DOI: 10.3901/JME.2013.18.069

基于虚拟再测量的精密转子轮廓测量技术*

杨天龙¹ 赵前程¹ 尹喜云² 黄东兆¹

(1. 湖南科技大学机械健康维护省重点实验室 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学机电工程学院 湘潭 411201)

摘要:精密转子表面为典型的复杂螺旋曲面,采用三坐标测量机较难实现高精度的测量。对此,基于螺旋曲面的数字化特征模型及其等距面的相关几何性质,将转子轮廓的测量转化为导程参数和端面型线的测量,并提出一套新型的转子导程、型线等主要几何参数坐标测量方案。阐述转子数学模型及其测量数据处理的若干基本方法,在此基础上模拟三坐标测量机的步进采样测量过程,实现测量结果的不确定度评价和测量采样策略的优化选取。针对导程测量中存在的螺旋线特征点捕捉问题,提出了型线匹配测量法;为解决测尖半径补偿问题,提出基于虚拟再测量的补偿评价方法和不补偿直接评价方法。通过仿真和实际测量试验进行验证,其结果与转子厂家提供的理论数据吻合度较高,表明此方案合理。

关键词: 转子 数字化模型 等距面 虚拟再测量 导程 轮廓度误差

中图分类号: TB92

Proposal for Measuring Profile of Precision Rotor Based on Simulation Re-measurement

YANG Tianlong¹ ZHAO Qiancheng¹ YIN Xiyun² HUANG Dongzhao¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201;

2. College of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract: Surface of a precision rotor, the typical helical surface, is too complicated to measure accurately with coordinate measuring machine(CMM). Aiming at this problem, a new proposal, based on geometric features and digital models, expressing complicated helical surface and its offset surface separately, is carried out to simplify contour measurement into parameter lead and transverse section profile measurement. Mathematical model of rotor and some methods for processing measurement data are explained, on this basis, continuous sampling mode of CMM is simulated to evaluate the uncertainty and select the optimal sampling strategy of measurement. After that, a method for measuring lead by rotary profile match is proposed to solve the problem existing in capturing spiral feature points; two solutions, one solves the problem of probe compensation by simulation re-measurement and the other avoids it directly, are also proposed to evaluate profile error. Simulation and actual measurement are carried out accordingly, and the comparison between measurement results and theoretical data provided by manufacturer proves that this proposal is advisable.

Key words: Rotor Digital model Offset surface Simulation re-measurement Lead Profile error

0 前言

精密转子作为螺杆式流体压缩、泵送设备的核心部件,在设备运作时,其以组啮合状态在压缩腔体中高速旋转,齿间闭合空间间隙的减小使封锁其

中的流体得到压缩^[1]。可见,转子表面的加工质量将直接影响转子组的啮合质量,从而影响设备的整体效能和可靠性。因此,其表面轮廓的测量有着不可或缺的重要性。

转子表面属于具有典型复杂螺旋曲面轮廓特征的规则回转类曲面,目前对于此类曲面而言,较成熟的测量模式是通过测量曲面上的一些特征线,并根据对被测特征线的评定来反映该曲面质量,从原理上看,此模式是将复杂曲面的测量简化为其基

* 国家自然科学基金(51275169, 50875083)和湖南省自然科学基金(11JJ9016)资助项目。20130407收到初稿,20130630收到修改稿

本参数的测量。对于转子而言,其主要参数包括端面型线、导程、齿顶圆直径、齿根圆直径、节圆直径、齿数和母圆柱高度等^[2],其中端面型线和导程作为重构转子模型的必要参数,显得尤为重要,通过测量转子上若干条端面型线和导程,即可达到评估转子工作面质量的目的。

近年来,国内外广泛采用以三坐标测量机为主要手段的坐标测量法来实现复杂曲面的测量,其研究主要集中在数据获取、曲面重构、测尖半径补偿以及误差分离与评定等关键技术^[3-5]。其中转子的三坐标测量由于螺旋线扫描和测尖半径补偿算法的局限性,以及测量参数选取的复杂性,使得其主要几何参数的获取和评价较为困难。对此,本文在螺旋曲面的数字化模型特征及其等距面的相关几何性质的基础上,提出一套新型的转子导程参数、端面型线坐标测量方案。基于转子数字化模型、测尖球心轨迹曲面的几何性质、以及型线拟合和轮廓度误差评价等数据处理基本方法,参考三坐标测量机扫描测量机理进行了转子坐标测量过程的仿真模拟,实现了测量结果的不确定度评价和测量采样策略的优化。在此基础上,采用型线匹配测量法来解决导程测量时较难获得精确螺旋角度的问题,提出了基于虚拟再测量的测尖半径补偿方法,以及测尖半径不补偿轮廓度直接评价方法来解决测尖半径补偿问题。通过仿真和实际测量试验进行验证,结果表明此测量方案可实现转子轮廓的高精度测量。

