

学术引领系列



国家科学思想库

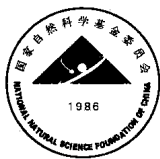
未来10年 中国学科发展战略

工程科学

国家自然科学基金委员会
中国科学院



科学出版社



国家科学思想库

未来10年 中国学科发展战略

工程科学

国家自然科学基金委员会
中国科学院

科学出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

未来 10 年中国学科发展战略·工程科学/国家自然科学基金委员会,
中国科学院编. —北京: 科学出版社, 2011
(未来 10 年中国学科发展战略)
ISBN 978-7-03-032297-5

I. ①未… II. ①国… ②中… III. ①工程技术-学科发展-发展战略-中国-
2011~2020 IV. ①TB-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 183253 号

丛书策划: 胡升华 侯俊琳

责任编辑: 付 艳 杨 然 / 责任校对: 何晨琿

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houlunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 33

字数: 646 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

联合领导小组

组 长 孙家广 李静海 朱道本

成 员 (以姓氏笔画为序)

王红阳 白春礼 李衍达

李德毅 杨 卫 沈文庆

武维华 林其谁 林国强

周孝信 秦大河 郭重庆

曹效业 程国栋 解思深

联合工作组

组 长 韩 宇 刘峰松 孟宪平

成 员 (以姓氏笔画为序)

王 澍 申倚敏 冯 霞

朱蔚彤 吴善超 张家元

陈 钟 林宏侠 郑永和

赵世荣 龚 旭 黄文艳

傅 敏 谢光锋

战略研究组

组 长	欧进萍	院 士	大连理工大学
副组长	陈祖煜	院 士	中国水利水电科学研究院
成 员	谢和平	院 士	四川大学
	罗平亚	院 士	西南石油大学
	殷瑞钰	院 士	钢铁研究总院
	黄伯云	院 士	中南大学
	李洪钟	院 士	中国科学院过程工程研究所
	钟 掘	院 士	中南大学
	温诗铸	院 士	清华大学
	胡海岩	院 士	北京理工大学
	任露泉	院 士	吉林大学
	吴硕贤	院 士	华南理工大学
	李 杰	教 授	同济大学
	曲久辉	院 士	中国科学院生态环境研究中心
	吴中如	院 士	河海大学
	吴有生	院 士	中国船舶重工集团公司第 702 研究所
	雷志栋	院 士	清华大学

秘 书 组

组 长	雒建斌	研究员	清华大学
副组长	茹继平	研究员	国家自然科学基金委员会工程与材料科学部
	钱莹洁	副处长	中国科学院院士工作局
成 员	薛向欣	教 授	东北大学
	缪协兴	教 授	中国矿业大学
	谢建新	教 授	北京科技大学
	陈 勉	教 授	中国石油大学（北京）

邵新宇	教授	华中科技大学
段吉安	教授	中南大学
李建桥	教授	吉林大学
刘加平	教授	西安建筑科技大学
葛耀君	教授	同济大学
陈云敏	教授	浙江大学
王 炜	教授	东南大学
钟登华	院士	天津大学
周创兵	教授	武汉大学
李华军	教授	中国海洋大学
王光谦	院士	清华大学
朱旺喜	研究员	国家自然科学基金委员会工程与材料科学部
王国彪	研究员	国家自然科学基金委员会工程与材料科学部
李万红	研究员	国家自然科学基金委员会工程与材料科学部

总序

路甬祥 陈宜瑜

进入 21 世纪以来，人类面临着日益严峻的能源短缺、气候变化、粮食安全及重大流行性疾病等全球性挑战，知识作为人类不竭的智力资源日益成为世界各国发展的关键要素，科学技术在当前世界性金融危机冲击下的地位和作用更为凸显。正如胡锦涛总书记在纪念中国科学技术协会成立 50 周年大会上所指出的：“科技发展从来没有像今天这样深刻地影响着社会生产生活的方方面面，从来没有像今天这样深刻地影响着人们的思想观念和生活方式，从来没有像今天这样深刻地影响着国家和民族的前途命运。”基础研究是原始创新的源泉，没有基础和前沿领域的原始创新，科技创新就没有根基。因此，近年来世界许多国家纷纷调整发展战略，加强基础研究，推进科技进步与创新，以尽快摆脱危机，并抢占未来发展的制高点。从这个意义上说，研究学科发展战略，关系到我国作为一个发展中大国如何维护好国家的发展权益、赢得发展的主动权，关系到如何更好地持续推动科技进步与创新、实现重点突破与跨越，这是摆在我们面前的十分重要而紧迫的课题。

