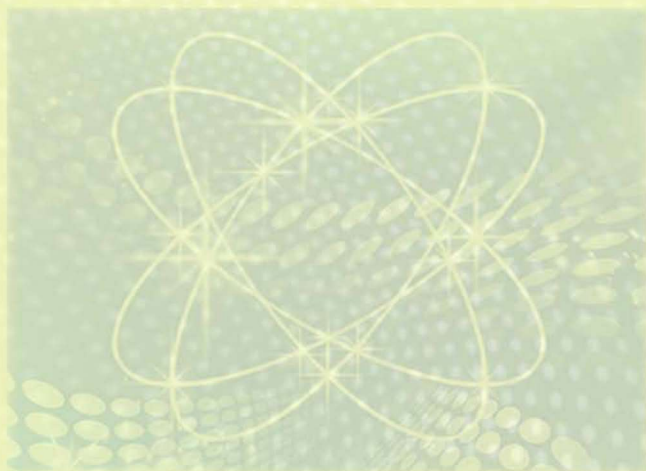


复杂产品协同 装配设计与规划

刘继红 王峻峰 著



华中科技大学出版社

内 容 简 介

本书从复杂产品设计工程的角度,系统地阐述了复杂产品协同装配与规划的方法和技术,着重介绍了复杂产品协同装配建模技术、协同装配性分析技术、人机协同的智能装配规划与优化技术,以及人人协同的集成装配设计与规划技术,并结合具体例子介绍了面向复杂产品的协同装配设计与规划系统及其应用。

本书集中体现了在国家“863”计划课题和国家自然科学基金项目支持下取得的科研成果,具有专业性、系统性和实用性,反映了现代产品开发技术的最新进展。

本书可作为广大工程技术人员,特别是产品开发技术人员及高等院校机械类专业研究生学习与工作的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂产品协同装配设计与规划/刘继红 王峻峰 著. —武汉:华中科技大学出版社,2011.11
ISBN 978-7-5609-7406-4

I. 复… II. ①刘… ②王… III. 装配(机械)-设计 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 205832 号

复杂产品协同装配设计与规划

刘继红 王峻峰 著

策划编辑:万亚军

责任编辑:刘 飞

封面设计:范翠璇

责任校对:何 欢

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:武汉中远印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:16.25

字 数:341千字

版 次:2011年11月第1版第1次印刷

定 价:59.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

随着市场全球化的发展,企业面临的竞争压力越来越大。如何在更加苛刻的开发周期和开发成本的制约条件下,快速响应市场需求,研发生产出高质量的产品,成为制造企业参与竞争、赢得发展的核心任务。在这样的背景下,新的、先进的产品开发技术必然成为制造企业高度关注和期待的、用来提升企业竞争能力的重要支撑。新的、先进的产品开发技术融合了各种先进的设计理论和方法、先进的信息技术和先进的管理思想。

复杂产品系统是指高成本的、大规模的、定制的、技术与工程密集型的产品,子系统和系统或设施,亦称为大型技术系统。复杂产品制造业是国防和国民经济的支柱产业,复杂产品设计水平往往代表国家制造业的技术水平,因此,复杂产品工程作为先进的产品开发技术,得到了越来越多的重视。

本书结合作者近十年来完成国家自然科学基金项目和国家高技术研究发展计划(“863”计划)课题,以及与合作企业研究开发项目所取得的研究成果,试图从解析复杂产品设计工程的内涵及内容着手,选择复杂产品装配问题,探讨面向复杂产品的先进产品开发技术的特点及关键技术。相关学科涵盖计算机图形学、网络技术、人工智能、认知科学、系统工程等计算机科学与工程,以及设计理论与方法、产品制造工艺等机械科学与工程。本书主要内容如下。

第1章主要介绍复杂产品设计工程的思想与内容。

第2章主要介绍与产品装配设计、装配建模、装配分析,以及装配规划等相关的基础性概念和一般技术。

第3章主要介绍复杂产品协同装配设计与规划的基本思想与技术框架。

第4章重点介绍面向复杂产品协同装配设计的产品装配信息模型及其建模方法。

第5章重点介绍考虑装配性的产品结构设计 with 优化流程、产品装配性评价体系,以及产品结构优化设计方法。

第6章主要介绍体现人机协同思想的虚拟装配技术、智能装配规划与优化技术,以及两者的结合。

第7章主要介绍体现分治思想的装配规划任务分解-规划结果合成技术。

本书反映了作者及作者所领导的研究团队在华中科技大学和北京航空航天大学工作期间的研究成果。本书的主要内容来源于作者指导的博士生、硕士生的工作成果和学位论文及发表的学术论文。这些学生一部分已经走上工作岗位,或者在高等院校继续从事科研教学工作,或者任职于制造企业,从事产品开发与生产工作。在此



