DOI: 10.3901/JME.2019.08.014

基于 Galfenol 合金的高灵敏度冲击力传感器*

李 波¹ 杨家斌¹ 舒 亮² 朱彦超¹ 陈定方¹

(1. 武汉理工大学智能制造与控制研究所 武汉 430063;

2. 温州大学浙江省低压电器智能技术重点实验室 温州 325035)

摘要: 目前基于压电材料等的冲击力传感器由于其材料本身的脆性限制了其应用范围, Galfenol 合金具有中等磁致伸缩以及较高机械强度, 更适用于对冲击载荷的检测。提出以 Galfenol 合金(铁-镓合金)为敏感元件的磁致伸缩冲击力传感器, 提出三种不同结构的敏感元件(棒、等截面矩形梁与变截面工字梁), 通过建立动力学模型对比其整体的传感性能, 并采用正交设计的方法对变截面工字梁的尺寸进行优化设计。动力学模型的对比表明, 基于变截面工字梁的传感器灵敏度最高。对基于变截面工字梁的传感器进行试验研究, 并采用麦夸特法对传感器进行标定, 试验结果表明该传感器可实现对冲击力准确测量, 平均误差不超过 5.73%。该传感器可实现对瞬态冲击的检测, 拓宽了 Galfenol 合金的动态检测领域。冲击载荷可直接作用在传感器的 Galfenol 合金梁上, 不需要额外的保护措施, 结构更简单。通过结构优化对传感器的灵敏度作了进一步的提升。

关键词: 磁致伸缩; 冲击力传感; Galfenol 合金; 正交设计; 麦夸特法

中图分类号: TB34

High Sensitivity Impact Force Sensor Based on Galfenol Alloy

LI Bo¹ YANG Jiabin¹ SHU Liang² ZHU Yanchao¹ CHEN Dingfang¹

(1. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063;

2. The Key Laboratory of Low-Voltage Apparatus Intellectual Technology of Zhejiang, Wenzhou University, Wenzhou 325035)

Abstract: The present impact force sensor based on piezoelectric materials is limited in application range due to the material brittleness. Galfenol alloy is a steel like material with moderate magnetostrictive and high mechanical strength properties, which is more applicable for impact detection. A Galfenol alloy based impact force sensor is presented. Three different configurations of sensitive elements including uniform rod, rectangular beam, and un-uniform I beam, are designed. The continuous kinetic models are developed to compare the total sensing performance, and the optimal size of the un-uniform I beam is obtained by employing the orthogonal design method. The kinetic models indicate that the un-uniform I beam based sensor demonstrates optimal sensitivity compared with the other two designs. The un-uniform I beam is constructed experimentally and the sensor is calibrated via a Levenberg-Marquardt fitting method. Experimental results show that the impact force can be detected accurately with a limited measurement error within 5.73 %. The proposed sensor can be used to detect instantaneous impact, which broadening the application of Galfenol alloy in dynamic force detection. The impact can be applied directly on the sensitive element with no extra protection, leading to a compact structure. The sensitivity of the sensor is further improved by structural optimization.

Key words: magnetostrictive; impact force sensing; Galfenol alloy; orthogonal design; Levenberg-Marquardt method

0 前言

冲击力是一种瞬态现象, 作用时间极短, 但是能量数值可以达到很大^[1]。对冲击力进行精确测量,

需要借助高度专业化的设备。传统的电阻应变片是较早用来检测冲击力的一种方法^[2], 但是该方法对应变片的装配精度要求较高, 线性工作区间小, 动态响应差^[3]。

智能材料的出现为冲击力传感器的开发提供了新的方向, 该材料的属性会根据外加力而改变, 这些特殊性质可被用于力传感器的开发。压电材料(石英晶体^[4-8]、压电聚合物 PVDF^[9-12]等)、光纤光栅^[13-16]、磁致伸缩材料^[17-25]是典型的用于制造冲击

* 国家自然科学基金(51205293)、浙江省自然科学基金(LY15E050011)、中国博士后科学基金(2015M571904)和武汉理工大学研究生优秀学位论文培育(2016-YS-078)资助项目。20180809 收到初稿, 20190121 收到修改稿

力传感器的智能材料。

压电材料比如石英晶体在沿着一定方向受到外力作用时, 内部会产生极化现象, 使带电质点发生相对位移, 从而在晶体表面上产生大小相等符号相反的电荷^[4]。文献[5-7]都对基于石英晶体的动态力传感器进行了研究, 石英晶体传感器精度高, 响应速度较快, 动态响应特性好, 但是材料较脆, 不能直接承受较大的载荷, 需要额外的保护装置, 增加了传感器结构复杂性, 限制了其在工程中的应用范围^[8]。

基于类似的测量原理和测量方法, PVDF 也可被用于力载荷的检测^[9-11]。PVDF 属于压电聚合物中的一种, 是一种机械强韧, 柔韧, 低密度聚合物, 可以以薄膜形式使用, 当结晶成 β 相时, PVDF 表现出压电和热电性质, 将机械能转换成热能^[9-10], 反之亦然。文献[10-11]研究了基于 PDVF 的冲击力传感器, PVDF 两层电极之间的间隙非常小, 如果薄膜正面承受较大的冲击, 很容易造成电极短路, PVDF 正面安装在冲击应力作用的路径上会影响输出的准确性甚至损坏传感系统^[11-12], 为避免 PDVF 的损坏, 文献[10]采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为基材以保护传感器免受外部冲击并维持其结构形式, 文献[11]采用 1-3 模态对碰撞应力进行检测的方法, PVDF 贴在被测目标的侧面且远离冲击力作用面。这些方法增加了传感器的复杂程度, 此外, 与应变片一样, PVDF 通过黏合剂粘贴在试件表面, 粘贴效果极大地影响输出的准确性^[12]。

