doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2020.02.010

开放科学（资源服务）标识码（OSID）

基于 Web of Science 的中国航空航天技术发展态势研究

周立秋 任佳妮 钱虹 杨阳 辛一 高尧

陕西省科学技术情报研究院 西安 710054

摘要：本文以 JCR 收录的航空航天工程领域的外文源刊为数据源，选取这些期刊在 2009-2018 年 10 年间所刊载的中国大陆的论文为研究对象，利用 DDA 软件、Ucinet 软件和科学计量方法，从可视化分析的角度对中国航空航天工程领域的研究现状、发展态势及格局等进行分析，进而总结出我国航空航天产业发展的主要特点以及存在的有关问题。本文的研究成果对于我国航空航天产业的政策制定、规划布局、科技创新等具有重要参考价值。

关键词：航空航天；发展态势；布局；竞争力；中国

中图分类号：G35

Research of Development Trend Analysis of China Aeropsace Technology Based on Web of Science

ZHOU Liqiu REN Jiani QIAN Hong YANG Yang XIN Yi GAO Yao

Institute of Scientific and Technical Intelligence of Shaanxi, Xi’an 710054, China

Abstract: The article chose 10 year’ articles of Chinese Mainland from foreign journals of aerospace engineering in JCR as data source. By using DDA software, Ucinet software and scientific metrology method, this study analyzed the research status, development trend and pattern of China’s aerospace engineering field from the perspective of visual analysis. Then this study

作者简介：周立秋（1969-），馆员，主要研究方向为情报研究、科技查新、科技咨询；任佳妮（1985-），副研究员，硕士，主要研究方向为情报研究、科技查新、科技咨询；钱虹（1985-），副研究员，主要研究方向为情报研究、科技查新、科技咨询；杨阳（1981-），馆员，主要研究方向为情报研究、文献服务；辛一（1982-），助理研究员，硕士，主要研究方向为情报研究、科技咨询；高尧（1985-），工程师，硕士，研究方向为科技项目管理、科技评估，E-mail: gaoyao1985@126.com。

summarized the main characteristics and existing problems of the development of China's aerospace industry. The research results of this paper have important reference value for policy making, planning and layout, scientific and technological innovation of China's aerospace industry.

Keywords: Aerospace; development trend; layout; competitiveness; China

引言

航空航天行业是一个以现代科学为基础的高新技术产业，是国民经济和国防建设的重要组成部分。航空航天领域一直是科学发展的最顶尖区域，谁能在这个领域有强大的实力，谁就能在空中有绝对的话语权。

美国是世界第一大航空航天工业强国。据报道，2016 年 8 月 26 日，美国《航空周刊与空间技术》选出了下一任美国总统必须关注的九大航空航天技术领域，指出美国在高超声速（Hypersonics）、推进（Propulsion）等 9 个领域的技术必须领先于各个竞争者，并确保航空飞行仍是经济上可承受且又能获利的，工业界能继续赢得出口并创造工作岗位 [1]。

我国从“十五”到“十三五”以来一直秉持“寓军于民”的政策，大力发展军用航空航天行业，目前已经成为一个航天实力雄厚的强国并且在军事航天实力与航天实力双方面实现实力的巨大飞跃。产业规模不断扩大，但与美国、俄罗斯、法国、日本等航天强国相比，当前我国技术创新体系还不适应航天强国建设需求，存在原始创新能力不足，技术水平与航天强国存大较大差距等问题，使我国航天处于第二梯队 [2-4]。

几乎全国所有省、自治区、直辖市都发布了详细的通航产业发展规划，争相布局通用航空产业，且政策措施遍布实施，发展势头十分迅猛 [5]。但航空航天产业布局分散，区域竞争力差距大，没有形成规模效应，因而面临着严峻的发展瓶颈。因此，利用文献及事实型数据分析研究中国区域航空航天领域成果产出状况和发展态势，不仅可以检验中国航空航天产业政策的产出效果，也能为后续航空产业布局规划寻找理论依据，充分发挥各区域的优势以更好地促进中国航空航天产业整体竞争力的提升。

