

FUZA JIXIE CHANPIN
MOKUAIHUA JICHENG ZHIZAO

复杂机械产品 模块化集成制造

李梦奇◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

复杂机械产品模块化集成制造

李梦奇 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

模块化通过将系统分解为相对独立的组成部分并以标准接口相互连接的方式减少产品发展过程中的复杂程度。本书基于模块化思想,研究复杂机械产品分解成相对简单的可进行独立设计的半自律性子系统模块或功能独立模块的模块化集成制造模式,建立集成框架体系,系统研究集成制造模式中模块化分解、模块求解、模块集成以及产品全生命周期的过程支撑技术。

本书可供从事机械工程设计制造的科研和工程技术人员参考,亦可作为高等学校本科生和研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂机械产品模块化集成制造 / 李梦奇著. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2016.12
ISBN 978-7-5170-5104-6

I. ①复… II. ①李… III. ①机械制造—模块化组装
IV. ①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第324223号

书 名	复杂机械产品模块化集成制造
作 者	FUZA JIXIE CHANPIN MOKUAIHUA JICHENG ZHIZAO
出版发行	李梦奇 著 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京智博尚书文化传媒有限公司
印 刷	北京市媛明印刷厂
规 格	170mm×240mm 16开本 11.25印张 174千字
版 次	2017年4月第1版 2017年4月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

对于光、机、电、流等多学科一体化的复杂机械产品，传统的零部件分解-协调的制造模式由于系统分解和集成运算量大、分解粒度不确定，导致了事实上的实现困难或实现过程中的多次返工，在质量保障和完成时间方面存在大量问题。本书将模块化思想应用到复杂机械产品制造中，提出模块化集成制造模式，通过将复杂机械产品或系统分解成相对简单的可进行独立设计的半自律性子系统模块或功能独立模块的方式实现产品制造。

本书面向全生命周期综合考虑产品制造，以模块为界把产品分为外部参数和内部参数，通过模块化分解和模块集成实现复杂机械产品，提出模块化集成制造模式，建立模块化集成制造框架体系，界定了模块化集成制造的模块化分解、模块求解、模块集成与系统建模等关键方面；分为独立模块和虚拟模块两类，从功能、接口、性能、结构、几何等特征函数定义模块，明确功能和结构作为模块划分的关键要素；归纳总结基于“功能元”或者基于系统中的能量流、物质流和信息流的划分模块的“功能元集合法”“流图通路法”“DSM 聚类”“基于灵敏度分析”的模块分解方法；虚拟模块方式实现图纸与报告模块化的模块化求解；模块集成不仅包括结构上的装配，同时还包括信息、环境、设备、人员及时间等资源的综合，集成序列规划和集成路径规划是集成的关键；制造是用户域、功能域、参数域、过程域、实体域的多领域映射过程，采用 DSM 处理域内元素关系和 DMM 进行域间元素映射。

感谢湖南省自然科学基金“面向一体化精度单元的数控机床 F-M-C 分解及建模（2016JJ4081）”和“基于 DSMF 的复杂产品系统模块化分解（12JJ6053）”、湖南省高等学校创新平台开放基金项目“面向 PSA 质量的数控机床精度建模研究（15K113）”等项目对作者在课题研究和专著出版中的相关资助。

作者在研究复杂机械产品模块化集成制造过程中，得到了重庆大学机械工程学院和邵阳学院机械与能源工程系的多位教师、研究生的支持和帮助，在此深深表示感谢！

复杂机械产品发展迅速，采用模块化方式的集成制造也在快速发展，技术以及模式不断更新。由于作者水平所限，加上时间仓促、精力有限，书中的错漏之处在所难免，恳请读者和同行不吝指正。

