

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2023.03.042

某轴悬式牵引电机疲劳强度分析及优化

王旭灿¹,王剑¹,王子明²

(1. 大连交通大学 机车车辆工程学院,辽宁 大连 116028;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111)

摘要:为验证某型轴悬式牵引电机强度是否满足设计要求,通过有限元前处理软件 HyperMesh 对其进行有限元建模,依据《TB/T 3548—2019 机车车辆强度设计及试验鉴定规范总则》要求,对电机进行加载并确定计算工况;通过 ANSYS 软件计算分析该型电机的静强度,并依据 BS 7608 标准对其关键位置焊缝进行疲劳损伤评估,得出该型牵引电机结构强度满足设计要求的结论。针对疲劳损伤大的焊缝进行优化处理,为之后电机结构优化和改进设计提供理论依据。

关键词:牵引电机;静强度;疲劳强度;焊缝优化;BS 标准

中图分类号:U262.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0176-04

Analysis and Optimization of Fatigue Strength of an Axle-mounted Traction Motor

WANG Xucan¹, WANG Jian¹, WANG Ziming²

(1. School of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: In order to verify whether the strength of a certain type of axle-mounted traction motor meets the design requirements, finite element modeling is carried out through the finite element pre-processing software HyperMesh. According to the requirements of "TB/T 3548—2019 General Rules for Strength Design and Test Appraisal of Locomotives and Rolling Stocks", the motor is loaded and its calculation conditions are determined. The static strength of the motor is calculated and analyzed by ANSYS software, and in the light of BS 7608 standard, the fatigue damage of its key location welds is evaluated with the conclusion that the structural strength of the traction motor meets the design requirements. The weld seam with large fatigue damage is optimized, which provides a theoretical basis for the subsequent optimization and improvement of the motor structure.

Keywords: traction motor; static strength; fatigue strength; weld optimization; BS standard

0 引言

随着轨道车辆的不断提速,机车构件的焊缝疲劳寿命不断影响着列车的运行安全^[1]。牵引电机作为轨道车辆转向架上的重要部件,本身质量大,加上工作环境恶劣,使得电机上的焊缝容易产生疲劳裂纹,甚至发生断裂的现象,造成不可逆转的后果。所以,对牵引电机进行抗疲劳性能分析是十分必要的。在研发过程中计算机辅助工程(CAE)软件的大量使用,可以在设计阶段对模型进行初步分析,有效地减少研发周期,降低成本,提高产品的各项性能^[2]。李朋等^[3]运用有限元仿真分析结果验证了重载货车车钩模型的可靠性及强度关系的准确性。谢素明等^[4]利用有限元的分析结果评估碳钢客车的疲劳寿命,并给出BS标准焊缝打磨之后的疲劳寿命增加这一结果。许喆等^[5]运用有限元软件分析计算结果对地铁车辆车体刚度、静强度、模态及疲劳强度进行校核,得出车体强度满足设计要求。黄晓青等^[6]用有限元方法计算评估节点的应

力变化范围,按照BS 7608中规定的方法计算评估点的累计损伤,证明评估节点的耐久性满足设计要求。

本文以某型机车的轴悬式牵引电机为研究对象,根据设计方提供的几何模型,基于有限元前处理软件 HyperMesh 建立该电机的有限元模型,根据《TB/T 3548—2019 机车车辆强度设计及试验鉴定规范总则》标准确定电机的运行计算工况,通过 ANSYS 软件进行有限元分析,完成静强度校核,最终依据英国 BS 7608 标准完成对电机的疲劳强度校核。

1 电机结构简介

该型牵引电机主要包括转子、定子铁心、传动端端盖、过渡盘、传动端压圈、上通风道板、下通风道板、小吊挂、大吊挂、吊耳、弧板、非传动端端盖、非传动端压圈等结构。其中,传动端端盖和非传动端端盖通过螺栓连接在主体上,而小吊挂和大吊挂主要靠焊缝与主体相互连接。电机主要由 Q235 钢、圆钢 20 以及 ZG230-450 钢等材料焊接

基金项目:大连市科技创新基金计划项目(2019J11CY017)

