

# 高精度时栅位移传感器研究\*

彭东林 刘小康 张兴红 陈锡侯

(重庆工学院电子信息与自动化学院 重庆 400050)

摘要：分析了传统位移传感器的优点与不足，讨论了时空转换思想、时空坐标转换方法与时栅位移传感器原理。通过高精度时栅位移传感器的研制过程，介绍了单齿式、差频式、场式和混合式几种时栅的原理结构及其分别达到的分辨率和精度指标，最终通过鉴定的场式时栅达到了 0.1 的分辨率和 ±0.8 的精度。还介绍了谐波修正法思想，目的在于把傅里叶变换用于传感器诞生之前的参数设计和制作过程中的误差修正，而不只是在其后的误差分解和分析。反映出时栅作为一种智能传感器所体现的技术优势和谐波修正法的实用效果，而最终目标是不依赖精密机械加工或不用刻线尺而实现精密位移测量。

关键词：修正 精度 时栅 位移传感器

中图分类号：TB22

## 0 前言

精密位移传感器通常采用两种原理构成：一种是调制式，如感应同步器、旋转变压器和自整角机等；一种是非调制式，如光栅、磁栅和容栅等。另外两种原理也互有交叉，如将磁栅用于调制式等。这些传感器各有优缺点，共同的优点是技术均已相当成熟。就测圆分度而言，精度都可以达 0.5 甚至更高。而共同的不足之处有两点：一是电器系统比较复杂。这不难理解，以现在的眼光来看半个世纪以前发明的这些传感器，就电路而言谈不上先进和智能化。二是都要依赖精密刻划技术。对非调制栅式传感器而言，要求栅线“既要密又要精”；对调制式传感器而言，要求节距“不需要密，但是要精”。因此精密刻划技术始终是决定这些传感器精度的关键技术。由于这些制约因素，传统位移传感器的共同缺点是：价格太贵，现场抗干扰力差，智能化程度不高。

最常见的光栅、磁栅、容栅及电栅(感应同步器)的精度情况如下表<sup>[1]</sup>。

表 光栅、磁栅、容栅及电栅的精度情况

直线测量				圆分度测量			
分辨率 $d/\mu\text{m}$		精度 $e/\mu\text{m}$		分辨率 $d/(\text{ }^\circ)$		精度 $e/(\text{ }^\circ)$	
一般	最高	一般	最高	一般	最高	一般	最高
1	0.1	10~30	3	0.5	0.36	6~10	1~0.5

通过所提出的时空坐标转换方法和时栅位移

传感器原理<sup>[2,3]</sup>，把位置差(位移)测量转换为时间差测量，把机械分度的问题转换为电信号提纯的问题，彻底回避了机械精密刻线的工艺，从而使产品成本大幅度下降，同时抗干扰力增强，智能化程度提高，而精度已达到传统传感器的水平。

## 1 时空坐标转换方法与时栅位移传感器原理

爱因斯坦创立的相对论是人类思想宝库中的宝贵财富。相对论中的一个重要结论是：在以恒速  $v_2$  相对运动的两个坐标系(图 1)中互相观察对方，尺度将会缩短  $\sqrt{1-v^2/c^2}$  倍，时间将会变慢(延长)  $\sqrt{1-v^2/c^2}$  倍，其中  $c$  为光速。这个结论要在速度  $v_2$  相当大而与光速  $c$  具有可比性时才能被验证，通常人们感觉不到它的价值。但是这种思维方式无疑打开了人们的遐想空间。

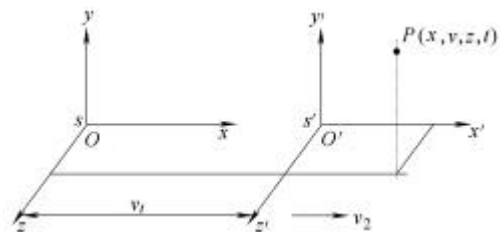


图 1 相对运动双坐标系

参考文献[2]中提出的时空坐标转换方法沿袭了这种思想，建立了“带时间考查点的相对匀速运动双坐标系”。如图 2d 所示，A 就是运动质点 P，B 就是静止坐标系原点 O。进而有了时栅位移传感器的发明思想。时空坐标转换思想的内涵可以概括为以下三点：

