

## 报告正文

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

### (一) 立项依据与研究内容（建议 8000 字以下）：

1. 项目的立项依据（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）；

#### 1. 研究意义

航天事业的发展关乎国家战略利益与安全。高性能航天器是《中国制造 2025》重点领域之一，也是我国由“航天大国”向“航天强国”转变的高端装备。随着高分辨率光学载荷、深空望远镜、星间激光通信等航天活动的不断发展，航天器携带的高性能载荷对姿态稳定性和指向精度的要求越来越高，因此对于由航天器上飞轮、力矩陀螺等器件产生的微振动的隔离技术提出了更高要求<sup>[1]</sup>。国际上目前主要采用被动隔振和主被动联合隔振等硬连接的方法抑制其扰动。被动隔振容易实现并且成本较低，但无法隔离低频振动。主被动联合隔振具有可靠性高、能够隔离大频带扰动的特点，但是结构复杂、消耗能量、造价昂贵<sup>[2,3]</sup>。

为克服硬连接方法的缺点，Lockheed Martin 公司的 Pedreiro 提出了一种称为无扰载荷 (Disturbance-free-payload, DFP) 的软连接结构<sup>[4]</sup> (图 1)。它将传统的航天器拆分为载荷模块 (Payload-module, PM)、支持模块 (Support-module, SM) 和 DFP 接口。空间相机等具有高精度要求的有效载荷安装于 PM 上，而产生振动的部件及其他附件安装于 SM 上。DFP 接口由音圈电机等非接触式作动器构成<sup>[5]</sup> (图 2 (B))，用于 PM 调姿以及避免它和 SM 碰撞。由于 PM 与 SM 之间无机械接触，理论上可完全消除航天器振源部件对高精度有效载荷的影响，使有效载荷具有极佳的稳定和指向性能。得益于其独特的结构和优异的隔振性能，DFP 系统被提出后即被认为是下一代航天器隔振平台。美国对其进行了大量的测试与仿真，已经逐步从理论研究转向了实际应用，在下一代太空望远镜项目中确定了具体的应用方案。测试分析表明，采用无扰载荷平台的太空望远镜不仅可以提高系统性能，还可以简化地面仿真并且降低成本<sup>[6]</sup>。

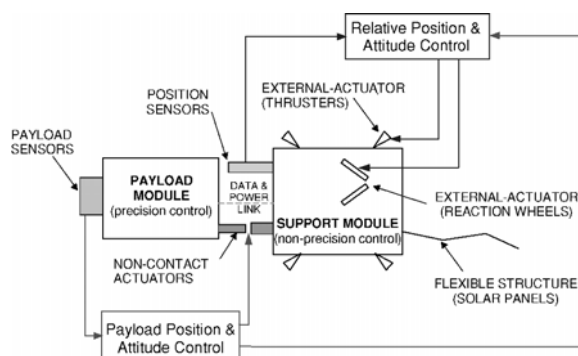


图 1 DFP 系统框架图

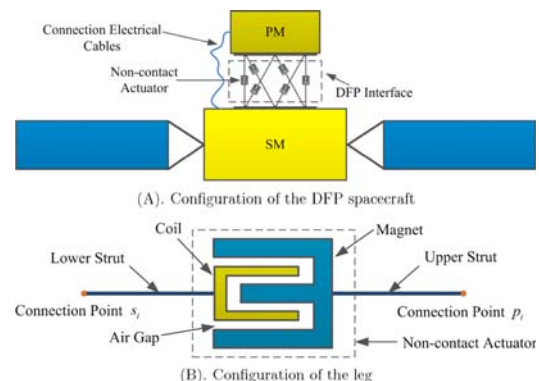


图 2 DFP 航天器结构及音圈电机

但是, DFP 必须使用反作用轮和推力器控制 SM 的姿态使其密切跟踪 PM 运动, 以避免两舱发生碰撞, 而音圈电机定子和动子的结构间隙仅为毫米级, 且音圈电机反电动势会引起 SM 与 PM 之间的耦合, 这导致新的控制难题出现。同时, 当航天器中小质量的 PM 需要调姿时, 大质量的 SM 必须随动控制, 既耗能又影响系统响应速度。此外, DFP 无法胜任航天器中有多个 PM 需要独立调姿的场合。

为解决 DPF 存在的问题, 申请者提出了一种全新的基于超声电机的航天器超静隔振/调姿平台<sup>[7]</sup>, 如图 3 所示。它除了能够实现 PM 和 SM 间的完全隔离外, 还具有节能、响应快、定位精度高以及多个 PM 可独立调姿等优点。它在结构上也分为 PM 和 SM, 通过超声电机控制的三自由度机械臂来实现 PM 的柔性捕获、调姿以及释放。图 4 描述了该平台的隔振和调姿过程。O1 和 O2 为两个旋转型超声电机, O3 为直线型超声电机。当机械臂与 PM 分离时自然实现振动隔离功能(图 4 (a)), 此时 PM 与 SM 间既无机械连接, 也无 DFP 上音圈电机中的电磁相互作用, 可将振动隔离至零频。

柔性捕获(图 4 (b)): 在将 PM 姿态调整到新的位姿前, 需要将处于分离状态的 PM 与 SM 在最小冲击情况下完成连接, 即柔性捕获, 以避免 PM 上脆弱的有效载荷受到冲击影响。为此, 超声电机驱动机械臂运动至距 PM 一定的距离, 此时向超声电机的两相通入同相电, 在电机定子驻波的作用下电机转子获得超声减摩效果, 实现机械臂各关节解锁。然后向 PM 上的电磁铁通电, 产生的磁力克服各关节的微弱阻力矩和阻力后使 PM 和机械臂以最小的冲击实现柔性连接。随后超声电机断电自锁, 机械臂各关节处于锁紧状态, 完成 PM 的柔性捕获。

调姿及释放(图 4 (c)): 超声电机驱动机械臂将 PM 平稳而高精度地定位于新的位姿。PM 的电磁铁断电, 机械臂离开 PM, 实现 PM 的精准调姿及释放。

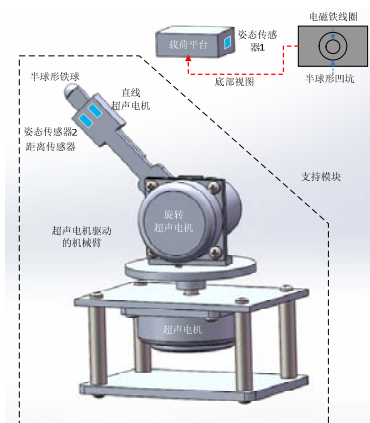


图 3 新型隔振/调姿平台

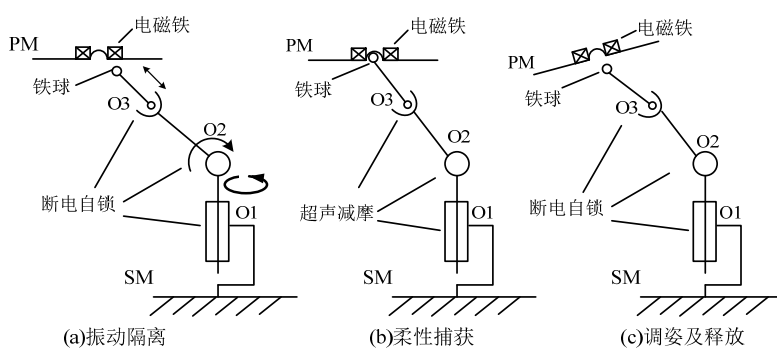


图 4 隔振/调姿平台动作示意图

可以看出, **超声电机是充分实现该全新平台功能的关键**。在该机构中, 充分利用了超声电机扭矩/重量比大、定位精度高、断电自锁、无电磁干扰等特点, 但还需克服诸多新出现的理论和实践中的困难, 包括超声电机的超声减摩理论, 以实现 SM 与 PM 的柔性连接; 可控的平稳启动/停止控制理论与实践, 以避免由电机快速启停引起机械臂的振荡; 适用于超声电机的简单而鲁棒性强的控制理论, 以实现变化的环境温度和负载下超声电机的稳定运行。目前的超声电机无法完美实现上述功能, 但理论分析和实验表明它是可行的。

如将该平台中的超声电机替换为电磁电机，则带来以下弊端。一是减速器的使用带来系统体积和重量上的大幅增加。二是由于各关节无法解锁，要实现 PM 和机械臂的柔性连接，需要对机械臂进行精确的轨迹和定位控制，无疑增加了控制系统的复杂性。三是较难满足电磁兼容性要求。

南京航空航天大学研制的超声电机已成功应用于嫦娥 3 号-嫦娥 5 号、“墨子号”和行云 2 号，初步验证了其在航天领域应用的优越性。本项目意在通过解决上述三个问题，进一步完善超声电机设计和驱动控制理论，继而为超声电机在航天器隔振平台等领域的广泛应用提供必要的理论基础和关键技术支持。

美国以南京航空航天大学参与嫦娥 3 号任务为由将其列为高风险高校（图 5）。嫦娥 5 号成功返回后，美国进一步将南航列入制裁“黑名单”。这凸显了我国对超声电机进行更深度研究的必要性。

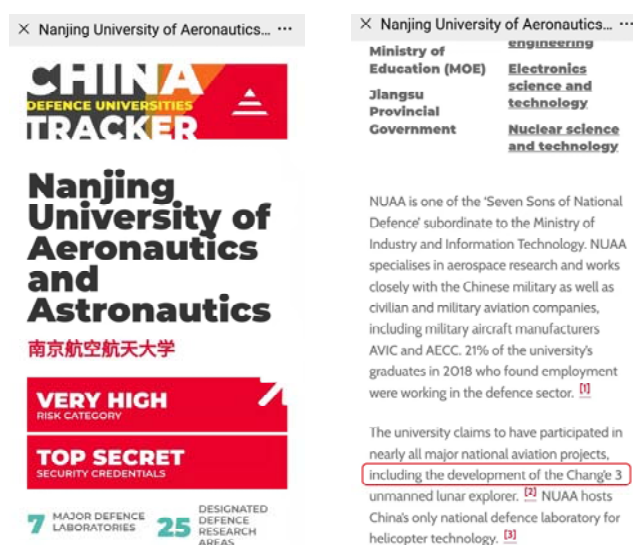


图 5 南京航空航天大学因参与嫦娥 3 号任务被美国列为高风险高校

## 2. 国内外研究现状

以下分别介绍航天器隔振系统、超声电机结构设计及其控制系统研究现状。

### 2.1 航天器隔振技术

航天器中的主要微振动源如表 1 所示，可见其来源广泛、频带宽。目前，航天器的隔振技术根据隔振平台接口的刚度主要分为两类：硬连接隔振和软连接隔振。前者主要包括无源的被动隔振系统和使用驱动器与传感器组成的半主动及主动隔振系统。被动隔振器主要包括橡胶隔振器<sup>[8]</sup>、金属弹簧隔振器<sup>[9]</sup>（图 6）、空气弹簧隔振器<sup>[10]</sup>等。该类隔振器优点是结构简单，但无法消除低频振动。

