

# 引入前馈的航天机电伺服系统复合控制技术

李彪, 李璐, 李佳雨, 杨玫

西安航天精密机电研究所, 西安 710100

**摘要** 针对航天机电伺服系统阶跃响应快速且无超调、跟踪连续变化信号稳态精度高的要求, 在位置-速度-电流三闭环控制基础上引入前馈控制组成复合控制, 实现了在不降低系统动态性能和稳定度的前提下, 提高了对连续变化信号的跟踪精度。分析了闭环控制器与前馈控制器的设计方法, 针对全不变性原理设计的前馈函数对噪声敏感的问题, 给出了基于误差系数法的设计方法。然后进行了实验验证, 实验结果显示: 伺服系统能够快速、无超调地响应阶跃指令, 对连续变化信号具有良好的跟踪精度, 系统带宽得到拓展, 说明了本文方法的有效性与实际可行性。

**关键词** 机电伺服系统; 前馈控制; 复合控制; 无超调; 高稳态精度

中图分类号: TP273+.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-3242(2024)05-0023-07

## Composite Control for Aerospace Electromechanical Servo Systems with Feedforward

LI Biao, LI Lu, LI Jiayu, YANG Mei

Xi'an Aerospace Precision Electromechanical Institute, Xi'an 710100, China

**Abstract** In response to the requirements of aerospace electromechanical servo systems for fast step response, no overshoot and high steady-state accuracy during tracking continuously changing signals, a composite control is involved on the basis of position-speed-current triple closed-loop feedback control with introduction of feedforward control. The tracking accuracy of continuously changing signals without reducing the dynamic performance and stability of the system is improved by using this control strategy. The design methods of closed-loop controller and feedforward controller are analyzed. Regarding the noise sensitivity of the feedforward function designed by invariance principle, a designed method based on error coefficient method is developed, and experimental verification is conducted. The experimental results show that the servo mechanism system can respond to step commands quickly without overshoot. The system has good tracking accuracy for continuously changing signals, and the system bandwidth has been expanded. The experimental results demonstrate the effectiveness and practical feasibility of the control method proposed in this paper.

**Key words** Electromechanical servo system; Feedforward control; Composite control; No overshoot; High steady-state accuracy

收稿日期: 2024-02-19

作者简介: 李彪 (1983 -), 男, 博士, 主要从事发动机机电伺服系统高性能控制技术的研究与应用。

引用格式: 李彪, 李璐, 李佳雨, 等. 引入前馈的航天机电伺服系统复合控制技术[J]. 航天控制, 2024, 42(5): 23-29.

LI Biao, LI Lu, LI Jiayu, et al. Composite Control for Aerospace Electromechanical Servo Systems with Feedforward[J]. Aerospace Control, 2024, 42(5): 23-29.

## 0 引 言

电机驱动机电伺服系统具有体积小、可靠性高及工艺性好等优点,并且可优化飞行器能源配置、提高系统维护性和战伤生存能力,因此广泛应用于各类先进飞行器。机电伺服系统是飞行器飞行过程中实现推力矢量控制、姿态和轨道控制及制导控制等功能的关键部件,其性能和控制精度直接影响全系统的控制品质<sup>[1-3]</sup>。机电伺服系统一般由控制器、驱动电机和机械传动机构(齿轮减速器、滚珠丝杠等)组成。驱动电机常选用可靠性和功率密度高的永磁同步电机。减速器和传动机构用以实现运动形式的转换,并增大末端输出力/力矩。

