

基于 LS-SVM 的机载天线伺服机构自适应控制

纪永¹, 李广超²

(1. 上海建峰职业技术学院 教务处, 上海 201900; 2. 上海大学 电子与信息工程学院, 上海 200433)

摘要: 针对机载天线伺服机构运行时所受外力是快时变、变化范围大、且自身摩擦等非线性特性不能忽略的问题, 提出一种基于最小二乘支持向量机(LS-SVM)的自适应控制设计方法。此方法将摩擦等非线性特性视为未知项, 并利用 LS-SVM 在线估计被控对象的非线性未知项, 从而设计得到 LS-SVM 的学习规则。系统运行结果证明: 该方法能够很好地解决全范围内的系统稳定问题, 并能在线跟踪任何光滑的输入信号, 同时补偿摩擦等非线性特性, 改善系统的动态品质和静态特性。

关键词: 伺服机构; LS-SVM; 自适应控制; 李雅普诺夫理论

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2012)19-0091-03

Airborne antenna servo mechanism adaptive control based on Least Squares Support Vector Machine

JI Yong¹, LI Guang-chao²

(1. Office of Academic Affairs, Jianfeng Vocational College, Shanghai 201900, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The airborne antenna servo mechanism runs in the conditions that the external force is time-varying changes fast during the whole scope, and its own friction and other nonlinear characteristics cannot be ignored, the paper propose the adaptive control designing method based on Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM). This method regarded the nonlinear characteristics such as the friction as an unknown item, and estimated the nonlinear unknown item of the controlled object by the LS-SVM. Then, the learning rule of the LS-SVM was designed. The results show that: the method can well solve the problem of system movement stability within the whole scope, and stable track any smooth input signal online. Meanwhile, the method can compensate for the nonlinear characteristics such as friction, and improve the dynamic quality and static characteristics.

Key words: servo mechanism; LS-SVM; adaptive control; Lyapunov theory

摩擦力是高性能伺服机构运行过程中需要考虑的重要非线性因素。当伺服机构运行于机载条件下, 即所受外力是快时变、变化范围大时, 将机载天线伺服机构视为具有参数不确定性的非线性系统就更加必要。传统 PID 控制方法无法给出满意的控制效果, 近年来, 控制领域学者已经就此问题提出了各自的解决方法, 特别是自适应控制、智能控制等控制方法为参数不确定性的非线性系统提供了新的控制思路等^[1-2]。如文献[3]自适应矩阵控制解决伺服系统高速制造运行中电流变化问题, 但没有讨论低速率运行条件。文献[4]依据非线性跟踪微分器的基本思想提出一种等效微分估计方法, 对摩擦等非线性项的在线估计采用干扰观测器及低通滤波器的方式进行, 未论证或证明估计结论。文献[5]采用自抗扰控制器抑制伪线性复合系统中非线性因素的作用, 引入扩张状态观测器对不确定性的估计, 增加了控制的复杂性, 对伺服系统的实时性要求

比较高。

在统计学习理论中, Vapnik 最早基于结构风险最小化理论提出的支持向量机 (SVM) 在充分学习的前提下具备了优越的泛化能力^[6], 因此在机器学习领域得到了广泛研究与应用。SVM 模型的核心是不等式约束条件下的二次规划问题, 求解成本较大。针对这个问题, Suykens 提出了最小二乘支持向量机(LS-SVM)。LS-SVM 将 SVM 中的不等式约束条件转换成等式约束条件进行求解, 缩减了计算的复杂度, 更便于计算机的在线实现。

文中提出一种基于 LS-SVM 的自适应控制设计方法。此方法将摩擦等非线性特性视为未知项, 并利用 LS-SVM 在线估计被控对象的非线性未知项。文中在利用李雅普诺夫理论论证了闭环系统的跟踪误差一致有界的条件下, 设计得到 LS-SVM 的权向量和偏移量的学习规则。并通过仿真和基于 TMS320F2812 的数字伺服控制系统上实验, 实际运行证明文中结论的正确性和可行性。

