

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.009

螺栓连接零件受拉力和压力的无线测量新方法

刘 岩,李双喜,蔡纪宁*,张秋翔

(北京化工大学 机电工程学院,北京 100029)

摘要:针对螺栓拉应力仅能测量螺栓连接零件受到的拉力,而无法测量压力的局限,在螺栓连接的两零件之间引入了高刚度弹性元件,并利用无线应变测试系统,通过测量螺栓因弹性变形产生拉力 F 的变化,实现了复杂工况下螺栓连接零件受拉压外力 F_e 的无线测量。设计、制造了测力螺栓和弹性元件;采用 ANSYS 软件分析了弹性元件的压应力及变形量,通过正交设计法优化了弹性元件的结构。建立了测量方法的计算模型,得到了测力螺栓受拉力 F 与螺栓连接零件所受的拉压外力 F_e 的关系,进行了不同预紧力下螺栓连接零件受拉压外力 F_e 的实验验证。研究结果表明,凹槽深度和单侧凹槽数量是影响弹性元件性能的关键因素。螺栓连接零件受拉压外力可以实时、准确地得到测量,零件受拉压外力与测力螺栓处受力为线性关系。

关键词:无线测量;弹性元件;拉压实验

中图分类号:TH39;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0860-05

Novel method for wireless measuring the pulling and compressive external-force loaded on the elements connected by bolt

LIU Yan, LI Shuang-xi, CAI Ji-ning, ZHANG Qiu-xiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University
of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the limitation that using the tensile stress of bolt could only measure the pulling external-force loaded on the elements connected by bolt, but not the compressive external-force, a high stiffness elastic element was added between two elements connected by bolt, using the wireless strain measurement system, the pulling and compressive external-forces F_e loaded on the element were measured by measuring the pulling force of bolt F from elastic deformation. The bolt for measuring force and the elastic element were designed and manufactured. The compression stress and deformation of the elastic element were analysed with ANSYS and the optimal design was determined by orthogonal design. The calculation model of measurement method was established so that the relationship between F_e and F was obtained. Then the replication experiments that the element was loaded F_e under different pretension were carried out. The results indicate that the groove depth and the number of single-sided grooves are the key factors that affect the performance of elastic element. The pulling and compressive external-forces loaded on the element can be measured accurately in real time, and the relationship between F_e and F is linear.

Key words: wireless measurement; elastic element; tension and compression test

0 引 言

目前,工程上被认可并被广泛使用的实验应力分析方法是电阻应变计测试法^[1],即狭义应变电测法。

但在特殊工况下,传统的电阻应变测试法具有局限性。例如螺栓连接的零件,在运动状态下与外界接触,受到拉、压外力所用。由于零件表面条件限制,为测量拉、压力,电阻应变片只能贴在螺栓光杆处,隔离在装置内

收稿日期:2013-12-18

作者简介:刘 岩(1989-),男,河北唐山人,主要从事化工机械设计方面的研究. E-mail:buctliuyan@163.com

通信联系人:蔡纪宁,女,高级工程师,硕士生导师. E-mail:caijn@mail.buct.edu.cn

部。通过导线传输力信号就存在困难。同时,螺栓将两零件紧固后,只能承受零件所受拉力,不能承受压力,这样电阻应变计法就不能实现压力测量。因此,能够实时、准确地对螺栓连接零件受到的拉、压力进行无线测量成为工程上急需解决的问题。

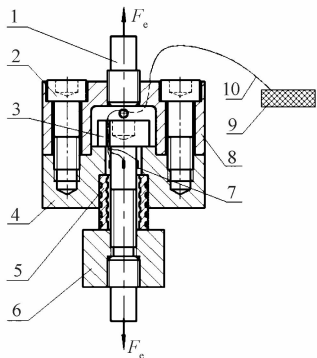
目前的无线通信技术中,ZigBee 技术作为一种近距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本、大网络容量、安全可靠的双向无线通信技术^[2],广泛应用于车载电子系统、家用网络、医疗传感器、机车车辆测力轮对^[3]、商场温度测量^[4]等领域,也适用于电阻应变计测力法。研究者通常采用安装弹性元件的方法实现测力,高红俐等^[5-6]用有限元法设计3种不同结构的弹性元件并进行静态测试,用于大型旋转机组轴向力在线监控;曾国华等^[7]利用弹性测力元件做被连接件,测量螺栓连接预紧力;陈炳^[8]通过有限元分析应变分布规律和固有频率,设计了合适的结构,用于切削力测量。

