

doi:10.3788/gzxb20174609.0912006

# 基于光纤光栅的螺纹管压弯扭测量技术

梅钰洁<sup>1</sup>, 余有龙<sup>1</sup>, 耿淑伟<sup>2</sup>

(1 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

(2 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

**摘要:**引入光纤光栅传感器,并结合螺纹管压弯扭分离测量理论,实现对螺纹管所受压力、弯矩和扭矩的测量.由测量结果可知,光纤光栅传感器测得压力与驱动电机上压力传感器测得压力基本相符,两者测得压力的差值为 $-11.4 \sim 15.5$  N;光纤光栅传感器测得弯矩与理论值基本一致,两者之间的差值为 $-0.54 \sim 0.46$  N·m;光纤光栅传感器测得扭矩与驱动电机上扭矩传感器测得扭矩基本相符,两者测得扭矩的差值为 $-0.54 \sim 0.87$  N·m.测量结果验证了光纤光栅传感器对螺纹管力学参数测量的可行性,为螺纹管的力学参数测量提供了一种新方法.

**关键词:**光纤光学;光纤光栅;压力;弯矩;扭矩;应变;螺纹管

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)09-0912006-6

## Measurement Technique of Pressure, Bending Moment and Torque for Threaded Pipe Based on Fiber Bragg Grating

MEI Yu-jie<sup>1</sup>, YU You-long<sup>1</sup>, GENG Shu-wei<sup>2</sup>

(1 School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(2 School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Based on the separation measurement theory of axial force, bending moment and torque in threaded pipe, the axial force, bending moment and torque of threaded pipe were measured by using Fiber Bragg Grating sensors. From the measured results, the axial force measured by fiber Bragg grating sensors is agreement with that by pressure sensor from driving motor, the error value is between  $-11.4$  N and  $15.5$  N; the bending moment measured by Fiber Bragg Grating sensor is agreement with the theoretical value, the error value is between  $-0.54$  N·m and  $0.46$  N·m; the torque measured by Fiber Bragg Grating sensor is agreement with that by torque sensor from driving motor, the error value is between  $-0.54$  N·m and  $0.87$  N·m. The measured results verify the validity of measuring mechanical parameters for threaded pipe by Fiber Bragg Grating sensor. This technology provides a new method of mechanical parameters measurement for threaded pipe.

**Key words:** Fiber optics; Fiber Bragg Gratings; Axial force; Bending moment; Torque; Strain; Threaded pipe

**OCIS Codes:** 120.5475; 120.5060; 060.3735; 060.2310; 050.2770

## 0 引言

螺纹管因其具有重量轻、抗弯和抗扭性能好、承载能力高等优点,被广泛应用于地质钻探、石油和煤矿勘

基金项目:登月三期预研项目(No.TY3Q-20110005)资助

第一作者:梅钰洁(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感,Email:myj1534032949@163.com

导师(通讯作者):余有龙(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤光栅传感器及网络化技术、光纤激光器以及光无源器件,Email:youlongyu@163.com

收稿日期:2017-03-17;录用日期:2017-05-09

<http://www.photon.ac.cn>

探中的钻杆结构<sup>[1-2]</sup>.在钻进过程中,钻杆的轴向压力(简称“压力”)和扭矩的大小关系到进尺速度,弯矩会弱化钻进效率,三者过大将引起钻杆变形甚至毁损,因此有必要对工作中螺纹管上的压弯扭进行分离检测.目前在螺纹管性能参数测量中,多对于螺纹管接头处所受的压力、弯矩和扭矩进行测量和分析<sup>[3-5]</sup>.对压弯扭测量的研究多集中在单参数测量方面,如张春月等人在特定结构的弹性环上布设电阻应变式传感器对航空涡轮发电机运转状态下转子压力大小进行测量<sup>[6]</sup>;李明等人在齿轮联轴器上布设应变片对其弯矩进行检测<sup>[7]</sup>;张艳君利用应变式传感器对球磨机的扭矩进行研究<sup>[8]</sup>.也有学者开展了双参数检测技术的研究,Idkowski A.等人采用双电流桥的应变计传感器分离和测量作用在梁上的压力和弯矩<sup>[9]</sup>;赵巍等人利用电阻应变计组成测量电桥对水轮机轴的弯矩与扭矩进行检测<sup>[10]</sup>;吴吉利等人基于电阻应变片设计的四梁式扭矩传感器对复合振动挤压攻丝的压力和扭矩进行测量<sup>[11]</sup>;在压弯扭同时测量方面,韩林海等人采用应变计、拉压式电阻应变传感器、转角仪和位移计等传感器,对钢管混凝土工件的复合载荷进行了检测<sup>[12]</sup>.但这些测量所用电学传感器易受环境温度、电磁场和潮湿空气的影响,而光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器是近年来发展起来的新型光学传感器,其不仅克服了电学传感器的缺点,且具有体积小、抗腐蚀、易复用成网络等优点<sup>[13]</sup>,已应用于应变<sup>[14]</sup>、位移<sup>[15]</sup>和加速度<sup>[16]</sup>等物理量的检测中.

