

某车用动力电机结构设计与仿真分析

王玲珑, 谌 胜, 章国光, 周厚建, 郭 俊
(东风汽车集团有限公司技术中心, 湖北 武汉 430056)

摘 要: 汽车产业面临越来越严峻的环境及能源挑战, 促使各大车企在新能源汽车上投入更多的资金及技术。驱动电机是新能源汽车的核心部件之一, 其工作在高温、振动的环境下, 功率密度高。因此, 电机结构设计关系到强度、振动噪声、耐久性等。阐述了某驱动电机的结构特点及设计开发过程。通过 CAE 软件仿真分析了整车不同工况下电机壳体静强度, 扫频、随机振动工况时壳体承受的应力, 以及整机模态。驱动电机通过专项振动试验, 证明其结构强度及模态满足设计目标。

关键词: 电机; 新能源汽车; 结构; 驱动系统

中图分类号: U 469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0097-05

doi: 10.12177/emca.2019.134

Structural Design and Simulation Analysis of a Vehicle Power Motor

WANG Linglong, SHEN Sheng, ZHANG Guoguang, ZHOU Houjian, GUO Jun
(Dongfeng Motor Corporation Technology Center, Wuhan 430056, China)

Abstract: The automobile industry is facing more and more severe environmental and energy challenges, urging the major automobile enterprises to invest more capital and technology in new energy vehicles. The drive motor is one of the core components of new energy vehicle. The motor works in high temperature and vibration environment with high power density. Therefore, the design of motor structure is related to strength, vibration and noise, durability, etc. The structural characteristics and the design and development process of a drive motor are described. The static strength of the motor shell under different working conditions of the whole vehicle, the stress on the shell under sweep-frequency vibration and random vibration conditions, and the modes of the whole motor are analyzed by CAE simulation. Through the special vibration test of the drive motor, it is proved that its structural strength and modes meet the design objectives.

Key words: motor; new energy vehicle; structure; drive system

0 引 言

当今社会在石油资源匮乏、环境污染加剧等严峻形势下, 各国汽车厂商正逐步向汽车电动化道路方向转变, 大力发展新能源汽车, 这无疑是保证汽车动力最具竞争优势和可持续发展性的技术路线, 同时也将促进汽车工业绿色、低排放、健康发展。新能源汽车采用一个及以上的电机驱动系统将电能转换为机械能驱动汽车, 同时回收刹车的制动能量, 从而实现能量的回收利用。

车用电机驱动系统^[1]是新能源汽车的关键技术和共性技术。受到车辆空间限制和使用环境的约束, 车用电机驱动系统要求具有更高的功率密度、更轻的重量、更小的体积、更高的结构强度, 以及适应更严酷的工作环境等。为了满足这些要求, 车用电机驱动系统的技术发展趋势基本上可以归纳为结构小型化、轻量化和系统集成化。车用电机的结构设计是关键技术之一, 涉及电机结构强度、可靠性、振动噪声等性能。因此, 对车用电机的结构设计提出了更具有挑战性的目标。

收稿日期: 2019-10-25; 收到修改稿日期: 2019-11-15

作者简介: 王玲珑(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机总成设计。

混合动力汽车^[2-3]按动力总成结构及能量流传递方案不同,可分为串联、并联及混联3种。混合动力车辆中,发动机动力与电动机动力通过电气线路或者减速箱耦合,并向车轮传递。

东风公司开发的某PHEV车型,采用驱动电机及发电机双电机架构。驱动电机包含驱动及发电2个工作状态,发动机根据工况通过变速箱驱动整车或发电。驱动电机需要满足整车的布置、各系统的机械及电气接口、性能指标、可靠性指标、环境防护等要求。本文根据上述要求,开展了驱动电机结构设计工作,按照相关试验标准及规范对驱动电机结构进行了结构强度、振动、模态等仿真分析,并通过台架试验对仿真及设计进行了试验验证,最终达成设计目标。

1 驱动电机结构设计

驱动电机采用三段式结构:前端盖、壳体、后端盖。电机壳体有悬置安装凸台、进出水口;同时电机壳体上设有三相高压线接口及弱电线束接口。电机后端盖设有悬置安装凸台。电机前后端盖通过螺栓固定在电机壳体上。为了尽量减低电机质量,电机壳体及端盖需尽量轻薄;同时为了保证电机在各工况下可靠工作,壳体及悬置凸台必需有足够的强度。因此,在结构设计过程中,壳体及后端盖悬置安装凸台设有加强筋等结构加强措施;同时壳体及后端盖设有减重槽,以减轻质量。驱动电机、发电机及减速箱组成的动力总成如图1所示。动力总成实物如图2所示。其主要结构特点有:驱动电机前端面与减速箱贴合安装,通过花键与减速箱传递动力;驱动电机壳体及后端面设有动力总成悬置支架安装点。

