

高温超导磁体非接触补偿供电可行性研究*

王超^{1,2} 马光同^{2†} 王志涛^{1,2} 龚天勇^{1,2} 周鹏博² 钱航宇^{1,2}

¹西南交通大学 电气工程学院 成都 610031;

²西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 成都 610031

收稿日期:2017-08-28;接收日期:2017-09-11

【摘要】 高温超导磁浮列车运行在高速状态,要受到环境振动、电磁激扰、轨道不平顺等问题,由此带来的运行损耗与高温超导接头电阻损耗等自身损耗相互叠加,使得高温超导磁体难以实现恒流运行.因此,本文基于近年来快速发展的非接触传能技术,提出了一种无漏热高温超导磁体非接触补偿供电方案,从理论上建立等效电路模型进行阻抗匹配,确定系统最优参数,同时利用搭建的实验测试平台研究了不同传输间距、不同负载的供电效率,证实了非接触传能技术用于现代轨道交通中高温超导磁体供电补偿的可行性.

关键词: 高温超导磁浮列车,高温超导磁体,闭环恒流运行,非接触补偿供电

PACS: 84.71.Mn, 74.25.N-, 85.25.Am, 03.50.De

1 引言

在轨道交通系统向运行能耗更低、效率更高、速度更快方向迅速发展的背景下,传统列车技术已经不能完全满足交通发展的需求,因此具有无接触、大气隙、高速等特点的超导磁悬浮成为最有希望的选择之一,其技术可行性已在日本低温超导磁悬浮列车中得到充分验证^[1].然而低温超导技术所需工作环境条件苛刻(工作温度 4.2 K),成本高昂.近年来,随着可工作于液氮温区的高温超导材料的发展,高温超导磁悬浮列车的应用已具备基本条件^[2].

作为高温超导磁悬浮列车的核心,高温超导磁体因其特有的零电阻特性,理论上在闭环状态下没有电流衰减,能产生极其稳定的强磁场^[3].但在轨道交通实际应用中,复杂的电磁环境以及运行工况,加上高温超导接头电阻损耗等自身损耗,使得高温超导磁体难以工作在恒流状态,因此必须寻求补偿磁体损耗的方法.日本铁科院采用外加驱动电源的接触供电方式补偿损耗,维持恒流运行^[4],但是由于接

触供电需要经历从室温到超导低温的温度变化,电流引线等引起的漏热和损耗将降低低温系统的效率,容易诱发失超,研究证实每根引线的漏热功率可达 0.1 W/A^[5].鉴于此,非接触供电成为理想选择.国内外学者做了大量研究工作,剑桥大学的 Fu 等提出了基于磁通泵原理的非接触供电补偿方式,设计了工作气隙为 1 mm 的磁通泵,励磁效率较高.但磁通泵受自身机械结构限制,原副边间隙较小,应用范围受到极大限制^[6].相较于磁通泵,感应非接触供电技术工作气隙更大,技术更加成熟,已广泛应用于各个领域,如电动汽车充电、植入式医疗、移动电子设备等.将其用于高温超导磁体的补偿供电,可降低对低温系统壁厚的要求,提升磁悬浮系统运行效率.

本文针对磁浮列车用高温超导磁体运行损耗补偿问题,基于感应非接触供电技术,利用等效电路进行阻抗匹配,设计了高温超导磁耦合感应非接触补偿供电实验系统,重点研究不同传输间距、不同负载下的供电能力及效率,为感应非接触供电技术应用用于高温超导磁体供电补偿进行原理性的尝试.

* 国家自然科学基金资助项目(51722706);四川省杰出青年基金资助项目(2016JQ0003)资助的课题.

