

热象仪检定用温差发生器的研究

樊鑫瑞 裴庆安 钱 华

(华中工学院自动控制系, 湖北, 武汉)

摘要——阐述了一种用于检定热象仪最小可分辨温差的温差发生器。从理论上分析了温场的均匀性, 并进行了表面温场的实测。简单介绍了温差的检测与控制。

关键词——热象仪, 温差发生器, 温度场。

1、引 言

温差发生器是用于检定热象仪的最小可分辨温差(MRTD)和信号传递函数(SITF)的标准仪器。考虑到目前热象仪的发展水平, 温差发生器的主要技术指标定为:

能产生 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 连续可调的温度差, 温差测量精度优于 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$; 在 ϕ 为 100 mm 视场范围内, 温场不均匀度小于 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$; 能产生不同空间频率下的温差, 温差控制精度优于 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。

2、温差的产生及温场均匀性分析

1. 加热方法

温差发生器结构如图 1 所示。图中目标板和背景板用铝合金板加工而成。目标板两面喷涂无光黑漆, 发射率可达 0.96 左右。背景板中间嵌装一条开有空槽的栅板。背景板面对目标板的一面抛光, 使其发射率极小(估计约为 0.05 左右), 另一面喷涂无光黑漆。用加热屏对目标板加热, 使其温度升高。由于从目标板辐射到背景板的热量大部分被反射回目标板, 因而背景板的温度接近环境温度不变, 从而使目标板和背景板之间产生温差, 通过改变背板上的栅条尺寸和加热板的加热量, 就可得到不同空间频率下的温差, 以供检定热象仪的最小可分辨温差和调制传递函数。

加热屏用 $\phi 0.28\text{ mm}$ 的铜电阻丝绕制而成, 当加热电流不变时, 加热屏表面温度均匀、稳定, 从而可以均匀地向目标板传递热量, 改变加热电流, 就可以改变传向目标板传递的热量。

2. 目标板温场分布分析

上述加热方法能否保证目标板表面温场的均匀性, 必须进行理论分析和实测。

加热屏主要通过辐射向目标板传递热量。加热屏和目标板的尺寸都是 $284 \times 284 \text{ mm}^2$ ，把目标板和加热屏均分为 10 个条区，即 A_1, A_2, \dots, A_{10} 和 B_1, B_2, \dots, B_{10} (见图 1)。 A_1 对 B_1 的角系数为 $x_{A_1-B_1}$ ，两板间距离 D 为 4mm，则：

$$X/D=7.1;$$

$$Y/D=284/4=71;$$

其中， X 为 A_1 区的宽度； Y 为 A_1 区的长度；查得^[1]： $X_{A_1-B_1}=0.8$ ；而 A_1 对整个加热板的角系数为

$$X_{A_1-B} = X_{A_1-B_1} + \frac{1}{2}(1 - X_{A_1-B_1}) = 0.9。$$

考虑四周的挡板为辐射面，则 X_{A_1-B} 还会更大，估计为 0.95；而中间区域的 X_{A_5-B} 和 X_{A_6-B} 接近 1；由此可见，其角系数差别甚小，可认为目标板是均匀地接受加热屏的辐射热量。

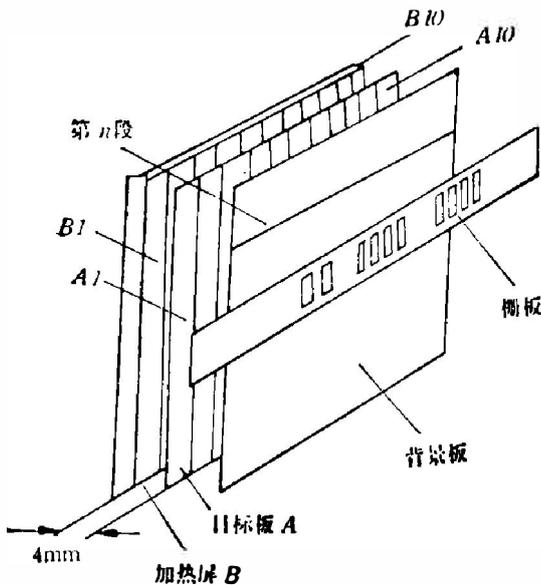


图 1 温差发生器结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the temperature difference generator.

