



混铁车用永磁直驱牵引电动机设计

庞 聪^{1,2}, 张 岩^{1,2}, 倪 伟^{1,2}

(1. 中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502;

2. 轨道交通牵引电机山西省重点实验室, 山西 永济 044502)

摘 要: 为解决冶金混铁车传统异步系统效率低下、结构复杂的问题, 文章提出一种全封闭防护且完全依赖自然散热的永磁直驱同步牵引电动机(D-PMSM)方案。基于国内首台永磁直驱混铁车项目需求, 针对高温、强振、重载冲击等极端工况约束, 采用多物理场电磁-热-结构协同设计方法, 文章开展了轴向分段、径向分层的永磁体抑涡流拓扑研究, 以及适配自然散热的全封闭抗冲击复合结构设计, 通过机座与端盖一体化散热翅片构建了自然热对流与热辐射通道, 取消了强迫风冷装置, 完成了21.7 kW永磁直驱同步牵引电动机样机的研制与试验验证。结果表明, 该全封闭自然散热型永磁牵引电机的效率达94.6%, 各项性能均满足混铁车运行要求。文章的研究可为永磁直驱技术在重型工业运输装备中的应用提供参考。

关键词: 重型工业运输装备; 永磁直驱; 混铁车; 牵引电动机; 自然散热; 有限元分析

中图分类号: U260.9⁵; TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2026)01-0089-08

0 引言

在冶金工业物流体系中, 混铁车承担着高温液态金属转运的核心职能, 其运行效率与可靠性直接影响整个生产流程的连续性与安全性。牵引系统作为混铁车的动力心脏, 其性能优劣对整车综合表现具有决定性作用。目前, 国内外广泛采用的异步电机配合齿轮减速箱的牵引方案, 虽技术成熟, 却存在系统效率低、传动链冗长、维护成本高以及噪声大等问题^[1], 尤其在高温、高粉尘的恶劣工况下, 齿轮箱故障频发, 难以适应冶金行业在节能、环保与全生命周期成本控制方面不断提升的要求。

近年来, 永磁同步电机凭借高功率密度、高效率、低噪声等优势, 在轨道交通、电动汽车及工业驱动等领域的应用取得了显著进展, 并展现出巨大的技术替代潜力^[2]。永磁直驱技术消除了传统传动系统中的齿轮减速环节, 实现了电机对负载的直接驱动, 不仅有效降低了机械损耗与维护成本, 而且显著提升了系统的可靠性与动态响应性能^[3]。国内外学者围绕永磁直驱技

术已开展大量研究, 在机车牵引、风力发电等领域积累了丰富的理论与工程经验。然而, 将其应用于混铁车牵引仍面临诸多特殊挑战: 混铁车运行工况极端, 需频繁启停、承受强烈的机械冲击与振动; 电机长期处于高温辐射环境, 对散热设计与材料耐热性提出了极高要求; 安装空间受限, 结构设计需兼顾紧凑性与可靠性。上述因素共同构成了永磁直驱技术在混铁车应用中亟待突破的技术瓶颈。

针对上述问题, 本研究将永磁直驱牵引技术应用用于混铁车, 重点解析混铁车在高温、强振、重载冲击等特殊运行条件下的技术需求与约束, 建立基于多物理场耦合的电磁-热-结构协同设计模型, 优化电机的电磁拓扑与散热系统布局, 给出抗冲击与抗热辐射的复合结构设计方案, 开展样机试制与试验验证, 系统评估所提方法的有效性与工程适用性, 为永磁直驱技术在冶金重型运输装备中的推广提供依据。

1 技术要求

混铁车的牵引特性对电机的设计提出了明确的技

基金项目: 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202501110101009)

通信作者: 庞 聪, 男, 正高级工程师, 从事电机设计及仿真技术研究; E-mail: 18092274120@163.com

引用格式: 庞聪, 张岩, 倪伟. 混铁车用永磁直驱牵引电动机设计[J]. 机车电传动, 2026(1): 89-96.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.012.

Citation: PANG Cong, ZHANG Yan, NI Wei. Design of a permanent magnet direct-drive traction motor for torpedo cars[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 89-96.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.012.

术要求。牵引工况下，电机需具备降转矩启动能力，在低速区输出高启动转矩；正常运行时，维持低速区的转速-转矩特性，并在速度提升至额定转速后切换为恒功率运行；有电机发生故障的工况下，正常电机则需保持更高的转矩输出能力，这要求电机具备一定的过载能力。每辆混铁车采用双对称布置结构，配置2台牵引电机。电机的牵引特性曲线如图1所示，可分为两个区间：转速[0, 41.9)r/min为降转矩启动阶段，[41.9, 83.8)r/min为恒功率运行区间。