† gtma@swjtu.edu.cn

2 理论分析

磁浮列车作为新型的轨道交通工具,其运行时速可达 400~500 公里,是地面运行速度最快的交通工具^[7].发展磁浮列车有助于缓解我国交通运输供需紧张的问题,国家“十三五”规划纲要中明确指出要大力发展高速磁浮交通,同时在 2016 年我国也启动了时速 600 公里高速磁浮研发项目,彰显国家对高速磁浮交通的重大需求.磁悬浮列车按悬浮类型可分为常导磁吸型和超导排斥型两大类.常导磁吸型列车以车上常规导体通电产生电磁力,吸引铁磁轨道使列车悬浮.而超导排斥型列车则是利用车上超导磁体通电产生强磁场,并与地面上的线圈相互作用,产生斥力使列车悬浮^[8].超导排斥型列车以日本 L0 系列为代表,2015 年完成的超导磁悬浮列车载人运行实验,创造了当时 603 km/h 的地面交通最快行驶记录^[9].其列车结构示意图如图 1 所示.

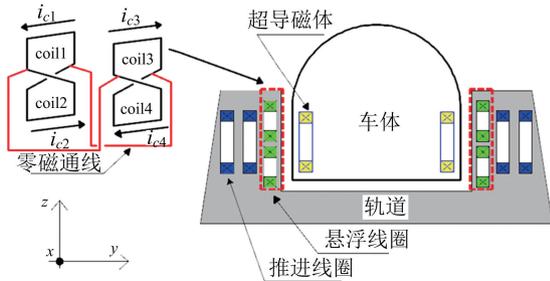


图 1 日本超导磁悬浮列车结构示意图

本文的研究对象针对车载超导磁体,运用非接触供电技术,基于相同谐振频率的发射线圈和接收线圈产生的磁耦合谐振原理进行能量传输,从而实现大气隙下对高温超导磁体的非接触供电.根据主次级电容电感的连接方式,磁耦合谐振式非接触供电系统的结构可分为四种类型:串串式(Series-Series, SS)、串并式(Series-Parallel, SP)、并串式(Parallel-Series, PS)和并并式(Parallel-Parallel, PP)^[10].研究表明,SS 和 SP 结构比 PS 和 PP 结构的耦合性更强,且传输距离、传输效率等特性更好^[11].因此结合等效电路的复杂性等因素,选择串串式(SS)结构设计实验系统.

实验的电路拓扑图如图 2 所示.其中 V_s 是高频交流电源, R_1 、 R_2 表示发射线圈和接收线圈的等效电阻, C_1 、 C_2 表示发射线圈与接收线圈的匹配电

容, C_e 表示发射线圈与接收线圈在高频下的寄生电容, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 表示整流二极管, R_L 表示负载的等效电阻.发射线圈与接收线圈采用同规格的利兹线绕制,电阻和电容完全相同,故 $C = C_1 + C_e = C_2 + C_e$.

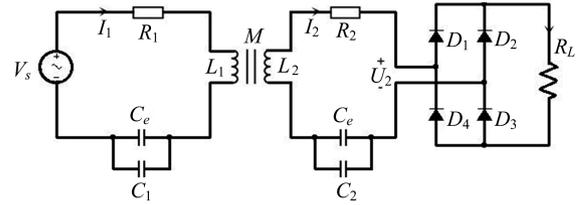


图 2 实验电路拓扑图

根据电路拓扑图,可列出 KVL 方程

$$\begin{cases} \dot{I}_1 Z_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_s \\ \dot{I}_2 Z_2 - j\omega M \dot{I}_1 = -\dot{U}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$Z_1 = R_1 + j\omega L - j \frac{1}{\omega C}$$

$$Z_2 = Z_1, \dot{U}_2 = \frac{10}{9} \dot{I}_2 R_L$$

可得

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_s}{Z}, \dot{I}_2 = \frac{j\omega M \frac{\dot{U}_s}{Z}}{Z_2 + \frac{10}{9} R_L}$$

其中

$$Z = Z_1 + \frac{(\omega M)^2}{Z_2 + \frac{10}{9} R_L}$$

发射线圈功率与负载接收到的功率可由下式计算

$$\begin{aligned} P_{in} &= \text{Re}[\dot{U}_s \cdot \dot{I}_1^*], \\ P_{out} &= |\dot{I}_{R_L}|^2 \cdot R_L \end{aligned} \quad (2)$$

