

# 大位移测量的容栅传感器工作原理<sup>\*</sup>

刘德全 王筱华

(大连轻工业学院机械工程系, 大连, 116034)

**摘要** 从理论上分析了容栅传感器的工作原理及其理论非线性误差, 提出了较为合理的等效电路和理论非线性误差表达式。容栅传感器是一种相位跟踪型位移传感器, 对输入信号的幅值变化不敏感, 具有较好的抗干扰能力。容栅传感器的原理非线性误差与小发射极板宽度成正比, 为减小非线性误差, 在工艺条件允许的情况下, 应尽可能减小小发射极的宽度。

**关键词** 容栅; 传感器; 位移测量; 误差

**中图分类号** TP 212

在几何量测量中, 电容传感器经常被用于微小长度和位移的测量, 但在大长度、大位移的测量中, 普通的电容传感器由于其固有的一些缺陷, 一直没有获得相应的发展, 而只有光栅、磁栅和同步感应器等传感器可用于大位移量测量。直到80年代初期, 瑞士SYLVAC公司研制出了一种采用新型的容栅技术的数显卡尺, 目前其分辨率最高可达 $1\mu\text{m}$ , 精度为 $2\sim 3\mu\text{m}$ 。80年代中期, 我国的容栅技术得到开发, 在引进了瑞士产品的基础上作了改进, 生产出了国产的芯片。我国生产的容栅传感器的分辨率只达到 $0.01\text{mm}$ , 精度为 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ 。国外在角度传感器开发方面亦采用了容栅技术, 生产的容栅角度传感器分辨率可达 $1'$ , 精度可达 $2'$ ; 而国内在容栅角度传感器方面刚刚起步, 还有待于开发。

容栅传感器在大位移测量上有其突出的优点: (1) 测量速度快。分辨率为 $1\mu\text{m}$ 的测量速度可达 $1\text{m/s}$ , 分辨率为 $0.01\text{mm}$ 的可达 $1.5\text{m/s}$ , 而其他类型的传感器很少能达到这一水平; (2) 结构简单、小巧, 易于与集成电路集成一体; (3) 对使用环境要求不高。能防油污、防尘, 对空气湿度不敏感, 适于生产车间使用; (4) 能耗小。这是由于容栅传感器本身的介质损耗和静电引力都很小的缘故。

容栅式传感器虽在生产中得到了应用, 但系统地介绍分析其工作原理的资料还很少, 且比较零乱, 有的文献中的分析尚待商榷<sup>[1~3]</sup>, 这不利于这一新型传感器的开发和推广应用。鉴于此, 本文作者结合在容栅式机床坐标显示系统的研制开发中查阅的大量资料<sup>[1~6]</sup>, 写成此文, 以供科技人员参考。

## 1 容栅传感器的结构组成

容栅传感器由动栅板和定栅板两部分组成。动栅板的正面装有专用大规模集成电路、液

\* 收稿日期: 1996-10-26

刘德全: 男, 1965年6月生, 讲师

晶显示器件及数据传送用输出接口;背面如图1所示,有发射极和接收极两部分。发射极共有48个小发射极,分成6组,每组各有8个小发射极。小发射极板宽度为 $l_0$ ,每8个小发射极所占的宽度称为一个节距 $s$ , $s=8l_0$ ;其大小与传感器的分辨率有关,如分辨率为0.01 mm的容栅数显卡尺的节距 $s=5.08$  mm。接收极为一长金属条,处于发射极的下方,长为5个节距,与中间5组发射极相对应,即前后各空出4个小发射极,这是为了消除边缘效应。定栅板如图2所示,是在环氧敷铜板上腐蚀出宽为 $s/2$ 、间隔亦为 $s/2$ 的与其他部分绝缘的小矩形方格,表面粘贴绝缘保护层,这些小方格称为反射极,其他连通部分屏蔽接地,对测量没有影响。

动栅板正对定栅板安装,每组发射极中有4个小发射极正对定栅板的屏蔽地,测量中不起作用。在测量时,将发射电压加至发射极上,通过电容耦合,在反射极上产生电荷 $q_f$ ,从而有电压 $V_f$ ;又通过电容耦合在接收极板上产生电荷 $q_r$ ,从而有电压 $V_r$ ,这就是传感器的输出信号。因有5组发射极与5组反射极相对应,在接收极上有5组相同的感应电荷产生,这样利用误差平均效应可以减小测量误差。

