

凸轮轴偏心的测量与修正方法研究

孔明¹ 丁力华^{1,2} 赵军¹ 周广才²

1. 中国计量学院,杭州,310018 2. 哈尔滨精达测量仪器有限公司,哈尔滨,150000

摘要:将实用谐波分析技术应用于凸轮轴两端主轴颈偏心修正中,建立了基于凸轮轴两端主轴颈的各凸轮偏心距和偏心角的计算模型并对其算法进行了分析,通过偏心修正减小了凸轮轴测量基准和设计基准不统一以及凸轮轴自身弯曲带来的系统误差,避免了传统修正偏心算法中的插值误差。搭建了测量凸轮轴的实验平台,对主轴颈和凸轮的实测数据进行了偏心修正。实验结果表明,该方法对主轴径和凸轮偏心量的修正效果明显,提高了仪器的测量精度。

关键词:凸轮轴;偏心修正;测量与修正;实用谐波分析

中图分类号:U464.134

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.08.009

Research on Measuring and Correcting Method for Camshaft Eccentricity

Kong Ming¹ Ding Lihua^{1,2} Zhao Jun¹ Zhou Guangcai²

1. China Jiliang University, Hangzhou, 310018

2. Harbin Jingda Measuring Instrument Co., Ltd., Harbin, 150000

Abstract: A practical harmonic analysis technology and its application in the correction of main journal eccentricity of camshaft ends was proposed, a calculation model of camshaft eccentric distance and eccentric angle was established based on the main journal eccentricity of camshaft ends and the algorithm was analyzed, which would reduce system errors caused by the disunity between measurement datum and design datum of camshaft, and the deflection of the camshaft itself and avoid interpolation errors of traditional eccentricity correction algorithm. Experimental platform for measuring camshaft was built, measured data was corrected according to the proposed eccentricity correction algorithm. Experimental results demonstrate the proposed algorithm can correct eccentricity of main journal eccentricity of camshaft ends and camshaft itself effectively, the accuracy of instrument is improved.

Key words: camshaft; eccentricity correction; measurement and correction; practical harmonic analysis

0 引言

在凸轮测量过程中,由于凸轮轴安装测量的旋转中心与凸轮实际工作时的旋转中心不在同一轴线上,因此,测量结果包含了测量基准与设计基准不统一引起的误差成分^[1-3]。同时,加工误差或自然因素等引起的凸轮轴自身的弯曲也会带来偏心误差。因此要对凸轮的偏心进行修正,以反映

凸轮本身的真实误差情况^[4-5]。

目前,主要的凸轮偏心修正算法有插值法、差分法、平均值法、曲线拟合法等^[6-8]。各种算法都有缺点:插值法计算会引入其他误差,削弱偏心修正的效果;平均值法和差分法不能对非对称凸轮进行修正;曲线拟合法精度较低,不能用于高精凸轮轴测量。因此本文根据实际的等周期测量数据,利用实用谐波分析技术,按照谐波分解式求系数的方法求出凸轮轴两端主轴颈的偏心量,进而

收稿日期:2011-10-17

2005:3374-3379.

[4] Gomand J, Bearee R, Kestelyn X, et al. Physical Dynamic Modeling and Systematic Control Structure Design of a Double Linear Drive Moving Gantry Stage Industrial Robot[C]//2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2007:1-9.

[5] Lorenz R D, Schmidt P B. Synchronized Motion Control for Process Automation[C]//Industry Application Annual Meeting, San Diego, United States, 1989:1693-1698.

[6] 黄艳,李家霖,于东,等. CNC系统S形曲线加减速

算法的设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2005(3): 55-58.

[7] Ziegler J G, Nichols N B. Optimum Settings for Automatic Controllers[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1993, 115(213): 759-768. (编辑 张洋)

作者简介:程 瑶,女,1988年生。西安交通大学机械工程学院硕士研究生。主要研究方向为双驱动同步控制技术。赵万华,男,1965年生。西安交通大学机械工程学院教授、博士研究生导师。李五霞,女,1987年生。西安交通大学机械工程学院硕士研究生。杨清宇,男,1974年生。西安交通大学电子与信息工程学院副教授。

