

再 入 体 红 外 特 性 测 量

赵 从 忠

(航天部 207 所)

摘要——介绍用 PbS 辐射计对某型号再入体的测量结果, 仪器的实测作用距离达 100 km, 并给出目标的一些特性。

一、前 言

任何空间再入体以超高速进入地球大气层时, 立即会产生剧烈的光电复合现象。其周围形成一个高温等离子体鞘套, 它使无线电遥测信号受到严重干扰以致通讯中断, 同时还发出大量炽热的紫外、可见与红外辐射信息。探测和利用飞船返回大气所产生的一系列光辐射信息, 可以进行精确制导, 并预测飞船达到的回收靶点^[1,2]。

本文介绍用 PbS 辐射计对全尺寸再入体的光辐射进行测试并获结果。由于布点得当, 预测正确, 设备配套齐全、可靠性较高, 测试获得成功, 并获得了具有实用意义的参考数据。

二、基本 原 理

超高速再入体进入大气后, 由于强大的气动加热而产生炽热的高温, 壁体最高温度可达 3000~4000 K (驻点温度接近 8000 K), 尾流长约 880 m, 并输出巨大能量的紫外、可见与红外辐射功率。

光辐射功率可由再入体的动能变化率^[3]来表示:

$$\frac{d(K E)}{dt} = \frac{1}{2} V^2 \frac{dm}{dt} + m V \frac{dV}{dt}; \quad (1)$$

式中, V 为再入体的速度; $\frac{dV}{dt}$ 为再入体的加速度; m 为再入体的质量; $\frac{dm}{dt}$ 为防护材料的烧蚀速率。 V , $\frac{dV}{dt}$ 由雷达和弹道照相机测出; m 为已知量; $\frac{dm}{dt}$ 由地面选定材料后在等离子体电弧风洞中通过材料的烧蚀试验测定, 则从式(1)可求出 $\frac{d(K E)}{dt}$ 。利用式(1)可以对所要拟定的再入体进行光辐射效率反设计与预估。

另外, 再入体的辐射功率也可以从下式获得, 并通过光学检测来验证其结果。

$$W_{\lambda} = \frac{4\pi R^2 H_{\lambda}}{T_{a\lambda}}; \quad (2)$$

其中,

$$H_{\lambda} = V_S / V_N \cdot NEFD; \quad (3)$$

及

$$J = \frac{R^2 H_{\lambda}}{T_{a\lambda}}; \quad (4)$$

上述式中, R 为再入体与辐射计之间斜距(km); H_{λ} 为辐射计接收孔径上的辐照度 (W/cm^2); $T_{a\lambda}$ 为再入体与辐射计之间的大气透过率; V_S 为辐射计测得的再入体电压信号(mV); V_N 为辐射计测得的天空背景电压信号(μV); NEFD 为辐射计系统灵敏度(W/cm^2); J 为再入体辐射强度(W/Sr)。

三、测试设备与标定

测试设备主要由光学头部与电子学数据处理两部分组成。光学头部包括主镜(1)、次镜(2)、马达(3)、调制盘(4)、光锥(5)和 PbS 元件(6)。电子学数据处理包括前置放大器、2107 频谱仪、2305 记录仪及时分器等组成,如图 1 所示。

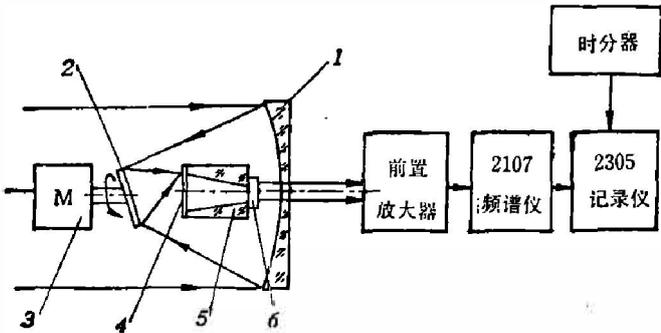


图 1 辐射计系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the radiometer.

