

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513996

绝对式角位移传感器的研究综述*

张天恒¹, 彭东林¹, 王阳阳², 郑永¹, 段正南¹

(1. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054; 2. 重庆理工大学两江国际学院 重庆 401135)

摘要:在智能控制系统的核心部件中,绝对式角位移传感器占据着至关重要的地位。其测量精度与长期运行的可靠性,直接决定了整个控制系统的性能上限。综述了基于不同物理原理的绝对式角位移传感器(电感式、光电式、电场式、磁电式),深入探究其核心传感机理。阐述了各类绝对式角位移传感器的工作原理、感知电极的形状(特殊编码、环形、扇形、正弦形、花瓣形等)来适应不同的传感机理、感知单元(从栅线到栅面再到阵列)的构型特征来提高感知精度、传感媒介向多媒介耦合转变增强复杂环境的适应性、典型的绝对测量的结构特征以及当前的研究现状。在分析各自优势的同时,也明确指出其固有的局限性,同时对比分析了当前市场上主流产品的性能指标及其典型应用领域,为工程选型提供参考。剖析了在不同传感机理下,融合时空调制技术,通过在空间上周期性分布感知单元并在时间维度上进行信号扫描与解调,具备高精度与抗干扰特性的绝对式时栅角位移传感器。最后,对绝对式角位移传感器未来发展趋势进行展望。在提升传感器精度与分辨率的同时,增强在极端环境下的鲁棒性与可靠性,深化多传感器信息融合技术以满足复杂智能控制系统对多维信息感知的更高需求。

关键词:绝对测量;传感机理;传感结构;感知电极的形状;绝对式时栅角位移传感器

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

A review of research on absolute angular displacement sensors

Zhang Tianheng¹, Peng Donglin¹, Wang Yangyang², Zheng Yong¹, Duan Zhengnan¹

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Liang jiang International College Chongqing, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China)

Abstract: In the core components of intelligent control systems, absolute angular displacement sensors play a crucial role. Their measurement accuracy and long-term operational reliability directly determine the performance limits of the entire control system. This article provides a comprehensive review of absolute angular displacement sensors based on different physical principles (inductive, photoelectric, electric field, magnetoelectric). It delves deeply into their core sensing mechanisms and elaborates on the working principles of each type of absolute angular displacement sensor. Sensing electrode shapes (special encoding patterns, rings, sectors, sinusoidal patterns, petal shapes, etc.) are designed to adapt to different sensing mechanisms. Configuration characteristics of sensing units (evolving from grating lines to grating planes and further to arrays) are utilized to enhance sensing accuracy. Sensing media are shifting towards multi-media coupling to improve adaptability in complex environments. Typical structural features of absolute measurement and current research status are included. Their respective advantages are analyzed while also explicitly identifying their inherent limitations. It includes a comparative benchmarking of performance indicators of mainstream products currently on the market and their typical application domains, offering valuable references for engineering selection. This article dissects the absolute time-grating angular displacement sensor. This sensor fuses spatiotemporal modulation technology with diverse sensing mechanisms, achieving high precision and interference resistance through the spatial periodic distribution of sensing units coupled with temporal signal scanning and demodulation. Finally, this article outlines future development trends for absolute angular displacement sensors, including improving

收稿日期: 2025-04-30 Received Date: 2025-04-30

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52175454)、重庆市教委科技攻关项目(KJQN202301161, KJQN202301116)、重庆市自然科学基金项目(CSTB2024NSCQ-MSX0244)资助

sensor accuracy and resolution while enhancing robustness and reliability in extreme environments, and advancing multi-sensor information fusion technology to meet the increasing demand for multi-dimensional sensing in complex intelligent control systems.

Keywords: absolute measurement; sensing mechanism; sensing structure; shape of sensing electrode; absolute time-grating angular displacement sensor

0 引言

绝对式角位移传感器能够实现对整周任意位置的角度直接读取,由于零点信号唯一并且相互独立,响应迅速,在测量过程中前面的测量误差对后续的测量结果没有影响。在工业、航空航天、机器人等领域有广泛的应用^[1]。由于在智能控制领域中不同的控制方法与复杂环境对绝对位置信号获取的要求不同,故了解不同传感媒介的绝对式角位移传感器的原理、特点及适用范围。根据不同的工况环境来选择合适传感媒介的角位移传感器,不仅可以提高智能控制系统的效果,还能降低成本。

电感式传感器具有工作可靠、分辨率高、输出阻抗小、抗干扰能力强等优点,但是自身频率响应低,不适用于快速动态信号的测量,对供电电源的频率、幅值稳定度要求较高,而且偏心转子加工难度大^[2]。光电传感器虽然可以提供高分辨率、高灵敏度并且不受电磁干扰,然而它们的性能受到油污、振动和多尘环境的影响^[3]。电容式传感器具有低功耗和高灵敏度的优点,但是在多尘、潮湿和油污的环境中传感器性能受到影响^[4-5]。磁性传感器不会受到灰尘、水分、油雾等的影响,然而需要磁屏蔽^[6]。因此,一种表现完美的技术在不同的应用环境中可能无法确保足够的精度和可靠性。国内外学者对式角位移传感器全面综述的文献比较少,因此本研究从不同类型电、磁、光感应媒介出发,分别介绍了感应式、光电式、电场式、磁电式等绝对式角位移传感器的原理、结构、感知形状、商业应用场合、局限性以及利用不同传感媒介+时栅技术(高频时钟脉冲插补)的5种绝对式时栅角位移传感器,并对绝对式角位移传感器的未来发展方向进行了展望。

1 电感式绝对式角度传感器

电感式角度传感器由于能够在恶劣和极端的环境中工作,被认为是工业和汽车应用中的不错的选择。电感式传感器利用线圈的自感或多个线圈的互感以获得测量角度。

1.1 基于可变互感的绝对式角度传感器

基于可变互感的角度传感器是利用一、二次绕组间的可变相对位置来改变它们之间的互感,以便在二次(转子)绕组中获得与旋转位置成正、余弦函数关系的端电

压^[7]。旋转式可变差动变压器(rotary variable differential transformer, RVDT)^[8]。旋变是RVDT的变体,可以提供具有最高精度的绝对角度位置^[9-10]。最近对旋转变压器的研究主要集中在高成本、复杂的绕组、信号处理的复杂性、满足高速应用的要求以及电磁干扰的影响等挑战上^[11-12]。

1.2 可变磁阻-基于线圈的绝对式角度传感器

单对极磁阻式旋变能获取绝对位置信息,但精度较低。为了同时满足绝对位置信息和精度的要求,通常选用粗精耦合双通道旋变,如图1所示,转子的激励信号为 U_{12} 、 U_{34} ,定子的感应信号为 U_{N12} 、 U_{N34} 、 U_{N56} 、 U_{N78} 。按照磁路的设计不同双通道旋转变压器又分为独立磁路双通道磁阻式旋变和共磁路粗精耦合磁阻式旋变^[13]。独立磁路双通道磁阻式旋变的精机磁路及绕组和粗机磁路及绕组完全独立,互不干扰,精度高,但体积大。

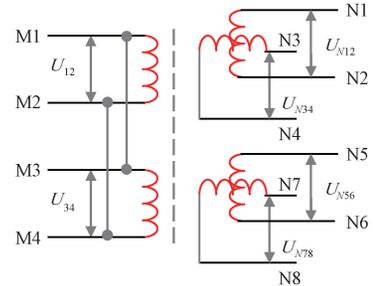


图1 双通道旋变工作原理

Fig. 1 Operating principle of dual-channel resolver

尚静等^[14]提出一种双通道粗精耦合共磁路径向磁阻式旋变结构,通过改变耦合面积实现绝对位置的测量。如图2所示,定子绕组由环形激励绕组、粗机正弦绕组、粗机余弦绕组、精机正弦绕组、精机余弦绕组构成,转子导磁环为1对极(粗通道)与多对极(精通道)相叠加组成,精机为15对极,精机和粗机共用一套磁路。虽然减小了旋变体积,但是粗精机输出信号不能实现完全解耦。

1.3 基于平面线圈的绝对式角度传感器

平面线圈为角位移传感的发展开辟了新的维度^[15]。平面线圈非常适合于有尺寸限制并提供经济高效的制造解决方案。Battu等^[16]提出一种低成本的柔性平面线圈结构绝对式角度传感器(非接触式可变磁阻(variable reluctance, VR)旋转变压器),如图3所示,由平面圆形方式缠绕多圈的激励线圈、布局在印刷电路板(printed circuit board, PCB)单个平面上4个感应线圈,具有扇形

