

水下弹道的研究

〔日〕磯部孝 著

SHUIXIADANDAO
DEYANJIU

周佩芬 译

519726



国防工业出版社

519726

水下弹道的研究

〔日〕 磯部 孝 著

周 佩 芬 译

内 容 简 介

本书通过各种形状的高速投射体在水中运动的轨迹、运动姿态和在水面跳弹现象的实验研究,探索了高速投射体跳弹的力学原理,提供了一种潜入水中而不跳弹的最佳弹形。在附录里,对弹头在水中的跳弹运动规律进行了理论上的阐述和推导。此外,附表中给出了许多有用的实验分析数据。

本书可供从事水中兵器研制工作的广大科技工作者和院校师生参考。

水中弹道の研究

磯部 孝 著

東京大学出版会

1975年1月30日

*

水下弹道的研究

〔日〕 磯部 孝 著

周 佩 芬 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张8⁵/₈ 199千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷 印数: 001— 900册

统一书号: 15034·2488 定价: 1.20元

出版说明

在水中兵器的研究中，常常遇到跳弹问题。为了有效地打击海上目标，特别是水下目标，必须求得一种能潜入水中而不跳弹的最佳弹形。本书为探求这样一种最佳弹形提供了有实用价值的研究和设计数据。

本书在实验上和理论上对各种形状的弹头在跳弹时的力学原理及其运动规律，以及对选择临界跳弹角的大小等问题进行了探讨。这不仅对水中兵器的研究有重要的意义，而且对其它类似武器的研究和设计也有一定参考价值。

另外，书中提供的实验装置相当简单，可供开展此项研究的科技工作者以借鉴。

本书是日本千叶大学教授、东京大学名誉教授磯部 孝于1974年所著，由东京大学出版社1975年第一次出版。为使广大研制水中兵器以及其它类似武器的科技人员充分利用本书的成果，我们特翻译出版了这本书。

本书由傅金祝同志校对，徐家梁、吴乔贤等同志技术校对，特在此表示感谢。

由于我们水平所限，谬误和不当之处在所难免，请读者批评指正。

译 者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1 球形弹头的跳弹	1
§ 2 平弹头	4
第二章 尖弹头在水面的跳弹	5
§ 1 实验装置和方法	5
§ 2 结果与分析	10
第三章 圆柱形弹头在水面的跳弹	18
§ 1 实验结果	18
§ 2 作用在尖弹头和圆柱形弹头上的力	23
§ 3 跳弹后的角速度与线速度之比	24
第四章 平弹头在水面的跳弹及在水中的运动	26
§ 1 装置和方法的改进	26
§ 2 平弹头的跳弹临界入射角	28
§ 3 跳弹临界入射角最小的弹形	30
§ 4 平弹头在水中的运动	33
§ 5 确定相似性的炮弹实验	35
§ 6 保持平弹头特性的临界平头面积	40
§ 7 跳弹临界入射角最小的平弹头的跳弹	44
§ 8 尖弹头型跳弹和平弹头型跳弹	51
第五章 步枪弹头在水中的侵彻距离及有关的现象	56
§ 1 装置和方法	56
§ 2 带白铜外壳的铅质制式弹头的侵彻距离及其变形破碎	60
§ 3 与制式弹头形状相同的黄铜弹头的侵彻距离	65
§ 4 球形弹头的侵彻距离及弹头的变形	67
§ 5 钝弹头的侵彻距离	70
§ 6 圆柱形弹头的侵彻距离和弹头的变形	71
§ 7 平弹头的侵彻距离及其变形	77
§ 8 侵彻距离特别大的弹形	85
第六章 结论	88
参考文献	91
附表	92
附录一 球形弹头在水面的跳弹	117
附录二 作用在水中弹头上的升力和升力系数	120
附录三 水下的弹轴运动——作用在尖弹头上的力	121
附录四 水下的弹轴运动——作用在圆柱形弹头上的力	128

第一章 绪 论

所谓打水漂，就是站在海边扔石头，使石头在水面上弹跳起来的游戏。好的情况，能跳 7~8 次。扁平的石头，不用说了，即使是圆的石头，也能弹跳，这是为什么呢？

既然在水面上跳，那么在触水后，为什么有时只擦一下水面，有时又潜入水中呢？那一定有个向上推石头的力在起作用。本书研究的目的之一，就是利用各种形状的投射体来说明这一力学原理。

§ 1 球形弹头的跳弹

有关投射体跳弹的物理研究，最初是由卡·拉姆绍尔^[1]进行的。他用无膛线枪，以约 620 米/秒的速度和各种不同的入射角向水面射击直径为 11 毫米的黄铜球形弹头和钢球形弹头，观察了球形弹头的运动情况，并作了说明。其结果是很吸引人的，这就是本书所要介绍之研究的出发点，下面，对此作稍详细的介绍。

如图 1-1 所示，当以小于 $6^{\circ}29'$ 的入射角 α 向水面射击球形弹头时，其跳弹的轨迹为 AOB；当 α 大于 7° 时，球形弹头潜入水中，其轨迹为 AOGH。

跳弹时的跳弹角 β 与入水时的入射角 α 之间的关系见表 1-1 所示，两者大致相等， β 角略小于 α 角。

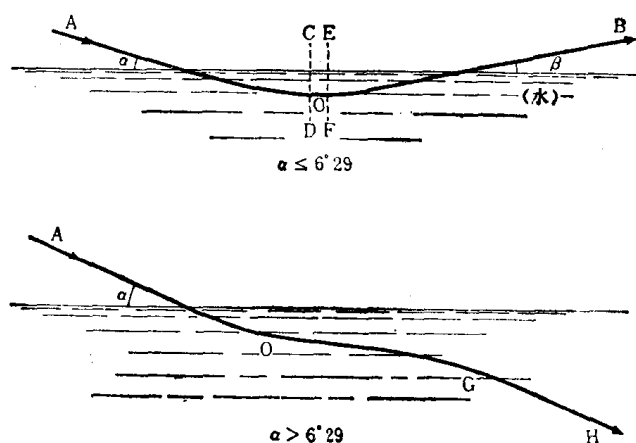


图1-1 球形弹头的跳弹与潜入

表 1-1

入 射 角 α (度分)		跳 弹 角 β (度分)	
1	00	1	00
1	59	1	55
3	01	2	48
4	03	3	51
4	56	4	37
6	03	5	36
6	29	5	53
7	00	—	—
8	00	—	—

