

文章编号 1000-5013(2004)02-0062-05

# 数显半径测试仪及精度分析

郑海波

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362011)

**摘要** 提供一种新型半径测量工具))) 数显半径测试仪. 它利用传感器技术、微计算机技术和集成电路技术设计的, 具有体积小、可手持式测量的特点, 用 LCD 显示测量结果表明, 它可用于生产现场. 从传感器精度、机械精度、测量方法以及机械磨损等方面, 详细地分析了数显半径测试仪测量误差. 最后, 给出量程与弦长和精度的关系.

**关键词** 半径测试仪, 球头测杆, 传感器技术, 集成电路, 精度, 量程

**中图分类号** TP 212.12 B TG 82

**文献标识码** A

在机械制造、模具等工业生产领域, 经常需要测量、校验工件圆弧面和圆弧形弯曲件的半径. 在反求工程中, 许多外形轮廓或截面曲线中都包含有圆弧段, 也需要对这些圆弧段进行测量. 许多学者和工程人员针对非整圆弧的半径测量开展了大量的研究工作<sup>1-10</sup>, 使其在测量装置的设计、制造、检验、误差补偿以及测量方法研究等方面, 都达到一定的理论水平和应用水平. 目前用于测量半径有下列主要仪器设备. (1) 半径规, 即圆弧样板. 由于圆弧样板数量限制, 大部分圆弧都不可能找到与它相对应的圆弧样板, 无法实现无级测量. (2) 普通卡尺, 通过测量直径而得到半径. 如果被测圆弧的圆心角小于  $180^\circ$ , 直径则不能被测得. (3) 圆弧卡尺, 专门用于测量外圆弧直径. 它对被测圆弧的弦高有限制, 同时由于半径与弦长的非线性关系, 使刻度不均匀. (4) 中国专利 90218334, 992201667 所述的圆弧半径测量仪提出很好的测量方法, 但在结构上较为复杂, 操作不太方便. (5) 坐标测量设备, 如光学式测量仪、万能工具显微镜或三坐标测量机, 用弓高弦长法、工字法、定值角相切法(或任意 3 点的坐标法)而得到圆弧半径. 这些设备能对坐标点进行精确测量(精度可达  $0.001 \text{ mm}$ ), 但操作繁琐. 测量之前, 要在工作台上将工件进行摆放与装夹; 测量之后, 要通过数学计算才能得到半径, 且投资大. (6) 自制简单装置进行测量<sup>14, 8</sup>. 从以上分析可以看出, 仍然缺乏一个操作方便、能自动计算、系统集成度高的专用半径测量仪. 本文针对现有半径测量仪器设备的不足之处和局限性, 将机械、传感器技术、微计算机技术以及集成电路技术有机结合, 开发出新一代具有高科技含量的半径测量工具))) 数显半径测试仪. 它具有体积小、手持式测量、可现场方便地测量工件的内外圆弧半径、成本低等特点, 同时还具有百分表和深度测量的功能.

## 1 数显半径测试仪

### 1.1 测量原理

数显半径测试仪采用弓高弦长法, 测量圆弧半径. 它的原理, 如图 1 所示. 可以采用 3 根球头测杆进行半径测量, 3 根测杆的球头半径相同, 其轴线共面且相互平行, 两侧测杆相对固定. 它们的测头顶部连线与测杆轴线垂直, 中间测杆可相对两侧测杆移动. 测量之前先清零, 即将三测头同时与 1 个标准平面接触, 如图 1(a) 所示. 然后将弦高置零. 测量时, 将三测头同时与被测量圆弧接触, 由位移传感器测出中间杆相对两侧测杆的移动. 然后通过单片机处理, 将其转换为被测圆弧的半径. 设两侧测杆的中心距为

收稿日期 2003-06-26

作者简介 郑海波(1962), 男, 讲师, 主要从事 CAD/CAM 和反求工程的研究 E-mail: hbzheng@hqu.edu.cn

1, 中间杆相对两侧测杆的移动量为  $s$ , 测头球径为  $r$ . 那么, 内外圆弧半径  $R$  的测量, 分别如图 1(b), (c) 所示, 其  $R$  的计算公式为

$$R = \frac{l^2 + 4s^2}{8s} \pm r. \tag{1}$$

式(1)的内圆弧半径为  $R = \frac{l^2 + 4s^2}{8s} + r$ , 外圆弧半径为  $R = \frac{l^2 + 4s^2}{8s} - r$ .

