

采用预测控制的地铁节能优化控制算法

汪仁智, 李德伟[†], 席裕庚

(上海交通大学 自动化系; 系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 本文针对地铁列车自动运行系统(automatic train operation, ATO)一般运行情况以及晚点延迟发车情况下的节能问题, 基于预测控制算法设计了地铁节能优化控制算法. 利用预测控制算法的在线滚动优化特性, 通过设计含有能量消耗趋势优化项的控制目标函数, 控制算法能够针对节能目标实现快速动态调整. 通过调节目标函数中各优化项权重的相对大小, 节能算法可以在满足列车时间与路程运行指标的同时, 达到降低能耗的目的. 在 MATLAB 平台上利用真实车辆模型对提出的节能优化控制算法进行了仿真, 在列车不延迟与延迟的情况下, 算法都很好地平衡了跟踪目标与节能目标, 为地铁能耗动态优化控制提供了可行方案.

关键词: 地铁; 节能优化; 滚动优化; 模型预测控制

中图分类号: U231.6 文献标识码: A

Metro energy saving optimization algorithm by using model predictive control

WANG Ren-zhi, LI De-wei[†], XI Yu-geng

(Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University;

Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: The goal of this paper is to solve energy saving optimization problem of metro trains which are probably delayed from starting station. Based on predictive control, a rolling optimization control algorithm is designed for the metro automatic train ATO system. The expression of energy consumption is introduced into the objective function of rolling optimization in the train ATO model predictive control. By adjusting the weights of each term in corresponding objective function, controller can track the set curve and achieve energy saving simultaneously. Simulation results on MATLAB platform verify the effectiveness of the control scheme. Energy optimization is dynamic and satisfactory solution taking both tracking and energy saving into account can be obtained even for the train with start delay.

Key words: metro; energy saving optimization; rolling optimization; model predictive control

1 引言(Introduction)

地铁具有运量大、速度快、运行准时、保护环境、乘坐舒适等特点, 是城市公共交通重要的组成部分. 地铁作为能源密集型产业, 每年都会消耗大量的能源, 其中牵引能耗占到45%~50%^[1], 因此从列车牵引的角度解决轨道交通能量消耗问题是地铁节能优化的重要方向.

当前解决地铁列车牵引节能优化问题主要是从静态优化设定速度曲线的角度进行, 在解析算法、启发式算法和转化为规划问题等方面都取得了进展. 解析算法方面, Khmelnitsky^[2]用最大值原理分析证明能耗最优解包括最大牵引、巡航、滑行和最大制动4种工况. Liu和Golovitcher^[3]给出了变化坡度中各路线行驶

策略的解析解, Howlett 等人^[4]给出了对于不止一个陡坡问题的解析解. 启发式算法方面, Chang和Sim^[5]提出了遗传优化算法, Ke提出了蚁群优化算法^[6]. 另外, 将连续优化问题转化为规划问题求解是静态优化设定速度曲线优化的重要发展趋势. Wang Y等人^[7]利用伪谱方法将速度曲线设计问题划归为多相位优化控制问题, 并且采用混合整数规划方法来降低时间复杂度. Wang P等人^[8]也利用伪谱方法使列车速度曲线满足变化的坡度和最大速度约束, 并平衡列车与后续延迟列车的能耗.

在静态优化设定曲线之后, 再针对地铁列车自动运行系统(automatic train operation, ATO)进行控制算法设计, 控制列车跟踪设定目标速度曲线. 当前地铁

收稿日期: 2016-11-17; 录用日期: 2017-06-12.

[†]通信作者. E-mail: dwli@sjtu.edu.cn; Tel.: +86 13917551024.

本文责任编辑: 陈虹.

国家自然科学基金项目(61374110, 61573239, 61433002, 61590924, 61521063)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61374110, 61573239, 61433002, 61590924, 61521063).

列车ATO控制算法主要采用PID算法或改进的PID算法^[9]. 由于PID算法具有反复加速、乘客舒适度不够高等缺点, S. Yasunobu等人提出了地铁模糊控制算法^[10], H. R. Dong等人对其进行了改进, 提出了ATO自适应模糊控制算法^[11]. 此外, 高精度的迭代学习控制^[12]以及可以多目标优化的预测控制控制算法^[13-15]都相继应用于ATO控制算法设计中.

