

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210047

电感式角位移传感器技术综述*

秦毅¹,王阳阳^{1,2},彭东林²,陈锡侯²,武亮²

(1. 重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044; 2. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程中心 重庆 400054)

摘要:电感式角位移传感器具有良好的环境适应力、较高的测量精度和稳定性的优点,该类型的角位移传感器广泛应用于高端装备、电动汽车、机器人、飞行器、武器等领域。本文介绍了3种电感式角位移传感器,包括旋转变压器、感应同步器这两种典型的电感式角位移传感器以及我国学者自主研发的磁场式时栅位移传感器。对它们的测量原理及关键技术做了详尽的综述,并分析了这些技术的优点与局限性。根据近年来电感式角位移传感器的发展现状,详细论述了电感式角位移传感器在机械、汽车、工业机器人、航空、航天和国防等领域的应用情况。最后,分析得出电感式角位移传感器技术应往高精度、高可靠性、嵌入式测量、复合功能测量、智能化等方向发展。

关键词:角位移传感器;电感式;旋转变压器;感应同步器;磁场式时栅

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Inductive angular displacement sensors technologies: A review

Qin Yi¹, Wang Yangyang^{1,2}, Peng Donglin², Chen Xihou², Wu Liang²

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Inductive angular displacement sensors have good environmental adaptability, high measurement accuracy and stability. They are widely used in high-end equipment, electric vehicles, robots, aircraft, weapons and other fields. This article reviews three types of inductive angular displacement sensors, including resolver, inductosyn and the magnetic field type time-grating displacement sensor which is independently developed by Chinese scholars. Their measurement principles and key technologies are reviewed in detail, and their advantages and limitations are also analyzed. According to the development of inductive angular displacement sensors in recent years, their applications in the fields of machinery, automobile, industrial robot, aviation, aerospace and national defense are discussed in detail. Finally, it is concluded that the inductive angular displacement sensor technology should be developed in the direction of high precision, high reliability, embedded measurement, composite function measurement and intelligence.

Keywords: angular displacement sensor; inductive; resolver; inductosyn; magnetic field type time-grating

0 引言

角位移传感器作为重要的位置反馈元件广泛应用于定位、自动跟踪系统、武器系统的精密制导、天文观测的精密分度定位、精密数控机床、航空航天、医疗器械等领域^[1-7]。目前,应用较为广泛的角位移传感器主要有光栅编码器、感应同步器、旋转变压器和电容式传感器。其中,光栅编码器采用光刻工艺并结合莫尔条纹测量原理

可以实现高精度测量,但其易受油污、粉尘、振动等环境影响^[8-10]。电容式传感器虽然具有结构简单、分辨率高、耐高温等优点,但是存在易受环境中温度和湿度变化的影响、易产生寄生电容、负载能力差等缺点,以致影响其输出稳定性和精度^[11-13]。当角位移传感器被用于如数控机床、工业机器人、高精度回转定位系统等场合时,需要确保传感器对温度、湿度、油污、粉尘、振动等的敏感性较低;同时兼具良好的线性度、充足的工作范围、较低的制造成本和较高的稳定性。以旋转变压器和感应同步器为

收稿日期:2022-07-01 Received Date: 2022-07-01

* 基金项目:国家重大科研仪器研制项目(51827805)、重庆理工大学科研启动基金资助项目(2022ZDZ048)、国家自然科学基金(51675071)项目资助

典型的电感式传感器成为以上应用中的重要选择。然而,不论是旋转变压器还是感应同步器其精度的提高主要依赖于增加极对数、改进机械加工的等分性、优化绕组的分布和补偿算法等。从机械的角度进行优化,势必引起传感器体积增大、工艺复杂化、整体成本增加等问题。如何在增加工艺难度和传感器尺寸的情况下,实现低成本、高精度测量是电感式传感器研制中亟待解决的一个重要问题。由我国科研人员自主研发的新型电感式传感器——时栅位移传感器利用高频时钟作为测量基准^[14],通过在传感器内部构建一个匀速运动,实现在时间坐标下对空间位置的精密测量,将对空间位移的求解转换为对时钟脉冲的计数。磁场式时栅位移传感器(简称“磁场式时栅”)以由机械加工的齿槽和绕组作为构建匀速时变磁场的媒介,其测量精度并不依赖于其加工精度。因此,可以在不过度依赖机械加工和制造精度的前提下,实现高精度测量。

1996年彭东林^[15]首次提出“用时间测空间”的思想,1999年第一台时栅位移传感器原理样机试制成功,自此时栅位移传感器的研究开始步入发展的快车道。2004年精度为0.8”的高精度磁场式时栅,通过国家自然科学基金委员会鉴定,2010年时栅传感技术获国家技术发明奖和中国专利金奖。此后,磁场式时栅^[14,16]、电场式纳米时栅^[17]、光场式时栅^[18]、寄生式时栅^[19]等相关技术陆续取得突破和进展。

尽管近年来已有一些关于角位移传感器的研究工作被报道,但是对电感式位移传感器的全面回顾和系统介绍却是缺失的。因此,本文以电感式角位移传感器为研究对象,对旋转变压器、感应同步器和磁场式时栅三种电感式传感器的原理、技术现状及其应用进行系统性的综述,分析了三者的技术现状和优缺点,并指出了电感式位移传感器未来的发展趋势。

1 电感式位移传感器工作原理

电感式角位移传感器测量原理,如图1所示。传感器的励磁绕组线圈内通入某一频率交变的电流,则在定子和转子的气隙中形成与其同频的交变磁场,当定子和转子之间相对运动时,感应绕组线圈中通过的交变磁通量与定、转子相对空间位置具有相关性,感应绕组线圈拾取反映定、转子相对位置信息的两路感应电动势:

$$\begin{cases} e_s = e_m \sin nx \\ e_c = e_m \cos nx \end{cases} \quad (1)$$

式中: e_m 为输出电势幅值, n 为传感器的极对数, x 为位移量。

对感应绕组中拾取的电动势信号进行了解算,便可以输出反映位移变化的角位移量。电信号的处理和

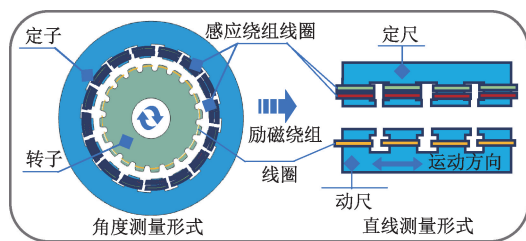


图1 电感式传感器测量原理

Fig. 1 Measurement principle of inductive sensors

解算可以分为鉴相和鉴幅两种形式:

$$e_p = k_1 \sin(\omega t + x) \quad (2)$$

$$e_a = k_2 \sin(x_0 - x) \cos \omega t \quad (3)$$

式中: k_1 、 k_2 为比例系数, ω 为角频率, x_0 为指令位移量。在实际的传感器设计中,可以根据应用场合、客户需求等选择适合的传感器工作方式和参数。

2 两种典型的电感式角位移传感器

电感式传感器通常是在电磁感应现象的作用下,通过对传感器绕组线圈的自感或者绕组线圈之间的互感的变化来实现角度测量,主要包括旋转变压器、感应同步器、可变差动变压器、电涡流传感器等^[13,20]。其中,在工作原理上可变差动变压器与旋转变压器相近,而电涡流传感器在用于位移测量时受限于其结构原理,其测量量程较小^[21-22]。因此,本文主要以旋转变压器和感应同步器为主要研究对象。

2.1 旋转变压器

旋转变压器又称同步分解器,具有抗干扰能力强、耐油污、抗振动、耐高温等优点,广泛应用于兵器工业、航空航天、伺服控制系统、汽车、装备制造等领域的位移测量和位置反馈中^[23]。旋转变压器的种类繁多,按照输出电压与转子转角之间的函数关系可以分为正余弦旋转变压器、线性旋转变压器及特种函数旋转变压器;按照有无电刷或滑环可分为接触式旋转变压器和非接触式旋转变压器;按照用途可分为解算用旋转变压器和数据传输用旋转变压器;按照转子上有无绕组分为磁阻式旋转变压器和无刷旋转变压器^[24-25]。由于转子绕线式(wound rotor, WR)旋转变压器和磁阻式(variable reluctance, VR)旋转变压器可以实现较高精度的测量或者具有良好的稳定性、可靠性等优点,在角位移测量领域的相关应用和研究中获得广泛关注,故而本文以二者为主要研究对象。

