

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.12.008

基于齿面波纹度的齿轮啮合噪声分析理论

于振辉^{1,2}, 夏 铤^{1,2,3}, 韩 江^{1,2,3}, 田晓青^{1,2,3}

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省智能数控技术及装备工程实验室, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥工业大学 机械工程国家级实验教学示范中心, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章提出一种基于齿面波纹度的齿轮啮合噪声分析理论,通过对齿轮全齿面的拓扑测量、齿面波纹度分析,对比全齿波纹度图、高阶频谱图的阶次振幅大小与三维形貌图中啮合线、波纹线的接近程度,实现对高速低噪齿轮的噪声分析。基于齿面波纹度分析技术,弥补传统齿轮测量在精度一致时无法辨别齿轮啮合噪声的缺点,可在生产周期前期对故障齿轮进行筛选,降低检测成本;基于新能源汽车变速箱,分析输入轴齿轮批次更换时反复出现噪声的原因,对测量的拓扑数据进行波纹度计算。结果显示,齿轮右齿面存在鬼阶和整阶不良,推断在啮合时产生噪声,该分析结果与变速箱台架实验结果一致。

关键词:新能源汽车; 啮合噪声; 齿轮测量; 齿面波纹度

中图分类号: TH132.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)12-1635-08

Research on gear meshing noise analysis theory based on tooth surface waviness

YU Zhenhui^{1,2}, XIA Lian^{1,2,3}, HAN Jiang^{1,2,3}, TIAN Xiaoqing^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Engineering Laboratory of Intelligent CNC Technology and Equipment, Hefei 230009, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In this paper, a gear meshing noise analysis theory based on tooth surface waviness is proposed. Through topological measurement and waviness analysis on full gear tooth surface, the amplitude of ripple above the rotation angle and the high orders of the spectrum are compared. Furthermore, how close the meshing line is to the waviness line in the microtopography is also compared. Then, the noise behavior of high-speed and low-noise gears can be analyzed. The technology of tooth surface waviness analysis can make up for the shortcomings of traditional gear measurement methods that cannot distinguish gear meshing noise under the condition of the same accuracy. Unqualified gears can be removed from the early stage of the production cycle, which reduces a lot of inspection costs. Based on a new energy vehicle gearbox, the reason for repeated noise during the batch replacement of input shaft gears is analyzed. The measured topological data is used for waviness analysis and calculation. The result shows that there is gear order noise and ghost order noise on the right tooth surface of one of the gears. It may cause noise in meshing process. The analysis result is consistent with the experimental result of the gearbox.

Key words: new energy vehicle; meshing noise; tooth surface detection; tooth surface waviness

随着新能源汽车的普及与发展,驱变控一体化技术显著提升,对变速箱提出了高速、高精度、低噪音的挑战。新能源汽车变速器较传统变速器

技术要求更高,齿轮作为变速箱中最重要的部分,其设计制造和测量分析至关重要^[1]。

传统测量分析在齿轮精度方面非常有用,但

收稿日期:2022-03-09;修回日期:2022-04-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFE0201000);国家自然科学基金资助项目(51875161;52075142)

作者简介:于振辉(1997—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

夏 铤(1964—),女,四川乐山人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

韩 江(1963—),男,河南洛阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

无法为噪声分析提供深入且易于分析的数据^[2]。因为传统的齿轮质量检测只能用于分析与低阶谐波相关的故障,而噪声与齿面的高阶谐波相关,所以引入齿面波纹度检测,使用快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT)兼顾高阶和低阶谐波数据,关联检测结果与噪声分析,对高性能齿轮进行分析。

表面波纹度在轴承等表面连续的零件中应用广泛^[3-5],齿轮表面测量的不连续性导致其应用较少。文献[6]对工件表面质量中波纹度的定义及其相关主要参数进行分析;文献[7]将齿面波纹度质量差的几种情形进行分类,列出影响齿面波纹度的主要因素;文献[8]指出齿面波纹度对噪声

的影响取决于啮合接触线方向的阶次振幅情况;文献[9]提出一种补偿正弦函数的算法,对鬼频和啮合频率进行了分析;文献[10]以相关实例证实了从齿面波纹度检测结果中可以得到噪声问题来源。

综上所述,目前国内对于齿面波纹度的研究还较为浅显,本文研究的变速箱齿轮啮合噪声检测基本流程如图 1 所示。对故障齿轮进行检测,在齿轮传统测量结果满足精度要求时,对齿面波纹度进行测量处理,依次对得到的全齿波纹度曲线、高阶频谱图和三维形貌图进行分析,判断齿轮是否会在啮合时产生噪声。开展相关实验分析,通过结果对比验证该方法的有效性。

