

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.02.02

轴系扭矩测量方法与发展趋势

吕华溢, 杨军, 宋娜

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 扭矩是反映轴系传动装置输出功率和评价其工作特性的主要技术指标, 通过实时监测输出扭矩可为机械动力设备的可靠运行、故障诊断、安全维护提供有效保障, 开展轴系扭矩测量方法研究具有重要意义。本文基于传递法的两大类扭矩测量原理, 详细分析了当今研究较为广泛的几种应力(应变)检测型、扭转角检测型扭矩测量方法和传感器结构的工作原理、特点以及存在的问题。结合轴系传动装置自身的特点与发展, 认为今后轴系扭矩测量方法应在应变片测量工艺改进、非接触式测量、特殊尺寸轴上测量、数据处理方法和可计量性设计几方面开展进一步研究。

关键词: 扭矩测量; 扭矩传感器; 轴系传动

中图分类号: TB93; TH823

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2017) 02-0006-05

The Methods and Development Trend of Torque Measurement for Transmission Shafting

LYU Huayi, YANG Jun, SONG Na

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Torque is main technical index that reflects the output power and performances of transmission shafting, which can provides effective guarantee for reliable operation, fault diagnosis and security maintenance of power equipment via real time monitoring of output torque. It has important implications for torque measurement of transmission shafting. Based on the two kinds of principles of torque measurement in transfer method, strain (stress) and torsion angle, the working principles, characteristics and drawbacks of several torque measuring methods and sensor structures that having been researched widely were analyzed in detail. In the future, combining with the own characteristics and development of transmission shafting, the torque measurement of transmission shafting should be further developed in the respects: craft improvement of strain gauge testing, non-contact measurement, measurement of special size shaft, method of data handling and design of measurability.

Key words: torque measuring; torque sensor; transmission shaft

0 引言

轴系传动是机械装置动力输出的主要形式, 其通过动力轴提供扭矩输出并带动设备运行, 通过扭矩可反映动力系统的整体工作特性和状态并评价机械装置的整体性能。在机械传动系统中, 轴上扭矩输出既是测算动力系统功率的重要参数, 也是监测动力系统工作状态和健康情况的技术指标, 其直接关系到机械装置的动力性能和运行安全。因此, 实时监测动力轴上的输出扭矩, 对于保障机械装置整体安全稳定工作具有重要意义。

目前, 对轴系扭矩测量方法和扭矩传感器的需求广泛存在于众多领域中。如航空航天、汽车制造、船舶工业、铁路运输、石油钻探等领域都会应用到扭矩测量方法和扭矩传感器。例如: 为保证飞机正常飞行和发动机可靠工作, 美国 FAA、欧洲 EASA 和我国 CCAR 都建立了相应的发动机扭矩特性适航规章^[1]; 为保证在全球各地生产线上扭矩应用完全相同, 空中客车集团采购了专门的扭矩实验室设备^[2]; 浙江大学研制了基于磁感应强度变化的汽车电动助力转向用非接触式扭矩传感器^[3]; 中北大学研制了用于装甲车辆变速箱输入轴和输出轴的应变式扭矩遥测系统^[4]; 中国船舶重工集团公司采用磁电感应式扭矩传感器对船舶主机轴系交变扭矩和扭振进行检测^[5]。

轴系扭矩测量属于动态扭矩测量范畴, 不同于扭杆等非旋转轴的静态扭矩测量, 需要考虑被测轴实时转动、信号采集的方法、径向跳动干扰等多种因素对

收稿日期: 2016-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475060)

作者简介: 吕华溢(1980-), 男, 工程师, 博士, 研究方向为多维力、加速度测量。

扭矩测量方法的影响。

1 扭矩测量方法的现状

扭矩测量研究一直受到国内外计量测试领域所关注, 扭矩测量方法依据原理的不同分为平衡力法、能量转换法和传递法三大类^[6]。平衡力法通过测量反作用力获取扭矩信息, 适用于测量匀速扭矩且受被测设备结构局限性大; 能量转换法通过间接测量由扭矩转化而来的其它形式能量实现, 相对误差较高因而很少被采用; 传递法通过测量扭矩造成的弹性元件物理参数变化实现对扭矩信息的测量, 是目前国内外应用最为广泛的扭矩测量方法。传递法又可分为两种主要类型: 一是应力(应变)检测型, 通过测量轴受到扭矩后的主应力或主应变获取扭矩信息; 二是扭转角检测型, 通过测量轴受到扭矩后产生的形变扭转角获取扭矩信息。由于轴的扭转角检测在实际应用中所需附加装置多、占用空间大, 因而当前扭矩检测方法多以应力(应变)检测型为主。此外, 目前基于传递法的这两种测量原理已经开发出多种扭矩传感器用于轴系传动的扭矩测量。

