

利用被引科学知识突变 识别突破性创新

张金柱 著



科学出版社

利用被引科学知识突变 识别突破性创新

张金柱 著

国家自然科学基金青年基金（编号：71503125）

教育部人文社会科学研究青年基金（编号：14YJC870025）

中央高校基本科研业务费专项资金（编号：30915013101）

江苏省 2011 协同创新中心平台“社会公共安全科技”项目

研究成果

科学出版社

北 京

内 容 简 介

突破性创新识别对规划技术发展方向、规避潜在落后技术、优化研发布局等具有重要意义。科学知识突变为引导技术创新突破发挥了基础性作用,而科学知识突变从哪些方面诱发、如何诱发突破性创新发生还需深入研究。本书以专利引用科学论文为纽带,以专利科学引文特征项及其关联关系表示被引科学知识,进而基于被引科学知识中的关键词簇突变、学科分类簇突变、研究主题突变和学科分类组合突变识别突破性创新,分析其成因,并在纳米电子学和基因工程领域进行实证。

本书可供从事情报分析、专利分析和知识转移转化研究的理论和实践工作者阅读,也可供高校师生,科研机构、政府相关部门的研究者、管理者和决策者参考。

图书在版编目(CIP)数据

利用被引科学知识突变识别突破性创新/张金柱著. —北京:科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-050978-9

I. ①利… II. ①张… III. ①知识创新—研究 IV. ①G302

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第296564号

责任编辑:魏如萍/责任校对:杜子昂
责任印制:霍兵/封面设计:无极书装

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

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:276 000

定价:82.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

2016年8月8日，国务院印发的《“十三五”国家科技创新规划》中明确指出：全球新一轮科技革命和产业变革蓄势待发。面对人类社会经济发展的众多复杂交错的战略性挑战，面对重大问题的因源的多元化、复杂化和相互动态影响，不仅科学技术本身从微观到宏观各个尺度向纵深演进，而且学科多点突破、交叉融合日益普遍和不断深入。特别值得注意的是，知识与技术的交叉融汇不仅产生新的知识，还往往（甚至更重要的）带来对问题及其应对原理和解决路径的重新的（甚至是突破性、颠覆性的）认识和设计，而恰好是这些突破性认识和设计，带来了从诺贝尔奖到杀手锏应用到市场重新洗牌的科学、技术和社会经济效益。从某种意义上讲，突破性创新已经成为推动各个新兴技术领域和战略性新兴产业快速发展的主要引擎。

突破性创新（radical innovation）也被称为颠覆性技术（disruptive technology）、突破性技术（radical technology）、创造性破坏（creative distruction）、技术突破（technological breakthrough）、重大技术变革（significant technological change）或不连续性创新（discontinuous innovation）等，是指技术创新的方法、产品、设备、材料等技术主题发生不连续性变化，并引发性能的跃迁或功能的变化，最终导致市场、产品、服务、商业模式等发生不连续性变化。突破性创新的意义在于对原有技术理念的颠覆、破坏，具有前沿性和突破性，往往重新定义学科内涵、技术基础、产品目标、应用场景和用户市场，往往导致学科范式演变、技术路径重置、市场重新定位、竞争占位突变，从而让那些占有突破性技术者（往往是原来竞争格局中籍籍无名者或者弱小者或者新手）迅速开辟新市场、夺取原有市场，带来学科、行业 and 市场的重新洗牌。突破性创新带来的行业颠覆并不少见，近期的就有：数码相机10年时间就将胶片相机送进博物馆，而智能手机仅仅5年时间就将低端数码相机赶出“旅游必备品”；在线银行还未摆脱安全性与便利性的挑战，移动支付就已经跨过头顶开始成为日常支付的主流；对于许多国家，工业化“还在路上”，数据密集和计算驱动的智能制造已经要求重新“设计工业”，而人工智能却已经开始威胁到几乎所有行业的就业机会。

面对这些挑战，突破性创新的识别、预警和预测成为迫切之需。通过加强对复杂问题多元因源的矛盾识别、缺口分析和隐性关联分析，加强对新兴技术、甚至是萌芽技术的识别和判断，加强对新兴技术冲击传统技术、甚至是替代传统技

