中国科学: 技术科学 2024 年 第 54 卷 第 6 期: 1137 ~ 1148
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 文

# 路面不平度对遥控武器站伺服性能的影响分析

谢馨, 张连超*, 郑杰基, 李宝宇, 范大鹏*

国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073
* E-mail: lchzhang@163.com; fdp@nudt.edu.cn

收稿日期: 2023-07-04; 接受日期: 2023-10-23; 网络版发表日期: 2024-06-12
国家自然科学基金(批准号: 52305079, U19A2072)资助项目

**摘要** 随着车载遥控武器站遂行作战任务的不断增加, 对遥控武器站行进间射击精度提出了越来越高的要求, 而车辆在行进过程中由不平整路面引入的基座扰动, 会给武器火线稳定精度带来极大的影响. 针对路面不平度扰动对遥控武器站稳定性能影响机理不明的问题, 本文在分析遥控武器站系统组成、工作原理及关键技术指标基础上, 建立了包含驱动、传动、控制以及路面不平度随机扰动的遥控武器站系统机电耦合全局动力学模型, 分析不同路面等级、不同车速下路面不平度扰动对系统稳定精度的影响, 搭建路面不平度随机扰动模拟测试平台, 验证理论分析和数值仿真的有效性. 仿真和实验结果表明, 当车速为18 km/h时, 在稳定平台作用下, 稳定误差几乎不随路面等级的变化而变化. 当车速为36和72 km/h时, 随着路面等级提高至E级以上时, 系统稳定误差呈近似指数增长, 且速度越高, 稳定精度恶化得越严重.

**关键词** 遥控武器站, 路面不平度, 机电耦合全局动力学模型, 稳定精度

## 1 引言

遥控武器站是为满足战场对武器平台高机动性、快速响应能力和较强防护能力的要求, 近年来迅速发展的一种综合武器系统, 主要由武器单元、光电侦察探测设备、稳定平台等构成, 具有侦察距离远、瞄准与火力打击精度高、人员安全性高、可昼夜使用等诸多优点, 已成为现代陆战战场重点发展的高技术武器装备之一[1,2].

随着车载遥控武器站遂行作战任务的不断增加, 对遥控武器站行进间射击精度提出了越来越高的要求. 而车辆在行进过程中由不平整路面引入的基座扰动, 会给武器火线稳定精度带来极大的影响. 因此, 研究路面不平度扰动对遥控武器站伺服性能的影响机理, 进而提出路面不平度扰动下的高精度控制算法, 是十分有意义的. 目前路面不平度相关研究主要集中在路面不平度建模和车载武器行进间射击动力学两个方面.

在路面不平度建模方面, 路面不平度通常被视为平稳随机过程的样本函数, 通常以功率谱密度描述不同起伏程度下的振动规律, 在此基础上分析特定行驶工况下的系统的动态响应特性, 常用的手段有: 功率谱密度函数直接作为系统输入或者利用谐波叠加法、伪白噪声法、逆傅里叶变换法等在时间域进行重构后

引用格式: 谢馨, 张连超, 郑杰基, 等. 路面不平度对遥控武器站伺服性能的影响分析. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1137–1148
Xie X, Zhang L C, Zheng J J, et al. Analysis of the influence of road roughness on the servo performance of remote control weapon stations (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1137–1148, doi: 10.1360/SST-2023-0216

© 2024 《中国科学》杂志社 

作为激励输入. 国内外学者已在路面不平度建模方面开展了大量研究工作, 余贵等人[3]为满足工程中虚拟实验的需求, 利用傅里叶逆变换法研究了三维随机路面不平度建模方法, 仿真生成的路面与标准路面谱是高度一致的, 有较强的实用性. 赵斌等人[4]通过路面不平度空间功率谱密度分析了路面频域模型, 并推导出了路面时域模型的滤波白噪声数值模拟方法. 王红岩等人[5]为提高车辆虚拟试验结果的准确性, 利用双轨真实路形计对中波和长波起伏路面进行测量, 采用基于周期图法改进的Welch算法对实测数据进行了功率谱密度估计, 并采用谐波叠加法建立三维随机路面模型, 通过与实测数据作功率谱密度对比, 验证了三维随机路面模型的准确性. 朱月风和王倩[6]为进一步提高路面平整度模拟精度, 基于AR模型建立了由路面随机激励的时间功率谱密度求得双轮路面随机激励时域模型的方法, 在MATLAB平台搭建了双轮路面时域AR模型. 为提高路面不平度模型的精度与效率, Bogsjö等人[7]提出了三种路面不平度模型, 包括齐次拉普拉斯滑动平均模型、非拉普拉斯模型以及混合模型. 以上研究可以有效指导路面不平度理论和仿真模型的建立.

车载武器行进间射击动力学研究的目的是分析车载武器在路面不平度输入以及射击载荷下的动力学响应. 目前国内外对车载武器行进间射击动力学的研究主要是建立路面-车辆-武器系统一体化模型, 探索路面不平度扰动下武器火力线角位移、角速度等动力学参量的变化规律, 从而为提高射击精度以及减轻系统重量提供理论依据. 如刘飞飞等人[8]基于非线性多体系统离散时间传递矩阵方法, 建立了以坦克行进间弹丸发射非线性动力学方程、火炮发射动力学建模与算法为核心的一整套理论体系, 为坦克、自行火炮等武器站行进间发射动力学设计与试验提供了理论和技术支持. 麻小明等人[9]基于虚拟样机技术对整车进行动力学仿真, 研究武器系统在不同路面及不同行进速度条件下的动态响应特性. 谢润[10]建立了考虑三维路面激励以及悬架非线性特性的车载武器刚柔耦合动力学模型, 在耳轴-轴承径向间隙、身管-衬瓦配合间隙以及前衬瓦轴向偏移量等总体结构参数变化条件下, 对不同行驶速度、路面等级、射击载荷、射角等工况下武器火力线振动响应进行了数值计算. 总的来看, 以上研究主要集中在如何准确地描述路面不平度扰动力传递到武器的全过程上. 然而, 能够有效抑制路面不平度扰动的稳定平台, 在机电耦合作用下开展路面不平度扰动影响分析, 显得尤为重要.

目前在稳定平台作用下分析路面不平度扰动对系统稳定精度影响的研究还不多, 主要的研究有: 宋雨荷[11]建立了某型轮式自行高炮伺服系统的俯仰向机电耦合动力学模型, 对路面不平度扰动作用下的稳定精度进行了仿真分析, 但将系统等效简化为了车体干扰输入-随机误差输出的传递函数, 难以分析不同控制器作用下路面不平度对系统的影响. 孙志群[12]建立了PID、滑膜控制器、模糊自适应滑膜控制器等三种控制器下的车载火箭炮伺服系统动力学模型, 并对不同路面不平度下阶跃、正弦信号跟踪进行了仿真计算. 陈宇和杨国来[13]基于RecurDyn/Control建立了坦克行进间机电耦合动力学模型, 通过数值计算对坦克在稳定器作用下的行进间炮口振动特性进行了分析. 但以上研究均缺乏相应的实验验证. 孙国轩等人[14]建立了考虑行进间路面不平度扰动的机电联合仿真模型, 采用实车试验方法验证联合仿真模型的正确性, 在此基础上, 利用差分进化算法整定PID控制参数, 说明差分进化算法整定得到的PID控制参数可进一步提高火力线的控制精度和稳定性. 通过以上分析可知, 路面不平度对遥控武器站稳定性能影响的研究相对还很薄弱, 亟待开展相关研究.

