

基于最优预见控制的货运列车速度跟踪控制研究^{*}

李 旺^{1,2}, 金鑫淼^{1,2}, 姜 鹏³, 易灵芝³

- (1. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;
3. 湘潭大学 自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 列车速度曲线的精确跟踪是货运列车自动驾驶系统保证稳定性、精确性和安全性的关键。货运列车速度跟踪系统大时滞特性会造成控制精度下降和能耗增加的问题。为解决该问题, 研究了牵引制动系统响应时间和指令传输延时特性, 构建了列车速度跟踪控制滞后模型。利用差分算子处理列车动力模型中的滞后项, 构造最优预见速度跟踪控制器。仿真对比试验表明, 基于最优预见控制的货运列车速度跟踪控制器具有响应快、速度误差小、安全性高等特点。

关键词: 货运列车自动驾驶; 速度跟踪系统; 离散时滞系统; 预见控制

中图分类号: TM922 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)07-0038-07

doi: 10.12177/emca.2022.033

Research on Freight Train Speed Tracking Control Based on Optimal Predictive Control^{*}

LI Wang^{1,2}, JIN Xinmiao^{1,2}, JIANG Peng³, YI Lingzhi³

- (1. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;
2. The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration, Zhuzhou 412001, China;
3. College of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: Accurate tracking of train speed curve is the key to stability, accuracy and safety of automatic freight train operation system. The large time delay of freight train speed tracking system leads to the decrease of control accuracy and the increase of energy consumption. To solve this problem, the response time and command transmission delay characteristics of traction braking system are studied, the lag model of train speed tracking control is constructed. The difference operator is used to deal with the lag term in the train dynamic model, the optimal predictive speed tracking controller is constructed. The simulation and comparison experiments show that the freight train speed tracking controller based on optimal predictive control has the characteristics of fast response, small speed error and high safety.

Key words: automatic freight train operation; speed tracking system; discrete time-delay system; predictive control

0 引 言

货运列车的特点是装载质量大、编组多, 结合

智能化发展需求, 其关键控制技术为大功率控制、无线重联、自动化三个方面^[1]。这也使货运列车速度跟踪系统大时滞问题更加突出, 并对跟踪精

收稿日期: 2022-05-08; 收到修改稿日期: 2022-06-03

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61572416); 湖南省自科基金项目(2020JJ6009)

作者简介: 李 旺(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为牵引传动技术和铁路新技术。

度和稳定性提出了更高要求。文献[2-4]报道国内对货运列车操控的研究主要集中在平稳操控和空气制动应用方面。

目前地铁系统的自动驾驶技术应用比较成熟,而货运列车自动驾驶将在未来有广泛的应用^[5]。随着客运列车运行自动化水平提高,PID控制、模糊控制、预测控制已广泛应用于城轨列车和高速铁路自动运行中^[6-10]。贺广宇^[11]将列车牵引系统和制动系统归结为动力伺服系统,运用线性二次型调节器(LQR)控制实现列车平直道路精确停车,但线路条件复杂时误差过大。预测控制可实现根据当前控制量提前预测控车效果以及线路条件,提高了系统精度,但实时性差^[12-13]。滑模控制可提高系统响应速度,较好适应列车模型参数时变,但抗干扰能力不足,线路复杂情况下误差增大且非线性切换控制增多^[14-15]。模糊控制响应延时大、参数整定依赖于经验,实施周期和难度大^[16]。张彦栋等^[17]将在城轨列车自动驾驶系统(ATO)控制系统设计中引入预见控制,提高了控制系统跟踪精度。此外,利用既定的先验知识设定控制规则,智能控制则可用于对列车速度控制^[18-19]。

本文针对货运列车大时滞问题,引入差分算子对系统的输入时滞项和跟踪目标进行差分处理,构造包含跟踪目标但不含时滞的扩大误差系统。用矩阵分解法将 Riccati 方程降阶得到原时滞系统的预见控制器。分析列车运行工况,将列车动力学模型与预见控制相结合,建立货运列车速度在线跟踪控制系统,以离线优化的速度曲线为目标,阻力产生的加速度作为扰动,提出最优预见跟踪控制方法。将该方法与模糊 PID(FPID)控制和滑模控制进行仿真对比,验证了该方案的优越性。

