

柴油机齿轮敲击噪声分析与优化

郭鑫^{1,2}, 彭博^{1,2}, 丁保安^{1,2}, 李秀山^{1,2}, 张安安^{1,2}, 杨铭^{1,2}, 王晓波^{1,2}

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决柴油机测试过程中出现的空压机打气时整机声压级偏高问题,测试柴油机声压级并进行小波变换,从发动机近场噪声及齿轮室振动2个角度进行分析,确定柴油机噪声为齿轮敲击噪声。分析齿轮噪声的产生机理、直齿圆柱齿轮齿侧间隙对齿轮敲击噪声的影响,采用以剪切齿轮代替齿轮系中间过渡齿轮的优化方案,并进行噪声试验验证。试验结果表明,使用剪切齿轮可显著降低齿轮敲击噪声。

关键词:柴油机;直齿圆柱齿轮;剪切齿轮;敲击噪声;齿侧间隙

中图分类号:TK421.6

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2021)06-0054-05

引用格式:郭鑫,彭博,丁保安,等.柴油机齿轮敲击噪声分析与优化[J].内燃机与动力装置,2021,38(6):54-58.

GUO Xin, PENG Bo, DING Baoan, et al. Analysis of knocking noise of diesel engine gear and its optimization[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2021, 38(6):54-58.

0 引言

消费者购买振动小、安静的汽车的意愿越来越强烈,整车噪声、振动与声振粗糙度(noise vibration harshness, NVH)性能成为评价汽车性能的重要指标。内燃机是整车振动及噪声的主要来源,对其进行减振降噪是提升整车NVH水平的重要途径^[1]。

内燃机噪声主要分为燃烧噪声、机械噪声和空气动力噪声^[2]。齿轮传动机构具有传动效率高、结构紧凑、传动比稳定、工作可靠、使用寿命长、适用的圆周速度和功率范围广的特点,在内燃机行业应用广泛。但是直齿圆柱齿轮振动及噪声大,是内燃机机械噪声的主要影响因素,降低齿轮噪声是降低内燃机噪声的关键^[3]。

本文中为解决某柴油机测试过程中空压机打气时出现的整机声压级偏高问题,通过对齿轮啮合及敲击噪声产生的影响因素分析及根据剪切齿轮可有效降低敲击噪声的特点,确定使用剪切齿轮代替齿轮系中间过渡直齿圆柱齿轮的降噪方案,并进行优化前后噪声对比测试,验证剪切齿轮降低敲击噪声的效果。

1 齿轮噪声产生机理

根据产生机理不同,齿轮系统噪声分为啮合噪声与敲击噪声2类。

在齿轮传动时,啮合齿面上存在相对运动,在齿轮啮合处产生滑动摩擦力,相对滑动速度反向时,摩擦力大小、方向的改变导致齿轮啮合点间产生“节点脉冲”现象^[4],随着齿轮转速升高、传动效率增大、表面精度降低,产生较大的啮合噪声。并且由于齿轮安装误差、加工误差以及轮齿刚度周期性变化,导致齿轮系在啮合过程中产生轴向及径向振动激励,激励通过固体传导或者固体表面直接辐射等途径形成齿轮啮合噪声^[5]。

收稿日期:2021-04-09

作者简介:郭鑫(1994—),男,辽宁铁岭人,工程师,主要研究方向为整车NVH仿真、测试及优化, E-mail: guoxin@weichai.com。

在齿轮啮合传动时,齿廓之间必须保持合适的齿侧间隙^[6],以便在齿廓间形成润滑油膜,并避免齿轮因摩擦发热而膨胀卡死。齿侧间隙过大,齿轮啮合时产生较大的啮合冲击,产生“咔哒”“咔哒”的敲击噪声。在实际生产、装配过程中,受齿轮加工误差、装配误差、齿轮传动尺寸链过长以及机体位置度等因素影响,很难将齿侧间隙控制在理想范围内,极易产生齿轮敲击噪声^[7]。

2 剪切齿轮降噪机理

剪切齿轮由主齿轮、副齿轮、定位销及支撑钉等组成,如图1所示。剪切齿轮装配时,调整主、副齿轮上3颗支撑钉孔中心的偏置量,主、副齿轮通过定位销定位,将支撑钉压装进主、副齿轮对应的支撑钉孔,最后拔出定位销,完成安装。齿轮系运行时,齿轮副驱动侧隙距离与背隙侧距离在齿轮啮合时交替变化,齿轮副相互撞击产生敲击噪声。剪切齿轮的主、副齿轮错开一定角度,可以减小相邻齿轮的齿侧间隙,降低齿轮副之间的相互撞击力,并且剪切齿轮支撑钉上半部分装有橡胶材料,起到支撑及减振作用,从而降低齿轮敲击噪声^[8]。



