

用在激波管风洞光学测量中的氩离子激光光源

力学所八室 束继祖 刘方

摘

本文报告了用在激波管风洞中光学测量用的, 高重复频率短脉冲, A_r^+ 激光光源的研制结果。

把激光调制成一组高频短脉冲的光脉冲组输出, 是采用了高频脉冲电流组驱动 A_r^+ 激光器的方法。

这台光源用来作为激波管风洞中光学显示仪器(阴影仪、纹影仪)的光源, 提高了仪器的灵敏度, 同时也是干涉仪用的良好的光源。此外还可用来作为模型自由飞测力和动导数量用的闪光光源。其性能如下:

发光器件: A_r^+ 激光器;

光谱范围: 4880 Å、5145 Å 等六条谱线;

工作频率: 1 千赫/秒——5 千赫/秒; 或单次光脉冲输出;

组脉冲宽度: 10 毫秒左右(易于任意调节);

单脉冲宽度: 约 5 微秒;

光脉冲能量: 单个光脉冲光能, 足使 24° 定胶片在 $\varnothing 20\text{mm}$ 的面积上感光黑度大于 1.0 以上。

本文报告的电源系统, 除了可以驱动离子激光器以外, 还可以用来直接驱动脉冲氙灯、氪灯等光源, 其最高重复频率也达 5 千赫/秒, 单脉冲宽度也在微秒的量级。这样就提供了一个大面积高速摄影用的频闪照明光源, 其用途就更加广泛了。

文中提供了有关光源性能的测试的示波照片, 以及在激波管风洞中应用, 拍摄的流场显示照片和模型自由飞的轨迹照片共 14 幅。提供了调制驱动电源的线路设计图和有关电路图。

符 号 说 明

a: 激光聚焦点的直径 [微米]

f: 聚焦透镜的焦距 [厘米]

θ : 激光束的发射角 [弧度]
 F : 照射功率密度 [瓦/米²]
 H_0 : 感光底片最低的曝光能量 [尔格/厘米²]
 $H_{1.0}$: 感光底片产生1.0黑度时的暴光能量 [尔格/厘米²]
 n : 仿真线 L_c 的节数
 t_p : 激光输出光脉冲宽度 [微秒]
 i_b : 激光管最佳驱动脉冲电流 [安]
 f_r : 工作频率 [千赫/秒]
 I_b : 平均电流 [安]
 V : 充电电压 [伏]
 R_L : 负载阻抗 [欧]
 L_c : 总电感量 [亨]
 C : 电容量 [微法]
 P : 激光输出功率 [瓦]
 M_∞ : 来流马赫数
 P_∞ : 来流压力 [Kg/厘米²]
 ρ_∞ : 来流密度 [克/厘米³]

一、前 言

激波管风洞在光学测量方面，给我们提出了这样的要求：

1. 提高现有的光学显示仪器（阴影、纹影仪）的测量灵敏度，获得清晰的流场显示照片；
2. 试制一种具有一定频率的闪光光源，以考察每次实验工作时间内，各阶段的流动状态，并满足自由飞测力实验^[1]和自由飞动导数测量的需要。
3. 工作时间（激波管风洞中准定常气流的建立时间）一般只有10毫秒左右，这就要求光源为他激式的，以满足与风洞同步的要求；
4. 激波管风洞实验段中的气流发光较强，对照相的影响很大，这就要求有一个发光强度更强的，而光谱谱线偏离风洞气流发光的光谱区的光；
5. 气流反模型的运动速度高，为了得到清晰的照片，要求光的脉冲宽度（即每张照片的曝光时间）在微秒的量级上。

提高阴影仪（纹影仪）的灵敏度，可以从两方面着手^[2]，一是增加主反射镜的焦距，这样就得增加厂房的使用面积。另一是减少光源的使用尺寸。为了减小光源的使用尺寸，以往是采用光栏的方式使光源的尺寸减小，这样光损大，为了满足起码的感光能量的要求，光栏不能无限制地减小，它受到最起码的感光能量的极大限制。另外由于光孔不断的缩小。小孔的衍射效果也越来越严重，直接影响着仪器的使用效果。

激光具有很高的亮度和良好的聚焦性能。若用 θ 表示激光光束的发散角，通过一个焦距为 f 的透镜使光束聚焦，在焦平面上的光点直径 d 为：

$$d = f\theta$$

对于气体激光器来说 θ 在 10^{-3} 弧度的量级内，若 f 取1.0厘米，则 $d = 10$ 微米的量级。

这束被聚焦的激光束在焦点上的功率密度（单位面积上的功率） F ，应是激光输出功率 P 除以光点面积，即：

$$F = 4P/\pi d^2$$

若取 $P = 1$ 瓦，则

$$F = 10.3 \times 10^9 \text{瓦/米}^2$$

这个照射功率密度要比太阳光在地球表面上的照射功率密度大得多。由此可见，采用激光作为流场显示仪器（阴影仪、纹影仪）的光源，其光点尺寸小、亮度高，是有助于提高仪器的测量灵敏度的。

要满足在激波管风洞中作模型自由飞测力和动导数测量，必须要有一个工作在一定频率上的，输出具有一定宽度的光脉冲组的光源。

这个光脉冲组的宽度（即工作时间）应和激波管风洞中准定常气流建立的时间相同，一般地来说是10毫秒左右。根据不同的要求，这个时间是易于调节的。

光脉冲频率对于作模型自由飞测力实验来说，有1千赫/秒—2千赫/秒就足够了；对一些飞行状态比较复杂的（如带运转、滚动）模型运动轨迹的记录，具有5千赫/秒的光脉冲频率，已足以判读模型各种情况下的姿态。

