

瞄准镜双向稳定系统协同仿真建模及性能预测

张雅琼 陈光辉 郭建都 徐阳 刘义 刘婧然

Co-simulation modeling and performance prediction on bidirectional stability system of gunner's sight

ZHANG Yaqiong, CHEN Guanghui, GUO Jiandu, XU Yang, LIU Yi, LIU Jingran

引用本文:

张雅琼, 陈光辉, 郭建都, 等. 瞄准镜双向稳定系统协同仿真建模及性能预测[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 29–36. DOI: 10.5768/JAO202647.0101004

ZHANG Yaqiong, CHEN Guanghui, GUO Jiandu, et al. Co-simulation modeling and performance prediction on bidirectional stability system of gunner's sight [J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 29–36. DOI: 10.5768/JAO202647.0101004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0101004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于柔性结构的视轴减振稳定框架设计

Visual axis vibration damping stability frame design based on flexible structure

应用光学. 2025, 46(4): 758–765 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0401007>

快速周扫探测系统扫描平台的高精度稳定控制

High-precision stability control of scanning platform of fast circumferential scanning detection system

应用光学. 2022, 43(3): 375–385 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301001>

基于扰动源分类控制的二维陀螺平台过顶稳定方法

Passing zenith stabilization method of two-dimensional gyro platform based on disturbance sources classification control

应用光学. 2021, 42(6): 989–996 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601007>

机载光电稳瞄平台减振技术研究

Vibration reduction technology of airborne photoelectric stabilized sighting platform

应用光学. 2022, 43(4): 611–617 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401004>

光电系统伺服稳定平台可靠性定性分析

Qualitative analysis of reliability on servo stabilization platform of electro-optical system

应用光学. 2022, 43(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0501004>

高精度光电跟踪系统中伺服稳定控制算法研究

Servo stabilization control algorithm in high-precision photoelectric tracking system

应用光学. 2021, 42(4): 597–607 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0029-08

引用格式: 张雅琼, 陈光辉, 郭建都, 等. 瞄准镜双向稳定系统协同仿真建模及性能预测 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 29-36.

ZHANG Yaqiong, CHEN Guanghui, GUO Jiandu, et al. Co-simulation modeling and performance prediction on bidirectional stability system of gunner's sight [J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 29-36.



在线阅读

瞄准镜双向稳定系统协同仿真建模及性能预测

张雅琼, 陈光辉, 郭建都, 徐 阳, 刘 义, 刘婧然

(中国北方车辆研究所 武器控制系统技术部, 北京 100072)

摘 要: 分析某车载瞄准镜双向稳定系统的控制原理, 并推导出基于惯性稳定技术的瞄准镜双向稳定系统的数学模型, 在此基础上, 利用 RecurDyn 与 Matlab 构建了瞄准镜双向稳定系统的协同仿真模型。为了验证模型准确性, 以稳定精度为评价指标, 利用协同仿真模型模拟瞄准镜台架的稳定精度, 并将仿真结果与实际台架试验结果进行对比, 结果表明: 仿真实验结果与台架试验结果相贴合, 模型精度达到了 83.2%。为了评价该瞄准镜在履带车辆上的实际应用效果, 以履带车辆 30 km/h 车速下的自然路面路谱曲线作为模型扰动输入, 运用协同仿真模型预测了瞄准镜双向稳定系统在车辆行进间的稳定性能。

关键词: 瞄准镜; 惯性稳定平台控制; 协同仿真; 性能预测

中图分类号: TN201; TP206.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0101004

Co-simulation modeling and performance prediction on bidirectional stability system of gunner's sight

ZHANG Yaqiong, CHEN Guanghui, GUO Jiandu, XU Yang, LIU Yi, LIU Jingran

(Weapon Control System Technology Department, China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: This paper initially analyzes in detail the control principle of bidirectional stabilization system for vehicular gunner's sights, derives the mathematical model of the system based on the inertial stabilization principle. On this basis, a collaborative simulation model for the bidirectional stabilization system of the gunner's sight was constructed by using RecurDyn and Matlab. Secondly, in order to verify model accuracy, stability accuracy was used as the evaluation index, and the model was adopted to simulate the stability accuracy test of the gunner's sight mount. The simulation results were compared with the actual mount test results, indicating a model accuracy of 83.2% compared to actual test results. Finally, to evaluate the practical application effect of this gunner's sight on tracked vehicles, the natural road spectrum curve of tracked vehicles traveling at 30 km/h was applied as the disturbance input for the model. The collaborative simulation model could be utilized to predict the stability performance of the bidirectional stabilization system for the gunner's sight during vehicle movement.