作者

2016 年 10 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 复杂机械产品及其研究背景和意义	1
1.1.1 传统机械与现代机械	1
1.1.2 复杂机械产品	3
1.1.3 复杂机械产品研究背景	5
1.1.4 复杂机械产品研究重要性	7
1.2 制造系统与复杂机械产品制造	9
1.2.1 制造系统及其类型	9
1.2.2 制造概念体系	13
1.3 复杂机械产品制造	14
1.3.1 复杂机械产品制造特征	14
1.3.2 理论和方法	15
1.3.3 分解是复杂机械产品制造常用方法	17
1.3.4 复杂机械产品制造函待解决的关键问题	19
1.4 研究内容及结构	21
参考文献	23
第2章 模块化集成制造体系	27
2.1 模块化设计及应用	27
2.1.1 模块和模块化	27
2.1.2 模块化设计	30
2.1.3 模块化应用	32
2.2 模块化集成框架	34
2.2.1 模块化集成思想基础	34
2.2.2 模块化集成制造框架	36
2.2.3 模块化集成制造关键问题	38
2.3 参数化模块	41
2.3.1 模块概念	41
2.3.2 模块处理	42
2.3.3 模块参数确定过程	44

2.4	模块化集成制造的影响	45
2.4.1	与模块化设计比较	45
2.4.2	产品制造模式和管理	46
2.4.3	对产品的影响	47
2.4.4	经济和社会效益	48
2.5	本章小结	49
	参考文献	50
第3章	模块化分解	54
3.1	分解概述	54
3.1.1	系统分解目的、依据和类型	54
3.1.2	模块化分解	56
3.2	分解对象及建模	58
3.2.1	功能体系是分解对象	58
3.2.2	需求工程是分解的前提	59
3.2.3	功能建模是分解的基础	62
3.2.4	功能建模方法	62
3.3	基于功能元的模块化分解	67
3.3.1	功能元集合模块化	67
3.3.2	流图通路法	70
3.4	基于 DSM 的聚类模块化分解	75
3.4.1	基于 DSM 的功能关系	75
3.4.2	基于功能的聚类模块化分解	78
3.4.3	模糊聚类模块化分解	80
3.5	基于灵敏度的模块化分解	84
3.5.1	灵敏度分析	84
3.5.2	灵敏度计算	85
3.5.3	灵敏度分析步骤	89
3.6	本章小结	91
	参考文献	91
第4章	模块求解	96
4.1	模块求解概述	97
4.1.1	求解形式——设计与生产	97
4.1.2	求解内容	98
4.2	理论求解模块化	99
4.2.1	图纸模块化	100

4.2.2	报告模块化	102
4.2.3	模块化的意义	104
4.3	面向生产的设计	105
4.3.1	制造系统目标	105
4.3.2	成本与精度关系	106
4.3.3	质量与成本决策	107
4.4	本章小结	110
	参考文献	111
第5章	模块集成	112
5.1	集成概述	113
5.1.1	集成对象及关系	113
5.1.2	模型与接口	115
5.1.3	集成框架体系	117
5.2	集成序列规划	118
5.2.1	基于优先约束关系的集成序列生成	119
5.2.2	基于拆卸法求解集成序列	121
5.2.3	模块化序列规划及其表达	122
5.3	集成路径规划	125
5.3.1	路径规划内容	125
5.3.2	碰撞检测技术	126
5.4	模块集成资源规划	127
5.4.1	集成时间是资源也是约束	128
5.4.2	集成信息资源	130
5.4.3	集成支撑资源	130
5.4.4	集成平台	132
5.5	本章小结	133
	参考文献	134
第6章	制造过程与支撑技术	136
6.1	概述	136
6.1.1	过程模型分类	137
6.1.2	串行与并行过程模式	140
6.1.3	过程建模与仿真	140
6.2	制造过程分析	141
6.2.1	多域映射的制造过程	141
6.2.2	域内关系 DSM 描述	142