关于球形弹头入水后的轨迹，也有精确的测定结果。跳弹时可以见到，球形弹头不是在水面上轻轻地一触，而是先潜入水中，然后再出水。当以接近跳弹临界的入射角 $6^{\circ}29'$ 射击时，球形弹头下端的轨迹如图 1-2 所示，球形弹头完全潜入水中，在水中潜行 95 厘米后再出水。

这是为什么呢？一定有一个推球形弹头向上的作用力。这个力是怎样形成的呢？是否象球撞在柔软的弹性壁上被弹回时那样，刚一入水，就产生阻力，所作的功通过介质变成

位能储存起来，上浮时则变成回跳力而使弹头跳弹的呢？这种设想通过下面的实验被否定了。拉姆绍尔在图 1-1 所示之 CD、EF 位置上插入两张薄薄的油纸，中间为 5 厘米的空气层，射击时，跳弹情况没有什么变化。即球形弹头在弹道的最低点，先进入空气层，水平前进，再重新进入水中后，仍能出水。

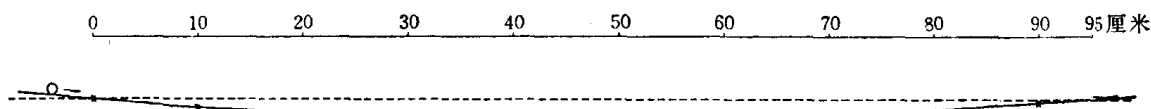


图 1-2 球形弹头下端在水中的轨迹，入射角 $6^{\circ}29'$



图 1-3 向侧面水平射击，P 是油纸

如图 1-3 所示，一开始在水箱的侧壁贴上一张薄油纸 P，水平射击时，又将会怎样呢？可以看到，球形弹头到某一深度时，同样会飞出来。球形弹头不断地向着水面运动，这一定有个不断向上的作用力。

显然，这个力实际上是球形弹头以高速在水中潜行时作用在球形弹头上的一种升力。若速度已知，则可根据水中弹道的曲率，求出升力。拉姆绍尔根据多次测定的球形弹头的弹道，求出靠近水平部分的曲率（根据弹道的长度 $\Delta x = 8.2$ 厘米，测定其切线方向的变化 $\Delta\theta$ ），并画出了球形弹头下端在不同深度 e 的水中弹道的曲率曲线（见图 1-4）。在点旁标出的数值（以 10 米/秒为单位）是球形弹头速度的估计值。

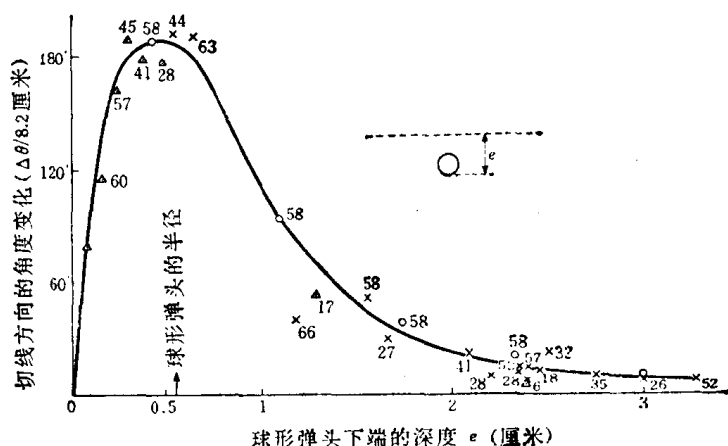


图 1-4 球形弹头下端在不同深度的水中弹道曲率

拉姆绍尔根据图 1-4 得出了下面的结论：

(1) 水中弹道的曲率与球形弹头速度几乎无关，只取决于深度 e 。如果是这样的话，

则以一定的入射角射击时，其跳弹前的水中弹道，以弹道的最低点为界，两侧的弹道应是对称的。事实上，如果倒过来再射击一次，恰好和原弹道重叠。例如以图 1-2 所示之入射角射击时，球形弹头在潜入水中后，尽管速度马上降到最初的 10% 左右，弹道还是左右对称的。跳弹角与入射角几乎相等。从正反方向两次的射击结果来看，两者之间仅有微小的差别。

(2) 推球形弹头向上的力为 $m \frac{\partial \theta}{\partial x} v^2$ ，式中 m 为质量， $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ 为曲率， v 为速度。曲率与速度无关，力与速度的平方成正比。

(3) 从图中可以看到，当球形弹头的一半浸入水中时，推球形弹头向上的力最大。若速度为 500 米/秒，则从式 $m \frac{\partial \theta}{\partial x} v^2$ 求出力的大小约为 90×10^6 达因（约为 90 千克重），此值约为由瓦·鲍尔^[2]用同样大小的球形弹头●使其在深水中以相同速度运动所测得的阻力 360×10^6 达因的 1/4。

很清楚，使球形弹头跳弹的力就是流体作用在其上的升力。

从图 1-4 可见，球形弹头在水中运动时，总是有一定的升力起作用。这对形状对称的球形弹头来说是不可思议的。拉姆绍尔向赛璐珞做的透明水箱里射击一球形弹头，把它在水中运动的瞬时姿态拍成照片，这在别的论文^[8]里已发表，这里对有关部分作如下说明。

图 1-5 是一复制图，从图中可见，运动的球形弹头的背后产生空泡。球形弹头分开水运动时，向斜侧方向推开的那部分水与垂直于空泡界面方向上不断推开的那些水一起向外扩展。