\* 国家自然科学基金资助项目(59675089, 50075091)。20050302 收到初稿，20050810 收到修改稿

(1) 建立带时间考查点的相对匀速运动双坐标系，则一个坐标系上的位置之差(位移)表现为另一个坐标系上观察到的时间之差。

(2) 通过建立匀速运动坐标系，把对被测物体的匀速要求转化为对传感器的匀速要求，使得用时间测变速运动物体的位移空间成为可能。

(3) 在一个匀速运动坐标系中，时间(时钟脉冲)具有了唯一的空间当量，就是  $v_2$ 。

按照时空坐标转换思想，参考文献[2, 3]分别提出了“单齿式时栅”和“场式时栅”的构建原理如图 2 所示。它们是一种“对偶”的关系，电信号波形图是一样的。

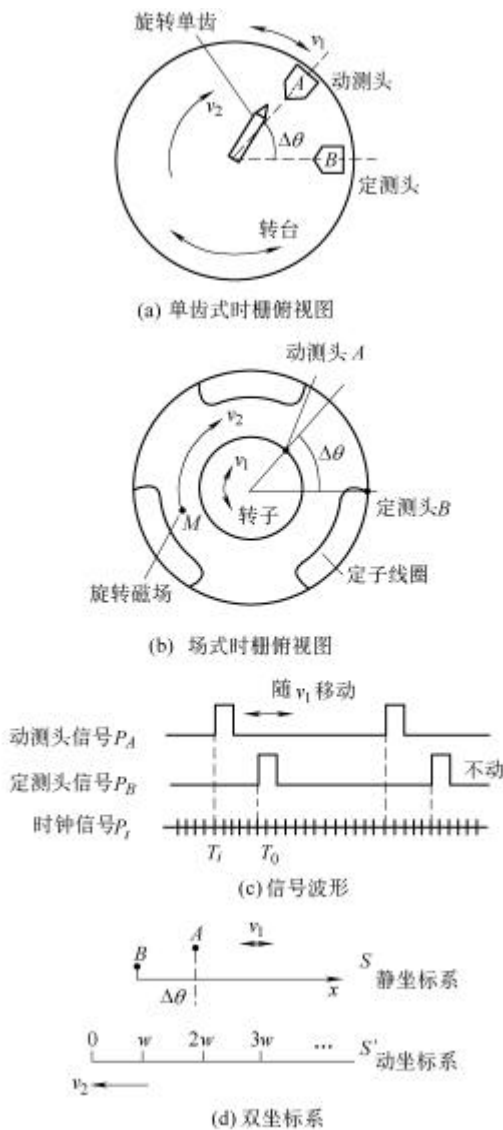


图 2 时栅原理图

图 2a 以电动机带动的恒速  $v_2$  单齿作为运动坐标系，节距  $W=360^\circ$ ，其缺点在于旋转机械引起的振动和非匀速性，以及体积大和安装不便，尤其是不能测直线位移。图 2b 根据电动机原理，由空间互差  $120^\circ$  的三相绕组配合时间互差  $120^\circ$  的三相电

流产生的恒速  $v_2$  旋转磁场  $M$  为运动坐标系，匀速性大大改善，体积缩小，安装方便，根据直线电动机原理，直线位移也一样能测。从图 2d 容易看出，无论静坐标系上的运动质点  $A$ (动测头)以何种变速度  $v_1$  运动(快慢、动停、正反转等)，只要有相对于参考点  $B$ (定测头)的位移，就会被运动坐标系上的观察点(单齿或运动磁场的过 0 点)反复采样确定， $\Delta x = v_2(T_i - T_0)$ ，即位置差等于时间差与恒定因子  $v_2$  的乘积。

在形成时空坐标转换的原始学术思想以后，时栅曾经历了长期的技术性探索，提出和研究过各种设计方案。图 3a 是直线式时栅<sup>[3]</sup>，与图 2b 是同样的原理，可视为其直线展开形式，旋转磁场变成直线移动磁场，实现了机械方式无法实现的无限长运动坐标系。图 3b 是差频式时栅<sup>[4]</sup>，实现了由 600 线的机械刻线达到 0.108 线/线的高分辨率。图 3c 是混激型时栅<sup>[5]</sup>，它是图 2a、2b 的混合，即运动坐标系是由机械旋转和磁场旋转共同组成，由机械旋转引

