

Design of the Device Capturing Six-Dimension Information of a Helical Spring Deformation *

WU Yuguang^{*}, LIU Qi

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A device capturing six-dimension information of a helical spring deformation is designed. The helical spring is fixed on the base of the device, by applying a force on the top of the spring, and then the six-dimension information of the spring's deformation is obtained by an ad hoc sensing technology. The principle of this sensing technology is described, and the circuit detecting the strain of the spring wire surface is designed. Finally, an experimental system of the device capturing six-dimension information is developed, and the experimental result verifies the feasibility of this method.

Key words: information input device; six-dimension information; deformation sensing; helical spring

EEACC:7210G; 7220; 7230S

一种基于螺旋弹簧形状感知技术的六维信息输入装置设计 *

吴玉光^{*}, 刘 琪

(杭州电子科技大学机械工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 提出一种基于捕捉圆柱螺旋弹簧变形信息的六维信息输入装置。将圆柱螺旋弹簧底端固定, 操作者在圆柱螺旋弹簧的顶端施加力和力矩, 使弹簧产生相应的变形, 利用圆柱螺旋弹簧形状信息感知技术捕捉操作者的操作意图。介绍了圆柱螺旋弹簧形状信息感知技术的原理和弹簧簧丝表面的应变的电测电路, 研制了六维信息输入装置原型系统, 实验结果证明该装置设计原理正确。

关键词: 信息输入装置; 六维信息; 形状感知; 螺旋弹簧

中图分类号: TH721

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)07-0949-05

六维信息包括沿三个坐标轴方向和绕三个坐标轴的运动信息和力信息, 如平移与转角数据、力和力矩数据等。随着计算机应用技术的不断扩展, 许多应用软件和仪器设备需要二维以上信息的人机交互输入操作, 具有多维信息的交互输入与控制能力的输入设备在 VR、CAD、多媒体和科学计算可视化等领域占有重要地位。人们在三维交互设备研究方面做了很多有益的探索^[1], 出现了各种三维交互设备, 如数据手套、三维鼠标、力矩球、六维力传感器等。陈浩强等^[2]提出一种新的鼠标器结构, 利用物体的惯性, 结合压力传感器以获取鼠标的三维运动状态, 实现了三维空间的定位。Laberge 等^[3]研制了适用于触觉虚拟环境的 6 维鼠标。王兴凤等^[4]在传统二维鼠标的基础上增加 2 个自由度, 设计并实现了五自由度三维 USB 鼠标。赵现朝

等^[5]提出一种以并联机构为力敏元件的微型六维鼠标的设计与开发工作, 并将其用于虚拟 6-SPS 并联机器人控制系统中, 宫金良等^[6]的六维鼠标同样采用并联机构作为机械主体, 用新型柔性铰链代替传统的运动铰链, 基于力和力矩控制原理。金振林等^[7]提出了一种以等平台 Stewart 机构为原形的新型机器人灵巧手指六维力传感器。这些设备采用声跟踪、光跟踪、电磁跟踪或机械跟踪的原理, 直接或间接地获取输入设备的三维信息, 因此普遍存在着技术复杂、使用条件限制、制造成本昂贵等问题^[8-9]。在计算机交互输入技术中, 多维信息的输入一直是个薄弱环节。

本文介绍一种基于圆柱螺旋弹簧形状感知技术的六维信息输入装置, 其基本原理是将圆柱螺旋弹簧底端固定在台板上, 操作者在圆柱螺旋弹簧的顶

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(50875069)

收稿日期: 2010-01-14 **修改日期:** 2010-03-12

端施加力和力矩,使弹簧产生相应的变形。通过检测弹簧簧丝表面的应变,推算出弹簧的变形和受力情况,从而获得操作意图和具体数据。圆柱螺旋弹簧结构简单、制造简便,保证这种输入装置性能可靠、成本低廉,容易使用。