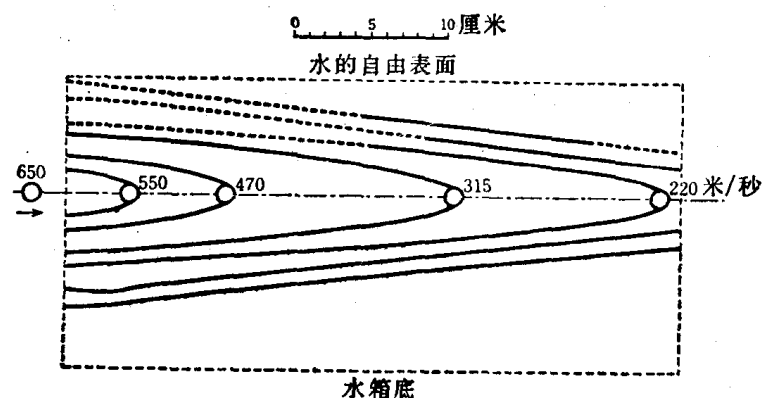


图 1-5 球形弹头背后形成的空泡

图中的点划线表示穿过球心的平面，球的表面在以该平面为界的上下两部分所受的压力若不对称，当然球形弹头的弹道就要向压力小的那一面倾斜。假定它的弹道与水的自由表面平行且接近自由表面，则向着自由表面这一面推出的水量就小，它在单位时间内给予水的动量也小，因此这一面的压力就低，球形弹头的弹道就向着自由表面靠近。

关于球形弹头的跳弹问题，在拉姆绍尔发表本报告之前，已经有人研究。早在 1883 年埃·德·让几尔在它的简短的研究报告中就利用了在英国进行的很多射击实验资料，想

● 这时，雷诺数 $\frac{v d \rho}{\eta}$ 为 3.5×10^6 。阻力 $F = \chi_R \cdot \rho v^2 \cdot \pi a^2$ 时，阻力系数 $\chi_R = 1.52$ 。

定量地处理这个问题。例如，资料中介绍，以 455 米/秒的初速向水平方向射击直径为 16 厘米的球形弹头时，平均跳弹 22 次后到达 2470 米的距离处。这时，球形弹头浸在水中的深度无论如何也不到 2 厘米（直径的 $1/8$ ）。假如跳弹角比平均为 6° 的跳弹临界入射角大，则其差值很小，只能以分计算。这与后面拉姆绍尔用直径为该球 $1/15$ 的球形弹头所做的实验得到的结果完全吻合。

关于球形弹头的跳弹，情况就是如此，其机理可以认为是解决了。

§2 平 弹 头

为了减小空气阻力，可使用尖头的普通枪弹（或炮弹），弹头触水时也会跳弹，这是众所周知的。这种尖弹头很不实用，例如，不能用炮弹打击象潜艇那样的水下目标。因此，



图1-6 惠氏标准弹头

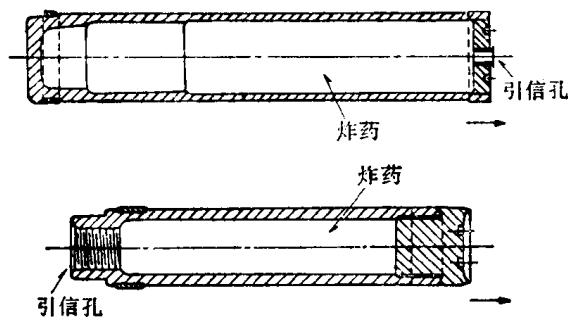


图1-7 攻潜用的平弹头

就提出这样的问题：有没有触水后就潜入水中的弹形？很久以前就考虑过平弹头，它的弹尖不是尖的，而是平的。

例如，在特·福·弗里曼特尔^[6]的著作中记载着知名的约·惠特沃思先生^①用图 1-6 所示的那种弹头击穿过水中船体的事例。早在第一次世界大战末期，1918 年 2 月的《科学美国人》^[6]杂志的扉页就报道发明了潜入水中的炸弹，从而减小了来自潜艇的威胁。其弹形是很秘密的，估计一定是平头弹。在三年后的 1921 年发行的教科书《海军军械》^[7]中的“水中射击”标题下提出了这样的方案，即用图 1-7 的平弹头作为攻潜用的弹头，为了减小这种弹头在空气中的阻力，弹头装一锥形整流罩，击水时，整流罩脱落。

这样，虽然知道了平弹头在水面和水中具有特殊的性能，但对其力学原理，以及为攻击水中目标应采用的弹尖平面直径与弹径的相互关系还没有进行系统的研究。

本研究的目的，就是解释高速投射体在水中运动的各种现象并解答实用上的各种问题。

在下面第二章中，首先通过实验探索普通尖弹头的跳弹机理。在第三章里，研究平头的圆柱形弹头，即弹尖平面和弹头底面直径相同的平弹头的跳弹问题，发现它与尖弹头的性质完全相反。接着，第四章介绍介于前二者之间的情况，即以小弹尖平面面积的平弹头作为研究对象，发现了跳弹临界入射角为 $1^\circ 20'$ 能在水中几乎以直线运动的弹形，并探索了其原理。在第五章里，对各种形状弹头的侵彻深度，即对作用在弹头上的阻力进行了系统的测定和分析，认为第四章介绍的平弹头的侵彻距离最深。

① 英国的机械师（1803～1887年）。

第二章 尖弹头在水面的跳弹

为了研究弹尖大体是尖的、最普通的步枪弹头在水面的跳弹现象，需测定入射角和跳弹角的关系、入射角和跳弹方向的关系、弹头在水中运动的弹道以及弹头的姿态等，并根据测定结果加以说明。与下一章的平弹头相比，这种形状的弹头叫做尖弹头。

§1 实验装置和方法

1. 枪

实验用的是三八式步枪。枪膛内有四条缠度 $\odot$ 为 $5^{\circ}50'$ 的右旋膛线，阳线 $\odot$ 的内径为6.50毫米，阴线 $\odot$ 的内径为6.65毫米。若弹头在枪膛内不打滑，则射出的弹头转速由缠度确定，在枪口附近每向前20.4厘米（弹径的30.7倍）向右旋转一周。

2. 弹头和装药量

图2-1给出了弹头各部分的尺寸。它与三八式步枪制式弹头的形状和大小完全相同，只是全部由黄铜造的。因此，它比制式弹头的质量（9克）稍小，平均为7.306克，每个弹头的质量标准误差为0.022克。

