

# 真空泵系统引致车内结构噪声快速识别与控制

张爱国

(瑞立集团有限公司(温州瑞立科密汽车电子有限公司) 浙江温州 325000)

摘要: 针对汽车在怠速状态下, 司机在多次踩下刹车踏板后, 会发出“哒哒”的异常噪音, 利用小波分析法, 迅速辨别出噪音来源为真空泵, 并对其进行了综合分析, 最终确定噪音来源为: 利用真空泵进行抽空时, 空气中的压力波动, 通过“真空泵-管道-固定支架-前挡板”的结构路线, 产生噪音并向司机传导。

关键词: 声学; 真空泵系统; 车内结构噪声; 噪声控制

Vacuum pump system causes the rapid identification and control of structural noise in the vehicle

Zhang Aiguo

Ruilu Group Co., LTD. (Wenzhou Ruicomi Automotive Electronics Co., LTD.), Wenzhou, Zhejiang 325000

Abstract: for the car in idle state, the driver after the brake pedal, will issue "da da" abnormal noise, using wavelet analysis, quickly identify the noise source for vacuum pump, and carried on the comprehensive analysis, finally determine the noise source is: using the vacuum pump for time, pressure fluctuations in the air, through the "vacuum pump-pipe-fixed bracket-front baffle" structure route, produce noise and conduction to the driver.

Key words: acoustics; vacuum pump system; interior structural noise; noise control

## 引言

车辆的制动性能是国家对其进行强制性规定的一项指标, 对车辆的研究和制造具有非常重要的意义。真空泵是汽车刹车系统中的关键部件, 其结构及工作原理使其在运行时会产生各种噪音。随着人们对车辆 NVH 性能的需求不断增加, 各个汽车厂商也开始重视和开展相关的工作。此外, 由于真空泵系统位于发动机舱, 而发动机舱结构形式多样、形式多样, 因此, 如何从这一复杂耦合系统中识别并排查出噪声来源, 成为汽车工程 NVH 研究的关键和难点。本文从产生异常噪音的原因出发, 给出了 4 个改进的方法: (1) 噪声源优化; (2) 构造通道阻隔; (3) 低刚性隔振路径 (4) 高阻尼路径 (5), 对四种方法进行了比较, 并对四种方法进行了比较, 给出了四种方法在短时间内和长时间内的使用情况, 根据试验结果, 四种方法可以将原来的异常振动峰从 0.69 克减少到 0.23 克, 0.15 克 (没有异常峰) 0.42 克, 0.38 克, 优化结果是显著的。

## 1 真空泵对车内噪声的影响机制

### 1.1 真空泵对车内噪声的影响

对于一款电动汽车, 当其通电时, 踩下制动踏板, 其噪声将明显增大。当踩下制动踏板时, 电子真空泵就会启动, 因此, 电子真空泵的运转会使其内部噪声增大。用试验采集得到的样车背景噪声 (即供电时未踩下制动踏板, 真空泵处于不工作状态时的噪声) 与供电时踩下制动踏板, 在真空泵工作状态下, 车内噪声在 63 Hz、125 Hz、191 Hz 处有明显的峰值分量, 并且车内轰鸣声严重。

### 1.2 噪声源及传递路径分析

电子真空泵是上述车内噪声问题的噪声源, 其本体噪声主要包括: 电机转速及其自身噪声、轴承间隙等造成的运动不平衡、电压电流的不稳定、电磁噪声等。

当刹车真空泵运行时, 它的噪音会从两条路径传递到交通工具中:

