

文章编号: 1000-8055(2015)11-2803-07

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2015.11.031

# 主要参数对面齿轮传动噪声辐射的影响分析

李政民卿, 陈宏尚, 朱如鹏

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

**摘 要:** 为研究面齿轮传动力学特性及噪声辐射, 通过建立面齿轮传动的弯扭耦合动力学模型, 在分析轴承支承处动载荷的基础上, 结合有限元法和边界元法, 形成了面齿轮传动的噪声辐射计算流程. 此外, 利用该计算流程, 开展了算例分析, 讨论了单一几何参数和工况对面齿轮传动噪声辐射的影响规律. 仿真结果表明: 模数和传动比对改善面齿轮传动噪声辐射有益, 压力角对其噪声辐射影响不明显. 研究结果为低噪声面齿轮传动的设计奠定了必要的理论基础.

**关键词:** 面齿轮传动; 动态啮合力; 噪声辐射; 有限元法; 边界元法

**中图分类号:** V233.1; TH132.4

**文献标志码:** A

## Influence predictions of base parameters on noise radiations of face gear drives

LI Zheng-min-qing, CHEN Hong-shang, ZHU Ru-peng

(College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To investigate the dynamic behaviors and noise radiations of face gear drives, a calculation procession of noise radiations of face gear drives, which is based on lumped mass method, finite element method (FEM) and boundary element method (BEM), was proposed. Furthermore, a noise radiation of an example case was simulated, and the influences of base geometric parameters and operating conditions on noise radiations of face gear drives were discussed. The analytic results indicate increasing module and drive ratios would benefit to reduce noise radiations, and pressure angles would be insensitive for noise radiations, et al. These contributions would be helpful to improve the design of face gear drives associated with low noise radiations.

**Key words:** face gear drives; dynamic mesh forces; noise radiations; finite element method; boundary element method

面齿轮传动是一种空间相交轴齿轮传动. 相对于螺旋锥齿轮传动, 由于其对加工和装配误差的不敏感, 因此得到西方发达国家的关注<sup>[1-6]</sup>. 另外, 面齿轮传动的重要应用场合之一, 即直升机主

减速器第一级齿轮传动<sup>[7-8]</sup>, 该级齿轮传动作为输入级齿轮传动, 具有转速高、功率大等特点. 此外, 先进直升机主减速器研究中, 除了对齿轮传动的振动有严格要求外, 还对噪声辐射有较高要求. 基

**收稿日期:** 2014-12-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(51105194, 51375226); 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2015049)

**作者简介:** 李政民卿(1977-), 男, 江苏南通人, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事航空齿轮传动研究.

E-mail: lzmq\_cmee@nuaa.edu.cn

于上述原因,面齿轮传动的动力学及噪声辐射是其研究的重要内容之一.目前,国内在面齿轮传动动力学研究方面已初见成效,例如:李晓贞、靳广虎等建立了单对面齿轮传动的非线性动力学模型,并开展了动力学特性的研究<sup>[9-10]</sup>.杨振等分析了面齿轮传动的参数振动以及混沌现象<sup>[11-12]</sup>.胡泽华等讨论了啮合刚度对面齿轮传动动力学特性的影响<sup>[13]</sup>.张乐、赵宁和陈广艳等分别对面齿轮分扭传动的动力学特性进行了研究<sup>[14-16]</sup>.同时,在齿轮传动的噪声辐射研究方面,国内外也颇为重视.例如:Moynes等利用有限元法探讨了汽车用齿轮传动系统的噪声辐射<sup>[17]</sup>;田中英一郎等采用边界元方法分析了齿轮箱的辐射噪声,并开展了相关试验验证<sup>[18]</sup>.但是,根据现有文献可知,关于面齿轮传动噪声辐射的研究鲜有报道.因此,本文通过建立面齿轮传动的弯扭耦合模型,分析了面齿轮传动的动态啮合力,得到了轴承支承处的动态激励;利用有限元法分析了齿轮箱体表面节点的振动响应速度,并利用边界元法,实现了面齿轮传动箱体的噪声辐射分析.此外,利用上述分析流程,还研究了主要几何参数和工况对面齿轮传动噪声辐射的影响规律.分析结果表明,增大面齿轮传动的模数和传动比,有益于减小其噪声辐射;而改变压力角则对面齿轮传动噪声辐射的影响不大.同时,等速下面齿轮传动的输入功率与其噪声辐射成正比;等功率下输入转速的提高则会减小面齿轮传动的噪声辐射.上述研究成果对评估面齿轮传动的噪声辐射以及实现低噪声的面齿轮传动设计具有积极意义.

