面、系统的描述和概括难免会有遗漏和错误，恳请读者和相关领域专家给予批评指正。

编著者

目 录

前言

第一篇 产品的前期准备与设计

第 1 章 产品的初步设计	1	2.2.4 装配体	53
1.1 机电产品现代设计的概念	1	2.2.5 工程图	54
1.2 现代设计的特点	1	2.3 Pro/ENGINEER 软件概述	58
1.3 现代制造的一些设计方法	3	2.3.1 Pro/ENGINEER 简介	58
1.3.1 并行设计	3	2.3.2 二维建模	63
1.3.2 系统设计	7	2.3.3 三维建模	70
1.3.3 模块化设计	8	2.4 Protel 软件概述	88
1.3.4 价值工程	14	2.4.1 Protel 简介	88
1.4 基于产品数据（信息）的设计管理 系统	16	2.4.2 原理图设计	88
2.4.3 PCB 设计	96	第 3 章 产品的设计评价	107
第 2 章 产品的详细设计	19	3.1 设计的评价特征	107
2.1 CAD 软件概述	19	3.1.1 工艺性评价	107
2.1.1 AutoCAD 2010 的工作空间	19	3.1.2 经济性评价	108
2.1.2 AutoCAD 2010 的界面组成	19	3.1.3 社会性评价	108
2.1.3 AutoCAD 的命令启动方法	21	3.2 产品全生命周期的绿色评价 体系	109
2.1.4 图层的创建和管理	22	3.2.1 成本与收益的测度	109
2.1.5 AutoCAD 的常用绘图命令	23	3.2.2 绿色产品竞争力评价	111
2.1.6 AutoCAD 的常用修改命令	26	3.2.3 绿色产品综合评价	111
2.1.7 AutoCAD 的尺寸标注	29	3.2.4 绿色制造现状及国内外发展 趋势	112
2.1.8 综合实例	30	3.2.5 绿色制造技术	113
2.2 SolidWorks 软件概述	34		
2.2.1 SolidWorks 2009 简介	34		
2.2.2 草图绘制	38		
2.2.3 零件设计	41		

第二篇 产品的生产加工

第 4 章 现代制造的生产加工环境	118	4.1.5 系统功能模块设计	124
4.1 现代加工车间的特点	118	4.1.6 信息模型设计	125
4.1.1 车间设备布局的基本要求	118	4.1.7 车间制造过程信息系统的实现 架构	125
4.1.2 影响车间设备布局的因素	119	4.1.8 车间制造过程信息系统的可重 构化	127
4.1.3 车间设备布局形式的分类	120	4.2 现代制造的网络结构特征	128
4.1.4 车间制造过程信息系统的总体 结构	123	4.3 现代加工中 CAD 与 CAM 的联系	131



第5章 计算机辅助工艺过程设计

与计算机辅助制造 133

- 5.1 计算机辅助工艺过程设计 (CAPP) 133
 - 5.1.1 CAPP 的基本概念 133
 - 5.1.2 CAPP 的系统结构 136
 - 5.1.3 CAPP 的功能 137
 - 5.1.4 CAPP 系统的分类 138
- 5.2 计算机辅助制造 (CAM) 139
 - 5.2.1 数控编程 139
 - 5.2.2 NC 刀具轨迹的生成方法 139
 - 5.2.3 数控仿真技术 141
 - 5.2.4 CAMWorks 功能简介 142
 - 5.2.5 CAMWorks 2003 的使用 143
 - 5.2.6 CAMWorks 的具体操作简介 143

第6章 典型切削加工 153

- 6.1 车削加工 153
- 6.2 铣削加工 154
- 6.3 刨削加工 156
- 6.4 拉削加工 157
- 6.5 磨削加工 157

第7章 成形加工 160

- 7.1 金属铸造成形 160
 - 7.1.1 铸造工艺基础 160
 - 7.1.2 铸造工艺方法 161
 - 7.1.3 铸造工艺拟定 162
- 7.2 金属锻压成形 163
 - 7.2.1 自由锻成形 163
 - 7.2.2 模锻成形 164

- 7.2.3 板料冲压 166
- 7.2.4 塑性成形新技术 167
- 7.3 金属焊接成形 167
 - 7.3.1 焊接工艺基础 167
 - 7.3.2 焊接成形方法 168
 - 7.3.3 焊接工艺拟定 169
 - 7.3.4 焊接结构设计 169
- 7.4 非金属热压成形 169
 - 7.4.1 高聚合物热压成形 169
 - 7.4.2 高分子胶接成形 170
 - 7.4.3 陶瓷及复合材料成形 170

