

# 纯电动客车电动液压转向系统噪声分析与改进

齐 瀛, 王浩宇, 李俊强

(宇通客车股份有限公司, 郑州 450016)

**摘要:**针对纯电动客车电动液压转向系统的噪声来源、种类、传播途径,通过噪声产生机理分析,进行试验研究和效果验证,采用客观数据与主观评价相结合的分析方法,最终降低电动液压转向系统噪声,提升整车乘坐舒适性。

**关键词:**纯电动客车; 电动液压转向; 噪声分析与改进

中图分类号:U463.4

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0015-04

## Analysis and Improvement on Noise of Electro-hydraulic Steering System for Pure Electric Buses

QI Ying, WANG Haoyu, LI Junqiang

(Yutong Bus Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

**Abstract:** Aiming at the noise source, type, and transmission path of the electro-hydraulic steering system for pure electric buses, this paper carries out experimental research and effect verification through the analysis of the noise generation mechanism, adopts the analysis method combining objective data and subjective evaluation, which finally reduces the noise of the electro-hydraulic steering system and improves the ride comfort of the whole vehicle.

**Key words:** pure electric bus; electro-hydraulic steering; noise analysis and improvement

由于纯电动客车取消了发动机,使得整车在怠速和行驶中相对安静,因此对车辆其他工作部件的噪声提出了更高的要求,需通过进一步研究来提升整车驾驶及乘坐舒适性。纯电动客车产生噪声的主要部件有主驱动电机、电动空调、电动打气泵(气压制动系统)或电控液压制泵(液压制动系统)、电动液压转向系统、冷却水泵、控制器、车身振动及传动部件等,此外还有风噪、轮胎噪声,其中电动液压转向系统是汽车噪声的主要来源<sup>[1]</sup>。本文重点研究电动液压转向系统噪声的产生机理和传播途径,通过优化转向电机控制程序、设计电机及油泵、改善转向油管及其固定方式等措施降低电动转向油泵噪声,并利用电动转向优势优化控制策略,以达到降低电动液压转向系统噪声的目的。

## 1 电动液压转向系统噪声分析及抑制措施

### 1.1 噪声源及噪声抑制措施

电动液压转向系统主要由转向控制器、电动转向油泵、转向油罐、整体式循环球动力转向器、转向油管组成,如图1所示,其中电动转向油泵由电机驱动。电动液压转向系统噪声来源主要为油泵电机的机械噪声和电磁噪声,油泵的机械噪声和流体噪声<sup>[2]</sup>。

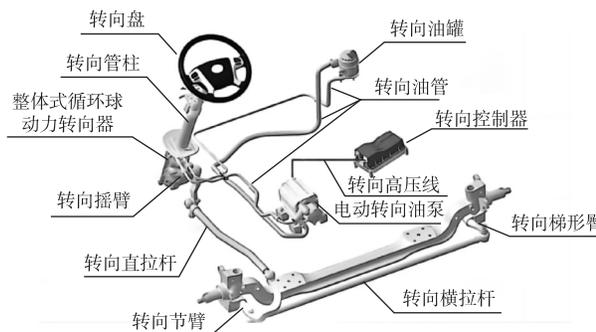


图1 电动液压转向系统的组成

收稿日期:2023-09-11。

第一作者:齐 瀛(1983—),男,高级工程师;主要从事新能源车辆电控、电附件设计工作。E-mail:qiyngxny@126.com。

### 1.1.1 油泵电机的机械噪声及抑制措施

机械噪声主要由油泵电机的定转子摩擦、动平衡破坏、轴承磨损以及电机本体共振共同形成。电机转子动平衡破坏是产生机械振动和机械噪声的主要原因;轴承是连接电机转子和定子的部件,其承受了电机中各种力的激励并传递激励力,产生振动和噪声并传递到电机本体,是影响电机机械噪声的次要原因<sup>[3]</sup>。

