

摘要：针对机械式角度尺存在的测量过程较为繁琐、测量结果不易读数、测量功能单一等问题，文章设计了一款数显角度尺。该数显角度尺利用容栅测量技术和单片机技术进行开发。基于容栅测量原理，设计开发符合要求的圆容栅传感器，该圆容栅传感器具有角位移信号输出功能，通过单片机对该位移信号进行数据运算及处理，从而实现 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 、 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 、 $270^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  5种测量模式，并配合特定的机械结构件，从而实现数显角度尺的精密测量。该文所设计的数显角度尺分辨率为 $1'$ ，经实测，其精度可达 $2'$ 。同时具有数据输出功能，便于实现在线测量，与传统机械式角度尺相比，具有操作简单、易于读数、测量功能多样等优点。

关键词：容栅技术；数显；角度尺

中图分类号：TP212

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2021)03-0015-05

收稿日期：2020-11-05

# 基于容栅技术的数显角度尺的研发

王玉珍<sup>1,2</sup> 贺小军<sup>1,2</sup> 张磊<sup>1</sup>

1. 北京航天试验技术研究所，北京 100074；2. 北京市航天动力试验技术与装备工程技术研究中心，北京 100074

## 0 引言

随着工业测量领域“数字化”的提出，越来越多的机械式量具被电子数显量具取代。机械式角度尺作为常用的角度测量量具，亦存在不易读数、使用繁琐、测量效率低、成本较高等缺点，而数显角度尺能够很好地解决上述机械式角度尺存在的问题，且目前国内外电子数显式角度尺较少，因此，数显式角度尺的研发便成为市场亟需。

自20世纪80年代从国外引进容栅技术以来，国内容栅技术也日趋成熟。与光栅、磁栅、电感式传感器等其他类型相比，容栅传感器具有结构简单，分辨率高，成本低，安装方便，对使用环境要求较低等特点，因此，越来越多的量具厂家基于容栅技术进行测量量具、量仪等研发<sup>[1-4]</sup>。

综上所述，本文基于容栅技术研发一款数显角度尺。该数显角度尺能够进行角度测量，同时直接显示角位移，读数直观，测量方便快捷，功能多样且成本较低，大大提高了角度测量的效率。

## 1 容栅传感器的基本工作原理

容栅传感器作为一种新型数字式位移传感器，基于平板电容理论，将电容器作为敏感元件，使机械位移量转变为电容量的变化，可进行大位移测量。通过设计两块能够相对移动的电极板组成平板电容器，当两电极板间距、介电常数一定的条件下，电容器的电容变化量与两电极板耦合面积变化量成正比<sup>[5]</sup>。

根据容栅传感器电极栅状及结构的不同，可将其分为长容栅传感器和圆容栅传感器。长容栅传感器用于直线位移的测量，主要应用于数显卡尺、数显深度尺等测量仪器；圆容栅传感器不仅用于测量角位移，还可对直线位移进行测量，在数显角度尺、数显千分尺等量具中广泛应用。

容栅传感器主要由主栅和副栅两部分组成：主栅由屏蔽电极和反射电极构成；副栅由发射电极、接收电极和屏蔽电极构成。其中每8条发射电极为一组，与一个反射电极相对应，对每组发射电极进行编号，并采用引线连接每组编号相同的发射电极，容栅传感器等效电路如图1所示<sup>[6]</sup>。

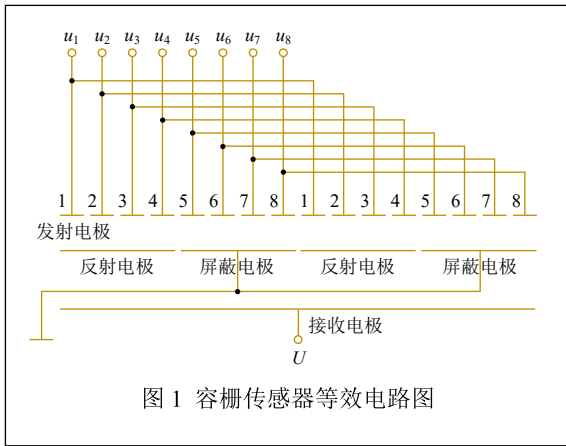


图1 容栅传感器等效电路图

容栅传感器工作时，对副栅中编号为1号到8号的发射电极送入相位依次相差  $45^\circ$  的等幅同频方波激励信号。测量时副栅相对主栅移动，产生位移变化，发射电极与反射电极的电容值也产生相应变化，再经反射电极和接收电极之间的反射电容器耦合后，引起接收电极上合成信号的相位变化。该相位变化反映了传感器主栅和副栅的相对位移变化，最后通过对该合成输出信号进行一系列的处理可获得位移信号<sup>[7]</sup>。

