



21世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材

现代设计方法

王安麟 姜 涛 刘广军 编著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



21 世纪高等学校机械设计
制造及其自动化专业系列教材

现代设计方法

王安麟 姜 涛 刘广军 编著

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

现代设计方法/王安麟 姜 涛 刘广军 编著. —武汉:华中科技大学出版社,
2010 年 1 月

ISBN 978-7-5609-5864-4

I. 现… II. ① 王… ② 姜… ③ 刘… III. 机械设计-高等学校-教材
IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 219076 号

现代设计方法

王安麟 姜 涛 刘广军 编著

策划编辑:万亚军 刘 锦

责任编辑:姚 幸

责任校对:李 琴

封面设计:潘 群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:17.5

字数:341 000

版次:2010 年 1 月第 1 版

印次:2010 年 1 月第 1 次印刷

定价:30.00 元

ISBN 978-7-5609-5864-4/TH·210

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

现代设计方法的内容极其丰富,在一本书中很难面面俱到。本书主要介绍有限元方法、优化设计方法、自组织方法、健壮性设计方法、系统分析与设计方法这几种现代设计方法。

本书在突出现代设计基本理论与方法的同时,侧重多种现代设计方法的综合和交叉,通过大量的实际工程实例,注重培养学生对系统进行分析与设计的能力,使学生初步掌握对复杂现代工程设计问题进行研究和分析的基本方法。

本书可作为高等院校工程类(如机械、动力、船舶、航空航天等)各专业和其他相关专业的高年级本科生或研究生教材,也可供从事设计研究、开发工作的学者与工程技术人员参考。

21 世纪高等学校 机械设计制造及其自动化专业系列教材

总 序

“衷心藏之，何日忘之”，在新中国成立 60 周年之际，时隔“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”出版 9 年之后，再次为此系列教材写序时，《诗经》中的这两句诗又一次涌上心头，衷心感谢作者们的辛勤写作，感谢多年来读者对这套系列教材的支持与信任，感谢为这套系列教材出版与完善作过努力的所有朋友们。

追思世纪交替之际，华中科技大学出版社在众多院士和专家的支持与指导下，根据 1998 年教育部颁布的新的普通高等学校专业目录，紧密结合“机械类专业人才培养方案体系改革的研究与实践”和“工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革研究与实践”两个重大教学改革成果，约请全国 20 多所院校数十位长期从事教学和教学改革工作的教师，经多年辛勤劳动编写了“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”。这套系列教材共出版了 20 多本，涵盖了“机械设计制造及其自动化”专业的所有主要专业基础课程和部分专业方向选修课程，是一套改革力度比较大的教材，集中反映了华中科技大学和国内众多兄弟院校在改革机械工程类人才培养模式和课程内容体系方面所取得的成果。

抚今这套系列教材出版发行 9 年来，已被全国数百所院校采用，受到了教师和学生的广泛欢迎。目前，已有 13 本列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材，多本获国家级、省部级奖励。其中的一些教材（如《机械工程控制基础》《机电传动控制》《机械制造技术基础》等）已成为同类教材的佼佼者。更难得的是，“21 世纪高等学校机械设计制造及其自动化专业系列教材”也已成为一个著名的丛书品牌。9 年前为这套教材作序的时候，我希望这套教材能“加强各兄弟院校在教学改革方面的交流与合作，

对机械工程类专业人才培养质量的提高起到积极的促进作用”，现在看来，这一目标很好地达到了，让人倍感欣慰。

李白讲得十分正确：“人非尧舜，谁能尽善？”我始终认为，金无足赤，人无完人，文无完文，书无完书。尽管这套系列教材取得了可喜的成绩，但毫无疑问，这套书中，某本书中，这样或那样的错误、不妥、疏漏与不足，必然会存在。何况形势总在不断的发展，更需要进一步来完善，与时俱进，奋发前进。较之9年前，机械工程学科有了很大的变化和发展，为了满足当前机械工程类专业人才培养的需要，华中科技大学出版社在教育部高等学校机械学科教学指导委员会的指导下，对这套系列教材进行了全面修订，并在原基础上进一步拓展，在全国范围内约请了一大批知名专家，力争组织最好的作者队伍，有计划地更新和丰富“21世纪机械设计制造及其自动化专业系列教材”。此次修订可谓非常必要，十分及时，修订工作也极为认真。

