# 基于鲁棒预测控制的高速列车节能运行研究

任志玲，夏博文
（辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院，辽宁 葫芦岛 125105）

**摘要**：针对高速列车在运行过程中的传统控制策略优化精度差、难以达到理想的节能效果的问题，提出了基于安全、准点、节能等多目标要求的高速列车鲁棒预测控制策略。对列车的运行过程进行受力分析，运用聚类和最小二乘法建立了基于多模型的线性预测模型，考虑高速列车惰行运行及道路条件等情况，合理设计出列车的节能目标曲线。将相应的节能曲线作为输入量，采用鲁棒预测控制算法进行优化，有效地提高了模型的适配性和跟踪性。以 CRH3 型列车作为研究对象进行仿真，结果表明，鲁棒预测控制能够满足跟踪节能曲线精度的要求，验证了该节能运行方式的可行性和优越性。

**关键词**：高速列车；多模型；节能；鲁棒预测控制
**中图分类号**：TP18　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000 - 8829(2020)09 - 0137 - 05
**doi**：10.19708/j.ckjs.2020.09.026

# Energy-Efficient Operation Mode of High-Speed Train Based on Robust Predictive Control

REN Zhi-ling, XIA Bo-wen
(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** A robust predictive control strategy based on high-speed train operation is proposed, which can solve the problem of speed train optimization in operation. High speed train was reasonably stress analyzed and a linear prediction model based on multiple models was established. Considering the corresponding situation, the energy saving target curve was reasonably designed. The energy saving curve was used as the input, and the robust predictive control algorithm was used for optimization, which effectively improved the adaptability and traceability of the model. Taking CRH3 train as the research object, the simulation results show that the robust predictive control can meet the requirements of the precision of tracking energy saving curve, and the feasibility and superiority of the energy saving operation mode is verified.

**Key words:** high-speed train; multiple models; energy saving; robust predictive control

随着我国高速铁路运营里程的快速增加，列车操控问题成为了研究热点，其主要集中在安全、准时、舒适和节能这 4 个方面。文献[1]根据时间约束对列车进行建模，根据专家经验和启发式的算法获得运行转换点；文献[2]采用 PID 控制方式，虽然可以满足列车运行的基本要求，但在乘客舒适度方面容易受外界因素影响。将模糊广义预测控制应用于速度跟踪，可以取得一定的跟踪效果，但由于现场经验储备不足，导致在线调整效果不佳[3]；神经网络控制可以很好地解决模糊规则的数量和冲突问题，但存在收敛速度慢的问

**收稿日期**：2019 - 04 - 18
**基金项目**：辽宁省高等学校国(境)外培养项目(2019GJWZD002)；辽宁省高等学校创新团队项目(LT2019007)
**作者简介**：任志玲(1971—)，女，博士，副教授，主要研究方向为控制理论与控制工程；夏博文(1992—)，男，硕士研究生，主要研究方向为电气传动节能控制。

**引用格式**：任志玲，夏博文. 基于鲁棒预测控制的高速列车节能运行研究[J]. 测控技术，2020，39(9)：137 - 141.
REN Z L, XIA B W. Energy-Efficient Operation Mode of High-Speed Train Based on Robust Predictive Control[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(9): 137 - 141.

题[4]。此外,通过充分利用列车区间运行的富裕时间,实现列车节能运行优化操纵,实时调整行车策略,可以提高列车的准点性和节能性[5-6]。

本文的目标是通过合理设计相应的优化曲线,找到合适的转换点,来同时满足上述 4 个方面的指标,以达到节能的效果。在运行控制中采用鲁棒预测控制算法进行优化,使跟踪曲线更加接近实际效果。