6.2.3	域间关系 DMM	147
6.2.4	多域映射分析	151
6.3	过程数据一致性	153
6.3.1	数据一致性	153
6.3.2	工程变更	154
6.3.3	变更传播	154
6.3.4	变更传播与数据一致性	155
6.4	模块化集成制造过程	156
6.4.1	复杂产品制造过程	156
6.4.2	模块化集成的过程	158
6.4.3	模块化集成制造的过程差异	159
6.4.4	集成制造中的现代方法	163
6.5	本章小结	164
	参考文献	164
	概要	168
	SUMMARY	170

第 1 章 绪论

1.1 复杂机械产品及其研究背景和意义

1.1.1 传统机械与现代机械

1. 机械与机械工程

机械 (machinery), 源自于希腊语 *mechine* 及拉丁文 *mecina*, 原指“巧妙的设计”, 作为一般性的机械概念, 可以追溯到古罗马时期, 主要是为了区别于手工工具。机械 (machinery) 是机构 (mechanism) 与机器 (machine) 的总称^[1-1]。机构是一个具有相对机械运动的构件系统, 用来传递与变换运动和动力的可动装置。机构是机器的重要组成部分。机器是一种人为实物组合的具有确定机械运动的装置, 用来完成有用功、转换能量或处理信息, 以代替或减轻人类的劳动。

在发展过程中, 内容广泛的机械工程专业实际上已经形成了能源工程、信息工程、工艺或材料工程三大领域。通常把这三个领域的技术系统分别称为机器、设备、仪器。根据技术系统中的转化和传递对象的不同划分标准^[1-2]为:

机器: 以通过任意方式实现能量转变和形成能量流为主要目的。

设备: 以通过任意方式实现物料转变和形成物料流为主要目的。

仪器: 以通过任意方式实现信息转变和形成信息流为主要目的。

现代机器由动力系统、传动系统、执行系统和控制系统四部分组成。

2. 机电一体化

机电一体化 (mechatronics), 由机械学 (mechanics) 的前半部分和电子学 (electronics) 的后半部分组合而成, 或称机械电子工程或机械电子学, 是 20 世

纪 70 年代由日本提出、用于描述机械工程和电子工程有机结合的术语。机械电子技术涉及机械技术、计算机与信息处理技术、检测与传感技术、自动控制技术、伺服驱动技术、系统总体技术^[1-3]。

基于机电一体化技术的产品是机电一体化产品，或称机电产品。根据产品中电子工程的功能，机电产品大致可分为四类^[1-4]：

(1) 在原有机械结构的产品中，采用电子装置来控制其性能，使之具有更好、更多的功能，如数控机床、工业机器人、电子控制发动机以及各种采用电子技术的（轻工、纺织、印刷、包装和医疗器械等各领域）机械；

(2) 机械产品中一部分机械控制机构由电子装置取代，使之有机组合成机电合一的新装置和系统，如电子照相机、打印机、缝纫机和自动售货机等；

(3) 原执行信息处理功能机构被电子装置取代，如电子计算器代替手格式计算器、电子式电话交换机代替机电式电话交换机、石英电子钟表代替机械式钟表等；

(4) 机械本身比较简单而以电子装置为主的机电共存产品，如传真机、复印机、录音机、电子化仪器仪表、磁盘存储器及其他各种信息处理设备。

3. 光机电一体化

光机电一体化技术（opto-mechatronics）是由机械技术与激光-微电子等技术糅合融会在一起的新兴技术^[1-5]。光机电一体化产品一般由传感、驱动、控制和执行机构四部分组成。

激光技术与微型计算机为代表的微电子技术迅速发展，向机电工业领域迅猛渗透，与机电技术深度结合的现代工业的基础上，综合应用机械技术、微电子技术、信息技术、自动控制技术、传感控制技术、电力电子技术、接口技术及软件编程技术等群体技术，从系统的观点出发，根据系统功能目标和优化组织结构目标，以智能、动力、结构、运动和感知组成要素为基础，在高功能、高质量、高精度、高可靠性、低能耗意义上实现多种技术功能复合的系统工程技术。

