

第二章 分领域报告

一、机械与运载工程领域

1 工程研究热点及工程研究焦点解读

1.1 工程研究热点发展态势

机械与运载工程领域（以下简称机械领域）所研判的 Top10 工程研究热点涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（表 1.1.1）。其中，“大型机器人触觉传感器及实现”“神经网络模型与模糊逻辑”“振动隔离系统”“压电能量收集”“流固耦合模拟”“燃气轮机燃烧室的不稳定性和动态”“形状记忆合金”“机械工程中的非线性振动模态”是传统研究的深入，“增材制造的过程设计与自适应控制”和“超音速流与空气动力学”是新兴热点。各个热点所涉及的核心论文自 2011 年至 2016 年的逐年发表情况见表 1.1.2，“增材制造的过程设计与自适应控制”是近年来论文发表增速最显著的热点。

(1) 大型机器人触觉传感器及实现

机器人通过触觉传感器获得外部信息来实现对外界环境的感知。现阶段触觉传感器基本上可以分为两类，第一类是利用压力传感单元检测力，可以在单点上检测接触力的矢量，也可以组成多点阵列的传感器；第二类是以弹性体作为传感器的接触部件，弹性体受力后会发形变，通过检测弹性体的形变量和形状来计算接触力的大小和分布。由于大型机器人的刚度和输出功率大，其与环境交互过程中的输出力较大，为实现精确操作，往往需要具有精密力感知能力的触觉传感器。目前对单维力传感器的研究较为成熟，但是作为机器人与环境交互的感知器，机器人触觉传感器不仅需要能实现对表面垂直压力的检测，同时也需要传感器能够检测水平方向的剪切力。当机器人接触表面不规则的物体时，需要实现三维方向甚至多维方向力的探测。三维力触觉传感器的研制已经成为智能机器人技术的一个

表 1.1.1 机械领域 Top10 工程研究热点

序号	工程研究热点	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	专利引用篇数
1	大型机器人触觉传感器及实现	49	1536	31.35	2012.35	12.2%	0
2	增材制造的过程设计与自适应控制	33	610	18.48	2013.82	12.1%	0
3	超音速流与空气动力学	41	697	17.00	2013.61	7.3%	0
4	神经网络模型与模糊逻辑	47	1600	34.04	2011.64	8.5%	0
5	振动隔离系统	35	786	22.46	2013.37	8.6%	0
6	压电能量收集	39	1578	40.46	2012.51	28.2%	0
7	流固耦合模拟	45	1442	32.04	2012.84	8.9%	0
8	燃气轮机燃烧室的不稳定性和动态	35	1105	31.57	2013.03	17.1%	0
9	形状记忆合金	41	1287	31.39	2013.17	24.4%	2
10	机械工程中的非线性振动模态	32	646	20.19	2013.69	6.3%	0

表 1.1.2 机械领域 Top10 工程研究热点逐年核心论文发表数

序号	工程研究热点	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	大型机器人触觉传感器及实现	17	11	13	4	3	1
2	增材制造的过程设计与自适应控制	2	3	7	9	11	1
3	超音速流与空气动力学	3	8	7	10	10	3
4	神经网络模型与模糊逻辑	24	16	7	0	0	0
5	振动隔离系统	3	8	7	8	8	1
6	压电能量收集	10	14	5	5	5	0
7	流固耦合模拟	9	13	3	16	4	0
8	燃气轮机燃烧室的不稳定性和动态	7	8	6	6	7	1
9	形状记忆合金	8	4	10	14	2	3
10	机械工程中的非线性振动模态	5	1	7	7	10	2

重要研究领域。为获得三维力触觉，常采用在交叉结构上覆盖压敏薄膜电阻、铂/钛薄膜、各向异性的碳纳米管、柔性电容、炭黑/硅橡胶等基体材料，实现对三维力的检测。主要研究工作集中在柔性结构优化与基底材料设计等方面。随着智能机器人技术的迅猛发展，人们迫切希望赋予机器人类似人类皮肤的触觉感知能力，提高智能化仿生机器人的性能水平。因此柔性触觉传感器的研究逐渐成为机器人触觉传感器领域的热点内容，柔性多维触觉传感器的研制与开发是其中的重点和难点之一。

(2) 增材制造的过程设计与自适应控制

金属增材制造技术按热源分为激光、电子束和电弧等种类。基于粉末材料的激光工程近成形、激光选区熔化和电子束选区熔化增材制造技术已在航空航天、生物医疗和模具领域获得应用，解决了一批传统工艺面临的复杂化、整体化和个性化制造难题。但激光和电子束控制复杂、系统成本高，粉末制备难、易污染，且成形效率低，在快速、低成本成形大型零件方面存在较大局限。丝材电弧增材制造(wire arc additive manufacture, WAAM)以电弧为载能束，零件由多道焊缝堆积而成，化学成分均匀、致密度高。局部气氛对成形尺寸无限制，效率可达每小时数千克甚至更高，丝材较粉材污染小、成本低，因此在航空航天大型构件低成本、高效率

增材制造方面更具优势。另外，电弧较激光和电子束系统更易实现，且丝材较粉材更易输送和收集，在太空金属增材制造方面最具潜力。然而，电弧增材相比激光和电子束技术，零件表面粗糙、尺寸精度低、内部组织粗大，与切削、锻造等传统工艺在线复合提高精度和零件性能是该技术的发展方向，也是该领域的研究热点之一。

(3) 超音速流与空气动力学

超音速喷气机超音速流在超音速民用和军用飞机的设计中起着至关重要的作用，其涉及诸多超音速空气动力学关键技术问题，如超音速流动下的边界层转捩、激波/边界层干扰、湍流/激波交互、超音速湍流边界层、超音速气动声学、超音速流动下先进气动布局设计等。探明超音速流动下的边界层转捩类型与控制措施，掌握激波/边界层干扰对气动布局设计的影响，明晰超音速流的扰动模态及与激波交互后的演变特征，了解超音速湍流边界层的相干涡结构特性以及气动噪声的产生与传播机制，能够实现对超音速喷气机的先进气动布局设计。对横侧射流场特性的研究，不但可优化燃料的混合过程，还可揭示超燃冲压发动机燃烧稳定性的物理机理，实现超燃冲压技术和发动机超燃冲压早日在工程实践中的应用。横槽射流在飞行器的整体热防护以及超燃冲压发动机的内部冷却中有着重要的应

用,但因受到激波干扰、超声速剪切层以及湍流作用,易出现超音速流动下的流动分离与再附着等非定常空气动力学问题。需探索新理论和机理,开展先进实验技术研究,开发高效数值模拟计算方法,重点探明射流场与主流流动场之间的湍流交互机制,系统了解激波、膨胀波、剪切层以及边界层的综合耦合对于射流介质与主流流动介质的混合特征,掌握激波撞击及其导致的流动分离与峰值热流的关系。

(4) 神经网络模型与模糊逻辑

模糊神经网络控制是由模糊控制和神经网络结合而成的智能控制技术。模糊逻辑接近于人的思维方式,利用模糊规则,进行系统的定性分析和推理,具有较强的自然语言理解和处理能力,可解决控制系统中难以精确量化处理的模糊信息问题;而神经网络类似于人脑由神经元构成,利用其自学习能力,调节权重矩阵,完成输入到输出任意精度的非线性映射。二者是非线性系统建模和控制中卓有成效的两类方法,尤其是神经网络中的三层BP网络可实现任意连续非线性映射的理论成果和模糊逻辑系统中的万能逼近定理,使它们在非线性系统的辨识、建模和控制中占据重要地位,在工业控制应用中也取得了引人注目的成就和突破性进展。随着计算机科学的飞速发展,两者的结合将充分发挥各自的优点,特别是当非线性系统中存在多变量强耦合因素难以建立起数学模型时,相比传统控制方法,这种智能控制方法可以有效提高系统的智能化程度,提升控制品质。目前模糊神经网络技术已广泛应用于工业控制、信息处理、模式识别、人工智能、故障预测与诊断等诸多领域,而最近随着硬件技术发展迅速崛起的深度学习技术更为神经网络注入了新的活力。模糊神经网络已成为智能控制技术中具有广泛应用前景的前沿和热点研究方向。

如何设计网络结构、模糊规则以及优化学习算法是今后研究模糊神经网络的重点。模糊理论和神经网络的交叉融合使得各自理论和技术上不断突

破,结合前沿的其他机器学习方法,完善各自的体系。在此基础上,模糊神经网络技术进一步融合先进控制及大数据分析方法,必将为新一轮智能制造、智能电网等新兴工业领域的深刻变革发挥越来越重要的作用。

(5) 振动隔离系统

对振源进行隔振的主要手段是为其安装隔振装置,或者说在振源与传递路径之间采取振动隔离技术,这一类起隔振作用的装置称为振动隔离系统。为了满足超精密器械的加工、高分辨率卫星在轨运行时星上遥感设备、高精度光学设备的性能指标等对于工作环境的严格要求,特别是对微振动和超低频振动的严格要求,使得超低频高性能振动隔离系统成为当今国内外研究的热点和难点问题。相对于传统线性被动隔振系统,在高性能隔振系统的研究中存在如下两大矛盾。其一,系统承载力和超低隔振频率之间难以兼顾的矛盾;其二,抑制共振频域峰值及改善高频域隔振特性不可兼顾的矛盾。采用非线性隔振技术和主动、半主动隔振技术是获得超高性能隔振系统的主要途径,常见的有:高静态低动态刚度振动隔离装置、基于阻尼器的非线性振动隔离系统、非线性磁力振动隔离器等。通过在线性隔振系统中引入具有负刚度的装置,设计出具有高静态低动态刚度的低频振动隔离系统,能够保证系统承载力的同时具有超低频隔振特性。基于非黏性阻尼器的非线性振动隔离系统能够有效地抑制共振频域的振动幅值并抑制跳跃现象的发生,而对高频域隔振特性几乎没有影响。通过智能材料和主动控制技术,亦能获得更宽的有效隔振频带。

(6) 压电能量收集

近年来,将环境中振动能量转换为电能的相关研究引起了极大关注。压电材料在外力作用下产生变形时表面会出现极化电荷形成电场,且具有较高的能量密度,利用压电效应产生能量的装置称为压电能量收集器。压电式能量收集器具有结构简单、发热量小、无电磁干扰、易微型化和低碳环保等

优点。

目前，压电能量收集关键技术问题主要包括：高性能压电材料研究、智能化压电能量收集结构设计及低功耗、简单高效的能量收集电路设计。未来的研究趋势中以下几点值得关注：通过研究新型高性能压电材料或将不同现有压电复合材料结合，进而提升压电能量收集性能；通过建立振动条件下的耦合场数学模型，设计智能化自适应调频的新型多方向压电振动能量收集结构，实现多方向、宽频带的基本非线性能量采集；分析电路参数及负载参数对能量收集装置发电性能的影响，采用新型电感器与模拟开关耦合设计，优化能量收集电路及其相应的控制电路，实现参数激励下的高效压电能量收集。基于压电能量收集的自供电装置在交通基础设施检测、无线医疗设备、室内环境监测和轮胎压力检测等方面均有应用。此外，将人体运动动能转换为电能并实现可穿戴电子设备供能具有广阔市场前景，受到了极大关注。

（7）流固耦合模拟

流固耦合是指固体和液体两种介质之间的相互作用，流固耦合模拟主要研究固体与流体之间的耦合动力学行为。流固耦合模拟问题涉及流体本身的非线性行为、固体材料的非线性本构方程和几何非线性问题以及流固耦合界面的非线性。可见，流固耦合模拟往往是一个非线性动力学问题，其分析常常依赖于数值求解算法。流固耦合模拟的关键在于模拟流体和固体子域间的作用力传递，随着新兴的流固耦合问题（如动脉血管模拟、降落伞空气动力学模拟）的发展，需要高精高效地求解大变形、强非线性、多尺度、时空耦合、多相流固耦合问题，研究高精度高效率的流固耦合模型和数值求解算法成为国内外研究热点问题。对于没有确定边界的流固耦合问题（如多孔固体渗流、降落伞空气动力学模拟），常用的方法为个性化流固耦合模拟技术。对于有明确边界的流固耦合问题，其难点包括流体的黏弹性、非线性运动，固体的黏弹塑性变形及几

何非线性大变形，界面的位移和变形带来的耦合作用变化等。对于流固耦合问题，一致和非一致网格划分技术、空间-时间模拟技术具有良好的发展前景。同时，在提高求解精度和效率方面，考虑时间和空间多尺度的流固耦合模拟方法有着显著的应用前景。

