doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2022.05.002

二维桥式吊车自适应神经网络消摆控制①

何熊熊②　王逸文　朱铮旸　陈　强③

(浙江工业大学信息工程学院　杭州 310023)

摘　要　针对含有未建模动态和不确定参数的二维桥式吊车系统,提出一种自适应神经网络消摆控制方法。首先,基于台车位移和摆角误差设计滑模变量,使得当滑模变量收敛至零时,各误差变量均能够收敛至零点,从而保证台车精确位置控制的同时消除负载摆动。其次,设计自适应神经网络控制器,利用神经网络逼近包含未建模动态和不确定参数在内的非线性不确定性,降低对系统模型的依赖性以及避免对其线性化处理。与基于模型的吊车控制方法相比,本文所提方法不依赖系统精确模型,且兼具滑模控制的鲁棒性。最后,通过二维桥式吊车实验对比验证了所提方法的有效性。

关键词　二维桥式吊车;自适应控制;滑模控制;神经网络;消摆控制

0　引　言

吊车是用来运输超出人类自身能力范围的负载的设备,被广泛用于不同的环境作业,例如建筑工地、仓库、码头等[1]。其中,桥式吊车是一类典型的欠驱动机械系统,实际运行中受各种外界干扰的影响,其负载容易发生大幅摆动,导致系统工作效率降低,甚至带来一定的安全隐患。因此,如何实现吊车的消摆控制和台车的快速、准确定位,是吊车控制器设计中的热点问题之一。

近年来,国内外学者提出多种控制方法实现欠驱动桥式吊车的有效消摆控制,主要分为开环控制和闭环控制。其中,开环控制代表性方法有输入整形[2]、轨迹规划[3-5]等。相比开环控制系统,闭环控制鲁棒性更强,适用于室外作业的吊车控制器设计。常见的代表性闭环控制的方法主要包括比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)控制[6-7]、最优控制[8-9]、滑模控制[10-12]等。文献[13]提出一种新的滑模控制方法,通过对系统模型进行变换并构建新的滑模面,保证系统状态沿滑模面收敛到零。文献[14]同时考虑系统匹配和非匹配干扰,设计扰动观测器估计和补偿未知干扰,并设计滑模控制器提高系统鲁棒性。

文献[15]针对一类欠驱动吊车系统,通过设计滑模微分器保证控制输入信号及其导数的连续性,从而减小控制输入的抖振问题。文献[16]针对二维桥式吊车提出一种基于无源性方法通过构造具有所需阻尼特性的新储能函数引入耦合耗散信号以显著降低负载摆动,并基于 Lyapunov 稳定性和 LaSalle 不变性原理设计控制器并证明闭环系统的稳定性。

上述文献尽管可以实现桥式吊车的有效消摆控制,但控制器设计多依赖于较为精确的吊车系统模型。在实际系统中,由于存在未建模的动力学动态以及参数不确定性,吊车实际系统与其理论模型之间通常存在一定的差异。文献[17]从系统无源性的角度出发,针对二维吊车系统中存在未知质量、未知绳长及摩擦力等问题,设计相应的自适应控制器,但要求未知不确定参数满足线性参数化条件。为提高模型不确定系统的控制性能,模糊控制[18-19]、神

---

① 国家自然科学基金面上项目(61973274,61873239)资助。
② 男,1965 年生,博士,教授;研究方向:欠驱动系统控制理论及应用;E-mail: hxx@zjut.edu.cn。
③ 通信作者:E-mail: sdnjchq@zjut.edu.cn。
(收稿日期:2020-12-22)

经网络[20-22]等人工智能策略被广泛应用于控制器设计中。文献[23]针对不确定二维桥式吊车系统,利用多个误差变量构造滑模面和设计自适应模糊滑模控制,并利用模糊机制改变滑模面的梯度。文献[24]将 PID 控制与神经网络补偿相结合设计吊车控制器,不仅能减小负载摆幅,还可补偿重力、摩擦力等未知因素的影响。文献[25]针对二维桥式吊车,利用神经网络逼近滑模控制器中各个参数,实现台车精确定位以及负载摆动有效消除。然而,现有的吊车神经网络控制方法一般需要在控制器设计时将系统模型在平衡点处进行线性化处理,导致系统在偏离平衡点时,负载需要多次震荡才能消除摆动。

基于上述讨论,本文提出一种不依赖于精确模型的自适应神经网络滑模控制策略。通过模型变换,构造包含台车位移和摆角的误差及导数的滑模面,并设计相应的滑模控制器和自适应律,保证当滑模变量收敛至平衡点时,各误差信号均收敛到零点,从而达到台车位置控制和负载消摆的目的。此外,利用神经网络逼近吊车系统中的非线性不确定,使得控制器设计中无需台车、负载质量信息或对系统模型进行线性化处理。最后,利用 Lyapunov 稳定性理论分析闭环系统信号的有界性和误差收敛性,并搭建二维桥式吊车实验平台验证本文所提方法的有效性。