# 1　列车模型

## 1.1　动力学模型

高速列车在运行过程中主要受到牵引力和相关阻力的作用,为分析问题时方便简单,将高速列车看成一个质点[6-7],其动力学方程为

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = cf_c \tag{1}$$

$$c = \frac{0.0098}{1+\alpha_3} \tag{2}$$

式中,$v$ 为列车运行时的速度;$t$ 为列车的运行时间;$c$ 为加速度系数;$f_c$ 为列车运行时所受的合力,其表达式为

$$f_c = u - w_0 - w_r - w_s - w_g \tag{3}$$

式中,$u$ 为单位牵引力或制动力;$w_0$ 为高速列车运行时所受的单位基本阻力;$w_r$ 为高速列车运行中的单位弯道阻力;$w_s$ 为高速列车穿越隧道时受到的单位隧道阻力;$w_g$ 为高速列车上下坡时受到的单位坡道阻力。其中:

$$w_0 = \alpha_0 + \alpha_1 v + \alpha_2 v^2 \tag{4}$$

式中,$\alpha_0$ 为高速列车的滚动阻力系数;$\alpha_1$ 为高速列车的机械阻力系数;$\alpha_2$ 为高速列车的外部空气阻力系数;$\alpha_3$ 为列车的回转质量系数,由高速列车的总质量和列车回转部分折算的质量同时决定[8]。

除了高速列车所受的基本阻力外,其他附加阻力的计算方法如下。

① 单位弯道阻力:

$$w_r = \frac{600g}{R} \tag{5}$$

② 单位隧道阻力:

$$w_s = 0.00013 l_s \tag{6}$$

③ 单位坡道阻力:

$$w_g = g\sin\left(\arctan\frac{h_i}{s_i}\right) \tag{7}$$

式中,$R$ 为列车所过弯道的半径;$l_s$ 为列车进入隧道的长度;$g$ 为重力加速度;$h_i$ 为列车运行第 $i$ 个坡度的高度;$s_i$ 为列车运行第 $i$ 个坡度的长度。遇到上坡时,$w_g$ 为正值,呈现阻力作用;遇到下坡时,$w_g$ 为负值,呈现牵引作用[9]。

约束条件如下:

① 初始时刻 $v(0) = v(s) = t(0) = 0$;

② 列车运行时间 $t(s) = T$;

③ 列车在某一段的最大速度应小于此路况的限制速度 $v_{\max} \leqslant v_{\lim}$,$v_{\lim}$ 为上限速度。

## 1.2　能耗模型

列车的能耗主要包括两个部分:① 高速列车克服阻力所消耗的能量;② 高速列车自身辅助设备所消耗的能量,包括灯光、空调等。由于高速列车辅助消耗的能量相对固定,故此不作为讨论重点。列车克服阻力所消耗的能量可以表示为

$$E_T = \int_{t_1}^{t_2} \mu(t)\,\mathrm{d}x \tag{8}$$

式中,$t_1$ 和 $t_2$ 为高速列车运行的始末时刻;$\mu(t)$ 为此时间段所需要的功率。

在实际运行中,需要考虑以下两点:

① 牵引电机的效率 $\eta_M$;

② 再生制动方式的转换效率,即动能转化成机械能的效率 $\eta_b$。

对高速列车能耗进行进一步分析,可以得到:

$$E = \frac{\int f v\,\mathrm{d}t}{\eta_M} - \eta_b \int b v\,\mathrm{d}t + e_0(t_2 - t_1) \tag{9}$$

式中,$f$ 为高速列车的牵引力;$v$ 为当前时刻的速度;$\eta_M$ 为列车电机效率;$\eta_b$ 为列车采用再生制动时转换效率;$b$ 为高速列车即将到站时所产生的制动力;$e_0$ 为单位时间列车辅助的能耗。表 1 为高速列车主要参数。

**表 1　高速列车主要参数**

| 参数名称 | 参数值 |
|---|---|
| 列车总质量 | 980t |
| 列车的最高速度 | 380km/h |
| 列车的运行速度 | 350km/h |
| 单位基本阻力 | $w_0 = 0.76 + 0.00636v + 0.000115v^2$ (N/kN) |

# 2　列车多模型的辨识

高速列车的控制具有不确定性和复杂性,其单一的数学模型很难描述其运行状态,而多模型的建立则可以使整个过程离散化,有助于更好地描述列车实际的运行状态,基于此,用减法类聚法对列车系统进行多模型辨识。减法聚类是一种用来估计数据中的聚类个数以及聚类中心位置快速的单次算法。通过对[0, 350]中随机产生的列车速度使用减法聚类的方法进行划分类别,再利用最小二乘法针对列车模型进行多模型的设计[10]。