虽然在静态节能优化和ATO控制算法两方面研究者都做了大量研究, 但两项研究相对独立. 如图1所示, 列车进行ATO控制时, 其控制信号是基于静态速度曲线的设定结果作出的, 并不是针对列车运行的实时动态情况作出的. 通过离线对列车设定速度曲线进行节能优化可以得到能耗更优的速度设定, 但这一过程涉及的优化问题规模一般较大, 且由于准点要求和当前列车运行情况等, 优化问题本身也随着运行时间的推进在实时改变, 因此对于速度设定曲线的优化计算难以在线实施. 另外, 在列车运行过程中, 尤其是在上下班运营高峰期, 由于自动感应门延迟关闭等而造成列车晚点发车的情况非常普遍^[16]. 在这种情况下, 目前的研究只能给出两种选择: 一种是继续跟随节能设定速度曲线, 维持能耗不变但列车及后续列车相继晚点; 另一种则是以更高的速度设定曲线到站, 增加能耗以避免晚点. 显然二者都不是让人满意的方式, 前者会扰乱列车正常的运行时刻表, 后者则存在灵活性不足的问题.

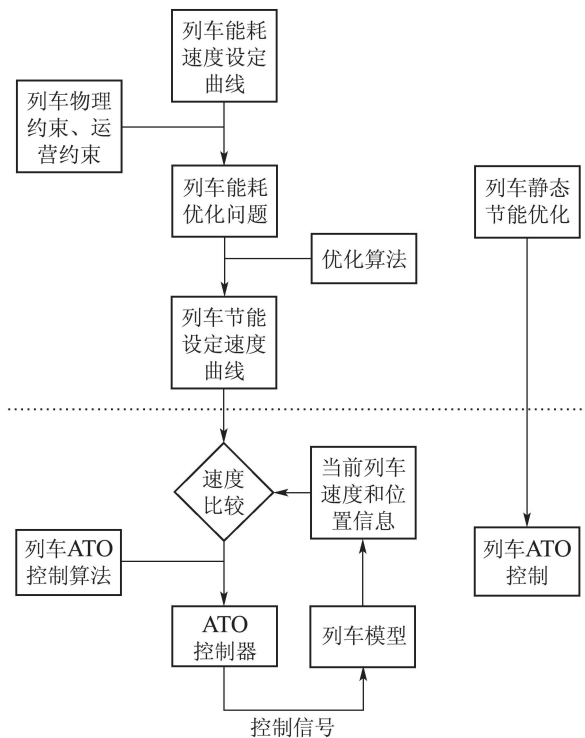


图1 列车节能优化控制当前研究

Fig. 1 Research on train energy saving at present

针对这一问题, 本文基于预测控制算法在ATO控制中的研究成果^[13], 提出基于预测控制的地铁节能优

化控制算法. 主要研究目标是解决在跟踪既定设计速度曲线情况下, 列车滚动节能优化问题, 包括列车延迟出发情况下的节能优化问题.

本文首先介绍列车的基础模型, 包括动力学模型与能量消耗模型. 接下来介绍基于预测控制的地铁节能优化控制算法设计, 重点说明包括列车路程跟踪项和能耗优化项的优化目标函数, 以及优化目标函数的节能原理. 最后在MATLAB平台上对控制器进行了仿真, 仿真依列车是否延时发车进行分类讨论, 说明控制算法在不同情况下的有效性.

2 地铁列车动力学与能量消耗模型(Dynamical model and energy consumption model of metro train)

地铁列车动力学模型是列车作为被控对象的数学表达式, 用来描述列车在输入控制加速度情况下列车的动态表现, 它由列车牵引制动特性决定. 能量消耗模型是列车能耗值的计算方法, 根据列车能耗相关的物理关系, 计算得到列车运行过程中的消耗的能量.

2.1 动力学模型(Dynamical model)

列车动力学模型的数学表达会随着列车物理模型、电机种类以及列车内部控制电路等因素的不同而有所差异. 利用地铁车辆的动力学特性, 列车的目标控车加速度 $a_c(t)$ 与响应加速度 $a_r(t)$ 之间的关系可以用1个一阶惯性加纯滞后环节来描述:

$$G(s) = \frac{a_r(s)}{a_c(s)} = \frac{k}{Ts + 1} e^{-ns}, \quad (1)$$

式中: 为 k 稳态增益, T 为惯性环节的过渡时间, n 为纯滞后时间.