1 货运列车数学模型

1.1 多质点动力学模型

货运列车因编组长、装载质量大,单质点模型不能模拟实际运行中的纵向作用力。多质点模型将每节车厢看作一个质点,列车受力与运动的关系如图 1 所示,其中 v 为列车运行速度, F_t 为机车牵引力,货车车厢无此作用力, f_{ij} 和 f_{ji} 分别为第 j 节车厢受到的前车和后车作用力, F_{vj} 为阻力, F_{bj} 为制动力。根据受力与运动的关系可得列车运动

学方程为

$$\begin{cases} m_1 \dot{v}_1 = F_t = F_t - F_{r1} - f_{b1} - F_{b1} \\ \vdots \\ m_j \dot{v}_j = F_j = -F_{vj} + f_{ij} - f_{bj} - F_{bj} \\ \vdots \\ m_n \dot{v}_n = F_n = -F_{rn} + f_{in} - F_{bn} \end{cases} \quad (1)$$

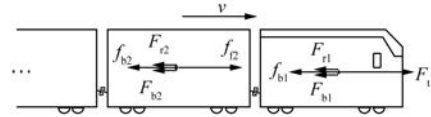


图1 货运列车车厢受力与运动关系

列车运行阻力包括基本阻力和附加阻力。基本阻力包括各种机械阻力和空气阻力,由于构成非常复杂,采用经验公式表示为

$$F_{rb} = (r_1 + r_2 \cdot v + r_3 \cdot v^2) Mg \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

式中: r_1 、 r_2 、 r_3 为阻力系数; M 为货运列车总质量; g 为重力常数。

机车车厢的基本阻力为

$$F'_{rb} = 1.40 + 0.038 \cdot v + 0.000\ 300 \cdot v^2 \quad (3)$$

货车车厢的基本阻力为

$$F''_{rb} = \begin{cases} 2.23 + 0.005\ 3v + 6.57 \times 10^{-5} v^2, & \text{空车} \\ 0.92 + 0.004\ 8v + 1.25 \times 10^{-5} v^2, & \text{重车} \end{cases} \quad (4)$$

附加阻力包括坡道附加阻力和曲线附加阻力,均质棒模型的附加阻力作用表示为

$$\begin{cases} F_{ra} = \sum_{j=1}^n w_j \\ w_j = \frac{1}{l_j} \left(\sum_{g=1}^{n_1} i_g l_g 10^3 + \sum_{c=1}^{n_2} \frac{l_c}{R_c} \cdot 600 \right) m_j g 10^{-3} \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为车厢总数; w_j 为附加阻力; l_j 为车厢长度; n_1 为车厢占坡道数; i_g 为坡道坡度; l_g 为坡道长度; n_2 为车厢占弯道数; l_c 为弯道长度; R_c 为弯道半径; m_j 为车厢质量。

列车运行中阻力合力为

$$\begin{aligned} F_r &= F_{ra} + F_{rb} = \\ &= \sum_{j=1}^n \left(\sum_{g=1}^{n_1} \frac{i_g l_g}{l_j} + \sum_{c=1}^{n_2} \frac{0.6 \cdot l_c}{l_j \cdot R_c} \right) m_j g + \\ &\quad (r_1 + r_2 \cdot v + r_3 \cdot v^2) Mg 10^{-3} \end{aligned} \quad (6)$$

列车包含阻力的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{v} = a \\ M(1 + \gamma)a = F_t - F_b - F_r \end{cases} \quad (7)$$