图1 剪切齿轮照片

3 噪声测试及优化

试验用6缸4冲程柴油发动机后端齿轮系采用直齿圆柱齿轮传动,测试过程中发现空压机在打气时,整体声压级偏高,与卸荷后状态形成鲜明对比,主观感受“咔哒”“咔哒”异响严重。为降低齿轮系噪声,将空压机齿轮与曲轴齿轮中间的过渡齿轮由直齿圆柱齿轮更换为剪切齿轮,并对优化前、后状态进行噪声测试,验证其优化效果。

3.1 齿轮敲击噪声测试及分析

试验用柴油机的怠速为700 r/min,空压机与曲轴速比为1.116:1。对柴油机进行整机噪声测试,以确定柴油机噪声特性以及最大噪声源。

整机噪声测试在半消声室内进行,依据文献[9]规定的方法进行试验,测试工况为怠速工况,试验时对中冷前后管路、排气管路进行包裹,将空压机进、排气引出至试验室外部。

测试麦克风布置如图2所示。图2中蓝色矩形代表柴油机最小包络面面积,顶部测点麦克风与柴油机缸体上沿的距离为1 m;前、后、左、右麦克风与柴油机缸体的横向距离均为1 m,麦克风纵向高度为顶部测点离开地面距离一半。齿轮室壳体振动测点如图3所示。

怠速打气与卸荷工况下,空压机近场1 m处的声压级如图4所示。由图4可知:空压机打气时的声压级较卸荷后高3.11 dB,打气噪声偏高。

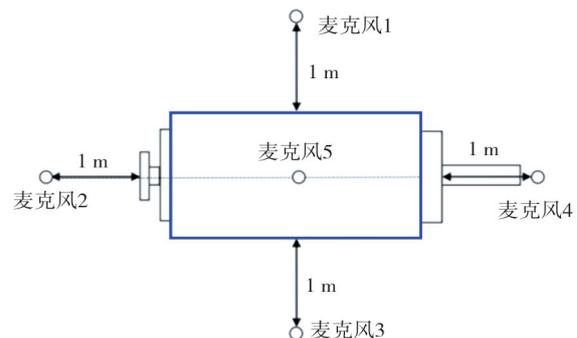


图2 噪声测试麦克风布置图

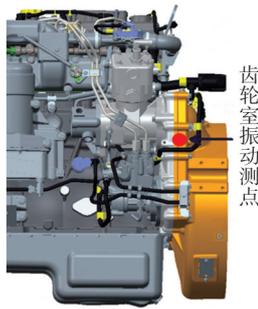


图3 齿轮室壳体振动测点

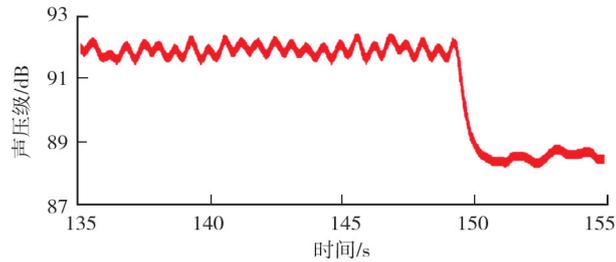


图4 空压机近场1 m处声压级曲线

经小波变换^[10]后的发动机近场1 m处噪声频谱如图5所示。由图5可知,小波变换后空压机打气时的噪声能量主要集中在2500~5500 Hz,时间间隔为0.077 s,与空压机工作时间间隔一致^[11]。

