

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007154

电磁式扭矩传感器原理、研究现状及发展趋势*

李志鹏, 王博男, 孟旭, 张超
(东北林业大学交通学院 哈尔滨 150040)

摘要:电磁式扭矩传感器可实现对扭矩的非接触式测量,该传感器具有精度高、抗干扰能力强、无需额外电源和易于安装的诸多优点,非常适合高温、高湿、粉尘极端环境下的扭矩测量。介绍并围绕电磁式扭矩传感器的工作原理,明确归纳了电磁式扭矩传感器的涵盖类别并给出了几款具有代表性的电磁式扭矩传感器。结合国内外30年来电磁式扭矩传感器的发展情况,根据测量扭矩量程大小的技术特点分类阐述,详细论述了其在传统汽车、船舶、航空等行业的应用及研究现状,并对新兴行业:生物医学、医疗器械、机器人行业的应用及研究现状进行了阐述。分析了制约电磁式扭矩传感器发展所存在的问题及其改进方向,最后归纳并阐述了此类电磁式扭矩传感器的发展趋势。

关键词:电磁感应;扭矩传感器;非接触测量;研究现状

中图分类号:TH73 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:460.4020

Principle, study status and development trend of the electromagnetic torque sensor

Li Zhipeng, Wang Bonan, Meng Xu, Zhang Chao

(Transportation College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract:The electromagnetic torque sensor can realize contactless torque measurement. The sensor has many advantages such as high accuracy, strong anti-interference ability, no additional power supply and easy installation. It is very suitable for torque measurement in extreme environment with high temperature, high humidity and dust. This article introduces and revolves around the working principle of electromagnetic torque sensors. The coverage categories of electromagnetic torque sensors is clearly summarized and several representative electromagnetic torque sensors are introduced. The development of electromagnetic torque sensor in the past 30 years at home and abroad is reviewed. According to the technical characteristics of measuring torque range, the application and study status of electromagnetic torque sensor are discussed in detail, including traditional automobile, ship, aviation and other industries. In addition, the application and study status of emerging industries are elaborated, including biomedicine, medical equipment and robot industry. The problems that restrict the development of electromagnetic torque sensors and the direction of improvement are analyzed. Finally, the development trend of such electromagnetic torque sensors is summarized and explained.

Keywords:electromagnetic induction; torque sensor; contactless measurement; study status

0 引言

随着传感器技术的迅速发展,扭矩传感器成为其中一个重要的研究方向。扭矩测量作为各种反映机械转动系统运行状态和检测的主要参数,对扭矩的检测关系到整个转动系统性能,表现在其所输出的功率、能耗、使用

寿命、安全性和稳定性等方面^[1-4]。扭矩测量已经在石油^[5-6]、汽车^[7-8]、船舶^[9-10]、航空航天^[11-12]、工程机械^[13-14]、交通运输^[15-16]、军事^[17-18]、口腔医学^[19-20]、医疗器械^[21-22]、电机^[23-24]、机器人^[25-26]及仿生机械^[27-28]等各个领域有着广泛的应用。随着全球资源的减少和国家战略的需求,原有的接触式扭矩测量易磨损,易受环境因素影响的弊端被日益放大^[29],为了提高扭矩传感器的测量

收稿日期:2020-11-20 Received Date: 2020-11-20

* 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2572019CP04)项目资助

精度,降低使用成本和提高抗干扰能力,非接触式的电磁式扭矩应运而生^[30]。

国内多数学者发表的综述性论文^[31-32]及中外文献如:文献[33-37]等都将电磁式、霍尔式和磁阻/巨磁阻式和一些基于电磁感应原理的传感器区分成为不同种类型的传感器^[38-39]。由于霍尔效应、磁阻效应及其他方式的实现原理都是隶属于电磁感应的一种,由此可知,旋转轴两端的检测旋转角度位置的传感器可以由磁阻传感器和霍尔传感器等来充当上述的电磁传感器^[40-42]。其中磁阻传感器包括^[43]:1)异向磁阻(anisotropic magneto resistance, AMR);2)超巨磁阻(colossal magneto resistance, CMR);3)巨磁阻(giant magneto resistance, GMR)3种传感器。

因此本文与宋春华等^[44]的分类一致,将实现原理为电磁感应这一大类的扭矩传感器都划归为电磁式扭矩传感器,这种归类方式也同国际上的分类一致^[45-49]。本文将在第2、3节分别介绍这一大类的几种典型的扭矩传感器和此类传感器在各个行业的应用。

1 电磁式扭矩传感器

1.1 电磁感应

早在1831年,物理学家法拉第在向皇家学会提交的一个报告中,提出了电磁感应现象,并概括了可以产生感应电流的五种类型:变化的电流、变化的磁场、运动的恒定电流、运动的磁铁、在磁场中运动的导体。其中感应电动势与其所穿过的闭合回路所围成面积的磁通量的时间变化率成正比。感应电动势为:

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt} = \int_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

式中: ψ 为磁通量,单位为Wb; \mathbf{B} 为匀强磁场的磁感应强度,单位为T; \mathbf{S} 为正对面积,单位为 m^2 ; \mathbf{E} 为产生的感生电动势,单位为V; l 为闭合导体内导线的长度,单位为m。

感应电动势的方向由式 $-\frac{d\psi}{dt}$ 中的符号与规定的电动势的参考方向相比较而判断出。

1.2 电磁式扭矩传感器的结构及其工作原理

扭转角扭杆传感器的工作原理是由于施加的扭矩而导致的扭转角的电位测量原理。电磁式扭矩传感器的实质就是通过上述原理检测在转动轴上相位角度的差值,通过电磁感应原理及相关的扭矩公式,来最终得出扭矩,实现对转动轴扭矩的测量^[50-52]。

具体的测量原理如图1所示,在转动轴的两侧分别安装有齿数相同的齿轮,将两个齿轮的初始相位预设定成 $0^\circ \sim 180^\circ$,即齿轮1和齿轮2电压信号的初始相位相同或

者相差 180° 。由于齿轮与感应器之间预留的空气间隙,其中气隙较小。通过该气隙实现了电磁式扭矩传感器的非接触测量。当转动轴开始转动时,转动轴是弹性轴,由材料力学可知,转动轴由于切应力的影响发生形变,此时两组齿轮间将形成微小扭转角。由此导致输出的两路电压信号的相位差不再是 0° 或 180° ,从而使得两组磁电检测器中分别感应出两个交变电动势,且交变电动势仅与两个齿轮的磁芯相对位置和相交位置有关。通过得到的两路电动势的信号之间的相位差,就可以计算出扭转角,进而计算出传动轴所受到的扭矩值。扭转角的测量原理如图2所示,以相位差为 0° 为例。

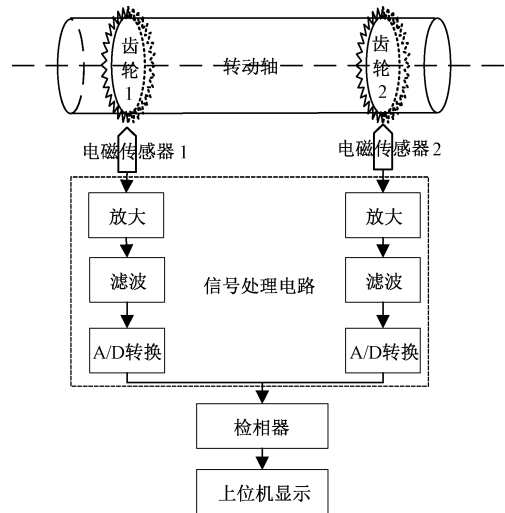


图1 电磁式扭矩传感器测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic torque sensor measurement

