

氢冰弹丸测速仪的研制

武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 北京)

摘要: 作为未来核聚变反应堆燃料添加及目前对高温等离子体进行诊断的有效工具之一的氢冰弹丸注入, 其物理上要求给出的弹丸注入速度参数的精度在 2% 以内。通过采用狭缝式辐射光源、阵列式分束光纤接收的方法来提高测速仪对空间飞行微小物体的目标信号分辨, 使得该测速系统最小可分辨 $\phi 0.5\text{mm}$ 的飞行物体, 其测量精度可控制在 1.6% 以内。

A velocimeter system for hydrogen pellet injection

Wu Songtao

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica)

Abstract: In the one of the effective way of plasma diagnosis now and the nuclear fusion fuelling in the future, the parameter of velocity of hydrogen pellets asked in physics is within 2%. A radiation light source of double seam and multichannel fibres in file style were used. This velocimeter system which has been developed could identify $\phi 0.5\text{mm}$ objective at least and the precision of measurement result could be controlled within 1.6%.

作为核聚变反应堆燃料添加及对高温等离子体诊断的有效工具之一的氢冰弹丸, 其注入过程中的重要参数之一就是速度, 它是确定弹丸注入等离子体内的深度、研究弹丸在等离子体中消融机理的不可缺少的参数。物理上要求给出的氢冰弹丸注入速度参数的精度在 2% 以内, 因为氢冰弹丸的体积很小 ($\sim \phi 1\text{mm}$), 并且是在超低温 (-267°C) 高真空 ($10^{-4}\text{Torr} \sim 10^{-5}\text{Torr}$) 状态下高速 (1000m/s) 飞行。为了解决捕捉目标信号的困难, 我们采取了双狭缝式辐射光源, 阵列式分束光纤接收的方法来提高测速仪对空间微小物体的目标信号分辨, 使得该测速系统最小可分辨 $\phi 0.5\text{mm}$ 的运动物体。为提高响应灵敏度, 将捕捉到的目标信号经光电转换后输入“零阻”电流计电路, 使得光敏二极管的频率响应时间小于 10^{-7}s 。经“零

阻”电流计电路放大后的信号通过其后的比较电路的精度调整及整形，经TTL电路输出至记忆示波器或电子计算机进行数据处理。经比较电路的校准后，该测速仪的测量精度可控制在1.6%以内，整个测速系统的原理方块图及示意图见图1。

下面就各部分的设计进行分析与计算。

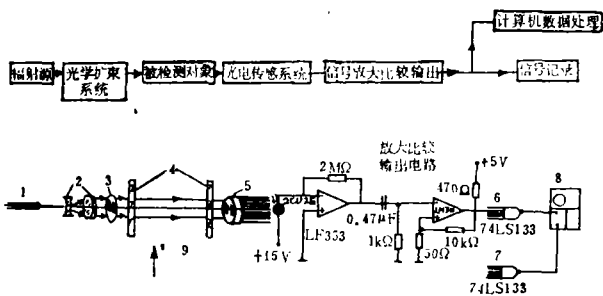


图1 氢冰弹丸测速系统原理方块图及系统示意图

- 1—He-Ne激光器 (1mW) 2—扩束镜组
3—双狭缝光栏 4—真空保护玻璃 5—阵列式分束光纤探测头 6—前10路输出 7—后10路输出 8—记忆示波器

头上阵列光纤的长度及相邻宽度所决定的。考虑到激光光斑光能的高斯分布，因此将激光光束扩束为 $D = 20\text{mm}$ 的光斑。而4D-A型He-Ne激光器输出光束直径约为1mm，因此要求光学扩束系统的放大倍率应为20倍左右。虽然激光器输出的光束在其截面内的光能分布呈高斯型，但经准直扩束系统扩束20倍后，其光斑截面内的光能分布可近似认为是均匀的，如图2所示。