“得时后代超前代，识路前贤励后贤。”这套系列教材能取得今天的成绩，是几代机械工程教育工作者和出版工作者共同努力的结果。我深信，对于这次计划进行修订的教材，编写者一定能在继承已出版教材优点的基础上，结合高等教育的深入推进与本门课程的教学发展形势，广泛听取使用者的意见与建议，将教材凝练为精品；对于这次新拓展的教材，编写者也一定能吸收和发展原教材的优点，结合自身的特色，写成高质量的教材，以适应“提高教育质量”这一要求。是的，我一贯认为我们的事业是集体的，我们深信由前贤、后贤一起一定能将我们的事业推向新的高度！

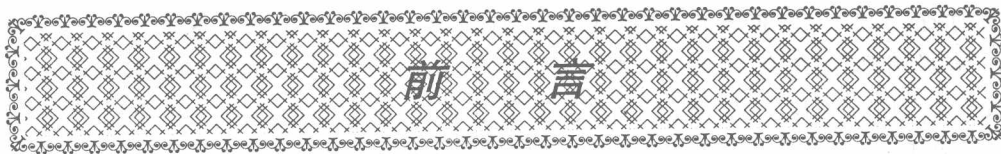
尽管这套系列教材正开始全面的修订，但真理不会穷尽，认识不是终结，进步没有止境。“嘤其鸣矣，求其友声”，我们衷心希望同行专家和读者继续不吝赐教，及时批评指正。

是为之序。

中国科学院院士

for

2009.9.9



前言

设计方法是产品设计的灵魂。设计方法的发展大致经历了直觉设计、经验设计、中间试验辅助设计和现代设计这四个发展阶段。对于前三个阶段,因其设计方法乃至相关理论均具有人工试凑、经验类比的特点,可统称为传统设计方法。

传统设计方法的对象(产品)一般具有产量大、寿命长、开发周期长、创新程度不高等特点。随着全球经济一体化的不断推进,市场竞争的日益激烈,产品越发呈现出个性化、多样化、寿命短、开发周期短、创新空间日益扩大等特点,同时产品开发所涉及的技术与科学领域也越来越宽广。因此传统设计方法就显得捉襟见肘、顾此失彼,越发难以满足当今产品的设计要求,凸显出自身的局限性。公理化设计理论的奠基人 Nam P. Suh 教授曾指出,“经验或对比设计技术与方法极大地限制了实际设计水平的提高,对复杂产品的高效、系统设计显得无能为力,基于新的设计技术与方法理论,建立系统、完整的现代设计方法学和设计平台,是应对设计挑战的关键。”

现代设计方法就是基于现代设计理论发展起来的,它融信息技术、计算机技术、知识工程和管理科学等多领域的知识于一体,是综合考虑产品特性、环境特性、人文特性和经济特性的一种系统化设计方法。应用现代设计方法的目的是减少传统设计中经验设计的盲目性和随意性,在缩短设计周期的前提下,同时提高设计的科学性和准确性,从而获得富有创新性和竞争力的优质产品。

现代设计方法本身具有多学科综合性与交叉性的特点,其具体设计方法种类繁多、内容极其丰富。在一本书中很难面面俱到,因此作者结合多年来从事教学与科研的经验,重点介绍有限元方法、优化设计方法、自组织方法、健壮性设计方法、系统分析与设计方法这几种现代设计方法。其中,有限元方法和优化设计方法在当今现代机械产品设计中已经成为必不可少的技术手段,其理论基础与方法论也相对成熟,主要体现在市场上有大量的商用有限元与优化软件及相关书籍可供选择、使用与学习。

显然,掌握一定的有限元与优化理论对用好有限元与优化软件非常有益,同时也为进一步系统化学习现代设计方法奠定了必要的基础。当然,仅仅掌握有限元与优化方法,对于现代产品的设计是远远不够的。在现代设计方法的理论体系中,作者认为有限元与优化方法属于相对微观的方法,侧重于局部分析,其宏观系统的分析能力偏弱。因此,本书后几章相继介绍了几种近年来逐渐兴起的、侧重系统级宏观分析与设计的现代设计方法,如自组织方法、健壮性设计方法、系统分析与设计方法等。为使读者能够明晰这些设计方法的基本原理与理念,相应章节都辅以大量的实际工程实例。

