

遥控武器站交流位置伺服系统控制及联合仿真

郭华新, 赫雷, 曹维清, 周克栋

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 本文设计了一种新型车载遥控武器站, 将复合前馈控制与模糊 PI 控制策略分别应用到遥控武器站位置伺服系统的位置环和速度环控制器, 组成永磁同步电动机位置伺服系统串级复合控制器, 解决了 PID 控制位置和速度变量带来的系统干扰问题, 提高了其动态跟踪精度。基于 ADAMS 和 Matlab/Simulink 平台, 建立了遥控武器站的机械动力学模型和联合仿真模型, 经过仿真计算, 验证了机电系统的可行性, 为遥控武器站的应用实践和进一步深入研究打下了一定的基础。

关键词: 遥控武器站; 位置伺服系统; 串级复合控制; 联合仿真

本文引用格式: 郭华新, 赫雷, 曹维清, 等. 遥控武器站交流位置伺服系统控制及联合仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2016(6):10-15.

Citation format: GUO Hua-xin, HE Lei, CAO Chu-qing, et al. Cascade Compound Control and Its Co-Simulation of AC Position Servo System of Remote Controlled Weapon Station [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(6):10-15.

中图分类号: TJ02

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2016)06-0010-06

Cascade Compound Control and Its Co-Simulation of AC Position Servo System of Remote Controlled Weapon Station

GUO Hua-xin, HE Lei, CAO Chu-qing, ZHOU Ke-dong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A new type of remote controlled weapon station (RCWS) was designed, in which the compound feedforward control and the fuzzy PI control strategy were applied to position loop and speed loop controller of AC position servo system of remote controlled weapon station respectively, and the cascade compound controller of permanent magnet synchronous motor position servo system was composed. This structure could not only solve the system interference caused by the position and velocity variables based on the PID control, but also improve the dynamic tracing accuracy. The mechanical dynamic model and co-simulation platform of remote controlled weapon station were built by ADAMS and Matlab/Simulink, and the feasibility of the mechanical and electrical system was validated by the simulation calculation. The obtained results provide a certain foundation for the further study of remote controlled weapon station.

Key words: remote controlled weapon station; position servo system; cascade compound control; co-simulation

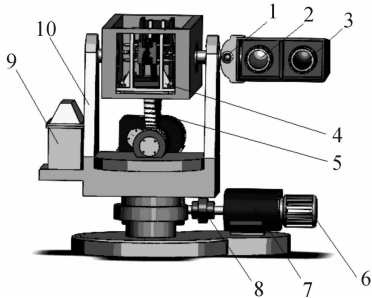
遥控武器站位置伺服系统包括方位位置伺服系统和高低位置伺服系统, 遥控武器站总体结构见图 1。位置伺服系

统最核心的驱动部件是方位电机和高低电机^[1]。

将永磁同步电动机位置伺服系统采用电流控制、速度控

制和位置控制分开进行,实现三环串级控制可以获得可靠的调整性能和动态跟踪性能,其传统串级 PID 控制策略是电流环采用 PI 控制规律,确保电流环的快速响应,速度环采用 PI 控制规律,保证进行稳定的速度控制,使其定位时不产生振荡,位置环通常采用比例控制,具有高精度和良好的跟踪性能,由这种经典 PID 控制组成的串级控制结构虽然具有结构简单、稳态精度高、可靠性强、实现容易等优点^[2],但系统在快速性、动态跟踪精度、抗干扰能力方面无法满足遥控武器站对位置控制及射击精度要求。

本文研究了将复合前馈控制与模糊 PI 控制策略分别应用到遥控武器站位置伺服系统的位置环和速度环控制器,从而组成永磁同步电动机位置伺服系统串级复合控制器,并应用 ADAMS 和控制仿真软件 Matlab/Simulink 建立遥控武器站的机械动力学模型和联合仿真模型。