术的拐点的预判, 加强产业变革趋势和重大技术的预警, 及时前置新兴技术和新兴产业的前沿技术研发和应用实验, 已经成为实施创新驱动发展战略的重要工作。

那么如何识别突破性创新呢? 大量事实证明, 许多突破性技术的诞生与发展都源自基础研究和交叉学科的重要突破, 现代科技革命无一不建立在科学知识重大进步的基础之上。例如, 20 世纪 60 年代, 美国国防高级研究计划局 (DARPA)、海军研究办公室等对原子光谱学研究的持续资助, 造就了激光技术的产生和应用; X 射线、电磁波、电流磁效应等重大科学发现, 直接导致 X 射线照相技术、无线通信、雷达、有线电报等突破性创新的产生。突破性创新具有的强大的科学基础性使得从基础研究对技术创新的影响角度识别突破性创新成为可能, 并且具有理论基础和现实意义, 是研究突破性创新识别及其形成机理的重要方面, 是突破性创新研究的重要完善和补充。

该书从基础研究对技术创新的影响角度出发, 以专利直接引用和间接引用的科学论文为基础, 通过专利引用的科学知识突变对可能产生突破性创新的时间、研究主题和学科分类组合进行识别。引入复杂网络和突变的理论与方法, 综合利用专利科学引文的外部特征、内容特征及其相互关系来表示被引科学知识, 并动态跟踪被引科学知识演变和突变, 识别可能产生突破性创新的专利, 对突破性创新进行动态识别; 在此基础上, 跟踪被引科学知识突变是从哪些方面诱发、如何诱发突破性创新的发生, 进而研究科学知识向技术创新的知识转移过程中的影响因素, 探索和明晰突破性创新的形成规律和机理, 对突破性创新进行预警。

该书从专利引用的科学知识突变的新角度研究了突破性创新识别及形成机理。通过扩展被引科学知识的范围, 形成了四种被引科学知识的表示, 即关键词簇、关键词共现形成的研究主题、学科分类簇和学科分类组合; 通过对突变进行量化计算, 形成了两种突变程度计算方式, 即数量突变率和频次突变率。最终由被引科学知识的表示和突变程度的计算方式共同形成了八种突破性创新识别指标, 这些指标更有助于识别与基础科学研究密切相关的技术领域中的突破性创新, 并能在一定程度上对突破性创新进行预警和预测。

张晓林

2016 年 12 月 8 日

前 言

全球科技进入新的创新密集期，重大发现和发明不断涌现。在能源、环境、健康等战略领域，一些重要的科学问题和关键技术正在发生或正在孕育着革命性突破，新的科技革命和产业变革爆发在即。新一轮科技革命会在哪些领域发生？在哪些领域可能发生重大突破？应该在哪些领域进行前瞻性部署？这些都是亟须解决的现实问题。突破性创新（radical innovation, RI）作为科技革命的重要组成部分，代表了技术创新中的高新技术，能够实现重大关键技术的突破和应用。通过对突破性创新进行事前预警和预测，揭示和判别可能发生突破性创新的领域和主题，为这些问题的解决提供了可能和可行的解决方案。这不仅对规划技术发展方向和优先主题、规避潜在落后技术、优化研发布局等具有重要意义，而且对国家的科技计划管理和制定、高新技术产业和行业认定、企业的发展规划制定具有重要的参考价值。

突破性创新有着强大的科学基础性，现代科技革命无一不建立在科学知识重大进步的基础之上。基础研究是技术创新的源泉和驱动力，是突破性创新产生的重要来源之一；基础研究的重大突破，将带动新兴产业群的崛起，引起经济和社会的重大变革。特别是在一些与基础研究密切相关的高技术领域，如纳米科学、基因工程、医学和生物科技等领域，科学知识的突变或科学原理的变化为引导技术创新和突破技术瓶颈发挥了极其重要的作用。如 X 射线、电磁波、电流磁效应等重大科学发现，直接导致 X 射线照相技术、无线通信、雷达、电报等突破性创新的产生。因此，从基础研究对技术创新的影响角度识别突破性创新，具有理论基础和现实意义，是研究突破性创新识别及其形成机理的重要方面，是突破性创新研究的重要完善和补充。

专利引用科学论文把基础研究和技术创新联系起来，分析专利引用的科学论文对专利技术的影响，是研究基础研究如何影响技术创新的重要途径。科学论文是基础研究成果的重要表现形式，科学论文的数量和质量通常作为基础研究绩效评价的重要依据和定量指标。根据世界知识产权组织的统计，全世界 90%~95% 的发明成果都会最先出现在专利文献中，其中有 70%~80% 不会以其他形式发表，只存在于专利文献中。在一些与基础研究密切相关的高技术领域（如生物、医药、基因工程、纳米技术等领域），科学知识对技术创新的贡献度更高，对专利科学引文进行分析更有助于识别技术创新中的突破性创新。如在基因工程领域，超过 90%

