

基于 NTC 的非平衡桥式测温电路的误差分析

李云辉 王晓东 朱小明

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 针对基于光腔衰荡光谱(CRDS)技术的痕量气体检测技术中对 DFB 激光器波长稳定性的要求,以 EPM1654 型激光器模块为例,对基于 NTC 热敏电阻的非平衡桥式测温电路进行了深入分析。对无源电阻器件的标称值误差和温漂、有源运算放大器的失调电压和温漂、AD 转换器的噪声和量化误差、热敏电阻阻值-温度非线性拟合等环节造成的测温误差进行定量分析和权重比较,得出桥臂参考电阻的标称值误差和温漂为影响测温精度的首要因素。同时通过对选取不同桥臂参考电阻阻值时的测温精度进行比较,发现选择使用环境温度范围内与 NTC 热敏电阻阻值相近的参考电阻有助于减小测温误差。

关键词: 光腔衰荡光谱;NTC 热敏电阻;温度检测;误差分析

中图分类号: TP202.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Error analysis of unbalanced bridge circuit based on NTC

Li Yunhui Wang Xiaodong Zhu Xiaoming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Focused on trace gas detection technology based on cavity ring down spectroscopy in the DFB laser wavelength stability requirements,taking EPM1654 laser module for example, the unbalanced bridge circuit for temperature measurement based on NTC thermistors is deeply analyzed. The quantitative analysis and weights comparison of the temperature measurement error caused by a variety of factors, which include the nominal value of the error and drift of passive resistance of the device,the active operational amplifier offset voltage and drift,noise and quantization error of the AD converter,thermistor resistance-temperature nonlinear fitting,shows that the nominal value of the reference resistor error and drift is the primary factor affecting temperature measurement accuracy. By the comprision of temperature measurement accuracy of differernt bridge reference resistior,we find that within the ambient temperature, the NTC thermistor which has the similar resistance to the reference resistanace helps to reduce measurement error.

Keywords: cavity ring-down spectroscopy; NTC thermistors; temperature detection; error analysis

1 引言

光腔衰荡光谱(CRDS)技术是一种新兴的痕量气体浓度检测技术,由于不受激光功率波动的影响,谐振腔又使气体吸收光程延长至数千米,其检测灵敏度可以达到 ppbv 量级。同时也是一种绝对测量方法,无需标准样品比对^[1-4]。但这项技术对硬件提出了很高的要求,其中重要的一项就是激光波长的稳定性,输出波长不仅受到特定气体吸收峰值带宽的限制,同时要满足谐振腔发生谐振的稳定性要求。工程上通常选用体积小、单色性好的分布反馈式半导体激光器(DFB)作为激光光源,但其输出波长受到环境温度和驱动电流的影响,为满足波长稳定性的要求,必须对激光器进行温度控制,而高精度的温度检测电路是实现温度控制的基础^[5-6]。本文

主要针对典型测温电路进行误差分析,对各误差源进行理论定量计算,为高精度测温电路的设计提供参考。

2 DFB 激光器温控系统组成

DFB 激光器温控系统组成如图 1 所示。虚线框内部分为采购的 EPM1654 型激光器集成模块,其内部集成了 NTC 半导体热敏电阻和热电效应制冷器(TEC)。NTC 半导体热敏电阻与铂电阻相比,其阻值较大,自热效应较轻,温度检测灵敏度高,但线性度差,需后期进行曲线拟合。整个系统由 NTC 半导体热敏电阻、检测调理电路、AD 转换器构成反馈通道,由 DA 转换器、TEC 驱动电路构成前向控制通道,TEC 作为执行器件^[7]。在主控制器内部完成闭环的温度控制。下面主要针对基于 NTC 热敏电阻的温度

检测电路进行分析,给出其误差来源。

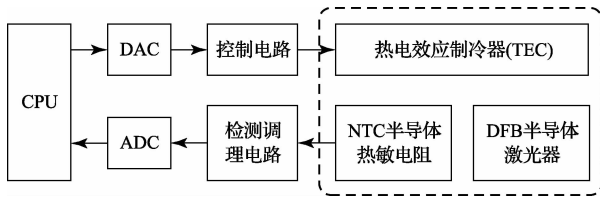


图 1 DFB 激光器温控系统组成框图

3 非平衡桥式测温电路

无论是基于铂电阻还是 NTC 半导体热敏电阻的温度检测电路,其误差来源主要包括:为检测电路提供激励的恒压源、恒流源的稳定性,无源电阻器件的标称值误差和温漂,有源运算放大器的失调电压和温漂,最终将采样信号转换为数字量的 AD 转换器的噪声和量化误差等^[8-9]。

