

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.03.004

模拟路面负载的驱动电机扭转疲劳试验系统升级研究*

刘万里¹, 郑孟冬²

(1.招商局检测车辆技术研究院有限公司,重庆 401329; 2.重庆航天职业技术学院,重庆 400021)

摘要:目前的驱动电机扭转疲劳试验系统无法实现高精度模拟路面负载加载功能,为了精确开展电动汽车驱动电机扭转疲劳试验,文章以频域迭代自学习控制方法为基础,对现有的电动汽车驱动电机扭转疲劳试验加载系统进行升级,根据扭转疲劳试验加载系统结构原理建立了系统仿真模型并进行仿真,通过采集试验场强化路面负载完成了对升级后的扭转疲劳试验加载系统的试验验证,试验结果表明:改进后的试验系统能够高精度模拟路面负载,具有重要的工程应用价值。

关键词:驱动电机;扭转疲劳;路面负载;频域迭代

中图分类号:U467.3

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2024)03-0012-03

Study on Loading System Upgrading for Torsional Fatigue Testing of Electric Vehicle Drive Motors Simulating Road Load

LIU Wan-li¹, ZHENG Meng-dong²

(1.China Merchants Inspection Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd, Chongqing 401329, China;

2.Chongqing Aerospace Polytechnic, Chongqing 400021, China)

Abstract: Currently, the torsional fatigue testing methods of driving motors are no longer able to accurately simulate road load. In order to accurately conduct torsional fatigue tests on electric vehicle drive motors, this article upgrades the existing electric vehicle drive motor torsional fatigue test loading system based on the frequency domain iterative self-learning control method. Based on the structural principle of the torsional fatigue test loading system, a system simulation model is established and simulated. The strengthened road load on the test site is collected, and the upgraded torsional fatigue test loading system is experimentally verified. The results indicate that the improved experimental system can accurately simulate road load and has important engineering application value.

Key words: drive motor; torsional fatigue; pavement load; frequency domain iteration

0 引言

电动汽车驱动电机性能的好坏直接影响到电动汽车的行驶可靠性、舒适性、操纵稳定性,因此对其进行扭转疲劳试验验证极其重要。随着汽车技术的发展,对产品性能、品质和开发周期提出了越来越高的要求。传统的扭转疲劳试验系统主要以开展正弦波加载为主,以路面负载作为加载目标可以满足传动系准确高效的开发需求,这是目前主流试验方法^[1]。为此,笔者对传统的驱动电机扭转疲劳试验加载系统进行了升级,通过仿真分析了系统升级的可行性,最后对升级后的试验系统运用路面负载进行了试验验证。为同类驱动电机扭转疲劳试验系统的升级改造提供一套行之有效的方法。

1 扭转疲劳试验系统升级

现有的驱动电机扭转疲劳试验系统主要包括加载电机、被测电机、数据采集系统、控制系统和冷却系统。由于其控制系统只能进行简单的正弦波形加载,无法实现路面负载加载,因此将路面负载在试验系统

上复现加载成为关键问题^[2]。

实际路面负载的变化率及变化加速度较大,控制系统升级需要一种先进的高精度加载控制方法。文章采取频域迭代自学习控制方法为加载系统实现路面负载加载功能,该方法以系统的传递函数为基础,通过反复迭代使其响应负载不断趋近于目标负载,是一种闭环控制策略。

