

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2011.04.008

光电技术

## 温度脉动仪标定装置的初步设计

赵乐至, 刘小勤, 卢伟

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 在大气参数中折射率结构常数  $C_n^2$  是一个重要的参数,  $C_n^2$  有多种测量方法, 其中利用温度脉动仪进行测量是一个重要的测量方法。但是可以精确控制的微温度脉动源较难产生, 所以至今还没一个标准的温度脉动源对温度脉动仪进行定标。从热力学原理出发, 采用绝热压缩和膨胀气体的方法, 研制了一个温度可以控制的温度脉动源装置, 并且对其不确定度进行分析, 认为这个装置可以用来标定温度脉动仪。

**关键词:** 折射率结构常数; 温度脉动仪; 温度脉动源

中图分类号: P414

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2011)04-0294-05

## Preliminary Design of Calibration Device of Micro-Thermometer

ZHAO Le-zhi, LIU Xiao-qin, LU Wei

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Refractive index structure constant  $C_n^2$  is an important atmospheric parameter. There are many methods to measure  $C_n^2$ , one is using micro-thermometer, but the precise controlled micro-thermometer source is difficult to be realized. Therefore, there isn't a standard micro-thermometer source for the calibration of the micro-thermometer until now. Based on the principle of thermodynamics, using adiabatic compression and expansion of gas method, a temperature controlled device is developed. The uncertainty analysis of the device is proved that the device can be used to calibrate micro-thermometer.

**Key words:** refractive index structure constant; micro-thermometer; micro-thermometer source.

### 1 前言

由于太阳辐射和地面辐射等因素的综合作用在大气中形成了不均匀的温度场, 这种温度场的起伏用  $C_T^2$  表示, 这种不均匀会导致大气的折射

率起伏, 用  $C_n^2$  表示

$$C_T^2 = \frac{\langle |T(r_1) - T(r_2)|^2 \rangle}{|r_1 - r_2|^{2/3}} \quad (1)$$

在局地均匀各向同性湍流条件下<sup>[1]</sup>,  $C_T^2$  只与两点之间的距离有关, 而与两点的相对取向无

收稿日期: 2009-08-25; 修改日期: 2010-10-22

E-mail: zhaolele@mail.ustc.edu.cn

关, 其表达式简化为

$$C_T^2 = \frac{\langle |T(x) - T(x+r)|^2 \rangle}{r^{2/3}} \quad (2)$$

$C_n^2$  与  $C_T^2$  关系为 [2]

$$C_n^2 = \left[ \frac{10^{-6}}{T} \left( \frac{77.6P}{T} + \frac{0.584P}{T\lambda^2} \right) \right]^2 C_T^2, \quad (3)$$

式中,  $P$  为大气压强 (hPa),  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ ).  $C_n^2$  有多种测量方法 [3]. 其中利用温度脉动仪进行测量是一个重要的测量方法, 在文献 [4] 中利用模拟信号对温度脉动仪的信号处理部分进行了测试, 还把几个温度脉动仪放在一起测量进行对比, 但没能够对全系统进行定标, 所以设计了下面的温度脉动源, 并对温度脉动源进行了讨论, 希望能够利用温度脉动源对温度脉动仪进行绝对定标.

## 2 温度脉动仪工作原理

温度脉动仪 [5] 如图 1 所示. 先求得  $C_T^2$ , 然后用式 (3) 计算  $C_n^2$ .  $R_1$ 、 $R_2$  和两个  $R_0$  组成一个惠斯登电桥, 其中  $R_0$  是标准电阻,  $R_1$ 、 $R_2$  则是两个热惯性极小的铂丝电阻.  $R_1$ 、 $R_2$  分别装在相距为  $r$  的探头上. 于是, 电桥的输出端就输出  $R_1 - R_2$  的信息, 它很容易转换为  $T_1 - T_2$  的信息. 将这个信息经过一定的程序处理, 就可以得到  $C_T^2$ .

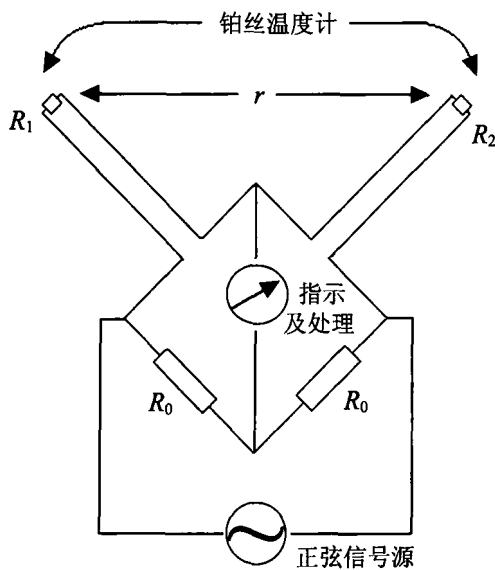


图 1 温度脉动仪

Fig.1 Schematic of micro-thermometer

## 3 温度脉动源的原理

图 2 所示为温度脉动源.