1 转子数学模型及相关几何性质

如图1所示,转子的端面型线指转子径向截面轮廓线,因转子各齿按一定角度均匀分布,端面型线可简化为转子工作面上完整一齿的径向轮廓线,将其按对应角度绕中心轴旋转再生,即可获得完整的闭合端面型线。

图1 转子主要几何参数

导程指螺旋曲面上任意一点沿其螺旋线转一周所移动的轴向距离,若图1中同一螺旋线上任意

两点 a, b 间的轴向距离为 H , 螺旋角度差为 θ , 则该转子的导程

$$S = \frac{2\pi}{\theta} H \quad (1)$$

若 $L(t)$ 为三维直角坐标系 $Oxyz$ 中以 z 轴为中心轴的某螺旋曲面 $D(t, \theta)$ 上的一条曲线, 其关于 t 的参数方程为

$$L(t) = (x_0(t) \ y_0(t) \ z_0(t))^T \quad (2)$$

则螺旋曲面 $D(t, \theta)$ 关于 t 和 θ 的参数方程可表示为

$$D(t, \theta) = \begin{pmatrix} x_0(t) \cos \lambda \theta - y_0(t) \sin \lambda \theta \\ x_0(t) \sin \lambda \theta + y_0(t) \cos \lambda \theta \\ z_0(t) + \frac{\theta}{2\pi} S \end{pmatrix} \quad (3)$$

令 z 轴正方向为视线方向, 定义顺时针为 $L(t)$ 旋转的正方向, θ 为 $L(t)$ 从开始位置处绕 z 轴所旋转的角度; 若 $D(t, \theta)$ 的螺旋方向为右旋, $\lambda=1$, 否则 $\lambda=-1$ 。一般地, $x_0(t)$ 与 $y_0(t)$ 的平方和不为常数, 否则 $L(t)$ 为螺旋线; 特别地, 当 $z_0(t)$ 为常数时, $L(t)$ 可视为以 $D(t, \theta)$ 为表面的转子的端面型线, 若 $L(t)$ 以样条曲线的形式来表达, 则参数 t 可视为该样条曲线的节点矢量。

采用三坐标测量机对被测面进行扫描测量时, 测尖球心轨迹将构成一个曲面, 称此曲面为测尖球心轨迹曲面。由于球面具有法矢自适应性, 即球面上任意一点的法矢与球心共线, 所以测尖球心轨迹曲面为被测面的等距面。根据等距曲面的定义可将测尖球心轨迹曲面 $\Delta(t, \theta)$ 和待测面 $D(t, \theta)$ 之间的几何关系表示为

$$\Delta(t, \theta) = D(t, \theta) + r\mathbf{n}(t, \theta) \quad (4)$$

式中, r 为测尖半径; $\mathbf{n}(t, \theta)$ 为两曲面间的公共法矢, 其由测尖与转子表面接触点和对应的测尖球心所在位置点确定。根据式(3)可将 $\mathbf{n}(t, \theta)$ 表示为

$$\mathbf{n}(t, \theta) = h^{-1} \begin{pmatrix} f_1 \cos \lambda \theta + f_2 \sin \lambda \theta \\ f_1 \sin \lambda \theta - f_2 \cos \lambda \theta \\ f_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_1 = \frac{S}{2\pi} \frac{dy_0(t)}{dt} - x_0 \frac{dz_0(t)}{dt} \\ f_2 = \frac{S}{2\pi} \frac{dx_0(t)}{dt} + y_0 \frac{dz_0(t)}{dt} \\ f_3 = x_0 \frac{dx_0(t)}{dt} + y_0 \frac{dy_0(t)}{dt} \\ h = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2} \end{cases} \quad (6)$$

则 $\Delta(t, \theta)$ 可化为

$$\Delta(t, \theta) = \begin{pmatrix} \left(x_0(t) + \frac{rf_1}{h} \right) \cos \lambda \theta - \left(y_0(t) - \frac{rf_2}{h} \right) \sin \lambda \theta \\ \left(x_0(t) + \frac{rf_1}{h} \right) \sin \lambda \theta + \left(y_0(t) - \frac{rf_2}{h} \right) \cos \lambda \theta \\ \left(z_0(t) + \frac{rf_3}{h} \right) + \frac{\theta}{2\pi} S \end{pmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可知, 测尖球心轨迹曲面也为螺旋曲面, 并与转子表面具有相同的导程。

2 转子仿真测量模型与数据处理

2.1 曲线拟合

在对转子进行设计、加工及测量时, 型线数据都以离散的数据点云形式存在, 为方便后续处理, 本文采用 NURBS 拟合来获得连续的型线数据, 其表达式如下

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(u)} \quad (8)$$

式中, w_i 为权因子, 其分别与控制顶点 d_i 相联系, $N_{i,k}(u)$ 是由节点矢量 $\mathbf{u} = (u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n+k+1})$ 按 DeBoor C 和 Cox MG 的递推公式决定的 k 次规范 B 样条基函数^[6], 这里取 $k=3$, 其流程如下。

