DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2312050

在机测量坐标系转换及齿面误差解算技术与实现*

金雨生1,丁建军1,张天伟2,胡炳旭1,卢光超1

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049; 2. 浙江金澳兰机床有限公司 金华 321200)

摘 要:面齿轮采用交叉轴或相交轴间的传动形式,在航空发动机和直升机装备中得到广泛的应用。但其独特的面型结构,使 其加工难、效率低,离线检测导致微米量级加工精度难以快速收敛。针对该问题,开发了面齿轮在机测量系统。针对在机测量 系统中齿面重构精度低和测量坐标系构建难、坐标系求解速度慢的问题,建立了基于插齿加工原理的齿面数学模型,提出了分 割逼近的齿面误差评价方法和法向距离约束的测量坐标系快速求解方法。实现了齿面误差的精确解算和测量坐标系的快速求 解。最后,在YK7280数控磨床上完成面齿轮的在机测量,验证所提算法的精度以及与克林贝格齿轮测量中心进行系统精度验 证。实验表明所研发的在机测量系统测量齿形误差为6μm,满足5级面齿轮的加工检测要求。

关键词: 面齿轮;在机测量;齿面重构;坐标系求解

中图分类号: TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Technology and implementation of coordinate transformation and tooth surface error calculation for on-machine measurement

Jin Yusheng¹, Ding Jianjun¹, Zhang Tianwei², Hu Bingxu¹, Lu Guangchao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Zhejiang Jinaolan Machine Tool Co., Ltd., Jinhua 321200, China)

Abstract: Facing gears are widely used in aero-engine and helicopter equipment in the form of cross-shaft or intersecting-axis transmission. However, its unique face structure makes it difficult and inefficient to machine, and offline inspection leads to micrometre-scale machining accuracy that is difficult to converge quickly. To address this problem, this article develops an on-machine measurement system for face gears. To solve the problems of low reconstruction accuracy of tooth face and difficulty in constructing and slow solving coordinate system in the on-machine measurement system, a mathematical model of tooth face is formulated, which is based on the principle of gear insertion processing. The evaluation method of tooth face error with segmentation approximation and the fast solution method of measurement coordinate system with normal distance constraints are proposed. The accurate solution of tooth surface error and the fast solution of measuring coordinate system are realized. Finally, the on-machine measurement of face gears is completed on the YK7280 CNC grinding machine to evaluate the accuracy of the proposed algorithms as well as to validate the accuracy of the system with the Klinberg Gear Measuring Center. The experiments show that the developed on-machine measurement system has a tooth shape error of 6 μ m, which meets the machining and inspection requirements of grade 5 face gears.

Keywords: face gear; on-machine measurement; tooth surface reconstruction; solving coordinate system

0 引 言

工业领域中传统的齿轮传动装置无法满足航空航天 领域中的低质量要求,开发面向军用直升机应用的高性 能齿轮传动系统已经迫在眉睫^[1]。面齿轮传动^[2]是通过 与渐开线圆柱齿轮啮合,实现了其相交轴或交叉轴之间 传动的新型传动方式^[3]。面齿轮传动实现了功率分流传 动技术^[4],较传统的齿轮传动方式相比,其质量下降了约 40%,并且提高了传动性能,具有非常大的优势^[5]。此

收稿日期:2023-10-23 Received Date: 2023-10-23

*基金项目:陕西省"两链"融合高端机床重点专项(2021LLRH-01-01)资助

外,面齿轮传动内部的传动副采用了渐开线圆柱齿轮,简 化了传动结构,降低了直升机减速器的质量和体积^[6],还 大幅度提高了承载能力,并且该传动方式的传动平稳性、 可靠性较高,在航空传动领域有着巨大应用前景^[7]。

实际生产中,通常采用齿轮测量中心或三坐标测量 仪等^[8]专门的仪器进行加工误差测量,根据误差检测结 果,通过优化面齿轮的加工参数来保证制造精度。然而, 这种离线测量方法存在加工坐标系与测量坐标系不统 一,最终引起齿面加工精度难以收敛。另外对于大尺寸 面齿轮的制造,测量仪器的检测范围很容易受到限制^[9]。 因此,研究在机测量系统将有助于加工质量和加工效率 的提高^[10]。

1995年,Blomquist^[11]提出了在机测量的概念,将测量系统集成于数控机床上,在工件试切或加工后,直接对其进行检测,实现了加工、检测一体化。之后国内外学者针对在机测量技术开展了大量研究。

在测量系统精度上,1998年,Lee^[12]利用三轴数控机 床实现了基于三坐标测量机的机床误差补偿方法和刀具 位置与轨迹的补偿方法,并通过点补偿的形式实现了对 于齿轮在机测量误差的补偿。赵锐^[13]采用接触式的测 量方法,在五轴工件磨床上开发立铣刀的在机测量系统, 通过输入被测参数、测头形状位置参数和辅助测量参数, 实现检测程序的自动生成,对于大多数被测参数,相对误 差不超过 2%,并且测量稳定性好。刘威^[14]基于 H350G 型数控机床,实现对螺旋锥齿轮齿面偏差的检测,同时研 究了锥齿轮齿距误差补偿技术,有效提高了加工精度,并 开发了相关在机测量软件,实现对螺旋锥齿轮的自动化 检测和分析评价,并与 CNC3906T 型齿轮测量中心对比, 最大偏差为 9.4 μm。王志永等^[15]针对螺旋锥齿轮大齿 轮齿形设计了在机测量流程,并利用最优化理论完成了 齿面重构和误差解算。

王延忠等^[16]根据面齿轮的加工原理,根据刀具和工件的相对位置关系,建立了切齿加工坐标系。并运用微分几何和啮合理论推导出理论齿面方程,从而提出了基于坐标测量获得面齿轮齿面法向偏差的方法,为面齿轮精度评定提供依据。赵宁等^[17]通过仿真分析探究了插齿加工的误差对非正交面齿轮齿面精度的影响规律,并通过实验量化了偏置误差、齿向误差和轴交角误差对齿面精度的相互关系。明兴祖等^[18]针对面齿轮齿面的形状误差,提出了一种基于序列二次规划(sequential quadratic programming,SQP)的面齿轮齿面误差评定方法。并通过齿面误差调整机床加工参数,达到减小正交面齿轮齿形误差的目标。尹培丽等^[19]研究了坐标系建立误差补偿理论,构建了极坐标法测量齿廓偏差的测量模型和坐标系建立误差补偿模型,实验论证了坐标系建立误差对极坐标法测量齿廓形状偏差的影响规律,误差

补偿模型提升了极坐标法测量渐开线齿廓偏差的精度。 石照耀等^[20]将齿面法向偏差映射至齿轮啮合面坐标系, 通过特征降维处理,实现齿面三维误差的二维化,以此构 建基于 Legendre 正交多项式的齿面三维误差表征方法。 通过建立 Legendre 多项式的展开系数与齿轮齿面各项 特征误差之间的关系,实现齿面三维误差中各项特征误 差的解耦以及齿轮精度的全面评价。李茂月等^[21]开发 了基于结构光的航空叶片在机测量样机,主要解决了非 接触方法三维点云中的噪声点剔除以及曲面误差的评价 难题。