Key words: gunner's sight; control of inertial stabilization platform; co-simulation; performance forecast

引言

车载瞄准镜作为陆域装甲火控系统的关键组

件, 肩负着目标搜索、精确跟踪、高效瞄准与距离测量的使命, 为火控系统提供必需的信息诸元, 其

收稿日期: 2024-07-26; 修回日期: 2024-11-24

基金项目: 军委科技委基金项目 (2024-JC-JQ-JJ-00XX)

第一作者: 张雅琼, E-mail: zhyq@noveri.com.cn

通信作者: 陈光辉, E-mail: shizhangyaqiongma@163.com

视轴的稳定精度直接影响远距离目标的首发命中率,是确保作战效能、提升战场生存能力的核心要素^[1-3]。随着新型装甲车辆朝着高机动、高精度方向的持续演进,对瞄准镜双向稳定系统的控制性能提出了更严苛的要求^[4]。

当前针对瞄准镜双向稳定系统的研究,多聚焦于数学推导和实验经验,但受限于数学模型的抽象性及实验条件的局限性,难以全面揭示系统在真实环境下所面临的复杂非线性机制(如间隙、摩擦)、多轴耦合特性以及外部环境的复杂干扰等^[5-6]。这些因素使得采用单一的 Matlab 工具对系统进行精确建模变得尤为困难,同时也增加了分析动态环境对控制系统影响的复杂度。针对这一问题,RecurDyn 多体动力学分析软件为研究者提供了一种创新的解决路径。该软件能够绕开繁琐的微分方程推导,直接构建贴近实际工作状态的多体动力学模型,为复杂系统的动态分析提供了强有力的工具^[7]。通过构建 RecurDyn 与 Matlab 的协同仿真平台,在 RecurDyn 中构建系统负载端的机械动力学模型,同时在 Matlab 中搭建系统驱动端控制模型,并利用软件之间接口实现数据交互,能够将机械动力学特性和控制系统特性相融合,从而有效解决复杂系统运动学、动力学与控制之间的耦合问题,显著提升模型的精确性和可靠性^[8-9]。目前,已有众多学者利用协同仿真模型进行了深入的研究并取得了显著成果。例如,袁树森^[10]等考虑到坦克炮塔稳定系统为一个非线性、耦合性、不确定性高的动力系统,建立了面向实际坦克的协同仿真模型,基于该模型设计了 AIR 控制器,仿真实验证明了控制器设计的有效性;陈宇^[11]等聚焦于坦克底盘-火炮系统的精细振动分析,应用协同仿真的方法,分别基于 RecurDyn 和 Matlab 构建坦克底盘多体动力学模型和炮控系统控制模型,对坦克底盘、火炮系统中火炮的振动特性进行了准确描述,为坦克在不同行驶条件下进行火炮射击提

供了定位精度参考;HONG C W^[12]等建立了基于 RecurDyn 和 Simulink 的倒立摆协同仿真平台,并利用该平台完成了模糊控制器的设计及能力验证,仿真实验结果表明,基于协同仿真平台可以有效缩短控制系统的设计周期,快速有效地分析控制系统的动态性能。然而,值得注意的是,尽管协同仿真研究在理论层面取得了丰硕成果,但缺乏与实物验证的紧密结合,在一定程度上限制了研究成果向实际应用的转化。鉴于此,本文依托 RecurDyn 和 Matlab 软件,建立了瞄准镜协同仿真模型,以瞄准镜稳定精度作为评价指标,通过对比仿真结果及台架试验数据,验证了模型的准确性。进一步利用协同仿真模型,将实际道路采集的路谱数据作为扰动输入,对瞄准镜双向稳定系统在履带车辆上的真实稳定性能进行了预测。

1 基于惯性稳定技术的瞄准镜双向稳定系统控制原理

相较于静态条件下的路基光电搜索平台,车载瞄准镜平台需要克服机动载体运动引起的光轴抖动。为了解决这个问题,瞄准镜采用惯性稳定技术使其反光镜稳定在惯性空间内,隔离外部的扰动,从而抑制光轴的抖动^[13-16]。目前,大多数瞄准镜采用双向整体稳定的方式,通过在运动轴安装陀螺来感知方位平台及俯仰平台相对于大地的转动角速度,以陀螺感知速度为反馈量,经控制器处理及功率放大器放大后,驱动反光镜平台朝着相反的方向转动,直至陀螺输出为零,实现光轴的稳定。由于瞄准镜方位与俯仰稳定系统之间的耦合很小,为了简化控制系统设计,通常将二者分开控制。瞄准镜单轴稳定系统控制框图如图 1 所示。该系统由驱动端和负载端组成,驱动端包括控制器、功率放大器、电机及陀螺,负载端为被稳定和控制的反光镜平台。

