

提高电阻应变式轧制力测力仪测量精度的方法

刘晓蒙

(上海工业自动化仪表研究院有限公司, 上海 200233)

摘要:针对电阻应变式轧制力测力仪,分别从传感器和二次仪表两方面分析了提高测量精度的方法。传感器的制造精度、现场安装条件是影响精度的主要因素。激励电源倍压法和六线制电桥线路,有助于减少激励电源带来的误差。传感器的比例校准法,可以解决因校准误差引起测量误差的问题,在轧钢现场应用非常方便,考虑到轧钢现场传感器与二次仪表之间电缆线的问题,经数学推导,得出了校准比值的修正公式。

关键词:轧制力;测力传感器;测力仪;电阻应变片;传感器自校准

中图分类号:TH823

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2023)02-0078-05

Methods for Improving Measuring Accuracy of Resistance Strain Type Rolling Force Dynamometer

Liu Xiao-meng

(Shanghai Institute of Process Automation & Instrumentation, Shanghai 200233, China)

Abstract: The methods for improving the measuring accuracy of resistance strain type rolling force dynamometer are analyzed from such two aspects as sensor and secondary instrument respectively. The manufacturing accuracy and on-site installation conditions of sensor are the main factors affecting accuracy. The voltage-multiplying of excitation power supply and six-wire bridge circuit are helpful to reduce the errors caused by excitation power supply. The ratio calibration of sensor could solve the problem of measurement errors caused by calibration errors, which is very convenient to apply in the steel rolling field. The modified formulas of calibration ratios are obtained through mathematical derivation considering the problem of cable between the sensor and secondary instrument in the steel rolling field.

Key words: rolling force; force cell; dynamometer; resistance strain gage; self-calibration of sensor

轧制力测力仪应用于冶金行业,是轧钢 AGC 系统中的重要测量仪表,测力仪包括传感器和二次仪表两部分。传感器又称压头,安装在轧机牌坊内,直接承受轧制力,具有测量力值大、过载能力强、外形扁平的特点^[1]。二次仪表用于将传感器输出的毫伏级电信号,转换成 4~20 mA 的标准仪表信号,并具有工业现场总线数据通信功能,其响应速度快,稳定性高。根据测量原理,轧制力测力仪主要分为两

类,以 ABB 公司为代表的磁弹性测力仪,和以 KELK 公司为代表的电阻应变式测力仪^[2],目前后者的应用较为广泛,本文将探讨提高电阻应变式测力仪测量精度的方法。

1 电阻应变式轧制力传感器

1.1 基本原理

电阻应变式传感器基于胡克定律,在材料的弹

性应变范围内,应力与应变成线性比例关系,并且金属导电材料的电阻率与伸长率也成近似线性比例关系^[3],因此,可以将元器件的物理变形转换为电阻变化量进行测量。通常,产生电信号的元件叫电阻应变片,受力的元件的叫弹性体,将电阻应变片粘贴在弹性体上,就构成了最基本的电阻应变式测力传感器。

早期的电阻应变片为丝状,因而又称为电阻应变丝,它与弹性体是线接触,不能充分反映弹性体的变形,并且具有零点漂移大的缺点。现在应用的电阻应变片为箔式结构,金属箔固定在绝缘基底上,通过光刻腐蚀制成任意形状的应变片,具有与弹性体接触面积大、横向效应小的优点^[4]。图1是HBM公司生产的电阻应变片,具有百万分之一的极高分辨率,确保了测量的分度值。电阻应变片的电阻变化量与自身的应变比值,称为应变片的灵敏度 k ,一般应变片的应变极限为2%,使用时最大变形量要小于应变极限。

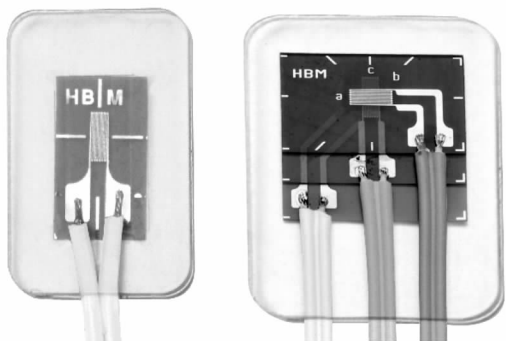


图1 HBM公司生产的电阻应变片

弹性体是电阻应变式传感器的受力或应变承载体,具有较高的强度,一般屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 在1 000 MPa以上,并且滞弹性效应小^[5]。例如常用的弹性体材料40CrNiMo钢,经过热处理后, $\sigma_{0.2}$ 约为1 200 MPa,滞后量为0.01%。电阻应变片通过高附着力的粘合剂粘贴在弹性体上,要求弹性体受力后产生均匀的变形,将应变传递给应变片,因此需要根据传感器的受力情况设计弹性体的结构。轧制力传感器安装在轧机牌坊内,为扁平状结构,高度通常为74 mm,额定工作应力约为100 MPa,具有七倍额定的过载能力,在弹性体内的水平方向均布若干盲孔,采用深孔贴片技术在盲孔内部粘贴应变片,确保应变片均匀受力。图2是上海自仪院生产的12.5 MN