第一作者简介:王旭灿(1995—),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为车辆结构分析与优化设计方法。

而成。电机装配组成如图 1 所示。

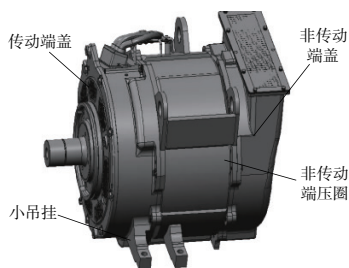


图 1 牵引电机几何结构模型

2 电机结构有限元分析

2.1 有限元计算模型的建立

将电机几何模型导入 HyperMesh 软件进行离散化处理,本文选用 3D 单元离散模型,单元尺寸为 20 mm,其中电机主体和焊缝主要用六面体和四面体网格来划分。因为焊缝位置是本次模型考察的重点,所以对焊缝位置处的网格进行细化处理,转子采用梁单元和质量点来模拟,螺栓使用梁单元和 CE 单元来模拟。该有限元模型由 2 947 994 个单元、1 380 165 个节点组成。离散后的电机有限元模型如图 2 所示。

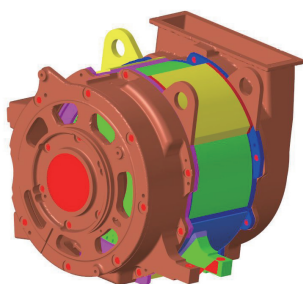


图 2 牵引电机有限元网格模型

2.2 边界条件

牵引电机在工作状态下除了转子质量、定子质量、线圈质量等自身质量外,还受到额定的转矩和单边磁拉力,这些都需要在有限元模型中模拟出来,除了施加荷载外,由于电机主要靠大吊挂和小吊挂悬挂在转向架上,所以电机的约束主要施加在大、小吊挂处,约束垂向、纵向、横向 3 个方向的线位移。

2.3 计算工况

根据《TB/T 3548—2019 机车车辆强度设计及试验鉴定规范总则》中规定的在超常荷载工况下,对牵引电机和齿轮箱连接装置惯性荷载对应的加速度按照以下原则选取:垂向加速度为 20g,横向加速度为 10g,纵向加速度为 5g。通过查阅相关资料可以得知,机车在运行过程中,受到的荷载是静荷载和动荷载的线性叠加,所以在计算分析

时要选取其极限状态,即将静荷载和动荷载进行组合,组合出电机运行过程中可能出现的最大荷载工况。所以,本文在电机静强度的校核分析中,选取了 4 个工况进行计算,如表 1 所示。其中静荷载由电机的额定转矩和单边磁向力组成,按照实际工作环境,电机的额定转矩为 8 806 N·m,单边磁向力为 5 517.8 N。

表 1 静强度工况列表

工况序号	工况描述
1	静荷载+垂向加速度 20g
2	静荷载+横向加速度 10g
3	静荷载+纵向加速度 5g
4	静荷载+垂向加速度 20g+横向加速度 10g+纵向加速度 5g

疲劳工况同样依据《TB/T 3548—2019 机车车辆强度设计及试验鉴定规范总则》规定的在运营工况下,牵引电机惯性荷载对应的加速度按照以下原则加载:轴悬式牵引电机垂向加速度为±6.0g,横向加速度为±5.0g,纵向加速度为±2.5g。

3 强度分析及评估

3.1 静强度计算与评估

首先对电机结构进行静强度分析,本文牵引电机主要材料是钢材,静强度的计算采用的是第四强度理论。即 Von Mises 等效应力,计算公式如下:

$$\sigma_{e4} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1)$$

式中: σ_{e4} 为等效应力; σ_i 为三个方向的主应力。

对结构进行静强度评估,安全系数 S 计算如式(2)所示。

$$S = \frac{R_L}{R_d} \quad (2)$$

式中: R_L 为材料许用应力; R_d 为计算应力。

根据 EN 12663-1 标准规定安全系数 S 要大于 1。

根据工况要求对电机进行静强度计算评估,得到各个工况下电机最大应力及其所在位置如表 2 所示。

表 2 静强度工况计算结果

工况	最大应力位置	材料	许用应力/MPa	计算值/MPa	安全系数
1	小吊挂	Q235	235	174.04	1.35
2	大吊挂(上)	圆钢 20	245	93.25	2.63
3	非传动端盖	ZG230-450	230	38.63	5.95
4	小吊挂	Q235	235	205.81	1.12

