

doi: 10.7690/bgzdh.2023.04.003

某舰载火箭炮交流伺服系统并行复合控制方法

朱开阳, 童仲志, 花纯磊

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对舰载火箭炮在发射过程中会受到风浪以及自身扰动的影响而导致射击精度和稳定性降低的问题, 提出一种 RBF 神经网络滑模-模糊 PID 控制方法。利用 RBF 神经网络来削弱滑模的抖振, 在误差较小时提高响应速度和鲁棒性; 利用模糊规则对 PID 参数进行调整, 在误差较大时提高控制精度。仿真结果表明: 该复合控制策略可使舰载火箭炮交流伺服系统具有更高的射击精度和反应速度, 提高系统性能。

关键词: 舰载火箭炮; 交流伺服系统; RBF 神经网络; 滑模变结构控制

中图分类号: TJ393 **文献标志码:** A

Parallel Composite Control Method for AC Servo System of Certain Type Shipborne Rocket Launcher

Zhu Kaiyang, Tong Zhongzhi, Hua Chunlei

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

Abstract: Aiming at the problem that the firing accuracy and stability of shipborne rocket launcher will be reduced due to the influence of wind and waves and its own disturbance in the launching process, a RBF neural network sliding mode-fuzzy PID control method is proposed. The RBF neural network is used to weaken the chattering of sliding mode and improve the response speed and robustness when the error is small. The fuzzy rules are used to adjust the PID parameters to improve the control accuracy when the error is large. The simulation results show that the hybrid control strategy can make the AC servo system of shipborne rocket launcher have higher firing accuracy and reaction speed, and improve the system performance.

Keywords: shipborne rocket launcher; AC servo system; RBF neural network; sliding mode variable structure control

0 引言

某舰载火箭炮以舰船为载体, 在发射炮弹时舰船处于复杂的海况之中, 会受到海浪、海风等影响, 舰船会产生较大幅度的摆动, 其中横向摇动最为明显, 导致舰载火箭炮的射击线产生偏差。同时, 舰载火箭炮在发射时会因燃气流冲击力矩等强干扰而导致舰载火箭炮发射平台产生振动, 导致实际发射角度与目标角度产生较大偏差。研究一些智能控制方法来提高舰载火箭炮的射击精度以及稳定性具有重要的实际意义。当前, PID 控制是应用最广泛的控制方法, 虽然技术已经相当成熟, 但还存在很大的局限性, PID 控制必须要知道被控对象的精确模型, 并且只能对线性时不变等相对简单的系统进行有效控制。随着智能控制的不断发展, 学者们将智能控制与 PID 控制结合起来, 研究出了很多新的控制方法。文献[1]将模糊控制与 PID 相结合, 利用模糊控制不需要确定模型, 而只需根据经验制定的模糊规则, 便可自动地对 PID 参数进行整定的优点对

非线性、多耦合的对象进行有效控制, 且具有很好的鲁棒性; 文献[2]提出了一种复合控制策略, 滑模变结构控制与反演控制相结合, 利用滑模变结构控制来克服外界干扰和参数摄动, 反演控制来消除滑模控制的抖振, 取得了很好的控制效果。

RBF 神经网络一共有 3 层, 分别为输入层、隐含层、输出层。输入层为神经网络的信号源; 隐藏层的神经元包含一个激活函数, 对输入的信号进行数学运算; 输出层为一个和函数, 采用线性优化策略, 对隐藏层的运算结果进行加权求和。因为 RBF 神经网络是局部逼近的, 所以利用 RBF 神经网络能够加快学习速度并避免局部极小问题^[3-5]。对于滑模变结构控制, 可以人为地定义滑动模态, 即可以对滑模面和等效控制律进行设计, 能够对输入的变换做出快速响应, 且系统的特性只与滑模面和控制律有关而与外界干扰无关, 所以滑模控制响应速度快、鲁棒性强^[6-9]。模糊控制利用模糊数学的思想和理论方法, 对复杂的和难以精确描述的系统中的变量以