光机电一体化技术涉及机械制造、交通、家电、仪器仪表、医疗、玩具娱乐等众多行业，在工业和经济发展中有着重要的地位。信息、生物、空间、海洋、新材料、新能源等高科技领域，国防装备的信息化、现代化及传统产业的改造都

离不开光机电一体化技术的发展。

1.1.2 复杂机械产品

1. 复杂产品系统

复杂产品系统 (Complex Products Systems, CoPS) 是由美国军事开发系统中大型技术系统 (large technical system) 演化而来, 由英国 Sussex 大学科技政策研究所 Hobday 和 Brighton 大学创新管理研究中心 Hansen、Rush 于 1998 年较为系统地提出, Hobday 将 CoPS 作为与传统大规模制造产品有重大差异的产品类型进行单独研究, 开创复杂产品系统研究的新时代。复杂产品系统指的是研发投入大、技术含量高、单件或小批量定制化生产的大型产品、系统或基础设施^{[1-6][1-7]}。

Prencipe 指出^[1-8]复杂产品系统创新过程动力、竞争策略以及工业化联合分类等方面与简单产品和大批量产品的差别, 提出鉴别复杂产品系统主要考虑其成本、项目周期、复杂程度、技术不定性、系统层次、定制化程度、风险、元器件种类、知识和技能含量、软件应用范围等因素。系统组成复杂程度和技术不确定程度是判断复杂产品系统的决定因素。产品空间大小并不是判定复杂系统的关键因素, 但是产品大小对研究思维的影响也是不容忽视的。

以产品组成复杂程度、技术不确定程度和产品空间尺寸大小建立基准, 对产品进行分类。组成复杂程度分为三个层次: 零部件装配、集成系统、子系统阵列; 技术不确定程度分为四种类型: 传统技术类型、中等技术类型、高技术类型、超高技术类型; 产品空间尺寸大小: 小型、中型、大型、巨型、极端 (极小、极大)。产品分类维度及复杂产品系统如图 1.1 所示。

复杂产品系统的特征主要表现在以下方面: ①产品与结构特征: 组成复杂 (子系统或零部件众多), 层级机构多关系复杂, 系统非线性特征, 组成部分之间耦合性特征, 生命周期长; ②研究与开发特征: 需求不明确逐渐细化, 变化与迭代多, 用户参与程度高或全程参与, 设计与生产交叉进行; ③市场特征: 产品一般为定制, 需求和供应的双头垄断结构, 交易不频繁, 有限竞争, 行业受政府高度管制和调控; ④生产特征: 个性化单件或小批量生产, 涉及供货厂商多, 系统集成需

要创新；⑤成本方面特征：研发和生产成本高，生产成本不确定性大。

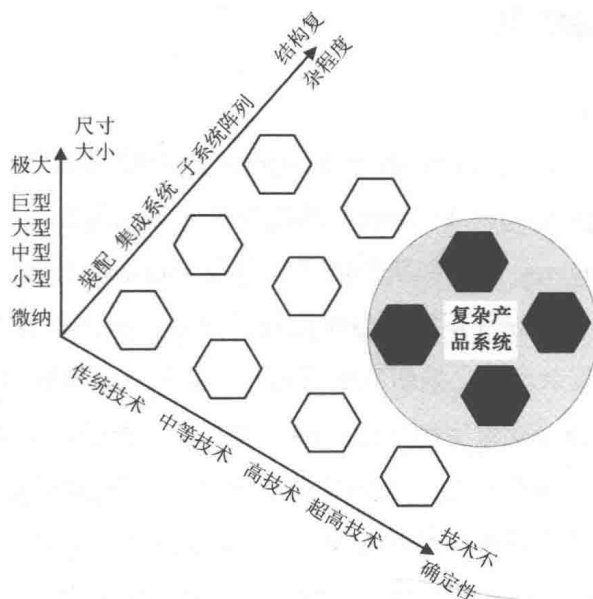


图 1.1 产品分类维度及复杂产品系统

Fig. 1.1 classify dimensionality of product and Complex product system

复杂产品系统虽然产量小，但由于其规模大、单价高、子系统和零部件多、综合程度高，涉及技术种类多、技术含量高，其开发能够直接推动直接相关产业发展，而且技术高速扩散到其他领域，进而带动其他普通大规模制造产品的发展，带来国家竞争力的提升，在现代经济发展中发挥着非常重要的作用。