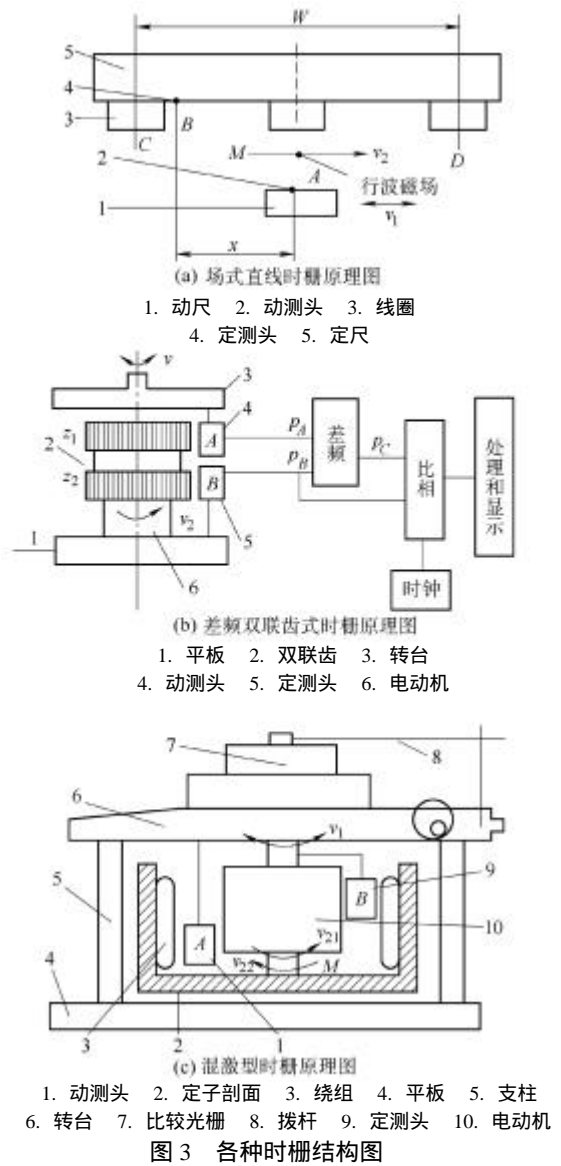


图 3 各种时栅结构图

起的平均效应来克服磁场线圈的空间分布不均匀性，试验样机精度达到  $\pm 18''$ 。

为了有利于研究成果的商品化，研制者最终将研究工作的重点放在结构最简单的场式时栅上面，力图让传感器摆脱对精密机械加工的依赖，使之不仅具有学术价值，更有生产实用价值，于是引出下面的讨论。

### 2 谐波修正法及实用效果

在从思想到高精度样机的研制过程中，提出的一种“傅里叶级数谐波修正法”(简称“谐波修正法”)起到了关键作用，最终实现了“不用高精度机械加工而达到高精度”的目标。

一方面，时栅的最大特点(优点)在于摆脱了刻划误差的束缚，从而使生产成本大幅度降低。另一方面，时栅不要求均匀划分，却要求匀速。这种匀速不是那种统计和平均的概念，而是要求在一转以内的任一位置都达到匀速。旋转磁场是大家承认客观存在的物理现象，虽无法直接观察或检测它，但可以想像它必然与三相线圈绕组的空间正交性和三相电源的时间正交性有关。要实现理想的正交性是很难的，或者说由于  $v_2$  的非匀速性引起的测量误差总是存在的，于是采用了谐波修正法。

快速傅里叶变换即 FFT 在工程中被大量使用，尤其是在旋转机械设备的故障诊断和误差分析之中。但常见的应用都是对已获取信息的事后分析处理，而谐波修正法是要把傅里叶变换用于传感器诞生之前的参数设计和制作过程中的误差修正。

按照傅里叶变换的思想，一条误差曲线总可以视为  $n(n \gg 1)$  次误差谐波迭加之和，并且如果一个圆周有  $K$  个测头，就可以消除其中除了  $K$  的整数次倍数以外的全部误差。

