

# 飞翼无人机主轮差动刹车系统的建模与仿真

陈磊, 陆宇平, 吴在桂

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 210016)

**摘要:**为了验证主轮差动刹车系统在飞翼布局无人机上应用的可行性,以某飞翼无人机为对象,在综合考虑了无人机的机体、起落架、轮胎等特性的基础上,建立了飞翼无人机地面滑跑仿真模型。它由无人机机体动力学模型、轮胎跑道间摩擦系数模型、轮胎跑道间结合力矩模型、机轮动力学模型、电液伺服阀模型以及刹车装置模型等组成。提出主轮刹车系统进行航迹纠偏控制的方案,并进行了仿真验证。仿真结果显示应用主轮差动刹车系统进行航迹纠偏控制是可行的。

**关键词:**飞翼无人机;主轮差动刹车;纠偏控制

中图分类号:V249.112.3

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2009)06-0186-04

## Modeling and Simulation of Flying Wing UAV Main Wheel Differential Brake System

CHEN Lei, LU Yu-ping, WU Zai-gui

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to validate the feasibility of the application of main wheel differential brake to flying wing UAV. With background of a certain flying wing UAV, on the basis of characteristics of the UAV body, tires and landing gears, established the simulation model of flying wing UAV during ground roll. It is made up of UAV body dynamic model, coefficient of friction model between tire and runway, combination moment model between tire and runway, aircraft wheel dynamic model, electro-hydraulic servo valve model, braking instrument model and so on. Put forward the scheme of main wheel differential brake system to trajectory bias rectification control and validate the scheme through simulation. The results of simulation show that main wheel differential brake system can realize the trajectory bias rectification control.

**Key words:** flying wing UAV; main wheel differential brake; bias rectification control

## 0 引言

当无人机在地面滑跑过程中由于风干扰、路面不平等情况而偏离正常跑道时,可以利用主轮差动刹车系统对其进行航迹纠偏控制<sup>[1]</sup>。具体方法是通过对其一侧主机轮刹车、另一侧主机轮不刹车,造成两轮滑移率大小不同,由滑移率与摩擦系数呈现一定的非线性关系可知,两轮与地面的摩擦系数也会有所不同,从而地面对两轮摩擦力大小发生差异,这样就可以通过两轮摩擦力对飞机质心产生的摩擦力矩差值来实现对飞机的纠偏控制。设计了控制律参数,在 Matlab/Simulink 中对主轮差动刹车系统航迹纠偏控制方案进

行仿真验证,取得了理想的效果,表明建立的系统模型基本合理正确。

## 1 主轮差动刹车系统工作原理

主轮差动刹车系统模型主要由电液伺服阀、刹车装置、机轮动力学和轮胎与跑道间结合力矩等模型组成。具体工作情况是:当飞机偏离正常跑道时,产生侧向偏差信号,通过逻辑选择开关接入相应的电液伺服阀,使电液伺服阀向刹车装置输出一定的刹车压力,刹车装置接收到刹车压力,向机轮输出刹车力矩,改变机轮的角速度,从而改变了机轮的滑移率和摩擦系数,使机轮所受摩擦力发生改变。差动刹车纠偏控制采取对一侧主轮刹车、另一侧主轮不刹车控制方案,两主轮摩擦力因摩擦系数不同而不同,产生对无人机质心的摩擦力矩也会不同,通过摩擦力矩差值对无人机航迹进行纠偏,使其回到正确的跑道上。这里要选择正确的控制策略:如果机体右偏,偏差信号为正,则只对左主

收稿日期:2008-09-28;修回日期:2008-12-28

基金项目:国家 863 项目(2007AA705707)

作者简介:陈磊(1984-),男,陕西铜川人,硕士研究生,研究方向为模式识别与智能系统;陆宇平,教授,博士生导师,研究方向为混合系统建模与控制、网络与远程控制、鲁棒控制、飞行器主动控制、景象匹配与精确制导等。