国外企业对于齿轮在机测量技术已经进行了深入的 研究,德国的 KAPP 公司在 ZP08 磨齿机上,通过安装测 量装置,实现对被加工工件的在机测量。HOFLER 公司 生产的 RAPID(2500-6000)系列磨齿机上都安装了三维 测量系统,实现对齿轮的加工、检测一体化。HURTH 公 司生产的 WF3500 型机床,配备了在机测量系统,同时还 集成了磨齿、插齿、滚齿等工序。目前,国内秦川机床工 具集团^[22]生产的 YK73125、YK7380、YK7380A 等型号磨 齿机均实现齿轮的在机测量,使我国对在机测量技术的 研究得到了发展,同时还设计了磨削计算、随机测量等相 关工艺,可以完成对于复杂齿轮的在机测量^[23]。

本文基于面齿轮加工原理构建了零件坐标系到设备 坐标系的转换模型,针对测量坐标系求解效率低的问题, 提出了基于法向距离的角度逼近的加速算法,实现了坐 标系的快速求解。针对当前齿面误差评价精度低的问题,提出了基于 NURBS 的分割逼近法实现齿面误差精确 解算。最后,设计并开发在机测量系统,通过与克林贝格 P100 齿轮测量中心对面齿轮齿面和齿距误差的测量对 比,验证所提算法的有效性和所研发系统的测量精度。

1 面齿轮在机测量模型

1.1 基于插齿加工原理的齿面数学模型

本论文以小齿轮副为渐开线直齿圆柱齿轮的面齿轮 为研究对象,首先根据面齿轮插齿加工原理,利用插齿刀 具齿面数学方程即可推导出面齿轮齿面方程,进而得到 齿面离散数据。插齿刀具与面齿轮的坐标系如图 1 所 示,具体包括插齿刀具与面齿轮初始坐标系 $O_{c}X_{c}Y_{c}Z_{c}$ 、 $O_{t}X_{t}Y_{t}Z_{t}$,随插齿刀具的转动坐标系 $O_{s}X_{s}Y_{s}Z_{s}$ 和随面齿轮 的转动坐标系 $O_{2}X_{2}Y_{2}Z_{2}$ 。插齿刀具坐标系与面齿轮坐 标系的转动角度分别为 φ_{s}, φ_{2} 。

由图 1 可知,插齿刀具的动坐标系 $O_{s}X_{s}Y_{s}Z_{s}$ 到固定 坐标系 $O_{c}X_{c}Y_{c}Z_{c}$ 的旋转矩阵为:

	$\cos \phi_s$	$-\sin\phi_s$	0	0]	
м –	$\sin \phi_s$	$\cos \phi_{s}$	0	0	(1)
IVI _{cm} –	0	0	1	0	(1)
	0	0	0	1	



图 1 面齿轮加工坐标系

Fig. 1 Face gear machining coordinate system

插齿刀具固定坐标系与面齿轮固定坐标系的旋转矩 阵为:

$$\boldsymbol{M}_{fc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_m & -\sin \gamma_m & 0 \\ 0 & \sin \gamma_m & \cos \gamma_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2)

面齿轮转动坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 到固定坐标系 $O_f X_f Y_f Z_f$ 的旋转矩阵为:

$$\boldsymbol{M}_{j_2} = \begin{bmatrix} \cos \phi_2 & -\sin \phi_2 & 0 & 0\\ \sin \phi_2 & \cos \phi_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3)

面齿轮传动时,轴交角为 $\gamma_m = 90^\circ$,得到插齿刀具坐标系到面齿轮的坐标系变换矩阵:

$$M_{2c} = M_{2f}M_{fc}M_{cm} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\phi_2\cos\phi_s & -\sin\phi_s\cos\phi_2 & -\sin\phi_2 & 0 \\ -\sin\phi_2\cos\phi_s & \sin\phi_s\cos\phi_2 & -\cos\phi_2 & 0 \\ \sin\phi_s & \cos\phi_s & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(4)$$

根据面齿轮插齿加工原理,通过渐开线直齿圆柱齿轮齿面数学模型可以得到刀具齿廓数据。设定上述插齿刀具坐标系 *O_sX_sY_sZ_s(Z_s*垂直纸面),得到渐开线齿廓截面数学模型如图 2 所示。

渐开线插齿刀具的齿面方程可以表示为:

$$\boldsymbol{r}_{s}(u_{s},\theta_{s}) = \begin{bmatrix} x_{s} \\ y_{s} \\ z_{s} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{bs} [\cos(\theta_{0s} + \theta_{s}) + \theta_{s}\sin(\theta_{0s} + \theta_{s})] \\ r_{bs} [\sin(\theta_{0s} + \theta_{s}) - \theta_{s}\cos(\theta_{0s} + \theta_{s})] \\ u_{s} \end{bmatrix}$$
(5)

式中: r_{bs} 为对应刀具齿廓的基圆半径; θ_{0s} 为齿槽对称线 到起始点的角度参数; θ_{s} 为刀具渐开线上一点对应的角



图 2 渐开线圆柱齿轮截面 Fig. 2 Involute cylindrical gear section

度; u_s 为当前点的轴向坐标。 θ_{0s} 定义如下:

$$\theta_{0s} = \frac{\pi}{2Z_1} - inv\alpha_0 \tag{6}$$

 $inv\alpha_0 = tan\alpha_0 - \alpha_0$

v

式中: Z_1 为刀具齿数, α_0 为压力角。

在得到渐开线插齿刀具的轮廓方程后,根据其截面 信息计算得到齿面上一点对应的单位法向量为:

$$\boldsymbol{n}_{s} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{n}_{sx} \\ \boldsymbol{n}_{sy} \\ \boldsymbol{n}_{sz} \end{bmatrix} = \frac{\partial \boldsymbol{r}_{s} / \partial \boldsymbol{\theta}_{s} \times \partial \boldsymbol{r}_{s} / \partial \boldsymbol{u}}{|\partial \boldsymbol{r}_{s} / \partial \boldsymbol{\theta}_{s} \times \partial \boldsymbol{r}_{s} / \partial \boldsymbol{u}|} = \frac{\sin(\theta_{0s} + \theta_{s})}{-\cos(\theta_{0s} + \theta_{s})}$$

$$(8)$$

假设面齿轮齿面上一啮合点 p 在插齿刀具坐标系中的速度为 $v_p^{(s)}$,对应角速度为 $w_p^{(s)}$ 。在面齿轮坐标系中的速度为 $v_p^{(2)}$,对应角速度为 $w_p^{(2)}$,根据齿面啮合点的速度与角速度关系可得:

$$\boldsymbol{v}_p^{(s)} = \boldsymbol{w}_p^{(s)} \times \boldsymbol{r}_s = \boldsymbol{w}_p^{(s)} \boldsymbol{k}_s \times \boldsymbol{r}_s$$
(9)

$${}_{p}^{(2)} = \boldsymbol{w}_{p}^{(2)} \times \boldsymbol{r}_{s} = w_{p}^{(2)} \boldsymbol{k}_{2} \times \boldsymbol{r}_{s}$$
 (10)