1 圆柱螺旋弹簧的受力分析

图 1 所示为圆形截面右螺旋弹簧受力分析模型,根据应用的目的,作用在弹簧的顶端载荷类型可归纳为轴向力 P 、径向力 P_r 、弯矩 M 和扭矩 T 四种。取过弹簧轴线的任意平面 V 所截取的上半部分弹簧为研究对象^[10],在平面 V 与簧丝中心线的交点 o 处建立坐标系 (o, t, n, b) ,其中, t 为簧丝中心线在 o 点处的切线, n 为簧丝中心线在 o 点处的法线, b 为簧丝中心线在 o 点处的副法线。 n 和 b 组成簧丝中心线的法平面 V' ,即弹簧簧丝的横截面 A ,因此,平面 V 与平面 V' 之间的夹角就是弹簧的螺旋升角 α 。图 1 中平面 V 、 T 、 H 分别为过弹簧轴线的任意平面、过簧丝中心线切线 t 的切平面和水平面, θ 为平面 V 与 $x-z$ 平面之间的夹角。

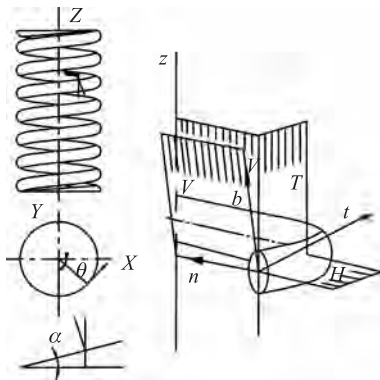


图 1 圆形截面右螺旋弹簧受力分析模型

对于平面 V 所截取的上部分弹簧,设弹簧顶端的四种载荷的作用方向分别为轴向力 $P(-z)$ 、径向力 $P_r(-x)$ 、弯矩 $M(+y)$ 和扭矩 $T(+z)$,则以上四种载荷在横截面 A 内分解为沿 t 、 n 和 b 坐标方向的扭矩和弯矩分别为 T_t 、 M_n 与 M_b ,以及沿 t 、 n 和 b 坐标方向的法向力、径向力和切向力分别为 P_t 、 P_n 与 P_b 。当弹簧的螺旋升角较小时,以上作用力的计算公式可以简化为如表 1 和表 2 所示。

表 1 轴向力、扭矩、弯矩在簧丝截面上的分解

力分解	轴向力 P ($-z$ 方向)	扭矩 T ($+z$ 方向)	弯矩 M ($+y$ 方向)
T_t	$0.5PD\cos\alpha$	$-T\sin\alpha$	$M\cos\theta\cos\alpha$
M_b	$-0.5PD\sin\alpha$	$-T\cos\alpha$	$-M\cos\theta\sin\alpha$
M_n			$M\sin\theta$

表 2 径向力 $P_r(-x$ 方向)在簧丝截面上的分解

力矩	公式	力	公式
T_t	$P_t\cos\theta\cos\alpha - 0.5P_rD\sin\theta\sin\alpha$	P_t	$P_r\sin\theta\cos\alpha$
M_b	$-P_t\cos\theta\sin\alpha - 0.5P_rD\sin\theta\cos\alpha$	P_b	$-P_r\sin\theta\sin\alpha$
M_n	$P_t\sin\theta$	P_n	$-P_r\cos\theta$

表 2 中 l 为平面 V 所在簧丝中心到弹簧顶端的距离。弹簧横截面 A 受到以上载荷时,其簧丝表面的最大应力点通常位于弹簧内侧^[7],最大正应力 σ_{tt} 与切应力 τ_{tb} 如表 3 所示。

表 3 簧丝表面的最大应力公式

作用力	正应力 σ_{tt}	切应力 τ_{tb}
轴向力 $P(-z$ 方向)	$\frac{16K_pPD}{d^3\pi}$	$\frac{8K_pPD}{d^3\pi}$
扭矩 $T(+z$ 方向)	$\frac{32K_T T_t}{d^3\pi}$	$\frac{16K_T T_t}{d^3\pi}$
弯矩 $M(+y$ 方向)		$\frac{16K_b M\cos\theta}{d^3\pi}$
径向力 $P_r(-x$ 方向)		$\frac{16K_{tb} P_r H\cos\theta}{d^3\pi}$

表中 K_p 、 K_r 、 K_T 、 K_b 等系数与弹簧簧丝截面形状、螺旋角 α 、绕旋比 C 有关,对于给定的弹簧,以上系数均为常数值^[10],在实际应用中可根据实际弹簧采用标定的方法确定。

