



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

轻量化手册 ①

HANDBUCH LEICHTBAU

轻量化

产品开发过程与生命周期评价

[德]弗兰克·亨宁 (Frank Henning) 主编
[德]埃尔韦拉·穆勒 (Elvira Moeller)
北京永利信息技术有限公司 译
陈瑶 审



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

轻量化手册 ①

HANDBUCH LEICHTBAU

轻量化

产品开发过程与生命周期评价

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

轻量化产品开发过程与生命周期评价 / (德) 亨宁, (德) 穆勒主编, 北京永利信息技术有限公司译. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 3

(轻量化手册; 1)

ISBN 978-7-5640-9237-5

I. ①轻… II. ①亨… ②穆… ③北… III. ①汽车轻量化-研究 IV. ①U462.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 166118 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2014-0361 号

Copyright © 2011 Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

All rights reserved.

Authorized translation from the original German language edition
published by Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 11.25

字 数 / 220 千字

版 次 / 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 88.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 孟祥敬

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

轻量化是一种发展战略的实施,旨在通过一个系统的最小质量,在给定的技术边界条件下实现所需的功能。在整个产品生命周期内还应确保系统的可靠性。轻量化不仅可减轻系统的重量,还可提高整个系统的效率。轻量化需要一个整体的、跨学科的方法,它可分为方法、材料和生产等领域。为了高效地实现轻量化,工程师们必须具有这些领域的全面知识。高效的轻量化解决方案不仅取决于技术要求,也与经济、环境和社会的边界条件相关。因此,高效的轻量化绝不仅仅是单纯的重量最小化、一种设计原理或一种低密度材料而已,而是需要对边界条件进行明确定义,以及进行系统性的整体考虑。未来的挑战主要在于对不同轻量化材料的优化和组合,从而实现轻量化的、经济上可行的系统,材料的优化和组合可以通过产品集成混合或通过随后对混合整体系统添加单个部件实现。在此,在可采用的加工和连接技术下,在考虑环境影响以及由此得出的结构措施的情况下,还应特别注意产品生命周期中不同的材料性能和材料间的相互作用。根据行业的不同,轻量化也具有不同的经济施展空间,在材料选择时其负责限定与材料数量相关的生产技术。

为了以实践为导向来编写这个复杂的课题,本套手册按价值创新流程进行章节划分:从轻量化组件和系统的产品形成,到各种与轻量化相关的结构材料,它们都是直接与生产相关的,这些材料还可以在制造工艺,后处理和连接技术等方面进行细分,另外还有对轻量化部件和结构的评估以及生命周期的评价方法。

《轻量化手册1 轻量化产品开发过程与生命周期评价》包含两个部分。第一部分介绍了集成产品形成模型和相关的生命周期解决方案,从而描述了产品形成过程及其支持的方法。这些流程的特点是具有面向目标系统的结构,且标准化的基本活动都有单个并行的和顺序的结构化序列。在此要感谢阿尔伯特·阿尔伯斯(Albert Albers)教授,其为本部分付出了很多努力,本部分由他和他的同事们合作完成。第二个部分介绍了对于轻量化来说极为重要的生命周期评估和所使用的方法。所谓的生命周期分析包括在产品生命周期内沿价值链对轻量化系统的整体考虑以及评估,因此也得出了技术、生态、经济和社会方面的有意义的结论。

《轻量化手册2 轻量化材料和属性》介绍了材料选择方面的相关轻量化材料和系统方法。针对个别材料的章节包含了材料的概况信息和特性比较以及许多特殊说明和应用示例,这些示例涉及作为轻量化材料的适用性情况。德国经济三分之二的创新都基

于材料创新,尽管这些成就通常不是公众的关注焦点。本部分要特别感谢凯·威德曼(Kay Weidenmann)博士,他不仅对本部分的各方面事宜进行了协调,还对这部分内容做了很多实质性的贡献。如果没有他的出色工作,本部分肯定不是我们看到的这样。

《轻量化手册3 轻量化加工工艺——成型,加工和处理》主要涉及轻量化的制造工艺,轻量化产品和材料的成形、处理和加工。制造工艺往往是轻量化部件经济生产的关键,且是方法、材料和产品交互范围的系统方法的重要组成部分。除了相关轻量化材料的加工外,分离和混合工艺等也是重点。在此向沃尔克·舒尔茨(Volker Schulze)教授表示感谢,他对本部分内容进行了协调。

