



气体炮及其常规测试技术(二)

王金贵

(西南流体物理研究所)

气体炮经过精密的安装以后,就要进入实验发射的调试阶段。在调试阶段要测量的性能参数大体上有两方面的内容:一是静态性能,主要检验加压和保压性能;抽真空和保真空性能;各联接部件的工作状态是否可靠等。这部分工作基本上属于检验机械加工和组装的质量;二是发射性能,主要检验弹道性能,其内容有高压气室工作过程中的压力变化,活塞和弹丸在管内的运动规律,弹丸出炮口的速度和姿态等。

静态检验的内容对于一级炮和二级炮都是相同的。发射性能检验,对于一级炮可以省去检验高压气室工作过程中的压力变化,重点在检验弹丸出炮口的速度和姿态;而对于二级炮,就必须重视高压气室中工作压力变化和弹丸、活塞在管内的运动规律。因为二级炮工作压力非常高,必须依靠监测有关参数了解弹底的工作压力来保证弹丸在管内飞行过程中不致破裂,同时还要确定二级炮高压段内的峰值压力,使其绝对不超过高压段的强度极限。

测量活塞在管内的运动规律可以借助微波速度干涉仪来完成。弹丸在管内的运动规律可以利用激光速度干涉仪或微波方法测量。气室内的压力变化可以利用压阻计测量。

然而,从使用炮的角度出发,弹丸出炮口的速度和弹丸的碰撞姿态是两个很重要的工作参数。本文将重点介绍对这两个参数的测量技术。

一、弹丸速度的测量方法

常用的弹速测量方法有接触测量和非接触测量两类。接触测量的缺点是部分地破坏弹丸的接触面,影响碰撞实验的有效碰撞面积。这种影响对于在大口径一级炮上进行的实验测量不会引起严重效果,但是在小口径的二级炮上往往会造成非常严重的问题。所以无论是二级炮还是一级炮,都是尽可能地使用非接触测量来确定弹丸速度。然而,就目前的设备水平来说,除了非接触的X光阴影照相法可以确切地看到弹丸的实际位置和经历时间外,其它非接触测量方法一般都和接触测量方法进行联合测量,以利于对测量结果进行比较。最简单的接触测速方法是电探针方法。

1. 电探针测量弹速的方法

图1是这种测速方法的测量原理图。以速度 u_1 飞行的弹丸前端面粘有一块金属板,它首先与接地探针接触,然后依次接通间距为 h 的两根探针。在它接触每根探针时,放电回路都有信号输出,判读计时仪上两信号的时间间距 t 就得到弹丸速度 $u_1 = h/t$ 。就目前设备水平来说,这种方法最简单。如果采取有效措施消除探针的误动作,这种方法所得结果最可靠。因此在研究其他非接触测量技术时常用电探针法作为一种重要的对比方法。