求解出任意凸轮的偏心距和偏心角,对长度和角度进行修正,有效减小了偏心计算的求解误差,提高了测量效率和偏心修正的精度。

1 实用谐波分析技术

实用谐波分析技术起源于谐波分析法。谐波分析法可以将任意周期性连续函数 $f(x)$ 展开为傅里叶级数:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx \quad (1)$$

式中, a_0, a_n, b_n 为展开的傅里叶级数的各项系数。

将傅里叶级数各谐波量分解开来,求出各次谐波分量的幅值和相角^[8]。

$f(x)$ 可以用有限个谐波分量近似:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^K a_n \cos nx + \sum_{n=1}^K b_n \sin nx \quad (2)$$

当 $f(x)$ 的周期为 2π 时,傅里叶级数的各项系数 a_0, a_n, b_n 分别为

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则 n 次谐波的幅值 c_n 和相角 φ_n 分别为^[9-10]

$$\left. \begin{aligned} c_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \varphi_n &= \arctan(a_n/b_n) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

一次谐波反映零件的直径和偏心量,即一次谐波的幅值和相角分别为被测工件相对于旋转主轴的偏心距和偏心角^[11-13]。然而在实际测量中,函数 $f(x)$ 的具体表达式对于凸轮这样的高次曲线往往无法写出。这样,傅里叶级数展开式的系数 a_0, a_n, b_n 无法根据式(3)的积分式表达出来^[14-15]。本文根据实用谐波分析技术原理,把凸轮轴测量的周期信号直接表示为傅里叶级数,获得傅里叶级数展开式的系数 a_0, a_n, b_n 。通过实用谐波分析技术,得到傅里叶级数展开式的系数

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{k} \sum_{i=0}^{k-1} f(x_i) \\ a_n &= \frac{2}{k} \sum_{i=0}^{k-1} f(x_i) \cos \frac{2\pi ni}{k} \\ b_n &= \frac{2}{k} \sum_{i=0}^{k-1} f(x_i) \sin \frac{2\pi ni}{k} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, k 为一个周期的等分数(偶数),常取 12、24、48 等; $f(x_i)$ 为第 i 个等分点上 $f(x)$ 的测量值。

实用谐波分析技术得到的 n 次谐波的幅值和相角计算式同谐波分析法的计算式(式(4))。

2 凸轮轴两端主轴颈的修正

凸轮轴两端主轴颈是圆柱,因此凸轮轴颈上

点的径向位置为一周期函数。根据谐波分析法的原理,应用傅里叶级数分解凸轮轴两端主轴颈的实际径向测量值和转角的周期性关系的数据组,即可得到凸轮轴两端主轴颈的偏心距和偏心角。

为了便于计算,将每周期的轴颈测量数据等分为偶数段,在这些等分点上测得的凸轮径向值分别为 $y_0 = f(x_0), y_1 = f(x_1), \dots, y_i = f(x_i)$,由式(5)可得一次谐波的正弦分量和余弦分量的表达式:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{k} \sum_{i=0}^{k-1} y_i \\ a_1 &= \frac{2}{k} \sum_{i=0}^{k-1} y_i \cos \frac{2\pi ni}{k} \\ b_1 &= \frac{2}{k} \sum_{i=0}^{k-1} y_i \sin \frac{2\pi ni}{k} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

按照式(4)和式(6)计算出一次谐波的幅值 c_1 和初相角 φ_1 ,即凸轮轴两端主轴颈安装偏心的偏心距和偏心角。

3 任意凸轮的偏心修正

凸轮升程的设计基准不同,其偏心值修正的方法也各不相同。当凸轮升程的设计基准为凸轮基圆时,可以利用凸轮轴两端主轴颈的测量数据进行偏心修正。当凸轮升程的设计基准为凸轮相邻轴颈或两端主轴颈时,可以利用实用谐波分析技术,分别计算出作为基准的 2 个轴颈的圆心坐标,再计算出两轴颈圆心的连线与第 m 个凸轮中心截面的交点坐标,并将其作为修正数据对凸轮偏心进行修正,如图 1 所示。