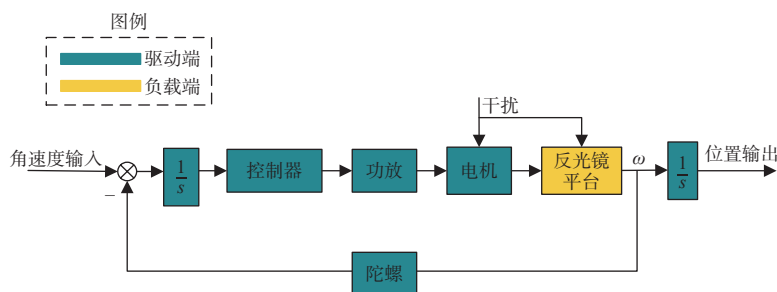


图 1 瞄准镜单轴稳定系统控制框图

Fig. 1 Control diagram for monoaxial stabilization of gunner's sight

2 瞄准镜双向稳定系统建模

2.1 系统驱动端建模

瞄准镜的双向稳定系统由方位与俯仰稳定系统构成, 控制系统建模可以将其简化为由 2 个图 1 所示的单轴稳定系统组成。图 1 中电机选用控制简单、调速范围广, 受电磁干扰影响小的直流电机, 其传递函数框图如图 2 所示。图 2 中, C_m 和 C_e 为力矩系数和电机反电势系数, L_a 和 R_a 为电机总电感和总电阻。直流电机 2 个关键的参数是机械时间常数 T_m 和电气时间常数 T_A , 计算公式如下:

$$T_m = \frac{J R_a}{C_m C_e} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (2)$$

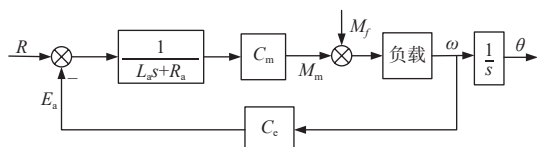


图 2 直流电机传递函数框图

Fig. 2 Transfer function block diagram of DC motor

在电机模型中, 负载可以简化为一个惯量 J 作用环节 $\frac{1}{Js}$, 得到空载无阻尼时的传递函数:

$$\frac{M_m(s)}{U_a(s)} = \frac{Js/C_e}{T_m T_e s^2 + T_m s + 1} \xrightarrow{T_m \gg T_e} \frac{Js/C_e}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (3)$$

光纤陀螺的单方向传递函数可以描述为一阶惯性环节串联纯延时环节^[17], 即:

$$G_g(s) = \frac{K_e}{\frac{1}{2\pi B_\omega} s + 1} e^{-T_d s} \quad (4)$$

式中: K_e 为陀螺的放大倍数; B_ω 为陀螺的闭环带宽; T_d 为陀螺输出延迟时间常数。

功率放大器的任务是将控制信号进行放大, 实际工作中 PWM 功率放大器为一个滞后环节, 当开关频率很大时, 其动态数学模型可以简化为一个一阶惯性环节, 即:

$$K_{PWM}(s) = K e^{-\tau s} \approx \frac{K}{\tau s + 1} \quad (5)$$

式中: K 为功率放大倍数; τ 为装置延迟时间, 可由 PWM 开关频率获得。

2.2 系统负载端建模

装甲车辆在实际行驶过程中, 瞄准镜处于高机动、强干扰的环境下, 导致真实的瞄准镜表现为一个多变量、非线性的系统, 为了提高瞄准镜双向稳定系统的控制精度, 建立准确反映瞄准镜双向稳定系统的电机负载模型是非常有必要的。为此,

借助 RecurDyn 多体动力学软件建立瞄准镜动力学模型, 并将其视作瞄准镜双向稳定系统的负载端。

参照文献 [7] 中外部几何模型导入方法, 将某瞄准镜三维模型导入到 RecurDyn 中, 通过合并功能将其简化为框架、垂直轴、水平轴、反光镜及二分之一机构部分, 基于真实样机物理特性, 设置各部件的质量、惯量及摩擦力等参数, 并按照图 3 所示拓扑结构完成各部件关系连接, 最终建立的瞄准镜动力学模型如图 4 所示。

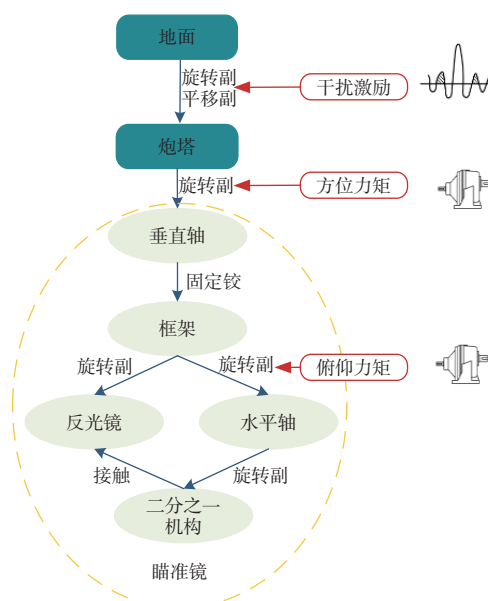


图 3 瞄准镜拓扑结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of topology structure of gunner's sight

