

一种工件孔径在线测量装置

吴 军 李 均

(精密机械与仪器系)

摘 要 本文介绍了可用于在线检测工件孔径的测量装置。该测量装置的探测头由三个电感传感器按一定角度配置构成。分析结果和实验结果都表明：传感器安装角度偏差是测量误差的主要起因；在一定条件下，测量精度优于 $\pm 2\mu\text{m}$ 。

本装置可用作加工中心监控系统中的测量设备，除测量孔径外，还可测量刀具与工件孔之间的偏心量，特别适用于批量生产的在线质量检测。

关键词 在线测量，监测，传感器

分类号 TH165.2

符 号 定 义

- | | |
|---|---|
| r : 探测头半径 | $\overline{OO'}$: 探测头中心与工件孔之间的偏心量 |
| O : 探测头中心 | Q_1, Q_2, Q_3 : 三个传感器触头的零点位置 |
| O' : 工件孔中心 | P_1, P_2, P_3 : 三个传感器触头的测量位置 |
| R : 工件孔半径 | a, b, c : 三个传感器触头的位移量 |
| D : 工件孔直径 | $90^\circ + \tau, 90^\circ + \varphi$: 三个传感器触头之间的夹角 (即传感器安装角度) |
| X_e, Y_e : 偏心量 e 在 X 和 Y 方向的分量 | |
| R^*, X_e^*, Y_e^* : R, X_e, Y_e 的泰勒展开近似值 | |
| $\Delta\theta$: τ 与 φ 的角度偏差 (理论上 $\tau = \varphi \triangle \theta = 30^\circ$) | |
| ΔR^* : $\Delta\theta$ 引起的 R 的测量误差 | |
| w : 电感传感器量程。 | |

加工过程的自动监测与控制在柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(IMS)中起着极其重要的作用，它包括对机器状态的监测和对产品质量的控制等，而加工中心的监控系统则是使这一技术向实用化迈进的一个重要步骤。目前，在加工中心上常用的检测设备是英国 Renishaw 公司的接触触发式传感器，这种传感器可安装在加工中心的转塔式刀库（可旋转换刀）中，测量时其触头接触到工件而发出一个开关信号，计算机通过信号接收设备获得这个信号后，读取当前的座标值作为工件的当前位置。除检测工件位

置之外,这种触发传感器还可以用来确定原点,在自动化加工中起着重要作用^[1-4]。然而,这种传感器也有其局限性。因此,在加工中心的监控系统中,还需要有专门的工件孔径自动检测装置,以便在线地将工件质量信息精确地反馈到控制计算机。本文介绍的工件孔径测量装置就是基于这一想法开发出来的^[5],其探测头由三个电感传感器按一定角度配置而成,可以象刀具那样安置在加工中心的转塔式刀库中,需进行测量时,由计算机发出换刀指令和座标位移指令,将探测头伸进工件孔内,而三个电感传感器的触头由于自身弹性力的作用,与工件孔壁保持接触。这样,三个触头相对于各自的零点位置分别产生了位移量 a 、 b 和 c ,通过电感测量放大电路及 A/D 转换器转换成数字量送入计算机进行数据处理,按专门的数学模型计算出工件孔的直径。测量结果可显示、打印或存盘。

探测头半径 r 可调整在 $30\sim 60\text{mm}$ 之间,传感器量程 w (即 a 、 b 或 c 的最大值)为 $\pm 100\mu\text{m}$ (亦可在 $\pm 20\mu\text{m}\sim \pm 300\mu\text{m}$ 之间进行调整)。被测工件孔径范围为 $2r\pm w$ 。为实验方便,本文取 $r=30\text{mm}$,故被测工件孔径范围为 $60\pm 0.100\text{mm}$ 。

1 测量原理

如图 1 所示。设三个传感器触头的零点位置分别为 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 ,测量时三个触头分别接触工件孔壁于 P_1 、 P_2 和 P_3 点,相应的位移量分别为 a 、 b 和 c ,而三个传感器之间的夹角分别为 $90^\circ+\tau$ 、 $90^\circ+\varphi$ 和 $180^\circ-(\tau+\varphi)$ 。定义探测头中心为 O ,半径为 r ;而工件孔圆心为 O' ,半径为 R 。则 $\overline{OO'}$ ($\triangle e$) 为探测头中心与工件孔圆心之间的偏心量。以 $\overline{OQ_1}$ 为 Y 轴, O 为原点作笛卡儿坐标系 xoy ,不难得到