作为主要面向高等院校工程类高年级本科生的教材,本书在突出现代设计基本理论与方法的同时,侧重多种现代设计方法的综合和交叉,注重培养学生对系统进行分析与设计的能力,使学生初步掌握对复杂现代工程设计问题进行研究和分析的基本方法。

本书可作为高等院校工程类(如机械、动力、船舶、航空航天等)各专业和其他相关专业的高年级本科生或研究生教材,也可供从事设计研究、开发工作的学者与工程技术人员参考。

本书第1、4章由王安麟撰写,第2、3章由姜涛撰写,第5章由刘广军撰写,第6章由王安麟、李晓田撰写。全书由王安麟统稿。在本书编写过程中,参考了大量专著和文献,限于篇幅未能一一列出,在此表示感谢。由于作者水平有限,书中不当、不足之处,恳请同行和读者及时批评指正。

本书部分内容是在高等学校博士学科点专项科研基金(20070247006)、国家自然科学基金(50805106)和中国博士后科学基金(20080430687)的资助下研究完成的,在此深表感谢。

作者

2009年12月于同济大学



第 1 章	现代设计方法概论	(1)
1.1	现代设计方法的基本概念	(1)
1.2	现代设计理论概要	(3)
1.3	现代设计方法的主要内容	(9)
第 2 章	有限元方法	(12)
2.1	有限元方法的基本思想与应用	(12)
2.2	弹性力学理论基础	(15)
2.3	弹性力学有限元法	(24)
2.4	有限元方法设计分析中的若干问题	(59)
2.5	有限元分析软件示例	(67)
	本章主要参考文献	(71)
第 3 章	优化设计方法	(72)
3.1	优化设计的基本概念	(72)
3.2	优化设计的基本流程	(78)
3.3	优化设计的数学基础	(83)
3.4	无约束优化方法	(94)
3.5	有约束优化方法	(99)
3.6	传统优化算法整理	(108)
3.7	遗传算法	(111)
3.8	常用的优化软件及其适用范围	(123)
	本章主要参考文献	(127)
第 4 章	自组织方法	(128)
4.1	自组织过程与原理	(128)
4.2	元胞自动机的自组织技术	(130)
4.3	汽车电子连接器微动磨损的自组织模拟	(147)
4.4	多物理场耦合解析的自组织方法浅析	(158)

4.5	结构拓扑形态的自组织设计	(168)
4.6	本章小结	(181)
	本章主要参考文献	(183)
第 5 章	健壮性设计	(187)
5.1	健壮性设计概述	(187)
5.2	健壮性设计的基本方法——试验设计方法	(189)
5.3	健壮性设计的基本方法——田口设计方法	(195)
5.4	健壮性设计的基本方法——响应曲面法	(201)
5.5	健壮性设计的基本方法——考虑随机性的健壮性设计	(208)
5.6	健壮性设计的应用实例	(216)
	本章主要参考文献	(228)
第 6 章	系统分析与设计方法	(230)
6.1	概述	(230)
6.2	系统的基本概念	(232)
6.3	系统论的构成及发展	(234)
6.4	键合图方法	(239)
6.5	系统建模分析的工程实例	(264)
	本章主要参考文献	(267)
附录	常用正交表	(268)