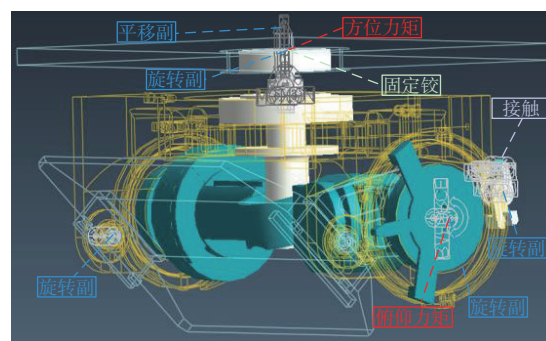


图 4 瞄准镜动力学模型

Fig. 4 Dynamics model of gunner's sight

3 协同仿真与分析

为了进行瞄准镜双向稳定系统的控制分析与性能预测, 利用 RecurDyn 与 Matlab 协同仿真技术, 建立协同仿真模型, 2 个软件之间的交互信息如图 5 所示。

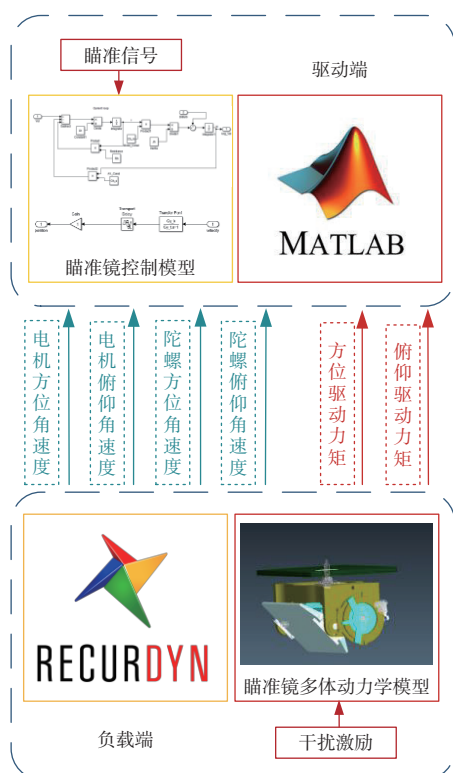


图5 瞄准镜双向稳定系统协同仿真原理图

Fig.5 Co-simulation principal of bidirectional stability system for gunner's sight

从图5可以看出,在Simulink平台搭建瞄准镜双向稳定系统驱动端控制模型,在RecurDyn平台搭建瞄准镜双向稳定系统负载端多体动力学模型。在RecurDyn环境中为瞄准镜动力学模型施加扰动激励,以模拟实际环节中的干扰。随后,通过交互接口,将电机转子与定子的相对角速度(包括电机方位角速度和电机俯仰角速度)加载到Simulink软件中的电机模型上,并乘以反电动势系数,以此作为反电动势闭环的输入。同时,惯性角速度即陀螺方位角速度及陀螺俯仰角速度同样经过信息交互接口加载到Simulink软件中,作为陀螺输入,经陀螺反馈后,再经控制器处理、功率放大器及电机环节后输出驱动力矩。驱动力矩通过信息交互接口加载到RecurDyn软件中,驱动瞄准镜反光镜平台运动,如此形成闭环控制,确保瞄准镜稳定平台受到外界扰动时能够迅速响应并保持稳定。以Simulink为主搭建的协同仿真模型如图6所示。