## 2 容栅传感器工作原理

容栅传感器构成简图如图3所示。F为反射极,R为接收极,1,2,...,8为小发射极板,B为尺体,每组发射极板上所加的发射电压 $V_1 \sim V_8$ 为8个频率、幅值相同而相邻小极板间相位差为 $\pi/4$ 的正弦交变电压,在反射极F上有电压 $V_f$ ,在接收极R上有电压 $V_r$ 。根据图3,可画出图4所示的等效电路。现有的文献中的等效电路往往漏掉了电容 $C_{fg}$ <sup>[1~3]</sup>,这显然会使分析结果出现偏颇。根据克希荷夫定律有

$$\frac{V_8 - V_f}{\frac{1}{j\omega C_8(x)}} + \frac{V_1 - V_f}{\frac{1}{j\omega C_1(x)}} + \frac{V_2 - V_f}{\frac{1}{j\omega C_2(x)}} + \frac{V_3 - V_f}{\frac{1}{j\omega C_3(x)}} + \frac{V_4 - V_f}{\frac{1}{j\omega C_4(x)}} = \frac{V_f}{\frac{1}{j\omega C_{fg}}} + \frac{V_f - V_r}{\frac{1}{j\omega C_{fr}}} \quad (1)$$

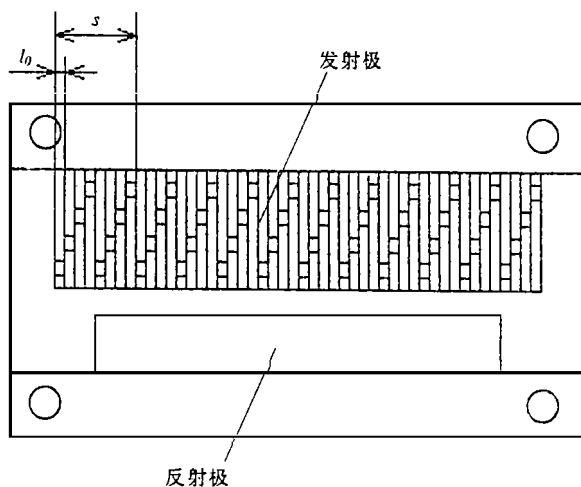


图1 动栅板的结构

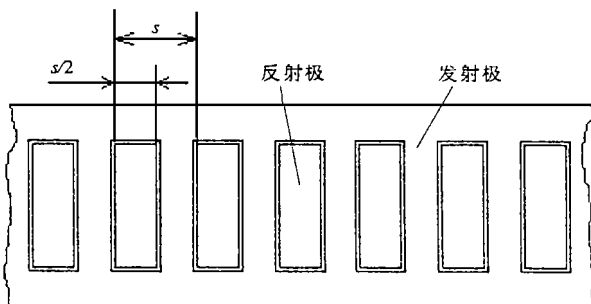


图2 定栅板结构

$$(V_f - V_r) / (\frac{1}{j\omega C_{fr}}) = V_r / (\frac{1}{j\omega C_{rg}}) \quad (2)$$

其中,  $x$  为动栅板与定栅板之间的相对位移;  $C_i(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 8$ , 为小发射极板与反射极板之间的电容, 测量中随  $x$  而变化;  $C_{fg}$  为反射极板与尺体(地)之间的电容, 测量中其值不变, 为常量;  $C_{fr}$  为反射极板与接收极板之间的电容, 测量中其值不变, 为常量;  $C_{rg}$  为接收极板与尺体(地)之间的电容, 测量中其值不变, 为常量。

若设一个小发射极板与反射极板完全覆盖时两者之间的电容为  $C_0$ , 则由

图 3 和图 4 可知:  $C_8(x) = C_0 x / l_0$ ;  $C_1(x) = C_2(x) = C_3(x) = C_0$ ;  $C_4(x) = C_0(1 - x / l_0)$ 。

如用  $V_0$  表示各发射极电压  $V_1, V_2, \dots, V_8$  的幅值, 则由式(1)、(2)可推出

$$V_r = \frac{C_0 [(1 - 2x/l_0)^2 + (1 + \sqrt{2})^2]^{1/2}}{[(C_{fr} + C_{rg})/C_{fr}] (C_{fg} + 4C_0) + C_{rg}} V_0 e^{j(\varphi_0 + \pi/4 + \theta)} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan [(1 - 2x/l_0) / (1 + \sqrt{2})]$$

