

直驱型机电作动器建模与动态特性分析^{*}

万琦¹ 马尚君² 佟瑞庭² 刘更^{2†}

(1. 西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710054)

(2. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘要 机电作动器作为飞行控制系统的关键执行机构,其性能对系统输出动态响应具有重要影响. 根据直驱型机电作动器的结构组成,建立包含永磁同步电机控制和行星滚柱丝杠非线性因素的系统仿真模型. 研究了“ $i_d = 0$ ”电流矢量控制下的系统阶跃响应,结果表明:基于永磁同步电机三闭环伺服控制策略的系统在不同位置阶跃信号指令下均具有良好的动态性能. 通过与文献的对比,表明该控制策略下的机电作动器仿真模型有效.

关键词 机电作动器, 动态特性, 电流矢量控制, 永磁同步电机, 行星滚柱丝杠

中图分类号:V249.1

文献标志码:A

Modelling and Dynamic Characteristics Analysis of the Direct-Drive Electro-Mechanical Actuator^{*}

Wan Qi¹ Ma Shangjun² Tong Ruiting² Liu Geng^{2†}

(1. Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract As a key actuator in a flight control system, the performance of an electro-mechanical actuator has a significant impact on the dynamic responses of the system. Based on the structural composition of the direct-drive electro-mechanical actuator, a simulation model is established that considering the control of a permanent magnet synchronous motor and nonlinear factors of a planetary roller screw mechanism. The step responses of the system under the current vector control of “ $i_d = 0$ ” are studied. The results show that the system based on the three-closed-loop servo control strategy of the PMSM has the good dynamic performance under different position commands with the step signal. With the comparison to the literature, it is shown that the proposed simulation model of the electro-mechanical actuator under this control strategy is effective.

Key words electro-mechanical actuator, dynamic characteristics, current vector control, permanent magnet synchronous motor, planetary roller screw mechanism

2023-06-29 收到第 1 稿,2023-09-18 收到修改稿.

^{*} 陕西省教育厅自然科学专项资助项目(23JK0570), National Science Special Project of Education Department of Shaanxi Provincial Government(23JK0570).

[†] 通信作者 E-mail:npuliug@nwpu.edu.cn

引言

机电作动器 (Electro-Mechanical Actuator, EMA) 具有绿色环保、质量较轻、维护成本低的优点,已在部分飞行器辅助飞行操舵系统上得到成功应用^[1]。随着全电化的快速发展,未来机电作动器将成为新型舵面执行机构的主流^[2,3]。

EMA 是包含机械和控制的机电伺服系统,分为直接驱动型和间接驱动型^[4]。前者不含减速机构,将执行机构和电机集成在一起;后者由电机、减速机构、执行机构(滚珠丝杠或者行星滚柱丝杠)、传感器等组成^[5]。关于 EMA 的研究主要有电机设计与控制算法研究^[4,6,7]、故障诊断与健康管理等^[8,9]、系统设计及动态特性分析^[10-12]等方面。魏科鹏等^[4]针对航空机电作动器提出了一种基于多层神经网络的快速终端滑模控制策略,该控制器具有高控制精度、快响应速度、强抗干扰能力的优势;Gerada 等^[6]针对大型民机扰流器上直驱型 EMA 设计了低速高极数永磁电机,通过采用合适的故障控制策略,以满足重量轻、体积小、高可靠性和高容错的设计目标;Yang 等^[7]针对 EMA 鲁棒性差、控制精度低的问题,提出了基于模糊 PID 和自抗扰控制的复合算法,该算法使作动器响应可以较好地跟踪指令;李世晓等^[9]提出一种基于一维卷积神经网络的智能故障诊断方法,可以有效地诊断出直驱型 EMA 的故障,故障识别率高达 98% 左右;Habibi 等^[11]设计了内环控制策略以降低由空程和静态摩擦产生的死区对 EMA 输入输出特性的影响;张阳阳等^[12]建立了 EMA 系统仿真模型,分析了刚度对跟踪性能的影响,并通过与传统液压作动器的对比,发现 EMA 具有结构紧凑、动态性能良好的优势。

