

车用内置式永磁同步电机转子热 - 机械应力耦合分析

邓家辉

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年10月19日; 录用日期: 2024年11月12日; 发布日期: 2024年11月19日

摘要

永磁同步电机因具有高效率、高功率密度、低噪音和高精度控制等优点, 被广泛应用于新能源汽车等领域。随着高速电机技术的不断发展, 对于更高转速扭矩的要求进一步加剧转子失效的风险, 表现为转子磁轭单片突出、磁桥断裂等现象。电机转子作为电驱系统的核心部件, 对其进行热 - 机械耦合应力分析以及失效主导载荷的确定, 对于车用驱动电机的设计有指导意义。通过建立永磁同步电机转子模型, 进行转子的温度场仿真、应力场仿真分析得出了转子的热 - 机械耦合应力, 在本文电机动态工况最高转速下, 转子的机械应力为121.35 Mpa, 热 - 机械耦合应力为142.42 Mpa, 其中机械应力占比为85.21%, 明确了电机转子失效的主要载荷, 也为以后的高转速、大功率车用驱动电机转子的设计奠定了基础。

关键词

转子, 温度场, 机械应力, 失效

Thermal Mechanical Stress Coupling Analysis of Rotor in Built-In Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicles

Jiahui Deng

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 19th, 2024; accepted: Nov. 12th, 2024; published: Nov. 19th, 2024

Abstract

Permanent magnet synchronous motors are widely used in fields such as new energy vehicles due to their advantages of high efficiency, high power density, low noise, and high-precision control.

With the continuous development of high-speed motor technology, the demand for higher speed torque further exacerbates the risk of rotor failure, manifested as phenomena such as rotor yoke single piece protrusion and magnetic bridge fracture. As the core component of the electric drive system, the thermal mechanical coupling stress analysis of the motor rotor and the determination of the dominant failure load have guiding significance for the design of automotive drive motors. By establishing a rotor model of a permanent magnet synchronous motor and conducting temperature field simulation and stress field simulation analysis, the thermal mechanical coupling stress of the rotor was obtained. At the highest dynamic operating speed of the motor in this paper, the mechanical stress of the rotor was 121.35 MPa, and the thermal mechanical coupling stress was 142.42 MPa, of which mechanical stress accounted for 85.21%. The main load causing the failure of the motor rotor was identified, laying the foundation for the design of high-speed and high-power vehicle drive motor rotors in the future.

Keywords

Rotor, Temperature Field, Mechanical Stress, Invalid

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速永磁电机因有转速高、功率密度大等优点使其在电动汽车、航空航天、分布式发电系统等领域具有广泛的应用前景[1],但其高速、高频的特点使其在设计过程中存在一些技术难题,高速大功率永磁电机转子转速高,使得电机在设计过程中必须严格约束机械强度方面的要求,电机转子部件承受巨大的离心力,尤其是在隔磁桥位置,高速旋转有可能导致转子发生扫膛、裂纹等现象,造成安全隐患[2]。转子在工作过程中,由于电磁力和机械负荷的作用,会导致温度升高和材料的热膨胀。这种热效应不仅影响电机的效率,还可能导致转子的失效,如材料疲劳和热变形。此外,转子内部的温度分布不均也会引起局部应力集中,进而影响电机的整体性能和使用寿命。因此,对转子的热-机械应力进行深入分析,能够为电机设计和优化提供重要依据。李乐[3]等人针对多物理场载荷下转子失效模式分析与动态交变工况下寿命预测研究,通过建立转子磁桥失效物理模型,从电磁场、温度场、结构场、热力耦合场进行仿真分析,确定转子危险点位置,得出转子在多物理场作用下的失效主导载荷。王煦宁[4]基于瞬态温度场仿真分析法,建立峰值工况和连续工况下的温度场仿真计算模型,并得到关键零部件的温升分布情况。王晓波[5]首先对汽轮机转子所受的热应力及机械应力的产生及分布进行了基础理论分析;然后建立汽轮机转子二维有限元模型,使用 ANSYS 有限元软件求解温度场,得出不同时刻的温度分布情况,关键点温度随时间的变化,通过热-结构耦合分析,得到转子的应力场分布,进而估算转子的寿命损耗。本文首先建立了永磁同步电机的转子模型,结合电机的运转工况计算出转子的损耗,进而得出转子的温度场分布和热应力大小,再结合转子的机械应力仿真得出转子在其运转工况下的热-机械耦合应力分布。