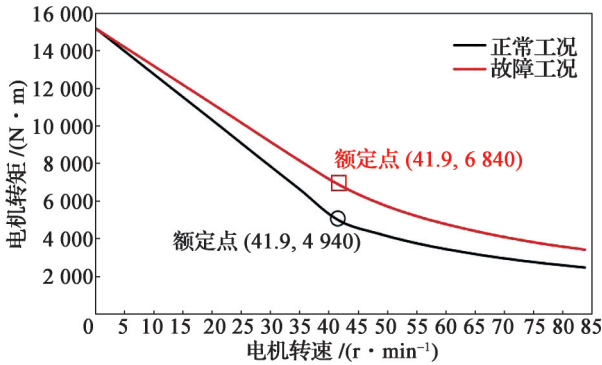


图1 电机牵引特性

Fig. 1 Motor traction characteristics

电机的具体技术参数要求如表1所示。

表1 电机技术要求

Table 1 Technical requirements for motor

工况	正常牵引模式	故障模式
额定功率/kW	21.7	30.0
额定转矩/(N·m)	4 940	6 840
额定转速/(r·min ⁻¹)	41.9	
最大电流/A	180	
最高电压/V	585	
启动转矩/(N·m)	15 200	
最高转速/(r·min ⁻¹)	83.8	
最大反电势/V	750	
冷却方式	自然冷却	
工作制	S2短时断续工作制（60 min）	

2 电磁参数设计

2.1 气隙长度设计

气隙长度是永磁电机电磁设计的关键参数，显著影响电机电磁性能与机械可靠性。适当增大气隙可有效削弱齿谐波电动势，抑制由此引发的电机振动与噪声问题^[4]。但气隙过大会导致电机功率因数降低。反之，较小气隙虽有助于提升功率因数，却增大了齿槽转矩脉动和电磁谐波含量；同时，过小的气隙会增加转子偏心及扫膛故障的发生概率，降低电机运行安全性。因此，电机气隙取值需综合权衡电磁性能、运行噪声与机械安全多重约束。针对混铁车需求，本文将

电机气隙值确定为2 mm，并通过调整绕组匝数和永磁体尺寸提高电机的功率因数^[5]。

2.2 极槽配合设计

采用72槽12极的极槽配合方案，绕组节距取为极距的5/6，以削弱反电动势中的5次与7次谐波^[6]。通过高槽极比设计实现电机优异的电磁性能与运行稳定性，有效降低转矩脉动，从而满足重载启动时对运行平稳性的严苛要求。同时，12极结构在低速区对应的基频仅为8.38 Hz，有助于降低铁心损耗、提升运行效率。电机绕组系数 K_w 可通过式(1)计算得到。

$$K_w = K_p K_d K_s = \sin\left(\frac{\lambda}{2}\right) \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_1}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} \frac{2 \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}{\alpha_1} \quad (1)$$

式中： K_p 为绕组短距系数； K_d 为绕组分布因数； K_s 为斜槽因数； q 为每极每相槽数； λ 为节距对应的电角度； α_1 为槽距电角度。

本文极槽配合对应的绕组系数为0.933，漆包线利用率较高，有利于提高效率，减小温升。

2.3 永磁体设计

永磁体的设计需重点围绕转子磁路结构设计、永磁体尺寸设计、抗失磁分析等关键技术开展^[7]。

针对电机高温运行环境，选用耐高温性能更优的钕钴永磁材料Sm30H。同时，采用轴向分段、径向分层设计，通过阻断大尺度涡流通路，有效降低永磁体内感应产生的涡流损耗^[8]，抑制高速弱磁工况下的永磁体温升。

永磁同步电动机的磁路结构依据永磁体布置形式可分为表面式（SPM）与内置式（IPM）两种拓扑^[9]。SPM拓扑电机的转子交轴、直轴电感接近，凸极效应微弱，因此其弱磁扩速能力受到限制。IPM拓扑电机通过将永磁体嵌入转子铁心内部，显著增强了转子的机械鲁棒性。特别是V型IPM电机的转子结构，其 d 轴与 q 轴磁路呈现高度不对称性，凸极效应显著，因此可利用磁阻转矩提升低速区的功率密度^[10]。上述特性使得V型IPM电机转子在机械可靠性、环境适应性及宽域转矩输出能力方面更契合混铁车用D-PMSM的运行需求。

永磁体的宽度直接决定其能够提供磁通的面积，是影响主磁通大小的关键因素。IPM径向式磁路结构可根据式(2)预估永磁体宽度，其宽度的初步预估尺寸为48 mm^[11]。

$$b_m = \frac{2\sigma_0 B_{\delta 1} \tau L_{ef}}{\pi b_{m0} B_r K_\phi L_M} \quad (2)$$

式中： σ_0 为空载漏磁系数； $B_{\delta 1}$ 为气隙基波磁密； τ 为电机极距； L_{ef} 为铁心轴向长度； b_{m0} 为永磁体空载工作点； B_r 为永磁体剩磁密度； K_ϕ 为气隙磁密波形系数；

