

# 小脑模型神经网络控制器在天线 跟踪指向控制中的应用

马 萍, 王松艳, 秦 莉, 杨 明

(哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 分析了天线跟踪指向控制系统的特性和影响系统跟踪性能的主要因素, 建立了系统数学模型。根据系统特点, 给出了小脑模型神经网络控制器(CMAC)和 PID 相结合的复合自适应控制方法的设计过程, 并分析了该算法适用于天线跟踪指向控制系统的优点。该方法利用传统的 PID 控制, 结合 CMAC 神经网络算法的快速自学习、精确逼近的优点, 既满足了天线跟踪指向控制系统快速实时跟踪的要求, 又提高了跟踪精度和跟踪平稳性。仿真结果表明, 该方法对摩擦力矩有很好的抑制作用, 跟踪精度较单独采用 PID 控制提高一个数量级, 且输出稳定, 具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 自动控制技术; 小脑模型神经网络控制器(CMAC); 复合控制; 天线指向; 摩擦补偿

**中图分类号:** TP273    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2010)04-1091-05

## Cerebellar model articulation controller (CMAC) for antenna pointing and tracking system

MA Ping, WANG Song-yan, QIN Li, YANG Ming

(Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The characteristics and main factors of antenna pointing and tracking system for tracking performance are analyzed, and the mathematic model is establish for the system. According to the system characteristics, the design process of Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC) network combined with PID control method is described. The advantages of the proposed method are analyzed. This method uses the fast self-learning and precise approaching of CMAC networks as the feed-forward control to get the object model; then together with the traditional PID control method it can have the advantages of fast response, high precision and robustness. Simulation results show that the proposed control method can effectively inhibit friction torque and provide stable output and robustness. The tracking precision of the proposed control method is one order of magnitude higher than that of PID control method alone.

**Key words:** automatic control technology; cerebellar model articulation controller(CMAC); compound control; antenna direction; friction compensation

收稿日期: 2008-06-05.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60434010).

作者简介: 马萍(1970-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 飞行器制导与控制, 复杂系统仿真.

E-mail: pingma@hit.edu.cn

通信作者: 王松艳(1976-), 女, 讲师, 博士. 研究方向: 飞行器制导与控制. E-mail: wangsyhit@yahoo.com.cn

天线是航天器、空间站、卫星接收和发射信号及跟踪目标的重要装置,天线能否平稳、高精度地工作对航天器的工作有直接影响。近年来国内外广泛开展了空间天线指向控制方面的研究<sup>[1-3]</sup>。通常情况下,天线有俯仰和方位两个方向的运动,其运动精度和平稳性是衡量系统性能的重要指标。目前,由于天线频段(如激光)越来越高,波束宽度越来越窄,从而对天线伺服系统的跟踪精度、跟踪时间、工作方式、稳定性等都提出了更新更高的要求<sup>[4]</sup>。

小脑模型神经网络(Cerebellar model articulation controller, CMAC)是一种具有高效地址映射,基于局部学习的自适应神经网络,其结构简单,学习不会出现局部最小点,比一般神经网络具有更好的非线性逼近能力,更适合于复杂动态环境下的非线性实时控制。通过 CMAC 和 PID 的复合控制实现的前馈反馈控制,具有输出误差小、鲁棒性强、实时性好等特点。作者根据天线跟踪指向控制系统的固有特点,利用传统 PID 的工程易实现优点和 CMAC 神经网络的自适应控制实现了系统的良好跟踪性能。

## 1 系统特点和影响跟踪性能的因素

### 1.1 系统特点分析

太空中的天线指向跟踪系统,其所在的特殊环境和承担的特殊工作任务,对它以下几个性能要求很高:①快速性。能快速捕获目标以及在目标丢失时迅速对目标进行重新捕获;②精确性。天线按控制指令精确运转,尽可能直接指向信号最强点的最优化方向;③平稳性。在捕获到目标之后,要平稳地过渡到跟踪过程,以防止捕获到目标后,由于天线转动较快以及其他干扰因素的影响又丢失目标。