式中: a 为列车加速度; γ 为列车回转系数; F_b 为列车制动力。

1.2 列车牵引制动系统模型

图2为列车运行控制系统图,ATO通过调整手柄级位向列车牵引和制动系统发出控制指令,牵引系统和制动系统模型描述了控制指令和列车状态之间的动态关系。

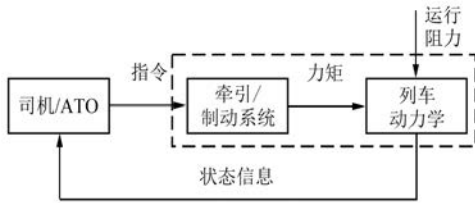


图2 列车运行控制系统

货运列车的牵引/电制动系统具有滞后特性,为消除滞后特性对速度跟踪的影响,针对牵引/电制动系统建立滞后模型^[20]。

根据控制领域的电机研究理论,将滞后特性近似线性化处理,并认为系统加载和切除的滞后特性参数近似相同,可得列车牵引/制动系统的滞后模型为

$$F_{vb} = \begin{cases} 0, & t_1 < t \leq t_2 \\ \frac{F_M}{t_3 - t_2} \cdot (t - t_2), & t_2 < t \leq t_3 \\ F_M, & t_3 < t \leq t_4 \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_{vb} 为牵引/制动力; F_M 为最大牵引/制动力; t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别为作用力达到 0、10%、90%、100% 的时间。

因计算量小、计算速度快,这里用单参数算法表示空气制动特性,其计算方程为

$$\begin{cases} p = \left(\frac{t - t_d}{t_{\max}} \right)^\lambda \cdot u(t - t_d) p_{\max}, & t < t_d + t_{\max} \\ p = p_{\max}, & t \geq t_d + t_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: t_d 为延时时间; $t_{\max}$ 为升压时间; λ 为特性参数; u 为单位阶跃函数; $p_{\max}$ 为最大缸压。

基于制动缸压特性建立货运列车空气制动滞后模型,其加载过程滞后模型为

$$p_i = \begin{cases} 0, & t < t_{sdi} \\ f_1(t - t_{sdi}, r), & t_{sdi} < t < t_{\max} + t_{sdi} \\ p_{\max}, & t \geq t_{\max} + t_{sdi} \end{cases} \quad (10)$$

$$t_{sdi} = f_2(i, r) \quad (11)$$

缓解过程滞后模型为

$$p_i = \begin{cases} p_{\max}, & t < t_{jdi} \\ f_3(t - t_{jdi}, r), & t_{jdi} < t < t_{\max} + t_{jdi} \\ 0, & t \geq t_{\max} + t_{jdi} \end{cases} \quad (12)$$

$$t_{jdi} = f_4(i, r) \quad (13)$$

式中: t_{sdi} 和 t_{jdi} 为第 i 缸压加载和缓解延时; $t_{\max}$ 为升压和降压时间; r 为制动减压量; p_i 为第 i 辆车缸压; f_1 和 f_3 为升压和降阶特性; f_2 和 f_4 为延时函数。

根据上述研究,建立货运列车时滞控制模型的状态空间方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = a \cdot f(x, v) + a_T \cdot g(u, v) + bu + d \end{cases} \quad (14)$$

式中: $f(x, v)$ 、 $g(u, v)$ 为状态滞后特性和输入滞后特性; a 和 a_T 为对应的控制输入; u 为控制器输入; d 为列车所受扰动。

采用一阶线性动态系统可以近似表达此动力伺服系统。由牵引指令和制动指令产生的牵引加速度和制动加速度方程如下:

$$t_{vb} \dot{a}_{vb}(t) + a_{vb}(t) = u_{vb}(t - \tau) \quad (15)$$

式中: $u_{vb}(t - \tau)$ 为牵引制动控制输入。

联立受力与运动分析可得:

$$a_{vb} = F / (1 + \gamma) M \quad (16)$$

同样,列车扰动加速度为

$$a_r = -F_r / (1 + \gamma) M \quad (17)$$

综上可得列车牵引/制动工况系统模型:

$$\begin{cases} \dot{v} - a_r = a_{vb}(t) \\ t_{vb} \dot{a}_{vb}(t) + a_{vb}(t) = u_{vb}(t - \tau) \end{cases} \quad (18)$$

