DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.04.028

基于导电硅橡胶的力触觉传感器结构设计

何可耀

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350116)

摘 要:基于量子力学的隧道效应,探究导电硅橡胶的压阻特性,以实验的方式拟合压力和导电硅橡胶电阻值的数学模型。根据触觉传感器压力检测方式,设计多层式传感器结构,实现外 界接触力的检测,并对传感器的输出特性进行误差分析,验证了该传感器结构的合理性。 关键词:触觉传感器;导电硅橡胶;压阻特性;柔性;复合材料 中图分类号:TP242 文献标志码;B 文章编号:1671-5276(2019)04-0103-03

Structure Design of Force Tactile Sensor Based on Conductive Silicone Rubber

HE Keyao

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract : Based on the tunneling effect of quantum mechanics, the pressure resistance characteristics of conductive silicone rubber are investigated, and the mathematical model of the pressure and conductive silicon rubber resistance value is studied experimentally. According to the tactile sensor pressure detection method, the multi-layer sensor structure is designed to realize the detection of external contact force. The error analysis of the output characteristics of the sensor is carried out to verify the rationality of the sensor structure.

Keywords: tactile sensor; conductive silicone rubber; pressure resistance characteristics; flexible; composite material

0 引言

随着智能机器人技术^[1]的不断发展,触觉类传感器^[2]在机器人中的应用越来越广泛。研制出可以模拟人体五官感知功能的柔性触觉传感器是实现机器人智能化的关键环节。机器人通过包覆在外表面的触觉传感器实现与周围环境的交互,获取与外界事物接触的信息,可以保障交互的安全性。为实现触觉传感器对机器人的包覆,触觉传感器必须具备柔性特性。导电高分子材料作为一种新兴的功能材料,除了具备柔性特性外,还具备良好的导电性能以及压阻特性,可作为柔性触觉传感器的敏感材料^[3]。导电硅橡胶属于复合型高分子功能材料^[4],作为制备柔性触觉传感器的核心敏感元件,材料的性能直接影响到传感器的性能。

目前国内外对于柔性触觉传感器的研究主要集中于 压阻式、压电式、电容式等^[5]。Dahiyacaiy^[6]通过在电极上 黏贴 PVDF 薄膜,利用 PVDF 的压电特性制作传感器单元 模块,可实现 0.04 N~4 N 的检测区间。Lee^[7]等人将一些 凸起物放置在平行电容器的表面,使传感器可以同时实现 外界切向力和正压力的测量。Canavese^[8]等人以添加了 镍粉颗粒的高分子复合压阻材料作为敏感元件,制备了 8×8的阵列式触觉传感器。2004年,Takao Someya 等学者 研制出了类皮肤传感器。传感器的接触面采用掺入了石 墨的高分子聚合物,内部放置阵列式温度和压力传感器。 当外界环境发生变化时,导致高分子聚合物材料的电阻发

作者简介:何可耀(1992—),男,硕士研究生,研究方向为机械制造。

生变化。记录这一变化,实现对外部环境的感知。

本文根据导电硅橡胶的压阻特性,提出了一种可实现 力检测的柔性触觉传感器模型。基于该模型制作传感器, 并进行误差分析。

1 触觉传感器检测原理

1.1 压阻效应

导电硅橡胶在外力的作用下发生变形,填充在导电硅 橡胶中的导电粒子之间的距离发生改变,改变了导电通路 的数量,进而改变导电硅橡胶的导电性,所以导电硅橡胶 的阻值发生变化,这种现象称为体压阻效应。其微观原理 如图1所示。



根据量子力学的隧道效应,可以得到导电硅橡胶的电阻 R_a的计算公式:

$$R_{\varphi} = \frac{1}{F} \cdot \frac{t}{\omega} \cdot \frac{n^2 R_m}{m} \tag{1}$$

式中:m 是导电硅橡胶中导电填料的数目; R_m 为导电颗粒的 电阻;F 是导电硅橡胶受到的压力;t 是单位面积内形成的导 电链的数目;n 是每个导电链中所含导电颗粒的数目。用可 变系数 ζ 代替 $tn^2R_m/\omega m$,则电阻 R_ω 的公式可表示为:

$$R_{\varphi} = \frac{\zeta}{F} \tag{2}$$

从公式可以看出,根据量子物理学的隧道理论导体硅 橡胶的阻值与压力成反比关系。

1.2 力检测原理

在受到外界压力时,胶体的几何尺寸和电阻值会同时 发生变化,这种现象叫做压阻效应。在外力作用下,导电 硅橡胶中由导电粒子形成的填料网络以及形成隧道效应 的导电粒子之间的间距发生变化,进而导致胶体的电阻率 发生变化。根据导电硅橡胶的压阻特性,在不同的压力 下,电阻值和压力存在一定的唯一性关系。这个可以通过 实验,测量导电硅橡胶在不同压力下的电阻值,根据实验 数据拟合出压力和电阻值的函数关系(*R*-*F*)。则只要测 量外界压力作用下导电硅橡胶的电阻值就可以反推出外 界压力的值,实现外界压力的检测。