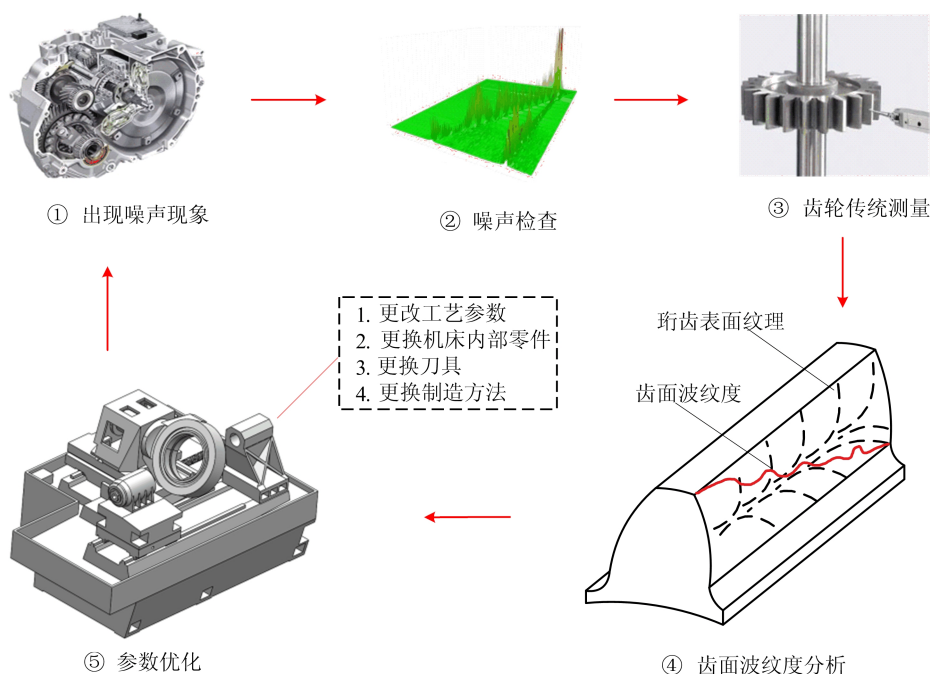


图 1 变速箱齿轮啮合噪声检测基本流程

1 齿面波纹度理论分析

齿轮的表面形貌主要分为齿形误差、齿面粗糙度、齿面波纹度、加工表面纹理 4 种。齿面粗糙度是对单齿进行分析,而齿面波纹度是对全齿进行分析。本节首先介绍齿面波纹度的基本概念、形成原因及影响;然后介绍基于波纹度曲线、频谱、形貌的综合分析方法;最后对全齿波纹度曲线、高阶频谱图及三维形貌图进行理论分析。

1.1 波纹度基本概念

齿面波纹度是由间距比齿面粗糙度大得多的、随机的或接近周期形式的成分构成的表面不平度,通常包含当齿轮加工时由意外因素引起的

不平度,例如,由一个工件或某一刀具的失控运动所引起的齿面变化。

在齿轮的加工中,波纹度产生的原因主要有 2 种:刀具误差在齿轮表面上的简单再现;加工时机床、刀具等部件的振动产生。齿面波纹度在齿轮传动的两方面产生影响,首先使齿面接触强度、接触应力产生变化,改变齿面的接触状态;其次会增大齿轮传动误差,大大降低齿轮传动效率^[11]。这是齿轮设计的关键指标,因此齿面波纹度不良将直接影响零件表面机械性能,导致齿轮在装入变速箱后产生较大噪声。

齿面波纹度主要评定参数包括波纹度轮廓间距、轮廓算数平均偏差、均方根偏差、不平度的间

距、平均间距等。这些参数大小可以判断齿面加工质量,但与齿轮啮合噪声并无直接关联,且以上部分参数已被证明与噪声无关^[12]。因此必须对齿面波纹度进行进一步的处理,才能了解与噪声的关联性。

1.2 基于波纹度曲线、频谱、形貌的综合分析

本文提出一种基于波纹度曲线、频谱、形貌的分析方法,对齿面波纹度处理得到的全齿波纹度曲线、高阶频谱图、三维形貌图如图 2 所示。

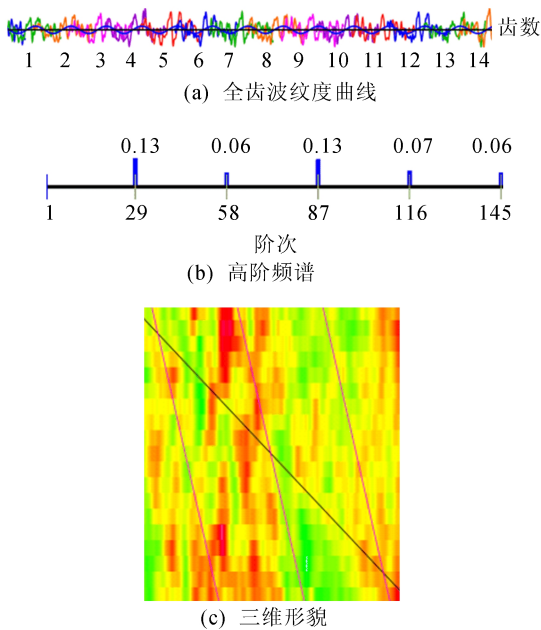


图 2 全齿波纹度曲线、高阶频谱和三维形貌

对全齿波纹度曲线进行分析,判断正弦波的振幅。将齿面进行全齿面测量得到的“Z”条曲线作为输入数据,通过 FFT 进行频谱分析,根据频谱图的异常振幅出现位置以及大小进行判断。分析单个齿面的三维形貌图,判断波纹趋势曲线与齿轮啮合接触线的夹角大小。

