

文章编号: 100028055(2010) 062132 Z08

裂纹故障齿轮结构声振特性与模拟研究

邵忍平, 徐志锋, 曹精明
(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘 要: 将齿轮结构按照圆盘来等效处理, 建立了故障齿轮的动力学分析模型与声学模型, 分别分析了径向裂纹和弧向裂纹情况下齿轮体的振动辐射声压与声场指向特性, 研究了裂纹对齿轮结构辐射声场特性的影响. 综合利用 ANSYS 及 MATLAB 软件模拟计算得到裂纹齿轮结构在 $r=0.5\text{ m}$ 球面上的声压指向分布及轴向声压分布, 探讨了不同的裂纹类型和不同的裂纹大小对齿轮结构振动声特性的影响程度, 通过对模拟研究结果的分析比较与评价来说明裂纹的位置、形状以及裂纹大小对齿轮结构声场特性的影响大小和影响规律, 为采用声学方法来诊断齿轮故障奠定了基础.

关 键 词: 齿轮; 径向裂纹; 弧向裂纹; 动力特性; 声学特性; 声压指向; 模拟
中图分类号: TH1131.1 **文献标识码:** A

Acoustic vibration characteristic of crack gear structure and simulation

SHAO Ren²ping, XU Zh²feng, CAO Jing²ming

(School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The gear structure was handled equivalent to circular plate, then the dynamics analysis model and acoustical model of fault gear were established, the sound pressure and the distribution characteristic of sound field of gear elastomer with radial direction crack and arc direction crack were analyzed; and the influence of crack on the radiation characteristic of the sound field of gear structure was studied. With the help of ANSYS and MATLAB software, the distribution of sound pressure in the $r=0.5\text{ m}$ sphere surface and axial sound pressure of cracked gear structure was obtained, and the influences of various crack types and crack sizes on acoustic characteristic of gear vibration were investigated. Based on analysis, comparison and evaluation of the simulation results, it shows the influence extent and rule of the crack location, crack shape and size in relation to acoustic vibration characteristic of gear structure. These lay a good foundation for gear fault diagnosis using acoustic method.

Key words: gear; radial direction crack; arc direction crack; dynamic characteristic; acoustic characteristic; sound pressure distribution direction; simulation

齿轮结构及其齿轮传动是重要的机械传动形式, 饱受国内外的广泛关注和研究, 特别是在齿轮的损伤检测与诊断方面, 国内外进行了大量和有效地研究, 取得了一些成果^[123], 在齿轮与系统的

声振特性及检测诊断领域, 近几年来在如下方面进行了有关的研究^[46]: 如重庆大学 YANG Cheng 等^[7]根据齿轮噪声传播途径, 提出了固体声检测, 使用时域分离法, 进行齿轮故障识别和

收稿日期: 20090509; 修订日期: 200909219

基金项目: 国家自然科学基金(50575187); 航空科学基金(01H53073); 陕西省自然科学基金(2004E219)

作者简介: 邵忍平(1962-), 男, 陕西宝鸡人, 副教授, 博士后, 主要从事机械动力学、振动噪声与控制、动态信号处理与识别、智能计算检测与诊断等方面研究. E2mail: shaorp@mail.nwpu.edu.cn

齿轮状态的监测;杨通强等^[8]分析了齿轮箱故障机理及与噪声信号的联系,对齿轮箱工作状态进行了检测实验,分析了系统的声学及振动信号,并通过倒频谱分析法进行特征参量提取,识别了齿面磨损故障;文献[9]等通过对齿轮制造缺陷噪声分类测试,从齿轮制造缺陷的噪声差谱,分析提取出了齿轮制造缺陷的声频特征,建立了汽车变速器噪声故障诊断专家系统知识库.杨德斌等^[10]提出了一种独立分量分析与自相关相结合的齿轮故障诊断方法,采用独立分量分析分离特征信号和干扰信号,使用自相关分析提取特征信号中的周期成分,有效地提取了在强背景噪声干扰下的齿轮故障特征.

但是这些研究,大多数是关于正常系统与结构的辐射声场特性的研究,有关故障系统及结构辐射的声特性及其检测方法的研究,大多数都是从实验测试方面来进行分析研究的,或者从信号处理的角度,依靠实验中测取的噪声信号从其中提取声学信号特征来说明故障与信号之间的关系,而没有真正从振动声学的角度,从理论上研究故障损伤发生后辐射的声学特征、以便更有效地从声振根源上进行声学分析与诊断.本文从齿轮结构最易发生且具有最危险性的裂纹故障出发,通过设置了不同种类的径向裂纹和弧向裂纹、不同位置不同大小的分度圆裂纹和齿根裂纹,建立了振动声学分析模型,从声学理论方面探讨了不同情况下不同种类裂纹的齿轮结构的辐射声特性的大小,并通过比较分析给出了裂纹对声辐射的影响规律,这为齿轮故障的声学分析和声学诊断研究奠定了理论基础.