1. 激光测距机;2. CCD 摄像机;3. 热像仪;4. 模块化通用武器架;5. 高低机蜗轮蜗杆;6. 方向机电机;7. 方向机减速器;8. 方向减速器输出端与传动装置联轴器;9. 弹药箱;10. 回转机构

图 1 遥控武器站总体结构

1 交流位置伺服系统串级复合控制

本文永磁同步电机 (PMSM) 位置伺服系统基于矢量控制,由电流环、速度环和位置环构成三闭环的调节系统,根据

$i_d = 0$ 矢量控制方式,给出在此控制方式下 PMSM 矢量控制系统原理图^[3],如图 2。

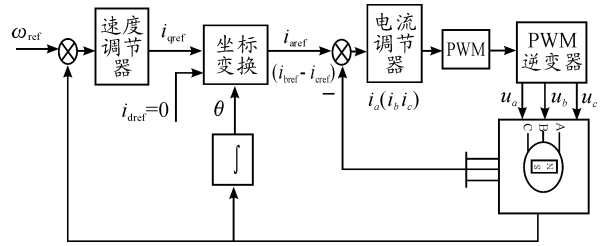


图 2 永磁同步电机矢量控制系统原理

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制,PMSM 解耦状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{p_n \psi_f}{L} \\ \frac{3p_n \psi_f}{2J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_q}{L} \\ -\frac{T_l}{J} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 i_q 为 q 轴电流, ω_r 为转子角速度, R 为绕组等效电阻; L 为等效电感; T_l 为负载转矩; J 为折算到电机轴上总的转动惯量, ψ_f 为永磁体在定子上所产生的耦合磁链, p_n 为极对数。在零初始条件下,对 PMSM 解耦状态方程求拉普拉斯变换,以电压 u_q 为输入,转子速度为输出的 PMSM 控制系统方框图如图 3^[4]。

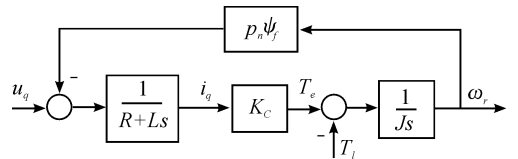


图 3 PMSM 控制系统框图

在图 3 中加入位置环控制器、速度环控制器及其前向滤波器、反馈滤波器和电流环控制器及其前向滤波器、反馈滤波器后,速度积分单元和光电编码器检测放大系数 α 可得到伺服系统三环控制图^[5],如图 4。

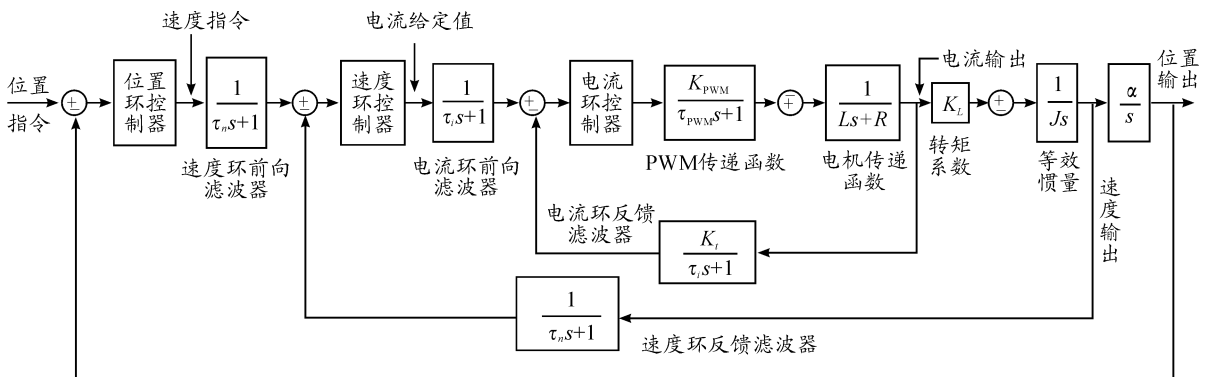


图 4 位置伺服系统控制框图

1.1 电流环 PI 控制器设计

电流环的关键部分包括电流环控制器、PWM 逆变器及电机电枢回路。

电流环是速度调节环节中的一个环节,由于速度调节环节的截止频率较低,且 $T_i \ll \tau_i$,故电流环可降阶为一个惯性环节,由此可实现速度调节环速度调节器的设计。降阶后的电流环传递函数为