1.1 应力(应变)检测型扭矩传感器

1.1.1 应变片测量方式

采用粘帖应变片在被测物体上对应力(应变)进行测量是一种常用的检测方法。根据材料力学理论可知, 扭矩测量中, 轴受到扭矩作用后其表面主应力的方向与轴心法线成 45° 和 135° 夹角, 并分别表现为拉应力和压应力的形式^[7]。因此可在扭转轴上沿这两个角度方向粘帖应变片, 联接构成差动全桥式检测电路进行轴上扭矩的检测, 如图1所示。应变片测量方式的成本低、精度高、工作原理简单, 是目前最成熟的力学测量方法, 在多领域中得到广泛应用。但其检测效果受粘帖因素影响大并需要连接电源和信号输出线, 因此, 更适用于对静态轴(扭杆)进行扭矩测量; 而对处于旋转工作中的动态轴进行测量时, 可以采用导电滑环的接触式, 旋转变压器的非接触式和无线电波(或红外线)作为数据传输手段的无线通信非接触式三种实现方法^[8]。接触式结构的导电滑环和刷臂需要时刻接触, 因而存在机械磨损、寿命低、稳定性差的缺点, 只适用于转速不超过 500 r/min 的低速转动轴测量场合; 旋转变压器方法可对电源和数据进行非接触式的传输并且不存在上述的机械磨损缺点, 但其对工作环境要求较高、结构复杂、体积庞大并随着轴直径的增加而同步变大, 更适用于小直径转动轴的测量场合; 无线通

信方法解决了测量数据的传送, 可用于 5000 r/min 以下的高速转动轴测量场合, 但可靠性还有待提升, 且需要在被测轴上安装电池并定期更换, 所附加的电池、通信装置等也会对小直径转动轴的动平衡造成影响。新兴的无线供电方式虽然可提供电源无线传输手段, 但存在较大的电磁干扰, 线圈体积也随着轴直径的增加而变大。另外, 随着轴的工作转速不断提高, 还需考虑增加轴上附加装置(信号调理电路、无线数据发射装置等)的强度以克服离心力作用。

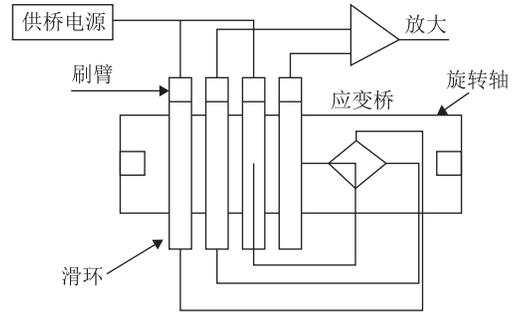


图1 应变片测量方式扭矩传感器结构示意图

1.1.2 磁弹性与压磁效应(逆磁致伸缩效应)测量方式

鉴于通常的机械传动轴均为铁磁性材料制造, 而这类材料的磁导率为结构应力敏感参数, 在受到扭转应力后磁化状态会发生改变, 因而可利用这一特性对轴进行扭矩检测^[9]。从20世纪中期利用材料自身磁弹性测量扭矩的方法提出, 到目前已有十字交叉型、变压器依附型等多种磁弹性扭矩传感器被发明^[10-11]。这些不同形式的扭矩传感器也都是在与轴心法线成 45° 和 135° 夹角的轴表面主应力方向上设置磁通检测铁心, 并在拉、压应力方向的交点上设置交流激励铁心, 从而在二者之间通过传动轴和气隙形成闭合检测磁场, 如图2所示。当轴在扭矩作用下内部形成的应力导致磁场畸变, 进而影响不同检测铁心的磁通量发生变化, 通过外接的检测电桥获取感应电势变化后可得出相应扭矩信息。磁弹性测量方式扭矩传感器与被测轴之间为非接触测量, 因而对静态轴或动态轴都可进行扭矩测量, 且安装简单易于实现小型化, 主要在船舶动力装置、冶金压延、石油勘探等大直径轴领域应用较多。不足之处主要表现在: 铁磁性材料自身的压磁效应较弱, 导致传感器的灵敏度和精度不高; 传感器性能很大程度上被轴的材料、加工工艺以及环境温度所影响; 由于轴材质的不均匀性、加工和安装的偏心导致轴在工作中出现偏心振摆造成传感器存在有角度依赖性, 使得传感器对被检测信息有时难以区分是轴上扭矩变