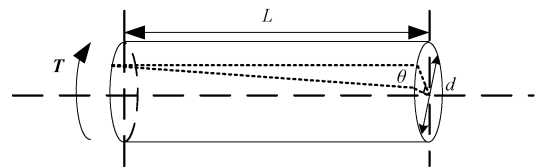


图2 扭转角测量原理

Fig. 2 Principle of torsion angle measurement

测得两个传感器的之间微小形变量对应的扭转角,当长为 L 的弹性传动轴受到扭矩 T 时,传动轴将产生变形,任意两个横截面围绕轴线发生相对转动,从而形成扭转角,此时再应用下述公式。

$$T = GI_p \theta / L \quad (2)$$

式中: θ 为轴扭转角; T 为负载扭矩; L 为扭杆有效长度; G 为扭杆材料剪切模量; I_p 为扭杆截面极惯性矩。

$$I_p = \pi d^4 / 32 \quad (3)$$

式中: d 为转动轴的直径。将 θ 和 I_p 代入式(2)得到:

$$T = \theta \pi G d^4 / 32 L \quad (4)$$

2 几种典型的电磁式扭矩传感器

自从 80 年代起开始,美国、日本等发达国家研制出了电磁式扭矩传感器后,科技界对其进行了广泛和深入的研究。各式各样的新型电磁式扭矩传感器接踵而至。其中主要代表的几款传感器如下,他们分别从结构,制作工艺和测量方式上进行了创新和改进,对该领域贡献较大。

2.1 立式电磁扭矩传感器

Li 等^[53]对平面式的电磁扭矩传感器进行了深入研究,虽然其具有结构简单,抗外界干扰能力强等优点。但它也有较为明显的缺点,由于该型传感器是平面式的,占用过多的横向空间,限制了其应用的范围。同时为解决国内该领域被国外垄断的情况,避开海拉传感器的专利^[54],利用 FPC (flexible printed circuit) 立体式曲面线圈优势,通过立体柱面电磁耦合和内外嵌套的曲面涡流耦合的结构,提出了立式电磁扭矩传感器。

在减小传感器体积的同时,为提高测量精度、减小非线性误差,提出将传感器结构设计成立式的两段结构,即 2 个转子和 2 个接收线圈主从级式结构,主级用于测量,从级用于校对,如图 3 所示^[53]。通过 Maxwell 软件对输出电压、激励线圈匝数、转子的厚度等参数进行电磁仿真,将上述多组参数的数据利用线性减惯性权重粒子群算法与有限元方法相结合的方法优化设计传感器的结构参数,除去电压波动较大及结构参数差的组别,最终找到一组传感器设计参数能使传感器的非线性度产生最小的误差,用以指导传感器的加工,为立式结构电磁扭矩-角度传感器的设计提供了新的理论基础和发展方向。

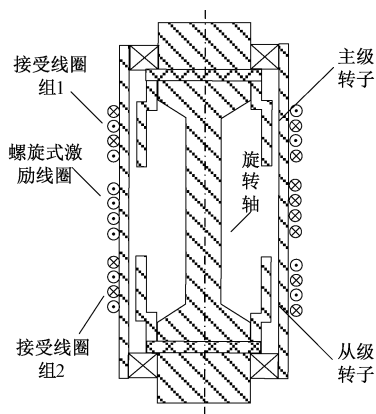


图 3 立式传感器结构
Fig. 3 Vertical sensor structure

2.2 霍尔式扭矩传感器

中北大学为解决现有的扭矩传感器结构复杂和制造

成本高的问题,设计了一种基于霍尔效应的扭矩传感器,传感器结构和传感器磁场如图 4、5 所示^[55]。该传感器使用成本较低的永磁体(N35 钕铁硼)作为激励来产生磁场,将其外形设计成片状,排列方式为相邻两片的 N、S 极,极性相反排列在转动轴的径向上,从而形成绕轴一圈的磁环。当旋转轴转动时,由轴两端的磁环产生周期性的交变磁场,在该磁场中霍尔元件将在其内部产生的霍尔电压,由于旋转轴两端存在着相位差,因此通过计算两路电压信号之间的相位差可得到轴两端相对扭转角大小,再应用式(4)即可得到旋转轴上所加的负载扭矩值。

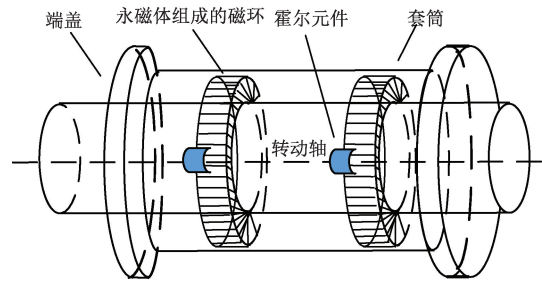


图 4 霍尔式扭矩传感器结构

Fig. 4 Hall-torque sensor structure

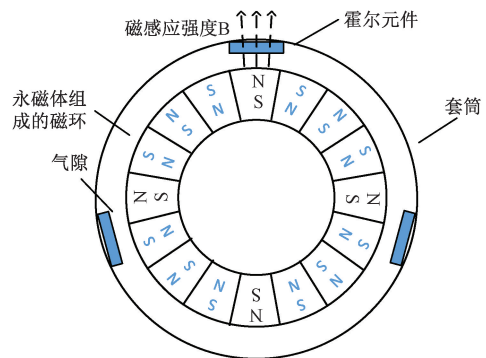


图 5 垂直于磁环方向上的磁场

Fig. 5 The magnetic field perpendicular to the magnetic ring

2.3 差动式电磁感应转矩传感器

Zhao^[56]研制出一种基于电磁感应原理的差动式扭矩传感器,其结构如图 6 所示。传感器轴的输出铁芯一端与转动轴同心固定在转动轴上,另一端使用轴承将其传感器轴相连且可以转动,将输出绕组布置在输出铁芯槽内。励磁铁心固定在励磁套管上,励磁绕组安装在励磁铁心上。该传感器的工作原理是将扭矩的转角信号转化成传感器的闭合磁路磁通,其中磁通是由励磁铁芯,气隙和输出铁芯所形成的磁路产生。由于负载扭矩的原因,此时输出绕组的两路磁通不再相同,产生的电动势也不再相等,经过差动输出后的输出

绕组将产生与该转角成线性关系的电动势,再经过电磁耦合最终得到电动势与负载扭矩 T 成正比的关系。在结构上取得创新的同时,同时实现了对测量动态及静态扭矩的测量。

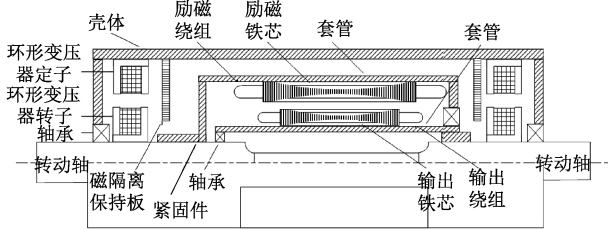


图6 差动式传感器结构

Fig. 6 Differential sensor structure

2.4 环型球栅式电磁扭矩传感

重庆大学喻洪麟课题组在原有的电磁式扭矩传感的基础上,通过将光栅扭矩传感器的测量原理和电磁式进行了结合,研究出来一个新型电磁式扭矩传感,实现方式如图7所示,命名为环型球栅扭矩传感^[57]。其原理还是应用的电磁感应现象,填补了光栅和电磁式结合领域的空白^[58-59]。

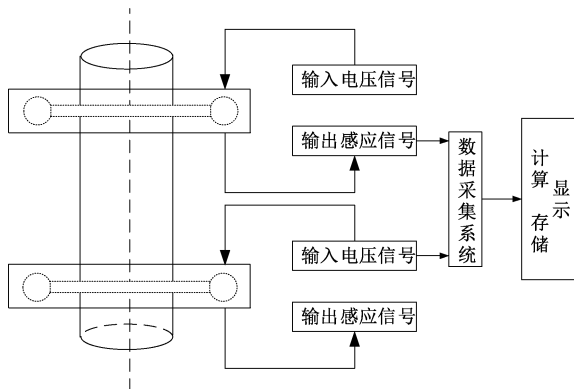


图7 环型球栅传感器扭矩测量系统

Fig. 7 Ring-ball-gird torque sensor measurement system

如图8所示传感器是由环型空间的磁性钢球和电磁式探测器阵列组成^[60],主要是对上述的结构进行了创新,将环型球栅引入其中,同时保留有电磁式测量头,由此将二者完美的结合。由于传感器的球栅圆环是固定的,因此当转动轴旋转时,通过环型球栅内的金属小球,小球和空气的磁阻不同,由于磁阻得变化,就可以转化为读数头和球栅之间相对位移,最终测得扭矩^[61]。该传感器具有物理性质稳定、结构可靠的优点。