1 研究方法与数据来源

本文基于 Web of science 核心合集数据库中的 SCIE 数据库（Science Citation Index Expanded），以 JCR 收录的 31 个航天空航天工程（Engneering, Aerospace）领域的科技期刊为数据源，选取这些期刊 2009-2018 年所刊载的中国大陆学者论文为研究对象，截止 2019 年 1 月 14 日，共检索出论文 7255 篇。利用 Derwent Data Analyzer（DDA）软件、Ucinet 软件和科学计量方法，从论文产出量、研究机构、被引用论文量、研究热点等方面，对中国各省（市）地区、高校及科研机构在航空航天工程领域的研究现状、发展态势及格局进行分析。

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2020.02.010

2 研究趋势分析

2.1 发文量变动趋势

2009—2018 年，国内有关航空航天技术领域所发表的论文总量为 7255 篇，见图 1 所示。从每年的发表数量趋势来看，航空航天技术领域的总体数量逐年递增，处于上升通道，2013 年以后发文量增长较快，2018 年比 2017 年增长 29.9%，说明我国对航空航天的研究热度持续升高。我国从“十五”到“十三五”以来一直秉持“寓军于民”的政策，大力发展军用航空航天行业，并且在军事航天实力与民用航天实力双方面实现实力的巨大飞跃，产业规模不断扩大。这与国家重视发展航空航天产业的国家战略、不断优化的政策环境分不开的。

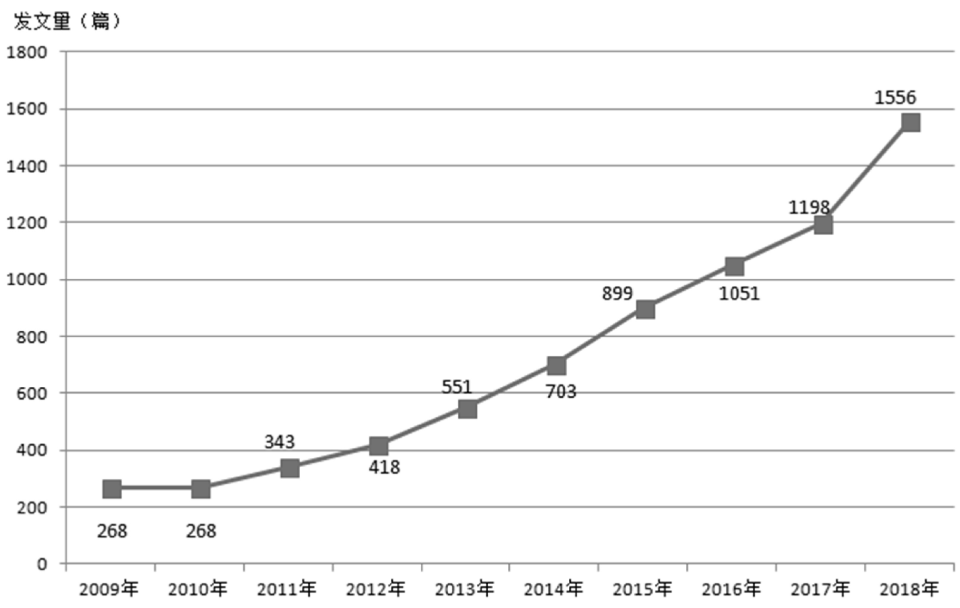

图 1 航空航天工程领域论文发表数量

2.2 主要区域发文量分布

国内学者针对主要国家航空航天领域技术进行研究，如马雪梅 [4] 主要针对美国、欧盟、俄罗斯、日本、印度等主要国家航空航天技术研究发展态势进行分析；孟祥昊 [6] 从可视化分析的角度对比研究中美俄三国航空航天领域的发展概况；邓砚谷 [7] 对中国航空产业竞争力的地区差异进行时空统筹层面的动态综合评价。未见针对国内各省（市）及地区在航空航天领域技术的基础研究实力和布局进行分析。在此背景下，本文统计分析国内主要省（市）及地区关于航空航天领域技术的发文量，如表 1 所示。主要省市现逐渐重视航空航天技术研究，争相把航空航天产业作为各自的支柱产业和新的经济增长点，综合竞争力水平提高。国家各种基金项目也是我国支持基础研究的主要渠道，为我国基础研究的发展和整体水平的提高做出了重大贡献。北京市航空航天领域整体的研究实力最强，处于国内首位，陕西省位居第二位，江苏省、黑龙江省、湖南省论文发表数量接近，