电机结构的材料中最小的屈服极限是 230 MPa,从表 2 列出的数据可以看出,不同工况下电机的最大等效应力均小于材料的屈服极限,安全系数也大于 1,满足电机

的静强度要求。通过计算结果也可以看出,小吊挂处的安全系数较小,说明该结构在各工况下因变形产生的应力较大,所以在之后的疲劳分析过程中需要注意这个部位的疲劳损伤,为以后的结构优化提供理论依据。

3.2 疲劳强度计算与评估

依据《BS7608—2015 钢结构的疲劳设计和评定》标准,在常幅载荷作用下,对于每一等级焊接接头,损伤比计算公式为:

$$\frac{n}{N} = \frac{n}{10^7} \left(\frac{S_r}{S_0} \right)^m, \quad S_r \geq S_0 \quad (3)$$

$$\frac{n}{N} = \frac{n}{10^7} \left(\frac{S_r}{S_0} \right)^{m+2}, \quad S_r \leq S_0$$

式中: S_r 为评估点的应力范围; S_0 容许应力范围; m 为S-N曲线的斜率。

根据之前静强度的计算结果和该牵引电机实际运行的情况等因素综合考虑得知,焊缝是结构中最容易产生疲劳问题的位置,所以本文重点选取该电机最有可能发生疲劳破坏的焊缝作为本次疲劳分析的评估点,包括上、下大吊挂处的焊接焊缝以及小吊挂处焊接焊缝进行焊缝疲劳强度评估,如图3所示。

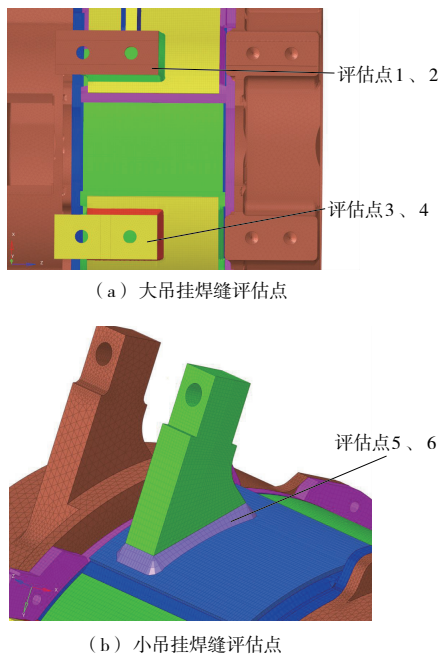


图3 焊缝评估点

通过上述疲劳工况要求对电机进行加载,得到焊缝评估位置的垂向、横向和纵向冲击工况下的第一主应力后,依据BS标准选择焊接接头。由于电机大、小吊挂位置的焊接接头型式都属于分支型焊接接头,其接头的几何型式对应于BS标准中的F等级,相关的参数从标准中可得,F级焊接接头容许应力范围 S_0 为40MPa,曲线斜率 m 为3。将上述参数代入式(3),计算得到各个冲击工况下不同位置焊缝的疲劳损伤。并依据Miner累积损伤原理对大、小吊挂焊缝处的疲劳损伤进行累加。计算结果如表3所示。

表3 各评估点累计损伤

评估点	垂向损伤	横向损伤	纵向损伤	累计损伤
1	2.10×10^{-3}	4.51×10^{-2}	4.04×10^{-6}	4.72×10^{-2}
2	6.29×10^{-1}	4.31×10^{-3}	1.12×10^{-4}	6.33×10^{-1}
3	5.92×10^{-3}	2.89×10^{-1}	4.24×10^{-7}	2.95×10^{-1}
4	4.68×10^{-7}	1.79×10^{-6}	3.12×10^{-4}	3.14×10^{-4}
5	1.57×10^{-5}	7.54×10^{-1}	6.85×10^{-8}	7.54×10^{-1}
6	1.92×10^{-8}	2.45×10^{-2}	1.49×10^{-10}	2.45×10^{-2}