半主动隔振器主要包括磁流变阻尼器<sup>[11]</sup>和形状记忆合金阻尼器<sup>[12]</sup>。该类隔振器可通过改变材料自身的刚度和阻尼来实现所需的振动抑制，但它仍存在被动隔振的缺点。

主动隔振器通过作动器和控制系统来抑制振动传递，作动器根据反馈信号提供额外的能量，消除振动干扰<sup>[13]</sup>（图 7）。该类隔振器理论上能够消除任何频率的振动，缺点是需要额外的能源，且控制算法复杂。国外主动隔振平台分类及特性指标见表 2，可见其并不能隔离甚低频至零频的微振动。

表 1 航天器主要微振动源

振动源	频率范围	振动形成原因
反作用飞轮、控制力矩陀螺	高频、中频	动静不平衡产生的干扰
推进器	高频、中频、低频	推进器的推进以及推力的不均匀
液体的晃动	中频、低频	制冷剂 and 液体燃料的晃动
液体的流动	高频、中频、低频	阀门作动引起的液体流动
驱动机构	高频、中频、低频	伺服电机的驱动
热控	中频、低频	热应力及制冷机工作
挠性附件	低频	帆板、伸展机构等

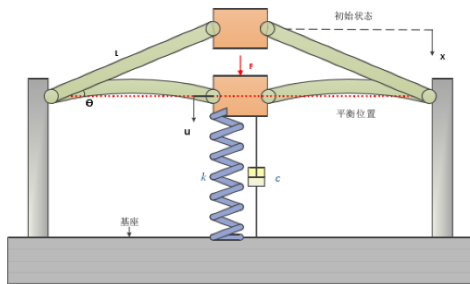


图 6 准零刚度隔振系统

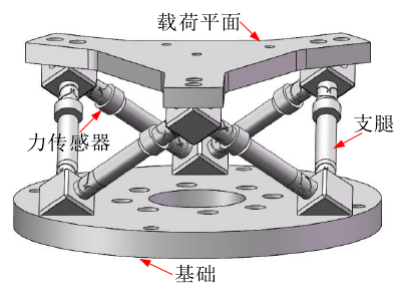


图 7 压电式 Steward 隔振平台

表 2 国外主动隔振平台分类及特性指标

研制机构/型号	执行机构分类	最大行程 (mm)	主动隔振频宽 (Hz)
Intelligent Automation	磁致伸缩器	$\pm 0.127$	10-200
Draper	压电陶瓷	$\pm 0.025$	10-200
Harris/ AIF	压电陶瓷	$\pm 0.025$	10-200
CSA UQP (SUITE)	电磁	$\pm 0.020$	3-100
Honeywell/ AFLR VISS	音圈电机	$\pm 2$	0.2-40
JPL	音圈电机	$\pm 0.5$	1-100
HT/UW	音圈电机	$\pm 5$	0.3-30

软连接隔振系统通过非接触驱动器和非接触传感器将卫星分为互无机械接触的载荷部分和支持部分，因此理论上可将支持模块产生的干扰隔离至零频。软连接主要包含 DFP 系统、双体卫星隔振系统<sup>[14]</sup>（图 8）和基于音圈式 Steward 隔振平台的零刚度超静卫星<sup>[15]</sup>（图 9）等。由于它们都使用音圈电机进行隔振和调姿，因而存在前述 DFP 系统固有的所有缺点。

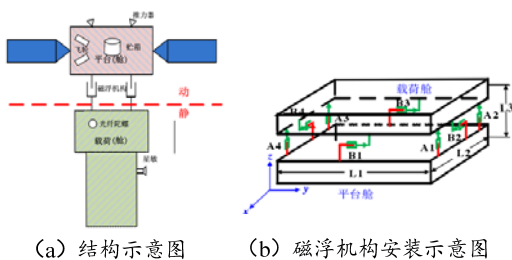


图 8 双体卫星结构

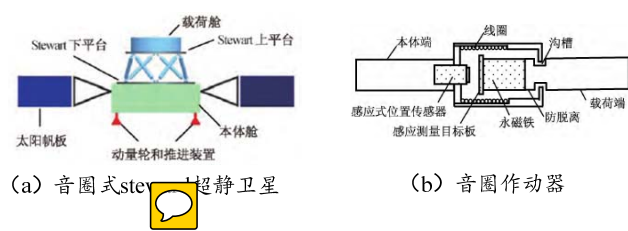


图 9 音圈式 Steward 隔振平台



## 2.2 超声电机设计理论

由上述隔振器的介绍可知，申请者提出的新型隔振平台是一种**全新概念的隔振平台**。它完全克服了上述隔振器的缺点，具有结构简单、隔振效果好、节能等优点，特别是 PM 调姿时 SM 无需改变姿态，且单 SM 可控制多个 PM 独立调姿。在该机构中，**超声电机的拓扑结构和驱动控制是核心和关键**。

在柔性捕获阶段，需要将超声电机由驱动模式变为超声减摩模式从而将机械臂各关节解锁。目前对于超声电机驱动机理和结构设计的研究都集中于如何提高其正常工作时的输出性能<sup>[16]</sup>。在电机数学模型方面，陈超构建了定子的半解析动力学模型<sup>[17]</sup>，通过分析定子齿和转子的三维接触驱动机理，并结合柔性转子刚柔耦合的动力学模型得到了旋转电机的较为完整的数学模型<sup>[18]</sup>。Li 建立了 V 型直线电机包括定子、摩擦界面以及动子在内的动力学模型以预测其机械性能<sup>[19]</sup>（图 10）。在有限元模型方面，Tao 采用响应面法获得了高精度的有限元模型<sup>[20]</sup>。这些模型为电机的结构优化设计奠定了基础。在电机材料方面，Li 研究了表面织构摩擦材料以提升电机效率<sup>[21]</sup>。在电机结构方面，Zhou 提出了一种悬浮定子的环形超声电机以提升其功率密度<sup>[22]</sup>（图 11）。以上研究都基于电机工作于正常的摩擦驱动模式，而电机两相通入同相电时的超声减摩是非正常工作模式，该方面研究未见公开报道。

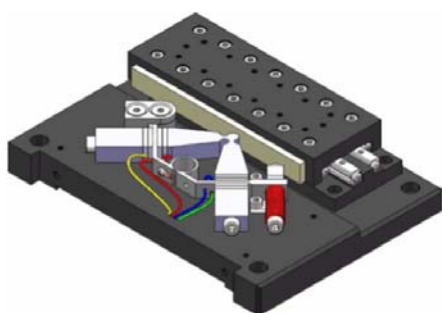


图 10 V 型直线超声电机

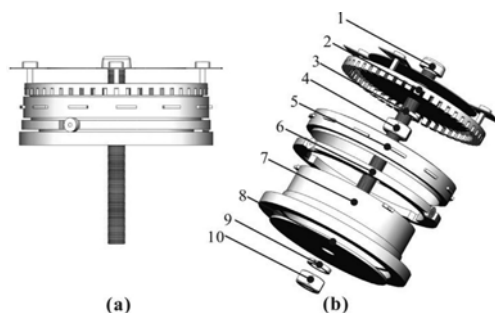


图 11 环形悬浮定子超声电机

## 2.3 超声减摩理论

对于超声减摩的研究，目前的工作集中于如何降低有空气存在情况下现代机械接触面间的摩擦力<sup>[23]</sup>。当两个物体接触时，如果对其中一个表面施加超声振动，则会产生近场声悬浮力使一个物体脱离另一个物体，减小了摩擦。当接触面压力较大时，即使不能使物体悬浮，也会由于超声悬浮力的存在使接触压力变小，导致摩擦系数显著降低<sup>[24]</sup>。杨浩杰研究了平面和圆柱面接触的超声减摩机制，得出了接触正压力、表面粗糙度、超声振动的频率和幅值等系统参数对减摩效果的影响规律<sup>[25]</sup>。这些研究工作关注的是如何利用振动体纵振模态产生的近场声悬浮力实现超声减摩，这与本课题中需研究的真空中超声电机定子由弯曲模态产生的超声减摩在原理上完全不同。

周宁宁研究了真空低温下超声电机的摩擦驱动机理<sup>[26]</sup>。他将电机定转子之间的椭圆形超声波振动分解成水平方向和垂直方向的超声波振动，并建立了垂直超声波振动的减摩模型，实验获得了定转子两表面的接触时间随振幅、预紧力和环境压强的变化规律。虽然其研究对象是行波而非本申请提出的驻波，但其研究方法对本研究有借鉴意义。由

于超声减摩的本质是减小定转子接触面积或接触时间,如能使超声电机定转子都产生弯曲振动且波峰相对,则理论上其摩擦力会大幅减小。目前对于超声电机转子的研究多集中于如何优化其结构使定转子接触面积增加以提高电机输出性能<sup>[27,28]</sup>,未考虑转子的模态以及其受迫振动。刘兰艳研究了电机柔性转子结构参数对自身固有频率的影响<sup>[29]</sup>,但未进一步研究其受迫振动问题。

#### 2.4 柔顺启停控制理论

超声电机启停响应快是其优点,但在 PM 的启停阶段,如对电机速度轨迹不加控制,则可能由于加速度过大甚至不连续而对机械臂造成冲击,引起 PM 的振荡。

目前国内外对超声电机启停的研究多集中于搭建测试系统以测量其启停特性<sup>[30,31]</sup>。由图 12 可见,电机启停时间都为毫秒级,加速度很大。李松珂将电机启动阶段定性分为超瞬态、瞬态和阻尼振荡三个阶段,将停止阶段分为定子振幅衰减、复合振动以及欠阻尼振动三个阶段,并分析了各阶段的物理特性<sup>[32]</sup>。陈宁利用电机的快响应特性,通过施加特定周期数的驱动信号实现精密定位<sup>[33]</sup>(图 13)。目前未有对超声电机启停特性进行控制的公开报道。

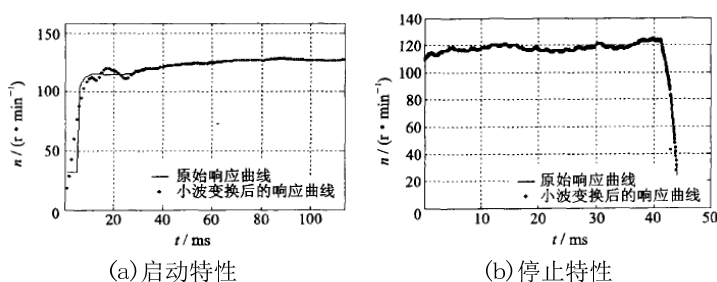


图 12 超声电机启停特性测量

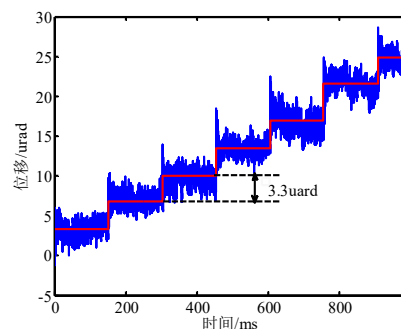


图 13 超声电机高精度定位控制

而在高精度数控加工领域,为减小机床振动、提高加工精度,对电磁电机也提出了柔顺启停的要求,通常以加速度或加加速度(急动度)连续为指标来规划速度曲线<sup>[34-36]</sup>(图 14-16)。在超声电机启停瞬间,时间很短控制器往往很难实现闭环控制。如能借鉴电磁电机速度曲线,通过深入研究超声电机瞬态响应特性,利用特定的驱动条件使电机启停速度按某类平滑曲线运行,则有望实现开环下的柔顺启停。

