

引用格式: 艾立旺, 方敬磊, 陈帅, 等. 高温超导磁力传动的发展现状及前景[J]. 中国材料进展, 2024, 43(6): 503–512.

AI L W, FANG J L, CHEN S, *et al.* Development Status and Prospect of High-Temperature Superconducting Magnetic Transmission[J]. Materials China, 2024, 43(6): 503–512.

高温超导磁力传动的发展现状及前景

艾立旺¹, 方敬磊¹, 陈帅², 靖立伟³, 许孝卓¹

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

(2. 郑州工商学院工学院, 河南 郑州 450018)

(3. 中国科学院电工研究所 应用超导重点实验室, 北京 100190)

摘要: 鉴于高温超导材料具有高载流、强捕获磁场特性与迈斯纳效应, 将高温超导材料应用于磁力传动装置, 可在实现无接触转矩传输的同时, 显著提高转矩密度、传动效率等性能。国内外已开展高温超导磁力传动的理论与应用研究工作, 并取得了相应的进展。以高温超导磁力耦合器和高温超导磁齿轮为研究对象, 通过调研国内外相关文献, 从结构及原理、建模与分析两方面综述高温超导材料在磁力传动领域的研究现状。在此研究基础上, 进一步探讨高温超导磁力传动研究在创新拓扑结构设计、冷却与供电、超导磁体交流损耗、复杂传输特性的多目标优化所面临的问题及未来发展前景。

关键词: 高温超导; 磁力传动; 转矩传输; 磁力耦合器; 磁齿轮

中图分类号: TM26⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)06-0503-10

Development Status and Prospect of High-Temperature Superconducting Magnetic Transmission

AI Liwang¹, FANG Jinglei¹, CHEN Shuai², JING Liwei³, XU Xiaozhuo¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

(2. School of Engineering, Zhengzhou Technology and Business College, Zhengzhou 450018, China)

(3. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In view of the high current carrying capacity, strong trapped magnetic field characteristics and Meissner effect of high-temperature superconducting materials, the application of high-temperature superconducting materials to magnetic transmission devices can significantly improve the torque density and transmission efficiency while realizing contactless torque transmission. The theoretical and applied research of high-temperature superconducting magnetic transmission has been carried out at home and abroad, and corresponding progress has been made. Taking high-temperature superconducting magnetic couplings and high-temperature superconducting magnetic gears as the research objects, this paper reviews the research status of high-temperature superconducting materials in the field of magnetic transmission from the aspects of structure and principle and modeling and analysis through the investigation of relevant literature at home and abroad. Based on this research status, we further discuss the problems and development prospects of high-temperature superconducting magnetic transmission in terms of innovative topology design, cooling and power supply, alternating current loss of superconducting magnets, multi-objective optimization of complex transmission characteristics.

Key words: high-temperature superconducting; magnetic transmission; torque transmission; magnetic coupling; magnetic gear

收稿日期: 2023-01-06 修回日期: 2023-09-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52177039); 河南省科技攻关项目(212102210013, 222102220016); 河南省高校基本科研业务费专项(NSFRF210316); 河南理工大学博士基金项目(B2020-20)

第一作者: 艾立旺, 男, 1989 年生, 讲师

通讯作者: 许孝卓, 男, 1981 年生, 教授, 博士生导师,

Email: xxz@hpu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202301002

1 前言

磁力传动装置, 例如磁力耦合器(magnetic couplings, MC)、磁齿轮(magnetic gear, MG), 与机械传动装置相比, 能够实现非接触性传递转矩, 在过载的情况下不易

出现损坏,可保护原动机;减小传动部件之间的摩擦损耗以及噪音,使用寿命长。因此,磁力传动装置在工业自动化、船用发电机、电动汽车及航空航天等领域得到了重视。

然而常规磁力传动装置(MC、MG)受到永磁材料及常规导体材料性能和结构尺寸的制约,存在转矩密度低、电磁损耗较大的缺陷。例如,机械齿轮的转矩密度通常在 $100 \sim 200 \text{ kNm} \cdot \text{m}^{-3}$ 的范围内^[1];而谐波型 MG 的转矩密度最高仅为 $150 \text{ kNm} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[2],不能满足一些大功率传动的要求。为弥补这一缺陷,国内外许多学者尝试采用高温超导体(high-temperature superconductor, HTS)来提高磁力传动的传递功率。

独特的物理特性决定了超导材料在核聚变装备^[3]、电力装备^[4]、国防装备^[5]、医疗装备^[6]等方面具有巨大的应用价值。如今随着各类新型超导体的出现和制备工艺的改善,可以将超导体制备成各种实用的超导材料(超导带材、超导块材、超导薄膜等)^[7],超导材料的应用更加广泛。目前,HTS 磁力传动装置中主要采用 HTS 带材(第一代 Bi 系带材、第二代 YBCO 带材)和 HTS 块材(第二代 YBCO 块材)。利用 HTS 带材绕制的超导磁体能够在 MC 与 MG 的气隙中产生强磁场,或者将 HTS 块材作为阻磁材料改善磁场分布,来提升磁力传动装置的转矩传输性能。

HTS 带材绕组在低温下具有零电阻特性,并且能在大电流作用下产生强磁场^[8],可提高磁力传动装置的运行效率及电磁转矩。第一代 Bi 系带材在电力技术方面的应用比较成熟,但其明显的各向异性、临界电流易受磁场影响及成本偏高等问题给其应用带来了局限^[9]。图 1 所示的 YBCO 超导带材各向异性较弱,有较好的高温磁场性能,在液氮温区附近具有较高的临界电流密度^[10],同时,低制备成本和低交流损耗为其应用带来了明显的优势。

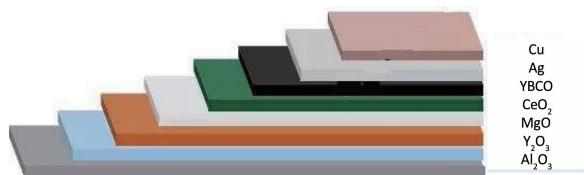


图 1 YBCO 超导带材

Fig. 1 YBCO superconducting strip

利用图 2 所示的 YBCO 超导块材的磁通钉扎效应产生的悬浮力和导向力^[11],已研制出时速能达到 $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高温超导磁悬浮列车^[12]。类似地,也可显著提升磁力传动装置的转矩传输性能,尤其当将 YBCO 块材用于捕获磁通作为磁源时,具有比永磁体

