

# 基于等距模型的弧面凸轮测量方法

杨建武, 孙树文, 曹思奇

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

**摘要:** 弧面凸轮的廓面为空间不可展曲面, 难以找到一种准确度高的快速测量方法. 通过三坐标测量机搭配转台组成测量装置, 对弧面凸轮等距模型的特征线进行测量, 提出一种基于等距模型的弧面凸轮测量方法. 首先, 分析了等距模型的测量原理, 避免了半径补偿; 其次, 提出了特征线的测量方法, 评定等距模型的线轮廓度误差, 讨论其对凸轮分度箱及换刀机械手的影响; 最后, 通过实验验证了测量方法的可行性, 并提出了本测量方法的改进意见, 可更好地实现弧面凸轮机构设计、加工、测量一体化.

**关键词:** 弧面凸轮; 等距模型; 线轮廓度误差; 精密测量

中图分类号: TH 721

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2015)01-0007-06

doi: 10.11936/bjtxb2014050018

## Assessment Method of Machining Error of Globoidal Cam Based on Equidistant Model

YANG Jian-wu, SUN Shu-wen, CAO Si-qi

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Because of the complicacy of working profile of a globoidal cam, there is not a fast measurement method with high accuracy. A method of measuring the characteristic line on the equidistant model of the globoidal cam based on the three-coordinate measuring machine (CMM) and the turntable system is proposed. The measuring theory of the equidistant model without radius compensation is first analyzed. The line profile error of equidistant model is then calculated and the influence on cam gearbox and automatic tool changer (ATC) is discussed. Test results show that cam measurements method is feasible, providing a foundation for integration of globoidal cam's design, manufacture and measure.

**Key words:** globoidal cam; equidistant model; line profile error; precision measurement

弧面凸轮机构广泛应用于各种自动机械中, 特别是自动换刀装置 (automatic tool changer, ATC) 中采用这种机构作为分度箱中的核心元件. 弧面凸轮用于控制换刀机械手进行旋转、定位与伸缩动作. 中国自主生产的自动换刀装置在刀具重量、换刀时间及换刀可靠性等方面难以满足机床厂的要求. 为确保制造的弧面凸轮能够满足使用要求, 需要提出

一种有效的精确检测弧面凸轮加工误差的方法.

国内外对弧面凸轮的静态测量进行了很多研究. 王海燕等<sup>[1]</sup>提出应用三坐标测量机测量弧面凸轮的两种扫描测量方法. 王晓飞等<sup>[2]</sup>在三坐标测量机上进行了测量, 并介绍了廓线(面)偏差和螺旋线偏差的概念. Lin 等<sup>[3]</sup>研究了测量坐标与理论位置之间的转换关系, 确定测量基准. 由吉林工业大学

收稿日期: 2012-04-15

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2013ZX04008021)

作者简介: 杨建武(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机电伺服及自动化控制系统方面的研究, E-mail: yjw@bjut.edu.cn.

通信作者: 孙树文(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事机电一体化技术方面的研究, E-mail: sshwen@bjut.edu.cn

牵头,提出了弧面凸轮机构的精度指标体系<sup>[4]</sup>. 宋丽娟<sup>[5]</sup>提出由测量结果反求制造误差的思想,没有对具体内容进行研究. 蔺小军等<sup>[6]</sup>提出了重构等距曲面来进行半径补偿的方法. 但是,目前的三坐标测量方法测量速度慢、测量方法复杂,不能满足生产线上对弧面凸轮进行测量的要求,并且难以从根本上解决半径补偿问题.

本文提出一种基于弧面凸轮等距模型特征线的快速测量方法. 该方法可用于生产线测量,测量速度快,有效地避免了半径补偿,通过计算等距模型的线轮廓度误差来指导生产线上的加工工艺.

## 1 弧面凸轮等距模型测量方法

### 1.1 弧面凸轮测量技术难点

弧面凸轮某些廓面点处于凹槽内,不能采用广泛采点的测量方式,如图1所示.

