

基于薄板搭接的摆动式相邻电容焊缝跟踪传感器

李湘文，陶 韬，洪 波，曹源源
(湘潭大学 机械工程学院,湘潭 411105)

摘 要: 针对薄板搭接自动焊缝跟踪目前存在的不足以及电容传感器边缘效应的特点,设计出一种应用于薄板搭接的摆动式相邻电容传感器. 首先建立了相邻电容传感器以及该传感器扫描焊缝坡口的数学模型,其次采用 Matlab 软件对模型进行了仿真分析,并通过试验验证了该模型的正确性及有效性. 最后搭建了跟踪试验平台进行了跟踪试验. 结果表明,采用摆动式相邻电容传感器能够实现薄板搭接焊缝的跟踪,这为薄板焊缝自动跟踪提供了一种新的技术.

关键词: 薄板搭接; 边缘效应; 相邻电容传感器; 焊缝跟踪

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151126005

0 序 言

薄板搭接焊缝作为工业生产中的一种应用非常广泛的焊接坡口形式,其焊缝的自动跟踪一直没有好的解决方案^[1]. 洪波等人^[2]设计了基于薄板搭接的互感式焊缝跟踪传感器实现了薄板搭接焊缝跟踪,但是目前薄板搭接焊缝自动跟踪多采用激光视觉传感器,然而激光视觉传感器需要前置,而且对工件质量和生产过程控制的要求十分严格^[3].

随着电容传感器技术的发展,电容边缘效应被重新认识并应用于测量系统^[4]. 2003 年台湾国立科技大学的 Wang 等人^[5]应用电容传感器的边缘效应实现了对平面位移变化的测量;2008 年美国华盛顿大学的 Wistort 等人^[6]通过对二维电容传感器的电场进行测量,实现了机器人的执行端部对预定目标进行动态跟踪;2010 西安电子科技大学的李楠等人^[7]提出了一种应用于车辆雨刷自动控制系统的新型相邻电容传感器. 文中结合薄板搭接焊缝自动跟踪的特殊性以及电容传感器发展的特点,提出了一种应用于薄板搭接焊缝跟踪的摆动式相邻电容传感器.

1 相邻电容传感器

电容传感器按照极板的空间位置不同,分为平行板电容传感器和相邻电容传感器,其中,相邻电容

传感器电极位于同一平面或曲面上,它具有单边穿透、信号强度可调节和层析成像的优点,如图 1 所示. 相邻电容传感器由激励极板和接收极板构成,极板间由接地屏蔽层隔离,在激励极板上加载交流信号,则激励极板和接收极板之间通过边缘效应形成一个稳定的静电场,当传感器与薄板工件距离发生变化时,相邻电容传感器产生的电容也会发生变化,通过检测电容输出值来识别待测物与传感器之间距离的变化.

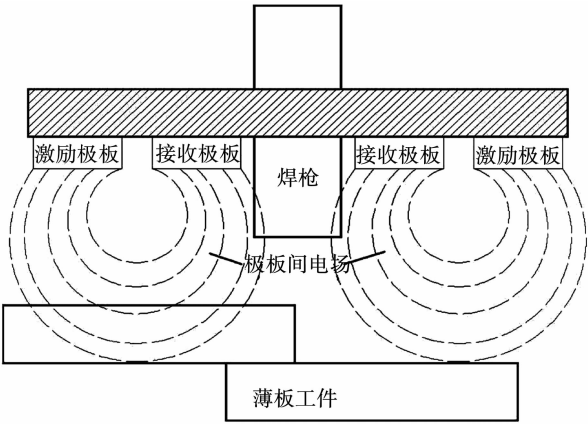


图 1 相邻电容传感器原理图
Fig. 1 Schematic of adjacent capacitive sensor

图 1 中相邻电容传感器嵌套在焊枪四周,焊接过程中实时采集焊枪的位置信息如图 2 所示;当焊枪右偏(图 2a),传感器扫描范围大部分集中在搭接工件的下薄板,焊枪左偏(图 2b),传感器扫描范围集中在上薄板,焊枪对中(图 2c),扫描上下薄板的

