

测量深孔直线度的一种新方法*

徐航¹, 焦冰², 杨光瑜³(1. 装甲兵工程学院, 北京 100072; 2. 总装通用装备保障部, 北京 100071;
3. 国防科技大学机电工程研究所, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对深孔直线度测量的实际问题, 提出了一种新方法, 建立了相应的物理和数学模型, 并对测量模型的函数系统误差进行了计算分析。经三坐标仪实验验证, 实际应用效果较好。

关键词: 深孔; 直线度; 测量; 建模

中图分类号: TG83 **文献标识码:** B

A New Method of Measuring Linearity of Deep Hole

XU Hang¹, JIAO Bing², YANG Guang-yu³

(1. Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China; 2. Department of Securing Universal Arming of the General Equipment, Beijing 100071, China; 3. Institute of Mechanical Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new method of measuring linearity of deep hole is put forward. Accordingly, the physical and mathematical model is established. Then the system error of measuring model function is analyzed. It is proved effective in practical application with the experiment of three-coordinated instrument.

Key words: deep hole; linearity; measuring; modeling

深孔直线度测量对于工业生产及产品的合理使用有着极其重要的意义。目前对孔深 $L > 5m$ 、孔径 $50 \sim 300mm$ 的深孔, 常用的直线度测量方法有准直望远镜法、激光准直法、悬臂法等, 但这些方法不同程度地受到准直仪等器件性能的限制^[1,2]。

1 测量模型

1.1 物理模型

在工业生产和产品使用过程中, 经常遇到深孔直线度测量问题, 如图 1 所示, 由于生产加工精度和产品使用变形等因素会使工件发生弯曲而产生直线度误差 ρ 。为了控制加工精度或掌握产品使用中的技术状况, 通常要测量弯曲量 ρ 和弯曲方向 θ , 其中 θ 可用 ρ 的两分量的比值来表征。

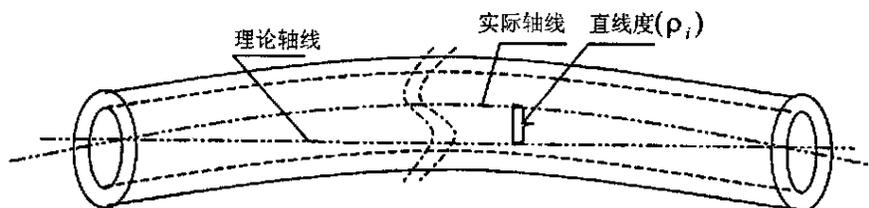


图 1 典型的深孔直线度测量问题

Fig. 1 Typical problem of measuring deep hole linearity

* 收稿日期: 2002-11-25

基金项目: 总装通用装备保障部资助项目(2000SC03)

作者简介: 徐航(1962-), 男, 教授, 在职博士生。

将图 1 所示的测量问题抽象为一般的物理问题, 如图 2 所示。在图中, 测量头安装在测量基线(本体)的中间位置, 通过测量不同深度的 δ_i , 可计算相应的 ρ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n-1, n = [2L/l]$, L 为被测孔深度, l 为测量基线长)。

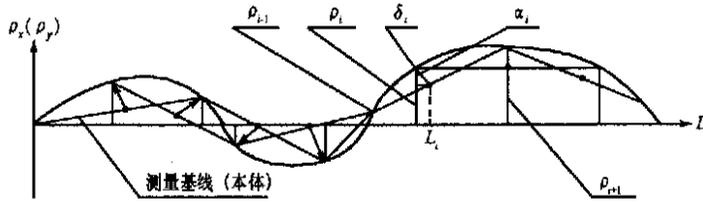


图 2 深孔直线度测量模型

Fig. 2 Model of measuring deep hole linearity

1.2 数学模型

由图 2, 对测量点 i , δ_i 和 ρ_i 满足关系式

$$\rho_i = \frac{1}{2}(\rho_{i-1} + \rho_{i+1}) + \delta_i \cos \alpha_i \xrightarrow{\cos \alpha_i \approx 1} \frac{1}{2}(\rho_{i-1} + \rho_{i+1}) + \delta_i \quad (1)$$

在实际生产和使用过程中, 一般都有 $l \gg (\rho_{i-1} + \rho_{i+1})$, 即 $\cos \alpha_i \approx 1$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n-1$)。

考虑到直线度测量的特点, 不妨令

$$\begin{cases} \rho_0 = 0 \\ \rho_n = 0 \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)和式(2)变换形式, 则有

$$A \cdot \rho = \delta \quad (3)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & 0 & \dots & 0 \\ -1/2 & 1 & -1/2 & \dots & 0 \\ 0 & -1/2 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad \rho = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \vdots \\ \rho_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \vdots \\ \delta_{n-1} \end{bmatrix}$$

由式(3)解方程组可以得出直线度测量的计算模型为

$$\rho = \frac{2}{n} \left[(n-i) \sum_{j=1}^i j \cdot \delta_j + i \cdot \sum_{k=i+1}^{n-1} (n-k) \delta_k \right] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (4)$$