2 弹簧形状信息感知技术原理

2.1 弹簧载荷类型识别原理

根据操作者的操作意图,作用在弹簧顶端的载荷可能是几种力的组合,这些组合可归纳为四种情况:①轴向力和径向力同时作用;②弯矩和径向力同时作用;③扭矩和轴向力同时作用,④轴向力、径向力、弯矩和扭矩四种力单独作用。弹簧受力类型识别就是要根据弹簧表面的应力情况判断出弹簧顶端的作用力的类型、大小和方向。

从表 1、2、3 可以看出,弹簧顶端的不同载荷类型对弹簧截面位置的影响是不同的。当弹簧顶端受到轴向力与扭矩作用时,任意横截面上的受力相同,即弹簧截面的受力只与弹簧顶端的载荷和弹簧结构参数相关,而与弹簧截面的位置无关。当弹簧顶端受到弯矩的作用时,弹簧横截面上的受力除了与弹簧的结构参数相关之外,还与横截面相对于弹簧圆柱的径向位置(θ 角)有关。当弹簧顶端受到径向力时,其在弹簧截面上的作用力与弹簧的结构参数、截面的径向位置(θ)以及轴向位置(l)有关。因此,对弹簧同一圈上

若干个检测点进行检测,可以得到与径向位置相关的应力分布情况。再在相隔若干节距的另一弹簧圈的相同径向位置设置相应的检测点,通过相同径向的检测点的应力对比可以得出沿轴线的应力变化情况。

根据弹性力学知识,弹簧的变形状况与弹簧的受力直接相关,不同受力情况产生不同的变形。在弹簧弹性变形范围内,弹簧的变形情况与簧丝表面的应力状态必然存在着——对应的关系。因此,根据弹簧簧丝表面一系列位置上的应力状态,再结合螺旋弹簧的结构特点,就可以获得弹簧的变形状况。同时,根据簧丝表面的应力状态也可以获得弹簧的受力状态。

2.2 弹簧载荷类型识别方法

根据以上原理,采用电阻应变传感器检测弹簧簧丝截面应变。应变片贴在六个弹簧截面的特定位置上,可以同时检测多路正应力与切应力。如图2所示,在弹簧底部的同一圈弹簧的内侧面上布置3个检测点,这三个检测点的 θ 角分别为 -90° 、 0° 、 135° 。在弹簧中部的同一圈弹簧上再另外布置3个检测点,这3个检测点与前3个检测点的对应 θ 角相同^[11]。

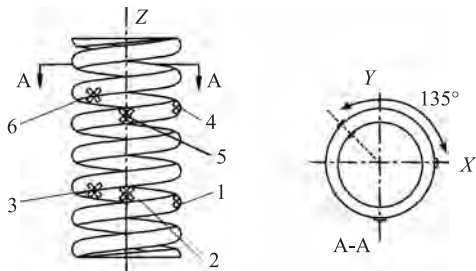


图2 应变片粘贴方案示意图

2.2.1 轴向力和扭矩同时作用时的表面应力

根据螺旋弹簧结构特点,在弹簧顶端的载荷为轴向力和扭矩时,作用在弹簧的任意横截面上的扭矩 T_i 相同,因此弹簧任意簧丝表面的应力相同。反过来,如果弹簧簧丝的两个不同位置上所测得的应力相同,则说明弹簧顶端只可能受到轴向力和扭矩的作用。

根据表3所列的公式,此时任意截面处簧丝表面上的最大正应力 σ_u 与切应力 τ_{ib} 的计算公式为公式(1)和公式(2):

$$\sigma_u = \frac{K_p PD}{2Z_m} + \frac{K_t T_i}{Z_m} \quad (1)$$

$$\tau_{ib} = \frac{K_p PD}{2Z_{ib}} + \frac{K_t T_i}{Z_{ib}} \quad (2)$$

其中 Z_m 、 Z_{ib} 分别为弹簧抗弯与抗扭截面系数,以上两式中,除了轴向力和扭矩未知以外,其余参数均是给定弹簧结构和材料相关的固定值,因此联立式(1)和式(2)就可以解得轴向力与扭矩的值。