$$G_{ib}(s) = \frac{1}{\frac{1}{K'}s + 1} \quad (2)$$

式中, $K' = KK_iK_p$ 。其中, $K = 1/R$, K_p 为电流调节器的比例放大倍数, K_i 为小惯性环节控制增益。

1.2 速度环控制器设计

在 PMSM 位置伺服系统中电流环节可以等效成一阶惯性环节如式(2)所示,选择速度调节环速度调节器为 PI 调节器时,其传递函数为

$$G_{ASR} = K_s \left(1 + \frac{1}{T_s s} \right) \quad (3)$$

K_s 、 T_s 分别为速度调节环速度调节器的放大倍数和积分时间常数。

采用速度环 PI 控制,其优点在于控制方法简单,对于在速度响应、跟随、抗干扰方面控制精度要求不高的系统是比较好的控制方法。但 PI 控制存在超调现象,特别是在高速响应时。由于超调的不确定性,很容易导致电机角速度超过其所允许的最大角速度,加剧电机的损耗,同时速度超调过程到恢复稳定过程中,系统加速度的变化更加干扰跟踪的准确性。为了提高位置伺服系统的鲁棒性,需要对速度环控制策略进行优化,本文对速度环调节器采用的优化策略是模糊 PI 控制策略,充分结合模糊控制和 PID 直接的优点,既体现 PID 控制精度相对高,又发挥模糊控制适应性强的优点^[6-9]。

1.3 位置环控制器设计

经典的位置环采用比例控制,主要从超调和振荡两方面考虑,在保证位置跟随性能稳定的前提下,控制器越简单越好。在位置伺服系统中的比例增益需要不断调试,小的位置比例增益虽然能够保证系统的稳定性,但控制系统频带较窄;大的位置比例增益可提高位置响应,但抗干扰性差。

对于遥控武器站,特别是在其执行目标检测、识别、跟踪工作状态,位置环若单纯使用比例控制器,其位置跟踪误差往往较大,并且若希望位置无超调,也必须以放弃快速响应为代价。为了达到位置伺服系统的无超调与快速响应,仅仅依靠改变位置环比例控制器的比例增益是无法完成的。

为克服系统静态精度与动态品质之间的矛盾,可以采用复合控制方法对误差进行补偿。复合控制是在误差控制的闭环系统基础上并联一补偿器,即系统的执行机构受系统误差信号和输入信号的高阶微分信号综合控制。遥控武器站交流位置伺服系统位置环复合前馈控制等效结构图如

图 5^[10]。

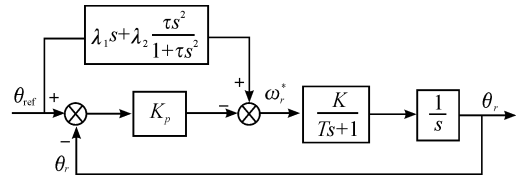


图 5 位置环复合前馈控制等效结构

遥控武器站交流位置伺服系统各环节传递函数为

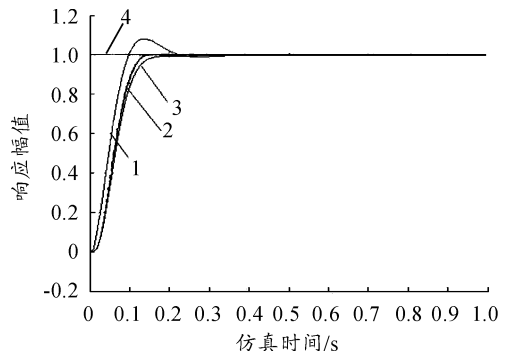
$$\begin{cases} W_1(s) = K_p \\ W_2(s) = \frac{K}{s(1 + T_s)} \\ W_{bc}(s) = \lambda_1 s + \lambda_2 \frac{\tau s^2}{1 + \tau s^2} \end{cases} \quad (4)$$

