

DOI: 10.3901/JME.2023.17.189

永磁悬浮技术的实现机理与发展现状^{*}

赵川¹ 孙凤¹ 裴文哲¹ 金俊杰¹ 徐方超¹ OKA Koichi²
于溯源³

- (1. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870;
2. 高知工科大学系统工学部 高知日本 7828502;
3. 清华大学能源与动力工程系 北京 100084)

摘要: 永磁悬浮技术利用磁体与磁体或铁磁体之间力的作用实现无接触支撑, 具有无摩擦、低能耗等显著特点。随着稀土永磁材料的发展, 具有高剩磁、高矫顽力、高磁能积的永磁体大幅提高了系统的承载性能, 国内外学者相继开展了永磁悬浮技术的研究工作。我国的稀土储量居世界首位, 发展永磁悬浮技术具有天然优势和重要意义。首先, 明晰了永磁悬浮技术的机理和特点; 其次, 系统性回顾了永磁被动悬浮和永磁主动悬浮技术的发展历史, 并重点阐述了气隙调节式、磁阻调制式、磁源调整式三种永磁主动悬浮系统的磁路结构、悬浮特性及研究现状; 再次, 分析了磁路设计与优化、磁力精确建模、系统性能与控制方法等技术难点, 并提出相应的解决策略; 最后, 展望了永磁悬浮技术在重力补偿器、轻载微型轴承、低频隔振等领域的未来应用前景及发展趋势。

关键词: 永磁悬浮; 磁路设计; 机理; 发展; 综述

中图分类号: T1

Realization Mechanism and Development of Permanent Magnetic Levitation: A Review

ZHAO Chuan¹ SUN Feng¹ PEI Wenzhe¹ JIN Junjie¹ XU Fangchao¹ OKA Koichi²
YU Suyuan³

- (1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870;
2. Institute of System Engineering, Kochi University of Technology, Kochi, Japan 7828502;
3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Permanent magnetic levitation technology uses the force between magnet and magnet or ferromagnet to achieve contactless support, which has the outstanding characteristics of no friction and low energy consumption. With the development of rare earth permanent magnet materials, the high remanence, high coercivity and high magnetic energy product improve the load-bearing performance of the permanent magnetic levitation system, which causes scholars have carried out many researches. China has the most reserves of rare earth resources in the world, and the development of permanent magnetic levitation technology has natural advantages and great significance. First of all, the mechanism and characteristics of permanent magnetic levitation technology are clarified. Secondly, the development history of passive levitation and active levitation is systematically reviewed. The magnetic circuit structure, levitation characteristics, and research status of three kinds of permanent magnet active levitation with air gap adjustment, magnetoresistive modulation and magnetic source regulation are described in detail. Thirdly, the technical difficulties such as magnetic circuit design and optimization, magnetic force accurate modeling, performance and control methods are analyzed, and the corresponding solutions are presented. Finally, the future application prospect and development trend of permanent magnetic

^{*} 国家自然科学基金(52005345, 52005344)、国家重点研发计划(2020YFC2006701)、辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC1905003)、辽宁省教育厅项目(LFGD2020002, LJGD 2019011)和辽宁省重点实验室建设项目(2020JH6/10500048)资助项目。20220308收到初稿, 20230301收到修改稿

levitation technology in gravity compensator, light load micro bearing, low frequency vibration isolation and other fields are prospected.

Key words: permanent magnetic levitation; magnetic circuit design; mechanism; development; review

0 前言

磁悬浮是指通过控制磁力以平衡重力,从而实现目标物在空间中稳定悬浮。以磁场作为媒介,磁体与悬浮目标物之间不存在物理范畴的接触就能产生力的作用,这种非接触支撑方式是磁悬浮技术的特点。磁悬浮技术归属于机电一体化领域,利用电力电子技术、控制理论、计算机技术等为机械构件赋予了无摩擦、无需润滑、清洁无污染等优点。同时,结合传感技术与主动控制赋予了机械系统智能化特征,具有广阔的应用前景,对我国高新技术产业发展具有深远的意义。

在磁悬浮系统中,根据磁力与磁场方向关系可以将磁力分为两种类型:洛伦兹力与磁阻力两种类型^[1]。根据 LORENTZ H A 所提出的洛伦兹力方程,带电粒子 q 在磁场中以速度 \mathbf{v} 运动时,受到的作用力如式(1)所示。宏观考虑时往往忽略电场分量作用,并以电流代替点电荷的移动,因此洛伦兹力可进一步表示为式(2)。洛伦兹力方向与磁场方向垂直,力的大小与电流成正比,并且与气隙无关。采用洛伦兹力的磁悬浮系统又被称为电动磁悬浮,其特点是磁体与定子线圈之间保持相对高速运动,从而在线圈内产生感应电流或在导体板表面产生涡流,通过排斥力实现悬浮。电动磁悬浮技术多应用于磁悬浮列车,如日本的低温超导电动磁悬浮列车 L0 和美国的永磁电动磁悬浮列车 Magplane 等。

$$\mathbf{f}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_L = i \times \mathbf{B} \quad (2)$$

式中, \mathbf{f}_L 为洛伦兹力; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁感应强度; i 为宏观电流。

应用磁阻力的磁悬浮系统中,悬浮气隙长度的变化源于磁能转变为机械能,从而使悬浮物体运动。磁阻力模型可以通过虚功原理求解,如式(3)所示。磁场能量为其能量密度在空间中的积分,其能量密度与磁场强度和介质相对磁导率 μ_r 相关。介质的磁导率越大,在其表面产生的磁阻力越大,并且磁阻力的方向垂直于介质的表面。

$$\mathbf{f}_R = \partial W / \partial \delta \quad (3)$$

式中, \mathbf{f}_R 为磁阻力; W 为磁场能量; δ 为工作气隙长度。

根据系统磁源类型(永磁体、电磁体)和悬浮物体的相对磁导率(铁磁性、抗磁性),磁阻力悬浮技术可分为图 1 所示主要类型^[2-3]。超导磁悬浮基于超导体的 Meissner-Ochsenfeld 效应。将处于超导态的超导体置于磁场中时,磁力线不能穿透超导体,表现出完全抗磁性,从而使超导体和外磁场之间产生斥力作用实现悬浮。抗磁悬浮技术则是利用材料自身的抗磁性,实现在磁场中稳定悬浮。这两种磁悬浮技术都具备自稳定特性,因此不需要主动控制介入,但超导磁悬浮需要提供特殊温度环境以维持材料的超导态。关于超导磁悬浮和抗磁悬浮的原理与研究进展可通过文献[4-7]详细了解。应用铁磁性材料的磁悬浮系统承载力较大,并且无特殊环境温度要求,在磁悬浮技术领域内研究较为广泛。部分电磁悬浮技术已实现产品应用,如常导磁悬浮列车^[8-9]、电磁悬浮轴承^[10-11]、磁悬浮左心室辅助装置^[12]以及应用磁轴承的透平机械^[13]等。

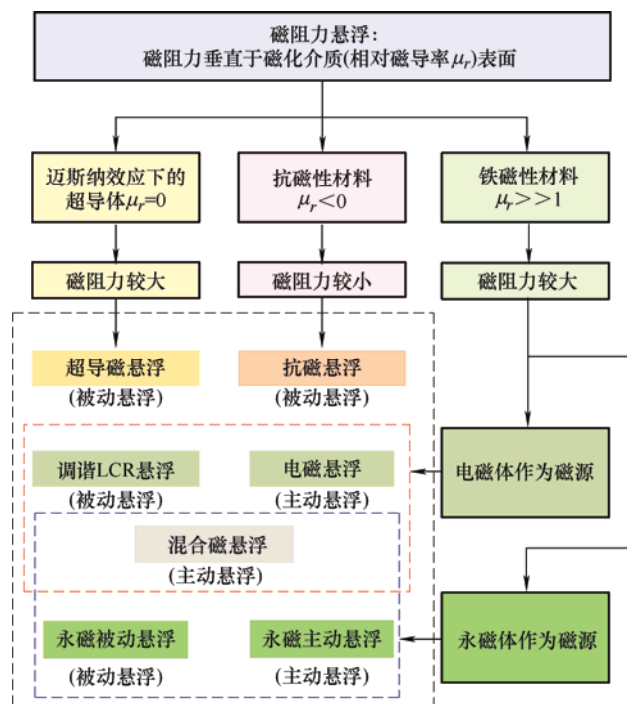


图 1 磁阻力悬浮技术分类

永磁悬浮技术主要应用如图 2 所示,该技术自 1976 年出现至今,前期研究集中在悬浮原理方面,代表性产品如磁悬浮陀螺等工艺品和磁力玩具。随着磁性材料研究的深入特别是稀土永磁材料的发展,永磁体的磁能积和矫顽力不断提高,永磁悬浮技术的优势逐渐凸显,如永磁被动悬浮轴承以及重

力补偿装置等。2021 年 11 月, 苏州同心医疗的第三代植入式全磁悬浮左心室辅助系统获批上市, 该产品应用永磁被动悬浮轴承实现无接触支撑。2022 年 8 月, 江西理工大学牵头的世界首条稀土永磁磁悬浮轨道交通工程实验线顺利建成, 实现永磁悬浮技术与空轨技术的有效结合。

由于单位体积磁体承载刚度大, 结构简单, 能耗低等特点, 永磁悬浮技术的理论与应用研究得到进一步发展。磁悬浮科技工作者提出采用主动反馈控制同样可以实现永磁悬浮, 利用作动器调节气隙磁通, 结合反馈控制可维持悬浮气隙恒定, 对永磁主动悬浮技术的机理开展了大量研究。永磁主动悬浮技术同样具有工业应用的潜力, 如磁悬浮传送车、永磁式隔振器等, 但其具体应用对系统结构设计、作动器选型、控制策略选择等提出的需求也不同, 对应的研发周期相对较长。永磁主动悬浮系统中作动器的定位精度工作频率是其性能提升的主要限制因素, 如何避免永磁体与铁磁性悬浮目标的接触吸附也是永磁悬浮进一步工业应用需解决的难题。

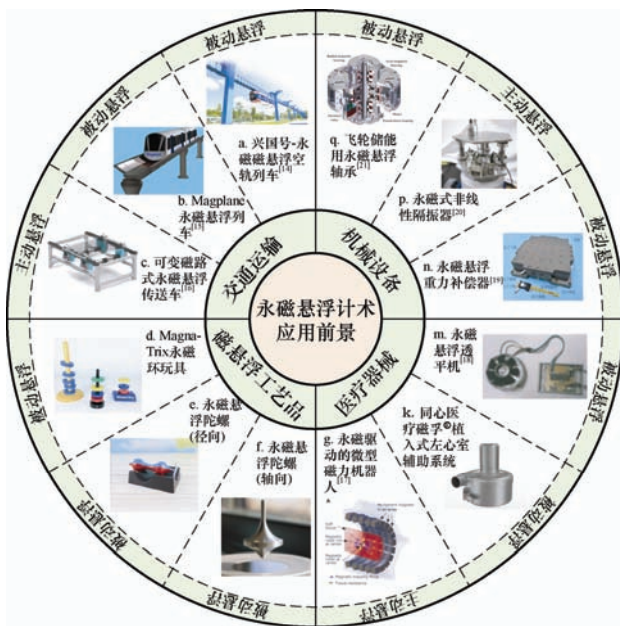


图2 永磁悬浮技术应用及其前景^[14-21]

本文首先明晰了永磁悬浮技术的工作原理与技术特点, 进一步对国内外相关研究工作进行详细综述, 比较了永磁被动悬浮与永磁主动悬浮的技术特点, 深入探究了气隙调节式、磁阻调制式、磁源调整式三种永磁主动悬浮技术的原理与特点, 分析了永磁悬浮工程化存在的技术难点, 最后对永磁悬浮技术的发展趋势与应用前景进行了展望。