（8）燃气轮机燃烧室的不稳定性和动态

燃烧不稳定性问题一直是燃烧领域最重要的研究课题之一，广泛存在于内燃机、航空发动机、燃气轮机等燃烧现象中。不稳定性的出现诱发火焰间断、局部熄灭、传播速度与火焰面震荡等情况出现，进而反应出循环变动、燃烧效率下降、恶化污染物排放、机械破坏等危害。加强对燃烧不稳定性机制的认识及其抑制途径方法研究，不仅可以避免因为燃烧不稳定性引发的危害，同时可以拓展先进燃烧模式的工作范围、提高效率、降低排放。

关键技术：燃气轮机燃烧室是将燃料以接近定压燃烧方式加热气体工质，环形燃烧室布局是当前燃气涡轮发动机的首选，民用和工业用燃气轮机追求高燃烧效率和超低污染排放，军用航空发动机追求向超高温升方向发展，新一代燃烧室温升要达到 1550°C 以上，相应油气比为0.49以上。需要解决的关键问题：慢车贫油熄火问题、宽广工况范围内的稳定工作、改善燃烧与提高燃烧效率、低污染燃烧技术等。高温升燃气轮机燃烧室空气冷却和室壁结构是关键技术，将采用基于高温复合材料的高效复合冷却技术。目前我国在燃气轮机及其燃烧室设计和制造方面与国外的主要差距在于设计加工和耐高温复合材料技术方面。

（9）形状记忆合金

形状记忆合金因其材料内部可发生热弹性马氏体相变而呈现出形状记忆效应和伪弹性（又称超弹性）。自20世纪60年代被发现以来，以镍钛合金为代表的形状记忆合金已经广泛应用于航空、航天、生物医学等各个领域。目前，在形状记忆合金研究方面尚未解决的主要问题有：形状记忆合金的热

力耦合 - 循环变形行为研究, 包括形状记忆合金变形过程中呈现的温度相关性、伪弹性形状记忆合金变形过程中的速率(频率)相关性、循环载荷下热-力行为的演变规律以及应力诱发马氏体相变的局部效应; 复杂结构、复杂载荷(非比例载荷)下形状记忆合金力学行为的数值模拟; 形状记忆合金疲劳与断裂行为研究, 包括循环相变下的裂纹形成与扩展机制、热力耦合对疲劳断裂行为的影响、高周疲劳载荷下的安定性以及宏观疲劳准则等。针对上述问题, 需要从微观、细观、宏观多尺度对形状记忆合金展开实验及理论研究, 建立多物理场耦合模型, 以揭示相关机制机理并实现对形状记忆合金力学行为的模拟及预测。

(10) 机械工程中的非线性振动模态

非线性现象普遍存在于工程应用中, 并且会急剧改变结构的动力学行为。近年来, 非线性机械系统的动力学分析、求解方法、实验测试、系统非参数识别、模态参数识别、模型修正、不确定性分析等工程问题已成为当前国内外研究热点。模态理论是线性振动理论的核心, 为了寻求一种类似线性模态那样简单而有效的求解多维非线性系统的计算方法, 提出了非线性模态理论, 将模态的概念推广到非线性系统。可以说, 非线性模态是线性模态的延伸, 是非线性系统简化的基础。线性系统的模态都是确定的, 而非线性模态可能产生分岔, 使得非线性系统的模态数目超过系统自由度。近年来, 关于非线性振动模态的直接求解方法、子空间迭代和非线性系统的模型降阶方法得到了一定的发展, 为分岔、跳跃、模态耦合、力弛豫、颤振的动力学研究提供了高效的求解方法。此外, 由于非线性系统动力学特性的复杂性, 很多影响因素难以精确地定量分析, 因此在研究模型识别、参数识别、模型修正、模型降阶、骨架曲线稳定性识别等问题时, 需要结合不确定性分析方法(如贝叶斯法)开展研究, 目前该问题尚未形成完整的体系, 其任务仍十分艰巨。

1.2 工程研究焦点解读

1.2.1 大型机器人触觉传感器及实现

由于大型机器人的刚度和输出功率大, 其与环境交互过程中的输出力较大, 为实现精确操作, 往往需要具有精密力感知能力的触觉传感器。目前对单维力传感器的研究较为成熟, 但是作为机器人与环境交互的感知器, 机器人触觉传感器不仅需要能实现对表面垂直压力的检测, 同时也需要传感器能够检测水平方向的剪切力。如机器人握持物体时, 需要感知切向力, 同时感知正向压力。当机器人接触表面不规则的物体时, 需要实现三维方向甚至多维方向力的探测。三维力触觉传感器的研制已经成为智能机器人技术的一个重要研究领域。为获得三维力触觉, 常采用在十字交叉结构上覆盖压敏薄膜电阻、铂/钽薄膜、各向异性的碳纳米管、柔性电容、炭黑/硅橡胶等基底材料, 实现对三维力的检测。主要研究工作集中在柔性结构优化与基底材料设计等方面。

(1) 高灵敏度的 3D 形触觉传感器

机器人通过触觉传感器获得外部信息来实现对外界环境的感知。现阶段触觉传感器基本上可以分为两类, 第一类是利用压力传感单元检测力, 可以在单点上检测接触力的矢量, 也可以组成多点阵列的传感器, 如多个应变片组成的阵列传感器; 第二类是以弹性体作为传感器的接触部件, 弹性体受力后会发生形变, 通过检测弹性体的形变量和形状来计算接触力的大小和分布。广义的触觉是接触、滑动、压觉等的总称, 而狭义上的触觉是接触面上的力觉。3D 形触觉是指具有对被触对象的形貌感知能力的触觉, 主要通过接触滑动过程中相关传感量的变化来间接感知。3D 形触觉传感器可广泛用于需要模拟人手抓取性能的场所, 如假肢手、遥操作机械臂等。现阶段 3D 形触觉传感器的研究领域存在诸多问题, 如制造成本高、工艺复杂、灵活性不够, 不能同时具备可拉伸性和多维力感知能力。现有研究主要利用光纤材料受力后的光反射特性变化

来实现 3D 形触觉。

(2) 柔性触觉传感器

随着智能机器人技术的迅猛发展，人们迫切希望赋予机器人类似人类皮肤的触觉感知能力，提高智能化仿生机器人的性能水平。能否依据外界环境的变化做出快速的判断和正确的决策是智能机器人触觉感知面临的重要挑战。因此柔性触觉传感器的研究逐渐成为机器人触觉传感器领域的热点内容，柔性多维触觉传感器的研制与开发是其中的重点和难点之一。柔性多维触觉传感器是指传感器既具有类似人类皮肤的柔性，还可以附着在物体的表面感知并测量多维信息。它具有良好的柔韧性、灵活性，能够贴敷于不同粗糙程度以及不同表面形状的载体，并快速准确地完成对外界环境的信息感知与获取任务。目前该领域的主要研究内容包括：新敏感材料的实验探索；触觉传感器的制造工艺；接触觉、压觉、滑觉、热觉、力觉等功能的多种敏感元件集成设计；触觉信息测量原理。通过探索新敏感材料和新制造工艺，柔性触觉传感器的柔软性和延展性将越来越接近人类皮肤，在此基础上，赋予柔性触觉传感器多维力测量能力是今后的研究重点。

(3) 触觉阵列传感器

通过对触觉传感器以阵列的形式大面积集成，可获得丰富的感知信息，如空间压力和温度分布等。在实际应用过程中，大部分的触觉阵列传感器多为柔性结构。用于制造人工皮肤的触觉阵列传感器不仅要具有一定的柔性，而且要能在任意载体表面进行接触压力的测量，为此需要将触觉阵列传感器部分或者全部覆盖在执行器表面。在一定程度上，敏感单元的面积越大，获得的信息量就越多。为了不受面积和结构的影响，触觉阵列传感器需要具有一定空间力信息分辨率，使其能够准确感知空间力分布。目前的触觉阵列传感器存在如下问题：首先有些触觉传感器的敏感元件单元是刚体的，利用柔性材料为触觉信息传递的媒介，将刚体传感器植入在柔性材料内部，因为触觉传感器本体不具备柔性，

弯曲程度受到限制，也难以获得较为准确的连续分布信息。其次，另外一类触觉阵列传感器的敏感元件是柔性材料，但此类柔性触觉阵列传感器目前仅仅能进行一维触觉信息的测量。为了解决以上问题，研究者近年来尝试用电容、聚偏二氟乙烯(PVDF)、光波导等技术，来研制触觉阵列传感器，主要的研究工作集中在阵列传感器的柔性化、多维化以及大规模设计等方面。

(4) 基于物理的抓取质量评估

鲁棒性抓取是机器人抓握运动最期望的属性，稳定的抓取是机器人手爪与环境发生物理交互的基础，也是实现更高阶抓握操作运动的基础。机器人抓取过程中的触觉信息可用来评估机器人抓握的质量，并为机器人手爪的实时抓握提供调控信息。丰富的触觉信息是机器人手爪实现抓取和灵活操作能力的基础，触觉理论与技术研究可为最终通过机器人系统再现人手操作和感知能力提供原动力。由于触觉信息存在冗余和维度高的特点，现有基于触觉信息的抓取质量评估多结合机器学习的方法，如 AdaBoost 迭代算法、支持向量机(SVM)和隐马尔科夫模型(HMM)等。影响抓取稳定性的因素包括被抓对象形状、抓握接近向量、接触点触觉信息以及手爪的关节形位等。机器人抓取质量评估主要研究内容包括抓取的封闭性、可操作性和稳定性等内容。

“大型机器人触觉传感器及实现”工程研究焦点中核心论文发文量排在前三的国家/地区分别为：美国(17)、德国(11)和瑞士(6)，篇均被引频次排在前三的国家/地区分别为瑞士(48.83)、西班牙(45.00)和意大利(42.25)，见表 1.2.1。在发文量 Top10 国家/地区中，德国和西班牙、英格兰和意大利合作较多，见图 1.2.1。核心论文发文量排在前三的机构分别为：Tech Univ Munich(4)、Czech Tech Univ(4)、Willow Garage Inc(3)、Royal Inst Technol(3)和 Columbia Univ(3)，篇均被引频次排在前三的机构分别为 ETH(97.50)、Univ Zaragoza(65.00)和 Univ Genoa(60.00)，

表 1.2.1 “大型机器人触觉传感器及实现”工程研究焦点中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心 论文数	论文 比例	被引 频次	被引频 次比例	篇均被 引频次	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	USA	17	34.69%	383	29.28%	22.53	4	0
2	Germany	11	22.45%	340	25.99%	30.91	3	0
3	Switzerland	6	12.24%	293	22.40%	48.83	0	0
4	England	5	10.20%	129	9.86%	25.80	1	0
5	Spain	4	8.16%	180	13.76%	45.00	1	0
6	Italy	4	8.16%	169	12.92%	42.25	3	0
7	Japan	4	8.16%	63	4.82%	15.75	1	0
8	Czech	4	8.16%	53	4.05%	13.25	0	0
9	Sweden	3	6.12%	94	7.19%	31.33	2	0
10	Denmark	2	4.08%	59	4.51%	29.50	1	0

表 1.2.2 “大型机器人触觉传感器及实现”工程研究焦点中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心 论文数	论文 比例	被引 频次	被引频 次比例	篇均被 引频次	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	Tech Univ Munich	4	8.16%	211	16.13%	52.75	1	0
2	Czech Tech Univ	4	8.16%	53	4.05%	13.25	0	0
3	Willow Garage Inc	3	6.12%	123	9.40%	41.00	1	0
4	Royal Inst Technol	3	6.12%	94	7.19%	31.33	2	0
5	Columbia Univ	3	6.12%	60	4.59%	20.00	0	0
6	ETH	2	4.08%	195	14.91%	97.50	0	0
7	Univ Zaragoza	2	4.08%	130	9.94%	65.00	0	0
8	Univ Genoa	2	4.08%	120	9.17%	60.00	2	0
9	Italian Inst Technol	2	4.08%	105	8.03%	52.50	1	0
10	Univ Sheffield	2	4.08%	105	8.03%	52.50	1	0

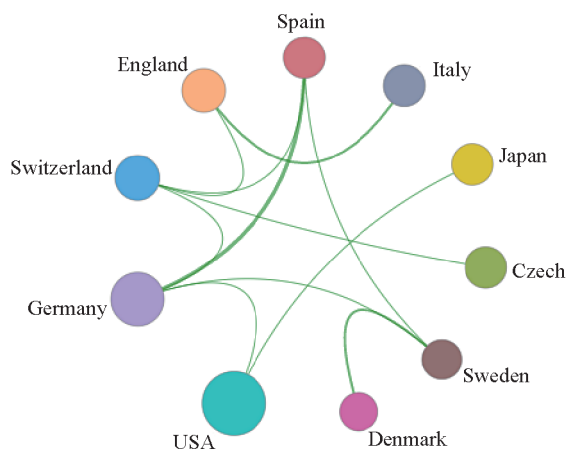
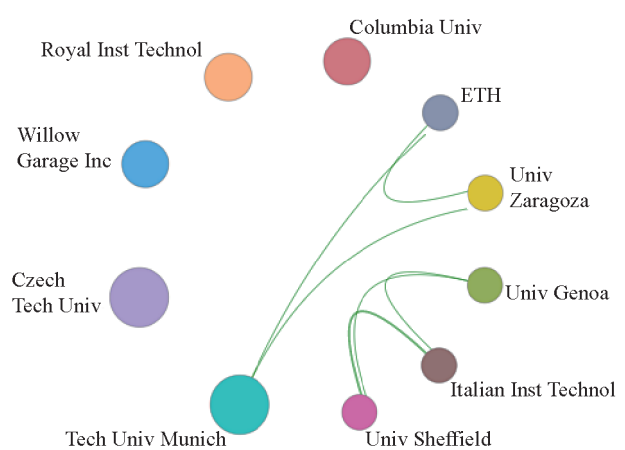

