

文章编号:1000-8055(2011)05-1194-07

螺旋锥齿轮齿面误差分析与自动反馈修正

李天兴¹, 邓效忠², 李聚波³, 杨建军²

- (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. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 基于齿面检测信息, 识别并分析了齿面误差及其影响因素, 推导出了机床运动参数与齿面误差的映射关系; 开发了齿面误差自动识别系统来自动确定误差类型及机床运动参数修正项; 建立了四轴联动数控铣齿机运动修正模型, 通过数值优化计算实现了机床运动参数的自动修正, 并经由测量加工网络完成了修正参数至数控机床的自动反馈。实验及应用表明, 通过齿面误差的自动识别、机床运动参数的自动修正与反馈处理, 达到了有效减小齿面误差的预期效果, 齿面精度能够满足设计要求, 很好地实现了螺旋锥齿轮的数字化闭环制造。

关 键 词: 螺旋锥齿轮; 齿面误差; 修正模型; 自动识别; 自动反馈; 数字化闭环制造

中图分类号: TH161.5

文献标志码: A

Automatic feedback correction and deviation analysis for tooth surface of spiral bevel and hypoid gear

LI Tian-xing¹, DENG Xiao-zhong², LI Ju-bo³, YANG Jian-jun²

- (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. School of Mechanical Engineering,
Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: Based on the measurement information of tooth surface, the deviations and influential factors were identified and analyzed, and the corresponding relations between the machine-tool motion parameters and the tooth surface deviation were derived. An automatic identification system was developed to determine the deviation type and the corrected items of machine-tool motion parameters. By the model of 4-axis computerized numerical control (CNC) cutting machine and the application of numerical optimization method, the automatic correction and feedback were realized via the network between the measuring center and the cutting machine. Experiments and applications show that the expected results of effective reduction of tooth surface deviation can be achieved, the tooth surface accuracy can meet the design requirements, and the digital closed-loop manufacturing of spiral bevel and hypoid gear can be carried out effectively by means of automatic feedback correction of machine-tool motion parameters and automatic identification of tooth surface.

收稿日期: 2010-04-25; **修订日期:** 2010-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(50675061); 河南省杰出人才创新基金(094200510007)

作者简介: 李天兴(1975—), 男, 河南孟州人, 讲师, 博士生, 研究方向为螺旋锥齿轮数字化制造与测量技术。

Key words: spiral bevel and hypoid gear; tooth surface deviation; correction model; automatic identification; automatic feedback; digital closed-loop manufacturing

螺旋锥齿轮广泛应用于航空、航天、航海、车辆及工程机械传动中,其齿面精度直接影响着设备的使用性能^[1].在美国、日本等发达国家,实际加工齿面与理论设计齿面的几何结构相一致已成为轮齿精度控制的首要目标,螺旋锥齿轮的闭环制造已经取代传统制造模式,自动检测和误差补偿技术已经在生产中广泛应用^[2-4].而我国螺旋锥齿轮制造仍沿用传统的制齿设备和工艺,通过滚动检验来控制齿面接触精度^[5],这严重影响着齿轮加工精度与质量的稳定性.为节省与避免昂贵的设备进口费用,充分利用国内齿轮检测与加工设备,通过齿面误差的识别与分析、机床运动参数的反馈与修正这两个数字化闭环制造的关键环节,来控制螺旋锥齿轮的制造精度^[6-9]具有重要的经济价值和理论意义.

鉴于此,本文基于国产齿轮测量中心和四轴联动数控铣齿机,根据齿面误差与机床运动参数映射关系,对齿面误差影响因素深入分析,开发出齿面误差自动识别系统,并通过构建四轴联动数控铣齿机机床运动参数修正模型,来自动反馈修正机床运动轨迹.数字化加工与自动修正的实验结果表明,经过1~2次试切齿面误差就能有效减小,达到了预期的理想效果,也验证了齿面误差分析与修正方法的正确性.

