

文章编号:1671-6833(2011)04-0116-04

一种平行片簧结构扫描测头的研制

费致根^{1,3}, 刘 宇², 郭俊杰³

(1. 郑州轻工业学院 机电学院, 河南 郑州 450002; 2. 中航光电科技股份有限公司制造技术部, 河南 洛阳 471003;
3. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对凸轮轴及曲轴测量的实际需要, 设计了一种一维扫描测头, 建立了测头的力学理论模型, 并重点研究其核心部件平行片簧机构的受力变形理论, 推导完善了平行片簧机构的变形公式. 定量分析了影响测头测量精度的因素, 找出误差产生的根源. 以凸轮轴测量仪为实验平台完成了测头的性能实验, 采用 VDI-3441 评价标准得到测头的重复定位误差为 $1.72\ \mu\text{m}$.

关键词: 平行片簧结构; 扫描测头; 误差分离; 坐标测量机

中图分类号: TG806

文献标志码: A

0 引言

测头作为坐标测量机的关键部件之一, 其性能直接影响着坐标测量机的测量精度、工作效率和柔性程度. 精密测头一般分为接触式测头和非接触式测头, 其中接触式测头又分为机械式测头、触发式测头和扫描测头, 非接触式测头主要包括激光测头和光学视频测头^[1]. 在接触式测头中, 扫描测头由于其自身的精度高、重复性好、无预行程误差等诸多优点, 得到了广泛应用. 英国 Renishaw 公司、德国 Zeiss 公司和 Leitz 公司以及瑞士的 Sip 公司在扫描电感测头方面的研究一直处于领先地位^[2]. 国内从事扫描测头研究的单位很少, 天津大学精密仪器系研制过三维扫描测头并对测量误差进行了标定和分析^[3], 西安工业大学的王建华等研制过用于齿轮测量的二维半扫描测头^[4], 华中科技大学研制过用于测量和仿形加工的三维测头^[5-7].

笔者根据凸轮轴及曲轴测量的实际需要, 设计了一种附带夹板的平行片簧结构一维扫描测头, 建立了其力学理论模型, 作为对以往该模型的改进, 所建力学模型考虑了夹板重量、动板重量的影响, 并使测端位于动板前端, 这样的结构大大减小了阿贝臂, 遵从了阿贝原则. 推导完善了平行片簧机构受力变形的理论公式, 并将其化为矩阵形

式方便利用软件工具来求解运算, 也为该类型扫描测头的设计选型提供了理论参考依据. 凸轮轴测量仪上的实验结果评定了该测头的性能, 最后定量分析影响测头精度的误差因素.

1 扫描测头工作原理

图 1 为该扫描测头实物图以及机械结构示意图. 平行片簧机构的固定端 1 固定在机座上, 由双片簧 2 组成的一维弹性导轨, 用于分辨微小位移并同时产生测量力, 平行片簧机构的平动板 3 固定在双片簧 2 的下方, 平动板 3 在受到外力作用时可以产生微小直线平动, 测端 4 固定在平动板 3 的前部, 在测量过程中测端 4 与被测件接触, 光栅尺 5 贴在平动板 3 上, 光栅读数头 6 安装在固定端 1 上, 可精确读出平动板 3 的位移量.

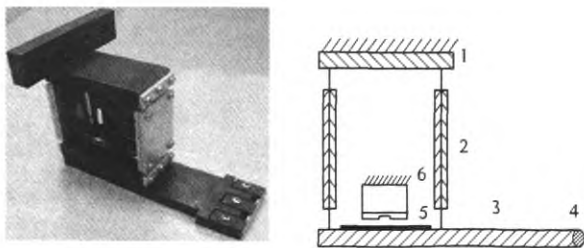


图 1 扫描测头实物图及示意图

Fig. 1 The scanning probe and its schematic diagram

收稿日期: 2011-01-27; 修订日期: 2011-05-01

基金项目: 国家“863”资助项目(2008AA042404).

作者简介: 费致根(1978-), 男, 河南原阳人, 西安交通大学博士研究生, 主要研究方向精密仪器测量与图像处理. E-mail: fzg2006@stu.xjtu.edu.cn.

2 带夹板平行片簧机构变形理论

在平行片簧两侧安装夹板,可以增加平行片簧机构的刚度及稳定性.

附带夹板的平行片簧模型如图2所示,自由端B除水平作用力P外还受到铅垂力 Q_1 ,为使该点转角为零,还附加一力偶M,另外考虑夹板的重力 Q_2 .