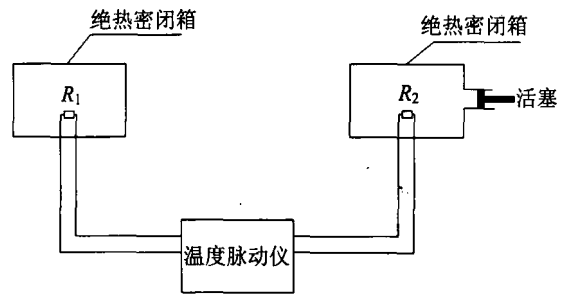


图 2 温度脉动源

Fig.2 Schematic of micro-thermometer source

温度脉动仪的两个探头分别放在两个绝热密闭箱中, 其中一个密闭箱上装有活塞. 当活塞不动的时候, 两个绝热密闭箱温度会慢慢变为一致, 即  $C_n^2$  为零, 这样只能对温度脉动仪的零点进行定标. 为了能够对温度脉动仪量程范围内的多个点进行定标, 就要产生多个稳恒的温度脉动. 最简单的方法是让气体绝热变化, 由变化量的大小决定温度脉动的大小. 当活塞往复运动时密闭箱的体积就要发生变化, 如果这个过程比较快可以认为是绝热过程, 气体的绝热方程为 [6]

$$TV^{\gamma-1} = \text{恒量}, \quad (4)$$

式中,  $\gamma$  为泊松比, 干空气的泊松比为 1.40.

当体积变大的时候气体的温度降低, 当体积变小的时候气体的温度升高. 图 3 是活塞运动和气体温度变化的示意图.

在图 3 中左侧是活塞运动示意图, 右侧是气体温度变化示意图.  $T$  表示气体的温度,  $t$  为时间, 直线  $T_0$  表示活塞不动时气体温度不随时间变化, 曲线  $T(t)$  表示当活塞运动时气体的温度随时间的变化情况. 空气中气压是按声速传播的, 在密闭箱这种狭小的空间内可以认为各处压强一致, 所以温度也一致. 由于活塞的运动可以控制, 这样就可以控制箱体内部的气体温度, 在一定范围内任意的  $C_n^2$  都能得到, 利用式 (3) 就能得到  $C_n^2$ , 把这个值和温度脉动仪的测量值进行比较, 就可以对温度脉动仪的测量结果进行评估和修正.

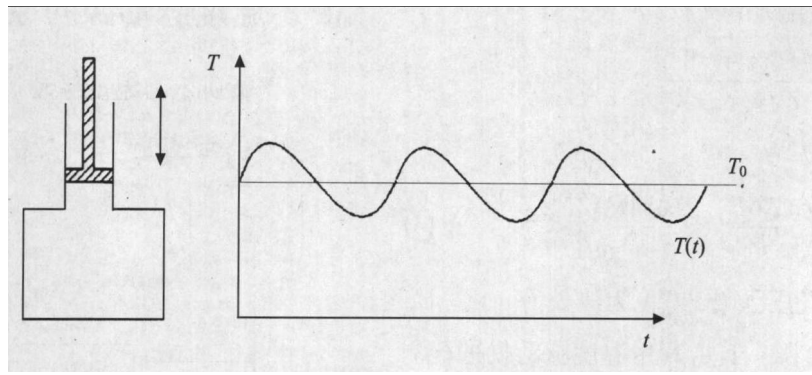


图3 活塞运动和气体温度变化

Fig.3 Relation of gas temperature and piston movement

由于正弦运动最容易通过弹簧振子系统获得，假设活塞的运动为正弦方式，则密闭的体积与时间的关系为

$$V(t) = V_0 + V \sin \omega t, \tag{5}$$

式中， $V_0$  为箱体的平均体积， $V$  为活塞振幅。

温度与时间的关系为

$$T(t) = T_0 + T_t. \tag{6}$$

假设式 (4) 中的恒量为  $C$ ，有

$$T(t)V(t)^{\gamma-1} = C,$$

$$T(t) = \frac{C}{V(t)^{\gamma-1}} = CV(t)^{1-\gamma} =$$

$$\begin{aligned} & C(V_0 + V \sin \omega t)^{1-\gamma} = \\ & CV_0^{1-\gamma} \left[ 1 + (1-\gamma) \frac{V}{V_0} \sin \omega t + \right. \\ & \left. \frac{-(1-\gamma)\gamma}{2!} \left( \frac{V}{V_0} \sin \omega t \right)^2 + \dots \right] \approx \\ & CV_0^{1-\gamma} + C(1-\gamma) \frac{V}{V_0^\gamma} \sin \omega t, \end{aligned} \tag{7}$$