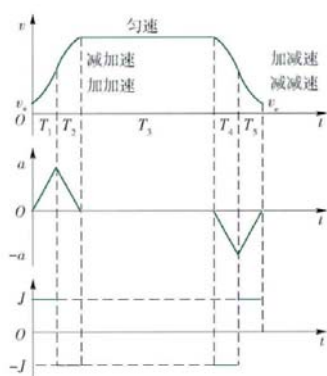


图 14 五阶段 S 曲线

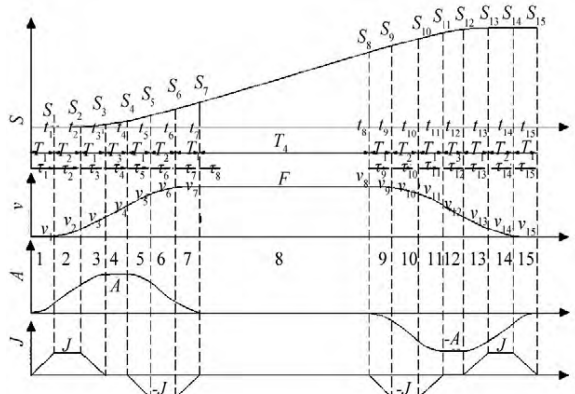


图 15 平滑 S 曲线加减速过程

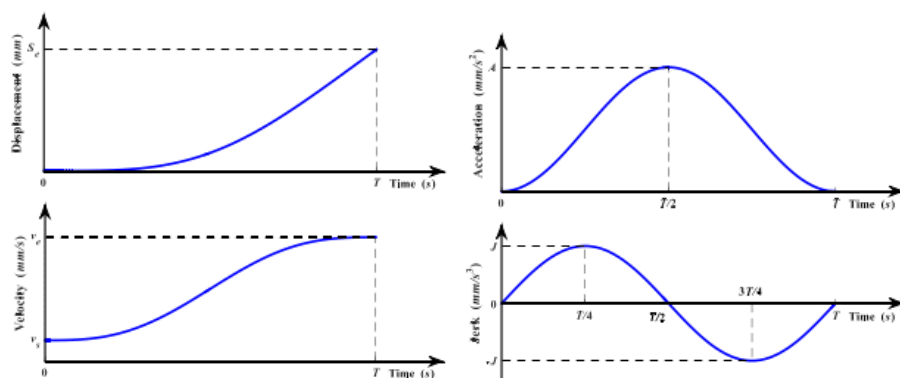


图 16 加加速度光滑的运动学轮廓

## 1.5 超声电机速度控制理论

在调姿阶段，需要电机稳速运行。超声电机输出性能受温度影响很大，而太空中温度变化范围宽，因此需要合适的控制算法进行速度稳定性控制。超声电机的运行机理涉及压电、振动、摩擦等多个方面，电机驱动电信号和机械输出之间呈现强非线性和时变特性<sup>[37]</sup>。为了实现超声电机的伺服控制，目前多数学者综合考虑电机的材料特性、机械结构、工作环境等方面因素，希望尽可能全面地建立电机的机理模型，并应用多种控制算法对其进行控制。实用系统中超声电机运动控制对实时性要求高，因此控制算法中仍以 PID 为主，其他先进控制算法或多或少与 PID 相结合来提高电机伺服系统的性能。

由于 PID 参数的选择是影响其控制性能的关键技术，因此将寻优算法和 PID 相结合，提高 PID 获得最优参数的效率，可能有助于提高系统控制效率。Alrijadjis 对 PID 控制参数利用粒子群算法寻优（图 17），根据寻优指标的不同可以对 PID 控制器参数进行有针对性地优化<sup>[38]</sup>。Mu Shenglin 采用神经网络识别 PID 参数，将 PSO 应用于 NN 中可获得最佳的权重系数（图 18），避免了传统 BP 神经网络中对雅克比矩阵的估计<sup>[39]</sup>，但是在线的计算方式同样面临着控制量大、计算周期长等问题。Wang Huang-Yu 等人为实现基于超声电机的二自由度 X-Y 平台的控制，为 PID 参数的外环添加了向后传播神经网络（BPNN），通过学习偏差和输出电压获得 PID 控制器的最优参数<sup>[40]</sup>（图 19）。

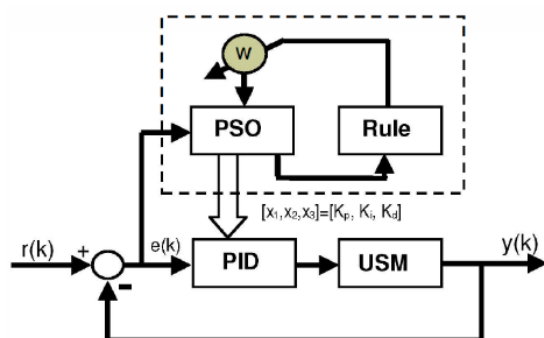


图 17 PSO-PID 转速控制系统

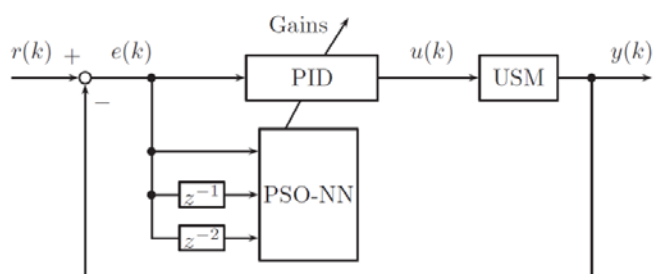


图 18 PSO-NN 的内模 PID 控制

除了 PID 及其改进算法，不少学者尝试将其他类型智能控制算法引入超声电机控制领域中。Gencer 基于模糊控制器设计了超声电机转速控制系统<sup>[41]</sup>，Chih-Min Lin 提出了小波模糊控制<sup>[42]</sup>（图 20）。

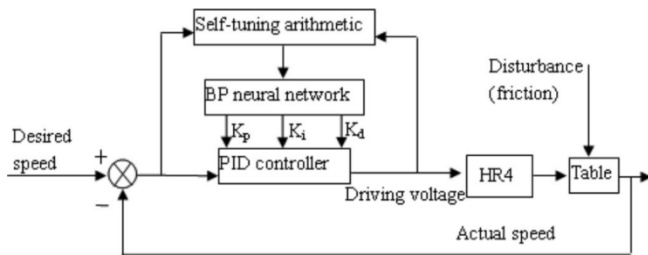


图19 BPNN-PID 实现超声电机速度控制框图

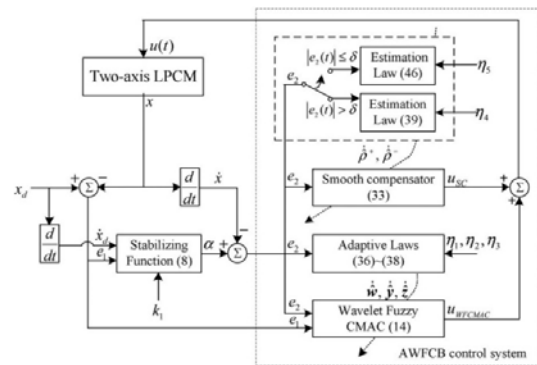
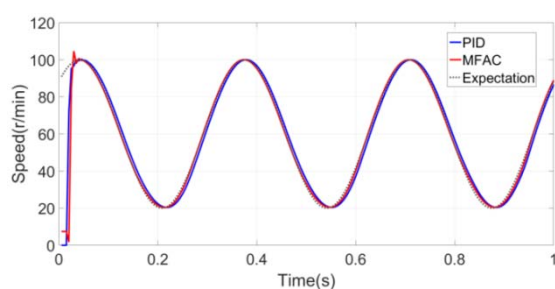


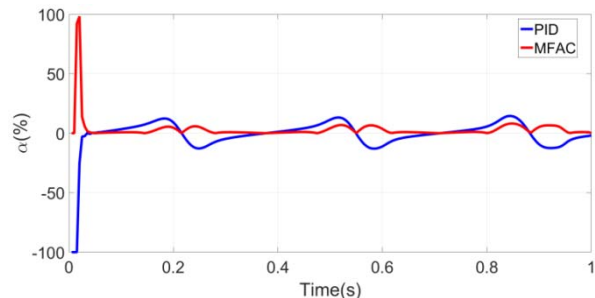
图20 小波模糊-CMAC 控制策略结构框图

目前，几乎所有曾经应用于传统电磁电机的控制策略都已尝试用于超声电机。但是由于多数现有控制算法是以被控对象机理模型或数学模型为设计基础的，而超声电机运行机理复杂，无论是利用逆压电效应的机电能量转换过程，还是定、转子间的机械能摩擦传递过程，均具有显著的分散性和时变非线性，因而难以得到准确的数学模型，更难以得到相对简单、适合于控制应用的模型。

不依赖电机模型的无模型自适应控制（Model Free Adaptive Control, MFAC）应该更适合超声电机的控制。DI 等人仿真分析对比了 MFAC 与 PID 的控制效果<sup>[43]</sup>（图 21），发现 MFAC 鲁棒性强，控制效果好于 PID，更重要的是其参数选择较易，是 USM 控制领域很有前途的控制算法。



(a) 跟踪结果



(b) 跟踪误差

图21 MFAC与PID跟踪正弦信号仿真结果

综上所述，基于超声电机的新型隔振/调姿平台是一种非常有前途的航天器隔振平台，但目前的超声电机不能很好地应用于该平台中，需要对现有的超声电机理论、设计和控制策略进行更深和更广维度的研究。这不仅会丰富超声电机的研究内涵，扩充相关领域研究成果，同时也会对航天领域产生积极影响。

## 参考文献：

- [1] 曹登庆. 大型柔性航天器动力学与振动控制研究进展[J]. 力学学报, 2019, 51(1): 1-13.
- [2] Chunchuan Liu, Xingjian Jing, Steve Daley, et al.. Recent advances in micro-vibration isolation [J]. Mechanical Systems and signal Processing, 2015:55-80.
- [3] Dae-Oen Lee, Geeyong Park, Jae-Hung Han. Hybrid isolation of micro vibrations induced by reaction wheels [J]. Journal of sound and Vibration, 2016, 363:1-17.
- [4] Pedreiro N. Spacecraft architecture for disturbance-free payload[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2003, 26(5): 794-804.