1.2.1 全齿波纹度曲线

由于齿轮测量的不连续性,每个齿都是独立分开的,无法直接使用 FFT 进行分析,需要旋转一定的角度将所有单个齿的波纹度曲线进行连接。旋转角度计算^[9]如图 3 所示。

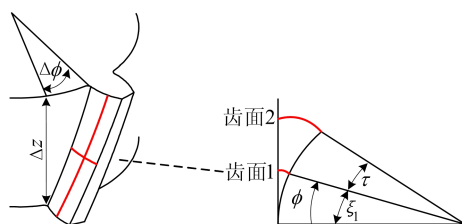


图 3 旋转角度计算

计算公式如下:

$$\Delta\phi = \frac{2\Delta z \tan \beta}{D} \quad (1)$$

$$\phi = -\xi_1 - \Delta\phi = -\xi_2 + \tau - \Delta\phi \quad (2)$$

其中: Δz 为斜齿轮两端部的轴向距离; β 为螺旋角; D 为节圆直径; ϕ 为旋转角度; ξ 为展成角; τ 为齿距角。

将每个齿的波纹度测量曲线进行连接,得到全齿的波纹度曲线。为方便在间隙和重叠时进行计算,采用正弦函数进行计算补偿。单齿的波纹度曲线需多测部分长度,便于后续连接。补偿正弦波模拟波纹度曲线如图 4 所示。

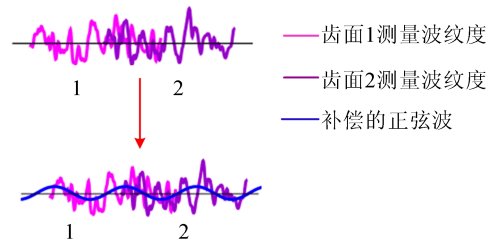


图 4 补偿正弦波模拟波纹度曲线

在分析全齿波纹度曲线时,观察补偿正弦波的振幅大小,若某个齿轮出现较大振幅,则该齿轮可能会在啮合过程中产生噪声。

1.2.2 高阶频谱图

高阶频谱图是对齿面进行傅里叶分析,原始输入数据是对齿轮齿面进行全齿面测量得到的“Z”条曲线,即齿形齿向检测报告。

频谱图的横坐标为阶次,纵坐标为振幅,一般情况只需要分析到 5 倍齿数以内的阶次便可发现噪声的产生趋势,全阶次频谱如图 5 所示,图 5 中分为齿轮副啮合阶次及倍频阶次、齿面波纹度产生的“鬼阶次”及由于调制现象引起的边带。

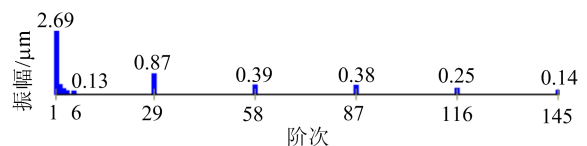


图 5 全阶次频谱

低阶频谱如图 6 所示,由于低阶振幅对噪音的影响非常小,1 阶对应齿轮偏心,2 阶相当于齿轮做椭圆形运动,3 阶对应 3 个高点的三角形,4 阶对应于 1 个矩形,以此类推,因此一般会将低阶频谱过滤掉,只考虑高阶频谱。

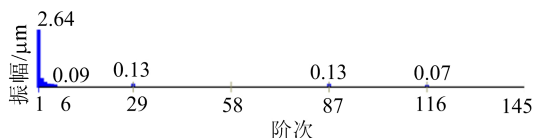


图 6 低阶频谱

高阶频谱如图 7 所示, 在高阶频谱图和全阶次频谱图中, 啮合频率基本存在, 而高阶频谱图中实际存在的低频均消失了, 便于观察分析。

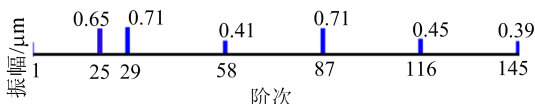


图 7 高阶频谱

若在齿轮副啮合阶次及倍频阶次产生较大振幅, 则为齿轮整阶不良, 由齿轮副在啮入啮出时冲击较大造成的。在非整数倍阶次产生较大振幅, 即产生“鬼阶次”, 由齿面波纹度不良造成的。