1. 光学头部

本系统采用牛顿系统:主镜为抛物面,口径 $D=250$ mm;次镜为平面镜,直径 $d=110$ mm,焦距 $f=680$ mm;系统总视场 $2\omega=3^{\circ}7'$;元件采用 PbS,尺寸为

6×6 mm;波段为 $1 \sim 3 \mu m$,常温工作, $D^* = 0.5 \sim 2 \times 10^9$ $cmHz^{1/2}/W$,带锗窗口;光锥入瞳口径 $\phi=20$ mm,出瞳口径 $\phi=5$ mm;条状狭缝,间距为 1 mm,与再入方向平行对准。调制盘线性区为 $20 \sim 24'$ 。次镜由马达带动转动与光轴垂线有一个小偏角,以保证入射光线作圆锥扫描,其扫描圆落在焦面处(即调制盘上),扫描圆轨迹大小 $\phi=10$ mm。信号频率由马达转数与调制盘狭缝数的乘积决定。低频背景云块由选频滤掉,以提取高频目标有用信息。光学系统弥散圆为 0.3 mm。

2. 电学系统

PbS 元件引线接入前置放大器,放大倍数为 10。由于这种条状调制盘调制信息频率较丰富,故由 2107 频谱分析仪进行选频,并由 2305 记录仪作纸带记录。实际选频为 500 Hz。由时分器勤务给出 1 次/秒时标、打印在记录纸上,选定纸速为 1 cm/s。前置放大器电路指标: $f=1$ kHz;放大倍数为 10;最大输入为 220 mV,输入阻抗为 2.8 M Ω ;噪声在开路时为 10 μV ,接上元件(510 k Ω)时为 5.6 μV ;带宽 30~80 kHz;电压信号输入线性范围为 2~200 mV,故电压信号输出线性范围为 20~2000 mV。

3. 仪器标定

(1) 标定设备

标定系统如图 2 所示。黑夜可在现场标定。

应当指出的是：辐射计标定应按文献 [4] 指出在提供准直红外辐射源条件下进行。这里，依实际条件将辐射计置于远离黑体炉 166 m 之处进行标定，黑体对辐射计张角较小，从而保证了准直性，故相对误差不大于 1%。试验前后各标定一次，以防某种不测因素引起辐射计灵敏度变化。所有量程及线型范围皆进行标定。

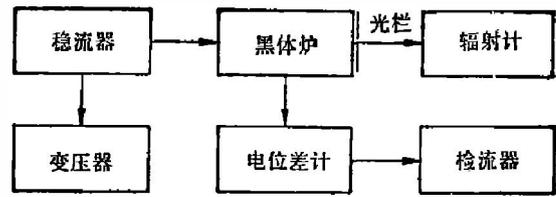


图 2 标定系统

Fig. 2 The calibration system.

(2) 标定结果

辐射计系统灵敏度公式为：

$$NEFD = \frac{\epsilon \sigma T^4 \Delta S \tau}{L_0^2 \pi V_S / V_N}; \quad (5)$$

式中， ϵ 为发射系数； σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数； T 为黑体炉温度(K)； ΔS 为黑体炉辐射面积； τ 为黑体炉至辐射计之间大气透过率； L_0 为黑体炉与辐射计之间距离^[4]，当标定条件是取自黑体炉置于单反射镜准直仪(焦距为 f_0)的焦点位置所发出的红外辐射时，式(5)中的 $L_0 = f_0$ ； V_S 为辐射计测出黑体炉黑体电压信号， V_N 为黑体炉背景噪声。依现场标定条件测得的各种参数值 ($T = 838.8 \text{ K}$ ，黑体炉辐射孔径 $\phi = 1.5 \text{ cm}$ ， $L_0 = 166 \text{ m}$ ， $V_S = 15.5 \text{ mV}$ ， $V_N = 165 \mu\text{V}$ ， $\tau = 0.4$ 等)代入式(5)得 $NEFD = 4.48 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2$ 。