如图所示，求出的质心位置距弹头底面12.8毫米。经计算，弹轴的回转惯性矩和通过质心、与弹轴垂直的轴的回转惯性矩分别为

$$A = 0.360 \text{ 克} \cdot \text{厘米}^2$$

$$B = 4.66 \text{ 克} \cdot \text{厘米}^2$$

弹的固定装药量为2.040克。为了使弹头入水速度尽可能地一致，每发弹的装药量（用化学天平测量）是一定的（精确到毫克）。而且，每射击一次，枪膛要用油洗一次，擦拭后的枪膛其发射条件不变。射击速度约为800米/秒（参见第五章§1.5）。

3. 实验装置

图2-2是实验装置的侧视图。T是水箱，其内侧尺寸长为1.30米，宽为0.60米，高为0.70米。实验时，水箱里灌满清洁的水，然后以一定流量慢慢地往里注水，直至溢出，使水面保持一定的高度。

在水箱上架有两根梁，其上装有很多测量弹道用的木架。中间的 D_1 、 D_2 …… D_{10} 等是

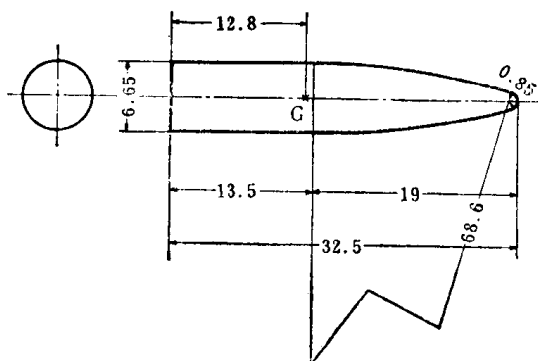


图2-1 与制式弹头形状相同的黄铜弹头

- 即膛线相对枪身轴的倾斜角度。
- 即膛线内侧高的部分。
- 即膛线底部。

为研究水中运动而张挂铅丝用的木框，根据情况，可放置 5~12 个。

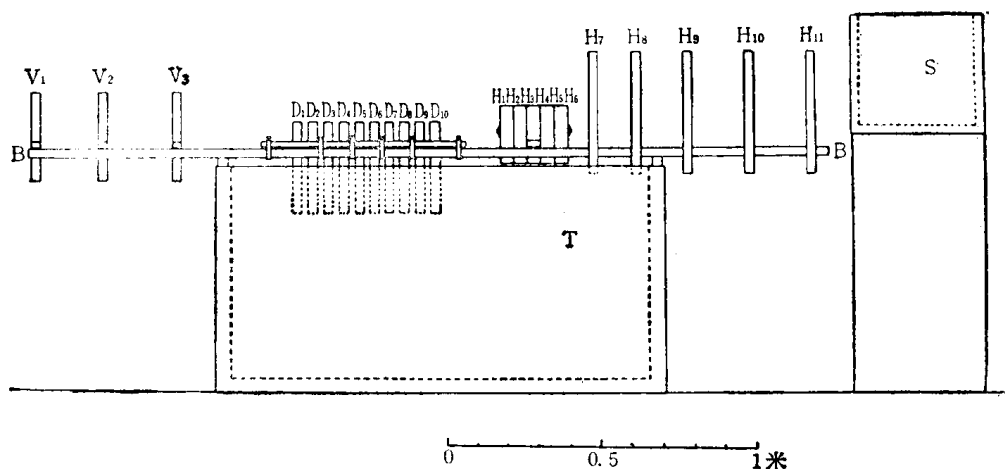


图2-2 实验水箱 SI

前面的木架 V_1 、 V_2 、 V_3 ，用于研究入射角和入水前弹轴是否倾斜；后面的木架 H_1 、 H_2 …… H_{11} ，用于研究跳弹后的运动。每个木架上用别针固定厚度为 0.4 毫米的白吸墨纸，用水准仪使其保持铅直。为了在不与水面接触的纸面上标出距水面的高度，在橡胶管的前端装上内径为 4.1 毫米的玻璃管，根据毛细现象用虹吸管进行 6.1 毫米的修正。图中的 S 为灌了水的木箱，水中浸有席子，以使跳弹后被接住的弹头不变形。枪口在图上的左上方，距 V_1 3 米，距水面入射点 4 米。

4. 水中运动的测定

正确测定水中运动，会遇到种种困难。首先，测量方法本身不应对水的运动和弹头的运动有影响，水的运动也不应扰乱记录下来的弹头弹道，而且，必须能够正确记录读数。为具备这些条件，拉姆绍尔^[8]用张挂铅丝的木框。这里也使用相同的装置（见图 2-3）。用螺钉将横木 L_1 、 L_2 固定在木框 R_1 、 R_2 上，横木上有槽，横木之间张挂了直径为 0.5 毫米的铅丝，其间隔为 5 毫米。

把木框固定在水箱的梁上，慢慢地旋转螺钉 S_1 、 S_2 ，使其下端刚好与水面 WW 接触。当弹头射入水中时，若铅丝被击断，断铅丝将卷在上下横木上。挂铅丝的木框后面挡着厚纸板 K，其形状如图中虚线所示。从水中取出木框后，将卷在横木上的铅丝拉开可见，被击断的铅丝的两个断头位置，在 S_1 、 S_2 的下端。

按照这个简单的方法，能够相当精确地测定运动情况。从结果来看，质心位置的误差不超过 ± 0.5 毫米。由于弹头突然击入，未被弹头击断的铅丝，因阻挡水的激烈运动而被拉长，有时，20 厘米的铅丝可拉长 1.5 厘米。与此相比，被击断的铅丝成为自由状态，不会阻挡水的激烈运动，因而，断铅丝不会被拉长。一根铅丝的两个断端的间距，与弹头通过的宽度大致相同。

跳弹后，木箱 S（见图 2-2）接住的弹头其表面如图 2-4 所示，有铅丝划的深痕（由于铅丝被打断，对弹头运动产生一定的影响。但是，由铅丝的惯性引起的作用力，虽然在局部的位置上较大，但从铅丝和弹头质量之比——大都为 1/300 来看，不会对整个弹头的运动有多大的影响）。然而从划痕的位置、形状来看，当然可以判断弹头穿过时其弹尖在