抑制措施:电机进行动平衡校正、轴承采用低噪声轴承、保证轴承安装精度、选用合适的润滑脂等。电机的机械噪声在电动液压转向系统中相对于电磁噪声、液压脉动噪声而言较低。

### 1.1.2 油泵电机的电磁噪声及抑制措施

电磁噪声主要由电机周期变化的定、转子空间容积中径向电磁力或不平衡的磁拉力引起。电磁噪声也与电机定子、转子本身的振动特性(固有频率、阻尼、机械阻抗等)有关<sup>[4]</sup>。另外电机的电磁噪声与电机控制器载波频率相关。纯电动客车电动转向油泵电机的电源为车载电池的直流电,电机一般为交流异步电机或永磁同步电机,采用电机控制器将直流电转换为交流电为电机供电。控制器采用最优的载波频率可有效降低电机的电磁噪声<sup>[5]</sup>。

需要综合考量电磁噪声的抑制措施:一是选择合适的定、转子槽数配合,二是选择合理的气隙磁密,三是电机制造过程中确保定、转子圆度并保证定、转子同心,四是电机运行时要保持电压对称度,此外还可采用磁性槽楔和转子斜槽来减少电磁噪声。

若电机控制器载波频率设置不合理,电机就会发出刺耳的高频噪声。载波频率要综合考虑基波频率、硬件限制、内部软件、谐波电流、温升、电磁噪声,通过控制器和电机台架调试找到合适的值。

### 1.1.3 油泵的机械噪声及抑制措施

油泵的机械噪声主要是转子、叶片在旋转过程中产生的振动引起的,这与设计参数、制造精度相关。叶片泵的定子曲线采用综合性能好的高次定子曲线,其次在叶片泵配油盘的吸、排油腔边缘的封油区部分开设三角槽,避免压力冲击,消除困油产生的噪声。

### 1.1.4 流体噪声及抑制措施

流体噪声主要是由叶片泵内腔内液压油压力、流

速周期性变化以及空穴现象引起的,分为脉动噪声、气蚀噪声、困油噪声等<sup>[6]</sup>。怠速工况下车内听到的“呜呜”和“嗡嗡”等声音,主要来自转向系统内油管的液压脉动噪声,通过油管与车身连接点传递到车身,对车内噪声影响最大。

抑制措施:改进吸油方式,降低吸油腔流道内的流速,减小进油口到转子的液流阻力,防止吸油系统进入空气。增加叶片泵出油口的容积腔,可有效衰减脉动频率。

## 1.2 噪声传播途径及抑制措施

电动液压转向系统噪声传播途径及抑制措施如下:

1) 油泵及其管路噪声通过空气传播。其抑制措施通常为增加密封舱体并加装隔音棉来降低空气噪声,具体可根据布置位置及空间大小合理选用,本文不再详述。

2) 油泵电机、油泵及其管路的振动噪声通过车身的连接点传递到车内<sup>[7]</sup>。针对振动噪声的传递,主要采用以下2种抑制措施:

①增加降噪管减弱振动。降噪管内部的1/4波长管可以扰乱转向油泵所输出的周期性脉动流体,避免油管内的流体谐振,从而衰减系统噪声<sup>[8]</sup>。降噪管中的波长管长度 $L$ (单位为m)的计算公式如下:

$$L=C/(4f)$$

式中: $C$ 为振动波在液压油中的传播速度,一般取132 m/s; $f$ 为压力脉动频率 $[f=(\text{电机转速} \times \text{叶片数})/60]$ ,单位为Hz,其中电机转速单位为r/min。