1 齿面误差分析

1.1 齿面误差与机床运动参数的映射关系分析

假设切齿参数(即机床运动参数) Φ_j ($j=1, 2, \dots, m$ 为机床运动参数个数,包含刀盘直径 r 、齿形角 α 、径向刀位 S 、角向刀位 q 、安装角 γ 、水平轮位 X 、垂直轮位 E 、加工床位 B 及滚切比 R 等)已知,经过一系列的坐标变换与推导过程^[10],得到测量坐标系中的理论齿面 $\mathbf{H}$ 和单位法矢 $\mathbf{n}$.对 $\mathbf{H}$ 进行测头半径补偿^[11],得到测头球心的理论轨迹 $\mathbf{H}_e$.

$$\mathbf{H}_e(\theta, \phi; \Phi_j) = \mathbf{H}(\theta, \phi; \Phi_j) + \rho \cdot \mathbf{n}(\theta, \phi; \Phi_j) \quad (1)$$

这里 θ 和 ϕ 为曲面坐标; ρ 为测头半径.

因切齿及机床调整等误差因素的影响,实际齿面 $\mathbf{H}^*$ 往往偏离理论齿面 $\mathbf{H}$,而偏离程度 δ (即

齿面误差)通常在 $\mathbf{H}$ 的单位法矢 $\mathbf{n}$ 的方向上进行度量^[11]

$$\delta = (\mathbf{H}^* - \mathbf{H}) \cdot \mathbf{n} \quad (2)$$

由式(2)可知, $\mathbf{H}$ 上每一点均有唯一一个 δ 与之对应,因此, δ 是 $\mathbf{H}$ 上点的函数,即曲面坐标 (θ, ϕ) 的函数,而 (θ, ϕ) 又由机床运动参数 Φ_j 决定,所以 Φ_j 是 δ 的参变量.则 $\mathbf{H}^*$ 可表示为

$$\mathbf{H}^* = \mathbf{H} + \delta(\theta, \phi; \Phi_j) \cdot \mathbf{n} \quad (3)$$

齿面误差 δ 的存在改变了 $\mathbf{H}^*$ 的法线方向,假设 $\mathbf{H}^*$ 的单位法矢为 $\mathbf{n}^*$,可求出 $\mathbf{H}^*$ 的等距曲面 $\mathbf{H}_e^*$,即测头球心的实际轨迹

$$\mathbf{H}_e^* = \mathbf{H}^* + \rho \cdot \mathbf{n}^* \quad (4)$$

为求齿面误差,一般是将测头球心的实际轨迹 $\mathbf{H}_e^*$ 与理论轨迹 $\mathbf{H}_e$ 做比较,得

$$\mathbf{H}_e^* - \mathbf{H}_e = \mathbf{H}^* - \mathbf{H} + \rho \cdot (\mathbf{n}^* - \mathbf{n}) \quad (5)$$

将式(3)代入式(5),得

$$\mathbf{H}_e^* - \mathbf{H}_e = \delta(\theta, \phi; \Phi_j) \cdot \mathbf{n} + \rho \cdot (\mathbf{n}^* - \mathbf{n}) \quad (6)$$

将式(6)两边与单位法矢 $\mathbf{n}$ 做点积,得

$$(\mathbf{H}_e^* - \mathbf{H}_e) \cdot \mathbf{n} = \delta(\theta, \phi; \Phi_j) - \rho \cdot (\cos \tau - 1) \quad (7)$$

式中 τ 是单位法矢 $\mathbf{n}$ 与 $\mathbf{n}^*$ 的夹角.将 $\cos \tau$ 展开为级数并略去高次项,得

$$(\mathbf{H}_e^* - \mathbf{H}_e) \cdot \mathbf{n} = \delta(\theta, \phi; \Phi_j) - \frac{1}{2} \rho \tau^2 \quad (8)$$

这里 $\frac{1}{2} \rho \tau^2$ 是二阶小量,可忽略不计.因此,

$$\mathbf{H}_e(\theta, \phi; \Phi_j) + \delta(\theta, \phi; \Phi_j) \cdot \mathbf{n}(\theta, \phi; \Phi_j) \approx \mathbf{H}_e^* \quad (9)$$

将式(1)代入式(9)整理,得

$$\mathbf{H}(\theta_i, \phi_i; \Phi_j) + (\rho + \delta(\theta_i, \phi_i; \Phi_j)) \cdot \mathbf{n}(\theta_i, \phi_i; \Phi_j) \approx \mathbf{H}_e^* \quad (10)$$

式中下标 $i=1, 2, \dots, 45$ 表示齿面网格点的顺序号.

