

摘要：惯导系统是精确制导武器中不可或缺的重要组成部分。在战术级或小型化产品上通常要对每个产品进行单独温度误差补偿等措施以抑制环境温度的影响。因此在生产线上，需要对光纤陀螺惯导系统的测温部件进行专门的标定，通过调整环节使其与基准温度源的误差保持在一定的要求范围内。通过对测温电路的分析，提出一种测温电路调试方法，对三温度点测试法得到的测试数据进行线性拟合，结合调试电阻对拟合曲线的斜率和截距的影响关系调整调试电阻的大小，即可快速完成测温电路的调试。实际测试证明该方法是可行的。

关键词：惯导系统；测温电路；温度特性；快速调试

中图分类号：TP342

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2018)06-0017-04

收稿日期：2018-04-26

基于硅三极管的测温电路 工作原理分析及应用

赵博宏¹ 孙蓉²

1. 中国空空导弹研究院，河南洛阳 471000；2. 洛阳市质量技术监督检验检测中心，河南洛阳 471000

一、引言

惯导系统是精确制导武器中不可或缺的重要组成部分，随着技术的发展，光纤陀螺已开始应用于现代惯导系统。相比较而言，光纤陀螺惯导系统具有高可靠、长寿命、参数稳定性好、性能不受启动次数影响等特点，为惯性测量产品实现长期免标定、免维护创造了条件。但光纤陀螺也有不足之处，例如其对温度等环境因素相对较敏感^[1]。因此，对于光纤陀

螺工作环境温度的精确测量将变得至关重要，其测量结果将直接影响软件补偿的参数值，并最终影响光纤陀螺的输出。

实践中一般需要对光纤陀螺惯导系统的测温部件进行专门的标定，通过调整环节使其与基准温度源的误差保持在一定的要求范围内。本文针对具体的测温电路，通过对电路工作原理进行分析，提出了一个采用高温、常温、低温三个温度点测试数据线性拟合的方法来进行电路调试，将原本需要两到三个高低温循环连续测试才能完成的工作，在一个温度循环内完成。

二、测温电路

1、测温电路工作原理

温度传感器采用硅 PNP 三极管 3CG160B，其安装在光纤陀螺表面。3CG160B 将敏感到的温度信号转换为电流信号，然后经过检测、调整环节变换成与特定温度成一定关系的模拟电压 V_T 后送入电压比较器作为比较电压源。

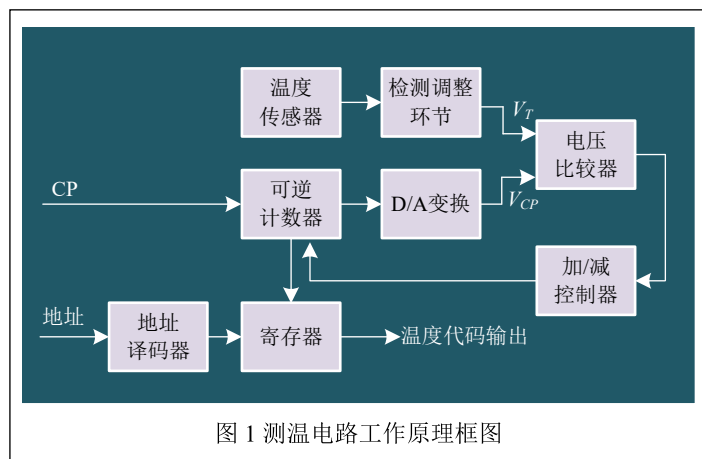


图 1 测温电路工作原理框图

CP 方波信号输入给可逆计数器的时钟端，可逆计数器输出频率成 1/2 倍的阶梯信号，该阶梯信号通过 D/A 转换器转换成相应的模拟电压量 V_{CP} 。该模拟电压量 V_{CP} 在电压比较器中和与温度相对应的模拟电压 V_T 进行比较。

当电压 V_{CP} 低于电压 V_T 时，电压比较器输出高电平给可逆计数器，则加计数；当电压 V_{CP} 高于电压 V_T 时，电压比较器输出低电平给可逆计数器，则减计数。当两电压基本相等时，可逆计数器的加减计数端将在高位、低位间交替变化。可逆计数器的计数值也在相应传感器电压值 V_T 的小区间内上下波动。可逆计数器的计数代码与传感器的电压相对应，也与某一特定温度相对应。此时，将计数代码放入寄存器中，只要有取温度指令，则寄存器输出计数代码即可完成测温过程。