1) 基本工作原理

旋转变压器的工作原理区别于普通变压器之处在于旋转变压器的原边绕组和副边绕组是随转子的转动而相对位置变化的而非固定不变的。

如图 2 所示,在定子上有原边绕组为 $L_1-L'_1$,转子上绕制有副边绕组为 $L_2-L'_2$ 和 $L_3-L'_3$ 。在空载和忽略漏阻抗的情况下,当原边绕组中通入励磁电压 U_{EX} 后,在空间正交的两个副边绕组中分别产生感应电动势:

$$\begin{cases} e_s = 4.44fN_s\phi\sin\theta = kU_{EX}\sin\theta \\ e_c = 4.44fN_c\phi\cos\theta = kU_{EX}\cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中: f 为励磁频率, N_s 等于 N_c 为副边绕组线圈的匝数, ϕ 为励磁绕组轴向磁通, θ 为转子转角, k 为电压比等于副边绕组线圈匝数与原边绕组线圈匝数之比。

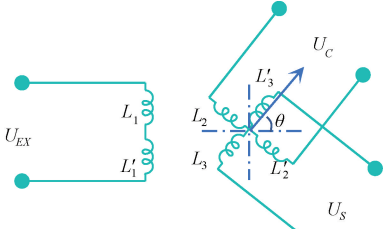


图 2 旋转变压器工作原理示意图
Fig. 2 Working principle of resolver

2) 旋转变压器的研究现状

(1) WR 旋转变压器

根据结构特点 WR 型旋转变压器可以分为接触式和非接触式两种,如图 3 所示。接触式旋转变压器^[24,26-27]的转子绕组电信号经由导电滑环或者电刷直接引出,结构简单、体积小。但其导电滑环和电刷结构为机械接触易受磨损、接触性能等影响,传感器可靠性相对非接触式较差、使用寿命较短。非接触式旋转变压器^[28]通过将旋转变压器本体的转子绕组与附件的耦合变压器的原边绕组相连,利用电磁耦合将旋转变压器本体中的电信号经耦合变压器的副边绕组输出实现测量。这类旋转变压器主要是通过改变励磁绕组线圈与感应绕组线圈之间的耦合面积,建立感应绕组线圈中的磁通量变化与二者的相对位移之间的关系实现测量。由电磁感应定律,输出电势可以表示为:

$$e = -N_0 \frac{d\psi}{dt} = -N_0 \frac{d(N_1 i A)}{dt} = -N_0 N_1 \mu \frac{s}{\delta} \frac{di}{dt} \quad (5)$$

式中: N_0 为感应绕组线圈匝数, N_1 为励磁绕组线圈匝数, Ψ 为磁链, i 为励磁电流, A 为气隙磁导, s 为耦合面积, δ 为气隙长度。

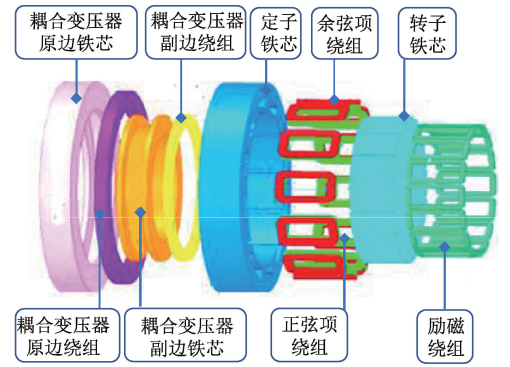


(a) 接触式旋转变压器 (a) Contact type resolver
(b) 非接触式旋转变压器 (b) Contactless type resolver

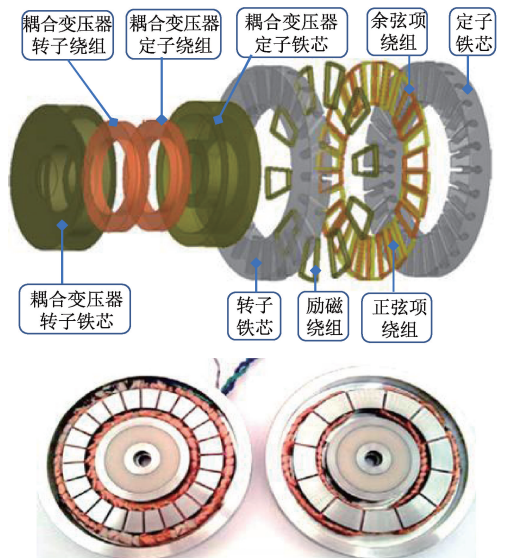
图 3 绕线转子式旋转变压器实物图

Fig. 3 Physical drawing of WR-resolver

根据磁链方向的不同,非接触式旋转变压器可以进一步划分为:径向磁链旋转变压器和轴向磁链旋转变压器两种,如图 4 所示。Saneie 等^[29]提出了一种多圈的径向磁链旋转变压器,推导和建立了其数学模型和物理模型,通过有限元仿真和实物实验验证了方案可行性。Lasjerdi 等^[30]运用绕组函数法和有限元分析法对径向磁链旋转变压器定子和转子绕组的短路故障进行了分析,指出在测量位置误差时定子绕组上的短路故障较转子绕组的破坏性更大。为了克服静态偏心对测量的影响,Tootoonchian 等^[31]提出了通过增加极数、减小转子轭长、



(a) 径向磁链旋转变压器及其空间结构^[29-30]
(a) Radial flux resolver and its structure



(b) 轴向磁链旋转变压器及其空间结构^[31-32]
(b) Axial flux resolver and its structure

图 4 两种典型的非接触式旋转变压器

Fig. 4 Two typical non-contact resolvers

增加气隙长度和改善绕组分布等方式优化旋转变压器结构的方法。Alipour-Sarabi 等^[32]提出了一种基于遗传算法优化绕线方式以减小输出信号谐波失真的方法,并提出了目标函数和约束条件以减少线圈匝数、降低成本和绕线工艺的复杂性。

上述研究表明:WR 旋转变压器具有良好的信号质量和较高的测量精度。但是,附加了电子滑环、电刷的传感器方案,其可靠性和寿命会受到了一定的影响;附加耦合变压器的方式虽然可以提高传感器的可靠性和使用寿命,但增加了绕线工艺的复杂性,绕组的短路故障率高、轴向尺寸大。在轴向安装空间受限的场合,径向磁链旋转变压器无法避免安装偏心带来的不良影响。在保障传感器可靠性和寿命的前提下,如何实现传感器的小型化、高可靠性和减少绕组故障率等问题是未来研究者需要解决的重要问题。

(2) VR 旋转变压器

VR 型旋转变压器是一种基于变磁阻效应的转子无绕组线圈的特殊形式的非接触式旋转变压器。由于取消了电刷或滑环使其具有良好的可靠性、抗冲击能力、环境适应力和使用寿命;并且没有转子绕组和耦合变压器使结构更简单、体积更小。VR 型旋转变压器由励磁绕组所激发磁场的磁通同时交链励磁绕组和感应绕组,并在定子齿轭、转子齿轭和气隙之间形成闭合链路。同时,由于气隙的磁导率远远低于以铁磁材料为基体的定子和转子,因而磁路中的磁阻主要为气隙的磁阻,并且励磁电动势主要消耗在气隙上。因此,根据磁阻与磁导的关系,式(5)可以改写为:

$$e = -N_0 \frac{d\psi}{dt} = -N_0 \frac{d\left(\frac{N_1 i}{R_m}\right)}{dt} = -\frac{N_0 N_1}{R_m} \frac{di}{dt} \quad (6)$$

