

永磁同步电机转子冲片疲劳仿真分析方法研究

余春祥, 彭国民, 郭丰

无锡星驱动力科技有限公司, 江苏 无锡 214000

摘要:为解决某电驱总成转子冲片的疲劳断裂故障,建立冲片有限元模型,对冲片疲劳断裂现象进行模拟,分析冲片厚度、冲片材料各向异性、胶料、电磁力、磁钢与冲片接触不均匀性、温度等因素对冲片应力的影响;基于应力试验结果修正材料应力 S -寿命 N 曲线;优化转子冲片结构,增大中间隔磁桥厚度和断裂处圆角半径,并对优化后冲片进行仿真与耐久试验验证。结果表明:冲片应力随着冲片厚度增大而下降,随磁钢与冲片接触不均匀性增大而显著增大;材料各向异性、胶料、电磁力对冲片应力的影响较小,而温度对冲片应力的影响较大;修正材料 S - N 曲线后,疲劳寿命的仿真结果与试验结果高度吻合,验证了模型的准确性;优化方案的仿真疲劳寿命为 218 万次循环,远高于 3 万次的要求,且通过了耐久试验验证。该方法成功解决了冲片断裂问题并提高了冲片疲劳寿命预测的精度。

关键词:电驱总成;永磁同步电机;冲片;应力分析;疲劳分析

中图分类号:U469.72;TM351

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)06-0071-07

引用格式:余春祥,彭国民,郭丰. 永磁同步电机转子冲片疲劳仿真分析方法研究[J]. 内燃机与动力装置, 2025,42(6):71-77.

YU Chunxiang, PENG Guomin, GUO Feng. Fatigue simulation method study on rotor punchings of a permanent magnet synchronous motor[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025,42(6):71-77.

0 引言

为应对全球化石能源供应紧张及汽车排放造成的环境污染问题,同时为保障国家能源安全,中国已将发展新能源汽车确立为重点战略方向之一^[1-2]。电机将电能转化为机械能,是新能源汽车的动力驱动核心,其性能直接决定了车辆的动力性、平顺性、经济性和可靠性。转子是电机的核心部件之一,主要由转子铁芯和转子绕组组成。转子铁芯通常由硅钢冲片叠压而成,外圆周有均匀分布的槽口以嵌装转子绕组^[3]。电机在高速旋转过程中,转子冲片作为关键承载件,需承受巨大的离心力作用,其强度与振动特性直接决定了电机的运行可靠性和使用寿命^[4]。

现有研究多集中于电机冲片的应力分析,关于冲片疲劳方面的研究相对较少,且分析模型及评价方式尚不够完善。陈璞等^[5]通过仿真计算不同载荷加载方式下的转子冲片强度,建立了适用于永磁同步牵引电机设计初期的转子冲片强度分析方法,但模型中未考虑温度及冲片厚度对应力的影响。崔月儿等^[6]以一台峰值转速为 12 000 r/min 的车用永磁同步电机为研究对象,分析了转子在热力耦合下的应力分布及疲劳寿命,并通过不同温度下的疲劳试验对材料应力 S -寿命 N 曲线进行实测校准,但分析结果没有与疲劳试验进行对比验证。李嘉明^[7]对转子发生偏心时因内部磁场不均匀分布而产生的径向电磁力进行了理论与解析计算,分析了径向电磁力和不平衡质量拉力共同作用对转子强度和疲劳寿命影响,但未考虑物理场、温度场、磁场等对转子疲劳寿命的综合影响。陈诗怡^[8]深入分析了永磁同步电机的故障模式、原因和机理,采用 Copula 函数对永磁同步电机进行多失效模式相关的可靠性分析,并对永磁同步电机进

收稿日期:2024-10-31

第一作者简介:余春祥(1987—),男,河南信阳人,工学硕士,工程师,主要研究方向为变速器及电驱总成开发,E-mail:chunxiang.yu@infimotion.com。

行了灵敏度分析和可靠性优化,但未考虑时间历程对失效模式相关性的影响,未进行时变 Copula 函数建模。

本文中针对某电驱总成转子冲片出现的断裂故障,从应力分析、疲劳仿真、仿真与试验对比等多方面展开研究,分析故障原因并提出提高冲片疲劳寿命的优化方法,为电驱总成转子冲片设计提供参考。

