

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.018

基于扰动观测器的武器站伺服运动控制

张俊勇, 甘代伟

(陕西国防工业职业技术学院智能制造学院 西安 710300)

摘要: 为提高武器站的动态跟踪和瞄准射击精度, 提出基于扰动观测器的武器站伺服运动控制解决方案。建立武器站射击过程的动力学模型和伺服控制模型, 对射击产生的干扰通过扰动观测器进行估计等效, 以补偿信号送至被控对象的输入端进行控制, 以提高武器站伺服运动控制的精度。结合武器站典型作战应用剖面, 在不同目标特性伺服跟踪和射击工况下, 进行建模和仿真试验。仿真结果表明, 武器站伺服运动控制精度得到有效提升, 该模型具有创新性与工程应用价值。

关键词: 武器站; 射击; 扰动观测器; 伺服运动控制

中图分类号: TP273; E92 **文献标志码:** A

Weapon Station Servo Motion Control Based on Disturbance Observer

Zhang Junyong, Gan Daiwei

(Department of Intelligent Manufacturing, Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710300, China)

Abstract: In order to improve the dynamic tracking, aiming and firing accuracy of weapon station, a solution of weapon station servo motion control based on disturbance observer is proposed. The dynamic model and the servo control model of the weapon station in the firing process are established, and the disturbance produced by the firing is estimated and equivalent by the disturbance observer, and the compensation signal is sent to the input of the controlled object for control, so as to improve the accuracy of the servo motion control of the weapon station. Combined with the typical operational application profile of the weapon station, the modeling and simulation experiments are carried out under different target characteristics, servo tracking and firing conditions. The simulation results show that the accuracy of the weapon station servo motion control is effectively improved, and the model has innovative and engineering application value.

Keywords: weapon station; firing; disturbance observer; servo motion control

0 引言

武器站是一种可在 2 个方向大范围伺服运动, 通过自动控制对目标进行探测、识别、跟踪、瞄准、攻击和毁伤目标的武器装备。武器站对目标的命中概率和杀伤效果与其射击的精度密切相关。张海燕等^[1]建立了参数化射击密集度计算模型, 对结构参数影响射击密集度的规律进行分析, 为武器站结构参数优化提高射击密集度提供参考。毛保全等^[2]综合考虑影响射击精度的因素, 建立虚拟样机模型, 对射击时炮口振动位移进行优化, 对遥控武器站射击密集度有一定指导。赵俊严等^[3]在 3 维建模、火炮发射多刚度体系动力学仿真, 对火炮射击的后坐力和射击精度进行优化, 为遥控武器站设计提供理论依据。文献[4-5]分别通过自抗扰稳定控制、模糊神经网络对武器站的不确定扰动、非线性问题进行建模仿真, 提高动态伺服精度, 以实现武器站精确跟踪目标和打击毁伤目标。Son 等^[6]以枪塔系统的

自动武器控制设计和实现为研究, 通过两自由度的 PID 闭环控制, 达到装备于转塔上的探测相机和武器对目标的高精度跟踪和攻击。Galal 等^[7]将模糊控制的决策逻辑应用在枪塔武器系统控制中, 提升瞬态响应、稳态误差和精度。Idris 等^[8]运用拉格朗日理论研究枪塔系统两自由度目标跟踪, 并建立枪塔系统两自由度的模型对射击条件下的精确目标跟踪进行了研究。雷昱等^[9]根据参考模型与系统过程的递归方程式关系, 确定自适应模糊控制器的单点输出值, 克服了小误差范围内灵敏度差的缺点, 提高随动系统的过渡时和速度跟踪性能, 达到了武器随动系统控制指标和效果要求。华洪良等^[10]通过喷管气流反推设计喷管, 以有效控制弹头膛口高低方向位移、射角及射速波动, 进行建模仿真提高射击精度。郭佼瑞等^[11]对导气孔对枪械的射击精度影响进行建模仿真, 以提高射击精度。化斌斌等^[12]通过武器系统的刚柔耦合虚拟样机建模, 对不同射击频率状态下载体、枪械支撑结构和枪械的振动特性和散

