

惠斯通电桥式压力传感器温度补偿电路设计

陈碧海, 陈杉杉, 程宝进
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 基于惠斯通电桥式压力传感器桥阻随温度变化的特性, 电路设计通过利用桥阻随温度变化、桥路电压也随之改变的特性, 完成对压力传感器的温度补偿。针对压力传感器灵敏度正温度系数-零位正温度系数、灵敏度正温度系数-零位负温度系数、灵敏度负温度系数-零位正温度系数、灵敏度负温度系数-零位负温度系数这四种情况进行补偿电路设计, 并对传感器灵敏度温度补偿部分电路进行公式推导, 选择合适的电路参数。计算结果表明, 电路补偿达到理想效果。

关键词: 压力传感器; 惠斯通电桥; 温度补偿

中图分类号: TH812

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)02-0015-05

The design of temperature compensation circuit for pressure sensor based on Wheatstong bridge

CHEN Bihai, CHEN Shanshan, CHENG Baojin

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: The circuit design is based on the characteristics of Wheatstone bridge pressure sensor's resistance changing with temperature. The temperature compensation of pressure sensor is completed by the change of the bridge voltage with bridge resistance which is dependent on temperature. The circuit is designed for temperature compensate accordance with four types: the positive sensitivity temperature coefficient with positive zero temperature coefficient, the positive sensitivity temperature coefficient with negative zero temperature coefficient, the negative sensitivity temperature coefficient with positive zero temperature coefficient and the negative sensitivity temperature coefficient with negative zero temperature coefficient. The theoretical analysis, formula deduction and practical calculation procedures are also presented. The result of parameter calculation shows that the circuit compensation achieves the ideal effect.

Key words: Pressure sensor; Wheatstone bridge; Temperature compensation

引 言

惠斯通电桥式检测原理广泛应用于压力传感器, 典型的有溅射薄膜式压力传感器、厚膜式压力传感器和半导体应变式压力传感器。无论哪种原理的传感器, 温度误差都或多或少地存在, 一般传感器温度误差可达 2% 或更多。因此, 在实际使用过程中必须对其进行温度补偿。目前, 大部分补偿方法是在传感器邻近部位增加热敏元件并接入检测电路中进行补偿。该方法弊端是热敏元件与压力传感器敏感压力部位存在温度差, 或温度达到平衡存在时间差, 造成测量的误差。因此, 对传感器进行温度补偿的理想途径是在传感器敏感元件部位采集温度信号, 通过对其处理以补偿传感器的温度误差。

1 惠斯通电桥式压力传感器原理及误差来源分析

惠斯通电桥式压力传感器由四个桥臂电阻组成, 如图 1 所示^[1,2]。

如以恒压源 E 激励, 则桥路输出

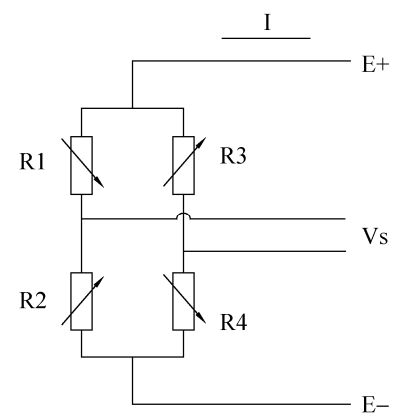


图 1 惠斯通电桥电路图
Fig. 1 Wheatstong bridge

$$V_s = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) * E$$

令 $R_1=R_4=R_0-\Delta R$, $R_2=R_3=R_0+\Delta R$

R_0 为传感器零位电阻, ΔR 为传感器感压后电阻变化值, 则

$$V_s = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + \Delta R + R_0 - \Delta R} - \frac{R_0 - \Delta R}{R_0 + \Delta R + R_0 - \Delta R} \right) * E$$

$$V_s = \frac{\Delta R}{R_0} * E \quad (1)$$

其中 $\Delta R/R_0$ 为桥路的灵敏度。

如以恒流源 I 激励, 则 $V_s = I * \Delta R$ 。 (2)

