

RECENT ADVANCES IN MAGNETIC COUPLERS

Cao Hao¹

¹ Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China

E-mail: 2698830864@qq.com

Abstract. Magnetic couplers are devices that utilize magnetic fields to achieve contactless torque transmission. They offer advantages such as leak-free operation, overload protection, vibration isolation, and suitability for sealed drive systems, and have garnered widespread attention in the chemical, metallurgical, pump drive, and specialized equipment industries. In recent years, with improvements in the performance of permanent magnet materials, refinements in finite element analysis methods, and increasing demands for power transmission under complex operating conditions, research on magnetic couplers has gradually expanded from traditional structural design and torque calculation to areas such as speed control mechanisms, multiphysics coupling, temperature rise and heat dissipation, vibration transmission, and fault diagnosis. This paper reviews and summarizes domestic research findings regarding the structural configurations and torque characteristics of magnetic couplers, as well as their losses, temperature rise and heat dissipation, speed regulation, and system dynamic performance. Research indicates that the development of magnetic couplers is evolving from single-field magnetic analysis toward multi-field coupling of electrical, magnetic, thermal, and mechanical fields, and is extending from conventional structural design toward adaptation to complex operating conditions and intelligent monitoring. Summarizing these research advancements can provide a reference for the design and optimization of magnetic coupling stirring structures.

Keywords: Magnetic coupler; Torque characteristics; Temperature rise; Speed control

磁力耦合器研究进展

曹浩¹

¹ 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 中国武汉, 430073

E-mail: 2698830864@qq.com

摘要: 磁力耦合器是一类利用磁场实现非接触式转矩传递的装置, 具有无泄漏, 过载保护, 振动隔离及适用于密封传动等优点, 已在化工, 冶金, 泵类传动及特种装备中得到广泛关注. 近年来, 随着永磁材料性能提升, 有限元分析方法完善以及复杂工况传动需求的增加, 磁力耦合器研究由传统的结构与转矩计算, 逐步拓展到调速机理, 多物理场耦合, 温升与散热, 振动传递及故障诊断等方向. 本文围绕磁力耦合器结构形式与转矩特性, 损耗与温升散热, 调速与系统动态性能等方面, 对国内相关研究成果进行梳理与归纳. 研究表明, 磁力耦合器的发展正由单一磁场分析向电, 磁, 热, 力多场耦合方向演进, 由常规结构设计向复杂工况适应和智能化监测方向延伸. 对相关研究进展进行总结, 可为磁力耦合搅拌结构的设计与优化提供参考.

关键词: 磁力耦合器; 转矩特性; 温升; 调速

0 引言

磁力耦合器依靠永磁体之间的磁场作用实现主动端与从动端之间的无接触传动, 与传统机械联轴器相比, 不仅避免了动密封泄漏问题, 还具有缓冲减振, 过载保护和适应特殊介质环境等优势 [1]. 在化工搅拌, 密封泵传动以及高温高压设备中, 磁力耦合器尤其具有较高的工程应用价值. 随着工业装备向高可靠性, 高密封性和长寿命方向发展, 磁力耦合器的结构设计, 传动性能及服役稳定性逐渐成为研究热点.

从现有研究来看, 磁力耦合器已形成多种结构形式, 包括筒式, 盘式, 锥筒式, 外笼型, 变面积式以及 Halbach 型等. 研究内容也由早期的磁场分布分析和静态转矩计算, 逐渐拓展到调速特性, 温度场演化, 损耗机理, 振动响应以及故障诊断等多个方面 [2]. 尤其是在隔离套存在, 大气隙传动, 鼠笼导体参与及高温高压工况下, 磁力耦合器的电磁性能与热力学行为之间存在显著耦合关系, 使得传统单一设计方法已难以满足工程需求. 因此, 对近年来磁力耦合器研究成果进行系统梳理, 对于把握该领域的发展脉络, 明确后续研究方向具有重要意义.