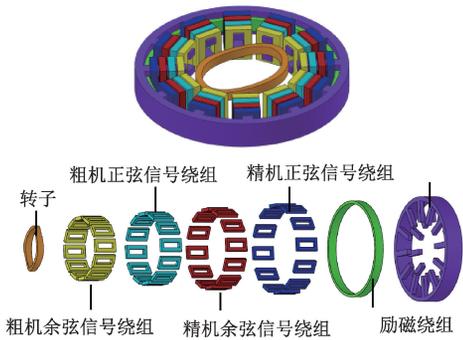


图 2 粗精耦合共磁路变耦合面积磁阻

Fig. 2 The total magnetic coarse-exact and magnet ring

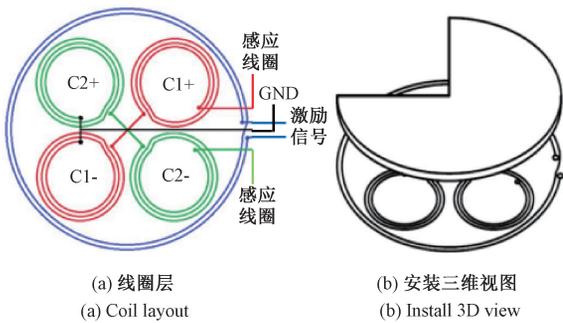


图 3 平面线圈型可变磁阻旋变结构图

Fig. 3 The structure of planar coil VR resolver

孔的圆形可旋转的感应耦合部件组成,对称的感应线圈 C1 和 C2 位于激励线圈内,弯曲并排列成圆柱形图案。感应耦合部件运动时改变感应线圈中的信号,从而感知到正余弦函数的电压信号,实现高分辨率绝对角位移测量。这种平面线圈的传感器适用于安装径向空间受限,传感器输出对感测线圈的轴向错位不敏感,但是该传感器的运动部件进行电气接触,这在许多应用中不是首选。

1.4 商用的电感式绝对式传感器

日本多摩川的绝对式旋转变压器性能优异,环境适应性强。工作温度范围宽($-55^{\circ}\text{C} \sim +158^{\circ}\text{C}$),耐振动、抗冲击,具备小型化、质量轻的特点,在高速旋转的工况下精度达到 $20'$ 。广泛应用于焊接机器人、注塑机等高温作业设备。

国内的上海赢双电机公司在绝对式旋变领域成果显著,其双通道绝对式旋变有 10 个系列,工作温度范围($-55^{\circ}\text{C} \sim +155^{\circ}\text{C}$),防护等级高,耐震动、冲击,最高转速达到 $60\,000\text{ rpm}$,最高精度 $5'$,运行稳定可靠。在电子凸轮、注塑机、数控机床、军用伺服等领域应用广泛,有力推动相关行业发展。

1.5 局限性

虽然基于可变磁阻线圈的角度传感器检测技术较为

简单,但其结构需要采用非标准的转子形状,且精度受限于机械加工公差和绕组分布均匀性。通过采用具有合适形状的平面线圈,提高传感器的稳定性。旋转变压器作为一种特殊的微型电机,在环境适应性和服役寿命方面优势显著。不过,与其他传感器相比,在精度上仍存在一定的提升空间。如何提升驱动系统效率,降低电动机的能源消耗。伴随着“多合一电机”和“油冷电机”等新一代电驱动系统的涌现。研发人员需要采取多种手段,提升其精度和环境的适应性,从而进一步拓宽其应用场景。同时,提高旋转变压器的耐油性和绝缘性能,以满足未来电驱动系统的发展需求。

2 基于光电效应的绝对式角位移传感器

基于光电转换原理进行工作,利用光的干涉、衍射、成像或遮挡等现象,将光信号转换为电信号,通过对电信号的处理来获取角度信息。基于光电转换的角位移传感器有光电编码器、图像式编码器和光栅。

光电编码器一般由光源、光电码盘和光电元件 3 部分组成。其基本原理是随着转子的转动,光源发出的光被码盘调制后带有码盘位置的信息,由光电元件将光信号转换为电信号,通过解码电信号得到位置信息。绝对式光电编码器可分为单码道、多码道、图像式。对绝对式编码器而言,码盘尺寸和分辨率是一对不可调和的矛盾。因此绝对式光电编码器的关键在于位置编码与解码^[17]。表 1 给出了绝对式编码器的 7 种编码方式,各自的分辨率、码道数、算法的复杂度、纠错能力和优缺点。

2.1 单码道绝对式编码器

单码道绝对编码有单码道格雷码、绝对码简码和回文码等。张帆等^[18]提出了应用卡诺图单码道均布式 11 位字长的绝对式单码道格雷码,如图 4(a)所示,需要将 11 组光电传感器均布在与码道直径相匹配的圆周上读取编码盘的位置信息即可实现对角度位置的测量,编码位置的不饱和性成为单码道格雷码在绝对位置检测应用中的唯一缺陷,而且执行效率高的优化搜索算法是一个待解决的问题。郁有文等^[19]提出的绝对码简码,是在格雷码和 M 系列绝对码的基础上,具有格雷码没有粗差和 M 系列绝对码单码道的特点。如图 4(b)所示:码盘图形简单、便于小型化,可以采用金属码盘,适合在恶劣环境下使用。顾震雷^[20]提出的回文码盘,通过一个 9 位字长 504 个位置进行编码,码盘小,但是算法复杂度高,高精度编码困难。

2.2 多码道的绝对式编码器

多码道绝对位移测量是基于游标式或组合式测量原理。张建辉等^[21]提出的反射式格雷码, 2^n 个码字具备

表1 基于不同编码方法的绝对式编码器性能对比

Table 1 Comparison of performance parameters of absolute encoders based on different encoder methods

编码方法	分辨率	码道数	算法复杂度	纠错能力	优点	缺点
反射式格雷码	$360^\circ/2^n$	n	适中	较好	误码率低,抗干扰能力强	解码与编码比较复杂
矩阵码	$360^\circ/2^n$	$n/3$	复杂	一般	信息容量大	解码与编码比较复杂
m 序列	$360^\circ/2^n$	2	较高	较强	自相关性	电路相对复杂,硬件成本高
单码道格雷码	约 $360^\circ/2^n$	1	适中	较好	误码率低,结构简单	信息量有限,抗干扰能力弱
绝对码简码	$360^\circ/2^n$	1	低	较弱	编码简单直接	抗干扰能力差、灵活性差
回文码		1	较低	一般	具有对称性、编码和解码简单	编码效率较低、灵活性差
索引式绝对位置编码		2	较低	无	快速定位	对序列长度变化敏感、编码信息有限、存储成本高

唯一性和单变性,编码可靠。缺点是随着分辨率的提高,码道数相应提高,无法实现微型化。曹振夫^[22]提出的8位矩阵码,如图4(c)所示。虽然对 2^n 个绝对位置进行编码,码道数仅 $n/3$ 条,将大大减小编码器径向尺寸,但是需要使用复杂的矩阵逻辑译码电路和额外的光敏探头才能完成适当的选通。王阳等^[23]提出的M系列绝对码,如图4(d)所示。

解码单元需要时序逻辑电路,需要增加额外的时钟码道,不利于码盘的小型化。王阳等^[25]提出了伪随机码形式的绝对式编码器的方法。伪随机码绝对式编码器的码道数较少,码盘的外径可以减小,更利于传感器的小型化,但是需要特定的算法来进行编码和解码,对信号处理系统的要求较高。

2.3 图像式绝对式光电编码器

为了实现绝对式编码器小型化问题,随着图像处理技术和图像传感器件的飞速发展,自20世纪90年代开始,国内外先后开展图像式绝对式光电编码器的研究。2008年Sugiyama等^[26]使用互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)图像传感器和狭缝盘研制出响应频率为3.2 kHz、14位的绝对式编码器,简易图形结合算法等方法实现高精度的测量。如图5所示,狭缝圆盘有间距为 5.625° 的64个索引码,每个索引码由6位代码组成,并且一个中心基准孔。在每个索引码中,孔表示“1”,无孔表示“0”。每个孔的大小是边长为 $101.4\ \mu\text{m}$ 的正方形,多个相邻的孔连接在一起形成一个矩形。所有中心基准孔均布在半径为15 mm的圆形轨道上,每个中心基准孔之间的距离为1.4726 mm,因此在传感器(2.0 mm)的活动区域中至少有一个索引码,偶数索引码排列在基准孔的外部 and 奇数索引码在基准孔内侧,但是对狭缝盘加工,安装要求比较高。

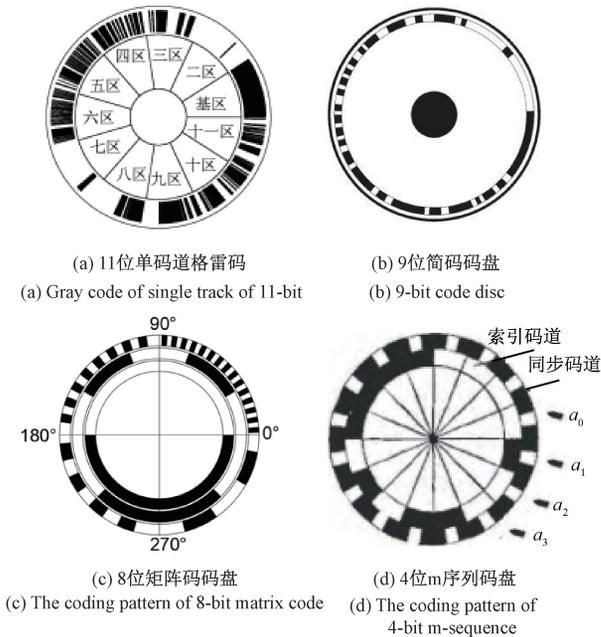


图4 不同编码的码盘图

Fig. 4 Diagram of code disc with different encodings

码盘由内圈的索引码道和外圈的同步码道组成,虽然提出了码盘上刻制一条码道,但却增加了辅助码道,编码器整体结构没有简化,而且需要多个检测器检测位置,这种绝对位置编码并不能解决任意字长编码的问题,不能灵活的在工程上使用。Das等^[24]提出了基于二进制组合逻辑状态的编码模式,虽然极大的提高了分辨率,但是

