

分段拓扑修形齿轮的成形磨削与试验

王会良¹, 邓效忠², 杨建军², 徐 恺², 苏建新², 陈 强³

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;

3. 常州驰轮精密齿轮齿条有限公司, 江苏 常州 213000)

摘 要: 基于成形磨削的几何原理和机床运动学原理,提出了斜齿轮副的一种分段拓扑修形方法.通过改变齿顶和齿根处渐开线的发生线长度实现齿廓分段修形;给砂轮附加一个抛物线+直线的径向进给运动实现齿向分段修形.推导出基于成形磨削过程中拓扑修形齿面的计算公式,对修形齿面的边界进行了划分,建立成形磨齿机各伺服轴的运动方程.根据齿面的数值模拟结果,在五轴数控(CNC)成形磨齿机上进行磨削加工与在机拓扑测量,验证了成形法实现齿面拓扑修形的可行性.对给定转速和负载工况下的齿轮箱进行加载试验,齿轮箱振动能量级幅值下降 0.008 dB,噪声减小约 2 dB.研究表明分段拓扑修形有利于降低齿轮传动振动和噪声.

关 键 词: 分段拓扑修形;成形磨削;五轴数控成形磨齿机;在机拓扑测量;齿面误差

中图分类号: V261.2

文献标志码: A

Form grinding and experiment on segment topographic modification gear

WANG Hui-liang¹, DENG Xiao-zhong², YANG Jian-jun²,
XU Kai², SU Jian-xin², CHEN Qiang³

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;

3. Changzhou Chilun Gear and Rack Company, Changzhou Jiangsu 213000, China)

Abstract: Based on the form grinding method geometry theory and gear profile grinding machine kinematics principles gears, a segment topographic modification method of helical gear drives was proposed. Profile segment modification was achieved by changing length of involute occurrence line of involute profile on the top and root of the tooth; longitudinal segment modification was achieved by attaching to a parabolic and linear radial feed motion when forming grinder is moving. The formula of topographic modification tooth flank was derived based on form grinding process, and the boundary of topographic modification tooth flank was divided and calculated to establish the equations of motion for every servo axis of form grinding machine. According to numerical simulation results of the tooth flank, machining on the five-axis computer numerical control (CNC) gear form grinding machine and on-ma-

收稿日期:2014-03-21

基金项目:国家自然科学基金(51375144, 51205108);河南省重点科技攻关项目(132102210248)

作者简介:王会良(1974—),男,河南偃师人,副教授,博士生,主要从事齿轮数字化制造与测量技术研究.

通讯作者:邓效忠(1957—),男,河南洛阳人,教授、博士生导师,博士,主要从事弧齿锥齿轮设计与制造技术研究.

E-mail:dxz01@163.com

chine topographic measurement can verify the feasibility of topological modification of tooth flank by the grinding method. Combined the given conditions of rotating speed and operating load gearbox loading experiment, the vibration energy level amplitude of gearbox is dropped 0.008 dB and noise is reduced by about 2 dB. The research results show that segment topographic modification is effective in reducing gear drives vibration and noise.

Key words: segment topographic modification; form grinding;
five-axis computer numerical control gear form grinding machine;
on-machine topographic measurement; tooth flank error

斜齿轮传动具有承载能力大、传动平稳、结构紧凑等优点,可应用于航空、汽车、风力发电、精密机床等机械的传动装置中,其齿面精度直接影响着设备的使用性能^[1].提高齿轮传动精度和改善齿面表面粗糙度的主要方法,目前仍以展成法和成形法磨齿工艺为主^[2-3].前者对机床的传动链精度要求较高,砂轮和工件由断续的点相接触,加工效率低;后者由于砂轮和工件成线接触,在磨削宽齿轮和模数较大的齿轮时,效率较高.

在成形磨削过程中,通过齿面修形可以较好地改善齿面啮合状态,有效防止边缘接触,减少振动和噪声^[4-6].王成等^[7-8]提出了以承载传动误差幅值最小为优化目标的修形齿面设计方法达到减小振动与噪声的目的.赵宁等^[9]提出了直齿面齿轮修形,避免了边缘接触和改善齿面载荷分布与承载传动误差.他们在铣齿机上进行验证.Yoshino 等^[10]提出了通过补偿砂轮廓形和砂轮与工件相对位置的齿面修形的方法,来降低齿轮副传动误差.Kobayashi 等^[11-12]通过对砂轮安装角的计算,推导出了砂轮和工件齿向修形的优化接触线.李国龙等^[13]对砂轮附加径向运动时的砂轮廓形进行了优化,有效降低了修形齿轮的成形磨削误差.以上学者虽在齿向修形上进行了研究,但没对齿向进行分段修形.Shih 等^[14-15]对砂轮的廓形使用 B 样条曲线进行拟合,降低了齿面加工误差.Litvin 等^[16-17]通过在展成法磨齿机上对齿面修形来减少传动误差,而没有在成形法磨齿上进行齿廓齿向修形研究,对成形法磨齿的分段拓扑修形理论研究较少.