1 基本理论

由于齿轮结构外周边带齿,有实体和空体之分,所以进行齿轮结构的精确声辐射与声场计算较为困难,国内外大多数研究者都是将齿轮按照圆板结构进行处理而估算声特性的.但在仿真和估算声特性时必须找准等效圆盘的大小.本文按照文献[11]的思想,根据固有特性相等的原理进行等效,可以较为准确地找出齿轮等效圆盘的大小,因此在此将齿轮结构按圆盘来等效处理为厚圆板,如图 1 所示,并且建立其坐标系,设振动声场空间点 $P(x, y, z)$ 的球坐标为 (r, φ, θ) .在圆板上任取一面元 $dxdy$, 设面元到 P 点的距离为 rc , 则 P 点的声压可表示为^[12]

$$p_i = - \frac{QX_i^2}{2P} \int_S \frac{w_i}{rc} e^{jk_i rc} dx dy \tag{1}$$

式中 X_i , p_i , w_i , k_i 分别表示第 i 阶模态的振动圆频率、声压、振动位移和波数; Q 为圆板密度. rc 通过推导可表示为

$$rc = \sqrt{r^2 + x^2 + y^2 - 2rx \sin \theta \cos \varphi - 2ry \sin \theta \sin \varphi} \tag{2}$$

将式(1)离散化后表示为

$$p_i = - \frac{QX_i^2}{2P} \sum_{m=1}^N \frac{w_{im}}{rc_m} e^{jk_i rc_m} \Delta A_m \tag{3}$$

式中 w_{im} 为第 i 阶模态中第 m 个单元中心点振动位移, r_m 为第 m 个单元中心到 P 点的距离, N 为单元的总数, ΔA_m 为第 m 个单元的面积.

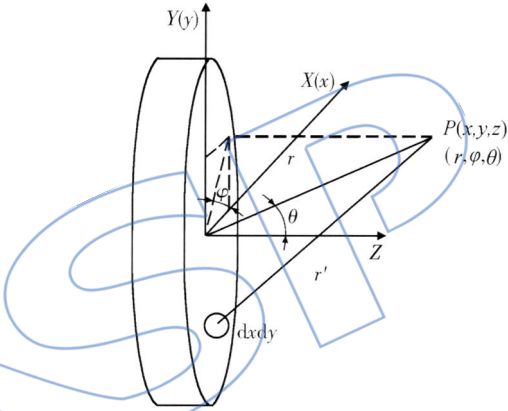


图 1 齿轮圆板辐射声场计算简图
Fig. 1 Analysis model of sound field of gear circular plate

对于某一阶模态,系数 $QX_i^2/(2P)$ 是常数,所以将该系数归一化为 1 后,得到第 i 阶模态振动辐射的相对声压幅值为

$$p_{is} = \sqrt{p_{i1}^2 + p_{i2}^2} \tag{4}$$

其中

$$p_{i1} = \sum_{m=1}^N \frac{w_{im}}{rc_m} \cos(k_i r_{\theta m}) \Delta A_m$$
$$p_{i2} = \sum_{m=1}^N \frac{w_{im}}{rc_m} \sin(k_i r_{\theta m}) \Delta A_m$$

利用 ANSYS 软件完成模态分析后,提取出单元面积,单元数目,各单元中心点坐标以及第 i 阶模态各单元中心点振动位移,利用 MATLAB 编程即可实现上述模拟计算的过程.

2 裂纹故障齿轮模型的建立

建立裂纹齿轮圆盘模型如图 2 所示,共有以下的 4 种裂纹模型.其中有关的参数为:外周半径

为 60 mm, 内周半径为 22.5 mm, 厚度为 $h=15$ mm, 齿轮圆盘材料杨氏模量 $E=2.058\times10^{11}$ N/m², 泊松比 $\nu=0.30$, 密度 $Q=7800$ kg/m³.

1) 如图 2(a) 所示, 裂纹在半径方向上, 在外周设置一个小豁口, 裂纹宽度为 1 mm, 长度为 5 mm, 等效为齿根短裂纹(外周径向裂纹).

2) 如图 2(b) 所示, 裂纹在半径方向上, 在内周设置一个小豁口, 长度为 5 mm, 宽度为 1 mm, 等效为齿轮与实体轴连接处的裂纹(内周径向裂纹).

3) 如图 2(c) 所示, 裂纹在圆周方向上, 裂纹为穿透裂纹, 裂纹距内周边缘距离为 1 mm, 裂纹宽度为 1 mm, 裂纹长度为 5 mm, 张角约为 12.5°(内周周向裂纹).

4) 如图 2(d) 所示, 裂纹在圆周方向上, 裂纹为穿透裂纹, 裂纹距外周边缘距离为 1 mm, 裂纹宽度为 1 mm, 裂纹长度为 5 mm, 张角约为 5°, 等效为分度圆裂纹(外周周向裂纹).

