



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

特种 加工

技术路线图

NONTRADITIONAL MANUFACTURING TECHNOLOGY ROADMAPS

中国机械工程学会特种加工分会 编著



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



2030

中国机械工程技术路线图丛书

中国机械工程学会 主编

特种加工

技术路线图

NONTRADITIONAL MANUFACTURING TECHNOLOGY ROADMAPS

常州大学图书馆
藏书章

中国机械工程学会特种加工分会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

特种加工技术路线图 / 中国机械工程学会特种加工
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 978-7-5046-6510-2

I. ①特… II. ①中… III. ①特种加工—技术发展—
研究报告—中国 IV. ①TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 253711 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	245千字
印 张	13.75
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 978-7-5046-6510-2 / TG · 20
定 价	68.00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					

责任编辑 钟永刚 刘艳秋 田利芳

本书编委会

主 任 朱 荻

执行主任 叶 军

副 主 任 赵万生 白基成 肖荣诗 李涤尘

徐均良 翟力军 陈远龙

委 员 (按姓氏笔画排序)

千为民 山昌祝 王华明 王振龙 王德新 石世宏

卢智良 史玉升 曲宁松 朱 宁 朱永伟 朱红钢

朱增伟 伏金娟 刘永红 刘志东 江开勇 孙洪波

李 勇 李冬庆 李尚政 杨永强 余祖元 张文武

张永康 张明岐 张建华 张海鸥 陈 涛 陈济轮

陈根余 林 峰 季凌飞 周建忠 周碧胜 姚建华

高坚强 郭钟宁 郭艳玲 黄 婷 曾永彬 焦俊科

参加编写单位

(按拼音排列)

北京工业大学

北京航空制造工程研究所

北京市电加工研究所

常州工学院

大连理工大学

大族激光科技产业集团股份有限公司

广东工业大学

哈尔滨工业大学

杭州华方数控机床有限公司

合肥工业大学

吉林大学

南京航空航天大学

清华大学

山东大学

上海交通大学

首都航天机械公司

苏州电加工机床研究所有限公司

西安航空动力股份有限公司

新疆短电弧科技开发有限公司

扬州大学

浙江工业大学

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

中国石油大学(华东)

特别支持单位

江苏冬庆数控机床有限公司

苏州电加工机床研究所有限公司

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、世界机械工程技术及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委员会、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

本书面向 2030 年，系统阐述了我国特种加工技术的发展现状、社会需求、应用前景、研发重点、关键技术及建议的发展路径，提出了未来的发展目标和实现措施。

全书共六章，第一章和第二章论述了特种加工技术的重要性及发展现状，分析了特种加工技术的发展机遇、发展趋势及面临的挑战；第三章至第五章从产业需求、典型装备、关键技术等方面对放电加工、电化学加工、激光加工等技术分别进行了论述，提出了不同时间节点的发展重点与实现路径，并预测了可达成的目标；第六章提出了实施路线图的关键要素及对国家政策的建议。

本书可作为政府部门决策及企业制定发展规划时的参考依据，也可从事特种加工技术教学、研究、开发、生产的科技人员提供一些启发。

Abstract

Aiming at the national developmental targets towards the year 2030, this book systematically presents the status quo, social demands, perspectives, R&D priorities, and the key techniques of the nontraditional manufacturing technologies in China. The roadmap describing how to achieve the goals is also highlighted. The objectives of the R&D of nontraditional machining technologies are described, and the corresponding practical measures are suggested as well.

This book comprises of six chapters in total. Chapter 1 and Chapter 2 describe the importance and the R&D status quo of the nontraditional manufacturing technologies, and analyze the development trends, opportunities and the challenges as well. Chapter 3 through Chapter 5 discuss the different nontraditional technologies including electrical discharge machining, electrochemical machining, laser machining, etc. in various aspects such as industrial demands, typical machineries, key techniques and so on. The reachable goals and corresponding approaches, the development priorities are also proposed. Chapter 6 emphasizes the necessary measures to achieve the determined objectives, and proposes the policy advices as well.