收稿日期: 2012-06-21

稿件编号: 201206139

作者简介: 纪永(1977—), 男, 吉林松原人, 硕士, 讲师。研究方向: 机电智能控制, 非线性控制。

1 问题描述

一类单输入单输出系统为：

$$z(n) = f(Z, t) + g(Z, t)u \quad (1)$$

其中状态量 $Z = [z, z', \dots, z^{(n-1)}]^T \in R^n$ 是可测的，控制输入 $u \in R$ ，量 $f(\cdot), g(\cdot)$ 是光滑的，且 $g(Z, t) \neq 0$ 。控制的目标是确定控制量 $u \in R$ ，使其状态量 Z 跟踪稳定的线性参考模型：

$$z_m^{(n)} = k_{n-1} z_m^{(n-1)} + \dots + k_0 z_m + r(t) \quad (2)$$

其中， $r(t)$ 是有界给定信号，选取合适的参数 $k_i (i=0, 1, \dots, n-1)$ 使得 $s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_0$ 为 Hurwitz 多项式。定义跟踪误差 $e = z - z_m$ ，则反馈线性化的控制器为：

$$u = \frac{1}{g(Z, t)}(-\hat{f} + h) \quad (3)$$

其中，参数 \hat{f} 是参数 f 的估计值， $h = z_m^{(n)} + k_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + k_0 e$ 是参考模型当前状态 $z_m^{(n)}$ 和跟踪误差的函数。

由式(1)、(2)、(3)可得，

$$e_m^{(n)} + k_{n-1}e^{(n-1)} + \dots + k_0 e = f(Z, t) - \hat{f} \quad (4)$$

式(4)中， \hat{f} 由 LV-SVM 实现。用离散的状态变量构成表示如图 1 所示。

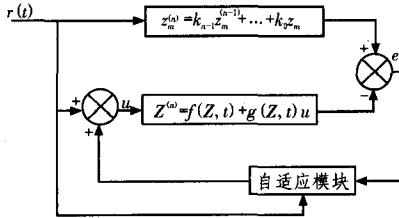


图 1 离散状态变量构成的自适应系统

Fig. 1 Adaptive system diagram constructed of discrete state variables

2 LV-SVM 控制器设计

LV-SVM 是 SVM 的改进，将传统 SVM 中的不等式约束改为等式约束，将误差平方和损失函数作为训练集的经验损失，把求解二次规划问题转化为求解线性方程组问题，提高求解问题的速度和收敛精度。

给定 N 个样本组成的样本集如下为 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$ ，其中， $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为输入向量， $x_i \in R^n$ ； $y_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为期望值， $y_i \in R$ 。利用结构风险最小化原则，SVM 回归算法采用的估计函数为：

$$y = w \cdot \delta(x) + b \quad (5)$$

其中， $\delta(x)$ 为从输入空间到高维特征空间的非线性映射，系数 w, b 由式(6)估计：

$$\min R_{\text{SVM}} = \frac{1}{2} \|w\|^2 + cR_{\text{emp}} \quad (6)$$

其中， $\|w\|^2$ 为控制模型的复杂度； c 为正规化参数，控制对超出误差样本的惩罚程度； R_{emp} 为不敏感损失函数。LV-SVM 将误差平方和损失函数作为优化目标，即式(6)的优化问题转化为：

-92-

$$\begin{cases} \min R_{\text{SVM}} = \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \\ y = w \cdot \delta(x) + b + \xi_i \end{cases} \quad (7)$$

其中， ξ_i 为松弛因子，其作用是将 SVM 中的不等式约束转化为等式约束。

为了求解该优化问题，引入拉格朗日函数：

$$L(w, b, \xi, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^n \xi_i^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i (w \cdot \delta(x_i) + b + \xi_i - y_i) \quad (8)$$

其中， $\alpha_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为拉格朗日乘子。

函数 L 应对 w, b, ξ, α 求最小值，即优化条件为：

$$\frac{\partial L}{\partial w} = 0, \frac{\partial L}{\partial b} = 0, \frac{\partial L}{\partial \xi} = 0, \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0$$

从而

$$\begin{cases} w = \sum_{i=1}^n [\alpha_i \delta(x_i)] \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i = 0 \\ \alpha_i = 2c\xi_i \\ w \cdot \delta(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0 \end{cases} \quad (9)$$