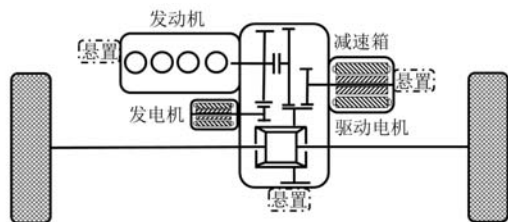


图1 动力总成示意图

2 驱动电机壳体强度 CAE 分析

按照整车边界及电机性能需求进行的电机结构设计完成后,需要通过CAE分析检验结构强度

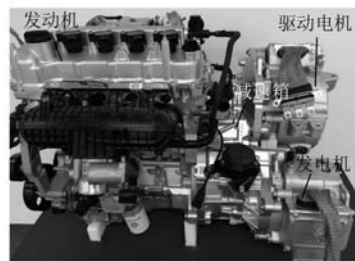


图2 动力总成实物图

是否满足设计指标。

2.1 结构强度仿真

将驱动电机一端固定在变速箱上,另一端通过悬置支架连接到车身上。驱动电机壳体材料为ZL101A,抗拉强度为275 MPa,屈服强度为195 MPa;驱动电机总质量为45 kg,壳体以外的质量通过质量单元配重。

2.1.1 电机结构强度分析

首先分析车辆全油门前进、后退、左转弯、右转弯时电机悬置在X、Y、Z3个方向的受力情况。根据受力情况计算仿真电机悬置安装凸台及壳体的应力分布。仿真计算时,驱动电机变速箱处螺栓孔施加全约束,将动力总成左悬置工况施加在驱动电机端支架上,如图3所示。

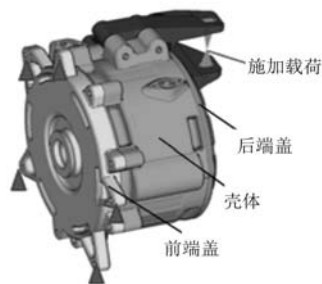


图3 驱动电机强度分析示意图

根据企业标准,动力总成共28个工况,选取载荷最大的4个工况计算,悬置工况及受力情况如表1所示。

2.1.2 电机扫频振动分析

为了模拟计算电机在整车上受发动机或路面激励所产生的振动,参照GB/T 18488.1—2015^[4]、GB/T 18488.2—2015^[5]、GB/T 2423.10—2008^[6]的要求进行扫频振动及随机振动仿真。电机应能经受X、Y、Z3个方向的扫频振动试验,根据不同的安装部位,其扫频振动试验的严酷度等

级应符合规定如表 2 所示。驱动电机安装在减速箱上,因此选择表 2 中的其他部位作为仿真输入参数。

表 1 动力总成左悬置工况及受力情况					N
动力总成左悬置工况	X	Y	Z		
工况一:全油门前进和 0.5g 前进加速	7 101.16	29.91	-1 443.13		
工况二:全油门后退和 0.6g 后退加速	-6 850.16	-8.47	-1 004.76		
工况三:5g 向上和 3g 左转负荷	212.09	-5 506.52	5 412.89		
工况四:5g 向下和 3g 右转负荷	0.85	5 698.86	-7 739.44		

表 2 扫频振动试验严酷度等级					
产品安装部位	频率/Hz	振幅/mm	加速度/(m·s ⁻²)	扫频速率/(OCT·min ⁻¹)	每一方向试验时间/h
发动机上	10~50	2.5	—	1	8
	50~200	0.16	—		
	200~500	—	250		
其他部位	10~25	1.2	—	1	8
	25~500	—	30		

注:(1)振幅和加速度适用于“Z”方向,对于“X”和“Y”方向其振幅和加速度值可以除以 2。(2)振动试验时的“Z”方向规定为安装在发动机上的产品为与发动机缸孔轴线方向平行的方向;安装在其他部位的产品则为与汽车的垂直方向平行的方向。

结构阻尼系数直接影响结构的最大应力,分析过程中结构阻尼系数根据标准推荐的经验值确定为 0.06。

2.1.3 电机随机振动分析

电机在整车上工作时符合随机振动的特征。随机振动分析方法有 2 个基本假设:载荷和响应满足正态分布假设;载荷和响应满足零平均值假设。

随机振动分析正态分布的置信水平如图 4、表 3 所示。随机振动结果通常使用 3σ 双边置信,即±3σ 范围包含 99.73% 的响应。随机振动功率谱密度(PSD)如表 4 所示。加速度均方根值为 96.6 m/s²,即标准差 σ 为 96.6 m/s²。

