

特约专栏

## 高温超导磁悬浮轴承的发展现状及前景

许吉敏, 张 飞, 金英泽, 张 帆, 袁小阳

(西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 第二类高温超导体的磁通钉扎效应使得超导体在外加磁场中无需主动控制而能稳定悬浮。利用这种无源自稳定悬浮特性, 高温超导磁悬浮轴承可以实现部件之间无机械摩擦的高速相对运动, 在旋转机械、飞轮储能和交通运输等方面展现出了良好的应用前景。近年来, 高温超导磁悬浮轴承的发展在世界范围内取得了令人瞩目的成就, 轴承的设计思想、结构和应用环境都得到了相应的拓展。从结构特征角度综述了近年来国内外超导磁悬浮轴承样机的发展现状, 重点介绍了西安交通大学的超导磁液复合轴承结构及其在液体火箭中的应用方案; 结合该领域的研究现状探讨了超导磁悬浮轴承有待研究的问题和应用前景, 指出超导轴承应向复合支撑方向发展以利于推进应用。

**关键词:** 钉扎; 无源自稳定; 高温超导磁悬浮轴承; 发展现状; 应用前景

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)05-0321-08

## Development Status and Prospects of High- $T_c$ Superconducting Magnetic Bearing

XU Jimin, ZHANG Fei, JIN Yingze, ZHANG Fan, YUAN Xiaoyang

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Pinning effect of flux in type II high temperature superconductor (HTS) can make superconductor be stably suspended in external magnetic field without active controlling. By adopting this passive self-stability, high temperature superconducting magnetic bearing (HTSMB) can realize the high speed relative motion between parts without mechanical friction. HTSMB has been demonstrated fascinating application prospects in rotating machinery, flywheel energy storage system, transportation system, and so on. During the past years, the development of HTSMB has made remarkable achievements worldwide. Design ideas, structures and application environments of HTSMB have been expanded accordingly. This paper summarizes typical HTSMB prototypes from the perspective of structural features. A kind of superconducting compound bearing proposed by Xi'an Jiaotong University and its application scheme in liquid rocket are introduced specially. This novel bearing is a combination of HTSMB and fluid film bearing. Based on the development status, issues to be studied and application prospects of HTSMB are discussed. This paper points out that HTSMB should be developed to compound bearing to advance the application process.

**Key words:** pinning; passive self-stability; HTSMB; development status; application prospects.

### 1 前 言

轴承作为旋转机械中关键的功能保障部件之一<sup>[1]</sup>, 其在机械传动过程中除支撑外, 最主要是用来减小部件

之间因相对运动产生的摩擦和磨损<sup>[2]</sup>。一般来说, 固体与固体之间的摩擦系数约为 0.1~1, 固体与液体之间摩擦系数约为  $10^{-4} \sim 10^{-3}$ , 固体与气体之间摩擦系数小于  $10^{-4}$ 。根据已有的基础摩擦学知识可知, 磁悬浮轴承通过磁力作用将转子悬浮在空间中, 可以最大程度上降低转子和定子系统的摩擦磨损<sup>[3]</sup>。电磁悬浮轴承是一种吸力型轴承, 具有本质不稳定性, 需要一套复杂的反馈控制系统及算法才能有效解决稳定性问题<sup>[4]</sup>。永磁悬浮轴承虽然结构简单, 但单靠永磁体无法保证转子 5 个自由度上的稳定悬浮, 一般需要和主动控制轴承配合使用<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175408)

第一作者: 许吉敏, 男, 1989 年生, 博士研究生

通讯作者: 袁小阳, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, Email:  
xyyuan@mail.xjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.05.01

近年来,随着液氮温区高温超导材料的发现<sup>[6]</sup>,超导技术及其应用都得到了长足的发展。以钇钡铜氧超导体为例,其内部存在各种与相干长度相近的晶体缺陷<sup>[7]</sup>,磁通线或磁力线束在这些缺陷位置会出现被捕获的磁通钉扎现象<sup>[8]</sup>。利用超导体的抗磁性及这种磁通钉扎特性,高温超导磁悬浮轴承(SMB)可以实现被支撑部件的稳定悬浮。由于摩擦小、转速高,SMB在旋转机械、储能飞轮和运输系统中的应用研究非常活跃,原理模型和全尺寸轴承样机推陈出新,成果丰富。1987年,康奈尔大学首先研制出了SMB,该轴承转子重量为5 g,转速10000 rpm<sup>[9]</sup>。之后康奈尔大学与阿贡实验室对SMB进行了较为系统的基础性探索工作,涉及超导轴承的材料、结构、性能优化等,在1992年便创下了最高转速520000 rpm的纪录<sup>[10]</sup>,摩擦系数仅为 $10^{-7}$ 。目前多个国家已经宣布研制出了面向不同应用领域的全尺寸SMB样机。随着超导材料性能的改进和轴承结构的创新,SMB进入实用化的障碍将愈来愈少。

## 2 国内外发展现状

SMB的基本原理可以通过一个高温超导体和永磁体相互作用的轴对称模型来表征,材料特性和轴承结构对SMB的性能影响较大。

### 2.1 超导材料悬浮力和摩擦性能的相关研究

单块永磁体和单块超导体之间的电磁相互作用力是SMB稳定运行的基础,相关研究一直是超导领域的基础性研究主题并得到了广泛的关注。兰州大学张兴义对各种条件下的超导磁悬浮系统的电磁作用力进行了大量实验研究,涉及准静态情形下系统悬浮力和横向力时间弛豫特性<sup>[11,12]</sup>以及悬浮系统在外加激励作用下悬浮体受力和悬浮中心随时间漂移的特征<sup>[13]</sup>。相对于理论模型预测精度的限制,高精度磁力测试仪所获取的结果更有应用价值。特别是超导体晶畴生长的随机性,理论模型分析