采用光纤光栅的弹光效应, 通过对布拉格波长的变化的检测, 也可以实现被测结构应变的测量^[13-14]。光纤的响应速度非常高, 然而由于光纤光栅比较脆弱, 在恶劣工作环境中非常容易破坏, 因而需要对其进行封装后才能使用^[15]。这一特性决定了裸光纤光栅无法直接用于压力测量, 必须配合外置的封装保护与增敏^[16], 增大了传感器的体积与复杂程度。此外, 光纤光栅需要高精密的设备对传感信号进行解调, 光纤光栅的信号解调, 即波长微小移位的检测问题不完善, 极大地限制了光纤光栅传感器的应用^[15]。

磁致伸缩材料是依靠自身的磁致伸缩逆效应来测量外载荷, 即当超磁致伸缩材料承受外载荷时, 其内部的磁化状态会发生变化, 通过测量这些变化便可得知外载荷的大小^[17]。超磁致伸缩材料(简写 GMM, 牌号 Terfenol-D)^[18-19]和铁-镓合金(牌号 Galfenol)^[20-21]是两种典型的磁致伸缩材料。Terfenol-D 也比较脆, 其拉伸强度仅为 28 MPa^[22], 不能承受较大的载荷, 这极大地限制了其在冲击力

检测方面的应用。

与 Terfenol-D 不同的是, Galfenol 具有磁致伸缩逆效应的同时, 具备良好的机械性能, 抗冲击能力强, 可以进行轧制、冲击、锻压、切割等, 其最大拉伸应力超过 500 MPa, 压缩强度超过 800 MPa^[22]。可见, 以 Galfenol 合金为敏感元件的力传感器适用于对冲击载荷的测量。现阶段大多数的传感器都是基于棒结构的敏感元件, 灵敏度相对较低^[23]。文献[24]以杆状结构的 Galfenol 合金为敏感元件, 建立了一套封闭式的力传感器结构。该传感器可实现对准静态的交变载荷进行测量。文献[25]则研究了利用 Galfenol 薄片的纵弯进行力检测的方法。这些研究都局限于静态和准静态应力的测量, 有关 Galfenol 合金在瞬态碰撞冲击高灵敏度检测方面的研究, 仍然是一项全新的课题。

本文以 Galfenol 合金为敏感元件, 设计了一种可实现对冲击力进行直接测量的力传感器。冲击力可直接作用在传感器敏感元件上, 不需要额外的保护装置, 结构更简单。传感器的主体采用变截面工字梁结构, 其灵敏度相对于文献[23-24]中的棒结构的力传感器可得到极大的提高。通过建立传感器的动力学模型对传感器的灵敏度进行对比分析, 其中变截面工字梁的尺寸通过正交设计确定。加工出传感器样品并进行试验研究, 通过试验确定传感器的最佳偏置磁场, 通过麦夸特法对传感器进行标定, 并且通过试验验证标定函数的准确性。

1 线性本征模型

基于 Galfenol 合金的力传感器的传感规律是依靠磁致伸缩材料的磁致伸缩逆效应, 应力的变化可以改变 Galfenol 合金的内部磁化率, 从而引起磁场强度的变化, 因此应力变化量可以通过测量磁场强度的变化来得到。当偏置磁场与偏置应力固定, Galfenol 合金的磁化率随着外部载荷的改变呈现非线性, 该非线性变化包括死区、线性区和饱和区, 这三个磁化率区域由 Galfenol 合金的磁滞产生^[24]。其中, 磁化率的线性区可以用来实现力检测。饱和以下的线性磁化率可以描述为^[26]

$$\chi(T) = \frac{\mu_0 M_s^2}{2K_4 - 3\lambda_{100}T} \quad (1)$$

式中, χ 为磁化率; T 为应力; μ_0 为真空磁导率; M_s 为饱和磁化强度; K_4 为四阶各向异性系数; λ_{100} 为<100>向磁致伸缩系数。

磁感应强度的计算公式为

$$B = (\chi + 1)\mu_0 H \quad (2)$$

式中, B 和 H 分别表示磁感应强度与磁场强度。

传感器的灵敏度定义为输出的磁感应强度与输入的冲击力的比值, 同样的输入冲击力作用下, 输出的磁感应强度越大则传感器的灵敏度越大。由式 (1)、(2) 可知, 磁化率变化量随着应力变化量的增加而增加, 磁感应强度由磁化率与偏置磁场强度决定。当偏置磁场强度一定时, 磁化率的变化量越大则磁感应强度的变化量越大, 施加的外部冲击力则可用由磁化率引起的磁感应强度变化量来描述。因此, 更高的应力变化量也就意味着更高的灵敏度。应力 T 与应变 ε 的关系为

$$T = E \cdot \varepsilon(F) \quad (3)$$

式中, F 表示外部冲击载荷; E 为弹性模量, 弹性模量 E 为磁场与应力的函数, 为简化模型, 在此考虑恒定的 E , 因此, 因此应力可用应变来表示, 即相同偏置磁场与输入冲击力下敏感元件产生的应变越大, 则传感器的灵敏度就越大。

为优化传感器的灵敏度, 研究了 3 种不同结构的敏感元件, 包括棒、等截面矩形梁、变截面工字梁, 分别建立三种结构的敏感元件动力学模型求解各个结构的冲击载荷与内部应变的关系来分析传感器的总体传感性能。

2 棒结构敏感元件

现阶段大多采用棒结构的 Galfenol 合金作为传感器的敏感元件, 通过建立 Galfenol 合金棒的动力学模型来计算棒的内部应变, 从而对基于 Galfenol 合金棒传感器的灵敏度进行表征。