强曼君^[33-34]对 VR 型旋转变压器的工作原理、定转子的齿形设计、气隙磁导的计算、误差分析及应用都做了详尽的阐述。图 5(a) 为传统结构形式的 VR 旋转变压器结构,由加工了一定槽数的矽钢片叠成的定子和转子铁心组成。在定子上有大、小两种齿形,小齿均布在大齿的齿端;励磁绕组、感应绕组及补偿绕组都绕制于大齿齿槽中,转子上无任何绕组。为了获得较高的精度可以通过增加补偿绕组、采用正弦分布绕组和斜槽等方法实现。

Sun 等^[35]提出了一种利用转子磁极的凸极效应进行位置信息检测的 VR 旋转变压器,并对其工作原理和转子凸极的设计准则做了介绍,结构如图 5(b) 所示。邢敬妮^[36]采用有限元仿真分析的方法对凸极式旋转变压器的设计参数进行了进一步的优化,得出了一个可供设计参考的设计规则。Ge 等^[37]采用增加辅助气隙磁导的方法设计了新的气隙长度函数并优化了转子轮廓形状,有效地消除谐波分量并提高角度测量精度,对于定子齿数

为转子齿数 4 倍的传统 VR 型旋转变压器消除齿谐波具有一定效果。Bahari 等^[38]提出了一种永磁-旋转变压器以克服对高励磁频率、高绕组工艺性和调幅解调困难等不利影响。旋转变压器的定子由 12 对齿槽构成,在其中 4 个齿上镶嵌有永磁体,8 个齿上镶嵌霍尔传感器。由于定子上没有线圈绕组,以永磁体作为励磁源,并采用高灵敏度的霍尔传感器作为感应元件;没有线圈绕组带来的误差,避免了复杂的信号处理和减小了漏磁通的影响。与之相似, Sun 等^[39-40]提出了一种在凸极型旋转变压器的基础上于定子上镶嵌一定个数永磁体的方法,分别设计了奇数极和偶数极传感器并进行了原理推导和结构设计。

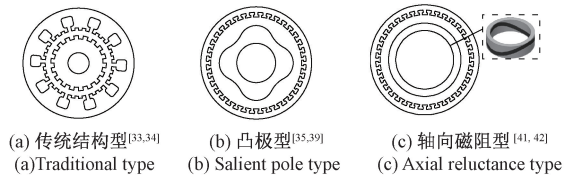


图 5 3 种常见结构形式的磁阻式旋转变压器

Fig. 5 Three common structural forms of VR resolvers

为了克服安装偏心带来的不良影响,在 VR 旋转变压器的研究中也出现了轴向磁路旋转变压器的研究。哈尔滨工业大学尚静等^[41-42]开展了关于如图 5(c) 所示的等气隙的轴向磁路 VR 旋转变压器的相关研究,其结构特点在于采用了导磁材料和非导磁材料共同构成转子,导磁材料加工为一种呈正弦函数规律变化的斜环形状;而定子上的励磁绕组与感应绕组成空间正交的关系。随着定、转子之间的相对转动,二者之间的耦合面积发生改变,进而使气隙磁导按正弦规律变化。Tootoonchian 等^[43]提出了一种盘式定子结构,外圆柱侧由正、余弦双层分布绕组构成感应端,内圆柱侧由集中绕组构成励磁端;转子为由铁芯端面加工规则形状的凸极齿构成。这种旋转变压器不仅具有变耦合面积 VR 型旋变的优点,而且简化了转子结构。为了解决轴向磁通变磁阻式旋转变压器在高精度应用领域精度不足的问题, Saneie 等^[44]提出了一种利用等效磁路和施瓦茨-克里斯托费尔映射来进行磁通、电感、感应电动势、位置误差等的计算,并结合有限元仿真对其模型和样机开展了相关对比实验,证明了该方法的有效性。

旋转变压器的研究主要集中在对转子齿形、气隙磁导分布、励磁源的选取与优化等方面。旋转变压器的极对数主要取决于转子上齿槽(或凸极)的数量,实现高精度测量主要依赖于提升极对数,即开槽的数量。因此,实现高精度测量一定程度上依赖于增加机械制齿数量,由此引起了传感器定子和转子的径向尺寸的增加以及齿槽加工和绕线的工艺复杂性的提升。如何实现不增加传感器体积和加工工艺下的高精度测量是旋转变压器研究的重要内容。

2.2 感应同步器

感应同步器是在电磁感应现象作用下,通过将两个平面型绕组之间的相对位移转换为电信号输出的位移传感器。感应同步器最初用于雷达天线的定位和自动跟踪、导弹的精密制导等领域^[45-46]。20 世纪 50 年代末,美国开始将感应同步器应用于低精度滚齿机中用于提高蜗轮加工精度,麻省理工学院第一台数控机床制作成功之后,感应同步器作为数显技术的核心部件被广泛使用。相较于旋转变压器,感应同步器可以实现更多极对数的精密测量,可作为精密定位部件广泛应用于天文观测、航空航天等领域。国内感应同步器的研究起步较晚,直到 1973 年后国内研究者才开始踊跃投入研究,并针对其原理、应用、优化设计开展了大量研究,并将其大量应用于数控机床中^[47]。近年来,对感应同步器的研究开始着力于信号处理和精度优化分析上,并在高精度转台伺服系

统中开展应用。在原理层面,感应同步器与旋转变压器相差无几,可以视为采用平面绕组的轴向磁通多极旋转变压器。

1) 基本工作原理

旋转式感应同步器^[48]由印制有绕组的定子和转子组成,如图 6 所示。图 6(a)为旋转式感应同步器的绕组结构示意图,在转子上的绕组是单相连续的,定子上的绕组则分为在空间上呈 90°电气角度正交的正弦和余弦两相。为了便于分析将其按直线展开排列为图 6(b)的形式,转子绕组两相邻导体组的中心距离 τ 称为极距,定子绕组两相邻导体组的中心距离 τ_s 称之为节距(节距根据设计要求可以等于或者不等于极距), θ 为定转子相对运动时二者之间的夹角。当在转子绕组中通入频率为 f 的交流电流 i 时,则会产生一个与该电流同频的交变磁场。当定子和转子相对运动时,定子绕组中的磁通和感应电动

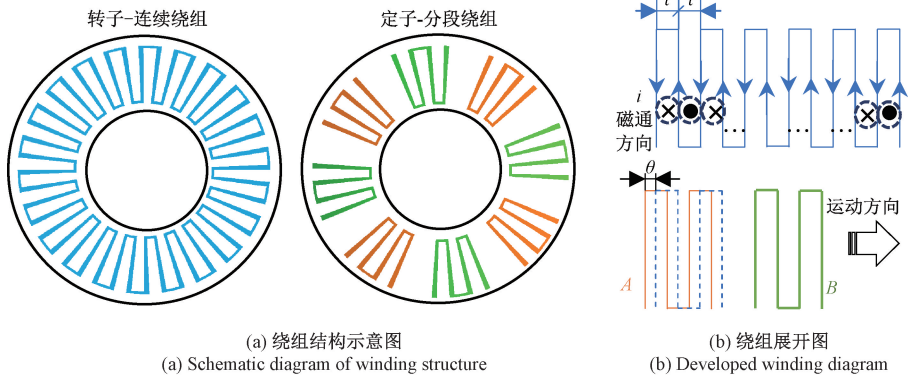


图 6 感应同步器结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of inductosyn

势以 2τ 为周期变化, A 、 B 两相绕组的感应电势可以表示为:

$$E_A = E_m \sin \frac{n}{2} \theta \quad (7)$$

$$E_B = E_m \sin \left(\left(N \pm \frac{1}{2} \pi \right) + \frac{n}{2} \theta \right) = \pm E_m \cos \frac{n}{2} \theta \quad (8)$$

式中: E_m 为电势幅值, N 为正整数。

2) 感应同步器技术现状

感应同步器作为一种高精度的位移传感器,在精密定位和控制系统中具有重要的应用价值。由于感应同步器的原理研究比较成熟,近年来其研究的主要聚焦于实现高精度测量的误差分析与补偿技术等方面^[49]。薛以达^[46]从绕组结构、绝对式位置测量和测试技术 3 个方面对感应同步器进行了综合性的介绍,阐明了感应同步器的优缺点和发展方向。李海霞等^[50]进行了一种稀疏误差采样及补偿方法的研究,实现了在全测量范围内感应同步器的系统误差补偿;刘承军等^[51]提出利用离线数据