瞄准镜驱动端伺服控制系统参数如表1所示,将其带入到图6协同仿真中的驱动端伺服系统。

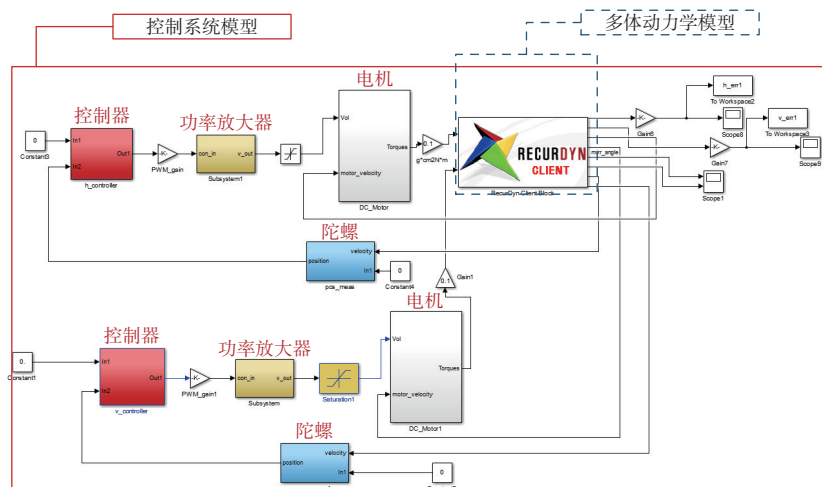


图6 瞄准镜双向稳定系统协同仿真模型

Fig.6 Gunner's sight co-simulation platform

控制器基于超前滞后网络方法设计,超前滞后网络相较传统PID控制器,可以同时改善系统的瞬态性能及稳态性能,兼具良好的响应时间^[18-20]。瞄准镜双向稳定系统的数字控制器设计如下。

方位向:

$$C_h(z) = \frac{17.78z^3 - 52.55z^2 + 51.77z - 17}{z^3 - 2.701z^2 + 2.423z - 0.722} \quad (6)$$

俯仰向:

$$C_v(z) = \frac{1.389z^3 - 2.731z^2 + 1.342}{z^2 - 1.606z + 0.606} \quad (7)$$

3.1 瞄准镜稳定精度仿真实验计算

稳定性是表征瞄准镜乃至整个火控系统性能的一项关键指标,一般用稳定精度进行描述。稳定精度计算公式为

表 1 瞄准镜双向稳定伺服系统参数

Table 1 Parameters of bidirectional stability servo system for gunner's sight

参数名称	方位向参数值	俯仰向参数值
R_a/Ω	13.5	13
$C_e/(V \cdot (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^{-1})$	0.571 4	0.285 7
$C_m/(\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{A}^{-1})$	571 4	285 7
L_a/mH	0.009	0.007 5
$K_e/\text{mil} \cdot \text{rad}^{-1}$	955	955
B_ω/Hz	200	200
T_d/s	0.000 25	0.000 25
K/V	48	48
τ/s	1/350 0	1/350 0

$$\sigma = \text{sqrt}(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \bar{\theta})^2) \tag{8}$$

式中： N 为偏差角采样数； θ_i 为第*i*次采样偏差角； $\bar{\theta}$ 为*N*次采样的偏差角平均值。

利用协同仿真模型模拟真实瞄准镜样机的摇摆台稳定精度试验。在模型负载端输入 3 轴正弦角扰动，如表 2 所示。

表 2 瞄准镜干扰信号要求

Table 2 Requirements for interference signals of gunner's sight

3轴扰动	频率/Hz	幅值/(°)
方位	1.2	2
俯仰	1	3
横滚	0.8	2

采集陀螺输出角速度 ω ，经积分处理得到的瞄准线角位移 θ 响应曲线如图 7 所示。利用公式 (8) 计算的稳定精度为：方位向 $\sigma_h = 0.07 \text{ mil}$ ，俯仰向 $\sigma_v = 0.09 \text{ mil}$ 。

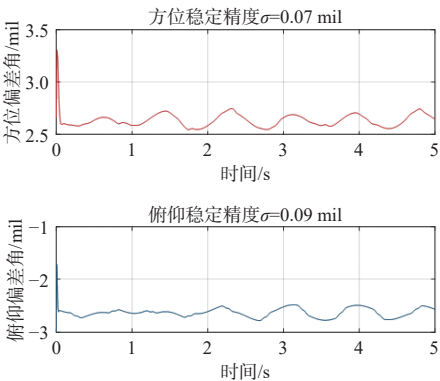


图 7 协同仿真瞄准线角位移曲线

Fig. 7 Co-Simulation of the gunner's sight line angular displacement curve

从图 7 中可以看出，瞄准镜双向稳定系统对角扰动的隔离效果很好，方位向与俯仰向稳定精度计算值均满足指标要求。

3.2 瞄准镜稳定精度台架试验计算

瞄准镜样机稳定精度测试采用一种基于图像处理的瞄准线稳定精度试验方法^[21]。试验设备包括一台瞄准镜样机、三自由度摇摆台、平行光管（含特定分划板）、视频采集处理装置等。瞄准镜样机双向稳定系统的数字控制器与仿真实验保持一致，即公式 (6)、公式 (7)。试验时，瞄准镜固定在摇摆台上，调整平行光管位置，使其分划线正对瞄准镜中心，摇摆台按照表 2 的要求摇摆，采集视频图像，利用图像处理算法获得瞄准线与图像基准点之间的偏差，如图 8 所示。