效率为 $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$

求解 KVL 方程,得到关于效率的解析解为

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 (a^2 - b^2) (Z_1 + \frac{10}{9} R_L)^4}{Z^2 [a(R_1 + \frac{10}{9} R_L) + b(\omega L - \frac{1}{\omega C})]} R_L$$

其中

$$a = R_1^2 - (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2 + \frac{10}{9} R_1 R_L + (\omega M)^2$$

$$b = 2R_1(\omega L - \frac{1}{\omega C}) + \frac{10}{9}R_L(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

对于给定的传输线圈, L 、 C 均为定值; 谐振频率 f 确定时, 线圈电阻 R 也是确定的, 本实验中的变量为发射线圈与接收线圈的间距及负载性质, 故传输效率只与 d 及 R_L 有关, 即 $\eta = \xi(d, R_L)$. 因此为了比较非接触供电系统对不同负载的励磁能力, 实验设计了同规格同尺寸的高温超导线圈和铜线圈, 负载线圈的参数如表 1 所示.

表 1 负载线圈参数

线圈参数	高温超导磁体	铜线圈
环形线圈内径/mm	100	100
线圈截面面积/mm ²	6.6	6.6
匝数	11	11
线圈自感/ μ H	52.9	53.8
线圈材料	YBCO 涂层带材	铜
常态电阻/ Ω	0.27	0.12
77 K@电阻/ Ω	0.005	0.04

同时, 为保持非接触供电系统的谐振频率与发射线圈、接收线圈的固有频率一致, 发射线圈与接收线圈参数完全相同, 具体参数如表 2 所示.

表 2 非接触供电系统线圈参数

线圈参数	具体值
环形线圈内径/mm	100
利兹线线径/mm	2.3
匝数	5
线圈自感/ μ H	12
线圈材料	铜

参照线圈参数, 并结合整流器件的开关特性, 调节串联电容值, 根据式(3)计算得到系统的谐振频率为 40 kHz.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

3 实验平台

实验所用高温超导磁体是由美国 SuperPower 公司生产的 YBCO 涂层带状导体绕制而成的. YBCO 涂层带材是一种多层薄带结构, 通常包括金属(铜—Cu 或不锈钢—SS)稳定层、银保护层(Ag)、

超导层、过渡层和基底层^[8].

实验系统如图 3 所示, 具体包括高频交流电源、阻抗匹配电路、发射线圈、接收线圈、整流滤波电路及 YBCO 高温超导磁体负载, 发射线圈连接高频交流电源, 整流滤波电路连接负载. 由于本实验系统工作在高频下, 为了减小发射线圈与接收线圈的集肤效应, 两线圈均由利兹线绕制而成. 能量经原副边磁耦合传递至接收线圈, 经过全波整流电路及滤波电路, 供给高温超导磁体. 为了保证实验条件相同, 所用负载线圈全部置于液氮环境中. 连接至电路的功率计, 用于测量发射线圈功率、检验两线圈是否谐振, 并确定计算的谐振频率是否正确. 同时利用示波器测量供电电流的幅值, 以表征实验系统的供电能力.

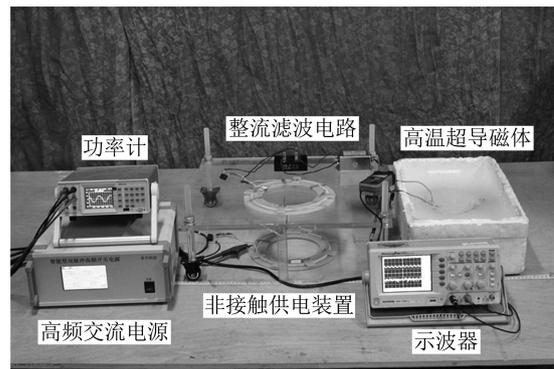


图 3 非接触供电实验系统

4 实验验证

为了验证非接触供电技术应用于高温超导磁体补偿供电的可行性, 借助上述实验测试平台, 对比分析了不同传输间距下、不同负载的供电能力及效率.