1 故障描述

某电驱总成用永磁同步电机的最高转速为 14 000 r/min,最高功率为 460 kW,额定电压为 800 V,最大转矩为 630 N·m。在开发过程中,电驱总成按最大转矩条件进行了转速疲劳试验,试验转速曲线如图 1 所示,图中, n_{\max} 为最高转速, t 为单次循环时间。试验过程中,2 台样机在分别完成 16 800 次、10 500 次试验循环时出现转子隔磁桥断裂故障。两台样机记为 1#样机、2#样机,其冲片材料分别为 B30AHV1500、B20AV1200。两台样机冲片断裂位置基本相同,均位于隔磁桥圆角区域,故障情况如图 2 所示。

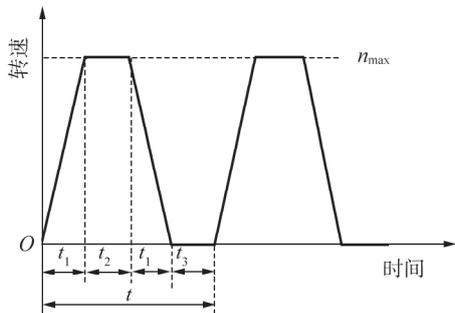


图 1 电驱总成疲劳试验转速曲线

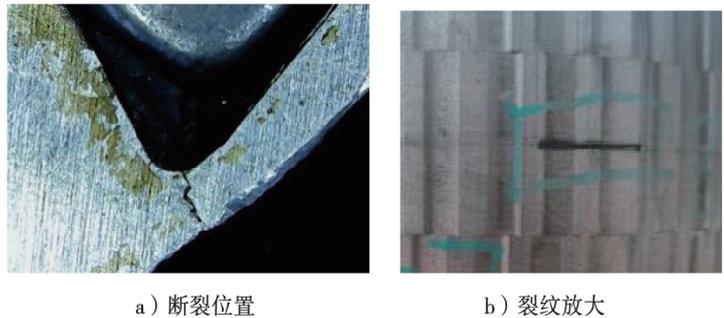


图 2 故障情况

根据导致失效所需的循环次数 N_f , 疲劳可分为高周疲劳和低周疲劳, 对于高周疲劳, $N_f \geq 10^4$; 对于低周疲劳, $10^3 \leq N_f < 10^4$ 。疲劳断口宏观上可见裂纹源、扩展区与瞬断区 3 部分。扩展区通常较为光滑, 并伴有海滩条带等疲劳特征, 若处于腐蚀环境则伴有腐蚀痕迹^[9]。通过观察冲片断口形貌, 结合试验断裂循环次数, 可判定断裂为典型的高周疲劳失效。为解决冲片断裂故障, 本文中将从影响因素、应力状态及疲劳寿命等方面进行分析, 确定故障原因, 提出优化方案, 并通过仿真和试验对优化方案进行综合验证。

2 疲劳影响因素

根据应力比 R (循环最小应力 S_{\min} 与循环最大应力 S_{\max} 的比), 循环应力可分为对称循环 ($R = -1$)、脉动循环 ($R = 0$) 及静载循环 ($R = 1$) 3 种形式, 如图 3 所示。

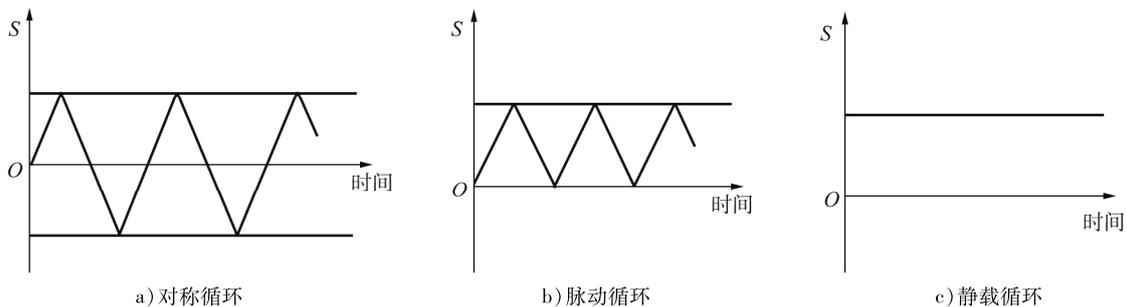


图 3 不同循环应力形式

根据冲片载荷谱形式,冲片所受应力为脉冲循环应力。该应力在 $0 \sim S_{\max}$ 反复循环。根据 Miner 线性累积损伤理论,材料或构件在变幅载荷下的疲劳损伤遵循线性累加原则。对某一应力幅为 ΔS_i 的单个循环,其造成的损伤可量化为 $D = 1/N_i$,其中 N_i 为该应力幅下的疲劳寿命(循环次数)。构件的总疲劳损伤即为所有应力循环造成的损伤之和^[10]。S-N 曲线如图 4 所示。

