



大功率高速飞轮储能电机表贴式转子涡流损耗研究及温度场分析

孙大南¹, 戴兴建², 李 丽¹, 李德金¹, 周茜茜¹, 傅佳伟¹

(¹中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412000; ²中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

摘要: 大功率高速飞轮储能电机通常运行在真空环境, 电机的转子涡流损耗高且散热困难, 易出现温升过高的问题。针对此问题, 本工作开展多相电机相数与转子涡流损耗关系研究, 多相电机磁动势公式证明十二相电机可削弱5、7、11、13、17、19次低次谐波, 利用有限元法在Maxwell仿真软件中建立三相、六相与十二相电机模型并分析其转子涡流损耗, 证明十二相电机可大幅度降低转子涡流损耗。高速永磁电机通常采用磁钢外加护套的表贴式转子结构, 对比基于合金钢和碳纤维两种护套材料电机方案的转子涡流损耗情况, 依据对比结果及制造工艺选择合金钢转子护套方案, 最后基于合金钢护套方案进行温度场仿真分析, 证明基于此方案电机温升的合理性。

关键词: 飞轮储能; 多相电机; 转子涡流损耗

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0334

中图分类号: TM 351

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3679-10

Research on eddy current loss and temperature field of surface-mounted rotor in high-power high-speed flywheel energy storage motor

SUN Danan¹, DAI Xingjian², LI Li¹, LI Dejin¹, ZHOU Qianqian¹, FU Jiawei¹

(¹CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd, Zhuzhou 412000, Hunan, China; ²Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: High-power, high-speed flywheel energy storage motors typically operate in vacuum environments where rotor losses are high and heat dissipation challenging, thereby inducing excessive temperature elevations. To address this issue, this study investigated the relationship between motor-phase counts and rotor losses. Theoretical analysis of the magnetic potential of multiphase motors demonstrated that a twelve-phase configuration suppressed the 5th, 7th, 11th, 13th, 17th, and 19th low-order harmonics. Models of three-, six-, and twelve-phase motors were established, and their rotor losses were analyzed. Results demonstrate that a twelve-phase motor significantly reduced rotor losses. High-speed, permanent magnet motors typically adopt a surface-mounted rotor with magnetic steel and an outer sleeve. Furthermore, the rotor losses of motor schemes based on two sleeve materials (alloy steel and carbon fiber) were compared. Based on the comparison results and

收稿日期: 2026-04-20; 修改稿日期: 2026-06-06。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划 (2023YFB2406300)。

第一作者: 孙大南 (1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电机系统集成设计, E-mail: sunsouth@126.com; 通信作者: 傅佳伟, 工程师, 研究方向为电机系统集成设计, E-mail: 634896197@qq.com。

引用本文: 孙大南, 戴兴建, 李丽, 等. 大功率高速飞轮储能电机表贴式转子涡流损耗研究及温度场分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3679-3688.

Citation: SUN Danan, DAI Xingjian, LI Li, et al. Research on eddy current loss and temperature field of surface-mounted rotor in high-power high-speed flywheel energy storage motor[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3679-3688.

manufacturing processes, the alloy steel rotor-sleeve scheme was selected. Finally, a temperature-field simulation analysis was conducted under this design, confirming the rationality of the motor temperature rise and ultimately validating the viability of the proposed system.

Keywords: flywheel energy storage; multiphase motor; rotor loss

飞轮储能是一种物理储能方式,具有响应速度快、充放电效率高、对环境无污染、循环寿命长和可靠性高等特点,可适用于城轨交通车辆制动能量回收、火力发电辅助AGC调频、风电新能源场站的“一机一储”构网型风机、一次调频等典型的短时与高频应用场景^[1-2],节能和调频应用效果非常显著。

飞轮储能系统是一种机电能量转换和储存装置,主要包括飞轮本体、电机、轴承、真空保护壳体、变流器等部件^[3-4]。飞轮储能系统以飞轮本体高速旋转的形式存储动能,并通过与飞轮本体同轴的电动/发电机完成动能与电能之间的转换,电机是飞轮储能系统中进行能量转换的关键部件。

飞轮储能电机可采用感应电机、永磁电机、开关磁阻电机等类型^[5]。永磁电机凭借其功率密度高、转速范围大以及损耗低的优点成为飞轮储能电机的主流选择^[6]。但随着飞轮储能电机向大功率、高转速方向发展,永磁电机转子损耗增大,同时飞轮储能电机为降低风摩损耗通常运行在真空环境内,易导致永磁体温度过高而失磁;目前通常采用优化电机电磁设计,从降低电机损耗和优化冷却系统两方面抑制电机运行时的温升;优化冷却系统主要采用定子水套冷却、蒸发冷却、增强辐射散热^[7-10]等方式,但对于飞轮储能电机来说,受制于空间及安装位置,冷却系统通常较为复杂且效果有限;通过电机电磁优化设计降低损耗是从源头抑制温升的方法,目前可采用多相绕组设计降低谐波、优化转子结构等手段降低损耗。

目前,多个三相的绕组配置已经常用,如六相电机、十二相电机等。与三相电机相比,多相电机可选取更多的绕组配置和极槽组合,能有效地提高电机的性能。常见六相电机绕组形式包括双Y偏0°整距绕组和双Y偏30°短距绕组等,结果表明双Y偏30°短距绕组结构磁动势更正弦,电枢反应磁场谐波含量更少^[11]。对于十二相永磁同步电机,张丙楠^[12]给出了十二相永磁同步电机可实现的主要绕组