因此, 本文在分析遥控武器站系统组成、工作原理及关键技术指标基础上, 建立包含驱动、控制以及考虑路面不平度随机扰动的遥控武器站系统机电耦合全局动力学模型, 其中利用时域合成模拟法建立了路面不平度扰动时域模型, 机构动力学模型包含摩擦、间隙等非线性因素, 控制器可根据实际要求进行设计. 以此开展不同路面、不同车速下路面不平度扰动对系统稳定精度的影响分析, 并搭建路面不平度随机扰动模拟测试平台, 验证理论分析和数值仿真的有效性, 为高精度、高鲁棒性控制算法的研究打下基础.

## 2 遥控武器站系统组成与工作原理

### 2.1 系统组成与工作原理

车载遥控武器站是一种集目标搜索、识别、跟踪和打击等功能于一体的新型武器系统, 主要由车外的自动枪塔单元和车内操控显示单元组成. 其中自动枪塔单元包括武器单元、光电侦察探测设备、稳定平台

等三个部分. 武器单元是武器站执行火力打击和非致命驱散任务的主要部件; 稳定平台主要由方位、俯仰伺服装置和框架结构等构成, 可以实现方位、俯仰双向稳定及运动; 光电侦察探测设备可搭配可见光摄像机、红外热像仪和激光测距等光学设备, 通常具有独立俯仰轴, 用于实现双向伺服稳定和目标观瞄. 车内操控显示单元由控制单元、显控单元以及辅助单元等组成, 用于实现枪塔控制、状态显示及车内系统通信等功能, 系统组成示意图如图1所示.

遥控武器站通常具有搜索模式、随动模式和目标跟踪模式三种工作模式, 可根据作战任务在不同工作模式之间相互切换. 搜索模式是利用光电侦察探测设备实现对周围环境的态势感知. 随动模式是武器单元以观瞄单元的实际角度信息作为指令, 实现武器单元跟随光电侦察探测设备运动. 目标跟踪模式是在锁定目标后, 光电侦察探测设备利用图像跟踪器计算目标脱靶量, 通过控制器对目标进行跟踪动态补偿, 实现瞄准线对目标的高精度跟踪, 并同时将观瞄单元的实际方位和俯仰位置信息作为武器单元的控制指令, 以此保证火力线与瞄准线指向的一致性, 所采用的控制器通常会包括速度环控制器、位置环控制器、前馈控制器、扰动补偿器等.

### 2.2　伺服性能关键指标

根据遥控武器站系统任务剖面、工作原理, 通常采用稳定精度、低速平稳性和定位精度等作为评价系统伺服控制性能的技术指标.

(1) 稳定精度

高稳定精度是克服载体扰动, 保持瞄准线和火力线稳定, 实现运动射击精度的重要保证. 根据遥控武器站工作原理可知, 武器站通常是利用稳定控制回路对瞄准线进行稳定, 火力线随动瞄准线运动, 从而达到火力线的稳定. 常用瞄准线或火力线在稳定状态下实际值与理想指向值角度偏差的均方根值(RMS)来衡量稳定精度.

(2) 低速平稳性

低速平稳性是指系统速度输出不发生“爬行”且跟踪误差满足不均匀要求的最低跟踪速度, 即低速运动时系统有较好的运动平稳性, 伺服装置运动没有明显的抖动和回摆现象. 低速平稳性直接影响了武器站对远距离低速运动目标的瞄准和跟踪能力. “爬行”现象是由于机电作动器内部的摩擦、间隙等非线性因素而导致的低速抖动.

(3) 定位精度

在目标锁定时, 需要较高的定位精度, 保证系统火力线的精确指向. 定位精度是指给定指令与瞄准线(火力线)实际位置之间的差距, 将系统工作于位置控制回路, 输入阶跃位置指令, 待伺服装置恢复静止后, 计算指令位置和实际位置的偏差作为定位误差. 定位误差越小, 说明定位精度越高.

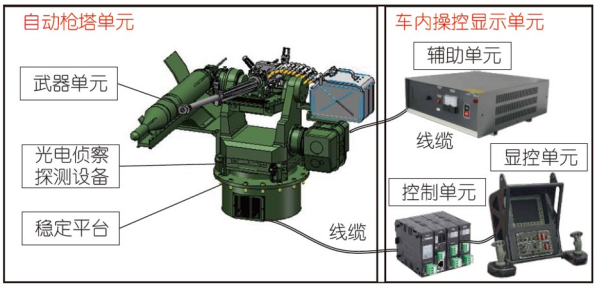



**图 1**　(网络版彩图)遥控武器站系统组成示意图

**Figure 1**　(Color online) Schematic diagram of remote control weapon stations (RCWS).

## 3　路面不平度扰动建模与分析

遥控武器站伺服性能的最主要外部扰动为路面不平度随机扰动, 绘制包含路面不平度随机扰动的武器站方位/俯仰轴模型框图, 如图2所示.

图2中, $\omega_{\mathrm{cmd}}$为速度指令, $K_{\mathrm{I}}$为驱动器转换系数, $K_{\mathrm{T}}$为电机转矩常数, $J_m$和$J_L$为电机转子的转动惯量, $\theta_m$和$\dot{\omega}_m$分别为电机端的角位置和角速度, $\theta_L$和$\dot{\omega}_L$分别为负载端角位置和角速度, $T_m$为电机的输出力矩, $T_N$为经过传动部件后的输出力矩, $K_{\mathrm{eq}}$为传动部件的传动刚度, $i$为传动比, $\Delta\theta$ 代表减速器回差值, $T_{fm}$和$T_{fL}$分别代表电机端、负载端摩擦转矩, $T_d$为由路面不平度引起的扰动力矩, $\theta_b$为路面不平度引起的基座晃动角度. 由此可得到系统机电混合模型为

$$\begin{cases} J_m\dot{\omega}_m = T_m - T_{fm} - \dfrac{T_N}{i}, \\ J_L\dot{\omega}_L = T_N - T_{fL} - T_d, \\ T_N = K_{\mathrm{eq}}\left(\dfrac{\theta_m}{i} - \theta_L \pm \Delta\theta\right), \\ T_m = K_I K_T u_{in}. \end{cases} \tag{1}$$