辨识的误差模型对在线数据进行实时补偿的方法,借助测角系统与感应同步器的相关性,通过傅里叶分解和误差建模实现了细分误差和零位误差的补偿模型的建立,降低了全测量范围内的测量误差;Wang 等^[52]提出了一种基于最小二乘法对长周期误差和短周期误差误差分离与补偿的方法。鲍茂然^[53]进行了基于最小二乘法和离散傅里叶分析的误差补偿与分离方法研究,并提出了一种利用两个感应同步器进行交叉补偿的方法。张翠芳^[54]建立了零位误差的 BP 神经网络模型,利用一组 720 点的零位误差数据样本,提出了 3 种改进算法,实现了高质量的误差补偿。徐繁荣^[55]开展了具有绝对位置测量功能的感应同步器的研究,采用 180 对极和 179 对极两种不同极对数感应同步组成双通道测量,实现绝对测量。王飞等^[56]提出了一种粗糙数据融合方法,实现了对绝对式感应同步器精通道的周期修正。

随着光电技术的迅猛发展,感应同步器在一些要求精密定位的应用领域逐渐被光栅等替代;在小型化

和抗干扰能力要求较高的领域又面临着旋转变压器、磁敏型微传感器的挑战。英国 Zettlex 公司发明了一种利用 PCB 作为基体的新型高精度位移传感器^[57-58],如图 7 所示。传感器的定子由 PCB 板印制的励磁线圈和感应线圈构成,转子 PCB 板上印制的线圈则主要通过谐振作用来改变定子上感应线圈的输出^[59-60]。Rahal 等^[61]提出了通过改变感应线圈的形状提升测量线性度的方法,Cha 等^[62]则提出了一种基于光刻工艺的平面感应式传感器,该传感器可以检测出磁性材料的非破坏性和非接触性裂纹,用于材料成型的故障检测中。



图 7 Zettlex 传感器

Fig. 7 Zettlex sensor

基于感应同步器基本原理的平面绕组式传感器,因采用 PCB 或光刻工艺,可以实现对极对数高精度、高灵敏度的测量,与旋转变压器在应用场合上可以形成有效的互补。相较于制作成本和工艺都较高的光电式编码器而言,良好的环境适应性和抗干扰能力使得以旋转变压器和感应同步器为典型代表的电感式传感器具有良好应用前景和研究价值。

3 磁场式时栅

磁场式时栅与旋转变压器及感应同步器皆属于电感式传感器。虽在测量原理上却大不相同,但在技术方案的上却又有很多相似之处。在原理层面,磁场式时栅以时钟脉冲为测量基准,通过在传感器内部构建一个匀速运动,将对空间位移的求解转换为时钟脉冲的计数。在结构方案上,其与旋转变压器和感应同步器颇为相似,都是按照一定规则开设齿槽和绕制绕组线圈,但是磁场式时栅却是将其作为构成匀速运动磁场的媒介,最终的测量精度并不依赖于其加工及工艺精度;而其他两者则主要以齿槽的刻划精度和绕组的分布水平作为实现传感器高精度测量的主要基础。在采用线切割、滚齿等常规工艺下,磁场式时栅在齿槽等分精度为 2' 时,测量精度可以达到 1",测量精度是其等分精度的 120 倍左右^[63]。磁场式时栅按结构形式可以分为整体式和寄生式两种类型。其中,整体式又可以根据磁通链的方向进一步划分为柱面式和平面式两种。

3.1 基本工作原理

1) 基本结构与数学模型

磁场式时栅主要由定子、转子及线圈绕组构成,如图 8 所示。绕组线圈分为正弦励磁绕组线圈、余弦励磁绕组线圈和感应绕组线圈 3 种。根据测量需求的不同感应绕组线圈可以选择性的绕制在定子上或者转子上。线圈绕组的绕线多采用励磁绕组间隔反向串接,感应绕组逐槽反向串接的方式。当分别对正、余弦励磁绕组线圈中通入式(9)形式的励磁电流,则在感应绕组线圈中拾取到如式(10)所示的感应电动势:

$$\begin{cases} i_s = i_m \sin \omega t \\ i_c = i_m \cos \omega t \end{cases} \quad (9)$$

$$e = -N_0 \frac{d(N_1 i \Lambda)}{dt} = -N_0 N_1 \Lambda \frac{di}{dt} \quad (10)$$

式中: i_m 为电流幅值, i_s 或 i_c 等于 i 为励磁电流, Λ 为气隙磁导。在只考虑基波电势的情况下,各齿感应绕组产生的电势可以表示为:

$$\begin{cases} e_s = \pm N_0 N_s A \omega \Lambda_1 \cos\left(\frac{2\pi(\theta + M\theta_0)}{\tau_1}\right) \cos \omega t \\ e_c = \pm N_0 N_c A \omega \Lambda_1 \cos\left(\frac{2\pi(\theta + (M+1)\theta_0)}{\tau_1}\right) \sin \omega t \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\pm$ 由绕组线圈的绕向决定, N_s 和 N_c 分别为正、余弦励磁绕组线圈的匝数等于 N_1 , θ 为角位移量, θ_0 为定子的齿节距, τ_1 为转子齿距(即一个极对的距离), M 为自然数。根据叠加原理,则在感应绕组上的最终电动势化简后可以表示为:

$$e = e_s + e_c = K \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} \theta + \omega t\right) \quad (12)$$

式中: K 为常数系数。至此,感应电动势信号中就建立起了空间位移量 θ 和时间变化量 t 之间的联系。

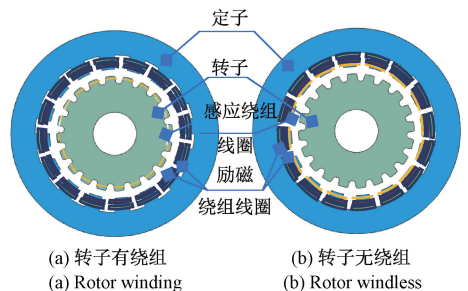


图 8 时栅传感器基本结构

Fig. 8 Basic structure of the time-grating sensor

2) 信号位移解析

磁场式时栅传感信号的位移解析方法如图 9 所示,由式(12)可知磁场式时栅的信号中的相位与位移信息

呈线性的关系。在传感器工作时,由测试电路系统提供一组在时间上呈正交关系的励磁信号到励磁绕组线圈中,在感应绕组中产生如式(12)的感应电动势信号,该感应电动势信号通常需要通过滤波、放大等处理后经过零比较器转换为方波信号。该方波信号与测试电路系统中提供的只含时间信息的参考信号进行连续比相,通过高频时钟脉冲记下传感器转动过程中方波信号与参考信号之间上升沿时刻的时间差 Δt ,角位移信息与该时间差的关系可以表示为:

$$\theta = \left(p + \frac{\Delta t}{T} \right) \theta_r \quad (13)$$

式中: T 为参考信号的周期, p 为方波变化的周期数, θ_r 为时间差为一个周期时的角位移量。

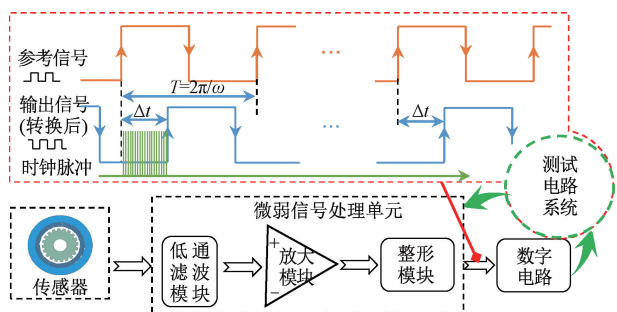


图 9 时栅信号位移解析方法^[64]