2.2.2 非轴向力和扭矩共同作用时的应力

如果六个检测部位所测到的切应力数值差别很大,则说明弹簧所受的载荷不仅仅是扭矩和轴向力,还有其它类型的力存在。根据前面的定义,此时弹簧的载荷必为以下4种情况之一:①径向力单独作用、②弯矩的单独作用、③径向力与弯矩混合作用、④轴向力与径向力的混合作用。各个检测点的应变是以上一种或几种载荷所引起应变的总和。

根据表1的应力公式,第 i 个检测点表面上由径向力、弯矩、轴向力引起的切应力的计算公式如公式(3)所示。

$$\tau_i = \frac{K_{ib} P_r H_i}{Z_{ib}} \cos \phi_i + \eta_i \quad (3)$$

式(3)中, H_i 为弹簧顶端到第 i 个检测截面的距离, η_i 为弯矩或轴向力导致的应力值, τ_i 为第 i 个检测点表面的切应力, ϕ_i 为检测点位置的簧丝表面法线 n 与 P_r 之间的夹角。由于检测位置1和4、2和5、3和6的角度值 ϕ_i 相同,因此弹簧顶端作用弯矩或轴向力而导致的应力在这3对位置上相同,即有 $\eta_1 = \eta_4$, $\eta_2 = \eta_5$, $\eta_3 = \eta_6$,并且有 $\Delta l = H_1 - H_4 = H_2 - H_5 = H_3 - H_6$,则以下公式成立:

$$\Delta \tau_1 = \tau_1 - \tau_4 = \frac{K_{ib} P_r \Delta l}{Z_{ib}} \cos \phi_1 \quad (4)$$

$$\Delta \tau_2 = \tau_2 - \tau_5 = \frac{K_{ib} P_r \Delta l}{Z_{ib}} \cos \phi_2 \quad (5)$$

$$\Delta \tau_3 = \tau_3 - \tau_6 = \frac{K_{ib} P_r \Delta l}{Z_{ib}} \cos \phi_3 \quad (6)$$

式中, $\phi_2 = \phi_1 - 90^\circ$, $\phi_3 = \phi_1 + 135^\circ$,联立以上公式中任意两式,即可求得径向力 P_r 的大小和作用方向角。再将求得的 P_r 的值和方向角代入公式(5),可以得到由弯矩或轴向力导致的应力 η_i 。

如果 $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3$,说明载荷中不存在弯矩作用,而只存在轴向力的单独作用。根据表3中轴向力作用的切应力公式,在只存在轴向力作用情况下的应力公式为:

$$\eta_i = \frac{K_p PD}{2Z_{ib}} \quad (7)$$

根据(7)式可求得轴向力的大小,根据 P 的正负,还可以判断拉力或压力。

若6个 η_i 不全相同,则说明载荷中存在弯矩的作用。将 ϕ_i 值分别代入表3中弯矩作用后的切应力公式,可得到弯矩的大小、方向。

根据公式(1)~(7),可以计算出作用在弹簧顶端的扭矩 T_i 、径向力 P_r 、轴向力 P 与弯矩 M 的大小和作用方向角,根据这些作用力的大小关系,可以判断出弹簧顶端的载荷类型,从而判断出人手操作意图。

3 仪器原型及实验结果分析

六自由度输入装置样机如图3所示,弹簧簧丝表面应变通过电阻应变片测量得到。电阻应变片分布在弹簧的6个检测截面上,贴在簧丝内表面中心位置。在每一个检测位置上都分别贴有两片应变片,两个应变片与弹簧簧丝轴线成 $\pm 45^\circ$,此两个应变片与两片等值电阻构成一个等臂电桥,可以抵消弯曲、拉伸对扭转应变信号的影响^[11],用于测量切应力 τ_{tb} 。6个检测截面共形成6个电桥电路,其编号与图2中的测量点编号相同,电桥电路经信号经线性放大后作为第1至第6路信号输出。此外,为了测量簧丝表面的正应力,在第3与第6个检测截面的外表面上沿簧丝轴线方向还分别贴有一片应变片,这两个应变片分别与3片等值电阻构成单臂电桥电路,经线性放大后,作为第7、8路输出。8路应变信号通过信号调理板放大调理后,再将其转换为数字信号,输入到计算机中。

在实验中,分别沿各个给定方向对弹簧顶端施加径向力和力矩,电阻应变信号经过处理输入计算机,计算机软件经过计算输出弹簧顶端所施载荷的大小和方向,实验结果如下表4、表5所示。

