文章编号：1673–1522（2010）02-0181–04

CMAC–PID 控制在飞机防滑刹车中的应用

刘泽华，高亚奎

（中航工业第一飞机设计研究院，西安 710089）

摘　要：提出了一种基于 CMAC 神经网络与 PID 相结合的控制方法，利用传统的 PID 控制器实现反馈控制，保证系统的稳定性并抑制扰动；利用 CMAC 神经网络控制器实现前馈控制，保证系统的控制精度和响应速度。以某型飞机为例，针对不同的跑道（干、湿、冰）情况，将该方法和传统的 PID 控制方法在 MATLAB 环境下进行了数字仿真。仿真结果表明：基于 CMAC–PID 控制方法较传统的 PID 控制方法，可以大大地提高飞机防滑刹车效率，具有更好的刹车控制效果，并具有较强的鲁棒性，为飞机防滑刹车系统的控制提供一条新的思路。

关键词：CMAC–PID 控制；飞机防滑刹车；滑移率；仿真

中图分类号：TP273.3；V226　　**文献标志码**：A

0 引言

防滑刹车系统对整个飞机的安全至关重要。随着飞机的起降重量与速度的增大，对防滑刹车系统也提出了更高的要求。飞机刹车系统是一个高阶非线性的时变系统，难以精确地建立其数学模型。传统的控制方法采用了大量的近似处理，因而刹车效率低，系统的鲁棒性差。如何有效地提高飞机的刹车效率，缩短滑跑距离，提高飞机对各种载荷状况、跑道状况、气候条件的适应能力，成为飞机刹车系统研究的主要目标。近些年，智能控制理论的发展为解决这一复杂问题带来了希望，智能化的飞机刹车系统也成为飞机刹车研究领域的热门方向[1-4]。

小脑模型神经网络（Cerebellar Model Articulation Controller，CMAC）是一种表达复杂非线性函数的表格查询型自适应神经网络，该网络可通过学习算法改变表格的内容，具有信息分类存储的能力。与一般的神经网络相比，CMAC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，它已被公认为是一类联想记忆神经网络的重要组成部分，能够学习任意多维非线性映射。CMAC 算法可有效地用于非线性函数逼近、动态建模、控制系统设计等[5-9]。

本文将 CMAC 与 PID 控制结合起来，利用 CMAC 的自学习方法通过不断学习产生控制规则来进行防滑刹车控制，使其系统输出和期望性能趋于一致。通过某机型的仿真分析表明，该方法对飞机的防滑刹车控制具有很好的效果。

1 飞机刹车系统原理

飞机刹车制动主要依靠刹车时轮胎和地面间产生的结合力使飞机减速。影响结合力大小的因素是称为结合系数的一个无量纲因子 μ，它受许多因素的影响，并且存在极其复杂的非线性关系[10-11]。

结合系数受滑移率的影响。滑移率 S 的定义如下：S=（飞机的速度–刹车机轮的速度）/飞机的速度，滑移率和结合系数的关系见图 1，对应最大结合系数的滑移率为最佳滑移率 S_p。整个刹车过程就是通过调节刹车力矩的大小来改变飞机机轮的速度，使滑移率跟踪最佳滑移率，这样结合系数就会达到最大，则结合力就会最大，刹车距离就会最小，飞机的刹车效率最佳。

