

doi: 10.7690/bgzdh.2013.03.021

# 半约束期弹丸膛内运动姿态测试方法

郭泽成, 陈明, 张飞猛

(解放军陆军军官学院研究生管理大队 1 队, 合肥 230031)

**摘要:** 针对目前国内外膛内弹丸姿态研究现状, 对半约束期弹丸姿态变化的实时测试理论和方法进行研究。介绍当前国内外火炮弹丸膛内运动姿态的测量方法, 包括高速摄影法、激光光学杠杆法和磁传感器法等, 比较各种方法的优缺点, 并总结研究新的火炮弹丸膛内运动姿态测量方法对于火炮设计和提高火炮射击精度的重要意义。该研究可为提高火炮射击精度、支撑发射动力学的实验研究提供参考。

**关键词:** 半约束期; 姿态测试; 发射动力; 射击精度

**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Measurement of In-Bore Projectile Motion Posture in Half Constraint Region

Guo Zecheng, Chen Ming, Zhang Feimeng

(No. 1 Administrant Brigade of Postgraduate, Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Based on domestic and foreign measurement for the motion posture of in-bore projectile currently, make the research on real time testing theory and method of in-bore projectile motion posture in half constraint region. Introduce current domestic and foreign in-bore projectile motion posture measurement methods, including high speed camera method, laser optics lever method and magnetism sensor method and so on. Comparing advantages and disadvantages of each method, summarize the important meaning of new in-bore projectile motion posture measurement method for artillery design and firing precision improvement. The research provides reference for improving artillery firing precision, and supporting firing dynamics test.

**Key words:** half constraint region; posture measurement; emission power; firing precision

### 0 引言

炮弹出炮口时的运动状态及以后的姿态变化, 直接关系到炮弹的飞行稳定性、弹道散布及射击精度, 而炮弹膛内运动规律决定了炮弹出炮口运动状态和起始扰动, 决定了炮弹自由飞行的起始条件。对炮弹膛内运动规律及相关影响因素的研究, 一直受到国内外学者的高度重视, 已经发展成为一个相对独立、非常活跃的研究领域——发射动力学。

国外对发射动力学的研究已经有三十多年的历史。为了测量发射过程中炮身和弹丸的复杂运动及其相互关联, 研制了各种各样光学的、电学的或光电结合的测量系统, 已经在外弹道(如弹丸的飞行速度、章动角、旋转速度等)、终点弹道的有关参数测量(如弹着点坐标)理论与方法方面取得了长足进步。尽管膛内弹丸-火炮动力学已被公认为对火炮的射击精度有一定影响, 尤其是对于直瞄射击武器系统的射击精度具有很大影响, 然而国内外有关这方面的工作还非常缺乏。这是由于身管的遮蔽和测试环境非常恶劣, 对测试方式提出了极高的要求, 因此测量难度很大, 目前国内外针对膛内弹丸姿态的研究工作主要是通过数值模拟进行的<sup>[1-5]</sup>; 因此, 笔

者立足于我国的技术、经济条件, 开展了半约束期弹丸姿态变化的实时测试理论和方法研究。

### 1 国内外研究现状与分析

炮弹发射过程是一个复杂的瞬态运动过程, 膛内弹丸在毫秒级的时间内由静止状态加速至数百米每秒甚至达到上千米每秒。由于人眼的视觉暂留效应, 限制了人们观察和分析高速运动过程的能力。为了能够获取出膛弹丸这类高速运动物体的高速运动过程, 目前主要的测试手段包括采用高速摄影测量、基于激光的光学杠杆测量法以及其他测量方法。

#### 1.1 高速摄影测量法

高速摄影综合使用光、机、电、光电传感器与计算机等一系列技术。常用的高速摄影方式主要有间歇式、光学补偿式和转镜式 3 种。

间歇式高速相机在拍摄过程中, 胶片作间歇运动, 要承受很大的动力载荷, 同时由于胶片的机械强度有限, 因此间歇式相机的拍摄速度有限, 一般仅能达到 102 幅/s。

光学补偿式相机的底片连续高速移动, 通过光学元件的作用, 使光学系统所成图像也作匀速运动,

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40876095)