(permanent magnet, PM) 更高的磁场,从而产生更高的转矩。



图 2 YBCO 超导块材

Fig. 2 YBCO superconducting bulk

2 高温超导磁力传动原理

1993 年,休斯顿大学德克萨斯超导中心的 McMichael 等提出了 HTS 在转矩传输和减震器上的应用^[13]。该团队利用驱动装置带动 PM 旋转,而 PM 与 HTS 之间的相对运动激发 HTS 盘产生作用力带动负载进行运动,基于此原理构建了如图 3 所示的高温超导磁力耦合器(high-temperature superconducting magnetic couplings, HTSMC)。

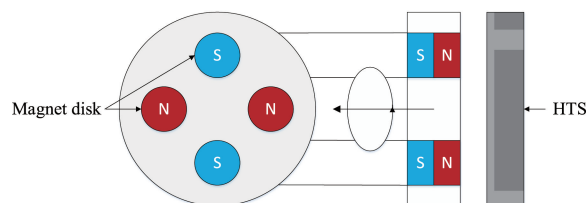


图 3 高温超导磁力耦合器基本结构^[13]

Fig. 3 Basic structure of high-temperature superconducting magnetic couplings^[13]

在 MC 中使用 HTS 材料为穿过大气隙传递高转矩密度提供了可能性,同时也可以抑制由空间谐波引起的转矩振动。

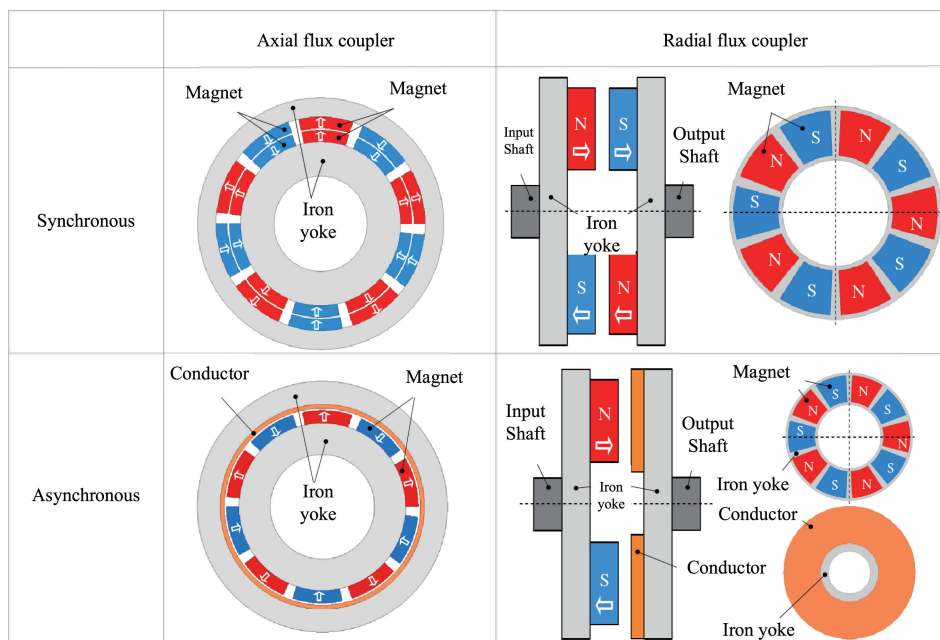
根据传动方式不同,HTSMC 可分为同步传动和异步传动:

(1)同步传动:主、从动侧旋转构件上均设置有磁体(至少一侧为超导块材磁体或超导线圈磁体),以相同速度旋转。

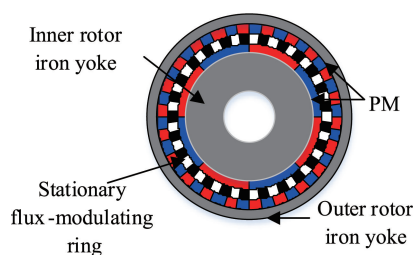
(2)异步传动:主、从动侧旋转构件的一侧设置有磁体(超导块材磁体或超导线圈磁体),另一侧设置导体(常规导体或超导体),两侧之间存在转速差。

两类超导磁力耦合器也都对应图 4 所示的轴向磁通盘式结构和径向磁通筒式结构^[14]。

高温超导磁齿轮(high-temperature superconducting magnetic gear, HTSMG)与 HTSMC 原理相同,在工作时依靠磁场耦合作用传递转矩,可实现空间上的无接触传

图4 超导磁力耦合传动的拓扑结构^[14]Fig. 4 Topology of superconducting magnetically coupled transmission^[14]

动;不同的是,在 HTSMG 中 HTS 不仅能够作为磁源或导体,还可仿照图 5 所示的磁场调制型 MG,利用 HTS 的迈斯纳效应,将它作为阻磁材料,进行磁场分布优化^[15]。迄今为止,大多数磁场调制型 MG 仍使用高磁导率的铁磁材料进行磁场调制,这种方法对 MG 的转矩传输性能提升有限,且存在一些常见的问题,如强磁场下的端部效应^[16]。

图5 磁场调制磁齿轮^[15]Fig. 5 Magnetic field modulated magnetic gear^[15]

为提高 MG 的转矩传输性能,在 MG 制作中,利用 HTS 的迈斯纳效应,将 HTS 作为阻磁材料,或者利用 HTS 强磁场捕获能力,将它作为磁源,可提高磁力传动装置的转矩传输性能,有望满足现代磁力传动应用的需求。

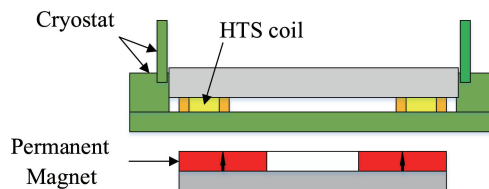
3 高温超导磁力耦合器研究现状

3.1 圆盘型高温超导磁力耦合器

为提高气隙磁通密度,进而增加 MC 的转矩密度,

法国洛林大学的 Belguerras 等提出通过在 MC 中使用 HTS 线圈产生强磁场来增强气隙磁通密度、减小 MC 尺寸的解决方案,为此构建并测试了一种如图 6 所示的盘型 HTSMC^[17]。该 HTSMC 主动侧转子主要由钕铁硼 PM 组成,4 块磁体中的每一块与相邻磁体的极性相反,从而在气隙中产生空间交变磁场。从动侧转子包括 4 个直流供电的饼状 BSCCO 线圈,以在气隙中产生交替的 N、S 极。经实验测试,当 HTS 线圈电流为 25 A, HTSMC 的气隙依次为 9 和 20 mm 时,其转矩分别可达到 31 和 20 Nm。在高功率应用中,HTSMC 体积将更大,但其电磁气隙厚度与该样机相当(10~20 mm)。在同等规格情况下,相比常规 MC,HTSMC 的转矩传输性能得到了更为显著的提升。