列出为本书内容作出直接贡献的人员名单:上海汽车工业(集团)总公司(上汽集团)管强博士,东华大学单鸿波博士,武汉工程大学曹鹏彬博士,华北电力大学王永博士,华东理工大学周炜博士,华为公司杨鹏硕士、李雄伟硕士、张鑫硕士和陈桓硕士,中国航天科工集团第二研究院王敏硕士,中国航天科技集团东方红卫星公司曾森硕士,以及目前正在读的孙兆洋博士生、朱玉明博士生、李连升博士生、谷志才硕士生和徐飞硕士生。同时,向没有提到名字但在本书形成过程中给予各方面帮助和支持的其他同事和学生表示感谢。

特别感谢国家科技部“863”计划、国家自然科学基金委员会的大力支持,没有国家“863”计划课题(编号 2006AA04Z138)和国家自然科学基金重大项目(编号 59990470)的资助,本书所展示的研究成果就难以取得。

作为研究成果,书中不可避免地会存在不完善的地方或者见解,内容的表述也会存在不妥当的地方,作者衷心希望各位专家和广大读者不吝批评和指正。

作 者

2011 年 10 月

目 录

第 1 章 复杂产品设计工程	(1)
1.1 复杂产品	(1)
1.1.1 产品的进化	(1)
1.1.2 复杂产品的定义	(2)
1.1.3 产品的复杂性与技术进步	(6)
1.2 复杂产品设计工程	(8)
1.2.1 复杂产品设计工程概述	(8)
1.2.2 复杂产品生命周期设计工程	(10)
1.2.3 复杂产品协同设计工程	(12)
1.2.4 复杂产品数字化设计工程	(13)
1.3 复杂产品协同装配设计与规划	(16)
主要参考文献	(16)
第 2 章 产品装配设计与装配规划技术基础	(18)
2.1 概述	(18)
2.2 装配建模	(19)
2.2.1 产品功能装配模型	(19)
2.2.2 产品结构装配模型	(21)
2.2.3 产品工艺装配模型	(23)
2.2.4 装配建模方法	(24)
2.3 面向装配的设计	(26)
2.3.1 并行工程	(26)
2.3.2 产品生命周期设计技术	(27)
2.3.3 面向装配的设计方法	(31)
2.4 装配规划	(33)
2.4.1 装配序列规划	(33)
2.4.2 装配过程优化	(35)
2.4.3 装配过程仿真	(36)
主要参考文献	(36)
第 3 章 协同装配设计与规划技术框架	(40)
3.1 基本思想	(40)
3.2 技术体系与框架	(41)



3.2.1	技术体系	(41)
3.2.2	集成框架	(42)
3.2.3	运行机制	(44)
	主要参考文献	(46)
第4章	协同装配建模	(48)
4.1	概述	(48)
4.1.1	装配信息建模	(48)
4.1.2	装配语义	(49)
4.1.3	协同装配建模	(50)
4.2	集成装配信息模型	(52)
4.2.1	装配模型中的信息	(52)
4.2.2	装配语义的分类与描述	(53)
4.2.3	基于特征的装配语义表达	(55)
4.2.4	基于本体的装配语义表达	(58)
4.3	协同装配建模方法	(61)
4.3.1	基于语义推理的协同装配建模	(61)
4.3.2	基于 OWL 的协同装配建模	(67)
4.4	应用实例	(74)
4.5	小结	(77)
	主要参考文献	(78)
第5章	协同装配分析	(81)
5.1	概述	(81)
5.2	装配复杂性综合评价体系框架	(81)
5.3	产品级和零部件级的装配性分析	(83)
5.3.1	面向手工装配的零件装配性分析	(83)
5.3.2	面向机器自动化装配的零件设计原则	(85)
5.3.3	产品装配性分析	(85)
5.4	装配过程综合分析	(87)
5.4.1	基于人工装配的操作复杂度评价	(88)
5.4.2	基于机器自动化装配的装配过程评价	(90)
5.4.3	装配稳定性分析	(92)
5.5	小结	(96)
	主要参考文献	(96)
第6章	人机协同的智能装配规划与优化	(98)
6.1	基本思想与体系	(98)
6.1.1	人机协同原理	(98)