2. 激光光束遮断法

从图2^[1]可以看出,利用光学分光系统将激光器输出的一束激光分为强度近似相等的三束光,

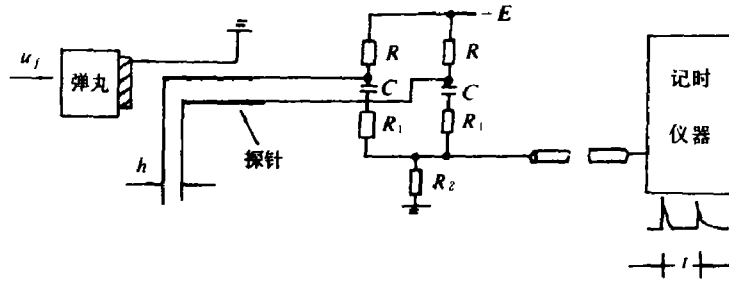


图1 电探针测量弹速的原理图

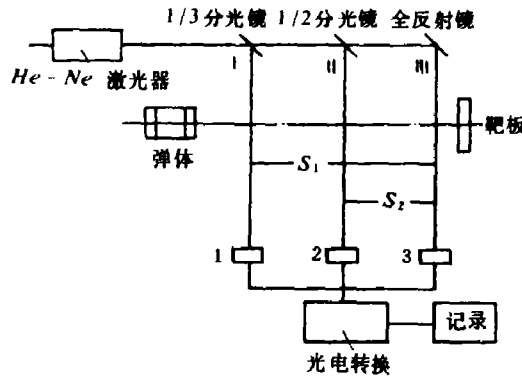


图2 激光光束遮断法工作原理

构成了三个激光“探针”。这三束光分别射到与计时系统连接的三个光电管上。弹丸飞越三束光时，将依次遮断每束光，造成光电管的输出截止，所产生的脉冲信号记录到记时仪上就提供了弹丸飞越时间的数据。这种方法用在一级炮上很成功^[1]，但是用在二级炮似乎还有些问题。主要是弹丸出炮口时弹托后面的高压气体以高速喷出绕到弹丸前面，先于弹丸触发了探针。当弹丸和发射管密封很好时，可以测到弹丸未全出炮口的速度，但是二级炮的碰撞实验是在距炮口200—400mm完成的，往往很难测到碰撞时的瞬时速度。虽然可以采取一些措施避免气体提前触发光束，但是结构上都比较麻烦。

3. X光阴影照相法^[2]

Mitchell, A. C. 和Nellis, W. J. 所使用的X光阴影法测量弹丸速度的示意图见图3^[2]。触发X射线源距第一个闪光X射线束仅8mm。弹丸遮断触发X射线束后，由光电倍增管发出的脉冲信号经过适当延时，使之在弹丸进入第一和第二闪光X光束视场时，启动闪光X射线源。于是在第一和第二底片盒内分别拍照了弹丸的阴影相。同时被拍照的还有一个刻度精确的标尺。这样可以根椐两幅照片上弹丸的实际位置和两次闪光时间计算弹丸速度。其精度优于0.1%

这种方法属非接触测量，所得结果很直观，而且精度很高，但是X射线系统造价昂贵，是其主要缺点。

4. 磁飞行体方法

根据法拉第电磁感应定律可知：在 n 匝线圈中磁通 Φ 随时间 t 改变时，线圈中产生的感应电动势

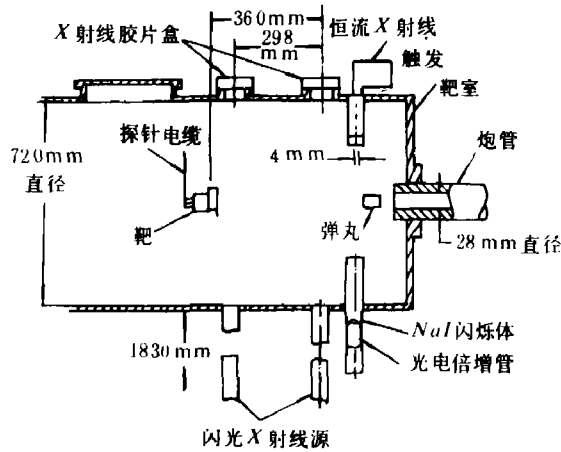


图3 测量弹丸速度的闪光X射线系统

E如下式给出:

$$E = -n \frac{d\Phi}{dt} = -n \frac{d\Phi}{dx} \cdot u_1$$

式中 u_1 是磁体飞越线圈的速度。然而 Φ 的函数形式很难精确给出。实验上采取的测量方法是在弹丸的飞行路线上安装两个线圈，将铁磁体装入弹丸内。当弹丸飞经两个已知距离的线圈时，两个线圈便会依次输出感应信号。测量这两个信号的时间间隔，就可以得到弹丸速度^[3]。(见图4^[3])典型的记录波形示于图5。