陕西师范大学的杨万民团队利用 HTS 与 PM 之间特有的磁通钉扎力,研制出了一种基于圆盘型 HTSMC 的无接触磁力传动装置,如图 7 所示^[16, 18]。相比 PM 之间的

图6 高温超导磁力耦合器基本拓扑结构^[17]Fig. 6 Basic topology of high-temperature superconducting magnetic couplings^[17]

磁力, PM 与 HTS 之间的磁通钉扎力具有稳定性高、无需外界控制的特点, 是一种被动的稳定悬浮。该装置中磁体转动平台凹槽内的 PM 以 N 极和 S 极交错排列。PM 的排列方式以及数量均根据 HTS 块材的大小和形状进行改变。为将 HTS 磁体运行的工作温度与环境温度隔离开来, 特意将 HTS 块材置于杜瓦壳体内, 这样可以降低系统漏热并减少电能损耗。

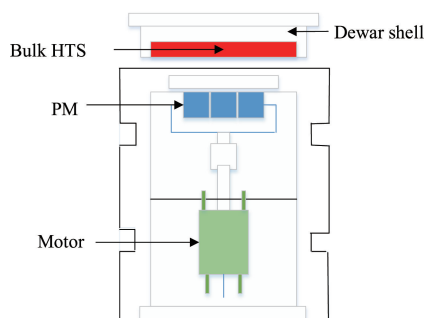


图 7 高温超导无接触传动装置^[18]

Fig. 7 High-temperature superconducting non-contact transmission device^[18]

当药物溶液的混合搅拌采用传统的机械传动时, 无法满足超清洁和零泄漏的要求。2009 年日本芝浦工业大学 Wongsatanawarid 等为实现药物溶液生产过程的严格无菌, 利用超导技术设计了一种新型非接触混合装置的简单模型^[19]。2021 年, 我国合肥工业大学 Xu 等利用高温超导钉扎效应提出了一种如图 8 所示的非接触转矩传输装置。该装置可以将内部带有驱动部件的搅拌容器与外部环境完全隔离, 又通过钉扎磁力线将整个装置集成一体, 可以将转矩更好地由超导驱动部分传递到 PM 驱动部分^[20]。

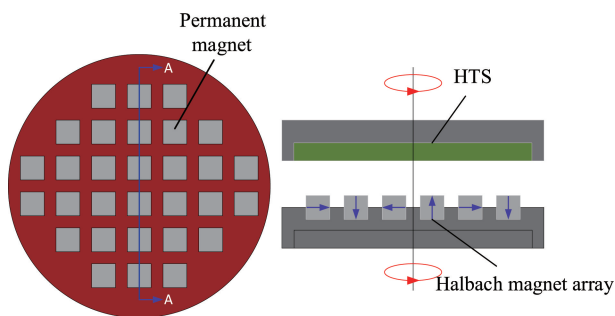


图 8 基于超导体磁通钉扎机制的超导磁力耦合器^[20]

Fig. 8 Superconducting magnetic couplings based on superconducting flux pinning mechanism^[20]

3.2 圆筒型高温超导磁力耦合器

为在低温环境下更好地传输转矩, 替代传统的机械传动装置, 2014 年法国洛林大学以及阿尔及利亚工业电气系统实验室合作建立了一种如图 9 所示的圆筒型

HTSMC^[21]。该 HTSMC 内转子由共同固定在非铁磁轴上的扇形 PM 及铁片组成, 每个 PM 的磁化方向与其相邻的 PM 相反; 外转子由一系列玻璃纤维片分隔的 HTS 线圈组成。线圈在非磁性 30 K 低温恒温器 (不锈钢) 内冷却。该 HTSMC 可适用于 5 MW、120 r·min⁻¹ 船舶推进电机的转矩传输, 未来也有望应用于风力涡轮机和船舶推进等大功率传动系统。

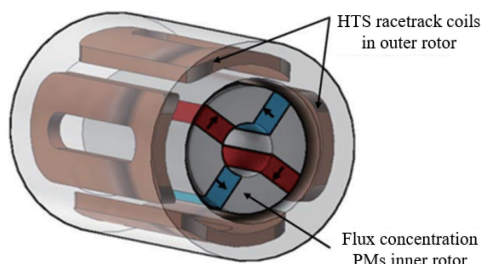


图 9 圆筒型高温超导磁力耦合器三维视图^[21]

Fig. 9 3D cylindrical view of high-temperature superconducting magnetic couplings^[21]

2022 年华中科技大学宋运兴等研制了一种以圆筒型 HTSMC 为基础的全超导磁力传动装置, 如图 10 所示^[22]。该传动系统的原动机侧转子铁心的内表面排列着 HTS 磁体, 并且相邻的 HTS 磁体的磁极反向设置。负载侧转子的铁心表面固定有 HTS 闭合导体层。HTS 闭合导体层与 HTS 磁体之间为工作气隙。相较于现有的采用钕铁硼等稀土永磁材料制成的磁体, HTS 磁体产生的最高磁场强度是其数十倍以上。为提高磁力传动系统气隙磁通密度以及输出转矩密度, 该传动装置利用 HTS 磁体替换 PM, 获得了更高的磁场; 除此之外, HTS 线材作为导体层, 能避免涡流损耗发热, 从而降低了传动装置内的损耗及温升, 确保温度保持在 HTS 正常工作所需的范围内, 提高了该磁力传动系统运行的可靠性。

对于定子和转子都封闭在一个普通的低温恒温器中的超导电机而言, MC 能将转矩穿过固定低温恒温器边

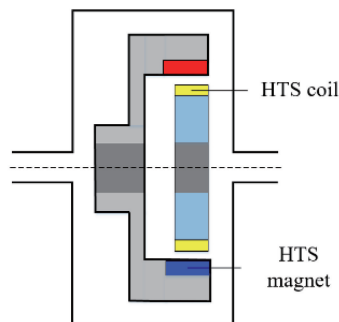


图 10 超导磁传动系统的结构^[22]

Fig. 10 The structure of the superconducting magnetic transmission system^[22]

