



开敞环境下超导磁浮系统 永磁轨道的磁场波动区间

杨 博¹, 彭 璨², 雷武阳³, 郑 珺¹

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 611756;

3. 西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心, 四川 成都 610031)

摘 要: 高温超导磁悬浮系统因其无源自稳定的悬浮特性, 被认为是具有发展前景的磁悬浮制式之一。超导磁浮系统中的永磁轨道如果因外界环境参量等因素影响而发生退磁, 将对其悬浮性能产生影响。鉴于针对开敞环境长周期尺度下永磁轨道磁场的影响因素及演化规律的研究较少, 文章分析了高温超导磁浮工程化试验线永磁轨道磁场的227天的测试数据, 得到了永磁轨道的磁感应强度分布区间, 并开展了磁轨的磁热相关性研究, 总结了磁轨磁场的长期演化及短期波动规律。研究结果表明, 永磁轨道沿其横截面方向的垂向磁场磁感应强度在各波峰位置的衰减幅度具有一致性, 且与温度呈较强的线性负相关关系; 永磁轨道磁感应强度的短期波动(即单日磁场的波动情况)可通过单峰拟合函数描述, 磁场衰退时间主要集中在8:00~20:00之间, 持续时长3~8 h, 单日磁场的最低值一般出现在15:00; 永磁轨道磁感应强度的长期演化行为可通过傅里叶公式表征, 呈现出正弦波动特征。文章研究所得到的磁轨磁场中长期波动数据及演化规律可为高温超导磁浮列车系统的长期服役及运行维护研究提供依据。

关键词: 超导磁悬浮; 永磁轨道; 磁热效应; 磁场演化; 钕铁硼永磁体

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0106-09

0 引言

磁悬浮交通系统因其无轮轨摩擦、运行噪声小、维护成本低、环境友好等优点, 被视为未来超高速轨道交通的重要发展方向。当前各类制式的磁悬浮系统不断涌现, 其中主流的磁悬浮制式包括电磁悬浮、电动悬浮、高温超导磁悬浮及永磁悬浮^[1-2]。高温超导磁悬浮系统的磁场源由地面铺设的永磁轨道提供, 车辆通过车载高温超导块材与轨道磁场的磁通钉扎作用实现“无源自稳定”的悬浮导向一体化, 故又称超导钉

扎悬浮。该制式具有原理简单、安全可靠等优势, 以西南交通大学的高温超导磁悬浮工程化试验线为代表^[3]。

永磁轨道作为高温超导磁悬浮系统的基本组成部分, 虽能提供较为理想的磁场强度, 但由于其主要使用钕铁硼(NdFeB)材料, 具有较高的温度敏感性^[4]——工作温度的变化会直接引发磁体磁场的波动。对于由不同充磁方向永磁阵列拼接而成的永磁轨道而言, 温度的影响具有普遍性与显著性^[5]。永磁轨道铺设于开敞露天环境下, 太阳辐射、气温波动等自然条件可能引发轨道及轨道梁的热应力, 同时通过磁热效应导致

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375132, 52507033); 四川省中试研发平台中试项目(GNYZ2025030017); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2682025CX019); 四川省青年基金项目(2025ZNSFSC1240)

通信作者: 郑 珺, 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事超导磁悬浮与电磁推进、机电耦合动力学、智能监测与控制方面的研究;
E-mail: jzheng@swjtu.edu.cn

引用格式: 杨博, 彭璨, 雷武阳, 等. 开敞环境下超导磁浮系统永磁轨道的磁场波动区间[J]. 机车电传动, 2026(2): 106-114.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.012.

Citation: YANG Bo, PENG Can, LEI Wuyang, et al. Magnetic field fluctuations of permanent-magnet guideways in superconducting maglev systems under open-air conditions[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 106-114.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.012.

轨道产生可逆或不可逆退磁^[6-8], 最终可能造成超导体悬浮间隙减小^[9]。

上述类似问题也存在于其他工程结构中, 例如无缝钢轨^[10]、桥梁^[11]、电缆^[12]、混凝土板轨道^[13]。这些长期暴露于自然环境中的工程部件, 受季节性太阳辐射、风速、湿度及气温等综合因素影响, 会承受多种应力进而产生形变。具有明显季节特征的周期性荷载, 不仅会影响工程部件的长期服役性能, 还会增加其运维成本。当前针对永磁阵列磁热效应的研究主要集中于永磁同步电机领域, 相关研究多通过对永磁体温度、磁场进行直接或间接测试^[14-16], 分析其对电机性能的影响, 进而为电机拓扑结构的优化、永磁体参数的选取提供参考^[17-18]。西南交通大学^[19-20]针对高温超导磁浮系统永磁轨道的研究主要是聚焦特定温度下的轨道进行优化分析, 尚未考虑开敞自然环境下长周期运用时轨道的实际温度区间以及磁场动态变化情况。

当前, 针对永磁轨道磁场温度特性的研究多基于固定温度条件开展, 缺乏对实际线路温度变化情况及磁场稳定性的系统性研究。与其他工程结构相比, 磁轨磁场在开敞环境下的长周期实际演化行为尚未得到深入探究。本文以高温超导磁浮工程化试验线的永磁轨道为研究对象, 设计磁场-温度测试系统并通过试验验证其可靠性, 收集开敞环境下永磁轨道垂向磁场、温度的测试数据; 基于这些数据得到永磁轨道的磁感应强度波动区间, 验证永磁轨道磁场与温度的相关性, 并总结轨道磁场随大气温度变化的规律; 最后给出磁轨单日磁场磁感应强度波动时间、幅值、极值等的数学表征, 用于描述磁轨磁场长期演化规律。