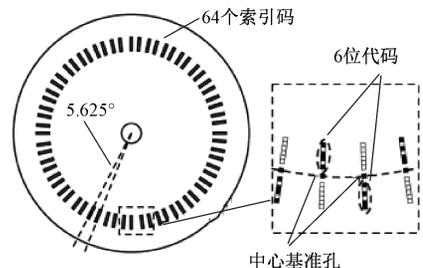


图5 狭缝圆盘示意图

Fig. 5 Schematic diagram of slit disk

为了解决编码器尺寸与分辨率之间的矛盾,谈颖皓等^[27]提出一种基于线阵探测器的单圈绝对式光电编码器,并分别利用图像处理技术读取粗码和利用像素细分技术获得精码,设计了码盘直径40 mm的样机,分辨率达到15位。码盘局部示意图如图6所示,编码单元由标识码、细分码和 n 位二进制码组成。

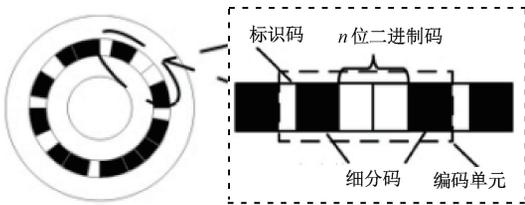


图6 码盘局部示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the partial coded disc

Wang等^[28]利用图像传感器和伪随机序列编码相结合,研制出与国际同类产品性能相当的绝对式编码器。杜颖财等^[29]利用线阵图像传感器和高分辨力编码技术,实现直径为38 mm、刻画有10位单圈码道的编码和译码。图像编码作为近年来新兴发展的产物,使用单码道结合图像传感器便能实现高精度的绝对测量,同时也兼顾了传感器小型化设计的需求。但是实现这种测量方式对图像传感器的测量速度、处理器的计算能力、图像识别算法都提出了较高的要求,总体来说实现难度较大。

2.4 绝对式光栅角位移传感器

圆光栅一般光栅盘、读数头和信号处理电路等组成,光栅盘通常为圆形的玻璃或金属盘,在其表面刻有大量均匀分布,透明和不透明的辐射状条纹形成不同的码道,用于编码角度信息。当光源通过光栅盘时,由于光的衍射效应,会产生一系列明暗相间的干涉条纹——莫尔条纹,通过检测莫尔条纹的数目和位置来计算旋转盘的角度位置。

绝对式光栅角位移传感器由精码道和粗码道组成,精码道是由一系列刻线组成,决定了光栅传感器的精度,粗码道是在整周进行无重复编码,实现光栅传感器的绝对定位。精码道刻线的密集程度决定了光栅角位移传感器的精度,但目前刻线的密集程度基本已经达到瓶颈,从制造上限制了光栅精度的提高^[30]。而在进行粗码道设计时,除了整周无重复位置编码外,还要考虑编码的可扩展、易处理、容错等多方面因素,因此传感器的设计较为复杂^[31-32]。

2.5 商用的绝对式光电编码器

海德汉、雷尼绍、多摩川在光栅与编码器领域各有优势。海德汉的光栅优势显著,整体轴式的最高转速10 000 rpm,最高精度 $\pm 1''$,分辨率28 bit,接口类型丰富^[33]。雷尼绍的绝对式圆光栅在不锈钢圆环柱面刻画

单码道,由RESOLUTE™系统读取信号,抗污能力强,重复定位精度0.01'',最高转速36 000 rpm,采用RS485接口^[34]。日本多摩川绝对式光电编码器,单对极轴式分辨率12 bit、体积小、重1.5 kg,轴径10 mm,多用于机床;多对极孔式的最高分辨率33 bit、最高转速8 000 rpm,能自动检测故障与数据备份,常用于机电控制和机器人领域^[35]。

国内多家公司投身绝对式光电编码器生产,其中浙江锐鹰产品丰富,涵盖分体式、十字联轴、锥轴、直轴系列的多圈和单圈产品,性价比高。其单圈最高分辨率23 bit,多圈最高17 bit,最高定位精度 $\pm 15''$,重复定位精度 $\pm 1''$,最高转速6 000 rpm,最小重量0.003 kg,采用RS485接口,广泛用于伺服驱动控制系统,提供位置和速度反馈^[36]。大连榕树光学生产的单码道绝对式圆光栅分辨率达26 bit,凭借体积小、内径大、易集成、低转动惯量等特性,应用场景广泛^[37]。

2.6 局限性

对绝对式光电编码器而言,码盘尺寸和分辨率是一对不可调和的矛盾,算法复杂度高、高精度的编码困难,而图像传感器对硬件的解算能力,图像识别算法要求比较高;对绝对式光栅而言,虽然光栅的技术成熟可靠,但是刻画又精又细的栅线难以做到。光电传感器对油污、高温、震动、粉尘等环境比较敏感,抗干扰力差,对码盘加工和安装的精度要求较高,加工工艺相对复杂,成本较高,尤其是高精度光栅技术多年来一直被国外卡脖子^[38]。研究新型光学树脂材料代替玻璃、金属;改进材料与封装技术,采用菲林胶片的码盘;研究新型的传感技术、码盘工艺和编码技术;设计抗干扰能力强的信号处理电路和优化光路。

3 磁电式绝对磁编码器

磁编码器主要由磁敏元件、永磁体和信号处理电路组成。磁编码器励磁方式分为线圈励磁和永磁体励磁。

3.1 线圈励磁

不同结构的绝对式磁编码器如图7所示。Zhang等^[39]提出了基于盘式线圈励磁的绝对式磁编码器,如图7(a)所示。编码器由铜板、动盘、集成了5个平面线圈和信号处理电路的定盘组成。5个平面线圈由按规律均布的一个大平面螺旋铜线圈和4个较小的铜线圈构成,动盘表面有两圈规则的铜栅线,根据游标卡尺测量原理的方法,动盘内外圈的栅线数相差1,从而实现绝对位移的测量。但此结构体积较大,重量较重。

3.2 永磁体励磁

永磁体励磁有2种方式:一种是使用旋转永磁体,而另一种则采用一种带齿和槽的钢轮来调节固定磁铁的

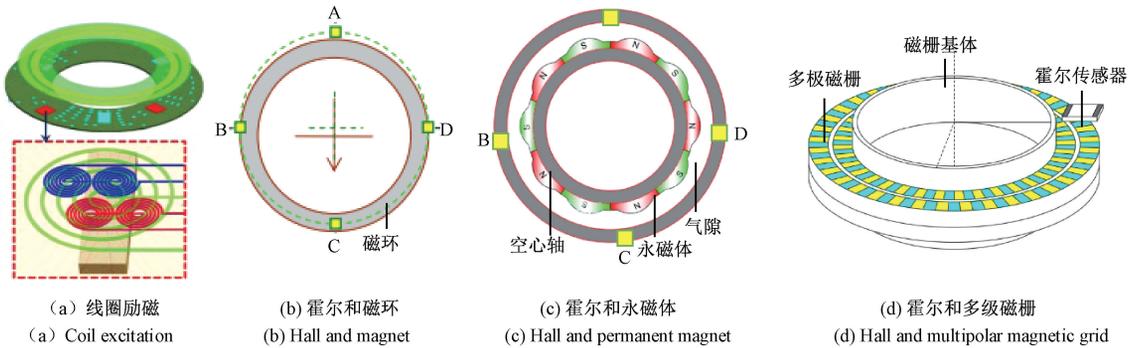


图7 不同结构的绝对式磁编码器

Fig. 7 Absolute magnetic sensors with different structures

磁通量。磁通量调制通过霍尔传感器获取,霍尔传感器具有低成本、高可靠性、磁通密度具有线性响应好、能实现 360° 绝对角度测量,但对传感器和磁体之间的错位非常敏感^[40]。通过单极霍尔式、多极霍尔式、集成霍尔传感器+游标法的特定结构来实现绝对式测量。

1) 单极霍尔式

单极霍尔式绝对磁编码器的单对极永磁体旋转一周,霍尔元件产生正余弦一个周期信号。如图7(b)所示。Wu等^[41]设计了一种具有4个霍尔(A、B、C、D)互差 90° 和NdFeB(钕铁硼)磁环的绝对磁编码器。中心轴磁化的环形磁铁,该中心轴偏离旋转轴一段距离,当磁环和霍尔传感器围绕不同的轴旋转时,可以生成具有不同相位和振幅的4个三角函数信号以确定角位置。此结构对安装的要求比较高,磁场强度分布不均时,导致测量误差;英国雷尼绍公司的绝对式磁编码器由8个呈几何分布的霍尔传感器构成的专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC)模组和轴向磁化的数字化条形编码的磁环组成,通过2个通道实现绝对位置的测量,但是电路复杂。