根据上述条件设置仿真分析条件,计算电机总成 X、Y、Z 3 个方向随机振动承受的应力。

2.1.4 电机模态分析

通过仿真计算电机总成各阶模态,防止电机总成工作时与激励源共振。

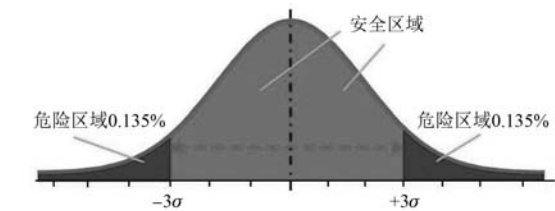


图 4 正态分布示意图

表 3 置信水平列表			%
λσ	P(x ≤λσ)	P(x >λσ)	
1σ	68.27	31.7	
2σ	94.45	4.55	
2.5σ	98.76	1.24	
3σ	99.73	0.27	
3.5σ	99.953	0.047	
4σ	99.993 7	0.006 3	
5σ	99.999 943	0.000 057	
6σ	99.999 999 8	0.000 000 2	

表 4 振动信号功率谱密度值	
频率/Hz	PSD/(m ² ·s ⁻⁴ ·Hz ⁻¹)
10	10
100	10
300	0.51
500	5
2 000	5

2.2 仿真结果

2.2.1 电机结构强度分析结果

按照第 2.1.1 节的工况进行仿真求解,仿真结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,各工况下驱动电机壳体最大应力小于材料屈服强度 195 MPa,满足设计要求。

2.2.2 电机扫频振动分析结果

按照第 2.1.2 节的条件进行仿真求解,仿真结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,3 个方向的最大应力均小于材料屈服强度 195 MPa,满足强度要求。

2.2.3 电机随机振动分析结果

按照第 2.1.3 节的条件进行仿真求解,计算结果默认为 1σ 置信水平下的均方根应力;要得到其他置信水平下的应力结果,将 1σ 下的应力乘

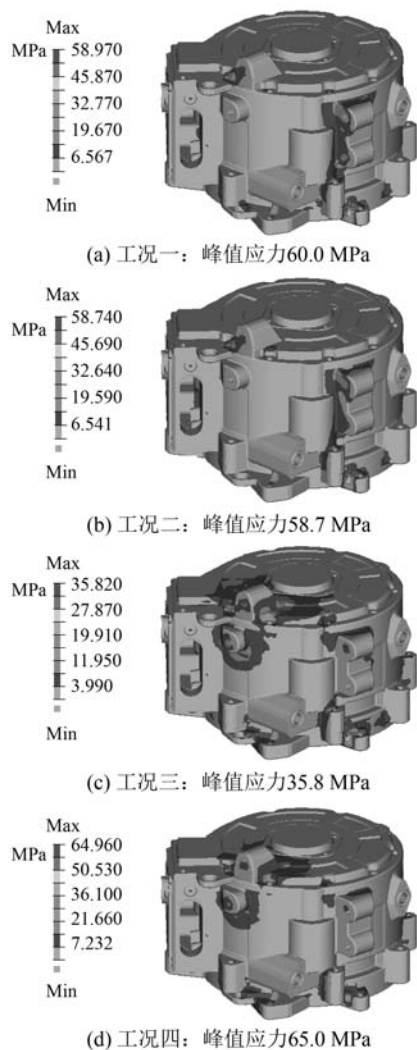


图5 强度分析

以相应倍数即可。仿真 1σ 置信水平结果如图7所示。

从图7可以看出,3个方向随机振动 1σ 置信水平的应力均较小。按照 3σ 置信水平的应力,其X向峰值应力为119.7 MPa,Y向峰值应力为88.5 MPa,Z向峰值应力为101.1 MPa,均小于材料屈服强度195 MPa,满足设计要求。

