

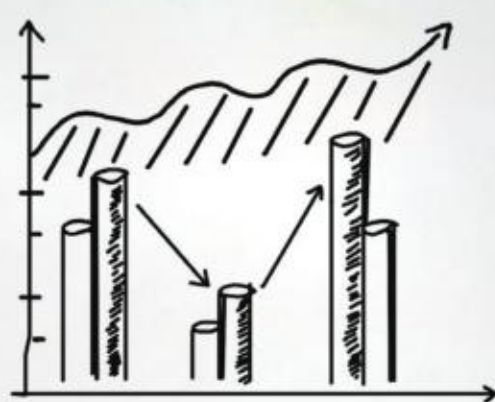


普通高中教科书

通用技术

选择性必修

工程设计基础



预算

- ✓ ¥10 000
- ✓ ¥500 000
- ✓ ¥30 000



人民教育出版社

人民教育出版社

普通高中教科书

通用 技术

选择性必修

工程设计基础

上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写

人民教育出版社

· 北京 ·

仅供个人学习使用，未经授权不得另做他用

总 主 编：褚君浩

副 主 编：朱志勇

本册主编：于 剑

编写人员：于 剑

责任编辑：朱春柳 梅栾芳

美术设计：胡白珂

普通高中教科书 通用技术 选择性必修 工程设计基础

上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写

出版发行 人民教育出版社

（北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 邮编：100081）

网 址 <http://www.pep.com.cn>

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分·违者必究

如发现内容质量问题，请登录中小学教材意见反馈平台：jcyjfk.pep.com.cn

声明 按照《中华人民共和国著作权法》第二十五条中有关规定，我们已尽量寻找著作权人支付报酬。

著作权人如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

本册教材图片提供信息：

本册教材中的图片由全景网、视觉中国等图片网站提供。

仅供个人学习使用，未经授权不得另做他用

通用技术是一门联系科学规律和技术应用的课程。人类在生产实践和科学实验的过程中，获得了知识，掌握了规律，形成了技术，进而在工程任务中利用技术，提升生产实践和科学实验的水平。实践—认识—再实践—再认识，这样的过程循环反复，人类的科学技术不断提升，社会生产力不断发展。

世界是物质的，物质是运动的。在我们周围充满着物质的多种多样的运动形式，除了常见的机械运动，还有光、声、热、电、磁、分子、原子、基本粒子、生命运动等。人们在观察和研究物质的这些运动形式时，发现了规律，运用规律发明了技术，相应产生了机械技术、光技术、声技术、热技术、电技术、磁技术、分子技术、核技术、生物技术等。这些技术分别或者集成起来在多类工程任务中得以应用，涉及机械工程、土木工程、热力工程、电子工程、光学工程、能源工程、环境工程、生物工程、航空航天工程、海洋工程、地质工程等。典型的工程，包括南浦大桥、世博会的中国馆、虹桥枢纽屋顶上的太阳能发电站、C919大飞机、风云四号等大工程，也包括制造服装、烹饪菜肴、室内装修、三维打印零件等小工程。工程任务完成后制造出各类产品，应用于社会方方面面不同领域，为社会创造财富。从事这些工作的勤奋踏实而富有创新精神的劳动者，成为了基础扎实的工程师和精益求精的工匠，他们是我们学习的楷模。

我国古代人民的发现和发明造就了中国科学技术的辉煌历史，不仅有指南针、造纸术、印刷术、火药等重要发明，还有以都江堰水利工程、传统木建筑的榫卯结构等为代表的水利、天文、建筑、铸造、纺织、陶瓷、冶金、航海等古代科学技术，这些杰出的技术是中国古代科技文明的精粹，对人类文明发展和社会生产力的进步产生了巨大推动作用和深远影响。

技术是人类利用自然规律实现某种功能和目标的一种能力，它的背后是科学规律，它的前面是工程任务。工程任务有明确目标，技术在完成工程任务中实现它的价值。例如，根据牛顿第三定律可以利用作用力的反作用力推进物体，这一原理可以用于火箭工程，再运用万有引力定律，可以发射地球卫星，甚至把嫦娥四号送到月球背面。技术的价值在工程任务中得到充分体现。

把技术应用于工程，就要遵循工程的规范。实现技术的应用，完成一项工程任务，首先要明确这项工程的具体目标，提出完整可行并有创新的设计方案。设计方案又涉及工程目标物的结构、工艺流程、组成系统、意图控制等。方案的具体内容要用技术语言和图样表达出来，根据图样来操作加工，最后实现方案，完成工程任务。工程实施过程中的经验和教训，需要同行互相交流；是否完成了预期的目标要求，需要由外部专家和使用者进行评价。工程交付后，还要经受时间和应用的评判。

同学们，新时代已经来临，新工业革命正在悄悄向我们走来。如同18世纪以机械化为特征的第一次工业革命、19世纪以电气化为特征的第二次工业革命、20世纪以信息化为特征的第三次工业革命，21世纪人类将开启以智能化为特征的第四次工业革命。人类

总是先在观察或实践中发现规律，在此基础上发明了技术，进而推动技术的应用与发展。人们发现了质能关系，发明核技术；发现了受激辐射规律，发明激光技术；发现了光纤中光传输规律，发明光通信技术；发现了电磁波规律，发明无线通信技术；发现了半导体光跃迁规律，发明半导体照明技术；等等。先进技术为构建人类绚丽文明打下基础。谁掌握了规律，谁发明了技术，谁就获得了主导权。智能制造是新工业革命的重要特征，而通用技术是智能制造的基础课程之一。同学们，机遇和挑战在等待着我们！

通用技术课程必修内容包括“技术与设计1”“技术与设计2”2个模块，它们分别从技术和设计的角度阐述通用技术的一般概念，并通过实践来帮助同学们体验技术与设计的内涵。选择性必修内容包括“技术与生活”“技术与工程”“技术与职业”和“技术与创造”4个系列11个模块。整体框架由图0-1表示。学习这门课程要注重掌握概念和加强实践，尤其要通过动手实践，来培养自己的技术意识、工程思维、创新设计、图样表达和物化能力等核心素养。

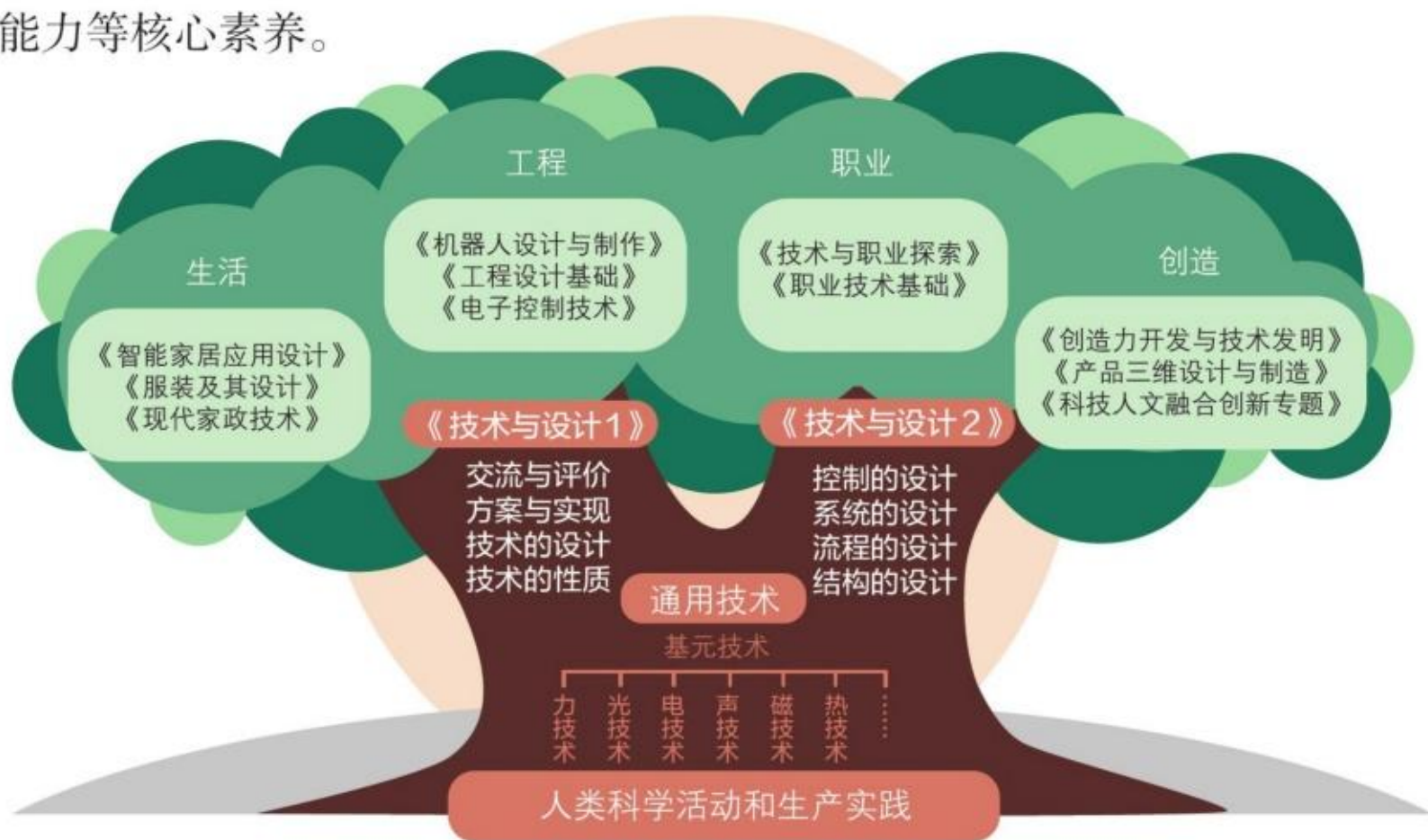


图0-1 课程内容整体框架

选择性必修分册《工程设计基础》立足实践、注重创造，综合科学技术与人文，协调设计知识、技能与素养。设计知识可以通过书本获得，而获得技能的最好方式是亲身经历真实项目——做设计。本分册系统地介绍了工程设计概述、工程设计的一般过程、工程设计建模、工程决策与管理知识，但工程设计所用的具体原理、技术、经济、法规等知识与信息，需要通过其他课程、技术报告等途径获取。工程设计是开放的，集知识、技能、思想、经验、文化、责任等于一身的工程素养需要在知识学习和工程实践中逐渐养成。

工程实例比比皆是。同学们在学习本分册的内容时，要经常观察相关知识在生活与生产中的实际应用，以此提升观察能力、分析与综合能力、创新与实践能力。这样，本分册的学习内容将更加丰满，实践也有理论指导。同时，同学们通过学习本分册设计的一些简易实践项目，可以进一步加深对工程设计的理解、掌握与应用。

第一章 工程设计概述 1

第1节 科学、技术与工程 2

第2节 工程设计 7

第3节 设计工程师 11

第二章 工程设计的一般过程 15

第1节 工程设计过程和要素 16

第2节 工程设计的活动 21

第3节 可制造性工程设计 40

第4节 可持续性工程设计 49

第三章 工程设计建模 59

第1节 工程模型的主要类型 60

第2节 计算机建模与仿真 63

第3节 快速成型与测试 67

第四章 工程决策与管理 71

第1节 决策与评价 72

第2节 时间进度管理 82

第3节 全面质量管理 88

第4节 生命周期成本管理 92

第一章 工程设计概述

工程设计是人类运用科学技术知识和实践经验，创造性地构造有效、可行、适用的工程系统，满足人类社会需求的一种有目的的活动。工程实例比比皆是，经常观察工程实例可以提升我们的观察与分析能力，强化我们的技术意识和工程思维。随着工程系统的结构越来越复杂、规模越来越庞大、社会矛盾越来越突出，工程设计常常需要受过专门训练的工程师团队协作才能完成。本章简述工程设计的内涵、特征和分类，介绍工程师的专业需求和社会责任。



第1节 科学、技术与工程

第2节 工程设计

第3节 设计工程师



第 1 节 科学、技术与工程



学习目标

了解工程的定义、简史与分类。



赵州桥



洛阳桥



北盘江大桥



港珠澳大桥

观察上图中的桥，想一想，你还知道哪些桥？思考一下，它们应用了哪些科学原理和技术？实现了哪些价值？

古今中外，桥都是一个典型工程。

它是智慧的，一根圆木、一块条石即可成桥；

它是科学的，古代的赵州桥、洛阳桥等都是建筑学的瑰宝；

它是技术的，人类用不同的材料建造了各种各样不同形式的桥；

它是历史的，不同历史时期的桥都代表了当时科学技术的进步；

它是经济的，人类的社会联系因其扩大和加强；

它是心灵的，人们喜欢把桥比作心灵沟通的纽带；

它是文化的，一座桥可以穿越千年时光熠熠生辉。

科学、技术与工程是人类认识世界、改造世界的重要活动，不断促进人类的政治、经济和文化发展，丰富人们的生活。

科学是对自然进行观察和实验，通过归纳、演绎、仿真等活动认知自然界的物质存在形态和运动行为，发现物质世界的演化规律。在设计桥梁时，运用材料力学、结构力学原理分析桥梁的静力平衡，运用运动学、数学等原理与方法分析桥梁的振动稳定性，运用氧化还原反应原理分析材料的腐蚀与防护，等等，都属于科学的范畴。

技术是人类在认识自然、改造自然的过程中积累起来并在生产劳动中体现、发展而来的方法和技巧、经验和知识。建筑桥梁时使用的设计技术、材料技术、施工技术、检测技术、减振技术、材料腐蚀与防护技术等，都属于技术的范畴。

工程是综合应用科学原理和技术手段有目的地去认识自然、改造自然、利用自然的实践活动，物化为有形的工具、装备、设施、产品等形态，以促进人类的生产和丰富人们的生活。建筑桥梁时选择吊桥还是拱桥、箱梁还是桁架梁，选择石材、钢材还是混凝土，确定建筑构件的形状、尺寸和安装工艺，计算承重、寿命、成本、维护量，等等，都属于工程的范畴。

科学虽然出现在近代，但人类自诞生之始就开始了“自然之道”的探索。在我国悠久的历史中，老子的“天下万物生于有，有生于无”，庄子的“天地与我并生，而万物与我为一”等“天人合一”的思想，道家的“所好者道也，进乎技矣”，儒家的“术不可以不慎”等“以道驭术”的观点，为科学与技术的探索提供了思想观与方法论。美国航天工程专家冯·卡门以“科学家发现已有的世界，工程师创造从未有过的世界”描述了科学与工程的关系。

交流 & 讨论

组织观看《伟大工程巡礼》《超级工程》等系列影片中的工程案例，分组交流这些工程是基于哪些科学原理和技术，工程设计和实施过程有哪些关键节点，工程团队是如何克服困难完成的。并讨论这些工程对现代社会发展的经济和文化价值。

科学和技术是工程的基础和源泉，工程实践反过来促进人类科学探索的深入与技术的发展。例如：观察苹果落地、行星运动等现象，人类发现万有引力、作用力与反作用力等，建立经典牛顿力学理论，奠定了土木工程、机械工程、航天工程等科学基础；观察小鸟飞翔等现象，人类建立空气动力学理论，奠定了航空工程、风力发电工程等科学基础；从观察摩擦吸附现象到电荷的发现、电磁学理论的建立，人类奠定了电力工程和电机工程的基础；从观察闪电到发现电磁波、建立电磁场理论，人类奠定了无线通信工程和雷达工程的基础；从观察物质可分现象到提出原子理论、建立元素周期

表和现代化学反应理论，人类奠定了化工工程和材料工程的基础；从对原子光谱和光电效应的观测到电磁理论和量子力学理论的建立，人类奠定了现代光学工程、照明工程的基础。

自然界是由大大小小的各种天然系统和人造系统组成的一个庞大的生态系统。其中，人造系统可以是某区域的电力网络、天然气网络，也可以像航空发动机那样是复杂机器，像材料那样是一些原子的堆积体，或者是制造汽车零部件的生产工序的组合。科学主要采用分析的方法对自然的物质世界进行分解，细分为不同的学科和专业，侧重对事物不同侧面与角度的分析；而工程则采用综合的方法，将科学技术与社会、政治、经济、文化、环境、资源等各种要素集成为一个有机整体，以实现特定的功能行为，侧重于系统的整体和协调。技术要素构成了工程系统的基本内涵，非技术要素构成了工程系统的边界条件。



设计 & 操作

“道法自然”是人类工程活动的源泉。以某大学的工科院系专业设置为例，列出这些专业对应的自然现象、科学理论、技术门类以及应用的工程领域。



拓展阅读

系统科学在我国产生

在我国，系统科学的产生和发展是与“两弹一星”工程任务相伴成长的。1962年3月21日，在酒泉卫星发射中心，我国设计研制的导弹“东风2号”首次发射，升空69秒后便坠毁在距发射台680米处，炸出一个直径约30米的大坑。失败原因很快查明：没有充分考虑导弹弹体在飞行过程中的弹性振动，导致飞行失控；火箭发动机推力提高了，材料强度却没跟上，飞行中发动机管道破裂起火。局部都没问题，加在一起却出了问题。钱学森先生找到了问题的症结：如果一个个局部构件彼此不协调，即使这些构件的设计和制造从局部看是很先进的，这部机器的总体性能也是不合格的。解决思路

继而形成：把整个研制视为一个复杂系统，既见局部更见整体。1964年6月29日，第二枚“东风2号”导弹一飞冲天发射成功。自此，钱学森主张的航天系统工程管理方法与技术，随着后续任务的成功得到不断完善。

1978年9月27日，钱学森撰写的《组织管理的技术——系统工程》一文在《文汇报》发表，首次在实践与理论层面对系统工程进行了清晰梳理。这篇文章开创了系统工程的中国学派，从此，系统工程的应用也突破航天领域成为社会管理领域的理论依据与方法论基础。系统工程根据学科可分为工程系统工程、环境系统工程、信息系统工程、军事系统工程、科研

系统工程、教育系统工程、企业系统工程、经济系统工程、社会系统工程、行政系统工程、法治系统工程等不同的专业系统工程。钱学森对系统科学的结构总结为三个层次：直接用来改造世界的应用技术，即系统工程；为应用技术提供理论方法的技术科学，如运筹学、控制论等；揭示客观世界规律的基础理论，即系统学。与此结构配套的方法论，概括为从定性到定量的综合集成方法。换句话说，系统工程是综合工程技术、社会科学、经济学等多种学科及其技术，运用系统的思想、观念和方法来解决工程发展中的系统性问题，以最优化的方法

求得系统的最佳结果。

系统科学不仅助力技术和社会的进步，而且成为我们治党治国的理论依据和思想方法。党的二十大强调必须坚持系统观念，要善于“透过现象看本质，把握好全局和局部、当前和长远、宏观和微观、主要矛盾和次要矛盾、特殊和一般的关系，不断提高战略思维、历史思维、辩证思维、系统思维、创新思维、法治思维、底线思维能力，为前瞻性思考、全局性谋划、整体性推进党和国家各项事业提供科学思想方法。”

工程有漫长的历史，起源于人类生存的需要、人类对器物的需要。人类自诞生起所进行的采集、狩猎、播种、饲养动物等生产活动中，已在进行工程活动，如建房、制衣、修路、挖渠等。在人类历史长河中，工程发展是连续性和阶段性相统一的过程。工程发展可分为史前工程、古代工程、近代工程和现代工程四个阶段，彼此间既有联系又有区别。历史上，万里长城、都江堰和京杭大运河等工程因造福人类而彪炳史册。近现代以来，铁路、飞机、计算机、互联网等重大工程推动了全球范围内人员、货物和信息的大交流，使人类的社会生活面貌发生了翻天覆地的变化。进入21世纪，我国的工程技术也取得长足进步，“天宫号”空间实验室、港珠澳跨海大桥、“复兴号”动车组和高速铁路网、大飞机、航空母舰、“嫦娥”探测器等重大工程相继投入试验或运营，为民族复兴提供了强力支撑。

拓展阅读

桥梁工程

桥梁是快速跨越河流、山谷、海湾及其他线路或障碍时的架空建筑物。人类在不同历史阶段，采用不同的建筑材料发展了木桥、石桥、砖桥、钢索桥、钢梁桥和钢筋混凝土桥。现代桥梁按用途可分为铁路桥、公路桥、公路和铁路两用桥、人行桥、输水桥、农用桥等。桥梁作为交通的重要组成部分，与政治、经济、军事、科技、社会、

文化、艺术等关系密切，只要政治安定、经济繁荣，桥梁事业就能得到大力发展。

我国古代利用天然材料建造出不少享誉世界的经典桥梁，例如隋代的赵州桥、宋代的虹桥和洛阳桥等，无论是建桥工艺还是建桥技术，当时都处于世界先进水平；近代，由于我国科技和经济的落后，建桥水平和建桥数量都

停滞不前。欧洲国家由于工业革命而崛起,新材料、新工艺的出现,使得建桥技术不断提高,各种桥型、各种跨径不断被刷新。近30年来,随着国力的增强和科学技术的发展,我国桥梁建设无论在数量上还是在技术上都得到了迅猛发展,桥梁技术已达到世界先进水平。例如,在高速铁路网中,高架桥占据了总线路的很高比例,在平原、软土以及人口和建筑密集地区,通常都采用高架桥通过。哈大客运专线桥梁累计长度占全线总长的比例超过70%,京沪高速铁路超过80%,广珠城际铁路超过90%。

桥梁工程的发展与科学技术的紧密关系自不待言,与文化艺术的关系也可以从桥梁建筑的风

格、装饰等方面看出来。早期的桥梁利用的是天然材料,简易且跨越能力弱,耐久性差。砖的发明开启了人工材料应用的历史,铁的发现促进了桥梁技术的极大进步。19世纪,混凝土的发明、钢的应用,使桥梁技术产生了革命性的飞越,现代桥梁绝大部分是预应力混凝土桥和钢桥。新材料的应用、施工技术的进步和不断创新、计算理论的发展等都是桥梁技术前进的巨大驱动力。从远古的经验积累,到现代的材料力学、结构力学、弹塑性力学等计算理论,容许应力法、极限状态法等设计理论,以及计算机的应用普及,都推动着桥梁技术的进步,现代桥梁工程已进入技术全面进步的时代。

工程的范围、领域、学科、分支和专业具有多样性,并且还在不断增加和扩展。现代大学工程教育的一大特点是将工程细分为不同的专业领域,如材料工程、机械工程、电子工程、化工工程、土木工程、航空工程、电气工程、通信工程、计算机工程、软件工程、测量与控制工程、生物工程、生命工程等上百个门类。随着知识的发展和学科的分化、交叉与融合,新的学科和新的工程专业还在不断产生,这通常以大学中新的院系、社会上新的行业工程组织或现有组织中新部门的成立为标志。按系统对象来划分,工程又包括航天器、航空器、桥梁、隧道、船舶、汽车、机器人、食品、水产、工业加工设备、枪械等。



思考 & 练习

1. 对你所了解的某一工程项目进行专题研究,分析该工程的产生过程及其政治、经济、社会与文化影响。
2. 瓦特蒸汽机的发明是第一次工业革命中的颠覆性技术进步,试阐述纽科门蒸汽机和瓦特蒸汽机的技术原理,分析瓦特蒸汽机的技术进步及其对工业革命的深远影响。
3. 语音信息的远程传送是信息社会的一项基本工程技术。思考分析电话机的科学原理及不同时期电话机的主要技术进步。
4. 人工智能技术研究使人工系统模拟人的智能,是智能化工业革命的基石。探究人工智能包含哪些科学与技术门类,在不同工程领域应用将产生哪些政治、经济、社会与文化价值。

第 2 节 工程设计



学习目标

理解工程设计的内涵与特征。



“长征”运载火箭



“山东舰”航空母舰



北斗卫星导航系统示意图



现代城市

仔细观察上图中这些典型工程案例。想象一下，这些复杂系统是如何设计出来的？只有专业技术知识能够设计出这些工程系统吗？要实现这些工程系统还需要哪些条件？

工程设计是人类为满足目标需求而创造某种工程系统、部件或方法的过程。工程设计既有主体也有客体。设计的主体指进行智力活动的人，设计的客体指设计的对象，既包含设计物的形状、色彩、材料、形式等外在表现形式，也包含设计物的需求、功能、结构、行为等内在特征，以及这些特征要素之间如何关联在一起物化为设计对象。设计过程既包括设计对象从初始状态（需求、约束）到目标状态的活动序列，也包括设计过程中的设计活动及其时序逻辑关系。

工程设计对象可以是诸如飞机、卫星、运载火箭、石油化工厂、

汽车生产线等技术系统，或者航空、铁路、高速公路等技术-社会系统，也可以是诸如机械、电子、建筑等特定领域内的特定对象。虽然设计对象形形色色，但是工程设计都需要应用美学、数学、工程科学等知识和信息来逐渐细化描述设计对象，这是一个决策过程。因此，好的设计既需要分析更需要综合。工程分析是将问题分解成可控的不同部分。例如，桥梁可分解成桥面、桥跨、支座、桥墩、承台、桩基等子系统，应用科学原理和工程方法，通过必要的计算，尽可能多地获知桥梁的物理行为，了解桥梁受力是如何分布的，振动幅度是如何控制的，等等。工程分析常常采用模型来模拟真实世界。工程综合是采用整体的观点看问题，通过识别系统的设计要素分解子系统，最终把可选零部件组合、集成为一个完整的工程系统。



拓展阅读

工程设计方法学

从工程设计过程的不同阶段和角度出发，现代设计已发展了“十一论”方法学。其中信息处理是设计的依据，功能实现是设计的宗旨，系统分析是设计的前提，突变创造是设计的基石，智能运用是设计的手段，广义优化是设计的目标，

相似模拟是设计的捷径，动态分析是设计的深化，离散处理是设计的细解，悦心宜人是设计的美感，模糊定量是设计的发展。它们既相对独立又有机联系，需要综合应用。

工程设计立足实践、注重创造、综合科技与人文，最终体现为设计师综合素养的外在表现。如图1-1所示，工程设计包含了丰富的内涵。因此，工程设计能力包括知识、技能和素养。设计知识可以划分为设计客体（对象）知识和设计过程知识两大分支。本课程涵盖设计的过程知识，包括设计流程、设计阶段、设计活动、设计方法、设计工具等。设计活动的主体（人）天生具备扩展设计活动的的能力，然而，由于设计客体和设计活动自身的复杂性，工程师需要经过学习和训练以具备完成复杂设计任务的能力。知识可以通过学习获得，获得技能的最好方式则是动手做设计，而素养是在学习与实践过程中形成的。

要解决工程设计的实际问题，常常需要应用很多学科技术和非工程学科知识来寻求解决方案。输入的数据可能是非常零散的，项目的范围也可能会很大，设计不仅需要团队协作，而且必须在给定时间和费用的严格限制下进行。此外，设计还会受到环境、法律法规等的限制。我们虽然希望设计能够成功，但你的设计是最好的吗？是最有效的吗？通常要等到项目实施应用、看到效果后才能最终证明。

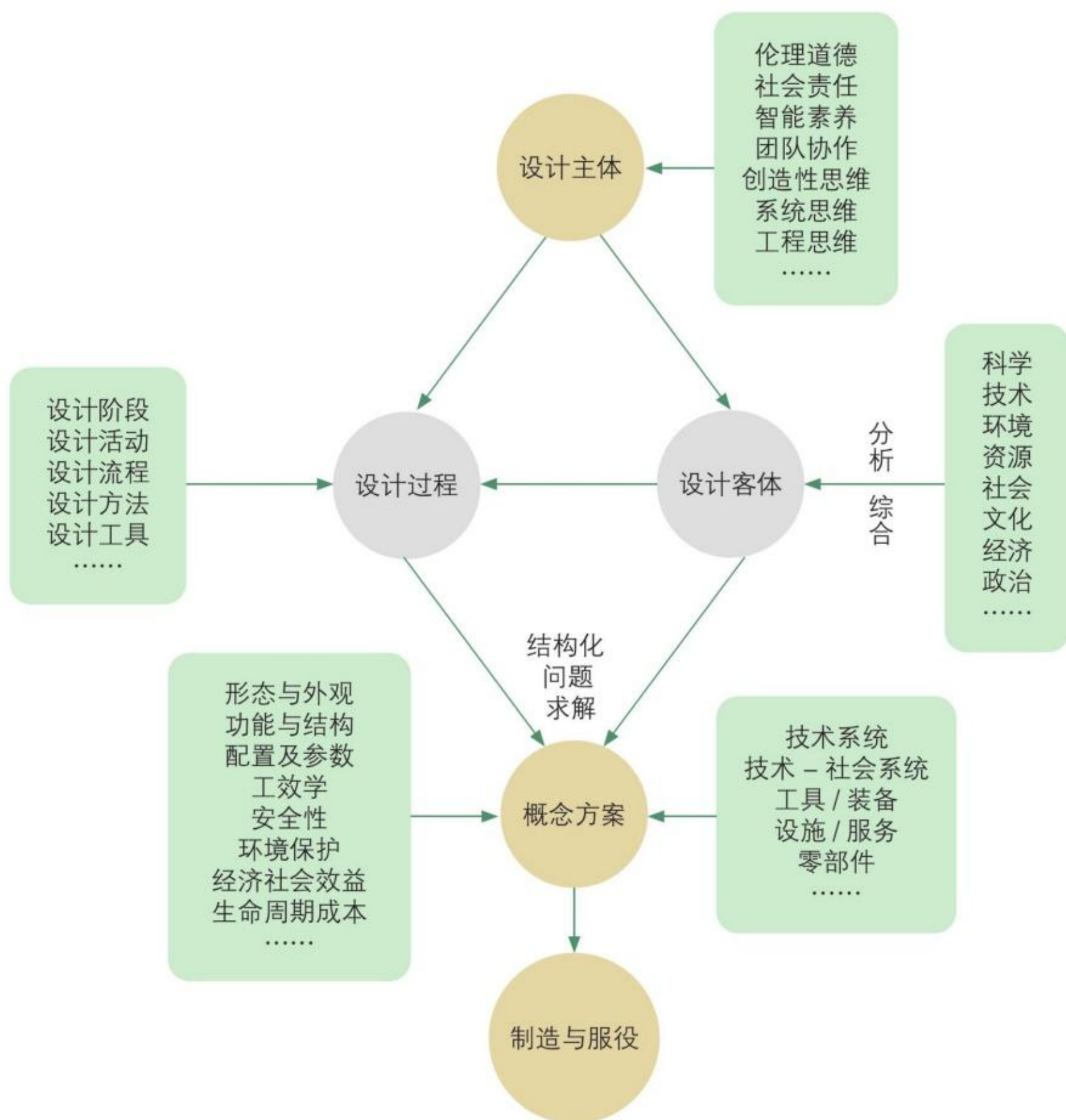


图1-1 工程设计的内涵



拓展阅读

工程设计的4C特征

关于设计情境所产生的挑战可以用设计的4C特征来概括，它们是创造性（creativity）、复杂性（complexity）、选择性（choice）和妥协性（compromise）。目前，一个非常清楚的事实，是

工程设计很好地扩展了科学的边界。扩展的领域和实现的工程任务为工程师创造了无限可能的机遇，他们有机会进行一系列的创造设计并因设计变为现实而获得满足感。



设计 & 操作

收集不同地域、不同形式的桥梁工程案例，分组观察分析这些桥梁的力学原理与建筑构型之间的关系，说明它们采用了哪些技术方法和手段。分析总结不同历史阶段、不同地域环境下桥梁的工程特性、技术发展、社会价值和文化内涵。

随着工程的进化，人类已发展了工业设计、机械设计、机电一体化设计、工艺设计、工程管理设计、营销与服务设计、集成电路设计、电子系统设计、软件设计等众多设计理论与设计方法，包括相关计算、测试、仿真、优化程序和软件等，创造了种类多样的新产品、新工艺、新装备和新的经营服务方式，优化了产品的功能，提升了质量效益，从而引导了社会消费时尚，体现了工程设计的经济、社会和文化价值。一项好的设计不但可以提升市场竞争力，还可以创造新需求，开拓新市场，从供给侧重塑产业格局和生态，创造新的生产和生活方式。



拓展阅读

工程的特征

1. 社会性。工程设计的目标是服务人类，为社会创造价值和财富。任何工程活动都是在一定历史时期、在一定社会环境中存在和展开的，因此，工程设计受特定时期社会、政治、经济、文化的制约，社会性贯穿工程活动的始终。经济全球化使得工程要素的获取和使用已在全球范围内进行，因此工程设计还受不同地域社会文化的制约。

2. 创造性。工程实践是工程师根据用户需求，确定工程目标、进行工程设计、将现有技术资源和物质资源重新整合、建构和创造的过程，也是物质、能量和信息转换产生新物质的过程，还是一个具体的管理运行过程。在这个过程中，科学规律和技术手段被应用于工程实践，由此而创造出经济和社会效益。对设计而言，想象力比知识更重要，因为知识是有限的，而想象力是无穷的。

3. 综合性。在工程设计中，除科学和技术因素外，还要综合考虑经济、法律、人文、环境、资源等因素。任何一个工程设计过程都是集成各

种异质要素并实现系统构建的创造过程。

4. 系统性。工程对象是一个包含了自然、科学、技术、社会、政治、经济、文化等诸多要素的复杂系统。要创造这样一个人工系统，不仅需要关注对象系统本身，还需要关注对象系统所处的环境大系统及其物质、能量与信息交换，关注对象系统创建的过程系统。要使系统内各个要素协调统一，实现整体最优。

5. 伦理约束性。工程设计的最终目的是造福人类，因此工程实践必须受到伦理、道德和法律约束。例如，克隆人就是一个极具伦理性的工程。现代工程必须遵循“以人为本、关爱生命、关爱自然、安全可靠”的工程伦理。

6. 效益和风险性。一方面，工程实践都有明确的效益目标，因满足人类的需要而获得价值，主要表现为经济效益、社会效益和环境生态效益；另一方面，效益总是伴随着风险，包括经济方面的市场风险、资本风险，社会方面的就业风险、安全风险、社区风险，环境生态方面的成本风险、能耗风险等。