现代设计方法概论

1.1 现代设计方法的基本概念

所谓现代设计方法是与传统设计方法相比较而言的,“现代”与“传统”本就是继承与发展的关系,没有传统也就没有现代,没有传统的沉淀与升华,现代也就成了无本之木、无源之水;反之,没有现代对传统的发展与扬弃,传统也就成了古董,失去了活力,如同一潭死水。因此,在历史的长河中,传统与现代本就是一对双子星,失去了一方,另一方也就失去了存在的意义。古之传统,今之现代,明之传统,历史就这样交替地把玩着传统与现代,按照自己的意志徐徐前行。纵观科学发展史与人类文明发展史,可能历史更加喜欢传统一些,几乎每一次,现代都是在传统的阵痛中诞生的。从哥白尼悒于传统只能在弥留之际出版光辉的《天体运行论》到达尔文的《物种起源》“可以用来当做历史上的阶级斗争的自然科学根据”(马克思语),无不体现着现代对传统突破的艰难。而历史似乎又将这种艰难不经意地抹去,当今连爱因斯坦的相对论也纳入了传统的怀抱。所以说,严格区分现代与传统没有太大的历史意义,现代由于时间的流逝终将归于传统。在历史的时间坐标轴上,现代只能是那个箭头,其后连绵不断的那根直线则是不断扩张的传统。18 世纪的英国诗人亚历山大·蒲柏在牛顿的墓志铭中写道:自然和自然的法则在黑夜中隐藏,上帝说,“让牛顿去吧!”,于是一切都被照亮。到了 20 世纪,魔鬼说,让爱因斯坦去吧!,于是一切又重新回到“黑暗”。

历史就是这样,传统无所不在,现代如同在传统土壤中蠕动的虫蛹,时不时地破土而出,照亮历史的前行方向。就设计方法而言,每一时代的设计方法都是与该时代的科技与人文发展水平紧密相连的。每一次设计方法的大突破都有时代科技与人文变更的大背景。人类的科技与人文发展历史大体上可分为古代、近代和现代三个时期。古代指的是公元 16 世纪之前;近代指的是 16 世纪到 19 世纪末,约 400 年;现代指的是 19 世纪末、20 世纪初迄今。每一时代的科技与人文发展水平决定着该时代的设计方法与水平。

16 世纪之前,生产力水平以农业生产为主导,观察世界的方式主要靠直觉、猜测与经验,相应的设计方法也以直觉设计为主,以经验的方式薪火相传。16 世纪到 19

世纪末,人类花了约 400 年的时间完成了对农业生产方式的突破,生产力水平渐以工业生产为主导。这一时期的自然科学完全从哲学中分化出来,走上了独立发展的道路,并且又逐步分化为物理学、化学、天文学、地学、生物学等多门学科,并相继成熟,形成了极为严密和可靠的自然知识体系,达到了全面发展的阶段。观察世界的方式从直觉、猜测与经验进化为理论、实证与定量分析和归纳。相应的设计方法也从直觉设计发展为理论与经验相结合的设计。19 世纪末、20 世纪初是现代科学技术的诞生期,尤其在物理学方面取得了一系列巨大的成就。自此以后,科学技术进入大发展时期,其发展速度越来越快,涉及领域越来越多,对社会经济的发展和贡献已难以用数字来表达。同时,科学技术呈整体化发展,一系列交叉学科、边缘学科、综合学科等新兴学科不断涌现,这表明科学越来越成为一个有机统一的整体。科学技术逐渐超前于生产,并对生产起到决定性的促进作用,成为第一生产力。在此期间,20 世纪 40 年代计算机的发明及 80 年代后的开始普及,以及 90 年代后信息革命的兴起是一系列标志性的事件。设计方法也因此开始有了突破性的进展。传统设计方法也因计算机的使用开始更新为现代设计方法。

传统设计方法是以理论公式及长期设计实践中形成的经验、公式、图表和设计手册等为基础,通过安全系数设计、经验设计、类比设计、分离设计等半理论半经验的方式,完成方案拟订、设计计算、绘图和编写设计说明书等设计工作。传统设计方法的对象产品一般具有产量大、寿命长、开发周期长、创新程度不高等特点。但随着全球经济一体化的不断推进,市场竞争的日益激烈,产品越发呈现出个性化、多样化、寿命短、开发周期短、创新空间空前扩大等特点,同时产品开发所涉及的技术与科学领域也越来越宽广,因此传统设计方法就显得捉襟见肘、顾此失彼,越发难以满足当今产品的设计要求,凸显出自身的局限性。

现代设计方法是对传统设计方法的深入、丰富和完善,它是基于现代设计理论发展起来的,融信息技术、计算机技术、知识工程和管理科学等多领域知识于一体的,综合考虑产品特性、环境特性、人文特性和经济特性的一种系统化的设计方法。其目的是减少传统设计中经验设计的盲目性和随意性,在缩短设计周期的同时提高设计的科学性和准确性,从而获得富有创新性和竞争力的优质产品。传统设计方法的特征是静态设计、经验设计与分离设计,而现代设计方法则是动态设计、优化设计与集成设计;传统设计方法的计算量小,以手工计算为主,而现代设计方法的计算量很大,以计算机计算为主。计算机由于运算速度快、数据处理准确、存储量大,且具有逻辑判断功能、资源可共享,因此,在现代设计中的分析、计算、综合、决策、数据处理、图形处理等多方面具有重要的作用,成为现代产品设计中必不可少的重要工具。简单地讲,现代设计方法可近似理解为