基于上述分析,可通过系统辨识来求得传递函数。对于驱动电机扭转疲劳试验系统,其输入有转速、转矩,输出也是转速、转矩,因此其传递函数是两输入两输出的二阶矩阵。具体辨识过程如下^[3]:

$$X(f) = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad Y(f) = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$H(f) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Y(f) = X(f) \times H(f) \quad (3)$$

$$H(f) = Y(f) \times X(f)^{-1} \quad (4)$$

$$H(f) = S_{yy}(f) \times S_{xx}(f)^{-1} \quad (5)$$

* 收稿日期:2024-03-07

作者简介:刘万里(1982-),男,四川巴中人,高级工程师,主要从事汽车系统及零部件试验检测技术研究方面的科研工作。

式中: $X(f)$ 为系统输入负载矩阵; $Y(f)$ 为系统输出负载矩阵; $H(f)$ 为系统的传递函数。以上是基于线性系统条件下通过非参数辨识,在已知输入、输出负载求得系统的传递函数,结合傅里叶变换和相关谱分析可以得出系统的频率响应函数与输入自功率谱 $S_{xx}(f)$ 、输入输出互功率谱 $S_{xy}(f)$ 的关系。

实际情况下系统并不是线性系统,因此经过上述公式对系统进行反求加载信号并能获得目标负载,因此需要反复迭代,其原理首先根据上述求得的初始驱动加载信息与初始响应负载信息来计算时频域下的误差值,具体如下所列^[4]。

$$y_0(t) = \begin{bmatrix} y_{1_0}(t) \\ y_{2_0}(t) \end{bmatrix} \quad Y_0(f) = \begin{bmatrix} Y_{1_0}(f) \\ Y_{2_0}(f) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$e_0(t) = \begin{bmatrix} e_{1_0}(t) \\ e_{2_0}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(t) - y_{1_0}(t) \\ y_2(t) - y_{2_0}(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$E_0(f) = \begin{bmatrix} E_{1_0}(f) \\ E_{2_0}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(f) - y_{1_0}(f) \\ y_2(f) - y_{2_0}(f) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $e_0(t)$ 为时域误差值; $E_0(f)$ 为频域误差值; $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 为时域下的路面负载。

根据上述结果并结合逆傅里叶变换可求得系统驱动加载信息修正量 $\Delta x_{1_0}(t)$ 、 $\Delta x_{2_0}(t)$:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{1_0}(t) \\ \Delta x_{2_0}(t) \end{bmatrix} = IFFT \begin{bmatrix} \Delta X_{1_0}(f) \\ \Delta X_{2_0}(f) \end{bmatrix} \quad (9)$$

进而可以求得第一次迭代的系统驱动加载信息 $x_{1_1}(t)$ 、 $x_{2_1}(t)$ 为:

$$\begin{bmatrix} x_{1_1}(t) \\ x_{2_1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1_0}(t) + \delta \times \Delta x_{1_0}(t) \\ x_{2_0}(t) + \delta \times \Delta x_{2_0}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: δ 为迭代衰减系数。

实际迭代时,控制系统不断反复进行多次迭代,使其响应负载信息不断趋近于目标信号。将程序写进扭转疲劳试验加载系统控制程序,完成对其升级。

2 升级后的试验系统仿真分析

为了验证升级后的扭转疲劳试验加载系统的路面负载迭代功能,需对试验系统建模开展仿真分析。

2.1 试验系统及驱动电机模型搭建

驱动电机扭转疲劳试验系统的负载电机为三相交流异步电机,其数学模型的特点有非线性、高阶和强耦合,因此建模时需要忽略空间谐波、磁路饱和等。基于此,建模的数学描述如下所列^[5]:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \\ \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \\ \psi_{r\alpha} = L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} = L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & L_m p \\ L_m p & w L_m & R_r + L_r p & w L_r \\ -w L_m & L_m p & -w L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$T_e = T_L + \frac{J}{p_n} \times \frac{dw}{dt} \quad (13)$$

$$T_{eu} = p_n L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (14)$$

式中: L_s 为定子自感; $\psi_{r\alpha}$ 、 $\psi_{r\beta}$ 为转子磁链在 α 、 β 坐标系分量; L_m 为定子和转子互感; $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ 为转子电流在 α 、 β 坐标系分量; L_r 为转子自感; $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ 为 α 、 β 坐标系定子磁链分量; $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 为定子电流在 α 、 β 坐标系分量; R_s 、 R_r 为定子、转子电阻; $u_{r\alpha}$ 、 $u_{r\beta}$ 为转子电压在 α 、 β 坐标系分量; w 为转子角速度; p 为微分算子; $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 为定子电压在 α 、 β 坐标系分量; T_L 为负载转矩; T_{eu} 为负载电磁转矩; J 为转子惯量; p_n 为极对数。

