

某城市客车电驱动桥啸叫噪声分析

陆中华, 王加乐

(凯博易控车辆科技(苏州)股份有限公司, 江苏 苏州 215127)

摘要:针对某城市客车电驱动桥的啸叫噪声问题,在分析电驱动桥构型的基础上,对电机和减速器做阶次计算,然后通过整车试验测量噪声数据,最后通过数据分析明确了电驱动桥啸叫噪声的主要来源。

关键词:啸叫噪声;阶次分析;电驱动桥;城市客车

中图分类号:U463.218

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)05-0042-04

Whistling Noise Analysis of the Electric Drive Axle of a Bus

LU Zhonghua, WANG Jiale

(eKontrol Co., Ltd., Suzhou 215127, China)

Abstract: Aiming at the problem of the electric drive axle whistling noise of a city bus, this paper carries out the order calculation of the motor and reducer based on the analysis of the configuration of the electric drive axle. Then measures the noise data through the vehicle test. Finally, identify the main source of the whistling noise in the electric drive axle through the data analysis.

Key words: whistling noise; order analysis; electric drive axle; city bus

城市客车的电驱动桥可分为集成式驱动桥和分布式驱动桥两种形式。集成式驱动桥的驱动力由电机输出,经减速器、差速器、半轴传递到车轮;分布式电驱动桥没有差速器和半轴,电机靠近车轮安装,传动链短,系统效率和空间布置都比集成式驱动桥更好,是城市客车驱动系统的发展方向。当前对电驱动桥的研究有技术路线和参数匹配^[1-2]、电子差速控制^[3-4]、NVH分析和优化^[5-9]等。其中文献[6]运用“源-路-响应”理论,研究了电动客车在中高速工况下悬架对电驱动桥振动的影响;文献[9]对电驱动桥的台架试验结果进行了阶次分析和啸叫特性研究。当前研究对象大都是纯电动卡车或轻客的集成式驱动桥,对城市客车分布式电驱动桥的噪声分析较少。

桥的整体结构如图1所示。电驱动桥左右两侧对称布置了两套电驱动系统,采用高速电机和减速器的方案,满足低地板城市客车的安装空间要求;图2为单边驱动系统传动构型,高速电机先经过平行轴齿轮两级减速,采用双中间轴方案,结构紧凑,再经过行星排减速,最后连接到车轮上。

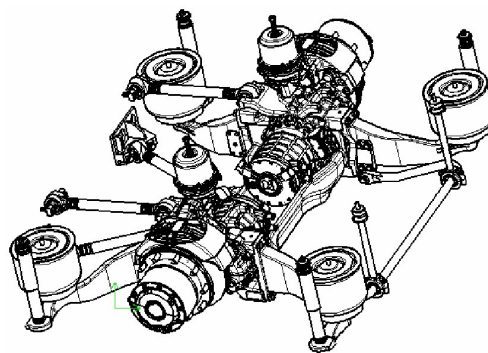


图1 城市客车分布式电驱动桥

1 噪声问题概述

1.1 分布式电驱动桥

某型纯电动城市客车所用的13 t分布式电驱动

收稿日期:2024-03-18。

第一作者:陆中华(1981—),男,博士;高级工程师;主要从事车辆传动及控制工作。E-mail:lu_zhonghua@163.com。

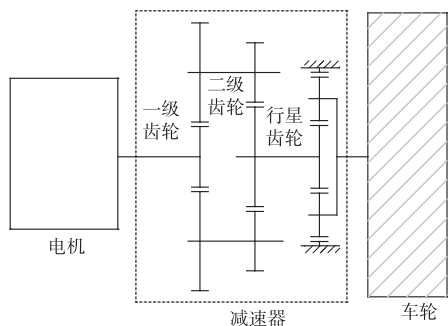


图2 单边驱动系统传动构型

1.2 啸叫噪声

在车辆满载、全油门0~50 km/h加速时,测量车厢内后部(后桥位置)和前部(驾驶员位置)的噪声,测试结果见表1,两处噪声均小于78 dB,声强虽符合要求,但有明显的啸叫噪声,尤其是后桥位置,主观感受不舒适,驾驶员位置的主观感受稍好一些。在车辆满载,匀速30 km/h或50 km/h行驶时,同样测量车厢内部噪声,测试结果见表1,啸叫声有所减弱,但主观感受仍不能接受。为提高乘坐舒适性,需要解决电驱动桥啸叫噪声问题。