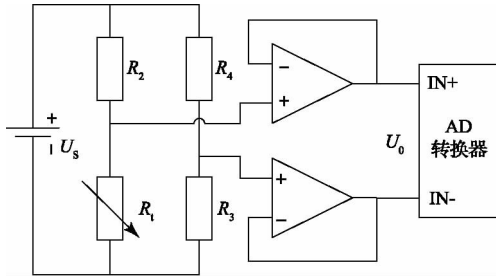


图 2 非平衡桥式测温电路

如图 2 所示为温度检测电路常采用的一种非平衡电桥式结构,输入 AD 转换器的差分电压可以表示为:

$$U_0 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \cdot U_s \quad (1)$$

其中的 NTC 半导体热敏电阻 R_1 的阻值与温度呈现指数衰减趋势,其对应关系如表 1 所示。

表 1 NTC 热敏电阻 R_1 阻值与温度对应关系

温度/℃	0	10	20	30	40	50	60
阻值/kΩ	32.89	20.02	12.52	8.051	5.327	3.614	2.508

由式(1)可知,AD 采样电压值与桥式电路的恒压源成正比,若使桥式电路和 AD 转换器的参考电压 V_{REF} 由同一恒压源提供,则可以消除恒压源波动引入的测量误差。

4 电桥测温电路误差源分析

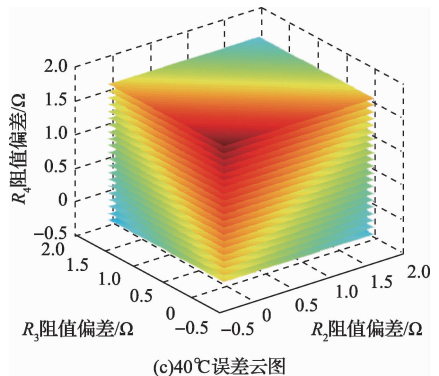
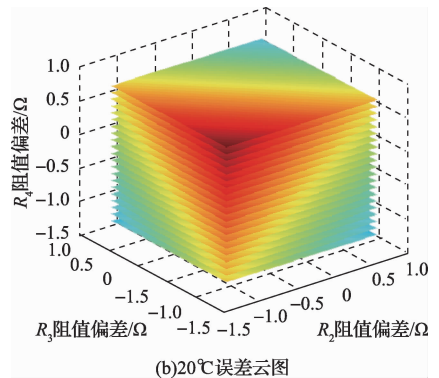
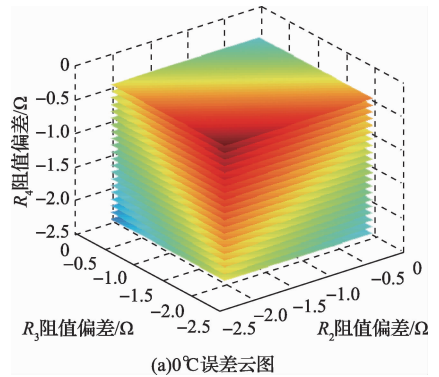
4.1 桥臂参考电阻误差影响

非平衡电桥部分的测量误差主要源于三个桥臂参考电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 的标称值误差和温漂,目前市场上所售的高精度低温漂电阻的阻值精度可以达到 0.01%,温漂系数为 5 ppm/℃。选取参考电阻 $R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$,以 0~60℃为温度检测范围,则在不同环境温度条件下由电阻的标称值误差和温漂引入的阻值误差如表 2 所示。

表 2 不同环境温度时的电阻阻值误差

环境温度/℃	阻值误差/Ω	偏差下限/Ω	偏差上限/Ω
0	±1-1.25	-2.25	-0.25
10	±1-0.75	-1.75	+0.25
20	±1-0.25	-1.25	+0.75
30	±1+0.25	-0.75	+1.25
40	±1+0.75	-0.25	+1.75
50	±1+1.25	+0.25	+2.25
60	±1+1.75	+0.75	+2.75