## 1 面齿轮传动噪声辐射分析流程

### 1.1 面齿轮传动弯扭耦合动力学模型

建立的4自由度(DOF)面齿轮传动弯扭耦合动力学模型,如图1所示.图1中, $x_1, x_2$ 分别为圆柱齿轮和面齿轮的弯曲振动自由度; $\varphi_1, \varphi_2$ 分别为圆柱齿轮和面齿轮扭转振动自由度; $T_i, T_o$ 分别为输入和输出扭矩; $k_1, k_2$ 分别为圆柱齿轮和面齿轮的支撑刚度, $c_1, c_2$ 分别为圆柱齿轮和面齿轮的支撑阻尼; $k_m, c_m$ 分别为面齿轮传动的啮合刚度和阻尼; $e_s$ 为面齿轮传动的准静态传动误差.

根据图1可知,面齿轮传动4自由度弯扭耦合动力学方程为

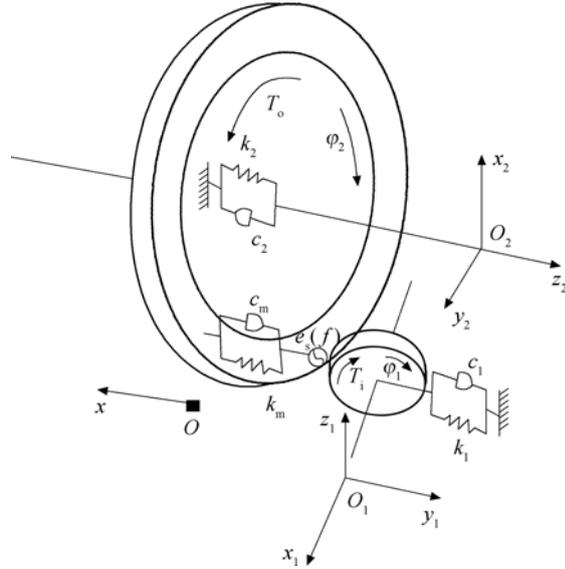


图1 4自由度面齿轮传动弯扭耦合动力学模型  
Fig.1 Four DOF dynamic model of face gear drives

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = -F_n \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 = T_i - F_n r_1 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = F_n \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 = -T_o + F_n r_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $m, I$  分别为齿轮的质量和转动惯量;  $r$  为齿轮分度圆半径;  $F_n$  为动态啮合力; 下标 1 和 2 分别为圆柱齿轮和面齿轮.

面齿轮传动啮合线上综合位移  $x_n$  为

$$x_n = x_1 + r_1 \varphi_1 - x_2 - r_2 \varphi_2 - e_s \quad (2)$$

动态啮合力  $F_n$  为

$$F_n = k_m x_n + c_m \dot{x}_n \quad (3)$$

### 1.2 面齿轮传动支承结构

传动支承结构影响箱体轴承处的激励,本文中面齿轮传动的支承结构,如图2所示.根据图2可知,圆柱齿轮采用悬臂支承,面齿轮采用简支;圆柱齿轮和面齿轮支承处的受力示意图,分别如图3(a)和图3(b)所示.