我们就阵列式分束光纤探测器接收头所受辐射的辐射通量进行了计算。根据激光器输出的辐射通量及扩束为 $\phi 20\text{mm}$ 后的辐射照度值，考虑到光学系统中透射面、反射面及材料对光能造成的损失等几个方面的因素，可以计算出包括真空防护玻璃在内的光学扩束系统后分束光纤每束接受到的辐射通量为：

$$\Phi' = E'S' = 1.1(\mu\text{W})$$

二、光电传感系统及放大、比较电路的分析与计算

分束光纤探测器为两阵列各10路分束光纤，每列由10束 $0.5 \times 1(\text{mm}^2)$ 的光纤整齐排列，分束后的每束光纤与一光敏二极管耦合，再经信号放大、比较器送至记忆示波器或计算机。

1. 光信号经分束光纤后的能量损失计算

考虑到光纤材料对辐射通量的吸收，光纤端面的反射等因素，光学纤维的透过率 τ 由下式确定：

一、辐射源、光学扩束系统的选择与计算

考虑到为使该测速仪结构紧凑，决定采用北京朝阳激光器械厂生产的4D-A型He-Ne激光器。

为了精确测量弹丸在枪口出口处的喷爆瞬时速度，特将阵列分束光纤探头设置在距枪口最近的诊断窗口上。

为扩大激光光束对氢冰弹丸飞行的探测范围，需将激光光束通过光学扩束系统将其扩束，所需扩束光斑的大小是由阵列式分束光纤探测器接收

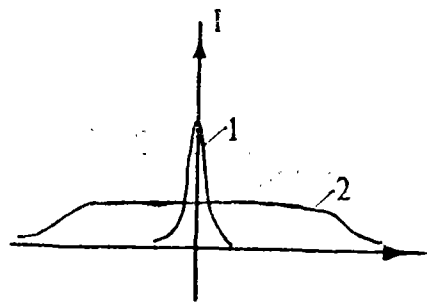


图 2

- 1—激光器输出光斑光能分布
2—扩束20倍后光斑光能分布

$$\tau = (1 - \alpha_p) m_0 (1 - \rho_p) e^{-\alpha_a l \sec \varphi}$$

式中, φ 为折射角, α_a 为吸收系数, ρ_p 为反射率, l 为光纤长度, m_0 为反射次数, α_p 为全反射时的吸收率。

一般说来, 光纤表面可以制造得非常光洁。因此光损失即使在反射次数极多的情况下, 也仅决定于材料深层中的吸收损失。由于在内全反射情况下, 吸收损失可以忽略, 所以光纤透过率可以写成:

$$\tau = (1 - \rho_p)^2 e^{-\alpha_a l \sec \varphi}$$

式中, α_a 一般为0.007~0.008。

对于我们所采用的光纤可以计算出其透过率为:

$$\tau = 89.8\%$$

所以光信号经分束光纤后到达光敏二极管时的辐射通量为:

$$\Phi'' = \Phi' \tau = 0.988 (\mu W)$$

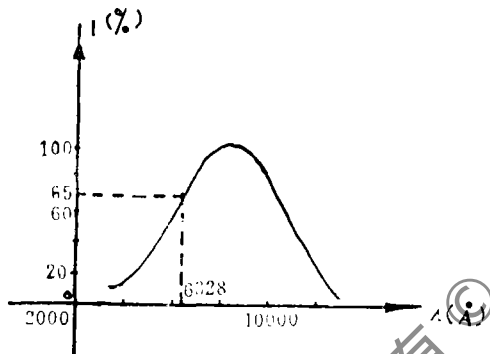


图 3

2. 光敏二极管光电流的计算

考虑到响应时间, 耦合对准等因素, 我们采用的是2CU2E型光敏二极管。

2CU2E型硅光敏二极管的光谱特性如图3所示, 其光谱最灵敏响应波长在8000 Å~9000 Å之间。而对He-Ne激光器输出的6328 Å的光谱响应约为峰值波长光谱响应的65%, 则我们所采用的2CU2E型光敏二极管在反向偏压状态下接收到分束光纤光信号而产生的光电流(考虑到光敏二极管的灵敏度0.5 μA/μW)约为:

$$I = 0.5 (\mu A / \mu W) \Phi'' \times 65\% = 0.32 (\mu A)$$

3. 光敏二极管频率响应的分析与计算

由于我们研制的氢冰弹丸注入器的弹丸飞行速度为800m/s~1000m/s, 则弹丸通过每一光纤的时间为:

$$t_{min} = 1(\text{mm}) / 1000(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) = 10^{-6}(\text{s}) = 1(\mu\text{s})$$