在实际应用时,不同的部件具有不同的阶次及谐阶次,通过客观测试和阶次分析,确定峰值处对应噪声频率,从而计算出波长管长度值。

②转向管路固定点采用减振橡胶线卡固定,减弱振动的传递。

## 2 某纯电动客车转向系统噪声优化

某7 m纯电动高档商务车,采用电动液压转向系统(转向泵)和电控液压制动系统(制动泵)。样车试验时,为排除制动系统的干扰,关闭制动泵,车内转向系统噪声明显,说明转向系统存在噪声过大的问题,特别是整车怠速工况下噪声最明显,车内听到令人烦

躁的“嗡嗡”声。经分析主要为电动转向油泵电机的电磁噪声和叶片泵的流体噪声,影响驾驶员及乘客的驾乘舒适性,对此采取以下优化措施。

### 2.1 噪声源抑制

1) 电磁噪声源抑制,选用电磁噪声优化后的电动转向油泵(详见1.1.2节,电机设计阶段充分考虑电磁噪声的抑制措施)。通过整车台架测试,选择合适的载波频率完成电磁噪声和变频控制器效率的最优解,实现载波频率优化。台架测试不同载波频率下的电磁噪声(注意:测试前查询变频器电子器件规格书对可使用的载波频率范围的说明,此车型规格书要求载波频率 $\leq 10$  kHz),此车型测试2~10 kHz下的电磁噪声,在6 kHz,电磁噪声为47 dB(A),噪声最小且变频控制器在最优效率区间,因此转向控制器载波频率设定值确定为6 kHz。

2) 流体噪声源抑制,主要调整电动转向油泵的工作转速,避免工作转速与整车固有频率相近引起共振。经台架测试,此款商务车电动转向油泵电机转速为怠速960 r/min,工作转速为1 200 r/min,满足转向受力要求,此转速下噪声值分别为51 dB(A)和53 dB(A),相对于其他转速噪声最低,设定此转速为工作转速。在此基础上增加整车传播路径隔音降噪措施。

3) 表1为电动转向油泵频率及噪声。由表中数据可知,车内电动转向泵噪声最明显的频率为192 Hz,噪声为34.1 dB(A)。由于转向泵怠速转速为960 r/min,叶片为12片,压力脉动频率为192 Hz,因此车内嗡嗡声主要由转向泵的基频贡献(192 Hz),其次是384 Hz倍频的贡献。

表1 电动转向油泵频率及噪声

频率/Hz	噪声/dB(A)			
	驾驶区	前坐区	中间区	后坐区
79	22.2	9.9	6.9	4.1
1 793	4.2	7.5	9.2	13.1
192	11.4	32.8	32.6	34.1
384	0.4	22.8	23.2	23.9

### 2.2 噪声传播途径抑制

1) 传播途径确认。同样,为排除电控液压制动

系统(制动泵)的干扰,首先关闭制动泵,然后将转向泵转向管路连接点与车身连接脱开,再将转向泵本体与车身固定连接脱开,最后将转向泵用隔音降噪材料包裹。试验结果见表2:192 Hz处噪声降低了14 dB(A),384 Hz处噪声降低了10.3 dB(A)。从而得出以下结论:

①电机电磁噪声通过空气传播,通过隔音降噪材料对转向泵电机包裹处理隔绝空气传播途径,整车噪声无明显变化。说明影响整车的并非电磁噪声,电磁噪声优化后不再是影响整车噪声的关键点,传播途径优化应不再考虑电机噪声。

②转向泵流体噪声通过转向高压管传递到车内,此为影响整车噪声的关键环节,所以传播途径抑制需重点抑制流体噪声。

表2 噪声试验结果

车辆状态	噪声/dB(A)		
	综合	基频 192 Hz	倍频 384 Hz
原始状态	35.7	34	23.5
转向管路脱开	33.4	20	13.2
本体脱开	37.7	34.6	28.1
本体包裹	32.8	30.7	14.9