 图 1.2.1 “大型机器人触觉传感器及实现”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络¹


图 1.2.2 “大型机器人触觉传感器及实现”工程研究焦点主要机构间的合作网络

¹ 图中，节点表示国家 / 地区，节点大小表示论文数量，节点连线表示有合作发表论文，连线粗细表示合作论文数量，全文相同。

表 1.2.3 “大型机器人触觉传感器及实现”工程研究焦点中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Spain	3	18.75%	2014.33
2	USA	3	18.75%	2013.00
3	Sweden	2	12.50%	2014.00
4	Germany	2	12.50%	2014.50
5	England	2	12.50%	2015.50
6	Denmark	1	6.25%	2014.00
7	Italy	1	6.25%	2015.00
8	Japan	1	6.25%	2013.00
9	Czech	1	6.25%	2015.00

表 1.2.4 “大型机器人触觉传感器及实现”工程研究焦点中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Royal Inst Technol	2	9.52%	2014.00
2	Univ Bristol	2	9.52%	2015.50
3	Carnegie Mellon Univ	1	4.76%	2013.00
4	Columbia Univ	1	4.76%	2014.00
5	German Aerosp Ctr DLR	1	4.76%	2015.00
6	Google Inc	1	4.76%	2013.00
7	Italian Inst Technol	1	4.76%	2015.00
8	Karlsruhe Inst Technol	1	4.76%	2014.00
9	MPI Intelligent Syst	1	4.76%	2014.00
10	Toyota Motor Co Ltd	1	4.76%	2013.00

见表 1.2.2。在发文量 Top10 机构中，Italian Inst Technol 和 Univ Sheffield 合作较多，图 1.2.2。施引核心论文发文量排在前三的国家 / 地区分别为：西班牙（3）、美国（3）、瑞典（2），见表 1.2.3。施引核心论文的主要产出机构分别为：Royal Inst Technol（2）、Univ Bristol（2）、Carnegie Mellon Univ（1），见表 1.2.4。

1.2.2 振动隔离系统

为了满足超精密设备的加工及检测、高分辨率卫星、高精度光学设备等的性能指标对于工作环境的严格要求，微振动的隔离与消除是该领域的一个具有挑战性和热点问题。随着航天器指向精度和指

向稳定度的要求越来越高，以前可忽略的航天器运动部件（如反作用轮、推力器、太阳能帆板、动量轮、冷机、天线驱动机构等部件）引起的航天器微振动问题，越来越受到国内外研究者的重视。运动部件引起的微振动传递到敏感部件（如中波红外传感器、激光通信设备以及太空望远镜等高精度设备），将影响其正常工作。此外，光刻机作为半导体科技工业的核心装备，是超精密设备的典型代表，其加工精度可达纳米级别。在传统加工与检测设备中无需考虑的微振动因素将会对光刻机的精度产生致命的影响。因此，微振动的抑制问题已成为发展高分辨率、高精度航天器和超精密设备的主要瓶颈之一。

微振动的主要特点是幅值小、频带宽、控制难。

微振动的频率范围从极低频到数千赫兹，其中几赫兹到几百赫兹范围内的振动能量较大，不易衰减。微振动由于振幅小，在机械结构中的传播机理复杂，不易从振源中消除。相对于传统线性被动隔振系统，在抑制微振动的研究中存在如下两大矛盾。其一，系统承载力和超低隔振频率之间难以兼顾的矛盾；其二，抑制共振频域峰值及改善高频域隔振特性不可兼顾的矛盾。采用非线性隔振技术和主动、半主动隔振技术是抑制微振动的主要途径，常见的有：高静态低动态刚度振动隔离装置、非线性振动隔离系统、主动/半主动隔离系统等。

(1) 高静态低动态刚度振动隔离装置

为解决系统承载力和超低隔振频率之间难以兼顾的矛盾，高静态低动态刚度振动隔离装置具有广阔的应用前景。采用正、负刚度元件并联构成的准零刚度隔振器（或具有高静态 - 低动态刚度的隔振系统）成为全球工程领域的研究热点。通过在线性隔振系统的基础上引入负刚度机构，设计出具有高静态低动态刚度的低频隔振器，解决了传统线性隔振系统难以隔离超低频振动的难题。正刚度弹性元件一般为垂直弹簧，而负刚度调节机构有多种形式。准零刚度隔振器由正刚度弹性元件和负刚度调节机构并联组成，其中正刚度弹性元件用于承受主要载荷，负刚度调节机构用于抵消正刚度弹性元件的刚度，使系统在静态平衡位置处的刚度趋于零。准零刚度隔振器具有高的静刚度和低的动刚度，高的静刚度使隔振器的承载能力提高，静态位移减小；低的动刚度使系统的固有频率降低，获得比线性隔振器更宽的隔振频带。

(2) 非线性振动隔离系统

基于非线性阻尼和非线性刚度技术发展起来的一些先进的非线性隔离方法具有优异的隔离性能和可靠性，如能够用于低频和（或）宽频率范围的隔振，在超低频隔振领域具有很大的应用潜力。对传统线性被动隔振系统设计时，阻尼比的大小和高频衰减能力存在矛盾。这一矛盾能够通过非线性阻尼

技术得以解决，采用非线性阻尼模型来限制共振放大倍数并提高高频振动衰减能力的设计成为当前研究热点。这种非线性阻尼隔振系统可以在微幅振动情况下提供较大的阻尼，不但能够在共振峰值处有效地控制共振峰放大系数，而且还可以在高频范围内提供良好的隔振效果。非线性阻尼在宽频率范围内的隔振性能优于线性阻尼，通过结合非线性刚度隔振系统诸如高静态低动态刚度振动隔离系统，将可能在设计超低频高性能隔振器方面发挥重要作用。

(3) 主动/半主动隔振系统

主动/半主动隔振技术可以有效地用于抑制空间结构和超精密器械的微振动，尤其对于在能量消耗和重量成本可接受的低频范围内的隔振问题。在主动隔振技术中，致动器和传感器通常用于提供控制力和反馈信号，可以通过主动反馈控制来调整系统刚度和阻尼，能够很好地隔离低频区域中的振动。与被动隔振系统相比，主动隔振系统在对低频区和共振区振动的隔离具有明显的优势，在超精密仪器的隔振设计方面具有广阔的应用前景。然而，若低频区域的微振动隔离完全通过主动隔振技术来实现，可靠性可能降低。半主动隔振技术结合了被动隔振和主动控制技术的优点，可提供比被动或主动隔振系统更好的隔振性能，能够有效地用于隔离窄频带，宽频带和低频范围内的在轨航天器的微振动，是空间工程中微振动抑制的一种有效方法。磁流变流体阻尼器具有反应时间快、功率要求低等优点，但由于重量限制，在航天器中很少采用基于磁流变流体阻尼器的半主动隔离器。智能材料能够将机械能转换为其他形式能量耗散掉，在微振动隔离方面具有明显的优势。

“振动隔离系统”工程研究焦点中核心论文发文量排在前三的国家/地区分别为：中国（26）、英格兰（9）、韩国（2）、巴西（2）和美国（2），篇均被引频次排在前三的国家/地区分别为韩国（38.50）、巴西（36.50）和印度（33.00），见表 1.2.5。在发文量 Top10 国家/地区中，中国和英格

兰合作非常密切，见图 1.2.3。核心论文发文量排在前三的机构分别为：Hong Kong Polytech Univ(6)、Univ Southampton (5)、Natl Univ Def Technol (5) 和 Tongji Univ (5)，篇均被引频次排在前三的机构分别为 Univ Bristol (39.50)、Univ Ulsan (38.50) 和 UNESP Ilha Solteira (36.50)，见表 1.2.6。在发文量 Top10 机构中，Hong Kong Polytech Univ 和 Tongji Univ、Beihang Univ 和 Sci Technol Inertial Lab 合作较多，见图 1.2.4。2011—2016 年间，我国发表的与“振动隔离系统”工程研究焦点相关的核心论文有 26 篇，发文较多的大陆机构为国防科技大学、同济大学、上海交通大学和北京航空航天大学等。施引核心论文发文量排在前三的国家/地区分别为：中国 (15)、英格兰 (2)、伊朗 (1)、美国 (1)，

见表 1.2.7。施引核心论文的主要产出机构分别为：Tongji Univ (4)、Hong Kong Polytech Univ (4)、Beihang Univ (3)，见表 1.2.8。

1.2.3 超音速流与空气动力学

超音速喷气机超音速流在超音速民用和军用飞机的设计中起着至关重要的作用，其涉及诸多超音速空气动力学关键技术问题，如超音速流动下的边界层转捩、激波 / 边界层干扰、湍流 / 激波交互、超音速湍流边界层、超音速气动声学、超音速流动下先进气动布局设计等。为了实现超音速喷气机的设计，需探索超音速客机新设计理论，开发新颖的实验技术和高效高精度数值模拟计算方法，对以上基础科学问题进行系统研究。重点探明超音速流动

表 1.2.5 “振动隔离系统”工程研究焦点中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心 论文数	论文 比例	被引 频次	被引频 次比例	篇均被 引频次	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	China	26	74.29%	401	58.88%	15.42	2	0
2	England	9	25.71%	242	35.54%	26.89	1	0
3	Korea	2	5.71%	77	11.31%	38.50	1	0
4	Brazil	2	5.71%	73	10.72%	36.50	0	0
5	USA	2	5.71%	49	7.20%	24.50	0	0
6	India	1	2.86%	33	4.85%	33.00	0	0
7	Iran	1	2.86%	13	1.91%	13.00	0	0

表 1.2.6 “振动隔离系统”工程研究焦点中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心 论文数	论文 比例	被引 频次	被引频 次比例	篇均被 引频次	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	Hong Kong Polytech Univ	6	17.14%	91	13.36%	15.17	1	0
2	Univ Southampton	5	14.29%	149	21.88%	29.80	1	0
3	Natl Univ Def Technol	5	14.29%	89	13.07%	17.80	1	0
4	Tongji Univ	5	14.29%	57	8.37%	11.40	1	0
5	Shanghai Jiao Tong Univ	4	11.43%	84	12.33%	21.00	0	0
6	Beihang Univ	4	11.43%	44	6.46%	11.00	0	0
7	Sci Technol Inertial Lab	3	8.57%	28	4.11%	9.33	0	0
8	Univ Bristol	2	5.71%	79	11.60%	39.50	0	0
9	Univ Ulsan	2	5.71%	77	11.31%	38.50	1	0
10	UNESP Ilha Solteira	2	5.71%	73	10.72%	36.50	0	0

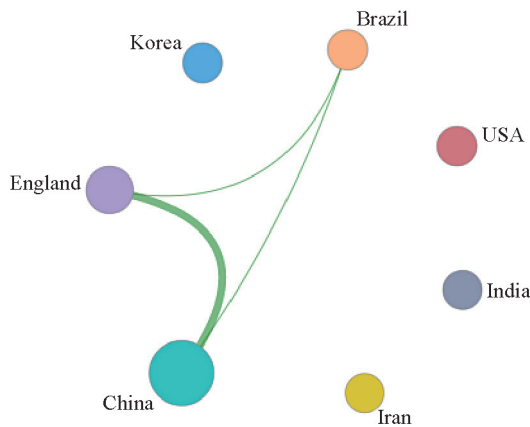


图 1.2.3 “振动隔离系统”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络

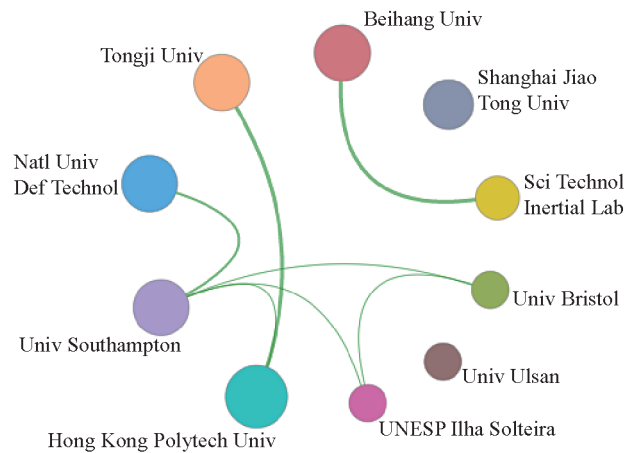


图 1.2.4 “振动隔离系统”工程研究焦点主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “振动隔离系统”工程研究焦点中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	15	78.95%	2014.27
2	England	2	10.53%	2014.00
3	Iran	1	5.26%	2014.00
4	USA	1	5.26%	2014.00

