



面向 2030

中国机械工程技术路线图丛书

中国机械工程学会 主编

焊接

技术路线图

WELDING TECHNOLOGY ROADMAPS

中国机械工程学会焊接分会 编著



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



面向 203

中国机械工程技术路线图丛书

中国机械工程学会 主编

焊接

技术路线图

WELDING TECHNOLOGY ROADMAPS

中国机械工程学会焊接分会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接技术路线图 / 中国机械工程学会焊接分会编著. — 北京: 中国科学技术出版社, 2016.11

(中国机械工程技术路线图丛书)

ISBN 978-7-5046-7263-6

I. ①焊… II. ①中… III. ①焊接—技术发展—研究报告—中国
IV. ①TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 253713 号

策划编辑	吕建华 赵 晖
责任编辑	夏凤金 赵 佳
装帧设计	中文天地
责任校对	刘洪岩
责任印制	张建农

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	321千字
印 张	18.25
版 次	2016年11月第1版
印 次	2016年11月第1次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7263-6 / TG·21
定 价	90.00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)

丛书编委会

荣誉主任 路甬祥

主 任 周 济

副 主 任 张彦敏

委 员 (按姓氏笔画排序)

王玉明	王立鼎	王至尧	王国彪	王麟书	尤 政
卢 刚	卢秉恒	田利芳	包起帆	冯培恩	邢 敏
朱 胜	朱 荻	朱森第	任洪斌	任露泉	刘艳秋
关 桥	孙守迁	孙智慧	苏仕方	李元元	李圣怡
李晓延	李培根	李敏贤	李新亚	杨申仲	杨明忠
杨海成	吴国凯	吴锡兴	何加群	沙宝森	沈功田
宋天虎	陆 辛	陆大明	陈 钢	陈 强	陈超志
苑世剑	林尚扬	林忠钦	周 云	周 宇	屈贤明
赵有斌	胡正寰	柳百成	钟 掘	钟永刚	钟志华
钟群鹏	娄延春	徐小力	徐永昌	徐均良	徐志磊
徐滨士	高金吉	郭东明	黄卫东	葛晨光	曾广商
雷源忠	蔡惟慈	谭建荣	熊有伦	黎 明	潘云鹤
潘健生					

本书编委会

指导委员会

潘际奎 关 桥 徐滨士 林尚扬 宋天虎
吴 林 陈剑虹 单 平 张彦敏 陈 强

编审委员会

主 任 冯吉才

副 主 任 李晓延 王麟书

主 编 李晓延

主 审 史耀武

委 员 (按姓氏笔画排序)

于浩楠 王 敏 王智慧 方洪渊 田艳红
刚 铁 刘会杰 刘金合 刘家发 闫久春
李俐群 李慕勤 吴九澎 邸新杰 邹贵生
张 平 陈华斌 陈树君 陈善本 武传松
罗 震 徐连勇 高洪明 唐新华 彭 云
韩永馥 熊华平

秘 书 黄彩艳

总 序

当今世界，科技创新日新月异，信息化、知识化、现代化、全球化发展势不可挡，新兴发展中国家快速崛起，国际经济和制造产业格局正面临新的大发展、大调整、大变革。我国制造业也将迎来新的发展战略机遇和挑战。

目前，我国制造业的规模和总量都已经进入世界前列，成为全球制造大国，但是发展模式仍比较粗放，技术创新能力薄弱，产品附加值低，总体上大而不强，进一步的发展面临能源、资源和环境等诸多压力。到 2020 年，我国将实现全面建设小康社会、基本建成创新型国家的目标，进而向建成富强、民主、文明、和谐的社会主义现代化国家的宏伟目标迈进。在人类历史上，大凡知识和技术创新，只有通过制造形成新装备才能转变为先进生产力。许多技术和管理创新也是围绕与制造相关的材料、工艺、装备和经营服务进行的。可以预计，未来 20 年，我国制造业仍将保持强劲发展的势头，将更加注重提高基础、关键、核心技术的自主创新能力，提高重大装备集成创新能力，提高产品和服务的质量、效益和水平，进一步优化产业结构，转变发展方式，提升全球竞争力，基本实现由制造大国向制造强国的历史性转变。