第8章 特种加工 171

- 8.1 特种加工的产生及发展 171
- 8.2 特种加工的分类 172
- 8.3 电火花线切割加工 174
 - 8.3.1 电火花线切割加工的原理和应用范围 174
 - 8.3.2 电火花线切割控制系统和编程技术 175
- 8.4 快速成形 186
 - 8.4.1 快速成形技术原理 186
 - 8.4.2 快速成形技术的工艺过程 186
 - 8.4.3 快速成形技术的特点 187
 - 8.4.4 快速成形技术的分类 187
 - 8.4.5 快速成形技术的应用 189
- 8.5 近净成形 190
 - 8.5.1 近净成形技术 190
 - 8.5.2 近净成形技术的国内外发展趋势 190

第三篇 产品的装配

第9章 装配公差分析及分配 193

- 9.1 装配公差的基本概念 196
 - 9.1.1 尺寸链 197
 - 9.1.2 形位公差 199
- 9.2 公差分析 213
 - 9.2.1 用完全互换法解尺寸链 213
 - 9.2.2 用大数互换法解尺寸链 214
 - 9.2.3 解尺寸链的其他方法 215
- 9.3 柔性件的公差分析 217
 - 9.3.1 柔性薄板装配技术的发展现状 217
 - 9.3.2 柔性薄板装配的基本形式 218

- 9.3.3 柔性薄板装配中的公差分析技术 219

第10章 装配序列规划与虚拟装配 222

- 10.1 基于多目标的装配序列规划 222
 - 10.1.1 装配序列规划的发展 222
 - 10.1.2 装配序列的评价与优化 225
 - 10.1.3 装配序列规划的方法 228
- 10.2 虚拟装配 229
 - 10.2.1 虚拟装配的基本概念 230
 - 10.2.2 虚拟装配的实现技术 232
 - 10.2.3 虚拟装配的规划过程 233



10.2.4 虚拟装配的发展趋势	236	11.3.2 自动化装配生产线	255
第 11 章 装配自动化设备	238	第 12 章 装配过程中的检测技术	258
11.1 物流车	238	12.1 数字化测量技术	258
11.1.1 物流车的类型和结构	238	12.1.1 三坐标测量机	258
11.1.2 物流车的导航方式	240	12.1.2 激光数字化测量	264
11.2 装配机械手	244	12.1.3 基于图像的测量技术	267
11.2.1 装配机械手的组成	245	12.1.4 室内 GPS	270
11.2.2 装配机械手的设计特点	248	12.2 装配检测系统集成技术	273
11.2.3 几种典型的机械手	248	12.2.1 多种检测方法的集成	273
11.3 专用装配设备	252	12.2.2 测试与加工制造过程的集成	275
11.3.1 自动化装夹	252		

第四篇 产品生产的信息化管理与工业网络

第 13 章 产品生产管理的信息集成技术	277	第 15 章 工业以太网实时通信模型及协议关键技术	301
13.1 现代制造系统信息流分析	279	15.1 面向嵌入式系统的工业以太网通信协议栈	301
13.2 设备数字化装备集成控制技术	280	15.1.1 协议栈模型分析	301
13.3 现代制造系统信息无缝集成方案	282	15.1.2 可嵌入现场设备的网络通信协议栈	302
第 14 章 开放式数控系统与制造系统动态集成技术	284	15.1.3 工业控制实时网络通信模型	302
14.1 开放式数控系统的概念设计	284	15.2 面向数控系统实时应用的通信协议的实现	304
14.2 开放式数控系统的网络化嵌入式解决方案	285	15.2.1 基于时间和事件驱动的报文传输模型	304
14.3 基于 ARM + DSP 的开放式数控系统设计	286	15.2.2 网络报文快速编码/解码算法	306
14.4 开放式数控系统的抽象模型	288	15.3 网络化数控系统的任务集成调度框架	309
14.4.1 设备对象模型	288	15.3.1 网络调度与单处理器任务调度的分析与处理	310
14.4.2 虚拟制造设备 (VMD) 的抽象模型	289	15.3.2 网络化数控系统的任务调度分析	311
14.4.3 功能和数据对象的抽象模型	291	15.3.3 网络化数控系统的分级调度策略	312
14.5 基于 XML 的现场设备互操作解决方案	291	15.4 基于以太网的设备信息集成平台及测试	313
14.5.1 基于 XML 的数控设备信息描述	292	15.4.1 数控系统通信功能测试	314
14.5.2 数据模型映射的 B/S 体系模型	293	15.4.2 数控系统及制造系统的动态集成相关实验	318
14.5.3 数控设备描述文件体系结构	293	参考文献	320
14.5.4 基于 XML 的设备描述文件解析	296		
14.5.5 制造系统组态与动态可重配置管理	296		