表 1.2.8 “振动隔离系统”工程研究焦点中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Tongji Univ	4	13.79%	2014.75
2	Hong Kong Polytech Univ	4	13.79%	2014.75
3	Beihang Univ	3	10.34%	2015.00
4	Natl Univ Def Technol	3	10.34%	2013.00
5	Sci & Technol Inertial Lab	2	6.90%	2015.00
6	Shanghai Jiao Tong Univ	2	6.90%	2013.50
7	Beijing Univ Technol	1	3.45%	2015.00
8	Harbin Inst Technol	1	3.45%	2015.00
9	Harvest Technol	1	3.45%	2014.00
10	HRL Labs	1	3.45%	2014.00

下的边界层转捩类型与控制措施（主要为第一模态不稳定波与横流模态波），掌握激波 / 边界层干扰对气动布局设计的影响，明晰超音速来流的扰动模态及与激波交互后的演变特征，了解超音速湍流边界层的相干涡结构特性以及气动噪声的产生与传播

机制，研究降温降噪新原理和技术，实现对超音速喷气机的先进气动布局设计。

（1）横槽射流场特性

横槽射流场主要表现在射流方向与主流方向平行，通过在射流中使用冷凝剂来达到降低物体表

面温度以及改变流场结构的双重目的。横槽射流在飞行器的整体热防护以及超燃冲压发动机的内部冷却中有着重要的应用，但因受到激波干扰、超声速剪切层以及湍流作用，易出现超音速流动下的流动分离与再附着等非定常空气动力学问题；此外，射流流场与超音速主流动之间的相对速度在剪切层中产生复杂的涡结构，并进一步产生强烈的声波辐射。针对以上问题，需探索新理论和机理，开展先进实验技术研究，开发高效数值模拟计算方法，重点探明射流场与主流动流场之间的湍流交互机制，系统了解激波、膨胀波、剪切层以及边界层的综合耦合对于射流介质与主流动介质的混合特征，掌握激波撞击及其导致的流动分离与峰值热流的关系。

(2) 横侧射流场特性

基于降低成本，提高舒适度的民用飞机要求，以及快速反应、强突防能力等军事需求，人类未停止过对飞行器提高速度的追逐。然而，在 $Ma > 3.0$ 时，要大幅地提高基于等压燃烧方式的燃气涡轮、涡扇发动机的推进热效率已经变得十分困难。冲压发动机通过几何构型的改变来实现气流增压以满足燃烧室内的压力需求，结构简单、重量轻，在高飞行马赫数下具有较好的性能，受到国内外广泛的关注。

因此，从 20 世纪 50 年代开始，世界主要发达

国家均投入巨资研究以超燃冲压发动机为核心的高超声速飞行技术，如美国、俄罗斯、法国、日本、德国，以及澳大利亚等国家研究机构，均围绕超燃冲压发动机开展了大量工作。燃冲压发动机内，超声速来流的驻留时间非常短，如何实现燃料 - 空气的快速混合，以促使燃烧室内的高效稳定燃烧，并尽可能的降低总压损失，是超燃发动机设计中面临的最根本的技术挑战。横侧射流穿透深度较高，混合效率较好，是常采用的一种燃料喷注方式。对横侧射流场特性的研究，不但可优化燃料的混合过程，还可揭示超燃冲压发动机燃烧稳定性的物理机理，实现超燃冲压技术和发动机超燃冲压早日在工程实践中的应用。

“超音速流与空气动力学”工程研究焦点中核心论文发文量排在前三的国家/地区为：中国(25)、英格兰(8)、美国(5)和伊朗(5)，篇均被引频次排在前三的国家/地区分别为英格兰(21.38)、埃及(19)和土耳其(16)，见表 1.2.9。在发文量 Top10 国家/地区中，中国和英格兰合作非常密切，见图 1.2.5。核心论文发文量排在前三的机构分别为：NatI Univ Def Technol(21)、Univ Leeds(6)和 Univ Michigan(5)，篇均被引频次排在前三的机构分别为 Univ Leeds(22.67)、Mil Tech Coll(19)

表 1.2.9 “超音速流与空气动力学”工程研究焦点中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次	常被引论文数	专利引用篇数
1	China	25	60.98%	383	67.43%	15.32	3	0
2	England	8	19.51%	171	30.11%	21.38	1	0
3	USA	5	12.20%	72	12.68%	14.40	1	0
4	Iran	5	12.20%	50	8.80%	10.00	1	0
5	Japan	4	9.76%	50	8.80%	12.50	0	0
6	Scotland	2	4.88%	25	4.40%	12.50	0	0
7	Sweden	2	4.88%	12	2.11%	6.00	0	0
8	Egypt	1	2.44%	19	3.35%	19.00	0	0
9	Turkey	1	2.44%	16	2.82%	16.00	0	0
10	France	1	2.44%	9	1.58%	9.00	0	0

表 1.2.10 “超音速流与空气动力学”工程研究焦点中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心 论文数	论文 比例	被引 频次	被引频 次比例	篇均被 引频次	常被引 论文数	专利引 用篇数
1	Natl Univ Def Technol	21	51.22%	333	58.63%	15.86	3	0
2	Univ Leeds	6	14.63%	136	23.94%	22.67	1	0
3	Univ Michigan	5	12.20%	72	12.68%	14.40	1	0
4	Babol Univ Technol	4	9.76%	39	6.87%	9.75	1	0
5	Tohoku Univ	3	7.32%	35	6.16%	11.67	0	0
6	Harbin Inst Technol	2	4.88%	31	5.46%	15.50	0	0
7	Univ Glasgow	2	4.88%	25	4.40%	12.50	0	0
8	Islamic Azad Univ	2	4.88%	17	2.99%	8.50	1	0
9	Mil Tech Coll	1	2.44%	19	3.35%	19.00	0	0
10	Univ Sheffield	1	2.44%	19	3.35%	19.00	0	0

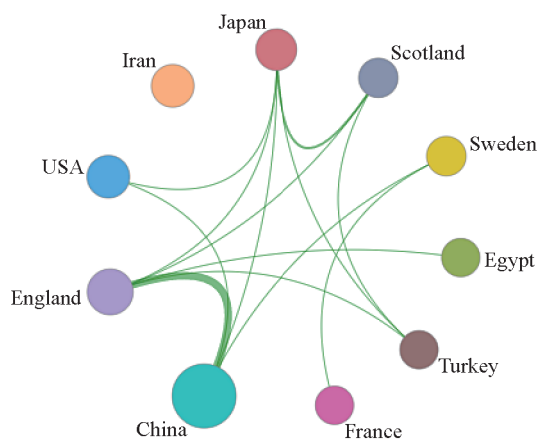


图 1.2.5 “超音速流与空气动力学”工程研究焦点主要国家或地区间的合作网络

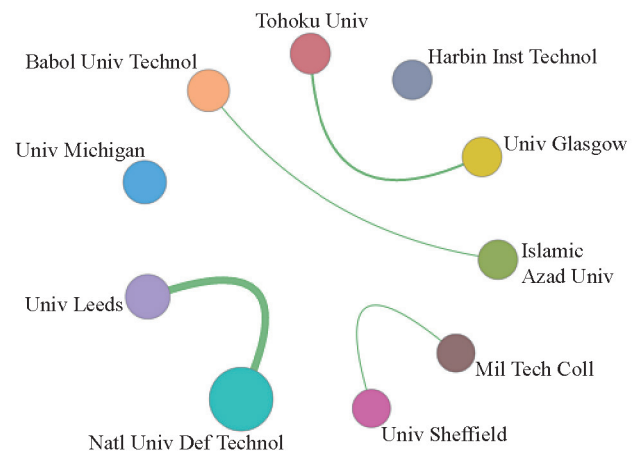


图 1.2.6 “超音速流与空气动力学”工程研究焦点主要机构间的合作网络

和 Univ Sheffield (19)，见表 1.2.10。在发文量 Top10 机构中，Natl Univ Def Technol 和 Univ Leeds 合作非常密切，见图 1.2.6。2011—2016 年间，我国发表的与“超音速流与空气动力学”工程研究焦点相关的核心论文有 25 篇，发文较多的大陆机构为国防科技大学和哈尔滨工业大学。施引核心论文发文量排在前三的国家/地区分别为：中国（19）、伊朗（4）、英格兰（3），见表 1.2.11。施引核心论文的主要产出机构分别为：Natl Univ Def Technol（18）、Babol Univ Technol（3）、Univ Leeds（3），见表 1.2.12。

2 工程开发热点及工程开发焦点解读

2.1 工程开发热点发展态势

机械与运载工程领域的 Top10 工程开发热点涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（表 2.1.1）。其中，“传感器技术”“先进半导体工艺及装备”“电动载具的电力系统”“无人载具与无人驾驶”“新型推进系统”“成像技术”“高效率低排放发动机设计与制造技

表 1.2.11 “超音速流与空气动力学”工程研究焦点中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	19	63.33%	2014.05
2	Iran	4	13.33%	2014.50
3	England	3	10.00%	2013.00
4	USA	2	6.67%	2013.00
5	Malaysia	1	3.33%	2016.00
6	Sweden	1	3.33%	2016.00

表 1.2.12 “超音速流与空气动力学”工程研究焦点中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Natl Univ Def Technol	18	52.94%	2014.00
2	Babol Univ Technol	3	8.82%	2014.67
3	Univ Leeds	3	8.82%	2013.00
4	Islamic Azad Univ	2	5.88%	2014.50
5	Univ Michigan	2	5.88%	2013.00
6	Amirkabir Univ Technol	1	2.94%	2014.00
7	China Aerodynam R&D Ctr	1	2.94%	2015.00
8	Harbin Inst Univ	1	2.94%	2016.00
9	Isfahan Univ Technol	1	2.94%	2015.00
10	Lund Univ	1	2.94%	2016.00

表 2.1.1 机械领域 Top10 工程开发热点

序号	工程开发热点	公开量	被引频次	篇均被引频次	平均公开年
1	传感器技术	259	3 122	12.05	2012.10
2	先进半导体工艺及装备	750	32 405	43.21	2012.30
3	无人载具及自主控制	88	3 070	34.89	2013.20
4	手术机器人及关键功能部件	118	4 877	41.33	2012.86
5	无人飞行器	401	2 210	5.51	2013.06
6	电动载具的电力系统	695	13 000	18.71	2011.80
7	无人载具与无人驾驶	166	2 983	17.97	2013.13
8	新型推进系统	507	2 048	4.04	2012.79
9	成像技术	214	7 409	34.62	2012.07
10	高效率低排放发动机设计与制造技术	440	2 137	4.86	2012.88

术”是传统研究的深入，“无人载具及自主控制”“手术机器人及关键功能部件”和“无人飞行器”是新兴热点。各个热点所涉及的自 2011 年至 2016 年的逐年核心专利公开量见表 2.1.2。

(1) 传感器技术

传感器是借助物理、化学或生物等领域的某种现象，按照一定规律将获取的信息转换成另一种信息的装置。随着科学技术的迅猛发展，传感器技术

表 2.1.2 机械领域 Top10 工程开发热点的逐年核心专利公开量

序号	工程开发热点	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	传感器技术	103	68	59	22	3	4
2	先进半导体工艺及装备	289	185	124	79	58	15
3	无人载具及自主控制	13	16	18	24	15	2
4	手术机器人及关键功能部件	29	23	21	28	15	2
5	无人飞行器	63	91	100	74	52	21
6	电动载具的电力系统	330	220	114	22	6	3
7	无人载具与无人驾驶	27	38	37	29	21	14
8	新型推进系统	87	158	123	65	61	13
9	成像技术	91	61	31	22	6	3
10	高效率低排放发动机设计与制造技术	97	90	93	105	37	18

已越来越广泛地应用于航天航空、交通运输、机械制造、石油化工、技术监督与测试等技术领域，并且也深入到人们的日常生活中。传感器在代替人的感官、采集人的感官所不能感知的信息方面发挥了重要作用。目前传感器技术开发焦点包括传感器自身发展的通用技术开发与面向行业领域的专用技术开发两方面内容，前者主要有传感器材料与制造工艺、传感器检测原理等；后者主要有面向医疗和健康领域的复合感知传感器及面向汽车与能源等领域极端工况传感器开发等。传感器在医疗、环境监测、大型基础设施、健康监测、智能制造、智能电网、可穿戴设备等领域的创新应用将成为新热点。传感器结构小型化、集成化、模块化，检测性能宽量程、高精度与高可靠，抗干扰能力强、寿命长久化，是传感器技术发展将面临的工程需求。此外，适应长期监测需求，实现传感器的能量自给也是传感器技术的未来发展趋势。

