

客车用轮边电机的轻量化设计研究

李 红^{1,2,3}, 朱克非^{1,2,3}, 丁永根^{1,2,3}

(1. 上海汽车电驱动有限公司, 上海 201806;

2. 上海电驱动股份有限公司, 上海 201806;

3. 上海汽车电驱动工程技术研究中心, 上海 201806)

摘 要: 针对客车用某型号永磁同步轮边电机的轻量化设计开展了分析。提出了电机轻量化的设计方案和原则, 对电机的转子端板、转子冲片、机壳和后端盖进行轻量化设计。利用有限元分析软件对轻量化后的电机转子进行模态分析, 并分析了轮边电机的随机振动。有限元分析结果满足电机的设计要求, 可以确保轮边电机使用的可靠性。对轮边电机轻量化设计的探讨为进一步减轻电机质量提供了思路。

关键词: 轮边电机; 永磁同步电机; 轻量化

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)05-0113-05

doi: 10.12177/emca.2020.240

Research on Lightweight Design of Wheel-Side Motor for Bus

LI Hong^{1,2,3}, ZHU Kefei^{1,2,3}, DING Yonggen^{1,2,3}

(1. Shanghai Automotive Electric Drive Co., Ltd., Shanghai 201806, China;

2. Shanghai Electrical Power Drive Co., Ltd., Shanghai 201806, China;

3. Shanghai Driving Engineering Technology Research Center, Shanghai 201806, China)

Abstract: The lightweight design of a certain type of permanent magnet synchronous wheel-side motor for bus is analyzed. The scheme and principle of the lightweight design of the motor are put forward, and the lightweight design of rotor end plate, rotor punching, casing and back-end cover of the motor is carried out. The finite element analysis software is used for the modal analysis of the lightweight motor rotor, and the random vibration of the wheel-side motor is analyzed by finite element method. The results meet the design requirements of the motor and ensure the reliability of the wheel-side motor. The lightweight design of the wheel-side motor provides an idea for further reducing the weight of the motor.

Key words: wheel-side motor; permanent magnet synchronous motor (PMSM); lightweight

0 引 言

在节能环保、治理雾霾成为社会热点话题并备受公众关注的背景下, 推广以电动汽车为主的新能源汽车成为交通领域实现节能减排的有效途径之一^[1]。随着汽车工业的不断发展、全球汽车保有量的不断攀升, 汽车对世界经济和能源环境的深层次影响也逐渐显现^[2]。面对全球变暖、空气污染严重、酸雨、资源和能源短缺问题^[3], 各国

政府也在制定更严格的排放标准, 引导新能源汽车的发展。

近年来, 中国各大主机厂和造车新势力在新能源汽车领域加大了投资和研发力度, 一批批新能源汽车不断推向市场。纯电动汽车发展不仅受制于电机、电池等技术, 消费者对纯电动汽车续航里程的普遍焦虑更成为阻碍电动车普及和推广的首要因素。续航里程不仅与电池包的容量和能量密度有关, 很大程度上也取决于整车的质量。因

收稿日期: 2020-12-28; 收到修改稿日期: 2021-03-21

作者简介: 李 红(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电机振动噪声。

此减轻纯电动车型的质量、提高续航里程一直是主机厂不懈追求的目标^[4-5]。

汽车轻量化后可以提高加速性,对噪声和振动也均有改善。电机作为整车整备质量占比较大的驱动单元,对其进行轻量化设计,可以对整车的减重做出重要贡献^[6]。轮边电机是一种新能源汽车驱动电机。在大型公交车上推广应用^[7-8]轮边电机,可以充分发挥其控制精度高、效率高、传动系统简单、成本低等一系列优点,为大型电动公交车提供一种新的动力搭载方式。本文针对纯电动大型公交车应用的轮边电机开展轻量化设计研究,对轮边电机的各部分结构进行轻量化设计,降低零部件质量并提高电机功率密度。