因此要求光敏二极管在电路中的响应时间要快, 也即截止频率应大于1M。考虑到可能有的其他因素的影响, 故截止频率取: $f = 1.5\text{M}$ 。我们对光敏二极管在电路中的频率响应进行了分析和计算, 考虑到一般光敏二极管的高频响应所受的各种因素的影响, 并根据光敏二极管2CU2E的性能参数, 我们求得其负载电阻 R_L 的值为:

$$R_L \leq \frac{1}{2\pi C_j f_H} = 21(\text{k}\Omega)$$

此值与实验结果有出入。在实际线路中, 一般当负载电阻为1kΩ时, 光敏二极管的频率响应为1.5M左右。一般厂家在产品出厂前所进行的测试, 其负载电阻取100 Ω, 此时可保证光敏二极管的响应时间为 10^{-7}s 。因此, 考虑到电子线路中各种因素的分布电容的影响,

光敏二极管的负载电阻应尽可能控制在 $1k\ \Omega$ 左右。

4. 放大器电路的设计与计算

因光敏二极管所接收到的光信号很微弱，光电流很小，为保证光敏二极管的频率响应， R_L 不可太大，同时考虑到为使线路简单，调试检测方便，因此采用由集成运算放大器组成转移电阻放大器，又称“零阻”电流计，如图4所示。该放大器的工作特点是：它好比一个具有功率增益的电阻。它可提供正比于输入电流的输出电压，比例常数就是反馈电阻 R_f ，因此 $V_o = -iR_f$ 。如果运算放大器是理想的，那么该电路就有输入电阻为零，输出电阻也为零的特点。此电路仅需一个电阻 R_f ，其大小（即电路增益）仅受运算放大器电压输出能力和输入电流大小的限制。

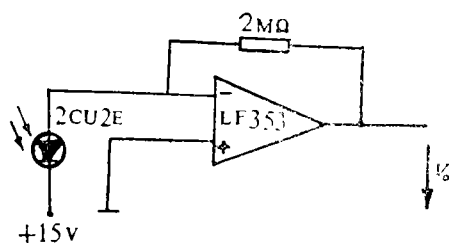


图 4

因为光敏二极管的光信号电流很小，所以必须采用电压增益高，基极输入偏置电流小，频带较宽及压摆大的运算放大器，经综合考虑，我们采用了由场效应晶体管作为输入级而集成的运算放大器LF353。

根据其性能参数，我们算出该放大器的输入电阻为：

$$R_{i_n} = \frac{R_{i_d}(R_o + R_f)}{R_o + R_f + R_{i_d}(1 + A_{v_o})} = 80(\Omega)$$

可见此放大电路的输入电阻很小，接在此电路中的光敏二极管的频率响应完全可在 $10^{-7}s$ 以内。

该放大器的输出电阻及闭环转移电阻分别为：

$$R_{o_{cl}} = \frac{R_o(R_f + R_{i_d})}{R_o + R_f + R_{i_d}(1 + A_{v_o})} = 0.0006(\Omega)$$

$$A_{v_t} = \frac{R_f R_{i_d} A_{v_o}}{R_f + R_{i_d}(1 + A_{v_o})} \approx 2(M\Omega)$$

对于 $I = 0.32\mu A$ 的光电流及由光敏二极管的暗电流在该放大器的输出端所产生的压差为：

$$\Delta V_o = V_o - V_o' = (I - I_D)R_f = 440(mV)$$

5. 比较电路的设计与计算

为尽量减少由于光敏二极管光电流参数的离散性所引起的放大后信号幅值的不同，从而造成测量精度的下降，同时为将信号接入TTL电路。故在放大器后我们采用了具有滞后特性的电压过零比较器，此电路借助所选择的滞后量，可改进噪声的抗扰性，并能防止 V_i 过零时输出在两状态间的抖动，滞后作用还可改善输出电压的切换速度，放大后的光脉冲信号经此比较电路还可以通过调节比较电压的大小，使得前后对应光敏二极管的光脉冲放大信号通过比较电路时在近乎同一时刻进行比较，从而提高本仪器的测试精度，如图5所示。我们所选用的是LM311型号的电压比较器，图5所示的电压比较电路，其高输出电压 V_{H1} 为 $4.78V$ ，低输出电压 V_{L1} 为 $0.3V$ 。我们可以算出滞后电压 ΔV_1 和 ΔV_2 ：

$$\Delta V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_h = 23.8(\text{mV})$$

$$\Delta V_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_l = 1.5(\text{mV})$$