1 永磁轨道结构及永磁体退磁原理

1.1 永磁轨道结构

本文的试验地点为西南交通大学九里校区高温超导磁浮工程化试验线, 其地理位置为东经 104.05°、北纬 30.70°。试验线总长 165 m, 轨道结构示意图如图 1 所示。永磁轨道制式采用“Halbach”型, 如图 1(b)所示。轨道通过螺栓连接到下方混凝土梁上, 外侧覆盖保护板以保护其免受太阳直射、雨水侵蚀。轨道材料选用钕铁硼永磁体, 牌号为 N50, 其剩余磁通密度(剩磁)为 1.42 T, 内禀矫顽力为 876 kA/m。该轨道已经历了超 5 年的使用时间。

1.2 永磁体退磁原理

永磁体随环境温度升高会产生退磁, 该退磁过程分为可逆退磁与不可逆退磁两种, 图 2 展示了永磁体的退磁过程^[9]。图 2 中 20 ℃、40 ℃、60 ℃所对应的永磁体磁感应强度-磁场强度 ($B-H$) 曲线表明, 温度越高, 曲线越容易到达“膝点”, 进而产生不可逆的退磁现

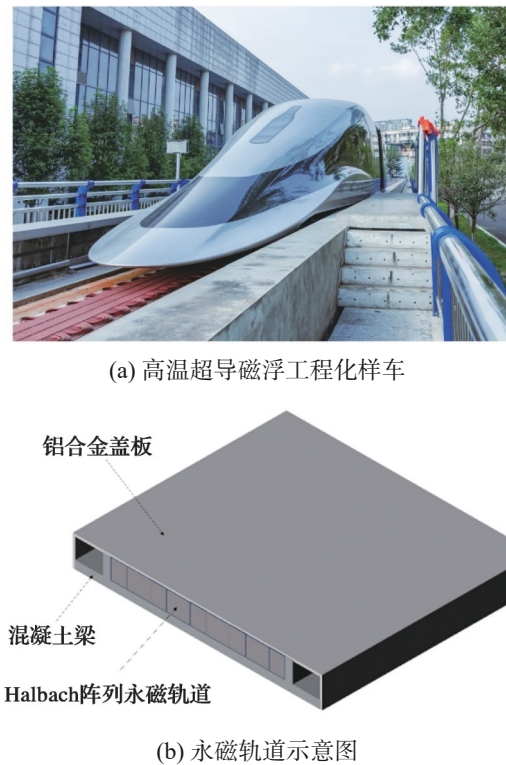


图 1 工程化样车及永磁轨道结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of engineering prototype vehicle and permanent-magnet guideway

象; 灰色斜线是由永磁轨道结构尺寸决定的负载线, 负载线与各温度实线的交点代表永磁体初始静态工作点。当温度升高, 退磁曲线的“膝点”不断向负载线靠近, 由此产生不可逆退磁。不可逆退磁发生, 永磁体磁化的恢复曲线会发生变化, 这将永久改变该永磁体的 $B-H$ 曲线。在不可逆退磁发生后, 永磁体所处工作区域为图 2 中的恢复线部分; 不可逆退磁发生后, 日常环境小幅升降温只会使永磁工作点在虚线恢复线上往复移动, 此时温度变化带来的磁感应强度变化属于可逆性退磁。因此, 开敞环境下永磁轨道的磁体工作区间应绝大部分处于可逆退磁范围内。

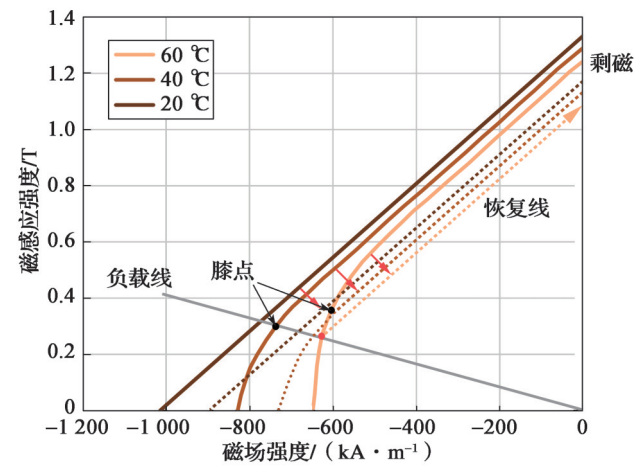
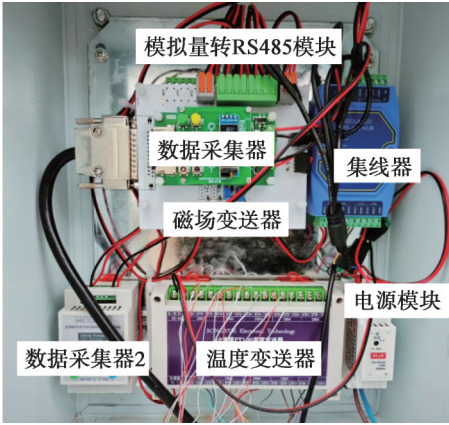


图 2 永磁体退磁曲线示意图^[9]
Fig. 2 Demagnetization curve of permanent magnet^[9]