收稿日期: 2022-12-21; 修回日期: 2023-01-28

作者简介: 朱开阳(1996—), 男, 安徽人, 硕士, 从事智能检测与控制技术研究。E-mail: zhu_kai_yang@163.com。

及信息进行模糊处理，模糊的过程能够容纳的信息量更大，因此鲁棒性和适应性更好^[10-11]。笔者充分利用模糊控制与 RBF 神经网络滑模控制的优点，将二者结合起来，对舰载火箭炮交流伺服系统进行控制。经仿真实验验证，该智能复合控制方法与传统的 PID 控制相比，能更好地满足舰载火箭炮交流伺

服系统的控制要求。

1 伺服系统数学模型推导

如图 1 所示，舰载火箭炮交流伺服系统采用三相永磁同步电机作为执行机构，根据永磁同步电机的数学模型可得永磁同步电机的传递函数，由此可得交流伺服系统三环结构模型。

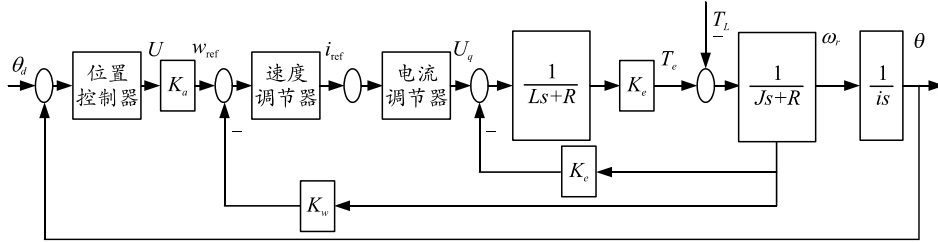


图 1 交流伺服系统结构

图中： θ_d 为执行机构目标角度； θ 为实际角度；笔者对位置环控制器进行设计，位置环控制器的输入为目标角度与实际角度的差值； K_a 为放大器增益； U 为控制电压； L 为电机电枢回路电感； R 为绕组等效电阻； T_L 为负载扰动转矩； J 为转动惯量； B 为黏性摩擦系数。电流环的作用是保证系统的响应快速性，控制环内干扰。电流环采用 PI 控制，将其等效为一阶惯性环节；因此，其闭环传递函数可简化为：

$$G_i(s) = 1/((1/k')s + 1) \tag{1}$$

式中 $1/k'$ 为电流环的积分时间常数。速度环的主要作用是提高系统的抗干扰能力，对速度环的要求是速度脉动率要小，频率响应速度要快，速度环也采用 PI 控制，其传递函数公式为：

$$G_w(s) = K_s(1 + 1/T_s s) \tag{2}$$

式中： T_s 为积分时间常数； K_s 为速度环放大倍数。忽略负载扰动转矩和黏性摩擦系数这 2 个参数的影响，可将图 1 转化为图 2。

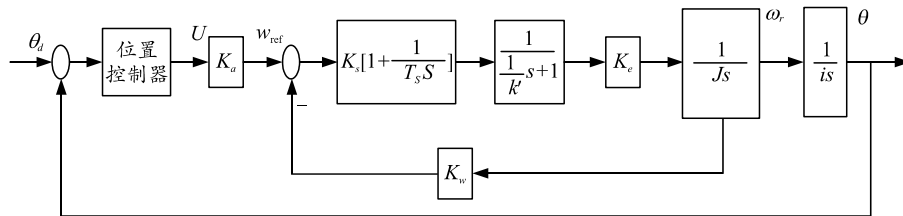


图 2 交流伺服系统结构

根据图 2 可得速度环开环传递函数如下：

$$G'_w = \frac{K_s K_c (T_s s + 1)}{J s^2 T_s (1/k' + 1)} \tag{3}$$

该交流伺服控制系统位置环开环传递函数如下：

$$G(s) = \frac{K_s K_c (T_s s + 1)}{J s^2 T_s ((1/k')s + 1) + K_s K_c K_w (T_s s + 1)} \cdot \frac{K_a}{s} \tag{4}$$

