

基于粒子群优化的弓网预测控制^{*}

赵伟良 周宁[†] 孙翌 程尧 姜杭艳 张卫华

(西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室,成都 610031)

摘要 为了应对受电弓与接触网系统在列车高速运行情况下剧烈振动的问题,提高弓网的受流质量,本文提出了一种基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)和扰动前馈补偿的复合控制器来降低弓网接触力波动。首先在线性化弓网系统的基础上设计了基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的模型预测控制器,实现对弓网接触力的波动优化;其次构造了广义扩张状态观测器(Generalized Extended State Observer, GESO),对于弓网系统中不可测量的状态进行估计,并对模型不确定性问题进行前馈补偿;最后,仿真验证所设计的控制器能够在考虑模型不确定性的条件下有效地降低接触力的波动。

关键词 受电弓主动控制, 模型预测控制, 状态估计, 前馈补偿, 粒子群优化

中图分类号:U264.34

文献标志码:A

Predictive Control of Pantograph-Catenary Based on Particle Swarm Optimization^{*}

Zhao Weiliang Zhou Ning[†] Sun Yi Cheng Yao Jiang Hangyan Zhang Weihua

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract In order to deal with the problem of severe vibration of pantograph and catenary system under high-speed train operation and improve the current collection quality of pantograph-catenary, a composite controller based on model predictive control (MPC) and disturbance feedforward compensation is proposed to reduce the fluctuation of pantograph-catenary contact force. Firstly, based on the linearized pantograph-catenary system, a model predictive controller based on particle swarm optimization (PSO) is designed to optimize the fluctuation of pantograph-catenary contact force. Secondly, a generalized extended state observer (GESO) is constructed to estimate the unmeasurable state in the pantograph-catenary system and compensate the model uncertainty. Finally, the simulation verifies that the designed controller can effectively reduce the fluctuation of the contact force under the condition of considering the model uncertainty.

Key words pantograph active control, model predictive control, state estimation, feedforward compensation, particle swarm optimization

2024-01-10 收到第 1 稿,2024-01-28 收到修改稿。

^{*} 国家自然科学基金项目(52072319),国家重点研发计划项目(2022YFB4301201-03),西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室自主课题(2023TPL-T05), National Natural Science Foundation of China(52072319), National Key Research and Development Program of China(2022YFB4301201-03), Independent Project of State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System(2023TPL-T05).

[†] 通信作者 E-mail:zhou_ningbb@sina.com

引言

近年来,随着我国综合国力的不断提升,高速铁路的发展也从未停歇.伴随着铁路运输速度的不断提高,随之而来的便是高速运行带来的弓网受流质量下降的问题^[1].显然,在列车高速行驶的环境下,弓网之间的接触力波动会越来越剧烈,导致弓网受流质量降低,受电弓的磨损加剧等等.受电弓与接触网系统如图1所示.

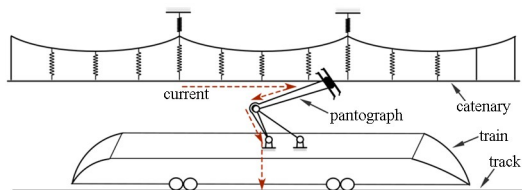


图1 受电弓与接触网系统
Fig. 1 Pantograph-catenary system

为了有效降低弓网间接触力的波动,许多学者提出了受电弓主动控制的方法,并进行了探索.当前适用于弓网系统的控制策略主要有PID控制^[2,3]、反馈线性化控制^[4]、LQR控制^[5]、滑模控制^[6]、模糊控制^[7]、反步控制^[8]等等.文献[2]采用粒子群算法优化PID控制器的三个参数,并以时间乘方误差的积分(ITSE)作为评价指标进行了测试,结果表明该方法能够快速有效地降低受电弓与接触网间的接触力变化;文献[4]通过受电弓线性化模型,设计反馈控制律解决弓网接触力的跟踪问题,并采用非线性干扰观测器补偿反馈控制律,仿真结果表明该策略能有效解决弓网接触力的跟踪问题;文献[5]建立了弓网接触力的伺服控制模型,并在此基础上设计弓网接触力的线性二次型调节器(LQR),仿真结果表明该方法有效减小了弓网接触力的波动,改善了弓网的受流质量;文献[7]针对不同型号的高速受电弓分别设计了滑模变结构控制器与模糊控制器,结果表明两种控制策略在不同受电弓上均能够减小接触力的标准差;文献[8]以受电弓弓头位移为控制对象,将弓网系统的线性时变模型转化成级联形式,以反步法作为控制器设计控制器,仿真结果表明,该策略能够使接触力有效地跟踪到目标值.文献[9]设计了鲁棒自适应无迹卡尔曼滤波估计器,获取噪声时变环境下的受电弓状态信息,分析了作动器时滞问题,设计了最优控制器.最后通过仿真验证了控制器的有效性和受电弓参数摄动下的鲁棒性.综上,大多数文献在设

计控制方法时通常采用的都是受电弓归算质量模型,但在实际中受电弓归算质量模型存在不确定性问题,主要包括受电弓等效参数的不精确及车体振动干扰等,同时在设计反馈控制律时也未考虑状态量的获取.

