

扭矩传感器的现状与发展趋势

文西芹 张永忠

中国矿业大学机电与材料工程学院 江苏省徐州市 221008

【摘要】综述了国内外研制的多种扭矩传感器,并介绍了发展趋势。

关键词: 扭矩 传感器 趋势

中图分类号: TP212.12

Present Situation and Development Trend of the Torque Sensors

Wen Xiqin Zhang Yongzhong

Institute of Mechatronic and Material Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, Jiangsu

Abstract: Some torque sensors developed home and abroad recently are given, and developing are introduced.

Key Words: Torque; Sensors; Trends

1 引言

机械动力设备的扭矩变化是其运行状况的重要信息,扭矩测试是各种机械产品开发、质量检验、优化控制、工况监测和故障诊断等必不可少的内容。扭矩传感器已广泛应用于各种机械设备的动力驱动系统优化设计和智能控制上。目前,国内外研制和开发的扭矩传感器种类很多,从原理上讲,主要分为应变型、磁弹性型、转角型和其他型等 4 种。

2 应变型传感器

此类传感器是目前国内外使用最多的一种传感器,它采用在旋转轴表面贴应变片的传统方法,利用适当的电路取得信号,然后进行分析处理。图 1 所示为这种传感器的贴片示意图。根据材料力学理论,受纯扭矩的轴,其表面主应力的方向与轴线成 45° 和 135° 角,主应力的绝对值等于最大的剪应力。因此在传感器的扭转轴上,沿与轴线成 45° 和 135° 两个方向各贴两片应变片,并将它们接成差动全桥,其输出电压正比于扭转轴所受的扭矩。此种传感器因成本低廉和操作简便仍广泛使用在静态和低速旋转系统的扭矩测量上。过去采用较多的用集流环传输扭矩信息的方法,因

其触头的磨损和接触电阻的变化,影响到传感器的测量精度和使用寿命,而且存在着较大的噪声。

随着大规模集成电路、固体模块器件及微型电路的发展,20 世纪 80 年代以来,国内外相继推出了无线电遥测技术在旋转轴扭矩测量上的应用。仅就国内情况而言,具有代表性的有 3 种。

(1) 洛阳工学院等单位研制的在线动态扭矩测试仪^[1],将检测及发射电路集中在一块 $20\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 的印刷电路板上,与传感器固接在一起,随传感器一起转动。它将扭矩信号经传感器转换成电信号,由发射装置发出与扭矩成正比关系的频率信号,经接收器和处理电路,再转换成电压,数字显示瞬时扭矩的大小,且当扭矩超过设定值时,仪器报警以保护设备。为提高抗自然干扰的能力,在电路设计过程中,采取了一系列的措施如电桥、发射机、电池的屏蔽,合理的布线、正确的接地等,使电磁干扰源对仪器的影响降低。

(2) 燕山大学研制的红外扭矩测试仪^[2],利用红外线对旋转构件扭矩进行遥测。这套测试系统包括两部分:固定于地面的红外数据接收装置(主机)和安装于旋转轴上的测量、红外数据发射装置(测量装置)。图 2 为测量装置工作原理框图。其工作原理是:当主机启动测量装置的光信号后,转轴圆盘上的接收二极管将光信号转为电信号,经放大器输送到单片机 P1.0 端口,启动单片机进行数据采集,电阻应变片组成的电桥,将扭矩引起的电阻变化量转化为电信号,经放大器放大后被采样/保持器接收并输入到单片机的 A/D 端口进行模数转换,转换后的数据存储在数据存储器 RAM 中,完成一个数据块的采集后,单片机开始测量旋转 1 周所需时间,根据旋转周期,发射的数据编码并

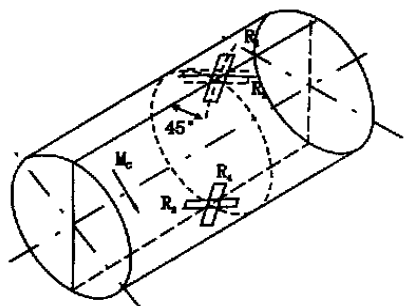


图 1 电阻应变传感器贴片示意图

分时将数据经 3 个红外发射管发射红外线, 主机接收后进行分析处理, 并在接收装置的液晶显示屏上显示扭矩的最大值、最小值和峰—峰周期。利用红外线在旋转机械上进行数据采集和发射, 具有极强的抗干扰能力和数据可靠性。

