

文章编号 1004-924X(2010)06-1333-07

容差分析在空间相机测温电路中的应用

王永成^{1,2}, 党源源³, 徐抒岩¹, 宋克非¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春工业大学 计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 为了提高空间相机测温电路的测温精度, 提出用容差分析法研究测温电路的性能。研究了测温电路原理和影响测温精度的各种因素; 讨论了电路容差分析的各种方法, 比较了它们的优缺点和适用范围, 并确定了本课题采用的分析方法。应用最坏情况分析法对测温电路进行了容差分析。根据分析结果提出了一种提高测温精度的方法, 并进行分析验证。验证结果表明: 改进后的测温电路在 $-14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内的测温精度满足指标要求, 测温精度达到 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与改进前的电路相比, 性能提高了 30 倍。

关键词: 容差分析; 测温电路; 空间相机; 最坏情况分析法

中图分类号: V475.3; V443 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101806.1333

Application of tolerance analysis to temperature measurement circuit of space camera

WANG Yong-cheng^{1,2}, DANG Yuan-yuan³, XU Shu-yan¹, SONG Ke-fei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Department of Computer Science and Engineering,*
Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to improve the temperature measurement accuracy of space cameras, the tolerance analysis is applied to temperature measurement circuits. The principle of a temperature measurement circuit is studied and a variety of influencing factors of temperature measurement accuracy are discussed. Several kinds of tolerance analysis methods are described, and their respective advantages and disadvantages are compared. Then the worst-case analysis method is chosen to analyze the tolerance of the temperature measurement circuit. Finally, a novel method for improving temperature measurement accuracy is proposed according to the analysis results. After validating proposed method, it is shown that the measurement accuracy of the improved temperature measurement circuit is $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 times higher than that of the original method, which can meet the requirements of temperature measurement in $-14\text{ }^{\circ}\text{C} - +50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

收稿日期: 2009-06-23; 修订日期: 2009-07-23.

基金项目: 国家重大国防科研基金资助项目

Key words: tolerance analysis; temperature measurement circuit; space camera; worst-case analysis method

1 引言

电路容差分析是 GJB450 的一个工作项目。容差分析技术是一种预测电路性能参数稳定性的方法,主要用于分析电路组成部分在规定的使用温度范围内其参数偏差和寄生参数对电路性能容差的影响,并根据分析结果提出相应的改进措施。电路容差分析主要适用于系统内的关键电路,电路性能参数发生变化的主要现象有:性能不稳定、参数发生漂移、退化等,造成这些现象的原因主要有三种,一是组成电路的元器件参数存在着公差,二是环境条件的变化产生参数漂移,如环境温度、相对湿度的变化,电应力的波动等使电子元器件参数发生变化,三是退化效应,其中第一种原因产生的参数偏差是固定的,第二种原因产生的偏差在多种情况下是可逆的,而第三种原因产生的偏差是不可逆的。电路容差分析的方法主要有阶矩法、最坏情况分析法、蒙特卡洛分析法以及环境温度影响分析法^[1-6]。

热控系统是空间相机必不可少的组成部分。热控系统担负着控制空间相机温度变化与温度分布,维持空间相机上热量吸收、转化及排散平衡的重要功能,以保障空间相机上各种设备的可靠工作,进而获取高质量的图像信息^[7-11]。而温度测量电路是空间相机热控系统的重要组成部分,是热控策略能否正确执行的前提条件,其性能的好坏直接影响着空间相机热控系统的性能。因此对测温电路性能以及提高测温电路测温精度的研究是非常必要的。

本文使用最坏情况分析法对某型号空间相机的测温电路进行容差分析,详细分析了影响测温电路性能的各种参数,通过研究找到了影响测温精度的主要原因,进而提出改进措施,从而使得测温电路的测温精度得到了很大的提高。对改进的测温电路经过分析计算得知测温电路在 $-14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测温精度控制在 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,而原电路的最大测温误差高达 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 测温电路的构成及其工作原理