为此,本文基于五轴数控成形磨齿机,提出一种齿廓和齿向修形相结合的分段拓扑修形方法,规划出齿面的拓扑修形原理与策略;通过建立拓扑修形齿面方程和划分修形区域边界,结合五轴数控成形磨齿机的数学模型,实现斜齿轮成形磨削的三维拓扑修形;并试验验证了该方法的可行性.

1 分段拓扑修形机理

拓扑修形是同时对齿廓和齿向进行修形,其中齿廓修形也是传统意义上的齿廓修缘和修根,使其端面齿形和标准渐开线相比成为鼓形.提出的分段拓扑修形是把齿轮齿面分成 9 个区域,如图 1 所示.其中区域 1 为渐开线齿面,区域 2、区域 4、区域 6、区域 8 为齿廓+齿向修形,区域 5、区域 9 为齿向修形,区域 3、区域 7 为齿廓修形.图中 a, b, c, d, e, f, h, j 为各区域之间的边界线.

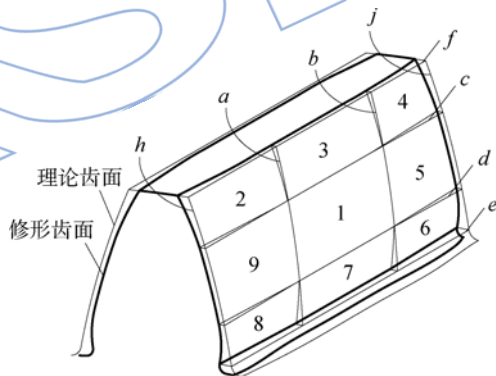


图 1 拓扑修形齿面示意图

Fig. 1 Schematic illustration of topographic modification tooth flank

1.1 齿廓分段修形

成形法磨齿具有加工效率高的特点,是由于砂轮和工件成线接触.它是将砂轮轴截面廓形修成与齿槽廓形一致(或接触线一致),靠砂轮廓形来保证磨削齿形精度.齿廓分段修形是通过在渐开线的发生线上叠加一个修形量 ΔL ,同时对齿廓进行修缘和修根,如图 2 所示. $e'f'$ 为理论齿廓渐开线, ef 为实际修形齿廓渐开线,齿廓 dc 段为理论渐开线, u_c, u_d 分别为齿廓上 c, d 处的展开角.修形量和展开角成一抛物线函数关系,则 ΔL 可表示为