Fig. 9 Analytical method of the time-grating displacement sensor

3.2 磁场式时栅技术现状

自 1999 年第一个时栅原理样机研制成功至今,为了不断满足市场需求和自身产品化需要,磁场式时栅的结构形式也在不断的发生变化^[64]。武亮等^[65-66]借鉴互感变压器的工作原理,取消了导电滑环结构,提升了可靠性和工作寿命。随后,一种将被测对象(齿轮、蜗轮、齿条等)作为传感器的一部分来实现的嵌入式测量的寄生式时栅传感器^[19]被提出,并应用于高精度转台时可实现精度 $\pm 7''$ 的回转分度。王淑娟等^[67-68]利用嵌入式时栅传感技术开展了电机的位置检测工作,并实现了其伺服控制功能。杨洪涛等^[69-70]开展了寄生式时栅的误差、不确定度等精度指标的分析。此后,Tang 等^[71]、刘小康等^[72]陆续提出了利用 PCB 工艺制备的平面感应式时栅的研究,并开展了信号处理方法和绕组线圈形状的优化研究工作。文献[73-74]提出了一种二维时栅,其主要由铁磁基体和 PCB 工艺制备的带螺旋形状线圈的传感单元组成,可以实现分辨力为 $2.67 \mu\text{m}$, x 和 y 方向线性度分别为 1% 和 0.75% 的测量。图 10 为磁场式时栅为满足市场和自身发展需求,传感技术与结构形式研究的演变过程示意图。

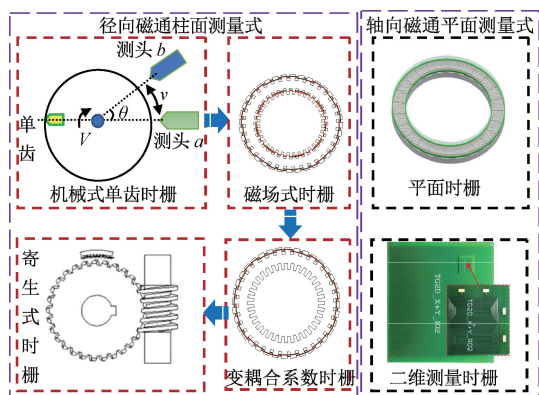


图 10 时栅传感技术与结构形式演变过程

Fig. 10 Evolution of time grating sensing technology and structure

为了解决面临的高精度参考基准和测量精度保持的问题,陈锡侯提出了一种基于误差坐标变换的时栅自校正方法^[64,75-76],利用带有误差测量值的参考坐标系求解真值坐标系中的测量误差曲线,并通过时间误差补偿方法实现误差的补偿。高忠华^[77]在此基础上,利用圆周封闭原则和磁场式时栅误差周期性极强的特点,提出了一种定角平移的自标定方法。陈锡侯等^[78]提出了一种利用测量数据微商的傅里叶级数实现的单读数头的标定方法,克服传感器多个读数头按照一致性和标定对硬件的要求。孙世政等^[79]通过设置 2 个离散化的读数头的角度位置,实现了传感器的动态自标定。苟李^[80]在随后的研究中提出了磁场式时栅的复合自标定方法,并通过工程应用验证了自标定方法在误差修正和标定中的作用。

4 应用与发展趋势

4.1 3 种电感式角位移传感器的对比

电感式角位移传感器通过感受被测对象在电磁感应作用下的自感或者互感的变化,并将这种变化经调理为电压或者电流信号从而实现角位移测量。表 1 为旋转变压器、感应同步器和磁场式时栅 3 种电感式角位移传感器在分辨率、精度、优缺点和适用场合等方面的比较分析情况,旨在为不同应用场合的传感器的使用提供选择的依据。

4.2 电感式角位移传感器的应用

在工业和制造等领域,作为感知和获取信息的重要功能部件,传感器常常作为位置和速度检测与伺服控制反馈的元件,是实现高精度的运动控制和加工的重要途径^[81]。宋现春等^[82]和郑永^[83]分别利用感应同步器和磁场式时栅提出了机床传动链的误差检测方法,为机床的精度优化和高精度加工提供了重要保障。Wang 等^[84]提

表 1 3 种电感式角位移传感器比较分析^[64,84]

Table 1 Comparative analysis of three inductive displacement sensors^[64,84]

名称类别	旋转变压器	感应同步器	磁场式时栅
信号输出形式	增量式/绝对式	增量式/绝对式	增量式/绝对式
结构形式	整周多读数头饼状	整周多读数头饼状	整周多读数头饼状/离散式单读数头
加工工艺	冲压、叠片	蚀刻、PCB	滚齿/插齿、线切割、PCB 等
装配方式	轴向/径向 同轴安装	轴向 同轴安装	轴向/径向/旁置 同轴安装
分辨率	17 bits	18~22 bits	20~22 bits
精度	±420"	±19"	±0.8"
优缺点	成本低、抗干扰能力强、高速特性好；但精度、分辨力不够，体积大。采用双通道方式实现绝对式测量，但会增加轴向或径向尺寸、重量。	成本低、抗干扰能力较强；分辨率较高，精度较高；但相应地体积增大。采用双通道方式实现绝对式测量，但会增加径向尺寸。	成本低、抗干扰能力强；分辨率高、精度高，可以实现嵌入式测量。采用双通道方式实现绝对式测量，不增加体积或重量。
应用场合	适用于对精度要求不高的高速角位置反馈场合，如机器人关节、汽车、军工等。	适用于对精度要求较高的角位置反馈场合，如装备制造、机床、船舶等。	适用于精密制造、数控机床、机器人及大型、中空、安装空间受限的高精度测量场合。

出了一种通过一个简单的电桥电路,利用一套定子、转子和电路实现双通道绝对式测量角位移传感器,并将其用于转台轴承的精密位置检测与反馈中。Nauduri 等^[85]提出了一种新型的平面感应式传感器进行永磁同步电机的位置控制与检测;Aung 等^[86]利用旋转变压器实现了主轴电机驱动系统的转子位置检测与反馈。

在汽车行业领域中,可以利用电感式扭矩传感器实现电动助力转向系统的扭矩和角度一体化测量^[87]。VR 型旋转变压器因结构与电机相似,易于集成到检测系统中,凭借其高可靠性、高检测精度、环境敏感度低等特点,在电动汽车或者混合动力汽车中大量应用^[88]。

在工业机器人领域,传感器与机械和控制一起被视为构成工业机器人的 3 大组成部分,获得了越来越多的关注、研究和应用,广泛服务于电子、物流、装备制造等领域。Djuric 等^[89]提出一种平面感应式位移传感器用于类人的机器人的双脚运动控制与位置信息检测;Seo 等^[90]设计了一种地面管道跟踪机器人利用电磁感应式传感器探测地下管道的磁场;王兴兴等^[91]提出了一种采用电感式角位移传感器实现位置反馈的高集成度高性能机器人关节单元。

在航天航空和军事领域对具有高精度位置反馈和良好环境适应性的传感器有着大量的需求。黎玉龙^[92]将圆感应同步器作为测角系统反馈元件在惯导测试转台中应用;段发阶等^[93]综合介绍电磁感应式传感在航空发动机叶间间隙在线测量中的应用;王强等^[94]采用旋转变压器作为无人直升机作为电机控制系统的角位置反馈单元,有效提高了整机系统恶劣环境工作的可靠性和安全性;郭超勇等^[95]采用旋转变压器作为转速测量元件实现

太阳能帆板驱动装置与卫星之间的对日定向功能。彭东林等^[15]介绍了磁场式时栅在武器系统中的相关应用。高忠华等^[96]开展了角度和角速度的同步测量方法研究,实现了复合功能磁场式时栅研制。

综上,得益于良好的环境适应性、低成本、高可靠性、易于集成等优点,电感式角位移传感器在工业、汽车、机器人、航天航空、军事工业等领域都具有广泛和良好的应用前景。

4.3 发展趋势

1) 结构方面

电感式角位移传感器的结构尺寸正向两个极端化发展。一方面,随着系统集成化的要求不断提高,结构紧凑、机电融合度高的机电系统对传感器尺寸要求逐渐趋于小型化、微型化和可集成化的方向发展。随着 PCB 和柔性 PCB 制造工艺的日趋成熟,低成本、高精度的小微化的传感器在 MEMS 中将有更多的应用空间。另一方面,随着大型高精度工业母机和超高精度、超大型机械装备的研制,对可以满足大工作直径和大中空直径的大量程、高精度位移传感器需求日盛。