《轻量化手册4 轻量化结构连接技术》涉及与连接技术相关的对于轻量化技术来说很重要的课题,这些课题分为五种。最古老的连接工艺是机械连接,现在这种工艺重新变得越来越重要。由于放弃了辅助连接件,因此对于轻量化来说,通过成形进行连接是很重要的。在钣金加工行业中最广泛使用的连接工艺是在良好的经济性下具有较高工艺兼容性的热连接。对于多材料设计中的混合结构来说,粘接,即化学连接,起到越来越大的作用。组合连接工艺,也称为混合连接,其结合了各种工艺的优点,且在轻量化方面,对于节约连接处的材料来说发挥了重要的作用。

《轻量化手册5 轻量化部件和结构的评价》涉及部件和轻量化结构的评估。主题范围包括新型轻量化材料的部件仿真和工艺仿真,这些往往不能通过传统的材料法规来描述,并提出了特别的挑战。其他章节是设计轻量化结构的使用强度、材料和部件的无损检验,结构健康监测-损伤检测,纤维复合结构的修复能力和修复概念以及使用周期结束概念和回收利用。

在此要感谢所有作者为本书做出的所有贡献,还要感谢所有公司和机构提供的图片和数据,这些图片和数据使本书更生动易读。

还要特别感谢卡尔汉瑟出版社的沃尔克·赫茨伯格(Volker Herzberg)工程师对本书的无私帮助,他对本书的专业知识和外交途径提供了很多积极的、建设性的支持。

弗兰克·亨宁
埃尔韦拉·穆勒
2011年8月

目 录

第 I 部分 轻量化部件和系统的产品形成过程

- 1 产品形成过程 / 3
 - 1.1 基础 / 3
 - 1.1.1 产品形成过程的建模 / 4
 - 1.1.2 系统技术基础 / 5
 - 1.1.3 广为人知的过程模型 / 6
 - 1.1.4 传统过程模型的局限性 / 9
 - 1.1.5 产品形成过程的新模型——控制与开发人员支持 / 10
 - 1.1.5.1 控制是重点 / 10
 - 1.1.5.2 开发人员的支持 / 11
 - 1.2 集成产品形成模型(iPeM) / 11
 - 1.2.1 产品形成的假设 / 12
 - 1.2.2 集成产品形成模型的定义和元素 / 14
 - 1.2.2.1 活动矩阵 / 14
 - 1.2.2.2 产品形成活动 / 14
 - 1.2.2.3 问题解决过程“SPALTEN” / 16
 - 1.2.2.4 由目标系统、对象系统和处理系统构成的三重系统 / 17
 - 1.2.2.5 资源 / 18
 - 1.2.2.6 阶段模型 / 18
 - 1.2.2.7 产品形成过程中的经验和知识 / 18
 - 1.2.3 模型层面 / 19
 - 1.3 应用集成产品形成模型开发的碳纤维增强塑料轮辋 / 20
 - 1.4 总结 / 25
 - 1.5 附加信息 / 25
- 2 轻量化技术管理 / 27
 - 2.1 轻量化范围内技术管理的范围 / 27
 - 2.1.1 战略性技术管理的基础 / 27
 - 2.1.2 创新的激励因素 / 29
 - 2.1.3 技术顺应——产品开发的机会 / 29
 - 2.2 发现技术潜力时的方法论支持 / 31
 - 2.2.1 发现轻量化的潜力 / 33
 - 2.2.2 不同市场替代性技术的评估 / 35