3 电磁式扭矩传感器技术现状及其应用

在工业中,电磁扭矩传感器已经应用在传统汽车的

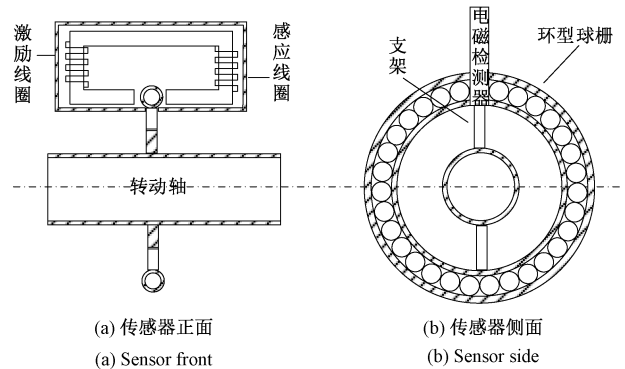


图8 环型球栅扭矩传感器结构

Fig. 8 Ring-ball-gird torque sensor structure

助力转向、变速器与传动轴之间、船舶及飞机的发动机、试验台和电机等传动系中需要进行扭矩测量和功率计算的场合^[62-64]。在进入21世纪以来,随着科技进步和材料的发展,此类型的传感器已经突破了传统行业应用的局限,已经开始在机器人、生物医学中崭露头角。

按照我国工业系统中转矩计量专业对转矩量程的大小划分,该标准将其划分为5个量程^[65]:

- 1) 超大量程转矩: $50 \text{ kN}\cdot\text{m} \sim 2.5 \text{ MN}\cdot\text{m}$
- 2) 大量程转矩: $5 \sim 50 \text{ kN}\cdot\text{m}$
- 3) 中量程转矩: $10 \text{ N}\cdot\text{m} \sim 5 \text{ kN}\cdot\text{m}$
- 4) 小量程转矩: $5 \text{ mN}\cdot\text{m} \sim 10 \text{ N}\cdot\text{m}$
- 5) 微小量程转矩: $5 \mu\text{N}\cdot\text{m} \sim 5 \text{ mN}\cdot\text{m}$

对应上述计量划分标准,本文根据扭矩传感器测量扭矩量程的大小,对电磁式扭矩传感器应用行业的情况进行分类阐述。

3.1 电磁扭矩传感器测量的扭矩为超大量程时的应用

1) 电机行业的应用

在重型机械设备的台架测试时和重型及大型机械旋转上扭矩的测量时,大多应用电机来给上述设备提供动力,因此电机和旋转轴系其中的一部分扭矩应用划分量程属于超大量程范围。

三相异步电动机的效率高是检验电动机性能的一个重要参数,对其测量的研究一直备受电动机领域的关注。为解决精确测量电动机效率的课题,上海理工大学和上海电器科学研究所有限公司对测量电动机效率核心的设备^[66],转矩-转速传感器系统即测功机,进行了深入的研究,其中在电机转矩的测量装置上使用磁电式传感器,通过测得转矩转角,就可计算出电机的转矩。使用该种方法不仅精度可达到 $\pm 0.2\%$,其测量范围: $0.2 \sim 100\,000 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。大大提高了电磁式扭矩传感器的测量量程,使得其横跨了小、中、大、超大,4个划分量程。

2) 机械旋转轴系的应用

由于现有的旋转轴系的高精度扭矩测量结构大多都

较为复杂,在既实现高转速-高扭矩测量,又达到精确实现扭矩时,其测量难度成指数的形式上升。为解决这一测量的短板,重庆交通大学提出了一种基于电磁(齿栅)式转矩传感器与计数器结合的测量方法,在信号方面使用单片机对其进行处理,从而实现了高精度-高扭矩的非接触式测量^[67]。

3.2 电磁扭矩传感器测量的扭矩为大量程时的应用

由于大型船舶的主轴输出的扭矩远大于一般的机械系统,因此主轴上的扭矩测量不适合采用接触式的扭矩测量方式,同时其主轴上输出扭矩数值在大量程的划分范围。由于船舶所处的工作环境极其恶劣,高温、空气潮湿、通风差、高盐度的气体侵蚀等都会对主轴的扭矩测量和检测造成很大的影响,而电磁式扭矩传感器本身的测量优点就可以完美的契合上述的工作需求。基于上述原因,欧大生等^[68]应用磁电相位差式转矩测量技术对船舶的扭矩及其扭振进行了研究,在研究中,以转速脉冲作控制信号,实现了同时对扭矩和转速信号的检测。这种测量技术的精度高,其精度在2.13%以上,且能适应-20℃~+60℃的工作环境,非常适合舰艇的扭矩测量。

中国船舶重工集团公司和海军舟山保障基地装备部为精确测量船舶主机轴系交变扭矩和扭振,采用电磁感应扭矩传感器设计了船舶主机轴系交变扭矩与扭振测试技术和船舶主机轴系交变扭矩与扭振测试装置,为船舶主机上的扭矩参数的长期监测提供一种全新的方法,同时提供了技术和装置保障^[69-70]。

杨海飞^[71]在总结和改进前人^[72-73]的基础上设计了一种非接触式船用驱动轴功率的计算方法,利用磁阻传感器和相位差法相结合的电磁扭矩测量系统,不仅可以监测扭矩,还可以监测船用柴油机轴功率,其中着重处理了外部干扰。提出使用虚拟仪器技术的软件功能代替常用的硬件,减少外部硬件电路的引入,从而提高整个系统对外界电磁场的抗干扰能力。

3.3 电磁扭矩传感器测量的扭矩为中量程时的应用

1) 汽车行业的应用

无论是家用日常代步车、物流货运车、还是重型挂车它们发动机的输出扭矩,大都在几十牛米到几百牛米之间,虽然有些特种车辆的发动机扭矩可超过1 000 N·m,但还是未超过中量程的上限,因此本文将汽车发动机应用的扭矩划分在中量程范围。

在汽车工业中,电磁式扭矩传感器占有极为重要的地位,因为它可测得旋转驱动机构所需物理量功率的基本参数。由于电磁式扭矩传感器结构简单,利于集成化等优势,也可用于对发动机相关的动态扭矩(离合器扭矩)及传动轴等旋转轴系上的扭矩测量^[74]。

针对汽车变速箱传动轴后端的扭矩测量,需要将应变式在线传感器插入在传动轴和变速箱之间进行测量,该测量方法有着滑环部件需要频繁维护更换的缺点。Lee等^[75]通过将磁传感器带(magnetic sensor band, MSB)应用到永磁体上来消除在使用设备期间进行校准,再和霍尔传感器结合的扭矩测量方法,实现了无需物理修正即可测量施加在齿轮箱旋转轴上的扭矩,同时克服了原有的应变式传感器无法在50℃以上的温度准确测量扭矩的问题。同年, Lee等^[76]在该基础上将MSB替换为4对永久钕磁铁,再与一对霍尔传感器组成扭矩测量系统,在扩大测量扭矩时的转速范围和降低了成本的同时,还可实现对变速机构的转速测量。

2) 小型船舶及潜水器的应用

由于小型船舶的吨位较小,潜水器质量更轻,其发动机主轴及潜水器的推进器所需输出的扭矩不是很大,因此将它们归类在中量程扭矩的范围。

Borges等^[77]提出了一种利用钕磁铁和霍尔效应相结合的旋转轴扭矩测量方法。由于旋转轴负载扭矩的存在,导致两个磁体相对运动引起的形变使得磁场强度发生改变。通过测量该磁场的强度的变化,确定轴的径向变形,最终测得扭矩。该方法最大的贡献是找到了一种可以应用在水下环境中,进行扭矩测量的方式,适用于如小型船舶或者潜水器所应用的潜水式扭矩传感器。同时该测量方法还适合那些空间有限、高速旋转和高磨损性场合的扭矩测量。

