

热辐射实验讲义

(CC1)

注意：

1. 辐射计是一个非常精细的传感器, 我们不应该往孔洞中插入任何物体。要在指定的场所存放好辐射计。
2. 辐射体温度可高达 120°C ，操作时注意皮肤不能接触辐射表面；建议在辐射表面温度低于 40°C 后再更换辐射体、或必须盖上隔热盖后才能更换辐射体；

2024

目 录

1	背景简述	2
1.1	黑体辐射	2
1.2	教学目的	4
1.3	实验设计要点:	4
2	热辐射传感器与热辐射度测量 A (CC1)	6
	【实验目的】	6
	【仪器用具】	6
	【实验注意事项】	6
	【实验原理】	7
	【实验内容】 (CC1)	9
	【实验顺序】	16
	附录 1、 平面辐射源的辐射度计算.....	18
	参考文献	20

1 背景简述

热辐射是19世纪发展起来的新学科，其中的“紫外灾难”是孕育近代物理诞生的两朵“乌云”之一，作为量子论的关键性实验，它敲开了量子力学的大门，它所带来的是人们认识世界观念的重大突破。与该实验相关的威廉·维恩、马克斯·普朗克分别获得了1911年和1918年的诺贝尔物理奖。

重温物理学发展中具有里程碑意义的关键实验，是高校实验教学中物理思维体验性教学的重要内容。热辐射不仅仅是一个热学问题，它还涉及到能量转换与传递、光谱学、量子力学等学科与技术领域；在应用方面，其意义也远超电灯的发光效率或（炼钢过程中）钢水温度的测量，它在遥感、热成像和非接触测温、空间散热等应用领域不可或缺。

1.1 黑体辐射

物体表面向外辐射连续的电磁波的现象称为热辐射。物体在向外辐射的同时，还会吸收来自外界的电磁（能量）辐射，且物体辐射或吸收的能量与它的温度、表面积、黑度等因素有关，是一个多因素系统。

1859年基尔霍夫（G.R. Kirchhoff）从理论上导入了辐射本领、吸收本领和黑体概念，他利用热力学第二定律证明了一切物体的热辐射本领 $r(\nu, T)$ 与吸收本领 $\alpha(\nu, T)$ 成正比，比值仅与频率 ν 和温度 T 有关，其数学表达式为：

$$\frac{r(\nu, T)}{\alpha(\nu, T)} = F(\nu, T) \quad (1)$$

式中 $F(\nu, T)$ 是一个与物质无关的普适函数。在1861年他进一步指出，在一定温度下用不透光的壁包围起来的空内腔中的热辐射等同于黑体的热辐射。1879年，斯特藩（J. Stefan）从实验中总结出了黑体辐射的辐射本领 R 与物体绝对温度 T 的四次方成正比的结论；1884年，玻尔兹曼对上述结论给出了严格的理论证明，其数学表达式为：

$$R_T = \sigma T^4 \quad (2)$$

即斯特藩-玻尔兹曼定律，其中 $\sigma = 5.673 \times 10^{-12} \text{W/cm}^2 \text{K}^4$ 为斯特藩-玻尔兹曼常数。

1888年，韦伯（H.F. Weber）提出了波长与绝对温度之积是一定的。1893年维恩（W. Wien）从理论上进行了证明，其数学表达式为：

$$\lambda_{\max} T = b \quad (3)$$

式中 $b=2.8978 \times 10^{-3}(\text{m} \cdot \text{K})$ 为一普适常数，随温度的升高，绝对黑体光谱亮度的最大值的波长向短波方向移动，即维恩位移定律。

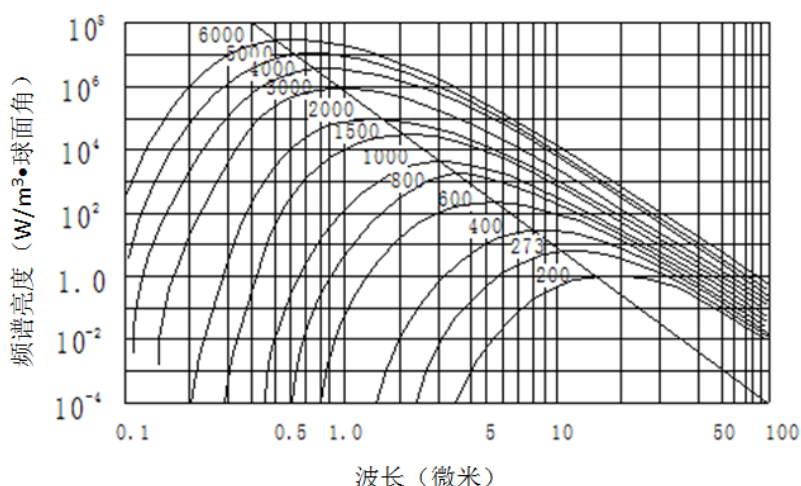


图 1-1 辐射能量与波长的关系

图 1-1显示了黑体不同色温的辐射能量随波长的变化曲线，峰值波长 λ_{\max} 与它的绝对温度 T 成反比。1896年维恩推导出黑体辐射谱的函数形式：

$$r_{(\lambda,T)} = \frac{ac^2}{\lambda^5} e^{-\beta c / \lambda T} \quad (4)$$

式中 α, β 为常数，该公式与实验数据比较，在短波区域符合的很好，但在长波部分出现系统偏差。为表彰维恩在热辐射研究方面的卓越贡献，1911年授予他诺贝尔物理学奖。

