

文章编号: 1000-5889(2004)02-0001-04

# Rogowski 电流传感器及其在电阻焊 数据采集中的应用

马跃洲, 金丽华, 陈剑虹

(兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** Rogowski 线圈电流传感器由均匀密绕的挠性空心线圈和积分器构成, 由于其原理和结构特点, 特别适合于电阻焊次级电流的测量. 讨论了 Rogowski 线圈工作原理、积分器设计及误差、传感器电路模型和灵敏度的频率响应, 设计了用于电阻焊测量的电流传感器, 据此研制出 ADuC812 单片机为核心的电阻焊数据采集系统, 并进行了低碳钢板搭接点焊试验和电压电流等信号的采集. 初步分析认为, 焊接电压、电流信号及接头动态电阻、输入功率与熔核形态密切相关, 可用于电阻点焊接头质量的在线监控.

**关键词:** 电阻点焊; Rogowski 线圈; 电流传感器; 单片机; 数据采集

**中图分类号:** TB52.6 **文献标识码:** A

## Rogowski current transducer applied in data collection of for resistance spot welding

MA Yue-zhou, JIN Li-hua, CHEN Jian-hong

(College of Materials Science and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The Rogowski coil current transducer consisting of a flexible 'air cored' toroidal winding and an integrator is applicable specifically to the secondary current detection in resistance welding process, due to the its operation principle and structural feature. The operation principle of the Rogowski coil, design and error of the electronic integrator, circuit model and sensitivity response characteristic of the transducer are discussed. A data gathering system based on AduC812 MCU is developed with the designed current transducer for resistance spot welding, by which the voltage and current signals are acquired in resistance spot welding test for mild steel board. The preliminary analysis shows that the voltage and current signal waveform, dynamic resistance, and input power of the welded joint correlate closely with the morphology of melt nugget, and they can be utilized in on-line quality monitoring of resistance spot welding.

**Key words:** resistance spot welding; Rogowski coil; current transducer; MCU; data gathering system

近年来, 基于焊接过程动态信号特征分析进行接头质量在线监控的研究受到了关注<sup>[1~3]</sup>. 对于电阻焊过程, 焊接电流和电压信号既反映输入能量变化, 又反映熔核形成过程接头阻抗动态变化, 影响到焊接质量的各种随机因素. 如母材及电极表面状态、临近焊点的分流、二次回路中铁磁物质引起的阻抗变化、散热情况、电极压力波动和电网电压波动等, 均直接或间接地蕴涵在电流和电压信号的变化之中. 研究电阻焊信号的动态特征及其与焊接过程状

态变化的相关性, 是实现焊接质量监控的关键, 这首先要精准地获取相关信号.

焊接电流对接头质量起着决定性作用. 电阻焊二次电流变化范围大, 通常为非正弦波形并伴随畸变, 传感器选择受焊机结构的限制, 因此数据采集系统的重点是解决电流信号的传感问题<sup>[4]</sup>. Rogowski 线圈电流传感器由于结构和原理两方面的特点, 恰好适用于电阻焊场合<sup>[5~6]</sup>. 其结构简单、体积小、重量轻, 挠性线圈便于安装. 测量原理与互感器类似, 即利用电磁感应进行交流电流的隔离测量. 但由于采用非磁性的线圈芯, 不存在磁饱和现象, 无磁滞效应, 因而具有较宽的电流测量范围和信号带宽. 显

收稿日期: 2003-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(50275028)

作者简介: 马跃洲(1963-), 男, 陕西汉中, 教授.

然,设计合理、制作精良的线圈和积分器,才能保证测量的准确度和稳定性.

### 1 Rogowski 线圈电流传感器

Rogowski 电流传感器由环形空心线圈和积分器两部分构成<sup>[7]</sup>,如图 1 所示.线圈绕组均匀密绕在一个挠性的环型绝缘骨架上,然后将骨架两端弯曲并固定到一起,即为 Rogowski 线圈.