由于机床运动参数 Φ_j 已知,测头球心的实际轨迹 $\mathbf{H}_e^*$ 由齿面测量得到,单位法矢 $\mathbf{n}$ 经理论计算确定.因此,式(10)是一个以 δ , θ_i 和 ϕ_i 为变量的非线性方程组,运用牛顿拉斐森方法求解即可

得到 H^* 相对于 H 的齿面误差. 如果要对齿面误差进行修正, 要根据 H^* 和 n , 以 Φ_j , θ_i 和 ϕ_i 为变量进行优化迭代, 寻求最佳机床运动参数 Φ^* 使得 δ 趋于最小.

由此可见, 式(10)体现了误差提取与齿面修正的可逆过程, 反映了齿面误差 δ 与曲面参数 θ_i , ϕ_i 和机床运动参数 Φ_j 之间的映射关系. 螺旋锥齿轮的齿面几何完全受控于机床运动参数, 齿面误差 δ 完全受控于机床运动参数误差. 当机床运动参数没有误差时, 实际齿面和理论齿面完全吻合, 齿面误差为零; 机床运动参数误差越大, 实际齿面相对理论齿面的齿面误差 δ 越大.

1.2 齿面误差影响分析

依据齿面误差和比例修正原理^[7,11], 齿面误差主要分为三类: 齿长误差、齿高误差以及对角误差. 其中, 齿长误差主要体现为螺旋角误差和齿面节线曲率误差; 齿高误差主要体现为压力角误差和齿形曲率误差; 而对角误差则是前两者的综合所致. 三种齿面误差的分布趋势如图1所示. 图中, 粗实线表示理论齿面, 细实线和虚线分别表示正向误差和负向误差.

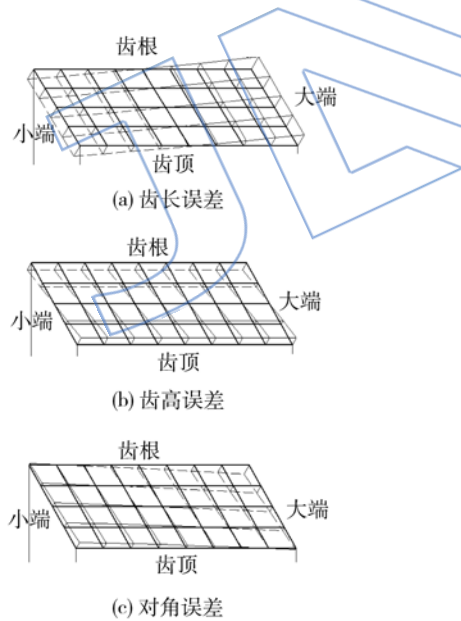


图1 齿面误差分布趋势

Fig. 1 Distribution of tooth surface deviations

鉴于螺旋锥齿轮齿面的复杂性, 其影响齿面几何结构的机床运动参数较多, 齿面误差和机床运动参数之间的影响规律复杂; 同时, 不同的加工方法和机床运动参数对齿面误差的影响规律也不同, 其误差修正策略与方法也随之不同. 根据理论研究及大量实际应用^[1,10,12], 笔者深入分析并总

结了机床运动参数对齿面误差的影响规律, 如表1和表2所示.