化还是振动造成间隙变化所引起的。

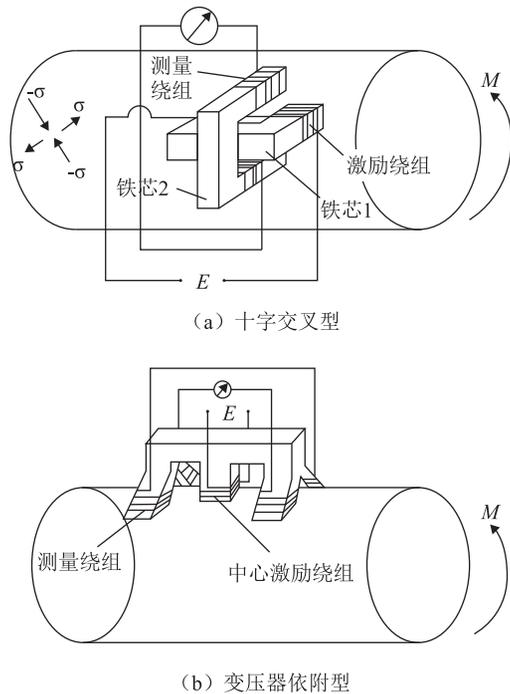


图2 磁性测量方式扭矩传感器结构示意图

针对铁磁性轴本身压磁效应较弱的缺点，利用非晶态合金或超磁致伸缩材料较强的压磁效应作为敏感转换元件构成基于压磁效应的扭矩传感器^[12,13]。这与采用磁性测量方式的传感器类似，区别在于前者的主轴被测部分表面贴附有非晶态合金或超磁致伸缩材料薄膜，用以增强扭矩作用下轴内部应力导致材料磁导率变化。目前，以采用铁基非晶态合金 $Fe_{80}B_{20}$ 和铁镓合金 (Galfenol) 两种材料开发扭矩传感器为代表，主要有正交磁头式和同轴线圈式两种类型，如图3所示。正交磁头式扭矩传感器的结构和工作原理与十字交叉型磁性测量方式相似，只是激励铁心与检测铁心通过传动轴表面的非晶态合金或超磁致伸缩材料薄膜和气隙形成闭合检测磁场，由于引入了非晶态合金或超磁致伸缩材料层使得轴内部应力所引起的磁导率变化更加显著和易于检测；同轴线圈式扭矩传感器是通过在轴表面的主应力正交方向贴附数条非晶态合金或超磁致伸缩材料薄膜，并与轴外侧非接触环绕的激励线圈和检测线圈构成，当轴上加载扭矩后拉、压主应力将使非晶态合金或超磁致伸缩材料薄膜的磁导率发生增大和减小，通过差分方式进行检测后可得出被测扭矩。两种类型的压磁效应方式扭矩传感器均为非接触测量方式，可在不改变现有轴系结构的情况下对静态、动态传动轴进行扭矩测量，现已在机床钻头

扭矩测量中被成功采用^[14]。此类扭矩传感器不足之处主要为正交磁头式需要从结构上解决传动轴径向振动所造成间隙变化引起的数据补偿问题，而同轴线圈式存在不同尺寸传动轴需定制匹配相应尺寸线圈的缺点。