轮进行刹车,右主轮自由滚动;如果机体左偏,偏差信号为负,则只对右主轮进行刹车,左主轮自由滚动;如果没有纠偏信号,不进行刹车,两轮均自由滚动,仅受到滚动摩擦力。它是通过逻辑选择开关模块进行控制的。下面着重建立差动刹车系统各个部分的数学模型,然后组成整个差动刹车系统模型。

## 2 主轮差动刹车系统的建模

### 2.1 飞机动力学模型

飞翼无人机在地面滑跑时受到如下的外力:空气动力  $R$ ;无人机的重力  $G$ ;地面对起落架的支撑力  $F_s$ ;地面对轮胎的摩擦阻力和侧向力  $f_1$ ;发动机的推力  $T$ 。

选用地面坐标系为活动坐标系,无人机的外合力为:

$$[F_x F_y F_z]^T = M_{gs}R + G + F_s + M_{gs}f_1 + M_{gt}T \quad (1)$$

式中  $[F_x F_y F_z]^T$  即所受的外合力向量;  $M_{gs}$  为速度坐标系到地面坐标系的变换矩阵;  $M_{gt}$  为稳定坐标系到地面坐标系的变换矩阵;  $M_{gt}$  为机体坐标系到地面坐标系的变换矩阵。

那么无人机在外合力作用下的线运动方程为:

$$[F_x F_y F_z]^T = m \cdot \left[ \frac{dv_x}{dt} \frac{dv_y}{dt} \frac{dv_z}{dt} \right] \quad (2)$$

式中,  $m$  为无人机的质量;  $[v_x v_y v_z]$  为无人机质心的速度向量。

选用机体坐标系为活动坐标系,无人机受到的合外力相对于各坐标轴的合力矩向量为:

$$[M_x M_y M_z]^T = M_R + M_F + M_f \quad (3)$$

式中,  $[M_x M_y M_z]^T$  为无人机受到的外力相对于各机体坐标轴的合外力矩;  $M_R$  是气动力矩;  $M_F$  是地面对无人机的支撑力形成的力矩;  $M_f$  是地面对无人机的摩擦力和侧向力形成的力矩。

无人机绕坐标轴转动的动力学方程为:

$$[M_x M_y M_z]^T = m \cdot \left[ \frac{dL_x}{dt} \frac{dL_y}{dt} \frac{dL_z}{dt} \right] \quad (4)$$

式中,  $[L_x L_y L_z]$  为无人机动量矩向量。

这样根据方程(2)和方程(4)建立了飞翼无人机在地面滑跑时的六自由度非线性数学模型<sup>[2-5]</sup>。在 Matlab 中通过 S 函数建立了无人机的地面滑跑模型。

### 2.2 电液伺服阀模型

通过对电液伺服阀的纠偏控制电流进行调节,使伺服阀产生一定的刹车压力,实现刹车控制。电液伺服阀系统的结构比较复杂,因此对其进行了简化,只考虑了其中的液压阀和管道模型<sup>[6]</sup>。

对于液压阀,其模型可以用下面的二阶传递函数

来表示:

$$\frac{1}{S^2 + 2\zeta W_n S + W_n^2} \quad (5)$$

式中,  $W_n$  为液压阀的固有频率,  $\zeta$  是液压阀的相对阻尼系数。根据大量的实验数据考证可以得到  $W_n$  为 17.74,  $\zeta$  为 0.36。

对于管道,根据机轮刹车系统惯性台实验的经验,系统的管道模型可简化为如下惯性环节:

$$\frac{K}{0.01S + 1} \quad (6)$$

式中,  $K$  是管道增益,取  $K = 60$ 。

### 2.3 刹车装置模型

刹车装置的功能是把传输来的刹车压力转换成刹车力矩。刹车装置的静力矩特性是刹车力矩随输送到刹车装置中刹车压力的变化曲线。实际上静力矩特性受到多种因素的影响,其变化曲线并不是纯粹的线性关系,而是一个比较特殊的三线滞环形<sup>[6,7]</sup>。文中做了简化,认为刹车装置的静力矩特性曲线是线性变化的。公式如下:

$$M_s = \mu_a N p_b (R + r)/2 \quad (7)$$

式中,  $M_s$  为刹车力矩;  $\mu_a$  为摩擦系数;  $N$  为摩擦面系数;  $R/2$  为静盘外半径;  $r/2$  为动盘内半径;  $p_b$  为刹车压力。