以连续系统为动力学模型来建立等截面棒沿轴向 x 的振动微分方程, 并采用振型叠加法进行求解动力学模型为^[27], 得到应变 ε 与固有频率 ω_i 的计算式

$$\varepsilon(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x} \cdot \frac{\varphi_i(L_R)}{\omega_{di}} \cdot \int_0^t F(\tau) \exp(-\zeta_i \omega_i(t-\tau)) \sin \omega_{di}(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

$$\omega_i = \frac{(2i-1)\pi}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

式中, L_R 表示杆的长度; ω_{di} 为第 i 阶阻尼振动频率; ζ_i 表示第 i 阶阻尼系数; F 为作用在杆上的集中力; ρ 为密度; $\varphi_i(x)$ 为振型函数, 表达式为^[27]

$$\varphi_i(x) = D_i \phi_i(x), \quad \phi_i(x) = \sin \frac{\omega_i}{\sqrt{E/\rho}} x \quad (6)$$

$$D_i = \sqrt{\frac{1}{\rho S} \int_0^{L_R} \phi_i(x) \phi_i(x) dx}$$

式中, S 表示杆的截面积。

然而, Galfenol 合金棒结构的轴向刚度相对较大, 这也就导致了其内部的应变相对较小。从前面的线性本征模型可以知道, 相同输入冲击力作用下的, 较小的应变也就意味着较小的灵敏度。因此, 棒结构的灵敏度也就相对较小, 无法满足日益增长的高灵敏度力检测的要求。

3 等截面矩形梁敏感元件

梁结构在承受弯曲变形时可产生更大的压缩应变与拉伸应变, 因此可用于制造更高灵敏度的传感器。常用的梁结构包括双晶片梁(两层磁致伸缩材料)^[28], 复合悬臂梁(磁致伸缩材料与基底材料复合结构)^[29], 以及单层磁致伸缩梁。然而, 双晶片梁中的单层 Galfenol 合金薄片产生严重的剪切变形, 导致磁感应强度的变化量减少; 复合悬臂梁的 Galfenol 合金层与被动层通过黏合剂粘贴在一起, 强度与可靠性有限, 其粘贴工艺极大地影响力传感的准确性。因此, 选用单层磁致伸缩梁作为传感器的敏感元件。

Galfenol 合金梁一端固定, 一端自由, 当在其自由端施加冲击力时, 梁发生弯曲变形, 中性面的一侧受压, 另一侧受拉。因此, 这两部分产生相反的磁感应强度变化, 从而在信号拾取线圈上产生相反的电压。为避免这两部分相反的电压相互抵消, 施加的偏置磁场使得 Galfenol 合金的磁致伸缩临近饱和。这时, 增大应力将会使得磁化率进入饱和区, 不再随应力的增加而变大; 减小应力则会导致磁化率减小。所以, 受拉的一侧不会输出磁感应强度, 而受压的一侧则可以输出反映冲击力的有效磁感应强度。因此, 梁结构传感器的传感规律同样遵守前文的线性本征模型, 即应变越大, 灵敏度越大。

较常用的典型梁结构为等截面矩形梁, 传感器的动力学模型可以简化为悬臂梁的振动。同样, 这里也需要考虑阻尼的影响, 悬臂梁的高频振动需同时考虑外阻尼与内阻尼的影响。外阻尼力 f_D 与梁体的振动速度成正比, 内阻尼产生的阻尼力 $\sigma_D(x)$ 与材料的应变速度有关。假设应变阻尼应力沿着梁截面高度方向呈线性分布, 则这些阻尼应力产生阻尼弯矩, 即

$$M_D(x) = -c_s I(x) \frac{\partial^3 y(x, t)}{\partial x^2 \partial t} \quad (7)$$

式中, $I(x)$ 为截面惯性矩; c_s 为应变阻尼系数; $y(x, t)$ 为距离悬臂梁固定端 x 处 t 时刻的挠度。

对梁结构进行微段分析, 如图 1 所示。图中, 梁被施加单位力 $f(x, t)$ 与单位弯矩 $m(x, t)$, F_s 、 M 与 f_d 分别表示剪力、弯矩以及外阻尼力。微段上的截面弯矩 M 应该包括弯曲变形弯矩与应变阻尼弯矩, 因此, 考虑内外阻尼的悬臂梁振动方程为

$$\rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(c_s I \frac{\partial^3 y}{\partial x^2 \partial t} + EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = f(x, t) - \frac{\partial m(x, t)}{\partial x} \quad (8)$$

图 1 梁的微段分析

采用振型叠加法求解梁的横向位移 y [27]

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{\varphi_i(x) \cdot \varphi_i(L_B)}{M_i \omega_{di}} \cdot$$

$$\int_0^t F(\tau) \cdot \exp(-\zeta_i \omega_i(t-\tau)) \cdot \sin \omega_{di}(t-\tau) d\tau \quad (9)$$

式中, L_B 为梁的长度; ω_i 与 ω_{di} 为第 i 阶固有频率与阻尼振动频率; $M_i = \int_0^{L_B} \rho S \varphi_i^2(x) dx$ 为第 i 阶广义质量; F 为作用在梁端部的集中力。

由梁的近似挠度曲线公式 $y'' = \frac{M(x)}{EI}$ 与应变公式 $\varepsilon = \frac{y_0 \cdot M(x)}{EI}$ 可得挠度位移与应变的关系公式

$$\varepsilon = y'' \cdot y_0 \quad (10)$$

式中, y_0 为距中性轴的距离。

因此, 将上述的位移式(9)转换为应变公式, 则

$$\varepsilon(x, t) = \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{\frac{\partial^2 \varphi_i(x)}{\partial x^2} \varphi_i(L_B)}{M_i \omega_{di}} \cdot$$

$$\int_0^t F(\tau) \cdot \exp(-\zeta_i \omega_i(t-\tau)) \cdot \sin \omega_{di}(t-\tau) d\tau \quad (11)$$