1 结构形式与转矩特性研究

磁力耦合器的结构形式直接决定其磁场分布特征与输出转矩能力, 也是当前研究中最为基础且最为活跃的部分. 围绕结构优化与转矩提升, 研究者提出了盘式, 筒式, 锥形, 外笼型及 Halbach 阵列等多类结构, 并采用等效磁路法, 解析法与有限元法相结合的方式开展研究.

在盘式磁力耦合器方面, 相关研究主要聚焦于气隙磁场分布, 实心导体感应特性以及电磁转矩形成机理. Chaojun Y 等人 [3] 针对磁体旋转型轴向盘式磁力耦合器, 研究了气隙变化对转矩和涡流行为的影响, 并结合理论分析, 有限元计算和实验验证对模型进行了校核. 这类研究说明, 气隙不仅直接影响磁场耦合强度, 也会同时改变导体中的涡流分布, 因此转矩提升和损耗控制不能孤立讨论, 而要在结构参数设计中同步考虑. 盘式磁力耦合器如图 1 所示.

在筒式磁力耦合器方面, 研究更偏重于径向磁场分布, 极对数匹配及转差传动机理. 针对筒式永磁磁力耦合器和鼠笼筒式磁力耦合器, 杭天等人 [4] 对其电磁转矩计算, 传动效率及负载适应能力进行了分析. 相比盘式结构, 筒式结构更适合密封传动与旋转机械场合, 但在隔离套存在及大气隙条件下, 磁路磁阻增加明显, 常导致传动能力下降. 为改善这一问题, 葛研军等人 [5] 提出了大气隙外笼型转子磁力耦合器, 通过对磁钢尺寸, 极弧系数及笼条参数进行优化, 提升了大气隙条件下的传动性能. 筒式磁力耦合器如图 2 所示.

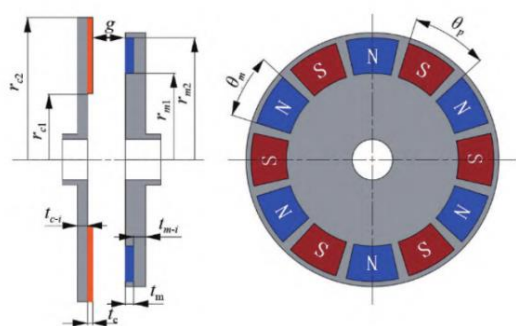


图 1 盘式磁力耦合器 [6]

Figure 1. Disc-type magnetic coupling

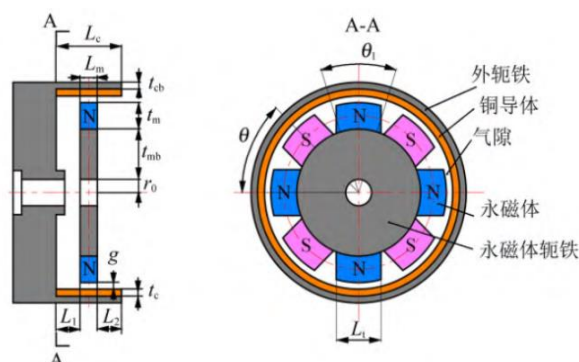


图 2 筒式磁力耦合器 [6]

Figure 2. Cylindrical magnetic coupling

除常规盘式和筒式结构外, Halbach 阵列和高温超导结构也在近年得到进一步发展. Yong D L 等人 [8] 针对 Halbach 阵列磁力耦合器开展了建模与实验研

究,说明通过优化永磁体排布方式可以有效增强有效磁场利用率,从而提升磁力耦合器的输出转矩.与此同时,Ai L 等人 [9] 将研究拓展到轴向高温超导磁耦合器,对其转矩特性进行了建模与分析,说明磁力耦合器的研究边界已从常规永磁耦合装置延伸至超导耦合领域.

此外,Chaojun Yang 等人 [10] 还针对分级启动条件下的开槽圆盘磁耦合器启动特性开展了研究.该研究将高转差,高载荷启动问题作为分析对象,说明磁力耦合器研究已不再局限于额定稳态转矩分析,而开始关注启动阶段的暂态传动能力与运行稳定性.这对于搅拌设备,泵类系统和重载启停装置都具有较强的工程参考价值.