3) 航空行业的应用

直升飞机和小型飞机的发动机输出扭矩均在几百牛米的量级上^[78],因此将该部分的航空发动机应用的扭矩划分在中量程范围。

为提高直升机在空中时,发动机的运行可靠性并监测扭矩输出、超转等参数,同时预警发动机故障,避免使直发动机运行在极限工况和出现发动机空中停车的危险。黑龙江省科学院高技术研究院孙凯明等^[79],利用磁阻效应设计了电磁式直升机发动机扭矩测量系统,它通过磁阻传感器来检测传动轴上带有磁钢的磁带所形成的两截面信号间的相位差,测得发动机扭矩,并通过信号处理电路及上位机软件,实现了整个扭矩系统的测量,并以此为依据可以为飞行员制定应急预案。

为解决长期测量旋转轴扭矩时的机械疲劳,Zhang等^[80]提出了一种通过检测磁感应强度来实现非接触式转矩测量的新方法。通过励磁线圈、旋转轴和高斯计搭建了实验平台。使用该实验台测量出扭矩和磁感应强度之间的线性关系。实验表明测量结果与理论模型是一致的,该方法可实现对扭矩的长期测量,同时实验初步证明了该扭矩测量方式是可以应用到飞机上。

4) 电机行业的应用

由于人们日常生活中,所需电机输出的扭矩大小,刚好在中量程扭矩的范围内,因此该量程下的电机扭矩测量的研究深受广大电机扭矩测量领域专家和学者的推崇。

在基于传递法的电机扭矩测量分析中,明确指出了基于相位差式的电磁扭矩测量技术在电机扭矩测量中的应用方式,以其在结构简单、测量精度高、本身的非接触特性、能适应恶劣的工作环境上的优势,尤其是在没有磁场或磁场比较弱的工作环境中时,电磁式扭矩传感器往往是最佳选择^[81]。

5) 机械旋转轴系的应用

大多数工业机械旋转轴系的应用中,在转轴系上所施加的扭矩刚好在中量程扭矩 $10 \text{ N}\cdot\text{m}\sim 5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 的范围内,因此广大旋转轴系的研究成果大都集中在此。

为解决传感器在测量机械旋转轴系的动态扭矩时,遇到的使用和安装不当所导致测量精度不高的问题,赵向飞等^[62]介绍了包括电磁式扭矩传感器在内安装方式和联轴器的选型等进行了讨论,为测量动态扭矩所需传感器的选型提供了参考。

3.4 电磁扭矩传感器测量的扭矩为小量程时的应用

1) 汽车行业的应用

电动助力转向(electric power steering, EPS)作为现代汽车的一个标配,已经成为一种普遍的需求功能,因此支撑该系统的扭矩传感器就显得尤为重要^[82]。由于一般的EPS所产生的助力扭矩为正向和反向: $0\sim 10 \text{ N}\cdot\text{m}$,因此EPS的电磁扭矩的助力范围刚好符合小量程扭矩的划分。Mohankumar等^[83]和吕露等^[84]都对电磁感应在汽车扭矩传感器中的应用进行了总体的阐述,俩人均指出电磁扭矩传感器是汽车转向等轴类的重要应用路径。

Angleviel等^[85]设计了一款EPS用基于Moving Magnet Technologies公司技术的扭矩传感器,该传感器的独特之处在于利用电子元件的霍尔效应产生足够的磁通变化测量由扭杆连接的两个旋转轴之间的移动角,可测量的扭矩范围是从 $\pm 1^\circ\sim \pm 8^\circ$ 的角度所对应的扭矩。

Brandl等^[86]设计了一款用于电动助力转向的非接触式扭矩传感器。工作原理为通过将扭杆上的扭矩参数转换为传感器套管中间部分的平移运动,再通过测量电磁感应装置中的输出电压随磁阻比的变化实现非接触的测量。该传感器具有可靠性高、成本低和鲁棒性强,能够自动补偿各种相对定位误差的优势。

Yoo等^[87]应用海拉式电磁扭矩的实现方式,设计了一款基于电磁感应测量原理的扭矩和角度一体化传感器。郭艳玲等^[88]基于立式电磁扭矩传感器的设计,推导了应用在EPS时,传感器的磁场计算公式,并对输出电压数学模型进行了建立和优化,最终实现了气隙磁场强度沿圆周方向呈类似方波分布,输出电压信号类似于正

弦曲线,该成果对传感器的结构尺寸设计及输出电压的优化提供了理论依据。

2) 医疗器械行业的应用

该行业主要是为相关患者提供一些人造器官,来代替或者辅助患者的器官,实现原器官正常工作所提供的功能。因此所适用的电磁扭矩传感器的扭矩数值不会太大,刚好在小量程扭矩的划分范围内。

Shen等^[89]为了解决人工心脏的电动机体积大,在轴承和轴上会出现血块,密封性不足缺点,设计了新型带电磁轴承的紧凑型永磁同步电动机。创新地设计了一种的轴向磁场开槽结构,具有集中绕组。推导了定子和转子间的电磁转矩,通过对定子电流的幅值和相角来控制输出转矩,达到精确控制电机的功率,从而实现人工心脏的跳动。

为了摆脱传统的人工心脏需要通过皮肤通道传递能量,且存在能量转换部件在人体内放热的致命缺点和植入物重量和体积过大的缺陷,中科院和清华大学将永磁体放置于人体外,作为血泵的非接触式驱动源^[90]。将永磁体与被动磁轴的间距设置为 120 mm ,此时血泵的驱动装置能够传递足够的电磁扭矩,实现了利用产生的电磁扭矩传递给血泵作为人工心脏的动力来源。该装置只需将含有被动磁铁的血泵植入体内,避免了将人工心脏的整体植入人体之内,减少了植入伤口、人工心脏与血液接触面,显著提高了其结构的可靠性,且能够避免切除天然心脏。

3.5 电磁扭矩传感器测量的扭矩为微小量程时的应用

1) 医疗器械行业的应用

上一小节中提到,医疗器械行业中多数设备所应用的扭矩范围在小量程范围内,但也有例外,例如电磁植入式听力设备,由于人的耳蜗所能承受冲击极小,因此与它相关的人工设备,所应用的扭矩也小,所以医疗器械行业也是一个横跨2个划分量程的行业。

为了评估植有电磁植入式听力装置的患者在做核磁共振检查时,该项检查是否会对患者耳道的听力装置有影响以及患者耳道的安全性进行了探究。该评估的一项重要评价标准是在 0.3 特斯拉开放式头颈部磁共振成像下,产生的电磁扭矩最大值和在听力装置上扭矩平均值是否会使得听力受损。通过 11 名患者的临床试验数据,SOUNDTEC公司开发出了SOUNDTEC直接系统,找到了以患者头部侧位的方式来控制听力装置在磁共振成像下产生的扭矩,实现最大限度地减少扭矩,最大限度地提高患者安全性^[91]。

2) 机器人行业的应用

扭矩传感器作为机器人整个闭环反馈控制系统中的末端执行器,其作用尤为重要,因此扭矩传感器越来越多地应用于在机器人学当中^[92-93]。由于现代社会,多数研

究的机器人都是高精尖设备,使得这些设备大都被应用在了人们无法亲自涉足的领域,例如微小管道的检查等,因此本文将该行业应用的扭矩归纳在微小量程范围内。

Honda 等^[94]为解决普通机械无法进入微小管道对其进行检查、维护和处理的难题,设计了一款微型游泳机构,用于在水中作业的微型机器人。该装置由附着在螺旋线上的小磁体组成,通过外部交变磁场使磁体由于电磁扭矩而旋转,进而实现了微型机器人在水中的螺旋式游动,达到检查管道的目的。