机械制造是制造业最重要、最基本的组成部分。在信息化时代，与电子信息等技术融合的机械制造业，仍然是国民经济发展的基础性、战略性支柱产业。工业、农业、能源、交通、信息、水利、城乡建设等国民经济中各行业的发展，都有赖于机械制造业为其提供装备。机械制造业始终是国防工业的基石。现代服务业也需要机械制造业提供各种基础设备。因此，实现由制造大国向制造强国的历史性转变，机械制造必须要先行，必须从模仿走向创新、从跟踪走向引领，必须科学前瞻、登高望远、规划长远发展。

中国机械工程学会是机械工程技术领域重要的科技社团，宗旨是引领学科发展、推动技术创新、促进产业进步。研究与编写中国机械工程技术路线图，是历史赋予学会的光荣使命。一段时间以来，机械工程学会依靠人才优势，集中专家智慧，充分发扬民主，认真分析我国经济社会发展、世界机械工程技术和相关科学技术发展的态势，深入研究我国机械行业发展的实际和面临的任务及挑战，形成了《中国机械工程技术路线图》。

《中国机械工程技术路线图》是面向 2030 年我国机械制造技术如何实现自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来的战略路线图。路线图力求引领我国机械工程技术 and 产业的创新发展，进而为我国建设创新型国家，实现由制造大国向制造强国的跨越，提升综合国力和国际竞争力发挥积极作用。

路线图的编写努力坚持科学性、前瞻性、创造性和引导性。科学性就是以科学发展观为指导，立足于科学技术的基础，符合科学技术和产业发展的大趋势。路线图不是理想主义的畅想曲，而是经过努力可以实现、经得起实践和历史检验的科学预测。前瞻性就是用发展的眼光看问题，不仅着眼于当前，而要看到 10 年、20 年后甚至更长远的发展。我们今天所面临的挑战和问题，很多都不是短期能够解决的，而是需要经过 10 年、20 年，甚至更长时间的持续努力才能根本化解。我们不仅要立足我国的发展，也要放眼世界的发展，对可能出现的科技创新突破、全球产业结构和发展方式的变革要有所估计。我们不仅要考虑已有的科学技术，还要考虑未来的科技进步与突破，如物理、化学、生物、信息、材料、纳米等技术的新发展，考虑它们对制造业可能产生的影响和可能带来的变化。对一些重要领域和发展方向、发展趋势要有一个比较准确的把握和判断。创造性就是根据我国国情进行自主思考和创新。路线图的编写是一个学习过程、研究过程、创造过程。我们既要学习借鉴国外的技术路线图，学习借鉴国外的成功经验和先进技术，又不完全照搬、不全盘模仿。路线图不仅要符合世界发展的大趋势，更要符合中国的实际国情。引导性就是要对机械制造技术和产业发展起引领和指导作用。路线图不是百科全书，也不同于一般的技术前沿导论，它是未来创新发展的行动纲领。路线图既要有清晰的基础共性、关键核心技术的提炼，同时也要有代表重大创新集成能力的主导性产业和产品目标，要适应企业行业的整体协调发展。路线图最终衡量的标准是先进技术是否能够转变成产业，是否能够占领市场。

《中国机械工程技术路线图》对未来 20 年机械工程技术发展进行了预测和展望。明确、清晰地提出了面向 2030 年机械工程技术发展的五大趋势和八大技术。五大趋

势归纳为绿色、智能、超常、融合和服务，我认为是比较准确的。这 10 个字不仅着眼于中国机械工程技术发展的实际，也体现了世界机械工程技术发展的大趋势，应该能够经得起时间的考验。八大技术问题是从小机械工程 11 个技术领域凝练出来的，是对未来制造业发展有重大影响的技术问题，即复杂系统的创意、建模、优化设计技术，零件精确成形技术，大型结构件成形技术，高速精密加工技术，微纳器件与系统（MEMS），智能制造装备，智能化集成化传动技术，数字化工厂。这些技术的突破，将提升我国重大装备发展的基础、关键、核心技术创新和重大集成创新能力，提升我国制造业的国际竞争力以及在国际分工中的地位，将深刻影响我国制造业未来的发展。

编写路线图，还要考虑如何为路线图的实施创造条件。如果没有政府的理解 and 政策环境的支持，没有企业积极主动的参与和有关部门的紧密合作，如果不通过扩大开放，改革体制，创新机制，为人才养成和技术创新创造良好的环境，促进企业为主体、以市场为导向、产学研用结合的技术创新体系的形成，如果没有一系列有力举措和实际行动，路线图所描绘和规划的目标就可能只是寓于心中的美好愿望和一幅美丽的图景。我认为，创新、人才、体系、机制、开放，是路线图成功实施的关键要素。