- [5] Chen Wua, Xianren Kong, Yanfang Liu, et al.. Coupling characteristics analysis for the disturbance free payload spacecraft. *Acta Astronautica* [J], 2017 (138): 407-416.
- [6] 武晨. DFP 航天器动力学特性分析及精确控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [7] 李华峰, 陈浩. 一种超声电机驱动的超稳卫星平台及其控制方法[P]. CN202010704362.4, 2020.10.
- [8] Li Yuyan, Huang Xieqing, Mao Wenxiong. Theoretical Model Construced and Experimental Investigation Nonlinear Constitutive Relation of Elastic Poro-metallic Rubber[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2005, 41(4): 303-312.
- [9] 闫健. 准零刚度隔振器特性研究与星上隔振应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [10] 张利国, 张嘉钟, 贾力萍, 等. 空气弹簧的现状及其发展[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(2): 146-151.
- [11] Hesselbach J, Abel-Keilhack C. Active Hydrostatic Bearing with Magnetorheological Fluid[J]. *Journal of applied physics*, 2003, 93(10): 8441-8443.
- [12] 王进强, 沈星, 李杰锋. 基于 SMA 的可变频隔振器设计与实验研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(20): 59-63.
- [13] Ko B, Park J W, Dong W K. A study on iterative learning control for vibration of Stewart platform [J]. *International Journal of Control Automation & Systems*, 2017, 15(1): 1-9.
- [14] 周雅兰. 双体卫星快速姿态机动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [15] 许域菲, 赵艳彬. 基于音圈式 Stewart 平台的零刚度卫星复合姿态控制研究[J]. *上海航天*, 2017, 34(2): 52-60.
- [16] 安大伟, 张建辉, 薛昊东, 等. 旋转行波超声电机性能提升技术进展[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(05): 1109-1115.
- [17] 陈超, 曾劲松, 赵淳生. 行波超声电动机的动力学模型[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(12): 76-82.
- [18] 陈超, 赵淳生. 柔性转子对行波超声波电动机性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(03): 152-159.
- [19] Xiaoni Li, Zhiyuan Yao, Rong Li. Dynamics modeling and control of a V-shaped ultrasonic motor with two Langevin-type transducers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 29(2): 025018.
- [20] Tao Zheng, Liu Xu, Hu Bin. Finite element model updating of a rod-type ultrasonic motor based on response surface method[J]. *Chinese Journal of Acoustics*, 2018, 37(01): 89-98.
- [21] Song Li, Rui Yang, Tingmei Wang, et al.. Surface textured polyimide composites for improving conversion efficiency of ultrasonic motor[J]. *Tribology International*, 2020: 106489.
- [22] Yanning Zhou, Jingjing Chang, Xinxin Liao, et al.. Ring-shaped traveling wave ultrasonic motor for high-output power density with suspension stator[J]. *Ultrasonics*, 2019, 102: 106040.
- [23] 李华. 基于超声减摩原理的气缸运动副摩擦特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [24] 姚卓晨. 超声减摩机理及转子系统摩擦抑制应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [25] 杨浩杰. 超声波悬浮机理及其在转子系统振动抑制中的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [26] 周宁宁. 面向真空低温下超声波电机的振动摩擦与悬浮特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [27] 牛子杰, 孙志峻, 陈超, 等. 基于响应面模型与自适应遗传算法的中空型行波超声电机柔性转子结构优化[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(30): 5378-5385.
- [28] Xu Zhangfan, Di Sisi, Pan Song, et al.. Rotor optimization for the improvement of ultrasonic motor performance[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(19-20): 7089-7100.
- [29] 刘兰艳, 张秀莉, 张毅锋, 等. 超声电机柔性转子振动模态及影响因素分析[J]. *机械制造*, 2017, 55(9): 110-112.
- [30] 赵淳生, 沈寿林. 基于小波变换的超声电机启动和关断特性的测试与分析[J]. *数据采集与处理*, 2004, 19(4): 376-380.

- [31] 万俊龙. 用于行波型旋转超声电机性能测试的系统设计与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [32] 李松珂. 基于瞬态响应的超声电机高精度位置控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [33] 陈宁, 郑杰基, 范世珣, 等. 超声电机速度与位置的高精度控制[J]. 光学精密工程. 2020, 28(4): 790-799.
- [34] 刘志峰, 张森, 蔡力钢, 等. 基于粒子群优化五阶段 S 曲线加减速控制算法[J]. 北京工业大学学报, 2015(05): 641-648.
- [35] 许光彬, 余道洋. 高速平滑 S 曲线加减速速度控制算法研究[J]. 控制工程, 2017(10): 87-92.
- [36] 李浩. 面向高速高精加工的运动轨迹控制关键技术研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳计算技术研究所, 2019.
- [37] Zhao Chunsheng. Ultrasonic Motors: Technologies and Applications [M]. Springer Press, 2011.
- [38] Alrijadjis D, Tanaka K, Nakashima S. Hybrid strategy for improving PSO and its application for self-tuning PID controller on position control of ultrasonic motor[C]. Information and Communication Technology. IEEE, 2013: 99-104.
- [39] Mu S L, Tanaka K. Position control of ultrasonic motor using PID-IMC combined with neural network based on probability[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2013, 41(1): 59-71.
- [40] Wang H Y, Fan K C, Ye J K, et al. A Long-Stroke Nano-positioning Control System of the Coplanar Stage[J]. ASME Transactions on Mechatronics. IEEE, 2014, 19(1): 348-356.
- [41] Gencer A. A comparative speed position control technique based Fuzzy Logic control for travelling wave ultrasonic motor[C]. International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence. IEEE, 2015: SG-7-SG-12.
- [42] Lin C M, Li H Y. Intelligent Control Using the Wavelet Fuzzy CMAC Back-stepping Control System for Two-Axis Linear Piezoelectric Ceramic Motor Drive Systems[J]. Transactions on Fuzzy Systems. IEEE, 2014, 22(4): 791-802.
- [43] Sisi Di, Huafeng Li. Model-free adaptive speed control on travelling wave ultrasonic motor[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 69(1): 14-23.

## 2. 项目的研究内容、研究目标, 以及拟解决的关键科学问题 (此部分为重点阐述内容);

### 2.1 研究内容

#### 1) 波动界面摩擦驱动/超声减摩复合模式的超声电机构型设计理论

分析波动界面质点运动方式对摩擦传动特性的影响规律, 总结出行波驱动/驻波减摩模式对界面质点运动的不同要求, 提出压电结构诱发和精巧调控界面质点运动的特定拓扑形式, 由此建立基于分布式压电激励的超声电机力电耦合模型。通过研究定子不同振动模态下波动界面质点运动轨迹调控机理, 获取多物理场作用下超声电机输出运动的稳态动力学行为及其与输出性能之间的关系, 可用于评估和设计适用于复合模式的特定电机拓扑形式。

超声电机在推动负载时依靠接触界面的摩擦驱动力使定子与转子(负载)“刚性”连接, 此时需要定子界面的波动能够以最大的接触动力传递给转子(负载); 与之相对, 在柔性捕获阶段又需要仅通过改变输入条件就能实现超声减摩功能, 此时定子界面波动能够最大可能地将定子与转子(负载)实现“柔性”弱连接。在同一个电机中集成两种

上述相反的“刚-柔连接”工作模式，需要建立基于分布式激励的压电振动机构-波动界面质点运动调控-定子/转子的“刚-柔”复合模式动力传递的数理描述。无论是超声电机还是超声减摩研究，定子/振动体与转子/减摩对象通常是分开研究，且不考虑转子/减摩对象的受迫振动，本研究需要将电机定子和转子视为多振动体进行整体理论建模和分析；预压力无论对摩擦驱动还是超声减摩而言都是非常重要的参数，但在两种场合下的效果却是相反的，需要进行权衡考虑；电机在驱动和减摩时选用不同的振动模态必然会有不同的输出效果，需要进行对比分析。所有这些都依赖于对该复合模式超声电机进行理论分析。

## 2) 超声电机受控柔顺启停理论

考虑预压力施加系统刚度对超声电机启停特性的影响，分析材料属性、振动模式、温度、摩擦材料蠕变等非线性时变因素对界面物化参数的不确定性影响，建立不确定参数的抽样概率模型，进而建立压电驱动系统不确定参数的瞬态非线性动力学模型，采用蒙特卡罗方法评估非线性时变因素对系统动力学行为的影响和电机瞬态输出特性的统计规律。

由于超声电机在正常供电状态下启停加速度过大且动作时间非常短，很难在此阶段对其速度进行闭环反馈控制，且压电材料参数、预压力施加装置的刚度特性和摩擦材料属性直接影响电机的瞬态特性，因此拟通过建立和分析超声电机在正常供电以及非正常供电（两相电压不同频率、不同幅值以及相位非正交等）情况下定子弹性体瞬态振动方程-定子表面质点运动轨迹描述-定转子接触界面摩擦材料形变-微观/宏观摩擦力统计模型-转子动力学和运动学方程，将不确定参数以蒙特卡罗法计入上述模型中，以期得到电机启停速度按某类平滑曲线（加速度或急动度连续）运行时电机输入条件的集合或边界，从而实现开环下柔顺启停的主动控制。

## 3) 超声电机无模型自适应控制理论

建立适用于超声电机这类时变非线性且输入受限系统的无模型自适应控制系统，创建伪偏导数以反映电机时变非线性特性，创建代价函数以估计系统实时状态和控制输入，设计参数在线调整策略以提高控制准确性。

搭建超声电机多参量测试平台，在线测试电机实时运行情况，总结其时变非线性特征，构建时间和空间上的控制输入-输出仿真模型，用于在 MFAC 控制算法仿真分析中产生模拟的输入输出数据。结合超声电机系统的非线性时变特性分析结果，采用诸如调整局部线性化模型、改进准则函数等方法优化控制律，经过算法自身稳定性分析以及其对外部干扰和内部噪声的鲁棒性分析后，有针对性地提出适合于超声电机的 MFAC 控制算法。MFAC 算法中的参数对控制效果的影响具有明显的非线性，且无法用解析式表达，因此需根据系统运行环境和运行状态的改变而动态调整，缓解未知参数对系统动态和稳态性能的影响，提高算法实时控制的精度。

## 4) 实验验证

根据复合模式超声电机设计理论制作超声电机，测试其摩擦驱动、超声减摩、柔顺启停和无模型自适应稳速性能。制作超声电机驱动的新型隔振/调姿平台模型，在真空、

高低温复合实验环境下研究在温度、真空等载荷联合作用下超声电机及平台的控制性能，通过实验验证和完善理论方法的正确性和有效性，进一步指导理论研究。

## 2.2 研究目标

本研究以新型航天器隔振/调姿平台中具有特殊要求的超声电机为研究对象，通过建立复合模式超声电机设计理论以实现柔性捕获，建立超声电机瞬态非线性动力学抽样概率模型以实现电机柔顺启停，建立超声电机无模型自适应速度控制理论以实现电机平稳运行，最终解决超声电机在该新型应用中出现的具体问题，丰富超声电机设计和控制理论，为超声电机在航空航天等领域的广泛应用提供必要的理论基础和关键技术支持。