### 1.2 影响系统跟踪性能的主要因素

太空中的天线跟踪指向控制系统由于所处环境复杂未知,又是以卫星或其他航天器为运动平台的,影响系统跟踪性能的因素有很多,主要影响因素有:①外部因素。外太空环境、复杂姿态预报精度、目标预报精度、卫星间的相对运动、空间任务的多样性。②内部因素。平台振动、平台与天线之间的动力学耦合、摩擦力矩、探测器噪声、控制器性能。

在系统分析设计中,直流电机、控制对象的数学模型都是在一定条件下的线性模型,传统的控

制器是针对线性模型建立的,但是真实系统都是非线性的,所建模型和实际系统本身就有偏差。另外,振动、摩擦、探测器噪声等干扰的建模也是不完全的,在实际系统中干扰因素如果不能得到有效补偿,干扰的非线性特性会激发控制对象中原本可以忽略的非线性特性,而且由于空间任务的多样性,在不同的工作阶段,对系统的性能要求也不同,显然基于模型所建立的单一传统控制器不能达到预期的效果。

## 2 数学模型建立

天线跟踪指向控制系统采用两轴常平架与力矩电机固定联结,实现方位和俯仰两个方向上的转动。除了方位方向需要正割补偿外,两个方向的设计一样。伺服系统结构图如图 1 所示,其中:

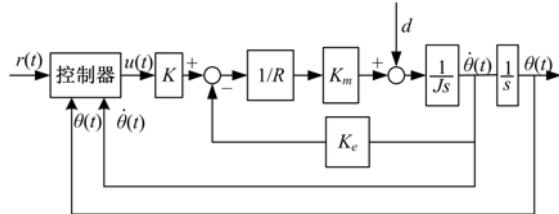


图 1 伺服系统结构图

Fig. 1 Servo system structure

$K$  为 PWM 功率放大器放大系数;  $R$  为电枢电阻;  $K_m$  为电机力矩系数;  $K_e$  为电压反馈系数;  $J$  为框架的转动惯量;  $d$  为系统所受到的干扰,在本文中主要考虑摩擦力  $M_f$ 。

由图 1 可得系统的数学模型为

$$\frac{R}{KK_m}J\ddot{\theta} + \frac{K_e}{K}\dot{\theta} = \frac{R}{KK_m}M_f + u \quad (1)$$

式中:  $\theta$ 、 $\dot{\theta}$  分别为天线转动的角度和角速度。

摩擦力采用 Stribeck 模型<sup>[5]</sup>

$$M_f(t) = (F_c + (F_m - F_c)e^{-\alpha_1 |\dot{\theta}(t)|})\operatorname{sgn} \dot{\theta}(t) + k_v \dot{\theta} \quad (2)$$

$$F(t) = J\ddot{\theta}(t) \quad (3)$$

式中:  $F(t)$  为驱动力;  $F_m$  为最大静摩擦力;  $F_c$  为库仑摩擦力;  $k_v$  为黏性摩擦力矩比例系数;  $\alpha_1$  为小的正常数。

将式(1)用状态方程表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_m K_e}{J R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{KK_m}{JR} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} M_f(t) \quad (4)$$

式中:  $x_1(t) = \theta(t)$  为天线转角;  $x_2(t) = \dot{\theta}(t)$  为天线转动角速度。

### 3 天线跟踪指向控制律设计

#### 3.1 工作模式选择

针对天线跟踪指向控制系统的数学模型,天线控制规律设计首先需要确定系统的性能指标。天线跟踪指向控制系统在不同的工作阶段需要不同的工作模式,在一般的工作任务中主要包括以下3种:

- (1) 初始定位。将天线从初始位置转动到设定位置。
- (2) 扫描搜索。让天线以某一预定位置为中心,按照一定的扫描方式旋转,从而捕获目标。
- (3) 自动跟踪。按照光电探测器接收到的误差信号,控制天线对目标进行角跟踪。