在加热屏和目标板四周封闭的情况下，根据格拉晓夫准则：

$$Gr_D = g\beta \Delta t D^3 / \nu^2; \quad (1)$$

式中， g 为重力加速度； β 为空气的体膨胀系数； ν 是空气的运动粘度； Δt 是加热屏和目标板之间的温差 (取最高温差为 5°C)。采用 20°C 时干空气的物理参数，即

$$\beta = 3.43 \times 10^{-3} \text{ 1/K}; \quad \nu = 15.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s};$$

得 $Gr_D = 47.16$ 。

由于 $Gr_D \ll 2000$ ，根据雅可布 (Jakob) 等的试验证实，两板之间的空气没有发生流动，可见加热屏和目标板之间无对流换热，说明加热屏向目标板的导热是通过静止的空气均匀进行的，因此，目标板是均匀地接受加热屏传递的热量。

在不安装背景板情况下，目标板向空气散热有辐射散热和对流散热，整块板上辐射散热是均匀的，不影响目标板上温场的均匀性。目标板和空气的对流散热，导致周围空气温度的升高，热空气向上自由运动，在目标板的表面就形成了边界层。这边界层随着目标板高度的增加而加厚，从而目标板对空气的放热系数随高度增加而减小，导致目标板上温度不均匀 (温度上面高，下面低)。经过理论分析计算，在目标板 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 范围内，加热 5°C 的情况下，上下最大温差为 0.094°C 。

在装上背景板后，由于目标和背景板之间的空气是不流动的，相当于目标板通过静止的空气均匀地向背景板传热，从而背景板不影响目标板温场的均匀性。

3. 背景板温场分布的分析

当背景板不受热时，其温度和环境温度一样，这时温场是均匀的，当目标板被加热并通过空气将热量传导给背景板时，背景板的温度升高。因背景板对空气的放热系数随高度的不同而不同，这就导致温场的不均匀。由于目标板和背景板之间的空气不流动，不发生对流传热。由于目标板的发射率很大 (约为 0.96)，而背景板的发射率很小 (约为 0.05)，辐射传

热也可忽略不计。下面只考虑空气传导引起的背景板温度的升高。

假设目标板的温度比背景板的温度高 5°C ，环境温度为 20°C 。背景板均匀接受目标板传递的总热量为

$$Q = A \cdot \frac{\lambda}{D'} \cdot \Delta t; \quad (2)$$

式中, A 为背景板的面积; $\lambda = 0.0257 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$ 是 20°C 干空气的热导率; D' 是目标板与背景板之间的距离, 其值为 $D' = 8 \text{ mm}$; Δt 是目标板和背景板之间的温度差。

将上述数据代入式(2), 计算得:

$$Q = 1.29554 (\text{W}).$$

背景板接收的热量 Q 一部分向空间辐射, 另一部分对外部空气对流放热, 可写成:

$$Q = A \cdot \sigma_b [T^4 - T_f^4] + A \cdot \bar{\alpha} (t - t_f); \quad (3)$$

式中, t 为背景板的温度, t_f 为环境温度, $T_f = 273 + t_f$; $T = 273 + t$; $\bar{\alpha}$ 是背景板的平均放热系数; σ_b 为斯忒芬-波尔兹曼常数

背景板高度为 x 处的放热系数为^[1]

$$\alpha_x = \frac{\lambda}{x} [0.508 P_r^{1/2} (0.952 + P_r)^{-1/4} Gr x^{1/4}]; \quad (4)$$

式中, P_r 是普朗特数, 对于 20°C 干空气, $P_r = 0.713$; $Gr x$ 是格拉晓夫数。

为计算 $Gr x$, 假设背景板的温度比环境温度高 2°C ; 将 20°C 干空气的物理参数代入式(1)可算出 $Gr x$, 然后再代入式(4)则可计算得:

$$\alpha_x = 1.272 x^{-1/4}. \quad (5)$$

整块背景板的平均放热系数为

$$\bar{\alpha} = \frac{4}{3} \alpha|_{x=H} = 2.3233 (\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C});$$

其中, H 是背景板的高度。

将数据代入式(3)并整理得

$$5.67 \left(\frac{t+273}{100} \right)^4 + 2.3233t - 480.4104 = 0; \quad (6)$$

用黄金分割法编程上机求解^[2], 得

$$t = 21.9864^{\circ}\text{C}$$

可见, 当加热目标板, 使其温度比背景板的温度高 5°C 时, 背景板的温度升高 $21.9864 - 20 = 1.9864^{\circ}\text{C}$, 与前面设计升高 2°C 是基本一致的。

背景板的长度 $L = 284 \text{ mm}$, 高度 $H = 284 \text{ mm}$, 厚度 $z = 2 \text{ mm}$ 。为了求出背景板中间 $\phi 100 \text{ mm}$ 视场不均匀度, 将背景板沿高度方向均分成 N 段, 如图 1 中背景板所示。分别求出每段上的温度值, 即可得到温场的不均匀度。

