

非线性闭环系统的虚拟参考反馈校正控制设计

王建宏¹, 朱永红¹, 肖 绚¹, 唐得志²

(1. 景德镇陶瓷学院机电学院, 江西 景德镇 333403; 2. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对闭环非线性系统中的控制器为一非线性函数的情况, 采用虚拟参考反馈校正控制的设计原理, 根据控制器的输入—输出观测数据构造一个基于输出数据的线性仿射函数。通过最小化逼近误差, 利用系统辨识的参数估计方法求取线性仿射函数中可调参数权值, 从而采用一个含可调参数权值的线性仿射形式来逼近原非线性控制器, 通过对参数权值的调整使得逼近误差较小, 并给出参数权值的凸优化求解过程。最后用仿真算例验证方法的有效性和可行性。

关键词: 非线性闭环系统; 虚拟参考反馈校正控制; 线性仿射函数; 可调参数

中图分类号: V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)01-0023-05

Virtual Reference Feedback Tuning Control Design for Nonlinear Closed-Loop Systems

WANG Jianhong¹, ZHU Yonghong¹, XIAO Xuan¹, TANG Dezhi²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China;

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

Abstract: For the situation that the controller's expression in a nonlinear closed loop system is a nonlinear function, we constructed a linear affine function of the output data based on the parameter estimation iterative method by using the virtual reference feedback tuning control design principle. Through minimizing the approximation error, we could seek the adjustable weights in the linear affine function by using the parameter estimation method of system identification theory. Then we could approximate the former nonlinear controller using a linear affine function, which included some adjustable weights. Finally, the efficiency and possibility of the proposed strategy was verified by the simulation results.

Key words: nonlinear closed loop; virtual reference feedback tuning control; linear affine function; adjustable weight

0 引言

对于大多数的工业生产过程来说, 安全和生产条件的局限性使得直接的开环系统控制设计日益减少, 从而迫切需要闭环系统控制的设计方法, 在此情况下, 试验数据只能从所谓的闭环条件下获取。闭环系统控制器设计的困难主要在于需要同时考虑控制输入和由反馈带来的外部扰动之间的相关性。对于该闭环系统控制器设计问题, 研究的思路大多数是假设闭环系统

中的系统模型是已知的, 而控制器的设计是围绕已知的系统模型来展开的。但在实际的工业控制应用过程中, 系统模型的数学描述是很难获得的, 获取过程往往需要付出很大的精力和财力, 因此控制器的设计只能依赖于观测数据。从20世纪40年代开始基于观测数据的控制器设计就吸引了大量学术界和工程界的工作者, 当时研究的重点在于工业中的PID控制器设计, 从而引入了一门新的学科方向——系统辨识。利用观测数据, 采用系统辨识的方法来建立关于系统模型的数学表达式。在2000年才专门提出基于数据驱动的控制方法, 避免建立系统模型这一复杂过程, 直接从观测数据中寻找相关信息来设计控制器。其中, 至今研究最为广泛的基于数据的控制方法包含子空间预测控制和迭代参考反馈校正控制。文献[1]对VRFT方法

收稿日期: 2011-11-28

修回日期: 2012-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(61164014); 江西省科技厅青年科学基金(20122BAB211012)

作者简介: 王建宏(1980—), 男, 江西吉安人, 博士, 副教授, 研究方向为系统辨识和凸优化。

进行了详细和全面的理论阐述,并将该方法成功用于单自由度的控制器设计;文献[2]将 VRFT 方法推广到 2 自由度的控制器设计,从而归纳可知 VRFT 方法将控制器设计问题转化为参数的系统辨识问题;文献[3]将椭圆优化算法结合子空间预测控制,可以有效克服传统的线性二次型高斯最优控制过程中系统辨识、卡尔曼滤波器设计和控制器设计 3 步的繁琐过程,并解决了关于控制输入的约束条件问题;文献[4]将 VRFT 方法的基本思想应用于对分段仿射系统中各个权重值的辨识;文献[5]分析了 VRFT 法对某参数的摄动所带来的影响;文献[6]分析了正交基函数的构造方法,当采用所构造的正交基函数形式来表示原非线性系统时,有限脉冲响应模型、Laruerre 模型和双参数 Kautz 模型都可作为该正交基函数模型结构的特例。

