

双元件栅半桥电阻应变计 接桥方式的研究

卢文发 李春兰

〔提要〕本文研究了双元件栅半桥自补偿电阻应变计的测量线路。在三线制接桥方式的基础上提出了四线制测量线路。由分析结果可知,不仅连接导线电阻的温度改变这不可避免因素对补偿结果的影响显著减小,而且总的误差也随之减小。并指出,无论采取何种接桥方式,导线电阻的温度改变都得不到完全补偿,故必须采取电阻温度系数低的连接导线并尽可能缩短高温区的布线长度。

主题词: 电阻应变计 接桥方式 测量线路

一、引言

在当今国防工业和国民经济重要领域内,很多高温零部件不仅要经过周密的设计和详细分析计算,为了确认其安全可靠,往往还要通过多种实验手段予以验证。在这方面,高温电测技术占有很重要的地位。它是近廿多年来发展起来的一种重要的热强度分析手段。

如果以 $\epsilon_{s,p}$ 表示应变计的指示应变,则在灵敏系数变化所存在的温度场中,外载荷以及热应力所产生的真实应变 ϵ 应为

$$\epsilon = \{\epsilon_{s,p} - F(T)\}(K_0/K_1) \quad (1)$$

式中

T ——测点温度;

K_0 ——电阻应变计室温时的灵敏系数;

K_1 ——电阻应变计 T 温时的灵敏系数;

$F(T)$ ——电阻应变计在温度 T 时的热输出。

通常, K_0/K_1 在一定温度范围内标定使用,而 $\epsilon_{s,p}$ 和 $F(T)$ 是同一量级的值,因此,精确求出 $F(T)$ 是热应力测量中必须确保的一个前提条件。对变温状态下的应力测量,由于急剧的温度变化,将会给测量结果带来很大误差。如应变计做成温度自补偿型,则在一定程度上可以得到弥补。为了适应各种工作条件和不同的试验环境,自补偿应变计有多种多样的结构形式。其中,双元件栅半桥自补偿应变计由于在线路中串联可调电阻,因而它可以适合不同的试件材料并能在较宽的温度范围实现自补偿。应变计及测量线路ASTM 1958年论文集曾作了报导,见图1。不难分析,其各项参数的关系式为

$$R_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \quad (2)$$

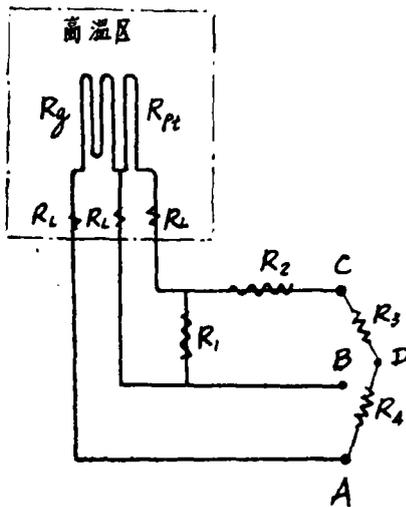


图 1 双元件栅半桥电阻应变计及测量线路

式中

$$\begin{aligned} A &= \Delta R_{P_t} - \Delta R_g \\ B &= \Delta R_g (2R_{P_t} + 4R_L + \Delta R_{P_t}) \\ C &= \Delta R_g (R_{P_t} + 2R_L) (R_{P_t} + 2R_L \\ &\quad + \Delta R_{P_t}) + R_L^2 P_{P_t} \end{aligned}$$

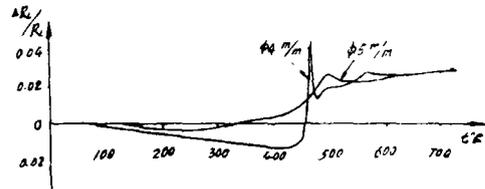


图 2 铁铬铝导线电阻温度特性

$$R_2 = R_g + R - \frac{(R_{P_t} + R_L)(R_1 - R_L)}{R_{P_t} + R_1 + 2R_L} \quad (3)$$

由(3)式作误差分析, 结果是

$$\frac{\partial R_g}{\partial R_{P_t}} = \frac{(R_1 + R_L)(R_1 - R_L)}{(R_{P_t} + R_1 + 2R_L)^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial R_g}{\partial R_L} = -2 \frac{(R_{P_t} + 2R)(R_1 + R_{P_t} + 2R) + (R_{P_t} + R)(R_1 - R)}{(R_{P_t} + R_1 + 2R_L)^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial R_g}{\partial R_1} = \frac{(R_{P_t} + 3R_L)(R_{P_t} + R_L)}{(R_{P_t} + R_1 + 2R_L)^2} \quad (6)$$