本文以受电弓接触网系统为研究对象,以降低接触力波动为主要目标,提出了一种基于模型预测控制(MPC)和扰动前馈补偿的复合控制器.首先根据控制目标设计目标函数,其次设计广义扩张状态观测器(GESO)用于运行环境下对状态量和不确定项的估计,最后通过目标函数和估计状态设计MPC控制器,并为了减少MPC策略的计算量,引入了粒子群优化算法.将MPC的成本函数作为PSO的目标函数,迭代优化控制量,最后通过仿真验证了所提控制策略的有效性.

1 弓网系统动力学模型建立

1.1 弓网系统模型

在受电弓的动力学特性研究中常采用归算质量模型以更直观有效地表达受电弓的动态性能.因此本文引用文献[10]的弓网系统模型,如图2所示,该系统模型中受电弓采用三质量块模型,接触网则看作一个变刚度的弹簧.

受电弓的动力学方程为^[10]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = [k_1 + k_{11}(x_1 - x_2)](x_2 - x_1) + [c_1 + c_{11}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)](\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - F_{pc}; \\ m_2 \ddot{x}_2 = [k_1 + k_{11}(x_1 - x_2)](x_1 - x_2) + k_2(x_3 - x_2) + [c_1 + c_{11}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)](\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2); \\ m_3 \ddot{x}_3 = k_2(x_2 - x_3) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - c_3 \dot{x}_3 + F_1 + u \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_1 、 m_2 、 m_3 分别为受电弓弓头、上框架、下框架的等效质量; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为受电弓弓头、上框架、下框架的等效刚度; c_1 、 c_2 、 c_3 分别为受电弓弓头、上框架、下框架的等效阻尼; x_1 、 x_2 、 x_3 分别为受电弓弓头、上框架、下框架的位移; $\dot{x}_1$ 、 $\dot{x}_2$ 、 $\dot{x}_3$ 分别为受电弓弓头、上框架、下框架的速度; $\ddot{x}_1$ 、 $\ddot{x}_2$ 、 $\ddot{x}_3$ 分别为各个质量块的加速度; k_{11} 、 c_{11} 为弓头柔性系数, F_{pc} 为弓网接触力; F_0 为静态抬升力; u

为主动控制力。

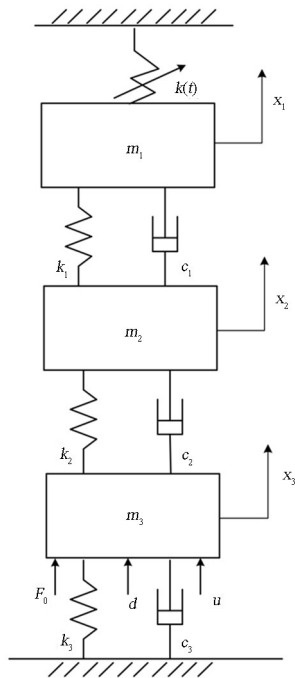


图2 弓网耦合系统

Fig. 2 Pantograph-catenary coupling system

而对于接触网模型,由于弓网之间接触力的波动主要是受其刚度变化的影响,因此一般采取周期性时变刚度公式 $k(t)$ 近似代替^[11]。

$$k(t) = k_0(1 + \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_1^2 + \alpha_4 f_3^2 + \alpha_5 f_4^2) \quad (2)$$

式中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 为接触网刚度变化系数; k_0 为接触网平均刚度系数; v 是车速; l 为接触网跨距; l_1 为接触网相邻吊弦的间距。

$$f_1 = \cos \frac{2\pi vt}{l}, \quad f_2 = \cos \frac{2\pi vt}{l_1},$$

$$f_3 = \cos \frac{\pi vt}{l}, \quad f_4 = \cos \frac{\pi vt}{l_1}.$$

于是受电弓弓头滑板部分与接触网之间的接触力 F_{pc} 可以表示为:

$$F_{pc} = k(t)x_1 \quad (3)$$

结合式(1)~式(3),定义系统状态变量 $\mathbf{z} = [z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6]^T = [x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2, x_3, \dot{x}_3]^T$,可将系统进一步表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{f}(\mathbf{z}) + \mathbf{b}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{c}\mathbf{z} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{f}(\cdot)$ 为关于 $\mathbf{z}$ 的非线性表达式, u 为系统输入, y 为弓网接触力,系数矩阵表达式具体为:

$$\mathbf{b} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1/m_3]^T,$$

$$\mathbf{c} = [k(t) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

1.2 线性化弓网模型

基于受电弓自身结构参数如刚度阻尼等是非时变的,接触网刚度以及受电弓自身状态在平衡点附近的变化是微小缓慢的,同时也为了方便后续控制律的设计,对弓网系统(4)中非线性项进行线性化处理。