收稿日期: 2024-12-06; 修回日期: 2025-01-12

基金项目: 2021 年陕西高等职业教育教学改革研究项目(21GG011)

第一作者: 张俊勇(1975-), 男, 河北人, 硕士。

布进行研究，可以分析出不同射击频率下射击精度的变化情况，可为武器射击精度分析和优化提供理论支持。李猛^[13]通过对射击时不同阶数模态、系统固有频率的分析研究，得出不同射击响应下的炮口振动规律，在不同武器系统集成应用是可以通过选择合适的射频，来达到较优的射击命中精度。武器站射击对目标打击是一个复杂的过程，涉及到武器站对目标识别探测、目标位置信息实时获取、综合火力控制和弹道修正、伺服运动控制、枪械射击动力学、弹药稳定可靠传送等问题。从单个的影响武器站射击精度影响因素对射击精度的提高是有限的，因此需要考虑不同影响因素之间的关系进行综合控制，以优化提升武器站射击精度。

武器站对目标的攻击和防御，是其操作控制人员根据战场态势判断和作战应用环境而进行的决策，其具有随机性、突发性和不确定性等因素。经典的 PID 控制对系统中随机性、突变性和不确定性的干扰抑制能力较差，使武器站攻击目标的伺服控制精度受到影响，对攻击目标的精度、命中概率和毁伤效能带来困扰。

为有效控制扰动对武器站伺服运动控制的影响，笔者提出基于扰动观测器的武器站伺服运动控制解决方案。

1 武器站射击动力学模型

武器站集成的机枪安装于俯仰架上，可绕俯仰轴进行俯仰运动。俯仰架及其安装于其上的设备和结构，整体安装于方位架上，可绕方位轴运动。以实现武器站的方位和俯仰运动，可对一定范围目标进行精确跟踪、瞄准和攻击。当需要对目标进行毁伤时，发射弹药即可。其射击动力学分析如图 1 所示。

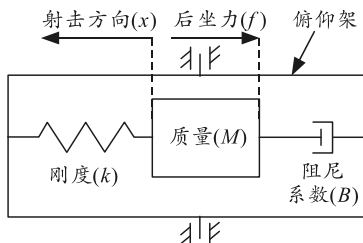


图 1 武器站射击动力学分析

机枪射击和初始位置方向与载体航向 X 相同，其动力学模型为：

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + kx = f \tag{1}$$

式中：机枪质量 M , kg；缓冲器的粘性阻尼系数 B , $N \cdot s/m$ ；刚度系数 k , N/mm ；航炮的前冲后坐位移 x ,

mm；后坐力 f , N。其传递函数为：

$$G(s) = X(s)/F(s) = 1/(Ms^2 + Bs + k) \tag{2}$$

武器站射击时，击针击发弹药底火，火药爆炸极短时间内产生强大的膛压使弹头获得动能，同时给机枪作用产生一定的前冲后坐位移和后坐力。实际中作用时间极短，可认为弹头获得的动能与后坐力作用时间在短时间内遵循动量守恒。则认为在极短的时间内后坐力变化可以忽略认为基本不变，表 1 为武器站机枪的相关参数表^[14]，后坐力 f ，力作用时间 t ，弹头质量 m ，弹头出膛获得的初速度 v ，则有：

$$mv = ft \tag{3}$$

表 1 机枪参数表

机枪参数	数值	机枪参数	数值
口径/mm	12.7	后坐力/N	13 729
射击射速/(发/min)	800~1 200	后坐位移量/mm	14
初速/(m/s)	785	前冲位移量/mm	8
质量/kg	28	弹头质量/kg	0.044

