

# 凸轮组的磨损程度和相对位置的检测

陈陆<sup>1</sup>, 张尧禹<sup>2</sup>, 冯进良<sup>1</sup>, 张雪峰<sup>1</sup>

(1.长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 在很多轻工机械、机电一体化装置中, 凸轮机构或凸轮组机构有大量的应用, 由于凸轮轮廓与从动件是点接触或线接触, 容易磨损, 磨损后从动件不能按预期的运动规律进行工作, 所以很有必要对凸轮轮廓进行测量并加以曲线拟合和误差分析来反映凸轮的现有状态。本文提出了一种检测方法, 能够对凸轮表面磨损程度进行在线、非拆卸、直接检测, 并可以对凸轮组之间的相对位置进行检测。对于检测结果, 先利用非均匀B样条法对检测数据进行曲线拟合, 再经过误差分析得出被测凸轮的理论曲线, 进而确定误差值大小。该方法具有测量精确、易于操作、实用性强等优点, 可有效反映凸轮轮廓状态。

**关键词:** 凸轮; 曲线拟合; 非均匀有理B样条

**中图分类号:** TH132.47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9870(2015)01-0049-04

## Detection for the Wear Degree and Relative Position of the Cams

CHEN Lu<sup>1</sup>, ZHANG Yaoyu<sup>2</sup>, FENG Jinliang<sup>1</sup>, ZHANG Xuefeng<sup>1</sup>

(1.School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;

2.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033)

**Abstract:** The cam mechanism has a large number of applications in many light industrial machineries and mechatronics devices. Because the cam contact with a follower with a point or a line, it is easy to abrade and the abrasion can cause that the follower does not work as expected movement. In this paper, a detection method which can detect the abrasion degree of the cam surface online and non-demolition is proposed. For the data, the Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) is used to fit the curve and the theoretical curve is determined after error analysis, and then the error value is confirmed. The method is accurate, simple, practical and it is effective to show the condition of cam profile.

**Key words:** cam; curve fitting; non-uniform rational B-spline (NURBS)

凸轮机构是很多机械结构中的重要组成部分。凸轮组转动, 带动与其接触的从动件运动, 从而实现各机械模块的运动。在机械部件的运动过程中, 要求机械装置各模块按照规定的工位运动完成相应的功能, 这些功能需要各个模块协同配合, 运动比较复杂, 而凸轮组是控制模块运动的核心部件。凸轮与从动件是点或线接触, 容易磨损, 当磨损量超过规定范围时, 就会影响从动件的运动位置精度。因此, 通过对凸轮轮廓曲线的测量判断凸轮的磨损情况, 具有重要的实际意义; 同时对凸轮相对位置的确定, 可以减少凸轮拆卸后再安装的繁琐调试, 并迅速对凸轮的工作位置进行确定, 所以对凸轮组相对位置的

确定很有必要性。

本文提出凸轮轮廓曲线的直接测量法, 可以在凸轮工作停止时对凸轮进行无拆卸轮廓测量, 测量数据记录后导入便携式计算机, 利用Matlab软件进行凸轮轮廓曲线拟合, 误差分析处理后得到凸轮现有轮廓曲线。将得到的凸轮曲线与理论标准曲线进行比较, 得出磨损量大小, 然后依据磨损量的大小对凸轮的现有磨损程度进行判断。