某型号空间相机所采用的测温电路原理图如图 1 所示,从原理图可以看出测温电路共由五部分组成,分别为电压基准单元、热敏电阻、惠斯通电桥、电压放大电路以及 A/D 转换电路单元等。为了实现温度测量,首先要精确测量热敏电阻的阻值,本系统采用了恒压分压法来测量热敏电阻的阻值,测温电路采用的是传统的惠斯通电桥电路,桥路电阻精度为 1%,其中参考电压 V_b 由高精度 10 V 电压参考源 AD581UH 提供,其输出电压的最大容差为 $\pm 5\text{ mV}$;测温电阻 R_t 采用负温度系数的珠状玻璃密封式半导体热敏电阻 MF501,其阻值与温度对应关系曲线如图 2 所示;电压放大电路采用了由 ADI 公司的一款低功耗、高精度测量放大器 AD620 构成,其放大倍数由一个外接电阻 R_m 进行调节;A/D 转换电路采用了 TI 公司的一款低功耗 12 位串行数模转换芯片 TLV2548MFKB,其最高采样率可达每秒 2×10^5 次,其中 A/D 转换芯片的参考电压源由 AD584TH 提供 5 V 的参考电源,AD584TH 输出电压的最大容差为 $\pm 6\text{ mV}$ 。

热敏电阻 MF501 温度与其阻值的计算公式如式(1)所示:

$$t = \frac{2 \times c}{-b + \sqrt{b^2 - 4 \times c \times a(a - \ln R_t)}}, \quad (1)$$

式(1)为热敏电阻生产厂家提供的热敏电阻阻值与温度的经验公式,系数 a, b, c 与热敏电阻的材料有关,通过标定实验可以得到其值,本测温电路所采用的热敏电阻的 $a = -6.011\ 88, b = 4\ 622.533\ 37, c = -86\ 421.724\ 14$,由于所采用的热敏电阻经过标定实验得到了阻值与温度的对应关系,因此,可以忽略热敏电阻阻值的误差。本系统的测温范围为 $-14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对应的热敏电阻的阻值为 $37.74\text{ k}\Omega$,因此桥路