由齿轮啮合定理,其在两个啮合传动副中角速度之 比为传动比,可得出啮合点处角速度对应关系。

$$\boldsymbol{v}_{p}^{(2)} = \boldsymbol{i}_{2s} \times \boldsymbol{w}_{p}^{(s)} \tag{11}$$

通过插齿刀具坐标系到面齿轮坐标系的矩阵变换, 得出面齿轮和插齿刀具有如下关系:

$$\boldsymbol{v}_p^{(s)} = \boldsymbol{M}_{s2} \times \boldsymbol{v}_p^{(2)} = \boldsymbol{M}_{2s} \times \boldsymbol{v}_p^{(2)}$$
(12)

由此得到在啮合点 p 的相对速度:

$$\mathbf{v}_{p}^{(s,2)} = \mathbf{v}_{p}^{(s)} - \mathbf{v}_{p}^{(2)} = (w_{p}^{(s)}\mathbf{k}_{s} - w_{p}^{(2)}\mathbf{k}_{2}) \times \mathbf{r}_{s}$$
 (13)
可以计算得到:

$$\mathbf{v}_{p}^{(s,2)} = w_{p}^{(s)} \begin{bmatrix} -y_{s} - z_{s}i_{2s}\cos\phi_{s} \\ x_{s} + z_{s}i_{2s}\sin\phi_{s} \\ i_{2s}(x_{s}\cos\phi_{s} - y_{s}\sin\phi_{s}) \end{bmatrix}$$
(14)

(7)

根据齿轮啮合原理可知:
$$n_{s}v_{p}^{(s,2)} = 0$$
 (15)
可以得到关于 $u_{s}, \theta_{s}, \varphi_{s}$ 的求解方程:

$$f(u_s, \theta_s, \phi_s) = r_{bs} - u_s i_{2m} \cos \phi_{\theta} = 0$$
(16)

$$\ddagger \psi.$$

$$\phi_{\theta} = \phi_{m} \pm (\theta_{s0} + \theta_{s}) \tag{17}$$

得出面齿轮齿面方程。

$$\boldsymbol{r}_{2} = \begin{bmatrix} x_{2} \\ y_{2} \\ z_{2} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{bs} \begin{bmatrix} \sin f_{2} (\sin \theta - \theta_{s} \cos \theta) + \frac{\cos f_{2}}{m_{2s} \cos \theta} \end{bmatrix} \\ r_{bs} \begin{bmatrix} \cos f_{2} (\sin \theta - \theta_{s} \cos \theta) - \frac{\cos f_{2}}{m_{2s} \cos \theta} \end{bmatrix} \\ - r_{bs} (\cos \theta - \theta_{s} \sin \theta) \\ 1 \end{bmatrix}$$
(18)

式中: $\phi_2 = i_{2s}\phi_s$, $r_{ls} = m \cdot Z_2 \cdot \cos(\alpha_0)/2$,m为插齿刀具模数。上述根据面齿轮插齿加工原理,结合插齿刀具的渐 开线截面轮廓模型得到面齿轮的齿面方程,进一步可根 据齿轮参数求解出齿面点三维坐标。表1为本论文所测 量的面齿轮基本参数。

		0		
参数	值	参数	值	
齿数	142	齿顶高系数	1	
法向模数/mm	3.9	齿根高系数	1	
法向压力角/(°)	25	顶隙系数	0.25	
螺旋角/(°)	0	齿顶尖化半径/mm	313	
轴交角/(°)	90	中点分度圆齿厚/mm	6.170	
外径/mm	610	内径/mm	507	
插齿刀具齿数	22	插齿刀具模数/mm	3.9	

表 1 面齿轮基本参数 Table 1 Basic parameters of face gear

由表1中面齿轮基本参数和面齿轮的齿面方程、法向方程,可计算出齿轮齿面坐标点及对应法矢方向。 图3为仿真计算得到的面齿轮单齿齿面数据的示意图, 图中的网格点为实际数据。



图 3 单齿齿面数据点 Fig. 3 Single tooth surface data points

1.2 面齿轮测量坐标系快速求解算法

在机测量过程中,输入的测量点坐标为工件坐标系 下的理论信息,测量系统需要把工件坐标系中的坐标转 换到机床坐标系下,从而控制机床带动测头对测量点进 行触碰,完成空间点三维坐标获取。因此,需要建立工件 坐标系与机床坐标系的转换关系,如图4所示。面齿轮 的工件坐标系原点为其轴线和对应小齿轮副轴线的交 点,沿轴线方向向下为Z轴正方向的工件坐标系。具体 测量时,触发式测头位于机床立柱上,将面齿轮固定在转 台上,建立测量坐标系。



(a) 坐标系平移 (a) Coordinate translation



 (b) 坐标系平移和Z轴取反方向
 (b) Coordinate system translation and Z axis in the opposite direction



(c)坐标系旋转(c) Rotation of coordinate system图 4 测量坐标系建立



测量坐标系到机床坐标系的变换矩阵为:
#T = #T₁#T₂ (19)
其中:
M T₁ = $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_x \\ 0 & -1 & 0 & L_y \\ 0 & 0 & -1 & L_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (20)

$${}_{W}^{M}T_{2} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 & 0\\ \sin\phi & \cos\phi & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(21)

假设面齿轮被测齿面上的理论点在其工件坐标系下 的坐标值为 $[x y z 1]^{T}$,其法线方向为 $[i j k 1]^{T}$,根据建立在机床坐标系下的工件坐标 系,可以计算出每个测量点理论坐标在机床坐标系下的 坐标值为:

$$\begin{bmatrix} x_m & y_m & z_m & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} {}^{M}_{W} \boldsymbol{T}_{1W}^{M} \boldsymbol{T}_{2} \end{pmatrix}^{-1} \boldsymbol{T}_{w} \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(22)

即测头球心在测量中的理论坐标值为:

$$\begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{T}_p \begin{pmatrix} {}^{M}\boldsymbol{T}_1 {}^{M}_{W}\boldsymbol{T}_2 \end{pmatrix}^{-1} \boldsymbol{T}_w \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(23)

同样可计算出被测点的法线方向为:

 $[i_p, j_p, k_p, 1]^{T} = ({}^{M}_{w} T_1 {}^{M}_{v} T_2)^{-1} T_{w} [i j k 1]^{T}$ (24) 根据计算得到的测量点的理论坐标及法线方向即可 实现对测量要素的在机测量。坐标系校准之后,在得到 式(21)中角度 ϕ 后就可以确定测量坐标系在机床中的 位置,实现坐标系统一。