弓网系统线性化状态空间方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{b}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{c}\mathbf{z} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{m_1}[k_1 + k(t)] & -\frac{1}{m_1}c_1 & \frac{1}{m_1}k_1 & \frac{1}{m_1}c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m_2}k_1 & \frac{1}{m_2}c_1 & \frac{1}{m_2}(k_2 + k_1) & \frac{1}{m_2}(c_2 + c_1) & \frac{1}{m_2}k_2 & \frac{1}{m_2}c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_3}k_2 & \frac{1}{m_3}c_2 & -\frac{1}{m_3}k_2 & -\frac{1}{m_3}(c_2 + c_3) \end{bmatrix}$$

2 控制策略设计

2.1 控制目标及策略分析

在进行控制器设计之前,有必要针对被控系统考虑以下方面^[12]。

(1)降低弓网接触力的波动;受电弓受流质量

的好坏很大程度上是由弓网间接触力的波动大小所决定的。因此控制器的主要目标就是降低接触力的标准差,即减小实时接触力与参考接触力 F_{ref} 之间的误差波动

$$\min [e(t)] = \min (F_{pc} - F_{ref}) \quad (6)$$

(2)针对弓网系统(1)存在的模型不确定性问题做出估计与前馈补偿^[13]。

2.2 模型预测控制

模型预测控制是一种通过迭代优化的控制算法^[14].在给定的系统模型下,预测系统在未来一段时间内的性能,以优化控制动作.为了便于系统模型进行迭代,需进一步对弓网系统(5)离散化处理,取采样时间为 T ,得到新的状态方程

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(k+1) &= \mathbf{A}_k \mathbf{z}(k) + \mathbf{B}_k u(k) \\ y(k) &= \mathbf{C}_k \mathbf{z}(k) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, k 为采样时刻.

为了更好地实现控制目标,在 k 时刻,对系统(7)进行增广,得到

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_k &= \begin{bmatrix} \eta_{k+1} \\ \eta_{k+2} \\ \vdots \\ \eta_{k+N_c} \\ \vdots \\ \eta_{k+N_p} \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{U}_k = \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+N_c-1} \end{bmatrix}, \Psi = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_{k+1} \bar{\mathbf{A}}_k \\ \bar{\mathbf{C}}_{k+2} \bar{\mathbf{A}}_{k+1} \bar{\mathbf{A}}_k \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{C}}_{k+N_c} \bar{\mathbf{A}}_{k+N_c} \cdots \bar{\mathbf{A}}_k \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{C}}_{k+N_p} \bar{\mathbf{A}}_{k+N_p} \cdots \bar{\mathbf{A}}_k \end{bmatrix} \\ \Theta &= \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_{k+1} \bar{\mathbf{B}} & 0 & \cdots & 0 \\ \bar{\mathbf{C}}_{k+2} \bar{\mathbf{A}}_{k+1} \bar{\mathbf{B}} & \bar{\mathbf{C}}_{k+2} \bar{\mathbf{B}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \bar{\mathbf{C}}_{k+N_p} \bar{\mathbf{A}}_{k+N_p-1} \cdots \bar{\mathbf{A}}_{k+1} \bar{\mathbf{B}} & \cdots & \cdots & \bar{\mathbf{C}}_{k+N_p} \bar{\mathbf{A}}_{k+N_p-1} \cdots \bar{\mathbf{A}}_{k+N_c} \bar{\mathbf{B}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

在式(9)中, $\mathbf{Y}_k$ 为预测输出矩阵, Ψ 为状态系数矩阵, Θ 为输入系数矩阵, $\Delta \mathbf{U}_k$ 为输入矩阵, N_p 为预测长度, N_c 为控制输入长度.一般情况下^[14] $N_c \geq N_u$,且 $N_p \approx 3 \sim 4N_c$.

2.3 构造优化目标函数

考虑2.1中提出的控制目标,设计目标函数 J :

$$\begin{aligned} J[\xi(k), u(t-1), \Delta u] &= \sum_{i=1}^{N_p} [e(k+i|k)]^T q_i [e(k+i|k)] + \\ &\quad \sum_{i=1}^{N_c-1} \Delta u(k+i|k)^T r_i \Delta u(k+i|k) \quad (10) \\ e(k+i|k) &= \eta(k+i|k) - \eta_{\text{ref}}(k+i|k) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, η_{ref} 为参考接触力, e 为输出接触力与参考接触力的误差, q, r 分别为目标函数中接触力误差,输入增量的权值.

引入误差矩阵 $\mathbf{E}_k$

$$\begin{aligned} \xi_{k+1} &= \bar{\mathbf{A}}_k \xi_k + \bar{\mathbf{B}} \Delta u_k \\ \eta_k &= \bar{\mathbf{C}}_k \xi_k \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\xi_k = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_k \\ \mathbf{u}_{k-1} \end{bmatrix}$ 为增广系统的状态变量; η_k 为系统输出; $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ 为系统输入增量; η_k 为系统输出; $\bar{\mathbf{A}}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_k & \mathbf{B}_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_k \\ 1 \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{C}}_k = [\mathbf{K} \mathbf{T}_k \quad \mathbf{0}_{1 \times 6}]$, $\mathbf{K} \mathbf{T}_k$ 为 k 时刻接触网刚度.