## 2.3 拟解决的关键科学问题

- 多振动体多振动模式下波动界面质点运动轨迹调控机理

无论是摩擦驱动还是超声减摩，其核心问题是分布式压电元件有效地诱发出压

电结构的行波或驻波波动，进而调控接触界面上定子质点的特定运动轨迹，使得定子与转子之间实现“刚性”推动负载或“柔性”的弱连接。通过激励出定子的不同振动模态并结合转子的不同振动响应，实现定子表面质点运动轨迹的调控，进而获得超声电机不同的稳态输出性能。

- 考虑压电驱动系统不确定参数的瞬态非线性动力学行为统计规律

超声电机宏观启停速度响应特性归结于压电驱动系统瞬态非线性动力学行为。

但受制于模型参数（材料、边界）的不易准确获取和时变特性，难以得到精确的超声电机瞬态响应。而放弃获取确定性结果，转而通过合理建立不确定性参数的抽样概率模型，针对超声电机瞬态非线性动力学特性开展蒙特卡罗仿真，可获得电机瞬态启停速度的统计规律，总结出可用的控制输入集，为顺利实现柔顺启停奠定理论基础。

## 3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）；

### 3.1 研究方案

超声电机是一种利用弹性体的超声振动以及摩擦耦合实现机电能量转换的新型微特电机，其典型结构如图22(a)所示。当为两组空间正交的压电陶瓷上施加相位差为 $90^\circ$ 的一组同频率等幅交变电压时，通过压电陶瓷元件的逆压电效应，可在定子上激发出两个幅值相等、在时间和空间上均相差 $90^\circ$ 的驻波，这两个驻波在定子上叠加而成的行波使得定子每一个齿上的质点产生椭圆运动，该椭圆运动会推动转子产生旋转运动。超声电机工作原理见图22(b)。

超声电机具有扭矩/重量比大（可达电磁电机的十倍）、低速大转矩、响应速度快（ms级）、定位精度高（旋转达角秒级，直线达nm级）、无电磁干扰、拓扑形式多样等特点。



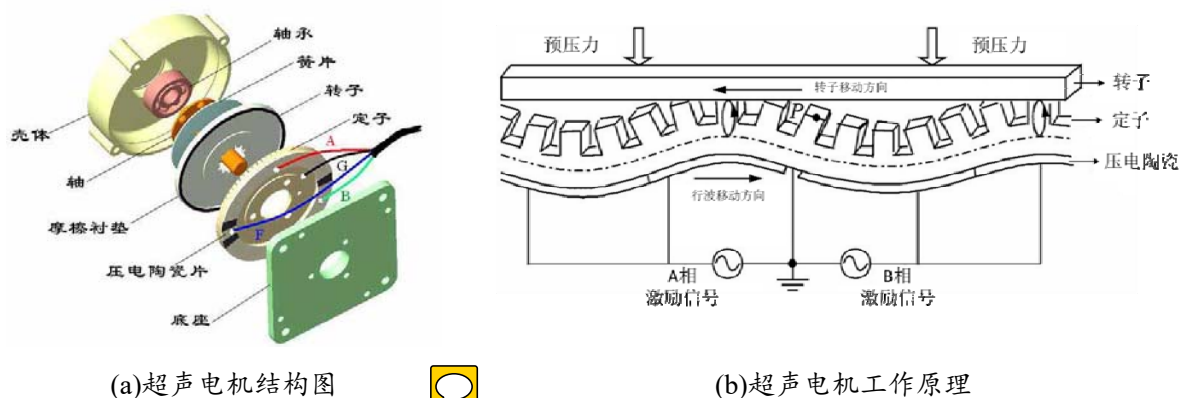


图22 超声电机结构及原理图

超声电机无论是研究其正常工作时的摩擦驱动还是非正常状态下的超声减摩或是研究其瞬态启停响应，都归结于压电陶瓷逆压电效应、定子弹性体振动以及摩擦界面摩擦行为，因此本课题紧紧围绕压电/金属复合弹性体振动以及接触界面摩擦行为分析，采取理论分析、数值计算与实验相结合的思路，按照机理分析、模型构建、理论推导、仿真分析和实验验证的研究思路，进行多模式超声电机理论分析和控制算法构建。整个课题研究框架见图23。

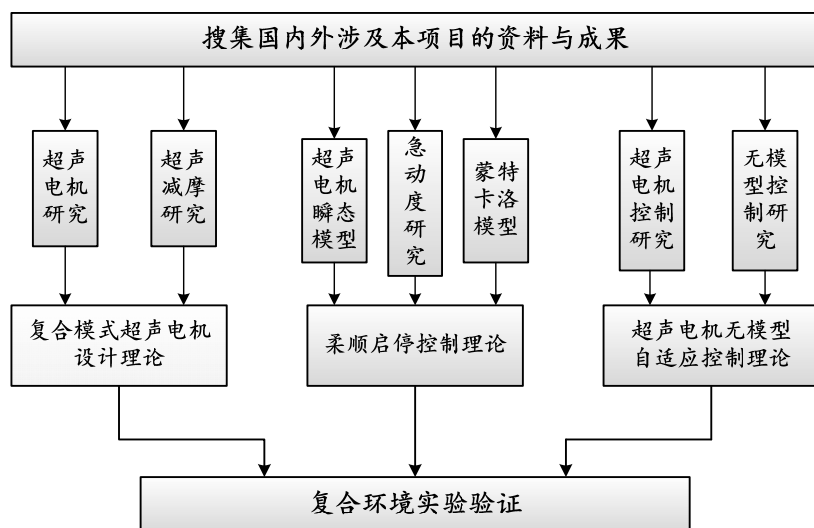


图23 课题研究框架

### ● 摩擦驱动/超声减摩复合模式超声电机设计理论

该部分研究内容的技术路线见图24，其核心为波动界面质点调控。

对于正常的摩擦驱动模式，基本延续现有的超声电机研究方法。由压电元件激发定子某阶合适的振动模态 $B_{0m}$ ，设计柔性转子使其在考虑预压力系统刚度的情况下固有模态为 $B_{0n}$ ，此时转子可视为刚体。结合Herz接触理论、库伦摩擦理论，通过对定转子接触的波动界面定子质点轨迹进行分析，并考虑滑动和粘着摩擦后，可获得行波下的摩擦驱动理论。

对于非正常的超声减摩模式，由分布式压电元件激发出定子 $B_{0n}$ 模态，设计电机结构使转子在定子的激励下激发出同模但反向的 $B_{0n}$ 模态，由驻波下定转子接触界面质点运动轨迹分析并结合Herz接触理论、库伦摩擦理论和冲量理论，对两个正弦柱面接触的超声减摩机制进行理论分析，可获得驻波下的超声减摩理论。由于定转子模态相同但相

位相反,此时的接触面积为极小值,且有可能实现间歇性接触,从而获得超声减摩效果。

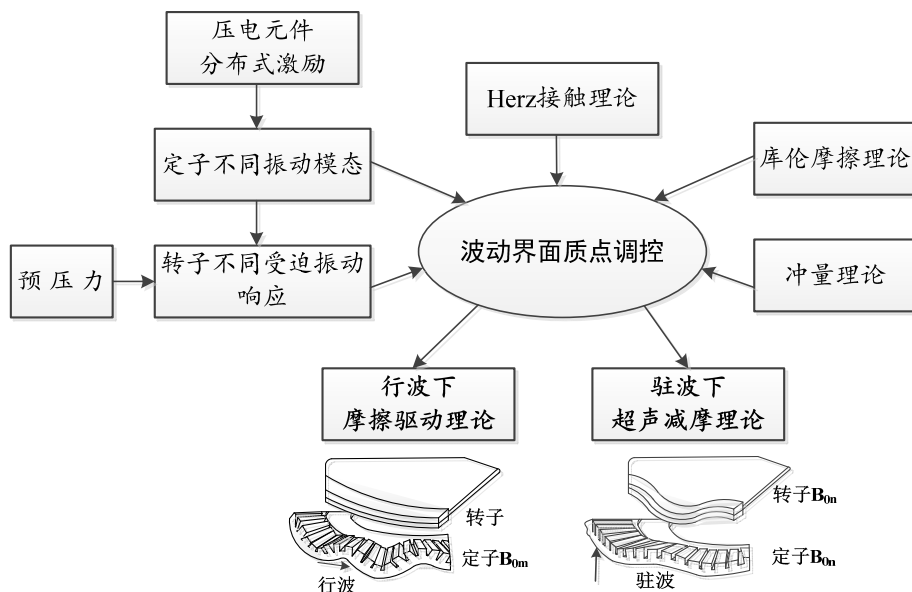


图24 复合模式超声电机设计理论研究方案

### ● 超声电机受控柔顺启停理论

该部分研究内容的技术路线见图25,其核心为不确定参数抽样模型下的电机瞬态非线性动力学行为统计规律。

建立电机定子两相中任意一相单独激励时的压电/金属复合弹性体瞬态振动方程,将正常供电(同频、等幅并正交)及非正常供电下的两个瞬态振动响应合并,获得定子表面质点运动轨迹描述。由于在非正常供电时定子中无法产生行波,即定子表面质点运动轨迹需构建其统计特性,因此由弹性Herz接触理论和库伦摩擦理论获得定转子接触界面微观摩擦力模型后,结合定子表面质点运动轨迹的统计特性,获得宏观摩擦力统计模型,再由转子动力学和运动学方程获得转子转速瞬态响应。在上述电机瞬态非线性动力学模型中,由于压电材料本构方程、预压力系统刚度、界面物理参数受温度、洁净度和时效影响变化的不确定导致驱动效果出现差异,因此需基于上述分析模型,结合各不确定因素的统计规律分析,利用蒙特卡罗方法分析不确定因素对系统输出的影响。通过压电共振系统的不确定性建模,获得超声电机瞬态输出特性的统计规律。

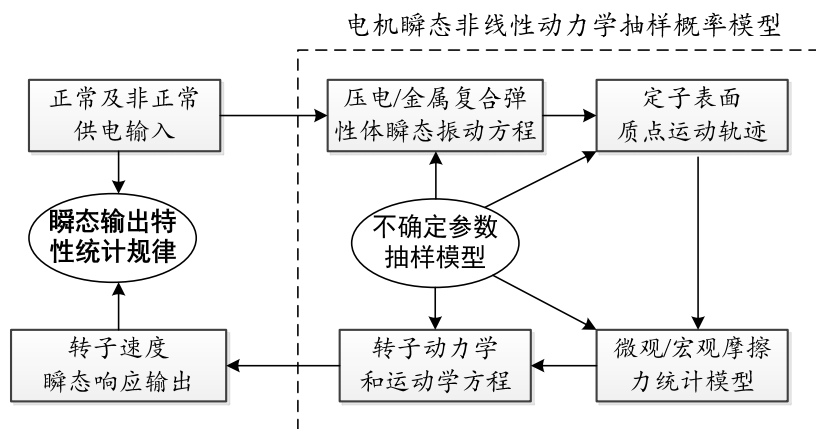


图25 电机柔顺启停研究方案

## ● 超声电机无模型自适应控制理论

该部分研究内容的技术路线见图 26，其核心为 MFAC 控制律推演及稳定性分析。

为检验控制算法的有效性，需要在仿真中模拟超声电机系统的输入输出关系。为此搭建光学精度的超声电机动态性能测试平台，借助于高分辨率的编码器和半实物实时仿真的软硬件平台 dSPACE，在变化的电机预压力、环境温度和负载情况下，改变电机驱动电压和频率，采集电机在稳定工况下的常用运行数据，在机理分析和经验的指导下，建立纯粹基于实验现象的超声电机多输入多输出 MIMO 模型。