应变计的连接导线经过高温区时, 温度同样可以使导线电阻变化, 桥路就有一个相当于热输出的信号输出。由式(5)可计算出它的大小。图 2 为两种型号铁铬铝导线电阻温度特性的实验结果。现以本文中列举的应变计参数为例, 当 \$\Delta t = 500^\circ\text{C}\$ 时, 其导线电阻的改变量按图 2 曲线计算得 \$\Delta R_L = (\Delta R_L / R_L) \cdot R_L = 0.192\Omega\$, 相当于桥臂电阻的改变量 \$\Delta R_{g,L} = \partial R_g / \partial R_L \cdot \Delta R_L = -0.019\Omega\$, 则引起的热输出 \$\varepsilon_{g,L} = -82\mu\varepsilon\$。应该看到, 这是一个不小的数值, 并随导线长度和温度升高而增加。在现场测试中, 因导线电阻温度改变是个未知量, 它成为不可避免又难以修正的一个系统误差, 不能不引起重视。

本文介绍该型应变计的另一接桥方式, 它不仅可以提高连接导线因电阻温度改变的补偿程度, 而且各参数的测量误差对补偿结果总的影响也有所减小。

二、测量线路及有关参数计算

将图 1 中三线制接桥方式改成用四根导线连接成测量桥路, 如图 3 所示。当和 \$R_3 = R_4\$ 的对称半桥组成桥路时, 电桥的平衡条件:

$$R_{AB} = R_{BC} \quad (7)$$

即

$$R_g + R_L = R_2 + \frac{(R_{p1} + R_L)(R_1 + R_L)}{R_{p1} + R_1 + 2R_L} \quad (8)$$

当温度发生改变时

$$\Delta R_{\Delta B} = \Delta R_g + \Delta R_L \quad (9)$$

$$\Delta R_B = \frac{(R_{p1} + \Delta R_{p1} + R_L + \Delta R_L)(R_1 + R_L + \Delta R_L)}{R_{p1} + R_1 + 2R_L + \Delta R_{p1} + 2\Delta R_L} - \frac{(R_{p1} + R_L)(R_1 + R_L)}{R_{p1} + R_1 + 2R_L} \quad (10)$$

由(8)式知, 当 $\Delta R_{\Delta B} = \Delta R_{Bc}$ 时电桥平衡, 则

$$\Delta R_{Bc} = \frac{(R_{p1} + \Delta R_{p1} + R_L + \Delta R_L)(R_1 + R_L + \Delta R_L)}{R_{p1} + R_1 + 2R_L + \Delta R_{p1} + 2\Delta R_L} - \frac{(R_{p1} + R_L)(R_1 + R_L)}{R_{p1} + R_1 + 2R_L} - \Delta R_L \quad (11)$$

解(11)式并令

$$A = \Delta R_{p1} - \Delta R_g$$

$$B = \Delta R_g(2R_{p1} + 4R_L + \Delta R_{p1}) - 2R_L\Delta R_{p1} \quad (12)$$

$$C = R_L^2\Delta R_{p1} - \Delta R_g(R_{p1} + 2R_L)(R_{p1} + 2R_L + \Delta R_{p1})$$

则

$$R_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (13)$$

将解得的 R_1 代入(8)式即可得 R_2 :

$$R_2 = R_g + R_L - \frac{(R_{p1} + R_L)(R_1 + R_L)}{R_{p1} + R_1 + 2R_L} \quad (14)$$