传统设计方法 + 计算机 + 现代设计理念

需要说明的是,按照传统与现代的历史辩证关系,不可静态狭隘地理解现代设计方法,不能把现代设计方法当做一把万能钥匙去开启未来的所有设计难题,所谓现代

也是有时效性的,它只能在当前及其后未来一小段时间内起主要作用。现代设计方法只能通过不断吸收各学科领域的最新成果而永葆“现代”。也许,在知识大爆炸的今天,过不了多久,当今的现代设计方法就又成了传统设计方法。而未来的现代设计方法又不知比当今的现代设计方法现代多少。“现代”之所以现代,因为它比照的是传统,而不是时间。

1.2 现代设计理论概要

现代设计理论是现代设计方法的基石。从20世纪50年代开始,为了适应生产力发展的需要,通过借鉴新兴的统计分析技术、管理技术、信息技术和方法论,在传统设计理论的基础上相继提出了一系列现代设计理论与方法,如公理化设计理论(axiomatic design theory, ADT)、发明问题解决理论(TRIZ)、田口设计法(Taguchi method)、六西格玛设计(design for six sigma, DFSS)等。正如公理化设计理论的奠基人 Nam P. Suh 教授曾指出的,“经验或对比设计技术与方法极大地限制了实际设计水平的提高,对复杂产品的高效、系统设计显得无能为力,基于新的设计技术与方法理论,建立系统、完整的现代设计方法学和设计平台,是应对设计挑战的关键。”

1. 公理化设计理论

公理化设计理论是由美国麻省理工学院 Nam P. Suh 教授于1990年在《The Principles of Design》一书中首次提出。该理论在产品设计领域有重要的影响。它通过理性的思考来改进设计活动,摆脱了传统“试验试错”的设计方法,为在科学基础上的设计提供了一个广阔的平台。目前其代表性应用主要集中在机械产品设计、软件设计等方面。

公理化设计的四个主要概念是:域(domain)、层次(hierarchies)、曲折映射(zig-zagging)和设计公理(design axioms)。其思想的核心是多域映射,即把设计活动分为用户域(customer domain)、功能域(functional domain)、物理域(physical domain)和过程域(process domain)。用户域代表用户关心的目标,用顾客需求(customer needs)来代表。功能域代表设计方案的功能需求,用功能需求(functional requirement)来代表,功能需求之间要满足约束(constraints)。物理域描述设计方案的设计参数(design parameters),过程域表达用于实现设计参数的过程变量(process variables)。公理化设计理论的设计域与设计过程链如图1-1所示。

公理化设计的两个公理描述如下。

独立公理 在设计过程(功能域向实体域的映射)中,当确定满足必要功能的设计参数时,必须确保设计参数的变化只会影响相应的必要功能。或者说,在可接受的设计方案中,设计参数的选择总是使得某个特定的设计参数只满足相应的必要功能而不影响其他必要功能。好的设计总是保持必要功能的独立性。

信息公理 设计要满足信息量最小的要求,信息量最小的设计成功的概率最大。

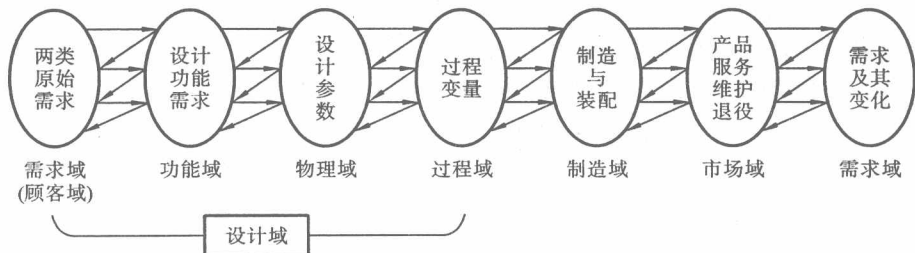


图 1-1 公理化设计理论的设计域与设计过程链

即在所有满足设计公理的设计方案中,最佳设计是必要功能保持独立而且信息量最小的设计。在实际设计中,独立公理用于指导确定设计参数,获得设计方案;信息公理用于指导设计方案的评价与选优。