表1 大轮齿面误差影响分析

Table 1 Effect of tooth surface deviations of gear

机床运动参数	齿面误差趋势	
	成形法	展成法
径向刀位	齿长误差	齿长误差
角向刀位	齿长误差	齿长误差
安装角	主要齿长误差, 次之齿高误差	
水平轮位	齿长误差	对角误差
垂直轮位		对角误差
加工床位		齿距误差
滚切比		对角误差

表2 小轮齿面误差影响分析

Table 2 Effect of tooth surface deviations of pinion

机床运动参数	齿面误差趋势		
	展成法	刀倾法	变性法
径向刀位	齿长误差	齿长误差	齿长误差
角向刀位	齿长误差	齿长误差	齿长误差
安装角	对角误差	对角误差	对角误差
水平轮位	主要齿高误差, 次之齿长误差		
垂直轮位	主要齿高误差, 次之齿长误差		
加工床位	齿距误差	齿长误差	齿距误差
滚切比	主要齿长误差, 次之齿高误差		
刀倾角		对角误差	
刀转角		对角误差	
二阶变性系数			对角误差
三阶变性系数			对角误差

2 自动识别与反馈修正

2.1 齿面误差自动识别

齿面误差修正时, 首先要对误差类型进行识别, 再根据不同的误差类型和切齿方法, 来修正相应的机床运动参数. 本文基于齿面误差值和切齿方法, 依据齿面误差影响规律数据库, 开发了齿面误差的自动识别系统. 通过误差类型的识别推理与数控机床运动参数转换, 来自动确定齿面误差类型和机床运动参数修正项, 并预置修正项初始值. 该自动识别系统能在齿面的45个测量节点

(网格点)中选取比较有代表性的四个点(例如大端、小端、齿顶和齿根的四个边界点),根据其齿面误差值的大小及正负,运用数学逻辑算法归纳出齿面误差的总体趋势;还可选取八个测量点,来进一步判断齿面的曲率误差,其系统模型如图2所示。

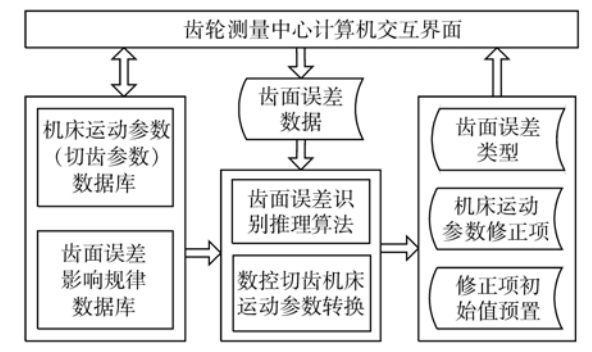


图2 自动识别系统

Fig. 2 Automatic identification system

2.2 数控机床运动参数修正

虽然现有的啮合理论与齿轮制造技术都是基于传统摇台型机床,但通过对数控机床各轴运动轨迹的控制,可以实现刀盘与工件的相对运动关系,从而修正螺旋锥齿轮的齿面误差。本文所述的四轴联动数控铣齿机具有4个数控轴,即3个平动轴(X、Y、Z轴)和1个旋转轴(A轴),它不能全部执行Free-form^[11]型机床所能完成的运动,但只要保证刀盘和工件在任意瞬时都具有相同的相对运动方向与相对位置,通过等效转换^[11],就可以再现传统机床展成法加工螺旋锥齿轮。

根据等效转换,可以得到传统机床运动参数与数控机床运动参数的关系

$$\begin{cases} x(\phi, \Phi_j) = S \cos(q - \phi) + (L - X) \cos \gamma \\ y(\phi, \Phi_j) = -S \sin(q - \phi) + E \\ z(\phi, \Phi_j) = (L - X) \sin \gamma - B \end{cases} \quad (11)$$

式中 $(x(\phi, \Phi_j), y(\phi, \Phi_j), z(\phi, \Phi_j))$ 表示数控机床运动轴X、Y、Z轴的瞬时坐标; ϕ 表示摇台转角; L 是轮坯安装距。

变性法切齿时,滚切比 R 时刻变化,A轴做非匀速转动,与X、Y轴联动实现展成运动,Z轴控制齿深。A轴与摇台转角 ϕ 可写成泰勒级数展开式

$$A(\phi, \Phi_j) = R \cdot (\phi - C \cdot \phi^2 - D \cdot \phi^3) \quad (12)$$