(1) 对于离散的型线坐标数据序列, 积累弦长参数化确定节点矢量。

(2) 求出非均匀 B 样条基函数, 反算控制顶点权因子和控制顶点。

(3) 在 $[0,1]$ 范围内均分节点矢量 $\mathbf{u}$, 利用式(8)得到 NURBS 曲线。

本文所测转子齿数为 4, 厂家提供的型线理论数据(一齿)由 400 个离散数据点序列组成(具体数据可联系作者获取), 拟合可得连续曲线如图 2 所示。

图 2 拟合型线

2.2 仿真测量模型建立

如图 3 所示, 在连续采样模式下, 三坐标测量机软件根据设定的步进增量和已获得的两触测点位置的测尖球心坐标来确定下一次测头的逼近方向, 测头逼近方向 $\mathbf{n}_{i+2}$ 垂直于已触测两点的测尖球心位置 $\mathbf{O}_i$ 与 $\mathbf{O}_{i+1}$ 之间的连线, 逼近路径上的位置 $\mathbf{P}$ 与 $\mathbf{O}_{i+1}$ 之间的距离等于初始步进增量 K 。测量软件将从第一个边界点开始, 以设定的初始增量步进采点, 当到达终止边界点时停止。

图 3 步进采样原理

连续采样按步进增量的不同可分为恒增量采样和变增量采样两种, 恒增量采样在曲率变化较大的区域, 将出现采样点相对稀疏的现象, 曲率变化信息将会丢失。相应地, 变增量采样能有效改善这一问题, 图 3 中, 在初始增量 K 下触测得到测尖球心坐标 $\mathbf{O}_{i+2}$, 若 $\mathbf{O}_{i+2}$ 、 $\mathbf{O}_{i+1}$ 所在直线与 $\mathbf{O}_{i+1}$ 、 $\mathbf{O}_i$ 所在直线之间的夹角 θ 超过阈值 t , 则将测头退回以相同的逼近单位矢量 $\mathbf{n}_{i+2}$ 和修改后的增量 K' 重新触测, K' 可按式(9)计算

$$K' = \frac{\cos \theta}{\cos t} K \quad (9)$$

仿真测量前需要根据式(3), 结合拟合后的转子理论型线数据, 螺旋方向及理论导程建立转子的三维数字化模型。单次仿真触测的步骤如下。

(1) 对模型表面进行粗略网格化细分, 迭代逼近获得接触点位置坐标和测尖位置坐标的粗略值, 其逼近过程如下

$$\begin{cases} k^j = \begin{cases} k-r & j=1 \\ (\min \|\mathbf{E} - \mathbf{O}^j\|) - r & j \geq 2 \end{cases} \\ \mathbf{O}^j = \begin{cases} \mathbf{A} & j=1 \\ \mathbf{O}^{j-1} + k^{j-1} \mathbf{n} & j \geq 2 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中, j 为迭代次数; $\mathbf{n}$ 为逼近单位矢量; $\mathbf{E}$ 为测尖沿 $\mathbf{n}$ 在网格表面上的投影区域; $\mathbf{A}$ 为测尖球心起点坐标; $\mathbf{O}^j$ 为测尖球心逼近坐标; k 为 $\mathbf{A}$ 到 $\mathbf{E}$ 上的最小距离; r 为测尖半径值。当 k^j 的绝对值小于初设阈值时迭代中止, 表明测尖已与待测轮廓表面接触。

(2) 取步骤(1)所得的接触点位置附近的较小邻

域再进行精细网格划分,采用与步骤(1)同样的方式获得更精确的测尖球心位置坐标。

定义初始逼近起点 A_1 , A_2 , 逼近单位矢量 n_1 , n_2 以及步进增量 K , 模拟三坐标测量机的连续采样模式,获得仿真测量的采样数据点云图如图4所示。

图4 仿真测量数据点云

2.3 补偿评价与不补偿直接评价原理

由于转子工作面几何特征的复杂性,在使用扫描测头对其进行步进采样时,接触点的法向是难以预测且不断变化的,按照常规的方法进行测头补偿将造成很大的误差,因此实际测量时一般取消三坐标测量机的常规补偿,直接获取测尖的球心坐标序列,通过第三方算法来完成较高精度的补偿。

目前可用于转子参数测量的测头补偿算法主要有微平面法、等距面法、叉积法等^[7],其中等距面法具有较高的补偿精度,但处理过程复杂。本文利用仿真测量模型对等距面法的处理过程进行简化,如图5所示,当获得测尖球心坐标序列后,对其进行NURBS拟合并结合理论导程值构造测尖球心轨迹曲面数字化模型,采用与实测同样的测尖半径 r 在模型内侧进行仿真型线扫描,则测尖球心轨迹为实测时各接触点经螺旋共 z 后构成的曲线,也即端面型线,实现了测尖的半径补偿,本文将此方法命名为虚拟再测量补偿法。

