

鼠笼转子端部扭振特性研究及其对结构可靠性影响

薛秀慧, 李 广, 许晓亮, 吕志成, 任晓辉*
(中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710016)

Research on Torsional Vibration Characteristics of Squirrel Cage Rotor End and Its Influence on Structural Reliability

XUE Xiuhui, LI Guang, XU Xiaoliang, LV Zhicheng, REN Xiaohui*
(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: In view of the impact of harmonic torque on traction motors driven by frequency converters, the mechanism of harmonic torque on the copper squirrel cage rotor structure is analyzed. A combination of experimental and simulation methods is used in order to identify the characteristics at the rotor end of the squirrel cage. Firstly, modal analysis is conducted to obtain the modal parameters of the squirrel cage rotor. Then, a finite element model of the squirrel cage rotor based on the modal tests is established, and its static strength and harmonic dynamic response under 12 times of frequency-induced electromagnetic excitation are simulated and analyzed. Finally, based on the guide bar vibration test platform, the torsional vibration characteristics of the squirrel cage rotor end are investigated and the load amplification effect is verified, which provides certain theoretical support for improving the structural reliability of the copper squirrel cage rotor end.

Key words: squirrel cage rotor; traction motor; finite element; modal analysis

摘 要: 针对变频器驱动下牵引电机受到谐波转矩的影响,分析了谐波转矩对铜条式鼠笼转子结构的作用机理。采用试验与仿真相结合的方法识别鼠笼转子端部特性。首先,通过模态分析,获取了鼠笼转子的模态参数;然后,建立了基于模态试验的转子等效有限元模型,分析了其在 12 倍频特征电磁激励下的静强度及谐响应。最后,基于导条振动测试平台,研究了鼠笼转子端部扭振特性,并对载荷放大效应进行了验证,为提升铜条式鼠笼转子端部结构的可靠性提供了一定的理论支撑。

基金项目: 中国中车基础研究项目(2022CTB150)
CRRC Basic Research Program (2022CTB150)

关键词: 鼠笼转子; 牵引电机; 有限元; 模态分析

0 引言

随着轨道交通车辆向高速、重载方向发展,对产品可靠性的要求也愈加严格。牵引电机作为关键设备之一,其振动特性不仅关乎自身的平衡运行,也是确保牵引驱动装置甚至列车持续可靠运营的关键,是轨道交通车辆发展的基础。列车牵引电机采用变频器供电,可在较宽的频率范围内运行。然而,供电电压和电流中含有谐波,产生的谐波转矩使电机结构承载幅值增大,导致运营工况恶劣,对电机寿命造成不利影响。此外,转子端部结构处于高电压、大电流的工作状态,受到电、热和机械力的共同作用以及不同运行状态条件的影响,使得转子端部结构振动问题突出。鼠笼转子结构最常见的故障为转子断条故障。转子断条故障不仅破坏了鼠笼转子结构的对称性,同时也破坏了电磁对称性,导致振动增大、温升增加,严重影响列车的运行安全。随着高速列车运行里程激增,牵引电机鼠笼转子结构磨损加剧且系统参数退化,因此识别牵引电机转子端部扭振特性,分析高次谐波转矩对端部结构的影响非常重要。这不仅有助于深入了解鼠笼转子端部故障的机理,获得谐波转矩载荷的作用机制,还能进一步提高轨道电机产品的运营可靠性,具有极高的工程实用价值。

已有文献针对牵引电机结构及供电特性进行了深入研究。文献[1]针对轨道牵引电机,开展

电机整机的模态试验,为建立转子端部有限元仿真模型提供支撑;文献[2-3]对交流鼠笼式牵引电机的典型故障进行了归类与分析;文献[4-7]分析了逆变器供电下牵引电机谐波转矩的产生机理与抑制技术;文献[8-9]对谐波转矩进行了理论推导与算例验证,明确了谐波转矩会造成电动机转速(主要是低速)振荡;文献[10]基于局部柔度理论及振动疲劳耦合效应,讨论了裂纹扩展下的结构振动行为与振动对疲劳裂纹扩展的影响;文献[11]利用梁型构件的横向弯曲振型固有属性,开展了构件弯曲共振实现方法的研究;文献[12]通过基于 Beam 梁单元的转子数值仿真与试验对比,验证了转子扭转振动中存在刚度渐软的立方非线性理论的正确性,并得到了避免系统发生共振的方案;文献[13]对航空领域涡轮机转子鼠笼结构件扭振的力学特性进行了分析;文献[14]基于 ANSYS 平台对薄壁件柔性夹持工装进行了仿真研究,获得了多因素影响下的静、动态特性及其变化规律,为夹持工装的设计提供了参考。

本文以异步牵引电机鼠笼转子结构为研究对象,首先开展模态测试,识别转子端部振动特征;其次基于 ANSYS 仿真平台,对扭转特征频率下的端部静强度及转子谐波转矩激励下的的谐响应进行了分析,获得导条端部频响曲线,得到载荷放大系数;然后通过制作标准试样,利用振动台扫频进行试验验证;最后对导条寿命进行预测,进一步得到共振对导条寿命的影响。通过分析牵引电机鼠笼转子端部扭转振动特性的影响因素,获得结构改善依据,提升设计可靠性。