高灿辉等人运用 FBG 传感器对圆管上的压弯扭载荷进行测量<sup>[17]</sup>.江华等人在修正圆杆压弯扭分离的基础上,给出螺纹杆压弯扭分离检测的模型<sup>[18]</sup>,本文在前两者工作的基础上,引入 FBG 传感器,实现对螺纹管所受压力、弯矩和扭矩的分离检测.

## 1 理论分析

### 1.1 螺纹管压弯扭分离原理

螺纹管的受力如图 1,在测点位置外表面与横截面交线上选 A、B 和 C 三点,彼此间圆心角相等.记螺纹管横截面圆心为 O,所受压力、弯矩和扭矩分别为  $F$ 、 $M$  和  $T$ .假设 A、B、C 三点处的轴向应变分别为  $\epsilon_A$ 、 $\epsilon_B$  和  $\epsilon_C$ ,A 点处与轴线方向成  $45^\circ$  方向的应变为  $\epsilon_{45^\circ}$ ,根据文献<sup>[14]</sup>,螺纹管轴向应力修正值  $\Delta = a \cos \alpha + b$  和切应力修正系数  $k$ ,其中  $\alpha$  为 AO 与弯矩力偶作用点连线的夹角,  $\alpha = \arctan \left[ \frac{\sqrt{3}(\epsilon_B - \epsilon_C)}{2\epsilon_A - \epsilon_B - \epsilon_C} \right]$ ,  $a$  和  $b$  为常数.得到螺纹管上压弯扭表达式为

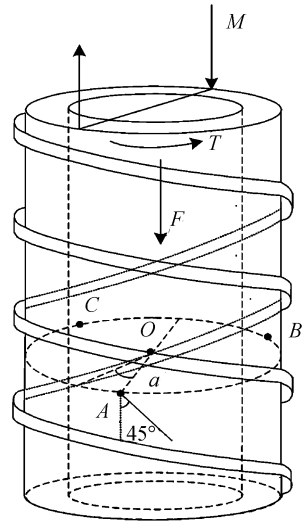


图 1 螺纹管受力图

Fig.1 The force loading of threaded pipe

$$F = \left( -\frac{E\epsilon_A + E\epsilon_B + E\epsilon_C}{3} + \Delta \right) S \quad (1)$$

$$M = \frac{I_z E}{R} \sqrt{\frac{(\epsilon_C - \epsilon_B)^2}{3} + \left( \frac{2\epsilon_A - \epsilon_B - \epsilon_C}{3} \right)^2} \quad (2)$$

$$T = k \left[ \frac{\epsilon_A}{2(1+\mu)} (1-\mu) - \frac{\epsilon_{45^\circ}}{1+\mu} \right] E W_P \quad (3)$$

为方便分析螺纹管受力情况,将其分为螺纹部分与圆管部分.式中,  $S = (\pi/4)(D^2 - d^2)$  为圆管部分横截面积;  $D$ 、 $d$  分别为圆管部分的外径和内径;  $R$  为圆管部分的外半径;  $I_z = (\pi D^4/64)(1 - \beta^4)$  为圆管部分的惯性矩;  $\beta = d/D$  为圆管部分的内外径之比;  $W_P = \pi D^3(1 - \beta^4)/16$  为圆管部分的抗扭系数;  $\mu$  为螺纹管泊松比;  $E$  为螺纹管杨氏模量.