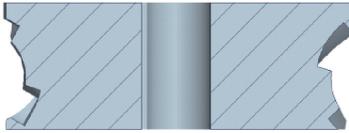


图1 弧面凸轮剖面

Fig.1 Section plan of the globoidal cam

弧面凸轮轮廓面上各点的法向量方向不同,其变化亦不规则. 传统方法难以消除半径补偿带来的误差.

### 1.2 测量装置

利用具有高测量精度的三坐标测量机作为测量工具,通过搭配转台系统构成4轴测量坐标系,实现弧面凸轮的快速测量,测量装置结构如图2所示.

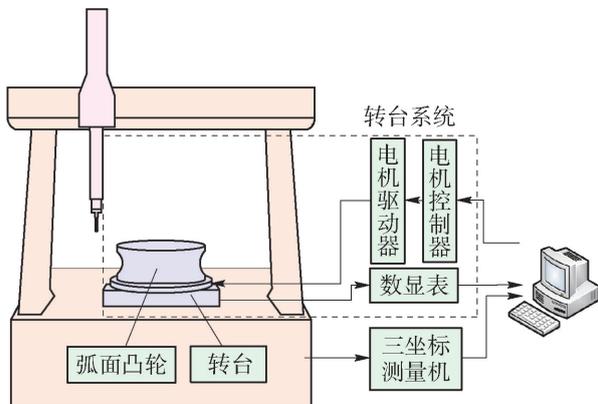


图2 测量装置结构

Fig.2 Measurement system

转台系统由转台、电机控制器、驱动器和数显表组成. 数显表实时显示转台角度信息,通过计算机

将该信息与三坐标测量结果进行处理,提高测量速度与准确性.

### 1.3 测量原理

#### 1.3.1 等距模型原理分析

以弧面凸轮为出发点,对其理论模型进行修改,构造等距模型. 三坐标测量机的测量结果为测球球心坐标,接触点与球心坐标的距离为测球半径  $R$ . 将弧面凸轮上的每一点  $P(x, y, z)$ , 根据等距曲面原理,把理论廓面上的点沿其法线方向  $T(d_x, d_y, d_z)$  偏移,偏移固定距离  $R$ , 则  $T(d_x, d_y, d_z)$  的计算式<sup>[7]</sup>为

$$T(d_x, d_y, d_z) = \begin{cases} \frac{(a - b \times \cos \theta) \times \sin \theta \times \cos \alpha + b \times v \times \sin \alpha}{\sqrt{(a - b \times \cos \theta)^2 + b^2 \times v^2}} \\ - \frac{(a - b \times \cos \theta) \times \sin \theta \times \sin \alpha + b \times v \times \cos \alpha}{\sqrt{(a - b \times \cos \theta)^2 + b^2 \times v^2}} \\ \frac{(a - b \times \cos \theta) \times \cos \theta}{\sqrt{(a - b \times \cos \theta)^2 + b^2 \times v^2}} \end{cases} \quad (1)$$

得到点  $P(x, y, z)$  对应的等距点  $P'(x, y, z)$ .

$$P'(x, y, z) = P(x, y, z) + R \times T(d_x, d_y, d_z) \quad (2)$$

每一个等距点  $P'(x, y, z)$  对应于一个测球球心坐标. 因此,可以直接将球心坐标与理论等距曲面模型上的点进行比较,省去半径补偿的相关步骤,提高测量速度与数据处理的准确性,如图3所示.