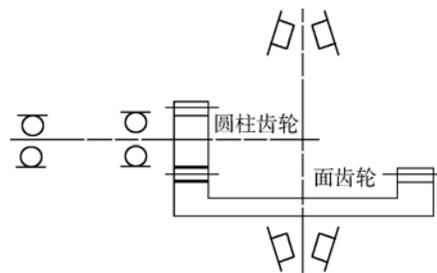


图2 面齿轮传动支承结构图  
Fig.2 Sketch of support structures of face gear drives

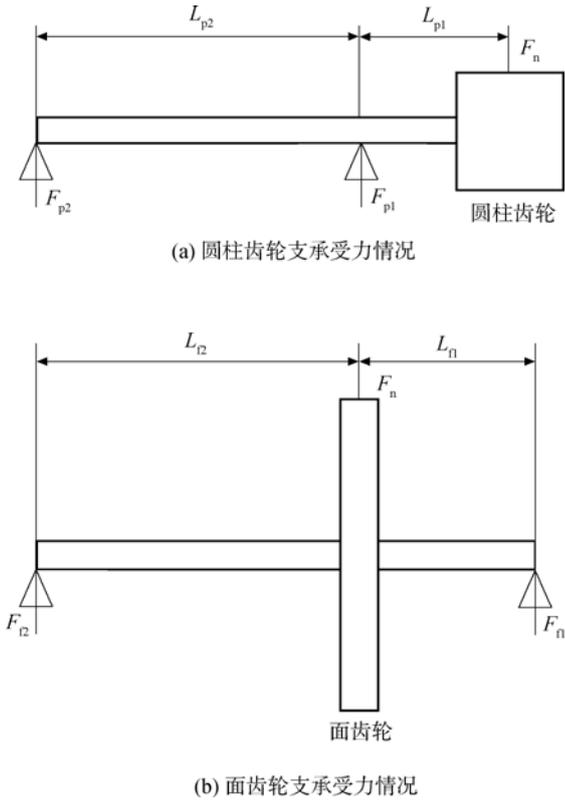


图 3 支承受力情况示意图

Fig. 3 Sketch of bearing loads of face gear drives

根据图 3 可知,圆柱齿轮的近端轴承支承处载荷  $F_{p1}$  为

$$F_{p1} = F_n \frac{L_{p1} + L_{p2}}{L_{p2}} \quad (4)$$

圆柱齿轮远端轴承支承处载荷  $F_{p2}$  为

$$F_{p2} = F_n \frac{L_{p1}}{L_{p2}} \quad (5)$$

面齿轮近端轴承支承处载荷  $F_{f1}$  为

$$F_{f1} = F_n \frac{L_{f2}}{L_{f1} + L_{f2}} \quad (6)$$

面齿轮远端轴承支承处载荷  $F_{f2}$  为

$$F_{f2} = F_n \frac{L_{f1}}{L_{f1} + L_{f2}} \quad (7)$$

式中  $L_{p1}$  为圆柱齿轮到其最近支承的距离,  $L_{p2}$  为圆柱齿轮两支承的间距;  $L_{f1}$  为面齿轮至其近端支承的距离,  $L_{f2}$  为面齿轮到其远端支承的距离。

### 1.3 面齿轮传动噪声辐射计算流程

面齿轮传动噪声辐射的分析,首先需要求解轴承支承处动载荷;并以支承处动载荷为外部激励,利用有限元法计算面齿轮传动箱体的表面振动速度;再将所得箱体表面振动速度引入边界元模型,分析面齿轮传动的噪声辐射。因此,根据上述方法,建立面齿轮传动噪声辐射的分析流程,如图 4 所示。