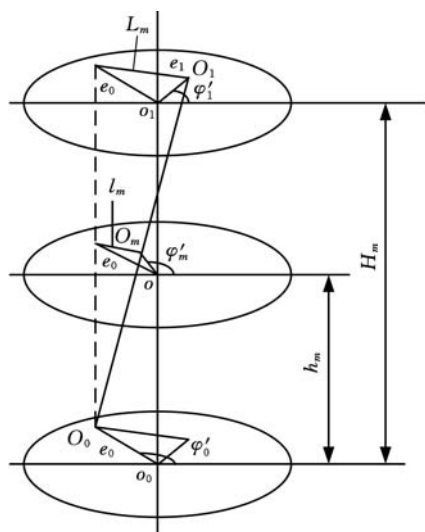


图 1 凸轮偏心的修正模型

图 1 中, e_0, e_1 分别为凸轮轴两端主轴颈的偏心距, φ'_0, φ'_1 分别为凸轮轴两端主轴颈的偏心角,偏心距和偏心角所在的两端主轴颈截面是平行的。将 e_0 投影到 e_1 所在的截面上,由三角形的余

弦定理可知：

$$L_m = \sqrt{e_0^2 + e_1^2 - 2e_0e_1\cos(\varphi'_0 - \varphi'_1)}$$

设 e_1 对应的夹角为 α_1 ，由三角形正弦定理可知：

$$\sin\alpha_1 = e_1\sin(\varphi'_0 - \varphi'_1)/L_m$$

在凸轮测量仪的基准坐标系中，凸轮轴两端的主轴径和任意凸轮相对于测量基准的高度已知， H_m 为两基准圆的距离， h_m 为需要修正的凸轮面到底端基准圆的距离，则根据三角形相似可知：

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_m}{H_m} &= \frac{O_0O_m}{O_0O_1} \\ \frac{O_0O_m}{O_0O_1} &= \frac{l_m}{L_m} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{l_m}{L_m} = \frac{h_m}{H_m} \Rightarrow l_m = \frac{h_m L_m}{H_m}$$

则由三角形余弦定理可求得凸轮的偏心距：

$$e_m = \sqrt{l_m^2 + e_0^2 - 2l_me_0\cos(\arcsin\alpha_1)} \quad (7)$$

由三角形的正弦定理可知， l_m 对应的角度 $\varphi'_m = \arcsin(l_m \sin\alpha_0 / e_m)$ 。因此，在第一象限，凸轮轴的偏心角为

$$\varphi_m = \varphi'_m + \varphi'_1 \quad (8)$$

对凸轮进行测量，利用式(7)、式(8)，计算出凸轮偏心距和偏心角，则第 m 个凸轮的各测量点补偿后的长度值为

$$y'_i = y_i - e_m \cos(\varphi_m + \theta_i)$$

其中， θ_i 为测量点 Y_i 对应的角度。对各测量点数据进行长度和角度修正后，就实现了凸轮轴的测量基准与凸轮的设计基准的统一^[15]，从而减小因凸轮基准不统一和凸轮轴自身弯曲带来的系统误差。

4 实验结果

4.1 主轴颈的偏心修正结果

利用设备对凸轮轴的主轴颈进行测量，并利用偏心修正的理论进行修正，实验结果如表 1 所示。由表 1 中的测量结果可知，实测圆与偏心圆之间的最大误差以及理论圆与修正圆之间的最大误差不大于 $2.6892\mu\text{m}$ ，符合实测圆与偏心圆重合、理论圆与修正圆重合的理论，表明了实用谐波分析技术在修正凸轮轴两端主轴颈偏心中的应用是合理的。

表 1 主轴颈偏心的测量与补偿结果 μm

	凸轮 1	凸轮 2	凸轮 3	凸轮 4
实测圆与偏心圆的最大误差	2.5984	2.6012	2.6214	2.6523
理论圆与修正圆的最大误差	2.6213	2.5632	2.6345	2.6892

4.2 凸轮偏心的修正结果

利用凸轮偏心的修正理论，在主轴颈修正的偏心量的基础上，取得各凸轮的偏心量。对凸轮轴的 4 个凸轮进行测量，测量偏差与补偿后的偏

差如表 2 所示，未修正的升程误差为实测圆与理论圆之间的误差，修正后的升程误差为修正圆与理论圆之间的误差。由表 2 可知，修正前后的最大升程误差均值的差值为 $15.47\mu\text{m}$ ，说明该方法对凸轮的偏心量修正效果明显，可以有效减小凸轮轴的安装偏心 and 自身弯曲带来的系统误差。