在不同的环境温度下,根据表 2 所示电阻 R_2 、 R_3 、 R_4 的偏差范围,可以绘制出对应温度下由阻值偏差引起的差分电压测量误差云图,如图 3 所示,分别表示了 0℃、20℃、40℃、60℃工作条件下的测量误差,其中电压源选择为 5 V。



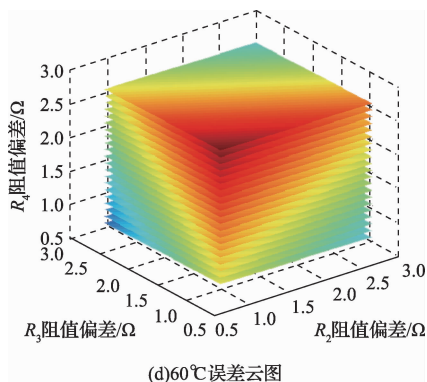


图3 不同温度时由阻值偏差引起的电压测量误差云图

从图3中可以看出:在不同环境温度下,电压测量偏差最大值均发生在 R_2 、 R_3 取偏差下限, R_1 取偏差上限的位置;电压测量偏差最小值均发生在 R_2 、 R_3 取偏差上限, R_1 取偏差下限的位置。最大最小的测量偏差值如表3所示。

表3 不同环境温度时的电阻阻值误差

环境温度/°C	最大测量偏差/mV	最小测量偏差/mV
0	0.451 2	-0.146 4
10	0.444 4	-0.196 5
20	0.404 3	-0.261 3
30	0.342 7	-0.323 2
40	0.278 3	-0.361 7
50	0.225 6	-0.388 1
60	0.189 8	-0.389 1

其中最大测量偏差随环境温度的升高逐渐减小,最小测量偏差的数值随温度升高而增大。在整个环境温度范围内,由桥臂电阻的标称值误差和温漂引起的电压测量误差峰值为0.451 2 mV。为便于对桥臂参考电阻阻值的最优化选取进行分析,将参考电阻分别取2 kΩ、5 kΩ、10 kΩ、20 kΩ时的最小和最大测量偏差曲线绘制于图4中。其中参考电阻取各阻值时,最小最大偏差曲线的变化趋势一致,电压测量误差峰值在参考电阻取10 kΩ时最小。

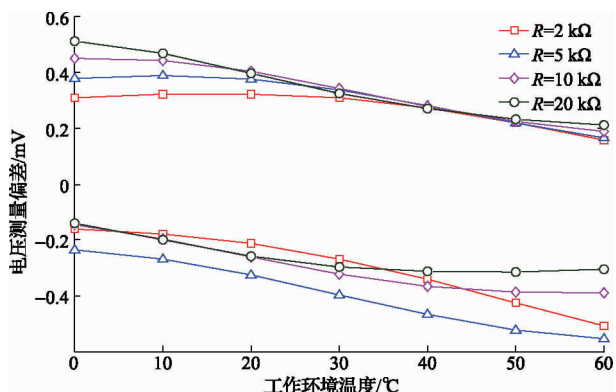


图4 不同阻值时电压测量误差随温度变化曲线簇

4.2 运放和AD转换器误差影响

从非平衡电桥引出的差分电压信号要经运放调理电路和AD转换器的量化处理,才能最终转换为数字信号。由上述对电桥的分析可知,应尽量减少电阻的使用数量,以减少小误差来源,因此通过调整参考电阻阻值,使得电桥输出差分电压信号范围在合理范围内,避免了运放的放大处理,直接经运放构成的射极跟随器后接入AD即可。为减小检测误差,应选用低噪声低温漂型精密运放,以OPA333为例,其失调电压为10 μV,温漂为0.05 μV/°C,其引入的误差为 10^{-2} mV量级。在AD转换器对电压信号进行处理时不可避免地会引入量化误差,AD转换器的位数越多,则引入量化误差越小,但同时成本也会相应增加,以5 V供电的16位AD转换器为例,其量化误差为0.038 15 mV。