分别位居三至第五名，论文发表数量是重要的航空产业聚集地，也是我国航天领域中实力最为雄厚的省份之一，其他省（市）地区的研究力量弱些。

表 **1** 发文量前 **20** 位的省（市）地区

序号	省（市）	论文数(篇)	序号	省（市）	论文数 (篇)
1	北京	2 981	11	山东	115
2	陕西	1 300	12	广东	115
3	江苏	922	13	天津	89
4	黑龙江	797	14	安徽	56
5	湖南	754	15	河南	53
6	上海	470	16	重庆	51
7	四川	286	17	河北	44
8	辽宁	259	18	吉林	34
9	湖北	181	19	福建	29
10	浙江	163	20	江西	24

3 研究热点分析

3.1 主要研究热点

对关键词进行清理、统计分析，按词频大于 20 次，得到研究热点词云，如图 2 所示。可看出中国近十年关于航空航天领域技术研究热点主要集中在 Numerical simulation（数值模拟）、Microgravity（微重力）、navigation（导航）、Aerodynamics（航空动力学）、Sliding mode control（滑模控制）、Attitude control （姿态控制）、Kalman filter （卡尔曼滤波器）、Aerospace Propulsion system（航天推进系统）、SpHypersonic Vehicle（高超声速飞行器）、Scramjet（超音速冲压喷射装置）等。中国主要偏向于应用问题研究，包括航天器控制系统及其优化、可靠性、稳定性、姿态控制、轨迹控制、性能分析、推进系统等。微重力、高超声速飞行器、超音速冲压喷射装置、航空器目前仍是我国关注的核心研究问题和研究前沿。

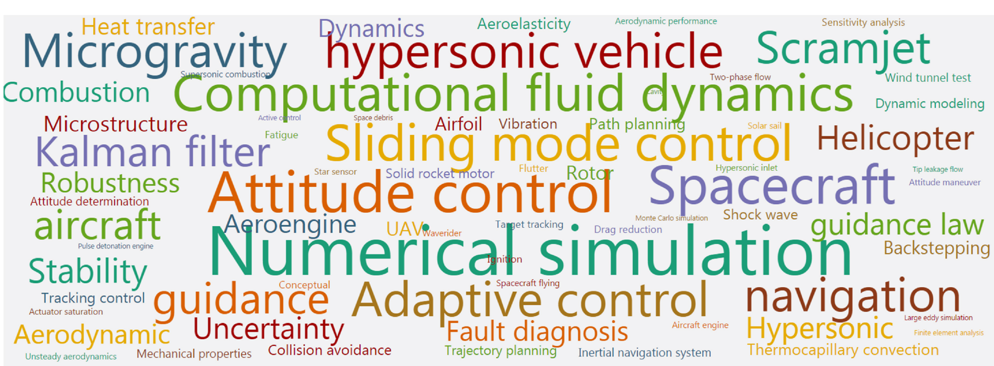

图 **2 2009-2018** 年研究热点词云

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2020.02.010

3.2 不同区域的研究热点

以关键词作为研究热点分析基础，通过对7255篇论文关键词的清理，对研究能力前5个省（市）（北京、陕西、江苏、黑龙江、湖南）进行近十年航空航天热点领域比较分析,见表2所示。