2. 电机模型参数及电机运转工况

2.1. 几何模型建立

本文研究对象为某新能源汽车企业提供的一款车用永磁同步电机。该电机为 8 极 48 槽 V 型转子永磁同步电机,由定子、转子、绕组、永磁体、三相线等部件组成。电机定转子均由硅钢片叠压而成,

叠压系数为 0.96，并涂有绝缘层。转子中的永磁体为 V 型结构，采用烧结钕铁硼材料。电机的额定功率为 60 kW，峰值功率为 120 kW，额定转速为 5210 rpm，峰值转速为 10,000 rpm。详细的电机尺寸参数见表 1。建立好的转子模型如图 1 所示。

Table 1. Motor dimensional parameters

表 1. 电机尺寸参数

参数	数值/mm
定子外径	260
定子内径	166.8
定子槽高度	21.6
转子外径	164.8
定子叠片厚度	160
转子叠片厚度	160
永磁体宽度	17
永磁体厚度	7.4
气隙长度	1
绕组线径	0.8

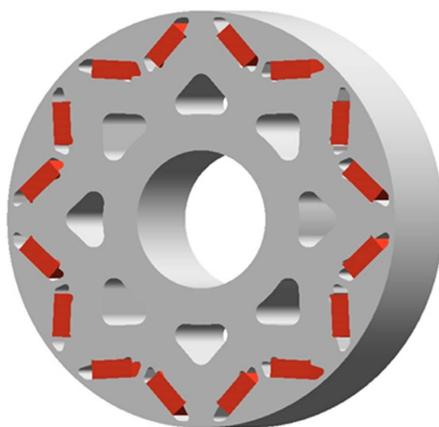


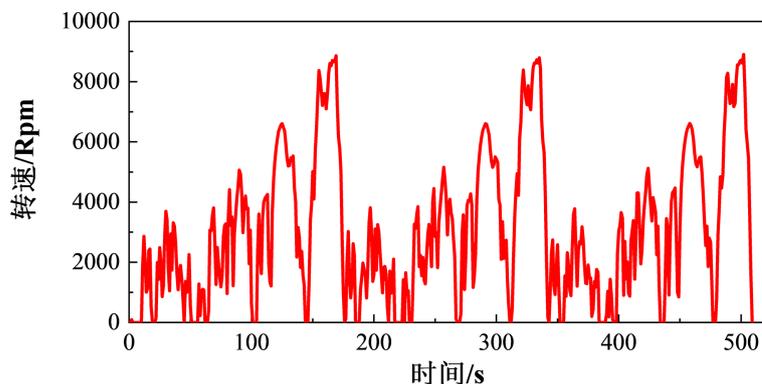
Figure 1. Three dimensional finite element model of motor rotor

图 1. 电机转子三维有限元模型

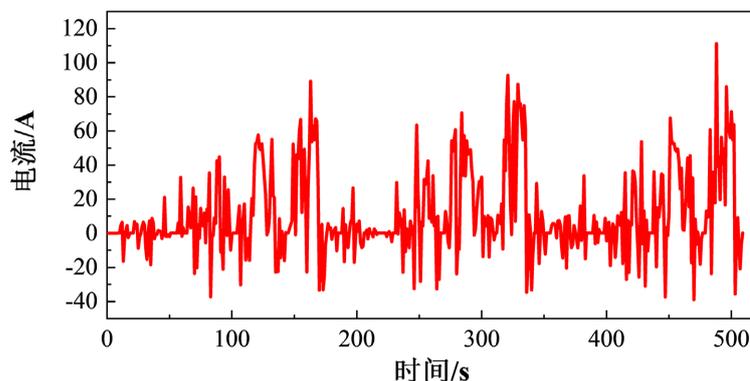
以真实的电机台架运行数据为基础，通过有限元仿真模拟电机在台架试验中的运行过程。动态交变试验工况数据如图 2 所示，一共是 508 s 的运行工况数据，电机的最高转速为 8907 rpm，最大电流为 200 A。