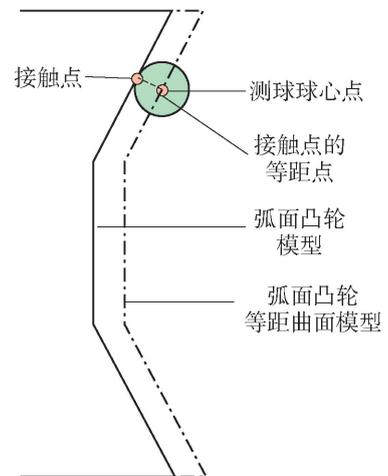


图3 等距模型原理

Fig.3 Principle of equidistant model

#### 1.3.2 弧面凸轮等距模型

弧面凸轮机构由弧面凸轮与从动件(滚子)组成. 弧面凸轮与从动件的运动规律为修正正弦运动规律,根据文献<sup>[8]</sup>给出的廓面方程,将凸轮与从动件接触点沿其法向量方向延伸后的等距模型,等价

于缩小从动件半径得到的弧面凸轮廓面方程, 如图4所示. 改造后的从动件接触点方程为

$$\begin{cases} x_2 = r \\ y_2 = (\rho - R) \cdot \cos \psi \\ z_2 = (\rho - R) \cdot \sin \psi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \times \cos \phi \times \cos \theta - y_2 \times \sin \phi \times \cos \theta - z_2 \times \sin \theta - C \times \cos \theta \\ -x_2 \times \cos \phi \times \sin \theta + y_2 \times \sin \phi \times \sin \theta - z_2 \times \cos \theta + C \times \sin \theta \\ x_2 \times \sin \phi + y_2 \times \cos \phi \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为弧面凸轮转角;  $\phi$  为从动件转角;  $C$  为弧面凸轮与滚子中心距;  $(x, y, z)$  为弧面凸轮等距曲面模型的廓面点坐标. 该弧面凸轮等距曲面模型作为三坐标测量时的理论等距模型.

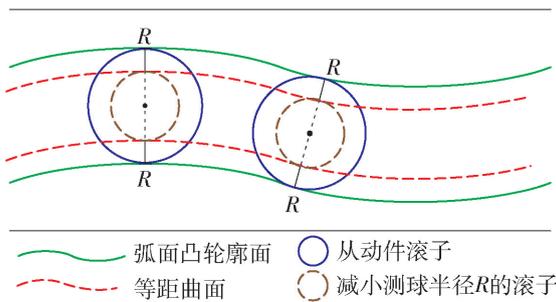


图4 等距模型与滚子半径的关系

Fig. 4 Relationship of equidistant model and roller radius

### 1.4 测量对象

当测球球心在同一轴截面  $S_\theta$  内运动, 其接触点并不在  $S_\theta$  内, 难以对弧面凸轮等距模型的线轮廓度误差进行评定, 如图5所示.

式中:  $(x_2, y_2, z_2)$  是从动件上一点;  $\rho$  为从动件滚子半径;  $\psi$  为压力角参数;  $r$  为走刀深度.

将该方程带入到弧面凸轮的廓面表达式<sup>[8]</sup>中, 即可得到弧面凸轮的等距曲面表达式

测球与弧面凸轮的接触点位置如何, 只要保证测球球心在轴截面  $S_\theta$  内运动, 其球心点的轨迹就在同一轴截面内, 可进行等距模型线轮廓度误差的计算.

当凸轮转角为  $\theta$  时,  $\theta$  对应的轴截面为  $S_\theta$ , 凸轮廓面为  $S_0$ , 定义凸轮轴截面  $S_\theta$  与轮廓面  $S_0$  的交线为理论特征线  $S$ . 特征线如图6所示, 通过选取  $n$  个不同的  $\theta$ , 可得到  $n$  条理论特征线  $S_i (i \in (1, n), n$  为特征线条数), 理论特征线  $S_i$  为测量曲线; 对弧面凸轮廓面每  $30^\circ$  测量一条特征线, 可反映出凸轮廓面的轮廓度误差.