其中  $\varphi_0$  为  $V_1$  的相位角。

可见, 容栅传感器的输出电压是一频率与发射电压相同的正弦电压, 其幅值在很小范围内变化, 变化量不超过  $\pm 3.8\%$ , 可近似看作为一常数, 而相位比  $V_1$  超前了  $\pi/4 + \theta$ , 相角  $\theta$  随相对位移  $x$  而变化, 采用鉴相型测量电路测出  $\theta$ , 即可得到相对位移  $x$ , 可见容栅传感器是一种相位跟踪型的位移传感器, 故这种传感器对输入信号的幅值变化不敏感, 具有较好的抗干扰能力。

应该注意, 式(3)只在  $0 \leq x \leq l_0$  时成立, 且相位组合与位置相对应, 否则式(3)不成立。当  $-l_0 \leq x \leq 0$  或  $l_0 \leq x \leq 2l_0$  时, 相位组合相当于顺序向前或向后移动  $\pi/4$ , 则式(3)相对于下一个  $0 \leq x \leq l_0$  仍然成立, 那么在整个量程上式(3)成立。

### 3 容栅传感器的理论非线性误差

由上节推导可知,  $\theta$  与  $x$  呈非线性关系, 而在测量中把它看成是线性关系, 这样就产生了

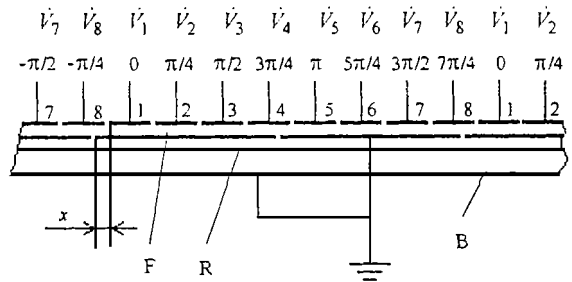


图 3 传感器的构成示意简图

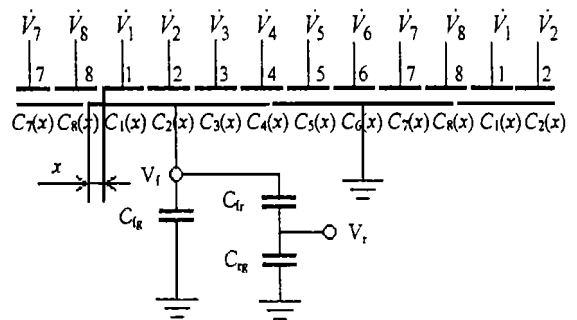


图 4 传感器的等效电路

理论非线性误差。容栅传感器的实际特性为

$$\theta = \arctan [(1 - 2x/l_0)/(1 + \sqrt{2})]$$

$$\text{或 } x = (l_0/2)[1 - (1 + \sqrt{2})\tan \theta],$$

其函数曲线如图5所示,理想特性为

$$x' = l_0/2 - 4l_0\theta/\pi.$$

文献[3]把理论特性看作

$$\theta' = (1 - 2x/l_0)/(1 + \sqrt{2})$$

这显然不妥,因 $\theta$ 不是一个微小量。理论非线性误差为

$$\Delta x = (x - x')$$

$$= \frac{l_0}{2}[1 - (1 + \sqrt{2})\tan \theta] - (\frac{l_0}{2} - \frac{4l_0\theta}{\pi})$$

其曲线亦绘于图5中。

由极值理论在 $-\pi/8 \leq \theta \leq \pi/8$ 范围内可求得极大值和极小值为

$$\Delta x_{\max} = 0.0102 l_0$$

$$\text{当 } \theta = \arccos [(1 + \sqrt{2})\pi/8]^{1/2};$$

$$\Delta x_{\min} = -0.0102 l_0$$

$$\text{当 } \theta = -\arccos [(1 + \sqrt{2})\pi/8]^{1/2}.$$

$$\text{故 } |\Delta x|_{\max} = 0.0102 l_0$$

可见,容栅传感器的理论非线性误差与小发射极板宽度 $l_0$ 成正比,所以为减小这一误差,提高测量精度,必须缩短小发射极板宽度 $l_0$ ,亦即减小节距 $s$ 。

