



中国科协学科发展研究系列报告
中国科学技术协会／主编

2016—2017

机械工程 学科发展报告 (机械设计)

中国机械工程学会 | 编著

REPORT ON ADVANCES IN
MECHANICAL DESIGN



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

非外借



中国科协学科发展研究报告
中国科学技术协会 主编

2016—2017
**机械工程
学科发展报告
(机械设计)**

中国机械工程学会 | 编著

REPORT ON ADVANCES IN
MECHANICAL DESIGN

中国科学技术出版社
· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

2016—2017 机械工程学科发展报告 (机械设计)/
中国科学技术协会主编; 中国机械工程学会编著. —北京:
中国科学技术出版社, 2018.3
(中国科协学科发展研究系列报告)
ISBN 978-7-5046-7937-6

I. ① 2… II. ① 中… ② 中… III. ① 机械工程—学科发
展—研究报告—中国—2016-2017 IV. ① TH-12
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 044699 号

策划编辑	吕建华 许 慧
责任编辑	余 君
装帧设计	中文天地
责任校对	凌红霞
责任印制	马宇晨
出 版	中国科学技术出版社
发 行	中国科学技术出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62173865
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn
开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	380千字
印 张	17.25
版 次	2018年3月第1版
印 次	2018年3月第1次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7937-6 / TH · 66
定 价	85.00元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)



2016—2017

机械工程学科发展 报告（机械设计）

首席科学家 谭建荣

专题负责人 项昌乐 张义民 丁希仑 姜 潮 石来德

专 家 成 员（按姓氏拼音排序）

陈殿生	陈振中	董志峰	高一聪	范大鹏
冯春生	冯毅雄	韩 旭	胡纪滨	雷 飞
刘 杰	刘 莹	吕胜男	马 越	王书亭
王文中	魏 巍	徐 兵	徐敬华	徐向阳
于靖军	余 皞	张勤河	张武翔	

学术秘书 于宏丽 丁昕祯



党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央把科技创新摆在国家发展全局的核心位置，高度重视科技事业发展，我国科技事业取得举世瞩目的成就，科技创新水平加速迈向国际第一方阵。我国科技创新正在由跟跑为主转向更多领域并跑、领跑，成为全球瞩目的创新创业热土，新时代新征程对科技创新的战略需求前所未有。掌握学科发展态势和规律，明确学科发展的重点领域和方向，进一步优化科技资源分配，培育具有竞争新优势的战略支点和突破口，筹划学科布局，对我国创新体系建设具有重要意义。

2016年，中国科协组织了化学、昆虫学、心理学等30个全国学会，分别就其学科或领域的发展现状、国内外发展趋势、最新动态等进行了系统梳理，编写了30卷《学科发展报告（2016—2017）》，以及1卷《学科发展报告综合卷（2016—2017）》。从本次出版的学科发展报告可以看出，近两年来我国学科发展取得了长足的进步：我国在量子通信、天文学、超级计算机等领域处于并跑甚至领跑态势，生命科学、脑科学、物理学、数学、先进核能等诸多学科领域研究取得了丰硕成果，面向深海、深地、深空、深蓝领域的重大研究以“顶天立地”之态服务国家重大需求，医学、农业、计算机、电子信息、材料等诸多学科领域也取得长足的进步。

在这些喜人成绩的背后，仍然存在一些制约科技发展的问題，如学科发展前瞻性不强，学科在区域、机构、学科之间发展不平衡，学科平台建设重复、缺少统筹规划与监管，科技创新仍然面临体制机制障碍，学术和人才评价体系不够完善等。因此，迫切需要破除体制机制障碍、突出重大需求和问题导向、完善学科发展布局、加强人才队伍建设，以推动学科持续良性发展。