1900年，英国物理学家瑞利（L. Rayleigh）从能量按自由度均分定律出发，推出了黑体辐射的能量分布公式：

$$r_{(\lambda,T)} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} KT \quad (5)$$

该公式被称之为瑞利·金斯公式，公式在长波部分与实验数据较相符，但在短波部分却出现了无穷值，而实验结果是趋于零。这部分严重的背离，被称之为“紫外灾

难”。

1900年德国物理学家普朗克（M. Planck），在总结前人工作的基础上，采用内插法将适用于短波的维恩公式和适用于长波的瑞利·金斯公式衔接起来，得到了在所有波段都与实验数据符合的很好的黑体辐射公式：

$$r_{(\lambda,T)} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (6)$$

式中 c_1, c_2 均为常数，但该公式的理论依据当时尚不清楚。

这一研究的结果促使普朗克进一步去探索该公式所蕴含的更深刻的物理本质。他发现如果作如下“量子”假设：对一定频率 ν 的电磁辐射，物体只能以 $h\nu$ 为单位吸收或发射它，也就是说，吸收或发射电磁辐射只能以“量子”的方式进行，每个“量子”的能量为： $E = h\nu$ ，称之为能量子。式中 h 是一个用实验来确定的比例系数，被称之为普朗克常数，它的数值是 6.62559×10^{-34} 焦耳秒。公式（6）中的 c_1, c_2 可表述为： $c_1 = 2\pi hc^2$ ， $c_2 = ch/k$ ，它们均与普朗克常数相关，分别被称为第一辐射常数和第二辐射常数。

1.2 教学目的

1. 认识普遍存在的热辐射现象；通过相对低温的热辐射实验认识影响热辐射的各种因素及其与热辐射的定量关系；初步掌握多因素影响系统的实验研究方法。
2. 定量测量黑体辐射谱，了解导致量子论产生的普朗克定律；
3. 学习设计实验；
4. 了解黑体辐射在天文学、宇宙学及其航天技术中的应用。

1.3 实验设计要点：

1. 能量传递过程

- a) 电加热器的电能（通过焦耳热）转换为热能量；

- b) 热能只能从辐射面向外发射（净能量），从而确定表面温度（并通过红外摄像机校正）；
- c) 热能以电磁波向外辐射；
- d) 辐射能（电磁波）到达热辐射传感器探头时，电磁能再转换为热能；并通过热电堆以电压的形式测出；
- e) 热辐射传感器的校正，包括辐射角，辐射距离；接收角。

2. 背景辐射的扣除

- a) 实验环境不是绝对零度，实验环境对热辐射传感器也存在辐射，本实验如何扣除环境（温度的）热辐射？
- b) 紧接a)，热电堆辐射传感器冷端温度为传感器壳体温度，那么，传感器的输出信号（电压）与接收辐照度是怎样的关系？
- c) 所选择的传感器是如何通过红外透镜过滤背景可见光的？

3. 约束条件

- a) 黑体温度范围及安全性指标，辐射源表面最高温度120℃；非辐射源表面温度40℃；
- b) 用经过色温校正的碘钨灯作为辐射源，需要考虑，灯泡玻璃对红外光的透射率对原辐射谱的影响；
- c) 辐射波段需分别用可见光光谱仪和红外光谱仪测量，为此：
 - i. 需要分别对可见光波段与红外光波段光谱仪的校正
 - ii. 可见光波段与红外光波段光谱仪数据提取与衔接：【谱仪厂家应提供相应的数据接口】

2 热辐射传感器与热辐射度测量 A (CC1)

【实验目的】

- 1、认识普遍存在的热辐射现象及其本质——一种能量转换与传递的形式；
- 2、通过相对低温的热辐射实验认识影响热辐射强度的各种因素及其与热辐射强度的定量关系；包括：
 - a) 辐射体表面温度（验证斯特藩-玻尔兹曼定律）；
 - b) 辐射距离¹；（面源辐射修正）
 - c) 表面的发射系数（拓展）；
 - d) 验证上述因素与辐射强度的定量关系是否符合黑体辐射定律？
- 3、了解热辐射传感器（SMTIR9902）原理和结构、使用（含校正）方法；
- 4、学习应用LabVIEW管理由具有NI通信协议的非NI专业仪器（数字多用表）、设备（程控电源）构成的实验系统。