2.2. 电机转子热应力分析

永磁同步电机在运行过程中会产生各种各样的损耗，主要包括定子和转子的铁芯损耗，永磁体的涡流损耗，定子绕组铜损等[6]。这些损耗是电机温度发生变化的主要原因而温度的变化又引起热应力的产生。本文主要关注电机转子部分的损耗，即永磁体涡流损耗和转子铁芯损耗。



(a) 电机转速工况



(b) 电机电流工况

Figure 2. Operating conditions of the motor

图 2. 电机运转工况

2.2.1. 转子损耗计算

电机永磁体涡流损耗产生的原因是由于磁场发生变化时，永磁体中会产生涡流，涡流在永磁体内部产生磁场，与磁化矢量反方向相互作用，导致涡流消耗一部分能量并产生热能损耗。具体公式如下：

$$P_w = \sum_n \left(\int \frac{|J_n|^2}{2\sigma} dV \right) \tag{1}$$

式中， J_n 为涡流密度，其大小与转速成正比； σ 为材料导电率。

电机转子铁损可以分为两部分：磁滞损耗和涡流损耗。磁滞损耗是由于铁磁材料内部分子磁矩的定向变化和摆动所产生的热能损耗。涡流损耗是由于涡流在铁芯内部产生的交变磁场和与定子磁场相互作用所导致的热能损耗。

$$f = \frac{np}{60} \tag{2}$$

$$P_h = C_n f B_m^n V \tag{3}$$

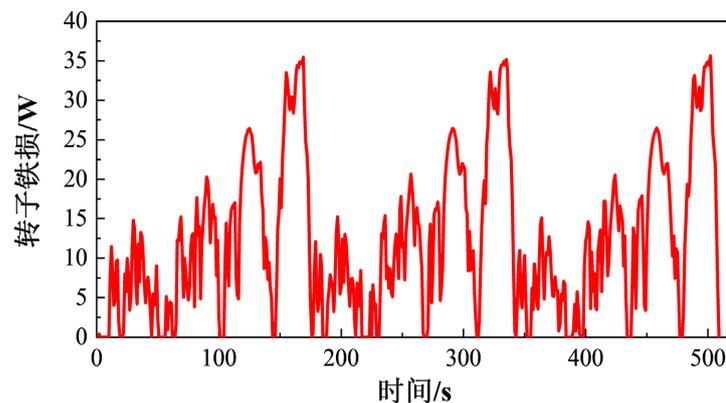
$$P_{Fe} = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V \tag{4}$$

式中， f 为磁场频率； n 为电机转速； P 为转子极对数； P_h 为定转子磁滞损耗； C_n 为磁滞损耗系数； n_1 为经验系数，硅钢材料为 1.6~2.3 之间； P_{Fe} 为定转子涡流损耗； C_e 为涡流损耗系数； Δ 为定转子的铁芯厚度； B_m 为运行磁场的磁通密度； V 为定转子体积。电机转子各部分的材料参数见下表 2。

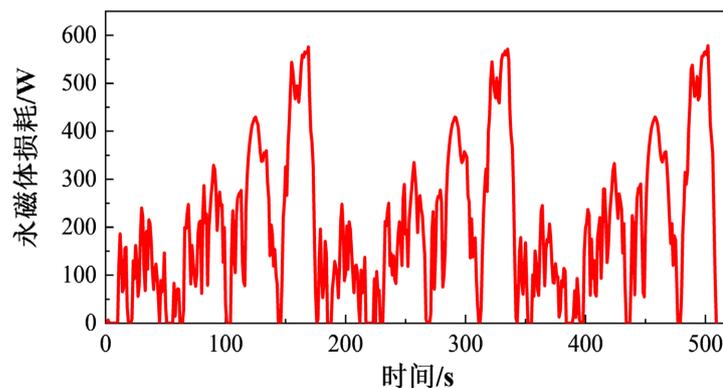
Table 2. Material parameters of each part of the motor rotor
表 2. 电机转子各部分的材料参数