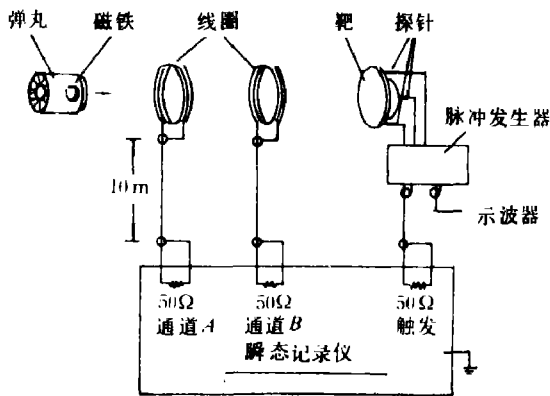


图4 磁飞行体方法原理图

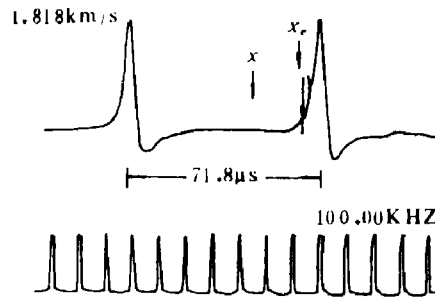


图5 磁飞行体方法记录的典型信号

实验设计上应注意使两个线圈产生的感应信号尽量具有相同的形状，在允许的情况下要尽量加大两线圈的间距，以减小速度测量的相对误差。同时，开始研究时要和电探针方法比较后再固定两线圈距炮口的位置。调整得当，这种方法的测速精度可达0.2%^[3]。磁飞行体方法在技术上比较简单易行。

二、弹丸姿态的测量方法

弹丸经发射管加速后,前端的碰撞板端面(以下简称弹丸端面)将发生倾斜或弯曲变形。这种畸变主要是由炮口的几何形状,弹丸形状的加工误差,以及安装不当等引起的。此外,弹丸经过发射管的磨损,弹丸出炮口瞬时由于其尾部与炮口端面的不平行使其后面高压气体的推进具有不对称性等影响因素,也将进一步引起弹丸端面形状的改变。原则上讲,弹丸端面形状的畸变程度具有随机性。用于碰撞实验的一级炮的弹丸,是在它出炮口 $1/2$ 或 $1/3$ 长度时完成碰撞的,在碰撞之前炮管的导向性仍然起作用,所以,一级炮弹丸端面的斜角较小,约为 0.03 。但是,用于碰撞实验的二级炮弹丸,是在它出炮口 $200\sim 400\text{ mm}$ 后完成碰撞的,弹丸在碰撞前已经失去了炮管的导向作用,因此,二级炮弹丸的碰撞端面倾斜度较大,约为 $0.5\sim 1$ 。

绝大部分碰撞实验都是按正(平行)碰撞设计的。弹丸的倾斜碰撞将使实验测量结果具有系统误差。故除了弹丸速度以外,弹丸与靶表面的碰撞角也是衡量炮的质量的一个重要指标。

测量弹丸端面形状大约有两种方法:一种是利用X光阴影照片和炮轴线进行比较^[1];另一种是利用平面靶下规则布置的探针记录靶内冲击波的到达时间,利用数学方法换算出畸变量^[2]。第二种方法似乎简单,但是它要求很高的仪器分辨率。尽管如此,人们还是比较多采用第二种方法。因为它的测量结果便于用到数据修正上,而且国产仪器水平可以初步满足测试要求。

利用垂直于炮管轴线的平面靶上规则布置的探针,可以对弹丸端面形状进行细致的监测。图6^[2]是靶后表面上探针陈列的一种布置方式,总共布置了19根探针。中心布置1根,三个同心圆上各布置6根探针。三条直径互为 60° 夹角。

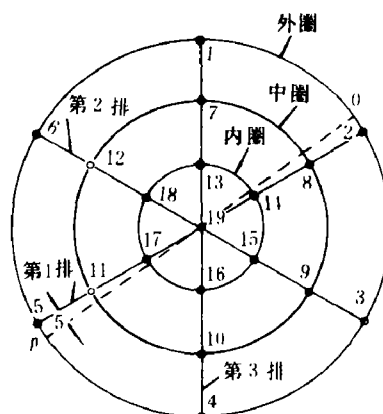


图6 探针布置图

弹丸端面与靶发生倾斜碰撞或弯曲碰撞时,将造成这些探针阵列记录的冲击波到达时间具有不同同时性。一次典型实验中,沿三条直径上测得的数据结果如图7^[2]所示。时间量是相对于每条直径上首先响应的探针而言的。数据分布的情况表明,在这次碰撞实验中,弹丸端面形状既有倾斜,又有弯曲变形。倾斜效应在一条直径分布的探针上造成的效果是,从最先响应的探针记录的到达时间算起,以后陆续响应的探针记录的到达时间呈线性增加(见图8左);弯曲变形所造成的效果是:各探针记录的到达时间近似呈抛物线形变化。在两种效应都不严重时,可以进行迭加处理,即表示为:

$$t_j = t_0 - \frac{\text{tg}\theta_j}{u_s} (R_m - R_j) + \frac{A_j}{u_s} (R_m^2 - R_j^2) \quad (1)$$

