

路面激励对火箭炮伺服控制影响研究

杜天柱¹, 杨 丽¹, 王茂余², 乔海涛², 郭策安¹

(1. 沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159; 2. 吉林三三五机械厂, 吉林 敦化 133709)

摘要: 为提高火箭炮的控制精度, 开展不同等级路面对火箭炮伺服系统性能影响的研究。以火箭炮永磁同步电机(PMSM)伺服系统为研究对象, 采用白噪声法将C、D、E级路面不平度信息转换为随机噪声信号, 并以负载形式施加到电机上进行仿真, 分析不同车速、不同路面对伺服系统的影响。研究表明: 路面激励下火箭炮伺服系统输出角度会出现随机震荡, 火箭炮的最大转动误差随路面等级的提升而显著增加; 在相同路面等级下, 车速越高, 最大转动误差越大, 且路面等级越大, 最大转动误差受车速变化的影响越大, 在E级路面上以20 m/s的速度行进时, 其最大转动误差为 0.1204° , 占据性能指标的24.1%。路面激励对火箭炮PMSM伺服系统的控制精度影响较大, 在控制策略设计时需考虑对其进行补偿。

关键词: 火箭炮; 永磁同步电机; 伺服系统; 路面激励

中图分类号: TJ393 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2026.01.007

Research on the Influence of Road Excitation on Rocket Launcher Servo Control

DU Tianzhu¹, YANG Li¹, WANG Maoyu², QIAO Haitao², GUO Cean¹

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Jilin 3305 Machinery Factory, Dunhua 133709, China)

Abstract: To enhance the control accuracy of the rocket launcher, a study on the impact of different road grades on the performance of the rocket launcher servo system was conducted. This study focuses on the permanent magnet synchronous motor (PMSM) servo system of a rocket launcher. Using white noise method, the road roughness information of Class C, D, and E roads is converted into random noise signals, which are then applied to the motor as load disturbances for simulation. The research analyzes the impact of different vehicle speeds and various road conditions on the servo system performance. The influences of different vehicle speeds and road grades on the servo system are analyzed. The results indicate that the rocket launcher servo system exhibits random oscillations in output angle under road excitation. The maximum rotational error of the rocket launcher significantly increases with the escalation of the road grade and exhibits a doubling growth trend. Under the same road grade, the higher the vehicle speed is, the greater the maximum rotational error is. Moreover, the larger the road grade is, the more significant the influence of the vehicle speed change is. When traveling at a speed of 20 m/s on the E-grade road surface, its maximum rotational error is 0.1204° , accounting for 24.1% of the performance index. Road excitation has a considerable influence on the control accuracy of the rocket launcher's PMSM servo system, and compensation for it needs to be considered in the design of the control strategy.

Key words: rocket launcher; permanent magnet synchronous motor; servo system; road excitation

火箭炮作为一种大规模杀伤武器,在行进间发射提高了作战效能。然而,火箭炮在行进时会受到凹凸不平路面的影响,从而影响其调炮精度。因此,研究火箭炮受路面激励的影响,对提高火箭炮在行进间的调炮精度、提高武器系统作战效能具有重要意义^[1-2]。目前对于火箭炮控制的研究主要集中在控制方法的研究,文献[3-5]采用滑模控制,文献[6-8]采用小波神经网络、有限控制集最优控制,文献[9-11]采用改进的自抗扰控制。上述伺服系统控制方法提高了火箭炮的伺服性能,但均未考虑火箭炮行进在不平路面对伺服系统的影响。