此外,在一些精密机械系统中安装空间狭小、无法安装独立传感器的场合,传统的饼状传感器逐渐失去安装位置和空间。因此,具有结构可随动设计优势的嵌入式测量技术必将在未来的传感器设计与应用中占据一席之地。

2) 性能方面

传感器的整体发展趋势是更加智能化、更高的精度、更优的可靠性、更完备的测量功能、更具的技术融合与创新性。

在智能化层面,传感需要具备自标定和自校正能力实现精度的自我保持,需要具有对环境因素如:温度、振动等的反馈与自动补偿能力等;需要与机器学习、深度学习、数字孪生等先进技术融合,不断提升传感器的自身性能,使其具备学习能力和自适应能力。

在精度方面,能够运用一些先进的优化算法对传感器的结构设计、绕组布置、误差分离、误差补偿等进行优化、处理,使传感器具有更高的精度、更稳定的性能输出。

在可靠性方面,则需要提升传感器的环境适应力,使其具有更好的抗电磁干扰、耐油污、粉尘、振动、高低温下正常工作的能力。

在测量功能方面,传感器可以集位移、加速度、速度、扭矩等测量功能于一身,并与无线通信技术、大数据、深度学习等深度融合,实现传感器的远程测试、状态监测、远程诊断、远程标定等功能。

在测量原理方面,可以引入量子隧穿效应、霍尔效应和永磁电机理论等新技术开展新原理的电感式传感器研究,以提高传感器的灵敏度、信号质量、测量精度等性能。

3) 应用领域

位移传感器被视为精密制造和精密检测的眼睛,对于实现精密制造和精密检测的信息化、智能化具有重要的意义。角位移传感器在需要精密角度位置反馈与检测的领域具有重要的应用,从高端装备制造到汽车电子,从航空航天到电机马达,从国防军工到医疗器械,都可以看到电感式角位移传感器的身影。以高端精密装备制造领域为例,工业母机的精度水平决定了高端装备的精度水平,而工业母机的精度水平取决于以传感器为主的各种精密测量仪器的精度。目前,在高精密制造领域,应用最为广泛的位移传感器产品主要集中于海德汉光栅、雷尼绍光栅等基于光电原理的传感器。由于其采用了先进的光刻技术和电子细分技术可以实现高精度、高分辨力测量。而电感式传感器为了实现高精度、高分辨力的测量,采用增加传感器的极对数、电子细分技术和补偿算法。但是,对于一些要求小体积、高精度、高分辨力的场合,电感式传感器受限于机械加工精度和传感器制备工艺等,往往无法满足使用需求。此外,在一些以制齿机床为例的大型工业母机中,通常要求其工作台为大型、中空的回转支撑件,传统的饼状传感面临着失去安装空间和受限于系统整体重要要求无法安装等问题。因此在前文所提及的传统领域之外,还需要不断提升技术以满足新的测量应用的需求,如对嵌入式位置检测、轻量化测量、集成化、智能化等有要求的应用场合。将电感式传感器的应用从中、低端市场向以航空航天、天文观测、实验仪器、工业母机等高端装备市场转变,提升产品竞争力。

5 结 论

电感式角位移传感器在以装备制造、工业机器人、汽车工业为代表的工业应用中具有重要的实用价值。本文通过大量的文献阅读和分析,对旋转变压器、感应同步器和磁场式时栅的工作原理、技术现状和应用做了较为详尽、系统的阐述,揭示了这3种电感式传感器在实现机理、技术方法等方面的异同,系统的论述了3种电感式位移传感器在结构、绕组绕制方式、误差补偿算法、嵌入式测量和工业中的应用情况,分析并阐释了电感式角位移传感器技术的未来发展趋势。传感器技术作为信息获取的源头技术,随着以制造业为核心的第二产业在国民经济中战略结构调整和国家安全等方面的重要性不断提升。在新一轮科技革命的影响下,位移传感器技术的高精度、智能化、嵌入式测量、复合化测量功能和高可靠性等方面的性能,对我国以工业母机、重大科研仪器和高端装备制造为代表的产业起着至关重要的作用。随着科技的进步和人类科技文明的发展,位移传感器在人类的生产、生活中必将拥有更广泛的应用空间、更复杂的应用环境和更高的性能指标需求。对于从事传感器技术及相关工作的研究人员,未来也必将面对更多的机遇和更大的挑战。

参考文献

- [1] MAMISHEV A V, SUNDARA-RAJAN K, YANG F, et al. Interdigital sensors and transducers [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(5): 808-845.
- [2] 劳达宝,王国名,崔成君,等.精密光电小角度测量技术研究[J].仪器仪表学报,2018,39(9):106-113.
LAO D B, WANG G M, CUI CH J, et al. Research on precision photoelectric small angle measurement technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 106-113.
- [3] 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.
- [4] PENG K, YU Z C, LIU X K, et al. Features of capacitive displacement sensing that provide high-accuracy measurements with reduced manufacturing precision [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7377-7386.
- [5] 赵长海,万秋华,梁立辉,等.小型高精度航天级光电编码器[J].电子测量与仪器学报,2015,29(8):

- 1224-1230.
- ZHAO CH H, WAN Q H, LIANG L H, et al. The small high-precision spaceborne photoelectric encoder [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8):1224-1230.
- [6] FLEMING W J. New automotive sensors—A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(11): 1900-1921.
- [7] GAO W, KIM S W, BOSSE H, et al. Measurement technologies for precision positioning[J]. CIRP Annals, 2015, 64(2): 773-796.
- [8] 高旭,李舒航,马庆林,等. 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, et al. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. Chinese Optics, 2019, 12(4): 741-752.
- [9] 汤天瑾,曹向群,林斌. 光电轴角编码器发展现状分析及展望[J]. 光学仪器, 2005(1): 90-96.
- TANG T J, CAO X Q, LIN B. Developing current situation and the trend of photoelectric angular encoder[J]. Optical Instruments, 2005(1): 90-96.
- [10] 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, 2020, 68(4): 3548-3557.
- [11] YE Y, ZHANG C Y, HE C L, et al. A review on applications of capacitive displacement sensing for capacitive proximity sensor[J]. IEEE Access, 2020, 8: 45325-45342.
- [12] HU X H, YANG W Q. Planar capacitive sensors—designs and applications [J]. Sensor Review, 201030(1): 24-39.
- [13] KUMAR A S A, GEORGE B, MUKHOPADHYAY S C. Technologies and applications of angle sensors: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(6): 7195-7206.
- [14] 陈锡侯. 新型时栅位移传感器研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- CHEN X H. New type time grating displacement sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [15] 彭东林. 时栅传感技术与超精密蜗轮副[M]. 北京:科学出版社, 2020.
- PENG D L. Time-grating technologies and ultra-precision worm gear pair[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [16] 彭东林,张兴红,刘小康,等. 场式时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2003(3): 321-323.
- PENG D L, ZHANG X H, LIU X K, et al. Study on the time grating displacement sensor of the field type [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003(3): 321-323.
- [17] 彭凯. 大量程纳米时栅位移传感器的测量模型和误差机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- PENG K. Study on measurement model and error mechanism of long-range nanometer time-grating displacement sensors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [18] 付敏. 新型光场式时栅位移传感器原理与实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
- FU M. Study on principles and experiment of novel light field type time grating displacement sensors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [19] 武亮. 寄生式时栅位移传感器研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- WU L. Research on the parasitic time grating displacement sensor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [20] GEORGE B, TAN Z, NIHTIANOV S. Advances in capacitive, eddy current, and magnetic displacement sensors and corresponding interfaces [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9595-9607.
- [21] MANDAL H, BERA S K, SAHA S, et al. Study of a modified lvdt type displacement transducer with unlimited range [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(23): 9501-9514.
- [22] WU S T, MO S C, WU B S. An LVDT-based self-actuating displacement transducer [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 141(2): 558-564.
- [23] 王文中. 旋转变压器及其 R2D 电路的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- WANG W ZH. Research on rotary transformer and its R2D circuit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [24] 上海微电机研究所. 微特电机[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1983.
- Shanghai Micro-electrical Research Institute. Small & special electrical machines [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1983.
- [25] 田恒安,陈燕玉,廖超宏,等. 特种函数旋转变压器[J]. 微特电机, 1976(1): 39-64.
- TIAN H AN, CHEN Y Y, LIAO CH H, et al. Special function resolver [J]. Small & Special Electrical Machines, 1976(1): 39-64.
- [26] 西安微电机研究所. 控制微电机设计. 第二册, 旋转变压器[M]. 北京:机械工业出版社, 1974.
- Xi'an Micromotor Research Institute. Control micromotor design. Part II: Resolver [M]. Beijing: China Machine