2) 多极霍尔式

由于单极霍尔式磁编码器旋转一周只能产生一个周期的正余弦信号,传感器的精度和分辨率有限^[42]。为了提高传感器的精度和分辨率必须增加永磁体的极对数, Park等^[43]中提出了单极和多极磁栅相组合,实现绝对位置的测量。Hu等^[44]提出4个霍尔(A、B、C、D)被移位($90^\circ+k360^\circ$)和优化的永磁环产生正弦气隙磁场,来确定正弦和余弦信号,然后可以获得绝对位置,如图7(c)所示。该方法对永磁体产生磁场均匀性和霍尔元件安装精度要求高。

3) 集成霍尔传感器+游标法

基于游标测量原理和集成霍尔传感器实现绝对式测量,永磁体由两个多极磁环组成,称为主码道和游标码道,集成霍尔传感器扫描两个码道,输出两组周期数差1

的正弦信号。通过多极环形磁栅按径向方向分布在环的圆周上,由集成霍尔传感器、两个多极磁栅码道和定子信息调理电路组成绝对式磁编码器^[45-46],如图7(d)所示。定子信号调理电路以集成霍尔元件为核心,通过感应转子磁场的变化,得到转子的角度信息。然而,在这些编码器中,分别使用了磁环和永磁体,很容易受到外部磁场的干扰,而且随着磁极极对数的增加,将有部分磁极不能得到有效识别。

4) 巨磁阻效应

巨磁阻效应(giant magnetoresistance, GMR)是指一种材料在外加磁场作用下,其电导率发生改变,从而导致电阻率发生变化的现象。陈如意等^[47]提出了基于GMR的多圈绝对式磁编码器,可提供15 bit分辨率的位置信息。该编码器由两个GMR感应单元组成,每个感应单元由4个GMR电阻连接到惠斯通电桥电路组成。在旋转磁场的作用下产生的正余弦信号经过A/D转换后,进行反正切运算得到需要的角度值

3.3 商用的绝对式磁编码器

国际上,德国海德汉的绝对式磁编码器由一个磁栅鼓和磁电读数头组成,利用铁钒永磁合金磁阻构成电桥电路测绝对位移^[48]。英国雷尼绍的SAR系列的孔式绝对式磁编码器种类繁多,分辨率23 bit,输出接口丰富^[49]。日本Tamagawa的TS569 MSB系列的绝对式磁编码器分辨率达24 bit,通过检测Z相位实现伪绝对输出^[50]。瑞士Baumer的HMG10/PMG10系列重载编码器采用两端式轴承,能量自给式多圈计数器储备能力高,单圈和多圈的分辨率达20 bit^[51]。

国内不同企业生产的绝对式磁编码器各有特点和应用领域:北京金钢科技生产的中空绝对式DPT双编码器,可在有限空间实现两轴测量。分辨率24 bit、精度 $\pm 0.01^\circ$ 、环形单边7 mm,因体积小、精度高,用于军工和机器人领域^[52]。威海艾迪科的分体式单圈绝对值编码器,采用集成磁传感器,分辨率17 bit,磁钢直径12 mm,

转速 7 200 rpm,重 0.1 kg,主要用于伺服系统^[53]。浙江锐鹰的 SRMAE34 多圈绝对式编码器,分辨率单圈 17 bit、多圈 16 bit,转速 6 000 rpm,重 0.008 kg,服务于伺服控制系统,提供位置和速度控制反馈信息。

3.4 绝对式磁编码器的局限性

目前,国内的大部分磁编码器的精度、稳定性和分辨率取决于所选的集成传感器芯片的性能,芯片的制造制约了磁编码器的发展,精度提升受限。为了提高分辨率,国内外的许多公司开发多极磁环和高性能的解码算法,但会带来干扰和成本增加。磁性材料对温度的敏感性、永磁体老化、磁滞现象、霍尔元件的布局而产生的寄生效应的影响等因素制约了它的应用。虽然线圈励磁、单极霍尔、多极霍尔、集成霍尔传感器+游标圆盘等不同类型的绝对式磁编码器已生产,绝对式磁编码器在电梯、建筑机械等工况下应用比较多,但是对于机器人、伺服系统等精度和体积要求比较高的工况,还是以光电编码器为主。

4 电场式绝对式编码器

电场式编码器通过由定子、转子和信号处理电路组成。定转子的相对位置变化会引起电容的变化,通过信号处理电路实现绝对角位移的测量。崔小强^[54]提出了一种 3 层极板结构的电容式传感器。发射电极和接收电极分布在两定极板上,动板采用正余弦曲线外形尺寸,通过粗机和精机相结合的方式实现绝对式测量。但是 3 层极板对生产工艺和装配精度的要求比较高、传感片的寄生电容和分布电容问题更加突出。Hou 等^[55]提出了一种单相激励绝对式电容编码器,编码器如图 8 所示。

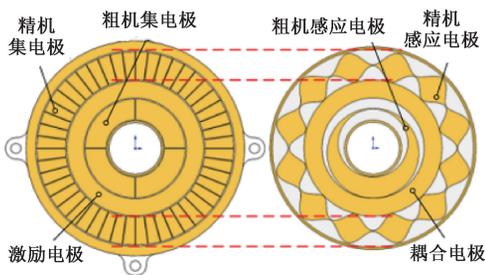


图 8 绝对式电容编码器结构

Fig. 8 Structural diagram of absolute capacitive rotary encoder

编码器由转子和定子组成。转子由平面耦合环、36 个花瓣形精机感应电极、不规则环形的粗机感应电极和耦合电极构成;定子由精机集电极、粗机集电极,单相激励电极构成。通过使用 36 个花瓣形精机感应电极和粗机感应电极的组合,获得了高精度的绝对位置信息。

4.1 商用的绝对电容式编码器

电容绝对式编码器以以色列的 Netzer 为代表,旗下有轴式、孔式的多个系列产品。该品牌编码器具备小型高精度、耐高低温、适应真空环境、抗高振动/冲击、低电磁干扰/电磁辐射等特点,在航空航天、医疗设备、汽车、电子通信等领域广泛应用^[56]。其中孔式的 DS70 型号,分辨率 21 bit,精度 10",尺寸外径 70 mm、内径 30 mm、厚度 10 mm、重量 40 g、转速 1 500 rpm。

国内企业以通用技术集团国测时栅为代表,如电场式纳米圆时栅的测量精度达到 $\pm 0.06''$ 。满足了高端应用领域对高精度的需求。

4.2 局限性

虽然已经有针对绝对电容式传感器开展了许多研究工作,但只有少数实现了商业化。电容式传感器本身具有一定的抗电磁干扰能力,但在强电磁干扰环境下,测量信号受到干扰,再加上寄生电容、边缘效应和温度漂移的影响都会导致测量不准确,测量范围和精度受到电场分布稳定性的制约;高速旋转时,信号处理电路的带宽限制;制造工艺要求高,高精度的加工和装配、复杂的信号处理电路导致成本较高。

5 绝对式时栅角位移传感器

时栅传感器是在传感器内部构建相对匀速运动坐标系,将空间位移量转换为运动坐标系上时间差进行间接测量,而时间差又可以用高频时钟脉冲计数来实现,从而提高空间的分辨率。绝对式时栅传感器按构成媒介的不同,分为电感式、磁场式、电场式、光场式、磁阻效应式等,不论采用何种感知媒介,最后的信号处理都是在微处理器中采用高频时钟脉冲计数来实现位移的测量,而且也获得了显著的实用效果。不同的传感媒介的绝对式时栅传感器如表 2 所示^[57-61]。从传感媒介、原理、绝对测量的结构、测量方式、制作工艺等方面进行了比较。

5.1 电感式绝对时栅角位移传感器

Wang 等^[62]提出的电感式绝对时栅角位移传感器。如图 9 所示,由共享同一套转子、定子和励磁电路的多对极增量传感单元和单对极绝对传感单元组成。定子等分开槽,整周有 84 个测头,每个测头由 4 个槽和 3 组绕组(2 组激励绕组和 1 组感应绕组)组成,2 组激励绕组按空间正交均布在定子齿上,转子齿形按外圆柱面齿形曲线加工。利用变气隙磁导效应,单对极传感单元利用定子和转子之间的装配关系,拾取整周范围内的磁场气隙变化信息。采用单对极单元的线圈绕组作为桥臂,通过桥式电路,实现绝对测量。此结构转子不绕线,降低绕线难度,避免双通道传感单元磁路串扰。

表2 不同测量媒介的绝对式时栅角位移传感器比较

Table 2 Comparison of absolute Time-grating angular displacement sensors with different measuring media