## 4 结束语

本文从理论上分析了容栅传感器的工作原理及其理论非线性误差,提出了合理的等效电路和理论非线性误差表达式。通过上面的分析可知,容栅传感器是一种相位跟踪型传感器,即通过鉴相电路测出接收极板上的输出电压与发射极板上的某一基准发射电压(如本文分析的情况是以 $V_1$ 为基准发射电压)之间的相位差,从而测得位移。故这种传感器对输入信号的电压幅值变化不太敏感,有较好的抗干扰能力。容栅传感器的理论非线性误差与发射极板宽度成正比,最大非线性误差为 $0.0102 l_0$ ,从理论上讲,为减小非线性误差,在工艺允许的条件下,应尽可能减小小发射极板的宽度 $l_0$ ,亦即减小节距 $s$ 。

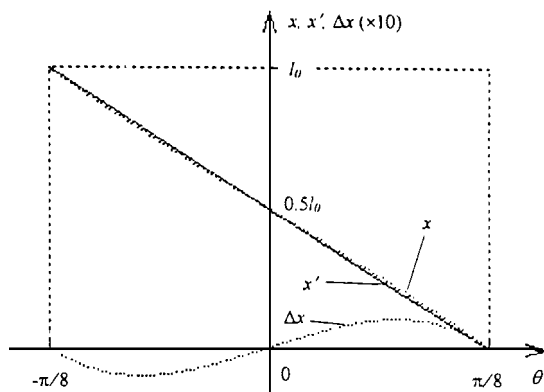


图5 位移 $x$ 与相位 $\theta$ 的特性曲线

## 参 考 文 献

1 沈生培. 电容式数显卡尺的研究. 计量学报, 1988, 9(1): 55~60

2 申义伦, 于晓洋, 关为民. 高精度调相式容栅位移传感器. 哈尔滨科学技术大学学报, 1994, 18(3): 29~32

- 3 徐科军, 马文, 班晓勇. 容栅传感器数学模型探讨. 合肥工业大学学报, 1993, 16(1): 71~77
- 4 凌锐鸿, 张跃华, 王 佶. 容栅传感器的误差平均效应. 机械工程学报, 1996, 32(4): 37~42
- 5 徐科军, 马修水, 廖健芳, 等. 容栅传感器研究与开发现状. 工具技术, 1994, 28(12): 37~40
- 6 伊振基. 容栅测量技术. 机械, 1995, 22(4): 44~46

## The Analysis on the Principle of the Capacitive Grate Transducer for Measuring of Large Displacement

Liu Dequan, Wang Xiaohua

(Dept. of Mech. Eng., Dalian Inst. of Light Ind., Dalian 116034)

**Abstract** In this paper, the principle of the capacitive grate transducer for large displacement is analyzed, and more reasonable equivalent circuit and formula of theoretic nonlinear error are presented. As a phase-modulated displacement transducer, it is insensitive to the amplitude changing of the input voltage signal, thus it possesses better capability for anti-disturbance. Its theoretical nonlinear error is directly proportional to the width of the small emitter. In order to reduce this error, the width of the small emitter should be reduced to the highest possible allowed by manufacturing technique.

**Key Words** capacitive grate; transducer; displacement measuring; error

### 科研成果简介

#### 盘磨机用长寿命、具气孔金属磨片的研制

盘磨机用金属磨片是造纸制浆磨浆机的关键部件之一。以往的国产磨片使用寿命低、磨浆效果差、耗电量高,与国外先进国家的金属磨片相比差距很大。

本项目采用双金属层,在铸铁或铸钢基体表面,铸造高硬度、高耐磨性的 X 合金或 S 合金。表面合金层的厚高可达 1~10 mm,硬度达 HRC 68 以上,比国内普遍使用的冷硬铸铁磨片的寿命长 5~10 倍。盘磨机用长寿命、具气孔金属磨片的表面合金层含有类似于花岗石或玄武岩、小麻石的气孔率,使磨浆的质量显著提高,耗电量下降,可节电 10% 以上。盘磨机用长寿命、具气孔金属磨片已应用到  $\Phi 450$ 、 $\Phi 380$  盘磨,使用寿命提高了 5~10 倍,节约了大量钢铁材料,节省了停机换磨片的时间及人工。此项技术可推广到  $\Phi 1250$ 、 $\Phi 915$ 、 $\Phi 650$  等规格的盘磨机磨片。

该项目由大连轻工业学院和大连裕顺科技开发公司共同研制,于 1997 年 3 月 29 日通过中国轻工总会主持的技术鉴定。