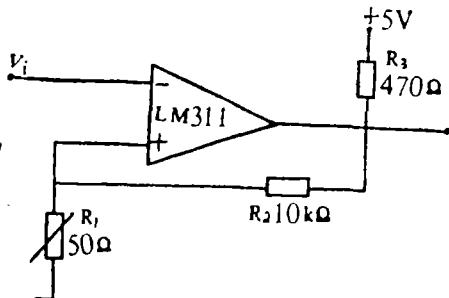


图 5

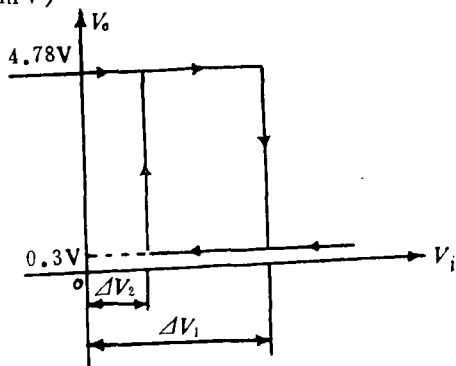


图 6

根据此结果，我们可以描绘出该比较电路近似的输入-输出转换函数，如图6所示，调节 R_1 的大小可控制输出电压的切换点。

6. RC阻容耦合电路

因为光敏二极管暗电流的影响，在放大器输出端有一恒定的噪声电压，为消除此噪声电压对其后电压比较器的干扰，在放大器与比较器之间加进了RC阻容耦合电路。

7. “与非”门输出

为将两阵列中任意两路信号取出，在电压比较电路后，前10路与后10路分别设置了一块 SN74LS133 “与非”门集成块，该集成块为13输入“与非”门。

三、精度分析与计算

影响该测量系统精度的主要因素有以下几个方面：

- (1) 探测头的倾斜或弹丸飞行时发散角的影响造成测量中距离的误差，如图7所示。考虑在最坏情况下 $\alpha_1 = \pm 2^\circ$ ，则

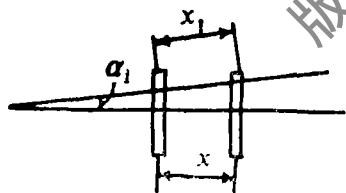


图 7

$$\Delta x_1 = x_1 - x = \frac{x}{\cos \alpha_1} - x = 0.0061(\text{mm})$$

- (2) 两阵列光纤间距的误差影响。此项误差为机械加工精度误差，经实测可知此误差值为： $\Delta x_2 = 0.04\text{mm}$ （此项误差可通过加修正值加以消除）。

(3) 由于平行光束的平行差造成的影响，如图8所示。若由镜片2出射的光不为平行光，而是发散角为 ω' 的散射光，则必然造成弹丸在探测头上的阴影所划过的两阵列距离误差。因此应使光斑的发散角 ω' 尽可能地小，而其光束发散角的大小取决于光学系统的放大率 γ ，也即与系统中光学元件的焦距有关，其关系式及值为：

$$\text{tg} \omega' = \text{tg} \omega / \gamma = \text{tg} \omega (f_1 / f_2) = 0.000075$$