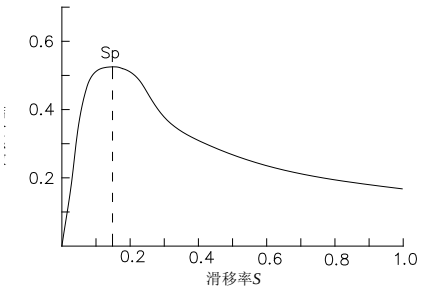


图 1　滑移率/结合系数曲线图

收稿日期：2009-09-10；　**修回日期**：2009-10-05

作者简介：刘泽华（1981–），男，工程师，硕士。

2 飞机滑跑的动力学模型

飞机在滑跑刹车时，假设没有侧风，或侧风速度很小，则对整个模型的影响很小，从而可以忽略不计。作用在飞机上的力如图 2 所示。则可以建立以下的关系[12]：

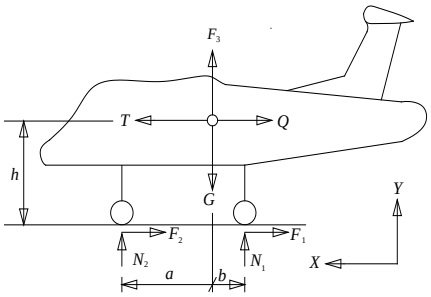


图 2 飞机受力示意图

2.1 飞机机体动力模型

飞机在滑跑方向（X 方向）的加速度和机轮与跑道的结合力关系如下：

$$(G/\mathrm{g})\ddot{X} = T - Q - n_1F_1 - n_2F_2\ , \tag{1}$$

$$F_1 = \mu_1 N_1\ , \tag{2}$$

$$F_2 = \mu_2 N_2\ 。 \tag{3}$$

以飞机的重心 O 为中心取矩，有 $\sum M_o = 0$ 即：

$$n_2N_2a - n_1N_1b - (n_1F_1 + n_2F_2)h = 0\ 。 \tag{4}$$

以上各式中：T为飞机发动机的剩余推力；F_1为飞机单个刹车机轮的结合力；F_2为飞机单个自由机轮的结合力；$\ddot{X}$ 为飞机的加速度；Q为飞机的迎风阻力；μ_1为飞机刹车机轮与跑道表面的结合系数；μ_2为飞机自由机轮与跑道表面的结合系数；N_1为跑道对单个刹车机轮的反作用力；N_2为跑道对单个自由机轮的反作用力；n_1为刹车机轮的个数；n_2为自由机轮的个数；G为飞机的重量；g为重力加速度；a为自由机轮到飞机重心线的距离；b为刹车机轮距飞机重心线的距离；h为飞机重心距地面的高度。

2.2 机轮与轮胎模型

机轮与轮胎模型如图 3 所示，则有以下关系。

$$I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = M_f - M_s\ , \tag{5}$$

$$M_f = F_1R_e\ , \tag{6}$$

$$R_e = R - \frac{1}{n_1}NK_x\ 。 \tag{7}$$

以上各式中：R为刹车机轮半径；R_e为刹车机轮的动态滚动半径；ω 为机轮的角速度；M_s为单个机轮受到的刹车力矩；M_f为单个机轮受到的结合力矩；I为单个机轮的转动惯量；K_x为轮胎的压缩系数。

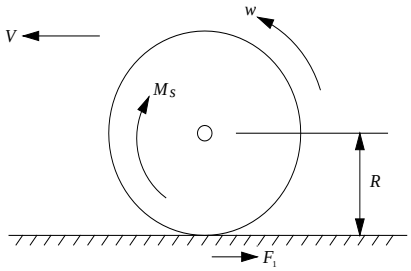


图 3 机轮与轮胎模型

以上建立的飞机机体动力学模型、机轮与轮胎的模型是刹车系统整体仿真模型的基础。

3 CMAC–PID 控制算法

3.1 CMAC 理论

在输入空间中给出一个状态，从存储单元中找到对应于该状态的地址，将这些存储单元中的内容求和得到 CMAC 的输出，将此响应值与期望输出值进行比较，并根据学习算法修改这些已激活的存储单元的内容。CMAC 的结构如图 4 所示。

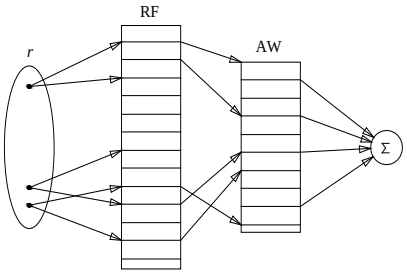


图 4 CMAC 网络结构图

CMAC 网络由输入层、中间层和输出层组成。在输入层与中间层、中间层与输出层之间分别为由预先确定的输入层非线性映射和输出层权值自适应性线性映射。

设输入空间向量为 $\boldsymbol{r}_i = [\boldsymbol{r}_{1i}, \boldsymbol{r}_{2i}, \cdots, \boldsymbol{r}_{ni}]^{\mathrm{T}}$，量化编码为 $[\boldsymbol{r}_i]$，输入空间映射至 RF 中 c 个存储单元，c 为泛化参数。设 $\boldsymbol{Q}_i$ 为输入 $\boldsymbol{r}_i$ 的量化值：

$$\boldsymbol{Q}_i = \boldsymbol{S}([\boldsymbol{r}_i]) = [\boldsymbol{s}_1(\boldsymbol{r}_i), \boldsymbol{s}_2(\boldsymbol{r}_i), \cdots, \boldsymbol{s}_c(\boldsymbol{r}_i)]^{\mathrm{T}}\ 。 \tag{8}$$

$\boldsymbol{r}_i$ 对应的输出为：

$$y_i = \sum_{j=1}^{c} \boldsymbol{w}_j \boldsymbol{s}_j([\boldsymbol{r}_i])\ , \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{w}_i = [\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \cdots, \boldsymbol{w}_c]^{\mathrm{T}}$。