2 损耗,温升与散热研究

随着磁力耦合器向高功率密度和复杂工况方向发展,损耗与温升问题逐渐成为制约其性能提升的重要因素.特别是在存在导电隔离套,实心导体或鼠笼结构时,由电磁感应引起的涡流损耗会导致明显温升,不仅影响传动稳定性,还可能引起永磁体退磁,材料性能劣化及系统寿命下降.

Xin Ma [11] 在双盘磁耦合器热计算与实验研究中,围绕传统温度场计算困难,精度不足的问题,开展了热计算与实验验证工作.这说明磁力耦合器温度场分析已经由简单热计算逐步走向热模型,仿真分析与实验校核相结合的研究阶段.于涵 [12] 对外鼠笼磁力耦合器的运行机理与温度场进行了分析,指出损耗主要集中在笼条,隔离套及邻近磁钢区域,热量沿径向和轴向扩散,最终通过自然对流或强迫对流方式散出.此类研究说明,温升分布具有明显的不均匀性,高温区域往往与磁场强度集中区和导体感应强区相对应.

在散热系统研究方面,已有学者针对磁力耦合器在高负载和高速条件下的散热需求,对冷却通道布置,对流换热条件和结构热阻进行了讨论 [13].在高温高压强磁力耦合器设计研究中,温升问题已不再是附属分析内容,而成为结构设计与材料选用的重要约束条件 [14].这表明磁力耦合器设计正在由“先满足传动,再校核温升”的思路,逐步转向“电磁性能与热管理协同设计”的思路.

此外,磁钢排布方式对涡流损耗也具有显著影响.刘鸿鹏等人 [15] 在研究中指出利用合理的磁钢分段与排布方式可有效降低导体中的感应损耗,改善温升水平.在开槽盘式和盘式实心磁力耦合器中,温度变化还会进一步影响材料磁性能与电阻率,从而反过来改变调速能力和转矩输出,表现出明显的磁-热耦合特征.因此,温升与散热研究已成为磁力耦合器工程化设计中不可忽视的重要组成部分.

3 调速特性与故障诊断研究

除静态传动和温升问题外,磁力耦合器在动态运行过程中的调速特性,振动传递规律及故障诊断,也是近年来研究不断拓展的方向.尤其是在异步式,混合式或可控式磁力耦合器中,转差变化,载荷扰动以及耦合磁场波动会共同影响系统运行稳定性.

在调速特性研究方面, 现有工作主要针对鼠笼筒式, 复合盘式, 锥形转子及开槽盘式磁力耦合器展开. 研究表明 [16], 磁力耦合器的调速能力与气隙大小, 导体参数, 极对数匹配以及温度状态密切相关. 对鼠笼筒式磁力耦合器的研究已开始考虑机, 电, 磁耦合效应, 说明磁力耦合器调速性能的研究正由单纯电磁分析向综合动力学分析发展. 对于复合盘式和锥形转子磁力耦合器, 研究者则更关注不同结构参数对调速范围, 稳定运行区间及效率变化规律的影响, 这为磁力耦合器在变工况传动中的应用提供了理论依据.

在状态监测与故障诊断方面, 近年来开始出现基于深度网络的退磁诊断研究. 相关研究尝试利用运行信号特征识别磁钢退磁程度及异常状态, 从而提高磁力耦合器的运行可靠性与维护效率 [17]. 这一趋势表明, 磁力耦合器研究正在由传统的设计与分析阶段, 逐步走向智能监测和寿命管理阶段. 未来在智能制造背景下, 将磁力耦合器的电磁设计, 状态感知和故障预警相结合, 有望成为该领域新的增长点.