类型	电感式 ^[57]	磁场式 ^[58]	电场式 ^[59]	单码道式 ^[60]	光场式 ^[61]
传感媒介	磁场	磁场	电场耦合	时变磁场	交变光场
原理	变气隙磁导效应	电磁感应	电容耦合原理	时变磁场	光电转换
结构	由共享一套转子、定子和励磁电路的多对极增量传感单元和单对极绝对传感单元组成。	由内外环的环形激励线圈与对极数互质的正弦型感应线圈构成的定子和双层铜箔阵列的转子组成。	由动盘、定盘、感应电极、4组激励电极、外圈反射电极和接收电极、中圈多对极精测和内圈单对极粗测组成。	由正余弦激励线圈、感应线圈和环形平板结构定子导磁体组成定子部分,环形齿槽结构导磁体转子组成。	由6个等分区间(相邻区间的栅距对应差对极码道栅距)的定盘、差对极游标码等分的动盘、光路系统组成。
测量方式	特殊结构	精机+精机	精机+粗机	单码道	单码道(差极游标编码)
制造商	大族	大族	通用	实验室	实验室
状态	XX军工企业	商用	商用	实验室	实验室
分辨率/bit	20~22	23	28	16	
精度/(")	±4.752	±5	±1	±13.43	±45
感知电极的形状	定子等分开槽按规律分布线圈、转子外圆柱面齿形曲线	扇环阵列的转子、正弦型叠加的感应线圈和环形的激励线圈构成的定子	双正弦形感应电极、扇形激励电极、两圈面积相等的圆环为接收电极	正余弦形激励线圈、扇形闭合线圈为感应线圈、等分齿槽的环形转子	上下双正弦栅面拼接成定盘、交替透遮光的类矩形栅面阵列组成动盘
对极数	105	6,15	精测64、粗测1	18	精测450、粗测449
激励信号	4 KHz	2 MHz	20 KHz	4 KHz	1 KHz
优点	体积小、转子不绕线、避免双通道传感单元磁路串扰	体积小、内外径比例大,安装便捷	体积小,转子不引线,分时复用反射电极消除信号串扰	体积小、加工简单,避免多码道的信号串扰	体积小、采用光学镀膜、分时控制

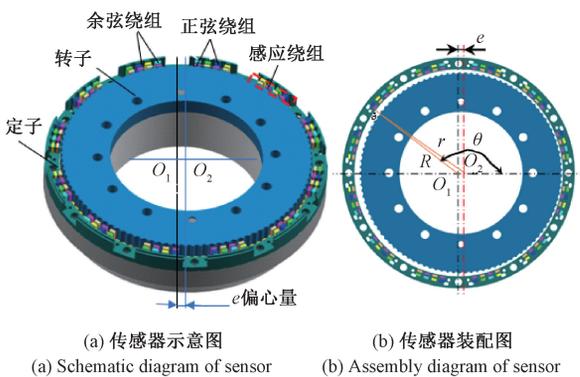


图9 绝对感应式传感器结构

Fig. 9 Structure of absolute induction sensor

杨亚权^[63]提出了共享磁场型绝对式时栅角位移传感器。传感器结构如图10所示,由双层铜箔阵列的转子和内外环的环形激励线圈和对极数互质的正弦型感应线圈的定子组成。

将多对极数感应线圈靠近多对极数的铜箔阵列,使上下两组不同对极数的感应线圈共享内外环激励线圈产

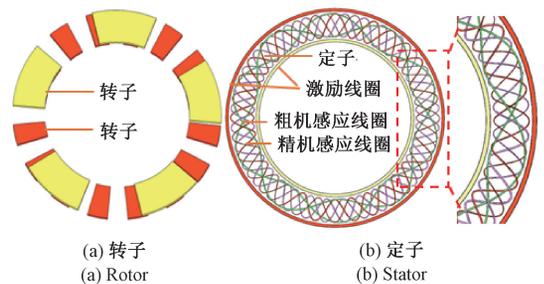


图10 平面共享磁场绝对式时栅传感器结构

Fig. 10 Structural diagram of planar shared magnetic field absolute time grating

生的磁场源,不同对极数的感应线圈产生的两种信号的相位差存在内在变化关系,从而实现绝对对测量。此结构可以使传感器的内外径比例缩小,降低了磁场相互耦合对传感器精度的影响。

5.2 电场式绝对时栅角位移传感器

利用电容耦合原理,刘小康等^[57]提出了一种基于二次调制的单圈绝对式时栅角位移传感器结合韦根多圈计

数模块,实现高精度多圈绝对式测量。单圈绝对式传感器如图 11 所示。

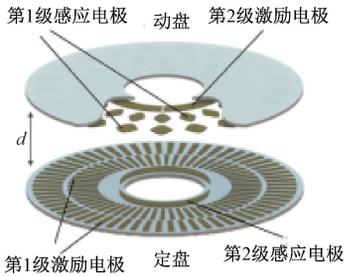


图 11 电场式绝对时栅传感器结构

Fig. 11 Structure of electric field absolute time grating sensor

电容阵列 3 圈结构的定盘和动盘采用 PCB 工艺设计,定盘由外圈和中间圈构成第 1 级激励电极和环形的第 2 级感应电极组成,动盘由外圈和中间圈构成的第 1 级感应电极和环形的第 2 级激励电极组成,其中第 1 级激励电极的形状是扇环形,第 1 级感应电极形状是双正弦形。第 1 级作为精测信号,第 2 级作为粗测信号,精测和粗测相结合实现单圈绝对式角位移测量。利用了二次调制方案,实现了中间圈和内圈的传感部分空间信息的融合,将融合后产生的整周单周期信号作为粗测信号,精测信号和粗测信号分别与参考信号进行比较,最终得到传感器的绝对角位移。精测信号和粗测信号相结合不需要复杂的编码解码过程,就能实现高精度单圈绝对式角位移测量,单圈绝对式传感器再加上多圈计数模块就实现多圈绝对式测量。精测信号和粗测信号共用了一组激励电极,实现了单边引线,无需滑环,结构更加紧凑。此外采用 PCB 制造传感片工艺简单,价格低廉。

5.3 单码道绝对式时栅角位移传感器

鲁进等^[58]提出了基于时变磁场的单码道绝对式时栅角位移传感器,如图 12 所示,传感器由正余弦激励线圈、扇形的绝对感应线圈、环形的增量感应线圈构成的环

形 PCB 板和环形平板结构导磁体构成的定子部分和环形齿槽结构导磁体转子部分组成。两路绝对感应线圈输出绝对感应信号和增量感应线圈输出增量感应信号间特定的相位差来标记不同对极,从而实现绝对式测量。但是这种齿槽结构加工要求较高且漏磁比较严重,从而影响感应信号的质量。

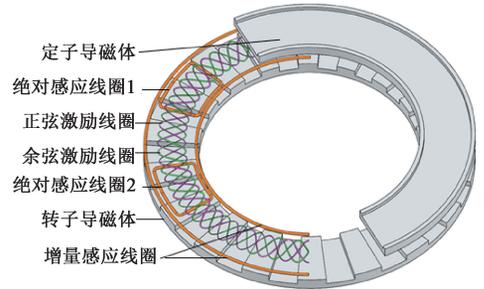


图 12 单码道绝对式时栅位移测量模型

Fig. 12 Measurement model of single channel absolute time grating displacement

5.4 光场式绝对时栅角位移传感器

冷从阳等^[59]提出一种差极单码道绝对光场式时栅传感器,在单一码道上同时实现增量和绝对测量,如图 13 所示。由定盘(上、下双半正弦栅面拼接而成,相邻的透光面间隔 90°)、动盘(交替透光、遮光的类矩形栅面阵列)、光源、光电接收器等组成。用差对极的游标编码方法,将游标编码的两个差对极码道集成到一个码道(动盘)上,彼此互相平分一个圆周,再在另外一个码盘(定盘)上,设置 6 个等分区间,相邻两个区间的栅距分别对应差对极码道的栅距(如 A_0 为 N 等分, B_1 为 $N+1$ 等分)。当动盘运动的时候,4 组依次相差 90°的正弦栅面的透光面的空间位置,用光电器件接收这 4 个透光面的光强变化,经光电转换后得到电行波信号的相位差即粗码,再加上对极内的精码,从而实现绝对式测量。