针对不同的列车, 列车动力学模型表现为这3个参数的不同. 本文采用真实列车车辆数据辨识得到列车模型: 真实列车在运行过程中, 其牵引特性和制动特性有很大差异, 因此针对牵引和制动进行分别建模. 基于地铁列车的真实运行数据^[13], 本文选取用于控制仿真的列车模型为

$$\begin{cases} \text{牵引: } G(s) = e^{-0.6s} \frac{1.2}{0.6s + 1}, \\ \text{制动: } G(s) = e^{-0.8s} \frac{1.1}{0.5s + 1}. \end{cases} \quad (2)$$

2.2 能量消耗模型(Energy consumption model)

本文根据真实列车的工作手册, 从功能关系来考察列车能量消耗模型. 设列车站间运行的总时长为 T , 列车站间运行的能量消耗 E 可由瞬时功率 $P(t)$ 在整个运行区间积分得到

$$E = \int_0^T P(t) \cdot dt, \quad (3)$$

式中瞬时总功率 $P(t)$ 可以表示为

$$P(t) = \frac{F(t)v(t)}{\eta(v)}, \quad (4)$$

式中: $F(t)$ 为列车运行过程中瞬时牵引力, $v(t)$ 为瞬时速度, $\eta(v)$ 为该速度所对应的电动机效率。

在列车运行过程中, 电能由负载电网将 1000 V~1800 V 的高压电的形式传输给列车电机, 由于空转、转动阻力等因素的影响, 并不是所有的电能都转换为了牵引力, 还需要考虑其他损耗的影响, 因此需要引入电机效率对功率进行修正。列车电机效率 $\eta(v)$ 与电机转动速度有关, 由于车辆轴承直接将电机转速传递给车轮, 因此直接考虑 $\eta(v)$ 与列车瞬时速度 $v(t)$ 的关系。本文利用列车实际测量数据, 得到了 $\eta(v)$ 的多项式如式(5)所示, 以仿真真实列车的运行情况:

$$\eta(v) = \varphi_0 + \varphi_1 \cdot v + \varphi_2 \cdot v^2 + \cdots + \varphi_5 \cdot v^5. \quad (5)$$

值得注意的是, 式(3)中的 E 代表的是能量消耗, 因此只有 $P(t) > 0$ 时才能计入能量消耗。 $P(t) < 0$ 时, 列车处于再生制动的过程中, 目前的真实列车运行尚未利用这部分能量, 而是通过电阻以热能的形式发散发掉, 因此本文不考虑再生制动能耗对总能耗的影响。

列车电机将电能转化为牵引力, 电机输出的牵引力并非完全用于列车牵引, 还有一部分需要抵消阻力的影响。瞬时牵引力 $F(t)$ 计算表达式为

$$F(t) = m \cdot (1 + \gamma) \cdot \dot{v} + f_r, \quad (6)$$

式中: m 为列车总质量(车重+负载), $\dot{v}$ 为列车瞬时加速度, f_r 为列车其他外力, 为回转质量系数。引入回转质量系数是因为列车运行不仅仅是平动运动, 还包括轮子的转动、列车皮带的拖动和其他损耗。

外力 f_r 主要考虑坡道力、空气阻力和曲面阻力:

$$\begin{cases} f_r = f_s + f_a + f_h, \\ f_a = a_1 v^2 + m \cdot (b_1 + c_1 v) + d_1, \end{cases} \quad (7)$$

式中: m 为列车总质量, a_1, b_1, c_1, d_1 为常数, 由车辆外形构造决定, 可由列车技术手册得到。

3 地铁节能优化控制算法设计 (Design of metro energy saving optimization algorithm)

本文基于模型预测控制算法针对列车晚点出发的节能优化问题进行节能优化控制算法设计。预测控制是一种动态优化控制算法, 可以进行滚动优化是预测控制与传统最优控制的根本区别^[17]。预测控制算法在预测时域内, 可以针对某几项性能指标进行综合优化来确定未来的控制作用。选择不同优化目标函数, 预测控制可以改善研究者关注的被控对象指标; 通过调整各项目标的权重, 研究者也能在多个控制目标之间取得一个满意的多目标控制结果^[18]。预测控制多目标控制的特性为本文滚动优化列车能耗提供了可能。本文利用预测控制这一特性, 将路程跟踪项和能耗优化项加入优化函数中, 在准点到站与节约能耗之间寻求满意解。

3.1 基于状态空间的预测模型 (Predictive model based on state space equation)

将列车动力学模型写成状态空间表达式并进行离散化后有

$$\begin{cases} \tilde{x}(k+1) = \tilde{A}\tilde{x}(k) + \tilde{B}\Delta u(k-n) + \tilde{J}_1\tilde{D}_1(k), \\ y(k) = C\tilde{x}(k) = [1 \ 0 \ 0]\tilde{x}(k), \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\tilde{x}(k) = \begin{bmatrix} v(k) \\ a_r(k) \\ u(k-n-1) \end{bmatrix}, \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{J}_1 = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{D}_1(k) = \begin{bmatrix} d(k) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