4 研究展望

综上所述, 磁力耦合器研究已由早期的基础磁场分析和静态转矩计算, 逐渐发展为涵盖结构创新, 多场耦合, 系统动态性能和智能诊断的综合性研究体系. 盘式, 筒式, 锥形, 外笼型及 Halbach 型等多类结构的提出, 丰富了磁力耦合器的设计方法, 也推动了其在不同工况中的应用拓展. 与此同时, 温升, 损耗, 调速稳定性和振动传递等问题的不断显现, 使研究重点由单一性能提升转向综合性能优化.

从现有成果来看, 磁力耦合器研究仍存在几个值得进一步深入的问题. 其一, 多数研究仍以单一性能指标为主, 针对转矩, 效率, 温升和结构强度之间协同优化的研究仍不够充分; 其二, 现有理论分析和有限元计算虽较为丰富, 但与实际工程装置长期运行条件相结合的试验研究仍有待加强; 其三, 针对高温, 高压, 大气隙及复杂载荷等特殊工况的研究虽已开展, 但尚未形成较为系统的设计准则; 其四, 基于智能算法的故障诊断和运行状态评估仍处于起步阶段, 与实际工业应用之间尚存在一定距离.

对于磁力耦合搅拌结构而言, 后续研究应更加关注隔离套, 气隙, 永磁体参数及工作载荷之间的匹配关系, 并在满足传动能力的基础上统筹考虑温升控制, 密封安全和运行稳定性. 将电磁分析, 热管理, 结构与试验验证有机结合, 建立适用于具体工况的综合设计方法, 将是磁力耦合器进一步提升工程应用价值的重要方向.

参考文献

- [1] 张达, 白玉新, 袁田, 等. 涡轮发电机用磁力耦合器设计 [J]. 微电机, 2023, 56 (05): 72-75.
- [2] 董法强, 王雨健, 葛研军, 等. 磁力耦合器散热系统研究 [J]. 微特电机, 2026, 54(03):16-21.
- [3] Chaojun Y., Tadesse W.A., Yang F., et al. Torque and Eddy Current Behavior of a Magnet Rotating Axial Disk Type Magnetic Coupler: Analysis and Experimental Verification [J]. IETE Journal of Research, 2024, 70(12):8580-8591.
- [4] 杭天, 杨超君, 朱继伟, 等. 盘式实心磁力耦合器气隙磁场分布及转矩分析 [J]. 机械传动, 2024, 48(01):111-119.

- [5] 葛研军, 杨博, 王大明, 等. 大气隙外笼型转子磁力耦合器设计及性能研究 [J]. 机械设计, 2024, 41(01):134-139.
- [6] 杨超君, 谷礼祥, 马超, 等. 实心盘式磁力耦合器转矩特性分析 [J]. 机械设计与研究, 2024, 40(01):220-224+229.
- [7] 杨超君, 王剑, 杭天, 等. 筒式实心磁力耦合器的电磁转矩计算与传动特性 [J]. 机械传动, 2024, 48(11):63-70.
- [8] Yong D.L., Shuang W., Yongcun G., et al. Modelling and Experimental Study of Halbach Array Magnetic Coupler [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 27(1):261-269.
- [9] Ai L., Ma P., Feng H., et al. Modeling and analysis of torque characteristics for an axial HTS magnetic coupler [J]. Physica C: Superconductivity and its applications, 2025, 6321354704-1354704.
- [10] Yang C., Gao Y., Wang J. Study on Starting Characteristics of Slotted Disc Magnetic Coupler under Graded Starting [J]. Engineering Letters, 2025, 33(9).
- [11] Ma X., Wang S., Guo Y. Thermal calculation and experimental study of a double-disk magnetic coupler [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 208109444-109444.
- [12] 于涵. 外鼠笼磁力耦合器运行机理与温度场计算 [D]. 大连交通大学, 2024.
- [13] 胡泽永. 可控电磁混合式磁力耦合器温升特性与散热分析 [D]. 安徽理工大学, 2025. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2025.000428.
- [14] 鲍忠利, 支宏旭, 白晓煜, 等. 高温高压强磁力耦合器设计与优化 [J]. 微电机, 2025, 58(08):9-13.
- [15] 刘鸿鹏, 胡文东, 刘洪, 等. 磁钢排布对磁力耦合器涡流损耗的影响 [J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(04):29-32.
- [16] 刘述良. 锥形转子磁力耦合器调速机理与散热系统研究 [D]. 大连交通大学, 2022.
- [17] 王爽, 章熙泰, 郭永存, 等. 基于深度网络的可控混合式磁力耦合器退磁诊断 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2026, 60(02):279-286+302.