二、确定方案的考虑

(一) 光脉冲能量的估算:

用纹影仪对激波管风洞进行流场显示照象, 每张照片的曝光时间是微秒的量级, 要使底片得到正确的曝光, 所需要的光能量是多少呢? 这是必须首先要解决的问题。因为它涉及到要选用多大功率的激光器和采用何种调制方式。

从一些文献中查得的一些结果来看, 一张底片要得到正常感光所要求的光能量并不大。文献〔3〕中提到: 有效输出功率为1毫瓦的激光光源, 完全满足于16毫米的摄影机, 以每秒 10^4 幅的速度摄影时所要求的光能量; 如果摄影速度在 $10^7 \sim 10^9$ 幅/秒, 其激光输出功率要求在100毫瓦以上。按这个量计算下来, 光能只是在0.5~0.05尔格/厘米²的量级上。

文献〔4〕中谈到, 在使用颇勒德 (POLAROID) #413红外软片时, 只要有0.06尔格/厘米²的光能, 就可以在底片上产生 $H_0 + 0.5$ 的光学密度。

为了慎重起见, 我们在上海感光胶片厂的同志的协助下, 对该厂的上海牌21°定全色胶片、24°定全色胶片以及22°色盲X光片进行了感光特性的测定〔5〕。拿上海牌21°定全色胶片为例, 在底片上产生最低可分辨黑度时所需要的曝光能量为:

$$H^0 = 1.2 \text{ [毫瓦} \cdot \text{微秒]} / \text{厘米}^2 = 1.2 \times 10^{-2} \text{ 尔格} / \text{厘米}^2$$

在底片上产生黑度为1.0时的曝光能量为:

$$H_{1.0} = 18.6 \text{ [毫瓦} \cdot \text{微秒]} / \text{厘米}^2 = 0.2 \text{ 尔格} / \text{厘米}^2$$

由此可见, 一般的感光胶片(21°定左右的全色片), 所要求的感光能量大致在 10^{-1} 到 10^{-2} 尔格/厘米²之间。

考虑到光学仪器系统和风洞光学窗口对光产生的损失, 我们认为, 如果选用输出功率为1瓦左右的激光器, 是完全可以满足要求的。

对于气体激光器来说, A⁺激光器是很容易达到这个功率水平的, 而它的输出光谱基本上是在5000Å左右的兰光谱线范围内, 对避开风洞自身发光光谱区很有好处。

(二) A⁺激光器

我们使用的A⁺激光器是和上海灯泡一厂共同试制成的, 关于它的结构以及工艺, 请参看〔6〕。

我们选定采用A⁺激光器, 不单是它的输出功率大, 还考虑到它的调制性能好, 此外还有它的光谱特性很适合避开激波管风洞自身发光光谱区的要求。A⁺激光器在正常的激励条件下, 输出的六条谱线是, 4765Å、4579Å、4880Å、4965Å、5017Å和5145Å, 其中4880Å和5145Å占总输出功率的70%以上。而激波管风洞气流发光分布在5500Å以上的黄红光区, 在照相机镜头前加上适当的光学滤光镜, 就可完全排除风洞中的杂光

干扰, 而获得清晰的照片。A⁺激光器的谐振腔, 是选了曲率半径为1.5米的共焦谐振腔的形式, 输出端的反射系数为97%。

(三) 光脉冲的调制方案:

把激光调制成光脉冲输出的方法十分之多。最简单的方法是采用机械式的调制方法, 如旋转棱镜腔外调制技术^[7]。转镜调Q技术^[8]。

目前采用最多的和最普遍的是利用电—光开关调制技术, 它可分为两类: 一是作为纯粹的电—光开关使用, 把电—光开关放在激光器的谐振腔外, 对已发出的激光束进行开关作用。使用的电—光开关器件有克尔盒^[9]和普克尔盒^[9]两类; 另一是将电—光开关放入激光器的谐振腔内, 控制激光器的增益, 即所谓的调Q技术^[10], 多数使用的是普克尔盒形式的电—光开关, 它是用电致双折射晶体(如ADP、KDP、KD*P等)作成的。它的调制电压要比克尔盒低很多。

利用超声波与光的衍射作用, 发展起来的声—光调制技术^[11]被广泛地用来调制激光束。特别引人注目的是腔倒空调制技术^[12]。它的调频率范围很宽, 可从单脉冲输出, 直到几兆周的频率输出, 其光脉冲宽度短到50毫微秒的量级, 所得到的激光输出功率为一般偶合形式的50倍之多。

锁相技术^[13]其特点是频率高, 一般在 10^8 — 10^9 赫/秒, 且光脉冲宽度小, 只有微微秒(10^{-12} 秒)的量级。适用于超高速摄影技术。

最后是电源调制方案, 即用脉冲电流去驱动激光器^[14], 使激光以脉冲的形式输出。

对于气体激光器来说, 特别是A⁺激光器, 上述的调制方案都可以用来得到所要求的光脉冲组。但对激波管风洞来讲, 同步要求在1毫秒的量级之内, 机械调制的惯性大, 满足这样的同步要求是困难的。

电—光调制技术, 是用电信号来驱动光开关, 其优点是反应时间快, 一般地来讲只在 10^{-9} 秒的量级之内, 另一就是电信号操作和控制都十分方便。我们曾在初期的方案中采用了它, 并作了一阶段工作^[15]。先是在腔外调制。采用KDP(KH_2PO_4)晶体作成的普克尔盒, 和一对偏振器(尼科尔棱镜)组成电—光晶体开关(如图1)进行了实验。为了简便, 记录系统一般是先将照相快门打开等待摄影, 这样对晶体开关的消光比要求很高, 在实际工作中是较困难的。我们一共实验了三种类型的开关。都未达到满意的效果。