航天机电伺服系统一般要求能够快速、无超调地响应阶跃指令,同时在跟踪连续变化指令时稳态精度高。反馈控制系统可以通过提高系统的开环增益或型次减小稳态误差,但这两种方法都会降低系统的动态性能和稳定度。前馈控制依据指令直接给出控制量,所以它比反馈控制更为“及时”,且不受系统延迟的影响。因此可以在反馈控制基础上引入前馈控制,利用前馈控制的超前控制作用提高系统对连续变化信号的跟踪精度。文献[4]针对电机伺服系统迟滞明显造成的稳态误差大,通过速度和加速度前馈控制改善了系统的稳态性能。文献[5]在速度前馈的基础上,为提高伺服系统的位置跟踪性能,研究了增加转矩前馈的新型前馈控制结构。文献[6]提出反馈微分和前馈微分自适应控制的新型控制策略,实现了无超调快速自适应响应控制。文献[7]为提高数控机床轮廓进给运动精度,分析了前馈微分控制和前馈滤波器对数控机床进给运动轮廓误差的影响。文献[8]为提高伺服控制的速度和精度,研究了前馈和微分负反馈对永磁同步电机控制性能的影响。传统前馈环节的设计依据全不变性原理,前馈函数中常具有纯微分和一阶、二阶等多阶微分环节,存在对噪声敏感的问题。

本文针对永磁电机驱动机电伺服系统高控制性能要求,在磁场定向控制策略及位置-速度-电流三闭环控制基础上,引入前馈控制构成复合控制,在不影响系统动态品质和稳定度的前提下,提高了系统跟踪连续变化指令的稳态精度。文中论述了三闭环反馈控制器设计方法;对于前馈环节,依据系统对无差度的需求设计前馈函数以降低对噪声

的敏感性。最后将本文控制方法应用于航天伺服机构控制系统进行了实验验证。

## 1 机电伺服系统数学模型

永磁同步电机是一个多变量、强耦合的非线性时变系统,磁场定向控制策略通过坐标变换,在同步旋转的 dq 坐标系下降阶和解耦数学模型,其中 d 轴一般选择沿转子磁场 N 极轴线方向,q 轴在空间逆时针超前 d 轴 90°电角度。在 dq 坐标下定子电流被分解为相互垂直的励磁电流分量和转矩电流分量,通过控制两个分量,实现了对磁场和转矩的解耦控制,从而获得了和直流电机相仿的高动态性能。

忽略电机磁路饱和、磁滞以及涡流损耗的影响,忽略电机齿槽效应,在 dq 坐标系下,采用  $i_d = 0$  电流控制方式的永磁同步电机数学模型包括:

1) 电压方程

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_d$ 和  $u_q$ 分别为 d 和 q 轴电压(V), $i_d$ 和  $i_q$ 分别为 d 和 q 轴电流(A), $\omega_e$ 为电机电气角速度(rad/s), $L_d$ 和  $L_q$ 分别为电机 d 和 q 轴电感(H),对于常用的隐极式永磁同步电机有  $L_d = L_q$ , $R$ 为电机电阻( $\Omega$ ), $\Psi_f$ 为永磁体磁链(Wb)。

2) 电磁转矩方程

$$T_e = 1.5p_0\psi_f i_q \quad (2)$$

式中: $T_e$ 为电磁转矩(N·m), $p_0$ 为电机极对数。

3) 运动方程

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_e - T_L \quad (3)$$

式中: $J$ 为折算到电机端的总转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ), $\omega$ 为电机机械角速度(rad/s), $T_L$ 为负载转矩(N·m), $B$ 为黏滞系数( $(\text{N} \cdot \text{m})/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ ),一般很小予以忽略。

4) 减速器环节

减速器环节一般由多级齿轮及滚珠丝杠组成,模型可以用速比  $i$  表示:

$$i = \frac{2\pi z}{P} \quad (4)$$

式中: $z$ 为齿轮总减速比, $P$ 为滚珠丝杠导程(mm/r)。





从而可得

$$b_0 = 0, b_1 = K_1(i - r_1), b_2 = K_1(\tau i - r_2), b_3 = i, b_4 = T_c i。$$

由式(8)可得前馈函数参数

$$\begin{cases} r_1 = i \\ r_2 = \tau i \end{cases} \quad (13)$$

依据拉普拉斯终值定理,由误差系数及误差传递函数可知,系统具有三阶无差度,相对反馈控制系统无差度提高两阶,可以对斜坡、抛物线指令稳态无静差跟踪。对照式(11)可知  $G_r(s) = is$ ,前馈环节不含有多阶微分环节,降低了对噪声的敏感性;同时前馈环节只与减速比有关,不依赖电机参数,因此具有良好的环境适应性。