1 鼠笼转子结构

1.1 结构特征

铜条鼠笼式转子结构如图 1(a)所示,由转子铁心、导条、端环和转轴组成。图 1(b)为某截断导条的端面剖视图,对其按数字定义位置点(1、3 为导条焊接端面内圈拐点,2、4 为外圈拐点)。转子铁心作为电机主磁路的一部分,由叠压的硅钢片构成。在转子铁心冲片外圆上开有均布槽,导条将均匀嵌入到叠装后的转子铁心外圆柱面上。转子导条的主要功能是切割定子磁场,从而产生感应电动势和电流。在磁场的作用下,受力使转子转动。

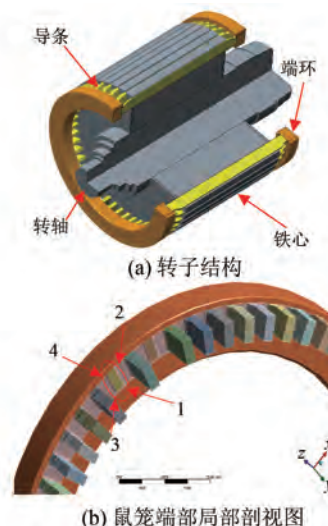


图 1 鼠笼式转子整体结构及端部局部剖视图

Fig. 1 The overall structure of the squirrel cage rotor and partial end cross-sectional view

转子导条从铁心两侧伸出,并与端环焊接在一起。通过悬伸出的导条相互连接,这种结构具有鼠笼式转子的特点。即,首先具有周期性的结构特点,因为相同的导条沿周向呈周期性排列;其次具有非连续性的结构特点,端环和铁心之间没有直接接触,而是通过导条传递扭矩载荷。

1.2 扭振特性

振动力学中,当构件为弹性体且受到外界变化的激振力矩作用时,则必然产生扭转振动^[15]。鼠笼转子是一个结构复杂的构件,导条端部伸出较长,呈显著弹性特性,转子高速运转,端部转动惯量大。鼠笼端部转动惯量与刚度经过一定的组合后,端部就会具有固有的扭转振动特性,同时牵引电机变频供电特性也使得转子产生周期性的激励扭矩。

共振是指机械系统所受激励的频率与系统某阶固有频率相接近时,系统振幅显著增大的现象。为分析共振载荷的影响,参考振动力学中结构响应评判条件,引入载荷放大因子 AF ,本文依据离心压缩机转子动力学定义^[16],通过计算放大因子来分析共振效果。

图 2 为结构响应曲线。其中, ω_{n1} 为一阶共振频率; ω_{n2} 为二阶共振频率; ω_a 、 ω_b 分别为距一阶共振频率 ω_{n1} 的 $\pm 10\%$ 界点; A_{Cr} 为一阶共振频率 ω_{n1} 的振动量值; A_1 、 A_2 分别为 ω_a 、 ω_b 频率点的振动量值。因此,载荷放大因子可表示为

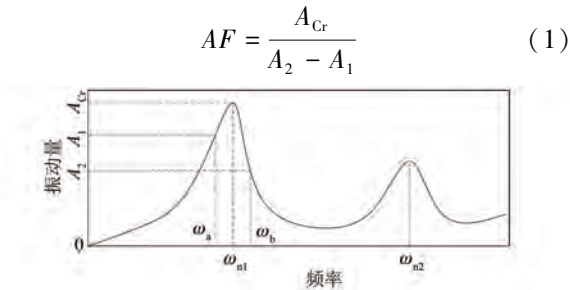


图 2 结构响应曲线
Fig. 2 Structural response curve

1.3 故障表现

通过对鼠笼转子故障的拆解研究发现转子断条故障主要集中在导条与端环焊接处,具体表现为外伸的导条在端环配合面上沿径向脱开。由于离心力的作用,断裂的导条会向上翘起,从而存在刚蹭定子绕组的风险。此外,由于导条断裂导致电流分布不均匀,使得断裂区域承受异常高温,进一步恶化了运行环境。通过对断面的分析,发现部分导条断口呈现出明显的金属材料疲劳断裂特征。这些研究结果提供了有关鼠笼转子故障的重要信息,有助于改进设计和提高转子的可靠性和稳定性。

2 鼠笼转子模态分析

根据模态分析的相关理论,使用 LMS 模态测试设备,并采用移动力锤固定传感器的锤击法对鼠笼转子进行模态特性测试。锤击的脉冲激励模态测试系统的基本结构如图 3 所示。通过弹性悬吊模拟自由边界,进行鼠笼转子的模态测试,并采用了多参考点锤击测试 (Multiple Reference Impact Testing, MRIT) 技术。通过移动力锤遍历所有测点进行测量,每个激励点上测量 6 次并取平均值,以提高信号的相关性并减小噪声干扰。转子弹性吊装模态测试过程如图 4 所示。