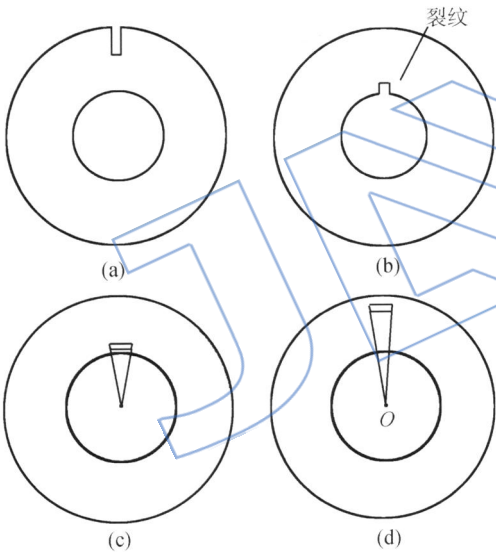


图 2 裂纹齿轮结构圆盘模型

Fig. 2 Model of circular plate of cracked gear structure

3 数值仿真及结果分析

输入某齿轮的参数如下: $E=2.058\times10^{11}$ N/m², $\nu=0.30$, $Q=7800$ kg/m³. 齿轮内周半径 0.025m, 齿轮外周半径 0.10m, 厚度 $h=0.025$ m, 齿轮齿数 $Z=40$, 模数为 5 mm, 利用 ANSYS 对齿轮结构以及等效圆盘进行模态分析^[11], 得到前 10 阶固有频率如表 1 所示. 可见齿轮带齿结构与按照分度圆等效圆盘所得到的固有频率除了第 7 和 8 阶误差最大为 8.568% 和 8.57% 之外, 其他各阶误差都不超过 3%, 因此实体齿轮与等效分度圆盘结构的结果相差不大(个别阶次除外), 按照分度圆盘分析其动力特性可以较好地体现齿轮体结构的动态特性. 另外, 为了更为精确的用等效圆盘来研究齿轮结构动力特性, 可以采用表 1 中的最优等效圆盘, 即按照动力特性(固有频率)相等的原理得到与齿轮结构等厚度的各阶固有频率相等或接近的一个最优等效圆盘(得到圆盘的外周直径), 按照最优等效圆盘作为齿轮结构的动力模型, 可以更为精确的展示齿轮结构的动力特性. 因此本文在进行声特性分析时采用等效圆盘模型来处理.

利用有限元数值方法对图 2 的 4 种模型及裂纹齿轮结构进行模态分析^[13](输入有关参数如第 2 节), 得到典型的几种模态振型如图 3 所示. 可以看出模型与裂纹齿轮结构分析结果较为一致, 相差不大. 另外还可发现各种不同位置 and 不同类型的裂纹振型各不相同, 相差较大, 说明裂纹的作用是明显的.

根据模态分析结果, 提取出齿轮体的单元面积 S 、单元数目 N 、各单元中心点坐标 x_m, y_m 以及第 i 阶模态各单元中心点位移挠度 W_m , 利用 MATLAB 软件编程, 分别得到各种裂纹情况下齿轮结构在 $r=0.5$ m 球面上的前 5 阶声压指向分布如图 4 所示, $y=0$ 平面上的轴向声压分布如图 5 所示.

表 1 齿轮结构及等效圆盘固有频率分析比较结果(单位: Hz)

Table 1 Analysis results of natural frequency of gear structure and equivalent circular plate (unit: Hz)										
阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
齿轮带齿	2918.0	2929.4	3220.6	3652.7	3652.9	3873.7	6345.0	6345.1	8359.9	8360.1
分度圆盘	2950.9	2951.0	3264.9	3752.2	3752.7	3926.2	6888.7	6888.9	8564.0	8564.3
误差/%	1.127	0.737	1.376	2.724	2.732	1.355	8.568	8.570	2.441	2.443
最优等效圆盘	2920.2	2922.0	3234.3	3668.1	3669.1	3740.6	6392.0	6393.2	8365.0	8365.3