2 最优预见速度跟踪控制器设计

预见控制数值仿真示意如图3所示,预见控制系统可提前施加控制输入,减小系统响应时间带来的控制延时,减小控制输入的突变。

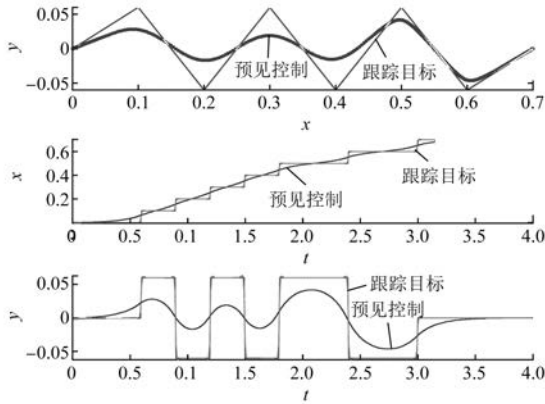


图3 预见控制示意图

2.1 针对状态时滞的扩大误差系统

对于状态时滞的离散系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_T(k)\mathbf{x}(k-T) + \\ \quad \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}\mathbf{d}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{x}(k)$ ($m \times 1$) 为状态变量; $\mathbf{y}(k)$ ($n \times 1$) 为输出变量; $\mathbf{u}(k)$ ($p \times 1$) 为输入变量; $\mathbf{d}(k)$ ($q \times 1$) 为干扰; T 表示系统状态在状态通道中的时滞; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{A}_T$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{E}$ 为相应维度的实数矩阵。

当系统能观能控, 且 $n \leq p$, 给定目标值为 $\mathbf{R}(k)$ ($n \times 1$), 定义误差信号:

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{R}(k) - \mathbf{y}(k) \quad (20)$$

对系统做如下假设: 目标 $\mathbf{R}(k)$ 有 T_M 步可预见, T_M 步以后的值为零。

控制器目标为

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{e}(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} [\mathbf{R}(k) - \mathbf{y}(k)] = \mathbf{0} \quad (21)$$

取差分算子为

$$\Delta \mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k) \quad (22)$$

差分算子具有如下性质:

$$\Delta[\mathbf{G}(k)\mathbf{V}(k)] = \mathbf{G}(k)\Delta\mathbf{V}(k) + \Delta\mathbf{G}(k)\mathbf{V}(k-1) \quad (23)$$

式中: $\mathbf{G}(k)$ 和 $\mathbf{V}(k)$ 为时变矩阵。

对 $\mathbf{x}(k+1)$ 和 $\mathbf{e}(k+1)$ 取差分可得:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\Delta \mathbf{x}(k) + \Delta \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k-1) + \\ &\quad \mathbf{A}_T(k)\Delta \mathbf{x}(k-T) + \Delta \mathbf{A}_T(k)\mathbf{x}(k-T-1) + \\ &\quad \mathbf{B}(k)\Delta \mathbf{u}(k) + \Delta \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k-1) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{e}(k+1) &= \Delta \mathbf{R}(k+1) - \mathbf{C}(k+1)\mathbf{A}(k)\Delta \mathbf{x}(k) - \\ &\quad \mathbf{C}(k+1)\Delta \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k-1) - \\ &\quad \mathbf{C}(k+1)\mathbf{A}_T(k)\Delta \mathbf{x}(k-d) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\mathbf{C}(k+1)\Delta \mathbf{A}_T(k)\mathbf{x}(k-d-1) - \\ &\quad \mathbf{C}(k+1)\mathbf{B}(k)\Delta \mathbf{u}(k) - \\ &\quad \mathbf{C}(k+1)\Delta \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k-1) - \\ &\quad \Delta \mathbf{C}(k+1)\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (25)$$

又 $\mathbf{e}(k+1) = \mathbf{e}(k) + \Delta \mathbf{e}(k+1)$, 引入向量 $\mathbf{X}(k) = [\mathbf{e}^T(k) \quad \Delta \mathbf{x}^T(k) \quad \cdots \quad \Delta \mathbf{x}^T(k-d-1)]^T$ 可得误差系统, 其中 d 为状态输入时滞常数。