为了消除静差, 式(8)采用了增量控制, 通过增广状态变量的方式将控制增量 $\Delta u(k)$ 作为控制变量。选取速度、加速度与前一时刻的控制量作为状态变量, 则状态空间表达式也为增广矩阵。

根据实际的工程应用场景, 选取目标控车加速度 $a_c(t)$ 为控制量:

$$u(t) = a_c(t). \quad (9)$$

设当前 k 时刻未来 M 个控制增量为 $\Delta U(k) = [\Delta u(k) \ \Delta u(k+1) \ \cdots \ \Delta u(k+M-1)]^T$, 在它们的作用下, 预测出的系统状态为 $\tilde{X}(k) = [\tilde{x}(k+n+1) \ \tilde{x}(k+n+2) \ \cdots \ \tilde{x}(k+n+N)]^T$ 。其中 N 为预测时域, 即预测未来 N 步内增广状态变量的值:

$$\begin{aligned} \tilde{X}(k+n) = \\ F\tilde{x}(k+n) + G\Delta U(k) + HD(k+n), \end{aligned} \quad (10)$$

其中:

$$\tilde{X}(k+n) = \begin{bmatrix} \tilde{x}(k+n+1) \\ \vdots \\ \tilde{x}(k+n+N) \end{bmatrix},$$

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+M-1) \end{bmatrix},$$

$$D(k+n) = \begin{bmatrix} \tilde{J}_1\tilde{D}_1(k+n) \\ \vdots \\ \tilde{J}_1\tilde{D}_1(k+n+N-1) \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} \tilde{B} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 \\ \tilde{A}^{M-1}\tilde{B} & \cdots & \tilde{B} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{A}^{N-1}\tilde{B} & \cdots & \tilde{A}^{N-M}\tilde{B} \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} E & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A} & E & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}^{N-1} & \tilde{A}^{N-2} & \cdots & E \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \tilde{A} \\ \vdots \\ \tilde{A}^N \end{bmatrix}.$$

由此可得预测未来 N 步的速度输出为

$$Y(k+n) = \begin{bmatrix} y(k+n+1) \\ \vdots \\ y(k+n+N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\tilde{x}(k+n+1) \\ \vdots \\ C\tilde{x}(k+n+N) \end{bmatrix} = F_1\tilde{x}(k+n) + G_1\Delta U(k) + H_1D(k+n), \quad (11)$$

其中:

$$F_1 = \begin{bmatrix} C\tilde{A} \\ \vdots \\ C\tilde{A}^N \end{bmatrix}, \quad G_1 = \begin{bmatrix} C\tilde{B} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 \\ C\tilde{A}^{M-1}\tilde{B} & \cdots & C\tilde{B} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C\tilde{A}^{N-1}\tilde{B} & \cdots & C\tilde{A}^{N-M}\tilde{B} \end{bmatrix}, \quad H_1 = \begin{bmatrix} C & 0 & \cdots & 0 \\ C\tilde{A} & C & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C\tilde{A}^{N-1} & C\tilde{A}^{N-2} & \cdots & C \end{bmatrix}.$$

3.2 节能优化控制器设计(Design of energy saving controller)

本文的控制目标为,在满足列车运行时间准确、路程准确的前提下,通过滚动优化能量消耗指标,降低列车的能量消耗.控制优化的目标函数考虑列车对路程曲线的跟踪效果、控制量增强变化幅度以及能量消耗大小.

3.2.1 路程跟踪函数(Distance tracking function)

对于常见ATO控制算法,控制器的控制目标是跟踪列车的设定速度曲线,即使得式(11)中列车输出的速度序列越接近设定速度序列越优,这是为了保证列车全局行驶的运行时间准确、路程准确.本文需要在满足运行时间和路程准确的基础上为能耗优化提供裕量,因此选取列车在预测时域内的路程作为跟踪项:

$$Y_s(k+n) = \begin{bmatrix} y_s(k+n+1) \\ \vdots \\ y_s(k+n+N) \end{bmatrix} =$$

$$T_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(k+n+1) \\ \vdots \\ y(k+n+N) \end{bmatrix} + y_s(k+n) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: T_s 是采样时间, $Y_s(k+n) = [y_s(k+n+1), y_s(k+n+2), \dots, y_s(k+n+N)]^T$ 代表了列车未来 N 个时刻内的各个时刻的路程,由预测时域内的路程叠加上当前列车输出路程构成.选取路程作为跟踪项的优点在于可以为能耗优化提供优化裕量,也利于保证全局路程的准确.

另外,为了增强ATO系统的稳定性保证车辆运行安全,根据文献[17],在跟踪目标函数中加入对控制量增量的抑制项,避免控制量增量变化幅度过大.