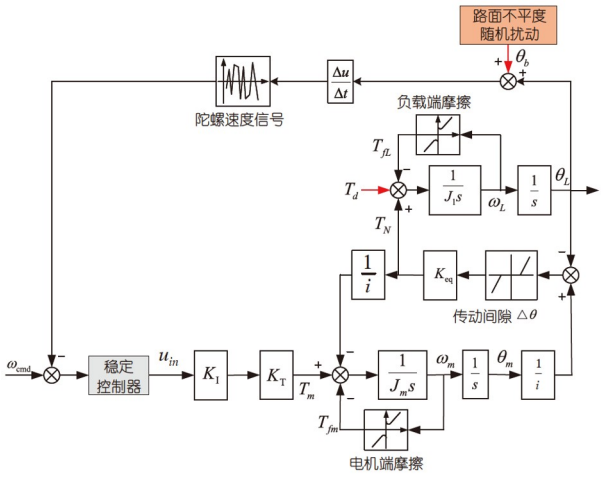



**图 2** (网络版彩图)考虑路面不平度扰动的武器站方位/俯仰轴动力模型

**Figure 2** (Color online) Dynamic model of weapon station azimuth/pitch axis considering road surface irregularity disturbance.

下面建立行驶过程中的路面不平度随机扰动模型, 并分析其对武器站系统伺服特性的影响.

### 3.1 路面不平度扰动建模

路面时域模型能为行进间武器站的基座扰动提供路面随机高程信号, 提高仿真分析结果的真实程度. 路面时域模型的获取方法主要有两种. 一种是对相应等级路面进行测试; 另一种是利用路面不平度的功率谱密度重构路面高程函数, 这种方法以成本低的优点广泛应用于工程实践和理论研究中.

国标GB/T 7031-2005《机械振动道路路面谱测量数据报告》将典型道路划分为8个等级, 提出了路面不平度的功率谱密度和均方差描述方法, 表达式分别为

$$G_q(n) = G_q(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega}, \tag{2}$$

$$\sigma_q(n) = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)\mathrm{d}t}, \tag{3}$$

其中, $n$, $n_0$, $G_q(n_0)$和$\omega$分别代表空间频率、参考空间频率、参考空间频率下的功率谱密度值和频率指数.

表1给出了路面不平度等级分类的标准, 据统计, 国内各国道、省道的路面不平度集中覆盖A~H等级内, B、C级占多数. 而对于履带车辆外场试验项目常常选用的越野环境, 可以定性为F和G级路面标准, 武器站动态仿真实验也可参照F和G级路面开展.

路面时域模型的数值模拟方法主要有谐波叠加法、傅里叶逆变换法、道路模拟法和基于离散时间序列的AP/APMA法等, 其中白噪声法以其构建步骤简单、计算量小和精度高的优点在工程中应用较广, 其路面不平度扰动时域模型表达式为

$$\dot{q}(t) = -2\pi n_{00}uq(t) + 2\pi n_0\sqrt{G_q(n_0)u}\,W(t), \tag{4}$$

其中, $n_{00}$为下截止空间频率, $u$为行驶速度, $W(t)$为白噪声, $q(t)$为路面高程.

### 3.2 路面不平度扰动传递机理分析

路面不平度扰动是影响车载遥控武器站行进间射击精度的主要因素, 车辆在不平路面上行驶, 会在垂直方向上产生作用力, 再通过车体和稳定平台作用到武器单元上, 影响武器单元的瞄准精度.

**表 1** 路面不平度的分类标准

**Table 1** Classification standards for road roughness

| 路面等级 | $G_q(n_0)/(10^{-6}\ \mathrm{m}^3)$ $n_0$=0.1 $\mathrm{m}^{-1}$ | | | $\sigma_q(n_0)/(10^{-3}\ \mathrm{m})$ 0.011 $\mathrm{m}^{-1}$<$n$<2.83 $\mathrm{m}^{-1}$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 下限 | 平均值 | 上限 | 下限 | 平均值 | 上限 |
| A | 8 | 16 | 32 | 2.69 | 3.81 | 5.38 |
| B | 32 | 64 | 128 | 5.38 | 7.61 | 10.77 |
| C | 128 | 256 | 512 | 10.77 | 15.23 | 21.53 |
| D | 512 | 1024 | 2048 | 21.53 | 30.45 | 43.06 |
| E | 2048 | 4096 | 8192 | 43.06 | 60.90 | 86.13 |
| F | 8192 | 16384 | 32768 | 86.13 | 121.80 | 172.26 |
| G | 32768 | 65536 | 131072 | 172.26 | 246.61 | 344.52 |
| H | 131072 | 262144 | 524288 | 344.52 | 487.22 | 689.04 |

图3中, $O_1$为俯仰轴回转中心, $\theta_{by}$为路面相对于惯性空间水平线的角度(坡度), $\theta_{Lb}$为俯仰轴相对于路面的转角, $\theta_L$为武器火力线相对于惯性空间水平线的角度. 在行驶过程中, 车体运动产生的扰动力会传递到基座中, 再通过方位框架耦合到俯仰框架上.

假设车体以速度$v$匀速行驶, 若车辆前轮处高程为$q(t)$, 则车辆后轮处为$q(t-L/v)$. 通过图4可得到基座角运动与路面高程之间的关系如式(5)所示:

$$\theta_{by}=\arcsin\left(\frac{q(t)-q\left(t-\frac{L}{v}\right)}{L}\right)\approx\arctan\left(\frac{q(t)-q\left(t-\frac{L}{v}\right)}{L}\right). \tag{5}$$

结合式(1)和(5), 可以得到各个角运动之间的关系为

$$\begin{cases} J_m\ddot{\theta}_m=T_m-T_{fm}-T_N/i, \\ J_L\ddot{\theta}_L=T_N-T_{fL}, \\ \theta_L=\theta_{Lb}+\theta_{by}, \\ \theta_m=\theta_{mb}+\theta_{by}, \\ \theta_{mb}=i\theta_{Lb}. \end{cases} \tag{6}$$

重新整理式(6)可得

$$(i^2J_m+J_L)\ddot{\theta}_L=iT_m-iT_{fm}-T_{fL}+T_b, \tag{7}$$

式中, $T_b$为基座耦合力矩, 有$T_b=i(i-1)J_m\ddot{\theta}_{by}$, 将式(5)代入式(7)中, 即可得到基座耦合力矩表达式.