的专利引文为非专利文献,而且其中的大多数为期刊论文并被SCI(Science Citation Index)收录;在我国的生物科技领域,平均每件发明专利引用的SCI论文数量为5.17篇;在医药领域,70%以上的技术创新活动直接引用了基础研究的科学知识。因此,从专利引用科学论文的角度识别突破性创新,实时跟踪专利科学引文特征项所代表的被引科学知识对技术创新的影响,使得基于被引科学知识的突破性创新动态识别成为可能;以知识转移的理论和方法为基础,对其进行扩展和改进能够揭示突破性创新的发生和发展规律,进而指导突破性创新的预警和预测,并且能够深化和扩展科学技术间知识转移转化的理论和实践。

基于此,本书将从基础研究影响技术创新的角度出发,以专利引用科学论文为纽带研究突破性创新识别。引入复杂系统和复杂网络中结构演变和突变的理论和方法,首先以专利科学引文的多个特征项及其关联关系表示被引科学知识;在此基础上,如果新专利出现导致现有的被引科学知识的主题内容或网络结构发生了突变,那么该专利可能成为突破性创新,通过实时跟踪被引科学知识突变,形成突破性创新的动态识别方法,实时监测科技发展态势;最后,在多个领域识别突破性创新发生的主题和领域,对突破性创新识别结果进行分析,发现导致被引科学知识发生突变的原因,探索突破性创新的规律和形成机理。

本书的第1章从对加快建设创新型国家,实现创新驱动发展的研究背景出发,发现突破性创新识别对规划技术发展方向和优先主题、规避潜在落后技术、优化研发布局等具有重要意义;对国家的科技计划管理和制定、高新技术产业和行业认定、企业的发展规划制定具有的重要参考价值。接着在第2章对国内外突破性创新的研究现状进行归纳和总结,发现突破性创新当前存在的主要问题在于提前对突破性创新进行识别和预警,特别是在一些与科学知识密切相关的技术领域,从被引科学知识的角度对突破性创新进行识别成为迫切需要。利用被引科学知识识别突破性创新的首要问题是如何对被引科学知识进行表示和抽取,因此,本书在第3章对该问题进行了阐述和解答,即以专利引用的科学论文内容和关系表示被引科学知识。被引科学论文包括专利直接引用的科学论文以及专利间接引用的科学论文(即被引科学论文引用的科学论文),前者称为一阶被引科学论文,后者称为二阶被引科学论文。与此对应,被引科学知识也包括一阶被引科学知识和二阶被引科学知识。其中,一阶被引科学知识代表了技术创新的直接理论基础和背景性知识;二阶被引科学知识是一阶被引科学知识的基础和补充,其作用主要体现在分析被引科学知识的演化以及降低科学知识向技术创新传递过程中的阻滞因素影响。在此基础上,本书第5、6、7、8章分别从关键词簇突变、学科分类簇突变、关键词主题突变和学科分类组合突变共4个角度对突破性创新进行识别,提出了基于被引科学知识内容及其关联关系的突破性创新识别方法,并与第4章基于科学关联强度的突破性创新识别方法进行比较和分析。在纳米电子学和基因工

程领域的实验证实,本书所提方法能够提前对突破性创新发生的学科方向、领域、主题和时间进行识别,验证了基于被引科学知识突变识别突破性创新方法的有效性。实验结果表明:该方法能够有效地识别纳米电子学领域的纳米导线、碳纳米管、可计算电路等突破性创新,基因工程领域的克隆技术、胚胎发育过程、基因测序、癌症的基因疗法等突破性创新;同时,该方法能够提前或同时识别出两个领域的突破性创新,预警功能较强,并且基于二阶被引科学知识可以识别出一阶被引科学知识无法识别的潜在突破性创新。相对于基于科学强度的计算方法,该方法能够从内容层面上提前识别多个突破性创新的产生时间,并从科学知识内容上得到证明,进而对突破性创新的结果进行分析,发现了一些突破性创新发生的规律和形成机理。最后,在第9章对本书的研究进行总结,指出该研究存在的一些不足之处,如被引科学论文的数据处理与匹配、突变程度计算方式的进一步细化以及在更多的领域进行验证等。

我要特别感谢为本书作出重要贡献的张晓林教授。正是由于张老师在作者博士期间的谆谆教导和风雨无阻的定期讨论,才使得利用被引科学知识突变识别突破性创新的思想火花迸发,并在不断的反复过程中完成了实验和论证,这些让本书具备了厚实的理论基础和可行的思路设计,并使得以此为基础的扩展和改进具备了可能性。与此同时,我要感谢研究生吕品、胡一鸣在本书扩展和校对过程中的协助。

此外,我还要感谢家人在精神上的支持和生活上的照顾,以及对我加班忙碌的理解!你们永远是我的坚强后盾,谢谢你们默默的支持、理解和包容。

最后,我要特别感谢每一位读者,是你们的阅读,使得该书的撰写变得有价值。如果书中能有一句话、一幅图,甚至仅仅是一个概念、一个公式对读者有所启发或为您带来灵感,这就是作者最大的成功。