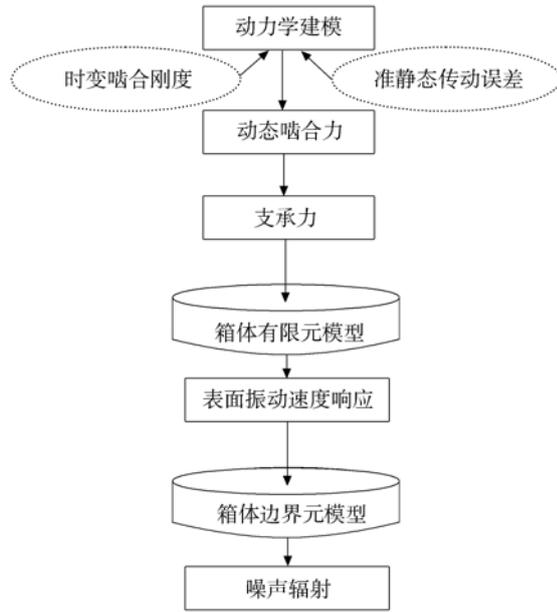


图 4 面齿轮传动噪声辐射计算流程图

Fig. 4 Procession of noise radiations of face gear drives

## 2 仿真及分析

### 2.1 噪声辐射仿真

面齿轮传动噪声辐射仿真中的主要几何参数和工况,如表 1 所示。

表 1 面齿轮传动主要几何参数和工况

Table 1 Geometric parameters and operating conditions

参数	数值
齿轮模数/mm	4
圆柱齿轮齿数	24
面齿轮齿数	96
压力角 $\alpha/(\circ)$	20
输入转速/(r/min)	1000
输入功率/kW	25

根据表 1 中参数,仿真得到面齿轮传动的时变啮合刚度和平均啮合刚度,如图 5 所示;准静态传动误差,如图 6 所示。同时,将计算得到的时变啮合刚度和准静态传动误差带入方程(1)中,得到面齿轮传动的动态啮合力,其时域图及频域图,分别如图 7(a)和图 7(b)所示。

根据图 3 所示面齿轮传动支承结构,经计算,得圆柱齿轮和面齿轮各支承处的动态力,如图 8 所示。

根据面齿轮传动箱体实物,建立面齿轮传动

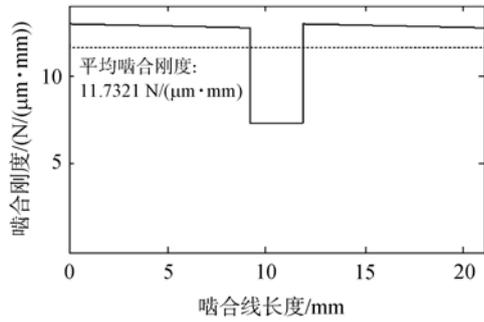


图 5 时变啮合刚度

Fig. 5 Time-varying mesh stiffness simulated

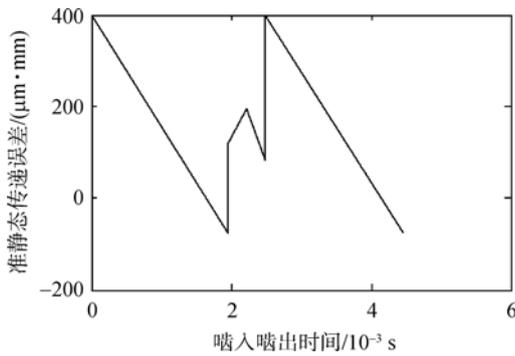
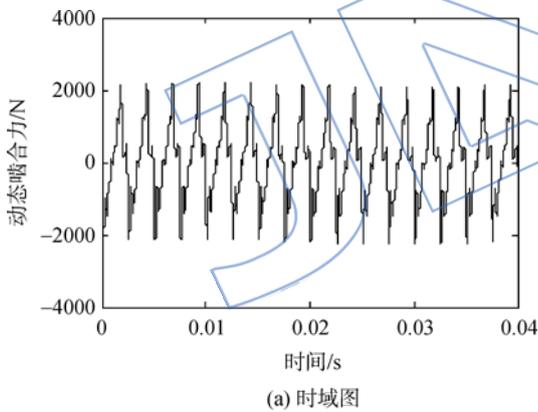
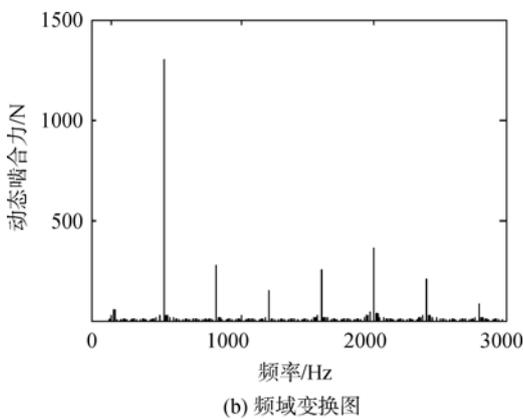