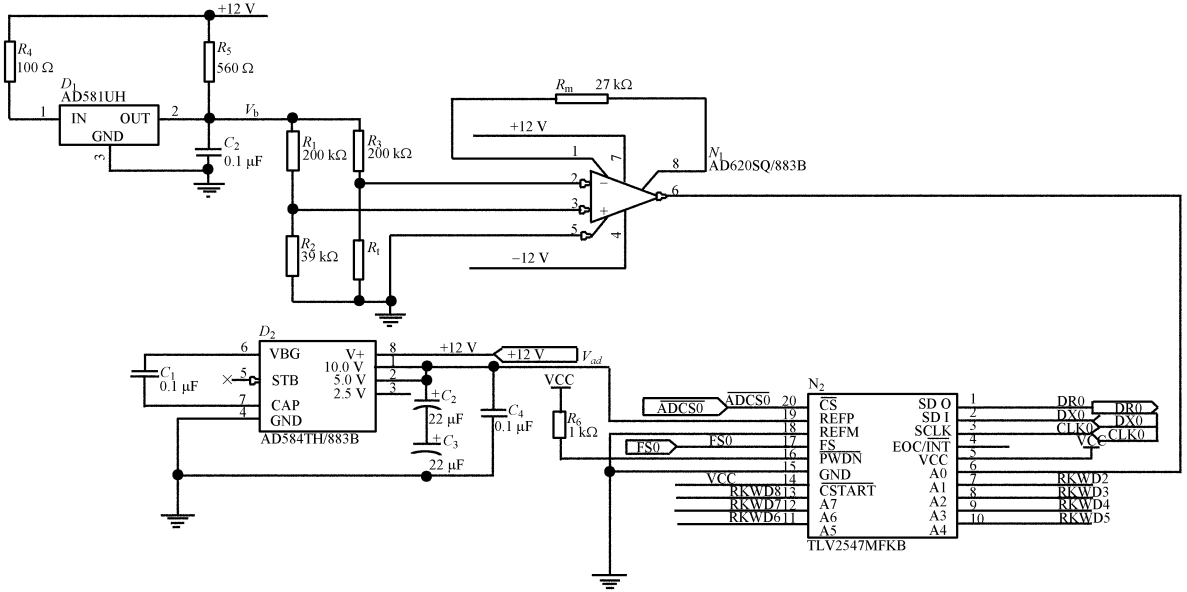


图 1 测温电路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature measurement

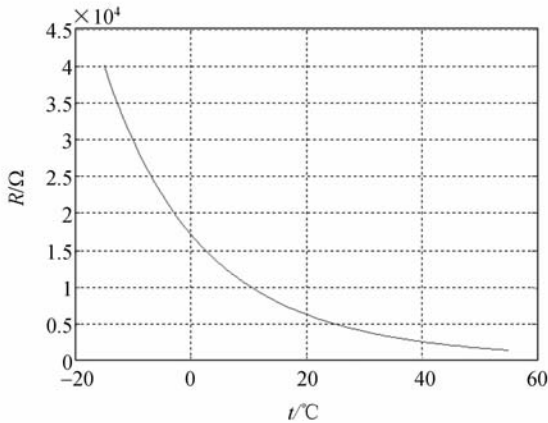


图 2 热敏电阻阻值与温度对应关系曲线

Fig. 2 Relationship curve of thermistor resistance and temperature

电阻 R_2 阻值选用 39 kΩ。经过电压放大与 A/D 采集后,对应的十进制数定义为 y ,则 y 的表达式如式(2)所示:

$$y = \frac{\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_t}{R_3 + R_t}\right) \times V_b \times \left(1 + \frac{49.4}{R_m}\right)}{V_{ad}} \times 4095, \quad (2)$$

利用 y 值可以反推出热敏电阻的阻值 R_t ,进而利用式(1)可以求出热敏电阻阻值对应的温度值,实现温度测量的目的。表 1 是试验过程中的测试数据,其中第一列阻值是热敏电阻在第二列所示温

度下的阻值,第三列的实测阻值是通过测温电路所测得的热敏电阻的阻值,第四列的温度值是实测阻值所对应的温度值,即实测温度值,第五列是实测温度值与实际温度值的差值。从表 1 可以看出,随着温度升高,所对应的误差也在增大,根据项目要求,测温电路的测温精度要求在 $-14\text{ }^\circ\text{C} \sim +50\text{ }^\circ\text{C}$ 内控制在 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,从测试结果看,实测数据并不满足指标要求,严重影响了相机热控策略的正确实施。因此,有必要分析和研究测温电路的误差源,并据此找出提高精度的措施,以达到测温指标要求。

表 1 温度测量数据

Tab. 1 Temperature measurement data

阻值/ Ω	温度值/ $^\circ\text{C}$	实测阻值/ Ω	温度值/ $^\circ\text{C}$	误差/ $^\circ\text{C}$
29 920	-10	31 005	-10.6	-0.6
17 200	0	18 158	-1.00	-1.00
6 317	20	7 156	17.4	-2.6
2 613	40	3 016	36.6	-3.4
1 746	50	2 145	44.8	-5.2

3 容差分析

3.1 电路容差分析方法

在工程中常用的容差分析方法主要有阶矩法、最坏情况分析法以及仿真法等。

3.1.1 阶矩法

阶矩法是一种概率统计方法,该方法根据电路组成部分参数的均值和方差,求出电路性能参数的均值和方差。该方法需要建立电路组成部分参数和电路性能参数之间的数学模型,根据数学模型推导出电路组成部分参数均值与方差和电路性能参数均值与方差之间的关系式,并据此进行偏差计算。式(3)是将电路性能参数 Y 表示成电路组成部分参数 (X_1, X_2, \dots, X_n) 的函数,式(4)和式(5)是将式(3)根据泰勒级数公式以标称值为中心展开,去掉高阶项后得到的性能参数均值和方差的计算公式,式(4)中的 m_1, m_2, \dots, m_n 是电路组成部分参数的均值,式(5)中 σ_i^2 是电路组成部分参数 X_i 的方差。