EMA 是一种典型的位置随动控制系统,其控制方法一般采用多环控制结构。本文采用永磁同步电机电流、转速、位置三闭环 PID 控制结构。PID 控制器具有算法简单、鲁棒性好、可靠性高等优点^[13]。在上述研究基础上,本文考虑永磁同步电机三闭环控制和执行机构非线性因素,建立 EMA 系统级仿真模型,分析不同位置指令下的 EMA 输出位移阶跃响应和电机响应。通过与文献的对比,验证所建模型的有效性。

1 结构组成

基于行星滚柱丝杠 (Planetary Roller Screw

Mechanism, PRSM) 的直驱型 EMA,即不含减速机构,将行星滚柱丝杠和电机集成在一起,行星滚柱丝杠内嵌在电机转子内,由电机转子带动螺母旋转,再通过行星滚柱丝杠将转子的旋转运动转化为直线运动,最终通过丝杠轴驱动舵面实现偏转^[14]。

永磁同步电机具有高功率因数、高效率、高可靠性、小体积的优势,被普遍应用于航空航天、工业机器人、电动汽车等高控制性能、高精度领域^[15,16];行星滚柱丝杠因其高精度、长寿命、高承载能力和抗冲击的优势被逐步应用于飞行器舵面、坦克高低向驱动、高档数控机床、焊接机器人摆臂等需要高速高负载直线驱动元件的领域^[17,18]。因此,本文以永磁同步电机和行星滚柱丝杠分别作为直驱型 EMA 的动力源和执行机构。

直驱型 EMA 由于无齿轮减速装置,可减轻重量、减小体积,具有结构紧凑、集成度高的特点。图 1 所示为 Exlar 公司生产的基于行星滚柱丝杠直驱型 EMA 产品^[19]。

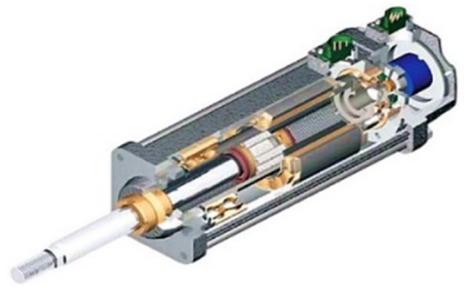


图 1 基于 PRSM 的直驱型 EMA^[19]
Fig. 1 Direct-drive EMA with the PRSM

2 建模

根据直驱型 EMA 结构组成,建立由永磁同步电机和行星滚柱丝杠组成的 EMA 仿真模型。

2.1 永磁同步电机

采用坐标变换以简化自然坐标系 abc 下永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 的数学模型,主要包括静止坐标变换 (即 Clark 变换,由 abc 变换到静止坐标系 $\alpha\beta$) 和同步旋转坐标变换 (即 Park 变换,由 $\alpha\beta$ 变换到同步旋转坐标系 dq)。

自然坐标系 abc 到静止坐标系 $\alpha\beta$ 的变换:

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

静止坐标系 $\alpha\beta$ 到同步旋转坐标系 dq 的变换:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

则 abc 坐标系和 dq 坐标系的变换为:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (3)$$

逆变换为:

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta-120^\circ) \\ \cos(\theta+120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (4)$$

AMESim 中通过电机及驱动库中坐标变换模块来实现式(3)和式(4),如图2所示.

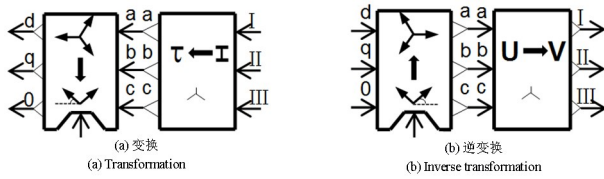


图2 Park、Clark 变换及逆变换模型

Fig. 2 Models of the Park and Clark transformation and inverse transformation

dq 坐标系下 PMSM 的电压方程可表示为:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega_e\psi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\psi_q + \omega_e\psi_d \end{cases} \quad (5)$$

式中, u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 ψ_d 、 ψ_q 分别为 dq 轴定子电压、电流、磁链; R 为定子电阻; ω_e 为电角速度.

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (6)$$

式中, L_d 、 L_q 分别为 dq 轴定子电感; ψ_f 为永磁体磁链.

将式(6)代入式(5)可得定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt}i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt}i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (7)$$

电磁转矩方程:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} p_n (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \\ &= \frac{3}{2} p_n i_q [\psi_f + i_d (L_d - L_q)] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: T_e 为电磁转矩; p_n 为三相 PMSM 极对数.