学科作为知识体系结构分类和分化的重要标志，既在知识创造中发挥着基础性作用，也在知识传承中发挥着主

体性作用，发展科学技术必须保持学科的均衡协调可持续发展，加强学科建设是一项提升自主创新能力、建设创新型国家的带有根本性的基础工程。正是基于这样的认识，也基于中国科学院学部和国家自然科学基金委员会在夯实学科基础、促进科技发展方面的共同责任，我们于2009年4月联合启动了2011~2020年中国学科发展战略研究，选择数、理、化、天、地、生等19个学科领域，分别成立了由院士担任组长的战略研究组，在双方成立的联合领导小组指导下开展相关研究工作。同时成立了以中国科学院学部及相关研究支撑机构为主的总报告起草组。

两年多来，包括196位院士在内的600多位专家（含部分海外专家），始终坚持继承与发展并重、机制与方向并重、宏观与微观并重、问题与成绩并重、国际与国内并重等原则，开展了深入全面的战略研究工作。在战略研究中，我们既强调战略的前瞻性，又尊重学科的历史延续性；既提出优先发展方向，又明确保障其得以实现的制度安排；既分析各学科自身的发展态势，又审视各学科在整个学科体系和科技与经济社会发展中的地位作用；既充分肯定各学科已取得的成绩，又不回避发展中面临的困难和问题；既立足国内的现状与条件，又注重基础研究的国际化趋势。经过两年多的战略研究工作，我们不断明晰学科发展趋势，深入认识学科发展规律，进一步明确“十二五”乃至更长一段时期推动我国学科发展的战略方向和政策举措，取得了一系列丰硕的成果。

战略研究总报告梳理了学科发展的历史脉络，探讨了学科发展的一般规律，研究分析了学科发展总体态势，并从历史和现实的角度剖析了战略性新兴产业与学科发展的关系，为可能发生的新科技革命提前做好学科准备，并对

我国未来 10 年乃至更长时期学科发展和基础研究的持续、协调、健康发展提出了有针对性的政策建议。19 个学科的专题报告均突出了 7 个方面的内容：一是明确学科在国家经济社会和科技发展中的战略地位；二是分析学科的发展规律和研究特点；三是总结近年来学科的研究现状和研究动态；四是提出学科发展布局的指导思想、发展目标和发展策略；五是提出未来 5~10 年学科的优先发展领域以及与其他学科交叉的重点方向；六是提出未来 5~10 年学科在国际合作方面的优先发展领域；七是从人才队伍建设、条件设施建设、创新环境建设、国际合作平台建设等方面，系统提出学科发展的体制机制保障和政策措施。

为保证此次战略研究的最终成果能够体现我国科学发展的水平，能够为未来 10 年各学科的发展指明方向，能够经得起实践检验、同行检验和历史检验，中国科学院学部和国家自然科学基金委员会多次征询高层次战略科学家的意见和建议。基金委各科学部专家咨询委员会数次对相关学科战略研究的阶段成果和研究报告进行咨询审议；2009 年 11 月和 2010 年 6 月的中国科学院各学部常委会分别组织院士咨询审议了各战略研究组提交的阶段成果和研究报告初稿；其后，中国科学院院士工作局又组织部分院士对研究报告终稿提出审读意见。可以说，这次战略研究集中了我国各学科领域科学家的集体智慧，凝聚了数百位中国科学院院士、中国工程院院士以及海外科学家的战略共识，凝结了参与此项工作的全体同志的心血和汗水。

今年是“十二五”的开局之年，也是《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》实施的第二个五年，更是未来 10 年我国科技发展的关键时期。我们希望本系列战略研究报告的出版，对广大科技工作者触摸和