机床所存储的坐标为测头的球心坐标,因此计算球 心坐标到齿面上的最短距离为测头半径。此时测球与齿 面相切,得到球心坐标的旋转角度。假设球心坐标为 Q(x,y,z),得到旋转后的球心坐标。

$$\begin{vmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$
(25)

当球心坐标到理论齿面的距离为测头半径时,得到 球心坐标的变换角度。

$$f(\theta) = \min\left(\sqrt{\frac{[x(u,v) - x_1]^2 + [y(u,v) - y_1]^2}{+ [z(u,v) - z_1]^2}}\right) - 0$$

$$(26)$$

r = 0

具体流程如下:

1)首先根据测球球心坐标与坐标原点的距离值 d₀, 计算出在相应齿面上距离坐标原点距离相等且 Z 值与测 球球心坐标相同的空间点坐标值,并在相应齿面上以该 点为圆中心,截取沿 X、Z 方向上范围为测球半径 r 的区 间,相切点必然会落在此区间上。

2)定义初始旋转角度 θ₀,为了避免测球与齿面另一侧相切,当测量左齿面时,初始旋转角度为正,测量右齿面时,初始旋转角度为负。并根据每次球心到曲面上的距离 d_i,调整旋转角度值。

3) 直到球心与曲面距离满足精度要求,此时曲面上 的该点为相切点。 该算法的主要问题是球面旋转角度的计算时间复杂 度高。针对该问题,本文提出采用基于法向距离约束的 角度逼近加速算法,即根据每次球心坐标到理论齿面的 法向距离优化下一次旋转角度。其数学模型如下:

$$\theta_{i} = f(d_{i-1}) \cdot \theta_{0}$$

$$\begin{cases} f(d) = 1, d > = l_{\max} \\ f(d) = \left(\frac{d}{l_{\max}}\right)^{2} \end{cases}$$
(27)
(27)
(28)

该算法首先测量面齿轮某一齿面上的点,得到球心 坐标为(20.34 mm,170.14 mm,47 mm),然后将齿面数据 与测量点的数据放在同一坐标系下。开始迭代寻找对于 测量点位置当 $|d-r| < = 0.1 \mu m$ 时,共旋转角度值为 -81.857° ,将测量坐标系旋转 81.857° 即可实现与工件 坐标系一致,如图 5 所示。



图 5 测量点迭代收敛图



2 面齿轮在机测量精度分析与评价

2.1 基于分割逼近的齿面误差解算

在机测量系统获取齿面离散数据点后,需要对齿面 进行重构,进而完成齿面误差的解算。为了利用齿面离 散数据得到光滑的齿面模型,本文采用非均匀有理 B 样 条曲面来实现齿面的重建。非均匀有理 B 样条即 NURBS 是一种创成曲线曲面方法,可以表示自由的曲线 曲面。NURBS 由于具有很好的灵活性,可以通过改变曲 线曲面中控制顶点或权因子等参数,来定义各种曲线曲 面,具有拟合精度高、应用广泛的特点。

任何齿面拟合过程中都不可避免的产生误差,为了 判定 NURBS 插值曲面与真实曲面的误差,定义 NURBS 插值曲面坐标为 (x(u,v),y(u,v),z(u,v)),可以得到 齿面理论数据点对应的 NURBS 插值曲面上的坐标。根 据理论坐标与实际坐标距离,计算出 NURBS 曲面的拟合 误差。设定理论齿面上误差数据点为 Q(X,Y,Z),误差 数据点在 NURBS 齿面上的对应坐标分别为 $x(u_0,v_0)$, $\sqrt{[x(u_0,v_0)-X]^2 + [y(u_0,v_0)-Y]^2 + [z(u_0,v_0)-Z]^2}$ (29)

理论点到拟合曲面的最小距离就是曲面上对应点的 误差值。论文提出分割逼近法来计算理论数据点对应的 齿面坐标。通过分割逼近法将齿面进行划分,缩小求解区 域,来逐步逼近得到对应的最终齿面坐标,计算流程如下:

1) 将 NURBS 齿面 p(u,v) 分别沿u,v两个方向进行 n 等分,可以得到 $(n + 1) \times (n + 1)$ 个网格区域,网格边 界点坐标为 $(x(u_i,v_j),y(u_i,v_j),z(u_i,v_j))$,其中 $(i = 0, 1, \dots, n)$ 。

2) 计算误差数据点与 NURBS 齿面上所有网格边界 点的距离,得到最小距离对应的网格边界点 C($x(u_i, v_j)$, $y(u_i, v_j), z(u_i, v_j)$),得到误差数据点到 NURBS 齿面的 最短距离会落在该边界点相邻的 4 个网格区域内。若此 时 (n + 1) × (n + 1) 个网格区域范围为 $u \in [a, b]$, $v \in [c, d]$,得到分割后的区域 $u \in \left[u_i - \frac{u_b - u_a}{n}, u_i + \frac{u_b - u_a}{n}\right], v \in [v, v_b - v_b]$

$$\left[v_j - \frac{v_d - v_c}{n}, v_j + \frac{v_d - v_c}{n}\right] <$$

3) 同样将分割后的区域再次进行 n 等分,计算出最 小距离所在的网格区域,根据网格划分区域的步长,判断 是否满足精度要求,如果不满足精度要求,回到步骤 2)继 续执行,直到满足精度要求后,得到齿面上的实际对应点。

2.2 面齿轮齿面误差评价

面齿轮的齿面在齿形、齿向方向上是均匀变化的,因 此直接以面齿轮的整个齿面为测量对象,以齿面整体形 状与理论轮廓的偏差作为齿面的偏差。测量面齿轮齿面 上划分的网格数据点,并以这些离散点的数据来评价整 个齿面的误差。齿面的误差通常以差曲面的形式来体 现,即计算出齿面测量点的实际位置与理论坐标值在其 法线方向上的偏差,得到齿面的误差曲面,如图6所示。



图 6 误差曲面示意图 Fig. 6 Error difference surface diagram

差曲面上测量点的偏差为:

$$\boldsymbol{\delta}_{i} = (x_{i}, y_{i}, z_{i})\boldsymbol{n} - (x, y, z)$$
(30)

其中, (x_i, y_i, z_i) 为测量点的实际坐标, **n** 为被测点的法线方向, (x, y, z) 为理论坐标。差曲面的方程通常

根据差曲面上的离散点数据来拟合出近似方程。可以用 一组基底表示:

 $z = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + a_5 xy + \cdots$ (31)

定义齿面实际测量坐标为 Q(x,y,z),由于齿面拓扑曲 面为曲面中点误差值为零的曲面,因此建立拓扑误差曲面 前,需要先将齿面中点的误差值转换为 0,将齿面测量数据 沿坐标系原点进行旋转,使得齿面中点测量数据与理论齿 面重合。之后计算其他齿轮测量数据到理论齿面的距离, 得到齿面的拓扑误差。计算齿面中点的旋转角度为 φ,将 齿面实际测量数据旋转角度 φ 得到变换后数据。

$$\begin{bmatrix} x'\\ y'\\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0\\ \sin\phi & \cos\phi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x\\ y\\ z \end{bmatrix}$$
(32)