采用 $i_d = 0$ 永磁同步电机电流矢量控制方法, 坐标系为 dq 旋转坐标系, 则式(8)可简化为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q \quad (9)$$

PMSM 的 $i_d = 0$ 电流矢量控制方法采用位置环、转速环和电流环三闭环控制, 主要包括作动器位置检测、电流检测、转子位置传感器及电机速度计算模块、位置环 PI 控制器、转速环 PI 控制器、电流环 PI 控制器、Park 变换、Clark 变换、空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 模块和三相逆变器模块. PMSM 及三闭环控制模型如图3所示.

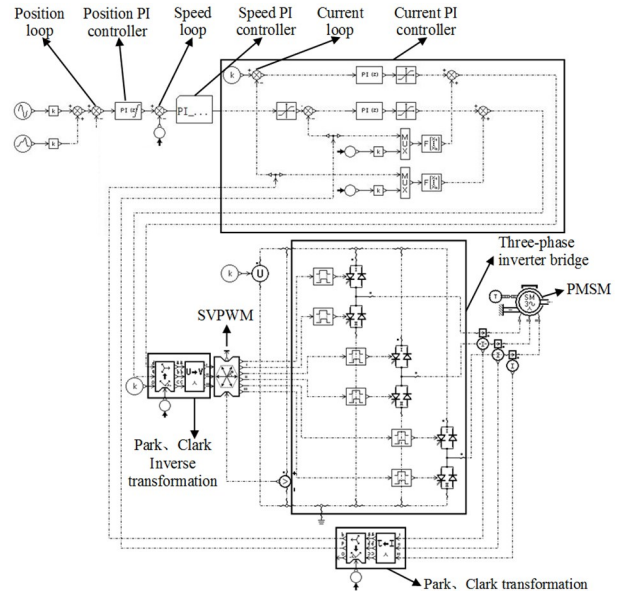


图3 永磁同步电机及伺服控制系统模型
Fig. 3 Models of the PMSM and servo control system

PMSM 的 $i_d = 0$ 电流矢量控制具体过程为: 输入作动器位置参考指令后, 由位置环 PI 控制器产生转速控制指令, 经转速环 PI 控制器输出参考电流 i_q , 由 Park、Clark 逆变换得到 SVPWM 模块的输入信号, 经过 SVPWM 模块计算电机控制电压, 从而输出到三相逆变器提供电机绕组, 以产生相应电流驱动电机转子进行旋转运动. 控制过程中电机转子转速反馈由电机转子位置传感器提供, 电流反馈由三相电流传感器提供, 并经过 Clark 变换和 Park 变换得到 i_d 和 i_q 至电流 PI 控制器, 位置

反馈由线位移传感器提供,三者均由 ACE 处理计算获得,最终实现 PMSM 的三闭环伺服控制。

设置逆变器开关频率为 10kHz,转速环 PI 控制器模型含积分分离模块,其中当系统误差超过限幅时,取消积分作用,在误差减小到一定数值后,再加上积分作用,以此减少系统超调量,改善动态特性。电机参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机参数
Table 1 Parameters of the PMSM

Item	Value	Unit
Winding resistance	0.187	Ω
Winding inductance	4.07	mH
Back EMF constant	174	V/krpm
Electromagnetic torque constant	2.87	Nm/A
Rotor moment of inertia	0.015	kgm^2
Rated frequency	113	Hz
Rated voltage	370	V
Rated torque	165	Nm
Stall torque	171	Nm
Rated speed	1800	Rpm
Rated current	59.6	A
Stall current	65.7	A
Rated power	31	kW
Pole number of electrode	8	/

2.2 行星滚柱丝杠

行星滚柱丝杠(Planetary roller screw mechanism, PRSM)以其体积小、重量轻、无污染等特点,成为新型作动器执行机构,其可以将电机输出轴的旋转运动转换为螺母的直线位移运动。

摩擦是 PRSM 的重要特性之一,Karam^[20]提出公式(10)以描述 PRSM 摩擦行为。如公式(10)所述,考虑了恒定库伦摩擦力(第一部分)、低速时的 Stribeck 效应(第二部分)以及与载荷和功率象限相关的库伦效应(第三部分)。

$$f = \{f_c + f_s \times e^{-|\omega|/\omega_{1r}} + |F_e| [b + c \times \text{sgn}(\omega \times F_e)]\} \text{sgn}(\omega) \quad (10)$$