1 永磁悬浮技术特点

永磁悬浮是依靠永磁体之间或永磁体与铁磁性材料之间的作用力实现悬浮的技术。EARNSHAW定理在磁场的推论表明, 具有平方反比定理的静磁场无法实现静态目标物的稳定悬浮^[22-23]。因此, 永磁悬浮技术具有“动”的本质, 即变化的磁场或运动的目标物是稳定悬浮的前提。根据是否需要主动控制的介入, 将永磁悬浮系统分为被动式永磁悬浮和主动式永磁悬浮两种类型。永磁被动悬浮利用永磁体之间的排斥作用实现悬浮, 其机理是旋转的物体的平衡位置处于其重力场和磁场的势能阱中时, 自身具有最小势能从而保持稳定悬浮。永磁主动悬浮通过控制磁体运动或调节有效磁通量实现稳定悬浮, 以气隙调整式永磁主动悬浮为例, 系统的基本组成如图3所示。当悬浮目标偏离参考平衡位置, 控制系统接收传感器反馈的误差信号, 并输出控制信号给驱动器系统, 作动器产生相应动作从而增大磁力或减小磁力, 从而使悬浮目标恢复至平衡位置。

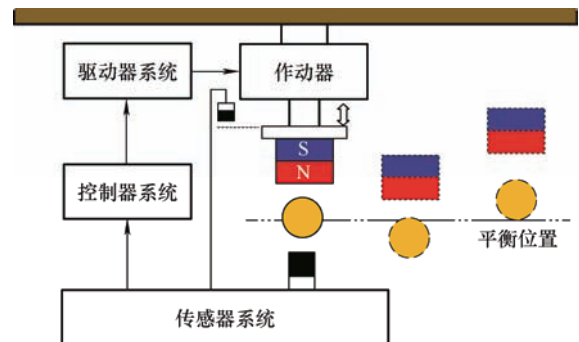


图3 永磁悬浮技术工作原理图(气隙调节式)

比较永磁主动悬浮技术与电磁悬浮技术的特点, 后者可视为通过调节电流改变磁路中的磁动势, 而前者由于永磁体固有磁能积的特点, 只能通过改变磁路的方式控制磁力的大小。电磁悬浮系统中磁力可用式(4)简化表示, 永磁悬浮系统的磁力模型可以用式(5)表示

$$f_{\text{EMS}} = k \frac{i^2}{(\delta + a)^2} \quad (4)$$

$$f_{\text{PMS}} = k \frac{B^2}{(\delta + a)^2} \quad (5)$$

式中, f_{EMS} 和 f_{PMS} 分别为电磁悬浮系统和永磁悬浮系统的磁力; k 为悬浮力系数, 表示磁路结构参数对磁力的影响; i 为电磁铁线圈的电流; δ 为磁铁与悬浮物体之间的气隙长度; a 表示磁路结构对磁力

的限制作用, 气隙为零时, 磁力不能为无穷大。

对永磁悬浮系统而言, 磁力大小与磁路结构和气隙长度相关。因此, 实现磁力调节有变气隙式与变磁阻式两种类型, 这两种方式能够提供在一定范围内变化的磁力, 当气隙过小时容易出现吸附问题, 系统无法自动调节恢复平衡。通过磁路的特殊设计以实现变磁动势永磁悬浮, 这种方式可以产生零悬浮力, 有效避免永磁悬浮系统中气隙过小产生接触吸附的固有弊端。

2 永磁悬浮技术发展现状

2.1 永磁被动悬浮

永磁悬浮技术的真正起源可追溯至 1976 年, 磁学爱好者 HARRIGAN 发现旋转磁体可以在磁场中悬浮^[24]。经过多次实验验证, 他申请了这项成果的专利, 该专利阐述了永磁悬浮陀螺的实现方法: 磁悬浮陀螺的原理如图 4 所示, 悬浮陀螺底部和底座均安装有永磁环, 两个磁环同极相对。首先将旋转状态的陀螺置于辅助铝板之上, 并缓慢抬起, 远离底座上的永磁体, 达到某一高度时, 旋转陀螺会处于一种“漂浮”的旋转状态并可以持续一定时间。然而, 由于相应的理论技术发展水平有限, 同时这种被动悬浮的方式实现困难, 往往需要多次尝试才能悬浮, 未能吸引科研人员的研究兴趣。

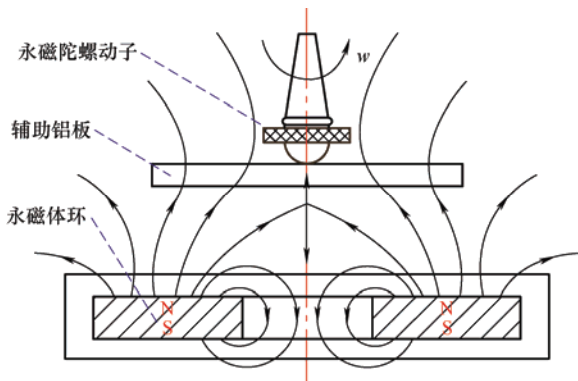


图 4 永磁悬浮陀螺磁通示意图

1995 年, HONES 父子将这项技术应用到玩具上, 创办了莱维托公司, 开发出一系列永磁悬浮陀螺产品^[25], 图 5 为该公司在售的一款永磁悬浮陀螺玩具。JONES 等^[26]对永磁悬浮陀螺进行深入研究, 分析了磁场分布对陀螺稳定性的影响, 测试了悬浮陀螺稳定悬浮范围。实验结果表明该陀螺的悬浮高度范围为 $[36.5 \text{ mm}, 39.5 \text{ mm}]$, 并且陀螺的质量误差不超过 1%。GENTA 等指出陀螺效应是永磁被动悬浮的另一个关键因素, 文献^[27]中建立了磁悬浮陀螺的动力学模型, 并进一步证明陀螺的转速范围

满足 $[98 \text{ rad/s}, 235 \text{ rad/s}]$ 时才能实现稳定悬浮。



图 5 永磁悬浮陀螺玩具

随着对永磁陀螺的悬浮机理研究的逐渐深入, KIM 等^[28]提出两种新的悬浮方案, 即在底座永磁环内放置一块轴向充磁的圆柱形永磁体。如图 6a 所示, 永磁环为悬浮磁体提供吸引力, 底部圆柱形磁体提供排斥力; 图 6b 中永磁环为悬浮磁体提供排斥力, 而底部磁体则提供吸引力。根据空间磁场分布情况, KIM 等人指出方案一中悬浮磁体在轴向具有最小磁能点, 磁体竖直方向发生偏移时, 磁场产生自回复力使其保持平衡。而方案二中悬浮磁体会受到径向自回复力作用, 当该系统由竖直布置方式改为水平布置时, 也具有实现稳定悬浮的潜力。

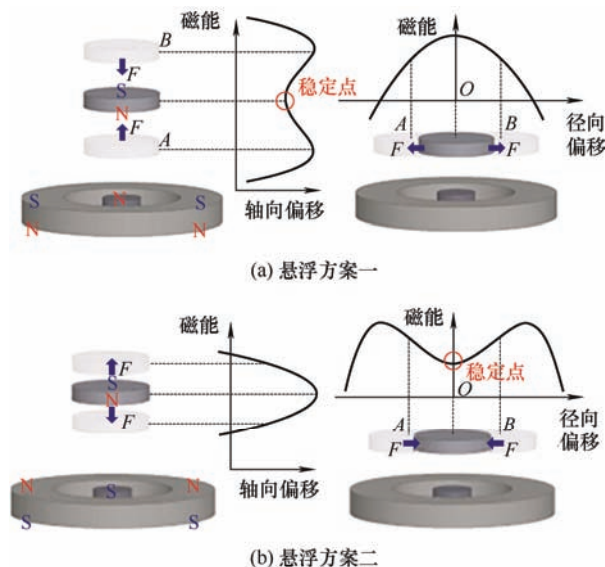


图 6 KIM 等提出的两种永磁悬浮方案

AZUKIZAWA 等^[29]采用等效电流法建立了磁悬浮陀螺磁场模型, 有效预测了陀螺动子稳定悬浮区间, 并分析了斥力式永磁被动悬浮应用于轴承的可行性。钱坤喜等^[30-31]设计了一种永磁悬浮轴承, 并分别应用于小型透平样机和离心式心脏泵样机, 图 7 为采用永磁悬浮轴承的透平机。当转子达到临界转速(实验中透平机为 $1\ 800 \text{ r/min}$, 心脏泵为 $3\ 250 \text{ r/min}$)后, 永磁悬浮轴承可以实现稳定的悬浮。上海大学张钢等^[32-33]设计了一种五自由度全永磁轴

承, 其结构如图 8 所示。该轴承由六个永磁环组成一对径向轴承和一对轴向推力轴承。张钢等应用等效磁荷理论建立了永磁轴承的磁力模型, 并通过蒙特卡洛算法求解四重积分, 进一步分析了转子参数与悬浮所需临界转速的关系。

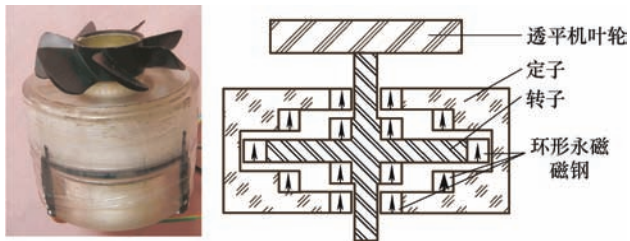


图 7 永磁悬浮透平机(实验样机与结构示意图)

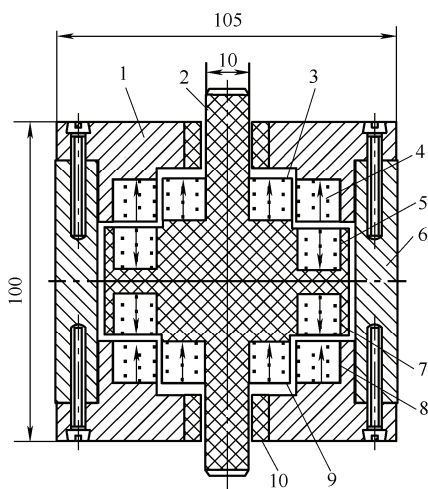


图 8 张钢等提出的五自由度全永磁轴承-转子系统^[32]

1. 座圈 2. 转子 3. 径向上动永磁环 4. 上端静永磁环
5. 轴向上动永磁环 6. 隔圈 7. 轴向下动永磁环 8. 下端静永磁环
9. 径向向下动永磁环 10. 保护轴承

利用陀螺效应实现永磁轴承悬浮必须满足临界转速条件, 转子处于启停阶段时可能会存在碰磨问题, 因此部分学者提出仅利用永磁体的斥力提供轴向或径向的被动支撑。MUKHOPADHYAS 等^[34]开发了一套基于永磁径向支撑和电磁轴向支撑的混合悬浮轴承系统, 在低转速(800 r/min)下转子的径向精度约为 $20\ \mu\text{m}$ 。RODRIGUEZ 等^[35]设计了一种用于 12 kW 风力发电机顶端承载的永磁径向轴承样机, 通过动态测试分析了轴承-转子系统的特性。由于永磁轴承的支承刚度较低, 采用单对磁环和双对磁环的实验结果表明转子的一阶固有频率分别出现在 1 300 r/min 和 1 700 r/min 附近。该实验样机的最大承载仅为 120 N, 需要提高轴承的结构尺寸以实现至少 2 kN 的承载能力。