传统的微型机器人由于需要附着昂贵且易受环境因素干扰传感器来测量力/力矩,这使得微型机器人体积过大,无法完成高精度的微操作。为实现在微域中的超高精度的微操作,滑铁卢大学 Mehrdash 等^[95]研究了一种新的磁力触觉微操作平台(magnetic-haptic micromanipulation platform, MHMP)中的微域力/力矩估计方法(micro-domain)。MHMP 由一个微型磁悬浮从属机器人和一个宏观触觉机器人组成,操作员能够通过操纵宏观主触觉机器人来控制微型从属机器人^[96]。其中从属机器人利用霍尔效应来测量磁通,再与此时微机器人的位置信息同过拟合方程来计算环境的作用力/力矩^[97-98],从而消除了对微机器人上传感器的需求。

3) 生物医学行业的应用

在医学应用中的扭矩通常是通过触摸获得的,而它属于触觉传感的重要属性,因此将扭矩定义为触觉参数的一种^[99]。作为医学应用的触觉式扭矩基本都为微观范围内的扭矩或为较小扭矩,因此该行业应用的扭矩属于微小量程的范围。磁电感应式扭矩作为触觉传感器的一种,它不仅可以在机器人领域中,同时还可以在生物医学中发挥重要作用,如作为微创手术(minimally invasive surgery, MIS)的工具,还可应用在生物检测和康复医学上^[100-101]。

微型机器人给 MIS 带来了革命性的变化,例如在循环系统,泌尿系统和中枢神经系统的靶向药物输送和原位活检取样中发挥了巨大的作用^[102]。受细菌鞭毛的启发,Nelson 等^[103]设计出螺旋式机器人,螺旋式机器人的螺旋运动就像木螺钉或开瓶器那样在组织中移动,机器人通过电磁感应出来的能量转化为螺旋运动,利用电磁转矩完美地抵消了流体阻力,最终实现了在充满液体的环境中工作。

为提高手持式分子诊断设备,如对蛋白质和 DNA 的检测效率,并降低使用成本。明尼苏达大学指出合适的磁性纳米粒子(magnetic nanoparticles, MNPs)对巨磁电阻(GMR)生物传感技术的检测信号的影响是至关重要的^[104]。该研究设计了一种基于 GMR 传感器的检测系统,实验发现,不同的 MNPs 明显影响最终检测信号,取决于它们的电磁转矩,大小和基于表面的结合能力的特

征。该项工作可为选择或制备 MNPs 以增强 GMR 生物传感器的灵敏度提供的理论依据,并最终指导便携式分子诊断设备的研发。

Wu 等^[105]为解决癌症生物标志物的检测速度慢、成本高和检测方式复杂的问题,提出了一种基于磁电式扭矩传感器的非接触生物标志物检测新方法。该系统的原理是使用电磁转矩传感器测量的被激活的磁性粒子标记物,对标记物蛋白质的敏感性进行非接触检测。该仪器实现了可大规模生产,手持式多次反复测量的快速医疗诊断目的。

4) 电机行业的应用

Guo 等^[106]指出在测量微牛·米级时,应用电磁式扭矩传感器的必要性。由于温度、抖动、摩擦力、空气流动等相关因素的存在,若采用接触式的扭矩测量方案,在微小扭矩的作用下,转动轴将无法转动,扭矩传感器将失效。为了克服上述因素引起的测量误差,提高测量精度,提出了一种非接触式测量方法来测量微电机的输出扭矩,该方法的微扭矩精度约为 $0.01 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ 。

4 制约电磁式扭矩传感器的发展因素

1) 制作材料及技术

虽然在进入 21 世纪以来,电磁扭矩传感器在其外形和布置方式上都有大幅度的创新,体积上有所减小,但是所减小的体积还是在与原有的体积在相同的数量级上,目前暂时没有找到新材料制造传感器的部件如齿轮等,替代现有铁磁等材料。也未发现布置线圈的新技术来更新印刷线路板(printed circuit board, PCB)和柔性电路板(flexible printed circuit, FPC)等技术,没有新的材料及技术就无法实现更小化的传感器的制造,只能实现将电磁扭矩的应用在微小领域,而制约了电磁扭矩传感器的应用,比如微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)就是个很好的例子^[107],新出现的硅微机械加工技术已经应用于制造差分电容力传感器,该传感器可作为触觉传感器有望应用在纳米机器人上,因此只需突破这一限制因素,找到并制造出具有特殊物理特性的超级材料^[108],电磁扭矩传感器即可获得更广泛的使用价值,甚至有望在纳米级别上得到推广。

在大型化机械进行高精度的测量扭矩时,由于传感器体积和质量大幅度的增加,这会导致转动轴所加负载值较小或转速低时,输出信号小甚至出现测量困难的情况。为了解决这一问题,要增加传感器中的元器件数量,利用通信技术和电路元器件,提高检测精度,灵敏度及放大信号,这使得信号处理电路更加复杂,进而影响测量系统的稳定性和快速性。转动轴高转速时,动态平衡是一直存在的问题,因此要考虑到扭振的影响。而要消除扭

振需要提高设备的安装精度、加工工艺甚至要考虑加入动态补偿等装置,这也会增加传感结构复杂性和增加制造成本。

2) 加工工艺

为了尽可能地提高测量精度和降低电磁干扰,要对传感器的铁磁材料要经过严格的热处理。目的是在不改变铁磁材料微观晶体结构的情况下,去加工铁磁材料时,刀具对其内部的应力影响。而其中热处理末端,进行退火时的温度把控是处理的关键,众所周知,温度是具有大惯性的控制量,对于降温速度的精准控制一直是一个难题。上述温度的处理也是影响铁磁性材料的磁稳定性、线性度及灵敏度的重要因素。因此提高加工工艺,是对传感器能否有更大的发展的重要条件之一。

5 结 论

随着电磁式扭矩传感器广泛的应用在更多的领域当中,电磁式扭矩传感器将面临更为复杂的应用环境和更苛刻的性能要求,因此对传感器尺寸大小、制造材料的选取以及加工工艺将提出更高的要求。电磁式扭矩传感器正朝着微型化、多功能化、高精度、高可靠性、与其他领域技术相融合等方面发展。结合30年来国内外电磁式扭矩传感器的研究现状的基础上,本文总结出以下几个发展趋势。

1) 性能方面

向着智能化、多功能、高精度、响应速度快以及与其他领域技术相融合的方向发展。

智能化方面:随着智能检测技术的发展,传感器具有自动校正、反馈补偿、自适应等功能。

多功能方面:集角度、扭矩、转速等功能于一体,将电磁扭矩传感器测量原理与无线传输等技术相结合,扩大电磁扭矩传感器所应用的空间范围,实现电磁扭矩传感器向着多用途的趋势发展。

精度方面:选取智能算法优化,如粒子群、模糊神经网络等算法来判别/识别扭矩波动,削弱外界干扰,使传感器具有更高的测量精度和更平稳的扭矩信号。

响应速度方面:在电磁扭矩传感器所测的得信号处理当中,选取卡尔曼滤波等智能算法,测量时快速的剔除奇点数据和冗余,提供给系统所需的扭矩信号,从而提高整个测量系统的响应速度。

与其他领域技术相融合方面:利用磁场聚焦技术来代替现有电磁扭矩传感器的激励方式,使传感器产生更大的磁感应强度,从而提高传感器的抗干扰能力及灵敏度等性能指标。

2) 结构方面

电磁扭矩传感器的结构向着小型化、微型化的趋势

发展。按照现有的PCB和FPC技术的发展趋势,找到新的电路板制造技术,类似于硅微机械加工技术,利用其体积小、可在极小的面积上布置多层线圈等优点,发展出可在MEMS当中应用的电磁式扭矩传感器。随着微电子技术的发展,通过将MEMS与电磁扭矩传感器相结合,开发微型MEMS的控制系统实现在纳米、甚至皮米等级别上的应用。