本研究提出一种新型测力方法,采用最新的基于 ZigBee 技术的无线应变测量系统,在螺栓连接的两零件之间引入高刚度的弹性元件。无论拉力还是压力,螺栓处的受力均与外加载荷成正比并精确输出。

1 外力测量方法与计算模型

实验装置示意图如图 1(a)所示。零件Ⅰ(件号4)和零件Ⅱ(件号6)由测力螺栓(件号3)连接紧固,中间装有弹性元件(件号5)。测力螺栓光杆处贴有应变片(件号7),用导线(件号10)与无线应变节点(件号9)连接(无线应变节点在实际工况时固定在装置内部)。

利用 INSTRON 试验机进行测量的现场图如图 1(b)所示。试验机通过上、下夹头为零件Ⅰ、Ⅱ输入拉压外力^[9]。零件Ⅰ、零件Ⅱ、测力螺栓、弹性元件可以



(a) 实验装置示意图 (b) 测量现场图

图 1 实验装置示意图和测量现场图

1—夹头(2个);2—连接螺栓;3—测力螺栓;4—零件Ⅰ;5—弹性元件;6—零件Ⅱ;7—应变片;8—压盖;9—无线应变节点;10—导线

简化为如图 2 所示的计算模型:预紧状态下,计算模型如图 2(a)所示,两零件被紧固,螺栓受到拉伸,弹性元件受到压缩,两者相互作用均可视为弹簧,由胡克定律得:

$$F_0 = k_1 \cdot \Delta x_1 = k_2 \cdot \Delta x_2 \quad (1)$$

式中: F_0 —螺栓预紧力, k_1 —螺栓拉压刚度, k_2 —弹性元件拉压刚度, Δx_1 —螺栓变形量, Δx_2 —弹性元件变形量。

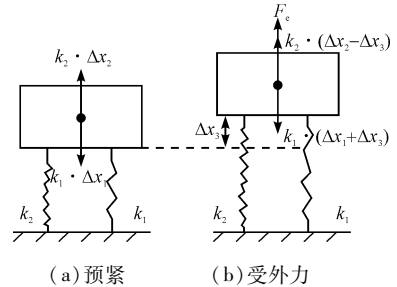


图 2 实验装置理论计算模型

被连接零件受到外力 F_e 时,计算模型如图 2(b)所示,由受力平衡得:

$$k_1 \cdot (\Delta x_1 + \Delta x_3) - k_2 \cdot (\Delta x_2 - \Delta x_3) = F_e \quad (2)$$

式中: F_e —作用在零件上的外力, Δx_3 —零件受外力后测力螺栓和弹性元件的变形量。

由式(1,2)得:

$$k_1 \cdot \Delta x_3 + k_2 \cdot \Delta x_3 = F_e \quad (3)$$

$$\Delta x_3 = \frac{F_e}{k_1 + k_2} \quad (4)$$

因外力 F_e 的作用,测力螺栓出现弹性变形,测力螺栓产生的拉力 $F = k_1 \cdot \Delta x_3$,两者的关系为:

$$F = \frac{k_1}{k_1 + k_2} F_e \quad (5)$$

因此,预紧后不论外加载荷是拉力还是压力,螺栓光杆处受力在理论上均与其呈线性关系。通过求得弹性元件和测力螺栓的刚度,就可以由螺栓处应力计算被连接件受力情况。

2 实验系统主要组成

2.1 无线应变测量系统

无线应变测试系统示意图如图 3 所示。基于 ZigBee 技术的无线应变测试系统由 4 部分组成:无线应变节点、USB 网关、装有动态采集分析软件的计算机以及电阻应变片。USB 网关由 USB 数据线与计算机连接,应变片上的导线接在无线应变节点适当的接线端子上。测量过程中,无线应变节点固定在装置内部,接

收来自测力螺栓的应变信号,通过自带的天线传给无线网关,将数据输入计算机中,动态采集分析软件对数据进行分析处理,对螺栓受力情况实时在线显示。经测定,该系统测量分辨率可达到 $1\text{ }\mu\text{ε}$,采样频率最高可达 $2\text{ }000\text{ Hz}$,无线传输距离可达 500 m (视距),工作时间约 12 h ,满足转换精度高、采样速度快,同时体积小、功耗低^[10]的要求。