利用传感器胶黏剂将 3 个 FBG 应变传感器沿螺纹管轴向分别贴于 A、B 和 C 三点处,第 4 个 FBG 应变传感器沿与轴向成  $45^\circ$  夹角的方向粘贴于 A 点旁,分别测出  $\epsilon_A$ 、 $\epsilon_B$ 、 $\epsilon_C$  和  $\epsilon_{45^\circ}$  通过式(1)、(2)和(3)对螺纹管所受的压力、弯矩和扭矩进行测量

## 1.2 光纤光栅传感原理

FBG 传感器受轴向应变( $\epsilon_x$ )作用时,一方面由于机械性拉伸而改变其光栅常数,另一方面,弹光效应会使得 FBG 的纤芯折射率发生变化,从而导致 FBG 传感器波长( $\lambda$ )发生漂移( $\Delta\lambda$ ),其漂移量的表达式为<sup>[19]</sup>

$$\Delta\lambda/\lambda = (1 - P_e)\epsilon_x \quad (4)$$

$P_e$  为有效弹光系数,硅纤介质中, $P_e = 0.22$ .FBG 传感器波长漂移量与轴向应变呈线性关系.若测出螺纹管测点位置 FBG 传感器的波长漂移量,则可测得该位置的轴向应变,从而测得螺纹管所受压弯扭的大小.

## 2 实验装置

压弯扭测量装置见图 2,实验所用的是基于波长扫描技术的 FBG 解调仪,其具有四个接入通道,内置光源的波长扫描范围为 1 528~1 568 nm,测量精度为  $\pm 1$  pm,灵敏度为 1.15 pm/ $\mu\epsilon$ ,采样频率最高可达 25 kHz.在螺纹管中部布设一个测点,测点处选用的 4 个 FBG 应变传感器  $FBG_A$ 、 $FBG_B$ 、 $FBG_C$ 、 $FBG_{45^\circ}$  的波长分别为 1 535.940 0 nm、1 553.924 0 nm、1 542.018 3 nm、1 547.820 4 nm,每个 FBG 应变传感器的长度均为 5 mm,3dB 带宽约为 0.3 nm.根据螺纹管压弯扭分离原理,将  $FBG_A$ 、 $FBG_B$ 、 $FBG_C$  沿轴向等间隔粘贴于螺纹管测点位置横截面与外表面的相交圆周上, $FBG_{45^\circ}$  沿与轴向成  $45^\circ$  夹角方向粘贴于  $FBG_A$  位置处,使传感器中心布设在相应的测量点位置.实验中,压力的测量范围为 150~250 N,弯矩的测量范围为 0~12 N·m,扭矩的测量范围为 6~16 N·m;测量系统的精度为压力为  $\pm 29.542$  1 N,弯矩为  $\pm 0.001$  3 N·m,扭矩为  $\pm 0.189$  0 N·m;测量灵敏度为测量灵敏度为压力为 0.033 4 pm/N,弯矩为 769.230 7 pm/N·m,扭矩为 5.291 0 pm/N·m.

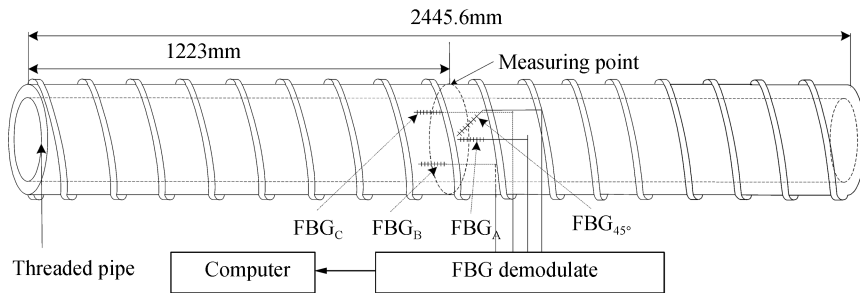


图 2 测量装置

Fig.2 Measurement setup

选用外径为 32.7 mm、内径为 25.5 mm、底径为 29.5 mm、长度为 2 445.6 mm、螺距为 12 mm,杨氏模量为 206 GPa、泊松比为 0.3、轴向应力修正值为  $\Delta = -0.041$  8cos  $\alpha$  + 0.163 9、切应力修正系数约为  $k = 1.101$  6 的螺纹管作为被测物.螺纹管压弯扭加载示意图见图 3.