配置和极槽组合,提出了绕组配置和极槽组合相匹配的约束条件。

高速永磁电机定子结构和转子保护套设计,对转子涡流损耗的影响显著。在定子结构设计方面,主要考虑定子极槽配合、槽开口宽度和气隙长度对转子涡流损耗大小的影响。在转子保护套设计方面,主要考虑护套的材料、厚度等对转子涡流损耗的影响^[13-14]。应用复合护套转子结构设计方案可降低转子损耗及提高散热能力^[15],但复合护套在工程应用中加工困难,成本等方面不占优势。

为解决大功率高速飞轮储能电机损耗大、温升高的难题,本工作以一台1.25 MW飞轮储能电机为研究对象,完成以下研究与分析:对比分析三相、六相和十二相电机的谐波含量和损耗情况,结果表明十二相电机在降低转子损耗方面具有显著优势;综合对比合金钢和碳纤维两种不同护套方案对转子涡流损耗的影响,结合损耗情况和加工工艺,选取合适的护套方案;最后基于该方案对1.25 MW飞轮电机含待机工况和不含待机工况下的温度场进行仿真分析,对比了两种不同工况的温升差异,为降低大功率高速飞轮电机转子涡流损耗及温升提供参考。

1 表贴式永磁同步电机转子损耗抑制方法

永磁同步电机转子损耗是由电机气隙磁密中高次谐波磁场产生,这些谐波主要由三方面引起,一是定子开槽使得气隙磁导分布不均匀而引起的空间谐波;二是定子绕组的空间分布带来的空间谐波;三是定子通电流的非正弦量引发的时间谐波,这些谐波磁场在永磁体和护套中感应出涡流损耗。永磁体和护套涡流损耗可以使用下式计算:

$$P = i^2 r = (JS)^2 \sigma \frac{l}{S} = \sigma l \iint J^2 dS \quad (1)$$

式中, P 为转子涡流损耗, J 为电流密度, σ 为材料的电导率, S 为端面面积, l 为轴向长度。

由式(1)可以发现, 影响护套和永磁体中涡流损耗大小的主要因素是材料电导率及电流密度, 材料电导率主要受材料本身属性影响, 电流密度则与谐波磁场的频率、谐波磁场强度等均有关。综合上述分析, 寻找抑制表贴式转子损耗的有效措施, 需从减小电机气隙磁密谐波含量等方面进行分析。

2 多相电机转子涡流损耗分析

2.1 绕组理论

美国学者 Klingshirn^[16]提出一种利用相带数对电机相数进行定义的方法

$$q = \frac{\pi}{\beta} \quad (2)$$

式中, q 为每极下相带数, β 为相带角度。

多相电机的相数定义为: 如果绕组引出线的根数为 $2q$, 则电机的相数为 $2q$ 相, 称之为 $2q$ 相电机; 如果绕组引出线的根数为 q , 则电机的相数为 q , 称之为半 $2q$ 相电机。例如相带角为 30° 时, 引出线的根数为 12, 则电机为十二相电机; 若引出线的根数为 6, 则电机为半十二相电机, 即为六相电机, 也可称为双三相电机。常规的三相绕组通常有 120° 相带角和 60° 相带角两种, 三相绕组的相磁动势对称分布。当采用 120° 相带时, 由于一个相带内的相量分布较为分散, 合成磁动势较小, 而采用 60° 相带合成磁动势更大, 可提供更大输出转矩。

常见的绕组形式有三相绕组、六相绕组(两套三相绕组移相 30°) 和十二相绕组(四套三相绕组移相 15°), 其空间向量分布如图 1 所示。

2.2 多相绕组合成磁动势求解与分析

为了推导分析绕组合成磁动势的简便性, 需做出如下假设条件: ①不考虑涡流效应、磁滞效应; ②不考虑齿槽效应, 假设定子内表面光滑且磁路是线性的, 适用叠加原理; ③电机槽中, 流过绕组的电流视为集中于槽口正中心。

在定子绕组中通入电流后, 电流中存在 1、3、5、7、9、11 次等谐波, 六相绕组(两套三相绕组移相 30°) 各相绕组磁动势可分别表示为:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{A_1} = & \frac{1}{2} F_{uv} \sum_{u=1,3,5,\dots} \sum_{v=1,3,5,\dots} \\ & [\cos(u\omega t + v\theta_m) + \cos(u\omega t - v\theta_m)] \end{aligned}$$