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (3)$$

$$m_y = f(m_1, m_2, \dots, m_n), \quad (4)$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial Y}{\partial X_i} \Big|_{m_1, m_2, \dots, m_n} \right]^2 \sigma_i^2. \quad (5)$$

由式(6)可计算电路性能参数在偏差容许范围内出现的概率。

$$P_r\{m_y - \Delta Y < Y < m_y + \Delta Y\} = \Phi(\Delta Y / \sigma_y) - \Phi(-\Delta Y / \sigma_y), \quad (6)$$

式中 Φ 为正态分布函数。

3.1.2 最坏情况分析法

最坏情况分析法是分析电路组成部分参数最坏组合情况下的电路性能参数偏差的一种非概率统计方法,它利用已知元器件参数的变化极限来预计电路性能参数变化是否超过了允许范围。在预计电路性能参数变化范围时,元器件参数的变化取它们的上、下极限值。如果预计的电路性能参数在规定的范围内,就可以确信该电路有较高的稳定性,如果预计值超出了规定的允许变化范围,就可能发生漂移故障。最坏情况分析法可以预测某个电路是否发生漂移故障,并提供改进的方向,但不能确定发生这种故障的概率。

3.1.3 仿真法

目前很多 EDA 软件都具有仿真计算和容差分析功能,它们所具有的容差分析方法主要有:最坏情况分析法、蒙特卡洛分析以及环境温度影响分析等。它们的分析流程主要是首先选定分析方法,然后设置相应的参数进行仿真,根据仿真结果与性能要求进行比较,判断是否满足性能指标要求。表 2 对各种容差分析方法的优缺点和适用范

围进行了总结,针对航天工程高可靠性的要求,其关键电路在各种极限环境中精度都需要达到指标要求,对测温电路容差分析的目的在于研究测温电路能否在各种极限误差情况下保证测温精度,并提出提高测温精度的方法,根据表 2 的分析结果选用最坏情况分析法对测温电路进行容差分析。

表 2 各种容差分析方法的比较

Tab. 2 Comparison of a variety of tolerance analysis methods

方法	应用方式		分析结果	优点	缺点	适用范围
	手工计算	软件仿真				
阶矩法	√		电路性能参数均值、方差	计算原理简单	计算过程复杂	模拟电路
最坏情况分析法	√	√	电路性能参数偏差	可以得到灵敏度数值	分析结果偏于保守	模拟电路
蒙特卡洛分析法		√	电路性能参数的分布特性	最接近实际情况	计算过程费时	模拟电路
环境温度影响分析法		√	不同温度下的电路性能参数值	可以检验电路的温度适应性	计算过程费时	模拟电路

3.2 应用最坏情况分析法分析电路

3.2.1 计算模型

应用最坏情况分析法的基础是建立数学模型,即将电路性能参数 Y 表示为设计参数 X_1, X_2, \dots, X_n 的函数,测温电路所对应的数学模型如公式 2 所示。最坏情况分析法采用灵敏度 S 来度量设计参数偏差对电路性能参数的影响,设计参数 X_i 的灵敏度 S_i 的计算公式如式(7)所示:

$$S_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \Big|_0, \quad (7)$$

式(7)中 $\frac{\partial Y}{\partial X_i}$ 为性能特征量 Y 对设计参数 X_i 的偏导数,下标“0”为标称值。电路性能参数的偏差可以用式(8)进行估算:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n S_i \Delta X_i. \quad (8)$$

式中偏差 ΔX_i 的确定方法如下:在求电路性能参数偏差的正极限值时,若 $S_i > 0$,则 $\Delta X_i = X_{i\max} - X_{i0}$;若 $S_i < 0$,则 $\Delta X_i = X_{i\min} - X_{i0}$;在求偏差的负极限值时,若 $S_i > 0$,则 $\Delta X_i = X_{i\min} - X_{i0}$;若 $S_i < 0$,则 $\Delta X_i = X_{i\max} - X_{i0}$ 。