了解学科前沿、认知和把握学科规律、传承和发展学科文化、促进和激发学科创新有所助益，对促进我国学科的均衡、协调、可持续发展发挥积极的作用。

在本系列战略研究报告即将付梓之际，我们谨向参与研究、咨询、审读和支撑服务的全体同志表示衷心的感谢，同时也感谢科学出版社在编辑出版工作中所付出的辛劳。我们衷心希望有关科学团体和机构继续大力合作，组织广大院士专家持续开展学科发展战略研究，为促进科技事业健康发展、实现科技创新能力整体跨越做出新的更大的贡献。

前言

国家自然科学基金委员会与中国科学院于2009年4月共同组织的“2011~2020年中国学科发展战略研究”，共分19个学科，其中工程与材料学部具体负责组织材料科学、能源科学和工程科学三个学科的发展战略研究。

本书基于2011~2020年我国部分工程学科发展战略研究报告编写而成。工程学科是研究人造物质和系统（包括其伴生的有害物质）的制造、工作原理、行为调控原理以及与自然界相互作用规律的科学与技术，涵盖范围非常广泛。本书仅包括冶金与矿业工程、机械工程、建筑环境与土木工程、水利科学与海洋工程四个工程学科战略规划的总体研究报告和分学科研究报告。第一章“工程科学总论”对此四个工程学科领域的特点、发展规律与趋势以及学科前沿、我国未来需求和发展战略进行了研究和阐述，提出了我国未来10年优先发展的领域和拟开展研究的重大交叉领域，并对相关资助政策提出了建议。第二章至第五章分别对上述四个工程学科领域的战略地位、发展趋势以及发展战略与保障措施进行了专门研究和阐述，提出了各个学科领域未来10年优先资助的领域或方向。

工程学科的主要特点与发展规律是科学与技术的高度融合，复杂性与规律性并存，综合性与跨学科性显著，安全性和可控性是核心；人类需求一直牵动着工程学科的发展，同时工程学科的发展水平也是社会生产力的决定性要素，挑战功能、性能、尺度、环境等“极限”是工程学科发展的重要动力，多学科交叉推动了工程学科的创新与发展。目前，本书涉及的上述四个工程学科领域正向深部资源开发和冶金绿色化、极端制造与生物制造、土木工程与人居环境可持续发展以及水资源、海洋资源和水利工程可持续开发等方向发展。

第一章“工程科学总论”从涉及的工程学科发展战略、重要性和交叉性考虑，提出了我国未来10年优先发展的领域，包括：①资源高效安全开采基础理论与关键技术；②冶金与材料制备过程中的界面科学问题；③复杂机电系统的功能原理与集成科学；④高性能零件/构件精密制造；⑤城乡建筑节能设计原理与技术体系；⑥饮用水复合污染机制、毒性效应与控制原理；⑦变化环境下我国水资源高效利用及对河流过程与河口演变的影响机理；⑧大型水电站建设与

安全运行的关键技术与基础科学问题。第一章中还提出了我国未来10年拟开展研究的重大交叉领域,包括:①资源高效利用与环境的相互作用规律;②生物制造与仿生制造;③工程结构系统全寿命性能设计与控制;④环境变迁中的城市科学;⑤深海工程和新型船舶的基础理论与前沿技术。第二章至第五章分别提出了工程科学领域未来10年优先资助的领域或方向。

本书在研究和编写过程中,广泛地征求专家意见,认真地分析讨论,高度地概括归纳,先后征求了100多名院士的意见,有200余名中青年学者参与了研究和讨论,提出了许多宝贵意见,为报告的完成付出了心血和汗水。

本书可供我国相关工程学科科研管理部门制订研究计划和资助计划参考,同时也可供从事相关工程学科研究的科研人员、教师、学生和工程技术人员参阅。

在研究和编写本书过程中,我们虽然广泛地征求了广大学者、专家的意见,但是,由于工程学科涵盖内容多、涉及面广,肯定有许多宝贵的意见没有吸收进来,也一定存在不足或缺陷,敬请批评指正!