1.2.3 三维形貌图

单齿的表面微观结构三维形貌如图 8 所示, 采用克林贝格齿轮测量机 P65 对齿轮进行测量。图 8 中: 黑色线为齿面啮合线, 角度为 β_b ; 红色线为波纹趋势线, 角度为 β_w 。

全齿面波纹由齿形波纹和齿向波纹综合得出, 即 β_w 由齿形波纹的波长 L_p 和齿向波纹的波长 L_h 共同决定^[10], 齿形、齿向波纹如图 9 所示。

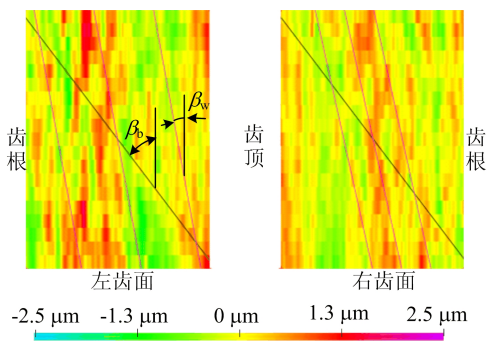


图 8 三维形貌

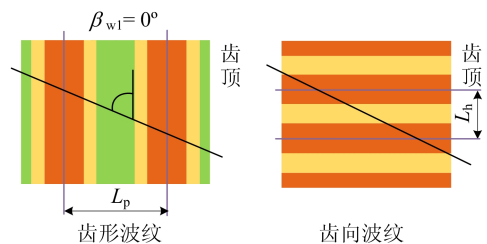


图 9 齿形、齿向波纹

波纹度趋势线 β_w 计算关系式为:

$$\beta_w = \arctan \frac{L_p}{L_h} = \arctan \left(\frac{d_b \pi O_h}{O_p p_z} \right) = \arctan \left(\frac{O_h}{O_p} \tan \beta_b \right) \quad (3)$$

其中: d_b 为基圆直径; O_p 为齿形方向阶次; O_h 为齿向方向阶次; p_z 为导程。

驱动面的接触线和波纹线夹角越小, 产生噪音的概率越大, 齿轮在啮合过程中驱动面会有规律地接触到齿面波纹度的波谷和波峰, 引起冲击, 从而产生噪音。 $\beta_w = \beta_b$ 时的三维形貌如图 10 所示, 当波纹线和接触线平行时, 产生噪音的概率最大。

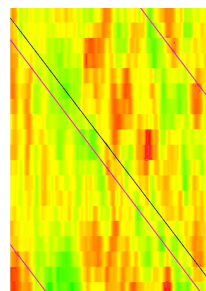


图 10 $\beta_w = \beta_b$ 时的三维形貌

2 齿轮检测结果及分析

基于某款新能源汽车变速箱批量出现 NVH(noise vibration harshness) 不良, 在输入轴齿轮批次更换过程中出现噪声, 输入轴齿轮为内齿珩轮强力珩齿加工, 参数见表 1 所列。

现有连续两天加工出来的 2 批齿轮, 每天代表不同批次, 依次记为 1 号齿轮、2 号齿轮。对 2 组齿轮进行齿轮传统质量及波纹度检测。

表 1 工件齿轮基本参数

基本参数	数值
齿数	29
左旋螺旋角 / (°)	22
法向模数 / mm	1.65
法向压力角 / (°)	19
齿宽 / mm	24

2.1 传统齿轮质量检测

对 1 号和 2 号齿轮进行传统齿轮质量检测, 检测结果包括齿轮的齿形、齿向、鼓形量等误差, 检测时将齿形和齿向分别平均划分 15 条线。对 1 号、2 号齿轮的质量检测报告进行分析, 结果均满足珩齿齿轮精度要求, 达到 5 级精度。由于无法直观判断齿轮产生噪声的组别, 需进一步进行齿面波纹度检测。

2.2 波纹度检测

本文提出的波纹度检测分别为全齿波纹度曲线、高阶频谱图、三维形貌图,分别对 1 号、2 号齿轮进行检测,得到并分析测量结果。

2.2.1 全齿波纹度曲线检测结果

如前文所述,观察旋转角度后生成的全齿波纹度曲线,讨论拟合后的振幅大小是否符合预期,1 号齿轮检测结果如图 11 所示,2 号齿轮检测结

果如图 12 所示。图 11、图 12 中: A 代表振幅,单位为 μm ; O 代表对应阶次。

由图 11、图 12 可知,在齿形测量结果中,1 号齿轮右齿面在 29 阶时振幅最大,为 $0.13 \mu\text{m}$,左齿面在 87 阶时振幅最大,为 $0.18 \mu\text{m}$,且测量曲线中并未出现异常处;2 号齿轮右齿面在 29 阶时振幅最大,为 $0.32 \mu\text{m}$,左齿面在 29 阶时振幅最大,为 $0.31 \mu\text{m}$ 。