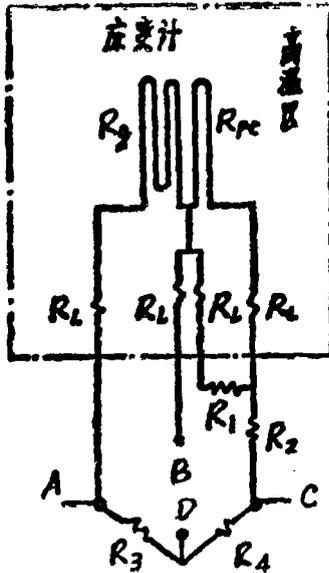


图 3 应变计及测量线路

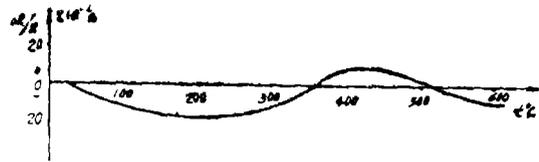


图 4 应变计热输出曲线

式中 ΔR_g 、 ΔR_{p1} 可根据单丝片的电阻温度特性曲线, 按所要求的补偿温度查出。

按 R_1 和 R_2 的计算结果, 接成图 3 桥路, 即可获得满意的效果。图 4 为某应变计补偿后的热输出曲线。

三、误差分析及两种接桥方式比较

可(8)式导出各参数对补偿结果的影响:

1. 铂栅阻值 $R_{p,t}$ 的影响

$$\frac{\partial R_g}{\partial R_{p,t}} = \frac{(R_1 + R_L)^2}{(R_{p,t} + R_1 + 2R_L)^2} \quad (15)$$

2. 并联电阻 R_1 的影响

$$\frac{\partial R_g}{\partial R_1} = \frac{(R_{p,t} + R_L)^2}{(R_{p,t} + R_1 + 2R_L)^2} \quad (16)$$

3. 连接导线电阻 R_L 的影响

$$\frac{\partial R_g}{\partial R_L} = -2 \frac{(R_{p,t} + R_L)(R_1 + R_L)}{(R_{p,t} + R_1 + 2R_L)^2} \quad (17)$$

现以某应变计参数为例

$R_g = 116.0\Omega$, $R_{p,t} = 1.96\Omega$, $R_L = 7.4\Omega$, 当 $\Delta t = 500^\circ\text{C}$ 时由单丝片性能查出 $\Delta R_g = 2.95\Omega$, $\Delta R_{p,t} = 3.17\Omega$ 。如按图1的三线制接桥, 则 $R_1 = 502.48\Omega$, $R_2 = 114.5\Omega$ 。如按图3的测量线路, 则 $R_1 = 291.4\Omega$, $R_2 = 114.32\Omega$ 。将这些参数分别代入各自误差分析式, 即(4)、(5)、(6)、(15)、(16)、(17), 计算结果列于表1。

表 1

接桥方式 \ 误差分析式	三线(图1)	四线(图3)
$\partial R_g / \partial R_{p,t}$	0.936	0.94
$\partial R_g / \partial R_1$	0.00084	0.00092
$\partial R_g / \partial R_L$	-0.0989	-0.0589

这样, 四线接桥线路导线电阻 R_L 在高温区的改变 ΔR_L 给补偿结果的影响为

$$\Delta R_{p,t} = \frac{\partial R_g}{\partial R_L} \left[\left(\frac{\Delta R_L}{R_L} \right) R_L \right] = -0.0113\Omega$$

表 2

接桥方式 \ 符号	$\delta R_{p,t} \times 10^{-4}\Omega$	$\delta R_1 \times 10^{-4}\Omega$	$\delta R_L \times 10^{-4}\Omega$	$\Delta R_{g1} = \frac{\partial R_g}{\partial R_{p,t}} \cdot \delta R_{p,t} \times 10^{-4}\Omega$	$\Delta R_{g2} = \frac{\partial R_g}{\partial R_1} \cdot \delta R_1 \times 10^{-4}\Omega$	$\Delta R_{g3} = \frac{\partial R_g}{\partial R_L} \cdot \delta R_L \times 10^{-4}\Omega$
三 线	± 19.6	± 5024	± 74	± 18.4	± 4.2	± 7.3
四 线	± 19.9	± 2914	± 74	± 18.4	± 2.7	± 4.4
	$\Sigma \Delta R_g = \Delta R_{g1} + \Delta R_{g2} + \Delta R_{g3} \times 10^{-4}\Omega$	$\Sigma e_R \pm \mu e$	$\Delta R_{gL} \times 10^{-4}\Omega$	e_{eL}	$\Delta R_{gL} \pm \Sigma \Delta R_g \times 10^{-4}\Omega$	$e_{\Sigma} \pm \mu e$
	± 29.9	13	-190	-82	-190 ± 29.9	-82 ± 13
	± 25.5	11	-113	-49	-113 ± 25.5	-49 ± 11