“无模型”的本质是采用局部线性化模型代替系统的机理模型或数学模型。大部分离散系统的输入/输出关系均可由图 27 来表示。对该曲线，可引入动态伪偏导数 PPD (pseudo partial derivation)  $\phi_c(k)$  来表达系统的动态特性，进而反映系统的时变特性。可以利用系统历史输入与输出数据构建并获得 PPD 和系统控制输入的估计准则函数。

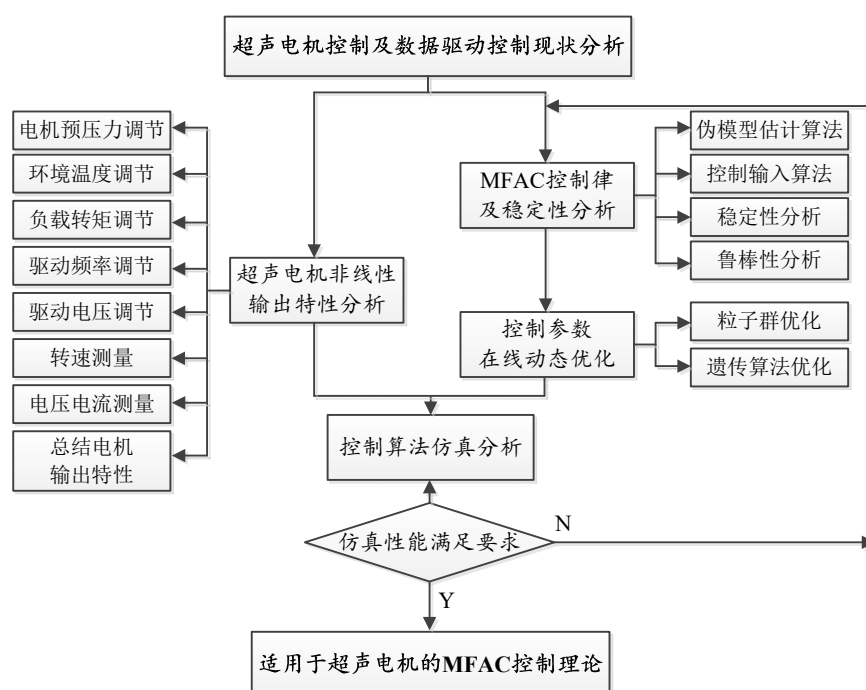


图26 MFAC控制理论研究方案

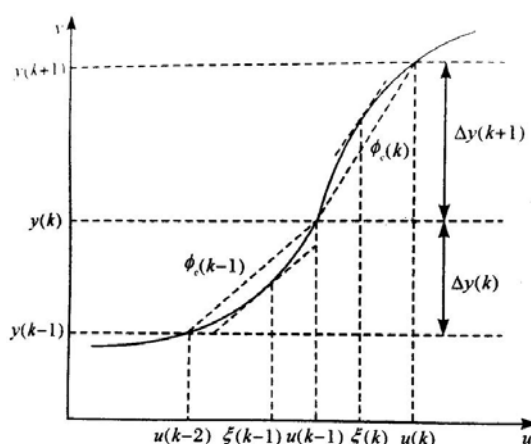


图 27 伪偏导数 PPD 示意图

不同的估计准则函数对应不同 PPD 和控制输入估计算法。在前述深入分析了超声电机动态特性的基础上，针对性地提出改进的控制算法，以适应超声电机的独特特征，

获得所需的控制效果。如在准则函数中加入跟踪误差变化率即一阶差分以及该变化率的改变值即二阶差分,有可能较好地抑制系统的振荡发散。这方面可参考各类最小二乘法。

在控制算法的稳定性分析中,可采用 Lipschitz 和李雅普诺夫稳定判据以及通过分析系统输出跟踪误差是否单调收敛来确定。

由于 MFAC 完全依赖于系统的输入/输出数据,因此,不同于基于模型的控制算法, MFAC 的鲁棒性分析主要针对噪声扰动和数据传输中的丢包现象。一旦当前控制算法经验证鲁棒性无法达标,可考虑采用预估补偿等方法弥补噪声扰动和数据丢包的情况。

为了确定估计算法中各个参数的最佳取值,或者应对 MFAC 改进算法中引入的其他未知参数,拟针对多参数优化问题引入寻优方法。如采用粒子群算法和遗传算法进行控制参数的动态寻优。

### ● 实验验证

该部分研究内容的技术路线见图 28,已搭建的真空/高低温复合环境实验平台见图 29。

根据复合模式超声电机理论制作超声电机后,分别在常温常压和复合环境下测量其正常驱动性能和超声减摩性能,然后在常温常压下分别测试柔顺启停和无模型自适应稳速控制,随后在高/低温真空复合环境试验箱中分别测试柔顺启停和无模型自适应稳速控制,最后在该复合环境试验箱中进行该隔振/调姿平台的性能测试。

由于启停时间很短,采用传统的光栅式编码器测量其瞬态转速会带来较大误差,因此拟选用 MEMS 角速率传感器进行启停阶段速度测试,并结合光栅传感器测量稳态速度。MEMS 过载传感器、角速率传感器和姿态敏感器安装在载荷平台上,测量柔性捕获阶段平台的冲击、启停阶段平台的速度以及平台最终的姿态。为在地面实验中去失重的影响,将隔振/调姿平台安装于无阻万向平台上,仅测试其二维的调姿性能。

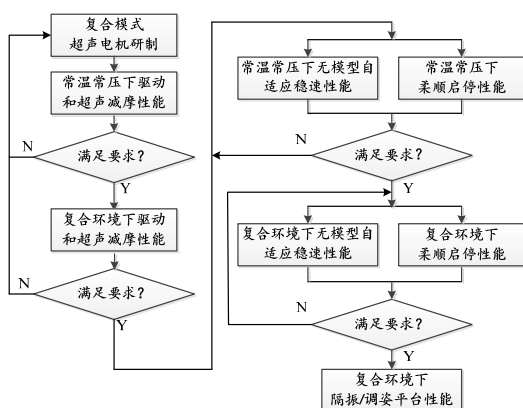


图 28 实验验证技术路线

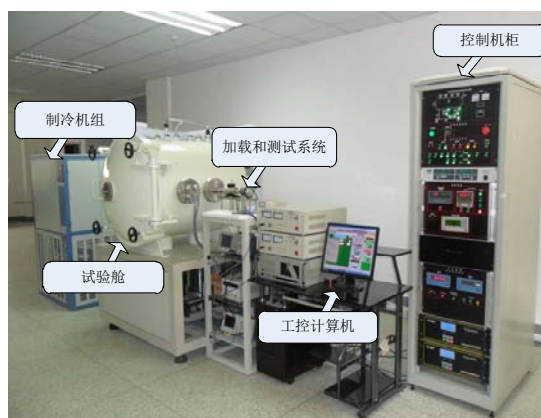


图 29 复合环境实验系统

## 3.2 可行性分析

● 本项目是在吸收国内外有关隔振/调姿平台最新研究成果和本研究所有关超声电机设计理论及其驱动控制雄厚的研究基础上构思而成的。已有大量研究表明DFP是一种具有很大优势的航天器隔振平台,而申请者提出的超声电机驱动的隔振/调姿平台从原理上较之具有更多优势;



● 超声减摩的本质是减小接触面积或接触时间。利用超声电机定子在不同的驱动条件下既能生成行波用以摩擦驱动，也能生成驻波用以超声减摩的优势，可将两种工作模式集成于一套电机中，这在技术上是可行的；

● 由于行波和驻波采用定子的不同振动模态，因此设计分布式压电陶瓷元件以高效激发所需的模态，这在技术上是可行的；

● 超声电机启停速度控制的本质是定子表面质点运动轨迹的调控。通过建立多种供电模式下定子瞬态非线性振动方程，并将可预见到的不确定非线性因素以抽样模型方式计入方程中，期望获得控制输入与期望输出集合间的统计规律，这在理论上是有可能实现的。虽然难以得到电机启停速度按某特定曲线运动的控制输入，但得到按某类速度曲线（如加速度连续或急动度连续）运动的控制输入集合是有可能的，而在此集合中的速度曲线都能实现电机柔顺启停；

● MFAC已经被证明可用于模型明确、系统简单的电磁电机中。虽然超声电机的时变非线性较电磁电机更强，但通过控制律改进以及控制参数优化以实现超声电机的优良控制效果，理论上是成立的，技术上是可行的；

● 虽然在地面模拟失重环境进行平台的三维调姿面临很大困难，但搭建测试平台进行二维调姿是可行的，其实验结果可用以检验所提出的理论，并初步测试隔振/调姿平台的性能。美国的DFP系统地面测试采取的也是这种方案（图30）。

● 申请者及所在单位一直从事超声电机及其系统的研究，在超声电机领域获得过两项国家技术发明二等奖，集中了一批相关的专门人才，具有一定的实验设备和实验条件。这些研究成果对本项研究具有一定的参考价值。

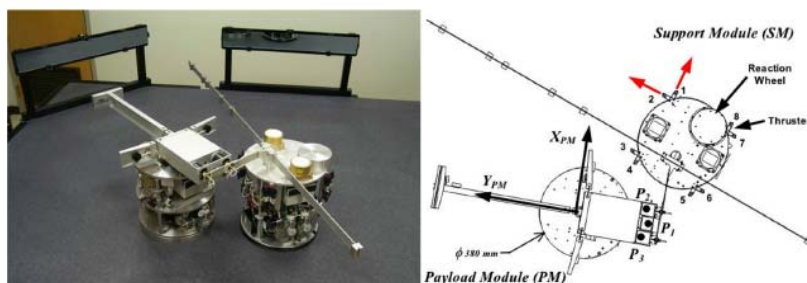


图 30 DFP 二维实验机构

综上所述，本项目已经具有扎实的前期工作基础、良好的实验条件、高素质的研究队伍。更为重要的是课题组对每项研究内容都制订了详细的技术路线，提供了高质量完成本项目的技术保障。由此可见，开展本项目的研究是切实可行的。

#### 4. 本项目的特色与创新之处；

与已有相关工作相比，本项目的特色与创新之处体现在：

- 研究的问题是新的。本项目针对的是具有更加优越性能的航天器隔振/调姿平台对超声电机提出的独特要求；
- 设计理论是新的。在同一超声电机中通过选取不同的工作模态并考虑转子动力