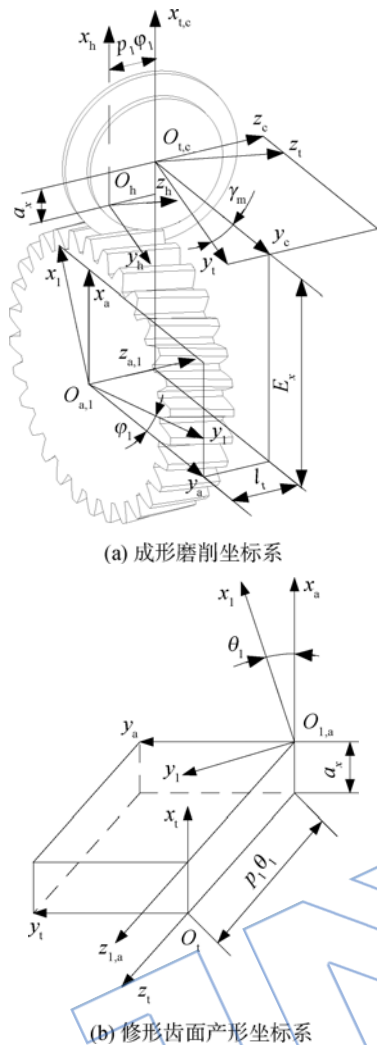


图 4 成形磨削与修形齿面产形坐标系

Fig. 4 Coordinate systems of form grinding and tooth flank modification

坐标系 S_a 固连于齿轮安装回转台的固定机架上, $x_a O_a y_a$ 平面位于齿轮安装的基准平面上. 如图 4(b) 所示. 工件坐标系 S_t 和工件固连在一起, 坐标轴 z_t 过回转台中心及工件轴线. 假定实际修形齿廓渐开线 ef 与砂轮坐标系 $S_t(x_t, y_t, z_t)$ 固连, ef 绕 z_a 轴做螺旋运动, 同时在 x_a 方向做抛物线运动, 便形成一个拓扑修形齿面. 在齿宽中部, 渐开线区域 1 没有齿向修形, 因而砂轮廓形可以用齿面区域 1 的端截面廓形来求解. 假定修形渐开线与砂轮坐标系 S_t 固连(这里假定砂轮轴截面与齿宽中部的端截面一致, 即 $r_0^{(i)} = r_0$). 砂轮坐标系 S_t 相对坐标系 S_a 的运动是当 S_t 绕 z_a 轴回转过 θ_1 时, 其坐标原点沿 z_a 方向移动一个距离 $l_t = p_1 \theta_1$; 同时沿 x_a 负方向移动一个距离 a_x .

拓扑修形的齿面矢量方程为

$$\mathbf{r}_1^{(1)} = \mathbf{M}_{1a}(\theta_1) \mathbf{M}_{at}(a_x, l_t) \mathbf{r}_0^{(i)} = \mathbf{M}_{1t}(\theta_1, a_x, l_t) \mathbf{r}_0^{(i)} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{M}_{1a}(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{at}(a_x, l) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将式(4)展开得

$$\mathbf{r}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} r_b \cos(\sigma_1 + u_1 - \theta_1) + (r_b u_1 - \Delta L) \sin(\sigma_1 + u_1 - \theta_1) - a_x \cos \theta_1 \\ r_b \sin(\sigma_1 + u_1 - \theta_1) - (r_b u_1 - \Delta L) \cos(\sigma_1 + u_1 - \theta_1) + a_x \sin \theta_1 \\ p_1 \theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2 成形磨削模型构建

与传统的展成法磨削加工相比, 成形法磨齿不但对成形砂轮的修形精度要求高, 而且砂轮相对工件的径向和切向位置精度也影响磨削齿形精度. 本文设计的数控成形磨齿机 YK73125 具有五轴全闭环数控伺服轴: 3 个直线轴 (x, y, z) 和 2 个旋转轴 (A, C), 如图 5 所示. 其中, φ_c 为齿轮旋转角, φ_a 为砂轮根据齿轮螺旋角大小所转的角度. x 轴为砂轮沿工件径向进给运动轴, y 轴为金刚轮水平方向运动轴, z 轴为砂轮沿工件轴向运动轴.

B_{sp1} 轴和 B_{sp2} 轴分别为砂轮和金刚轮绕自身轴线高速旋转的电动主轴. 坐标系 $S_t(x_t, y_t, z_t)$ 和 $S_i(x_i, y_i, z_i)$ 分别固连于砂轮和齿轮, 坐标系 $S_a(x_a, y_a, z_a)$ 固连于齿轮安装回转台的固定机架上, $x_a O_a y_a$ 平面位于工件安装的基准平面上. 坐标系 S_c 为辅助坐标系, S_{d0} 为金刚轮零点坐标系, S_d 为砂轮修形时金刚轮所在的坐标系, 在机床调整时, 应使金刚轮中心、砂轮中心和工件齿槽对称轴线在 y 方向上对中, k_1 为常数.