清华大学李奕良等^[36]设计了一种永磁推力轴承, 在工作气隙 1.5 mm 时, 轴向承载力可达 860 N,

应用于储能飞轮系统提供轴向卸载。针对单因素变量法在永磁轴承的结构优化中的缺陷, 汤双清等^[37]提出采用遗传算法理论的多目标优化方法。基于所建立的永磁轴承径向力模型和径向力密度为目标函数的优化模型, 应用智能算法求解出最优结构尺寸比例, 可确定轴承的结构参数。张锦光等^[38]提出一种轴向磁环叠加的永磁轴承方案, 置于小型风力发电机转子前端承受主要径向载荷, 后端采用滚动轴承作为保护。与传统风力发电机相比, 启动阻力矩和功率损耗降低明显, 在低风速条件下能够启动运行。LI 等^[39]设计了应用于高速电主轴的径向永磁悬浮轴承, 改善了转子系统的振动特性, 提高其旋转精度和稳定性。

在满足刚度要求的条件下, 轴承安装空间有限时, 通过改变磁体分布方式, 能有效提高其承载特性。MARTH 等^[40-41]设计了一种连续 Halbach 排列的永磁轴承, 通过分析磁体截面尺寸和排布方式对系统刚度的影响, 指出在永磁体结构尺寸参数相同的条件下, 连续 Halbach 阵列永磁轴承的最大刚度提升近一倍(与 180° 离散型 Halbach 阵列相比), 如图 9 和图 10 所示, 图中 b 和 l 为永磁环的厚度和高度, h 为气隙长度。受到充磁技术的限制, 目前这种连续 Halbach 永磁轴承尚停留在理论研究阶段。

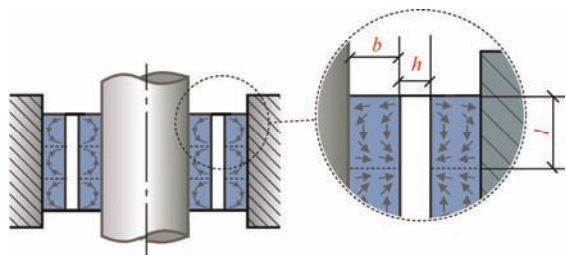


图 9 连续 Halbach 永磁悬浮轴承

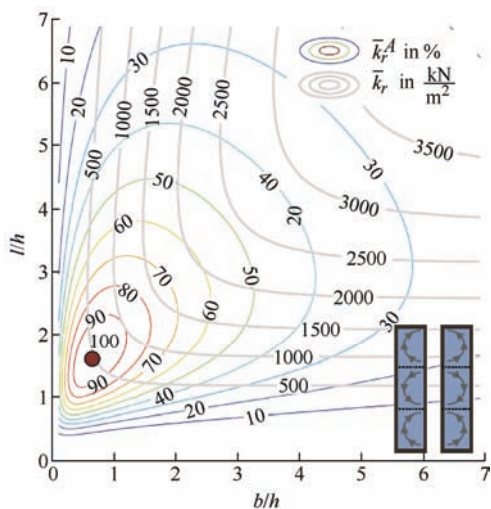


图 10 Halbach 永磁体截面尺寸与轴承刚度关系^[40]

OHJI 等^[42]提出了基于永磁轴承托辊单元的物料输送系统,其工作原理如下:利用永磁环间的斥力作用实现托辊被动悬浮,向垂直安装的两组电磁铁施加不同相位的正弦激励信号,可实现托辊转子的回转运动。胡坤等^[43]研制了应用于永磁斥力型带式传送样机,如图 11 所示。通过磁性输送带与定子磁体的斥力实现悬浮传送,该装置避免了传统托辊结构传送过程中的摩擦生热问题,主要用于煤炭的长距离输送。通过探究永磁铁与磁性输送带间的悬浮气隙对悬浮特性的影响,得出气隙与磁通密度的近似关系。通过对比分析,槽型磁性输送带悬浮稳定性优于其他形状,设计了一种防跑偏装置进一步提高支撑系统的稳定性^[44]。王爽等通过理论计算与仿真建立了系统的磁力模型,并分析了输送带上压力分布对气隙的影响,随着气隙长度减小,悬浮系统承载能力变大,其支撑刚度逐渐增大^[45-46]。

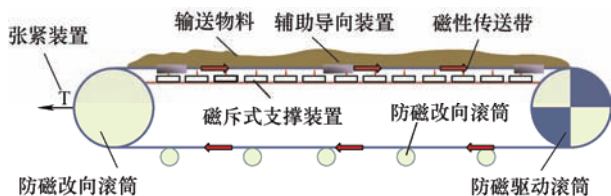


图 11 永磁悬浮带式输送机结构示意图^[45]

永磁被动悬浮的上述研究表明,利用陀螺效应实现悬浮只能抵抗很小外部扰动。当悬浮目标位于稳定区域外或低于临界转速,系统将失去稳定,难以实现工程化应用。但是,永磁悬浮陀螺的出现对磁悬浮技术的发展具有重要的研究意义。基于这种原理的磁悬浮商业产品被开发出来,如磁悬浮地球仪,磁悬浮花盆,磁悬浮台灯等,都是利用永磁体之间的斥力作用提供被动支撑,通过电磁线圈和反馈调节实现主动控制,悬浮物体不需要旋转运动也可以实现悬浮^[47],图 12 为深磁科技公司的磁悬浮地球仪。



图 12 深磁科技公司的磁悬浮地球仪

2.2 气隙调节式永磁主动悬浮

东京大学 TOSHIRO 和 OKA 最早进行永磁主动悬浮装置研究,采用压电驱动器调节悬浮物与永磁

体之间的气隙实现了对悬浮物重力的补偿^[48]。1995 年,OKA 等提出一种气隙调节式永磁悬浮系统,并采用三个音圈电机驱动永磁体实现了铁质圆盘的悬浮^[49]。1999 年 OKA 等^[50]提出一种应用于无接触传送的悬挂式磁悬浮装置,如图 13 所示,铁质导轨作为固定在装置上方,悬挂系统由永磁体、压电驱动器、电涡流位移传感器等组成。实验中的压电驱动器采用两个杠杆机构将压电元件的运动放大 14 倍,其最大位移为 500 μm 。MORITA 等^[51]采用压电驱动实现铁质小球悬浮,悬浮小球直径 2 mm,其质量仅为 32.8 mg。由于压电驱动的行程较小,并且时滞的缺点,这限制了悬浮系统的承载能力和动态响应。

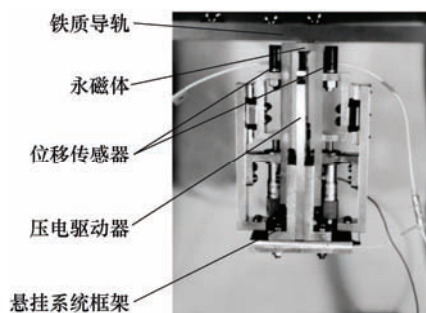


图 13 基于压电驱动的变气隙式永磁悬浮系统

上述系统中,作动器的动子与永磁体相连,悬浮物体对磁体的作用力传递至作动器的动子,因此系统需要电流输入维持悬浮,长时间运行情况下系统功耗较大。孙凤等^[52-53]采用基于音圈电机和弹簧的组合执行器,如图 14 所示,极大提高了永磁悬浮系统的悬浮范围和响应特性。弹簧克服音圈电机动子和悬浮物体重量,在平衡位置时音圈电机的线圈输入电流为零,结合电流积分反馈控制策略实现零功率悬浮。

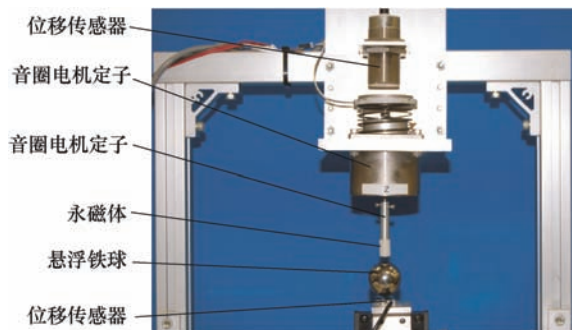


图 14 零功率永磁悬浮实验装置

OKA 和孙凤等还提出一种永磁悬浮非接触回转驱动系统,其原理如图 15 所示,在竖直方向采用变气隙方式实现铁质小球的悬浮,小球稳定悬浮面内布置了四个沿直径方向充磁的盘式永磁体^[54]。

该悬浮小球存在表面剩磁, 当以伺服电机驱动盘式磁铁旋转时, 磁场耦合作用使小球在其悬浮平面内做回转运动。文献[55]对该系统的回转驱动特性进行研究, 实验表明其输入转速与输出转速呈线性关系, 驱动铁球的盘式永磁体数目越多, 系统的响应特性更好, 但磁铁数量增多也限制了小球的极限转速。采用两个磁铁驱动时, 其极限转速可达到 150 r/min, 当采用四个永磁体时, 其极限转速只能达到 120 r/min。

上述采用变气隙式原理的永磁悬浮系统中, 铁质小球在水平方向依赖磁体的吸引力实现自动复位, 抗扰能力差。为解决这一问题, OKA 等提出一种采用双磁体摆动调节的变气隙式永磁悬浮系统, 如图 16 所示^[56]。当悬浮小球受到竖直方向扰动时, 可同步调节永磁体角度, 当小球受到水平方向扰动时, 可调节单侧磁体摆动角度, 实现铁质小球的二自由度悬浮。磁体角度在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 范围时, 磁力随着角度的增大而减小, 并且呈近似线性关系。

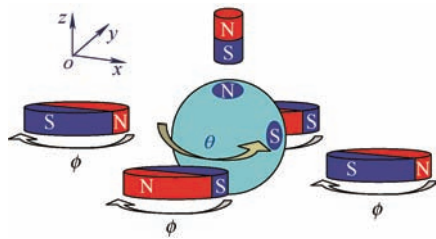


图 15 永磁悬浮非接触回转驱动系统

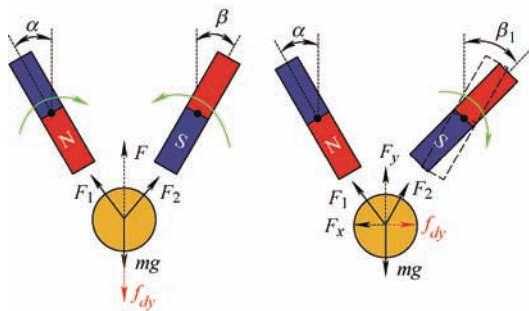
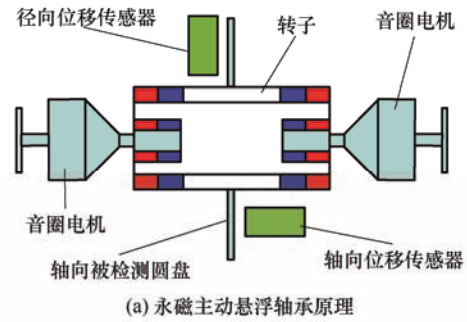
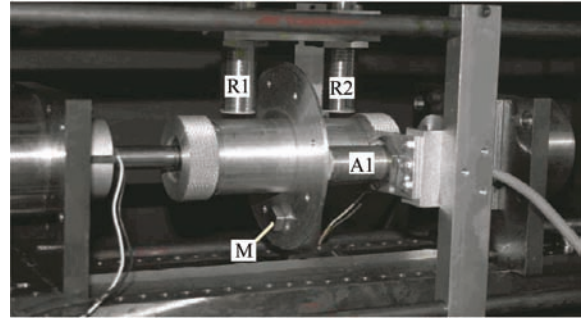


