

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.09.005

偏置距和加工误差对面齿轮传动误差的影响研究*

林家春¹, 季新艳¹, 石照耀¹, 于 渤¹, 张 白²

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124;

2. 北方民族大学 电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:针对准确测量正交面齿轮的传动误差,减小测量过程中面齿轮安装误差对测量结果影响的问题,对既有偏置距又有加工误差的正交面齿轮进行了数学建模,并采用了TCA分析方法,研究了偏置距对带有加工误差的正交面齿轮传动误差及接触轨迹的影响规律,确定了最大偏置距范围。对不同偏置距下的面齿轮传动误差进行了测量实验,得到了一系列传动误差实测曲线及面齿轮一齿切向综合偏差。研究表明:面齿轮沿轴向上偏对传动误差影响不大;面齿轮沿轴向下偏时,面齿轮一齿切向综合偏差增大 $8.086\ \mu\text{m}$;齿轮相对于小齿轮左右偏时,对传动误差无明显影响,面齿轮一齿切向综合偏差偏移量在 $1\ \mu\text{m}$ 之内;这一结果对面齿轮传动误差测量中如何减小安装误差对测量结果的影响具有指导意义。

关键词:偏置距;面齿轮;TCA分析;传动误差

中图分类号:TH132;TH161+.5

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)09-0907-06

Influence of offset distance and machining error on face gear transmission error

LIN Jia-chun¹, JI Xin-yan¹, SHI Zhao-yao¹, YU Bo¹, ZHANG Bai²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Northern Nationalities University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Aiming at the problem of accurately measuring the transmission error of the face gear and reducing the influence of the face gear installation error on the measurement result during the measurement process, the orthogonal face gear mathematical model with both offset distance and machining error was established. The TCA analysis method was adopted. The influence of offset distance on the transmission error and contact trajectory of orthogonal face gear with machining error was studied. The maximum offset range was determined. The measurement experiment of the face gear transmission error under different offset distances was carried out, and a series of transmission error measurement curves and tangential comprehensive deviation of one tooth of face gear were obtained. The results indicate that when the face gear is shifted upward in the axial direction, it has little effect on the transmission error. When the face gear is shifted downward in the axial direction, tangential comprehensive deviation of one tooth of face gear is increased by $8.086\ \mu\text{m}$. When the face gear is biased to the left and right of the pinion gear, there is no significant influence on the transmission error, and tangential comprehensive deviation of one tooth of face gear is within $1\ \mu\text{m}$. This result has guiding significance on how to reduce the influence of installation error on the measurement results of face gear transmission error.

Key words: offset distance; face gear; TCA analysis; transmission error

收稿日期:2019-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775003)

作者简介:林家春(1978-),男,四川南充人,博士,副教授,主要从事精密测量技术与仪器方面的研究。E-mail: linjc@bjut.edu.cn

0 引 言

面齿轮传动是由圆柱齿轮和面齿轮相互啮合的一种齿轮传动,它具有振动小、噪音低、互换性高、重合度大等优点,尤其在直升机传动系统、航空、航海、汽车等工业的应用过程中体现出了其他齿轮元件无法替代的优越性^[1]。面齿轮接触轨迹及传动误差直接决定了面齿轮副传动过程中的传动精度、振动和噪声等。因此,对面齿轮接触轨迹及传动误差的研究具有十分重要的意义。

国内外许多专家对面齿轮传动进行了大量研究。LITVIN F L 等人^[2-4]使用有限元方法对面齿轮接触轨迹及传动误差进行了研究;Chung T D 等人^[5]根据面齿轮啮合原理,分析了安装误差对面齿轮传动啮合轨迹和运动误差的影响;汪中厚等^[6]对正交直齿面齿轮接触轨迹及传动误差进行了研究,并通过仿真分析出了部分安装误差对面齿轮传动误差的影响;朱如鹏等^[7]分析了偏置误差对接触点主曲率的影响;王延忠等^[8]分析了偏置误差对重载面齿轮传动啮合轨迹的影响。