1 问题描述

二维桥式吊车模型如图 1 所示,其动态特性可用如下方程描述[13]:

$$(M+m)\ddot{x}+ml\ddot{\theta}\cos\theta-ml\dot{\theta}^2\sin\theta=u+d \tag{1}$$

$$ml^2\ddot{\theta}+ml\cos\theta\ddot{x}+mgl\sin\theta=0 \tag{2}$$

其中, x 表示小车位移, θ 表示摆角幅度, $\dot{\theta}$ 表示摆角速度, $\ddot{\theta}$ 表示摆角加速度, M 表示小车质量, m 表示负载的质量, u 表示控制输入, d 表示包括电磁干扰和风力干扰等在内的有界干扰,满足 $|d(t)|<\bar{d}$, 其中 $\bar{d}>0$ 表示干扰上界。

定义吊车的期望轨迹 x_d, 其具体表达式为 $x_d=0.605(1-e^{-0.05t^3})$。为便于控制器设计,进行以下模型变换,定义下列状态变量:

$$\begin{cases}\eta_1=x-x_d+l\ln\left(\dfrac{1}{\cos\theta}+\tan\theta\right)\\ \eta_2=\dot{x}-\dot{x}_d+\dfrac{l}{\cos\theta}\dot{\theta}\\ \eta_3=-g\tan\theta\\ \eta_4=-\dfrac{g}{\cos^2\theta}\dot{\theta}\end{cases} \tag{3}$$

对式(3)求导可得

$$\begin{cases}\dot{\eta}_1=\eta_2\\ \dot{\eta}_2=\eta_3-p_1(\eta_3)\eta_4^2-\ddot{x}_d\\ \dot{\eta}_3=\eta_4\\ \dot{\eta}_4=a+b(u+d)\end{cases} \tag{4}$$

其中,

$$a=p_2(\eta_3)+p_3(\eta_3)\eta_4^2,\ b=\frac{g}{(Ml+ml\sin^2\theta)\cos\theta},$$

$$p_1(\eta_3)=\frac{l\eta_3}{(g^2+\eta_3^2)^{\frac{3}{2}}},$$

$$p_2(\eta_3)=\frac{(M+m)g^2\tan\theta}{(Ml+ml\sin^2\theta)\cos\theta},$$

$$p_3(\eta_3)=\frac{m\sin\theta\cos^3\theta}{(M+m\sin^2\theta)^2g}-\frac{2\sin\theta\cos\theta}{g} \tag{5}$$

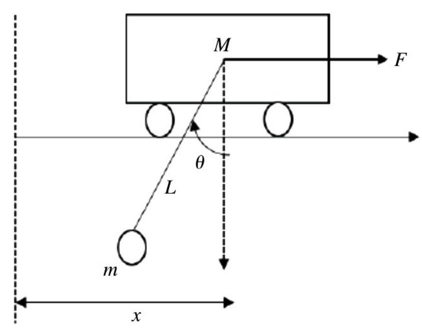

图 1 二维桥式吊车模型

本文控制目标是针对式(1)和(2)所示的二维桥式吊车系统,设计自适应神经网络控制器,使得式(3)中状态变量 η_1、η_2、η_3 和 η_4 最终均趋于零点。

注 1 在实际状况中,由于绳子质量远小于台车质量,绳子的韧性可以忽略。因此,在描述二维桥式吊车时可以将绳视为刚性。此外,负载被视为质点并且它的质量是均匀的。

注 2 在二维桥式吊车中,负载摆角 $\theta(t)$ 通常在 $(-\pi/3,\pi/3)$ 内。结合式(4)可知, b 存在上界

和下界，即 $0 < b_0 \leqslant b \leqslant b_1$，其中 b_1 和 b_0 分别表示其上、下界值。

2　神经网络消摆控制

二维桥式吊车神经网络控制结构图如图 2 所示，其中控制器采用滑模控制，神经网络用于估计包含未建模动态和不确定参数在内的非线性不确定性。

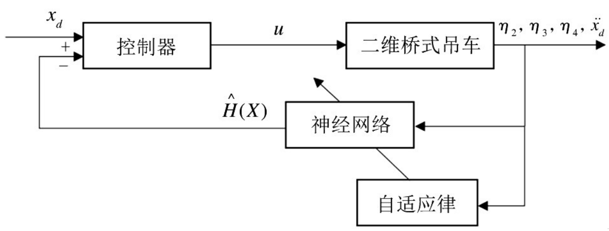

图 2　二维桥式吊车神经网络控制结构图

2.1　控制器设计

本文设计的滑模面形式如下：

$$\sigma = \lambda_1\eta_1 + \lambda_2\eta_2 + \lambda_3\eta_3 + \eta_4 \tag{6}$$

对 σ 求导可得：

$$\begin{aligned}\dot{\sigma} &= \lambda_1\dot{\eta}_1 + \lambda_2\dot{\eta}_2 + \lambda_3\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4\\ &= \tilde{n}(t) + b(u + d)\end{aligned}$$