等截面悬臂梁横向振动的固有振动频率与振型函数表达式为 [27]

$$\omega_i = (\beta_i L_B)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho S L_B^4}} \quad i = 1, 2, \dots \quad (12)$$

$$\phi_i(x) = (\cos \beta_i x - \cosh \beta_i x) + \tau (\sin \beta_i x - \sinh \beta_i x)$$

$$\varphi_i(x) = D_i \phi_i(x), \quad \tau = \frac{\sin \beta_i L_B - \sinh \beta_i L_B}{\cos \beta_i L_B + \cosh \beta_i L_B} \quad (13)$$

式中, $\beta_1 = \frac{1.875}{L_B}$, $\beta_2 = \frac{4.694}{L_B}$, $\beta_3 = \frac{7.855}{L_B}$, $\beta_i \approx \frac{2i-1}{2L_B} \pi$ ($i \geq 3$); 系数 D_i 由归一化广义质量方程 $M_i = 1$ 确定为

$$D_i = \sqrt{\frac{1}{\rho S} \int_0^{L_B} \phi_i(x) \phi_i(x) dx} \quad (14)$$

将得到的频率以及对应的振型函数代入式(11)即可求解等截面矩形梁的振动方程, 得到等截面矩形梁的应变与输入冲击载荷的关系, 进而分析其传感特性。

4 变截面工字梁敏感元件

4.1 变截面工字梁动力学模型

梁的截面形状极大地影响其应变输出, 为进一步提高传感器的灵敏度, 采用变截面的梁作为敏感元件。变截面梁的截面采用工字梁, 梁宽沿 x 轴向线性变化。变截面梁的振型函数较为复杂, 采用 Rayleigh-Ritz 法进行求解。

图 2 为变截面工字梁几何模型, 图中 L_B 、 H 、 W 分别表示梁长、梁高、梁宽, 下标 a 、 b 表示固定端与自由端, h 、 w 分别表示工字梁的槽高与槽宽。距离固定端 x 处的梁宽 $W(x)$ 、截面积 $S(x)$ 、截面惯性矩 $I(x)$ 分别表示为

$$\begin{aligned} W(x) &= W_a + (W_b - W_a)x/L_B \\ S(x) &= S_a [1 + (e-1)x/L_B] \\ I(x) &= I_a [1 + (e-1)x/L_B] \end{aligned} \quad (15)$$

式中, 固定端的面积与惯性矩为 $S_a = W_a H (1 - kr)$, $I_a = W_a H^3 (1 - kr^3)/12$; $e = W_b/W_a$ 为固定端与自由端的梁宽之比; $k = w/W$ 为槽宽与梁宽之比; $r = h/H$ 为槽高与梁高之比。取振型函数为

$$\varphi_i(x) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \phi_{ij}(x) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中, 其中满足几何边界条件振型基函数为: $\phi_{ij}(x) = (1 - x/L_B)^{j-1} (x/L_B)^2$, a_{ij} 表示权重系数。由 Rayleigh-Ritz 法可得关于 a_{ij} 的线性齐次方程组, 即

$$(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}) \mathbf{a}_{ij} = 0 \quad (17)$$

式中, $\mathbf{K} = (k_{ij})$ 与 $\mathbf{M} = (m_{ij})$ 分别表示刚度系数矩阵与质量系数矩阵

$$m_{ij} = \int_0^L \rho S(x) \phi_i \phi_j dx = \rho S_a \int_0^L [1 + (e-1) \frac{x}{L_B}] \phi_i \phi_j dx$$

$$k_{ij} = \int_0^L EI(x) \phi_i'' \phi_j'' dx = EI_a \int_0^L [1 + (e-1) \frac{x}{L_B}] \phi_i'' \phi_j'' dx$$

图2 变截面工字梁几何模型

取前5项进行计算,可得前五阶刚度系数矩阵 K 与质量系数矩阵 M

$$K = \frac{EI_a}{105L^3} \bar{K},$$

$$\bar{K} = \begin{pmatrix} 210(e+1) & -210e & 0 & 0 & 0 \\ -210e & 105(3e+1) & -42(e-1) & -21(e-1) & -12(e-1) \\ 0 & -42(e-1) & 42(e+1) & 6(2e+5) & 3(e+7) \\ 0 & -21(e-1) & 6(2e+5) & 9(e+3) & 5e+22 \\ 0 & -12(e-1) & 3(e+7) & 5e+22 & 4(e+5) \end{pmatrix}$$

$$M = \rho S_a L \bar{M},$$

$$\bar{M} = \begin{pmatrix} \frac{5e+1}{30} & \frac{5e+2}{210} & \frac{5e+3}{840} & \frac{5e+4}{2520} & \frac{e+1}{1260} \\ \frac{5e+2}{210} & \frac{5e+3}{840} & \frac{5e+4}{2520} & \frac{e+1}{1260} & \frac{5e+6}{13860} \\ \frac{5e+3}{840} & \frac{5e+4}{2520} & \frac{e+1}{1260} & \frac{5e+6}{13860} & \frac{5e+7}{27720} \\ \frac{5e+4}{2520} & \frac{e+1}{1260} & \frac{5e+6}{13860} & \frac{5e+7}{27720} & \frac{5e+8}{51480} \\ \frac{e+1}{1260} & \frac{5e+6}{13860} & \frac{5e+7}{27720} & \frac{5e+8}{51480} & \frac{5e+9}{90090} \end{pmatrix} \quad (18)$$

代入相应的 e, k, r 值求解上述特征值问题即可求得频率 ω_i^2 与系数 a_{ij} , 然后可以得到频率以及实际振型函数, 将频率、振型函数以及质量矩阵代入式(11)即可求解变截面梁的阻尼振动方程。

