



CETC **CAICT**
中国电科 中国信通院

中国电子信息工程 科技发展研究 (综合篇2018—2019)

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心

**Research on the
Development
of Electronic Information
Engineering Technology in China**



科学出版社

非外借

中国电子信息工程科技发展研究

(综合篇 2018—2019)

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书旨在分析研究电子信息领域年度科技发展情况,综合阐述国内外电子信息领域年度重要突破及标志性成果,集中展现我国信息与电子领域工程科技的年度新进展、新特点和新趋势,为我国科技人员准确把握电子信息领域发展态势提供参考,为我国制定电子信息科技发展战略提供支撑。本书分“总论”和13个“专题”两大部分,对2018—2019年度电子信息工程科技各领域的全球发展态势、我国发展现状、我国发展展望以及热点亮点等方面展开具体探讨。

本书同时包含了科技前沿技术研究成果、部分产业发展现状及其趋势研究,对国家不同层面和不同领域的各界专家学者、工程科技管理人才、科研工作者、高校相关专业学生的工作和学习具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

中国电子信息工程科技发展研究. 综合篇. 2018—2019/中国信息与电子工程科技发展战略研究中心编著. —北京: 科学出版社, 2019.9
ISBN 978-7-03-062335-5

I. ①中… II. ①中… III. ①电子信息—信息工程—科技发展—研究—中国 IV. ①G203

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第198227号

责任编辑: 赵艳春 任 静 王 哲 / 责任校对: 彭珍珍
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京画中画印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年9月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019年9月第一次印刷 印张: 30 1/4

字数: 580 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《中国电子信息工程科技发展研究(综合篇 2018—2019)》

指导组

组 长：陈左宁 卢锡城

成 员(以姓氏笔画为序):

丁文华	马远良	王天然	王成俊	王恩东	韦 钰
方家熊	方滨兴	邓中翰	吕跃广	邬江兴	邬贺铨
刘尚合	刘泽金	许祖彦	李天初	李乐民	李伯虎
李国杰	杨德森	吴建平	吴曼青	吴 澄	余少华
沈昌祥	张广军	陆 军	陈志杰	陈良惠	陈 纯
陈 杰	范滇元	金国藩	赵沁平	赵梓森	段宝岩
姜会林	费爱国	柴天佑	倪光南	高中琪	高 文
龚惠兴	谭久彬	戴 浩	戴琼海		

《中国电子信息工程科技发展研究(综合篇 2018—2019)》

工作组

组 长：余少华 陆 军

副组长：安 达 党梅梅 许守任

成 员(以姓氏笔画为序):

王庆国	王 鹏	卢 玥	史德年	付 强	邢 飞
乔 钢	刘 壮	刘 默	李少晖	李 论	束宇翔
何 炜	张丁一	张新全	张 睿	陆 燕	陈 亮
邵秀梅	武 莹	季向阳	周 兰	周 峰	郑 征
孟 楠	胡小锋	陶 利	商志刚	谢 玮	戴 飞
戴方芳	魏云峰				

国家高端智库



中国信息与电子工程科技发展战略研究中心

CETC
中国电子

CAICT
中国信通院

CHINA ELECTRONICS AND INFORMATION STRATEGIES

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心简介

中国工程院是中国工程科学技术界的最高荣誉性、咨询性学术机构，是首批国家高端智库试点建设单位，致力于研究国家经济社会发展和工程科技发展中的重大战略问题，建设在工程科技领域对国家战略决策具有重要影响力的科技智库。当今世界，以数字化、网络化、智能化为特征的信息化浪潮方兴未艾，信息技术日新月异，全面融入社会生产生活，深刻改变着全球经济格局、政治格局、安全格局，信息与电子工程科技已成为全球创新最活跃、应用最广泛、辐射带动作用最大的科技领域之一。为做好电子信息领域工程科技类发展战略研究工作，创新体制机制，整合优势资源，中国工程院、中央网信办、工业和信息化部、中国电子科技集团加强合作，于2015年11月联合成立了中国信息与电子工程科技发展战略研究中心。

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心秉持高层次、开放式、前瞻性的发展导向，围绕电子信息工程科技发展中的全局性、综合性、战略性重要热点课题开展理论研究、应用研究与政策咨询工作，充分发挥中国工程院院士，国家部委、企事业单位和大学院所中各层面专家学者的智力优势，努力在信息与电子工程科技领域建设一流的战略思想库，为国家有关决策提供科学、前瞻和及时的建议。