基于五轴数控成形磨齿时, 砂轮廓形取齿面区域 1、区域 3 和区域 7 的齿面径矢, 用 $r_i(u_i, \theta_1)$

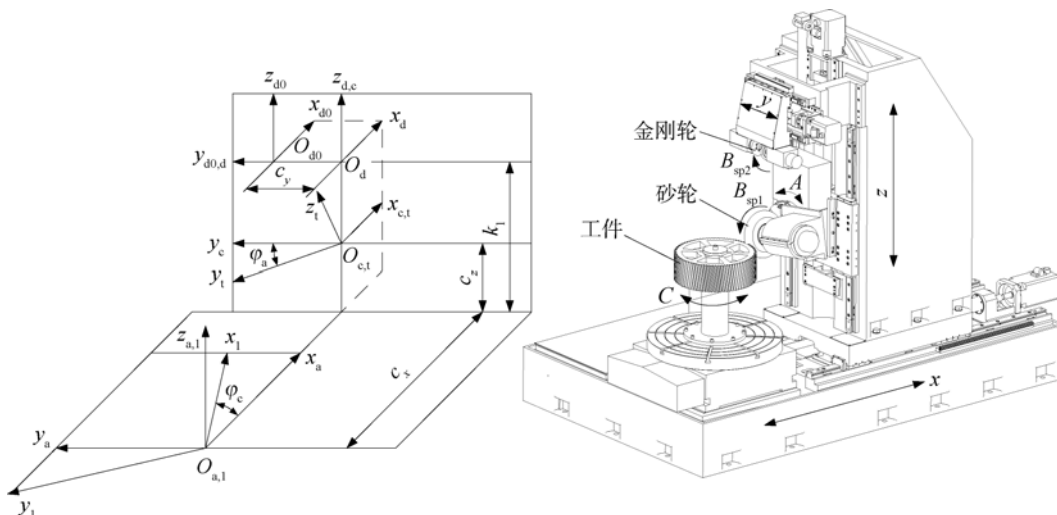


图5 成形磨削模型

Fig. 5 Model for form grinding

表示. 砂轮廓形经过 S_l 到 S_1 坐标变换后在坐标系 S_1 下的方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1^{(C)}(u_1, \theta_1, C_x, C_z, \varphi_c, \varphi_a) = \\ \mathbf{M}_{1a}^{(C)}(\varphi_c) \mathbf{M}_{ac}^{(C)}(C_x, C_z) \mathbf{M}_{ct}^{(C)}(\varphi_a) \mathbf{r}_t(u_1, \theta_1) = \\ \mathbf{M}_{1t}^{(C)}(C_x, C_z, \varphi_c, \varphi_a) \mathbf{r}_t(u_1, \theta_1) \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$\mathbf{M}_{1a}(\varphi_c) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_c & \sin \varphi_c & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_c & \cos \varphi_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{ac}(C_x, C_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & C_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{ct}(\varphi_a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_a & \sin \varphi_a & 0 \\ 0 & -\sin \varphi_a & \cos \varphi_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由于在成形磨削时, 砂轮中心应与工件齿槽中心始终在一条线上, 因此 C 轴转角与工件转角相反, 同理 A 轴转角与工件螺旋角相反. 在磨削时, 数控轴的运动方程为

$$\begin{cases} \varphi_c(\varphi_1) = -\varphi_1 \\ \varphi_a(\varphi_1) = -\gamma_m(\varphi_1) \\ C_x(\varphi_1) = \frac{d_f + d_w}{2} - \frac{\delta}{\sin(\sigma_1 + u_1)} \\ C_z(\varphi_1) = \frac{d_1 \cot \beta}{2} \cdot \varphi_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 γ_m 为常数, d_f 和 d_1 分别为齿轮的齿根圆直

径和分度圆直径, d_w 为砂轮外径, β 为齿轮的螺旋角.

齿面的单位法向量在坐标系 S_1 中的表达式为

$$\mathbf{n}_1^{(C)} = \frac{\frac{\partial \mathbf{r}_1^{(C)}(u_1, \theta_1, \varphi_1)}{\partial u_1} \times \frac{\partial \mathbf{r}_1^{(C)}(u_1, \theta_1, \varphi_1)}{\partial \theta_1}}{\left| \frac{\partial \mathbf{r}_1^{(C)}(u_1, \theta_1, \varphi_1)}{\partial u_1} \times \frac{\partial \mathbf{r}_1^{(C)}(u_1, \theta_1, \varphi_1)}{\partial \theta_1} \right|} \quad (8)$$

结合式(6)~式(8), 可以求出齿面方程和齿面单位法向量方程, 进而得到齿面和砂轮廓形的啮合方程为

$$\begin{aligned} f_1^{(C)} = \mathbf{n}_1^{(C)}(u_1, \theta_1, \varphi_1) \cdot \mathbf{v}_1^{(1)}(u_1, \theta_1, \varphi_1) = \\ \mathbf{n}_1^{(C)}(u_1, \theta_1, \varphi_1) \cdot \left[\varphi_1 \frac{\partial \mathbf{r}_1^{(C)}(u_1, \theta_1, \varphi_1)}{\partial \varphi_1} \right] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\mathbf{v}_1^{(1)}$ 为砂轮和工件在坐标系 S_1 中的相对速度.