界对外输出。美国麻省理工大学 Michael 等针对高速 ($>3600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 全超导旋转电机设计了一种如图 11 所示的非接触式高转矩 HTSMC^[23]。该装置可以省去超导电机联接内部低温到外部环境的机械传动轴, 从而避免制冷系统复杂的动态轴封。

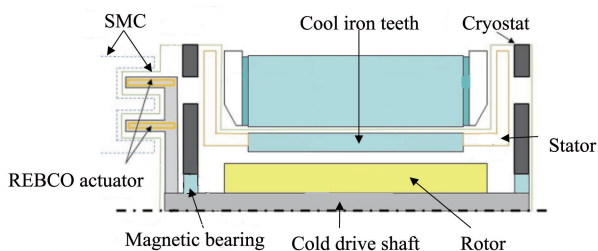


图 11 典型超导电机系统及恒温装置^[23]

Fig. 11 Typical superconductive machine and cryostat configuration^[23]

3.3 总结讨论

表 1 给出了 HTSMC、常规 MC 及机械耦合器的性能对比情况。可见, HTSMC 的转矩密度大于常规 MC 的转矩密度, 却小于机械耦合器的转矩密度。但是 HTSMC 使用寿命长而且在传输转矩过程中的损耗很小, 符合绿色发展理念。HTSMC 的未来发展方向就是在合理的范围内尽可能提高 HTSMC 转矩密度, 以最大限度地发挥 HTS 磁力传动装置的优势。

表 1 不同耦合器性能对比

Table 1 Performance comparison of different couplings

Coupler type	Torque	Maintain	Whether cooling is required	Transmission loss
HTSMC	High	Easy	Yes	Lower
Conventional MC	Low	Easy	No	Low
Mechanical couplings	Higher	Easier	No	High

Notes: HTSMC represents high-temperature superconducting magnetic couplings, MC represents magnetic couplings

4 超导磁齿轮研究现状

4.1 高温超导体作为阻磁材料

2019 年伊斯坦布尔技术大学 Cansiz 等为研究 MG 的极靴中 HTS 对 MG 转矩传输性能的影响, 提出了一种如图 12 的同轴 MG 结构^[24]。径向磁化的 NdFeB 磁体安装在转子内外表面。定子部分由叠层铁磁钢 (M15 钢) 制成的磁极片与 HTS 块材交替布置组成。经实验测试表明, 用 HTS 块材充当阻磁材料的 MG 可提高转矩密度。

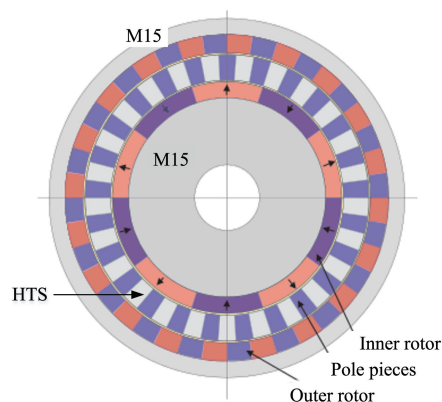


图 12 采用超导块材的同轴高温超导磁齿轮^[24]

Fig. 12 Coaxial high-temperature superconducting magnetic gear using superconducting bulks^[24]

2017 年浙江大学 Xin 等提出了基于 HTS 进行磁通调节的新型单 PM 阵列的同轴 MG, 如图 13 所示^[25]。不同于传统 MG 的拓扑结构, 所提出的同轴 MG 由 1 个夹在中间的 PM 定子和 2 个带齿转子构成。所有磁通调节齿均由 HTS 材料制成, PM 极对数为 11, 外齿数为 37, 内齿数为 15, 2 个转子沿相同方向旋转。最后与使用铁磁齿的同轴 MG 进行比较发现, 采用 HTS 材料进行磁通调节的同轴 MG 具有更加优秀的大转矩稳定传输能力。

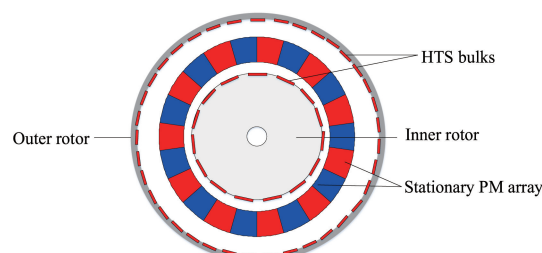
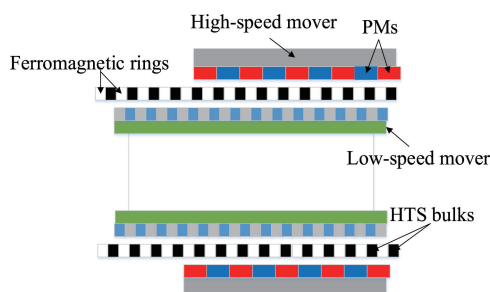


图 13 同轴高温超导磁齿轮^[25]

Fig. 13 Coaxial high-temperature superconducting magnetic gear^[25]

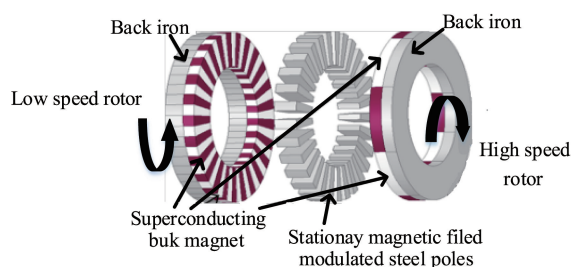
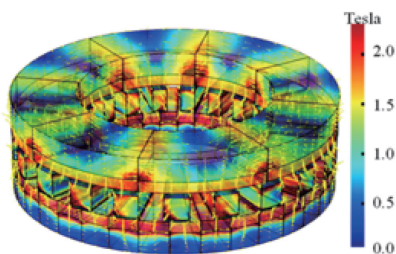
为降低漏磁以及提高线性 MG 的转矩传输性能, 香港大学 Li 等提出了一种利用块状 HTS 进行磁场调制的管状线性 MG, 如图 14 所示^[26]。该 MG 利用 HTS 块屏蔽磁场调制铁磁环之间的漏磁, 大幅度提高了气隙磁通密度。在同等规格下, 所得到的管状线性 HTSMG 的最大转矩是传统 MG 的 1.8 倍, 其转矩传输性能得到了改善。由此可见, 受到严重饱和的铁磁材料影响, 传统 MG 转矩密度较低, 采用 HTS 材料进行磁通屏蔽能够优化 PM 的磁场分布, 提高 MG 的转矩传输性能。块状 HTS 材料的引入不仅提供了所需的场调制效应, 而且还抑制了不良的端部效应^[27], 从而改善了 MG 的转矩传输性能。