图 16 双磁体摆动式永磁悬浮装置原理

水野毅等^[57-58]研制了一种气隙调节式永磁悬浮轴承, 如图 17 所示, 两个直径不同的磁环均为轴向充磁, 小磁环嵌套在大磁环内部, 通过音圈电机主动控制小磁环的轴向位置调节悬浮力的大小, 实现转子的悬浮和可变径向刚度。山东大学关勇等^[59]提出了一种轴流式人工心脏泵, 采用两个径向永磁轴承为叶轮转子提供被动支撑, 轴向电磁轴承用于转子轴向运动的主动控制。由于径向永磁轴承的定子磁环与转子磁环在轴向的干扰, 李红伟等进一步分析了磁场耦合对轴向运动的影响^[60]。



(a) 永磁主动悬浮轴承原理



(b) 永磁主动悬浮轴承样机

R1 和 R2 为径向位移传感器, A1 为轴向位移传感器; M 为偏心质量

图 17 气隙调节式永磁悬浮轴承(水野毅)

2.3 磁阻调制式永磁主动悬浮

采用变气隙控制的永磁悬浮系统中, 对悬浮物体和作动器定子均需要位移检测才能确定悬浮物与永磁体之间的气隙长度, 传感器的特性对系统悬浮稳定性和鲁棒性影响很大。此外, 当实际气隙小于平衡气隙时, 磁力大于重力, 悬浮物体已经有向磁铁靠近的趋势。若要实现稳定悬浮, 作动器必须以更快的速度执行动作, 才能确保悬浮物和磁铁不至于接触吸附。并且当永磁体与铁质目标物之间的气隙减小时, 二者吸引力急剧增大, 容易发生碰撞。MIZUNO 等采用磁力补偿策略, 根据气隙的变化实时补偿作动器输入电流, 实现变刚度控制^[61]。这种控制方法不能解决永磁体和铁磁性悬浮物之间的接触吸附问题。因此, 很多学者展开了变磁路式永磁悬浮系统的研究。

UENO 等^[62-63]在 2000 年提出利用超磁致伸缩材料的逆效应实现磁力调节的装置, 通过施加压力改变材料的磁化特性, 从而改变磁路中的磁通量。在文献[64]和[65]中, UENO 等对磁致伸缩系数为 0.2% 的 Terfenol-D 材料进行逆磁致伸缩特性的研究, 通过实验测定了磁力随外加压力变化的特性: 随着压力增加, 磁力逐渐增大; 压力范围为 0~200 MPa, 该材料内部的相对磁通密度由零降低至 -0.6 T(相对于材料应变为零时永磁体提供的磁通密度)。

2006 年 UENO 等^[66-68]研制出基于磁致伸缩材

料和压电驱动器的永磁悬浮系统样机,如图 18 所示。其工作原理如下:当实际气隙大于平衡气隙,通过压电驱动器使条形 Terfenol-D 材料缩短,增大工作气隙处有效磁通量;当实际气隙小于平衡气隙时,控制磁致伸缩材料伸长,减小工作气隙的有效磁通量。

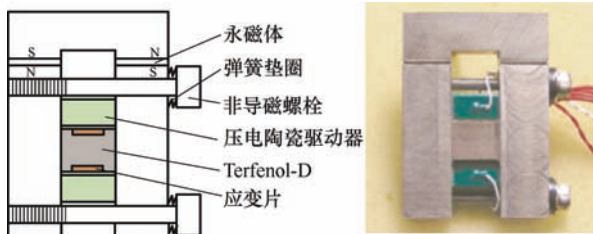


图 18 UENO 提出的永磁主动悬浮系统

上述装置中磁力的调节范围受到磁致伸缩材料的磁化特性和磁致伸缩性能的限制,文献[69]采用铁基磁致伸缩材料 Galfenol 进行实验,结果表明,相同条件下最大磁力可达 20 N,对应磁通密度约为 1.2 T,在永磁悬浮系统中可以更好实现悬浮力的控制。浙江大学 XU 等^[70]对这种磁致伸缩/压电驱动原理的永磁悬浮系统的磁力与气隙和工作电压之间的关系进行探究,建立了较为精确的磁力模型,并通过仿真和实验对其进行验证,指出该系统的可控磁力精度较高,稳定状态下磁力波动范围在 0.06%,能够满足超精密加工及装配中对精确操纵力的需求。

MIZUNO 等^[71]提出一种磁阻调制方式的变磁路永磁悬浮方法,其原理如图 19 所示,在永磁体和悬浮目标物之间设置矩形铁质调磁片,通过执行机构驱动调磁片运动,控制铁球所受磁力的大小。将调磁片换为永磁体,可以增大磁通的变化量,从而实现更大范围的磁力调节^[72]。

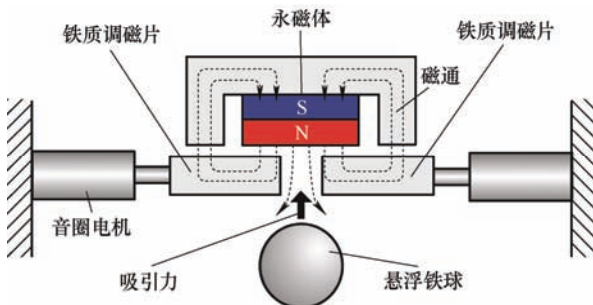
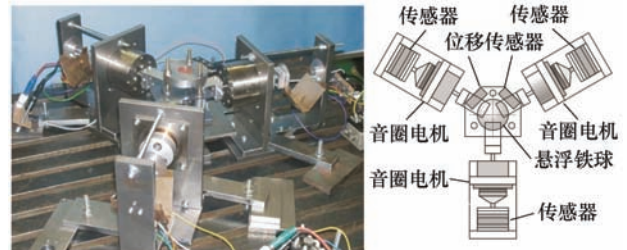


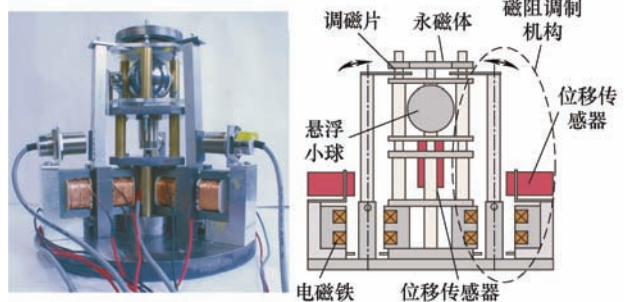
图 19 磁阻调制式永磁悬浮原理

基于磁阻调制的原理,MIZUNO 等^[73]研制了一种永磁悬浮样机,如图 20a 所示,三个调磁片位于永磁体和铁球(0.1 kg)之间,在同一平面内呈 120° 均匀分布,分别用三个音圈电机控制调磁片运动。

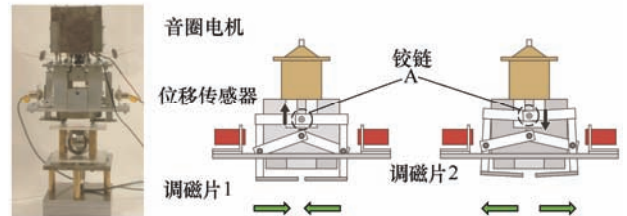
当磁力小于铁球重力时,调磁片远离小球中心,工作气隙出的磁通量增大,从而增大磁力。由于小球在水平方向的偏移也会对悬浮特性造成影响,因此,除在竖直方向设置位移传感器检测小球悬浮高度外,水平方向也设置了两个位移传感器用于检测径向偏移。实验结果表明,将径向偏移信号也用于闭环反馈有利于提高悬浮稳定性,并一定程度提高抗干扰能力^[74]。悬浮时执行器不会受到小球的重力作用,具有低功耗的特点。



(a) 作动器: 音圈电机



(b) 作动器: 电磁铁



(c) 作动器: 音圈电机与连杆机构

图 20 磁阻调制式永磁悬浮样机

FURUTACHI 等^[75]用电磁铁驱动代替音圈电机,结构如图 20b 所示,三个铁质长条分别与调磁片相连,用一对电磁铁控制调磁片在径向偏移。通过测力实验建立了小球在竖直方向受力与调磁片位移和悬浮气隙的关系模型,采用 PD (proportional differential) 控制实现 1 kg 小球的稳定悬浮。为了简化装置结构并减小执行机构数量,文献[76]设计了一种并联型连杆机构,如图 20c 所示,将音圈电机的直线运动转变为两个调磁片的旋转运动,通过控制调磁片的旋转角度实现对磁力的调节。

2.4 磁源调整式永磁主动悬浮

前述变气隙式和变磁路式永磁悬浮系统中,磁

力可调节范围小, 并且存在接触吸附的问题, 当铁磁性目标物与永磁体或铁轭接触时, 难以通过主动调节使其恢复至平衡位置。

孙凤等^[77-78]提出一种旋转永磁体的磁通控制方法, 分别实现了铁质小球和铁制条形物的稳定悬浮。其原理如图 21 所示, 永磁体沿直径方向充磁, 轭铁与永磁体之间具有弧形气隙, 铁质目标物位于轭铁腿部端面之下。当磁铁位于初始角度, 磁路中的磁感线由 N 极出发, 分别经过左右两侧的轭铁回到 S 极, 此时悬浮物为零磁通状态。当磁铁旋转一定角度, 部分磁感线由 N 极经过右侧轭铁, 进入悬浮目标物, 并通过左侧轭铁回到 S 极, 悬浮物受到磁力作用, 随着角度增加, 磁力逐渐增大。当永磁体转动角度为超过 90° 时, 轭铁腿部端极性改变, 磁力仍然表现为吸力, 但磁力随着角度的增加而减小。不同气隙下磁力与角度的关系如图 21b 所示, 磁力变化周期为 180° 。OKA 等^[79]对系统可控性进行分析, 指出悬浮状态磁铁角度不能为 90° 的整数倍。

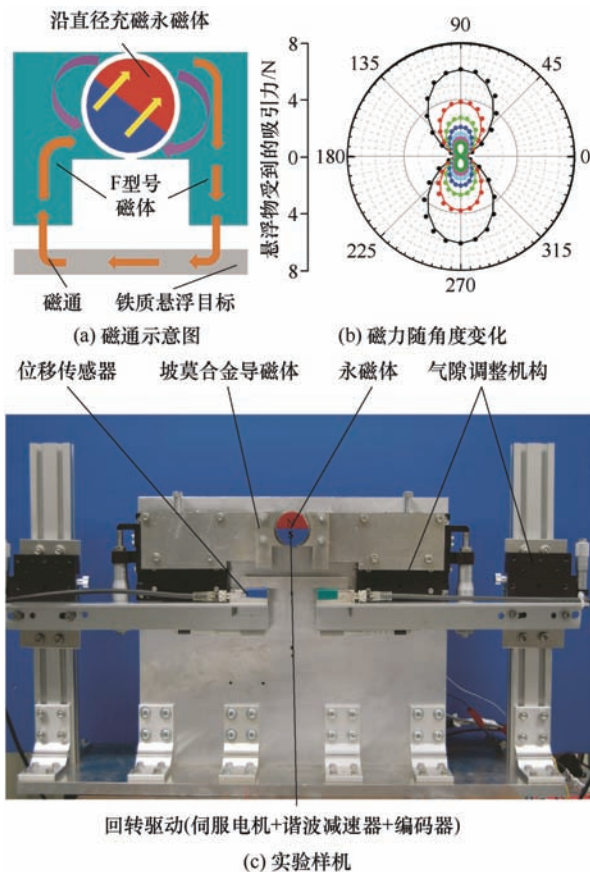


图 21 变磁源式永磁悬浮系统

金俊杰等^[80]应用 ARX 模型辨识方法建立了较为精确的并联式永磁悬浮双球系统的模型。在这种可变磁路式永磁悬浮系统中, 永磁体旋转时还会受到 F 型轭铁的吸引作用, 表现为负载转矩。孙兴伟等应用等效磁路法和虚功原理建立了该永磁悬浮系