式中 C 和 D 分别表示二阶和三阶变系数,展成法切齿时,滚切比 R 恒定,A轴匀速转动, $A = R \cdot \phi$ 。

假设理论机床运动参数为 Φ_j ,运动轴的理论位置为 $(x(\phi, \Phi_j), y(\phi, \Phi_j), z(\phi, \Phi_j), A(\phi, \Phi_j))$,测量得到机床运动的实际位置 (x^*, y^*, z^*, A^*) 。假设机床运动参数修正量为 $\Delta\Phi_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 为修正项个数), $\Phi^* = \Phi_j + \Delta\Phi_k$ 表示修正后的机床运动参数,是理论机床运动参数与对应修正量之和。根据齿面误差与机床运动参数的映射关系可以得到

$$\begin{cases} x(\phi_i, \Phi^*) + (\rho + \delta(\phi_i, \Phi^*)) \cdot n_x(\phi_i, \Phi^*) = x_i^* \\ y(\phi_i, \Phi^*) + (\rho + \delta(\phi_i, \Phi^*)) \cdot n_y(\phi_i, \Phi^*) = y_i^* \\ z(\phi_i, \Phi^*) + (\rho + \delta(\phi_i, \Phi^*)) \cdot n_z(\phi_i, \Phi^*) = z_i^* \\ A(\phi_i, \Phi^*) = A_i^* \end{cases} \quad (13)$$

理论机床运动参数 Φ_j 决定了理论齿面 H 和单位法矢 n ,齿面误差 δ 决定了实际齿面 H^* 。由于齿面精度的影响因素不仅仅是理论机床运动参数 Φ_j ,修正后的齿面也不可能与理论齿面完全重合,所以式(13)可视为非线性优化问题。以 $\Delta\Phi_k$ 和 ϕ_i 为设计变量,寻求最佳机床运动参数 Φ^* 使得齿面误差 δ 的平方和最小。优化模型如下:

$$f(\phi_i, \Delta\Phi_k) = \min \sum_{i=1}^{45} |\delta(\phi_i, \Phi_j + \Delta\Phi_k)|^2 \quad (14)$$

数值优化求解可以得到各齿面测量节点(网格点)处摇台转角 ϕ_i 和机床运动参数修正量 $\Delta\Phi_k$,进而得到机床修正后的瞬时运动位置。

2.3 机床运动参数自动反馈

对机床运动参数的自动反馈,可通过齿轮测量中心、螺旋锥齿轮数控铣齿机和中心计算机之间的数据传输来实现。数控铣齿机和齿轮测量中心,可以通过协议转换器实现协议转换后,连接到齿轮测量与加工中心计算机上,并经过传输参数设置后即可完成三者之间的数据信息通信^[12]。具体过程如下:齿轮测量中心的机床运动参数修正量通过网络系统反馈到中心计算机上,中心计算机更新机床运动参数和加工程序后,通过网络将修正后的机床运动参数和切齿程序传输到机床上,数控铣齿机可根据新加工程序和机床运动参数完成再次试切。同样,切削修正后的齿轮,通过铣齿机和齿轮测量中心的联网系统,可再次进行加工与自动反馈循环。该自动反馈修正系统,只需

1~2 次循环迭代就能有效降低齿面误差,满足工程设计要求. 齿轮自动反馈修正系统的流程如图 3 所示.