第一篇

产品的前期准备与设计

第1章 产品的初步设计

当前,国民经济各部门迫切需要质量好、效率高、消耗低、价格便宜的机电产品,而产品设计是决定产品性能、质量、水平和经济效益的重要环节之一。产品是否有竞争能力,很大程度上取决于产品的设计。近几十年来,随着科学技术的不断发展,尤其是计算机技术的发展,设计领域发生了巨大的变革。新原理、新方法、新技术与新结构的不断涌现,大大提高了设计水平并加快了设计速度。国外自20世纪70年代初期就开始推行基于电子计算机软硬件的现代设计方法,极大地推动了机电产品设计工作的进展,使设计水平、设计质量和新产品的开发效率都有了很大的提高,设计周期也缩短了。而我国推行现代设计方法起步较晚,目前还处于推广应用阶段。

1.1 机电产品现代设计的概念

设计是人类改造自然的基本活动之一。设计的目的是将预定的目标经过一系列规划与分析决策,产生一定的信息,形成设计方案,并通过制造使设计方案成为产品,造福人类。设计是复杂的思维过程,设计过程蕴含着创新和发明的机会。

现代设计是传统设计活动的延伸和发展,是随着设计实践经验的积累而逐步发展起来的。随着电子计算机的出现、设计方法学和创造方法学的迅速发展以及科学技术的进步,人们在掌握事物的客观规律、掌握人类的思维规律的同时,能够运用有关科学、技术原理进行复杂的甚至在这以前认为不可能的计算。这就使得机电产品的设计工作发生了质的变化。20世纪60年代末期,在机电产品的设计领域中相继出现了一系列新兴学科,主要有设计方法学、优化设计、价值工程、计算机辅助设计(CAD)、可靠性设计、工业艺术造型设计、模块化设计、反求工程、有限元方法等,还有一系列的分支,如相似性设计、系统化设计、人机工程学、模态设计、动态设计、疲劳设计、三次设计等,其中不少技术已日趋成熟,并已得到了广泛应用。

20世纪80年代以前,我国对国际上设计领域的巨大变化了解甚少,因此,对这些新发展的学科大多是生疏的。为了强调对设计领域的革新,我国设计领域习惯上把国际上新崛起的设计方法的相关学科称为“现代设计”,而把过去常用的设计称为“传统设计”。

1.2 现代设计的特点

(1) 综合性



现代设计突破传统、经验、类比的设计,采用逻辑、理论、系统的设计方法:在静态分析的基础上考虑载荷谱等随机变量,进行更合理、更全面的动态分析;强度设计时不是一味地加大安全系数,而是从概率论和统计学出发,考虑载荷和应力的离散性进行可靠性设计。现代设计在系统工程、创造工程基础上运用信息论、相似论、模糊论、可靠性理论、有限元方法、人机学等自然科学理论及价值工程、决策论、预测论等社会科学理论,同时采用集合、矩阵、图论等数学工具和计算机技术更科学地解决设计问题。

(2) 最优性

现代优化设计即在产品设计时,在各种限制条件下,运用最优化方法,通过计算机迭代计算,寻求最佳的设计参数值。而“传统设计”仅通过设计—评定—再设计等一系列试探性的设计过程,从多种设计方案中选取其中较为满意的方案,虽然这也是一种优化过程,但是这是凭借设计人员的知识、经验、判断力进行的,因此这仅是一个“自然优化”的过程。这种“自然优化”在设计的时间、优化的精度等方面与最优化设计方法是不能比拟的。

(3) 系统性

现代设计强调用系统工程的方法来处理技术系统问题,设计时分析各部分的有机联系,力求系统整体优化,同时考虑技术系统与外界的联系,即人一机—环境三者之间的相互协调关系,并把舒适性放在首位。通过功能分析、功率分配、界面设计、系统综合等方法,使人机之间的功能相互协调,从而发挥产品的最大潜力或提高系统的有效性,而“传统设计”是凭借经验或自发状态来考虑人一机—环境间的关系。由于“传统设计”思想的局限性,没有从系统出发合理分配人机的功能,因此难以达到三者之间的协调关系,而往往是通过操作者的训练来适应机器的设计中对操作的要求。

(4) 创造性

现代设计突出创造性,发挥集体智慧,运用各种创造技法,通过直觉想象和推理思维,力求探寻更多突破性方案,开发创新产品。

(5) 程式性

现代设计方法研究设计的全过程,要求设计者从产品规划、方案设计、技术创新、施工设计到试验、试制进行全面考虑,按步骤、有计划地进行设计。现代设计方法强调设计、生产与销售一体化。设计不是单纯的科学技术问题,要把市场需求、社会效益、经济成本、加工工艺、生产管理等问题统一考虑,最终反映到质高价廉的产品上。