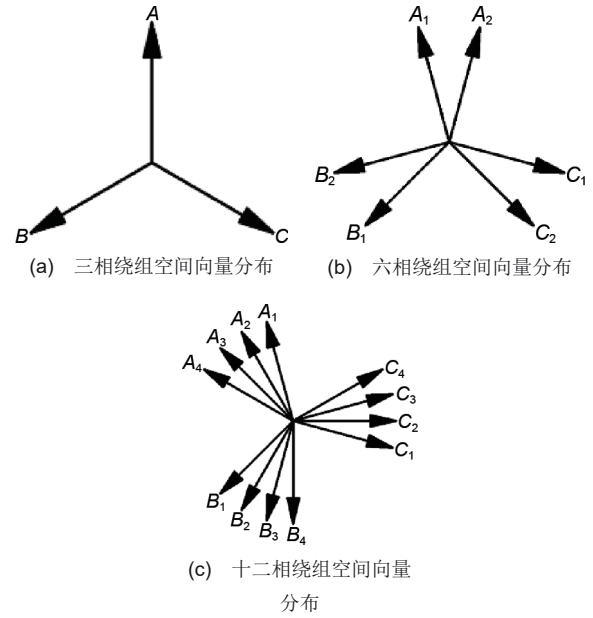


图1 常见绕组空间向量分布
Fig. 1 Common winding space vector distribution

$$\begin{aligned} F_{B_1} = & \frac{1}{2} F_{uv} \sum_{u=1,3,5,\dots} \sum_{v=1,3,5,\dots} \left\{ \begin{aligned} & \cos \left[u\omega t + v\theta_m - \frac{2\pi}{3}(u+v) \right] \\ & + \cos \left[u\omega t - v\theta_m + \frac{2\pi}{3}(u-v) \right] \end{aligned} \right\} \\ F_{C_1} = & \frac{1}{2} F_{uv} \sum_{u=1,3,5,\dots} \sum_{v=1,3,5,\dots} \left\{ \begin{aligned} & \cos \left[u\omega t + v\theta_m + \frac{2\pi}{3}(u+v) \right] \\ & + \cos \left[u\omega t - v\theta_m - \frac{2\pi}{3}(u-v) \right] \end{aligned} \right\} \\ F_{A_2} = & \frac{1}{2} F_{uv} \sum_{u=1,3,5,\dots} \sum_{v=1,3,5,\dots} \left\{ \begin{aligned} & \cos \left[u\omega t + v\theta_m - \frac{\pi}{6}(u+v) \right] \\ & + \cos \left[u\omega t - v\theta_m + \frac{\pi}{6}(u-v) \right] \end{aligned} \right\} \\ F_{B_2} = & \frac{1}{2} F_{uv} \sum_{u=1,3,5,\dots} \sum_{v=1,3,5,\dots} \left\{ \begin{aligned} & \cos \left[u\omega t + v\theta_m - \left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) (u+v) \right] \\ & + \cos \left[u\omega t - v\theta_m + \left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) (u-v) \right] \end{aligned} \right\} \\ F_{C_2} = & \frac{1}{2} F_{uv} \sum_{u=1,3,5,\dots} \sum_{v=1,3,5,\dots} \left\{ \begin{aligned} & \cos \left[u\omega t + v\theta_m + \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6} \right) (u+v) \right] \\ & + \cos \left[u\omega t - v\theta_m + \left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6} \right) (u-v) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, u 为电流谐波次数, θ_m 为空间位置角, v

为空间磁动势谐波的次数, F_{uv} 为各相绕组中磁动势谐波的幅值。

六相绕组磁动势之和表达式为:

$$F = F_{A_1} + F_{B_1} + F_{C_1} + F_{A_2} + F_{B_2} + F_{C_2} \quad (4)$$

即

$$F = \begin{cases} 3F_{uv} \cos(u\omega t + v\theta_m) & u + v = 12n \\ 3F_{uv} \cos(u\omega t - v\theta_m) & u - v = 12n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

对于十二相绕组(四套三相绕组移相 15°)按照上述六相绕组磁动势的表达式和求解方法, 十二相绕组(四套三相绕组移相 15°)磁动势之和由四套三相绕组磁动势叠加, 可表示为

$$F = \begin{cases} 6F_{uv} \cos(u\omega t + v\theta_m) & u + v = 24n \\ 6F_{uv} \cos(u\omega t - v\theta_m) & u - v = 24n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

由上述表达式可得出, 十二相移 15° 绕组合成磁势可显著降低 5、7、11、13、17、19 等低次谐波, 在降低转子损耗方面具有优势。

2.3 三相、六相和十二相电机方案转子涡流损耗对比分析

以一台 1.25 MW/10500 r/min 飞轮储能电机为研究对象, 对比不同相数对电机转子涡流损耗的影响。由于电机转速较高, 受变频器频率限制, 电机的极数为 4, 槽数设计为 96。

本工作设计的大功率高转速飞轮储能电机基本技术参数如表 1。

表 1 大功率高转速飞轮储能电机基本技术参数

Table 1 Basic technical requirements for high-power, high-speed flywheel energy storage motors

指标	数值
额定功率(最大功率)/MW	1.25
转速范围/(r/min)	0~10500
极数	4
额定电压-最大电压/V	690-740
绝缘等级	H
冷却方式	水冷
冷却水量/(L/min)	100
环境温度/ $^\circ\text{C}$	40

在电机基本尺寸相同以及电机极数和槽数不变条件下, 利用 ANSYS 软件分别建立三、六、十二相电机模型, 如图 2 所示。对不同电机模型的气隙磁密波形进行仿真分析, 如图 3 所示。对气隙磁