3) 材料方面

研发或寻找特殊物理特性的新材料,来制作电磁扭矩传感器的磁芯、齿轮、电磁检测器等零件,用于替代现有铁磁等材料。来改善现有传感器相关的磁滞现象、磁饱和等材料本身的缺陷,提高电磁扭矩传感器测量的线性度和精度、减小涡流损耗等,进一步提高传感器的性能指标。同时新材料的问世,也有助于突破电磁扭矩传感器现有的应用领域。

参考文献

- [1] 谢锐, 马铁华, 张红艳. 传动轴扭矩无电池实时测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 47-54.
XIE R, MA T H, ZHANG H Y. Real-time measurement method for drive shaft torque without battery[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 47-54.
- [2] 谢锐, 马铁华, 武耀艳, 等. 嵌入式容栅传感技术及轴功率测试研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 844-849.
XIE R, MA T H, WU Y Y, et al. Study on embedded capacitive grating sensing technology and shaft power testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4): 844-849.
- [3] 陶婕, 肖本贤. 电动叉车EPS系统的故障检测与诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 173-180.
TAO J, XIAO B X. Fault detection and diagnosis of EPS system of electric forklift [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 173-180.
- [4] 罗毅, 杨昆, 商春雪, 等. 基于多摄像头的汽车保险丝盒检测与装配方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 30-39.
LUO Y, YANG K, SHANG CH X, et al. Automobile fuse box detection and assembly method based on multi-camera [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 30-39.
- [5] 赵亮. 随钻钻压、扭矩工程参数测量方案研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
ZHAO L. Research on measurement scheme of drilling and torque engineering parameters [D]. Beijing: China

- University of Petroleum, 2017.
- [6] ZHA CH Q, DONG ZH W, ZHU L X, et al. Development and dynamic analysis of a torsional vibration damping tool for PDC bit[J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2020, 56(5): 807-820.
- [7] 张艳辉, 徐坤, 郑春花, 等. 智能电动汽车信息感知技术研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4): 794-805.
- ZHANG Y H, XU K, ZHENG CH H, et al. Advanced research on information perception technologies of intelligent electric vehicles [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 794-805.
- [8] SEO Y K, HONG S D, JUNG D Y, et al. A study on the performance restoration of torque converters for passenger car 6-speed automatic transmissions with remanufacturing process technology [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2020, 21(4): 1061-1070.
- [9] 李凯, 袁峰, 胡英辉. 电动舵机减速器扭矩测量误差分析与补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(10): 2271-2278.
- LI K, YUAN F, HU Y H. Torque measurement error analysis and compensation of electrical steering engine decelerator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(10): 2271-2278.
- [10] MALTSEV L I, DIMITROV V D, MILANOV E M, et al. Jet control of flow separation on hydrofoils: Performance evaluation based on force and torque measurements [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 29(3): 424-442.
- [11] 苗强, 蒋京, 张恒, 等. 工业大数据背景下的航空智能发动机: 机遇与挑战[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 1-12.
- MIAO Q, JIANG J, ZHANG H, et al. Development of aviation intelligent engine under industrial big data: Chances and challenges[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 1-12.
- [12] EHAB B, MEHDI G, LOTFI R, et al. Modeling and experimental comparative analysis on the performance of small-scale wind turbines [J]. *Wind and Structures*, 2020, 30(3): 261-273.
- [13] 姜伟, 陈品超, 裴信国, 等. 新型旋转比例电-机械转换器静态特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(4): 107-114.
- JIANG W, CHEN P CH, QIU X G, et al. Research on static characteristics of a novel rotating proportional electro-mechanical converter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(4): 107-114.
- [14] SHARAN A S, HIREMATH S S, VENKATESHA C S, et al. Investigation on the critical parameters affecting the working design dynamics of a torque motor employed in an electro-hydraulic servovalve [J]. *Simulation*, 2019, 95(1): 31-49.
- [15] 宫海彬, 苏建, 王兴宇, 等. 基于极值外推的高速列车齿轮传动装置载荷谱编制[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2014, 44(5): 1264-1269.
- GONG H B, SU J, WANG X Y, et al. Compiling method of load spectrum of high-speed train gear drive system base on extreme value extrapolation [J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2014, 44(5): 1264-1269.
- [16] ZIREK A, ONAT A. A novel anti-slip control approach for railway vehicles with traction based on adhesion estimation with swarm intelligence [J]. *Railway Engineering Science*, 2020, 28(4): 346-364.
- [17] 胡凯明, 文立华. 新型弹载压电舵机驱动器方案设计及力学分析 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(21): 104-112.
- HU K M, WEN L H. Scheme design and mechanical analysis about new-type bullet based piezoelectric rudder actuator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(21): 104-112.
- [18] EAGLE S R, KONTOS A P, MI Q, et al. Shared neuromuscular performance traits in military personnel with prior concussion [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2019, 51(8): 1619-1625.
- [19] 樊世锋, 郗会, 张文轩, 等. 局部应用唑来膦酸与纳米银对即刻种植骨结合影响的比较[J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(10): 1547-1552.
- FAN SH F, QIE H, ZHANG W X, et al. Comparison of the effects of topical application of zoledronic acid and silver nanoparticles on osseointegration of immediate implant [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2020, 24(10): 1547-1552.
- [20] LAGES F S, DOUGLAS-DE O D W, COSTA F O. Relationship between implant stability measurements obtained by insertion torque and resonance frequency analysis: A systematic review [J]. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 2018, 20(1): 26-33.
- [21] 姚斌, 张建勋, 代煜, 等. 用于微创外科手术机器人的多维力传感器解耦方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(1): 147-153.
- YAO B, ZHANG J X, DAI Y, et al. Research on decoupling method of multi-dimensional force sensor used in minimally invasive surgical robot [J]. *Chinese Journal*

- of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 147-153.
- [22] YU H L, JIANG J, XIE L, et al. Design and static calibration of a six-dimensional force/torque sensor for minimally invasive surgery [J]. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, 2014, 23(3): 136-143.
- [23] 郭占社, 吴一辉, 孟永钢. 非接触法在微电机力矩测试中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(1): 83-86.
- GUO ZH SH, WU Y H, MENG Y G. Application of noncontact measurement method to the torque measurement of micromotors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(1): 83-86.
- [24] JASZCZUK W, CZERWIEC W. Experimental studies of static torque/rotor position characteristics of stepper motors [J]. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2011, 57(11): 1317-1320.
- [25] 蔡世波, 韦威, WAN W W, 等. 基于磁流变液传动的柔顺关节研究:设计, 仿真和实验(英文)[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(1): 200-210.
- CAI SH B, WEI W, WAN W W, et al. Study on the compliant joint based on magnetorheological fluid transmission: Design, simulation and experiments [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(1): 200-210.
- [26] JUNG B J, KIM B, CHOI H R, et al. Joint torque sensor embedded in harmonic drive using order tracking method for robotic application [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 2017, 22(4): 1594-1599.
- [27] 吴常铖, 宋爱国, 曾洪, 等. 基于sEMG和GRNN的手部输出力估计[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1): 97-104.
- WU CH CH, SONG AI G, ZENG H, et al. Force estimation based on sEMG and GRNN [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1): 97-104.
- [28] SONG AI G, WU J, QIN G, et al. A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor[J] *Measurement*, 2007, 40(9): 883-891.
- [29] 王岩, 储江伟. 扭矩测量方法现状及发展趋势[J]. *林业机械与木工设备*, 2010, 38(11): 14-18.
- WANG Y, CHU J W. Current status and development trend of torque measuring methods [J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2010, 38(11): 14-18.
- [30] TURNER J D, AUSTIN L. A review of current sensor technologies and applications within automotive and traffic control systems [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering*, 2000, 214(6): 589-614.
- [31] 王登泉, 杨明, 叶林, 等. 非接触式旋转轴扭矩测量现状[J]. *电子测量技术*, 2010, 33(6): 8-12.
- WANG D Q, YANG M, YE L, et al. Study of noncontact torque measurement of rotating shaft [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33(6): 8-12.
- [32] 吕华溢, 杨军, 宋娜. 轴系扭矩测量方法与发展趋势[J]. *计测技术*, 2017, 37(2): 6-10.
- LYU H Y, YANG J, SONG N. The methods and development trend of torque measurement for transmission shafting [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2017, 37(2): 6-10.
- [33] 罗胜彬. 磁电式扭矩传感器的研究[D]. 成都: 西华大学, 2015.
- LUO SH B. Research of magnetoelectric torque sensor [D]. Chengdu: Xihua University, 2015.
- [34] 赵浩. 一种基于霍尔效应的扭矩传感器[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(10): 1505-1508.
- ZHAO H. A new torque sensor based on hall effect [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(10): 1505-1508.
- [35] 逢金鑫, 潘海林, 张清, 等. 基于转角差法的扭矩传感器设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2015, 52(10): 13-15.
- PANG J X, PAN H L, ZHANG Q, et al. Research and design of torque sensor based on angle difference method [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015, 52(10): 13-15.
- [36] 吴永烽. 基于环形球栅的扭矩测量原理与方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- WU Y F. Research on the principle and methods of torque measuring based on ring ball gratings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [37] LIU J, YANG L F, MA J P. The state-of-art and prospect of contactless torque measurement methods [C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 542: 012013-012017.
- [38] 余成波, 张莲, 陈学军, 等. 螺管形差动变压器的非接触式扭矩传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(8): 881-884.
- YU CH B, ZHANG L, CHEN X J, et al. Research on noncontract torque measurement for solenoid-type differential transformer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(8): 881-884.
- [39] 周盼盼, 邬尚良, 徐坤, 等. 电磁感应式无线转矩测量系统的研究[J]. *电子世界*, 2016, 38(6):