针对闭环系统中的非线性闭环系统,基于系统对象的输入—输出观测数据,利用含未知参数权值的线性仿射形式来逼近原非线性控制器,通过对未知参数权值的调整使得逼近误差减小,给出参数权值的凸优化求解过程^[7]。在仿真试验中,对状态空间形式表示的非线性控制器通过最优化的方法利用线性仿射函数逼近,将此逼近性用于对转台系统中摩擦非线性模型的线性仿射函数逼近验证。

1 非线性系统描述

对于线性控制器关于未知参数的线性形式,已不能仿照非线性时的情形^[8],准确地写出其具体形式,因为非线性控制器中隐藏着关于 $u(t)$ 、 $e(t)$ 及未知参数的各项信息,根据 $e(t) = r(t) - y(t)$,对于使用虚拟参考反馈校正控制方法,利用输出数据 $y(t)$ 和已知期望的闭环传递函数 $M(z)$,可得到一个虚拟的参考输入 $\bar{r}(t) = M^{-1}(z)y(t)$,如图 1 所示。

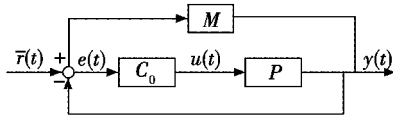


图 1 非线性闭环系统

Fig. 1 The nonlinear closed-loop system

由图 1 可知: $e(t) = M^{-1}y(t) - y(t) = (M^{-1} - 1) \cdot y(t)$,因为 $u(t)$ 、 M 、 $y(t)$ 均是已知的,即非线性控制器中包含的是关于 $u(t)$ 和 $y(t)$ 的各项。选用 C_0 表示非线性控制器, M 表示期望的闭环传递函数, $\bar{r}(t)$ 表示由输出数据 $y(t)$ 虚拟构造的参考输入。

对于非线性控制器 C_0 ,其控制器的输出 $u(t)$ 已知,输入 $e(t) = M^{-1}y(t) - y(t) = (M^{-1} - 1)y(t)$,因系统对象模型 P 的输入 $u(t)$ 与输出 $y(t)$ 都可通过观测采样数据得到,而 $M(z)$ 为事先给定的闭环传递函数,

即非线性控制器 C_0 的输入 $e(t)$ 已知,现在要解决的问题是给定一组输入输出数据 $\{e(t)\}$ 、 $\{u(t)\}$,利用函数逼近论^[8]设计非线性控制器 C_0 。逼近方法的思路在于:首先选用一个关于控制器输出数据 $\{u(t)\}$ 的线性仿射函数,在此线性仿射形式中包含可调权重值^[9]。以下考虑各种干扰噪声的存在,在最小化差的条件下得到一个最优化问题,利用经典最优化理论中的 KKT 充要条件得到最佳的可调权重值^[10]。

2 线性仿射函数的逼近

对于原闭环系统中的非线性控制器 C_0 有

$$u(t) = C_0(\varphi(t)) \quad (1)$$

式中, $C_0(\varphi(t))$ 未知, $\varphi(t)$ 在此形式中称为回归向量。通常的 $\varphi(t)$ 有两种形式: $\varphi(t) = [e(t-1) \cdots e(t-n_e)]^T$ 和 $\varphi(t) = [u(t-1) \cdots u(t-n_u) \ e(t-1) \cdots e(t-n_e)]^T$ 。

设非线性控制器 C_0 对应的非线性函数 $C_0(\varphi(t))$ 的一个逼近线性仿射函数为

$$\hat{C}(\varphi^*(t)) = w_0 + \sum_{i=1}^N w_i u(t) \quad (2)$$

为了能够在任意指定点 $\varphi^*(t)$ 处都得到良好的逼近程度,逼近的准确度依赖于权重值 w_0 和 w_i 的合适选取^[11]。建立衡量逼近性能的目标函数为

$$W(\varphi^*, C_0, \mathbf{w}^N) = (C_0(\varphi^*(t)) - \hat{C}(\varphi^*(t)))^2 \quad (3)$$