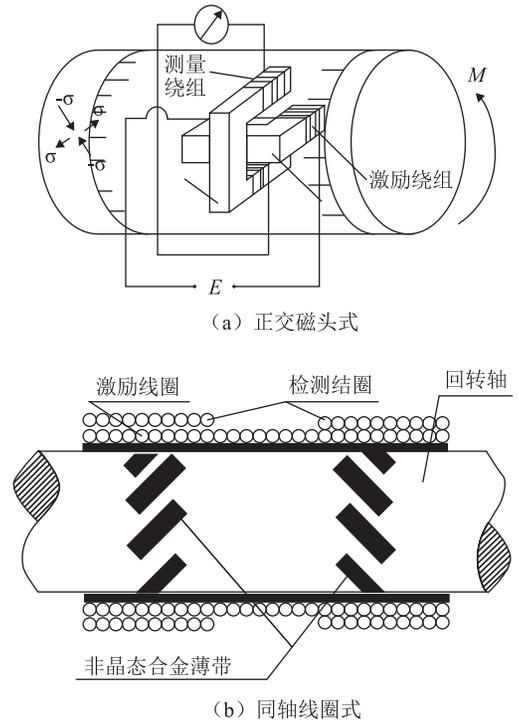
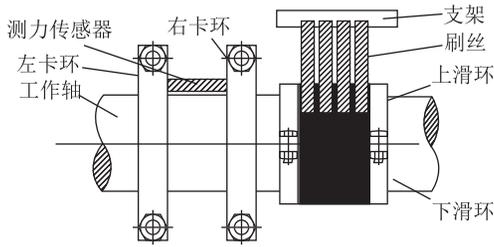


图3 压磁效应方式扭矩传感器结构示意图

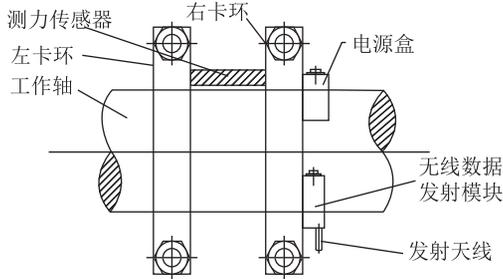
1.2 扭转角检测型扭矩传感器

1.2.1 卡环测量式

卡环式扭矩传感器是通过在传动轴上相距一定距离(通常大于 80 mm)安装两组由螺栓紧固在轴上的半圆结构卡盘形成卡环，然后在两组卡环之间安装一个应变式传感器构成^[8]，如图4所示。当对被测轴施加扭矩后，由于轴自身的形变导致卡环间会形成微小扭转角使得应变传感器也产生形变，这与轴上所受的扭矩成正比并可通过检测电桥获取该应变信号，计算后可得到传动轴上的扭矩信息。由于卡环测量式扭矩传感器的测量原理也是利用应变片，因此，可采用与前述应变片测量方式扭矩传感器相同的信号引线和电源连接方式，即导电滑环的接触式 and 无线传输的非接触式两大类。故也具有与应变片测量方式相同的优缺点。卡环测量式扭矩传感器可在轴上直接安装，具有轴系结构改动小、适宜现场测量的优点；但其安装空间需求较大，适合大直径轴在中低转速的大扭矩测量场合应用。



(a) 导电滑环接触式



(b) 无线传输非接触式

图4 卡环测量式扭矩传感器结构示意图

1.2.2 磁电感应式

磁电感应式传感器对扭矩的测量是通过固定安装在传动轴上且相距一定距离的两组具有铁磁性质的齿轮或钢珠环形阵列实现,如图5所示。当轴在不承受扭矩而空载转动的情况下,两组磁电检测器能感知齿轮或钢珠通过带来的磁场变化,并输出相位恒定的交变电压信号;在对轴施加扭矩后,两组齿轮或钢珠阵列间将形成微小扭转角从而使得两组磁电检测器输出的交变电压信号产生相位差^[15]。通过建立轴上扭矩与两组磁电检测器输出信号相位差之间的对应关系,即可实现对扭矩的测量。磁电感应式扭矩传感器结构简单,可同时实现对被测轴转速和扭矩的非接触式测量,适用于高温、高湿、粉尘等恶劣工作环境;但其只能