CMAC学习算法：采用δ 学习规则调整权值，权值调整指标为：

$$E=\frac{1}{2}e(t)^2=\frac{1}{2c}(r(t)-y(t))^2\text{。}\tag{10}$$

由梯度下降法，权值按式(11)、(12)调整。

$$\Delta w_i(t)=-\eta\frac{\partial E}{\partial w}=\eta\frac{(r_i(t)-y_i(t))}{c}\frac{\partial y_i}{\partial w}=\eta\frac{e(t)}{c}s_i\text{，}\tag{11}$$

$$w_i(t)=w_i(t-1)+\Delta w_i(t)+\alpha(w_i(t-1)-w_i(t-2))\text{，}\tag{12}$$

式中：α 为惯性系数。

3.2 CMAC–PID 控制算法

CMAC 有多种控制形式，如 CMAC 直接逆运动控制、CMAC 前馈控制、CMAC 反馈控制等，文中采用 CMAC 前馈控制。CMAC-PID 控制结构图见图 5，该系统通过 CMAC 和 PID 的复合控制实现前馈反馈控制，其特点：① CMAC 控制器实现前馈控制，实现被控对象的逆动态模型；② 常规控制器实现反馈控制，保证系统的稳定性，且抑制扰动。

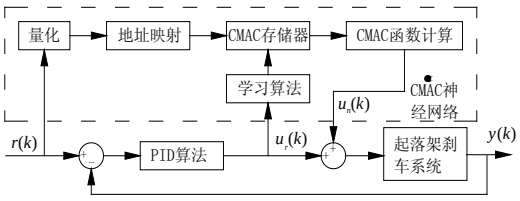


图 5　CMAC-PID 控制结构图

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$u_n(k)$，并与总控制输入$u(k)$相比较，修正权值，进入学习过程。学习的目的是使总控制输入与 CMAC 的输出之差最小。经过 CMAC 的学习，使系统的总控制输出由 CMAC 产生。该系统的控制算法为：

$$u_n(k)=\sum_{i=1}^{c}w_i a_i\text{，}\tag{13}$$

$$u(k)=u_n(k)+u_r(k)\text{。}\tag{14}$$

式中：a_i 为二进制选择向量，

$$a_i=\begin{cases}1 & \text{若}s_i\in[\upsilon_i,\upsilon_{i+c}],\quad i=c+1,\cdots,c+N\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\text{；}$$

c为 CMAC 网络的泛化参数；υ_i为设定判断阈值；$u_n(k)$为 CMAC 产生相应的输出；$u_r(k)$为常规控制器 PID 产生的输出。

CMAC 的调整指标为：

$$E(k)=\frac{1}{2}(u_n(k)-u(k))^2\frac{1}{c}\text{，}\tag{15}$$

$$\Delta w_i(k)=-\eta\frac{\partial E(k)}{\partial w}=\eta\frac{u(k)-u_n(k)}{c}a_i=\eta\frac{u_r(k)}{c}a_i\text{，}\tag{16}$$

$$w_i(k)=w_i(k-1)+\Delta w_i(k)+\alpha(w_i(k)-w_i(k-1))\text{，}\tag{17}$$

式中：η为网络学习速率，$\eta\in(0,1)$；α 为惯性量，$\alpha\in(0,1)$。

当系统开始运行时，设 $w=0$，则 $u_n=0$，$u=u_r$，系统由常规控制器进行控制。通过 CMAC 学习，使 PID 产生的输出控制量$u_r(k)$逐渐为零，CMAC 产生的输出控制量$u_n(k)$逐渐逼近控制器总输出$u(k)$。

4 实例分析

按照飞机滑跑模型、控制器模型和防滑刹车系统的逻辑关系，在 MATLAB 中通过其模块化的操作建立各子系统的模型，将各个子系统连接，并设置好参数就可以对飞机防滑刹车系统进行仿真。图 6 为飞机防滑刹车系统在 MATLAB 中的整体模型。

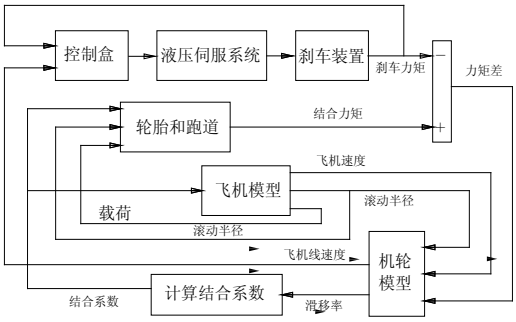


图 6　飞机防滑刹车系统整体模型

分别用设计的CMAC-PID控制算法和传统的PID控制算法在MATLAB环境下对飞机防滑刹车系统进行仿真研究[13]。仿真计算中，飞机着陆的起始速度为 72 m/s，终止速度为 6 m/s，仿真步长为 10 ms。分别在干、湿、冰跑道上进行刹车仿真比较，其仿真结果见表 1 ~ 3。