欧进萍

工程科学学科发展战略研究组组长

2010年11月10日



摘要

面向学科前沿和国家科学技术发展战略需求，国家自然科学基金委员会与中国科学院于 2009 年 4 月共同组织“2011~2020 年我国学科发展战略研究”，其中工程科学包括冶金与矿业工程、机械工程、建筑环境与土木工程、水利科学与海洋工程等四个领域。本书对上述四个工程学科领域的特点、发展规律与趋势以及学科前沿、我国未来需求和发展战略进行研究和阐述，提出我国未来 10 年优先发展的领域和拟开展研究的重大交叉领域，并就相关资助政策提出建议。

一、工程学科的特点和发展规律

工程学科是研究人造物质和系统（包括其伴生的有害物质）的制造、工作原理、行为调控原理以及与自然界相互作用规律的科学与技术。

工程学科具有科学与技术高度融合、复杂性与规律性并存、综合性与跨学科性显著、安全性和可控性为其核心等显著特点。人类需求一直牵动着工程学科的发展，同时工程学科的发展水平也是社会生产力的决定性要素；追求功能、性能、尺度、环境等“极限”是工程学科发展的重要动力，多学科交叉与融合推动了工程学科的创新与发展。目前，本书涉及的上述四个工程学科领域正向深部资源开发和冶金绿色化、极端制造与生物制造、土木工程与人居环境可持续发展以及水资源、海洋资源和水利工程可持续开发等方向发展。

二、工程学科的科学前沿、国家需求与发展战略目标

资源、能源、环境等方面的问题是当前人类社会面临的最严峻的挑战。与此同时，世界各国经济社会的发展与国防安全也越来越依赖于科学技术的水平。未来 10 年，我国工程学科将面向学科前沿，围绕资源、能源、环境（人类与自然和谐）、国民经济与社会发展及国防安全等国家重大战略需求部署我国工程学科科学研究的发展战略。研究重点将集中在：资源能源高效开发与利用的工程

技术原理与核心装备、先进制造技术与复杂装备系统、社会可持续发展的工程科学与技术等三个方面。

1. 学科前沿

(1) 资源能源高效开发与利用的工程技术原理与核心装备

当前,世界各国解决资源能源短缺问题的途径主要有“寻找新资源能源”和“合理地调控和节约资源能源”。随着陆地浅部和海上浅水资源的枯竭,开发地球深部资源,开发太阳能、风能、核能、氢能等新能源就成为世界各国资源能源战略和竞争的焦点,结合我国的实际情况,有关前沿学科方向主要包括:

- 1) 深部陆地与海洋资源高效开发与利用的科学与技术;
- 2) 新能源开发的核心装备与关键制造技术;
- 3) 气候变化下我国典型流域水文水资源分布变化的分析理论;
- 4) 城市建筑节能科学与技术。

(2) 先进制造技术与复杂装备系统

纳米技术、生物技术和信息技术的发展,为制造技术与装备的研究开辟了崭新的领域,注入了新的活力。美国国家科学技术协会在 *Manufacturing the Future* 报告中,将“氢能制造、纳米制造、智能制造与集成制造”列为美国制造业未来的三大优先发展领域。欧盟在 *The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020* 中将“新材料和新器件制造(纳米结构材料、智能材料、多功能材料、集成纳米器件)、制造新原理和新工艺、产品和工艺设计技术、建模与仿真技术、新能源/材料与燃料电池”列为未来10年机械与制造科学发展的前沿研究方向。未来10~20年,机械科学与技术研究的焦点将集中在能源、资源和环境等领域,制造技术的热点将围绕生物制造、信息制造和微/纳制造等展开,具体将体现在以下几方面:

- 1) 复杂机电系统及其集成科学;
- 2) 高性能零件/构件的精密制造科学与技术;
- 3) 纳米制造科学与技术;
- 4) 生物制造与仿生制造科学与技术;
- 5) 冶金与材料制备过程及复杂工程系统的界面科学;
- 6) 数字化与智能化技术。