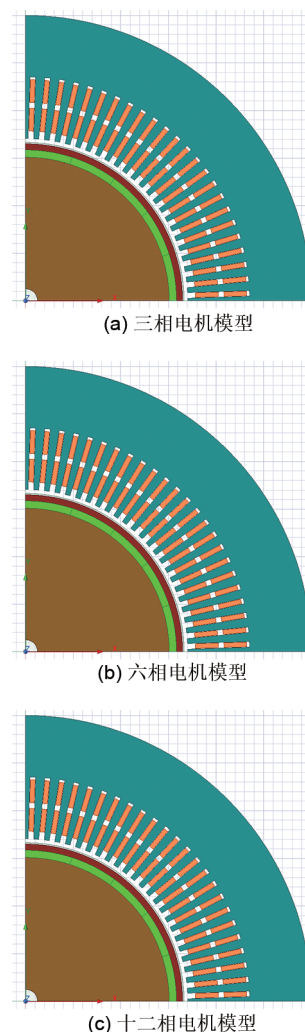


图 2 不同相数的电机模型图

Fig. 2 Diagram of the motor model with different phases

密波形进行傅里叶分解, 如表 2 所示。

由表 2 可知, 十二相电机的 5、7、11、13 次谐波均有一定削弱, 气隙磁密波形正弦度更好。

对转子护套及磁钢涡流损耗进行计算和对比, 对比结果见表 3, 转子护套及磁钢涡流损耗占转子总涡流损耗比例如图 4 所示。

由表 3 可知, 随着相数的增加, 护套涡流损耗与磁钢涡流损耗都大幅度降低, 且降低幅度越来越大, 十二相电机的转子涡流损耗比三相电机和六相电机分别降低 73.4% 和 54.1%。由图 4 可以看出, 护套的涡流损耗占转子总涡流损耗的比例远大于磁钢, 且随着相数增大, 磁钢的涡流损耗占比越来越低, 由 7.92% 下降至 0.9%, 因此本设计的大功率飞轮储能电机采用十二相移相 15° 绕组方案。

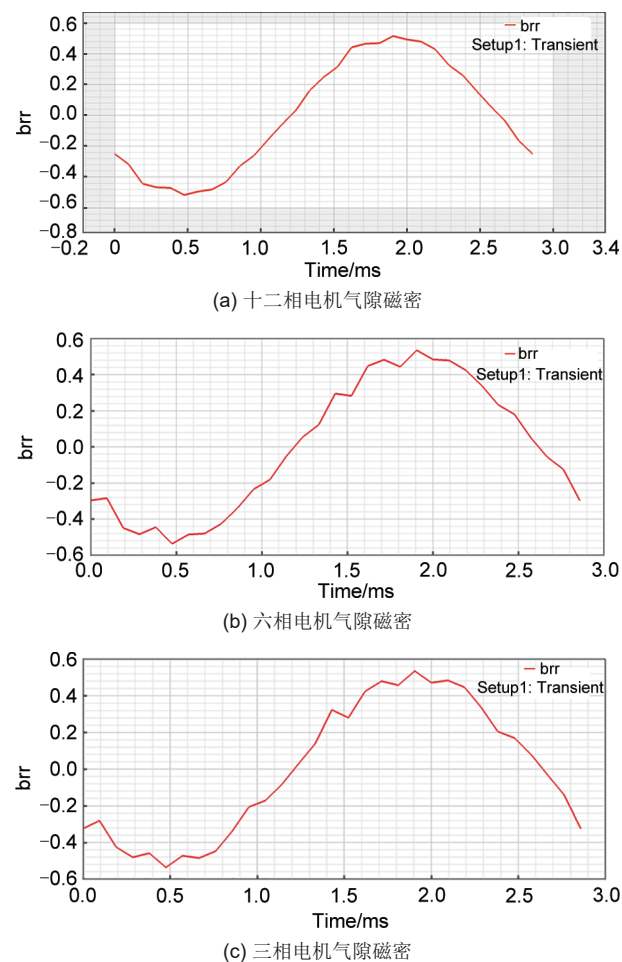


图3 不同相数电机气隙磁密波形

Fig. 3 Air-gap flux density waveforms of motors with different phase numbers

谐波次数	气隙磁密幅值/T		
	十二相电机	六相电机	三相电机
5	0.008	0.007	0.016
7	0.008	0.009	0.023
11	0.016	0.030	0.030
13	0.002	0.025	0.002

3 基于不同护套材料电机方案下转子涡流损耗分析

永磁电机的转子结构一般可采用内置式和表贴式。对本文设计的飞轮储能电机来说，转速超过 10000 r/min 且转子外径较大，内置式转子结构的

表 3 不同相数的永磁电机转子损耗对比			
Table 3 Rotor loss of permanent magnet motors with different phase numbers			
变量	相数		
	三	六	十二
定子内径/mm	341	341	341
铁心长/mm	420	420	420
极数	4	4	4
定子槽数	96	96	96
磁钢厚度/mm	7.5	7.5	7.5
磁钢牌号	SmCo33H	SmCo33H	SmCo33H
护套涡流损耗/W	792.6	644.4	310
磁钢涡流损耗/W	61.67	32.78	0.8

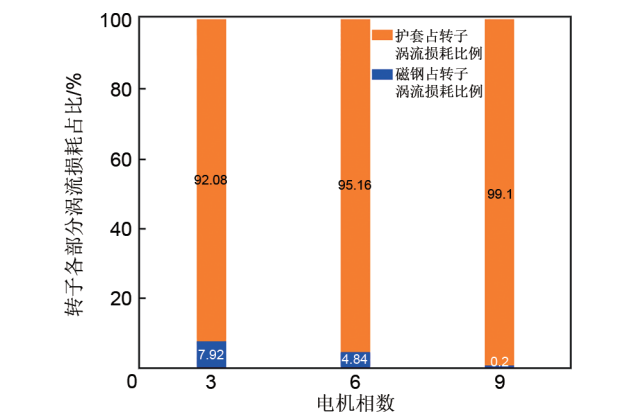


图4 转子各部分涡流损耗占比

Fig. 4 Proportion of the eddy current loss in each part of the rotor

强度难以满足设计需求，因此采用表贴式转子结构。

高速电机表贴式转子结构通常在磁钢的外侧套上护套以防止在高转速下磁钢脱落，不同护套材料对转子涡流损耗有较大影响，现阶段常采用的磁钢护套材料为碳纤维与合金钢。护套材料参数如表4。