4.2 变截面工字梁尺寸优化设计

变截面工字梁的尺寸(槽宽、槽高、梁宽)极大地影响其输出特性, 文中将变截面工字梁的尺寸归纳为三个参数(自由端与固定端梁宽之比 e , 槽宽与梁宽之比 k , 槽高与梁高之比 r)进行描述, 采用正交设计法^[30]对变截面工字梁的尺寸进行优化设计。灵敏度为优化结果的主要判断指标, 根据前文的线性本构模型可知灵敏度可由应变表征, 因此悬臂梁的灵敏度 v_1 采用变截面工字梁的应变与等截面矩形梁的应变的比值进行表征; 此外, 悬臂梁的一阶固有频率 v_2 与强度 v_3 越大, 则以其为敏感元件的传感器的频率带宽以及承载能力越大。因此, 优化设计过程中, 也将悬臂梁的一阶固有频率 v_2 与强度 v_3

纳入优化结果的判断指标。其中, 一阶固有频率 v_2 表示为变截面工字梁的一阶固有频率与等截面矩形梁的一阶固有频率的比值; 强度 v_3 表示为变截面工字梁的固定端的截面惯性矩与等截面矩形梁的固定端的截面惯性矩的比值。

考虑到加工、材料等各方面的条件, 文中将优化变量的变化范围设定为 0.3~0.7, 步长为 0.1, 即 5 种变化水平。采用全面试验的方法则有 125 种水平组合, 而采用正交设计的方法则可极大地减少水平组合的数目, 仅 25 种水平组合。正交设计法就是利用排列整齐的表(正交表)来对目标进行整体设计、综合比较、统计分析, 实现通过少数的分析次数找到较好的结果, 这种设计法是从大量的目标点中挑选适量的具有代表性的点, 利用已经造好的表格——正交表来安排设计过程并进行数据分析的方法。

本次设计选用的正交表为 $L_{25}(5^6)^{[31]}$, 其中, “L”代表正交表; L 下角的数字“25”表示所有优化变量的 25 种水平组合; 括号内的指数“6”表示最多允许安排的优化变量数目是 6 个; 括号内的数“5”表示每个变量有 5 种变化(5 种水平)。

试验采用直观分析法对数据进行分析, 由于有多个指标, 采用指标叠加法对 3 个指标进行综合分析。综合指标 $v = a_1 v_1 + a_2 v_2 + a_3 v_3$, 其中系数根据各指标的重要程度以及指标的性质确定, 系数的取值如下: $a_1=0.5$, $a_2=0.5$, $a_3=1.6$ 。首先计算各个水平组合的指标 v , 然后计算所有包含该变量水平的组合的指标的平均值得到各个优化变量的水平效应值(表 1)。

表1 变截面工字梁的水平效应值

水平	梁宽比 e	槽宽比 k	槽高比 r
0.7	2.830 7	3.085 6	3.011 1
0.6	2.914 1	3.062 8	3.032 3
0.5	3.008 6	3.033 1	3.044 9
0.4	3.127 7	3.004 8	3.045 3
0.3	3.285 8	2.980 7	3.033 3

由表 1 可知, 梁宽比 m 在 0.3 水平效应值最大, 槽宽比 k 在 0.7 水平效应值最大, 槽高比 r 在 0.4 水平效应值最大, 即优化结果为: $e=0.3$, $k=0.7$, $r=0.4$ 。

将优化结果代入式(17)求解特征值问题即可得到频率 ω_i^2 以及对应的振型函数的系数 a_{ij} , 结合式(16)即可得到振型函数。将得到的频率以及振型函数代入式(11)即可求解变截面工字梁的动力学模型。

5 解析模型对比分析

以幅值 200 N, 宽度 0.1 ms 的三角脉冲激振力作为输入, 对比不同结构传感器的应变输出, 进而反应灵敏度的对比关系。参与对比的敏感元件结构包括棒结构(A), 等截面矩形梁结构(B)与变截面工字梁结构(C), 棒结构(A)的尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 两种梁结构的尺寸如表 2 所示。

表 2 敏感元件的尺寸

结构	等截面矩形梁	变截面工字梁
长 L/mm	30	
宽 W/mm	8	
高 H/mm	4	
梁宽比 e	—	0.3
槽宽比 k	—	0.7
槽高比 r	—	0.4

将尺寸参数代入前文建立的模型进行计算, 由于里兹法的基函数采用前五阶进行计算, 第五阶频率误差较大, 所以此处只计算前四阶频率进行对比(表 3)。

表 3 敏感元件频率

频率阶数	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶
A	6 903	20 709	34 514	48 320
B	1 982	12 423	35 054	68 167
C	3 203	16 036	42 839	85 632

由于第一阶振动占总振动的主要贡献, 所以此处仅计算各结构的第一阶振动的应变输出进行对比分析。由前文的线性本征模型(1)~(3)可知, 在偏置磁场与输入冲击力一定的情况下, 应变越大, 则传感器的灵敏度越大。棒结构的敏感元件的应变沿轴向变化; 由第 3 节可知, 梁结构的敏感元件仅受压部分输出有效的磁感应强度变化量, 且内部的应变沿轴向与厚度方向变化。因此, 采用积分均值应变来描述敏感元件的整体输出应变, 进而对传感器的灵敏度进行描述

$$\bar{\varepsilon}_R = \frac{\int_0^{L_R} \varepsilon(x) dx}{L_R} \quad \bar{\varepsilon}_B = \frac{\int_0^{\frac{H}{2}} \int_0^{L_B} \varepsilon(x, y_0) dx dy_0}{L_B \cdot \frac{H}{2}} \quad (19)$$