### 1 测量原理

图1所示是该测量系统的二维极坐标测量机。主要由光栅尺、轴角编码器、带有水平仪的自制角度

收稿日期: 2014-09-19

作者简介: 陈陆 (1989-), 男, 硕士研究生, E-mail: 329851107@qq.com

通讯作者: 冯进良 (1964-), 男, 教授, E-mail: feng-20071101@163.com

尺、高速数据采集卡、便携式计算机组成。

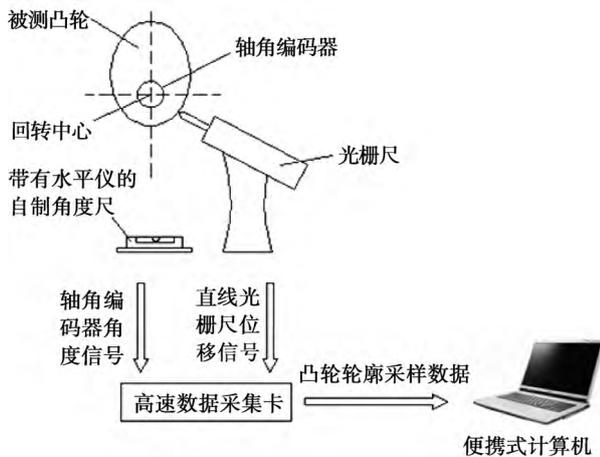


图1 系统结构图

轴角编码器安装在凸轮的回转轴上,与凸轮共轴线,当凸轮回转时,轴角编码器输出的数值即为凸轮转过的角度值。光栅尺顶针与凸轮外轮廓相接触,凸轮转动推动顶针前后运动。安装时,顶针要与凸轮回转中心轴线相垂直,并且通过回转中心,如果不与中心轴线垂直,那么测量时顶针前后移动量与凸轮上升曲线的增量会不同,而产生误差。所以在装配时,要用直角尺对光栅尺的安装角度进行调校,然后固定光栅尺。由于所测凸轮在垂直于轴心线的各个截面上的形状都是相同的,所以在测量过程中,只需要测定一个平面内的数据就满足检测要求。光栅尺在数显表上所显示的数值加上凸轮基圆尺寸(已知)即为极坐标径向值。由于对凸轮进行的是非拆卸测量,光栅尺为了躲避其它零件的干扰,需倾斜一定角度放置,因此将光栅尺安装在角度可调节的自制支架上,并配备有带有水平仪的自制角度尺,起到确定凸轮间相对位置的作用。在记录各角度的极坐标之前,可以通过角度尺读出初始测值点和凸轮旋转中心所成直线与水平方向的夹角角度值 $\alpha$ ,这样就可以确定被测凸轮的初始位置。如果凸轮需要更换并再次安装时,就可以迅速的进行定位安装,略微进行调节角度即可使新更换的凸轮进行工作。

在本次测量中所选用的光栅尺的测量精度可达到 $1\mu\text{m}$ 。

在被测凸轮的基圆边缘处作为起始点开始测量,此时将光栅尺的读数置零。测量过程中,读数轴角编码器,每转动一个角度记录一个光栅尺数值,也就是说通过数据采集卡采集到的数据是各个角度值和该角度所对应的极坐标径向值。

如果经过测量,一个凸轮组中的多个凸轮都需

更换,因为通过角度尺已经测定了各个凸轮的 $\alpha_i$ ,所以多个凸轮间的相对位置就已经确定,那么再次安装时就可以迅速定位新安装凸轮的初始位置,可以在最短时间内完成对凸轮的安裝调校。

## 2 数据处理流程

通过二维极坐标测量机对凸轮进行测量后所得到的数据是一系列不连续的离散数据点,需要进一步把检测数据经过误差分析计算,得到拟合曲线、误差数据大小等检测结果。

在数据处理过程中,首先需要把已测量的各点极坐标数据进行拟合处理。数据拟合可以把多个离散点转化为连续的曲线,比较客观地反映被测物体的轮廓形状。在对数据进行拟合之后,由于测头的存在,我们测得的数据实际上是测头中心点的轨迹数据,所以要对拟合曲线进行测头半径误差补偿。

经过曲线拟合并进行测头半径误差补偿之后的数据,就可以认为是凸轮的实际轮廓曲线数据,它反映了凸轮的实际轮廓状态。最后的误差值就是通过实际轮廓曲线数据与标准凸轮的理论数据相比较而得出的。

具体的数据处理流程框图如图2所示:

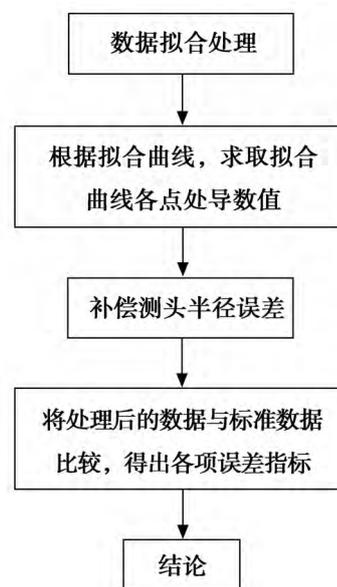


图2 数据处理流程图

## 3 曲线拟合及误差分析

### 3.1 曲线拟合

数据拟合处理主要目的有:(1)拟合一条通过各个离散数据点的曲线,让该曲线反映数据点的分布特征,并让该曲线在各数据点处满足二阶连续;(2)