图 14 高温超导块材管状线性磁齿轮^[26]Fig. 14 High-temperature superconducting block tubular linear magnetic gear^[26]

4.2 高温超导体作为磁源

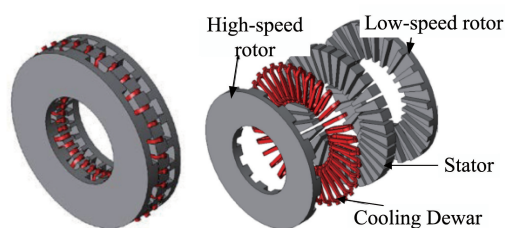
HTS 块材磁体和 HTS 带材励磁绕组都能比同等规格下的 PM 以及铜励磁绕组产生更高的磁场, 进而有效提升 MG 的转矩传输性能。

我国东南大学 Dong 等对轴向磁通调制的 HTSMG 进行了研究, 并利用 HTS 磁体代替传统 PM 作为磁源, 设计了一种 HTSMG 拓扑结构, 如图 15 所示^[28]。该 HTSMG 主要包含 3 个磁性部件: 由 17 对极 HTS 磁体组成的低速转子, 21 个铁磁性极片组成的调制部件以及 4 对极 HTS 磁体组成的高速转子, 其齿轮比为 4.25。为了充分利用 HTS 磁体, 铁芯和极片的饱和点必须足够高, 相应的材料由铁钴合金制成。经有限元法分析计算可得 HTSMG 磁场分布情况(图 16)。低速转子的转矩平

图 15 磁通调制超导磁齿轮的拓扑结构^[28]Fig. 15 Topology of magnetic flux modulated high-temperature superconducting magnetic gear^[28]图 16 高温超导磁齿轮磁场分布^[28]Fig. 16 Magnetic field distribution of high-temperature superconducting magnetic gear^[28]

均值为 34.30 Nm, 高速转子的转矩平均值为 7.82 Nm, 其比值为 4.39, 几乎与理论值一致。

中国石油大学(华东)Wang 等研制了一种如图 17 所示的静态密封 HTS 定子励磁轴向磁通齿轮^[29]。该 HTSMG 采用定子励磁和轴向磁通拓扑结构, 以提高其机械可靠性, 通过 HTS 励磁提高气隙磁通密度并改善转矩传输性能。轴向放置在定子两侧的高速和低速转子的表面上分别有 11 和 23 个凸极。定子由 34 个铁块和放置在跑道式冷却杜瓦中的 HTS 励磁线圈交替布置组成。通过实验表明, 该 HTSMG 具有稳定传递转矩的能力, 转矩密度约为 $123 \text{ kNm} \cdot \text{m}^{-3}$, 远大于同类型的传统 MG。

图 17 轴向超导磁齿轮结构^[29]Fig. 17 Structure of axial high-temperature superconducting magnetic gear^[29]

轴向型 HTSMG 具有高可靠性而且结构简单, 易于装配、拆卸, 最重要的是具有稳定传输高转矩密度的能力, 因而特别适合于高转矩传输系统以及大功率应用场合, 如风力发电系统。

4.3 总结讨论

在 MG 中, HTS 材料既可以当作磁源, 提供远高于以 PM 为磁源的磁场强度, 也可利用其完全抗磁性作为阻磁材料来改善磁场分布, 通过这 2 种方式都可以有效提高 MG 的转矩密度。表 2 给出了 HTSMG、常规 MG 及机械齿轮的性能对比。

HTSMG 在运行过程中损耗极小, 且具有能够媲美机械齿轮的转矩密度。但在价格以及维护过程方面, 目前 HTSMG 相较于常规 MG 和机械齿轮不占优势, 该问题

表 2 不同齿轮性能对比

Table 2 Performance comparison of different gears

Gear type	Torque	Maintain	Whether cooling is required	Transmission loss
HTSMG	High	Easy	Yes	Lower
Conventional MG	Low	Easy	No	Low
Mechanical gear	Higher	Easier	No	High

Notes: HTSMG represents high-temperature superconducting magnetic gear, MG represents magnetic gear

有望通过超导材料制备技术及制冷技术的发展得到缓解或解决。

5 高温超导磁力传动的理论分析现状

与常规磁力传动装置不同的是 HTS 磁力传动装置的理论建模需要考虑 HTS 的宏观电磁特性。为描述超导体非线性电导率, 目前主要采用非连续 E - J 本构模型(如 Bean 临界态模型^[30])和连续 E - J 本构模型(包括磁通蠕动模型、磁通流动与蠕动模型和幂指数 Power-Law E - J 模型等)^[31]。HTS 磁力传动装置的理论建模方法主要有解析法和数值法, 其中解析法主要包括等效磁本构关系法、磁通冻结镜像法等, 但目前多采用以有限元法为主的数值法(包括矢量磁位 A 法^[32]、磁场强度 H 法^[33]和电流矢量 T 法^[34])。

基于超导体迈斯纳效应的等效磁本构关系法, 将超导体视为一种相对磁导率小于 1(多取值在 0.01~0.2)的抗磁性材料。进而采用基于分离变量法的磁场子域解析模型便可实现超导-永磁间电磁力特性的快速计算。2017 年东南大学 Dong 等提出采用预磁化的 HTS 块材磁体代替 PM, 并进行了轴向磁通型高温超导涡流耦合器的理论研究工作^[35]。该研究通过简化预磁化超导块材的本构关系, 建立了超导块材磁体的数学描述(剩磁密度为 2.5 T, 相对磁导率为 0.48); 并提出基于 Schwarz-Christoffel 变换的轴向磁通型超导涡流耦合器二维等效磁路(magnetic equivalent circuit, MEC)模型。基于 Bean 的临界状态模型, 块体中俘获磁通密度(B_{trap})取决于临界电流密度、块体尺寸和施加在块体上的磁场脉冲的形式:

$$B_{\text{trap}} = k(a, t)\mu_0 J_c a \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率; J_c 是超导材料的临界电流密度, 取决于温度和磁密度; a 是样品半径; t 是超导材料厚度; k 是简单 Bean 模型的校正因子。最后通过与有限元模型(finite element modelling, FEM)的仿真结果进行验证。图 18 为 2 种不同模型下的转矩-滑移关系曲线。