式中, $\bar{\varepsilon}_R$ 为棒的积分均值应变, $\bar{\varepsilon}_B$ 为两种梁的积分均值应变。三种敏感元件结构的整体输出应变如图 3 所示。

为了让各结构的对比更加直观清晰, 计算各结构的频率响应得到伯德图(图 4)进行对比。

图 3 三种结构的输出应变对比

图 4 应变-激励频率伯德图

从表 3、图 3 与图 4 可知, 棒结构的带宽最大, 但是两种梁结构的灵敏度是棒结构的 12.27 倍以上; 另外, 两种梁结构中, 变截面工字梁的灵敏度与频率带宽最大(灵敏度为等截面矩形梁的 203.61%, 频率带宽为等截面矩形梁的 161.57%)。所以, 选择变截面工字梁作为传感器的敏感元件进行加工与试验研究。

6 试验

以前文选定的变截面工字梁结构加工出 Galfenol 梁敏感元件以及冲击力传感器样机进行试验研究, 搭建试验平台, 所需要的试验仪器如图 5 所示。Galfenol 梁的退火应力约为 -15 MPa, 传感器设有一个激励线圈, 激励线圈通过恒流源的激励电流产生的磁场通过磁回路给 Galfenol 梁施加一定大小的偏置磁场, 通过粘贴在 Galfenol 悬臂梁表面的霍尔元件(YS49E)测量; 通过冲击力锤(KSI-728A002)给 Galfenol 梁施加一定幅值与宽度的脉冲力, 信号提取线圈输出电压信号, 将该电压信号输入到磁通计(Fluxmeter480)便可得到 Galfenol 梁上的磁感应强度的增量; 冲击力锤输出的冲击力信号通过信号调

理仪(KSI-8201)调理后输出, 试验数据由示波器(TPS2024B)进行采集。

(f) 变截面梁冲击力传感器
图 5 主要试验仪器

6.1 确定最佳偏置磁场

Galferol 合金的整体磁致伸缩是所有磁畴的磁致伸缩的累积的结果, 而磁畴的磁致伸缩取决于的磁场强度与应力^[32]。磁场作用下可使得磁畴向平行于磁场方向旋转, 应力作用下可使得磁畴向垂直于负载方向旋转。对于 Galferol 梁, 偏置磁场需要使 Galferol 梁的磁致伸缩接近饱和, 从而避免前文所述的抵消效应。当 Galferol 梁的磁致伸缩饱和后, 增加偏置磁场几乎不会影响灵敏度的大小。为了确定冲击力传感器的最佳偏置磁场, 即使 Galferol 梁的磁致伸缩接近饱和的偏置磁场, 采用恒流源依次给激励线圈施加 0.08 A 到 0.98 A 的激励电流, 每隔 0.05 A 测试一次, 同时通过冲击力锤给 Galferol 悬臂梁施加幅值基本一致的冲击力(50 N ± 0.1 N)。

Galferol 悬臂梁冲击力传感器的灵敏度定义为输出磁感应强度与输入冲击力的比值, 磁通计测量的磁感应强度为 $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 脉冲锤输入的对应力为 $\mathbf{F} = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ 则灵敏度为

$$\text{Sen} = \left(\frac{b_1}{f_1}, \frac{b_2}{f_2}, \dots, \frac{b_n}{f_n} \right) \quad (20)$$

传感器的磁特性具有较强的非线性, 前文提到,

该非线性变化包括死区、线性区和饱和区, 在偏置磁场的作用下, Galferol 梁的磁化强度饱和, 此刻在冲击力的作用下, 梁受压的一侧则可以输出反映冲击力的有效磁感应强度。由于冲击力是从零开始逐渐增加到峰值, Galferol 梁受压部分的磁化强度从饱和值开始下降, 这就意味着产生的应力将会有一小部分分布在饱和区, 一部分分布在线性区, 这也就导致了灵敏度也具有非线性。为了更好地反映灵敏度与偏置磁场的关系, 此处将灵敏度的最大值与平均值进行比较, 最大值 $\text{Sen}_{\max}$ 与均值 Sen_{ave} 计算公式为

$$\text{Sen}_{\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{f_i} \quad \text{Sen}_{\max} = \max \left(\frac{b_1}{f_1}, \frac{b_2}{f_2}, \dots, \frac{b_n}{f_n} \right) \quad (21)$$

图 6 为不同磁场强度的偏置磁场作用下的灵敏度的均值与最大值的对比关系。通过重复性试验对灵敏度与偏置磁场的关系进行分析。由图 6 可知, 当偏置磁场的磁场强度小于 14 kA/m 时, 灵敏度的幅值的最值与均值灵敏度随偏置磁场增大而增大; 当偏置磁场的磁场强度大于 14 kA/m 时, 增大偏置磁场时灵敏度的幅值的最值与均值增长都较平缓, 开始趋于饱和状态。因此, 传感器的最佳偏置磁场为 14 kA/m, 激励线圈中对应的直流电流为 0.58 A。

图 6 灵敏度与偏置磁场的关系

6.2 传感器的标定

为了便于实际冲击力的测量, 需要对 Galferol 梁冲击力传感器的输出电压(磁通计输出电压)与输出的冲击力的关系进行标定。在偏置磁场的磁场强度不变的情况下, 影响 Galferol 梁冲击力传感器的磁特性的主要因素便是输入的冲击力, 其本质为 Galferol 梁内部的应力状态与磁化率的关系。Galferol 合金的应力-磁化率曲线具有较强的非线性, 采用线性磁化率公式标定误差较大, 因此, 此处采用试验数据进行拟合输出磁感应强度与输入冲