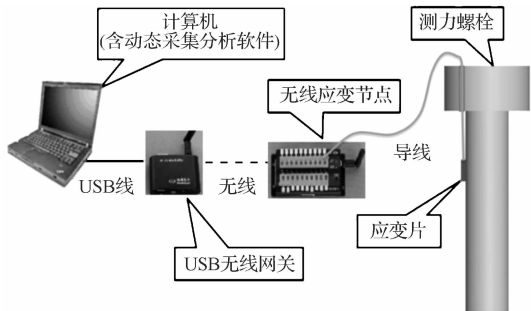


图3 无线应变测试系统示意图

2.2 测力螺栓

根据实验装置结构和测量外力的需要,本研究设计制造的测力螺栓如图4所示。

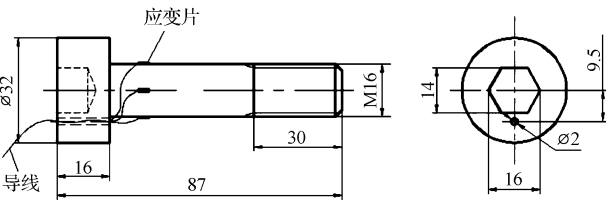


图4 测力螺栓结构示意图

测力螺栓采用内六角圆头螺栓形式,材料选用25Cr2MoVA,并进行调质处理。螺栓光杆处应变片采用全桥连接,4个应变片周向均匀分布,每个应变片均配有温度补偿片,保证了测量数据的准确。螺栓头部开有通孔,便于将连接应变片的导线引出并连至无线应变测试系统。由应力应变公式有:

$$\sigma = \frac{F_1}{A} = E \cdot \varepsilon = \frac{E \cdot \Delta l_1}{L} \tag{6}$$

式中: σ —螺栓受到的拉应力, F_1 —拉力, A —螺栓最小截面积, E —弹性模量, ε —螺栓产生的应变, L —螺栓有效长度, Δl_1 —变形量。

可得到螺栓的拉压刚度:

$$k_1 = \frac{F_1}{\Delta l_1} = \frac{E \cdot A}{L} = 0.347 \times 10^9\text{ N/m} \tag{7}$$

2.3 弹性元件

根据式(3),为了较为灵敏地反映被连接件所受外力,同时实验过程中不能大幅度改变两被连接件的

空间位置,需要设计加工一种能够承受足够大压力,同时保持较小形变的弹性元件。笔者仿照弹簧结构设计的弹性元件如图5所示。

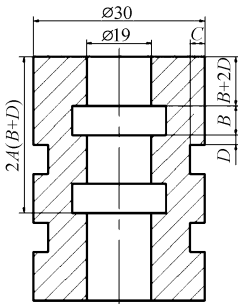


图5 弹性元件结构图

2.3.1 正交法设计弹性元件

如图5所示,弹性元件的结构参数主要有单侧凹槽数量A、凹槽宽度B、凹槽深度C、内外相邻凹槽间距D。为了节省设计、实验时间,科学进行弹性元件的优化设计,笔者采用正交设计法^[11],并利用ANSYS有限元分析软件进行模拟。每个因素选取3水平,建立的因素正交水平表如表1所示。本研究选用 $L_9(3^4)$ 正交表,进行表头设计,具体如表2所示。

表1 因素正交水平表

	因素			
	A	B	C	D
水平	单侧凹槽数量(个)	凹槽宽度(mm)	凹槽深度(mm)	内外相邻凹槽间距(mm)
1	3	3	1	-0.5
2	4	3.5	1.3	0
3	5	4	1.5	0.5

本研究中,弹性元件材料为65Mn,并进行调质处理,弹性模量为201GPa,泊松比为0.3。采用solid45三维实体单元类型,六面体网格划分,网格尺寸为0.0005m。在弹性元件径向截面施加位移约束,截面压强为 $2.362 \times 10^8\text{ Pa}$ 。

2.3.2 弹性元件优化设计

模拟结果如表2所示。通过对各因素进行极差分析,可知凹槽深度对强度影响最明显,单侧凹槽数量对变形量的影响最明显。

65Mn的屈服极限为785MPa,在考虑保证一定变形量的条件下,最大应力值适中为好。根据模拟结果,变形量很小,均在0.1mm以内,为使实验效果更明显,变形量越大越好。因此,两个指标的最优值分别为 $A_1B_3C_2D_1$ 和 $A_3B_2C_3D_3$ 。