记 $\tilde{\mathbf{X}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(k) \\ \mathbf{u}(k-1) \end{bmatrix}$, 可以得到初始系统的误差系统为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{X}}(k+1) &= \tilde{\mathbf{A}}(k)\tilde{\mathbf{X}}(k) + \tilde{\mathbf{B}}(k)\Delta \mathbf{u}(k) + \\ &\quad \tilde{\mathbf{E}}\Delta \mathbf{R}(k+1) \end{aligned} \quad (26)$$

由假设可得包含未来信息的扩大误差系统:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}(k+1) \\ \mathbf{X}_R(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}(k) & \mathbf{G}_R \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}(k) \\ \mathbf{X}_R(k) \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}}(k) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $\mathbf{X}_R(k) = [\mathbf{R}^T(k) \quad \cdots \quad \mathbf{R}^T(k+T_M)]^T$;

$$\mathbf{G}_R = \begin{bmatrix} -\tilde{\mathbf{E}} & \tilde{\mathbf{E}} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_R = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_m & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \mathbf{I}_m \\ \mathbf{0} & \cdots & \cdots & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$

$$\text{令 } \mathbf{X}_F(k) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}(k) \\ \mathbf{X}_R(k) \end{bmatrix}, \mathbf{A}_F(k) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}(k) & \mathbf{G}_R \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_R \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_F(k) &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}}(k) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \text{ 可将误差系统简化为} \\ \mathbf{X}_F(k+1) &= \mathbf{A}_F(k)\mathbf{X}_F(k) + \mathbf{B}_F(k)\Delta \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (28)$$

其在形式上没有时滞和多采样率特征。

2.2 最优预见速度跟踪控制器

列车速度控制系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}\mathbf{d}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (29)$$

将差分算子作用到 $\mathbf{x}(k+1)$ 和 $\mathbf{e}(k)$ 上得到:

$$\Delta \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}(k) + \mathbf{E}\mathbf{d}(k) \quad (30)$$

$$e(k+1) = e(k) + \Delta r(k) - C\Delta x(k) \quad (31)$$

联合导出误差系统为

$$x_0(k+1) = \Phi x_0(k) + G_u \Delta u(k) + G_R \Delta R(k+1) + G_d \Delta d(k) \quad (32)$$

$$\text{其中, } \Phi = \begin{bmatrix} I_n & -CA \\ 0 & A \end{bmatrix}, x_0(k) = \begin{bmatrix} e(k) \\ \Delta x(k) \end{bmatrix}, G_u = \begin{bmatrix} -CB \\ B \end{bmatrix}, G_R = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}, G_d = \begin{bmatrix} -CE \\ E \end{bmatrix}。$$

最优预见跟踪控制的输入为

$$\Delta u(k) = F_0 x_0(k) + \sum_{j=0}^{M_R} F_R(j) \Delta R(k+j) + \sum_{j=0}^{M_d} F_d(j) \Delta d(k+j) \quad (33)$$

$$\begin{cases} F_0 = -[H + G_u^T P G_u]^{-1} G_u^T P \varphi \\ F_R(j) = 0, j = 0 \\ F_R(j) = -[H + G_u^T P G_u]^{-1} G_u^T (\xi^T)^{j-1} P G_R \\ F_d(j) = -[H + G_u^T P G_u]^{-1} G_u^T (\xi^T)^{j-1} P G_d \end{cases} \quad (34)$$

$$\xi = \Phi + G_u F_0 \quad (35)$$

P 是 Riccati 方程的正定解:

$$P = Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P G [H + G^T P G]^{-1} G^T P \Phi \quad (36)$$

式中: Q 和 H 为控制器输入权重, Q 为半正定矩阵, H 为正定矩阵。

控制输入的第一项表示最优伺服系统, 最优预见伺服系统增加了第二项表示的目标前馈补偿项和第三项表示的干扰前馈补偿项, 其结构如图 4 所示。

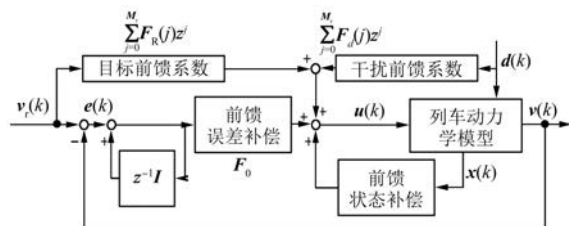


图4 最优预见控制系统框图

最优预见控制器的设计问题是系统在约束条件下最优解求解问题, 求出控制器输入, 使性能指标为最小值。性能指标为

$$J = J_1 + J_2 =$$

$$\sum_{k=-M+1}^{\infty} [x_0^T(k) Q x_0(k) + \Delta u^T(k) H \Delta u(k)] \quad (37)$$