### 2.4 轮胎跑道间摩擦系数模型

无人机轮胎在跑道上滑跑时,受到地面对其的摩擦力的作用。摩擦力是由轮胎垂直载荷与摩擦系数的乘积。摩擦系数受到许多因素的影响,包括跑道路面的结构、轮胎表面的状况、飞机的速度和滑移率的大小等<sup>[8]</sup>。为了简化情况,主要建立滑移率与摩擦系数之间的关系式。

滑移率的定义如下:

$$\sigma = \frac{(V - V_s)}{V} \quad (8)$$

式中,  $\sigma$  为滑移率;  $V$  为飞机的速度;  $V_s$  为刹车机轮的线速度。

摩擦系数与滑移率以及飞机速度的关系是一个复杂的非线性关系,为了简化问题,这里给出飞机速度一定的情况下摩擦系数与滑移率的经验公式<sup>[9-11]</sup>:

$$\mu = D \sin(\text{Carctg}(B\sigma)) \quad (9)$$

式中,  $\mu$  为摩擦系数;  $B$ 、 $C$ 、 $D$  是三个待定的系数。

### 2.5 轮胎与跑道结合力矩模型

建立此模型主要来求机轮受到的结合力矩<sup>[6]</sup>。结合力矩的表达式为:

$$M_f = \mu NR \quad (10)$$

式中,  $M_f$  为机轮受到的结合力矩;  $\mu$  为轮胎摩擦系数;

$N$  为受刹机轮的垂直载荷;  $R$  为轮胎的滚动半径。

## 2.6 机轮动力学模型

飞机在滑跑过程中,机轮受到地面支撑力、地面摩擦力、刹车压力、回正力矩、刹车力矩与结合力矩的共同作用,若忽略次要因素,只考虑机轮转动部分的惯量,则由刹车力矩  $M_s$  和结合力矩  $M_f$  来共同控制机轮的转速<sup>[6,7]</sup>。由转动惯量定理得:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I_w}(M_f - M_s) + \frac{V_{sx}}{R} \quad (11)$$

式中,  $M_f$  为结合力矩;  $M_s$  为刹车力矩;  $\omega$  为机轮转动角速度;  $I_w$  为机轮转动惯量;  $V_{sx}$  为沿机体纵向的轮轴速度。

由机轮转动速度  $\omega R$  和  $V_{sx}$  可以得到轮胎相对地面的滑移率:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I_w}(M_f - M_s) + \frac{V_{sx}}{R} \quad (12)$$

## 2.7 主轮差动刹车系统总模型

由上面建立各个模型组合成主轮差动刹车系统的总模型,在 Matlab/Simulink 环境下搭建。其中左机轮滑移率和右机轮滑移率信号接入飞机的动力学模型,为飞机动力学模型两个输入量,用来控制两主轮的摩擦力大小,如图 1 所示。