武器站在射击过程中，因为前冲后坐位移和后坐力的存在，不同连发射击时，将对武器站产生附加的负载转矩。武器站方位和俯仰 2 个方向输出端旋转半径分别为 r_y 和 r_p ，武器站方位方向输出端运转的摩擦系数分别为 u_y ，则射击产生的附件转矩在方位和俯仰轴分别为 T_y 和 T_p ，可得在不同前冲后坐位移时的附加转矩：

$$T_y = fu_y r_y \tag{4}$$

$$T_p = fr_p \cos \theta_p \tag{5}$$

式中 θ_p 为当前时刻的俯仰角度。

在俯仰轴上，因为机枪整体的前冲后坐，还将产生因为重心偏移引起的附件转矩 T_g 。为了简化研究分析，假设在未射击时，俯仰轴的重心偏移量为 0，根据射击动力学关系和结构几何关系可以得出：

$$T_g = Mgxcos\theta_p \tag{6}$$

武器站射击时，机枪的射击速度一般在 800~1 200 发/min 可调，仅是后坐力的频率不同。高射频对武器站射击产生的附加扰动转矩、伺服运动控制和射击精度的影响更为严酷，因此选取射击频率 1 200 发/min，10 连发作为武器站射击的输入，其后坐力曲线如图 2 所示。

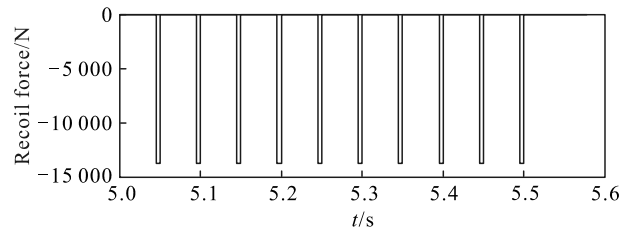


图 2 后坐力

2 武器站伺服运动控制模型

武器站能够在方位和俯仰 2 个方向伺服运动，可自动跟踪目标调整集成于其上的机枪的武器线，并精确地指向目标，以实现对其一定范围目标的精确打击和毁伤。武器站系统在 2 个方向伺服控制，其驱动源多采用直流永磁无刷电机，其在方位和俯仰 2 个方向的电压平衡方程、电磁转矩方程和反电动势方程表示为：

$$\left. \begin{aligned} U_y &= R_y i_y + L_y \frac{di_y}{dt} + E_y \\ U_p &= R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + E_p \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{cy} &= K_{my} i_y \\ T_{cp} &= K_{mp} i_p \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} E_y &= K_{ey} \omega_y \\ E_p &= K_{ep} \omega_p \end{aligned} \right\} \circ \quad (9)$$

式中： U_y 和 U_p 分别为方位和俯仰直流永磁无刷电机电枢两端的电压； i_y 和 i_p 、 R_y 和 R_p 、 L_y 和 L_p 、 E_y 和 E_p 分别为方位和俯仰直流永磁无刷电机电枢绕组的电流、电枢电阻、电枢电感和反电动势； T_{cy} 和 T_{cp} 、 K_{my} 和 K_{mp} 、 ω_y 和 ω_p 分别为方位和俯仰电机电磁转矩、电机转矩系数和电机转子的角速度。可以得出武器站在方位和俯仰 2 个方向的运动平衡方程为：

$$J_y \frac{d^2 \theta_y}{dt^2} = T_{cy} - B_y \frac{d\theta_y}{dt} - T_{Ly}; \quad (10)$$

$$J_p \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} = T_{cp} - B_p \frac{d\theta_p}{dt} - T_{Lp}; \quad (11)$$

$$T_{Ly} = T_y + T_{fy}; \quad (12)$$

$$T_{Lp} = T_p + T_{fp} + T_g \circ \quad (13)$$

式中： J_y 和 J_p 分别为折合到方位和俯仰电机轴端的转动惯量； θ_y 和 θ_p 分别为方位和俯仰轴的转动角度； B_y 和 B_p 分别为粘性阻尼比； T_{Ly} 和 T_{Lp} 分别为方位和俯仰负载转矩； T_{fy} 和 T_{fp} 分别为折合到方位和俯仰电机轴的摩擦转矩。进行拉氏变换后可得到方位和俯仰电机电枢电压和输出角速度之间的传递函数 $G_y(s)$ 和 $G_p(s)$ ，即：