之后, 又将晶体开关插入A⁺激光器的谐振腔内进行调制。实验证明A⁺激光器输出的两个主波长4880Å和5145Å的增益不一样, 两个波长的光不能同时达到100%的调制度。在正常的激励功率下, 4880Å的光抑制不住, 而5145Å的光以及其他谱线的光。由于它们的阈值都大于4880Å的, 而比较容易被电—光晶体的关闭状态所抑制住, 当开关开启时也就产生振荡输出, 而完全被晶体开关所控制, 达到了100%的调制度。用它作为高速摄影用的光脉冲时, 必须要用一分光三棱镜把4880Å的光从光路上分开不用。经过我们的实践证明, 这种调制方案, 要求激光器(A⁺激光)的增益高, 开关的光损耗要求越小越好。我们用的这种晶体开关^[16], 其抑制电压(抑制激光器产生激光振荡的电压)为1.6KV, 插入A⁺激光器腔内, 使其阈值增加10A左右的功率电流, 但

同时仍能输出六条谱线的激光束，但总功率被抑制了三分之一还强。

由于KDP晶体极易潮解，很难维护，时间稍长一点，开关的光损耗剧增，使5145A°的振荡完全抑制住了。另外，A⁺激光器本身是属于低增益的激光器，比起红宝石激光器来说它的激光增益就小得多了，因此它对插入元件的透过率要求是很高的。从A⁺激光管本身来说，它的衰老也较快，二者结合起来，可适用的有效期就很短了，就得经常地更新晶体开关和激光管，造成使用代价太高，而又很不方便。

经过多方面的研究和试验，最后选用了用电脉冲直接驱动A⁺激光管的电流驱动调制方案，而获得了完全满足激波管风洞光学测量技术方面要求的光脉冲组，其主要性能如下：

发光器件：A⁺激光器（或脉冲氙灯、氪灯）；

光谱范围：4880A°、5145A°等；

工作频率：1千赫/秒—5千赫/秒，或单次光脉冲输出；

组脉冲宽度：即工作时间，可根据具体情况任意选定的。对于用在激波管风洞中，一般选10毫秒左右；

单脉冲宽度：约5微秒；

光脉冲能量：单个光脉冲光能，足使24°定胶片在φ20毫米的感光面积上，黑度大于1.0以上。

三、调制与驱动电源

调制电源是根据以下要求设计的：

1.要是他激式的。即由风洞发出的信号触发其动作，要求与激波管风洞的运转时间相匹配；

2.每触发一次电源工作10毫秒左右（此时间易于延长或缩短），然后自动关闭，即要求光脉冲的输出时间与激波管风洞中准定常气流的建立时间相匹配；

3.在10毫秒左右的工作时间内，光脉冲频率要求可以调节。且能单次单脉冲输出。

实际的线路设计如图2所示称组脉冲发生器。简单地介绍如下：

由 $\frac{1}{2}G_1$ 6 V 8 组成一个间谐振荡器。该振荡器可以运转在他激状态，也可以运转在自激状态，由开关 K_1 来选择。作风洞实验时处于他激等待状态，由风洞上的信号触发其运转。设计一个自激运转状态，是为了方便仪器的调试和维修。自激运转的频率是1~5次/秒，由 C_1 、 R_2 和 W_1 来控制。

放大的脉冲信号，通过脉冲变压器耦合到阴极输出器输出，去触发由 G_2 组成的单稳态电路，得到一个宽度在1毫秒到10毫秒的矩形脉冲，称其为主脉冲，其脉宽是通过 C_7 、 R_{13} 和 W_2 来调节的。主脉冲通过电容 C_8 耦合到下一级阴极输出器输出，触发由 G_4 组成的间谐振荡器工作，它的工作频率由 C_{11} 和连接在转换开关 K_2 上的阻性元件来决定，转动 K_2 频率是阶梯式的变换。该级工作状态是主脉冲中包络了许多小脉冲，这些小脉冲称为单脉冲，这样就形成一组脉冲输出。 K_3 、 K_4 是为单脉冲输出手控触发而设

置的。单脉冲的宽度由 G_5 组成的单稳态电路来控制,由 C_{15} 、 R_{31} 和 W_9 的量数来决定,旋转 W_9 可使单脉冲宽度从1微秒连续调节到10微秒。组脉冲通过 C_{16} 耦合到由 G_6 组成的阴极输出器中;分两路输出,一路是通过 C_{17} 耦合到功率放大管FM-30,经过隔离变压器送到驱动电源中去触发闸流管 GQ_1 导通,对 L_c 网络充电。另一路是通过 C_{22} 和 R_{33} 微分后,输入到延时器中去。经过延时后的电脉冲,再经过放大去触发驱动电源中的闸流管 GQ_2 导通,对激光管放电。它们的关系用方框图表示在图3中。

延时器电路图如图4所示,其延迟时间由 G_2 组成的单稳态电路的参数来决定,即由 C_4 、 R_7 和 W_2 来控制,旋转 W_2 可改变延迟时间。 G_3 组成的单稳态电路是为了调节脉冲宽度,以保证闸流管栅极所要求的触发能量。

驱动电源采用的是仿真线(LC网络),通过闸流管对激光管放电的方式。其中仿真线的时间常数,取在所要求的激光光脉冲宽度的3~5倍的量级上,这是由于激光管要求一定的驱动功率和能量,另外由于激光输出的光脉冲宽度是大大小于其驱动电流脉冲宽度的(如图9所示),因而允许这样选取。其计算方法如下:

设 n : 仿真线 L_c 的节数;

t_p : 激光输出光脉冲宽度;

i_b : 激光管最佳驱动脉冲电流;

f_r : 工作频率;

I_b : 平均电流;

V : 充电电压;

R_L : 负载阻抗(激光管内阻);

L_c : 总电感量

它们应满足如下关系式:

$$V = i_b R_L$$

$$nc = t_p / 2R_L$$

$$nL = R_L t_p / 2$$

$$L_c = 1 / (\pi f_r)^2 nc$$

$$I_b = f_r t_p i_b$$

只要给出 i_b 、 R_L 、 t_p 和 n 就可以把仿真线的参数 c (电容)、 L (电感)算出来, n 一般取10左右; t_p 取3~5倍于激光光脉冲宽度时间; i_b 是要根据激光管的特点来定,一般是取70A~120A; R_L 对激光管来讲是个变数,因为它的内阻是随驱动电流而变化的。

图5所示的是一个实际的A₊激光管内阻与驱动电流的关系曲线。在初步设计时可取 $R_L = 5$ 欧姆。

为了使驱动电源在高频情况下,运转可靠、稳定,在充放电电路中分别放了一支闸流管。 GQ_1 为充电闸流管, GQ_2 为放电闸流管,这两个管子是交替导通的, GQ_1 是由主脉冲发生器直接接触导通的;而 GQ_2 是由通过延迟之后的信号触发导通的,其延迟的时间必须选取得当,否则就会紊乱,达不到预期的效果。

在运转之前,激光管是用启辉电源将其予先导通,成辉辉光放电状态,放电电流由限流电阻 R_0 控制在100毫安左右,此时它的内阻大约是3K欧姆。此触发电源的电压应是

大于 3 KV 的直流电源。

当 GQ_2 导通时, 仿真线 (LC) 通过激光管放电, 它的内阻迅速下降, 形成弧光放电, 产生激光输出, 此时 GQ_1 是处在截止状态。弧光放电的时间, 固然受到仿真线 (LC) 的常数的限制, 同时也受到 GQ_2 截止板压的限制, 这样的放电方案设计, 避开了器件 (激光管) 本身的消电离的特性, 而能工作在高频状态。

激光管在脉冲驱动时, 要求每次的驱动电流要稳定, 因为它的最佳驱动脉冲电流值允许的偏差范围较小, 这就要求对仿真线充电的电源电压要稳定和有足够的容量。为了避免采用大型变压器和庞大的整流设备, 根据短时间工作的特点, 我们采用大容量贮能电容的方式, 合理地解决了这个问题。

不同的激光管, 它的最佳驱动脉冲电流是不一样的, 即使是同一支管子, 当内部的 A^+ 气压有了变化时, 其最佳驱动脉冲电流也要改变, 这就要求对仿真线充电的电源电压可以调节, 以便适应不同的要求。

这套电源经过一年多来的实际使用, 证明它的性能良好, 工作稳定可靠。它不但可以用来驱动 A^+ 激光器这类的离子激光器 (如 K^+ 、 H^+ 等), 还可以用来驱动脉冲氙灯、氪灯等脉冲光源, 其运转频率同样可达到 5 千赫/秒。此外还可以用来驱动电—光晶体开关 (如用 KDP、ADP 等做成的普克尔盒), 对激光器进行 Q 调。

四、光源性能的测试

对光源性能测试所用的仪器是 SBR—1 型双线示波器, 和光电转换电路, 来测量光脉冲波型。转换元件选用的是光电硅二极管, 型号为 2DU2, 其具体线路如图 6 所示。

驱动激光管的电流脉冲波型的测试, 是在激光管的阴极上串接一个 1 欧姆的电阻, 把电流讯号取出来, 送到示波器中去显示。光电测试的线路如图 7 所示。光脉冲在示波器上显示为负极性的, 而电流脉冲为正极性的, 如图 8 所示, 上线是激光光脉冲组, 下线为驱动电流脉冲组, 驱动频率为 1 千赫/秒, 示波器扫描速度为 1 毫秒/格。

图 9 为激光脉冲与驱动电流脉冲的展开波型, 示波器的扫描速度为 20 微秒/格。从图中可以看到: (1) 激光光脉冲是迟后于它的驱动电流脉冲; (2) 激光光脉冲宽度是小于其驱动电流脉冲的宽度。这是离子激光器所具备的特点。

图 10 为驱动频率为 5 千赫/秒时的, 激光光脉冲组的示波器照片。示波器扫描速度 1 毫秒/格。

用同一电源去驱动脉冲氙灯, 其光脉冲波型如图 11 所示。其脉冲宽度也在微秒的量级以上, 但是氙灯的内阻要比 A^+ 激光管小很多。前面已经谈到, 驱动脉冲氙灯也能工作到 5 千赫/秒的频率, 其示波器照片如图 10、图 8 十分相似, 就不再重复了。

五、实验结果

我们的全部实验工作, 都是在激波管风洞中进行的。实验内容分为两类, 分别介绍如下:

(一)作为纹影仪(阴影仪)的光源。

用这台激光光源作为纹影仪(阴影仪)的光源,对流场进行显示照相。作为单次闪光照相,我们提供出三张照片,都是模型在激波管风洞中作自由飞实验的流场情况,实验的光路布置如图12所示。

图13为单模型自由飞时的流场照片。

图14为双模型自由飞时的流场照片,显示出激波干扰的情况。

图15为单模型在自由飞中,突然破碎的一瞬间的流场情况。

以上三张照片的流场情况为: $M_{\infty} = 9.2$; $P_{\infty} = 2 \times 10^{-2}$ 公斤/厘米²; $\rho_{\infty} = 1.1 \times 10^{-4}$ 克/厘米³。