【仪器用具】

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	黑体辐射与红外测量装置	1	DHRH-B：含带标尺（60cm）位移导轨、辐射器（三种辐射面：黑面、粗面、光滑金属面）、热辐射传感器（SMTIR9902），
2	数字多用表	2	RIGOL DM3058E
3	程控电源	1	RIGOL DP831
4	计算机	1	已安装 LabView 和控温软件

【实验注意事项】

1. 实验过程中，禁止触摸辐射体表面，一方面是避免在高温时烫伤；另一方面避免污染表面，影响发射系数。
2. 测量不同辐射表面对辐射强度影响时，辐射温度不要设置太高，更换辐射体时，应带手套。

¹ 传感器位置与辐射体表面距离

3. 实验过程中，计算机在采集数据时不要触摸测试架，以免造成对传感器的干扰。
4. 在使用控温程序时，要留意程序是否正常运行，若运行有问题，请及时关闭可编程直流电源的输出，防止辐射器温度过高而损坏。停止运行程序时，要用程序的Stop output按钮，不要用菜单键的红色强制终止按钮。
5. 辐射传感器上方有一块金属挡板。在测量时将挡板移开；非测量时关上，避免不必要的触碰污染传感器表面。

【实验原理】

DHRH-B测试台由安装在竖直导轨上的**辐射源**、与辐射源距离可调的**热辐射传感器**组成。**辐射体**由辐射面、安装在辐射面金属（内部）上的并与金属块有良好热接触的陶瓷**加热片**、**PT1000温度传感器**、外围的绝热层以及分别接通加热器和温度传感器的电连接器组成（如图 1-1所示），辐射面即为**辐射源**；仪器标配有三种不同辐射面的辐射体。

辐射体的温度通过陶瓷加热器控制，而加热器的功率由程控电源提供，由计算机输出指令控制。【注意，绝热层材料耐温极限为120℃，因此，在控温程序中加入了警报和断电保护。】

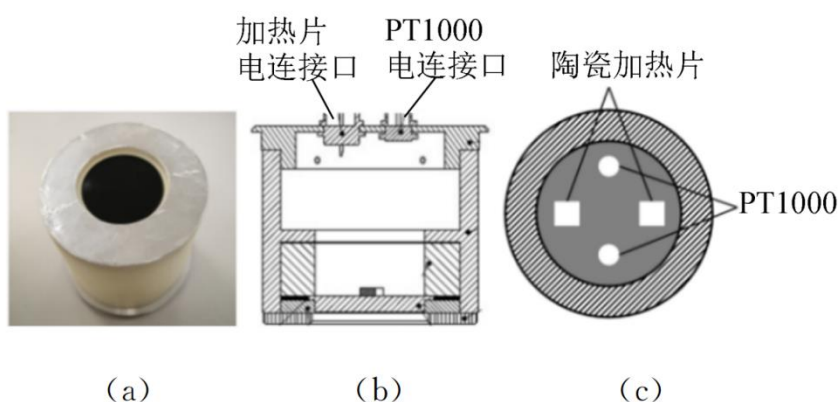


图 2-1 辐射体实物照 (a)，内部结构 (b)，辐射面（背部c）是一块不可更换的金属。

热辐射传感器原理为N个串联的热电偶（热电堆），热电偶一端与吸热面（接近黑体）热连接、另一端与传感器外壳热连接（如图 2-2和图 2-3所示）。当吸热面受

到热辐射时，吸收热能使温度升高，从而使热电偶两端形成温度差产生热电势，其输出电压信号为每个热电偶之热电势的N倍；辐射通量越大，温差越大，输出电压越高。当达到平衡时（SMTIR9902的平衡时间在毫秒量级），热电堆热端从辐射中吸收的热量等于它从热端传到冷端的热量，这一热量又正比于热电偶冷热端的温差，从而正比于热电堆输出的电压（ $\dot{Q} = \dot{q}A = \kappa\Delta T \propto \Delta V$ ）。因此，原则上，SMTIR9902的输出信号正比于当地从辐射方向进入的辐射通量或能流密度，或接收功率 $\Delta V = S\dot{Q}$ ，其中S为探测灵敏度；从说明书得到， $S = 110 \pm 20(V/W)@500K$ 。由于传感器接收面积已确定（ $A = 0.5mm^2$ ），从而可以计算当地辐射通量和对辐射源的立体角，再进一步计算辐射源辐射强度 $I_E = d\phi/d\Omega$ （单位 W/sr ） $= \dot{q}d^2$ 。