$$G_y(s) = (1/K_{ey}) / ((T_{ey}s + 1)(T_{my}s + 1)); \quad (14)$$

$$G_p(s) = (1/K_{ep}) / ((T_{ep}s + 1)(T_{mp}s + 1) \circ \quad (15)$$

式中： $T_{ey} = L_y/R_y$ 和 $T_{ep} = L_p/R_p$ 分别为方位和俯仰 2 个方向的电磁时间常数； $T_{my} = J_y R_y / K_{ey} K_{my}$ 和

$T_{mp} = J_p R_p / K_{ep} K_{mp}$ 分别为方位和俯仰 2 个方向的机电时间常数。

3 扰动观测器的设计

武器站射击时，后坐力较大、作用时间极短，连续射击时将呈现周期性作用，武器站将会受到周期性扰动转矩作用，给伺服运动控制精度和精确打击毁伤目标带来困扰；因此，提出基于扰动观测器的武器站伺服运动控制。扰动观测器 (DOB) 的核心思路是把被控系统的输出与参考模型输出间的差异作为等效干扰。将该等效干扰补偿到被控对象的输入端，以消除外部扰动对武器站伺服运动控制性能的影响，扰动观测器的补偿原理如图 3 所示。

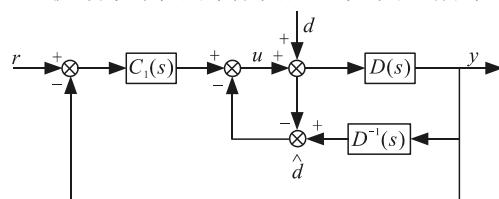


图 3 扰动观测器的补偿原理

$D(s)$ 和 $D^{-1}(s)$ 分别为实际被控对象模型和其逆， r 为输入， y 为输出，外部扰动为 d ，设计控制器的传递函数 $C_1(s)$ 。 d 的估计值为 \hat{d} ，将其引入前向回路输入端进行叠加以抵消外部扰动的影响。

工程应用中，由于被控对象 $D(s)$ 的参数是变化的，工程应用多采用其标称模型 $D_n(s)$ 。 $D(s)$ 因为是严格的真有理分式， $D^{-1}(s)$ 难于在工程中实现，因此通过 $D_n^{-1}(s)$ 代替 $D^{-1}(s)$ 。需要增加滤波器 $Q(s)$ ，使得 $Q(s)D_n^{-1}(s)$ 满足工程可实现，工程应用闭环控制如图 4 所示。

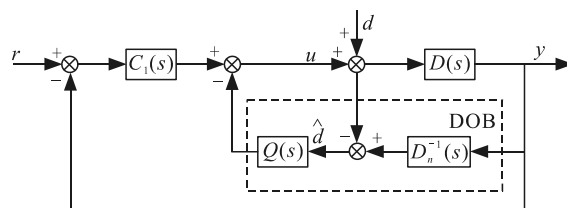


图 4 扰动观测器工程应用闭环控制

武器站实际应用中，射击产生的后坐力、前冲后座的浮动引起重心变化、弹药传送及柔性范围变化引起干扰、各弹量随着射击消耗的重量变化等，将导致被控对象模型、参数具有一定的不确定和变化；因此，需要扰动观测器在闭环控制中能够抑制和消除各种外部扰动引起的干扰。扰动观测器设计核心是通过滤波器 $Q(s)$ ，以满足 $Q(s)D_n^{-1}(s)$ 为有理分式。等效的对扰动进行补偿，来使被控对象逼近

标称模型的特征。 $Q(s)$ 的带宽需要综合考虑稳定性和噪声抑制能力。 N 阶 $Q(s)$ 可设计为^[15]:

$$Q(s) = \frac{1 + \sum_{k=1}^{N-M} a_k (\tau_N s)^k}{1 + \sum_{k=1}^N a_k (\tau_N s)^k} \quad (16)$$