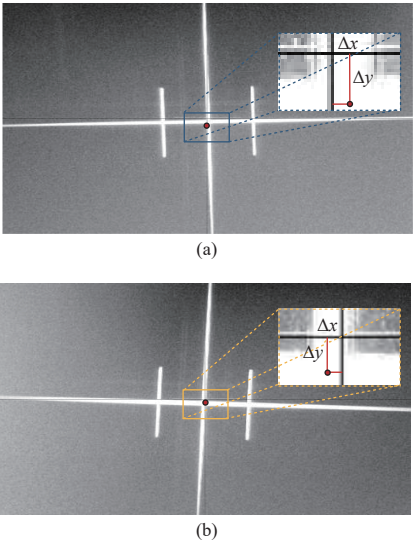


图 8 稳定精度计算帧

Fig. 8 Frame for stability precision calculation

采集 400 帧图像，经 Matlab 处理后，获得的瞄准线方位向及俯仰向角位移曲线如图 9 所示。利用式 (8) 计算的稳定精度为：方位向 $\sigma_h = 0.09 \text{ mil}$ ，俯仰向 $\sigma_v = 0.10 \text{ mil}$ 。

从图 9 可以看出，根据超前滞后网络算法设计的控制器控制效果较好，对角扰动起到了很好的隔离效果，物理样机方位向与俯仰向稳定精度均满足指标要求。

3.3 协同仿真模型分析及精度计算

协同仿真模型的准确度对于确保设计结果的可靠性至关重要。为了评估并验证模型的精度，结合仿真结果与实物样机试验数据计算模型精度，即：

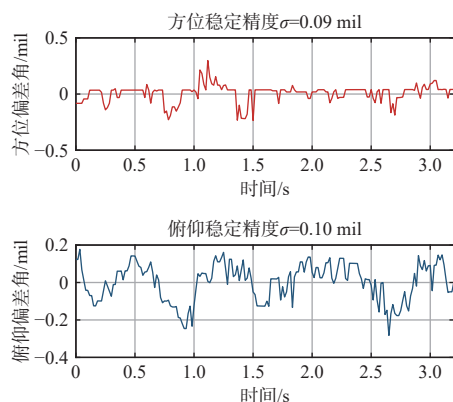


图9 台架试验瞄准线角位移曲线

Fig. 9 Bench test of gunner's sight line angular displacement curve

$$\varepsilon = [1 - |(\sigma' - \sigma)/\sigma|] \times 100 \quad (9)$$

式中: σ' 为仿真模型测量值; σ 为实物样机测量值。

协同仿真模型根据样机的真实物理参数及系统参数完成了标定,选取瞄准镜的稳定精度作为模型评价指标,根据3.1节和3.2节的仿真结果求得模型双向精度分别为:方位向 $\varepsilon_h = 77.8\%$,俯仰向 $\varepsilon_v = 88.9\%$ 。

为了全面评估模型的总体精度,利用几何平均值计算公式,得到的模型总体精度为

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_h \varepsilon_v} = 83.2\%$$

以上分析表明,本文设计的协同仿真模型在方位向和俯仰向均展现了高准确性及稳定性,体现了模型设计的科学性和有效性。因此,该模型可作为一种可靠的预测工具,用于预测物理样机在实际应用中的性能表现。

4 实车振动稳定精度预测及性能分析

装甲车辆在行驶时,履带受到地面的激励,由于悬架减振装置的弹性特性,这些激励会进一步引起炮塔随机振动,从而对瞄准镜双向稳定系统造成干扰。特别是,当车辆以30 km/h速度行驶时,振动对瞄准镜的稳定精度产生了显著的影响,导致瞄准镜的稳定精度大幅度降低。

为了分析车辆行进间瞄准镜的稳定性能,采用如图10所示的30 km/h车速炮塔的方位角振动、俯仰角振动、方位线振动作为干扰激励源,利用图6所示协同仿真模型,对瞄准镜稳定精度进行了预测。在RecurDyn软件中施加上述3个外部干扰信号至瞄准镜多体动力学模型中,仿真得到瞄准镜预测瞄准线方位及俯仰向角位移曲线,如图11所

示。利用公式(8)计算的稳定精度为:方位向 $\sigma'_h = 0.06 \text{ mil}$,俯仰向 $\sigma'_v = 0.12 \text{ mil}$ 。