其中,权重值 $\mathbf{w}^N = [w_0 \ w_1 \ \cdots \ w_N]^T$ 。通过最小化式(3)所表示的目标函数得到各个权重值,权重值可表示为 $w_i = w_i(\varphi^*)$ 。对于采用的线性仿射函数,式(2)有着一般性,多种其他形式都可作为式(2)的特例。如经常使用的带有固定基函数的参数线性回归模型结构为

$$C(\varphi(t), \theta) = \sum_{k=1}^d \theta_k f_k(\varphi(t)) \quad (4)$$

式中, $f_k(\varphi(t))$ 为一组事先选定的已知基函数。参数矢量 θ 可通过简单的线性最小二乘法来求解得到

$$\hat{\theta}_N = \left(\sum_{k=1}^N \mathbf{F}(\varphi(k)) \mathbf{F}^T(\varphi(k)) \right)^{-1} \sum_{k=1}^N \mathbf{F}(\varphi(k)) u(k)$$

其中, $\mathbf{F}(\varphi) = [f_1(\varphi) \ \cdots \ f_d(\varphi)]^T$ 。将参数估计值代入到在 $\varphi^*(t)$ 处的函数式(4)中可得 $\hat{C}_N(\varphi^*) =$

$$C(\varphi^*, \hat{\theta}_N) = \mathbf{F}^T(\varphi^*) \hat{\theta}_N = \mathbf{F}^T(\varphi^*) \left(\sum_{k=1}^N \mathbf{F}(\varphi(k)) \right) \cdot \mathbf{F}^T(\varphi(k))^{-1} \mathbf{F}(\varphi(t)) u(t) = \sum_{i=1}^N w_i u(t), w_i = w_i(\varphi^*) = \mathbf{F}^T(\varphi^*) \left(\sum_{k=1}^N \mathbf{F}(\varphi(k)) \mathbf{F}^T(\varphi(k)) \right)^{-1} \mathbf{F}(\varphi(t)), w_0 = 0。$$

即基函数时的形式可转化为线性仿射函数形式。

3 可调权重值的凸优化求解

对式(3)定义的逼近性能目标函数展开并引入

$\tilde{\varphi}(t) = \varphi(t) - \varphi^*(t)$, 则有

$$W(\varphi^*, C_0, \mathbf{w}^N) = \left(C_0(\varphi^*(t)) - \hat{C}(\varphi^*(t)) \right)^2 = \left(w_0 + \sum_{i=1}^N w_i u(t) - C_0(\varphi^*) \right)^2 = \left(w_0 + \sum_{i=1}^N w_i \left(C_0(\varphi(t)) - C_0(\varphi^*) - \nabla^T C_0(\varphi^*) \tilde{\varphi}(t) \right) + C_0(\varphi^*) \left(\sum_{i=1}^N w_i - 1 \right) + \nabla^T C_0(\varphi^*) \sum_{i=1}^N w_i \tilde{\varphi}(t) \right)^2 \quad (5)$$

式(5)中,得到的平方项即为通常的平方偏差,因不考虑未建模的影响,故不出现方差误差项。在关于内模控制的输入信号设计中,则需要着重考虑由噪声和未建模项所产生的方差误差项对系统造成的影响^[12]。从式(5)中可看出,偏差项将会变得任意大,除非添加如下关于权重值的两个约束条件

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1, \sum_{i=1}^N w_i \tilde{\varphi}(t) = 0 \quad (6)$$