《中国电子信息工程科技发展研究》编写说明

当今世界，以数字化、网络化、智能化为特征的信息化浪潮方兴未艾，信息技术日新月异，全面融入社会生产生活，深刻改变着全球经济格局、政治格局、安全格局。电子信息工程科技作为全球创新最活跃、应用最广泛、辐射带动作用最大的科技领域之一，不仅是全球技术创新的竞争高地，也是世界各主要国家推动经济发展、谋求国家竞争优势的重要战略方向。电子信息工程科技是典型的“使能技术”，几乎是所有其他领域技术发展的重要支撑，电子信息工程科技与生物技术、新能源技术、新材料技术等交叉融合，有望引发新一轮科技革命和产业变革，给人类社会带来新的机遇。电子信息又是典型的“工程科技”，作为最直接、最现实的工具之一，直接将科学发现、技术创新与产业发展紧密结合，极大地加速了科学技术发展的进程，成为改变世界的重要力量。电子信息工程科技也是新中国成立70年来特别是改革开放40年来，中国经济社会快速发展的重要驱动力。在可预见的未来，电子信息工程科技的进步和创新仍将是推动人类社会发展的最重要的引擎之一。

中国工程院是国家工程科技界最高荣誉性、咨询性学术机构，把握世界科技发展大势，围绕事关科技创新发展的全局和长远问题，为国家决策提供科学的、前瞻的和及时的建议。履行好国家高端智库职能，是中国工程院的一项重要任务。为此，中国工程院信息与电子工程学部在陈左宁副院长、卢锡城主任和学部常委会的指导下，第一阶段(2015年年底至2018年6月)由邬江兴、吴曼青两位院士负责，第二阶段(2018年9月至今)由余少华、陆军两位院士负责，组织学部院士，动员各方面专家300余人，参与《中国电子信息工程科技发展研究》综合篇和专题篇(以下简称“蓝皮书”)编撰工作。编撰“蓝皮书”的宗旨是：分析研究电子信息领域年度科技发展情况，综合阐述国内外年度电子信息领域重要突破及标志性成果，为我国科技人员准确把握电子信息领域发展趋势提供参考，为我国制定电子信息科技发展战略提供支撑。

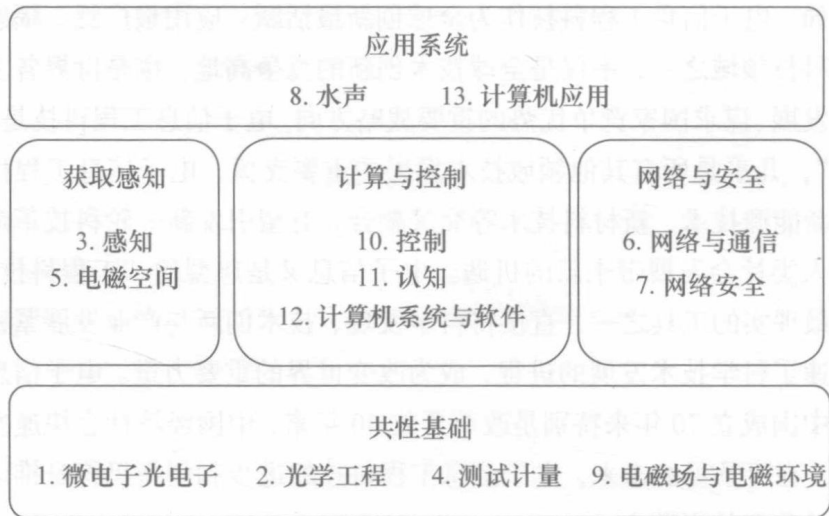
“蓝皮书”编撰的指导原则有以下几条：

(1) 写好年度增量。电子信息工程科技涉及范围宽、发展速度快，综合篇立

足“写好年度增量”，即写好新进展、新特点、新趋势。

(2) 精选热点亮点。我国科技发展水平正处于“跟跑”“并跑”“领跑”的三“跑”并存阶段。专题篇力求反映我国该领域发展特点，不片面求全，把关注重点放在发展中的“热点”和“亮点”。

(3) 综合专题结合。该项工作分“综合”和“专题”两部分。综合部分较宏观地讨论电子信息领域科技全球发展态势、我国发展现状和未来展望；专题部分对 13 个子领域中热点亮点方向进行具体叙述。