从独立公理和信息公理可以推出以下方案设计原则。

(1) 设计独立化原则 如果在设计方案中必要功能相互干涉或耦合,则需要对设计方案进行分解,从而实现独立化。

(2) 功能数目(FRs)最小化原则 即尽量减少必要功能和约束条件的数目。

(3) 零件集成原则 在必要功能能够独立地得到实现的设计方案中,尽可能将设计特征集中到单个物理零件上。

(4) 标准化原则 使用与必要功能和约束条件匹配的标准件或可互换零件。

(5) 对称性原则 使用与必要功能和约束条件匹配的对称形状或布置。

(6) 最大公差原则 即在表述必要功能时,指定最大允许公差。

(7) 更小信息量原则 即在满足必要功能的前提下,寻找比干涉或耦合设计所需信息量更少的独立设计。

公理化设计理论以独立公理和信息公理两个理论为基础,在设计初期为设计者提供一种作出正确设计决策的工具。设计者可以根据独立公理寻找独立设计,在获得若干个独立设计之后,再根据信息公理,确定最佳设计。虽然在实际设计中,常由于设计对象的复杂性而使这两个公理很难得到满足,但设计者依然可以利用它,很方便地对设计要求、解决方案及设计过程进行综合和分析,并对设计方案作出合理性与优劣性判断。公理化设计理论认为:设计过程可以分层表示(从系统到子系统、部件、零件、零件特征),每一层的各个域(功能域、物理域、工艺域)中都存在相应的设计目标。高层次的决策影响低层次问题的求解状态,设计就是在各个设计域中进行问题求解的过程。在每一个设计目标层次上,都存在着一系列的功能要求,在满足某一目标层次的功能要求的设计参数选定后,再将该目标层次上的功能分解成为一系列的子功能要求,然后选定满足该子功能要求的设计参数,并且反复这一过程,直到完成设计。

公理化设计理论是设计领域的通用性设计理论,它以四个域和两个设计公理抽象概括了设计领域的基本规律。公理化设计理论能提高设计过程的效率,缩短开发

时间,从而增强产品和企业市场中的竞争力。公理化设计理论的最终目标是:证明设计活动本身是可描述、可掌握的设计科学,利用公理设计理论可以增强设计的创造性、设计方案的鲁棒(稳定)性和可制造性、可维护性,并建立通用的设计科学基础、设计平台和设计工具,提升设计的可控性和自主性。

2. 发明问题解决理论

发明问题解决理论又称技术冲突的解决原理(theory of inventive problem solving, TIPS)。发明问题解决理论的俄文拼写为 теории решения изобретательских задач,俄语缩写为“ТРИЗ”,用英文表示为 teoriya resheniya izobreatatelskikh zadach,缩写为 TRIZ。

TRIZ 理论是由前苏联里海海军专利局的发明家阿奇舒勒(G. S. Altshuller)在 1946 年创立的,阿奇舒勒也因此被尊称为 TRIZ 之父。最初阿奇舒勒在研究和整理世界各国著名发明专利的过程中,发现任何领域的产品改进、技术的变革、创新和生物系统一样,都存在产生、生长、成熟、衰老、灭亡的过程,是有规律可循的。他坚信发明问题的基本原理是客观存在的,这些原理不仅能被确认,而且也能经整理而形成一种理论,掌握该理论的人不仅能提高发明的成功率、缩短发明的周期,而且也可使发明问题具有可预见性。随后他及他的小组又分析了世界各国近 250 万份高水平的发明专利,总结出各种技术发展进化遵循的规律模式,以及解决各种技术矛盾和物理矛盾的创新原理和法则,建立了一个由解决技术、实现创新开发的各种方法、算法组成的综合理论体系,并综合多学科领域的原理和法则,建立起 TRIZ 理论体系。20 世纪 80 年代中期以前,TRIZ 属于前苏联的国家机密,在军事、工业、航空航天等领域均发挥了巨大作用,成为创新的“点金术”,让西方发达国家望尘莫及。80 年代中期以后,随着一批前苏联学者移居到美国等西方国家,TRIZ 理论开始流传于西方,受到极大重视,TRIZ 的研究与实践得以迅速普及和发展。西北欧及美国、中国台湾等地出现了以 TRIZ 为基础的研究、咨询机构和公司,一些大学将 TRIZ 列为工程设计方法学课程。经过半个多世纪的发展,如今 TRIZ 理论和方法已经发展成为一套解决新产品开发实际问题的成熟的理论和方法体系。TRIZ 方法工程实用性强,经过实践的检验,现已在全世界广泛应用,促成了成千上万项重大发明,带来了重大的经济效益和社会效益。