2 并行复合控制器设计

2.1 RBF 神经网络滑模控制器设计

滑模控制器采用指数趋近律，电机的跟踪误差为：

$$e(t) = \theta_d - \theta(t) \tag{5}$$

对上式两边求导得：

$$\dot{e}(t) = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}(t) \tag{6}$$

滑模函数设计为：

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) (c > 0); \tag{7}$$

$$\dot{s} = c\dot{e}(t) + \ddot{e}(t) = c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}(t)) + (\ddot{\theta}_d - f - bu - d) \tag{8}$$

取指数趋近律：

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks (\varepsilon > 0, k > 0) \tag{9}$$

为削弱系统的抖振，需对趋近律中的参数 k 和 ε 进行调整，应在增大 k 的同时减小 ε ，既能削弱抖振又可保证快速趋近。由式(8)和式(9)可求得滑模控制律为：

$$u(t) = [\theta_d - f - d + c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks]/b \tag{10}$$

令 Lyapunov 函数为：

$$V = s^2/2; \tag{11}$$

则：

$$\dot{V} = S\dot{S} = -\varepsilon|S| - kS^2 \leq 0 \tag{12}$$

因此可判定此系统稳定。

理想的滑模变结构控制系统是基于无时间和空间滞后的结构切换，滑动模态总是渐进稳定于原点，因此系统不会发生抖振。但是对于一个现实的滑模变结构控制系统而言，时间和空间开关的滞后是必然存在的，另外还存在系统惯性的影响；所以抖振不可能完全消除，必然存在切换增益 k ，并且系统的抖振程度与切换增益 k 成正比例关系。控制抖振的方法有很多，比如：准滑动模态法、趋近律法、神经网络法、干扰观测器法等。笔者选择利用 RBF 神经网络来调节切换增益，以此来控制系统的抖振^[12-13]。RBF 神经网络滑模控制器的结构如图 3 所示。

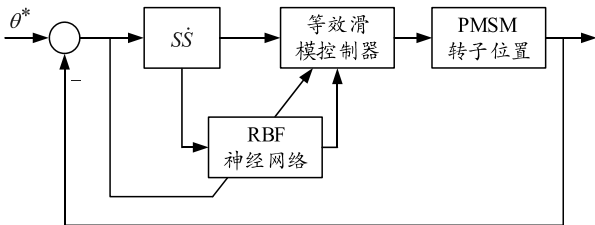


图 3 RBF 神经网络滑模控制器结构

设 RBF 神经网络的输入为 $x=[s\dot{s}]$ ，输出的绝对值等于切换增益 K ，则：

$$k = |w^T h(x)| \quad (13)$$

式中： $w=[w_1, w_2, w_3]^T$ 为隐藏层至输出层的连接权重； $h(x)=[h_1(x), h_2(x), h_3(x)]^T$ 为高斯函数。

$$h_i(x) = \exp\left(-\|x - c_i\|^2 / 2b_i^2\right), i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

式中： c_i 为神经网络第 i 个节点的中心向量； r_i 为神经网络基宽向量中的第 i 个值。定义目标函数：

$$E = e^2 / 2 \quad (15)$$

神经网络权值调整算法为：

$$\Delta w_i = -\eta(\partial E / \partial w_i) = \eta e \operatorname{sgn}(s) h_i(x) \operatorname{sgn}(w_i h_i(x)) \quad (16)$$