其中，$\tilde{n}(t) = \lambda_1\eta_2 + \lambda_2(\eta_3 - p_1(\eta_3)\eta_4^2 - \ddot{x}_d) + \lambda_3\eta_4 + a$。

由于神经网络能够逼近任意连续函数，因此利用 $H(X)$ 来逼近非线性函数 $\tilde{n}(t)$。其中，$H(\boldsymbol{X})$ 表达式为

$$H(\boldsymbol{X}) = \boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\phi(\boldsymbol{X}) + \varepsilon \tag{8}$$

$\boldsymbol{X} = [\eta_2, \eta_3, \eta_4, \ddot{x}_d]^{\mathrm{T}} \in R^4$ 表示神经网络输入向量，$\phi(\boldsymbol{X})$ 表示神经网络（neural network，NN）基函数，具体表达式为

$$\phi(\boldsymbol{X}) = \frac{h}{c + e^{-\frac{X}{m}}} + n \tag{9}$$

其中，$\boldsymbol{W}^* = [w_1, w_2, w_3, w_4]^{\mathrm{T}} \in R^N$ 和 ε 分别表示理想有界的权值矩阵和神经网络逼近误差，h、c、m、n 为常数，且 $\| \boldsymbol{W}^* \| \leqslant W_N$，$| \varepsilon | \leqslant \varepsilon_N$，$W_N$ 为 $\| \boldsymbol{W}^* \|$ 的上界，ε_N 为 ε 的上界，$W_N > 0$，$\varepsilon_N > 0$。为了后续设计中表达方便，将 $\phi(\boldsymbol{X})$ 记为 ϕ。

结合式(6)～(10)，设计控制器为

$$u = -\hat{\theta}\sigma\phi^{\mathrm{T}}\phi - k_1\sigma - k_2\mathrm{sgn}(\sigma) \tag{10}$$

其中，$\hat{\theta}$ 表示 $\theta^* = \| \boldsymbol{W}^* \|^2 / b_0$ 的估计值，其自适应更新律设计为

$$\dot{\hat{\theta}} = r(\sigma^2\phi^{\mathrm{T}}\phi - \beta\hat{\theta})$$

其中，$r > 0$，$\beta > 0$。

注 3　控制器式(9)中的符号函数 sgn(·)会带来一定的控制器抖振问题，因此在实验中将采用以下连续函数[26]代替 sgn 函数。

$$\varpi(s) = \begin{cases}\mathrm{sgn}(s) & | s | \geqslant \iota\\ \dfrac{2s}{| s | + \iota} & | s | < \iota\end{cases}$$

其中，$\iota > 0$ 表示边界层厚度。

2.2　收敛性分析

定理 1　针对式(1)和(2)所示的二维桥式吊车系统，选择滑模面式(6)，且设置控制律式(10)中的参数满足 $k_1 > 0, k_2 \geqslant \bar{d} + (\| \boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\phi(\boldsymbol{X}) \|_F + | \varepsilon_N |)/b_0$，则当 $t \to \infty$ 时，滑模变量 σ 收敛至滑模面 $\sigma = 0$。

证明　由式(9)可得：

$$0 < \phi_i(\boldsymbol{X}) < L_0 \quad i = 1, \cdots, L_1 \tag{12}$$

其中，$L_0 = \max\left\{ \left| \dfrac{h}{c} + n \right|, \left| \dfrac{h}{c+1} + n \right| \right\}$。因此 $\| \phi_i(\boldsymbol{X}) \|$ 的界可以计算为 $\| \phi_i(\boldsymbol{X}) \| \leqslant L_0\sqrt{L_1}$。

构造如下 Lyapunov 函数：

$$V_1(t) = \frac{1}{2b_0}\sigma^2 \tag{13}$$

对式(13)求导，并将式(7)和式(10)代入可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t) = {} & \frac{1}{b_0}\sigma[b(\eta)(-\hat{\theta}\sigma\phi^{\mathrm{T}}\phi - k_1\sigma - k_2\mathrm{sgn}(\sigma)\\ & + d) + \boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\phi(x) + \varepsilon]\end{aligned} \tag{14}$$

根据 $\dfrac{b(\eta)}{b_0} \geqslant 1$，式(14)可化简为

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t) \leqslant {} & -\hat{\theta}\sigma^2\phi^{\mathrm{T}}\phi - k_1\sigma^2 - | \sigma | (k_2 - | d |)\\ & + \frac{1}{b_0}\| \boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\phi(X) \|_F \cdot | \sigma | + \frac{1}{b_0}| \varepsilon | \cdot | \sigma |\\ = {} & -\hat{\theta}\sigma^2\phi^{\mathrm{T}}\phi - k_1\sigma^2 - | \sigma | (k_2 - | d |\\ & - \frac{1}{b_0}\| \boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\phi(X) \|_F - \frac{1}{b_0}| \varepsilon |)\end{aligned} \tag{15}$$