3.2.2 分析方法

从式(2)可以看出,测温电路性能参数 y 与 6 个参数有关,分别为电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_m 的电阻阻值以及参考电压 V_b 和 V_{ad} 的电压值。将这 6 个参数的灵敏度分别定义为 $S_1 \sim S_6$, 然后求出各灵敏度在 $-14\text{ }^\circ\text{C} \sim +50\text{ }^\circ\text{C}$ 以 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 为单位时各点的灵敏度,然后将其绘制成曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出 S_1 、 S_4 和 S_6 在整个测温范围内都小于 0, 而 S_2 、 S_3 和 S_5 在整个测温范围内都大于 0, 电阻 R_1 和 R_2 的灵敏度与温度无关, 并且其值很小, 说明这两个参数对于性能参数 y 的影响很小, 而 V_b 和 V_{ad} 所对应的灵敏度 S_5 和 S_6 相对偏大, 并且与温度有关, 在高温端其值较大, 说明对性能参数 y 的影响较大, 从表 1 的测试结果也可以看出在高温端时误差较大。因此提高 V_b 和 V_{ad} 的精度是提高测温电路精度的关键所在。根据式(8), 以及前述对各敏感度的分析, 测温电路性能参数 y 的偏差 Δy 的负极限值的计算公式如式(9)所示:

$$\Delta y = S_1 \times x \times R_1 + S_2 \times (-x) \times R_2 + S_3 \times (-x) \times R_3 + S_4 \times x \times R_m + S_5 \times (-\Delta V_b) + S_6 \times \Delta V_{ad}, \quad (9)$$

式(9)中 x 指电阻的精度, ΔV_b 指 V_b 的极值误差, ΔV_{ad} 指 V_{ad} 的极值误差。求出性能参数的极值偏差后, 即可反推算出温度值。

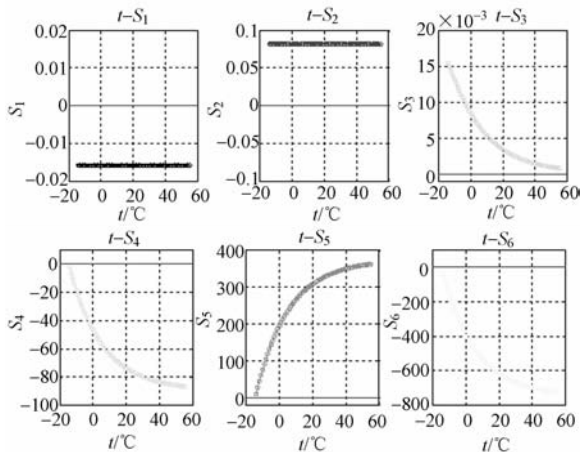


图 3 各参数的灵敏度与温度的对应曲线

Fig.3 Relationship curve of sensitivity and temperature

图 4 是假设 V_b 和 V_{ad} 无输出误差, 而各电阻的精度为 1%、0.1%、0.01% 的情况下, 测温电路测温误差与温度的对应关系曲线, 从曲线可以看

出当电阻精度为 1% 时, 在整个测温范围内, 测温精度都超标。当电阻的精度为 0.01% 时, 在整个测温范围内, 测温精度都不超标。从图 4 可以看出, 即使 V_b 和 V_{ad} 的输出误差为 0, 要使测温电路的测温精度控制在 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 以内, 各电阻的精度也需要达到 0.01%。从式(8)可以看出, 如果要减小 ΔY , 可以通过减小 S_i 或者 ΔX_i 来实现。而 S_i 是由性能参数与电路参数的函数所确定的, 是不可改变的, 因此只能通过减小 ΔX_i 来实现。减小各电阻阻值所对应的 ΔX_i 的方法有二: 一是提高电阻精度, 二是减小电阻阻值, 在本测温电路中, 由于测温范围的限制, 减小电阻阻值对于减小 ΔX_i 的贡献不大, 因此可以通过提高电阻精度来实现减小 ΔX_i 。目前符合空间环境使用的厚膜片式固定电阻器的最高精度为 0.1%, 从图 4 可以看出, 当电阻精度为 0.1% 时, 温度超过 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 后, 测温误差就会大于 $0.3\text{ }^\circ\text{C}$, 显然选用精度为 0.1% 的电阻不符合要求。为了使电阻精度达到 0.01%, 对精度为 0.1% 的电阻做二次筛选, 使得筛选后的电阻精度达到 0.01%。

