

doi: 10.7690/bgzd.2016.01.002

多联装高射速自动机后坐力特性分析

戴劲松, 战元国, 王茂森, 张明亮
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为对发射装置施加控制力矩从而提高射击精度, 建立多联装自动机系统的动力学模型。主要研究在内外能源共同作用下的多联自动系统后坐力动态响应情况, 分别对两门转管自动机在击发位置相同、相差 30° 和 60° 3 种模式进行连发射击动力学仿真, 并通过分析对比 3 种模式下的后坐力及扭转力矩变化趋势。结果表明: 抵消扭转力矩和降低后坐力都会提高多联装自动机系统的射击精度, 该分析可为多联装自动机系统的设计奠定基础。

关键词: 自动机; 发射装置; 动力学仿真; 后坐力; 扭转力矩

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Recoil Characteristic Analysis of Multiple Automatic Mechanism with High Rate of Fire

Dai Jinsong, Zhan Yuanguo, Wang Maosen, Zhang Mingliang
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to exert control torque upon the launch device to improve the firing accuracy, the dynamics model of multiple automat system was set up by means of correlative modeling software. This paper mainly studies the recoil dynamic response of multiple automat system under the combined effect of the internal and external energy. The bursts of fire dynamic simulation of 3 kinds of patterns on two Gatling guns as such as the same firing positing, difference of 30° or 60° were performed respectively. And compared with recoil and torsion torque variation trend of 3 kinds of pattern. Simulation results indicate that offsetting torque and reducing the recoil can improve the firing accuracy of multiple automat system with future league gives reference to the design of automation system.

Keywords: automatic mechanism; the launch device; dynamic simulation; recoil; deflection torque

0 引言

随着反舰导弹、作战飞机性能的提高, 一般的武器系统已经不能满足舰艇的末端防空要求。为了更有效地提高水面舰艇的防空反导性能, 尤其是低空、超低空, 单纯依靠转管自动机已经不能满足现代化的实战要求; 因此, 亟需进一步提高小口径自动机的射速。对于舰艇来说, 多联装高射速自动机系统可以成倍提高射速; 但是联装炮容易横摆影响射击精度, 这就需要对发射装置施加控制力矩来提高射击精度。

对于联装武器系统, 安装方式有对于同一个安装平台相互独立, 射击状态互不影响, 或者联动安装于同一武器安装平台, 射击状态彼此影响^[1]。这 2 种安装方式的发射装置受力是不一样的, 并且由于两门自动机击发位置的差异, 在射击过程中发射装置的受力也不相同。总体来说, 联动安装, 其发射装置的受力和稳定性要优于射击时彼此独立的安装方式。笔者主要分析两门自动机联动时, 击发位置相同也就是同时击发, 击发位置相差一定角度,

后坐力对比变化趋势, 两门自动机后坐力差异引起的偏转力矩变化趋势。

1 多联装高射速自动机系统工作原理分析

多联装高射速自动机系统采用两门某型耦合源转管自动机组装而成。耦合能源转管自动机是在舰用某型内能源转管自动机的基础上改进而成, 由火药气体和电机耦合驱动。耦合能源转管自动机靠电机启动。电机带动身管组件旋转并使其达到一定转速, 再通过离合器带动供弹机开始供输弹, 完成炮弹的击发, 然后火药气体能量通过导气孔进入导气室, 并与活塞等相互作用驱动自动机作循环运动。当然, 电机也参与自动机的循环运动, 控制自动机射速, 从而达到内外能源耦合的作用效果。

对于多联装高射速自动机系统, 双自动机共用一个电机首发启动。区别在于两门转管自动机炮管的击发位置。击发位置相同时, 发射装置所受后坐力比较大, 几乎不受偏转力矩; 或者刚好相差一定角度。由于两门自动机在同一个电机带动下耦合, 因而两门自动机炮管交替在击发位置的相位差始终

收稿日期: 2015-08-16; 修回日期: 2015-09-10

基金项目: 国防基础科研计划(A0820132003)

作者简介: 戴劲松(1968—), 男, 重庆人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 从事火炮自动机技术、多能量场复杂系统动态仿真研究。