相当于热输出 $\varepsilon_{\varepsilon L} = -49\mu\varepsilon$ 。它和三线制接桥方式比,减小了几乎一半。

此外,如引入各参数的绝对误差 δR_{P1} 、 δR_1 、 δR_L 进行计算(测量精度皆以0.1%计),则可得出各参数对补偿结果影响之和 $\Sigma\Delta R_{\varepsilon}$ 或 $\Sigma\varepsilon_{\varepsilon}$ 。那么,连同 $\Delta R_{\varepsilon L}$ 或 $\varepsilon_{\varepsilon L}$,则对补偿结果总的影响应为 $\Delta R_{\varepsilon L} \pm \Delta R_{\varepsilon}$ 或 $\varepsilon_{\varepsilon L} \pm \Sigma\varepsilon_{\varepsilon}$,计算结果列于表2。

四、结 论

比较两种接桥方式,四线制不仅可以减小导线电阻温度改变所引起的系统误差,而且总的偶然误差也有所减小。也应该看到,无论三线制或四线制,都应选择电阻温度系数低的连接导线并尽可能地缩短在高温区的布线长度,方能获得较好结果。

五、参 考 文 献

[1] Symposium ON ELEVATED TEMPERATURE STRAIN GAGES. ASTM Special Technical Publication №230 1958.

[2] [日] 大田原康彦 “蒸汽透平高压缸的热应力” 《国外舰船技术》《透平锅炉类》1980年№5



消息报导

我国向GE公司订购50000千瓦的联合循环装置

我国已向美国GE公司订购一套50000千瓦单轴STAG 106联合循环动力装置,它将装在大庆油田。

这项订货是由中国国家技术进口公司代表石油工业部大庆石油管理局提出的。该项合同费用为1390万美元。GE公司将供应全套设备、备件并为该项目提供技术顾问。

STAG装置的设备包括:一台国际标准大气条件下基本额定功率约为37000千瓦的MS 6001燃气轮机、一台不用燃烧的余热锅炉、汽轮机、6000万伏发电机、IV型燃气轮机控制系统和一套数据记录信息和控制系统。

该装置计划分成二个阶段投入运行,即在1986年10月以简单循环方式使燃气轮机投入运行,1987年8月以联合循环方式投入运行。

大庆的这套装置为注水过程提供动力,注水过程被用来提高油田的生产能力。也将从装置抽出过程蒸汽加热原油,以便于泵唧。

(吉桂明摘译自“Gas turbine world 1985.9—10”)

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

No.2 1986

CONTENTS

GAS TURBINE EXPERIMENTAL RESEARCH

1. An experimntal study of a blade-type total-pressure probe
.....*Sun Jihu, Liu Zhanmin*(1)

Synopsis

A monographic study was carried out of a blade-type total-pressure probe. Through tests, characteristic curves under various regimes ranging from low velocities to high ones were obtained. Analysis was made of factors influencing probe measurement accuracy. Performance comparison of three kinds of blade-type probes was made and its result discussed. The study results have been used by the 703 Research Institue in its research work concerned with the measurement of compressor interstage aerodynamic parameters. Our practice has shown that blade-type probes are not only usable, but are highly effective.

2. Thermal stress measurements of flow deflectors in a power turbine exhaust duct.....*Zhu Zhuhong, Wang Shuxia*(9)

Synopsis

In an effort to solve the problem of warping, cracks and splintering being found on the flow deflector of a power turbine exhaust duct, several thermal stress measurements were made in the original and the improved version of the exhaust duct to obtain their respective stress and temperature distribution patterns under various operating conditions. The use of the welded half-bridge self-compensating high temperature strain gauges has provided a firm basis for ensuring a high efficiency and a long life feature for the power unit.

MEASUREMENT AND TESTING TECHNIQUES

3. A study of bridge forms of double-element half-bridge resistance strain gauges
.....*Lu Wenfa, Li Chunlan*(16)

Synopsis

This paper studies measuring circuits of double-element halfbridge self-compensaing resistance strain gauges and describes a four-line measuring circuit on the basis of the three-line connecting circuit. It can be seen from the results of analysis that the effect of the connecting wire resistance change with temperature on the compensation results has been significantly reduced, and the overall error has also been reduced accordingly. It is pointed out that, whichever bridge form is used, the wire resistance change with temperature can not be completely compensated and therefore a connecting wire with low resistance-temperature coefficient and a shortest possible wiring length in the high-temperature area must be used.