- 2.3 技术战略的建立和协调 / 46
- 2.4 结论 / 47
- 2.5 附加信息 / 48
- 3 轻量化策略与结构类型 / 50**
 - 3.1 引言 / 50
 - 3.2 对轻量化结构的要求 / 50
 - 3.3 轻量化策略 / 54
 - 3.3.1 条件轻量化 / 54
 - 3.3.2 方案轻量化 / 55
 - 3.3.3 材料轻量化 / 56
 - 3.3.4 形状轻量化 / 57
 - 3.3.5 制造轻量化 / 58
 - 3.3.6 轻量化与成本 / 58
 - 3.4 结构类型 / 61
 - 3.4.1 分体结构 / 61
 - 3.4.2 整体结构 / 61
 - 3.4.3 模块化结构 / 61
 - 3.4.4 复合结构 / 63
 - 3.4.4.1 混合结构 / 64
 - 3.4.4.2 多材料设计 / 65
 - 3.5 结论 / 66
 - 3.6 附加信息 / 67
- 4 虚拟产品开发 / 69**
 - 4.1 计算机辅助设计(CAD) / 69
 - 4.2 计算机辅助开发(CAE) / 71
 - 4.2.1 采用有限元法(FEM)进行产品模拟 / 71
 - 4.2.2 有限元法发展的简要回顾 / 72
 - 4.2.3 有限元法的应用领域 / 72
 - 4.2.4 有限元程序 / 74
 - 4.2.5 有限元法分析流程 / 75
 - 4.2.6 计算程序和有限元方面的文献 / 80
 - 4.3 结构优化 / 80
 - 4.3.1 拓扑优化 / 82
 - 4.3.1.1 自行车制动助力器的拓扑优化 / 84
 - 4.3.1.2 星形轮辋的拓扑优化 / 86
 - 4.3.2 形状优化 / 89

- 4.3.2.1 基于 CAD 的形状优化 / 89
 - 4.3.2.2 基于有限元网格的形状优化 / 91
 - 4.3.2.3 基于网格的形状优化示例 / 92
 - 4.3.3 通过加强筋进行形状优化 / 97
 - 4.3.4 参数优化 / 103
- 4.4 结论 / 106
- 4.5 附加信息 / 106
- 5 系统轻量化——降低整体重量 / 108**
 - 5.1 术语的定义 / 108
 - 5.2 系统轻量化的框架条件 / 111
 - 5.3 技术系统的分析与合成 / 112
 - 5.3.1 将功能集成在一个部件中 / 113
 - 5.3.2 功能的分离 / 114
 - 5.4 系统轻量化中的计算辅助方法 / 114
 - 5.4.1 技术系统中单元的拓扑优化 / 115
 - 5.4.2 机电一体化系统的优化 / 115
 - 5.4.3 自动载荷测定 / 116
 - 5.5 机器人手臂的结构设计 / 117
 - 5.6 结论 / 120
 - 5.7 附加信息 / 121
- 6 产品形成过程中的验证 / 122**
 - 6.1 产品特性的验证与确认 / 122
 - 6.2 虚拟和试验性验证环境 / 123
 - 6.3 轻量化中验证产品特性时的目标冲突 / 124
 - 6.4 验证过程 / 124
 - 6.5 以陶瓷材料为例的系统轻量化结构 / 126
 - 6.6 结论 / 127
 - 6.7 附加信息 / 127
- 7 以赛车为实例 / 129**
 - 7.1 轻量化对赛车的意义 / 129
 - 7.2 赛车轻量化组件的结构设计 / 129
 - 7.3 在考虑安全要求的情况下,碳纤维增强塑料材质防撞结构的设计 / 131
 - 7.4 后扰流板的轻量化设计方案 / 134
 - 7.4.1 带支撑结构的后扰流板 / 134
 - 7.4.2 无支撑结构的后扰流板 / 135

- 7.5 赛车运动的材料轻量化 / 136
 - 7.5.1 由碳纤维增强塑料制成的制动盘 / 137
 - 7.5.2 踏板 / 137
 - 7.5.3 碳纤维增强塑料材质的变速箱 / 137
 - 7.5.4 碳纤维增强塑料材质的支架 / 139
- 7.6 总结 / 139
- 7.7 附加信息 / 140

第 II 部分 生命周期评估

- 1 轻量化结构中的生命周期评估和可持续性 / 143
 - 1.1 可持续性和生命周期分析的重要性 / 144
 - 1.2 技术的发展和现状 / 146
 - 1.2.1 符合 ISO 标准的生命周期评估发展 / 146
 - 1.2.2 归因生命周期评估及间接生命周期评估 / 148
 - 1.3 简化复杂关系的问题 / 150
 - 1.3.1 基于经济的投入产出生命周期评估方法 / 151
 - 1.3.2 资源评估 / 151
 - 1.3.3 使用“足迹法”的方法 / 152
 - 1.4 材料和原料常见的错误认识 / 153
 - 1.4.1 聚合物和原油资源 / 153
 - 1.4.2 由可再生原材料制成的产品 / 154
 - 1.4.3 可生物降解的产品 / 155
 - 1.4.4 回收利用 / 156
 - 1.4.5 轻量化 / 157
 - 1.5 轻量化方面对产品和系统技术生态特性的影响 / 159
 - 1.5.1 上游工序中的材料和原料供应 / 160
 - 1.5.2 从材料到系统 / 162
 - 1.5.3 使用中的系统性能 / 164
 - 1.5.4 后续利用选项 / 164
 - 1.6 结论和建议 / 165
 - 1.7 附加信息 / 167