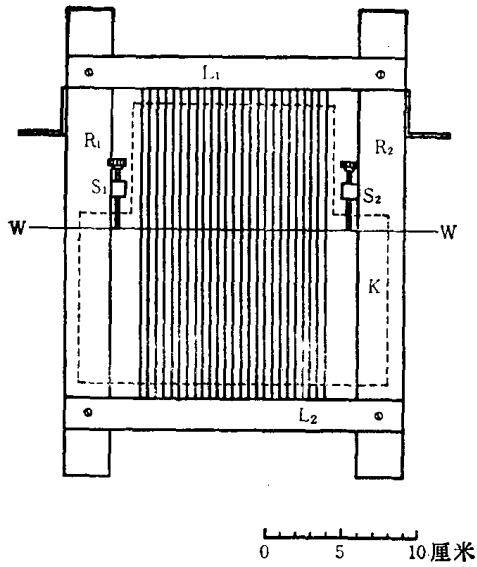
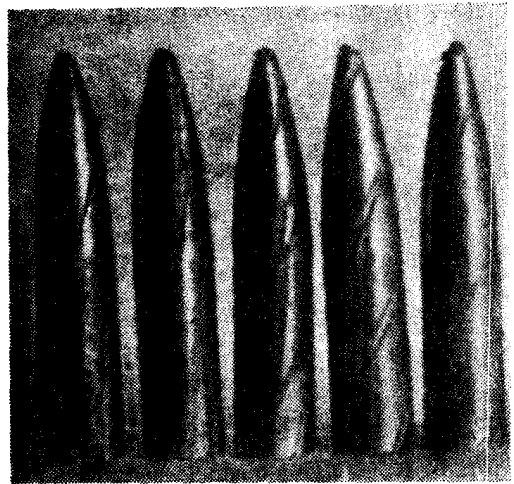


图2-3 张挂铅丝的木框



照片是实物的一倍半

图2-4 在弹头表面留下的划痕(蓝色的铅附在金黄色的弹头上)

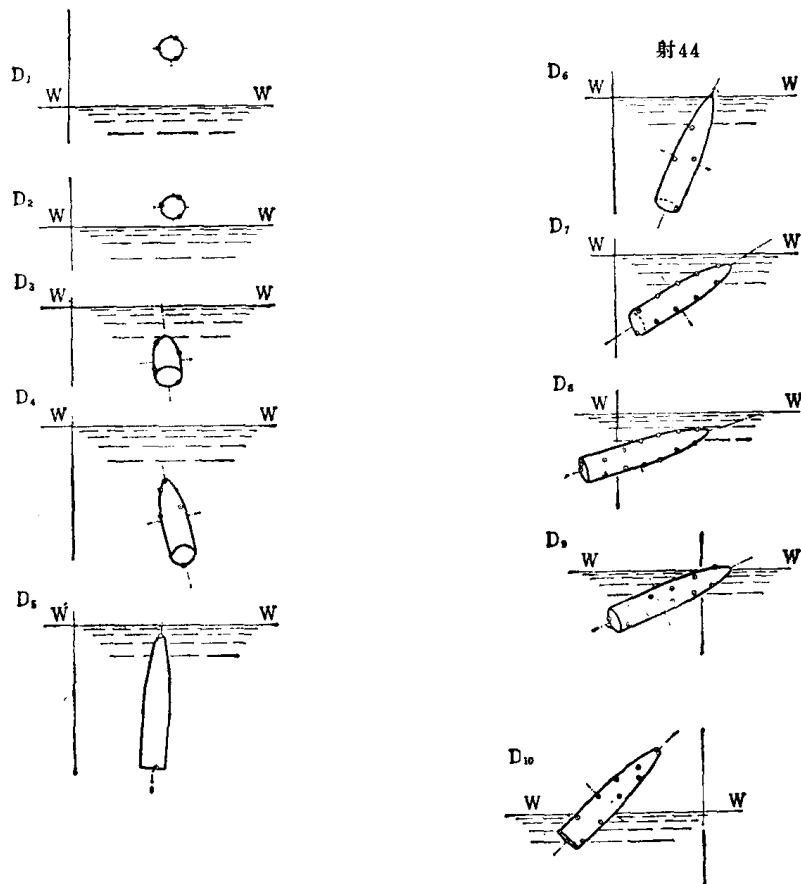


图2-5 求穿过木框的弹头质心位置和姿态一例

前还是在后。通过铅丝断头位置的相互比较，甚至连表示弹头在水中姿态的进动角、攻角（参见本节“进动角”、“攻角”两段及图2-7）都能相当精确地测定出来。不同的角度，其精确度也不同，求出的攻角误差约为 $\pm 5^\circ$ ，进动角误差约为 $\pm 1^\circ$ 。图2-5是依次穿过张挂

铅丝的木框 $D_1 \sim D_{10}$ 时所测定的弹头姿态一例。可以看到, 弹头穿过 D_5 时方向正横; 而穿过 D_6 、 D_7 时, 由于弹头底面有划痕, 可断定弹头底面在前, 反向穿过铅丝。

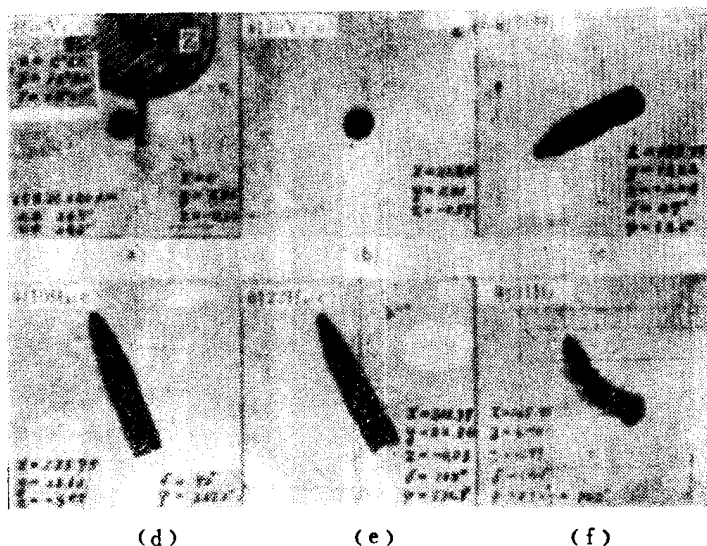


图2-6 在空气中的木架 V、H 纸上留下的穿孔

另外, 如下所述, 根据铅丝对弹头的划痕, 还可了解角速度的问题。

5. 入水前、跳弹后弹头在空气中运动的测定

图 2-6 为在纸上穿孔的典型照片。(a)、(b) 为入水前的穿孔, (a) 中的黑圆圈 Z (参见图 2-2) 为木架 V 纸上标出的射击瞄准点。穿孔通常约在瞄准点下 1 厘米。(c)、(d)、(e)、(f) 分别为跳弹后的穿孔, (c) 为弹尖在前, (d) 为正横方向, (e)、(f) 为弹尖在后。