2.2.4 模态分析结果

电机结构设计关系到振动噪声,需要对电机总成进行模态分析,避免电机在工作范围内出现共振。仿真结果如图8所示。

从图8可以看出,电机一阶模态434.7 Hz,高于最高转速12 000 r/min 对应频率200 Hz,有效避开了共振点,满足动力总成的要求。

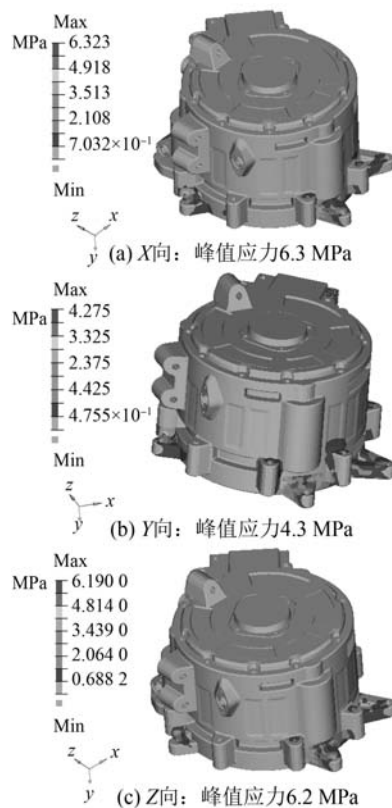


图6 扫频振动分析

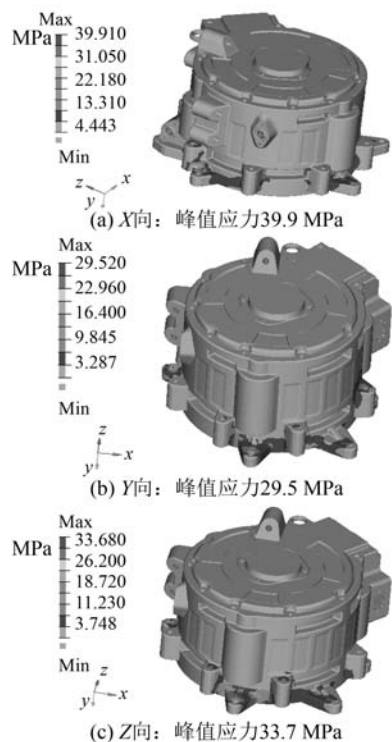


图7 随机振动分析

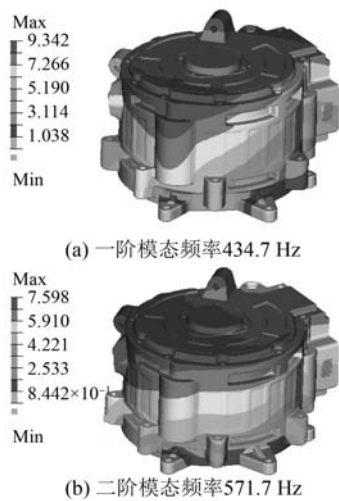


图 8 模态分析

3 驱动电机振动耐久试验

驱动电机在完成设计后,在振动台架做振动耐久验证试验。试验装置如图 9 所示。试验标准及条件如表 5 所示。试验结果与仿真计算的工况一致。

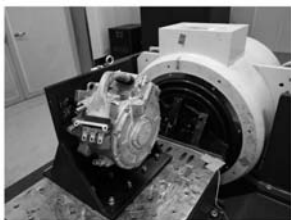


图 9 振动耐久试验装置

表 5 振动试验标准及条件

试验项目	试验标准	试验条件
扫频振动	参照 GB/T 18488.1—2015 中 5.6.4.1.1、GB/T 18488.2—2015 中 9.4.2 和 GB/T 2423.10—2008 的要求进行	X、Y、Z 3 个方向,每个方向 试验时间 8 h;
		10~25 Hz 时 振幅控制 1.2 mm,25~500 Hz 时加
		速度控制 30 m/s ² ,扫频速率 1 OCT/min(试验条件严酷等级按被试样品的安装部位为其他部位选取)
随机振动	参照 GB/T 28046.3—2011 中 4.1.2 的要求进行	X、Y、Z 每个轴向的试验持续时间为 22 h,被试样品电机加速度均方根值为 96.6 m/s ²

振动耐久试验结束后,对电机进行台架试验,可知电机性能与试验前相比无下降;对电机进行拆解,电机壳体等部件无裂纹、变形,关键尺寸与图纸一致。

4 结 语

因为混合动力汽车动力总成中的驱动电机设有悬置安装点,使混合动力总成质量和工作时的振动加速度更大,但同时要求尽可能轻量化,所以对电机壳体设计工作提出了更高的要求。为此,在驱动电机开发过程中,进行了一系列仿真分析计算及试验验证工作。从仿真试验结果可以看出,所设计的驱动电机在轻量化、结构强度及模态方面满足设计要求。

【参考文献】

[1] SATO Y, ISHIKAWA S, OKUBO T, et al. Development of high response motor and inverter system for the Nissan LEAF electric vehicle [C] // SAE 2011 World Congress & Exhibition, 2011.

[2] KIMURA M, SHIBUYA A, NAKADA N. Development of a brand new hybrid powertrain for compact car market [C] // 6th Aachen Colloquium China Automobile and Engine Technology, 2016.

[3] KUROKI J, OTSUKA H. Development of motor and PCU for a SPORT HYBRID i-MMD system [J]. Honda R&D Technical Review, 2013(10): 42.

[4] 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.电动汽车用驱动电机系统 第 1 部分: 技术条件: GB/T 18488.1—2015 [S].北京: 中国标准出版社, 2015.

[5] 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.电动汽车用驱动电机系统 第 2 部分: 试验方法: GB/T 18488.2—2015 [S].北京: 中国标准出版社, 2015.

[6] 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.电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 Fc: 振动(正弦): GB/T 2423.10—2008 [S].北京: 中国标准出版社, 2008.