保持一致。在这种情况下, 两门自动机由于击发位置不同, 产生后坐力大小也有差异, 可以使后坐力大为降低, 但是自然而然会产生偏转力矩使发射装置左右横摆, 对发射装置施加控制力矩是必要的。

2 多联装高射速自动机系统动力学模型

自动机的工作特点^[2]是自动机相关构件承受膛内高温、高压火药的作用, 通过相接触两构件之间的碰撞来传递动力和运动, 故自动机系统具有较强的动态特性, 构件间的运动既有平动又有转动, 还存在一般的空间运动, 并且两构件间还有摩擦。笔者就内外能源耦合转管自动机的工作特点, 在考虑电机的动特性条件下, 对自动机系统进行动力学分析, 并作出下列假设: 研究自动机的运动规律, 自动机各构件弹性很小, 可将自动机构件看作刚性构件, 因此, 应用多刚体动力学来研究自动机动力学问题; 应用集中于若干点的质点代替原有构件, 不考虑构件本身尺寸大小, 但是要注意保证替换前后运动特性彼此接近。

2.1 自动机微分方程

基础构件星形体相对于自动机后坐部分的角位移为 θ , 后坐部分的位移为 y ; 所以有 $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 表示星形体的角速度和角加速度, \dot{y} 和 \ddot{y} 表示后坐部分运动的速度和加速度。

2.1.1 自动机启动过程微分方程

自动机启动时, 自动机的运动过程中没有炮弹的运动, 也不存在火药气体的作用, 后坐部分也没有进行后坐运动; 所以, 自动机启动时的运动微分方程为

$$\left[J_0 + 4J_5 + J_7 \frac{k_7^2}{\eta_7} + \sum_{j=1}^4 \left(m_{5j} \frac{k_{5j}^2}{\eta_{5j}} + J_{8j} \frac{k_{8j}^2}{\eta_{8j}} \right) + m_3 \frac{k_3^2}{\eta_3} \right] \ddot{\theta} + \sum_{j=1}^4 \left(m_{5j} \frac{k_{5j} \dot{k}_{5j}}{\eta_{5j}} + m_{5j} R_2 f \frac{k_{5j}}{\eta_{5j}} + J_{8j} \frac{k_{8j} \dot{k}_{8j}}{\eta_{8j}} \right) + m_3 \frac{k_3 \dot{k}_3}{\eta_3} = T。$$

式中 T 为自动机的启动转矩。

2.1.2 自动机耦合驱动射击过程微分方程

$$J_{h1} = \sum_{j=1}^4 (m_{2j} \frac{k_{2j}^2}{\eta_{2j}} + m_{5j} \frac{k_{5j}^2}{\eta_{5j}} + m_{6j} \frac{k_{6j}^2}{\eta_{6j}} + J_{8j} \frac{k_{8j}^2}{\eta_{8j}});$$

$$J_{h2} =$$

$$\sum_{j=1}^4 \left(m_{2j} \frac{k_{2j} \dot{k}_{2j}}{\eta_{2j}} + m_{5j} \frac{k_{5j} \dot{k}_{5j}}{\eta_{5j}} + m_{5j} R_2 f \frac{k_{5j}}{\eta_{5j}} + m_{6j} \frac{k_{6j} \dot{k}_{6j}}{\eta_{6j}} + J_{8j} \frac{k_{8j} \dot{k}_{8j}}{\eta_{8j}} \right);$$

$$\left(J_0 + 4J_5 + J_7 \frac{k_7^2}{\eta_7} + J_{h1} + m_3 \frac{k_3^2}{\eta_3} \right) \ddot{\theta} + \left(\alpha_3 m_3 \frac{k_3}{\eta_3} + \sum_{j=1}^4 \alpha_{5j} m_{5j} \frac{k_{5j}}{\eta_{5j}} \right) \dot{y} = T + \sum_{j=1}^4 \left(p_q A_h \frac{k_{3j}}{\eta_{3j}} - F_{6j} \frac{k_{5j}}{\eta_{5j}} \right) - \left(J_{h2} + m_3 \frac{k_3 k_3}{\eta_3} \right) \dot{\theta}^2; \left(\beta_3 m_3 k_3 + \sum_{j=1}^4 \beta_{5j} m_{5j} k_{5j} \right) \ddot{\theta} + \left(M + \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq 4,5}}^9 m_i + \sum_{j=1}^4 m_j \right) \ddot{y} = \sum_{j=1}^4 p_j S - (y_0 - y) K_y - F_M - \left(\sum_{j=1}^4 m_{5j} k_{5j}' + m_3 k_3' \right) \dot{\theta}^2。$$