图 1 中左机轮刹车控制子系统模型和右主轮刹车子系统模型分别如图 2 和 3 所示。

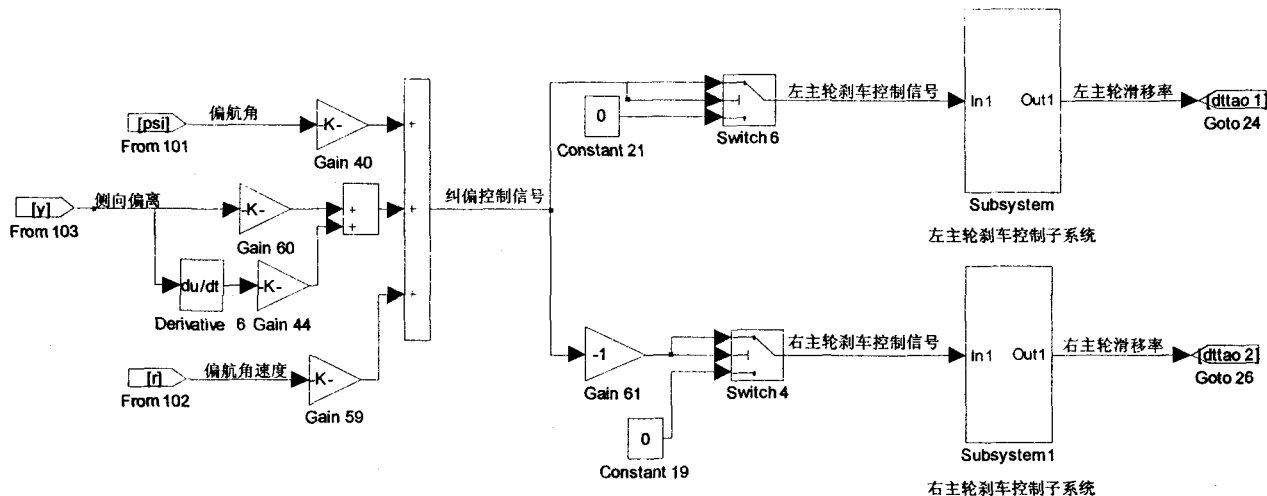


图 1 在 Matlab/Simulink 中的主轮差动刹车系统模型

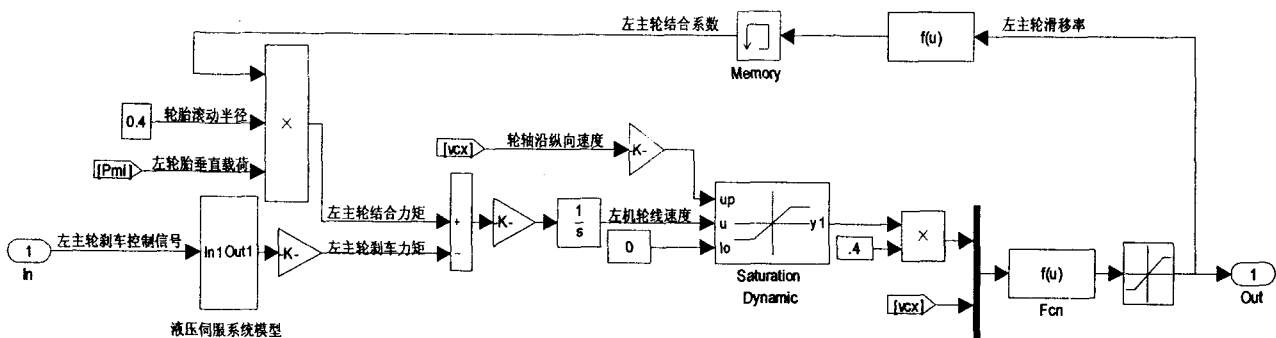


图 2 左机轮刹车控制子系统模型

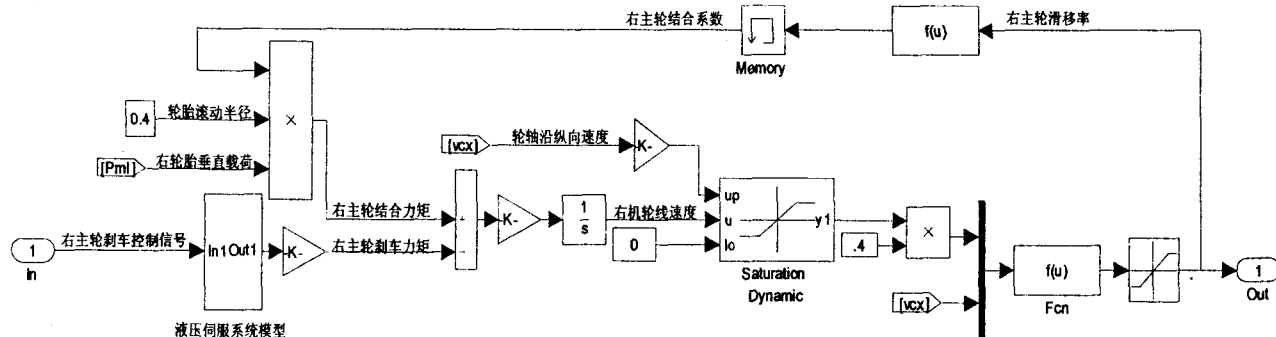


图 3 右机轮刹车控制子系统模型

### 3 主轮差动刹车系统与仿真分析

无人机在地面上开始滑跑,无人机存在初始侧向偏差  $y = 1\text{m}$  时,使用主轮差动刹车系统进行纠偏控制,控制律设计如下:

1) 当  $K_\phi\phi + K_r r + K_y y \geq 0$  时:

$$\begin{cases} I_z = K_\phi\phi + K_r r + K_y y + K_{\dot{y}}\dot{y} \\ I_y = 0 \end{cases} \quad (13)$$

2) 当  $K_\phi\phi + K_r r + K_y y \leq 0$  时:

$$\begin{cases} I_y = K_\phi\phi + K_r r + K_y y + K_{\dot{y}}\dot{y} \\ I_z = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式(13)和式(14)中,  $I_z$  是左主轮纠偏控制信号;  $I_y$  是右主轮刹车控制信号;  $\phi$  是偏航角;  $r$  为偏航角速度;  $y$  是侧向偏差;  $\dot{y}$  是侧向速度;  $K_\phi$ 、 $K_r$ 、 $K_y$ 、 $K_{\dot{y}}$  是一组控制律参数。

经过调参,选取的一组控制律参数如下:

$$K_\phi = 22920, K_r = 17190, K_y = 800, K_{\dot{y}} = 760$$

在 Matlab/Simulink 环境下进行系统的仿真,系统仿真结果如图4所示。

由仿真图形4可以看出,在主轮刹车控制系统的作用下,侧向偏差  $y$  值在6秒内被纠偏到0,且没有产生超调,满足设计要求。其它的横侧向信号如偏航角、偏航角速度在控制的作用下也回到0,因此使用主轮刹车控制系统能够很好地使无人机保持在正确的跑道上。由左轮刹车力矩和右轮的刹车力矩的变化曲线可以看出:主轮刹车系统对左右机轮交替进行刹车,实现了一侧刹车控制、另一侧不刹车的控制策略,最后当侧偏为0的时候,左右两主轮的刹车力矩均为0,两轮的滑移率也近似为0,这时两轮自由滚动。由以上分析可以证明所建立的主轮差动刹车系统模型基本正确,能够实现对无人机的航迹控制。