基本算法过程如下。

① 设分类数目为 $c$,权重指数为 $m$,起初的聚类中心点为 $v$。

② 根据式(10)得到模糊隶属矩阵为 $\boldsymbol{u}$:

$$\boldsymbol{u}_{ij}=\begin{cases}\left[\sum_{k=1}^{c}\frac{\|x_i-v_j\|^{\frac{2}{m-1}}}{\|x_i-v_k\|^{\frac{2}{m-1}}}\right]^{-1}, & \|x_i-v_k\|\neq 0\\ 1, & \|x_i-v_k\|=0 \text{ 且 } k=j\\ 0, & \|x_i-v_k\|=0 \text{ 且 } k\neq j\end{cases} \tag{10}$$

式中,$u_{ij}$为单独个体;$x_i$ 为第 $j$ 类的模糊隶属度;$v_j$ 为第 $j$ 类的聚类中心。

③ 计算每一类的聚类中心 $v$:

$$v_j=\frac{\sum_{i=1}^{n}u_{ij}^{m}x_i}{\sum_{i=1}^{n}u_{ij}^{m}} \tag{11}$$

④ 计算并判别是否满足函数值,若满足,则聚类结束;若不满足,则返回第②步重新计算。

$$J=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{c}(u_{ij})^{m}|x_i-v_j| \tag{12}$$

⑤ 在每一个聚类选择数据,得到输入和输出的第 $i$ 个子模型:

$$y(k)+a_iy(k-1)=b_iu(k-1)+\xi(k) \tag{13}$$

⑥ 参数 $a_i$ 和 $b_i$ 通过最小二乘法进行辨识。令采样周期 $T_s=1$ s 建立列车多模型的集合[10]:

$$\begin{aligned}&y(k)-0.9998y(k-1)=0.318u(k-1)+\xi(k)\\&y(k)-0.9995y(k-1)=0.318u(k-1)+\xi(k)\\&y(k)-0.9989y(k-1)=0.318u(k-1)+\xi(k)\\&y(k)-0.9984y(k-1)=0.318u(k-1)+\xi(k)\\&y(k)-0.9979y(k-1)=0.318u(k-1)+\xi(k)\\&y(k)-0.9976y(k-1)=0.318u(k-1)+\xi(k)\end{aligned}$$

式中,$y(k)$作为输出量,为 $k$ 时刻的运行速度;$u(k)$作为输入量,为 $k$ 时刻的单位牵引力或者单位制动力;$\xi(k)$为 $k$ 时刻的外界干扰。

## 3 节能优化曲线分析及算法

### 3.1 目前的控制策略及优化曲线

高速列车在运行中的节能优化主要从以下两个方面进行研究:① 列车的运行方式多处于匀速或者惰行的情况[8-9];② 再生制动产生能量。

由于运行环境复杂,列车运行具有不确定性。为了使效果更加接近实际,将模型简化为平直道和上下坡道来进行分析。传统优化运行过程:列车出发—加速—匀速—减速—停车,期间大部分处于匀速模式,如图 1 所示。而所做的改进优化曲线则是相对于时间误差之内,让列车处于加速—惰行—加速过程之间的转换,如图 2 所示[11-12]。图 3 为列车改进优化加速度曲线图,它满足启动和运行中较平稳的要求($-1\leqslant a\leqslant 1$)。在不同工况下,改进优化节能运行方式的模型切换能做到更加平稳。在过渡期间,单位控制力的变化量不是很大,所以耗能也较少,同时也满足了舒适性的需求。图 4 为改进优化距离曲线。