近年来，中国科协组织所属全国学会发挥各自优势，聚集全国高质量学术资源和优秀人才队伍，持续开展学科发展研究。从2006年开始，通过每两年对不同的学科（领域）分批次地开展学科发展研究，形成了具有重要学术价值和持久学术影响力的《中国科协学科发展研究系列报告》。截至2015年，中国科协已经先后组织110个全国学会，开展了220次学科发展研究，编辑出版系列学科发展报告220卷，有600余位中国科学院和中国工程院院士、约2万位专家学者参与学科发展研讨，8000余位专家执笔撰写学科发展报告，通过对学科整体发展态势、学术影响、国际合作、人才队伍建设、成果与动态等方面最新进展的梳理和分析，以及子学科领域国内外研究进展、子学科发展趋势与展望等的综述，提出了学科发展趋势和发展策略。因涉及学科众多、内容丰富、信息权威，不仅吸引了国内外科学界的广泛关注，更得到了国家有关决策部门的高度重视，为国家规划科技创新战略布局、制定学科发展路线图提供了重要参考。

十余年来，中国科协学科发展研究及发布已形成规模和特色，逐步形成了稳定的研究、编撰和服务管理团队。2016—2017学科发展报告凝聚了2000位专家的潜心研究成果。在此我衷心感谢各相关学会的大力支持！衷心感谢各学科专家的积极参与！衷心感谢编写组、出版社、秘书处等全体人员的努力与付出！同时希望中国科协及其所属全国学会进一步加强学科发展研究，建立我国学科发展研究支撑体系，为我国科技创新提供有效的决策依据与智力支持！

当今全球科技环境正处于发展、变革和调整的关键时期，科学技术事业从来没有像今天这样肩负着如此重大的社会使命，科学家也从来没有像今天这样肩负着如此重大的社会责任。我们要准确把握世界科技发展新趋势，树立创新自信，把握世界新一轮科技革命和产业变革大势，深入实施创新驱动发展战略，不断增强经济创新力和竞争力，加快建设创新型国家，为实现中华民族伟大复兴的中国梦提供强有力的科技支撑，为建成全面小康社会和创新型国家做出更大的贡献，交出一份无愧于新时代新使命、无愧于党和广大科技工作者的合格答卷！



2018年3月



《2016—2017 机械工程学科发展报告（机械设计）》（以下简称《报告》）根据《中国科协学科发展研究项目管理实施办法（2014 年修订）》的精神和要求，组织机械工程学科的专家学者对机械设计领域开展调研，对其科技发展情况进行研究总结后编写而成。

机械工程涵盖众多领域，学科内容极为丰富，设计作为形成机械产品的起点和先导，决定着产品的功能品质以及制造、服务的价值。产品的结构、性能、成本、可维修性、人机环境、风格等影响产品竞争力的关键因素都是由设计阶段决定的。现代制造业的竞争往往是产品设计的竞争，产品设计创新能力已成为保持企业竞争力的核心和关键。在当前数字化、信息化、智能化发展趋势下，不同学科之间强力融合，这给机械设计带来了巨大的挑战和极大的机遇，也将引发现代设计方法的深刻变革。为此，中国机械工程学会组织成立了以中国工程院院士、本会副理事长谭建荣为首席科学家的专家撰写组，下设五个专题小组，在充分收集资料、深入调查研究和严谨数据分析的基础上，经过多次研讨会讨论和广泛征求本学科领域内专家学者的意见，并反复修改，形成了《报告》。

《报告》共设综合报告及机构学发展研究、传动机械设计发展研究、机械可靠性设计发展研究、车辆设计发展研究、数控机床设计发展研究六个部分，涵盖了与机械设计密切相关的主要领域。共有三十多位专家学者参与了《报告》的专题研究及撰写工作，撰稿者都是工作在机械设计领域研究第一线的知名中青年学者及专家。

《报告》力求客观、科学地评价近几年我国机械设计学基础理论研究以及机械设计学基础理论在不同工业领域应用中取得的创新性和突破性研究进展，通过对国内外研究进展进行对比，对今后机械设计理论和