基于模型预测控制的滚动优化机理,将模型预测输出 $\mathbf{Y}$ 统一整理为便于计算的矩阵形式:

$$\mathbf{Y}_k = \Psi \xi_k + \Theta \Delta \mathbf{U}_k \quad (9)$$

式中,

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{Y}_{\text{ref}} - \Psi \xi_k \quad (12)$$

则目标函数(10)可改写为矩阵形式:

$$\mathbf{J} = (\Theta \Delta \mathbf{U} - \mathbf{E})^T \mathbf{Q} (\Theta \Delta \mathbf{U} - \mathbf{E}) + \Delta \mathbf{U}^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{U} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ 为权值矩阵.对目标函数(13)进行整理,得到待优化方程:

$$\mathbf{J} = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{U}_k^T \mathbf{H} \Delta \mathbf{U}_k + \mathbf{F}^T \Delta \mathbf{U}_k \quad (14)$$

式中,

$$\mathbf{H} = 2(\Theta^T \mathbf{Q} \Theta + \mathbf{R}), \mathbf{F}^T = -2\mathbf{E}_k^T \mathbf{Q} \Theta$$

2.4 状态观测器设计

由于弓网系统实际运行工作环境复杂,且在受电弓装置上面安装大量的传感器可能存在一定的风险.因此,不能直接利用系统状态来设计控制器^[11],所以针对弓网系统的不匹配特性^[15],假设可获得的状态量为受电弓弓头的垂直位移,并基于式(5)得到的线性模型,设计广义扩张状态观测器估

计受电弓的状态,减少传感器的数量.同时,将系统中的模型不确定项视作集总扰动,作为观测器的扩展状态变量.

将弓网系统线性化模型(5)化作一般的 SISO 形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u + \mathbf{b}_d d \\ y_m = \mathbf{C}_m x \end{cases} \quad (15)$$

其中, y_m 为可测输出,在本文中,受电弓弓头位移为可测输出, $\mathbf{C}_m = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$.

令 $x_{n+1} = d$ 为扩展的状态变量,则式(15)可改写为:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{x} + \tilde{\mathbf{B}}u + \mathbf{E}h(t) \\ y_m = \tilde{\mathbf{C}}_m \tilde{x} \end{cases} \quad (16)$$

其中: $\tilde{x} = \begin{bmatrix} x \\ x_{n+1} \end{bmatrix}$, $h(t)$ 是扰动量 d 关于时间的变化率.

化率. $\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b}_d \\ \mathbf{0}_{1 \times 6} & 0 \end{bmatrix}$, $\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6 \times 1} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}$, $\tilde{\mathbf{C}}_m = [\mathbf{C}_m, 0]$;

同时可得出系统(15)是能控的,式(16)是能观的,GESO^[15]的设计如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \tilde{\mathbf{A}}\hat{x} + \tilde{\mathbf{B}}u + \mathbf{L}(y_m - \hat{y}_m) \\ \dot{\hat{y}}_m = \tilde{\mathbf{C}}_m \hat{x} \end{cases} \quad (17)$$

其中 $\hat{x}$, $\hat{y}_m$ 为对应的状态量 $\tilde{x}$ 、输出 y_m 的估计量, $\mathbf{L}$ 是观测器增益矩阵.当 $\mathbf{L}$ 的取值能够使得矩阵 $\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{L}\tilde{\mathbf{C}}_m$ 为 Hurwitz 矩阵时,观测器是有界稳定的,扩张状态量 x_{n+1} 可以渐近稳定地估计系统扰动.

设计如下扰动补偿控制律为系统进行前馈补偿^[16]:

$$u_c = \mathbf{K}_f \hat{d} \quad (18)$$

其中, $\hat{d}$ 为集总扰动的估计量,即扩张状态观测器的状态量 x_{n+1} . $\mathbf{K}_f$ 为干扰补偿增益^[17],其定义为:

$$\mathbf{K}_f = -[\mathbf{c}_m (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_{mpc})^{-1} \mathbf{B}]^{-1} \mathbf{c}_m (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_{mpc})^{-1} \mathbf{B}_d \quad (19)$$

式中, $\mathbf{K}_{mpc}$ 为模型预测控制的反馈控制增益.