表1 车厢内噪声测试结果 dB

试验工况	车厢后部	车厢前部
0~50 km/h 加速	74.3	73.1
30 km/h 匀速	67.3	67
50 km/h 匀速	67.9	67.4

2 阶次计算

电驱动桥的啸叫噪声不仅与电机和减速器的噪声阶次有关,还与控制器开关噪声阶次有关^[10-12]。将电机和减速器的噪声阶次定义为某部件旋转产生的噪声响应与其转速之间的对应关系。将控制器开关噪声阶次定义为谐波噪声响应与控制器载频和基频的对应关系。通过测量啸叫噪声的阶次,并与电机、减速器和控制器开关的噪声阶次进行对比,可以定位啸叫噪声的来源。

2.1 电机噪声阶次计算

电机是电驱动桥的动力源,是振动噪声的重要来源之一。电机的噪声阶次包括:电磁力振动噪声阶次

h_{ef} 、齿槽谐波噪声阶次 h_{ch} 、扭矩波动噪声阶次 h_{tf} ,其计算公式如下:

$$h_{ef} = 2 \times p \times h \quad (1)$$

$$h_{ch} = Z \times h \quad (2)$$

$$h_{tf} = \text{LCM}(Z, 2p) \times h \quad (3)$$

式中: p 为电机极对数,本文为4; h 为倍频数; Z 为定子槽数,本文为48;LCM为最小公倍数,本文为48。

以某电机为例,根据以上公式,可计算得到电机各噪声阶次,结果见表2。

表2 电机噪声阶次

h	h_{ef}	h_{ch}	h_{tf}
1	8	48	48
2	16	96	96
3	24	144	144
4	32	192	192

2.2 减速器噪声阶次计算

齿轮传动是电驱动桥噪声的重要来源之二。图2中各齿轮齿数见表3。

表3 电驱动桥齿轮齿数

齿轮	齿数
一级减速主动齿轮 Z_{11}	22
一级减速被动齿轮 Z_{12}	87
二级减速主动齿轮 Z_{21}	31
二级减速被动齿轮 Z_{22}	52
行星排减速太阳轮 Z_s	29
行星排减速齿圈 Z_R	86

齿轮啮合噪声的阶次计算包括:一级减速齿轮啮合阶次 h_{1st} ,二级减速齿轮啮合阶次 h_{2nd} ,行星排齿轮啮合阶次 h_{PG} ,其计算公式如下:

$$h_{1st} = Z_{11} \times h \quad (4)$$

$$h_{2nd} = \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \times Z_{21} \times h \quad (5)$$

$$h_{PG} = \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \times \frac{Z_{21}}{Z_{22}} \times Z_s \times \frac{Z_R}{Z_s + Z_R} \times h \quad (6)$$

根据表3中齿数和以上公式计算得到各齿轮的啮合阶次,结果见表4。

表 4 齿轮啮合阶次

h	h_{1st}	h_{2nd}	h_{PG}
1	22	7.8	3.2
2	44	15.7	6.5
3	66	23.5	9.8
4	88	31.4	13.1

2.3 控制器开关噪声阶次计算

电机控制器采用正弦脉宽调制 (SPWM), 会产生一系列开关谐波, 是电驱动桥噪声的重要来源之三。控制器开关噪声阶次计算即为开关谐波噪声频率 f_k 的计算, 其公式如下:

$$f_k = h_1 f_T \pm h_2 f_0 \tag{7}$$

$$f_0 = p \times n / 60 \tag{8}$$

式中: f_T 为载波频率, 本文为 5 kHz; f_0 为基波频率, 与电机转速和极对数有关, 单位 Hz; h_1 和 h_2 为奇偶性相异的正整数, h_1 为载波频率的倍频数, h_2 为基波频率的阶次; n 为电机转速, 单位 r/min。

根据以上公式计算得到控制器开关噪声频率, 结果见表 5。

表 5 控制器开关噪声频率 Hz

h_1	h_2	f_k
1	1 阶	$5\,000 \pm f_0$
	3 阶	$5\,000 \pm 3f_0$
	5 阶	$5\,000 \pm 5f_0$
	7 阶	$5\,000 \pm 7f_0$
	9 阶	$5\,000 \pm 9f_0$
2	2 阶	$10\,000 \pm 2f_0$
	4 阶	$10\,000 \pm 4f_0$
	6 阶	$10\,000 \pm 6f_0$