张金柱

2016年12月

目 录

1	绪论	1
1.1	突破性创新识别的研究背景	1
1.2	相关概念界定	13
1.3	研究意义和研究问题	15
1.4	研究方法和研究框架	22
2	突破性创新识别的理论和方法基础	29
2.1	突破性创新的概念辨析	29
2.2	突破性创新的特征	33
2.3	突破性创新的识别指标和方法	35
2.4	科学到技术的知识转移	43
2.5	现有研究的总结和不足	46
3	被引科学知识的表示与抽取	48
3.1	非专利科学引文的作用	48
3.2	被引科学知识的表示	50
3.3	被引科学知识的抽取	53
4	基于科学关联强度的突破性创新识别	57
4.1	基于科学关联强度的突破性创新识别理论基础和方法	57
4.2	纳米电子学领域的突破性创新识别	61
4.3	基因工程领域的突破性创新识别	65
5	基于关键词簇突变的突破性创新识别	72
5.1	关键词簇的突变程度计算方法	72
5.2	验证方式和领域	76
5.3	技术路线	81
5.4	纳米电子学领域的实证分析	81
5.5	基因工程领域的实证分析	107
5.6	结论	124
6	基于关键词主题突变的突破性创新识别	126
6.1	研究主题的突变程度计算方法	126
6.2	纳米电子学领域的实证分析	129

6.3	基因工程领域的实证分析	135
6.4	结论	146
7	基于学科分类簇突变的突破性创新识别	148
7.1	学科分类簇的突变程度计算方法	148
7.2	纳米电子学领域的实证分析	152
7.3	基因工程领域的实证分析	161
7.4	结论	168
8	基于学科分类组合突变的突破性创新识别	170
8.1	学科分类组合的突变程度计算方法	170
8.2	纳米电子学领域的实证分析	172
8.3	基因工程领域的实证分析	180
8.4	结论	188
9	结论与展望	190
9.1	研究总结	190
9.2	贡献与创新之处	192
9.3	不足与后续研究	193
	参考文献	194
	附录	203

1 绪 论

1997年,美国哈佛商学院教授克莱顿·克里斯坦森在其专著和代表作《创新者的窘境》中提出:“颠覆性技术创新”是具有前沿性和突破性的技术创新,例如,重大原始创新及跨学科或跨领域创新应用^[1]。谁能在“颠覆性技术创新”中胜出,谁就能“人无我有,人有我强”,获得主动权。一个国家或地方能否占领科技创新高地,主要就看是否拥有更多“颠覆性技术创新”。突破性创新作为和颠覆性创新类似甚至在现在经常被看作相同的概念,对于建设创新型国家和科技强国具有重要意义。

在2016年的政府工作报告中,“创新”再次成为一个重要的关键词。报告中明确提出,到2020年,力争在基础研究、应用研究和战略前沿领域取得重大突破,全社会研发经费投入强度达到2.5%,科技进步对经济增长的贡献率达到60%,迈进创新型国家和人才强国行列。李克强在全球研究理事会2014年北京大会开幕式致辞时强调:“科学作为历史进步的杠杆,从来都是与现实发展紧密联系在一起的。当前,新一轮科技革命正在孕育和突破,许多颠覆性技术不断涌现,人们期待科技创新的渗透力、扩散力,能够转变为促进世界经济稳步复苏的强大力量。科学技术无止境,是一座持续攀升的通天塔,会引领世界发展进步,不断达到新的高度。”刘延东在2016年1月12日到北京考察中国科学院国家空间科学中心时,强调:“创新是引领发展的第一动力,要强化重大基础研究攻关,重视突破性创新,积极抢占未来发展制高点。”白春礼在谈到中国科学院“十三五”发展规划时指出:在“率先实现科学技术跨越发展”方面,预期将在物理、化学、材料科学、数学、环境与生态学、地球科学等学科取得一些主要突破性进展,成为我国科学技术跨越发展和创新型国家建设的标志性成果。

1.1 突破性创新识别的研究背景

中国科学院(简称中科院)院长在《求是》上发表文章《深化科技体制改革 实现创新驱动发展——致力重大创新突破服务创新驱动发展》,其中明确指出^[2]:科技发展对于国家发展具有支撑引领作用。加快建设创新型国家,实现创新驱动发展,对科技创新提出了新的更高的要求。必须大幅提升科技创新的质量和水平,不断解决本领域公认的重大科学问题和经济社会发展中关键科学问题,提出新理