References

- [1] Zhang Da, Bai Yuxin, Yuan Tian, et al. Design of a Magnetic Coupler for Turbine Generators [J]. Micro Motors, 2023, 56 (05): 72-75.
- [2] Dong Faqiang, Wang Yujian, Ge Yanjun, et al. Study on the Heat Dissipation System of a Magnetic Coupler [J]. Micro and Special Motors, 2026, 54(03): 16–21.
- [3] Chaojun Y., Tadesse W.A., Yang F., et al. Torque and Eddy Current Behavior of a Magnet Rotating Axial Disk Type Magnetic Coupler: Analysis and Experimental Verification [J]. IETE Journal of Research, 2024, 70(12): 8580–8591.
- [4] Hang Tian, Yang Chaojun, Zhu Jiwei, et al. Analysis of Air Gap Magnetic Field Distribution and Torque in a Disc-Type Solid Magnetic Coupler [J]. Mechanical Transmission, 2024, 48(01): 111-119.
- [5] Ge Yanjun, Yang Bo, Wang Daming, et al. Design and Performance Study of a Large-Air-Gap Outer-Cage Rotor Magnetic Coupler [J]. Mechanical Design, 2024, 41(01): 134-139.
- [6] Yang Chaojun, Gu Lixiang, Ma Chao, et al. Torque Characteristics Analysis of a Solid-Disk Magnetic Coupler [J]. Mechanical Design and Research, 2024, 40(01): 220-224+229.
- [7] Yang Chaojun, Wang Jian, Hang Tian, et al. Electromagnetic Torque Calculation and Transmission Characteristics of Cylindrical Solid Magnetic Couplers [J]. Mechanical Transmission, 2024, 48(11): 63-70.
- [8] Yong D.L., Shuang W., Yongcun G., et al. Modeling and Experimental Study of Halbach Array Magnetic Coupler [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 27(1): 261-269.
- [9] Ai L., Ma P., Feng H., et al. Modeling and analysis of torque characteristics for an axial HTS magnetic coupler [J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2025, 6321354704–1354704.
- [10] Yang C., Gao Y., Wang J. Study on Starting Characteristics of Slotted Disc Magnetic Coupler under Graded Starting [J]. Engineering Letters, 2025, 33(9).
- [11] Ma X., Wang S., Guo Y. Thermal calculation and experimental study of a double-disk magnetic coupler [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 208, 109444–109444.
- [12] Yu Han. Operating mechanism and temperature field calculation of an external cage magnetic coupler [D]. Dalian Jiaotong University, 2024.
- [13] Hu Zeyong. Temperature Rise Characteristics and Heat Dissipation Analysis of a Controllable Electromagnetic Hybrid Magnetic Coupler [D]. Anhui University of Science and Technology, 2025. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2025.000428.

- [14] Bao Zhongli, Zhi Hongxu, Bai Xiaoyu, et al. Design and Optimization of High-Temperature, High-Pressure, High-Strength Magnetic Couplers [J]. Micro Motors, 2025, 58(08): 9-13.
- [15] Liu Hongpeng, Hu Wendong, Liu Hong, et al. Effect of Magnet Arrangement on Eddy Current Losses in Magnetic Couplers [J]. Modern Manufacturing.
- [16] Liu Shuliang. Research on the speed regulation mechanism and heat dissipation system of tapered rotor magnetic coupler [D]. Dalian Jiaotong University, 2022.
- [17] Wang Shuang, Zhang Xitai, Guo Yongcun, etc. Diagnosis of demagnetization of controllable hybrid magnetic coupler based on deep network [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2026, 60(02):279-286+302.