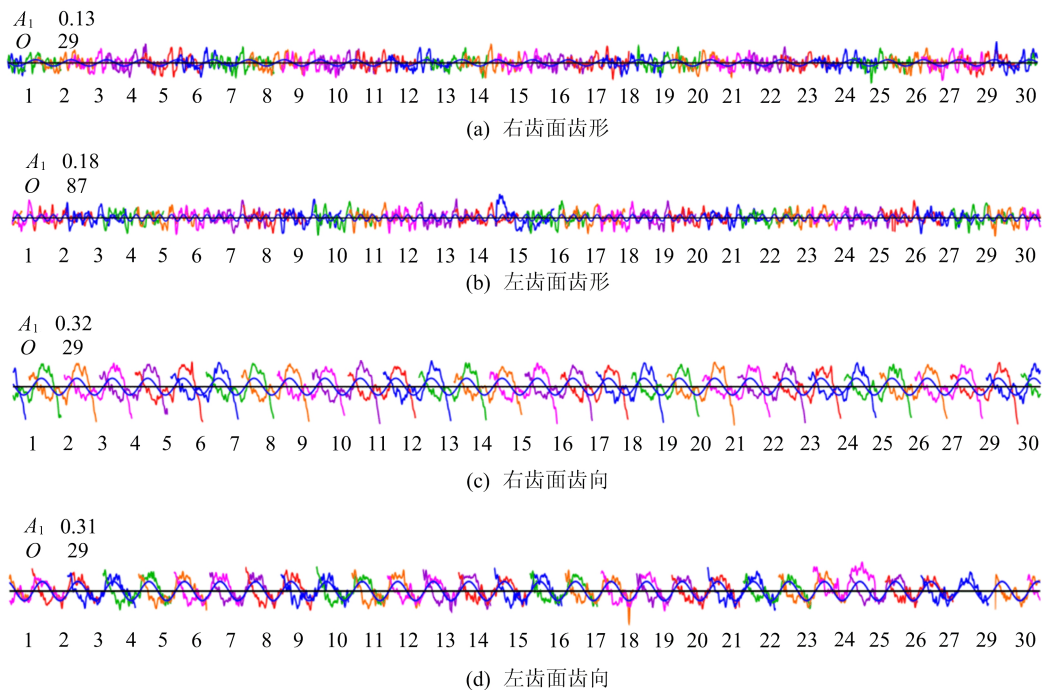


图 11 1 号齿轮全齿波纹度曲线

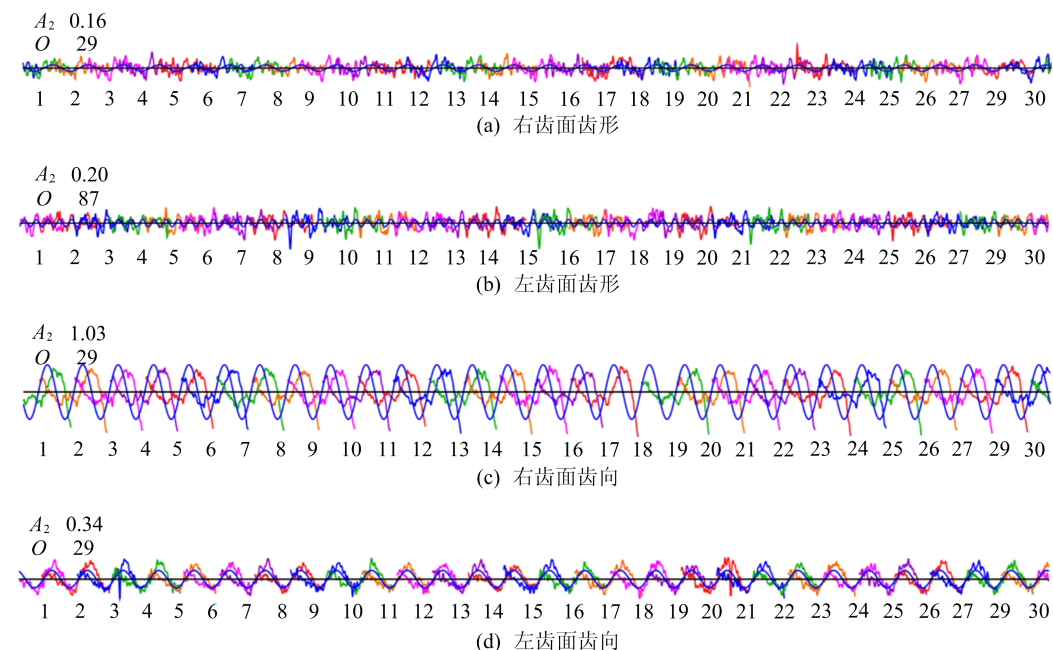


图 12 2 号齿轮全齿波纹度曲线

在齿向测量结果中,1号齿轮右齿面在29阶时振幅最大,为 $0.16\ \mu\text{m}$,左齿面在87阶时振幅最大,为 $0.20\ \mu\text{m}$,且测量曲线中未出现明显凸起或异常;2号齿轮右齿面与左齿面均在29阶时振幅最大,分别为 1.03 、 $0.34\ \mu\text{m}$,测量曲线中也未出现明显凸起或异常处。