## 2 数显角度尺的设计

本文研发的角度尺基本设计原理为基于容栅技术，采用圆容栅传感器测量角度，并对传感器信号进行相关处理，再采用主控芯片处理数据，并进一步将数据转化为角度值并显示，同时响应按键操作。本文主要从数显角度尺的角度测量原理、主控电路设计和结构设计3部分进行阐述。

### 2.1 角度测量原理

本文角度尺的角度测量部分主要包括圆容栅传感器的设计和圆容栅传感器信号处理两部分，其基本测量原理为根据容栅传感器测量原理测量角度值，并通过一系列电路处理，将容栅信号转换为二进制数字信号输出。

#### 2.1.1 圆容栅传感器的设计

根据容栅传感器基本原理，本文设计满足要求的圆容栅传感器，其印制电路板设计示意图如图2所示。

图2(a)为该传感器主栅部分，图2(b)为该传感器副栅部分，两部分通过盘心同轴安装。传感器主

栅中1对屏蔽电极加反射电极，对应传感器副栅中1组发射电极（发射电极条数及极距可根据实际测量需求进行设计）<sup>[8]</sup>。其中，传感器屏蔽电极连接信号地，起隔离屏蔽作用。表1为圆容栅传感器副栅发射电极设计不同组数时，相应分辨率和预计达到的精度情况。

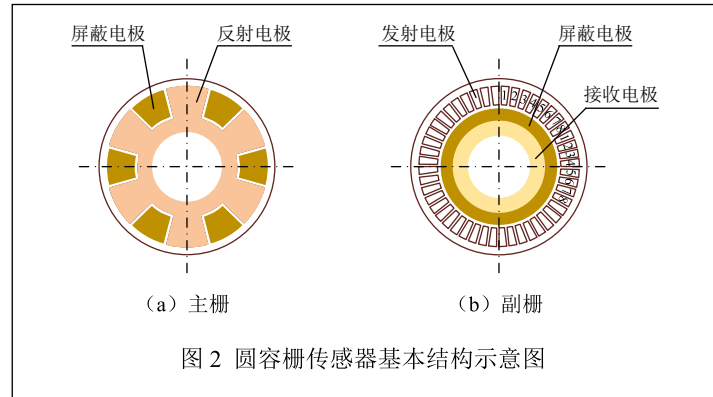


图2 圆容栅传感器基本结构示意图

表1 圆容栅传感器副栅发射电极不同组数时，分辨率及精度情况

传感器副栅发射电极组数	分辨率	预计达到的精度
15组	3'	6'
23组	2'	4'
45组	1'	2'

综上，本文所设计圆容栅传感器的副栅发射电极组数为45组，其可达到的分辨率为1'，该数显角度尺预计可达到的测量精度为2'。

#### 2.1.2 圆容栅传感器信号处理

本文圆容栅传感器信号处理基本原理框图如图3所示<sup>[9-10]</sup>。

图3中，由信号函数发生器产生一组具有  $45^\circ$  相位差的8路激

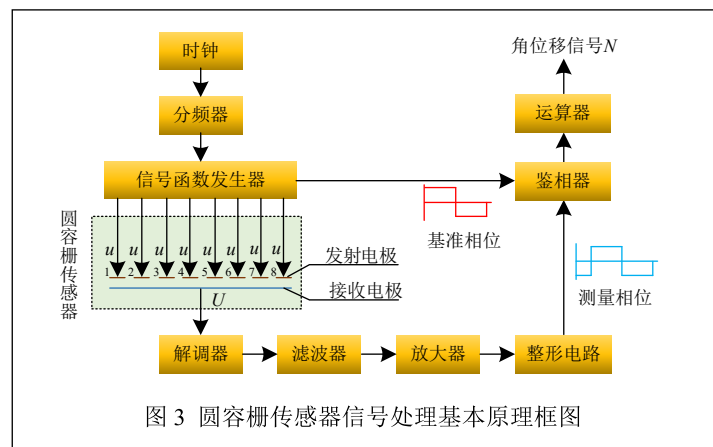


图3 圆容栅传感器信号处理基本原理框图

励信号，并把该激励信号施加于圆容栅传感器副栅的发射电极，经主栅和副栅之间电容传感器的耦合，在副栅接收电极输出合成信号。该信号经解调器解调后，进入滤波器滤除杂波等，然后将有用信号输入放大器进行放大，再经整形电路进行处理，之后将此信号测量相位与基准相位输入鉴相器鉴别信号的相位变化，最后采用运算器进行运算处理，输出角位移信号  $N$ 。