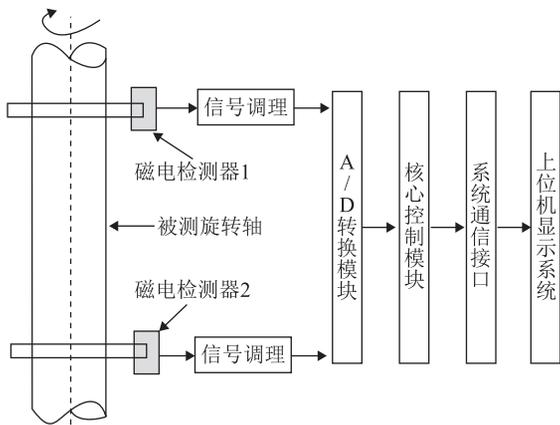


图5 磁电感应式扭矩传感器结构示意图

对动态轴进行扭矩测量,且在检测时需要使轴达到一定的转速;随着轴直径的增加,检测装置的齿轮或钢珠阵列的体积和质量也随之增加;另外,也需要解决传动轴径向振动对扭矩测量产生的影响。

1.2.3 光电测量式

光电测量式扭矩传感器是由在传动轴上固定安装的两组圆盘光栅以及光源和光电检测元件构成,如图6所示。当轴在不承受扭矩空载转动时,两组圆盘光栅相互遮挡,使得光源发出的光无法透过光栅照射到光电检测元件上;在对轴施加扭矩后,轴的微小扭转角使得两组圆盘光栅发生相对转动,从而使得部分光线得以透过光栅照射到光电检测元件上产生输出信号。扭矩越大,导致两组圆盘光栅之间产生的相对转角也越大,进而光电元件输出的信号也越强^[16]。此类扭矩传感器适用于中低转速、低振动的扭矩测量场合,对于工作环境要求较高,烟雾、灰尘等都会对测量产生干扰。目前,光电测量式扭距传感器已经开始应用于车辆电动助力转向系统(EPS)的扭矩测量中^[17]。

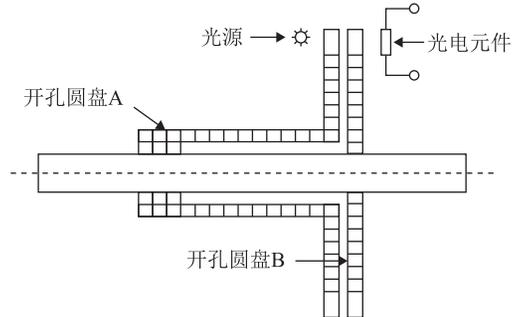


图6 光电测量式扭矩传感器结构示意图

以上从传递法的两大类扭矩检测原理出发,对目前研究较为广泛的代表性扭矩测量方法进行了工作原理介绍与优缺点分析。除此之外,针对不同测量领域提出或研究了多种各具特点的新型扭矩测量原理和方法。如声表面波(SAW)扭矩传感器^[18]具有非接触测量的优点,但传感器制作复杂、受温度影响大、回波信号处理困难;电容式扭矩传感器^[19,20]具有结构简单、测量线性度好的优点,但对传感器材料刚度和加工精度要求高;激光多普勒式扭矩测量法^[21]具有非接触测量、不影响轴系的优点,但传感器结构复杂、使用环境要求高。

2 扭矩测量的发展趋势

由于机械装置动力轴自身的转动特性以及轴上载荷呈现高速、重载的增长趋势,现有常用的扭矩测量方法仍存在需对轴系改动、附加装置过大过重、现场

校准检测不便等问题,需要作进一步的研究和改进。扭矩测量方法今后的研究趋势应体现在以下几个方面。

1) 应变片式扭矩测量的工艺改进

应变片测量方式是最为成熟的高精度扭矩测量方法,但是由于应变片在轴上采用贴附方式,存在因粘贴工艺问题导致测量效果差异性大、长期使用后应变片发生蠕变等问题,这些都需要对应变片安装工艺做深入研究和改进。

2) 扭矩测量的非接触式研究

现有成熟的扭矩测量方法主要来源于力学应变式测量,需要在轴上安装附加装置但信号采集不便;而采用基于新型材料和敏感原理的非接触式扭矩测量有望解决现有问题和满足今后扭矩测量的发展需求。