根据现有电动汽车用电机类型,永磁同步电机的市场份额极高。因此,以永磁同步电机作为动力源来建立被测驱动电机数学模型。永磁同步电机主要由定子和转子组成,其系统结构极其复杂,内部还存在一种强耦合,因此在建立其模型时必须进行降阶以及解耦变换。基于此,需要将自然坐标系转换到相应的静止坐标系也就是 Clark 转换,也可以转换到同步旋转坐标系也就是 Park 转换。一般建立永磁同步电机的模型是在同步旋转坐标系下进行 Park 转换,这是由于前一种坐标系建立的数学模型会导致控制器研究变得复杂。基于此分析,建立的数学模型如下所列:

$$\begin{cases} u_d = R i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_e \psi_q \\ u_q = R i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (16)$$

$$T_{ej} = \frac{3}{2} p_n i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (17)$$

式中: u_d 、 u_q 为 d ~ q 轴分量(定子电压); ψ_d 、 ψ_q 为 d ~ q 轴分量(定子磁链); R 为电枢绕组阻值; ω_e 为电机角速度值; i_d 、 i_q 为 d ~ q 轴电流分量; ψ_f 为永磁体磁链; p_n 为极对数; L_d 、 L_q 为 d ~ q 轴电感; T 为被测电机电磁转矩。

2.2 仿真分析

根据以上分析,结合轴系参数等建立驱动电机扭转疲劳试验系统的 MATLAB/Simulink 仿真模型如图 1 所示。

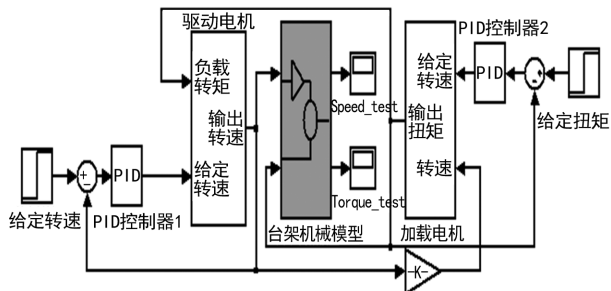


图1 扭转疲劳试验系统仿真模型

以模拟信号作为目标信号,不断进行迭代,使其响应负载信息不断趋近于目标信号。

经过9次迭代,迭代后的信号如图2所示,系统的加载转矩迭代误差为3.12%,满足工程实际要求的10%内。仿真说明采用的频域迭代自学习控制方法实现路面负载加载功能是可行的。

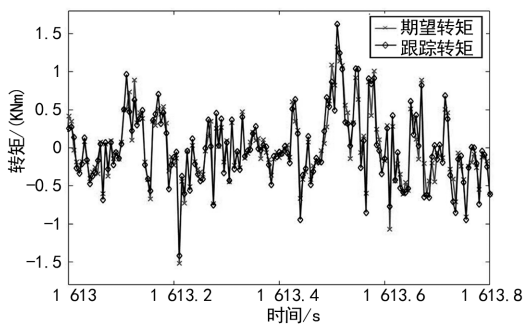


图2 迭代误差收敛曲线

3 升级后的试验系统试验验证

在完成了试验系统仿真分析后,为验证升级的试验系统能够实现高精度复现路面负载,需进一步对升级后的试验系统进行路面负载试验验证。

3.1 实车路面负载采集

3.1.1 采集系统标定

为了能够精确获取驱动电机实际路面受载情况,通过在靠近驱动电机端的汽车半轴处布置应变式无线扭矩遥测传感器,并组建相应的采集系统实现路面负载获取^[6-7]。由于无线扭矩遥测传感器输出的是电压信号,为了能够得到驱动电机输出端的扭矩,需要对其进行标定。