表 2 凸轮偏心的测量与补偿结果 μm

	凸轮 1	凸轮 2	凸轮 3	凸轮 4
未修正的最大升程误差	20.2	19.8	20.5	19.9
修正后的最大升程误差	4.6412	4.5727	4.6456	4.6625
未修正的最小升程误差	-7.8	-7.2	-7.4	-7.1
修正后的最小升程误差	2.4049	2.1450	-2.0266	2.0271

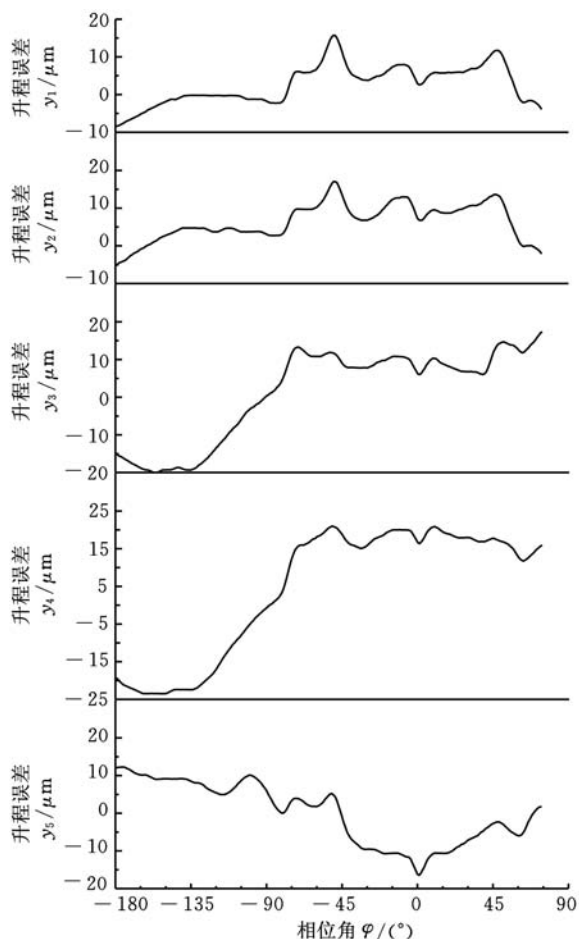
4.3 整机测量结果

凸轮轴上各凸轮的升程和相位角是评价凸轮轴质量和性能的关键参数，因此在凸轮轴的主要检测项目中，最关键的是检测各凸轮的升程误差和相位角误差。因凸轮升程的真值无法得到，因此常用仪器的重复测量精度代替仪器的测量精度，本实验中用摆谱仪选择一弯曲度较大的凸轮轴，在同一截面上重复测量同一凸轮 5 次，偏心修正前后的凸轮升程误差曲线如图 2 所示。由图 2 可知，偏心修正有效减小了仪器的测量误差。

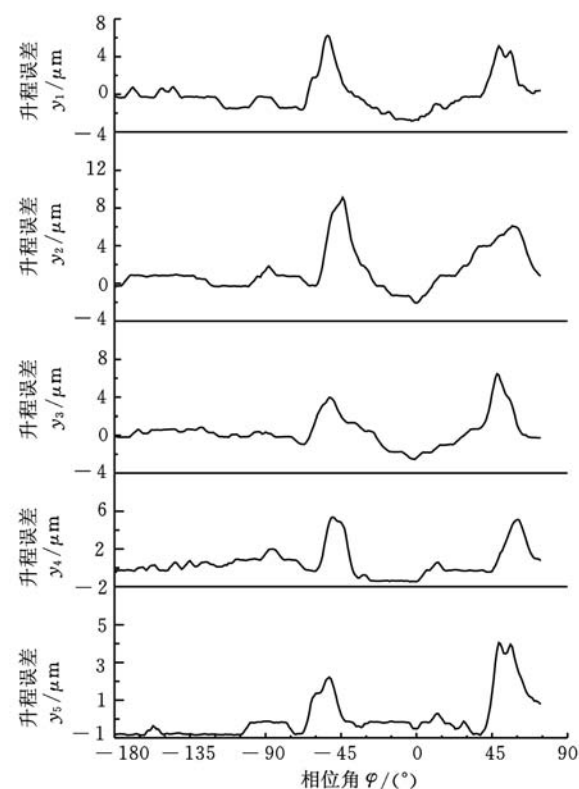
偏心修正后，5 次测量的升程误差值与 5 次测量的升程误差均值的最大正误差为 $3.0\mu\text{m}$ ，最大负差值为 $-2.8\mu\text{m}$ ；5 次测量的相位角误差与 5 次测量的相位角误差均值的最大正误差为 $0.0194'$ ，最大负差值为 $-0.0256'$ 。由此确定，偏心修正有效减小了凸轮的测量误差，仪器的重复测量精度为 $2.8\mu\text{m}$ 。因凸轮升程的真值无法得到，因此常用重复测量精度代替仪器的测量精度，测量结果表明，偏心修正提高了仪器的测量精度。