式中: N 为 $Q(s)$ 的阶数; M 为 $Q(s)$ 与 $D_n^{-1}(s)$ 的相对阶数; τ_N 为 $Q(s)$ 的截止频率。滤波器 $Q(s)$ 与标称模型 $D_n(s)$ 的阶次要保持相当。武器站的扰动和目标位置信号输入以低频信号为主, 测量噪声以高

频段为主。需要滤波器 $Q(s)$ 在对低频输入端的扰动和高频段噪声具有抑制能力。设计低通滤波器 $Q(s)$ 为:

$$Q(s) = 1/(\tau_N s + 1)^2 \quad (17)$$

4 仿真与分析

4.1 系统仿真

基于扰动观测器的武器站伺服运动控制的原理如图 5 所示。

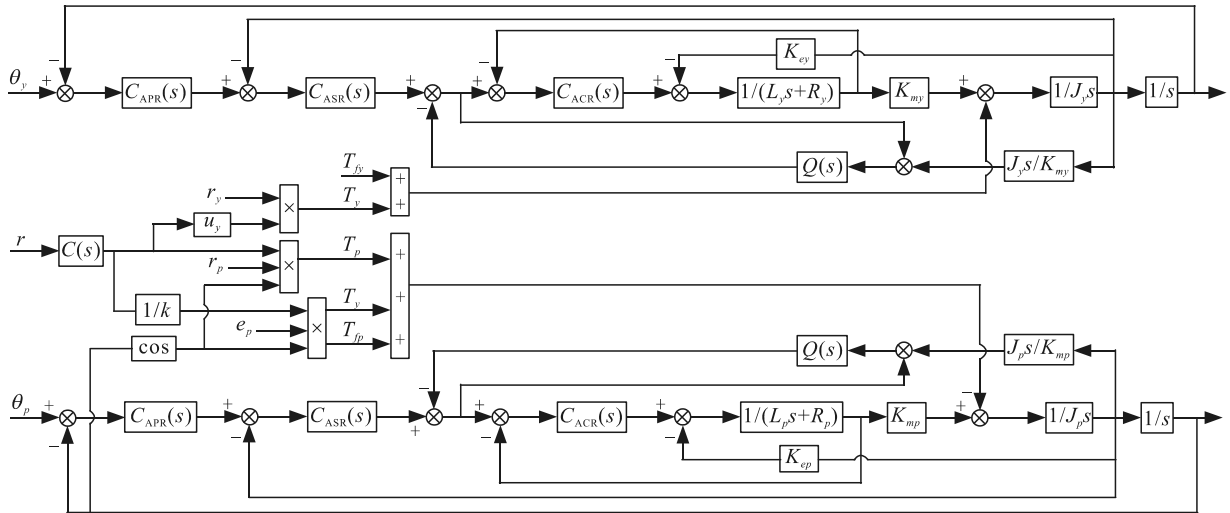


图 5 基于扰动观测器的武器站控制

$C_{APR}(s)$ 、 $C_{ASRS}(s)$ 、 $C_{ACR}(s)$ 分别为位置、速度和电流调节器, θ_y 和 θ_p 分别为方位和俯仰位置信号输入, 在 Matlab/Simulink 仿真环境下进行建模、参数配置和仿真参数设定。通过已经建立的武器站射击动力学模型、武器站伺服运动模型和扰动观测器模型, 配置参数、设定仿真参数。在武器站对不同目标运动特性动态跟踪和瞄准射击时, 经典三闭环控制和基于 DOB 控制下的仿真特性为:

1) 在武器站方位和俯仰跟踪为三角波目标时, 三角波幅值 10° , 周期 4 s, 在时间为 5 s 时, 进行了 10 连发射击。经典三闭环控制与基于 DOB 的武器站伺服运动射击精度在方位和俯仰 2 个方向的仿真曲线如图 6 和 7 所示。