组件	材料密度(kg/m ³)	比热容 J/(kg·°C)	导热系数 W/(kg·°C)
转子冲片	7800	460	径向 22.0816 轴向 0.9599
永磁体	7600	450	8.5

根据以上公式求得电机转子各部分的损耗曲线如下图 3:



(a) 转子铁损



(b) 永磁体损耗

Figure 3. Losses of various components in the rotor

图 3. 转子各部件损耗

2.2.2. 转子温度场仿真

电机运行过程中,各部件由于损耗会产生热量,热量会通过热传导的方式在相互接触的物体表面由高温向低温传递,然后通过热对流的方式在相互不接触的物体表面由高温向低温传递[7]。因此在进行电机有限元分析时,首先要明确电机各个部分导热系数、发热率和转子表面的对流散热系数。

上一节已经求得的电机转子、永磁体损耗曲线,分别除以各自的总体积,可以得到电机各部分的发热率,并在有限元软件中添加内部热生成这一激励进行热源的设置。同时对转子的外表面设置对流散热系数,电机转子表面的对流散热系数由转速决定,转速越大,空气流动速率越大,对流散热效果越好,因此转子的对流散热系数一般采用如下的经验公式进行计算:

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{1 + 0.04v}{0.145} \\ \alpha_r = 28(1 + \sqrt{0.45v}) \end{cases} \quad (5)$$

式中， α_s 为定子表面的对流散热系数； α_r 为转子表面的对流散热系数； v 为转子外表面线速度。由上式求出转子表面的对流系数如下图 4：

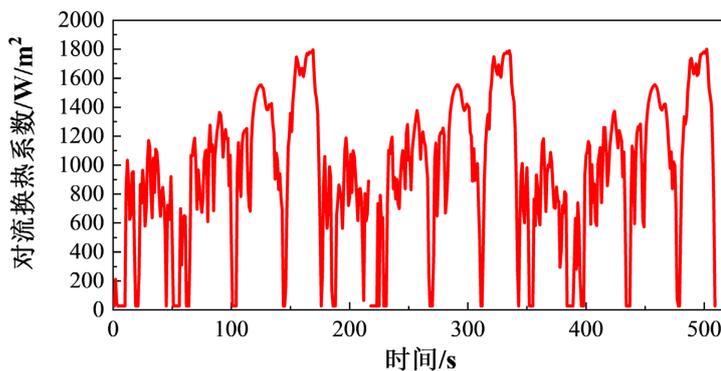


Figure 4. Convection coefficient on rotor surface
图 4. 转子表面对流系数

为减少仿真时间，并且电机转子无论是在结构上还是接触上都具有对称性，故本文所有仿真都基于转子 1/8 模型进行。在转子温度场有限元分析中，将电机 500 s 的转速输入到转子静态结构中，再将求得的永磁体损耗和转子铁芯损耗的发热率以热条件的形式输入到对应的转子结构，最后对转子表面施加对流换热系数，最终得到转子的温度场分布如下图 5 所示。