伺服系统是控制火箭炮的加速度、转角以及位移的关键系统,现有对火箭炮行进间受路面影响的研究主要侧重于采用路面激励对火箭炮机电耦合系统和悬架影响的研究。文献[12-13]通过建立刚柔耦合火箭炮发射动力学模型,分析了不同路面和不同土壤对火箭炮控制精度的影响;文献[14]针对传统悬挂系统不能满足运动中的高平稳性和高机动性等问题,提出了一种磁流变阻尼器的半主动悬架混合控制策略,提高了系统的平稳性。然而,采用机电耦合的方法费时费力,且由于其积分步长不一致,会增加一定的累积误差,降低仿真可靠性^[15],同时不平衡力矩和摩擦力矩等非线性因素影响控制效果,因而无法准确判断路面激励对于火箭炮伺服系统的影响程度^[16]。

为了准确判断出行进过程中路面激励对火箭炮伺服系统调炮精度的影响程度,为火箭炮伺服系统控制策略的研究提供参考,本文提出一种将路面不平度信息转换为随机噪声,将噪声的随机特性与电机负载相结合的方法模拟伺服系统在路面行进所受到的不确定性干扰,以分析不同等级路面对伺服系统性能的影响。

1 伺服系统模型

目前火箭炮伺服系统多采用永磁同步电机(PMSM),PMSM的控制精度对于火箭炮伺服控制精度起着至关重要的影响^[17]。本文采用表贴式PMSM,由于其电压、电流等非线性参量相互耦合,为了易于研究分析,对PMSM作如下假设:

- 1) 忽略定子铁心饱和;
- 2) 磁场在气隙中呈正弦分布;
- 3) 不计涡流和磁滞损耗;
- 4) 转子上没有阻尼绕组。

PMSM在 $d-q$ 同步旋转坐标系下的电压方程表达式为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega_e \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q 分别为 d 轴和 q 轴电压; i_d, i_q 分别为 d 轴和 q 轴电流; R_s 为三项静止坐标系下的电阻; ψ_d, ψ_q 分别为 d 轴和 q 轴磁链; ω_e 为电角速度。

在同步旋转坐标系下,磁链方程表达式为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_d, L_q 分别为 d 轴和 q 轴电感; ψ_f 为永磁体的磁链。

将式(2)代入式(1)可得

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega_e \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d i_d + \psi_f) \omega_e \end{cases} \quad (3)$$

一般情况下,定子磁链 ψ_f 满足如下表达式。

$$\begin{cases} \psi_f = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \\ \theta_\psi = \arctan(\psi_\beta / \psi_\alpha) \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ_ψ 为磁链的电角度; ψ_α, ψ_β 为两相静止坐标系 $\alpha-\beta$ 的磁链。 ψ_α, ψ_β 表达式为

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int (u_\alpha - R_s i_\alpha) dt \\ \psi_\beta = \int (u_\beta - R_s i_\beta) dt \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_α, u_β 分别为两相静止坐标系下的定子电压; i_α, i_β 分别为两相静止坐标系下的定子电流。

在同步旋转坐标系下,电磁转矩 T_e 表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} P (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} P [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

对于表面式PMSM来说,满足 $L_d = L_q$,电磁转矩方程表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} P \psi_f i_q \quad (7)$$

式中 P 为磁极对数。

综上,可得表面式PMSM系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\omega_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & P\omega_m & 0 \\ -P\omega_m & -\frac{R_s}{L} & -P\frac{\psi_f}{L} \\ 0 & \frac{3P\psi_f}{2J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L} \\ \frac{u_q}{L} \\ -\frac{T_d}{J} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: ω_m 为机械角速度; J 为电机及负载的转动惯量; T_d 为扰动转矩。