下面介绍根据纸面上的穿孔测定运动诸元的方法及其精度。

(1) 弹道与水面的夹角

由于纸面都保持铅直状态, 所以根据两张纸面上弹头质心穿过点与水面的高度差 H , 就能求出弹道与水面的夹角 α

$$\tan \alpha = \frac{H}{X} \quad (2-1)$$

式中 X 为两张纸的间距。

为求 α 的误差, 将此式微分, 由于 α 角在这里不超过 15° , 若与 1 相比可省略 $2/3\alpha^2$, 则得

$$\frac{d\alpha}{\alpha} \approx \frac{dH}{H} - \frac{dX}{X} \quad (2-2)$$

如果只测定 H 、 X 的长度, 而 dH/H 为 $1/1000$, dX/X 为 $1/500$, 即使 α 为最大角 15° , 误差也不超过 $\pm 2'$ 。但是, 由于要在纸面上标出距水面的高度, 并且要求出穿孔内的质心穿过点, 所以就会产生 (与 α 角的大小几乎无关的) 另外的误差。为了尽量精确地测定质心穿过点, 用透明的小方格纸记下以各种不同角度 (每次差 1°) 穿过纸面时的穿孔形状, 根据这些穿孔形状来判断质心穿过点。

入水前的穿孔通常近似于圆, 误差不大。 H 的误差 (包括水面高度的测定误差) 不超过 ± 0.3 毫米, 从式 (2-1)、(2-2) 得出

$$d\alpha \approx \frac{dH}{X} = 2.2' \quad (X = 460 \text{ 毫米})$$

入射角即使约为最大的 15° ，总的误差也不超过 $\pm 5'$ 。

跳弹后的穿孔，在线速度大的情况下，穿孔的位置很清楚，其误差和入射角的误差几乎相同。但是，入射角超过 7° ，弹头的水中弹道变长，跳弹速度变小时，穿孔的位置就不清楚。 H 的最大误差为 ± 1 毫米。换算成角度则为

$$d\alpha \approx \frac{dH}{X} = 8.6' \quad (X = 400 \text{ 毫米})$$

因此，当入射角约为 6° 时，跳弹角的误差应是 $\pm 5'$ ；而入射角约为 12° 时，跳弹角的误差应不超过 $\pm 10'$ 。

(2) 攻角

如图 2-7(a) 所示，攻角是弹道切线和弹轴间的夹角。图 2-7(b) 为弹头在纸上的穿孔， L 为测定的长轴长度。该夹角为 150° 左右时，每差 1° ，长度 L 变化 0.5 毫米，因此，要以不大于 $1'$ 的精度来测定。但是，夹角为 85° 左右时，角度变化不会引起 L 的变化。因此，这时应根据弹头底部穿孔形状测量夹角[见图 2-6(d)、(e)]，然而有 $\pm 5^\circ$ 的误差(严格地说，确定攻角的这种方法，只是在质心轨迹垂直穿过纸面时才正确。一般来说，质心轨迹不与纸面垂直。因此，准确地说，穿孔投影在质心轨迹垂直的面上时，才应用上面这种方法。但是，因质心轨迹相对纸面法线倾斜至多不超过 15° ，故上述误差至多不超过 3%)。

即使穿孔的长度相等时，也有两种情况：一种弹尖在前，一种弹尖在后。到底是哪一种情况，根据下面的方法判定。因为弹头旋转时要产生进动，所以从最初碰到纸面到穿孔完毕，弹轴的进动角在变化，在极端的情况下，会形成如图 2-6(f) 那样的弯孔。那不是因为弹头弯曲了(拿跳弹后的弹头来看就清楚了)，而是因为弹头底部先穿入纸面，弹尖后出来，弹轴顺时针转动的结果。针纸的木架是前后排列的，根据依次不同的穿孔就可看出进动角的变化方向。因此就可以断定弹尖在前还是在后。

(3) 进动角

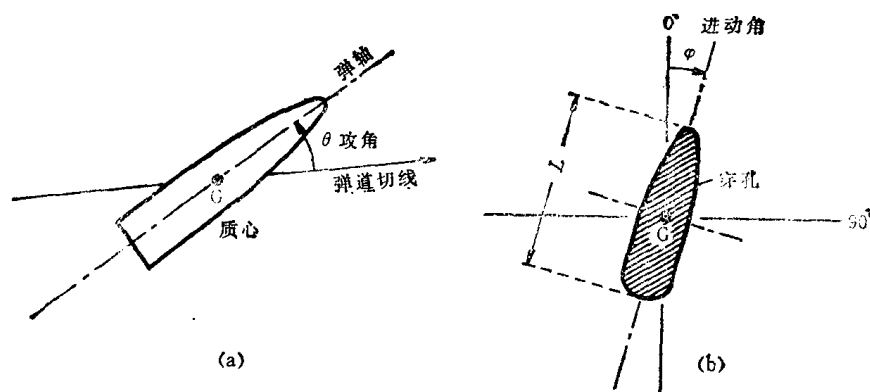


图2-7 根据穿孔测定的质心位置 G 、攻角 θ 和进动角 φ

- 表示刚体运动的欧拉角 θ 。
- 表示刚体运动的欧拉角 φ 。

如图2-7(b)所示,进动角是穿孔的长轴与铅直线间的夹角。由于是从后面看弹头的,故可把顺时针方向作为正方向用量角器测定,其精度可达 $\pm 0.5^\circ$ 。测量进动角与攻角一样,应根据在与质心轨迹垂直的面上的穿孔形状求出。但是不这样做误差也很小。