图5 虚拟再测量补偿点云

实测时,端面型线上的被测点相对其理论型线的偏差可由测尖传递给测尖球心轨迹曲线上的对应点,因此可将型线轮廓度误差评价分为两种:测尖半径补偿评价和不补偿直接评价。测尖半径补偿评价的对象为测头半径补偿后的实测型线,评价的参考为转子的理论型线;不补偿直接评价对象为未经测头半径补偿的实测型线,评价的参考为转子的理论模型经高保真的仿真型线扫描后得到的测尖球心轨迹曲线。两种评价方法的合理性与相关性将在下文结合仿真测量模型进行验证分析。

2.4 型线轮廓度误差计算

转子型线属于较复杂的自由曲线,按照最小条件评定比较困难,本文按照最小二乘法求近似结果。轮廓度检测理论上要求设计基准与测量基准重合,而通过实测的转子轮廓数据反算获得的测量中心轴与理论中心轴之间必然存在一定偏差,所以令测量中心轴与理论中心轴重合并将实测型线与理论型线进行旋转匹配,并不能达到轮廓度误差计算所需的最佳匹配状态,若要获得准确的评定结果,需要在此匹配状态的基础上进行坐标系微调^[8]。

设定微调变量 $u = (\theta \ \Delta x \ \Delta y)$, 对考察型线上一定数量的考察点 $(x_i \ y_i)^T$ 进行微调变换

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \cos \theta - y_i \sin \theta + \Delta x \cos \theta - \Delta y \sin \theta \\ x_i \sin \theta + y_i \cos \theta + \Delta x \sin \theta + \Delta y \cos \theta \end{pmatrix} \quad (11)$$

基于小偏差和小误差假设,因 u 中元素均为微小量,可近似认为 $\cos \theta = 1$, $\sin \theta = 0$, 式(11)可简化为

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \cos \theta - y_i \sin \theta + \Delta x \\ x_i \sin \theta + y_i \cos \theta + \Delta y \end{pmatrix} \quad (12)$$

建立最小二乘评定模型,目标函数为

$$F = \min \sum_{i=1}^n d_i^2 = \min \sum_{i=1}^n \left[(x'_i - x_i^*)^2 + (y'_i - y_i^*)^2 \right] \quad (13)$$

式中, $(x_i^* \ y_i^*)^T$ 为参考型线上与考察点 $(x'_i \ y'_i)^T$ 距离最小的点的坐标,可见目标函数为一组非线性函数的平方和,采用高斯-牛顿法^[9]可获得最优解,同时计算上偏差 $\max d_i$ 和下偏差 $\min d_i$, 两者之差即为型线轮廓度误差评定结果。

2.5 导程测量原理

由式(1)和式(3)可知,测量转子导程需要获得同一螺旋线上两点或同一齿上两端面型线间的螺旋角度差和轴向高度差,同时由式(7)可知,导程计算无须对型线进行测尖半径补偿。因实测时螺旋线捕捉较为困难,本文采用型线旋转匹配的方法获得螺旋角度差。旋转匹配过程是轮廓度误差计算过程的简化形式,其平移变量 Δx , Δy 都为零,则式(11)可

化为

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \cos \theta - y_i \sin \theta \\ x_i \sin \theta + y_i \cos \theta \end{pmatrix} \quad (14)$$

目标函数仍可按式(13)建立, 因只存在一个变量 θ , 可简化采用二分法迭代。获得旋转匹配角度 θ 和 z 轴位置差 H 后, 代入式(1)即可得到导程计算值。

3 测量参数选取

由于坐标测量参数选取目前没有严格的标准, 使得实测时测尖半径、步进增量的选取具有一定的盲目性, 对此本文结合转子数学模型和仿真测量模型对转子参数测量进行理论的仿真与分析, 对仿真结果进行评价, 根据评价结果优化测量参数^[10-11]。

3.1 测尖半径选取

测尖半径的选择将直接影响实测型线轮廓信息的保真性和曲率信息的完整性。如图 6 所示, 因测尖半径选择不当, 在被测表面上 P_1 和 P_2 之间的区域出现包络盲区, 其根本原因是此区域内的最小空间曲率半径小于测尖球半径, 使得测尖球面体对其包络失败。