作者简介: 郭泽成(1983-), 男, 山东人, 博士, 从事武器系统总体设计研究。

并与胶片运动速度相同, 造成图像在胶片上的相对静止。典型的光学补偿式相机是狭缝高速摄影。狭缝摄影技术是 20 世纪 50 年代发展起来的一种高速摄影技术, 它在兵器系统的科研生产测试中居重要的位置, 特别是在飞行弹丸的初始段弹道参数测试中, 它不仅能定性地观察飞行中弹丸的外部特征, 如发动机点火、弹托飞离、尾翼张开等情况, 也可以定量地对飞行中弹丸的外弹道参数, 如飞行速度、转速、章动角、章动周期等参数进行记录和测量, 因此已经广泛用于导弹、火箭、炮弹的靶场测试中。然而, 对于光学补偿式高速摄影来说, 由于底片从静止加速到一定的高速移动状态需要耗费大量片长, 拍摄速度有限, 通常在 105 幅/s。另外, 在常规武器试验中, 目前还是采用胶片式狭缝摄像机将弹丸飞行过程拍摄下来, 然后对胶片进行人工定性和定量的计算与分析。这一过程费时费力, 而且对仪器操作者以及胶片判读人员的实际经验要求较高, 已难以满足现代武器装备研制的需要。

对于转镜式相机来说, 底片布置在大体圆形的底片架上, 通过高速旋转反射镜使得光束在底片上成像并扫描, 由于底片是静止的, 所以这种方式拍摄速度可以达到 106~107 幅/s。例如, 中国工程物理研究院研制的 FJZ-1000 型超高速分幅相机最高摄影频率可以达到  $1 \times 10^7$  幅/s, 是目前国内在用转镜式相机中具有最高技术性能的设备。

以上 3 种高速摄影方法均涉及到使用几何光学原理及高速动作的机械结构实现对快速现象观测记录的设备, 因此又统称为光机式高速相机。

光机式高速相机在 20 世纪 70 年代末已经发展得十分成熟。由于这类相机的拍摄数度都分别受到它们所使用的机构和材料的限制, 所以自 20 世纪 80 年代以来这 3 类相机的技术就没有显著的进步。

随着光电子技术、光电成像等技术和工艺的不断发展与成熟, 逐渐出现了使用电光、光电效应以及脉冲电光源的电子类高速相机。电子类高速相机又可以分为闪光高速摄影、高速视频录像以及变像管高速摄影相机。在闪光高速摄影中最具代表性的是脉冲 X 光摄影, 由于它具有极强的穿透能力, 既可以拍摄某些利用可见光无法直接观察、记录的快速现象, 如炮膛内弹丸的运动等, 也可以避开烟雾、火光的干扰, 因此常用于研究弹丸在内弹道及中间弹道运动的情形。

高速视频录像出现于 20 世纪 70 年代末, 最初使用摄像管和高速录像带。此后, 特种高帧频光电成像器件逐步取代了摄像管, 超大容量集成电路存

储芯片代替了磁带, 使得拍摄速度、存储速度与存储容量均有大幅提高。例如, 美国 Cooke 公司的 pco 1200 hs 高速摄像机在分辨率为  $144 \times 128$  时帧速率可以达到 56 300 帧/s, Phantom v12.1 高速摄像机在分辨率为  $128 \times 8$  像素情况下拍摄速率甚至可以达到  $1 \times 10^6$  帧/s。据 2009 年 5 月份国际权威期刊《自然》报道, 美国加州大学洛杉矶分校的研究人员通过采用全新的光学成像技术, 使得摄像机拍摄速率达到了  $6 \times 10^6$  帧/s, 是目前世界上最快的摄像机。尽管能够达到如此高的拍摄速率, 然而目前的高速摄像机空间分辨率还十分有限, 难以满足高精度测量要求, 且价格不菲。

另外, 随着微电子技术和高灵敏光电成像技术的发展, 出现了超高速照相技术。目前的超高速照相相机曝光时间已能达到纳秒级, 例如, 由北京创美伟业科技有限公司代理的 Dicam pro 高速相机和约克科技公司代理的 SIR2 超高速弹道相机曝光时间均可达到 2~5 ns, 武汉中创联达科技有限公司代理的 XXRapidFrame 超高速相机最高拍摄速度甚至达到了 100 亿帧/s, 是目前国内外曝光时间、帧间时间最快的超高速相机。然而, 上述超高速照相机仅能保存几帧或十几帧图像, 无法完整记录从弹丸在整个半约束期内姿态变化的全部影像数据, 因此所获取的数据量太少, 难以用于后续的分析与处理。