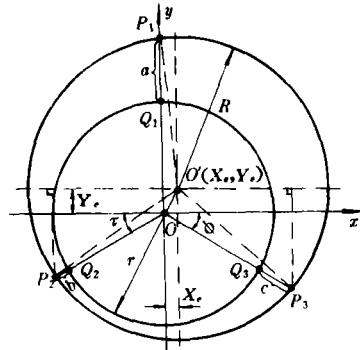


图 1 测量原理

$$[(r+b)\cos\tau + X_e]^2 + [(r+b)\sin\tau + Y_e]^2 = R^2 \quad (1)$$

$$[(r+c)\cos\varphi - X_e]^2 + [(r+c)\sin\varphi + Y_e]^2 = R^2 \quad (2)$$

$$X_e^2 + (r+a-Y_e)^2 = R^2 \quad (3)$$

解此方程组,并令 $\tau=\varphi\triangle\theta$,可得其泰勒级数近似解为

$$X_e^* = \frac{c-b}{2\cos\theta} \quad (4)$$

$$Y_e^* = \frac{2a-b-c}{2(1+\sin\theta)} \quad (5)$$

$$R^* = r + \frac{2a\sin\theta + b + c}{2(1+\sin\theta)} \quad (6)$$

当取 $\theta=30^\circ$ 时,有

$$X_e^* = \frac{c-b}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

$$Y_e^* = \frac{2a-b-c}{3} \quad (8)$$

$$R^* = r + \frac{a+b+c}{3} \quad (9)$$

因为 r 是已知的探测头半径, 而 a 、 b 和 c 是测得之位移量, 故可得工件的孔径为

$$D \approx D^* = 2R^* \quad (10)$$

显然, 偏心量可由下式求得:

$$e = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (11)$$

2 误差分析

实际测量中, 误差的情形是较复杂的。根据我们的研究, 产生误差的原因大致可分为 4 个方面: 1)、泰勒级数近似解的余项误差; 2)、由于 τ 、 φ 不等于 30° 产生的误差; 3)、触头敏感方向不交于一点而产生的误差; 4)、探测头轴心线与工件孔轴心线的垂直截面因不垂直而产生的误差。其中起主要作用的将是第 2) 项误差, 其余三项误差相对而言可忽略不计。这里我们将主要讨论第 2) 项误差 (即夹角偏差 $\Delta\theta$ 引起的测量误差), 并通过理论分析给出一个补偿公式来。

对(6)式微分, 有

$$\frac{dR^*}{d\theta} = \frac{\cos\theta}{1 + \sin\theta} \cdot Y^* \quad (12)$$

故得

$$\Delta R^* = K_\theta \cdot Y^* \quad (13)$$

式中

$$K_\theta = \frac{\cos\theta}{1 + \sin\theta} \cdot \Delta\theta = \frac{\Delta\theta}{\sqrt{3}}, (\theta = 30^\circ)$$

当探测头加工与装配好后, $\Delta\theta$ 即为定值, 因此(13)式表示测量误差将正比于 y 方向的偏心量。例如, 当 $\Delta\theta = 1^\circ$ 时, $K_\theta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\pi}{180} \approx \frac{1}{100}$, 故知 $|\Delta R^*| \leq \frac{1}{100} \cdot |Y^*|$, 即若 Y^* 在 $\pm 100\mu\text{m}$ (传感器量程) 之内, 则有 $|\Delta R^*| \leq 1\mu\text{m}$, 或 $|\Delta D^*| = 2|\Delta R^*| \leq 2\mu\text{m}$ 。

利用(13)式对(6)式进行补偿, 则实际测量结果应取 $R \approx R^* - \Delta R^*$, 即有

$$D \approx D^* - \Delta D^* \quad (14)$$

3 探测头参数的测定方法

由(6)式与(13)式知, 须事先测定的参数主要有: 探测头半径 r 和传感器夹角 τ 和 φ 。我们定义理想情况下探测头的参数如图 2 所示。 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 为触头的零点位置, 而箭头表示触头的敏感方向, 其交点即为探测头中心 O , 故有