5 结语

将实用谐波分析技术应用于凸轮轴两端主轴颈偏心修正，利用谐波分析法实现周期函数误差各谐波量的分解，并求出各次谐波分量的幅值和相位角，通过一次谐波的幅值和相位角分别求出被测工件相对于旋转主轴的偏心距和偏心角，获得凸轮轴两端主轴颈的偏心值，从而建立基于凸轮轴两端主轴颈偏心值的各凸轮偏心值的模型和算法。实验证明，实用谐波分析技术能很好地解决凸轮轴偏心量修正问题，有效减小了测量基准和设计基准不统一以及凸轮自身弯曲带来的系统误差对凸轮升程误差的影响，该算法在偏心轴修正中有一定的应用价值。



(a)修正前



(b)修正后

图2 偏心修正的测量误差验证

参考文献:

- [1] 朱正德.非整圆回转零件测量过程中修正偏心影响的研究[J].装备制造技术,2004(3):3-7.
- [2] 高鹏,杨军良,尚付鹏.凸轮轴测量中统一基准的方法[J].计量技术,2009(7):12-14.
- [3] 刘兴富,李红卫.精密凸轮测量的偏心修正方法[J].计量技术,2002(10):30-32.
- [4] 朱正德.关于凸轮轴测量过程中修正偏心影响的研究[J].组合机床与自动化加工技术,2002(3):20-22.
- [5] 明友成.全自动凸轮轴测量仪的开发[D].北京:清华大学,2005.
- [6] 陈为民,陈卫,陈雍乐.相关算法在凸轮误差测量中的应用[J].仪器仪表学报,2003,24(3):315-317.
- [7] Xu Lianhu, Yuan Yibao, Wang Yuhua. Development of Camshaft Journals Multi-parameters Measuring Instrument[C]//First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Application. Harbin, 2010:1285-1389.
- [8] Wigley N M, Jullien G A. On Implementing the Arithmetic Fourier Transform[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1992, 40(9):2233-2242.
- [9] 张宪超,李宁,陈国良.离散余弦变换的改进的算术傅立叶变换算法[J].电子学报,2000,28(9):329-331.
- [10] 戴先中,唐统一.周期信号谐波分析的一种新方法[J].仪器仪表学报,1989,10(3):248-255.
- [11] 孙运强,宋文爱,任树海.轴类零件直径、偏心、圆度等自动测量中的角度空间谐波分析[J].测试技术学报,1996,10(2):592-597.
- [12] 张明,袁道成.一种气浮主轴径向回转误差的测量方法[J].制造技术与机床,2008(1):115-117.
- [13] 蒲竞秋,罗正国.谐波分析技术在回转体测量中的应用[J].仪器仪表学报,2004,25(4):117-119.
- [14] 陈雍升,姜国清,廖海洋.实用谐波分析技术在多测头凸轮轴检测系统中的应用[J].机械工人冷加工,1995(3):4-5.
- [15] Zhang Manchao, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Offset Algorithm for Non-circular Contour with Point Cloud Data[C]//2010 International Conference on Computer Application and System Modeling. Shanghai, 2010:150-153.

(编辑 张洋)

作者简介:孔明,男,1978年生。中国计量学院计量测试工程学院副教授。主要研究方向为精密仪器、光电检测。发表论文23篇。丁力华,女,1986年生。中国计量学院计量测试工程学院硕士研究生,哈尔滨精达测量仪器有限公司研发中心工程师。赵军,男,1960年生。中国计量学院计量测试工程学院教授级高级工程师。周广才,男,1961年生。哈尔滨精达测量仪器有限公司研发中心高级工程师。