近十年在数值模拟、计算流体力学、滑模控制、自适应控制、姿态控制、导航、微重力、卡尔曼滤波器、超音速冲压喷射装置、飞机、高超声速飞行器、航空器等每一技术几乎在这5个省（市）均有涉及研究。这5个省（市）也有所不同侧重研究，其中北京主要侧重在轨迹优化方面研究；陕西侧重在不稳定流动控制等方面；江苏侧重在旋翼、直升机、航空发动机等方面研究；黑龙江侧重在输入饱和状态下的航天器姿态控制、高超声速进气道、编队飞行等方面研究；湖南侧重在航天推进系统、发动机燃烧室空腔、乘波器、减阻等方面研究。

Numerical simulation（数值模拟）又称数值分析方法，是用计算机程序来求解数学模型的近似解。这5个省（市）分别在火箭发动机、推进器、飞行器、机翼、超声速、微重力场等航空航天技术领域广泛应用数值模拟方法，已成为研究热点，主要用于稳定性、控制、动力学等模拟研究。

表2 主要省（市）近10年在航空航天技术领域研究热点

北京	陕西	江苏	黑龙江	湖南
Numerical simulation 数值模拟	Numerical simulation 数值模拟	Helicopter 直升机	Spacecraft 航空器	Supersonic flow 超声速流动
Microgravity 微重力	Sliding mode control 滑模控制	Rotor 旋翼	Attitude control 姿态控制	Hypersonic vehicle 高超声速飞行器
Navigation 导航	CFD 计算流体力学	Numerical simulation 数值模拟	Adaptive control 自适应控制	Scramjet 超音速冲压喷射装置
Attitude control 姿态控制	Microgravity 微重力	CFD 计算流体力学	Scramjet 超音速冲压喷射装置	Aerospace-Propulsion system航天推进系统
CFD 计算流体力学	Attitude control 姿态控制	Navigation 导航	Input saturation 输入饱和	Numerical simulation 数值模拟
Guidance 制导	Flow control 流动控制	Attitude control 姿态控制	Sliding mode control 滑模控制	Trajectory optimization 轨迹优化
Sliding mode control 滑模控制	Navigation 导航	Aircraft 飞机	guidance law 制导律	Opposing jet 对置喷射
Adaptive control 自适应控制	Unsteady flow 不稳定流动	Spacecraft 航空器	Numerical simulation 数值模拟	Cavity 空腔
Aircraft 飞机	Adaptive control 自适应控制	Spacecraft 航空器	Finite-time control 有限时间控制	Sliding mode control 滑模控制
Trajectory optimization 轨迹优化	Hypersonic vehicle 高超声速飞行器	Electrochemical machining电解加工	Hypersonic inlet 高超声速进气道	Navigation 导航
Hypersonic vehicle 高超声速飞行器	Kalman filter 卡尔曼滤波器	Hypersonic vehicle 高超声速飞行器	Formation flying 编队飞行	Drag reduction 减阻
Spacecraft 航空器	Aircraft 飞机	Kalman filter 卡尔曼滤波器	Kalman filter 卡尔曼滤波器	Waverider 乘波器
Kalman filter 卡尔曼滤波器	Genetic algorithm 遗传算法	Aero-engine 航空发动机	Guidance 制导	Kalman filter 卡尔曼滤波器

4 研究机构及合作关系分析

4.1 研究机构实力分析

4.1.1 主要研究机构发文量及总体被引情况

从发文数量、总被引频次及篇均被引次数三个角度分析排名前 10 位的中国航空航天工程领域的高影响力机构，显示了航空航天工程领域的高关注度。

从表 3 研究发现，北京航空航天大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学三所高校是中国航空航天领域技术研究的三大核心机构，实力较强，发文量分别为 1543 篇、764 篇和 729 篇。其他国防科技大学、南京航空航天大学、北京理工大学、清华大学、中国科学院、上海交通大学、西安电子科技大学分别位于四至十名。

