

新型三维力传感器的研制与应用

方立, 孙怡宁, 王理丽

(中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 在不同的应用背景下, 对传感器的特性有不同的要求, 就要用不同原理、结构和工艺来设计传感器。首先介绍一种新型的三维力传感器。并着重分析它的结构、原理及各种影响它准确度的原因和相应解决办法。最后, 叙述它在拳击等竞技体育中的应用。

关键词: 三维力传感器; 维间耦合; 应变计

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2002)07-0049-03

Development and application of new three dimensions force sensor

FANG li, SUN Yi-ning, WANG Li-li

(Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In different application field, sensors with different principium, structure and technics will be designed to suit to especial character the people requested. A new-style three dimensions force sensor will be provided. Then complete explaintions of how it works and what it consists of will be given. Final, it's applications in athletic sports, for example pugilism etc will be introduced.

Key words: three dimensions force sensors; cross-axis coupling; strain gauge

0 引言

为了提高跆拳道、拳击运动员日常训练的科学性, 根据这类竞技体育的一些特点和它对传感器特性的一些特殊要求, 设计出一种新型的三维力传感器。它能准确、实时反映出运动员击打目标时力的大小和方向、击打动作间的时间间隔、击打部位是否准确等, 从而能够定量地刻画运动员动作完成质量的状况。让教练员能够根据数据来指导运动员进行科学训练。提高训练质量和增强实战能力, 因此有着重要现实意义。

1 三维力传感器的设计

1.1 三维力传感器的结构和原理

对三维力传感器的设计而言, 除要考虑传统力学量传感器的动力学性能和静态标定指标等特性外, 还要对其各维灵敏度及维间耦合系数等指标予以充分考虑。因此, 结构设计时应该做到对所测维的力有较好的灵敏度, 而对于非所测维力尽可能不灵敏, 最好在理论上是不起作用, 这样使维间耦合小; 还要保证整个结构有足够的刚度; 传感器基准坐

标要明确; 结构的对称性要好; 可方便对外连接和安装; 及便于实现机械过载保护措施等要求。同时还要考虑应用领域的诸多条件的限制。新型三维力传感器结构设计如图 1。

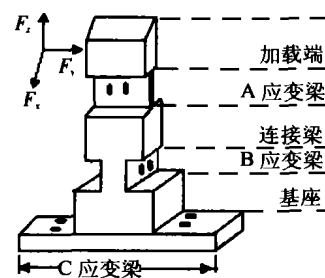


图 1 三维力传感器结构示意图

Fig 1 Structure of three dimensions sensor

它包括加载端、A、B、C 三个应变梁、连接梁和基座。其中, A、B、C 应变梁的中轴线相互垂直且各按其中轴线对称。连接梁、加载端和基座的宽度大于应变梁厚度 3~5 倍。这种结构设计, 使传感器受力时形变主要发生在 A、B、C 应变梁处, 在测量准确度允许的范围之内可以将连接梁上所产生的形变忽略不计, 而将其等效为刚性固支^[1,2]。于是 A、B 应