本文采用 $i_d=0$ 矢量控制,内部电流环、中间速度环和外部位置环的控制方式均采用传统PI控制。

PI控制器基于系统输入与输出的偏差进行控制,因此需要计算的参数少,结构简单,并且具有较好的鲁棒性,其结构如图1所示。

系统输入输出的偏差值 $e(t)$ 为

$$e(t) = r(t) - x_o(t) \quad (9)$$

式中: t 为时间; $r(t)$ 为输入值; $x_o(t)$ 为输出值。

PI控制器 $u(t)$ 的定义为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (10)$$

式中: K_p 为比例常数; K_i 为积分常数。

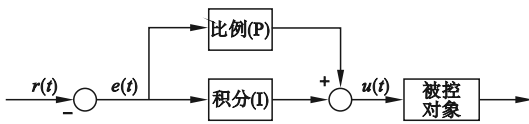


图1 PI控制器结构

Fig.1 PI controller structure

2 路面不平度

一般情况下可根据路面不平度创建所需要的路面模型。路面不平度是道路表面相对于理想平面的偏离,具有平稳、随机、复杂的特征,在研究中通常选择用路面功率谱密度函数表示。

2.1 白噪声法建立路面激励

在国标GB 7031—86中将路面按路面功率谱密度分为8级,分级标准如表1所示。

表1 GB 7031—86路面分级标准

Table 1 GB 7031—86 pavement classification standards

路面等级	路面不平度系数 几何平均值/ 10^{-6}m^3	路面不平度系数 均方根值/ 10^{-3}m
A	16	3.51
B	64	7.61
C	256	12.30
D	1 024	30.45
E	4 069	60.90
F	16 384	121.80
G	65 536	243.61
H	262 144	487.22

表2为某装甲试验场典型试验路面测试的路面不平度系数表。由表2可见,多数车辆行驶的路面基本上相当于C、D、E级路面。

表2 典型试验路面测试的路面不平度系数

Table 2 Roughness coefficient of typical test pavement

路面	路面等级	均方根值/ 10^{-3}m	几何平均值/ 10^{-6}m^3
直线跑道	C	7.49	303
环形跑道	C	23.87	864
沥青路	D	13.59	715
砂石路	D	16.28	1 024
卵石路	G	81.06	34 796
河滩路	E	64.62	6 061
起伏路	H	350.01	120 225

常用模拟路面不平度的数学方法有逆傅里叶法、谐波叠加法和积分单位白噪声法等。其中,积分单位白噪声法具有计算速度快、计算稳定性高的优点,因此,本文选用白噪声法模拟路面的激励,表达式为

$$\dot{z}_0(t) = -2\pi n_1 u z_0(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G(n_0) u} \omega(t) \quad (11)$$

式中: u 为车速, m/s ; n_1 为下截止频率,取为 0.01m^{-1} ,对应波长为 100m ; $z_0(t)$ 为路面位移; $\omega(t)$ 为该线性系统的输入,即理想白噪声; n_0 为参考空间频率,取值为 0.1m^{-1} ; G 为功率谱密度。

2.2 Matlab/Simulink模型搭建

本文以简易脉冲信号结合滤波白噪声路面不平度信号为随机路面激励。以Matlab/Simulink为平台,通过设置滤波白噪声发生器、增益模块以及积分器,搭建随机路面激励时域仿真模型,其中2个增益模块分别为 $K_1 = 2\pi n_0 \sqrt{G(n_0) u}$, $K_2 = 2\pi n_1 u$ 。

限带白噪声模块的参数包括噪声功率、采样时间和种子,对仿真的输出结果起到决定性作用。由于Matlab/Simulink平台提供的是一个双边功率谱,而仿真模型中需要的是一个单边功率谱为1的限带白噪声,因此需将噪声功率设为0.5,以保证限带白噪声输出的功率为一定值。限带白噪声模块的采样方式设为每1 m距离内有10个采样点。限带白噪声模块中种子值无需更改,保持默认即可^[18]。设定车速为 20m/s ,在Simulink中

建立 C、D、E 级随机路面激励模型, C、D、E 级路面不平度如图 2 所示。

3 仿真分析

将由积分单位白噪声法得到的随机路面不平度作为负载的随机变化趋势加载在 PMSM 上, 以研究随机路面激励下对 PMSM 伺服系统的影响。图 3 为永磁同步电机控制结构图, 其中位置、速度和电流控制器均为 PI 控制。根据结构图, 在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型进行仿真。