(3) 社会可持续发展的工程科学与技术

自20世纪80年代国际社会提出可持续发展的概念以来,社会的可持续发展已经从社会领域的政策研究发展到工程领域的科学技术研究,并在美国、欧洲和日本等发达国家和地区得到高度重视。研究通过长寿命材料、可循环利用的材料、全寿命设计理论等实现工程结构和工程系统的可持续化是当前世界各

国工程学科研究的热点；而环境污染控制和生态恢复、水资源高效利用和安全保护、低能耗低污染工业过程也是发达国家近 20 年来大力投入、重点研究的方向。围绕“社会可持续发展的工程科学与技术”相关前沿研究方向包括：

- 1) 工程系统对环境的作用科学（水利水电工程对河流系统演变的影响机理与调控，资源开采和冶金对环境的作用，岩土工程对环境的作用）；
- 2) 城市水质安全保障与风险控制的科学与技术；
- 3) 工程结构可持续化的科学与技术；
- 4) 可持续化的城市科学。

2. 国家需求与发展战略目标

(1) 深部资源和新能源开发是我国可持续资源战略与海洋安全战略的重要保障

支撑现代人类社会物质基础的是资源和能源。矿产资源和油气资源是人类社会生存、发展和国民经济建设中不可替代的、不可缺少的物质基础，是工业的命脉，并被誉为“工业之母”。随着我国浅部陆地资源和浅水海洋资源的枯竭，深部陆地资源和深水海洋资源的开发成为我国可持续资源战略与海洋安全战略的重要保障，是我国解决资源、能源问题的重要途径之一；核能、太阳能、风能等新能源是解决我国能源问题的另一战略，而新能源的开发和利用迫切需要我国在新能源开发和利用的制造技术和核心装备上取得突破。因此，深部资源和新能源开发利用是我国可持续资源战略与海洋安全战略需求的重要保障，其中深部陆地和深水海洋资源开发是解决我国能源短缺与海洋安全战略的有效途径，新能源装备制造是新能源开发利用、实现我国可持续能源发展战略的重要手段。

(2) 先进制造技术和高端制造装备是国家核心竞争力的科技支柱

先进制造技术和高端制造装备是一个国家工业体系最基础、最核心的问题，是一个国家核心竞争力的科技支柱。虽然“中国制造”已经遍布世界，但我国自主研发先进制造技术和高端制造装备的能力还相当薄弱，这种状况极大地限制了我国现代工业体系的建设，并使我国在国际竞争中处于劣势。2009 年国家把高端制造产业列为当年要大力培育的六大战略性新兴产业之一；大力振兴装备制造业是党的十六大、十七大提出的保障我国走新型工业化道路、实现国民经济可持续发展的战略举措，并将节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等七大产业，作为我国现阶段重点培育和发展的主攻产业。近年来，我国部署了极大规模集成电路制造技术及成套工艺、高档数控机床与基础制造技术、大型飞机、载人航天与探月工程、高速铁路、高速列车、大型舰船、高速轧机、微电子/光电子制造装备、微/纳机械学

与微/纳制造、大型火/水/核电机组和大型盾构掘进机等一系列以复杂机电系统为载体,旨在推动我国先进制造技术与高端制造装备发展、构建我国先进工业和国防体系的战略举措。先进制造技术和高端制造装备是国家核心竞争力的科技支柱。其中,基础装备与制造技术是实施国家重大工程的重要支柱,不断突破的极小尺度、极高精度制造是我国信息产业持续发展的基础,极高性能精密制造是实现我国先进国防装备战略的重要支撑,复杂机电系统的集成科学将为重大工程系统的安全可靠运行提供理论基础,机械制造科学与生命科学的交叉融合将提供崭新的改善人类健康的新途径和新技术。