对于多指标问题,笔者采用综合平衡法^[12],综合出一个或几个较满意的水平组合,同时考虑将弹性元

件长度控制在一定范围内,因此, $A_3B_2C_2D_1$ 的因素组合(凹槽深度为 1.3 mm,内外相邻凹槽间距为 -0.5 mm,凹槽宽度为 3.5 mm,单侧凹槽数量为 5,总长 35.5 mm)为最优设计,有限元模拟结果显示,最大应力 697 MPa,小于屈服极限 785 MPa,变形量 0.068 4 mm,满足要求。

表 2 正交设计方案及模拟结果

试验号	列号				模拟结果	
	A	B	C	D	最大应力/MPa	变形量/mm
1	1(3)	1(3)	1(1)	1(-0.5)	598	0.031 9
2	1(3)	2(3.5)	2(1.3)	2(0)	745	0.050 7
3	1(3)	3(4)	3(1.5)	3(0.5)	870	0.071
4	2(4)	1(3)	2(1.3)	3(0.5)	753	0.063 2
5	2(4)	2(3.5)	3(1.5)	1(-0.5)	818	0.064 8
6	2(4)	3(4)	1(1)	2(0)	593	0.062 3
7	3(5)	1(3)	3(1.5)	2(0)	831	0.075 4
8	3(5)	2(3.5)	1(1)	3(0.5)	866	0.097 2
9	3(5)	3(4)	2(1.3)	1(-0.5)	776	0.078 7
最大应力	K_{1j}	2 213	2 182	2 057	2 192	
	K_{2j}	2 164	2 429	2 274	2 169	
	K_{3j}	2 473	2 239	2 519	2 489	
	k_{1j}	737. 67	727. 33	685. 67	730. 67	
	k_{2j}	721. 33	809. 67	758	723	
	k_{3j}	824. 33	746. 33	839. 67	829. 67	
	极差 R_j	103	82. 33	154	106. 67	
变形量	K_{1j}	0. 153 6	0. 170 5	0. 172 9	0. 175 4	
	K_{2j}	0. 190 3	0. 212 7	0. 192 6	0. 188 4	
	K_{3j}	0. 251 3	0. 212	0. 211 2	0. 231 4	
	k_{1j}	0. 051 2	0. 056 8	0. 057 6	0. 058 5	
	k_{2j}	0. 063 4	0. 070 9	0. 064 2	0. 062 8	
	k_{3j}	0. 083 8	0. 070 7	0. 070 4	0. 077 1	
	极差 R_j	0. 032 6	0. 014 1	0. 012 8	0. 018 7	

本研究将弹性元件最优设计方案加工出 a、b、c、d 4 件,进行验证实验。笔者利用 INSTRON 试验机,对弹性元件施加 10 kN、20 kN、30 kN…90 kN、100 kN 压力,记录 4 个弹性元件在不同压力下的压缩量 s ,弹性元件压缩实验压缩量变化如图 6 所示。结果显示,压力 F_2 每增加 10 kN,弹性元件压缩量为 0.01 mm~0.02 mm 之间,

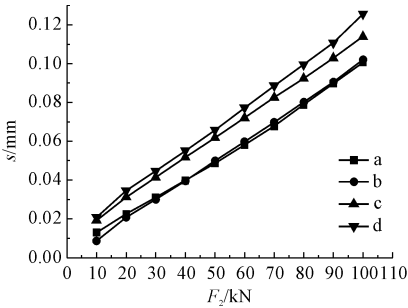


图 6 弹性元件压缩实验压缩量变化

压力为 100 kN 时,压缩量为 0.1 mm~0.12 mm 之间。因此,弹性元件的拉压刚度 k_2 约为 1×10^9 N/m。

本研究同时测量压缩前、后弹性元件的轴向长度,发现其变形率仅有万分之一左右,不发生塑性变形,该弹性元件满足要求。

3 拉、压力无线测量验证实验

本研究组装如图 1 所示的实验系统,利用静态力输入软件、INSTRON 试验机和动态采集分析软件进行实验。跟踪动态采集分析软件的示数,给测力螺栓施加 30 kN 预紧力(允许 ± 0.5 kN 偏差)。实验前将静态力输入软件和动态采集分析软件清零。依次输入 -50 kN、-40 kN…0 kN…40 kN、50 kN 并重复 4 次,观察软件示数,数据稳定后,记录示数。将 4 次实验得到