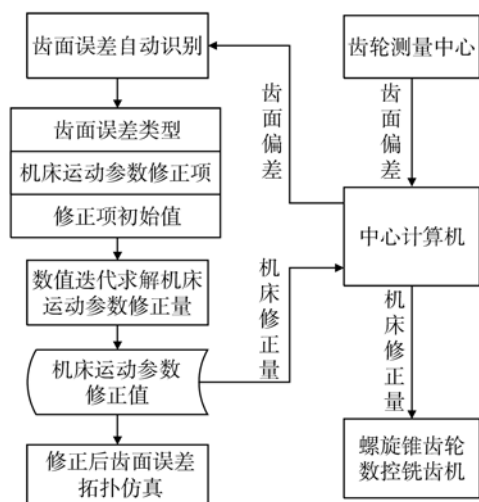


图 3 自动反馈修正流程

Fig. 3 Flowchart of automatic feedback corrections

3 实验验证

本文借助于课题组的齿轮数字化加工设备与网络化资源,以一对准双曲面齿轮为例来验证齿面误差自动识别与反馈修正系统的正确性与有效性. 大轮采用展成法加工,在一次装夹中用双面刀盘同时切出凹面和凸面,所以大轮的齿面修正需要同时兼顾凹面和凸面;小轮采用变性法加工,轮齿的凹面和凸面采用不同刀盘、不同机床运动参数分别加工,因此小轮齿面修正单面进行. 齿轮几何参数见表 3,小轮的初始切齿参数见表 4.

表 3 齿轮几何参数

Table 3 Geometric parameters

几何参数	大轮	小轮
齿数	41	11
轴交角/(°)	90	
偏置距/mm	44.45	
旋向	右旋	左旋
外径/mm	376.29	153.69
齿宽/mm	52	58.43
根锥角/(°)	67.20	18.02
节锥角/(°)	70.70	18.70
面锥角/(°)	71.40	22.10
全齿高/mm	16.9	17.09

表 4 小轮机床运动参数(切齿参数)修正

Table 4 Machine-tool motion parameters corrections of pinion

机床运动参数	初始参数		修正量	
	凹面	凸面	凹面	凸面
刀盘直径/mm	306.07	282.96		
齿形角/(°)	16.00	31.00		
安装角/(°)	18.02	18.02	0.12	2.88
径向刀位/mm	173.63	123.48	-0.81	1.36
角向刀位/(°)	70.78	74.35	0.069	0.603
滚切比	4.68	3.0277	-0.0507	0.2303
水平轮位/mm	20.03	-29.17	0.008	0.866
垂直轮位/mm	54.61	34.29	0.745	0.478
加工床位/mm	6.32	8.89	-0.005	-0.26
二阶变性系数	0.45	-0.13		
三阶变性系数	0.607	0.0507		

由于机床运动参数经等效转换后能成为数控铣齿机的一个确定的运动点,同时,各数控轴的联动关系满足式(11)和式(12),所以以摇台转角为变量,通过给定初始展成位置及插补步长,就可得到展成时各联动数控轴的瞬时位置. 结合表 4,经过等效转换后小轮凹面的瞬时运动位置见表 5. 根据表 5 所示的加工轨迹数据,在国产 YH605 型数控铣齿机上完成了小轮的第一次试切.

表 5 数控轴初始运动位置

Table 5 Initial coordinates of computerized numerical control axes

X 轴/mm	Y 轴/mm	Z 轴/mm	A 轴/(°)
201.3070	-115.5284	60.5231	-37.1853
202.7904	-115.2195	60.5231	-34.7082
⋮	⋮	⋮	⋮
223.8251	-109.3390	60.5231	0
⋮	⋮	⋮	⋮
265.2089	-88.3395	60.5231	67.5471
266.4526	-87.4740	60.5231	69.6002

在 JD45S 型齿轮测量中心上对试切后的小轮进行了齿面测量,检测信息经误差识别与处理后得到齿面误差拓扑图见图 4. 另外,为了增加实验结果的可比性,对小轮的齿距误差和齿距累积

误差也进行了测量.小轮凹面和凸面的齿距误差分别达到 $16.2\mu\text{m}$ 和 $26.9\mu\text{m}$,齿距累积误差分别达到 $27.1\mu\text{m}$ 和 $30.1\mu\text{m}$.