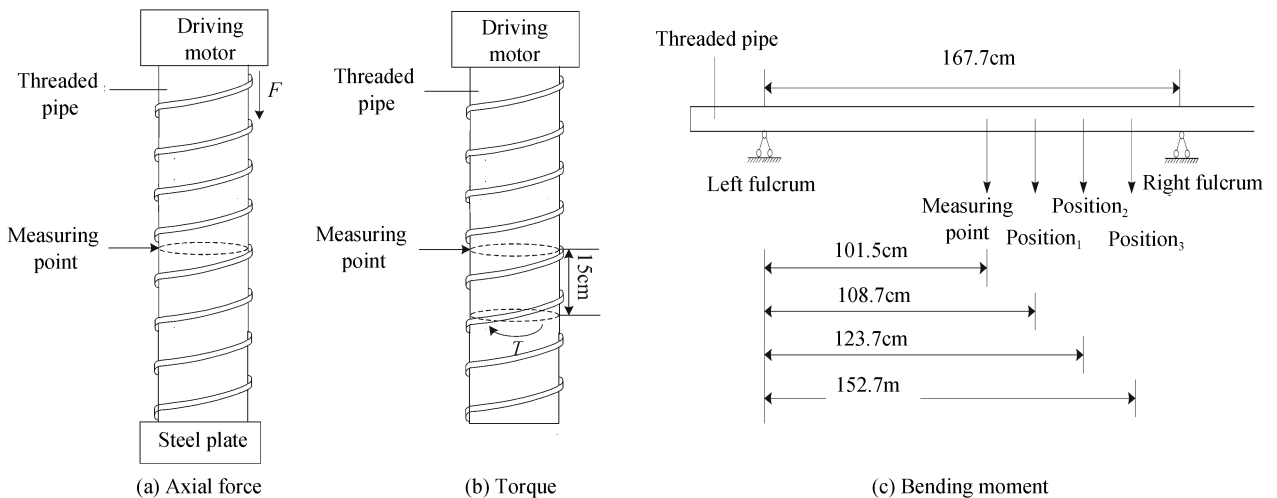


图 3 压弯扭加载

Fig.3 Loading axial force, bending moment and torque

螺纹管压力加载装置见图 3(a),将螺纹管与驱动电机固定,在螺纹管正下方放置一块表面平整的钢板,启动电机,使螺纹管以 10 mm/min 的速度竖直向下运动.在竖直向下运动的过程中,螺纹管会与钢板接触,产生压力.当产生的压力在 150~250 N 之间时停止向下运动,使螺纹管达到受压稳定状态.对比在受压稳定状态下,FBG 传感器测得压力与驱动电机上压力传感器测得压力.

螺纹管扭矩加载装置见图 3(b),将螺纹管与电机固定,在距离测点大概 15 cm 处,施加外力使得螺纹管顺时针扭转,从而实现了对螺纹管施加扭矩,对比在扭转达到稳定状态时,FBG 传感器测得扭矩与驱动电机上扭矩传感器测得扭矩.

螺纹管弯矩加载装置见图 3(c),将螺纹管以简支梁的形式进行固定,左端简支点到右端简支点的距离为 167.7 cm,测量节点距离左端简支点为 101.5 cm.分别在位置 1(距离左端简支点为 108.7 cm)、位置 2(距离左端简支点为 123.7cm)和位置 3(距离左端简支点为 152.7 cm)上挂重物,重量分别为 0.542 Kg、0.959 Kg、1.909 Kg、1.995 Kg 和 2.870 Kg.通过加载重力载荷,使得螺纹管径向受力,产生弯曲形变,从而对螺纹管施加不同的弯矩.弯矩加载原理见图 4.测点位置理论弯矩为

$$M(x) = (F_M c / l)x \tag{5}$$

式中,  $l$  为左端简支点到右端简支点的距离,  $g$  为载荷施加位置到左端简支点的距离,  $c$  为载荷施加位置到右端简支点的距离,  $x$  为测点位置到左端简支点的距离,  $F_M$  为施加的重力载荷.根据式(5)可算出不同位置不同加载重量的实际加载弯矩值.