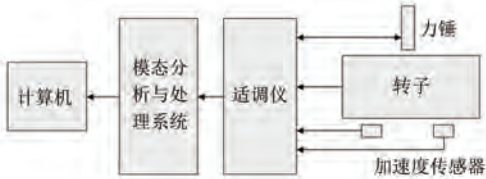


图 3 鼠笼转子模态试验测试系统
Fig. 3 Modal testing system for squirrel cage rotor

根据所有测点获得的频率响应函数

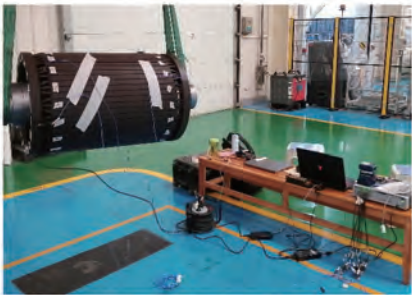


图 4 转子弹性吊装模态测试过程图
Fig. 4 Diagram of modal testing process for rotor elastic lifting

(Frequency Response Function, FRF) 数据,得到自由状态下的稳态图,如图 5 所示。根据稳态图确定系统的极点,并关注低阶模态特性,以识别主要模态参数。为了验证试验测试数据的有效性,进行了模态正交性检验,结果表明转子模态为正则模态,能够表现出转子尤其是端部的主要模态特性。

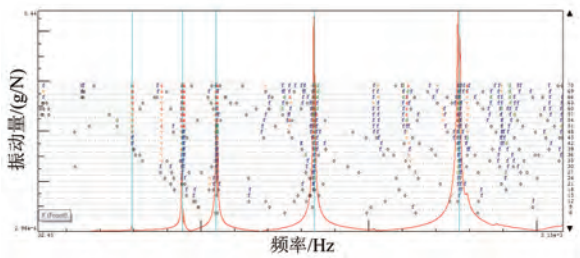


图 5 自由状态下的稳态图
Fig. 5 Stabilization diagram under free state

进一步通过测试分析得到转子多阶模态特性参数,具体振型描述如图 6 所示,其中鼠笼转子两端端部反向扭转振型特征模态为转子一阶模态,频率为 715.94 Hz。

3 有限元仿真分析

3.1 等效仿真模型

开展自由模态仿真,构建基于模态试验的鼠笼牵引电机转子有限元模型^[17]。除准确定义转子各部件材料属性外,还对影响仿真模型与实际转子结构匹配精度的相关项点进行了敏感性分析和迭代。特别是针对转子端部结构件联接和导条槽内接触状态的设置等关键因素,进行了修正。最终得到了一个修正模型,该模型包含了导条、端环及铁心等端部装配部件的接触特性。此修正模

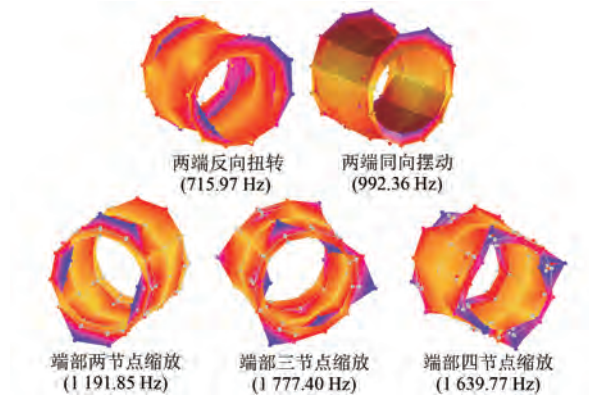


图6 鼠笼转子模态振型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of squirrel cage rotor mode shapes

型能够更加准确地描述鼠笼牵引电机转子的实际结构和性能,为后续的有限元分析和应用提供了更可靠的基础。

通过分析得到了牵引电机鼠笼转子的各阶振型及固有频率,仿真和试验结果对比如表1所示。

表1 鼠笼转子模态频率对比

Tab. 1 Squirrel cage rotor modal frequency comparison

模态类型	试验频率/Hz	仿真频率/Hz	误差/%
反向扭转	715.95	722.69	0.94
同向摆动	992.63	1 010.60	1.81
两节点缩放	1 191.85	1 242.50	4.25
三节点缩放	1 777.4	1 706.48	3.99
四节点缩放	2 639.77	2 720.54	3.06

由表1可知,修正模型的特征频率与试验结果之间的相对误差均小于5%,表明该仿真模型能较好地模拟转子实际的振动特性。转子振动特性主要表现在两端端部的振型上,其中一阶振型表现为转子端部两端反向扭转,频率值为722.69 Hz,如图7所示。阶数越低,模态的有效质量越大,且频率较低更容易受到外界激励。由于谐波转矩的激励方式与当前一阶振型振动方式一致,因此后续仅分析该阶模态频率特征的相关仿真。

3.2 静强度分析

结合列车运行数据,从脉宽调制(Pulse-Width Modulation, PWM)供电电压波形中截取60 Hz附近的特征点作为仿真输入,在电磁仿真中得到了12倍频下的谐波转矩数据。然后,根据该谐波转矩以及鼠笼转子导条循环特征,选择了单根导条进行循环对称边界下的静强度分析。谐波扭矩载