从表3计算结果中可以得到在200万次循环下大、小吊挂焊缝处的累积疲劳损伤均小于1,满足疲劳强度要求。其中垂向冲击工况下,大吊挂(上)处的焊缝疲劳损伤较大,疲劳损伤达到了0.629;横向冲击工况下,大吊挂(下)和小吊挂处的焊缝疲劳损伤较大,小吊挂处损伤最大,达到了0.75,比较危险;纵向冲击工况下,大、小吊挂焊缝处的疲劳损伤都较小,较为安全。在今后的优化过程中要注意小吊挂的焊缝位置,最大累积损伤过大,可能主要是应力集中导致的,可以进一步改进结构形式或者通过对焊缝部位进行打磨处理,来减少应力集中,进而降低焊缝部位的疲劳损伤,提高电机的使用寿命。

4 焊缝疲劳寿命优化

从前文的计算结果可以看出:电机大、小吊挂处的焊缝疲劳强度均满足要求(累积疲劳损伤小于1),但是考虑到电机实际焊接过程中无法避免的各种问题,所以需要考虑安全余量。因小吊挂处的累积疲劳损伤过大,可能会产生疲劳危险,所以要针对小吊挂处的焊缝进行结构优化,来减少焊缝疲劳损伤,提高焊缝的疲劳寿命。

本文从以下3个方案来提高焊缝的疲劳寿命:方案一,通过增大小吊挂的板厚,增大构件焊接接触面积,降低焊缝处的应力集中;方案二,通过改变焊接坡口角度,比较不同的焊接坡口角度(45° 、 50° 、 55°)的焊缝疲劳寿命来选取较优的焊接坡口角度;方案三,在原方案基础上进行焊缝打磨,根据BS标准中提供的焊趾打磨后S-N曲线来看,在承受1000万次循环载荷时疲劳强度等级为F级(40MPa),焊趾打磨处理后,使得许用应力达到了60MPa,可以有效地提高焊缝的疲劳寿命。

