



火炮多体动力学相似模型分析

冯金富 高树滋

(南京理工大学机械学院, 南京 210094)

摘要 本文给出了火炮发射运动的多刚体系统动力学模型, 运用拉格朗日方法建立了动力学方程; 应用相似理论建立了原型和模型的动力相似关系, 通过数值计算、实弹试验验证了相似模型的正确性

关键词 火炮, 动力学, 相似模型

1 引言

火炮系统的射击过程是一个动态过程, 一般认为野战火炮按照其结构特点, 有大架、上架、摇架、后坐部分等组成^[1]。火炮发射时, 有些部件会做大的相对运动(后坐复进运动)^[2], 有些部件由于存在配合间隙并受复杂外力的作用, 会发生相对微小运动, 这些运动包括部件本身的刚体运动和受力变形的弹性运动, 火炮本身也会由于受力作用而发生位移, 产生“跳动”出现射击稳定性问题, 影响射击精度和下一发射时的姿态。因此研究火炮发射的动力现象, 对火炮的论证、设计、使用与维护具有重要的意义。

研制大口径火炮 相应的实验是必不可少的, 传统的方法是在原型炮上进行的, 受到研制周期、经费的制约; 而从相似与模化^[3]的基本原理出发, 探讨火炮性能的动力相似^[4]方法, 即“小炮代大炮”问题, 作为数学模拟的补充, 集上述特点于一身, 显示出了强大的生命力。据俄罗斯专家介绍, 俄罗斯在这一领域已取得了突破性进展, 形成了一套独立的火炮设计规范, 而国内尚未见这方面的技术报道。作者以 7.62mm 步枪为模型, QX-37mm 野炮为原型, 作了有益的尝试, 建立了其动力相似关系, 得到了理论与实验结果相吻合的结论。随着我国对火炮物理模拟研究工作的进一步发展, 火炮物理模拟的研究有着广阔的应用前景。

2 动力学模型和方程

通常将火炮简化为多个刚体, 建立多刚体系统动力学模型来模拟火炮的发射运动。处理多刚体系统, 一般用矢量力学的牛顿-欧拉方法或分析力学

的拉格朗日方法。拉格朗日法可避开不做功的运动副、理想约束反力, 未知变量较少, 只需对系统总动能求导, 即可得动力学方程。

2.1 力学模型

根据火炮结构特点, 将火炮分为 3 个刚体: 炮架(包括上、下架, 大架, 坐盘, 运动体等), 摇架及后坐, 建立一个 5 自由度火炮多刚体发射动力学模型如图 1 所示。

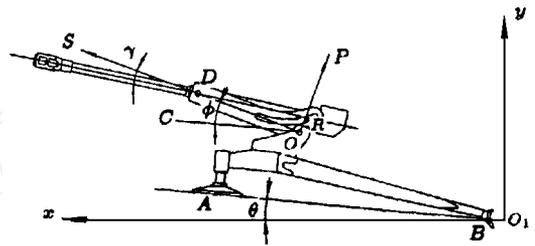


图 1 原型炮力学模型

各广义坐标分别为: x 为炮架在驻锄支点 B 处相对地面的水平位移; y 为炮架在驻锄支点 B 处相对地面的垂直位移; θ 为炮架相对驻锄支点 B 的转角; φ 为摇架相对炮架部分绕耳轴 O 的转角; s 为后坐质心相对摇架固联参考系 SO_P 的 s 方向位移; p 为后坐质心相对摇架固联参考系 SO_P 的 p 方向位移; γ 为后坐相对摇架固联参考系的转角。

由于后坐相对摇架只有一个自由度, 由运动学可知, 有约束方程, 其 Pfaff 形式为

$$\left. \begin{aligned} A_{1s}\dot{s} + A_{1p}\dot{p} + A_{1\gamma}\dot{\gamma} + A_{1\theta} &= 0 \\ A_{2s}\dot{s} + A_{2p}\dot{p} + A_{2\gamma}\dot{\gamma} + A_{2\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2.2 运动微分方程

由于自由度数为 5, 广义坐标数为 7, 可以直接用分析力学的 Routh 方程建立动力学方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{R}}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial q_j} = Q_j + \sum_{s=1}^2 \lambda A_{sj} \quad (j = 1, 2, \dots, 7) \quad (2)$$