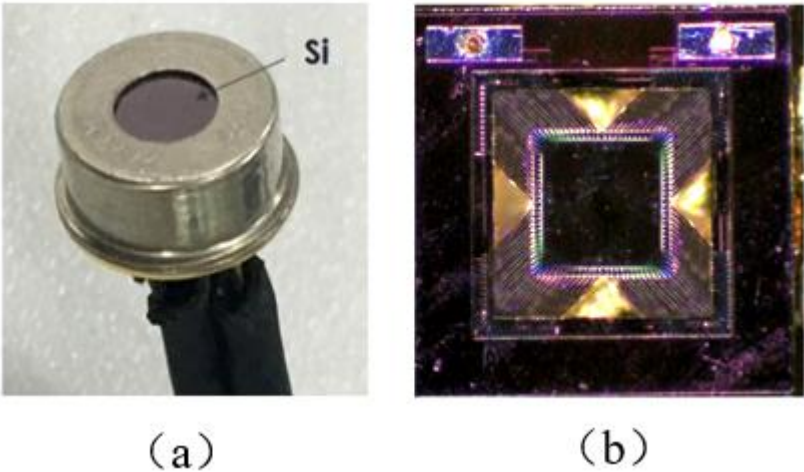


图 2-2 热辐射传感器实物照片（a）及显微放大的内部结构（b）。

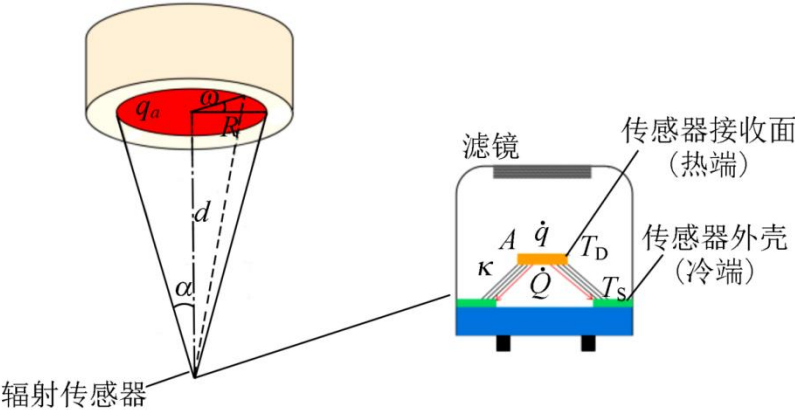


图 2-3 热辐射传感器工作原理示意图

SMTIR9902系列热辐射传感器面向低温热辐射测量，为过滤环境辐射的影响，增加了滤镜，以过滤可见光的影响；SMTIR9902SIL自带透镜，减少接收角从而减少非探测物辐射的影响。（详见两种传感器的技术说明）。传感器外壳带Ni1000热敏电阻，以便测量冷端（外壳的）温度。

实验系统中，热辐射传感器安装在可移动的金属铝臂上，保证传感器外壳与铝臂良好的热接触，而传感器的位置可通过导轨上方的手摇臂连续调节；辐射传感器上方提供了一块金属挡板。在测量时可将挡板移开；非测量时关上，避免不必要的触碰污染传感器表面，给测量造成误差。

热辐射传感器的信号除受到接收面发射率、接收角等自身结构因素的限制以外，还受环境（外壳）温度的影响。因此，不能通过一个预设的校正系数把传感器输出信号直接转换为该地点的辐照度，通常建议在使用环境下进行校正。【在实验（CC1+A）中设计校正方案。】

这还是一个典型的涉及多参量的实验，热辐射强度本身受辐射源温度、表面发射率的影响，这对实验结果分析以及精密测量方案的设计带来了复杂性和挑战。应对复杂性，我们往往需要把其他因素固定来研究某个因素的影响；例如，对材料的防辐射能力进行评价时，要注意对材料厚度的控制，或在掌握厚度的影响后，通过数据处理回归到相同厚度的前提下进行对比。真实的系统都是多参量系统，在之前的许多实验中，往往待测参量对其他因素不敏感或其他参量变化很小而被忽略，从而比较容易做某一参量对测量的影响。

【实验内容】（CC1）

一、实验系统搭建

- 1、辐射体的安装（见图 2-5所示）。辐射体固定于辐射架的最上端，轻旋旁边的固定螺丝，即可从上方取下辐射体（固定螺丝不要拧太紧，防止损坏外壳）。
- 2、控制系统与数据采集系统的连接。

本实验一共用到2台台式万用表，一个可编程直流电源，其中一台万用表测量

辐射体的热敏电阻PT1000（用于温度采集），另一台万用表测量辐射传感器上的电压。接线方式如图 2-4所示。（注：由于仪器厂家分批次提供的仪器标准没有统一，所有电线在连接前需再确认是否正确，可参考表1所述方法辨别。）

