

# EMA 伺服控制系统研究

黄敏\* 胡晓伟 李世佳

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

## 摘要:

机电作动器(EMA)作为先进飞机的主要作动系统有着体积小、效率高、重量轻的优势,是未来航空作动器的主要发展方向。在介绍 EMA 的工作原理之后建立了 EMA 的机械传动机构与永磁同步电机(PMSM)的非线性模型,构建了含有电压前馈的三闭环 EMA 控制系统。考虑到机械传动系统对 EMA 位置环的影响,针对位置环构建了基于径向基(RBF)神经网络的 PID 控制器,将其与 EMA 三闭环 PI 控制系统进行仿真并比较控制结果,结果显示 RBFPID 控制器的控制精度与响应速率得到明显提高。

关键词: 机电作动器;径向基神经网络;永磁同步电机;闭环控制

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

现代民用飞机配置的作动系统依据使用能源的不同可分为三类:即液压、电力与机械作动系统。其中,液压作动系统运用最为广泛,特别是在飞行控制领域,末端执行单元基本是以液压作为动力来操纵舵面,以实现飞行姿态与航迹的控制。机载作动系统的性能已经成为影响民用飞机的整体性能的重要因素之一。

为满足未来民用飞机向高安全可靠、经济性及大功率方向发展的需求,飞机液压系统正朝着高压化、大功率、智能化、集成化、多余度方向发展。然而,冗余的液压系统管路在增加系统复杂性的同时也增加了机体总重量,降低了民机的有效载重与运营经济性。其次,高压化和大功率化使传统液压系统进而引发了诸如散热、燃油总效率降低等问题。

为解决这些问题,在先进飞机上机电作动器(Electro Mechanical Actuator,以下简称 EMA)正在逐步取代液压作动器作为舵面的执行机构,EMA 的性能是提高多电飞机性能的关键<sup>[1]</sup>。

目前,MOOG 公司与 Parker 宇航公司对于 EMA

有着充足的实践经验,而我国的 EMA 技术还处于发展阶段,与国外水平差距较大<sup>[2-3]</sup>。

驱动控制技术是发挥 EMA 性能的关键,EMA 中的电机的伺服控制技术主要有矢量控制与直接转矩控制两种。矢量控制依据电极坐标变换通过调节一相电流来实现电机控制,而转矩控制直接以转矩作为控制对象。传统的直接转矩控制存在低速时零电压矢量较多且开关频率低转矩大的问题。矢量控制虽然高效可靠,但磁链难以准确观测使得控制效果受到一定影响。目前,随着智能算法的不断发展,可将神经网络与传统控制相结合,利用神经网络的辨识能力以提升控制系统的性能。

## 1 EMA 伺服系统

EMA 作为一种机电一体化装置,可将伺服控制器的输出信号转变为速度、位移、载荷等物理量,以实现控制对象的驱动<sup>[4]</sup>。机电作动器在各式电控系统中已广泛应用<sup>[5-7]</sup>。

一类 EMA 的结构如图 1 所示,EMA 通常由伺服驱动控制系统(包括电机、位置传感器、角速度传感器与控制器)与机械负载组成。永磁同步电机

\* 通信作者. E-mail: hm3355350@outlook.com

引用格式: 黄敏,胡晓伟,李世佳. EMA 伺服控制系统研究[J]. 民用飞机设计与研究,2019(4):31-35. HUANG M, HU X W, LI S J. Research on EMA servo control system[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2019(4):31-35 (in Chinese).

(Permanent magnetic Synchronous Machine, 以下简称 PMSM) 以其优秀的机械特性, 重量轻、体积小与电流利用效率高的优势在 EMA 中逐渐被使用<sup>[8-9]</sup>。舵面上 EMA 的工作原理是: 系统进入工作状态并且离合器保持结合, 控制系统收到指令并控制电机驱动滚柱丝杠, 在丝杠副的带动下推杆驱动舵面运动。系统处于在待机状态或者故障状态时, 离合器脱离防止机械结构与伺服系统结构的损伤。

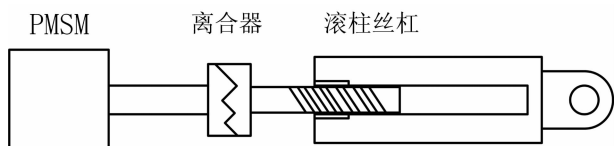


图 1 一类 EMA 结构示意图

### 1.1 PMSM 系统建模

PMSM 与常规电机相同, 主要结构部件是定子、转子与端盖等, 但其转子为永磁体。PMSM 工作原理是定子在受到三相对称正弦交流电之后, 会产生一个旋转的感应圆磁场, 感应磁场与转子互相作用从而驱使转子转动, 从而输出转矩。依据安倍原理可知当转子磁链矢量滞后感应磁场矢量  $90^\circ$  时, PMSM 的输出转矩最大, 效率最高<sup>[4]</sup>。