### 3.3　路面不平度扰动时域合成模拟

为了便于分析路面不平度随机扰动对武器站伺服控制性能的影响, 可以采用时域合成模拟方法, 将路面不平度扰动信号分解成易于表示的波形集. 本文以正弦波为基础波形, 即

$$a_0=\sum_{i=1}^{n}a_i=\sum_{i=1}^{n}A_i\sin(\omega_it+\varphi_i), \tag{8}$$

其中, $a_0$为路面不平度扰动信号, $a_i$为基础正弦函数. 时域合成模拟过程实质为多组数据拟合寻优问题, 可以采用最小二乘法进行求解. 具体求解过程如图4所示, 其中$r_i$为剩余波形, $\varepsilon_i$为剩余波形能量$E_{r_i}$与原始信号能量$E_{a_0}$的比值. 当剩余能量$\varepsilon_i$小于某一阈值$\Delta\varepsilon$后, 便认为路面不平度扰动信号时域合成模拟完成.

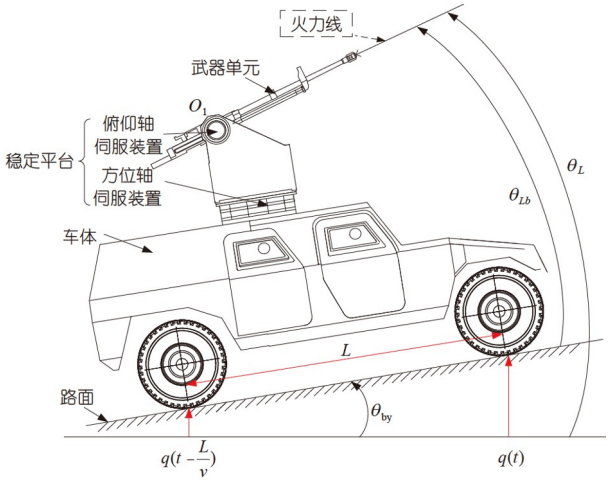



**图 3**　(网络版彩图)路面不平度随机扰动传递机理分析示意图

**Figure 3**　(Color online) The transmission mechanism of random disturbance due to road surface roughness.

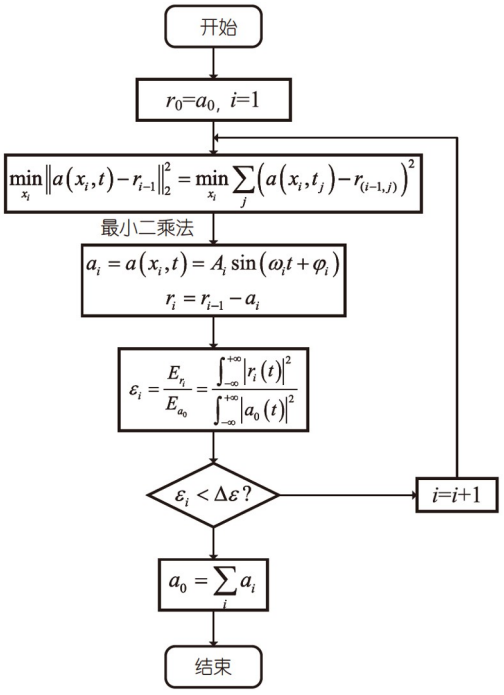



**图 4**　路面不平度扰动时域合成模拟流程图

**Figure 4**　Flow chart of time-domain synthesis simulation of road roughness disturbance.

## 4　仿真分析

### 4.1　仿真模型的建立

在MATLAB/Simulink中搭建包含驱动、传动、控制及外部扰动特性的武器站机电耦合全局动力学仿

真模型, 如图5所示. 具体分为三个部分: 一是方位和俯仰传动装置的机电混合模型, 如图2所示. 模型中考虑了机构内部的摩擦、间隙等非线性因素以及路面不平度等外部扰动. 二是方位/俯仰轴控制器, 为了提高武器站在摩擦、谐振等多特征非线性扰动作用下的行进间稳定精度, 通常采用“前馈+反馈+扰动补偿”的复合控制算法, 本文所述控制器拟采用文献[15]所述复合控制算法, 对路面不平度扰动开展影响分析. 三是两轴框架耦合动力学模型, 指的是方位俯仰框架的运动学耦合关系和框架间转动惯量耦合关系, 具体分析可见文献[16]. 内部各个关键模块的Simulink仿真模型框图及具体参数值见支持信息.

仿真模型中的路面不平度扰动信号是根据路面不平度扰动时域模型和时域合成模拟方法形成的. 具体来说, 根据式(4)建立路面时域模型模拟路面不平度扰动高程, 可得到特定速度下不同路面高程图, 如图6所示, 为36 km/h速度下A, C, E, G级路面高程图. 可以看出随着路面不平度等级的增加, 路面高程也相应增加.

再利用式(8), 以正弦波为基础波形对路面载荷进行时域合成, 以36 km/h速度下的H级路面实测载荷为例, 运用该方法对信号进行分解和重构. 如图7所示, 分别为原始信号与重构信号, 从图7可看出, 二者的相似度较高. 图8所示为时域合成后按照能量占比排序前十的波形分量. 表2展示了这些波形分量表达式的参数值, 以及单个波形分量能量占原始信号能量的比值. 前10阶波形集总能量约占原始信号能量的93%. 利用该重构波形, 可以分析路面不平度随机扰动对武器站伺服控制性能的影响规律.

### 4.2 影响分析

利用重构后的波形集作为路面不平度扰动信号输入系统, 开展路面不平度对武器站伺服系统的影响分析. 具体包括稳定平台、不同车速、不同路面等级等三方面对武器站稳定精度的影响.

(1) 稳定平台影响分析

假设车体以72 km/h的速度行驶于F级路面, 车辆载体指向和经稳定平台后的武器指向精度如图9所示. 由于路面不平度扰动, 未经稳定平台的载体指向误差峰峰值为173.72 rad, 而经稳定平台的武器指向误差峰峰值为4.26 rad, 降低了约97.55%, 说明稳定平台能够有效降低路面不平度扰动对武器火线稳定精度的影响.

(2) 不同车速影响分析

假设车体以不同速度行驶于F级路面, 结果如图10所示. 车速变化对于武器站俯仰轴稳定精度的最主要影响在于频率方面, 随着车速变大, 武器火力线晃动的频率相应增大, 在车速为72 km/h时, 速度偏差出现了高频振荡, 要求稳定平台有更高的响应带宽, 以克服路面不平度扰动带来的不利影响.

(3) 不同路面等级影响分析

假设车体以36 km/h的速度行驶于等级路面, 结果如图11所示. 随着路面等级增加, 武器站俯仰轴火力线晃动范围变大并逐渐偏移, 严重制约了武器站射击精度的提高. 分析其原因, 当路面起伏高度越大, 伺服系统需在反方向旋转更大角度以精确抵消路面不平度给基座带来的扰动影响, 增加了伺服系统控制难度.