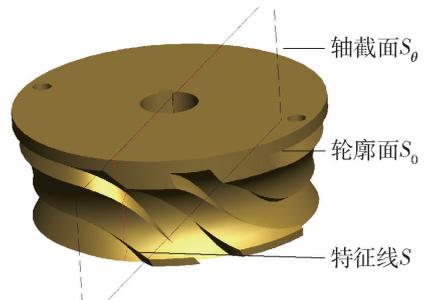


图6 特征线示意

Fig. 6 Characteristic line

由弧面凸轮的廓面形状可知, 理论特征线  $S_i$  上不同部分的曲率变化不同, 在理论特征线  $S_i$  上均匀取点, 将这些待测点定义为特征点, 该特征点作为待测对象. 通过对理论特征点与测量结果进行处理, 计算弧面凸轮等距模型的线轮廓度误差.

在保证三坐标测头沿轴截面进行动作的情况下, 当特征线处于弧面凸轮间歇段部分, 实测特征点与理论特征点处于匹配状态, 由于间歇段曲率变化慢, 可规划较多特征点, 取16个点时效果较好; 当特征线处于弧面凸轮分度段时, 实测特征点应处于理论特征线上, 由于分度段曲率变化快, 需要规划较少特征点, 取12个点时效果较好.

### 1.5 测量过程

将弧面凸轮等距模型作为理论模型, 以弧面凸轮的制造基准为基础, 建立基准坐标系, 使弧面凸轮

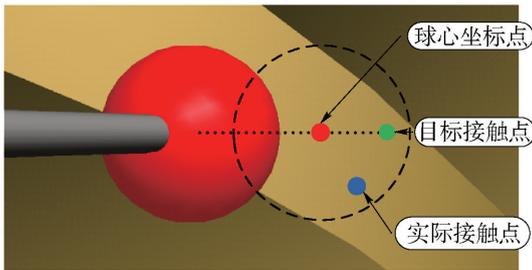
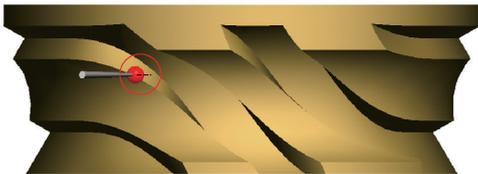


图5 接触点示意

Fig. 5 Contact point

为了提高测量速度、评定线轮廓度误差, 提出对等距曲面模型特征线进行测量的方法. 无论三坐标

与其理论模型处于同一坐标系下. 测量过程中, 一条特征线测量完毕后, 控制转台旋转至下一条待测特征线处, 进行测量.

结合弧面凸轮等距模型的测量方法与上述测量装置, 该测量过程如图7所示.

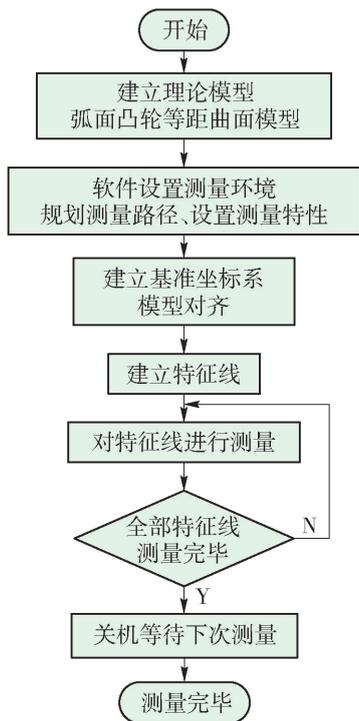


图7 测量过程流程

Fig. 7 Measurement process

## 2 等距模型线轮廓度误差评定方法

### 2.1 线轮廓度误差的评定

用实际测量点与其对应的理论点之间的变动量来表示实际测量曲线对理论曲线的变动量, 评定测量曲线的线轮廓度误差<sup>[9]</sup>.

每条特征线由若干个特征点组成, 计算测量特征点与理论特征点之间的偏差. 定义当实测点位于理论模型外部时, 偏差取正值; 当实测点处于模型内部时, 偏差取负值.

根据三坐标测量机的测量结果, 导出的数据点信息包括: 每个理论特征点  $P_{ij}$  ( $i$  为特征线条数;  $j$  为特征线上对应的特征点数) 的坐标  $(x, y, z)$ , 及其对应的实际测量点  $P'_{ij}$  的坐标  $(x', y', z')$ .