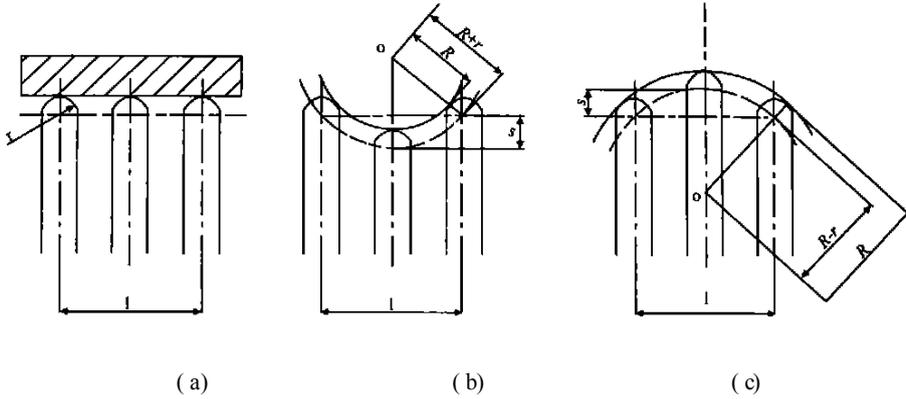


图 1 测量原理

### 1.2 机械设计

图 2 所示, 主尺 6 和副尺 4 的相对位移量经容栅位移传感器转换为电信号. 3 根测量杆分别为侧测杆 1、中间测杆 2 和侧测杆 3. 侧测杆 1、3 和容栅位移传感器的定极板 9, 安装在主尺 6 上. 中间测杆 2 和

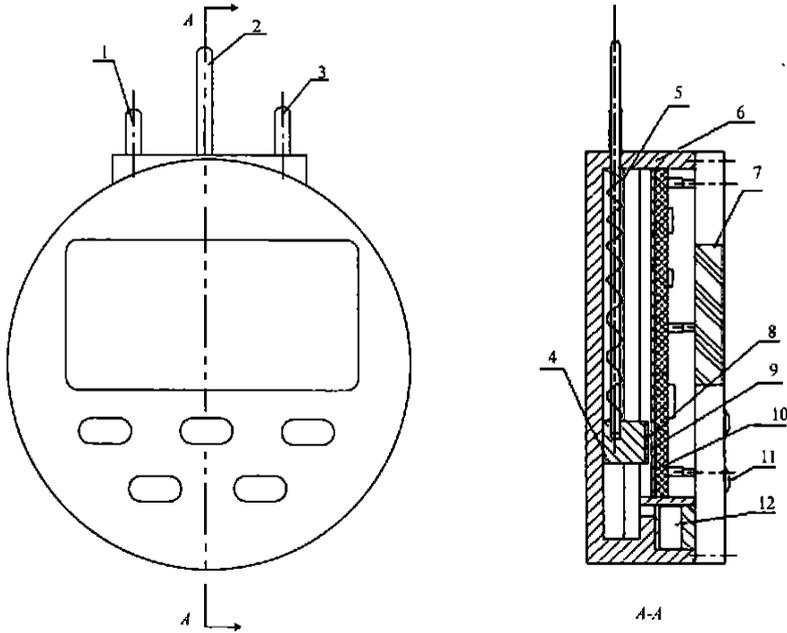


图 2 半径测试仪结构设计

电容式位移传感器的动极板 8 安装在副尺 4 上, 副尺 4 可在主尺 6 的滑槽内移动. 从而实现 3 根测杆相对移动. 3 根测杆的轴线平行且共面, 同时两侧测杆 1、3 对称地安装在中间测杆 2 的两侧. 电路板 10、按键 11、液晶显示器 7 和电池 12 安装在主尺 6 上, 弹簧 5 装在主尺 6 的滑槽内, 其作用是让中测杆 2 在测量完毕后复位. 测量时, 副尺 4 在主尺 6 上的滑槽内沿测杆的轴线方向移动, 带动中间测杆 2 相对两侧测杆 1、3 移动. 其相对位移量由集成电路转换为被测圆弧的半径值, 并输出到液晶显示器 7. 按键 11 用来设置测量参数, 如测量方式(长度、内径、外径)、清零、公英制转换、电源开关以及数据保持等. 当 3 根测杆都同时与被测圆弧接触时, 液晶显示器 7 上所显示的数字即为被测圆弧的半径.