PMSM 的原理分析需要在三种坐标系 (ABC 定子坐标系,  $\alpha\beta$  两相静止坐标系,  $dq$  坐标系) 下进行, 三个坐标系如图 2 所示。

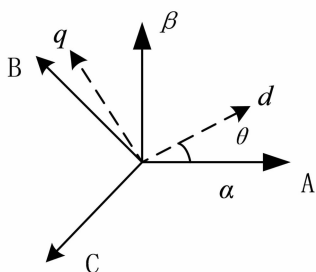


图 2 电机三坐标系示意图

ABC 坐标系以定子三相对称绕组为三轴, 彼此相位差为  $120^\circ$ 。 $\alpha\beta$  坐标系以定子 A 相绕组为  $\alpha$  轴, 并且  $\beta$  轴相位超前  $\alpha$  轴  $90^\circ$ 。 $dq$  坐标系的  $d$  轴与转子轴线重合为直轴,  $q$  轴相位逆时针超前  $d$  轴  $90^\circ$  为交轴。 $dq$  坐标系随转子旋转, 与转子相对静止。

三个坐标系之间可以通过 Clarke 变换、Park 变换与其逆变换来实现互相转化。通过坐标变化可得

到简化的 PMSM 数学模型。

(1) 电机电压方程:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \Psi_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \Psi_d \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $R_s$  为定子电阻;  $i_d, u_d$  分别为直轴上的电流与电压;  $i_q, u_q$  分别为交轴上的电流与电压;  $L_d, L_q$  分别为直轴电感和交轴电感;  $\omega_e$  为电角速度;  $\Psi_d, \Psi_q$  分别为直轴磁链和交轴磁链。

(2)  $d/q$  轴磁链方程:

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\Psi_f$  为永磁体的磁链, 与材质、几何尺寸有关, 为常数。

(3) 转矩方程:

$$T = \frac{3}{2} p [\Psi_d i_q - \Psi_q i_d] \quad (3)$$

将式(3)带入式(2)可得:

$$\begin{aligned} T &= \frac{3}{2} p [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ &= \frac{3}{2} p \Psi_f i_q + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 机械运动方程:

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_m \quad (5)$$

式中,  $\omega_m$  是电机转速,  $T_m$  是负载转矩,  $J$  是等效转动惯量,  $B$  是摩擦系数。

### 1.2 机械传动机构建模

本 EMA 伺服系统的机械传动系统由离合器、滚珠丝杠副与推杆组成。将离合器视作刚性连接, 可将传动系统等效为单自由度的动力学系统如式(6)所示。

$$T_m = J_l \ddot{\theta}_m + B_l \dot{\theta}_m + T_l + Kl\theta_m Ph \quad (6)$$

式中,  $J_l$  为系统负载的等效转动惯量;  $\theta_l$  为丝杠输出端的角度;  $B_l$  为系统的等效阻尼系数;  $k_l$  为系统的等效扭转刚度;  $\theta_m$  为电机输出的角度;  $T_l$  为负载转矩。 $\theta_l$  与  $\theta_m$  的转换关系可依据滚柱丝杠的原理, 通过丝杠副的传动比  $K_l$  与丝杠导程  $P_h$  得到。

## 2 PMSM 控制系统

### 2.1 三环控制系统

本文所构建的 PMSM 伺服控制系统是一个位

置-速度-电流三环控制系统,控制原理图如图3所示。系统由外向内分别是位置环调节器(APR),速度环调节器(ASR)与电流环调节器(ACR)。对于PMSM的电流环控制采用 $i_d = 0$ 的矢量控制算法,取 $i_{dref}$ 为0,再以经过变换得到的

$i_d, i_q$ 作为反馈量与电流参考值进行比较,产生的误差再经过ACR与电压前馈补偿输出电压 $u_q, u_d$ 。电压 $u_q, u_d$ 再通过逆Park变换经过空间矢量脉宽调制技术(SVPWM)产生绕组电流,实现对PMSM的控制。