3 车内噪声源识别

为了确定电驱动桥啸叫噪声的来源, 对车辆做车内噪声测试。

3.1 测试方案

本次测试采用西门子的振动噪声测试系统 (LMS Test. Lab), 包括噪声测试软件分析平台、数据采集设备和传感器, 如图 3 所示。



图 3 振动噪声测试系统

在车厢内后桥地板位置和驾驶员右耳位置分别布置麦克风。为同步电机转速、扭矩等相关数据, 设备连接了车辆 CAN 网络。测试在试验场进行, 道路条件良好, 记录两个麦克风的噪声数据及 CAN 网络数据。

车辆满载, 电门踏板开度 50%, 做 0~50 km/h 起步加速试验; 车速超过 50 km/h 后, 松开加速踏板, 车辆滑行, 最后制动停车。工况曲线如图 4 所示。

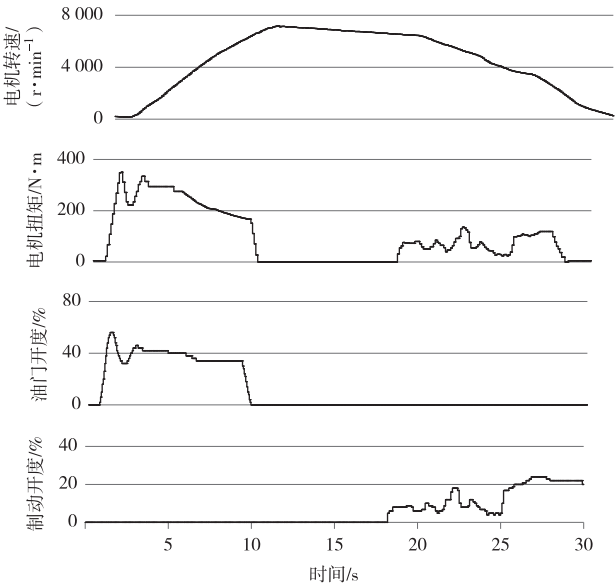


图 4 测试工况曲线

3.2 测试结果及分析

1) 加速噪声分析。对车辆加速过程的噪声数据进行分析。如图 5 所示, 上半部分为后桥地板位置的噪声图, 下半部分为驾驶员右耳位置的噪声图, 由图可知, 啸叫噪声的主要阶次是 3.2 阶, 而由第 2 部分计算可知, 3.2 阶是由行星排 h_{PG} 产生; 同时 22 阶也是啸叫噪声的来源之一, 由一级减速 h_{1st} 产生。图 6 为加速阶次噪声切片图, 体现了各噪声源对总体啸叫噪声的贡献度。以后桥地板位置的噪声为例, 电机 6 500 r/min (基频的一个转速点) 时的噪声强度最大, 为 76 dB; 此时 3.2 阶的噪声强度 (贡献度) 是 71 dB, 22 阶的噪声强度 (贡献度) 为 60 dB。