(2) 先进半导体工艺及装备

近年来，半导体加工工艺面临特征尺寸的减小、新材料以及新结构的引入等诸多技术变革点，这对半导体制造技术提出了新的要求及挑战，先进半导体制造工艺与装备成为研究热点。目前，半导体工艺与装备关键技术问题主要集中于：极大规模集成

电路制造、新型半导体材料加工、新型结构半导体器件制造。

集成电路特征尺寸减小要求实现超精细图形加工，精确控制图形形状，并控制形状表面能量状态等诸多要素。超微细化形状加工需要更短波长极紫外光刻(extreme ultraviolet lithography ,EUV)设备，或其他加工工艺，如多重曝光技术、定向自组装技术等，而形状表面粗糙度、能量状态等需要结合其他工艺装备。大规模电路集成化程度的提高，同时对封装工艺提出了新的要求，基于硅通孔(through silicon via , TSV)的三维封装技术受到极大关注。新结构的引入，需要在精确控制三维高深宽比结构的同时避免不必要的形状损伤；新材料的引入，需要在性能提高的同时避免其对工艺整合的影响。近年来，物联网和移动消费电子的爆发极大促进了半导体市场的增长，此外市场对柔性电子的需求，推动了有机无机柔性电子制造技术的发展，先进半导体制造工艺和装备的进步将有力推动相关产业的快速发展。

(3) 无人载具及自主控制

无人载具是无需人在载具内驾驶的移动平台，目前无人载具已经覆盖了陆地、空中、水中。陆地无人载具主要包括轮式、履带式，在排爆、侦察等

领域有所应用，为增强陆地无人载具的越野性能，足式无人载具也得到关注和开发；空中无人载具包括固定翼无人机、旋翼无人机、扑翼无人机等，已经应用到灾害救援、观察、测绘等领域；水中无人载具包括水面无人艇、水下无人航行器等，在水下救援、探测领域得到初步应用。传统无人载具采用遥控实现运动，即由人进行远程控制。随着计算机及信息交互技术飞速发展，无人载具正从遥操作向自主控制方向发展。自主控制是无人载具的最高智能化形式，突破传统人工控制的局限性，提高无人载具在复杂环境中的自主性、适应性、稳定性以及人机共融性，让无人载具能够真正在复杂恶劣环境进行自主移动。要实现无人载具的自主控制，涉及无人载具本体设计、环境感知、地图、定位、导航和避障多方面技术，其主要应用有自动泊车、自动驾驶等。从技术安全性及可靠性来看，自主控制还应包括状态监测、故障诊断及维修。以上方面的基本理论已经建立，但技术应用仍面临挑战，依然是众多研究人员的开发重点。随着未来无人载具大规模应用，无人载具的自主控制将从个体智能向群集智能发展。

（4）手术机器人及关键功能部件

手术机器人指的是替代或辅助医生进行外科手术的专用机器人，其关键功能部件即指完成整个手术流程所需的精密机构和硬件、软件，如术前规划、术中执行机构、测控系统等。根据手术空间开放程度的不同，机器人手术可分为两类：开放式和封闭式，前者如骨科的关节成形术，后者如各种内镜（腹腔镜）手术。两类手术对相关设备的需求各有侧重。

对于骨科手术，手术机器人及配套系统应满足的基本需求为：术前的人工假体（植入物）的3D设计与制造以及手术规划，术中的人工假体植入的导航与固定。在实现了人工假体的设计与制造之后，“看不见，打不准，拿不稳”仍是骨科手术中的难点。相关的开发热点包括：术前人工假体的计算机辅助设计与制造、手术规划系统，术中位姿检测、

3D导航、器械依托和导引、“可视化”观察等。假体设计个性化、假体植入精准化、手术过程集成化是骨科手术机器人发展的重要趋势。

对于内镜手术，由于其手术过程中，空间受限、视野狭窄，无论用机器人控制器，还是用手持控制器，都要求末端执行机构能够完成夹持、切割、剥离、止血、冲洗、抽吸、吻合（缝合）等基本手术操作。相关的开发热点包括：组织吻合器、腔镜器械控制器、多功能手术刀（如超声刀-电刀一体）、立体视觉、触觉反馈、组织及器械状态的无线监测等。微创化、多功能集成化是腔镜手术机器人和腔镜手术器械发展的重要趋势。

（5）无人飞行器

我们认为，在无人飞行器中，下一个工程前沿热点将是三栖自主无人飞行器。空海潜三栖无人飞行器是一种能在空中、海面、海下运动的系统，其能自动地进行运行环境的转换，如从空中到海面、从海面到海下以及从海面到空中，并能在不同运行环境下执行多种任务。空海潜三栖无人飞行器是一个复杂的系统，其需要对已有的空中、海面、海下飞行器技术进行利用和综合，并设计针对多种任务环境通用的系统。空海潜三栖无人飞行器的难点是运行过程中多种任务环境的切换，其中涉及无人飞行器外形的创新设计、自动可变构型设计、抗腐蚀和防水结构设计、可用于多任务环境的动力系统、高抗干扰多模态的控制系统。空海潜三栖无人飞行器的关键技术包括：不依赖工作环境的长航时动力系统；远距离通信和控制技术；机身材料的耐压、耐腐蚀和防水设计、制造；不同工作环境下的自动飞行和避障；关键子系统密封技术；三种工作模式转换技术。

不依赖工作环境的长航时动力系统是保证无人飞行器在复杂环境下有效工作的基础，当前的研究热点是采用燃料电池作为动力来源。燃料电池是一种密闭的动力源，能提供较高的能量密度，并且满足材料结构的密封要求。由于常规无线电波在水底

传输效果很差，需要开发一种稳定可靠的远距离通信和控制技术。目前的研究热点有两个：有线信号传输和无线传输。有线信号传输保证了信号的稳定可靠，但是限制了航行器的运行范围。而无线传输能很好地利用无人航行器长航时复杂环境运行的优势，但需要研究新的信号传输方式来保证信号的可靠性。3D 打印是制造轻质、防水、耐压无人飞行器机体的有效技术。3D 打印能够为复杂外形提供密闭效果良好的防水保护，对敏感元件进行很好的保护。空海潜三栖无人航行器需要在多种复杂环境中运行，并自由切换运行环境，这对飞行控制系统提供了极大的挑战。无人航行器在运行环境切换时将面临高度非线性和高度不确定性的系统特性。飞行控制的难题是保证运行环境切换过程中稳定控制问题。可能的解决方案是开发具有高抗扰、自适应特点的非线性控制方法。

空海潜三栖无人航行器在民用和军事上有广阔的应用前景。如搜索海面下鱼雷，排除舰艇的潜在威胁，从海底攻击舰艇或潜艇；也能检测海底泄漏原油的扩散、检测桥梁、检测水底管道以及执行复杂情况的搜索和救援任务。

(6) 电动载具的电力系统

电动载具是指用电动机或牵引电动机用于推进的交通工具，包括道路和轨道车辆、水面或水下船舰、飞机和航天器等。2016 年，中国大陆个人电动载具销量约 7900 万台，其应用前景被广泛看好，同时也面临诸多技术难题。电池是电动载具的核心技术难题，虽然新的清洁能源材料研究已经取得很大突破，但受限于成本和技术难以广泛应用。短期内，锂电池仍将占据动力电池市场主导地位，其中又以三元锂电池最具前景，硅碳负极会得到规模化应用，逐步取代石墨负极。燃料电池、金属-空气电池、全固态电池、超级电容-蓄电池复合电源等新体系、新技术将是今后各大厂商竞逐的焦点。电机、电控技术在电动汽车上的应用已得到了普遍认可，但技术成熟度远远不能达到要求，未来要整合

驱动电机、系统产业链的核心技术，借助第三代宽禁带功率半导体，研发高性能、高效率和轻量化的电机系统和电驱动总成。充电基础设施体系是电动汽车普及的重要障碍，需要大量建设各类集中式充换电站和分散式充电桩，发展快速、无线充电技术，为用户提供便捷的充电体验。此外，高效智能的能量管理技术和先进的整车控制技术也直接决定了电动车辆的各项性能指标。未来的电动载具将是与新兴产业、新能源、新信息相融合的全电产业模式。

(7) 无人载具与无人驾驶

未来无人载具发展的重点将会集中在突破智能陆空两栖无人驾驶汽车。它是一个集无人驾驶与无人飞行功能于一体的综合载具系统，是典型的高技术集成。该综合体将智能无人驾驶汽车与无人飞行平台融为一体，能够长时间独立执行地面任务；也具备空中飞行能力，执行空中飞行任务；并可自由切换飞行、地面运动模式，完成协同工作。这类无人系统中的每个智能体均强调的是低空、低速性能，以及具备垂直起降和悬停的功能；各个智能综合体之间还可以实现协同侦察、协同跟踪与碰撞预警等任务，构成多机集群系统。由于环境状况的复杂性、环境信息的多边性、任务的多样性，以及同时满足地面行驶与空中飞行的设计要求，智能无人驾驶陆空两栖飞行汽车的设计十分具有挑战性。除了需要统一装备的通信终端系统，还需要有强大计算能力的计算机和先进的算法，让多个飞行器避免碰撞。未来的无人驾驶陆空两栖飞行汽车必然是由现代通信技术、计算机网络技术、行业技术、智能控制技术等汇集而成，并逐步向智能化、多任务化发展。

涉及的关键技术包括：基于多传感器数据融合的环境感知系统设计；无人载具的导航定位技术；根据环境状况信息进行任务决策和融合，进行无人载具的行驶或飞行轨迹规划以及无人载具的动作部署，寻找最优决策的智能决策系统设计；单个无人载具的路径和姿态的实时控制以及多个无人载具的

集群控制技术；无人载具路径跟踪控制技术；在未知路况条件下的高速高精度轨迹跟踪自适应控制；城市等复杂综合环境下无人载具的运动控制；无人载具运动过程中的障碍物检测、预测和避撞技术；对外界障碍物的速度和轨迹估计、障碍物的分类和聚类、基于图像处理技术的车道识别或者路标识别等；地面和空中两种工作模式的转换技术。未来可应用在解决道路拥堵问题、增强地面部队避障与突围能力、货物快速运输等领域。

（8）新型推进系统

电力推进是由原动机组产生电能，再由电动机驱动螺旋桨、喷水推进器等推进系统的推进方式。目前舰船电力推进装置的发展动向为：以交流电力推进装置取代直流电力推进和交直流电力推进装置，发展超导电力推进，发展潜艇燃料电池推进系统代替铅酸电池，以及发展综合全电力推进系统。喷水推进与飞机喷气推进的工作原理本质相同，其推力是被加速后向船尾方向喷射的水流产生的反作用力，具有机动性能好、推进效率高、抗空化能力强、振动噪声小、附体少、吃水浅等优点，在各国海军有着广泛的应用。泵喷推进器是一种旋转组合式水动力推进器，由轴对称环形导管以及导管内的旋转和静止叶栅组成，旋转叶栅与静止叶栅通常称为转子和定子（或叶轮和导叶），导管截面通常为翼型，具有良好的抗空化性能。

螺旋桨是应用最为广泛的船舶推进器，是决定船舶性能的重要部件，推进效率高、节能性好、抗空化能力强、振动噪声低、结构简单、可靠性强是螺旋桨发展的重要方向。为满足螺旋桨的性能需求，各种新型螺旋桨不断出现，如 Kappel 螺旋桨、尾流收缩叶梢有载（contracted and loaded tip, CLT）螺旋桨、GPT 螺旋桨、对转螺旋桨、可调螺距螺旋桨、导管螺旋桨、串列螺旋桨、对转螺旋桨、大侧斜螺旋桨、阿尼松表面桨、壳形螺旋桨、自重构变形桨叶螺旋桨等。为研究螺旋桨的性能特性，基于势流理论计算螺旋桨水动力性能的面元法在螺旋桨

性能计算和空泡几何形状的预报中具有较为精确的结果。考虑流体黏性，基于 RANS 方程的计算流体力学（computational fluid dynamics, CFD）技术已被广泛地应用于螺旋桨的设计与性能预报，通过数值计算对螺旋桨的机构参数进行优化分析，是综合提高螺旋桨整体性能的重要方法。