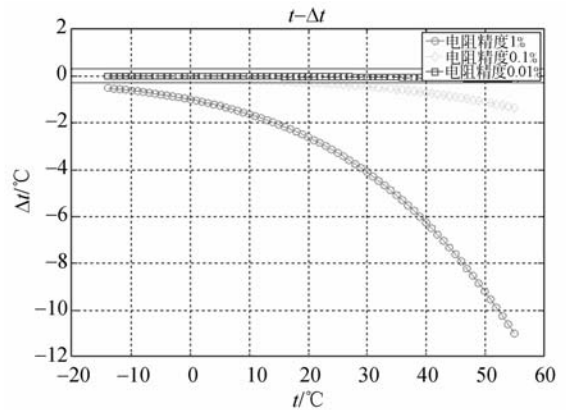


图 4 测温电路测温误差与温度对应关系图

Fig.4 Relationship curve of temperature measurement error and temperature

电压参考源 AD581UH 和 AD584TH 的输出电压误差主要是由使用环境温度的变化引起的, 图 5 是 AD581 的输出电压和温度关系曲线图, 从图 5 可以看出, 在 $-20\text{ }^\circ\text{C} \sim +50\text{ }^\circ\text{C}$, AD581 的输出电压在 $9.999 \sim 10.001\text{ V}$ 变化, 在该温度范围内 AD584TH 的输出电压处于 $4.999 \sim 5.001\text{ V}$, 此时 AD581UH 和 AD584TH 的输出电压的极值误差为 $\pm 0.001\text{ V}$, 图 6 是电阻精度为 0.01%, 电压调节器输出电压极值误差为

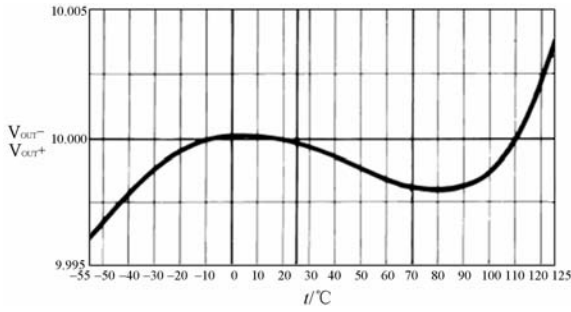


图 5 AD581 的输出电压和温度关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of output voltage and temperature of AD581

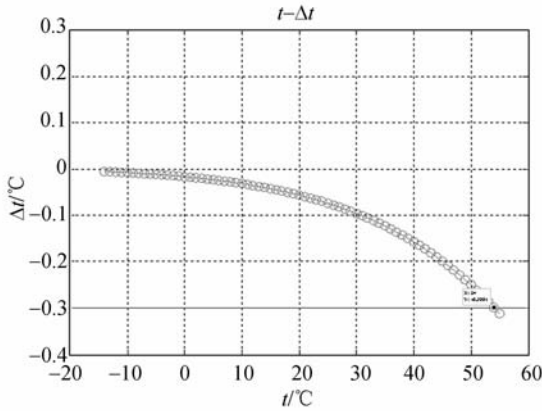


图 6 测温电路测温误差与温度对应关系

Fig. 6 Relationship curve of temperature measurement error and temperature

0.001 V 时, 测温电路测温误差和温度对应关系图, 从图中可以看出, 在测温范围内, 测温精度都控制在 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。根据空间相机的工作温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可知, 只要能保证电压参考源的工作温度不超过 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即可保证其输出电压误差极值不超过 0.001 V, 通过对器件降额使用, 并采取良好的散热措施可以将电压参考源的工作环境温度控制在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过上述分析过程可知, 改进后的测温电路的测温精度可以达到指标要求的 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4 结 论