尤其值得关注的是，国际金融危机后，发达国家重视和重归发展制造业的势头强劲。2011 年 6 月美国总统科技顾问委员会（PCAST）向奥巴马总统提交的《确保美国在先进制造业中的领导地位》报告，就如何振兴美国在先进制造业中的领导地位提出了战略目标和政策的建议，建议联邦政府启动实施一项先进制造计划（AMI）。AMI 所建议的项目实施经费由商务部、国防部和能源部共同分担。项目基金最初每年 5 亿美元，四年后提高到每年 10 亿美元，并将在未来的 10 年里，实现美国国家科学基金会、能源部科学办公室和国家标准与技术院等三个关键科学机构的研究预算增倍计划，实现研发投入占 GDP3% 的目标。着力为先进制造技术创新和产业的振兴提供更有吸引力的税收政策，建设可共享的技术基础设施和示范工厂等，加强对基础、共性、关键技术创新的支持，吸引和培养先进制造的创造人才，培育支持中小制造企业创新和发展等。

政府在推动机械工业发展中具有关键作用。政府的政策支持是机械工程技术路线图顺利实施的重要保障。路线图向政府及各有关部门提出了一些具体建议，包括制订中国未来 20 年先进制造发展规划、设立科技专项、创新科研体制机制、改进税收政策和投融资等，希望得到各方面的理解和支持，共同为我国实现制造强国的目标而努力。

人才是实现制造强国之本，教育是育才成才之源。在通向路线图目标的种种技术路径上，既需要从事基础前沿研究的科学家，也需要从事技术创新的工程师，还需要更多的优秀技师、高级技工等高技能人才。我们不仅要提高人才培养的质量，更要注重优化人才结构，发展终身继续教育。

对于中国机械工程学会而言，组织编写完成《中国机械工程技术路线图》只是迈出了第一步。只有路线图的研究成果得到政府和社会的大力支持，只有吸引企业和广大科技工作者的积极参与，路线图的实施才能成为广泛、深入、创造性的实践，路线图的目标才可能实现。因此，宣传普及、推介实施路线图是学会下一步更加重要而紧迫的任务。此外，路线图的持续研究、及时补充完善与修改，要成为学会今后长期、持续性的工作，成为学会建设国家科技思想库的重要组成部分。

期望《中国机械工程技术路线图》经得起实践检验，期望中国机械工程技术取得创新突破，期望中国机械工业由大变强，期望中国尽快成为制造强国乃至创造强国！

是为序。



2011年8月

摘 要

技术路线图是技术经营和研究开发管理的基本工具，在欧美等发达国家实施科技创新管理和战略集成规划中得到广泛应用。为实施《中国制造 2025》和我国机械制造强国战略，制定我国的焊接技术路线图具有十分重要的意义。由于焊接技术的复杂性和学科交叉特点，焊接技术路线图编制很难覆盖焊接技术涉及的所有方面，本次编制焊接技术路线图的内容主要包括在钎焊与特种连接、切割、堆焊及喷涂、焊接材料、压力焊接、高能束流焊接、焊接质量保证、焊接力学与结构制造、焊接电源与装备、计算机辅助焊接工程、机器人焊接、微纳连接和焊接环境与卫生。围绕上述 13 个领域，分析其未来市场需求及产品、技术壁垒及研发需求，并对技术发展路径进行研究。焊接技术路线图的编制采用了德尔菲法、头脑风暴法、情景分析法及 SWOT 分析法等，以 2015 年为起点，绘制了未来 15 年的发展路线。