收稿日期: 2015-11-26
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405414); 湖南省自然科学基金省市联合基金项目(2015JJ5013); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ6107)

范围较为均衡,显然焊枪在不同位姿时,摆动周期距离不同,则传感器在摆动一周时输出的电容也不同,变化的电容值通过后续的信号处理电路之后可以转变为电压或电流的变化,输出给主控制器,通过控制器的运算输出控制信号给步进电机,步进电机控制十字滑架系统对焊枪各个方向进行偏差调节。

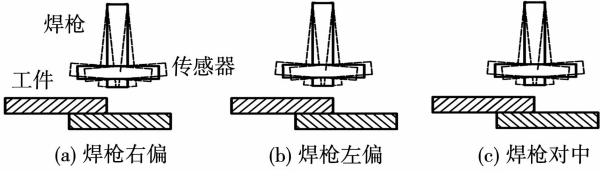


图 2 摆动式相邻电容传感器原理图

Fig. 2 Schematic of swing type adjacent capacitive sensor

2 摆动式相邻电容传感器数学模型

如图 3 所示,环形电容传感器可用电势函数 $V(x,y,z)$ 表示. 选择柱坐标形式,数学模型为静电场中拉普拉斯方程

$$\frac{\partial^2 V}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \tag{1}$$

式中: $V(r,\varphi,z)$ 是电势函数; r,φ,z 为柱坐标参数。

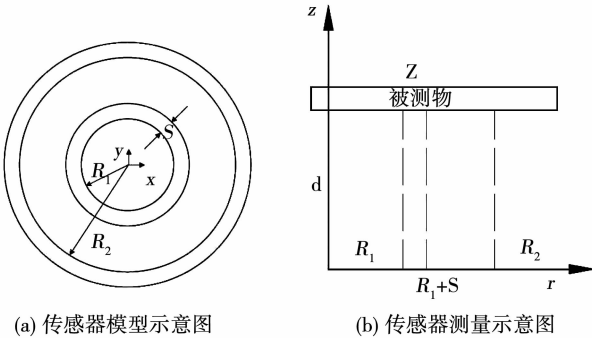


图 3 相邻电容传感器模型

Fig. 3 Model of adjacent capacitive sensor

图 3 中: R_1 为接收极板半径; R_2 为激励极板半径; S 为极板厚度; d 为传感器与被测物的距离。

电容表达式^[8]为

$$C = 4R_1 \varepsilon_r \varepsilon_0 r \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} I_n \left(\frac{n\pi R_1}{d} \right) \int_{\pi \leq R_1+S \leq d} \left[\left(K_1 \left(\frac{n\pi R_2}{d} \right) / I_1 \left(\frac{n\pi R_1}{d} \right) \right) I_0(y) + K_0(y) \right] y dy \tag{2}$$

利用修正贝塞尔函数的特性进行变换可得

$$\int y I_0(y) dy = y I_1(y) \int y K_0(y) dy = -y K_1(y) \tag{3}$$

式(3)中积分化简得

$$C = 4R_1 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\pi(R_1 + S)}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1 \left(\frac{n\pi R_1}{d} \right)}{I_1 \left(\frac{n\pi R_2}{d} \right)} \left\{ I_1 \left(\frac{n\pi R_1}{d} \right) K_1 \left[\frac{n\pi(R_1 + S)}{d} \right] - I_1 \left[\frac{n\pi(R_1 + S)}{d} \right] K_1 \left(\frac{n\pi R_2}{d} \right) \right\} \tag{4}$$

式中: R_1 为内电极半径; R_2 为外电极半径; S 为极板间屏蔽层距离; d 为传感器到被测物距离; C 为传感器电容边缘电容值; $\varepsilon_r, \varepsilon_0$ 为相关材料的介电常数; $I_1(x)$ 与 $K_1(x)$ 为一阶的修正贝塞尔函数的第一类与第二类。