联立式 (1)、(2) 可得到如下形式的方程组

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{19} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{91} & \dots & A_{99} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_9 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $[\ddot{q}] = [s, p, \gamma, \varphi, \theta, x, y]^T$, $[\lambda] = [\lambda_1, \lambda_2, \dots]^T$, B_1 到 B_9 分别为各广义坐标的广义力与推导产生的速度二次项的合并项 求解式 (3) 的方程组即可获得各广义坐标的信息

3 动力学相似关系

火炮机械系统是由炮弹、炮身、反后坐装置、平衡机、高低方向机、架体等子系统组成的具有整体功能和综合行为的统一集合体 系统相似性分析, 离不开子系统的相似性研究 火炮动力系统相似性研究是由内弹道相似提供动力源, 其它子系统相似产生动力响应的综合 如果动力特性、参数不匹配, 系统相似就无序, 难以找出内在的规律, 而考虑所有的相似法则, 必然导致一比一的相似, 亦即模型和原型相同, 无实际价值, 理论上转型为数学模拟 因此, 系统的近似模化显得尤为重要

3.1 近似模化

首先约定, 用一个“代表值”代表所有相同物理意义的物量 对于某一物理量 q , 用 q 作为原型现象中该物理量的代表值, 用 q 作为模型现象中相应物理量的代表值, 而用 C_q 表示 q 与 q 之比, 即物理量 q 的相似比

$$C_q = \frac{q}{q}$$

系统动力学相似, 几何相似是前提, 但对复杂的气动机械系统而言是可望不可及的 因此我们在结构上 (模型炮) 采取了必要的措施 例如为保证原型与模型炮动力源重要参量最大膛压 P_{n1} 和弹丸初速 v_0 的相似, 火药药形采用了多孔火药换算成带状药相当厚度的手段, 以及截短身管、改变装药重量, 修正弹丸质量等措施; 针对反后坐装置的结构特点及工程加工的可行性, 引入了方向性量纲分析法, 改变驻退液等方法以保证后坐阻力的相似要求; 通过在模型炮上加弹性力和配重的方法以满足火炮机械系统的相似要求 当然模型炮与原型炮具有相同的结构形式

要满足系统动力相似, 由公式 (3) 可知, 仅保

证各刚体质心位置、质量及转动惯量的相似是不够的, 这是因为式 (3) 中涉及到重力, 重力是质量与重力加速度之乘积, 其相似比与质量的相似比恒等, 而我们在建立内弹道相似准则时, 涉及了牛顿数、斯坦顿数、欧拉数、柯西数等主要物理法则; 在反后坐装置子系统相似研究中, 考察的是牛顿数、雷诺数、斯特劳哈尔数、欧拉数等主要物理法则 它们的一个共同特点是未涉及弗鲁德数, 其加速度的相似比为 $C_i^{-1} C_f C \varphi^{-1}$, 其中 C_i , C_f 及 $C \varphi$ 分别表示口径、火药力及次要功计算系数的相似比, 这就和火炮机械系统中重力加速度的相似比为 1 产生了矛盾 本文以式 (3) 为依据, 采用在全炮重心位置上人为地加入弹性力的方法, 变向性地改变了重力加速度, 有效地解决了大炮机械系统动力相似有悖的现象, 其模型炮的力学模型如图 2 所示

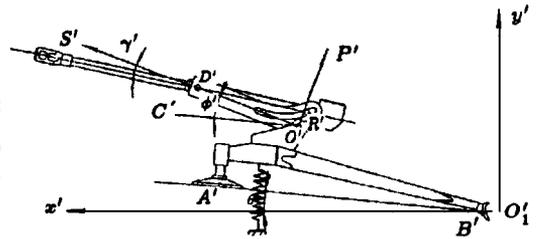


图 2 模型炮力学模型

值得一提的是原型与模型炮动力相似程度的好坏取决于弹性力的大小, 因此模型炮中弹簧的设计显得尤为重要 其设计准则是, 初力 P_{f0} 符合式 (4), 刚度较小 (刚度与全炮在重心位置上的跳动量的乘积为弹簧初力的 $1/20 \sim 1/50$)

$$P_{f0} = (C_i - 1) M g \quad (4)$$

式中, M 为模型炮质量, g 为重力加速度

3.2 相似公式

通过对原型和模型炮机械系统动力相似分析, 在内弹道, 反后坐装置物理模拟的基础上依据文献 [5] 中的“选定物理法则方式”, 可得出如下的相似关系

$$C_F = C_i^2 C_f C \varphi^{-1} \quad (5)$$

$$C_v = C_f^{1/2} C \varphi^{1/2} \quad (6)$$

$$C_t = C_i C_f^{-1/2} C \varphi^{1/2} \quad (7)$$

$$C_m = C_i^3 \quad (8)$$

$$C_p = C_f \quad (9)$$

$$C_k = C_i C_f C \varphi^{-1} \quad (10)$$

$$C_j = C_l^2 C_j^{1/2} C_\phi^{1/2} \quad (11)$$

式中, C_F 、 C_v 、 C_k 、 C_m 、 C_p 、 C_k 、 C_j 分别为原型和模型炮作用力、速度、时间、质量、压力、刚度以及跳高的相似比。有了上述相似关系, 我们就可以根据模型炮的试验值, 去揭示原型炮的内在规律。