北京航空航天大学发文量和总被引频次最多，篇均被引次数 5.2 次 / 篇，属于该领域内的高影响力机构。哈尔滨工业大学、国防科技大学的发文总量、总被引频次和篇均被引次数接近，位于第二梯队。清华大学、西安电子科技大学虽然发文量和总被引频次不占优势，但两者的篇均被引次数（7.2 次 / 篇、6.7 次 / 篇）分别列于前两位。陕西省航空航天产业的主要研发团队在高校、科研院所和企业均有分布，高校以西北工业大学、西安电子科技大学和西安交通大学为代表。其中，西北工业大学是中国唯一一所以同时发展航空、航天、航海（三航）工程教育和科学研究为特色的全国重点大学，有国家重点学科“航空宇航科学与技术”。其发文量与哈尔滨工业大学、国防科技大学相近，但篇均被引次数与两者相比尚有较大差距。

表 3 2009-2018 年发文量前 10 位的机构

机构	发文量(篇)	发文量占比（%）	总被引频次(次)	篇均被引次数（次/篇）
北京航空航天大学	1 543	21.3	7993	5.2
西北工业大学	764	10.53	3195	4.2
哈尔滨工业大学	729	10.05	4759	6.5
国防科技大学	676	9.32	4527	6.7
南京航空航天大学	652	8.99	2420	3.7
北京理工大学	396	5.46	1564	3.9
清华大学	359	4.95	2576	7.2
中国科学院	305	4.20	1420	4.7
上海交通大学	225	3.10	604	2.7
西安电子科技大学	154	2.12	1029	6.7

4.1.2 论文被引最高的研究机构

被引频次是论文影响程度的一个重要指标，体现了科研机构（团队）对学者的关注度。表 4 中列出 2009—2018 年航空航天技术领域总被引频次前 10 位的论文题目、出版年、机构及被引频次。

前 10 位的机构分别为武汉空军雷达学院、东南大学、国防科技大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、清华大学及电子科技大学。空军雷达学院的许稼发表的论文以被引 153 次高居

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2020.02.010

首位，研究综述研究电介质屏障放电（DBD）等离子体流控制中的最新发展情况。东南大学的郭雷发表的论文以被引 148 次排名第二位，研究主题涉及基于非线性干扰观测器的高超声速飞行器鲁棒飞行控制。国防科技大学航天与材料工程学院的陈小前发表的论文以被引 144 次排名第三位，研究综述基于不确定性的航天飞行器多学科设计优化方法。其他发表的 7 篇论文分别来自国防科技大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、东南大学、清华大学和电子科技大学。

表 **4** 航空航天工程领域的被引论文前 **10** 位的文献列表

	论文标题	年度	第一作者机构	被引频次
1	Radon-Fourier Transform for Radar Target Detection, I: Generalized Doppler Filter Bank	2011	空军雷达学院	153
2	Nonlinear-Disturbance-Observer-Based Robust Flight Control for Airbreathing Hypersonic Vehicles	2013	东南大学	148
3	Review of uncertainty-based multidisciplinary design optimization methods for aerospace vehicles	2011	国防科技大学	144
4	Influences of the turbulence model and the slot width on the transverse slot injection flow field in supersonic flows	2012	国防科技大学	130
5	Guidance Laws with Finite Time Convergence	2009	哈尔滨工业大学	128
6	Chaotic artificial bee colony approach to Uninhabited Combat Air Vehicle (UCAV) path planning	2010	北京航空航天大学	114
7	Stabilization of the attitude of a rigid spacecraft with external disturbances using finite-time control techniques	2009	东南大学	113
8	Practical Techniques for Low-Thrust Trajectory Optimization with Homotopic Approach	2012	清华大学	108
9	Recent developments in DBD plasma flow control	2013	北京航空航天大学	107
10	MIMO Radar Moving Target Detection in Homogeneous Clutter	2010	电子科技大学	100

4.2 研究合作关系

4.2.1 网络密度分析

利用 Ucinet 软件对研究机构之间的合作关系，或省（市）地区之间与国外等的合作关系进行可视化，并截取最具代表性的区域（见图 3、图 4）进行展示。整体网密度可以测量网络成员之间的联系紧密程度，整体密度越大则网络中成员联系越紧密。在这个网络中，整体密度的大小反映了主要省（市）地区及研究机构之间共同出现的情况，存在着合作关系。