图 6 包络盲区示意图

理论上, 测尖半径越小, 对被测曲面的包络越完整, 但对于接触式测量而言, 因转子表面存在一定的粗糙度, 在测头测量力不变的情况下, 测尖越小, 测尖与待测面接触处所受压强越大, 过大的压强将对转子表面和测尖本身造成刮伤, 同时也对测量精度造成影响。本文通过考察待测曲面的主曲率分布情况来确定测尖半径 r , 结合式(3)、(5)、(8)求导可得转子表面的第一类基本量 E, F, G 和第二类基本量 L, M, N 。

$$\begin{cases} E = |\mathbf{D}'_i(t, \theta)|^2 \\ F = \mathbf{D}'_i(t, \theta) \cdot \mathbf{D}'_\theta(t, \theta) \\ G = |\mathbf{D}'_\theta(t, \theta)|^2 \\ L = \mathbf{n}(t, \theta) \cdot \mathbf{D}''_{ii}(t, \theta) \\ M = \mathbf{n}(t, \theta) \cdot \mathbf{D}''_{i\theta}(t, \theta) \\ N = \mathbf{n}(t, \theta) \cdot \mathbf{D}''_{\theta\theta}(t, \theta) \end{cases} \quad (15)$$

则式(16)所构方程的两个解 k_1, k_2 即为主曲率 k 。

$$\begin{pmatrix} EG - F^2 \\ -EN + 2FM - GL \\ LN - M^2 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} k^2 \\ k \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (16)$$

得到转子理论模型在一齿型线上对应位置的主曲率分布如图 7 所示。

图 7 转子理论模型径向主曲率分布图

图 7 中主曲率值小于零表示其弯曲方向为外凸, 大于零表示内凹。若使测尖球面体对转子工作面包络成功, 测尖半径 r 应满足以下条件^[12]

$$r \leq \frac{1}{|k_m|} \quad (17)$$

若测量路径在被测曲面外侧, k_m 为测量路径上的最大主曲率, 否则 k_m 为最小主曲率。图 7 中 $\max k = 0.574 \text{ 1 mm}^{-1}$, 基于式(17)预选 $r = 1.500 \text{ 0 mm}$ 的测尖用于实际测量。

3.2 步进增量选取

理论上, 步进增量越小测量获得的型线数据点越密集, 所得轮廓也将越精确, 但最小步进增量受限于三坐标测量机的步进分辨率, 且步进增量越小, 采样效率越低, 获得的数据点数越多, 处理工作量也就越大^[13]。在理论型线所在区域内, 步进增量选择的最低标准是以此进行步进采样获得的采样点数不小于型线理论数据点数。

如图 8 所示, 在采集端面型线数据点时, 测尖球心轨迹为平面曲线, 但对应的测尖与被测面的接触点轨迹为空间曲线, 因此, 在采用微平面法、等距面法、叉积法等算法进行测尖半径补偿后, 一般需对补偿后的型线进行共 z 处理。

因同一螺旋线上的各点具有特定的相对位置关系, 即其中任意一点可通过其他点螺旋产生, 因此可采用螺旋偏移的方式对数据点进行共 z , 若型线上某点 P 的坐标为 $(x \ y \ z_0 + \Delta h)^T$, 则共 z 到 z_0 平面后该点的坐标 P_i 为

图8 测尖球心与接触点轨迹

$$\mathbf{P}_i = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z_0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \cos \lambda \beta & \sin \lambda \beta & 0 \\ -\sin \lambda \beta & \cos \lambda \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T \quad (18)$$

式中, $\beta = 2\pi\Delta h/S$; 若转子右旋, $\lambda = -1$, 否则 $\lambda = 1$ 。基于式(5)计算出理论型线上各点在转子理论曲面上的外法矢, 沿其偏移测尖半径 $r(1.500\ 0\ \text{mm})$, 得到一组三维的坐标序列 $\mathbf{O}_i$, 基于式(18)对 $\mathbf{O}_i$ 进行共 z 处理后得到坐标序列 $\mathbf{P}_i$, 由等距面的几何性质可知, $\mathbf{P}_i$ 对应的转子理论曲面上的各点经螺旋共 z 后的坐标序列即为转子的理论型线数据。计算 $\mathbf{P}_i$ 上相邻点间的距离 K_m , 其分布如图9所示。

图9 型线测量 K_m 分布图

理论上步进增量 K 应满足 $K \leq \min K_m$, 但考虑到采样效率和测量机步进分辨率等因素的影响, 这里预选步进增量 $K=0.250\ 0\ \text{mm}$ 用于实际测量, 统计可得满足条件的区域段约占总区域段的 90%。

3.3 虚拟再测量测量参数选取

为考察虚拟再测量的测量参数, 对第 3.2 节中的 $\mathbf{P}_i$ 进行拟合处理, 由式(16)可得测尖球心轨迹曲面在一齿轨迹曲线上对应位置的主曲率分布如图10所示。

因扫描路径位于曲面内侧, 则式(17)中的 k_m 应取 $\min k = -0.487\ 7\ \text{mm}^{-1}$, 可见虚拟再测量补偿应取的测尖半径值(1.500 0 mm)完全满足包络条件。