式中, w_0 通常选择为 $w_0 = 0$, 则由此所得的线性仿射函数即为一线性估计子。

利用泰勒级数公式将 $C_0(\varphi(t))$ 在 $C_0(\varphi^*)$ 处展开得

$$C_0(\varphi(t)) = C_0(\varphi^*) + \frac{dC_0(\varphi(t))}{d\varphi(t)} (\varphi(t) - \varphi^*(t)) + \frac{1}{2} \frac{d^2 C_0(\varphi(t))}{d\varphi(t)^2} (\varphi(t) - \varphi^*(t))^2 \quad (7)$$

假设非线性函数 C_0 满足如下的 Lipschitz 条件

$$\|\nabla C(\varphi+h) - \nabla C(\varphi)\|_{\varrho} \leq \|h\|_{\varrho}, \quad \forall \varphi, h \in \mathbf{R}^n \quad (8)$$

联合式(6)~式(8)可得到式(5)的一个上界值为

$$W(\varphi^*, C_0, \mathbf{w}^N) \leq \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |w_i| \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 + |w_0| \right)^2 \quad (9)$$

当取 $w_0 = 0$ 时,最小化 $W(\varphi^*, C_0, \mathbf{w}^N)$ 可转化为最小化式(9)中右边的上界值,即得如下优化问题

$$\min_{\mathbf{w}^N} \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^N |w_i| \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 + |w_0| \right)^2 \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N w_i = 1, \sum_{i=1}^N w_i \tilde{\varphi}(t) = 0$$

在上述优化问题中引入松弛变量 s_i , 利用凸优化中相关的结论可得如下等价凸二次规划问题

$$\min_{\mathbf{w}^N} \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^N s_i \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 \right)^2 \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N w_i = 1, \sum_{i=1}^N w_i \tilde{\varphi}(t) = 0,$$

$$w_i - s_i \leq 0, -w_i - s_i \leq 0$$

对此凸二次规划问题求解得到线性仿射函数表达式中各个最优权重值,且 $w_0 = 0$ 。对于式(11)表示的凸二次规划问题,因两等式约束和两不等式约束都为线性形式,则 KKT 条件将成为该优化问题最优性的充要条件^[13]。对应的拉格朗日函数为: $L(\mathbf{w}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}) =$

$$\frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^N s_i \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 \right)^2 + \sum_{i=1}^N \mu_{1i} (w_i - s_i) + \sum_{i=1}^N \mu_{2i} (-w_i - s_i) + \lambda_1 \left(\sum_{i=1}^N w_i - 1 \right) + \lambda_2 \left(\sum_{i=1}^N w_i \tilde{\varphi}(t) \right)。$$

利用 KKT 最优性充要条件可得

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 \tilde{\varphi}(t) + \mu_{1i} - \mu_{2i} = 0, \\ -\mu_{1i} - \mu_{2i} + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N s_i \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 \right) \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 + |w_i| = 0, \\ \mu_{1i} (w_i - s_i) = 0, \\ \mu_{2i} (-w_i - s_i) = 0, \\ \sum_{i=1}^N w_i = 1, \\ \sum_{i=1}^N w_i \tilde{\varphi}(t) = 0, \\ s_i = |w_i| \end{cases} \quad (12)$$

通过这些 KKT 最优性条件即可求解出对应的最优值^[14]。当 $w_i > 0$ 时,由式(12)的第 4 式可知 $-w_i - |w_i| = -w_i - w_i = -2w_i < 0$, 从而要使得第 4 式成立需

要有 $\mu_{2i} = 0$ 。将 $\mu_{2i} = 0$ 代入第 1 式中可得 $\mu_{1i} = -(\lambda_1 + \lambda_2 \tilde{\varphi}(t))$, 将此两结果代入到第 2 式中有

$$(\lambda_1 + \lambda_2 \tilde{\varphi}(t)) + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N s_i \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 \right) \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 + w_i = 0, \text{ 整理可得 } w_i = -(\lambda_1 + \lambda_2 \tilde{\varphi}(t)) + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N s_i \cdot \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 \right) \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2 = -(\lambda_1 + \lambda_2 \tilde{\varphi}(t)) + \lambda_3 \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2,$$