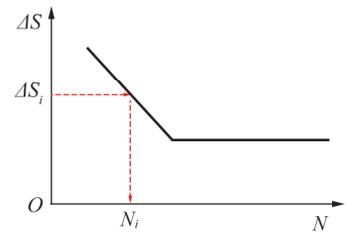


图 4 应力-寿命曲线

冲片的疲劳载荷模式相对单一,其应力循环特征简单。因此,冲片疲劳寿命主要取决于最大应力,并受材料特性、表面粗糙度、几何形状等因素影响。在此背景下,疲劳寿命预测的准确性高度依赖于工作应力的计算精度以及材料 S-N 曲线的可靠性。

应力计算的精度主要受建模方式影响,但诸多关键因素在仿真中难以精确复现。结构层面,转子由多叠硅钢片组装而成,硅钢片与磁钢间的接触存在固有间隙偏差,导致在部分硅钢片离心力作用下出现应力集中与偏载。材料层面,硅钢片与磁钢间的填充胶料,其力学参数通常难以准确获得,使模拟依赖于假设条件。工艺层面,冲片的建模叠厚及由转子成形工艺导致的材料各向异性,是建模中难以简化的不确定性来源。物理场层面,实际冲片应力还受到电磁力的影响,如何在应力仿真中准确计入电磁力,也是一项重要技术挑战。

3 应力分析

3.1 应力分析模型

有限元应力分析模型主要由冲片、轴及磁钢三部分组成,如图 5 所示。轴中心采用固定约束,同时释放径向位移,施加相应离心力;磁钢与冲片之间采用有限滑移接触,摩擦因数设置为 0.2;轴与冲片之间采用过盈配合连接。应用该模型可分析冲片厚度、偏载、胶料、电磁力等多因素对应力的影响。

利用有限元应力分析模型对冲片进行 Mises 应力分析,结果如图 6 所示。由图 6 可知:冲片最大应力为 400.834 MPa,已超过其材料屈服极限,最大应力点的位置与断裂位置相吻合。

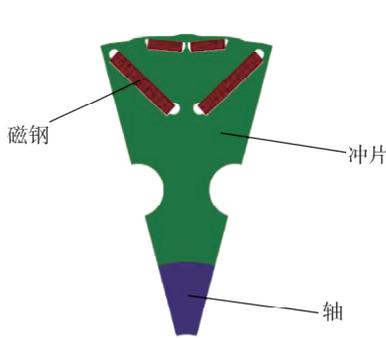


图 5 分析模型

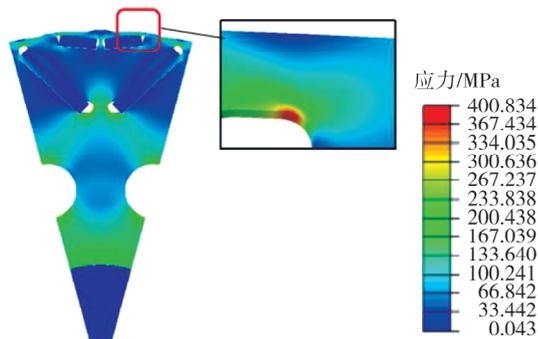


图 6 原冲片应力分析

3.2 冲片厚度的影响

冲片厚度影响模型的整体刚度,进而影响应力计算结果。本文中分析断裂位置的冲片厚度对应力的影响,结果如图 7 所示。由图 7 可知:随着冲片厚度增大,应力总体呈下降趋势;当厚度小于 1 mm 时,应力快速下降,但当厚度大于 1 mm 后,应力下降趋于平稳,降幅较小。这是因为增大冲片厚度可提高整体刚度,减小结构变形,内部应力也随之降低。因此,为规避前期的设计风险,建议建模时冲片厚度应与实际冲片厚度保持一致。