- Press, 1974.
- [27] MIYA T, MATSUURA M. Inner core structure of a rotary transformer-type resolver; US20040145264 A1 [P]. 2004.
 - [28] MIYA T, MATSUURA M. Winding fixing structure of a rotary transformer-type resolver; US, 6952152 B2[P]. 2005.
 - [29] SANEIE H, NASIRI-GHEIDARI Z, TOOTOONCHIAN F. Structural design and analysis of a high reliability multi-turn wound-rotor resolver for electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(5): 4992-4999.
 - [30] LASJERDI H, NASIRI-GHEIDARI Z. A comprehensive analysis of short-circuit fault in wound-rotor resolvers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14884-14892.
 - [31] TOOTOONCHIAN F, ABBASZADEH K, ARDEBILI M. Novel axial flux brushless resolver analysis and optimization using 3D finite element and d-q model method[J]. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, 2012, 8(3): 243-258.
 - [32] ALIPOUR-SARABI R, NASIRI-GHEIDARI Z, TOOTOONCHIAN F, et al. Improved winding proposal for wound rotor resolver using genetic algorithm and winding function approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 1325-1334.
 - [33] 强曼君. 磁阻式多极旋转变压器[J]. 微特电机, 1979(2): 22-46.
QIANG M J. VR multipolar resolver [J]. Small & Special Electrical Machines, 1979(2): 22-46.
 - [34] 强曼君. 磁阻式多极旋转变压器的误差分析[J]. 微特电机, 2000(1): 9-12.
QIANG M J. Error analysis for VR two speed resolver [J]. Small & Special Electrical Machines, 2000(1): 9-12.
 - [35] SUN L Z, LU Y P. Rotor-position sensing system based on one type of variable-reluctance resolver[C]. IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IEEE, 2006: 1162-1165.
 - [36] 邢敬妮. 新型磁阻式旋转变压器相关问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
XING J W. Study of concerning problem on novel variable reluctance resolver [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
 - [37] GE X, ZHU Z Q. A novel design of rotor contour for variable reluctance resolver by injecting auxiliary air-gap permeance harmonics[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 31(1): 345-353.
 - [38] BAHARI M, DAVOODI A, SANEIE H, et al. A new variable reluctance PM-resolver [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(1): 135-142.
 - [39] SUN L, LUO Z, WANG K, et al. A stator-PM resolver with field modulation principle[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 36(1): 159-172.
 - [40] SUN L, TAYLOR J, CALLEGARO A D, et al. Stator-pm-based variable reluctance resolver with advantage of motional back-emf[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(11): 9790-9801.
 - [41] 尚静, 徐谦. 轴向磁场单对极旋转变压器变磁阻原理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(11): 70-74.
SHANG J, XU Q. Analysis of the principle of one pair pole axial-flux resistance resolver[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(11): 70-74.
 - [42] 尚静, 王昊, 王伟强. 多极轴向磁路磁阻式旋转变压器的分析与优化 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(8): 73-78.
SHANG J, WANG H, WANG W Q. Finite element analysis and structure optimization of the multipole axial flux reluctance resolver[J]. Journal of Harbin institute of Technology, 2013, 45(8): 73-78.
 - [43] TOOTOONCHIAN F. Design, performance, and testing of a brushless axial flux resolver without rotor windings[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(20): 7464-7471.
 - [44] SANEIE H, NASIRI-GHEIDARI Z, TOOTOONCHIAN F. Design-oriented modelling of axial-flux variable-reluctance resolver based on magnetic equivalent circuits and Schwarz-Christoffel mapping[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(5): 4322-4330.
 - [45] FINDEN H J, HORLOCK B A. The inductosyn and its application[J]. Journal of the British Institution of Radio Engineers, 1957, 17(7): 369-383.
 - [46] 薛以达. 新结构感应同步器及技术发展动向[J]. 微特电机, 1985(2): 44-49.
XUE Y D. New structure inductosyn and technology development trend [J]. Small & Special Electrical Machines, 1985(2): 44-49.
 - [47] 郭英智, 孙建平. 国内外感应同步器技术的发展综述[C]. 中国仪器仪表学会精密机械学会精密机械系统与元件设计专委会第二届学术会, 1989.
GUO Y ZH, SUN J P. Review on the development of inductosyn technology [C]. The Second Academic Conference of Precision Mechanical Systems and Components Design Committee of Precision Engineering Sub-Society of China Instrument and Control Society, 1989.

- [48] 陆永平. 感应同步器及其系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
LU Y P. Inductosyn and its system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
- [49] 许杜弘. 感应同步器测角系统实现及误差的分析与补偿[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
XU D H. The implementation of inductosyn angle measuring system with error analysis and compensation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [50] 李海霞, 张嵘, 韩丰田. 感应同步器测角系统误差测试及补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(6): 611-616.
LI H X, ZHANG R, HAN F T. Error testing and compensation of an inductosyn-based angular measurement system[J]. Journal of Tsinghua University (SCI. & Tech.), 2016, 56(6): 611-616.
- [51] 刘承军, 齐明, 邹继斌. 感应同步器测角系统误差建模[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 51-55.
LIU CH J, QI M, ZOU J B. Error modeling of inductosyn angle measuring system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(9): 51-55.
- [52] WANG X Q, WU M, ZHU G, et al. The error analysis and harmonic wave correction of inductosyn [C]. Proceedings of the 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics-Volume 2, 2010: 358-361.
- [53] 鲍茂然. 感应同步器精密测角技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
BAO M R. Research on technologies of precise angle measurement based on inductosyn transducer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [54] 张翠芳. 基于神经网络的感应同步器测角系统的误差补偿[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
ZHANG C F. Error compensation of angular measuring system of inductosyn based on neural network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [55] 徐繁荣. 具有绝对编码绕组的感应同步器测角系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
XU F R. Research on inductosyn angle measuring system with absolute coding winding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [56] 王飞, 付晶, 朱钰, 等. 绝对式圆感应同步器粗精数据融合[J]. 传感技术学报, 2018, 31(2): 213-217.
WANG F, FU J, ZHU Y, et al. Coarse and fine data fusion of absolute round inductosyn[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(2): 213-217.
- [57] HOWARD M. The new generation of inductive sensors[J]. World Pumps, 2013, 2013(2): 10-11.
- [58] HOWARD M A, SILLS C S, KREIT D, et al. Position sensing apparatus and method: US, US7298137 B2[P]. 2007.
- [59] RAHAL M, DEMOSTHENOUS A. An ASIC front end for planar high-frequency contactless inductive position sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(9): 3021-3030.
- [60] HOWARD M A, KREIT D. Inductive position detector: US, US8278945 B2[P]. 2012.
- [61] RAHAL M, DEMOSTHENOUS A. An integrated signal conditioner for high-frequency inductive position sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 21(1): 015203.
- [62] CHA Y J, NAM B, KIM J, et al. Evaluation of the planar inductive magnetic field sensors for metallic crack detections [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 162(1): 13-19.
- [63] 彭东林, 付敏, 陈锡侯, 等. 典型位移传感器分类研究与时栅传感器特点分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(10): 36-42.
PENG D L, FU M, CHEN X H, et al. Classification study on typical displacement sensors and analysis on the characteristics of time grating sensors [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 36-42.
- [64] 汤其富. 基于时变磁场精确约束方法的时栅位移传感器研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
TANG Q F. Study on time grating displacement sensor based on precise confine method of time-varying magnetic field[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [65] 武亮. 变耦合系数时栅位移传感器研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2011.
WU L. Research on time-grating based on variable coupling coefficient. [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2011.
- [66] 武亮, 彭东林, 汤其富, 等. 寄生式时栅位移传感器测量原理与结构优化[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 976-984.
WU L, PENG D L, TANG Q F, et al. Measurement principle and structure optimization of parasitic time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5): 976-984.
- [67] 王淑娟. 基于时栅传感技术的伺服电机嵌入式位置检测新方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
WANG SH X. Research on embedded position detection method of the servo motor based the time grating sensing technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.