式中: Q 和 H 为系统状态量和控制量权重。

3 货运列车速度跟踪系统设计

3.1 速度跟踪系统

为验证控制器的有效性, 在相同环境相同参数下进行仿真试验。基于预见控制器的货运列车速度跟踪模型如图 5 所示, 预设数据包括列车运行期望速度、运行工况、线路和列车参数等, 力学模型包括列车牵引与制动系统、阻力模型和列车动力模型。

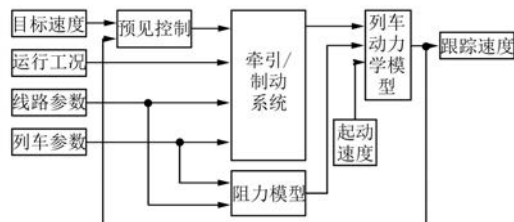


图5 货运列车预见速度跟踪控制器

包含时滞的列车模型分为牵引滞后和制动滞后两部分。根据列车动力和传输延时利用滞后特性计算出带有滞后特性的列车动力。然后经过状态转换得到加速度信息。

3.2 参数设置

以 HX_D1 型货运电力机车为对象进行仿真, 仿真线路总长为 20 km, 设定运行时间为 22.8 min, 仿真计算步长为 0.01 s, 货车车厢选择 C₈₀ 型货运车厢, 具体参数和编组信息如表 1 所示。

表 1 货运列车参数及编组数据

参数名称		参数值
HX _D 1 型货运机车	计算质量/m	200
	机车全长/m	35.2
	最高运行速度/(km·h ⁻¹)	120
C ₈₀ 型货车车厢	质量/t	20
	装载质量/t	77
	车长/m	12
编组数据	机车数	1
	重车数	108
	编组总质量/t	10 676
	编组总长度/m	1 331.2

货运列车线路空间图形化如图 6 所示。上方折线表示线路的限速, 梯形表示货运列车运行线路中的弯道, 弯道半径和转弯的大小成反比, 故取半

径的倒数为纵坐标。圆头线段表示货运列车运行线路中的隧道。下方实线表示运行线路中的海拔。

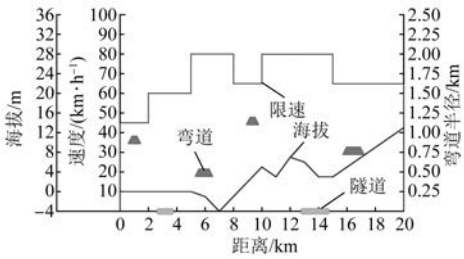


图6 货运列车线路空间图形化

4 试验与结果分析

货运列车速度跟踪控制多目标优化的列车运行速度曲线如图7所示。实线为线路限速,虚线为优化列车运行速度。

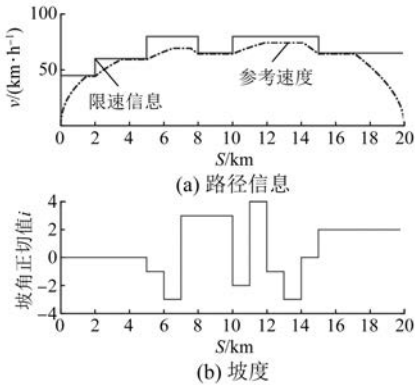


图7 目标曲线及线路信息

货运列车速度跟踪曲线如图8所示,最优预见控制器保证了速度曲线的精确追踪,速度跟踪误差明显小于对比试验。滑模控制器响应速度较快,速度跟踪误差较小,但速度波动频繁无法满足列车平稳运行的要求。FPID 控制器速度跟踪曲线在速度变化缓慢情况下能保持较小的跟踪误差,但响应速度慢,在速度变化快时跟踪误差变大,无法满足列车速度精确跟踪的需求。