结合现有的 MTS 试验设备,组建的半轴标定系统如图3所示。



图3 半轴标定系统

通过旋转作动器施加扭矩,结合 eDAQ 采集信号,根据统计分析,最后标定结果如下所列:

$$y = -0.2872x - 17.014 \quad (18)$$

式中: y 为半轴扭矩; x 为半轴电压信号。

3.1.2 路面负载采集和数据处理

在完成半轴标定的基础上,在重庆垫江试验场进行强化路面负载采集。采集的主要路面包括鹅卵石路、比利时路、坡道、井盖路、高速环道等18个强化工况。对获取的路面负载进行滤波及剔除奇异处理。处理后的路面负载如图4所示。

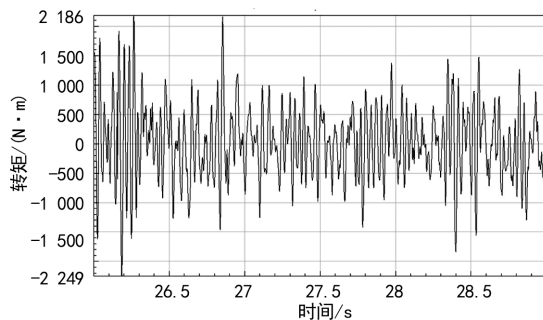


图4 路面负载

3.2 试验验证及分析

以采集的路面负载为目标响应,对系统进行扭转疲劳试验迭代,通过软件采集功能收集响应负载,最终负载响应结果如图5所示。

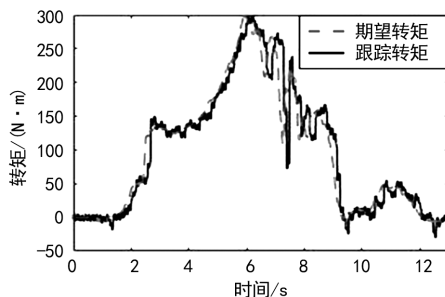


图5 加载跟踪响应结果对比

为验证试验系统能够高精度复现路面负载,需要对响应结果进行评价。评价动态系统的误差采用统计学线性回归方法,其评价的前提是系统的目标和响应间存在一次线性回归关系,公式如下所列:

$$y_i = ax_i + b \quad (19)$$

当试验系统响应迅速,跟踪精度高时,系统的线性回归参数 a 和回归常值 b 具有收敛性,响应 y_i 与期望 x_i 具有固定的相互作用关系,结合搭建的系统响应特性可知,运用一元线性回归方程评价方法,可得到路面负载和响应负载的内在关联,系统跟踪结果评价如表1所列。

(下转第18页)

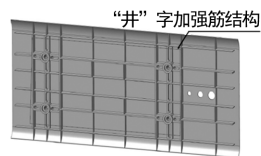


图7 优化后悬挂系统
三维模型

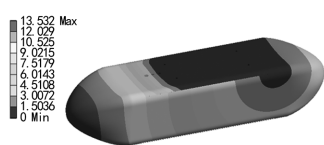


图8 优化后吊舱整体变
形示意图

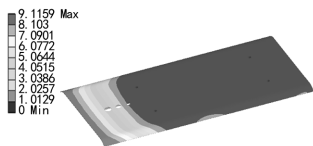


图9 优化后悬挂系统变
形示意图



图10 优化后吊舱应力
示意图

3 结论

利用有限元分析软件对吊舱振型及固有频率分析,并对其进行冲击分析。通过仿真计算得到悬挂系统薄弱部位,并参照固有频率、应力云图对薄弱部位进行拓扑优化。优化后悬挂系统的吊舱刚度、强度均满足设计要求,为后续部件结构设计提供理论指导。具体结论如下。