L_M 为永磁体轴向长度。

永磁体的充磁方向长度对电机的性能有重要影响。适当增加永磁体充磁方向长度, 可提升电机的过载能力、功率因数及抗退磁能力, 但同时会增加永磁材料用量, 并使反电动势升高。反电动势的升高将增大弱磁控制所需的去磁电流, 在逆变器电流容量有限的前提下, 可能使恒功率运行范围收窄。因此, 根据式(3)可初步预估 IPM 径向式磁路结构中永磁体充磁方向的长度, 其长度的评估尺寸为 65 mm。

$$h_m = \frac{K_h K_a b_{m0} \delta}{(1 - b_{m0}) \sigma_0} \quad (3)$$

式中: K_h 为电动机的饱和系数, $K_h = 1.05 \sim 1.30$; K_a 为与转子结构有关的系数, $K_a = 0.7 \sim 1.2$; δ 为气隙长度。

3 结构设计

混铁车用 D-PMSM 在起动工况下, 需在低转速区间持续输出大转矩。该运行模式下电机磁路容易进入饱和状态, 且工作电流幅值较大, 会产生显著的定子铜耗, 进一步加剧电机内部发热。同时, 电机整体采用全封闭结构布置, 加之处理铁水罐作业过程中持续向外辐射散热, 致使电机的实际工作环境温度远高于常规电机, 外部散热环境十分恶劣。受限于安装空间要求, 该电机只能采用自然冷却方式。因此, 电机散热面临严苛挑战, 需结合全封闭永磁电机成熟的设计经验并针对性开展优化^[12]。

3.1 总体结构

电机总体结构三维模型图如图2所示, 针对冶金运输的特殊工况需求, 采用抱轴安装结构, 电机转轴与车轴一体化设计, 牵引力矩直接传递至轮对, 省去了齿轮箱、联轴器等中间传动环节^[13]。

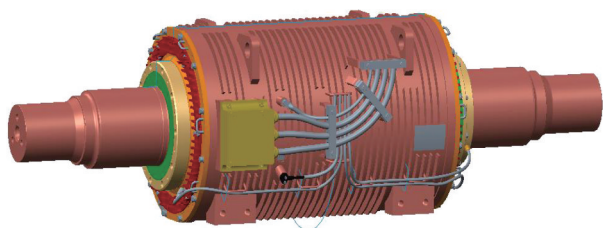


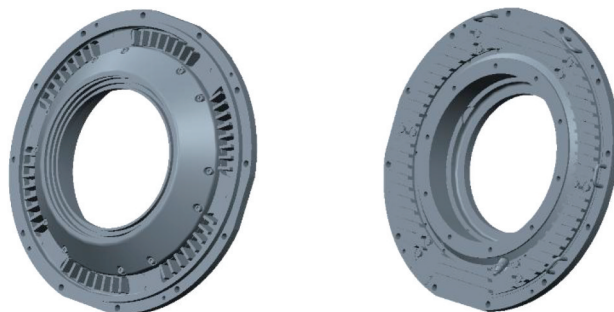
图2 电机总体结构三维图

Fig. 2 3D diagram of overall motor structure

传感器配置集成了旋转变压器与电流传感器接口。其中, 旋转变压器提供高精度的转子位置反馈信息, 以满足电机矢量控制的需求; 电流传感器实时监测相电流, 为过载保护及热管理提供数据支撑。

电机采用全封闭自然冷却结构。机座散热片的布局避开了吊挂安装面, 确保周向散热效率; 散热片的几何结构参数经综合优化设计, 可在满足散热需求的

同时防止粉尘堆积。封闭式设计有效阻隔了环境中粉尘的侵入, 避免了因粉尘积聚导致的绝缘问题, 其中, 端盖三维图如图3所示。由图3可知, 在端盖外表面布置环形散热片组, 可增大散热面积, 强化被动散热能力^[14]。



(a) 前端盖三维图

(b) 后端盖三维图

图3 端盖三维图

Fig. 3 3D diagram of end housing

3.2 定子铁心与绕组结构

定子铁心选用 50TW400 硅钢片, 矩形开口槽的设计兼顾高槽满率与绕组嵌线工艺的可实现性。铁心采用斜槽结构, 以抑制齿谐波引起的转矩脉动^[15]; 同时, 在外圆设置若干道焊槽, 通过氩弧焊实现叠片固紧, 从而有效控制铁心的振动与噪声。

通过矩形槽与双层绕组结构的配合, 有效提升槽满率。绕组采用短距设计, 在提升基波绕组系数的同时, 能够显著削弱电机主要低次谐波电动势, 将电机电磁转矩脉动控制在较低范围, 以满足混铁车重载低速工况下的运行平稳性要求^[16]。

3.3 转子结构

在重载冲击工况下, V 型 IPM 电机磁路的隔磁桥区域承受离心力与电磁力的双重作用。随着隔磁桥厚度减小, 转子机械安全系数下降, 但磁路饱和程度降低, q 轴电感提升。这种机械强度与电磁性能的此消彼长, 构成了重载冲击下的机械-电磁耦合特性。该特性需在隔磁桥尺寸优化中予以协同考虑。因此, 转子冲片隔磁桥的厚度应通过结构强度分析确定, 并保留必要的安全裕度^[17]。冲片圆周方向增设通风孔, 以增强转子散热性能。转子转轴与车轴共用, 轴端增设中心工艺孔, 且轴伸部位需具备较高的机械强度。