统的磁力和磁扭矩模型, 通过仿真分析对系统的时域和频域响应特性进行了研究^[81]。系统稳定需要满足两个条件: ①悬浮力与重力相等; ②磁铁所受扭矩与电机提供的转矩相等。孙凤等^[82-83]提出了双闭环控制方法, 系统平衡位置作为被控目标, 即气隙长度和磁铁旋转角度共同作为参考输入, 控制系统如图 22 所示。

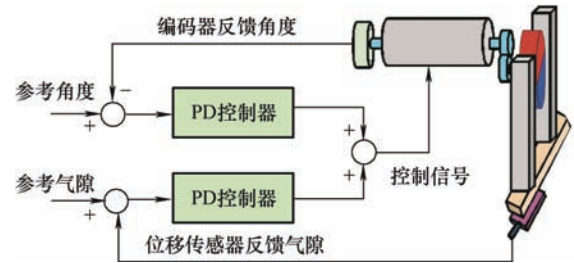


图 22 永磁悬浮系统双闭环控制策略

为提高系统的鲁棒性, 降低参数摄动以及不确定外扰等因素对系统稳定性的影响, 孙凤等设计了状态反馈 $r-H^\infty$ 次优鲁棒控制器, 实验结果表明系统的抗外扰能力得到有效提高^[84]。基于该系统可实现零悬浮力的特性, 李强等^[85]提出一种防跌落防吸附控制方法, 通过根据气隙变化调整控制器参数, 提高了系统的稳定悬浮范围, 同时解决了接触吸附的问题。双闭环控制器的参数对该永磁悬浮系统的气隙刚度影响较大, 孙凤等根据所建立的磁力模型, 提出一种变刚度控制方法, 受到外扰时增大角度以补偿磁力, 从而减小气隙的变化^[86]。

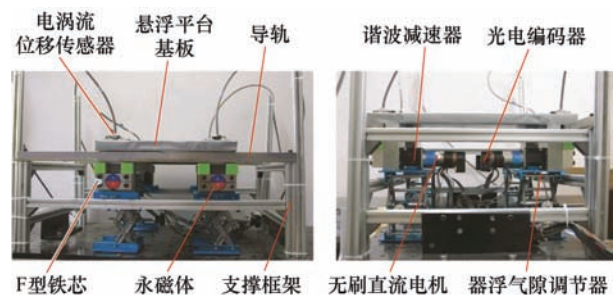


图 23 永磁悬浮无尘传送装置

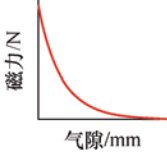
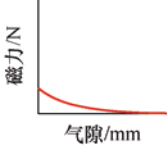
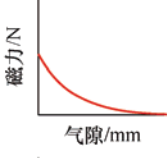
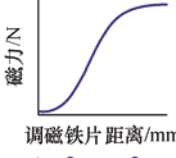
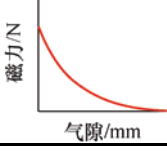
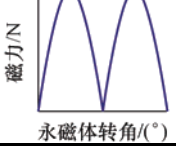
ZHAO 等^[87]对该系统的准零功率特性进行探究, 在稳定悬浮状态, 电机仅需克服磁铁的负载转矩, 而不需要克服悬浮物重力。通过分析磁扭矩与气隙和旋转角度的关系, 提出了定气隙控制和定角度控制, 采用主动调节系统悬浮位置的方式可以降低系统的稳态功耗。文献[88,89]对永磁悬浮装置结构进行优化, 采用两个相同的永磁体磁路, 磁体角度相位差为 90° , 从而抵消磁扭矩, 实现悬浮状态的零功耗特性。基于变磁动势永磁悬浮支撑原理, 金俊杰等提出一种永磁悬浮无尘传送装置, 如图 23 所示, 并采用状态反馈集中

控制策略消除了一个冗余控制的悬浮支撑点, 仿真结果表明各自由度可实现独立控制^[90]。

表 1 对第 2 节所述四种永磁悬浮技术的悬浮原理、磁力特性和主要特点进行说明。其中, 斥力式永磁被动悬浮技术易于实现, 承载刚度大, 但其工业应用中往往需要与主动控制电磁悬浮系统相结合。气隙调节式永磁悬浮系统中, 存在接触吸附的弊端, 因而悬浮气隙的设置不能过小。由此导致气

隙处漏磁较大, 永磁体工作负载线斜率低, 并且气隙刚度小, 承载能力受到限制。与之相比, 磁阻调制式与磁源调整式方案能够克服上述缺点, 可通过主动调节调磁片之间距离或永磁体转角改变磁力, 具有较好的气隙刚度及抗扰动力。并且, 磁源调整式永磁悬浮系统可以实现零磁力, 有效避免气隙过小时的吸附现象, 其磁力的主动调节范围也优于磁阻调制式永磁悬浮系统。

表 1 磁悬浮技术类型及特点

永磁悬浮技术类型	悬浮原理	磁力特性	主要特点
永磁被动悬浮	利用永磁体之间的同极相斥作用实现被动支撑或悬浮		被动悬浮易于实现 承载刚度大 稳定性较差 不存在接触吸附缺陷
气隙调节式主动悬浮 (以图 3 为例)	引入反馈控制, 利用执行机构控制永磁体与悬浮目标物之间的气隙实现磁力调节, 维持稳定悬浮		气隙处漏磁大 悬浮气隙变化范围小 承载能力弱 具有一定的抗扰动力 存在接触吸附缺陷
磁阻调制式主动悬浮 (以图 19 为例)	引入反馈控制, 利用执行机构控制磁路中有效磁路横截面积, 通过改变磁阻实现磁力调节, 维持稳定悬浮	 	气隙稳定时磁力调节范围小 承载能力较好 抗扰动力较好 线性调节范围小 存在接触吸附缺陷
磁源调整式主动悬浮 (以图 21 为例)	引入反馈控制, 利用执行机构调整永磁体的有效磁动势实现磁力调节, 维持稳定悬浮	 	磁力调节范围大 承载性能较好 抗扰动力较好 具有零磁力特性, 不存在接触吸附缺陷

3 永磁悬浮技术研究难点及其对策

国内外对永磁悬浮技术机理及其特性展开了深入研究, 并在实验室条件下验证了永磁悬浮技术的可行性, 相关研究工作为永磁悬浮系统的应用提供了有力的理论与方法支持, 如样机的结构优化与研制、磁场建模分析与计算、控制策略及相应算法研究开发、悬浮特性测试与分析等。但作为一项涉及多学科相融合的高新技术, 永磁悬浮技术的进一步发展与工业化应用还需要解决一些关键技术问题。

3.1 磁路设计与永磁悬浮系统工作性能

永磁主动悬浮通过可控磁力的调节实现稳定悬浮, 而磁路设计决定了系统的静态承载能力与动态调节范围, 对永磁悬浮系统工作特性十分关键。合理优化磁路结构及尺寸参数、选择所需磁性材料是磁路设计的重要工作。

根据矫顽力大小将磁性材料分为软磁材料(H_c

小于 1 kA/m)和硬磁材料(H_c 大于 1 kA/m), 如图 24 所示^[91-92]。常见的硬磁材料有稀土永磁材料(NdFeB 系和 SmCo 系)、铁氧体永磁材料(钡铁氧体和锶铁氧体)、金属永磁材料(AlNiCo 系和 FeCrCo 系)等。软磁材料有金属软磁材料(硅钢 FeSi, 坡莫合金 FeNi)、软磁铁氧体(MnZn 系, NiZn 系)、非晶态软磁合金、纳米晶软磁合金以及软磁复合材料等。

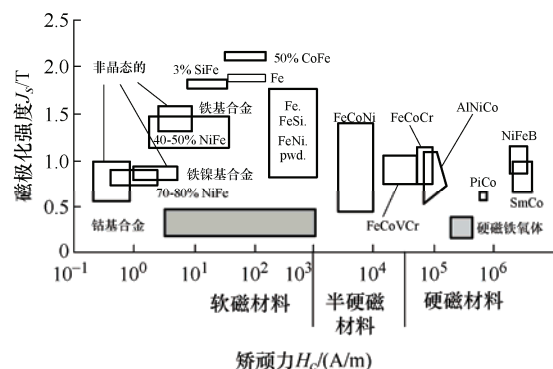


图 24 磁性材料分类

作为系统的磁源, 永磁体应具备较高的剩余磁感应强度 B_r 、矫顽力 H_c 、最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 等性能, 才能确保永磁悬浮系统的承载能力。目前永磁悬浮装置中常用的永磁体材料多为稀土永磁材料, 采用烧结制备方法得到的块状永磁体可满足上述高性能要求。国家标准^[93]中烧结钕铁硼永磁材料 N54 磁性能如下: $B_r \geq 1.45$ T, 磁感矫顽力 $H_{cB} \geq 836$ kA/m, 内禀矫顽力 $H_{cJ} \geq 875$ kA/m, $(BH)_{\max} = 406 \sim 438$ kJ/m³。随着制备技术的发展, 如多合金工艺以及添加元素方法还将进一步提升磁体性能, 永磁悬浮系统承载能力也会得到相应改善。

永磁悬浮系统中导磁轭铁和悬浮目标物采用软磁材料, 其磁化特性同样影响着工作气隙磁通密度及承载性能。永磁悬浮系统磁路中导磁体应具备高磁导率和低矫顽力, 以迅速响应磁场变化, 同时应具有较高的饱和磁感应强度, 提高悬浮力调节范围, 避免发生磁饱和现象。此外, 还应考虑软磁材料的磁滞损耗以及涡流损耗特性。永磁悬浮装置常用的软磁材料有电工纯铁、坡莫合金、高磁导率铁氧体等^[94]。电工纯铁起始相对磁导率 μ_i 为 $300 \sim 500$, 最大相对磁导率约为 $(0.6 \sim 1.2) \times 10^4$, 矫顽力为 $(12 \sim 240)$ A/m, 饱和磁化强度范围为 $1.15 \sim 1.6$ T; 坡莫合金指镍含量约为 $30\% \sim 90\%$ 的镍铁基合金, 以高磁导率坡莫合金为例(1J76~1J86), 具有高起始磁导率和低矫顽力的优良特性。铁镍合金起始相对磁导率约为 $(1.5 \sim 6) \times 10^4$, 最大磁导率可达 $(8 \sim 26) \times 10^4$, 矫顽力为 $0.8 \sim 3.6$ A/m, 具有优良的磁化特性, 但其饱和磁感应强度比电工纯铁低, 约为 $0.2 \sim 0.8$ T。高磁导率 Mn-Zn 铁氧体初始相对磁导率一般在 10^4 以上, 但其剩磁较低, 约为 $0.3 \sim 0.5$ T, 在永磁悬浮系统中应用较少。软磁复合材料可降低高频交变磁场下的涡流, 但由于颗粒之间的间隙效应, 但其磁导率较低, 随着软磁复合材料产品的发展, 其磁化特性会得到相应改善, 在未来永磁悬浮系统中将得以应用^[95]。