(6) 艺术感染力

现代设计在强调内在质量的实用性的同时,也非常重视外观质量的美观性、时代性、艺术性,使产品造型有一定的艺术感染力,对操作者有新颖、心情舒畅、愉快、兴奋等精神功能,满足操作者的审美要求。现代设计对造型已形成较为完整的美学法则,即比例尺与尺度、对称与平衡、稳定与轻巧、节奏与韵律、统一与变化等,并灵活地运用色彩设计、视错觉、新材料、新工艺、新结构等以增强产品的美感。而传统设计往往仅强调产品的性能等物质功能,忽略精神功能,即使有所考虑,也是片面而零散的。

(7) 计算机辅助设计(CAD)

现代设计全面地引入计算机辅助设计,通过设计者和计算机的密切配合,采用先进设计方法,提高设计质量和速度。对于许多设计对象,可先建立设计模型,将参数输入计算机进行计算或绘图,使设计更加准确、高效且便于修改。计算机辅助设计不仅用于计算和绘图,



它在信息储存、预测、评价决策、动态模拟、特别是人工智能方面将发挥更大作用。

1.3 现代制造的一些设计方法

1.3.1 并行设计

1. 并行设计的发展现状及趋势

自20世纪80年代提出并行工程以来,美国、欧盟的成员国和日本等先进发达国家均给予了高度重视,成立了研究中心,并开展实施了一系列以并行工程为核心的政府支持计划,如美国的DICE计划(投资逾亿美元)、欧盟的ESPRIT计划以及日本的IMS计划。

通过大量的研究,国际上已在并行工程的思想、方法和实现技术上取得了一些成果,如阵列型机构、稻草人指导原则等企业组织机构形式和多功能综合产品开发(群)组(Team Work)的组织与管理方式;动态经营模型、高级Petri网等产品开发过程的建模和仿真技术;DFX(面向装配/制造/拆卸/检测/维护等的设计)等并行设计技术。

很多企业,特别是空中客车公司、波音公司、ABB、西门子、IBM等一系列大公司开始了并行工程实践的尝试,取得了良好效果。

进入20世纪90年代,并行工程也引起了我国学术界的高度重视,成为我国制造业和自动化领域的研究热点,一些研究院所和高校开始进行一些有针对性的研究工作。1995年,“并行工程”正式作为关键技术列入863计划的CIMS研究项目,有关工业部门也开始设立小型项目,资助并行工程技术的预研工作。国内部分企业也已经自觉地运用并行工程思想和方法来缩短产品开发周期、增强竞争能力。但是,由于投资规模比较小,绝大部分研究项目还仅仅局限在学术讨论的层次上,相关成果还只是一些原理化、特例化的推理和公式,未得到系统化、工程化的扩充和完善,难以满足企业实践的要求。

2. 并行工程概述

并行工程(Concurrent Engineering, CE)技术是对产品及其相关过程(包括制造过程和支持过程)进行并行、集成化处理的系统方法和综合技术。它要求产品开发人员从一开始就考虑产品全生命周期(从概念形成到产品报废)内各阶段的因素(如功能、制造、装配、作业调度、质量、成本、维护与用户需求等),并强调各部门的协同工作,通过建立各决策者之间的有效的信息交流与通信机制,综合考虑各相关因素的影响,使后续环节中可能出现的问题在设计早期阶段就被发现,得以解决,从而使产品在设计阶段便具有良好的可制造性、可装配性、可维护性及回收再生等方面的特性,最大限度地减少设计反复工作,缩短设计、生产准备和制造时间。并行工程的内涵及其组成如图1-1所示。由此可见,并行工程是一种现代产品开发中的系统化方法,它以信息集成为基础,通过组织各学科的产品开发小组,利用各种计算机辅助手段,实现产品开发过程的集成。

并行工程的关键是用并行设计方法代替串行设计方法,图1-2所示为串行设计方法示意图,图1-3所示为并行设计方法示意图。

对比图1-2和图1-3可以看出,在串行设计中信息流是单向的,而在并行设计中信息流是双向的。并行工程与传统串行产品设计方式的根本区别在于:并行工程把产品开发的各个活动看成是一个整体、集成的过程,并从全局优化的角度出发,对集成过程进行管理和控