学模型，获得复合模式超声电机设计理论；

- 研究方法是新的。将蒙特卡罗法与超声电机非线性瞬态非线性动力学模型相结合，获得超声电机瞬态响应的不确定性建模。

## 5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

### 5.1 年度研究计划

本项目预期 2022 年 1 月-2025 年 12 月四年内完成。具体的年度研究计划及预期进展如下：

2022 年 1 月-2022 年 12 月：

进一步搜集国内外与本项目相关的最新研究成果，为本项目提供参考。考虑预压力施加系统刚度的超声电机转子受迫振动，研究超声电机定子、转子多振动体的超声减摩机理，制作样机并分别在常压和真空下测试超声减摩效果，验证理论分析结果的正确性。

2023 年 1 月-2023 年 12 月：

在超声减摩理论基础上，将超声驱动模式结合进来，建立压电元件分布式激励下多振动体机电耦合模型，获取多物理场作用下多模式超声电机输出运动的稳态动力学行为及其与输出性能之间的关系。建立压电驱动系统瞬态非线性动力学模型，仿真研究系统输入输出关系。

2024 年 1 月-2024 年 12 月：

在前述动力学模型基础上，分析振动模式、温度、摩擦材料蠕变等非线性时变因素对界面物化参数的不确定性影响，建立不确定参数的抽样概率模型，评估非线性时变因素对系统动力学行为的影响和电机瞬态输出特性的统计规律。仿真及实验研究系统输入输出关系。

2025 年 1 月-2025 年 12 月：

建立超声电机无模型自适应控制系统。制作超声电机驱动的新型隔振/调姿平台模型，在真空、高低温复合实验环境下研究在温度、真空等载荷联合作用下超声电机及平台的控制性能，通过实验验证和完善理论方法的正确性和有效性，进一步指导理论研究。撰写总结报告。

部分年度研究内容也将交叉或并行进行。

### 5.2 预期研究结果

- 阶段性研究成果将以6-10篇SCI/EI论文的形式提供；
- 申请发明专利6项以上；
- 真空、高低温环境下新型隔振平台控制演示系统一套；
- 培养研究生4-6名。

### 5.3 国际合作与交流计划

拟参加2~3次国际压电材料及其在作动器上的应用学术年会(International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators), 本项目的研究方向是其中内容之一。在“高性能压电驱动系统关键技术”学科创新基地基础上, 课题组成员近几年一直与该学术会议的发起者、压电作动器领域的著名专家有密切交流, 项目进行期间必将会有更多的合作。申请者在英国谢菲尔德大学访问期间, 与国际著名电机专家诸自强教授建立了良好的合作关系, 可就本课题涉及到的学术问题进行研讨。

## (二) 研究基础与工作条件

### 1. 研究基础(与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩);



- 申请者一直从事包括超声电机在内的新型作动器及其驱动控制技术的研  
究, 主持过国家自然科学基金项目三项, 江苏省自然科学基金项目“单定子二自由度直  
线型超声电机及其控制技术研究”, 参与国家973项目“压电精密驱动功能部件的  
基础研究(2015CB057500)”, 国家自然科学基金重点项目“压电精密致动技术  
的基础研究”和“超声电机若干关键技术的研究”。研究成果获得过国家技术发  
明二等奖和教育部技术发明一等奖(图31)。通过这些研究, 积累了丰富的工  
作经验。

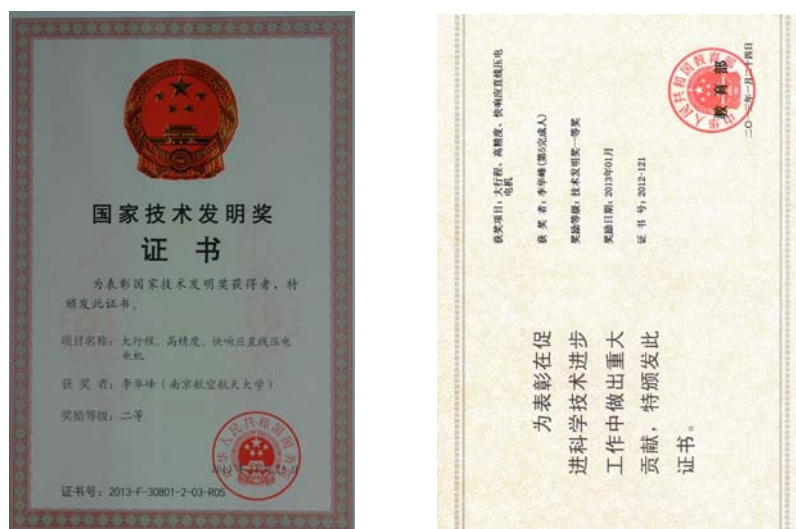


图 31 获得的科研奖励

- 申请者在国内第一个将超声电机由实验室产品成功应用于航天领域国家重大专  
项-探月工程。研制的超声电机成功用于嫦娥3号“玉兔”巡视器中有效载荷红  
外成像光谱仪定标板的开合和定位控制(图32), 使得该光谱仪只有同类航天应  
用产品重量的几十分之一。特别是由于“玉兔”机械故障使得超声电机实际存  
储温度远远低于任务书中温度的情况下, 超声电机仍能正常工作, 圆满完成了  
科研任务(图33)。通过该项目的研究, 申请者在超声电机的运行机理、构型设

计、关键材料、组装工艺和驱动控制等方面获得了全方位提升。随后研制的超声电机也成功应用于“墨子”号量子科学实验卫星、嫦娥4号和嫦娥5号探测器中（图34）。这些研究经历使得申请者无论对超声电机本体还是航天器对作动器的要求都有了深入的理解。

- 申请者将现有的PMR60型超声电机的预压力稍微调小后，当电机两相施加同相电时电机轴上的自锁力矩在某个频率点处接近于零，验证了超声电机具有附条件超声减摩效果。
- 通过给电机两相施加同频、正交但不等幅的驱动电压时，获得了转速的平滑调速且能实现极低速平稳运转，这个结果有望实现电机柔顺启停控制。
- 申请者已制作出了该隔振/调姿平台模型（图35），并初步验证了其隔振、柔顺捕获和调姿的功能。



图 32 用于“玉兔”巡视器的超声电机

回复: 南航李华峰

发件人: sunzezhou <sunzezhou@sohu.com>

收件人: lihuaf <lihuaf@nuaa.edu.cn>

日期: 2014/4/9 0:27:21

李老师，你好！

超声电机在嫦娥三号上应用的很成功。由于巡视器经历了严酷的低温考核，超声电机同样经历了长时间（每个月夜14天）低温的存储考核，目前的认识和分析认为最低温度可以达到零下150度以下。

截止目前为止，在经历了两次超低温存储后（低温时没有加电），超声电机工作正常（工作时是在正常的工作温度范围内），配合红外光谱仪完成了科学探测任务。如果有其他问题，随时跟我联系，同时也感谢

你们对嫦娥三号的贡献！

祝愉快！

孙泽洲

图33 超声电机适应极端环境证明



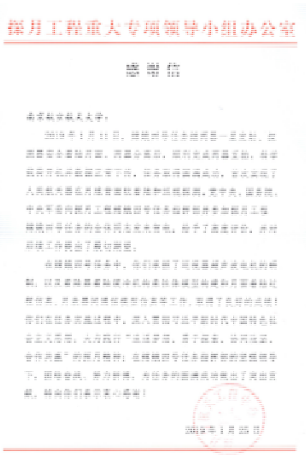
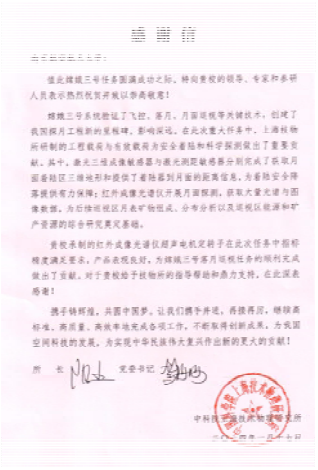


图34 超声电机应用于嫦娥系列的感谢信

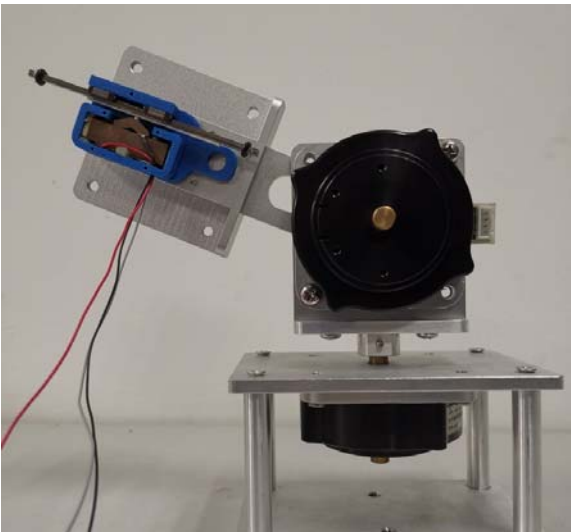


图35 隔振/调姿平台模型

- 申请者已搭建的电机特性测试平台构成图见图 36，获取的超声电机输入输出数据可用于 MFAC 算法研究中。

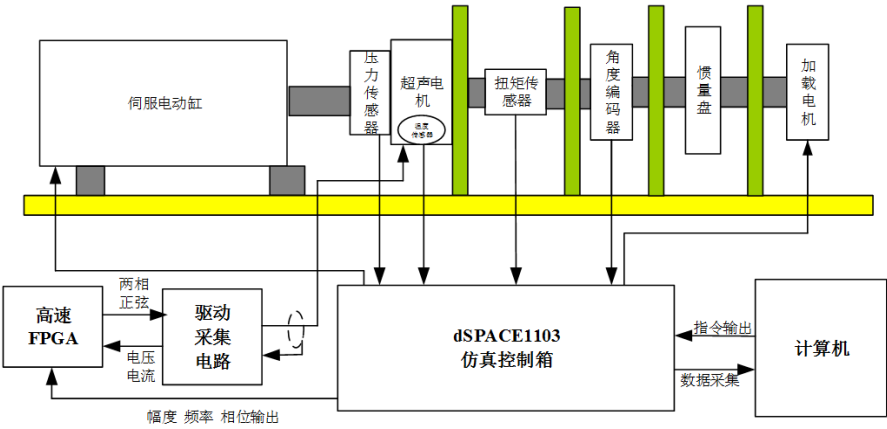


图 36 超声电机特性测试平台构成图

- 申请者已针对MFAC在超声电机中应用的可行性开展了实验工作。图37是MFAC和PID分别作用下电机跟踪方波速度指令实验结果，图38展示了MFAC作

用下控制系统输出频率和电机伪偏导数 $\Phi$ 的曲线，图39和40分别为MFAC和PID作用下变负载稳速实验结果。这些实验结果表明MFAC能够用于超声电机速度控制中，与PID相比具有控制性能好、参数调试简单、鲁棒性强的优点。