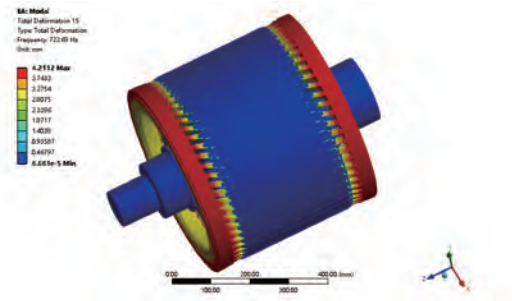


图7 鼠笼端部反向扭转振型

Fig. 7 Vibration mode of reverse torsion at the end of the squirrel cage rotor

荷下的鼠笼转子端部结构应力分布云图如图8所示。可见,结构的应力极值点位于导条焊接端面内圈拐角处,与前述断面裂纹起源位置一致。其中导条在焊接端面内侧圆角处应力为 $\sigma_{\text{Max}} = 4.6512 \text{ MPa}$,焊缝对应位置处应力为 $\sigma_{\text{Max}} = 6.7005 \text{ MPa}$ 。

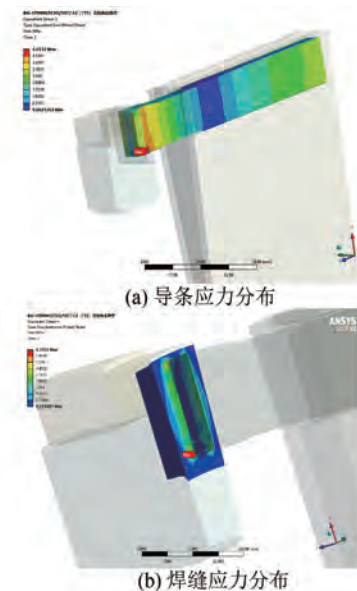


图8 谐波转矩载荷下鼠笼转子端部结构应力分布云图

Fig. 8 Stress distribution cloud chart of squirrel cage rotor end structure under harmonic torque load

3.3 谐响应分析

谐响应分析用于确定线性结构在承受随时间变化的简谐载荷时的稳态响应,其目的是计算结构在不同频率下的响应值,以预测结构的持续性动力特性。

定义转矩载荷为激励载荷,扫频范围为680 Hz~740 Hz,应用模态叠加法进行分析,阻尼比设置为模态测试得到的扭转模态阻尼比。选取

鼠笼转子的某根导条两端焊接端面节点,输出加速度响应图。根据图 1(b) 所示选取 1#~4#部位节点,另一端相应位置定义为节点 5#~8#。得到鼠笼转子两端监测点位置频响曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,节点在共振点处响应反向,表明鼠笼转子两端端部反向扭转的振动特性,同时内侧拐角部位 1#节点处响应值比其余节点部位大。分析 1#节点在共振点与非共振点处的响应值(按起始输入点 680 Hz,远离 722 Hz 约 10%)得到载荷放大因子 AF 为 11.17。

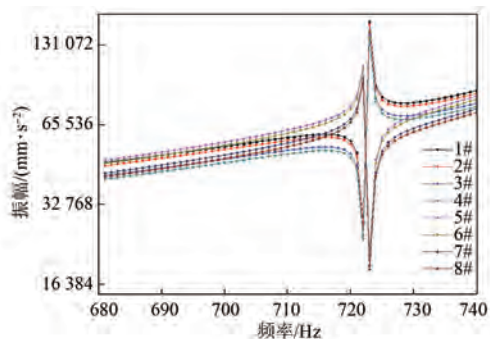


图 9 鼠笼转子端部节点加速度响应图

Fig. 9 Acceleration response graph of end nodes of the squirrel cage rotor

由于鼠笼转子具有固有扭振特性,运行过程中在承受 12 倍频谐波转矩激励作用时,导条端部将受到线性载荷放大影响。结合静强度与谐响应分析结果,该谐波转矩作用下,鼠笼转子端部导条最大应力为 $\sigma_{\text{Max}} = 51.954 \text{ MPa}$,焊缝最大应力为 $\sigma_{\text{Max}} = 74.845 \text{ MPa}$ 。

4 鼠笼转子端部载荷放大效应的验证

4.1 试验方案

依据振动理论^[18],任意时刻自由约束梁的弯曲振动可认为是在平面内的振动,其振动曲线可表示为平面曲线。结合鼠笼转子端部的结构特点,得到单根导条扭转轮廓变形示意图,如图 10 所示。

设计端部响应测试方案,采用局部模型制备与测试分析的方法来获取鼠笼转子端部整体扭振特性的数据,并通过振动台扫频试验进行验证。结合第三方振动台台位设计参数,设计试验设备的端部夹持工装横向刚度与鼠笼端部扭转刚度等效,最终获得振动台的设计方案如图 11 所示。