3.2.2 能量消耗优化项(Energy saving optimizing expression)

预测控制每实施一步控制信号,控制量都会动态实时地进行滚动优化.因此针对某些复杂的优化指标,可以在不改变其变化趋势的情况下进行近似,以简化优化问题,提高算法实时性.基于这个目标,本文在优化目标函数中引入能耗优化项 $E(k)$, $E(k)$ 通过计算在预测时域内增加的能量消耗来反应能耗变化趋势.

由式(3)–(7)可知 $E(k)$ 是一个非线性函数,优化问题是一个非线性优化问题,这给实际实施带来困难.考虑到能耗的非线性特征主要体现在电机效率的转化上,对能耗的趋势没有影响,因此将功率 $P(t)$ 进行线性化处理:

$$P(t) = (C_1\dot{v}(t) + C_2) \cdot v(t), \quad (13)$$

式中: $v(t)$ 为列车瞬时速度, $\dot{v}(t)$ 为列车加速度.

将式(5)–(7)代入式(4)中可以发现,决定功率趋势的是列车瞬时牵引力,因此 C_1 和 C_2 表达式为

$$C_1 = \frac{m \cdot (1 + \gamma)}{\bar{\eta}}, \quad C_2 = \frac{\bar{f}_r}{\bar{\eta}}, \quad (14)$$

式中 $\bar{f}_r$ 和 $\bar{\eta}$ 分别为在运行区间内外力与电机效率的平均值.

由式(9)可知控制量选取为设定加速度,在优化过程中,优化目标函数考察的是预测时域 N 内的能耗增量,因此可得

$$P(t) = (C_1u(t) + C_2) \cdot v(t). \quad (15)$$

在预测时域内, $v(t)$ 变化量很小,可以近似认为

$$P(t) = (C_1 \cdot \Delta u(t) + C_2) \cdot v(t). \quad (16)$$

由式(3)和式(16)可得, 列车在预测时域内增加的能量消耗 $E(k)$ 为

$$E(k) = \sum_{k=n+1}^{n+N} \Delta P(k) \cdot T_s, \quad (17)$$

式中 T_s 为采样时间。

通过上述近似处理后, 式(17)中 $E(k)$ 与控制增量向量 $\Delta U(k)$ 呈线性关系。优化问题由非线性优化问题转变为是二次规划问题, 在保证优化趋势的情况下大幅降低计算时间, 实现实时动态的滚动优化。

3.2.3 优化模型(Optimizing model)

由以上分析, 可以将控制器的目标函数设计为

$$J = \|W_s(k+n) - Y_s(k+n)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 + \|E(k)\|_V^2, \quad (18)$$

其中: 加权值分别为 $Q = \text{diag}\{q_1, q_2, \dots, q_P\}$, $R = \text{diag}\{r_1, r_2, \dots, r_M\}$, $V = \text{diag}\{v_1, v_2, \dots, v_M\}$ 。式(18)中第1项为路程跟踪性能; 第2项为控制量增量抑制项; 第3项为能耗优化项。列车运行过程中需要考虑准时到站、准确停靠、乘客舒适度等运行指标, 可以通过调整式(18)中各权值的相对比值来满足对各优化目标的不同需求。

整个列车ATO系统节能优化控制的优化问题为

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U(k)} J &= \|W_s(k+n) - Y_s(k+n)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 + \|E(k)\|_V^2, \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} Y_s(k+n) = O \cdot Y(k+n), \\ Y(k+n) = \\ F_1 \tilde{x}(k+n) + G_1 \Delta U(k) + H_1 D(k+n), \\ Y_{\min} \leq Y(k+n) \leq Y_{\max}, \\ U_{\min} \leq U(k) \leq U_{\max}, \\ \Delta U_{\min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\max}, \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $Y_{\min}$, $U_{\min}$, $\Delta U_{\min}$ 分别为输出量、控制量和控制量增量向量的下限, $Y_{\max}$, $U_{\max}$, $\Delta U_{\max}$ 分别为输出量、控制量和控制量增量向量的上限。其中: $Y_{\min}$, $Y_{\max}$, $U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 由电机最大输出、允许最大加速度等列车运行约束决定, $\Delta U_{\min}$ 和 $\Delta U_{\max}$ 由列车舒适度约束决定。

通过优化问题求解出控制增量向量

$\Delta U(k) = [\Delta u(k) \ \Delta u(k+1) \ \dots \ \Delta u(k+M-1)]^T$ 后, 由 $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ 可以求得当前时刻控制量 $u(k)$, 施加到被控对象后进入下一个时刻的控制过程。

4 仿真结果(Simulation results)