应用技术的研究趋势进行了展望，努力为从事本领域科研、教学、生产的科技人员，以及国家相关的科研管理和决策部门提供有益的启迪。

由于时间、信息、研究和撰写水平的局限，《报告》中难免存在疏漏之处，欢迎读者指正。

中国机械工程学会
2017 年 11 月



序 / 韩启德

前言 / 中国机械工程学会

综合报告

机械设计学科研究现状与展望 / 003

一、引言 / 003

二、机械设计方法学研究进展 / 005

三、机械设计应用专题领域研究进展 / 021

四、机械设计学发展趋势与未来展望 / 036

参考文献 / 044

专题报告

机构学发展研究 / 059

传动机械设计发展研究 / 100

机械可靠性设计发展研究 / 146

车辆设计发展研究 / 196

数控机床设计发展研究 / 212

ABSTRACTS

Comprehensive Report

Report on Advances in Mechanical Design / 245

Reports on Special Topics

Report on Advances in Mechanism / 252

Report on Advances in Transmission / 253

Report on Advances in Mechanical Reliability Theories and Technologies / 255

Report on Advances in Vehicle Design / 256

Report on Advances in CNC Machine Tools / 257

索引 / 259



综合报告

机械设计学科研究现状与展望

一、引言

“设计”是“设”与“计”的合成词，据《说文解字》，“设”为“施陈”，“计”为“会算”，其含义是设想、运筹、规划和计算。“设计”一词英文为 Design，源于古拉丁文 Designare，意为构思、计划。随着生产发展和科技进步，设计的内涵和外延不断向深度和广度发展，其含义也越来越深刻。设计是人类改造自然的一种创造性智力活动，它几乎涉及人类生产与生活的各个方面。设计过程可概括为：运用自然科学知识与法则，通过输入信息、创意、构思、综合、决策、迭代和寻优等过程，将信息、知识和技术转化为集成创新和整体解决方案，实现应用价值的发明创造和应用创新。机械设计是根据使用要求对机械的工作原理、构型与造型、力和能量的传递方式、运动方式、控制方式、零部件的材料和几何形状、服役工况、性能可靠性、可回收性等进行构思、建模、分析和优化并将其转化为具体蓝图以作为制造依据的工作过程。设计作为形成机械产品的起点和先导，决定着产品的功能品质以及制造、服务的价值。产品的结构、性能、成本、可维修性、人机环境、风格等影响产品竞争力的关键因素与设计的优劣紧密相关。现代制造业的竞争往往是产品设计的竞争，产品设计创新能力已成为企业竞争力的核心和关键。

设计创造推动了社会文明的进步，人类对机械设计理论与方法进行探索以及将其应用于生产和生活实践已有悠久的历史。总体来说，机械设计的发展经历了三个阶段，即直觉设计阶段、理论设计阶段和现代设计阶段。在直觉设计阶段，人们或是从自然现象中直接得到启示，或是全凭人的直观感觉来设计制作工具，设计方案存在于手工艺人头脑之中，缺乏必要的理论基础，产品也比较简单。直觉设计阶段在人类历史中是一个很长的时期，十七世纪以前基本都属于这一阶段。理论设计的发展得益于力学和制造为基