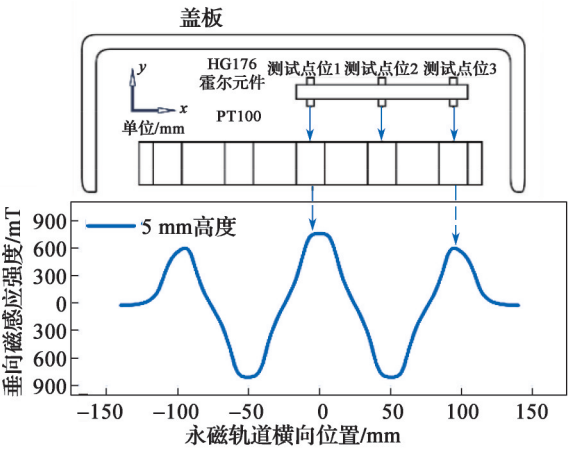
2 磁轨磁场测试系统

2.1 磁轨磁热测试系统

本文设计的磁轨磁热测试系统主要由磁场传感器、温度传感器、电源模块以及变送器和数据收集模块组成。为保障试验顺利进行，测试地点选在试验线末端，磁轨磁场温度测试装置粘贴在轨道与盖板夹层中距离永磁轨道末端截面 20 mm 处，使其免受轨道边端效应的影响。传感器安装位置如图 3(b)所示，进行温度测试时将 PT100 铂电阻温度传感器贴片紧贴在磁轨表面，电路板同位置背面 3 个霍尔元件的安装位置分别为磁轨垂向磁感应强度的波峰和波谷位置。数据采集频率为 2 s 采集一次，试验于 2025 年 5 月 2 日开始、到 2026 年 1 月 21 日结束，有效测试时间共计 227 天。该时间段覆盖了成都地区前一年度的最高温度和最低温度时刻。



(a) 数据采集系统示意图



(b) 传感器安装位置示意图

图3 测试系统构成及测试位置

Fig. 3 Test system composition and test location

测试系统工作时，轨道垂向磁场的磁感应强度通过霍尔元件的霍尔效应转化为电压信号，与 PT100 温度传感器数据共同经由变送器输出，变送器通过 RS485 协议与数据记录仪通信。测试装置各项参数如表 1 所示。

表 1 传感器参数
Table 1 Parameters for sensors

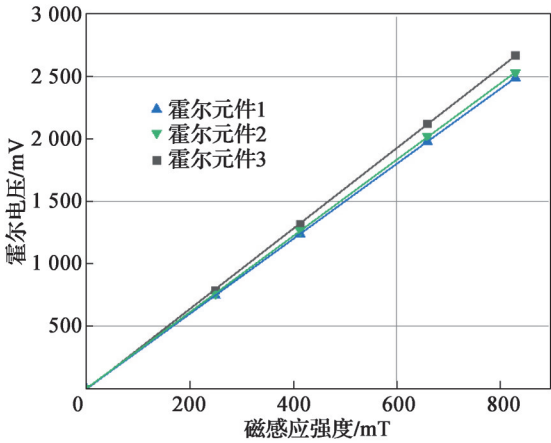
参数	温度传感器	磁场传感器
供电交流电压/V	220	220
通信方式	RS485	RS485
传感器型号	PT100	HG176A
分辨率	0.1 ℃	0.3 mT
波特率	9 600	9 600
测试范围	-10 ~80 ℃	-1.5~1.5 T

2.2 磁场模块的标定

为明确 HG176A 霍尔元件输出的霍尔电压与实际磁感应强度之间的对应关系，本文采用英国 Cryogenic Limited 公司生产的无液氮超导磁体主体装置（型号为 CRYCFM-5 T-300-H3）提供垂向强磁场，完成对磁场测试模块的标定，如图 4(a)所示。试验时，首先将测试电路板探入超导磁体中，测量电路输出的霍尔电压并记录该电压与磁感应强度，然后改变超导磁体的励磁强度并重复上述过程。试验得到的霍尔电压与磁感应强度的关系如图 4(b)所示，每个霍尔元件的霍尔电压与施加磁场的磁感应强度之间均呈现出较好的线性关系，对该关系进行线性拟合所得的拟合优度 (R^2) 均大于



(a) 超导磁体



(b) 霍尔元件线性度标定

图4 磁感应强度标定试验

Fig. 4 Calibration experiment for magnetic flux density

0.99, 因此采用该方法对永磁轨道的磁感应强度进行计算是准确且合理的。

为避免环境温度对霍尔电压产生影响进而导致较大测量误差, 本文采用恒流源电路驱动霍尔元件。温度标定试验的结果如图5所示。由图5可知, 电路板在磁轨试验温度波动区间内的磁感应强度波动幅度不超过1%。测试结果说明本文所设计制作的磁场测试模块受环境温度影响较小, 可不考虑温度效应。

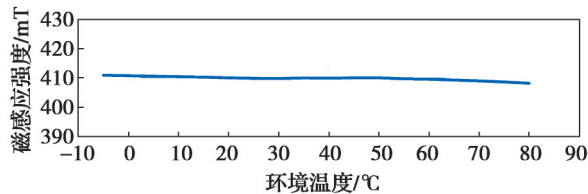


图5 温度标定试验

Fig. 5 Calibration experiment for temperature

3 永磁轨道磁感应强度波动区间

3.1 永磁轨道横截面磁场分布

永磁轨道的横截面磁场分布和磁场时程曲线是本文研究的重点。通过分析截面上各点位的磁场数据可以得到永磁轨道的代表性磁感应强度, 基于此, 本文统计给出了2025年5月2日至2026年1月21日试验期间所测得的垂向磁感应强度时程曲线数据, 具体如图6所示。