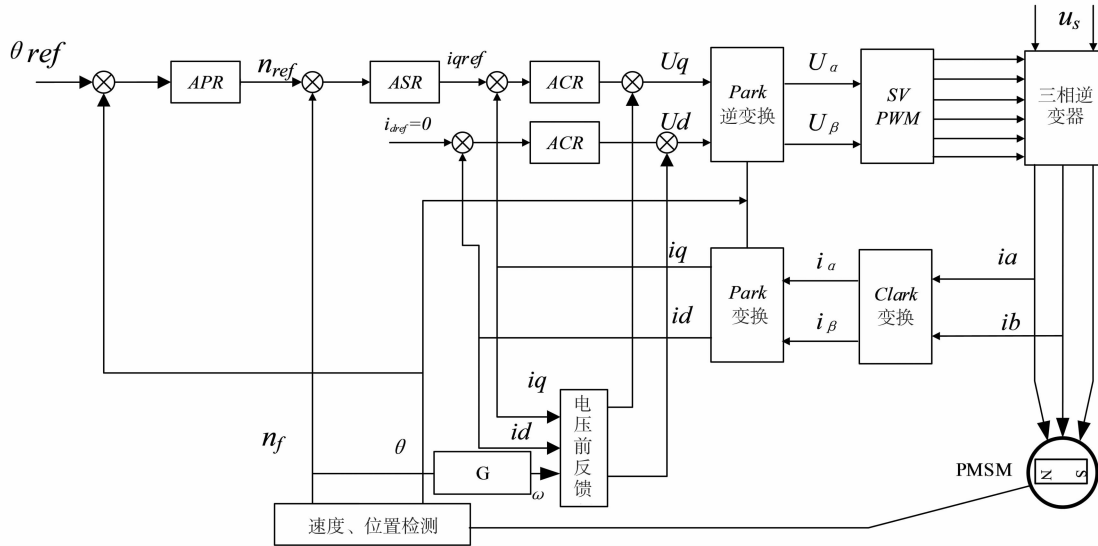


图3 PMSM 三环控制系统

2.2. 基于 RBFPID 的位置环控制

三环PI控制系统常用于PMSM的伺服控制,补过EMA的机械传动系统进一步增加了系统的复杂性,随着系统持续工作,传统PI控制的局限性会逐渐被凸显出来<sup>[5]</sup>。

径向基(Radial Basis Function,以下简称RBF)神经网络是一种单隐层的三层前馈网络,结构如图4所示。RBF的映射是非线性的,它的优势是学习速率快且能避免陷入局部极小化。<sup>[11]</sup>

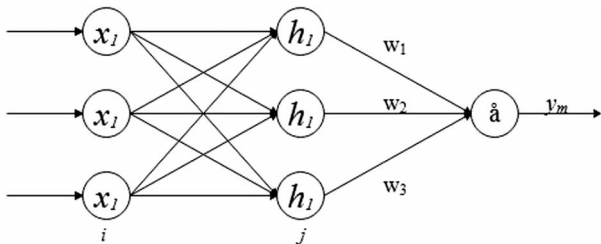


图4 RBF神经网络示意图

考虑到伺服系统的位置环直接受到机械系统的影响<sup>[10]</sup>,为降低此影响,引入智能控制方法代替传统PI控制方法以提高控制系统的性能。RBF具有对系统模型参数与扰动的实时学习能力,是一种优秀的辨识算法,易于实现实时控制。通过传统控制

器与智能算法的结合,可建立位置环的RBF神经网络PID控制器,其原理如图5所示。

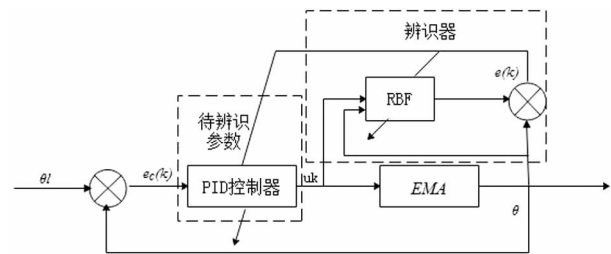


图5 位置环RBFPID控制原理图

采用增量式PID控制器,控制误差为:

$$error(k) = \theta L - \theta \tag{7}$$

PID三项输入为:

$$\begin{aligned} P: xk(1) &= error(k) - error(k - 1) \\ I: xk(2) &= error(k) \\ D: xk(3) &= error(k) - 2error(k - 1) \\ &\quad + error(k - 2) \end{aligned} \tag{8}$$