### 113 电路设计

电路设计如图 3 所示, 选用容栅位移传感器作为半径测试仪的测量传感器. 容栅传感器与其它大位

移传感器(如光栅、感应同步器、磁栅)相比,具有体积小(其整个测量线路都集成在1个1 cm@1 cm大小的芯片上)、造价低、环境适应能力强.容栅传感器是利用相位跟踪原理实现位移测量的传感器,其结构组成由动栅板和定栅板两部分组成.动栅板的正面装有鉴相型测量专用集成电路和数据传送用输出接口.鉴相型测量专用集成电路通过非标准同步串行数据口输出测量结果.单片机不能直接处理从鉴相型测量专用集成电路中输出的数据,所以设计了1个电平转换电路.通过对鉴相型测量专用集成电路中输出电平进行转换.然后,再进入MCU处理电路,对测量数据和设定数据进行计算,并向LCD输出测量结果.

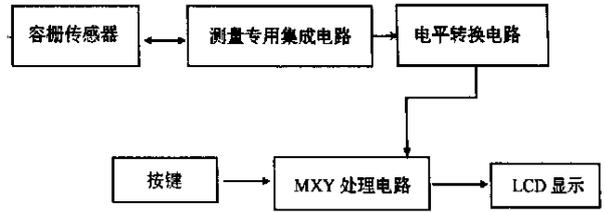


图3 电路设计原理图

### 114 数显半径测试仪样机

容栅位移传感器的测量分辨率为0.002 mm.采用固定弦长测爪来代替两侧测杆.测爪共为5套,其产品外形如图4所示.它具有多种功能.(1)装上测爪,可用于内外径测量和深度测量.(2)卸掉测爪为百分表.(3)公英制转换与其测量精度.例如,测量R=22 mm的标准圆柱,可用l=20 mm的测爪测量20次,其平均误差为0.04 mm;用l=10 mm的测爪测量20次,其平均误差为0.09 mm,由于可见,它具有相当高的精度.



图4 样机外形图

## 2 案精度分析与量程确定

作为一种测量工具,其测量精度和量程是最重要的两个方面.下面,我们就这两个方面的具体问题,进行分析.

### 211 精度分析

测量结果的误差来源于以下4个方面.(1)传感器误差,取决于传感器本身的精度.为减少误差,应选择尽可能高精度的传感器.(2)机械误差,取决于制造精度和装配精度,并最终体现在三测杆的加工和装配上.数显半径测试仪,要求三测杆的轴线共面且相互平行,测头为半径相同的半球,两侧测头的顶端连线与测杆轴线垂直,两侧测杆对称于中测杆.(3)测量误差,由测量方法不正确所造成.因此,测量时,三测杆轴线所在平面不与被测圆弧共面.(4)磨损误差,由测头等机械部件的磨损而带来的误差.其中传感器误差、机械误差由制造商确定,可视为系统误差;测量误差、磨损误差,分别与使用者经验和使用情况有关,可视为偶然误差.由于传感器精度是预先选定的,且对弦高的影响又是直接的,所以不需再分析.磨损误差可以归类于机械误差.测量误差可以通过多种方法来消除,也可象对机械误差那样分析.所以,下面只分析机械误差对测量结果带来的影响.如果按上述(2)的要求,综合讨论各项误差对测量结果的影响,那将是一个非常复杂的问题.但若考察图1中的测量过程,只需关心测杆与被测圆弧的接触情况,便可使问题得到简化.真正影响测量结果的只有如下几项.(1)对零时,中测头顶端相对于两侧测头顶端连线的偏离.(2)对零时,中测头顶端不在两侧测头顶端的连线中点处.(3)对零时,中测杆不垂直于对零用的标准平面.(4)中测头的顶部不为半球面.(5)两侧测头顶端连线的距离不等于设定的弦长l.(6)测头球径的误差.上述几项中,(1)~(4)影响公式(1)中的s,(5)影响公式(1)中的l,(6)影响公式(1)中的r.它们对测量结果的影响程度,与被测圆弧所在的曲面形状密切相关.对一块很薄(如厚度为测头球径的1/10)的标准圆弧板的测量来说,(1)和(3)项误差使增大,(2)的(4)项误差使s变小.s,l和r对测量结果R的影响,由公式(1)决定.对公式(1)全微分,有