4 电机性能分析

4.1 空载反电势

电机的空载反电动势 E_0 可通过式(4)计算得到。

$$E_0 = 4.44 f N K_w K_\phi \phi_0 \quad (4)$$

式中: f 为空载反电动势的频率; N 为每相绕组串联匝

数； K_w 为绕组系数； K_ϕ 为气隙磁通波形系数； ϕ_0 为空载主磁通。

为进一步分析电机的线反电势特性，基于理论计算公式，采用有限元仿真进行建模和验证，得到电机在额定转速下的空载线反电势波形如图4所示。对其进行傅里叶（FFT）分解，可测得总谐波畸变率（THD）约为1.6%，如图5所示。

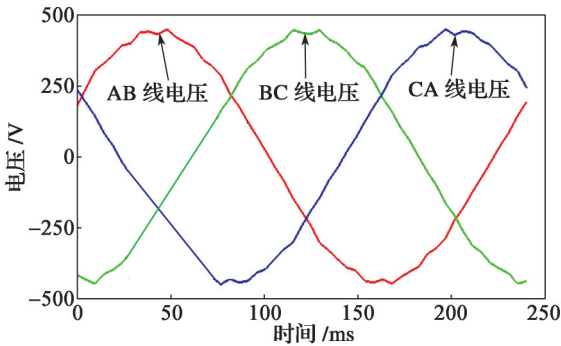


图4 线反电势波形
Fig. 4 Line-to-line back-EMF waveform

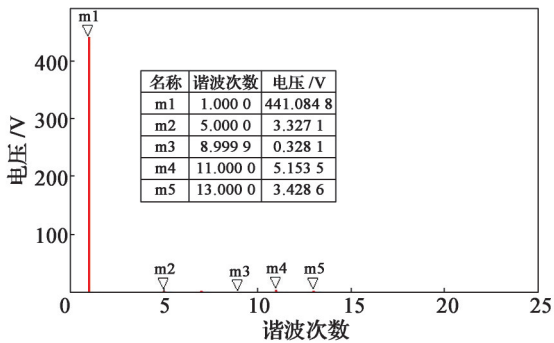


图5 线反电势FFT分解
Fig. 5 Line-to-line back-EMF FFT decomposition

4.2 电机稳态运行性能

在永磁电机领域，相关文献已对电机稳态性能参数的理论计算模型进行了详尽阐述，包括电压平衡方程、转矩方程及功率方程等基本理论。这些计算方法是开展理论分析与设计预估的基础。

为精确模拟电机内部复杂的非线性电磁场分布及磁路饱和效应，并获取详尽的场信息（如磁密、损耗密度分布），必须借助有限元仿真。通过建立精确的电机电磁有限元模型，可在预设的转速与负载工况条件下，精准计算出各项稳态性能参数随转速或工作频率变化的完整特性曲线，如图6所示。

4.3 短路失磁校核

针对电机在短路故障工况下可能存在的失磁风险，采用二维有限元场计算方法进行永磁体短路失磁校核^[18]，计算结果如表2所示。由表2可知，通过计算电机在额定工况下运行时突然发生单相对地短路、两相短路、三相短路后电机的电流、转矩和永磁体工作点，

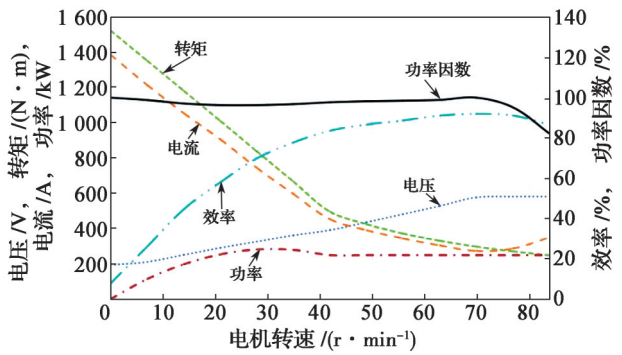


图6 电机运行特性曲线
Fig. 6 Motor operating characteristic curve
可以看出两相短路工况下的短路电流幅值与瞬时转矩峰值均高于其他类型短路工况。

表2 短路计算结果

Table 2 Calculation results for short-circuit conditions			
负载短路工况	电流/A	转矩/(N·m)	最小工作点的剩磁通/T
单相对地短路	124	9 674	0.26
两相短路	188	10 612	0.13
三相短路	169	11 698	0.22

200℃下Sm30H永磁体的退磁曲线如图7所示。由图7可知，该退磁曲线的拐点为-0.58 T。在两相短路工况下，永磁体的最小工作点是0.13 T，大于退磁曲线拐点-0.58 T，因此不会发生不可逆失磁。