图 4 为薄板搭接坡口扫描示意图, A 和 B 分别为焊枪摆动到最右端和最左端位置, 图中 L 为焊枪摆动固定点到薄板下板工件的距离; h 为焊枪摆动固定点到传感器探头端部的距离; δ 为薄板工件的板厚; e 为不对中的焊缝偏差; θ 为摆动角度, 设焊枪摆动到最右端时, $t = 0$; 传感器摆动均匀, 则任意时刻的摆动角度为

$$\theta_i = \omega t \tag{5}$$

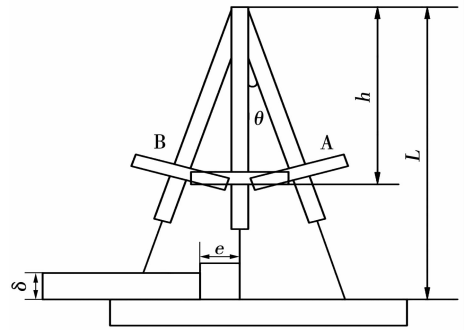


图 4 薄板搭接坡口扫描示意图

Fig. 4 Schematic of sheet lap groove scanning

焊接开始,对于薄板搭接焊缝,在焊枪偏离焊缝中心 e 的情况下,在一个摆动周期 T 内传感器端部到薄板工件的距离 $l(t)$ 随时间变化扫描规律为

$$l(t) = \begin{cases} \frac{L}{\cos(\theta_i - \theta)} - h, 0 \leq \theta_i < \theta + \arctan \frac{e}{L - \delta} \\ \frac{L - \delta}{\cos(\theta_i - \theta)} - h, \theta + \arctan \frac{e}{L - \delta} \leq \theta_i < 2\theta \\ \frac{L - \delta}{\cos(3\theta - \theta_i)} - h, 2\theta \leq \theta_i < 3\theta - \arctan \frac{e}{L - \delta} \\ \frac{L}{\cos(3\theta - \theta_i)} - h, 3\theta - \arctan \frac{e}{L - \delta} \leq \theta_i < 4\theta \end{cases} \tag{6}$$

3 仿真及试验

利用 Matlab 软件仿真分析式(4)的相邻电容传感器在不同距离下电容的分布情况. 仿真过程中, 设 $R_1 = 20\text{ mm}$, $R_2 = 40\text{ mm}$, $S = 5\text{ mm}$, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\text{ F/m}$, $\varepsilon_r = 4.2\text{ F/m}$.

仿真结果如图 5 所示.

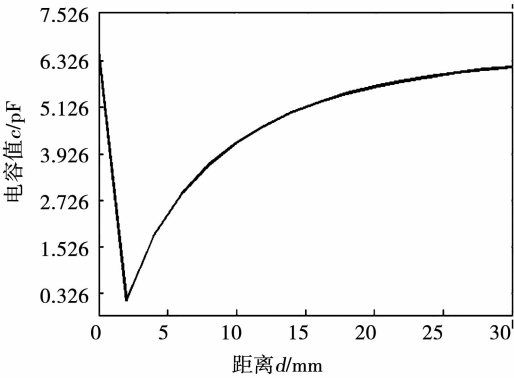


图 5 输出电容值相对距离的变化情况
Fig. 5 Output capacitance value of relative distance change

距离在比较近的时候电容值是一个突降的过程,但是当距离继续增加时,电容值呈现为一个缓升的过程. 因此,通过采集电容值则可知此刻的距离,为验证环状相邻电容传感器仿真的正确性,通过试验传感器在不同距离下电容的分布情况. 试验采用印刷电路板 (PCB) 设计制作相邻电容传感器探头,其结构如图 6 所示.

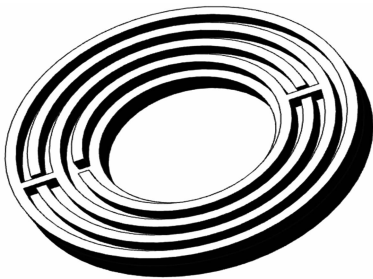


图 6 传感器探头结构
Fig. 6 Structure of sensor probe

采用的 PCB 厚度为 1.6 mm 的单面板,铜箔厚度为 0.1 mm,外径为 40 mm,内径为 20 mm,雕刻深度为 0.15 mm,位移台采用 CNC3040 雕刻机,传感器固定在雕刻机 z 轴,z 轴的有效行程为 80 mm,测量仪器为 AT610 电容测试仪,电容测量范围:

0.01 pF ~ 9 999 μF,基本准确度:0.1%. 每一组进行 10 次数据采集,然后取平均得到的试验数据.