6.1.2	人机协同装配规划与优化体系	(102)
6.2	虚拟装配技术	(108)
6.2.1	虚拟现实技术	(108)
6.2.2	虚拟装配技术概述	(109)
6.2.3	人机协同的虚拟装配/拆卸	(113)
6.3	智能装配过程优化(1):演化算法	(126)
6.3.1	遗传算法原理	(126)
6.3.2	面向装配过程优化的多层次并行演化方法	(128)
6.3.3	装配过程的几何推理	(138)
6.3.4	装配过程优化的演化算法	(140)
6.3.5	示例与分析	(142)
6.4	智能装配过程优化(2):蚁群算法	(146)
6.4.1	基本蚂蚁系统	(146)
6.4.2	面向装配序列优化的蚁群算法	(148)
6.4.3	示例与分析	(156)
6.5	智能装配过程优化(3):粒子群算法	(160)
6.5.1	粒子群优化算法	(160)
6.5.2	面向装配序列优化的混沌-粒子群(CPSO)算法系统	(163)
6.5.3	示例与分析	(166)
6.6	面向装配规划优化的智能算法库	(171)
6.6.1	智能算法库框架	(171)
6.6.2	装配规划优化模型	(174)
6.6.3	装配规划优化智能算法的比较	(179)
6.6.4	装配规划优化智能算法库的应用示例	(180)
6.7	小结	(186)
	主要参考文献	(186)
第7章	人人协同的集成装配设计与规划	(192)
7.1	策略与体系	(192)
7.1.1	策略	(192)
7.1.2	体系	(193)
7.2	协同装配规划的任务建模	(195)
7.2.1	面向协同装配规划的装配建模	(195)
7.2.2	面向协同装配规划的装配单元规划	(207)
7.3	装配序列综合	(227)
7.3.1	概述	(227)
7.3.2	自顶向下和自底向上的装配序列合并方法	(228)



7.3.3 合并装配接口结构分析与装配序列合并策略	(229)
7.3.4 装配序列合并流程	(231)
7.3.5 基于装配关系干涉的装配序列合并	(234)
7.3.6 应用示例	(240)
7.4 小结	(244)
主要参考文献	(245)

第1章 复杂产品设计工程

1.1 复杂产品

1.1.1 产品的进化

人工制品(artifact)——产品(product)既是人类改造自然的成果,也是人类用来改造自然的工具。作为技术物化的结果,不同的产品赋予历史以截然不同的时代特征。

在从两百万年前到公元前四五千年左右的人类文明进化早期的石器时代,古人类因陋就简,以石器和棍棒作为护身的武器和狩猎的工具。这些工具从通用的卵石和扁状石器逐步发展成专用的针状和叉状石器和骨器,之后陶器和青铜器出现,人类由此进入青铜器时代。因为不同地域的人类进入青铜器时代的时间不同,甚至相差数百年,所以青铜器时代具有明显的区域性。青铜器制品最早作为装饰物,后来随着重要原料之一的锡不再是稀有资源,青铜器制品开始被用做工具和武器。公元前1200年前后,标志人类进入真正的技术时代的铁器时代拉开帷幕。铁器时代其实是各种金属普及使用的时代,熔炉技术使得达到熔化铁金属的温度不再是件困难的事情,铁中加少量的碳能成钢的现象也被发现。金属制品覆盖壶、盆、碟等生活用品,以及弓弩、刀剑、甲冑、轮式战车等武器装备。

18世纪,人类进入工业化时代,机器轰鸣掩盖了刀耕火种。最早起源于英国纺织业的工业革命,其最大特点是史无前例的技术创新浪潮。从 John Kay 的织梭机和梳棉机,到 James Hargreaves 的多轴纺纱机,再到由 Samuel Crompton 改进的织布机,陆续采用了由 Thomas Newcomen、James Watt 及 Richard Trevithick 等人开发的新的动力装置——蒸汽机。英国在18世纪90年代至19世纪30年代之间,就投入使用了十余万台动力织机。20世纪,技术日新月异,并深刻地改变着世界。层出不穷的新发明转化成大量的新产品,人类拥有了电话、照相机、无线电收音机。18世纪70年代,法国制造出被称为世界上最早的汽车的蒸汽汽车。19世纪80年代初,德国的戴姆勒和奔驰公司几乎同时制造出汽油发动机。1903年12月,美国的莱特兄弟的成功飞行宣告,人类社会拥有了真正意义的克服自然束缚的强力工具。除了人们生活的需要之外,战争的需要也促进了技术的飞跃发展,第一次世界大战期间面世的机枪、坦克、飞机、潜艇、战舰,以及化学武器将技术发展破坏性的一面暴露无遗。第二次世界大战期间研制和开发成功的原子弹及核技术至今仍随时可能使人类陷入灭顶之灾,具备巨大威慑力。当然,第二次世界大战的其他产物,如晶体管和计算机



等,也正丰富和改变着人类的生活。

伴随着工业化的进程,产品的生产方式也历经了一系列变迁。在工业革命早期,定制生产方式是主要的生产方式。一个工匠掌握所有的技能,只要有一个小作坊就能够独立地设计和制造出产品,而且这些产品大多数是根据客户需求定制的。随着人口的不断增长,再高超的工匠也不可能及时地制造出足够的产品来满足人们的需要。在小型工厂,间断生产方式的采用能够实现小批量生产。当人们对某些产品的需求量更大时,连续生产方式应运而生。零部件连续地被搬运到生产车间里的生产线上,生产线上各工位的技术工人只需完成某些规定的操作,完整的产品就可以源源不断地出现在生产线的尽头。当由计算机控制的机器越来越多地添置在车间里时,柔性生产方式便率先应用在发达工业国家。采用柔性生产方式能够像采用间断生产方式那样生产多种小批量的产品,但是使用的却是代表连续生产方式最重要特征的生产线,因此,采用柔性生产方式可以按照大批量的形式生产出低成本而且面向客户不同需求的产品,是 20 世纪末和 21 世纪的新型生产方式。