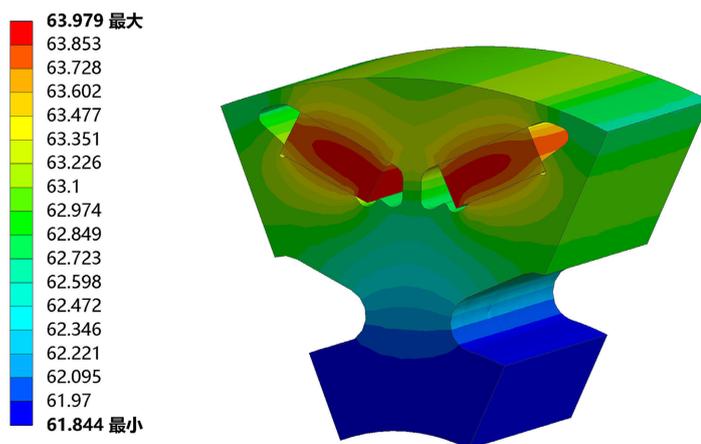


Figure 5. Distribution of rotor temperature field
图 5. 转子温度场分布图

由图 5 可知，转子的最高温度分布在永磁体附近，由于永磁体的总损耗比较大，转子温度沿永磁体中心区域向外逐渐递减。转子外表面的温度是小于转子整体的温度，随着转速的变化，转子外表面会有相对较好的空气对流环境进行散热。

2.2.3. 转子热应力仿真

电机内部温度的变化会导致各部件内部形成温度梯度，由此产生热应力。这种热应力是由于不同部

件的发热率和热膨胀系数不同而产生的。由热应力理论可知，物体发生变形的原因主要有两个：一方面是由于温度变化产生的应变，另一方面是由于应力挤压产生的弹性应变。因此，在计算热应力时，需要同时考虑热应变和弹性应变的影响。

电机运行过程中，由于电机各部分会不可避免的产生损耗，这些损耗又转化为热能导致电机温度升高。转子部分产生的损耗会导致转子温度的上升，转子内部由于材料的热膨胀系数不同以及结构的相互挤压，会产生热应力。这些热应力可能会导致转子内部的裂纹和其他损伤，最终影响电机的性能和寿命[8]。因此，为了研究电机内部的热应力分布，将温度场仿真得到的转子温度分布情况导入到结构场，最终可以得到转子的热应力分布。如下图6所示。

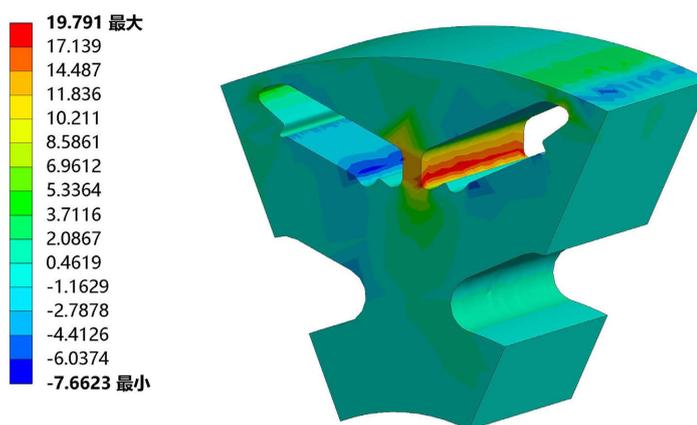


Figure 6. Distribution of thermal stress in the rotor
图 6. 转子热应力分布图

由图6可知，电机转子热应力的最大位置在双边隔磁桥处，最大值为19.79 Mpa，其次是在隔磁桥处，这是因为永磁体的损耗比转子铁芯大，温度变化也更高，故永磁体受热膨胀的程度大，这便使得转子铁芯的隔磁桥处于受拉的状态，而其他部分处于受压状态，从而产生热应力。

3. 转子耦合应力分析

3.1. 转子机械应力

机械应力是物体受到外力作用而发生形变时，结构内部产生的相互作用力。这些力会阻止物体的进一步形变，试图将物体恢复到变形前的位置。机械应力通常由物体内部分子间的相互作用力引起。在电机工作时，高频交变的转速载荷使得电机转子承受较高的机械应力，这可能导致转子的变形、裂纹和其他损伤[5]。永磁转子高速旋转所产生的离心力为

$$F = mr\omega^2 \quad (6)$$

式中， m 为转子质量； r 为转子半径； ω 为转子角速度。

转子所受离心应力为

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

式中， A 为离心力作用面积。

电机高速运行时产生的离心力会使转子铁芯上产生显著的应力，这可能导致转子铁芯失效。转子铁芯所使用的硅钢片为塑性材料，通常采用第四强度理论来判断其是否失效，即转子铁芯的 Von Mises 应