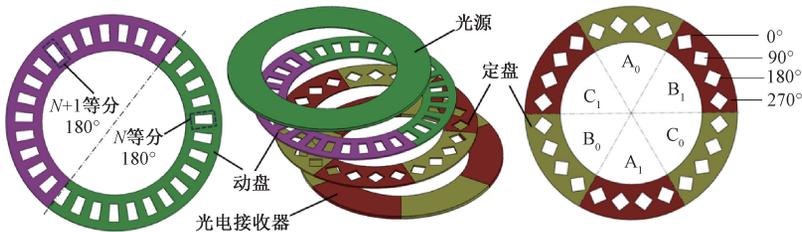


图 13 光场式单码道绝对测量

Fig. 13 Diagram of optical field single track absolute measurement system

针对不同的传感媒介,采用了特殊结构、组合式(精机+粗机、精机+精机)和游标式单码道结构,构建匀速运动的磁场、电场、光场,利用高频时

钟脉冲对感应信号相位进行插补计数,将空间的测量转换为时间的测量,从而实现时栅传感器的绝对测量。

5.5 绝对式时栅传感器的商业化

随着国外对高精度角位移传感器的技术封锁,为时栅角位移传感器发展带来了机遇。通过专利授权,产生了多家公司,专注于实现时栅技术产业化,聚焦高端装备工程化和产业化。

重庆大族时栅基于磁场式的绝对时栅角位移传感器有整体式、标准分体式、紧凑型分体式3种结构,共9个品种,支持多种通讯类型。其中整体式 HTRA1-0200A 最高精度 $\pm 2''$ 、重复性 $\pm 1''$ 、分辨率 23 bit。产品应用于数控机床附件、数控回转台、大中小 DD 马达、机器人关节臂、光电吊舱等领域。

通用技术集团国测时栅基于纳米时栅技术(电场式),研发出高精密绝对式角位移传感器,含整体式、分体式结构,支持多种通讯模式,产品多样且能适应不同工况。分体式有 RAE 等6个系列20个品种,如 RAD 结构轻薄(重 120 g、精度 $\pm 5''$ 、分辨率 26 bit),RAN 窄环宽、非接触、大中空;整体式有 RAT 等3个系列4个品种,均自带轴承和保护外壳,像 RAS 精度 $\pm 1''$ 、分辨率 28 bit,最高转速 3 000 rpm。产品已应用于数控机床等高端装备,企业单线年产量达 50 000 套,正实现换道超车和进口替代。

随着时栅传感器技术研究的持续深入,智能化发展成为新的趋势。研究团队积极探索创新,提出了具备自校正功能^[60-61]、自标定功能^[64]、安装状态自诊断、基于多场耦合^[65]、双层正交性^[66]等先进功能的绝对式时栅角位移传感器,为未来高精度测量与智能控制领域的发展奠定了坚实基础。

5.6 绝对式时栅传感器的局限性

结构与制造方面:粗测与精测或者精测与精测组合测量,需建立两套传感和测量单元,会导致传感器体积较大。同时,其定子、转子等结构加工精度要求较高,制作工艺复杂,绕线难度也较大,这些因素可能增加生产成本和生产周期。信号干扰方面:激励绕组与感应绕组之间寄生电容,会对感应信号产生干扰。并且,激励磁场之间也可能互相耦合到对方的感应线圈上,导致测量精度下降。环境影响方面:尽管有一定的环境适应性,但在一些极端环境条件下,如超高温、超低温、强磁场、强振动等环境中,其性能可能会受到影响,导致测量精度下降。不过,需要注意的是,随着技术的不断发展,这些局限性也在逐步得到改善和克服。例如,新型的时栅角位移传感器通过改进结构设计和信号处理方法,在一定程度上提高了抗干扰能力和环境适应性。

6 绝对式角位移传感器的理论研究

测量原理方面:基于不同的物理原理和不同的物理

原理+时钟脉冲信号作为位移测量基准实现角位移的测量。

绝对测量方案方面:常采用单码道、“粗机+精机”或者“精机+精机”的组合式测量方法^[67],利用感知部件对极数互质的特性实现绝对测量,减小信号干扰,提高精度。3种绝对测量方案的比较如表3所示。

表3 常见绝对测量的3种方案比较
Table 3 Comparison of three common methods for absolute measurement

方案	单码道	粗机+精机	精机+精机
结构复杂度	最低	中等	最高
精度	中等	高	最高
多圈方案	依赖电池/齿轮	粗机多圈	多圈
抗干扰能力	一般(光学/磁性限制)	较强(粗机抗干扰)	最强(冗余校验)
成本	低~中	中~高	最高

从表3可以看出,单码道绝对测量在成本、体积和响应速度上的优点,但分辨率、多圈可靠性和抗干扰能力较弱,双通道适用于更高要求的工业场景,但成本和复杂度更高。为了提升单码道的分辨率和抗干扰能力,可以采用微机电系统(microelectron mechanical systems, MEMS)工艺;为了平衡成本和性能,可以采用混合方案:“单码道+冗余校验”或者“单码道+增量辅助”。

小型化设计方面:基于不同物理原理与 PCB 技术或柔性技术相结合,在实现高精度测量的同时减小传感器体积。

抗干扰方面:通过优化感应结构和信号处理方式,进一步降低环境敏感度,或者采用混合式设计(光学+磁性备份、多模态传感与信息融合^[68]、多参量测量等)。

多学科技术融合方面:光学、机械、材料学、信号处理算法等跨学科研究,通过理论建模优化抗污染、抗电磁干扰的能力。

误差修正与补偿方面:通用的方法有查表法、神经网络、谐波修正等。3种误差修正与补偿的比较如表4所示。

从表4可以看出选择何种补偿方法取决于误差本质,静态低维选查表、周期误差必选谐波修正,多源耦合误差、环境时变系统选神经网络。但是在工况环境下,可以采用分层补偿(先用谐波修正消除周期性误差,再用查表法补偿剩余静态非线性(如温度漂移),最后再用神经网络处理耦合残留误差)。或者组合补偿策略(查表法+谐波修正,或者查表法+BP神经网络)。随着技术的不断发展出现了许多新的误差修正与补偿技术。群智能的量子效应模型,建立非线性误差的混沌预测补偿

表4 3种误差补偿技术的对比

Table 4 A comparison of three error compensation techniques

特性	查表法 ^[69]	神经网络 ^[70]	谐波修正法 ^[71]
适用误差	静态非线性	复杂非线性	周期性误差
精度	依赖插值	非常高	对周期误差高
实时性	极高	中-低	中
计算成本	极低	高	中
建模难度	中	高	中
适应性	差	中	差
存储空间	高	中	低
优点	简单、静态 误差好	逼近复杂 非线性关系	周期性 误差克星
缺点	维度灾难、 适应性差	黑箱模型、 需海量数据	限周期误差、 需相位信号

算法^[72]、结合 AI 算法(如深度学习)进行实时误差补偿、自标定^[73]、物联网结合实现远程校准^[74]、基于实时工况环境参数动态调整输出,结合数字孪生技术实现自适应补偿系统^[75]。

仿生与新兴原理方面:仿生编码原理、量子编码和原子时栅的绝对测量理论。理论研究的核心目标是在提高精度、分辨率和可靠性的同时降低成本。

7 结 论

在深入探究绝对式角位移传感器的过程中,以不同的传感机理为核心脉络,对各类绝对式角位移传感器展开了阐述。通过分析,洞察到绝对式角位移传感器在多个维度的变革与发展。

从结构设计来看,根据不同的传感机理不断推陈出新。电感式采用螺线管结构、粗机+精机、平面线圈等结构;光电效应式采用单码道、多码道+优化编码,而图像传感器与编码技术的融合,带来了全新的测量思路;磁电式包含磁钢与感应线圈、磁钢与霍尔传感器的组合等结构;电场式有着独特的电极分布的粗机+精机的结构;而时栅式根据不同传感机理设计了特殊线圈的定转子、精机+精机、差极+单码道等结构的创新发展。这些不同的结构形式在满足多样化测量需求的同时,也不断推动着传感器性能的提升。

在感知单元层面,从简单的栅线演进到复杂高效的栅面,最后迈向高度集成的阵列结构。这一变革极大地提升了传感器的感知精度与信息处理能力。与此同时,感知电极的形状也愈发丰富多样,电感式有环形、螺旋形等;光电式的码盘上有规则或特殊编码形状的透光、遮光

区域;磁电式有平面线圈、环形磁环等;时栅式从常见的环形线圈,到扇形、扇面、正弦形、矩形,再到别具特色的上下双半正弦栅面以及类矩形栅面等,每种形状都因其独特的物理特性,在不同的应用场景中展现出独特的优势。

在激励信号方面,激励方式有单相、两相,信号频率由单频向多频激励发展。多频激励技术的应用,不仅有效提高了传感器的测量精度和抗干扰能力,还为其在复杂环境下的稳定运行提供了有力保障。

传感媒介方面,从单一媒介进行信号传输与感知,逐渐向多媒介耦合的方向转变。这种多媒介耦合的模式,充分整合了不同媒介的优势,显著增强了传感器对复杂环境的适应性和测量的准确性。

测量参数方面,从单纯的角位移测量,逐步拓展到角位移与扭矩、角位移与直线位移等多参量的同步测量。这一转变使得传感器能够为工业生产和科学研究提供更为全面、丰富的数据支持。

为了适应现代电子设备对低功耗和高效能的需求,绝对式角位移传感器在电路设计上采用了低功耗的控制电路,并集成了先进的能量收集技术,如太阳能、振动能、磁场能等。这些技术的应用,不仅降低了传感器的能耗,还为其在能源有限的环境下长期稳定工作提供了可能。此外,内置的微型处理器,极大地提升了系统的响应速度和安全性,使其能够更加迅速、准确地处理海量数据。