由式 (1) 可以看出, 桥路输出与 ΔR 、 R_0 相关。 ΔR 、 R_0 均是随温度变化的参数, 如 ΔR 、 R_0 随温度变化的系数相同, 则可以自身起到灵敏度温度补偿作用, 但两者温度系数接近, 实际上是很难的, 有时方向甚至是相反的, 此时会导致桥路输出温度系数更差。

由式 (2) 可以看出, 恒流源激励时, I 不变, 桥路输出仅与 ΔR 相关, ΔR 不仅随压力变化, 还随温度变化。

根据压力传感器灵敏度的温度特性, 可以选择恒压源激励或恒流源激励, 这对传感器温度灵敏度有一定改善, 但仍然不能最大程度地补偿灵敏度温度。

如果 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的初始电阻 R_0 不同, 且电阻温度系数虽然为相同工艺, 但仍可能存在微小差异, 那么桥路输出的零位不是零, 且零位温度系数可能为正也可能为负。

因此, 压力传感器的灵敏度温度补偿和零位温度补偿对传感器的稳定性显得至关重要。

2 补偿方式选择

根据上述分析可知, 恒压源激励方式对灵敏度正温度系数压力传感器的灵敏度有一定补偿, 但补偿效果是不可控的, 补偿效果取决于 $\Delta R/R_0$ 的温度稳定性, 即 ΔR 和 R_0 随温度变化的相互关系, 这个关系是传感器自身特性决定的。为了改善传感器温度特性, 必须针对这两个变量进行后续增加感温元件和电路补偿, 补偿方式相对较复杂。

恒流源激励方式桥路输出仅与 ΔR 相关, ΔR 在固定应变情况下, 还与温度相关, 有可能为正温度系数也可能为负温度系数, 无论那种压力传感器, 仅对 ΔR 随温度变化的趋势补偿即可。

由于 $R_1=R_4=R+\Delta R$, $R_2=R_3=R-\Delta R$, 桥路总电阻 $R_b=(R_1+R_2)/(R_3+R_4)=R_0$, R_1 、 R_2 变化互抵, R_3 、 R_4 变化互抵, R_b 在压力作用下不变, 仅随温度变化而变化^[3]。我们通过测量恒流源桥路电压, 即可得到桥路电阻, 桥路电阻随温度变化而变化, 进而可以对传感器零度温度系数和零位温度系数进行补偿。

这种补偿方法避免了由于外加温度传感器与压力传感器敏感芯体实际温差带来的补偿误差, 提高了温度补偿的精度, 同时节约了成本, 简化了电路的设计。

3 补偿电路设计

压力传感器全桥路电阻均为正温度系数, 根据压力传感器输出灵敏度为正温度系数、负温度系数设计两种电路, 并根据零位正温度系数、负温度系数对零位补偿电路进行调整。

3.1 传感器灵敏度为负温度系数补偿电路设计

根据压力传感器灵敏度为负温度系数、桥路电阻是正温度系数^[4,5], 设计负温度系数压力传感器温度补偿电路如图 2 所示。图 2 中电路 A1 用于构成恒流源电路, A2 用于构成桥路输出的差动放大, A3 用于对恒流源的温度补偿, A4 用于输出级放大, 同时进行调零和零位温度补偿。