（9）成像技术

人类所获取的信息有 80% 来自视觉，成像和图像处理技术一直是一个热门研究前沿，在工业、农业、医疗、航空航天、军事等重要领域有着广泛的应用，是信息时代的重要基础。当前成像技术的前沿热点包括：高分辨率及复杂恶劣环境的成像技术，如工业气泡检测、道路桥梁与铁路的裂缝检测等；高分辨率遥感成像，可应用于农业、军事等领域；医学成像，如广泛应用的超声波成像、计算机断面成像、扩散光学成像、核磁共振成像、脑磁图、正电子发射成像、单光子发射计算机断面成像；海底成像是未来的一个重要发展方向，人类对海底世界的认识还远不如对陆地和空中的认识，其中基于多束海底成像声纳技术的水底成像显得尤为重要。随着成像技术的发展，人类可以获取海量的图片，图片的识别与理解是实现信息化的一个重要基础，当下图像处理相关的前沿热点包括轮廓检测、图像分割以及底层信息提取等。与此同时，随着深度学习的发展，深度学习大大地提高了传统方法的结果，近年来在各种类型图像的识别、理解、目标检测取得了巨大成功。

（10）高效率低排放发动机设计与制造技术

本次论述主要针对微型涡轮发动机（微型燃机），主要指功率在几百千瓦以下，具有体积小、重量轻、马力大、增压比高、结构简单的优点，主要用于分布式供电、备用电源、微型燃机-燃料电池联合发电、传统活塞式车用内燃机替代动力等，也有航空用微型涡轮发动机，目前微型涡轮-发电机是热点。国内轻-微型燃机不仅在设计技术方面，在市场开发方面也仍处于刚刚起步阶段，国内相关

专业研究机构和生产企业很少，但市场需求在逐年增加，设计与加工水平也达到一个新的高度。涡轮叶片属于燃气轮机部件，关键技术问题是：叶片结构设计（叶型、流道尺寸等）、叶片与叶轮的制造工艺技术、叶片材料，目前我国的冶金和工艺技术已为高性能的涡轮叶片部件提供了有利保证

未来的小型和微型涡轮发动机出口温度超过 1800 K，涡轮仍不能冷却，因此只能采用复合陶瓷基材料，该技术已在美国、德国、日本等国取得初步的进展，纳米涂层技术也是当前的技术热点，应该也是热障涂层，耐高温同时又低散热，提高整机热效率，纳米涂层的另一个作用是耐磨涂层，满足涡轮发动机工作轮轴高达十几万转的旋转速度。

2.2 工程开发焦点解读

2.2.1 传感器技术

传感器是借助物理、化学或生物等领域的某种现象，按照一定规律将获取的信息转换成另一种信息的装置。作为人类感官功能的延伸，传感器对探索未知世界和改善日常生活具有重要意义。作为信息获取的源头，传感器性能直接决定后续系统的性能。

随着科学技术的迅猛发展，传感器技术已越来越广泛地应用于航天航空、交通运输、机械制造、石油化工、技术监督与测试等技术领域，并且也深入到人们的日常生活中。如果没有传感器对原始信息进行准确可靠的捕获和转换，一切测试与控制都将无法实现。如果信息获取不准确或数据转换不可靠，无法实现不失真的输入，即使最现代化的电子计算机，也无法发挥其应有的作用。传感器在代替人的感官、采集人的感官所不能感知的信息方面发挥了重要作用。传感器材料是传感器技术的重要基础，对新材料的开发是传感器技术的重要内容。目前传感器技术开发焦点包括传感器自身发展的通用技术开发与面向行业领域的专用技术开发两方面内

容，前者主要有传感器材料与制造工艺、传感器检测原理等；后者主要有面向医疗和健康领域的复合感知传感器及面向汽车与能源等领域极端工况传感器开发等。

(1) 传感器材料与制造工艺

传感器一般由敏感元件、转换元件和测量电路三部分组成，传感器材料是传感器技术的重要基础，对新材料的开发是传感器技术的重要内容，传感器中敏感元件和转换元件的材料性能和工艺水平很大程度上决定了传感器的性能。

加工技术的微精细化在传感器制作中越来越重要，许多新型传感器制作可以借助于微机电系统（micro-electro-mechanical system, MEMS）技术实现。MEMS 传感器是采用微电子和微机械加工技术制造出来的新型传感器。与传统的传感器相比，它具有体积小、重量轻、成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化的特点。同时，在微米量级的特征尺寸使得它可以完成某些传统机械传感器所不能实现的功能。

衬底、敏感元件和辅助材料借助于 MEMS 技术可以封装成各种标准半导体封装。利用 MEMS 技术可以制造压力传感器、加速度传感器、声传感器等。如谐振 MEMS 器件的谐振频率是压力的函数，可以通过检测谐振频率变化的装置感测压力。电容式单片集成 CMOS-MEMS 多层金属三轴加速度传感器，有效地减少三轴加速装置的互连寄生电容值，实现多晶硅微加速度计生产操作，从而提高布线灵活性。MEMS 传感器由于传感元件、处理电路、放大器电路、通信电路均设置在公共基板上，降低了功耗并使得结构小型化。同时传感器结构简单，采用折叠式梁结构，增加剪切强度，有效降低封装应力。

(2) 传感器检测原理

多数传感器都是利用某些材料的特殊性能来达到获取信息的目的，其中材料的力学性能和磁学性能是新型传感器的研究热点。力传感器将力的量值

转换为相关电信号，力传感器能检测张力、拉力、压力、重量、扭矩、内应力和应变等力学量。磁传感器以感应磁场强度来测量电流、位置、方向等物理参数。测量力变化的方法有多种，其中力引起机械谐振系统固有频率变化，通过频率测量获取力的相关信息是力传感器开发的一个焦点，如谐振 MEMS 器件。力传感器的发展方向有：高灵敏度，在严苛工作环境下工作如高温、测量精度避免受温度影响，通用性更好，更宽的动态范围，更短的响应时间。磁传感器的发展方向有：高灵敏度、温度稳定性、抗干扰性、集成化、低功耗等。微机械压力传感器是最早开始研制的微机械产品，也是微机械技术中最成熟、最早开始产业化的产品。从信号检测方式来看，微机械压力传感器分为压阻式和电容式两类，分别以微机械加工技术和牺牲层技术为基础制造。通过形成由多个感测元件构成的桥接电路的在测量环境的温度波动的情况下也可实现高精度测量。

（3）面向医疗和健康领域的复合感知传感器开发

医疗传感器和可穿戴设备在提高人们生活质量、提升人们生活舒适度和方便性，在人们日常生活方面发挥着越来越重要的作用，这些领域的传感器发展十分迅速，出现了各种类型的传感器，如用于治疗心律失常的起搏器、用于治疗心脏颤动的除颤器、用于治疗耳聋的耳蜗刺激剂、用于治疗失明的视网膜刺激剂、用于治疗失明的视网膜刺激剂、用于治疗慢性疼痛的脊髓刺激剂等。这些传感器可在一定程度上治疗和预防疾病，如集成压力传感器的装置在检测到心脏供血不足时增加压力感受器刺激以增加血管扩张反应并潜在地预防或减少心肌缺血损伤。

医疗传感器的位置监控及能量补给是研究的一个重要方向，如一种新型的植入式医疗传感器外部充电器既可以实现传感器的能量补给又可以定位传感器的位置，可用于治疗心律失常的起搏器、治疗

心脏颤动的除颤器、治疗耳聋的耳蜗刺激器、治疗失明的视网膜刺激剂以及其它病痛的治疗，如睡眠呼吸暂停、肩关节半脱位等。另外，医疗器械的驱动力控制也是开发的一个焦点，驱动力控制的难点在于保证医疗器械的操纵方便，同时要保证医疗器械有一定的结构刚度，还要避免操作时损坏周围的组织。

可穿戴设备一般包含多种类型的传感器，用于测量心率、温度、睡眠和血压等，电子皮肤和仪器化 (Instrumented) 假肢应用了压力传感器。传感器制作工艺的发展，如 MEMS 技术等的应用使得可穿戴传感器体积更小，更易于皮肤或人体组织贴合，能够更加灵敏地获得监测指标的变化。

（4）面向汽车与能源等领域极端工况传感器开发

安全与节能是汽车和能源等领域面临的工程难题，电动汽车的充电控制、电池全生命周期监测、电网传输过程中的监控等都依赖于传感器在其中发挥的重要作用，传感器在这些领域的发展日新月异，如汽车导航用传感器、车距测量用传感器、监测电池故障的传感器、锂离子动力电池匹配传感器、充电控制传感器、汽车动力转换控制传感器和汽车进气质量监测传感器、电力系统保护传感器等。

每个监测系统包含的传感器往往是多种传感器的集成应用，如电网传输电路的监测系统包括高度计、加速度传感器、温湿度传感器、降雨传感器、泄漏电流传感器、张力传感器和风速风向传感器等，传感器的多维感测技术可以有效地防止和减少汽车和能源领域的安全事故。

利用新型的传感器可以使测量结果更加准确，如利用磁传感器检测汽车方向盘旋转角度可以减少角度检测误差。利用磁致伸缩效应的传感器可以精确测量汽车电动助力转向系统的旋转轴的转矩和角位置。另外如何减少传感器的错误检测和错误诊断在汽车安全领域十分重要，如一种增加了抑制错误检测和错误诊断技术的电容传感器应用于汽车姿态监控。一种抵消由噪声感应磁场引起测量误差的扭

矩检测装置用于测量施加到可旋转轴的扭矩。在电动汽车领域，传感器的应用需要与充电控制方法相结合以达到节能的目的，如为准确地控制在每个充电站对每个电动车辆充电的电力，通过在适当时间引导正确数量的电动车辆到充电站，实现电力系统中的供需平衡。

(5) 发展现状与未来发展的趋势

此前沿的发展现状为：传感器被广泛应用于汽车、工业自动化、航天技术、军事工程、环境探测等领域，微纳制造技术的发展极大推动了 MEMS 传感器的发展及应用，传感器广泛应用于制造工艺控制，测量工艺变量如温度、液位、压力、流量等；小型、低成本和高可靠的传感器在汽车电子方面应用广泛，适应智能家居、智能穿戴、消费电子等应用领域的发展，各种新型传感器不断涌现。

未来的发展趋势：医疗、环境监测、大型基础设施(如长输管线及城市管网、大型桥梁、超高坝等)健康监测、智能制造、智能电网、可穿戴设备等领域的创新应用将成为新热点，结构小型化、集成化、模块化；检测性能宽量程、高精度与高可靠，抗干扰能力强、寿命长久化，从而为传感器技术发展提出新的工程需求。适应长期监测需求，如何实现传感器的能量自给也是传感器技术未来发展趋势。

“传感器技术”工程开发焦点中核心专利公开

量排在前三的国家/地区分别为：美国(87)、日本(60)和中国(41)，篇均被引频次排在前三的国家/地区分别为美国(14.61)、中国(13.02)和荷兰(11.83)，见表 2.2.1。在公开量 Top10 国家/地区中，美国与中国、德国、法国、荷兰等国家均有合作，见图 2.2.1。核心专利公开量排在前三的机构分别为：BOSC(13)、FRSE(7)和 SHIH(7)，篇均被引频次排在前三的机构分别为 BERT(19.33)、FRSE(16.29)和 TOKE(14.5)，见表 2.2.2。在公开量 Top10 机构中，NXPS 和 AMSI 合作较多，见图 2.2.2。2011—2016 年间，我国公开的与“传感器技术”工程开发焦点相关的核心专利有 41 项，公开较多的大陆机构为浙江大学。

2.2.2 高效率低排放发动机设计与制造技术

高效率低排放发动机设计与制造技术主要针对大型燃气涡轮发动机和微型涡轮发动机(微型燃机)。微型涡轮发动机主要指功率在几百千瓦以下，具有体积小、重量轻、马力大、增压比高、结构简单的优点，主要用于分布式供电、备用电源、微型燃机-燃料电池联合发电、传统活塞式车用内燃机替代动力等，也有航空用微型涡轮发动机，目前微型涡轮-发电机是热点。

涡轮叶片属于燃气轮机部件，关键技术问题是：

表 2.2.1 “传感器技术”工程开发焦点中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	87	33.59%	1271	40.71%	14.61
2	Japan	60	23.17%	648	20.76%	10.80
3	China	41	15.83%	534	17.10%	13.02
4	Germany	35	13.51%	314	10.06%	8.97
5	France	8	3.09%	50	1.60%	6.25
6	Switzerland	6	2.32%	44	1.41%	7.33
7	Korea	6	2.32%	52	1.67%	8.67
8	The Netherlands	6	2.32%	71	2.27%	11.83
9	Canada	4	1.54%	41	1.31%	10.25
10	UK	4	1.54%	8	0.26%	2.00