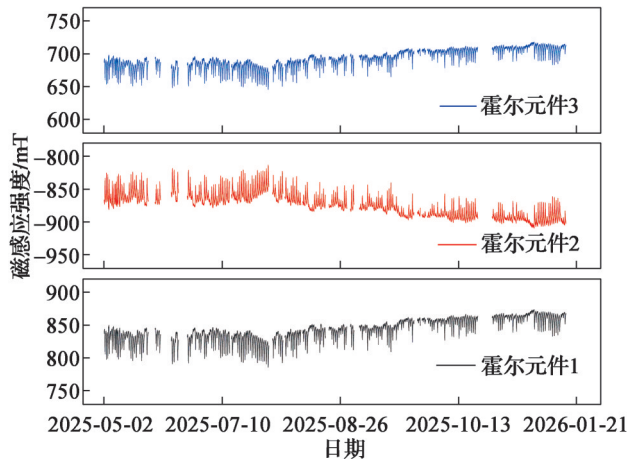


图6 磁感应强度测试时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of magnetic flux density test

从图6各点位磁感应强度数据可以看出, 磁感应强度波动趋势基本一致。其中, 霍尔元件2位置的垂向磁感应强度为负值, 因此表现出与其他2个霍尔元件位置相反的特性, 本文在后续研究中将采用霍尔元件2位置磁感应强度的绝对值来分析整体变化规律。3个测点处的磁场均具有较明显的季节性变化特征。永磁轨道磁场的时间维度波动过程表现为渐变趋势的长期演化行

为与上下振荡的短期波动现象。长期演化行为是磁轨磁场在年周期内的季节性变化规律, 表现为在夏季磁感应强度整体较低, 而在冬季则会恢复。短期波动现象是磁轨在单日温度周期内的磁场波动, 表现为磁感应强度时程曲线上的“毛刺”。为研究磁场分布规律, 对各点位磁感应强度数据进行正态分布统计并获得平均值和分布区间。

不同点位磁场正态分布如图7所示。由图7可知, 3个测点处的磁感应强度数据均值不同, 这是由于Halbach轨道的垂向磁场在中间3个峰值位置存在横向磁化永磁体聚磁, 而两侧垂向磁场峰值位置只存在聚磁铁聚磁, 因此通过霍尔元件3测量得到的垂向磁感应强度绝对值比霍尔元件1、2更小。以霍尔元件2为例, 磁感应强度均值为873.5 mT, 最大值为908.8 mT, 最小值为813.0 mT, 测试时间内磁感应强度振幅不超过11%。同时, 3个测点处的磁感应强度振幅幅度均在10%~11%之间。通过以上分析表明, 永磁轨道横截面垂向磁感应强度各峰值的振幅具有一致性。因此, 在对永磁轨道的磁场演化进行分析时, 可以认为磁轨不同位置的磁场波动具有相同变化规律。为方便研究, 后文采用霍尔元件2所在位置的磁场数据来描述永磁轨道横截面垂向磁感应强度的波动规律。

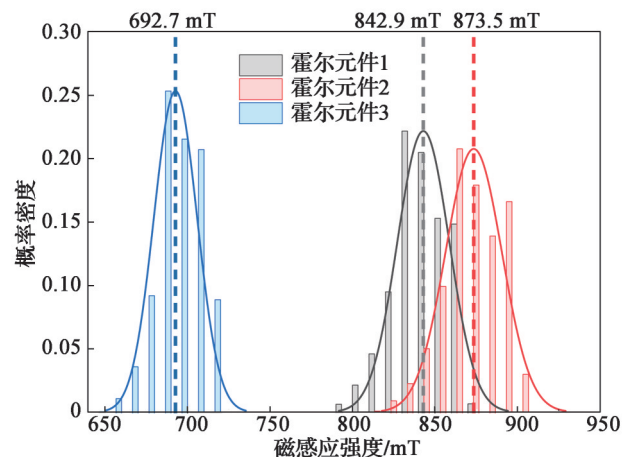


图7 不同点位磁感应强度正态分布图

Fig. 7 Normal distribution of magnetic flux density at different points

3.2 永磁轨道磁场温度相关性

永磁轨道磁感应强度和温度的时程分布情况如图8所示。由图8可知, 永磁轨道的最高温度可达65.7 °C, 测试期间最低温度为-1.7 °C。可以看出, 磁感应强度随夏季温度的升高而减小, 随冬季温度的降低而增大。受夏季高温与太阳辐射影响, 永磁轨道温度波动剧烈, 磁轨磁场的衰减程度与短期波动幅度在7、8月份达到全年峰值; 冬季磁轨温度波动较为平缓且均值较低, 磁轨磁场恢复且波动较为平缓。