求解实际测量点  $P'_{ij}$  与其对应的理论特征点  $P_{ij}$  的偏差  $d_{ij}$ , 则  $P_{ij}$  与  $P'_{ij}$  的关系为

$$d_{ij} = \pm \sqrt{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]} \quad (3)$$

使  $F(i) = \max(d_{ij}) - \min(d_{ij})$ ,  $F(i)$  作为等距曲面

的线轮廓度误差.

### 2.2 线轮廓度误差对凸轮分度箱的影响

线轮廓度误差为负值时, 弧面凸轮与滚子配合状态为间隙配合<sup>[10]</sup>. 凸轮分度箱输出的运动曲线不够光滑, 曲线上出现“毛刺”, 输出轴抖动加剧, 机械手在运动过程中容易产生“掉刀”现象.

线轮廓度误差为正值时, 弧面凸轮与滚子配合状态为过盈配合, 凸轮分度箱容易发生卡顿, 凸轮机构磨损严重, 使用寿命缩短, 导致机械手产生“卡死”现象.

## 3 测量方法实验与分析

### 3.1 特征线测量方法验证

利用本文设计的测量方法对某工厂加工的弧面凸轮进行测量, 测量系统实物如图8所示.

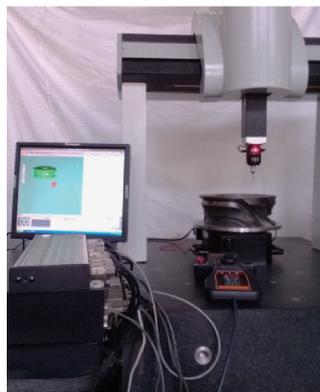


图8 测量系统

Fig. 8 Measuring equipment

在弧面凸轮间歇段, 在从动件滚子与弧面凸轮接触的一段特征线上取8个点进行测量, 如图9所示.

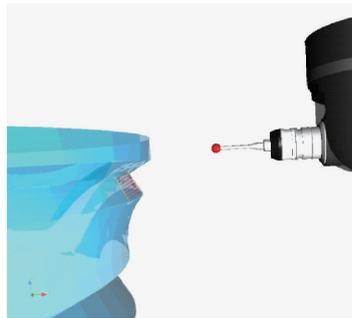


图9 弧面凸轮间歇段特征点

Fig. 9 Feature points on dwell segment

应用三坐标测量机的自动测量功能, 对特征点进行测量, 部分测量结果如表1所示.

在弧面凸轮分度段, 在从动件滚子与弧面凸轮

的一段特征线上取 6 个特征点进行测量, 如图 10 所示. 数据点坐标信息如表 2 所示.

表 1 间歇段部分三坐标测量结果

Table 1 Measurement results on dwell segment

特征点	x/mm		y/mm		z/mm	
	理论	实际	理论	实际	理论	实际
PT1	127.770 2	127.740 8	0.360 7	0.363 9	-28.221 8	-28.260 7
PT2	127.013 1	126.987 3	0.344 0	0.346 9	-26.911 9	-26.945 7
PT3	126.256 0	126.229 8	0.327 3	0.329 9	-25.602 1	-25.636 2
PT4	125.498 8	125.472 3	0.310 5	0.312 0	-24.292 3	-24.326 2

表 2 分度段部分三坐标测量结果

Table 2 Measurement results on index segment

特征点	x/mm		y/mm		z/mm	
	理论	实际	理论	实际	理论	实际
PT5	108.465 4	108.446 9	0.000 0	0.002 0	-45.206 6	-45.310 7
PT6	110.072 2	110.046 8	-0.000 1	0.001 9	-45.764 9	-45.884 8
PT7	111.669 9	111.641 3	-0.000 1	0.001 4	-46.348 7	-46.465 5
PT8	113.258 6	113.227 7	-0.000 2	0.001 3	-46.956 6	-47.076 6