电阻应变式轧制力传感器。



图2 上海自仪院生产的12.5 MN电阻应变式轧制力传感器

1.2 误差分析

电阻应变式轧制力传感器产生的测量误差,主要有两方面的原因。第一部分,是由传感器制造工艺引起的,传感器内均匀分布着若干个盲孔,盲孔侧壁的中心位置是应变均匀的区域,电阻应变片粘贴在这个位置。由于盲孔的深度较深,在加工时有一定的难度,当盲孔的位置出现偏差,就会引起力分布不均匀,引起测量误差。在传感器盲孔内粘贴应变片的工艺,要求非常高,也是各个轧制传感器生产厂商的技术机密,粘贴应变片的位置一定要准确,否则也会引起测量误差。此外,传感器要做到整体密封,提高应变片与弹性体的绝缘等级。

第二部分是在传感器安装使用过程中产生的误差。轧制力传感器的额定测力值为1~60 MN,在受力均匀时,能达到七倍的额定过载能力。但是在轧钢过程中,难免发生偏载,使传感器受力不均,引起测量误差,严重时甚至会破坏传感器,因此需要在传感器上部和下部安装均压板,根据力学原理,均压板的厚度不小于传感器的厚度(或直径的一半),均压板的硬度应为HB 350~400,表面平行度不低于0.05 mm,表面粗糙度 Ra 要求0.63。传感器安装后与四周要有1 mm的间隙,并要求水平平整^[6]。

2 电阻应变式轧制力二次仪表

电阻应变式轧制力测力仪的二次仪表,主要有两个功能,首先给传感器提供稳定的激励电源,然后将传感器输出的毫伏级电信号,转换成标准仪表信号输出。由于轧钢生产现场环境恶劣,因而二次仪表除了具有较高的测量精度外,更重要的是要稳定可靠。为提高仪表的抗干扰能力,通常根据功能将模块其做隔离处理,激励电源和信号采样电路为一

部分,仪表信号输出为第二部分,数据处理为第三部分,三部分之间通过光电隔离进行数据传输。轧钢现场存在较多的电磁干扰,容易引起处理器死机,因此在软件上要有自我检测功能,在异常情况下能够迅速重置处理器,确保轧钢生产的连续性。

2.1 激励倍压法

电阻应变片在传感器内组成惠斯顿电桥,电桥激励电源的精度直接影响电桥的输出,即影响轧制力的测量精度。为减少激励电源精度带来的影响,可以用 ADC 采样的基准电源来整定激励电源,使激励电源的电压与基准电源电压成倍数关系,如此,ADC 所采样的电桥输出电压与自身的参考电压相关,消除了激励电源精度带来的测量误差^[7]。图 3 是激励倍压电路的示意图, ref 代表基准电压, V_{ref} 代表惠斯顿电桥的激励电压,电阻 nR 与电阻 R 成倍数关系。

$$V_{ref} = \frac{nR}{R}ref \quad (1)$$

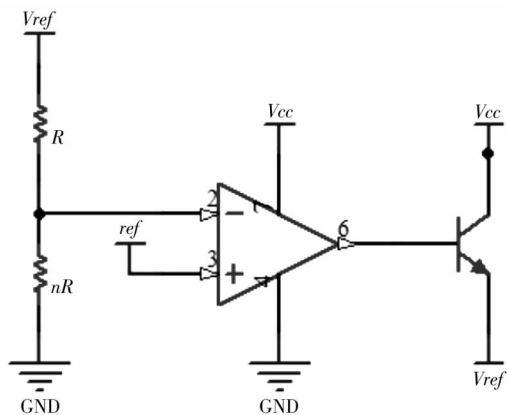


图 3 激励倍压电路

2.2 六线制

在轧钢生产现场,轧制力传感器安装在轧机牌坊内,二次仪表安装在电气控制室内,通常情况下两者的屏蔽电缆排线距离较远,约为 100 ~ 300 m。在传感器内部由电阻应变片构成的电桥,其输入阻抗较小,一般在 360 ~ 720 Ω 之间。传感器与仪表之间电缆线的阻抗,与电桥输入阻抗相比已经不能忽略,导致在传感器应变片电桥上的激励电压,明显小于二次仪表输出的激励电压,因而影响轧制力的测量精度。传感器应变片电桥的输出信号,经电缆线进入仪器放大器,由于仪器放大器具有高输入阻抗特