思考 & 展示

1. 分析总结有线电话、无线电话和手机短信、微信等工程技术产品对人类社会交流和商业活动产生了哪些变革性的影响，体会工程设计提出的历史脉络。

2. 列举你所了解的一些工程系统的灾难事故，例如发生在2019年10月的无锡G312国道桥梁倾覆事故，从工程设计的角度讨论事故发生的原因，体会工程设计的重要性、复杂性和严肃性。

第 3 节 设计工程师



学习目标

初步理解设计工程师的智能素养与社会责任需求。



人类的生产和生活产生了大量的垃圾，你知道这些垃圾是如何处理的吗？它们需要采用哪些技术与工程系统进行处理？你有更好的处理方案吗？要完成这些任务，工程师需要做哪些思想的、知识的、技能的、素养的准备呢？

工程对象形形色色，工程学科多种多样，它们都是人类应用知识、应用技术进行创造性活动的结果，因此设计工程师是工程设计的实践主体。工程设计不仅需要学科交叉、技术更新，更需要科技、经济、社会、人文、艺术等人才以及知识、信息的跨界融合。工程师不仅要提升专业技能和创造力，还要提升自身的沟通协作能力，具备社会伦理、道德和法律素养。

人的智能是智力和能力的有机结合，前者主要以认识和思维为主，后者主要以实践和创造为主。人脑具有诸如推理判断、模糊识别、联想思维等功能，它们是不能从外部灌输的；而人脑的一些缺陷，诸如运算精度不高、速度慢、易疲劳、存储量不足、易出错

等，则可以充分运用以计算机为主的智能工具来弥补。虽然运用计算机辅助工程（computer aided engineering, CAE）、计算机辅助设计（computer aided design, CAD）、人工智能（artificial intelligence, AI）等技术可以便捷、高效地完成工程设计的大部分工作，但它们却无法代替人的创造性工作。

现代工程越来越深刻地影响和改变着人类世界，设计工程师所肩负的社会责任也越来越大。现阶段，不可再生自然资源枯竭、环境污染、生态破坏、能源危机、网络威胁、生物多样性减少等问题越来越突出，工程活动越来越密切地关系到各种伦理、道德和价值问题。我们党的二十大报告提出，“中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化”，我们要“走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路，实现中华民族永续发展”。这就需要工程师群体增强社会责任感，自觉自律应用技术提高工程产品的生态和社会效益。工程师不应该仅仅关注技术，还应该关注人、关注社会、关注自然，在工程活动中遵循以人为本、道法自然、天人合一，实现人与自然的和谐共生。工程设计不能仅仅跟随市场、满足市场，更要把握人类的真正需求，从而定义需求、引领需求，创造市场。当下我国正处于从中国制造（made in China）走向中国创造（created in China）的历史阶段，突破核心技术、拓展设计领域，设计绿色智能的新产品、新能源、新工艺、新装备、新系统，已成为工程师责无旁贷的使命。

人类活动在不断变化发展。在不久的将来，智能机器人代替人的大部分操作工作后，原本承担生产操作工作的人能去做什么？显然，从事设计工作是一条出路。未来，人们大部分时间将从事工程设计或者服务工程设计。什么样的设计有益于社会、什么样的设计有害于社会，将成为社会发展的突出问题。因此，设计工程师不仅要具备专业技术能力，还要具备在利益冲突、道义和功利矛盾中做出正确选择的能力。设计工程师除了对工程进行经济价值和技术价值的判断，还必须对工程进行伦理判断；除了具备专业素养，还应具备道德品质；除了对雇主负责，还要对社会大众、环境以及人类未来负责。工程师对社会的忠诚应该高于对雇主利益的忠诚。

思考 & 展示

同学们，我们正身处从“中国制造”走向“中国创造”的历史阶段。思考一下你的职业规划，假如你要成为一名工程师，那么需要有哪些智能和素养准备？能够对社会做些什么贡献？

现代工程系统的结构越来越复杂，规模越来越庞大，必须组成团队才能胜任，完成工程目标。因此，现代工程设计是一项团体活动。作为团队的一员，工程师不仅要具备所负责任务或方向的知识 and 技能，还需要具备高效的团队协作能力。拥有不同教育经历和多样生活阅历的团队成員，会给团队奠定一个更广泛、更富创意的知识基础；团队成员各司其职，可以更快、更有效地完成任务和目标。由于工程对象千差万别，工程团队的构建与运作需要建立在对工程系统进行功能结构分解与集成的基础上，并随着对工程系统认知的深入适时调整。



设计 & 操作

采访你身边的设计工程师，或者组织观看1~3部《大国工匠》《两弹一星》等元勋系列影片，或者观察你熟悉的工程案例，分析归纳不同岗位工程师所需的知识和技能、工作特点、工作伦理和社会责任。



综合实践

随着经济发展、科技进步和城市规模的扩大，城市人口不断增加，居民生活水平大幅提高，商品消费量迅速增加，生产和生活垃圾也急剧增加，并且成分越来越复杂。如果不加处置，大量的生活垃圾、工业垃圾、电子垃圾、医疗垃圾会对大气、水、土壤等生态环境造成污染，不仅严重威胁人类的身体健康和生存环境，还会造成资源浪费，影响国民经济的可持续发展。党的二十大提出“深入推进污染防治。坚持精准治污、科学治污、依法治污，持续深入打好蓝天、碧水、净土保卫战”。要从源头上控制垃圾的产生量并达到垃圾处理的无害化、减量化、资源化目标，都离不开工程设计。垃圾处理的工程设计对象是一个复杂的技术-社会系统，需要合理设计垃圾分类和有效进行垃圾处理，尽可能降低垃圾产生量，实现垃圾资源化利用，减少最终排放到环境中的垃圾，实现社会、经济与生态效益最大化。

像垃圾处理这种结构复杂、规模庞大的技术-社会工程系统，需要组建多学科团队来完成。同学们分组进行角色扮演，组建一个固体废弃物处理系统工程设计团队，在协商的基础上进行任务分工，并交流讨论如何协作可以快速完成设计任务，体验团队合作的重要性和必要性。组织团队成员进行固体废弃物处理系统工程设计前的相关调查和信息收集工作。



本章小结

工程设计是人类为满足生活需要与社会发展所进行的创造性活动，是设计主体针对设计客体的结构化问题进行创造性求解的过程及结果，需要多方面知识与信息的综合与集成，具有社会性、创造性、综合性、系统性、伦理约束性、效益和风险性等特点。设计工程师需要知识和技能，更需要道德素养。由于工程系统的结构越来越复杂、规模越来越大，需要在系统分解与集成的基础上组建相应的工程师团队，分工合作来完成任务。

本章学习评价表

实践项目	评价标准	评价方式		
		自评	互评	师评
需求调查	技术意识明显、内容准确、数据翔实、需求明确、社会和生态效益显著			
团队组建	结构合理、分工明确、职责清晰			
分工协作	责任意识强、沟通能力好、组织效率高、团队目标明确			
信息收集	渠道多样、内容明确、分析合理、效果显著			

等级标准：A——优秀，B——良好，C——合格，D——待改进。

第二章 工程设计的一般过程

工程设计是设计主体为满足一定的需求，综合运用科学、技术与人文知识创造性求解结构化问题的过程。工程设计需要设计主体建立技术意识和工程思维，并最大程度发挥其创新设计能力。设计活动既需要设计客体的相关知识，又需要设计过程的相关知识。本章主要讨论工程设计的要素、设计的一般过程以及一些具体的设计活动。通过这些关联的逻辑活动，我们能够快速构建出最优设计方案、完成图样表达、提升物化表现性，并平衡工程系统的经济、社会、生态效益。

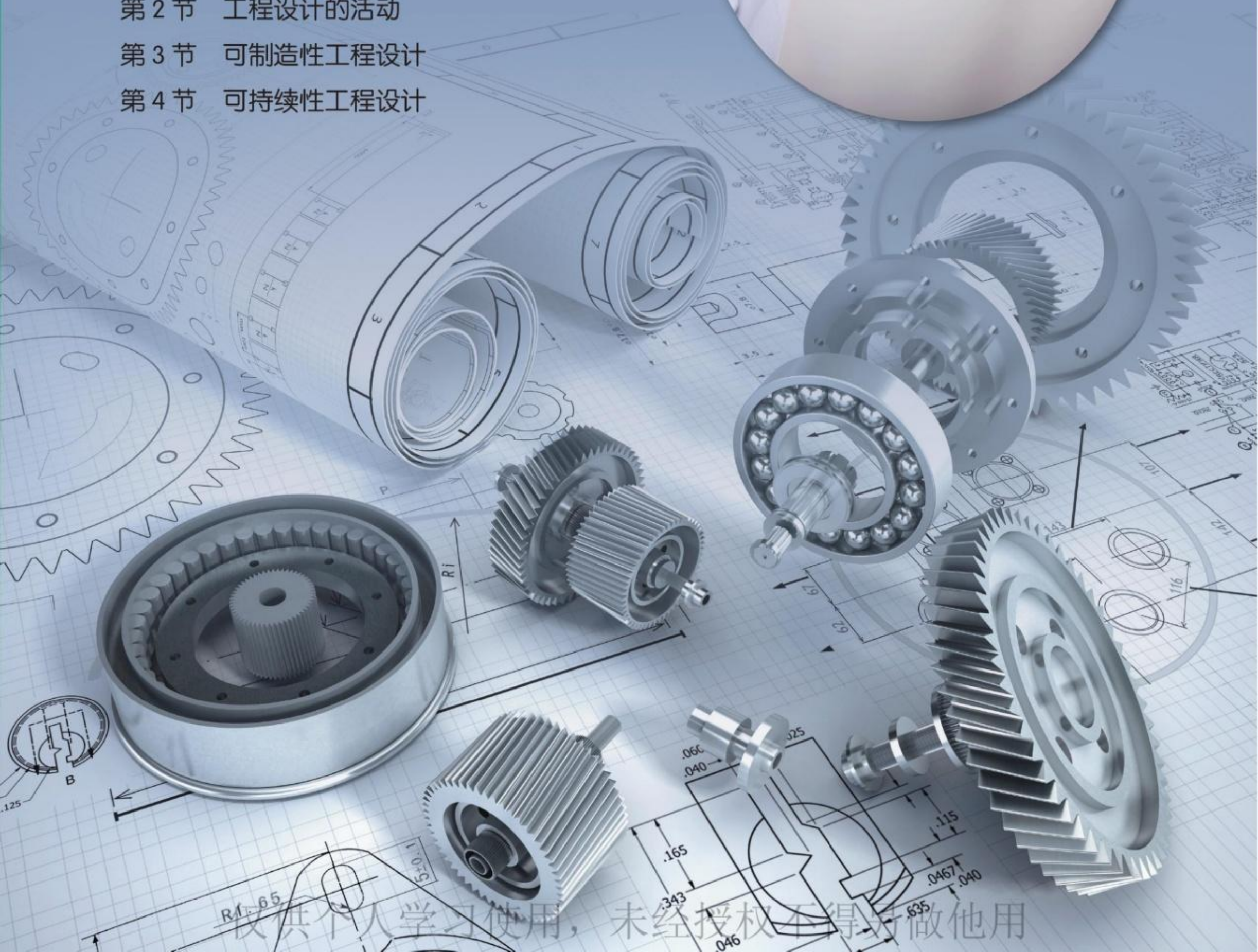


第1节 工程设计过程和要素

第2节 工程设计的活动

第3节 可制造性工程设计

第4节 可持续性工程设计



第 1 节 工程设计过程和要素

学习目标

理解工程设计的一般过程，学会简要分析工程设计的要素。

选择一个你熟悉的工程案例。试想一下，这样一个工程系统是如何从无到有创造出来的？一个“好”产品包含哪些要素和特征？如何做到既满足应用需求又与环境协调完美？

一、设计过程的基本模型

工程设计的对象是某个系统，由完成指定任务而必需的硬件、信息和人员组合而成。工程对象系统的复杂程度不同，设计过程所需的步骤多寡也就不同。如图2-1所示为设计对象和设计过程的基本模型，工程设计的核心流程是由很多设计要素和操作组成的顺序流程。

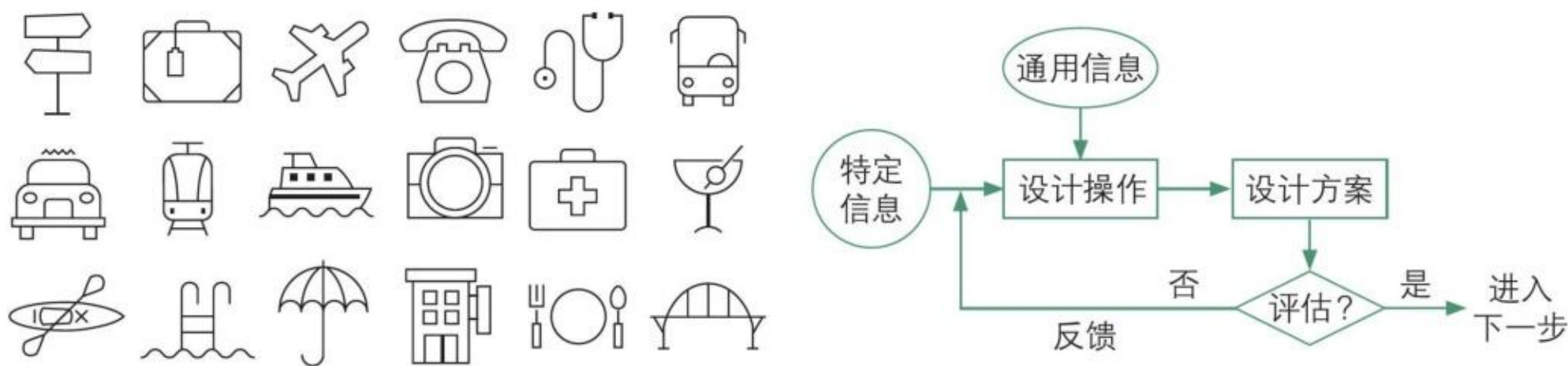


图2-1 设计对象举例（左）和设计过程的基本模型（右）

设计操作包括：①探索满足需求的概念；②构建系统的模型；③确定构成系统的零部件；④选择制造零部件的材料和工艺。每个操作的完成都需要信息，包括通用信息、特定信息（特定工程系统的专业信息，例如造一座桥，需要了解桥址的地质、地形、水文、气候、生态等信息）。获取信息是设计过程中的一项重要活动。

一旦获取了必需的信息，设计团队就可以运用合适的技术知识，借助计算、试验等工具来实施设计操作。在设计阶段，可能需要构

建一个几何模型并进行仿真，或者建立一个全尺寸原型并测试到失效。设计操作产生一个或多个备选方案后，必须对设计结果进行评估。如果设计方案充分满足设计要求，设计工作就可以进入下一步；如果评估发现了缺陷，设计师就必须重复设计操作。第一次设计的信息与评估产生的问题信息一起作为反馈信息输入再一次的设计过程，这就是迭代。复杂系统可以分解成一系列的设计过程，设计的最终结果是一个新的工作对象或工作对象组合成的一个新系统。

工程设计承担了不同的设计任务，有不同的设计类型，包括原始设计（创新设计）、适应性设计、再设计、选择性设计。再设计是比较常见的一种情形，包括产品投放市场后未达到预期性能要求而进行的改善设计，为了增加新特征、修改现有产品以满足新需求，为了提升产品性能、改善产品外观等以保证产品的竞争力。例如，由于环境污染问题，政府发布了制冷剂使用的新规定，因此需要对冰箱制冷系统进行再设计。

二、优秀设计的考虑要素

工程设计需要考虑多方面的问题，包括工程系统的性能需求、生命周期、质量控制、环境关系、制造能力、维护、工效学、法律法规、社会文化等要素。一个优秀设计包含的要素可以分为三类：性能需求实现、生命周期事项、法规与社会事项。

（一）性能需求实现

设计首先必须达到需求的性能。性能衡量了设计的功能和行为。设计的主要要素是功能，例如设计的是人行桥、公路桥还是铁路桥。辅助性能侧重的是桥梁承重、通行能力、使用寿命、鲁棒性、可靠性、易用性、经济性、可维修性等。此外，还必须考虑工程系统的安全性、工作时的噪声级别等固有性能。

工程产品通常是一些零部件的组合。与零部件功能联系紧密的设计是它的外部形态。形态指的是零部件看起来是什么样子，包括形状、尺寸和表面粗糙度等。零部件的性能也受材料的某些设计性质的限制。为了获得一定的性能水平，材料的设计性质必须要达到一定的要求，否则设计是失败的。如图2-2所示为飞机机翼材料的力学设计性质示意图，可以看到，刚度、强度、韧性、密度等是限制飞机机翼选材的设计性质。同理，抗高温蠕变、抗高温疲劳、抗氧化、抗高温腐蚀等是航空发动机和燃气轮机涡轮叶片选材的设计性质。

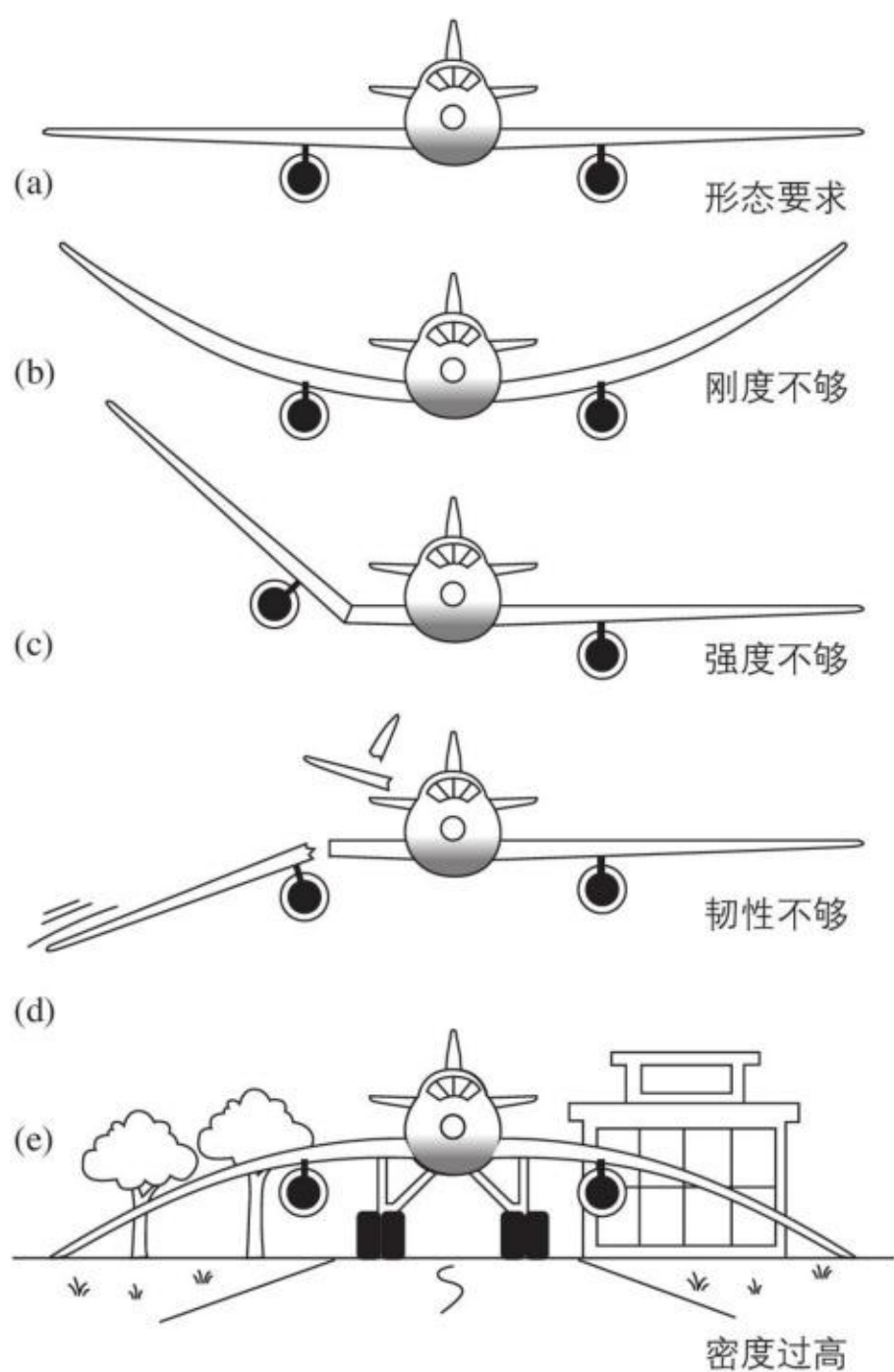


图2-2 飞机机翼材料的力学设计性质示意图

环境需求涉及两方面。一方面，考虑工程系统运行的工作环境，例如温度/湿度、腐蚀裕度、灰尘浓度，以及振动和噪声的极限等，对其进行预测并在设计中给予满足。另一方面，考虑如何使工程产品的行为能够保证生态环境的安全与清洁，即绿色设计，包括工程产品报废后如何处置，即面向环境的设计。

美学需求指的是能满足人对美的感受。它关心客户如何根据产品的外形、色彩、表面肌理，以及平衡、统一和兴趣等因素看待产品。这方面的设计通常由工业设计师而不是工程师来完成。工业设计师要对人因工程负责。人因工程应用生物力学、工效学和工程心理学来保障工程产品可以被人安全有效地操作。

可制造性需求。由于材料选择或公司设备对拟定的制造工艺有所限制，因此工程设计必须考虑制造技术。

成本需求是最重要的设计要求。每个设计都有经济性要求，包括生产研发成本、内部生产成本、生命周期成本、工具成本及投资回报等要求。如果初步的成本预测结果不理想，那么设计项目有可能永远不会启动。成本涉及设计过程的方方面面。

(二) 生命周期事项

现代设计不仅要考虑产品的性能、寿命、质量和价格，还需要考虑生态环境影响和资源利用效率。使产品在从设计、制造、使用到报废的全生命周期都符合环境保护和人类健康的需要，尽力做到对生态环境无害或危害最小，资源利用率最高，能源消耗最低。

零部件的生命周期始于设计需求，终于产品的报废与处置。材料选择是一个关键要素。工程设计需要知道材料在工作条件下是否稳定，材料的显微结构是否随温度变化而改变，材料是否会缓慢腐蚀或快速磨损。

材料选择不能从可制造性中分离出来。如图2-3所示，工程设计与材料选择和加工工艺

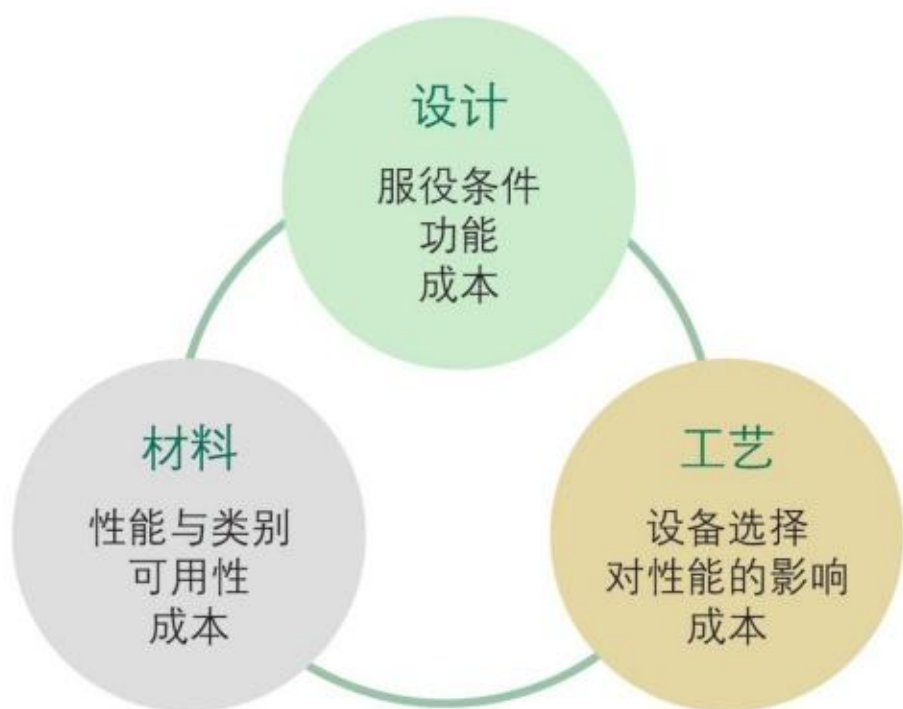


图2-3 设计、材料与工艺间的相互关系

有着内在的紧密联系，工程师需要在成本与耐久性之间进行权衡。通过设计可以减少因腐蚀、磨损、断裂造成的材料老化或失效等状况，延长产品的使用寿命。

从图2-4所示完整的材料循环链可以看出产品的生产与消耗的全生命周期。这个过程从矿山钻探、开采开始，这些原生材料经过提取、冶炼、处理等加工变成块材料（如铝锭），块材料进一步加工制成工程材料（如铝板）。工程师选择使用这些工程材料制造产品，产品投入使用。最终，产品磨损或因市场上有了更好的替代品而废弃。此时，一种选择是对废弃物进行处置使其最终回归地球。另外一种选择则是回收废弃物（如铝制饮料罐）并循环再利用，降低对环境的负面影响，减少废弃物和有害物质的排放。

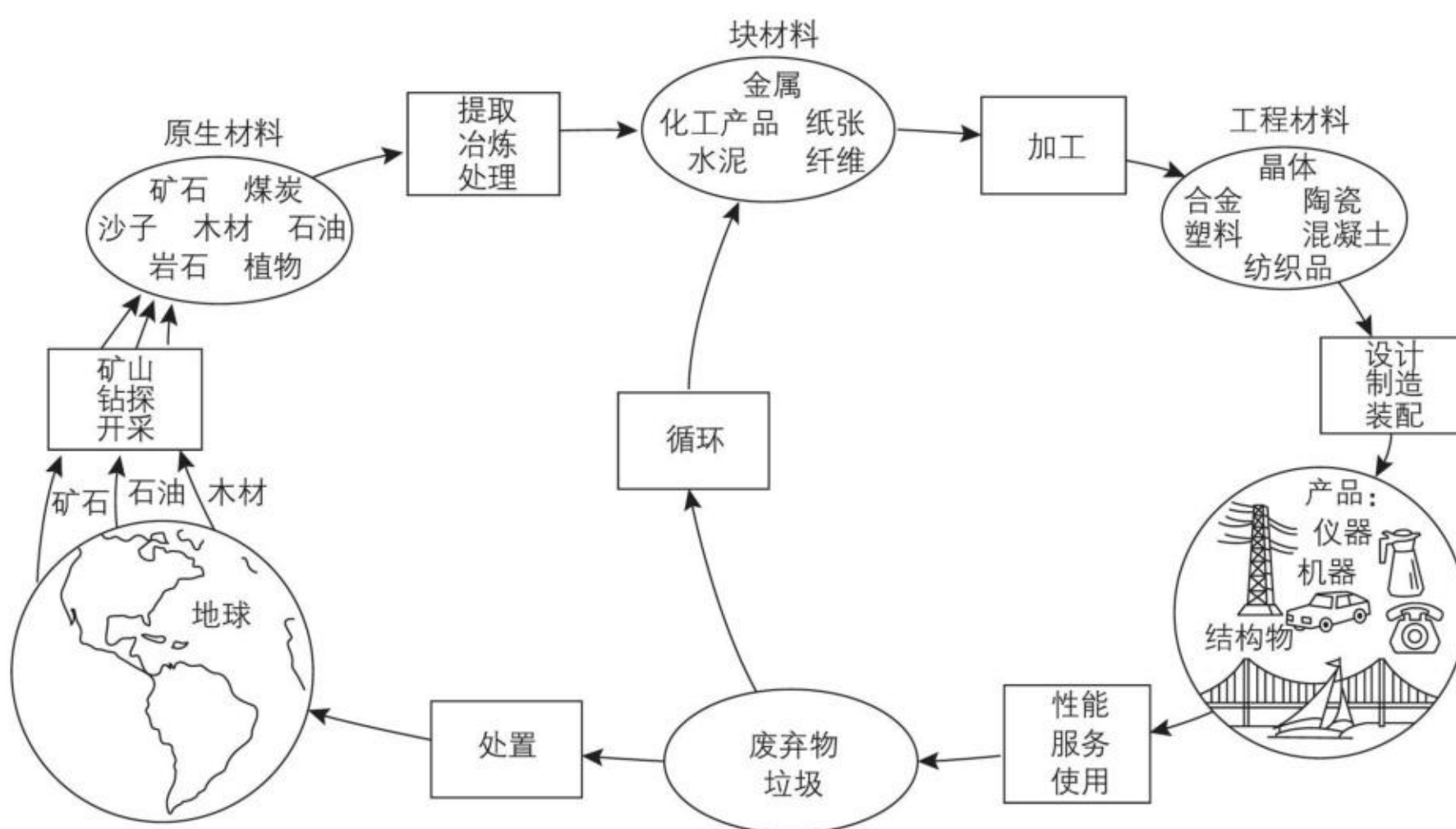


图2-4 完整的材料循环链

（三）法规与社会事项

工程设计要遵守法规和标准。法规是法律和规则的集合，目的是保障大众人身、财产安全。标准是对流程、准则、尺寸、材料、零部件等统一的规定，是为了在一定的范围内获得最佳秩序，经协商一致制定并由公认机构批准，共同使用的和重复使用的一种规范性文件。《中华人民共和国标准化法》规定，我国标准包括国家标准、行业标准、地方标准、团体标准和企业标准五类。工程标准可以统一规定零部件的尺寸和型号、材料的最低性能，以及性能指标测量的流程等。在全球化的今天，不仅要关注我国的法规和标准，还要考虑工程产品最终目的国发布的规范和标准。

所有专业工程协会的道德规范都要求工程师保护公众的健康和安全。尽管产品的正常用途是明确的，但产品的非正常使用后果却不明显。设计师需要去预见尽可能多的非正常使用情形，然后完善产品设计，预防非正常使用的危险。如果非正常使用不能通过功能设计避免，那么就要永久地在产品上附上清晰、完整和没有歧义的警示。设计师还需要监督所有与产品相关的广告宣传材料、用户手册和操作说明，以保证内容与安全操作流程一致，不对超出设计能力的性能给予承诺。



拓展阅读

技术创新

20世纪40年代，人类发明了数字计算机和晶体管。随着晶体管演变成集成电路，计算机的体积减小，成本降低，逐渐发展为现代的台式和笔记本式计算机。把计算机与诸如光纤通信协议等通信系统结合起来，创造了互联网以及廉价、可靠的世界范围内的通信网络。大体上，技术的发展历经以下三个阶段。

- 发明阶段：创造性概念构想与表达记录。
- 创新阶段：发明成功实现并获得经济价值。
- 推广阶段：创新案例的广泛应用。

创新阶段是三个阶段中最关键的，也是最难

的。基础研究可以产生直接进行后续商业开发的构想，然而，响应市场需求的创新通常比面向技术研究机遇的创新具有更多成功的机会。数字图像的案例表明，为达到某个目的进行的基础技术研发可能在另一个产品领域有更大潜力。电荷耦合器件（charge-coupled device, CCD）最初是为新型存储芯片技术进行的设计，最终却在数字图像领域大放异彩，在天文观测、空间遥感、数码设备等领域获得广泛应用，产生了巨大的商业价值。



设计 & 操作

选择参观上海长江隧道、地铁网络、东海大桥海上风电场、磁悬浮列车或你周围的某项典型工程，分组进行工程信息、设计操作、工程要素的探究。分析该工程包含了哪些工程要素，需要哪些信息和设计操作，它们是如何集成的。



思考 & 展示

市场调研是启动工程设计的第一步：有哪些信息资源可用，需要收集哪些类型的信息，为了形成市场报告和用户需求，需要从哪些视角整理数据和信息。

第 2 节 工程设计的活动



学习目标

1. 了解工程设计各阶段的活动及其逻辑关系。
2. 初步掌握建立工程特性和质量功能配置的方法，学会编制简易工程设计任务书。

面对大量的数据、信息和知识，如何合乎逻辑地把它们应用到具体的设计任务中去？这就需要设计过程形式化，遵循创造性思维和系统思维，运用一些系统化的设计方法进行分析和综合，采用工程特性语言描述用户需求，通过质量功能配置确定控制工程系统质量的关键参数，最终提出可行的解决方案。

工程设计的创意常常是用直觉的方式得到一个设计概念。然而，产生创新想法与生成一个可行的设计概念是不同的，工程设计在很多节点都需要结构化的问题求解。一般来说，设计过程的前三个阶段为概念设计、实体设计和详细设计。图 2-5 描述了工程设计从问题定义到详细设计各活动的逻辑次序。