采用了一条 $\varnothing 0.25$ 毫米的细丝代替刀口K,这样既提高了测量灵敏度,又保持了阴影照片的特点。

图16记录的激波管风洞气流过程的结尾情况,这是用闪光频率为2千赫/秒的激光光源,配上转鼓相机照下来的。每张照片的间隔时间为500毫秒,每张照片的曝光时间约5微秒。

(二)作为自由飞测力实验用的光源:

作为模型自由飞测力实验,通常是采用单张底板重复曝光的技术,即在一块底板上记录下模型的运动轨迹,从而计算出气动力。

图17为一球形模型在激波管风洞气流作用下的运动轨迹照片,照相用的光源频率为1千赫/秒,每次曝光时间为5微秒,发光元件用的是脉冲氙灯。

气流 $M_{\infty} = 12$, $P_{\infty} = 3 \times 10^{-3}$ Kg/Cm²模型自重2.5克

这台光源的工作频率可达5千赫/秒,完全满足模型自由飞的各种姿态的轨迹记录,从而可以从中进行气动力的计算。

六、结 束 语

用脉冲电源去驱动A⁺激光器,可以获得频率高达5千赫/秒的光脉冲组。而且每个单脉冲宽度在微秒的量级上,这是一个很好的用于高速摄影的光源。由于激光的聚焦光点小,亮度大,是作为阴影仪(纹影仪)极好的点光源,使仪器的测量灵敏度大有提高;激光的良好相干性,是作为干涉仪的极好光源,不但可以使仪器的调整工作简便,而且可以使仪器的设计结构更加简单。高重复频率的光脉冲组,除了可以用来记录模型在风洞中自由飞行时的运动轨迹,从而计算出气动力和气动力矩等参数外,还可以用来摄取风洞实验过程中的高速变化过程(如图16)。此外,在气动激光、爆炸力学、射流元件、燃烧、火焰、某些化学反应以及对透明物质(固体、液体、气体)的密度(折射率)测量等方面的课题研究,都有实用价值。

这种电源驱动的调制方式,不但操作简便,可靠,维护尚单,效果良好,其电源设备还可用来直接驱动脉冲氙灯等脉冲光源器件,这就提供了一个大面积高速摄影用的频

闪照明光源，其用途就更加广泛了。

这台高重复频率、短脉冲 A₊ 激光光源，是在所党委和实验站党支部的领导和关怀下，按照毛主席的教导，政治挂帅，树立赶超思想，以“独立自主，自力更生”的精神，完全立足于国内，立足于我们自己，全部采用国产元件研制成功的。我们的同志按照毛主席的教导，直接下工厂和那里的工人、干部和技术人员共同研制激光管，晶体电光开关，亲自动手按装调试电源设备。目前这项工作只能说是初步的结果，尚存在着很多的缺点和不足，请领导和同志们多提意见，共同努力把这台仪器搞得更完善、合理，为我国填补好这个空白点。实验已经证明，要把工作频率提高到10千赫/秒~20千赫/秒是可能的。

www.cnki.net

参 考 文 献

- [1] 1705所504室, 激波管风洞中模型自由飞测力技术, (1975.8)
- [2] 中国科学院力学研究所十一室一组, 纹影仪在风洞中的应用。
- [3] "A Laser-Schlieren Technique to take Kin films of gas flows within a highly luminous,transient ARC", Journal of Photographic Science, Vol. 17, No. 1,P. 25 (1969)
- [4] "A Laser Photography of hypervelocity projectiles" Rev. Scient. Instrument, 36, No.11,P.1551-3 (1965)
- [5] 1705所504室, 感光底片感光光能量的测定和估算 (1972)
- [6] 上海灯泡一厂, 氩离子激光器研制小结 (1972)
- [7] "Holography interferometry applied to highspeed flame research" Proc.9th Interna.Cong. on High-speed Photography, P.30-35, 1970
- [8] 天津大学精仪系编著, 激光技术, 科学出版社, 第15—1节, 1972.
- [9] "Pockels cell primer", Laser Focus, Feb.p.21-27, 1968
- [10] "Q-switching laser for high-speed photography"proc. 9th Interna. Cong. on High-speed Photography,p.74-78,1970
- [11] 中国科学院武汉地震大队, Jcy-1 激光测炬仪调制器制作总结, 1972
- [12] "Fast modulator of Extraction of Internal Laser power", J. Appl. phys, Vol. 41, p. 1552-9, 1970
- [13] "Application of phase-locked solid laser to high-speed cinematography" Proc.9th Interna.Cong.on High-speed Photography, p. 68-73, 1970
- [14] 作者: 小林春洋 日刊工业新闻社出版レーザー-应用技术(日文) P.49-53
- [15] 1705所504室, 激光脉冲光源研制小结 (1972)
- [16] 1705所504室, 电光晶体调制器 (1972)