四、测试结果

1. 主要测试结果

现场再入现象可观察时间约 25 s。实测数据模型整理简化后列于表 1。

表 1 再入体光辐射测量值

Table 1 The radiant measurement values for the reentry-body

| 再入参数 | | | 光辐射测量值 | | | |
|---------------|----------------|----------------|------------------|-----------|-----------------------|-------------------|
| $t(\text{s})$ | $h(\text{km})$ | $R(\text{km})$ | $V_s(\text{mV})$ | V_S/V_N | $H(\text{W/cm}^2)$ | $J(\text{W/Sr})$ |
| 0 | 54.3 | 97.2 | 48 | 192 | 8.6×10^{-10} | 4.1×10^5 |
| 3 | 46.5 | 85.4 | 593 | 2371 | 10.6×10^{-8} | 3.7×10^6 |
| 6 | 38.6 | 72.6 | 1000 | 4000 | 1.8×10^{-8} | 4.7×10^6 |
| 9 | 30.7 | 58.9 | 1117 | 4466 | 2.0×10^{-8} | 3.4×10^6 |
| 12 | 22.9 | 46.1 | 548 | 2192 | 9.8×10^{-9} | 1.1×10^6 |
| 15 | 15.3 | 34 | 531 | 2125 | 9.5×10^{-9} | 5.4×10^5 |
| 18 | 8.7 | 24.5 | 803 | 3214 | 1.4×10^{-8} | 4.2×10^5 |
| 21 | 3.2 | 17.6 | 71 | 286 | 3.8×10^{-10} | 2.0×10^4 |

表中， t 、 h 、 R 分别为时间，再入体高度和斜距。 V_N 为天空背景噪声，现场测量值 $V_N = 250 \mu\text{V}$ 。当时天气较好，背景测值一致。

2. 再入辐射曲线

(1) $V_S = f(t)$ ，表示再入辐射电压信号与时间变化的关系，其曲线见图 3。

图 3 可见，信号起伏与目标翻滚运动特性、目标随太阳照射角度的变化及地球反照特性、仪器对准精度，目标质阻比、大气传输与散射特性等因素有关。曲线表明：再入辐射信息总的趋势呈由小到大再到小的变化规律；在高度约 40 km 达到最大值，使仪器数值指示达

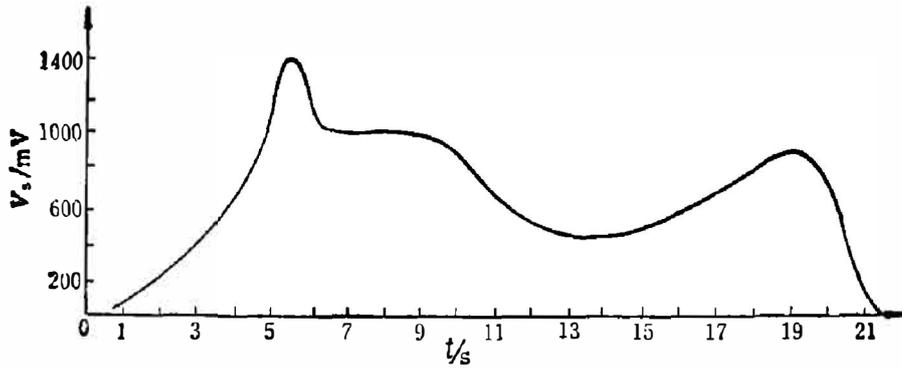


图3 再入体的辐射电压信号随时间的变化曲线
Fig. 3 Signal voltage as a function of time for the reentry-body.