图 6 准静态传动误差

Fig. 6 Static transmission errors simulated



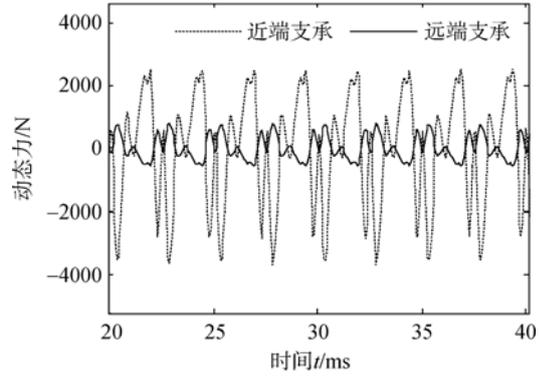
(a) 时域图



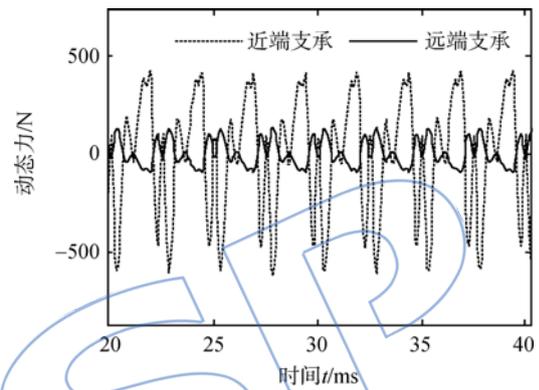
(b) 频域变换图

图 7 动态啮合力

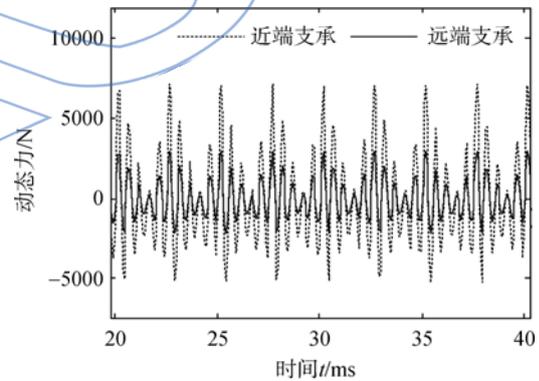
Fig. 7 Dynamic mesh forces simulated



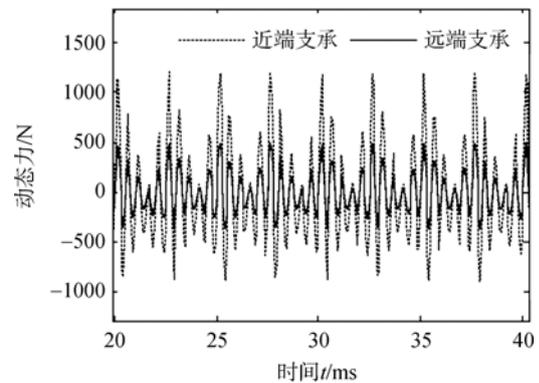
(a) 圆柱齿轮支承垂直方向动态力



(b) 圆柱齿轮支承水平方向动态力



(c) 面齿轮支承垂直方向动态力



(d) 面齿轮支承水平方向动态力

图 8 面齿轮传动支承处动态力

Fig. 8 Dynamic forces at bearings simulated

的箱体结构有限元模型,如图 9 所示。

将支承处动载荷作为外部激励引入图 9 所示的有限元模型中,得到箱体表面振动速度响应,如图 10 所示。

将图 10 中分析结果引入箱体边界元模型,即可计算得到面齿轮传动的噪声辐射;图 11 为 1000 Hz 时箱体表面的声压级分布云图;图 12 为箱体某位置噪声辐射的声压频谱图。