货运列车最优预见控制器速度跟踪误差及控

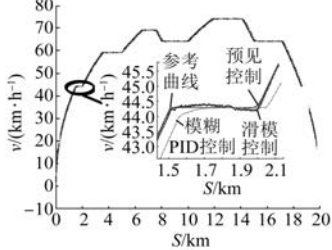


图8 货运列车速度跟踪曲线

制输入如图9所示,列车运行速度曲线整体较为平稳,跟踪误差小。在列车起动时和工况切换点有明显的速度跟踪误差,其最大跟踪误差为 $\pm 0.2\text{ km/h}$ 。牵引工况下,控制输入约为 $0.4\sim 0.5\text{ km/s}^2$,匀速运行时,控制输入几乎为0,制动工况下,控制输入约为 $-0.5\sim 0.6\text{ m/s}^2$ 。平稳内的加速度变化可以有效减小车钩受力,增加列车运行安全性,也能减少系统消耗多余能耗进行列车运行状态调整,降低系统能耗。

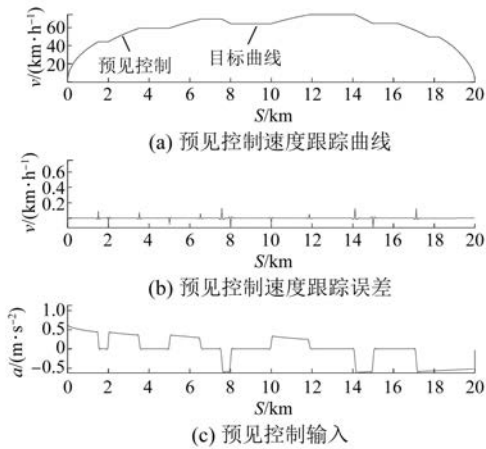


图9 货运列车最优预见控制速度跟踪误差及输入

货运列车滑模控制器速度跟踪误差及控制输入如图10所示,最大跟踪误差约为 $\pm 0.25\text{ km/h}$,但在列车各个工况均有周期性的误差。控制器输入约为 $-2.0\sim 2.0\text{ m/s}^2$,大幅超出了列车速度控制需要的数值。不必要的列车加速和减速过程,增加了系统能耗,也增大了车钩受力,降低了列车运行安全性。

货运列车 FPID 控制器速度跟踪误差及控制输入如图11所示。匀速运行时,跟踪误差几乎为

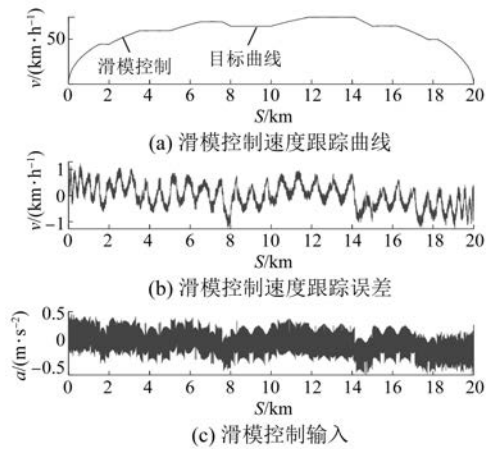


图10 货运列车滑模控制速度跟踪误差及输入

0,牵引工况下,误差约为0.6~1.2 km/h,制动工况下,误差约为-1.2~-1 km/h。牵引工况下控制输入约为0.3~0.6 m/s²,匀速运行时控制输入几乎为0,制动工况下控制输入约为-0.7~0.5 m/s²。FPID控制器跟踪误差在牵引和制动工况下长期存在,说明控制器不能较好地应对列车滞后特性。