背景板上每段热量为:

$$\frac{Q}{N} = \frac{1.29554}{N} (\text{W});$$

第 n 段的对流放热量为

$$Q_{n1} = \frac{A}{N} \bar{\alpha}_n (t_n - t_f);$$

其中, t_n 为第 n 段的平均温度, 第 n 段的平均放热系数 $\bar{\alpha}_n$ 为

$$\bar{\alpha}_n = \frac{1}{h} \int_{K(n-1)}^{\lambda_n} \alpha_x dx = 5.9718N \left[\left(0.284 \frac{n}{N} \right)^{3/4} - \left(0.284 \frac{n-1}{N} \right)^{3/4} \right];$$

式中, h 为每一小段的高度, $h = \frac{H}{N}$ 。

第 n 段对空气的辐射热量为

$$Q_{n2} = \frac{A}{N} \sigma_b [T_n^4 - T_f^4] = \frac{0.45732}{N} \left[\left(\frac{t_n + 273}{100} \right)^4 - 73.7 \right];$$

对第 n 段, 接受的热量 $\frac{Q}{N}$ 与从上一段导入的热量之和除对流放热与对空气辐射的热量外, 多余的热量向下一段传导。则第 n 段多余热量为

$$\Delta Q_n = \frac{Q}{N} + Q'_n - (Q_{n1} + Q_{n2}); \quad (7)$$

式中, Q'_n 是上一段导入第 n 段的热量。

在热平衡时, 第 n 段传导到第 $n-1$ 段的热量为

$$\Delta Q'_n = \frac{\lambda_m L z}{h} \delta t; \quad (8)$$

式中, L 为背景板的长度; z 为背景板的厚度; λ_m 为背景板的热导率, 其值为 $164.8 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{C}$; δt 为第 n 段与第 $n-1$ 段的温度差。

$\Delta Q'_n$ 和 ΔQ_n 是相等的, 将已知数据代入式(8)整理得:

$$\delta t = 3.034 \frac{\Delta Q_n}{N}; \quad (9)$$

因此, 对固定的 N 值, 知道 ΔQ_n 就可算出各段的 δt 。最后检查并要求各段的平均温度 $\bar{\delta t} = 21.9864^\circ\text{C}$, 否则, 就要重新设置最上一段的温度, 重新计算, 直到 $\bar{\delta t} = 21.9864^\circ\text{C}$ 为止。

背景板中间的视场尺寸为 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 。当背景板边缘到视场边的距离 $X_1 = 92 \text{ mm}$ 时, 由计算得 $t_1 = 21.9667^\circ\text{C}$; 当背景板边缘到视场另一边距离 $X_2 = 192 \text{ mm}$ 时, 由计算得 $t_2 = 21.9986^\circ\text{C}$, 则目标板比背景板温度高 5°C 时的最大温度差为 $t_2 - t_1 = 0.0319^\circ\text{C}$ 。与中心点温度相比, 其温场的不均匀度为 $\pm 0.016^\circ\text{C}$ 。

从上面的分析可知, 要使背景板上的温场均匀, 就要想办法使其表面的空气不发生流动。这可通过在背景板前面加一同尺寸的隔离板来实现。在隔离板中间开一个带套筒的 $\phi 100 \text{ mm}$ 的孔。为使背景板的温度在给出 5°C 温差时不升得更高, 将隔离板两面喷涂无光黑漆。选择隔离板与背景板之间的距离时, 应注意使格拉晓夫数 $Gr \ll 2000$ 。

3、表面温场均匀性的测试

3.1 传感器及安装

采用的传感器是由 $\phi 10 \text{ mm}$ 、厚 1 mm 的特种陶瓷 BeO 作基片, 将铂溅射在上面精制而成的铂电阻。安装时在被测板上加工一个 $\phi 10 \text{ mm}$ 、深 1 mm 的圆形平底槽。将铂电阻嵌入, 接合处用导电胶烧结^[3]。由于 BeO 片、铝合金和导电胶的热导率很接近, 安装铂电阻不会影响被测板的原来温度场, 同时能较准确地测出被测板的真实表面温度。

3.2 表面温场的实测

用一块尺寸、材料都和目标板一样的温场均匀的检测板, 在中间 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 范围内安装 5 个铂电阻, 安装位置如图 2 所示。引线用厚 0.05 mm , 宽 1.5 mm 的银铜丝引出, 银铜丝粘贴在板上, 然后板的两面喷涂无光黑漆。

为了保证温场均匀性的检测精度, 采取以下几点主要措施:

(1) 采用以中心点测温电阻 R_{t3} 为基准, 测量与其它各点之间的温差, 以便减小在信号处理中的系统误差;

(2) 采用高精度恒流源, 将测温电阻的变化转换成电压信号; 与中心点测温电阻对应的电压差分放大后, 通过 12 位 A/D 转换, 用 APPLE-II 机快速采样测量各测点与中心点的温差;

(3) 对上下两个测试点, 采用检测板正置和倒置 180° 两次测量(均与中心点相比), 然后算出 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 范围内的最大温度差, 这相当于用同一铂电阻测量两点的温度差, 基本上可消除传感及测量电路的系统误差, 大大提高测量结果的精度。

表面温场均匀性的实测结果:

(1) 当目标板的温度比背景板的温度高 5.02°C 时, 测出背景板的温度比环境温度高 1.50°C , 和前面的分析结果基本相符。

(2) 将温场均匀性检测板置于目标板位置, 装上背景板, 不加热时目标板上出现的最大温差是 0.002°C , 当加热使中心点温度升高 6.76°C (相当于目标板和背景板之间的温差为 5°C 的情况) 时, 在目标板 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 范围内出现的最大温差(最上一点和最下一点的差值)为 0.062°C 。因而, 在 $\phi 100 \text{ mm}$ 视场内, 与中心点温度相比, 目标板的最大温场不均匀度为 $\pm 0.031^\circ\text{C}$ 。这主要是由于背景板上开有槽口, 会产生一些微弱的对流而引起的。

(3) 将温场均匀性检测板置于目标板的位置, 在不装背景板的情况下进行测量, 这相当于测量背景板温场的均匀性。当加热使中心点温度升高 1.50°C 时(相当于目标板与背景板的温差为 5°C 时背景板的情况), 在 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 范围内出现的最大温差为 0.046 。所以, 在 $\phi 100 \text{ mm}$ 视场内, 与中心点温度相比, 背景板最大温场不均匀度为 $\pm 0.023^\circ\text{C}$, 这和前面的分析结果基本相符。

(4) 将温场均匀性检测板置于目标板位置, 在背景板的位置上装上隔离板, 加热, 使中心点温度升高 1.68°C (这相当于产生 5°C 温差时背景板的情况), 实际测得在 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 范围内, 最大温差为 0.021°C , 即与中心点温度相比, 背景板 $\phi 100 \text{ mm}$ 视场内最大温场不均匀度为 $\pm 0.011^\circ\text{C}$ 。

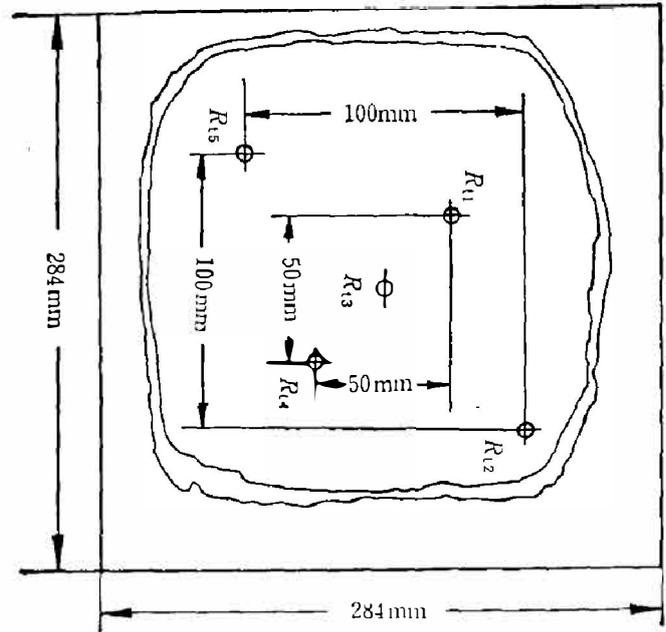


图 2 铂电阻安装位置图

Fig. 2 Installation position of platinum temperature transducers.