综上所述, 稳定平台能够有效降低路面不平度扰动对武器火线稳定精度的影响, 随着车速提高或者路

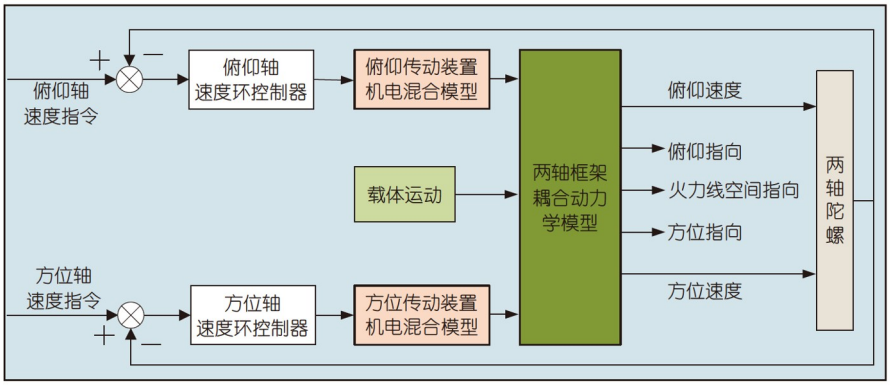



**图 5** (网络版彩图)武器站机电耦合全局动力学仿真模型框图

**Figure 5** (Color online) Block diagram of the global electromechanical coupling dynamic model for RCWS.

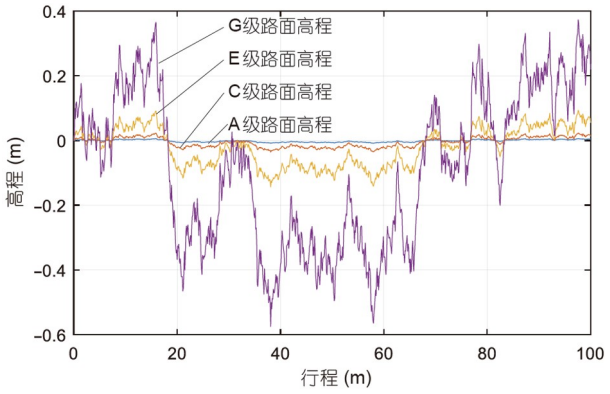



图 6　(网络版彩图)车辆36 km/h速度下A, C, E, G级路面高程图

**Figure 6**　(Color online) Elevation map of A, C, E and G level road surface at a speed of 36 km/h.

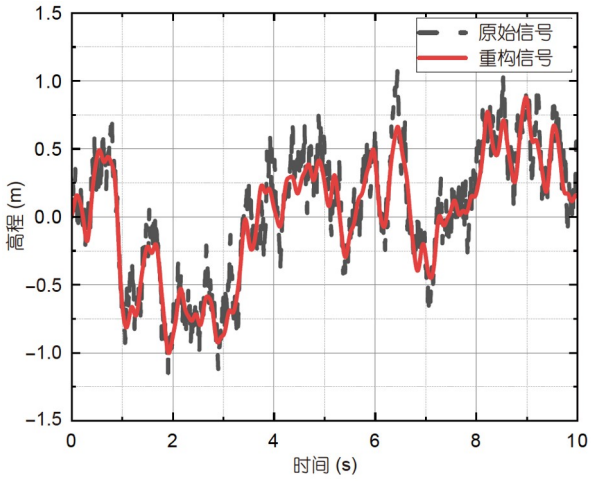



图 7　(网络版彩图) H级路面不平度扰动信号时域合成模拟对比图

**Figure 7**　(Color online) Comparison of time-domain synthesis simulation of H-level road roughness disturbance signals.

面等级增加, 速度偏差出现了高频振荡, 有一定的失稳风险, 对武器站稳定平台的抗干扰能力提出了更高的要求.

## 5　实验验证

武器站俯仰轴K∏平台由某型武器站俯仰轴伺服装置、负载模拟杆和摇摆台组成, 如图12所示. 将俯仰轴伺服装置安装在摇摆台上, 利用摇摆台模拟车辆行驶于不平整路面时对武器站俯仰轴的扰动力. 俯仰轴伺服装置由一台交流伺服电机(型号: ASM80B1007-

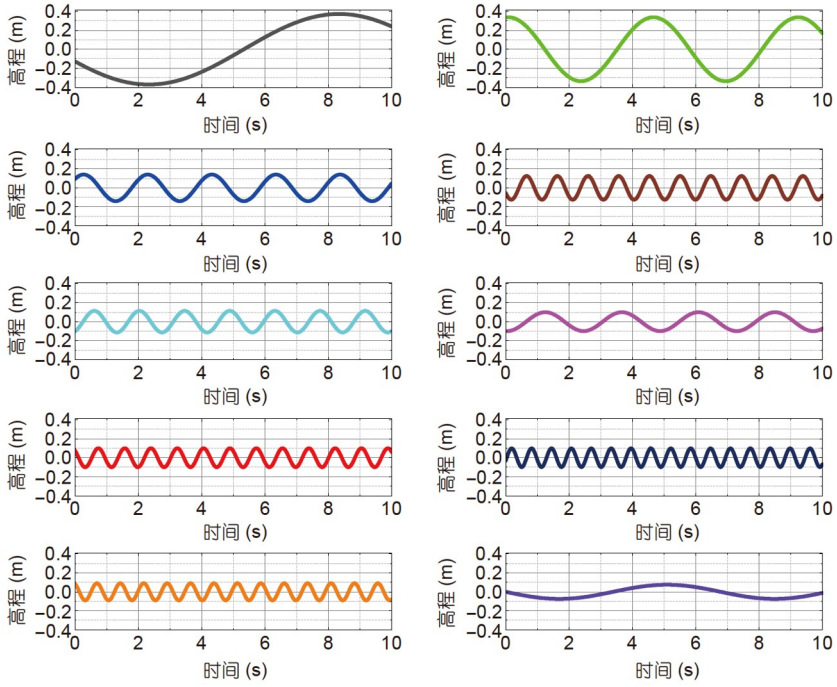



图 8　(网络版彩图) H级路面不平度扰动信号重构波形集

**Figure 8**　(Color online) Reconstruction waveform set for H-level road roughness disturbance signals.

**表 2** H级路面不平度扰动信号重构波形集参数值

**Table 2** Reconstruction of waveform parameter values for H-level road surface roughness disturbance signals

| 序号 | $A$ | $\omega$ | $\varphi$ | $\varepsilon$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 370.72 | 0.52 | 22.34 | 35.84 |
| 2 | 336.02 | 1.37 | 1.45 | 26.49 |
| 3 | 139.78 | 3.1 | −5.56 | 4.43 |
| 4 | 124.62 | 6.48 | 3.55 | 3.55 |
| 5 | 113.06 | 4.41 | 5.15 | 2.89 |
| 6 | 99.3 | 2.6 | −1.68 | 2.28 |
| 7 | 99.48 | 7.56 | −22.84 | 2.23 |
| 8 | −97.99 | 10.01 | 2.82 | 2.17 |
| 9 | −89.88 | 8.5 | −1.16 | 1.82 |
| 10 | 74.36 | 0.92 | 3.15 | 1.27 |
| 其他 | – | – | – | 7 |