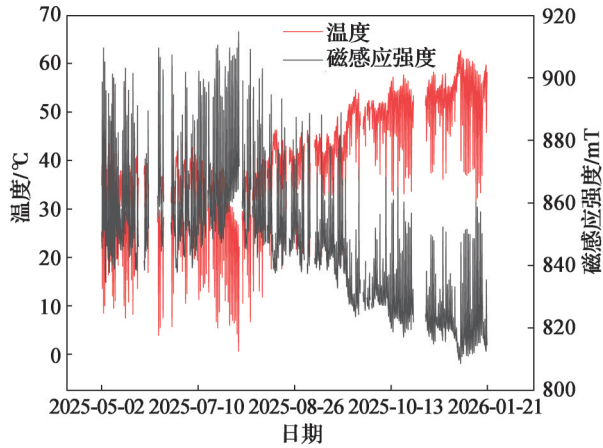


图8 温度-磁感应强度时程曲线

Fig. 8 Time-history curve of temperature and magnetic flux density

霍尔元件2位置处的磁感应强度-温度变化关系如图9所示。由图9可知,磁感应强度强弱与温度高低具有显著的相关性。

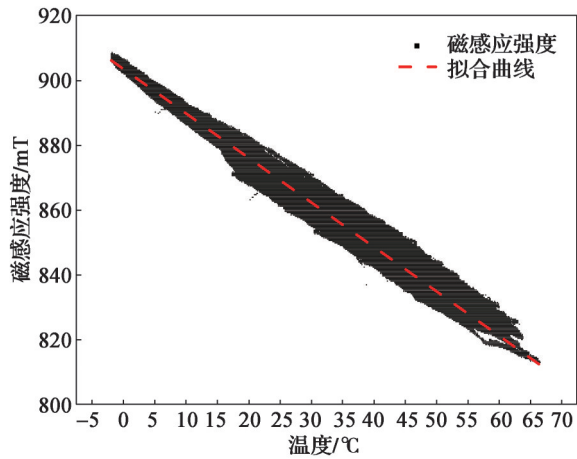


图9 磁感应强度-温度关系图

Fig. 9 Correlation between magnetic flux density and temperature

在露天环境下,磁感应强度 B 随温度 T 变化的规律可描述为

$$B(T) = B_0 + k_{B,T}T \quad (1)$$

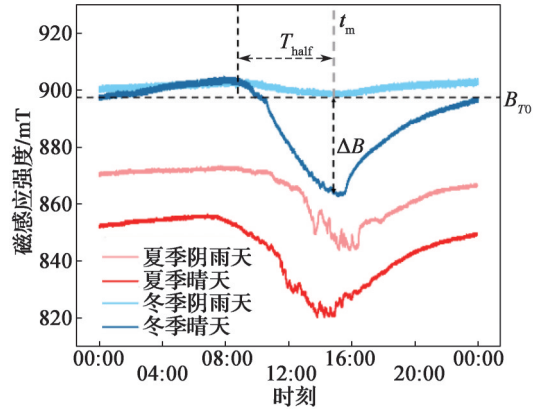
式中: $B(T)$ 为与磁轨温度 T 相关的磁感应强度函数; B_0 为轨道温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的磁感应强度, $B_0=903.68\text{ mT}$; $k_{B,T}$ 为磁轨温度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时磁感应强度的变化量, $k_{B,T}=-1.38$ 。

该拟合优度(R^2)为0.98。可以看出,永磁轨道产生可逆性磁场波动的主要原因是其本身的温度波动,磁场-温度关系为线性负相关。这是因为永磁轨道在长期服役过程中,所经历的温度环境介于日常波动与最高温度之间,其磁体工作点主要位于 B - H 曲线的恢复线上,从而呈现出线性可逆退磁现象。

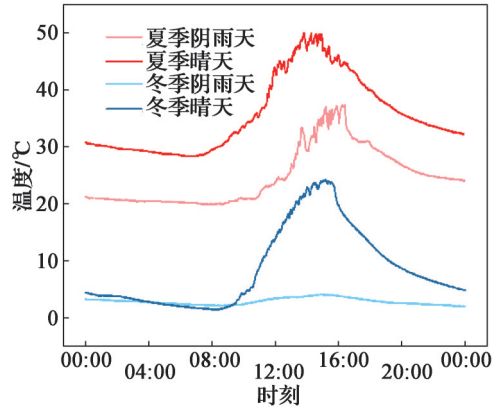
3.3 永磁轨道磁场短期波动

永磁轨道磁场的短期波动主要由热传导、热对流

及热辐射引发的单日温度波动所致。短期波动在磁场时程曲线上表现为出现“毛刺”现象,且呈现单日循环周期性特征。为分析磁轨磁场短期波动的普遍规律,本文综合考虑磁轨在不同季节多种天气条件下的服役情况,选取夏季晴天(2025年8月1日)、夏季阴雨天(2025年7月26日)、冬季晴天(2026年1月11日)以及冬季阴雨天(2026年1月1日)4种典型天气下的相关数据进行分析,相关温度波动及磁场波动曲线如图10所示。



(a) 典型天气磁感应强度



(b) 典型天气温度

图10 典型天气下单日内磁轨磁感应强度数据

Fig. 10 Daily magnetic flux density data under typical weather conditions

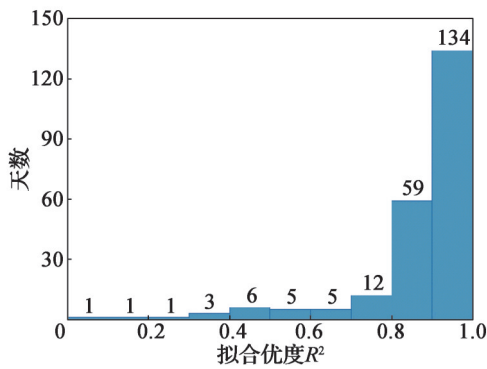
由图10可知,无论是在夏季还是在冬季,晴天的磁场波动均较阴雨天更为明显,冬季平均磁感应强度随太阳辐射减弱而升高。永磁轨道的磁场波动主要集中在8:00~20:00,夜晚磁轨磁感应强度趋于平稳。对于所选的典型天气情况,磁感应强度和温度曲线均呈现出单峰形状,因此本文采用高斯单峰函数描述磁感应强度的短期波动,相关参数标注如图10(a)所示,短期波动可表示为

$$B_T(t) = B_{T0} + \Delta B \exp\left(-\frac{(t-t_m)^2}{2T_{\text{half}}^2}\right) \quad (2)$$