4、温差的测量与控制

4.1 温差测量方法

在目标板和背景板中间相对应的位置上,同样采用嵌装的方法,各装一只经过精密标定的铂电阻(R_{16} 、 R_{17}),采用图3的电路检测两板的表面温度差。

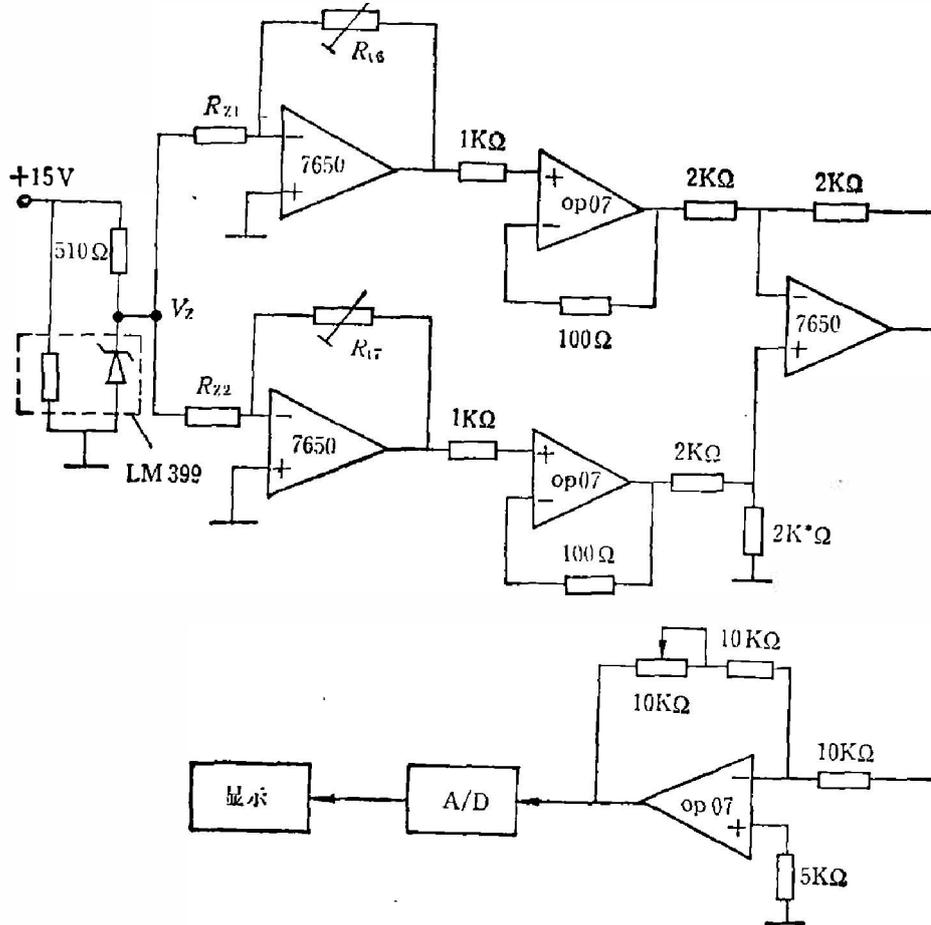


图3 温差测量电路

Fig. 3 The circuit for measuring temperature difference.

用线绕电阻代替标定得到的 R_{16} 和 R_{17} 在 20°C 和 25°C 时的电阻值,并调整温差测量电路。由于采用差分电路,有效地减小了恒流电路随环境温度的微小变化而引入的误差。温差测量的误差主要来源于铂电阻的标定误差、线绕电阻的配置误差及显示误差。总的合成误差为 $\pm 0.038^{\circ}\text{C}$ 。因而温差在 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 范围内,测量误差小于 $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$,分辨率为 0.01°C 。

4.2 温差控制

采用上海自动化仪表三厂生产的 XMT 温度数显调节仪作为控制和调节仪表,在 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,控温精度可优于 $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ 。

最后,采用瑞典 AGA-782 热像仪和日本 6T61 热像仪对温差发生器的性能和温场均匀性作了对比测试,证明温差发生器在 100mm 视场内的温场是均匀的。

5、结 论

通过理论分析和实验,证实了本文采用的方案是切实可行的。在产生 0~5°C 连续可调温差范围内,温差测量精度优于 $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$,平面温场在 $\phi 100\text{ mm}$ 范围内的均匀性优于 $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$,控温精度优于 $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ 。

参 考 文 献

- [1] J. P. 霍尔曼著[美],传热学,北京:人民教育出版社,(1981)。
- [2] 席少霖、赵风治编,最优化计算方法,上海:上海科学技术出版社,(1985)。
- [3] 樊鑫瑞等,华中工学院学报,15(1987),4: 177~180。

STUDY OF TEMPERATURE DIFFERENCE GENERATOR FOR TEST OF THERMAL IMAGER

FAN XINRUI, PEI QINGAN, QIAN HUA

(Department of Automatic Control, Hua Zhong University of Science and Technology)

ABSTRACT

A temperature difference generator is expounded for measuring the MRTD (minimum resolvable temperature difference) of thermal imagers. The uniformity of the temperature field is analysed in theory and the experimental result of the surface temperature field is given. The measurement and the control of temperature difference are briefly introduced.