式中: J_0 为基础构件转动惯量; J_5 为炮闩绕星形体回转轴的转动惯量; R_2 为炮闩质心到星形体回转轴距离; m_{2j} 为拨弹轮上递次进入运动的炮弹质量; m_3 为活塞组质量; m_{5j} 为炮闩组质量; m_{6j} 为递次进入抛壳运动弹壳的质量; J_7 为进弹机构旋转部分的转动惯量; J_{8j} 为闩体绕自身转轴的转动惯量; p_q 为气室压力; T 为电机提供的力矩; A_h 为气室内气体作用活塞的面积; F_{6j} 为抽壳力; M 为炮箱质量; $p_j S$ 为膛底压力; y_0 为缓冲簧预压量; K_y 为缓冲簧刚度; F_M 为炮箱受到的摩擦力; α_i 、 β_i 为影响系数。

2.2 多联装自动机系统虚拟样机的建立

2.2.1 建立模型

根据转管自动机各零件结构参数, 利用相关三维软件建立该系统三维模型。由于转管自动机零件比较多, 结构比较复杂; 因此需要按照自动机各部件运动情况, 对自动机进行一定程度的结构简化。例如: 不影响总体结构运动以及固定不动的螺栓、螺母等, 不影响仿真结果的次要零件可直接忽略不装配; 模型中相对静止的零部件可以合并为一个零件。建模完成后将装配完成的联装自动机系统模型导出为 Parasolid 文件, 以便于将装配好的模型导入动力学分析软件。

2.2.2 添加运动副和约束

虽然模型经过简化后, 自动机结构大大简化, 但是多联装自动机系统依然结构复杂, 零件繁多。为了便于运动副和约束的添加及修改, 根据转管自动机各部分间运动关系和功能, 将模型分为炮闩、旋转体组件(包括身管、星形体、炮尾等)、活塞组件、输弹和供弹等部分。多联装自动机系统又可以分为电机组件、传动机构组件、转管自动机系统组件以及架体 4 大部分。根据系统中各构件间的运动

关系，在各个零件上施加运动副和约束，相对移动的零件之间添加滑移副，相对转动的零件之间施加旋转副，相对固定的部件之间施加固定约束，最后施加各构件间的碰撞约束。

2.2.3 施加载荷

自动机工作时受力非常复杂，主要受到膛压合力、弹簧力以及接触力等载荷的作用。

1) 接触力。

接触力是一种只有在两构件发生碰撞时才会产生的特殊力，转管自动机很多构件间的运动及动力传递都是通过碰撞来传递；因此在模型中，很多构件间不能通过简单的转动副和移动副来实现，需要通过添加 solid to solid 接触力来实现。

相互接触构件间的接触力采用该动力学软件自带的 IMPACT 函数^[3-4]来计算，IMPACT 函数表示为

$$\text{IMPACT}(x, x_1, k, e, c_{\max}, d) = \begin{cases} \max(0, k(x_1 - x)^n - \\ \text{STEP}(x, x_1 - d, c_{\max}, x_1, 0)x) & x < x_1 \\ 0 & x \geq x_1 \end{cases}$$

式中：STEP(x, x_0, h_0, x_2, h_2) 为广义阶跃函数； x 为位移变量，为 2 个碰撞构件之间的距离； x_1 为触发距离，为接触力可以作用的距离； k 为刚度系数； e 为刚度力系数； c_{\max} 为阻尼系数； d 为插入深度，碰撞构件间重叠深度小于 d 时阻尼为 0，大于 d 时阻尼力开始作用。