环顾四周,各式各样的产品布满我们生活的地球。现代的产品或者用于满足人们的生活需要,如家电、汽车、船舶、民用飞机,甚至各类建筑物;或者用于产生其他产品和服务于工程应用,如各种生产设备和装备;或者用于科学研究,如测试仪器、计算机、卫星;或者用于国家防务,如军用飞机、军用舰船等武器装备。仰望苍穹,数不胜数的航天器在遥远的外太空中遨游,空间探测器甚至在外星球上留下了碾轧的痕迹。从 1957 年 10 月 4 日苏联成功发射第一颗人造地球卫星以来,空间探测器相继在月球、金星、火星上成功登陆,而美国的前驱者 10 号历经 17 年,于 1989 年 5 月飞越冥王星,成为第一个飞出太阳系的航天器。人类借助宇宙飞船成功漫步太空,甚至踏上月球的表面。

1.1.2 复杂产品的定义

总体而言,人工制品不断进化的结果是其复杂程度剧增,以至于许多产品可以归类为产品系统甚至复杂产品系统。所谓系统是指有组织的或被组织化的整体,是以有规律的相互联系、相互作用、相互制约、相互依存形式结合起来的要素或对象(子系统)的集合。统一整体性是系统的实质。关于系统的完整科学体系称为系统科学,其中,系统学研究系统的概念、性质和演化规律,而系统工程研究设计和控制系统的工程技术,其目的是使系统达到整体最优或满意。

钱学森、王寿云、戴汝为等人认为,根据子系统数量和种类的多少及子系统之间关联关系的复杂程度,系统可以分为简单系统和巨系统两类(见图 1-1)。简单系统的子系统的数量和种类较少,而且子系统之间的关系也比较单纯。简单系统又分为小系统和大系统,两者的区别在于子系统数量的多少。研究简单系统,可以从子系统间的相互作用出发,直接综合成整个系统的行为功能。巨系统的子系统的种类较多,数量庞大(成千上万甚至上亿),而且子系统之间的关系复杂。如果

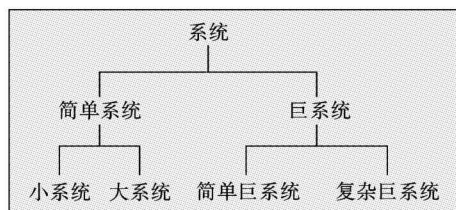


图 1-1 系统的类别

巨系统中子系统的种类不多(几种或十几种),且它们之间的关联关系相对简单,就称为简单巨系统。复杂巨系统是指子系统的种类繁多(几十、甚至成百上千种),相互的关联关系复杂的巨系统,如生物系统、人体系统、人脑系统、地理系统、生态系统、社会系统等。

事实上,简单系统与巨系统的界限并不是绝对的。比如,大系统的概念也可能涵盖巨系统。大系统一般指规模庞大、结构复杂(环节较多、层次较多、关系复杂)、目标多样、影响因素众多、常常带有随机性的系统,例如电力系统、城市交通网、数字通信网、柔性制造系统等。

英国萨西克斯大学(University of Sussex)科技政策研究所和布赖顿大学(University of Brighton)创新管理研究中心联合创办的复杂产品系统创新中心在 20 世纪 90 年代中期提出复杂产品系统(CoPS, complex product and system)概念,并系统研究了复杂产品系统的定义、特性及创新过程规律和创新管理技术。所谓复杂产品系统是指高成本、大规模、定制的、技术与工程密集型的产品、子系统和系统或设施,亦称为大型技术系统(large technical systems)。确定一个产品是否是复杂产品系统,主要考虑其成本、项目周期、复杂程度、技术不确定性、系统层次、定制化程度、风险、零部件种类、知识和技能含量、软件应用范围等因素。复杂产品系统包括飞机与飞机发动机、飞行模拟器、航空控制系统、武器装备、建筑设施、海上石油平台、通信网络、船舶、高速列车及其他很多工程化的产品和系统。复杂产品系统涵盖的范围主要是根据产品的生产方式来界定的,如图 1-2 所示。