本文在MATLAB平台对算法进行了编程仿真, 以

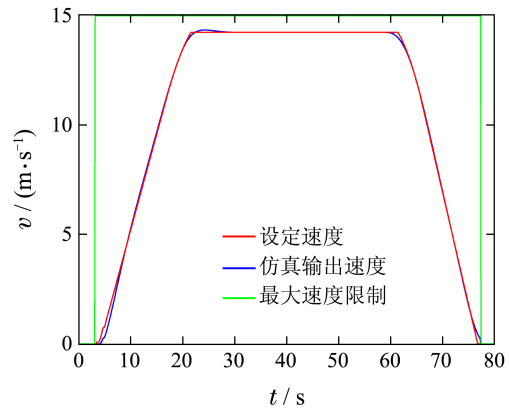
测试算法有效性。列车模型采用实测数据列车模型, 即式(2)得到的牵引与制动模型。选取的设定速度曲线如图2中红线所示, 设定速度曲线采用离线计算得到的能耗最优速度曲线, 由加速、巡航和制动3部分组成。

控制器参数选取为: 采样时间 $T_s = 0.1$ s, 预测时域 $N = 30$, 控制时域 $M = 1$, 跟踪项权重控制量增量抑制权重, 能耗优化权重 V 作为变量, 通过设定 $V = 0$ 及 $V > 0$ 来对比仿真结果。

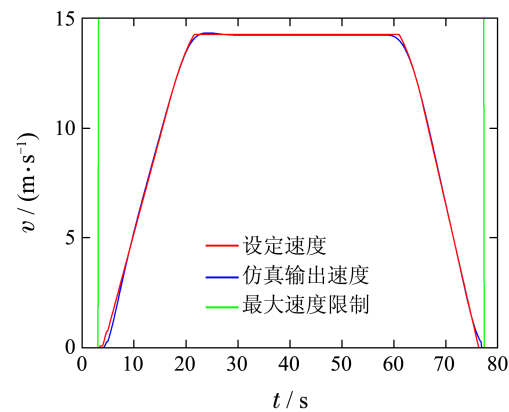
仿真针对列车是否发生延迟发车情况进行讨论: 不延迟发车与延迟发车。

4.1 列车未延迟发车仿真(Simulation of undelayed train)

假设列车未延迟发车, 其仿真结果如图2所示。图2中红线为设定速度曲线, 蓝线为仿真输出速度曲线, 绿线为最大速度限制。



(a) 列车未延迟发车 $V = 0$



(b) 列车未延迟发车 $V = 0.1$

图2 列车未延迟发车仿真结果

Fig. 2 Simulation results of undelayed train

图2(a)–2(b)分别为能耗优化权重 $V=0$ 与 $V=0.1$ 的情况, 即能耗优化权重逐渐增大。由图2(a)与图2(b)对比可见, 当能耗优化权重增大后, 列车实际输出速度与之前有少许差别。

依次取 $V = 0, V = 0.05, V = 0.1$, 根据列车仿真速度曲线依式(3)计算得到列车的能量消耗, 结果如表1所示。

表1 列车未延迟发车能耗

Table 1 Energy consumption of undelayed train

能耗优化权重/ V	实际能耗/(kw · h)	设计能耗/(kw · h)
0	11.309	11.208
0.05	11.304	11.208
0.1	11.291	11.208

表1左栏为能耗优化权重, 中栏为列车响应曲线的实际能耗, 右栏为设计能耗最优速度曲线的设计能耗. 从表1中可以看出, 由于列车存在纯滞后等原因, 列车的实际能耗都高于设计能耗. 随着 V 的增大, 实际能耗有所下降, 但由于设定速度曲线是离线能耗最优的, $V = 0.1$ 相比于 $V = 0$ 的能耗优化幅度不大, 能够优化的能耗仅是运行过程中存在的部分优化裕量。