4.3 热敏电阻阻值测量误差

将以上桥臂电阻、运放、AD转换器引入的电压测量误差进行累加,并由式(1)计算,可以间接得到对NTC热敏电阻阻值的检测误差。具体算法为:将某一温度下热敏电阻的阻值代入到式(1)中,得到标准的差分电压值,再将上述误差值和叠加到标准差分电压值上,得到测量电压值,再经式(1)反算得到测得的热敏电阻值,与标准值作差后即得到阻值的检测误差。如图5所示,为分别在参考电阻取2 kΩ、5 kΩ、10 kΩ、20 kΩ时的热敏电阻值测量误差,可以明显看出在低温段热敏电阻测量误差较大。但在低温段热敏电阻的阻值也较大,因此较大的测量阻值误差并不一定会引起的温度测量误差的增大。

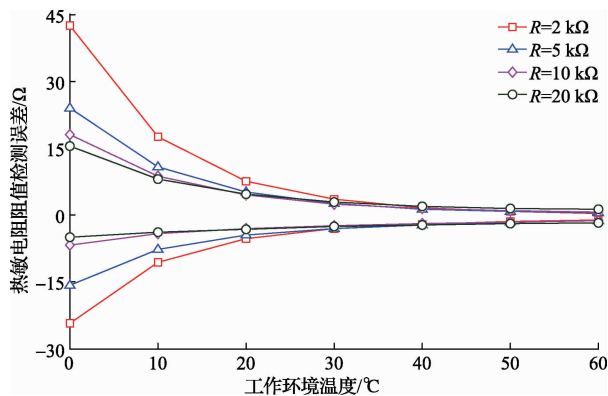


图5 不同阻值时热敏电阻值测量误差随温度变化曲线簇

5 NTC阻值-温度非线性拟合

由于NTC半导体热敏电阻阻值与温度存在的非线性关系,在将热敏电阻阻值转换为对应温度数值时需要进行曲线拟合。根据模块生产厂商提供的温度-阻值数据,进行以 $\log(R_t)$ 为自变量,温度 T 为函数的最小二乘法拟合^[10-11]。如图6、7所示,为进行5、6次拟合后的温度误差曲线,当拟合次数达到6次时,其误差已经为 10^{-10} °C量级。

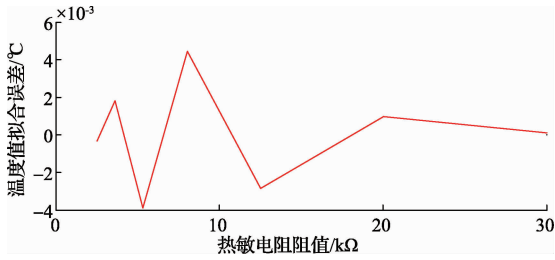


图 6 5 次曲线拟合后的温度误差曲线

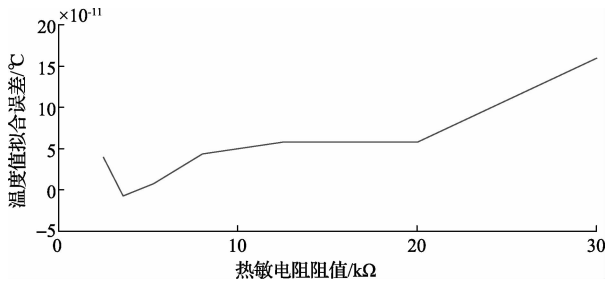


图 7 6 次曲线拟合后的温度误差曲线

按 6 次进行拟合后的函数关系式为:

$$T = A_6(\log(Rt))^6 + A_5(\log(Rt))^5 + A_4(\log(Rt))^4 + A_3(\log(Rt))^3 + A_2(\log(Rt))^2 + A_1(\log(Rt))^1 + A_0 \quad (2)$$

式中: $A_6 = 7.2795 \times 10^{-4}$ 、 $A_5 = -0.01714$ 、 $A_4 = 0.1678$ 、 $A_3 = -0.8738$ 、 $A_2 = 2.5560$ 、 $A_1 = -3.9909$ 、 $A_0 = 2.6156$ 。

根据图 5 中的电阻检测误差曲线数据, 叠加到某一温度下热敏电阻标准阻值, 然后代入到式(2)进行计算, 再将计算结果与标准温度值作差, 便可以得到将硬件系统所有误差和软件曲线拟合误差都包含在内的温度检测误差曲线, 如图 8 所示。