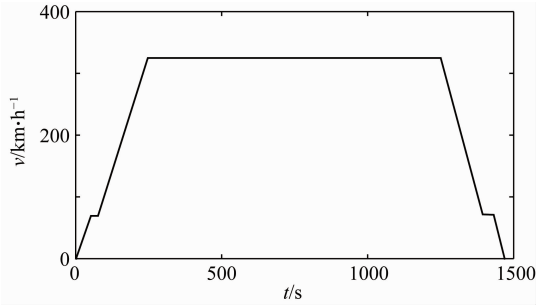



图 1 传统优化运行曲线

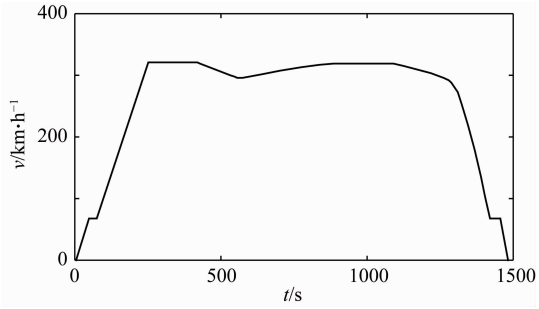



图 2 改进优化运行曲线

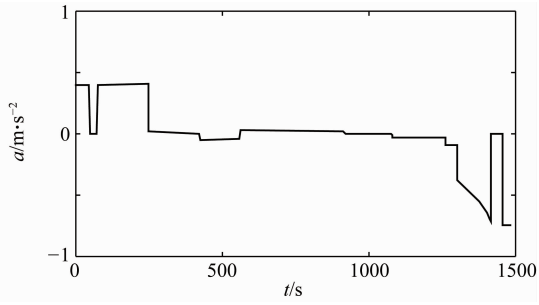



图 3 改进优化加速度曲线

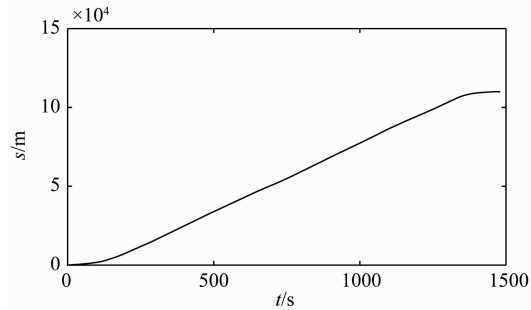



图 4 改进优化距离曲线

牵引(加速的能耗)、惰行(自消耗)和制动(列车的自身损耗和回馈的能耗)是能量消耗主要 3 个方面。根据上述的能耗计算公式可以得出图 4 列车的能耗为 11302.2MJ;而图 3 中进行改进优化后所消耗的能量为 9205.4MJ。根据两者能耗之间的对比,可得出改进优化方式比传统传统方式节能 17.7%,具体结果如表 2 所示。

表 2　高速列车运行能耗对比　　单位:MJ

| 能量消耗 | 加速区间 | 区间行驶 | 制动区间 |
|---|---|---|---|
| 传统运行 | 2432.4 | 6468 | 2401.8 |
| 优化运行 | 2432.4 | 4880 | 1893.0 |

### 3.2　鲁棒预测控制

列车运行控制时难免会受到模型不准确和外部干扰等因素的影响。传统 MPC 虽然具有一定的鲁棒性,但模型一旦失配,MPC 将会失准。当模型不确定时,就不能准确反映出列车的实际特性,所以在 MPC 控制策略下可能会出现误差增大的情况,致使跟踪结果不理想。针对此问题,设计鲁棒预测控制算法[13-15]:

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}(k)\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}(k)\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{D}(k)\boldsymbol{\xi}(k) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k) \tag{15}$$

式中,$\boldsymbol{x}(k)$为状态量;$\boldsymbol{u}(k)$为输入量;$\boldsymbol{y}(k)$为输出量;$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 为动态矩阵;$\boldsymbol{D}$ 为权重矩阵;$\boldsymbol{\xi}(k)$为干扰量,且 $\|\boldsymbol{\xi}(k)\|\leqslant 1$,若 $\boldsymbol{\xi}(k)=0$,则说明 $k$ 时刻无干扰。