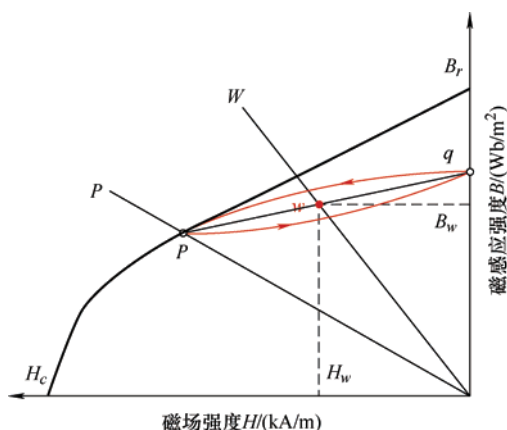


图 25 永磁体退磁曲线与回复线

由于受到内部退磁作用场的影响, 永磁体的工作点位于磁滞回线的第二象限部分, 其对应的磁感应强度 B_w 低于永磁体剩磁 B_r ^[96]。对永磁悬浮系统而言, 永磁体或导磁轭铁与悬浮目标之间的气隙长度是变化的, 磁阻的变化导致永磁体工作点在回复线 pq (此处将局部磁滞回线用线段近似代替)上往复变化。如图 25 所示, 工作点 p 和 q 分别对应无限大气隙和零气隙状态, 实际系统中工作点 q 往往不在纵轴上。文献[97]指出当悬浮气隙对应点平分 pq 线段, 动态永磁体具有最大磁能积。此外, 在进行磁路设计时, 还应进行磁路形状结构和尺寸参数的优化, 降低磁滞损失和漏磁通, 确保工作气隙获得最大磁能, 从而最大程度利用永磁体固有磁能特性。

3.2 多方法结合建立非线性磁力模型

永磁悬浮系统中, 磁力模型具有强非线性的特点, 此外还受到磁路漏磁与磁滞等动态变化参数的影响, 因而其精确化建模也是一项具有挑战性的研究内容。目前, 国内研究多采用解析法、有限元法以及实验测量等多种方法相结合的策略提高磁力模型的准确性。解析计算方法应根据永磁悬浮系统的磁路结构选择。当磁路中仅有永磁体或永磁体与铁磁性悬浮物时, 可应用等效磁荷法^[98-99]、分子电流法^[100]建立工作气隙磁场模型, 进而计算磁力, 其中涉及求解多重积分问题, 通常采用高斯法^[101]、蒙特卡洛算法^[102]、椭圆积分算法^[103]、积分定义算法^[104]等近似处理。当磁路结构较为复杂时, 多采用等效磁路法^[105-106], 通过计算此路各部分磁导得出工作气隙磁能, 并应用虚功原理建立磁力模型。解析法建立模型虽然存在近似处理、不确定参数经验取值等导致的模型误差, 但其在磁路结构设计中仍是一种有效可靠的方法。

通过有限元分析可以借助计算机简化磁路计算, 快速得到磁力模型, 同时还可以直观显示磁场分布、磁通走向等, 便于设计者对磁饱和及漏磁等问题进行磁路优化。目前常用的磁场仿真分析软件有 ANSYS Maxwell(美国)、CST EM STUDIO(德国)、INFOLYTICA MagNe(意大利)、JMAG(日本)等。为获得精确的磁力计算结果, 在磁性材料设置时应尽量符合实际, 如采用非线性 $B-H$ 曲线定义材料的特性。基于解析法和有限元法建立磁力模型之后, 还应该通过测量实验对磁力模型进行修正处理, 确定磁力与气隙变化曲线。建立精确的磁力模型是实现永磁悬浮技术工业应用的基础, 对悬浮系统的精密定位和可变刚度的控制具有十分重要的意义。

3.3 基于非线性策略的控制器设计

永磁悬浮系统是开环不稳定的, 需要设计控制器实现其稳定悬浮并改善其动态特性和鲁棒性, 这也是永磁悬浮技术的重要研究内容。控制理论的发展为永磁悬浮技术的控制器设计提供了多种选择, 采用经典比例-积分-微分(Proportional integral differential, PID)控制方法、状态反馈等方法实现稳定悬浮已经得到验证^[107]。基于磁力模型的线性化处理, 可以根据稳定性判据确立 PID 控制器参数的范围, 应用 Simulink 可以快速实现控制器参数整定。为提高永磁悬浮系统的动态响应, 减小系统时滞等影响, 可适当引入前馈校正环节。根据系统性能要求设计输入补偿或扰动补偿等。状态反馈也是一种基于模型的控制方法, 通过极点配置或 LQR(线性二次型调节器)等方法可以计算反馈增益。上述 PID 和状态反馈控制器对模型依赖程度较高, 实验时往往还需进一步整定控制器参数。在平衡气隙附近, 系统具有良好的稳定性, 但磁力模型的非线性导致 PID 方法在气隙变化较大时出现吸附或跌落问题。为保持大气隙范围内稳定悬浮, 基于模型辨识方法建立大闭环系统大范围内输入输出模型, 进而通过模糊 PID、自适应 PID 等方法实现 PID 参数的自调节, 或在控制器输出引入非线性补偿和全局最优控制器等策略进行改进^[108-109]。

闭环系统的动态性能和鲁棒性是衡量系统输出跟踪控制信号和抑制扰动信号能力的重要特性, 也是永磁悬浮系统控制器设计的主要目标。闭环系统频带宽度越大, 系统跟踪输入能力强, 但是抑制输入端高频扰动信号的能力减弱。控制器带宽的选择应根据实际系统综合考虑, 永磁悬浮系统受到动态磁滞、涡流损耗、作动器自身的响应频率等诸多因素限制, 其带宽一般较低。在确保稳定悬浮的前提下, 应尽量提高永磁悬浮系统的鲁棒性, 单一的控制方法难以取得较好的效果。鲁棒控制器可以较好地抑制干扰, 但动态特性存在缺陷, 其加权函数的选择取决于系统性能要求; 滑模变结构控制可以使系统在参数摄动和不确定扰动作用下保持不变性, 但切换函数导致的抖振问题会降低系统的稳态精度; 自适应预测控制通过自动调节参数可以提高鲁棒性, 但其依赖系统模型的参数辨识; 自抗扰控制不需要精确的被控对象模型, 但其控制器设计时整定参数困难。针对永磁悬浮系统自身特性以及工作性能需求, 可以选择定参数与变参数、有模型与无模型、优良动态特性与优良鲁棒性的控制方法结合的综合策略。

4 研究展望

永磁悬浮技术从最初的永磁被动悬浮陀螺发展到永磁主动悬浮系统, 具备了基于传感、反馈与控制的智能化特征, 低能耗悬浮特性使其具有广阔的应用前景。未来实现永磁悬浮技术的工业化应用尚需解决磁路设计与磁性材料特性、磁力精确化模型建立与动态磁滞特性分析、系统性能与控制器设计等三个技术难点。需要指出的是, 以上三部分内容之间是交叉相融的, 因此应当根据具体实际应用场合进行系统性研究, 才能确保实现永磁悬浮技术从实验室样机向工业产品的跨越。永磁悬浮技术未来的发展体现在以下几个方面:

(1) 永磁悬浮技术应用向轻载、低频发展。受限于永磁体磁能积和作动器的工作频率, 永磁悬浮系统承载能力较小, 频率较低, 更适合于轻载低频场合: 如微型永磁悬浮轴承、低频永磁隔振、永磁悬浮重力补偿器等。将五自由度永磁轴承应用于左心室辅助装置中, 可有效减小溶血和血栓的风险, 同时避免了电磁悬浮轴承对电源的依赖。利用永磁悬浮技术克服传送平台重力, 既能保证稳定的悬浮, 又能实现低功耗连续工作, 在半导体元器件的洁净传送将会发挥重要作用。

(2) 磁路设计与磁力建模精确化

永磁悬浮系统磁路设计工作核心是最大程度合理利用永磁体的磁能, 磁路结构、尺寸、软磁材料特性决定了磁力的变化范围。在磁性材料产品的性能有重大提升之前, 磁路设计仍然是研究的重点, 如永磁体工作点、漏磁、磁饱和、磁滞损耗等都需要精确化考量。结合有限元计算, 建立精确的磁力模型, 对需要实现精密定位的微动永磁悬浮执行机构以及分段控制的变刚度磁悬浮隔振系统十分关键。

(3) 永磁悬浮系统控制方法智能化。永磁主动控制悬浮系统分为变气隙式、变磁阻式、变磁源式, 永磁悬浮系统的性能与控制器设计关系密切, 经典的 PID 和状态反馈存在悬浮范围小, 鲁棒性差的缺点。在保证系统稳定悬浮的前提下, 提高其动态特性和鲁棒性需要设计综合控制策略, 其中模糊 PID、 H_∞ 鲁棒控制器、分数阶 PID 以及非线性状态反馈已在实验中得以验证。滑模变结构控制、自适应预测控制、自抗扰控制等方法在永磁悬浮系统中的应用还有待于进一步研究。

5 结论

我国的稀土永磁体产业约占世界市场份额的60%~70%，发展永磁悬浮技术具有天然优势。本文回顾了永磁悬浮技术的发展历史，系统性总结了永磁悬浮系统的原理、分类及其特点，分析了该技术实现工业化应用的难点，并对未来研究内容进行展望，为国内开展永磁悬浮技术的研究提供综述资料。

(1) 永磁悬浮技术具有无接触、低噪音、低能耗的特点，在轻载磁轴承、低频磁悬浮隔振、磁悬浮重力补偿及微动机械等领域具有广阔前景。永磁悬浮技术主要包括永磁被动悬浮和永磁主动悬浮，其中永磁主动悬浮系统根据磁力调节方式还可分为气隙调节式、磁阻调制式和磁源调整式。磁源调整式永磁主动悬浮系统可以实现零悬浮力，从而解决接触吸附的固有弊端，同时还具有定气隙和定刚度多种性能，在未来发展中潜力巨大。

(2) 磁路设计与优化决定力永磁悬浮系统的磁力变化特性，合理利用磁能积可实现悬浮力的大范围调节。磁路设计工作除考虑磁路各部件的材料、结构、形状尺寸和磁路的漏磁、磁饱和等因素之外，还需要分析永磁体动态工作曲线和软磁材料的磁滞损耗等问题。进一步地，通过解析法、有限元法和实验测量建立精确的磁力模型。

(3) 永磁悬浮闭环控制系统的带宽受到作动器工作频率、磁滞以及传感器信噪比等硬件设备性能的限制。控制器的设计应充分考虑系统自身的频率特性，在保持稳态特性的前提下，兼顾动态特性与鲁棒性。根据工作条件，针对性地提出综合控制策略。

参 考 文 献

- [1] BLEULER H. A survey of magnetic levitation and magnetic bearing types[J]. JSME International Journal, Series III, 1992, 35(3): 335-342.
- [2] MASLEN E H, SCHWEITZER G, BLEULER H, et al. Magnetic bearings-theory, design, and application to rotating machinery[M]. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009.
- [3] MASLEN E H, SCHWEITZER G, BLEULER H, 等. 磁悬浮轴承: 理论, 设计及旋转机械应用[M]. 徐旸, 张凯, 赵雷译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- MASLEN E H, SCHWEITZER G, BLEULER H, et al. Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery[M]. XU Yang, Zhang Kai, Zhao Lei Trans.. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [4] 王家素, 王素玉. 高温超导磁悬浮列车研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(11): 1-10.
- WANG Jiasu, WANG Suyu. High temperature superconducting maglev train[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(11): 1-10.
- [5] DENG Zigang, ZHANG Weihua, ZHENG Jun, et al. A high temperature superconducting maglev ring test line developed in Chengdu, China[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(6): 1-8.
- [6] 徐园平, 周瑾, 金超武, 等. 抗磁悬浮研究综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 214-222.
- XU Yuanping, ZHOU Jin, JIN Chaowu, et al. Diamagnetic levitation: a review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(2): 1-10.
- [7] XU Yuanping, CUI Qingwen, KAN R, et al. Realization of a diamagnetically levitating rotor driven by electrostatic field[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(5): 2387-2391.
- [8] LONG Zhiqiang, HE Guang, XUE Song. Study of EDS & EMS hybrid suspension system with permanent-magnet halbach array[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(12): 4717-4724.
- [9] 马卫华, 罗世辉, 张敏, 等. 中低速磁浮车辆研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 199-216.
- MA Weihua, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 199-216.
- [10] SU Yixin, GU Yongpeng, KEOGH P S, et al. Nonlinear dynamic simulation and parametric analysis of a rotor-AMB-TDB system experiencing strong base shock excitations[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155: 104071.
- [11] 朱焜秋, 王绍帅. 六极径向-轴向主动磁轴承电磁特性分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1653-1663.
- ZHU Huangqiu, WANG Shaoshuai. Electromagnetic characteristics analysis and experiment study of six-pole radial-axial active magnetic bearing[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1653-1663.
- [12] SAWA Y. Current status of third-generation implantable left ventricular assist devices in Japan, Duraheart and HeartWare[J]. Surg Today, 2015, (45): 672-681.
- [13] 董宝田, 王坤, 韩邦成, 等. 高速磁悬浮鼓风机涡轮锁