论新方法、开辟新方向；不断突破产业共性关键技术、新兴产业关键技术、国防安全重大关键技术，集成多种技术形成系统解决方案；不断开发、应用、推广科技成果，形成新产品、新工艺、新产业，取得重大社会经济效益；不断对关系经济社会发展的重大问题提出科学建议和预测预见，为宏观决策提供科学依据；不断培养凝聚具有国际国内重要影响的领军人才，在破解发展难题、创新发展模式、创新体制机制与管理上不断取得新突破，抢占科技经济制高点，为创新驱动发展提供有力的知识基础和发展动力。

全球科技进入新的创新密集期，重大发现和发明不断涌现。在能源、环境、健康等战略领域，一些重要的科学问题和关键技术正在发生或正在孕育着革命性突破，新的科技革命和产业变革爆发在即。新一轮科技革命会在哪些领域发生？在哪些领域可能发生重大突破？应该在哪些领域进行前瞻性部署？这些都是亟须解决的现实问题。突破性创新（Radical Innovation, RI）作为科技革命的重要组成部分，代表了技术创新中的高新技术，能够实现重大关键技术的突破和应用。通过对突破性创新进行事前预警和预测，揭示和判别可能发生突破性创新的领域和主题，为这些问题的解决提供了可能和可行的解决方案。不仅对规划技术发展方向和优先主题、规避潜在落后技术、优化研发布局等具有重要意义，而且对国家的科技计划管理和制定、高新技术产业和行业认定、企业的发展规划制定具有重要的参考价值。

基于此，一些国内和国际组织和机构耗费大量人力、物力等资源从不同角度通过专家访谈和数据分析相结合的方式对可能产生的技术热点、研究趋势和发展方向进行总结和归纳，特别是对可能产生颠覆性作用的突破性创新进行了分析和识别，说明突破性创新识别和预警对于国家政策制定和规划布局具有重要作用。

（1）作为中国科学院年度报告系列产品之一的《科学发展报告》自1997年开始发布，到2016年是第19本，它分析每年度国际科学研究前沿进展动态，展望研判重要科学领域国际研究发展趋势，观察综述主要科技领域国际科技战略规划与研究布局，报道介绍我国科学家所取得的代表性突破性重要科研成果，概括介绍我国科学研究整体发展状况，遴选可能对国家产生重要影响和作用的突破性创新发展方向和领域，并向国家提出有关我国科学发展的战略政策咨询建议，为国家宏观科学决策提供重要依据。其中，《2015 科学发展报告》在以往报告框架的基础上进行了一定的改版，整合或调整了“诺贝尔科学奖评述”“公众关注的科学热点”“科技战略与政策”等栏目，增加了“科技领域发展观察”栏目，以期更系统、全面地观察和揭示反映国际科学发展的整体进展态势、总体趋势、发展战略和研究布局，以及总览我国科学发展的进展状态、发展影响以及相关政策建议。描绘最新科学进展，透析科学前沿问题，观察科技领域发展，众多院士建言献策，科学应对发展难题。2015年的报告重点专题如下。①科学展望：介绍空间科学和

微纳光子学的发展现状并展望未来发展趋势。②科学前沿：综述分析核物理前沿科学问题、中微子物理、手性科学与技术、煤炭清洁高效转化中的碳化学、新一代基因组编辑技术、脑功能联结图谱、冷冻电子显微学和乳腺癌分子靶向治疗等 15 个前沿方向的研究进展。③中国科研代表性成果：介绍我国科学家在希尔伯特第十八问题、黑洞热吸积领域、在常温固态系统中实现抗噪的几何量子计算、过渡金属元素高氧化态、乙炔法制氯乙烯无汞催化剂、30 纳米染色质双螺旋结构解析、互补序列介导的外显子环形 RNA 产生机制、水稻代谢组的生化及遗传基础、中国手足口病疫苗研发的临床研究、卵透明带缺失致病基因、鸟类起源整合性研究、热带生态系统碳源汇功能对气候变化的响应，以及我国灰霾 PM_{2.5} 中二次气溶胶的定量研究等领域取得的 25 项创新性成果。④科技领域发展观察：综述基础前沿、人口健康与医药、生物、农业、环境、地球、海洋、空间、信息、能源、材料制造和重大研究基础设施等 12 个科技领域的研究进展和科技战略规划与研究布局。⑤中国科学的发展概况：介绍国家基础研究管理工作进展和国家自然科学基金项目的资助情况，并从科学论文的产出规模、学术影响力和引领性、国际合作等多个维度，分析 2009~2013 年我国科研产出的整体水平及其所处的国际地位。⑥中国科学发展建议：中国科学院学部的咨询项目组就实施“材料基因组计划”推进我国高端制造业材料发展、京津冀大城市群各部分功能定位及协同发展、进一步深化我国医药卫生体制改革、建立“生态草业特区”探索草原牧区新发展模式、气候变化对青藏高原环境与生态安全屏障功能影响及适应等提出的政策与建议。《2016 科学发展报告》则是主要包括科学展望、科学前沿、2015 年中国科研代表性成果、科技领域发展观察、中国科学发展概况和中国科学发展建议等六大部分，重点是从当年受关注度最高的科学前沿领域和中外科学家所取得的重大成果中，择要进行介绍与评述。