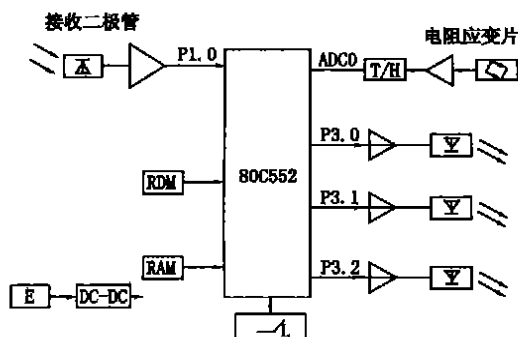


图2 测量装置工作原理框图

(3)北京冶金一局超硬材料研究所李国林研制的环形变压器供电的应变式扭矩传感器^[3], 是在应变传感器的基础上设计了一组旋转变压器, 实现了能源的非接触传递。信号的传递采用无线遥测的方法, 做到了扭矩信号的传递与是否旋转、转速大小、旋转方向无关。图3为该扭矩传感器测量原理图。将专用的应变片用应片胶粘贴在被测弹性轴上并组成应变桥路, 向应变桥提供电源即可测得该轴受扭的电信号。将该应变信号放大后, 经过压频转换, 变成与扭应变成正比的频率信号。

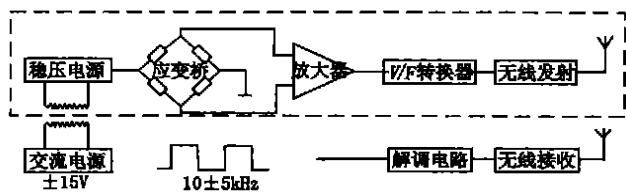


图3 应变扭矩传感器测量原理图

从上面介绍可以看出: 电阻应变式传感器无论信号传输是采用滑环或是采用无线传输, 都存在有不足之处。对于滑环方式会受到接触电阻变化的影响, 而无线传输因发射天线或线圈随轴转动, 会造成接收装置接到的信号强度发生变化, 有时甚至会失去信号。另外从目前国内外技术水平来看, 尽管传输精度较高、抗干扰能力强的遥测系统并不少见, 但是因为旋转遥测系统的电源及发射组件必须装在转轴上, 实际使用时需要视测试对象不同而做专门的设计, 因此系统的成套性是一个较难解决的问题。

3 磁弹性型扭矩传感器

此类型传感器是基于铁磁材料的压磁效应制成的。因为铁磁材料的磁导率是一个结构应力敏感参数, 转轴中的应力变化将引起磁导率的相应变化, 而磁

导率的变化又导致传感器磁路磁阻的变化, 最终转化成检验线圈中磁通的变化。其信息变换过程如下:

$$M \rightarrow \Delta \sigma \rightarrow \Delta \mu \rightarrow \Delta R_m \rightarrow \Delta V$$

式中: M 为扭矩; $\Delta \sigma$ 为被测轴表面最大正应力变化量; $\Delta \mu$ 为被测轴磁导率的变化量; ΔR_m 为被测轴磁阻的变化量; ΔV 为传感器输出电压的变化量。

根据这个变换原理, 可以制成各种不同类型的磁弹性扭矩传感器。国内外自 20 世纪 80 年代中期开始此种类型传感器的研究和开发, 具有代表性的是双“Π”逆磁致伸缩效应传感器^[4], 它的示意图和等效磁桥图如图4所示。

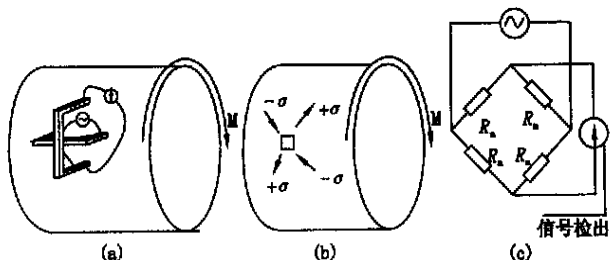


图4 双“Π”逆磁致伸缩效应传感器示意图和等效磁路图

双“Π”型磁芯正交置于轴侧, 磁极上绕有线圈, 两组励磁线圈和两组测量线圈, 交变电流通过励磁线圈在轴表面建立磁场, 如图4(a)所示, 当轴受扭后, 其表面应力如图4(b)所示, 由于磁致伸缩逆效应轴表面磁场发生改变, 其等效磁阻的变化, 使得测量线圈中产生与扭矩成比例的感应电势, 如图4(c)所示。