式中 t_j 是冲击波到达 R_j 处的时间; R_m 是沿直径分布的探针最大的同心圆半径; u_s 是靶内冲击波速度; θ_j 是冲击波相对于第 j 行探针的倾角; A_j 是描述冲击波弯曲阵面的抛物线方程系数。图7中的曲线就是对每行探针记录的到达时间按(1)式进行最小二乘法拟合的结果。

(1)式反映的是平面靶内冲击波阵面的情况。我们知道,由于碰撞板碰靶时所造成的效果与靶内冲击波阵面的效果是对应的,也就是说,一个倾斜弯曲的碰撞板表面产生了一个倾斜弯曲的冲击

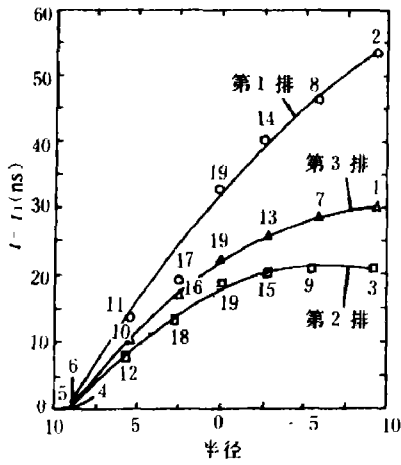


图7 实验数据点和拟合曲线

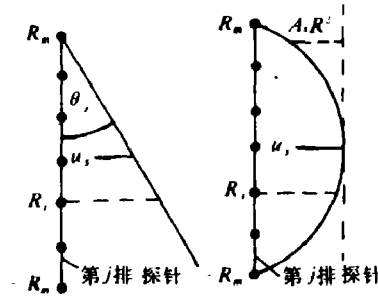


图8 单纯倾斜和单纯抛物线形弯曲

波阵面。但是，由于冲击波速度比弹丸碰撞速度大，所以两种效果的倾斜角和畸变程度是不相同的。因为倾斜的碰撞板到达靶表面各测点之间的时间差等于靶内冲击波到达各对应测点探针处的时间差，所以有

$$\frac{\text{tg } \theta_i}{u_i} = \frac{\text{tg } \phi_i}{u_f} \quad (2)$$

式中 ϕ_i 是碰撞板与第 j 排探针的碰撞角， u_f 是弹丸的碰撞速度。同理，我们还可以得到

$$\frac{A_i}{u_i} = \frac{A_f}{u_f} \quad (3)$$

式中 A_f 是碰撞板弯曲变形时的抛物线方程系数。将 (2)、(3) 代入 (1) 得到

$$t_i - t_0 = \frac{\text{tg } \phi_i}{u_f} (R_m - R_i) + \frac{A_f}{u_f} (R_m^2 - R_i^2) \quad (4)$$

(4) 式描述了弹丸端面（碰撞板）的碰撞姿态，表述了弹丸端面在碰撞时的形状。(1) 式描述了靶内冲击波阵面的形状。

(4) 式所描述的弹丸碰撞板姿态，是从三条直径上观察的。处理结果将得到三个碰撞角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 和三个系数 A_{f1} 、 A_{f2} 、 A_{f3} 。

此外，根据图6的探针布置方式，我们可以用每一个圆周上的六根探针确定出碰撞板的碰撞角 ϕ 和碰撞时的方位角 α_0 ；利用中心探针19所记录的到达时间 t_c 与圆周上6根探针所确定的冲击波到达中心的时间 t_0 可以描述弯曲变形。

假定取图6中任一圆周上分布的6根探针，如图9所示^[2]，定义 PQ 为碰撞板击靶时的方位轴线， P 点最先击靶， Q 点最后击靶。

考虑到单纯倾斜情况有

$$t_0 = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{2} (t_{j0} + t_{j3}) + (t_{j1} + t_{j4}) + \frac{1}{2} (t_{j2} + t_{j5}) \right] \quad (5)$$