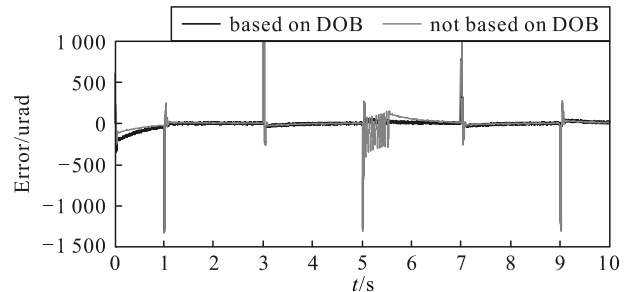


图 7 俯仰三角波跟踪误差仿真

2) 在武器站跟踪方位和俯仰跟踪为正弦波 $y=6*\sin(\pi t)$ 和 $y=15*\sin(0.5*\pi t)$ 目标时, 在时间为 5 s 时, 进行了 10 连发射击。经典三闭环控制与基于 DOB 的武器站伺服运动射击精度在方位和俯仰 2 个方向的仿真曲线如图 8—11 所示。

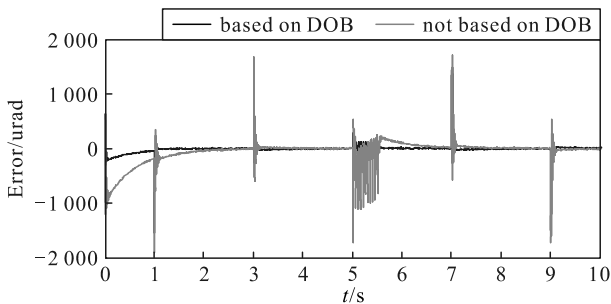


图 6 方位三角波跟踪误差仿真

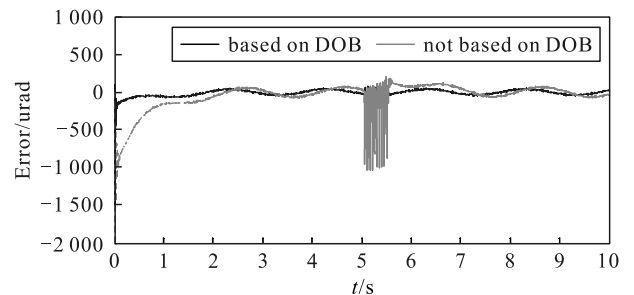


图 8 方位正弦跟踪误差仿真曲线 I

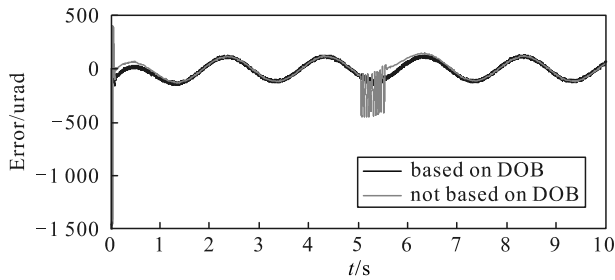


图 9 俯仰正弦跟踪误差仿真曲线 I

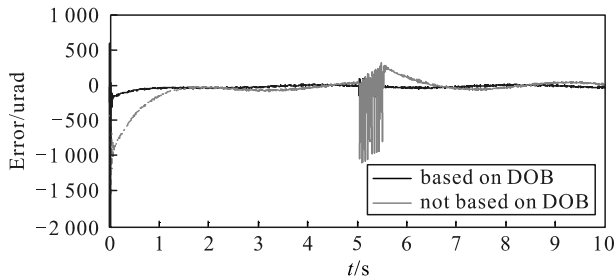


图 10 方位正弦跟踪误差仿真曲线 II

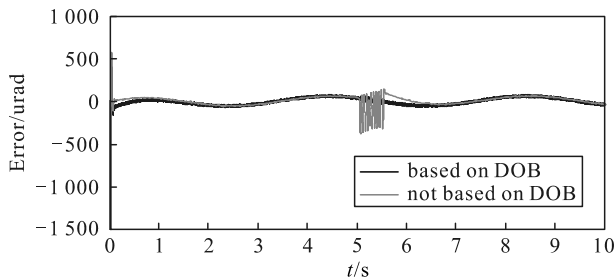


图 11 俯仰正弦跟踪误差仿真曲线 II

4.2 仿真结果分析

1) 由图 6 和 7 中可以分析得出：武器站伺服运动控制在经典三闭环控制和基于 DOB 的控制下，可对幅值 10° 和周期 4 s 三角波运动目标跟踪。伺服控制的过程中，在三角波的换向时，武器站伺服运动出现了较短时间的控制精度突变到 1.5 mrad，作用时间在 0.1 s 内可快速地响应调整精度控制稳定在 0.1 mrad 以内。

对于 0.15 mrad 的误差要求，基于 DOB 的武器站伺服运动控制响应时间方位和俯仰分别为 0.22 和 0.1 s，经典的三闭环控制响应时间方位和俯仰分别约为 1.2 和 0.25 s。当射击时，因扰动作用，基于 DOB 的精度有 0.05~0.1 mrad 的波动，经典三闭环控制精度波动在 0.2~1 mrad。

2) 由图 8 和 9 中可以分析得出：武器站伺服运动在经典三闭环控制和基于扰动观测器的控制下，可对幅值 6° ，频率 1 Hz 正弦波运动目标跟踪。对于 0.15 mrad 的误差要求，基于 DOB 的武器站伺服运动控制响应时间方位和俯仰均为 0.1 s，经典的三闭环控制响应时间方位和俯仰分别约为 1 和

1.2 s。当射击时，因扰动作用，基于 DOB 的精度有 0.06~0.15 mrad 的波动，经典三闭环控制精度波动在 0.45~1.05 mrad。