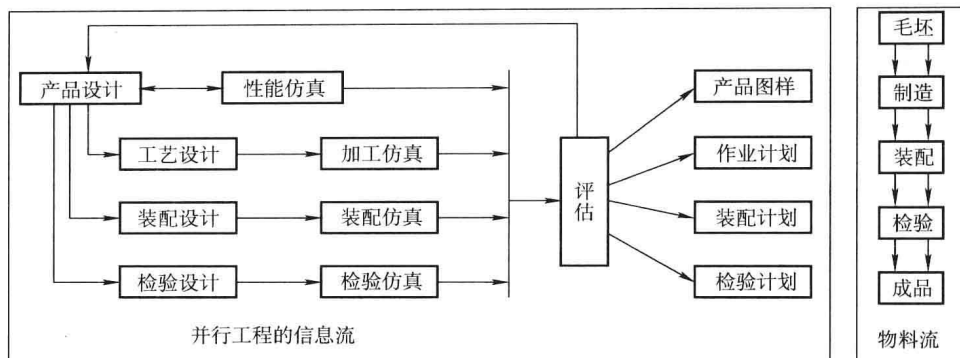


图 1-1 并行工程的内涵及其组成



图 1-2 串行设计方法示意图

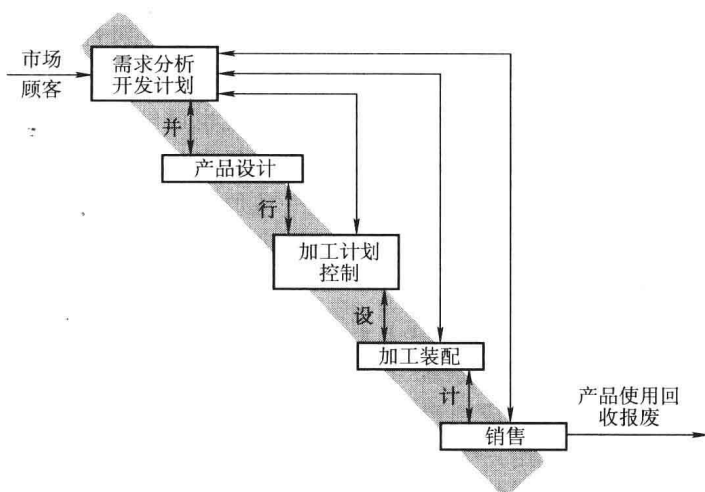


图 1-3 并行设计方法示意图

制。并行工程的重要目标就是使产品一次性成功，缩短产品开发周期，提高产品质量，降低生产成本，提高产品竞争力。

3. 并行设计系统

并行工程的核心是产品并行设计。并行设计是指设计工程师在产品设计阶段就已经综合考虑到了工艺规划、制造、装配、测试、维护等其他环节的影响，以证明其设计的正确性与可行性。在产品并行设计过程中，按 4 个阶段进行设计和评价，如图 1-4 所示。

(1) 产品概念设计

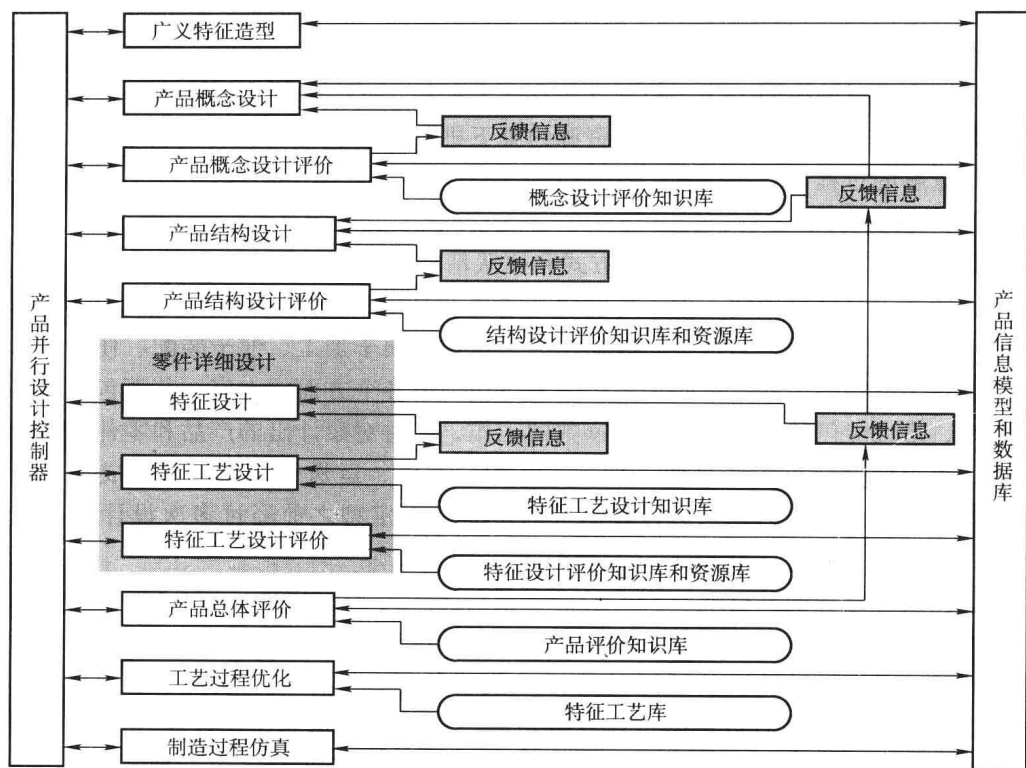


图 1-4 计算机辅助产品并行设计系统

对产品设计要求进行分组描述和表述，如设计实体的模式，以及性质、属性等之间的关系描述，并对方案、产品批量、类型、可制造性和可装配性进行评价，选出最佳方案，指导产品概念设计。