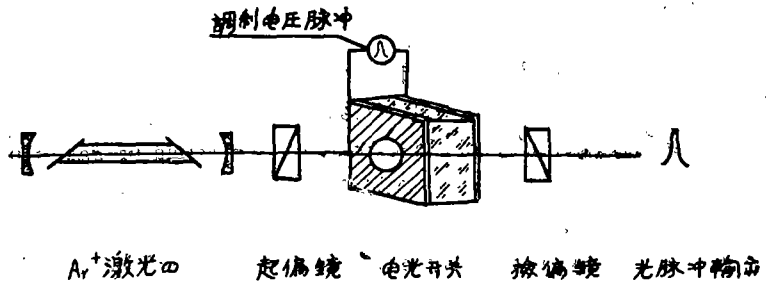


图1 晶体电光开关工作原理图

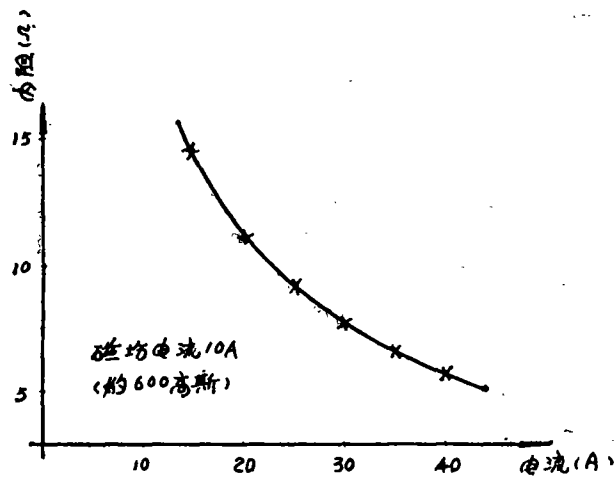


图5 A_r^+ 激光管内阻与驱动电流的关系

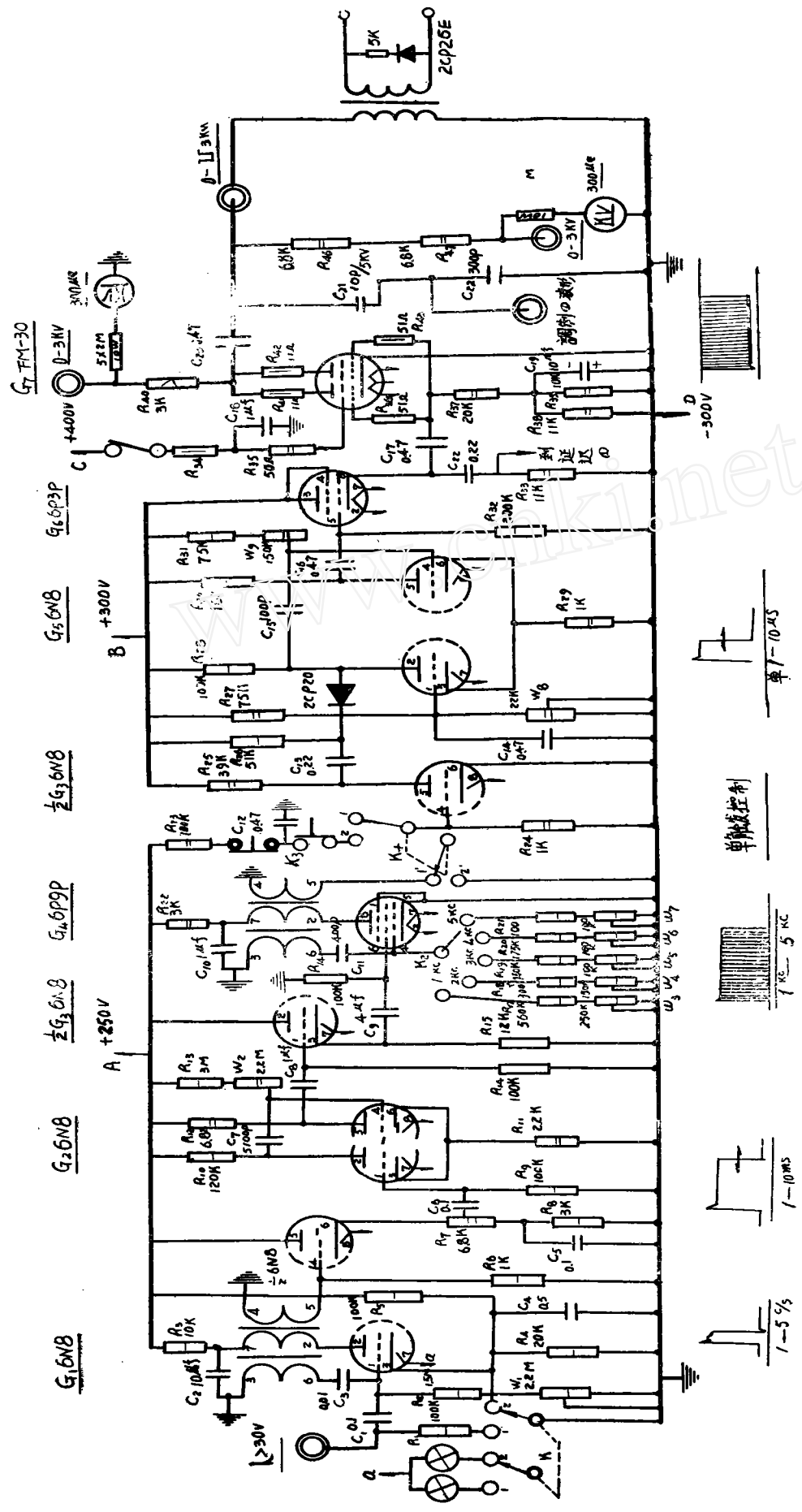


图2 组脉冲发生器线路设计原理图

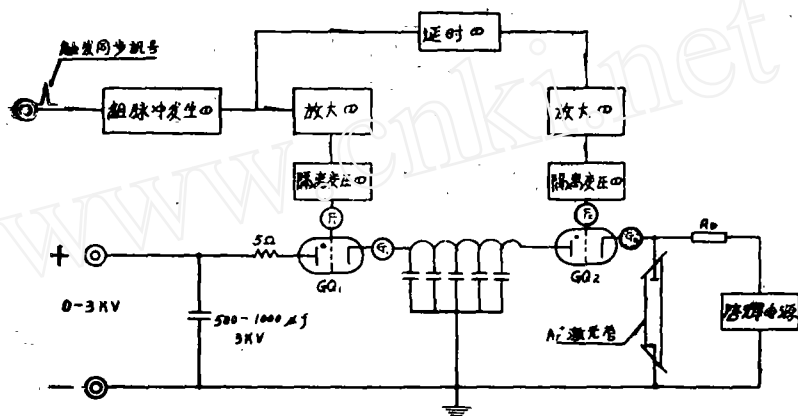


图 3 调制原理方框图

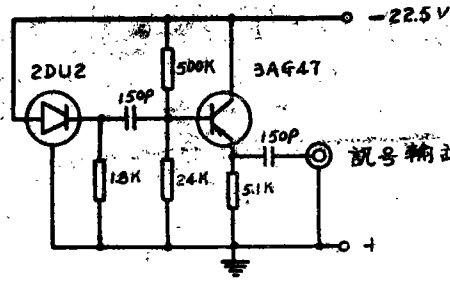


图6 光、电接收放大电路图

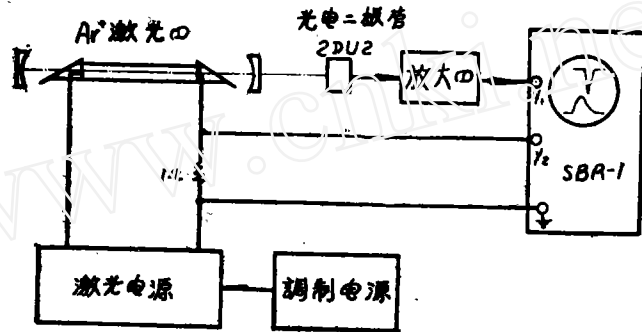


图7 光、电脉冲测试线路原理图

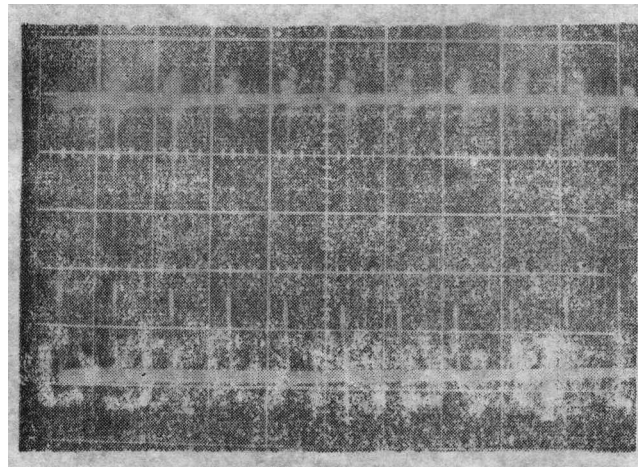


图8 激光光脉冲组与驱动电流脉冲组上线：光光激脉冲组