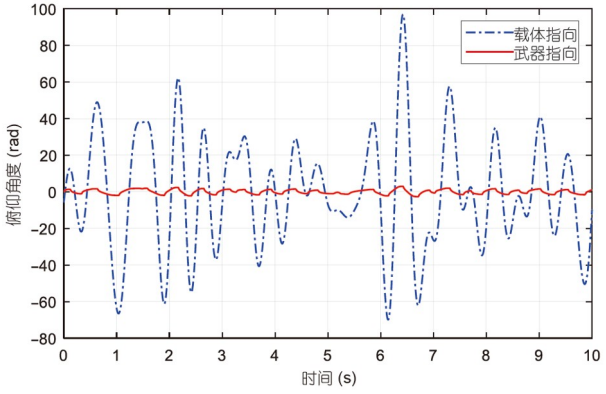



**图 9** (网络版彩图)稳定平台对武器站俯仰轴控制精度的影响

**Figure 9** (Color online) The influence of stable platform on the control accuracy of RCWS pitch axis.

30M)、精密RV减速器(型号: ZKRV-20E-161-B)和光纤陀螺组成, 俯仰轴伺服装置电机端的角度和角速度通过增量式编码器采集, 而RV减速器输出端的速度通过光纤陀螺(型号: FOG-118)获取. 以两只螺纹伸缩杆作为负载模拟杆, 以相同的转动惯量及质心偏移量模拟武器单元重量. 摇摆台由一台额定功率为200 W、额定转速为3000 r/min的交流伺服电机(型号: MSMF022L1A1M)和减速比为50的精密行星减速器(型号: FABR060-50-S1-P1)组成.

采用式(8)所示时域合成模拟方法, 将路面不平度随机扰动波形集作为摇摆台的位置输入指令, 利用摇

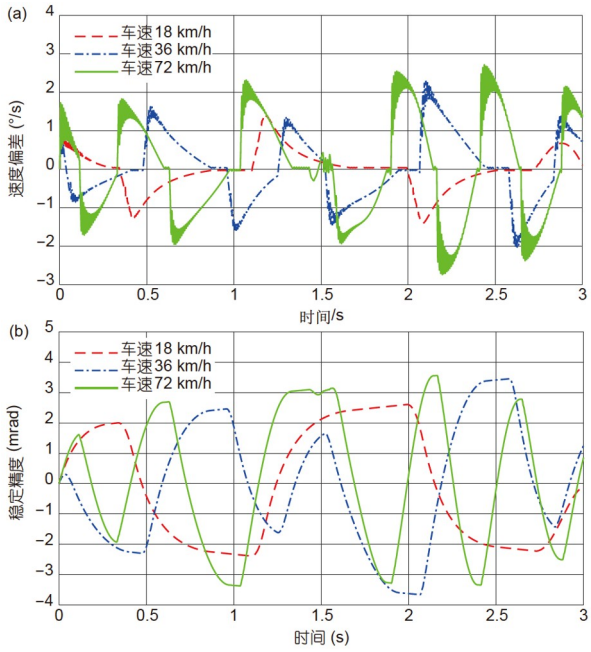



**图 10** (网络版彩图)不同车速对武器站俯仰轴控制精度的影响. (a) 速度偏差; (b) 稳定精度

**Figure 10** (Color online) The influence of different vehicle speeds on the control accuracy of RCWS pitch axis. (a) Speed deviation; (b) stable accuracy.

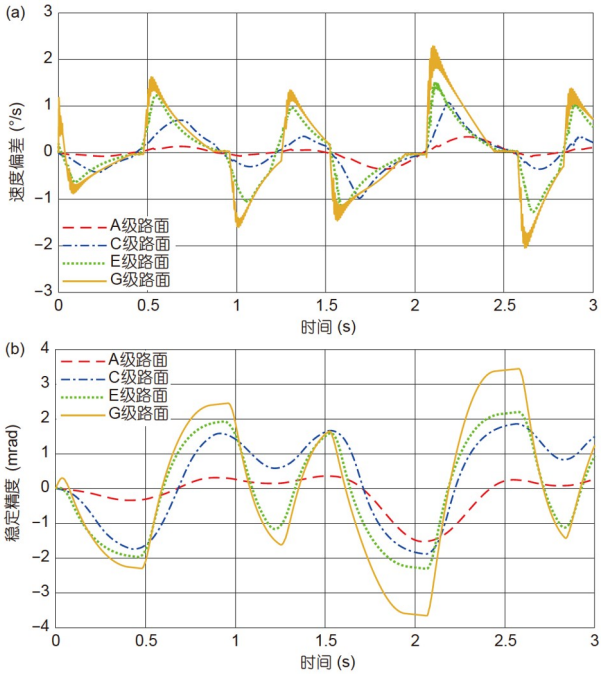



**图 11** (网络版彩图)不同路面等级对武器站俯仰轴控制精度的影响. (a) 速度偏差; (b) 稳定精度

**Figure 11** (Color online) The influence of different road grades on the control accuracy of RCWS pitch axis. (a) Speed deviation; (b) stable accuracy.

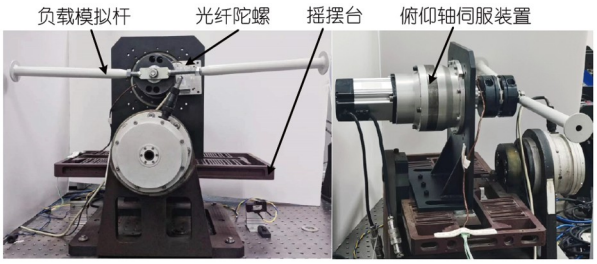



**图 12**　(网络版彩图)武器站俯仰轴伺服装置测试平台

**Figure 12**　(Color online) Test platform for pitch axis servo device of RCWS.

摆台模拟车辆以不同速度在不同等级路面上行驶对武器站俯仰轴稳定精度的影响.

选取的路面等级为C级、D级、E级、F级和G级, 装甲车辆行驶速度通常在80 km/h以内, 为便于分析, 取“低速”“中速”“高速”三档展开分析, 即为18, 36和72 km/h. 在如图5所示伺服控制系统的校正下, 保持火力线在惯性空间的指向稳定, 控制器采用常规的PID控制器, 实验中使用的控制器参数与仿真参数相同, 可见支持信息, 实验过程中记录陀螺速度及其积分值, 分别表征俯仰轴伺服装置因车辆行进过程中路面不平度引起的陀螺速度偏差和稳定误差, 并以稳定误差的均方根值(RMS)来衡量稳定精度.