利用分割逼近法计算旋转后的齿面测量数据到理论 齿面的最短距离,建立齿面拓扑误差。

2.3 面齿轮齿距误差评价

本文采用绝对测量法来进行齿距检测。面齿轮的齿 距测量点为齿面中点,即齿面测量离散数据的中间网格 点为齿距测量点。面齿轮通过在分度圆上提取的齿面中 点,计算两个齿面中点的弧长值与理论弧长的差值,得出 面齿轮的单个齿距偏差,如图7所示。



图 7 单个齿距误差评价 Fig. 7 Evaluation of single pitch error

由于齿面存在加工误差,实际测量点与理论测量点 无法一一对应,因此通过计算出实际测量点在理论齿面 上的对应坐标,此坐标为对应理论弧长的计算点。计算 实际测量点对应弧长误差时,可以通过旋转测量点一定 角度,使得测量点与对应齿面相切,得到实际测量位置。 当 *Z* 为面齿轮齿数,*r*₁ 为被测圆的半径值时,得到其对应 的实际面齿轮相邻齿面上测量点的旋转角度 *θ_i*,*θ_{i+1}:*

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{y_i}{x_i}\right) \tag{33}$$

理论齿距的计算公式为:

$$l_0 = \frac{\pi}{Z} \cdot \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$
(34)

计算相邻两个齿面点的实际角度间隔:

$$\Delta \theta_i = \theta_i - \theta_{i+1} - \frac{\pi}{Z} \tag{35}$$

可以计算出角度误差对应齿距误差为:

$$l_i = \Delta \theta_i r_1 \tag{36}$$

齿距累积偏差 f_{pt} 为多个连续所测齿的实际弧长与 理论弧长的差值,如图 8 所示。通常齿轮累积偏差常限 定在不大于 1/8 的齿轮圆周上。



图 8 齿距累积误差评价 Fig. 8 Evaluation of cumulative error of pitch

对于计算
$$k$$
个齿的累积偏差,其公式如下:

$$l_k = \sum_{i=1}^{k} \Delta \theta_i r_1 \tag{37}$$

齿距累积总偏差 F_p 为齿轮左齿面或右齿面内任意 连续齿的最大累积偏差,如图 9 所示。



图 9 齿距累积总偏差 Fig. 9 Cumulative total deviation of pitch

首先计算 z = 1 到 $z = Z_2$ 的最大和最小齿距累积 偏差。

$$\begin{cases} S_{\max} = \max\left(\sum_{i=1}^{z_2} \Delta \theta_i\right) r_1 \\ S_{\min} = \min\left(\sum_{i=1}^{z_2} \Delta \theta_i\right) r_1 \end{cases}$$
(38)

之后计算最大齿距累积偏差。

$$U_{\rm max} = S_{\rm max} - S_{\rm min} \tag{39}$$

3 实验分析

3.1 在机测量实验系统搭建

本文在 YK7280 数控磨床上搭建在机测量系统,对 面齿轮关键参数进行在机测量,进而验证所提算法的 可行性和精度,如图 10 所示。YK7280 数控磨床硬件 精度参数如下:机床直线轴直线误差 $\leq 0.002 \text{ mm}/200 \text{ mm};回转轴系径向及轴向回转精度 <math>\leq 0.0015 \text{ mm};$ 直线轴光栅分辨率 $\leq 0.001 \text{ mm};回转主轴光栅分辨$ 率 $\leq 1.8'';两两直线轴、回转主轴轴线的垂直度误$ $差 <math>\leq 0.01 \text{ mm}(267程);垂直轴与回转主轴的平行度$ $正/侧面误差 <math>\leq 0.002 \text{ mm}/200 \text{ mm}.$



图 10 面齿轮在机测量 Fig. 10 Measurement of face gear in the machine

YK7280 数控磨床采用西门子 840Dsl 数控系统,研 发的在机测量系统采用雷尼绍 LP2 触发式测头,相关参 数如表 2 所示。同时选用旋转摆臂来配合测量,并依靠 连接板将旋转摆臂固定在机床上。测量时通过旋转摆 臂,将测头移动至测量位置,加工时可以收回摆臂,保证 测头在加工过程中的安全性。该在机测量系统选用雷尼 绍 HPGA 高精度通用摆臂,其可实现 90°的旋转定位,旋 转重复定位精度≤3 μm。

表 2 LP2 测头基本参数 Table 2 Basic parameters of LP2 probe

参数描述	LP2	参数描述	LP2
单项重复性	2σ≤1 μm	温度范围	0℃ ~60℃
触发方向	$\pm X, \pm Y, \pm Z$	最大直径	25 mm
最大触发超程	$XY \pm 12.5^{\circ}$	重量	65 g
触发力	<i>XY</i> 0. 5~0. 9 N, <i>Z</i> 5. 85 N	最大平均重复性	0.2 μm

实验中选择的面齿轮的齿数为 86,其基本参数如 表 1 所示。在完成测量坐标系与工件坐标系校准之后, 根据面齿轮基本参数,生成理论模型,并根据检测项目, 生成数控运动程序,最后完成数据的采集和评价。

为了避免实际测量过程中产生干涉,以及减小机床 几何精度的影响,每次对一个齿进行测量时,都将被测齿 旋转至1号测量齿的位置来进行测量,因此被测点的坐 标与测量点的理论坐标值产生了以下变换关系。

$$T_{w} = \begin{bmatrix} \cos(-\varphi_{i}) & -\sin(-\varphi_{i}) & 0 & 0\\ \sin(-\varphi_{i}) & \cos(-\varphi_{i}) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(40)

式中: φ_i 为被测齿对应齿槽与X正方向的夹角。

在每次对一个齿测量完成之后,转台带动面齿轮旋 转一定角度,从而进行下一个齿的检测。

3.2 曲面重构误差实验分析

实验通过齿面的离散点来重构齿面进行齿面误差分析,因此需要分析基于 NURBS 曲面插值重构算法的精度。实验中取面齿轮齿面 7×15 的离散数据点进行双三次 NURBS 曲面重构。表 3 为齿面离散数据点以及 NURBS 算法重构计算得到的控制点(部分数据)。图 11(a)和(b)分别为根据离散数据点计算得到的控制顶点和 NURBS 插值重构曲面。