考虑对遥控武器站交流位置伺服系统速度跟踪信号和正弦跟踪进行前馈补偿,前馈补偿传递函数参数设计为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{1}{K} \\ \lambda_2 = \frac{T}{K\tau} \end{cases} \quad (5)$$

2 遥控武器站位置伺服系统串级复合控制策略及仿真

根据交流伺服电机及其他结构参数分别设计位置环比例控制器、位置环前馈控制器并结合速度环 PI 控制器与速度环模糊 PI 控制器组成遥控武器站位置伺服系统串级复合控制器并进行计算机仿真。图 6~图 8 分别为高低系统单位阶跃跟踪曲线比较图、正弦跟踪比较图、输入单位阶跃信号在 0.5 s 时加入扰动力矩为 1.21 N·m 时的扰动曲线比较图。



1. 经典 PID 串级控制曲线;2. 位置环复合前馈控制、速度环模糊 PI 控制曲线;3. 位置环比例、速度环模糊 PI 控制曲线;4. 输入曲线

图 6 高低系统单位阶跃跟踪曲线比较

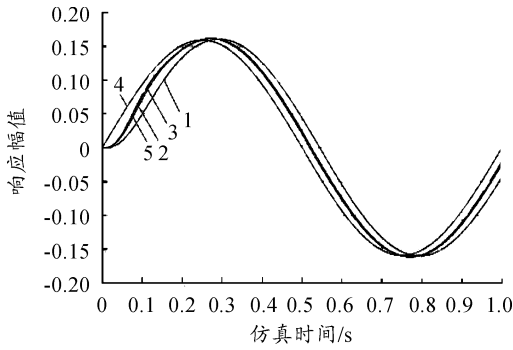


图7 高低系统正弦跟踪曲线比较

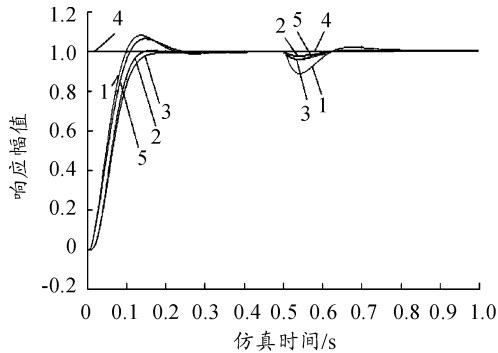


图8 高低系统受干扰曲线比较

当输入信号为位置阶跃信号时,因为位置指令是定常数,基于PI速度环控制的位置环复合前馈控制在理论上就是PID控制,即位置环比例控制、速度环PI控制,因此图6中未加入基于PI速度环控制的位置环复合前馈控制曲线。比较结果表明:位置环复合前馈、速度环模糊PI控制在单位阶跃过程中不存在超调,并且稳定时间较短,在输入信号为正弦信号时,其跟踪性能较强,对干扰不敏感,恢复时无超调。相比于其他3种串级复合控制策略,位置环复合前馈、速度环模糊PI控制的鲁棒性能更好。