由于 $d(t)<|\bar{d}|$、$\|W^{*\mathrm{T}}\phi(X)\|_F$、$\varepsilon$ 均有界,因此选择 $k_2 \geqslant \bar{d}+(\|W^{*\mathrm{T}}\phi(X)\|_F+|\varepsilon_N|)/b_0$,将不等式代入到式(15)可得:

$$\dot{V}_1(t) \leqslant -\hat{\theta}\sigma^2\phi^{\mathrm{T}}\phi - k_1\sigma^2 \leqslant 0 \tag{16}$$

当 $\dot{V}_1(t)<0$ 时,由于 $V_1(t)=0.5\sigma^2/b_0 \geqslant 0$,因此 V_1 最终收敛于0,且 σ 收敛至零点。当 $\dot{V}_1(t)=0$ 时 $\dot{V}_1(t) \leqslant -\hat{\theta}\sigma^2\phi^{\mathrm{T}}\phi - k_1\sigma^2$,因此 $\hat{\theta}\sigma^2\phi^{\mathrm{T}}\phi = k_1\sigma^2=0$。综上所述,当 $t\rightarrow\infty$ 时,滑模变量 σ 收敛至滑模面 $\sigma=0$。证毕。

定理2 当滑模变量 σ 收敛至滑模面 $\sigma=0$ 时,各个状态变量 η_1、η_2、η_3、η_4 最终均趋于零点。

证明 当滑模变量 σ 收敛至滑模面 $\sigma=0$ 时,根据式(6)可得:

$$\eta_4 = -\lambda_1\eta_1 - \lambda_2\eta_2 - \lambda_3\eta_3 \tag{17}$$

将式(17)代入式(4)可得:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = \eta_2 \\ \dot{\eta}_2 = \eta_3 - p_1(\eta_3)\eta_4^2 - \ddot{x}_d \\ \dot{\eta}_3 = -\lambda_1\eta_1 - \lambda_2\eta_2 - \lambda_3\eta_3 \end{cases} \tag{18}$$

为便于后续分析,将式(18)改写为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_u = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\eta}_u + \boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\zeta} \tag{19}$$

其中,$\boldsymbol{\eta}_u = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\lambda_1 & -\lambda_2 & -\lambda_3 \end{pmatrix}$,$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -p_1(\eta_3)\eta_4^2 \\ 0 \end{bmatrix}$,$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\ddot{x}_d \\ 0 \end{bmatrix}$。

对 $p_1(\eta_3) = \dfrac{l\eta_3}{(g^2+\eta_3^2)^{1.5}}$ 求导可得:

$$\frac{\mathrm{d}p_1(\eta_3)}{\mathrm{d}\eta_3} = \frac{l(g^2+\eta_1^2)^{\frac{1}{2}}(g^2-2\eta_3^2)}{(g^2+\eta_3^2)^3} \tag{20}$$

令 $\mathrm{d}p_1(\eta_3)/\mathrm{d}\eta_3=0$,则 $p_1(\eta_3)$ 在 $\pm(\sqrt{2}/2)g$ 处取得全局极值。则 $|p_1(\eta_3)| \leqslant \sqrt{2}gl/(2\times(1.5g^2)^{\frac{3}{2}}) = 0.004l$,将不等式两边乘 η_4^2 可得:

$$|p_1(\eta_3)|\eta_4^2 \leqslant 0.004l\cdot\eta_4^2 \tag{21}$$

根据矩阵理论,存在一个可逆矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}$,使得

$$\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\Gamma} = \boldsymbol{J} \tag{22}$$

其中,$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} -k & 1 & 0 \\ 0 & -k & 1 \\ 0 & 0 & -k \end{bmatrix}$,$k$ 表示 $\boldsymbol{A}$ 的特征值。不失一般性,选择 $\lambda_1=k^3$,$\lambda_2=3k^2$,$\lambda_3=3k$,可逆矩阵表示为

$$\boldsymbol{\Gamma}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & \dfrac{2k+1}{k^2} \\ -(k^2+k) & -(2k+3) & -\dfrac{k+2}{k} \\ k^2 & 2k & 1 \end{bmatrix} \tag{23}$$

根据式(19)、式(21)和式(23)可得:

$$\begin{aligned} \|\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\xi}\| &\leqslant \sqrt{8k^2+12k+18}\cdot|p(\eta_3)|\cdot\eta_4^2 \\ &\leqslant \sqrt{8k^2+12k+18}\cdot 0.004l\cdot\eta_4^2 \\ &= \beta_1\eta_4^2 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\|\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\zeta}\| \leqslant \sqrt{8k^2+12k+18}\cdot|\ddot{x}_d| = \beta_2|\ddot{x}_d| \tag{25}$$

其中,$\beta_1 = 0.004l\sqrt{8k^2+12k+18}$,$\beta_2 = \sqrt{8k^2+12k+18}$。

定义式(26)所示的新的状态变量:

$$\boldsymbol{\psi} = \boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\eta}_u \tag{26}$$