子领域归类图

5 大类和 13 个子领域如上图所示。13 个子领域的颗粒度不尽相同，但各子领域的技术点相关性强，也能较好地与学部专业分组对应。

编撰“蓝皮书”仍在尝试阶段，难免存在一些疏漏，敬请批评指正。

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心

2019 年 3 月

目 录

《中国电子信息工程科技发展研究》编写说明

总 论

第一部分 全球发展态势	3
一、宏观态势	3
(一) 电子信息工程科技深刻改变人类的生产生活方式, 推动人类文明发展	3
(二) 电子信息工程科技与各行业深度融合, 加速带动现代产业变革	4
(三) 电子信息工程科技孕育技术群体突破, 迎来体系化创新新时期	5
(四) 世界各国不断强化电子信息工程科技发展, 加快构建数字时代核心竞争力	6
二、相关态势	7
(一) 微电子技术持续多元化演进, 光电子正从分离器件加速向集成化方向发展	7
(二) 光学技术融合量子技术共同发展, 新型光学设备走进人们生活	8
(三) 遥感信息的定量化、全球化及新技术应用, 推动产业发展	8
(四) 新型感知技术快速发展, 人工智能助力传感技术变革	10
(五) 国际单位制“从实物到量子”巨大变革, 科学仪器和工程测量仪器发展迅速	11
(六) 多样化任务需求催生新型装备涌现, 雷达与对抗的技术体制正发生深刻变化	12
(七) 人-网-物三元万物互联飞速演进, 大融合大连接新智能引领未来	12
(八) 海洋信息技术水平能力较高, 多方协同广泛开展海洋信息基础设施建设	14
(九) 国际网络安全对抗博弈持续升级, 网络安全技术创新加速落地	14
(十) 军用、民用需求显著, 水声各领域快速发展	15
(十一) 全球制电磁权争夺激烈, 新型电磁材料和器件高速发展	16
(十二) 大数据和人工智能等快速兴起, 传统控制发生深刻变革	16
(十三) 脑认知科学与人工智能快速发展, 二者交叉成为热点	17
(十四) 全球计算能力竞争持续升级, 专用计算芯片发展持续升温	17
(十五) 计算机应用技术持续突破, 为产业发展模式创新注入新动力	18

第二部分 我国发展现状	19
一、发展环境	19
(一) 优化战略布局, 建设电子信息工程科技创新生态	19
(二) 强化自主创新, 完善电子信息工程科技创新环境	20
(三) 深化体制改革, 激发电子信息工程科技创新活力	22
(四) 加强开放合作, 提升电子信息工程科技创新位势	23
二、技术现状	23
(一) 微电子和光电子技术仍处于跟跑阶段	23
(二) 特种光源成就瞩目, 材料、镜片、系统研制能力提高	24
(三) 空间系统工程建设初具规模, 商业遥感迅速发展, 可持续的商业模式尚待 探索	24
(四) 我国智能传感技术快速发展, 新产品获得市场认可	25
(五) 基本单位定义领域技术全面追赶, 科学和工程测量仪器稳步提高	25
(六) 雷达和对抗装备与国际先进水平基本相当, 仍有精细化提升的潜力	26
(七) 网络通信成为我国自主创新典范, 首要解决大而不强补短板问题	27
(八) 海洋信息技术水平有了较大提升, 国家层面逐步推进海洋信息基础设施 建设	28
(九) 网络安全向“长板式”防御模式转变, 5G 和工业互联网安全架构逐渐 成形	28
(十) 水声工程紧密对接国家战略需求, 不断加强技术与装备研发	29
(十一) 电磁兼容及防护技术创新突破, 电磁制衡能力大幅提升	30
(十二) 机器学习等技术向控制领域快速渗透, 智能化成为控制技术发展第一 主线	30
(十三) 人工智能技术逐步落地, 脑科学促进理论新发展	31
(十四) 国产计算芯片取得长足进步, 国产基础软件的软硬件生态环境初步 建立	31
(十五) 计算机应用技术体系持续完善, 产业化发展进程加快	32
三、产业现状	32
(一) 电子信息制造业对工业增长贡献持续提升, 产业周期性波动影响加大	32
(二) 产业进入高质量发展初级阶段, 国内布局持续优化	33
第三部分 我国发展展望	35
一、发展思路	35
二、发展重点	37
(一) 加强集成电路创新和供给能力, 夯实光电子产业基础助力高端升级	37
(二) 促进信息系统全光化与量子化, 发展人工智能急需新技术	38