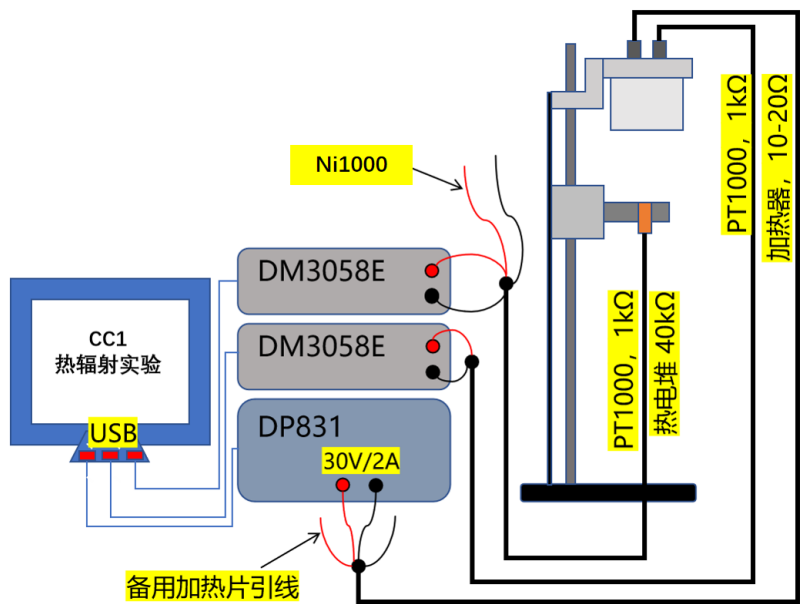


图 2-4 低温热辐射实验接线。

表 1 辐射器与辐射传感器的接线

辐射体部分	热敏电阻PT1000有两个，实验中任选其一接入万用表（热敏电阻电连接线辨别方法：使用万用表测量任意两根导线间的电阻约为1.2 kΩ，则所测试的导线为其中一个热敏电阻的电连接线。否则，更换其中一根导线，直到找到一个热敏电阻所连接的一对电连接线为止。其余2根导线则为另外一个热敏电阻的电连接线。）
	加热器有两个，为了加热均匀，需要并联在一起接入直流电源（接入中间1路30V/2A通道）（加热器的电阻约为10 Ω：电连接线辨别方法请参考热敏电阻电连接线的辨别方法。）
辐射传感器部分	热电堆，接入另一台万用表。（热电堆的阻抗为 40 kΩ，首先根据上述方法辨别出热电堆的一对连接线。再判断热电堆电连接线的正负极，若测温时输出电压正向变化则正负极刚好接入电压表的正负接线口，若负向变化则为反接，需要交换接线口。）

	热敏电阻NI1000，黑、白色连接线（校正温度时使用）。（除热电堆的一对电连接线，剩余的一对电连接线即为热敏电阻的电连接线，室温下阻值约为1.2 k Ω 。）
--	--



图 2-5 装置实物照（勿参照电连接线的颜色直接连接，请参照表 1 的方式进行辨别和电线连接。）

3、 基于LabVIEW的实验管理编程

PC机上已保存预编好的基于LabVIEW的实验管理程序，放于桌面，文件名为“CC1 热辐射实验控温程序”。在运行控温程序前，先进行如下检查：

（1）检查所有连线是否已经正确连接：辐射器的PT1000、辐射器的两组陶瓷加热器、辐射传感器、程控电源、数字万用表。

（2）检查2台数字万用表、程控电源与电脑通信是否正常。在桌面找到“Ultra Sigma”快捷方式图标并双击启动,如果通讯正常，将会看到三台USB设备，2台为DM3058E，1台为DP831，这就是连接电脑的三台设备。每台设备都有自己的唯一地址，例如“USB0::0x1AB1::0x09C4::DM3R174301832::INSTR”，DM代表台式表DM3058E的英文首字母，后面数字为仪器序列号，为简单起见，利用后四位数字区分每台仪器的USB地址，并和实验台上放置的仪器对应起来。具体如图 2-6所示。