变梁可简化成为一端固定的悬臂梁。C 应变梁则可简化成为双端固定梁。在 A、B、C 应变梁的中心轴线两侧对称的地方贴上两对箔式应变计(图 2, 图 3)。

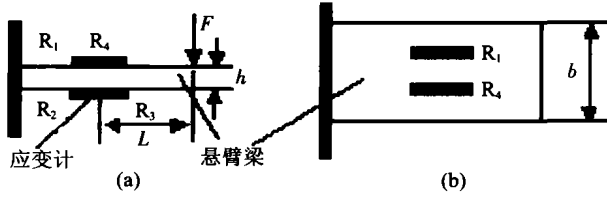


图 2 A, B 应变梁侧视图和俯视图

Fig 2 Side view and planform of elastomer A, B

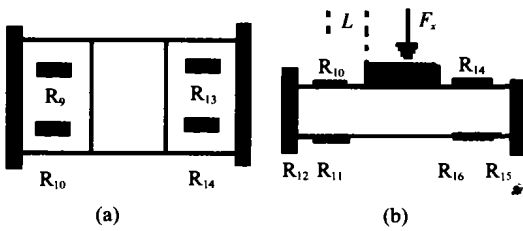


图 3 C 应变梁俯视图和平视图

Fig 3 Planform and view of elastomer C

这样每个应变梁上贴有 4 片应变计。组成了一个全桥电路(图 4)。

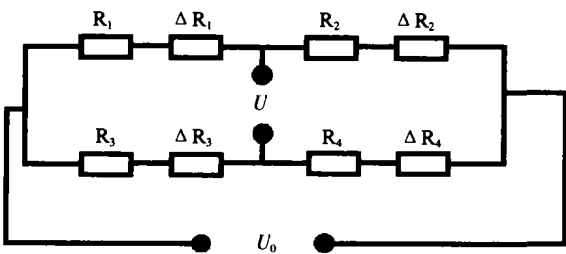


图 4 应变及电压输出电路

Fig 4 Circuit of strain gauge voltage output

当受到力载荷时 $F(F_x, F_y, F_z)$ 。它将在 A、B、C 应变梁产生形变,并使 A、B、C 应变梁上的箔式片电阻发生变化,电桥桥路平衡被打破,在输出端有电压输出,从而根据输出电压的变化量测出矢量力来。

1.2 三维力传感器受力的简化分析

对 A 悬臂梁的受力分析:

当 F_x 作用时,

此时 R_1, R_4 若受拉伸,则 R_2, R_3 受压缩,两者发生极性相反的等量应变,即

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \propto \frac{FL}{bh^2E}, \quad (1)$$

式中 ϵ_x 为悬臂梁弹性体受外力时产生的应变; E

为弹性体的弹性模量; h 为悬臂梁厚; b 为悬臂梁宽; L 为悬臂梁外端距应变计中心的长度; σ_x 为截面正应力。

4 片应变计组成全桥电路,当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 此时电桥的电压输出为

$$U_0 \propto U \times \frac{\Delta R_1}{R_1}, \quad (2)$$

式中 U_0 为电桥的电压输出; $\Delta R_1, R_1$ 分别为桥臂应变电阻的变换量和桥臂的应变电阻原值。

把箔式应变计的应变公式 $\frac{\Delta R}{R} = K_0 \epsilon_x$, 代入式(2)中得

$$U_0 \propto U \times K_0 \times \frac{FL}{bh^2E},$$

式中 K_0 金属材料应变系数。

当 F_y 作用时,对 A 应变梁来说 R_1, R_2, R_3, R_4 应变计相当于贴在悬臂梁的中轴线且对称。故它们组成的全桥电路应变输出电压可忽略。

当 F_z 作用时,对 A 应变梁中的 R_1, R_2, R_3, R_4 应变计同时产生等量的拉伸或压缩应变,它们组成的全桥电路的输出电压趋近于零。

综上所述可知:A 应变梁理论可以忽略 F_y, F_z 方向的力对其产生应变的影响,能够很好的测出 F_x 方向的力值。

同分析 A 应变梁一样,B 应变梁也能够很好的测出 F_y 方向的力,可忽略 F_x, F_z 方向上的力对它产生应变的影响。但是,B 应变梁贴应变计处距传感器加载端较 A 应变梁远。故在大小相等的力作用下,由力臂长,它的电压输出比 A 应变梁的电压输出大。

C 应变梁段的两端被固定形成双端固定梁。 $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$ 形变输出能够测出 F_z 方向的力。

它的应变公式为

$$\epsilon_z \propto \frac{LF}{bh^2E}.$$

1.3 三维传感器的标定和测力

从三维力传感器加载负载后的电压输出的数据(见表 1)表明,负载和灵敏度轴上的输出电压基本是线性关系。

表1 三维力传感器的负载和输出电压

Tab 1 Relation between load and voltage output of the three dimensions sensor $U = 5V$