由于力学性能方面碳纤维材料抗拉强度大于合金钢材料。因此采用碳纤维材料方案时，永磁体厚度较合金钢护套增加。本文分别对碳纤维护套材料与合金钢护套材料两种方案进行对比分析，保证两种电机方案的绕组方案、磁钢材料等保持一致，仅改变转子外径及磁钢、护套厚度等参数，两种电机方案对比见表5。

在 Maxwell 仿真软件中建立两种电机模型，如图6所示，利用 ANSYS 软件对两种方案在工作转速 10500 r/min 下的转子涡流损耗进行仿真分析，

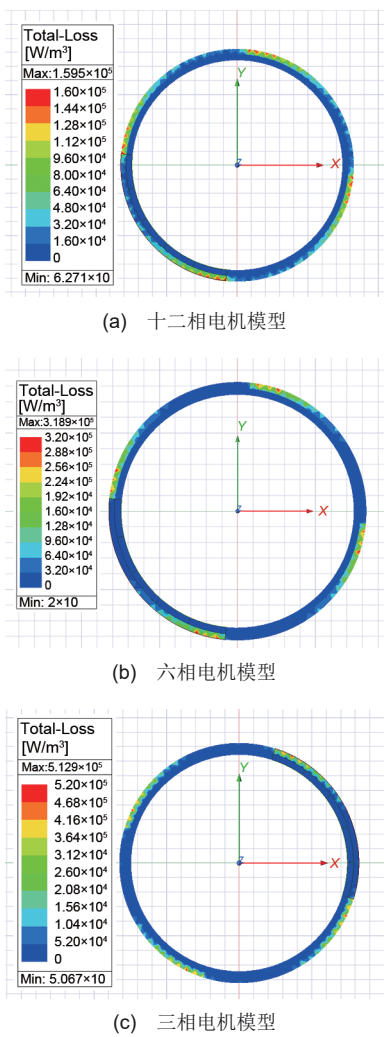


图5 转子护套、磁钢涡流损耗云图
Fig. 5 Rotor sleeve and magnet eddy current loss contour cloud diagram

表4 护套材料参数表
Table 4 Parameters of sheath materials

材料参数	碳纤维护套	合金钢护套
电导率/(S/m)	16000	4760000
相对磁导率/(H/m)	150	1
抗拉强度/MPa	560	1500
导热系数/[W/(m·K)]	15	34.2

其中转速下损耗计算采用变流器仿真输出电机侧电源波形进行仿真计算。分析结果见表6。

合金钢护套和碳纤维护套方案相比，合金钢护套的屏蔽作用将电流集中在护套上，护套上的损耗占比更高，磁钢上损耗占比较低，同时转子总损耗下降，合金钢护套方案的转子总涡流损耗为294.72 W，与碳纤维护套方案转子总涡流损耗373.92 W相比，

表5 基于不同转子外径、护套材料的2种电机方案
Table 5 Two motor schemes based on different rotor outer diameters and sheath materials

参数	方案1	方案2
护套材料	合金钢	碳纤维
相数	12	12
极数	4	4
槽数	96	96
转子外径/mm	330	340
磁钢牌号	SmCo32H	SmCo32H
护套厚度/mm	6.5	6
磁钢厚度/mm	7.5	15

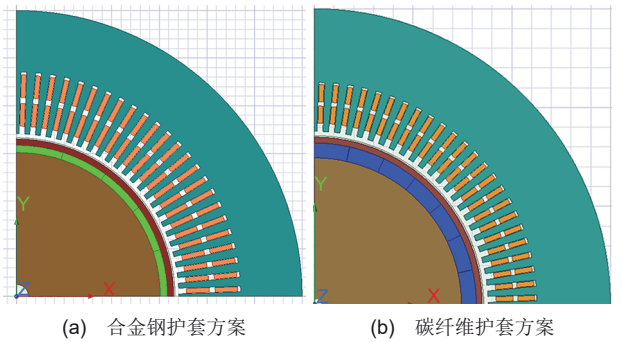


图6 基于不同护套材料的电机模型图
Fig. 6 Diagram of a motor model based on different jacket materials

表6 基于不同转子外径、护套材料的2种电机方案性能对比

Table 6 Comparison of performance of two motor schemes based on different rotor outer diameters and sheath materials

损耗类别	方案1	方案2
护套涡流损耗/W	288	292.32
磁钢涡流损耗/W	6.72	81.6
转子总损耗/W	294.72	373.92

降低约21.2%。另外，碳纤维护套方案所需磁钢用量也更大，成本偏高，本项目转子采用飞轮体与转轴一体化设计，若采用碳纤维护套，转子需带飞轮体进行碳纤维缠绕，运输及碳纤维护套缠绕工装成本增加较大。结合不同护套材料电机方案的性能及成本，优先考虑合金钢护套的电机方案。

4 飞轮储能电机温度场仿真分析

根据对飞轮储能电机相数及转子结构对转子损耗影响研究，选取十二相、合金钢护套表贴式转子结构方案，完成1.25 MW飞轮储能电机基本参数

设计，现对电机在真空环境下的充、放电工况下的温升情况进行仿真分析，核算多相电机方案温升是否满足要求。

4.1 不考虑待机工况下温升计算

飞轮储能电机冷却方式采用机壳水冷，水道形式采用轴向水道，其飞轮储能装置三维模型如图 7 所示。飞轮的转速越高。储存的能量越多。材料强度决定转速上限为 10500 r/min 的可行性；最低工作转速为 5000 r/min，保证了充放电时的效率和功率，同时兼顾放电深度。