构造函数 $K(x_i, x_j) = 0$ ，使问题转化为求解如下线性方程：

$$\begin{bmatrix} 0 & I^T \\ I & H + c^{-1}I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中， $y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T \in R^N$ ， $I = [1, 1, \dots, 1]^T \in R^N$ ， $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T \in R^N$ ， $I \in R^{N \times N}$ 为单位阵， $H \in R^{N \times N}$ 为方阵，其中 $H_{ij} = K(x_i, x_j) = \delta(x_i) \cdot \delta(x_j)$ ， $\forall ij = 1, 2, \dots, N$ ，其中 $K(\cdot, \cdot)$ 为核函数，它是 $\delta(x_i)$ 和 $\delta(x_j)$ 的内积。任何满足 Mercer 条件的函数，都可作为核函数，采用不同的函数作为核函数可以构造实现输入空间中不同类型的非线性决策面的学习机器。最常用的核函数有多项式函数 $K(x_i, x_j) = (x_i \cdot x_j + 1)^d$ ，RBF 函数 $K(x_i, x_j) = \exp(-\|x_i - x_j\|^2/2\sigma^2)$ ，Sigmoid 函数 $K(x_i, x_j) = \tanh(b(x_i \cdot x_j) + c)$ 等。

通过式(10)求解 α, b ，并进一步求解出 w 。

LS-SVM 的函数估计为：

$$\hat{y} = \sum_{k=1}^n [\alpha_k K(x_i, x)] + b \quad (11)$$

LV-SVM 控制器设计步骤如下：

1) 离线理论设计计算，得到并选取合适的参数 $k_i (i=0, 1, \dots, n-1)$ 使得 $s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_0$ 为 Hurwitz 多项式。选取合适的对称正定矩阵 R, Q ，并求得正定矩阵 P 。

2) 对机载天线伺服机构输入合理的输入值或随机值，以便产生丰富的输入输出数据。基于交叉验证方法选取核参数和正则化参数，对 LS-SVM 进行离线训练，得到初始值。

3) 利用式(11)在线自适应调整相关参数。使机载天线伺服机构在线稳定地跟踪任何光滑的输入信号。

3 设计应用与结果分析

文中的设计方法在某型正在研制的机载天线伺服机构的控制系统设计采用。此机载天线伺服机构实质上是一种小型

的两轴伺服稳定跟踪平台, 可以实时采集、输出天线的姿态角, 并可以按照任务计算机的指令控制天线的姿态指向。它的组成为: 控制器、精密电位器、速率陀螺、直流力矩电机、电机驱动模块、二次电源、导电环、连接母板等组成。为了简化试验, 暂不接入速率陀螺, 仅使用精密电位器作为测角部件。电机及框架等试验参数如下: $R_a=0.55 \Omega$, $C_m=3.3 \text{ Nm/A}$, $C_e=0.9 \text{ V}/(\text{rad/s})$, $J=1.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 由于本载天线伺服机构控制系统包括方位、俯仰两轴两通道和其它指令性功能等的实时控制, 故数据分析方法为将微处理器所采集到实时位置信息经由 RS422 与计算机通讯, 这样既可以从计算机接收控制指令, 也可以将实时的运行数据传送给计算机, 最后将计算机中所记录记录的离线数据导入到 MATLAB 环境。这样可以在计算机上可以方便地观察运行结果和进行结果分析。

以某机载天线伺服机构的方位角为例, 讨论 LV-SVM 控制器的设计。通过改变方位角的直流电机的电压 u 可以控制天线伺服机构方位角度值 z , 代入式(1)得到伺服机构控制系统模型为:

$$\ddot{z} = f + gu \quad (12)$$

设定方位角初始位置值为 $z(t)=0^\circ$, 参考输入值为 $r(t)=2^\circ$ 。摩擦力视为有界未知项, 根据离线测量, 此伺服机构控制系统中, 摩擦力折算到控制电压值后小于 0.3 V。按前文所述的 LV-SVM 控制器的设计步骤, 取控制系统的输入为 $x=[z \ z']^T$, 输出为 \hat{f} , 进行离线训练, 得到 LS-SVM 的参数初始值, 再进行在线自适应控制。图 2 为经典 PID 控制器方位角位置运行图, 图 3 为 LV-SVM 控制器方位角位置运行图。分析实验结果可知: 基于 LS-SVM 的机载天线伺服机构自适应控制器比经典 PID 控制器取得更好地控制效果, 能够在线稳定地跟踪包括阶跃信号在内的任何光滑的输入信号, 同时补偿摩擦等非线性特性, 改善系统的动态品质和静态特性。