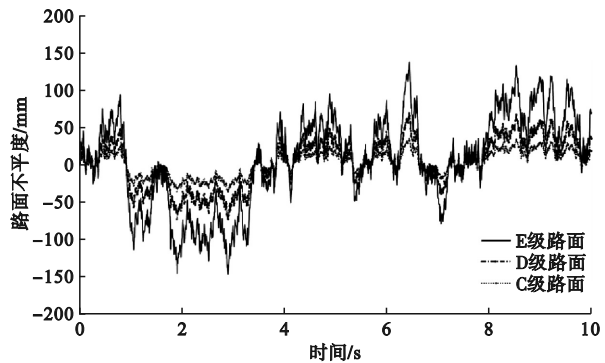


图 2 C、D、E 级路面不平度

Fig. 2 Road roughness of grade C, D and E

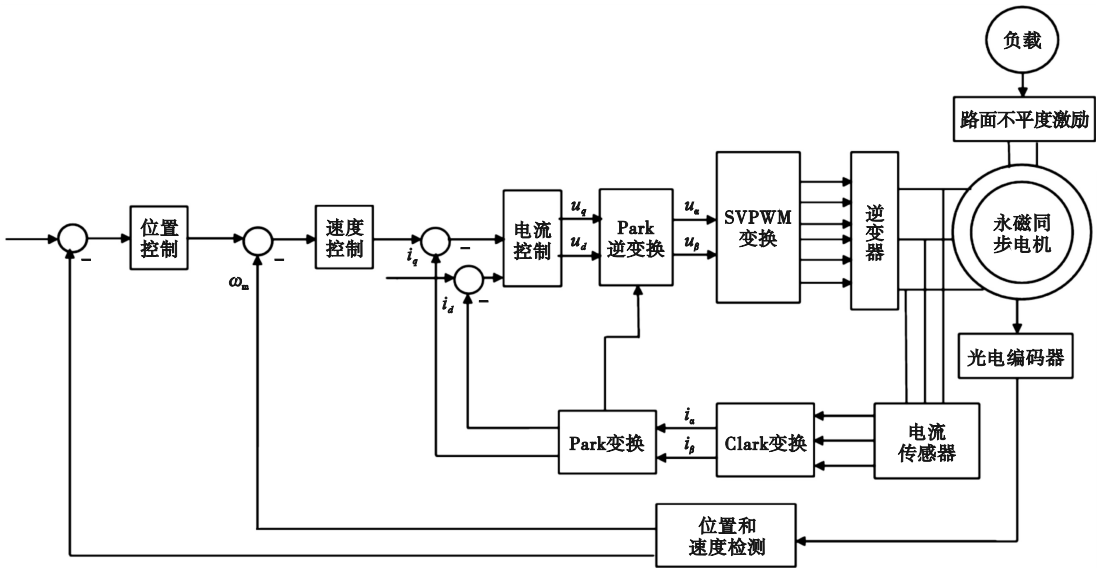


图 3 永磁同步电机控制结构图

Fig. 3 Permanent magnet synchronous motor control structure diagram

PI 控制算法的参数通过实验凑试法确定, 一般按照以下 3 个步骤进行:

- 1) 确定比例系数 K_p , 使 $K_i = 0$, 调整 K_p , 直到系统出现轻微震荡;
- 2) 确定 K_i 初始值, K_p 不变, 逐渐缩小 K_i , 记录 K_i 第一次出现震荡时的值;
- 3) 对两个参数进行微调, 达到最优控制效果。