根据上述方案进行小吊挂处的焊缝优化处理及有限元计算,评估点5的有限元计算结果如图4所示。

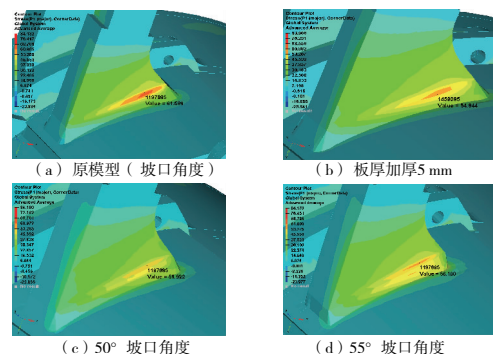


图4 不同优化方案焊缝处应力

按照之前计算方式对评估点进行疲劳寿命计算,得到疲劳寿命对比(图5)。

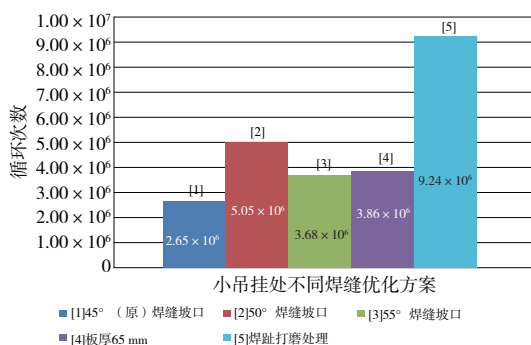


图5 不同优化方案焊缝寿命对比图

通过图5可以发现,增大板厚可以使焊缝处的疲劳寿命增加,板厚60 mm时焊缝5的疲劳寿命为 2.65×10^6 次循环;而增大板厚后,焊缝5的疲劳寿命增大到 3.86×10^6 次循环;效果较为明显,但板厚增大5 mm对于电机减重有较大影响。而优化焊缝坡口角度方案可以看出随着焊缝坡口角度的增大,小吊挂处的焊缝疲劳寿命有较大的提高,从数据可以看出随着焊接坡口角度的增大,焊接根部熔深相应增大,可以有效减少应力集中,降低焊接缺陷,但坡口角度过大,反而也会使焊接缺陷增大,且坡口角度过大,实际焊接过程中,由于根部熔深过大,需要对焊接位置进行扣槽清根处理,会增大工作量,也会造成焊接材料的浪费,增大焊接成本。所以达到较好焊缝质量要求的恰到好处的坡口角度为 $50^\circ \sim 55^\circ$ 。而方案三中进行焊缝焊趾打磨效果最为明显,焊缝疲劳寿命达到了 9.24×10^6 ,是原方案

的3倍寿命,但进行焊缝打磨同样会增大工作量,增大焊接成本,且打磨焊缝对加工工艺要求较高,不同的打磨效果对焊缝寿命影响较大。

5 结语

本文通过对该型牵引电机的静强度、疲劳强度的仿真计算评估,得出该型牵引电机结构强度满足标准的要求,对疲劳损伤大的焊缝提出了不同的优化处理方式,几种优化方式都有效提高了电机小吊挂处焊缝的疲劳寿命,可以根据实际需求选择不同的焊缝优化处理方法,进而提高电机的使用寿命。

参考文献:

- [1] 王腾飞,肖维雄,肖茂. 基于BS 7608标准及利用结构对称性对转向架构架疲劳试验的强度评估[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(5): 43-46, 116.
- [2] 郭珍江,刘厚林,刘丰芹. 基于有限元法的动车组行李架仿真分析与结构优化[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(3): 47-51.
- [3] 李朋,朱涛,王超,等. 重载货车车钩强度非线性有限元仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 90-94.
- [4] 谢素明,苑忠华,张相宁. 基于英国标准的碳钢客车车体结构疲劳寿命评估[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(2): 29-32.
- [5] 许喆,李永华,盛自强,等. 地铁车车体结构性能仿真分析[J]. 安阳工学院学报, 2021, 20(4): 31-34, 51.
- [6] 黄晓青,吴才香,刘余龙,等. 基于BS 7608标准转向架构架疲劳强度评估[J]. 装备制造技术, 2021(3): 113-115.

收稿日期: 2022-01-05

(上接第151页)

参考文献:

- [1] 许茗宸. 应用于IGBT冷却的相变换热实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017, 2-5.
- [2] 林灵娇,连文磊,牛文敬. 机电作动器产热与传热特性实验研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(3): 33-36.
- [3] 胡翔宇,王尧尧,周阳,等. 一种运载火箭用大功率电动伺服驱动器的散热设计[J]. 飞控与探测, 2019, 2(2): 71-75.
- [4] 李超,陈庆浩,王珊. 大功率伺服控制驱动器热管温控仿真设计[J]. 电子技术与软件工程, 2019(23): 205-206.
- [5] 于荣,张秀秀. 变频器中的IGBT模块损耗计算及散热设计[J]. 科学技术创新, 2021(35): 51-53.
- [6] 董莉莉,丁永根,李星明. 车用电机控制器散热结构及热仿真分析[J]. 微特电机, 2021, 49(11): 30-33, 37.
- [7] MOROZUMI A, COHARA H, MOMOSE F, et al. Next-generation IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation [C]//2014

International Power Electronics Conference (IPEC - Hiroshima 2014 - ECCE ASIA). Hiroshima, Japan; IEEE, 671-676.

- [8] WANG Y G, DAI X P, LIU G Y, et al. Integrated liquid cooling automotive IGBT module for high temperatures coolant application[C]// Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany: VDE, 1-7.
- [9] 张新鹏,张广泰,张辉亮,等. 螺旋水道水冷IGBT散热器数值模拟及试验研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(2): 71-73.
- [10] 宋郭蒙,王雄,王幸智,等. 基于高效扰流技术的IGBT双面冷却散热器性能优化研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 22-27.
- [11] 周慧琳,邱燕. 矩形蓄热单元内石蜡的相变换热特性[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(4): 99-107.

收稿日期: 2021-12-15