础的科学体系的建立和工业革命的推动。蒸汽机的发明为采矿、冶炼、船舶、食品、铁路等工业提供了强大的动力,也推动了多种行业对机械在载荷、速度、尺寸等方面的需求。这一时期,材料力学、弹性力学、疲劳强度、断裂力学、高温蠕变、流体动力润滑、弯曲疲劳强度等方面取得的研究成果为机械设计的发展提供了有力的理论与技术支持。1854年,德国学者劳莱克斯发表了著作《机械制造中的设计学》,产生了“机构学”“机械零件设计”,成为机械设计的基本内容。第二次世界大战后进入了现代设计阶段,这一时期机械设计学在理论、内容、方法和应用方面得到迅猛发展,相继出现了工业造型设计、TRIZ 创新设计、计算机辅助设计、虚拟设计、基于有限元分析的设计、模块化设计、反求工程、可靠性设计、机械优化设计、绿色设计、智能设计等现代设计方法。尤其是计算机技术在机械设计中的推广,使机械设计的速度和质量大幅提升。在机械设计中计算机的广泛运用和自动化程度的提高,是现代设计的显著特色。同时,机构学及机器人设计、传动机械设计、机械强度与可靠性设计、机床设计、车辆工程设计等工业机械设计学也得到了蓬勃的发展。近年来随着计算、通信、感知、控制等技术的相互融合,不同学科之间交叉频繁,特别是信息技术向先进设计领域的不断渗透,给机械设计学的发展带来了巨大的挑战和极大的机遇。不仅需要有效地将用户的个性化需求、社会性因素、文化与情感、环境友好等融入到复杂机械产品的创意设计之中,还需要充分考虑现代机械装备具有多尺度、多目标、多时空、高维度、非线性、不确定性、开放性等特点,为此需要建立更为广义高效的优化设计平台,实现复杂装备不同层次及尺度的协同设计。

经过三十余年的高速发展,我国已成为全球第二大经济体、制造业大国,但发展主要依靠高要素投入、低成本优势,我国多数企业主要依靠代工生产和仿制,付出了巨大资源 and 环境代价。未来五至十年将是我国实现产业转型升级,迎接世界新产业革命挑战的关键时期,创新设计能力薄弱仍然是制约我国自主研发能力跃升的主要瓶颈。提升创新设计能力,对提升我国制造业的国际竞争力,推动中国制造向中国创造转变,实现创新驱动和跨越发展具有重大意义。为此,有必要开放融合全球先进设计理念、技术、人才等资源要素,推动跨地区、跨产业、跨学科融合发展,形成面向产业、和谐包容的创新设计服务体系,推动中国设计走向世界。针对各工业领域对机械设计学的发展需求,本报告主要概述了近几年我国机械设计学基础理论研究以及机械设计学基础理论在不同工业领域应用中取得的创新性和突破性研究进展,通过对国内外研究进展进行对比,对今后机械设计理论和应用技术的研究趋势进行了展望。

二、机械设计方法学研究进展

(一) 基于 TRIZ 的创新设计

1. 研究进展

创新设计的实现依赖于企业研发人员的领域知识与创新能力,技术创新方法的应用则是提升研发人员创新能力和创新效率的有效途径,可辅助研发人员快速、高质量地开发出产品创新设计方案。产品创新通过模糊前端、新产品开发及商业化三个阶段实现。模糊前端和概念设计是位于产品创新前端且与创新设计方案构建直接相关的两个核心阶段,模糊前端阶段产生创新设想,概念设计阶段构建创新原理^[9]。

TRIZ 是产品创新的一般化理论^[10],是苏联 Altshuler 及其领导的一批研究人员归纳总结出来的创造性问题解决理论和方法。二十世纪八十年代中期前,该理论对其他国家保密。此后,一批科学家移居美国等西方国家,逐渐把该理论介绍给世界产品开发领域,对该领域产生了重要影响。目前,TRIZ 已经演化成为一套系统地解决各类复杂技术问题的方法和工具,这些方法包括技术进化理论(Technical evolution theory)、发明原理(Inventive Principles)、发明问题解决算法(Algorithm for Inventive Problem Solving)及标准解(TRIZ Standard Techniques)等。

设计冲突是 TRIZ 定义技术问题的基础,产品创新的关键在于发现和解决设计过程中的冲突,这决定了冲突及其解决技术在 TRIZ 中的重要地位^[11-13]。TRIZ 对于创新有明确的定义和较完整且可操作的原理,在产品创新设计中得到了广泛关注和应用,它并不针对某个具体机构、机械或过程,而是要建立解决问题的模型及指明问题解决对策的探索方向,提供人们思考问题、解决问题的科学化依据^[14, 15]。TRIZ 在工程上实用性强,其方法核心系经验的集合,可视为一种知识库的方法,可有效地帮助设计者缩短试验纠错的过程并创造性地解决设计难题。