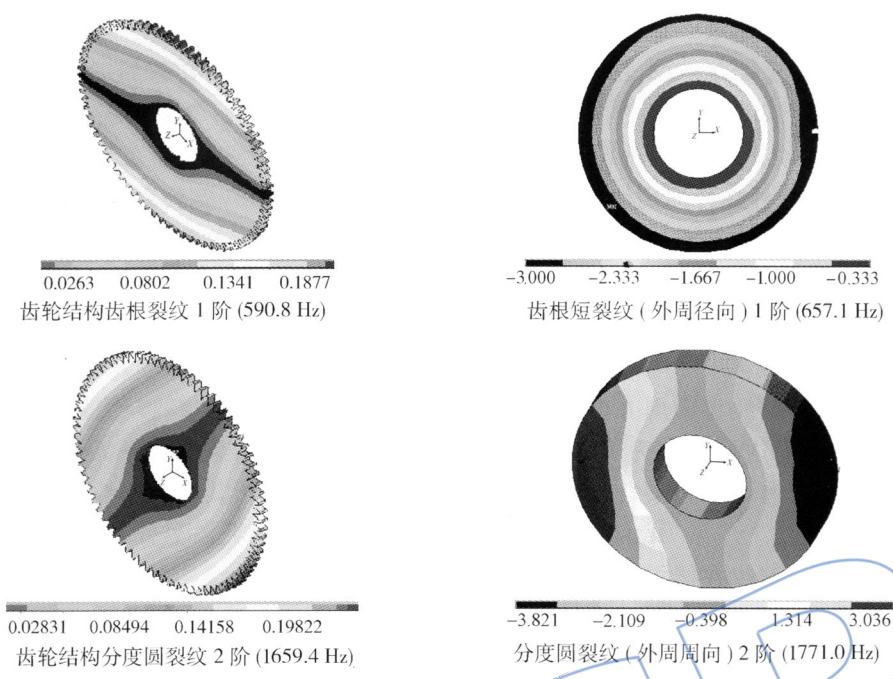
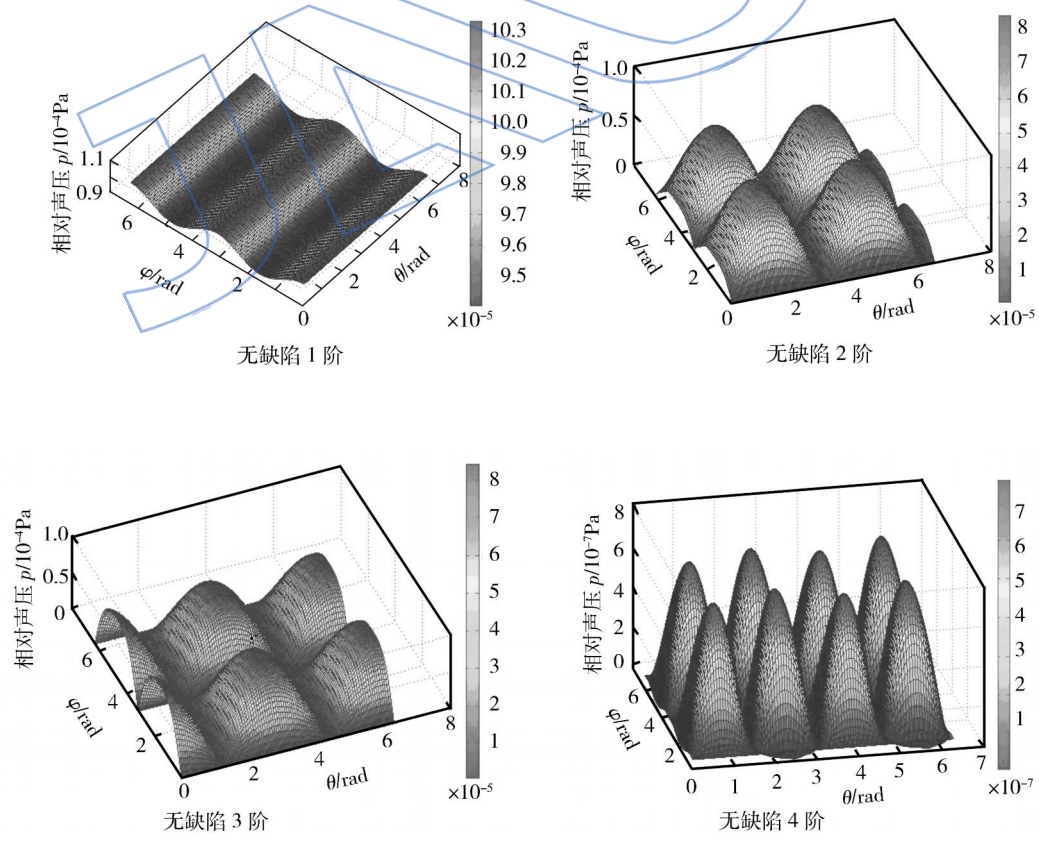
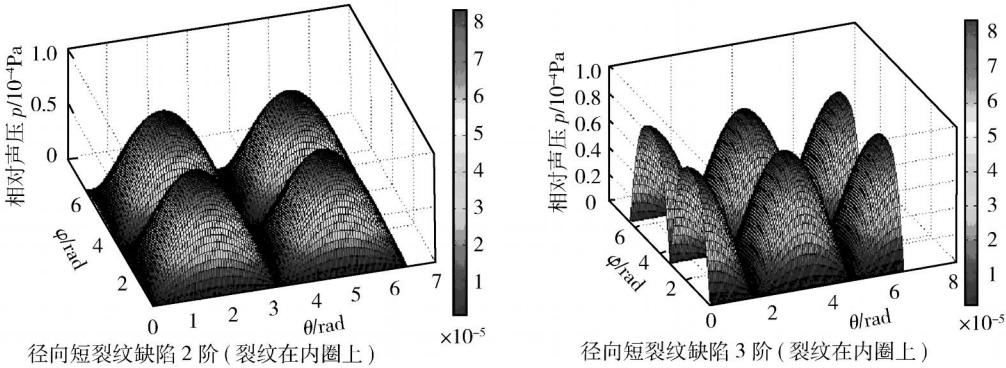
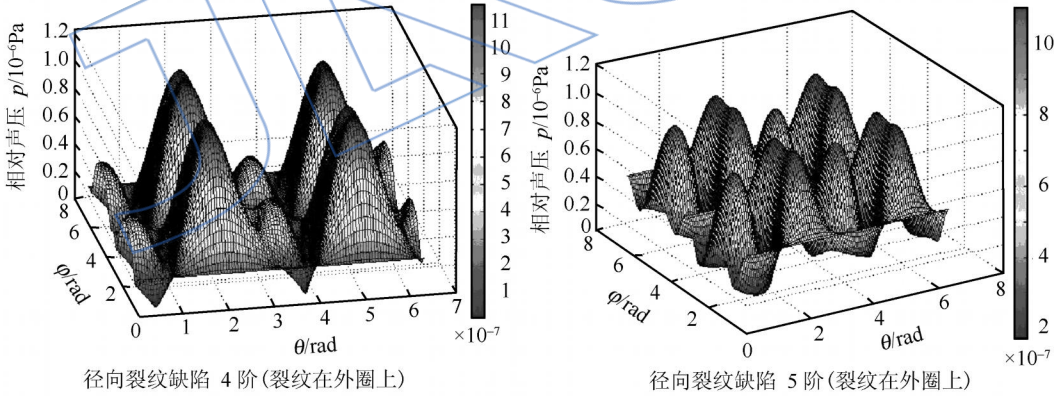
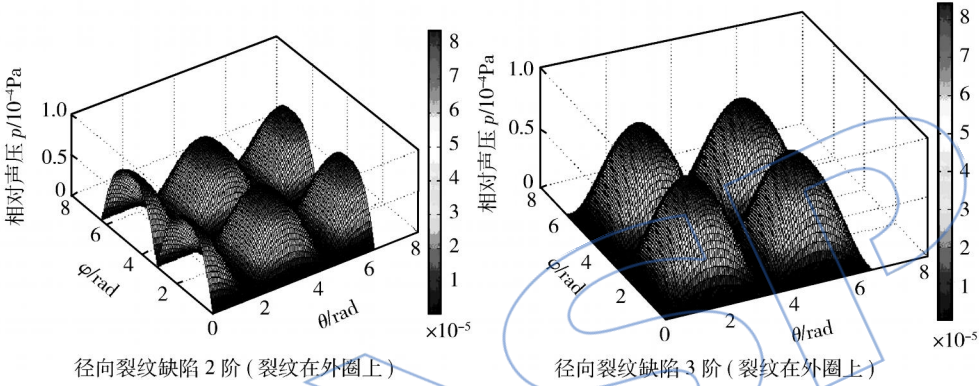
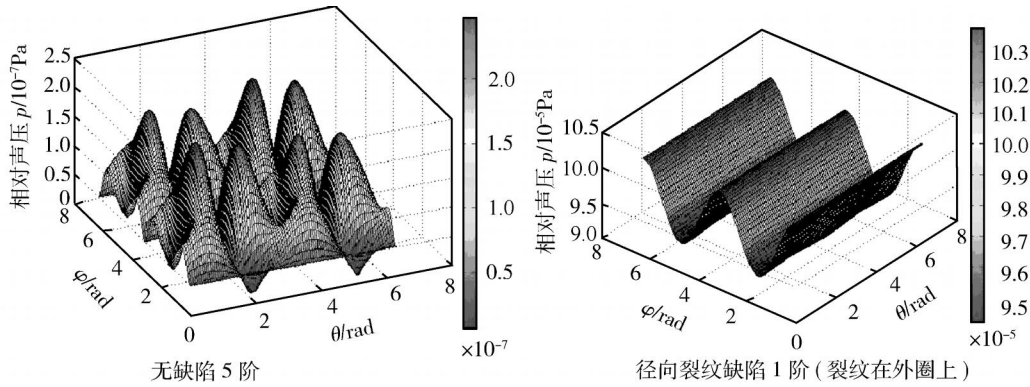
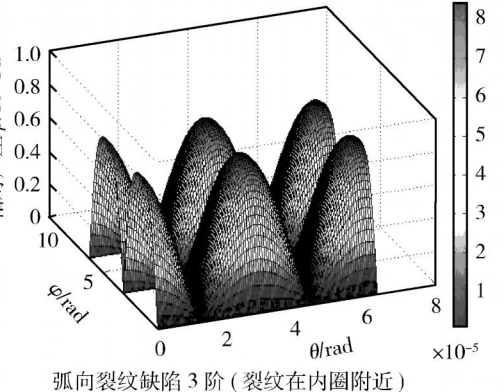