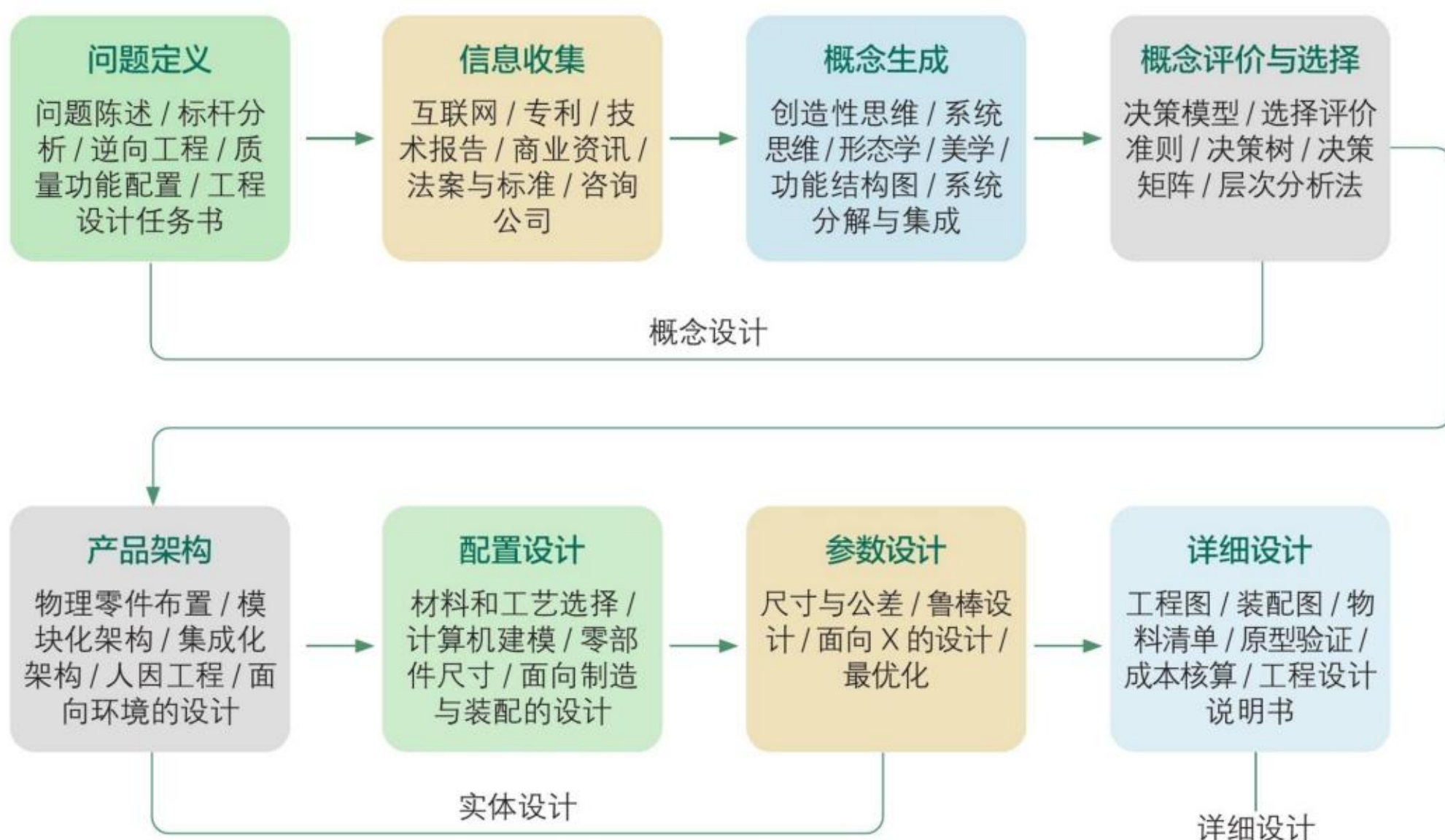


图 2-5 工程设计过程前三个阶段的设计活动

一、概念设计阶段

概念设计是工程设计的开始阶段，任务是提出一系列可能的备选方案，然后再筛选出一个最佳概念。概念设计需要极高的创造力，它涉及极大的不确定性，需要协同组织的多个功能部门。概念设计阶段的活动包括以下几个方面。

- 客户需求识别。要完全了解客户的需求，还要了解客户是谁，客户想要什么；获利的同时，产品如何设计才能使客户满意。例如，“市民抱怨水质差”“旅客想要一个便携行李箱”都包含了客户需求。

- 问题定义。采用工程特性语言描述客户需求，包括分析竞争产品、确定目标规格和约束、列出需要权衡的因素。质量功能配置是一个将用户需求与设计要求联系起来的有效工具。工程项目的详细要求清单称为工程设计任务书。

- 信息收集。工程设计有特殊的信息获取要求，信息的范围也相当广泛，包括产品信息、工业信息、公司信息、市场信息等。可以通过直接观察、阅读产品和技术文献、把物理和工程科学的原理应用到任务中去等方式来实现信息收集。

- 概念化。生成一系列潜在的能满足问题陈述的概念。个人的直觉、基于团队的创造方法与高效的信息收集相结合是概念设计的关键活动。如图2-6所示为桥梁和茶壶设计的一些可选概念。

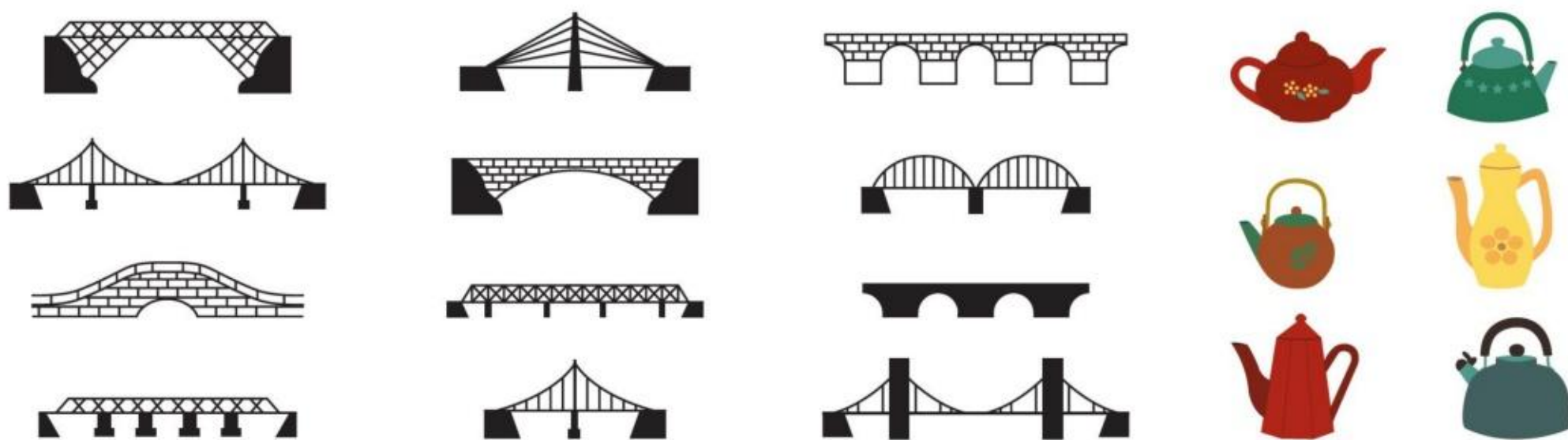


图2-6 桥梁（左）与茶壶（右）设计的可选概念



拓展阅读

创造性思维

没有任何一种活动比设计更需要创造性。优秀的工程师能够运用创造性方法进行问题的创造性求解，会用创造性思维和设计流程来综合提出前所未有的新概念。通过有意使用头脑风暴法、

5W1H法、类比法、仿生法等特定的方法和技术获得创造性思维，这些方法还可以消除创造过程中普遍存在的一些心理障碍。

很久以来，个人的创造力被认为是一种天赋，

创造力不能被教授、复制或者模仿。随着科学方法的逐渐普及，人们已经认识到，基于生理学和心理学知识产生艺术创造的认知过程同样适用于缜密思考和问题求解。对那些有创造性的人和那些能体现创造性发明过程的研究，产生了能提高个人创造性思维的步骤或流程，揭示了产生创造性结果的关键决策或者决定性时刻。由此，创造性思维是可学会的这种观点得到迅速扩散。

创造性思考者的非凡之处在于，他们有能力把想法和概念重新综合成有意义的和有用的形式。这些想法可能是被某个发现激发的完全原创性的构思。更常见的是，创造性的想法是把现有想法用新颖的方法重新组合在一起的想法。富有创造性的人擅长把问题求解任务进行分解，能从新角度对它的要素进行分析，能够把当前问题与看起来毫不相关的观察或事实相联系。

绝大多数人认为创造性思维是如闪电一样的自然过程。然而，对创新过程的研究使人们确信，大多数想法都产生自一个缓慢的、深思熟虑的过程，这个思维是可以通过学习和实践得到培养和提高的。通常，具有创造性的人首先感觉到的是整体构思。起初仅能理解一部分有限的细节，伴随着缓慢的探索，整个思想逐步清晰化。创造性过程可以被视为一个想法所经历的从模糊的到结构完整的、从混乱的到有组织的、从不明显的到明显的动态过程。有天分和经过训练的工程师重视秩序和明晰的细节，拒绝混乱和模糊的概括。因此，人们需要自我训练使自己接受创新过程的这些特征；明白命令是不会产生创造性的，要善于创造有助于创造性想法产生的有利条件；认识到创造性想法是难以捉摸的，要注意捕捉和记录。

- 概念选择。设计概念的评价、完善并演化成一个优选概念是该阶段的设计活动，决策模型和可用的评价方法见本书第四章第1节。这个过程通常需要进行多次。

- 工程设计任务书细化。在概念选定后，任务书还需要细化。设计团队必须负责获得质量关键点参数，并在成本和性能之间进行权衡。

- 设计评审。在拨付资金进入实体设计阶段前，必须进行评审。评审会议要保证设计在物理上能够实现、在经济上值得投入。设计评审也会审查详细的产品研发进度。设计团队需要一个策略来最小化产品开发周期，并确定完成项目所需的人员、设备和费用等。

交流 & 讨论

工程设计需要创造性。分组讨论如何提高创造性，如何克服影响创造性的心理障碍。从废弃物处理、家庭安防、通用技术课专用教室改造、学校花卉管理、城市交通、农田水利灌溉等工程项目中选择1~3项，组织头脑风暴活动，记录下每个创意想法。

（一）建立工程特性

在概念设计阶段，探索和确定工程系统的性能需求是关键。只有在产品描述足够清晰并得到了技术专家、商业专家等的认可后，

设计过程才能进入概念生成阶段。

工程系统的描述包含以下工程特性。

设计参数。设计参数是一系列的物理属性，例如桥梁的承重和通行能力、汽车的载重和动力、茶壶的容积等。参数包括由设计者决定的设计特征和用来描述设计性能的数值，它决定了设计的形式和行为。

设计变量。设计变量是需要设计团队进行选择的参数。例如，汽车变速器和电动机主轴减速器的齿轮比就是一个设计变量。

约束。约束是对设计自由度的限制。约束可以是对设计变量或性能参数的最大值或最小值的限制，也可以表现为一系列固定数值的形式。

工程描述是由一系列工程特性组成的中性解决方案。这些中性解决方案是工程设计说明书的主架，但不是最终的规格。工程师经常使用标杆分析法、逆向工程法来拓展和更新对类似工程产品的认知。

1. 标杆分析

标杆分析是将本公司的产品、流程等与市场上的标杆进行比较，以衡量本公司的产品设计和制造水平的过程，是一种通过信息交流向其他企业学习的方法。由于标杆分析只是执行了初步评估，公司如果想要保持运营的竞争优势，就应该把标杆分析视为持续改进产品设计流程的第一步。

竞争性能标杆分析是以当前市场上的一流产品作为标杆来测试本公司的产品。标杆分析为设置新产品的功能预期提供了必要的性能数据，还可用于分析市场竞争、找到真正的对手。

2. 逆向工程

逆向工程是通过观察使用中的产品、拆开看看它是怎样工作的来获得既存产品的信息，是最自然的一种信息收集方式。逆向工程通过对产品的拆解，确定产品中零部件的选择和配置，并深入研究产品的制造工艺。在剖析过程中收集到的信息能帮助人们更好地理解生产商做出的设计决策。逆向工程主要包括四项活动，在剖析过程中每项活动都伴随着期待回答的重要问题。

（1）发现产品的运行需求。产品是怎样运行的？产品正常运行需要哪些必要条件？

（2）考察产品怎样实现预定的功能。产品为了实现所需的功能使用了什么样的机械、电子系统或其他装置？能量和力以什么样的形式流经产品？组件和元件的空间约束是什么？正常运行是否需要

间隙？如果存在间隙，原因是什么？

（3）确定产品零件之间的关系。主要的组件是什么？关键零部件接口是什么？

（4）确定产品的生产工艺和组装流程。每个零件是由什么材料和什么工艺制造的？关键零件的连接方式是怎么样的？哪些地方用了紧固件？用了什么类型的紧固件？

发现产品的运行需求是唯一一项针对完整产品的活动。为了完成其他活动，必须对产品进行拆解，创建包括拆解步骤的详细列表、零部件清单等完整文档。如果没有产品的装配图，则要在首次拆解产品时画一张。



设计 & 操作

以台式计算机、洗衣机、扫地机等家用电器中的某一项设计为例，采用标杆分析法和逆向工程法进行信息收集。重点探究产品架构和接口，思考更换哪些模块可以提升产品性能，并简述理由。

逆向工程的目的是了解竞争对手的产品，工程师采用逆向工程来挖掘通过其他方式不能获取的信息。如果仅仅为了获利而采用逆向工程仿制他人产品，则是违反商业道德和知识产权保护法的。实施逆向工程时，设计者不能简单地认为看到的是竞争对手的最佳设计，因为有些影响因素不会体现在产品的物理形态中。

客户由于缺乏基础知识和专业经验，不能用工程特性语言来描述他们想要的产品，而工程设计人员可采用设计参数、设计变量和约束等工程特性语言将客户需求翻译成设计人员需要的参数，形成产品的中性解决方案。为了进一步规划设计方案的细节水平，通过创建质量屋的活动，设计团队能最终确定那些重要的工程特性。

（二）质量功能配置

质量功能配置是一种在工程设计过程中最大限度满足用户需求、识别工程特性关键质量控制点的系统化思想方法。运用质量功能配置能够确定产品设计开发过程中每一阶段的重要需求，并用这些需求来识别该阶段对满足客户需求贡献最大的工程特性。为了收集质量功能配置过程所需的信息，设计团队必须回答那些可能被掩盖的问题，并学习该问题的相关知识。质量功能配置是一种群体决策行为，它会使设计团队对问题达成高度认同和一致理解。

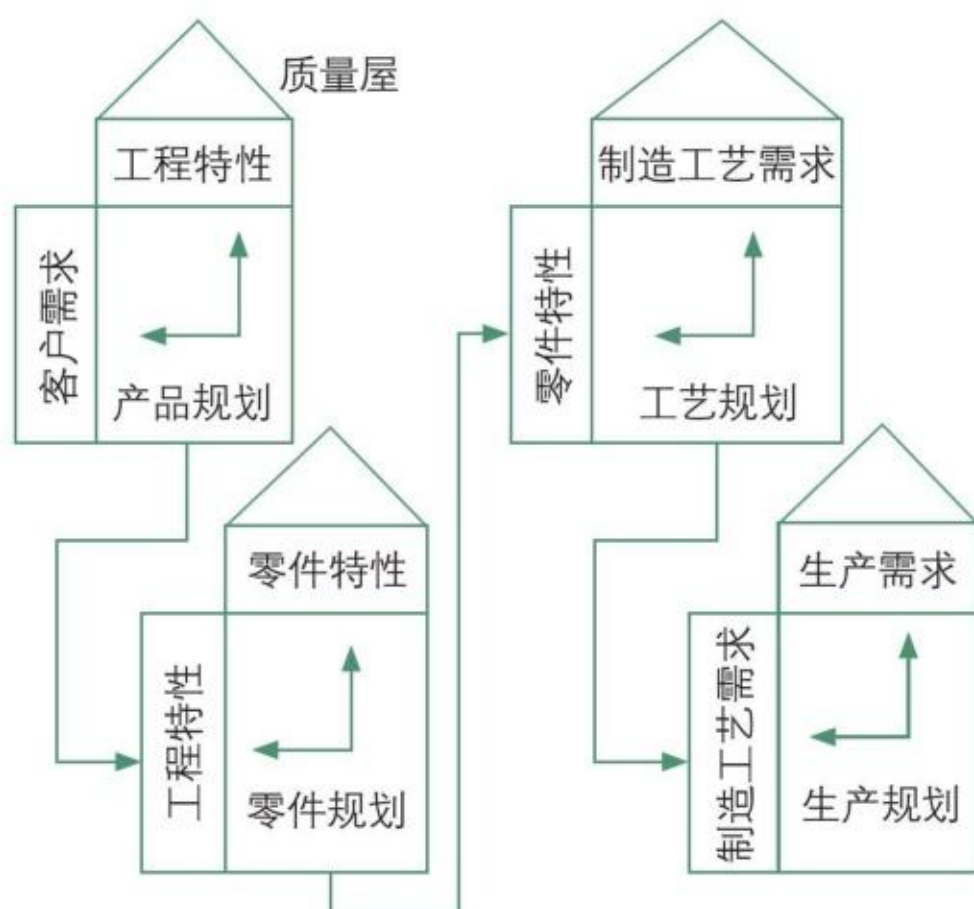


图2-7 完整的质量功能配置流程图

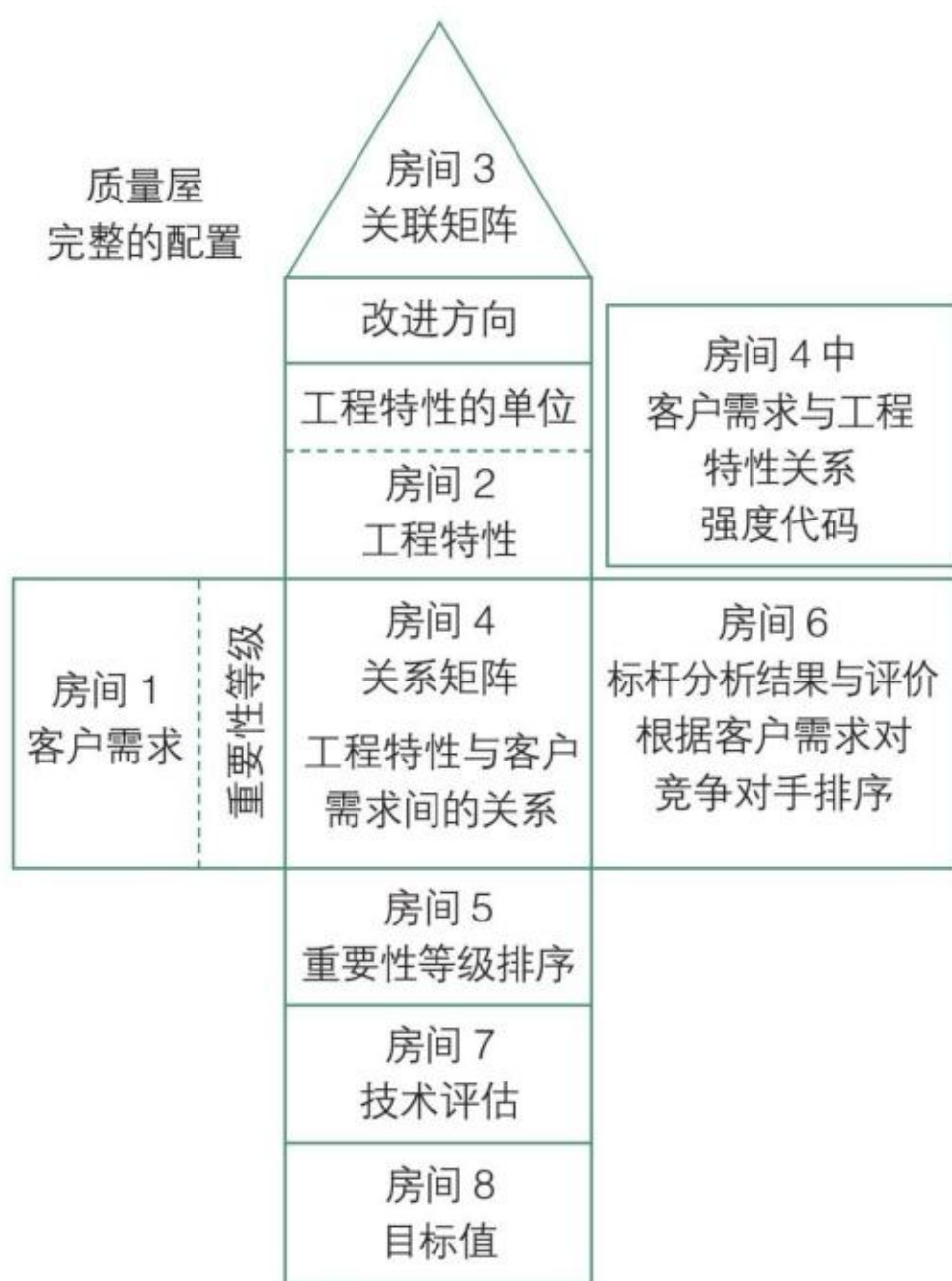


图2-8 八房间质量屋

如图2-7所示，完整的质量功能配置流程由四个依次进行的阶段组成，它们串联成链，每个阶段的输出都是下一阶段的输入。工程产品规划阶段也称为质量屋，由质量屋确定的重要工程特性为零件规划屋提供输入，零件规划屋为工艺规划屋提供输入，工艺规划屋为生产规划屋提供输入。执行质量功能配置流程，可以将每个屋的需求输入转换成该屋的输出特性。

由于质量功能配置是一个串联的、有序的、转换的过程，质量屋建立的客户需求与工程特性之间的映射关系将强烈影响后续的设计过程。在规划阶段使用结构完整的质量屋，可以识别出满足客户需求的一系列重要的工程特性与性能指标，它们是设计团队需要实现的目标。因此，实施质量功能配置分析至少要完成如图2-7所示的第一个屋——质量屋。

质量屋引导设计团队将收集到的信息转换成对新产品生成更加有用的形式。如图2-8所示，在一个八房间质量屋布局中，关系矩阵（房间4）是实现将客户需求与工程特性联系起来这一目标的核心。工程特性的质量关键点可通过房间5里的简单计算获得。房间6和房间7记录了通过标杆分析、逆向工程和客户调查等方式收集到的额外信息。房间3记录了工程特性之间可能存在的关联矩阵，可用于后续的权衡与决策。

质量屋中所有水平排列的房间都是关于客户需求的，客户需求按重要性等级排列在房间1。垂直对齐的房间根据工程特性排列，已经确定为约束的工程特性排列在房间2中。如果它们不是客户主要看重的质量方面的内容，则可将它们忽略。质量屋的最终结果是一系列工程特性的目标值，它们流经质量屋并从屋底部的房间8流出。

质量屋用一张图汇总了大量的信息。房间1对客户需求的识别驱动了质量屋分析；房间8中目标值的确定驱动了设计团队执行概念评

估与选择过程。然而，质量屋的总体目标并不仅仅限于确定目标值。设计团队通过收集整理信息，已经知道了哪些工程特性（房间5）是最重要的，了解了技术竞争（房间6）和技术困难（房间7），团队可以很好地为每个工程特性设定目标。通过创建质量屋，团队对设计问题有了深刻的理解。如图2-9所示，某铅笔制造公司为了提升产品性能与市场竞争力，对国内外产品进行了标杆分析和逆向工程信息收集，通过质量功能配置确定了再设计工作的质量控制点。

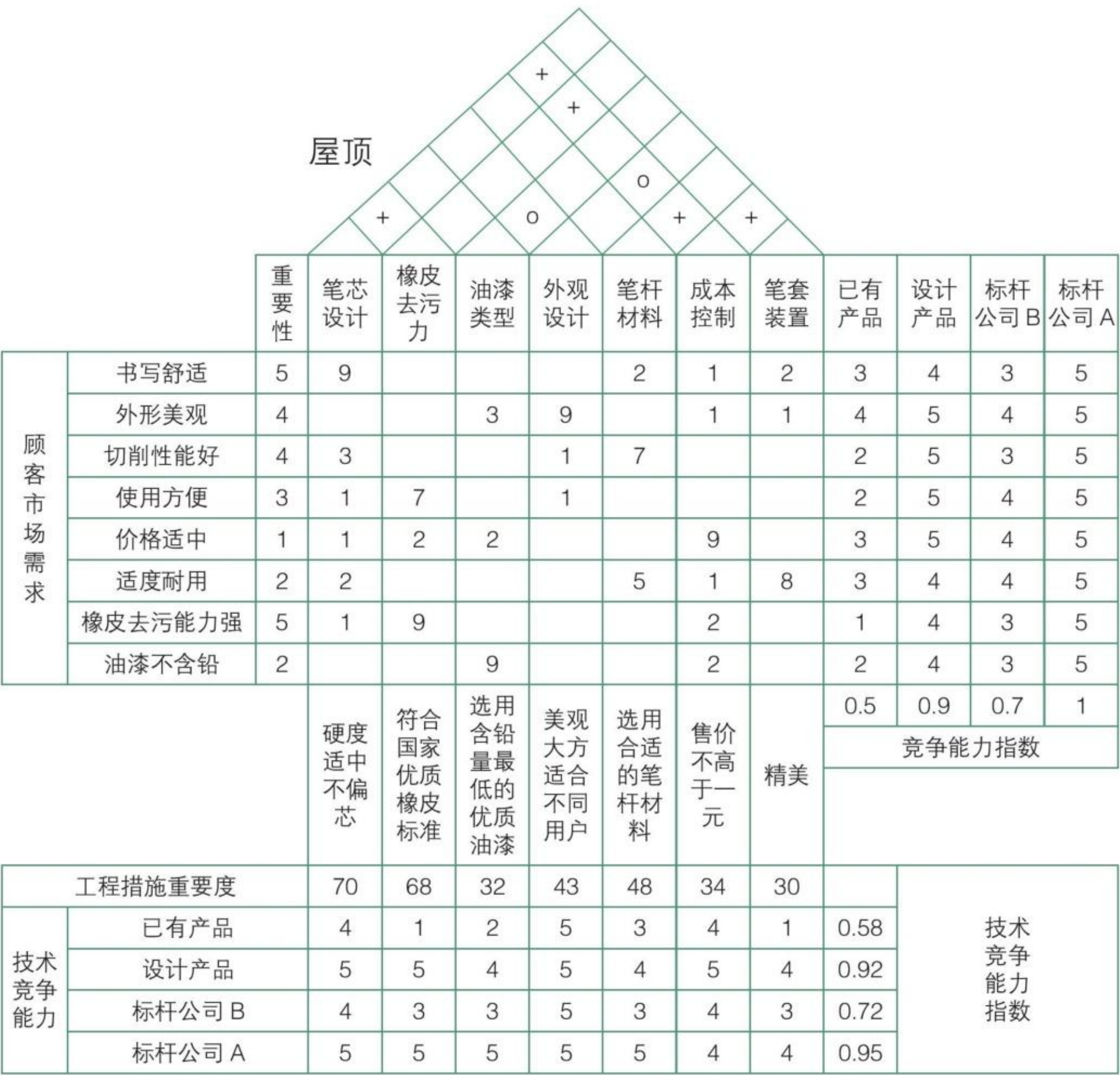


图2-9 铅笔再设计的质量功能配置

质量功能配置也是一个全面质量管理工具。通过对质量屋的分析和构建，可以确定哪些工程特性是设计过程的约束，哪些工程特性可作为选择最佳设计概念的决策准则，提供了工程特性的相对权

重信息。当然，并不是所有的设计项目都要建立图2-8所示的八房间质量屋，从客户需求到工程特性的基本转换可以通过由房间1、2、4、5构成的质量屋完成。

总之，是否启动概念设计的关键在于问题定义，在于识别一个产品性能是否能够满足客户需求。如果需求不能被恰当定义，那么设计师的努力是徒劳的。收集客户需求的方法有很多，例如市场部门可以对现有客户和目标客户进行访谈、客户调查以及分析现有产品的保修资料。设计团队必须专心研究数据以确定哪些需求会激发客户去选择一个新产品。建立工程特性是撰写工程设计任务书的关键，建立质量屋则是撰写工程设计任务书的先行工作。随着设计信息的增加，应及时对质量屋进行更新。在概念设计阶段的最后，设计过程产生了一个需要在后续过程中逐步完善的动态设计文档——工程设计说明书。

二、实体设计阶段

实体设计阶段是将设计概念转换成物理形式的阶段。实体设计需要充分考虑设计对象系统的功能、形式、匹配和精度，需要对系统零部件的物理形态和参数配置进行分析，需要对强度、材料、尺寸、外形和空间相容性等进行决策。过了这个阶段，较大的设计变更将产生很多的费用。实体设计的基本原则包括明确性、简洁性和安全性，总目标是满足技术功能，成本经济可行，保障用户和环境安全。实体设计有三个主要任务。

(1) 确定产品架构。产品架构指的是零部件之间的组织结构形式。产品架构在概念设计阶段就出现了，如功能结构图、概念草图、概念验证模型。在实体设计阶段需要决定所设计的实际零部件如何布置和组合，以实现产品的设计功能。

产品架构通常根据零部件之间的关系和产品功能来确定，主要有模块化和集成化两种形式。模块化架构的产品通常由一些标准化模块和定制零部件组合而成。例如，汽车有发动机、变速箱、转向架、底盘、电气、车身等模块，计算机有数据处理、数据存储、数据传输、显示、电源等模块。对于模块接口，机电系统常见的有信息、管道、机械和电气接口，软件系统有信息和数据接口。模块间的接口对实现产品功能非常重要，例如，内燃机活塞与燃烧室的连接，如果接口设计得不合理，就容易引起残余应力、额外变形和振动，发生腐蚀和磨损。软件系统接口设计应尽可能简洁、清晰和

稳定,降低接口复杂度可以提高系统的可读性、准确性,有利于系统的测试和维护。接口应尽可能选用设计者和零部件供应商都非常了解的标准接口。计算机是一个使用标准接口的典型例子,用户可以从不同的供货商获得不同零部件,根据需要逐个组装,键盘、鼠标、摄像头、打印机等可以通过标准接口连接到计算机上。

模块化架构在产品升级和新产品开发方面优势明显。不同用户可以通过增减模块来满足各自的需求。产品退化后方便更换磨损或报废的零部件,而报废后的模块可用于再制造。模块化设计可使多种产品使用相同的基础零部件。这种标准化模式可以提高零部件的产量,通过规模生产达到降低成本的目的。一个典型的多用途模块例子是可充电电池组,常用在手持电动工具等设备中。模块化架构还有助于缩短产品研发周期,产品的设计可以交给不同设计小组去完成,他们之间的交流将主要集中在模块间的接口上。经过产品的模块分解后,高度模块化的子系统可以分包给外部供应商,或者本公司的其他分支机构。

在集成化产品架构中,将某些零部件多功能化,可以减少零部件的数量;在不过分增加零部件的复杂度时,也会降低成本。例如:简易撬棍既提供了杠杆功能,又起到了把手的作用;摩托车变速箱在结构上还起到支撑作用,既减轻了重量也节省了成本。当产品在质量、空间、成本约束下很难达到所需性能时,可考虑采用集成化产品架构。



拓展阅读

系统思维

系统思维是把工程设计对象看作系统,从系统和要素、要素和要素、系统和环境的相互联系、相互作用中综合考察设计对象的一种思维方法。系统思维关注对象系统内部诸要素的结构、状态演化,关注系统与所在环境的物质、能量和信息交换,以动态、发展和演化的观点考虑问题。系统思维注重从整体出发考虑问题,“既见树木又见森林”,避免片面和近视的局部思维。系统思维分析包括系统结构分析、系统功能分析和系统的分解与集成。

(1) 系统结构分析

系统定义的若干要素和集合体都是具体的空

间结构,包括实体系统和概念系统。系统结构分析包括空间层次结构分析、空间并列结构分析、关联结构分析和时间结构分析。其中,空间层次结构是由系统的层次性决定的,指系统由若干层次组成纵向层次结构,每个层次的要素组成的整体形成该层次的系统。例如,化合物通过空间层次结构分析可以逐层向下分为分子、原子、原子核和电子。汽车主要由发动机以及传动、悬挂、转向和车身等分系统组成。对于航天器,如图2-10所示,它在本层次是一个工程系统,由有效载荷、航天器平台(结构机构、电源、热控制、姿轨控制、推进和测量控制等分系统)组

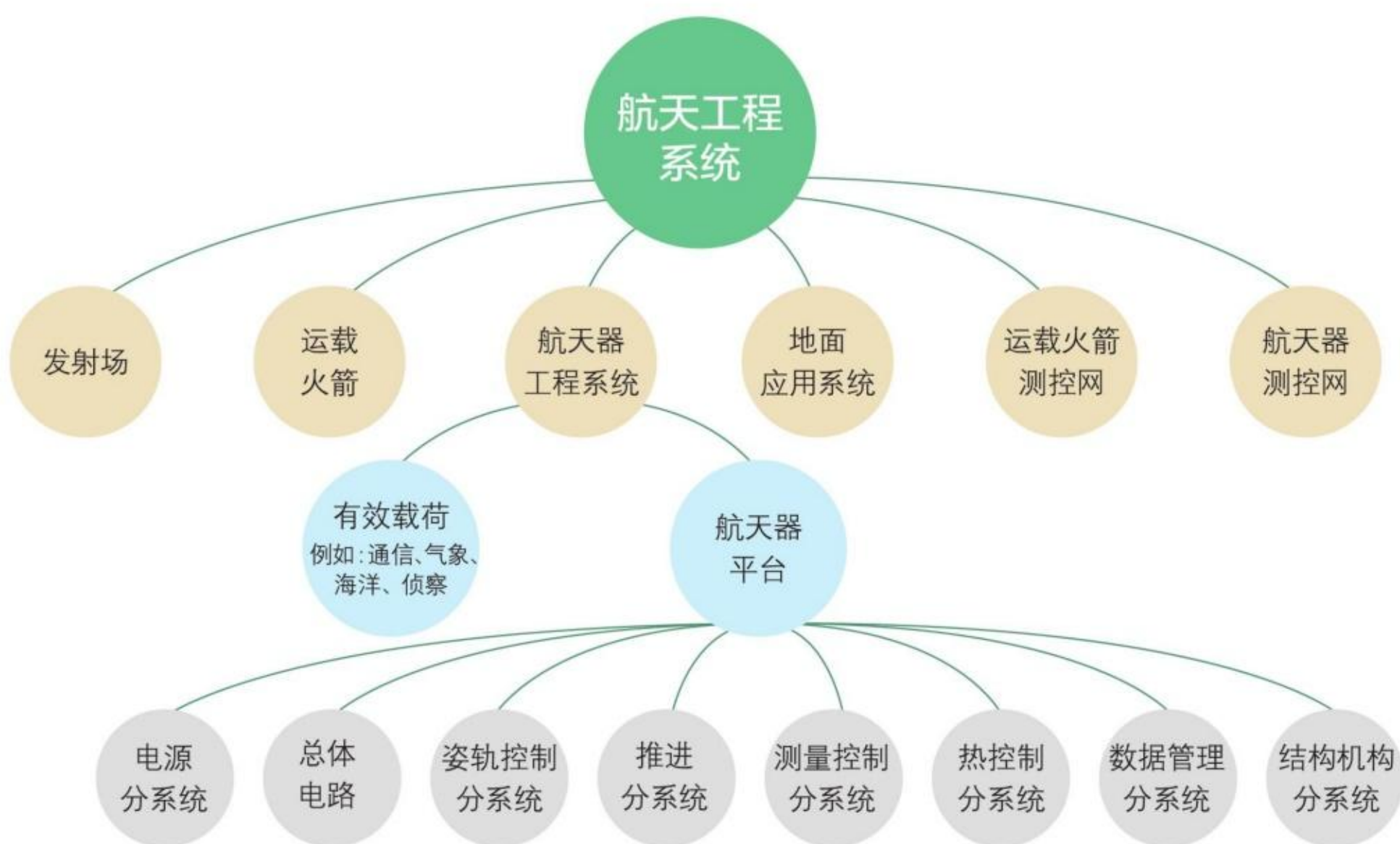


图2-10 航天工程系统和航天器工程系统的组成

成；在分系统下还可分子系统，如测量控制分系统下有遥测、遥控和跟踪等子系统；而它又和同一层次的其他系统组成上一层次的大系统——航天工程系统，该系统包括航天器工程系统、运载火箭、航天器测控网和地面应用系统等部分。系统上下层次结构之间既有所区分又有特定的关联。例如，航天器与运载火箭之间的关联有航天器的重量、空间尺寸、入轨参数、机电热接口、力学环境和星箭力学耦合等。