$$dR = \frac{1}{4s}dl + \frac{4s^2 - l^2}{8s^2}ds + dr$$

根据误差理论,有

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{4s}\right)^2 \Delta l^2 + \left(\frac{4s^2 - l^2}{8s^2}\right)^2 \Delta s^2 + \Delta r^2} \tag{3}$$

为了明确R与s的关系,将公式(1)代入公式(3),可推出

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{R}{2s} - \frac{1}{4}\right) \Delta l^2 + \left(\frac{R}{s} - 1\right)^2 \Delta s^2 + \Delta r^2} \quad (s \ll R). \quad (4)$$

从式(4)可以得出结论: 对于确定的 R 和 s 越大,  $\Delta R$  越小;  $\Delta l$ ,  $\Delta s$  和  $\Delta r$  越小, 则  $\Delta R$  越小. (1) 提高测量精度的办法. (1) 通过提高传感器精度、制造精度和使用正确的测量方法, 以减少  $\Delta l$ ,  $\Delta s$  和  $\Delta r$ . (2) 对给定圆弧的测量, 尽量采用跨距 l 大的测爪来测量, 以增大 s. 制造策略上, 可在不提高传感器精度的前提下, 采用多个不同跨距的测爪. 这样的话, 对于很平坦的圆弧的测量, 也可通过选用大跨距的测爪来最大程度地降低误差. 下面以  $s = 0.001 \text{ mm}$ ,  $\Delta l = \Delta r = 0$  为例, 说明弦长和精度之间的关系. 根据式(4)可制得表 1, 表中 s 表示弦高. 表 1 说明测量不同半径, 选择不同弦长所对应的绝对误差和弦高. 从表中可以看出, 对于给定半径和选用较长的测爪, 可以得到较高的精度. 例如, 对于被测半径为 40 mm 的圆弧, 弦长(mm)为 10, 20, 40 和 60 的测爪都可使用. 但是, 其测量精度却差别很大, 绝对误差值(mm)分别为 0.131, 0.032, 0.006 和 0. 很显然, 用弦长为 60 mm 的测爪, 精度最高. 但是, 它所需要的弦高也较大, 为 13.054 mm, 这就要求容栅传感器有较大的量程.

表 1 弦长的选择与半径测量误差的关系(mm)

R	误差和 s 值	l				
		10	20	40	60	100
5	绝对误差	0.001				
	s	2.684				
12	绝对误差	0.011	0.002			
	s	1.001	4.694			
20	绝对误差	0.033	0.007	0		
	s	0.604	2.534	20.000		
40	绝对误差	0.131	0.032	0.006	0.002	
	s	0.307	1.239	5.209	13.054	
80	绝对误差	0.516	0.129	0.031	0.013	0.003
	s	0.155	0.62	2.508	5.761	17.275
150	绝对误差		0.451	0.112	0.049	0.016
	s		0.332	1.331	3.011	8.519
300	绝对误差		1.781	0.449	0.199	0.070
	s		0.167	0.666	1.499	4.182
600	绝对误差			1.797	0.798	0.287
	s			0.333	0.750	2.084
800	绝对误差			3.186	1.421	0.510
	s			0.250	0.562	1.563
1 000	绝对误差				2.216	0.798
	s				0.450	1.250

2.1.2 量程确定

作为一个测试仪器, 其量程除了与它本身的机械电子结构有关系, 还与精度有很大关系. 量程一般是指在一定精度下的测量范围. 下面以  $\Delta l = 0.001 \text{ mm}$ ,  $\Delta l = \Delta r = 0$  为例, 说明弦长、精度和量程之间的关系. 根据式(4)可制得表 2(表中 R 表示最大半径, s 为弦高). 表 2 说明在同精度等级下, 不同弦长所对