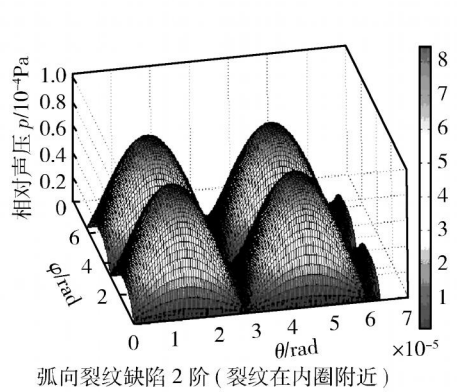
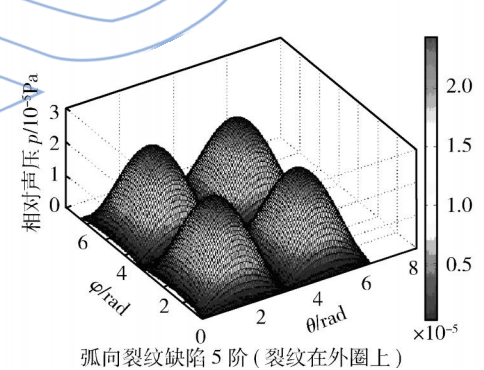
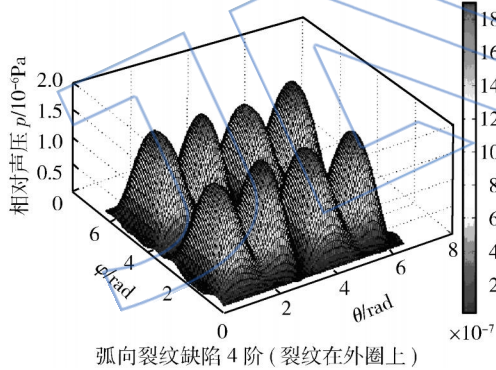
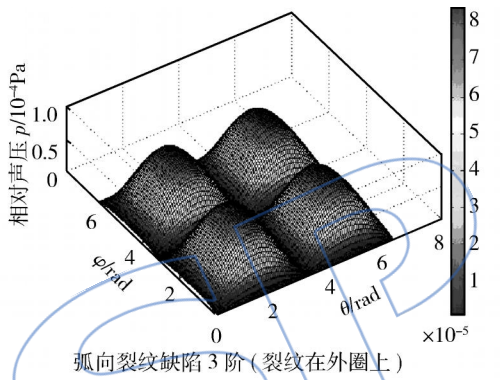
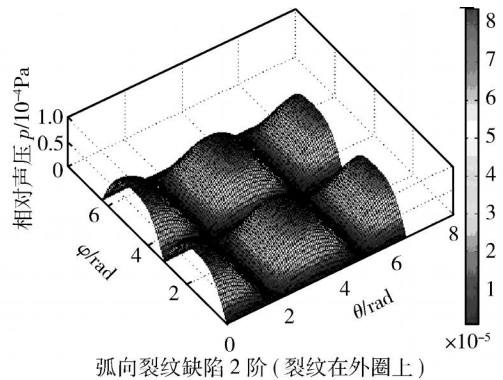
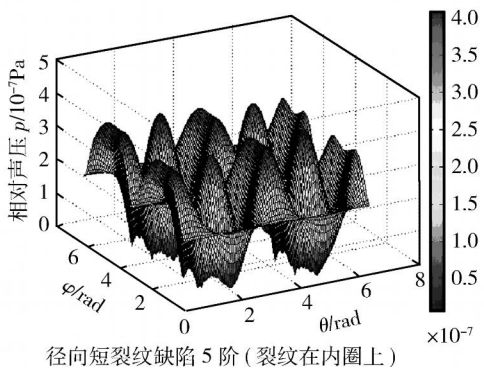
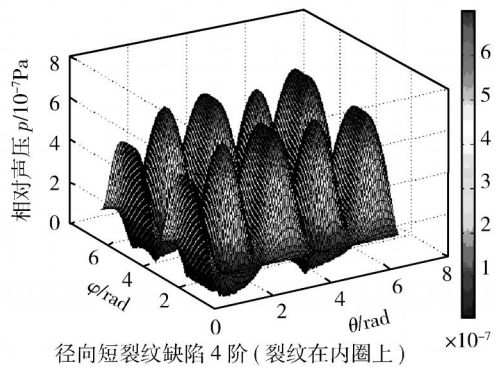