(3) 工程学科是实现社会可持续发展的重要科技支撑

我国人口众多,是资源能源消耗大国,同时也是环境污染和生态破坏十分严重的国家。在保持经济增长的同时,注重社会的可持续发展是我国今后相当长一段时期的重要战略。目前制约我国社会可持续发展的因素众多,如在各种能耗中,建筑能耗占总能耗的40%左右,我国城乡房屋建筑面积已经超过450亿平方米,绝大部分的运行能耗很高,城市化程度提高带来建筑规模的加大,建筑用能的年均递增率将大大超过国家能源生产增长率,而城市化进程和城市的快速扩张带来的城市生态化问题,也成为制约我国未来社会可持续发展的重要“瓶颈”;此外,目前我国基础设施的建设规模已经比全世界其他国家的总和还多,这些重大工程基础设施在为我国国民经济发展提供重要支撑的同时,也在大量地消耗资源;工业生产过程和人类活动带来的环境污染和生态破坏是我国社会和经济发展中面临的另一个严峻的问题。工程学科为社会可持续发展提供解决方案,是实现社会可持续发展的重要科技支撑。其中高效建筑节能理论和技术、可持续土木工程与城市是实现社会可持续发展的有效措施,绿色制造与再制造技术是实现环境与社会可持续发展的重要途径,环境污染控制与生态系统修复是实现人类与自然和谐生存的直接手段,水资源高效利用和安全保护是国民经济和社会可持续发展的有力保障。

三、工程学科的优先发展领域

工程学科涵盖的范围广,涉及国家战略需求的领域多。围绕21世纪人类共同面临的资源、能源、环境问题,面向国际工程科学的前沿,根据我国构建现代工业和国防工业体系的战略需求和工程学科未来10年的发展战略目标,确定以下工程学科的8个优先发展领域。

1. 资源高效安全开采基础理论与关键技术

针对我国深部资源开采中涉及的复杂的地质构造及其多尺度建模,高地应

力、高渗透压、高地温环境下多场多相耦合非连续体非线性力学行为与非线性渗流行为、灾变演化机理及防治与控制技术、资源开采与生态环境互馈等科学问题,以发展深部资源高效安全开采理论和关键技术为目标,重点研究:

- 1) 多场多相耦合作用下深部裂隙岩体工程力学特性;
- 2) 深部固体资源开发的充填开采方法与技术;
- 3) 深部流体资源开发中的方法与技术;
- 4) 深部资源开发中安全保障与作业环境改善的理论与方法。

2. 冶金与材料制备过程中的界面科学问题

冶金与材料制备过程中广泛存在气-固、气-液、液-固、液-液、固-固、吸附、偏析、氧化、分凝、催化、粗糙度、组织结构等复杂界面/表面,材料的表面与界面对材料整体性能具有决定性的影响。针对冶金与材料制备过程中界面/表面结构的表征方法,相界面上质量、能量、动量的传递规律,界面/表面性质、行为及其微观机理,相变过程中相间界面相互作用,相变与形变过程中界面交互作用等科学问题,以揭示提取冶金与材料制备过程中的表面/界面/相间相互作用机理与规律、构建表面/界面/相间相互作用行为宏/微观模型、发展其行为调控理论为目标,重点研究:

- 1) 复杂界面宏观物理化学性质的微观机理;
- 2) 新相形成过程及相间界面作用规律与调控原理;
- 3) 形变与相变过程界面交互作用及调控理论。

3. 复杂机电系统的功能原理与集成科学

针对现代复杂机电系统多物理过程耦合机制与机构系统集成设计,能量流对物质流的作用原理与功能界面设计,能量流的传递、聚集与发散规律及控制,信息流对能量流/物质流作用过程的精确协同调控与系统稳定运行等科学问题,以建立多过程耦合与能量流/物质流/信息流融合协同的复杂机电系统集成设计理论为目标,重点研究:

- 1) 复杂真实机构的集成设计理论与方法;
- 2) 机械驱动与传动中的能量传递、转换与精密复合运动的创成;
- 3) 复杂机电系统物质流、能量流与信息流融合协同设计;
- 4) 复杂机电系统多学科设计优化与集成设计理论;
- 5) 极端服役条件下复杂机电系统的结构损伤与系统可靠性;
- 6) 复杂机电系统动力学理论、故障动态演化及智能诊断。

4. 高性能零件/构件精密制造

围绕高精度、高效率、高洁净、高能量密度等加工技术需求,针对极端能