同理,当 $w_i < 0$ 时 $\mu_{1i} = 0$, $\mu_{2i} = (\lambda_1 + \lambda_2 \tilde{\varphi}(t))$, 代入第 2 式中同样有

$$w_i = -(\lambda_1 + \lambda_2 \tilde{\varphi}(t)) + \lambda_3 \|\tilde{\varphi}(t)\|_{\varrho}^2. \quad (13)$$

4 基函数时的特例

若线性仿射函数选择为式(4)时的带固定基函数的参数线性回归模型: $C(\varphi(t), \boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^d \theta_k f_k(\varphi(t)) = \mathbf{F}(\varphi)^T \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\theta} \in \mathbf{R}^d, \mathbf{F}(\varphi) = [f_1(\varphi) \cdots f_d(\varphi)]^T。$

最小化逼近性能的目标函数为

$$W(\varphi^*, C_0, w^N) = \left(\left(\sum_{i=1}^N w_i F(\varphi(t)) - F(\varphi^*) \right)^T \theta_0 \right)^2 \quad (14)$$

类似有式(14)表示的偏差项将会变得任意大,除非增加如下约束条件: $\sum_{i=1}^N w_i F(\varphi(t)) = F(\varphi^*)$,这和一般线性仿射函数形式的结果是类似的。

5 仿真算例

1) 考虑一个非线性控制器设计问题^[15],系统定义为如下的状态空间形式

$$\begin{cases} x_1(t+1) = \left(\frac{x_1(t)}{1+x_1^2(t)} + 1 \right) \sin x_2(t) \\ x_2(t+1) = x_2(t) \cos x_2(t) + x_1(t) e^{-(x_1^2(t)+x_2^2(t))/8} + \frac{e^3(t)}{1+e^2(t)+0.5\cos(x_1(t)+x_2(t))} \\ u(t) = \frac{x_1(t)}{1+0.5\sin x_2(t)} + \frac{x_2(t)}{1+0.5\sin x_1(t)} \\ M = \frac{0.762z^2 - 0.682z}{z^2 + 0.613z + 0.102} \\ e(t) = M^{-1}y(t) - y(t) = (M^{-1} - 1)y(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $x_1(t), x_2(t)$ 为辅助的状态变量,本身是不可测的;仅 $u(t), y(t)$ 为可观测的输入输出数据;期望的闭环传递函数 M 为已知的; $u(t), e(t)$ 为可观的。三维的非线性控制器可选为

$$u(t) = C(u(t-1), u(t-2), u(t-3), e(t-1), e(t-2), e(t-3)) \quad (16)$$

仿真条件:选取采样输入输出数据 $N = 20000$,通过合适的数据选择可使得误差输入 $e(t)$ 为一均匀分布的随机变量 $e(t) \in [-2.5, 2.5]$ 。为了验证非线性控制器可通过最优化的方法来利用一线性仿射函数逼近的有效性,输入的误差信号为

$$e(t) = \sin \frac{2\pi k}{10} + \sin \frac{2\pi k}{25}, \quad k = 1, 2, \dots, 200 \quad (17)$$

仿真结果说明:利用输入的误差信号 $e(t)$ 通过原来的非线性控制器,所得到的真实输出曲线见图2中的蓝色曲线。在基于给定的20000个输入输出观测数据的基础上,采用最优化方法得到一个线性仿射函数,用此线性仿射函数替换原来的非线性控制器。同样,利用输入误差信号 $e(t)$ 通过替换后的线性仿射函数型控制器,得到的仿真输出曲线为图2中的正方形处。由图2可见:正方形完全覆盖在蓝色曲线上,表明同一个输入误差信号 $e(t)$ 通过原来的非线性控制器和线性仿射函数型控制器的输出完全是一致的,即线性仿射函数型控制器在某些约束条件下可最优地逼近原非线性控制器。