综上所述,国内外许多专家就偏置距对面齿轮接触轨迹的影响作了大量研究,得出了偏置误差对面齿轮接触轨迹的影响规律。但是,对于带有加工误差的面齿轮,在传动过程中受偏置距影响的分析较少,关于面齿轮传动过程中传动误差受偏置距影响的试验国内也鲜有报道。

因此,本文拟对带有加工误差的面齿轮进行研究,并分析偏置距对其传动误差的影响,通过仿真与试验得出结论,以为面齿轮传动误差测量仪中面齿轮副安装提供依据,使得面齿轮传动误差测量更加准确。

1 带偏置距和加工误差的面齿轮啮合接触分析

1.1 带有加工误差的正交面齿轮数学建模

面齿轮齿面通过直齿轮刀具(插齿刀),采用范成法进行加工,在面齿轮齿面的加工过程中,面齿轮齿面会以一定的传动比随直齿轮刀具的转动而转动,直齿轮刀具齿面的包络面即为面齿轮的齿面。面齿轮齿面径矢函数及齿面法向量是依据齿轮啮合原理及空间啮合原理,由直齿轮刀具的齿面径矢函数及齿面法向量推导得到^[9-10]。

面齿轮齿面径矢函数及齿面法向量的求解可以分为以下几步:

(1) 建立坐标系 S_1 及 S_2 ,使其分别与直齿轮刀具及面齿轮固联的,求得刀具齿面径矢函数及齿面法向量;

(2) 设刀具 θ_s 处有一误差量 $\Delta\theta_s$,将误差量代入标准刀具齿面径矢函数,得到带有刀具误差的刀具齿面径矢函数;

(3) 引入4种加工误差 Δr 、 Δa 、 ΔE_s 、 Δq_s ,建立带有加工误差的坐标系;

(4) 确定坐标系 S_1 到 S_2 转换矩阵,将坐标系 S_1 中的刀具齿面径矢函数及齿面法向量坐标转换至坐标系 S_2 中,在面齿轮坐标系中,由啮合方程求得带有加工误差的面齿轮齿面径矢函数及齿面法向量。

面齿轮齿面加工坐标系如图 1 所示。

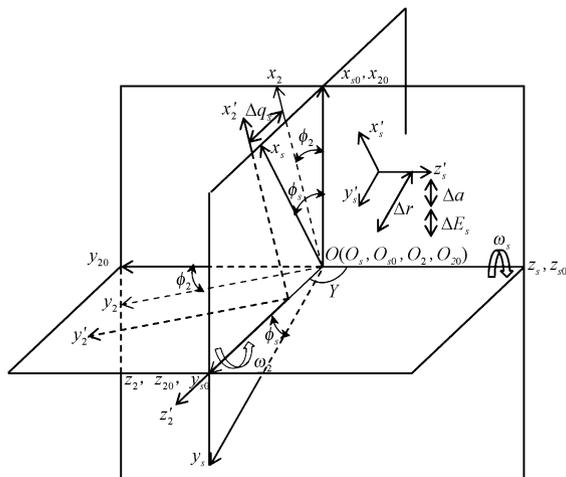


图 1 面齿轮齿面加工坐标系

Δr —刀具径向跳动; Δa —刀具轴向窜动; ΔE_s —两轴相错偏差; Δq_s —面齿轮轴向位移; S_1 —无加工误差的刀具坐标系; S_2 —无加工误差的面齿轮坐标系; S_3 —面齿轮运动坐标系; S_s —刀具运动坐标系

插齿刀齿面径矢函数 $r_s(u_s, \theta_s)$ 为:

$$r_s = \begin{bmatrix} \pm r_{bs} [\sin(\theta_{os} + \theta_s) - \theta_s \cos(\theta_{os} + \theta_s)] \\ -r_{bs} [\cos(\theta_{os} + \theta_s) + \theta_s \sin(\theta_{os} + \theta_s)] \\ u_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

插齿刀齿廓单位法向量 n_s 为:

$$n_s = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{os} + \theta_s) \\ \mp \sin(\theta_{os} + \theta_s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