2、检测调整环节分析

前端检测调整环节的电路图如图 2 所示。

运放 A 的正、反相输入端电势分别为^[2]：

$$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{RE} + V_{eb} \tag{1}$$

$$V_- = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{RE} \tag{2}$$

式中： V_+ —运放正相输入端的电位；

V_- —运放反相输入端的电位；

V_{eb} —三极管发射结电压；

V_{RE} —参考电压源电压。

运放 A 的输出为：

$$V_T = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \cdot V_+ - \frac{R_6}{R_5} \cdot V_- \tag{3}$$

代入（1）式和（2）式，则有：

$$V_T = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \cdot V_{eb} + \frac{R_1 - \frac{R_6}{R_5} \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{RE} \tag{4}$$

对于硅 PNP 三极管 3CG160B，电压 V_{eb} 随着温度的升高近似线形的下降， V_{RE} 为电压源输出，基本不随温度进行变化，但不同的器件固定输出会有一定的差别。 R_1 、 R_3 、 R_6 为固定电阻，但不同的产品电阻值会有差别。由此可以看出，代表最终温度值的电压 V_T 是由式（4）的右边决定的，对于具体检测调整电路，除电阻 R_5 和 R_2 外，其他的都是确定的数值，因此 V_T 与

V_{eb} 成线性关系，其中电阻 R_5 调整测温曲线的斜率， R_2 调整测温曲线的截距。

这样，只要调整电阻 R_5 和 R_2 就能使该检测调整电路在全温度范围内符合测试指标的要求。

四、测温电路调试方法改进

一般测温电路标定方法采用多温度点方法，需要间隔 5℃ ~ 20℃ 进行一个温度点的温度误差测试，然后调整调试电阻缩小测温误差，不断迭代，直到符合指标要求。

改进后的方法采用低温（-45℃ 附近）、常温（20℃ 附近）和高温（+60℃ 附近）三个温度点的测试数据，利用 Excel 软件进行线性拟合，然后与多温度点的测试数据线性拟合结果进行对比，试验数据拟合结果与电路理论分析结果一致，即该测温电路的温度特性为线性，且三温度点测试数据拟合结果与多温度点测试数

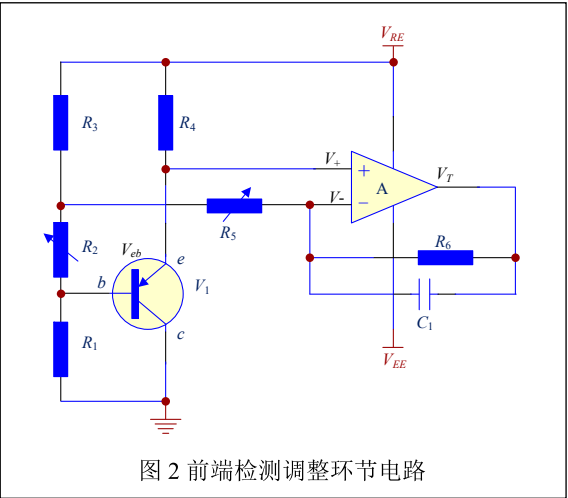


图 2 前端检测调整环节电路

表 1 三温度点测试数据（测温电路测量值以 20℃ 为零温度点）

序号	温度基准测量值 (℃)	测温电路测量值 (℃)	温度误差 (℃)
1	-45.13	-67.62	-2.49
2	-45.14	-67.38	-2.24
3	24.19	-0.75	-4.94
4	25.14	0.25	-4.89
5	60.35	34.25	-6.10
6	60.78	34.50	-6.28

表2 多温度点测试数据(间隔5℃测试,测温电路测量值以20℃为零温度点)

序号	温度基准 测量值(℃)	测温电路 测量值(℃)	温度误差 (℃)	序号	温度基准 测量值(℃)	测温电路 测量值(℃)	温度误差 (℃)
1	-45.13	-67.62	-2.49	24	10.93	-13.50	-4.43
2	-45.14	-67.38	-2.24	25	14.72	-10.75	-5.47
3	-39.87	-62.62	-2.75	26	15.75	-9.38	-5.13
4	-39.03	-61.25	-2.22	27	19.62	-5.88	-5.50
5	-35.19	-57.50	-2.31	28	20.60	-4.50	-5.10
6	-34.23	-57.00	-2.77	29	24.19	-0.75	-4.94
7	-30.65	-53.62	-2.97	30	25.14	0.25	-4.89
8	-29.70	-52.25	-2.55	31	29.76	3.25	-6.51
9	-25.83	-48.75	-2.92	32	30.61	4.62	-5.99
10	-24.93	-48.50	-3.57	33	34.48	8.50	-5.98
11	-20.24	-43.50	-3.26	34	35.39	9.50	-5.89
12	-19.14	-42.38	-3.24	35	40.08	14.50	-5.58
13	-15.84	-39.25	-3.41	36	40.95	15.62	-5.33
14	-14.77	-38.62	-3.85	37	44.88	19.38	-5.50
15	-10.40	-34.50	-4.10	38	45.85	20.62	-5.23
16	-9.36	-33.75	-4.39	39	50.11	24.25	-5.86
17	-5.40	-29.62	-4.22	40	51.23	25.62	-5.61
18	-4.48	-28.62	-4.14	41	54.93	29.50	-5.43
19	-0.56	-24.88	-4.32	42	55.92	30.50	-5.42
20	0.39	-24.12	-4.51	43	59.67	33.12	-6.55
21	4.26	-20.62	-4.88	44	60.35	34.25	-6.10
22	5.17	-19.50	-4.67	45	60.78	34.50	-6.28
23	9.91	-14.25	-4.16				