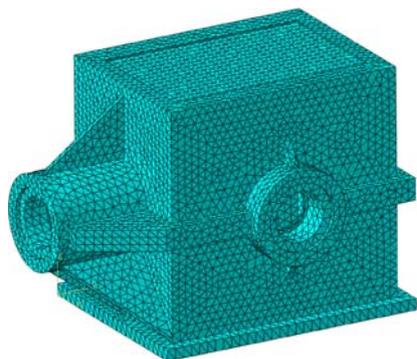


图 9 面齿轮传动箱体有限元模型

Fig. 9 Finite element model of a face gear gearbox

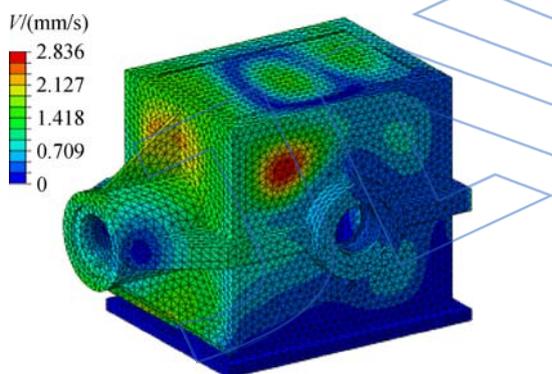


图 10 面齿轮传动箱体表面的振动速度

Fig. 10 Vibration velocity responses of the gearbox

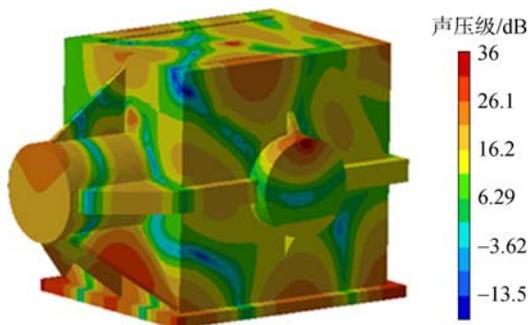


图 11 1000 Hz 时箱体表面声压云图

Fig. 11 Sound pressures of the gearbox by 1000 Hz

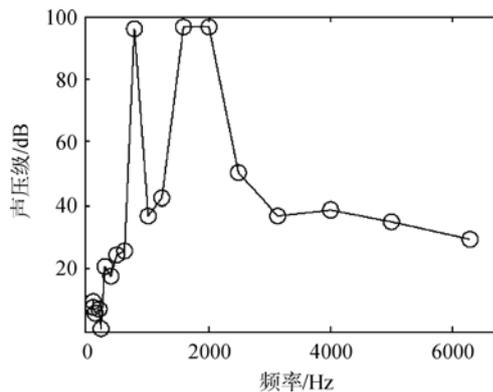


图 12 箱体某位置噪声辐射的声压频谱

Fig. 12 Spectrum of noise radiations simulated

由图 11 和图 12 可知,面齿轮传动的啮合频率处存在声压峰值,即啮合谐频率对齿轮箱的振动有较大影响。

### 2.2 影响因素分析

为分析主要几何参数和工况对面齿轮传动噪声辐射的影响规律,分析中取面齿轮传动主要几何参数和工况,即主要影响因素值,如表 2 所示。

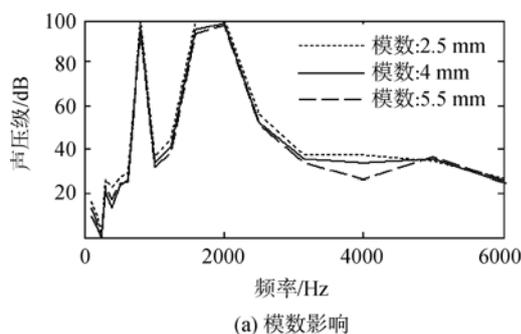
表 2 影响因素取值表

Table 2 Influence factor values

参数	数值
齿轮模数/mm	2.5/4/5.5
压力角 $\alpha/(\circ)$	20/22.5/25
传动比	2.5/4/5.5
输入功率/kW	25/50/100
输入转速/(r/min)	1250/2000/3300