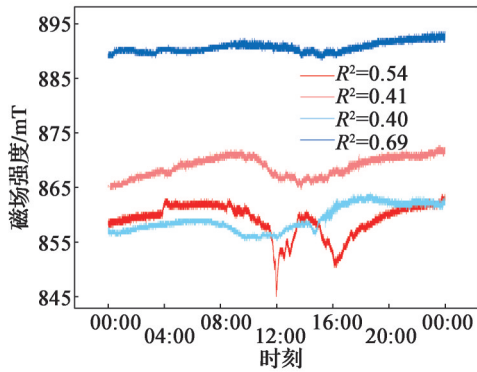
式中: $B_T(t)$ 为磁感应强度函数; B_{T0} 为基线磁感应强

度; ΔB 为磁感应强度振幅; T_{half} 为波动步长; t_m 为磁场达到极值的时刻; t 为一天中的任意时刻。

根据式(2)对测试时间跨度内每日的数据进行拟合, 得到拟合优度 (R^2) 特征如图 11 所示。由图 11(a)可知, 85% 的拟合优度大于 0.8, 可证明该拟合函数的适用性。拟合优度低于 0.8 的数据, 对应日期多为多云、降温等天气。在这些天气条件下, 磁场波形呈现多峰或无峰特征, 如图 11(b)所示, 这主要是源于云层变化、间歇性降雨及天气系统过境等因素。针对拟合优度大于 0.8 的对应日期, 分析当天的基线磁感应强度 B_{70} 、磁感应强度振幅 ΔB 、极值时刻 t_m 以及波动步长 T_{half} , 结果如图 12 所示。



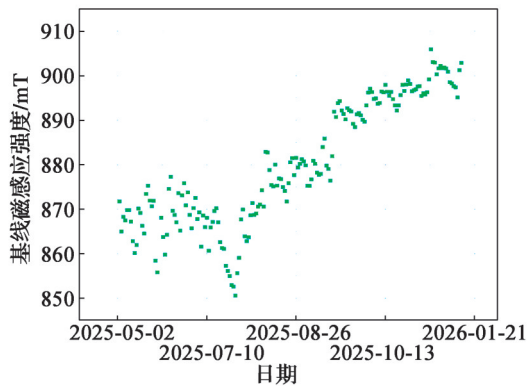
(a) 拟合优度 (R^2) 分布图



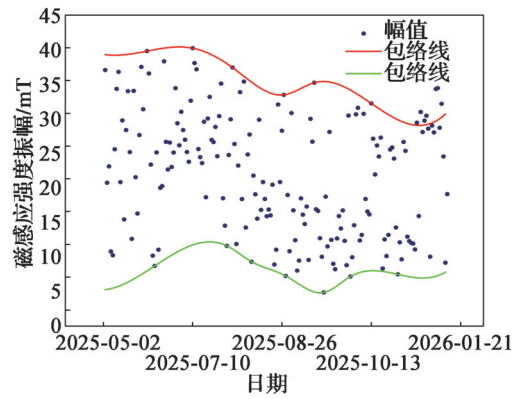
(b) 拟合优度较低的样本

图 11 拟合优度 R^2 特征

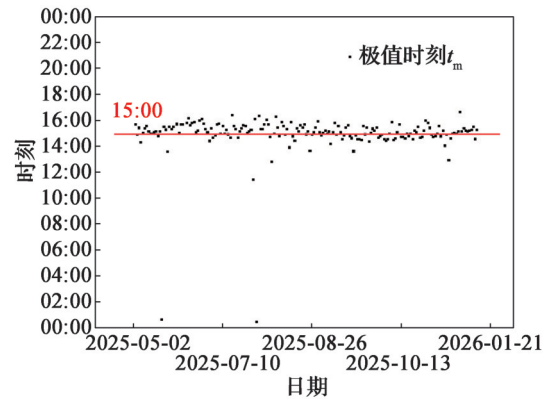
Fig. 11 Characteristics of goodness-of-fit (R^2)



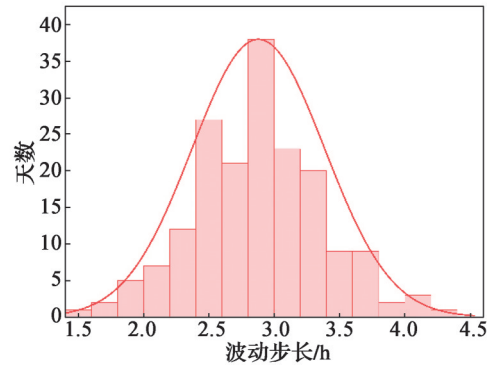
(a) 基线磁感应强度散点图



(b) 磁感应强度振幅散点图



(c) 极值时刻散点图



(d) 波动步长分布图

图 12 拟合函数参数统计图

Fig. 12 Statistical chart of fitting function parameters

对式(2)中的各参数综合分析可以得到永磁轨道磁场短期波动的变化规律。轨道磁场以凌晨的平稳基线磁场数据为起点, 其单日变化规律与图 6 磁感应强度时程曲线所呈现的规律一致。轨道受太阳辐射影响后温度升高, 引发轨道磁场的可逆性退磁。该过程持续 3~8 h, 磁场最大衰减时刻主要集中在 15:00 左右, 之后磁轨温度伴随日落缓慢降低, 磁轨磁场逐渐恢复至基线磁场。少数特殊天气情况引起的温度突变使得结果中存在 00:00 时刻左右为磁轨磁场极值的情况。但总体来看, 磁轨磁感应强度无论是在夏季还是在冬季均可能产生较大的振幅, 但夏季磁感应强度振幅平均值高于冬季, 且日均磁感应强度振幅不高于 5%。式(2)可作为