表 3 齿面型值点与对应控制顶点

Table 3 Partial data of tooth profile value points and													
	cori	responding	control ve	rtices	mm								
型值点 <i>X</i>	型值点 Y	型值点 <i>Z</i>	控制顶 点 X	控制顶 点 Y	控制顶 点 Z								
162. 499	4.223 9	46.6096	162. 499 0	4.223 9	46.6096								
162. 500	3.933 6	47. 502 4	162.500 3	4.0421	47. 138 8								
162. 500	3.660 1	48.400 0	162. 499 0	3.708 5	48.226 5								
162. 500	3.448 5	49.121 2	162.500 0	3.452 2	49.108 5								
162. 500	3.2387	49.8425	162. 499 6	3.1657	50.091 0								
÷	:	÷	÷	:	÷								
182. 500	4.4714	48.400 0	182.497 0	5.5957	46.6175								
182. 500	3.571 0	49.8785	182.498 6	5.084 0	47.411 8								
182. 500	2.6706	51.357 1	182.500 2	4.904 5	47.6847								
182. 500	1.7701	52.835 6	182.500 0	3.546 2	49.9200								
182. 500	0.8699	54.314 2	182. 499 6	2.3873	51.8216								







(b) NURBS 西面里构模型 (b) NURBS tooth surface reconstruction model

图 11 NURBS 曲面插值重构 Fig. 11 NURBS surface interpolation reconstruction

采用分割逼近法可以快速计算出面齿轮上离散采样 数据点对应的齿面数据点,计算出的实际对应齿面坐标 如表4所示。其中误差数据为齿面上7×15的离散采样 数据点(部分数据),齿面数据为齿面模型上对应的理想 点坐标。

表 4 误差数据与对应齿面数据

Table 4 Error data and corresponding tooth surface data

					mm
误差数据	误差数据	误差数据	齿面数据	齿面数据	齿面数据
X	Y	Ζ	X	Y	Ζ
162. 499	4. 223 910	46.6096	162. 499	4. 223 920	46.6096
162. 500	3.933 680	47.5024	162. 500	3.933 690	47.5024
162. 500	3.660 130	48.400 0	162. 500	3.660 140	48.400 0
162. 500	3.448 500	49.121 2	162. 500	3.448 500	49.1212
162. 500	3.238 760	49.8425	162. 500	3.238 760	49.8425
÷	÷	÷	÷	÷	÷
182. 500	4.471430	48.400 0	182. 500	4.471430	48.400 0
182. 500	3.571 060	49.878 5	182. 500	3. 571 070	49.8785
182. 500	2.670 600	51.357 1	182. 500	2.670 600	51.357 1
182. 500	1.770 140	52.835 6	182. 500	1.770 140	52.8356
182. 500	0.869 975	54.314 2	182. 500	0.869 979	54.3142

NURBS 通过离散点进行插值重构齿面,离插值点距 离越近重构精度越高,距离越远重构误差越大。取面齿 轮每列的最大误差拟合曲线,如图 12 所示。图 12 表明 基于 NURBS 方法的齿面重构误差最大为 3×10⁻⁵ mm,曲 面重构算法的精度高于齿面精度两个数量级。因此,可 以采用 NURBS 插值曲面代替真实曲面进行齿面误差的 解算,满足测量的精度要求。

mm



3.3 面齿轮在机测量系统测量重复精度分析

搭建完在机测量系统之后,首先对机床单方向重 复定位误差进行测试。本文采用面形 PV 值 1 μm 的标 准样板对机床的单方向重复定位精度进行检测,并且 采用环规内孔进行了 XY 二维方向的重复定位精度检 测,共进行了 5 组重复性试验。基于对标准样板的单 点重复性检测,计算各采样点数据与该点总测量数据 的平均值之差,得到在机测量系统在单方向上的重复 性误差变化。

测量时,测量范围 X 方向选取-140~70 mm, Y 方向 选取-20~30 mm, XY 联动时选取了 0°~350°的检测范 围。由图 13 分析可以得出,该在机测量系统在 X 方向测 量重复性误差 $\leq 0.6 \mu$ m, Y 方向测量重复性误差 $\leq 1.2 \mu$ m, Z 方向测量重复性误差 $\leq 1.8 \mu$ m, XY 直线运动 时测量重复性误差 $\leq 1.7 \mu$ m。

3.4 面齿轮在机测量精度分析

为了验证所设计的在机测量系统的测量精度,实验 采用在克林贝格 P100 齿轮测量中心(测量误差≤ 0.5 μm)上,进行面齿轮关键参数检测对比验证实验。

表 5 和 6 分别为某一齿左、右齿面的在机测量检测 结果。可以看出面齿轮左齿面的最大加工误差为 8.9 μm,右齿面的最大加工误差为 8.7 μm。

表 7 和 8 分别为该齿在齿轮测量中心下的检测结 果。表中左齿面的最大加工误差为 4.7 μm,右齿面的最 大加工误差为 6.0 μm。

提取左齿面第2行和第5行的测量数据,如 图14(a)和(b)所示。图14表明在齿向方向上,在机测 量与齿轮测量中心的检测结果趋势一致,两者之间最大 误差为3.0和4.5μm。同样提取右齿面在机测量与离 线测量的第2行和第5行测量数据,可知在齿向方向上, 在机测量与齿轮测量中心的误差趋势一致,最大误差为 2.8和4.5μm。



图 13 单点测量重复性

Fig. 13 Repeatability of single-point measurements

						105	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1	ᆂᄯᅜᄧ	12 1/1 20 1						
			Tab	le 5 O	n-machi	ne meas	urement	of the l	eft tooth	n surface	e detecti	on data			μm
石旦		列号													
115	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.1	4.2	1.6	1.1	-0.7	-0.3	1.4	-1.9	-4.4	-5.1	-4.8	-2.9	0.2	-0.8	-3.6
2	3.2	3.1	6.2	4.8	1.7	-1.9	0.1	2.5	0.9	-2.3	-2.9	-5.0	-1.9	0.1	0.4
3	2.5	4.5	5.7	7.4	3.9	2.3	0.2	0.4	2.2	1.7	-0.8	-1.1	-1.1	-0.8	1.0
4	4.4	4.1	5.3	5.7	3.1	0.9	0.3	0	-0.2	0.3	-1.9	-1.6	-1	-1.9	0. 7
5	5.0	5.7	8.3	7.4	6.0	1.2	1.3	0.8	3.2	1.9	0.7	0.5	1.0	-0.3	1.5
6	6.1	5.8	6.4	6.3	6.4	2.2	2.7	3.2	3.4	2.1	0	0.5	1.2	1.0	1.9
7	7.2	6.3	5.5	8.9	6.0	2.3	1.9	2.5	3.8	1.6	-0.5	-0.1	2.7	1.9	1.2

表5 在机测量左齿面检测数据

表6 在机测量右齿面检测数据

Table 6 On-machine measurement of the right tooth surface detection data

行旦。		列号													
11 5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.6	-1.2	-2.3	-3.2	-3	-2.6	-4.3	-6	-3.1	-3.9	-4.8	-6.4	-5.9	-6.4	-8.7
2	2.1	5.0	2.0	2.6	1.4	0.5	-0.3	-3.8	-3.1	-0.5	-1.5	-2.6	-3.2	-2.4	-4.7
3	4.9	4.0	3.5	2.9	3	2.7	1.8	-1.4	-2.1	-0.9	-0.6	-3.0	-3.7	-3.6	-4.6
4	6.4	6.0	4.4	2.6	3.4	2.5	3.3	0	0	1.5	1.2	-1.3	-3.1	-2.5	-4.9
5	5.8	6.1	5.7	4.5	4.5	4.9	4.6	0.2	-0.7	0.7	2.5	0.7	-0.9	-2.5	-2.6
6	6.2	4.3	5.8	4.6	4.0	4.1	5.1	2.0	0.8	1.8	2.3	-0.9	-2.4	-2.1	-2.0
7	-1.5	-0.4	5.5	3.4	6.1	4.4	5.3	0.9	0	2.4	2.7	0.2	-2.1	-0.9	-2.1