系统的系数矩阵满足:

$$[\boldsymbol{A}(k),\boldsymbol{B}(k),\boldsymbol{D}(k)]\in Co\{[A_1,B_1,D_1],[A_2,B_2,D_2],\cdots,[A_L,B_L,D_L]\}=\boldsymbol{\Omega} \tag{16}$$

$$[\boldsymbol{A}(k),\boldsymbol{B}(k),\boldsymbol{D}(k)]=\sum_{i=1}^{L}\lambda_i(k)[A_iB_iD_i],\ \sum_{i=1}^{L}\lambda_i(k)=1,\ \lambda_i(k)\geqslant 0,\ i=1,2,\cdots,L \tag{17}$$

为使系统的预测输出值尽可能接近给定的参考值,根据高速列车行驶过程设计优化性能指标,并且通过加权方式体现出来。取二次型优化目标函数为

$$J=\sum_{i=1}^{p}\|\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{y}_P(k)\|_Q^2+\|\boldsymbol{U}(k)\|_R^2 \tag{18}$$

在 $k$ 时刻,求解:

$$\min_{\boldsymbol{u}(k)}\max_{[\boldsymbol{A}(k),\boldsymbol{B}(k),\boldsymbol{D}(k)]\in\boldsymbol{\Omega}}J(k) \tag{19}$$

$$\|\boldsymbol{u}(k)\|_2\leqslant u_{\max},\ i\geqslant 0 \tag{20}$$

$$\|\boldsymbol{y}(k)\|_2\leqslant y_{\max},\ i\geqslant 1 \tag{21}$$

式中,$Q=\mathrm{diag}(q_1,q_2,\cdots,q_p)$;$R=\mathrm{diag}(r_1,r_2,\cdots,r_p)$为权系数;$\boldsymbol{y}(k)$为参考值矩阵;$\boldsymbol{y}_p(k)$为预测输出值矩阵;$\boldsymbol{u}(k)$为控制增量。对于 $Q$ 列车舒适度、停车准时性和停车准确度的加权,本文取相同的值;权系数 $R$ 影响控制量,当对控制能耗影响程度降低时,其跟踪能力会变强,加速度变化明显。

$x$ 的二次函数 $V(x)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p}\boldsymbol{x}$,其中 $\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{p}>0$。在 $k$ 时刻,满足如下不等式:

$$V(\boldsymbol{x}(k+i+1|k))-V(\boldsymbol{x}(k+i|k))\leqslant -[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(k+i|k)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}(k+i|k)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k+i|k)\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(k+i|k)] \tag{22}$$

当 $\boldsymbol{x}(\infty|k)=0$ 时,即 $V(\boldsymbol{x}(\infty|k))=0$,系统渐进稳定。从 $i=0$ 到 $\infty$ 进行累加,可得:

$-V(x(k|k))\leqslant -J_\infty(k)$。此时可以转化成求解反馈控制律 $\boldsymbol{u}(k+i|k)=\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}(k+i|k)$的问题,并使得 $V(\boldsymbol{x}(k|k))$最小。

在 $k$ 时刻的反馈矩阵为:$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{Y}\boldsymbol{Q}^{-1}$,$\boldsymbol{Q}>0$。可以求解 $\min_{\gamma,\boldsymbol{Q},\boldsymbol{Y}}\gamma$。

同时须满足:

$$\begin{bmatrix}1 & \boldsymbol{x}(k|k)^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{x}(k|k) & \boldsymbol{Q}\end{bmatrix}\geqslant 0 \tag{23}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q} & \boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{0.5} & \boldsymbol{Q}\boldsymbol{Q}_1^{0.5} & \boldsymbol{Q} & (\boldsymbol{A}_j\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{B}_j\boldsymbol{Y})^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{R}^{0.5}\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}} & \gamma\boldsymbol{I} & 0 & 0 & 0\\ \boldsymbol{Q}_1^{0.5}\boldsymbol{Q} & 0 & \gamma\boldsymbol{I} & 0 & 0\\ \boldsymbol{Q} & 0 & 0 & \gamma\boldsymbol{\lambda}^{-1} & 0\\ \boldsymbol{A}_j\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{B}_j\boldsymbol{Y} & 0 & 0 & 0 & \boldsymbol{Q}-\boldsymbol{D}_j\gamma\boldsymbol{\lambda}^{-1}\boldsymbol{D}_j^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\geqslant 0,\quad j=1,2,\cdots \tag{24}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{u}_{\max}^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{y}\\ \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{Q}\end{bmatrix}\geqslant 0 \tag{25}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q} & (\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{y})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{B}_i\boldsymbol{y}) & y_{\max}^2\boldsymbol{I}\end{bmatrix}\geqslant 0 \tag{26}$$