首先, 利用摇摆台模拟车辆以不同速度行驶于F级路面, 得到稳定控制下的陀螺速度偏差与稳定精度如图13所示. 同一路面等级时, 随着车辆速度的提高, 车辆俯仰变化频率升高, 传动装置的稳定控制模式带宽有限, 无法响应更高频率的速度变化, 进而使陀螺速度偏差和稳定精度变大. 从图中可以得出, 车辆速度提高时, 陀螺速度偏差和稳定精度均变大, 且车辆速度线性变大时, 陀螺速度偏差和稳定精度的峰峰值呈近似线性增长.

再利用摇摆台模拟车辆以72 km/h的速度行驶于不同等级的路面, 得到稳定控制下的陀螺速度与稳定精度如图14所示. 从图中可看出, 随着路面等级的提高, 路况高程增大引起武器站俯仰轴速度偏差和火力线稳定误差增大. 在车速为72 km/h条件下, C级路面和D级路面下的稳定精度约0.6 mrad, 随着路面等级提高至E级以上时, 陀螺速度偏差和稳定精度峰峰值呈近似指数增长, G级路面下的稳定精度约为2.3 mrad, 两项指标值均达到C级路面和D级路面的4倍左右.

测试不同路面等级、不同车辆速度下系统的稳定精度, 以稳定精度的均方根值评价传动装置在稳定控制模式下的控制效果, 仿真和测试结果如图15所示. 采用拟合度[17]来对比分析模型仿真结果与实验测试结果的一致性, 车速为18, 36和72 km/h时, 拟合度分别为90.13%, 83.31%, 87.98%. 图中所示仿真结果均大于

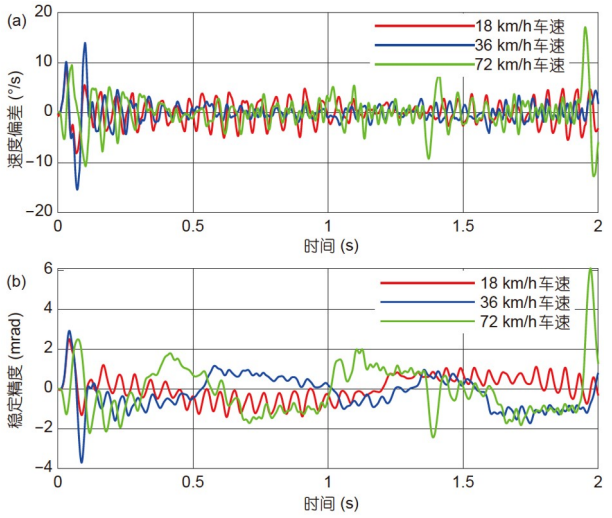



**图 13**　(网络版彩图)不同速度行驶于F级路面时的速度偏差和稳定精度. (a) 速度偏差; (b) 稳定精度

**Figure 13**　(Color online) Speed deviation and stability accuracy when driving on F-class roads at different speeds. (a) Speed deviation; (b) stable accuracy.

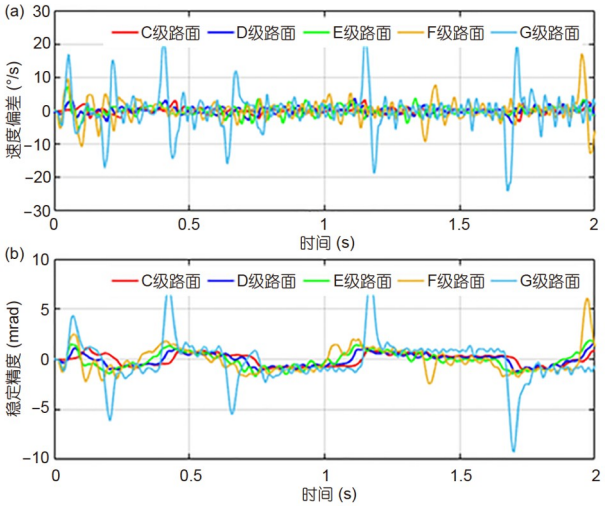



**图 14**　(网络版彩图)72 km/h行驶于不同等级路面时的速度偏差和稳定精度. (a) 速度偏差; (b) 稳定精度

**Figure 14**　(Color online) Speed deviation and stability accuracy when driving on different levels of road surfaces at 72 km/h. (a) Speed deviation; (b) stable accuracy.

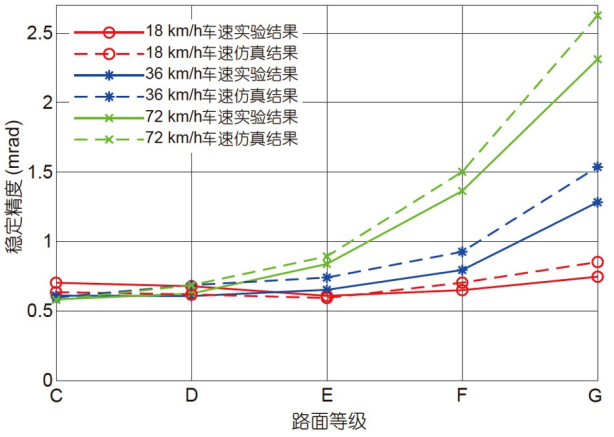



**图 15** (网络版彩图)稳定精度与路面等级、车辆速度的关系

**Figure 15** (Color online) Relationship between stability accuracy, road grade, and vehicle speed.

实验结果，主要原因为摇摆台是通过“力矩电机+减速器”实现运动的，难以模拟路面不平度的高频率扰动，输入系统的路面不平度随机扰动波形集有所减弱，以上结果较好地说明了所建立理论模型的准确性.

当车速为18 km/h时，稳定精度几乎不随路面等级的变化而变化. 当车速为36和72 km/h时，在路面等级为E级以下时，稳定精度并未随着路面等级的提高及车辆速度的增大而变差. 当路面等级高于E级时，随着路面等级和车辆速度的提高，稳定精度数值呈现近似指数增长的趋势，稳定精度显著变差，且速度越高，稳定精度恶化得越严重. 在路况相对良好、车辆以低速通过时，车辆俯仰角度变化量级大而变化频率低，当车辆以较高速度通过时，车辆俯仰角度变化量级减小，频率变高，此时，传动装置在稳定控制模式下的扰动从低频大扰动变化为高频小扰动，稳定精度存在变优的可能，测试数据符合理论分析结果.

## 6 结论

本文在分析遥控武器站系统组成、工作原理及关键技术指标基础上，建立了考虑路面不平度随机扰动的遥控武器站系统机电耦合动力学模型，其中利用时域合成模拟法建立了路面不平度扰动时域模型. 由仿真分析和实验结果，得到如下主要结论:

(1) 当车速为18 km/h时，在稳定平台作用下，稳定误差几乎不随路面等级的变化而变化. 当车速为36和72 km/h时，随着路面等级提高至E级以上时，系统稳定误差呈近似指数增长;

(2) 当车速为36和72 km/h时，在路面等级为E级以下时，稳定精度并未随着路面等级的提高及车辆速度的增大而变差. 当路面等级高于E级时，随着路面等级和车辆速度的提高，稳定精度数值呈现近似指数增长的趋势，稳定精度显著变差，且速度越高，稳定精度恶化得越严重.