当圆容栅传感器主栅与副栅的相对位置发生变化时，角位移信号  $N$  改变。假设主栅与副栅相对转动量为  $\theta$ ，其与角位移信号  $N$ 、圆容栅传感器分辨率  $R$  存在如公式 (1) 所示关系：

$$\theta = N * R \quad (1)$$

### 2.2 主控电路设计

选用 STM32L0x3 系列芯片作为主控芯片，其具有低成本、易操作、易编程等优点。该芯片作为基于 Cortex-M0+ 的超低功耗 MCU，具备新的自主式外设 (USART 等)，多种低功耗模式 (低功耗运行模式、低功耗睡眠模式、低功耗待机模式等)，内置 16 位 ADC (硬件过采样)、超低功耗时钟振荡器、液晶显示驱动器、比较器等，减少了处理时间及功耗，简化了外围电路设计，可方便快速对数据进行处理和显示输出。

主控电路硬件设计框图如图 4 所示。主控芯片采集角位移信号  $N$ ，对其进行数据运算处理，并将该角度值输送至液晶显示屏显示。假设液晶屏显示  $G^\circ M'$ ，则根据公式 (1) 角度值  $\theta$  有如公式 (2) 所示关系：

$$\theta = N * 1' = G^\circ M' \quad (2)$$

其中， $G$  —— 显示的度值；

$M$  —— 显示的分值。

主控芯片通过公式 (2) 可计算任意角度测量值。

该主控芯片也可通过数据接口将该角度值输出

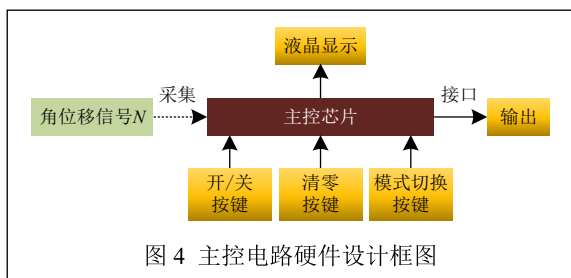


图 4 主控电路硬件设计框图

至上位机测量软件进行数据分析及管理。同时，该主控芯片还响应各不同按键操作，主要包括：开 / 关按钮、清零按钮、模式切换按钮，其中，模式切换按钮可实现  $0^\circ \sim 90^\circ$ 、 $90^\circ \sim 180^\circ$ 、 $180^\circ \sim 270^\circ$ 、 $270^\circ \sim 360^\circ$ 、 $0^\circ \sim 360^\circ$  5 种测量模式切换。

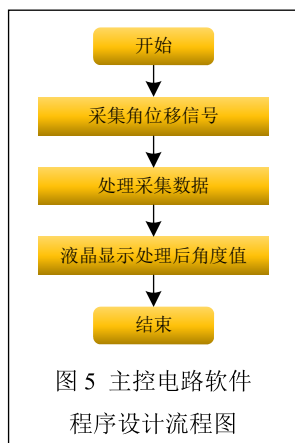


图 5 主控电路软件程序设计流程图

主控电路软件程序设计流程图如图 5 所示。主控芯片先采集二进制角位移信号，经相关运算处理，将处理后的角度值送入液晶显示屏。

### 2.3 结构设计

数显角度尺基本结构示意图如图 6 所示。

主要由电子部件和机械部件两部分组成。电子部件主要包括圆容栅传感器、主控电路功能板、液晶显示屏等，机械部件主要包括测量尺和基座联动部分。其中，测量尺包括基尺和直尺；基座联动部分包括基座和由转轴、转动齿轮等构成的同轴旋转件。

该角度尺圆容栅传感器安装于基座处，主栅通过基尺的轴连接基尺，副栅连接直尺；主控电路功能板、液晶显示屏部分安装于显示组件内，主控电路功能板与副栅通过软线实现电气连接，其测量结果可在液晶显示屏上直接显示。上述基尺经基座底部使用螺钉来连接联动部分的转动齿轮；直尺经锁紧帽固定于基座侧边缘处，根据各种角度的测量需求，直尺的两个侧