将三维模型导入 Fluent 软件进行温升计算，其中损耗加载采用低速及额定转速下损耗的平均值来模拟连续充电、放电工况（最严苛工况）下损耗，电机在 10500 r/min 和 5000 r/min 的损耗分布如表 7 所示，计算时将损耗加载到各个部件上，计算时设定环境温度为 40℃，入水口温度为 40℃，冷却水流量为 100 L/min，真空度为 10 Pa，温度场计算结果如表 8，电机温度分布如图 8 所示。

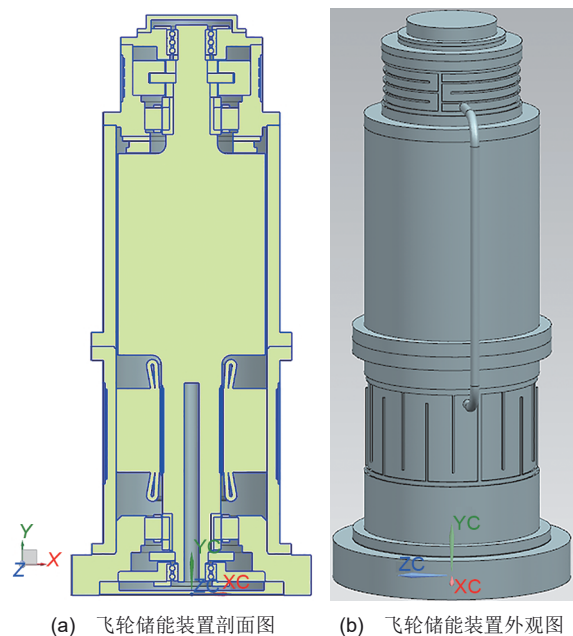


图 7 飞轮储能装置三维图
Fig. 7 Three-dimensional view of flywheel energy storage device

图 8(a)显示飞轮储能电机的最热点为绕组端部，次热点为护套、磁钢及就近的转轴位置。水冷机壳直接与铁心相连，带走铁心和绕组直线段的热量，因此绕组端部散热较差，温升较高。转轴靠近电机端的温升高是因为转子磁钢和护套分布着损

表 7 损耗分布
Table 7 Loss distribution

损耗类型	转速		损耗平均值/W
	10500 r/min	5000 r/min	
电枢直流铜耗/W	4586	16830	13731.5
交流铜耗/W	775	846	
定子铁损/W	3669	3499	3586
护套涡损/W	207	288	248
磁钢涡损/W	3.84	6.72	5.28
总损耗/W	9285	21451.72	17595.36

表 8 温升计算结果
Table 8 The temperature rise calculation results

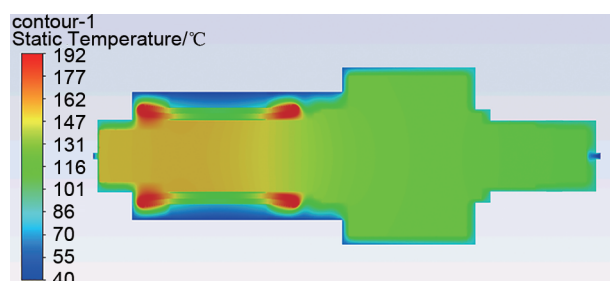
不同工况	计算温度/℃
绕组平均	150
绕组热点	194
护套热点	154
飞轮转子热点	132

耗，飞轮腔内因考虑减少机械损耗为低真空 10 Pa，空气极其稀薄，导致空气的传热能力极差，转子上的热量传递主要靠热辐射，而光亮金属的辐射能力也较差。图 8(b)较清晰地显示了绕组的温度分布情况，绕组热点温度 194℃，分布在绕组端部，平均温度 150℃，相差 44 K。图 8(c)是定子铁心温度分布图，从端部看铁心外圆温度最低，从外圆到齿部温度逐渐升高，从轴向看铁心中间位置温度最低，两端温度较高，主要是绕组端部温度高导致铁心端部温度较高。图 8(d)是转子温度分布图，热点分布在护套上，从护套到两端温度呈逐渐降低趋势，左端体积小，右端有飞轮等大体积结构，因此靠近飞轮端的转轴温度较低。

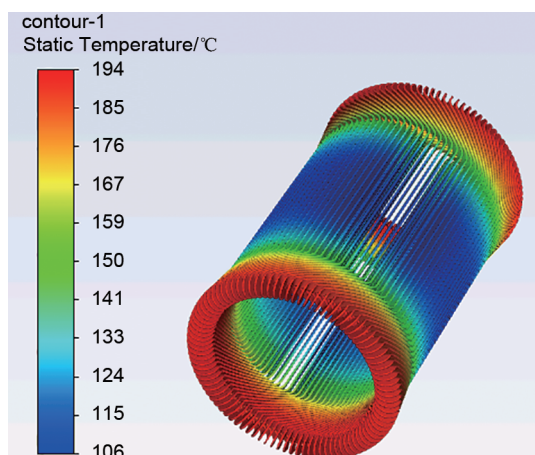
4.2 充放电及待机工况下电机温升计算

由于 Fluent 软件适用于计算温度稳态场，难以计算含有待机工况的电机温升变化情况，故考虑充电、放电、待机循环工况下瞬态温升采用 MotorCAD 进行仿真计算。电机运转过程先以 1.25 MW 功率在转速区间 5000~10500 r/min 充电，然后在 10500 r/min 下待机 30 s，最后在转速 10500~5000 r/min 区间以 1.25 MW 额定功率放电，每小时完成上述充放电循环 20 次。其电机各部件损耗加载数值如表 7 所示，仿真边界条件与不含待机工况的仿真设置一致，瞬态温升仿真计算结果见表 9 及图 9、图 10。