- 紧装置设计分析及试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 154-161.
- DONG Baotian, WANG Kun, HAN Bangcheng, et al. High-speed maglev blower turbine locking device design analysis and experiment research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 154-161.
- [14] 杨杰, 高涛, 邓永芳, 等. 永磁磁浮空轨系统的研究与设计[J]. 铁道学报, 2020, 42(10): 30-37.
- YANG Jie, GAO Tao, DENG Yongfang, et al. Study and design on suspended permanent maglev rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(10): 30-37.
- [15] MONTGOMERY D B. Overview of the 2004 Magplane design[C]//18th International Conference on Maglev Levitated Systems and Linear Drives, October 26-28, 2004, Shanghai.
- [16] SUN Feng, PEI Wenzhe, ZHAO Chuan, et al. Permanent maglev platform using a variable flux path mechanism: stable levitation and motion control[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(7): 1-10.
- [17] SON D H, UGURLU M C, SITTI M. Permanent magnet array-driven navigation of wireless millirobots inside soft tissues[J]. Science Advance, 2021, 7(43): eabi8932.
- [18] 钱坤喜, 许自豪, 王颢, 等. 新型永磁悬浮轴承在透平机及心脏泵中的应用[J]. 江苏大学学报, 2011, 32(6): 663-666+677.
- QIAN Kunxi, XU Zihao, WANG Hao, et al. Applications of novel permanent maglev bearings in turbinemachines and heart pumps[J]. Journal of Jiangsu University, 2011, 32(6): 663-666+677.
- [19] 周立山. 永磁阵列式大载荷磁悬浮重力补偿器的基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHOU Lishan. Basic research on a large-load magnetic levitation gravity compensator with permanent magnet array [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [20] FANG Jiancheng, WANG Xi, WEI Tong, et al. Homopolar 2-Pole radial permanent-magnet biased magnetic bearing with low rotating loss[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(8): 2293-2303.
- [21] 严博, 马洪业, 韩瑞祥, 等. 可用于大幅值激励的永磁式非线性隔振器[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 169-175.
- YAN Bo, MA Hongye, HAN Ruixiang, et al. Permanent magnets based nonlinear vibration isolator subjected to large amplitude acceleration excitations[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 169-175.
- [22] EARNshaw S. On the nature of molecular forces which regulate the constitution of luminiferous ether[J]. Transactions of the Cambridge Philosophical Society. 1842(7): 97-112.
- [23] BASSANI R. Earnshaw (1805-1888) and passive magnetic levitation[J]. Meccanica, 2006, 41(4): 375- 389.
- [24] HARRIGAN R M. Levitation device: U.S. Patent, 4382245[P]. 1983-05-03.
- [25] HONES E W, HONES W G. Magnetic levitation device and method: U.S. Patent, 5404062[P]. 1995- 04-04.
- [26] JONES T B, WASHIZU M. Simple theory for the Levitron[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(2): 883-888.
- [27] GENTA G, DELPRETE C, RONDANO D. Gyroscopic stabilization of passive magnetic levitation[J]. Meccanica, 1999, 34: 411-424 .
- [28] KIM K B, IM S H, UM D Y, et al. Comparison of magnetic levitation systems using ring-shaped permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7): 1-4.
- [29] AZUKIZAWA T, YAMAMOTO S, MATSUO N. Feasibility study of a passive magnetic bearing using the ring shaped permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4277-4280.
- [30] 钱坤喜, 曾培, 茹伟民, 等. 永磁体磁浮叶轮血泵的研制和试验研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(5): 86-88.
- QIAN Kunxi, ZENG Pei, RU Weimin, et al. Prototype design and experimental study of a permanent maglev impeller blood pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(5): 86-88.
- [31] QIAN Kunxi, XU Hongxia. Gyro-effect and Earnshaw's theorem: Stable and unstable equilibrium for rotary and stationary permanent magnetic levitators[C]//2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, May 16-18, 2006, Shanghai. Computer Society, United States: IEEE, 2008: 1323-1325.
- [32] 张钢, 孟庆涛, 钟永彦, 等. 五自由度全永磁轴承系统的稳定悬浮特性分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 56-63.
- ZHANG Gang, MENG Qingtao, ZHONG Yongyan, et al. Stable levitation performance analysis of five degrees of freedom all permanent magnetic bearing system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 56-63.
- [33] 张钢, 张坚, 张海龙, 等. 基于等效磁荷法用蒙特卡洛法计算永磁轴承磁力[J]. 轴承, 2013(10): 1-4.

- ZHANG Gang, ZHANG Jian, ZHANG Hailong, et al. Calculation on magnetic force for permanent magnetic bearings by monte carlo method based on equivalent magnetic charge method[J]. Bearing, 2013(10): 1-4.
- [34] MUKHOPADHYAS S C, OHJI T. Design, analysis and control of a new repulsive-type magnetic bearing system[J]. IEE Proceedings, Part B, 1999, 146(1): 33-40.
- [35] RODRIGUEZ E, SOTELO G G, OLIVEIRA J D, et al. Designing, simulations and experiments of a passive permanent magnet bearing[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2016, 51(2): 131-149.
- [36] 李奕良, 戴兴建, 张小章. 储能飞轮永磁卸载设计及试验[J]. 清华大学学报, 2008(8): 1268-1271.
- LI Yiliang, DAI Xingjian, ZHANG Xiaozhang. Design and testing of a permanent magnetic bearing for an energy storage flywheel[J]. Journal of Tsinghua University, 2008(8): 1268-1271.
- [37] 汤双清, 周东伟, 李庆东, 等. 基于遗传算法的飞轮储能系统用径向永磁轴承的优化设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(8): 101-105, 131.
- TANG Shuangqing, ZHOU Dongwei, LI Qingdong, et al. Optimization design of the radial permanent magnet bearings of the flywheel energy storage systems based on genetic algorithm[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(8): 101-105+131.
- [38] 张锦光, 胡业发, 王念先. 小型低风速风力发电机永磁轴承的设计与分析[J]. 机械制造, 2010, 48(5): 20-23.
- ZHANG Jinguang, HU Yefa, WANG Nianxian. Design and analysis of permanent magnetic bearings in small-sized low-speed wind power generator[J]. Machinery, 2010, 48(5): 20-23.
- [39] LI Songsheng, MAO Huawei, CHEN Ping, et al. Dynamic performance of the bearing-rotor system in the ultra-high speed electric spindle with a additional supporting system make up of the permanent magnetic bearings[J]. Advanced Materials Research, 2011, 295-297: 2294-2299.
- [40] MARTH E, JUNGMAIR G, AMRHEIN W. A 2-D-based analytical method for calculating permanent magnetic ring bearings with arbitrary magnetization and its application to optimal bearing design[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(5): 1-8.
- [41] MARTH E, JUNGMAIR G, PANHOLZER M. Optimization and realization of a multi-pole permanent magnetic bearing with rotating magnetization[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(i4): 320-329.
- [42] OHJI T, ICHIYAMA S, AMEI K, et al. Conveyance test by oscillation and rotation to a permanent magnet repulsive-type conveyor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(4): 3057-3059.
- [43] 胡坤, 王爽, 李德永, 等. 一种永磁磁垫式带式输送机的气隙特性研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 701-706.
- HU Kun, WANG Shuang, LI Deyong, et al. Research on air gap characteristics of permanent magnetic cushion belt conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 701-706.
- [44] 胡坤, 王爽, 郭永存, 等. 永磁悬浮带式输送机侧向力与跑偏仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1173-1178.
- HU Kun, WANG Shuang, GUO Yongcun, et al. Analysis of lateral force and deviation of permanent magnetic levitation belt conveyor[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1173-1178.
- [45] WANG Shuang, HU Kun, LI Deyong. Analysis and experimental research on air gap characteristics of permanent magnet low-resistance belt conveyor[J]. IET Science Measurement Technology, 2018, 12(4): 472-478.
- [46] 王仲勋, 郭永存, 胡坤. 永磁悬浮带式输送机悬浮力特性分析[J]. 煤炭技术, 2019, 38(05): 133-135.
- WANG Zhongxun, GUO Yongcun, HU Kun. Analysis on suspension force characteristics of permanent magnet suspension belt conveyor[J]. Coal Technology, 2019, 38(05): 133-135.
- [47] CHO H W, HAN H S, LEE J M, et al. Design considerations of EM-PM hybrid levitation and propulsion device for magnetically levitated vehicle[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4632-4635.
- [48] TOSHIRO H, OKA K. Reluctance control magnetic suspension system with permanent magnet and linear actuator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 113(8): 988-994.
- [49] OKA K, TOSHIRO H. A three-degrees-of-freedom Maglev system with actuators and permanent magnets[J]. Electrical Engineering in Japan, 1996, 116(5): 138-147.
- [50] OKA K, TOSHIRO H, TAKUYA S. Hanging type Mag-lev system with permanent magnet motion control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 119(3): 291-297.
- [51] MORITA T, SHIMIZU K, HASEGAWA M, et al. A miniaturized levitation system with motion control using a piezoelectric actuator[J]. IEEE Transactions on Control