式中: f_c 为 Coulomb 摩擦力; f_s 为 Stribeck 摩擦力; ω_{1r} 为决定指数衰减的常数; F_e 为负载作用力; b 为外力影响平均系数; c 为象限决定系数。

图 4 中,通过丝杠螺母模块表示 PRSM 运动关系,考虑其间隙、接触刚度和摩擦等因素,依据式

(10),用力传感器和转速传感器作为输入变量计算 PRSM 摩擦力。舵面被简化建模为一个可施加空气载荷的等效集中质量块,EMA 壳体安装到机翼上的固定刚度和 EMA 与负载的传动刚度被建模为弹簧阻尼模型。PRSM 及舵面相关参数如表 2 所示。

表 2 行星滚柱丝杠及舵面参数

Table 2 Parameters of the PRSM and rudder surface

Item	Value	Unit
Screw lead	8	mm
Effective stroke	250	mm
PRSM contact stiffness	10^8	N/m
PRSM contact damping	8944	N/(m/s)
Anchorage stiffness	1.4×10^7	N/m
Anchorage damping	334	N/(m/s)
Transmission stiffness	1.4×10^7	N/m
Transmission damping	334	N/(m/s)
Nominal thrust	104	kN
Nominal speed	240	mm/s
Accuracy	$\pm 1\% \text{FS}$	/

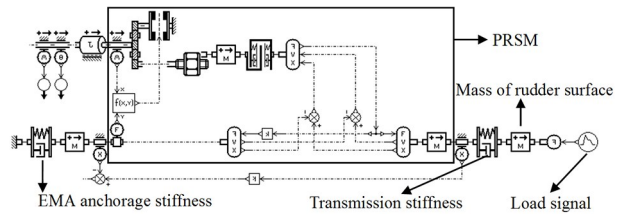


图 4 行星滚柱丝杠及舵面模型

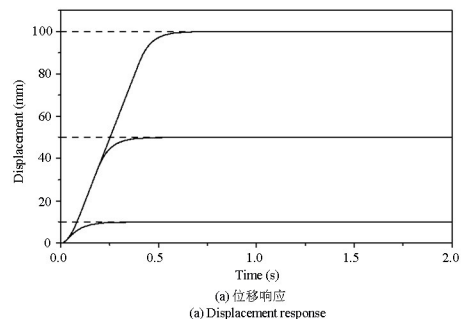
Fig. 4 Models of the PRSM and rudder surface

3 EMA 系统动态特性分析

3.1 机电作动器响应

空载下给定 EMA 阶跃信号指令幅值分别为 10mm、50mm 和 100mm,仿真结果如图 5 所示。

由图 5(a)可知,空载时系统不存在超调和振荡,三种幅值下的系统调节时间分别为 0.149s、



(a) 位移响应
(a) Displacement response

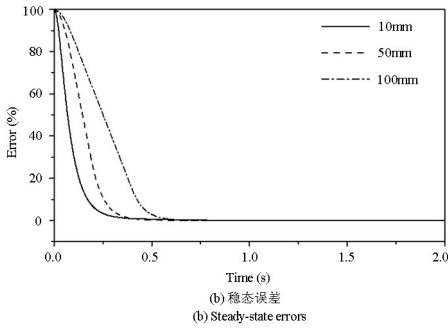


图5 空载条件下EMA阶跃响应
Fig.5 EMA step responses without load

0.199s和0.342s,均能满足EMA性能指标要求,当系统到达稳态过程时,稳态误差很小,如图5(b)所示。

以100mm幅值阶跃信号为例,图6(a)所示为电机输出扭矩曲线,图6(b)为电机转速曲线.由图6可知:仿真初始时刻,电机启动扭矩突然增大,使电机转速迅速达到最大值1800r/min,以保证较快的动态响应速度,随着EMA响应位置逐渐到达指令信号位置时,电机速度也逐渐趋向于零,当EMA位置稳定下来时,电机停止转动,速度为零。