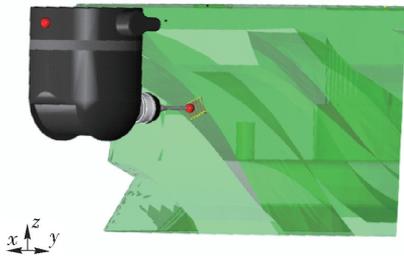


图 10 弧面凸轮分度段特征点

Fig. 10 Feature points on index segment

### 3.2 等距模型线轮廓度误差计算与分析

#### 3.2.1 间歇段线轮廓度误差计算与分析

根据特征线的测量结果, 在弧面凸轮间歇段上测量 8 个点, 计算各点之间的误差, 如图 11 所示.

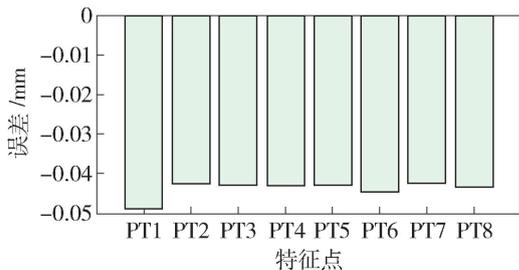


图 11 间歇段特征点误差

Fig. 11 Error of feature points on dwell segment

间歇段此段特征线的线轮廓度误差为

$$F = \max(d_{ij}) - \min(d_{ij}) =$$

$$0 \text{ mm} - (-0.0488) \text{ mm} = 0.0488 \text{ mm}$$

弧面凸轮间歇段测量精度较高, 各点之间的误差较小, 证明等距模型的测量方法在间歇段是适用的. 其中  $x$  坐标与  $z$  坐标偏差较大, 原因在于, 该凸轮加工时廓面切削量稍大, 弧面凸轮与滚子配合会存在微小间隙, 产生“抖动”现象.

#### 3.2.2 分度段线轮廓度误差计算与分析

在弧面凸轮分度段上测量 6 个点, 计算各点之间的误差, 如图 12 所示.

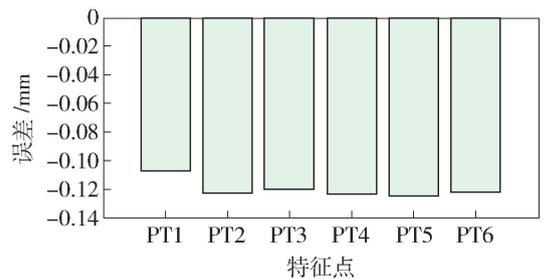


图 12 分度段特征点误差

Fig. 12 Error of feature points on index segment

间歇段此段特征线的线轮廓度误差为

$$F = \max(d_{ij}) - \min(d_{ij}) =$$

$$0 \text{ mm} - (-0.1249) \text{ mm} = 0.1249 \text{ mm}$$

弧面凸轮分度段各点之间的误差较大. 这种现象是由理论点与实际测量点不匹配造成的, 当测头在轴截面内运动, 并沿理论点的平面向量与弧面凸

轮接触时,测球球心坐标对应于理论特征线上一点,该点并不与球心坐标对应的理论点重合.因此,需要一种找到与球心坐标准确对应的理论点的方法.

### 3.3 测量方案改进

当测量分度段时,需要对测量结果进行处理.首先,在理论特征线上选取  $i$  个特征点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ , 测量点为  $P(x, y, z)$ . 设定收敛条件  $a$ , 即计算  $P_i$  与  $P$  之间的距离  $d_i$ , 使  $d_i \leq a$ . 如图 13 所示.