§2 结果与分析

1. 入射角和跳弹角

用各种入射射击角时的跳弹角的测定值示于附表1-1中。若用图表示,见图2-8所示,横坐标为入射角,纵坐标为跳弹角。图中“ $\odot$ ”表示在水中放置挂铅丝的木框时的值;“ $\circ$ ”表示在水中不放置挂铅丝的木框时的值。

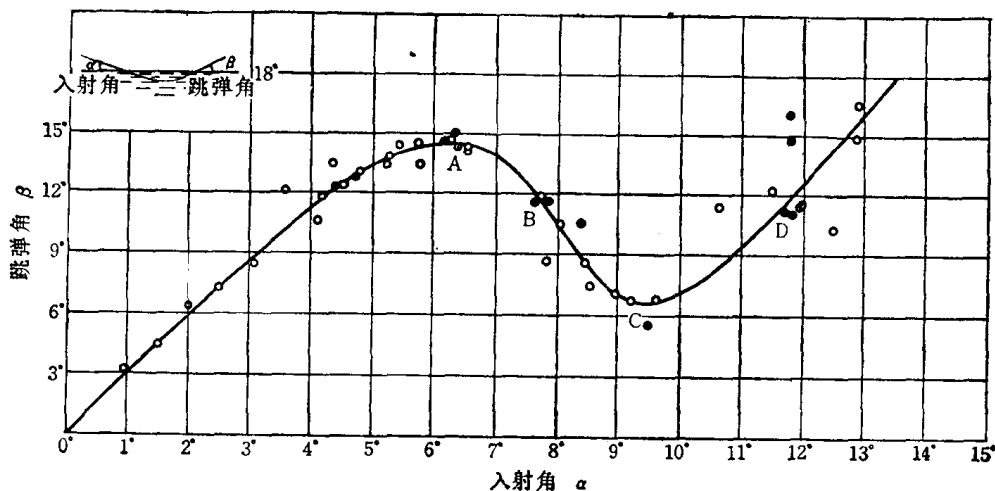


图2-8 入射角与跳弹角的关系(尖弹头)

入射角小时,跳弹角大致是入射角的3倍。应该注意到,与球相比,跳弹角变得很大。入射角为 $6^\circ 20'$ 时,跳弹角最大;入射角继续增大,跳弹角就减小;当入射角为 $9^\circ 30'$ 时,跳弹角变得最小;在入射角大于 $9^\circ 30'$ 时,跳弹角又变大。

在最后一段,点上下分布得很零乱,这可能是因为在弹头入水的瞬间,弹轴的倾斜虽然极微小,但由于弹头在水中的弹道长,倾斜的大小和方向将对其后的弹轴运动产生很大的影响,使弹头的弹道发生变化,跳弹后的角度也发生变化。

当以 $10^\circ 27'$ 入射角射击一发枪弹时,弹头在后面的木架H的纸上没有留下任何痕迹,因而也就没有产生跳弹,反倒正好落在水箱前面的木架V₁(见图2-2)的正下方,弹尖向下,象陀螺那样吱吱地旋转起来。在射击后约20秒时倒下来停止转动。这是一个特例。

2. 跳弹临界入射角

从表2-1可见,弹头的跳弹临界入射角为 $14^\circ 20'$ 。入射角大于该角时,射击的弹头就不跳弹。另外,以接近此临界入射角射击时,弹头跳弹明显地向左偏。

3. 跳弹方向

各种不同入射角时的跳弹方向的测定值示于附表1中。这里的所谓跳弹方向角,就是指包含入射弹道的铅直面与包含跳弹弹道的铅直面之间的夹角,向右为正,向左为负,见图2-9,入射角为纵坐标,跳弹方向角为横坐标。

表 2-1

射击序号	入 射 角 (度) (分)	跳弹或潜入
48	13 31	跳弹
49	13 41	跳弹
50	14 12	跳弹
51	14 14	跳弹
52	14 24	潜入
53	14 24	潜入
54	15 26	潜入

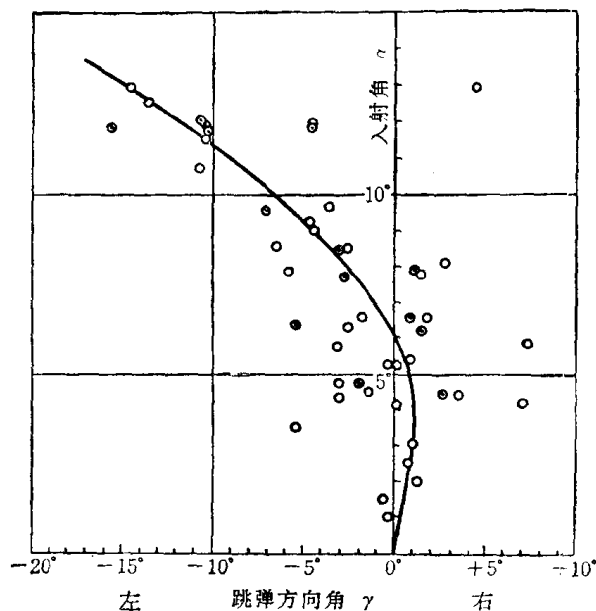


图2-9 入射角与跳弹方向角的关系 (尖弹头)

一发发地射击时, 弹头跳弹方向是很零乱的。但是, 总的来看, 入射角小时向右跳弹, 入射角约大于 $6^{\circ}20'$ 时向左跳弹。

值得注意的是在从右向左移时跳弹角达到最大值时的这个入射角。

4. 在水中的质心轨迹及弹轴运动

跳弹角和跳弹方向与入射角的关系上面已经介绍了。为了了解它们与水中运动的关系, 特别需要选择跳弹角的最大点、最小点及其前后的点 (图 2-8 的 A、B、C、D 四点), 以研究质心在水中的轨迹和弹轴运动。在图 2-8 中, A、B、C、D 各点所示之弹头在水中的轨迹和弹轴运动见图 2-10~2-13。从以相同的入射角射击时的各种结果可见, 水中轨迹的长度和潜入深度等是有差别的。入射角小时差别比较小, 但入射角大时差别相当大。在 D 的情况下, 以几乎相同的入射角所作的五次射击的结果见图 2-15~2-19 所示。