图3给出了列车无延迟情况下, 设定曲线路程与列车仿真输出曲线路程的比较. 从图3可以看出, 列车满足全局路程约束, 在运行时间内能够达到设定路程。

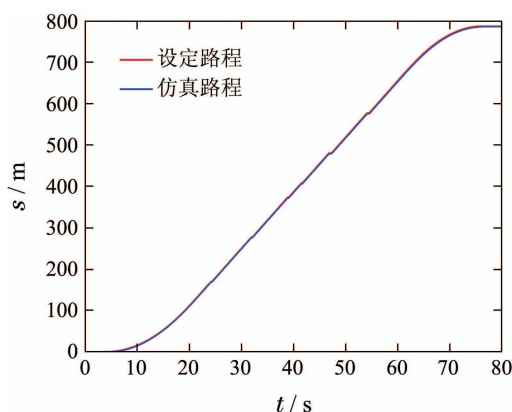


图3 列车无延迟发车路程曲线

Fig. 3 Distance curve of undelayed train

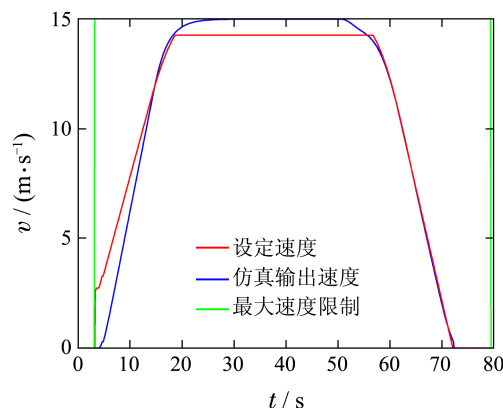
4.2 列车延迟发车仿真 (Simulation of delayed train)

假设列车由于某些原因延迟了3 s发车, 基于算法设计的思想, 仍然采用之前的设定速度与路程曲线, 并在存在优化裕量的情况下对能耗进行优化。

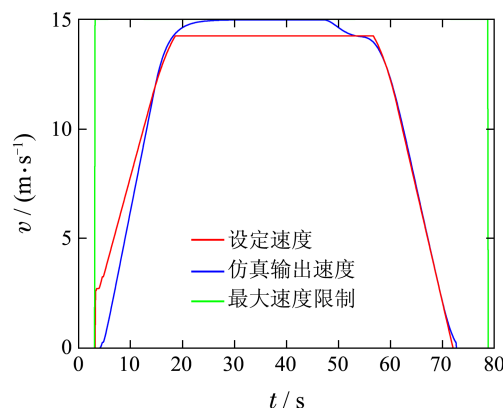
列车延迟发车的仿真结果如图4所示, 图中红线为延迟发车的设定速度曲线. 蓝线为仿真输出速度曲线, 绿线为最大速度限制。

同样的, 图4(a)与图4(b)分别为能耗优化权重 $V = 0$ 与 $V = 0.1$ 的情况, 即能耗优化权重逐渐增大. 从图4中可以看出, 在列车延迟发车的情况下, 列车在牵引阶段会以约束范围内列车的最大加速度进行牵引, 并维持一段高速运行, 从而减少到站延迟, $V = 0$

与 $V = 0.1$ 都使得列车在运行区间内追赶回了发车延迟并准点到站。



(a) 列车延迟发车 $V = 0$



(b) 列车延迟发车 $V = 0.1$

图4 列车延迟发车仿真结果

Fig. 4 Simulation results of delayed train

依次取 $V = 0, V = 0.05, V = 0.1$, 计算得到列车的能量消耗如表2所示。

表2 列车延迟发车能耗

Table 2 Energy consumption of delayed train

能耗优化权重/ V	实际能耗/(kw · h)
0	11.658
0.05	11.550
0.1	11.493

由表2可以看出, 能耗优化权重 V 越大, 列车的实际能耗越低. $V = 0.05$ 相比 $V = 0$ 能耗降低0.92%, $V = 0.1$ 相比 $V = 0$ 能耗降低1.42%. 即在列车延迟情况下, 算法在保证准点的情况下, 实现了滚动节能的目标。

图5给出了列车延迟情况下, 设定曲线路程与列车仿真输出曲线路程的比较. 从图5可以看出, 列车在前期与设定路程曲线差距较大, 在运行过程中运行路程逐渐追上设定路程曲线, 最终实现了准确到站。

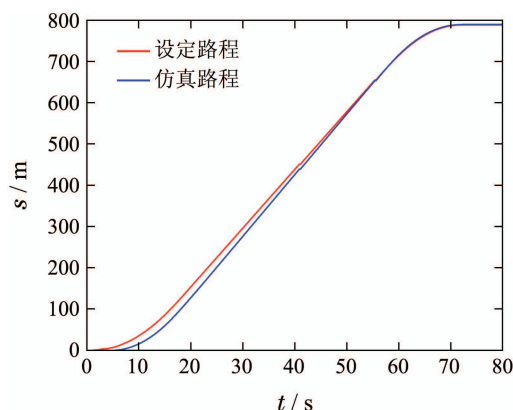


图5 列车延迟发车路程曲线

Fig. 5 Distance curve of delayed train

5 结语(Conclusions)

基于预测控制算法, 本文针对地铁列车滚动节能优化问题进行了节能优化控制算法设计. 通过在优化模型中引入能耗优化项, 解决地铁列车在运行过程中、包括延迟发车情况下, 跟踪既定设计速度曲线的动态节能问题. 通过调整优化目标函数中跟踪项与能耗优化项的权重相对大小, 控制算法可以在列车准确跟踪与节约能耗之间寻求满意解. 通过仿真结果可以看出节能优化控制算法达到了实时动态节能的目标, 并在列车延迟发车情况下也能够实施较节能的控制策略.