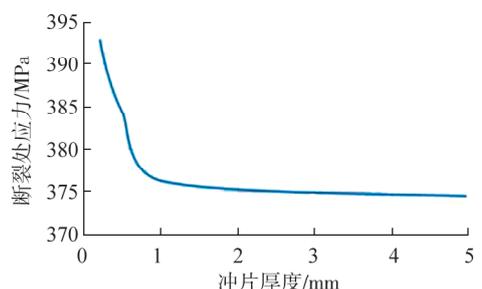


图 7 冲片厚度对应力影响

3.3 材料各向异性的影响

转子由冲片逐片叠压成段,多段压装固化后形成一个整体,其轴向刚度通常较低,且冲片本身具有各向异性特征。虽然冲片各向异性会影响应力分布,然而在离心力作用下,载荷主要作用于径向平面,轴向并不直接承受外力,在分析离心应力时,材料各向异性对冲片断裂处的应力影响通常可以忽略。采用各向同性和各向异性两种材料、厚度均为 0.5 mm 的冲片进行应力分析,两种材料的泊松比均为 0.25,密度均为 7.6 t/m^3 ,但弹性模量和剪切模量不同。各向同性材料的弹性模量为 175 GPa;对于各向异性材料,其主平面内两个相互垂直方向的弹性模量均为 175 GPa,厚度方向的弹性模量为 30 GPa,主平面内的剪切模量为 42 GPa,涉及厚度方向的两个平面的剪切模量均为 21 GPa。仿真结果表明:各向同性和各向异性材料冲片断裂处的应力分别约为 384、387 MPa。两者差异不大,这与前述理论相符,所以可以忽略材料各向异性对应力的影响。

3.4 胶料对应力的影响

磁钢与冲片之间的空隙通过磁钢胶填充,这使得冲片的应力主要集中在磁桥圆角区域。磁桥圆角区位置及网格模型如图 8 所示。理论上胶料的填充应有助于提高该区域刚度,降低应力。但仿真分析胶料对冲片应力的影响时,可忽略胶料的粘连性,原因为:1) 胶料的粘连性参数难以准确获得;2) 在转子最大转速工作时的温度下,胶料粘连性会降低。

磁钢胶的弹性模量为 8 GPa,泊松比为 0.33,密度为 1.14 t/m^3 。基于厚度为 0.2 mm 的冲片分析胶料对冲片断裂处应力的影响。结果表明:有胶、无胶时冲片断裂处的应力分别约为 382、392 MPa,相差约 10 MPa,胶料可以小幅降低应力。

鉴于胶料的参数很难获取,可以忽略胶料对应力的影响。

3.5 电磁力的影响

电机最高转速下,冲片同时承受巨大的离心力和高频交变的电磁力。两种力的共同作用加剧了材料的疲劳,冲片的振动模态还可能与电磁力的激励频率耦合,引发共振,影响电机可靠性。电磁力可分解为径向电磁力和切向电磁力,两者对比如图 9 所示。由图 9 可知:冲片受到的径向电磁力远大于切向电磁力,前者约为后者的 4~5 倍。

鉴于切向电磁力较小,本文中仅分析径向电磁力对冲片断裂处应力的影响。径向电磁力有两个方向,一个方向为沿着冲片径向向外,这种情形可增大冲片应力;另一个方向为沿着冲片径向向内,这种情形可减小冲片应力。在转子转速为 14 000 r/min、峰值电流为 1 068.58 A、电流角为 75.96° 、磁钢温度为 150°C 的条件下仿真分析电磁力对冲片断裂处应力的影响,电磁力的施加位置如图 10 所示。结果表明:无电磁力、施加向内电磁力、施加向外电磁力 3 种情况下,断裂处应力分别约为 393、385、404 MPa,这与上述理论分析相符;电磁力对冲片应力的影响为 8~11 MPa。