为验证 PI 控制器调参效果, 对无负载伺服系统进行仿真, 得到输出角度曲线如图 4 所示。

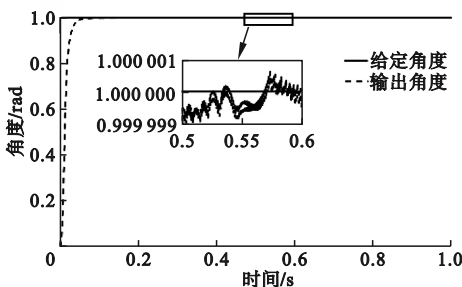


图 4 无负载下 PI 控制输出角度曲线

Fig. 4 PI control output angle curve without load

由图 4 可以看出, 在无负载的状态下, 伺服系统输出角度误差在 1×10^{-6} rad 范围内, 误差值较小, 因此该 PI 控制具有较优的控制效果, 增加负载后, 输出角度的误差值为随机路面激励对伺服系统造成的影响。

设定仿真工况: 火箭炮分别以 10、12.5、15、17.5 和 20 m/s 的速度在 C、D、E 级路面上匀速前进, PMSM 伺服系统位置角度输入信号定为 1 rad, 负载为 100 N·m, 需满足某型火箭炮伺服性能指标(如表 3 所示), PMSM 的参数如表 4 所示。当系统平稳运行后, 观察系统的输出角度受路面激励的影响。

表 3 火箭炮伺服性能指标

Table 3 Servo performance index of rocket launcher

性能指标	给定值
俯仰范围/(°)	0 ~ 85
转动速度/((°)·s ⁻¹)	≥ 10
转动精度/(°)	± 0.5

表4 电机模型参数

Table 4 Motor model parameters

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	2.981
母线电压/V	311
交直轴定子电感/mH	8.5
转子磁链/Wb	0.175
转动惯量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.001
磁极对数	4

在C、D、E级路面激励下,当位置角度给定1 rad时,PMSM 伺服系统在五种速度下平稳运行后给定角度与俯仰角度如图5~7所示。

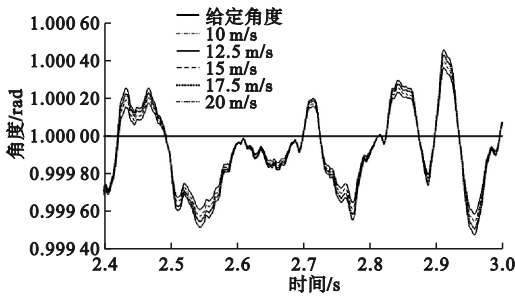


图5 C级路面各速度输出角度曲线

Fig.5 Velocity output angle curve of class C pavement

由图5可以看出,在C级路面上,火箭炮以不同车速行驶时,系统输出角度会随路面激励发生震荡,震荡值随着车速的增加而增加,五种速度下震荡区间分别为0.999 59~1.000 39 rad、0.999 58~1.000 41 rad、0.999 54~1.000 44 rad、0.999 50~1.000 46 rad、0.999 47~1.000 50 rad。

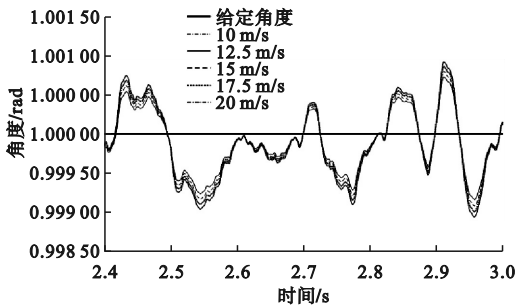


图6 D级路面各速度输出角度曲线

Fig.6 Velocity output angle curve of class D pavement

由图6可以看出,在D级路面上,五种速度下震荡区间分别为0.999 17~1.000 70 rad、0.999 16~1.000 75 rad、0.999 08~1.000 90 rad、0.999 00~1.000 95 rad、0.998 90~1.001 00 rad。