（2）系统功能分析

人工系统的目的性最终体现在系统的功能上。系统功能是指系统通过与外界环境相互作用而表现出来的期望的特性，该特性包括系统对环境的适应性、系统对环境作用而产生的为人类服务的能力。例如，通信卫星在发射场通过运载火箭被运送到预定轨道，测控站控制卫星工作，保持卫星轨道以及监控卫星上各种仪器设备的工作状态。此时，卫星就能发挥空间中继站的功能，不同终端之间就可以通过卫星中继进行通信。

系统功能建立在各要素组成的系统空间并列结构基础上，只有当系统与环境相互作用时才得以发挥。系统的功能分析分为要素—功能分析和

环境—功能分析两种。要素对系统功能的影响可从要素的种类、数量和质量三个方面来分析。例如，航天器有效载荷要素的种类不同，功能就不同，如通信、导航、遥感等卫星系统的功能就不同；要素的种类相同，但数量不同，则会影响系统功能的强弱，通信卫星转发器的数量决定了系统通信功能的强弱；此外，控制分系统测量部件采用星敏感器，要比采用太阳和地球敏感器、卫星敏感器的测量精度高。通信卫星系统要发挥其功能，首先要适应运载火箭的力学环境、空间环境和各类环境的接口。然后，通信卫星系统要从外界得到太阳能流和地面通信终端输入的信息流，经过卫星通信分系统的变换后，向地面通信终端输出信息流，从而实现卫星通信功能。

为了使人造系统更好地实现功能，常常需要改造环境。例如，建立各种公共交通网，可以大大改善生产和生活的质量；要建设卫星通信网络，需要研制大型运载火箭，建设地面通信站；要实现深空探测，还需要研制大型运载火箭和深空探测用地面测控站。随着环境的变化，人类需要建立具有新功能的人造系统。环境对功能的选择是普遍的，在生物进化、社会发展和市场竞争过程中的优胜劣汰都

是环境选择功能的表现。

(3) 系统的分解与集成

从图2-10可以看出,航天工程系统涉及众多学科和专业。航天器的环境特点要求航天器具备重量轻、体积小、刚度大、强度好、高可靠、寿命长、高控制精度、高度自主控制、抗辐射、抗干扰等特性。研制这样复杂、高要求的航天器系统,必须要有一支多种学科、多种专业、多种技能人才组成的庞大团队。工程设计团队需要从工程项目的总目标出发,在航天器工程系统任务分析的基础上,把航天器系统分解成若干具有一定功能的分系统(系统功能分解),把用户初始要求逐步转化成对各个分系统的要求(系统性能指标分解),再把各个分系统综合、集成起来,使

其成为能够适应环境、满足需求、具有预定功能的航天器系统。这个方法称为系统分解-集成法。系统分解-集成法也同样适用于分系统。

只有保证各分系统间的联系是协调的,才能发挥系统的整体功能。若某分系统设计性能较差,则系统功能不能发挥;若某分系统设计过于先进,系统也不是最优,有时还可能起反作用。一个工程系统必然要与外界环境进行物质、能量和信息交换,能够经常与外界环境保持最优适配状态的系统才是理想的系统。那种只顾局部不顾整体、只顾本部不顾他部、只顾当前不顾长远的规划和设计都是很难达到总体最优的。现实世界里,系统最优设计是指在一定的约束条件下筛选出来的最现实可行的设计方案。

(2) 零部件的配置设计。零部件的配置设计需要确定零部件的形态和总体尺寸、设计特殊零部件以及选用标准零部件,需要给出有关材料选择及其加工的更多信息,通过建模和仿真来检查零部件的功能和空间约束。用快速成型工艺制作零部件的物理模型是一个合适的方法。

零件指的是不需要任何装配操作的设计单元,通常用孔、槽、壁、筋、凸起、倒角、斜面等几何特征来描述。零件配置指的是确定零件需要什么样的特征,包括零件形状和主要尺寸的确定、材料和加工工艺的初步选择,以及对其空间关系进行安排。零件形状源于零件功能,而形状的实现多取决于所用材料及其加工工艺,同时,可行的形状还依赖于系统架构及其运行范围内的空间约束,这些关系如图2-11所示。与概念设计相比,给出零件配置设计的方法更困难,因为它涉及材料与工艺选择、面向制造和装配的设计等许多因素。

(3) 零件的参数设计。参数设计从零件的构型信息开始,旨在确定零件或零件特征的准确值,如尺寸和公差、表面粗糙度等参数的值。一方面,参数设计要检查零件、装配件和系统的设计鲁棒性,参数设计也涉及系统失效的问题。另一方面,参数设计要用提升可制造性的方式进行。典型的变量是零件的尺寸和公差,也可能是零件的材料、热处理或表面粗糙度。参数设计的目标是要确定设计变量的值,获得兼顾性能与成本最可行的设计。遵守相关设计规范和标准,能够减少工作量,提高安全性和可靠性。当工程系统的环境

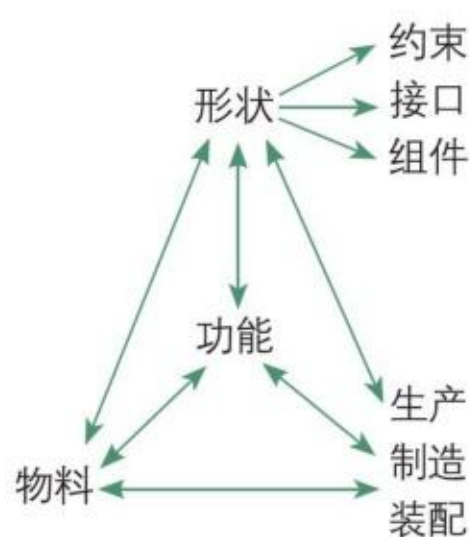


图2-11 功能、形状、物料以及生产、制造、装配间的相互关系

发生变化时，对规范和标准的引用必须重新进行审视。

将参数设计与配置设计分开便于通过鲁棒设计来提升产品质量。鲁棒性是指零件在工作环境变化的情况下仍能保证系统性能的稳定，在广泛的使用条件下确保产品性能优越的能力。一般来说，所有投放市场的产品在实验室条件下都能运行良好，而鲁棒设计可确保产品在与实验室条件相差甚远的情况下仍然可以良好运行。

（一）尺寸与公差

在工程图中，尺寸标注大小、位置、方向等零件的特征。工程图上的尺寸与工程图所要传递的几何信息一样重要，每张工程图都必须包含每个特征的大小、特征之间的相对位置关系、确定特征大小和位置所需的精度（公差）、材料类型以及获得预期性能的加工工艺等信息。工程制图与标注都必须遵守相关标准，避免引起歧义或误解。

实际加工过程不可能重复制造尺寸完全相同的零件，公差指的是可以接受的尺寸变化。公差小的零件互换性好，功能改进相对容易。小公差还可以减少相对运动的零部件的振动。然而，公差越小，加工成本越高。大公差降低了制造成本，但也付出了系统性能下降的代价。设计时需要反复权衡成本与性能之间的关系，选择合适的公差。

零件组合装配时的公差问题大概分为两类：①配合问题。公差控制在什么程度才能保证两个零件在装配过程中配合良好。关注配合的典型机械部件，包括轴承中旋转的轴、气缸中运动的活塞等。②公差累积。当需要将几个零件装配在一起时，各个零件的公差叠加可能会造成装配干涉。在工程产品的实际装配过程中，通过公差匹配装配能够降低零部件的振动与磨损。

（二）材料选用

新材料常常能够催生新设计、产生新产品，例如高纯硅材料使晶体管 and 大规模集成电路的发明成为现实，高纯玻璃材料提供了光纤发明的物质基础，高矫顽力永磁体使耳机小型化，固体激光器实现了数据的光盘存储。反过来，工程发展也常常推动新材料的研发，例如，核技术需要新型锆合金和不锈钢材料；空间技术需要钛合金和轻质复合材料；航空发动机和燃气轮机需要高温合金和陶瓷结构材料，需要能在高温环境工作的传感器和电子元器件。

工程设计更常见的情形是根据需求选用合适的材料与工艺，以实现设计预定的功能。在工程设计中，质量和成本的重要性凸显了

材料和工艺与产品最终性能之间的紧密联系。制造过程自动化水平的提高，使得材料成本在大多数产品成本中的比例高达60%。通过合理选材，可以用更少的成本得到更佳的性能。

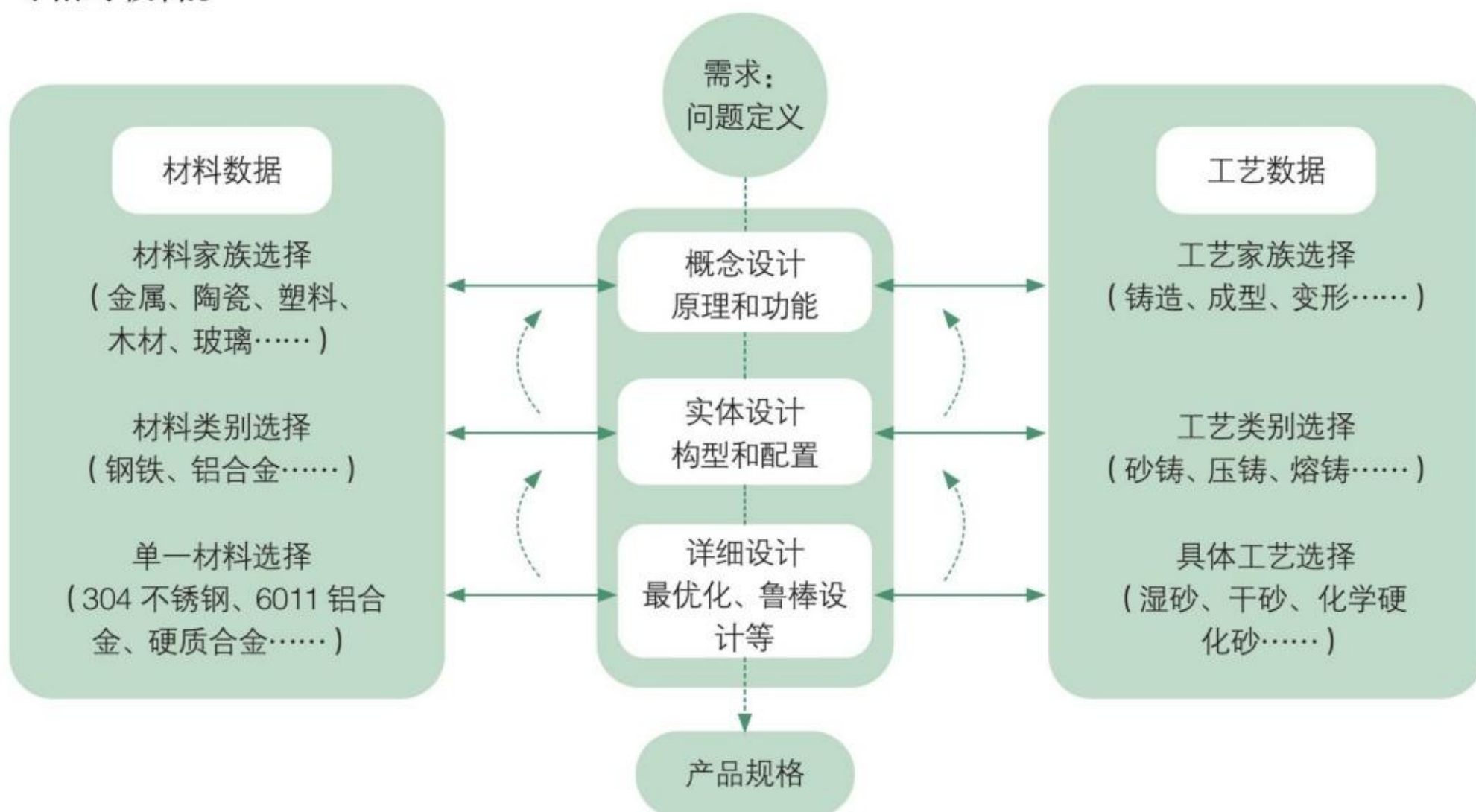
思考 & 练习

列举你所知道的材料，简要说明它们的性能与应用。对这些材料进行分类，并说明分类依据。

1. 设计与选材的关系

为零部件选用最佳材料的首要任务是提供必要的服役性能和合适的加工方法。加工工艺可能增强或减弱材料的性能，进而影响到零部件的服役性能。选材不当不仅会造成零部件失效，还会提高加工成本和生命周期成本。

面对大量的可选材料与加工工艺的组合，只能通过简化和系统化来实现有效选材。如图2-12所示为材料和工艺选择的设计流程图。随着设计由概念设计到配置设计和参数设计再到制造设计的推进，材料和工艺的选择变得越来越具体。在概念设计阶段，基本上所有的材料和工艺都可以考虑。首先确定设计概念中由金属、陶瓷、塑料、木材、玻璃、复合材料等材料中的哪种来制造，再将选择范围缩小到材料家族中的某一类材料，对于材料性能数据的精度要求可相对较低。



虚线表示设计的迭代属性和再设计时的路径

图2-12 材料和工艺选择的设计流程图

如果计划选用一种新材料，那么一定要在概念设计阶段决定，因为后续阶段已经做出的决定不允许更改太多。实体设计阶段的重点是利用工程分析来确定零件的形状和尺寸。参数设计将可供选择的材料和加工工艺具体到一种材料和几种加工工艺；通过鲁棒设计进行公差优化，采用质量工程和成本模型方法来选择最佳加工工艺。根据零件重要性的不同，实体设计阶段需要更加精确地了解材料的性能。由此可见，材料和工艺选择是一个由众多可能性到某一特定材料和工艺的渐进过程。

为零件选材是通过确定合适的材料性能以实现系统无故障运行，并针对选定的材料确定最佳加工工艺。材料选择一般基于性能特征、工艺特征、环境属性和商业考量四项基本准则：①基于性能特征的选择是一个材料的性能价值与设计约束相匹配的过程；②基于工艺特征的选择意味着寻求从原材料到成型的最优加工方法，使其产生的缺陷最少、成本最低；③基于环境属性的选择致力于预测材料在整个生命周期对环境的影响；④商业考量主要基于零件的制造成本，包含购买材料的成本和零件加工成本。更精确的选材依据是生命周期成本，包括更换失效零件的成本和服役完毕后的处置成本。

思考 & 练习

以你身边熟知的产品（例如椅子、茶杯、厨卫墙面砖、地板砖、桥梁等）为例，讨论设计与材料和工艺之间的关系。

2. 材料的性能需求

材料的性能需求通常用力性能、热性能、电性能、光性能、磁性能、化学性能、生物性能等来表示。材料的性能通常由一系列明确定义的、可测量的性能参数表示。如图2-13所示为材料科学导引的正向设计和材料工程导引的逆向设计示意图，材料性能建立了材料结构与零件服役表现之间的映射关系。材料的性能需求由零件的功能决定。例如，内燃机连杆的功能是连接活塞与曲轴，在工作过程中无故障地传递动力，基本的材料性能是抗拉屈服强度、抗疲劳强度和对运行环境足够的抗性，以保证这些性能在服役期间不退化。

材料科学通过认识和控制材料的结构来提高材料的性能。改变材料结构的主要方法有成分控制（合金化）、热处理以及加工工艺控制。材料工程师凭借对材料性能和材料工艺的深刻理解建立起材料性能与设计之间的联系。

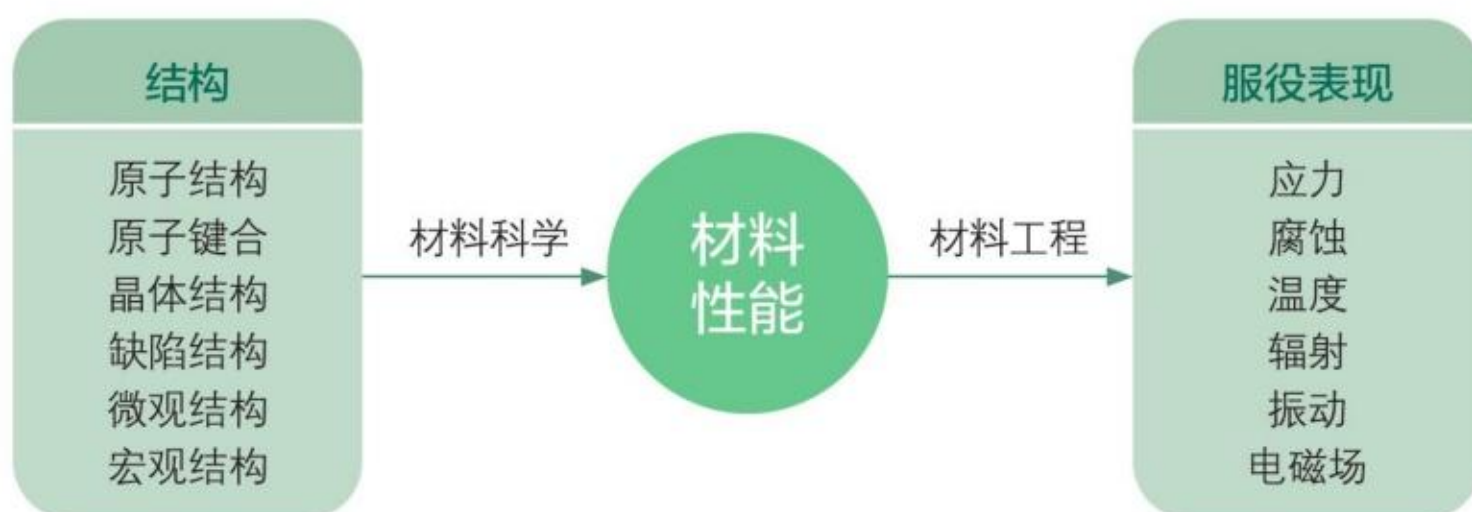


图2-13 材料科学导引的正向设计和材料工程导引的逆向设计示意图

选材的首要任务是确定与应用相关的材料性能。这些性能参数可通过廉价的、重复的方式进行测量，并且与服役过程中表现出的、明确定义的行为相关。例如，设计机械零件是基于应力水平不超过预期失效模式的极限值，或者保证挠度或变形不超过某个极限。为了技术上的可操作性，工程应用的材料性能测试与进行材料科学研究时的测试有所不同，通常不测量材料的基本性能。例如，金属或者高分子材料在断裂时有超过10%的伸长率，其失效模式为总体塑性变形。工程应用屈服强度则是基于拉伸试验产生0.2%永久塑性变形时的应力。对于热塑性塑料，屈服强度一般取值在1.0%应变处。对于脆性材料，例如陶瓷，最常用的强度测试为断裂强度——扁平梁弯曲断裂时的张应力。用这种方法获得的强度值比直接拉伸测量的强度值高30%左右，但数据的一致性较好。对于纤维增强复合材料，屈服通常在偏离线弹性行为0.5%时发生。由于纤维的屈曲，纤维增强复合材料具有高度的各向异性，抗压强度远小于抗拉强度。

思考 & 练习

镍基高温合金是制造航空发动机叶片的主体材料。自己动手查阅资料，阐述航空发动机推力与叶片工作温度之间的关系以及镍基高温合金的微观结构与工作温度间的关系。镍基高温合金已发展了三代，你认为第四代的发展方向是什么？

拓展阅读

材料选择步骤

解决选材问题与设计过程其他方面的问题一样具有挑战性，遵循相同的问题解决和决策的方法。成功的选材取决于对下列问题的回答：①是否恰当完整地描述了性能需求和工作环境；②用于评价候选材料的性能指标是否与性能需求相匹

配；③是否对材料的性能及其在加工过程中的变化进行了全面的考虑；④材料能否以所要求的形状和配置以及合理价格进行供货。

选材步骤是：①确定设计必须实现的功能，将其转换为对材料性能的要求，以及成本和供货

能力等商业因素；②确定加工参数，例如零件的需求数量，零件的尺寸和复杂度、公差、质量水平以及材料的可加工性；③将所需的性能和工艺参数与大型材料数据库中的信息进行比对，选择几

种具有应用前景的材料，利用筛选准则来确定候选材料；④更加细致地考察候选材料，尤其要在性能、成本和工艺性上进行权衡，做出最终的选材决定；⑤制订设计数据和设计规范。

在实体设计阶段，一般借助计算机来筛选材料数据库，运用决策矩阵等评价方法缩小材料的选择范围。当对设计进行修改时，失效分析数据是非常重要的选材信息。由于材料性能通常表现出一定程度的不确定性，对于那些失效后果非常严重的系统，例如航空器、核反应堆等，需要基于风险分析进行选材。此外，还要考虑生命周期问题，尤其是那些与循环利用和报废处置有关的材料。

一个成功的工程设计需要考虑很多因素，例如，设计的物理外观影响消费品的销售；人因工程设计决定用户界面及其使用方式，影响销售及操作安全性；产品的公众接受度取决于其是否为环境友好设计。面向X的设计方法正是为满足这些需求而开发的一种有效的并行工程设计方法。实体设计的最后阶段需要建立并测试一个全尺寸工作原型。该原型是一个具备完整视觉和技术特征的工作模型，用于确定产品是否满足所有的客户需求以及性能指标。

三、详细设计阶段

详细设计位于抽象设计的最底层，将整合所有的细节信息并做出相关决策。在此阶段，每个零件的配置、外形、尺寸、公差、表面性能、材料和加工工艺所缺失的信息都将补充完整。为了规避永无止境的小修小补，尽快完成这些大量的细节工作，一般实行“设计冻结”。借助设计冻结，只有那些真正影响产品性能、安全和成本的关键变更，经管理部门正式审核批准才可以进行修改。在详细设计阶段，需要完成以下活动并准备相关文档。

（1）满足制造要求的详细工程图。如果采用并行工程设计，那么与产品质量密切相关的大部分零部件工程图在实体设计阶段已经完成。剩余的零部件可能是从外部供应商购买，例如紧固件之类的常用标准件，也可能是需要实验数据或者有限元分析辅助验证。这些工作都必须在设计结束前完成。对零件个体而言，详细工程图与零件说明书是同一个文件，包括零件的技术性能要求、尺寸要求、测试要求、材料要求、可靠性要求、设计寿命要求、包装要求和营销装运要求等信息。零件说明书应足够详细，避免引起供应商不必要的误解。

(2) 完成原型验证测试,提交验证数据。一旦设计完成,就可以制造原型进行验证试验,以保证设计满足任务书的要求,并且安全可靠。原型需要使用实际材料和生产工艺制造,但并不采用实际的生产线进行生产。验证试验可能只是在某一预定工作循环内的超负荷运行,也可能是一系列基于统计试验方案的测试。

(3) 完成装配图和装配说明,以及所有装配体的物料清单。

(4) 准备好详细的产品规格,包括从概念设计阶段开始做出的设计变更。在详细设计阶段,工程设计说明书要不断更新,使之包含设计所要满足的全部最新要求。

(5) 对零部件是内部加工还是外部采购做出决策。决策主要基于成本和生产能力,适当考虑零部件的质量和交货的可靠性。有时候,决定内部生产某一关键零部件仅仅是出于保护某一关键制造工艺的商业秘密。尽早做出这个决定就可以把供应商作为扩展的团队成员纳入设计工作。

(6) 基于详细设计图和物料清单进行成本核算。成本核算时还需要知道制造每个零件所需的机床、工艺步骤等特定的加工信息。

详细设计阶段要完成可测试和可制造产品的所有工程描述。拙劣的详细设计会使一个杰出的设计概念黯然失色,导致制造缺陷、成本高企、运行失灵等。当然,优秀的详细设计也无法挽救拙劣的概念设计。详细设计的另一个重要任务,是针对这些决策和数据与负责产品开发的商业组织各部门进行交流。最后,详细设计以设计评审结束,并由管理部门做出是否投产的决定。

四、工程设计说明书

管控工程设计规划过程的结果文件将被汇编成一套工程设计说明书。表2-1所示的工程设计说明书模板列出了工程设计说明书应包含的典型要素。这些要素按种类分组,包含了需要设计团队回答并进行决策的问题。该表展示了工程设计的复杂性,但并不是每一个工程项目都需要考虑表中的每个条目。

交流 & 讨论

由于工程对象千差万别,工程设计说明书没有固定模式。收集你所熟悉的工程设计案例说明书,结合表2-1,分组讨论“工程设计说明书”需要在设计阶段完成哪些重要工作及其意义。

表2-1 工程设计说明书模板

工程设计说明书	
产品识别 ● 产品名称（型号或产品序列号） ● 产品基本功能 ● 产品特殊属性 ● 关键性能指标 ● 工作环境（使用条件、存储、运输、使用和误用） ● 客户培训 时间进度 ● 完成项目时间 ● 项目关键时间节点（例如评审日期） 物理描述 对新产品的物理需求知道多少或者有多少已确定？ ● 在概念设计前知道或者确定的设计变量值（例如外形尺寸、功率） ● 已确定的边界条件对设计参数的约束（例如可接受重量的上限） 财务需求 公司对产品开发的经济状况预期有哪些？公司的盈利原则是什么？ ● 生命周期定价策略（目标制造成本、价格、预计的零售价格、折扣） ● 保修政策 ● 预期财政业绩或投资回报率 ● 所需资本投资等级 生命周期目标 在产品使用寿命中性能的设定目标是什么（这与产品竞争有关）？公司的最新再循环政策是什么？产品设计如何反映这些政策？ ● 产品寿命和保质期 ● 安装和操作费用（能源费用、所需人员数量等） ● 维修计划和地点（客户自行完成或由服务中心维护） ● 可靠性（失效平均时间）：确定关键零部件及其可靠性目标 ● 退役策略（可再循环零部件的比例和类型，产品的再制造、公司回收、升级策略） 社会和法规要求 目标市场管理有政府机构、学会或规范委员会吗？有为产品或其子系统申请专利的机会吗？ ● 安全和环境法规（适用于目标市场的所有政府法规） ● 标准（适用的产品标准） ● 安全性和产品责任（产品可预期的无意识使用、安全标识、适用的安全标准） ● 知识产权（与产品相关的专利、关键技术的许可策略） 制造说明 哪些零部件或子系统将在企业内部生产？ ● 制造需求（制造最终产品必需的工艺和能力） ● 供应商（确定拟采购零部件的关键供应商和采购策略）	市场识别 ● 目标市场及其规模 ● 预期市场需求（以年为单位） ● 竞争产品 ● 品牌策略（商标、徽标、品牌） 新产品的需求是什么？新产品有多少竞争对手？与现有产品的关系是什么？

评审是设计过程的重要环节，是在相应的时间节点对设计工作进行的反思性研究，用于识别设计中存在的问题，确定未来的工作安排，启动相关更改工作。根据工程系统的规模和复杂程度，在整个项目周期应该安排3~6次评审会议。每次评审会议至少要探究两个主要问题：一是设计的技术要素，二是产品的商业问题。技术评审的核心是比较已经完成的设计与工程设计任务书。商业评审是追踪项目成本，预测设计如何影响产品的目标市场和销售，保障时间进度。为了获得合理的商业利益，需要及时对资源、人员和资金做出相应调整。注意，任何一次评审的结果都有可能是终止项目，收回资源。



设计 & 操作

1. 以废弃物处理、房屋装修、校园改造等工程中的某一项为例，进行信息收集与判断、需求分析、概念设计，给出1~3种设计方案，采用系统分析的方法手绘设计概念的功能结构图。
2. 根据上例中的工程对象进行分组，对设计方案的技术发展趋势、存在的风险进行评估分析，团队讨论完成质量屋的构建和设计概念的选择，阐述设计方案所采用的系统结构、流程和控制，进行系统架构设计和零部件配置设计。

第 3 节 可制造性工程设计



学习目标

了解面向制造和装配设计的实践指南。

以前，设计与制造部门在制造企业中是独立的、分开的。“我们做完设计，把它抛到墙的另一面，然后制造工程师们对我们的设计为所欲为。”从设计工程师的这句玩笑话中可以看出这种分割文化的弊端。采用并行工程，让制造、装配等工程师进入设计团队，可以很好地解决工程设计的性能、时间、质量、成本和风险问题。团队合作、信息集成有利于实现可制造性工程设计。

工程设计最终都要物化为硬件，而实现硬件化需要靠材料工程、机械工程、电子工程等工程制造技术。在现代科学技术条件下，设计、选材与制造工艺之间的关系越来越紧密。尤其是大规模集成电路和无源固态集成模块技术（如蓝牙技术）的革新，已使得材料、元器件、模块设计与工艺制造的整个过程交叉融合、紧密关联。科技的发展在推动工程技术迅猛发展的同时，也要求工程师具有更强的创新性、灵活性和渊博的知识。在制造工程师与设计工程师的紧密合作过程中，一方面，应用一系列基于制造的实践准则，设计工程师可以拿出更易于制造的设计；另一方面，对生产流程进行设计，制造工程师也创造了以准时制、零库存为特征的精益生产方式。



拓展阅读

并行工程

传统的工程设计是按产品概念、产品设计、产品测试、工艺规划、制造系统设计、生产和销售这样的顺序进行的。从前，这些按顺序的功能设计是在很少有交互的、不同的、分立的组织中完成的。理解设计团队如何做出决策比较容易，然而，在没有足够的制造工艺知识时所做出的决策很多都需要修改，修改所花费的时间成本和费用成本非常高。图2-5强调的理念是在概念设计和实体设计阶段，绝大部分的成本已经确定。大体上讲，如果做出修改的成本在概念阶段为10元的话，那么详细阶段为100元，制造阶段则为1000元。顺序设计过程意味着一旦需要修改，则要返

回才能补救，而实际过程是螺旋上升的。

伴随着不断增长的竞争压力，演变出一种新的工程设计方法：并行工程。并行工程是一种基于团队的系统化设计方法，它以信息集成为基础，通过组织多学科的设计开发团队，把设计、工艺、制造、销售、维护等部门直接融合，使团队成员并行协同工作。并行工程利用各种计算机辅助工程手段实现工程设计开发过程的集成，力争后续的制造过程一次成功，从而达到缩短产品开发周期、提高产品质量、降低成本的目的。并行工程强调考虑问题的全局，从设计开始就考虑工程系统整个生命周期的所有因素，追求整体最优。并行设计指的是每个功能领域都尽可能早地

开展工作。例如，一旦确定了产品的外形和材料，制造工艺开发团队就可以开展工作；一旦选定了制造工艺，工具开发团队就可以开展工作。在并行工程中，团队成员都将相应信息及时共享，而传统设计需要在提交给制造部门前完成所有设计图和任务书。

供应商参与是并行工程的一种形式。在并行工程中，技术精湛、供货可靠和成本合理的关键厂家，在设计初期、零件还没有完全设计出来时就已经被选定。供应商参与不仅能减少必须在公司内部进行设计的零部件数量，通过把供应商的制造知识融入设计，还能加强合作双方互惠互信，实现零部件供货时间的最小化。

一、制造与制造工艺

传统制造可划分为五个方面：工艺工程、工具工程、工作规范、设备工程、管理控制。如图2-14所示，制造包含了广泛的活动。制造过程始于步骤④，此时设计工程师将设计的完整信息交给工艺规划师。在并行工程中，很多工艺规划工作与细节设计同时完成。工艺选择和工艺设计是这个步骤的主要内容。步骤⑤调整工艺过程，通常采用计算机建模优化操作流程进行工艺优化，进而提高吞吐量和成品率，降低生产成本。步骤⑥涉及实际零件加工过程，包括培训和动员加工人员。在许多情况下，需要处理大量的原材料。为了实现有效的加工操作，步骤⑦涉及的许多问题至关重要。最后，步骤⑧将产品发货并销售给客户。步骤⑨是售后服务环节，主要负责保修和维修，直至产品不再服务用户，以期循环利用。通过用户反馈，收集有用的信息后，返回步骤②的新产品设计。至此，整个制造周期完成。

通过不断的努力，工业界已将计算机与制造的各个方面紧密联合，产生了一项新技术——计算机辅助制造（computer aided manufacture, CAM）。另外，不同于流水线大规模生产方式中把销售作为生产经营的终点，精益生产方式把市场看作生产的起点，采用市场拉动装配、装配拉动加工、加工拉动原料的一环扣一环的系统管理模式进行准时生产。核心是使生产要素与资源得到最合理的配置，调动方方面面的积极性，达到消除无效劳动和资源浪费的目的。