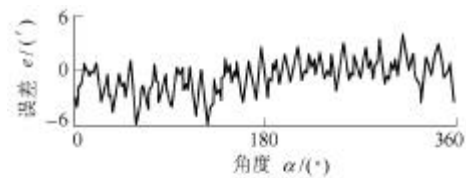
图 4 显示了研制的高精度场式时栅及试验装置。以手摇分度转台为基础，下面同轴安装时栅传感器，上面同轴安装检定用的 24 面棱体和 Heidenhain 圆光栅。



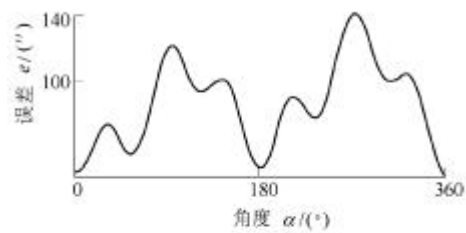
图 4 场式圆时栅及试验装置

图 5a 显示了采用单测头对全周采样 1 536 点后

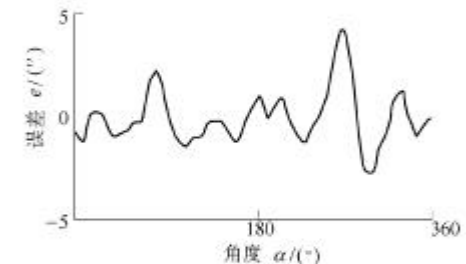
由计算机描绘出的误差曲线，其综合误差为  $\pm 5'24''$ ，这个误差反映了传感器原始机械加工的误差，被形容为“一堆垃圾”，意即毫无机械精度可言。图 5b 是采用  $n$  个测头后实测的一对极范围的误差实测曲线和由计算机拟合出的由 2、4、6 次误差谐波迭加而成的拟合曲线，因两条曲线非常接近，看上去就像是一条线，证明误差主要是由这三次误差组成的。其峰值为  $134''$ ，即  $\pm 67''$  或  $\pm 1'14''$ 。这个结果反映了采用多测头消除了  $K \cdot n$  以外的谐波分量后，误差从约  $\pm 5'$  降到约  $\pm 1'$ 。图 5c 是用图 5b 的两条曲线相减后剩余的误差，即通过第一次修正，消除 2、4、6 次谐波后，误差已从  $\pm 67''$  降到约  $7''$  或  $\pm 3.5''$ 。图 5d 是在图 5c 的基础上，拟合出含 2、4、6、8 次谐波的拟合曲线，再经过第二次修正，误差再由约  $7''$  降到约  $2.6''$  或  $\pm 1.3''$ 。图 5e 是继续上面的过程



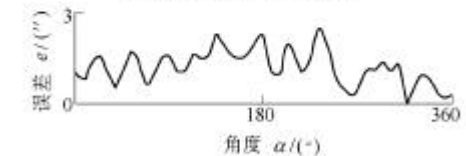
(a) 单测头全周实测误差曲线



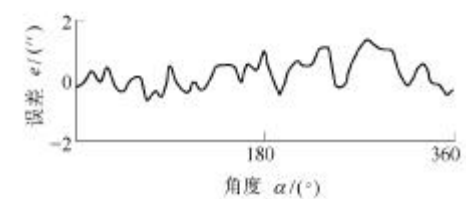
(b) 多测头实测误差曲线及拟合曲线



(c) 第一次修正后实测曲线



(d) 第二次修正后实测曲线



(e) 第三次修正后实测曲线

图 5 谐波修正法使用过程

后的结果。采用含 1、12 次谐波的拟合曲线，再经过第三次修正后 误差由 2.6 降到约 1.3 或  $\pm 0.65$ 。

从理论上说，上述方法可以一直做下去，结果可以超过“母仪”即光栅系统。但是当精度做到一定程度后，其他矛盾逐渐凸现出来，如电信号的稳定性、试验装置的机械刚度和环境温度变化等等。

通过上述工作，可以体会到谐波修正法的以下两点重要实用价值。

(1) 工作量问题。一个圆周有 1 296 000，如果分辨率为 1 $\mu$ ，采用逐点修正就要进行上百万次采样和修正；如果分辨率为 0.1 $\mu$ ，就要进行上千万次采样和修正，这是根本不可能去做的笨办法。而本方法采用“局部采样、谐波分析拟合曲线、以线带点”的办法，并且完全是由计算机完成，简便高效，实用化成为可能。