(2) 全球领先的信息技术研究和顾问公司 Gartner 依据技术生命周期理论绘制新兴科技技术成熟度曲线，对可能产生颠覆或者突破的技术和产品进行预测。新兴技术成熟度曲线以简洁明了的方式呈现出对企业机构战略规划影响十分重大的新兴技术与趋势。技术成熟度曲线重点聚焦的技术组合将很有可能在未来五到十年展现出极大的竞争优势。从 1995 年开始，Gartner 咨询公司依其专业分析预测与推论各种新科技的成熟演变速度及要达到成熟所需的时间，并分成 5 个阶段，分别为萌芽期、引入期、成长期、成熟期和衰退期。Gartner 公布的 2016 年新兴技术成熟度曲线(hype cycle for emerging technologies, 2016)指出当前三大科技趋势，认为它们将是企业机构在加快数字化业务创新时必须优先考虑的事项。这三大关键科技趋势包括透明沉浸式体验(transparently immersive experience)、感知型智能机器时代(perceptual smart machine age)以及平台革命(platform revolution)。Gartner 认为这些技术将通过无与伦比的智能化打造出震撼体验，同

时提供能使企业机构与新型商业生态系统互联的平台。

①透明沉浸式体验是指科技将越来越以人为中心,最终将在人与人、企业与企业以及物件与物件间实现透明的环境与关系。而当科技在演化过程中不断依靠各种情境及变化提升在职场、家庭或是和企业与其他人互动过程中的适应能力,这种关系将变得越发密不可分。此领域的主要关键科技包括 4D 打印、脑机界面 (brain-computer interface)、人体增强 (human augmentation)、立体显示技术 (volumetric displays)、情感计算 (affective computing)、联网家庭 (connected home)、纳米管电子 (nanotube electronics)、增强现实 (augmented reality)、虚拟现实 (virtual reality) 以及手势控制设备 (gesture control devices)。

②感知型智能机器时代则因其基础计算能力、几近无限的数据数量以及在深层神经网络上前所未有的进步,智能机器将是未来 10 年内最具革命性的科技。这些都使得拥有智能机器技术的企业机构可利用数据来帮助其适应新的环境以及解决前人未曾遇到过的问题。正往此方向发展的企业应考虑以下技术:智能微尘 (smart dust)、机器学习 (machine learning)、虚拟个人助手 (virtual personal assistants)、认知专家顾问 (cognitive expert advisor)、智能数据挖掘 (smart data discovery)、智能工位 (smart workspace)、会话式用户界面 (conversational user interface)、智能机器人 (smart robots)、商用无人机 (commercial uavs-drones)、自动驾驶汽车 (autonomous vehicles)、自然语言问答系统 (natural-language question answering)、个人分析 (personal analytics)、企业知识分类与知识本体管理 (enterprise taxonomy and ontology management)、数据经纪人 PaaS (data broker PaaS, dbrPaaS) 以及情境代理 (context brokering)。

③平台革命是指新兴科技正在为平台的既有定义及使用方式带来一场变革。这种从技术架构转移到能打造生态系统平台的过程正在为新形态的商业模式打下良好基础,同时也在搭起人与技术之间的桥梁。在这些动态的生态系统中,企业机构须主动了解并重新定义策略,以此创造以平台为基础的商业模式,并利用内部与外部算法来创造价值。需要持续追踪的关键平台打造技术包括神经形态硬件 (neuromorphic hardware)、量子计算 (quantum computing)、区块链 (blockchain)、物联网平台 (IoT platform)、软件定义安全 (software-defined security) 与软件定义世界 (software-defined anything-SDx)。

(3) 专有顶尖前沿技术的突破性创新预测。以空间科学为例,空间科学开展宇宙、生命的起源演化和基物理规律的前沿探索,是当今自然科学重大发现与突破不断涌现的热点学科。在刚闭幕的 2016 年第十二届全国人民代表大会上,“宇宙演化”“物质结构”“生命起源”等作为今后五年中国将重点突破的基础前沿科学领域被列入了中国第十三个五年规划纲要,为我国空间科学的未来发展提供了强大的动力。在中国科学院空间科学先导专项支持下,国家空间科学中心牵头的