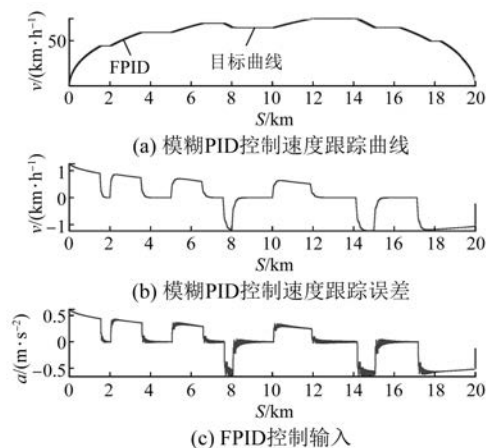


图11 货运列车FPID控制速度跟踪误差及输入

5 结 语

本文针对货运列车速度跟踪系统大滞后的特点展开研究,设计了针对离散时滞系统的最优预见速度跟踪控制器。

在满足精确停车要求下,与滑模控制器和FPID控制器进行对比,验证了其精确跟踪和稳定运行的可行性。仿真结果表明该控制方法在抗干扰性、稳定性和精确性方面优势明显,对滞后特性的处理取得了较好的效果。

【参考文献】

- [1] 肖家博,丁荣军,尚敬.重载列车关键控制技术研究 and 展望[J]. 机车电传动. 2019(1):1.
- [2] 杨杰,贾利民,卢少锋,等.电力牵引货运列车节能运行研究(一):目标速度曲线优化[J]. 铁道学报. 2016,38(4):22.
- [3] 杨杰,贾利民,付云晓,等.电力牵引货运列车节能运行研究(二):速度跟踪组合控制方法[J]. 铁道学报. 2016,38(6):23.
- [4] 林轩,王青元,刘强强,等.长大下坡区间货运列车周期性制动研究[J]. 铁道学报. 2019,41(1):50.
- [5] 樊运新.我国重载电力机车发展历程及思考[J]. 机车电传动,2019(1):9.
- [6] 何之煜,杨志杰,吕旌阳.基于自适应模糊滑模的

- 列车精确停车制动控制算法[J]. 中国铁道科学. 2019,40(2):122.
- [7] YAO X, PARK J H, DONG H, et al. Robust adaptive nonsingular terminal sliding mode control for automatic train operation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019,49(12):2406.
- [8] 杨艳飞,崔科,吕新军.列车自动驾驶系统的滑模PID组合控制[J]. 铁道学报,2014,36(6):61.
- [9] 王龙生,徐洪泽,张梦楠,等.基于混合系统模型预测控制的列车自动驾驶策略[J]. 铁道学报. 2015,37(12):53.
- [10] 余进,何正友,钱清泉,等.列车运行过程的自适应模糊控制[J]. 铁道学报. 2010,32(4):44.
- [11] 贺广宇.基于LQR的列车精确停车控制算法研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [12] 吴鹏,王青元,梁志成,等.基于预测控制的列车精确停车算法[J]. 计算机应用,2013,33(12):3600.
- [13] LIU Z, XIANG C, WANG Y, et al. A model-based predictive direct power control for traction line-side converter in high-speed railway [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017,53(5):4934.
- [14] 王青元,吴鹏,冯晓云,等.基于自适应终端滑模控制的城轨列车精确停车算法[J]. 铁道学报. 2016,38(2):56.
- [15] CAO Y, WANG Z, LIU F, et al. Bio-inspired speed curve optimization and sliding mode tracking control for subway trains [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019, 68(7):6331.
- [16] WANG X, LI S, SU S, et al. Robust fuzzy predictive control for automatic train regulation in high-frequency metro lines [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(6):1295.
- [17] 张彦栋,王青元,刘强强,等.自动驾驶系统运行模式曲线最优预见跟踪控制算法[J]. 计算机应用, 2017,37(增2):266.
- [18] YIN J, CHEN D, LI Y. Smart train operation algorithms based on expert knowledge and ensemble CART for the electric locomotive [J]. Knowledge-Based Systems, 2016,92:78.
- [19] 颜罡,赵斐然,叶锋,等.基于元强化学习的自动列车定速控制[J/OL]. 控制理论与应用,2022. doi: 44.1240. tp. 20220216. 1729. 016.
- [20] 陆小红,郑木火,林宏泉.重载列车智能化操控算法研究与实现[J]. 铁道学报. 2017,39(1):11.