由图7可以看出,在E级路面上,五种速度下震荡区间分别为0.998 33~1.001 54 rad、0.998 3~

1.0015 rad、0.998 13~1.001 70 rad、0.998 10~1.001 80 rad、0.997 90~1.002 00 rad。

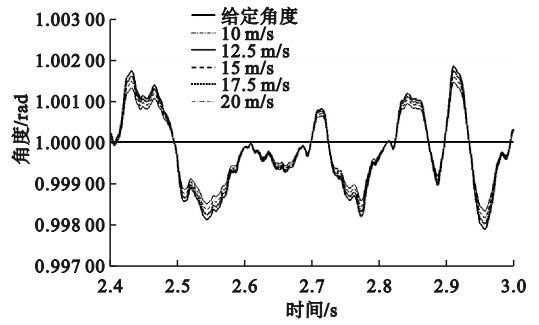


图7 E级路面各速度输出角度曲线

Fig.7 Velocity output angle curve of class E pavement

对上述数据进行整理,得到C、D、E级路面的误差分布和误差累积,如图8、图9所示。

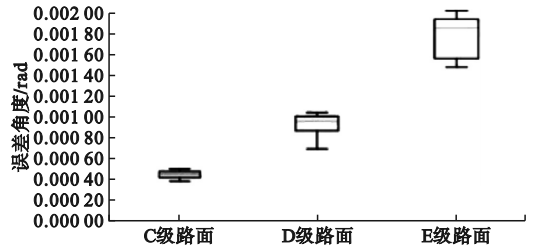


图8 三种路面下的误差分布

Fig.8 Error distribution under three kinds of pavement

由图8可以看出,随着路面等级的提高,最大转动误差的平均值呈现上升趋势,并且误差范围也随之扩大,每种路面的误差下限均高于低等级路面的误差上限。其中,当火箭炮以10 m/s的速度行驶在C级路面时,观测到的最大转动误差最小值为0.022 35°(0.000 39 rad);而当车速提升至20 m/s,且在E级路面上行驶时,最大转动误差最大值达到0.120 33°(0.002 10 rad),分别占误差指标的4.7%和24.1%。

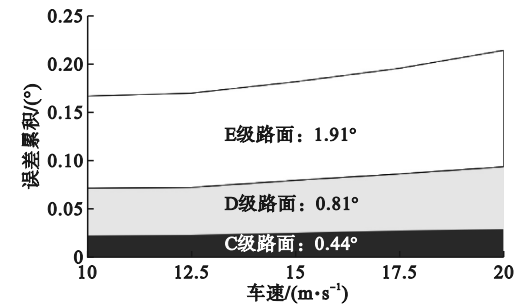


图9 三种路面下的误差累积

Fig.9 Error accumulation under three kinds of pavement

由图9可以看出,C级路面的误差累积为0.44°、D级路面的误差累积为0.81°、E级路面误

差累积为 1.91° 。不难发现,随着路面等级的增大,伺服系统的转动误差呈现一种增加态势。

将上述数据整理并拟合为二次函数,得到伺服系统在不同车速、不同路面条件下的最大误差曲线以及趋势拟合曲线,如图 10 所示。

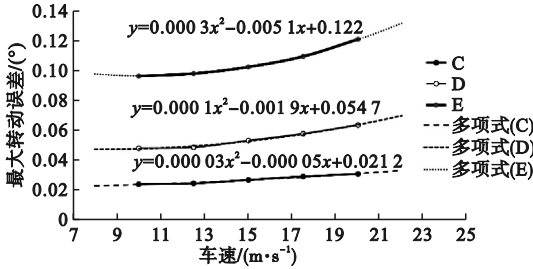


图 10 不同工况下最大转动误差曲线与趋势拟合曲线

Fig. 10 Maximum rotation error curves and fittings of trend curves under different working conditions

由图 10 可以看出,三种路面的最大转动误差随时间变化趋势曲线拟合效果较好,表明三种路面的误差变化趋势近似为二次函数。通过对这些函数求导,得到 C、D、E 级路面最大转动误差随车速变化率曲线,如图 11 所示。