表 7 齿轮测量中心左齿面检测数据

	Table 7 Detection data of left tooth surface of gear measurement center														μm
行旦		列号													
115	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.7	4.1	1.6	-0.4	-1.5	2.5	3.5	0.3	-2.9	-3.8	-2.5	-1.8	1.0	0.1	-2.0
2	3.8	2.5	4.7	1.8	0.1	1.1	1.1	2.9	-0.1	-2.5	-2.2	-2.9	-1.8	0.2	0.1
3	1.5	3.2	3.9	4.2	2.8	4.2	1.3	0.8	2.0	1.8	2.1	0.7	-0.2	-0.8	1.8
4	2.4	2.6	2.0	1.8	0.6	1.9	-0.4	0	-0.4	-1.2	-0.6	-1.4	-1.4	-2.2	-0.7
5	2.5	2.9	3.7	3.7	2.1	2.2	0.3	0.4	1.2	0.1	0.1	-0.7	-1.0	-1.8	-0.4
6	2.5	3.1	2.9	3.2	1.8	2.8	0.9	0.7	1.0	-0.3	0	-1.0	-1.1	-2.0	-0.6
7	2.3	2.9	1.0	3.9	1.8	2.6	0.5	0.3	0.9	0.2	0.5	-0.7	-0.1	-0.8	-0.1

同时,分别提取在机测量检测结果与齿轮测量中心 检测结果中左、右齿面第5列和第10列数据,由 图 15(a)可知,左齿面在齿形线上误差最大值分别为 4.6 和 2.4 µm。由图 15(b)可知,右齿面在齿形线上误差最 大值分别为 3.0 和 2.2 µm。

根据齿面检测数据,分别提取齿面误差拓扑图中,每 列数据对比误差绝对值的最大值,如图 16 所示。通过分 析可以得出,在机测量检测结果与齿轮测量中心检测结 果相比,齿面误差最大值为5.0 µm。因此,本在机测量 系统可以满足面齿轮的加工需求。

μm

μm

表 8 齿轮测量中心右齿面检测数据 Table 8 Gear measuring center right tooth surface detection data

							-	-							-
行号	列号														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-0.3	-1.0	-1.0	-0.6	0	-2.4	-4.1	-4.0	-1.1	-1.7	-4.1	-4.8	-2.8	-3.5	-5.3
2	0.7	4.3	1.8	3.5	2.5	-0.8	-1.6	-2.1	-0.5	1.3	-1.6	-2.2	-1.5	-0.1	-1.9
3	0.8	1.7	2.9	3.4	4.4	0.8	1.2	-0.8	-0.6	1.0	-0.6	-1.3	-1.3	-0.6	-1.0
4	2.1	2.6	2.7	2.5	3.0	0	1.5	0	-0.4	1.3	0.1	-1.4	-1.4	-0.8	-2.2
5	1.9	1.6	2.8	2.6	3.5	0.4	1.6	-1.0	-1.5	0.4	0.2	-0.9	-0.9	-0.6	-1.5
6	2.6	0.2	3.5	2.6	3.5	-0.1	2.7	-0.6	-1.5	0.6	-0.3	-2.3	-2.3	-1.3	-1.8
7	-6.0	-4.5	2.9	2.0	4.6	0.5	2.4	-0.7	-2.0	1.3	0.8	-0.4	-1.3	-0.6	-1.4



图 14 齿向误差测量对比

Fig. 14 Comparison of tooth direction error measurement

实验结果中,在机测量结果与齿轮测量中心检测结 果对比误差相差 5.0 μm,主要原因有以下两点:一方面 是由于数控加工机床与齿轮测量中心的硬件平台差异, 引入了较大的几何误差。另一方面由图 14 和 15 中面齿 轮齿向型线与齿形型线误差趋势的一致性可知,两者之 间的部分误差源于坐标系校准和测量坐标系建立时的测 量误差,使得在机测量坐标系与齿轮测量中心坐标系不 一致,导致两者的实际测量点并不是同一位置,进而在进



图 15 齿形误差测量结果对比



行齿面误差对比时出现不一致。

齿面上靠近外边缘的齿顶和倒角位置的点将对面齿 轮齿面的评价引入误差。因此,实验采用齿面内部 7×15 的网格点来分析其齿面误差,可以计算得到齿形误差为 5.8 μm。目前对于面齿轮的评价标准还不完善,因此本 文参考锥齿轮测量的有关标准来进行面齿轮的评价,根 据锥齿轮标准 GB 11365-1989,4 级精度的齿形误差为 4 μm,5 级精度的齿形误差为6 μm,可以得出所开发的在 机测量系统可以满足 5 级精度的制造标准。



图 16 齿面测量误差比对 Fig. 16 Tooth surface measurement error comparison

4 结 论

本文针对面齿轮加工精度不收敛的问题,研发了面 齿轮在机测量系统,实验结果表明本文所研发的在机测 量系统可以满足5级精度的制造标准要求,满足当前直 升机用面齿轮生成的应用需求。现将本文所做工作总结 如下:

1)基于面齿轮插齿加工原理,建立了面齿轮齿面数
 学模型,并进一步建立了零件坐标系到设备坐标系的转
 化和快速求解模型,

2)针对面齿轮齿面误差和齿距误差评价中齿面重构 精度低的问题,提出了分割逼近的齿面误差解算模型,提 高了齿面误差求解的精度。

3)在YK7280数控加工磨床进行了在机测量应用验证,并跟克林贝格齿轮测量中心检测结果进行对比,表明该在机测量系统能够满足5级面齿轮的加工检测精度要求,具有工程实用价值。

参考文献

 [1] 谭武中,王祁波.面齿轮在直升机传动系统中的应用前景分析[J].机械制造与自动化,2020,49(1): 52-55.

> TAN W ZH, WANG Q B. Application prospect analysis of face gear in helicopter transmission system [J]. Machine Building & Automation, 2020, 49(1):52-55.

[2] 白瑀,曹岩,石亚茹,等. 直齿面齿轮增量制造技术研 究[J]. 机床与液压, 2019, 47(4):25-28.

BAI Y, CAO Y, SHI Y R, et al. Research on incremental manufacturing technology of spur face

gear[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(4): 25-28.