表 2.2.2 “传感器技术”工程开发焦点中核心专利的主要产出机构

序号	机构*	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	BOSC	13	5.02%	97	3.11%	7.46
2	FRSE	7	2.70%	114	3.65%	16.29
3	SHIH	7	2.70%	81	2.59%	11.57
4	TOKE	6	2.32%	87	2.79%	14.50
5	INFN	5	1.93%	44	1.41%	8.80
6	NXPS	5	1.93%	45	1.44%	9.00
7	HONE	4	1.54%	45	1.44%	11.25
8	UYZH	4	1.54%	46	1.47%	11.50
9	AMSI	3	1.16%	31	0.99%	10.33
10	BERT	3	1.16%	58	1.86%	19.33

* BOSC (Bosch Group) ; FRSE (Freescale Semiconductor Inc) ; SHIH (Seiko Epson Corp) ; TOKE (Toshiba KK) ; INFN (Infineon Technologies AG) ; NXPS (NXP Semiconductors BV) ; HONE (Honeywell International Inc) ; UYZH (Zhejiang University) ; AMSI (Ams AG) ; BERT (Bertec Corporation)。

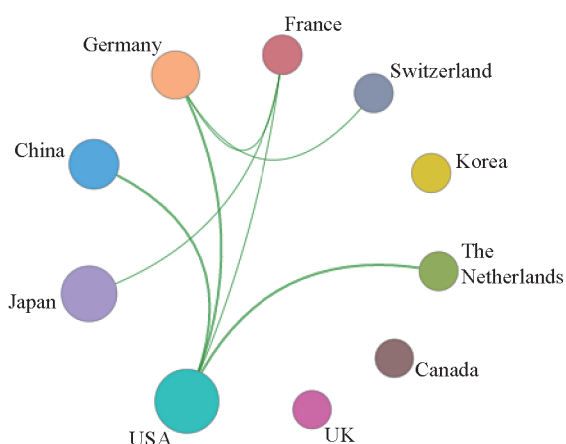


图 2.2.1 “传感器技术”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

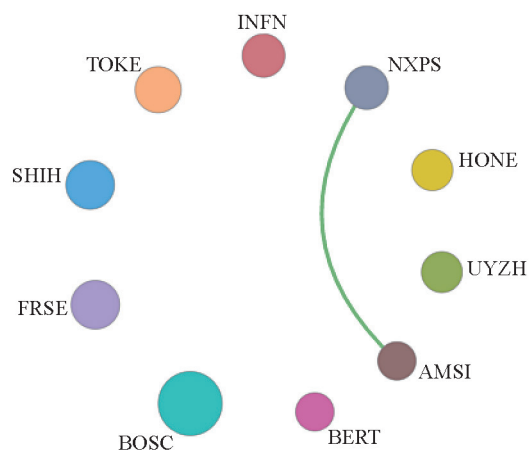


图 2.2.2 “传感器技术”工程开发焦点主要机构间的合作网络

叶片结构设计（叶型、流道尺寸等）、叶片与叶轮的制造工艺技术、叶片材料。目前我国的冶金和工艺技术已为高性能的涡轮叶片部件提供了有力保证，未来的高温升航空涡轮发动机出口温度超过 1900 K，涡轮仍不能冷却，因此只能采用复合陶瓷基材料，该技术已在美国、德国、日本等国取得初步的进展，纳米涂层技术也是当前的技术热点，应该也是热障涂层，耐高温同时又低散热，提高整机热效率，纳米涂层的另一个作用是耐磨涂层，满足涡轮发动机工作轮轴高达十几万转的

旋转速度的要求。

地面燃气轮机技术的发展与应用历来有赖于航空燃机技术和理论的发展、地面燃机自身技术的发展、相关学科技术的发展以及市场需求的激励。在讨论地面燃机技术前景时也离不开上述几方面。目前在展望地面燃机技术前景时，主要根据西方国家制定的中长期的航空和地面燃机及相关学科研发规划中已经验证具有突出价值的正在研究和尚未完成的一些项目。这些项目筛选仍是根据高效、节能、低污染、低成本、高可靠性等要求。下面简要列举如下。

(1) 高参数、高性能

第4、第5代航空燃机 $T_4=1800\sim 2000\text{ K}$, $\pi_c \geq 30$, 将来作为母型机, 地面燃机的涡轮出口温度 T_4 也就可能达到 $1527\sim 1727^\circ\text{C}$, $\pi_c \geq 30$, 相应的性能会显著提高。

(2) 耐高温材料的研制

为适应高涡轮工作温度的要求, 目前超级合金已不适用, 将采用非金属超高温材料, 如陶瓷及其复合材料、增强碳-碳复合材料(RCC), 作为热端部件。

(3) 高效冷却方式设计

涡轮叶片及燃烧室目前采用的气膜、对流、冲击组合冷却仍可能采用, 而蒸汽是下一代冷却剂。目前, 在个别燃机上已试用, 如WH公司501G机组的火焰筒和燃气导管, GE公司的涡轮静叶等。蒸汽冷却可节约冷却空气10%~20%, 热效率、功率均提高, 但是仅适用于地面联合循环燃机。其关键是地面防止蒸汽泄露的密封技术。

(4) 先进的叶轮机设计与制造技术

航空燃机压气机致力于改进叶型设计方法, 提高级增压比; 涡轮致力于高效率、大焓降、耐高温研究。其成果必然继续为地面燃机所吸收、采用, 为地面燃机注入新的活力。

(5) 低污染燃烧技术

目前, 航空和地面燃机已有不少型号采用了干式低 NO_x 燃烧室, 如径向、轴向分级燃烧室, 顺序再热燃烧室(SCS), 贫油预混预蒸发燃烧室(LPP)等, 今后有可能继续推广。另外, 研究已久的催化燃烧室(SCR、SNR)、富油急冷贫油燃烧室(RQL)等今后有可能被采用, 以实现超低 NO_x 燃烧。在目前及今后采用的整体煤气化联合循环及燃煤增压流化床燃气-蒸汽联合循环中寻求更有效的脱硫技术以降低 SO_2 排放。

(6) 新型热力循环与总能系统

目前, 单独复杂循环(回热、再热、中冷)或复杂循环参与联合循环已被采用。一些新型联

合循环也已被采用, 如注蒸汽(水)联合循环, 燃煤联合循环中整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC), 常压、高压流化床燃煤联合循环。今后IGCC、增压流化床联合循环(pressurized fluidized bed combustion combined cycle, PFBC-CC)会更完善并广泛应用, 至于其他循环方式待技术上成熟后被采用。

(7) 微型和超微型燃机的设计与制造技术

集中大功率燃机发电和分布式微型燃机供电成为未来电力供给并驾齐驱的两驾马车。目前, 主要技术关键是: 空气冷却轴承, 高速微电机, 小尺度下的流体黏性、传热、燃烧等机理的创新, 今后将更为重视这项技术领域的研发和应用。

“高效率低排放发动机设计与制造技术”工程开发焦点中核心专利公开量排在前三的国家/地区分别为: 美国(231)、法国(75)和英国(58), 篇均被引频次排在前三的国家/地区分别为加拿大(7.27)、日本(5.75)和美国(5.32), 见表2.2.3。在公开量Top10国家/地区中, 美国和荷兰合作非常密切, 见图2.2.3。核心专利公开量排在前三的机构分别为: RORO(63)、UNAC(58)和GENE(43), 篇均被引频次排在前三的机构分别为BOEI(8.33)、HONE(6.65)和SFRA(6), 见表2.2.4。在公开量Top10机构中, UNAC和SUNH合作较多, 见图2.2.4。2011—2016年间, 我国公开的与“高效率低排放发动机设计与制造技术”工程开发焦点相关的核心专利有23项, 未出现进入Top10的机构。

2.2.3 无人载具及自主控制

无人载具是无需人在载具内驾驶的移动平台, 目前无人载具已经覆盖了陆地、空中、水中。陆地无人载具主要包括轮式、履带式, 在排爆、侦察等领域有所应用, 为增强陆地无人载具的越野性能, 足式无人载具也得到关注和开发; 空中无人载具包括固定翼无人机、旋翼无人机、扑翼无人机等, 已经应用到灾害救援、观察、测绘等领域; 水中无人

表 2.2.3 “高效率低排放发动机设计与制造技术”工程开发焦点中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	231	52.50%	1230	57.56%	5.32
2	France	75	17.05%	336	15.72%	4.48
3	UK	58	13.18%	176	8.24%	3.03
4	China	23	5.23%	107	5.01%	4.65
5	Germany	18	4.09%	77	3.60%	4.28
6	Japan	12	2.73%	69	3.23%	5.75
7	Canada	11	2.50%	80	3.74%	7.27
8	The Netherlands	7	1.59%	21	0.98%	3.00
9	Austria	2	0.45%	10	0.47%	5.00
10	Belgium	2	0.45%	10	0.47%	5.00

表 2.2.4 “高效率低排放发动机设计与制造技术”工程开发焦点中核心专利的主要产出机构

序号	机构 *	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	RORO	63	14.32%	201	9.41%	3.19
2	UNAC	58	13.18%	219	10.25%	3.78
3	GENE	43	9.77%	156	7.30%	3.63
4	SNEA	40	9.09%	196	9.17%	4.90
5	SUNH	31	7.05%	132	6.18%	4.26
6	EADS	22	5.00%	79	3.70%	3.59
7	HONE	17	3.86%	113	5.29%	6.65
8	SFRA	10	2.27%	60	2.81%	6.00
9	BOEI	9	2.05%	75	3.51%	8.33
10	MOTU	9	2.05%	34	1.59%	3.78

* RORO(Rolls-Royce Limited) ; UNAC(United Technologies Corp) ; GENE(General Electric Company) ; SNEA(Snecma) ; SUNH(Hamilton Sundstrand Corp) ; EADS(Airbus Helicopters) ; HONE(Honeywell International Inc) ; SFRA(Turbomeca) ; BOEI(Boeing Company) ; MOTU(MTU Aero Engines AG).

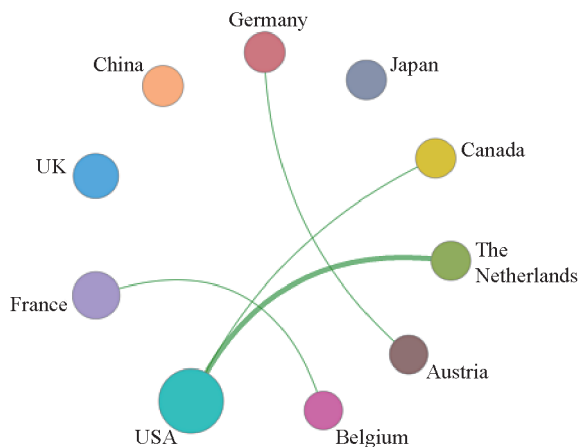


图 2.2.3 “高效率低排放发动机设计与制造技术”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

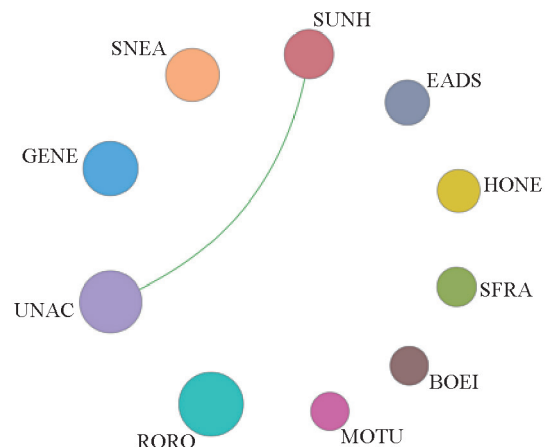


图 2.2.4 “高效率低排放发动机设计与制造技术”工程开发焦点机构间的合作网络

载具包括水面无人艇、水下无人航行器等，在水下救援、探测领域得到初步应用。传统无人载具采用遥操作实现运动，即由人进行远程控制。随着计算机及信息交互技术飞速发展，无人载具正从遥操作向自主控制方向发展。自主控制是无人载具的最高智能化形式，突破传统人工控制的局限性，提高无人载具在复杂环境中的自主性、适应性、稳定性以及人机共融性，让无人载具能够真正在复杂恶劣环境进行自主移动。要实现无人载具的自主控制，涉及无人载具本体设计、环境感知、地图、定位、导航和避障多方面技术，其主要应用有自动泊车、自动驾驶等。从技术安全性及可靠性来看，自主控制还应包括状态监测、故障诊断及维修。以上方面的基本理论已经建立，但技术应用仍面临挑战，依然是众多研究人员的开发重点，近年来突破性成果层出不穷，呈现出“万船竞渡、百舸争流”的繁荣景象。随着未来无人载具大规模应用，无人载具的自主控制将从个体智能向群集智能发展。