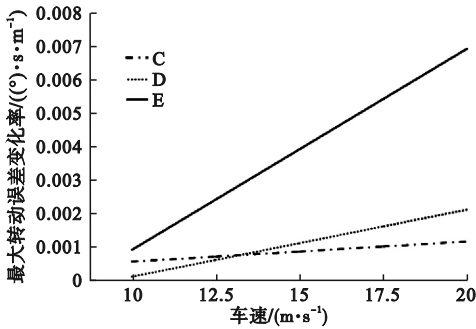


图 11 最大转动误差随车速变化率曲线

Fig. 11 Curves of maximum rotation error with speed variation

由图 11 可以看出,E 级路面最大转动误差随车速的变化率明显高于 C、D 级路面,而 C、D 级路面最大转动误差随车速的变化率在 13 m/s 左右有一个交点,表明在低速和高速时两者最大转动误差随车速的变化率受路面等级的影响相反。

综上所述,通过对伺服系统进行无负载仿真和随机路面激励的负载仿真,发现火箭炮伺服控制系统对于在激励较小的 C 级路面以较低速度行进时,可以达到精确的控制效果。然而,其控制精度随着路面不平度的增大和车速的增大而降低,当火箭炮以 20 m/s 速度行驶在 E 级路面时,路面激励对其控制精度造成了较大影响。

4 结论

本文为研究随机路面激励对火箭炮 PMSM 伺服系统的影响,将随机路面噪声信号与电机负载相结合,分析 PMSM 伺服系统角度输出曲线,得出如下结论。

1) 在路面激励下,PMSM 伺服系统的输出角度会出现随机震荡。车速恒定时,路面等级越高,伺服系统的最大转动误差越大,并且转动误差呈现出成倍增加的态势。

2) 在 E 级路面上以 20 m/s 的速度行进时,输出角度震荡最大达到 $0.99790 \sim 1.00200 \text{ rad}$,其最大转动误差为 0.1204° ,占据性能指标的 24.1% ,路面激励对 PMSM 伺服系统的控制精度影响较大。

3) E 级路面最大转动误差随车速的变化率明显高于 C、D 级路面,C、D 级路面最大转动误差随车速的变化率在低速和高速时受路面等级的影响相反。

综上所述,随机路面激励是火箭炮在行进过程中必将受到的非线性影响因素,并且这种影响会随着路面等级和车速的增加而增大,其对 PMSM 伺服系统的控制精度影响较大,在控制策略设计时,需对其进行补偿,以削弱随机路面激励对伺服系统的扰动。

参考文献 (References):

- [1] 王荣林. 某舰载火箭炮交流位置伺服系统辨识与控制策略的研究[D]. 南京:南京理工大学,2021.
- [2] CHOW T E, SANCHEZ D P, AMATYA P, et al. Modelling the suitability of multiple launch rocket system in the war in Ukraine[J]. Applied Geography, 2024, 164: 103206.
- [3] 王海迪,赵永娟,张鹏飞,等. 基于乌鸦搜索改进超螺旋滑模控制算法的防空火箭炮随动控制研究[J/OL]. 火炮发射与控制学报, 2024: 1-8 (2024-05-15) [2024-07-11]. <https://doi.org/10.19323/j.issn.1673-6524.202403005>.
- [4] WANG H D, ZHAO Y J, ZHANG P F, et al. Research on servo control of air defense rocket launchers based on crow search improved super-twisting sliding mode control algorithm [J/OL]. Journal of Gun Launch & Control, 2024: 1-8 (2024-05-15) [2024-07-11]. <https://doi.org/10.19323/j.issn.1673-6524.202403005>. (in Chinese)
- [5] WANG A N, FENG X Y, LIU H Y, et al. Design of sliding mode controller for servo feed system based on generalized extended state observer with reinforcement learning[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 24976.
- [6] 廖叶敏,尹海斌,肖郭城,等. 基于自适应滑模控制的火箭炮运动控制器设计[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(10): 240-247.
- [7] LIAO Y M, YIN H B, XIAO G C, et al. Design of rocket artil-