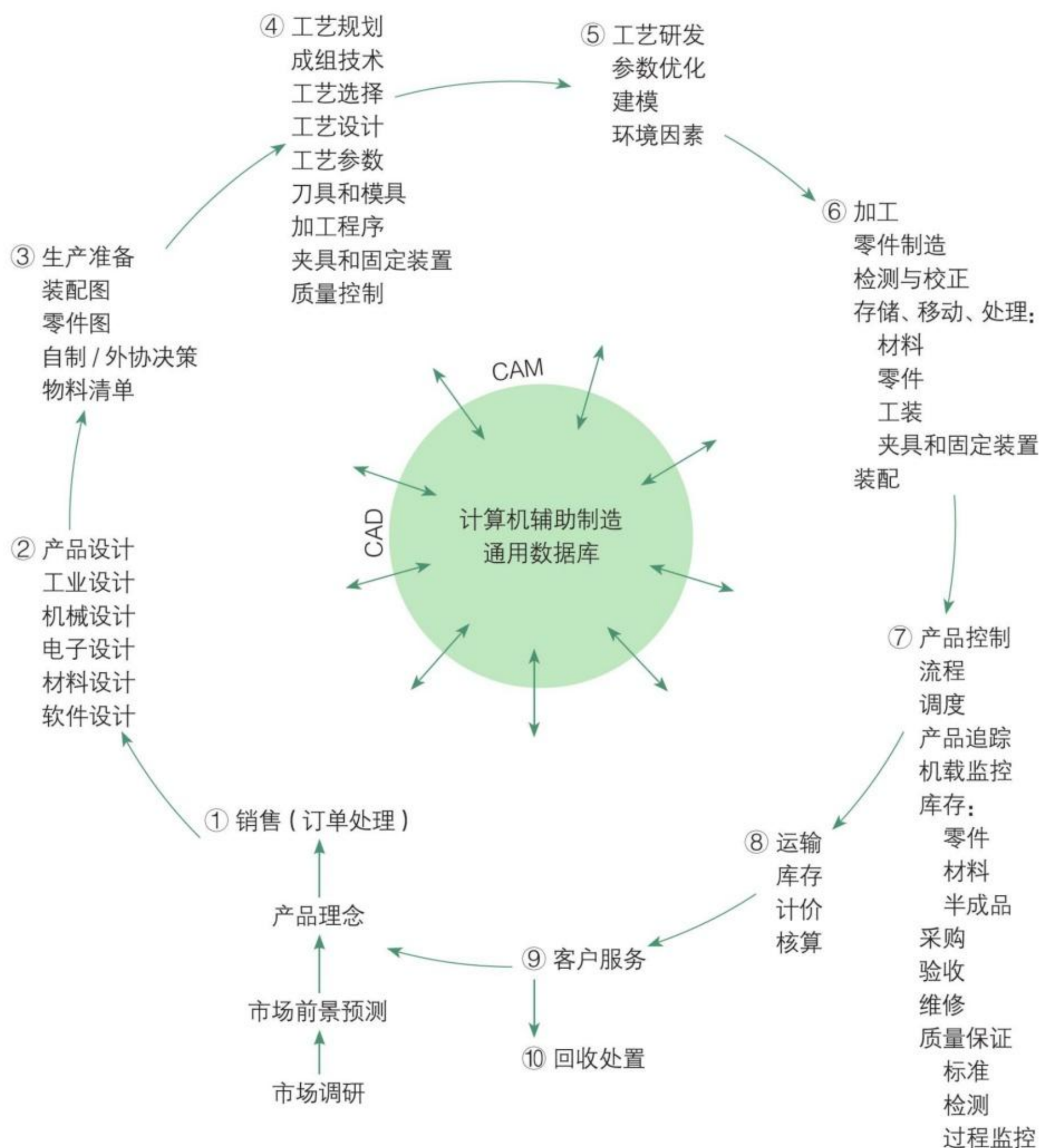


图2-14 制造包含的活动

制造是将工程材料转变为零部件或产品的过程。加工改变了材料的形状和尺寸，影响了材料的微观结构与性能。例如，将不锈钢板制成圆筒状保温杯的外壳后，由于位错滑移，虽然材料的强度提高了，但延展性降低了。能量流、物质流和信息流不仅可以描述一个设计的功能分解，还可以描述制造的功能分解。制造过程中能量流引起物质流，由此改变了材料的形状；零件形状和材料性能的信息流依赖于所用材料类型、所用工艺类别（机械的、化学的或者热学的）、刀具的特点、工件相对刀具的运动形式等。

在上百种制造工艺中，一种传统的分类方式是按照工件质量的变化把它们分为等材制造（工件质量不变）、减材制造（工件质量减小）和增材制造（工件质量增加）三大类。

对于等材制造工艺，工件加工前后的质量差异不大。形状复制工艺是一种工件质量不变的制造工艺，它通过外力使零件具有模具型腔的表面形状，复制了工装保存的信息，例如铸造、注塑成型、轧制、拉伸、挤压、锻压等。

对于减材制造工艺，起始时工件的质量大于完工后工件的质量。这类工艺属于成型工艺，零件的形状是由刀具和工件之间的相对运动决定的。材料去除需要通过可控的材料断裂、熔化或化学反应来完成，例如车、铣、刨、磨、钻孔等。

增材制造工艺以数字模型为基础，通过材料的逐层堆积制造出零部件，例如液态金属喷墨三维打印、选择性熔融、选择性烧结、连续液面生长、黏结剂喷射、多射流熔融等多种工艺技术，已涵盖高分子材料、合金材料、生物活性材料和陶瓷材料。通过集成增材制造、机器人、数控机床、铸锻焊等工艺和技术，不仅能制造结构复杂的零部件和产品，还可以实现产品的近净成型，满足无支撑成型等严苛的工艺要求。

还可以根据材料对制造工艺进行分类。例如，成型工艺包括铸造类、聚合物成型类、变形类和粉末类。变形工艺又可进一步细分为轧制、拉伸、冷成型、模锻、金属薄板成型和纺丝。对每种工艺都需要了解其工艺特性，例如适用的工件尺寸范围、可加工工件的最小截面厚度、工艺允许的最小公差和表面粗糙度、最具经济效益的批量大小等。

拓展阅读

制造工艺的主要类型简介

(1) 铸造（凝固）工艺。将金属或金属合金熔液倒入模具中凝固成模腔的形状。铸件形状的设计要确保金属熔液流能够在自身重量或适当的压力作用下充满模腔的各个部分，凝固过程要逐步进行，以确保凝固的壳体中不会含有残留的液体。由于模具的差异，不同的铸造工艺成本各不相同。通过计算机仿真预测和控制液体材料的流动与凝固过程，可以减少铸造缺陷，极大地推动铸造工艺的进步。

(2) 聚合物成型工艺。聚合物的广泛应用促进了适用于高黏性聚合物成型工艺的发展。大部分情形是把热而黏的聚合物压入或注射到模具中。也可以采用其他形式，例如在热模具中压制塑料

制粒成型、在奶瓶状的模具中吹制塑料管成型等。铸造与成型工艺的区别在于加工材料的黏性不同。

(3) 变形工艺。金属材料经（冷或热）塑性变形加工可以提高材料性能，改变材料形状。典型的变形工艺包括锻造、轧制、挤出和拉丝。制造桥梁吊索广泛使用的是钢材的拉丝工艺。金属薄板成型作为一种特殊的变形工艺，是在二维应力下变形实现的。

(4) 粉末工艺。粉末工艺是金属、陶瓷或聚合物粉末经成型和烧结（热压或塑性变形）固结。粉末工艺常用于制备不需机加工或修饰处理的高精度小零件。粉末工艺对于不适合铸造或变形工艺加工的材料来说是最好的加工方法，例如

熔点很高的硬质合金和陶瓷材料。

(5) 切削工艺。切削工艺通常采用坚硬锋利的刀具通过可控断裂来去除材料，在成型的同时产生一定量的切屑。切削操作包括车削、铣削、磨削、刨削等。基本上，任何形状都可以通过一系列的切削操作实现。

(6) 接合工艺。接合工艺包括所有类型的焊

接、软钎焊、硬钎焊、扩散连接、铆接、螺栓连接和胶接等，这些操作使零件互相连接。紧固操作在制造的装配阶段进行。

(7) 热处理和表面处理。热处理和表面处理包括改善工件力学性能的热处理工艺，改善工件表面特性的扩散工艺（如渗碳、渗氮，喷敷、热浸镀、电镀、喷涂等），以及表面清洁处理等。

制造工艺选择

加工零件时，影响制造工艺选择的因素包括零件的数量、零件的复杂性、零件的材料、零件的质量、加工成本、工艺的可用性、加工周期和交付时间。选择制造工艺的步骤如下。

(1) 根据零件的具体要求，确定材料种类、零件的加工数量，以及零件的尺寸、形状、最小厚度、表面粗糙度和重要尺寸的公差，这些是工艺选择的限制条件。

(2) 确定工艺选择的目标。一般情况下，目标为工件加工成本最小化。也可以是零件质量最大化或者加工时间最小化。

(3) 使用已确定的限制条件进行工艺筛选，删除那些不满足条件的工艺。

(4) 根据加工成本对筛选后的工艺进行排序。案例研究和工程实例能够提高决策的可靠性，为决策提供良好的支撑。



设计 & 操作

观看典型制造工艺视频，选择合适的制造工艺，设计并加工一个便携式凳子。

二、面向制造的设计

面向制造的设计的兴起说明人们意识到了在设计阶段就综合考虑加工问题的重要性。并行工程为制造代表一开始就参与设计过程提供了保障，使工程设计可以更好地实现需求目标。面向制造的设计指南是从工程实例中总结出来的良好实践经验。运用这些指南有助于锁定可用设计方案的数量，使必须考虑的细节数量被控制在设计者的处理能力范围之内。

(1) 减少零件的总量。去除零件可以节省大量成本。去除了某零件，就不用再支付该零件的材料、加工、装配、运输、仓储、清洗、检验和服务所需的费用。去除零件的最好方法是在概念设计阶段提出最少零件的设计要求。另一种方法是将两个或多个零件组合为一个集成的设计架构，例如，塑料零件就特别适合集成设计。

(2) 使用标准零部件。标准零部件具有已被认可的寿命和可靠

性,可以减少零件数量、缩减设计步骤、减少加工设备、降低工装成本,并且易于仓储。

(3) 在不同产品中使用通用件。在不同产品中使用通用件是一种具有商业智慧的做法。这样不但可以创造规模经济,还可以降低单位成本,简化人员操作培训的流程和过程控制。

(4) 标准化设计特征。对设计特征设置一定的标准,如钻孔的尺寸、螺纹类型和倒角半径等,可以减少刀具数量,降低制造间接成本。对机加工零件、铸件、注塑件及冲压件上的空间孔,在一次操作中完成多个孔的加工可以避免工装缺陷。

(5) 确保功能与简洁设计。实现产品功能的同时性能指标不要定得过高。例如,在碳素钢可以满足要求的情况下使用合金钢就不是一个好的工程行为。给零件增加新特征要有充分的理由。具有最少数量的零件、最简单的结构形状、最少精度修正和加工步骤的产品也是制造成本最低的产品。简洁的设计最可靠也最易于维护。

(6) 设计多功能零件。设计具有多种功能的零件是减少零件数量的好方法,这就需要集成化架构。设计零件时可以考虑提供定向、校准、自我固定等装配特征。如果过分执行此原则,就可能与原则(5)相矛盾并违反原则(7)。

(7) 设计易于加工的零件。在满足产品功能要求的前提下,应选择成本最低的材料。一般情况下,较高强度的材料可加工性较差,不仅要多花钱购买材料,还要花更多的钱才能将它加工成型。切削成型通常是比较昂贵的,无论什么时候都应优先选择能将工件加工成接近成品形状的其他制造工艺,以最小化切削操作。

设计人员需要检视机加工操作步骤以尽量缩减生产操作过程。例如,零件夹固是一个费时的操作,设计时应该减少为了完成切削操作而在机床上调整零件夹固的次数。二次夹固是几何误差的主要来源。设计师必须考虑夹具的使用需求,零件设计时应提供大且坚固的安装表面或平行的装夹表面。

(8) 避免过紧的公差要求。若指定的公差高于需求,将导致成本增加。下列情形容易出现这种情况:要求二次磨削、研磨、搭接精修操作,要求额外的工装精度,工人采用精细进刀量而延长加工周期,要求技术更好的工人。在选择制造工艺前,一定要确保所选工艺能够加工出符合要求的公差和表面光洁度。

确保制造公差对维护设计师的信誉十分重要。如果设计师对公差能否实现存有疑问,就应该与制造专家沟通。不能随便同意制造人员放松公差要求或改变零件图样。同时,应当注意图样上未用文字描述的公差,避免制造方的错误理解。

(9) 尽可能减少采用辅助工艺和修饰操作。必须尽可能减少使用辅助工艺,例如热处理、切削、连接等操作;必须避免修饰操作,例如去毛刺、喷涂、电镀、抛光等。只有在存在功能性、安全性或美观性要求等情况时,才进行相关操作。

(10) 利用工艺的特殊性质。例如,模塑成型的聚合物材料具有内置的颜色,这与金属需要喷涂或电镀才能具有颜色的情况不同;铝合金挤出成型具有复杂的截面,可通过切割得到所需的零件。

三、面向装配的设计

零件制造完成后需要把它们装配成部件和产品。装配过程包含搬运(抓取、定向和定位)、插入和紧固操作。根据自动化程度,装配工艺分为手工装配、自动化装配和机器人装配三种类型。装配成本由需要装配的零件数量以及零件搬运、插入和紧固的难易程度决定。相应的,面向装配的设计指南分为三类:一般原则、搬运原则、装入与紧固原则。

1. 一般原则

(1) 最小化零件总数。检查装配零件列表,确定那些对产品正常功能来说必要的零件。必要零件的确定标准为:与其他必要零件有相对运动,零件由不同的材料制成,如果不拆除该零件就无法装配或者拆卸其他零件,产品维护时要求将其拆卸或者替换。仅用于紧固或连接的零件一般是要去除的备选零件。

(2) 最小化装配面的个数。进行简洁设计以减少在装配中需要准备的装配面的数量,并保证当一个装配面上的所有工作都完成后再进行其他装配面的工作。

(3) 使用部件。部件在最终装配时的接口较少,使用部件能够节约装配成本。部件要能够在没有拆卸的情况下进行定位调整,要能够很容易与其他已装配的部分进行连接。由部件组成的产品易于维修,出现故障时只需更换故障部件。

(4) 防止装配的错误。面向装配的设计的一个重要目标是确保装配过程是明确的,装配工人在装配零部件时不会发生错误。设计时要保证零部件的装配只有一种方法,抓取零件时零件的朝向应是明显的。装配中常用的防错方式有定向缺口、不对称的孔或挡块。

2. 搬运原则

(1) 避免使用分散的紧固件或减少紧固件数量。紧固件可能只占产品材料成本的5%，但装配操作所需的劳动力成本却可能达到装配成本的75%。例如，螺栓的装配费用较高，只要可能就应该尽量使用嵌合方式。当设计允许时，尽量使用少量大紧固件，这样做可以减少紧固件的数量。对紧固件的类型与尺寸、紧固工具和紧固力矩进行标准化，可以降低紧固成本。

(2) 减少搬运操作。零部件的设计应保证易于装入和连接定位。有些设计特征起到引导和定位作用，可以帮助零部件定向。用机器人搬运的零部件应具有真空吸附用的平整光滑的顶面，或夹持用的孔，或抓手用的圆柱面。

3. 装入与紧固原则

(1) 最小化装配方向的数量。工程产品应设计成可以从单个方向完成所有的装配。转动装配件需要花费额外的时间和操作，还可能需要额外的传输站和夹具。装配设计最好的情况是零部件从上向下装入和紧固。

(2) 零部件和工具自由进出。零部件的设计不仅要匹配所预定的位置，还必须留有装配路径能让工具自由进入。要为工人的手臂、螺丝刀、扳手、焊枪等预留所需的空間。如果工人必须弯腰才能操作，那么工作一段时间后，工作效率和产品质量都可能会降低。

(3) 增大装配的适应性。当零部件不完全一致或加工较差时，需要额外的装配力。设计时应注明允许的装配容量。工程设计的适应性包括大量使用锥度、凹槽、圆角等特征。

面向装配的设计包括分析和再设计两个阶段。在分析阶段，设计者根据预先制订的数据表查询运送和安装各个零部件所需的装配时间。这些数据表是在空间运动和装配时间试验研究的基础上制订的。表中的数据来自零部件的尺寸、质量以及几何特征，零部件需要重新定向的时间也包含在内。由此可以计算装配所需的总时间，进而确定工程设计的装配效率，以及再设计时为了提高装配效率需要改进到哪一步。使用较少的零部件和轻松组装有助于降低产品的总成本。

面向装配的设计的主要贡献是使设计团队在再设计阶段严肃认真地考虑零件的去留问题。多去除一个零件意味着少生产一个零件，并减少产品装配的成本开销。在时间顺序上，面向装配的设计应该在面向制造的设计之前进行，因为面向装配的设计强调要减少零件

的数量。实质上，这两种方法是同一种方法互补的两部分。面向装配的设计着眼于构成产品的宏观零件系统，而面向制造的设计则专注于单个零件。参见图2-3，由于设计、材料和工艺是紧密关联的，因此关于零部件加工的决策应该在实体设计阶段尽早做出。



拓展阅读

成组技术

成组技术是根据设计特征的共性，对复杂形状的零件进行标准化，将零件、制造工艺和工艺步骤分为零件组、制造工艺组和工艺步骤组。设计一个新产品，通常只有大约20%的设计属于原创设计。成组技术使用原有的相似设计，减少了零件的重复设计，从而大大节省了成本和时间。成组技术也迎合了消费者对产品多样化的需求，使得很多消费品从大批量生产转为小批量生产。

通过制造单元布局，缩短了工件从一个单元移到另一单元所需的时间，并且简化了操作，确保了分散在产品中的零件具有足够的生产数量，加工设备可以连续工作，经济上具有可行性。成组技术允许灵活组织生产，使厂家对动态多变的市场提高了适应能力和竞争能力。

成组技术的实施取决于将零件分组的能力，CAD的使用极大地提升了这种能力。

防错

面向制造和装配的设计的一个重要作用是在工程设计阶段提前采取防范措施来预测和避免制造过程中出现简单的人为错误。防错的基本原则是制造过程中出现的人为错误不应该简单归咎于工人，而应看作是设计不完善导致的系统错误。防错的目标是呈现零缺陷状态，此处的缺陷是指任何偏离设计和加工规定的变化。

防错是通过控制手段来防范错误、检查错误或者查明由错误造成的缺陷。显然，与其错误发生后再采取措施，不如通过适当的设计和过程控制来避免错误。将涉及形状、尺寸和公差的实体设计决策与制造和装配方面的决策集成是绝对必要的。目前，支持面向制造和装配的设计的各种设计软件已经开发出来，并且应用日益广泛。



设计 & 操作

1. 运用面向制造和装配的设计方法，分析你所在小组上一节课所设计的工程系统（废弃物处理、房屋装修或校园改造）的零部件可以进行哪些取舍和改进。
2. 任何工程设计最后都需要物化。针对你们小组所设计的系统，选择2~5个零件，制订出可用的材料和工艺选择表，并从性能、成本、加工、安全、质量、美学、环境等方面进行材料和工艺评价决策。

第 4 节 可持续性工程设计



学习目标

理解工程设计过程中的安全性、可靠性等性能评价指标，初步掌握面向X的工程设计方法。

人类是地球生态系统的一部分。与其他物种被动适应环境不同，人类已找到了各种各样的方法改造环境。一方面，伴随着工业大发展，丰盛的物资满足了人们的基本需求；另一方面，粗放型的资源利用方式导致了环境破坏和生态危机。环境保护运动推动政府立法，促进了垃圾的分类回收处理，更重要的是推进了工程设计的可持续化。工程设计的可持续性包括哪些内涵？它们又是如何集成到工程设计中去的呢？

党的二十大提出，要“坚持可持续发展，坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针，像保护眼睛一样保护自然和生态环境”。为了留住青山绿水，现代社会开始重视人与自然的和谐共生，强调资源节约、环境友好、经济循环等可持续性发展。因此，工程设计关注的主题越来越多，用来描述它们的设计方法统称为面向X的设计，X代表设计关注的某一方面的性能或要素。计算机软件工具的开发与使用，为开展并行工程提供了许多便利，面向X的设计工具有时也称为并行工程软件。可持续性工程设计的X已涵盖诸如材料选择、工艺规划、制造和装配、环境保护、鲁棒性、可靠性、安全性、经济性、服务性等众多因素。面向X的设计主要集中在实体设计阶段。

实施面向X设计策略的步骤包括：①确定需要考虑的目标因素X；②确定聚集点，是整个产品、单个零件、单个模块还是工艺规划；③明确X因素的特性及其改进的方法和技术，包括数学方法、试验方法、计算机建模或其他某种探索方法。面向X的设计策略是工程项目团队在设计过程中尽可能早地重视X因素，使用参数化测试与改进技术来实施设计。

一、面向环境的设计

环境问题已发展成为所有工程系统和消费品设计需要考虑的首

要问题。在一个自然资源有限的世界里，任何能够维持产品持续使用的设计最终对环境应该都是有益的，这样可以降低废弃物的处置量，减少自然资源的额外消耗。耐久性、可靠性、适应性、可维修性、可再制造性、可再利用性等都是能够延长产品或零部件使用寿命的设计策略。

（一）退役产品的处置

所有产品和服务最终都会面临性能下降直至报废的情况，它们必须能够易于回收处理以支持社会发展的可持续性。填埋是最不理想的废弃物处置方法。“当物料有用时，我们尊其为材料；当物料没用后，我们弃之为垃圾”反映了某些产品处置的现状。目前，退役产品的处置方式主要有重用、再制造、再循环、燃烧或填埋，选择废弃物处置方式的首要因素是成本。



拓展阅读

废弃物处置

重用意味着从废弃物中找到它们可以重新利用的价值。

再制造指的是对已有产品进行更新处理，可以替换损坏的零部件以延长产品的使用寿命，也可以将还能用的零部件用于某个新产品的制造。空墨盒填充是再制造的一个典型例子。

再循环指的是从废弃物中寻找那些能够用于同类产品生产的原材料，旨在通过废弃物利用实现价值的回收。这增加了原材料的供应，减少了自然资源的消耗和垃圾的产生量，也降低了原材料加工的能源消耗。例如，回收铝的能耗大约是从铝矿石开始加工制铝的5%。为了证明回收塑料在轿车中应用的可行性，欧洲某汽车公司在2018年推出了一款新车：控制台是由天然亚麻纤维编织网格结构增强海洋塑料（废弃的渔网和海绳衍生物）制造的；地毯是由聚乙烯对苯二酸酯

（PET）制成的纤维和从服装制造边角料中提取的再生棉制造的；座椅是用回收瓶子制成的PET纤维制造的。

焚化处理通过燃烧的方式有效减少了填埋处理固体废弃物的数量。燃烧将固体废弃物中残存的能量先转化为热能。固体废弃物的体积通过燃烧可以减小50%~90%，体积减小的效率取决于垃圾分拣的程度。燃烧产物是灰烬和那些不能燃烧的物质、烟气和热能。城市垃圾场会通过颗粒物过滤、气体净化等方式来减少垃圾焚烧造成的污染。

垃圾处置的最后方式是填埋。将固体垃圾压缩、密封、打包形成紧实的固体，然后埋入地下，隔绝与环境（如空气、雨水、地下水和动物）的交互。填埋工作面临的两大挑战是液体渗漏和沼气的产生。

（二）面向环境设计的材料选择

工程产品的生命周期可分为材料生产、零部件生产、产品转移

与运输、用户使用和报废处理五个阶段。这五个阶段都涉及能源消耗，有热量、液体、固体废料、废气等产生。一般来说，某个阶段的能耗可能会占生命周期能耗的大部分比例。例如，铝制饮料罐的大部分能耗来自材料生产阶段——从铝矾土中提取金属铝；一架运输机的大部分能耗来自用户使用阶段——服役过程中的油料消耗。

在工程产品生命周期的每个阶段，材料选择都起着重要作用。例如，在材料生产阶段，应尽量选择对环境破坏力小的材料；在零部件生产阶段，应选择能耗低且二氧化碳产量小的加工工艺；在运输阶段，较轻的重量能够降低能量消耗；在用户使用阶段，产品轻量化可以降低运动类产品的能源消耗；在报废处置阶段，较好的可再利用性无疑具有很大的优势。

思考 & 练习

根据需求来设计、选材是一种方式，根据材料来设计、应用也是一种方式。以你身边的某个产品为例，思考两者的优劣。列举3~5种产品，比较一下哪种方式设计效率更高。

（三）生命周期设计

对环境的关注在可持续性工程设计中体现为强调生命周期设计，强调在实体设计阶段除了考虑生产、应用，还必须考虑产品报废后的零部件或材料如何经再循环用于新产品。图2-15描述了可持续性设计与其他面向X设计策略的概念关系。可持续性设计对设计工程师的影响程度取决于他们所从事的行业类型。在石油生产、化学制剂、汽车制造等政策导向型企业里，工程设计必须满足政府制定的环境保护和公共安全方面的政策和法规。化石燃料面临淘汰、全球气候变暖威胁生物生存、新型清洁能源开发问题等影响着能源生产企业的未来。这些情况对设计工程师而言既是挑战也是机遇。很多行业把可持续性设计作为传统产品转型升级为绿色产品的重要途径。

生命周期设计着眼于工程系统组成结构中那些可能会影响使用寿命、服务期限的问题和因素，需要考虑产品最终报废的情况和新产品替代的情况。下列设计策略有助于保护环境并提高工程设计的可持续性。



图2-15 可持续性设计与其他面向X设计策略的概念关系图

(1) 最小化制造过程中排放的废气、废水和废弃物。检查所有可能会对环境造成消极影响的方面,通过改进设计消除或降低这些不利影响。

(2) 尽量选用可循环材料,运用可拆卸设计指南提高可循环材料的再用机会。

(3) 延长产品的使用寿命和使用时间。产品的使用寿命会因磨损、腐蚀、损坏、环境老化等因素缩短。也有一些生命周期设计无法顾及的、造成产品更新换代的因素,如技术过时、样式过时等。



拓展阅读

实体设计阶段的指南

材料和能源消耗最小化设计。首先,在不影响产品质量、性能和成本的前提下减轻产品重量。例如,汽车制造商已制定了通过材料替代等实现车身轻量化的长期目标以提高燃油经济性。其次,降低各种形式的浪费,例如生产过程中的废料、装配过程中的瑕疵零部件、运输过程中损坏的产品等。再次,认真看待包装设计并对产品进行包装,寻找能够让货箱重复利用的方法。重视包装理念,注重材料升级:从使用传统的聚合物材料到使用能够再循环和重复利用的材料,一个典型例子是快餐包装从传统的泡沫聚苯乙烯到现在的纸板。

拆卸设计。当产品报废时,重要零部件要能

够用经济的方法拆卸下来以便重用、再制造和循环利用。尽量少用粘接、焊接等方式进行零部件的连接,采用可拆解但不易破损的紧固装置,提高紧固装置的耐蚀性。

可维护性设计。大多数工程系统是按照定期维护的要求设计的。当忽略维护或操作不当时,使用寿命会大打折扣。由于消费者购买产品后不会适时维护,因此良好的设计策略是设计不需要维护的产品。可维护性指南包括易拆卸设计和易服务性设计。工程设计的一个重要决策是确定最少维修零部件的构成,如果数量超出,就只能替换部件却无法进行诊断和维修。

报废回收指南

环保设计、绿色设计、可持续性设计等要求工程产品在使用寿命结束后也能够实现有利于环境保护的行为。这些设计方式与产品性能并无必要关联,但要求在工程设计时考虑报废后的回收再利用。

面向再制造的设计。产品初始设计时应遵循的、能够有利于再制造的设计指南包括但不限于:提高产品整个生命周期中的抗损坏能力,使易磨损的部位容易被检测到,采用一般工具就能够装配产品的零部件,减少使用易藏灰、易藏碎

屑的零部件。必须注意,工程设计的初衷并不是为了产品的再制造,并且不是每种产品都适合再制造。因此,这里的某些指南与面向装配设计的某些指南是冲突的,实际设计时必须进行折中权衡。

可循环设计。遵循一些设计步骤可以提高产品的可循环性。例如,使产品易拆卸有利于零部件的分离回收,减少使用材料的种类可以简化分类回收,选择兼容性好的材料可以省去回收前的分离步骤。应用这些设计指南必将造成设计过程

的反复或设计方案的折中。例如：减少材料种类可能会使产品无法达到最佳性能；一个包裹金属外壳的板材或一块镀铬板可以实现零件的最佳表面性能，却不利于回收再循环。这些问题的决策权衡主要取决于成本。

加工过程中的废弃物回收和重用设计。应重视研究减少产品加工废弃物产生的方法，避免使用危险或不理想的材料，关注政府发布的危险材料列表。例如，避免使用氟利昂制冷剂，尽可能使用水溶性洗涤剂，使用生物可降解塑料等。

保护自然环境是政府、企业、公众的共同责任。企业需要提供相应的设计工具、制定一系列的原则或指南来指导新产品的的设计以帮助达到环境保护标准。企业技术团队的技术水平是政府进行决策的重要依据。政府通过政策手段保证所有行业的企业在环境保护方面承担相应的成本。企业成本的上涨最终将转嫁到消费者头上，因此政府的政策手段必须谨慎与明智。

二、面向可靠性和安全性的设计

工程系统的可靠性准则是在概念设计阶段就基本确定下来的，在实体设计和详细设计阶段应严格遵守；在大规模生产阶段，会适当修改可靠性准则，以规避设计失误和制造缺陷。设计时没有考虑的环境状况，例如雨淋、湿度大、冰冻等会严重影响产品的使用寿命甚至导致产品失效。产品运行时须严格按照规定操作，否则设备可能会发生故障。

在延长产品使用寿命、降低产品维修需求的同时，产品设计还要非常重视规避风险。这就要求工程师必须能够识别设计中的潜在危害，评估所用技术手段或措施中的风险，了解在什么条件下会引发危险，采用能够规避风险的设计方法进行可靠性设计。达成此目标的一个常用方法是在设计时遵循规范和标准。

并非所有的设计都是成功的，灾难性的失败时有发生。一些广为人知的与工程系统有关的灾难有切尔诺贝利核电站泄漏，波音737飞机在高空丢失舱顶盖，波音737 MAX8在起飞阶段坠毁，挑战者号航天飞机爆炸，桥梁坍塌与倾覆，等等。造成系统故障、导致工程灾难可能的设计原因包括：不正确或过分的假设，对待解问题的理解不够，不正确的设计规范，不完善的制造或装配体系，设计计算错误，不完全的试验和不当的数据采集，制图误差，由正确假设出发的不完善推理，等等。事实上，工程领域的许多进步都是通过对事故分析取得的。对样机进行仿真模拟和测试试验是保证工程设计成功的重要步骤。

工程设计对系统的可靠性影响重大，设计架构决定了系统的冗余度，设计细节决定了缺陷等级。通过失效模式与影响分析对潜在失效模式进行早期评估有助于实现更可靠的设计。其他增加系统可靠性的手段包括使用耐用的材料和零部件、降低零部件的额定值、缩减零件数量与简洁设计、采用损伤容限设计和实时检查等。对试制样机进行大量试验以找出漏洞也是一种有效的方法。所有关于失效根源的分析都可以提高系统的可靠性等级。

面向可靠性和安全性设计的目的是避免人员伤害、避免财产损失。在进行安全设计时，设计人员必须首先明确哪里存在潜在危险，然后提出避免危险的设计方案。如果在保证原设计功能的前提下无法实施，那么就提供保护装置来避免危险的发生。如果以上都做不到，就必须使用警告标签、警示灯或报警器。发生人员伤亡的严重事故对用户来说是痛苦的，对相关责任工程师来说可能会终结其职业生涯。

思考 & 练习

以你身边的某项工程产品为例，观察、思考、总结该产品存在哪些潜在的风险，可能引起哪些人身、财产等方面的危险或损失，如何针对这些风险进行相关的安全性设计。小组讨论一下，并相互进行补充。

三、面向美学与工效学的设计

在现如今高度竞争的市场上，仅凭性能是卖不出去产品的。工业设计还关注产品的视觉效果及其与用户的交互。其中，美学诉求是指产品与人的感官交互：产品看起来怎样、摸起来怎样、闻起来怎样、听起来怎样等。对大多数产品而言，产品各组成部分的外形、比例、平衡和色彩整体上要令人愉悦。充分体现美学的设计可以为产品使用者带来良好的使用体验。

工程师可能将色彩、形状、舒适性、便利性视为设计中的小问题，但工业设计师更注重这些特性在满足用户需求上的本质作用。工程师由内至外进行设计，主要从技术细节开始思考。工业设计师由外至内进行设计，通常从一个被用户采纳的完整产品概念开始，回过头来解决实现这个概念的细节问题。无论怎样，在项目的初始阶段引入工业设计师是十分重要的。如果细节设计后才去找他们，就没有他们提出适用概念的空间了。在数码产品领域，卓越的工业

设计一直是消费类电子产品市场竞争制胜的关键因素。

工业设计还要确保产品能够满足用户界面相关的所有需求，即工效学。人因工程学研究人与工程产品及其生活、工作环境的相互作用，应用与人的特征相关的信息来创建用品、设施和环境。它将产品视为人机系统的一部分，系统中的操作员、机器、工作环境都必须高效运行，远远超出了面向可靠性和安全性设计的可用性范畴。人与产品的交互可以作为功能结构的输入，例如：人通过肌肉提供力和扭矩为系统提供能量，通过视觉、听觉、触觉以及一定范围内的味觉和嗅觉来提供信号，当人体必须包括在系统中时，人也作为物料输入。