由于转轴常用的铁磁性材料的磁致伸缩逆效应较弱, 影响测试的灵敏度和精度, 且对转轴材料的均匀性和旋转精度的依存性较大。

为发挥其优点, 且有效地弥补其不足, 国外从 20 世纪 80 年代开始研制基于用非晶磁致伸缩材料制作的扭矩传感器。

1982 年, 日本福岗九州大学研制出了新型磁头扭矩传感器^[5], 其结构如图5所示。它采用在转轴表面用等离子法喷覆一段磁致伸缩层的方法。采用这种结构, 可以使整个测试装置做得很小巧。如本例中, 磁头两极之间的距离是 2.8mm, 磁极横截面尺寸仅为 2mm×2mm。

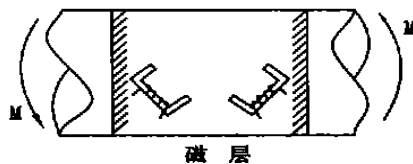


图5 磁头与轴上磁涂层的示意图

1986 年 Sasada 等人研制的螺线管式扭矩传感器^[6]采用在转轴表面粘贴与轴成 45° 角的八字形布置的 Fe 基非晶薄带, 利用非晶薄带的磁致伸缩逆效应检测扭矩, 原理示意图如图6所示。

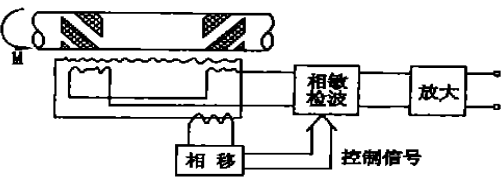


图 6 螺线管扭矩传感器原理示意图

1992 年, 韩国科学与标准研究磁学实验室研制出了非晶态线圈最大差分感应装置⁷, 其基本结构如图 7 所示。它是在轴上与轴线成 $\pm 45^\circ$ 方向上贴上数条磁致伸缩层 MR (磁电阻) 材料, 轴周围环绕激励线圈和感应线圈。当轴上加载扭矩时, 拉应力使 MR 材料的磁导率增大, 压应力则使磁导率减小, 因而反映在感应线圈中一个线圈的磁通大, 另一个线圈的磁通小, 最后以差分方式输出, 测出应力大小, 再计算出扭矩。

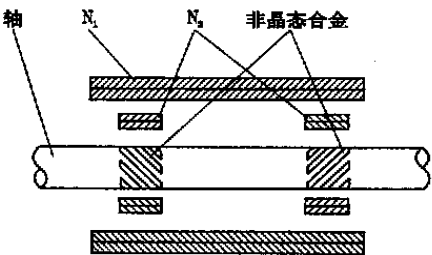


图 7 传感器敏感元件的原理示意图

1992 年由王荣等人研制的逆磁致伸缩扭矩传感器⁸, 则采用在转轴的表面粘贴一层特制的软磁合金薄带的方法来改善“角度依存性”问题。

1986 年由日本山崎二郎研制的线爆喷涂膜扭矩传感器⁹, 利用具有高粘附力的线爆喷涂膜在轴表面进行反复喷涂得到斜条形模, 然后利用斜条形膜构成双磁芯多谐振荡器桥路, 制成扭矩传感器。此膜的电感因转矩 σ 而变化, 使电桥不平衡而产生输出电压, 可以获得没有磁滞、线性良好的 $E-\sigma$ 特性。

可以看出: 磁弹性扭矩传感器均是非接触式传感器, 安装使用方便, 且不需要占用较大的空间。通过在轴表面粘贴或喷涂一层磁致伸缩材料可以减少轴表面材料不均匀性所带来的误差, 提高测试灵敏度。但不足之处在于: 这些传感器最终测得的是磁致伸缩层材料应力。因此, 如何妥善地转化为转轴本身应力或扭矩是一个值得进一步研究的问题。