（1）机械本体的仿生设计

无人载具本体性能决定了其负载运输能力、环境顺应性以及续航能力，目前无人载具本体存在载荷自重比小、运动能效低的问题。解决这些问题的根本途径是向自然学习，学习动物适应自然的运动机制、发力机制和能量调节机制，探究自然生物向人工物功能、构型映射的方法，以生物模本为基础进行结构相似、运动相似和动力相似，综合得到本体机构。针对具体结构尺寸设计，在总体重量尺寸空间约束下，以高能量密度、高功率自重比、高机动性为设计目标，进行运动-力-能量协同优化，提高结构的等效机械增益（EMA），降低相对能耗。构造高能量密度、高动态响应的驱动器和高强度、高储能的结构，建立基于运动-力-能量协同多目标、多层次、多变量设计方法，是未来研究的重点问题。

（2）无人载具的智能体系

无人载具智能体系结构直接决定了自主控制系统的复杂程度和控制效果。无人载具作为一个复杂

离散事件动态系统，需要处理的信息包括语义信息、符号信息和变量信息等多种类型，是一个复杂的混合系统。传统的感知-建模-规划-执行式递阶控制体系存在较大时滞，难以满足这种复杂系统的实时控制要求。随着仿生学研究的深入，从仿生学角度分析生物控制行为，建立信息处理、逻辑分析、决策选择和系统控制的总体结构逐渐成为无人载具智能体系研究的热点。动物的空间行为能力分为反射行为、融合行为、学习行为、认知行为四个不同层次，运动模式则包括模式的运动、随意的运动和反射的运动。基于动物的行为、运动特性，研究人员开发设计了反应式智能、慎思式智能和慎思/反应复合式智能等无人载具自主控制智能体系。随着人工智能技术的发展，基于符号分级的智能体系、基于深度学习的智能体系和开放的分布式智能体系越来越受到人们的重视。

（3）无人载具的控制方法

无人载具的自主控制问题是一个高维混杂系统控制问题。运行环境的复杂性和运动模式的多样性要求无人载具自主控制系统必须具有多态性和复合性，并且各种状态之间能够进行平滑切换。从传统的基于运动学的规划与控制，演变为运动-动力学规划与控制，进行无人载具力-位置-姿态协同规划与控制研究，将是设计无人载具自主控制系统的根本技术途径。状态变量的增加会使计算规模急剧扩大，针对这一问题，需要研究无人载具等效简化降阶动力学模型，在不影响控制效果的前提下合理降低运动规划与控制变量的维度。此外，无人载具一般是一个非完整系统，非完整约束带来的冗余驱动使得无人载具自主控制面临多解问题，基于运动-力-能量的综合动力学计算成为无人载具自主控制需要着重考虑的热点问题之一。

（4）定位与导航

定位与导航是无人载具自主运动的基础，目前定位导航主要依靠人工信标的辅助，预先进行环境结构化，要实现更大范围的定位，必须实现无人载

具自主定位导航。无人载具定位导航过程可以分为三个环节：环境建模、定位以及路径规划，其技术关键在于环境建模。精确的定位导航技术以卫星定位导航信息为基础，结合惯性、视觉、激光雷达等多种传感信息形成局部环境地图，实现多传感信息融合局部全局无缝定位导航。传统的即时定位与地图构建（SLAM）技术适用于结构化规整环境，为满足无人载具实用性需求，定位导航技术需从面向结构化环境空间向面向野外自由环境发展。定位导航技术精确性及有效性依赖于传感器的精度，传感器对多时间段的环境光线和能见度的适用性也决定了定位导航技术的实用性，因此针对环境识别建模的适应全天候高精度传感器的研制是开发热点。随着近年来对定位导航技术需求的增加，带来了激光雷达等传感器价格的降低，使得高精度传感器的使用更加广泛，促进了整个行业的发展。

（5）主动避障

主动避障是无人载具自主运动面临的重要问题。避障技术主要包括信息获取、障碍检测以及动态决策等方面，信息获取、障碍检测的实时性和准确性以及动态决策的有效性是高速移动无人载具实现实时避障的技术关键点。目前的避障技术采用激光、雷达、超声或视觉等方式进行信息获取及障碍检测，主要针对的是静止固定的障碍，避障过程的环境信息无动态变化并且决策较为单一。随着无人载具向实用化推进，无人载具需在复杂环境下高速移动过程中应对动态障碍和突显障碍，因此避障技术发展重点在于提高动态障碍识别能力和动态决策能力，需在传统几何识别的基础上增加动态障碍运动意图和运动参数的识别，提高障碍识别准确性、可信性，并实时机动进行光滑的路径再规划。

（6）自动泊车

自动泊车是无人载具自主控制的重要应用场合，可以帮助车技较差驾驶员顺利泊车，提供高品质泊车服务，同时自动泊车能大大提高城市停车场的容积率。自动泊车服务的实现主要有两种途径，

一种是在汽车本身增加自动泊车功能，一种是在停车场增加基础设施，利用自主泊车底盘对车辆进行运输停放。此外类人形机器人代替人进行泊车的应用也在发展。自动泊车时通过传感器对外界环境进行感知，采用特定的控制算法规划出泊车运动轨迹，并利用控制系统和执行装置来自主控制车辆准确的停在目标车位中。针对自主泊车底盘对车辆进行运输停放的自动泊车技术，该技术通过车库位置标识实现精准定位对汽车进行全方位停放，提高车库容积率，目前该技术能够实现对车辆的举升、移动和停放，但自主泊车底盘尚未投入实际应用，其应用开发重点在于对大惯量物体全方位快速移动能力、自动泊车效率以及多机协同合作调度。针对汽车自身的自动泊车技术，目前尚需人进行辅助驾驶至指定位置后自主实现简单的轨迹停放，尚不能实现完全自主的随意停放，而城市交通中停车位样式多变，因此汽车自身的自动泊车应用开发重点在于对车位的适应能力以及泊车的可靠性、高效性。

（7）自动驾驶

自动驾驶是指利用计算机控制代替人完成载具运动控制任务的技术应用，目前野外自动驾驶技术已经取得突破，但其安全性和可靠性仍难以满足实际应用要求。无人载具的自动驾驶包括环境感知、路径规划两个部分，环境感知对无人载具行进中的环境信息进行提取，并分辨出可通行区域，从而为路径规划提供可靠依据，通过合理路径规划得到最佳行进路线，保障无人载具的安全运动。传统单一传感信息辨识环境的方式难以满足实时准确需求，未来自动驾驶需采用多传感信息融合的环境感知方式，并对冗余信息进行实时辨析整合，以更加丰富环境信息保障无人载具安全驾驶。未来载具种类及数量均会大幅增加，针对单个体的自动驾驶技术难以保证这个无人载具交通网络的高效安全的进行，自动驾驶系统需具备多机协调自主优化的能力，通过建立多载具间通信机制构建智能交通网络。

(8) 状态监测及故障诊断

为提高载具的安全性、可靠性，无人载具的自主控制必须具有状态监测和故障诊断技术，出现故障时降性能运行的能力以及健康预测能力。状态监测包括周围环境状态监测和载具自身运行状态监测两方面内容。周围环境状态监测是载具

避开潜在危险的基础，从而预防载具故障发生，其中环境信息识别与提取、时变复杂环境等问题是研究人员关注的热点。载具自身运行状态监测面临的挑战主要是多传感器信息融合、载具运行状态量化表示、失效/故障判定准则以及故障准确定位等，多故障智能诊断与预防性维修技术将是未来研究和发展的热点之一。针对故障问题，自修复技术和主被动容错控制可以保障无人载具在发生系统故障时仍能按原定性能指标或略有降低、安全地完成任

(9) 群集智能

随着计算机技术和智能控制算法的发展，多无人载具的群集智能技术成为众多研究者关注的重点。群集智能技术由早期的人委派和人监督，发展为完全自主群集，自主化水平高明显提高，同时编队规模和任务复杂程度也显著增加。无人载具群集智能技术已经在编队运输、智能分拣、集群作战等

领域进行应用，实现了较高级别的群集自主协作。多平台/多传感器信息融合、高效的通用通信接口设计以及开放式控制架构研究是群集智能技术研究的重点问题。随着仿生研究的发展，借鉴自然界的自组织机制为群集智能技术研究提供了新的思路。基于仿生学和群智能算法研究，未来无人载具群集智能技术将进一步实现规模化和自主化。此外，群集智能技术由同种无人载具向多种不同无人载具发展，构成复杂的大系统，可以协同完成更多更复杂的任务，受到研究人员的关注。

“无人载具及自主控制”工程开发焦点中核心专利公开量排在前三的国家/地区分别为：美国(70)、日本(6)和德国(4)，篇均被引频次排在前三的国家/地区分别为德国(46.25)、美国(38.09)和中国(33.67)，见表2.2.5。在公开量Top10国家/地区中，美国和德国合作较多，见图2.2.5。核心专利公开量排在前三的机构分别为：FORD(15)、GOOG(15)和Flextronics(6)，篇均被引频次排在前三的机构分别为GOOG(49.47)、BOSC(46.25)和Flextronics(41.83)，见表2.2.6。在公开量Top10机构中，HONE和EMS Technologies合作较多，见图2.2.6。2011—2016年间，我国公开的与“无人载具及自主控制”工程开发焦点相关的核心专利有3项，其中2项出自深圳大疆(Shenzhen Dajiang)。

表 2.2.5 “无人载具及自主控制”工程开发焦点中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	70	79.55%	2666	86.84%	38.09
2	Japan	6	6.82%	90	2.93%	15.00
3	Germany	4	4.55%	185	6.03%	46.25
4	China	3	3.41%	101	3.29%	33.67
5	UK	2	2.27%	17	0.55%	8.50
6	Canada	1	1.14%	17	0.55%	17.00
7	Israel	1	1.14%	4	0.13%	4.00
8	Korea	1	1.14%	9	0.29%	9.00
9	Taiwan of China	1	1.14%	30	0.98%	30.00

表 2.2.6 “无人载具及自主控制”工程开发焦点中核心专利的主要产出机构

序号	机构*	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	FORD	15	17.05%	432	14.07%	28.80
2	GOOG	15	17.05%	742	24.17%	49.47
3	Flextronics	6	6.82%	251	8.18%	41.83
4	BOSC	4	4.55%	185	6.03%	46.25
5	HONE	3	3.41%	14	0.46%	4.67
6	EMS Technologies	2	2.27%	6	0.20%	3.00
7	Shenzhen Dajiang	2	2.27%	63	2.05%	31.50
8	TOYT	2	2.27%	18	0.59%	9.00
9	TTTA	2	2.27%	17	0.55%	8.50

* FORD(Ford Inc) ; GOOG(Google Inc) ; Flextronics (Flex International Ltd) ; BOSC(Bosch Group) ; HONE(Honeywell International Inc) ; EMS Technologies (EMS Technologies Inc) ; TOYT(Toyota Motor Corp) ; TTTA(Jaguar Land Rover Ltd)。

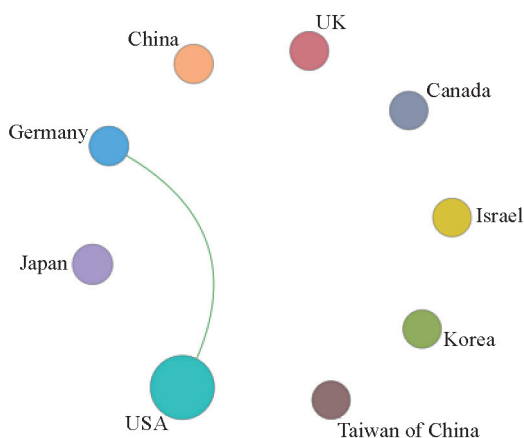


图 2.2.5 “无人载具及自主控制”工程开发焦点主要国家或地区间的合作网络

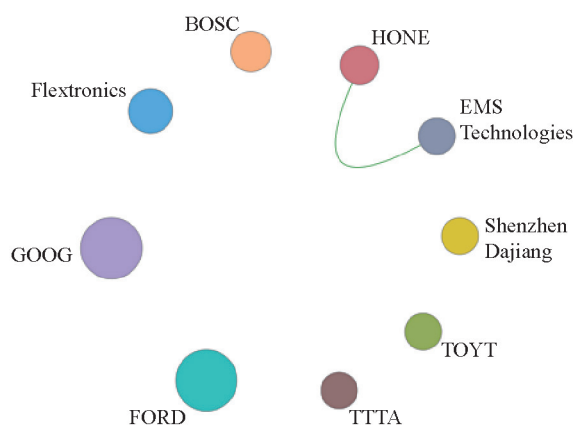


图 2.2.6 “无人载具及自主控制”工程开发焦点主要机构间的合作网络

项目参与人员

领域课题组

领域课题组长：段正澄 郭东明

其他成员：

史铁林 李仁府 赵英俊 王少荣 程远胜

夏奇 夏凉 孙博 陈惜曦

执笔组

史铁林 赵英俊 熊蔡华 武新军 罗欣

李仁府 成晓北 黄永安 胡先罗 刘银水

魏青松 夏奇 夏凉 孙博 李立