击力的关系, 将得到的拟合函数用于 Galfenol 梁冲击力传感器的标定。

为了降低误差, 本文采用麦夸特法(Levenberg-Marquardt)^[33]拟合 Galfenol 梁冲击力传感器的试验数据, 得到输入冲击力与输出磁感应强度之间的函数关系表达式为

$$f'(b) = \frac{\sum_{i=1}^5 p_{2i-1} \cdot b^{i-1}}{1 + \sum_{i=1}^5 p_{2i} \cdot b^i} \quad (22)$$

式中, $f'(b)$ 表示通过拟合函数得到的冲击力; p 表示系数, b 表示输出的磁感应强度。以幅值为 64.7 N 的输入冲击力作用下的试验数据进行拟合, 得到拟合函数的系数数组 p

$$p = (1.563, 0.702\ 0, 1.494, -0.220\ 0, 0.234\ 4, 0.041\ 19, 0.304\ 6, 0.001\ 402, 0.053\ 32, -4.091) \quad (23)$$

将上述拟合的函数曲线用于标定 Galfenol 悬臂梁冲击力传感器, 为了测试标定结果, 选取幅值为 61.7 N、51.5 N、41.9 N 的冲击力进行试验验证。将磁通计输出的磁感应强度代入拟合得到的函数关系式, 计算出 Galfenol 悬臂梁冲击力传感器输出的冲击力, 在与冲击力锤输入的冲击力进行对比, 结果如图 7 所示。其中, 平均误差的计算表达式为

$$e_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\|f(b_i) - f'(b_i)\|}{f(b_i)} \quad (24)$$

从图 7 中可知, 通过标定函数计算得到的传感器的输出冲击力与通过冲击力锤测量的冲击力吻合较好, 平均误差分别为 5.73 %、5.58 %和 3.85%。

试验结果表明 Galfenol 变截面工字梁冲击力传感器结合 Levenberg-Marquardt 拟合法可在误差允许范围内实现对冲击力的准确测量。此外, Galfenol 合金存在滞后现象, 但是试验结果表明基于材料滞后的时间延迟是微不足道的, 所以, 该传感器中的材料滞后可以直接忽略不计。当施加的冲击载荷幅值超过 80 N 时, 输出的磁通密度出现饱和, 这意味着此刻梁内部产生的应力已经进入了死区, 死区部分的力难以进行准确测量, 所以测量的载荷最好限制在 80 N 以下, 即该传感器的最大量程为 80 N。

7 结论

(1) 以 Galfenol 合金为敏感元件, 研制了一种可实现对冲击载荷进行测量的冲击力传感器, 拓宽了 Galfenol 合金在动态力检测领域的应用。冲击力可直接作用于敏感元件本身, 不需要额外的保护措施, 结构更简单。

(2) 通过对三种不同结构的敏感元件(棒, 等截面矩形梁和变截面工字梁)建立动力学模型结合本征模型对灵敏度进行对比分析, 其中, 变截面工字梁的尺寸通过正交设计法进行优化设计以达到最佳的灵敏度、频率带宽与强度。解析模型表明, 采用变截面工字梁结构的敏感元件, 传感器的灵敏度可得到进一步提升。

(3) 加工变截面工字梁以及对应的传感器结构进行试验研究, 通过重复性试验确定传感器的最佳偏置磁场为 14 kA/m, 并通过麦夸特法拟合试验数据完成对冲击力传感器的标定, 标定结果的吻合程度较好, 平均误差不超过 5.73%。

参 考 文 献

- [1] 王俊峰. 碰撞冲击力的数值计算与测试方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
WANG Junfeng. Study on numerical simulation and testing method of impact force[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [2] 王斌. 薄壁筒体结构跌落冲击响应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WANG Bin. Metal thin walled tube structure drop experiment and simulation[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [3] VIOTTI M R, Jr AIBERTAZZI A G, KAPP W. Experimental comparison between a portable DSPI device with diffractive optical element and a hole drilling strain gage combined system[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2008, 46(11): 835-841.