网络的权值学习算法为：

$$w_i(t) = w_i(t-1) + \Delta w_i(t) + \alpha(w_i(t) - w_i(t-1)) \quad (17)$$

式中： η 为学习率， $\eta \in (0, 1)$ ； α 为惯性量系数， $\alpha \in (0, 1)$ 。

2.2 模糊控制器设计

误差 e 和误差变化 e_c 经过模糊化之后得到模糊的偏差量作为模糊控制器的输入，根据工程设计人员所建立的模糊规则进行模糊推理得到相应的模糊集合，最后在进行反模糊化得到精确的 3 个参数 k_p ， k_i ， k_d 来对 PID 控制器的参数进行实时调节，以满足对于不一样 e 和 e_c 时对控制参数的要求。模糊 PID

控制器的结构如图 4 所示。

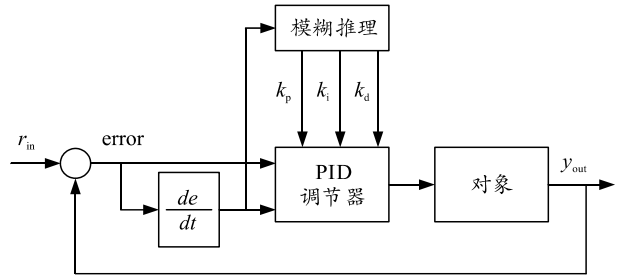


图 4 模糊 PID 控制器结构

将 e 和 e_c 的模糊集均设置为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)，输出量 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊子集划分与输入量相同。并且将系统误差 e 和误差变化 e_c 以及 k_p 、 k_i 、 k_d 的基本论域都选择为 $\{-3, 3\}$ 。建立针对 k_p 、 k_i 、 k_d 3 个参数的模糊控制如表 1—3 所示。

表 1 k_p 模糊规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
qPS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 k_i 模糊规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
qPS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 k_d 模糊规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

控制器的输入量 e 和 e_c 以及输出量 k_p ， k_i 和 k_d 的隶属度函数均选择三角分布式。根据 3 个模糊控制表可对 3 个参数 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 分别进行动态整定，进行模糊推理，得出最终的控制量。通过模糊推理得到的是模糊集合，但是在实际的模糊控制中，必须要有一个确定的值才能控制执行机构，因此需要进行去模糊化。常见的去模糊化有 3 种，即最大隶属度法、重心法、加权平均法。选择使用重心法

对输入的模糊集合进行反模糊化处理，得到精确的 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 后即可得模糊 PID 参数：

$$k'_p = k_p + \Delta k_p; \tag{18}$$

$$k'_i = k_i + \Delta k_i; \tag{19}$$

$$k'_d = k_d + \Delta k_d. \tag{20}$$

2.3 复合控制算法设计

基于 RBF 神经网络滑模控制和模糊 PID 控制，设计出最终的复合控制策略结构如图 5 所示。利用传感器采集火箭炮发射时的实际角度与目标角度进行对比，得到角度误差信息，根据角度误差来分配 2 种控制方法的作用权值，实现对舰载火箭炮交流伺服系统的复合控制。

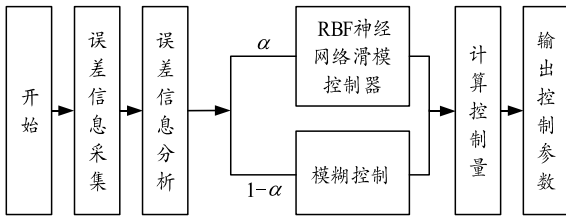


图 5 RBF 神经网络滑模控制器结构

当测量角度与目标角度相差较大时，增大模糊控制的权重，利用模糊控制加快响应速度，减小误差。当测量角度与目标角度相差较小时，增大 RBF 神经网络滑模控制的权重，使用 RBF 神经网络滑模控制，在保证系统鲁棒性的前提下提高其控制精度。

3 仿真实验分析

笔者所设计的复合控制方法是在 RBF-PID 控制的基础上设计的，因此选择与 RBF-PID 控制进行比较，来验证所设计的复合控制策略的控制效果，RBF-PID 控制是利用 RBF 神经网络对 PID 的 3 个参数进行实时修正，提高控制效果，RBF-PID 控制结构如图 6 所示。