2. 复杂机械产品概念界定

复杂机械产品（Complex Mechanical Products, CMPs）从多角度进行概念界定：

（1）产品角度：复杂机械产品是机械工程领域的复杂产品，如航空发动机、直升机、喷气式战斗机、高速列车、大型船只、同步粒子加速器、大型桥梁、大型轧制装备、大型旋转机械、大型工程机械等；

（2）系统角度：复杂机械产品是机械工程领域的复杂系统，如柔性制造系统、半导体生产车间、污水处理设施、核电厂、空间站、机场、海洋钻井、制导系统、混合动力系统、数控机床、机器人等；

(3) 学科角度: 复杂产品系统是光学、机械、电子与电气、流体等多种单元技术集成、多物理过程融合于一体的实现特定功能的多学科集成系统, 即光机电(流)一体化系统, 涉及机械学、工艺学、材料学、热力学、电气工程、控制工程、电子学、微电子学、计算机技术、光学工程等多学科、多领域, 完成高度复杂的多物理过程中, 系统及内部各子系统与环境间进行着能量、物质与信息流的多种传递、转换和演变。

3. 复杂机械产品特征

现代复杂机械产品特征有以下几点:

(1) 复杂性: 复杂机械产品的本质特征, 组成系统的子系统之间存在着错综复杂的线性或非线性相互作用、强或弱的耦合作用, 系统目标与变量、约束条件之间的关系非常复杂;

(2) 多学科与协作性: 产品往往具有多项功能和性能要求, 涉及多个学科(诸如结构、强度、动力学、运动学、振动稳定性、噪声、摩擦学、热力学、造型美学、人机工程学、电子学、系统控制等)的复杂任务, 单靠某一领域的专门知识及设计人员难于完成, 而愈加趋向于依靠多个学科专家的协同工作;

(3) 耦合性: 系统维数高、单元数量大, 过程间耦合错综复杂, 而且耦合作用随子系统数目增加更为重要, 机电耦合、界面耦合、流固耦合等是复杂机械产品的常见耦合;

(4) 非显式、非光滑、不连续性: 耦合关系隐含在偏微分方程组中导致系统目标、约束条件难以用解析表达式表示, 系统目标和约束常常表现为不可微的非光滑特性, 以及不连续、多峰值、有噪声的黑箱函数特性。

1.1.3 复杂机械产品研究背景

1. 机械相关学科纵深跟横向发展导致复杂机械产品的必然走向

1860 年蒸汽机问世以后的机械学科发展过程表明复杂机械产品是机械工业发展过程中的必然阶段: 20 世纪 60 年代以前, 机电产品通常只包括了机械和电气部件; 70 年代以来, 大规模集成电路、微电子技术、大功率电子元器件和计算

机技术带动下产生机械电子单元技术,使得机电产品的发展进入了前所未有的繁荣期;80年代以来所不断出现的新型传感器技术、MEMS技术、各种新型作动器技术以及信息与通信技术,极大地增强了系统的感知和自适应调节能力;通过外围计算机随时对运行系统提供诸如专家系统、知识库的在线支持和指导,以确保复杂机电系统在全生命周期内安全、经济、可靠地运行,从而在更大范围内扩大了复杂机电系统的内涵和外延;21世纪由于工程学科、计算机科学和自然科学的交会所取得的新成就,能够在一定程度上满足人类对于产品性能的完美性和更快、更高、更强、更远的追求,高速列车、大型飞机、载人航天、激光聚变装置等复杂机械产品应运而生。