(三) 优化遥感技术顶层布局, 创新引领空间信息产业链发展	38
(四) 弥补产业生态链短板, 面向重点行业领域推广新型感知技术	39
(五) 推进基本单位新定义的复现能力和水平, 提升科学仪器和工程测量仪器 水平	39
(六) 以电磁空间安全与防卫为战略定位, 体系化发展雷达与对抗系统	40
(七) 探索建立可持续发展的网络通信技术体系, 建立新型信息基础设施	41
(八) 加强海洋信息理论与技术研究突破, 统筹推进海洋信息基础设施建设	42
(九) 深耕网络安全细分领域创新突破, 构建攻防同步的安全技术互动发展新 局面	42
(十) 需求驱动水声技术持续发展, 装备、技术、产业谱性化发展	43
(十一) 电磁环境效应机理与体系化防护研究并重, 推进大型基础平台研制	44
(十二) 新兴智能技术与控制技术快速融合, 成为生产组织和资源配置方式 变革的核心动力	44
(十三) 持续推动脑认知科学与人工智能深度融合, 促进理论研究与产业应用 协调发展	45
(十四) 紧抓新兴应用机遇, 加快关键计算技术研发及生态建设	45
(十五) 推动计算机应用关键技术自主可控, 促进产业升级跨入新阶段	46
参考文献	46

专 题

专题一 微电子光电子	51
编写说明	52
专家组和撰写组名单	53
专题研究	55
一、全球发展态势	55
二、我国发展现状	57
三、我国未来展望	59
四、我国热点亮点	60
(一) 5G 移动通信芯片	60
(二) RISC-V 第五代精简指令集架构	61
(三) 高速光模块	62
(四) 混合光子集成	63
(五) 硅光子	65

(六) 表面等离子体光子学	67
五、领域年度热词	68
参考文献	71
专题二 光学工程	73
编写说明	74
专家组和撰写组名单	75
专题研究	77
一、全球发展态势	77
(一) 激光器性能不断提高, 激光应用不断扩展	77
(二) 量子产品丰富, 量子技术发展加速	77
(三) 量子计算优势显现, 量子计算机诞生	77
(四) 多种太赫兹元件被研发, 太赫兹系统成本将降低	78
(五) 红外隐身材料更薄, 探测器发现更难	78
(六) 光学新结构可实现光学成像, 部分领域可替代传统镜片	78
二、我国发展现状	78
(一) 国内激光技术成果显著	78
(二) 多个波段光源取得突破性进展	79
(三) 我国掌握多项光学玻璃、晶体与高端镜片生产关键技术	79
(四) 我国太赫兹基础与应用持续取得丰硕成果	79
(五) 新型光学材料不断被研制	80
(六) 显微镜方向取得多项重要进展	80
(七) 偏振光谱多维度成像研究取得进展	80
三、我国未来展望	81
(一) 未来信息系统将向全光系统和量子化发展	81
(二) 我国高分辨率多维度光学成像技术将促进生命科学和临床医学进步	81
(三) 石墨烯在光电集成器件领域将大有作为	81
(四) 光伏发电将为我国提供更多能源	81
(五) 与人工智能相关的光学技术将快速发展	82
四、我国热点亮点	82
(一) 激光光束数字化精密诊断	82
(二) 人眼自适应光学成像技术	84
(三) 超分辨成像光学技术及装备	88
(四) 激光钠信标技术及应用	90
五、领域年度热词	92
参考文献	93

专题三(1) 感知-遥感	95
编写说明	96
专家组和撰写组名单	97
专题研究	99
一、全球发展态势	99
(一) 航天高分辨率可见光成像遥感军、民、商共同发展	99
(二) 无人机光电/红外遥感成为航空侦察遥感的主力	101
(三) 高光谱和多光谱成像/探测技术走向成熟, 应用不断拓展	102
(四) 激光遥感在空间多个领域得到应用	102
(五) 微波遥感向微小化发展	105
(六) 气象和气候监测应用的遥感新技术得到验证	105
(七) 遥感海洋应用体系正在完善	106
(八) 遥感陆表观测应用向全球化和量化迈进	106
二、我国发展现状	107
三、我国未来展望	110
四、我国热点亮点	112
参考文献	114
专题三(2) 感知-传感器	115
编写说明	116
专家组和撰写组名单	117
专题研究	119
一、全球发展态势	119
(一) 全球智能传感器市场处于快速增长态势	119
(二) 智能传感器的重要性在智能物联网时代更加凸显	120
(三) 分布式智能传感网络进入快速发展阶段	120
(四) 人工智能持续驱动智能图像传感技术革新	121
二、我国发展现状	121
(一) 国家创新中心落地生根, 中国产业发展稳步推进	121
(二) 传感器市场的巨大需求与自主技术十分有限的矛盾亟待解决	122
(三) 智能传感网络技术的研发投入有待提高	122
(四) 智能图像传感技术得到快速发展	123
三、我国未来展望	123
四、我国热点亮点	124
(一) 智能传感器项目融资成果喜人	124
(二) 高端智能芯片产品不断涌现	125