图10 测尖球心轨迹曲面模型径向主曲率分布图

通过计算理论型线数据上相邻点间的距离 K_m , 来确定虚拟再测量的步进增量, 其 K_m 分布如图11所示。

图11 虚拟再测量 K_m 分布图

兼顾补偿效率与补偿精度考虑, 可预选步进增量 $K=0.250\ 0\ \text{mm}$ 用于虚拟再测量补偿。

3.4 仿真验证

基于上文所述的仿真测量步骤进行仿真测量试验用以考察测量参数选择的合理性。获得型线扫描数据后, 将其进行拟合处理得到连续型线数据 L , 对 L 进行虚拟再测量补偿, 得到补偿后的型线数据 M , 令理论型线数据为参考, 在 M 的一齿上均匀取 800 个考察点, 计算其轮廓度误差。选取不同的测尖半径 r 和步进增量 K 进行多组仿真测量, 每组测量的测量边界点和初始逼近单位矢量相同, 所得结果如表1所示。

表1 轮廓度误差计算结果

mm		mm
测尖半径	步进增量	轮廓度误差
0.750 0	0.125 0	0.002 9
0.750 0	0.250 0	0.003 1
0.750 0	0.500 0	0.009 6
1.500 0	0.125 0	0.003 3
1.500 0	0.250 0	0.003 5
1.500 0	0.500 0	0.010 1
3.000 0	0.125 0	0.014 4
3.000 0	0.250 0	0.015 7
3.000 0	0.500 0	0.021 3

可见,测尖半径和步进增量的增大都将对测量精度造成影响;综合考虑测量效率与测量精度,选择测尖半径 $r=1.500\ 0\ \text{mm}$,步进参数 $K=0.250\ 0\ \text{mm}$ 进行型线扫描和虚拟再测量补偿较为合理。同时,在无噪声的情况下,由于网格化细分等因素影响,测量模型仍不可避免地引入一定误差。

4 仿真测量试验

对转子的导程与型线测量进行仿真分析,测量过程中,仿真测量参数均取测尖半径 $r=1.500\ 0\ \text{mm}$,步进增量 $K=0.250\ 0\ \text{mm}$;对模型或对象引入噪声时,相同噪声情况下重复测量 15 次;型线匹配时,考察型线上考察点数均取 800。

4.1 导程仿真测量

建立转子的理论数字化模型并对模型引入幅值范围为 $[-0.005\ 0\ \text{mm}\ 0.005\ 0\ \text{mm}]$ 且均匀分布的随机噪声,其他测量参数相同,在 4 个不同的 z 轴位置进行仿真型线扫描得到 4 条型线数据,将最下端位置($z=10.000\ 0\ \text{mm}$)的型线拟合并定义为参考型线,其他 z 轴位置的型线依次与其旋转匹配,并结合式(1)计算相应导程值。重复测量所得结果如表 2 所示。

表 2 测量结果平均值和标准差统计 mm

z 轴位置	高度差	均值	标准差
40.000 0	30.000 0	222.001 9	0.016 1
70.000 0	60.000 0	222.003 5	0.009 4
100.000 0	90.000 0	221.999 0	0.004 4

由表 2 可知导程测量结果不确定度与高度差有关。若两型线的螺旋角度差和高度差的标准差分别为 s_θ 和 s_H ,则导程测量误差可采用相对标准差的形式表示

$$\frac{s_S}{S} = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial H} \frac{s_H}{S}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial \theta} \frac{s_\theta}{S}\right)^2} \quad (19)$$

结合式(1)可将式(19)化为

$$\frac{s_S}{S} = \sqrt{\left(\frac{s_H}{H}\right)^2 + \left(\frac{s_\theta}{\theta}\right)^2} \quad (20)$$

可见减小导程测量不确定度的有效手段是选择具有较大螺旋角度差和高度差的型线位置进行测量。由式(1)可知,对于多个导程测量值 S_i ,理论上其对应的螺旋角度差 θ_i 与高度差 H_i 的变化是呈线性关系的,因此最终导程测量结果可通过加权平均获得

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (21)$$

4.2 型线仿真测量

对基于虚拟再测量的补偿评价方法和不补偿直接评价方法进行评估,步骤如下所述。

(1) 对转子的理论型线 L_0 上的数据点引入一定强度的均匀分布的随机噪声,生成型线数据 L_1 ,令 L_0 为参考型线,考察型线 L_1 的轮廓度误差, L_1 的轮廓度误差计算结果如表 3 所示。

表 3 L_1 轮廓度误差的均值及标准差统计 mm

噪声幅值范围	均值	标准差
$[-0.001\ 0, 0.001\ 0]$	0.001 0	0.000 7
$[-0.002\ 0, 0.002\ 0]$	0.001 8	0.001 2
$[-0.004\ 0, 0.004\ 0]$	0.004 0	0.002 6