（3）如果接线和通信正常，就可以双击放于桌面、文件名为“CC1 热辐射实验控温程序”。控温程序打开后界面如图 2-7所示。



图 2-6 检查设备与电脑通信

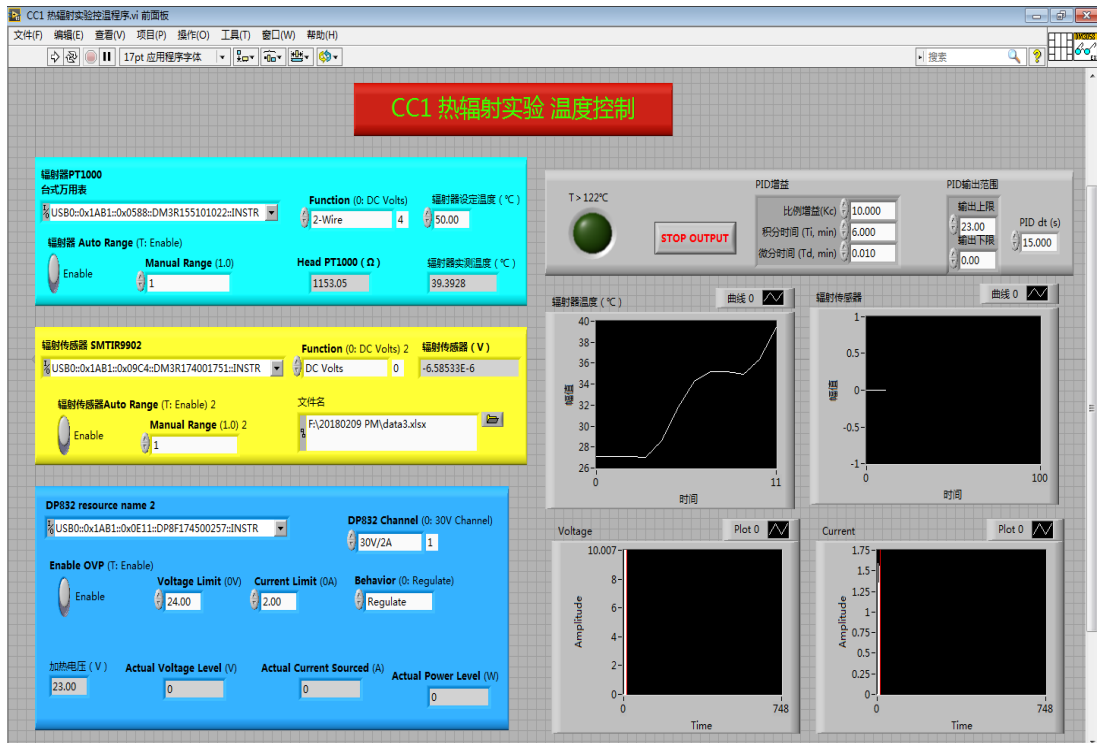


图 2-7 控温程序前面板

辐射器温度探测部分：面板左上部，“辐射器PT1000台式万用表”下拉框请选择连接辐射器PT1000的那台万用表，注意仪器USB地址里的数字要和仪器背后的序列号一致。“Function”选择2-Wire测量电阻，程序会根据测得的PT电阻换算出温度值。“辐射器温度设定”请根据具体实验设置控温目标温度，“辐射器Auto Range”指的是万用表测量时量程是否为自动，按钮在上部为选择“自动量程”。“Head PT1000”和“辐射器实测温度”分别为测得的电阻和对应的实际温度值。

辐射传感器部分：面板左中部，“辐射传感器SMTIR9902”下拉框请选择连接

辐射传感器的那台万用表，注意仪器USB地址里的数字要和仪器背后的序列号一致。“Function”选择DC Volts测量直流电压，“辐射传感器（V）”为实测的传感器电压。“辐射传感器Auto Range”指的是万用表测量时量程是否为自动，按钮在上部为选择“自动量程”。“文件名”显示的保存参数的文件名和路径，程序设计的可以同时保存“辐射器温度”、“可编程直流电源输出功率”、“辐射传感器输出电压”这三个参数。

可编程直流电源部分：面板左下部，通过对DP832或DP831电源进行控制，进而控制辐射体的加热功率。“DP832 Resource name”请通过下拉框选择实验台上放置的直流电源，本实验采用同系列的DP831（请核对一下仪器背后的序列号是否一致）。“DP832 channel”请选择30V/2A（注意DP831有3个通道：8V/5A，30V/2A，-30V/2A，）。“Enable OVP”是极限参数保护开启按钮，按钮在上面是开启，旁边的“Voltage Limit”、“Current Limit”分别为最大限制电压、最大限制电流，采用默认值即可（24V，2A）。最下面会显示实际输出的电压、电流、功率。

面板右上方有：温度超过122度报警灯（辐射器温度不能设定超过120度，否则会过热损坏辐射器。程序运转正常时，若温度超过122度会切断直流电源供电）。

“STOP OUTPUT”按钮，其功能为停止控温（请用这个按钮结束程序，不要用菜单的红色强制终止运行按钮）。

PID的相关参数，这里用的是LabVIEW的PID工具包里的模块：

$$e(k) = SP - PV(k)$$

其中， $e(k)$ 为当时偏差， SP 为设定值， $PV(k)$ 为第 k 次的测量值。PID的输出表达式为：

$$\begin{aligned} u_{output}(k) &= u_P(k) + u_I(k) + u_D(k) \\ u_P(k) &= K_c \cdot e(k) \\ u_I(k) &= u_I(k-1) + \frac{K_c \Delta t}{T_i} \cdot \frac{e(k) + e(k-1)}{2} \\ u_D(k) &= \frac{K_c \cdot T_d}{\Delta t} [e(k) - e(k-1)] \\ u_{output}(k) &= K_c e(k) + \frac{K_c \Delta t}{T_i} \sum_{i=1}^k \frac{e(i) + e(i-1)}{2} + \frac{K_c \cdot T_d}{\Delta t} [e(k) - e(k-1)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中 K_c 、 T_i 、 T_d 分别为比例、积分、微分参数， Δt 为采样时间间隔， $u_{output}(k)$ 为第 k 次采样及计算后所输出的控制电压。本实验控温的PID参数已经调好，实验中采用默认值即可（ $K_c=10$ ， $T_i=6$ ， $T_d=0.01$ ， $\Delta t=15$ ）。PID的输出范围默认设定为（23,0），这对应于可编程直流电源的输出电压范围为0~23V。