(1) 刹车真空泵工作时产生的噪声, 通过发动机和驾驶舱之间的防火墙, 以及车门和车窗的缝隙, 通过汽车内部的空气辐射进入汽车内部。

(2) 在刹车真空泵运转过程中, 结构传声所引起的振动和噪声, 是通过诸如安装支架之类的结构来传输的, 这些结构将声音传到车辆中, 从而为车辆中的人所感受到。

在此基础上, 针对在 63 赫兹, 125 赫兹, 191 赫兹范围内的真空泵内部噪音问题, 进行了详细的分析。

### 1.3 膜片式电动真空泵制动系统

汽车制动系统是一种能够保证汽车安全运行的系统, 其工作原理是利用汽车的制动器和车轮之间的相互摩擦力, 对其进行一定程度的强制

制动, 它可以被划分为驻车制动和行车制动两种类型。停车刹车是指车辆在停车时, 靠刹车系统将车辆保持在停车位置上的动作, 也就是手刹; 行车制动是指车辆在行驶过程中, 依靠制动系统来减速或停车的一种方式, 也就是所谓的脚踏刹车。汽车刹车系统的性能与司机的驾驶安全有着密切的联系, 一旦刹车系统失效, 不仅会对车辆的正常运行造成影响, 而且还会引发交通事故。刹车系统由不同的零件组成, 包括刹车操作装置和刹车执行器。制动操纵机构指的是将驾驶员的制动操作, 通过一系列部件来进行控制, 并将其传递给制动执行机构 (制动器, 分为前轮制动器和后轮制动器) 来进行制动的各种构件。通常情况下, 制动踏板、制动总泵、制动组合阀、真空助力器和制动管路等都包含在内。在刹车控制系统中, 采用了一个真空助力器, 将刹车踏板上的作用力进行放大, 从而解决了司机在刹车时, 由于刹车阻力过大, 无法灵敏刹车, 甚至无法刹车的问题。真空助力器需要有一个稳定的真空源, 在新能源汽车没有发展起来以前, 一般都是通过发动机的进气歧管或机械真空泵来实现。

### 1.4 真空泵的振动噪声传递特性分析

通过实验, 分析了真空泵工作时本体的振动和噪声特征, 并对真空泵到连接支架的振动阻尼程度和传递到车辆内部的噪声分布进行了分析。从试验中可以看出, 泵体在 X 向、Y 向上的振动比 Z 向要大得多, 并且对支座的阻尼比对支座上的阻尼快得多, 对支座上的作用力也少。当频率为 191 Hz 时, 支座方向的振幅大于泵体, 且有增加的趋势。振幅对比分析显示, 在 191 Hz 时, 车厢内的噪音主要是由结构传递的声音。当真空泵脱离车身时, 车厢内的噪音在 191 Hz 时显著下降, 噪音的声压级下降了 20 dB (A) 左右; 在 63 赫兹和 125 赫兹频率下, 车内噪音没有显著下降, 反而在 63 赫兹频率上有轻微上升的趋势。比较结果表明, 63 Hz 和 125 Hz 频率对应的车内噪声主要是空气辐射噪声, 191 Hz 频率对应的车内噪声主要是结构传声。从分析结果可以看出, 车身噪声及其安装方式对汽车内部噪声有较大的影响, 其影响频率分别为 63 赫兹、125 赫兹和 191 赫兹。其中, 以 63 赫兹和 125 赫兹为主要的空气辐射噪声; 在 191 赫兹频段, 主要是通过构造传递的声音。

## 2 优化控制方案

针对此真空泵系统所引起的车辆内部结构噪声, 从声源与传播途径两个方面, 分别提出了 4 项控制与优化方案:

### 2.1 噪声源优化

为了降低真空泵运行过程中的压力波动, 用 190 mL 的真空泵替换了原来的 260 mL 的真空泵, 同时保证了汽车的制动力。从膜片式真空泵的结构及工作原理可以看出, 因为使用了小容量的真空泵, 使得一次吸入、排出的空气量减小, 从而减弱了压力波动引起的冲击, 同时, 降低了所引起的噪声。

在此基础上,对该方案的样件进行了装载试验,并对真空泵管道固定架的振动频谱进行了测试,结果显示,异常噪声的频率(250Hz-550Hz-550Hz-Hz-Mz-Guide)基本上没有了,司机室内的异常噪声也基本上没有了。在时间域中,随着时间的推移,管道固定架的振幅显著降低,最大振幅降低到0.23 g。

2.2 传递路径隔离

通过对真空泵系统的结构分析,发现异常噪声冲击的传递路径是:真空泵-管路-支撑件-前挡板-司机室,为阻断真空泵气体冲击的传递,可以截断该结构的传递路径,去除前挡板上的两个真空泵管线支撑件,对管线方向进行优化,使之与发动机连接。

此方案不仅可有效地阻止膜片式真空泵的空气压力波动对前围板的影响,而且可确保管道安装的稳定性。在项目实施后,因为在原来的真空泵管道上,没有了真空泵的空气对其产生的冲击,所以,在此基础上,所产生的不正常的断续振峰也就随之消失了,司机室内产生的不正常的噪声也随之消失<sup>[1]</sup>。

2.3 路径低刚度隔振

在不改变管道方向的情况下,通过在管道和固定支座间加设低刚性橡胶垫片来削弱空气冲击对真空泵系统的影响。采用该方案后,通过橡胶垫片对真空泵系统的空气冲击作用,使输送到支座上的振幅显著降低,其中该方案对支座的振幅最大为0.42 g的影响。

2.4 路径高阻尼衰减

将减振材料添加到体系中,可以实现如下功能:

- (1) 帮助系统在遭受瞬间的冲击之后迅速返回到一个稳定的状态;
- (2) 帮助减小由机械振动引起的声辐射、减小机械噪音;
- (3) 帮助减小结构的震动传输能力:为更好地抑制由真空泵系统的空气流动引起的在传输路径上的压力波动,可以在真空泵管道和它的固定架之间添加一种减震材料。