人体尺寸多种多样，设计中选择什么样的人体尺寸取决于具体的设计任务，不存在诸如平均人体的概念。例如，如果设计任务是在拥挤的飞机驾驶舱中放置一个紧急情况控制杆，则应使用最小可达尺寸，即女性1%百分位的可达尺寸。如果设计的是潜艇中的逃生舱，那么就要选男性99%百分位的肩宽尺寸。裁缝倾向于采用最匹配设计方法，而服装厂则为各种身材的顾客提供现成的、基本合身的尺寸选择。某些场合使用可调节的匹配，如汽车座椅、办公座椅、立体声耳机等产品。在工效学方面投入多的产品，其品质通常也很高，原因是用户认为他们的使用体验良好。



拓展阅读

面向质量和鲁棒性的设计

欲获得高质量的设计，需要着重理解客户需求，但要做的远远不止这些。早在20世纪80年代，人们就已意识到，保证产品质量的方法是将质量设计到产品中去，而不是之前认为的在制造过程中进行认真的检测来确保质量。全面质量管理工具可以帮助人们简化设计过程中的各种相关问题，质量功能配置建立了用户需求与工程特性之间的紧密联系。

与质量相关的一个基本原理是各种变化是质量的敌人，那么避免变化就是获得高质量的一个指导原则。鲁棒设计是通过统计学试验发现设计参数最佳值的系统化方法，能够产生低可变性的、

经济性的设计。具体实施方法为：实施质量关键点参数设计，如果不能得到最优结果，那么就实施公差设计来完成目标。参数设计是确定那些能够降低对变化源敏感的设计参数或工艺变量的组合。首先识别那些主要影响信噪比而不是均值的设计参数。应用统计学试验，可以发现将响应的可变性降到最小的控制因素的等级，一旦性能统计的方差降低，就可以通过使用适当的设计参数（例如信号因子）来调节平均响应。公差设计方法超出了本书范围，在此不做介绍。总之，鲁棒设计是应用统计学试验方法寻求设计参数的最优组合，以实现期望的最大化和非预期的最小化。



设计 & 操作

针对你们小组所设计的固体废弃物处理、房屋装修或校园改造中的某一工程系统，思考一下哪些是必须考虑的重要因素。展示你如何采用面向X的设计方法来实现相关需求。



综合实践

垃圾分类是指将固体废弃物按产生来源、成分、处置技术或可利用的方式进行分门别类的收集，目的是提高垃圾资源化利用的效率，为回收和后续处置带来便利，以节约费用、减少焚烧所需的能源及由其产生的二次污染问题、减少最终填埋用地。分组进行固体废弃物处理的项目调查研究，例如：走访学校厨房，调查厨余垃圾的产生量；走访社区垃圾站，调查垃圾的种类和产生量；参观垃圾处理场，调查垃圾处理现状；观察统计你家垃圾的种类和每周的产生量。各自独立撰写调查报告。

选择某种类型的垃圾，例如厨余垃圾、瓶子、报纸、家具，以及家庭装修垃圾、产品包装物、电器等，以小组为单位，运用标杆分析法和逆向工程法探究废弃物处理工程系统有哪些工程特性，运用质量功能配置探寻废弃物处理工程系统的关键质量参数，动手设计一个固体废弃物处理工程系统。

“浪费”是一个热门话题。小组讨论下列话题：过度包装、垃圾填埋、垃圾焚烧、有毒废物、废品回收、塑料降解、环境污染、资源循环等。自行选择一个话题，阐述如何改进可以满足可持续性经济与社会发展需求，各自独立撰写总结报告。



本章小结

工程设计是由一系列设计要素和设计操作组成的顺序流程，是一个多次迭代的过程。运用标杆分析法、逆向工程法可以获得设计对象的诸如设计参数、设计变量、约束等工程特性，运用质量功能配置可以将用户需求转换为关键工程特性质量控制点。优秀的工程设计需要关注可制造性、生态效益、安全性、可靠性、经济性等多种性能评价指标，并行工程和面向X的设计方法能够在工程设计的早期阶段就把相关人员和知识信息纳入设计流程，由此获得高质量、低成本的最优设计方案。

本章学习评价表

实践项目	评价标准	评价方式		
		自评	互评	师评
概念设计	工程意识强，具有创造性、系统性，要素明确、完备			
逆向工程	拆解工作准备得当，系统分解次序合理，零部件功能描述准确			
质量屋	信息充分，关联关系把握准确，分析合理			
工程任务书	任务清楚，指标明确，关键质量点参数合理			
功能结构图	系统分解层次结构合理，概念框图简洁明晰			
面向X的设计	X因素重要性突出，X因素特征明确，改进方法合理			

等级标准：A——优秀，B——良好，C——合格，D——待改进。

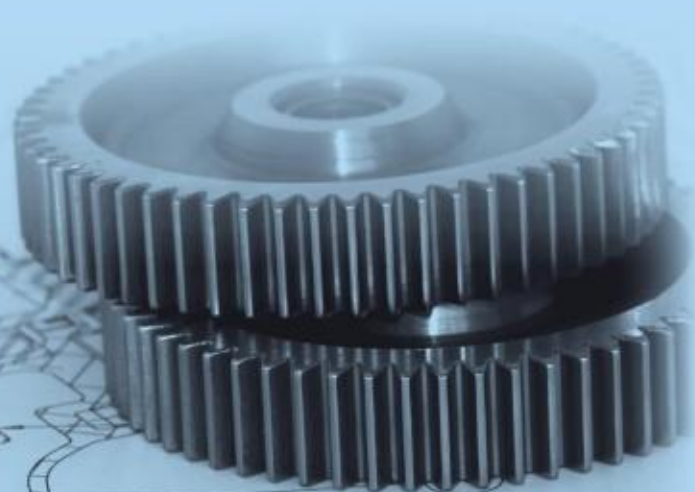
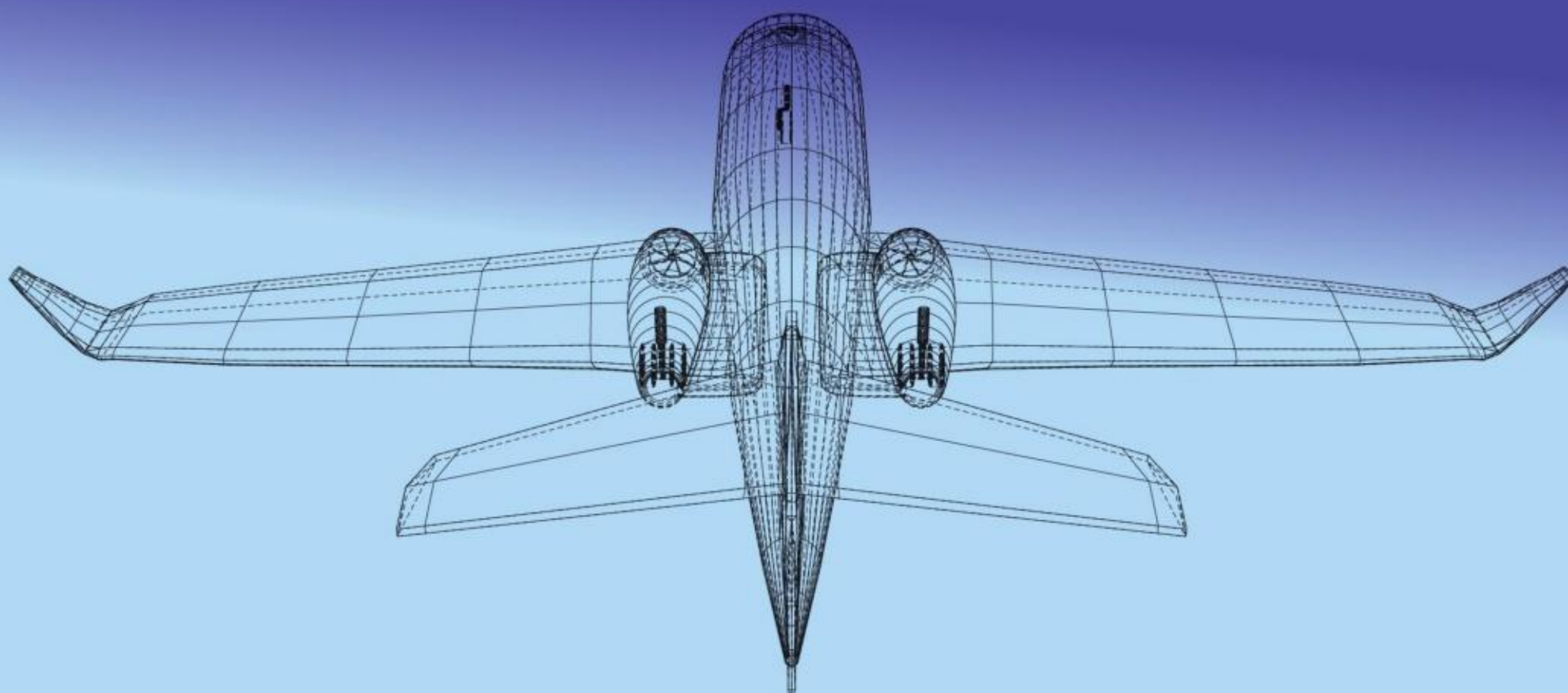
第三章 工程设计建模

工程设计的不同阶段需要不同精度的模型辅助进行方案的评价与决策。本章介绍工程模型的主要类型、计算机建模及其仿真优化方法，以及快速成型建模方法，还设计动手建模活动以提高工程设计的图样表达和物化能力。

第1节 工程模型的主要类型

第2节 计算机建模与仿真

第3节 快速成型与测试



供个人学习使用，未经授权不得另做他用

第 1 节 工程模型的主要类型



学习目标

了解工程模型的主要类型及其作用。

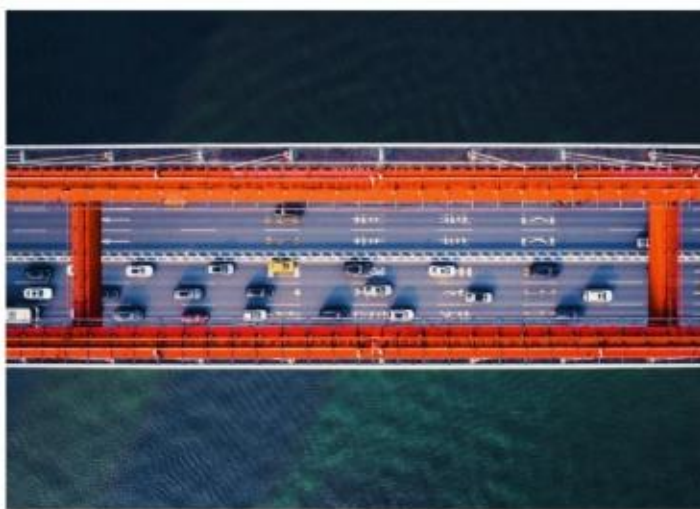
评价竞争性概念（方案）需要分析从各类模型中得到的信息，这是工程决策的前提和基础。工程建模是通过描述物理系统及其所处的即时环境，使用各种分析、逻辑、数学和经验等方法来解决复杂的工程问题。找到问题解决方案的关键是建立适理解问题的工程模型，用简洁的方式表述复杂现象，从而使复杂问题易于理解。想一想：在工程设计的不同阶段，需要哪些类型的模型？它们对精细度和精确度有何要求？

模型是相对原型而言的，它是对原型的抽象和解释。二者之间具有相似性，通过对模型的分析与验证可以得到关于原型的信息。工程设计常用的有物理模型和符号模型两种。

物理模型是一个看起来像原型、用图标或实物以一定比例表示的模型。模型比例依据现实状况缩小，如风洞试验中的飞机（见图 3-1 左）、火箭、动车组比例模型，振动试验中的楼房、桥梁比例模型。物理模型的优点是它比原型小、简单，因此建造和测试更快，成本也更低。物理模型也可以是一种几何表示。它们可能是二维的，像地图、照片、工程图、交通规划图（见图 3-1 中）；也可能是三维的，像被制造的零件、产品、城市规划模型（见图 3-1 右）。现阶段，常常使用 CAD 等软件进行数字化工程建模和仿真。



风洞试验中的飞机



交通规划



城市规划

图 3-1 工程设计的模型

符号模型是物理系统中可定量零部件的抽象，它使用符号表示实际系统的属性。符号模型中，数学等式用来表达系统输出参数对输入参数的依赖。符号可以代表一类对象、一个特定对象、一个自然状态或仅仅一个数字。符号的价值在于便捷性，有助于解释复杂的概念、拓展情况的普遍性。使用符号模型解决问题需要分析、数学和逻辑能力，能够产生定量结果。当符号模型被转化为计算机语言后，就可以定量计算分析工程设计的备选方案。

计算机技术——包括计算机图形技术、计算机虚拟现实技术、数值计算和分析技术的快速发展，数字化、程序化了物理模型和符号模型。与实物表示的物理模型相比，计算机模型具有提供结果快和建造成本低的优势，使用有限元分析或其他CAE工具还可以提供从许多实物模型无法得到的信息。计算机辅助工程首先影响的是工程图，自动绘制工程图通过修改和使用已存储的零件参数为绘制新设计图节省了大量时间。三维实物模型为零部件提供了完整的几何形状与数学描述，它不但用于设计，还可用于分析、仿真与优化。例如，三维立体模型与有限元分析紧密结合可进行应力分析、流体分析、机构运动学分析。在计算机辅助工程设计中，大量的计算工作已使得工程设计的方式发生了质的变化：不仅大大提高了设计能力，还使得工程设计的快速迭代成为现实。在计算机虚拟现实系统中，观察者如同身临其境一般，计算机模型实现了更强大的仿真和模拟效果。同时，计算机实物模型还可以被剖切开来观察其内部细节，也可以方便地转换成二维工程图。



拓展阅读

计算机虚拟现实技术

计算机虚拟现实技术是近年来迅速发展的一门综合性技术，融合了计算机图形、计算机建模仿真、人机交互、传感、人工智能等多个领域的技术，利用计算机模拟产生三维空间的虚拟世界，提供有关视觉、听觉、触觉等感官的输入输出模拟，让使用者如同身临其境一般、自然地虚拟世界中体验和交互，实时观察三维空间的事物。通过定性、定量综合从集成环境中得到的感性和理性认知，运用运动学、动力学知识，使用性能仿真，帮助设计工程师深化概念、萌发创

意、提高分析决策能力。

计算机虚拟现实系统既是仿真模拟系统，又是虚拟设计和虚拟制造系统，可以广泛应用于快速设计与快速成型、面向装配的设计、面向制造的设计、面向X的设计，以及操作培训、产品维护等方面，为工程设计带来革命性的进步。

以产品概念设计阶段为例，由于概念设计阶段决定了产品成本的60%~70%，设计师需要研究多种可行的设计方案，并从中确定经济效益最好的设计。传统设计者是在图纸上用线条、线框

勾勒出设计概念，需要逐一对各个二维平面进行设计并组合过渡到设计的空间构造，相当费时而且常常会出现错误；而虚拟现实的设计者在计算机虚拟现实系统环境中可以实时交互，对模型进行反复改进，并能马上看到修改结果，及早发现与解决问题。例如，在三维空间实时观察、操作

改变产品模型的形态、色彩和材质；用人因工程指导产品设计，使产品符合人的生理特点和心理习惯；用美学观点创造产品形态，使产品给用户带来美的享受；用人机交互平台，使用户在虚拟环境中真切体验新产品的魅力。

计算机技术不仅在工程设计建模方面扩展了设计师的能力，通过组织和处理重复的、耗时的操作，它还将设计师解放出来，使他们能专注于更复杂的设计任务；通过更快、更完整地分析复杂问题，设计师可以进行更多的设计迭代和优化；通过互联网和计算机信息系统，设计师可以快速与身处全球各地的同事——如制造工程师、工艺师、刀具和模具师、采购代理等分享信息。一个大胆使用CAD的成功设计案例是波音777远程客机的工程设计，其整机设计、部件测试、整机装配以及各种环境下的试飞，均是在计算机上模拟完成的，开发周期从过去的8年缩短到了4年。

思考 & 展示

设计废弃物处理、房屋装修或校园改造工程系统需要哪些模型？自己动手做一个概念验证模型，看看效果如何。

第 2 节 计算机建模与仿真



学习目标

理解并掌握计算机建模和仿真的基本方法。

随着计算机和人工智能技术的发展，计算机几何绘图、几何建模、仿真优化、虚拟设计、虚拟制造等技术工具为工程设计带来了革命性的变化，已成为现代工程设计必须掌握的基本工具。

一、计算机模型的作用

计算机几何建模在工程设计领域发展迅速，现在的CAD产品已从最初的二维绘图、支持三维线框图和表面建模发展到具有实物建模能力。CAD建模变得越来越重要的一个原因是数据关联，它已与有限元数值计算与分析、数控加工等应用工具共享数字设计数据，不再需要每个应用都必须翻译或传递数据。计算机技术和有限元分析技术的快速发展，使得工业界开始广泛采用计算机建模的方法，通过优化零部件设计来减少实物模型的数量及其测试成本。

应用计算机几何模型与有限元分析技术，人们可以方便地对复杂几何体以及载荷情况进行应力、温度和其他场变量的计算，从而优化设计零件的特征与参数。计算机建模软件也包含越来越多的分析工具用于制造过程的仿真。实物建模软件可以处理包含上千个零件的大型装配件，并且能处理零件的关联，管理零件的变更。越来越多的系统提供自上向下的装配建模功能，可以组装配件与系统，随后用零件发布。计算机工艺建模同样能够减少工装开发与成本。例如：铸造和注塑成型工艺中，针对模具的改进实现了物质流完全充满各个区域；锻造和挤压变形工艺中，模具的改进防止了零件高受压区的破裂。利用计算机仿真软件，可以通过查看温度等某个工艺参数的一系列彩图获知仿真结果，可以通过动画来实时展现金属熔液的固化过程，还可以与数控加工中的刀具路径进行交互，仿真优化提高数控加工效率。

二、有限元分析仿真

多数经典模型把固体和流体当作连续的同质体，在平均的意义上预测应力、热流量等属性，这种假设经常被现实否定。如果将连续体划分为小的、良好定义的、有限的单元，就可以基于本地化得到场的属性。每个单元的行为由它的材料和几何属性决定，并与附近的所有其他单元相互作用。如今，同时求解上千个联立方程的有限元分析在个人计算机上就可以快速获得结果。

有限元分析技术及其应用还在不断发展，现已涵盖静态的和动态的、线性的和非线性的应力和挠度分析、弯曲挠度分析、自由和受迫振动、热传递、热应力和挠度、流体力学、声学、静电学和磁学等。一个重要进步是多体软件，它允许来自多个工程学科模型与强大的计算机图形能力进行互动。

在有限元分析中，连续固体或流体被划分为许多小单元。每个单元的行为是由节点未知变量的估计值和材料的本构方程描述的。通过确保各单元在边界的连接性，所有的单元被连接在一起。在假定的边界条件下，可以求得系统线性代数方程的唯一解。有限元分析中的各单元是以虚拟的方式进行布置的，可以用它为复杂的形状建模。因此，不必再寻找接近理想模型的分析解，也不必猜测模型的偏差如何影响原型。

与复杂的数学分析方法不同，有限元方法基于线性代数方程。有限元建模分为三个阶段。

(1) 预处理。在预处理阶段需要完成如下任务。

- 从CAD中导入零部件模型。因为实物模型包含大量的细节，所以预处理通常要删除小的非结构特征，利用相似性减少计算时间。

- 网格化，将几何体划分单元。选择网格需要知道使用哪种类型的单元——线性的、二次或者三次插值函数，建立满足求解方程精确度和效率需要的网格。

- 确定如何加载和支撑结构。在热学问题中要确定初始温度，确保已理解边界条件，重要的是包含对位移足够的约束，阻止结构的刚体运动。

- 选择描述材料的本构方程，将位移与应力进行关联。

(2) 计算。这一阶段的操作由有限元分析软件完成。

- 有限元分析程序对网格中的节点重新编号以最小化计算资源。
- 为每个单元产生刚度矩阵，并把各单元安装在一起，从而维

持连接性形成全局矩阵。基于载荷矢量，软件产生外部载荷并应用位移的边界条件。

- 计算机为位移矢量或独立变量求解大规模矩阵方程。

(3) 后处理。这一阶段的操作也由有限元分析软件完成。

- 在应力分析问题中，后处理把位移矢量逐单元转化为应变，然后使用本构方程转化为应力场。

- 一个有限元的解可以包含上千个场值，因此，需要后处理操作有效阐释这些数据。一种典型的方式是把应力轮廓图叠加在几何图上。显示数据前，有限元分析软件先要对数据进行数学处理，例如决定应力分布。

- 当有限元分析软件与优化程序共同使用时，可在迭代计算中优化关键尺寸或形状。

实际应用有限元分析的关键是有限元分析软件与CAD软件的集成，从而使有限元分析不离开CAD程序便可以执行。使用实物建模、参数化的、基于特征的CAD软件，不重要的几何特征可以暂时忽略但不永久删除，不同的设计配置可以用CAD模型参数形式方便地进行检查。多数案例使用有限元分析软件提供的默认网格化和单元选择，有限元分析软件也提供用户定制功能。

为了最小化成本，在保证所需精度的前提下，模型的单元数量应该最少。最佳策略是使用迭代建模，粗略的、单元数较少的模型在关键区域逐渐精细化。粗略的模型可以用梁和板面结构建立，忽略像洞、法兰等细节。一旦使用粗略模型找到整体的结构特征，就在应力和挠度必须更精确定义的区域建立精细的网格模型。随着自由度（节点数乘以每个节点的未知变量数）的增加，精确度快速提高，计算成本呈指数增长。

图3-2展示了有限元分析应用于货车框架的复杂问题。首先建立用火柴棒（梁）表示的货车框架的物理模型，确定挠度并定位高应力区域。一旦找到关键应力区，例如图中所示梁模型的阴影部分，就建立精细的网格模型进一步分析。分析的结果是计算机产生的用应力分布作为轮廓的零件图。通过货车框架应力分析可以预判断裂失效的高发区，有针对性地改进设计。

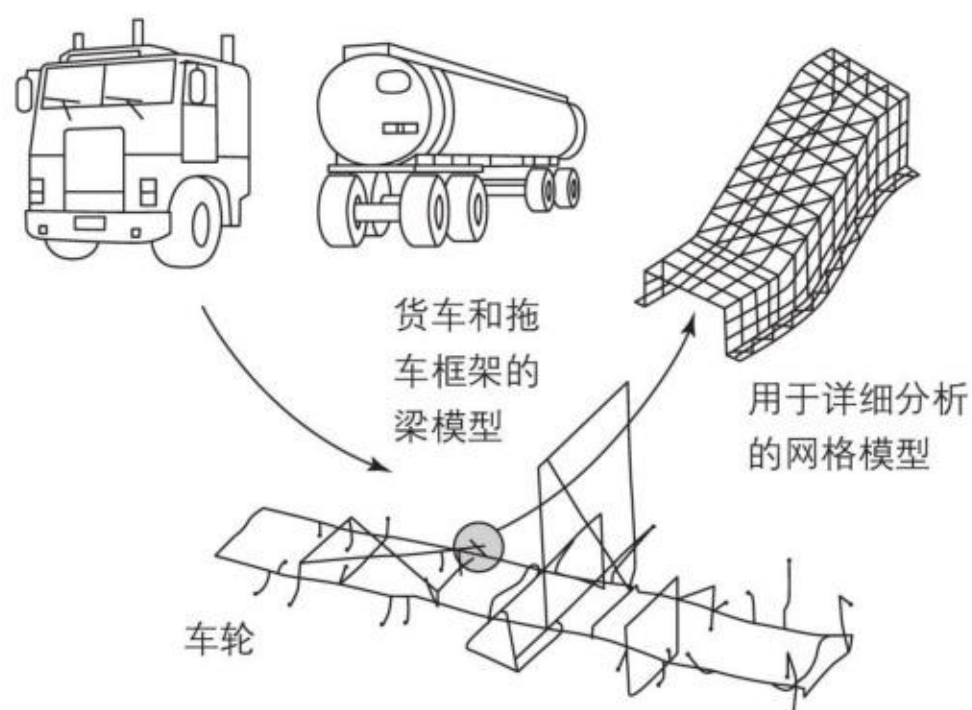


图3-2 有限元分析设计的实例

三、系统仿真

计算机仿真技术是以相似原理、信息技术和控制论为基础,对模型输入一系列值以获得拟定的设计在给定的一组条件下的动态行为。工程模型可以模拟整个系统或某一部分在某些条件下的行为。仿真的目的是探索真实系统各种可能的输出,通过仿真深入了解模型受不同环境约束时的行为。零件建模是通过逻辑规则和符号模型完成的,规则决定了预定义的哪些行为会发生,符号模型计算行为变量的值。系统模型由零部件的独立模型组合而成。正是通过对各零部件模型的布置产生了整个系统,可以研究、预测系统的行为。



拓展阅读

优化设计

优化技术是一种用数学方法求解各种实际问题优化解的应用技术。优化的目的是在原有结果基础上,通过优化技术和算法的应用,力求在所考虑的关联范围内找到最佳结果。求解过程中,选定的基本参数为变量,对变量取值的限制为约束,表示可行方案衡量标准的函数为目标函数。数学上,最优化指的是多变量函数在满足一些等式、不等式约束下求得的最大(小)值。一般的最优化问题是指函数优化问题或组合优化问题。

最优化是设计过程的固有属性。关于优化的数学理论已得到高度发展,并且被应用到设计函数可以表达为数学公式的设计中。数学方法的适用性通常取决于是否存在连续可调的目标函数。当目标函数无法用微分方程表示时,可用计算机辅助计算来进行优化。

像航天器、动车组、飞机这种庞大、复杂的

工程系统,由于其复杂性、多约束性、非线性、不同属性、不确定性和建模困难,很难用传统的优化方法来解决系统设计的优化问题。CAE与基于计算机优化算法的仿真工具相结合创建了CAE设计工具,用系统化的设计搜索方法取代了传统的试错法。该方法将设计者的能力从运用有限元分析来量化详细设计拓展到了如何改进设计以更好地实现关键性能指标。

绝大多数有限元软件包都提供优化功能,这种优化过程将设计仿真、优化和设计灵敏度分析融入一个综合设计环境。用户输入初步数据并规定可接受的设计变量和所要求的约束。优化算法生成连续模型及网格重建过程,直到最后收敛于最优设计。例如,涡轮盘的结构优化设计使其重量减轻了12%,应力降低了35%。需要注意的是,这不是数学意义上的最优,而是目标函数改善的一组可接受的设计变量。



设计 & 操作

自行选择废弃物处理、房屋装修或校园改造某一工程系统设计中的2~3个关键零部件,采用CAD软件进行计算机三维建模,并采用有限元分析进行仿真和优化。

第 3 节 快速成型与测试



学习目标

理解并掌握快速成型建模方法。

三维打印快速成型技术是近年来快速发展的一种增材制造技术。试想一下，如何用它来制作工程设计模型或验证原型？

实体设计阶段确定了产品架构、零件配置、特征尺寸和公差，并对质量起决定性作用的几个零件或模块进行了参数设计。使用面向X的设计方法对材料和生产工艺进行了审慎的选择决策。面向质量和鲁棒性的设计在重要参数的确定中得到了应用。为了确保工程系统能够正常工作并实现预期功能，需要制备物理原型进行测试和失效试验。

用于测试和验证的原型数量需要根据产品开发成本和开发周期进行权衡决定。原型可以用来检测产品，但它们会耗费大量成本和时间。虽然计算机仿真模型既便宜又快捷，但仍有许多通过仔细规划的原型测试和极端条件下的全尺寸测试是不能取消的。

计算机模型唯一不能取代物理模型的地方是在概念设计的初级阶段。为了对该阶段的设计目标进行决策，需要使用普通结构材料制作一个粗略的快速物理模型并进行必要的测试。手工制作模型是理解和改进概念开发的最佳方法，通过该方法设计人员可以制作出很多简单的模型。

一、制作原型

设计团队需要自己动手制作实物模型来进行概念验证。通常，手工制作的物理原型可以获得出色的视觉效果，有魅力的实物模型对一些顾客仍极具吸引力。

用于实体设计原型测试的模型通常在模型加工车间进行制作,一个小型的模型加工车间通常配有专业的工艺匠人、数控机床和其他精密加工设备。为了提高效率,要使用与数控机床交互性良好的CAD软件,并对车间工作人员进行培训。用数控机床加工模型的大部分时间消耗在工艺规划和数控编程上,而不是在金属切削上。技术的发展大大缩减了模型加工时间,但是在加工简单几何体方面,数控加工面临着快速成型技术带来的竞争压力。

详细设计的原型和预制造原型都是在加工车间用生产成品的材料和工艺进行制作的。

二、快速成型

快速成型是利用CAD模型制作原型的技术,制作时间比采用机加工或铸造工艺短很多。快速成型经常用于制作概念验证原型,在实体设计阶段大量使用。最早快速成型应用在制作外观模型上;当尺寸精度可以控制后,还用于与装配相关的匹配问题;此外,快速成型模型也常用于验证运动学功能,但其强度不足以用于高强度功能的验证。采用快速成型技术制作模型的过程如下。

- 创建CAD模型。任何快速成型工艺都始于三维CAD模型,三维模型也可以视为零件的一个可视原型。快速成型方法要求模型必须是封闭的形体。

- 用CAD软件将模型文件格式转换为STL格式。在STL格式中,零件表面通过曲面细分被转换成非常小的三角面,这些三角面组合形成的网格可以近似零件表面。

- 将STL文件切割成薄图层。将STL文件传送给快速成型设备,控制软件将文件切割成许多薄图层。这个步骤是必需的,因为大多数快速成型方法是一层一层构建实物模型的。与数控加工相比,快速成型技术节省了设计工序和编程的时间。

- 制作原型。一旦完成薄图层切片,快速成型设备就开始制作零件的模型,这期间不需要人为操作。

- 后处理。所有从快速成型设备上取下的模型都需要后处理,包括清洗、除去所有的支撑结构、通过表面精饰除去锐边。后处理方式取决于快速成型对象使用的材料,此外,可能还需要进行固化、烧结、聚合物渗透等工艺以提高模型强度。

快速成型模型的加工时间可能需要8~24小时。与数控加工相

比，快速成型从详细图样到获得原型所需的时间短了许多。快速成型可以一次性加工非常复杂的形体，这些模型通常是由塑料制成的。

三、测试

产品开发过程中使用的一系列原型都需要进行相关测试，以验证产品开发和工程系统的设计决策。测试有两个主要目的：①确定设计是否满足任务书的规格要求；②测试时按计划获得失效状态。大多数材料测试的最后状态都要达到失效点，子系统和产品测试同样也要过载测试直到失效。采用这种方法，可以获得真实失效模式并深入探究工程设计的弱点。失效测试通常采用加速试验，测试级别按一定的量不断提高直到失效点出现。

当有两个或更多参数（如应力、温度、加载速率）需要测试时，需要制订测试计划以一种经济的方式将这些因素联合起来同时进行测试。统计学为人们提供了开展试验设计的工具，市场可以验证消费品的可接受性。但很多其他类型的工程产品，则需要进行一系列规定的验收测试，例如军用设备和系统需要按照合同规定完成具体的测试。



设计 & 操作

采用简易材料制作或快速成型方法制备废弃物处理、房屋装修或校园改造工程系统设计中的2~3个关键零部件的模型，分析理解不同工程模型的特点和作用。



综合实践

1. 用CAD软件绘制你所在小组设计的废弃物处理工程系统的系统模型，并探究系统优化的方向。
2. 采用CAD软件建构一个桥梁模型，运用有限元分析法分析桥梁的静态稳定性和振动稳定性；采用纸板、木条制作或用三维打印制备一个桥梁模型，并测试桥梁模型的承重能力。



本章小结

工程设计常用的模型有两种：物理模型和符号模型。计算机辅助工程软件的发展实现了物理模型和符号模型的数字化与程序化，不仅简化了许多工程设计和分析任务，还极大地提高了工程设计能力。同时，计算机建模与快速成型等制备加工技术的融合提高了工程建模水平，使得工程设计的快速、多次迭代成为现实。

本章学习评价表

实践项目	评价标准	评价方式		
		自评	互评	师评
物理模型加工	建模材料具备适用性、可加工性、环保性，模型的外形、色彩与比例准确			
计算机建模	零部件几何特征齐全，尺寸标注规范，层次结构合理			
有限元仿真	网格选择具有合理性，仿真结果具有准确性、可读性			

等级标准：A——优秀，B——良好，C——合格，D——待改进。

第四章 工程决策与管理

工程设计的所有阶段都需要对备选方案进行评价和决策。工程管理综合应用工程技术、管理科学和社会科学等领域的理论与方法，为工程设计提供决策依据，以达到降低成本、提高质量和效益的目的。工程设计经常表现为一系列在信息不充分的条件下进行决策、管理的创造性活动。本章介绍基本的决策模型和相关决策方法，以及时间进度管理的两种常用方法，讨论全面质量管理和生命周期成本的概念，设计工程项目的规划、管理与评估体验以强化学生的技术意识和工程思维。

第1节 决策与评价

第2节 时间进度管理

第3节 全面质量管理

第4节 生命周期成本管理



第 1 节 决策与评价



学习目标

1. 了解决策模型的基本要素和类型。
2. 初步学会用决策矩阵法进行评价和决策。

工程设计过程的每个阶段都会产生一系列备选方案，需要从中选择最能满足需求的方案以进行下一步设计工作。因此，我们需要学习决策模型，选择决策策略，通过一致性评价获得最优设计方案。

设计概念的产生和选择是一系列思维发散和思维收敛的过程。设计团队常常通过概念组合和概念改造的方式生成新概念，并进行新概念的循环选择，直至留下符合评价标准的一小组概念。而评价标准是在识别客户需求、进行质量功能配置等系统化问题定义过程中获得的。对备选方案的物理行为进行建模、仿真和测试是做好工程决策的前提条件。对备选方案做选择时，仅仅有性能分析是不够的。在概念设计阶段就需要把一些影响结果的其他因素考虑在决策过程中，例如成本预算、法规变化、市场趋势、社会影响等。