的输出值取平均数,以试验机输入值(零件受到的外力) F_e 为横坐标,软件输出值(测力螺栓受力) F 为纵坐标,作出 F 和 F_e 的拟合曲线。实验步骤不变,提高测力螺栓预紧力,所作出的预紧力为 40 kN 和 50 kN 下 F 和 F_e 的拟合曲线,如图 7 所示。

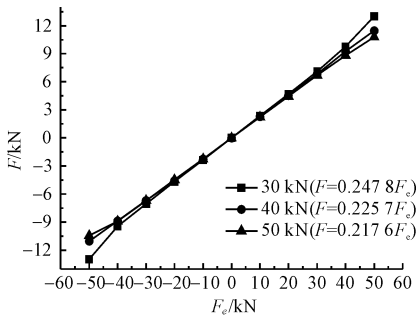


图 7 不同预紧力下输入值与输出值趋势图

由上文可知,螺栓的拉压刚度 k_1 为 0.347×10^9 N/m,弹性元件的拉压刚度 k_2 为 1×10^9 N/m,则 F 与 F_e 的关系为:

$$F = \frac{k_1}{k_1 + k_2} F_e = 0.258 F_e \quad (8)$$

图 7 中的拟合曲线显示,测力螺栓预紧力为 30 kN、40 kN 和 50 kN 时,输入值与输出值均呈线性关系,系数 $k_1/(k_1 + k_2)$ 的值分别为 0.247 8、0.225 7 和 0.217 6,与理论计算结果相比,误差分别为 4%、12.5%、15.7%,考虑到试验机通过夹头输入外力的损耗,误差可以接受,该实验较好地反映了输入值和输出值的线性关系。因此,该测量方法可行,根据输出值和拉压刚度,就可以知道被连接件所受外力。

4 结束语

笔者采用基于 ZigBee 技术的无线应变测量系统,在被连接件之间加装与螺栓相互作用的弹性元件,可以实现复杂工况下螺栓连接零件受拉、压外力的有效测量。得到的研究结果如下:

(1) 凹槽深度对弹性元件强度影响最明显,单侧凹槽数量对弹性元件变形量的影响最明显。

(2) 实验数据与理论计算基本吻合,被连接件受外力 F_e 与测力螺栓处受力 F 之间存在线性关系, $F = k_1 F_e / (k_1 + k_2)$ 。

参考文献 (References):

- [1] 张 帅. 柴油机缸盖螺栓动态应力分析方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学能源与动力工程学院, 2012.
- [2] 周怡霖, 凌志浩, 吴勤勤. ZigBee 无线通信技术及其应用探讨[J]. 自动化仪表, 2005, 26(6): 5-6.
- [3] 杨 骏. 无线测力轮对监测系统研究[D]. 成都: 西南交通大学机械工程学院, 2010.
- [4] 包亚萍, 史丽娟, 田 峰. 基于 ZigBee 和 MSP430 的商场无线测温系统的设计[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(11): 2458-2460.
- [5] 高红俐, 姜 伟, 殷建军, 等. 大型旋转机组轴向力在线监控测力弹性元件的结构方案设计[J]. 浙江工业大学学报, 2001, 29(1): 34-39.
- [6] 庄力健, 朱建新, 方向荣. 旋转机械联锁系统安全完整性等级(SIL)评估[J]. 流体机械, 2013, 41(5): 38-43.
- [7] 曾国华, 杨祖鸾. 螺栓联接预紧力测量装置的研究[J]. 机械研究与应用, 2002, 15(2): 45-46.
- [8] 陈 炳. 基于应变传感器的切削力测试装置实验研究[J]. 机电工程, 2012, 29(12): 1439-1442.
- [9] 管建军, 孙 伦, 张大群, 等. 高温下工作螺栓预紧状态变化研究及应对措施[J]. 轻工机械, 2013, 31(5): 104-107.
- [10] 郭宏伟, 孙贺欣. 基于无线数据传输技术的测力装置[J]. 传感器技术, 2004, 23(9): 52-54.
- [11] 何秀华, 张 睿, 杨 嵩, 等. 基于正交设计法的“V”形管优化设计[J]. 排灌机械, 2008, 26(5): 14-15.
- [12] 金良超. 正交设计与多指标分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

刘 岩, 李双喜, 蔡纪宁, 等. 螺栓连接零件受拉力和压力的无线测量新方法[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 860-864.

LIU Yan, LI Shuang-xi, CAI Ji-ning, et al. Novel method for wireless measuring the pulling and compressive external-force loaded on the elements connected by bolt[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(7): 860-864.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>