4 转角型扭矩传感器

这是一类利用扭矩和扭转角关系的传感器, 它们实际上是一个角位移测量的编码系统, 具典型代表性的有以下两种。

由日本日立公司研制的 MR 编码器式扭矩传感

器¹⁰的结构和工作原理是: 在驱动轴和负载轴之间固定一根扭力棒, 在棒的两端各装有一个 MR 编码器, 这两个编码器应尽量靠近并规格一致。由每个编码器的两相正弦输出可以计算出扭力棒两端的角度 θ_1 和 θ_2 , 再由两角度交差计算出扭矩 T 。

$$T = (\pi GD/32L) \times \Delta\theta$$

式中: G 为横向弹性模量; D 为扭力棒直径; L 为扭力棒长度; $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 。

1987 年日本九州技术研制成功了非晶态星形线圈扭矩传感器¹¹。将 N 束非晶合金丝依次串联在一起, 放置于固定在轴上的 N 极环形磁铁周围, 它们感应到磁场强度的变化, 与后续元件组成一多谐振荡电压输出型电路, 扭矩产生的位移通过振荡电路以电压形式输出。此传感器的一大特点是通过采用非晶态星形线圈, 平均了磁场强度的不均匀性分布, 消除了外部场强的干扰, 同时也减少了旋转轴偏转带来的误差。因此, 它的角分辨率较高, 静态可以达到 0.002° , 动态可以达到 0.01° 。

以上这两种应变测试系统, 均是采用相位测量原理, 即将扭矩产生的角变形通过感应信号的相位差形式输出到测量电路, 因此它们实际所测的是角位移, 也就是总变形。为了达到所要求的精度, 常要求被测轴相对长而细些, 以产生较大的变形, 所以此类传感器主要应用于长轴的扭矩测量。

5 其他类型扭矩传感器

近几年一些新型的传感器在不断被开发和研制出来。如清华大学 1999 年研制的无线无源声表面波 (SAW) 扭矩传感器¹²就是一例。这种传感器是将雷达技术与 SAW 传感器相结合。同电阻应变式传感器一样, 是通过测量与轴成 45° 方向上的应变来完成对转轴的扭矩测量。它主要由压电基片、叉指换能器 (IDT)、反射栅 (R_1-R_3) 组成, 采用光刻、真空镀膜等工艺。其工作原理是利用被反射的 SAW 波的相速度在应变前后所产生变化来间接测量扭矩的大小。

另外还有一些其他的传感器¹³, 如美国佛吉尼亚西蒙斯飞行器公司利用光纤技术研制的光纤扭矩传感器用于飞行器涡轮发动机的扭矩测试; 又如英国福特汽车公司委托南安普大学机械工程系为其研制的一种电容式扭矩传感器可用来连续监测汽车发动机或齿轮箱传动轴的扭矩测试。

6 发展趋势

随着各种系统的自动化程度和复杂性的提高, 需
(下转第 11 页)

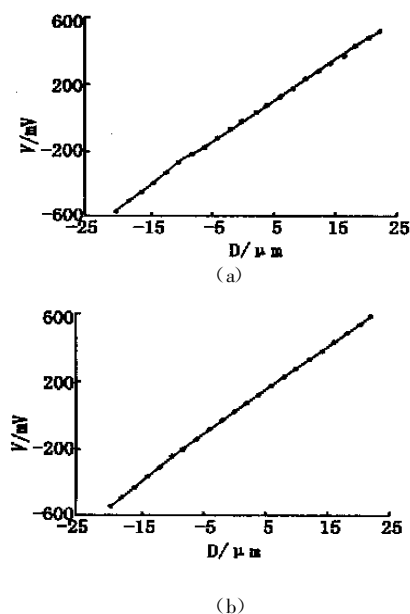


图 5 特性曲线

曲线的灵敏度分别为 $26.5 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 和 $42.0 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 超过了目前常用电涡流传感器的灵敏度, 在测量范围内的线性度良好, 其范围亦能满足电磁轴承的应用要求。

5 结论

(1) 电涡流传感器的形式、结构及安装位置对测量

(上接第 3 页)

要获取的信息越来越多。这不仅对传感器的精度、可靠性和响应速度提出了越来越高的要求, 还要求传感器有标准输出形式以便和系统挂接。

根据最近几年国内外的研究, 扭矩测量正呈现以下的发展趋势^[12]:

(1) 由静态测试向动态在线检测方向发展;