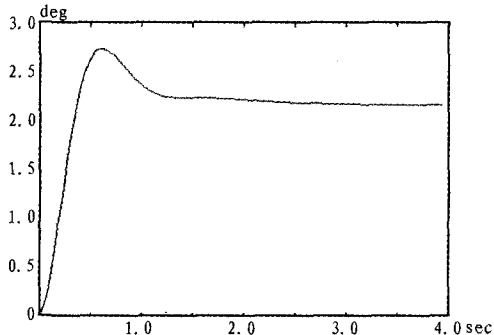


图 2 经典 PID 控制器方位角位置运行图

Fig. 2 Azimuth position operation diagram of the classical PID controller

4 结束语

从某机载天线伺服机构的测试结果和实际控制系统对天线目标的定位可以得到如下结论: 1) 在机载天线伺服机构运行条件为所受外力是快时变、变化范围大、且自身摩擦等非线性特性不能忽略, 如果忽略并采用经典 PID 控制器的设

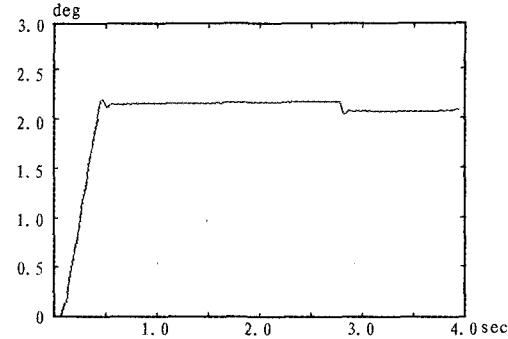


图 3 LV-SVM 控制器方位角位置运行图

Fig. 3 Azimuth position operation diagram of the LV-SVM controller
计方法, 会使得控制系统的性能无法满足精度跟踪需要。2) 摩擦力作为伺服机构固有非线性特性的一种, 其有界、光滑等特点, 使得本文假设的前提存在, 为 LS-SVM 自适应控制器设计提供可能。3) LS-SVM 将 SVM 中的不等式约束条件转换成等式约束条件进行求解, 缩减了计算的复杂度, 完全能够使用计算机的在线实现。目前文中控制器设计方法已成功运用于某型某机载天线伺服机构的控制系统, 具有实用意义。重复试验结果表明该方法正确、可靠。

参考文献:

- [1] Kima H M, Park S H. Precise friction control for the nonlinear friction system using the friction state observer and sliding mode control with recurrent fuzzy neural networks[J]. Mechatronics, 2009, 19(2): 805–8152.
- [2] Wai R J, Chang J M. Intelligent control of induction servo motor drive via wavelet neural network[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(1): 67–76.
- [3] Wang D, Li C. Self-Adaptive dynamic matrix control for high-speed machining servo control[J]. Journal of Machine Learning Research, 2003(21):733–738.
- [4] 田大鹏, 吴云洁. 高精度电机伺服系统控制综合方法[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(7): 66–74.
TIAN Da-peng, WU Yun-jie. Synthesis methods of high precision motor servo system control[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(7): 66–74.
- [5] 刘国海, 张懿. 基于自抗扰控制器的两电机变频调速系统最小二乘支持向量机逆控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 138–145.
LIU Guo-hai, ZHANG Yi. Least squares support vector machines inverse control for two-motor variable frequency speed-regulating system based on active disturbances rejection[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 138–145.
- [6] DONG Jia-xiong, Krzyzak A, Suen C Y. Fast SVM training algorithm with decomposition on very large data sets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(4): 603–618.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>