由此造成的误差为：

$$\Delta x_3 = 0.075(\text{mm})$$

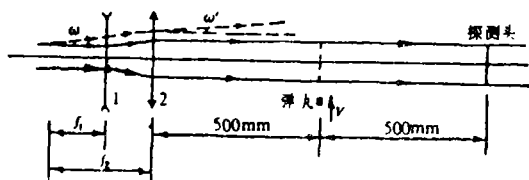


图 8

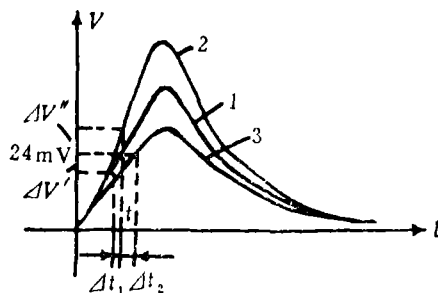


图 9

(4) 由于光敏二极管的参数离散性及光照不均匀等因素，使得光信号的强弱有所差异，在电压比较电路中可能产生误差，我们所采取的措施是：

a. 对光敏二极管进行筛选。将在同一辐射光源及反向电压情况下光电流基本相同的光敏二极管两两组合成对，并将其在两阵列光纤中作对应放置，使之经放大器出来的放大信号差异不至于太大。

b. 调整比较电路的比较电压，使各路光信号在同一时间点进行比较，如图9所示。通过调整比较电压的差值量 $\Delta V'$ 及 $\Delta V''$ 可使得2、3曲线在同一时刻点 t 进行比较，从而消除由于比较电路而产生的时间差 Δt_1 或 Δt_2 。根据实验调试情况，一般可将各信号的比较电压调整在 $0.1\mu\text{s}$ 范围内，即 $\Delta t = 0.1\mu\text{s}$ 。

综上所述，由于各种原因所造成的测量距离的绝对误差为：

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 = 0.1211(\text{mm})$$

由于比较电路产生的时间误差为：

$$\Delta t = 0.1(\mu\text{s})$$

为求氢冰弹丸飞行速度 $v = x/t$ 的相对误差值，可见间接测量值 v 是由直接测量 x 与 t 组成的函数，间接测量值 v 的误差可以从各直接测量误差计算出来。

若设间接测量的函数关系为：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

根据推导我们可以得出间接测量值 y 的相对误差 e_y 为：

$$e_y^2 = \frac{(\Delta y)^2}{y^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 (\Delta x_i)^2}{y^2}$$

对于我们欲测量的氢冰弹丸速度 v ，由上面的推导可算出：

$$\begin{aligned} (\Delta v)^2 &= \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2 (\Delta t)^2 \\ &= \left(\frac{1}{t}\right)^2 (\Delta x)^2 + \left(-\frac{x}{t^2}\right)^2 (\Delta t)^2 \end{aligned}$$

则

$$\varepsilon_v^2 = \frac{(\Delta v)^2}{v^2} = \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 = \varepsilon_x^2 + \varepsilon_t^2$$

也即:

$$\varepsilon_v = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_t^2}$$

现已知:

$$x = 10\text{mm}, \quad \Delta x = 0.1211\text{mm}$$

$$t = 10\mu\text{s}, \quad \Delta t = 0.1\mu\text{s}$$

所以

$$\varepsilon_v = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2} = 0.0157 = 1.57\%$$

故所得速度的相对误差为1.57%。

不难算出,对于两阵列光纤间距的误差 Δx_2 若加修正值加以消除的话,测量速度的相对误差为1.29%。

四、测试及结果

由于目前我们所研制的氢冰弹丸注入装置未加工完毕,故无法对实际飞行的氢冰弹丸进行测速试验,所以,我们进行了通过发光二极管的高频闪光测试及对高压气枪子弹飞行速度的测量。

1. 发光二极管高频闪光的测试

我们设置了发光二极管测试系统,其原理是:将脉冲信号发生器(XC-19)发出的脉冲调制为由2.5V降至0V的1 μ s负脉冲,直接供给高频发光二极

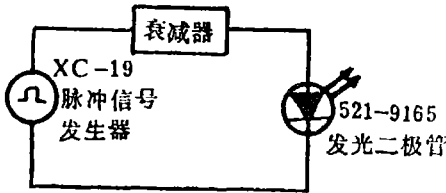


图 10

管(521-9165),如图10所示。此时发光二极管所发出的光脉冲即类似于氢冰弹丸瞬间扫过狭缝辐射光束在分束式阵列光纤探测头上产生瞬态阴影的情景,通过示波器在测速仪的输出端观察其输出波形的情况。利用发光二极管测试系统还可在放大器的输出端观察经放大器放大后的光信号波形,通过对两两对应及两列20路光敏二极管波形的比较,调整电压比较电路中的R₁阻值,使得各对