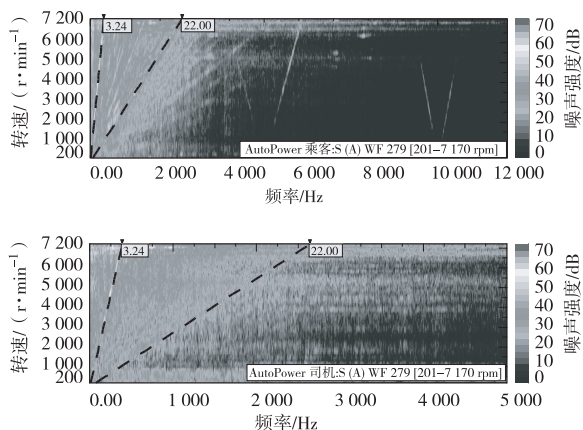


图5 加速噪声阶次图

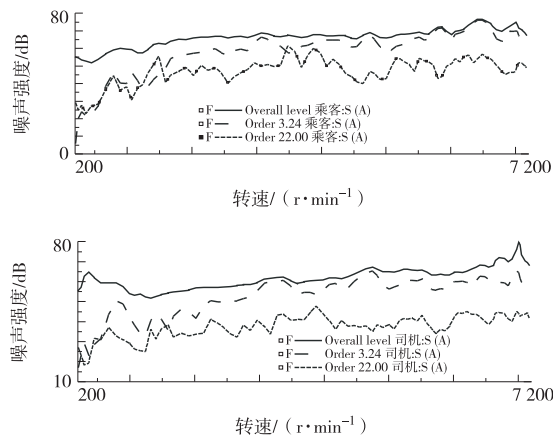


图8 减速噪声阶次切片图

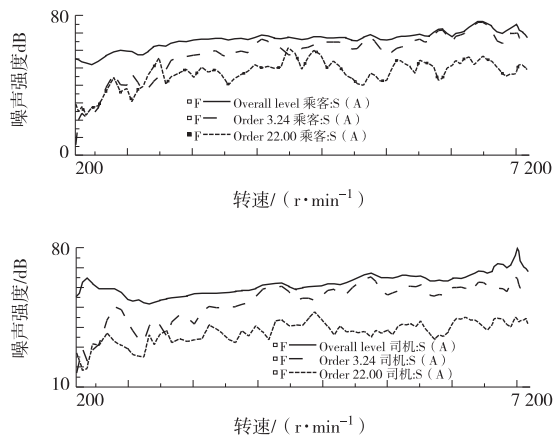


图6 加速噪声阶次切片图

2) 减速噪声分析。图7和图8是车辆减速时的噪声图和阶次切片图,与加速时的分析结果一致。以乘客位置的噪声为例,电机6 000 r/min(基频的另一个转速点)时的噪声强度最大,为70 dB,此时3.2阶的噪声强度(贡献度)是68 dB,22阶的噪声强度(贡献度)为50 dB。

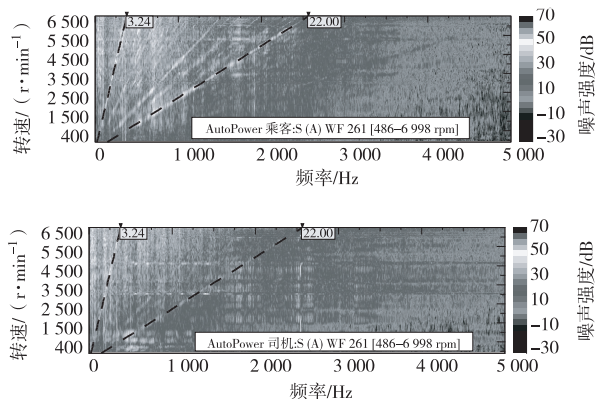


图7 减速噪声阶次图

3) 开关噪声分析。电机控制器的开关噪声—频率关系如图9所示,噪声相对较大的频率点有2个,一个是 $5\text{ kHz}\pm 9f_0$,最大噪声强度为35 dB,此时车速为50 km/h,对应的电机转速为7 200 r/min, f_0 为480 Hz;另一个是 $10\text{ kHz}\pm 6f_0$,最大噪声强度为27 dB,对应的 f_0 同样为480 Hz。但控制器开关噪声与齿轮啮合噪声相比强度很小,不是啸叫噪声的来源。

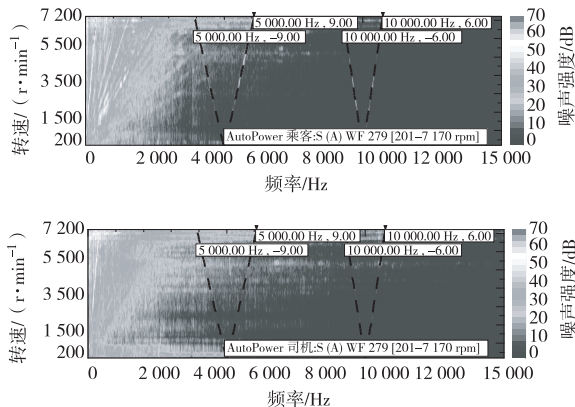


图9 电机开关图

由以上分析可知,本文电驱动桥啸叫噪声主要由行星排的3.2阶次贡献,其次由一级减速齿轮啮合的22阶次贡献。

4 结束语

针对某城市客车电驱动桥的啸叫噪声来源,在分析了电驱动桥构型的基础上,对电机噪声和减速器齿轮啮合噪声做了阶次计算,然后进行车内噪声测试并分析了噪声数据的色彩图和阶次切片图,找到了电驱

(下转第55页)

理。根据鲜映性的影响因素,介绍了优化油漆配方、喷涂工艺、打磨工艺、闪干工艺、施工环境等改善客车车身涂层鲜映性的措施。

参考文献:

- [1] 李国波. 中涂质量影响油漆车身综合外观水平(NAP 值)案例解析[J]. 电镀与涂饰, 2008(11): 58-60.
- [2] 蔡捷, 黄道兵, 杜蓉, 等. 钢板表面形貌对汽车外板涂装质量的影响研究[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2014, 26(4): 30-32.
- [3] 冯立明, 管勇. 涂装工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 35-42.
- [4] 许朋辉, 王海燕. 桔皮鲜映性仪用于面漆的外观改善[J]. 客车技术与研究, 2008, 30(6): 32-35.
- [5] 卢琳, 任玉苓, 温乃盟, 等. 有机涂层钢板鲜映性影响因素的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(2): 14-18.
- [6] 何章翔. 油漆车身橘皮控制研究[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(4): 42-43.
- [7] 刘国锋, 曹兆斌, 赵珺, 等. 影响重型汽车涂装橘皮等级的因素[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(6): 69-72.
- [8] 孟东阳, 刘安心, 殷勇青. 影响商用车车身面漆涂层质量的部分因素[J]. 涂料工业, 2006, 36(7): 50-51.

- [9] 江勤, 邱绕生, 李纯, 等. 高鲜映性水性丙烯酸氨基烘烤涂料的开发与研究[J]. 涂料技术与文摘, 2012, 33(5): 13-15.
- [10] 刘汉功, 张汉青, 狄志刚, 等. 水性双组分聚氨酯面漆流平性的研究[J]. 涂料工业, 2021, 51(6): 13-19.
- [11] 王明, 完颜成功, 强俊, 等. 油漆外观能力提升创新成果探讨[J]. 现代涂料与涂装, 2023, 26(8): 60-62.
- [12] 胡玲, 陈向, 黄茂韶, 等. 客车车身油漆色差原因及控制[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(1): 59-62.
- [13] 陈珂. 面漆桔皮分析与对策[J]. 汽车工艺与材料, 2006(10): 29-33.
- [14] 魏新战, 张充. 关于驾驶室主色漆膜厚外观质量均匀性提升的研究[J]. 汽车实用技术, 2017(15): 178-179.
- [15] 李蓬勃, 李抗战, 陈文昌, 等. 面漆精加工工艺[J]. 电镀与涂饰, 2020, 40(8): 608-612.
- [16] 许文彬. 客车素色面漆橘皮的成因及预防[J]. 现代涂料与涂装, 2019, 22(2): 24-26.
- [17] 宋海泉, 朱广, 郭瑞, 等. 客车车身油漆外观光泽影响因素及提升措施[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(2): 55-58.
- [18] 宾春兰. 浅析汽车面漆漆膜鲜映性提高的措施[J]. 装备制造技术, 2013(7): 114-115.

(上接第45页)

动桥啸叫噪声的主要来源。可通过对行星排齿轮和一级减速齿轮做微观修形,以降低电驱动桥的啸叫噪声,提升电动客车的乘坐舒适度。

参考文献:

- [1] 陈志龙, 程方斌, 常颖. 一种集成电驱桥的整车应用匹配设计及验证[J]. 客车技术与研究, 2022, 44(6): 18-21.
- [2] 刘栋, 高一博, 雷俊鹏, 等. 新能源重车电驱总成技术路线研究[J]. 重型汽车, 2023(4): 6-7.
- [3] 臧怀泉, 戴彦, 张素燕, 等. 一种基于相对滑移率的电动汽车电子差速控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 112-119.
- [4] 王军年, 倪健士, 杨斌, 等. 电动汽车转矩定向分配差速器建模与动态仿真[J]. 汽车工程, 2020, 42(4): 491-497.
- [5] 武冬梅, 张子威, 徐宏明, 等. 电驱桥商用车的振动特性分析和悬架参数匹配[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(7):

66-72.

- [6] 金文辉, 邓欣, 段龙杨, 等. 某电驱桥车型 Moan 噪声分析与优化控制[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(4): 270-275.
- [7] 李钰杰. 一体化电驱桥的电磁噪声研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [8] 曾梦媛. 纯电动客车振动源识别与振动传递特性试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [9] 黄月芹, 黄显淞, 李春楠. 电动汽车电驱桥啸叫特性识别与研究[J]. 机械设计与制造, 2023(2): 177-180.
- [10] 周明浩, 陈闯, 汪海洪. 永磁同步电机振动噪声仿真研究[J]. 客车技术与研究, 2023, 45(6): 14-19.
- [11] 卢晓莉, 刘晓晴. 客车 NVH 主观评价方法的初步探讨[J]. 客车技术与研究, 2008, 30(5): 19-22.
- [12] 吕良远, 周炳松, 余云飞, 等. 基于模态分析的电驱动桥噪声优化[J]. 客车技术与研究, 2023, 45(6): 33-36.