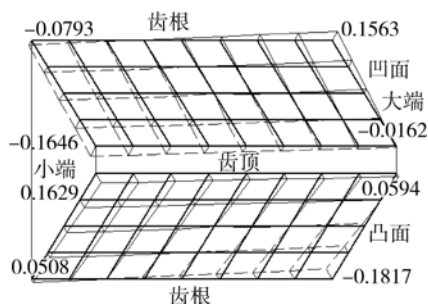


图4 第一次试切后的小轮测量结果(单位:mm)

Fig. 4 Measurement results of pinion after first trial cut (unit:mm)

齿面误差识别系统根据图4数据进行误差类型自动识别,判断结果为对角误差,并初步推荐机床运动参数修正项(径向刀位、角向刀位、安装角、水平轮位、垂直轮位及滚切比).识别系统的修正模块根据机床运动参数修正模型数值优化得到机床运动参数修正量见表4,凹面和凸面的目标函数数值分别减小为 0.319mm 和 0.55mm .四轴联动数控铣齿机经坐标转换后的各数控轴的运动修正量见表6.

表6 数控轴运动修正量

Table 6 Corrections of computerized numerical control axes

X轴/mm	Y轴/mm	Z轴/mm	A轴/(°)
-0.4871	1.4973	0.3515	0.4028
-0.4936	1.4940	0.3515	0.3760
⋮	⋮	⋮	⋮
-0.5847	1.4414	0.3515	0
⋮	⋮	⋮	⋮
-0.7527	1.2938	0.3515	-0.7318
-0.7574	1.2883	0.3515	-0.7540

修正后自动生成的机床加工数据,通过实验室网络,经由中心计算机传递到 YH605 型数控铣齿机上进行切齿修正,第二次试切后的小轮齿面误差测量结果如图5所示.修正后小轮凹面和凸面的齿距误差分别达到 $9\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$,齿距累积误差分别达到 $22\mu\text{m}$ 和 $26\mu\text{m}$.

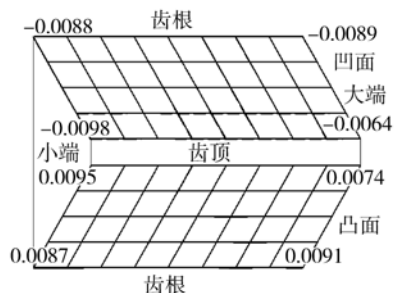


图5 修正后的小轮齿面误差(单位:mm)

Fig. 5 Corrected tooth surface deviations of pinion (unit:mm)

可以看到,经过一次修正后,实际齿面相对于理论齿面的误差得到了有效减小,齿面精度有所提高,齿面误差识别系统推荐不予修正.

为了验证修正效果,运用本文的齿面误差识别与反馈修正系统在 YH605 型数控铣齿机上对大轮也进行了切齿加工,同时通过闭环系统进行了大轮齿面误差修正与反馈,经二次修正后齿面误差的目标函数值减小到 0.0042mm ,达到了设计要求.具体修正与反馈过程与小轮类似,不再赘述,在此只给出修正后的大轮齿面误差,如图6所示.

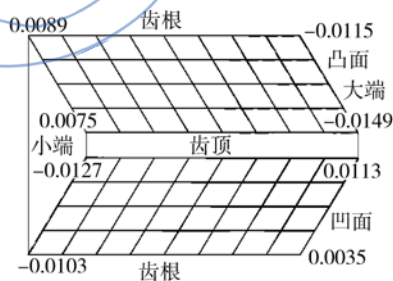


图6 修正后的大轮齿面误差(单位:mm)

Fig. 6 Corrected tooth surface deviations of gear (unit:mm)

最后,对修正后的齿轮副进行了接触区检验,对正车面(小轮凹面、大轮凸面)的接触区进行了拓印(见图7),可以看到修正后的接触区位置和形状都比较理想,达到了预期的修正效果.