关于 TRIZ 的研究、普及以及应用越来越引起我国学者的关注,高常青等^[16]提出了概念因子分解重构法用于领域解的产生,基于时间、空间、客体三个概念解空间基本维度分解问题,获得概念因子及其相互关系,将其作为思维活动的信息载体,以 TRIZ 解为约束,以各种创新方法为基础,建立了可控性思维流程,提供了由 TRIZ 求解领域解的系统思维方法。檀润华等^[17, 18]对 TRIZ 分析问题方法、解决问题方法和创新流程等进行改进,形成了基于 TRIZ 的系统化创新方法,并将基于 TRIZ 的系统化创新方法应用于产品模糊前端阶段的创新设想产生,形成了 TRIZ 框架下产品创新设想产生关键技术、需求与功能进化辅助产品创新设想产生关键技术、生物效应辅助产品创新设想产生关键技术,这些技术可有效地指导研发人员在模糊前端阶段不断形成高质量的产品创新设想;将基于 TRIZ 的系统化创新方法应用于产品概念设计阶段的创新原理构建,形成了 TRIZ 辅助



产品突破性创新设计关键技术、TRIZ 辅助产品破坏性创新设计关键技术、TRIZ 辅助产品集成创新设计关键技术和 TRIZ 辅助产品专利规避设计关键技术;此外,将 TRIZ 辅助机械产品创新设计关键技术通过技术转化、技术合作等方式应用在机械制造企业中,为企业培养了一批高层次技术创新人才,解决了大量实际工程问题,与企业合作开发了一批新产品,产生了较大的经济效益和社会效益。

2. 国内外研究进展比较

TRIZ 在国外的研究开始得较早,已经取得了一些研究成果,且将其应用到实际问题中。在俄罗斯,TRIZ 方法一直作为大学的专业技术必修科目,并且已广泛应用于工程领域中。在欧美,将 TRIZ 与计算机技术相结合催生了计算机辅助创新技术。美国有些大学也开设了 TRIZ 课程,而且成立了有关 TRIZ 的研究、咨询机构。同时,一些公司开始致力于以 TRIZ 为核心的 TRIZ 软件商业化,较为著名的有 Tech Optimizer、Innovation Workbench、Goldfire 等。目前关于 TRIZ 的研究文献较少,东京大学的烟村洋太郎开始将 TRIZ 引入教学中,开设了“机械创造学”等课程,尝试提高学生创造力,出版了介绍 TRIZ 的书籍。Domb^[225]指出经典的和软件化的 TRIZ 方法都非常倚重使用类比作为教授方法和问题解决方法。关于 TRIZ 研究现状,Ilevbare 等^[226]通过综述做出了更详细的阐述。

TRIZ 引入国内只不过是近几年的事,我国对 TRIZ 的研究、教学与应用工作刚处于起步阶段,尚未产生较大的社会效益和经济效益。檀润华等^[227, 228]致力于以 TRIZ 为核心的 CAI 软件研究取得了重要成果,开发了国内第一套具有自主知识产权的基于 TRIZ 的商品化 CAI 软件 Invention Tool,并实现了基于 TRIZ 的创新应用。马力辉等^[229]针对 TRIZ 冲突解决理论在实践中存在的具体问题,深入研究了冲突的确定及多冲突间的相互关系分析方法,提出了领域解转化的实现方法,最终形成复杂冲突设计系统的设计过程模型。

(二) 基于外形与内涵的外型设计

1. 研究进展

外型设计是产品外形与内涵的设计。国际工业设计协会(International Council of Societies of Industrial Design, ICSID)在 1980 年巴黎第十一次年会上定义“就批量生产的工业产品而言,凭借训练、技术知识、经验及视觉感受而赋予材料、结构、形态、色彩、表面加工以及装饰以新的品质和规格,称为工业设计。根据当时的具体情况,工业设计师应在上述工业产品全部侧面或其中几个侧面进行工作,而且当需要工业设计师对包装、宣传、展示、市场开发等问题付出自己的技术知识和经验及视觉评价能力时,这也属于工业设计的范畴。”^[1]由此可见,工业设计是一个内涵和外延都十分广泛的专业。