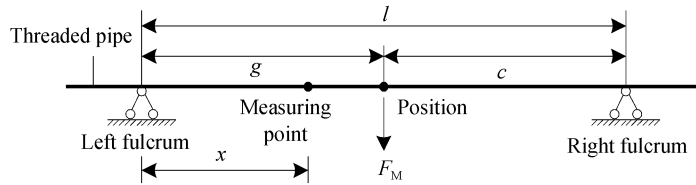


图 4 弯矩加载原理

Fig.4 Schematic diagram of loading bending moment

### 3 结果与分析

环境温度约为 18℃,常压下进行螺纹管上的压弯扭测量,测量结果见图 5.

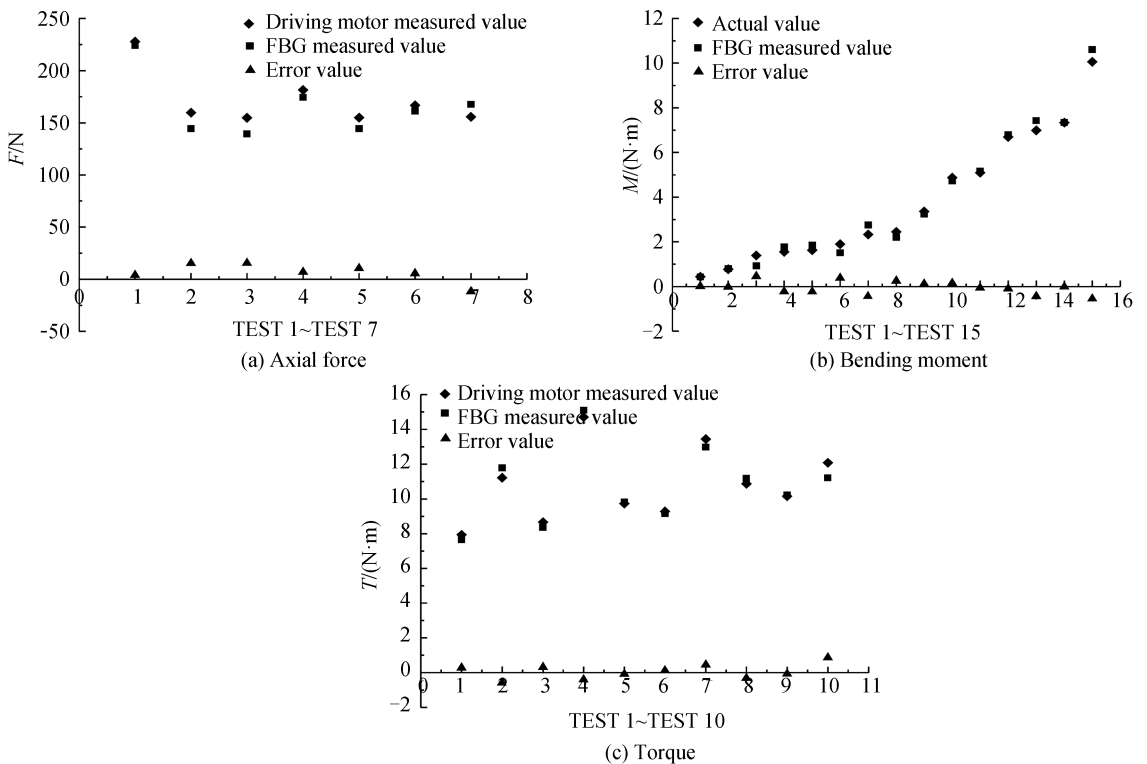


图 5 压弯扭测量结果

Fig.5 The measured results of axial force, bending moment and torque

如图 5(a)所示,对螺纹管所受的压力进行了 7 次实验,实验结果表明 FBG 传感器测得压力与驱动电机上压力传感器测得压力基本相符,两者之间测得压力的差值约为  $-11.4 \sim 15.5$  N.如图 5(b)所示,在三个加载位置加载五个不同重量的重物共得到 15 种不同的弯矩,通过这 15 次对螺纹管上所受弯矩的测量结果,表明 FBG 传感器测得弯矩与实际加载弯矩基本一致,两者之间的差值约为  $-0.54 \sim 0.46$  N·m.如图 5(c)所示,对螺纹管所受的扭矩进行了 10 次实验,实验结果表明 FBG 传感器测得扭矩与钻机上扭矩传感器测得扭矩基本相符,两者之间测得弯矩的差值约为  $-0.54 \sim 0.87$  N·m.因此,在螺纹管布设 FBG 传感器可以测量出螺纹管所受压力、弯矩和扭矩.但测量中存在一些误差,产生误差的主要原因有:

1) 由于螺纹管的杨氏模量为 206 GPa,在 150~250 N 压力作用下,螺纹管测点位置应变范围在  $4.216 \sim 7.027 \mu\epsilon$ ,使得 FBG 测得的应变较小,而实验所用 FBG 解调仪测量精度  $\pm 1$  pm(约  $\pm 0.870 \mu\epsilon$ ),这是导致出现压力误差较大的原因

2) 由于螺纹管上的螺纹凸起,FBG 传感器难以理想性的布置于同一横截面内,无法准确测量测点位置横截面的应变,使得测量结果存在一定误差.

3) 实验所用传感器胶黏剂的弹性模量小于螺纹管的弹性模量,FBG 传感器测到的应变与螺纹管表面的真实应变之间存在传递损耗,导致测量结果存在误差.

4) 由于实验所使用的螺纹管较长,在加载力学载荷时,螺纹管会产生一定的变形,会对测量结果有一定的影响

## 4 结论

本文通过光纤光栅传感原理结合螺纹管压弯扭分离理论,实现对螺纹管的压弯扭分离与检测.测量结果与压力传感器,实际加载弯矩和扭矩传感器的测量结果基本相符,压力测量差值约为  $-11.4 \sim 15.5$  N,弯矩测量差值约为  $-0.54 \sim 0.46$  N·m,扭矩测量差值约为  $0.54 \sim 0.87$  N·m.若能采用更高精度的 FBG 解调仪,改进传感器的黏贴方式,优化传感器布设方式使得传感器粘贴在同一横截面内,可以很大程度地减小测量误差.通过该技术可以测量螺纹管在使用过程中的受力情况来判断是否有异常情况出现,保证了其安全性,从而满足许多现代工程中的应用需求,为螺纹管的力学参数测量提供了一种新的可行性方法.

## 参考文献

- [1] WANG Guo-xiang, WEI Si-qing, ZHAO Hong-jun. Development and application of forward and reverse rotary drilling pipe for water and wing using[J]. *Zhongzhou Coal*, 2010, (5): 24-25.  
王国祥, 韦四清, 赵红军. 风水两用正反旋转螺旋钻杆的研制及应用[J]. 中州煤炭, 2010, (5): 24-25.
- [2] DING J F, KANG Y H, WU X J. Research on the method for drill pipe thread inspection[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, **321-323**: 472-475.