结果往往相差甚远。构建SMB时大多选择单畴超导体并保证足够的实测磁悬浮力密度。以目前的发展水平,磁悬浮力密度应保证在 $10 \text{ N/cm}^2$ (零场冷,1 mm左右最小间隙,0.5 T外磁场)以上。用于磁力测试的仪器从最初的一维已发展到三维,杨万民小组研发的三维测试仪,可同时测量垂直方向悬浮力和侧向回复力,并能通过霍尔探头实现捕获磁通的测量<sup>[14]</sup>。对于微小间隙下的超导块材磁力测试需求,袁小阳小组提出并制作了适用于 $100 \mu\text{m}$ 以下间隙的磁力测试仪<sup>[15,16]</sup>,采用手动代替伺服电机来精细调节小范围内超导体和永磁体之间的间隙。

若SMB进入工程应用,其载荷状况将数倍恶劣于样机和试验装置,因冲击载荷或失超<sup>[17]</sup>导致的轴承碰磨现象将不可忽视。目前关于高温超导材料摩擦学性能的研究鲜有报道,其摩擦学机理尚需深入研究。超导体在临界转变温度上下的摩擦学特性呈现出了奇特的现象,大气环境下YBCO摩擦系数基本稳定,而在液氮环境中摩擦系数会急剧降低<sup>[18]</sup>。Dayo等<sup>[19]</sup>认为摩擦以电子-空穴对的扩散散射和声子产生两种能量耗散的形式存在,当材料处于超导态时,电阻为零,电子对摩擦的贡献降到最低,因而摩擦系数会急剧降低。李长生小组<sup>[20,21]</sup>对Y系和Bi系高温超导体的常温和低温摩擦学性能进行了较为系统的实验研究,提出掺杂Ag来提高超导体摩擦学性能的方法。Ag添加到超导体中可以抑制裂纹萌生和扩展,并可在摩擦作用下向表面转移形成Ag的转移膜,起到减摩的作用。

超导材料的基础性理论和实验研究支撑了SMB样机的研发,在这方面国内外的水平相当。

### 2.2 典型结构SMB的发展现状

典型结构SMB主要由超导定子和永磁转子两部分构成,按照悬浮力方向与转子轴线方向是否平行,SMB可以分为轴向型和径向型两种,如图1所示<sup>[22]</sup>。

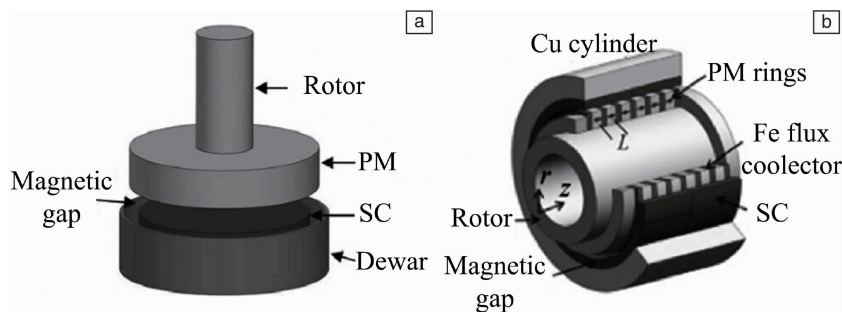


图1 轴向型SMB(a)和径向型SMB(b)<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Schematic of axial-type SMB (a) and radial-type SMB (b)<sup>[22]</sup>

表1对两种类型SMB结构和性能进行了比较。轴向型SMB的平板式结构使超导定子可以由多块超导块材几何组合而成,制作相对容易。径向型SMB中超导

定子的制备工艺要复杂的多,原因在于超导材料的机械加工性能差,需要采用多个圆弧瓦块拼装成环形定子。

表1 轴向和径向型 SMB 结构和性能比较

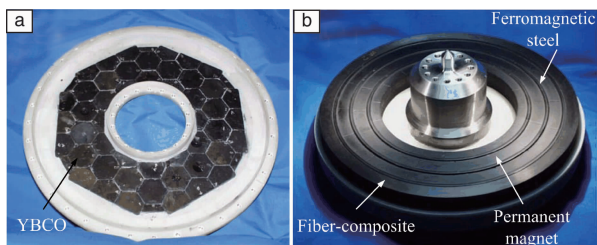
Table 1 Structure and performance of axial - type and radial - type SMB

Items	Axial - type SMB	Radial - type SMB
Structural features	Planar structure, extended - type	Cylindrical structure, compact - type
Shape of superconductors	Bulk	Arcuate
Stiffness	About 100 N/mm	About 1000 N/mm
Rotational speed	About 100 krpm	About 10 krpm