3 遥控武器站位置伺服系统联合仿真

3.1 联合仿真模型

遥控武器站的武器系统、观瞄设备和目标的空间三维简

图如图9。

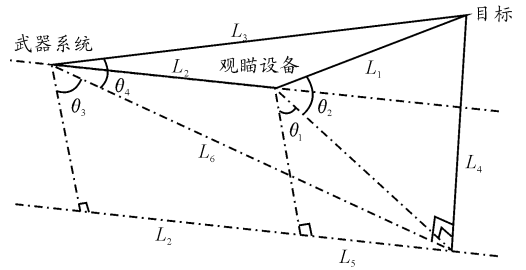


图9 武器系统、观瞄设备和目标的空间三维简图

其中 L_1 为激光测距仪测量的目标到观瞄设备的空间距离; L_2 为武器系统与观瞄设备的水平距离,遥控武器站的武器系统的重心与观瞄设备在同一水平面, $L_2 = 0.25 \text{ m}$; L_3 为武器系统重心到观瞄设备的空间距离; L_4 为目标到武器系统重心和观瞄设备所在平面的垂直距离; L_5 为目标到观瞄设备所在平面的水平距离; L_6 为武器系统与目标投影到观瞄设备与武器系统所在平面的距离; θ_1 为观瞄设备观测到目标所在的水平视角; θ_2 为观瞄设备观测到目标所在的垂直视角; θ_3 为武器系统需要在方向位置(图中水平位置)旋转角度; θ_4 为武器系统需要在高低位置(图中垂直位置)旋转角度。

以静止目标为远距离时,即目标到武器系统和观瞄设备的空间距离 L_1 ($L_1 > 15 \text{ m}$) 观瞄设备到武器系统的水平距离 L_2 ($L_2 = 0.25 \text{ m}$) 时,可近似得到: $\theta_3 \approx \theta_1$, $\theta_2 \approx \theta_4$, 取:

$$\begin{aligned} \theta_{1\max} &= \theta_{3\max} = 50^\circ = 0.86 \text{ rad} \\ \theta_{2\max} &= \theta_{4\max} = 20^\circ = 0.35 \text{ rad} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 θ_1 为水平视角, θ_2 、 θ_3 为垂直视角。本设计中选取观瞄设备的垂直视角为 $-20^\circ \sim 20^\circ$, 水平视角为 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 。

假设目标出现在观瞄设备的搜索区域内,并给武器系统下达位置转动命令:方向位置转动 0.87 rad , 高低位置转动 0.35 rad 。

联合仿真过程中设置^[6]:方向位置转动 0.87 rad , 高低位置转动 0.35 rad 。折算到方向电机输入轴的转动角度为 137.6 rad , 方向电机输入轴的转动角度为 56 rad 。方位系统的最大角速度为 1.3 rad/s , 高低系统的最大角速度为 1.0 rad/s , 折算到方向电机轴的最大角速度应为 208 rad/s , 高低电机轴的角速度应为 160 rad/s 。仿真时间为 2.5 s 。遥控武器站机电系统联合仿真模型原理图如图10。