(2) 零点问题。如果采用逐点修正法，上百万个孤立点相互之间没有任何规律可循，这时传感器空间位置的绝对零点尤为重要，一旦丢失或错开少许，所有修正数据全部报废。而本方法以线带点，可以用计算机很快分析并拟合出这条曲线，找到零点。时栅作为智能化传感器所具有的这种独特优势，是传统的基于精密机械制造的传感器如光栅、感应同步器等无法比拟的。

### 3 结论

机械总是与空间联系在一起的，电气总是与时间联系在一起的，时空转换也就是机电转换。本课题的最终目标是要使几何量位移计量摆脱对以空间刻划技术为代表的精密机械加工的依赖，逐渐形成基于以时间计量为代表的电气技术的新型几何量位移计量新模式。其优势之一，由于回避了高精度机械加工而使成本大大降低；优势之二，由于机械结构不讲究而经得起生产现场的碰撞和油污等干扰，使得时栅既可作为计量基准也可作为生产基准，从而具有很好的市场前景。

本项目先后得到两项国家自然科学基金资助，历时 8 年。目前时栅传感器的分辨率已达到 0.1 $\mu$ ，而精度由课题组自检为  $\pm 0.65\mu$ ，由中国测试技术研究院检定定为  $\pm 0.8\mu$ ，由国家自然科学基金委员会组织的专家鉴定会检定定为  $\pm 0.6\mu$ 。鉴定意见的主要结论为“...该传感器特点在于无需高精度机械加工即可实现高精度，...本项目研究提出的不用刻线尺而实现精密角位移测量的新方法和新技术，具有显著的创新性，处于国际先进水平；时栅位移传感器原理属国内外首创，具有广泛的应用前景”。

### 参 考 文 献

- 1 李谋. 位置检测与数显技术. 北京：机械工业出版社，1993
- 2 彭东林，刘成康，谭为民. 时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究. 仪器仪表学报，2000，4：338~342
- 3 彭东林，张兴红，刘小康，等. 场式时栅位移传感器研究. 仪器仪表学报，2003，3：321~323
- 4 彭东林，刘成康，谭为民. 差频式时栅位移传感器研究. 仪器仪表学报，2001，5：506~509
- 5 彭东林，张兴红，谭为民，等. 混激型时栅位移传感器研究. 仪器仪表学报，2004，1：113~115
- 6 强锡富. 几何量电测量仪. 北京：机械工业出版社，1981
- 7 和子康. 机床传动精度测量与提高. 北京：计量出版社，1985

## RESEARCH ON HIGH-PRECISION TIME-GRATING DISPLACEMENT SENSOR

Peng Donglin Liu Xiaokang

Zhang Xinghong Chen Xihou

(Department of Electronic Engineering, Chongqing  
Institute of Technology, Chongqing 400050)

**Abstract** : The advantage and disadvantage of traditional displacement sensors are analyzed. The time space transformation idea, the time space transformation method and the principle of time grating sensor are discussed. By researching the high precision time grating displacement sensor, the principle, structure, resolution and accuracy of the single tooth type, frequency difference type, field type and composite type time grating are introduced. The time grating displacement sensor that has passed through the appraisal gets a 0.1  $\mu$  resolution and  $\pm 0.8\mu$  accuracy. Meanwhile a harmonic wave correcting idea is introduced. Besides the error decomposing and analysis of sensor, FFT is used to design parameter and correct error before and during the sensor is made. The technical advantages of time grating as a smart sensor and practical effect of harmonic wave correcting are obvious. The purpose is to realize high-precision measurement without the requirement of high precision machining and high precision scale ruler.

**Key words** : Correcting Precision Time grating

Displacement sensor

作者简介：彭东林，男，1952 年出生，教授，博士生导师。获省部级二等奖 2 项，发明专利 3 项，4 次承担国家自然科学基金项目，发表论文 50 余篇，成果列入“国家级科技成果重点推广计划”(以上工作均排名第一)，为“重庆市首批学术学科带头人”。

E-mail : pdl@cqit.edu.cn