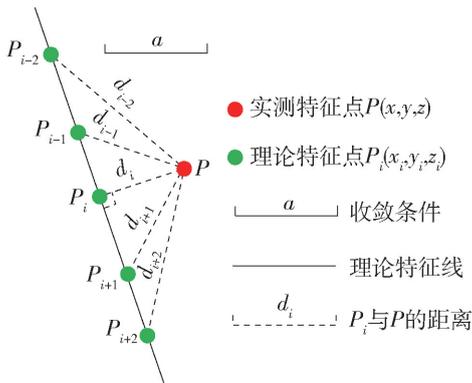


图 13 测量点与理论点的匹配

Fig. 13 Matching measurement point and theory point

若存在,则  $P_k (k \in i)$  为测量点  $P$  对应的理论点,用于计算轮廓度误差;若不存在,则找到与  $P$  距离最近的 2 个点  $P_m$  与  $P_n$ , 在  $P_m$  与  $P_n$  之间的特征线上选取  $j$  个特征点,重复以上计算过程,直至满足收敛条件为止.

## 4 结论

1) 利用三坐标测量机搭配水平转台建立了弧面凸轮专用测量系统,提出基于弧面凸轮等距模型的测量方法.

2) 通过对原有理论模型进行等距改造,定义弧面凸轮特征线/点,实现了弧面凸轮的快速精确检测.

3) 评定等距模型的线轮廓度误差,讨论了该误差对 ATC 的影响,进一步为加工误差的评价与分离建立误差评价体系与检测标准,能更好地实现弧面凸轮机构设计、加工、测量一体化.

## 参考文献:

[1] 王海燕, 赵汝嘉, 刘昌祺. 弧面分度凸轮轮廓的精密测量与误差评定[J]. 计量技术, 1999, 6: 9-12.  
WANG Hai-yan, ZHAO Ru-jia, LIU Chang-qi. Precision measurement and error evaluation of globoidal cam [J]. Measurement Technique, 1999, 6: 9-12. (in Chinese)

[2] 王晓飞, 唐琳. 弧面分度凸轮的坐标测量原理及其实现[J]. 天津大学学报, 2011, 44(11): 1024-1028.  
WANG Xiao-fei, TANG Lin. Measurement theory and implement of globoidal indexing cam using cmm [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(11): 1024-1028. (in Chinese)

[3] LIN P D, HSIEH J F. Dimension inspection of spatial cams by cnc coordinate measuring machines[J]. Transaction of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122: 149-157.

[4] 胡秉辰, 孔庆沂, 徐连棠. 弧面分度凸轮机构精度指标体系的探讨[J]. 农业机械学报, 1994, 25: 13-16.  
HU Bing-chen, KONG Qing-yi, XU Lian-tang. The discussion of precision index system of globoidal cam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1994, 25: 13-16. (in Chinese)

[5] 宋丽娟. 弧面分度凸轮的三坐标机测量[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2005.  
SONG Li-juan. Using CMM to measure surface error of roller gear cam [D]. Dalian: College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)

[6] 蔺小军, 王增强, 单晨伟. 自由曲面 CMM 测量测头半径补偿方法[J]. 航空制造技术, 2011, 10: 75-78.  
LIN Xiao-jun, WANG Zeng-qiang, SHAN Chen-wei. Method of probe radius compensation for free surface measurement by CMM [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 10: 75-78. (in Chinese)

[7] 卜凡华. 加工中心自动换刀装置(ATC)加工工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 2012.  
BU Fan-hua. Study on machining technology of globoidal cam employed in automatic tool changer (ATC) of machine center [D]. Beijing: College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, 2012. (in Chinese)

[8] 邹慧君, 殷鸿梁. 间歇运动机构设计与应用创新[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 161-186.

[9] 王伯平, 曾建潮. 一种自调整的空间面轮廓度误差的评定方法[J]. 计量学报, 2002, 23(2): 106-108.  
WANG Bo-ping, ZENG Jian-chao. An automatic adjustment method for evaluation of space surface profile error [J]. Acta Metrologica Sinica, 2002, 23(2): 106-108. (in Chinese)

[10] 刘昌祺, 刘庆立, 蔡昌蔚. 自动机械凸轮机构实用设计手册[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-198.

(责任编辑 杨开英)