- [3] 赵宁,李旺,郭辉,等. 某型直升机同轴面齿轮分扭传 动均载研究[J]. 机械传动, 2020, 44(5):10-17.
 ZHAO N, LI W, GUO H, et al. Study on load sharing behavior of the concentric torque-split face gear transmission for helicopter [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(5):10-17.
- [4] 盛伟,冯占荣,王利霞,等. 面齿轮传动研究进展[J]. 工具技术, 2018,52(7):3-9.
 SHENG W, FENG ZH R, WANG L X, et al. Research progress of internal surface gear transmission [J]. Tool Engineering, 2018, 52(7):3-9.
- [5] CHEN X B, ZHANG P, MIN X H, et al. Study on power split characteristics of planetary multistage face gear transmission device and its effect to drive efficiency under variable speed working condition [J]. Mechanical Sciences, 2020, 11(1): 173-182.
- [6] DONG J X, TANG J Y, HU Z H. Dynamic characteristics of the face gear transmission system based on a rotor-shaft-bearing model with multiple nodes [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2021, 137: 103825.
- [7] 张广,张丰收,靳园园,等. 面齿轮加工进展综述[J]. 机械传动, 2021, 45(11):1-10.
 ZHANG G, ZHANG F SH, JIN Y Y. Summary of progress in face gear processing [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(11):1-10.
- [8] WANG SH H, ZHOU Y SH, TANG J Y, et al. Digital tooth contact analysis of face gear drives with an accurate measurement model of face gear tooth surface inspected by CMMs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167: 104498.
- [9] 金嘉琦,赵丰慧.大型齿轮在机测量技术的发展研究[J]. 机械设计与制造, 2010(12):264-266.
 JIN J Q, ZHAO F H. The development and research of on-machine measurement of the large gear[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(12):264-266.
- [10] 尚笑非.数控机床在线检测技术原理及其发展趋势[J].经贸实践,2016(7):249.
 SHANG X F. Principle of online inspection technology of CNC machine tools and its development trend [J].

Economic & Trade, 2016(7):249.

- [11] BLOMQUIST D. Quality in automated manufacturing[C]. Control and Dynamic Systems-Advances in Theory and Applications, 1995, San Diego, CA: Academic Press.
- [12] LEE E S, SUH S H, SHON J W. A comprehensive method for calibration of volumetric positioning accuracy of CNC-machines [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, 14 (1): 3-49.
- [13] 赵锐. 五轴工具磨床立铣刀在机测量系统研发[D]. 成都:西南交通大学, 2019.

ZHAO R. Developent of on-machine measurement system for five-axis tool grinder end mill [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[14] 刘威. 螺旋锥齿轮在机测量及齿距误差补偿技术的研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2015.
 LIU W. Research on on-machine measuring and pitch

deviation compensation technology of spiral bevel gears [D]. Changsha; Central South University of Forestry and Technology, 2015.

 [15] 王志永,刘威,曾韬,等. 螺旋锥齿轮大轮齿形误差的 在机测量[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (5): 1047-1053.

> WANG ZH Y, LIU W, ZENG T, et al. On-machine measurement of tooth profile errors for the spiral bevel gears [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (5): 1047-1053.

- [16] 王延忠,王庆颖,吴灿辉,等. 正交面齿轮齿面偏差的 坐标测量[J]. 机械传动, 2010, 34(7): 1-4.
 WANG Y ZH, WANG Q Y, WU C H, et al. Deviation of face gear rea tooth surface determined by coordinate measurements[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(7): 1-4.
- [17] 赵宁,靳永先.非正交面齿轮插齿加工仿真及误差分析[J]. 机械传动,2020,44(2):88-97.
 ZHAO N, JIN Y X. Simulation and error analysis of non-orthogonal face gear shaping[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020,44(2):88-97.
- [18] 明兴祖,方曙光,王红阳. 面齿轮磨削齿面齿形误差修 正[J]. 中国机械工程,2018,29(17):2031-2037.
 MING X ZH, FANG SH G, WANG H Y. Tooth surface

form error correction for face gear grinding [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(17): 2031-2037.

- [19] 尹培丽,王建华,韩凡滨,等.极坐标法测量齿廓偏差的坐标系建立误差补偿[J].工具技术,2021,55(12):111-117.
 YIN P L, WANG J H, HAN F B, et al. Error compensation of coordinate system establishment for measuring tooth profile deviation by polar coordinate method[J]. Tool Engineering, 2021,55(12):111-117.
- [20] 石照耀,赵保亚,于渤,等.齿轮三维误差表征与分解[J]. 机械工程学报,2022,58(6):1-9.
 SHI ZH Y, ZHAO B Y, YU B, et al. Characterization and decomposition of gear 3-D deviation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(6):1-9.
- [21] 李茂月,马康盛,王飞,等.基于结构光在机测量的叶 片点云预处理方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020, 41(8):55-66.

LI M Y, MA K SH, WANG F, et al. Research on the preprocessing method of blade point cloud based on structured light on-machine measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8):55-66.

- [22] 刘插旗. YK73125 数控成形砂轮磨齿机[J]. 设备管理与维修, 2006(1):34-35.
 LIU CH Q. YK73125 CNC forming wheel grinding machine[J]. Plant Maintenance Engineering, 2006(1): 34-35.
- [23] 黄亚超,樊利军.YK7380A数控成形砂轮磨齿机的研发与应用[J].世界制造技术与装备市场,2020(5):
 25-29.

HUANG Y CH, FAN L J. Research and application of YK380A CNC gear grinding machine with forming Wheel[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2020(5):25-29.

作者简介



金雨生,2014年于郑州大学获得学士学 位,2022年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学助理教授,主要研究方向 为机器视觉,点云分析和精密测试技术与 仪器。

E-mail: yushengj@ xjtu. edu. cn

Jin Yusheng received his B. Sc. degree from Zhengzhou University in 2014, and received his Ph. D. degree from Xi'an

133

Jiaotong University in 2022. He is currently an assistant professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include machine vision, point cloud analysis, and precision testing technology and instruments.



丁建军(通信作者),2001年于中南大 学获得学士学位,2003年于中南大学获得硕 士学位,2009年于西安交通大学获得博士学 位,现为西安交通大学教授,主要研究方向 为精密测试技术与仪器和精密超精密加工

与装备。

E-mail: dingjianjun@ xjtu. edu. cn

Ding Jianjun (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Central South university in 2001 and 2003, and received his Ph. D. degree from Xi' an

Jiaotong University in 2009. He is currently a professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include Precision Testing Technology and Instruments and Precision and ultraprecision machining and equipment.



张天伟,2007年于湖南工业大学获得学士学位,现为浙江金澳兰机床有限公司研发部经理,主要研究方向为重型冲压设备结构设计,冲压工艺优化和数值模拟。

E-mail: 13605884143@126.com

Zhang Tianwei received his B. Sc. degree from Hunan University of Technology in 2007. He is currently the R&D manager of Zhejiang Jinaolan Machine Tool Co., Ltd. His main research interests include structural design of heavy stamping equipment, stamping process optimization and numerical simulation.