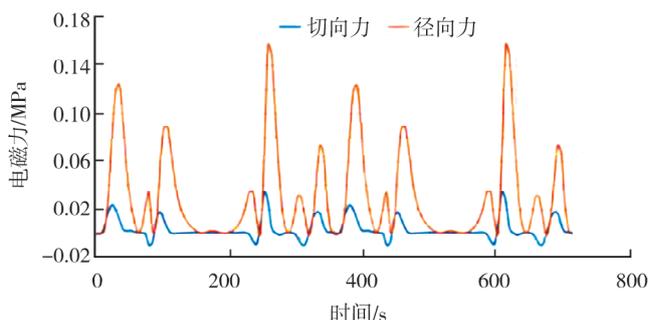


图9 径向力与切向力对比

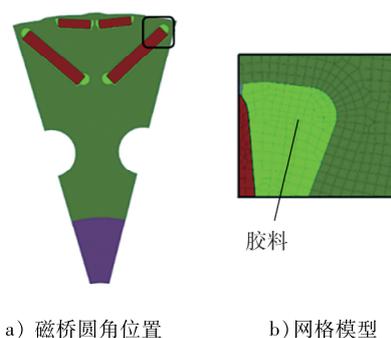


图8 磁桥圆角位置及网格模型

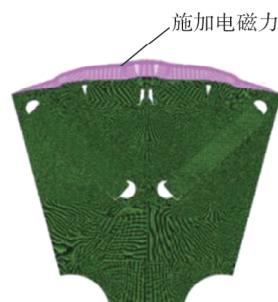


图10 电磁力的施加位置

3.6 磁钢与冲片接触不均匀性的影响

转子由许多冲片叠加装配而成,装配过程中,由于离心力的作用,很难保证每一片冲片受到的磁钢作用力相同。磁钢与冲片接触不均匀性对冲片断裂处应力的影响如图 11 所示。由图 11 可知:磁钢与冲片接触不均匀性对应力的影响显著,随着不均匀性系数增大,应力大体呈线性增大趋势。但是,实际工作过程中,难以通过可量化、可对比的几何、力学和电磁性能指标准确计算磁钢与冲片接触不均匀性。

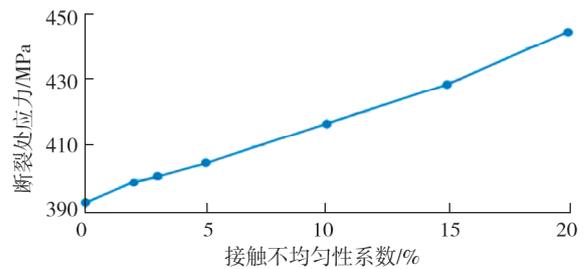


图 11 磁钢与冲片接触不均匀性对断裂处应力的影响

3.7 温度的影响

硅钢片材料 B30AHV1500 的力学性能随温度升高而下降。常温(25 ℃)下材料的屈服强度、抗拉强度较高温(150 ℃)时分别降低约 60、15 MPa,硅钢片材料力学性能随温度变化如图 12 所示。

转子在工作过程中温度较高,通常大于 100 ℃。在环境温度为 85 ℃、冷却油温度为 80 ℃、冷却油体积流量为 2 L/min、转子转速为 14 000 r/min 的条件下对转子温度场进行仿真分析,结果如图 13 所示。由图 13 可知:转子在最高转速下的温度为 140~150 ℃。由图 12、13 可知,在分析冲片应力时必须考虑温度的影响。

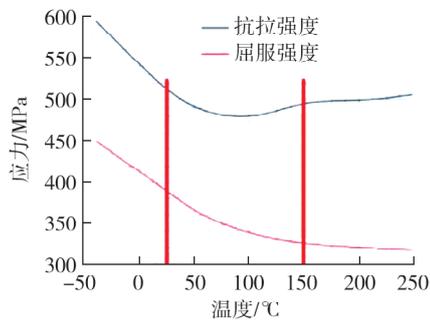


图 12 硅钢片材料力学性能随温度变化

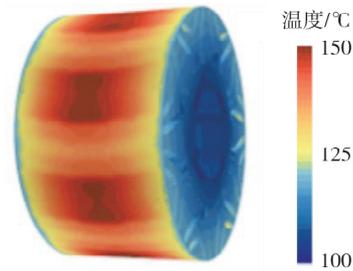


图 13 转子温度场

综上,通过应力仿真分析可以准确预测冲片失效区域,但受上述多种因素的综合影响,无法精确预估应力,在一定程度上无法精确模拟试验失效现象,因此需要进行疲劳仿真分析。

4 疲劳分析及优化

材料的疲劳强度受外部因素和内部因素的共同影响。外部因素包括零部件的形状、几何尺寸、表面粗糙度等;内部因素主要涉及材料的 $S-N$ 曲线、残余应力、材料的组织成分等。建模过程中,已将几何尺寸、表面粗糙度纳入分析模型,这部分误差可以忽略。材料的 $S-N$ 曲线虽然可以通过疲劳试验机对大量试棒进行疲劳试验获得,但存在试验时间长、成本高、人力投入大等问题。此外, $S-N$ 曲线会因实际零件的具体几何形状(如缺口、截面变化等)而发生改变,在工程实践中,直接使用基于标准试样的 $S-N$ 曲线往往无法准确预测真实零件的疲劳寿命。