1 轮边电机轻量化方案分析

轮边电机轻量化的原则是在保证产品性能和强度安全的前提下,尽量减轻电机质量和降低电机振动噪声。

目前驱动电机的轻量化方法主要有3种,分别为工艺轻量化、结构轻量化和材料轻量化。本文将对轮边电机的机壳、前端盖、后端盖和转子等重要部件分别进行不同轻量化设计。本文研究的轮边电机的主要性能指标,如表1所示。

表1 轮边电机主要性能指标

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定直流电压/V	350	防护等级	IP67
额定功率/kW	85	峰值功率/kW	110
额定扭矩/(N·m)	250	峰值扭矩/(N·m)	420
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 247	峰值转速/(r·min ⁻¹)	7 500

轮边电机的基本结构如图1所示。电机主要由转子、定子、前轴承、后轴承、后端盖和接线盒端盖组成。本文主要对转子中的轴(20CrMnTi, 1.89 kg)、转子端板1(ADC12, 0.88 kg)、转子端板2(ADC12, 0.65 kg)、转子冲片(硅钢片, 24.2 kg)、定子中的机壳(A356-T6, 16.38 kg)以及后端盖(ADC12, 4.13 kg)进行轻量化设计。

1.1 工艺轻量化设计

将轮边电机前端盖和机壳合并为一个部件,这样既减少了一道装配工序,又减少了一道密封工序,使产品能更好地满足IP67防护要求。机壳模型如图2所示。电机机壳的轻量化设计方法主

要有:

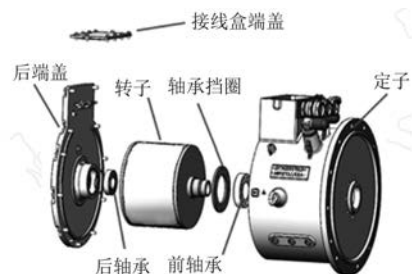


图1 轮边电机的基本组成

(1) 优化加强筋的数量和样式,将加强筋从机壳内部移到机壳外部,从而减小轴向尺寸,达到轻量化目的;

(2) 在兼顾散热的前提下,对机壳厚度进行优化,减小外壳厚度;

(3) 在满足装配要求的前提下,减小配电盒的余量空间;

(4) 沙孔与进、出水口合并,利用一个凸台完成多种功能。

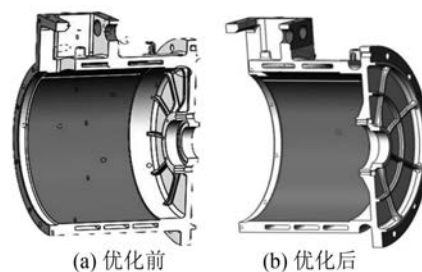


图2 机壳模型

1.2 结构轻量化设计

后端盖的轻量化利用HyperWorks有限元软件中的Optistruct模块进行优化设计,在保证电机整体性能的前提下,利用拓扑优化中的密度法来确定加强筋的数量和位置,结合随机振动,去掉承受最小载荷部位的材料来达到轻量化目的。

后端盖模型如图3所示。后端盖由原来的10 mm壁厚改为4 mm壁厚,并根据尽量避免筋与筋之间在同一个部位加固和交叉的原则设计加强筋。轴承室设计为锥形结构,避免结构产生呼吸模态,降低电机端盖辐射噪声。