(三) 智能多层次神经调控与检测系统取得重要突破·····	126
参考文献·····	126
专题四 测量计量与仪器 ·····	129
编写说明·····	130
专家组和撰写组名单·····	131
专题研究·····	133
一、全球发展态势·····	133
(一) 国际单位制基本单位重新定义·····	133
(二) 计量基准、标准·····	135
(三) 科学探测与仪器·····	136
(四) 工程测量与仪器·····	138
二、我国发展现状·····	140
(一) 国际单位制基本单位的重新定义·····	140
(二) 计量基准、标准·····	142
(三) 科学探测与仪器·····	143
(四) 工程测量与仪器·····	145
三、我国未来展望·····	147
(一) 计量基准、标准·····	147
(二) 科学探测与仪器·····	148
(三) 工程测量与仪器·····	150
四、我国热点亮点·····	152
(一) 计量基准、标准·····	152
(二) 科学探测与仪器·····	154
(三) 工程测量与仪器·····	156
五、领域年度热词·····	159
参考文献·····	162
专题五 电磁空间 ·····	167
编写说明·····	168
专家组和撰写组名单·····	169
专题研究·····	171
一、全球发展态势·····	171
(一) 在防空预警探测领域, 新型防空雷达装备不断涌现, 综合作战能力持续 增强·····	171
(二) 在反导预警探测领域, 推进前沿部署, 发展空基探测能力·····	172
(三) 在空间目标监视领域, 装备新研和部署并重, 提高空间监视能力·····	172
(四) 在天基雷达领域, 呈现多样化任务需求, 分布式、小型化成为发展方向·····	172
(五) 在舰载雷达领域, 向多功能、综合射频方向发展, 海基反导力量逐步	

提升	173
(六) 在机载雷达领域, 重点推进智能化、分布式、网络化、无人化	173
(七) 在地基电子对抗领域, 新型装备大量涌现, 着力发展电子战规划与管理能力	174
(八) 在舰载电子对抗领域, 升级换代稳步推进, 积极发展舷外对抗装备	174
(九) 在机载电子对抗领域, 全面推动智能化、分布式、无人化发展	175
(十) 在电磁空间管控领域, 向着预测精细化、控制精准化、评估精确化方向发展, 体系能力持续增强	175
(十一) 在军民融合领域, “军转民” 应用领域持续拓展	175
二、我国发展现状	176
(一) 装备技术体制与国际先进水平基本相当、局部领跑	176
(二) 雷达装备仍有精益改进的空间	176
(三) 电子对抗装备仍有精细化提升的潜力	176
(四) 积极探索新兴技术, 引领装备形态变革	177
三、我国未来展望	177
(一) 战略定位向电磁空间安全与防卫转变	177
(二) 探测体系向网络化、有源无源协同感知方向发展	177
(三) 硬件架构向多功能一体化方向发展	178
(四) 雷达系统向探测攻击一体方向发展	178
(五) 信息处理向智能化、精细化方向发展	178
(六) 雷达实时处理技术向天基平台发展	179
(七) 电子对抗技术向精细化、智能化方向发展	179
(八) 电子对抗应用模式向协同化、体系化方向发展	180
(九) 电子攻击向硬毁伤方向发展	180
(十) 电磁空间管控向时-空-频综合管控方向发展	180
四、热点亮点	181
(一) 防空预警雷达	181
(二) 反导预警雷达	182
(三) 空间目标监视雷达	185
(四) 舰载雷达	187
(五) 机载雷达	189
(六) 天基雷达	192
(七) 地基电子对抗	195
(八) 舰载电子对抗	197
(九) 机载电子对抗	199