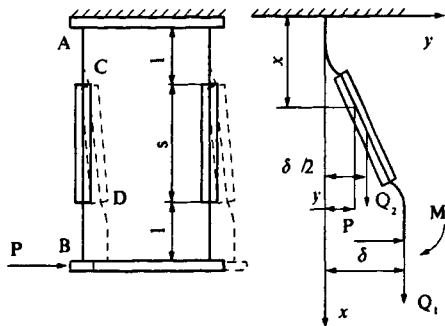


图2 带夹板平行片簧结构示意图

Fig. 2 The structural schematic diagram with splints

距固定端A距离为 x 处截面上的弯矩为:

$$M(x) = P(2l + s - x) - M -$$

$$Q_1(\delta - y) - Q_2\left(\frac{\delta}{2} - y\right) \quad (1)$$

根据材料力学,由挠曲线的近似微分方程:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2)$$

得片簧的挠曲线方程为:

$$y = Ce^{\alpha x} + Ce^{-\alpha x} + \frac{P(x - 2l - s) + M}{Q_1 + Q_2} + \delta\left(\frac{Q_1 + \frac{Q_2}{2}}{Q_1 + Q_2}\right) \quad (3)$$

则AC,CD,DB三段的挠曲柱面微分方程分别表示如下:

AC段

$$y_1 = C_1 e^{\alpha_1 x} + C_2 e^{-\alpha_1 x} + \frac{P(x - 2l - s) + M}{Q_1 + Q_2} + \delta\left(\frac{Q_1 + \frac{Q_2}{2}}{Q_1 + Q_2}\right) \quad (4)$$

CD段

$$y_2 = C_3 e^{\alpha_2 x} + C_4 e^{-\alpha_2 x} + \frac{P(x - 2l - s) + M}{Q_1 + Q_2} + \delta\left(\frac{Q_1 + \frac{Q_2}{2}}{Q_1 + Q_2}\right) \quad (5)$$

DB段

$$y_3 = C_5 e^{\alpha_1 x} + C_6 e^{-\alpha_1 x} +$$

$$\frac{P(x - 2l - s) + M}{Q_1 + Q_2} + \delta\left(\frac{Q_1 + \frac{Q_2}{2}}{Q_1 + Q_2}\right) \quad (6)$$

对上述方程分别求一次导得到其对应的转角方程:

AC段

$$\theta_1 = \alpha_1 C_1 e^{\alpha_1 x} - \alpha_1 C_2 e^{-\alpha_1 x} + \frac{P}{Q_1 + Q_2} \quad (7)$$

CD段

$$\theta_2 = \alpha_2 C_3 e^{\alpha_2 x} - \alpha_2 C_4 e^{-\alpha_2 x} + \frac{P}{Q_1 + Q_2} \quad (8)$$

DB段

$$\theta_3 = \alpha_1 C_5 e^{\alpha_1 x} - \alpha_1 C_6 e^{-\alpha_1 x} + \frac{P}{Q_1 + Q_2} \quad (9)$$

以 $x=0$ 处的边界条件 $y_1(0)=0, \theta_1(0)=0$ 分别代入(4)和(7),以 $x=l$ 处的连续条件 $y_1(l)=y_2(l), \theta_1(l)=\theta_2(l)$ 分别代入(4)、(5)、(7)、(8),以 $x=l+s$ 处的连续条件 $y_2(l+s)=y_3(l+s), \theta_2(l+s)=\theta_3(l+s)$ 分别代入(5)、(6)、(8)、(9),以及利用 $x=2l+s$ 处的连续条件 $y_3(2l+s)=\delta, \theta_3(2l+s)=0$ 分别代入(6)和(9),这样就得到8个方程,整理得:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 + \frac{M}{Q_1 + Q_2} + \left(\frac{Q_1 + \frac{Q_2}{2}}{Q_1 + Q_2}\right)\delta = \frac{P}{Q_1 + Q_2}(2l + s) \\ C_1 - C_2 = -\frac{P}{(Q_1 + Q_2)\alpha_1} \\ C_1 e^{\alpha_1 l} + C_2 e^{-\alpha_1 l} - C_3 e^{\alpha_2 l} - C_4 e^{-\alpha_2 l} = 0 \\ \alpha_1 C_1 e^{\alpha_1 l} - \alpha_1 C_2 e^{-\alpha_1 l} - \alpha_2 C_3 e^{\alpha_2 l} + \alpha_2 C_4 e^{-\alpha_2 l} = 0 \\ C_3 e^{\alpha_2(l+s)} + C_4 e^{-\alpha_2(l+s)} - C_5 e^{\alpha_1(l+s)} - C_6 e^{-\alpha_1(l+s)} = 0 \\ \alpha_2 C_3 e^{\alpha_2(l+s)} - \alpha_2 C_4 e^{-\alpha_2(l+s)} - \alpha_1 C_5 e^{\alpha_1(l+s)} + \alpha_1 C_6 e^{-\alpha_1(l+s)} = 0 \\ C_5 e^{\alpha_1(2l+s)} + C_6 e^{-\alpha_1(2l+s)} + \frac{M}{Q_1 + Q_2} - \frac{1}{2}\left(\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}\right)\delta = 0 \\ C_5 e^{\alpha_1(2l+s)} - C_6 e^{-\alpha_1(2l+s)} = -\frac{P}{(Q_1 + Q_2)\alpha_1} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)写成矩阵形式为:

则式(11)形如 $AB=C$,方便利用软件工具求解,有形式: $B=A^{-1}C$.

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Q_1+Q_2} & \frac{Q_1+\frac{Q_2}{2}}{Q_1+Q_2} \\
 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 e^{\alpha_1 l} & e^{-\alpha_1 l} & -e^{\alpha_2 l} & -e^{-\alpha_2 l} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \alpha_1 e^{\alpha_1 l} & -\alpha_1 e^{-\alpha_1 l} & -\alpha_2 e^{\alpha_2 l} & \alpha_2 e^{-\alpha_2 l} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & e^{\alpha_2(l+s)} & e^{-\alpha_2(l+s)} & -e^{\alpha_1(l+s)} & -e^{-\alpha_1(l+s)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \alpha_2 e^{\alpha_2(l+s)} & -\alpha_2 e^{-\alpha_2(l+s)} & -\alpha_1 e^{\alpha_1(l+s)} & \alpha_1 e^{-\alpha_1(l+s)} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\alpha_1(2l+s)} & e^{-\alpha_1(2l+s)} & \frac{1}{Q_1+Q_2} & \frac{1}{2}(\frac{Q_2}{Q_1+Q_2}) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\alpha_1(2l+s)} & -e^{-\alpha_1(2l+s)} & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 C_1 \\
 C_2 \\
 C_3 \\
 C_4 \\
 C_5 \\
 C_6 \\
 M \\
 \delta
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \frac{P}{Q_1+Q_2}(2l+s) \\
 -\frac{P}{(Q_1+Q_2)a_1} \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 -\frac{P}{(Q_1+Q_2)a_1}
 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 测头误差分析

测头的加工、装配误差是影响其精度的主要因素。当双片簧不平行时,造成 ΔS 的误差,双片簧之间产生 θ 夹角,见图 3。在测量过程中,整个系统可能产生绕双片簧延长线交点 O 的转动,造成较大的阿贝误差。

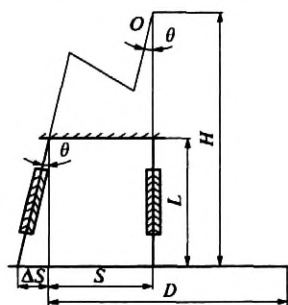


图 3 双片簧不平行示意图

Fig. 3 The case with non-parallel springs

$$\tan \theta = \frac{\Delta S}{L} \quad (12)$$

由于 ΔS 一般相对于 L 很小,因此有 $\tan \theta \approx \theta$, 则 $\theta \approx \frac{\Delta S}{L}$,

$$\text{可得: } H = \frac{S}{\tan \theta} = \frac{S}{\theta} \quad (13)$$

因为该测头测量范围为 2 mm,则平动板产生的最大转角为:

$$\alpha = \frac{2}{H} = \frac{2\Delta S}{LS}(\text{rad}) \quad (14)$$

则由平动板旋转所产生的阿贝误差为:

$$\Delta_1 = D(1 - \cos \alpha) \approx D \frac{\alpha^2}{2} \quad (15)$$

当双片簧 L_1 和 L_2 不相等时,设 $\Delta L = L_2 - L_1$ 。在测量过程中,整个系统可能产生平动并附加转动,同时产生阿贝误差。

$$\tan \beta = \frac{\Delta L}{S} \quad (16)$$

由于 ΔL 一般相对于 L 很小,因此有 $\tan \beta \approx \beta$,

$$\beta \approx \frac{\Delta L}{S}$$

如图 4 所示,产生的阿贝误差为:

$$\Delta_2 = D(1 - \cos \beta) \approx D \frac{\beta^2}{2} \quad (17)$$

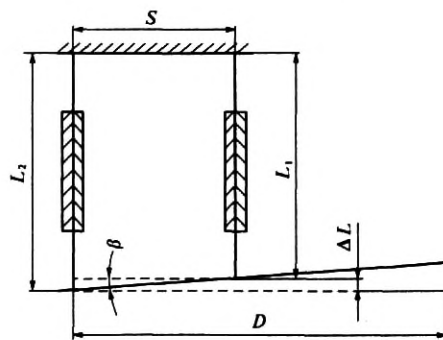


图 4 双片簧不等长示意图

Fig. 4 The case with non-equal length springs

4 实验部分

以凸轮轴测量仪为实验平台,见图 5。在利用激光干涉仪对测头光栅完成标定之后,按照德国 VDI-3441 机床重复精度评价标准,正反行程各测量 5 次,分度步长设为 10 度,实验结果见图 6。计算结果表明该测头重复定位误差为 $1.72 \mu\text{m}$ 。

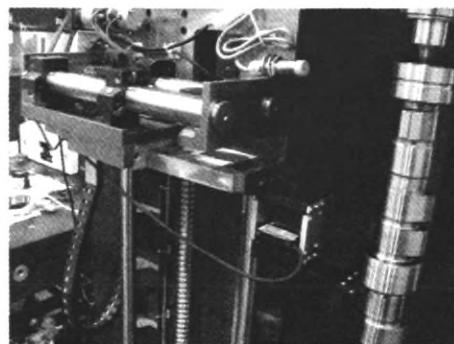


图 5 实验平台

Fig. 5 The experiment platform

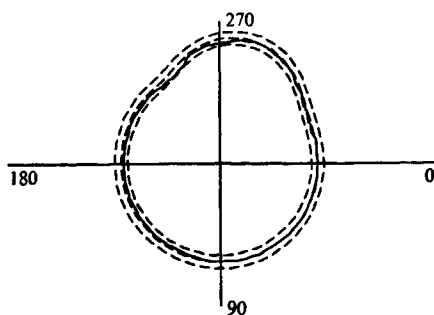


图6 测量结果

Fig. 6 The measuring result

5 结论

(1) 完成了该一维扫描测头的设计、加工与装配。

(2) 在测头设计过程中,采用了优化设计的思想,把测端直接安装在测头的动板前端,等于减小了阿贝臂,遵循了阿贝测量原则。

(3) 在前人研究的基础上,考虑了夹板重量、动板重量,推导并完善了平行片簧结构的力学模型公式,并将之化为矩阵形式,便于利用软件工具求解。

(4) 定量分析了影响测头精度的因素,给出了该测头的重复定位误差精度。

参考文献:

- [1] 石照耀,韦志会.精密测头的演变与发展趋势[J].工具技术,2007,(41):3-8.
- [2] 安卫.国外三坐标测量机技术发展动态[J].航空精密制造技术,1996,32(4):37-40.
- [3] 王宝光,毛云英,张国雄,等.高精度三维测头结构设计研究[J].天津大学学报:自然科学版,1993,(1):76-83.
- [4] 杨海军,李平,王建华.平行簧片导轨的性能研究[J].西安工业学院学报,2004,24(1):15-18.
- [5] 朱定见.三维整体切割式测量头系统的研究[D].武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2005.
- [6] 赵清望.平行四边形片簧机构刚度设计[J].上海机械学院学报,1982,(2):41-61.
- [7] Jones R. V, CB, CBE, et al. Parallel and rectilinear spring movement [J]. Journal of Scientific Instruments. 1951,(28):38-41.

Research on a Type of Parallel Spring Mechanism Scanning Probe

FEI Zhi-gen^{1,3}, LIU Yu², GUO Jun-jie³

(1. Mechanical and Electrical Engineering Department, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. Manufacturing Department of China Aviation Optical-Electrical Technology Co., Ltd, Luoyang 471003, China; 3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on practical measuring requirement of camshaft and crankshaft, a specific one-dimensional scanning probe is designed and its mechanics theory model is established. As a research emphasis, the force deformation theory of parallel spring mechanism is investigated, and its deformation formula is derived and improved. The factors which have a quantitative effect on probe accuracy are discussed and the error sources are located. Finally, the VDI-3441 criterion is applied to evaluate the repetitive position error of probe. The testing result shows that its repetitive position error is within 1.72 μm .

Key words: parallel spring mechanism; scanning probe; errors separation; CMM