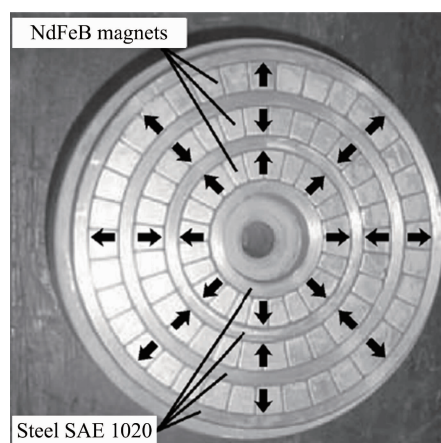
### 2.2.1 轴向型 SMB

轴向型 SMB 的结构简单、研制门槛较低，样机的研制非常活跃。其中以美国波音公司与阿贡实验室联合研制的样机最具代表性<sup>[23,24]</sup>，如图 2 所示。该轴承定子由若干六边形块状 YBCO 块材拼凑而成，块材的边长约为 36 mm、厚度 4.5 mm，捕获磁通 3900 ~ 4600 Gs (77 k)。波音将其应用于 10 kWh 级飞轮储能系统中，转速最高达到了 23675 rpm，整个系统损耗低于总储能的 0.1% /h，轴向刚度 144 N/mm、径向刚度 69 N/mm，在同级别飞轮储能占领先地位。

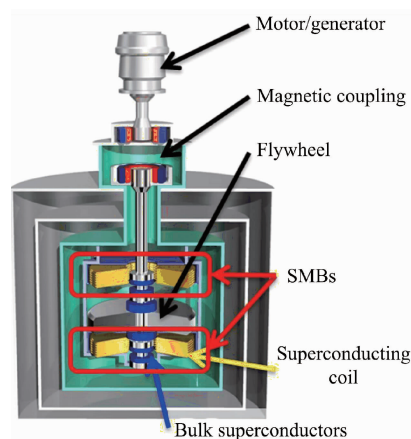
图 2 中的永磁转子包含 3 个拼装永磁环，永磁环由多个径向磁化的永磁弧段拼接而成，是一种磁通型 (FS) 转子。巴西里约热内卢大学提出了一种轴向磁化型 (AM) 永磁转子<sup>[25]</sup>，拼接的永磁弧段轴向磁化，如图 3 所示。相邻两磁环之间同极相配以提高轴向磁通梯度，从而提高悬浮力和刚度。但相比之下，FS 型转子质量要轻，磁通连续规则、损耗低。

图2 波音 SMB 的定子 (a) 和转子 (b)<sup>[24]</sup>Fig. 2 Stator (a) and rotor (b) of Boeing SMB<sup>[24]</sup>

日本铁路技术研究所提出利用超导线圈和块材构建 SMB 的设想并制作了实验模型<sup>[26]</sup>。定子由直径 120 mm 的 NbTi 超导线圈构成，由 4K - GM 制冷机直接冷却，最大磁场 5 T。转子由两块  $D 60 \text{ mm} \times h 20 \text{ mm}$  的 GdBCO 组成，由旋转杜瓦中的液氮直接冷却。1000 rpm 时轴向承载力可达 2500 N，远大于同尺寸永磁 - 超导型 SMB 的承载力。Arai 等<sup>[27]</sup>制作了一个类似的小型超导飞轮储能系统，如图 4 所示。其转子由 2 个 SMB 支撑，通过磁力联

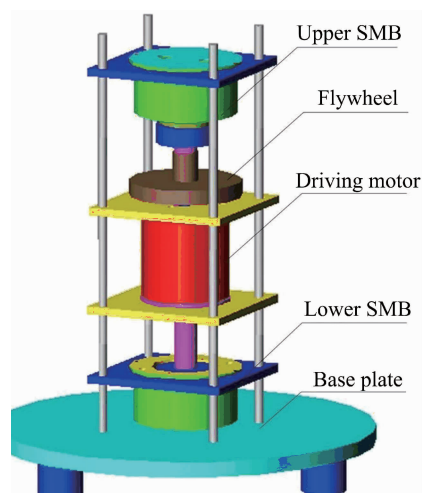
图3 轴向磁化型永磁转子<sup>[25]</sup>Fig. 3 Axial - magnetization type permanent rotor stator<sup>[25]</sup>

轴器与电机联接。SMB 的定子是采用 BSCCO 线材绕制的电感线圈。转子由直径 140 mm/80 mm 的 GdBCO 块材构成。定子和转子的温度维持在 12 K 以下，悬浮力最大为 73 N，超导线圈中的电流最大达到了 60 A，转子转速超过 2000 rpm。这种独特的定转子结构设计思想对于发展全超导磁悬浮轴承、充分利用冷却源、提高超导轴承承载力有较为突出的参考价值。

图4 采用超导线圈和块材的飞轮储能系统<sup>[27]</sup>Fig. 4 Flywheel energy storage system using superconducting coil and bulk superconductors<sup>[27]</sup>

国内关于 SMB 的研究起步较晚，比较有代表性的轴向 SMB 是 2009 年西南交通大学研制的双轴向 SMB 飞轮储能样机<sup>[28,29]</sup>，如图 5 所示。2.4 kg 的转子通过上置式 SMB 和下置式 SMB 同时悬浮支撑。两轴向 SMB 的定子均由 7 块直径 30 mm、厚度 18 mm 的圆柱形 YBCO 块材组成，转子为 3 块轴向磁化的圆柱形永磁体重叠构成。转速最高 3000 rpm，轴向悬浮力和侧向回复力分别为 79.2 N、9.7 N。



图 5 双轴型 SMB 样机<sup>[28]</sup>Fig. 5 Double-axial superconducting bearing prototype<sup>[28]</sup>