第 I 部分

轻量化部件和系统的产品形成过程

在当今这个全球化市场时代，一个企业的成功在很大程度上取决于新产品的成功开发。在这方面，不论是以发明为导向的活动，即寻找新的理念和方法，还是以创新为导向的活动，即成功地将这些理念和方法转化为市场上成功的产品，都具有非常重要的意义。在轻量化领域中，这就要求人们必须具有对跨学科合作和整个产品形成领域的广泛认识。越来越短的产品寿命周期，全球化的竞争和有限的资源，以及与此相关的进一步的综合产品形成方法，也都使技术解决方案本身及其相关过程变得越来越复杂。

在研究和实践中，综合产品形成模型（iPeM）及其相关的全面解决方案，以及支持这些解决方案的方法已成为研究和实践中普遍使用的面向开发阶段的过程模型，这种模型不仅能够用于描述产品形成过程，而且还适于根据产品成功开发当前和未来的要求及时重新定位。就此而言，产品形成过程可以理解为，以目标系统为导向的结构和以单个并行及连续结构顺序为特点的标准化基本活动。

在一个新产品的各个开发阶段中，可以根据需要按时间顺序来安排这些活动，从而构成特定产品开发的各个阶段。这样就具有高度的灵活性，从而可以将开发方法和开发管理有机地结合在一个协调系统中。



以碳纤维复合材料的轮圈为例，
产品形成过程的结果

现代产品发展的一大趋势就是越来越多地采用轻量化设计，这就需要人们对轻量化产品的技术潜力有一个系统化的认识。将轻量化作为一项长期战略技术规划可以明显降低开发风险，也会对产品重量和资源消耗产生影响，从而取得持续的商业成功。与之矛盾的是，如在汽车行业中，由于安全和环保要求的不断提高以及人们对舒适性要求的不断增长，车辆的重量也在不断增加。因此，人们通过将轻量化策略应用于产品当中，例如使用轻量化的材料，改变零部件的几何形状或者整个系统的构造，从而有效地解决这一问题。在所有这些方法中，虚拟产品形成是产品形成过程的核心活动，许多工业部门都已经成功地建立了自己的产品形成过程。

虚拟产品形成可以考虑加大品种多样化，降低产品重量和缩短产品形成周期的趋势，这也是为什么虚拟产品形成能够成为轻量化领域中关键技术的重要原因。实践中，轻量化可以使用各种计算机辅助方法来完成，这些计算机辅助方法一般被简称为CAx法。其中，最后一个字母x可以是“Design（设计）”的首字母“D”，可以是“Engineering（工程设计）”的首字母“E”或者“Manufacturing（生产制造）”的首字母“M”，也可能是“Styling（造型）”的首字母“S”，等等。对于充分利用轻量化的全部潜力，系统轻量化在产品形成过程中起着举足轻重的作用。在同时考虑到技术和经济条件以及系统内部相互作用的前提下，可以对技术系统进行优化。当产品的整个系统或局部系统特性涉及客户利益，并可能会因其而影响到整个产品的成熟度时，可以考虑通过虚拟研究方法和实验研究方法或者通过组合的方式对整个系统或局部系统进行验证。

制造企业的原始目标是开发、制造和销售适销对路的产品，以达到利润最大化为目的。是开发新产品还是改进现有产品对于这一目标来说都是无关紧要的，而产品形成在很大程度上总是多次重复相同的步骤和模式。这些处理步骤及其组织和管理所必需的要素可以使用产品形成过程的模型进行描述。尤其是在轻量化的过程中，系统地考虑产品形成对于这个过程至关重要，例如在建模的时候就应当考虑到企业生产能力的限制。下面就对产品形成过程建模的原理和主要方面加以说明，并且通过文章中的实例对轻量化这一概念加以阐述。