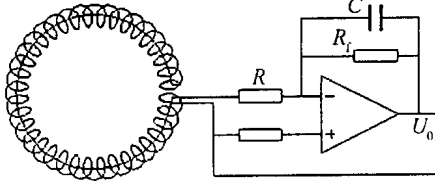


图 1 Rogowski 线圈电流传感器

Fig. 1 Rogowski coil current transducer

#### 1.1 测量原理

当电流  $I(t)$  沿轴线方向通过线圈时,将在环形绕组所包围的体积内产生磁场  $H$ .如  $H$  为垂直于线圈截面方向的磁场强度,根据安培环路定律:

$$Hdl = Hl = I(t) \tag{1}$$

由磁感应强度  $B = \mu H$ ,磁通  $\Phi = BS$ ,线圈上的感应电压:

$$- E(t) = nl \frac{d}{dt} = n\mu S \frac{dI(t)}{dt} = M \frac{dI(t)}{dt} \tag{2}$$

互感系数:

$$M = n\mu S \tag{3}$$

线圈自感:

$$L = n^2 \mu Sl \tag{4}$$

式中,  $l$  为闭合回线长度,即线圈长度;  $n$  为单位长度线圈的匝数;  $S$  为线圈截面积;  $\mu$  为空气的磁导率,  $\mu = \mu_0 = 4 \times 10^{-7} (H/m)$ .

上式表明,线圈端电压与被测电流的时间导数呈线性关系,互感系数正比于线圈的截面积以及单位长度匝数,增加匝数和截面积,可提高传感器的灵敏度;增加匝数同时会引起线圈内阻和电感的增加,故匝数选取应综合考虑.在电阻点焊次级电流测量时,挠性线圈套在电极臂上,如使用不当会造成线圈截面和长度的变化,影响到互感系数,从而引起测量误差<sup>[8]</sup>.

#### 1.2 积分器

测量线圈的输出电压与电流的时间导数成正比,因此需进行积分运算.对于角频率为  $\omega$  的正弦稳态电流,无源  $RC$  电路积分运算的相对误差  $\delta$   $= ((1 + (\omega RC)^2)^{-1/2})$ ,为保证精度必须增大时间常

数,这样会造成信号严重衰减.用运算放大器构成理想积分器虽可解决精度与增益的矛盾,但实际应用中运放的失调电压、失调电流、偏置电流和温漂等经电容不断累积,形成积分漂移,导致测量误差,甚至无法正常工作<sup>[9,10]</sup>.

除了选择失调及温漂小的运放外,采用图 1 所示的带反馈电阻的近似积分器(即惯性环节),也可以较好地解决上述问题.惯性环节与理想积分器的相对误差:

$$\delta = \frac{\frac{1}{RC} - \frac{R_f/R}{\sqrt{1 + (R_f C)^2}}}{\frac{1}{RC}} = 1 - \left( 1 + \frac{1}{(R_f C)^2} \right)^{-1/2} \tag{5}$$

根据上式合理选择积分器元件参数,既能有效抑制积分漂移、稳定工作点,又能将惯性环节引入的近似误差控制在允许的范围内,同时满足信号增益和带宽的要求.

#### 1.3 电路模型及灵敏度

图 2 为 Rogowski 线圈电流传感器的简化电路模型.图中,  $R_0$  为线圈内阻,  $L$  为线圈的自感,  $C_0$  为匝间电容.根据电路模型,忽略运放输入和输出电阻的影响,则传感器灵敏度的传递函数:

$$G(s) = \frac{U_0(s)}{I(s)} = \frac{M}{RC} \frac{1}{1 + (sR_f C)^{-1}} \tag{6}$$

式中,  $Z$  为积分器的等效输入阻抗.

$$Z = R + \frac{R_f}{sR_f C + 1} \tag{7}$$

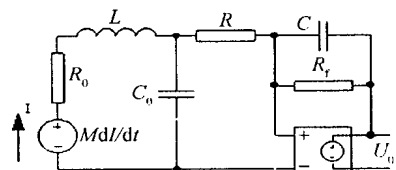


图 2 Rogowski 电流传感器电路模型

灵敏度数值的稳定性,是决定测量精度的重要因素.分析上式,线圈自感  $L$  和匝间电容  $C_0$  主要影响灵敏度的高频性能,  $R_f C$  影响低频性能,  $RC$  决定传感器增益.当积分器的输入阻抗远大于线圈自感和内阻的阻抗,且  $R_f C$  足够大时,灵敏度近似等于  $M/RC$ .