现代 TRIZ 理论体系主要包括以下几个方面的内容。

(1) 创新思维方法与问题分析方法 TRIZ 理论中提供了如何系统分析问题的科学方法,如多屏幕法等;而对于复杂问题的分析,则包含了科学的问题分析建模方法——物-场分析法,它可以帮助快速确认核心问题,发现根本矛盾。

(2) 技术系统进化法则 针对技术系统进化演变规律,在大量专利分析的基础上,TRIZ 理论总结提炼出 8 个基本进化法则。利用这些进化法则,可以分析确认当前产品的技术状态,并预测未来发展趋势,开发富有竞争力的新产品。

(3) 技术矛盾解决原理 不同的发明创造往往遵循共同的规律。TRIZ 理论将

这些共同的规律归纳成 40 个创造性问题的解决原则,针对具体的技术矛盾,可以基于这些创新原则,结合工程实际寻求具体的解决方案。

(4) 创新问题标准解法 针对具体问题的物-场模型的不同特征,分别对应有标准的模型处理方法,包括模型的修整、转换、物质与场的添加等。

(5) 发明问题解决算法 ARIZ 主要针对问题情境复杂、矛盾及其相关部件不明确的技术系统。它是一个对初始问题进行一系列变形及再定义等非计算性的逻辑过程,实现对问题的逐步深入分析,问题转化,直至问题的解决。

(6) 基于物理、化学、几何学等工程学原理而构建的知识库 基于物理、化学、几何学等领域的数百万项发明专利的分析结果而构建的知识库可以为技术创新提供丰富的方案来源。

TRIZ 理论的核心是技术进化原理及冲突解决原理。根据这一原理,技术系统一直处于进化之中,解决矛盾是其进化的推动力。进化速度随技术系统一般矛盾的解决而降低,使其产生突变的唯一方法是解决阻碍其进化的深层次矛盾。消除矛盾的核心算法是发明问题解决算法(algorithm for inventive problem solving, ARIZ)。ARIZ 算法是 TRIZ 理论的一种主要工具,是解决发明问题的完整算法,该算法采用一套逻辑方法逐步将初始问题程序化。该算法特别强调冲突与“理想解”的程序化,一方面技术系统向着“理想解”的方向进化,另一方面如果一个技术问题存在冲突需要克服,该问题就变成了一个创新问题。这里,“理想解”指的是在解决问题之初抛开各种客观限制条件,通过理想化定义的问题最终理想解(ideal final result, IFR)。它具有保持原系统的优点、消除原系统的不足、不会使系统变得更复杂、不会引入新的缺陷等四个特点。

在利用 TRIZ 解决问题的过程中,设计者首先通过物-场分析等方法将待求解的特定问题转化为 TRIZ 的通用问题,然后利用 TRIZ 中的原理与工具,如发明原理等,求出该通用问题的普适解或称模拟解(analogous solution),最后设计者根据普适解的提示,参考各种已有的知识,将该普适解转化为特定问题的解。

TRIZ 理论以其良好的可操作性、系统性和实用性在全球的创新和创造学研究领域占据着独特的地位。在经历了理论创建与理论体系的内部集成后,TRIZ 理论正处于其自身的进一步完善与发展,以及与其他先进创新理论方法的集成阶段,尤其是已成为最有效的计算机辅助创新技术和创新问题求解的理论与方法基础。