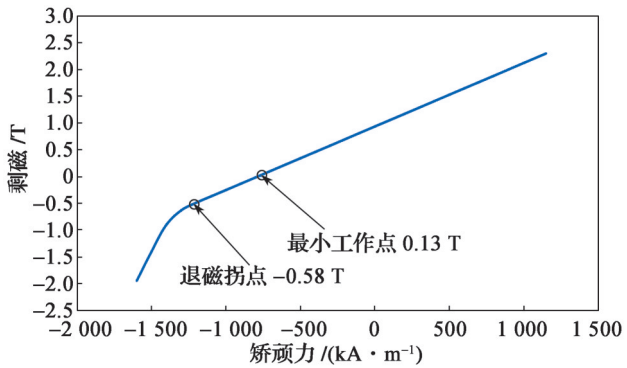


图7 退磁曲线
Fig. 7 Demagnetization curve

5 结构有限元分析

为确保电机的结构可靠性，针对关键承载部件进行了机械强度与刚度计算分析。

5.1 转子冲片有限元分析

对转子冲片隔磁桥这一关键应力集中区域进行了分析^[19]，模拟了电机在超速工况下运行时，隔磁桥区域的应力分布和变形特性。转子冲片材料与物理性质参数如表3所示。

超速工况下转子冲片的等效应力图、径向位移图

表3 转子冲片物理特性

Table 3 Physical characteristics of rotor sheet	
参数项目	参数值或说明
材质	50TW400
抗拉强度/MPa	400
屈服强度/MPa	349
气隙长度/mm	2

分别如图8、图9所示。

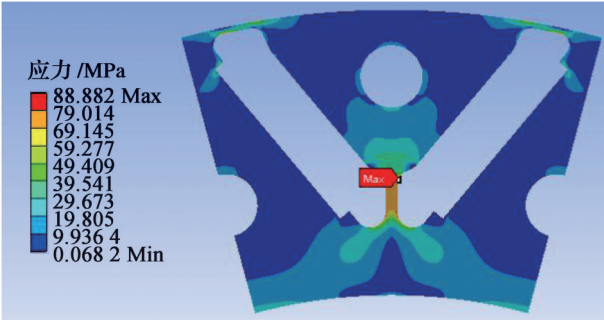


图8 转子冲片等效应力图
Fig. 8 Equivalent stress diagram of rotor sheet

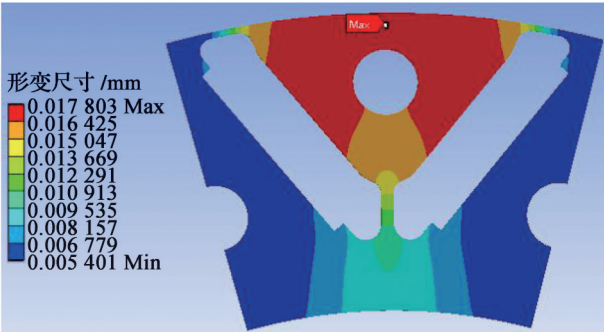


图9 转子冲片形变分布云图
Fig. 9 Cloud map of deformation distribution for rotor sheet

由图8的仿真结果可知, 转子冲片隔磁桥部位的最大等效应力为88.9 MPa, 低于材料许用应力极限349 MPa, 满足强度要求。图9显示转子冲片的最大径向位移为0.0178 mm, 小于5%的气隙长度值, 满足刚度要求。

5.2 机座与端盖有限元分析

针对机座及两端端盖等关键承载部件, 开展了模拟长寿命服役条件的应力与形变计算分析。分析中充分考虑了电机装车状态下, 通过特定类型转向架安装时所承受的长期交变载荷作用。

机座与两端端盖的综合应力与综合形变分布云图如图10所示。

由图10可知, 机座的最大应力为51 MPa, 小于屈服强度325 MPa, 满足材料长期使用的强度需求。机座的最大形变量为0.032 mm, 小于5%倍的气隙长度值, 符合结构刚度设计要求。

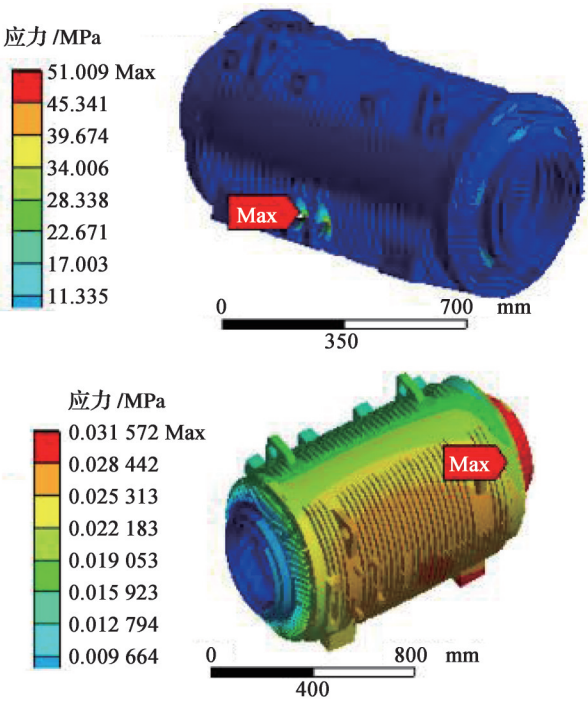


图10 机座与端盖综合应力与形变分布云图
Fig. 10 Cloud map of comprehensive stress and deformation distribution for base and end housing