根据以上讨论,针对电阻焊数据采集系统设计了 Rogowski 电流传感器.线圈匝数为 4 160,长度 800 mm,圆形截面直径 14 mm,采用  $\phi 0.17$  mm 的

漆包线绕制. 积分器采用高精度低失调运算放大器 OP77 构成,  $R = 100\text{ k}$ ,  $C = 0.2\text{ }\mu\text{F}$ ,  $R_f = 1\text{ M}$ . 计算结果  $R_0 = 128$ ,  $L = 4.18\text{ mH}$ ,  $M = 1.01\text{ }\mu\text{H}$ , 灵敏度  $G = 50.2\text{ mV/kA}$ . 取匝间电容  $100\text{ pF}$  时灵敏度的频率响应如图 3 所示, 在  $20 \sim 2\text{ 000 Hz}$  传感器理论误差小于  $0.5\%$ , 且不会产生相位失真.

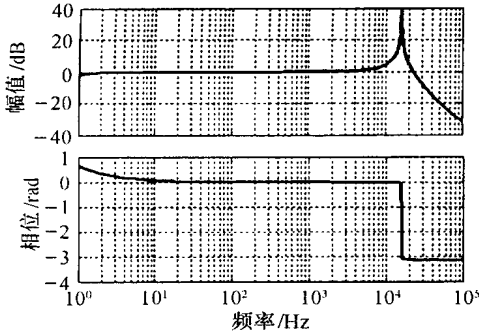


图 3 传感器灵敏度的频率响应

Fig. 3 Frequency response of Rogowski coil current transducer's sensitivity

## 2 电阻焊数据采集系统

### 2.1 系统构成

采集系统以 ADuC812 单片机为核心构成, 如图 4 所示. ADuC812 是 ADI 公司专门为数据采集设计的一款嵌入式 MCU. 它采用 8051 内核, 具有 8051 的全部功能; 片上集成 8 通道 12 位高精度 ADC, 采样率高达  $200\text{ kSPS}$  且支持 DMA 方式; 2 通道 12 位 DAC 和温度传感器;  $8\text{ kB}$  的闪存程序存储器和  $640$  字节的数据存储器,  $256$  字节片内数据 RAM,  $16\text{ MB}$  的外部数据存储器寻址空间; 除此之外, 还具有 I<sup>2</sup>C 和 SPI 串行接口、看门狗定时器和电源监视器等功能<sup>[11]</sup>.

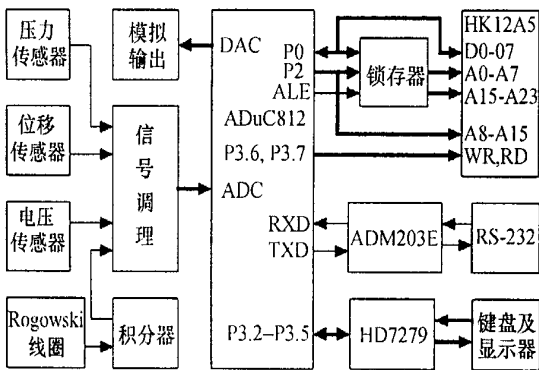


图 4 电阻焊数据采集系统

Fig. 4 Data gathering system for resistance spot welding

系统扩展 1 片  $4\text{ MB}$  的非易失 RAM 器件 HK12A5 (必要时扩充为  $16\text{ MB}$ ), 用于数据存储; 单片机的 UART 经 ADM202E 转换为 RS-232 接口,

用于程序下载和数据上载; P3.2 ~ P3.5 通过键盘及显示驱动电路 HD7279 扩展  $4 \times 4$  键盘和 6 位 LED 显示器, 构成人机界面. 为全面研究电阻焊信号与焊接过程和接头质量的相关性, 除通过 Rogowski 线圈采集焊接电流外, 还设计了焊接电压、电极位移和电极压力等信号的模拟通道. 图 4 中信号调理电路完成信号的极性转换和增益调整, DAC 用于模拟控制信号输出.