中国空间科学中长期发展规划研究团队最近完成了《2016~2030 空间科学规划研究报告》，并于 2016 年 3 月 15 日正式出版、公开发行人。报告在介绍空间科学国际发展趋势和国内发展现状的基础上，分析了我国发展空间科学的国家需求，阐述了至 2030 年中国空间科学拟研究的前沿科学问题，提出了中国至 2030 年发展战略目标、空间科学计划及所包含的科学卫星任务，绘制了至 2030 年中国空间科学发展路线图，并探讨了支撑和保障空间科学发展所需的技术手段与能力。暗物质卫星发射升空并正式交付开展科学观测，实践十号卫星、量子科学实验卫星、硬 X 射线调制望远镜卫星等今年陆续发射，反映出我国空间科学正在进入历史上最好的发展时期。报告的出版发行，不仅可供科技工作者、高校学生和社会公众了解中国空间科学领域的发展现状和未来发展方向，也可为相关管理部门提供决策参考依据。中国的空间科学将以回答事关人类发展的基本问题为己任，为我国经济社会发展甚至人类的文明进步作出应有的贡献。报告提出，至 2030 年，中国空间科学要在宇宙的形成和演化、系外行星和地外生命的探索、太阳系的形成和演化、超越现有基本物理理论的新物理规律、空间环境下的物质运动规律和生命活动规律等热点科学领域，通过系列科学卫星计划与任务以及“载人航天工程”相关科学计划，取得重大科学发展与创新突破，推动航天和相关高技术的跨越式发展。为了实现这一战略目标，报告提出了 2020 年、2025 年、2030 年的分阶段目标，并提出了一系列空间科学计划。如黑洞探针计划，目标是研究宇宙天体的高能过程和黑洞物理；天体号脉计划，旨在理解各种天体的内部结构和剧烈活动过程，主要项目包括中国引力波计划等；系外行星探测计划，拟探索太阳系外类地行星等，初步回答“宇宙中是否存在另一个地球”这一基本问题；火星探测计划，拟以全球遥感、区域巡视和取样返回等方式探测火星；“腾云”计划，研究空间特殊环境下的生命活动规律等；“桃源”计划，旨在探索地外生命和智慧生命，研究普适的生命起源、演化与基本规律等。报告同时提出，把空间科学系列卫星计划纳入国家科技发展规划，确保稳定支持，开展多层次、多种形式的国际合作，加强空间科学教育和人才培养等政策建议。

以上仅列出了一些具有重大影响力的代表性组织和机构正持续不断地对可能产生突破性创新的方向、领域和主题进行预测，而且只是这些机构预测结果的一部分，实际上，还有大量的其他报告或报道对突破性创新发生的方向进行预测，如 *Science* 的年度十大科学进展，《麻省理工科技评论》的十大突破技术等，均从不同角度对突破性创新进行了预测。这些预测大多以专家智慧为主，以数据分析结果为辅进行论证，揭示了未来的技术发展热点和方向。而当前大数据环境下，特别是数据密集型科学知识研究范式的出现，使得数据在发现技术突破方面的作用需要进一步加强，使得基于数据科学理论和方法的突破性创新定量识别方法成为迫切之需。

1.1.1 突破性创新是科技革命的重要组成部分

中国科学院白春礼院长在《新科技革命的拂晓》的报告中指出：抓住科技革命的国家都会发生很大的变革，而失之交臂的国家其发展速度不仅会减慢，而且很有可能从发达国家降级为发展中国家。目前，世界正处于第六次科技革命前夜，我们必须密切关注和紧跟世界经济科技发展的大趋势，在新的科技革命中赢得主动。因此，在目前的情况下，如何预测第六次科技革命发生的方向，对于我们国家的发展来讲是至关重要的。要突破带动技术革命、促进产业振兴的前沿科学问题；突破提高人民健康水平、保障改善民生、破解资源环境制约的重大公益性科技问题；突破增强国际竞争力、维护国家安全的战略高技术问题。致力重大成果产出，培育新的学科增长点，形成发展新优势。围绕战略性新兴产业七大领域，开展产业关键技术与前沿技术研究、技术集成创新和工程化示范。前瞻部署一批基础与前沿交叉研究的重要方向，提出原创科学思想、科学理论和创新方法，开拓新的前沿领域和方向。

突破性创新是科技革命的重要组成部分，特别是技术革命的重要组成部分。科技革命是科技发展的一种表现形式。科技发展既有渐进性变化，也有爆发性突变，前者是常规科技进步，后者是科技革命。科技革命的定义主要有以下几种形式^[3]，可以看出，科技革命和突破性创新有很多类似之处。