1.3 材料轻量化设计

在转子材料选择上采用轻量化组合搭配,用铝支撑代替部分硅钢片,使质量大大减轻。在轮边电机的铝块上调整轴承压板一侧的支撑倒角,在保证

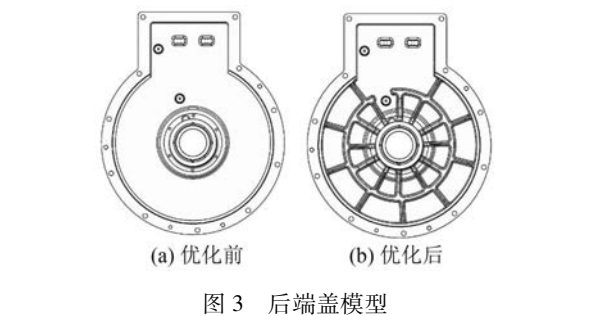


图3 后端盖模型

电机旋转时不发生干涉的前提下,将轴向尺寸缩小了 3 mm,机壳也相应地缩小了 3 mm,可以使电机总减重达 0.2 kg。转子模型如图 4 所示。

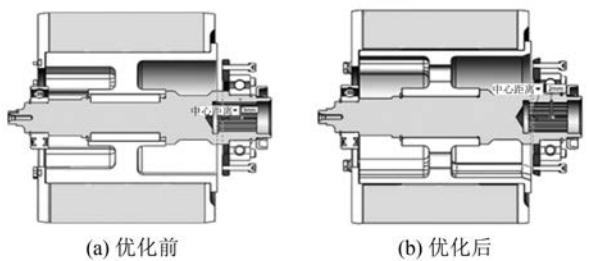


图4 转子模型

2 轮边电机优化模型的有限元分析

因为整车的应用工况比较复杂,需要满足各种地形、各种驾驶工况的要求,所以整车零部件在整个生命周期内的振动等级要求比较高。尤其传动系直接受到来自地面的振动影响,故对轮边电机的振动等级要求更为苛刻。

轮边电机的轻量化设计,不仅要保证轮边电机的各项性能和功能指标正常,更重要的是要满足振动等级要求。下面主要对优化的轮边电机壳体结构进行随机振动强度校核分析,确认其能否达到 GB/T 28046.3—2011 振动标准^[9]。

2.1 有限元仿真材料参数

轮边电机的材料性能参数主要如表 2 所示。

表 2 材料性能参数表					
名称	材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	屈服强度/ MPa
机壳	A356.0-T6	69	0.33	2 685	185
端盖	ADC12	69	0.33	2 660	154
定子	硅钢	165	0.27	7 650	385

2.2 轮边电机建模有限元仿真边界条件

在简化掉的部件质心处建立等效的质量点。简化部件及质量前后的电机模型如图 5 所示,简化后整个系统的质量约为 80 kg。

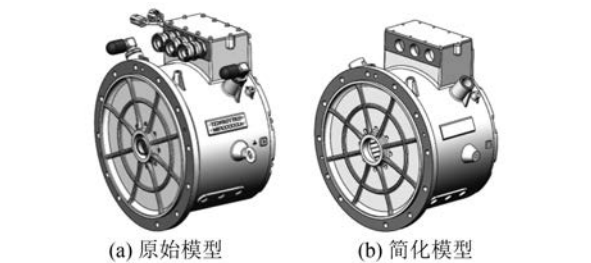


图5 电机整体效果图

对轮边电机的机壳和后端盖模型进行网格划分,并依据 GB/T 28046.3—2011 规定的乘用车非弹性体要求进行轮边电机的随机振动边界条件确认,得到前处理效果图,如图 6 所示。

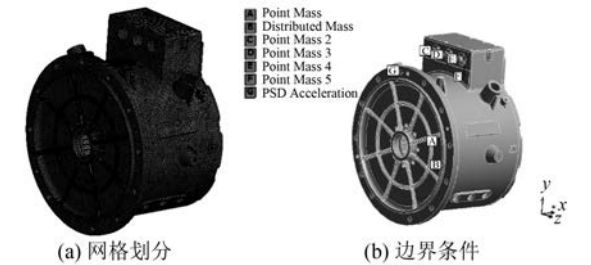


图6 电机前处理效果图

轮边电机随机振动(加速度)功率谱密度(PSD)的加速度均方根值目标为 107.3 m/s^2 ,其他相关参数如表 3 所示。

表 3 PSD 参数值			
频率/Hz	PSD/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{Hz}^{-1}$)		
	水平左右	水平前后	垂直上下
20	200	200	200
40	200	200	200
300	0.5	0.5	0.5
800	0.5	0.5	0.5
1 000	3	3	3
2 000	3	3	3

2.3 轮边电机壳体模态分析

主要对轮边电机进行了前 14 阶的模态有限元分析,分析结果如表 4 所示。

表 4 轮边电机前 14 阶模式的固有频率 Hz

模式	频率/Hz
1 阶	249
2 阶	405
3 阶	414
4 阶	738
5 阶	790
6 阶	970
7 阶	1 116
8 阶	1 129
9 阶	1 246
10 阶	1 259
11 阶	1 484
12 阶	1 514
13 阶	1 630
14 阶	1 909