- [68] 王淑娴,彭东林,吴治峰,等. 伺服电机位置检测技术综述[J]. 仪器仪表学报,2018,39(8):143-153.
WANG SH X, PENG D L, WU ZH Y, et al. Review of position estimation techniques for servo motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 143-153.
- [69] 杨洪涛,章刘沙,费业泰,等. 寄生式时栅传感器测量不确定度的分析与评定[J]. 中国机械工程,2016,27(18):2487-2493.
YANG H T, ZHANG L SH, FEI Y T, et al. Analysis and evaluation of measurement uncertainty sources for parasitic time grating sensors [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(18): 2487-2493.
- [70] 杨洪涛,章刘沙,周姣,等. 寄生式时栅传感器动态测量误差的贝叶斯建模[J]. 光学 精密工程,2016,24(10):2523-2531.
YANG H T, ZHANG L SH, ZHOU J, et al. Modelling of dynamic measurement error for parasitic time grating sensor based on bayesian principle [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 2523-2531.
- [71] TANG Q, WU L, CHEN X, et al. An inductive linear displacement sensor based on planar coils [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(13): 5256-5264.
- [72] 刘小康,李佳豪,彭凯,等. 平面二维时栅位移传感器的理论模型与误差分析[J]. 仪器仪表学报,2020,41(12):111-121.
LIU X K, LI J H, PENG K, et al. Theoretical model and error analysis of the planar two-dimensional time-grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 111-121.
- [73] WU L, TANG Q, CHEN X, et al. A novel two-dimensional sensor with inductive spiral coils[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(13): 4857-4865.
- [74] 武亮,王鑫达,童鹏,等. 基于平面驻波磁场的二维位移传感器测量原理与结构优化[J]. 仪器仪表学报,2021,42(9):225-235.
WU L, WANG X D, TONG P, et al. Measurement principle and structure optimization of two-dimensional displacement sensor based on planar standing wave magnetic field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 225-235.
- [75] 周玮. 时栅角位移传感器自标定研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2012.
ZHOU W. Time grating angular displacement sensor self-calibration [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2012.
- [76] 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.
- [77] 高忠华. 时栅角位移传感器自标定与误差修正方法及关键技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
GAO ZH H. Research on methods and key technologies of self-calibration and error correction for time grating angular displacement sensors [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [78] 陈锡侯,苟李,官云丽,等. 基于单个读数头的角位移传感器自标定方法[J]. 传感技术学报,2014,27(8):1049-1053.
CHEN X H, GOU L, GUAN Y L, et al. A self-calibration method of angular displacement sensor based on single reading head [J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2014, 27(8): 1049-1053.
- [79] 孙世政,陈锡侯,彭东林,等. 嵌入式时栅传感器的动态自标定[J]. 光学 精密工程,2014,22(10):2757-2764.
SUN SH ZH, CHEN X H, PENG D L, et al. Dynamic self-calibration for embedded time grating sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2757-2764.
- [80] 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.
- [81] 刘强,尔联洁,吴云洁,等. 圆感应同步器在采样伺服系统中的应用研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003(2):116-119.
LIU Q, ER L J, WU Y J, et al. Application of inductorsyn in sampled servo system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(2): 116-119.
- [82] 宋现春,张承瑞,李春阳,等. 感应同步器传动链精密检测系统[J]. 计量技术,2000(2):11-13.
SONG X CH, ZHANG CH R, LI CH Y, et al. Precision test system for drive chain of inductorsyn [J]. Metrology Science and Technology, 2000(2): 11-13.
- [83] 郑永. 基于时栅传感器的精密蜗轮副动态检测技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2011.
ZHENG Y. Dynamic testing technology for precision worm gears based on time grating sensor [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.
- [84] 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.
- [85] NAUDURI B S, SHAGA G. A novel approach of using a planar inductive position sensor for the Permanent magnet synchronous motor control application [C]. 2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), IEEE, 2018: 1-5.
- [86] AUNG N L H, BI C, AL-MAMUN A, et al. A demodulation technique for spindle rotor position detection [C]. 2012 Digest APMRC, IEEE, 2012: 1-2.
- [87] YOO K, SEO J, BAN J, et al. Study on development of torque and angle sensor for EPS [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2012, 5(2012-01-0941): 292-296.
- [88] GE X, ZHU Z Q, REN R, et al. A novel variable reluctance resolver for HEV/EV applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 2872-2880.
- [89] DJURIC S M, NAGY L, DAMNJANOVIC M. Inductive displacement sensor for force measuring in humanoid robotic application: Testing the invariance on angular displacement [C]. 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, IEEE, 2009: 100-104.
- [90] SEO D J, KIM T G, NOH S W. Underground pipeline tracking robot development based on magnetic inductive sensor (ICCAS 2016) [C]. 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), IEEE, 2016: 338-340.
- [91] 王兴兴, 杨知雨. 一种高集成度高性能机器人关节单元: CN209364654U [P]. 2019-09-10.
WANG X X, YANG ZH Y. A high integration and high-performance robot joint unit: CN209364654U [P]. 2019-09-10.
- [92] 黎玉龙. 圆感应同步器测角系统在惯导测试转台中的应用研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
LI Y L. The application of angular measurement system using inductorsyn in inertial test system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [93] 段发阶, 牛广越, 周琦, 等. 航空发动机叶尖间隙在线测量技术研究综述 [J]. 航空学报, 2022, 43(9): 82-108.
DUAN F J, NIU G Y, ZHOU Q, et al. A review of online blade tip clearance measurement technologies for aeroengines [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 82-108.
- [94] 王强, 应浩. 基于 FPGA 的双余度旋变无刷电机控制系统 [J]. 兵工自动化, 2020, 39(10): 6-9, 19.
WANG Q, YING H. Control system of dual redundant rotary brushless motor based on FPGA [J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(10): 6-9, 19.
- [95] 郭超勇, 刘若莹, 于国庆, 等. 太阳帆板驱动装置高分辨率转速测量方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(4): 537-542.
GUO CH Y, LIU R Y, YU G Q, et al. High-resolution speed detection method of solar array drive assembly [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(4): 537-542.
- [96] 高忠华, 万家烙. 时栅角度角速度同步测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 98-104.
GAO ZH H, WAN J L. Research on simultaneous measurement method of angular position and angular speed for time grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 98-104.

作者简介



秦毅, 2004 年于重庆大学获得学士学位, 2008 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆大学教授, 主要研究方向为机械状态监测与故障诊断。

E-mail: qy_808cqu.edu.cn



Qin Yi received his B. Sc. degree in Engineering degrees from Chongqing University (CQU) in 2004 and his Ph. D. (Eng.) degrees from CQU in 2008. He is currently a Professor in CQU. He main research interests include mechanical condition monitoring and fault diagnosis.

王阳阳, 2017 于重庆理工大学获硕士学位, 现为重庆大学博士研究生。主要研究方向为精密测量技术与智能装备制造。

E-mail: why_go@163.com



Wang Yangyang received his M. Sc. degree from CQUT in 2017. He is currently a Ph. D. candidate at CQU. His main research interests include precision measurement technologies and Intelligent manufacturing.

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

E-mail: pdl@cqu.edu.cn

Peng Donglin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from CQU in 1992.

He is currently a professor at CQUT. His research interests mainly include precision measurement technology and instrument.