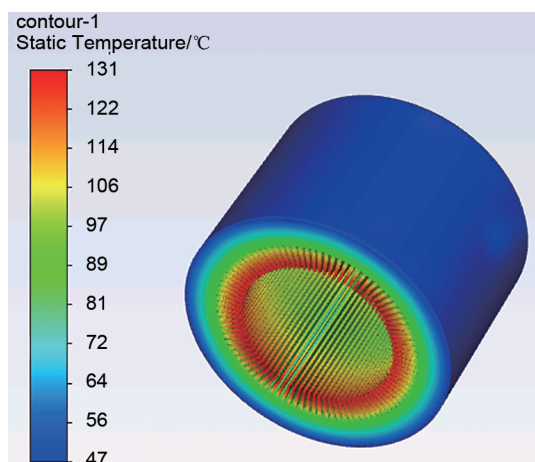
由上述结果可知最高温度出现在定子绕组，为



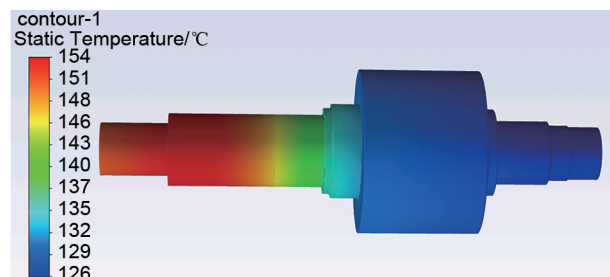
(a) XY截面温度分布云图



(b) 绕组温度分布云图



(c) 定子铁心温度分布云图



(d) 转子温度分布云图

图8 温度分布云图

Fig. 8 Temperature distribution cloud diagram

表9 瞬态温度计算结果

Table 9 Transient temperature calculation results

项目	数值
定子绕组热点温度/°C	136
绕组平均温度/°C	110
护套热点温度/°C	96
磁钢热点温度/°C	85

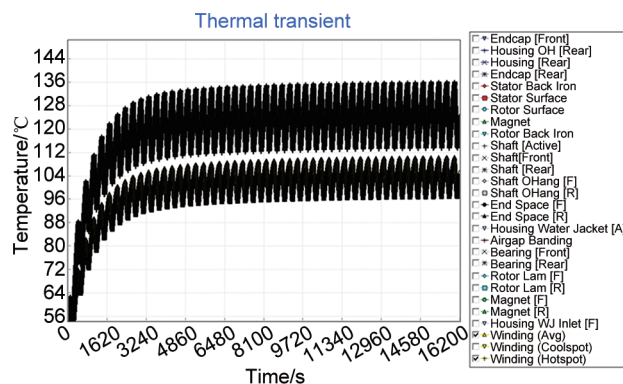


图9 定子绕组瞬态热点及平均温度曲线

Fig. 9 Transient hot spots and average temperature curve of the stator winding

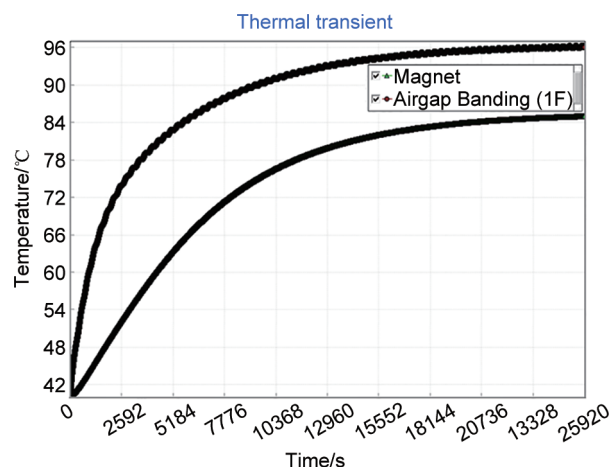


图10 转子护套及磁钢瞬态温度曲线

Fig. 10 Transient temperature curve of the rotor sheath and magnetic steel

136℃, 定子平均温度为110℃, 磁钢最高温度为85℃, 本设计电机绝缘等级为H级, 磁钢选用的SmCo32H可在此温度下运行。

如表10所示“充电-待机-放电”循环工况较仅考虑“充电-放电”严苛工况下定子热点温度降低29%, 绕组平均温升降低26%, 护套热点温度降低38%。这是由于含有待机的工况, 有空歇时间

表 10 两种不同循环工况的温度计算结果

Table 10 Temperature calculation results of two different cycle conditions

参数	充电+放电	充电+放电+待机
定子绕组热点温度/℃	194	136
绕组平均温度/℃	150	110
护套热点温度/℃	154	95

将堆积的热量通过辐射散热等方式传递到外界，导致温度更低，此工况为实际运行工况，满足本电机在实际运行中的使用要求。

5 结 论

大功率高转速飞轮储能电机运行在真空下，电机的温升问题突出，本文针对电机温升问题，从多相电机绕组结构和转子结构方面出发，研究电机相数对转子损耗的影响，对比合金钢与碳纤维护套方案的转子损耗，最后对电机不同运行工况下的温度场进行仿真分析，具体研究结论如下。

（1）通过六相（两套三相绕组移相 30°）和十二相（四套三相绕组移相 15°）的磁动势表达式，证明采用十二相绕组可消除 5、7、11、13、17、19 等低次谐波，同时建立三相、六相和十二相电机模型，通过有限元仿真发现十二相电机的转子损耗比三相电机和六相电机分别降低 73.4% 和 54.1%，十二相电机降低转子损耗优势明显，且护套的涡流损耗占转子总涡流损耗的比例远大于磁钢，且随着相数增大磁钢的涡流损耗占比越来越低，由 7.92% 下降至 0.9%。