### 3 实验验证

针对某航天伺服机构,采用本文前馈-反馈复合控制方案进行实验验证。伺服系统由控制器和永磁同步电机组成,采用电机直驱伺服框架机构,无减速器。主控芯片采用 ARM,电流环控制周期为 100  $\mu s$ ,速度环控制周期为 400  $\mu s$ ,位置环控制周期为 1 ms。电机相电流采用霍尔电流传感器检测,电机转子位置角度采用光电编码器检测,电机转速通过电机位置实时解算。逆变器开关时间计算采用 SVPWM 算法,控制频率为 10 kHz。电机参数见表 1,电机控制系统采用 6 V 直流母线电压供电,电机额定电流 1 A,额定转速 3000 r/min。

表 1 永磁同步电机参数

参数	数值
电机电阻/ $\Omega$	1.48
电机电感/H	$2.8 \times 10^{-4}$
转动惯量/ $(kg \cdot m^2)$	$1.8 \times 10^{-7}$
转矩系数/ $(N \cdot m) \cdot A^{-1}$	0.0088
反电动势系数/ $(V \cdot (rad \cdot s^{-1})^{-1})$	0.0059

前馈控制属于开环控制,引入后不会影响原闭环系统的稳定度,但能加快系统响应速度。通过对系统引入前馈前、后输入输出传递函数频率特性分析得出:无前馈控制时,系统带宽为 11.14 Hz,引入前馈后系统带宽达到 190 Hz。系统带宽大幅拓展,低频段相位滞后减小,因此引入前馈后对连续变化指令信号的跟踪精度会大幅提高。

图 4(a)和(b)为 160°位置阶跃响应测试结果。

引入前馈对阶跃响应几乎无影响,系统可以快速、无超调地响应阶跃指令,具有良好的稳态性能与动态特性。上升时间(0~90%终值)约为 85 ms,调节时间约为 145 ms( $\Delta = 2\%$ ),稳态误差不大于 0.15°。引入前馈环节不影响系统阶跃响应,是因为前馈控制函数由微分函数组成,当位置信号为阶跃信号时,经过微分及限幅后,施加到控制系统的控制量为持续时间为一个控制周期(约几百微秒)的脉冲信号。由于实际系统存在惯性,且速度环带宽有限,所以此时前馈控制对系统的作用可以忽略。

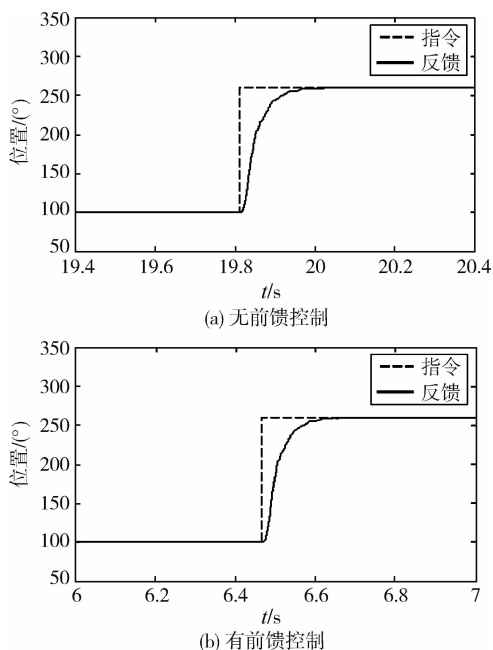


图 4 位置阶跃响应

图 5(a)和(b)为幅值 130°/5 Hz 正弦响应测试,可以看到无前馈时位置响应出现明显幅值衰减和相位滞后,响应波形存在畸变,引入前馈后几乎实现全跟踪。因为前馈控制能够以超前控制作用来补偿反馈控制的动态滞后,提高了对连续变化信号的稳态跟踪精度,同时也拓展了系统带宽。前馈控制无需等到跟踪偏差形成后就能产生较强的控制作用,从而提高了系统抗扰动能力,改善了响应波形畸变。