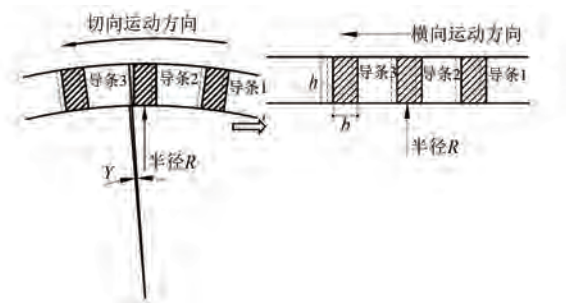


图 10 导条轮廓变形示意图

Fig. 10 Schematic diagram of conductor strip outline deformation

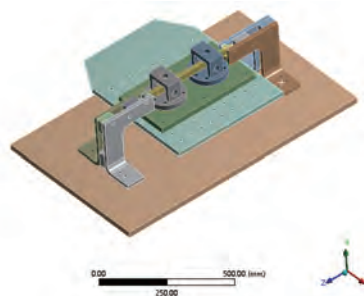


图 11 振动工装夹持设备示意图

Fig. 11 Schematic drawing of vibration workholding equipment

4.2 振动试验及结果

根据试验设计方案,截取一根标准带焊接端环结构的导条进行扫频振动试验。在导条端部内圈焊接区域贴应变片,以监测应力;同时,在导条两端布置加速度传感器和位移传感器,以识别振动响应和振动变形,试验装置如图 12 所示。

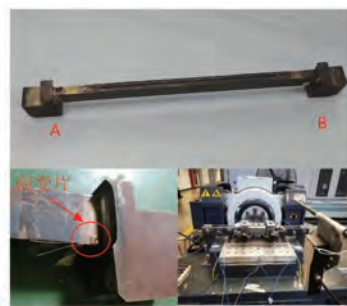


图 12 试验装置

Fig. 12 Test setup

相关试验参数如下:扫频区间为 200 Hz ~ 1 500 Hz;横向振动加速度为 0.5 g (0.5 g 载荷等效为 12 倍谐波转矩载荷, g 取 9.81 m/s^2);以 200 Hz/min 进行线性扫频。得到的导条试样频响曲线如图 13 所示。可知, A 端二阶频率为

700.2 Hz, B 端二阶频率为 692.0 Hz(工装夹持下,试样的一阶频率特征为两端点振型,故剔除)。

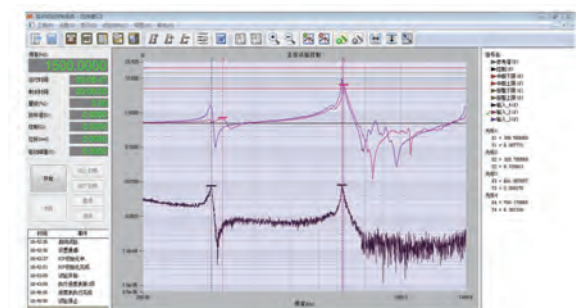


图 13 导条试样频响曲线图

Fig. 13 Frequency response curve of guide bar sample

对扫频试验结果进行分析, A 端测点响应值为 9.50 g, B 端测点响应值为 6.38 g, 根据式(1)所示的放大因子 AF 计算式得到 A 端测点的 AF 约为 19, B 端测点的 AF 约为 13。

导条端部各应变片测点的测试结果如图 14 所示。可知, 共振条件下应变测点应力值最大为 19.55 MPa。比较 6 个测点应变幅值后发现, 在共振区间时, 导条拐角部位的应力增幅较其余部位大。这些数据有助于理解结构的振动特性和共振效应。

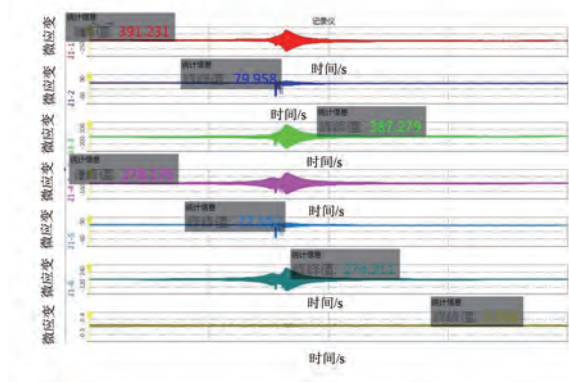


图 14 导条端部各测点应变记录图

Fig. 14 Strain recording plot of guide bar end measurement points

综上, 在等效 12 倍谐波转矩载荷横向激励下, 标准试样的端部响应和应变数据表明, 结构在承受外部激励载荷后, 端部会出现载荷放大现象。这一现象会导致导条端面与端环焊接区域的应力急剧增大。并且, 贴片检测部位的应力值与计算应力值基本一致。试验结果揭示了端部结构在特定激励下的动态响应和承载特性。

5 鼠笼转子端部结构疲劳分析

结构的疲劳强度决定其服役寿命, 作用在结构上的载荷是导致结构发生疲劳破坏的直接原因。研究载荷作用下结构的应力响应和疲劳损伤可以有效地了解结构的损伤情况并指导结构进行改进优化。