根据式(26)可得:

$$\boldsymbol{\eta}_u = \boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{\psi} \tag{27}$$

$$\|\boldsymbol{\eta}_u\| \leqslant \|\boldsymbol{\Gamma}\|\cdot\|\boldsymbol{\psi}\| \tag{28}$$

式(17)经过变换可得:

$$\begin{aligned} \eta_4 &= -[\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3]\cdot\boldsymbol{\eta}_u = -[\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3]\cdot\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{\psi} \\ &= \boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{\psi} \end{aligned}$$

其中,$\boldsymbol{\Lambda} = -[\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3]\cdot\boldsymbol{\Gamma}$。则 $\eta_4^2 \leqslant \|\boldsymbol{\Lambda}\|^2\cdot\|\boldsymbol{\psi}\|^2$,将不等式代入式(24),有

$$\|\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\xi}\| \leqslant \beta_1\|\boldsymbol{\Lambda}\|^2\cdot\|\boldsymbol{\psi}\|^2 \tag{30}$$

对式(26)求导可得:

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \boldsymbol{\Gamma}^{-1}\dot{\boldsymbol{\eta}}_u \tag{31}$$

将式(19)代入式(31)中可得:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\psi}} &= \boldsymbol{\Gamma}^{-1}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{\eta}_u + \boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\zeta}) \\ &= \boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\eta}_u + \boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\zeta} \end{aligned} \tag{32}$$

将式(22)和式(27)代入式(32)可得:

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \boldsymbol{J}\boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\zeta} \tag{33}$$

定义如下 Lyapunov 函数：

$$V_2(t) = \boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi} \tag{34}$$

对式(34)求导可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_2(t) &= \boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{J})\boldsymbol{\psi} + 2\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\xi} + 2\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\zeta} \\ &= -\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\psi} + 2\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\xi} + 2\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\boldsymbol{\zeta}\end{aligned} \tag{35}$$

其中，$\boldsymbol{Q} = -(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{J})$，且 $\boldsymbol{Q}$ 特征值为 $2k$，$2k \pm \sqrt{2}$。令 $k > \sqrt{2}/2$，则 Q 的每一个特征值都为正值，且 $\boldsymbol{Q}$ 的最小特征值为 $\lambda_m = 2k - \sqrt{2}$。因此 $\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\psi} \geqslant \lambda_m \|\boldsymbol{\psi}\|^2$，将不等式代入式(35)可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_2(t) \leqslant &-\lambda_m \|\boldsymbol{\psi}\|^2 + 2\|\boldsymbol{\psi}\| \cdot \|\boldsymbol{\Gamma}^{-1} \cdot \boldsymbol{\xi}\| \\ &+ 2\|\boldsymbol{\psi}\| \cdot \|\boldsymbol{\Gamma}^{-1} \cdot \boldsymbol{\zeta}\|\end{aligned} \tag{36}$$

将式(24)和式(30)代入式(36)可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_2(t) \leqslant &-\lambda_m \|\boldsymbol{\psi}\|^2 + 2\beta_1 \|\boldsymbol{\Lambda}\|^2 \|\boldsymbol{\psi}\|^3 \\ &+ 2\beta_2 \|\boldsymbol{\psi}\| \, |\ddot{x}_d| \\ =& \|\boldsymbol{\psi}\| (R_1 \|\boldsymbol{\psi}\|^2 - R_0 \|\boldsymbol{\psi}\| + R_2) \\ =& \rho \|\boldsymbol{\psi}\|\end{aligned} \tag{37}$$

其中，$R_0 = \lambda_m$，$R_1 = 2\beta_1 \cdot \|\boldsymbol{\Lambda}\|^2$，$R_2 = 2\beta_2 |\ddot{x}_d|$，$\rho = R_1 \|\boldsymbol{\psi}\|^2 - R_0 \|\boldsymbol{\psi}\| + R_2$。

由于 $R_0 > 0$、$R_1 > 0$，则存在一个区间使得 $\rho < 0$。该区间通过计算可得：

$$\|\psi(t)\| \in \left(\frac{R_0 - \sqrt{\Delta}}{2R_1}, \frac{R_0 + \sqrt{\Delta}}{2R_1}\right) \tag{38}$$

其中，

$$\Delta = R_0^2 - 4R_1R_2 > 0 \tag{39}$$

由上述可知，当 $\|\boldsymbol{\psi}\|$ 在该区间内时，$R_1\|\boldsymbol{\psi}\|^2 - R_0\|\boldsymbol{\psi}\| + R_2 < 0$，根据式(34)和式(37)可知，$V_2(t) \geqslant 0$，$\dot{V}_2(t) \leqslant 0$，因此 V_2 会减小，从而 $\|\psi(t)\|$ 减小，最终 $\|\boldsymbol{\psi}\| = (R_0 - \sqrt{\Delta})/2R_1$。当 $\|\psi(t)\|$ 在 $[0, (R_0 - \sqrt{\Delta})/2R_1)$ 时，同理可得，最终 $\|\boldsymbol{\psi}\| = (R_0 - \sqrt{\Delta})/2R_1$。