(1) 定义一：在科技史层次上，根据美国科学哲学家库恩的观点，科学革命指科学范式的转变，技术革命指技术范式的转变。

(2) 定义二：在文明史层次上，科学革命不仅是科学范式的变化，而且是引发人类思想观念的革命性变化的科学变迁；技术革命不仅是技术范式的变化，而且是引发人类生活方式和生产方式的革命性变化的技术变迁。许多科技史学家认为，16 世纪以来，世界科技大约发生了五次革命。

(3) 定义三：科技革命是科学革命和技术革命的统称，指引发科技范式、人类的思想观念、生活方式和生产方式的革命性变化的科技变迁。

照此定义，16 世纪以来大致发生了两次科学革命和三次技术革命，合称五次科技革命，即近代物理学诞生、蒸汽机和机械革命、电力和运输革命、相对论和量子论革命、电子和信息革命，每次科技革命都伴随着大量的突破性创新的产生和发展。反过来说，大量的突破性创新的产生也可能预示着新的科技革命正在孕育和发生，这也使得突破性创新的识别具有重要的理论和现实意义。当前，一些专家认为第六次科技革命可能发生在以下五个主要方向^[4]。

(1) 整合和创生生物学。16 世纪以来，生物学发展的基本轨迹是从整体、器官（系统）、细胞到分子。似乎这条路已经快走到尽头；因为人们将会发现，即使

把生物体内的每一个分子都搞清楚了，也不能完全解释生命现象。我们需要在原有路径之外，开辟新的道路，从分子、细胞、器官到生物体，研究大量分子如何协同、耦合、整合形成细胞；细胞如何协同、耦合、整合形成组织和器官；器官如何协调、耦合、整合形成生物体。这个过程是自组织的。目前，自组织理论、协同学已经诞生，耦合理论、整合理论还在孕育之中。今天，我们正在揭开人体的全部遗传信息，我们已经认识了成千上万的生物体内的分子和细胞，以及各种组织和器官。如果把这些分子、细胞、组织、器官组装起来，能否“制造一个生命”？生物体与机器（技术）的多种组合，能否创造新的生命形式和新的物种？

（2）思维和神经生物学。人脑是思维的载体，神经系统是思维的工厂，它们都是如何工作的？人脑认知和创造性思维的机理，人脑信息加工、储存、提取和再现的机理等，非常有挑战性。对这些问题的认识，将改善人类的智慧，推进信息技术的革命性发展。

（3）生命和再生工程。对生命的操纵有违人类的现行伦理道德，但是，人类将逐渐具备操纵生命的能力。首先，操纵遗传物质，改变生物特性，制造新物种。其次，操纵神经系统，改变生物行为特征。其三，操纵生物节律，实施人工休眠和人工唤醒，改变生物的生命周期。其四，操纵生物细胞，实现体细胞无性繁殖（克隆）。目前，植物体细胞的全能性已经被反复证明，动物体细胞的全能性研究已经取得一些进展。所谓体细胞全能性，指生物体细胞包含全部的遗传信息，在合适条件下可以培养出完整的新生物体。其五，操纵组织器官，进行组织器官的体外培养，随时随意替换生物体的任何组织或器官。其六，操纵生物生殖，进行体外受孕、体外怀胎（人造子宫），实现体外生殖。其七，操纵生物性状，建立“生物工厂”，生产人类需要的产品，如干扰素等新药。其八，操纵生命形式，实现生物和机器的组合。再生工程包括细胞、组织、器官、躯体、人体和物种的仿生、创生和再生等。人造组织和器官如人造心脏、肺、胃、皮肤、骨头、血、血管和肢体等实现产业化生产。

（4）信息和仿生工程。与第五次科技革命有交叉。人脑思维和动物信息处理的数字化模拟和仿真，实现信息和知识的无障碍获取、现有信息传播渠道的整合等。开发以新原理为基础的计算技术，大幅度提高计算速度。模拟人脑的认知和思维原理，并行处理和整合各种类型的信号，逐步建立非线性推理功能（直觉），具有部分人类情感。开发新的网络技术，大幅度提高信息传输速度。“信息转换器”的发明，实现人脑与电脑之间的直接信息转换，人脑可以直接“知识充电”。“人格信息包”的发明，它包含人的全部人生信息、独立人格和自主意识，使人的“网络化生存”和网络虚拟人（网络人）成为可能，实现人的“网络化永生”。

（5）纳米和仿生工程。纳米仿生材料、纳米仿生器官、纳米仿生设计和制造等。纳米工程指在分子或原子水平上逐个原子地操纵物质，在纳米尺度上进行设