负载(kgf) F_x, F_y, F_z	F_x 方向输出 电压(mV)	F_y 方向输出 电压(mV)	F_z 方向输出 电压(mV)
0,0,0	0	0	0
50,0,0	0.467	0.016	-0.010
100,0,0	0.933	0.020	-0.030
150,0,0	1.397	0.047	-0.050
200,0,0	1.863	0.077	-0.085
250,0,0	2.320	0.100	-0.110
300,0,0	2.785	0.110	-0.130
0,50,0	0	1.411	-0.040
0,100,0	0.011	2.801	-0.030
0,150,0	0.021	4.186	-0.020
0,200,0	0.030	5.550	0
0,250,0	0.042	6.947	0.011
0,300,0	0.054	8.330	0.023
0,0,50	0	0.030	0.300
0,0,100	0	0.050	0.606
0,0,150	0	0.070	0.906
0,0,200	-0.010	0.075	1.214
0,0,250	-0.010	0.090	1.520
0,0,300	-0.015	0.110	1.825

注:1kgf=9.80665N

A 应变梁电压输出的灵敏度比 B 应变梁电压输出灵敏度小,这些都与力的简化分析是吻合的,但是,数据还反映出一些非线性的情况。主要原因是:在实际工作中,精确贴片的位置难以保证;温度对零点和灵敏度的影响;维间作用力的互相影响不可能完全靠结构的对称性消除等。因此,还需对传感器进行标定与解耦处理以提高其准确度。

多维力传感器的标定问题归结为:由给定力矩阵 F 和采集应变输出电压矩阵 U 。通过解耦算法^[3,4],求系数解耦矩阵。因此,逐次在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向加力。保证 F 的逆矩阵存在的同时,由

$$U = CF$$

可以得出 C_x, C_y, C_z 再利用解耦算法。去掉它们的维间耦合 $C = f(C_x, C_y, C_z)^{[3-5]}$ 。最后得标定后的系数解耦矩阵 C 。它是个列向量线性无关 3×3 的矩阵。

因此,在实际监测时,可由采集到的电桥输出电压得出矩阵 U 。由

$$F = C^{-1}U$$

就可以求出三个方向的力值。可进一步通过矢量运算求出合力值与合力的方向。实验结果表明标定解耦后所算出的力基本上消除了维间干扰,准确度提高了 1 倍左右。从而满足了使用的要求。

2 三维力传感器在击打仪中的应用

2.1 多目标动态击打仪系统结构

多目标动态击打仪系统由三大部分组成:三维力传感器(靶体);调理电路和数据采集电路;数据处理和击打规则的实现。其结构图如图 5 所示。

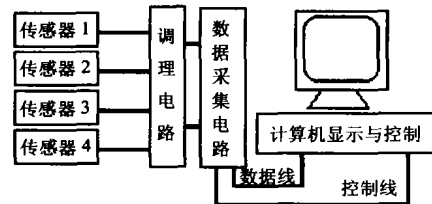


图5 击打仪原理图

Fig 5 General construction of beating instrument

2.2 软件功能

在跆拳道、拳击的运动项目中,运动员击打动作可分为按规定动作击打靶体和随意击打靶体两种情况。但每种情况都要测出击打力和击打的时间间隔,并在屏幕上显示出。要求在测力时还要对传感器维间力进行实时解耦。因此,用 VC6.0 开发出了一个具有多线程的应用软件。

在现场测试过程发现:防止运动员在击打中受伤的缓冲机构在运动员全力击打时发生震动,并导致在测力过程中的误动作和传感器的输出电压为一衰减震荡波形。在必须保留该装置的情况下,只有在软件上采取了设高击打力触发域值与在测力之后延时大约 200 ms 和把测出的最大力值作为该运动员击打力的处理方法来给以解决。

3 结束语

这种新型三维力传感器在设计时很好地遵循了多维力传感器设计的一般方法,同时也满足应用领域对传感器特性特殊要求。基于这种三维力传感器设计的多目标动态击打仪已应用在安徽省跆拳道和拳击队日常训练中,并取得了很好训练效果。

参考文献:

- [1] 李章政.材料力学[M].北京:科学出版社,1999.99-112,128-114.
- [2] 黄继昌.传感器工作原理及应用实例[M].北京:人民邮电出版社,1998.106-122.

作者简介:

方立(1977-),男,安徽合肥人,中国科学院合肥智能机械研究所传感中心硕士研究生,主要从事力学传感器,测量仪器等方面的研究。