2) 弹簧力。

转管自动机中的弹簧元件全都用该动力学软件里的弹簧阻尼器来替代，弹簧阻尼器的刚度、预压力和预压缩量根据自动机内部的弹簧特性来确定，阻尼量保留默认。

自动机的缓冲簧是影响自动机工作可靠性和稳定性的重要部件。由于缓冲簧为环簧，压缩过程和复进过程中弹簧的刚度不同；因此在仿真中需要设置传感器通过后坐速度方向来确定缓冲簧工作状态，然后依据缓冲簧的工作状态确定它的刚度值。

3) 膛压合力。

按照自动机实际结构参数和火药参数，应用火炮内弹道理论，根据膛压和弹丸相关的微分方程，采用 Matlab 语言编写内弹道程序，求解得到如图 1 所示的膛压-时间曲线，然后用膛压乘以膛面积计算求得如图 2 所示的膛压合力-时间曲线。在该动力学软件中，采用施加单向力的方式将膛压合力施加到后坐部分，其表达式为 CUBSPL(time,0,Spline_n,

0), time 代表仿真所用时间，Spline_n 代表膛压合力随时间的变化曲线。

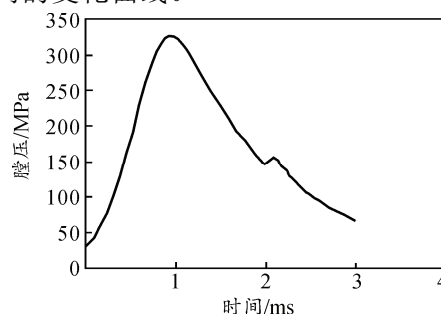


图 1 膛压-时间

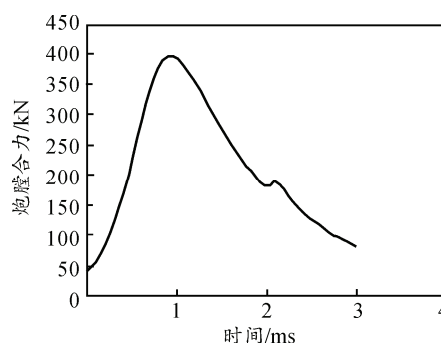


图 2 膛压合力-时间

4) 气室压力。

内外能源耦合转管自动机实现自动射击的一部分动力来自导气孔导入气室的高温高压火药气体，气室压力在一定程度上影响了自动机的运动情况。笔者采用布拉文经验公式^[5]计算导气室压力，其经验公式为

$$p_{dq} = p_{\phi} e^{-(t-t_g)/b} \left[1 - e^{-\alpha(t-t_g)/b} \right]$$

式中： p_{dq} 为导气室压力； p_{ϕ} 为弹丸通过导气室时膛内火药气体压力； e 为自然对数底； b 为时间参数； α 为结构参数； t_g 为弹丸经过导气孔的时间； t 为燃气压力作用时间。