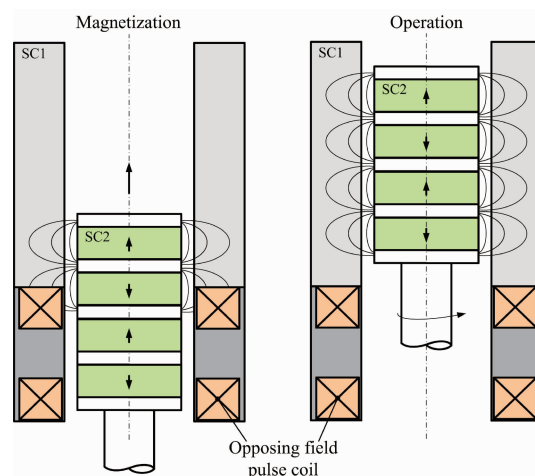
### 2.2.2 径向型 SMB

径向型 SMB 主要面向于卧式结构转子系统的承载, 其研制难度大于轴向型。原因在于圆环超导定子制备困难, 如何将脆性的高温超导块材通过加工、拼接成圆环是关键之一。德国、日本、韩国、英国、中国等都有相应的径向 SMB 轴承样机问世, 面向电机、飞轮储能、低温液体泵等应用场所。

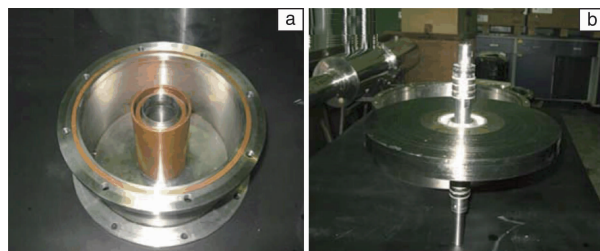
2006 年德国耐克森公司、布伦瑞克大学及西门子公司合作研制了应用于 4MVA 超导发电机的高温超导径向磁力轴承<sup>[30]</sup>。该轴承直径 300 mm、悬浮刚度 5.1 kN/mm, 其超导定子是由 270 块 YBCO 正方形块材拼接而成。径向承载力和转速分别达到了 6900 N、3600 rpm, 第一次实现了 SMB 的工业级应用。

德国 ATZ 公司 2001 年研制出采用径向型高温超导轴承的激光偏转多边形检测仪, 最大转速达到了 17400 rpm<sup>[31]</sup>。之后 2009 年研制出了采用 55 块超导体的径向超导轴承<sup>[8]</sup>, 径向负载力达到了 4700 N (72 K)、刚度达到了 1.8 kN/mm (72 K); 轴向负载力达到了 10080 N、刚度达到了 4.5 kN/mm (72 K)。该轴承的热沉设计成了双壁环形容器结构, 既可以在外壁安装冷却头传导冷却, 也可填充液氮冷却。该轴承具有占用空间小、悬浮力和刚度大、损耗小等优点, 基本代表了径向型 SMB 的发展水平。韩国电力研究院对径向 SMB 在飞轮储能系统中的应用进行了深入的研究。2001 年设计的 SMB 使飞轮转速达到了 67000 rpm<sup>[32]</sup>。2007 年更使飞轮转速达到了惊人的 51000 rpm<sup>[33]</sup>, 储能 337 J, 能够在无电压输入的情况下正常运行 3.33 h。2007 年韩国在欧洲应用超导会议上首次公开了迄今最大飞轮储能项目 100 kWh 级径向 SMB 的

研究<sup>[34]</sup>, 该轴承定子由 80 块矩形超导体拼接而成。英国剑桥大学<sup>[35]</sup>提出了一种新型全超导径向轴承, 如图 6 所示, 转子和定子均为超导材料。超导转子通过脉冲线圈先行磁化, 捕获磁通梯度达到了 1.5 T, 远大于永磁体磁场梯度, 超导定子和超导转子之间的悬浮力密度达到了 100 N/cm<sup>2</sup>。

图 6 剑桥大学的全超导径向型 SMB<sup>[35]</sup>Fig. 6 A novel fully superconducting radial-type SMB in Cambridge University<sup>[35]</sup>

在国内, 2011 年西南交通大学研制出了用于低温液体泵的径向 SMB<sup>[36]</sup>, 超导定子由 6 块长方形 YBCO 构成, 转速最高达到了 3801 rpm, 径向刚度约为 80 N/mm。中国科学院电工研究所张国民小组 2014 年为超导飞轮储能系统研制了径向型超导轴承<sup>[37]</sup>, 如图 7 所示。其定子由 32 块弧形瓦拼接成 4 条超导环, 并内嵌在两层铜壁之间, 采用液氮冷却。最大悬浮力约为 100 N, 径向刚度约为 25 N/mm。

图 7 中科院的径向型 SMB 定子 (a) 和转子 (b)<sup>[37]</sup>Fig. 7 Stator (a) and rotor (b) of radial-type SMB in Chinese Academy of Sciences<sup>[37]</sup>

整体来说, 国内在 SMB 的应用方面与国际先进水平有一定差距, 关键性能指标并不出色, 很大程度上受限于先进机械加工手段的应用。

### 2.3 超导混合磁力轴承的发展现状

SMB 是一个低阻尼系统,共振频率低。通常希望 SMB 工作在较高的转速下,如飞轮储能、低温泵等。因此需要提高 SMB 系统的阻尼及刚度,使其顺利通过共振频率且具有较好的抗冲击能力。有研究者提出将 SMB 与 PMB (永磁悬浮轴承) 或 AMB (电磁悬浮轴承) 相组合,形成超导混合磁力轴承系统,以提高轴承承载性能和刚度特性。