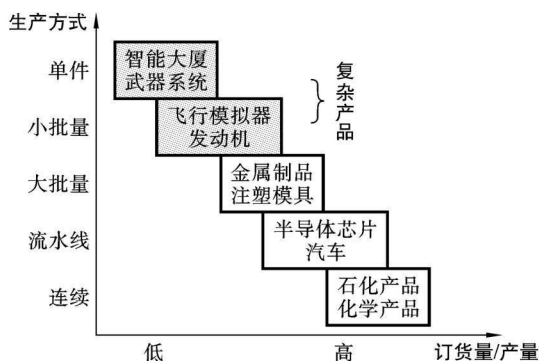


图 1-2 复杂产品系统的涵盖范围



国内从 20 世纪 90 年代开始开展计算机集成制造系统技术的攻关研究与应用实施,取得显著成就,并进一步发展了计算机集成制造技术的概念,提出了现代集成制造技术的新概念,其中的一个重点是复杂产品集成制造系统技术。李伯虎、柴旭东等人将复杂产品定义为客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、制造过程复杂、项目管理复杂的一类产品,如航天器、飞机、汽车、船舶、复杂机电产品、武器系统等。

综上所述,由于研究人员的立场和目的的不同,复杂产品的内涵和外延也不尽相同。为了限定关注的范围和重点,本书给出复杂产品的定义如下。

【定义 1-1 复杂产品】 复杂产品是具有以下特征的技术系统:

- (1) 功能的多样性;
- (2) 结构的层次性;
- (3) 技术的复合性;
- (4) 管理的综合性。

复杂产品必须是技术系统。技术系统是实现一定功能的人工物,包括输入、过程、输出、反馈和目标等五个要素。输入是技术系统使用的资源,包括人力资源、自然资源、资本资源、智力资源和能量资源;过程是技术系统实现输入和输出转换的行为;输出是技术系统行为的结果,包括期望的结果(功能的实现)和不期望的结果(如产生废弃物、污染环境等);反馈是技术系统过程的调整或者控制;目标则是技术系统存在的原因,一是满足人类的需要,二是实现技术系统的生产企业的利益。

复杂产品的功能多样性源于用户需求的多样性和环境的多样性。例如,对于轿车,用户不仅要求车速范围适当,而且要求启动的平缓性、行驶的平稳性、乘坐的舒适性、视野的开阔性,还有安全性等。除此之外,还要考虑应付不同的路况、不同的气候等。复杂产品的功能多样性还源于产品性能的高度化。比如,航天器、航空器等超越正常物理条件约束的复杂产品的控制性能、可靠性,还有可维护性等,要求都非常高。因此,复杂产品的功能本身具备多层次性的特点,即总功能由许多子功能完成,而子功能又各自由许多子子功能完成,直至由元器件完成的单元功能。

与功能的多样性和层次性相对应,复杂产品的结构具有明显的多层次性。虽然功能层次与结构层次并不一定一一对应,但是毕竟功能在很大程度上决定结构。作为技术系统的复杂产品同样具有多层次性,由子系统、部件和零件组成,而且子系统和部件往往也是复杂的技术系统,同样由更多的零部件组成。例如,汽车总成包括发动机、驱动装置、电气装置、仪器仪表和车身等,这些子系统又由许多复杂零部件构成,如图 1-3 所示。复杂产品的结构层次性一方面强调组成子系统、零部件数量庞大,另一方面指产品构成关系复杂。复杂产品通常拥有成千上万的零部件,至少数百,甚至高达数百万。例如,程控交换机的零部件数目为数千,轿车的零部件数目为 2 万~3 万,战斗机的零部件数目一般为 20 万~50 万,船舶的零部件数目约为 150 万,而波音 777 客机的零部件总数则达到 300 多万。复杂产品构成关系之所以复杂,主要是因为不同的子系统和零部件不是独立实现某种功能,而是必须发生密切的相

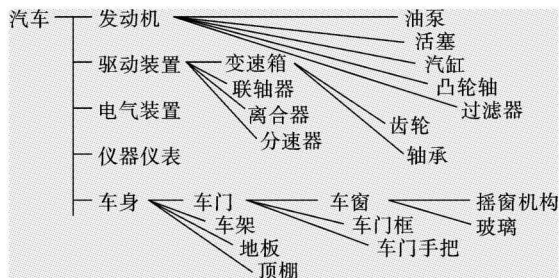


图 1-3 汽车总成结构图(部分)

互作用才能实现预期的功能。而且由于复杂产品的功能多样性,不同的子系统和零部件又同时与多个功能相关,更增加了子系统和零部件之间耦合关系的复杂程度。特别是,从技术属性的角度考虑,复杂产品系统是多学科多领域综合的技术系统。例如,飞机包括机械、液压、气动、控制、电子、软件等不同领域学科的子系统。图 1-3 所示为汽车总成结构图。

复杂产品的技术复合性源于复杂产品的功能多样性和结构层次性,代表知识含量和技能含量的深度及新知识和新技能的广度。功能的多样性要求更新更好的技术能够得到更积极的应用,从而使得产品更具有市场竞争力。同样,复杂产品多学科多领域的特征更要求不同领域前沿技术的综合集成。复杂产品的技术复合性决定了复杂产品的研制生产难度,因此,复杂产品往往能够标志一个企业、一个国家的科技水平。