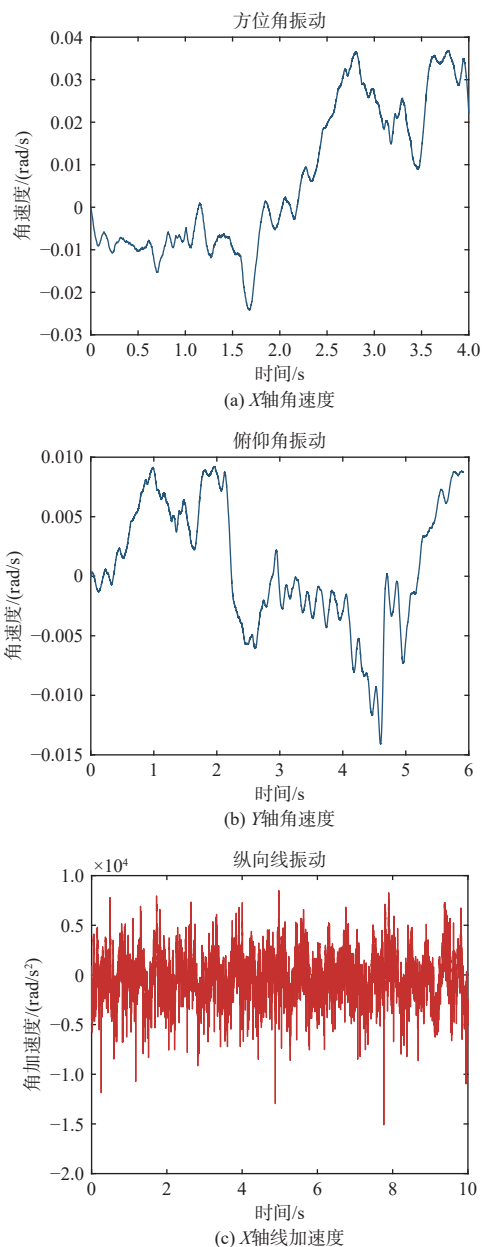
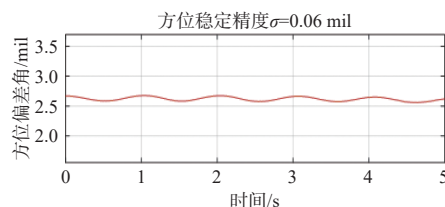


图10 干扰激励曲线

Fig. 10 Interference incentive curve

仿真结果显示,瞄准镜在方位向的稳定性能表现优越,展现了较高的稳定性和精度;虽然俯仰向稳定性能稍显逊色,但仍满足指标要求。



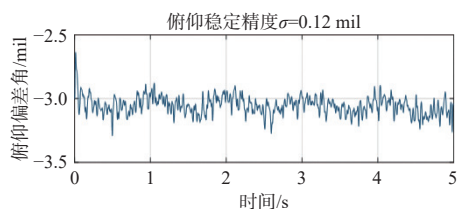


图 11 实车预测瞄准线角位移曲线

Fig. 11 Predicted gunner's sight line angular displacement curve for actual vehicle

5 结论

本文分析了瞄准镜双向稳定系统的原理, 建立了基于 Matlab 与 RecurDyn 的协同仿真模型。通过此模型对瞄准镜的稳定精度进行了全面、细致的仿真分析, 最终得到以下结论:

1) 相较于传统单独使用 Matlab 平台的建模仿真方法, 本文所采用的协同仿真模型展现出显著优势, 其交互性更为优越, 更贴近物理实际特性, 而且避免了负载端复杂的动力学公式推导及非必要的简化, 从而大幅降低了研发成本和时间, 显著提升了设计效率。

2) 利用协同仿真模型模拟了瞄准镜台架稳定精度试验, 试验结果表明, 仿真实验与样机台架试验结果相符, 模型精度为 83.2%, 可以用来评价及衡量瞄准镜在真实使用环境下的稳定效果, 为制定合理的瞄准镜双向稳定系统的控制策略提供了客观依据。

3) 利用协同仿真模型对装甲车行进间瞄准镜的稳定性能进行了协同仿真和预测, 仿真结果表明, 车辆行进间路面扰动对瞄准镜俯仰向稳定系统影响较大, 方位向稳定系统影响较小。这一发现为瞄准镜双向稳定系统的进一步优化设计提供了重要的参考。

本文提出的瞄准镜协同仿真模型为瞄准镜双向稳定系统设计及早期性能指标验证提供了仿真途径, 对装甲车行进间的瞄准镜稳定性进行了初步研究, 后续还需考虑更多实际因素, 如不同控制策略、不同结构、不同使用工况的影响等, 以进一步完善和优化瞄准镜双向稳定系统的设计与应用。

参考文献:

- [1] 朱竞夫, 赵碧君, 王钦钊. 现代坦克火控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
ZHU Jingfu, ZHAO Bijun, WANG Qinzhaoh. Modern tank

fire control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.

- [2] 陈永鹏, 段海龙, 王维博, 等. 基于加速度反馈的上反稳瞄系统最优控制研究[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 997-1005.

CHEN Yongpeng, DUAN Hailong, WANG Weibo, et al. Optimal control of upper anti-stabilization aiming system based on acceleration feedback[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 997-1005.

- [3] 唐涛, 张桐, 黄永梅, 等. 惯性稳定平台中的加速度反馈控制技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3462-3466.

TANG Tao, ZHANG Tong, HUANG Yongmei, et al. Acceleration feedback control in inertial stabilization system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3462-3466.