本文建立了遥控武器站系统机电耦合全局动力学模型，其中机构动力学模型包含摩擦、间隙等非线性因素，控制器可根据实际要求进行设计，可增加路面不平度等各类扰动信号. 据此可以开展路面不平度等外部扰动、机构内部非线性动力学特性和控制器三者相互耦合作用关系的机理研究，以保证武器站的行进间射击精度，促进轻武器的智能化、无人化应用，具有重要的理论意义和应用价值.

## 补充材料

本文的补充材料见techcn.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责.

## 参考文献

1 Zheng B W, Mao B Q, Zhong M C, et al. Development status and key technology analysis of intelligent weapon station (in Chinese). Fire Control Command Control, 2020, 45: 1–7 [郑博文, 毛保全, 钟孟春, 等. 智能武器站发展现状与关键技术分析. 火力与指挥控制, 2020, 45: 1–7]

2 Qi C. Research on servo control problems of remote control weapon station (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2020 [祁超. 遥控武器站关键伺服控制问题研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2020]

3 Yu G, Zhou X L, Dong J M, et al. Modeling and simulation of 3D stochastic pavement based on inverse Fourier transform (in Chinese). J Chongqing Univ, 2020, 43: 62–69 [余贵, 周兴林, 董菊明, 等. 基于傅里叶逆变换的三维随机路面建模与仿真. 重庆大学学报, 2020, 43: 62–69]

4 Zhao B, Dong H, Huang B, et al. Establishment and simulation of time domain model for band-limited white noise pavement roughness (in Chinese). Aut Appl Technol, 2019, 3: 89–90, 115 [赵斌, 董浩, 黄波, 等. 白噪声路面不平度时域模型的建立与仿真. 汽车实用技术, 2019, 3: 89–90, 115]

5 Wang H Y, Wang Q L, Rui Q, et al. Research on digital modeling method of riding road of vehicle (in Chinese). Acta Armamentarii, 2016, 37: 1153–1160 [王红岩, 王钦龙, 芮强, 等. 车辆行驶路面的数字化建模方法研究. 兵工学报, 2016, 37: 1153–1160]

6 Zhu Y F, Wang Q. Simulation of road surface random excitation based on time domain model (in Chinese). Highways Auto Appl, 2015, 2: 112–114 [朱月风, 王倩. 基于时域模型的路面随机激励模拟. 公路与汽运, 2015, 2: 112–114]

7 Bogsjö K, Podgórski K, Rychlik I. Models for road surface roughness. Vehicle Syst Dyn, 2012, 50: 725–747

8 Liu F F, Rui X T, Yu H L, et al. Study on launch dynamics of the self-propelled artillery marching fire (in Chinese). J Vib Eng, 2016, 29: 380–385 [刘飞飞, 芮筱亭, 于海龙, 等. 自行火炮行进间发射动力学研究. 振动工程学报, 2016, 29: 380–385]

9 Ma X M, Liu X X, Xu H B, et al. Study on launch dynamics for tracked vehicle-mounted weapon on traveling (in Chinese). J Project Rocket Missiles Guid, 2019, 39: 5 [麻小明, 刘馨心, 徐宏斌, 等. 履带式车载武器行进间发射动力学研究. 弹箭与制导学报, 2019, 39: 5]

10 Xie R. Study on launch dynamics for vehicle-mounted weapon on traveling (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015 [谢润. 车载武器行进间发射动力学研究. 博士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2015]

11 Song Y H. Influence of road spectrum on the firing effectiveness of antiaircraft gun in marching fire (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019 [宋雨荷. 行进间射击时路面谱对高炮射击效能的影响. 硕士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2019]

12 Sun Z Q. Research on the dynamics and control of an air defense V-MRLS on the move (in Chinese). Dissertation for the Master's Degree. Taiyuan: North University of China, 2021 [孙志群. 某防空车载火箭炮行进间发射动力学与控制研究. 硕士学位论文. 太原: 中北大学, 2021]

13 Chen Y, Yang G L. A study on muzzle vibration characteristics of moving tanks under the influence of a stabilizer (in Chinese). J Vib Shock, 2019, 38: 21–27 [陈宇, 杨国来. 稳定器作用下坦克行进间炮口振动特性研究. 振动与冲击, 2019, 38: 21–27]

14 Sun G X, Gong X Y, Shi Y, et al. PID parameter tuning of self-propelled antiaircraft gun servo system based on differential evolution algorithm (in Chinese). Acta Armamentarii, 2021, 42: 903–912 [孙国轩, 宫新宇, 时岩, 等. 基于差分进化算法的自行高炮随动系统PID参数整定. 兵工学报, 2021, 42: 903–912]

15 Jiang X, Fan D, Fan S, et al. High-precision gyro-stabilized control of a gear-driven platform with a floating gear tension device. Front Mech Eng, 2021, 16: 487–503

16 Jiang X L. Research on high precision and safety integrated control of weapon station servo device (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2021 [江献良. 武器站伺服装置高精度与安全集成控制问题研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2021]

17 Xie X. Research on the design and characteristic analysis of precise cable drive system (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2019 [谢馨. 精密柔索传动特性分析与设计问题研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2019]

# Analysis of the influence of road roughness on the servo performance of remote control weapon stations

XIE Xin, ZHANG LianChao, ZHENG JieJi, LI BaoYu & FAN DaPeng

*College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

With the continuous increase in combat tasks performed by vehicle-mounted remote control weapon stations (RCWSs), the requirements for the shooting accuracy of RCWSs while moving are increasing. However, during the vehicle's travel, uneven road surfaces can introduce base disturbances to the system, considerably affecting the stability and accuracy of the weapon firing line. To deduce the mechanism by which the road roughness disturbance influences the stability performance of RCWS, this paper analyzes the composition, working principle, and key technical indicators of RCWS. First, a global dynamic model for RCWS that considers the electromechanical coupling effect of random disturbances in road roughness, internal nonlinear characteristics of the mechanism, and controllers is established. Subsequently, the effect of the road roughness disturbance on the system stability accuracy under different road levels and vehicle speeds is analyzed. Finally, a simulation testing platform is developed for analyzing random disturbance due to road roughness for verifying the effectiveness of the theoretical analysis and numerical simulation. The simulation and experimental results show that the stability error hardly changes with the change in the road surface grade under the action of a stable platform when the vehicle speed is 18 km/h. Moreover, the system stability error increases approximately when the vehicle speed is 36 and 72 km/h, increasing exponentially as the road level increases above Class E, and the higher the speed, the poorer the stability accuracy.

**remote control weapon station, road roughness, electromechanical coupling dynamic model, stabilization precision**

doi: 10.1360/SST-2023-0216