大型复杂产品的研制生产大多属于单台套的或者小批量的项目形式,如太空探测器、飞机、船舶等。当然,也有一些复杂产品是大批量生产的产物,如汽车等。不论是单件小批量,还是大批量,复杂产品的研制生产必须处于综合管理之下。这种管理的综合性体现在产品全生命周期的综合管理和协作企业管理上。复杂产品一般不仅研制周期长,而且使用寿命长,例如,1990 年投入使用的哈勃望远镜现今仍然在工作,因此,全生命周期的综合管理是保障复杂产品质量,最大限度发挥复杂产品效用的必要手段。另外,复杂产品的研制往往由多个企业临时组成的联合体来完成,参与企业之间必须密切协作,因此,协作企业的组织管理是复杂产品研制生产的重要课题。

根据定义 1-1,对本书考虑的复杂产品与其他已有的研究对象的差异进行说明。因为复杂产品必须是技术系统,所以排除了钱学森、王寿云、戴汝为等人提到的复杂巨系统。也就是说,本书考虑的复杂产品主要属于简单巨系统和大系统的范畴。同样,也排除了社会系统、生态系统等。本书的复杂产品不考虑诸如机场、机场跑道、智能大厦、桥梁、港口等,这些更多指的是工程建设项目,而不是我们通常所指的产品。同时,本书并不同意复杂产品系统是大批量生产产品的对照物的观点,因此,诸如汽车等大批量生产的产品在本书中也归于复杂产品的范畴,因为这类产品具备定义 1-1



的所有特征。最后需要指出的是,本书考虑的复杂产品的定义与范畴与李伯虎等人的复杂产品的概念是基本等同的。复杂产品的例子包括太空探测器、卫星、飞机、船舶、列车、汽车、工业汽轮机、高档数控机床、工程机械、大型计算机、通信设备、发动机、飞行模拟器、航空控制系统、武器装备、粒子加速器等。

不论是单件小批量定制,还是大批量生产,复杂产品产业在国民经济和国防建设中都占有相当重要的地位,甚至关系到国家利益和在国际上的政治经济地位。冷战时期,美、苏军备竞赛和太空竞争在某种程度上落实在复杂产品产业的竞争中,而这场竞争的失败也可以说是苏联政治体制崩溃的原因之一。中国的“两弹一星”、运载火箭,以及载人飞船等复杂产品的研制成功不仅鼓舞国人,而且也大大提升了中国在国际上的政治地位。在国民经济方面,大多数复杂产品属于大型资本型产品,而且都是多学科多领域的产品,它们不仅为生产其他产品以及提供现代化的服务创造了条件,而且带动了其他行业的发展。例如,汽车制造业的兴起直接带动钢铁、橡胶等材料行业、电力、煤炭、石油等能源行业,以及交通等行业的发展,德国、美国、日本和韩国等国的发展深刻地佐证了汽车这一复杂产品产业对国家经济的重要作用。2002年,汽车制造业出口占日本制造业总出口的13.2%。据统计,1994年,英国21个复杂产品相关产业产值高达680亿英镑,占当年国内生产总值(GDP)的11.9%。美国目前有3万多种民用产品得益于航天飞机研制的相关技术。因此,研究复杂产品工程具有重大意义。

1.1.3 产品的复杂性与技术进步

人工制品(产品)是人类智慧的结晶,是技术物化的结果,而技术密集的复杂产品更是技术进步的产物。换言之,技术是复杂产品进化的直接推动因素。技术进步经历了三次革命。第一次革命以蒸汽机的发明为标志,实现了从手工作业向机器化生产的进化;第二次革命以发电机和电动机的发明为标志,实现了从机械化生产向电气化生产的进化;第三次革命则以信息技术、材料技术、能源技术为标志,实现了柔性化智能化生产。这三次技术革命导致企业战略重点从以生产为中心,到以销售为中心,再到以产品开发为中心的转移。结合1.1.2小节给出的复杂产品的定义与范围,可以得出一个结论,即技术进步的这种趋势实际上也对应着产品复杂化的趋势。

产品的复杂性与技术进步密切相关。正如技术进步对处于激烈市场竞争中的企业而言是一把双刃剑,既促进企业提高新产品开发能力又急剧缩短新产品生命周期一样,技术进步对于产品复杂性而言同样具有双向作用,即技术进步一方面提高了产品的复杂程度,另一方面又降低了产品的复杂程度,如图1-4所示。通常,提高产品复杂程度的技术进步是跳跃式的(见图1-4中的细实线的斜线部分),因为产品的创新往往导致产品的功能和结构的重大变化,甚至导致管理模式的重大变革。例如,蒸汽机的发明迅速地催生了一大批动力机器,这些动力机器相对于以往的手工设备而言,复杂程度大大提高。相反,降低产品复杂程度的技术进步往往是持续的渐进式的