带有刀具误差的刀具齿面径矢函数 $r'_s(u_s, \theta_s)$ 为:

$$r'_s = \begin{bmatrix} \pm r_{bs} [\sin(\theta_{os} + \theta_s + \Delta\theta_s) - \theta_s \cos(\theta_{os} + \theta_s + \Delta\theta_s)] \\ -r_{bs} [\cos(\theta_{os} + \theta_s + \Delta\theta_s) + \theta_s \sin(\theta_{os} + \theta_s + \Delta\theta_s)] \\ u_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

带有刀具误差的刀具齿廓单位法向量 \mathbf{n}'_s 为:

$$\mathbf{n}'_s = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{os} + \theta_s + \Delta\theta_s) \\ \pm \sin(\theta_{os} + \theta_s + \Delta\theta_s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: r_{bs} —一直齿圆柱齿轮刀具的基圆半径; u_s —一直齿圆柱齿轮刀具齿面任意一点的轴向参数; θ_s —渐开线起点与发生线之间夹角; $\Delta\theta_s$ —刀具 θ_s 处一误差量。

根据上述步骤,确定坐标系 S_f 到 S_2 转换矩阵 $\mathbf{M}_{2's'}$,即:

$$\mathbf{M}_{2's'} = \mathbf{M}_{2'2} \mathbf{M}_{2s} \mathbf{M}_{s'}$$
 (5)

对刀具齿面径矢函数进行坐标变换,得到刀具产形面的曲面方程:

$$\mathbf{r}'_2(\theta_s, \varphi_s) = \mathbf{M}_{2's'} \mathbf{r}'_s(u_s, \theta_s) \quad (6)$$

再结合啮合方程,有:

$$\mathbf{n}_s \cdot \mathbf{v}_s^2 = 0 \quad (7)$$

$$r_{bs} - u_s i_{2s} \cos(\varphi_s \pm (\theta_{os} + \theta_s + \Delta\theta_s)) = 0 \quad (8)$$

面齿轮的齿面方程 Σ_2 为:

$$\begin{cases} \mathbf{r}'_2(\theta_s, \varphi_s) = \mathbf{M}_{2's'} \mathbf{r}'_s(u_s, \theta_s) \\ r_{bs} - u_s i_{2s} \cos(\varphi_s \pm (\theta_{os} + \theta_s + \Delta\theta_s)) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

面齿轮齿面法向量为:

$$\mathbf{n}_2 = \begin{bmatrix} -\cos\varphi_2 \cos(\theta_s + \Delta\theta_s + \theta_{os} \pm \varphi_s) \\ \sin\varphi_2 \cos(\theta_s + \Delta\theta_s + \theta_{os} \pm \varphi_s) \\ \mp \sin(\theta_s + \Delta\theta_s + \theta_{os} \pm \varphi_s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $i_{2s} = N_s/N_2$; $\varphi_2 = i_{2s}\varphi_s$; $\theta_{os} = \pi/(2N_s) - \text{inv}\alpha_0$ 。

1.2 面齿轮传动误差仿真分析

本研究建立啮合分析坐标系,引入偏置距 Δq 和 ΔE ,带偏置距的面齿轮啮合坐标系如图2所示。

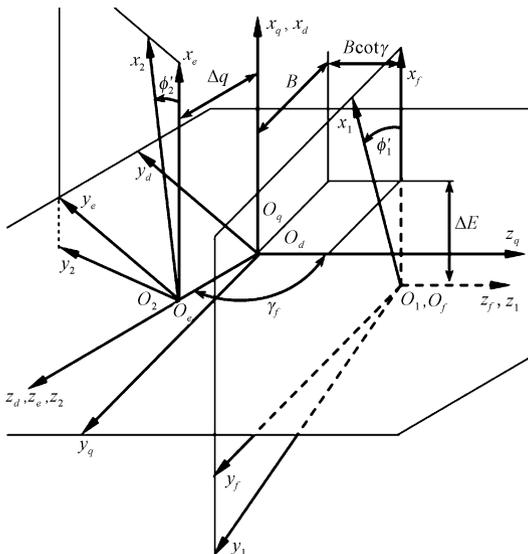


图2 带偏置距的面齿轮啮合坐标系

Δq —面齿轮轴向位移; ΔE —两轴交错最短距离; S_1 —小齿轮坐标系; S_2 —面齿轮坐标系; S_f —固定坐标系; S_q, S_d, S_c —辅助坐标系; B —刀具与小齿轮的中心距