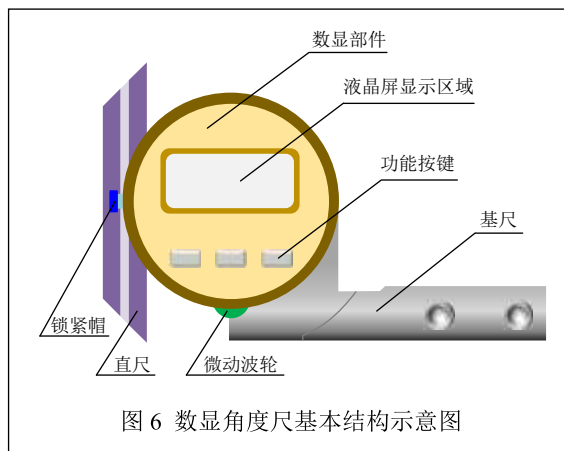


图 6 数显角度尺基本结构示意图

面均可作为测量面。微动波轮可用于正反方向的微调转动。

上述角度尺结构设计方便于将圆容栅传感器、主控电路功能板、液晶显示屏及基座集成为一个测量数显部件，该部件区别于角度尺的基尺和直尺单独装配，具有独立精度。该设计安装简便，使用简易、直观，便于生产及测试<sup>[1]</sup>。

### 3 实验结果与分析

在常温条件下，采用分辨率为0.001°角度测试仪对100个上述数显角度尺样品进行精度检测。通过在角度尺0°~8°范围内平均选取20个测试点进行对比测量，计算误差（测量误差为角度尺示值与角度测试仪示值之差），从而获得该角度尺精度。本文以1#角度尺、2#角度尺为例，图7所示为1#角度尺测量误差折线图，其精度为0.022°，约1.3'；图8所示为2#角度尺测量误差折线图，其精度为0.028°，约1.7'；图9所示为上述所选100个角度尺的精度散点图。通过观察各角度尺精度均不超过预计的精度2'，检测结果均合格。

### 4 结论

本文基于容栅技术，通过相关硬件设计、软件程序设计以及紧凑的机械结构设计进行数显角度尺的研发。通过实验验证，该角度尺可进行较高精度的测量。相比于传统机械式角度尺，该数显角度尺避免了人为读数误差，具有操作简单、稳定可靠、数据可输出等优点，可在测量领域得到广泛应用。

### 参考文献

[1] 黄桂云, 李振雄, 李品毅, 等. 浅谈容栅

技术产业发展趋势及技术提升的思路和建议[J]. 装备制造技术, 2015(10): 84-87.

[2] 胡洁. 容栅式位移测量系统机理研究及嵌入式应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

[3] 王孝, 王玉花, 谢行. 绝对式容栅测量技术浅析[J]. 传感器世界, 2016(4): 25-28.

[4] 闵希凯, 李新城, 张红艳, 等. 基于容栅传感器的微小位移测试系统[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(6): 89-93.