不同工作模式对系统的性能要求也不同,如表1所示,所以设计控制器之前要确定相应的工作模式。

表1 工作模式与系统性能

Table 1 System characteristic under different working modes

工作模式	系统性能		
	快速性	精确性	平稳性
初始定位	高	一般	一般
扫描搜索	一般	较高	高
自动跟踪	较高	高	较高

#### 3.2 CMAC+PID 控制器设计

基于空间平台的天线指向控制系统不同于基于地面的控制系统,设备一旦出现问题不易维修,所以设计一个简单易行、鲁棒性好,同时满足系统基本性能指标要求的控制器非常重要。

CMAC 网络结构如图2所示,它的操作可由3个映射来表示。

第1个映射将输入向量  $s$  从  $N$  维状态空间  $S$  映射到一个二进制的  $N$  维逻辑地址  $A$ 。即  $f: S \rightarrow A = \{0,1\}^N$ 。

第2个映射是从逻辑地址  $A$  到物理地址  $A'$  的映射,即  $R: A \rightarrow A'$ 。

第3个映射是从物理地址  $A'$  到标量输出  $Y$  的映射,即  $g: A' \rightarrow Y$ 。

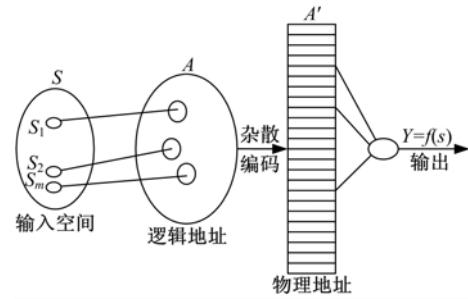


图2 CMAC 网络结构图

Fig. 2 Structure of CMAC network

该系统通过 CMAC 与 PID 的复合控制实现自适应前馈控制,系统控制结构如图3所示,其特点为:(1)由 CMAC 实现前馈控制,通过训练获得被控对象的逆模型;(2)由常规的 PID 控制器实现的闭环反馈控制来保证系统的稳定性、抑制扰动;(3)采用自适应神经元控制器取代常规的 PID 固定增益控制器,达到更好的控制效果。

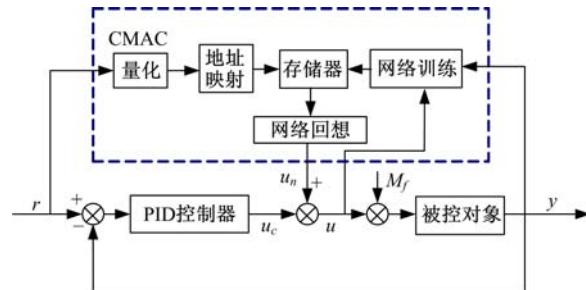


图3 系统控制结构图

Fig. 3 Structure of control system

CMAC 采用有导师的学习算法,每一控制周期结束时,计算出相应的 CMAC 输出  $u_n(k)$ ,并与总控制输出  $u(k)$  相比较,修正权重,进入学习过程。通过学习,使总控制输出与 CMAC 的输出之差最小,即经过 CMAC 的学习,使系统的总控制输出由 CMAC 控制器产生。

CMAC 自适应控制器的工作过程分为控制周期与学习周期,具体的控制算法为:

##### (1) 控制周期

设定值发生器给出下一步的期望状态,输入至对象的控制量为

$$u(k) = u_n(k) + u_c(k) \quad (5)$$

式中:  $u_n(k)$  为 CMAC 网络产生的相应输出;  $u_c(k)$  为常规 PID 控制器产生的输出。

##### (2) 学习周期

将系统的实际状态  $x(k)$  作为 CMAC 学习周期的输入,网络的输出为  $u_n(k)$ ,取  $u(k)$  为导师信号。

输入空间  $U$  在区间  $[U_{\min}, U_{\max}]$  上分成  $N + 2c$  个量化间隔, 即

$$\begin{cases} u_1 \dots u_c = U_{\min} \\ u_j = u_{j-1} + \Delta u_j (j = c+1, \dots, c+N) \\ u_{N+c+1} \dots u_{N+2c} = U_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

CMAC 的实际映射为

$$d_j = \begin{cases} 1, & \text{若 } U_j \in [u_j \dots u_{j+c}], j = c+1, \dots, c+N \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

取  $E(k) = \frac{1}{2c} (u_n(k) - u(k))^2$  (8)