据拟合结果基本一致。这样,便可以采用三温度点的测试数据进行电路调试的方法替代多温度点测试的方法。

将表1、表2数据导入Excel电子表格中以温度基准测量值为横坐标、温度误差为纵坐标画散点图,结果如图3所示。在散点图上增加趋势线,即温度误差的拟合曲线方程,结果如式(5)、(6)所示。

三温度点温度误差拟合曲线方程为:

$$y = -0.036x - 4.005 \quad (5)$$

全温度温度误差拟合曲线方程为:

$$y = -0.036x - 4.181 \quad (6)$$

由图3及式(5)、式(6)对比发现,三温度点测试数据和全温度点测试数据拟合的曲线相似度非常高。因此,完全可以用三温度点的测试数据进行曲线拟合,然后依

据电阻 R_3 和 R_2 对曲线斜率和截距的影响大小,进行适当调整即可。

五、结论

通过对测温电路的计算分析,找到了测温电路的温度特性关系式。运用三温度点测试得到测试数据进行线性拟合,结合调试电阻对拟合曲线的斜率和截距的影响关系调整调试电阻的大小,即可快速完成测温电路的调试。

参考文献

- [1] 王巍. 光纤陀螺惯性系统[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [2] 李宁. 模拟电路[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

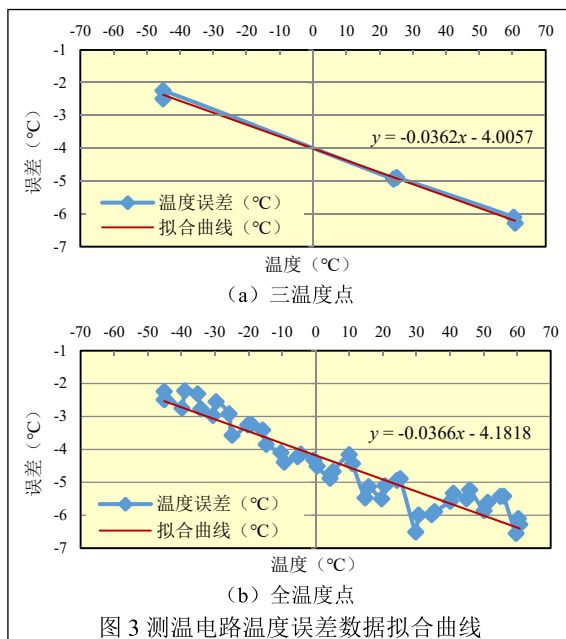


图3 测温电路温度误差数据拟合曲线

Working Principle Analysis and Application of Temperature Measuring Circuit Based on Silicon Triode

ZHAO Bo-hong¹, SUN Rong²

(1. *China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China*; 2. *Luoyang Quality and Technical Supervision and Testing Center, Luoyang 471000, China*)

Abstract: Inertial navigation system is an indispensable part of precision guided weapons. In a tactical or miniaturized product, individual temperature error compensation and other measures are usually used to suppress the influence of ambient temperature. Therefore, it is necessary in the production lines to calibrate the temperature measuring components of fiber optic gyroscope inertial navigation system and keep the error with the reference temperature source within a certain range through the adjustment. Based on the analysis of temperature measuring circuit, a debugging method is put forward for the rapid adjustment of the temperature measuring circuit, which adopts three-temperature-point test method to measure temperatures, performs the linear fitting of the test data, and adjusts the debug resistance combined with the influence of the debugging resistance on the slope and intercept of the fitted curve. The test results show that the method is feasible.

Key words: inertial navigation system; temperature measurement circuit; rapid debugging

作者简介

赵博宏：中国空空导弹研究院，工程师，研究方向为电子装联及测试技术。

通讯地址：河南省洛阳市解放南路 166 号

邮编：471000

邮箱：88447896@qq.com

孙蓉：河南省洛阳市质量技术监督检验测试中心，工程师，研究方向为计量技术。