减小系统的随机误差;(3)满足测头半径误差补偿的需求。作为逼近工具的函数应具有以下性质:函数类中的函数应相对光滑;数据能够在便携计算机上轻松储存和读取;函数本身以及该函数的导数、积分在计算机上可以很容易的求得;对任意光滑函数,这个函数类的函数能很好的进行接近。在本系统中,采用三次非均匀B样条法来实现曲线拟合。

由于光栅尺重复性精度的问题,每次会产生0.002mm的误差,第一次除外,每次读数应该减去该误差。在本次测量过程中,对凸轮曲线进行了多次测量,每个角度的读数去除光栅尺重复精度的误差后,测量数据的平均值如表1所示。

表1 测量数据值

	读数	角度
1	60.0014	0°
2	64.9298	36°
3	82.9992	72°
4	89.6138	108°
5	89.5950	144°
6	89.6306	180°
7	89.6998	216°
8	84.9748	252°
9	72.9220	288°
10	62.2652	324°

对于一系列数据采集点  $(R_r, \theta_r)$ ,  $(r=1, 2, 3, \dots, m)$ , 用非均匀B样条法表示的拟合曲线方程为:

$$R(\theta) = \sum_{i=0}^n a_i B_{i,k}(\theta) \quad (1)$$

式中,  $n$  为将原测点重新作划分所形成的节点数  $(n < m)$ , 设节点序列为  $\{t_i\}_0^{n+k}$ , 满足

$$t_0 = t_1 = \dots = t_k = \theta_1 < t_{k+1} < t_{k+2} < \dots < t_n = \theta_m = t_{n+1} = \dots = t_{n+k}$$

$a_i$  为待定系数;  $B_{i,k}(\theta)$  为各点处的非均匀B样条函数,  $k=3$ 。其计算公式为:

$$\begin{cases} B_{i,k}(\theta) = \begin{cases} 1 & t_i < \theta < t_{i+1} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \\ B_{i,k}(\theta) = \frac{\theta - t_i}{t_{i+k} - t_i} B_{i,k-1}(\theta) + \frac{t_{i+k+1} - \theta}{t_{i+k+1} - t_{i+1}} B_{i+1,k-1}(\theta) \end{cases} \quad (2)$$

各点处的  $\theta_r$  值已知, 所以根据公式(2)就可以求得各点的  $B_{i,k}(\theta)$  值。公式(1)中的待定系数  $a_i$  则可以使用最小二乘法原理来求解确定。根据多元函数求极值的必要条件可以得到简易方程组  $Ga = d$ , 其中系数阵  $G$  为对称带状矩阵, 在矩阵  $G$  中, 所有

的非零元素都集中在以主对角线为中心的带状区域。当  $k=3$  时, 带状矩阵  $G$  的半宽度为3。根据一般解带状方程组的方法, 可以得出待定系数值  $a_i$ 。

### 3.2 误差分析

在对各个离散点的数据进行拟合处理之后, 还要对在测量过程中由测头半径产生的误差进行补偿。由于光栅尺测头半径的存在, 凸轮转动带动测头前后移动所采集到的数据实际为光栅尺测头中心的轨迹数据, 而凸轮的实际轮廓曲线是与光栅尺测头中心所成轨迹线相距测头半径  $R$  的轮廓线。图3是测头部分与被测凸轮外表面轮廓接触部分放大示意图, 反映了由测头产生误差的原理。图中  $O_1$  是凸轮的回转中心,  $O_2$  为测头圆心, A点是凸轮回转中心  $O_1$  与测头圆心  $O_2$  的连线与凸轮轮廓线的交点, B点是测头与凸轮轮廓线的实际接触点。从下图3可以看出, 点A是期望被测点, 点B为实际被测点, 两点之间存在着误差, 这个误差就是由于测头半径的存在而造成的。