根据运行运行条件,给出以下限制。

① 影响列车舒适度的加速度:$a_{\min}\leqslant a\leqslant a_{\max}$;

② 列车停车时间误差范围:$\Delta T\leqslant\Delta T_{\max}$;

③ 列车停车位置误差范围:$\Delta l\leqslant\Delta l_{\max}$。

### 3.3　模型切换策略

切换指标体现了每一个子模型和系统的相似程度,$J_i$ 的值越小,说明与模型的匹配程度越高。

$$J_i(k)=ae_i^2(k)+b\sum_{j=1}^{l}\rho^j e_i^2(k-j) \tag{27}$$

式中,$e_i(k)=y(k)-y_i(k)$表示第 $i$ 个子模型与实际输出的差值[11];$l$ 为过去的时域长度;$a>0$,$b>0$ 分别为当前时刻和过去第 $i$ 时刻失配误差的加权系数;遗忘因子 $\rho$ 在(0,1)中取值,表示过去 $l$ 个时刻的失配误差被遗忘的程度。

在式(27)中,取最小值作为切换条件,理论上匹配值越高,系统的控制性能越理想,但系统的性能指标 $J_i$ 的值也并非完全决定了模型的失配程度,可能出现 $J_i$ 短时间内较小,系统存在较大失配的情况。所以在运行过程中不仅需要考虑选取相对小的 $J_i$ 值时所对应的子模型,而且需要选取一定长度的 $l$、合适的 $\rho$ 和加权系数 $b$。综上所述,切换方式可以表示为

$$s=\arg(\min_{i=1,2,3\cdots}J_i) \tag{28}$$

## 4　系统仿真实验分析

以节能优化目标曲线作为系统输入,将新一代高速列车 CRH3 为对象,再选定路线进行仿真,运用预测控制算法对其进行优化,提高对目标曲线的跟踪控制性能以及减少高速列车在匀速区域运行时的能耗。其间通过传感器得到当前时刻信息,对未来的行驶状态

进行预测和反馈校正,在下一时刻重复此次操作。

$a_{\min}=-1\ \mathrm{m/s^2}$,$a_{\max}=1\ \mathrm{m/s^2}$;$\Delta T_{\max}=5\ \mathrm{s}$;$\Delta l_{\max}=0.5\ \mathrm{m}$;$V_{\max.\,out}=V_{\max.\,in}=75\ \mathrm{km/h}$,$V_{\min}=0$,$V_{act}=330\ \mathrm{km/h}$,$V_{\lim}=350\ \mathrm{km/h}$;$D=1$;$R=1$;$Q=\mathrm{diag}(1,1,1)$。

图5为速度跟踪曲线仿真图,图5中将鲁棒预测控制和广义预测控制进行对比,可以看出,基于广义预测控制方法所得的速度跟踪曲线效果相对较差,尤其是在启动和工况切换阶段误差较大。鲁棒预测控制的跟踪曲线在各个工况下更加接近目标曲线,反映出了鲁棒预测控制方法的跟踪性能更好。虽然鲁棒跟踪时间与设定值的误差为2 s,但仍在允许的误差范围之内,体现了良好的跟踪性能。