1.1 基础

产品

在产品形成中，产品这一概念是指可以在市场上出售并盈利的商品或服务。它可以是实物，也可以是诸如软件类的商品。

产品生命周期

一个产品的生命周期包括了从其开发、进入市场直到其退出市场的整个过程。产品生命周期中的不同阶段可以通过几种模式加以描述。产品生命周期的市场经济理论将“产品寿命”划分为以下四个阶段：开发和进入市场，成长，成熟/饱和以及萎缩/消失（图 1.1；Vernon，1966）。

产品开发

产品开发包括产品的研发（也被称为前期开发）、设计和验证。其主要任务是明确任务、构思、设计和加工制造（Pahl 和 Beitz，2003）。

产品形成

产品形成包括产品的开发，也包括生产准备和生产以及营销相关的所有活动。

因此，产品形成是产品寿命周期的起始点。在下面的章节中将详细阐述，产品形成不仅对寿命周期中随后的各阶段有着巨大的影响，而且在产品形成的早期阶段就必须预先考虑和顾及这些影响带来的后果，以确保产品获得成功。

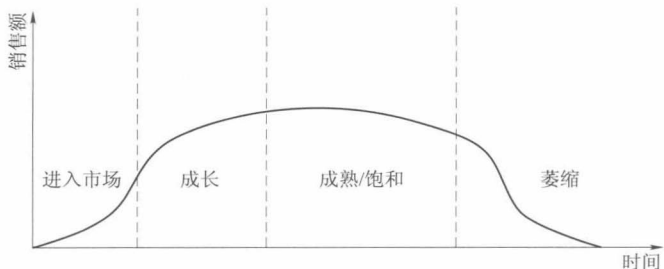


图 1.1 产品寿命周期的四个阶段 (Vernon, 1966)

1.1.1 产品形成过程的建模

新产品及其销售不仅能为制造企业获得经济上的利益，而且往往也能促进企业的进步，从而完成全面增值。应当指出的是，客户的利益应当与供应商的利益得到同样的保障。根据经济学家熊彼特 (Schumpeter) 的理论，一个新的产品构思 (发明) 只有在市场上成功地销售，才能称为一项真正的创新 (Schumpeter, 1912)。

为了确保成功的可持续性，产品形成必须以市场为导向。因此，必须将企业自身、客户以及竞争对手放入一个系统内加以通盘考虑。这时，首先必须确保正确理解客户的期望，然后通过产品形成过程满足这一要求；随后，在一定的经济边界条件下将客户的要求转化为功能性产品。企业本身的能力和边界条件以及在相关细分市场的竞争态势也是进一步的限制 (图 1.2)。

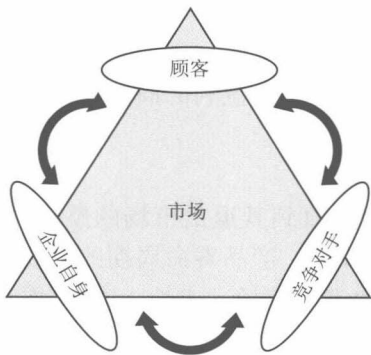


图 1.2 市场三角：顾客—企业—竞争对手 (Deltl, 2004)

“以正确的方法开发正确的产品!”——在产品形成的各种活动中可以通过方法上的支持来满足这一要求。预先给出开发人员在开发过程中进行定位的结构，有助于有效地利用工程设计方法 (CAD、有限元分析工具等)。这样可以为产品形成过程提供充分支持。各种开发项目中经常使用的解决方案模式可以汇总成可反复使用的行动指南，从而使随后的开发过程更加清晰和条理化。而产品形成过程模型正是这样一种结构。

图 1.3 显示了高效产品形成的重要性，从图中可以看出，产品在进入市场销售之前，开发和生产都首先要投入资本。因此，应使产品上市时间 (产品从构思到进入市场的时间) 尽可能短。在这个阶段中尽管时间和成本压力都很大，但还是应当在产品寿

命周期的早期阶段就尽可能消除产品存在的缺陷。根据所谓的 10 的 n 次方规则，任何新产品形成的故障排除成本都会呈 10 的 n 次方关系增加（图 1.4）。适当的产品形成过程模型及其目标将有助于降低这些成本并缩短将产品推向市场的时间。