力应小于其屈服强度，表达式如下：

$$\sigma \leq \frac{\sigma_v}{S} \quad (8)$$

式中， S 为安全系数， σ_v 为转子的抗拉强度。电机高速运行时，转子应力情况可考虑为一个平面应力问题，对应的 Von Mises 应力可由下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \sigma_\theta} \quad (9)$$

式中， σ_θ 表示转子的切向应力分量； σ_r 则为径向应力分量。

汽车在行驶的过程中高频动态交变工况会使电机转子产生很大的交变离心力，且随着转速越大，离心力的增幅就越大。因此，基于结构场下的建立的电机转子模型，在不考虑温度与电磁力的影响下，单独施加动态转速载荷，并且对转子与转轴接触的面施加圆柱形支撑，把径向和轴向的自由度释放，把永磁体和转子铁芯的接触状态设置为无分离状态，并对转子铁芯 1/8 模型的切割面施加无摩擦支撑以此来模拟转子在真实情况下的受力，最后分析在不同转速下，电机转子的应力分布情况。最终得到转子在图 3 动态工况下的机械应力分布。如下图 7 所示。

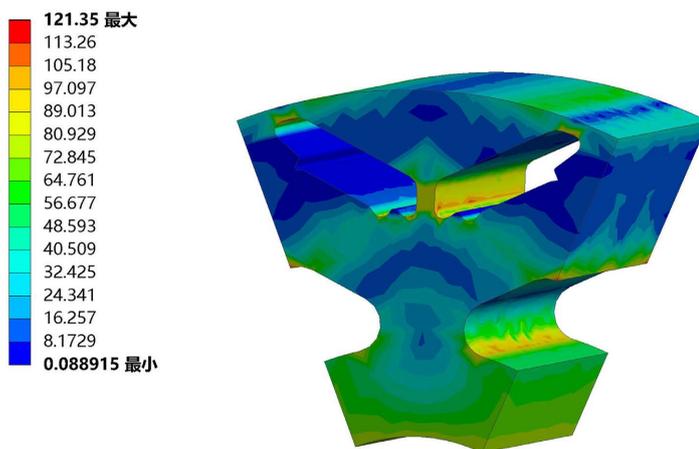


Figure 7. Mechanical stress distribution diagram of rotor
图 7. 转子机械应力分布图

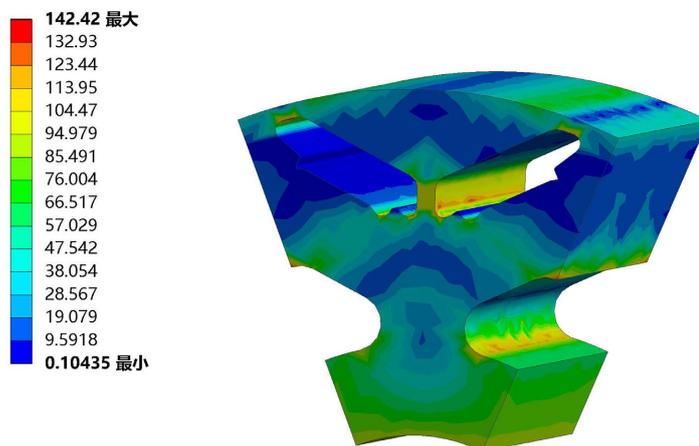
由图 7 可知，电机在动态工况下，转子收到的机械应力随着电机转速的变化而变化，并且转子应力最大值出现在隔磁桥处，这是由于电机高速运行时，由于永磁体是 V 型结构，受到的离心力会沿着 V 型的角度向外，进而传导到隔磁桥处，使隔磁桥处受拉力最大。当电机最大转速为 8907 Rpm 时，转子磁桥的机械应力为 121.35 Mpa，所以转子的隔磁桥是一个容易发生破裂的部位。