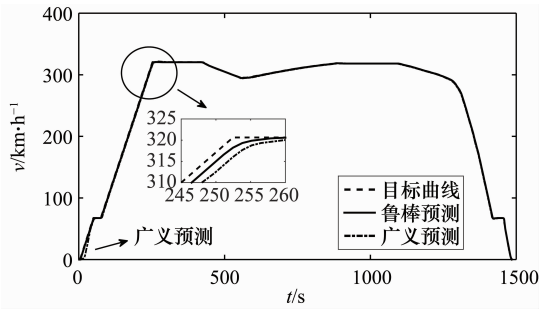



图5 速度跟随曲线对比图

图6为距离跟踪曲线图。从图6中可以看出,广义预测控制的距离跟踪误差效果较差,而本文采用的优化方法在高速列车运行时具有很好的距离跟踪性,相比之下,本文方法比广义预测控制方法的跟踪性明显提高了一定的精度。加之鲁棒预测控制本身具有的抗干扰性,使列车运行更加平稳,而舒适度和停车准确性等方面也均达到了相应的要求。

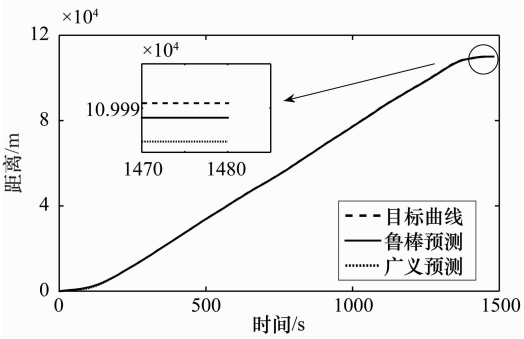



图6 距离跟踪曲线

## 5 结束语

根据高速列车的牵引特性,基于聚类和最小二乘法辨识建立高速列车的运行模型,设计了改进节能运行曲线和鲁棒预测控制算法。该控制策略在满足高速列车安全、舒适和准时的要求基础上,相比于广义预测控制方法,可获得更高的控制精度和更快的收敛速度,并且体现了一定的节能效果。

**参考文献:**

[1] 丁勇,毛保华,刘海东,等. 列车节能运行模拟系统的研究[J]. 北京交通大学学报,2004,28(2):76-81.

[2] 杨罡,刘明光,喻乐. 高速列车运行过程的非线性预测控制[J]. 铁道学报,2013,35(8):16-21.

[3] 顾桂梅,蒲松芝. 基于模糊广义预测控制算法的ATO系统仿真研究[J]. 城市轨道交通研究,2014,17(1):69-73.

[4] GAO S G,DONG H R,NING B,et al. Adaptive fault-tolerant automatic train operation using RBF neural networks[J]. Neural Computing and Applications,2015,26(1):141-149.

[5] 曹佳峰,张博昊,刘斌. 高速列车节能优化运行模式研究[J]. 铁道运输与经济,2017,39(8):87-93.

[6] 王娟. 高速列车节能运行自适应优化方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.

[7] 黄问盈. 我国《列车牵引计算规程》的回顾与前瞻[J]. 铁道机车车辆,2000(1):7-10.

[8] 康熊,曾宇清,张波. 高速列车空气阻力测量分析方法[J]. 中国铁道科学,2012,33(5):56-61.

[9] 周锋. 动车组牵引计算建模及软件仿真[D]. 成都:西南交通大学,2007.

[10] 杨辉,张坤鹏,王昕,等. 高速列车多模型广义预测控制方法[J]. 铁道学报,2011,33(8):80-87.

[11] 刘建强,魏远乐,胡辉. 高速列车节能运行优化控制方法研究[J]. 铁道学报,2014(10):7-12.

[12] 仲维锋,徐洪泽. 基于控制参数化方法的列车节能操纵优化研究[J]. 铁道学报,2017,39(6):72-79.

[13] 平续斌,丁宝苍,韩崇昭. 动态输出反馈鲁棒模型预测控制[J]. 自动化学报,2012,38(1):31-37.

[14] 俞华军. 带有非线性扰动的不确定时滞系统鲁棒预测控制[J]. 电子设计工程,2016,24(6):190-193.

[15] 余开江,荆鹏辉,张宏伟,等. 插电式混合动力汽车模型预测控制策略研究[J]. 测控技术,2015,34(8):273-278.

□

《测控技术》征订
电子版期刊静态、动态广告!

一朝发布,持续在线,
让广告展示无穷的生命活力,
不再为刊期、页面、成本困扰!

网址:www.mct.com.cn(测控在线)
电话:(010)65667357 / 65665345