当 $t = 0$ 时，由式(19)和式(26)可得：

$$\begin{aligned}\|\psi(0)\| &= \|\boldsymbol{\Gamma}^{-1} \cdot \eta_u(0)\| \\ &= \|\boldsymbol{\Gamma}^{-1} \cdot x_d(0)\| = 0\end{aligned} \tag{40}$$

综上所述，当 $\|\boldsymbol{\psi}\|$ 初值在区间 $[0, R_0/2R_1)$ 时有

$$\lim_{t\to\infty} \|\boldsymbol{\psi}\| = \frac{R_0 - \sqrt{\Delta}}{2R_1} \tag{41}$$

由于 $\ddot{x}_d = 0.18te^{-0.05t^3} - 0.0136t^4e^{-0.05t^3}$，因此当 $t \to \infty$ 时，$\ddot{x}_d \to 0$，根据式(36)可知，$R_2 \to 0$，且 $\Delta \to R_0^2$。因此根据式(41)可得：

$$\lim_{t\to\infty} \|\boldsymbol{\psi}\| = \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2}}{2R_1} = 0 \tag{42}$$

由式(42)可知，$\lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{\psi} = 0$，因此根据式(27)可得：

$$\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{\eta}_u = \lim_{t\to\infty}\boldsymbol{\Gamma\psi} = 0 \tag{43}$$

由于 $\boldsymbol{\eta}_u = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3]^{\mathrm{T}}$，因此 η_1、η_2、η_3 将趋于0，再根据式(17)可知，η_4 将趋于0。证毕。

3　实验分析

为进一步验证本文所提方法的有效性，搭建二维桥式吊车控制系统实验平台，并与不同的控制方法进行对比。其中，方法 1 为本文所提出的自适应神经网络控制方法，方法 2 为文献[15]所提出的滑模控制方法，其中滑模面和控制器分别设计为

$$s = \lambda_1\eta_1 + \lambda_2\eta_2 + \lambda_3\eta_3 + \eta_4 \tag{44}$$

$$\begin{aligned}u = &-\frac{a(\eta) + \lambda_1\eta_2 + \lambda_2(\eta_3 - p_1(\eta_3)\eta_4^2 - \ddot{x}_d) + \lambda_3\eta_4}{b(\eta)} \\ &-\frac{k_1}{b(\eta)}\sigma - k_2\,\mathrm{sgn}(\sigma)\end{aligned} \tag{45}$$

实验平台主要包括个人电脑、伺服驱动器、运动控制板和角度编码器，具体设备如图 3 所示。台车的位移由嵌入在伺服电机内的编码器测量，而负载摆角由固定在小车下方的编码器捕获。控制器使用经过低通滤波器后的测量数据在线估算台车以及摆

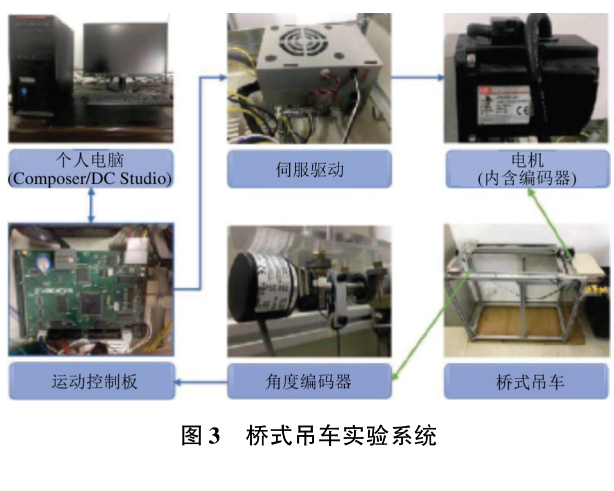

图 3　桥式吊车实验系统

角速度。控制器选用 DSP28335 芯片,开关频率设置为 50 kHZ,并采用 CCS 编译工具编写相关软件程序。

桥式吊车平台的物理参数为 $m = 1$ kg, $M = 1.7$ kg, $l = 0.8$ m, $g = 9.8$ m/s^2。台车参考轨迹为 $x_d = 0.605(1 - e^{-0.05t^3})$。在实验中,其他相关参数如表 1 所示。

表 1　实验控制参数

控制方法	控制参数
方法 1	$k_1 = 1.1$, $k_2 = 0.01$, $h = 5$, $c = 1$, $p = 0.1$ $n = -2.5$, $\lambda_1 = 27$, $\lambda_2 = 27$, $\lambda_3 = 9$
方法 2	$k_1 = 1.5$, $k_2 = 0.01$, $\lambda_1 = 27$, $\lambda_2 = 27$, $\lambda_3 = 9$