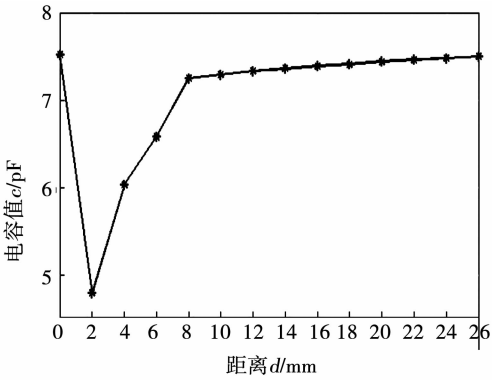


图 7 传感器电容值的实际变化情况
Fig. 7 Actual changes of capacitance sensor

从图 7 可以看出传感器输出电容值整体上呈现出的趋势与仿真结果一致. 仿真过程为设 L 为 200 mm, h 为 175 mm, δ 为 3 mm, θ 为 5° , T 为 0.5 s, f 为 2 Hz,三种焊枪偏差 $e = 0, e = -5\text{ mm}, e = 5\text{ mm}$.

仿真结果如图 8 所示.

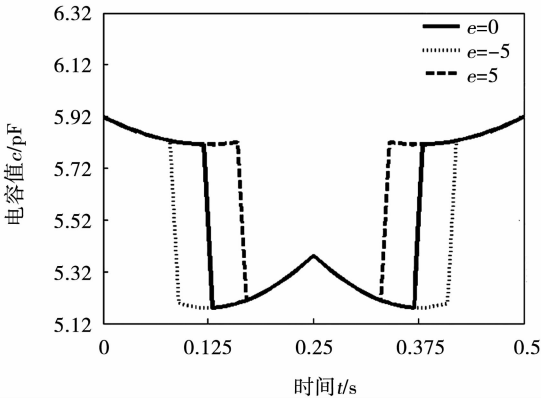


图 8 不同偏差情况下传感器距离的变化情况
Fig. 8 Changes of sensor capacitance under different deviations

从图 8 中可知,焊枪在偏差 $e = 0, e = -5\text{ mm}, e = 5\text{ mm}$ 三种情形中,传感器输出电容值在周期的 1/4 和 3/4 处有一个信号的阶跃,且随着偏差 e 的不同信号阶跃的时间点也不同,主控制器通过半波积分比较法来识别焊枪偏差信号.

$$e_i = S_{C(i)} - S_{B(i)} = \sum_{i=0}^n u_C(i) - \sum_{i=0}^n u_B(i) = kE_i \quad (7)$$

式中: $u_C(i)$ 表示当前截取半周波形中第 i 个点采集的电压值; $u_B(i)$ 表示焊枪对中时波形 i 个点采集的

电压值; k 为比例系数;其反映了偏差的方向;即当 $k > 0$ 时焊枪偏差 $e_i > 0$ (焊枪右偏), 当 $k < 0$ 时焊枪偏差 $e_i < 0$ (焊枪左偏); E_i 是焊缝的偏差大小值, 完全对中时为零。

4 摆动电容传感器跟踪试验

在摆动焊接过程中, 传感器的变换电容值输出到数据转换及处理模块对原始的电容信号进行转换处理, 处理后的信号经过主控器进行偏差分析处理, 得出具体偏差量, 在通过跟踪执行模块和十字滑块对焊缝进行纠偏。数据转换及处理模块中包括传感器激励信号电路、传感器信号调理电路、差分放大电路、低通滤波电路、A/D 转换电路。其中激励信号电路产生用以驱动传感器的不同频率的正弦信号, 传感器信号调理电路把传感器输出的微弱变化的电容信号进行缓冲转换成利于处理的电信号, 再通过差分放大电路对转换的电压信号进行放大, 低通滤波电路则负责滤除信号中的高频噪声, 最后通过 A/D 转换电路对传感器信号进行采样, 采样后的信号便输入到主控器进行运算处理。