表 1　干跑道 CMAC–PID 与传统 PID 刹车指标

	CMAC-PID 算法	传统 PID 算法
刹车距离/m	530.217 4	556.485 2
刹车时间/s	14.892	16.351 8
刹车效率	0.941 2	0.921 5

表 2　湿跑道 CMAC–PID 与传统 PID 刹车指标

	CMAC-PID 算法	传统 PID 算法
刹车距离/m	812.241 6	956.412 8
刹车时间/s	21.875 2	25.281 0
刹车效率	0.895 2	0.872 7

表 3　冰跑道 CMAC–PID 与传统 PID 刹车指标

	CMAC-PID 算法	传统 PID 算法

刹车距离/m	1 402.46	1 564.19
刹车时间/s	40.384 6	43.458 6
刹车效率	0.833 2	0.819 2

在不同的跑道（干、湿、冰）进行刹车时，刹车时间和刹车距离都有很大差别；很明显干跑道刹车的性能优于湿跑道，其主要原因是干跑道刹车机轮与跑道之间的结合系数比湿跑道的大。可见结合系数的大小对飞机防滑刹车系统的影响较大，对于采用CMAC-PID控制算法较传统的PID控制算法控制的刹车系统相比，明显缩短了刹车时间和刹车距离，同时也提高了刹车效率。

5 结论

飞机防滑刹车系统是一种高阶非线性的时变系统，难以精确地建立其数学模型，本文提出了CMAC-PID 复合控制方法，利用 CMAC 学习速度快、网络收敛所需的训练次数少，PID 控制算法简单、易于实现的优点实现了对飞机的防滑刹车控制，改变了常规 PID 控制器低速打滑、湿跑道刹车效率低和环境适应性差的问题，为飞机防滑刹车系统的控制提供了一条新的思路。

参考文献：

[1] 严爱军, 王普, 安晓辉. 飞机防滑刹车控制方法综述[J]. 控制工程, 2008,15(1):1-4.

[2] 蔡文举, 林辉. 参数模糊自整定 PID 在飞机全电刹车中的应用[J]. 电光与控制, 2008,15(2):39-42.

[3] 黄伟明, 吴瑞祥, 张鑾年. 神经网络及模糊控制在飞机防滑刹车系统中的应用[J]. 航空学报, 2001,22(4):317-320.

[4] 何恒, 吴瑞祥. 改进的 BP 神经网络在飞机防滑刹车系统的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2004,30(6):561-564.

[5] 万太平, 曾文华. 小脑模型神经网络研究和发展综述[J]. 杭州电子工业学院学报, 2003,23(1):75-79.

[6] 何超, 徐立新, 张宇河. CMAC 算法收敛性分析及泛化能力研究[J]. 控制与决策, 2001,16(5):523-530.

[7] SHEN Z P, GUO C, ZHAN X. A general fuzzified CMAC neural network and its simulation study[C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control. 2005:1257-1262.

[8] 刘媛, 王卫红. 基于 CMAC 的伺服系统控制研究[J]. 航空学报, 2006,27(3):515-519.

[9] SHUN F S, TED T, HUANG T H. Credit assigned CMAC and its application to online learning robust controllers[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2003,33(2):202-213.

[10] TUNAY I, RODIN E Y, BECK A A. Modeling and robust control design for aircraft brake hydraulics[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001,9 (2):319-329.

[11] 刘泽华. 基于遗传算法的 PID 控制在飞机防滑刹车系统中的应用研究[C]//第二届中国导航、制导与控制学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 2008:1-3.

[12] 余驰, 贾玉红. 飞机防滑刹车系统的 MATLAB/SIMULINK 建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007,19(5):1144-1147.

[13] 刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2004.

Research on Aircraft Anti-Skid Braking Based on CMAC-PID Control

LIU Ze-hua，GAO Ya-kui

（AVIC The First Aircraft Institute，Xi’an 710089，China）

Abstract: A new method based on CMAC and PID control was proposed. The traditional PID controller that realizes feedback control, not only guarantees the stability, but also restrains the disturbance. The CMAC controller realizes feed forward control and guarantees the control precision and response speed. Taking a type of aircraft for example, with different runway condition (dry/wet/ice), the computer numeral simulation with MATLAB was established. Compared the control performance of traditional PID control with PID control based on CMAC, the result showed that PID control with CMAC method could achieve a more ideal control effect and had a stronger robust characteristic than traditional PID control, and the braking efficiency had been improved

greatly by controlling wheel slid-ration. It provided a new way for controlling aircraft anti-skid braking system.

Key words: CMAC-PID control; aircraft anti-skid braking; slid-ratio; simulation