经过计算可得导气室压力-时间曲线如图 3。

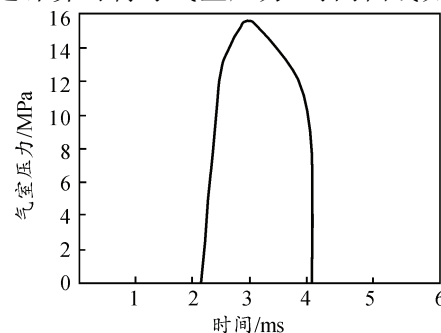


图 3 气室压力-时间

3 仿真结果与分析

笔者以正在研制的多联装高射速自动机系统为

研究对象, 研究其在不同工况下, 60°射角 8 连发射击时系统的动态响应状况。

对于单个内外能源耦合转管自动机射击时, 其后坐力变化曲线如图 4 所示。由图可知, 后坐力最大值为 40.58 kN。多联装自动机系统耦合射击时, 两门自动机击发位置相同的情况下, 如图 5 所示, 后坐力最大值为 80 kN 左右, 由于是两门炮同时击发; 因此其扭转力矩永远为 0, 也就是此时不会产生扭转力矩。两门自动机击发位置不同的情况下, 限于篇幅问题, 笔者只研究了击发位置相差 30°和 60°的情况。两门自动机击发位置相差 30°时, 如图 6 所示, 后坐力最大值为 43.8 kN, 比击发位置相同时几乎降低了接近 50%。而对于此时架体所受到的扭转力矩, 如图 7 所示, 扭转力矩是大幅波动的, 扭转力矩的波动会引起架体的摇摆, 为了防止架体的摇摆可以采用电机对发射装置施加与其相反的力矩。两门自动机击发位置相差 60°时, 如图 8 所示, 后坐力最大值为 54.1 kN, 比击发位置相同时降低了 33%。在这种情况下的扭转力矩如图 9 所示, 对比 2 种情况下的扭转力矩情况, 60°时波动幅度比 30°时要小得多, 而 30°时扭转力矩峰值要比 60°时小得多。抵消扭转力矩和降低后坐力都会提高多联装自动机系统的射击精度。