图 3 展示说明，在机构间合作方面，机构间的合作呈现出很强的区域性特点，形成了以北京航空航天大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学、清华大学几所高校为核心的研究机构群。从图中可见，除了上述机构外，还有其他多个机构、高校亦开展相关研究，但其总体实力和专业研究成果与上述机构相对较弱。

图 4 展示说明，对于中国大陆各省（市）而言，以北京市、陕西省、江苏省、黑龙江省、湖南省之间相互合作关系密切，与其他各省（市）地区及国外（美国、澳大利亚、加拿大、日本、德国等）也开展相互合作研究。促进与国际科研机构的合作与交流，同样是提升研究水平与研究影响力的重要途径。

我国航空航天技术产业发展史也已有六十多年了，以上知识图谱截图表明，这些研究机构之间和省（市）地区之间研究相互合作，形成一定合作关系网，一定程度上影响我国航空航天领域技术集体优势的发挥和水平的提高。

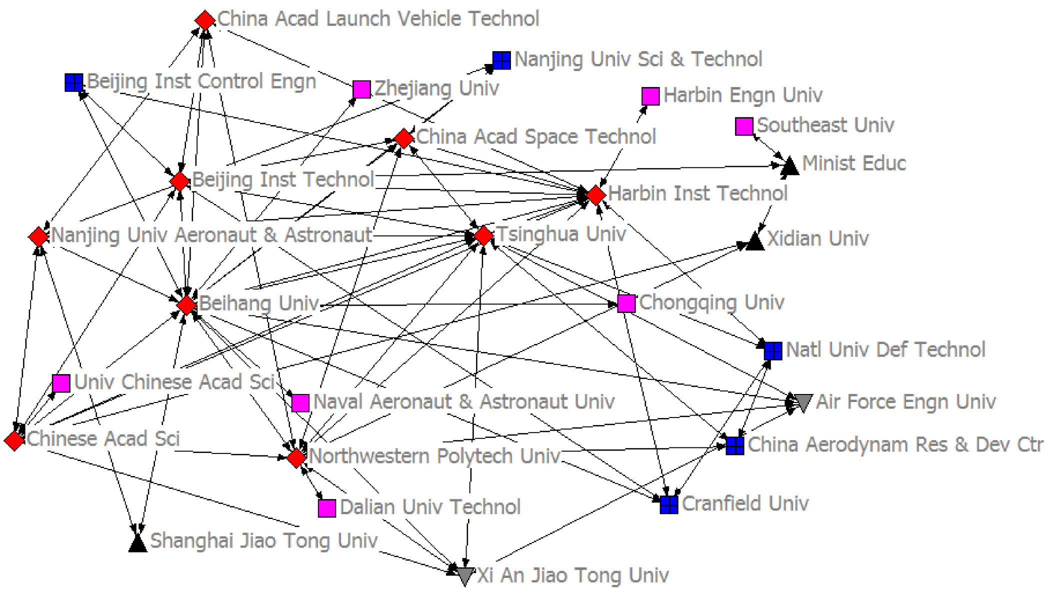

图 3 主要研究机构的合作关系

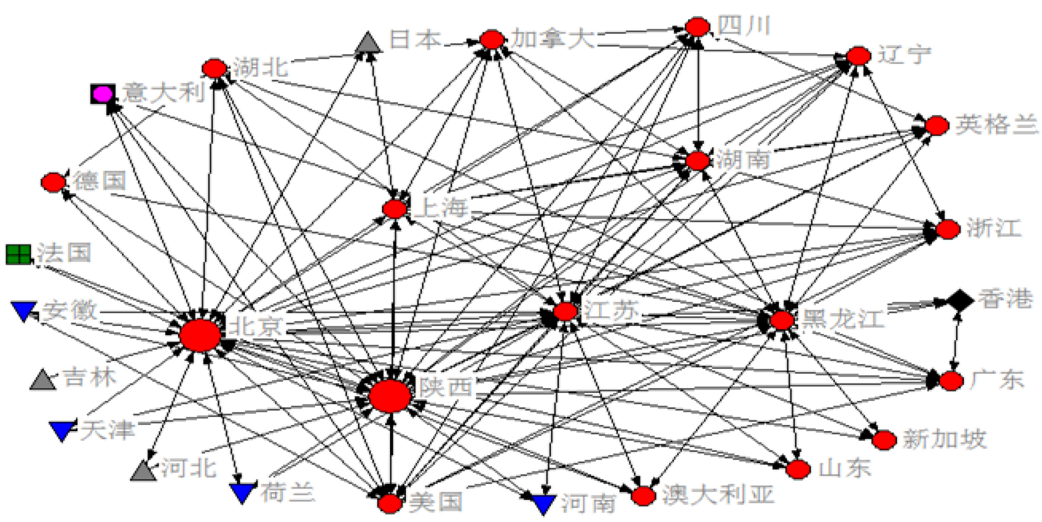

图 4 省（市）地区间及与国外的合作关系

4.2.2 中心性分析

衡量省（市）或者机构在其社会网络中处于何种中心地位，常采用中心性分析 [8]，中心性分析的主要指标有 3 种：度数中心性（Degree）、接近中心度（Closeness）、中介中心性（Betweenness）。本文就度数中心性及中介中心性对省（市）地区及各研究机构之间的合作关系进行分析和研究。

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2020.02.010

如果某省（市）地区或某研究机构在整个网络中具有较高的度数，则可称为该省（市）地区或该研究机构居于网络的中心，具有较高的度数中心性，中心度数值越大说明其具有的“权利”或者“影响力”越大。表 5 为中心性排名前 10 位的省(市)地区。从中可以看出北京、陕西、江苏、上海、黑龙江、辽宁、湖南等具有明显较高的介数中心性，而这些省（市）也是发文量靠前的。北京的度数中心性(Degree)、中介中心性（Betweenness）值最高，表明北京在该网络中的研究力强于其他省（市），其次是陕西、江苏、上海、黑龙江等也具有很高的度数中心性、介数中心性，这说明他们在航空航天领域研研究实力占优势。