- [4] 田文杰, 程红亚, 宁永怀, 等. 单基多电极石英晶体谐振器的力-频特性[J]. 压电与声光, 2007, 29(6): 641-643.
TIAN Wenjie, CHENG Hongya, NING Yonghuai, et al. Force-frequency characteristic of mono-base multi-electrode quartz crystal resonator[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2007, 29(6): 641-643.
- [5] 冯冠平, 王晓红, 王劲松. 石英晶体谐振器的力—频效应及其应用[J]. 清华大学学报, 1998, 38(8): 35-38.
FENG Guanping, WANG Xiaohong, WANG Jinsong. Force-frequency effect of quartz crystal resonator and its application[J]. Journal of Tsinghua University, 1998, 38(8): 35-38.
- [6] FRITZ J, WÜNNEMANN K, REIMOLD W U, et al. Shock experiments on quartz targets pre-cooled to 77 K[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(6): 440-445.
- [7] 王中立, 李丽宏. 基于石英传感器的动态称重数据处理算法研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(2): 236-241.
WANG Zhongli, LI Lihong. Research on dynamic weighing data processing algorithm based on quartz sensor[J]. Journal of Sensor Technology, 2017, 30(2): 236-241.
- [8] TONGE A L, KIMBERLEY J, RAMESH K T. The mechanism of compressive unloading failure in single crystal quartz and other brittle solids[J]. International Journal of Solids & Structures, 2012, 49(26): 3923-3934.
- [9] 郑永军, 马超, 张艳超, 等. 基于 PVDF 压电传感器的水滴冲击力检测系统[J]. 农业机械学报, 2014(s1): 142-147.
ZHENG Yongjun, MA Chao, ZHANG Yanchao, et al. Water drop impact force detection system based on PVDF piezoelectric sensor[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2014(s1): 142-147.
- [10] HWANG S K, HWANG H Y. Study on signal characteristic analysis of multi-axis load measurement sensors[J]. Smart Material and Structures, 2016, 25(11): 115004.
- [11] KOTIAN K, HEADINGS L M, DAPINO M J. Stress averaging in PVDF sensors for in-plane sinusoidal and impact-induced stresses[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(11): 4444-4451.
- [12] ROH Y, VARADAN V V, VARADAN V K. Characterization of all the elastic, dielectric, and piezoelectric constants of uniaxially oriented poled PVDF films[J]. IEEE Trans. Ultrason Ferroelectr. Freq. Control, 2002, 49(6): 836-847.
- [13] XIONG L, JIANG G, GUO Y, et al. A Three-dimensional fiber bragg grating force sensor for robot[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(9): 3632-3639.
- [14] 许会超, 苗新刚, 汪苏, 等. 一种机器人多维光纤光栅力传感器[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(12): 1881-1884.
XU Huichao, MIAO Xingang, WANG Su, et al. A robot multi-dimensional FBG force sensor[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(12): 1881-1884.
- [15] OMAN K, HOE B V, ALY K, et al. Instrumentation of integrally stiffened composite panel with fiber Bragg grating sensors for vibration measurements[J]. Smart Materials & Structures, 2015, 24(8): 085031.
- [16] 张智禹, 于文革. 一种新型 FBG 微力传感器[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(3): 70-71.
ZHANG Zhiyu, YU Wenge. A novel FBG micro-force sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(3): 70-71.
- [17] 蔡万宠, 张建富, 郁鼎文, 等. 超磁致伸缩超声振动系统的机电转换效率研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 66-72.
CAI Wanchong, ZHANG Jianfu, YU Dingwen, et al. Research on the electromechanical conversion efficiency for giant magnetostrictive ultrasonic matching system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 66-72.
- [18] 郑家驹, 王洪礼, 曹淑英. 基于逆磁致伸缩效应的超磁致伸缩磁力控制器件建模[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 51-56.
ZHENG Jiaju, WANG Hongli, CAO Shuying. Modeling of a giant magnetostrictive device for magnetic force control based on inverse magnetostrictive effect[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 51-56.
- [19] ZHOU H M, LI M H, LI X H, et al. An analytical and explicit multi-field coupled nonlinear constitutive model for Terfenol-D giant magnetostrictive material[J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(8): 085036.
- [20] 朱翔鸥, 舒亮, 吴桂初, 等. 基于各向异性的 Galfenol 复合悬臂梁三维非线性耦合模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 95-102.
ZHU Xiangou, SHU Liang, WU Guichu, et al. Three-dimensional nonlinear coupled model of Galfenol-driven composite cantilever beam based on anisotropy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 95-102.
- [21] CLARK A E, RESTORFF J B, WUN-FOGLE M, et al. Magnetostrictive properties of body-centered cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al alloys[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3238-3240.
- [22] DENG Z, DAPINO M J. Magnetic flux biasing of magnetostrictive sensors[J]. Smart Material & Structures, 2017, 26(5): 055027.

- [23] DAPINO M J, DENG Z, CALKINS F T, et al. Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering: magnetostrictive devices[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [24] LI B, LI P H, SHU L, et al. Parametric design and experimental research for an iron-gallium alloy force sensor[J]. *Sensors & Materials*, 2016, 28(3): 261-270.
- [25] ADOLPHI B, MCCORD J, BERTRAM M, et al. Improvement of sputtered Galfenol thin films for sensor applications[J]. *Smart Materials & Structures*, 2010, 19(5): 055013.
- [26] EVANS P G, DAPINO M J. Stress-dependent susceptibility of Galfenol and application to force sensing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(7): 074517.
- [27] 武兰河. 结构动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- WU Lanhe. Structural dynamics[M]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [28] UENO T, YAMADA S. Performance of energy harvester using iron-gallium alloy in free vibration[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(10): 2407-2409.
- [29] KITA S, UENO T, YAMADA S. Improvement of force factor of magnetostrictive vibration power generator for high efficiency[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(17): 3238-3240.
- [30] 陈波, 高殿荣, 杨超, 等. 大功率远程射雾器结构参数多目标智能协同优化[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(6): 166-175.
- CHEN Bo, GAO Dianrong, YANG Chao, et al. Multi-objective intelligent collaborative optimization of structure parameters for high-power remote sprayer[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(6): 166-175.
- [31] DUAN P, WANG Y, YANG Y, et al. Optimization of adiponitrile hydrolysis in subcritical water using an orthogonal array design[J]. *Journal of Solution Chemistry*, 2009, 38(2): 241-258.
- [32] WENG L, WALKER T, DENG Z, et al. Major and minor stress-magnetization loops in textured polycrystalline Fe_{81.6}Ga_{18.4} Galfenol[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(2): 043001-595.
- [33] 严正, 范翔, 赵文恺, 等. 自适应 Levenberg-Marquardt 方法提高潮流计算收敛性[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(8): 1909-1918.
- YAN Zheng, FAN Xiang, ZHAO Wenkai, et al. Improving the convergence of power flow calculation by a self-adaptive Levenberg-marquardt method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(8): 1909-1918.
-
- 作者简介: 李波, 男, 1963 年出生, 副教授。主要研究方向为机械设计与制造。
E-mail: whlibo163@163.com
- 杨家斌, 男, 1993 年出生。主要研究方向为智能材料与器件。
E-mail: yangjiabin_whut@163.com
- 舒亮(通信作者), 男, 1982 年出生, 副教授。主要研究方向为智能材料、结构的建模方法及控制理论。
E-mail: shuliangalbert@163.com
- 朱彦超, 男, 1995 年出生。主要研究方向为智能材料与器件。
E-mail: 349260872@qq.com
- 陈定方, 男, 1946 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能制造与控制。
E-mail: cadcs@126.com