实验结果如图 4 ~ 图 7 所示,其中图 4 描述了台车在方法 1 和方法 2 的作用下的运行轨迹。由图 4 可以看出,在方法 1 和方法 2 控制下系统稳态时均存在一定的稳态误差,但方法 1 控制下的稳态误差远小于方法 2,且方法 1 更早到达系统稳态。图 5 给出了不同控制方法下负载摆角对比。由图 5 可以看出,方法 1 和方法 2 的最大负摆角为 1.08 ° 和 1.18 °,方法 1 和方法 2 的最大正摆角分别为 0.99 ° 和 1.08 °。因此,方法 1 具有更好的瞬态性能。

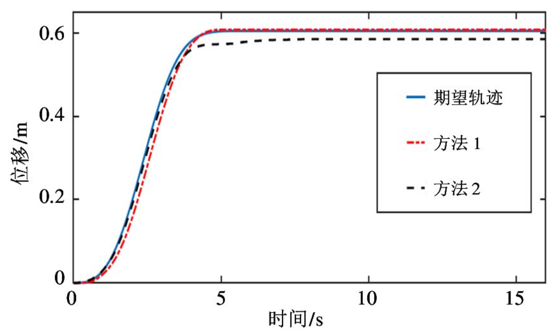

图 4　台车位移对比

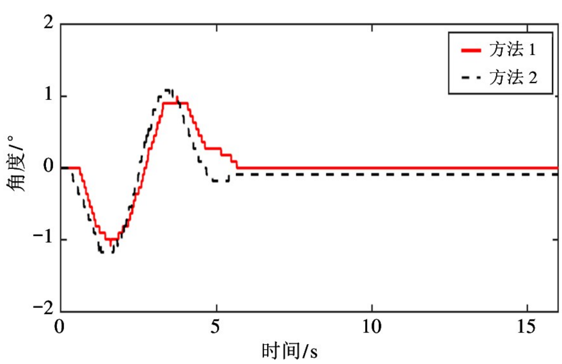

图 5　负载摆角对比

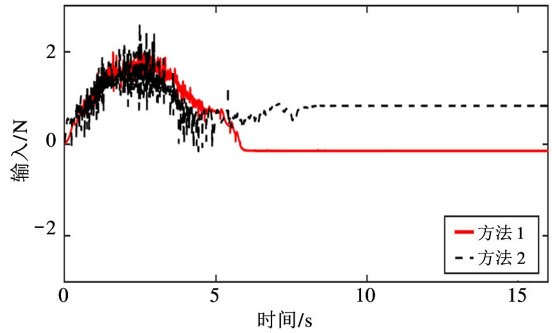

图 6　控制输入对比

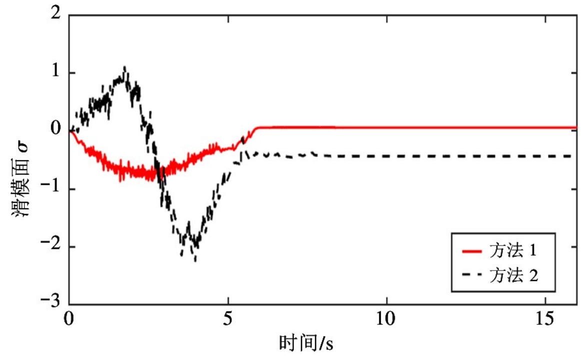

图 7　滑模变量 σ 对比

图 6 给出了方法 1 和方法 2 的控制输入信号。从图 6 中可以看出,方法 1 的输入信号比方法 2 幅值更小,且能较早趋于稳态。图 7 给出了在方法 1 和方法 2 作用下系统滑模面的值。从图 7 中可以看出,随着系统的运行,方法 1 滑模变量 σ 的值能够更快收敛至零点附近。表 2 给出了两种方法具体的实验性能指标。

表 2　实验性能指标

性能指标	方法 1	方法 2
到达时间/s	5.0	7.0
稳态误差/mm	2.233	20.023
残余摆角/°	0	0
最大正摆角/°	0.99	1.08
最大负摆角/°	1.08	1.17

从表 2 中可以看出,方法 1 比方法 2 在更快时间内到达期望点,且方法 1 具有更小的稳态误差,这

与图 4 描述的结果一致,即方法 1 能够提高系统稳态性能。方法 1 和方法 2 最终均未产生残余摆角,但在运行过程中,方法 1 的最大正摆角和最大负摆角均小于方法 2。结合图 5 与表 2 可知,方法 1 能够提高系统的动态性能。

4 结 论

本文针对二维桥式吊车系统的台车精确定位与负载摆动消除等问题,提出一种自适应神经网络消摆控制方法。通过神经网络逼近系统中的非线性函数,减少控制器对系统模型信息的依赖。同时,通过构造包含台车位置与负载摆角误差在内的滑模变量,将控制器目标转换为保证滑模变量收敛至平衡点,从而使得台车到达期望位置的同时能够消除负载摆动。最后,在实际二维桥式吊车平台上进行了实验验证,实验结果表明本文所提方法的有效性。

参考文献

[1] ABDEL-RAHMAN E M, NAYFEH A H. Dynamics and control of cranes: a review[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2003, 9(7): 863-908

[2] SINGHOSE W, KIM D, KENISON M. Input shaping control of double-pendulum bridge crane oscillations[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2008, 130(3):424-424