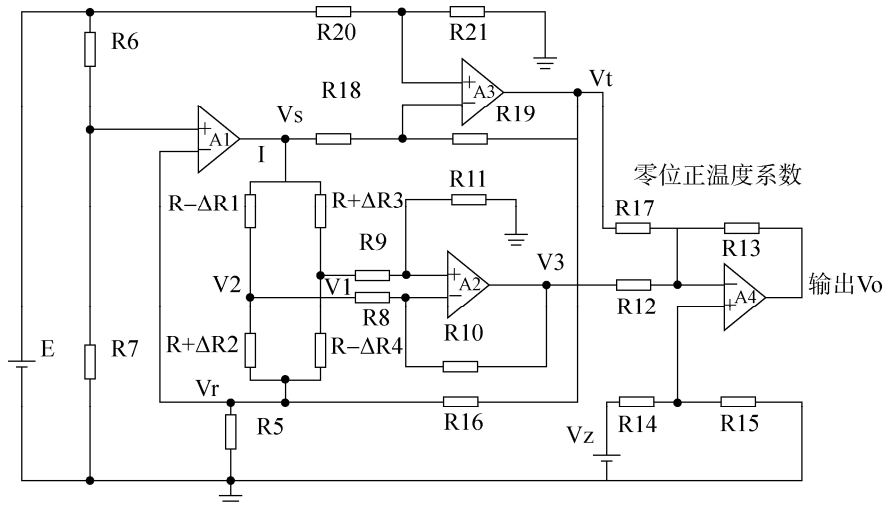


图2 传感器灵敏度负温度系数补偿电路-零位负温度系数补偿电路

Fig. 2 Circuit of negative sensitivity temperature coefficient-zero negative temperature coefficient

由运放 A1 和桥路电阻 R_5 、 R_6 、 R_7 构成恒流源激励压力传感器检测电路。桥路电阻随温度升高而增加，桥路电压 V_s 增加，经 A3 构成的反向放大器后输出电压 V_t 减小，经 R_{16} 反馈于桥路，使桥路电流增加，从而提高压力传感器桥路输出灵敏度。调节 R_{16} 大小，可以使灵敏度随温度提高量值与传感器本身灵敏度随温度降低量值相当，达到灵敏度温度补偿作用。具体公式推导如下。

A3 为反向放大，根据基本差动放大电路输出电压为

$$V_t = \frac{R_{21}}{R_{20}} * E - \left(1 + \frac{R_{21}}{R_{20}} \right) \left(\frac{R_{19}}{R_{18} + R_{19}} \right) * V_s \quad (3)$$

当 $\frac{R_{21}}{R_{20}} = \frac{R_{19}}{R_{18}}$ 时，有

$$V_t = \frac{R_{19}}{R_{18}} * (E - V_s) \quad (4)$$

根据 A1 构成恒流源电路，可得到

$$\frac{V_r}{R_s} = \frac{V_s - V_r}{R} + \frac{V_t - V_r}{R_{16}} \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5) 有

$$\frac{V_r}{R_s} = \frac{V_s - V_r}{R} + \frac{\frac{R_{19}}{R_{18}}(E - V_s) - V_r}{R_{16}} \quad (6)$$

根据式 (6) 推出

$$V_s = \frac{R_{16} * R_{18} * R * V_r + R * R_5 * R_{18} * V_r + R_5 * R_{16} * R_{18} * V_r - R_5 * R_{19} * R * E}{(R_5 * R_{16} * R_{18} - R * R_5 * R_{19})} \quad (7)$$

根据式 (1) 有 $\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{V_s - V_r}{R} * \Delta R$ ，即

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R} \left(\frac{(R * R_{16} * R_{18} + R * R_5 * R_{18} + R_5 * R_{16} * R_{18}) V_r - R * R_5 * R_{19} * E}{(R_5 * R_{16} * R_{18} - R * R_5 * R_{19})} - V_r \right) \quad (8)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R_{16} * \frac{R_{18}}{R_{19}} - R} * \frac{R_{16}}{R_5} * \left(\frac{R_{18}}{R_{19}} * V_r + \frac{R_{18}}{R_{19}} * V_r + V_r - E \right)$$

式 (8) 中分子 ΔR 为负温度系数, R 为正温度系数, 分母 $R_{16} * \frac{R_{18}}{R_{19}} - R$ 为负温度系数。通过选择合适电路的参数可以使分子、分母变化比例相同, 达到温度补偿的目的。

对于零位负温度系数的传感器, 在图 2 中 A4 放大电路部分, 通过 V_t 、 R_{17} 作用于 A4 反向端使输出零位 V_0 随温度增加而增加, 调节 R_{17} 阻值可以调节零位补偿的量值, 使补偿增加量值与传感器本身零位降低量值相当, 达到零位温度补偿作用。