本研究采用 TCA 分析方法,将小齿轮齿面 Σ_1 及其单位法线矢量和面齿轮齿面 Σ_2 及其单位法线矢量坐标变换至固定坐标系 S_f 中,则 Σ_1 和 Σ_2 在坐标系 S_f 中的相切接触方程为:

$$\mathbf{r}_f^{(1)}(u, \theta, \varphi'_1) = \mathbf{r}_f^{(2)}(\theta_s, \varphi_s, \varphi'_2) \quad (11)$$

$$\mathbf{n}_f^{(1)}(\theta, \varphi'_1) = \mathbf{n}_f^{(2)}(\theta_s, \varphi_s, \varphi'_2) \quad (12)$$

小齿轮齿面 Σ_1 和其单位法线矢量转换到 S_f 坐标系中表示为:

$$\mathbf{r}_f^{(1)}(u, \theta, \varphi'_1) = \mathbf{M}_{f1} \mathbf{r}_1(u, \theta) \quad (13)$$

$$\mathbf{n}_f^{(1)}(\theta, \varphi'_1) = \mathbf{L}_{f1} \mathbf{n}_1(\theta) \quad (14)$$

从 S_1 坐标系转换到 S_f 坐标系,转换矩阵为:

$$\mathbf{M}_{f1} = \begin{bmatrix} \cos\varphi'_1 & -\sin\varphi'_1 & 0 & 0 \\ \sin\varphi'_1 & \cos\varphi'_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{L}_{f1} = \begin{bmatrix} \cos\varphi'_1 & -\sin\varphi'_1 & 0 \\ \sin\varphi'_1 & \cos\varphi'_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

\mathbf{r}_1 和 \mathbf{n}_1 分别与刀具的齿面方程和单位法向量类似,推导可得小齿轮齿面 Σ_1 转换到 S_f 坐标系中可表示为:

$$\mathbf{r}_f^{(1)}(u, \theta, \varphi'_1) = \begin{bmatrix} r_b [\sin(\varphi'_1 \pm (\theta_0 + \theta)) \pm \theta \cos(\varphi'_1 \pm (\theta_0 + \theta))] \\ -r_b [\cos(\varphi'_1 \pm (\theta_0 + \theta)) \pm \theta \sin(\varphi'_1 \pm (\theta_0 + \theta))] \\ u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{n}_f^{(1)}(\theta, \varphi'_1) = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi'_1 \pm (\theta_0 + \theta)) \\ -\sin(\varphi'_1 \pm (\theta_0 + \theta)) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

面齿轮齿面 Σ_2 和其单位法线矢量转换到 S_f 坐标系中表示为:

$$\mathbf{r}_f^{(2)}(\theta_s, \varphi_s, \varphi'_2) = \mathbf{M}_{f2} \mathbf{r}_2(\theta_s, \varphi_s) \quad (19)$$

$$\mathbf{n}_f^{(2)}(\theta_s, \varphi_s, \varphi'_2) = \mathbf{L}_{f2} \mathbf{n}_2(\theta_s, \varphi_s) \quad (20)$$

从 S_2 坐标系转换到 S_f 坐标系,转换矩阵为:

$$\mathbf{M}_{f2} = \begin{bmatrix} \cos\varphi'_2 & -\sin\varphi'_2 & 0 & \Delta E \\ 0 & 0 & 1 & B + \Delta q \\ -\sin\varphi'_2 & -\cos\varphi'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{L}_{f2} = \begin{bmatrix} \cos\varphi'_2 & -\sin\varphi'_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\sin\varphi'_2 & -\cos\varphi'_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