但等效磁本构关系法的计算精度受超导体相对磁导率取值大小的影响较大, 且取值需要同实验结果进行对比校核。

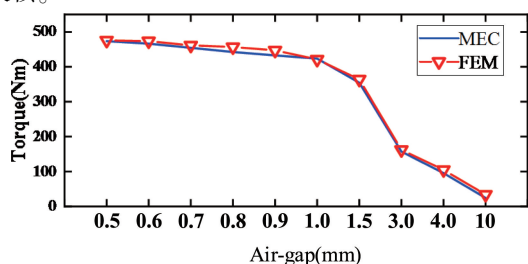


图 18 转矩-滑移关系曲线^[35]

Fig. 18 Torque-slip relationship curves^[35]

磁通冻结镜像法将 PM 等效为磁偶极子, 超导体视为半无限大平面, 其核心可以简单理解为 PM 与 HTS 块材间的作用力可等效为偶极子之间的作用力^[36]。通过定义 3 个磁偶极子, 分别表征 PM、超导体的抗磁性及超导体的捕获磁通性, 可快速计算超导-永磁系统的电磁力特性。我国华中科技大学陈伟等^[37]在利用如图 19 所示磁通冻结镜像法对 HTS 径向磁悬浮轴承的悬浮特性的分析中指出, 磁通冻结镜像法具有计算时间短、精度较高的特点, 在小尺寸模型的分析中具有优势, 但针对大尺寸模型而言, 其计算误差将会变大。

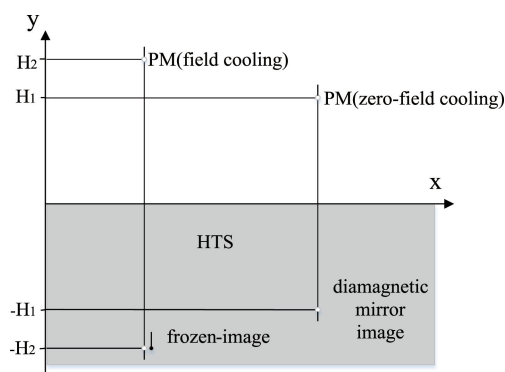


图 19 磁通冻结镜像模型^[37]

Fig. 19 Magnetic flux frozen-image model^[37]

由于磁通冻结镜像模型构建主要基于超导体穿透深度远小于超导-永磁系统特征尺寸的假设, 与实际情况存在较大差别, 使得该模型在超导磁力耦合器电磁特性的定量计算中具有一定局限性。

近年来, 商业软件 COMSOL 中的偏微分方程 PDE 接口以及磁场公式 MFH 接口出现, 使得采用磁场强度 H 法求解含超导体的电磁场问题时更加方便且高效, 并逐渐成为主流。由法拉第电磁感应定律和 B - H 本构关系可得:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial (\mu_r \vec{H})}{\partial t} \quad (2)$$

其中, μ_0 、 μ_r 分别为真空磁导率和材料的相对磁导率。

2021 年法国洛林大学 Belguerras 等提出了一种二维有限元分析模型, 用于计算带有圆盘磁体的轴向 MC 中的磁场分布^[38]。为进行简化, 可以假设轭铁的半径无限大, 通过确定所有单个磁体产生的磁场, 再通过叠加获得总磁场。为了证明该模型的有效性, 将分析结果与三维有限元模拟结果进行了比较。测量值和分析结果如图 20 所示, 相对差异不超过 10%, 一致性非常好, 而且计算效率高。

尽管有限元法被广泛采用, 但这种方法在相对位移较大情况下的移动网格剖分时易出现网格畸变与失真, 导致物理场不连续。考虑到超导体的强非线性本构关系

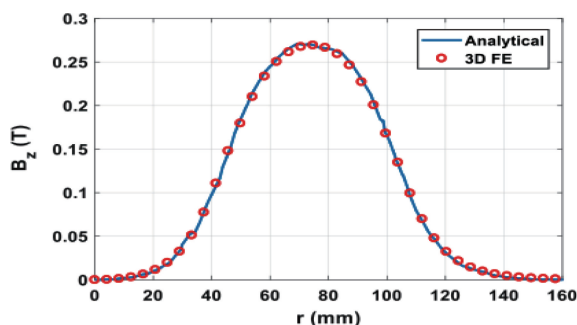


图 20 气隙为 22 mm 时轴向气隙磁通密度的径向分布^[38]

Fig. 20 Radial distribution of axial air gap flux density for an air gap of 22 mm^[38]

和复杂运动体的移动网格剖分,用于超导磁力传动装置特性计算的有限元建模将更为复杂,计算收敛性较差且计算量庞大、耗时较长,难以适用于需要大量重复计算的多目标多变量优化。

6 有待研究的问题与应用前景

6.1 有待研究的问题

尽管 HTS 磁力传动装置具有比传统磁力传动装置更高的转矩密度,但面向不同应用场合下机械能传动系统对 HTS 磁力传动的转矩密度、传输特性、工程可靠性等方面的要求时,HTS 磁力传动还存在如下有待研究的问题。

(1) 创新拓扑结构的设计

无论 HTS 在磁力传动装置中充当磁源还是阻磁材料,均可类比常规磁力传动装置的拓扑结构发展思路,以提升 HTS 磁力传动装置的转矩传输性能。HTS 磁力传动装置的新拓扑结构设计,将围绕提高励磁磁场、降低漏磁而展开。只有通过设计合理的励磁磁极结构尺寸^[39],尽可能降低漏磁通,才能获得期望的励磁磁场分布,提高超导材料利用率,诸如轴径向混合励磁结构等新型复合聚磁结构将是 HTS 磁力传动装置拓扑结构的研究方向之一。因此,HTS 磁力传动装置拓扑结构的创新设计至关重要。

(2) 冷却与供电

为使 HTS 磁力传动装置能够正常工作,应加强与 HTS 材料应用密切相关的低温冷却系统以及供电系统的研究^[40]。HTS 磁力传动装置的正常工作要确保 HTS 磁力传动装置运动部件超导体的工作环境温度保持在合适的范围内,这就要求配套高效而可靠的低温冷却系统。此外,直流超导线圈励磁和超导块材磁体励磁均可提供高磁场,从而大幅度提升磁力传动装置的转矩密度。但前者需要直流电源通过滑触装置为超导线圈供电,后者则需要合适的磁化装备(如脉冲磁化电源)为超导块材捕获