日本 Komori 等制作了 2AMB + 2SMB 样机<sup>[38]</sup>,径向 SMB 提供悬浮力以支撑转子,AMB 用以提高刚度抑制振动。转速最高可达 63000 rpm,径向振动小于 30  $\mu\text{m}$ 。Murakami 等提出了一种 PMB + SMB 组合的飞轮储能系统<sup>[39]</sup>,如图 8 所示。该系统可储能 10.6 J,转速可达 5000 rpm。

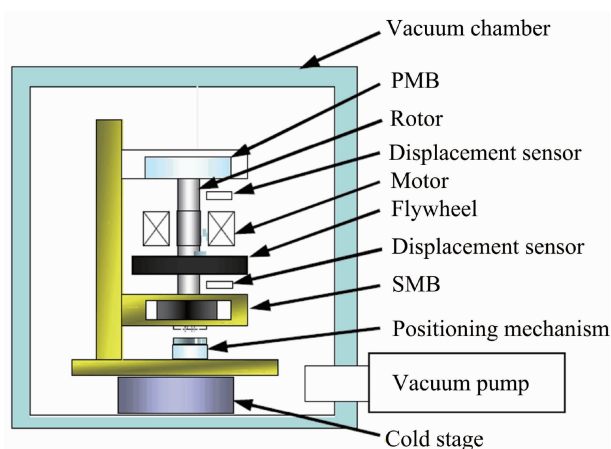


图 8 PMB + SMB 组合飞轮储能系统<sup>[39]</sup>

Fig. 8 Flywheel energy storage system using PMB and SMB<sup>[39]</sup>

中国科学院电工研究所 20 世纪 90 年代末便开展了超导混合磁力轴承的研究,与国际基本保持了同步。方家荣等<sup>[40]</sup>提出了一种立式永磁有源超导混合磁力轴承 (PASMB),采用 PMB 用以轴向卸载,一个 SMB 提供稳定悬浮力,一个 AMB 提高径向刚度和阻尼,从而满足大载荷、高刚度、高阻尼的工业级应用需求。此外,2006 年国家“863”课题“基于主动电磁和高温超导组合轴承的高速飞轮储能系统”也面向发展超导混合磁力轴承。

整体来说,超导混合磁力轴承还是利用同性质的磁力来提高轴承性能。由于磁场固有的迟滞特性,轴承的刚度性能难以得到大幅的提升。此外,这种靠增加轴承数目的方法,一定限度上也增加了系统复杂性同时也减低了可靠性。

### 2.4 西安交通大学提出的超导磁液复合轴承

目前所发展的 SMB 大部分面向于飞轮储能系统的应用前景,限制其发展的原因一方面是轴承性能本身的缺陷,另一方面是 SMB 稳定工作所需的低温环境带来能量的人不敷出。如果系统中具有天然低温环境,则可大大节省冷却成本。20 世纪 90 年代,美国 NASA 工作人员<sup>[41]</sup>和日本部分研究者<sup>[42]</sup>对 SMB 应用于液体火箭发动机的可行性进行了研究。1993 年 Decher R 撰文讨论了将 SMB 与滑动轴承组合应用于火箭涡轮泵的可行性<sup>[43]</sup>。日本超导国际技术研究中心于 2006 年 9 月 27 日公布的一份产业化报告书“プロジェクトの詳細説明資料事業化について (超電導バルク製造)”中提到,超导将应用于火箭的涡轮发动机。目前火箭涡轮泵中所用轴承主要为滚动轴承,由于滚动轴承自身结构的影响,涡轮泵的最高转速也受到一定的限制,制约了火箭运载能力的提升。因此采用新型轴承来替代滚动轴承是一种发展趋势。

近年来,西安交通大学袁小阳课题组在国家自然科学基金“超导磁斥力与液膜力复合新型轴向径向联合轴承的建模和实验”项目的资助下,以新一代液体火箭发动机为应用前景,提出了一种超导磁液复合轴承方案<sup>[44,45]</sup>,如图 9 所示。

该轴承最大特色在于一种可称为“超导可倾瓦”的结构,即圆形或扇形超导瓦,其安装方式不同于典型 SMB 中的固定安装方式,它安装在可产生弹性变形的碟簧和可倾支点上。可倾瓦轴承结构在工程中应用广泛,一般认为其具有天然稳定性,可以增强转子高速稳定性。工作时,低温燃料被泵入轴系中,浸泡在低温介质中的超导复合轴承在高速旋转的永磁体推力盘的作用下,除了超导磁力,还有因瓦块轻微摆动产生的流体动压力。

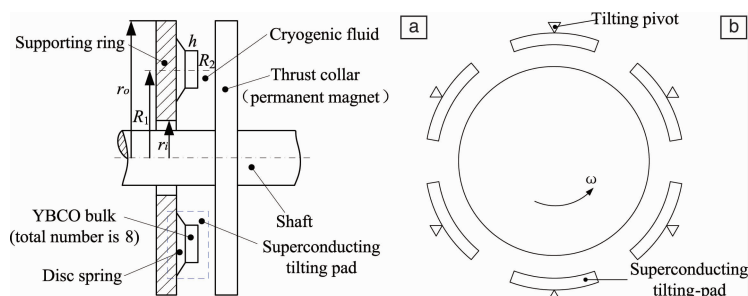


图 9 超导磁液复合轴向 (a) 和径向 (b) 轴承方案<sup>[44]</sup>

Fig. 9 Structural diagram of axial - type (a) and radial - type (b) superconducting compound bearing<sup>[44]</sup>