5.3 整机模态分析

采用模态分析方法^[20]对整机动态特性进行研究, 提取整机前6阶模态特征参数, 包括固有频率及对应的模态振型, 相关结果如表4所示。其中, 一阶频率为217.64 Hz, 振型为整体摆动, 固有频率远大于供电基频8.38 Hz, 也远大于转频1.397 Hz的2倍频(2.794 Hz), 因此不会发生共振。部分仿真结果(一阶、二阶、三阶、五阶)如图11所示。

表4 频率与模态振型

Table 4 Frequency and modal shapes		
阶数	频率/Hz	振型
一阶	217.64	整体摆动
二阶	252.54	轴向平动
三阶	393.62	椭圆振型
四阶	396.64	同三阶正交椭圆
五阶	425.67	椭圆与摆动复合
六阶	475.86	端部扭摆

6 温度场分析

损耗计算的准确性直接决定了温度场仿真结果的可靠性。为此, 采用软件内置的改进型Steinmetz铁耗计算模型, 计算电机在额定工况下的相关损耗。结果显示, 总损耗为0.951 kW, 其中铜耗和铁耗分别占总损耗的65%和17%, 其余磁钢涡流损耗、杂散损耗、机械损耗共占总损耗的18%。

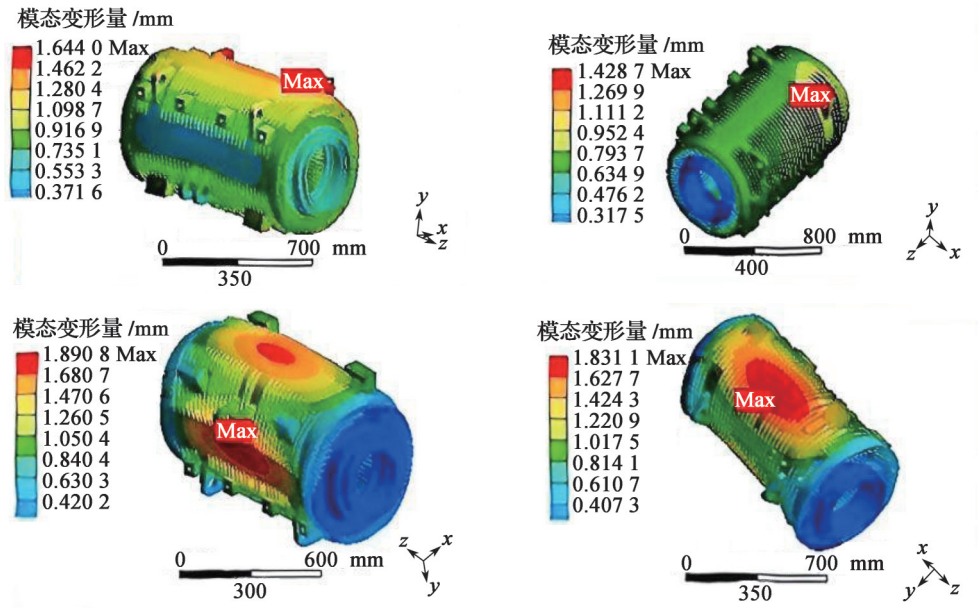


图 11 部分整机模态仿真结果
Fig. 11 Partial modal simulation results of complete machine

基于损耗计算结果，对电机在额定工况下的温升进行有限元仿真分析。仿真环境温度设置为 60℃、冷却方式为自然冷却，得到额定工况下电机的温度场分布如图 12 所示，各部分温升计算结果如表 5 所示。电机在额定工况（额定转速 41.9 r/min，额定输出功率 21.7 kW）下的小时温升计算结果显示，定子绕组平均温升为 69.90 K，可满足运行要求。

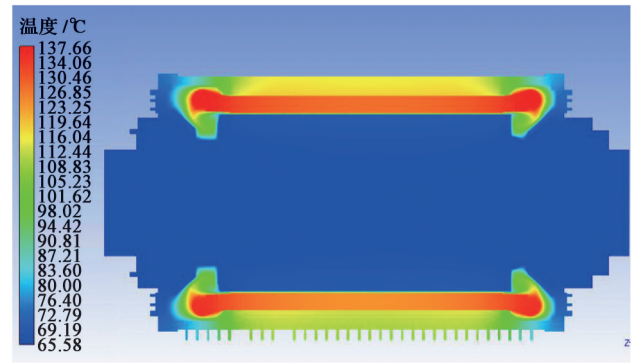


图 12 额定工况电机温度场分布云图
Fig. 12 Cloud map of temperature distribution for motor under rated conditions

表 5 额定工况温升

Table 5 Temperature rise under rated conditions

部件	最高温度/℃	最低温度/℃	平均温度/℃	平均温升/K
定子绕组	137.66	124.24	129.90	69.90
定子铁心	123.14	102.40	117.04	57.04
转子铁心	73.01	69.03	71.33	11.33
永磁体	73.49	68.79	71.56	11.56