3.2. 转子热 - 机械耦合应力

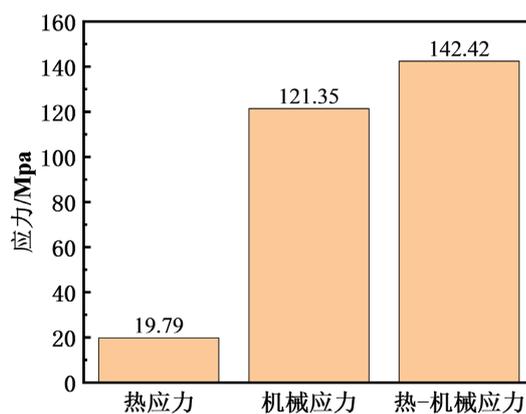
综合结构场下的热应力和机械应力有限元分析结果可知：电磁应力的影响可以忽略不计，热应力的最大应力位置在双边隔磁桥处，机械应力的最大应力位置在中心隔磁桥处。因此为了探究电机转子的失效主导载荷，将温度场仿真得到的转子温度分布情况导入到结构场，同时对转子模型施加试验工况下的转速载荷，得到转子热力耦合场下的有限元分析结果[9]。图 8 为转速达到峰值时的热 - 机械应力结果。

由有限元的分析结果可知，在热力耦合作用下电机转子的最大集中应力是在中心隔磁桥处，最大应力值为 142.42 Mpa，而单独离心力作用的最大应力值为 121.35 MPa，机械应力占比 85.21%。由热应力场仿真结果可知，热应力虽然在双边隔磁桥处比较大，不容忽略，但总体的热力耦合场下的合应力最大区

域位于中心隔磁桥，因此电机转子主要的失效点为中心隔磁桥和单边隔磁桥，失效主导载荷为机械应力。



(a) 转子热 - 机械耦合应力



(b) 转子热 - 机械耦合应力占比分析

Figure 8. Distribution of thermal mechanical coupling stress in the rotor
图 8. 转子热 - 机械耦合应力分布图

4. 小结

本文以永磁同步电机转子为对象，利用 ANSYS Workbench 对电机转子进行了热应力、机械应力的单独仿真，以及热 - 机械应力综合仿真。结果表明，电机转子运行时永磁体产生的损耗较大，与之对应的永磁体处温度较高，由于永磁体和转子铁芯热胀冷缩的性质和相互挤压的作用，导致单边隔磁桥处的热应力最大。机械应力由于永磁体受离心力的作用，而转子铁芯的隔磁桥主要承受永磁体离心力，故转子铁芯的最大应力集中在转子中心隔磁桥处；而热 - 机械应力分布结果显示，转子离心力产生的机械载荷占比 85.21%，所以机械应力对转子磁桥损伤最大。

另一方面，本文虽然确定了离心力作用是转子磁桥失效的主要原因，但是随着现在车用永磁同步电机追求更高功率、更小体积，电机的设计与应用转速不断提高，这样一来转子的温度场将会进一步升高，热应力也会随之增加，这就导致在电机设计中，热应力愈发变成了一个不可忽视的因素。

参考文献

- [1] 董剑宁, 黄允凯, 金龙, 等. 高速永磁电机设计与分析技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4640-4653.

- [2] 郑晋, 韩明, 黄文祥, 罗平亮. 车用永磁同步电机转子受力浅析[J]. 上海汽车, 2015(5): 18-21.
- [3] 赵礼辉, 李乐, 王震, 等. 多物理场下转子磁桥失效模式分析与寿命预测[C]//中国汽车工程学会. 2022 中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社有限公司, 2022: 8.
- [4] 王煦宁. 全电飞机用驱动电机轻量化设计及热应力分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [5] 王晓波. 调峰工况汽轮机转子热应力分析[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2015.
- [6] 付相达. 高温永磁同步电机损耗计算与效率优化[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
- [7] 李建军. 永磁同步电机磁热耦合分析与温升研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [8] 石振禾. 永磁同步电机损耗及热特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [9] 尹青华. 永磁同步电动机电磁—机械应力耦合场的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.