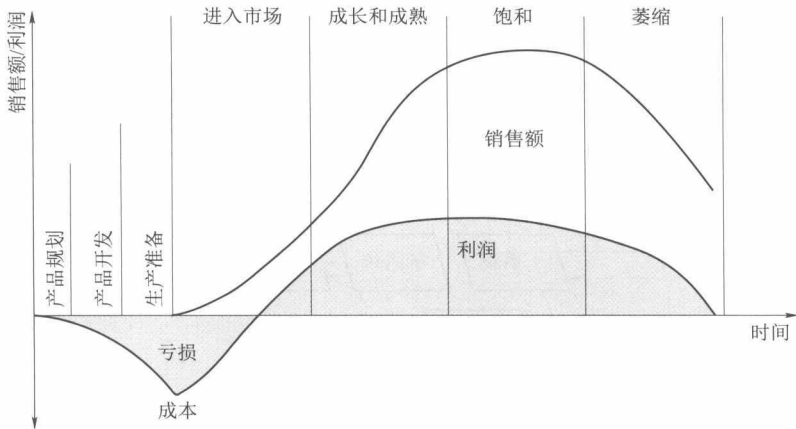


图 1.3 寿命周期各阶段的销售业绩曲线 (Ehrlenspiel, 2003; Geyer, 1976)

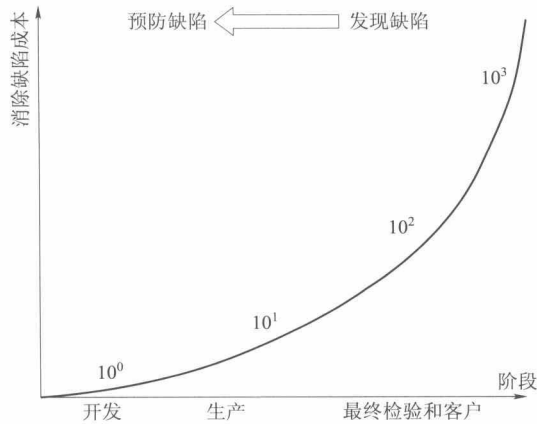


图 1.4 消除缺陷成本的 10 的 n 次方定律 (Ehrlenspiel, 2003; Reinhart et al., 1996)

1.1.2 系统技术基础

产品形成可以建模成一个系统 (Ropohl, 2009)。在不了解系统内部结构的情况下，系统可以被视为一个黑匣子。这时，只需要考虑系统边界与系统进行交换的物质、能量和信息这三个变量。系统可以是由子系统按照等级组成的和/或其子系统构成的上一级系统（图 1.5）。

产品形成可以基于一般的系统理论进行建模。不论是一个多么复杂的系统，其输入变量的总和总是与输出变量的总和相等，其中，这些输出变量中的一个表示产品本身。附带的副产品为诸如需求列表、项目计划和测试报告等文档，虚拟原型和

实物原型以及所有的模拟结果等。所有由此产生的过程及其相互之间关系的总和构成了对象系统。输入变量代表着目标，其中，这些目标中的一部分在产品形成过程开始时已被确定，而其他的只有在过程进行中才会出现，如对单个对象（测试报告）进行分析时得出新结论。目标通过各种相互关联联系在一起，从而形成目标系统。

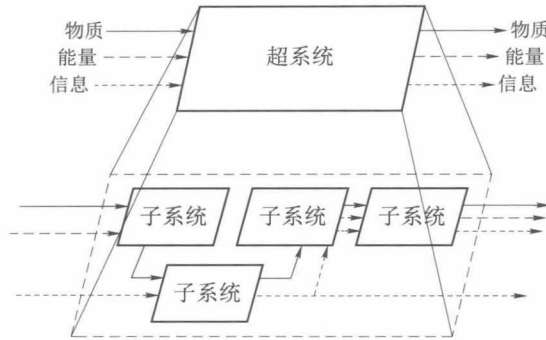


图 1.5 系统的分级结构和流动性变量 (Ehrlenspiel, 2003)