4.1 高温超导磁体的供电实验

图 4 为负载是高温超导磁体时, 高频交流电源在不同输出电压有效值情况下, 发射线圈与接收线圈在不同气隙下的供电电流变化情况. 在示波器的显示周期即 2.5 μ s 内, 1 cm 气隙下最大励磁电流可达到 4.44 A, 5 cm 气隙下最大励磁电流可达 2.16 A. 随着发射线圈与接收线圈气隙的增加, 非接触补偿供电系统的供电能力逐渐下降. 这是由于能量的传输是依靠线圈间的互感, 非接触补偿供电系统的传输效率在频率一定的条件下, 只与互感系数 M 有关. 传输间距的变化本质上是影响了互感系数的变化, 导致传输效率发生改变. 等效电路模型如图 5 所示^[11].

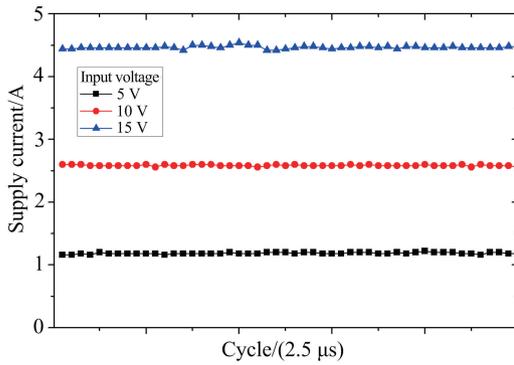


图4(a) 1 cm气隙下高温超导磁体的供电电流

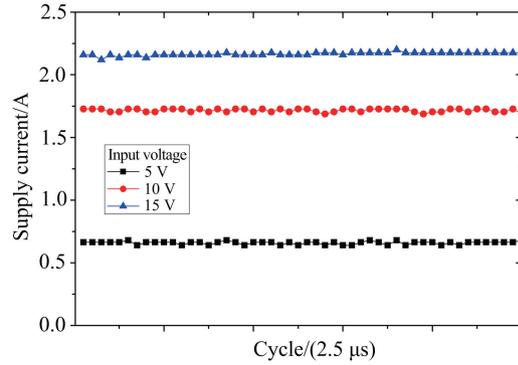


图4(b) 5 cm气隙下高温超导磁体的供电电流

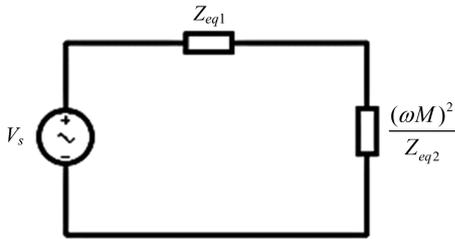


图5 非接触供电互感等效电路

其中 Z_{eq1} 为发射线圈等效阻抗, $\frac{(\omega M)^2}{Z_{eq2}}$ 为接收线圈等效到原边的阻抗. 设 $Z_{eq1} = A + jB$, $\frac{(\omega M)^2}{Z_{eq2}} = \frac{(\omega M)^2}{C + jD}$, 则根据式(4)可知

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 \cdot C}{A + (\omega M)^2 \cdot C} \quad (4)$$

当发射线圈与接收线圈距离较小时,耦合程度较高, M 较大,因此传输效率较高,供电电流较大;当发射线圈与接收线圈距离变大时,耦合程度下降, M 变小,因此传输效率下降,供电电流减小.

4.2 铜线圈的供电实验

为了比较非接触供电系统对不同负载的励磁能力,实验测试了在同样的交流电源输出电压有效值下,处于液氮环境中与高温超导磁体同尺寸的铜线圈作为负载时,发射线圈与接收线圈在不同气隙下的供电电流变化情况,测试结果如图6所示.