对于零位正温度系数的传感器, 需对图 2 中 A4 放大电路部分进行调整, 通过 V_t 、 R_{14} 作用于 A4 同向端, V_z 、 R_{17} 作用于 A3 反向端。 V_t 使输出零位 V_0 随温度增加而减小, 调节 R_{14} 阻值可以调节零位补偿的量值, 使补偿减小量值与传感器本身零位增加量值相当, 达到零位温度补偿作用。

3.2 传感器灵敏度为正温度系数补偿电路设计

根据压力传感器灵敏度为正温度系数、桥路电阻是正温度系数^[6], 设计灵敏度为正温度系数补偿电路如图 3 所示, 图中电路 A1 用于构成恒流源电路, A2 用于构成桥路输出的差动放大, A3 用于对恒流源的温度进行补偿, A4 用于输出级放大, 同时进行调零和零位温度补偿。

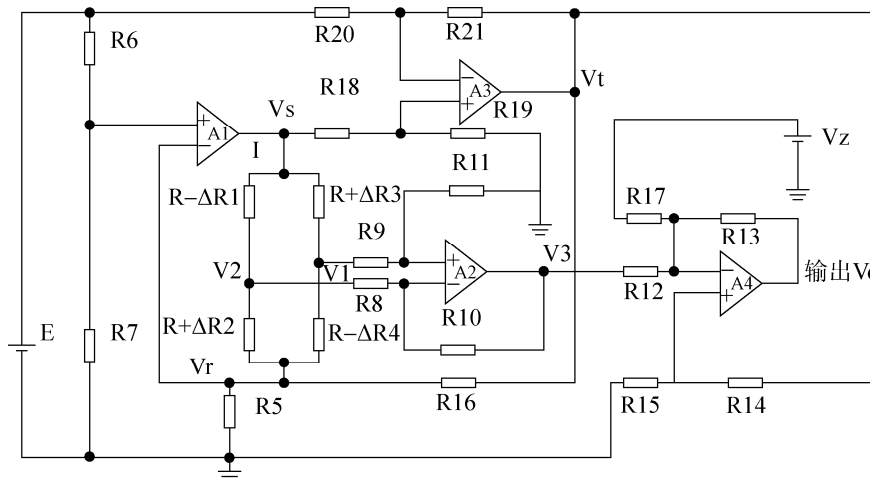


图 3 传感器灵敏度正温度系数-零位负温度系数补偿电路

Fig 3 The circuit of positive sensitivity temperature coefficient-zero negative temperature coefficient

由运放 A1 和桥路电阻 R_5 、 R_6 、 R_7 构成恒流源激励压力传感器检测电路。桥路电阻随温度升高而增加, 桥路电压 V_s 增加, 经 A3 构成的正向放大器后输出电压 V_t 增大, 使桥路电流减小, 从而降低压力传感器桥路输出灵敏度。调节 R_{16} 大小, 可以使电路灵敏度随温度降低量值与传感器本身灵敏度随温度增加量值相当, 达到灵敏度温度补偿作用。

具体公式推导如下。

A3 为正向放大, 根据基本差动放大电路输出电压为

$$V_t = -\frac{R_{21}}{R_{20}} * E + \left(1 + \frac{R_{21}}{R_{20}}\right) \left(\frac{R_{19}}{R_{18} + R_{19}} V_s\right) \quad (9)$$

当 $\frac{R_{21}}{R_{20}} = \frac{R_{19}}{R_{18}}$ 时, 有

$$V_t = \frac{R_{19}}{R_{18}} (V_s - E) \quad (10)$$

根据 A1 构成恒流源电路, 可得到

$$\frac{V_r}{R_5} = \frac{V_s - V_r}{R} + \frac{V_t - V_r}{R_{16}} \quad (11)$$

将式 (10) 代入公式 (11) 有

$$\frac{V_r}{R_s} = \frac{V_s - V_r}{R} + \frac{\frac{R_{19}}{R_{18}}(V_s - E) - V_r}{R_{16}} \quad (12)$$