- 157-158.
- ZHOU P P, WU SH L, XU K, et al. Research on electromagnetic induction wireless torque measurement system [J]. *Electronics World*, 2016, 38 (6): 157-158.
- [40] VOGELGESANG B, BAUER C, RETTING R. Performance of GMR-elements in sensors for automotive application [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 435-446.
- [41] MOERBE M. Sensor array for detecting rotation angle and/or torque: US6578437 B1 [P]. 2003-06-17.
- [42] PEILLOUD F, BLACHE C. Torsion measuring device for a rotating shaft: US5501110 A [P]. 1996-03-26.
- [43] LISA J, DANIEL K, RAHEL K, et al. Recent developments of magnetoresistive sensors for industrial applications [J]. *Sensors*, 2015, 15 (11): 28665-28689.
- [44] 宋春华, 徐光卫. 扭矩传感器的发展研究综述[J]. *微特电机*, 2012, 40(11): 58-60.
- SONG CH H, XU G W. Development and research overview on torque sensor [J]. *Small & Special Electrical Machine*, 2012, 40(11): 58-60.
- [45] SHI G, WANG N, CHO CH D. Design of a new noncontact torque sensor for rotating stepped shaft by monitoring magnetic field [J]. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, 1082(12): 547-551.
- [46] FLEMING W J. Overview of automotive sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002, 1(4): 296-308.
- [47] FLEMING W J. New automotive sensors—A view[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(11): 1900-1921.
- [48] URBAN G. Jacob Fraden: Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications, 5th ed [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2016, 408(21): 5667-5668.
- [49] LEMARQUAND V. Synthesis study of magnetic torque sensors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, 35(6): 4503-4510.
- [50] ZHAO H. Present situation and development review of torque measurement [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 422(9): 141-145.
- [51] 方玉良. 用于 EPS 的电磁感应式扭矩传感器研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2014.
- FANG Y L. Research on contactless inductive torque sensor in electric power steering system [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [52] 逯继业. 施力器用动态扭矩传感器开发研究[D]. 太原:太原理工大学, 2017.
- LU J Y. Research on the development of dynamic torque sensor for force generator [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [53] LI ZH P, ZHANG CH, SHI S ZH, et al. Design and parameter optimization of contactless vertical inductive angle sensor[J]. *Vacuum*, 2019, 169: 108865.
- [54] LIPPSTADT H I, GESEKE N K, SCHMINDT F J, et al. Inductive angle sensor: US6236199 B1 [P]. 2001-05-22.
- [55] 郭彦青, 李赛, 段志强, 等. 一种基于霍尔效应的扭矩传感器研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2019, 48(4): 56-59.
- GUO Y Q, LI S, DUAN ZH Q, et al. The development of a torque sensor based on Hall effect [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2019, 48(4): 56-59.
- [56] ZHAO H. A differential electromagnetic induction torque sensor and its finite element analysis[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(5): 055003.
- [57] 陈卓. 环形球栅扭矩传感器的结构分析与原理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- CHEN ZH. Research on the principle and the structural analysis of the ring-ball-grid torque sensor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [58] 喻洪麟, 巴军, 何安国. 环型空间阵列扭矩传感器设计及电磁分析[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(8): 1687-1691.
- YU H L, BA J, HE AN G. Design and electromagnetic analysis of ring-space array torque sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(8): 1687-1691.
- [59] 吴永烽, 喻洪麟, 何安国. 环形球栅扭矩测量原理研究[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(11): 2580-2585.
- WU Y F, YU H L, HE AN G. Research on the measuring principle of torque based on ring ball gratings [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(11): 2580-2585.
- [60] 吴麒麟. 环型球栅电磁式检测器的结构优化设计研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- WU Q L. Optimization of the electromagnetic detector based on ring-ball-grid [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [61] 吴永烽, 喻洪麟, 何安国. 基于 WNN 的环形球栅扭矩传感器的信号解调[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(10): 2216-2221.
- WU Y F, YU H L, HE AN G. Signal demodulation of ring ball grating torque sensor based on WNN [J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2216-2221.
- [62] 赵向飞, 刘军, 钟正虎. 动态扭矩传感器在机械传动中的应用研究[J]. 电工电气, 2018, 40(11): 33-36.
ZHAO X F, LIU J, ZHONG ZH H. Application research on dynamic torque sensor in mechanical transmission [J]. Electrotechnics Electric, 2018, 40(11): 33-36.
- [63] TREULER C P O. Magnetic sensors for automotive applications[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2001, 91(1): 2-6.
- [64] TURNER J D. Development of a rotating-shaft torque sensor for automotive applications[J]. IEE Proceedings D - Control Theory & Applications, 1988, 135(5): 334-338.
- [65] 徐进. 超大量程转矩测量装置的选择[C]. 第十三届全国电气自动化与电控系统学术年会, 2007: 313-316.
XU J. Choice of the super-rang of torquemeter [C]. Proceedings of the 13th Annual Conference Automation and Electronic Control Systems, 2007: 313-316.
- [66] 唐海松, 陈亦新, 倪立新. 现代转矩转速传感器在电机能效测试应用中的技术[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(1): 95-100.
TANG H S, CHEN Y X, NI L X. Modern torque and speed sensor in the application of motor efficiency test [J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(1): 95-100.
- [67] 王会青. 旋转设备的高转速、高转矩测试技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
WANG H Q. Rotating equipment's high speed, high torque test engineering research [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [68] 欧大生, 张剑平, 秦建文. 电磁相位差式转矩测量技术研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30(4): 100-103.
OU D SH, ZHANG J P, QIN J W. Research on the magnet-electric phase-difference torque measurement [J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(4): 100-103.
- [69] 严康平, 林静, 胡巍, 等. 船舶主机轴系交变扭矩与扭振测试装置[J]. 船舶工程, 2009, 31(S1): 36-38.
YAN K P, LIN J, HU W, et al. Device of shaft alternative torque and torsional vibration test of marine main engine [J]. Ship Engineering, 2009, 31(S1): 36-38.
- [70] 严康平, 林静, 吴韵文, 等. 船舶主机轴系交变扭矩与扭振测试技术[J]. 船舶工程, 2012, 34(S1): 44-46.
YAN K P, LIN J, WU Y W, et al. Technology of shaft alternative torque and torsional vibration test of marine main engine [J]. Ship Engineering, 2012, 34(S1): 44-46.
- [71] 杨海飞. 非接触式磁电法轴功率测试系统的开发[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
YANG H F. Development a non-contact shaft power testing system based on magnetoelectric method [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014
- [72] 张成伟, 杨建国. 磁阻式扭矩测量方法研究及主推进装置监测系统研制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
ZHANG CH W, YANG J G. Research on a measurement method of torque on magneto-resistive sensor and development of monitoring system of main propulsion plant [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [73] 何浩, 杨建国. 基于相位差法的船舶柴油机轴功率监测系统的开发[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
HE H, YANG J G. Development of with shaft power monitoring system for marine diesel engine based on the way of phase difference [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [74] MURTY B V. Electromagnetic torque sensor for a rotary shaft: US4724710 A [P]. 1988-02-16
- [75] LEE K, CHO C D. Study of noncontact torque measurement method with magnetic sensor band [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(9): 3897-3903.
- [76] LEE K, CHO C D. A feasibility study of a noncontact torque sensor with multiple hall sensors [J]. Journal of Sensors, 2015: 126935.
- [77] BORGES J C S, DE DEUS D B B, LIMA FILHO A C, et al. New contactless torque sensor based on the hall effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(16): 5060-5067.
- [78] 赵立峰, 李云清, 成传松, 等. 活塞式航空发动机的优化与标定[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(4): 391-394.
ZHAO L F, LI Y Q, CHENG CH S, et al. Model-based optimization and calibration of piston aero-engine [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(4): 391-394.
- [79] 孙凯明, 吴涛, 刘彤军. 直升机发动机扭矩测量系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2012, 31(7): 54-56.
SUN K M, WU T, LIU T J. The design of helicopter torque measurement system [J]. Techniques of Automation and Applications, 2012, 31(7): 54-56.