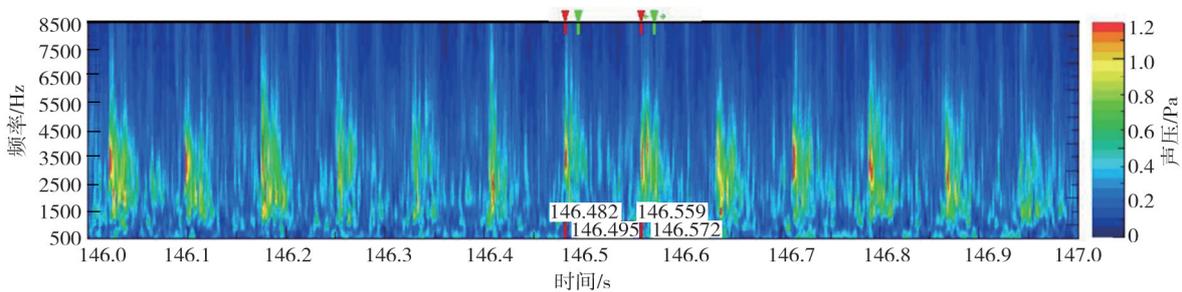


图5 发动机近场1 m处噪声频谱图

齿轮室壳体振动频谱图如图6所示(图中 g 为自由落体加速度)。由图5、6可知,噪声频率特征、时间特征与齿轮敲击特征完全符合,近场噪声能量与齿轮室振动能量趋势一致,声振耦合^[12]。因此确定空压机打气时柴油机1 m处声压级偏高的主要原因为齿轮系齿轮敲击噪声过大。

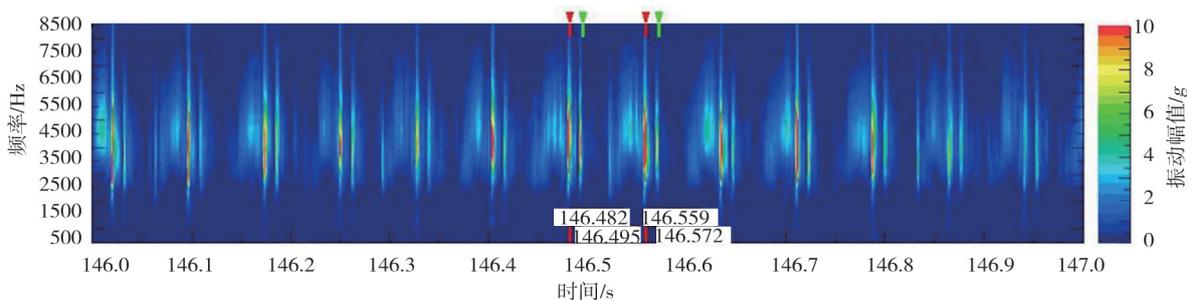


图6 齿轮室壳体振动频谱图

当活塞上行时,曲轴齿轮驱动空压机齿轮运动,空压机开始打气,缸内气压增加^[13]。当活塞下行时,空压机内高压气体驱动活塞,空压机转速瞬间加快,导致空压机齿轮转速大于曲轴齿轮转速,此时空压机齿轮驱动曲轴齿轮转动,且空压机齿轮先脱离后啮合,齿轮先后连续2次敲击,产生敲击噪声^[14]。试验用柴油机后端齿轮系均采用直齿圆柱齿轮传动,当齿轮系齿侧间隙较大时,齿轮敲击能量较高,产生较大的齿轮敲击噪声。

3.2 降噪优化方案

齿轮噪声的表现形式不同,优化方法也不同。该柴油机齿轮噪声主要表现为敲击噪声,因此采用剪切齿轮降低噪声。优化后的齿轮系布置方案如图7所示,图中齿轮系左上方为空压机齿轮,右下方为发动机曲轴驱动齿轮,中间过渡齿轮由直齿圆柱齿轮更换为直齿剪切齿轮,齿轮剪切量控制在 $(0.43 \pm$

0.10)mm。剪切齿轮的主、副齿轮错开一定角度,产生剪切量,从而减小相邻啮合齿轮间的齿侧间隙,降低齿轮敲击能量和齿轮敲击噪声。

3.3 优化效果验证

怠速工况下对优化后的柴油机近场1 m处的整机噪声进行测试,试验测点及试验方法与优化前均保持一致。将优化前、后2种状态进行对比,结果如表1所示。通过试验数据可知,更换剪切齿轮后,空压机打气时发动机近场1 m声压级降低2.64 dB,打气声压级差值降低3.5 dB。