展望未来,随着人工智能、新材料技术、边缘计算等前沿领域的飞速发展,绝对式角位移传感器的发展将迎来更为广阔的空间。其发展趋势不仅聚焦于高精度测量和低功耗设计,更强调针对特殊工况环境的数据处理能力。未来的传感器将具备主动感知、深度分析、智能决策以及自主学习与自适应的强大能力,以满足不断变化的工业生产和科学研究需求。综合来看,绝对式角位移传感器的未来发展趋势可概括为高精度、高稳定性、低功耗、微型化、智能化、网络化、自主化、非接触式测量、多功能集成和多物理量融合测量。这些发展趋势将共同推动绝对式角位移传感器在各个领域的广泛应用和深入发展,为人类社会的科技进步和产业升级注入强大动力。

参考文献

- [1] 卢国纲. CIMT2017 展览会高精度绝对式位移传感器评述[J]. 世界制造技术与装备市场, 2017(5):47-51.
- LU G G. Review of high-precision absolute displacement sensors at CIMT2017 exhibition [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2017(5):47-51.
- [2] ASCHENBRENNER B, ZAGAR B G. Analysis and validation of a planar high-frequency contactless absolute

- inductive position sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2015, 64(3):768-775.
- [3] PAUL S, CHANG J, FLETCHER J E, et al. A novel high-resolution optical encoder with axially stacked coded disk for modular joints: Physical modeling and experimental validation[J]. IEEE Sensors, 2018, 18(14):6001-6008.
- [4] 郭永彩, 赵毅, 高潮. 一种绝对式容栅测量新技术[J]. 光电工程, 2010, 37(2):69-73.
GUO Y C, ZHAO Y, GAO CH. An absolute measurement technique using capacitive displacement sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(2):69-73.
- [5] HOU B, LI CH, GAO ZH Y, et al. Design, optimization, and compensation of a high-precision single-excitation absolute capacitance angular encoder up to $\pm 4^\circ$ [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10):8161-8171.
- [6] 袁野. 绝对式磁编码器设计及其在伺服系统的应用[J]. 传感技术学报, 2019, 32(4):625-630.
YUAN Y. Design of an absolute magnetic encoder and its applications in servo systems [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(4):625-630.
- [7] YE L, YANG M, XU L. Rotor study of inductive angle sensor [C]. 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2012: 697-701.
- [8] JONG J N M D, EARLE R L. Rotary variable differential transformer[P]. US4551699A, 1985.
- [9] AUNG N L H, BI CH, AL MAMUN A, et al. A demodulation technique for spindle rotor position detection with resolver [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2013, 49(6):2614-2619.
- [10] SUN L ZH. Analysis and improvement on the structure of variable reluctance resolvers[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2008, 44(8):2002-2008.
- [11] WAN J Q, LI X SH, GUO H. The analysis and design of high-speed brushless resolver plus R/D converter shaft-angle measurement system[C]. 5th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2001: 289-292.
- [12] BAHARI M, DAVOODI A, SANEIE H, et al. A new variable reluctance PM-resolver [J]. IEEE Sensors, 2020, 20(1):135-142.
- [13] SHANG J, HU J H, XU Y X. The parameter design and calculation for axial-flux resistance resolver [C]. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011:3378-3382.
- [14] 尚静, 王昊, 刘承军, 等. 粗精耦合共磁路磁阻式旋转变压器的电磁原理与设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13):3938-3944.
SHANG J, WANG H, LIU CH J, et al. Design and magnetic principle analysis of one kind of dual channels total magnetic[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(13):3938-3944.
- [15] TANG Q F, PENG D L, WU L, et al. An inductive angular displacement sensor based on planar coil and contrate rotor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7):3947-3954.
- [16] BATTU P R, ASHWIN M, GANESH S. Low-cost planar coil structure for inductive sensors to measure absolute angular position [J]. 2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies, 2017:14-18.
- [17] MATSUZOE Y, TSUJI N, NAKAYAMA T, et al. High-performance absolute rotary encoder using multitrack and M-code [J]. Optical Engineering, 2003, 42(1):124-131.
- [18] 张帆, 朱衡君. 基于单码道绝对位置编码理论的11位字长旋转编码器设计[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(3):80-85.
ZHANG F, ZHU H J. Design of prototype of a length 11 rotary encoder based on single-track gray codes [J]. Journal of Beijing Jiao Tong University, 2010, 34(3):80-85.
- [19] 郁有文, 常健. 绝对码编码器中一种新型的编码方法[J]. 仪器仪表学报, 2004(4):541-544.
YU Y W, CHANG J. A modern coding way of absolute encoder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004(4):541-544.
- [20] 顾震雷. “回文”码制光电编码盘及其设计方法; CN1069120A [P]. 1993-02-17.
GU ZH L. Design of Huiwen code based photoelectric coding disc; CN1069120A [P]. 1993-02-17.
- [21] 张建辉, 陈震林, 张帆. 绝对式光电编码器的编码理论研究进展[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1):1-12, 197.
ZHANG J H, CHEN ZH L, ZHANG F. Advances in

- coding theory of absolute optical encoders[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(1): 1-12,197.
- [22] 曹振夫. 小型绝对式矩阵编码器[J]. *光学机械*, 1985(5):65-70.
- CAO ZH F. Micro absolute matrix encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1985(5):65-70.
- [23] 王阳,邱成,朱衡君. 基于m序列索引式绝对位置编码[J]. *电子测量与仪器学报*,2007,21(2):77-80,85.
- WANG Y, QIU CH, ZHU H J. An absolute angular encoder based on m-sequence[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2007,21(2):77-80,85.
- [24] DAS S, SARKAR T S, CHAKRABORTY B, et al. A simple approach to design a binary coded absolute shaft encoder[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016,16(8):2300-2305.
- [25] 王阳,邱成,朱衡君. 基于伪随机序列的索引式绝对位置编码[J]. *计量学报*,2007(2):118-123.
- WANG Y, QIU CH, ZHU H J. Absolute encoder based on Pseudo-random sequence [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007(2):118-123.
- [26] SUGIYAMA Y, MATSUI Y, TOYODA H, et al. A 3.2 kHz, 14-bit optical absolute rotary encoder with a CMOS profile sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(8):1430-1436.
- [27] 谈颖皓,袁波,孟子博. 基于线阵探测器的单圈绝对轴角编码器[J]. *光子学报*,2011,40(12):1771-1775.
- TAN Y H, YUAN B, MENG Z B. A singletrack absolute angular encoder using the linear detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011,40(12):1771-1775.
- [28] WANG H, WANG J, CHEN B, et al. Absolute optical imaging position encoder[J]. *Measurement*, 2015, 67: 42-50.
- [29] 杜颖财,宋路,万秋华,等. 基于线阵图像传感器的高分辨率单圈绝对式编码方法[J]. *光学学报*,2016, 36(11):111-117.
- DU Y C, SONG L, WAN Q H, et al. High-resolution absolute code disk based on linear array image sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016,36(11):111-117.
- [30] 高旭,李舒航,马庆林. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*,2019,12(4):741-752.
- GAO X, LI SH H, MA Q L. Development of grating based precise displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2019,12(4):741-752.
- [31] 冯超鹏,祝连庆,潘志康,等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法[J]. *仪器仪表学报*,2016,37(11): 2459-2464.
- FENG CH P, ZHU L Q, PAN ZH K, et al. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11):2459-2464.
- [32] 韩旭东,徐新行,刘长顺,等. 用于星载激光通信终端的绝对式光电角度编码器[J]. *光学精密工程*, 2016,24(10):2424-2431.
- HAN X D, XU X H, LIU CH SH, et al. Absolute optical angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016,24(10):2424-2431.
- [33] 陈迷. 高精度海德汉编码器的处理及应用[D]. 成都:中国科学院大学(光电技术研究所),2014.
- CHEN M. Processing and applying of the heidenhain encoders with high precision[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics), 2014.
- [34] 韦湘宜,丁红昌,曹国华. 光电编码器检测技术的研究现状及发展趋势[J]. *电子科技*,2015,28(9):184-188.
- WEI X Y, DING H CH, CAO G H. Current status and development of detection of photoelectric encoders[J]. *Electronic Science and Technology*, 2015, 28(9):184-188.
- [35] YU H, WAN Q H, LU X R, et al. High-precision displacement measurement algorithm based on a depth fusion of grating projection pattern[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(4):1049-1056.
- [36] 任曦. 基于图像的绝对式圆光栅测角技术研究[D]. 成都:中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所),2020.
- REN X. Research on angle measurement technology of absolute circular grating based on image[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics), 2020.
- [37] XING H W, YE G Y, LIU H, et al. High-accuracy and high-tolerance laser encoder with a grating-pyramid configuration[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(8): 8277-8283.