磁通提供外场,这些均增加了超导磁力传动装置结构上的复杂性和工程上的故障率。

(3) 超导磁体的交流损耗

交流损耗的存在将会造成 HTS 磁体及传动装置的温升增加甚至失超,这将对 HTS 磁力传动装置正常工作的传动特性造成影响。如果能够精确计算交流损耗并预防失超,例如,在磁场调制效应下复杂磁场谐波环境中的高温超导体交流损耗特性与失超传播特性,直接影响超导磁力传动工作性能,则将能够对 HTS 传动装置工作性能的改善带来极大的帮助。

(4) 复杂传输特性的多目标优化

HTS 捕获磁通密度随时间而下降的磁弛豫现象,导致传输转矩出现衰减,这对 HTS 磁力传动装置的长期连续运行构成威胁。目前,HTS 捕获磁通弛豫对 HTS 磁力传动装置传输特性的影响规律尚不清晰。另外,HTSMC 与 HTSMG 存在同步和异步运行模式,两种模式下的交流损耗规律及温升特性不同,相应的稳定运行条件也不同。因此,考虑到转矩裕度设计准则与稳定运行条件,多工况运行、多物理场耦合情况下 HTS 磁力传动装置复杂传输特性的优化问题很难通过常规多目标优化方法得以解决。

6.2 应用前景

由于存在比常规磁力传动装置更好的转矩传输性能,HTS 磁力传动装置可广泛地应用于新能源的开发利用、牵引驱动以及医疗化工器械等领域,可概括为以下几点。

(1) HTS 磁力传动与电机集成

HTS 磁力传动装置与电机集成^[41]具有过载保护、降低机械损耗以及可以实现软起动的优点,能够较好地满足风力发电以及电动汽车的需求。

(2) 大功率转矩传动装置

HTS 磁力传动装置的转矩传输性能有望媲美机械传动装置的性能,而且具有过载保护、隔离振动等许多机械传动装置不具备的优点。HTS 磁力传动装置在风力涡轮机、船舶推进以及矿山机械设备等大功率转矩传输系统中具有很大的应用价值。

(3) 无泄漏无接触传动领域

磁力传动在密封传动领域具有不可替代的作用^[42]。许多工业过程(即核、化学、制药和食品工业)需要在原动机和与过程连接的从动件之间进行密封隔离,在此情况下需要通过大气隙进行非接触式转矩传输。为提高大气隙工况下磁力传动装置的传输转矩,可将 HTS 当作磁源产生强磁场,或者作为阻磁材料增加气隙磁场密度。此外,具有良好密封性能的 HTS 磁力传动装置可应用于医药生产等领域的高真空设备,不仅可以有效解决橡胶

密封圈容易泄露、易污染真空环境等问题, 还能显著提高工艺质量, 比如医用的 HTS 无菌搅拌器^[43]。

(4) 低温清洁能源的生产输送

常规磁力传动装置在低温环境下, 永磁材料易碎性增强、机械强度下降, 在传输转矩的同时内部的常规导体材料会产生涡流损耗, 造成低温液体汽化。相较于常规磁力传动装置, HTS 磁力传动装置能够适用于低温环境并具有良好的转矩传输性能。例如 HTS 磁力传动装置在低温液体泵中的应用^[44], 低温泵输送的低温液体介质为 HTS 提供了天然的冷却环境, 从而省却了专用的制冷系统。

(5) 深空探测与航天装备的传动系统

由于太空中存在着适合 HTS 材料正常工作的低温环境^[45], 故 HTS 磁力传动装置有望在深空探测器、航空航天工程装备的传动系统中得到应用, 例如太空望远镜姿态调整动力传递、航天飞行器低温液态燃料输送等。

7 结 语

本文以高温超导磁力耦合器和高温超导磁齿轮为研究对象, 分别从盘式、筒式结构高温超导磁力耦合器、磁源式、磁阻式高温超导磁齿轮, 综述了高温超导磁力传动装置的结构原理以及建模分析的研究现状。进一步探讨了高温超导磁力传动研究在创新拓扑结构设计、冷却与供电、超导磁体交流损耗、复杂传输特性的多目标优化所面临的问题, 从而为高温超导磁力传动装置的未來研究提供了方向。最后, 展望了高温超导磁力传动装置在无泄漏无接触传动、大功率转矩传动、低温清洁能源的生产输送等领域的应用前景。探索超导技术在低温无接触转矩传动装备中的应用, 能为低温环境下电磁装备的研制及发展提供有效参考。

参考文献 References

- [1] 杨敏健. 高转矩密度永磁齿轮优化设计与比较研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
YANG M J. Optimization Design and Comparative Study of High Torque Density Permanent Magnetic Gears[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [2] GOUDA E, MEZANI S, BAGHLI L, *et al.* IEEE Transactions on Magnetics[J], 2011, 47(2): 439-450.
- [3] 信赢. 新材料产业[J], 2017(7): 2-8.
XIN Y. Advanced Materials Industry[J], 2017(7): 2-8.
- [4] 林良真. 电力设备[J], 2002(7): 91.
LIN L Z. Electric Equipment[J], 2002(7): 91.
- [5] 金之俭, 洪智勇, 赵跃, 等. 上海交通大学学报[J], 2018, 52(10): 1155-1165.
JIN Z J, HONG Z Y, ZHAO Y, *et al.* Journal of Shanghai Jiaotong University[J], 2018, 52(10): 1155-1165.
- [6] 吴兴超, 李永胜, 徐峰. 材料开发与应用[J], 2014, 29(4): 95100.
WU X C, LI Y S, XU F. Development and Application of Materials[J], 2014, 29(4): 95100.
- [7] 刘湘月. 黑龙江科技信息[J], 2015(12): 74.
LIU X Y. Scientific and Technological Innovation[J], 2015(12): 74.
- [8] 杜卓越, 陈玉泉, 吴巍, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2022, 51(10): 3900-3904.
DU Z Y, CHEN Y Q, WU W, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2022, 51(10): 3900-3904.
- [9] 金建勋, 郑陆海. 电子科技大学学报[J], 2006(S1): 612-627.
JIN J X, ZHENG L H. Journal of University of Electronic Science and Technology of China[J], 2006(S1): 612-627.
- [10] 马衍伟, 肖立业. 科学通报[J], 2005(1): 1-5.
MA Y W, XIAO L Y. Chinese Science Bulletin[J], 2005(1): 1-5.
- [11] 马光同, 杨文姣, 王志涛, 等. 华南理工大学学报(自然科学版)[J], 2019, 47(7): 68-74.
MA G T, YANG W J, WANG Z T, *et al.* Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)[J], 2019, 47(7): 68-74.
- [12] 熊嘉阳, 邓自刚. 交通运输工程学报[J], 2021, 21(1): 177-198.
XIONG J Y, DENG Z G. Journal of Traffic and Transportation Engineering[J], 2021, 21(1): 177-198.
- [13] MA K B, MCMICHAEL C K. IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J], 1993(1): 3.
- [14] 李毅搏. 新型永磁调速器解析建模与电磁特性分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
LI Y B. The Research About Analytical Modeling and Electromagnetic Characteristic Analysis of Novel Permanent Magnet Adjustable Speed Drives[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [15] 付兴贺, 王标, 林明耀. 电工技术学报[J], 2016, 31(18): 12.
FU X H, WANG B, LIN M Y. Transactions of China Electrotechnical Society[J], 2016, 31(18): 12.
- [16] 罗帅, 邹易达, 郝秀红, 等. 机械设计与制造[J], 2022(8): 142-147.
LUO S, ZOU Y D, HAO X H, *et al.* Machinery Design & Manufacture[J], 2022(8): 142-147.
- [17] BELGUERRAS L, MEZANI S, LUBIN T, *et al.* Superconductor Science and Technology[J], 2015, 28(9): 095003.
- [18] 杨万民, 杨芑焘. 一种高温超导无接触传动装置: CN108696095B[P]. 2019-08-16.
YANG W M, YANG P T. A Kind of High-Temperature Superconducting Contactless Transmission Device: CN108696095B[P]. 2019-08-16.
- [19] WONGSATANAWARID A, IKEDA M, SEKI H, *et al.* Physica C: Superconductivity[J], 2009, 469(15-20): 1258-1261.
- [20] XU J, LIU N, LI Z, *et al.* Journal of Superconductivity and Novel Magnetism[J], 2021, 34(12): 3131-3140.
- [21] BELGUERRAS L, HADJOUT L, MEZANI S, *et al.* IEEE Transac-