火箭的燃料一般以过冷状态储存在燃料箱中,液氧和液氢温度分别约为 70 K 和 30 K,能使高温超导体冷却良好。此外液体燃料作为润滑介质,在超导瓦与推力盘之间形成液膜以承载。基于此,该轴承实现了超导磁力与动压液膜力的复合。超导磁力可保证在火箭启停阶段无接触摩擦(超导),动压液膜力则可保证稳定运行阶段的高刚度要求。

图 10 为超导磁液复合轴承在火箭涡轮泵中的应用方

案。该轴承转子系统采用超平衡设计,即正常状态下平衡装置平衡力  $F_p$  大于轴承力  $F_z$  与叶轮力  $F_y$  之和。优势在于:当火箭启动瞬间,产生一个向上的加速度(5 g),平衡力不能平衡这个冲击载荷,双向推力轴承的轴承力反向,以避免直接碰磨。该轴系轴向采用一个双向推力超导磁液复合轴承,径向采用 2 个径向型超导磁液复合轴承,不再采用存在机械摩擦的滚动轴承。

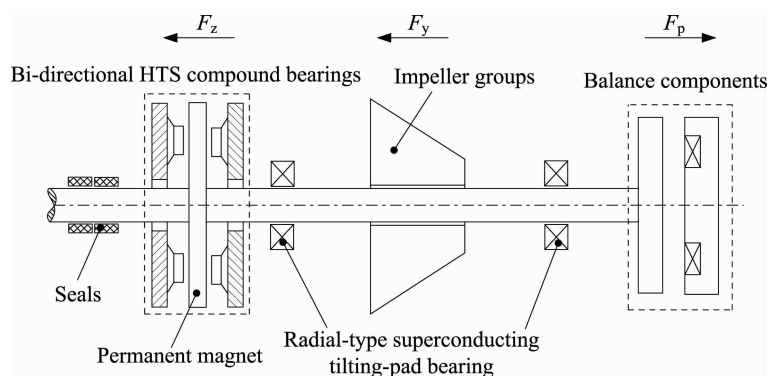


图 10 超导磁液复合轴承在火箭涡轮泵中的应用<sup>[44]</sup>

Fig. 10 Application scheme of superconducting compound bearing in rocket engine<sup>[44]</sup>

复合轴承兼具了超导轴承摩擦小和动压液膜轴承刚度的优点,对于发展新一代高速火箭涡轮泵有价值。值得注意的是,超导磁液复合轴承还存在一个“尺寸”问题:由于低温燃料的低粘特性,高速下动压液膜轴承的膜厚经计算在 20 ~ 50  $\mu\text{m}$  左右,而高温超导材料是一种金属陶瓷,机械加工性差,所能达到的表面粗糙度与膜厚数量级相同,使得这种超导磁液复合轴承的应用存在一定的困难。因此提出采用添加铜套来解决这个问题,将超导瓦块安装在铜套之中。由于铜是非磁性材料,不会影响磁通线的分布,对超导磁场的影响有限。铜的加工性能优良,表面粗糙度可以做到远低于膜厚数值,并使得可倾支点的安装更方便。

### 3 有待研究的问题

通过对 SMB 发展现状的调研和分析发现,自从 1987 年康奈尔大学首先研制出转速 10000 rpm 的样机,近 20 年来 SMB 的发展迟缓,未有重大突破。原因在于 SMB 的性能没有提高到可以大规模工业应用的级别,轴承材料、结构、应用等方面还有待深入研究,具体来说:

(1) 高性能超导轴承材料的研制。对现有的 Y 系超导材料来说,制备高性能大尺寸单畴块材仍是全世界范围内的热点和难点问题。虽然法国报道其制备了直径 100 mm 左右的单畴,但工艺的可重复性差,距离大批量的制备还很遥远,原因在于:YBCO 层状生长机制导致生产速度极慢,而 YBCO 的生长窗口很小,使得生长前

沿容易再形核破坏晶畴的长大;制备过程中添加的 Y211 粒子长大阻碍了单畴的生长;生长前沿液相流失,迫使 123 单畴停止生长。此外,高温超导体中固有的磁通蠕动现象会进一步减弱 SMB 的承载性能,永磁转子中的涡流损耗会使得转速逐渐减小<sup>[46]</sup>。因此有必要对已有高温超导块材的制备工艺进行改善,并致力于新型超导轴承材料的开发,同时提高材料的机械加工性能;

(2) 轴承材料的摩擦学性能和 SMB 的失超保护研究。SMB 进入工程应用后,因冲击载荷或失超导致的轴承碰磨现象不可忽视。高温超导材料在液氮温区呈现出了减摩效应甚至超滑,应该得到足够的重视。SMB 的稳定运行需要极低的低温,一旦失超,轴承将发生机械摩擦,室温下的超导轴承材料摩擦磨损严重,会带来系统安全性的急剧降低,因此有必要加强对 SMB 失超保护的原理、结构等方面的研究;