2. 复杂机械产品越来越多、投入巨大

复杂机械产品虽然数量少,但由于其规模大、单价高,其总产值及占GDP的份额比较高,在现代经济发展中发挥着非常重要的作用,且复杂机械产品的数量和种类越来越多。英国Sussex大学SPRU中心研究人员Miller和Hobday通过调查英国各种产品数据资料认为复杂产品系统至少占GDP的11%,至少提供140万~430万个工作岗位^[1-9]。Kash和Rycroft^[1-10]研究表明1970年每30件最有价值的出口货物中有43%的货物包含了复杂产品技术,而到1996年这一比例达到84%。复杂机械产品的资金、时间和人力投入巨大,浙江大学陈劲等^[1-11]对中国复杂产品项目的调研显示,投资主要集中在500万~3000万之间(累计达到69%),平均周期为2年,平均投入技术人员达到200人年。2009年5月29日在美国加州北部的劳伦斯·利弗莫尔国家实验室落成的世界最大的激光器国家点火装置(National Ignition Facility, NIF),从1997年5月破土动工算起建设历时12年,耗资35亿美元;法国的兆焦激光装置(Laser Megajoule, LMJ),1996年开始建设,经费预算17亿美元^[1-12]。实际2015年基本建成,耗资30亿欧元。

3. 复杂机械产品失败率高,工程增资和延期时常发生

复杂机械产品制造需要技术创新,而技术创新本身具有高风险和低成功率,美国学者曼斯菲尔德^[1-13]研究了美国三大公司,其技术、商业和经济失败率依次是45%、70%和88%。浙江大学陈劲等^[1-11]的调研表明中国复杂产品项目失败率

大约为 30%。美国国家点火装置 (NIF) 是工程增资和延期的典型例子^{[1-14][1-15]}, 1993 年 1 月项目启动, 1996 年 6 月批准最终详细设计, 计划 2002 财年第三季度完成。经费情况: 1996 财年首次确定为 11 亿美元, 1998 财年修订为 12 亿美元, 2001 财年确定总费用 34.48 亿美元 (项目经费 22.48 亿美元, 运行和维护相关经费 12 亿美元); 建设时间: 1996 财年确定为 2002 财年第三季度完成, 1998 财年决定延长到 2003 财年第三季度完成, 2001 财年最终确定于 2008 财年完成, 实际 2009 年 5 月落成。

1.1.4 复杂机械产品研究重要性

1. 当前面临的实际问题迫切需要解决

为满足当前我国制造业现代化与国防工业自主发展, 以及国家正在进行和将要启动的一系列重大工程的需要而建设的大量高技术水平、多功能的重大装备如百万千瓦大型发电机组、百万吨级乙烯成套装备、300 千米以上时速的高速列车、大型连轧机组、大型舰船、大型盾构掘进装备、成套 IC 制造装备等过程中面临的系统高度集成化、工作条件极端化与技术精密化导致的实际问题的解决依赖于对复杂机械产品的研究。复杂装备研制既需要研究、掌握和运用多种先进单元技术, 更需要将单元技术有效地集成以实现期望的物理过程, 从而构建一个结构简约、信息融通、节能驱动、工况极端、精确稳定的功能系统, 这个过程所涉及的众多科学规律都需要从基础研究中获得。

复杂装备在运行中出现一系列复杂现象和问题, 依据人们现有的知识是无法加以清晰解释和明确回答的, 必须找到新的解决办法, 如复杂振动几乎是所有高速机械发展的普遍性障碍; 近年来高速轧机差不多表演了所有振动形态——发散性振动、微幅颤振、频谱非常复杂的随机振动等, 其产生机理各不相同, 但是它们都依存于系统的某种工况或耦合状态; 众多复杂装备在不为人知的奇异内力作用下异常损伤; 高速运动装备的种种扰动和涨落使工作的高精度无法获得。复杂系统和复杂过程的设计与控制更需要科学的指导和有效的手段。