当跟踪目标的特性变为幅值 15° ，频率 0.5 Hz 正弦波时，武器站伺服运动能够快速响应跟踪。由图 10 和 11 仿真曲线可以分析与跟踪幅值 6° ，频率 1 Hz 的趋势相同，只是频率有所变小。

综述对不同典型目标特性的仿真试验分析可知：武器站在对动态目标跟踪时，能够快速响应、适应射击精度和命中。由仿真试验分析的数据可以得出基于 DOB 的动态目标射击精度明显优于经典三闭环，实际应用适应性较好，更能发挥武器站系统的性能。

5 结束语

在载体运动环境下武器站对动态目标的跟踪和攻击是其主要的作战应用场景。通过扰动观测器对机枪射击产生的附加转矩和扰动进行补偿。在不同运动目标特性的武器站伺服跟踪和动态射击进行了建模和仿真试验。对经典三闭环和基于扰动观测器的武器站伺服控制及动态射击精度进行了对比分析。仿真试验特性表明，基于扰动观测器的武器站伺服控制和动态射击精度明显更优。可用于武器站伺服跟踪和动态射击研究，具有工程应用价值。

参考文献：

- [1] 张海燕, 周润强, 徐礼, 等. 遥控武器站结构参数对射击密集度灵敏度影响分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 12: 54-58.
- [2] 毛保全, 王传友, 邵毅, 等. 某型遥控武器站射击密集度仿真与优化[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(2): 36-40.
- [3] 赵俊严, 毛保全, 杨明华, 等. 基于虚拟样机的火炮系统建模仿真与优化研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6901-6904.
- [4] 张伟, 陈宇中, 胡永明. 遥控武器站的自抗扰控制[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 44-46.
- [5] 毛保全, 汪凡, 徐礼, 等. 基于模糊神经网络的遥控武器站伺服系统 PID 控制器[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 75-78.
- [6] SON K, MUHAMMAD N T, DWINUGROHO H W. Gun automatic weapon control system design and realization[C]//2016 international symposium on electronics and smart devices(ISESD). Bandung, 2016: 30-34.