一种叶轮叶片分度角自动测量方法

陈金存[1]　王　庆[2]　刘大亮[2]　吕祥照[2]　樊　莉[2]　刘国华[2]
（1.中国运载火箭技术研究院，北京 100076；2.首都航天机械公司，北京 100076）

摘要：提出一种基于数控转台和坐标测量机的测量方法，以涡轮转子为研究对象，实现其叶片分度误差的自动数字化测量。通过建立分度角模型，进行干涉分析，并提出一种闭环反馈测量算法，从而避免测针与叶片之间发生干涉。试验结果表明，该方法的扩展不确定度为18.14″，测量周期为1.5h/件。

关键词：涡轮转子；分度角；闭环反馈；坐标测量机

An Automatic Measuring Method of the Turbine Rotor Centripetal Angle

Chen Jincun[1]　Wang Qing[2]　Liu Daliang[2]　Lv Xiangzhao[2]　Fan Li[2]　Liu Guohua[2]
(1.China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076;
2.Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract：Based on the numerical control running-platform and coordinator measuring machine, an automatic digital method is developed to measure the centripetal angle error of turbine rotor. The mode of centripetal angle is set up, the analysis of intervene problem is put forward, and an algorithm called closed loop feedback is designed to avoid the intervene between the probe and vane. The experimental results show that the expand uncertainty is 18.14″, and the measuring cycle is 1.5 hour per piece.

Key words：turbine rotor；centripetal angle；closed loop feedback；coordinator measuring machine

1　引言

涡轮转子是发动机涡轮泵中的关键零件，驱动氧化剂泵和燃料泵高速旋转。该产品的整体加工周期较长，叶片分度测量效率较低是其中一个重要的因素。

传统方法中主要采用光学显微镜测量涡轮转子叶片分度误差。测量过程中，需要人工找正、读数、记录、计算等。以测量I级氢涡轮转子的数十个叶片分度角为例，完成测量工作需用时约1个工作日。与此同时，生产线只能停工等待检测结果；若重复测量，生产周期将延长。同时，光学显微镜存在测量盲区，不能完整反映产品加工质量。因此，这样的测量能力难以有效保障生产的需要。

鉴于该产品的重要性和当前的测量能力，本文提出一种基于数控转台和坐标测量机的测量方法，以涡轮转子为研究对象，实现其叶片分度误差的自动数字化测量，不仅可弥补传统方法测量能力上的不足，而且可大幅度提高测量效率。

2　测量原理

图1所示的涡轮转子通常由叶片、涡轮盘和泵轴组成。

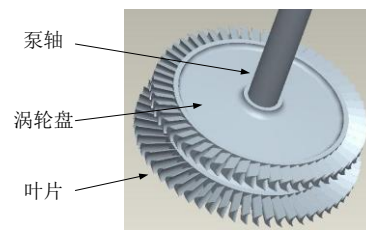


图1　氢涡轮转子三维模型

作者简介：陈金存（1970–），研究员，材料工程专业；研究方向：工艺技术及管理。
收稿日期：2013-03-26

2.1 叶片分度角的表示

如图 2 所示，在极坐标系 Σ_0 内，涡轮轴为 Z 轴，坐标平面穿过叶片，并在极半径 r 上与叶片的叶背、叶盆表面分别交于点 A 和点 B。记叶背的极角为 θ_A，叶盆的极角为 θ_B，则叶片分度角 θ 可以表示为中点 P 的极角，即：$\theta=(\theta_A+\theta_B)/2$。

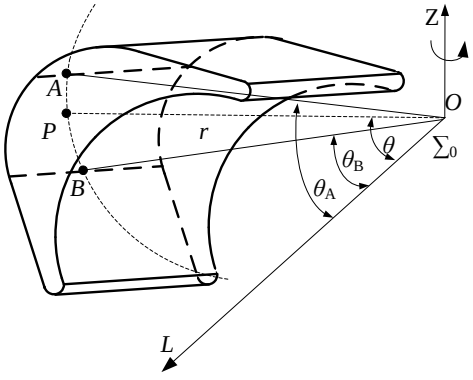


图 2 氢涡轮转子叶片分度角示意图

2.2 测量装置

如图 3 所示，轴向上将涡轮转子固定在转台上，利用水平测针在叶背和叶盆表面分别测量 1 个点；控制转台转动一个中心角后，再测量一组点；周而复始，直至测量完所有的叶片为止，通过计算得到转子叶片的分度角。程序计算得到的结果会自动存储在指定文件中。若需要，可将结果复制到设计的报表后，打印即可。