3 试验研究

3.1 磨削加工实例

本文在自行研发的数控成形磨齿机 YK73125 上, 进行了基于拓扑修形的齿面磨削加工试验. 根据承载啮合仿真确定最大修形量, 所加载荷为 $500 \text{ N} \cdot \text{m}$. 首先, 根据齿轮基本参数和计算参数(如表 1 所示)求解齿轮的端面截形和齿向螺旋线的离散点数值解, 建立齿面的三维数字模型, 图 6 为修形齿面与标准渐开线齿面的三维数字模型.

表 1 齿轮成形磨削的数值算例基本参数
Table 1 Basic parameters for gear form grinding in numerical example

参数	数值
法向模数 m_n/mm	8
压力角 $\alpha_n/(\circ)$	20
螺旋角 $\beta/(\circ)$	12.102
齿数 Z_1	44
齿宽 b/mm	70.000
旋向	左旋
砂轮外径 d_w/mm	300.000
砂轮宽度 w_w/mm	60.000
齿廓顶部修形系数 $\alpha_{mp(cf)}/\text{mm}^{-1}$	0.0003
齿廓根部修形系数 $\alpha_{mp(de)}/\text{mm}^{-1}$	0.000005
齿廓修形起始展开角 u_c/rad	0.459
齿廓修形终止展开角 u_d/rad	0.262
齿向下端修形系数 $\alpha_{ml(ha)}/\text{mm}^{-1}$	0.0006
齿向上端修形系数 $\alpha_{ml(bj)}/\text{mm}^{-1}$	0.0006
齿向修形终止转角 θ_a/rad	0.013
齿向修形起始转角 θ_b/rad	0.071

由图 6 可以看出,修形齿面分别在齿向和齿廓方向上沿齿面法线向内凹陷,呈近似抛物线形状.齿面中间区域与标准渐开线齿面完全吻合,保留了标准渐开线齿面.根据齿面的三维数字模型,可以进行砂轮廓形的计算和承载接触分析应用.

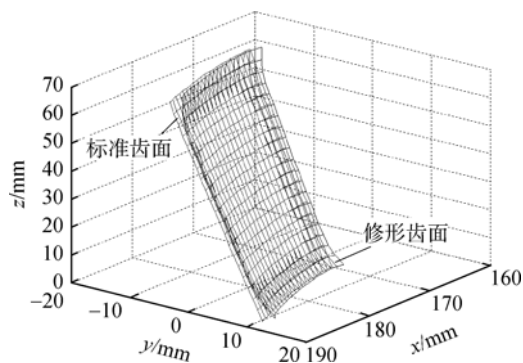


图 6 斜齿轮齿形三维数字模型

Fig. 6 Three-dimensional digital model of helical gear tooth

通过在磨齿机人机界面上输入齿轮参数(如表 1 所示)和砂轮外径.在磨削前,设定好机床加工工艺参数,砂轮转速为 2500 r/min,工件分度速

度为 0.523 rad/s,砂轮修整时金刚轮转速为 800 r/min,砂轮间隔 5 个齿修整 1 次,砂轮单行程进给量为 0.05 mm.数控系统自动对输入参数进行校核和计算,生成加工程序,实现了对齿轮进行自动磨削.磨削加工如图 7 所示.

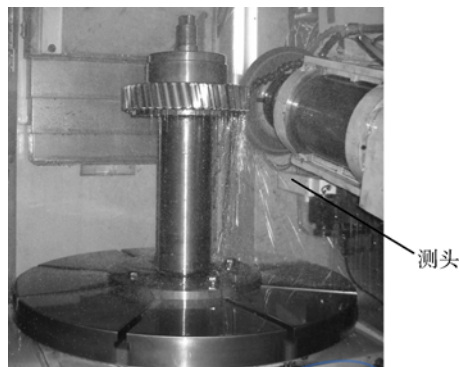


图 7 齿轮在五轴数控成形磨齿机上磨削

Fig. 7 Gear grinding on five-axis CNC gear form grinding machine

齿轮磨削加工完成后,依据开发的数控磨齿齿面误差在线检测系统,利用一维测头进行齿面的在机拓扑测量,如图 8 所示.测量拓扑图分别如图 9 和图 10 所示.



图 8 在机拓扑测量

Fig. 8 On-machine topographic measurement

图 9 为采用拓扑修形齿面方程进行测量,测量结果反映了实际齿面误差,误差分布没有明显趋势,误差最大值在齿顶部分为 -0.0006 mm,右齿面区域 1 中心点的误差为 -0.00055 mm.