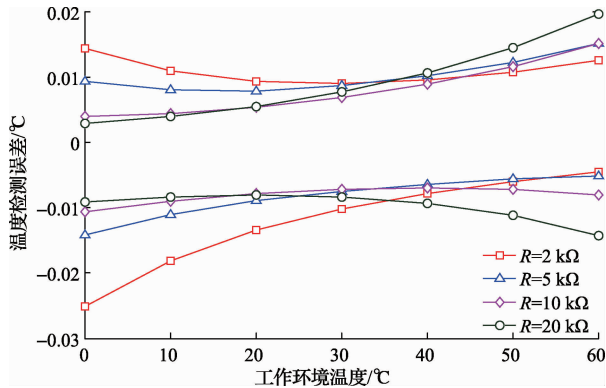


图 8 不同阻值时温度检测误差随温度变化曲线簇

由图 8 可以看出: 在整个环境温度范围内, 选择桥臂参考电阻为 10 kΩ 时测量误差值最小, 为 0.015 °C。这是在理想情况下, 若考虑到实际电路中不可避免地会引入干扰因素, 其实际精度会更低一些。在低温段, 电阻为 20 kΩ 时

温度检测误差较小; 在高温段, 电阻为 2 kΩ 时温度检测误差较小。而 NTC 热敏电阻的阻值在 0 °C 时为 32.82 kΩ, 60 °C 时为 2.508 kΩ。据此可以推断: 选择与环境温度中 NTC 热敏电阻的阻值相近的桥臂参考电阻可以获得相对较小的检测误差。

同时对比图 8 中多条曲线可以看出, 参考电阻阻值在 2~20 kΩ 范围内变化时, 温度检测误差并不相差很大, 因此若要从量级上提高整个测温系统的精度, 需要从以上各部分误差源入手。以参考电阻 10 kΩ、环境温度 20 °C 为例进行分析, 其中由桥臂电阻的标称值误差和温漂引起的电压测量误差峰值为 0.404 3 mV, 对应温度误差 7.2×10^{-3} °C; 由运放调理电路引入的误差约为 1.175×10^{-2} mV, 对应温度误差 2.087×10^{-4} °C; 由 AD 转换器量化引入的量化误差为 0.038 15 mV, 对应温度误差 6.777×10^{-4} °C; 由 NTC 热敏电阻的非线性拟合引入的温度误差为 10^{-10} °C 量级, 很明显造成温度检测误差的主要来源是桥臂参考电阻的标称值误差和温漂。

因此在进行更高精度的温控系统设计时, 若采用非平衡电桥结构, 首先应对桥臂参考电阻的标称值误差和温漂问题予以解决。可以事先对电阻阻值进行精确测量, 以减小标称值误差带来的影响; 同时为解决电阻温漂问题, 可以对环境温度进行粗略检测, 以便对电阻温漂带来的阻值偏差进行补偿。

6 结 论

本文针对基于 NTC 的非平衡桥式测温电路进行了深入分析, 分别对桥臂参考电阻的标称值误差和温漂、运放调理电路、AD 转换器等硬件部分引入的误差进行了定量计算, 同时对 NTC 热敏电阻的温度-阻值的非线性特性进行了曲线拟合。其中桥臂参考电阻的标称值误差和温漂对温度检测精度的影响最大。同时在特定的温度检测范围内, 选择与 NTC 热敏电阻阻值相近的桥臂参考电阻有助于减小测温误差。

参考文献

- [1] KEETERAK J, DURBEND, ZEHFUS M. Development of a Custom CRDS-based Trace Gas Analyzer for Argon and Xenon [J]. Nuclear Physics, 2010, 834: 819-822.
- [2] 宋科峰, 高波, 刘安雯, 等. 高灵敏的连续激光光腔衰荡光谱仪及其应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 835-838.
- [3] MOTTO-ROS V, DURAND M, MORVILLE J. Extensive characterization of the optical feedback cavity enhanced absorption spectroscopy (OF-CEAS) technique: ringdown-time calibration of the absorption scale [J]. Applied Physics B, 2008, 91(1): 203-211.