图 3 不同裂纹的模式振型
Fig. 3 Modal shape of different crack types for gear







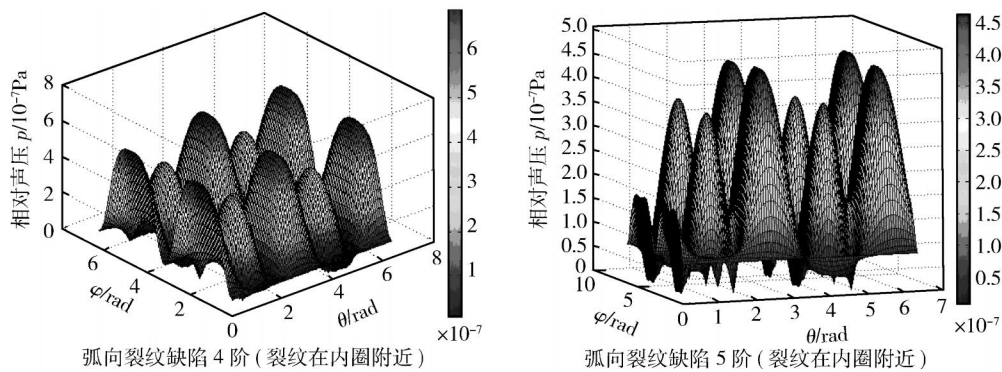


图 4 前 5 阶声压指向分布图

Fig. 4 Sound pressure distribution direction of gear structure (first five order vibration)