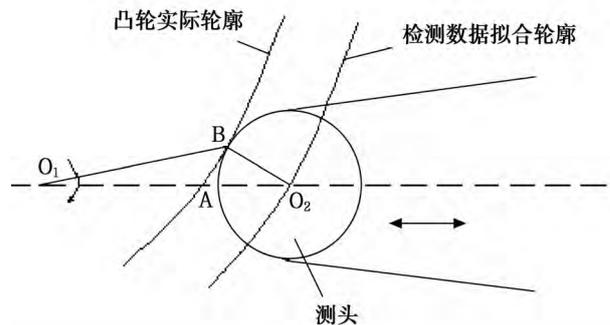


图3 误差原理图

为了让被测量结果更加客观真实的反映出被测凸轮轮廓曲线情况, 要计算补偿测头半径  $R$  所产生的误差。补偿过程实际上就是计算出与已经根据检测数据拟合出的轮廓曲线相距测头半径  $R$  的平行等距轮廓线, 这条等距包络线才是可以反映凸轮的实际轮廓线。根据平面等距线的计算公式可知:

$$\begin{cases} x_r = r(\theta_r) \cos \theta_r \pm \frac{R[r'(\theta_r) \sin \theta_r + r(\theta_r) \cos \theta_r]}{\sqrt{(r'(\theta_r))^2 + r^2(\theta_r)}} \\ y_r = r(\theta_r) \sin \theta_r \pm \frac{R[r'(\theta_r) \cos \theta_r - r(\theta_r) \sin \theta_r]}{\sqrt{(r'(\theta_r))^2 + r^2(\theta_r)}} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $x_r$ 、 $y_r$  为与角度  $\theta_r$  相对应的实际轮廓线上的坐标值;  $R$  是测头半径值; “ $\pm$ ”号, 当补偿检测为外轮廓凸轮时, 取“+”号, 当补偿检测为内轮廓凸轮是, 取“-”号, 本文取“-”号;  $r'(\theta_r)$  为监测数据拟

合轮廓曲线各个点的导数值,计算公式如下:

$$r'(\theta_r) = \sum_{i=0}^n a_i B'_{i,k}(\theta) \quad (4)$$

$$B'_{i,k}(\theta) = k \left[ \frac{B_{i,k-1}(\theta)}{\theta_{i+k} - \theta_i} - \frac{B_{i+1,k}(\theta)}{\theta_{i+k+1} - \theta_{i+1}} \right] \quad (5)$$

由公式(4)、(5)可以求得拟合曲线上各点的导数值,再带入公式(3),可以得到实际轮廓线上每个点的坐标值。

经过数据拟合、误差分析后得到的凸轮曲线如图4所示。

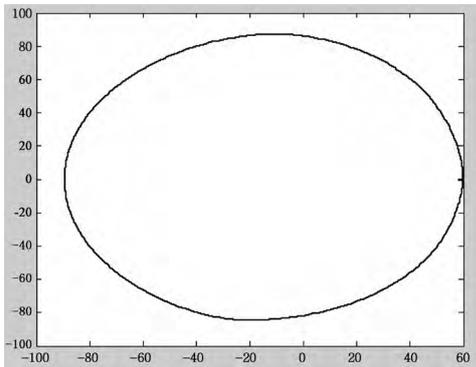


图4 数据处理后的凸轮曲线坐标图

根据图4不但可以确定已测数据点的极坐标值,还可以确定任意一点的极坐标值 $(R_i, \theta_i)$ ,而对于各凸轮的标准曲线的极坐标是已知的 $(R_{ii}, \theta_i)$ ,那么各角度相对应的误差值 $\Delta$ 为:

$$\Delta = |R_i - R_{ii}| \quad (6)$$

对于各机械设备的最大可接受误差值 $\Delta_{\max}$ 是不同的,当 $\Delta < \Delta_{\max}$ 时,我们认为误差可以接受,该凸轮的磨损程度在可接受范围之内;当 $\Delta > \Delta_{\max}$ 时,我们认为该凸轮的磨损程度已影响机械设备的正常工作,需要更换。

## 4 结论

在线、非拆卸、直接检测凸轮曲线系统很好地解决了凸轮拆卸不便,无法确定初始工作位置的缺点,具有方便快捷,稳定性好的特点。二维极坐标机的硬件结构简单,稳定性好;便携式计算机对测量数据处理的速度快、精度高,并且软件操作简单,有效地节省了数据计算时间。该系统对提高检测精度和增大生产效益都有着重要的意义。

## 参考文献

- [1] 维基百科: <http://zh.wikipedia.org/wiki/B样条>. 2014-04-04
- [2] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [3] 郭文杰. 基于MATLAB的凸轮机构轮廓曲线计算机辅助设计[J]. 机电工程技术, 2002, 31(1): 38.
- [4] 张义智, 李卫国. 盘形凸轮轮廓曲线检测中的数据处理[J]. 机械设计与制造, 2006(3): 14-15.