[5] 徐科军. 容栅传感器的研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

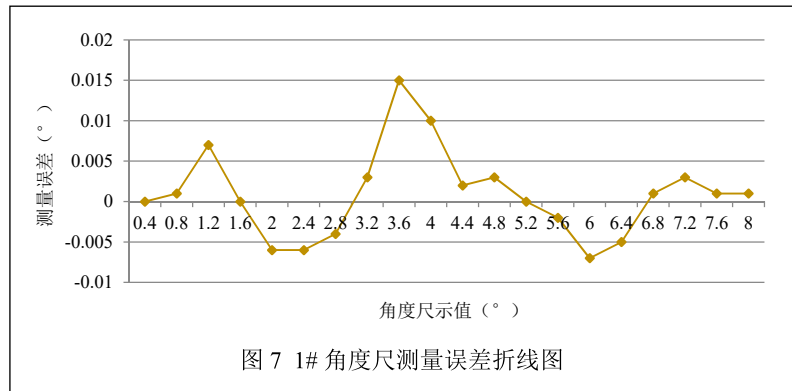


图7 1#角度尺测量误差折线图

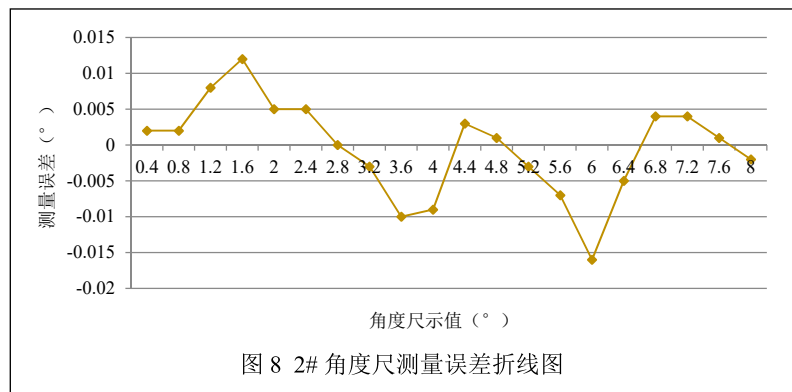


图8 2#角度尺测量误差折线图

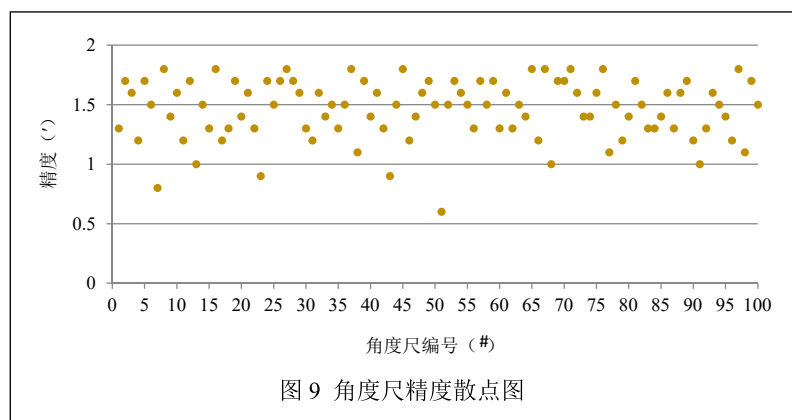


图9 角度尺精度散点图

- [6] 张增耀, 骆家贤. 容栅技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2002.
- [7] 王习文, 齐欣, 宋玉泉. 容栅传感器及其发展前景 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2003, 33(2): 89-94.
- [8] 侯俊, 周欢喜, 肖伸平, 等. 容栅式旋转编码器的设计及应用 [J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(5): 45-50.
- [9] 张荣, 徐鸣谦. 容栅旋转编码器原理及应用 [J]. 传感器世界, 2006, 12(2): 21-24.
- [10] 周善波, 谢行, 温鹏飞. 容栅式数显角度测量系统的研制 [J]. 工具技术, 2011, 45(1): 98-100.
- [11] 钟胜, 赵志强, 赵颀. 数字显示万能角度尺: 中国, 201320765922.2[P]. 2014-05-21.

### Research and Development of Digital Display Angle Ruler Based on the Capacitive Technology

WANG Yuzhen<sup>1,2</sup>, HE Xiaojun<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>

(1. *Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China*; 2. *Beijing Engineering Research Center of Aerospace Propulsion Testing Technology and Equipment, Beijing 100074, China*)

**Abstract:** In view of the problems of mechanical angle ruler, such as complicated measurement process, difficult reading of measurement results and single measurement function, the paper designs a digital angle ruler. The digital display angle ruler is developed by capacitive grating measurement technology and single chip microcomputer technology. Based on the principle of capacitive grating measurement, a circular capacitive grating sensor is designed and developed. The circular capacitive grating sensor has the function of angular displacement signal output. Through the data operation and processing of the displacement signal by single-chip microcomputer, five measurement modes of  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,  $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ,  $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ ,  $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$  and  $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$  are realized. With the specific mechanical structure, the precision measurement of digital angle ruler can be realized. The resolution of the digital angle ruler designed in the paper is  $1'$ , and its accuracy can reach  $2'$ . At the same time, the angle ruler has the function of data output, which is convenient for on-line measurement. Compared with the traditional mechanical

angle ruler, it has the advantages of simple operation, easy reading and various measuring functions.

**Key words:** capacitive technology; digital display; angle ruler

### 作者简介

王玉珍: 北京航天试验技术研究所, 北京市航天动力试验技术与装备工程技术研究中心, 工程师, 主要从事硬件电路设计。

通信地址: 北京市丰台区云岗田城中里 1 号院

邮编: 100074

邮箱: 1092483718@qq.com

贺小军: 北京航天试验技术研究所, 北京市航天动力试验技术与装备工程技术研究中心, 高级工程师, 主要从事测控方面研究。

张磊: 北京航天试验技术研究所, 助理工程师, 主要从事硬件电路设计。