5.1 导条材料 S-N 曲线

依据标准[19-20]对导条开展疲劳试验以获取 S-N 曲线。导条材料为 Cu-HCP, 焊接过程中局部将承受 700 °C 高温, 其使用温度约 170 °C, 因此制备试样时通过电炉使其升温至 700 °C 后再降温至 170 °C 来模拟焊接过程。疲劳试验前、后对比如图 15 所示。疲劳试验的应力比 R 取 0.1, 通过一系列试验, 遴选符合条件的试样数据, 并对数据进行归纳, 形成 S-N 曲线和描述模型。



图 15 疲劳试验前、后对比图

Fig. 15 Comparison of before and after fatigue test

S-N 曲线通常表达为幂函数形式, 即:

$$S^m N = C \quad (2)$$

式中: m 和 C 为与材料、应力比和加载方式等有关的参数。

对式(2)取对数后得到:

$$\lg S = \lg C/m - (1/m) \lg N \quad (3)$$

令 $y = \lg S$, $x = \lg N$, 则回归方程可写为: $y = A + Bx$, 其中 $A = \lg C/m$, $B = -(1/m)$ 。

通过试验数据计算得到, 在应力比 $R = 0.1$ 、95% 存活率下, S-N 曲线方程为: $S^{22.07018} N = 1.60252 \times 10^{45}$ 。基于试验数据绘制的 S-N 曲线如图 16 所示。

5.2 电机运行特性与导条受力影响

电机运行过程中的典型特征曲线如图 17 所示。主要包含加速、平稳运行、谐波作用(可能的)和减速工况。

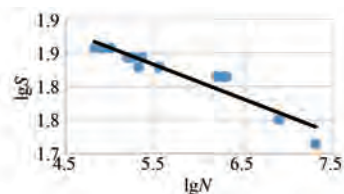


图 16 材料的 S-N 曲线

Fig. 16 S-N curve of the material

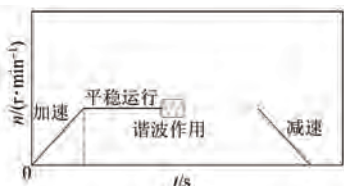


图 17 电机运行的典型特征曲线

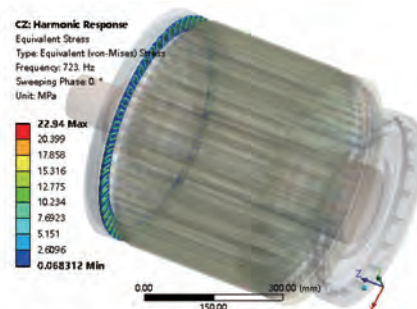
Fig. 17 Typical characteristic curve of motor operation

在以上四种典型工况下, 导条会发生应力变化, 这种复杂的应力变化过程, 导致导条材料发生疲劳。加(减)速工况下, 导条端部承载的应力与转子加(减)速度的大小密切相关, 同时由于转子端部转动惯量占比小, 此工况下产生的应力非常低, 可忽略不计; 恒速工况下, 转子端部产生的应力载荷主要由离心力引起, 其值恒定, 通常设计时按此条件核算强度并保持相当裕度; 谐波作用工况下, 应力的产生依赖于转子固有频率与电机供电的谐波特征, 若谐波频率与转子固有频率重合, 将引起转子结构振动, 在导条上产生附加交变应力, 该应力是导条疲劳破坏的来源之一。

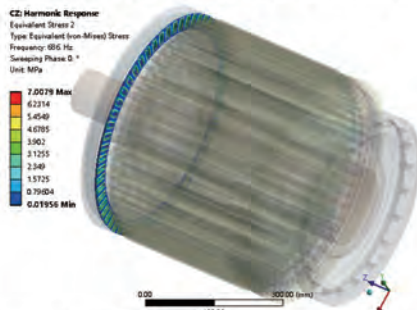
5.3 导条疲劳寿命预测

对结构进行谐响应分析, 并对初始存在谐波振动影响的 723 Hz 频率点与避开谐波振动影响的 686 Hz、760 Hz 频率点 ($\pm 5\%$ 界点外) 进行导条承载寿命计算, 转子端部不同频率点应力响应值如图 15 所示。结构高速运行时导条端部应力极值为 32 MPa, 该应力为导条承载的基础应力。同时, 存在某谐波转矩运行工况 (约占运行过程的 2%), 12 倍谐波频率为 723 Hz, 共振点处端部应力值为 22.94 MPa, 非共振点处端部应力值为 7.01 MPa 和 8.43 MPa。由于谐波响应为正弦曲线, 故各频率点下交变应力分别为 ± 22.94 MPa、 ± 7.01 MPa 以及 ± 8.43 MPa。

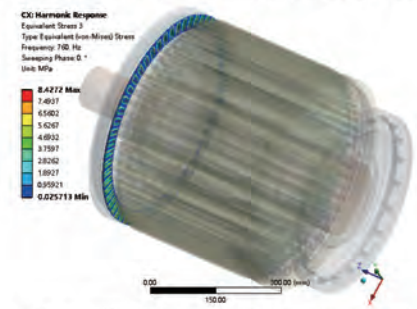
导条端部存在焊接圆角, 将形成应力集中, 材料的疲劳曲线是无应力集中条件下由试验得出的, 评估时需考虑疲劳缺口系数。