(2) 结构设计及其评价

将产品概念设计获得的最佳方案结构化，确定产品的总体结构形式以及零部件的主要形状、数量和相互间的位置关系；选择材料、确定产品的主要结构尺寸，以获得产品的多种结构方案，并对各种制造约束条件、加工条件、装夹条件、工装设计和零部件标准化等各种方案进行评价和决策。选择最佳结构设计方案或提供反馈信息，指导产品的概念设计和结构设计。

(3) 详细设计及其评价

根据结构设计方案对零部件进行详细设计。零部件由许多个特征组合而成，进行特征设计的同时进行工艺设计（生成其加工方法、切削参数、刀具选用和装夹方式等），并对其可制造性进行评价，及时反馈修改信息，指导特征设计，实现特征/工艺并行设计。

(4) 产品总体性能评价

该阶段由于产品信息较完善，对产品的功能、性能、可制造性和成本等采用价值工程方法对产品进行总体评价，并提出反馈信息，指导产品的概念设计、总体设计和详细设计。

在完成上述4个阶段的设计和评价后，还必须进行工艺过程优化，在完成产品设计、工艺设计和工装设计的基础上，对零部件的实际加工过程进行仿真。

从图1-4可知，给予广义特征建立的产品信息模式，为产品并行设计过程中各项活动的



信息交换与共享提供了切实的保证。而并行设计控制器是一种协调板,它对设计结构进行发布和接受设计的反馈信息,对设计过程中的上下游活动进行协调与控制,实现多学科工程技术人员以及专家系统的协同工作,控制方式有电子邮件、文件传输、远程登录、远程布告牌和系统菜单操作等。并行设计是在各种资源约束下进行反复迭代(设计与修改),获得产品最优解和满意解的过程。

4. 并行工程的特点

(1) 强调团队工作(Team Work)方式和团队精神

一个人的能力总是有限的,他不可能同时精通产品从设计到售后服务各个方面的知识,也不可能掌握各个方面的最新情报。因此,为了设计出便于加工、便于装配、便于维修、便于回收、更便于使用的产品,就必须将产品寿命循环中各个方面的专家,甚至包括潜在的用户集中起来,形成专门的工作小组,大家共同工作,随时对设计出的产品和零件从各个方面进行审查,力求使设计出的产品便于加工、装配、维修、运送、使用,并且成本低、外观美。在集中了各方面专家的智慧后设计出来的产品(在定型之前经过多次设计修改)必然可以满足(或基本满足)上述要求。

(2) 强调设计过程的并行性

并行性有两方面的含义:其一是在设计过程中通过专家把关,同时考虑产品寿命循环的各个方面;其二是在设计阶段就可同时进行工艺(包括加工工艺、装配工艺和检验工艺)过程设计,并对工艺设计的结果进行计算机仿真,直至用快速原型法产生出产品的样件为止。这种方式与传统的设计在设计部门进行,工艺在工艺部门进行已大不相同。

(3) 强调设计过程的系统性

设计、制造、管理等过程不再是一个个相互独立的单元,而要将它们纳入一个整体的系统来考虑,设计过程不仅出图样和其他设计资料,还要进行质量控制、成本核算,也要产生进度计划等。这种工作方式是对传统管理机构的一种挑战。

(4) 强调设计过程的快速反馈

并行工程强调对设计结果及时进行审核,并及时反馈给设计人员。这样可以大大缩短设计时间,还可以保证将错误消灭在“萌芽”状态。

5. 并行工程的效益

(1) 缩短产品投放市场的时间

顾客的偏好是不断改变的,在制造业不发达的时代,顾客主要考虑产品的功能,要求功能的完善程度和实用性,其他要求则放在次要的位置。随着制造技术的发展,能够提供的商品增多,顾客又开始强调产品的价格。这时,价格往往作为顾客考虑的主要因素。因此,制造者拼命降低成本,以求得价格优势。当价格降到一定程度后,顾客又开始将质量提到重要地位来考虑。现在正处在必须以质量取胜的时代,没有好的质量,产品就难于在市场上站稳脚跟,只靠价格取胜近乎成为历史。市场的下一步发展将会是以缩短交货期作为主要特征。并行工程技术的主要特点就是可以大大缩短产品开发和生产准备时间,使两者部分相重合。而对于传统的串行产品开发过程,正式批量生产时间的缩短是有限的。