实践证明,运用 TRIZ 理论,可大大加快创造发明的进程,而且能得到高质量的创新产品。它不仅能够帮助人们系统分析问题情境,快速发现问题本质或矛盾,准确确定问题探索方向,不会错过各种可能,而且还能够帮助人们突破思维障碍,打破思维定式,以新的视点分析问题,进行逻辑性和非逻辑性的系统思维,并能根据技术进化规律预测未来发展趋势,帮助人们开发富有竞争力的新产品。

需要说明的是,虽然 TRIZ 经过了六十多年的发展,作为一种技术本身,它目前仍处于“婴儿”期,还远未达到纯科学的水平,称之为“方法学”是合适的。随着经济全

球化和新经济的崛起,企业间的竞争越发残酷激烈。传统 TRIZ 对于现代企业来说,显得过于庞杂,并且传统 TRIZ 还存在一些没有完全解决的问题或缺陷。因此,为了适应现代产品设计的需要,TRIZ 不得不面临自身现代化的建设问题,这是当前国际上 TRIZ 研究的重点之一。另外,TRIZ 主要是解决设计中如何做的问题,对设计中做什么的问题未能给出合适的工具。大量的实例表明,TRIZ 的出发点是借助于经验发现设计中的冲突,冲突发现的过程也是通过对问题的定性描述来实现的。因此,如何将 TRIZ 与其他设计方法相结合,以弥补 TRIZ 的不足,已经成为设计领域的重要研究方向。

3. 六西格玛设计

六西格玛(six sigma,简记为 6σ)概念于 1986 年由摩托罗拉公司的比尔·史密斯提出,此概念属于品质管理范畴,旨在生产过程中降低产品及流程的缺陷次数,防止产品变异,提升品质。西格玛(即希腊字母 σ ,大写为 Σ)是统计学中的一个单位,表示与平均值的标准偏差。 6σ 质量水平表示在生产或服务过程中有百万次出现缺陷的机会仅出现 3.4 个缺陷,即达到 99.999 7% 的合格率。也就是说,做 100 万件事情,其中只有 3.4 件是有缺陷的,这几乎趋近到人类能够达到的最为完美的境界。

$6\sigma=3.4$ 失误/百万机会,意味着有卓越的管理、强大的竞争力和忠诚的客户。

$5\sigma=230$ 失误/百万机会,意味着有优秀的管理、很强的竞争力和比较忠诚的客户。

$4\sigma=6\,210$ 失误/百万机会,意味着有较好的管理、运营能力和满意的客户。

$3\sigma=66\,800$ 失误/百万机会,意味着平平常常的管理,缺乏竞争力。

$2\sigma=308\,000$ 失误/百万机会,意味着企业资源每天都有三分之一的浪费。

$1\sigma=690\,000$ 失误/百万机会,每天有三分之二的事情做错的企业是无法生存的。

6σ 理论认为,大多数企业在 $3\sigma\sim 4\sigma$ 间运转,也就是说每百万次操作失误在 $6\,210\sim 66\,800$ 之间,这些缺陷要求经营者以销售额 15%~30% 的资金进行事后的弥补或修正,而如果做到 6σ ,事后弥补的资金将降低到约为销售额的 5%。

6σ 是在 20 世纪 90 年代中期开始被美国通用电气公司(GE)从一种全面质量管理方法演变成为一种高度有效的企业流程设计、改善和优化的技术,并提供了一系列同等地适用于设计、生产和服务的新产品开发工具。 6σ 作为当今最先进的质量管理理念和方法,在帮助通用电气公司取得骄人的成绩之后,所受的关注达到了一个新的顶峰。但是人们发现,要想使产品设计及其质量控制提升到 6σ 水平是一件很困难的事情(一般到 4.8σ),若要达到 6σ 水平,企业在产品设计与研发的时候就必须全面考虑客户需求、原材料特性、生产工艺要求、生产人员素质等各方面要素和条件。在这种背景下,六西格玛设计(design for six sigma,DFSS)便应运而生了。

六西格玛设计的核心思想是将产品的质量问题的消灭在萌芽阶段,即产品的设计阶段。一个产品的设计质量本质上决定了该产品的固有质量特性。在现实中同样一个问题,发现得越早,付出的代价越小,而发现得越晚,付出的代价越大。质量问题同