2 函数系统的误差估计

作为一种间接测量方法, 测量误差是各个直接测量值误差的函数^[3,4]。结合式(4), 则测量误差可表示为

$$\Delta \rho = \frac{2}{n} \left[(n-i) \sum_{j=1}^i j \Delta \delta_j + i \sum_{k=i+1}^{n-1} (n-k) \Delta \delta_k \right] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (5)$$

根据本测量方法的特点, 可以做出如下假设: 系统的单次测量误差 $\Delta \delta_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n-1$) 只包含有系统误差 $\Delta \delta_s$ 和随机误差 $\Delta \delta_r$ (粗大误差已经判别剔除), 且 $\Delta \delta \sim N(\delta_0, \sigma_0^2)$ ^[4,5]。则有

$$\begin{cases} E(\Delta \delta_i) = \delta_0 \\ D(\Delta \delta_i) = \sigma_0^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, δ_0 为仪器系统误差, 可由计量部门检定; σ_0 为单次测量标准差, 可通过有限次的检定性测量进行无偏估计。

由于单次测量误差 $\Delta \delta_i$ 包含有测量仪器的系统误差和测量过程中的随机误差与粗大误差, 为随机

变量,因此,函数系统误差也为随机变量,可用函数的标准差进行评定^[3~5]。

由式(5)和式(6)可得 $\Delta\rho_i$ 的数学期望和标准差分别为:

$$\begin{cases} \mu_i = \frac{2}{n} \delta_{s0} \left[(n-i) \sum_{j=1}^i j + i \sum_{k=i+1}^{n-1} (n-k) \right] \\ \sigma_i = \frac{2}{n} \sigma_0 \sqrt{ \left[(n-i)^2 \sum_{j=1}^i j^2 + i^2 \sum_{k=i+1}^{n-1} (n-k)^2 \right] } \end{cases} \quad (7)$$

可以证明,当 $i = n/2$ 时, μ_i 和 σ_i 达到极大值, $\mu_{\max} = \frac{n^2}{4} \delta_{s0}$, $\sigma_{\max} \approx \frac{n\sqrt{n}}{2\sqrt{3}} \sigma_0$ 。

3 实验验证

为了验证测量方法和数学模型的正确性,用 Leitz PMM 181010 三坐标测量机对长度为1 500mm 的工件进行了模拟测量。先以1 500mm 为基准长度,分别直接测量 50, 100, 150, 300, ...1 450mm 处的直线度值 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_{29}$;再以 100mm 为基线长,将1 500mm 分成 30 段($n = 30$),即 0~ 100, 50~ 150, 100~ 200, 150~ 250, 1 400~ 1 500, 分别测量各段中点 50, 100, 150, ..., 1 450mm 处的弯曲量值 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{29}$;按照式(4),取 $n = 30$ 计算 $\rho_i (i = 1, 2, 3, \dots, n - 1)$ 并整理结果,如表 1 所示。结果表明,用本文方法进行测量的精度比较高,效果比较好。

表 1 实验验证结果(单位: mm)

Tab. 1 Results of validation by experiment(unit: mm)

序号	测点位置	ρ_{si}	δ_i	ρ_i	$\rho_i - \rho_{si}$	序号	测点位置	ρ_{si}	δ_i	ρ_i	$\rho_i - \rho_{si}$
01	50	0.0312	0.0067	0.0311	-0.0001	17	850	0.0451	-0.0016	0.0446	-0.0005
03	150	0.0594	0.0050	0.0592	-0.0002	19	950	0.0530	-0.0022	0.0525	-0.0005
05	250	0.0548	-0.0013	0.0545	-0.0003	21	1050	0.0858	0.0022	0.0853	-0.0005
07	350	0.0508	-0.0010	0.0504	-0.0004	23	1150	0.1131	0.0036	0.1128	-0.0003
09	450	0.0551	-0.0004	0.0547	-0.0004	25	1250	0.1151	0.0019	0.1151	0.0000
11	550	0.0628	-0.0001	0.0623	-0.0005	27	1350	0.0915	0.0029	0.0916	0.0001
13	650	0.0674	0.0021	0.0668	-0.0006	29	1450	0.0383	0.0033	0.0383	0.0000
15	750	0.0586	0.0012	0.0581	-0.0005						

4 结论

提出的深孔直线度测量方法和数学模型经实践验证可行,且在应用中具有较高的精度。式(7)表明仪器系统误差对函数系统误差影响较大,并且必须注意保持测量的稳定性。

参考文献:

- [1] 武晋燮. 几何量精密测量技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
- [2] 花国梁. 精密测量技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [3] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [4] 王中宇. 测量不确定度的非统计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [5] Kubisa S, Turzeniecka D. Evaluation of Some Approximated Methods of Measurement Estimation[R]. Proc Third International Symposium on Methods in Automation and Robotics. Tech., Univ Szczecin, Szczecin, Poland, 1996(2): 537~ 542.