参考文献(References):

- [1] LONG Tan. Research on metro energy management system [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2010, 13(2): 77 – 79.
(龙潭. 地铁能源管理系统 [J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(2): 77 – 79.)
- [2] KHMELNITSKY E. On an optimal control problem of train operation [J]. *IEEE Trans Automatic Control*, 2000, 45(7): 1257 – 1266.
- [3] LIU R, GOLOVITCHER I M. Energy-efficient operation of rail vehicles [J]. *Transportation Research Part A Policy & Practice*, 2003, 37(10): 917 – 932.
- [4] HOWLETT P G, PUDNEY P J, XUAN V. Local energy minimization in optimal train control [J]. *Automatica*, 2009, 45(11): 2692 – 2698.
- [5] CHANG C S, SIM S S. Optimising train movements through coast control using genetic algorithms [J]. *IEEE Proceedings of Electric Power Applications*, 1997, 144(1): 65 – 73.
- [6] KE B R, CHEN M C, LIN C L. Block-layout design using MAX-MIN ant system for saving energy on mass rapid transit systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(2): 226 – 235.
- [7] YANG Yanfei, CUI Ke, LV Xinjun, et al. Combined sliding mode and PID control of automatic train operation system [J]. *Journal of The China Railway Society*, 2014(6): 61 – 67.

(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(6): 61 – 67.)

- [8] WANG Y, SCHUTTER B D, BOOM T J J V D, et al. Optimal trajectory planning for trains — A pseudospectral method and a mixed integer linear programming approach [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 29(29): 97 – 114.
- [9] WANG P, GOVERDE R M P. Multiple-phase train trajectory optimization with signalling and operational constraints [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 69: 255 – 275.
- [10] YASUNOBU S, MIYAMOTO S. Automatic train operation system by predictive fuzzy control [J]. *Industrial Applications of Fuzzy Control*, 1985, 18(1): 1 – 18.
- [11] DONG Hairong, GAO Bing, NING Bin. Adaptive fuzzy control for speed adjustment of automatic train operation system [J]. *Journal of Dynamic and Control*, 2010, 8(1): 87 – 91.
(董海荣, 高冰, 宁滨. 列车自动驾驶调速系统自适应模糊控制 [J]. 动力学与控制学报, 2010, 8(1): 87 – 91.)
- [12] WANG Y, HOU Z, LI X. A novel automatic train operation algorithm based on iterative learning control theory [C] // *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*. Beijing: IEEE, 2008: 1766 – 1770.
- [13] LUO Y, LL D, XI Y. Model predictive control with swithing strategy for a train system [C] // *International Conference on Control Automation Robotics & Vision*. Singapore: IEEE, 2015: 913 – 918.
- [14] GU Guimei, PU Songzhi. Simulation of ATO system based on fuzzy generalized predictive control algorithm [J]. *Urban Mass Transit*, 2014, 17(1): 69 – 73, 94.
(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, 94.)
- [15] WANG Longsheng, XU Hongze, ZHANG Mengnan, et al. Hybrid model predictive control application to automatic train operation [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015(12): 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(12): 9.)
- [16] WU Yang, WANG Yueming, ZENG Li. Method of real-time adjustment of metro trains headway after a delay [J]. *Lectric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2003, 26(5): 21 – 23.
(吴洋, 王月明, 曾理. 晚点情况下地铁列车间隔的实时调整方法 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2003, 26(5): 21 – 23.)
- [17] XI Yugeng. *Model Predictive Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
(席裕庚. 预测控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.)
- [18] WANG Naiqian, LI Dewei, XI Yugeng. The trajectory planning of redundant manipulator with gantry by using model predictive control [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(8): 989 – 998.
(汪乃茜, 李德伟, 席裕庚. 采用预测控制的龙门架式冗余自由度机械臂轨迹规划算法 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(8): 989 – 998.)

作者简介:

汪仁智 (1992–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为地铁调度与ATO控制, E-mail: wangrenzhi1992@163.com;

李德伟 (1971–), 男, 副研究员, 目前研究方向为预测控制理论、方法及其应用, E-mail: dwli@sytu.edu.cn;

席裕庚 (1946–), 男, 教授, 目前研究方向为预测控制与滚动优化、大系统理论与应用, E-mail: ygxi@sytu.edu.cn.