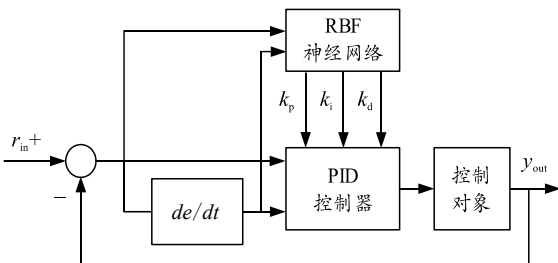


图 6 RBF-PID 控制结构

分别对基于 RBF-PID 控制的舰载火箭炮随动系统位置环控制器和基于复合控制的舰载火箭炮随动系统位置环控制器进行阶跃响应实验和正弦跟踪实验，并在阶跃实验中加入一个干扰来模拟燃气流

冲击的影响。

首先以阶跃信号作为输入信号进行阶跃跟踪性能测试。设定目标角度为 30° ，并在 6 s 处加入一个持续 0.2 s 的 $500 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的干扰信号，这 2 种控制策略的阶跃响应曲线如图 7 所示。

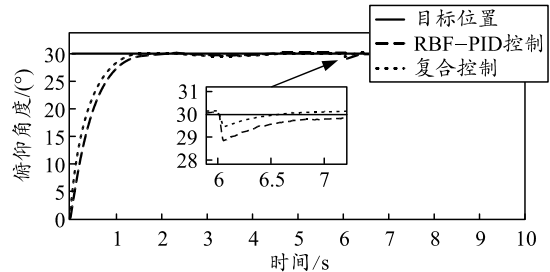


图 7 阶跃响应位置曲线

由阶跃响应曲线可得出，2 种控制的超调量都为 0。采用 RBF-PID 控制时，系统达到稳定状态的时间为 2.0 s，采用复合控制时，系统达到稳定状态的时间为 1.4 s，复合控制更先达到稳定状态。当系统受到燃气流冲击时，采用 RBF 神经网络 PID 控制发生的最大角度偏差为 1.18° ，而采用复合控制的最大角度偏差仅为 0.6° ，并且复合控制也以更快的速度使系统恢复至稳定状态；因此，复合控制具有更快的响应速度，振荡较小，稳定性也更强。

在做舰载火箭炮交流伺服系统的正弦跟踪仿真实验时，通常假设海洋条件为三级海况。三级海况的海浪情况为小浪，浪高为 0.5~1.2 m，海浪不大，但会出现白色浪花。通过正弦信号跟踪仿真实验模拟三级海况中舰艇随海浪波动的情况，验证海浪对船身扰动情况下的系统性能。图 8 为复合控制方法与 RBF 神经网络 PID 控制方法进行的正弦跟踪对比图。其中输入信号为 $y(t)=50\sin(t)$ ，仿真时间为 20 s。

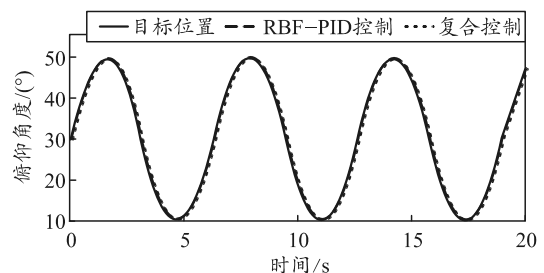


图 8 正弦跟踪曲线

图 9 为正弦跟踪误差仿真结果，其中，RBF 神经网络 PID 控制的正弦跟踪误差在 $\pm 0.48^\circ$ 之间，复合控制的正弦跟踪误差在 $\pm 0.2^\circ$ 之间，因此复合控制策略控制精度更高。由仿真结果可知，该复合控制策略能够提高舰载火箭炮的射击精度以及稳定性。