If this book can be of any references for the policy maker or decision makers in governmental agencies and enterprises, or it can offer some inspirations to the developers and researchers in the domain of nontraditional manufacturing technologies, the authors would be very delighted.

目 录

引 言	1
第一章 特种加工技术发展的机遇与挑战	2
第一节 特种加工技术的重要性及发展现状	2
第二节 特种加工技术的发展机遇及挑战	12
第二章 特种加工技术的发展趋势	19
第一节 独特	19
第二节 智能	20
第三节 融合	21
第四节 绿色	22
第五节 优质	23
第三章 放电加工技术	24
概论	24
第一节 电火花成形加工技术	27
第二节 单向走丝电火花线切割加工技术	39
第三节 往复走丝电火花线切割加工技术	48
第四节 高速电火花小孔加工技术	62
第五节 微细电火花加工技术	73
第六节 高效放电加工技术	83
第四章 电化学加工技术	99
概论	99

第一节	电化学成形加工技术	100
第二节	微细电解加工技术	108
第三节	电铸技术	117
第四节	电化学复合加工技术	125
第五章	激光加工技术	138
	概论	138
第一节	激光切割技术	139
第二节	激光制孔技术	147
第三节	激光连接技术	154
第四节	激光表面强化与再制造技术	164
第五节	激光刻蚀技术	173
第六节	激光复合加工技术	184
第七节	超快激光前沿加工技术	190
第六章	实施路线图的关键要素及对国家政策的建议	200
第一节	实施路线图的关键要素	200
第二节	实施路线图的政策建议	201
索 引		203
后 记		205

引 言

特种加工技术是先进制造技术的重要组成部分，它基于物理或化学能量场，利用电能、热能、光能、电化学能、化学能、磁能、声能及它们的复合，对工件材料进行去除、增加、变形、改性或连接，从而达到零部件的设计目标。特种加工解决了大量传统加工方法无法解决的加工难题，发挥了不可或缺的作用，在航空航天、能源、汽车、模具、医疗、电子、冶金、石化、地质等行业得到了广泛应用，为我国制造业的发展做出了重要贡献。典型的特种加工技术包括电加工（包括放电加工和电化学加工）、激光加工、增材制造、电子束加工、离子束加工、水射流加工、超声加工等。

我国特种加工技术在发展过程中，始终能沿着独立自主的道路前行，不断创新，形成了独具特色的自主技术体系，具有较强的国际影响力和竞争力。但毋庸讳言，尽管我国特种加工技术取得了长足的进步，但就目前所能达到的技术水平及产业基础而言，创新能力仍较薄弱，高端技术及产品的性能质量与国际先进水平相比仍有一定的差距。因此，研究和提出我国特种加工技术中长期发展方向和发展路径很有必要。

《特种加工技术路线图》以特种加工技术研发、产业应用和未来发展为主线，分别对放电加工、电化学加工、激光加工等特种加工技术的基本现状、发展趋势、社会需求、应用前景、研发重点、关键技术和实现路径等进行研究，提出了面向 2030 年特种加工技术的发展目标和实现措施。伴随着新的技术产业变革，特种加工技术正发挥着越来越重要的作用，也面临着前所未有的挑战与机遇。在“十三五”至“十五五”期间，特种加工技术与装备将呈现“独特、智能、融合、绿色、优质”五大发展趋势。

特种加工在制造业中已创造了许多奇迹，把许多不可能变为了可能，在未来将获得更高水平的发展及更为广泛的应用，更好地肩负起对国家的特殊责任。

第一章 特种加工技术发展的机遇与挑战

第一节 特种加工技术的重要性及发展现状

随着科学技术的发展和社会的进步,各种新材料、新结构以及形状复杂的精密、微细零件和器件大量涌现,对制造业提出了一系列迫切需要解决的难题。由于采用已有的加工方法来加工这些零部件十分困难,甚至无法加工。因此,人们一方面千方百计完善和改进传统机械加工技术,提高加工水平;另一方面则借助科学技术的发展,冲破传统加工方法的束缚,不断地探索、寻求新的非传统加工方法,于是在本质上区别于传统加工的特种加工便应运而生,并不断得到发展。