性,可以忽略电缆阻抗的影响。为此,可以在电缆中增加两根电压采样线,采集传感器中应变片电桥上真实的激励电压 U_s ,使 U_s 与基准电压 ref 成倍数关系。六线制的应变片电桥如图 4 所示,图中 R_1 — R_4 代表应变片组成的惠斯通电桥, U_0 为电桥输出信号。

2.3 传感器自校准

在激励电压为 U_s 的情况下,轧制力传感器承受额定负载 F_N 时测量电桥输出额定电压 U_{ON} ,将激励电压 U_s 换算成 1 V DC,此时测量电桥的输出额定电压 U_{ON} 可以定义为传感器的额定灵敏度 K ,其单位是 mV/V 。每一台轧制力传感器制造完成后,需要在力标准机上通过试验标定额定灵敏度 K ,然后在使用中,根据额定灵敏度 K 整定二次仪表,仪表根据数值 K 校准传感器,换算得出轧制力值数据。实际上,上述的方法存在现场测量值不准确的问题,究其原因,是因为标定得出的额定灵敏度 K 是相对量,由标准仪表标定得出,但是当现场使用的仪表其内部基准电压精度不高时,用额定灵敏度 K 校准就会产生校准误差,导致测量的轧制力值数据不准确。

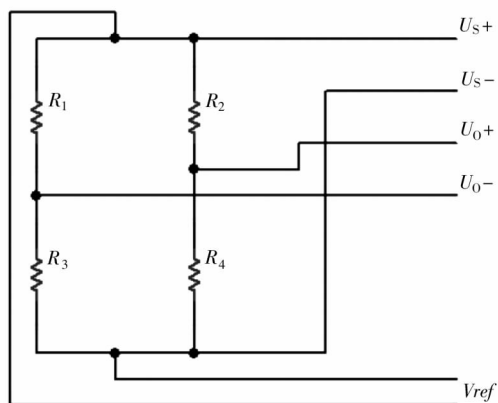


图 4 六线制应变片电桥

如果采用比例校准的方法,就可以避免因校准误差引起测量误差的问题。电阻应变片式轧制力传感器受力时,引起惠斯顿电桥桥臂电阻值的变化,根据此原理,可以人为地改变桥臂阻值,模拟传感器的受力情况。电阻应变片式测力传感器在力标准机上进行标定试验时,使传感器承载额定力值,记录此时传感器的额定灵敏度 K ,然后卸掉加载力,让传感器工作在空载状态下,如图 5 所示,将惠斯顿电桥中的一个特定桥臂并联校准电阻 R_c ,此时传感器的输出

灵敏度为 K_1 , 记录下 K_1 与 K 的比值 P , 到此, 电阻应变片式测力传感器在力标准机上的标定试验完成。当传感器在使用现场进行校准时, 将二次仪表内部的校准电阻 R_c 并联在惠斯顿电桥中的特定桥臂上, 得出灵敏度 K_1 , 并将校准比值 P 输入仪表, 经过计算后得出传感器的额定灵敏度 K , 此时完成电阻应变片式测力传感器的校准工作。校准电阻选用千分之一精度的标准电阻, 阻值一般为 $100\text{ k}\Omega$ 。相比单位为 mV/V 的额定灵敏度 K , 校准比值 P 精度更高, 是比例值, 从而可以解决因校准误差引起测量误差的问题。

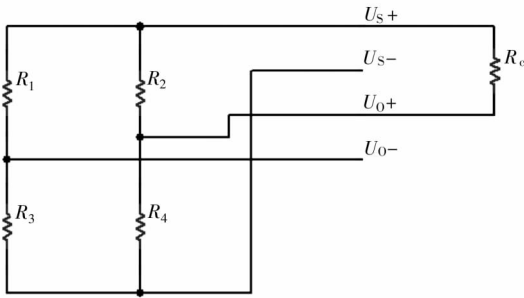


图5 传感器自校准示意图

考虑到轧钢现场传感器与二次仪表之间电缆线的问题, 在实际应用中, 需要对校准比值 P 进行修正。如图6所示, ΔR_f 代表传感器受力时电阻应变片阻值的变化, U_s 代表二次仪表输出的激励电压, 无电缆线时电桥输出电压为:

$$U_o = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_f}{R} U_s \quad (2)$$