控制律:

$$\Delta u_k = k_p xk(1) + k_i xk(2) + k_d xk(3) \tag{9}$$

根据神经网络整定指标:

$$E = \frac{1}{2} error(k)^2 \tag{10}$$

采用梯度下降法对 PID 的三个参数进行调整。

### 3 仿真与结果分析

在 MATLAB/Simulink 平台中, 建立 EMA 伺服

控制系统仿真模型如图 6 所示, 可通过 APR 的可调开关在仿真开始前进行 RBFPID 控制器与 PI 控制器的切换。EMA 仿真设定参数如表 1 所示, 控制系统参数设定如表 2 所示。

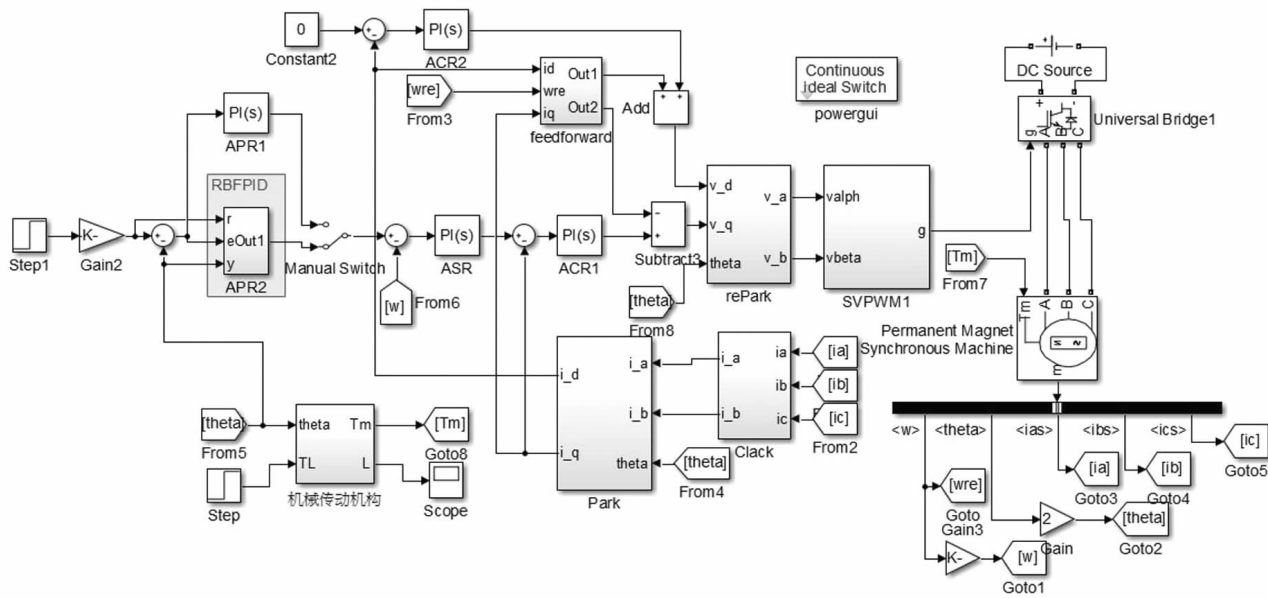


图 6 EMA 控制系统模型

表 1 EMA 伺服系统参数

参数名	数值	参数名	数值
电机极对数/P	4	阻尼系数 B	0.001
定子绕组电/R	0.956 Ω	额定电压/U	330 V
转动惯量/J	0.001 65 kg · m <sup>2</sup>	传动扭转刚度 /K <sub>L</sub>	523 rad/N
直轴电感/L <sub>q</sub>	12.4 mH	传动等效惯量 J <sub>1</sub>	0.003 4 kg · m <sup>2</sup>
丝杠导程	2 mm	传动阻尼系数 B <sub>1</sub>	0.008

表 2 三闭环控制的相应参数

控制器名称	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>
APR	324	15
ASR	1	2.5
ACR1	5	40
ACR2	7	50

RBF 神经网络整定的 PID 控制器的初始参数与表中 APR 控制器一致, K<sub>D</sub> = 0; 其余参数设定为: 隐藏层为 6 层, 学习速率分别为 n = 0.25, 动量因子 α = 0.05, 三个分量学习速率都为 0.15。