特种加工也称为“非传统加工”(non-traditional machining),泛指那些不属于传统机械加工范畴的加工方法。特种加工不同于直接利用机械能加工成形零件的传统加工方法,它基于物理或化学能量场,利用电能、热能、光能、电化学能、化学能、磁能、声能及它们的组合或复合(包括与机械能的组合或复合),对工件材料进行去除、增加、变形、改性或连接,从而达到零部件的设计目标。与传统的加工方法相比,特种加工在加工制造各种难加工材料、复杂形面、微细结构等方面具有明显的技术优势,并且能获得相当高的尺寸精度和表面质量。

目前,特种加工技术主要有电加工(包括放电加工和电化学加工)、激光加工、电子束加工、离子束加工、水射流加工、超声加工及增材制造等。本书主要对放电加工、电化学加工和激光加工进行研究和讨论。

特种加工技术自20世纪中叶开始工业应用以来,历经几十年的发展,已成为先进制造技术不可或缺的重要组成部分,被广泛应用于制造业的各个领域,特别是航空航天、汽车、能源动力装备、微电子、微机电系统、生物医药、精密模具等高端制造领域,解决了大量传统加工方法难以解决或无法解决的加工难题,发挥了不可替代的重要作用。

一、放电加工技术

放电加工技术具有以下特点：①以柔克刚：用电、热的能量代替机械能，可以采用比被加工零件软得多的工具电极，不受被加工材料强度和硬度的限制；②化繁为简：采用简单形状的工具电极，通过轨迹的运动和控制可完成复杂形状结构的加工要求；③细致入微：放电加工多为非接触式加工，加工过程中无宏观作用力，通过控制放电能量的大小，就可实现材料最小去除单位与能量作用区域的控制，进而实现微米甚至纳米量级的放电加工。目前，放电加工技术已被广泛应用于航空航天、能源动力装备、汽车、微电子、精密模具、生物医疗等高端制造领域。放电加工技术的发展对我国国防工业的技术提升也起到了相当重要的作用。

先进制造技术的发展和制造业市场竞争的加剧对放电加工技术提出了更高的要求，同时也为放电加工技术的发展提供了新的源动力。近年来，随着放电加工机理研究的不断深入、信息技术的深度融入、智能软件的完善、新型电子器件及机电基础件的应用，放电加工技术的发展迈上了一个新的台阶。

放电加工脉冲电源是放电加工的关键核心技术，国内外在微精、高效、节能、数字化及智能化等关键技术的研究方面不断取得突破。在电火花成形加工中，为了提升脉冲电源的高精度和一致性，采用 PWM 开关电源替代工频变压器作为电火花脉冲电源的供电系统，采用储能元件电感代替耗能元件电阻，使能量利用率达到 60% 以上。在电火花线切割加工中，单向走丝电火花线切割脉冲电源已从单极性有电阻结构发展为双极性无电阻、防电解结构，该类电源的脉冲峰值电流达到千安培以上，脉冲宽度可控制在数十纳秒；我国往复走丝电火花线切割脉冲电源实现了数字化控制，研发了无电阻型脉冲电源，通过对电流上升沿的控制，实现了电极丝的更低损耗，并获得了更高的加工效率。在电火花高速小孔加工中，广泛采用独立式控制、高峰值电流、窄脉宽脉冲电源，明显提高了小孔加工的效率 and 表面质量。微细电火花加工中的脉冲电源提高了 RC 式电源能量的可控性，减小了独立式脉冲电源的脉宽，降低了单次脉冲能量，提高了脉冲电源的能量利用率。

由于放电加工不仅仅是在加工过程中对轴的运动轨迹进行控制，更重要的是在时间、空间维度上，对加工状态精准快速感知判别，对加工能量、轴运动状态、工具电极运动状态、工作介质等诸多工艺参数进行智能决策控制，以达到最佳的加工效果。通过对单脉冲放电波形的快速、精准检测，明显提高了电火花加工放电状态的感知水