7 样机试验与验证

按照 GB/T 22669—2008 与 GB/T 25123.4—2015 标

准完成电机样机的型式试验。试验样机如图 13 所示，相关试验对比数据如表 6 所示。



图 13 样机试验图
Fig. 13 Prototype motor under test

表 6 样机试验值与仿真值对比

Table 6 Comparison between prototype test values and simulation values

项目	技术要求	试验值	仿真值
额定功率/kW	21.7	21.7	21.7
额定转速/(r·min ⁻¹)	41.88	41.88	41.88
额定效率	≥94%	94.6%	95.8%
温升(额定工况)/K	<100	73.5	69.9
温升(故障工况)/K	<100	81.3	76.7
最高线反电势/V	<750	660	672
质量/kg	≤2 400	2 360	2 357

由表 6 可知，样机试验值与仿真值具有较高的一致性，本文研制的样机在效率、温升、反电势等关键指标方面均满足技术要求。试验结果表明，电机总体性能可满足混铁车实际运行需求。

8 结束语

基于混铁车对永磁直驱电机的技术需求, 本文设计了一款内置式V型转子结构的全封闭自然冷却永磁同步牵引电动机, 并分析了混铁车特殊运行环境对电机的具体技术要求。针对永磁体高温退磁风险, 采用了轴向分段、径向分层的永磁体抑涡流拓扑技术, 有效减小了永磁体涡流损耗与工作温升。在结构设计方面, 提出了一种全封闭抗冲击复合结构方案, 包括抱轴安装一体化转轴、机座周向与端盖环形强化自然散热结构及布局、定子斜槽与双层短距绕组配置。在整机全封闭、无外部强迫通风的约束下, 对转子冲片隔磁桥的结构强度进行分析与对整机进行模态分析, 确保了电机在重载冲击下的机械可靠性。同时, 基于全封闭腔体内的自然对流与导热热路模型, 验证了该散热结构的合理性。

样机试验结果表明, 电机的各项性能满足混铁车实际运行技术要求。本研究不仅为混铁车装备研制提供了一套高效可靠的全封闭无风冷自然散热的永磁直驱牵引系统解决方案, 同时也为永磁直驱技术在冶金重型运输装备领域的推广提供了经验, 包括适配高温、强振、重载冲击恶劣工况的多物理场协同设计、抗冲击复合结构优化设计等。

参考文献:

- [1] 张济民, 苏辉, 任乔, 等. 轨道交通永磁同步牵引系统发展概况与关键技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(6): 63-77.
ZHANG Jimin, SU Hui, REN Qiao, et al. Development overview and key technologies of rail transit permanent magnet synchronous traction system[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(6): 63-77.
- [2] 冯江华, 桂卫华, 符敏利, 等. 铁道车辆牵引系统用永磁同步电机比较[J]. 铁道学报, 2007(5): 111-116.
FENG Jianghua, GUI Weihua, FU Minli, et al. Comparison of permanent magnet synchronous motors for traction system in railway vehicles[J]. Journal of the China railway society, 2007(5): 111-116.
- [3] 王晨, 郭兵, 贺亮, 等. 鞍钢鲑鱼圈新型永磁直驱自走行智能混铁车的研究[J]. 冶金设备, 2023(增刊2): 30-33.
WANG Chen, GUO Bing, HE Liang, et al. Research on the new permanent magnet direct drive self-propelled intelligent hot metal car of ansteel bayuquan[J]. Metallurgical equipment, 2023(Suppl 2): 30-33.
- [4] 夏永洪, 杨玉文, 李梦茹, 等. 气隙长度对转子齿谐波电动势的影响[J]. 微特电机, 2016, 44(11): 15-17.
XIA Yonghong, YANG Yuwen, LI Mengru, et al. Influence of air gap length on rotor tooth harmonic EMF[J]. Small & special electrical machines, 2016, 44(11): 15-17.
- [5] 戴文进, 张景明. 电机设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
DAI Wenjin, ZHANG Jingming. Electric machine design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [6] 郭鑫. 大功率潜水电泵调速永磁直驱系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
GUO Xin. Research on high-power submersible pumps adjustable permanent-magnet direct drive system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [7] 刘鹏, 原志强, 贾流桐. 大功率永磁直驱系统技术研究及应用[J]. 机车电传动, 2019(6): 62-65.
LIU Peng, YUAN Zhiqiang, JIA Liugang. Research and application of high-power permanent magnet direct drive system technology[J]. Electric drive for locomotives, 2019(6): 62-65.
- [8] 周凤争, 沈建新, 林瑞光. 从电机设计的角度减少高速永磁电机转子损耗[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(9): 1587-1591.
ZHOU Fengzheng, SHEN Jianxin, LIN Ruiguang. Reduction of rotor loss in high-speed permanent magnet motors by design method[J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2007, 41(9): 1587-1591.
- [9] 唐任远. 现代永磁电机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
TANG Renyuan. Modern permanent magnet motor theory and design[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [10] 符荣, 窦满峰. 电动汽车驱动用内置式永磁同步电机设计与实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2014(5): 737-743.
FU Rong, DOU Manfeng. Design and experimental research of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) for electric automobiles[J]. Journal of northwestern polytechnical university, 2014(5): 737-743.
- [11] 符敏利. 电动汽车用永磁同步牵引电动机设计[J]. 变流技术与电力牵引, 2007(5): 48-52.
FU Minli. Design of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle drive[J]. Converter technology & electric traction, 2007(5): 48-52.
- [12] 何思源. 全封闭永磁同步牵引电动机冷却系统设计[J]. 大功率变流技术, 2012(3): 48-53.
HE Siyuan. Design of the cooling system for fully enclosed permanent magnet synchronous traction motor[J]. High power converter technology, 2012(3): 48-53.
- [13] 蔡志伟, 石开文, 张瑞珍, 等. 一种铁路自走行混铁车用永磁直驱驱动组合式车轴: CN202411479509.9[P]. 2024-10-22.
CAI Zhiwei, SHI Kaiwen, ZHANG Ruizhen, et al. A combined axle with permanent magnet direct drive for railway self-propelled hot metal car: CN202411479509.9[P]. 2024-10-22.
- [14] 李广, 贾喜勤, 刘永强, 等. 一种热管散热端盖冷却结构: CN202111462860.3[P]. 2021-12-02.
LI Guang, JIA Xiqin, LIU Yongqiang, et al. A cooling struc-