为了进一步体现线性仿射函数逼近原非线性控制器的逼近效果,图3所示为式(5)建立的逼近目标性能准则函数 $W(\varphi^*, C_0, w^N)$ 随时间 t 逐渐趋于零的误差曲线仿真图,由图3可知,误差在优化过程开始时较大,而随着时间的推移变得较小,这也充分说明,此时线性仿射函数逼近原非线性函数的可行性。

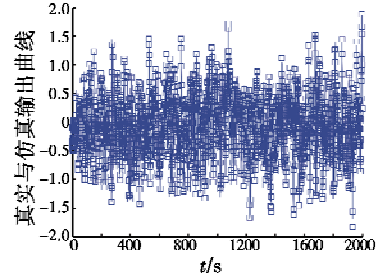


图2 真实输出和仿真输出对比曲线

Fig. 2 Curves of true output and simulated output

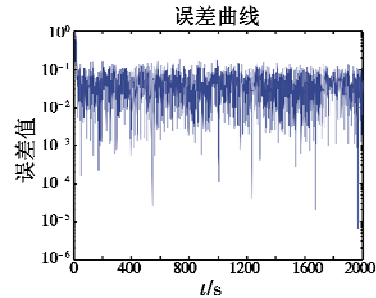


图3 逼近误差曲线

Fig. 3 The approximation error curve

2) 下文将非线性系统可利用一个线性仿射函数来近似逼近的理论知识用于对飞行仿真转台系统中 Stribeck 摩擦非线性模型的线性近似逼近。

Stribeck 模型是比较著名的摩擦模型之一。在对 Stribeck 摩擦模型分析中有,当外作用力施加于接触面时,产生的静摩擦力与外作用力大小相等,方向相反,当外作用力在克服最大静摩擦力后,接触面开始出现相对运动,此时摩擦力会随着相对运动速度的增加而逐渐减小;当接触面完全脱离外作用力时,起主导作用的是库仑摩擦力和与速度成正比的粘性摩擦力,此时摩擦力随着相对运动速度的增加而增加。摩擦力与接触面相对运动速度之间的非线性关系通常称为 Stribeck 曲线关系,描述为

$$f(t) = (f_c + (f_s - f_c) e^{-(\dot{\theta}(t)/\dot{\theta}_c)^2}) \text{sgn}(\dot{\theta}(t)) + K\dot{\theta}(t) \quad (18)$$

式中: f_c 为最大静摩擦力; f_s 为库仑摩擦力; K 为粘性摩擦系数; $\dot{\theta}_c$ 为临界 Stribeck 速度。将式(17)中的 $\dot{\theta}(t)$ 看作式(1)中 $\varphi(t)$, 利用一个线性仿射函数来近似 Stribeck 摩擦非线性模型。

$$\hat{f}(t) = w_0 + \sum_{i=1}^N w_i f(t) \quad (19)$$

通过最小化式(5)所示的性能指标函数来得到未知参数矢量 $w = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_N]^T$ 的估计值算式(13)。在最小化过程中,可用试验法来尝试选取 N 的数值大小。当 N 增大到某一定值时,继续增大对性能指标函数的递减并没有多大影响时,即取此时的值为 N 。下面对含有 Stribeck 摩擦模型的转台系统进行仿真研究。

图4所示为在给定正弦位置信号下的系统非线性摩擦力和线性仿射函数型摩擦力与转轴关系曲线。由图4可见,在转速较小时存在较大的差异,而当转速逐渐增大时,非线性摩擦力和线性仿射型摩擦力与转速的关系近似相等,差异较小。此时,当转速较大时,该近似的线性仿射函数可用来替换原非线性摩擦力。

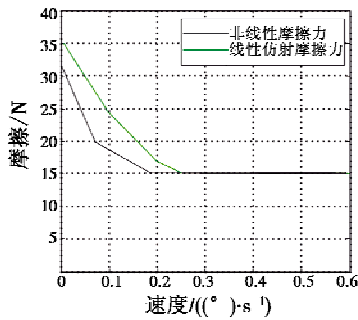


图4 正弦位置信号下摩擦力与转速的关系
Fig. 4 The relation between friction and velocity under sine position signal