4.1 优化思路

本文中在相对精确应力分析的基础上,对材料理论 $S-N$ 曲线进行修正,并对仿真的应力计算误差及工艺缺陷的影响进行补偿,使仿真计算与试验测得的失效循环次数更接近,以期更真实地还原试验情况,提高冲片疲劳寿命预测的准确性。具体方法为:基于 1[#]样机的应力试验结果调整 $S-N$ 曲线,建立试验与仿真间的量化对应关系,总结疲劳特性规律;利用 2[#]样机的试验结果进行有效性验证,确保分析方法的准确性;基于修正后的分析方法开展优化设计,最终使优化方案在试验中的通过率达到 100%。

4.2 S-N 曲线仿真修正

1#样机(材料为 B30AHV1500)修正前、后的 S-N 曲线对比如图 14 所示。基于修正后 S-N 曲线仿真计算得到的 1#样机的疲劳寿命云图如图 15 所示。由图 15 可知:修正 S-N 曲线后,冲片的疲劳寿命为 1.07 万次循环。

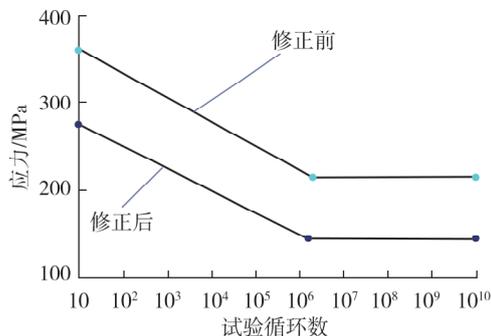


图 14 调整前、后 S-N 曲线对比

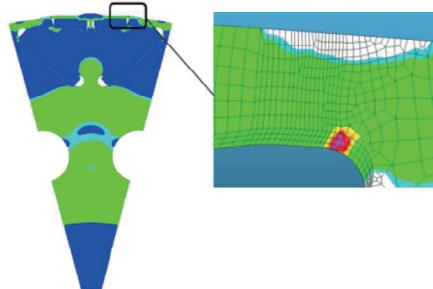


图 15 1#样机疲劳计算结果

通过试验测得的 1#循环样机的疲劳寿命为 1.05 万次循环。仿真与试验的相对误差为 1.90%,表明仿真与试验结果吻合性较好。

将 1#样机的仿真方法应用在 2#样机上,再次进行仿真与试验疲劳寿命的对比。2#样机仿真寿命与试验寿命分别为 1.71 万次循环、1.68 万次循环,相对误差为 1.79%,进一步表明该分析方法具有很高的可信度。

4.3 优化与验证

对冲片断裂处的结构进行优化,将中间隔磁桥厚度由 0.8 mm 增加到 1.0 mm,将断裂处圆角半径由 0.3 mm 增加到 0.6 mm,结构优化方案如图 16 所示。对冲片优化方案进行仿真验证,其疲劳寿命约为 218 万次循环,远大于 3 万次的要求,与原 2#样机的仿真疲劳寿命相比,安全系数提高 125 倍。将优化后冲片安装在电机上进行耐久试验验证,试验完成后拆检,电机转子没有损坏及开裂痕迹,如图 17 所示。