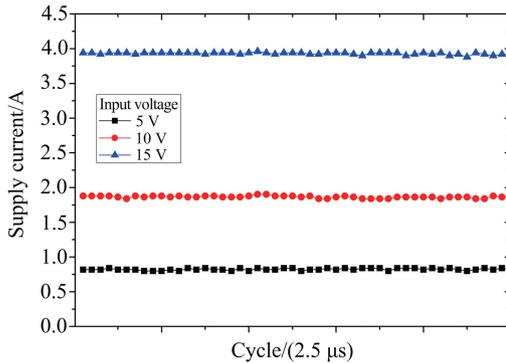


图6(a) 1 cm气隙下铜线圈供电电流

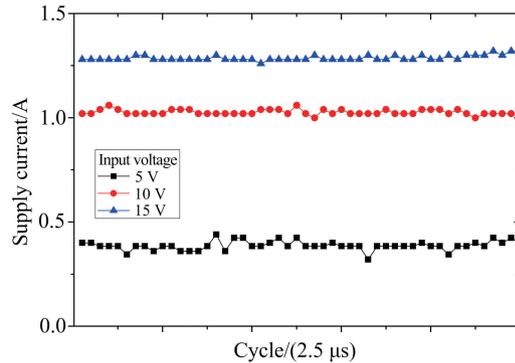


图6(b) 5 cm气隙下铜线圈供电电流

由图6(a)(b)可知负载性质影响非接触供电系统的供电电流大小.在1 cm的气隙下铜线圈的最大励磁电流可达到3.94 A;在5 cm的气隙下,最大励磁电流可达到1.28 A.1 cm气隙下高温超导磁体的励磁电流约是铜线圈的1.13倍,5 cm气隙下高温超导磁体的励磁电流约是铜线圈的1.69倍.高温超导磁体的供电电流明显大于铜线圈的供电电流,传输间距增大时,此现象更加明显.结合表1可见虽然铜线圈置于液氮中电阻有所减小,但相比高温超导磁体的电阻,铜线圈电阻相对较大.因此在电源输出

电压相同的条件下,铜线圈的供电电流比高温超导磁体小.

4.3 传输效率的比较

由理论分析可知传输效率与负载性质有关,因此结合以上实验结果,可得到实验系统在不同传输间距下,针对不同负载的传输效率.

图7(a)(b)分别表示在不同传输间距下,发射线圈的能量传递至高温超导磁体负载与铜线圈负载的效率.由图可知,随着发射线圈功率的增加,传输效率逐渐上升;高温超导磁体负载的传输效率较铜

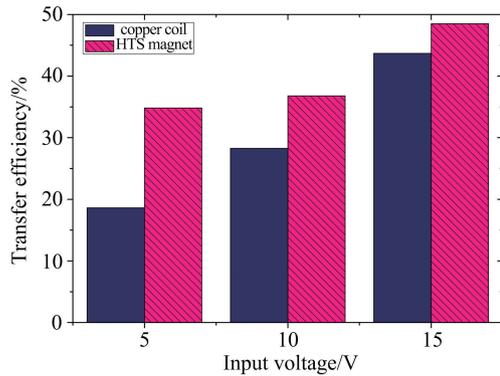


图7(a) 1 cm气隙下发射线圈与高温超导磁体、铜线圈的传输效率

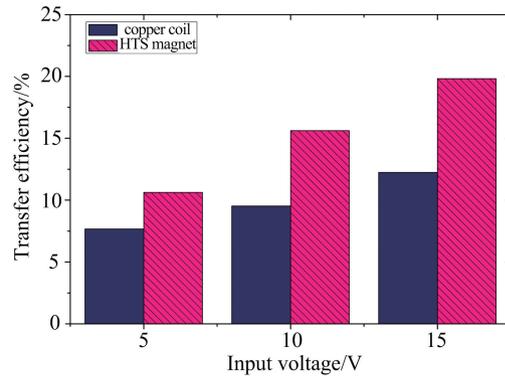


图7(b) 5 cm气隙下发射线圈与高温超导磁体、铜线圈的传输效率

线圈负载更高,两者的传输效率有着相同的变化趋势.随着发射线圈与接收线圈距离的增加,传输效率下降明显.但当传输距离太近时,会出现频率分裂现象^[12].此外,当接收线圈的能量经过整流滤波电路供给负载时,约有10%的能量消耗在了整流滤波电路中^[13],这也会导致传输效率的下降.