- ture for end cap with heat pipe heat dissipation: CN202111462860.3[P]. 2021-12-02.
- [15] 李华, 龚天明, 祝令帅. 定子斜槽结构对永磁同步电动机影响的分析[J]. 防爆电机, 2012, 47(4): 6-8.
LI Hua, GONG Tianming, ZHU Lingshuai. Analysis of influence of stator skewed-slot on permanent magnet synchronous motor[J]. Explosion-proof electric machine, 2012, 47(4): 6-8.
- [16] 蔡广瀚, 杨帆, 冯凌, 等. 一种基于同步策略的方波谐波注入振动噪声抑制方法[J]. 机车电传动, 2024(2): 16-24.
CAI Guanghan, YANG Fan, FENG Ling, et al. A method based on synchronization strategy for suppressing vibration noise by injecting square wave harmonics[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 16-24.
- [17] 陈璞, 晏才松, 周立安, 等. 1 430 kW 永磁同步牵引电机转子冲片强度分析[J]. 微特电机, 2021, 49(5): 15-17.
CHEN Pu, YAN Caisong, ZHOU Lian, et al. Strength analysis of rotor lamination of 1 430 kW permanent magnet synchronous traction motor[J]. Small & special electrical machines, 2021, 49(5): 15-17.
- [18] 李霞, 王淑红. 内嵌式异步起动永磁同步电动机短路故障下失磁状况分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊2): 626-632.
LI Xia, WANG Shuhong. Demagnetization analysis of the interior permanent magnet synchronous motor under different short circuit faults[J]. Journal of China coal society, 2017, 42(Suppl 2): 626-632.
- [19] 郝玉涛, 王亚杰, 罗英露. 永磁同步电动机转子冲片强度分析[J]. 电工材料, 2024(3): 9-12.
HAO Yutao, WANG Yajie, LUO Yinglu. Strength analysis of rotor lamination of permanent magnet synchronous motor [J]. Electrical engineering materials, 2024(3): 9-12.
- [20] 侯世旭, 杨川, 刘广鹏. 城轨列车牵引电机的噪声分析与优化[J]. 电机技术, 2024(5): 37-40.
HOU Shixu, YANG Chuan, LIU Guangpeng. Noise analysis and optimization of the urban rail transit traction motor[J]. Electrical machinery technology, 2024(5): 37-40.

Design of a permanent magnet direct-drive traction motor for torpedo cars

PANG Cong^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}, NI Wei^{1,2}

(1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji, Shanxi 044502, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Traction Motor for Rail Transit, Yongji, Shanxi 044502, China)

Abstract: To address the issues of low system efficiency and complex structure in traditional asynchronous systems for torpedo cars in the metallurgical industry, this paper proposes a scheme using a direct-drive permanent magnet synchronous motor (D-PMSM) that is fully enclosed and relies entirely on natural heat dissipation. Based on the technical requirements for China's first permanent magnet direct-drive torpedo car, a multi-physics electromagnetic-thermal-structural collaborative design method was adopted to address the extreme condition constraints such as high temperature, strong vibration, and heavy-load impact. An eddy current confinement topology for permanent magnets featuring axial segmentation and radial layering was studied, and a fully enclosed impact-resistant composite structure adapted for natural heat dissipation was designed. Natural convection and radiation channels were constructed through integrated heat sink fins for base and end housing, and the forced air cooling device was eliminated. A prototype of a 21.7 kW permanent magnet direct-drive synchronous traction motor was developed and experimentally validated. A 21.7 kW prototype D-PMSM was developed and experimentally validated. Test results show that the efficiency of a fully enclosed permanent magnet traction motor using natural heat dissipation reaches 94.6%, and that all performance metrics meet the operational requirements for torpedo cars. This paper provides a reference for the application of permanent magnet direct-drive technology in heavy-duty industrial transport equipment.

Keywords: heavy-duty industrial transport equipment; permanent magnet direct-drive; torpedo car; traction motor; natural heat dissipation; FEA