3.2 仿真结果分析

通过建立测量可得到高低机和方向机的转角曲线,本节以方向系统为例,仿真结果如图11~图12所示。

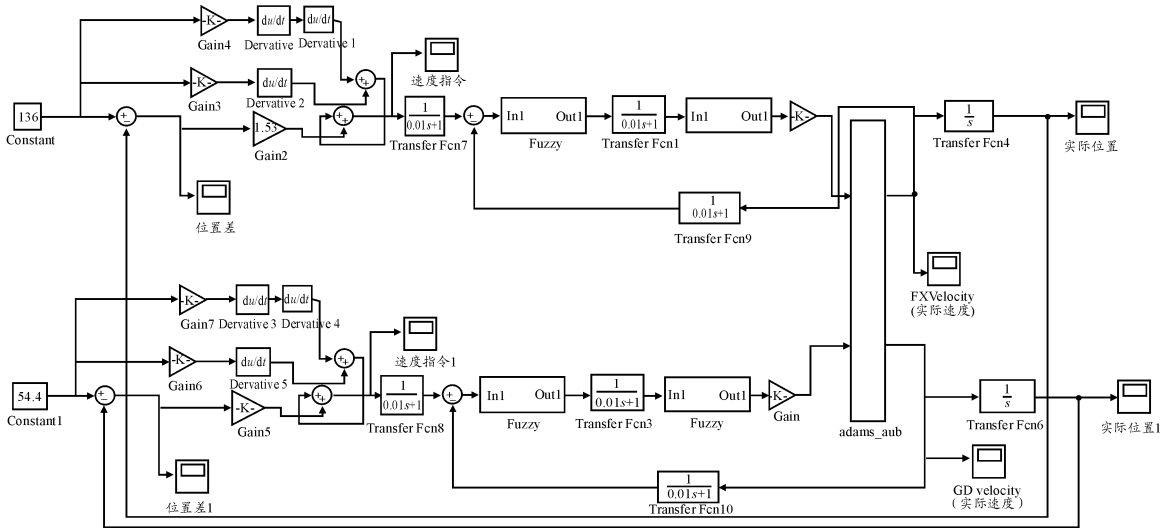


图 10 遥控武器站机电系统联合仿真模型原理图

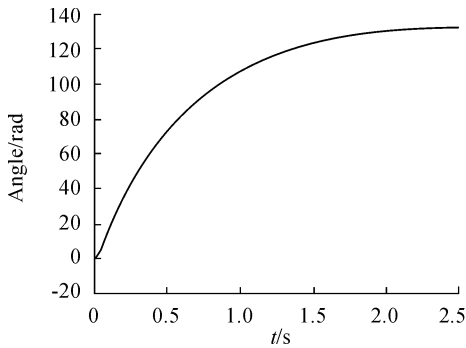


图 11 方向电机转角曲线

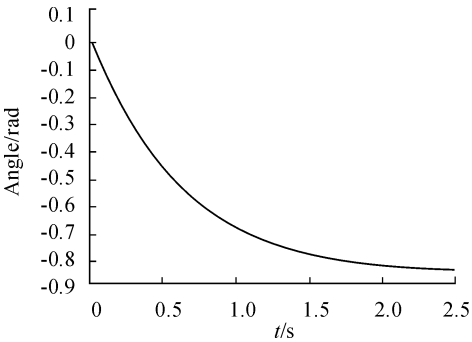


图 12 武器系统方向位置转角曲线

从图 11、图 12 可知方向电机在 2.5 s 时到达指定目标位置 137.6 rad,同样是在开始调速时,加速度较大,之后位置的移动量减缓。

方向电机指令转速、实际转速及其武器系统转速、加速度如图 13 ~ 图 16 所示。

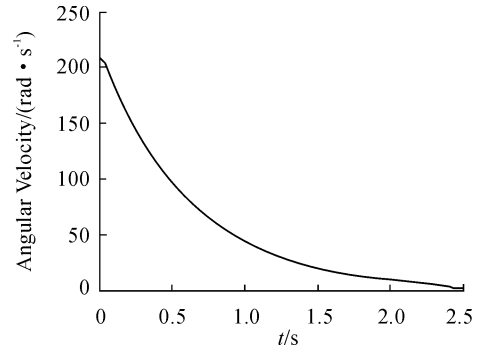


图 13 方向电机指令转速曲线

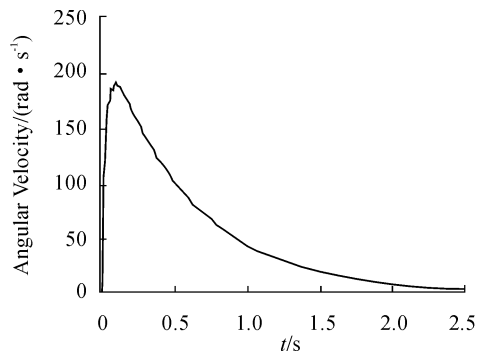


图 14 方向电机实际转速曲线

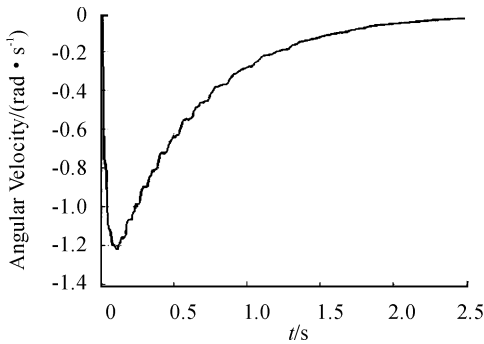


图 15 武器系统方向位置转速曲线

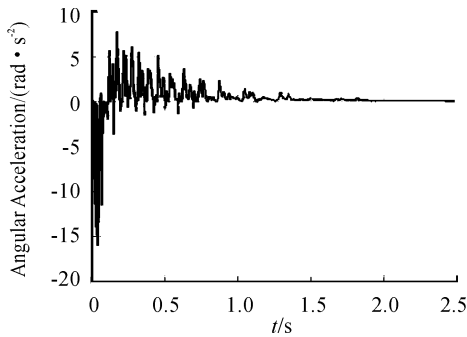


图 16 武器系统方向位置角加速度曲线

从图 13 ~ 图 16 可知,方向电机在开始调速时的指令转速是方向电机最大的设计转速 208 rad/s。调速过程中,指令转速越来越小,最终趋向于 0,而方向电机在 0.1 s 达到最高转速 190 rad/s 后,开始做减速旋转,直到 2.5 s 实际速度为 0,此时系统的指令速度也为 0,表示遥控武器站的方向系统在 2.5 s 后静止。图 16 表示武器系统方向位置的加速度变化,在开始快速响应时,最高加速度数值为 15.6 rad/s²,小于设计的最高加速度的数值(本设计中武器系统方向位置角加速度的最大值为 18 rad/s²),响应时间区域为 0 ~ 0.1 s,减速时间区域为 0.1 ~ 2.5 s,其中 1.5 ~ 2.5 s 之间加速度很小,直到 2.5 s 时加速度为 0。方向电机在 0.1 s 电机达到最高速及加速过程终止开始减速时,抖动现象明显。武器系统在方向位置转动时出现小幅脉动,其原因主要由于减速器模型、方向机蜗轮蜗杆中的齿轮接触碰撞引起。

4 结论