考虑到电缆线的阻值 ΔR_l 后, 其对激励电源的分压为:

$$\Delta U = \frac{2\Delta R_l}{R + 2\Delta R_l} U_s \quad (3)$$

则电桥的实际输出电压为:

$$\begin{aligned} U' &= \frac{1}{4} \frac{\Delta R_f}{R} (U_s - \Delta U) = U_o (U_s - \Delta U) \\ &= U_o \frac{R}{R + 2\Delta R_l} \end{aligned} \quad (4)$$

表现为灵敏度减小。校准比值 P 也可以写为:

$$P = \frac{U_R}{R_o} \quad (5)$$

U_R 表示传感器并联校准电阻的输出电压。电桥输出的信号进入输入阻抗较大的仪器放大器, 因此可以忽略电桥输出延长线阻抗的影响, 二次仪表内

的校准电阻比延长线阻抗大四个数量级以上, 因而 U_R 无变化, 则修正后的校准比值 P' 为:

$$\begin{aligned} P' &= \frac{R_R}{U'_o} = P \frac{R + 2\Delta R_l}{R} \\ &= P \left(1 + \frac{2\Delta R_l}{R} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

可以看出, 考虑电缆线的阻值后, 校准比值增大, 即修正校准比值后, 检测到的轧制力大于未修正时的力值。

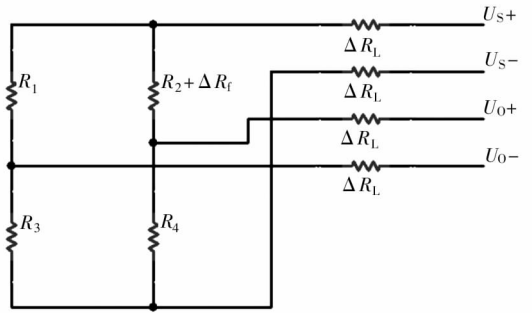


图6 电缆线对传感器自校准的影响

3 结束语

早期的轧制力测力仪, 磁弹性式为主流产品, 以至于 ABB 公司生产的传感器, 其高度 74 mm 成为不成文的行业标准。随着箔式应变片的推出, 弹性体结构的改进和工业现场仪表电子技术的发展, 以 KELK 公司为代表的电阻应变式测力仪, 依托测量精度高、成本低、皮实耐用的优点, 成为占据市场的主流。本文针对电阻应变式轧制力测力仪, 分别从传感器和二次仪表两方面分析了提高测量精度的方法。传感器的制造精度、现场安装条件是影响精度的主要因素。激励电源倍压法和六线制电桥线路, 有助于减少激励电源带来的误差。传感器的比例校准法, 可以解决因校准误差引起测量误差的问题, 在轧钢现场应用非常方便, 考虑到轧钢现场传感器与二次仪表之间电缆线的问题, 经数学推导, 得出了校准比值的修正公式。

参 考 文 献

- [1] 刘晓蒙. 轧制力传感器标定不确定度的计算方法[J]. 传感器世界, 2022, 28(7): 8-11.
- [2] 宋秀娥. ABB 和 KELK 公司轧制力测量系统对比分析[J]. 现代冶金, 2012, 39(4):

- 41-43.
- [3] 强锡富. 传感器[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [4] 尹福炎. 电阻应变片发展历史的回顾:纪念电阻应变片诞生70周年(1938—2008)[J]. 衡器, 2010, 39(11):42-51.
- [5] 高秀者,戴起勋,朱向群. 热处理对40CrNiMo钢弹性体滞后性的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(10):57-61.
- [6] 张怀锁. 轧制力传感器的强度验算和安装研究[J]. 自动化仪表, 2020, 41(9):31-36.
- [7] 蒋宁,杨其华,刘钢海. 平板式轧制力传感器的有限元分析[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(9):29-31.
-

启 事

本刊已加入“万方数据库”“中国知网”“维普数据库”等。凡向本刊投递的稿件一经采用,即视为作者同意将作品的网络传播权及电子版使用权授予本刊,本刊一次性给付的稿酬已包含上述授权的费用。若不同意上述内容者,请在投递的稿件上予以特别声明,以便本刊酌情处理。

《包钢科技》编辑部