- [4] 马晓军, 袁东, 臧克茂, 等. 数字全电式坦克炮控系统研究现状与发展[J]. 兵工学报, 2012, 33(1): 69-76.

MA Xiaojun, YUAN Dong, ZANG Kemao, et al. Research on situation and development of digital all-electrical gun control system of tank[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(1): 69-76.

- [5] 柯诗剑, 陈平, 李杰, 等. 线性振动、角扰动对机载光电吊舱图像质量的影响[J]. 应用光学, 2013, 34(2): 198-202.

KE Shijian, CHEN Ping, LI Jie, et al. Influence of linear vibration and angular disturbance on image quality of airborne optoelectronic pod[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(2): 198-202.

- [6] GUELMAN M. Acquisition and pointing controls for intersatellite laser communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 2004, 40(4): 496-500.

- [7] 刘义, 徐恺. RecurDyn 多体动力学仿真基础应用与提高[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

LIU Yi, XU Kai. Basic application and improvement of RecurDyn multi-body dynamics simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.

- [8] 张骞, 李年裕, 杨怀彬, 等. 基于 RecurDyn 和 Matlab/Simulink 的一种小型轮式平台的联合仿真[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(3): 112-115.

ZHANG Qian, LI Nianyu, YANG Huaibin, et al. Joint simulation of a small wheeled platform based on RecurDyn and Matlab/Simulink[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(3): 112-115.

- [9] 佟刚, 张显军, 赵林楠. 基于 RecurDyn 与 Matlab 的油电混合四旋翼飞行器虚拟样机仿真[J]. *航空精密制造技术*, 2015, 51(6): 24-27.
TONG Gang, ZHANG Xianjun, ZHAO Linnan, et al. Virtual prototype simulation of a hybrid oil-electric quadcopter based on RecurDyn and Matlab[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2015, 51(6): 24-27.
- [10] 袁树森, 邓文翔, 姚建勇, 等. 全电坦克双向稳定系统自适应积分鲁棒控制[J]. *兵工学报*, 2023, 44(1): 140-155.
YUAN Shusen, DENG Wenxiang, YAO Jianyong, et al. Adaptive integral robust control for bidirectional stability system of all-electric tank[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(1): 140-155.
- [11] 陈宇, 杨国来, 付羽翀, 等. 高速机动条件下坦克行进间火炮非线性振动动力学研究[J]. *兵工学报*, 2019, 40(7): 10.
CHEN Yu, YANG Guolai, FU Yuchong, et al. Dynamic simulation on nonlinear vibration of marching tank gun under high mobility conditions[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(7): 10.
- [12] HONG C W, CHOI G J, AHN D S. Integrated development platform for design of fuzzy inference system using RecurDyn and Simulink[C]//2006 SICE-ICASE International Joint Conference. New York: IEEE, 2007.
- [13] 贾桐, 李秀智, 张祥银. 车载惯性稳定平台的神经网络滑模控制[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(1): 13-22.
JIA Tong, LI Xiuzhi, ZHANG Xiangyin. Neural network sliding mode control for vehicle inertially stabilized platform [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 38(1): 13-22.
- [14] 李明锁. 惯性技术在光电探测技术中的应用[J]. *导航与控制*, 2020(4): 179-188.
LI Mingsuo. Application of inertial technology in electro-optical detection technology[J]. *Navigation and Control*, 2020(4): 179-188.
- [15] 熊辉, 李锐华, 刘海, 等. 一种移动平台红外搜索跟踪系统的稳定控制方法[J]. *红外技术*, 2024, 46(6): 634-645.
XIONG Hui, LI Ruihua, LIU Hai. A stable control method for infrared search and tracking system on mobile platform[J]. *Infrared Technology*, 2024, 46(6): 634-645.
- [16] ZHANG Y, FENG S, WANG Z, et al. A novel separated position and orientation system integrated with inertially stabilized platform[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018(Pt. 2): 1-10.
- [17] 邓超. 运动平台预测跟踪技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2018.
DENG Chao. Research on prediction and tracking technology of motion platform [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [18] GUO X, LI Z, ZHAI Y, et al. Design on a lag-lead emendation network for some missile control system[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*, 2017, 2017(1): 47-1-7.
- [19] XIA L S, YOU D M, JIANG X, et al. Emergence and temporal structure of Lead-Lag correlations in collective stock dynamics[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2018, 502(c): 545-553.
- [20] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2001.
HU Shousong. Principles of automatic control[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2001.
- [21] 陈小军, 胡杰, 张瑜, 等. 瞄准线稳定精度试验方法研究[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(4): 180-183.
CHEN Xiaojun, HU Jie, ZHANG Yu, et al. Research on test method for the stabilizing accuracy of the aiming line[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(4): 180-183.