图5所示为在给定斜坡位置信号下,转台中的非线性摩擦力和近似线性仿射函数与转速的关系曲线。

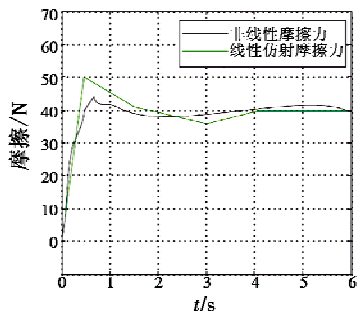


图5 斜坡位置信号下摩擦力与转速的关系
Fig. 5 The relation between friction and velocity under step position signal

图6所示为在斜坡位置信号下系统表现出来的爬行现象。由图6可见,非线性摩擦模型对应的各个输出都是由一些不规则的曲线构成,而线性仿射函数模型对应的各个输出都是由一些分段的线段组成。近似的体现即在不同的时间段,用这些线段来近似那些不规则的曲线。在每段时间段中,线段与对应的曲线之间的偏离即为近似的误差,开始时这种偏离误差较大,随着时间的推移,线段与曲线之间靠得很近,表明近似误差较小,达到了基本接近的程度。

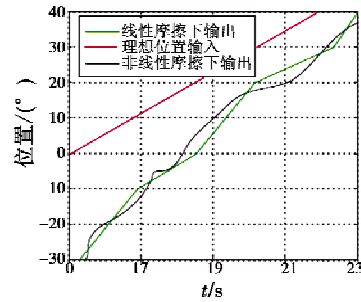


图6 斜坡位置信号下的爬行现象
Fig. 6 The saturation under step position signal

6 结语

本文在闭环非线性系统中,避开系统对象,对于非线性闭环系统的控制器设计,采用一个基于输出数据的线性仿射函数来逼近原非线性控制器,从理论上推导出这些未知权重值的选取过程,可明确,增加的未知权重值在整个逼近非线性系统中起着关键作用。

参考文献

- [1] GUARDABASSI G O, SAVARESI S M. Virtual reference direct design method: An off-line approach to data-based control system design[J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2000, 45(5): 954-959.
- [2] CAMPI M C, LECCHINI A, SAVARESI S M. An application of the virtual reference feedback tuning method to a benchmark problem[J]. European Journal of Control, 2003, 9: 66-76.
- [3] 王建宏,王道波. 子空间预测控制中的椭球优化及其应用[J]. 应用科学学报, 2010, 28(4): 424-429.
- [4] PACLETTI S, ROLL J, GARULLI A, et al. On the input-output representation of piecewise affine state space models [J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2010, 55(1): 60-73.
- [5] ZEILINGER M N, JONES C N, MORARI M. Real-time suboptimal model predictive control using a combination of explicit MPC and online optimization [J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2011, 56(7): 1524-1534.
- [6] MARTENSSON J, ROJAS C R, HJALMARSSON H. Conditions when minimum variance control is the optimal experiment for identifying a minimum variance controller[J]. Automatica, 2011, 47(3): 578-583.
- [7] CAMPI M C, LECCHINI A, SAVARESI S M. Virtual reference feedback tuning: A direct method for the design of feedback controllers [J]. Automatica, 2002, 38(8): 1337-1346.
- [8] CAMPI M C, SAVARESI S M. Direct nonlinear control design: The virtual reference feedback tuning (VRFT) approach[J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2006,