3 粒子群寻优

3.1 算法原理

PSO 的工作原理^[18]为:对于优化问题的求解过程都可以将其看作是在 $\mathbf{D}$ 维搜索空间上的一个

微粒,称之为“粒子”(particle),通过参考粒子的历史最佳位置和粒子群体的历史最佳位置,以迭代更新的方式向目标值靠近.在 $\mathbf{D}$ 维空间中,第 j 个粒子的位置可表示为 $\mathbf{X}_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jD}]$,粒子的飞行速度可表示为 $\mathbf{V}_j = [v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jD}]$,粒子的历史最佳位置 $\mathbf{P}_{best}$ 可表示为 $\mathbf{P}_j = [p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jD}]$,粒子群体即所有粒子遍历过的最好位置记为 $\mathbf{P}_g$,也称 g_{best} .对第 n 代的第 j 个粒子,PSO 算法根据下式更新下一代中第 d 维的速度和位置

$$v_{jd}^{n+1} = \omega v_{jd}^n + c p_1 r_1^n (p_{jd}^n - x_{jd}^n) + c p_2 r_2^n (p_{gd}^n - x_{jd}^n) \quad (20)$$

$$x_{jd}^{n+1} = x_{jd}^n + v_{jd}^{n+1} \quad (21)$$

式中 $j=1, \dots, M$, M 为种群 (swarm) 大小, ω 为惯性权重, $c p_1$, $c p_2$ 为加速度权重.

3.2 基于 PSO 的预测控制律

从目标函数(14)可以看出,求解目标函数的过程本质上就是处理一类带约束的优化问题^[19].而依靠传统的优化方法很难获得合适的解.因此本文引入 PSO 算法,来进行优化计算,求解预测控制律.

因此可将预测输入增量 $\Delta \mathbf{U}_k$ 看作变化量,即粒子.则粒子群的维数 $\mathbf{D}$ 等于控制范围 N_c ,粒子群的适应度函数为目标函数(14),算法^[20]的具体流程为:

Step1 在 k 时刻,初始化待优化方程中的矩阵 $\mathbf{H}$,并获取给定的参考矩阵 $\mathbf{Y}_{ref}$.

Step2 根据观测器算法(17),得到系统当前状态估计量,计算矩阵 $\mathbf{E}_k$, $\mathbf{F}_k$.

Step3 利用 PSO 算法优化求解,得到新的控制序列 $\Delta \mathbf{U}_k^*$.将 $\Delta \mathbf{U}_k^*$ 的第一个分量视作最优控制增量 $\Delta u^*(k|k)$.

Step4 将控制量 $\Delta u(k) = u(k+1) + \Delta u^*(k|k)$ 作用于系统.

Step5 令 $k = k+1$,转 Step1.

3.3 PSO 算法参数调整

标准 PSO 算法在求解高维非线性问题时可能会陷入局部最优值.因此为了避免这一情况发生,同时也利于算法的快速收敛^[20],本文采用改进的粒子群算法^[17]对粒子群的权重和加速度权重进行调整:

$$\omega = \omega_e + \frac{(\omega_s - \omega_e)(N - n)}{N} \quad (22)$$

$$\begin{cases} cp_1 = c_{1s} + (c_{1e} - c_{1s}) \frac{n^2}{N^2} \\ cp_2 = c_{2s} + (c_{2e} - c_{2s}) \frac{n^2}{N^2} \end{cases} \quad (23)$$

式中: n 是当前迭代次数; N 是总迭代次数; w_s 和 w_e 是惯性权重因子的初始值和终止值.

为了提高 PSO 算法的稳定性与收敛速度,可使每一时刻粒子的初始值取为上一时刻的控制输入序列,即 $k+1$ 时刻时,粒子群的初始值可取为 ΔU_k^* .

综上所述,提出的复合控制器控制律为^[21]:

$$U = \Delta u(k) + u_c \quad (24)$$

控制过程如下图:

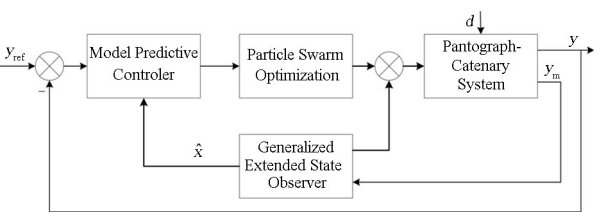


图 3 复合控制器流程图
Fig. 3 Composite controller flow chart

4 仿真结果与分析

弓网模型采用 DSA380 型受电弓和简单链型接触网的结构参数,弓网系统的模型不确定主要考虑受电弓等效参数失配与车体振动干扰.因此考虑受电弓参数摄动 10%,车体振动作为外界干扰,使用噪声功率为 0.005 的白噪声加入原系统.验证在不同运行速度下控制策略的有效性和鲁棒性,具体参数见表 1.

表 1 受电弓接触网参数
Table 1 Pantograph catenary parameters

Notation(Unit)	Value	Notation(Unit)	Value
m_1 (kg)	7.12	k_0 (N/m)	3684.5
m_2 (kg)	6	α_1	0.4665
m_3 (kg)	5.8	α_2	0.0832
k_1 (N/m)	9430	α_3	0.2603
k_2 (N/m)	14100	α_4	-0.2801
k_3 (N/m)	0.1	α_5	-0.3364
c_1 (N·s/m)	0	l_1 (m)	9
c_2 (N·s/m)	0	l (m)	50
c_3 (N·s/m)	70		
k_{11} (N/m)	0.5		
c_{11} (N·s/m)	1		

4.1 考虑模型不确定性对于弓网接触力的影响

由图 4 可知,模型不确定性问题对于弓网接触力的稳定性具有重要的影响.随着速度等级的提高,模型的不确定对接触力的标准差影响分别提高了约 15%,12%,14%,同时离线的次数也显著增多.因此在设计控制器时有必要考虑模型的不确定性对弓网接触力的影响.