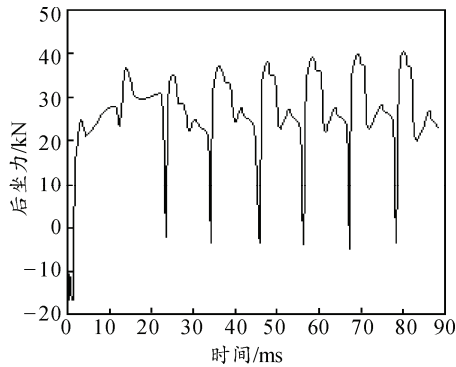


图 4 单自动机后坐力-时间曲线

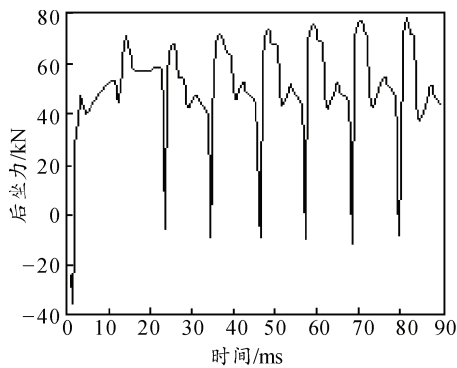


图 5 两门自动机击发位置相同时后坐力-时间曲线

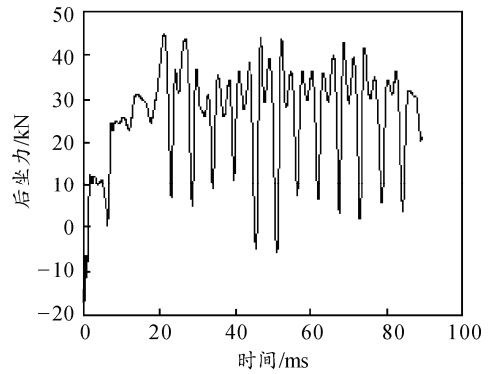


图 6 击发位置相差 30°时后坐力-时间曲线

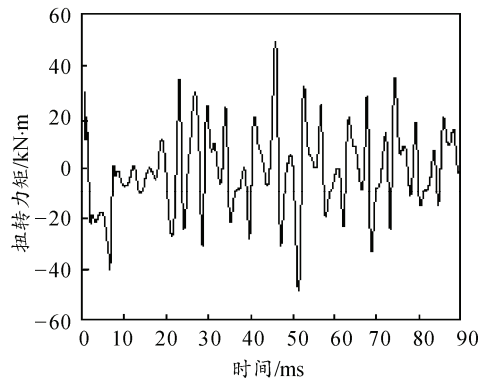


图 7 击发位置相差 30°时扭转力矩-时间曲线

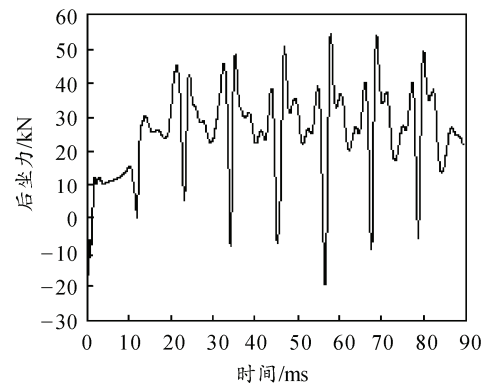


图 8 击发位置相差 60°时后坐力-时间曲线

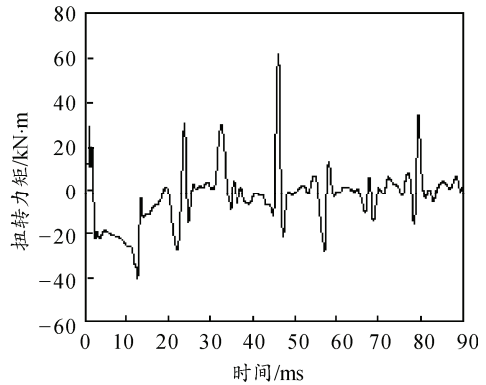


图 9 击发位置相差 60°时扭转力矩-时间曲线

4 结束语

笔者根据多联装自动机系统的工作原理, 建立

多联装自动机系统动力学模型并进行 8 连发射击仿真, 通过仿真得到了比较满意的结果, 为多联装自动机系统的设计奠定了基础。但是文中只考虑了部分因素的影响, 还有一些影响因素没有提及, 比如射角、工作环境等, 在以后的研究工作中需要加以改进。

参考文献:

[1] 何大平, 廖振强, 王涛. 基于耦合双联装的转管武器动

(上接第 2 页)

4 应用模式

通信控制机是新型数字化部队通信控制装备, 是通信组网的核心, 与其他装备相结合可建立野战通信网和高速通信网。

4.1 野战通信网

野战通信网具备完善的组网能力及路由能力, 任意拓扑结构的互连方式(可无线、有线和有线/无线混合)。具有单/双工无线电台入网、多个野战通信网可通过中继组成有线数话网、无线数话网和有线/无线混合数话网^[5]。

4.2 高速通信网

高速通信网也具备比较完善的组网能力及路由能力, 通过网络交换机组成高速网, 能够进行数据、图形、图像和 IP 电话等多种通信业务。高速网的建立使得作战单元与上级、下级、友邻之间可以召开电视电话会议, 进行大数据量传输、态势播发以及毁伤效果评估等信息, 并能进行联机标绘^[6]。

力学研究[J]. 南京理工大学学报, 2005(5): 540-546.

[2] 刘思春. 耦合源自动机动力学分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 39-42.

[3] 郑鹏, 张相炎, 郑建国, 等. 基于虚拟样机技术的某舰炮自动机动力学仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2011(6): 56-58.

[4] 徐凤军, 高跃飞, 曹红松, 等. 某高炮自动机动力学仿真[J]. 计算机仿真, 2013(9): 14-17.

[5] 姚养无. 火炮与自动武器动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000: 22-34.

5 结论

通信控制机的成功设计, 拓展了战场通信网络, 满足了部队使用和维护等要求, 实现了在传统野战被复线上实时传输大容量数据的功能, 有效提高了部队执行多样化任务的能力, 推动了部队基于信息系统体系作战能力的生成。

参与文献:

[1] 陈春, 常书杰. 指挥信息系统集成问题探析[J]. 陆军军官学院学报, 2013(2): 32-34.

[2] 金伟新, 肖田元. 基于复杂系统理论的信息化战争体系对抗仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2435-2445.

[3] 史利娟, 樊德忠, 王东滨, 等. 军需装备标准化建设探析[J]. 军事经济研究, 2011(3): 61-63.

[4] 舒敬荣, 张继春. 激光仪目标多路信息生成器设计[J]. 陆军军官学院学报, 2012(2): 37-39.

[5] Zhang Min, Shen Yi, Wang Qiang, et al. Dynamic artificial potential field based multi-tobot formation control[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC), 2010 IEEE, China, 2010: 1530-1534.

[6] 张桐春. 联合作战指挥信息系统构建问题研究[J]. 军队指挥自动化, 2011(4): 43-45.