- [3] JONA S, ROEYGEN S, KOENRAA D, et al. Failure behaviour of preloaded API line pipe threaded connections[J]. *Sustainable Construction & Design*, 2011, **2**(3): 407-415.
- [4] ZHU X, DONG L, TONG H, et al. Mechanical behaviors of short-round thread of the API casing under combined load of stretching and bending moment[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, **34**(1): 157-163.
- [5] LIU P, ZHANG L, XU S, et al. Stress of make-up torque on the gas storage well bore and coupling connecting thread [J]. *Journal of Theoretical & Applied Mechanics*, 2013, **43**(3): 33-42.
- [6] ZHANG Chun-yue, BIAN Jie. Design and application of sensor for rotor axial force measurement of aeroengine[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014, **0**(6): 13-15.  
张春月, 边杰. 航空发动机轴向力测量传感器设计及应用[J]. 仪表技术与传感器, 2014, **0**(6): 13-15.
- [7] LI Ming, YU Lie. Experimental investigation of the bending moments acting on gear couplings [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2003, **27**(6): 11-12.  
李明, 虞烈. 作用在齿轮联轴器上弯矩的实验研究[J]. 机械传动, 2003, **27**(6): 11-12.
- [8] ZHANG Yan-jun. Development of wire-less measuring device for torque of transmission shaft of in-service ball mill[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2012, **40**(14): 98-100.  
张艳君. 一种在役球磨机传动轴扭矩的无线测量装置研制[J]. 机床与液压, 2012, **40**(14): 98-100.
- [9] IDKOWSKI A, MAKAL J. Axial and bending force measurement system based on double current supplied bridge[C]. SPIE, 2006, **6159**: F1592-F1592
- [10] ZHAO Wei, ZHANG Yong-zhen. Torque and bending moment in a shaft with combined deformation measured by resistance strain gauge[J]. *Journal of Tangshan College*, 2009, **22**(3): 1-2.  
赵巍, 张永珍. 电阻应变计法测量组合变形轴的扭矩和弯矩[J]. 唐山学院学报, 2009, **22**(3): 1-2.