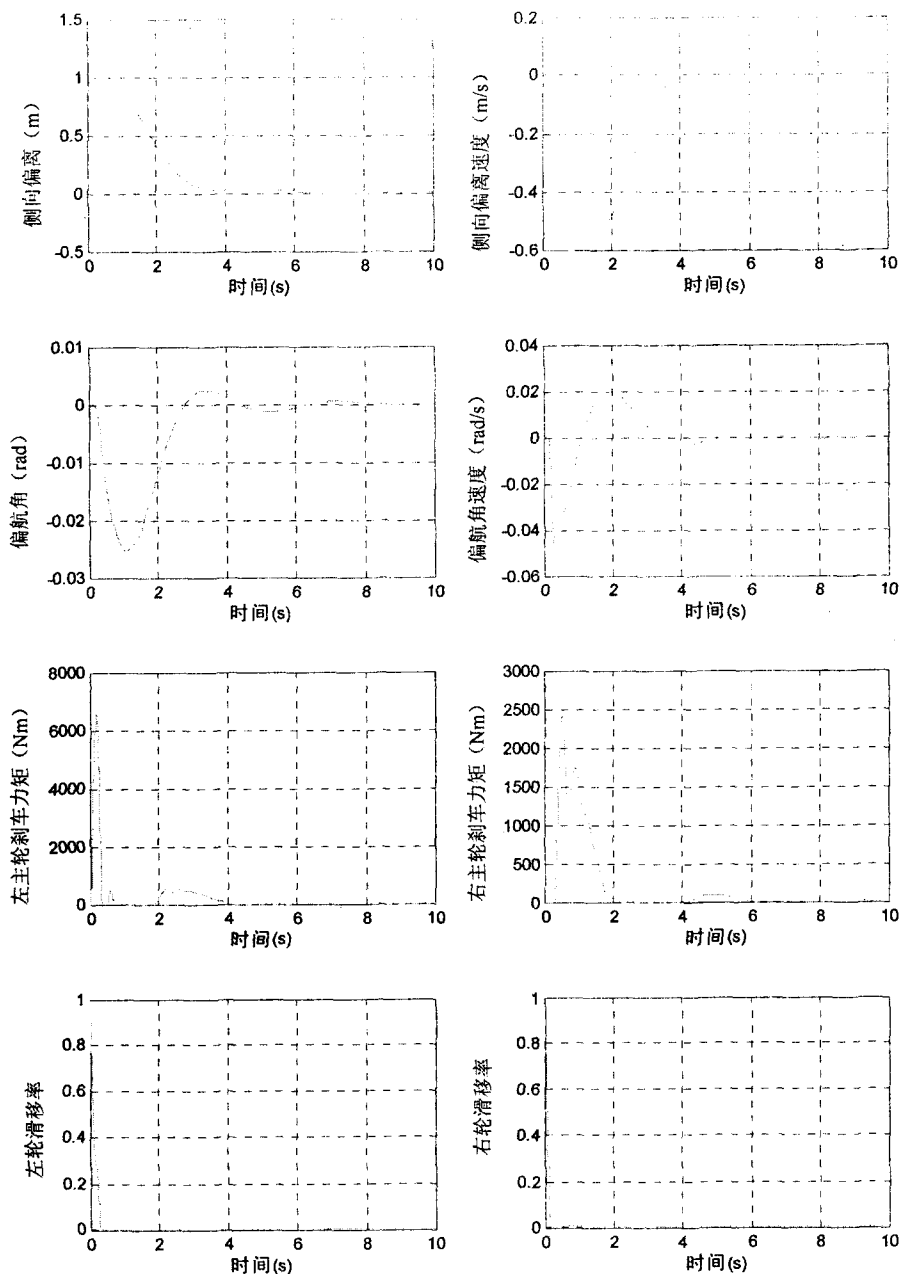


图4 初始侧向偏离1米的主轮刹车控制系统仿真图

### 4 结束语

文中所建立的主轮差动刹车系统模型能够很好地实现对无人机的航迹控制,当无人机偏离正确的跑道时,能够快速准确地对其进行纠偏控制,使飞机稳定地保持在正确的跑道上。

#### 参考文献:

- [1] Dr Robert, Nelson C. Flight stability and automatic control [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [2] 张明廉. 飞行控制系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 1999.

(下转第193页)

### 3 结束语

非平衡数据集日益受到大家的关注,传统算法在该问题上有很大的局限。关于神经网络、决策树、SVM等的各种改进方法被提出。文中分析了SVM在非平衡数据集中的应用情况,提出了SVM几种主要的改进方法。各种方法有不同的适用领域,同时正确选择分类结果的度量也很重要。也可以对不同的SVM运用集成和组合等方式,提高对非平衡数据整体的分类表现。