(见图 1-4 中的细虚线),因为产品的改进主要是对产品局部的小的优化改善。综合两方面的影响,技术进步还是使得产品总体上向着复杂化的方向发展(见图 1-4 中的粗实线)。当然,这种复杂化的趋势呈现为波折的曲线状。另外,产品的复杂化趋势随着时代的发展越来越明显。

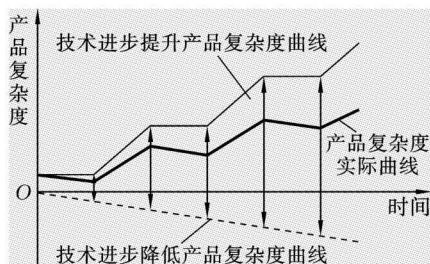


图 1-4 技术进步对产品复杂性的影响

技术进步导致产品复杂程度提高的一个非常著名的而且具有说服力的理论就是半导体行业,也是如今 IT 行业 40 年发展所遵循的摩尔定律。在 1965 年 4 月出版的《Electronics(电子学)》杂志上,时任仙童(Fairchild)半导体公司研发实验室主任,后来成为大名鼎鼎的英特尔公司创始人之一的戈登·摩尔(Gorden E. Moore)提出了著名的摩尔定律,认为集成电路密度(每平方英寸(1 in=25.4 mm)芯片上集成的晶体管数目)每 12 个月将增加一倍。他预言,电路包含的元器件数目增大时,单位成本会下降,而到 1975 年,在单块硅芯片上会被塞进 6.5 万个元器件。众所周知,在中央处理器(CPU)领域,产品的复杂性与集成电路密度是同义词。集成电路的晶体管集成度越高,电路复杂性越高,制造成本越高。据美国半导体工业联合会(SIA, Semiconductor Industry Association)发表的国际半导体技术路线图预测,到 2009 年,一个面积为 620 mm^2 的芯片上的零件数将达到 5.2 亿个。

如果说摩尔定律揭示了产品如此迅猛的复杂化趋势的话,那么,作为一个事例,交通工具的变迁则证明了技术进步往往会跳跃式地提高产品的复杂性。陆地交通工具从马车到汽车、火车、高铁,水上交通工具从舢板到舰艇,每一次重大技术创新都导致产品的复杂程度显著提高。同样的现象也发生在航空航天飞行器上。

产品复杂性的不断增加,主因是技术进步,但归根到底是人们需求不断改变和期望不断提高所致。正是因为功能需求不断增多,性能要求不断提高,拥有成千上万个元件的产品结构越来越精致,复杂产品的每次更新换代都会导致复杂性显著提高。从满足人们需要的角度而言,产品复杂性的提高并不是一件坏事,也是一个必然结果。但是,从技术进步的角度而言,降低甚至抑制产品复杂性的无制约的提高则是产品开发技术人员必须考虑的问题或者就是技术人员工作的重要目标之一,比如标准化工作。毕竟,使用或享用产品的人们也不希望得到的是一味考虑功能的实现却忽视由于复杂性增加而带来诸多不便的产品。



1.2 复杂产品设计工程

1.2.1 复杂产品设计工程概述

复杂产品在国民经济和国防事务中的重要地位,决定了复杂产品设计工程研究的必要性和重要性。而复杂产品的特性则决定了复杂产品设计工程研究与一般产品设计工程研究有着不同之处。按照一般设计方法学的观点,设计分为三种类型,即原创设计、适应设计和变型设计。原创设计注重技术系统原理方案的创新,能够产生重大创新的产品;适应设计则是为了适应某些要求的变化而对技术系统进行相应改进的设计,能够产生具有一定创新和优化效果的产品;变型设计则主要是改变产品的某些尺寸和结构布置的设计。据统计,原创设计、适应设计和变型设计的比例分别为25%、55%和20%。复杂产品设计也不外乎上述三种形式,但是三种形式的比例有所不同。其中,涉及原理创新的原创设计的比例相对较小,因为复杂产品是技术密集型的产品,并不是任何一种技术的创新都会导致整体技术的原理性的更改。因此,复杂产品的设计更多地属于适应设计和变型设计。然而,这个观点并不意味着复杂产品的原创设计的不可能。实际上,在复杂产品相关的技术领域的原理创新或关键子系统 and 部件的原理创新可以代表复杂产品的原理性创新。例如,飞机的发动机的原理创新能够使飞机的飞行速度达到超音速,那么可以说飞机实现了原创设计。再如,采用电力、天然气乃至太阳能等新型能源取代汽油或柴油作为动力驱动源的电动汽车或者混合动力汽车也是原创设计的成果。