## 1.2 基于激光光学杠杆测量法

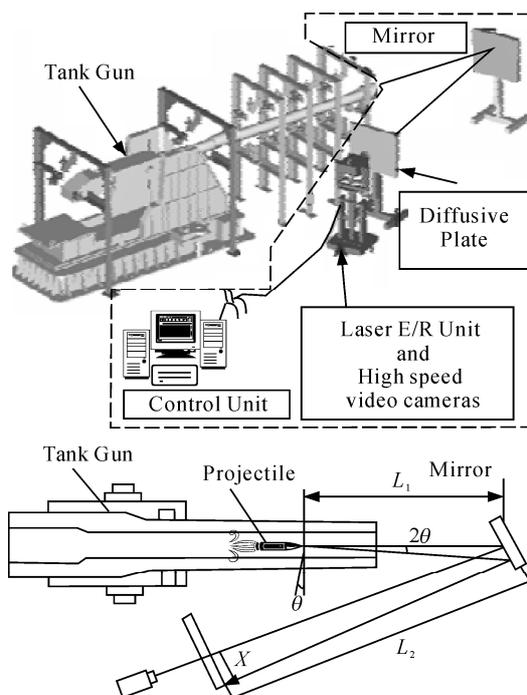


图 1 日本 Nasuno 等人提出的弹丸膛内姿态测量装置

由几何光学知识可知, 对于平面镜来说, 当镜

面绕入射点旋转  $\theta$  角度时, 反射光线将相对于原反射光线偏转  $2\theta$  角度, 可见平面镜光路具有角度放大功能。利用这样一种特性可以将微小的角度变化进行放大, 从而达到高精度测量的目的。

借助激光良好的单色性和方向性, 采用光学杠杆原理对炮弹膛内的运动姿态实施测量被认为是一种有效的测量手段。隶属于日本防卫厅技术研究与开发研究所弹道研究部的 Nasuno 等人在综合弹道模拟器这个项目研究中, 提出了如图 1 所示的膛内弹丸姿态测量装置。该装置主要由参考激光束、反射镜、弹载反射镜、毛玻璃像屏和位置敏感元件 PSD 或高速摄像机组成。

日本九州大学的 Nagayama 等人在研究气体自动枪中高速弹丸的加速过程中, 也提出了基于光学杠杆的测量方案, 不过他们采用的是激光全息成像方法来记录加速的过程。

在国内, 相关单位也基于光学杠杆原理, 提出了如图 2 所示的弹丸膛内姿态测量方案。

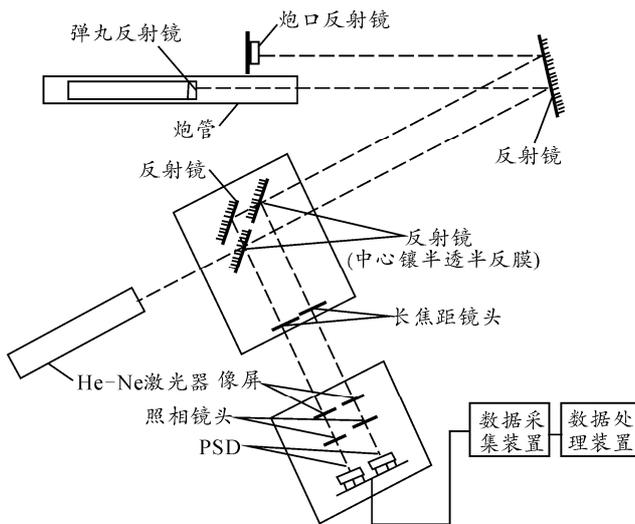


图 2 弹丸膛内姿态测量方案 I

由于该系统是针对中小口径火炮设计的原理样机, 在保证量程的条件下容许的光程较短, 抗冲击波振动性能较低, 不能适应大口径火炮野外试验弹丸膛内运动姿态的测量的要求。为了满足大口径火炮系统型号研究的需要, 提出了如图 3 所示的火炮弹丸膛内运动姿态测试方案。其工作原理为: 整个测试系统由两路测试装置构成, 一路用来测量膛内弹丸的运动姿态, 另一路用来测量炮口角振动量。两路测量装置的光学系统基本相同, 它们分别由半导体激光器、带中心小孔的抛物面反射镜、折反镜、测量反射镜、毛玻璃像屏、二次成像透镜组和 PSD 光敏器件构成。半导体激光器安装在抛物面反射镜