根据图 4 的仿真流程,分析各单一因素对面齿轮传动噪声辐射的影响,如图 13 所示。仿真中,除变化的单一参数外,其余几何和工况参数均采用表 1 中数值。

根据图 13 的仿真结果可知,增大面齿轮传动的模数和传动比对改进面齿轮传动的噪声辐射有利,而压力角的增大则对其影响不显著;同



(a) 模数影响

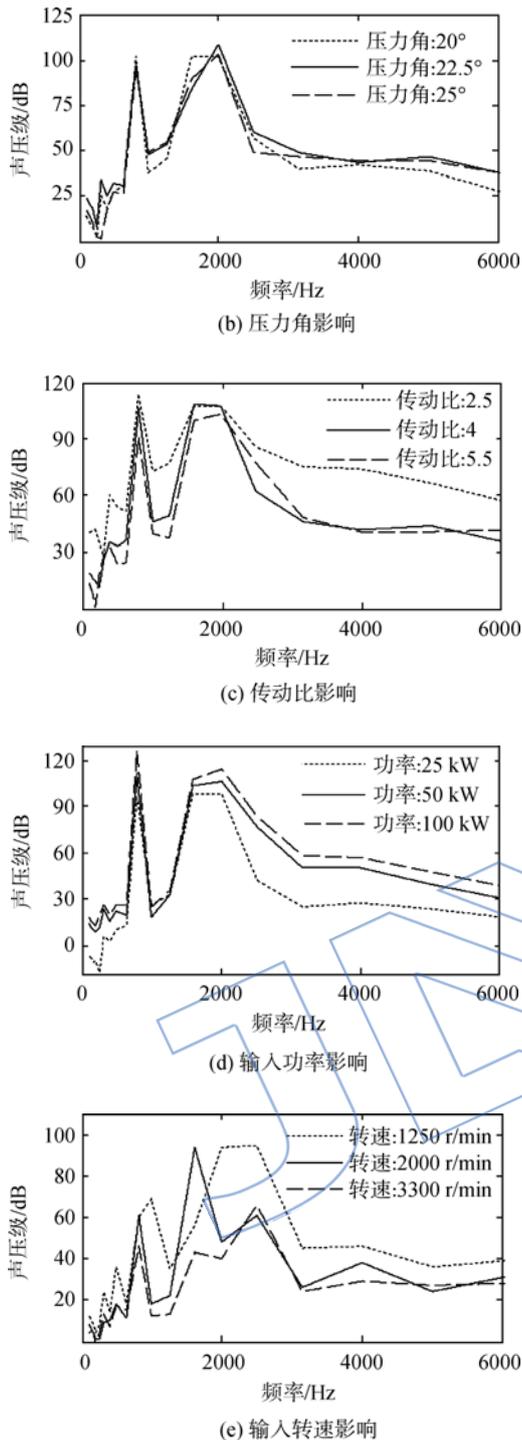


图13 面齿轮传动主要几何参数和工况对噪声辐射的影响分析

Fig. 13 Influences of base geometric parameters and operating conditions on noise radiations of face gear drives

时,等转速下输入功率与面齿轮传动噪声辐射成正比,即输入功率越大面齿轮传动的噪声辐射越明显;相反,等功率下输入转速的增大,则会降低面齿轮传动的噪声辐射,且其频率随转速的增加而提高。

### 3 结论

本文对面齿轮传动噪声辐射及其影响因素开展了研究,主要工作和结论如下:

1) 提出了面齿轮传动噪声辐射计算流程;建立了面齿轮传动系统的弯扭耦合振动模型,通过求解时变啮合刚度和准静态传动误差,得到了面齿轮传动的动态啮合力;根据面齿轮传动支承结构,求解了各支承处的动态力;并利用有限元法计算了面齿轮传动箱体表面的振动速度,利用边界元法,实现了面齿轮传动的噪声辐射计算。

2) 开展了模数、压力角、传动比、输入功率和输入转速对面齿轮传动的噪声辐射影响分析;仿真分析结果得出模数和传动比对改善面齿轮传动的噪声辐射有益、压力角对其影响不大等结论。