通过对实验结果的分析发现,传输效率与传输间距、负载性质及整流滤波电路等因素有关.因此在实际应用中优化传输间距与效率的关系,设计更加高效节能的整流滤波模块可进一步提高传输效率.

5 结 语

本文通过设计感应非接触供电系统以完成对高

温超导磁体的非接触补偿供电,研究了不同间距、不同负载的供电电流与传输效率.实验发现,随着传输间距的增大,供电电流逐渐减小;不同性质的负载,高温超导磁体的供电电流比铜线圈大,该实验证实了采用感应非接触供电技术补偿高温超导磁体电流损耗的可行性.

此外,由于实验系统设置的最大输出电压以及谐振频率较低,气隙为10 cm时所测得的高温超导磁体供电电流仅为0.10 A左右,因此下一步工作将通过增强传输线圈间的磁耦合、减小传输线圈的交流损耗以及优化整流滤波电路等方面的探究,进一步提升大气隙工况下系统的供电电流及传输效率.

参 考 文 献

- [1] H. W. Lee, K. C. Kim, L. Ju, *IEEE Trans. Magn.*, **42** (2006), 1917.
- [2] M. Ogata, Y. Miyazaki, H. Hasegawa, T. Sasakawa, and K. Nagashima, *Physica C*, **470** (2010), 1782.
- [3] 张涵, 马光同, 李兴田, 等., 低温与超导, **4** (2016), 43.
- [4] K. Mizuno, M. Sugino, M. Tanaka, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **27** (2017), 1.
- [5] K. Mizuno, M. Sugino, M. Ogata, *Q. Rep. RTRI.*, **57** (2016), 234.
- [6] L. Fu, K. Matsuda, T. Lecrevisse, et al., *Supercond. Sci. Tech.*, **29** (2016), 04T01.
- [7] 罗龙秋, 王超, 综合运输, **9** (2010), 33.
- [8] 程建峰, 苏晓峰. 铁道车辆, **41** (2003), 14.
- [9] 李晓琳, 阎锋, 国外铁道车辆, **6** (2016), 5.
- [10] H. Qiang, X. L. Huang, L. L. Tan, et al., *Adv. Mater. Res.*, **308-310** (2011), 1000.
- [11] 黄学良, 吉青晶, 谭林林, 等., 电工技术学报, **28** (2013), 171.
- [12] 张国民, 余卉, 刘国乐, 等., 南方电网技术, **9** (2015), 3.
- [13] Y. D. Chung, Y. L. Chang, "Feasible study of wireless power charging system for EDS-based superconducting magnetic levitation train using HTS receiver", International Conference on Power Electronics and Ecce Asia. IEEE, (2015), 2328.

Feasibility Study of Contactless Power Supply Compensation for High Temperature Superconducting Magnet

WANG Chao^{1,2} MA Guangtong² WANG Zhitao^{1,2}
GONG Tianyong^{1,2} ZHOU Pengbo² Qian Hangyu^{1,2}

¹ School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

² State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Received date: 2017-08-28; accepted date: 2017-09-11

【Abstract】 High temperature superconducting (HTS) maglev train operates at high speed, which is subject to environmental vibration, electromagnetic disturbance, track irregularities and so on. The operation losses resulted from these reasons together with the joint resistance loss, would be quite difficult for HTS maglev train to achieve persistent current operation. Therefore, based on the emerging technology of contactless power transfer in recent years, a contact-free power compensation scheme without any heat leakage for HTS magnets is proposed in this paper. The equivalent circuit model is established theoretically for impedance match in order to determine the optimal parameters of the system. At the same time, the experimental test platform is used to study the efficiency of power supply under different transmission distances and loads. These theoretical and experimental studies strongly confirmed the feasibility of contactless power transfer technology for HTS magnet power supply compensation in modern rail transit.

Keywords: high temperature superconducting (HTS) maglev train, HTS magnet, persistent current operation, contactless power supply compensation

PACS: 84.71.Mn, 74.25.N-, 85.25.Am, 03.50.De