应用中需对 Rogowski 线圈电流传感器进行标定. 电阻焊二次电流达数万安培, 获得这样的稳定电流源和测量仪表较为困难, 故可适当损失测量精度, 用较小规格 (如  $3\text{ kA}$ ) 的互感器和电流表, 在线圈穿入不同匝数下标定. 影响传感器精度的另一重要因素是积分电容随温度的变化, 本系统采用温度系数较低的 ( $-1\% \sim -4\%$ ) 聚丙烯薄膜电容, 同时根据标定结果通过软件进行温度补偿. 利用 ADuC812 片内温度传感器监测环境温度. 标定后的传感器在  $1 \sim 30\text{ kA}$  测量范围内, 线性误差不大于  $1\%$ .

### 2.2 试验结果

利用研制的系统进行了电阻焊信号的数据采集, 采样率为  $33\text{ kHz}$ . 用唐山松下生产的 YF-0201Z2 型焊机, 对板厚  $1.5\text{ mm}$  的低碳钢试样进行搭接点焊, 电极压力  $19.6\text{ kN}$ , 恒流控制方式.

图 5 为设定电流  $7\text{ kA}$ , 时间 17 周波时采集的焊接电压  $u(t)$ 、电流  $i(t)$  的信号波形, 以及电压有效值  $U$ , 电流有效值  $I$ , 接头等效电阻  $R$  和输入功率  $P$  的变化趋势. 有效值为工频半波的均方根值, 动态电阻和功率根据有效值求得. 可以看出, 焊机动态电阻随焊接时间单调减小, 大致分为快速降低、平稳下降和趋于饱和三个阶段. 接头动态电阻变化规律可根据熔核的形成过程加以解释: 第一阶段通电初期, 由于工件表面微观不均匀性, 在接触点会产生局部高温, 在电极力作用下, 触点软化变形, 会挤掉或压碎接触点上的氧化膜等杂物, 使接触面积增大, 导致接触电阻快速降低; 第二阶段是熔核形成和扩展阶段, 即电流密度大、散热条件差的地方, 接触点熔化形成具有一定体积的微熔核, 继而扩展成熔核, 随加热时间增加熔核向四周扩展, 使电阻平稳下降, 这一阶段工件材料的温度系数也是影响电阻的重要因素; 熔核扩展到一定程度后, 焊接区产热与散热趋于平衡, 温度场基本稳定, 熔核尺寸趋于饱和, 形成动态电阻的第三阶段. 恒流控制下的加热功率变化趋势与接头电阻可以相互印证: 通电初期电阻较大, 因而电流较小, 功率也小; 通电后期电阻变小, 而电流恒定, 功率也变小; 功率在熔核扩展阶段出现峰

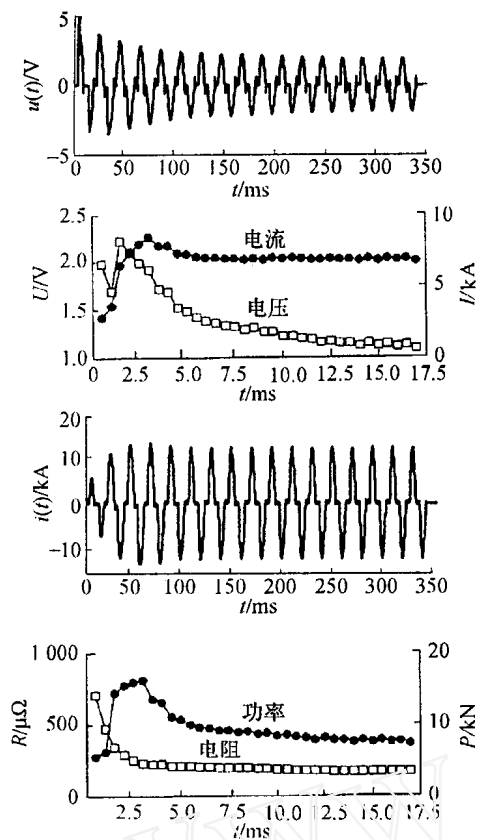


图 5 焊接电压、电流信号及其有效值、等效电阻和功率  
Fig. 5 Welding voltage and current signals and their virtual value, equivalent resistance and power

值. 可见, 动态电阻和加热功率的变化与熔核形态密切相关, 可用于点焊接头质量的在线监控.