产品形成是一个社会技术系统。除了工作介质、开发工具和生产技术之外，在产品形成过程中，人在很大程度上扮演着主要角色。这是由于人类渴望改变大自然的天性决定了产品形成的最初目的（例如生产特殊用途的工具）。通过在产品形成过程中投入的劳动力，尤其是所掌握的相关（创造性）知识，人类在将目标转化为实际对象的过程中起着决定性的作用。通过实际对象的消费最终达到人类改造自然的目的。所有参与从目标到实际对象这个转换过程的元素一起构成了处理系统 (Ropohl, 2009)。

1.1.3 广为人知的过程模型

下面描述的产品形成过程模型是广为人知的。

德国工程师协会规程 (VDI-Richtlinie) 2221

德国工程师协会规程 2221 (图 1.6) 给出了所谓的顺序模型。在这里，过程的每个步骤都分配有各自的工作成果，并有产品形成阶段的迭代顺序。在规程中，对各个过程步骤的活动及其结果（例如需求列表、功能结构）进行了详细的说明。

Cooper 的阶段-门径模型

Cooper 研发的阶段-门径模型可以在时间和质量以及跟踪优先目标方面优化开发过程 (Cooper, 1994)。这样就可以对项目的进度加以权衡，并据此进行检验。这种以管理为导向的方法将产品开发过程按顺序划分为几个连续的阶段，这些阶段彼此之间通过所谓的门径相连接。这些门径在这里起着里程碑的作用，通过它时就意味着已转移到下一阶段中。这时，管理层可以在其所处位置相关信息的基础上根据预定的规范决定下一步的行动（继续、迭代或终止）。阶段-门径法被广泛应用于工业实践中。

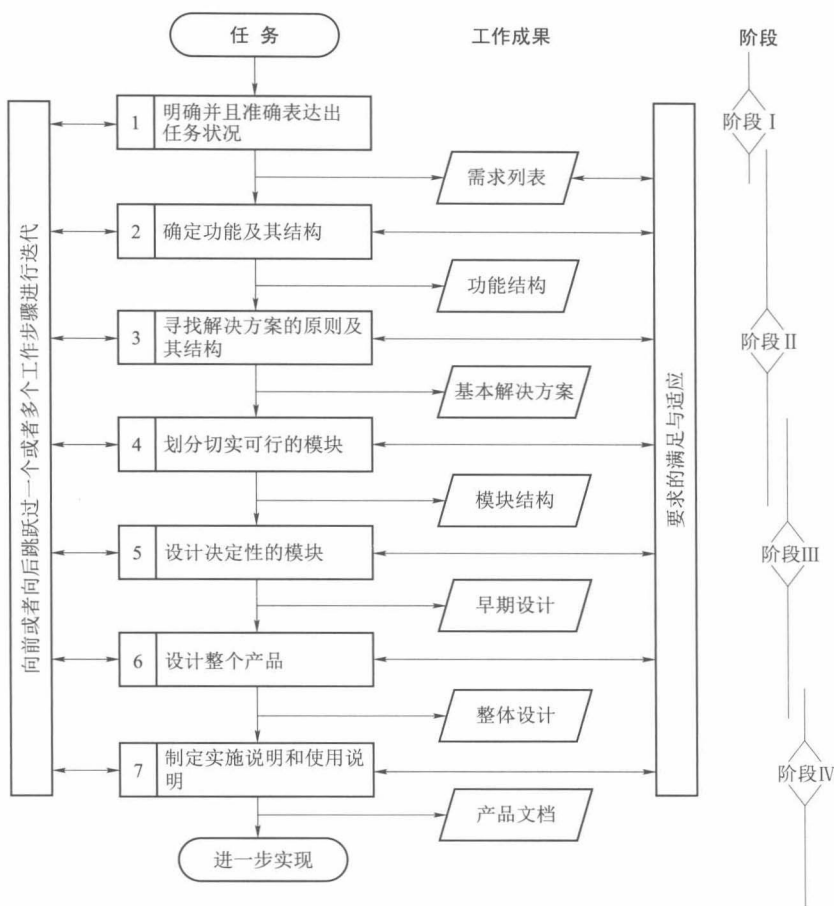


图 1.6 规划与设计的工作步骤（德国工程师协会规程 2221）

模糊的阶段门径管理模式

模糊的阶段门径管理模式的进一步发展是一种基于所谓模糊门径的逻辑（图 1.7）。

在这种方法中，并没有预先给定门径的时间点，而是需要从项目进度和资源管理中得出这一结果。在此，重叠阶段延伸到多个门径，因此，可以根据状态的需要灵活地终止某个阶段，然而，在这种方法中，不同阶段执行者之间的信息传递必须要通过一定的辅助手段才能完成，例如由核心团队管理继续加以支持。