由式 (6) 得

$$\begin{aligned} T_t &= C(1-\gamma) \frac{V}{V_0^\gamma} \sin \omega t = \\ & T_0(1-\gamma) \frac{V}{V_0} \sin \omega t, \end{aligned} \tag{8}$$

由温度结构常数的定义得

$$\begin{aligned} C_T^2 &= \frac{\langle |T(x) - T(x+r)|^2 \rangle}{r^{2/3}} = \frac{\overline{T_t^2}}{r^{2/3}} = \\ & \frac{T_0^2(1-\gamma)^2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2}{2r^{2/3}}, \end{aligned}$$

则折射率结构常数为

$$\begin{aligned} C_n^2 &= \left[ \frac{10^{-6}}{T_0} \left( \frac{77.6P}{T_0} + \frac{0.584P}{T_0 \lambda^2} \right) \right]^2 \times \\ & \frac{T_0^2(1-\gamma)^2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2}{2r^{2/3}}, \end{aligned} \tag{9}$$

通过式 (9) 可以看出，折射率结构常数与活塞的频率无关，与活塞振幅的平方成正比，可以通过改变振幅来改变折射率结构常数。

### 4 源自身的不确定分析

取气温为 20 ℃，气压为 1000 hPa 的通常条件。设密闭箱体体积为  $8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，活塞体积振幅为  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ，这种条件下温度不是很低，气压不是很大，密闭的空气满足理想气体的条件。温度脉动仪探头间距为 1 m。不考虑波长的影响时，对应的折射率结构常数大约为  $3.50 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。自动气象站的测量精度很高 [7]，普通的自动气象站测量指标都优于下面的给出值，体积的测量精度是根据长度的测量精度计算出来的，下面这些指标都容易达到：

- 温度测量的不确定度为： 0.2 ℃；
- 温度的相对不确定度为： 0.07%；
- 气压测量的不确定度为： 0.4 hPa；
- 气压的相对不确定度为： 0.04%；

箱体体积测量的不确定度为:  $10 \text{ cm}^3$ ;

箱体体积的相对不确定度为:  $0.125\%$ ;

活塞振幅测量的不确定度为:  $0.2 \text{ cm}^3$ ;

活塞振幅的相对不确定度为:  $1\%$ 。

对  $C_T^2$  求偏导数可以得到

$$\frac{\partial C_n^2}{C_n^2} = 2 \frac{\partial V}{V}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_n^2}{C_n^2} = -2 \frac{\partial V_0}{V_0}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_n^2}{C_n^2} = 2 \frac{\partial P}{P_0}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_n^2}{C_n^2} = -2 \frac{\partial T}{T}. \quad (13)$$

由式 (10)~(13) 的源的最大相对不确定度为:  
 $|2 \times 1\%| + |2 \times 0.125\%| + |2 \times 0.04\%| + |2 \times 0.07\%| = 2\% + 0.25\% + 0.08\% + 0.14\% = 2.47\%$ 。可以看出源的不确定度, 主要是由活塞振幅的不确定度造成的, 因此提高活塞振幅的测量精度, 对于提高标准源的精度具有十分重要的意义。

实际上绝热过程是不可能存在的, 热传导的存在会使源的值比计算值偏小, 这个问题严格的定量处理起来比较复杂。这里仅仅只是半定量的计算一下。

由于常见的材料的导热系数比空气的导热系数大一个数量级, 假设容器的温度不变, 容器内的空气分为两部分, 一部分为  $h=2 \text{ cm}$  厚的隔热层; 另一部分为温度均一的空气。空气的热传导系数为  $k = -0.025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 温度均一空气的质量为  $m = 6.24 \times 10^{-3} \text{ kg}$ , 有效热传导面积为  $A = 0.24 \text{ m}^2$ 。空气的定容比热容为  $c = 717 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 热传导方程为

$$\frac{dQ}{dt} = k \frac{A}{h} \Delta T, \quad (14)$$

由于

$$dQ = -mcd(\Delta T), \quad (15)$$

由式 (14)、(15) 和初始条件得

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp\left(-\frac{kA}{hmc}t\right), \quad (16)$$