表 **5** 中心性排名前 **10** 位的省（市）地区

	省（市）	度数中心性	接近中心度	中介中心性
1	北京	100.000	100.000	4.047
2	陕西	96.875	96.970	3.507
3	江苏	93.750	94.118	3.384
4	黑龙江	87.500	88.889	2.275
5	湖南	84.375	86.486	2.231
6	上海	93.750	94.118	3.337
7	四川	84.375	86.486	1.767
8	辽宁	87.500	88.889	2.294
9	湖北	84.375	86.486	1.896
10	浙江	62.500	72.727	0.556

5 结论和启示

通过对我国在航空航天技术领域的研究现状和发展态势分析，可以得到三点结论和启示。

（1） 我国综合竞争力快速提升，打破制约产业发展的瓶颈。

科技论文作为知识创新最主要的产出形成，是技术创新的基础，因此可以看出我国各区域航空航天产业的研究能力、综合竞争力近年来快速提升，随着全球经济发展和国际交流合作深化，航空航天产业迎来了新的发展机遇，特别在政策、资本和技术的推动下，我国航空航天产业发展已经进入快车道，但区域差异性始终存在。东部地区（北京、江苏、上海为首），西部地区（以陕西省为首），中部地区（以湖南省为首）、东北地区（以黑龙江为首）的综合研究能力强，形成我国东部、中部、东北和西部四大经济地区的航空航天产业研究竞争布局，其他省市相对研究能力较弱。由于存在资本、人才、科技要素差距，目前航空航天产业的重心已逐渐转移到东部地区，应合理有效地利用东部地区对航空产业效率、产业绩效的带动作用，促进产业转型升级，打破制约产业发展的瓶颈。各级部门应为航空航天产业发展，出台更有针对性、可操作性、实效性的产业政策，营造更好的创新环境。