- [80] ZHANG X M, ZHAO M R, HUANG Y G, et al. Novel non-contact torque measurement using the magnetomechanical effect[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2019, 47(1): 107-116.
- [81] 曾建敏, 杨向宇. 基于传递法的电机转矩测量分析[J]. *日用电器*, 2014, 57(9): 32-34.
ZENG J M, YANG X Y. Survey of torque measurement of motor based on transfer method [J]. *Electrical Appliances*, 2014, 57(9): 32-34.
- [82] 吴利君. EPS的电磁感应式扭矩传感器测试系统研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.
WU L J. Study on the testing system of electromagnetic induction torque sensor for EPS [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016.
- [83] MOHANKUMAR P, AJAYAN J, YASODHARAN R, et al. A review of micromachined sensors for automotive applications[J]. *Measurement*, 2019, 140: 305-322.
- [84] 吕露, 徐慧惠, 周清华, 等. 汽车传感器技术中电磁感应现象的应用[J]. *内燃机与配件*, 2020, 41(15): 105-106.
LYU L, XU H H, ZHOU Q H, et al. The application of electromagnetic induction phenomenon in automobile sensor technology [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2020, 41(15): 105-106.
- [85] ANGLEVIEL D, FRACHON D, MASSON G. Development of a contactless hall effect torque sensor for electric power steering [C]. *SAE 2006 World Congress*, 2006: 10240-10248.
- [86] BRANDL M, HAAS F, MARIK R. Contactless torque sensor-mechatronic principle and prototype development for automotive applications [C]. *International Conference on Icinco*, 2009: 55-61.
- [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(1): 292-296.
- [88] 郭艳玲, 常子凡, 那少聃. 立式扭矩传感器磁场与输出电压分析[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(2): 18-20,24.
GUO Y L, CHANG Z F, NA S D. Magnetic field and output voltage analysis of 3D torque sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(2): 18-20,24.
- [89] SHEN J X, VILATHGAMUWA D, TSENG K, et al. A novel compact PMSM with magnetic bearing for artificial heart application [J]. *Industry Applications IEEE Transactions on*, 2000, 36(4): 1061-1068.
- [90] XIA D, XIA L. The electromagnetic torque and eddy current loss analysis of the non-contact driving device of artificial heart [C]. *2010 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2010: 1931-1935.
- [91] DYER R K, NALKMAIL D, DORMER K J. Magnetic resonance imaging compatibility and safety of the soundtec direct system [J]. *The Laryngoscope*, 2006, 116(8): 1321-1333.
- [92] HARMON L D. Tactile sensing for robots [C]. *Robotics and Artificial Intelligence*, 1984: 109-157.
- [93] 潘新安, 王洪光, 姜勇. 一种机器人谐波减速器内嵌扭矩传感器的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(1): 154-161.
PAN X AN, WANG H G, JIANG Y. Development of a built-in torque sensor in harmonic drive gears for robots [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(1): 154-161.
- [94] HONDA T, ARAI K I, ISHIYAMA K. Micro swimming mechanisms propelled by external magnetic fields [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(5): 5085-5087.
- [95] MEHRTASH M, KHAMESEE M B. Micro-domain force estimation using hall-effect sensors for a magnetic microrobotic station [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems & Manufacturing*, 2013, 7(1): 2-14.
- [96] MEHRTASH M, TSUDA N, KHAMESEE M B. Bilateral macro-micro teleoperation using magnetic levitation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(3): 459-469.
- [97] KHAMESEE M B, KATO N, NOMURA Y, et al. Design and control of a microrobotic system using magnetic levitation [J]. *Mechatronics IEEE/ASME Transactions on*, 2002, 7(1): 1-14.
- [98] MEHRTASH M, KHAMESEE M B. Design and implementation of LQGLTR controller for a magnetic telemanipulation system-performance evaluation and energy saving [J]. *Microsystem Technologies*, 2011, 17(5): 1135-1143.
- [99] TIWANA M I, REDMOND S J, LOVEL N H. A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2012, 179: 17-31.
- [100] LEE M H, NICHOLLS H R. Tactile sensing for mechatronics: A state of the art survey [J]. *Mechatronics*, 1999, 9(1): 1-31.
- [101] LEE M H. Tactile sensing: New directions, new

- challenges [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2000, 19(7): 636-643.
- [102] LI H, TAN J, ZHANG M J. Dynamics modeling and analysis of a swimming microrobot for controlled drug delivery [J]. *IEEE Transactions on Automation Ence & Engineering*, 2009, 6(2): 220-227.
- [103] NELSON B J, KALIAKATSOS I K, ABBOTT J J. Microrobots for minimally invasive medicine[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2010, 12 (1): 55-85.
- [104] WANG W, WANG Y, TU L, et al. Magnetoresistive performance and comparison of supermagnetic nanoparticles on giant magnetoresistive sensor-based detection system[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 1339-1354.
- [105] WU Y Z, LIU Y W, LI F, et al. A novel approach based on magneto-electric torque sensor for non-contact biomarkers detection [J]. *Sensors and Actuators; B. Chemical*, 2018, 276: 540-544.
- [106] GUO ZH SH, HAN J X, AN Y, et al. A new method to measure the output torque for micromotor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2015, 64(9): 2481-2488.
- [107] JONES B E, YAN T H. MEMS force and torque sensors/ a review [J]. *Measurement and Control; Journal of the Institute of Measurement and Control*, 2004, 37 (8): 236-241.
- [108] LOSBY J E, SAUER V T K, FREEMAN M R. Recent advances in mechanical torque studies of small-scale magnetism[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(48): 483001.

作者简介



研究。

E-mail: 984764220@qq.com

Li Zhipeng received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 1986, received his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2004, and received his Ph. D. degree from Northeast Forestry University in 2014. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Northeast Forestry University. His main research interests include electromagnetic torque-torsional vibration parameter measurement and research on automobile EPS control system.



王博男(通信作者), 2012年于佳木斯大学获得学士学位, 2016年于东北林业大学获得硕士学位, 现为东北林业大学博士研究生, 主要研究方向为扭矩传感器、解调算法及应用。

E-mail: linyedaxue@nefu.edu.cn

Wang Bonan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiamusi University in 2012, and received his M. Sc. degree from Northeast Forestry University in 2016. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Northeast Forestry University. His main research interests include torque sensor, demodulation algorithm and application.