在齿向测量结果中,2号齿轮右齿面的基频

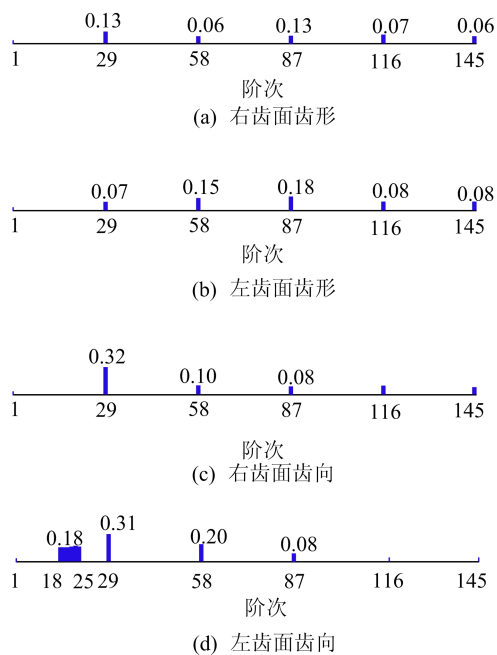


图 13 1号齿轮高阶频谱

振幅为 $1.03\ \mu\text{m}$,对应的1号齿轮只有 $0.32\ \mu\text{m}$,故2号齿轮的右齿面可能存在问题,即若将2号齿轮作为输入轴齿轮,且以右齿面驱动时,2号齿轮极有可能产生较大的噪声。

2.2.2 高阶频谱图检测结果

只考虑高阶频谱图,1号、2号齿轮高阶频谱分别如图13、图14所示。

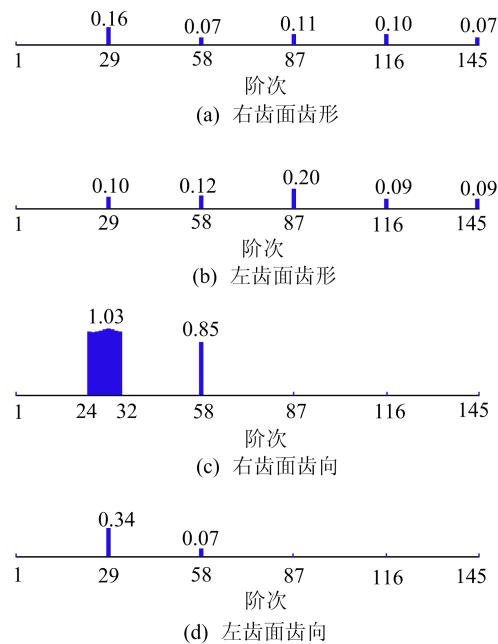


图 14 2号齿轮高阶频谱

由图13、图14可知,在齿形检测结果中,1号、2号齿轮的左右齿面无明显差别,且振幅均符合正常范围。

在齿向检测结果中,1号齿轮右齿面在18~25阶中连续出现 $0.15\ \mu\text{m}$ 左右的振幅,幅值较小,存在轻微的鬼阶噪音;2号齿轮在29阶处产生 $1.03\ \mu\text{m}$ 的振幅,在24~32的鬼阶次存在较大振幅,且在二次谐波上产生 $0.85\ \mu\text{m}$ 的振幅。无论是在啮合频率、倍频、齿面波纹度对应阶次上,2号齿轮的振幅均较大。

高阶频谱图的检测结果与全齿波纹度图的结论相同,即2号齿轮右齿面存在较大问题,存在整阶不良,且鬼阶噪声明显。

2.2.3 三维形貌图检测结果

对齿面的微观三维形貌图进行检测,1号、2号齿轮三维形貌如图15、图16所示。图15、图16中当波纹线在啮合接触线右侧时,夹角记为正值,左侧为负。由图15、图16可知:1号齿轮的左齿面波纹线和接触线的夹角为 45° ,右齿面为

-0.22° ;2号齿轮左齿面波纹线和接触线的夹角为 42° ,右齿面为 2.5° 。2号齿轮右齿面的波纹线和接触线更接近,因此以2号齿轮的右齿面作为驱动面时,驱动面会有规律地接触到波纹度的波谷和波峰,产生较大噪声。