图 6 为不同焊接电流下获得的接头等效电阻随焊接时间的变化趋势. 可以看出, 接头电阻及其变化率均随焊接电流、焊接时间的增大而减小, 电流对电阻的影响大于时间的影响.

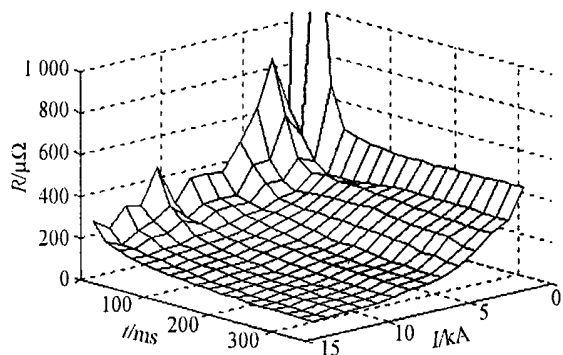


图 6 接头动态电阻随焊接电流和时间的变化趋势  
Fig. 6 Variation tendency of tie-in of dynamic resistance with welding current and time

图 7 为不同焊接电流下测定的点焊熔核尺寸. 焊接时间为 17 周波, 电极端部直径为  $\phi 8$  mm. 熔核直径  $d$  和高度  $h$  随电流增加而增加, 并逐渐趋于饱

和, 直径变化的规律性尤其明显.

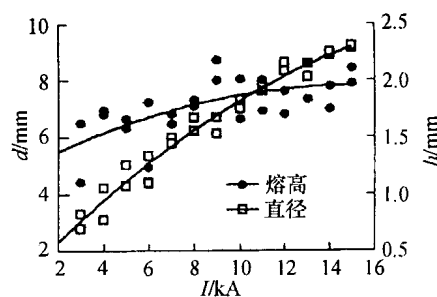


图 7 熔核直径  $d$  和高度  $h$  随焊接电流的变化趋势  
Fig. 7 Variation tendency of fusion diameter,  $d$ , and height  $h$  with welding current

### 3 结论

1) 由于 Rogowski 线圈电流传感器测量原理和结构特点, 特别适合于电阻焊次级电流的测量. 采用运算放大器构成近似积分器, 合理选择器件参数, 能够保证传感器的测量灵敏度、精度和信号响应带宽.

2) 研制的以 AduC812 单片机为核心的电阻焊数据采集系统, 利用 Rogowski 线圈电流传感器, 实现了电阻点焊电流等信号的数据采集. 电流、电压信号波形以及接头动态电阻、加热功率的变化与熔核形态密切相关, 可用于电阻点焊接头质量的在线监控.

#### 参考文献:

- [1] Livshits G A. Universal quality assurance method for resistance spot welding based on dynamic resistance [J]. Welding Journal, 1997, 76(5): 383-390.
- [2] Broomhead J H W, Dony P H. Resistance spot welding quality assurance [J]. Welding & Metal Fabrication, 1990, (7): 172-179.
- [3] 马跃洲, 金虎, 梁卫东, 等. 短路过渡的 MGAW 声音特征分析及产生机理 [J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(1): 11-14.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会电阻焊( )专业委员会. 电阻焊理论与实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [5] 邹积岩. 罗哥夫斯基线圈测量电流的仿真计算及实验研究 [J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 81-84.
- [6] 樊宽军. 微秒级电脉冲的测量 [J]. 核技术, 1999, 22(8): 469-473.
- [7] 马乃祥, 周佩白. 电磁干扰的预防 [J]. 华东电力, 1999, 27(11): 47-50.
- [8] 西ノ尺敬次. 回路から見た抵抗溶接のモニタリング [J]. 溶接技術, 1981, (3): 50-55.
- [9] 郭晓华, 叶妙元, 徐雁, 等. 用于 110 kV 变压器的空心线圈电流传感器研究 [J]. 高压电器, 2002, 6(3): 23-25.
- [10] 翟小社, 王颖, 林莘. 基于 Rogowski 线圈电流传感器的研制 [J]. 高压电器, 2002, 6(3): 19-20.
- [11] 李刚. AduC8XX 系列单片机原理与应用技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.