任何阶段都需要评价和决策，否则就会对设计方案的优劣一无所知。例如，图2-6所示的桥梁概念对不同的地域环境有不同的适用性，需要根据具体的施工环境进行评价和决策。决策需要面对选项，预测每个选项对结果的影响，按照一组标准对备选方案进行评价，实施有效和一致的选择过程。不同阶段的区别在于决策需要的信息量、模型的细节和精确度、备选方案的细节不同。随着设计过程的推进，设计细节的数量快速增加。本节聚焦决策策略的确定，产生基于决策标准评估备选方案的模型；通过评估将备选方案减少至一个或几个最佳方案。使用这些方法，能够从一组备选方案中选定一个进入下一阶段的设计工作。

一、决策模型

做决策要以已有的事实为基础，必须仔细斟酌事实以提炼出真正的含义：知识。瞄准问题进行正确提问是十分重要的，要避免错误的提问，要防止对不利结果的选择性审查。缺少知识时必须寻求建议。经验很重要，但它不必是你自己的。决策过程最后、最重要的要素是判断。好的判断是一个人最基本的思维过程和道德标准的综合，是一种很高的能力。由于大多数评价情况处于灰色地带，不是纯黑的或纯白的，因此一个好的判断要能够清晰地理解情况的现实性。通常，一个决策会导致一个行为，而行为的轻重缓急常常分属以下四种情形：应该的、实际的、必需的、愿望的。

决策过程通常按照下述步骤顺序进行：①确定决策目标；②根据重要性对目标进行分类；③提出备选行为；④根据目标评估备选行为；⑤选择最有可能实现所有目标的备选行为形成意向决策；⑥探究意向决策在未来可能出现的不利结果；⑦采取其他行为阻止不利结果的产生，并确信所采取的行为能够实施，据此控制最终决策的效果。

决策模型包括以下六个基本要素。

(1) 备选行为，标识为 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 。例如，设计如图4-1所示汽车挡泥板时，设计者会考虑钢材(a_1)、铝材(a_2)、玻璃钢(a_3)。

(2) 自然状态，它是决策模型的环境。通常，这些条件是不受设计者控制的。例如，如果设计的挡泥板是抗盐蚀的，那么这种自然状态表示为不含盐(θ_1)、低盐度(θ_2)。

(3) 输出，是一个行为和一个自然状态结合的结果。

(4) 目标，是设计者想要达到的目的。

(5) 效用，是设计者对每个输出满意的程度。

(6) 知识状态，是能够与自然状态相吻合的确定程度，用概率表示。

根据知识状态，决策模型可以分为四类。

- 确定决策。每个行为都会引起一个概率为1的已知结果。
- 不确定决策。每个自然状态都有一个确定的发生概率。
- 风险决策。每个行为都可能会产生两个或者两个以上的结果，结果发生的概率是未知的。

● 冲突决策。自然状态被竞争者采取的行为改变，竞争者试图使目标函数最大化。这种类型的决策理论通常称为博弈论。

在确定决策中，决策者拥有评估需要的所有信息，同时他们拥



图4-1 汽车挡泥板实例

有在不同条件下必须做出决策的信息。此时，决策者仅仅需要认识清楚决策发生的情形，查验所有可能选择的结果。这里的挑战是所需信息的可得性。



例 4.1

确定决策

为了降低汽车挡泥板遭受路面盐的腐蚀作用，要选择最好的材料，在此为组合情况构建一个效用表格。可能的自然状态是路面条件 θ_1 ：无盐； θ_2 ：微盐； θ_3 ：高浓度盐。效用可以是一个广义的增益或者损益，所有的因素（如材料成本、制造成本、耐蚀性等）都已经转化到某个统一的度量。表 4-1 所示为材料选择决策损益表。注意，也可以选择增益来做效用表，此时该表称为收益矩阵。决策者只需要查看表中列的数值就可以做出正确的选择。检查表 4-1，可以得到结论：没有盐时，钢材是最好的材料（损益最低）；盐浓度适中时，铝材是最好的；盐浓度比较高时，玻璃钢是最好的。

表 4-1 材料选择决策损益表

备选行为	θ_1	θ_2	θ_3
a_1 ：钢材	1	4	10
a_2 ：铝材	3	2	4
a_3 ：玻璃钢	5	4	3

对不确定决策来说，每个自然状态出现的概率必须是可以估算的，只有这样才能确定每个备选项预期值的大小。



例 4.2

不确定决策

自然状态发生的概率 P_i 评估如下：

自然状态	θ_1	θ_2	θ_3
发生概率	0.1	0.5	0.4

对于表 4-1 中的三种材料来说，预期的损益值如下：

钢材： $E(a_1)=0.1 \times 1+0.5 \times 4+0.4 \times 10=6.1$

铝材： $E(a_2)=0.1 \times 3+0.5 \times 2+0.4 \times 4=2.9$

玻璃钢： $E(a_3)=0.1 \times 5+0.5 \times 4+0.4 \times 3=3.7$

因此，应选择铝材来制造汽车的挡泥板，因为它是所有效用损益中数值最小的。

风险决策假设的是自然状态发生的概率都是未知的。这时可建构一个用效用表达的基于不同决策规则的结果矩阵。例4.3和例4.4分别展示了最小化和最大化决策规则。



例 4.3

最小化决策规则

最小化决策规则是选择能使最小回报率增大的选项。处理效用损益时应该选择能使最大损益最小化的选项。参见表4-1，得到每个选项的最大损益为

钢材： $\theta_3=10$ ； 铝材： $\theta_2=4$ ； 玻璃钢： $\theta_1=5$

因此，最小化决策规则要求选择铝材，它是最大损益中最小的，即最好的结果是选择在最糟糕条件下引起最小损失的选项。



例 4.4

最大化决策规则

与最小化决策规则相反的情况是最大化决策规则，这个规则要求选择能使最大价值最大化的选项。这是一个乐观的方法，它假设的是所有结果中最好的结果。对损益表4-1来说，将从最小损益中进行选择。因为

钢材： $\theta_1=1$ ； 铝材： $\theta_2=2$ ； 玻璃钢： $\theta_3=3$

所以基于最大化决策规则的选择是钢材，它拥有最好结果中最小的损益。

应用最小化决策规则意味着决策者是悲观主义者。与此相反，应用最大化决策规则的决策者是乐观主义者。没有一个决策规则是完美的，消极的人过于谨慎，而积极的人又过于大胆，因此人们想要一个介于两者之间的决策规则。组合规则是通过应用乐观指数 α 将两者合并得到的，决策者可以衡量组合规则中悲观元素与乐观元素的相对值。



例 4.5

组合决策规则

将组合决策规则的乐观指数定为0.3，建立表4-2。在“乐观”的列中填入每个选项的最小损益，在“悲观”的列中填入每个选项的最大损益，然后让每个数值乘以 α 或 $1-\alpha$ 后再相加，获得如表4-2中的“组合损益”。快速查表，铝材又一次被选中作为汽车挡泥板的材料。

表4-2 组合决策损益估算表 ($\alpha=0.3$)

备选行为	乐观	悲观	组合损益
钢材	0.3×1	0.7×10	7.3
铝材	0.3×2	0.7×4	3.4
玻璃钢	0.3×3	0.7×5	4.4

条件不同决策自然也不同。表4-1表明,存在一种自然状态,可以根据最佳结果来合理使用每一种材料。由于汽车使用的自然状态不同,决策者必须确定选择挡泥板材料的策略。上述几个例子展示的不同决策规则包含了决策者对不确定性和风险的考虑。



拓展阅读

决策树

决策树是一种在不确定条件下支持决策的图形化和数学化方法。当必须连续做出一系列决策,并且每个结果的概率是已知的或可估时,决策树结构是一种常用的技术方法。图4-2所示为某电

子公司项目研发的决策树。在现有的研究基础上,项目负责人预测,历时两年、耗资 4×10^6 元的新产品将上市。

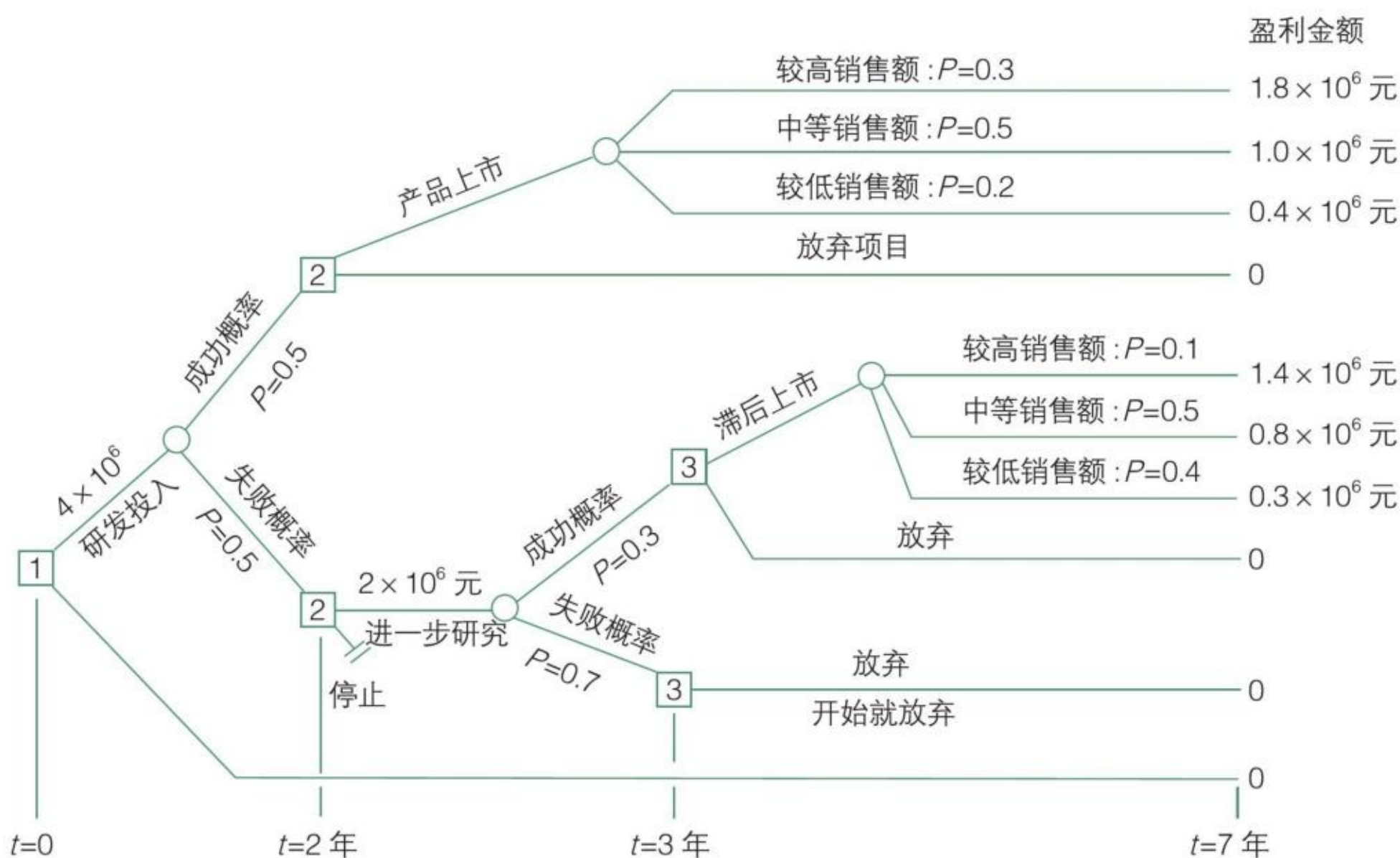


图4-2 某电子公司项目研发的决策树

二、评价过程

决策是根据每个可选方案的结果确定方案的过程。评价是根据一些标准评估备选方案的过程。通过比较评分或排名，从而做出最优决策。

绝对比较是把设计方案直接与诸如工程设计任务书或者设计法规这些固定且已知的需求进行比较。例如，检查卫星设计备选方案中质量是否在设计任务书规定的界限内。相对比较是在不同方案之间基于一定标准进行的相互比较。例如，如果卫星的最优设计是质量最小的，那么设计团队就需要估算各备选方案里的质量，按质量衡量的最合适的备选方案是估算结果最小的方案，这是相对比较。

如果备选方案的某些方面不符合选择要求，那么针对这样的方案进行评价是没有意义的。开始评价前，首先对方案进行一系列的绝对比较。例如，基于功能可行性判断的评价、基于技术准备的评价、基于工程特性约束阈值水平的评价。初步筛选是设计团队就每个备选方案的可行性进行整体评价，结果分为：①不可行；②有条件可行；③可行。这些判断的可靠性强烈地取决于设计团队的专业知识。

三、决策矩阵法

决策矩阵法是一个从备选方案中识别出最有竞争性设计方案的有效方法。它针对每条准则把每个备选方案与一个基准方案进行比较，判断本方案是更好、更糟、还是一样。备选方案相对比较的选择矩阵是由团队创建的，通常需要经过多轮迭代考察和凝练才能完成。



拓展阅读

决策矩阵法选择概念（方案）的步骤

（1）选择概念评价准则。准则选择由质量功能配置开始。如果设计概念能够很好地生成，那么准则将基于质量屋列上的工程特性。在形成最终准则清单时，重点考虑每条准则能否区分设计概念间的差异。一条准则可能很重要，但是每个概念都能很好地满足它，那么这条准则将无助于

概念的选择，应放在概念选择矩阵外。概念设计阶段的信息非常有限，因此应该避免给每条准则加一个权重，但应按优先权递减顺序排列。

（2）构建决策矩阵。准则作为矩阵的行标题，备选概念作为矩阵的列标题。再强调一次，不同设计概念要在同一准则下进行比较。

(3) 阐明设计概念。这一步做好了,会使所有团队成员对每个概念都达到一定层次上的共同理解,从而建立起团队对每个概念的所有权。如果团队成员对这些概念有不同程度的理解,那么最终决策可能会被政治协商所左右。团队对概念的讨论往往是一次创造性经历。讨论过程中常常会涌现新的想法,用来改进概念或者提出全新的概念,应该将结果添加到概念集中。决策矩阵法的一个主要优势是能够帮助团队深入理解如何更好地满足设计需求。

(4) 选择基准概念。第一轮要选择一个概念作为基准概念,作为其他概念与之比较的参考。基准概念的选择非常关键。一个糟糕的基准会使所有概念都是正面的,对决策造成不必要的延迟。作为基准概念的列将会相应地标出基准数据。可能的话,可以选择市场上的标杆产品。

(5) 完成矩阵单元。每个概念都逐个与基准概念进行比较。每次比较,都问同样的问题,这个概念相对基准来说是优(+)、糟糕(-)、还是等效(S),然后把相应的符号填入矩阵的对应单元中。在填写每个单元时,应该进行简洁的、富有建设性的讨论。发散性思维能够帮助团队对设计问题进行深入思考。长时间的讨论通常是因为信息不充分,应及时安排成员来提供所需信息。

(6) 评价分级。一旦完成比较矩阵,对每个概念来说,+、-的总和就确定了。对这些评分不用太过定量。在没有进一步检查之前,对于是否要抛弃一个负值较多的概念,一定要谨慎小心。概念中有积极意义的特性也许只是一个能被其他概念应用的“胚胎”。对于总分比较高的概念,要确定它们的优势和劣势。如果对于某条准则,很多概念都得到了同样的分数,那么就需要检查一下,看看准则是否描述清楚了,或者各个概念是否被一致地评价了。如果这条准则确实很重要,那么就值得花时间来生成更好的概念,或者使准则更加清晰。

(7) 建立新基准并返回矩阵。通常选择在第一轮评价中分数最高的概念作为新的基准,重新比较并填写矩阵。第二轮比较中,要消除那些得分较低的概念。本轮比较的主要目的不是核实第一轮选择的有效性,而是通过深入领悟来激发进一步的创造性。运用不同的基准会给每一次比较提供不同的看法,有助于澄清不同概念之间的相对优势和劣势。

(8) 检查已选概念的改进机会。一旦选定了最优概念,就要考虑比基准差的每一条准则。通过不断对劣势要素提出问题,新的手段就会出现,负分会变成正分。问题的答案通常会改进某些设计并得到一个最优的设计概念。

在应用决策矩阵法时,很多人没有意识到:创建矩阵所得到的评价分数的重要性弱于团队讨论对问题和概念(方案)的深入理解。创建矩阵图是集中的团队活动,在这个过程中常常会产生改进的概念(方案)。

加权决策矩阵法是通过带有加权系数的设计准则进行排序、对每个概念(方案)满足该设计准则的程度进行评分来实现竞争性的评价。要完成这些工作,需要把根据不同设计准则获得的一系列权重数值转换成具有一致性的权重。在表达满足设计准则程度的各种方法中,最简单的是点标度法。如表4-3所示,5点法通常在准则知识不够详细时应用,11点法主要在信息比较完善时应用。

表4-3 设计方案评价的点标度法

11点标度	说明	5点标度	说明
0	完全无用的方案	0	不充分
1	非常不充分的方案		
2	弱方案	1	弱
3	差方案		
4	可以容忍的方案	2	满足
5	满意的方案		
6	较少缺点的好方案	3	好
7	好方案		
8	非常好的方案		
9	优秀（超出需求）方案	4	优秀
10	理想方案		

确定准则的加权系数是一个不太准确的过程。直观地讲，一组有效的加权系数的和应等于1。确定加权系数可以采用系统化方法，其中的三种方法如下。

- 直接分配。团队根据准则的重要性把100分分配给不同的准则，用每个准则的分数除以100得到标准化的加权系数。这种方法主要适用于有经验的设计团队。

- 目标树。加权系数可以通过目标树来确定。只有在同一层次进行比较时，才能做出关于优先级的好决策，例如苹果只能与苹果比较，橘子只能与橘子比较。这个方法也依赖于对重要设计标准的一些经验。

- 层次分析法。层次分析法的选择准则是多目标的，具有自然的层次结构或者定性和定量的估量。它是通过计算矩阵的主特征向量来获得合理的加权系数，便于进行一致的成对比较，是一种确定加权系数随机性最小、计算最省时的方法。



例 4.6

如图4-3所示的大型起重机吊钩，在多个行业中被广泛使用。例如，钢厂用来吊装传送熔融钢液包、装配车间用来吊装传送大型零部件，以及野外设备吊装等。设计提出的工艺概念有三个：用火焰切割钢板和焊接制造、用火焰切割钢板和铆接制造、整体铸钢吊钩。

第一步是提出概念评估依据的设计准则，这类信息通常来源于设计任务书。设计准则包括以下六项：材料成本、制造成本、生产周期、耐久性、可靠性和可维修性。



图4-3 起重机吊钩实例

第二步是确定每个设计准则的加权系数。首先构建层次目标树（见图4-4），然后基于工程判断直接分配加权系数。使用目标树进行加权系数分配的好处是该问题可以分为两层。每层中每个项目的权重之和必须是1。在第一层中，给定成本的权重是0.6，服役质量的权重则是0.4。在下一层中，与同时确定六个设计准则的加权系数相比较，确定材料成本、制造成本和可维修性三者间的权重更容易。为了获得下层的加权系数，需要乘以上层目标的权重，因此，材料成本的加权系数为 $0.3 \times 0.6 \times 1.0 = 0.18$ 。

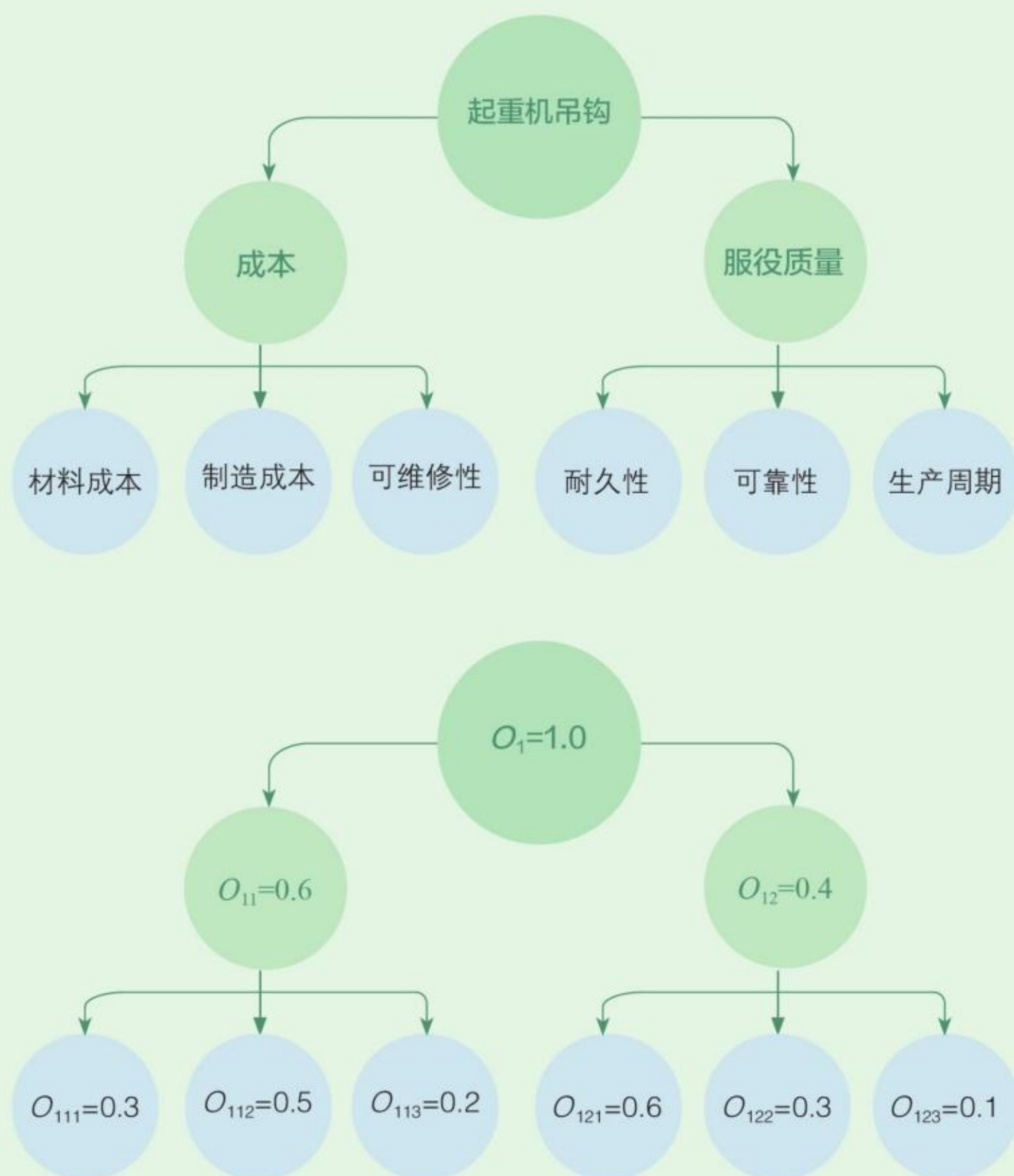


图4-4 起重机吊钩设计评价的层次目标树

起重机吊钩的加权决策矩阵见表4-4，加权系数由图4-4确定。每个概念方案对每个准则的评分采用表4-3的11点法。表4-4所描述的分数建立在团队对工艺设计的适应性评价基础上。每个概念对应准则的等级分由评价得分乘以相应的加权系数得到。对于焊接钢板材料成本来说，等级分是 $0.18 \times 8 = 1.44$ ，概念的总分是评价列各等级分之和。加权决策矩阵显示，最好的设计概念是铆接钢板的起重机吊钩。

表4-4 起重机吊钩的加权决策矩阵

设计准则	权重	单位	焊接钢板			铆接钢板			整体铸钢		
			量级	评价	等级分	量级	评价	等级分	量级	评价	等级分
材料成本	0.18	元/公斤	30	8	1.44	30	8	1.44	25	9	1.62
制造成本	0.30	元	500	7	2.10	400	9	2.70	600	4	1.20
可维修性	0.12	——	好	7	0.84	优秀	9	1.08	适当	5	0.60
耐久性	0.24	——	高	8	1.92	高	8	1.92	好	6	1.44
可靠性	0.12	——	好	7	0.84	优秀	9	1.08	适当	5	0.60
生产周期	0.04	小时	40	7	0.28	25	9	0.36	60	5	0.20
					7.42				8.58		

比较备选概念最简单的步骤是对每个概念进行等级分计算与求和，总分最大的概念为胜。应用决策矩阵法时需要仔细检查构成等级分的各个因素，看看哪些因素对结果有影响，这会为未来的设计指明研究方向。注意，决策矩阵的结果在很大程度上取决于准则的选定，要避免把评定等级绝对化。

设计 & 操作

1. 以小组为单位，构建电热水器、洗衣机等某一家电产品设计的目标树，并讨论确定不同设计准则的加权系数。
2. 针对便携式凳子设计的材料与加工工艺，运用决策矩阵法选出最佳方案。

第 2 节 时间进度管理



学习目标

初步掌握甘特图、关键路径法时间进度管理方法。

“时间就是金钱”是一句古老的商业格言。在激烈的市场竞争中，不再仅仅是大吃小，还有快吃慢。一个企业要保持市场竞争力，必须在尽可能短的时间内，将满足用户需求的高性价比产品投放市场。你知道有哪些方法和工具可以辅助工程项目的进度管理吗？

工程规划首先要确定一个项目的主要内容，明确各项内容的完成次序。时间进度安排即是对规划内容制订具体的工作日程安排。如今，使用计算机来处理工程项目的大量信息已司空见惯，然而，在各种规模的工程项目中，下列简单规划和进度安排方法仍然适用。

一、工作分解结构

工作分解结构是将整个项目细分成便于管理的工作单元以确保整个工作内容容易理解的一种方法。如表4-5所示是某小家电设计的工作分解结构，列出了每个设计阶段需要完成的工作任务。工作分解最好的方式是用可提交的成果来表示这些工作任务。这是因为在项目开始时目标比活动更容易被准确预测，同时，目标驱动还可以为工程师充分发挥聪明才智提供更大的施展空间。

制订工作分解结构分为三个阶段：①项目总体目标；②项目设计阶段；③每个设计阶段的预期成果。对于大型复杂项目，工作分解可以细至两个或两个以上的层次。当采取详细的分解层次时，会产生一份厚的报告，通常用叙述性的段落来描述工作任务。完成每项任务的时间通常用“人·周”来表示，例如两个人工作两周的时间是4人·周。常用的项目进度规划和管理工具有甘特图和关键路径法。

表4-5 某小家电设计的工作分解结构

小家电开发过程	时间/(人·周)
1.1 产品需求	
1.1.1 确定客户需求(市场调查)	4
1.1.2 进行标杆分析	2
1.1.3 建立和审批产品设计任务	2
1.2 概念生成	
1.2.1 提出备选概念	8
1.2.2 选择最适合的概念	2
1.3 实体设计	
1.3.1 确定产品架构	2
1.3.2 确定部件配置	5
1.3.3 材料选择、可制造性和可装配性设计	2
1.3.4 质量关键点鲁棒设计	4
1.3.5 可靠性与失效分析	2
1.4 详细设计	
1.4.1 子系统整体检查,公差分析设定	4
1.4.2 完成详细图样和材料清单	6
1.4.3 原型测试结果	8
1.4.4 设计完善	4
全部时间(如果按顺序完成)	55

二、甘特图

甘特图是最简单和使用最广泛的进度安排工具之一。将需要完成的任务按顺序在垂直轴上列出，水平方向的横条左端代表任务计划开始的时间，右端代表预期完成的时间。预计的完成时间是由开发团队凭借集体经验确定的。像建筑业、制造业等领域，可通过手册、计划表以及成本估算软件等来确定有关数据。

例如，某项目为在现有壳体内部安装一个新的热交换器原型并测试性能。如图4-5所示，该项目的甘特图表明设计沿着两条路径进行：①从壳体中移出内部材料并安装新的管路；②安装线路和器件。需要说明的是，从图4-5无法清晰了解某项任务的延期会对后续活动和工程总体产生哪些影响。

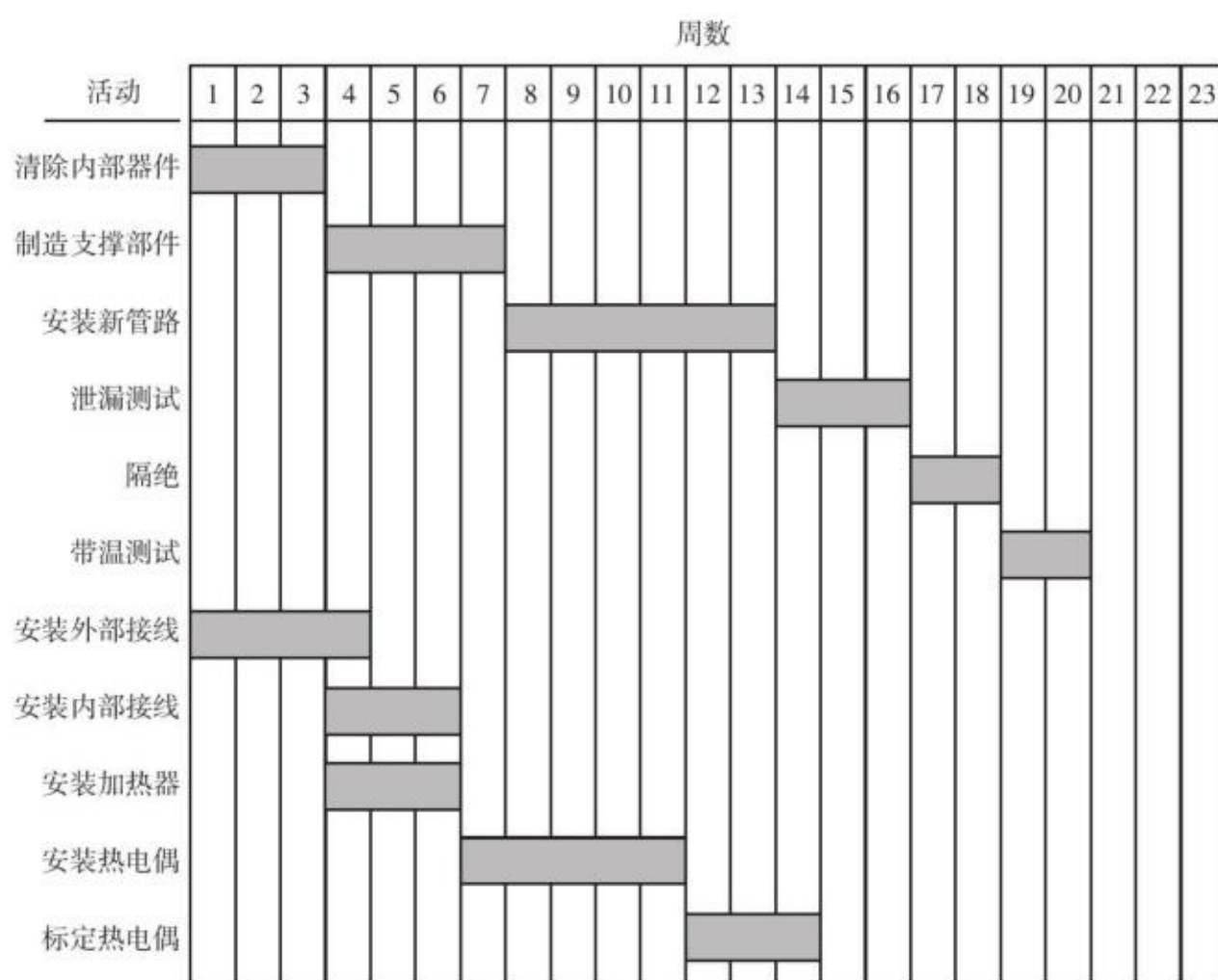


图4-5 热交换器原型安装并测试的甘特图

甘特图的另一个缺点是不易确定后续任务与先前任务的关系。对于图4-5所示的项目，一个任务对另外一个任务的依赖性可以通过图4-6所示的网络逻辑图表示。图4-6虽然清楚地表明了各个任务间的优先次序，但没有表明甘特图所显示出的时间对应关系。