图 10 为采用标准齿面方程进行测量,测量结果包含了加工误差和修形量.在齿面区域 2、区域 4、区域 6 和区域 8 的虚线部分(加工误差与修形量的叠加)明显在齿廓和齿向上都呈现出抛物线形状,其最大值在齿顶部分为 -0.0427 mm.在齿面区域 1 中心点的误差为 -0.0049 mm,在齿向

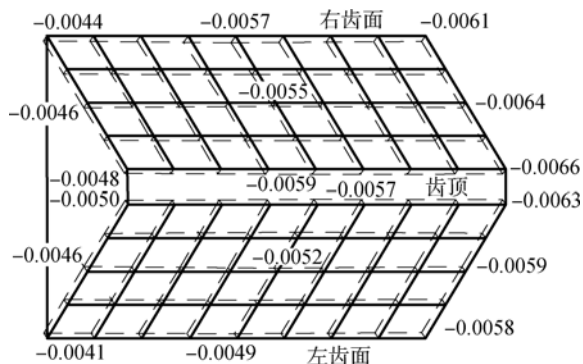


图9 实际齿面误差(单位:mm)

Fig. 9 Actual tooth flank error (unit:mm)

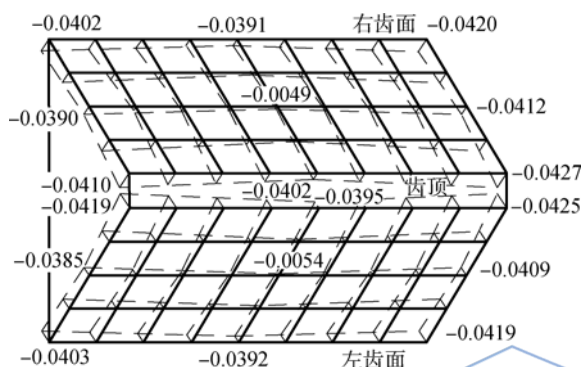


图10 加工误差+修形量(单位:mm)

Fig. 10 Amount of machining error and modification

(unit:mm)

和齿廓中部误差最小,向两边成逐渐增大趋势,呈现出中间高两边低的形状。

3.2 加载试验

为进一步验证修形的效果,使用一对修形齿轮副(从动轮修形,主动轮不修形)进行研究.修形齿轮副的各项参数如表2所示.分别选取修形齿轮副和未修形齿轮副安装到齿轮箱中进行加载试验。

齿轮加载试验台由齿轮箱、磁粉制动器、变频电动机、扭矩转速传感器、加速度传感器等装置组成,如图11所示.先后分别安装未修形从动轮、修形从动轮进行加载试验(载荷为 $100\text{ N}\cdot\text{m}$,转速为 1000 r/min),读取加速度传感器数据.图12为齿轮箱内部结构图。

齿轮箱试验的结果如图13、图14所示.其中图13(a)、图14(a)为时域中振动加速度信号,图13(b)、图14(b)为其频谱图。

从图13、图14中可以看出,未修形齿轮副齿轮箱振动能量级(L_w)为 0.022 dB ,修形齿轮副齿轮箱振动能量级为 0.014 dB ,振动能量级下降了

0.008 dB .通过声压计测量,噪声经过多次试验平均后,从未修形齿轮副齿轮箱的 66 dB 下降到修形齿轮副齿轮箱的 64 dB 。

表2 修形齿轮副基本参数

Table 2 Basic parameters for modification gear drives

序号	参数	取值	
		主动轮	从动轮
1	齿数 Z	23	26
2	法向模数 m_n/mm	5	5
3	压力角 $\alpha_n/(\circ)$	20	20
4	螺旋角 $\beta/(\circ)$	11.478	11.478
5	齿宽 b/mm	53	53
6	变位系数 X_n	0.032	-0.032
7	齿廓修形系数 a_{mp}/mm^{-1}	0	0.001
8	齿廓修形起始展开角 u_c/rad	0	0.511
9	齿廓修形终止展开角 u_d/rad	0	0.145
10	齿向修形系数 a_{ml}/mm^{-1}	0	0.0008
11	齿向修形终止转角 θ_a/rad	0	0.024
12	齿向修形起始转角 θ_b/rad	0	0.138