由于 r_2 和 n_2 在上面已求出,再根据式(19~22),可以推导出 $r_f^{(2)}$ 和 $n_f^{(2)}$ 。由矢量方程式(11,12)可以提供具有 6 个未知数的方程组,如下:

$$x_f^{(1)}(\varphi'_1, \theta, u) = x_f^{(2)}(\varphi'_2, \theta_s, \varphi_s) \quad (23)$$

$$y_f^{(1)}(\varphi'_1, \theta, u) = y_f^{(2)}(\varphi'_2, \theta_s, \varphi_s) \quad (24)$$

$$z_f^{(1)}(\varphi'_1, \theta, u) = z_f^{(2)}(\varphi'_2, \theta_s, \varphi_s) \quad (25)$$

$$n_{xf}^{(1)}(\varphi'_1, \theta) = n_{xf}^{(2)}(\varphi'_2, \theta_s, \varphi_s) \quad (26)$$

$$n_{yf}^{(1)}(\varphi'_1, \theta) = n_{yf}^{(2)}(\varphi'_2, \theta_s, \varphi_s) \quad (27)$$

$$n_{zf}^{(1)}(\varphi'_1, \theta) = n_{zf}^{(2)}(\varphi'_2, \theta_s, \varphi_s) \quad (28)$$

该 6 个方程只有 5 个是相互独立的,其中有 6 个未知数。设定 φ'_1 为已知,可求出其他参数,从而确定一个接触点以及在该点处的传动误差;以一定步长改变 φ'_1 ,可以得出下一个接触点以及该点处的传动误差,直到接触点超出面齿轮齿面边界。

理想的齿轮传动是共轭的,当小齿轮转过一定角度的时候,面齿轮也要转过相应的角度。但实际面齿轮副存在加工误差及安装偏置距时,其传动误差为:

$$\delta = (\varphi'_2 - \varphi_2^*) - \frac{N_1}{N_2} \times \varphi'_1 \times r \times 10^3 \quad (29)$$

式中: r —面齿轮分度圆半径。

2 传动误差仿真及安装偏置距范围

本研究采用上述方法对面齿轮传动误差及接触轨迹进行仿真。啮合参数如下:

模数 $m = 6$, 压力角 $\alpha = 25^\circ$, 刀具齿数 $N_s = 22$, 圆柱齿轮齿数 $N_1 = 19$, 圆柱齿轮精度为 7, 面齿轮齿数 $N_2 = 60$, $\Delta\theta_s = -0.025 \text{ rad}$, $\Delta r = 0.12 \text{ mm}$, $\Delta a = -0.05 \text{ mm}$, $\Delta E_s = 0.1 \text{ mm}$, $\Delta q_s = 0.1 \text{ mm}$ 。

为避免面齿轮副实际啮合过程中出现边缘接触,设定接触轨迹的极限位置在距离边缘 1 mm 处。

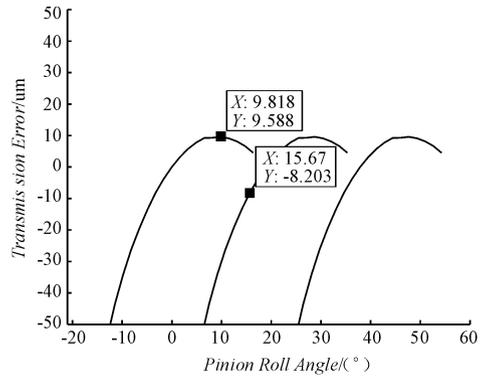
本文重点列举了部分仿真结果图, Δq 变化时,面齿轮传动误差及接触轨迹如图 3 所示。

首先分析安装偏置距 Δq 对接触轨迹的影响:

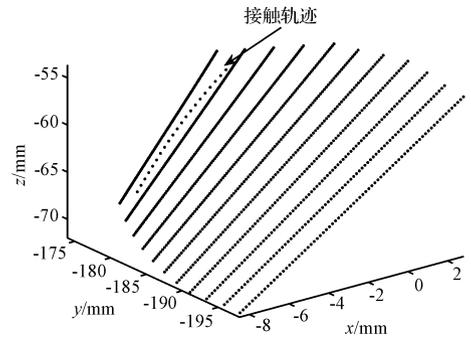
Δq 为 -0.5 mm , 面齿轮传动误差如图 3(a) 所示。接触轨迹如图 3(b) 所示。此时接触轨迹达到面齿轮齿面内侧极限; Δq 为 0.8 mm , 面齿轮传动误差如图 3(c) 所示。接触轨迹如图 3(d) 所示。接触轨迹达到面齿轮齿面外侧极限; 所以 Δq 的范围为 $-0.5 \text{ mm} \sim 0.8 \text{ mm}$ 。

分析安装偏置距 ΔE 对接触轨迹的影响:

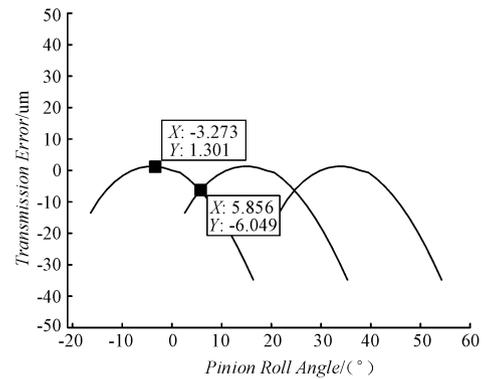
ΔE 为 -0.8 mm 接触轨迹达到面齿轮齿面内侧极限, 随 ΔE 的增大接触轨迹向面齿轮外侧移动, ΔE 为 1.1 mm , 接触轨迹达到面齿轮外侧极限, 所以确定 ΔE 的范围为 $-0.8 \text{ mm} \sim 1.1 \text{ mm}$ 。



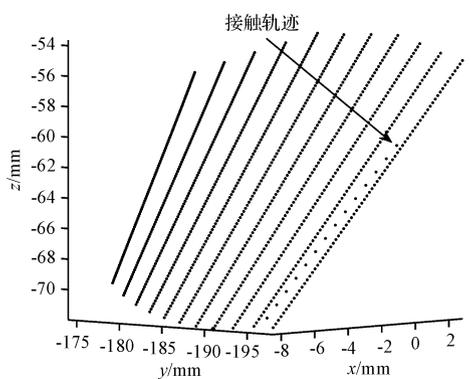
(a) 面齿轮传动误差



(b) 接触轨迹



(c) 面齿轮传动误差



(d) 接触轨迹

图 3 Δq 变化时,面齿轮传动误差及接触轨迹

3 偏置距对正交面齿轮传动误差影响实验

3.1 实验仪器

面齿轮传动误差测量仪器主要由:面齿轮精密

密珠轴系、圆柱齿轮精密密珠轴系、光栅测量系统、控制单元组成。本研究采用时钟脉冲细分计数法,实现传动误差数据采集,可测量面齿轮副传动误差,并分析出面齿轮切向综合总偏差、一齿切向综合偏差等^[11]。

3.2 实验条件

电机转速恒定,面齿轮转速为 3 r/min,调节齿轮偏置距,每个位置连续测量 3 次,求取平均值,进而完成实验。

传动误差实验如图 4 所示。

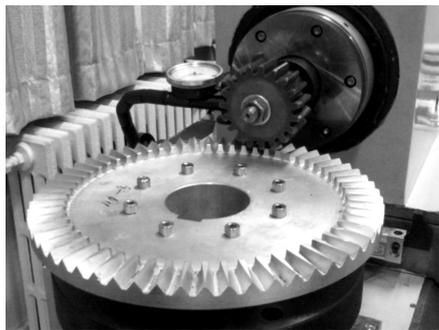


图 4 传动误差实验

3.3 实验数据分析

面齿轮在正确啮合位置上下偏移,每隔 0.1 mm 测量 3 次其传动误差。由本文第 2 节得出 Δq 的范围为 $-0.5 \text{ mm} \sim 0.8 \text{ mm}$,进而得出测量范围为 $-0.5 \text{ mm} \sim 0.8 \text{ mm}$ 。