图 7 中位置响应曲线显示, 与传统三闭环 PI 调

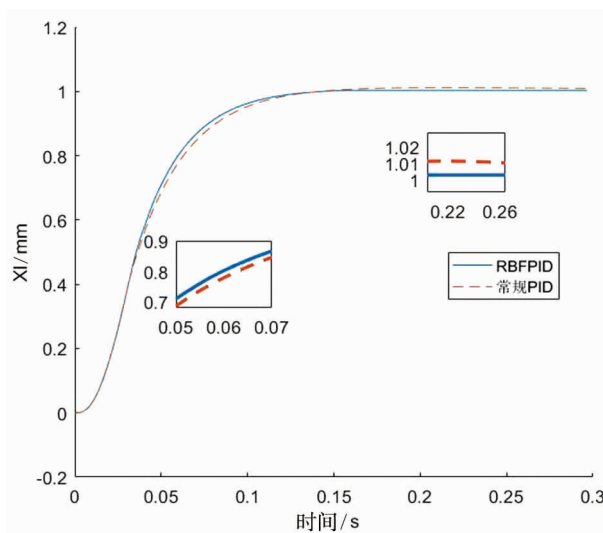


图 7 EMA 单位阶跃的位置响应曲线

节器系统相比基于 RBFPID 位置调节器的系统的响应时间与稳态误差都得到改善。响应时间缩短约 0.03 s 且响应速度提高了约 17%; 同时稳态误差降低 0.095 mm, 精度提高了约 9.5%。可见, 在改进位置环控制后, EMA 的伺服响应速度和响应精度都得到了-定的改善。通过两类位置环控制方法的 EMA 系统仿真结果的分析与对比, 可知基于 RBFPID 的位

置控制器在一定程度上改善了 EMA 的控制特性,提高了 EMA 伺服驱动系统的响应速度与响应精度。因此,利用 RBFPID 对 PMSM 进行位置环控制的改善有助于提高 EMA 伺服驱动系统的控制性能。

## 4 结论

本文基于 EMA 工作原理与 PMSM 控制方法,构建了 EMA 非线性模型与带电压前馈的三闭环控制系统,为减缓机械传动机构对 EMA 动态响应影响,提出将传统的位置环 PI 控制器替代为 RBFPID 控制器,结果表明采用 RBFPID 控制器有利于提高 EMA 伺服系统的性能。

### 参考文献:

- [1] 严仰光,秦海鸿,龚春英,等. 多电飞机与电力电子[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(1):11-18.
- [2] 卢晓慧. 机电作动器中永磁容错电机设计与控制系统研究[D]. 国防科学技术大学,2012.
- [3] 龙国浩,赵东标,吉星宇,等. EMA 伺服系统速度环自校正控制设计[J]. 机械与电子,2015(2):15-19.
- [4] 肖前进,贾宏光,章家保,等. 电动舵机伺服系统非线性辨识及补偿[J]. 光学精密工程,2013,21(8):2038-2047.

- [5] 吉星宇. 大功率 EMA 伺服驱动系统设计与研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [6] 付永领,郑世成. 机电作动器驱动转臂机构的设计[J]. 船舶工程,2017,39(增刊1):109-112.
- [7] 耿家涛. 永磁直流伺服电机在船载测角天线中的应用[J]. 国内外机电一体化技术,2012(3):38-39.
- [8] 张明月. 滚珠丝杠式电动舵机非线性分析及控制策略研[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2014.
- [9] 杨国良,李建雄. 永磁同步电机控制技术[M]. 北京:知识产权出版社,2015.
- [10] 周磊杰,赵东标,马越民. EMA 伺服驱动系统控制性能的仿真研究[J]. 机械与电子,2016,34(10):34-37.
- [11] 赵志刚,单晓虹. 一种基于遗传算法的 RBF 神经网络优化方法[J]. 计算机工程. 2007,33(6):211-212.

### 作者简介

黄敏 男,硕士。主要研究方向:飞控系统综合设计与验证,动力学分析与控制。E-mail: hm3355350@outlook.com

胡晓伟 男,硕士。主要研究方向:飞控系统综合设计与验证。E-mail: huxiaowei@comac.cc

李世佳 男,硕士。主要研究方向:飞机材料标准化与技术创新;算法优化。E-mail: lishijia@comac.cc

## Research on EMA servo control system

HUANG Min\* HU Xiaowei LI Shijia

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** Electro-Mechanical Actuator (EMA), as the main actuating system of advanced aircraft, has the advantages of small size, high efficiency and light weight. It is main development direction of future aviation actuator. Firstly, the working principle of EMA was introduced, the non-linear model of mechanical transmission structure and permanent magnet synchronous motor was established, and a three-loop EMA control system with voltage feed-forward was constructed. Then, considering the influence of mechanical transmission system on EMA position loop, a radial basis function (RBF) neural network PID controller was constructed for position loop by using the identification ability of neural network. The results show that the control accuracy and response rate have been improved obviously.

**Keywords:** electro-mechanical actuator; radial basis function neural network; permanent magnet synchronous motor; closed-loop control

\* Corresponding author. E-mail: hm3355350@outlook.com