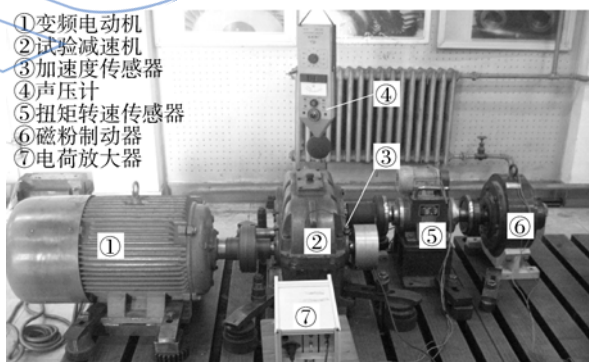


图11 齿轮加载试验台

Fig. 11 Gear loading experiment rig

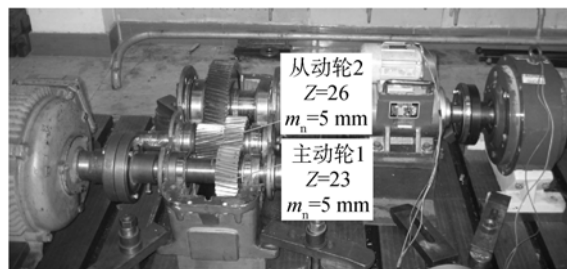


图12 齿轮箱内部结构图

Fig. 12 Gearbox internal structure chart

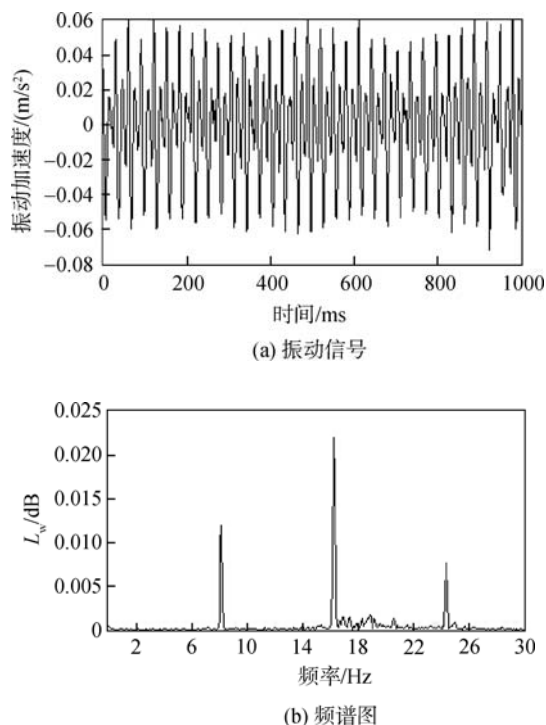


图13 未修形齿轮副试验结果

Fig. 13 Result of no modification gear drives experiment

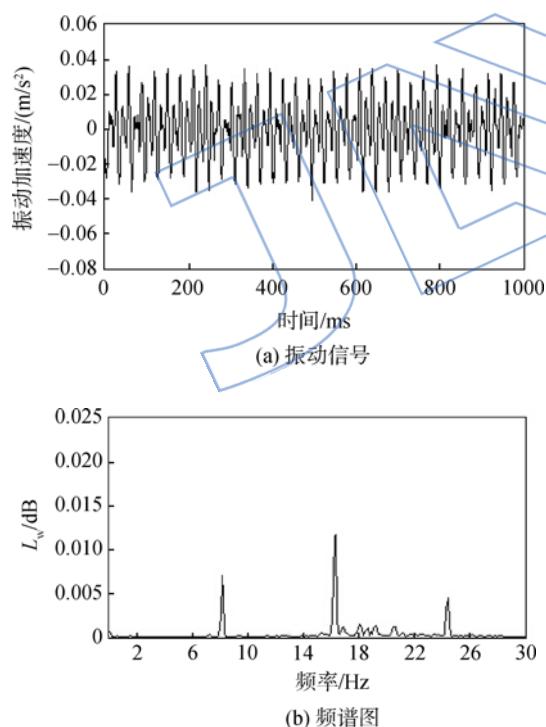


图14 修形齿轮副试验结果

Fig. 14 Result of modification gear drives experiment

4 结 论

本文系统研究了基于成形法磨齿的分段拓扑修形方法,根据齿廓和齿向分段修形的策略,建立齿面拓扑修形方程.依据修形参数对齿面拓扑修

形区域进行边界划分,计算齿廓和齿向的修形系数以及起始渐开线展开角和转角的边界值,实现齿轮副啮合性能的预控.在自主研发的数控成形磨齿机上进行磨削加工并在机测量,实现了齿面的拓扑修形.对修形齿轮副进行承载试验,结果表明,合理的修形能减小齿轮的啮入、啮出冲击,改善齿面载荷分布,减小齿轮振动和噪声,有利于提高齿轮的动态性能.根据拓扑修形的齿面方程和砂轮的径向运动轨迹建立的五轴数控成形磨齿机的轴运动方程,能够为今后补偿各轴运动误差、实现闭环制造打下基础.