- [11] WU Ji-li, YANG Ming-liang, LIANG Ying-xuan. Design and optimization of four-beam torque sensor[J]. *Journal of Shanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2011, **27**(4): 1-6.  
吴吉利, 杨明亮, 梁应选. 四梁式扭矩传感器的设计与优化[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2011, **27**(4): 1-6.
- [12] HAN Lin-hai, ZHONG Shan-tong. Study on the working mechanism and behavior of concrete filled steel tubular (CFST) members subjected to compression, bending and torsion[J]. *Journal of Building Structures*, 1995, **16**(4): 32-39.  
韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土压弯扭构件工作机理及性能研究[J]. 建筑结构学报, 1995, **16**(4): 32-39.
- [13] YUAN Zi-lin, GONG Yuan, MA Yao-yuan, *et al.* Sturucture optimization of fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1261-1266.  
袁子琳, 龚元, 马耀远, 等. 光纤布喇格光栅应变传感器结构化研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(11): 1261-1266.
- [14] ZHENG Yan, YU You-long, MEI Yu-jie, *et al.* Ultrasonic detection of metal sheet using fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(5): 0506003.  
郑艳, 余有龙, 梅钰洁, 等. 基于光纤光栅传感的金属薄板超声探测[J]. 光子学报, 2016, **45**(5): 0506003.
- [15] YANG Xiu-feng, YU Hui, WANG Peng, *et al.* A novel micrometric displacement fiber grating sensor based on the principle of lever[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(8): 1156-1158.  
杨秀峰, 于汇, 王鹏, 等. 基于杠杆原理的新型光纤光栅微位移传感器[J]. 光电子·激光, 2010, **21**(8): 1156-1158.
- [16] HUO Dian-heng, CHANG Jun, LIU Tong-yu, *et al.* Demodulation fiber Bragg grating acceleration sensor by DFB laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 1906-1909.  
霍佃恒, 常军, 刘统玉, 等. 基于窄频分布反馈激光器和光纤光栅的加速度传感器[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 1906-1909.
- [17] GAO Can-hui, WANG Dong, YU You-long, *et al.* Measurement technique of mechanical parameters for tubular workpiece based on fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, **32**(5): 817-822.  
高灿辉, 王冬, 余有龙, 等. 基于光纤光栅的管状工件力学参数测量新技术[J]. 应用力学学报, 2015, **32**(5): 817-822.
- [18] JIANG Hua, GENG Shu-wei, GAO Can-hui, *et al.* Simulation and separation of mechanical parameters for external spiral drill under compound loading[J]. *Mining and Processing Equipment*, 2014, **42**(6): 21-25.  
江华, 耿淑伟, 高灿辉, 等. 复合载荷下外螺纹钻杆力学参数的仿真与分离[J]. 矿山机械, 2014, **42**(6): 21-25.
- [19] YU You-long. FBG sensors and networking technology[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 2003: 114-116.  
余有龙. 光纤光栅传感器及其网络化技术[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 2003: 114-116.