（2）对比合金钢和碳纤维护套方案转子涡流损耗情况，在额定转速点合金钢护套方案转子总涡流损耗下降更明显。综合损耗及成本因素，优先考虑合金钢护套方案。

（3）对含有充、放电和待机循环工况进行温度场校核，定子绕组最高温度 136℃，护套最高温度 96℃；对仅含有充放电循环工况进行温度场校核，定子绕组 194℃，护套最高温度 154℃，两种工况温度差异较大，在含有充、放电和待机循环工况下温升满足电机使用需要。

参 考 文 献

[1] 张维煜, 朱焜秋. 飞轮储能关键技术及其发展现状[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 141-146.

ZHANG W Y, ZHU H Q. Key technologies and development status of flywheel energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 141-146.

[2] 全雨鑫, 王春雷, 刘新宇, 等. 飞轮储能技术及其应用场景探讨[J]. 工程建设与设计, 2023(24): 91-93. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.12.230.

TONG Y X, WANG C L, LIU X Y, et al. Discussion on flywheel energy storage technology and its application scenarios[J]. Construction & Design for Project, 2023(24): 91-93. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.12.230.

[3] CHOUDHURY S. Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(9): e13024. DOI:10.1002/2050-7038.13024.

[4] 邢向上, 姜新建. 飞轮储能系统电机及其控制器概述[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(2): 147-152. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239. 2015. 02.004.

XING X S, JIANG X J. Introduction to motors and controllers of flywheel energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 147-152. DOI: 10.3969/j.issn. 2095-4239.2015.02.004.

[5] 徐帆, 戴兴建, 王又珑, 等. 飞轮储能用永磁电机研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3423-3441. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0320.

XU F, DAI X J, WANG Y L, et al. Research progress on permanent magnet machines for flywheel energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3423-3441. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0320.

[6] CARDENAS R, PENA R, ASHER G M, et al. Control strategies for power smoothing using a flywheel driven by a sensorless vector-controlled induction machine operating in a wide speed range[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 603-614. DOI:10.1109/TIE.2004.825345.

[7] SATRUSTEGUI M. Thermal and hydraulic design of water-based cooling systems for electrical machines[D]. Pamplona: Universidad de Navarra, 2018.

[8] 王晨, 张卓然, 刘业. 高转矩密度转子磁分路混合励磁电机转子涡流损耗及散热优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7476-7485.

WANG C, ZHANG Z R, LIU Y. Optimization of rotor eddy-current loss and heat dissipation for high torque density hybrid excitation synchronous motor with magnetic shunting rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7476-7485.

[9] LEE K H, CHA H R, KIM Y B. Development of an interior permanent magnet motor through rotor cooling for electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 348-356. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.11.022.

[10] 高建民, 李法敬, 史晓军, 等. 一种基于轴芯热管冷却的高速高精度电主轴: CN105598477B[P]. 2017-07-14.

[11] 赵士豪, 高云鹏, 陈进华, 等. 六相双Y永磁同步电机绕组重构与分析[J]. 微电机, 2022, 55(8): 18-22, 54. DOI: 10.3969/j.issn. 1001-6848.2022.08.004.

ZHAO S H, GAO Y P, CHEN J H, et al. Winding reconstruction

- and analysis of six phase dual Y permanent magnet synchronous motor[J]. Micromotors, 2022, 55(8): 18-22, 54. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6848.2022.08.004.
- [12] 张丙楠. 舰船推进用十二相永磁同步电机电磁振动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- ZHANG B N. Research on electromagnetic vibration characteristics of twelve-phase permanent magnet synchronous motor for ship propulsion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024.
- [13] 吕东元, 吕奇超, 李延宝, 等. 磁悬浮储能飞轮高速永磁电机设计及优化[J]. 大电机技术, 2022(2): 6-12, 44. DOI:10.3969/j.issn.1000-3983.2022.02.002.
- LYU D Y, LYU Q C, LI Y B, et al. The design and optimization of high-speed permanent magnet machines for maglev flywheel energy storage system[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2022(2): 6-12, 44. DOI:10.3969/j.issn.1000-3983. 2022. 02.002.
- [14] 马吉祥. 飞轮储能用高速永磁电机转子涡流损耗计算与抑制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- MA J X. Calculation and suppression of rotor eddy current loss in high-speed permanent magnet motor for flywheel energy storage [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [15] 田野. 复合式转子高速永磁电机转子涡流损耗与温升研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- TIAN Y. Research on rotor eddy current loss and temperature rise of highspeed permanent magnet motor with compound rotor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [16] KLINGSHIRN E A. High phase order induction motors—part I-Description and theoretical considerations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(1): 47-53. DOI:10.1109/TPAS.1983.317996.

广 告 索 引

封二 惠州亿纬锂能股份有限公司

封三 中储国能(北京)技术有限公司

封四 北京清能互联科技有限公司

后插 1 融固新材料科技(绍兴)有限公司

后插 2 鄂尔多斯实验室

后插 3 南方电网电力科技股份有限公司

后插 4 中关村储能产业技术联盟

后插 5 厦门宇电自动化科技有限公司

后插 6 广西电化学能源材料与器件科技成果转化中
试研究基地

后插 7 公益广告

后插 8 上海交通大学中英国际低碳学院