图7 剪切齿轮方案布置

表1 优化前后声压级对比

发动机齿轮	怠速打气声压级	怠速打满气后声压级	打气声压级差值
直齿圆柱齿轮	91.75	88.64	3.11
直齿剪切齿轮	89.11	88.50	0.61

发动机近场1 m处,小波变换后噪声频谱图如图8所示。与图5相比,柴油机近场齿轮敲击能量明显降低,降噪效果明显。

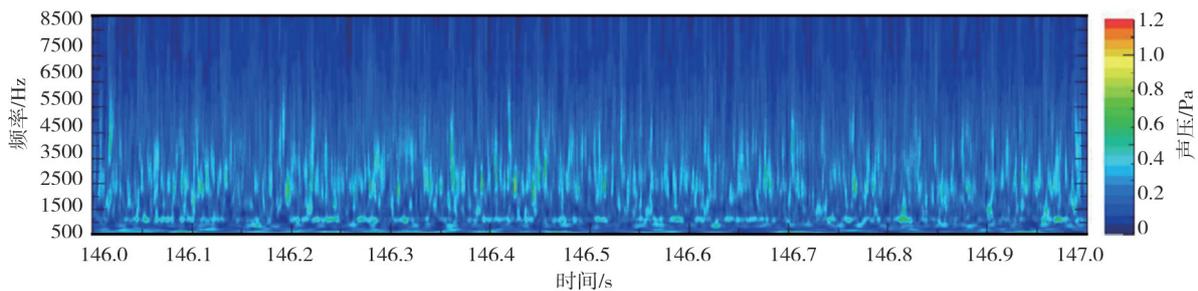


图8 优化后发动机近场1 m处噪声频谱图

4 结语

以柴油机后端齿轮系为研究对象,通过声压级测试及小波变换,从发动机近场噪声及齿轮室振动2个角度进行分析,确定采用剪切齿轮代替原直齿圆柱齿轮,优化方案可以有效减小齿侧间隙,降低齿轮敲击能量和敲击噪声。该方案对实际工程应用中剪切齿轮设计及产品规划具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 庞剑, 谌刚, 何华. 汽车噪声与振动: 理论和应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [2] 王建昕, 帅石金. 汽车发动机原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [3] 王丽娟, 黄清世, 邹雯. 齿轮发展研究综述[J]. 机械研究与应用, 2008(1): 17-18.
- [4] 任丰兰, 周尧晨. 齿轮传动噪声的优化设计[J]. 农机使用与维修, 2020(10): 17-18.
- [5] 黄其柏, 师汉民, 卢文祥, 等. 齿轮啮合噪声辐射特性研究[J]. 农业机械学报, 1993(4): 80-85.
- [6] 刘本超. 汽车振动测试与分析系统的研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [7] 闻邦椿. 机械系统的振动设计及噪声控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [8] 王学莲. 对渐开线圆柱齿轮噪声的探讨[J]. 机械工程与自动化, 2017(3): 192-194.
- [9] 中国机械工业联合会. 往复式内燃机 声压法声功率级的测定: 第3部分: 半消声室精密法; GB/T 1859.3—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

- [10] 蔡建进, 邵明亮. 小波降噪在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 厦门理工学院学报, 2008, 16(2): 28-31.
- [11] 武倩平. 基于噪声的旋转机械故障诊断研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [12] 谭详军. 从这里学 NVH[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [13] 陈伟. 汽车振动测试分析系统的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [14] 黄其柏, 杨叔子, 师汉民. 低噪声齿轮副最佳齿侧间隙的确定方法研究[J]. 噪声与振动控制, 1992(5): 26-28.

Analysis of knocking noise of diesel engine gear and its optimization

GUO Xin^{1,2}, PENG Bo^{1,2}, DING Baoan^{1,2}, LI Xiushan^{1,2},
ZHANG An'an^{1,2}, YANG Ming^{1,2}, WANG Xiaobo^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261061, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 61061, China

Abstract: In order to solve the problem of high overall sound pressure level of air compressor during air injection in the test process of a diesel engine, the sound pressure level test and wavelet transform of the diesel engine are carried out. The noise of the diesel engine is determined as gear knocking noise from the perspectives of engine near-field noise and gear chamber vibration. By analyzing the generation mechanism of gear noise, the influence of gear side clearance of spur gear on gear knocking noise and the noise reduction principle of shear gear, the optimization scheme of replacing the intermediate transition gear of gear system with shear gear is determined and verified. The test results show that the knocking noise of gear can be significantly reduced by using shear gear.

Keywords: diesel engine; spur gear; shear gear; knocking noise; gear side clearance

(责任编辑: 郎伟锋)

.....
(上接第 48 页)

combustion stroke, and at the engine speed 3000-5000 r/min, that is about 300°-320° before top dead center of combustion stroke. For the double injection strategy, the appropriate second injection end phase and split injection ratio could improve the fuel economy and PN emission. With the increase of engine speed and load, better economy and emission could be obtained by postponing the second injection end phase and increasing split injection ratio.

Keywords: GDI engine; injection timing; injection pressure; pollutant emissions; PN

(责任编辑: 张啸虎)