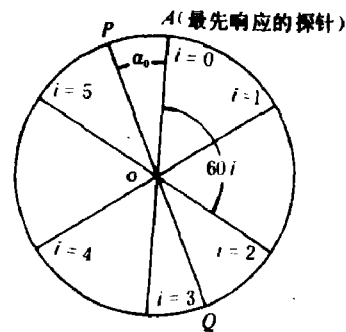


图9 用一个圆周上分布的探针描述动态碰撞角 ϕ

式中的每一项表示每条直径上的平均到达时间。在轴对称情况下，这三个平均值相差极小，都标志圆心O处的到达时间。 t_0 是这三个时间“对”的平均值。

对于单纯倾斜碰撞，参考图8左的情况，可以把圆周上各探针所记录的到达时间应用下式拟合^[2]。

$$t_i - t_0 = -\frac{lg\phi}{u_j} R_j \cos(\alpha_0 + 60^\circ i), (i = 0, 1, \dots, 5) \tag{6}$$

脚标j表示第j个圆周。图10是一次实验的数据点和应用（6）式作出的拟合曲线。如果把曲线图卷成一个圆筒，那么每条曲线就是圆筒和一个成 ϕ_j 角的平面的相贯线。从理论上说，三个圆周上探针记录的到达时间所得出的 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 应该相同，实验结果也符合得很好^[2]。

此外，如果没有弯曲变形发生，三个圆周上探针记录的到达时间所得出的三个 t_0 值〔见（5）式〕也应该相同。 t_0 值若不相同，就表示碰撞板具有弯曲变形。对于图10的实验所得到的 t_0 值可形象地用图11表示出来。图11中 t_c 是中心探针实测的时间。由 t_c 和 t_0 值可按下式确定三个抛物线方程

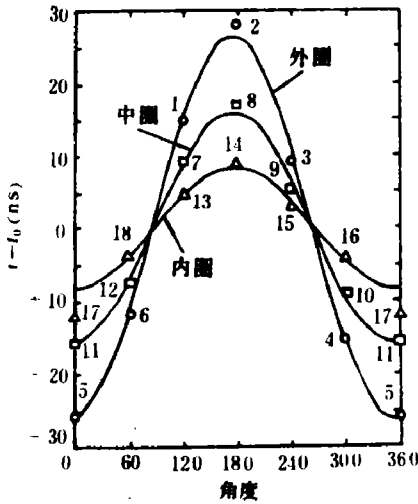


图10 三个圆周上探针的测量结果和拟合曲线

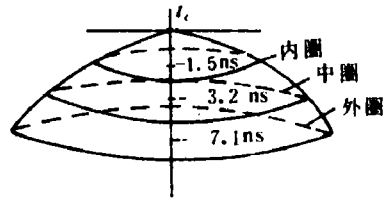


图11 三个 t_0 值不同反映碰撞板具有弯曲变形

的系数 A_j 。

$$A_j R_j^2 = u_j (t_c - t_0) \tag{7}$$

实验表明，由（7）式和（4）式确定的 A_j 值也符合得很好^[2]。

以上的处理方法可供我们监测弹丸端面形状时使用。对于一级轻气炮的弹丸端面形状监测问题，由于弹速较低，需要使用高灵敏度的探针，否则将出现时间差处理结果的高度分散性（由于大数相减的结果）。我们也可以把探针前面的靶板去掉，直接利用处于同一平面上的探针进行弹丸端面形状监测，此时对探针灵敏度的要求可以降低，但是要加强抗干扰的措施。

我们曾经用数据处理程序对（6）式进行过分析。计算表明，当记录的到达时间精确到1 ns时， θ 角的相对误差为1.4%；如果精确到2 ns时， θ 角的相对误差为5%左右。并且， α_0 角在很大范围内变化也不会引起 θ 角的明显变化。为了精确地测量弹丸端面的形状，应该逐步建立起亚纳秒精度的记时系统。

参 考 文 献

- [1] 杨柏全、曹述生等, 爆炸与冲击 5 (4) (1985), 54.
[2] Mitchell, A.C., Nellis, W.J., *Rev. Sci. Instrum.*, 52 (3) (1981), 317.
[3] Ken-ichi Kondo, Akira Spwgoka, Shinrokn Saito. - *Rev. Sci. Instrum.*, 43 (12) (1977), 1581.
[4] Yasuhiko Syono, Tsuneak Goto. *Sci. Rep. Res. Inst.*, Teheku, Univ, 29 (1) (1980), 17.

GAS GUN AND ITS ORDINARY MEASURING TECHNIQUES (II)

Wang Jingui

(*Southwest Institute of Fluid Physics*)