到饱和程度, 动态范围可达 10^3 倍以上。辐射功率最大值 $W_\lambda \approx 5 \times 10^7$ W。

(2) $J=f(h)$, 表示再入辐射强度随高度变化情况, 其曲线见图4。在40 km 高度处辐射强度最大值 $J \approx 4 \times 10^6$ W/Sr。

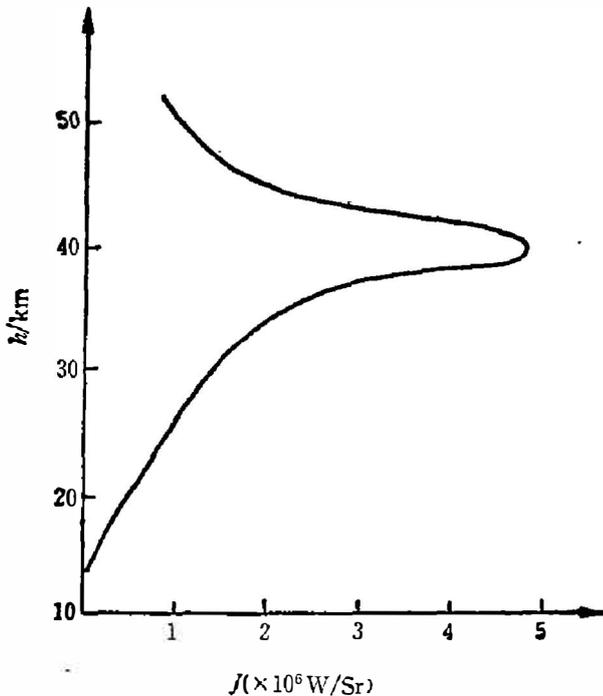


图4 再入体的辐射强度随高度变化的曲线
Fig.4 Radiant intensity as a function of height for the reentry-body.

3. 简要分析

(1) 当再入速度渐增至约 4.5 km/s 时 (对应高度约 40 km), 开始出现减速现象, 显示出强大而剧烈的气动加热阻尼效应, 直至减速为 2.4 km/s 左右坠落。

(2) 再入现象的速度突变点并随之光辐射的突增点皆发生在约 40 km 高度上, 与雷达回波测量值急剧增加基本一致。尾迹有明显反应。

(3) 测量的再入体辐射功率约为 $10^4 \sim 10^8$ W。辐射强度 $J=10^3 \sim 10^7$ W/Sr。据报道: 一个重 900 kg 物体, 再入速度 6 km/s, 加速度为 50 个 g, 可产生总辐射功率为 3×10^9 W, 可供本次测试值类比。由此证明: 超高速再入体是一个非常强烈的可见与红外辐射源。夜晚观察类似一颗三等星, 比行星亮度亮约 1000 倍。

(4) 由于现场实验条件极为复杂, 本数据证明, 对于一个 4.5 km/s 再入体, 在良好天气条件下, 用 PbS 辐射计可完全接收到斜距为 100 km 左右的再入体目标光辐射信息。

五、小 结

1. 试验证明: 用本设备 PbS 辐射计测量远程超高速再入体的光辐射特性获得成功。实测值的曲线模式较真实地反应了再入体的特性及其规律。

2. 本次再入体的信噪比最大测量值 $V_s/V_N=4466$, 对应高度为 31 km。在最远斜距为 97.2 km 时, 信噪比达 $V_s/V_N=192$, 辐射计扩大作用距离范围具有潜力。

3. 由于试验环境复杂,测试设备、测量方法、测量精度有待进一步完善与提高。

致谢——对徐根兴同志主持再入测量大系统工程及姚连兴同志提出了宝贵的意见表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Ried R. C. Jr. et al, *NASA TM X-58091*, April 1972, 2.
- [2] Cecil Brownlow, *Aviation Week July 14*, 1958,33.
- [3] Robert V. Meyer, *Applied optics January*, 5(1966),1; 159.
- [4] Richard D. Hudson JR., *Infrared System Engineering*, 1969,225.

THE INFRARED MEASUREMENT FOR THE REENTRY-BODY

ZHAO CONGZHONG

(*Ministry of Astronautics Industry*)

ABSTRACT

The measured results of a reentry-body by a PbS radiometer are described in this paper. The standoff range of the radiometer reaches 100 km. Some features about the target are given.