研究高温超导磁浮系统在时域温度不平顺条件下动态响应的磁场输入。

3.4 永磁轨道长期演化规律

针对永磁轨道的长期演化性能进行研究。采用单日平均磁场 B_d 表示某日磁场的平均值, $B_{d,t}$ 表示该日 t 时刻的磁场值, 并通过 B_d 的变化研究永磁轨道长期的磁场波动。其中, B_d 可用公式表示为

$$B_d = \sum_{i=1}^n \frac{B_{d,i}}{n} \quad (3)$$

受气温季节性变化影响, 磁轨磁场会发生长期波动与演化。根据图 6 所示的磁场时程曲线, 采用傅里叶级数的拓展公式进行拟合, 公式表示为

$$B_d(t) = a_0 + b_0 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - c_0)\right), t \geq 0 \quad (4)$$

式中: a_0 为永磁轨道测试期内的平均磁感应强度; b_0 为磁感应强度平均振幅; t 为时间变量; c_0 为时间计算的初始点。

拟合曲线如图 13 所示, 拟合结果为: $a_0=874.33$ mT; $b_0=-18.07$ mT; $c_0=-671.89$ 。拟合优度 $R^2=0.81$ 。由拟合结果可知, 永磁轨道平均磁感应强度为 874.33 mT, 磁感应强度平均振幅为 36.14 mT, 在测试周期内磁轨磁场以正弦函数形式波动, 夏季磁轨受温度影响而出现退磁现象。式(4)可为长周期下的磁轨磁场变化及长期服役下的轨道演化研究提供参考。

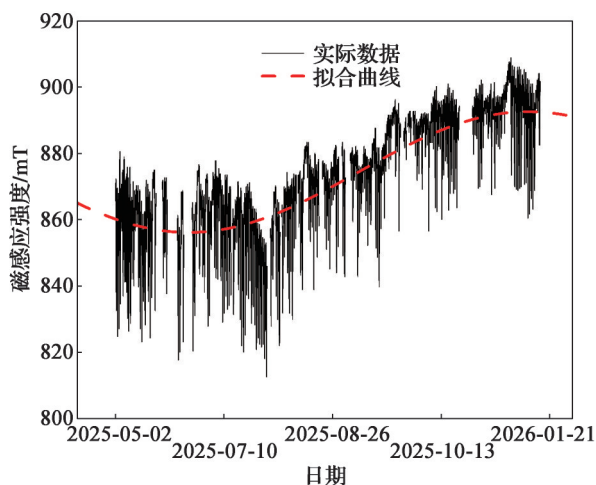


图 13 磁感应强度长期演化测试及拟合曲线

Fig. 13 Long-term evolutionary testing of magnetic flux density and curve fitting

4 结论

本研究针对高温超导钉扎磁浮试验线永磁轨道在开敞自然环境下的磁场波动问题, 通过磁场标定试验与数学拟合验证, 分析磁轨磁场的磁热相关性、长期演化及短期波动特征, 得到磁感应强度变化的拟合曲线与短期波动规律。主要结论如下:

①搭建的磁场测试装置适用于永磁轨道的长期测试。永磁轨道横截面垂向磁感应强度振幅在不同位置具有一致性, 磁轨的磁感应强度 B 与温度 T 呈线性负相关关系。磁轨磁场的波动过程主要包括长期演化行为与短期波动现象。

②通过对 4 种典型天气的分析可知, 永磁轨道磁场的短期波动符合单峰函数特征。本文所提出的拟合公式对测试周期内大多数日期的磁场变化均能实现良好的拟合效果。永磁轨道磁感应强度的单日最低值出现在 15:00 左右, 其单日主要波动时长为 3~8 h, 且该磁场在夏季、冬季均会出现大幅波动。

③磁轨磁场的长期演化特征呈现正弦波动规律, 具有夏季磁场弱、冬季磁场强的特点。磁轨在测试周期内的磁感应强度波动幅度不超过 10.9%, 该波动对磁浮系统悬浮力的影响处于可控范围内, 该永磁轨道测试周期内温度区间为 $-1.7\sim 65.7$ $^{\circ}\text{C}$ 。

尽管本文仅针对成都地区磁浮系统工程化试验线永磁轨道的横截面展开研究, 且仅考虑温度因素对磁轨磁场的影响, 但所提出的数学模型与得到的结论, 可为永磁轨道的全生命周期管理、悬浮系统长期性能演化研究及系统安全维护提供参考, 并为搭建高温超导磁浮系统车-轨耦合多要素状态识别及智能监测体系提供指导。

参考文献:

- [1] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2022, 57(3): 455-474.
- [2] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 177-198.
XIONG Jiayang, DENG Zigang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 177-198.
- [3] 佚名. 我国首台高温超导高速磁浮工程化样车及试验线下线启用[J]. 中国机电工业, 2021(2): 36.
ANON. The first high-temperature superconducting high-speed maglev engineering prototype and test line in China have been launched and put into operation[J]. China machinery & electric industry, 2021(2): 36.
- [4] CHEN J Q, WANG D, CHENG S W, et al. A hysteresis model based on linear curves for NdFeB permanent magnet considering temperature effects[J]. IEEE transactions on magnetics, 2018, 54(3): 1-5.
- [5] 王文. 永磁轨道高温下磁特性及对高温超导块材悬浮力的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
WANG Wen. Studies on the magnetic characteristics of permanent magnet guideway at high temperature and its effect on levitation force of HTS bulk[D]. Chengdu: Southwest