4 数值仿真与试验结果分析

本文以 7.62mm 步枪为模型, QX-37 炮为原型作了相应的试验和数值分析。图 3、图 4、图 5 中虚线是以模型炮的实验结果为依据, 根据式 (5) ~

(11) 而得到的原型炮的驻锄轴向位移、驻锄径向位移、火炮跳高随时间变化的关系, 实线是原型炮的理论计算曲线。由于模型中人为地加上了弹簧力, 振频加快, 导致时间轴的收缩现象。图 6 是原型炮实测的后移-跳高关系。由模型预测的原型炮的最大跳动量为 24.8mm, 实测的原型炮最大跳动量为 24.6mm, 其相对误差仅为 0.8%。由此可见, 本文建立的多体动力学相似模型是正确的, 采用的方法不仅具有通用性, 而且具有重大的经济价值。

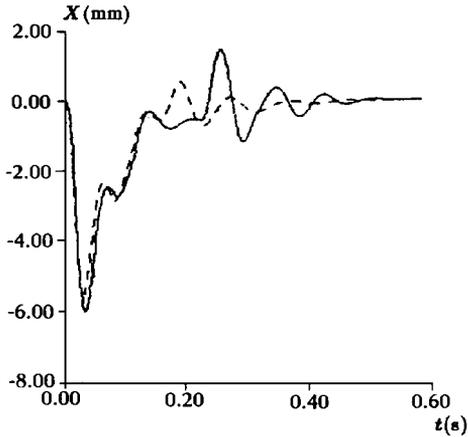


图 3 驻锄轴向位移-时间曲线

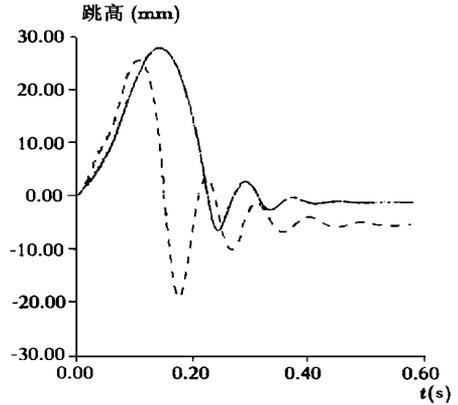


图 5 跳高-时间曲线

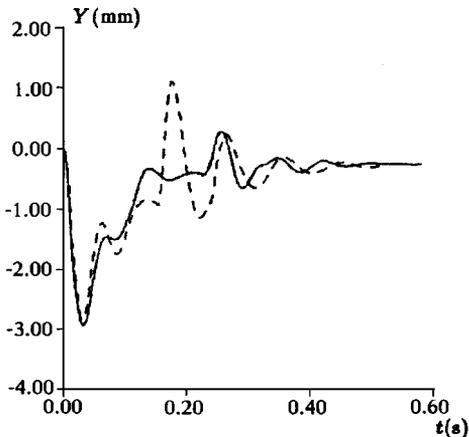


图 4 驻锄径向位移-时间曲线

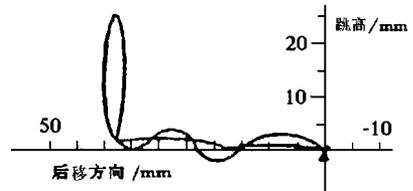


图 6 后移-跳高曲线

参 考 文 献

- 1 王靖君, 赫信鹏. 火炮概论. 北京: 国防工业出版社, 1992
- 2 何永. 火炮总体设计方法研究. 南京理工大学学位论文, 1995
- 3 周美立. 相似学. 北京: 中国科学技术出版社, 1993
- 4 周美立. 相似系统论. 北京: 科学技术文献出版社, 1994
- 5 江守一郎等. 模型实验的理论和应用. 北京: 科学出版社, 1984

(本文于 1996 年 3 月 12 日收到)

¹⁾ 国家自然科学基金资助项目