下线：驱动电流脉冲组 频率：1千赫/秒 扫描速度：1毫秒/格

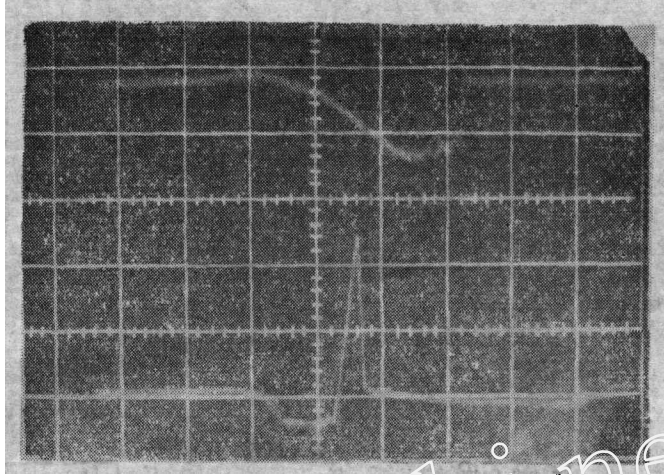


图9 激光光脉冲波型与驱动电流脉冲波型 上线：激光光脉冲波型
下线：驱动电流脉冲波型 扫描速度：20微秒/格

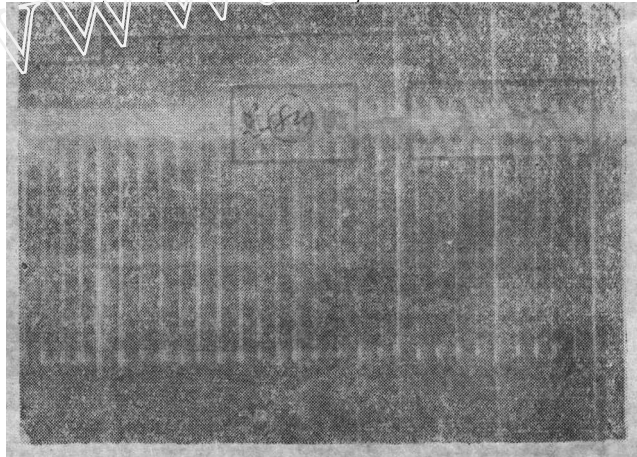


图10 激光光脉冲组 频率：5千赫/秒 扫描速度：1毫秒/格



图11 脉冲氙灯光脉冲波型 扫描速度：20微秒/格

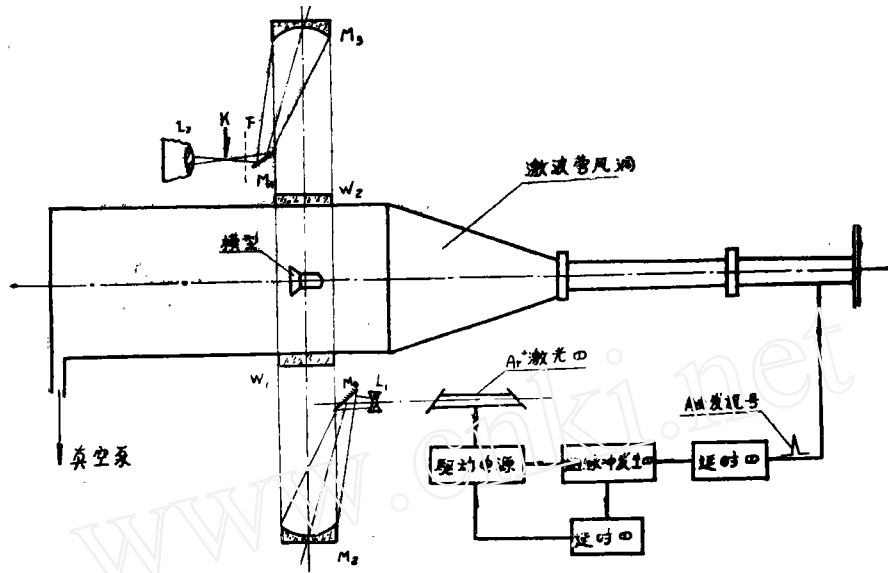


图12 激波管风洞光学测量仪器布置图

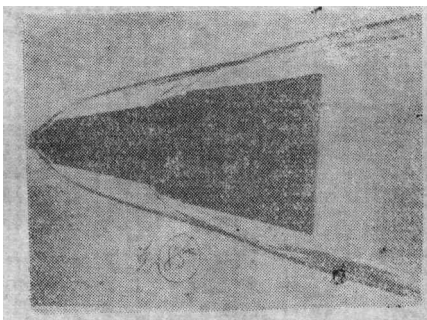


图13 单模型自由流场照片 $M_{\infty} = 9.2$
 $P_{\infty} = 2 \times 10^{-2} \text{Kg/cm}^2$

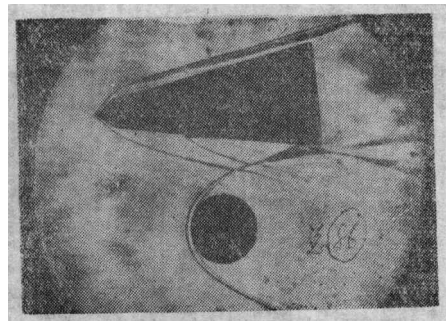