(十) 前沿技术的研究和应用·····	202
(十一) 军民融合领域·····	205
五、领域年度热词·····	209
参考文献·····	212
专题六(1) 网络与通信 ·····	215
编写说明·····	216
专家组和撰写组名单·····	217
专题研究·····	219
一、全球发展态势·····	220
(一) 前沿创新·····	221
(二) 技术创新·····	224
(三) 产业发展·····	226
二、我国发展现状·····	227
(一) 前沿创新·····	228
(二) 技术创新·····	228
(三) 产业发展·····	229
(四) 机遇挑战·····	229
三、我国未来展望·····	230
(一) 前沿创新·····	230
(二) 技术创新·····	231
(三) 产业发展·····	231
四、我国热点亮点·····	232
(一) 移动通信·····	232
(二) 数据通信·····	234
(三) 光纤通信·····	236
(四) 移动互联网·····	238
(五) 物联网·····	240
(六) 边缘计算·····	242
(七) 量子通信·····	243
五、领域年度热词·····	246
参考文献·····	251
专题六(2) 海洋网络信息体系 ·····	255
编写说明·····	256
专家组和撰写组名单·····	257
专题研究·····	259

一、全球发展态势	260
(一) 基础理论方面	260
(二) 关键技术方面	260
(三) 基础设施方面	262
(四) 政策法规方面	263
(五) 产业能力方面	264
(六) 人才培养方面	264
二、我国发展现状	265
(一) 基础理论方面	265
(二) 关键技术方面	265
(三) 基础设施方面	266
(四) 政策法规方面	267
(五) 产业能力方面	267
(六) 人才培养方面	268
三、我国未来展望	268
(一) 发展思路	268
(二) 发展目标	269
(三) 发展举措	270
四、我国热点亮点	271
(一) 基础理论方面	271
(二) 关键技术方面	271
(三) 基础设施方面	273
(四) 政策法规方面	273
(五) 产业能力方面	275
(六) 人才培养方面	275
五、领域年度热词	276
参考文献	278
专题七 网络安全	279
编写说明	280
专家组和撰写组名单	281
专题研究	283
一、全球发展态势	283
(一) 网络空间安全形势仍然严峻，网络安全创新技术加速落地	283
(二) 5G 技术标准统一化局面基本成形，新架构新体系安全需求迫切	284
(三) 工业互联网安全防护技术加快布局，顶层设计和应用实践同步推进	285

(四) 人工智能加剧网络安全攻防对抗性, 智能攻防触发深度安全威胁	286
(五) 数据泄露滥用问题加剧, 跨域防护技术难题浮出水面	287
二、我国发展现状	289
(一) 数字经济发展新机遇驱动网络安全技术创新再上新台阶	289
(二) 内生网络安全技术加快部署应用步伐, 开始取得防御实效	290
(三) 5G 安全标准制定进入关键阶段, 5G 安全产业发展势头初现	292
(四) 工业互联网安全防护能力不断强化, 安全技术保障体系逐步形成	293
(五) 人工智能安全研究逐渐升温, 安全应用持续深化	295
(六) 数据安全防护多措并举, 应对数据流动新需求	295
三、我国未来展望	297
(一) 聚焦网络安全核心技术细分领域创新突破	297
(二) 继续推动体系化内生安全理论创新和技术应用	298
(三) 加快突破 5G 网络安全核心技术	298
(四) 加速构建工业互联网安全保障体系	299
(五) 趋利避害, 推进安全智能与智能安全同步发展	300
(六) 积极推进数据安全防护关键技术研究	300
四、我国热点亮点	301
(一) 网络安全试点示范	301
(二) 内生安全	301
(三) 5G 安全	302
(四) 工业互联网攻防对抗	302
五、领域年度热词	302
参考文献	304
专题八 水声工程	305
编写说明	306
专家组和撰写组名单	307
专题研究	309
一、全球发展态势	309
(一) 海洋声学研究领域向深海、极地声场特性研究拓展	309
(二) 声隐身技术向低频方向发展, 各方向合力推动声隐身能力	310
(三) 水声目标探测与识别关键技术持续发展, 新体制、新技术不断应用	310
(四) 水声通信技术继续呈现理论研究与应用研究并重的局面	311
(五) 换能器技术持续改进, 低频、大功率、大水深、微型化等新型换能器涌现 ..	313
(六) 水声定位导航产业继续蓬勃发展	315
(七) 声学测流测速技术向多频测量和小型化发展	316