(a) 723 Hz 频率点转子端部应力响应值



(b) 686 Hz 频率点转子端部应力响应值 (-5% 界点外)



(c) 760 Hz 频率点转子端部应力响应值 ($+5\%$ 界点外)

图 18 转子端部不同频率点应力响应值

Fig. 18 Stress response values of rotor end at different frequency points

共振条件下对导条进行疲劳寿命预测, 基础应力为 32 MPa, 交变应力为 ± 22.94 MPa, 疲劳缺口系数取 1.9, 即采用 60.8 ± 43.59 MPa 作为导条应力评价的数据。代入本节中的 S-N 曲线方程, 所得循环数为 $9.98E8$, 合约运行公里数为 264 万公里^[21]。考虑到小子样条件下疲劳分析需有 4 倍的分散系数, 则可估计其寿命在 66 万公里~264 万公里之间。同样在非共振条件下对导条进行疲劳寿命预测, 所得循环数分别为 $2.44E20$ 、 $4.20E18$, 均可认为是无限寿命, 满足 30 年的运营要求。

6 结语

牵引电机鼠笼转子端部承受高次谐波转矩激

励,当端部扭转特征频率与激励频率重叠或处于共振区域时将导致导条与端环焊接区域产生过大的交变应力,产生疲劳累积性损伤,威胁牵引电机的安全运行。本文分析了12倍谐波转矩动力载荷对鼠笼转子结构的作用机制与影响,得到以下结论:

1) 鼠笼转子端部具有扭转振动特性,为其结构的主要模态特征;

2) 通过模态测试、谐响应仿真及试验,结果表明外部激励频率与端部扭转特征频率重叠或处于共振区域时,导条端部将受到载荷放大的影响;

3) 谐波转矩作用下导条及焊缝接触端面会形成高应力区,应力极值点位于内圈拐角处,与故障导条断面裂纹起始区域一致,为分析类似故障机理提供了思路;

4) 对导条进行疲劳寿命预测,对比了不同频率点处转子端部应力响应值与疲劳损伤情况,进一步论证了牵引电机设计时需开展基于鼠笼端部扭转振动特征识别。结合列车运行特征,以避免开定子供电12倍频点共振区域为目标,提升鼠笼转子端部结构设计的可靠性。

参考文献

- [1] 龙吟,任晓辉,张珂,等. 基于模态试验的轨道牵引电机整机有限元模型的建立[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1553-1559.
LONG Y, REN X H, ZHANG K, et al. Finite element modeling of rail traction motor based on modal experiments [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1553-1559.
- [2] 王鑫,李庐,邹晓璇,等. 交流鼠笼式牵引电动机两种典型故障分析与改进措施[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(1): 107-110.
WANG X, LI L, ZOU X X, et al. Analysis and improvement measures of two typical faults of AC squirrel cage traction motor [J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(1): 107-110.
- [3] 牛志钧,卫文改,王鑫. HX系列机车交流牵引电机典型故障分析与解决方案[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(1): 95-99.
NIU Z J, WEI W G, WANG X. Malfunction analysis and solution for AC traction motor of HX series locomotive [J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(1): 95-99.

- [4] 刘伽,张志锋,孙全增. 基于混合式脉宽调制的双三相电机谐波抑制技术[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 10-19.
LIU J, ZHANG Z F, SUN Q Z. Harmonic suppression technology of dual three-phase motor based on hybrid pulse width modulation [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(10): 10-19.
- [5] 王文勋. 动车组牵引电机转矩脉动研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
WANG W X. Research on torque ripple of traction motors in electric multiple units [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [6] LIANG X D, LUY Y. Harmonic analysis for induction motors [C]//2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Ottawa, 2006.
- [7] TANIGUCHI K, INOUE M, TAKEDA Y, et al. A PWM strategy for reducing torque-ripple in inverter-fed induction motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(1): 71-77.
- [8] 李伟,韩力. 逆变器供电的感应电动机谐波转矩分析与计算[J]. 微特电机, 2005, 4: 7-9.
LI W, HAN L. Analysis and calculation of harmonic torques for induction motor fed inverter[J]. Small & Special Electrical Machines, 2005, 4: 7-9.
- [9] 李东亮,缪仲翠,王志浩,等. 基于模型预测的多电机弱磁同步控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 7-12.
LI D L, MIAO Z C, WANG Z H, et al. Synchronous flux weakening control of multi-motor system based on model prediction [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(11): 7-12.
- [10] 刘文光. 结构共振疲劳试验及裂纹构件的振动疲劳耦合分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
LIU W G. Fatigue testing of the resonating structure and coupling analysis of vibration fatigue for cracked components [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [11] 刘学飞. 梁型构件的弯曲共振实现方法及应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
LIU X F. Research on method and application of bending resonance for beam-type components [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [12] 刘阳,涂晓彤,张希,等. 转子非线性扭转振动成