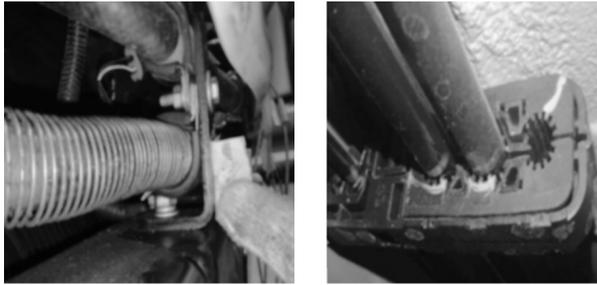
2) 传播途径中噪声基频确认。通过整车上转向泵管路支架 NTF(噪声传递函数)噪声诊断分析,进一步确认支架在转向泵的基频192 Hz和倍频384 Hz处有振动峰值(见表3),转向泵管路隔振性能差,导致转向管路的结构传递噪声未充分衰减,经过与车架和车身的连接支架,以结构声的方式进入车身。

表3 管路支架本体隔振量

支架	隔振量/dB(A)		
	X向	Y向	Z向
支架1	23.349 82	29.409 81	16.901 96
支架2	4.436 975	12.736 44	19.172 15
支架3	-2.922 56	6.020 6	7.359 536
支架4	53.979 4	63.690 49	51.796 51

3) 传播途径中噪声的衰减方法。改进措施:通过在转向管路中增加合适的降噪管(计算公式见1.2节),从而降低管路压力脉动导致的系统噪声;优化管

路与车身和车架的隔振垫,提高管路支架刚度,以提高隔振效果,图2为隔振垫改进前后对比。将优化后的液压助力管装车验证效果,主观感觉上已经听不到“嗡嗡”声,效果明显。



(a) 改进前

(b) 改进后

图2 隔振垫改进前后对比

### 3 结束语

本文分析了电动液压转向系统噪声源及传播途径,并针对不同噪声源提出了不同的改善措施,通过实车对比试验,确定了改进措施有效,最终降低了电动液压转向系统噪声,提高了整车 NVH 水平。

### 参考文献:

- [1] 秦成,盛君,龚佳强. 纯电动客车转向系统噪声的改善研究[J]. 汽车实用技术,2021,46(15):21-24.
- [2] 牛彦彦,孙家宝,马腾. 液压助力转向系统的噪声分析[C]//河南省汽车工程学会. 第十届河南省汽车工程科学技术研讨会论文集,2013:67-68.
- [3] 黄国治,罗麦,曾兆炎. 电机振动噪声研究(三)定子机械振动特性计算研究[J]. 中小型电机,1984(6):20-25.
- [4] 欧忠杰. 电动汽车用永磁同步电动机电磁噪声的研究[D]. 广州:广东工业大学,2021.
- [5] 上海大郡动力控制技术有限公司. 电动汽车电机控制器抑制高频噪声的方法:201611235387.4[P]. 2018-07-06.
- [6] 陶维龙,陈乐强,金明,等. 液压转向助力系统噪声研究[J]. 机械工程师,2015(5):80-82.
- [7] 逢增山,朱志文,蔺磊,等. 液压助力转向系统的噪声优化设计[J]. 上海汽车,2015(12):32-34.
- [8] 张乾斌,张兵舰,张莉萍. 乘用车液压转向系统噪声分析及优化[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2016,34(6):923-925.

## 理事会邀请函

尊敬的客户企业:

《客车技术与研究》创刊于1979年,是我国创刊较早、发行量较大、学术水平较高的客车专业期刊,是交流客车技术的重要“阵地”。

当前,新能源、智能网联等新技术重塑着客车行业的发展,为准确把握市场和技术脉搏,进一步发挥期刊推动技术交流、促进行业发展的平台作用,现热忱邀请贵单位加入《客车技术与研究》理事会,共同擘画客车行业的美好未来!

希望广大客户企业积极参与并大力支持我国客车行业发展。本期刊理事会将充分发挥自身优势,竭诚为理事单位做好服务工作。

如有意向,请联系《客车技术与研究》编辑部,电话:023-62653044。