综上所述,在经过对2组齿轮的全齿波纹度曲线、高阶频谱图以及三维形貌图的分析后得出的结论一致,相比1号齿轮来说,2号齿轮的右齿面存在问题。

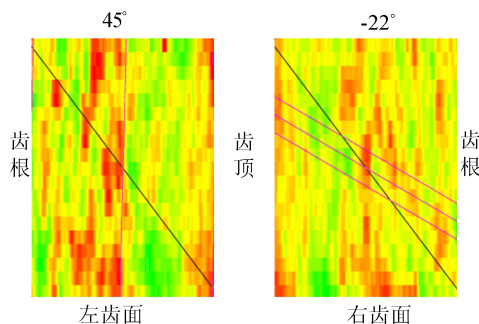


图 15 1号齿轮三维形貌

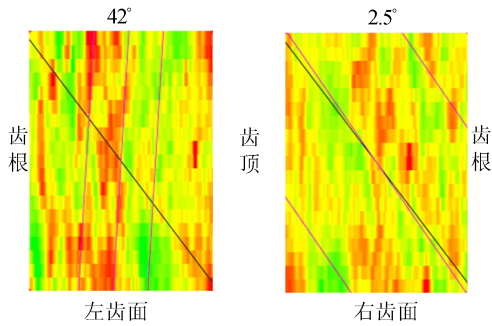


图 16 2号齿轮三维形貌

3 实验分析

该新能源汽车变速箱的传动系统结构较为简单,只有 2 级齿轮传动,以输入轴为基准计算各齿轴阶次取值见表 2 所列。

表 2 各齿轮轴阶次取值

位置	H_1	H_2	H_3
输入轴与中间齿啮合	29	58	87
中间轴轴频	0.35	0.70	1.05
中间轴与输出齿啮合	8.38	16.77	25.16
输出轴轴频(减速比)	0.099	0.197	0.296

以波纹度分析结果为参考进行实验验证,可以明显看出,2 号齿轮的右齿面存在较大问题,且 2 组齿轮为连续 2 d 加工出来的齿轮,加工参数并未做出调整,故本文分别将 1 号齿轮的右齿面和 2 号齿轮的右齿面作为驱动面进行分析。

由于变速器齿轮噪声受到支撑刚性、制造误差、装配误差等多种因素影响,需将 2 组齿轮与同一被动轮啮合,齿数为 83 齿,22° 右旋,且被动轮齿面状态良好。将 2 组齿轮分别放入变速箱中进行 EOL(end of line) 台架实验,使用德国 DISCOM 公司的 ROTAS 噪音振动分析系统进行测量,变速箱噪音对比如图 17 所示。

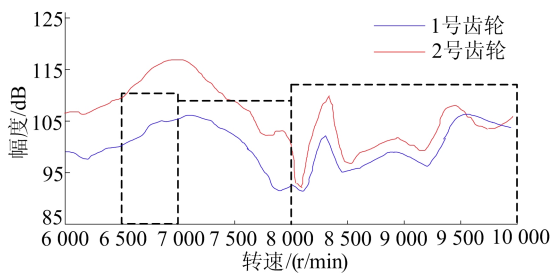


图 17 变速箱噪音对比

图 17 中:蓝色线为 1 号齿轮右齿面作为驱动

面的结果,红色线为 2 号齿轮右齿面作为驱动面的结果。

由图 17 可知,2 组齿轮整体走势相同,图中用虚线将曲线分为 3 段。第 1 段中,噪音水平逐步提升,并达到最高;第 2 段中,噪音逐渐减小;第 3 段中噪音变化较大。本实验的内齿珩轮强力珩齿转速基本维持在 6 000 ~ 8 000 r/min。

当 2 号齿轮右齿面为驱动时,曲线整体都在 1 号齿轮之上,即 2 号齿轮产生的噪声水平整体都在 1 号齿轮之上,与之前的波纹度检测预期结果符合,即以 2 号齿轮的右齿面作为输入轴齿轮驱动面时,变速箱会产生较大噪声。

4 结 论

本文提出一种基于波纹度分析的齿轮啮合噪声评估方法,在满足传统齿轮测量精度要求的情况下,通过全齿波纹度曲线、高阶频谱图和三维形貌图的波纹度检测,均发现 2 号齿轮右齿面作为驱动面时,变速箱可能会产生较大噪声。在装入变速箱进行实验后,现场实验结果表明,当以 2 号齿轮右齿面为驱动面时,会产生更明显的噪声,得到与波纹度分析相同的结论。

在改善齿面波纹度不良方面提出如下措施:

- ① 通过齿面波纹度对应检测结果可知,珩齿机的振动问题较大,因此须减小工艺系统的振动,振动是产生波纹度的主要原因;
- ② 2 号齿轮齿面的整阶不良较为严重,是由于齿轮副在啮入啮出时产生较大冲击,工件齿轮齿面在啮入啮出的位置产生了微小的翘曲变形,虽然该翘曲量在齿轮质量检测报告范围内,但仍会造成啮入啮出冲击;
- ③ 改变切削量,珩削加工中,在不影响工艺系统振动的前提下,可以通过提高珩磨轮的速度来降低齿面波纹度;
- ④ 正确选择珩磨轮和提高工件的硬度,珩磨轮磨料的种类会影响工件齿面波纹度;
- ⑤ 修整珩磨轮和使用冷却润滑液。