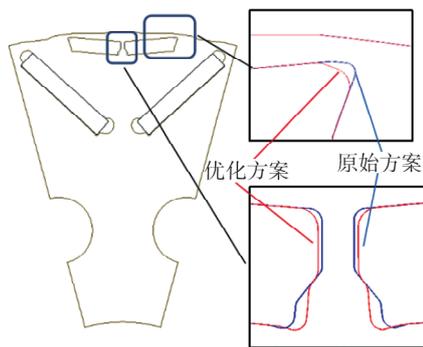


图 16 优化方案示意

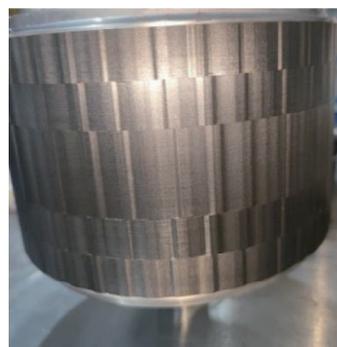


图 17 优化方案耐久试验结果

5 结论

为解决某转子冲片断裂故障,建立冲片有限元模型,对冲片应力与疲劳进行仿真,得到以下结论。

1)随着冲片厚度增大,应力下降,当厚度小于 1 mm 时,应力快速下降,但当厚度大于 1 mm 后,应力下降趋缓,降幅较小;各向同性和各向异性材料冲片断裂处的应力分别约为 384、387 MPa,差异很小,可以忽略;有胶、无胶时冲片断裂处的应力分别约为 382、392 MPa,相差约 10 MPa,胶料填充虽可小幅降低应力,但胶料的参数很难准确获取;沿着冲片径向向外的电磁力增大冲片应力,沿着冲片径向向内的电磁力减小冲片应力,电磁力对冲片应力的影响约为 8~11 MPa;磁钢与冲片接触不均匀性对应力的影响显著,随着不均匀性系数增大,应力大体呈线性增大趋势;转子在最高转速下的温度为 140~150 ℃,在分析

冲片应力时必须考虑温度的影响。

2) 提出基于试验数据修正材料 $S-N$ 曲线的方法,该方法使疲劳仿真结果与试验结果高度吻合,1#样机和2#样机仿真与试验疲劳寿命的相对误差分别为1.90%、1.79%。

3) 优化转子冲片结构,增大中间隔磁桥厚度和断裂处圆角半径。优化后冲片的仿真疲劳寿命为218万次循环,远高于3万次的要求,且通过了耐久试验验证,有效解决了冲片断裂问题。

参考文献:

- [1] 王云琦. 新能源汽车驱动电机轴承剥落故障对电机振动影响的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2024.
- [2] 王聿俊. 无人搬运车用低压高转矩密度永磁同步电机设计[D]. 南京:南京理工大学,2024.
- [3] 王贞仁. 永磁同步电机的结构原理与检修的教学设计[J]. 汽车维护与修理,2023(16):7-10.
- [4] 郭化超,邱玉峰. 新能源汽车驱动电机及控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2023.
- [5] 陈璞,晏才松,周立安,等. 1430 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.
- [6] 崔月儿,李淑慧,崔荣高. 车用永磁同步电机转子热力耦合疲劳仿真[J]. 机械设计与研究,2022,38(1):202-206.
- [7] 李嘉明. 永磁同步电主轴转子疲劳强度分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [8] 陈诗怡. 多失效模式下的电动汽车永磁同步电机可靠性分析[D]. 成都:电子科技大学,2022.
- [9] 杨新华,陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2018.
- [10] 刘辉,李大伟,石华山,等. 离心力作用下电机转子强度接触有限元分析[J]. 机械,2015,42(9):65-67.

Fatigue simulation method study on rotor punchings of a permanent magnet synchronous motor

YU Chunxiang, PENG Guomin, GUO Feng

Wuxi InfiMotion Propulsion Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China

Abstract: In order to solve the fatigue fracture fault in the rotor punchings of an electric drive unit (EDU) assembly, a finite element model of the punchings is established to simulate the fatigue fracture phenomenon of the rotor punchings. The influence of punching thickness, punching material anisotropy, adhesive material, electromagnetic force, uneven contact between magnetic steels and punchings, temperature and other factors on punching stress are analyzed. The $S-N$ curve of the material is refined based on stress test results. The rotor punching structure is optimized, the thickness of the intermediate magnetic bridge and the fillet radius at the fracture point are increased, and simulation and durability testing are conducted to verify the optimization scheme. The results show that the punching stress decreases continuously with the increase of punching thickness, and significantly increases with the increase of uneven contact between the magnetic steels and punchings. The influence of material anisotropy, adhesive, and electromagnetic force on the stress of the polarizer are relatively small, while temperature has a greater impact on the punching stress. After correcting the $S-N$ curve of the material, the fatigue life simulation results are highly consistent with the experimental results, verifying the accuracy of the model. The simulated fatigue life of the optimized solution is 2.18 million cycles, far exceeding the requirement of 30 000 cycles, and has been verified by durability tests. This method successfully solve the problem of punchings fracture and improved the accuracy of punching fatigue life prediction.

Keywords: EDU assembly; permanent magnet synchronous motor; punching; stress analysis; fatigue analysis

(责任编辑:臧发业)