(2) 降低成本

并行工程可在3个方面降低成本:首先,它可以将错误限制在设计阶段。据有关资料介绍,在产品寿命周期中,错误发现得越晚,造成的损失就越大;其次,并行工程不同于传统



的“反复试制样机”的做法，强调“一次达到目的”，这种“一次达到目的”是靠软件仿真和快速样件生成实现的，省去了昂贵的样机试制；其三，由于在设计时就考虑加工、装配、检验、维修等因素，因此，产品在上市前的成本将会降低。同时，在上市后的运行费用也会降低。所以，产品的寿命循环价格降低了，这样既有利于制造者，也有利于顾客。

(3) 提高质量

采用并行工程技术，尽可能将所有质量问题消灭在设计阶段，使所设计的产品便于制造、易于维护。这就为质量的“零缺陷”提供了基础，使得制造出来的产品不用检验就可上市。事实上，根据现代质量控制理论，质量首先是设计出来的，其次才是制造出来的，并不是检验出来的。

(4) 保证功能的实用性

由于在设计过程中，同时有销售人员参加，有时甚至还包括顾客，这样的设计方法反映了用户的需求，可以保证去除冗余功能、降低设备的复杂性、提高产品的可靠性和实用性。

(5) 增强市场竞争能力

由于并行工程可以较快地推出适销对路的产品并投放市场，能够降低生产制造成本、保证产品质量、提高企业的生产柔性，因而，企业的市场竞争力将会得到加强。

6. 并行工程在先进制造技术中的地位与作用

并行工程在先进制造技术中具有承上启下的作用，这主要体现在以下两个方面：

1) 并行工程是在 CAD、CAM、CAPP 等技术支持下，将原来分别进行的工作在时间和空间上交叉、重叠，它充分利用了原有技术，并吸收了当前迅速发展的计算机技术、信息技术的优秀成果，使其成为先进制造技术中的基础。

2) 在并行工程中，为了达到并行的目的，必须建立高度集成的主模型，通过它来实现不同部门人员的协同工作。为了使产品一次设计成功，减少反复工作，在并行工程中许多部分应用了仿真技术。并行工程的进一步发展方向是虚拟制造（Virtual Manufacturing, VM）。虚拟制造又叫做拟实制造，它利用信息技术、仿真技术、计算机技术对现实制造活动中的人、物、信息及制造过程进行全面仿真，以发现制造中可能出现的问题，在产品实际生产前就采取预防措施，从而达到产品一次性制造成功，来达到降低成本、缩短产品开发周期、增强产品竞争力的目的。并行工程中主模型的建立、局部仿真的应用等都包含在虚拟制造技术中。可以说，并行工程的发展为虚拟制造技术的诞生创造了条件，虚拟制造技术将是以并行工程为基础的。

1.3.2 系统设计

现代设计中，应用系统论思想和方法的情况是十分普遍的。系统论的设计思想，其核心是把设计对象以及有关的设计问题，如设计程序和管理、设计信息资料的分类整理、设计目标的拟定、人一机—环境系统的功能分配与动作协调规划等，视为系统，然后用系统论和系统分析概念和方法加以处理和解决。

系统设计是一种综合的、形象性的创造行为，是为满足人的特定需求，运用系统原理，集中相关信息与能力要素，研究与处理其环境—整体—局部间动态关系，有效提出问题解决方案的活动。

产品系统设计的构筑要素在综合考虑产品系统开发流程、产品生命周期系统、产品使用



环境系统等综合体系后，主要分为基系统与宏系统两块。基系统指的是狭义上的，仅仅针对开发对象可视范围内的系统范畴，即开发对象所必需的、不可或缺的系统要素，包括围绕对象最紧密的要素和对象内部的子要素，否则开发对象失败。宏系统指的是广义上的，考虑到与社会经济、时代、环境、用户等的相互关系及影响，开发对象作为系统中的一个有着复杂相互关系的主要要素来考虑。两者区别在于一个是将开发对象作为系统，一个是将开发对象作为系统中的一个子要素。

1.3.3 模块化设计

1. 模块化的概念

模块是模块化产品的基本元素，是一种实体的概念，可以把模块定义为一组同时具有相同功能和相同结合要素、具有不同性能或用途甚至不同结构特征，但能互换的单元。

模块化一般是指使用模块的概念对产品或系统进行规划设计和生产组织。产品的模块化设计是在对一定范围内的不同功能，或相同功能而不同性能、不同规格的产品进行功能结构分析的基础上，划分并设计出一系列模块，通过模块的选择和组合可以构成不同的产品，以满足市场不同需求的设计方法。