面板的右下方设置了四个波形图表，用于显示辐射器温度、辐射传感器电压、直流电源的输出电压和电流。

本实验内容重点在于辨认和选择实验所需的仪器及其驱动程序。对于有兴趣并且有时间的同学，可在以往LabVIEW编程训练的基础上，优化本实验管理程序，包括增加一台（手持式）数字多用表全时监测传感器（SMTIR9902）的外壳温度。熟悉控温程序的界面后，就可以设定目标温度，运行程序开始实验（程序框图采用了while循环，运行程序使用单次运行按钮即可）。本实验的热敏电阻采用的是PT1000，和温度精确对应关系已经写入程序，这里仅列主要温度的分度表供参考（如表2）。

表 2 PT1000 温度分度表

电阻 (Ω)	1000.00	1077.94	1155.41	1232.42	1308.97	1385.06	1460.68
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	0.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0

二、测量物体的辐射面温度对辐射强度大小的影响

- 1、选择某一辐射距离，将辐射传感器调至该距离；
- 2、设计至少5个温度控制点；由于120 $^{\circ}\text{C}$ 的断电保护控制，建议设计的控温温度设置值不高于118 $^{\circ}\text{C}$ 。记录每个控温点（稳定后）所需的电功率以及辐射传感器输出电压于表3中；
- 3、分析数据，探索辐射强度与辐射表面温度之间的关系，并绘制温度-辐射强度曲线图；
- 4、分析数据，探索电源加热功率与辐射表面温度之间的关系；

表 3 黑体温度与辐射传感器输出电压记录表²

设定温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	20.0	50.0	80.0	117
辐射传感器输出电压 P (μV)					
电源输出平均功率 (W)					

注：温度值个位数要与学号个位数相同，十位或百位数自选。

三、 测量在不同辐射距离在 d 的辐射传感器输出 P ，拟合给出 P ~ d 之间的关系

- 1、设计至少5个位置测量点；
- 2、将控温度控制目标设置在某温度，[建议在实验内容二的某个状态（如控温在 100°C ）完成后，转入本实验内容的测量]；
- 3、移动红外传感器的位置，每移动一定的距离后，记录测得的辐射传感器输出电压，并记录在表 4中，绘制 P - d^2 图。
- 4、分析绘制的图形，你能从中得出什么结论，是否具有类似光强和距离的平方成反比的规律？
- 5、对比距离平方反比律与（平面辐射源的）辐射角关系式（见附录公式（6）），哪个符合得更好？讨论其适用范围。

表 4 黑体辐射与距离关系记录表

设定距离 d (mm)	400	380	360	
辐射传感器读数 P (μV)					

注：（1）距离值的个位数要与学号个位数相同，十位或百位数自选；（2）辐射表面凹进隔热层5mm。

【思考题】：以下距离的定义哪个正确：（1）从辐射表面到传感器表面（红外透镜）的距离；（2）从辐射表面到传感器内部热电堆表面的距离。两者对测量误差的影响有多大？

² 本实验可以动态测量，也可以静态测量。实验系统标配为静态测量，PID 控温；建议静态测量时，每个控温点控温（测量温度与目标温度之差小于 1°C ）时间不少于 3 分钟。也可以设计动态测量或准静态测量，并与静态测量结果比较。

四、 测量不同物体表面的发射系数（选）

1、将热辐射传感器移开，更换所需辐射面的辐射体。分别正确连接辐射器 PT1000和陶瓷加热器的连线到万用表和可编程直流电源上，控温表设置在 60℃，待温度控制好后，将热辐射传感器移至靠近辐射体处，测量并记录该辐射传感器读数（实验时，保证热辐射传感器与待测辐射面距离相同，便于分析和比较），记录在表 5中。

注意：妥善放好卸下的辐射器，以免烫伤。

表 5 黑体表面与辐射传感器读数记录表

所用距离：	黑体面	黑面	粗糙面	光面
	辐射传感器读数 P(μV)			