2 传感器结构设计及检测原理

基于稳定电流场的唯一性原理,构建特定的电流场检测接触点的位置,利用导电硅橡胶的压敏特性检测力的大小,将两者相结合,构建合理的传感器模型,可以使传感器既可以检测接触点的位置又可以检测接触力的数值。

本文提出了如图 2 所示的触觉传感器结构。该传感 器总共有 5 层,从上到下依次为:上保护层、上引出层(兼 隔离)、检测层(导电硅橡胶)、下引出层(兼隔离)、下保护 层。上下保护层采用绝缘的柔性胶体,放置在最外侧,主 要起到保护传感器的作用。上引出层一方面用来引出接 触点的电势值,另一方面和下引出组合用来测量导电硅橡 胶的电阻值。



其中,上、下引出层采用导电性能较好的材料,主要起 到引出电势值和测量电阻的作用。检测层采用导电硅橡 胶材料,利用检测层的压阻特性检测力的大小,因此要求 检测层同时具备导电性能和压阻特性。

2.1 力检测模型建立

在检测接触力的结构上,当触觉传感器受到外界压力时,上引出层、检测层、下引出层接触导通,这样就可以检测出检测层此时的电阻值,其结构如图3所示。



接触的位置受到外界压力作用后,不仅使上、下引出 层和检测层接触,检测层也发生变形而产生压阻效应,不 同压力下检测层的变形量不一样,即阻抗值不一样。因此 通过上、下引出层测出此时的阻抗值,就可以通过数学模 型(*R*-*F*)计算出接触力的数值,实现力值大小的检测。

2.2 力检测模型拟合

导电硅橡胶由 GD414 型硅橡胶、乙炔炭黑、镍粉、纳 米白炭黑以及其他助剂组成。制得的试验样品的压阻特 性如图 4 所示。



基于量子力学的隧道效应,虽然复合材料的导电性能和 导电网络的形成有关,但导电网络并不都是依靠导电颗粒相 互接触形成的。在导电粒子之间的间隙较大时,复合材料内 部的导电网络主要是由于电子在间隙中跃迁导致的,粒子间 的间隙<10 nm 时,宏观电流密度符合式(3)的关系:

$$J(\varepsilon) = J_0 \exp\left[-\left(\frac{\pi \chi \omega}{2}\right) / \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - 1\right)^2\right]$$
(3)

$$\chi = \sqrt{2mV_0\eta^2} \tag{4}$$

其中:ε₀ 表示无外力时粒子间的场强;ε 为在外力作用下 粒子间的场强;m 是电子的质量;V₀ 是势垒值;η 是普朗克 常数: ω 是导电粒子之间的间距。

导电硅橡胶在弹性变化范围内,材料所受外力F、材 料的初始厚度 h_0 、受压后的厚度h以及材料的弹性系数 之间的关系有:

$$F = k_1 \left(h_0 - h \right) \tag{5}$$

近似地认为导电粒子之间的间距 ω 与材料的厚度h的关系如式(6),k,是比例系数。

$$\omega = k_2 h \tag{6}$$

导电粒子之间的场强与厚度 h 成反比关系,如式(7) 所示:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{h}{h_0} \tag{7}$$

根据欧姆定律得:

$$R = \frac{\rho h}{S} = \frac{Jh}{ES} \tag{8}$$

所以,综合式(3)-式(8)可得:

$$R(F) = \frac{Jh}{ES} = \frac{(h_0 k_1 - F)\rho_0}{Sk_1} \cdot \exp\left(\frac{\pi \chi k_2 F^2}{2k_1 (h_0 k_1 - F)}\right) \quad (9)$$

将式(9)按泰朝公式展开待:
$$(h_0k_1-F)\rho_0$$

$$R(F) = \frac{\pi \chi k_2 F^2}{Sk_1} \cdot \left\{ 1 + \frac{\pi \chi k_2 F^2}{2k_1 (h_0 k_1 - F)} + \left[\frac{\pi \chi k_2 F^2}{2k_1 (h_0 k_1 - F)} \right]^2 + \dots \right\} = (10)$$

$$R_0 = \pi \frac{\pi \chi k_2 R_0}{2k_1 (h_0 k_1 - F)} = (\pi \chi k_2)^2 R_0$$

$$R_0 - \frac{1}{k_1 h_0} \cdot F + \frac{1}{2k_1^2 h_0} F^2 + \frac{1}{8k_1^2 h_0 (h_0 k_1 - F)} F^4 + \frac{1}{2k_1^2 h_0 (h_0 k_1 - F)} F^4$$