式中: A_0 为初始无线电高度(ft); A_L 为飞机掉高(ft)。图10中包线右边区域即为告警区域。

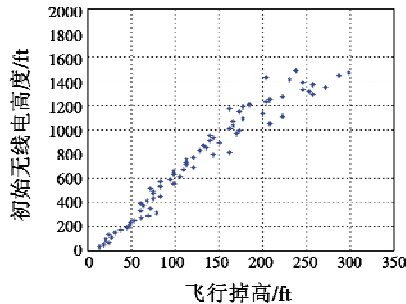


图9 模式三告警阈值点分布图

Fig.9 Mode 3 threshold points

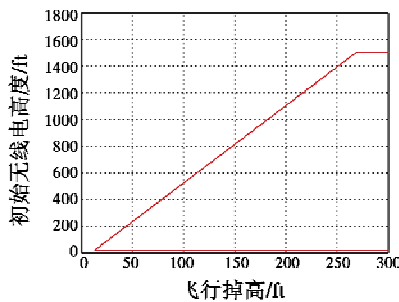


图10 模式三告警包线

Fig.10 Mode 3 alerting threshold curve

当飞机掉高超过了飞机出现掉高前所记录的无线电高度对应的掉高阈值,进入包线所覆盖的区域时,便触发告警,提示飞行员立刻采取拉升措施,有效防止CFIT的发生。

4 结束语

本文阐述了TAWS模式三告警的基本原理,并对模式三的告警阈值包线生成算法进行了理论研究。通过建立相应的告警模型,对飞机发生掉高后的无告警轨迹以及告警后规避轨迹进行分析,基于SOC方法获得了告警包线。仿真结果与HONEYWELL公司所研制的MK增强型近地告警系列产品告警包线基本一致,符合当今民航TAWS的阈值设置。这表明本文基

于SOC曲线的掉高阈值包线生成方法的有效性和实用性,对TAWS其余5种传统告警模式的告警包线生成具有重要的理论价值。

参考文献

- [1] TSO-C151b. Terrain awareness and warning system [S]. Washington, DC: Department of Transportation Federal Aviation Administration Aircraft Certification Service, 2002.
- [2] ARNIC 762-2000. Terrain awareness and warning system [S]. Annapolis, Maryland: Airlines Electronic Engineering Committee, 2000.
- [3] KUCHAR J K. Methodology for alerting-system performance evaluation[J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(2):438-444.
- [4] KUCHAR J K. A united methodology for the evaluation of hazard alerting systems[D]. MA: Dept of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 1995.
- [5] 陈冬梅. 机载增强型近地告警系统的设计[C]//中国航空学会大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会论文集,北京:中国航空学会,2007:1-5.
- [6] 陈广永. 近地告警系统报警曲线算法模型与控制仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- [7] 陈广永,何亦征,龚华军. 近地告警系统报警阈值算法研究[J]. 航空电子技术,2007,38(3):25-30.
- [8] 杨超,虞红娅,张浩森,等. 民航地形感知警告系统前视功能分析及仿真[J]. 电光与控制,2011,18(7):90-93.
- [9] Honeywell International Inc. Product specification for the Enhanced Ground Proximity Warning System (EGPWS) [Z]. Redmond, Washington: Honeywell International Inc, 2009.
- [10] 张弘,魏榕祥. 通用飞机抗坠撞设计指南[M]. 北京:航空工业出版社,2009:4-10.
- [11] POOLE R A. Whoop whoop pull up[J]. Flying Safety, 1992, 48(6):16-17.
- [12] LEWIS C. Whoop, whoop, pull up! [C]//American Airlines Flight Deck, 1994:7-13.
- [13] erative minimization of H_2 control performance criteria [J]. Automatica, 2008, 44(10):2549-2559.
- [12] LJUNG L. System identification: Theory for the user [M]. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [13] PINTELON R, SCHOUKENS J. System identification: A frequency domain approach [M]. New York: IEEE Press, 2001.
- [14] BOYD S L, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. UK: Cambridge University Press, 2008.
- [15] 王建宏. 基于先进辨识的控制策略研究及其应用 [D]. 南京:南京航空航天大学,2011.

(上接第27页)

51(1):14-27.

- [9] LECCHINI A, CAMPI M C, SAVARESI S M. Virtual reference feedback tuning for two degrees of freedom controllers [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2002, 16(5):355-371.
- [10] NOCEDAL J, WRIGHT S. Numerical optimization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [11] BAZANELLA A S, GEVERS M, MISKOVIC L, et al. It-