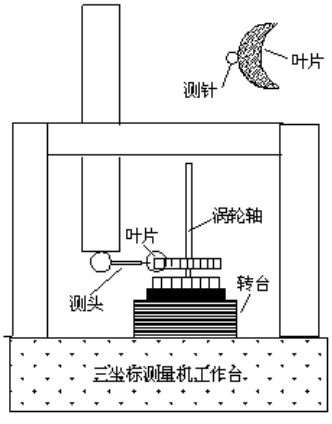
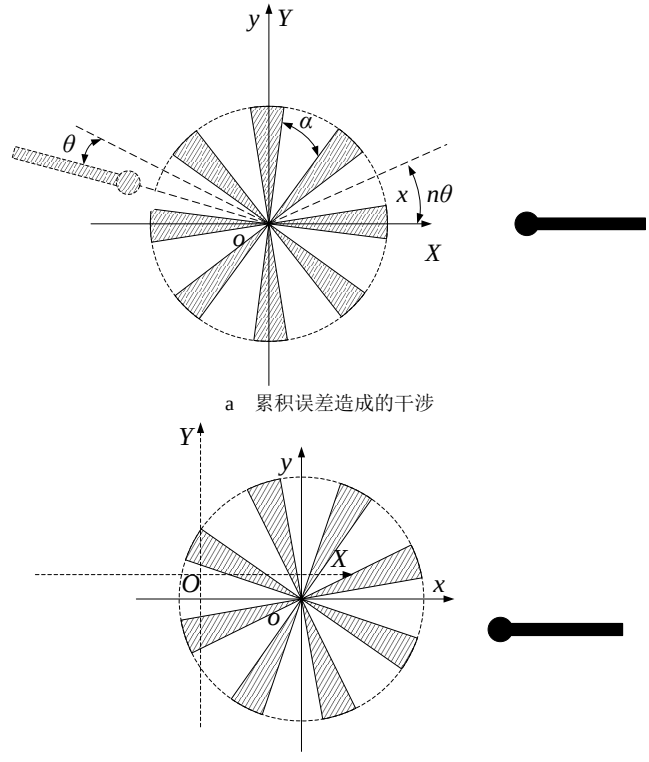


图 3 测量原理示意图

2.3 干涉分析与闭环测量法

图 3 中的数控转台使用一个离合器系统控制其运动，当其准备旋转运动时，工作台先升高，再转动，然后重新固定。因此，转动不能精确定位。但是，角度输出传感器却是精确的。

通常采用开环运动方式转台。如图 4 所示，设叶片理论位置角为 α，转台转动 α 角的误差为 θ，当转过 n 次后，累计误差为 $n\theta$，当 $n\theta>\alpha$ 时，由于测针在机器坐标系 ΣOXY 内运动路径保持不变，造成测针和叶片发生干涉。另外，人工安装工件时，造成工件的转动中心与转台的转动中心不重合，即工件未找正。由于测针在机器坐标系 ΣOXY 内运动路径保持不变，转动若干角度后，同样会使测针与叶片发生碰撞。



a 累积误差造成的干涉

b 未找正造成的干涉

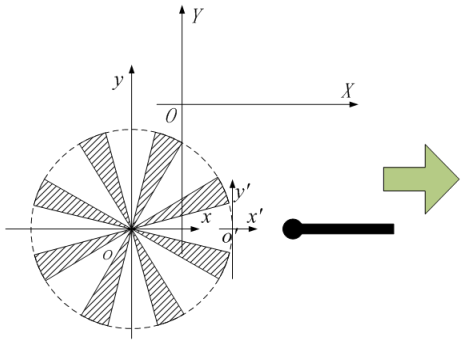
图 4 测针与零件干涉示意图

产生上述干涉现象的根本原因是坐标测量机在测量采样点时的运动方式是开环的，而且转台未采用伺服控制方式，即首先对转台设定转动角度，对坐标测量机设定目标点，待转台执行完动作后，坐标测量机运动到指定位置。然而，在坐标测量机动作前却没有考虑转台转动的误差。