式(10)可以简化为:

$$R(F) = R_0 + AF + BF^2 + CF^4 + \cdots$$
 (11)

将图 4 中的数据通过最小二乘法进行二阶拟合得: $R(F) = 135.610 \, 3F^2 - 1\, 204.051 \, 3F + 4\, 319.783 \, 9 \quad (12)$ 拟合结果如图 5 所示。



图 5 压阻模型二阶拟合

从图 5 中可以看出, 二阶拟合下的数学模型与实验数 据具有较高的拟合度。

触觉传感器误差分析 3

接触位置力值大小主要根据测量的压阻特性来测量, 因此测量层是否存在电场对力值的测量没有影响。根据 传感器的结构模型,制作如图6的力值误差测量结构。



不同的接触面积、同样大小的压力下,测量层产生的 形变不一样,这会在一定程度上影响测量的准确度。因 此,可以通过改变压块的面积,模拟不同的接触面积,分析 接触面积的改变对测量精度的影响。

3.1 接触面积对力检测精度的影响

压力的施加选用 ZO-21B-4 小型压力试验机,所以通 过改变压力机与上引出层的接触面积来模拟不同接触面 积的情况。施力位置对力检测的精度影响不大,所以随机 选取一个固定的位置,分别采用5mm、6mm、7mm、8mm、 9mm、10mm、11mm、12mm 为接触半径.2N 的压力进行力 值误差检测。根据测量结果,力值检测误差与其接触面积 的关系如图7所示。



图 7 接触面积对力检测精度的影响

从图7可以看出,力检测误差基本保持在0.4%以内, 在不同的接触面积下,误差的浮动并不是很大,且没有明 显的相关性。虽然随着接触面积的增加,在同一压力下, 测量层所受压强变小,变形量也会随之减小。根据体压阻 效应以及实验数据可以得出,变形量减小后电阻率会变 大。但根据电阻率公式 $R = \rho L/S$, 电阻率 ρ 增加、L 减小的 同时面积 S 也随之增加。因此,在不同的接触面积下检测 到的电阻值变化不大。这从一定程度上证明了这种力检 测方式的可行性。

3.2 不同接触力下的力检测精度

根据上一节的实验结果,已经得知接触面积的大小对 力检测精度的影响不大。因此本节就采用固定的接触面 积下,随机选取4处位置进行不同压力的精度检测。这里 选用 10 mm 作为接触半径,压力变化范围为 0~5 N,测试

4 结语

针对涡轮螺旋桨动力飞机,开展了螺旋桨和发动机性 能仿真建模研究,基于飞行器需用推力开展了螺旋桨巡航 阶段桨发匹配优化建模研究,在此基础上提出了桨发匹配 优化思路。采用上述模型,计算了某型飞机巡航阶段桨发 匹配性能,并进行了巡航剖面优化,优化后的飞机巡航航 程提升了 13%,显著地提升了巡航性能。充分说明了开 展桨发匹配性能优化的必要性和意义。

参考文献:

- [1] 刘沛清. 空气螺旋桨理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航 天大学出版社,2006.
- [2] Freeman, H. B. Comparison of Full Scale Propeller Having RAF -6and Clark-Y Airfoil Sections[R]. NACA Rept, 1943: 378-381.
- [3] David Biermann, Robert N. Conway. PropellerCharts for the determination of the rotational speed for the maximum ratio of the

propulsive efficiency to the specific fuel consumption [R]. NACA. Report, 1940: 749-751.

- [4] 亚历山大洛夫. 空气螺旋桨[M]. 王适存,译. 北京: 国防工 业出版社,1954.
- [5] 刘远强. 基于片条理论的螺旋桨性能计算[J]. 沈阳航空航天 大学学报 2013,30(1):43-46.
- [6] 邓志伟,黄向华,田超. 涡桨发动机螺旋桨实时建模技术[J]. 航空动力学报,2014,29(2):434-440.
- [7] 田泽. 典型飞行剖面下变几何 TBCC 特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [8] 吴宏升. 燃气轮机总体与空气系统耦合计算方法研究与匹配 分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [9] Joachim Kurzke. GasTurb 10 User's Manual [M]. Germany: MTU Aero Engines, 2004.
- [10] 张锡金. 飞机设计手册(第6册): 气动设计[M]. 北京: 航 空工业出版社,2006.

收稿日期:2018-02-02