3) 小型轴与大型轴上的扭矩测量研究

由于小型轴体积和安装空间的限制,应以光电测量等非接触式扭矩测量方法作为今后研究的方向;对于大型轴主要针对扭矩测量精度、量程范围和可靠性等指标进行相应的测量方法研究。

4) 扭矩测量中数据处理方法的改进

由于扭矩测量装置在使用中易受温度、振动、电磁等环境因素影响,导致传统的拟合、回归分析等数据处理结果不甚理想;而采用神经网络、深度学习等方法建立扭矩测量模型进行训练和应用是今后数据处理方法的发展方向。

5) 扭矩测量装置的可计量性设计

现有扭矩测量装置需在实验室中进行校准后应用于轴上扭矩测量,在其结构设计中需求、空间和环境条件等因素考虑较多;而扭矩测量装置的现场计量校准具有重要实用价值,应在装置设计阶段考虑今后现场校准的实现方法。

3 结论

扭矩输出的测量存在广泛需求,特别是对处于旋转工作中动态轴扭矩测量方法的研究,一直是该领域研究的热点。经过多年的研究发展,扭矩测量在新型敏感原理、测量方法、传感器结构、可靠性改善、适用领域等方面都取得了显著进步。同时,现有扭矩测量方法中存在的一些问题、缺点仍有待进一步深入研究,以适应实际需求中对于轴系扭矩测量方法和传感器的发展要求。

参 考 文 献

[1] 徐迟. 航空发动机扭矩特性适航规章分析[J]. 燃气轮机技术, 2010, 24(3): 18-24.
[2] 诺霸精密机械有限公司. 提升精度 诺霸协助航空领域检测

扭矩工具 [EB/OL]. (2008-12-26)[2016-09-01]. http://www.norbar.com.cn/docc/news_detail.asp?id=366.

- [3] 孟潜, 王华强. 车用无接触式扭矩传感器的信号采集与处理[J]. 控制工程, 2012, 19(2): 339-342.
[4] 张之泰, 潘宏侠, 赵文亮. 车辆动态扭矩遥测测试系统设计[J]. 自动化与仪表, 2010, 25(4): 46-49.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 文西芹, 张永忠. 扭矩传感器的现状与发展趋势[J]. 仪表技术与传感器, 2001(12): 1-3, 11.
[8] 柴继新, 王恩锋, 范小燕, 等. 几种常见的电阻应变式旋转扭矩传感器[J]. 计测技术, 2010, 30(2): 34-36.
[9] 文西芹, 张永忠, 宁晓明. 逆磁致伸缩效应扭矩传感器的历史、现状、趋势[J]. 传感器世界, 2002, 8(2): 1-7.
[10] 武延鹏, 张松涛, 尤政. 新型抗气隙干扰磁弹性扭矩传感器的研究[J]. 传感器与微系统, 2001, 20(5): 16-18, 24.
[11] 文西芹, 张永忠, 刘成文. 基于磁弹性效应的磁头型扭矩传感器[J]. 化工矿物与加工, 2003, 32(8): 17-20.
[12] 石延平, 臧勇, 周庆贵. 基于铁基非晶态合金的非接触半套环式扭矩传感器的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 13-17.
[13] Raghunath G, Flatau A B, Purekar A, et al. Non-Contact Torque Measurement Using Magnetostrictive Galfenol [C]// ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. 2013; V001T04A013.
[14] Shimada M. Magnetostrictive torque sensor and its output characteristics[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73(10): 6872-6874.
[15] 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.
[16] 喻洪麟, 朱传新, 杨张利. 光栅扭矩动态测量系统设计及实现[J]. 应用光学, 2006, 27(5): 442-445.
[17] 季学武, 马小平, 周寒露, 等. 电动助力转向系统光电式转矩传感器的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2004(10): 4-6.
[18] 徐继辉. 应用于船舶传动轴扭矩检测的声表面波传感器设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
[19] 余成波, 陶红艳, 张莲, 等. 基于圆柱体电容面积变化型扭矩测量的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2005(12): 4-5.
[20] Madni A M, Vuong J B, Yang D C H, et al. A Differential Capacitive Torque Sensor With Optimal Kinematic Linearity [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 800-807.
[21] 黄震, 刘彬, 董全林. 基于激光多普勒技术的扭矩测量研究[J]. 计量学报, 2007(1): 61-63.