- [38] 董莉莉,熊经武,万秋华. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学精密工程,2000(2):198-202.
DONG L L, XIONG J W, WAN Q H. The development trends of optoelectronic axial encoder[J]. Optics and Precision Engineering, 2000(2):198-202.
- [39] ZHANG Z J, NI F L, DONG Y Y, et al. A novel absolute magnetic rotary sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(7):4408-4419.
- [40] 黄姗姗. 磁编码器的设计与实现[D]. 南京:东南大学,2019.
HUANG SH SH. Design and implantation of magnetic encoders[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [41] WU S T, CHEN J Y, WU S H. A rotary encoder with an eccentrically mounted ring magnet[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(8):1907-1915.
- [42] 曾一凡,曹春琴. 单对磁极磁编码器的信号获取方案[J]. 仪表技术与传感器,2011(3):6-8,14.
ZENG Y F, CAO CH Q. Signal acquirement method of single pair-pole encoder[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(3):6-8,14.
- [43] PARK J W, NGUYEN H X, TRAN N C, et al. A linear compensation method for improving the accuracy of an absolute multipolar magnetic encoder[J]. IEEE Access, 2021(9):19127-19138.
- [44] HU J H, ZOU J B, XU F, et al. An improved PMSM rotor position sensor based on linear hall sensors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11):3591-3594.
- [45] 邹添,倪风雷,李斐然,等. 一种新型大中心孔绝对式磁编码器[J]. 仪器仪表学报,2016, 37(7):1532-1538.
ZOU T, NI F L, LI F R, et al. A new absolute magnetic encoder with big hallow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7):1532-1538.
- [46] NGUYEN T H, NGUYEN H X, TRAN T N C, et al. An effective method to improve the accuracy of a Vernier-type absolute magnetic encoder[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8):7330-7340.
- [47] 陈如意,周翟和,王锋,等. 基于TLE5012B的高精度多圈绝对式磁编码器设计[J]. 测控技术,2017, 36(7):116-120.
CHEN R Y, ZHOU ZH H, WANG F, et al. Design of high multiloop absolute magnetic encoder based on TLE5012B[J]. Measurement and Control Technology, 2017,36(7):116-120.
- [48] 崔丽. 2009年国内旋转编码器市场分析[J]. 电气时代,2009(5):28,30.
CUI L. Analysis of domestic rotary encoder market in 2009[J]. Electrical Age, 2009(5):28,30.
- [49] 陈洪生,王寅,邱鑫,等. 磁编码器研究现状及展望[J]. 微特电机,2023, 51(11):71-78.
CHEN H SH, WANG Y, QIU X, et al. Research status and prospect of magnetic encoders[J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(11):71-78.
- [50] 梁芳萍,曹广忠,赵磊,等. 磁编码器技术现状及发展研究[J]. 自动化仪表,2021,42(8):1-6,12.
LIANG F P, CAO G ZH, ZHAO L, et al. Current status and development of magnetic encoder technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2021,42(8):1-6,12.
- [51] 李安福. 基于KEA8和AS5048A高效磁编码器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2020,20(2):12-15,18.
LI AN F. High-efficiency magnetic encoder design based on KEA8 and AS5048A [J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2020,20(2):12-15,18.
- [52] 生迪迪. 磁编码器设计及误差补偿研究[D]. 吉林:东北电力大学,2022.
SHENG D D. The design and error compensation research of magnetic Encoder [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2022.
- [53] 寇丽萍,夏超英. 基于TLE5012可编程磁编码器的设计[J]. 电源学报,2016,14(1):35-42.
KOU L P, XIA CH Y. Design of programmable magnetic encoder based on TLE5012 [J]. Journal of Power Supply, 2016,14(1):35-42.
- [54] 崔小强. 电容式绝对编码角位移传感器的研究[D]. 长春:长春理工大学,2019.
CUI X Q. Research on capacitive absolute coded angular displacement sensor[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [55] HOU B, LI CH, GAO ZH Y, et al. Design, optimization, and compensation of a high-precision single-excitation absolute capacitance angular encoder up to $\pm 4^\circ$ [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,

- 2019,66(10):8161-8172.
- [56] WANG H W, PENG K, LIU X K, et al. Design and realization of a compact high-precision capacitive absolute angular position sensor based on time grating[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3548-3557.
- [57] 刘小康,柳康,蒲红吉,等. 基于二次调制的高精度多圈绝对式时栅角位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2021,42(5):90-98.
- LIU X K, LIU K, PU H J, et al. High-precision multi-turn absolute time-grating angular displacement sensor based on re-modulation scheme[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(5):90-98.
- [58] 鲁进,张星,谢述祥. 单码道绝对式时栅角位移传感器研究[J]. 机械工程学报,2023,42(5):90-98.
- LU J, ZHANG X, XIE SH X. Single-coding track absolute Time Grating displacement sensor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023,42(5):90-98.
- [59] 冷从阳. 差极单码道绝对式时栅角位移传感器硬件系统设计[D]. 重庆:重庆理工大学,2022.
- LENG C Y. Hardware system design of differential single code channel absolute time grid angular displacement sensor[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [60] 周海宁. 基于复合时变磁场平面型绝对式时栅角位移传感器研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2023.
- ZHOU H N. Research on planar absolute time-grating angular displacement sensor based on composite time-varying magnetic field [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [61] 王阳阳. 具备自校正功能的绝对式时栅角位移传感器研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2017.
- WANG Y Y. Research on absolute type time-grating angular displacement sensor with self-calibration function[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017.
- [62] WANG Y Y, QIN Y, CHEN X H, et al. Absolute inductive angular displacement sensor for position detection of YRT turntable bearing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022,69(10):10644-10655.
- [63] 杨亚权. 平面共享磁场型绝对式角位移传感器研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2021.
- YANG Y Q. Study on the planar shared magnetic field absolute angular displacement sensor [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2021.
- [64] 王阳阳,陈锡侯,彭东林,等. 具备自标定功能的绝对式时栅位移传感器研究[J]. 工具技术,2017,51(4): 98-101.
- WANG Y Y, CHEN X H, PENG D L, et al. Absolute-type time-grating displacement sensor with self-calibration function[J]. Tool Technology, 2017, 51(4):98-101.
- [65] 崔南川. 基于多场耦合的绝对式角位移时栅传感器测量误差与实验研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2024.
- CUI N CH. Measurement errors and experimental research of the absolute angular displacement time grating sensor based on multi field coupling [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024.
- [66] 周润. 双层正交型绝对式时栅角位移传感器的信号处理与误差分析[D]. 重庆:重庆理工大学,2023.
- ZHOU R. Signal processing and error analysis of double-layer orthogonal absolute time grating angular displacement sensor [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [67] 王阳阳. 转台轴承精密位置检测方法及其传感器研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.
- WANG Y Y. Research on precise position detection method and sensor of turntable bearing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [68] 陈鸿友,张桁潇,余海游,等. 多场耦合绝对式时栅角位移传感器误差分析及优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2023, 37(7):120-128.
- CHEN H Y, ZHANG H X, YU H Y, et al. Error analysis and optimization of multi-field coupling absolute time-grating angular displacement sensors[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023,37(7):120-128.
- [69] 杨成宗. 新型高精度单码道绝对式磁编码器的设计及优化[D]. 吉林:东北电力大学,2024.
- YANG CH Z. Design and optimization of a new high-precision single channel absolute magnetic encoder[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2024.
- [70] 谭丁诚. 六自由度工业机器人末端定位误差补偿研究[D]. 吉林:吉林化工学院,2024.
- TANG D CH. Research on compensation for end positioning error of 6-DOF industrial robot [D]. Jilin:

Jilin Institute of Chemical Technology, 2024.

- [71] 张治滔. 基于双周期特征磁场的绝对式时栅角位移传感器研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2024.
ZHANG ZH T. Research on absolute angular displacement sensor based on dual-period characteristic magnetic field[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024.
- [72] JIANG C L, TIAN ZH H, YU W J. Displacement measurement technology of nano grating sensor based on HHT algorithm [J]. Microelectronics Journal, 2021, 109: 104986.
- [73] 苟李. 面向复杂机电系统的时栅角位移传感器复合自标定方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
GOU L. Research on compound self-calibration method of time grating angular displacement sensor for complex electromechanical systems[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [74] 秦毅,王阳阳,彭东林,等. 电感式角位移传感器技术综述[J]. 仪器仪表学报,2022,43(11):1-14.
QIN Y, W Y Y, PENG D L, et al. Inductive angular displacement sensors technologies: A review [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(11): 1-14.
- [75] 陈绍涛. 基于数字孪生的工业机械手状态监测与误差

补偿系统[D]. 东莞:东莞理工学院,2025.

CHEN SH T. Industrial manipulator condition monitoring and error compensation system based on digital Twin[D]. Dongguan: Dongguan University of Technology, 2025.

作者简介



张天恒(通信作者),2010年于重庆理工大学获得硕士学位,现为重庆理工大学工程师,主要研究方向为精密测量技术和智能传感器。

E-mail: zth@cqut.edu.cn

Zhang Tianheng(Corresponding author) received his M. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2010. He is currently an engineer at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision measurement technologies and intelligent sensors.



彭东林,1992于重庆大学获得博士学位,现为重庆理工大学教授,主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: pdl@cqut.edu.cn

Peng Donglin received his Ph. D. degree from Chongqing University in 1992. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His research interest mainly includes precision measurement technology and instrument.