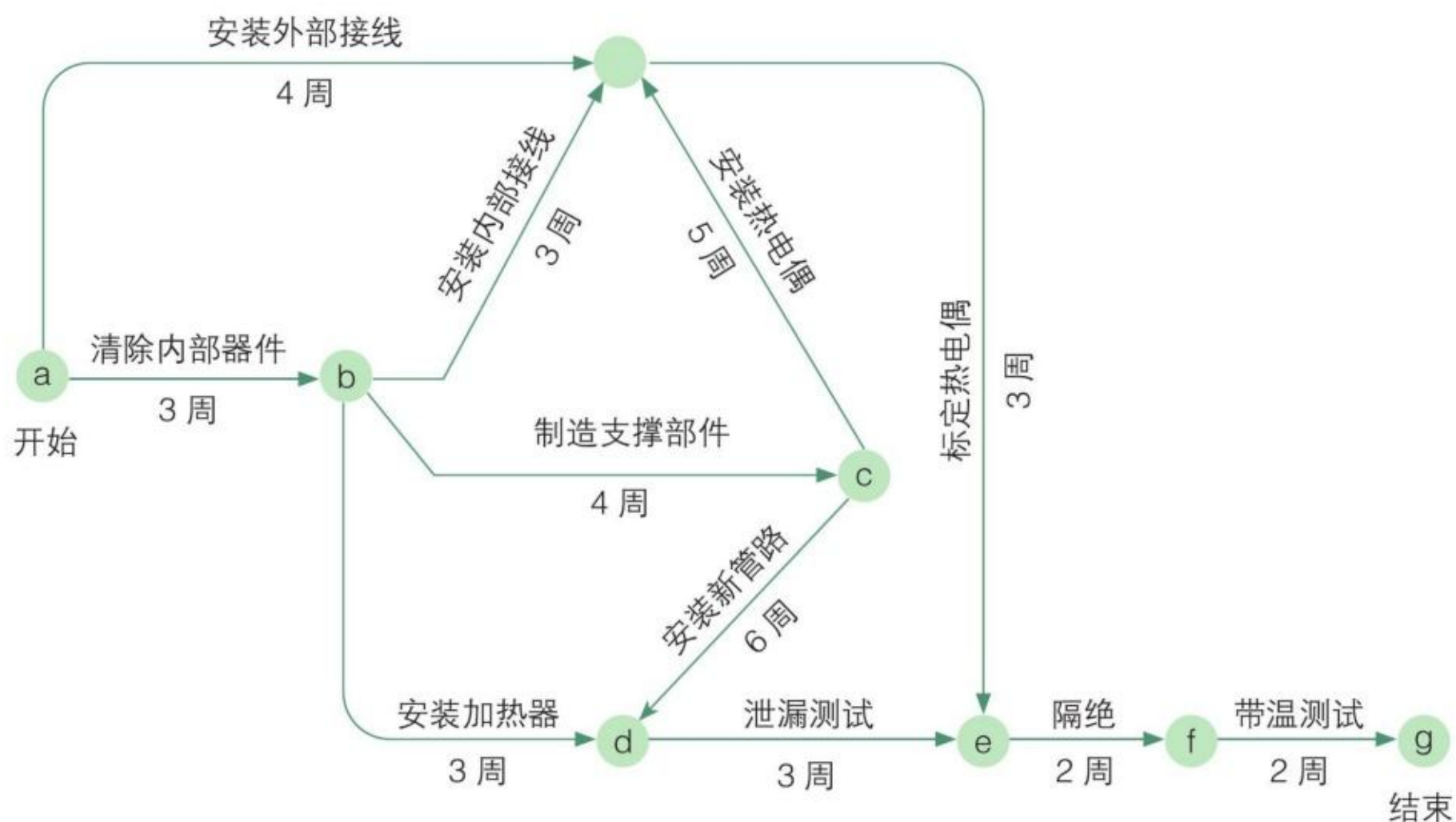


图4-6 热交换器原型安装并测试的网络逻辑图

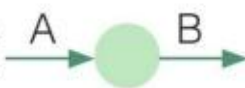
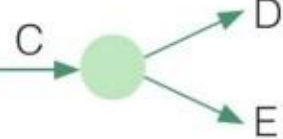
三、关键路径法

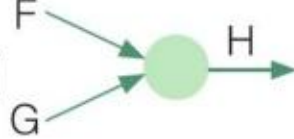
关键路径法是带箭头的网络逻辑图中的一种方法。重点放在确定项目计划从开始到结束的最长路径上，放在潜在瓶颈上，它决定了项目的总耗时间。主要定义和制作规则如下。

- 活动是用来完成项目某一部分的耗时的的工作。活动用带箭头的线段表示，箭头指向项目完成的进程方向。

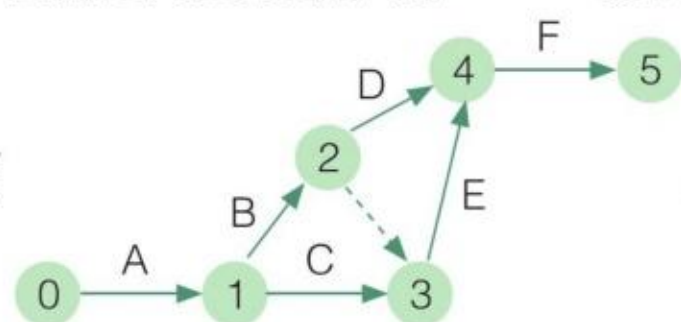
- 事件是一项活动的结束点也是另一项活动的起点，是工作完成的节点。关键路径图中的每一项事件都被两个活动分开。但假定事件没有消耗时间，用圆圈代表事件。

构建网络图的几点逻辑要求如下。

(1) 上一个事件没有响应，下一个活动就不能开始。图  表示 A 没有结束前 B 不能开始。同理，图  表示 C 没有结束前，D 和 E 不能开始。

(2) 事件前的每一个活动都完成后，它才能进行。图  表示 F 和 G 必须在 H 开始之前完成。

(3) 即使两个事件没有通过活动直接联系在一起，有时一个事件也依赖于另一个先于它的事件。关键路径图中，引入虚拟活动的概念来表示它们之间的联系，用 $----->$ 表示。虚拟活动不需要时间及成本，如图



所示，A 必须在 B 和 C 之前

完成，D 之前只需完成 B 而与 C 没有关系，B 和 C 必须在 E 之前完成，D 和 E 必须在 F 之前完成。

要找到最长的关键路径，还需要确定一些额外的参数：活动时间 (D)、最早开始时间 (ES)、最迟开始时间 (LS)、最早结束时间 ($EF = ES + D$)、最迟结束时间 ($LF = LS + D$)、总时差 ($TF = LS - ES$)。如果有多个路径，则计算 ES 和 LS 时选择最长的持续时间。关键路径上的活动时差为零。

热交换器原型安装并测试的网络逻辑图 (图 4-6) 可画成关键路径图 (图 4-7)。活动用大写的英文字母表示，活动时间在线下用周数表示。为了便于用计算机解决，节点处的事件用数字顺序编号。每项活动尾部的节点数字必须大于头部的节点数字。第一个活动的开始时间为项目的开始时间，后续活动的开始时间由前面活动的开始时间加上持续时间确定，具体见表 4-6。

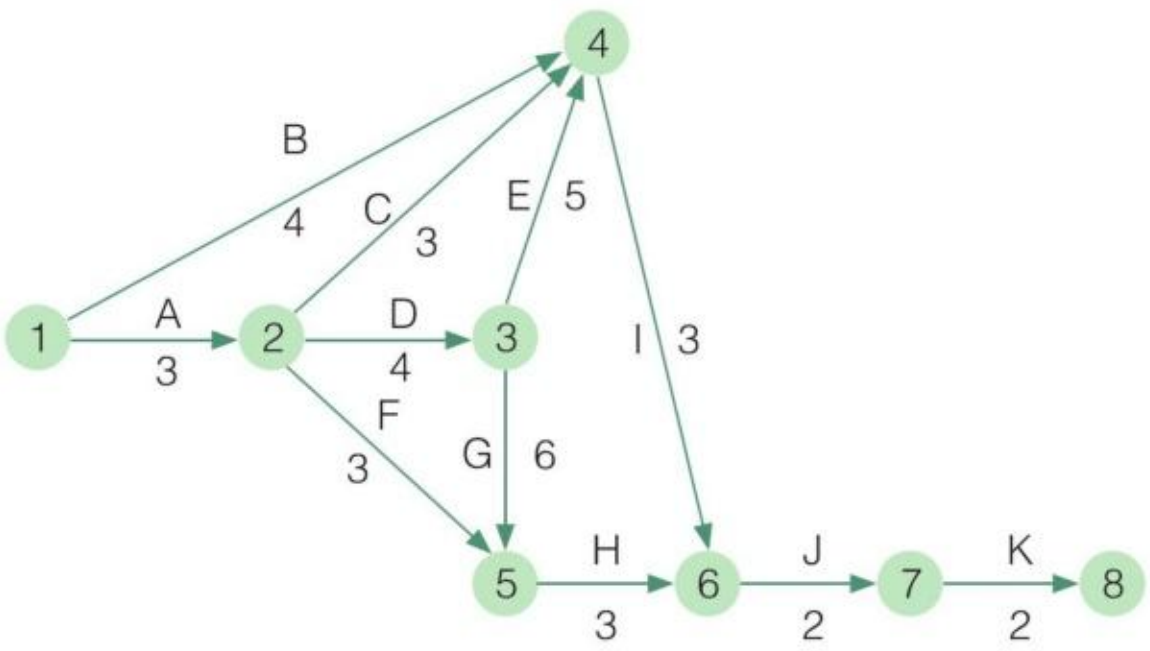


图4-7 热交换器原型测试的关键路径图

表4-6 根据图4-7计算的最早开始时间

事件	活动	最早开始时间	备注
1	A、B	0	起始点最早开始时间规定为零
2	C、D、F	3	$ES_2=ES_1+D=0+3=3$
3	E、G	7	$ES_3=ES_2+D=7$
4	I	12	$ES_4=ES_3+D=12$
5	H	13	$ES_5=ES_3+6=13$
6	J	16	$ES_6=ES_5+3=16$
7	K	18	
8	—	20	

表4-7 根据图4-7计算的最迟开始时间

事件	活动	最迟开始时间	事件	活动	最迟开始时间
8	—	20	5-2	F	10
8-7	K	18	4-3	E	8
7-6	J	16	4-2	C	10
6-5	H	13	4-1	B	9
6-4	I	13	3-2	D	3
5-3	G	7	2-1	A	0

最迟开始时间采用逆推法计算。从网络图终端向始端计算，即完成时间减去持续时间。计算结果在表4-7中列出，对于计算最迟开始时间，从同一个事件开始的每一项活动可能有不同的最迟开始时间，而从同一事件开始的所有活动都有同样的最早开始时间。

表4-8列出了总结结果，总时差是由最迟开始时间和最早开始时间的差值确定的。总时差是在不影响项目最后完成期限的前提下，活动可以延期的最长时间。当总时差为零时，意味着该活动为关键路径。表4-8中的关键路径活动为A-D-G-H-J-K。

表4-8 热交换器原型安装并测试项目时间管理计划参数

活动	活动内容	D/周	ES	LS	TF	活动	活动内容	D/周	ES	LS	TF
A	清除内部器件	3	0	0	0	G	安装新管路	6	7	7	0
B	安装外部接线	4	0	9	9	H	泄漏测试	3	13	13	0
C	安装内部接线	3	3	10	7	I	标定热电偶	3	12	13	1
D	制造支撑部件	4	3	3	0	J	隔绝	2	16	16	0
E	安装热电偶	5	7	8	1	K	带温测试	2	18	18	0
F	安装加热器	3	3	10	7						

每项活动的持续时间是最可能完成该项活动所需时间的估计值。所有的持续时间采用相同的单位表达，可以用小时、天或周。持续时间主要是根据类似项目的记录测算的，同时考虑涉及的人员与设备需求、法规限制和技术因素等。

进行项目时间进度规划时必须识别那些优先等级最高的活动，确保它们准时完成。通过向关键路径要时间、向非关键路径要资源，保证整个项目在最短时间内完成。



设计 & 操作

1. 画出表4-5所示的小家电设计任务的甘特图。

2. 画出你所在小组废弃物处理系统设计项目的时间进度甘特图和关键路径图。

第四章 工程决策与管理

87

仅供个人学习使用，未经授权不得另做他用

第 3 节 全面质量管理



学习目标

理解全面质量管理的理念，了解质量控制的基本方法。

20世纪80年代，许多美国和西欧制造商强烈感受到来自日本的高质量产品的威胁。通过对日本制造商夺取市场份额秘诀的疯狂探寻，调查人员最终发现的只是一个持久的全面质量管理体系，该系统利用简单的统计学工具，强调团队合作，关注消费者的满意度。进入21世纪后，我国政府把质量发展上升为兴国之道、强国之策。党的二十大提出加快建设制造强国、质量强国。加强全面质量管理，建设质量强国，对于不断增强我国经济创新力和竞争力，建设现代化经济体系，具有重要意义。思考一下：在工程设计阶段，如何贯彻质量意识？如何实施质量管理？

质量是人类生产生活的重要保障。人类社会发展历程中，每一次质量领域变革创新都促进了生产技术进步、提高了人民生活品质。质量是一个具有多重含义的概念。从用户角度看，质量是产品满足需求的程度；从产品角度看，质量是精确的、可测量的性能参数；从制造角度看，高质量等同于第一次就将产品做好；在工程设计中，质量是产品满足设计性能需求的程度。事实上，大多数产品缺陷源于产品规划设计阶段，而这其中80%的缺陷直到最终产品测试或投入使用后才被检测到。因此，从现场服务得到的信息可以为产品的再设计提供所需的数据。要保证并提高产品质量，就必须对影响质量的各种因素进行全面而系统的管理。

全面质量管理的一条经验是：一件产品获得高质量的最佳途径是把质量理念从产品设计之初就贯穿其中，并在整个制造过程中都遵循和贯彻这一理念。一条更进一步的经验是：产品质量的最大敌人是产品性能和制造过程中的可变性。通过鲁棒设计降低产品的可变性和制造过程的可变性，可以使产品性能达到近乎最优的状态。



近年来,有关质量问题的产品召回与安全事故隔三岔五就见诸公众。举例最近发生的质量召回或安全事故案例,讨论质量管理的重要性。重点讨论:质量为什么是设计出来的?高质量必须高成本吗?生命周期不同阶段质量管理的作用和角色是什么?

一、全面质量管理的基本原则

工程实践中,质量是管理学中一类广泛的基本原则。如今,工业界广泛接受的全面质量管理的14条基本原则如下。

(1) 树立坚定不移的目标并持之以恒地提高产品和服务的品质。以具有行业竞争优势、能提供就业岗位为目标。

(2) 采用新经济时代的价值体系。管理者必须在挑战面前保持清醒,必须明确责任并在变革中居于领导地位。

(3) 停止依靠审查制度来保证质量。将生产优质产品的理念纳入产品设计,并消除流水线上的检测。

(4) 停止仅仅基于价格对企业进行奖励的惯例。目标应该是使生命周期成本最小化,而不只是购置成本最小化。每个项目应只有一个供应商,创建与供应商忠诚可信的相互关系。

(5) 不断探究系统中的问题并寻求改进的途径。

(6) 建立现代职业培训体系。管理者与员工都应当了解统计学。

(7) 监管的目的应当是帮助工作人员和设备更好地完成工作。为工作人员提供工具和技术,使他们能够为自己工作的技艺感到自豪。

(8) 消除恐惧,鼓励双向交流,使每个人都能有效工作。

(9) 打破部门之间的障碍。研发、设计、销售、生产等部门必须作为一个团队进行工作。

(10) 消除对员工使用的量化指标、口号、标语海报。在造成质量和生产率下降的原因中,系统的失误所占比例为80%~85%,人工原因仅仅占15%~20%。

(11) 在工厂中消除作业定额,消除目标管理和数字管理,减少管理者与领导人员。

(12) 消除障碍,加强工作人员对制造工艺的自豪感。

(13) 建立与时俱进的教育和培训计划,使工作人员了解材料、方法和技术等方面最前沿的发展状况。

(14) 令公司中的每个人都为完成这一变革而努力,这不仅仅是管理者的责任,更是每个人的责任。

二、质量控制与质量保证

质量控制是指在工程设计和制造过程中为防止产品出现缺陷、保障产品安全所采取的措施。狭义地讲，质量控制是指在产品抽样或监测产品可变性时所采用的统计学技术。传统意义上的作用是监管原材料的质量、控制制造过程中零件的尺寸、消除生产线上有缺陷的零件以及保证产品的性能表现。随着对更严格的耐受水平、压缩的利润空间、法院对责任法更为严格的解读等因素重视程度的提高，质量控制问题已经变得更加突出。

质量保证与公司所有的措施有关，这些措施影响消费者对产品质量的满意程度，必须设立充分独立于制造部门的质量部门来保证质量。质量保证的一个重要方面是依靠现有标准对某一组织的质量系统进行审查。ISO 9001质量管理体系标准是国际公认的质量管理优良方法，该项标准通过认证手段在全世界广泛应用，目前已有超过100万家组织获得认证，从而该项标准成为国际标准化组织（ISO）发布的最具影响力的标准之一。质量管理体系认证通过行业定位、技术评价、质量诊断、能力建设等多样化服务活动，推动国际先进质量管理方法的应用，开展对全员、全过程、全要素、全生命周期的质量管理，有效增强企业管理能力，提升产品和服务质量；有效促进供需对接，提高技术能力水平；有效开展持续培训，提升人员素质和质量意识。

全面质量管理以客户为中心，采用数据驱动的方法解决问题；强调全员参与、持续完善，随着时间推移，很多小的改进最终促成了大进步。产品质量形成于工程设计，保证于制造加工，实现于使用。当每一位员工都对工作负责时，就能够及时发现并纠正出现的差错，制造出满足质量标准的产品，提供高质量的服务，从而实现工程设计对质量的控制意图，稳定持续地进行生产。



拓展阅读

统计学控制图表质量控制

现代工程设计的首要理念是在产品设计中涵盖质量要求，因为生产制造过程中无法弥补设计错误。经过鲁棒设计的产品即使在极端环境下使用也能满足用户需求。统计学控制图表能显示过程的可变性是否处于合理的范围，工艺过程能力

指数能反映所选择的公差范围是否易于通过特定的制造工艺完成，在保障质量和鲁棒性方面起着重要作用。注意，产品可变性与制造成本之间存在着某种经济平衡。

统计学控制图表的使用基于以下观点，即每

个制造过程受两种变化源的影响：随机变化和预期变化。随机变化起源于操作过程中的大量不可控因素，这些因素单独来看都不是很重要，它们是可预期但并不可控的变化；预期变化是可以被检测和控制的一种变化，这归因于特殊因素，例如操作者培训欠缺、生产工具破旧等。统计学控

制图表是一种重要的用来检测预期变化的质量控制工具。如果一个样本显示了一种非典型行为，那么可以假设它是由某种特殊因素导致的，而且这种因素包含在最可疑因素列表中。统计学控制图表还可以持续识别和评估工艺趋势，用于衡量工艺稳定性。

思考 & 展示

全面质量管理的实施过程是一个质量计划制订与组织实施的过程，按照计划—执行—检查—处理四个阶段管理循环的方式进行。该管理方式各个阶段有哪些活动？任选工程设计的某一因素，分组展示四阶段质量管理过程的活动要点。

第4节 生命周期成本管理



学习目标

体验成本估算，理解生命周期成本的概念。

工程设计过程中做出的决策决定了产品70%~80%的成本。因此，掌握成本评估的基本知识对得到高性能、低成本的设计至关重要。在竞争日趋激烈的全球市场上，想要保住市场份额，不仅需要工程师掌握成本构成和核算方面的知识，还需要了解如何应用新技术降低成本。

任何工程产品，其成本增加都始于概念设计阶段，贯穿于实体设计和详细设计过程。只有工程师清楚地了解成本，才能更好地进行工程设计，在功能等同的可选方案中，低成本的设计通常会在自由市场环境下取得成功。

成本评估通常用于以下几个方面：①为确定产品售价、产品报价、维修报价等提供必要的参考信息；②为产品制造确定最经济的材料和工艺；③为成本削减计划奠定基础；④为控制成本的产品性能确定标准；⑤为新产品的盈利估算提供输入信息。

成本评估是一项十分细致的活动。虽然成本评估需要遵循特定组织特有的高度专业化和标准化的程序，但是下述有关成本的概念仍具有通用性。

一、生产成本构成

工程产品的成本构成有多种分类方法，例如有直接成本和间接成本之分、固定成本和可变成本之分、产品成本和期间成本之分等。工程产品的直接成本是与特定产品单元的加工直接相关的成本，例如原料成本、直接劳动成本、质量控制人员工资、知识产权许可费用、包装和存储成本、废品和损坏成本等是直接成本。当广告费用可以分配给某个特定的产品或产品线时，它也是一种直接成本，但

不是可变成本。间接成本不与任何特定的产品直接相关，例如厂房租金、水电费、资产折旧费、资本投资和利息、财产税、保险费、营业运行、行政管理费、销售费、运输和库存费、技术服务费等都属于间接成本。直接成本与间接成本的界限通常比较模糊。例如，如果某台机器仅用于生产单一产品，则维修费视为直接成本；如果它用于生产多种产品，维修费则是间接成本。

图4-8显示了构成销售价格的成本要素。直接材料成本、直接劳动成本构成了初始成本；初始成本加上照明、动力、维修、供给、工厂间接劳动等工厂费用构成了工厂成本；工厂成本加上资产折旧、工程开支、税收、职工工资、采购费等一般固定成本构成了制造成本；制造成本加上销售费用构成了总成本；总成本加上利润构成了销售价格。

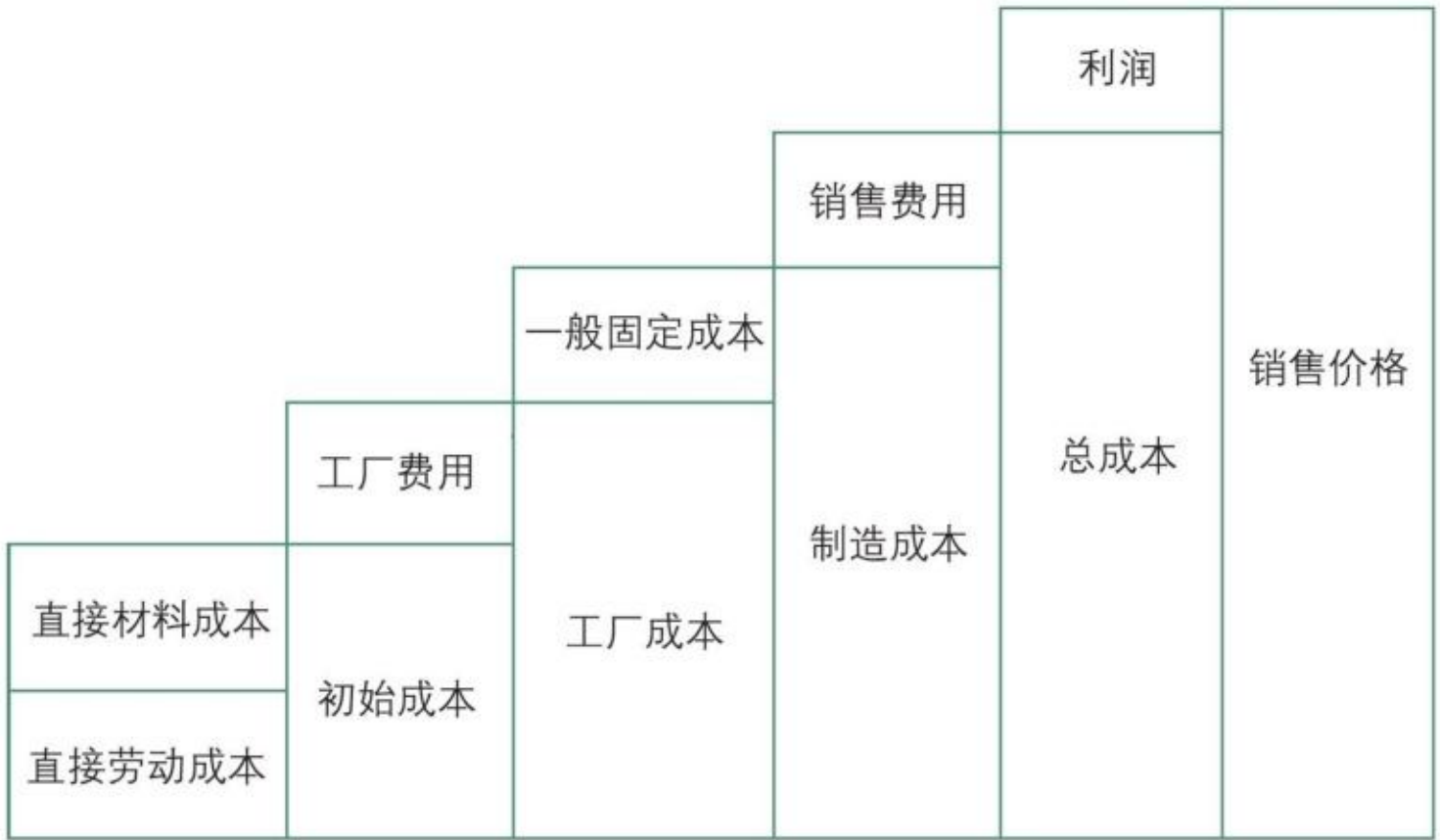


图4-8 构成销售价格的成本要素

盈亏平衡点是销售额与成本平衡时的销售量或生产量。运营产量超过盈亏平衡点意味着盈利，运营产量低于盈亏平衡点意味着亏损。

思考 & 练习

- 1. 回想一下：人们是怎样购买手机的？是怎样购买家用汽车的？从成本的角度看，买便宜的产品划算还是买贵的产品划算？从设计、外观、可靠性、质量、价格等要素出发，你是如何确定性价比的？
- 2. 公司选择自行制造零部件还是向供应商采购零部件的决定因素是成本。探究影响制造—购买决策成本动因的因素。



作业成本分析法

传统成本核算体系中，通常是采用直接工时或其他一些单位化方法将间接成本分配给产品。在生产率大幅提高后，传统的成本核算方法不能准确计算出间接成本，偏差的产生与计算方式有关。例如，新产品的研发费用来源于现有产品，越复杂的产品需要越多的研发投入，从而需要生产更多的现有产品。

作业成本分析法是一种分配间接成本的方法。与将成本分配到直接工时或者机器运行时间等参考基准不同，作业成本分析法认为产品成本是由设计、制造、销售、交付和服务等作业引起的。反过来，这些作业通过工程设计、生产规划、设备安装、产品包装和运输等支持服务而产生成本。为将作业成本分析法付诸实施，必须确

定支持部门开展的主要作业及其作业成本动因。典型的作业成本动因包括工程设计工时、测试工时、出货订单数量、已签约采购订单数量等。

作业成本分析法因其更为精确的成本数据，使得基于产品的决策得以改进。通过将财务成本与作业联系起来，作业成本分析法为质量等无财务指标的性能提供了成本信息。计算机辅助制造是应用作业成本分析法的好例子，因为它对技术支持要求较高，直接劳动成本低。作业成本分析法比传统成本核算方法需要更多的工作量，使用计算机收集、处理成本数据可以减少工作量。应用作业成本分析法的一大优势是该方法所指向的间接成本领域可以大幅降低成本。

二、生命周期成本

生命周期成本是与产品整个生命周期有关的成本。产品的拥有成本是生命周期成本的传统组成部分，它包括产品售价、交易税费、运行成本、维护费用、备件成本、操作培训费用等部分。其中，产品售价常常取决于订购量，对于大订单，卖家一般会乐于减少利润，促成出售。在此，一个典型问题是：高价买一个运营维护成本低的产品更经济，还是低价买一个运营维护成本高的产品更经济？生命周期成本法用更仔细的分析来评估所有相关的成本，无论是现在的还是未来的成本。

由于维持军事设备所需的成本常常高达购置成本的2~20倍，因此生命周期成本最早在军事采购领域得到广泛提倡，用于比较相互竞争的武器系统。现在，生命周期成本已经与生命周期内其他费用的评估结合在一起，包括生产和服务过程中能源消耗和环境污染治理费用，以及产品达到使用寿命后的退役费用。涵盖污染治理和处置费用的扩展成本模型超越了传统模型的界限，将引导设计工程师做出更佳的权衡决策。

产品生命周期循环如图4-9所示，该图强调了那些曾经被忽视的社会成本。在工程设计阶段，实际投入的费用仅占生命周期成本

的一小部分，但设计中的投入却可降低产品生命周期中的大部分成本，例如：通过使用耐用材料和可靠零部件可减少维修次数，延长使用寿命，降低运营耗费；通过再制造、材料循环再用等设计可降低生命周期成本。此外，在设计阶段做出更改或修正，其成本约是制造过程中的十分之一。

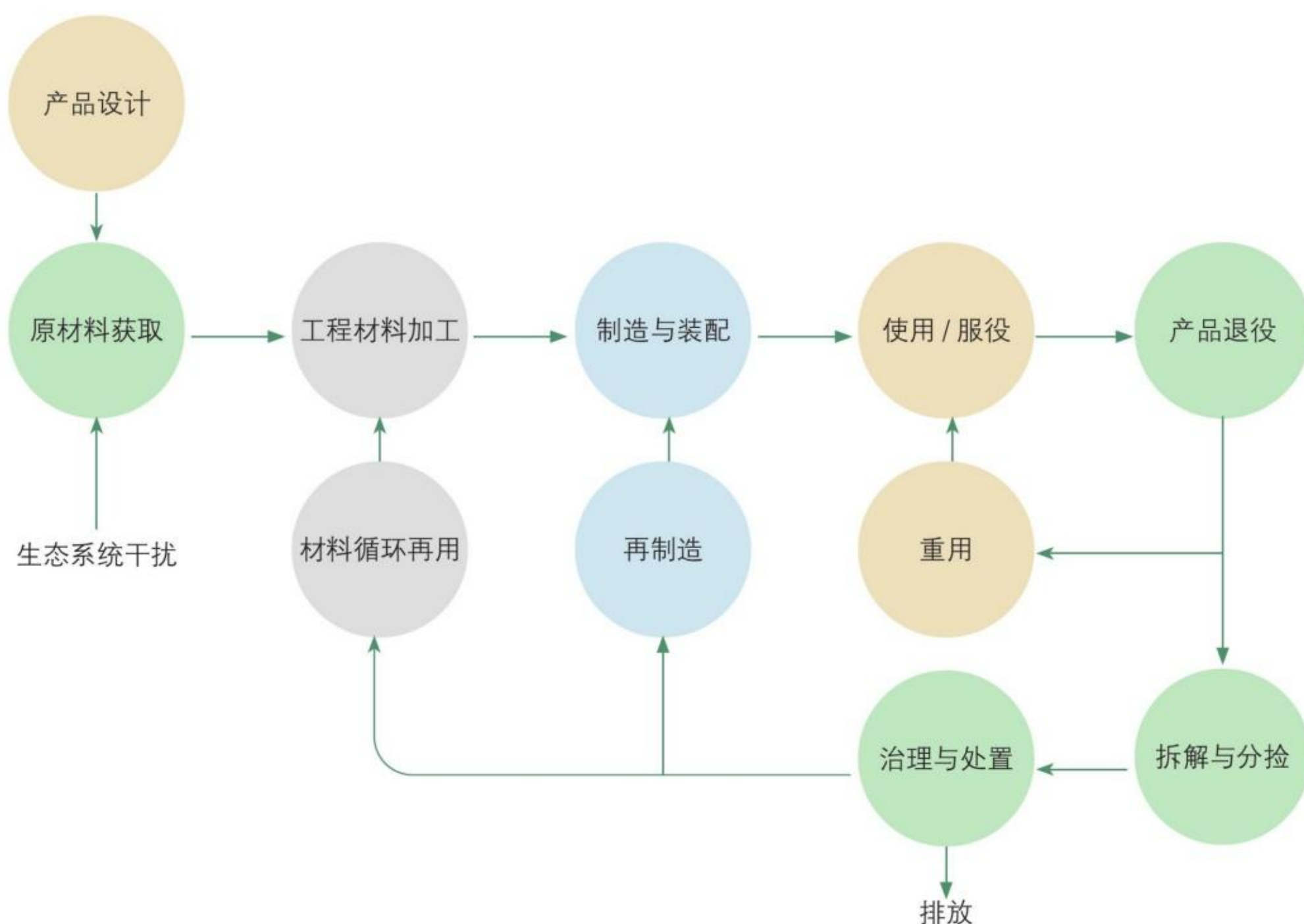


图4-9 产品生命周期循环

生命周期成本旨在获取从设计到退役全生命周期内与产品相关的全部成本。随着可持续经济与社会发展的理念广泛传播，生命周期成本已从最初只注重产品在使用过程中产生的费用过渡到广泛关注产品在环境和能源方面的社会成本。



设计 & 操作

选择桥梁建造、房屋装修、城市公交系统等工程项目，分组讨论它们包含哪些工程决策，进行生命周期成本估算。探究工程设计中权衡技术性能与成本的方法和策略。



固体废弃物处理工程系统是一个涉及万千垃圾处理从业人员、家庭、企事业单位、政府和生态环境的技术-社会工程系统，其设计和决策不仅仅是工程设计团队的事。大家一起来进行角色扮演，体验工程决策中工程师、政府、施工方、民众等各方的关系和立场，体会其中的系统思维与工程思维。

全班同学一起采用决策矩阵法，基于技术可行性（适用性、工艺、安全性、作业有效性、维修要求），环境可行性（资源回收可能性、填埋场要求、填埋场建筑材料可用性、大气污染防治、水污染防治、土壤污染防治、有害物防治、生态稳定性、当地公众认可情况）和工程成本等准则，对各小组固体废弃物处理工程系统设计方案进行评价，并对所选择的最佳设计方案进行完善。



本章小结

工程设计有不同的决策模型，基于相对比较的决策矩阵法不仅能够对多种设计方案进行最优选择，而且能够帮助设计团队达成对设计方案的一致理解和共同所有权，帮助设计团队深入理解如何更好地满足用户需求。时间管理的甘特图可以清楚地显示任务进度，而关键路径法能够规划工程任务的最短工期。产品质量形成于工程设计，以客户为中心、全员参与、持续改进的全面质量管理有利于稳定地生产出高质量的工程产品。工程设计阶段需要进行成本评估，只有关注生命周期成本才能实现工程设计的经济、社会、生态效益的协调与平衡。

本章学习评价表

实践项目	评价标准	评价方式		
		自评	互评	师评
决策评价	决策模型选择合理、评价准则适用、决策方法运用正确			
进度规划	方法运用准确、具有效率意识			
质量管理	具有质量意识、全面质量理念			
成本评估	成本构成因素合理、具有生命周期成本理念、降低成本方法有效			

等级标准：A——优秀，B——良好，C——合格，D——待改进。

后 记

本册教科书根据教育部颁布的《普通高中通用技术课程标准（2017年版）》编写，2020年经国家教材委员会专家委员会审核通过。

编写过程中，上海市通用技术教学研究基地（上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地）及基地所在单位华东师范大学等单位给予了大力支持。

在此感谢所有为本套教科书编写提出修改意见，提供过帮助与支持的单位以及专家、学者、教师和社会各界朋友！

本册教科书投入使用后，我们根据各方意见作了修订，真诚希望广大师生和家长继续提出宝贵意见。

联系方式

电 话：010-58758033

电子邮箱：jcfk@pep.com.cn

编者



PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU
TONGYONG JISHU



绿色印刷产品

ISBN 978-7-107-36808-0



9 787107 368080 >