根据式(12)推出

$$V_s = \frac{R_{16} * R_{18} * R * V_r + R * R_5 * R_{18} * V_r + R_5 * R_{16} * R_{18} * V_r + R_5 * R_{19} * R * E}{(R_5 * R_{16} * R_{18} + R_5 * R_{19} * R)} \quad (13)$$

根据式(1)有 $\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{V_s - V_r}{R} * \Delta R$, 即

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R} \left(\frac{(R * R_{16} * R_{18} + R * R_5 * R_{18} + R_5 * R_{16} * R_{18})V_r + R * R_5 * R_{19} * E}{(R_5 * R_{16} * R_{18} + R * R_5 * R_{19})} - V_r \right)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R_{16} * \frac{R_{18}}{R_{19}} + R} * \left(\frac{R_{16}}{R_5} * \frac{R_{18}}{R_{19}} * V_r + \frac{R_{18}}{R_{19}} * V_r - V_r + E \right) \quad (14)$$

式(14)中, 分子 ΔR 为正温度系数, R 为正温度系数, 分母 $R_{16} * \frac{R_{18}}{R_{19}} + R$ 为正温度系数, 通过选择合适的电路参数可以使分子、分母变化比例相同, 达到温度补偿的目的。

对于零位负温度系数的传感器, 在图3中A4放大电路部分, 通过 V_1 、 R_{14} 作用于A4同向端使输出零位 V_0 随温度增加而增加, 增加量值与传感器本身零位降低量值相当, 达到零位温度补偿作用。

对于零位正温度系数的传感器, 需对图3中A4放大电路部分进行调整, 通过 V_1 、 R_{17} 作用于A4反向端, V_2 、 R_{14} 作用于A4同向端, 使输出零位 V_0 随温度增加而减小, 减小量值与传感器本身零位增加量值相当, 达到零位温度补偿作用。

4 试验及计算结果

对于灵敏度负温度系数, 根据图2电路的式(8), 取典型值 $E=5V$, $V_r=2.5V$, $R=3000\Omega$ (100°C 温区内随温度变化 $\pm 13\%$), 满量程变化 $\Delta R=70\Omega$ (100°C 温区内随温度变化 $\pm 10\%$), $R_5=1000\Omega$, $R_{16}=1000\Omega$, $\frac{R_{18}}{R_{19}}=6.9$, 有

$$\Delta V = \frac{70 \pm 7}{1000 * 6.9 - (3000 \pm 390)} (1 * 6.9 * 2.5 + 6.9 * 2.5 + 2.5 - 5) \quad (15)$$

$$\Delta V = \frac{70 \pm 7}{3900 \pm 390} * 32 \quad (16)$$

由上式可看出分子部分 ΔR 随温度增加或减小 10%, 分母部分亦随温度增加或减小 10%, 变化比例相同, 输出 ΔV 得到补偿不变。

对于灵敏度正温度系数, 根据图3电路的式(14), 取典型值 $E=5V$, $V_r=2.5V$, $R=3000\Omega$ (100°C 温区内随温度变化 $\pm 1.5\%$), 满量程变化 $\Delta R=10\Omega$ (100°C 温区内随温度变化 $\pm 1\%$), $R_5=1000\Omega$, $R_{16}=1000\Omega$, $\frac{R_{18}}{R_{19}}=1.5$, 有

$$\Delta V = \frac{10 \pm 0.1}{1000 * 1.5 + 3000 \pm 45} * (1 * 1.5 * 2.5 + 1.5 * 2.5 - 2.5 + 5)$$

$$\Delta V = \frac{10 \pm 0.1}{4500 \pm 45} * 10$$

由上式可看出分子部分 ΔR 随温度增加或减小 1%, 分母部分亦随温度增加或减小 1%, 变化比例相同, 输出 ΔV 得到补偿不变。

(下转第 26 页)