上述研究成果对评估面齿轮传动的噪声辐射和为低噪声面齿轮传动的设计奠定了必要的理论基础。

### 参考文献:

- [1] Litvin L F, Zhang Y, Wang J C, et al. Design and geometry of face-gear drives [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1992, 114(4): 642-647.
- [2] Litvin L F, Fuentes A, Howkins M. Design, generation and TCA of new type of asymmetric face-gear drive with modified geometry [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 190(43): 5837-5865.
- [3] Litvin L F, Fuentes A, Zanzi C, et al. Design, generation, and stress analysis of two versions of geometry of face-gear drives [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37(10): 1179-1211.
- [4] Litvin L F, Gonzalez-Perez I, Fuentes A, et al. Design, generation and stress analysis of face-gear drive with helical pinion [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005, 194(36): 3870-3901.
- [5] LI Zhengminqing, LIU Xinsheng, ZHU Rupeng. Comparison of dynamic behaviors and strength among three versions of face gear drives with high contact ratios [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015, 17(1): 125-136.
- [6] LI Zhengminqing, WU Hao, ZHU Rupeng. Influence predictions of geometric parameters on face gear strength [J]. *Advanced in Mechanical Engineering*, 2015, 2(1): 1-7.
- [7] Litvin L F, Wang J C, Bossler R B, Jr, et al. Application of face-gear drives in helicopter transmissions [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1994, 116(3): 672-676.
- [8] Litvin L F, Egelja A, Tan J, et al. Handbook on face gear drives with a spur involute pinion [R]. NASA CR-209909, 2000.
- [9] 李晓贞, 朱如鹏, 李政民卿, 等. 齿面摩擦对面齿轮传动系统振动特性的影响分析 [J]. *振动工程学报*, 2014, 27(4):

- 584-588.
- LI Xiaozhen, ZHU Rupeng, LI Zhengminqing, et al. Influences of frictional coefficient on vibration characteristic of face gear transmission system[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(4): 584-588. (in Chinese)
- [10] 靳广虎, 朱如鹏, 鲍和云. 正交面齿轮传动系统的非线性振动特性[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2010, 41(5): 1807-1813.
- JIN Guanghu, ZHU Rupeng, BAO Heyun. Nonlinear dynamical characteristics of face gear transmission system [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2010, 41(5): 1807-1813. (in Chinese)
- [11] 杨振, 王三民, 范叶森, 等. 面齿轮传动系统参数激励振动特性分析[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(1): 26-35.
- YANG Zhen, WANG Sanmin, FAN Yesen, et al. Vibration characteristics of face-gear transmission system with parametric excitation [J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(1): 26-35. (in Chinese)
- [12] 杨振, 王三民, 范叶森, 等. 正交面齿轮传动系统分岔特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(3): 107-110.
- YANG Zhen, WANG Sanmin, FAN Yesen, et al. Bifurcation characteristics of face-gear transmission system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(3): 107-110. (in Chinese)
- [13] HU Zehua, TANG Jinyuan, CHEN Siyu, et al. Effect of mesh stiffness on the dynamic response of face gear transmission system [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2013, 135(7): 1-7.
- [14] 张乐, 朱如鹏, 李政民卿. 面齿轮传动分扭系统扭转振动的固有频率分析[J]. *机械制造与自动化*, 2012, 41(5): 21-24.
- ZHANG Le, ZHU Rupeng, LI Zhengminqing. Research on natural frequency of torsional vibration of torque-split face gear transmission system [J]. *Machine Building & Automation*, 2012, 41(5): 21-24. (in Chinese)
- [15] 赵宁, 王锐锋, 贾清健. 面齿轮分扭传动系统均载研究[J]. *机械传动*, 2013, 37(12): 5-8.
- ZHAO Ning, WANG Ruifeng, JIA Qingjian. Study on the load sharing of face gear split torque transmission system [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2013, 37(12): 5-8. (in Chinese)
- [16] 陈广艳, 陈国定, 李永祥, 等. 含有面齿轮的传动系统动态响应特性研究[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(10): 2391-2396.
- CHEN Guangyan, CHEN Guoding, LI Yongxiang, et al. Dynamic response analysis of gear drive with face-gears [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(10): 2391-2396. (in Chinese)
- [17] Moyne S L, Tébec J L. Ribs effects in acoustic radiation of a gearbox; their modelling in a boundary element method [J]. *Applied Acoustics*, 2002, 63(2): 223-233.
- [18] Tanaka E, Houjou H, Muton D, et al. Sound radiation analysis system and design of a low noise gearbox with a multi-stage helical gear system [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 2003, 69(4): 272-279.

(编辑: 秦理曼)