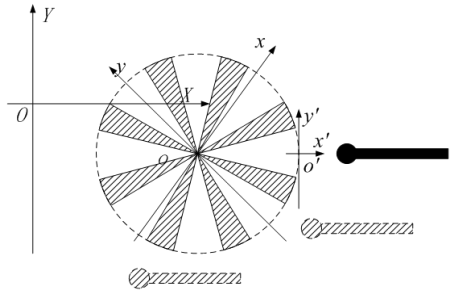
坐标测量机和数控转台的运动控制是异步的，即测量系统软件不能同时控制二者运动。因此，本文提出一种异步闭环反馈控制算法，在转台执行转动动作后，将转动误差反馈到坐标测量机的下一步运动过程中，消除干涉现象的发生。

该方法的基本思想是：根据反馈运动控制理论，如图 5 所示，引入叶片定位坐标系 $\Sigma o'x'y'$，转台每次

转动前，测量程序计算上次转台转动误差，将该误差自动补偿到下次转台转动的角度量中，这样每次转台转动误差不大于 θ，避免图 4a 现象的发生；同时，测量程序根据叶片坐标系的零点位置自动调整测针的在机器人坐标系 Σ*OXY* 内的运动路径，从而保证了安装在任意位置的工件都不会使测针与叶片发生碰撞，避免图 4b 现象的发生。



a　转动前



b　转动后

图 5　无干涉测量设计示意图

上述异步闭环反馈控制算法结构如图 6 所示。初始时刻，手动方式在起始叶片间测量 2 个点（叶背 1 个，叶盆 1 个），并建立叶片的粗坐标系。然后：

a. 采用自动测量方式，在指定半径、高度位置分别在叶盆和叶背上测量 1 个点，构造中点，并计算叶片分度角；

b. 以中点为原点，以中点和工件中心点的连线为 *x*′轴建立叶片坐标系 Σ*o*′*x*′*y*′。

c. 根据叶片实际位置角 α'，计算转台角度误差 θ，以 α-θ 为转动角度转动转台，根据此时叶片坐标系原点 *o*′在基础坐标系 Σ*OXY* 内的坐标，规划测针的运动轨迹，并控制其运动到下一个叶片间的初始位置。

d. 循环第一步到第三步的操作，直至测完所有的叶片分度角。

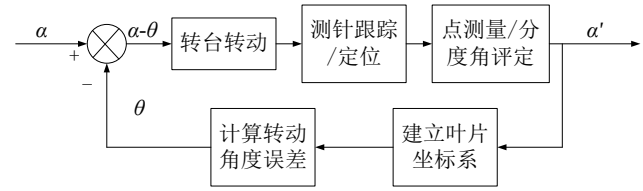


图 6　异步闭环反馈控制算法结构图

2.4　叶片分度角误差计算

记任意叶片分度角为 θ_i，相邻 2 个叶片的分度角误差为 e_i，任意 2 个叶片的分度角累积误差为 s_i，若任意级叶片的数量为 *N*，则有：

$$e_i = \theta_i - \theta_{i\text{-}1}$$

$$s_i = \sum_{j=1}^{i} e_j \qquad (1)$$

$$i = 1, \cdots\cdots, N$$

最大相邻误差为 $\max|e_i|$，最大累积误差为 $\max|s_i|$-$\min|s_i|$。

3　试验与分析

3.1　测量方法测量能力的评定

图 3 的移动桥式坐标测量机的最大测量误差为 0.7μm+*L*/600mm，其中转台的直径为 300mm，示值的最大误差为±1″，重复性为±1″。

在进行试验前，用所提出的测量方法测量 24 面的多面棱体的分度角，校准该测量方法的测量能力。经试验和计算得多面棱体分度角测量结果的合成标准不确定度 *u*=3.78″，校准测量能力 *U* 可用 *k*=2 的扩展不确定来表示：

$$U = ku = 2 \times 3.78'' = 7.56''$$

根据 JJF1094—2002《测量仪器特性评定》的规定，坐标测量机采用提出的测量方法测量多面棱体的分度角误差的测量不确定度 *U*=7.56″，与涡轮转子分度角误差测量结果的最大允许误差之间满足 *U*<5′/5，即测量误差评定的测量不确定度对符合性评定的影响可忽略不计。因此，该坐标测量机配合转台，采用本文的测量方法测量涡轮转子的分度角。