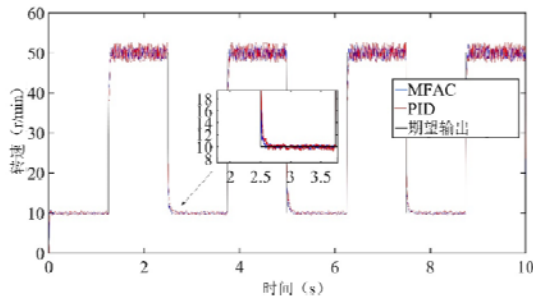


图 37 方波速度跟踪曲线

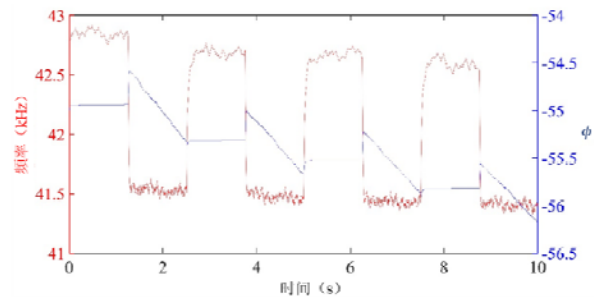


图 38 控制输入和 $\Phi$ 曲线

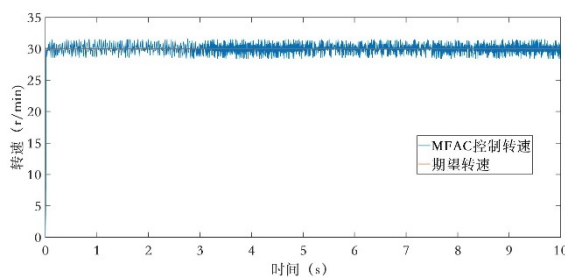


图 39 MFAC 下变负载速度跟踪曲线

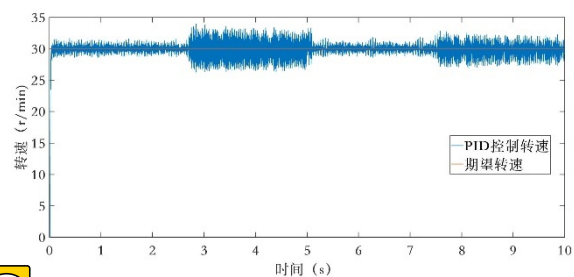


图 40 PID 作用下变负载速度跟踪曲线

2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；

南京航空航天大学精密驱动与控制研究所是压电作动器专家赵淳生院士创办的压电材料及其应用的专门科研机构，拥有专职研究人员22人，其中中科院院士1人，青年千人计划1人，教授11人。成员包括机械、材料、电子、控制及超精加工等多方面的高技术人才，知识结构全面、人才梯队合理，是国内压电材料应用领域一支技术水平较强的团队。研究所依托“高性能压电驱动系统关键技术”学科创新基地，与国际上所有著名压电驱动领域专家建立了定期交流机制。在“111”引智基地成功运行后，又与立陶宛多所著名高校签署了全球战略合作伙伴关系协议和国际合作联合实验室协议。

研究所拥有2000平方米实验室和压电材料及其作动器设计、制备、加工、测量相关的专、通用设备价值2000余万元。

与本项目相关的主要设备有：

- (1) 真空高低温空间环模试验设备（ $-80^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ ， $1\times 10^{-3}\text{Pa}$ ）；
- (2) CH250C 高/低温试验箱（ $-70^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ ）；
- (3) TSP025 高真空试验箱；
- (4) dSPACE 电机实时仿真系统；
- (5) 电机测功机系统；
- (6) 高精度的数控车床、铣床、研磨床等机械加工设备；

- (7) Polytec PVS—500 三维多谱勒激光测振仪;
- (8) Polytec PVS—300F 二维多谱勒激光测振仪;
- (9) 十万级洁净房, 气浮平台;
- (10) HP4294 阻抗分析仪;
- (11) VW-6000E 高速动态显微影像解析系统;
- (12) XL-80 激光干涉仪 (分辨率: 1nm);
- (13) KEYENCE 激光小位移测量系统 (分辨率: 0.1 $\mu$ m);
- (14) MTI MicrotrackII 激光微位移测量系统 (分辨率: 0.1 $\mu$ m);
- (15) 信号发生器、功率放大器等通用设备若干。

综上所述, 本项目所需的实验设备以及计算机软、硬件条件已完全具备。

3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况 (申请人和项目组主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况, 包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目, 要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等);

无。

4. 完成国家自然科学基金项目情况 (对申请人负责的前一个已结题科学基金项目 (项目名称及批准号) 完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要 (限 500 字) 和相关成果的详细目录)。

**项目名称:** 基于 MFC 的各向异性柔性仿生鱼尾研究

**批准号:** 51175250

**完成情况:** 该项目已于 2015 年底顺利结题。目前针对其驱动控制的小型化正在进行相关工作。该项目与本申请项目无直接关系, 但其研究经验和 MFC 的驱动控制可应用于本项目中。该项目培养博士后 1 人, 博士 2 人, 硕士 9 人。

**总结摘要:**

区别于电磁电机驱动的多关节仿生鱼, 本课题以 MFC 为柔性驱动材料, 并运用多种振动模态实现了鱼尾多种运动, 具有结构简单、质量轻、运动模式多样等优点, 为仿生鱼的研究探索出一条可行路径。

- 提出了一种以 MFC 及各向异性材料为基体, 以摆动模式为推进模式的仿鲛鱼尾, 研究了复合材料性能对鱼尾摆动幅值的影响。制备出了符合要求的两种玻璃纤维增强型复合材料, 成功实现仿鲛鱼尾的推动应用。
- 提出了一种采用扭转推进模式的变截面尾鳍柔性仿生鱼尾, 利用解析与数值方法研究了尾鳍的振动特性, 分析了柔性变截面尾鳍的固有频率与结构尺寸之间的关系, 系统地研究了鱼尾在空气和水中的扭转特性。通过分析鱼尾在一个运



动周期内的水动力性能，探明了扭动模式鱼尾产生推力的机理。最终成功实现了扭转模式的柔性仿生鱼尾的应用。

- 提出了一种采用波动推进模式的仿金枪鱼尾的设计方案。以兰杰文振子的放大原理为基础设计了变截面鱼尾结构；根据波从波密媒介向波疏媒介传播无半波损失的特点，实现了由多种不同性能复合材料构成鱼尾的行波波动运动；依据阻尼吸收能量方法，探讨了材料的不同阻尼系数对鱼尾的波动运动的影响，仿真实现了基于振动原理的仿金枪鱼尾的波动运动。

#### 成果目录：

- [1] Yuan-Lin Guan, Hua-Feng Li, Xi-Xin Yang, etc. Numerical simulation and experimental research of a flexible caudal fin by piezoelectric fiber composite. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(7): 1-13.
- [2] 官源林, 李华峰, 杨熙鑫, 等. 弹性模量对柔性仿生鱼尾振动行为的影响. *振动. 测试与诊断*, 2105, 01: 12~16+183.
- [3] Zhang Benfeng, Li Huafeng, Li Sunan. MULTI-CHANNEL ADJUSTABLE DC POWER SUPPLY WITH SINGLE TRANSFORMER BASED ON SPECTRAL SEPARATION. *Journal of Electrical Engineering*, 2014, 65(1): 50~54.
- [4] Yuan-lin GUAN, Hua-feng LI, Xi-xin YANG. A Compound Biomimetic Robot by piezoelectric Fiber Composite. *The 11th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators & The 9th Energy Harvesting Workshop*, 2014.
- [5] Si-si DI, Hua-feng LI, Yuan-lin GUAN. Modeling and Characterization of Artificial Caudal Fin Using Macro Fiber Composite on Biomimetic Fish. *The 11th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators & The 9th Energy Harvesting Workshop*, 2014.
- [6] 官源林, 李华峰, 杨熙鑫. 基于MFC的复合型仿生鱼尾的振动性能. *振动. 测试与诊断*, 2013, S2: 165~168.
- [7] 官源林, 李华峰, 杨熙鑫. 基于MFC的复合型仿生鱼尾的振动性能. *振动. 测试与诊断*, 2013, 33(157): 165~168.
- [8] 张本锋, 李华峰, 李苏楠. Research on Multi-channel Adjustable DC Power Supply with Single Transformer. *Advanced materials research*, 2013, 816: 717~722.
- [9] 张本锋, 李华峰, 李苏楠. 用于MFC驱动的双极性任意波形驱动器设计. *科学技术与工程*, 2013, 13: 3723-3727.
- [10] 张本锋, 李华峰, 狄思思. 基于PSoC3的MFC驱动系统. *振动. 测试与诊断*, 2013, 33(157): 169~173.
- [11] 张本锋, 李华峰, 官源林. 基于嵌入式芯片的MFC驱动系统研究. *第十七届中国小电机技术研讨会*, 2012.
- [12] 张本锋, 李华峰. 基于PSoC3的MFC驱动系统研究. *The Fifth Conference on Vibration Utilizing Engineering in China*, 2012: 136~140.
- [13] 官源林, 徐志伟, 李华峰. Design of a Biomimetic Fish Caudal Drive via Macro Fiber Composite. *Symposium on Piezoelectricity. Acoustic Waves, and Device Applications*, 2011: 123~125.
- [14] 李华峰, 官源林, 夏孝云, 等. 一种新型仿生鱼尾结构, 中华人民共和国, CN201210578963.0, 2013/4/17
- [15] 李华峰, 狄思思, 官源林. 主动变刚度振动板复合结构, 中华人民共和国,



- CN201210566232.4,2013/4/17
- [16]李华峰,张本锋,夏孝云.一种多通道可调直流电源,中华人民共和国,CN201310063986.22013/6/19.
- [17]李华峰,狄思思,官源林.植入励磁线圈并具磁记忆功能的磁流变弹性体及制备方法,中华人民共和国,CN201210566147.8,2013/4/17.
- [18]李华峰.一种用于压电作动器的驱动器中的谐振装置,中华人民共和国,201110037915.6,2013/6/19
- [19]李华峰,胡俊辉.一种可控电抗器,中华人民共和国,CN201210249703.9,2012/12/5.
- [20]李华峰.用于压电作动器的驱动器的可控电感装置,中华人民共和国,CN201110314413.3,2012/2/22.
- [21]赵淳生,姚志远,时运来,金家楣,李华峰,黄卫清.大行程、高精度、快响应直线压电电机,中华人民共和国奖励办,中华人民共和国科技部,发明,国家二等奖,2013/12/26.
- [22]赵淳生,姚志远,时运来,金家楣,李华峰,黄卫清.大行程、高精度、快响应直线压电电机,中华人民共和国教育部,发明,省部一等奖,2013/1/24.

### (三) 其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况(列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息,并说明与本项目之间的区别与联系)。

无。

2. 具有高级专业技术职务(职称)的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况;如存在上述情况,列明所涉及人员的姓名,申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者,并说明单位不一致原因。

无。

3. 具有高级专业技术职务(职称)的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况;如存在上述情况,列明所涉及人员的姓名,正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月,并说明单位不一致原因。

无。

4. 其他。

无。