$$\tau \triangleq \alpha - 90^\circ, \quad \varphi \triangleq \beta - 90^\circ$$

$$r \triangleq \overline{OQ_1} = \overline{OQ_2} = \overline{OQ_3}$$

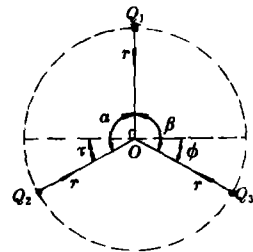


图 2 探测头参数示意图

但是, 由于探测头加工及装配的原因, 实际情况下触头的敏感方向不是交于一点, 而是相切于一个小圆, 如图 3 所示。我们取内切圆圆心为探测头中心 O , P_1 、 P_2 和 P_3 可取为触头在未接触任何物体时的空间自由位置。参数的测定工作在一台光学分度仪上进行, 可测量角度和空间座标值。实际上我们只须测出 P_1 、 P_2 、 P_3 、 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 的座标值, 即可

算知 r 、 α 和 β 。通过调整 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 位置可使

$$\overline{OQ_1} = \overline{OQ_2} = \overline{OQ_3} \triangleq r.$$

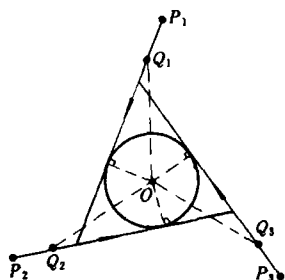


图3 探测头敏感方向示意图

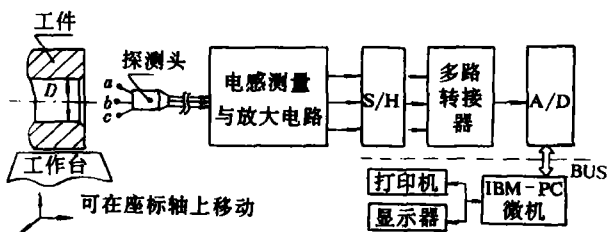


图4 测量装置组成示意图

4 测量装置的组成与实验

测量装置的组成如图4所示。探测头参数实测值为： $\tau \approx 29.16^\circ$ ， $\varphi \approx 31.50^\circ$ ， $r \approx 30.9980\text{mm}$ ，即 $\Delta\tau \approx -0.84^\circ$ ， $\Delta\varphi \approx 1.50^\circ$ ，我们不妨取

$$\Delta\tau = \max \{ |\Delta\tau|, |\Delta\varphi| \} \approx 1.5^\circ$$

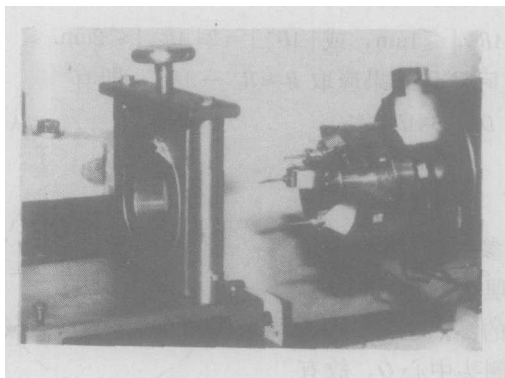


图5 实测试验

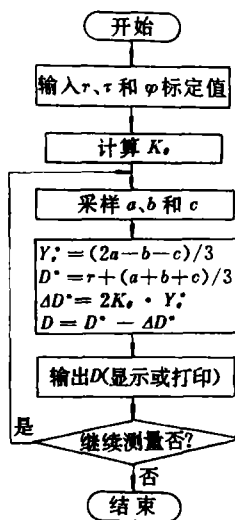


图6 流程图

由(13)式知：

$$\Delta D^* \approx 0.03Y^*$$

实验是在一台 S1-235 超精密车床上进行的 (见图5)，流程图如图6所示。被测工件孔径 $D=61.9975\text{mm}$ 。测量数据列于表1，根据表1得出的 $\Delta D \sim Y^*$ 曲线如图7所示。当 Y^* 不