表4 施加径向力的实验结果

力作用方向/(°)	输出结果/(°)	误差/(°)
0	-2.832	2.832
45	40.215	4.786
90	85.334	4.666
135	127.628	7.372
180	187.376	7.376
225	227.457	-2.457
270	265.864	4.136
315	321.660	-6.660

表5 施加力矩试验结果

力矩作用方向/(°)	输出结果/(°)	误差/(°)
0.0	3.387	-3.387
90.0	82.469	7.531
180.0	185.349	-5.349
270.0	264.224	-5.776

表4为在弹簧顶端沿8个方向施加径向力之后,计算机输出的径向力施加方向角。表5为弹簧顶端沿4个坐标方向施加弯矩,计算机输出的弯矩施加方向角。由于径向力和弯矩采用人手直接施加在弹簧顶端,径向力和弯矩的施加角度的测定是不精确的,但从表4和表5可以看出,实验装置的输出

结果和输入方向基本吻合。图3为计算机软件生成的弹簧实时变形图形,弹簧的变形参数数据通过电阻应变片的数据采集得到,随着弹簧顶端载荷的变化,计算机图形的变化与实际弹簧变化形状一致。



图3 六维信息输入装置控制虚拟弹簧

4 结论

(1)提出了一种六自由度输入装置,利用圆柱螺旋弹簧的变形情况与簧丝表面的应力状态必然存在着——对应的关系的原理,通过检测弹簧簧丝表面的应变,再结合螺旋弹簧的结构特点,就可以获得弹簧的变形状况,从而获得操作意图。

(2)研究了螺旋弹簧的载荷形式,建立弹簧的受力分析模型,建立了弹簧载荷与簧丝表面应变之间的关系公式和弹簧簧丝表面应变与弹簧变形参数之间的关系。

(3)研制了六自由度输入装置样机,采用电阻应变检测弹簧载荷的方法,建立了相应的电桥电路和数据采集电路和计算机接口电路。

(4)原型样机经过实验检测,实验结果与理论分析基本符合。

参考文献:

- [1] 齐建昌,戴国忠. CAD中三维交互技术的研究与实现[J]. 计算机研究与发展. 1999,36(9):1104-1109.
- [2] 陈浩强,张海航,汪永林,等. 一种新的鼠标器结构探讨[J]. 电脑知识与技术,2008,3(7):1585-1586.
- [3] Laberge D, Lapointe J F, Petriu E M, et al. 6-D Mouse for Virtual Environments [C]//Proceedings of HAVE 2002 - IEEE Workshop on Haptic Virtual Environments And Their Applications. Ottawa, Ontario, Canada, 2002, 11(17-18): 37-41.
- [4] 王兴凤,秦开怀. 五自由度三维鼠标的设计与实现[J]. 清华大学学报(自然科学版)2008,48(10):1684-1686.
- [5] 赵现朝,高峰. 并联结构六维鼠标研制开发[J]. 机械设计, 2003,20(6):15-17.
- [6] 宫金良,张彦斐,周玉林,等. 一种新型六维鼠标在虚拟现实技术中的应用. 传感器技术,2005,24(9):82-84,88.
- [7] 金振林,赵现朝,高峰,等. 新型灵巧手指六维力传感器参数设计方法研究[J]. 仪器仪表学报,2003,24(4):371-374,413.

- [8] 王海东,朱文华,苏玉鹏,等. 基于3DMouse的虚拟仿真系统人机交互技术[J]. 计算机技术与发展,2009,19(10):18-21,25.
- [9] 宁志鹏,侯增选,闫锋欣,等. 虚拟油泥造型交互方法研究[J]. 计算机测量与控制,2009,(7):1371-1374.
- [10] 张英会. 弹簧[M]. 机械工业出版社,1984:162-178.
- [11] 沈林勇,陈建军,钱晋武,等. 利用应变片实现曲线形状的实时检测[J]. 机器人,2004,26(4):600-602.



吴玉光(1961-),男,博士,教授,主要研究方向为机械CAD/CAM技术,加工工艺自动规划,夹具自动设计、多指抓取自动规划等,ygwu@hdu.edu.cn;



刘 琪(1983-),男,硕士研究生,主要从事形状感知技术研究,spa270@163.com。