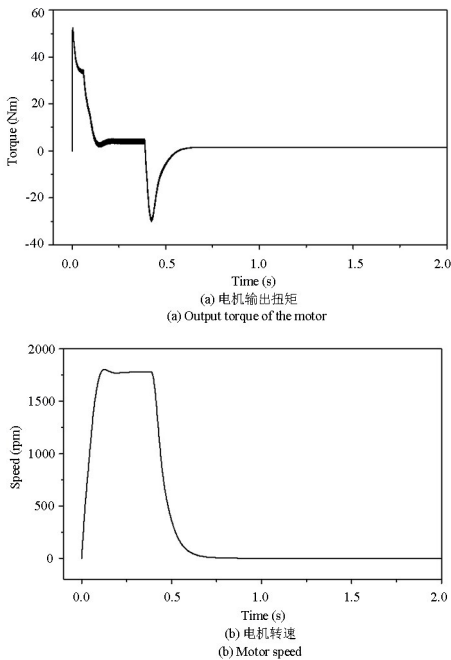


图6 空载条件下电机响应
Fig.6 Motor response without load

给定EMA位移阶跃信号指令幅值分别为10mm、50mm和100mm,1s时加入10000N负载力,仿真结果如图7所示.由图7(a)可以得到,系统不存在超调现象,加载后系统产生微小振荡,但随即快速稳定达到稳态过程.如图7(b)所示,三种

幅值下的系统稳态误差分别为5.901%、1.204%和0.607%,均大约为0.6mm的稳态误差值,但该位置误差满足EMA 1%F.S(全行程250mm),即2.5mm的位置精度指标要求。

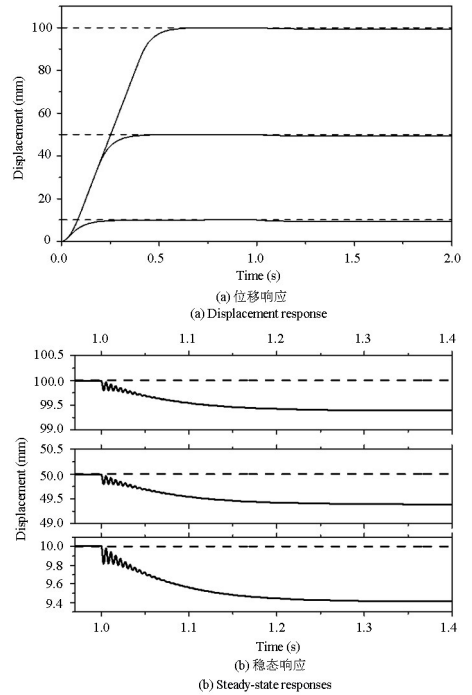


图7 加载条件下EMA位移阶跃响应
Fig.7 EMA displacement step response with load

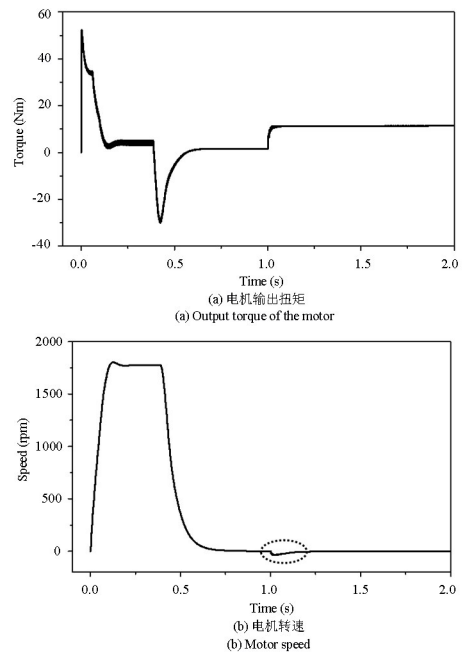


图8 加载条件下电机响应
Fig.8 Motor response with load

以100mm幅值阶跃信号为例,图8(a)所示为电机输出扭矩曲线,图8(b)为电机转速曲线.由图8可知:加载时刻,电机扭矩增大,随后增加至一恒定扭矩以满足负载要求,而电机转速也在1s时刻

发生一个较小的跳动以缓冲负载的冲击,随后在伺服控制的作用下使得位置稳定同时电机转速为零。

3.2 模型验证

给定与文献[21]相同的位移信号指令,仿真时间为 200s,仿真步长为 0.001s. 基于本文建立的永磁同步电机三环闭环控制的 EMA 模型仿真结果如图 9(a)所示,基于文献[21]建立的模型仿真结果如图 9(b)所示. 由图 9 可知,基于本文模型的系统响应动态跟踪性能良好,与文献结果保持较好的一致性。