(2) 利用步骤(1)中获得的 L_1 和 L_0 ,结合导程理论值建立两个数字化模型,分别进行仿真测量获得测尖球心型线数据 M_1 和 M_0 ,令 M_0 为参考型线,考察型线 M_1 的轮廓度误差以验证不补偿直接评价方法的合理性, M_1 的轮廓度误差计算结果如表 4 所示。

表 4 M_1 轮廓度误差的均值及标准差统计 mm

噪声幅值范围	均值	标准差
$[-0.001\ 0, 0.001\ 0]$	0.002 4	0.001 5
$[-0.002\ 0, 0.002\ 0]$	0.003 4	0.002 3
$[-0.004\ 0, 0.004\ 0]$	0.005 6	0.003 6

(3) 对 M_1 进行虚拟再测量半径补偿得到型线 N_1 ,令 L_0 为参考型线,考察型线 N_1 的轮廓度误差以验证基于虚拟再测量的补偿评价方法的合理性, N_1 轮廓度误差计算结果如表 5 所示。

表 5 N_1 轮廓度误差的均值及标准差统计 mm

噪声幅值范围	均值	标准差
$[-0.001\ 0, 0.001\ 0]$	0.002 0	0.001 0
$[-0.002\ 0, 0.002\ 0]$	0.003 0	0.001 8
$[-0.004\ 0, 0.004\ 0]$	0.005 7	0.003 4

表 4、5 数据验证了两种评价方法的相关性和正确性,同时两者的型线轮廓度误差相对于表 3 偏大,同样表明仿真测量模型不可避免地引入一定误差,其在虚拟再测量补偿中表现为测尖半径补偿误差。

5 实际测量试验

5.1 型线扫描

采用配备有扫描测头(型号: SP600; 厂家: Renishaw Plc., UK)的三坐标测量机(型号: Global

Image 7107; 厂家: Brown & Sharpe Inc., USA)对螺杆转子进行型线数据扫描。如图12所示,螺旋方向为右旋的阳转子由夹具固定,使其中心轴与三坐标测量机测量坐标系的 z 轴平行,根据测量参数的优化选取结论,选择半径 $r=1.500\ 0\text{ mm}$ 的测尖,设定初始步进增量 $K=0.250\ 0\text{ mm}$,并在测量软件中关闭测量机的常规补偿。移动测头在转子同一齿面的不同的截面位置上对齿形进行扫描获得端面型线数据,单条型线扫描过程中应确保测头的 z 方向锁定,防止数据引入较大的 z 轴位置误差。此外,需要对转子的上端圆柱和下端圆柱进行扫描,获得的数据将用来确定测量坐标系中转子中心轴的坐标。

图12 型线扫描现场

5.2 前期处理

对上下端圆柱的采样数据进行最小二乘拟合获得转子中心轴在测量坐标系中的坐标,整体平移点云数据使转子中心轴与测量坐标系 z 轴重合,得到标准化后的坐标系,便于后续的数据处理操作^[14]。

单条型线扫描时测头 z 方向虽已锁定,但由于测量力和转子表面粗糙度等因素的影响,采样的数据点仍会有较小的 z 轴位置偏移,如图13所示, z 轴锁定值为 $-485.500\ 0\text{ mm}$ 时,采样数据点的 z 轴坐标值仍在 $[-485.650\ 0\text{ mm}\ -485.400\ 0\text{ mm}]$ 范围内波动。

图13 单条型线数据点云三维图

基于式(18),采用螺旋共 z 的方法对采样数据点的 z 值进行修正,如图14所示,螺旋共 z 后的数据相比未处理前更加光滑。

图14 共 z 前后数据点对比

前期处理完成后,可得到完整的型线采样数据点云如图15所示。

图15 采样数据点云

5.3 导程测量

设定 z 轴位置为 $-439.500\ 0\text{ mm}$ 的型线为参考型线,其他位置型线依次与其旋转匹配获得相应旋转角度差,结合高度差计算可得各导程测量结果如表6所示。

表6 导程计算结果			mm
z 轴位置	高度差	导程	
$-485.500\ 0$	$46.000\ 0$	$221.957\ 0$	
$-543.500\ 0$	$104.000\ 0$	$222.029\ 3$	
$-605.000\ 0$	$165.500\ 0$	$222.001\ 9$	

将表6中相应数据代入式(21)计算,可得最终导程测量值为 $222.004\ 4\text{ mm}$,与转子生产厂家提供的理论值($222.000\ 0\text{ mm}$)比较,其偏差为 $0.004\ 4\text{ mm}$ 。

5.4 型线轮廓度误差评定

分别对实测型线进行不补偿直接轮廓度误差评价和基于虚拟再测量补偿的轮廓度误差评价,其步骤如下。

(1) 以端面型线的理论数据作为参考,对4条实测型线采用等距面虚拟再测量进行测头补偿,对补偿后的型线进行轮廓度误差评价,每次评价均取800个考察点,获得虚拟再测量补偿评价结果。