(1) 悬挂系统结构改进后,吊舱整体的刚度得到

明显提高,1阶固有频率由11.8 Hz提高到16.5 Hz;因此,优化后悬挂系统的吊舱结构的前3阶固有频率均远大于使用环境载荷频率10 Hz,不会发生共振。

(2) 吊舱在冲击条件下的整体最大变形量由20.9 mm降低到13.5 mm;悬挂系统最大变形由14.7 mm降低到9.1 mm;最大应力由466 MPa减小到277.7 MPa,优化后的吊舱安全系数为1.6。

参考文献:

- [1] 李思潭.电子设备机载吊舱强度及模态分析[J].机械工程师,2018(4):141-143.
- [2] 叶明,朱国征.某吊舱结构强度与疲劳寿命仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(3):56-60.
- [3] 王延忠,吕晓宇,孙红梅,等.基于ABAQUS的高速立式加工中心床身的优化设计[J].机床与液压,2011,39(5):64-66.
- [4] 钟飞,史青录.基于ANSYS Workbench的挖掘式冲击器工作装置模态分析[J].机械研究与应用,2012(4):37-39,42.
- [5] 余旭东,吴斌,徐超,等.飞行器结构动力学[M].西安:西北工业大学出版社,2018.
- [6] 李真.机载吊舱结构动力学研究[J].航空科学技术,2014,25(2):60-63.
- [7] 尚晓江,孟志华.ANSYS Workbench 结构分析理论与高级应用[M].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [8] GJB 150.18A-2009.军用装备实验室环境试验方法 第18部分:冲击试验[S].

(上接第14页)

表1 系统跟踪结果评价

参数	转矩	参数	转矩
跟踪误差	2.67%	r^2	0.983 2
a	0.998 1	SE	12.113 4
b	0.45		

分析表明:回归参数为0.998 1趋近于1,表明系统的响应和路面负载间存在很好的线性关系,一致性很好;标准误差 SE 为12.113 4,标准误差比较小说明离散的各点误差都较小;试验系统在复现路面负载时能使加载误差控制在2.67%,具有比较高的再现精度,表明驱动电机扭转疲劳试验系统改进有效。

4 结语

文章采用频域迭代自学习控制方法对驱动电机扭转试验系统进行了升级,进行了扭转试验加载系统的仿真分析;设计了半轴标定试验系统,并通过实车采集了试验场路面负载,以采集的路面负载为目标完成了台架试验验证,结果表明升级后的试验加载系统

的加载误差为2.67%,具有很高的再现精度,验证了该方法及改进后的试验系统的有效性。为电动汽车驱动电机等零部件的扭转疲劳和电动汽车传动系性能开发验证提供了参考。

参考文献:

- [1] 樊晓松,邵华,邢进进.新能源汽车驱动电机测试系统平台[J].汽车技术,2014(9):39-43.
- [2] 马瑞海,王丽芳,张俊智,等.带随机网络时滞补偿的测功机动态负载模拟[J].汽车工程,2020,42(5):700-708.
- [3] 姚元丰,刘子龙.电动汽车负载模拟加载系统[J].系统仿真技术,2014,10(3):177-183.
- [4] 莫志勇,张为公,吉同舟.基于模型参考控制的汽车试验台动态加载[J].中国机械工程,2010,21(7):877-881.
- [5] 肖顺利,石晓辉,李文礼.变速器试验台自适应控制系统研究[J].机械设计与制造,2010(5):154-156.
- [6] 李文礼,石晓辉,施全,等.车辆驱动电机试验台动态模拟控制方法[J].中国机械工程,2015,26(2):278-283.
- [7] 逢淑一,管欣,杨得军.基于总成特性的动力传动系统建模研究[J].汽车工程,2013,35(10):873-877+914.