它们的测定值见附表 2~9。为方便起见, 用坐标轴表示, 取 x 轴为射向水平轴, y 轴为铅直轴, z 轴为与它们垂直的横向水平轴。

各图中, (a) 表示水中质心轨迹在铅直面上的投影, (b) 表示水中质心轨迹在水平面上的投影。但是, 为了明确地表示每个轨迹的形状, 纵坐标的比例为横坐标的 5 倍, 因此, 实际上轨迹形状在横坐标方向上放大了 4 倍。(c) 表示弹轴运动在与弹道切线垂直面上的投影。弹头质心位于原点时, 从后看, 可以看作是弹头前端的轨迹。纵坐标为铅直轴, 横坐标为水平轴, 都取攻角的比例。

另外, 为一目了然地看出各种情况下的运动状态, 根据图 2-10~2-13 的曲线, 可以读出弹道各点的诸元, 通过计算, 可用图示法表示投影在铅直面上的弹头姿态 (见图 2-14)。

下面用图说明 A、B、C、D 各种情况的运动。

A (见图 2-10) 在该入射角条件下, 跳弹角大致最大。(a)、(b)、(c) 图上标有相同数字的点分别为弹道同一点诸值的实验值。

比较图 (a) 和 (c) 可见, 弹头入水时最初是慢慢地, 后来是突然地抬起头来, 点 2 稍前一些的点是弹道的最低点 (质心在水面下 9 毫米处), 这时弹轴的倾斜度为 25° 。大约从这里开始轨迹突然上升。

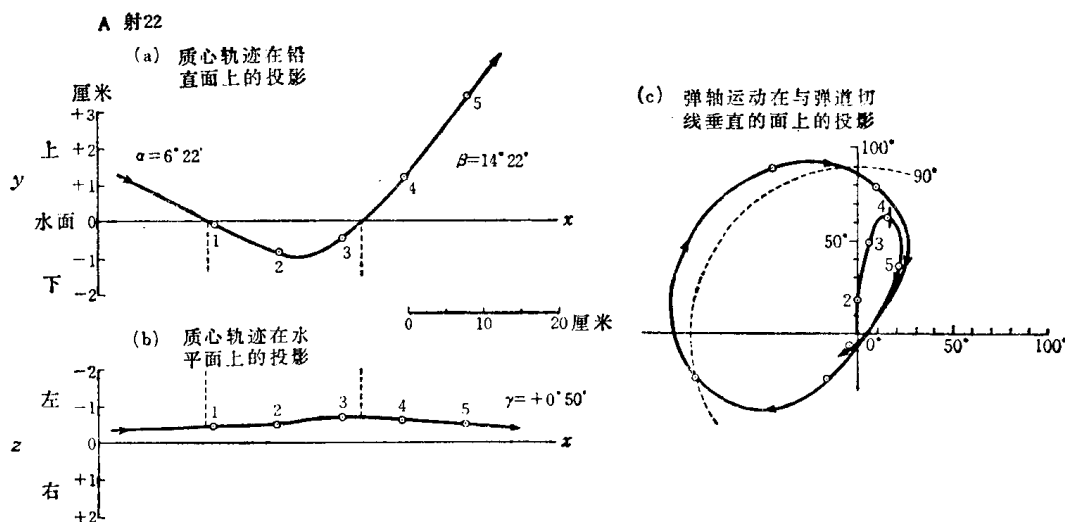


图2-10 (a)、(b) 质心的轨迹 (纵坐标的比例为横坐标的 5 倍); (c) 弹轴运动 入射角 $6^\circ 22'$

当然, 这里有一个向上的作用力, 这个力的大小, 可根据其附近质心轨迹的曲率计算出来。若估计其平均速度约为 500 米/秒, 则通过计算可知, 这个力实际上是作用在弹头上的重力的 40000 倍。这种巨大的作用力就是对弹头倾斜起主要作用的升力。这可从后面的各种情况看得很清楚。

质心在点“3”和“4”之间时, 弹头出水, 但还有 $1/2$ 的弹头在水中。到点“4”时才完全出水。这时与轨迹相对应的弹轴的倾斜度为 65° , 见图 (c)。此倾斜度小于 90° , 而这时的跳弹角变得非常大, 这两点应该同时考虑, 引起注意。

弹头一出水, 便在攻角约为 0° 的地方通过, 这是很清楚的, 而后, 反复作大的进动和章动运动。图 (c) 中虚线所示的圆弧表示攻角为 90° 的圆的一部分, 弹头在此圆外运动时, 弹尖在后。

参见质心轨迹在水平面上的投影图 (b), 可清楚地看到, 点“3”附近向右弯得很厉害。从图 (c) 看, 在此点上弹尖向着右前方。这个向右旋转的弹头在水中逐渐抬起头来, 同时弹尖必定向右 (如图所示), 这是因为有使弹头旋转的力在作用, 这从下面的说明可以清楚。弹尖向右运动时, 质心向右偏, 弹头这样出水, 就向右跳弹。图2-15所示之跳弹方向的测定结果果然如此。

B (见图2-11) 在此入射角条件下, 跳弹角比最大跳弹角要小。与 A 的情况相比, 水中轨迹变长, 因而, 弹轴在水中的运动范围也变大, 在水中的弹轴倾斜度超过了 65° 。而在点“6”处, 倾斜度达到 90° , 这时弹头完全以正横方向前进, 直到弹头出水, 倾斜度变得更大。到了点“7”处, 弹尖才向后偏。图 (a) 的点“7”附近, 轨迹稍微向下倾。当弹头底面向前、弹尖向后运动时, 质心轨迹向下弯, 因此跳弹角比 A 的情况要小。跳弹角达到最大值后渐渐变小, 出水时弹轴相对运动方向的倾斜度超过 90° 。