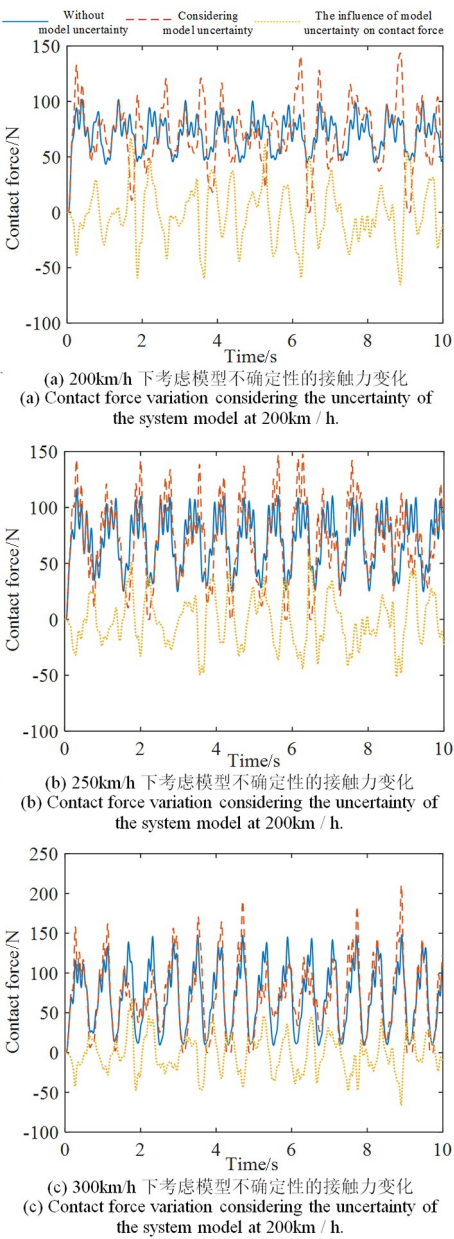


图 4 不同速度等级下考虑模型不确定性的接触力变化
Fig. 4 The change of contact force considering the uncertainty of the system model under different speed levels

4.2 观测器验证

考虑存在模型不确定的条件下,为了保证观测器稳定收敛,同时保证观测器的收敛速度快于系

统,观测器的极点应该比闭环系统的极点离原点远得多^[15].因此观测器增益选择为:

$$L = [600 \quad 13370 \quad 940 \quad 3475 \quad 350 \quad -512 \quad 17746]^T$$

对系统不可测状态以及集总扰动的观测结果如图 5、图 6 所示,受电弓状态量的均方根误差分别为:0.1436,0.0363,0.1675,0.0412,0.1777,分析受电弓状态量的均方根误差可知,观测器算法能够保证估计的精确性.