复杂机械系统涌现出的新问题,迫切需要从系统的角度去研究和解决,特别是“融合集成效应”,以融合中所产生的现象和问题为切入点,研究其中的新机理,获得新认识;从融合集成过程中的预期效果与实际差异中研究和发现系统集成复杂规律,从系统动力行为的奇异性中研究系统集成中的功能保障与突变机制。

已有积累的精密导轨、减速箱、连杆机构的运动学、动力学、摩擦学等基础理论和相关技术是考察那些更加复杂组合现象的基石,但直接研究机床、汽车、发电机组等诸多复杂装备的整机规律已是十分迫切^[1-16]。

2. 满足人类文明不断进步的需要

宇宙飞船、载人航天、载人登月等工程展示人类对于自然的探索,同时也体现人类文明的进步。科学技术的进步为人类进一步探索自然提供了技术手段,重登月球、火星探测、大型客机、维纳机器人等工程对当前制造技术提出了更高的要求。

复杂机械产品的极端化、综合化、信息化和绿色化方向发展为满足人类文明不断进步提供保障。高效化、高速化、大型化、微型化、精密化,多功能、高精度的综合和集成,超高压、超高温、高真空度、高能量密度、高位场所等极端环境,低能耗、低污染等都属于极端化的范畴。数字化、网络化、自动化、智能化是信息化的主体。为了解决人类与自然之间出现矛盾现象的产品研究、设计、生产、使用、废物回收全过程中考虑自然环境和资源的合理利用、考虑保护社会环境和生态环境、考虑劳动者和使用者的健康等关于环境问题的绿色化体现不断进步的人类文明。

3. 为未来国际科技竞争奠定必备的基础(带动作用)

当前的复杂装备中大量依靠国外进口,这大大制约着我国经济的发展,而复杂机械产品的非自主开发可以导致创新能力的丧失。在实现工业化的同时形成对于高水平重大装备的自主研发能力,是国家战略发展赋予机械学科的历史重任,也是机械学科自身发展的良好机遇。

在机械学所定义的范畴内,对于共性技术基础的研究较多地关注各类机械(例如,流体机械、电机/发电机、轧制机械、工程机械等)的共性单元技术或部件,

而较少涉及这些部件所组成的系统。现代科学的发展,使得过去历史上对于机械、电气、空间工程、化学、土木建筑等的分类和定义越来越模糊。不同学科间交叉融合的重要性也日益突现出来。但是,对于如何将不同门类的科学技术相关部分有机地组织到一起,并由此规划不同学科间交叉融合的有效路径则是每个学科发展所面临的普遍性问题。系统集成的内涵和灵魂就在于寻找和发现集成、融合与演变过程的规律,而技术集成则是构造复杂装备的方法与手段。复杂装备是人类运用已知的十分有限的自然规律按照人的意志所构造的系统。构建复杂机电系统的关键问题之一就在于深度掌握系统集成中的演变规律。针对重大装备的基础研究首先是认识和把握复杂机电系统构成的基本科学规律和方法。

对于复杂机电产品的研究,有助于克服以往传统学科划分的局限性,为机械学科在交叉融合中寻求自身发展提供了极好的契机。同时,对于复杂机电产品的研究,也为从事机械科学研究的专家学者提供了一种研究方法,即在深化理解和认识复杂机电系统产品创成过程中去发现科学与社会的发展对机械科学各个方向提出的需要^[27]。

复杂机械产品研究可以为未来国际科技竞争提供必须的人才和学科基础。

1.2 制造系统与复杂机械产品制造

1.2.1 制造系统及其类型

1. 制造

制造 (manufacture=manu+factus), made by hand, 源于拉丁 manu (用手工) 和 facere (制作)。制造为“用体力劳动或机械制作某物体,尤指以大规模的方式运作”^[1-17]。几千年来,制造一直是由人们靠手工技艺和体力劳动完成的,200年前的工业革命开始了机器发挥重要作用的新时代。

中文中的“制造”,人们常常理解为产品的机械工艺过程或机械加工过程。实际上,随着产品生命周期理论的提出,“制造”的概念和内涵大大拓展,1990年