[3] FANG Y, MA B, WANG P, et al. A motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 20(1): 241-248

[4] SUN N, FANG Y, ZHANG X, et al. Transportation task-oriented trajectory planning for underactuated overhead cranes using geometric analysis[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2012, 6(10): 1410-1423

[5] SUN N, FANG Y. An efficient online trajectory generating method for underactuated crane systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 204(11): 1653-1663

[6] JAAFAR H I, MOHAMED Z, ABIDIN A F Z, et al. Performance analysis for a gantry crane system (GCS) using priority-based fitness scheme in binary particle swarm optimization[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 903(2): 285-290

[7] JAAFAR H I, HUSSIEN Y S. Optimal tuning of PID + PD controller by PFS for gantry crane system[C]//2015 10th Asian Control Conference (ASCC), Kota Kinabalu, Malaysia, 2015: 1-6

[8] WU Z, XIA X, ZHU B. Model predictive control for improving operational efficiency of overhead cranes[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 79(4):2639-2657

[9] CHEN H, FANG Y, SUN N. A swing constraint guaranteed MPC algorithm for underactuated overhead cranes [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(5): 2543-2555

[10] TUAN L A, KIM J J, LEE S G, et al. Second-order sliding mode control of a 3D overhead crane with uncertain system parameters[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(5): 811-819

[11] 于涛,赵伟,杨昆. 欠驱动桥式吊车的自适应滑模变结构控制[J]. 工业控制计算机,2020,33(5):136-138

[12] 于涛,赵伟,杨昆. 一类欠驱动系统的滑模变结构控制[J]. 控制工程,2019,26(10):1824-1829

[13] SUN N, FANG Y, CHEN H. A new antiswing control method for underactuated cranes with unmodeled uncertainties theoretical design and hardware experiments[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(1):453-465

[14] LU B, FANG Y, SUN N. Sliding mode control for underactuated overhead cranes suffering from both matched and unmatched disturbances[J]. *Mechatronics*, 2017, 47(9): 116-125

[15] LU B, FANG Y, SUN N. Continuous sliding mode control strategy for a class of nonlinear underactuated systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(10): 3471-3478

[16] ZHANG S Z, HE X, ZHU H, et al. Partially saturated coupled-dissipation control for underactuated overhead cranes [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 136(1): 1-8

[17] 马博军,方勇纯,王宇韬,等. 欠驱动桥式吊车系统自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1105-1109

[18] 刘友才,吴怀宇,陈洋. 基于自适应模糊 PID 控制的四旋翼飞行器的自主跟踪[J]. 高技术通讯, 2017,27

(2):168-176

[19] TENG Q, XU D, YANG W, et al. Neural network-based integral sliding mode backstepping control for virtual synchronous generators[J]. *Energy Reports*, 2021,7:1-9

[20] 韩红桂,林征来,乔俊飞. 基于 UKF 的增长型模糊神经网络设计[J]. 控制与决策, 2017, 32(12):2169-2175

[21] 罗文辉,张宪文,徐进钊,等. 基于模糊滑模控制算法的欠驱动控制器研究[J]. 机电工程技术, 2020,49(10):127-129

[22] 何文凯,王江北,陈萌. 绳索牵引式并联机器人神经网络 PID 控制[J]. 高技术通讯, 2018, 28(7):627-632

[23] LIU D, YI J, ZHAO D, et al. Adaptive sliding mode fuzzy control for a two-dimensional overhead crane[J]. *Mechatronics*, 2005, 15(5): 505-522

[24] PANUNCIO F, YU W, LI X. Stable neural PID anti-swing control for an overhead crane[C]//2013 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Hyderabad, India, 2013: 53-58

[25] LEE L H, HUANG P H, et al. Parallel neural network combined with sliding mode control in overhead crane control system[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2014, 20(5): 749-760

[26] [美]SLOTINE J J E, LI W P 著. 陈代展等,译. 应用非线性控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2006

Adaptive neural network anti-swing control for two-dimension overhead crane

HE Xiongxiong, WANG Yiwen, ZHU Zhengyang, CHEN Qiang

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

An adaptive neural network anti-swing control scheme is proposed for a two-dimensional overhead crane system with unmodeled dynamics and uncertain parameters. First of all, a sliding mode variable is designed based on the trolley displacement and swing angle error. When the sliding mode variable converges to zero, each error variable can also converge to zero, such that the accurate control of the trolley position and elimination of load swing can be guaranteed simultaneously. Secondly, an adaptive neural network controller is presented, and the nonlinear uncertainties including unmodeled dynamics and uncertain parameters are approximated by using neural networks. With the proposed controller, the dependence on the system model is reduced and the linearization of the model can also be avoied. Compared with the model-based crane control schemes, the proposed method is independent of the accurate system model, and has the robustness property of sliding mode control. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by a two-dimensional overhead crane experiment.

Key words: two-dimension overhead crane, adaptive control, sliding mode control, neural network, anti-swing control