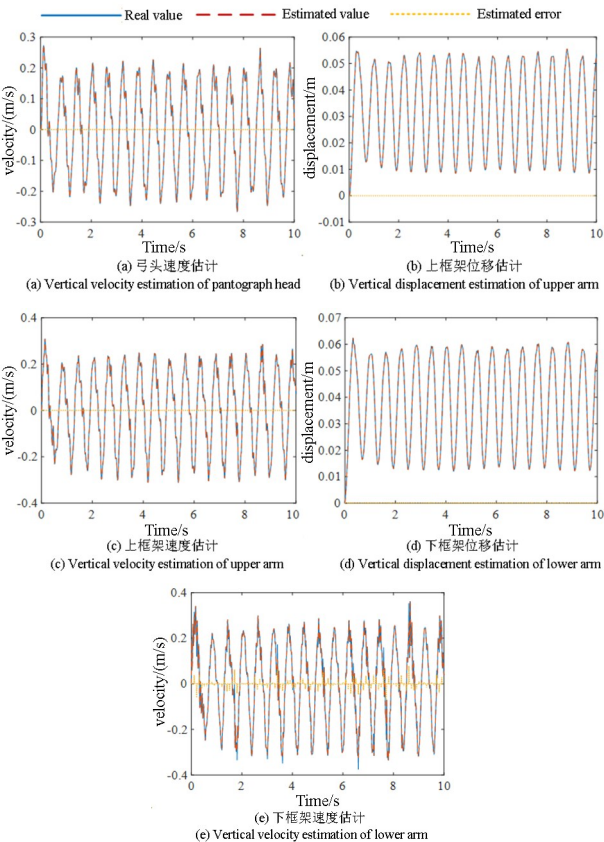


图 5 观测器观测效果对比

Fig. 5 Observer observation effect comparison

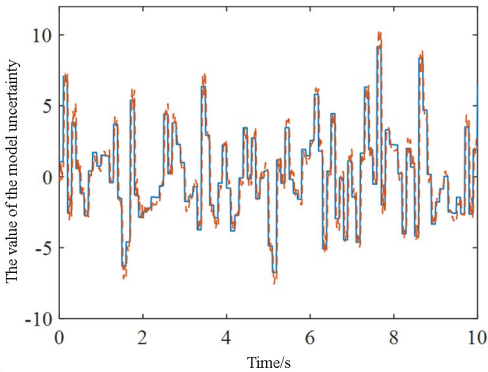


图 6 不确定项估计效果对比

Fig. 6 Comparison of uncertainty estimation effects

4.3 控制器验证

基于表 1 和表 2 的数据,设置参考接触力为标

称非线性弓网模型(1)的动态接触力,记为 $\mathbf{Y}_{ref}$,弓网静态接触力 $F_0=70\text{ N}$,采样时间 $T=0.01\text{ s}$;控制参数 $N_p=10, N_c=4, \mathbf{Q}=\text{eye}(N_p), \mathbf{R}=10^{-4}\text{eye}(N_c)$;粒子群参数 $\omega_s=0.9, \omega_e=0.4, c_{1s}=2.5, c_{1e}=0.5, c_{2s}=0.5, c_{2e}=2.5$,粒子群个数为 80,最大迭代数 $N=250$.根据上述的参数,在分别为 200km/h、250km/h 和 300km/h 的速度等级下,进行了考虑模型不确定的仿真验证.得到目标接触力的跟踪结果如下:

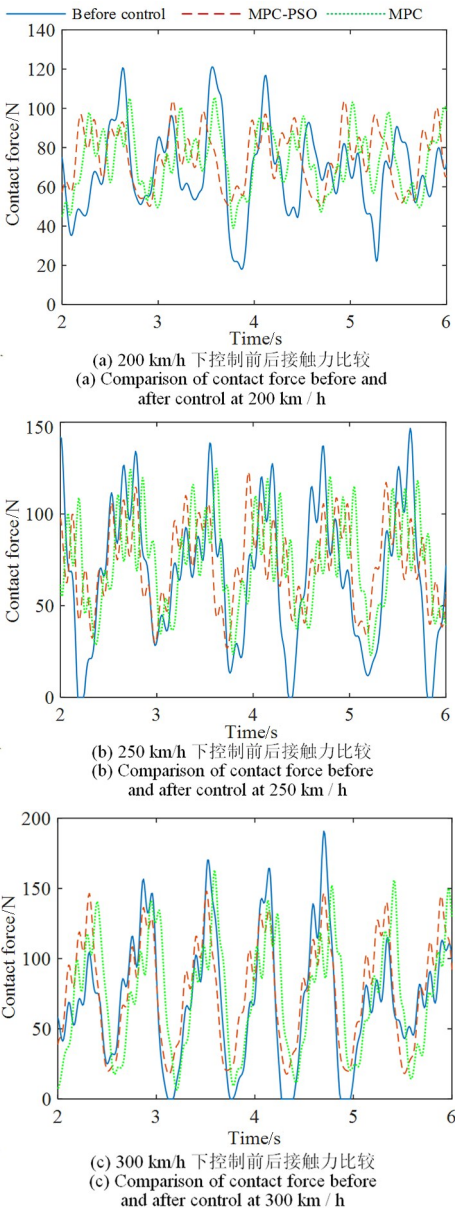


图 7 不同速度等级下控制前后接触力比较

Fig. 7 Comparison of contact force before and after control under different speed levels

通过对图 7 的分析可以得出,相较于传统的 MPC,PSO-MPC 的控制性能更加优异.弓网接触力在控制后平均值较控制前基本不变的条件下,接

触力的极大值显著减小,同时接触力的标准差在300km/h、250km/h和200km/h速度等级下分别降低了13.45%、12.8%和12.05%。尽管随着列车的速度提高,控制器的性能发生了削弱,但在整体上仍然大大降低了弓网接触力的波动,减小了受电弓在高速运行时离线的概率,验证了控制器的有效性和鲁棒性。

5 结论

本文针对受电弓主动控制中弓网模型存在不确定性的问题,设计了一种基于粒子群优化的受电弓预测控制策略。对于系统中不可测的受电弓状态,构造了广义扩张状态观测器来对其进行估计,即使在存在干扰的情况下,受电弓状态量的均方根误差分别为:0.1436, 0.0363, 0.1675, 0.0412, 0.1777,验证了估计的有效性。在考虑受电弓—接触网系统模型存在不确定的情况下,提出的控制策略能够在三个不同的列车速度等级下,使接触力的标准差分别降低13.45%、12.8%和12.05%。结果表明,提出的控制器能有效降低接触力的波动,改善高速列车弓网受流质量。