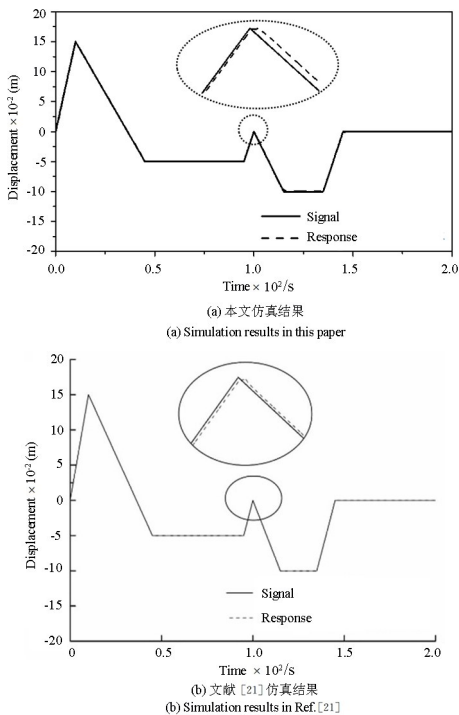


图 9 EMA 输出位移跟踪曲线

Fig. 9 Tracking curves of the EMA output displacement

图 10 所示为 EMA 输出位移较位移指令的位移跟踪误差曲线,可以看出,基本本文模型的误差曲线与文献中的误差曲线变化趋势相似,其中:基于本文模型的 EMA 响应最大误差为 0.412 mm,

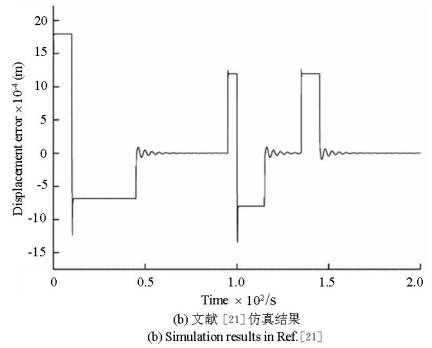
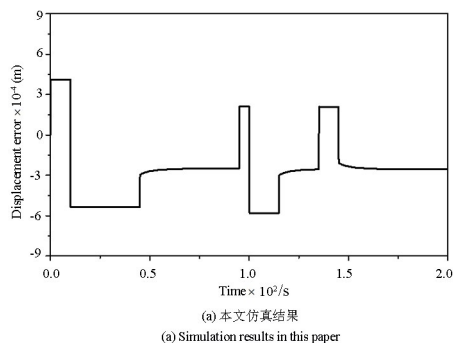


图 10 跟踪误差曲线

Fig. 10 Errors of the tracking curves

基于文献的 EMA 输出位移最大误差为 1.8 mm, 相对误差分别为 0.275% 和 1.2%, 即表明本文所建立的 EMA 仿真模型有效。

4 结论

本文以永磁同步电机为动力源,根据坐标变换建立了永磁同步电机在同步旋转坐标系 dq 下的数学模型,并采用 $i_d = 0$ 电流矢量控制方法实现直驱型机电作动器位置环、转速环和电流环三闭环回路控制;建立了考虑机械结构刚度、间隙和摩擦等非线性因素的机械传动部件仿真模型;分析了不同位置指令下的系统动态响应特性,并进行了文献验证. 结果表明:

(1) 不同位置阶跃信号指令下的机电作动器响应在空载时均不存在超调和振荡,无稳态误差;当加载时系统产生微小振荡,但随即快速稳定达到稳态过程,位置稳态误差满足作动器位置精度指标要求,即基于永磁同步电机三闭环伺服控制策略的机电作动器具有良好的动态性能。

(2) 通过与文献中机电作动器仿真输出位移跟踪曲线和误差曲线的对比,可知本文所建模型系统响应动态跟踪性能良好,最大误差较小,模型有效。

参考文献

- [1] 牛涛, 张益齐, 张国林, 等. 一种双冗余机电伺服系统设计仿真与优化[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(4): 62—67.
- NIU T, ZHANG Y Q, ZHANG G L, et al. Design and optimization of a dual redundancy electromechanical servo system [J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(4): 62—67. (in Chinese)