通过对某型号空间相机的测温电路进行容差分析, 构建了测温电路性能参数的数学模型, 并对数学模型中的各参数进行了详细的分析, 通过分析找出了影响测温精度的各种原因, 并分析了各参数对测温精度影响的大小程度, 从而找出影响测温精度的关键因素。通过分析提出了提高测温精度的方法, 并对改进后的电路再次进行了容差分析, 分析结果表明, 改进后的电路在 $-14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的测温精度能够控制在 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 满足指标要求。

参考文献:

- [1] GJB/Z 89-97, 电路容差分析指南 [S]. GJB/Z 89-97, Guide to the circuit tolerance analyses [S]. (in Chinese)
- [2] 石君友, 康锐. 基于 EDA 技术的电路容差分析方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(1): 121-124. SHI J Y, KANG R. Research on method of circuits tolerance analyses based EDA technology [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2001, 27(1): 121-124. (in Chinese)
- [3] 龚庆祥. 型号可靠性工程手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. GONG Q X. *Handbook of Equipment Reliability Engineering* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [4] TIAN W, LING X T, LIU R W. Novel methods for circuit worst-case tolerance analysis [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1996(4): 272-278.
- [5] FEMIA N, SPAGNUOLO G. True worst-case circuit tolerance analysis using genetic algorithm and affine arithmetic [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2000(9): 1285-1296.
- [6] FEMIA N, SPAGNUOLO G. Genetic optimization of interval arithmetic-based worst-case circuit tolerance analysis [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1999(12): 1441-1456.
- [7] 罗志涛, 徐抒岩, 陈立恒. 大功率焦平面器件的热控制 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2187-2192. LUO ZH T, XU SH Y, CHEN L H. Thermal control of high-power focal plane apparatus [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2187-2192. (in Chinese)

nese)

- [8] 訾克明,吴清文,郭疆,等.空间光学遥感器 CCD 焦面组件热设计[J]. 光学技术,2008,34(3):401-407.
 ZI K M, WU Q W, GUO J, *et al.*. Thermal design of CCD focal plane assembly of space optical remote-sensor[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 401-407. (in Chinese)
- [9] 李积慧,韩双丽,王家骥,等.空间相机的热分析与热控制技术[J]. 光学精密工程,1999,7(6):36-41.
 LI J H, HAN SH L, WANG J Q, *et al.*. Thermal analysis and thermal control techniques of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7

(6):36-41. (in Chinese)

- [10] 吴清文,卢泽生,卢镔,等.空间光学遥感器热分析[J]. 光学精密工程,2002,10(2):205-208.
 WU Q W, LU Z SH, LU E, *et al.*. Thermal analysis for a space optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 205-208. (in Chinese)
- [11] 李运泽,宁献文,王小明,等.航天器热控系统的可靠性设计与分析[J]. 中国工程科学,2007,9(7):53-56.
 LI Y Z, NING X W, WANG X M, *et al.*. Reliability design and analysis of spacecraft thermal control thermal management system[J]. *Engineering Science*, 2007, 9(7): 53-56.

作者简介:



王永成(1980—),男,甘肃嘉峪关人,博士研究生,助理研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,主要从事嵌入式系统、可靠性工程方面的研究。E-mail: wyc_dyy@sina.com



徐抒岩(1963—),男,吉林人,研究员,博士生导师,1985年于天津大学获得学士学位,1989年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器总体设计、图像处理等方面的研究。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn



党源源(1980—),女,吉林人,讲师,2003年于吉林工程技术师范学院获得学士学位,2006年于长春工业大学获得硕士学位,主要从事人工智能与数据挖掘方面的研究。E-mail: dyy1980_1980@sina.com

通讯作者:



宋克非(1967—),女,吉林长春人,研究员,现任FY-3卫星紫外臭氧垂直探测仪副主任设计师,主要从事微弱信号检测及紫外遥感技术的研究。E-mail: songkefei@sina.com