#### 参考文献:

- [1] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. New York: Springer, 2000: 138 - 167.
  - [2] Van Hulse J J, Khoshgoftaar T M, Napolitano A. Experimental Perspectives on Learning from Imbalanced Data[C]//In Proceedings of the 24th International Conference on Machine Learning. New York: ACM, 2007: 143 - 146.
  - [3] Jo T, Japkowicz N, Stephens. The class imbalance problem: a systematic study[J]. Intelligent Data Analysis, 2002, 6(5): 203 - 231.
  - [4] Domingos P. Metacost: A general method for making classifiers cost-sensitive[C]//In Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: Elsevier Science Inc, 1999: 230 - 232.
  - [5] Han P Hui, Mao Binghuan, Lv Hairong, et al. One-Sided Fuzzy SVM Based on Sphere for Imbalanced Data Sets Learning[C]//In proceedings of the Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Washington. IEEE Computer Society, 2007: 166 - 170.
  - [6] Ertekin S, Huang Jian, Bottou L, et al, Learning on the Border: Active Learning in Imbalanced Data Classification[C]//Proceedings of the sixteenth ACM conference on information and knowledge management. New York: ACM, 2007: 127 - 136.
  - [7] Akbani R, Kwek S, Japkowicz N. Applying support vector machines to imbalanced datasets[C]//Proc. of European Conference on Machine Learning. Berlin: Springer, 2004: 39 - 50.
  - [8] 李刚. 代价敏感的支持向量机监督学习研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2007.
  - [9] Veropoulos K, Campbell C, Cristianini N. Controlling the sensitivity of support vector machine[C]//In: Dean T. Proc of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 1999), Workshop ML3, Stockholm: [s. n.], 1999: 55 - 60.
  - [10] Raskutti B, Kowalczyk A. Extreme balancing for svms: a case study[C]//Workshop on Learning from Imbalanced Datasets II, ICML. [s. l.]: AAAI Press, 2003: 178 - 181.
  - [11] Chew Hong-Gunn, Crisp D J, Bogner R E, et al. Target detection in radar imagery using support vector machine with training size biasing[C]//Sundararajan N. Proceeding of the sixth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore: [s. n.], 2000: 80 - 85.
  - [12] 张琦, 吴斌, 王柏. 非平衡数据训练方法概述[J]. 计算机科学, 2005(8): 181 - 183.
  - [13] Chawla N V, Bowyer K W, Hall L O, et al. Smote: Synthetic minority over-sampling technique[J]. Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR), 2002, 16: 321 - 357.
  - [14] 王凯峰, 秦前清. 基于单类 SVM 的遥感图像目标检测[J]. 计算机工程与应用, 2005(3): 63 - 65.
  - [15] Scholkopf B, Platt J C, Shawe-Taylor J, et al. Estimating the support of a high-dimensional distribution[J]. Neural Computation, 2001, 13(7): 1443 - 1472.
  - [16] Wu P Gang, Chang P Y. Aligning Boundary in Kernel Space for Learning Imbalanced Dataset[C]//In Proceedings of the Fourth IEEE International Conference Washington: IEEE Computer Society, 2004: 265 - 272.
  - [17] Li P Peng, Chan P K, Luk, Fang Wen. Hybrid Kernel Machine Ensemble for Imbalanced Data Sets[C]//In Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Washington: IEEE Computer Society, 2006: 1108 - 1111.
  - [18] Yan R, Liu Y, Jin R, et al. On predicting rare classes with SVM ensembles in scene classification[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Hong Kong: [s. n.], 2003: 21 - 24.
- 
- (上接第 189 页)
- [3] 段松云. 无人机着陆数学模型研究——三轮着地滑行[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 1296 - 1299.
  - [4] 顾宏斌. 飞机地面运行的动力学模型[J]. 航空学报, 2001, 22(2): 163 - 167.
  - [5] Jr Doyle G R. A Review of Computer Simulation for aircraft-surface dynamics[J]. Journal of aircraft, 1986, 23(4): 257 - 265.
  - [6] 邹美英. 飞机防滑刹车系统新型控制律设计与仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
  - [7] 徐冬苓. 飞机防滑刹车系统的建模与仿真研究[J]. 测控技术, 2005, 23(11): 66 - 68.
  - [8] Lindsley N J, Talekar N B. A new tire model for aircraft landing gear dynamics[C]//2000 International ADAMS User Conference. Michigan, USA: [s. n.], 2000.
  - [9] Bakker E, Nybory L, Pacejka H B. Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies[P]. USA: SAE 870421, 1987.
  - [10] 王纪森, 何长安. 飞机轮胎与跑道间结合系数模型的研究[J]. 西北工业大学学报, 2000, 18(4): 569 - 571.
  - [11] 高泽迥, 林宏, 赵世春, 等. 飞机地面载荷若干问题的探讨[J]. 航空学报, 1994, 15(1): 8 - 16.