3.2　涡轮转子分度角全自动测量试验

采用本文提出的方法进行试验，测量结果的不确定度评定过程如下。

3.2.1　数学模型

建立分度角测量模型为：

$$\Delta = L_i \quad (2)$$

式中：Δ——各分度角的示值；L_i——各分度角的坐标读数值。

3.2.2 输入量的不确定度评定

输入量 L_i 的不确定度由坐标测量机的测量重复性 $u(L_1)$和测量方法的定值不确定度 $u(L_2)$合成得到。

通过连续测量得到坐标测量机的测量重复性 $u(L_1)$后，再采用 A 类方法[1]进行评定。

合成样本标准差 s_p 为：

$$s_p = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} s_j^2} = 8.24''$$

则可得到：

$$u(L_i) = s_p = 8.24''$$

自由度为：

$$v_1 = \sum_{j=1}^{m} v_{1j} = 56\times(5-1) = 224$$

测量方法的定值不确定度 $u(L_2)$可以采用 B 类方法[1]进行评定。经计算得测量方法的合成标准不确定度 $u(L_s)$为 3.78″，有效自由度 v_{eff}=96。

输入量 L_i 的标准不确定度如表 1 所示。

表 1 输入量的标准不确定度

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度	c_i	$\lvert c_i\rvert u(x_i)$	v_j
$u(L_1)$	坐标机的测量重复性	8.24″	1	8.24″	224
$u(L_2)$	测量方法的定值不确定度	3.78″	−1	−3.78″	96

3.2.3 合成标准不确定度

由于坐标测量机的测量重复性和测量方法的定值不确定度彼此不相关，合成标准不确定度按下式得到：

$$u_c^2(\Delta) = \left[\frac{\partial\Delta}{\partial L_1}u(L_1)\right]^2 + \left[\frac{\partial\Delta}{\partial L_2}u(L_2)\right]^2$$

$$= \left[c_1u(L_1)\right]^2 + \left[c_2u(L_2)\right]^2$$

$$u_c(\Delta) = \sqrt{3.78^2 + 8.24^2}'' \approx 9.07''$$

合成标准不确定度的有效自由度为：

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(\Delta)}{\dfrac{\left[c_1u(L_1)\right]^4}{v_1} + \dfrac{\left[c_2u(L_2)\right]^4}{v_2}} \approx 299$$

3.2.4 扩展不确定度

取置信概率 p=95%，按有效自由度 v_{eff}=299，查 t 分布表得到：

$$k_p = t_{95}(299) = 1.96$$

扩展不确定度为：

$$U_{95} = t_{95}(299)u_c(\Delta) = 17.78''$$

若取 k=2，则扩展不确定度为：

$$U = 2u_c(\Delta) = 18.14''$$

3.3 试验结果分析

根据式（1）计算得到 I 级叶片的相邻误差和累积误差，采用相同的方法测量 II 级叶片，并评定测量结果。综合 I 级和 II 级的测量结果，见表 2。

表 2 试验综合测量结果

	I 级叶片	II 级叶片
最大相邻误差	10′18″	9′12″
最大累积误差	11′8″	14′4″
扩展不确定度	18.14″(k=2，v_{eff}=299)	
测量周期	1.5h/件	

4 结束语

本文提出一种基于数控转台和坐标测量机的测量方法，以涡轮转子为研究对象，实现其叶片分度误差的自动数字化测量。文中建立了分度角模型，进行了干涉分析，并提出一种闭环反馈测量算法，避免测针与工件的干涉。试验结果的扩展不确定度为 18.14″(k=2，v_{eff}=299)。该方法不仅可弥补传统方法测量能力上的不足，而且可大幅度提高测量效率。

参考文献

1 上海市计量测试技术研究院. 常用测量不确定度评定方法及应用实例[M]. 北京：中国计量出版社，2000：1～11