参考文献

- [1] 周宁. 350km/h及以上弓网动态行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
ZHOU N. Investigation on dynamic behavior of pantograph and catenary system for the running speed of 350km/h or above [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [2] GAING Z L, CHANG R F. Optimal PID controller for high-speed rail pantograph system with Notch filter [C]//TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference. New York: IEEE, 2009: 1—6.
- [3] 刘职,刘宜成,邹栋,等. 弓网接触力的区间二型模糊PID半主动控制[J]. 机械科学与技术,2021,40(5): 787—793.
LIU Z, LIU Y C, ZOU D, et al. Interval type-2 fuzzy PID semi-active control of contact force between pantograph and catenary [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(5): 787—793. (in Chinese)
- [4] 时光,陈忠华,郭凤仪,等. 弓网接触力反馈线性化控制[J]. 控制理论与应用,2016,33(1): 85—91.
SHI G, CHEN Z H, GUO F Y, et al. Feedback linearization control of load between pantograph and catenary [J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(1): 85—91. (in Chinese)
- [5] 时光,陈忠华,刘健辰,等. 基于伺服模型的受电弓LQR控制[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(7): 1120—1126.
SHI G, CHEN Z H, LIU J C, et al. Research of LQR control of pantograph based on servo model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 1120—1126. (in Chinese)
- [6] 杨岗,李芾. 高速受电弓滑模半主动控制[J]. 西南交通大学学报,2013,48(1): 10—15.
YANG G, LI F. Sliding mode semi-active control for high-speed pantograph [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 10—15. (in Chinese)
- [7] 鲁小兵,刘志刚. 高速铁路受电弓主动控制算法适用性研究[J]. 西南交通大学学报,2015,50(2): 233—240.
LU X B, LIU Z G. Applicability of active control algorithms for pantographs of high-speed railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 233—240. (in Chinese)
- [8] 祁文延,王江文,韩宝峰,等. 基于反步法的弓网系统接触力跟踪控制策略[J]. 计算机仿真,2023,40(1): 200—207.
QI W Y, WANG J W, HAN B F, et al. Tracking control strategy of contact force of pantograph-catenary system based on backstepping method [J]. Computer Simulation, 2023, 40(1): 200—207. (in Chinese)
- [9] 谢松霖,张静,宋宝林,等. 计及作动器时滞的高速铁路受电弓最优控制[J]. 电工技术学报,2022,37(2): 505—514.
XIE S L, ZHANG J, SONG B L, et al. Optimal control of pantograph for high-speed railway considering actuator time delay [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 505—514. (in Chinese)
- [10] 崔营波. 高速列车受电弓半主动控制方法研究及应用[D]. 北京:北京交通大学,2018.
CUI Y B. Study and apply on semi-active control method for high-speed trains pantograph [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [11] 张静,宋宝林,谢松霖,等. 基于状态估计的高速

- 受电弓鲁棒预测控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1075—1083.
- ZHANG J, SONG B L, XIE S L, et al. Robust predictive control of high-speed pantograph based on state estimation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1075—1083. (in Chinese)
- [12] LU X B, LIU Z G, SONG Y, et al. Estimator-based multiobjective robust control strategy for an active pantograph in high-speed railways [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(4): 1064—1077.
- [13] 李前明, 杨蔡进, 李艳, 等. 基于协同转向的铰接车辆轨迹跟随控制研究[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(2): 87—95.
- LI Q M, YANG C J, LI Y, et al. Research on trajectory following control of articulated vehicle based on cooperative active steering [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(2): 87—95. (in Chinese)
- [14] 许芳, 靳伟伟, 陈虹, 等. 一种模型预测控制器的FPGA硬件实现[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(4): 1042—1050.
- XU F, JIN W W, CHEN H, et al. Hardware implementation method for model predictive control on a FPGA chip [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(4): 1042—1050. (in Chinese)
- [15] LI S H, YANG J, CHEN W H, et al. Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4792—4802.
- [16] PAWAR S N, CHILE R H, PATRE B M. Design of generalized extended state observer based control for nonlinear systems with matched and mismatched uncertainties [C]//2017 Indian Control Conference (ICC). New York: IEEE, 2017: 65—71.
- [17] 张庆新, 郝晨乐, 朱金旭. 基于MPC和ESO的无人直升机姿态控制[J]. 飞行力学, 2022, 40(5): 53—58.
- ZHANG Q X, HAO C L, ZHU J X. Attitude control for unmanned helicopter based on model predictive control and extended state observe [J]. Flight Dynamics, 2022, 40(5): 53—58. (in Chinese)
- [18] 李兴莘, 张靖, 何宇, 等. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(3): 1—7.
- LI X S, ZHANG J, HE Y, et al. Multi-objective optimization dispatching of microgrid based on improved particle swarm algorithm [J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(3): 1—7. (in Chinese)
- [19] FAN W, HU Z J, VEERASAMY V. PSO-based model predictive control for load frequency regulation with wind turbines [J]. Energies, 2022, 15(21): 8219.
- [20] TANG X Z, SHI L F, WANG B, et al. Weight adaptive path tracking control for autonomous vehicles based on PSO-BP neural network [J]. Sensors, 2022, 23(1): 412.
- [21] GONG L Y, YU M, KOLLIAS S. Optimizing crop yield and reducing energy consumption in greenhouse control using PSO-MPC algorithm [J]. Algorithms, 2023, 16(5): 243.