其中  $\Delta T_0$  为初始温差, 可见空气的温度是按指数规律变化, 时间常数为  $hmc/kA$ 。易得通过增加箱体的体积可以增加时间常数。将上面的数据代入得时间常数为  $15 \text{ s}$ , 活塞的运动周期最长为  $1 \sim 2 \text{ s}$ , 所以可以认为是绝热过程, 在实际实验中可以实测出时间常数, 得到实际时间常数以后, 对源的强度进行修正。现在还没有找到合适的压强传感器 (响应足够快、精度足够高), 如果能够找到合适的压强传感器, 就利用气体的温度、体积与压强的关系式, 把边界上的热传导效应完全忽略。

在源工作时存在运动, 摩擦生热不可避免, 这有三个方面: 1) 空气的内摩擦; 2) 空气与容器壁的摩擦; 3) 活塞与气缸的摩擦。由声学<sup>[8]</sup>知识知道次声波的大气衰减系数极小, 而活塞恰好工作在次声频率内, 所以空气的内摩擦影响很小。同理空气与容器的摩擦的影响也很小。活塞和气缸壁的摩擦将导致整个系统的缓慢升温, 最简单的办法是把气缸放在容器的上方, 使摩擦产生的热量集中在容器的上部, 加上在没有对流的时候空气是良好的绝热体, 这样可以降低摩擦对源强度的影响。还可以通过测量容器内空气的温升对源的强度进行修正。最好的办法是对气缸和活塞进行适当的冷却, 使气缸和活塞处于恒温状态。

## 5 实验步骤

1) 利用木材橡胶等制作一台定性演示实验装置, 用于研究这个方案的可行性。如果效果比较好, 进行下一步实验。

2) 对上面的装置参数进行精确测量, 进行定量的分析。这已经达到预期的目的。

3) 选用合适的材料再制作一台装置。如用好的绝热材料, 选用各种气体进行实验等。

4) 和计算机技术相结合制作一台一体化装置。

## 6 结 论

这个设计的温度脉动源, 具有可靠的重复性,

和可控性,要远比文献[4]中提到的方法可信,有可能成为温度脉动仪的标准鉴定源。这个装置还有以下的优点:

1) 这个装置中压缩气体的频率可以随意改变,可以利用这一点来研究温度脉动仪的频谱响应特性。

2) 在这个装置中当活塞运动的时候虽然各处的温度一样变化,但是各处的气流速度却是不一样的,靠近活塞的地方气流大,远离活塞的地方气流小。可以利用这一点研究风对温度脉动仪测量精度的影响。

#### 参考文献:

- [1] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, et al. Measurement and analysis of atmospheric optical parameters of surface layer in Mianyang region [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(1): 11-15(in Chinese)
- 孙刚,翁宁泉,肖黎明,等. 绵阳地区近地面层大气光学参数的测量与分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(1): 11-15.
- [2] Su Yi, Wan Min. *High Energy Laser System* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 128-129(in Chinese).
- 苏毅,万敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 128-129.
- [3] Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Xiao Liming, et al. Comparison of some methods of measuring refractive index structure parameter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6): 755-761(in Chinese)
- 袁仁民,曾宗泳,肖黎明,等. 不同方法测量折射率结构常数的比较 [J]. *光学学报*, 2000, 20(6): 755-761.
- [4] Xiao Liming, Weng Ningquan, Ma Chengshen, et al. Experimental research on the reliability of  $C_n^2$  Sonde and its data processing method [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2004, 27(2): 179-182(in Chinese).
- 肖黎明,翁宁泉,马成胜,等.  $C_n^2$  探空仪的可靠性实验与数据处理方法 [J]. *合肥工业大学学报*, 2004, 27(2): 179-182.
- [5] Wu Jian, Yang Chunping, Liu Jianbin. *Theory of Light Propagation in Atmosphere* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 141-142(in Chinese).
- 吴健,杨春平,刘建斌. 大气中的光传输理论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 141-142.
- [6] Fan Hongchang. *Calorifics* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 158-159(in Chinese).
- 范宏昌. 热学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 158-159.
- [7] Zhu Lekun, Zheng Lichun. Uncertainty analysis of various sensors calibration results for AWS [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(5): 635-642(in Chinese).
- 朱乐坤,郑丽春. 自动气象站各要素传感器检定结果的不确定度分析 [J]. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 635-642.
- [8] Du Gonghuan, Zhu Zhemin, Gong Xiufen. *Fundamentals of Acoustics* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001: 461-463.
- 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 461-463.

作者简介: 赵乐至 (1981-),男,江苏沛县人,研究生,研究方向为大气物理。