图 6 为三角波指令测试,可以看到无前馈控制时,系统跟踪斜坡指令存在稳态误差,这是因为位置闭环为 I 型系统。引入前馈控制后,通过对速度预测补偿到速度环加快响应能力,实现了对斜坡指令的无静差跟踪。说明引入前馈环节,实现了不用增加积分环节,即不降低系统稳定度情况下,提高

了系统的无差度。

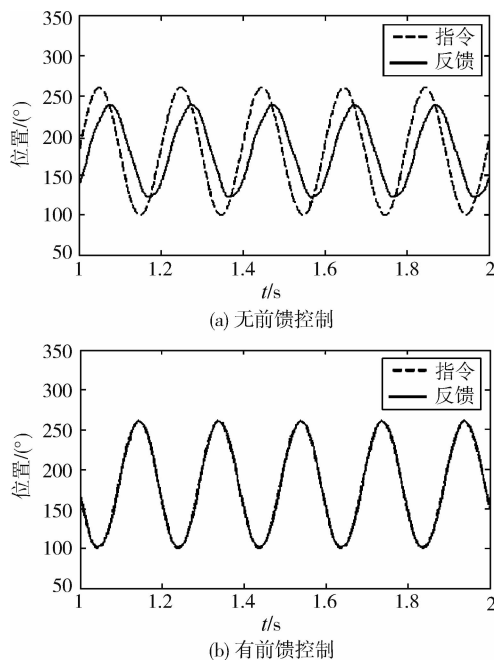


图5 130°/5 Hz 正弦响应测试结果

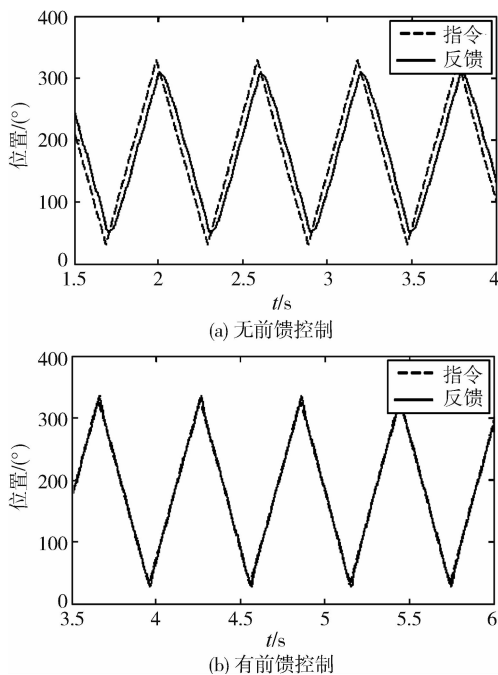


图6 三角波指令测试

实验结果表明,机电伺服系统采用本文的前馈-反馈复合控制方案后,能够兼具良好的动态特性和稳态跟踪精度。系统阶跃响应动态特性由三闭环确定,引入前馈控制不会影响阶跃响应的动态特性,但能大幅改善跟踪连续变化指令的稳态精度,拓宽系统带宽,并提高了系统无差度。因此对于采

用本文复合控制技术的机电伺服系统,可以先根据系统动态品质和稳定度要求设计三闭环;然后再根据稳态精度或无差度要求设计前馈环节。从而实现对系统动态特性和稳态跟踪精度的二自由度设计。

## 4 结 论

针对航天机电伺服系统高控制性能要求,本文在永磁同步电机磁场定向控制策略、位置-速度-电流三闭环控制基础上,引入前馈控制组成复合控制,解决了系统高动态性能与高稳态跟踪精度之间的矛盾。通过三闭环设计使得系统阶跃响应具有良好动态特性。然后引入前馈环节,在不影响系统动态品质与稳定度的前提下提高了对连续变化指令的稳态跟踪精度。针对全不变性原理设计的前馈函数对噪声敏感的问题,采用基于误差系数法的前馈函数设计方法,根据系统的无差度需求设计前馈环节,在满足性能需求前降低对噪声的敏感程度。