(2) 由先测应变再间接转换成应力或扭矩而向直接测应力或扭矩方向发展, 并提高检测精度;

(3) 测试系统向微型化、数字化、智能化、虚拟化和网络化方向发展;

(4) 从单功能向多功能发展, 包括自补偿、自修正、自适应、自诊断、远程设定、状态组合、信息存储和记忆;

(5) 扭矩检测与动力装置的控制系统相结合, 达到转速、扭矩、输出功率之间的优化配置, 保证机械设备运行在最佳状态。

参 考 文 献

- [1] 李孟然, 任焕琴, 孙淑敏. 在线动态扭矩测试仪的研制. 洛阳工学院学报, 1998(1).
- [2] 刘宝华. 红外扭矩测试仪的研制. 仪器仪表学报, 1996(3).
- [3] 李国林. 环形变压器供电应变式传感器技术性能与应用. 仪表技术与传感器, 2000(6).
- [4] 傅俊杰. 磁致伸缩效应非接触扭矩传感器的研究 [学位论文].

信号的精度是有影响的, 由于传感器测量的是转子表面运动的信号, 因此, 信号中既包含转子中心的偏移, 也包含着转子的涡动的情况。

(2) 位移传感器主要影响电磁轴承的控制精度, 应选择灵敏度高、线性范围大、信噪比大的传感器。

(3) 若能将传感器装在轴承中, 则会使系统的分析简化, 且系统的稳定性更好, 这就是进一步研究差动电感式位移传感器的目的。这种传感器的另一个优点是电磁轴承的结构更紧凑, 更便于产品化。

参 考 文 献

- [1] 金光阳. 磁气轴受用变位ヒンザ. 公开特许公报. 平 2-2-11-1. 1990.
- [2] 加藤一路. 磁气轴受用の非接触型变位检出装置. 公开特许公报. 平 1-284701. 1989.
- [3] Brian J., Hamilton, Glandale A. Position sensor for magnetic suspension and pointing system. U. S. Patent 1986(16).
- [4] 汪希平. [学位论文]. 西安交通大学, 1994.
- [5] Matsumura F., Fujita M., Oida C. A design of robust servo controllers for an unbalance vibration in magnetic bearing system. Prot. of the 1st Int. Symp. on Magnetic Bearings, 1988(6-8): 319-326.
- [6] 戴维德. F. 斯图特. 运算放大电路设计手册. 北京: 人民邮电出版社, 1984.

江苏徐州: 中国矿业大学, 1995.

- [5] Sasada I., Uramoto S., Hara K. Non-contact torque sensors using magnetic heads and a magnetostrictive layer on the shaft. IEEE Trans on Magn. MAG-22, 1986(5): 406.
- [6] 吴国安. 磁致伸缩型非晶磁性传感器. 磁性材料与器件, 1994(9).
- [7] Son D., Lin S. J., Kim C. S. Non-contact torque sensor using the different of maximum induction of amorphous cores. IEEE Trans on Magn. MAG-28, 1992(5): 2205.
- [8] 王荣, 蔡德源. 一种逆磁致伸缩扭矩传感器. 现代科学仪器, 1992(2).
- [9] 山崎二郎. 日本应用磁学会志, 1986, 10(2): 375-378.
- [10] Miyashita K., Hunt R. P. IEEE Trans. Magn, 1990, 26(5): 1560-1562.
- [11] Mohri K., Makai Y. New torque using amorphous star-shaped cores. IEEE Trans on Magn. MAG-23, 1987(5): 2191.
- [12] 程卫东, 董永贵, 李源, 等. 无线无源声表面波扭矩传感器的研究. 压电与声光, 2000(3).
- [13] 欧扬, 张纪龙. 扭矩测试的发展动态和发展方向. 华北工学院学报, 1996(1).
- [14] 翁桂荣, 岳强. 微型遥测扭矩仪. 电子技术应用, 1994(5).
- [15] 徐军, 李春兰. 旋转机械的功率在线测试技术. 热能动力工程, 1999(3).
- [16] 张立勋. 一种大刚度传动轴的扭矩测量方法. 机械与电子, 1995(5).
- [17] 过壁君. 薄膜磁阻扭矩传感器. 北京: 计量出版社, 1985.
- [18] Ю. И. 雷巴利琴科. 北京: 计量出版社, 1985.