- Systems Technology, 2002, 10(5): 666-670.
- [52] SUN Feng, OKA K. Zero power non-contact suspension system with permanent magnet motion feedback[J]. Journal of System Design & Dynamics, 2009, 3(4): 627-638.
- [53] 孙凤, 王亚刚, 李东生, 等. 悬挂式永磁悬浮系统的悬浮特性研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(11): 25-28.
- SUN Feng, WANG Yagang, LI Dongsheng, et al. Characteristics analysis of a hanging type permanent magnetic suspension system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(11): 25-28.
- [54] SUN Feng, OKA K. Noncontact spinning mechanism using rotary permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 130(7): 913-919.
- [55] 孙凤, 韦伟, 金嘉琦, 等. 永磁悬浮非接触回转驱动系统[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 192-201.
- SUN Feng, WEI Wei, JIN Jiaqi, et al. Non-contact rotation driving system using permanent-magnetic suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 192-201.
- [56] OKA K, YAMAMOTO K, HARADA A. Magnetic suspension mechanism using rotary permanent magnets[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(1-4): 977-983.
- [57] 水野毅, 関口秀樹, 荒木献次. 永久磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受に関する研究: アキシヤル方向の安定化制御[J]. 日本機械学会論文集 C 編, 1998, 64(628): 4717-4722.
- MIZUNO T, SEKIGUCHI H, ARAKI K. Repulsive magnetic bearing using motion control of permanent magnets (stabilization in the axial direction)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 1998, 64(628): 4717-4722.
- [58] EIRICH M, ISHINO Y, TAKASAKI M, et al. Development of a repulsive magnetic bearing device with an adjustability function of radial stiffness[C]// ULBRICH H and GINZINGER L, Motion and vibration control: selected papers from MOVIC 2008. The international conference on motion and vibration control, September 15-18, 2008, Technical University of Munich, Munich, Germany. Berlin: Springer Netherlands, 2009: 63-70.
- [59] 关勇, 李红伟, 刘淑琴. 轴流式磁悬浮人工心脏泵磁悬浮轴承系统设计[J]. 山东大学学报, 2011, 41(1): 151-155.
- GUAN Yong, LI Hongwei, LIU Shuqin. System design of magnetic bearings in an axial-flow artificial blood pump[J]. Journal of Shandong University, 2011, 41(1): 151-155.
- [60] 李红伟, 范友鹏, 张云鹏, 等. 轴流式人工心脏泵混合磁悬浮系统的耦合特性[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 105-111.
- LI Hongwei, FAN Youpeng, ZHANG Yunpeng, et al. Coupling in hybrid magnetic levitation system of axial-flow blood pump[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 105-111.
- [61] MIZUNO T, ISHINO Y, TAKASAKI M. Force compensation for anti-collision in placing a magnetized component on ferromagnetic plate[C]// European Control Conference (ECC), June 29-July 1, 2016, Aalborg, Denmark. New York: IEEE, 2017: 1556-1561.
- [62] 上野敏幸, 裘進浩, 谷順二. 超磁歪材料を用いた新しい磁気力制御方法[J]. 日本機械学会論文集 C 編, 2000, 66(644): 1180-1185.
- UENO T, QIU J, TANI J. New magnetic force control method using giant magnetostrictive material[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 2000, 66(644): 1180-1185.
- [63] UENO T, QIU J, TANI J. Magnetic circuit design method for magnetic force control systems using inverse magnetostrictive effect: Examination of energy conversion efficiency depending on ΔE effect[J]. Electrical Engineering in Japan, 2002, 140(1): 8-15.
- [64] UENO T, QIU J, TANI J. Magneto-electric composite element and its application to magnetic levitation system[C]// Proceedings of the SPIE 4327, Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems, March 5-8, 2001, California, USA. SPIE, 2001: 533-540.
- [65] UENO T, QIU J, TANI J. Magnetic force control based on the inverse magnetostrictive effect[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2004, 40(3): 1601-1605.
- [66] UENO T, HIGUCHI T. Novel composite of magnetostrictive material and piezoelectric actuator for coil-free magnetic force control[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2006, 129(1-2): 251-255.
- [67] UENO T, KEAT C S, HIGUCHI T. Linear step motor based on magnetic force control using composite of magnetostrictive and piezoelectric materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 11-14.
- [68] UENO T, HIGUCHI T. Zero-power magnetic levitation using composite of magnetostrictive/piezoelectric

- materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(8): 3477-3482.
- [69] UENO T, HIGUCHI T. Magnetic circuit for stress-based magnetic force control using iron-gallium alloy[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2594-2596.
- [70] XU Aiqun, GU Qianxing, YU Haikuo. Mechanism of controllable force generated by coupling inverse effect of piezoelectricity and magnetostriction[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2020(8): 1-11.
- [71] MIZUNO T, HIRAI Y, ISHINO Y, et al. Flux path control magnetic suspension: development of a system using voice coil motors[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 2006, 72(721): 2869-2876.
- [72] TAKABAYSHI A, MIZUNO T, TAKASAKI M, et al. Development of flux-path control magnetic suspension system using flux concentration[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2013, 79(801): 1483-1494.
- [73] MIZUNO T, HIRAI Y, ISHINO Y, et al. Magnetic suspension system using three flux path control modules[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2006, 39(16): 554-558.
- [74] MIZUNO T, HIRAI Y, ISHINO Y, et al. Flux-path control magnetic suspension system using voice coil motors[J]. Journal of System Design & Dynamics, 2007, 1(2): 147-158.
- [75] FURUTACHI M, INABA S, ISHINO Y, et al. Three-dimensional force measurement and control of a flux-path control magnetic suspension[J]. Journal of System Design & Dynamics, 2008, 2(6): 1239-1249.
- [76] MIZUNO T, NAGANO Y, ISHINO Y, et al. Flux-path control module using a single actuator[C]// The Society of Instrument and Control Engineers, 2009 ICCAS-SICE, August 18-21, 2009, Fukuoka, Japan. New York: IEEE, 2009: 4407-4410.
- [77] SUN Feng, JIN Junjie, OKA K. Noncontact magnetic suspension of an iron ball using flux path control mechanism[J]. Advanced Materials Research, 2011, 230-232: 573-577.
- [78] SUN Feng, OKA K, SAIBARA Y. Magnetic suspension system by flux path control using rotary actuator[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(1-2): 769-776.
- [79] OKA K, OKAZAKI T, MORIMITSU T. 2 DOF non-contact magnetic suspension system: A feasibility study[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 45(1-4): 627-632.
- [80] JIN Junjie, DUAN Zhenyun, SUN Feng, et al. Model identification and analysis for parallel permanent magnetic suspension system based on ARX model[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2016, 52(1-2): 145-152.
- [81] 孙兴伟, 路英园, 孙凤, 等. 可变磁路式永磁悬浮系统的动力学特性研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2782-2787.
- SUN Xingwei, LU Yingyuan, SUN Feng, et al. Research on dynamics performance of permanent magnet suspension system with variable magnetic circuit[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(20): 2782-2787.
- [82] 孙凤, 韦伟, 金俊杰, 等. 可控磁路式并联型永磁悬浮系统[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1714-1722.
- SUN Feng, WEI Wei, JIN Junjie, et al. Parallel permanent magnetic suspension system with flux path control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1714-1722.
- [83] ZHAO Chuan, SUN Feng, JIN Junjie, et al. Research of permanent magnetic levitation system: Analysis, control strategy design, and experiment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(14): 7617-7628.
- [84] 孙凤, 夏鹏澎, 孙兴伟, 等. 可控磁路式永磁悬浮系统的鲁棒控制[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 65-70.
- SUN Feng, XIA Pengpeng, SUN Xingwei, et al. Robust control of a permanent magnetic suspension system using the variable flux path control method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(10): 65-70.
- [85] 李强, 唐敬虎, 孙凤, 等. 可变磁路式永磁悬浮系统的防跌落防吸附控制[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 246-254.
- LI Qiang, TANG Jinghu, SUN Feng, et al. Anti-fall and anti-adsorption control of permanent magnetism levitation system with flux path control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 246-254.
- [86] 孙凤, 唐敬虎, 李强, 等. 可变磁路式永磁悬浮系统刚度特性分析及变刚度控制[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 132-139.
- SUN Feng, TANG Jinghu, LI Qiang, et al. Stiffness characteristics analysis and variable stiffness control for a permanent magnetic levitation system with variable magnetic circuit[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020,

- 39(7): 132-139.
- [87] ZHAO Chuan, SUN Feng, JIN Junjie, et al. Analysis of quasi-zero power characteristic for a permanent magnetic levitation system with a variable flux path control mechanism[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(1): 437-447.
- [88] ZHOU Ran, YAN Mingyin, GUO Yongquan, et al. Suspension characteristics of a zero-power permanent magnetic suspension system with flux path control[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 63(01): 187-198.
- [89] SUN Feng, ZHOU Ran, JIN Junjie, et al. Optimal design for quasi-zero power performance of a permanent magnetic suspension system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(2): 607-616.
- [90] 金俊杰, 段振云, 孙凤, 等. 永磁悬浮无尘传送系统的悬浮特性及解耦控制仿真分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(4): 518-525.
- JIN Junjie, DUAN Zhenyun, SUN Feng, et al. Simulation analysis on suspension characteristics and decoupling control for dust-free transit system using permanent magnetic suspension[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(4): 518-525.
- [91] STOICA M. Casting and characterization of Fe-(Cr, Mo, Ga)-(P, C, B) soft magnetic bulk metallic glasses[D]. Dresden, Germany: Technische Universität Dresden, 2005.
- [92] TUMANSKI S. Modern magnetic materials-the review[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2010, 86(4): 1-15.
- [93] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 13560-2017 烧结钕铁硼永磁材料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 13560 -2017 Sintered neodymium iron boron permanent magnets[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [94] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21219-2007 磁性材料分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 21219- 2007 Magnetic materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [95] 王进. 低损耗复合结构铁基软磁材料的制备及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- WANG Jin. Preparation and properties of low loss iron-based soft magnetic materials with composite structures [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [96] 梁慧敏, 张荣岭, 徐俊, 等. 组装式永磁体分段回复线模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 133-138.
- LIANG Huimin, ZHANG Rongling, XU Jun, et al. Modeling of combined permanent magnet subsection recoil line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 133-138.
- [97] 严密, 彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 2 版. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- YAN Mi, PENG Xiaoling. Magnetic foundation and magnetic material[M]. 2nd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [98] 田录林, 李鹏. 锥形永磁轴承磁力解析模型[J]. 中国机械工程, 2014, 25(3): 327-332.
- TIAN Lulin, LI Peng. Magnetic force analytic model of conic permanent magnetic bearings[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(3): 327-332.
- [99] BACHOVCHIN K D, HOBURG J F, POST R F. Magnetic fields and forces in permanent magnet levitated bearings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(7): 2112-2120.
- [100] 杨欢, 赵荣祥, 祝长生. 基于电流片模型的永磁推力轴承优化设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 51-58.
- YANG Huan, ZHAO Rongxiang, ZHU Changsheng. Optimum design of permanent magnet thrust bearings based on current sheet model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 51-58.
- [101] 孙立军, 张涛, 赵兵. 永磁磁轴承数学模型的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 69-74.
- SUN Lijun, ZHANG Tao, ZHAO Bing. Study of mathematical model of permanent magnet bearings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 69-74.
- [102] 王洪昌, 蒋书运, 梁玉飞. 基于分子电流法轴向永磁轴承轴向刚度的分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 102-107.
- WANG Hongchang, JIANG Shuyun, LIANG Yufei. Analysis of axial stiffness of permanent magnet bearings by using the equivalent surface currents method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,

- 45(5): 102-107.
- [103] 李群明, 万梁, 段吉安. 一种永磁轴承的设计和磁场分布的解析计算[J]. 中南大学学报, 2006, 37(5): 970-975.
- LI Qunming, WAN Liang, DUAN Ji'an. Design of a new radial permanent magnet bearing and analytical calculation of its magnet field[J]. Journal of Central South University, 2006, 37(5): 970-975.
- [104] 张海波, 邱玉江, 蒋书运. 永磁轴承承载能力分子电流模型的积分定义求解方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 54-59.
- ZHANG Haibo, QIU Yujiang, JIANG Shuyun. Analysis of the equivalent surface current model for the permanent magnet bearing by using the integral definition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 54-59.
- [105] CHO H W, YU J S, JANG S M, et al. Equivalent magnetic circuit based levitation force computation of controlled permanent magnet levitation system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 4038-4041.
- [106] TAQAVI O, TAGHAVI N. Development of a mixed solution of Maxwell's equations and magnetic equivalent circuit for double-sided axial-flux permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(4): 1-11.
- [107] SUN Feng, JIN Junjie, OKA K. Permanent magnetic suspension system: principle, model, simulation and experiment[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [108] WU Huachun, ZHOU Jian, XIE Chunhu, et al. Two-dimensional time series sample entropy algorithm: Applications to rotor axis orbit feature identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147: 107123.
- [109] ZHOU Jian, WU Huachun, WANG Weiyu, et al. Online unbalance compensation of a maglev rotor with two active magnetic bearings based on the LMS algorithm and the influence coefficient method[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2022, 166: 108460.
-
- 作者简介: 赵川, 男, 1993 年出生, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为永磁悬浮传送系统及其控制策略, 混合磁悬浮系统及零功率控制方法。
E-mail: zhaochuan@ sut.edu.cn
- 孙凤(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为磁悬浮与磁力驱动技术, 高端制造装备研发、评价与一致性提升, 地外天体采样探测技术的研究工作, 复杂曲面智能制造与加工技术, 特种加工智能制造装备及工艺方法。
E-mail: sunfeng@sut.edu.cn