(3) SMB 动态特性表征和高速稳定性研究。在传统的轴承转子动力学中,轴承的动力特性可以通过刚度、阻尼系数来表征,从而建立系统动力学模型,研究转子系统的高速稳定性。SMB 虽然有刚度和阻尼系数的简单定义,但一般表述认为 SMB 始终是无源自稳定的,很少关注 SMB 的高速稳定性或者说这种稳定性的研究手段缺乏,有必要发展并深入研究;

(4) 复合型轴承结构的实验验证。原理上来说 SMB 与 PMB、AMB 和液膜轴承的复合可以提高轴承的性能,但这种复合有时候是耦合的,两两之间的关系和影响不

够明确,一方面需要加强理论研究,更多的是需要实验去发现问题并验证相应的理论。

## 4 应用前景

目前所开发出的 SMB 样机大部分都是面向飞轮储能系统。由于摩擦系数极低的 SMB 可以大大降低储能系统的能量损耗,可以预见这一热门应用将一直持续。近年来 SMB 的应用前景范围在大量研究者的努力下不断拓宽,总结来说还有:

(1) 具有天然低温环境的旋转机械,如液体火箭发动机、低温液体泵等<sup>[47]</sup>。自带的低温环境为 SMB 的稳定运行提供了必要的工作温度,简化了轴承结构。在目前超导材料的技术限制下是一种成本较为低廉的应用。此外,这些机械中的低温液体可以充当液膜轴承的润滑剂,实现超导磁力与液膜力的复合,提高轴承的承载性能和动力学性能。理论上说,这种磁液复合轴承距离应用已不远;

(2) 太空和深空应用。太空中固有的低温环境也使得 SMB 具有明显的优势。利用 SMB 实现高速旋转可以提供旋转能量和角动量,实现卫星的能量储存与姿态控制一体化<sup>[48]</sup>;

(3) 其他旋转机械,如纺织机械<sup>[49]</sup>等。德国 Sparing 等采用 SMB 来降低纺纱过程中因摩擦产生的热量,并使转轴的转速达到了 11000 rpm,提高了纺纱效率。

整体来说,低摩擦、高速的 SMB 具有巨大的潜在工业应用价值。

## 5 结 语

本文从原理和结构特征角度综述了近年来国内外超导磁悬浮轴承样机的典型研究成果,结合发展现状探讨了领域内的热点和应用前景,形成以下结论:

(1) 高温超导材料的磁悬浮密度目前最高约  $18 \sim 20 \text{ N/cm}^2$  ( $0.5 \text{ T}$ ,  $77 \text{ K}$ ) 远低于理论预估最高值,且机械加工性差,制约了 SMB 承载性能的提升,需要从制备工艺和新材料开发角度提高材料性能;

(2) SMB 的动力特性应与转子动力学结合研究,对超导材料的动力特性和超导轴系的高速稳定性应加强重视;

(3) 超导飞轮储能作为目前 SMB 最热门的应用前景,其发展趋势是功率大型化。发展大型的超导飞轮储能电站,具有以极低的能量损耗取代现有成熟技术的优势;

(4) 液体火箭发动机是 SMB 最有前景的应用场所之一,其发展趋势是高速化。SMB 与液体支撑技术的复合

支持发展新一代高速火箭涡轮泵,在获取更高转速的同时兼顾了高速稳定性;

(5) 单纯的超导轴系需要向混合支撑轴系发展,将 SMB 与成熟支撑技术复合,推进 SMB 的应用进程。

## 参考文献 References

- [1] Ouyang Wu (欧阳武), Zhao Zhiming (赵志明), Ge Qing (葛庆), et al. *Journal of Vibration and Shock* (振动与冲击) [J], 2012, 31 (S): 231–236.
- [2] Zhang F, Ouyang W, Hong H, et al. *Tribology International* [J], 2015, 88: 228–235.
- [3] Valiente-Blanco I, Diez-Jimenez E, Cristache C, et al. *Tribology Letters* [J], 2014, 54 (3): 213–220.
- [4] Pesch A H, Smirnov A, Pyrhönen O, et al. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* [J], 2015, 20 (3): 1448–1457.
- [5] Jiang S, Wang H, Wen S. *Journal of Mechanical Science and Technology* [J], 2014, 28 (12): 5043–5053.
- [6] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J, et al. *Phys Rev Lett* [J], 1987, 58 (9): 908–910.
- [7] Zhang Cuiping (张翠萍). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010.
- [8] Hou Jiejie (侯洁洁). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2015.
- [9] Moon F C. *Superconducting Levitation Applications to Bearings and Magnetic Transportation* [M]. Wiley – Interscience, 1994: 198–212.
- [10] Ma K B, Postrekhin Y V, Chu W K. *Rev Sci Instrum* [J], 2003, 74 (12): 4989–5017.
- [11] Zhang X, Zhou Y, Zhou J. *IEEE Trans Appl Supercond* [J], 2008, 18 (3): 1687–1691.
- [12] Zhang X, Zhou Y, Zhou J. *Mod Phys Lett B* [J], 2008, 22 (7): 499–506.
- [13] Zhang X, Zhou Y, Zhou J. *Mod Phys Lett B* [J], 2008, 22 (7): 2659–2666.
- [14] Yang W M, Chao X X, Shu Z B, et al. *Physica C* [J], 2006, (445–448): 347–352.
- [15] Xu Jimin (许吉敏), Hou Jiejie (侯洁洁), Wu Jiuhui (吴九汇), et al. *Engineering & Test* (工程与试验) [J], 2014, (s): 44–48+65.
- [16] Yuan Xiaoyang (袁小阳), Xu Jimin (许吉敏), Ding Defu (丁德甫), et al. *China*, CN104180750A [P]. 2014–12–10.
- [17] Fu Y, Tsukamoto O, Furuse M. *IEEE Trans Appl Supercond*. [J], 2003, 13 (2), 1780–1783.
- [18] Kuleba VI, Ostrovskaya Ye L, Pustovalov V V. *Tribology International* [J], 2001, (34): 237–246.
- [19] Dayo A, Alnasrallah W, Krim J. *Phys Rev Lett* [J], 1998, 80 (8): 1690–1693.
- [20] Ding Q, Li C, Dong L, et al. *Wear* [J], 2008, 265: 1136–1141.
- [21] Dong Lirong (董丽荣). *Thesis is for Doctorate* [D]. Zhenjiang:

- Jiangsu University, 2009.
- [22] Yu Zhiqiang (余志强), Zhang Guomin (张国民), Qiu Qingquan (邱清泉), *et al. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy* (电工电能新技术) [J], 2014, 33 (7): 55–61.
- [23] Day A C, Strasik M, McCrary K E, *et al. Supercond Sci Technol* [J], 2002, 15: 838–841.
- [24] Strasik M, Hull J R, Mittleider J A, *et al. Supercond Sci Technol* [J], 2010, 23: 034021 (5pp).
- [25] Sotelo G G, Ferreira A C, Andrade R De. *IEEE Trans Appl Supercond* [J], 2005, 15 (2): 2253–2256.
- [26] Nagashina K, Seino H, Sakai N, *et al. Physica C* [J], 2009, 469: 1244–1249.
- [27] Arai Y, Seino H, Yoshizawa K, *et al. Physica C* [J], 2013, 494: 250–254.
- [28] Deng Zigang (邓自刚), Li Qunxu (李群煦), Wang Jiasu (王家素), *et al. Chinese Journal of Low Temperature Physics* (低温物理学报) [J], 2009, 31 (4): 311–314.
- [29] Deng Z, Li Q, Wang J, *et al. Cryogenics* [J], 2009, 49: 259–262.
- [30] Walter H, Bock J, Frohne C, *et al. Journal of Physics: Conference Series* [J], 2006, 43: 995–998.
- [31] Werfel F N, Floegel–Delor U, Rothfeld R, *et al. IEEE Trans Appl Supercond* [J], 2001, 11 (1): 1737–1740.
- [32] Sung T H, Lee J S, Han Y H, *et al. Cryogenics* [J], 2001, 41 (7): 461–467.
- [33] Lee K, Kim B, Ko J, *et al. Supercond Sci Technol* [J], 2007, 20 (7): 634–639.
- [34] Hart Y H, Jung S Y, Lee J P, *et al. Characteristics of a Superconductor Journal Bearing Substator for a 100 kWh SFES* [C]. 8<sup>th</sup> European Conference on Applied Superconductivity. Brussels, 2007: 16–20.
- [35] Patel A, Palka R, Glowacki B A. *Supercond Sci Technol* [J], 2011, 24: 015009 (8pp).
- [36] Lin Q, Jiang D, Ma G, *et al. IEEE Trans Appl Supercond* [C], 2012, 22 (3): 5201604 (4pp).
- [37] Yu Z, Zhang G, Qiu Q, *et al. IEEE Trans Appl Supercond* [J], 2014, 24 (3): 5700405 (5pp).
- [38] Kormori M, Kumamoto M, Kobayashi H. *IEEE Trans Appl Supercond* [J], 1998, 8 (2): 79–83.
- [39] Murakami K, Komori M, Mitsude H, *et al. Cryogenics* [J], 2007, 47: 272–277.
- [40] Fang Jiarong (方家荣), Lin Liangzhen (林良真), Xia Pingchou (夏平畴), *et al. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energys* (电工电能新技术) [J], 2000, 1: 27–31.
- [41] Heinen V O, Sokoloski M M, Aron P R, *et al. Advances in Superconductivity IV* [J], 1992, pp11–15.
- [42] Yoshida K, Ohashi T, Shiraishi K, *et al. Feasibility Study of Superconducting LSM Rocket Launcher System* [R]. Faculty of Eng, Kyushu Uni, Fukuoka, 1994.
- [43] Decher R, Peters P N, Sisk R C, *et al. Applied Superconductivity* [J], 1993, 1 (7–9): 1265–1278.
- [44] Xu J, Chen R, Hong H, *et al. IEEE Trans Appl Supercond* [J], 2015, 25 (6), 3601908 (8pp).
- [45] Xu J, Yuan X, Zhang C, *et al. IEEE Trans Appl Supercond* [J], 2016, 25 (3), 3600505 (5pp).
- [46] Demachi K, Masaie I, Ichihara T, *et al. Physica C* [J], 2005, 426–431: 826–833.
- [47] Zhu Shengliang (朱圣良), Yuan Chunyan (袁春燕). *Cryo & Supercond* (低温与超导) [J], 2010, 39 (2): 25–29+80.
- [48] Zhang Y, Postrekhin Y, Ma K B, *et al. Supercond Sci Technol* [J], 2002, 15 (5): 823–825.
- [49] Sparing M, Hossain M, Berger D, *et al. IEEE Trans Appl Supercond* [J], 2015, 25 (3): 3600504 (4pp).

(编辑 盖少飞)