- 因研究[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(6): 1262-1266+1287.
- LIU Y, TU X T, ZHANG X, et al. Nonlinear torsional vibration research of a rotor system [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6): 1262-1266+1287.
- [13] 谢晨醒. 鼠笼结构件扭振动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- XIE C X. The research on the torsional vibration dynamics of the squirrel cage structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [14] 孙依禺. 薄壁件柔性夹持工装的仿真技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
- SUN Y Y. Simulation research on flexible assembling tooling for thin-wall components [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012.
- [15] 刘开. 低速柴油机轴系扭转振动分析及润滑研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- LIU K. Low-speed diesel analysis on torsional vibration of crankshaft and lubrication condition of its main bearings [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013.
- [16] American Petroleum Institute. API TR 684-1-2019: API standard paragraphs rotordynamic tutorial; lateral critical speeds, unbalance response, stability, train torsionals, and rotor balancing (FIRST EDITION) [S]. Washington: API Publishing Services Publisher, 2019.
- [17] 任晓辉, 杜小渊. 轨道牵引电机铁心材料参数识别[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1298-1306.
- REN X H, DU X Y. Material parameter identification of traction motor core [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1298-1306.
- [18] 李欣业, 张明路. 机械振动[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- LI X Y, ZHANG M L. Mechanical Vibrations [M]. 4th Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24176-2009: 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 24176-2009: Metallic materials-fatigue testing-statistical plans and analysis methods [S]. Beijing: Standard Press of China, 2009.
- [20] ASTM Committee E08. ASTM E466-21: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21563-2018: 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 21563-2018: Railway application-rolling stock equipment-shock and vibration tests [S]. Beijing: Standard Press of China, 2018.

收稿日期:2023-10-03

收到修改稿日期:2023-11-09

作者简介:

薛秀慧(1982-),女,学士,教授级高工,研究方向为轨道交通牵引电机结构设计与分析, xuexiuhui_2006@163.com;

* 通信作者:任晓辉(1984-),男,学士,高级工程师,研究方向为轨道交通牵引电机结构仿真, renxiaohui007@163.com。

Research on Torsional Vibration Characteristics of Squirrel Cage Rotor End and Its Influence on Structural Reliability

XUE Xiuhui, LI Guang, XU Xiaoliang, LV Zhicheng, REN Xiaohui*
(CRRC Yongji Electirc Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Key words: squirrel cage rotor; traction motor; finite element; modal analysis

The traction motor is powered by a frequency converter, allowing it to operate over a wide range of frequency. However, the power supply voltage and current contain harmonics, resulting in increased torque caused by harmonic components that contribute to an increase in the structural loading capacity of the motor, ultimately adversely affecting its lifespan. In particular, the most common malfunction of squirrel cage rotor structure is the rotor bar breakage fault, which not only destroys the symmetry of the squirrel cage rotor structure, but also destroys the electromagnetic symmetry, resulting in to increased vibration and temperature rise, which seriously affects the safety of train operations.

Firstly, this paper investigates the asynchronous traction motor squirrel cage rotor structure by analyzing the structural features of the copper bar squirrel cage rotor and previous failure manifestations. Additionally, considering the variable frequency supply characteristics of the traction motor, it is found that the end structures with inherent torsional characteristics are subjected to potential torsional vibration excitations. The overall structure of the squirrel cage rotor is shown in Fig.1.

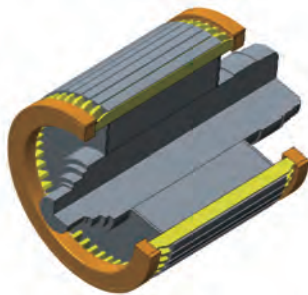


Fig. 1 The overall structure of the squirrel cage rotor

Secondly, using the modal analysis theory, the modal characteristics of the squirrel cage rotor were tested by applying the LMS modal testing equipment, which resulted in obtaining the vibration characteristics of the structural end.

Thirdly, static strength and harmonic response simulations are carried out based on the finite element correction model of the squirrel cage rotor modal test. The acceleration response curve of the welding end face of the bar is obtained, which led to the determination of the load amplification factor, as shown in Fig.2. The maximum stresses at the end of the bar and at the weld are determined under the action of harmonic torque.

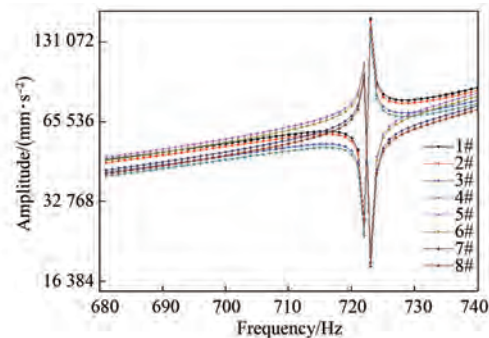


Fig. 2 Acceleration response graph of end nodes of the squirrel cage rotor

Finally, through the standard model preparation and testing analysis, the end load amplification effect is verified. The test results are relatively consistent with the simulation results, further confirming the influence of torsional vibration characteristics at the rotor end of squirrel cage induction motors and obtaining structural improvement basis.