图14 双模型自由流场照片 $M_{\infty} = 9.2$
 $P_{\infty} = 2 \times 10^{-2} \text{Kg/cm}^2$

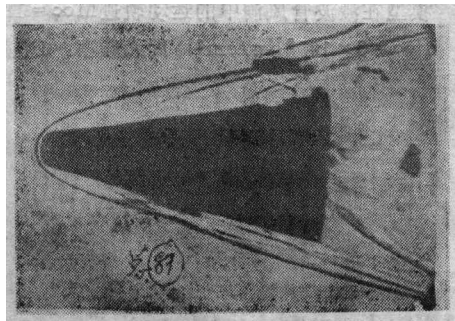


图15 模型在自由飞行中突然破碎的一瞬间 $M_{\infty} = 9.2$ $P_{\infty} = 2 \times 10^{-2} \text{Kg/cm}^2$

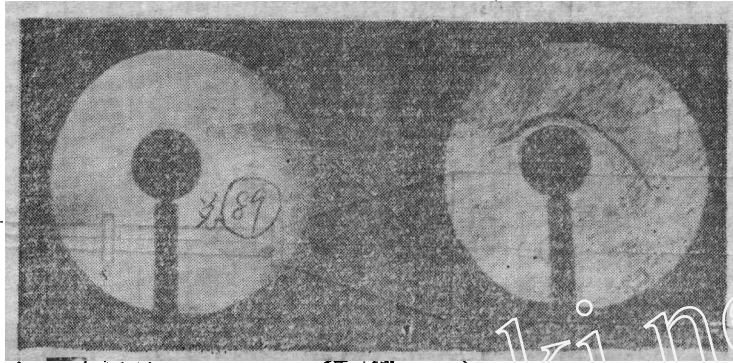


图16 激波管风洞气流过程的结束情况拍摄频率：2千幅/秒

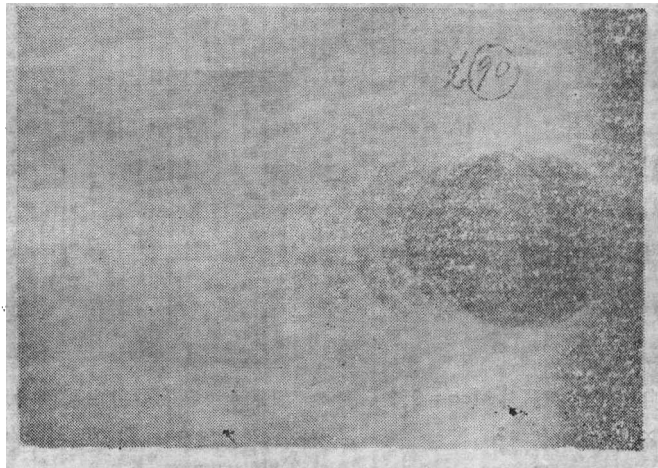


图17 模型在激波管风洞中的运动轨迹 $M_{\infty} = 12$
 $P_{\infty} = 3 \times 10^{-3} \text{Kg/cm}^2$ 闪光频率：1千赫/秒