现代社会的发展已进入数字技术时代,目前基于计算机技术的工业设计不断涌现,如工业创意设计技术、计算机辅助工业设计、计算机支持的人机交互设计、计算机支持的协同设计、计算机辅助的创新造型设计等。其中工业创意设计技术是融入文化与情感的创意

设计技术,属于多学科交叉结合的新技术,包括创意认知与协同设计技术、情感表达与评价技术、文化品牌、文化构成及多元文化融合设计技术、个性化配置设计技术、基于人机工程的环境友好设计技术、基于网络大数据与云服务的协同设计技术等^[2]。

何人可等^[3]通过对界面交互人格化的设计方法的探讨,提高了界面交互系统的审美感受和情感体验,强化了用户探索界面交互方式的主观意愿,这不仅有助于保持界面交互体验与日常生活体验的连续性,而且对交互设计研究在审美层面的延展具有重要意义。夏清洁等^[4]开展了机车协同设计方法研究,其针对机车协同设计数据之间的传递,分析了基于模型的定义(Model Based Definition, MBD)的数据集构成,在此基础上研究了协同设计原理,并提出了基于协同设计数据成熟度关键技术,从设计、制造、检验三个角度出发,给出了系统协同设计流程,为机车的协同设计提供了指导,有效降低了机车的研制周期。在人机工程学方面,为有效提升座椅的舒适性及设计合理性,减少不良坐姿对人体健康造成的损害,杨宛萤和张福昌^[5]以人机工程学原理和方法为依据,探讨了坐姿变化和座椅因素对人体舒适性的影响,同时提出了基于坐姿变化的人机工程学座椅设计准则,从而为座椅结构形式和功能尺寸的设计提供了科学依据,为座椅的人机工程学改良设计提供了有效方案。罗仕鉴和董烨楠^[6]为了将器物知识融入文化创意设计领域,从工业设计角度出发结合跨领域专家的协同合作以及迭代设计方法,研究了器物知识在创意设计领域中的分类,通过专家调查建立器物本体知识分类框架以及通过实验研究建立器物设计知识分类框架,并在综合这两类框架的基础上建立面向创意设计的器物知识分类框架。吕杰锋等^[7]从工业设计学科的视角出发,对现代军事舰艇的外观造型设计进行风格类型研究,运用多种不同的风格描述模型与心理测试表,从大量现代舰艇中归纳、提炼出三种特色鲜明的造型设计风格类型,并分别对其风格特征加以描述,对影响风格形成的因素进行分析研究,总结了现代舰艇造型风格发展的基本规律与机制。赵江洪等^[8]研究了汽车造型特征语义表达中的工程驱动因素,采用问卷调查法获取用户对汽车造型特征的工程语义认知情况,用分析法对工程语义造型对象及其认知要素属性类型进行归类,结合案例研究验证工程驱动在汽车造型设计中的作用。研究分析表明,体量类型属性的造型特征对工程语义表达贡献最大,形面属性特征次之;工程语义是整体汽车造型特征语义表达的重要组成部分,是汽车造型设计的一个驱动来源,将工程驱动作为设计策略纳入汽车造型设计方法体系中,是对汽车造型设计理论和应用的有用补充。

2. 国内外研究进展比较

工业设计已经在发达国家趋于基本成熟,早在1957年就成立了国际工业设计协会(现为国际设计组织),该组织每两年召开一次会议,现有近五十个国家和地区共一百五十多个会员组织参加,促进了各国设计界的交流和发展。英国是工业设计的发源地,非常重视工业设计的作用,成立了国家设计委员会,全面推动英国工业设计的发展。德国在工业革命后一直注重现代工业设计的发展,拥有一万三千多家设计机构。美国是世界先进制造