2. 机电产品模块化的特点

(1) 互换性强、便于维修

模块化机械产品是由一些具有互换特性的标准化模块集合而成的，可直接更换模块，显著简化了产品的维护和修理，可提高产品的维修速度，节约修理费用，提高效率。

(2) 质量高、成本低，能解决多品种、小批量和大批量加工之间的矛盾

在模块化产品中，模块是具有特定功能的标准化部件单元，可安排专人负责设计，并通过对所设计模块进行试验研究，不断完善模块的性能和提高模块的质量，从而提高产品的质量。因为各种模块可集中在专门的工厂进行专业化批量加工，可使单件小批量生产变为相当批量的规模生产，把传统的以产品为单位组织生产的方式转变为以部件为单位组织生产的方式，解决了多品种小批量和大批量加工之间的矛盾，而且还便于采用先进的加工设备、加工工艺及 CAD/CAM 等技术，提高生产效率，降低废品率。同时，由于模块化产品的设计周期短，设计成本也大大降低。

(3) 有利于企业采用先进技术改造旧产品、开发新产品

随着竞争的日益加剧，企业需要不断增强对市场需求的快速应变能力，传统的设计与制造方法显然是不能胜任的。利用模块化设计制造方法，可以不断地采用新技术，革新那些在结构上或技术上已经陈旧的模块，并在不改变其他模块的基础上集成成先进的产品，使产品不断保持先进性，从而增强企业对市场变化的适应能力。

(4) 有利于缩短产品的设计、制造和供货周期

模块化设计制造的不同用途的机械，是通过相应层次和功能的模块集合而成的，而非各个单一零件的组合装配，因此产品的更新周期短。这是因为：一是在产品的系列化设计时，因为系列中存在很多通用模块，设计周期较传统方法短；二是当进行模块化设计之后，便可采用全部现成模块或添加少量专用模块来集成用户所要求的品种；三是可以从基本型的模块化产品，派生出若干变型产品来；四是模块化设计的产品，是按功能模块组织生产的，由于同一层次、同一功能的模块，其加工的木模、工艺流程及工艺装备都是定型的，故产品的



制造周期比传统的制造周期要短。因此,产品的短周期设计与制造,导致其供货周期缩短,从而满足市场的要求。

产品模块化设计具有缩短设计与试制周期、提高质量、降低成本、产品更新及维护更简便等诸多优越性,是产品设计的发展趋势。

3. 模块化设计的优势

(1) 减少产品开发时间

模块化根据清楚的分界面把产品分解为元件。这些分界面允许对设计任务进行压缩。压缩的结果是使设计的复杂性降低,并能使设计任务并行进行,最终缩短产品的开发周期。

(2) 便于产品顾客化和升级

模块化产品通过集成几种相互作用的功能模块满足了顾客需求。这种集成方法允许产品通过利用更有效的元件来提高自身性能。另外,元件可以被定制的元件替代以实现不同的功能。

(3) 提高效率、降低成本

模块化元件可以应用于几条生产线,这就意味着它们的产量是非常高的。这将允许大量产品开发成本的分期偿还。

(4) 提高产品质量

模块化允许生产任务的同时进行。于是,在独立的元件集成为一个模块化产品之前,元件可以分立地进行生产和检测。这将有助于提高产品的质量。

(5) 易于确立统一的设计标准

模块化设计清楚地确立了元件的功能,减少了元件和产品其他部分的相互联系。这就使得设计标准的确立比较容易。

(6) 缩短产品的订购周期

模块化产品可以通过标准件或顾客性元件的集成来获得。这将允许对标准元件进行目录清单的编制,并使顾客化集中在不同的元件上。同时,标准元件结合起来也可形成模块化产品,也就是说,同样的标准件以不同的方式集成后可以形成不同的产品,满足不同的顾客需求,大大缩短了产品的订购周期。

4. 模块化设计的基本支撑理论

(1) 系统论原理

任何模块化的事或物都可看成是一个系统,开展模块化工作,只有善于运用系统论的原理才能取得良好的系统效果。整体性是系统的最基本属性,把系统作为有机整体看待,构成系统的各个要素虽然具有不同的性能,但它们都由逻辑统一性的要求构成整体。系统内各单元之间是互相联系、互相作用、有机结合的,系统与环境、系统与系统之间也存在相互联系和相互作用。在模块化系统中,这种相关性体现为系统中的链状的接口系统,如模块之间的机械接口、电气接口、各种物理量与电量的接口、信息接口等。只有充分考虑各接口之间的协调与匹配性,才能保证系统整体的良好质量及可靠性。运用结构分析方法,对模块化系统内各单元之间既有的关系、空间排列顺序及组合的具体形式、结构与功能的关系、功能间的联系进行分析和考虑。

另外,由于模块化系统具有的结构层次特点,且模块化系统并非建立后一成不变,而会随着技术和时间的发展而不断吸收新技术、新模块。因此,层次性原理与层次分析法,动态性原理和动态思维法的合理运用也是开展模块化的重要分析原理和手段。