表1 测量结果

No	c(μm)	b(μm)	a(μm)	Y_s^* (mm)	D(mm)	$\Delta D(\mu\text{m})$
1	2.1	0.88	-1.37	-1.9	61.9972	-0.1
2	40.75	38.65	-84.8	-83	61.9949	-2.4
3	-31.21	-34.4	76.81	74.1	61.993	2
4	0.59	-0.39	2.05	1.3	61.9975	0.2
5	46.46	44.41	-96.87	-94.9	61.9948	-2.5
6	21.67	20.3	-44.16	-43.4	61.9958	-1.5
7	-5.42	-6.15	14.84	13.8	61.9978	0.5
8	-21.91	-22.35	50.36	48.3	61.9987	1.4
9	-31.09	-31.18	69.93	67.4	61.9991	1.8
10	-38.89	-38.75	86.47	83.5	61.9994	2.1
11	-10.83	-11.42	26.64	25.2	61.9981	0.8
12	1042	0.63	0.1	-0.6	61.9974	0.1
13	10	9.17	-18.93	-19	61.9968	-0.5
14	2.49	1.76	-2.34	-3	61.9974	0.1
15	28.45	27.23	-58.85	-57.8	61.9956	-1.7
16	34.65	33.38	-72.61	-71.1	61.995	2.3
17	-4.05	-4.49	11.37	10.4	61.9976	0.3
18	-15.62	-15.71	36.36	34.7	61.9948	1.1
19	1.42	0.98	-0.39	-1.1	61.9973	0
20	4.29	3.76	-6.59	-7.1	61.9972	-0.1

上表中, $D=61.9973(\text{mm})$, $\Delta D=D^*-D$

超过 $\pm 70\mu\text{m}$ 时, $|\Delta D| \leq 2\mu\text{m}$, 又由图7易见, ΔD 与 Y_s^* 基本上呈线性关系, 这说明误差的随机成分不是很大而主要是确定性成分(系统误差)在起作用。这一结果对于进一步提高测量精度是很有用的。但值得说明的是, 传感器夹角测量的不准确性是确定性误差存在的主要原因。

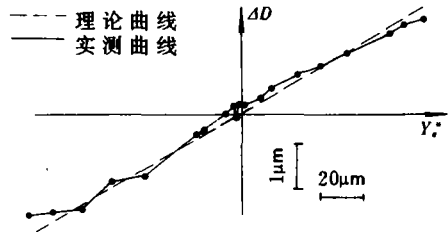


图7 $\Delta D \sim Y_s^*$ 关系曲线

5 结论

- (1) 通过实验检验了本文方法的可行性;
- (2) 改进探测头结构将使参数测定更容易;
- (3) 根据本文理论, 若传感器夹角的准确性能达到 $6'$, 则测量精度将优于 $\pm 1\mu\text{m}$. 这对于在批量生产中根据统计学方法估计刀具的磨损情况提供了可能性;
- (4) 若事先确定探测头与刀具的位置关系, 则本装置可测量刀具与工件孔之间的偏心量。这对于刀具位置补偿, 提高镗孔的同轴度提供了一种可行的方法;
- (5) 用于批量生产中可望体现出其高效率检测的优越性;
- (6) 便于与计算机联接, 用作监控系统中的一个自动检测设备。

感谢杨昂岳副教授和张绪强高工在探测头结构设计中的帮助, 感谢赵世俊老师和文

晓希同志在探头参数测定工作中的合作，感谢唐丙阳教授对本课题的支持。

参 考 文 献

- [1] Bollinger J G and Duffie N A. Sensors and actuators. IEEE Spectrum, 1983, 20(5): 70~75
- [2] Hartley J. FMS at work. IFS (Publications) Ltd., UK, 1984: 36
- [3] Franck G L and Henry J L. Flexible on-line Inspection for the Automated Factory. Proc. of Biennial International Machine Tool Technical Conf. 1984: 347
- [4] Roe J M. Touch Trigger Probes on Machine Tools. Proc. of Autofact. 1983: 121
- [5] 吴军. 三点法工件孔径测量装置的设计与研究. 国防科技大学硕士学位论文, 1989

An Equipment for On-Line Measurement of the Bore Size of a Workpiece

Wu Jun Li Jun

(Department of Precision Machinery and Instrument)

Abstract

The equipment for on-line measurement of the bore size of a workpiece, is described in this paper. The probe is set up by three inductance sensors, assembled with certain angles. The result of analysis and experiment show that the error of assembling angles between the rods of sensors is the main Cause of the measuring error. The measuring precision is better than $\pm 2\mu\text{m}$ in the certain case.

This equipment is available to the monitoring system of machine centres for bore size measuring. In addition, it can also be used for the measuring of eccentricity between the centres of measuring tool and workpiece bore. Especially, it is available in the batch process for the purpose of on-line quality inspection.

Key words on-line measurement, monitoring, sensors