参考文献:

- [1] 苏建新,邓效忠,任小中,等.基于数值模拟的内斜齿轮成形磨削砂轮修形方法[J].航空动力学报,2011,26(10):2388-2393.
SU Jianxin, DENG Xiaozhong, REN Xiaozhong, et al. Grinding wheel dressing method for inner helical gear form grinding based on numerical simulation[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2388-2393. (in Chinese)
- [2] Litvin F L, Fuentes A. Gear geometry and applied theory [M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [3] Shih Y P, Fong Z H. Flank correction for spiral bevel and hypoid gears on a six-axis CNC hypoid gear generator[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(6): 062604. 1-062604. 11.
- [4] Fan Q, DaFoe R S, Swanger J W. Higher-order tooth flank form error correction for face-milled spiral bevel and hypoid gears[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(7): 072601. 1-072601. 7.
- [5] Argyris J, Donno M D, Litvin F L. Computer program in visual basic language for simulation of meshing and contact of gear drives and its application for design of worm gear drive[J]. Computer Methods Apply Mechanical Engineering, 2000, 189(2): 595-612.
- [6] Lee C K. Manufacturing process for a cylindrical crown gear drive with a controllable fourth order polynomial function of transmission error[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1): 3-13.
- [7] 王成,方宗德,贾海涛,等.人字齿轮修形优化设计[J].航空动力学报,2009,24(6):1432-1436.
WANG Cheng, FANG Zongde, JIA Haitao, et al. Modification optimization of double helical gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6): 1432-1436. (in Chinese)
- [8] 蒋进科,方宗德,苏进展,等.基于承载传动误差幅值最小的斜齿轮齿面修形优化设计[J].航空动力学报,2013,28(7):1637-1643.
JIANG Jinke, FANG Zongde, SU Jinzhan, et al. Optimal design of modified helical gear tooth surfaces based on minimum amplitude of loaded transmission error[J]. Jour-

- nal of Aerospace Power, 2013, 28(7): 1637-1643. (in Chinese)
- [9] 赵宁, 郭辉, 方宗德, 等. 直齿面齿轮修形及承载接触分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2142-2146.
ZHAO Ning, GUO Hui, FANG Zongde, et al. Modification and loaded contact analysis of spur face gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 2142-2146. (in Chinese)
- [10] Yoshino H, Ikeno K. Error compensation for form grinding of gears[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 1991, 57(543): 3652-3655.
- [11] Kobayashi Y, Nishida N, Ougiya Y, et al. Tooth trace modification processing of helix gear by form grinding method[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 1995, 61(590): 4088-4093.
- [12] Kobayashi Y, Nishida N, Ougiya Y, et al. An estimation of grinding wheel setting error in helical gear processing by form grinding[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 1997, 63(612): 2852-2858.
- [13] 李国龙, 李先广, 刘飞, 等. 拓扑修形齿轮附加径向运动成形磨削中的砂轮廓形优化方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 155-162.
LI Guolong, LI Xianguang, LIU Fei, et al. Method of profile optimization of a form grinding wheel for grinding with additional radial motion of topologically modified gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 155-162. (in Chinese)
- [14] Shih Y P, Chen S D. A flank correction methodology for a five-axis CNC gear profile grinding machine[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 47(1): 31-45.
- [15] Shih Y P, Chen S D. Free-form flank correction in helical gear grinding using a five-axis computer numerical control gear profile grinding machine[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134(4): 041006. 1-041006. 3.
- [16] Litvin F L, Chen N X, Lu J, et al. Computerized design and generation of low-noise, helical gears with modified surface topology[J]. Journal of Mechanical Design, 1995, 117(2A): 254-261.
- [17] Litvin F L, Daniele V, Ken Y, et al. Reduction of noise of loaded and unloaded misaligned gear drives[J]. Computer Methods Apply Mechanical Engineering, 2006, 195(41/42/43): 5523-5536.
- [18] 唐进元, 陈兴明, 罗才旺. 考虑齿向修形与安装误差的圆柱齿轮接触分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(5): 1704-1709.
TANG Jinyuan, CHEN Xingming, LUO Caiwang. Contact analysis of spur gears based on longitudinal modification and alignment errors[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(5): 1704-1709. (in Chinese)