根据下列阻尼力的计算公式,可以看出,该阻尼力直接与所述物质的阻尼系数以及撞击速度成比例:

$$F_{damping}=cv$$

式中 c 为阻尼系数,v 为冲击速度。

为提高阻尼力,达到较好的减振效果,选用阻尼系数较高的粘弹性阻尼材料,其常用于车体结构噪声的抑制,对此真空泵产生的结构噪声也有抑制作用。

在设计方案实施后,对应用所设计方案的原型车进行了性能验证。在最大振峰下降到0.38 g的情况下,真空泵线固定架的振动时域数据被显示在图1中。

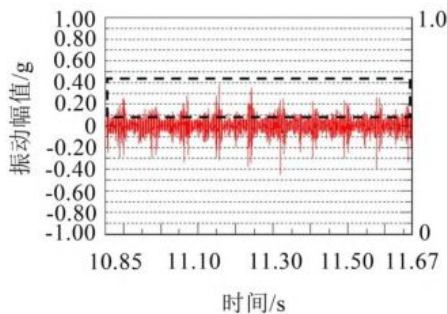


图1 真空泵管路固定支架振动时域数据

2.5 方案对比与分析

图2显示了4种控制和优化方法的振动试验结果,其中真空泵油管固定架在原始状态下的异常振动峰值为0.69 g,司机室内有明显的“哒

哒”声响。经过对噪音源的优化处理,使司机室内的异常噪声降低到0.23 g,并使司机室内的异常噪声基本消除。车室内异常噪声彻底消失;在实施了路径低刚度隔振和高阻尼衰减后,真空泵管线固定支架的异常振动峰值分别下降到0.42 g和0.38 g,司机室内的异响情况得到了显著改善,但并没有完全消除<sup>[2]</sup>。

综上所述,通过比较4个方案的利弊,我们可以将方案3.4用作一个暂时的优化方案,来解决这个问题,而在执行方案2的过程中,我们可以继续进行,最终从长远来看,彻底消除这个问题。

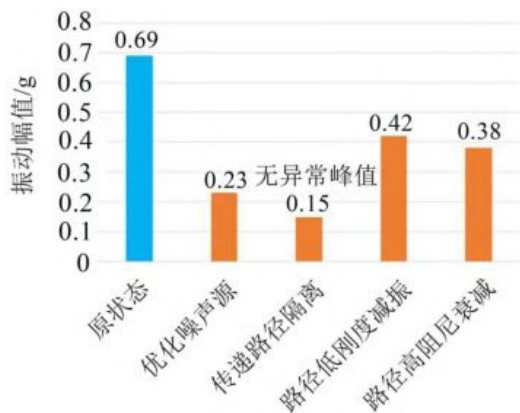


图2 真空泵管路固定支架振动峰值对比

3 结语

当真空泵系统处于一个复杂的机舱中时,可以从时域信号的频谱中提取出问题的特征点,从而判断出问题的根源,但是常规的快速傅立叶变换法对时变系统中出现的暂态异常噪声问题已不适合,小波变换法由于其本身的特点,可以应用于多时域窗的特点。

在利用小波变换进行暂态问题的频谱特性分析时,经常会涉及到两个频率参量,一是冲击振动的频谱,冲击振动信号一般为宽频段,如真空泵的冲击频率在250Hz-550Hz-550Hz-2,二是两次冲击之间的时间间隔,对应的频率在这种情况下,它的频率是11.1 Hz。根据冲击频率,通常情况下,很难判断出问题到底出在哪里。而后者则更具实际价值,尤其是与发动机转速、车速等信号的相关性,可作为故障诊断的重要依据。此时,由于真空泵的动力来自于内燃机,而在空载时,由内燃机产生的压力是11.1赫兹,故可判断故障是出在内燃机上<sup>[3]</sup>。另外,如果采用了电子真空泵,那么建议在检查故障发生的频率时,要同时检查电子控制真空泵的控制信号。

参考文献:

[1]徐猛,袁细祥,石计红,等. 真空泵系统引致车内结构噪声快速识别与控制[J]. 噪声与振动控制,2022,42(4):256-261.  
 [2]吴建龙,赵腾,马正锋,等. 炼钢用低碳绿色机械真空泵系统研发与应用[J]. 重型机械,2022(2):20-26.  
 [3]杨荣林. 钢液真空精炼用全干式真空泵系统的设计及应用[J]. 大型铸锻件,2022(5):37-41.

作者简介:张爱国(1970年1月)男,汉族,河北省霸州市,硕士,工程师/总经理助理,研究方向:汽车制动产品,ABS、ESC、IPB、真空泵、助力器、盘式制动器、踏板、调整臂等等