本文运用 Simulink 建立了遥控武器站位置伺服系统控制方框图,仿真结果表明在电流环为 PI 控制的前提下,位置环采用复合前馈控制、速度环采用模糊 PI 控制系统的鲁棒性较好,响应快速并且无超调,抗干扰能力强。ADAMS 的机械部分与 Simulink 控制部分联合仿真,所设计的遥控武器站满足设计要求。

参考文献:

- [1] JAMES P Q. Dual Elevation Weapon Station and Method of Use: United States Patent, US7493846 [P]. 2009.
- [2] 王传有. 遥控武器站结构形式对武器性能影响[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(5): 52 - 59.
- [3] 李辉. 某车载遥控武器站的初步研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [4] 王耀辉. PID 控制原理简析[J]. 洁净与空调技术, 2013 (3): 79 - 82.
- [5] WANG L X. Adaptive fuzzy systems and control[M]. Prentice-Hill Press, 2014.
- [6] 杨菲. 基于 MATLAB 的模糊自适应 PID 控制器的设计与仿真[J]. 信息与电脑(理论版), 2011, 4(9): 32 - 39.
- [7] 邹金红. 基于复合前馈控制的交流位置伺服系统动态特性[J]. 电机与控制应用, 2011(1): 48 - 53.
- [8] 王金鹏. 俯仰翻转运动控制系统设计及控制性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [9] GUO X G. A high-speed positioning method for servo systems. Int J Adv Manuf Technology [J]. 2013, (21): 1021 - 1028.
- [10] ZHU CHUNXIAN. Dynamics simulation for flexible parallel robot[C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE Press. 2007: 2155 - 2159.

(责任编辑 周江川)