- tions on Applied Superconductivity[J], 2014, 24(6): 1-12.
- [22] 宋运兴, 李亮, 郑恒康, 等. 一种超导磁传动系统: CN113890306A [P]. 2022-01-04.
- SONG Y X, LI L, ZHENG H K, *et al.* A Superconducting Magnetic Drive System: CN113890306A[P]. 2022-01-04.
- [23] MICHAEL P C, HENSLEY S L, GALEA C A, *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J], 2016, 26(4): 1-5.
- [24] CANSIZ A, AKYERDEN E. Cryogenics[J], 2019, 98: 80-86.
- [25] XIN Y, FANG Y, PFISTER P D. IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J], 2017, 27(4): 2672676.
- [26] LI W, CHAU K T, LI J. IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J], 2011, 21(3): 1167-1170.
- [27] JIAN L, CHAU K T, LI W, *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J], 2010, 20(3): 981-984.
- [28] DONG K, YU H. IEEE Transactions on Applied Superconductivity [J], 2018, 29(2): 1-5.
- [29] WANG Q S, LI X, WANG Y. IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J], 2021, 31(5): 1-6.
- [30] 韩永胜, 袁国秋, 俞力, 等. 低温物理学报[J], 2003(S1): 50-54.
- HAN Y S, YUAN G Q, YU L, *et al.* Low Temperature Physical Letters[J], 2003(S1): 50-54.
- [31] 周军. 高温超导悬浮系统在温度循环和横向移动速度下的电磁力实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- ZHOU J. Experimental Investigations of Influence of Temperature Cycling and Lateral Moving Speed on Electromagnetic Forces in High-Temperature Superconductor Levitation Systems[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [32] 王琳, 王厚生, 王秋良. 低温与超导[J], 2006, 34(3): 190-193.
- WANG L, WANG H S, WANG Q L. Cryogenics & Superconductivity [J], 2006, 34(3): 190-193.
- [33] 艾立旺, 苗森, 许孝卓, 等. 电子测量与仪器学报[J], 2022, 36(1): 28-35.
- AI L W, MIAO S, XU X Z, *et al.* Journal of Electronic Measurement and Instrumentation[J], 2022, 36(1): 28-35.
- [34] BIRO O, PREIS K. IEEE Transactions on Magnetism[J], 1993, 29(2): 1325-1328.
- [35] DONG K, YU H, HU M, *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J], 2017, 27(4): 0600905.
- [36] HULL J R. Superconductor Science and Technology[J], 2000, 13(6): 854.
- [37] 陈伟, 徐颖, 石晶, 等. 低温与超导[J], 2018, 46(4): 20-22.
- CHEN W, XU Y, SHI J, *et al.* Cryogenics & Superconductivity[J], 2018, 46(4): 20-22.
- [38] BELGUERRAS L, MEZANI S, LUBIN T. IEEE Transactions on Magnetism[J], 2021, 57(2): 8000305.
- [39] CAMPBELL A M. Superconductor Science & Technology[J], 2016, 29(5): 054008.
- [40] 肖立业, 刘向宏, 王秋良, 等. 中国工业和信息化[J], 2018(8): 30-37.
- XIAO L Y, LIU X H, WANG Q L, *et al.* China Industry & Information Technology[J], 2018(8): 30-37.
- [41] 黄海林, 李大伟, 曲荣海, 等. 电工技术学报[J], 2022, 37(6): 17.
- HUANG H L, LI D W, QU R H, *et al.* Transactions of China Electrotechnical Society[J], 2022, 37(6): 17.
- [42] 王洪群, 虞培清, 章志耿. 重型机械[J], 2006(6): 1-4.
- WANG H Q, YU P Q, ZHANG Z G. Heavy Machinery[J], 2006(6): 1-4.
- [43] 蒋冬辉, 邓自刚, 林群煦, 等. 一种高温超导磁悬浮无菌搅拌器: CN201862378U[P]. 2011-06-15.
- JIANG D H, DENG Z G, LIN Q X, *et al.* A High-Temperature Superconducting Magnetic Levitation Aseptic Stirrer: CN201862378U [P]. 2011-06-15.
- [44] 艾立旺, 张国民, 靖立伟, 等. 低温与超导[J], 2021, 49(2): 32-43.
- AI L W, ZHANG G M, JING L W, *et al.* Cryogenics & Superconductivity[J], 2021, 49(2): 32-43.
- [45] 许吉敏, 张飞, 金英泽, 等. 中国材料进展[J], 2017, 36(5): 321-328.
- XU J M, ZHANG F, JIN Y Z, *et al.* Materials China[J], 2017, 36(5): 321-328.

(编辑 费蒙飞)