试验采用松下 YD-450FR 焊机, 对 3 mm 的搭接钢板进行跟踪试验, 试验参数为, 焊接电流 180 A; 电压 20 V; 焊丝直径 1.2 mm; 保护气体为 CO_2 ; 摆动周期为 0.5 s; 小车行进速度 400 mm/min; 试验效果如图 9 所示。



图 9 焊缝跟踪效果图

Fig. 9 Seam tracking effect diagram

从图 9 中可以看出, 系统实现了基本的焊缝跟踪, 然而由于传感器初始电容值和输出变化信号较小, 跟踪精度与稳定性均未达到最佳效果, 在后期的工作中还需要对传感器结构和信号处理电路上做进一步的优化。

5 结 论

(1) 试验以及仿真结果表明摆动式相邻电容焊

缝跟踪传感器可以实现焊缝跟踪并且可以得到较满意的焊缝跟踪效果, 但是相邻电容传感器初始电容较低, 且随着传感器与被测工件距离增加其灵敏度降低, 这些问题一定程度上影响到了焊缝跟踪效果, 针对这些问题, 今后需要从以下几点进行改进, 第一, 优化传感器结构提高输出电容值, 增加灵敏度; 第二, 改进信号处理模块, 提高系统的抗干扰能力; 第三, 完善试验平台, 减少试验误差影响。

(2) 就目前试验结果上看采用摆动式相邻电容传感器能够实现薄板搭接焊缝的跟踪, 这为薄板焊缝自动跟踪提供了一种新的技术。

参考文献:

- [1] 洪宇翔, 向小明, 洪 波, 等. 一种应用于薄板搭接的磁控电弧焊缝跟踪方法[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 67-70.
Hong Yuxiang, Xiang Xiaoming, Hong Bo, et al. A seam tracking method for overlap sheet welding based on magnetic-control arc sensing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(10): 67-70.
- [2] 洪 波, 刘 湘, 何荣拓, 等. 基于薄板搭接的互感式焊缝跟踪传感器的分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 15-18.
Hong Bo, Liu Xiang, He Rongtuo, et al. Seam tracker of mutual-inductance based on sheet lapping[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(9): 15-18.
- [3] 雷正龙, 吕 涛, 陈彦宾, 等. 基于扫描激光视觉传感的焊缝图像特征信息识别[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 54-58.
Lei Zhenglong, Lü Tao, Chen Yanbin, et al. Features extraction for weld image of scanning laser sensing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 54-58.
- [4] 李 楠, 韩 颖. 几何参数设计对相邻电容传感器性能的影响[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(2): 330-336.
Li Nan, Han Ying. Influence of geometric parameter design on performance of capacitive proximity sensors[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(2): 330-336.
- [5] Wang D C, Chou J C, Wang S M, et al. Application of a fringe capacitive sensor to small-distance measurement [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2003, 42(16): 28-32.
- [6] Wistort R, Smith J R. Electric field servoing for robotic manipulation[C]// IEEE/RSJ International Conference on the Intelligent Robots and Systems; IEEE, 2008: 494-499.
- [7] 李 楠, 郭宝龙, 王 湃. 车辆雨刷自动控制系统中相邻电容传感器设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 12-7.
Li Nan, Guo Baolong, Wang Pai. Proximity capacitive sensor design in an automatic car wiper control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 12-7.
- [8] Luo R C, Chen Z H. Modeling and implementation of an innovative micro proximity sensor using micromachining technology[C]// 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Yokohama, Japan July, 1993: 26-30.

作者简介: 李湘文, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授. 主要从事电容式焊缝跟踪传感器和焊接机器人自动化关键技术的研究工作. 发表论文 10 余篇. Email: xwlee@xtu.edu.cn

通讯作者: 洪 波, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: hongbo@xtu.edu.cn