本书所绘制的路线图可供产业技术管理部门和产业组织的人员参考，也可供与焊接技术相关的科研机构、企业管理者、大专院校的学生参考使用。

Abstract

Technology roadmap is a basic tool for technology and R&D managements. It is widely used in scientific and technology innovation management and strategic planning in Europe, the United States and other developed countries. Welding technology plays an important role in the successful implementation of Made in China 2025 and Mechanical Manufacture Power Strategy. Therefore, the drawing up of the welding technology roadmaps is of great significance. Due to the complexity of welding technology and overlapping in disciplines, it is hard to include all aspects of welding and related technologies in this roadmap. The main scope in this roadmap involves 13 branch roadmaps, such as brazing, soldering and special joining, cutting, overlaying and surface engineering, weld ability and welding materials, pressure welding, high energy density beam welding, welding production and quality assurance, welding mechanics and structure manufacturing, welding process and equipment, computer-aided welding technology, welding robots, welding environment and health, micro-joining technology, and welding environment. While, on the other hand, Delphi method, Brainstorming method, Scenario analysis and SWOT analysis were used in the drawing process, and the development route starting from the year of 2015 to 2020, 2025 and 2030 were sketched.

The welding technology roadmap could be used as a reference for staff from technology management departments and industrial organizations, as well as for personnel of welding related research institutes, enterprise managers, and college students.

目 录

第一章	绪论	1
第二章	钎焊与特种连接技术	4
第一节	概述	4
第二节	市场需求及产品分析	6
第三节	技术壁垒及研发需求	19
第四节	分路线图	26
第三章	切割技术	32
第一节	概述	32
第二节	市场需求及产品分析	36
第三节	技术壁垒分析	42
第四节	分路线图	45
第四章	堆焊及喷涂技术	47
第一节	概述	47
第二节	市场需求分析	57
第三节	技术目标分析	73
第四节	技术壁垒分析	76
第五节	研发需求分析	77
第六节	分路线图	83

第五章	焊接材料	87
第一节	概述	87
第二节	市场需求及产品分析	91
第三节	技术壁垒及研发需求	99
第四节	分路线图	102
第六章	压力焊接技术	104
第一节	概述	104
第二节	市场需求及产品分析	109
第三节	技术壁垒及研发需求	116
第四节	分路线图	118
第七章	高能束流焊接技术	121
第一节	概述	121
第二节	市场需求及产品分析	134
第三节	技术壁垒及研发需求	146
第四节	分路线图	154
第五节	分路线图实施建议	156
第八章	焊接质量保证技术	158
第一节	概述	158
第二节	市场需求及差距分析	162
第三节	技术壁垒及研发需求	165
第四节	分路线图	169
第九章	焊接力学与结构制造技术	171
第一节	概述	171
第二节	市场分析	172
第三节	目标分析	177
第四节	技术壁垒分析	178
第五节	研发需求	181
第六节	分路线图	182
第七节	分路线图的实施建议	183

第十章 焊接电源与装备技术	185
第一节 概述	185
第二节 市场需求及产品分析	186
第三节 技术壁垒及研发需求	195
第四节 分路线图	197
第五节 分路线图实施建议	198
第十一章 计算机辅助焊接工程	200
第一节 概述	200
第二节 发展现状	200
第三节 技术目标	204
第四节 技术壁垒与研发需求	205
第五节 关键技术	206
第六节 分路线图	207
第十二章 机器人焊接技术	209
第一节 概述	209
第二节 市场需求及产品分析	210
第三节 技术壁垒及研发需求	223
第四节 分路线图	224
第十三章 微纳连接技术	226
第一节 概述	226
第二节 市场需求和产品分析	229
第三节 技术壁垒及研发需求	250
第四节 分路线图	252
第五节 分路线图实施建议	253
第十四章 焊接环境与卫生技术	255
第一节 概述	255
第二节 市场需求及产品分析	257
第三节 技术壁垒及研发需求	270

第四节	分路线图	273
第五节	分路线图实施建议	274
索引		276
后记		278

第一章 绪论

一般认为,技术路线图反映对某一技术领域前景的预测,以及实现这个前景的方法。技术路线图的编制和应用起源于20世纪70年代美国汽车行业发展的需要,此后技术路线图作为一种灵活的、结构化的前瞻方法,被迅速地推广到很多技术领域,不仅在行业或企业的技术决策和产业规划中得到应用,而且还被一些国家应用于政府的战略规划中。

技术路线图是产业技术经营和研究开发管理的基本工具,是以科学知识为基础的、关于技术前景发展的产业共识。产业技术路线图的编制,需要关联领域科技专家、政府决策者和技术成果使用者的共同参与。

基于上述认识,《焊接技术路线图》依托中国机械工程学会焊接分会的人才优势,集中专家智慧,充分发扬民主,在认真分析我国焊接技术和相关科学技术发展态势,深入研究我国焊接行业发展的实际和面临的任务及挑战的基础上完成。在编制过程中,参考了国内外其他产业技术路线图编制的基本程序和通用方法。