采用 delta 学习规则调整存储器中的权系数:

$$\Delta w(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w} = \eta \frac{u_c(k)}{c} d_i \quad (9)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) \quad (10)$$

式中:  $\eta$  为网络学习速率,  $\eta \in (0, 1)$ 。

当系统开始运行时, 置  $w = 0$ , 此时  $u_n = 0, u = u_c$ 。系统由常规控制器控制, 此时误差向量  $e = x_d - x$  很大, 输入 PID 控制器, 输出控制量  $u_c$ 。随着网络的不断学习训练, 经 CMAC 产生的控制量  $u_n$  将逼近使系统跟踪期望状态所需的  $u$ 。

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c w_i d_i \quad (11)$$

式中:  $d_i$  为二进制选择向量;  $c$  为 CMAC 网络的泛化参数。

为了取得更好的控制效果, 采用文献[6]中的方法, 通过自适应神经元控制器调整常规 PID 控制器的固定增益, 由系统的动态特征优化 CMAC 神经网络的自学习控制, 提高系统的稳定性和鲁棒性, 改善系统的控制品质。

### 3.3 算法优势分析

根据天线跟踪指向控制系统和 CMAC 神经网络的特点, 下面分析将 CMAC+PID 用于本系统的特点和优势:

(1) 星体之间存在的相对运动会给系统带来跟踪偏差, 而将 CMAC 神经网络作为前馈控制加入, 获得对象的逆模型, 使得系统能够对相对运动和控制对象参数变化进行补偿, 并且不影响系统的稳定性。

(2) 一般的伺服控制器设计需要事先知道被控对象的性质和特征, 以及随环境等因素变化的情况, 但是运动平台处于外太空, 存在许多不确定和不可预知的情况, 所以要求控制器能在运行过

程中不断地测量被控对象的特性, 而 CMAC 是模拟人的小脑学习结构的自适应神经网络(人的小脑是感知和控制运动的, 含有局部调整神经元), 具有从输入到输出的多维非线性映射能力, 可以满足天线指向控制系统加入干扰和模型参数变化带来的不确定性影响, 使系统具有良好的鲁棒性。

(3) CMAC 是基于局部学习的神经网络, 每次修正的权很少, 所以学习速度快, 适合于复杂动态环境下的非线性实时控制, 这正好满足天线跟踪指向控制系统对快速性的要求。

(4) 空间设备一旦出现问题不易维修, CMAC+PID 的复合控制器简单易行、鲁棒性好, 满足系统的特殊要求。

## 4 仿真结果

以天线跟踪指向控制系统的自动跟踪过程为例, 通过对方位子系统的仿真来说明 CMAC+PID 复合控制的有效性。

伺服系统参数为:  $R = 5 \Omega, K_m = 7 \text{ N} \cdot \text{m/A}$ ,  $K_e = 2.8 \text{ V}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ ,  $J = 0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $K = 11 \text{ V/V}$ 。

系统输入为一正弦信号  $0.1 \times \sin(2\pi t)$ 。设系统仿真步长为 1 ms。为了比较控制性能, 同时给出相同条件下采用 CMAC+PID 的复合控制与单独采用 PID 控制的仿真结果。其中 PID 控制器参数为:  $k_p = 40, k_i = 0, k_d = 0.6$ ; CMAC 神经网络的参数设定为: 泛化参数  $c$  为 30, 物理化存储器的数目为 200, 学习率  $\eta$  为 0.08。

表 2 给出了当摩擦力变化时, 单独采用 PID 控制和采用 CMAC+PID 复合控制时系统跟踪精度的仿真结果, 从表中可以明显看出, 复合控制的跟踪精度比单独 PID 控制的跟踪精度提高一个数量级, 而且随着摩擦力的变化跟踪精度变化波动小, 抗干扰能力强。

表 2 跟踪精度仿真结果

Table 2 Simulation results of tracking accuracy

$F_c$ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	$F_m$ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	$K_v$ ( $\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1}$ )	跟踪精度/mrad	
			PID	CMAC+PID
15	20	2	2.34	0.0705
12	20	2	2.21	0.0666
15	25	2	2.65	0.0800
15	20	2.6	2.38	0.0716