- [2] CROKE S, HERRENSCHMIDT J. More electric initiative-power-by-wire actuation alternatives [C]// Proceedings of National Aerospace and Electronics Conference (NAECON'94). New York: IEEE, 1994.
- [3] BENNOUNA O, LANGLOIS N. Modeling and simulation of electromechanical actuators for aircraft nacelles [C]//2013 9th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA). New York: IEEE, 2013
- [4] 魏科鹏, 胡健, 姚建勇, 等. 航空机电作动器神经网络快速终端滑模控制[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 624540.
WEI K P, HU J, YAO J Y, et al. Fast terminal sliding mode control of neural networks for aeromechanical actuators [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 624540. (in Chinese)
- [5] WAN Q, LIU G, ZHOU Y, et al. Numerical and experimental investigation on electromechanical aileron actuation system with joint clearance [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(2): 525-535.
- [6] GERADA C, BRADLEY K J. Integrated PM machine design for an aircraft EMA [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(9): 3300-3306.
- [7] YANG J Z, YANG Z S, SUN X Z. Control design for nonlinear electromechanical actuation system based on fuzzy PID and active disturbance rejection control [C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). New York: IEEE, 2018.
- [8] WANG J Y, ZHANG H, MIAO Q. Source free unsupervised domain adaptation for electro-mechanical actuator fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(4): 252-267.
- [9] 李世晓, 杜锦华, 龙云. 基于一维卷积神经网络的机电作动器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 62-73.
- [10] TANASKOVIĆ M, RISTANOVIĆ M, STOJANOVIĆ S, et al. Design of electro-mechanical actuator for medium sized helicopter and a test platform for its testing and verification [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 393: 012008.
- [11] HABIBI S, ROACH J, LUECKE G, et al. Inner-loop control for electro-mechanical (EMA) flight surface actuation systems [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2008, 130(5): 556-562.
- [12] 张阳阳, 尹成斌, 邢继峰. 机电作动器系统设计与动态特性研究[J]. 液压气动与密封, 2014, 34(6): 26-28.
ZHANG Y Y, YIN C B, XING J F. Design and dynamic characteristics study of electromechanical actuator system [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2014, 34(6): 26-28. (in Chinese)
- [13] 李永歌, 张潇, 许勇. 航空发动机分数阶PID控制器的参数自整定方法[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(7): 77-88.
LI Y G, ZHANG X, XU Y. Parameter self-tuning method of fractional order PID controller for the aero engine [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(7): 77-88. (in Chinese)
- [14] 刘俊, 王占林, 付永领, 等. 基于EEMD分解的直驱式机电作动器故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(12): 1567-1571.
LIU J, WANG Z L, FU Y L, et al. Fault diagnosis of direct-driven electromechanical actuator based on ensemble empirical mode decomposition [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(12): 1567-1571. (in Chinese)
- [15] LEMOR P C. The roller screw, an efficient and reliable mechanical component of electro-mechanical actuators [C]//Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. New York: IEEE, 2002: 215-220.
- [16] GARCIA A, CUSIDO I, ROSERO J A, et al. Reliable electro-mechanical actuators in aircraft [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2008, 23(8): 19-25.
- [17] 乔冠, 刘更, 马尚君. 行星滚柱丝杠副主曲率计算与接触特性分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 140-148.
QIAO G, LIU G, MA S J. Principal curvature calculation and contact characteristics analysis of the planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(21): 140-148. (in Chinese)
- [18] BRANDENBURG G, BRUCKL S, DORMANN J, et al. Comparative investigation of rotary and linear motor feed drive systems for high precision machine tools [C]//6th International Workshop on Advanced Motion Control. New York: IEEE, 2000: 384-389.

- [19] FU Y L, WANG D Y, CHEN J, et al. Nonlinear modeling and system analysis of the linear electro-mechanical actuators [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2015, 11(6): 1983—1995.
- [20] KARAM W, MARE J C. Modelling and simulation of mechanical transmission in roller-screw electro-mechanical actuators [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2009, 81(4): 288—298.
- [21] 乔冠, 刘更, 马尚君, 等. 基于行星滚柱丝杠副的机电作动器动态特性分析[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(7): 82—88+101.
- QIAO G, LIU G, MA S J, et al. Dynamic characteristic analysis for an electro-mechanical actuator based on planetary roller screw mechanism [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(7): 82—88+101. (in Chinese)