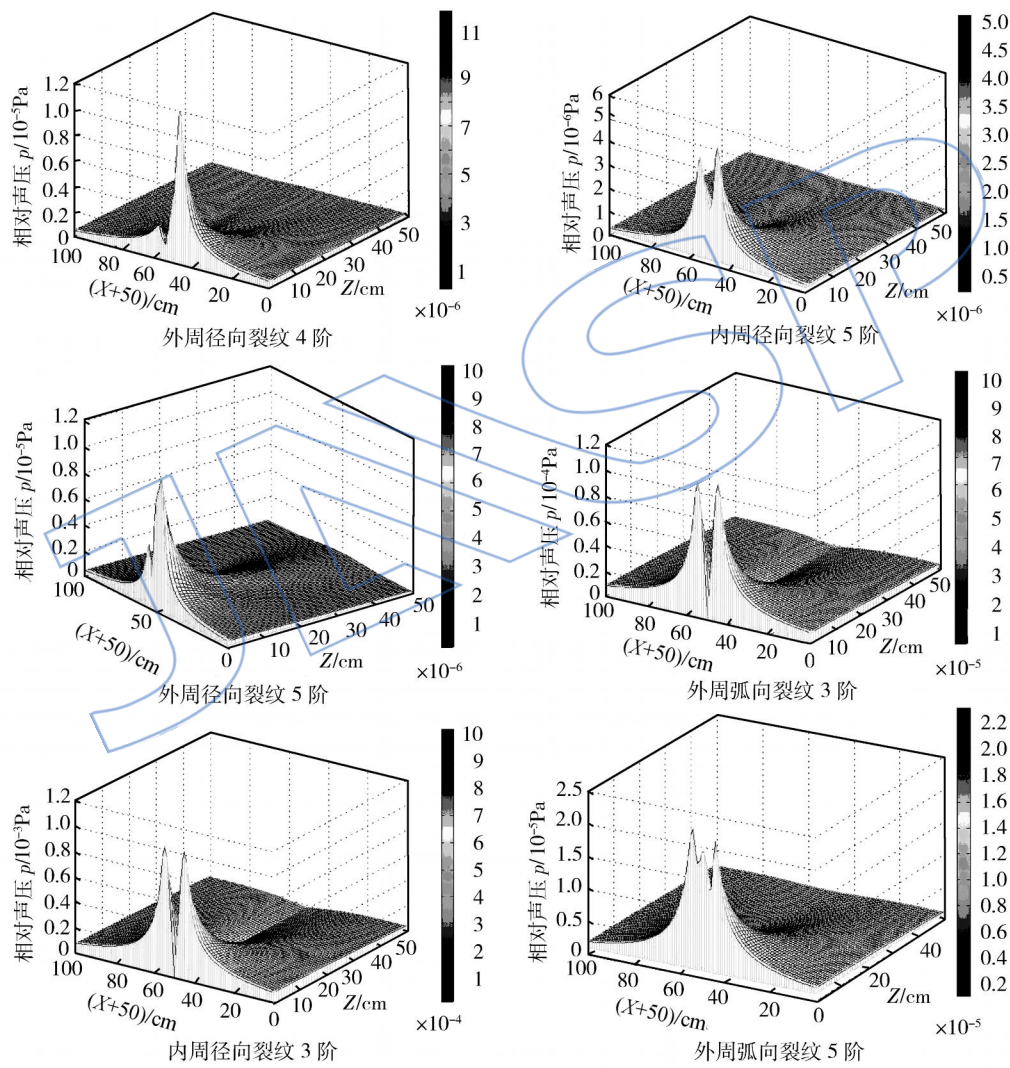


图 5 3 至 5 阶轴向声压分布(Y= 0 平面)

Fig. 5 Axial sound pressure distribution of gear structure (32rd, 42th, 52th order vibration)(Y= 0 plane)

由上图 4 可以看出, 对于前 3 阶辐射声压指向, 内周裂纹(径向、弧向)与无缺陷情况差别不大, 而外周裂纹时有一定差别, 第 2 阶在保持峰值不变的情况下, 峰值点增多, 第 3 阶峰值增大 10 倍; 对于第 4、5 阶辐射声压指向在各种情况下区

别比较明显, 对于径向裂纹来说, 外周裂纹第 4 阶峰值分布明显不均匀, 同样是 10 个峰值点的情况下, 峰值要大于内周裂纹的情况, 第 5 阶亦是如此; 对于弧向裂纹来说, 外周裂纹在第 4 阶峰值点与无缺陷相比基本相同, 但峰值要增大两倍, 而内

周裂纹则在保持峰值基本不变的情况下, 峰值点增多, 第5阶时外周裂纹只有4个峰值点, 但声压指向峰值是内周裂纹的100倍以上. 由此可以说明当裂纹发生后齿轮结构辐射的声压各不相同, 不同位置处的裂纹和不同类型的裂纹辐射的声压指向性相差较大, 外周裂纹的情况大于内周裂纹的幅值, 高阶辐射的声压大于低阶辐射的声压.