图 2-8 不同粗糙度辐射面的辐射单元实物照片

【实验顺序】

每张实验台光滑金属面、粗糙金属面、黑色金属面各 1 个。

- (1) 选择光面、黑面或者粗糙面的辐射体中的一种，完成实验内容一至三；
- (2) (选) 继续实验内容四，不要求选择辐射面种类数量；

实验前思考题：

1. 人体热辐射会对SMTIR9902系列传感器读数产生影响（自己可验证），如何消除这种影响？日光灯是否有影响呢？这种传感器是否适合测量高温热辐射，为什么？
2. 如果对辐射体制冷，使辐射表面温度低于室温（传感器温度），辐射传感器输出信号会如何变化？
3. 按辐射定律，处于室温的物体也有辐射，为何辐射传感器的输出信号为零？如果要直接测量该物体的辐射强度（辐射传感器输出信号正比于辐射强度），环境（传感器外壳）温度应该多高？如果环境（传感器外壳）温度维持在室温附近但温度有变化，是否可以通过数学方法扣除（非绝对零度的）环境温度的影响？（对给定辐射源温度，传感器外壳温度与辐射传感器读数之间是什么关系？提示，热辐射传感器内置Ni1000可以测量外壳的温度，其分度表见附录2）
4. 辐射体的加热功率与辐射体温度之间呈何关系？与辐射传感器的信号值之间呈何关系？为什么？
5. （选）（对防热辐射实验内容）透过防热辐射材料后的辐照度随材料的厚度怎么变化？请推导并验证。

实验报告思考题：

1. 为何当热辐射传感器太靠近辐射表面时，所测出的辐照度偏离距离平方反比规律？
2. （选）SMTIR9902与SMTIR9902SIL各有什么特点？各适合于什么场景的非接触温度测量？为什么？
3. 辐射传感器输出信号与辐射表面绝对温度4次方成线性关系，为何直线不过原点？斯特藩-玻尔兹曼定律是否成立？为什么？
4. （设计性实验）如何评价材料（如透光隔热膜）的防热辐射能力及其在窗户应用中的节能效果？
5. （设计性实验）如何在（变化的）大气环境温度下测量各热辐射源的温度？

附录 1、平面辐射源的辐射度计算

设：

1) 辐射面直径为 $2R$ ，辐射面与接收面距离为 d ，则对如图所示接收器法向相对于辐射方向的夹角 θ 有：

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{r}{d} \quad (1)$$

2) 辐射传感器视角角满足

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{d} \quad (2)$$

3) 辐射面的面辐射功率密度（辐射度）为 q_a ，

1. 单位面元的辐射功率：

$$\dot{q}_a r d\omega dr \quad (3)$$

2. 单位面元在 θ 方向角的辐射功率：

$$\frac{1}{2\pi} \cos \theta \dot{q}_a r d\omega dr \quad (4)$$

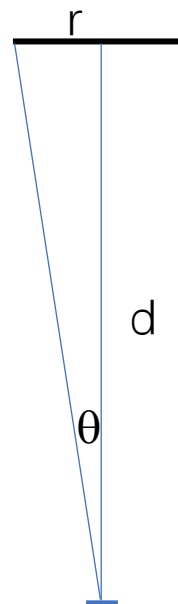
3. 探测器所在位置接收的来自该面元的辐射功率：

$$\left(\frac{\cos \theta}{d}\right)^2 \frac{1}{2\pi} \cos^2 \theta q_a r d\omega dr = \frac{\dot{q}_a}{2\pi} \sin \theta \cos \theta d\theta d\omega \quad (5)$$

4. 探测器所接收的总功率(辐照度)：

$$\dot{q} = \frac{\dot{q}_a}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\omega \int_0^\alpha \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{\dot{q}_a}{4} (1 - \cos 2\alpha) = \frac{\dot{q}_a}{2} \sin^2 \alpha \quad (6)$$

因此，对平面辐射源，**辐照度**(当地辐射通量)与距离的关系不直接表达在平方反比公式中，而是需要通过公式(6)体现。



附录 2、

1. Ni1000 热敏电阻的分度表

电阻 (Ω)	1000.00	1090.70	1185.70	1285.40	1390.10	1500.0	1615.40
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	0.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0

2. 传感器测温电阻阻值与温度之间的关系

使用红外传感器，在计算辐射温度时必须考虑传感器自身的温度。 所使用的热敏电阻是标准的镍（Ni）电阻，阻值在 0°C 时为 1000 欧姆。

下面给出了温度传感器（热敏电阻）的电阻值与温度之间的关系：

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + aT + bT^2 + cT^4 + dT^6) \quad (\text{B 级容差})$$

其中： R_0 =0°C 下的电阻值，为 1000 欧姆， T = 温度，摄氏度 °C，
 $a = 5.485 \cdot 10^{-3}$, $b = 6.650 \cdot 10^{-6}$, $c = 2.805 \cdot 10^{-11}$, $d = -2.000 \cdot 10^{-17}$

参考文献

1. Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation ;
2. 黑体实验装置说明书（CC1+）
3. SMTIR99XX 系列红外传感器说明书
4. Multipurpose MEMS thermal sensor based on thermopiles, Sensors and Actuators A 141 (2008) 404–413（期刊论文）
5. Seebeck's effect in micromachined thermopiles for infrared detection. A review, Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 2007, 13, 4, 338–353（期刊论文）
6. Smartec 红外传感器 SMTIR99XX 系列数据手册。
7. 鹿 博， 薛玉琪， 何振辉， 低温热辐射实验设计及教学方法，《物理实验》 41 卷 4 期（2021） 11-16 页。

其他自己调研。