- lery motion controller based on adaptive sliding mode control [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45 (10): 240 - 247. (in Chinese)
- [6] WANG R L, LU B C, GAO Q, et al. Internal model control for rocket launcher position servo system based on improved wavelet neural network [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236 (9): 4487 - 4502.
- [7] SHI D F, HOU Y L, GU X H, et al. Improved finite control set optimal control for PMSM in rocket launcher servo system [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 3651298.
- [8] MIAO Y F, WANG G P, RUI X T. Simulation and adaptive control of back propagation neural network proportional-integral-derivative for special launcher using new version of transfer matrix method for multibody systems [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2020, 26 (9/10): 757 - 768.
- [9] SHI D F, HOU Y L, GU X H, et al. A novel active disturbance rejection control with a super-twisting observer for the rocket launcher servo system [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021 (1): 6617599.
- [10] 廖华, 侯润民, 张志豪. 基于 WNN 参数整定的 ADRC 在火箭炮伺服系统中的应用 [J]. *兵工自动化*, 2024, 43 (4): 14 - 18, 53.
LIAO H, HOU R M, ZHANG Z H. Application of ADRC based on WNN parameter tuning in rocket launcher servo system [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2024, 43 (4): 14 - 18, 53. (in Chinese)
- [11] WANG S H, LI B L, CHEN P C, et al. A fractional-order active disturbance rejection control for permanent magnet synchronous motor position servo system [J]. *Asian Journal of Control*, 2024, 26 (6): 3137 - 3147.
- [12] 孙志群, 李强, 袁卫, 等. 路面激励对火箭炮行进间发射控制的影响研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42 (4): 37 - 41.
SUN Z Q, LI Q, YUAN W, et al. Study on effect of road excitation on rocket launch control between travels [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42 (4): 37 - 41. (in Chinese)
- [13] 孙志群, 李强, 刘朋展, 等. 不同土壤硬度对火箭炮发射初始扰动的影响研究 [J]. *火炮发射与控制学报*, 2021, 42 (1): 43 - 48.
SUN Z Q, LI Q, LIU P Z, et al. Research on the influence of different soil hardnesses on the initial perturbation of rocket launching [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2021, 42 (1): 43 - 48. (in Chinese)
- [14] 王明, 童仲志, 侯远龙, 等. 基于磁流变阻尼器的火炮悬架振动控制研究 [J]. *火炮发射与控制学报*, 2019, 40 (4): 51 - 56.
WANG M, TONG Z Z, HOU Y L, et al. The research of vibration control based on magnetorheological damper for gun suspension [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2019, 40 (4): 51 - 56. (in Chinese)
- [15] 金涛, 严洪森, 李东晓. 坦克行进间发射的 PID 控制 [J]. *工业控制计算机*, 2016, 29 (7): 18 - 19, 22.
JIN T, YAN H S, LI D X. PID control for tank firing in motion [J]. *Industrial Control Computer*, 2016, 29 (7): 18 - 19, 22. (in Chinese)
- [16] 朱开阳, 童仲志, 花纯磊. 某舰载火箭炮交流伺服系统并行复合控制方法 [J]. *兵工自动化*, 2023, 42 (4): 13 - 16, 25.
ZHU K Y, TONG Z Z, HUA C L. Parallel composite control method for AC servo system of certain type shipborne rocket launcher [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2023, 42 (4): 13 - 16, 25. (in Chinese)
- [17] WANG R L, LU B C, HOU Y L, et al. Passivity-based control for rocket launcher position servo system based on ADRC optimized by IPSO-BP algorithm [J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018 (1): 5801573.
- [18] 魏帅帅. 随机路面激励下二自由度悬架性能仿真分析 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2023, 61 (10): 136 - 139.
WEI S S. Simulation analysis of 2-DOF suspension performance under random road excitation [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2023, 61 (10): 136 - 139. (in Chinese)

(责任编辑: 和晓军)