表 2 精度等级(用绝对误差表示)与弦长的关系表(mm)

精度等级	R 值和 s 值	l				
		10	20	40	60	100
0.1	R	35.687	71.274	142.549	213.824	356.373
	s	0.352	0.705	1.410	2.115	3.525
0.5	R	80.722	161.445	322.891	484.336	807.228
	s	0.155	0.310	0.620	0.929	1.550
1	R	112.668	226.355	451.689	678.044	1 129.730
	s	0.111	0.221	0.443	0.663	1.107

应的最大测量半径. 从表中可以看出, 精度越低, 测量范围越大; 弦长越长, 最大测量半径也越大. 最小可

测量半径为弦长  $l$  的一半, 据表 2 可确定每个测爪的量程. 由上可知, 误差来源主要是弦高  $s$  的误差. 特别对于弦长与半径之比较大的短圆弧, 其弦高本身就很小, 很可能被其它误差淹没. 因此, 在实际测量时, 为了提高测量精度, 最好能使被测圆弧的弦高比传感器精度高一个数量级.

### 3 结束语

(1) 本文提供一种具有高科技含量的新型半径测量工具)) 利用传感器技术、微计算机技术和集成电路技术设计的数显半径测试仪. 它具有体积小、读数方便、手持式测量的特点, 可用于生产现场. (2) 采用球头测杆, 误差补偿计算简单. 同时, 对于不同半径的圆弧测量, 接触点是变化的, 可以延长测头使用寿命, 且适合于曲面测量. (3) 对误差计算公式进行进一步推导, 明确得到  $s$  与  $R$  的关系为  $s$  越大,  $R$  越小. (4) 量程与弦长和精度的关系是其精度越低, 测量范围越大; 弦长越长, 最大测量半径也越大. 最小可测量半径为弦长的一半. (5) 采用多套测爪设计, 针对不同的半径和测量精度选用合适跨距的测爪.

### 参 考 文 献

- 1 廖平, 喻寿益. 基于遗传算法的圆的半径测量[J]. 计量学报, 2001, 22 (2): 87~ 89
- 2 刘兴富, 赵杰. 圆弧半径的/多点0 测算方法[J]. 计量技术, 1999, (7): 40~ 43
- 3 周富臣, 王生辉. 圆弧半径的测量及数据处理[J]. 工业计量, 1999, (2): 39~ 41
- 4 杨自萍. 圆弧面的滚棒测量机械研究与应用[J]. 机械研究与应用, 1994, (2): 34~ 36
- 5 王转柱, 董敏. /弓弦法0 测量圆弧半径时最小弓高值的确定[J]. 工具技术, 1995, 29 (5): 47~ 48
- 6 王转柱, 董敏. /旋转法0 测量大圆弧半径[J]. 工具技术, 1996, 30 (6): 28~ 31
- 7 仲思东. 传感器与微机技术在曲率半径测量中的应用[J]. 计量技术, 1994, (4): 16~ 19
- 8 王晓光. 非整圆弧半径和非整球半径的简易测量装置[J]. 机械工程师, 1994, (4): 20~ 21
- 9 王晓光. 非整圆弧圆心位置及半径的测量[J]. 计量技术, 1994, (6): 33~ 34
- 10 张建平. 用于测量圆弧半径和角度的新型量具[J]. 工具技术, 2000, 34 (10): 32~ 35

## A Digital Display Radius Tester and Its Accuracy Analysis

Zheng Haibo

(College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

**Abstract** A new measuring tool is offered for measuring radius. It is known as digital display radius tester which is designed by using sensor technique and microcomputer technique and integrated circuit technique. It is small in volume and manually operated. Its results are displayed by LCD. It can be used in production line. Its measurement error has been analysed in detail from accuracy of sensor, accuracy of machinery, measuring method and mechanical wear. The relation between measurement range, chord length, and accuracy is given finally.

**Keywords** radius tester, ball-headed measuring rod, sensor technique, integrated circuit, accuracy, measuring range