图5给出了各种裂纹下的轴向声压. 由于前两阶变化基本相同, 这里仅给出3, 4, 5阶几种典型故障的轴向声压分布图. 由图可以看出, 所有情况下声压都随 z 轴(轴向)数值的增大而减小, 不同的是在 x 方向上以 $x=0$ 为中心出现变化大小不一的单个或多个峰值的情况.

通过对图5的比较分析可以得出:¹ 所有情况下, 声压都随着 z 的增大而减小;² 外周弧向裂纹对齿轮轴向声压的影响要大于内周弧向裂纹的影响;³ 外周弧向裂纹对齿轮轴向声压的影响要大于外周径向裂纹的影响;⁴ 内周径向裂纹与内周弧向裂纹对齿轮轴向声压的影响差别不大.

4 结 论

通过上述的研究、推导、模拟计算和分析, 结果表明, 当齿轮结构发生裂纹故障后动力特性与声辐射特性发生明显的变化, 不同的裂纹故障类型所辐射的声场也不相同, 当裂纹发生位置都出现在外周时, 弧向裂纹对齿轮辐射声场的影响要大于径向裂纹的影响; 当裂纹类型同为弧向裂纹时, 外周裂纹对齿轮辐射声场的影响要大于内周裂纹的影响; 弧向裂纹和径向裂纹同时发生在外周时的对辐射声压的影响差别要比同时出现在内周时明显, 即裂纹位置对辐射声场的影响要大于裂纹形状所产生的影响. 这些结论都为工程实际中利用声诊断方法对齿轮故障进行定征和判断提供了一定的理论依据.

参考文献:

- [1] Kar C, Mohanty A R. Multistage gearbox condition monitoring using motor current signature analysis and Kolmogorov-Smirnov test[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 290(12): 3372368.
- [2] Pareya A, Badaoui M El, Guillet F, et al. Dynamic modelling of spur gear pair and application of empirical mode decomposition-based statistical analysis for early detection of localized tooth defect[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 294(3): 5472561.
- [3] SHAO Renping, HUANG Xinna, JIA Purong, et al. Dynamic analysis and three-dimensional finite element simulation of cracked gear[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 353: 358-10721077.
- [4] 于德介, 程军圣, 杨宇. Hilbert-Huang变换在齿轮故障诊断中应用[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(6): 102107. YU Dejie, CHENG Junsheng, YANG Yu. Application of Hilbert-Huang transform method to gear fault diagnosis[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(6): 102107. (in Chinese)
- [5] Kwon O, Kim S. Fatigue crack growth behavior and recognition of AE signal from a composite patch-repaired Al panel[C]// *Proceedings of the 18th International Acoustic Emission Symposium*. Tokyo, Japan: [s. n.], 2006: 2527.
- [6] 邵忍平, 沈允文, 孙进才. 齿轮传动加速度噪声辐射机理研究[J]. *机械强度*, 2000, 22(4): 312314. SHAO Renping, SHEN Yunwen, SUN Jincan. Research on acceleration noise radiation from gear transmission[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2000, 22(4): 312314. (in Chinese)
- [7] YANG Cheng, HE Yansong. Identification of gear tooth root crack failure through solid sound wave signals[C]// *Processing of the International Conference on Mechanical Transmission (ICMT)*. 2001. Chongqing, China: China Machine Press, 2001: 382388.
- [8] 杨通强, 唐力伟, 郑海起. 基于声测法的齿轮箱齿轮故障诊断研究[J]. *军械工程学院学报*, 2000, 12(4): 2427. YANG Tongqiang, TANG Liwei, ZHENG Haiqi. Research on diagnosing gear fault of gearbox by acoustic method[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2000, 12(4): 2427. (in Chinese)
- [9] 明廷锋, 姚晓山, 张永祥. 齿轮裂纹声发射检测模拟实验研究[J]. *煤矿机械*, 2009, 30(6): 212214. MING Tingfeng, YAO Xiaoshan, ZHANG Yongxiang. Simulation experimental research on acoustic emission for gear fatigue fracture test[J]. *Coal Mine Machinery*, 2009, 30(6): 212214. (in Chinese)
- [10] 杨德斌, 杨聚星. 基于声信号分析的齿轮故障诊断方法[J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30(4): 436440. YANG Debin, YANG Juxing. Method of gear fault diagnosis based on acoustic signal analysis[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(4): 436440. (in Chinese)
- [11] SHAO Renping, HUANG Xinna, Hirota K. Dynamic analysis of three-dimensional elastomer and finite element simulation for gear structure[C]// *Proc. the 3rd Inter. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems, SCIS and ISIS*. Japan, Tokyo: [s. n.], 2006: 754759.
- [12] 邵忍平. 机械系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. SHAO Renping. *Mechanical system dynamics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
- [13] 邵忍平, 张延超, 黄欣娜. 弹性支撑条件下裂纹齿轮体有限元模拟与仿真[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(6): 10181024. SHAO Renping, ZHANG Yanchao, HUANG Xinna. FEM simulation of cracked gear body under elastic supporting condition[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(6): 10181024. (in Chinese)