《焊接技术路线图》的编制包括了路线图准备阶段和开发阶段等基本流程。准备阶段的主要任务是确定参与路线图编制的专家,成立《焊接技术路线图》编制领导小组,界定研究的范围和边界。2014年11月,在中国机械工程学会的指导下,成立了以焊接分会副理事长为主任、以焊接分会12个专业委员会部分专家为主体的编写委员会。由于焊接技术的复杂性和学科交叉特点,路线图的编制很难覆盖焊接技术涉及的所有方面,本次路线图的范围主要界定在以下13个主要方面:钎焊与特种连接,切割,堆焊及热喷涂,焊接材料,压力焊接,高能束流焊接,焊接质量保证,焊接力学与结构制造,焊接电源与装备,计算机辅助焊接工程,机器人焊接,微纳连接,焊接环境与卫生。每个方面包含的焊接相关技术都有各自的特点,很难相互覆盖与包容,因此,《焊接技术路线图》由13个分路线图构成。《焊接技术路线图》开发阶段的主要任务是,分析判断焊接技术市场需求,确定焊接产业发展目标,识别实现焊接技术需求的主要技术领域,分析判断阻碍焊接产业目标实现的技术壁垒、主要技术壁垒

中的关键技术难点，确定焊接技术研发需求和研发模式，对焊接技术研发项目进行凝练，绘制焊接技术路线图。

在市场需求分析、焊接产业目标分析、焊接技术壁垒分析、焊接研发需求分析中采用的分析方法主要有德尔菲法、头脑风暴法、情景分析法、SWOT 分析法等。

德尔菲法实际上是专家调查统计法，其主要特点是匿名征求焊接专家的意见，对收集的专家意见进行统计归纳，再匿名反馈给焊接专家，再次匿名征求焊接专家意见，对专家意见进行进一步统计归纳。如此多次反复，凝炼专家共识。

头脑风暴法是使用一系列激励和引发新观点的特定规则和技巧，通过专家的共同努力来寻求特定问题解答的方法。头脑风暴法的原则是：每次聚焦一个核心问题，专家自由畅谈，禁止批评性评价，追求新设想的数量，形成新设想的思维共鸣。

情景分析法是在对焊接产业和焊接技术中演变提出关键假设的基础上，通过对未来详细严密地推理和描述来构成未来各种可能的解决方案。情景分析法的原则是：追求系统性思考，避免单一个体的分析；鼓励开放性思考，考虑多种可能结局；推动策略性思考，兼顾眼前与长远利益。在技术路线图编制中，情景分析法一般包括如下步骤：明确决策焦点及其不确定性；识别影响决策成功的关键因素；分析技术发展的外在驱动力，决定关键决策因素的未来状态；基于市场的高冲击力和高度不确定性，构建不确定轴面，发展情景逻辑；分析情景内容，认定情景在决策上的涵义。

SWOT 分析法又称为态势分析法。SWOT 四个英文字母分别代表：优势（Strength）、劣势（Weakness）、机会（Opportunity）、挑战（Threat）。其中，优势和劣势是产业发展的内在因素，机会和挑战是产业发展的外部因素。在技术路线图编制中，SWOT 分析法一般包括如下步骤，首先分析环境因素，环境因素分为外部环境因素和内部环境因素，外部环境因素包括机会因素和挑战因素，它们是外部环境中对产业发展产生直接影响的有利和不利因素，属于客观因素。内部环境因素包括优势因素和劣势因素，它们是产业在其发展中自身存在的积极和消极因素，属于主动因素。其次对于各种因素根据轻重缓急或影响程度进行排序，构造 SWOT 矩阵。在完成环境因素分析和 SWOT 矩阵的构造后，下一步可制定出相应的行动计划。行动计划制定的基本思路是发挥优势因素，克服劣势因素，利用机会因素，化解挑战因素。最后完成 SWOT 分析表，依据与潜在的机会相关还是与潜在的挑战相关，分别将识别出的所有优势和劣势分成两组，构件一个表格，把优势和劣势与机会和挑战配对，分别放在相应的表格中，这一表格表明了内部的优势和劣势与外部的机遇和挑战的平衡。