(2) 设定仿真测量参数与实际测量参数相同,通过仿真测量模型获得端面型线理论数据的仿真型线扫描数据,将其拟合后作为参考,对4条实测型

线进行轮廓度误差评价，同样地，每次评价同样取 800 个考察点，获得不补偿直接评价结果。

厂家提供的转子型线轮廓度误差上限为 0.020 0 mm，可见表 7 中两种评价方法所得结果都较好地满足这一条件，同时，实测型线的两种轮廓度评价结果的对应关系与仿真测量相符。在转子批量检测时，测尖半径补偿型线轮廓度误差评价须对每条实测型线进行测尖半径补偿，其评价效率相对较低。测尖半径不补偿型线轮廓度误差评价只需一次性获得理论测尖球心轨迹曲线，无须测尖半径补偿，可节省大量的数据处理时间。

表 7 型线轮廓度误差评价结果 mm

z 轴位置	不补偿评价结果	补偿评价结果
-439.500 0	0.019 4	0.018 3
-485.500 0	0.021 1	0.019 2
-543.500 0	0.012 5	0.013 9
-605.000 0	0.017 0	0.015 8

6 结论

(1) 建立转子坐标接触式测量的仿真模型，通过模型优化测量参数的选取。

(2) 针对螺旋曲面导程测量中对应特征点难以捕捉的问题，提出了测尖半径不补偿的型线旋转匹配测量法，取得较好的测量结果。

(3) 基于仿真测量模型，对等距面法进行优化，提出基于虚拟再测量的测尖半径补偿算法，补偿效果良好，精度较高，并将其应用于型线轮廓度误差评价过程中。

(4) 提出不补偿直接评价的型线轮廓度误差评价方法，通过仿真和实际测量试验证明其合理性。

参 考 文 献

- [1] WU Yuren, FENG Zhanghua. Improved rotor profiling based on the arbitrary sealing line for twin-screw compressors[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43: 695-711.
- [2] Brown&Sharpe. Quindos Scrcpm, Measurement of Screw Compressors, Reference Manual[M]. North Kingstown: Brown&Sharpe, 1996.
- [3] 石照耀, 谢华坤, 费业泰. 复杂曲面测量模式与关键技术[J]. 工具技术, 2000, 34(11): 31-34.
SHI Zhaoyao, XIE Huakun, FEI Yetai. Modes and key technologies of complex surface measurements[J]. Tool Engineering, 2000, 34(1): 31-34.
- [4] 丁汉, 朱利民, 熊振华. 复杂曲面快速测量、建模及基于测量点云的 RP 和 NC 加工[J]. 机械工程学报, 2003, 39(11): 28-37.
- [5] DING Han, ZHU Limin, XIONG Zhenhua. Survey on coordinate measurement, geometric modeling and RP or NC code generation from measured data points[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(11): 28-37.
- [6] AINSWORTH I, RISTIC M, BRUJIC D. CAD-based measurement path planning for free-form shapes using contact probes[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technolo., 2000, 16: 23-31.
- [7] 赵吉宾, 刘伟军, 孙玉文. 自由曲面测量点云数据的建模方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9): 1044-1047.
- [8] ZHAO Jibin, LIU Weijun, SUN Yuwen. Research on the modeling method of measured points cloud for freeform surface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(9): 1044-1047.
- [9] TIBET E, RENE M, ADAM W. Surface probing simulator for the evaluation of CMM probe radius correction software[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technolo., 2011(55): 307-315.
- [10] 张琳, 郭俊杰, 姜瑞, 等. 自由曲线轮廓度误差评定中的坐标系自适应调整[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(2): 203-207.
- [11] ZHANG Lin, GUO Junjie, JIANG Rui, et al. Self-adapt adjustment of coordinate system in evaluation of freeform curve profile[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(2): 203-207.
- [12] 彭天强, 张文林, 常宁. 高精度参数估计问题[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(14): 56-66.
- [13] PENG Tianqiang, ZHANG Wenlin, CHANG Ning. A high precision parameter estimation problem[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(14): 56-66.
- [14] ZHAO Qiancheng, LU Changyou, XU Qiao, et al. Analyzing by simulation to evaluate the method of measuring screw rotors with CMM[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 36: 63-67.
- [15] 车仁生, 林伟国, 黄庆成. 虚拟坐标测量机的体系结构及功能模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(2): 32-35.
- [16] CHE Rensheng, LIN Weiguo, HUANG Qingcheng. System structure and functional model of virtual coordinate measuring machine[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(2): 32-35.
- [17] 易先中, 刘浩鸿, 徐铁钢, 等. 大型螺旋曲面 5 轴旋式数控铣削技术[J]. 机械与电子, 2010(1): 21-24.

(下转第 84 页)