产品的复杂性问题复杂产品设计工程必须重点解决的问题。这个问题实际上需要从两个方面予以考虑:一方面,在满足功能需要的前提下,研究各种降低产品复杂性的设计技术手段,以优化复杂产品;另一方面,在承认产品复杂性的条件下,研究各种提高复杂产品研发效率的设计技术手段。这两方面在本书中分别称为复杂产品设计工程的产品设计优化问题和产品研发效率问题。产品设计优化问题本质上是要降低产品本身(重点是结构)和产品研发过程的复杂性,对照图 1-4,就是要增大技术进步降低产品复杂度曲线(图 1-4 中的细虚线)的斜率,使得综合产品复杂度降低。对于产品研发效率问题,并不主要考虑降低产品本身的复杂性,而是更关注如何降低与产品复杂性密切相关的产品研发过程的复杂性。

本书将复杂产品设计工程分解成三个部分,即复杂产品生命周期设计工程(life cycle design engineering)、复杂产品协同设计工程(collaborative design engineering)和复杂产品数字化设计工程(digital design engineering),如图 1-5 所示。

从实践的角度看,复杂产品设计工程的思想已经在一些大型复杂产品的研制中得到应用。一个著名的事例是美国联合攻击机(JSF)项目。该项目是美国军方历史上最大的军火采购项目,项目目标研制下一代高性能多用途的作战飞机 F-35,2001

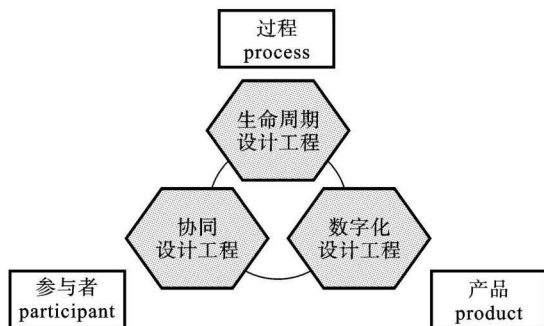


图 1-5 复杂产品设计工程的体系

年 10 月由以洛克希德-马丁公司为首的研制作联盟中标。F-35 战机的研制费用将达到 2 000 亿美元,预计市场有 4 000~5 000 架的需求。F-35 战机毫无疑问是典型的复杂产品,它融合了“通用低成本轻型战斗机”和“联合先进攻击技术”的先进战机理念,被称为“世界战斗机”,具有垂直起降、飞行速度快、载弹量大等功能,拥有优异的机动性、敏捷性和隐蔽性,具备全天时、全天候攻击陆海空任何目标的能力,将成为美军以对地攻击为主的多用途战斗机。F-35 战机凝聚了众多的高新技术和系统,例如,具有高分辨率精确探测成像与识别、红外搜索与自动跟踪、激光指示测距与激光点跟踪等多功能、高性能的电光瞄准系统(EOTS)。武器系统包括空对空导弹、空对地导弹、反舰导弹和联合直接攻击弹药、激光制导炸弹、联合防区外武器等。F-35 战机根据空军、海军和海军陆战队等的不同需求分为三个型号,即常规起降型 F-35A、常规舰载型 F-35B 和短距起飞和垂直着陆型 F-35C。F-35 项目的周期可谓漫长,整个项目周期将持续 40~50 年。其中,生产周期将持续 20~25 年,而使用和维护周期将持续 25~30 年。JSF 项目的概念设计阶段从 1996 年到 2000 年。在洛克希德-马丁等公司的概念机 X-35 中标后,被正式命名为 F-35 战机,之后进入研制和生产阶段,历时 11 年,2006 年 8 月进行 F-35 战机的首次试飞,2012 年为首批飞机部署时间。F-35 战机的研制由美国的洛克希德-马丁公司牵头,目前共有 9 个国际伙伴国(英国、澳大利亚、加拿大、丹麦、意大利、荷兰、挪威、土耳其和新加坡)宣布加入该计划。从参与的企业来看,F-35 战机项目由美国洛克希德-马丁公司、诺瑟若普-格鲁门公司和英国宇航公司 BAE 作为主承包商共同承担,联合近 30 个国家约 30 家供应商共同生产制造。据不完全统计,由洛克希德-马丁公司、MBDA 公司、雷声公司等负责研制武器系统,由英国 BAE 系统公司、挪威 Kitron 公司、荷兰泰莱斯公司、意大利伽利略航空电子公司等负责研制电子战系统,由诺瑟若普-格鲁门公司负责研制卫星通信、导航与识别系统,惠普公司、通用电气公司和罗尔思·罗依斯公司负责研制 F-35 战机的发动机。F-35 战机主要由 3 家公司联合生产:洛克希德-马丁公司除了负责总装外,还负责生产飞机前机身和机翼;诺瑟若普-格鲁门公司负责制造中机身;BAE 系统公司制造后机身和尾翼。数字化技术是 F-35 成功实施的核心问题。