本研究将仪器中测量的面齿轮一齿切向综合偏差 f_i' ,以及仿真得出的一齿切向综合偏差值进行综合分析,以 Δq 为横坐标,一齿切向综合偏差 f_i' 为纵坐标绘制每个不同偏置距下的误差曲线。

Δq 对传动误差的影响如图 5 所示。

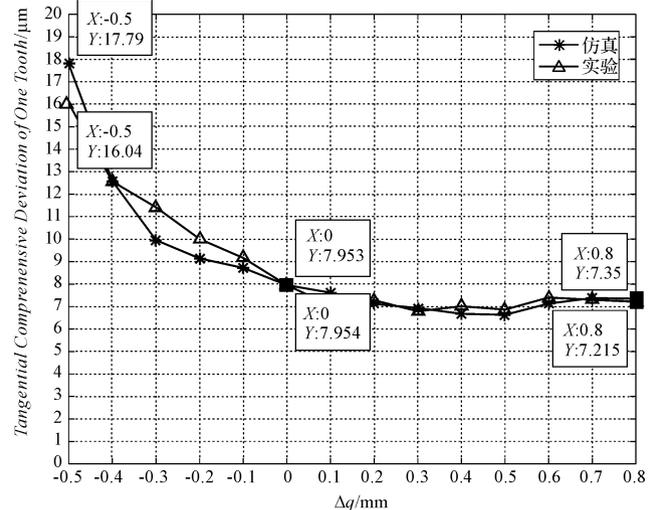


图 5 对传动误差的影响

通过图 5 可以看出:

Δq 为负时,随 Δq 减小,一齿切向综合偏差 f_i' 呈增大趋势; Δq 为正时,对面齿轮传动误差影响较小。

Δq 为负时,面齿轮沿轴向下偏,随偏移量的增大,接触域逐渐减小,重合度降低,使得两对齿之间啮合出现脱啮,齿轮传动出现较大冲击,齿轮传动误差曲线出现尖峰,每个齿的误差越来越明显,一齿切向综合偏差 f_i' 增大 $8.086 \mu\text{m}$; Δq 为正时,面齿轮沿轴向上偏,啮合力增大,小齿轮与面齿轮传动更加平稳,传动误差曲线更加平滑,一齿切向综合偏差值相对较小。

对面齿轮左齿面进行测量,小齿轮在正确啮合位置左右偏移,每隔 0.1 mm 测量 3 次传动误差。小齿轮左移, ΔE 为负;小齿轮右移, ΔE 为正。

由本文第 2 节得出 ΔE 的范围为 $-0.8 \text{ mm} \sim 1.1 \text{ mm}$ 。将仪器中测量的面齿轮一齿切向综合偏差 f_i' 以及仿真得出的一齿切向综合偏差值综合分析,以 ΔE 为横坐标,一齿切向综合偏差 f_i' 为纵坐标绘制不同偏置距下的误差曲线。

ΔE 对传动误差的影响如图 6 所示。

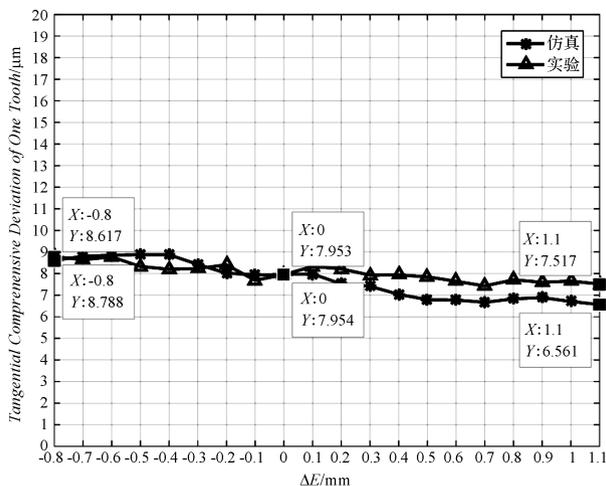


图 6 对传动误差的影响

实验与仿真对比发现:

实验与仿真结果比较相近,一齿切向综合偏差 f_i' 实验数据与仿真数据略存在差异的主要原因是,齿轮一齿切向综合偏差 f_i' 通常由齿轮跳动、仪器各轴运动误差、齿轮负载等综合因素决定,测得一齿切向综合偏差是这些综合因素的结果。

4 结束语

考虑安装偏置距及加工误差对面齿轮传动误差的影响,本文首先确定了偏置距对带有加工误差的面齿

轮的接触轨迹的影响,建立了带有偏置距及加工误差的面齿轮传动模型,通过 TCA 分析得出偏置距的范围,在此基础上进行了实验,分析了偏置距对面齿轮传动误差的影响,得出结论如下:

(1) 偏置距 Δq 为负时,面齿轮接触轨迹向面齿轮小端移动; Δq 为正时,面齿轮接触轨迹向面齿轮大端移动,在面齿轮大端面齿轮齿厚较小,所以需求载荷较大时,需控制 Δq 的上限;偏置距 ΔE 为负时,面齿轮接触轨迹向小端移动; ΔE 为正时,面齿轮接触轨迹向面齿轮大端移动;

(2) 偏置距 Δq 为正时,对面齿轮传动误差影响不大;偏置距 Δq 为负时,面齿轮传动误差随 Δq 的减小而增大; $\Delta q = -0.5 \text{ mm}$ 相对于 $\Delta q = 0 \text{ mm}$ 时,测得面齿轮一齿切向综合偏差 f_i' 增大 $8.086 \mu\text{m}$;偏置距 ΔE 对面齿轮传动误差影响不大,测得面齿轮一齿切向综合偏差 f_i' 偏移量均在 $1 \mu\text{m}$ 之内;安装面齿轮时要严格控制 Δq 下限;

(3) 通过研究偏置距对接触轨迹及传动误差的影响,可以指导传动误差测量过程中面齿轮副安装,减小安装误差对测量结果的影响。

参考文献 (References):

- [1] 陈昌鹤. 面齿轮单面啮合测量仪的测控系统研发[D]. 北京:北京工业大学机械与应用电子技术学院,2013.
- [2] LITVIN F L, WANG J C, BOSSLER R B, et al. Application of face gear drives in helicopter transmissions [J].

Journal of Mechanical Design, Transactions Of the ASME, 1994, 116(3): 672-676.

- [3] ARGYRIS J, LITVIN FL, PENG A, et al. Axes of meshing and their application in theory of gearing[J]. *Comput Methods Appl Mech-Engrg*, 2002 (191): 3035-3054.
- [4] LITVIN F L, EGELJA A, TAN J. Computerized design, generation and simulation of meshing of orthogonal offset face gear drive with a spur involute pinion with localized bearing contact [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1998, 33 (1-2): 87-102.
- [5] CHUNG T D, CHANG Yun-yuan. An investigation of contact path and kinematic error of face-gear drives[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2005, 13 (2): 97-104.
- [6] 汪中厚,牛波,张扬扬. 正交直齿面齿轮接触斑点及传动误差的研究[J]. *机械传动*, 2013, 37(10): 7-13.
- [7] 李政民卿,朱如鹏,靳广虎. 加工偏置误差对面齿轮传动接触特性的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42 (12): 1938-1942.
- [8] 王延忠,刘元鹏,吴玉广,等. 考虑装配误差的重载面齿轮传动啮合性能分析[J]. *新技术新工艺*, 2016(11): 29-32.
- [9] 何国旗,严宏志,胡威,等. 面齿轮啮合过程中齿面接触分析[J]. *中南大学学报*, 2013, 44(1): 95-100.
- [10] 何国旗. 面齿轮齿面创成方法及啮合特性研究[D]. 湖南:中南大学机电工程学院,2014.
- [11] 石照耀,张万年,曲宏芬. 小模数齿轮单面啮合测量机的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(4): 913-919.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

林家春,季新艳,石照耀,等. 偏置距和加工误差对面齿轮传动误差的影响研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(9): 907-912.

LIN Jia-chun, JI Xin-yan, SHI Zhao-yao, et al. Influence of offset distance and machining error on face gear transmission error[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(9): 907-912.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>