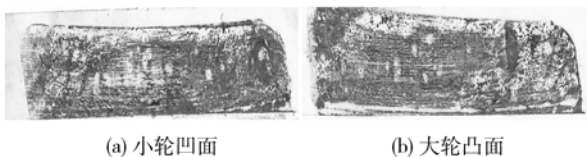


图7 齿面接触印痕

Fig. 7 Contact pattern of tooth surface

4 结 论

齿面误差信息分析与自动识别,机床运动参数的自动修正与反馈是实现螺旋锥齿轮数字化闭环制造的关键环节.本文结合齿面误差的影响因素以及其与数控机床运动参数的映射关系,所提出的齿面误差自动识别与机床运动参数自动反馈修正,与传统的齿面着色滚检及比例修正相比,改善了传统滚检的偶然性大、质量不稳定、调整复杂、花费时间长、劳动强度高等缺点,提高了齿轮的加工质量与效率,能很好地实现齿轮的数字化加工与修正以及齿轮加工的柔性化.

参考文献:

- [1] 邓效忠,方宗德,魏冰阳,等.高重合度弧齿锥齿轮的性能分析与实验研究[J].航空动力学报,2003,18(6):744-748.
DENG Xiaozhong, FANG Zongde, WEI Bingyang, et al. Analysis of meshing behavior and experiments of spiral bevel gears with high contact ratio[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 744-748. (in Chinese)
- [2] 樊奇,让·德福.格里森专家制造系统(GEMS)开创弧齿锥齿轮及双曲面齿轮数字化制造新纪元[J].世界制造技术与装备市场,2005(4):87-93.
Fan Q, Ron D. Gleason expert manufacturing system (GEMS) opens a new era for digitized manufacturing of spiral bevel and hypoid gears[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2005(4): 87-93. (in Chinese)
- [3] Tobisawa K, Kano M, Saiki K, et al. Real tooth contact analysis of loaded hypoid gear directly using measured tooth surfaces[J]. Review of Automotive Engineering, 2006, 27(2): 317-324.
- [4] Takeda R, Wang Z H, Kubo A, et al. Performance analysis of hypoid gears by tooth flank form management[J]. Gear Technology, 2002, 19(4): 26-30.
- [5] 王军,王小椿,姜虹.螺旋锥齿轮齿面的三坐标测量[J].机械工程学报,2003,39(6):151-154.
WANG Jun, WANG Xiaochun, JIANG Hong. Coordinate measurement of tooth surface of spiral bevel gear[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(6): 151-154. (in Chinese)
- [6] Simon V. Computer simulation of tooth contact analysis of mismatched spiral bevel gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(3): 365-381.
- [7] 王志永,曾韬.弧齿锥齿轮基于比例修正参数的齿形误差修正[J].机械工程学报,2010,46(1):43-47.
WANG Zhiyong, ZENG Tao. Correction of tooth flank errors of spiral bevel gear based on proportional change parameters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1): 43-47. (in Chinese)
- [8] 李敬财,王太勇,范胜波,等.基于数字化制造的螺旋锥齿轮齿面误差修正[J].农业机械学报,2008,39(5):174-185.
LI Jingcai, WANG Taiyong, FAN Shengbo, et al. Error corrections of spiral bevel gear tooth surface based on digitized manufacturing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 174-185. (in Chinese)
- [9] 唐进元,卢延峰,周超.调整参数误差对齿面接触质量的影响[J].航空动力学报,2008,23(9):1718-1723.
TANG Jinyuan, LU Yanfeng, ZHOU Chao. Effect of machine tool adjustment parameter errors on spiral bevel gears tooth contact quality[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9): 1718-1723. (in Chinese)
- [10] 李天兴,邓效忠,魏冰阳.基于一维测头准双曲面齿轮齿面偏差的测量[J].中国机械工程,2007,18(8):958-962.
LI Tianxing, DENG Xiaozhong, WEI Bingyang. Tooth surface deviation measurement of hypoid gears based on one-dimensional probe [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(8): 958-962. (in Chinese)
- [11] Litvin F L, Fuentes A. Gear geometry and applied theory [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2004.
- [12] 李聚波,邓效忠,徐爱军,等.异构数控系统的网络化集成制造技术[J].农业机械学报,2009,40(7):192-196.
LI Jubo, DENG Xiaozhong, XU Aijun, et al. Networked integration manufacturing based on different numerical control systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 192-196. (in Chinese)