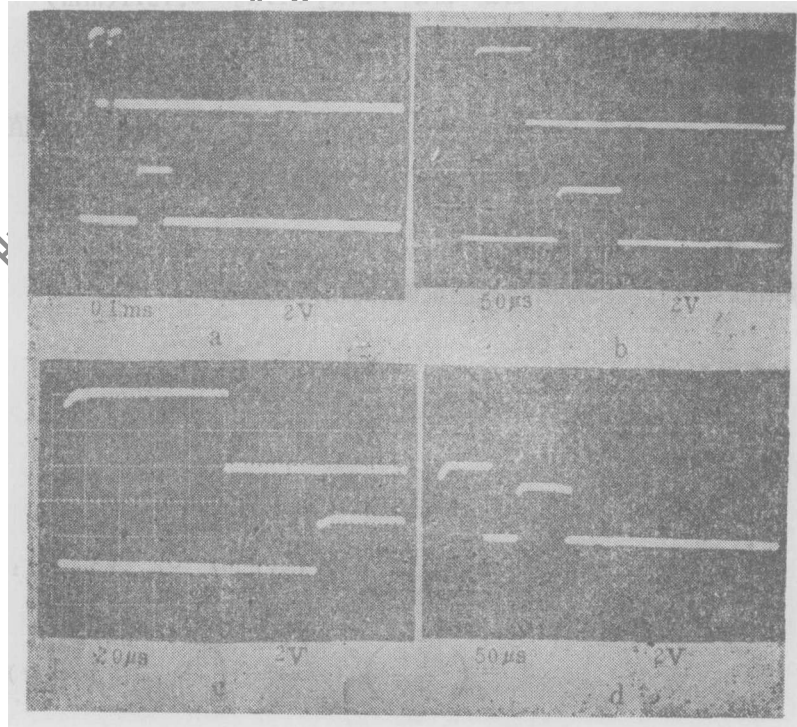


图 11

应两组光敏管的放大信号在近乎同一时刻进行比较翻转，从而提高测量精度。

2. 气枪子弹飞行速度的测试

利用ST3型二踪记忆示波器进行记录，所给出的波形见图11，其中图11a中第一路信号有一断开点，这是因为气枪子弹是由阵列光纤上边缘飞过，子弹头部及尾部两次挡光所造成。图11中除图11d为 $Y_A + Y_B$ 扫描外，其余均为断续扫描。下面对图11c波形计算，因为我们所关心的是二路波形的前沿时间差，故由该波形可知 $\Delta t = 148\mu\text{s}$ ，所得气枪子弹的飞行速度为：

$$v = x/\Delta t = 67.6(\text{m/s})$$

参 考 文 献

- [1] 浙江大学梁铨廷主编，物理光学。北京：机械工业出版社，1982
- [2] 天津大学张以谟主编，应用光学。
- [3] 秦积荣编著，光电检测原理及应用。
- [4] [苏]巴甫洛夫 A B，光电装置理论与计算基础。
- [5] 戴维特 F 斯图特，运算放大器电路设计手册。

作者简介：武松涛，男，1962年6月出生。工程师。从事等离子体电物理仪器设备的研究。

收到修改稿日期：1990年3月29日。

· 简 讯 ·

光学晶体和窗口材料技术交流会在承德召开

1990年三季度中国光学学会光学材料专委会在承德举办光学晶体和窗口材料技术交流会。

成膜技术讨论会在北京召开

1990年三季度中国光学学会光学薄膜专委会在北京召开成膜技术讨论会，目的是讨论发展和引入其它成膜技术，以便大幅度提高光学薄膜的质量。

第六届全国光学教学研讨会将在杭州召开

1990年11月中国光学学会基础光学专委会同杭州师范学院将在杭州召开第六届全国光学教学研讨会，交流基础光学教学与光学科学的新进展。

(摘自学会活动计划)