其中前 8 阶的模式振型如图 7 所示。

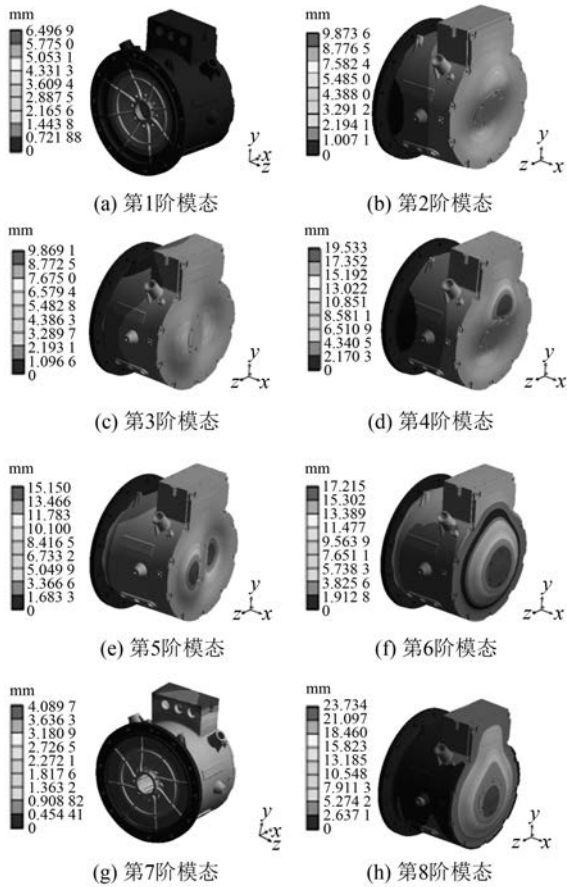


图 7 轮边电机壳体的前 8 阶模态

2.4 轮边电机随机振动分析

轮边电机的后端盖随机振动有限元分析结果

如图 8 所示。轮边电机的后端盖部分在 X 轴方向上的最大应力值为 76.62 MPa;在 Y 轴方向上的最大应力值为 68.27 MPa;在 Z 轴方向上的最大应力值为 73.43 MPa。

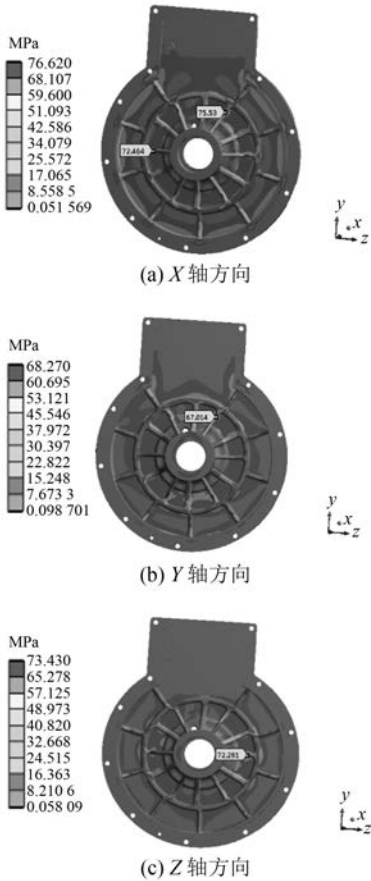


图 8 轮边电机后端盖应力分布

轮边电机机壳的随机振动有限元分析结果如图 9 所示。轮边电机的机壳部分在 X 轴方向上的最大应力值为 78.78 MPa;在 Y 轴方向上的最大应力值为 76.98 MPa;在 Z 轴方向上最大应力值为 67.43 MPa。

2.5 轮边电机随机振动分析结果

对轮边电机后端盖进行有限元振动分析的结果显示,后端盖的最大应力约为 77 MPa,发生在 X 轴的振动方向上。后端盖选用的材料为 ADC12,其屈服强度为 154 MPa,安全系数为 2 左右,满足设计要求。