图4、图5分别为带有摩擦环节的位置跟踪和速度跟踪的局部放大图,仿真结果表明,在摩擦条件下单独采用PID控制的位置跟踪存在着“平顶”现象,速度跟踪则存在着“死区”现象。也就是说,单独采用PID控制时鲁棒性差,不能满足高精度跟踪。而采用PID和CMAC的复合控制可有效地抑制摩擦产生的波形畸变,提高系统的动态跟踪性能。

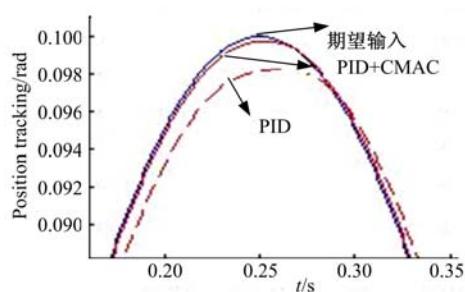


图4 位置跟踪曲线

Fig.4 Position tracking curve

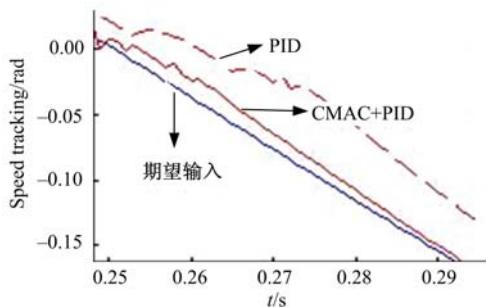


图5 速度跟踪曲线

Fig.5 Velocity tracking curve

图6为阶跃响应仿真结果。由图6易知,采用CMAC+PID的复合控制,上升时间只要0.06 s,而单独采用PID控制,上升时间需要0.12 s,可见复合控制对系统的快速性有很大的改善。

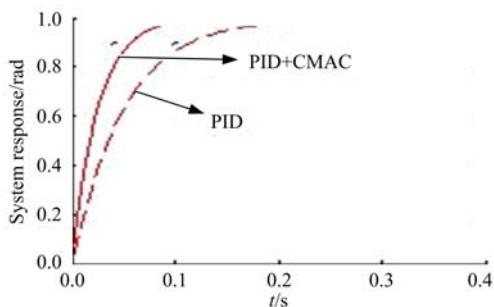


图6 阶跃信号跟踪曲线

Fig.6 Step signal tracking curve

## 5 结束语

针对星间天线跟踪指向系统所处环境复杂、系统性能要求高的特点,提出了基于小脑模型神经网络(CMAC)和PID复合的自适应前馈控制器,使用该控制器可对系统进行有效控制,提高了系统的快速性、抗干扰性和跟踪精度,而且具有实现简单、算法效率高和实时性好的优点。仿真结果表明了该方法的有效性。由于受被控对象自身带宽的限制,若再通过跟踪对其误差进行补偿,则可使跟踪精度达到亚微弧度量级,这也是本文下一步要研究的工作。

## 参考文献:

- [1] Lee S, Alexander J W, Jeganathan M. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground[C]//SPIE, 2000, 3932:150-157.
- [2] Racho C, Portillo A. Characterization and design of digital pointing subsystem for optical communication demonstrator[C]//SPIE, 1999, 3615: 250-262.
- [3] 于思源, 马晶, 谭立英, 等. 激光星间链路中天线扫描捕获技术实验室模拟研究[J]. 中国激光, 2002, A29(6): 498-502.  
Yu Si-yuan, Ma Jing, Tan Li-ying, et al. Experimental study of acquisition with antenna scanning in intersatellite laser links[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, A29(6):498-502.
- [4] Gawronski W. Antenna control system: from PI to  $H_\infty$ [J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 2001, 43(1): 52-60.
- [5] Karnopp D. Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1985, 107:100-103.
- [6] 秦莉, 杨明, 郭庆. 基于RBF网络的质量矩导弹姿态控制[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1184-1189.  
Qin Li, Yang Ming, Guo Qing. Moving mass attitude control system based on RBF networks[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22 (7): 1184-1189.