反射面中央, 毛玻璃像屏安装在抛物面反射镜前下方的焦平面上, 二次成像透镜组安装在像屏后方, PSD 光敏面安装在二次成像透镜组后, 其安装位置使得像屏与 PSD 光敏面互为共轭成像关系。第 2 路测量装置将折反镜架设于炮口正前方, 测量反射镜安装在弹丸顶部的假引信体上, 并使其法线与弹丸轴线重合。从第 1 种装置的半导体激光器发射出来的激光穿过抛物面反射镜中心的小孔后, 通过炮口前方的折反镜反射后折向膛内, 与膛轴线重合, 射向弹丸顶部安装的测量反射镜。从弹头反射镜反射回来的激光再经折反镜二次折反到抛物面反射镜上, 经抛物面反射镜聚焦成一个光斑并成像在接收装置前方的毛玻璃像屏上, 再经二次成像镜头将像屏上的光斑二次成像为一个很小的光点, 并作用于 PSD 的光敏面上。通过 PSD 将光点的位置信号转换为电信号, 经放大处理后传送给数据采集装置。由数据采集装置将信号数据采集后存入电子盘, 并将寄存的数据传送到数据处理装置, 经数据处理后可得弹丸在膛内运动姿态和弹丸炮口起始扰动参量<sup>[6]</sup>。

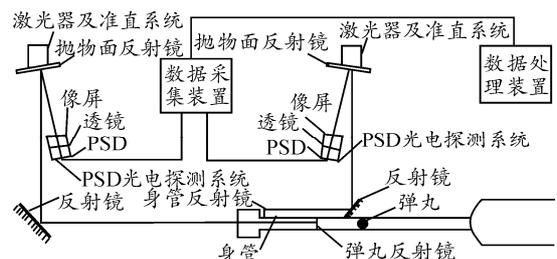


图 3 弹丸膛内姿态测量方案 II

采用光学杠杆原理测量弹丸膛内运动姿态主要存在以下优点:

- 1) 能够将弹丸攻角的微小变化放大成较大的线位移, 并便于记录, 设计足够大的聚光透镜焦距, 将会有很高的角灵敏度, 能满足测量炮弹膛内姿态角的要求;
- 2) 光学杠杆无惰性, 完全能够保证瞬态变化的同步测量, 不会产生滞后及畸变;
- 3) 弹上不需加传感器件, 只需安装一块平面反射镜即可, 不怕发射时的冲击影响。

另外, 上述测量方案采用了位置敏感传感器 PSD, 由于 PSD 器件是一种高灵敏度、高分辨率、快响应速度且适配电路简单的一种半导体位置敏感探测器, 目前的制作工艺能够达到很高的测量精度 ( $< \mu\text{m}$ ) 和很短的响应时间 ( $< \mu\text{s}$ ), 如果再加上高速率的 A/D 采样电路和高速存储设备, 将能够满足实时测量的要求。

但是, 上述测量方案还存在一些不足:

1) 如果弹丸顶部反射镜的镜面太小, 可能无法接收和返回激光信号, 此时必须使得激光束光斑面积足够大, 从而降低了光束质量, 并且 PSD 得到的是光斑能量质心的位置, 因此传输过程中, 如果光束质量较差, 激光束会发生强烈的光束漂移和散射等作用, 会改变光斑的质心分布, 从而影响测量的精度。

2) 如果弹丸顶部反射镜的镜面较大, 将会影响到弹丸在高速运动过程中的空气动力学特性, 从而使得测量出来的参数与真实弹丸出现偏差, 给测量结果的分析与利用带来了难度; 另外, 如果镜面较大, 在弹丸作高速运动过程中将容易使弹丸反射镜产生形变, 从而改变了反射光线的方向, 使得反射光线的角位移不能反映出弹丸本体的真实位移, 导致测量精度下降。

3) 火炮发射后, 弹丸在膛内做高速运动时压缩空气, 使局部空气的折射率发生改变, 加上火炮发射中产生的烟尘颗粒, 都会使从炮口前方反射镜进入到炮膛内的光线尚未到达弹丸顶部反射镜就由于后向散射、反射作用而提前折回, 导致得到的数据并非弹丸姿态变化的真实数据。