（2）自主创新能力不足，主攻航空航天产业薄弱环节，核心关键技术亟待突破。

发动机、复合材料、航电系统是发展航空产业的三大关键技术，发动机更是被誉为航空产业“皇冠上的明珠”。我国主要偏向于应用问题研究，包括航天器控制系统、姿态控制、轨迹控制、推进系统，且微重力、高超声速飞行器、超音速冲压喷射装置、航空器目前仍是我国关注的核心研究问题和研究前沿。经过长时间的技术积累，我国在材料、电子设备等领域已经取得了许多突破，但是在飞机发动机上

仍然依赖于国外进口，成为制约我国航空事业发展的主要瓶颈。因此，我们应加强跟踪世界研发前沿热点及专利技术，多层次、多渠道、多形式推进合作交流，引进吸收消化国外先进技术，借鉴航空航天强国经验，逐步提高研发能力、自主创新能力，推动产业集聚发展。主攻航空航天产业薄弱环节，增强企业综合实力，进一步完善产业链条，带动各省制造业等配套产业提质升级，为我国成为航空航天强国建设作出更大贡献。

（3）研究能力形成梯度化，产业规划合理布局。

我国各省航空航天产业的主要研发团队在高校、科院和企业均有分布，在航空航天领域研究能力方面形成梯度化，选取在航空航天领域研究能力强的北京、陕西、江苏、黑龙江、湖南五个省市，这五个省市均以高校为科研主体，不断自主研究、创新。以北京航空航天大学为主体的北京市研究实力最强，陕西以西北工业大学为主体的研究团队位居第二位，陕西省内科研院所、高校众多，技术基础和人才优势也十分突出，而且已经形成了西航、西飞等一批航空航天龙头企业，只要把握住自身优势，实行差异化发展战略，陕西在未来的航空航天产业版图中必然会占据重要的一席。江苏、黑龙江、湖南三省基础实力处于第三梯队，在全国处于领先地位，与各省长期致力于发展该产业的努力密不可分的。

从航空航天产业发展规划来看，从依托单位、基础研究能力、龙头企业等方面分析每个地区可能具有的航空航天产业发展潜力。竞争力强的区域并没有带动周围区域的发展，生产模式较为孤立，产业集群尚未形成。因此，要合理进行产业规划，合理布局产业模式，以龙头省份带动周边省份大力发展通用航空制造配套产业，包括关键结构部件、机载设备、航空材料等，延伸通航产业上下游链条，促进龙头省份与周边省份的跨区域协同发展，各省充分发挥优势技术，带动相对较弱技术实现“短道超车”，形成完整的产业技术链，助力我国整个航空航天产业的发展，进一步加强航空航天技术的战略布局。

参考文献

[1] 美媒：下任美国总统必须关注哪九大航空航天技术领域？ [EB/OL]. (2016-09-16)[2019-02-12]. https://www.guancha.cn/america/2016_09_16_374548.shtml

[2] 2011 年全球主要国家航空航天产业发展现状及企业概述 [EB/OL].（2013-2-7）[2019-02-12]. http://www.istis.sh.cn/list/list.aspx?id=7782

[3] 张振军 . 中国航天软实力与世界航天强国建设 (上)[J]. 中国航天 , 2013(11):33-37.

[4] 马雪梅 , 薛慧锋 , 袁建华 . 主要航天国家航空航天技术研究发展态势——基于 Web of Science 数据库的科学计量分析 [J]. 情报工程 , 2017, 3(4):87-98.

[5] 韩静 . 大手笔布局航空航天产业 [J]. 小康 , 2018(23):44-45.

[6] 孟祥昊 , 潘云涛 . 中美俄航空航天工程领域科学论文产出对比研究 [J]. 科技管理研究 , 2014, 34(23):8-13.

[7] 邓砚谷 , 佘颖 , 王伟 . 时空视角下中国航空产业竞争力的地区差异分析 [J]. 南昌航空大学学报（社会科学版）, 2018, 20(3):38-46.

[8] 接丹丹 . 基于 UCINET 共现分析的春晚主持人合作网络 [J]. 视听 , 2018(7):18-20.