对轮边电机机壳进行有限元振动分析的结果显示,机壳的最大应力约为 79 MPa,发生在 X 轴的振动方向上。机壳选用的材料为 A356.0,其屈

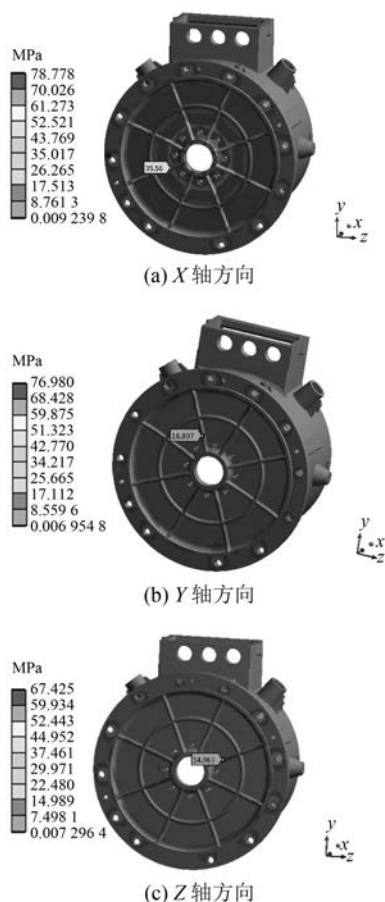


图9 轮边电机机壳应力分布

服强度为 185 MPa,安全系数为 2.3 左右,满足设计要求。

根据 GB/T 28046.3—2011 振动标准,轮边电机在加速度均方根值为 107.3 m/s^2 的随机振动条件下,各部件均能满足振动强度要求。

3 轮边电机轻量化设计效果

通过大型客车用轮边电机的轻量化设计分析,从轮边电机的各个机械结构上对轮边电机进行了轻量化的设计,并对优化后的轮边电机进行了有限元分析,结果表明其振动等级满足 GB/T 28046.3—2011 的振动设计要求。轮边电机模型优化前后各部分结构的对比效果如表 5 所示。

对比分析显示,通过对轮边电机的轻量化设计,电机总质量降低了 13%。

表5 轮边电机优化前后效果对比

参数名称	机壳	后端盖	转子冲片	转子端板	总重
原始模型质量/kg	16.38	4.13	24.2	1.64	46.35
优化模型质量/kg	14.89	2.63	21.5	1.10	40.12
总减重质量比/%	9	36	11	33	13

4 结 语

本文针对大型纯电动客车使用的轮边电机各部分结构开展轻量化设计分析,并对轻量化设计后的模型进行了有限元仿真分析计算。经过分析校核确认,优化后的轮边电机壳体在振动等级上符合 GB/T 28046.3—2011 的振动标准,完全满足安全要求,且有足够的强度和刚度储备。结果显示,满足应用条件的前提下,对整个轮边电机轻量化后降重了约 13%,有助于整车的轻量化及提高纯电动客车的续驶里程。

【参考文献】

- [1] 张之超,邹德伟. 新能源汽车驱动电机与控制技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2016.
- [2] 王志福,张承宁. 电动汽车电驱动理论与设计[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2017.
- [3] HACKNEY J, DE NEUFVILLE R. Life cycle model of alternative fuel vehicles: emissions, energy, and cost trade-offs[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(3):243.
- [4] 孙冠男. 汽车轻量化技术[J]. 汽车工程师,2017(7):14.
- [5] 范子杰,贵良进,苏瑞意. 汽车轻量化研究的技术与进展[J]. 汽车安全与节能学报,2014,5(1):1.
- [6] 陈辛波,杭鹏,王叶枫. 电动汽车轻量化技术研究现状与发展趋势[J]. 汽车工程师,2015(11):23.
- [7] 高雄. 轮边电机驱动中巴客车平顺性分析与多目标优化[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [8] 张洪兵,杨思雨,康娟,等. 纯电动客车用高速永磁轮边电机损耗分析方法研究[J]. 微电机,2019,52(5):11.
- [9] 国家发展和改革委员会. GB/T 28046.3—2011:道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第3部分:机械负荷[S]. 北京:中国标准出版社,2011.