4) 由于 PSD 得到的光束位置是局部坐标系下的位移量, 因此在每次测量时, 均必须对不同位置的 PSD 进行精确的坐标统一, 否则无法反映出弹轴相对于火炮身管中轴线的变化量; 另外, 火炮在反射过程中产生的震动对于不同点的影响不相同, 因此这也会影响 PSD 的测量精度。

5) 由于需要在统一的时间系下计算出弹轴相对于火炮身管中轴线的变化量, 因此必须对分布配置的 PSD 传感器进行精确同步控制, 否则各自得到的数据难以进行数据关联, 从而得不到弹丸中轴线相对于火炮身管中轴线在不同测量时刻的变化量。

6) 上述方案并没有考虑如何抑制环境杂散光(如太阳光正好照射到炮口), 火炮发射过程中产生的火光等背景干扰光的影响, 而这些光一旦进入到 PSD 光敏面, 将叠加错误的位移信号, 从而影响到测量的精度。

### 1.3 其他的测量方法

除了上述 2 种测试手段外, 采用雷达探测技术测量弹丸的飞行参数也是较为常用的手段。美国陆军弹道研究实验室采用 FM/FM 无线电遥测技术测量弹丸的内弹道特性; 美国也有专利报道采用角速度传感器测量外弹道弹丸的运动参数, 或者射频姿态测量系统来跟踪高速飞行弹丸并确定其瞬间姿态, 包括章动角、偏航角等参数; 美国陆军研究实验室则提出一种基于弹载磁性传感器和太阳指示传

感器系统对飞行中弹丸的角度进行连续测量的方案, 它通过获得弹丸相对于地球磁场和太阳场的姿态和旋转速度, 最后反演出弹丸自身的运动姿态; 而法国学者 Changey 则提出一种仅用磁力计传感器来测量弹丸姿态和位置的方法; 美国俄勒冈州立大学通过在炮口诱导一个已知的空间不断发生变化的磁场, 利用从弹丸上加载的一系列磁力传感器的读数, 通过求解非线性方程组来确定弹丸的全状态。

## 2 结论

通过前面的分析可知, 高速摄影直接拍摄法由于高速摄影技术空间分辨率有限, 在测量精度上难以满足要求, 所以在现有技术条件下可行的途径是采用光学杠杆测试法。尽管基于光学杠杆原理的测试方法具有很多优点, 例如能够将弹丸微小的角位移量进行放大, 光学杠杆无惰性等, 但这种测试方法还存在一定的不足, 从而影响到对弹丸姿态进行测量的精度。

由于炮弹发射过程是一个复杂的瞬态运动过程, 离开对大量的实验现象、运动参数(如发射过程身管的振动, 弹丸的位移、攻角和转动等)的仔细观察、精确测量及对实验数据的科学分析, 要对发射动力学进行理论研究, 并得出普遍有用的规律是很难的。然而, 在炮弹发射过程中, 伴随着高温、高压、高速、高频振动及强声、强光等物理和化学瞬变现象, 环境条件恶劣, 给炮弹运动参数的测量带来困难。特别是在测量炮弹膛内的角运动规律时, 由于弹丸在很短的时间内由静止加速至最大速度, 同时与膛壁发生剧烈的接触碰撞, 导致弹丸进行角度很小的高频摆动; 因此, 对测试系统的频响、精度以及测试方式提出了极高的要求。为此, 克服火炮发射时产生的剧烈火光、冲击波和烟尘等的干扰, 形成高精度、高可靠性的弹丸姿态测试方法, 对于火炮设计和提高火炮射击精度具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Fuller PW. Measurement of in bore yaw projectiles[C]. 5th International Symposium on Ballistics, 1980: 92-96.
- [2] 李观涛, 任国民, 余劲天, 等. 弹丸膛内运动姿态实时测量系统[J]. 弹道学报, 1997, 6(2): 54-57.
- [3] 陆文广, 芮苒亭, 顾金良, 等. 弹丸膛内姿态与纵向运动测试与分析[J]. 兵工学报, 2006, 1(1): 149-153.
- [4] 芮苒亭, 陆毓琪, 陆文广, 等. 自行炮发射动力学研究[J]. 兵工学报, 2008, 8(增刊): 38-40.
- [5] 丁建春. 弹丸膛内动力分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2001.
- [6] 陈新, 曹从咏, 刘英舜. 弹丸初速膛口激光实时测量系统研究[J]. 弹道学报, 2002, 12(4): 84-86.