- Jiaotong University, 2021.
- [6] SHU Z Q, WU J M, LI S Q, et al. Road performance, thermal conductivity, and temperature distribution of steel slag rubber asphalt surface layer[J]. *Journal of renewable materials*, 2020, 9(2): 265-280.
- [7] RUOHO S, DLALA E, ARKKIO A. Comparison of demagnetization models for finite-element analysis of permanent-magnet synchronous machines[J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2007, 43(11): 3964-3968.
- [8] ZHOU P, LIN D S, XIAO Y M, et al. Temperature-dependent demagnetization model of permanent magnets for finite element analysis[J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2012, 48(2): 1031-1034.
- [9] PENG C, ZHOU X C, YANG B, et al. Levitation performance evolution of HTS maglev systems under thermally induced magnetic irregularities in permanent magnet guideways[J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2025, 74: 1-11.
- [10] 黄志斌, 曾志平, 叶梦旋, 等. 基于机器视觉的大跨长联桥上无缝线路小阻力扣件纵向服役状态监测研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(1): 409-418.
- HUANG Zhibin, ZENG Zhiping, YE Mengxuan, et al. Research on longitudinal service condition monitoring of small resistance fasteners on long-span connecting bridge continuously welded rail based on machine vision[J]. *Journal of central south university (science and technology)*, 2024, 55(1): 409-418.
- [11] YANG D H, YI T H, LI H N, et al. Correlation-based estimation method for cable-stayed bridge girder deflection variability under thermal action[J]. *Journal of performance of constructed facilities*, 2018, 32(5): 04018070.
- [12] BAYRAKTAR A, AKKÖSE M, TAŞ Y, et al. Long-term strain behavior of in-service cable-stayed bridges under temperature variations[J]. *Journal of civil structural health monitoring*, 2022, 12(4): 833-844.
- [13] ZHANG Q Q, DAI G L, TANG Y. Thermal analysis and prediction methods for temperature distribution of slab track using meteorological data[J]. *Sensors*, 2022, 22(17): 6345.
- [14] JUNG H S, KIM H, SUL S K, et al. Magnet temperature estimation of traction motor in standstill with considering spatial harmonics[J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2021, 68(11): 10546-10557.
- [15] XIAO S, GRIFFO A. PWM-based flux linkage and rotor temperature estimations for permanent magnet synchronous machines[J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2020, 35(6): 6061-6069.
- [16] ARMANDO E, RUBINO S, BOGLIETTI A, et al. A test procedure to evaluate magnets thermal time constant of permanent magnet machines[J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2021, 57(5): 4694-4706.
- [17] HUYNH T A, HSIEH M F. Irreversible demagnetization analysis for multilayer magnets of permanent magnet-assisted synchronous reluctance machines considering current phase angle[J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2019, 55(7): 1-9.
- [18] HUYNH T A, HSIEH M F, SHIH K J, et al. An investigation into the effect of PM arrangements on PMa-SynRM performance[J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2018, 54(6): 5856-5868.
- [19] WANG W, DENG Z G, CHEN L, et al. Magnetic characteristics of Nd-Fe-B permanent magnets at high temperature and the effect of temperature on high-temperature superconducting levitation performance[J]. *IEEE magnetics letters*, 2020, 11: 1-5.
- [20] YANG Y F, WANG W, PENG C, et al. Optimization of Nd-Fe-B permanent magnet guideways with high-temperature stability[J]. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2024, 604: 172290.

Magnetic field fluctuations of permanent-magnet guideways in superconducting maglev systems under open-air conditions

YANG Bo¹, PENG Can², LEI Wuyang³, ZHENG Jun¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 3. Research Center for Super-High-Speed Evacuated Tube Maglev Transport, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: High-temperature superconducting (HTS) maglev systems represent one of promising maglev technologies, owing to their passive self-stabilizing levitation. However, their levitation performance can deteriorate due to demagnetization of the permanent-magnet guideways driven by various factors including external environmental parameters. Few studies have focused on influencing factors and evolution laws for permanent-magnet guideway magnetic fields in open-air conditions over long timescales. This paper analyzes test data from 227-day magnetic field measurements on the permanent-magnet guideway of a HTS maglev test line, yielding the magnetic flux density distribution ranges along the guideways; and summarizes the long-term evolution and short-term fluctuation laws of magnetic fields along the permanent-magnet guideways through magneto-thermal correlation analysis. Key findings are as follows. The attenuation magnitudes of vertical magnetic flux density across the cross-section of permanent-magnet guideways remain consistent at all peak positions, and this physical quantity shows a prominent negative linear correlation with ambient temperature. Short-term (daily) magnetic flux density fluctuations are well described by a unimodal fitting function: magnetic field attenuation mainly occurs between 8:00 and 20:00, with a duration of about 3 to 8 hours, and the daily minimum magnetic flux density normally appears near 15:00. The long-term evolutionary behavior of permanent-magnet guideway magnetic flux density can be described by a Fourier formula and exhibits sinusoidal fluctuation characteristics. The medium- and long-term magnetic field fluctuation data and evolution laws of the permanent-magnet guideways presented in this work provide a theoretical basis for future research on long-term service, operation and maintenance of HTS maglev systems.

Keywords: superconducting maglev; permanent-magnet guideway; magneto-thermal effect; magnetic field evolution; NdFeB permanent magnet

收稿日期：2026-02-01；修回日期：2026-03-01
责任编辑：白 云