齿轮是在承载条件下传动的,齿面啮合力使初始波纹度发生变形,最终变形后的波纹度才是齿轮高频振动的激励,而测量时的条件是静态不加载的,存在一定的误差。

更为重要是确定问题出现的工序,根据具体环节进行优化,提前在设计和制造过程中发现问题,从而最大程度地节省人力物力,达到更好的 NVH 性能。

(下转第 1658 页)

- 述[J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 2319-2336.
- [3] 李维刚, 叶欣, 赵云涛, 等. 基于改进 YOLOv3 算法的带钢表面缺陷检测[J]. 电子学报, 2020, 48(7): 1284-1292.
- [4] 杨珂, 方诚, 段黎明. 基于深度学习模型融合的铸件缺陷自动检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 150-159.
- [5] 何彧, 宋克臣, 张德富, 等. 融合多层次特征的弱监督钢板表面缺陷检测算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 687-692.
- [6] 于海涛, 李福龙, 刘亚姣, 等. 改进注意力机制的型钢表面微小缺陷检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(11): 250-259.
- [7] LIU Y, GENG J H, SU Z F, et al. Real-time classification of steel strip surface defects based on deep CNNs[C]// Proceedings of 2018 Chinese Intelligent Systems Conference. [S. l.]: Springer, 2019: 257-266.
- [8] 朱晓璐, 韩林, 邹香玲. 基于 SIFT 特征与多层 BP 神经网络的钢板缺陷检测算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(10): 54-56, 61.
- [9] WANG H Y, ZHANG J W, TIAN Y, et al. A simple guidance template-based defect detection method for strip steel surfaces[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(5): 2798-2809.
- [10] NEVEN R, GOEDEME T. A multi-branch U-Net for steel surface defect type and severity segmentation[J]. Metals, 2021, 11(6): 870.
- [11] 徐镗, 朱洪锦, 范洪辉, 等. 改进的 YOLOv3 网络在钢板表面缺陷检测研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(16): 265-272.
- [12] 翁玉尚, 肖金球, 夏禹. 改进 Mask R-CNN 算法的带钢表面缺陷检测[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(19): 235-242.
- [13] LIU K, WANG H Y, CHEN H Y, et al. Steel surface defect detection using a new Haar-Weibull-variance model in unsupervised manner[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(10): 2585-2596.
- [14] CAI Z W, VASCONCELOS N. Cascade r-cnn: Delving into high quality object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2018: 6154-6162.
- [15] QIAO S Y, CHEN L C, YUILLE A. Detectors: detecting objects with recursive feature pyramid and switchable atrous convolution[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2021: 10213-10224.
- [16] BODLA N, SINGH B, CHELLAPPA R, et al. Improving object detection with one line of code[EB/OL]. [2023-11-20]. <https://arXiv.org/pdf/1704.04503.pdf>.
- [17] NEUBECK A, VAN GOOL L. Efficient non-maximum suppression[C]// 18th International Conference on Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2006: 850-855.
- [18] LI Z M, PENG C, YU G, et al. Detnet: a backbone network for object detection [EB/OL]. [2023-11-20]. <https://arXiv.org/pdf/1804.06215.pdf>.
- [19] LIN T Y, DOLLAR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2017: 2117-2125.
- [20] 赵振兵, 熊静, 李冰, 等. 基于改进 Cascade R-CNN 的典型金具及其部分缺陷检测方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1060-1067.

(责任编辑 李 凯)

(上接第 1641 页)

[参 考 文 献]

- [1] 曹科. 精密齿轮传动误差的研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2019.
- [2] 韩连福. 齿轮测量中心若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] 刘国云, 曾京, 戴焕云, 等. 考虑轴箱轴承表面波纹度的高速车辆振动特性分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 147-156.
- [4] 邵建敏, 王伟. 表面波纹度对球轴承振动影响的模拟分析[J]. 郑州工学院学报, 1994, 15(3): 67-72.
- [5] 时博阳. 实测波纹度圆柱滚子轴承的动力学建模及波数识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [6] 胡凤英. 波纹度参数的研究及检测[J]. 内燃机配件, 2006(2): 38-39.
- [7] 罗太景. 齿轮表面波纹度的质量控制[J]. 机械传动, 2006, 30(1): 84-85.
- [8] 郝梦梦, 谢小秤, 孙长义. 齿面傅里叶检测与噪音分析[J]. 江西化工, 2019(2): 249-250.
- [9] GRAVEL G. Analysis of ripple on noisy gears[J]. Gear Solutions, 2013(1): 38-47.
- [10] GRAVEL G. Analysis of gear measurement to solve noise problems in gear boxes[C]// Swedish Production Symposium Lund. [S. l. : s. n.], 2016: 1-7.
- [11] REAVIE T, KOULIN G, FRAZER R C, et al. A method to quantify waviness measurement capability of a gear measurement machine[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2019, 7(1): 015002.
- [12] MALBURG M, ZECCHINO M. Understanding and controlling the source of gear noise[J]. Gear Technology, 2021(8): 48-51.

(责任编辑 闫杏丽)