实验结果表明:本文设计的机电伺服复合控制系统可以快速、无超调地响应阶跃指令,并对连续变化指令具有良好的稳态跟踪精度,能够对斜坡指令无静差跟踪。证明了本文方法对系统动态性能和稳态跟踪精度二自由度设计的有效性与实际可行性。

## 参 考 文 献

- [1] 郭洪根,王指国. 中大功率航天电动伺服机构发展综述[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(3): 1-5. (GUO Honggen, WANG Zhiguo. A review of the current development of high-power aerospace EMA[J]. Navigation Positioning and Timing, 2016, 3(3): 1-5.)
- [2] 郭宏,邢伟. 机电作动系统发展[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 620-627. (GUO Hong, XING Wei. Development of electromechanical actuators[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 620-627.)
- [3] 张新华,黄建,张兆凯,等. 大功率高性能航天伺服系统发展综述[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 14-19. (ZHANG Xinhua, HUANG Jian, ZHANG Zhaokai, et al. Review on the development of high-power high-performance aerospace servo system[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(1): 14-19.)
- [4] 尉世超,杨振强. 基于前馈控制的高精度伺服系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, 6: 134-137.

- (YU Shichao, YANG Zhenqiang. High precision servo system based on feed-forward control[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022,6:134-137.)
- [ 5 ] 腾福林,李宏胜,葛红宇,等. 伺服系统中一种新型前馈控制结构的研究[J]. 电气传动,2012,42(2):61-64. (TENG Fulin, LI Hongsheng, GE Hongyu, et al. Design on a novel feedforward control structure in servo system[J]. Electric Drive, 2012, 42(2):61-64.)
- [ 6 ] 黄科元,周滔滔,黄守道,等. 永磁伺服系统基于微分自适应补偿的快速无超调控制策略[J]. 电工技术学报,2014,29(9):137-144. (HUANG Keyuan, ZHOU Taotao, HUANG Shoudao, et al. Non-overshoot and fast response control of PMSM servo system based on differential adaptive compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9):137-144.)
- [ 7 ] 李宏胜,孙权,张建华,等. 基于前馈控制的数控机床进给运动轮廓误差分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2010(2):9-15. (LI Hongsheng, SUN Quan, ZHANG Jianhua, et al. Analysis to contour error of CNC machine tool feed motion based on feedforward control[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010(2):9-15.)
- [ 8 ] 张丹,张政权,王邦继,等. 永磁同步电机控制系统建模及微分负反馈优化[J]. 微电机,2017,50(10):45-48+52. (ZHANG Dan, ZHANG Zhengquan, WANG Bangji, et al. Modeling of permanent magnet synchronous motor control system and optimization of differential negative feedback[J]. Micromotors, 2017, 50(10):45-48+52.)
- [ 9 ] 董恒,王辉,黄科元. 永磁同步电动机驱动系统数字PI调节器参数设计[J]. 电气传动,2009,39(1):7-10. (DONG Heng, WANG Hui, HUANG Keyuan. Design of PMSM drive system digital PI adjuster parameters[J]. Electric Drive, 2009, 39(1):7-10.)
- [10] 王莉娜,朱鸿悦,杨宗军. 永磁同步电动机调速系统PI控制器参数整定方法[J]. 电工技术学报,2014,29(5):104-117. (WANG Lina, ZHU Hongyue, YANG Zongjun. Tuning method for PI controllers of PMSM driving system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014,29(5):104-117.)
- [11] 廖晓钟,刘向东. 控制系统分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社,2008:199-213.
- [12] 刘胜,彭侠夫,叶瑰昀. 现代伺服系统设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001:179-184.