德国工程师协会规程 2206 的 V 模型

所谓的 V 模型（德国工程师协会规程 2206）将德国工程师协会规程 2221 和软件开发的方法联系在一起（图 1.8），其代表特定领域的过程模型组。机电一体化系统需要在机械、电气和信息技术之间进行跨学科界限的密切合作。在系统、子系统和元件这三个观察层面上，需要制定出系统设计、特定领域元件的扩展和系统集成的过程步骤。在集成系统时，需要将系统特性与设计阶段的规格相比较，对比时需

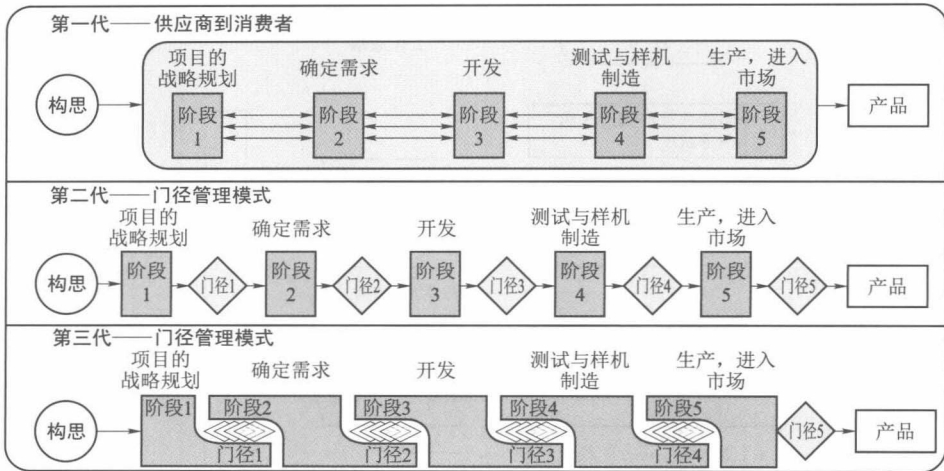


图 1.7 Cooper 阶段门径管理模式——第三代开发过程

要将它们按照彼此之间的关系分别放置在字母 V 的两个臂上。V 模型是在像德国工程师协会规程 2221 这样的顺序过程模型的基础上延伸出的一种方法。

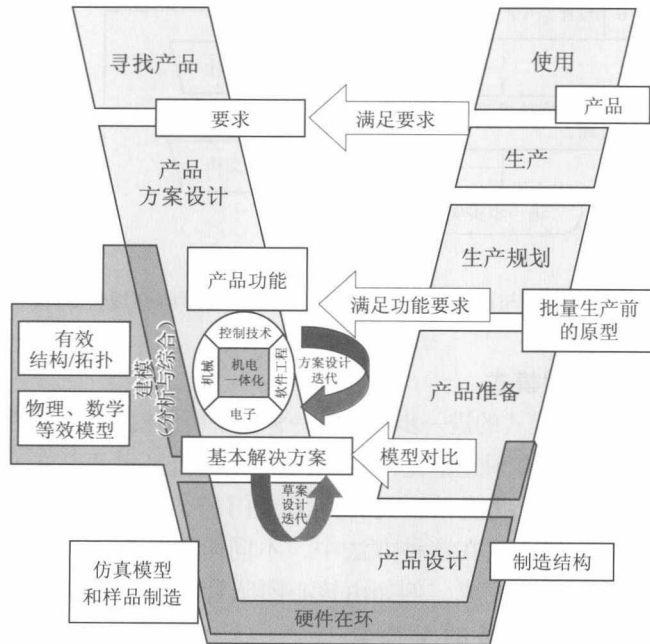


图 1.8 机电一体化设计中的 V 模型（德国工程师协会规程 2206）

综合方法

在集成产品开发中，重点是领会和满足客户的需求，但是要考虑到这一过程的所有参与者（客户，竞争对手，包括供应链和分销网络在内的企业自身）