

文章编号: 1001-8360(2020)02-0011-07

基于混合整数规划的高速列车多区间节能优化研究

金 波, 孙鹏飞, 王青元, 冯晓云

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘 要: 当今巨大的能源消耗成为高速铁路发展不可忽视的问题, 节能优化显得尤为重要。从列车优化操纵与区间运行时分分配两方面出发, 在总运行时分约束下, 探讨全程最节能的运行时分分配方案及所对应的列车操纵策略。在列车运动方程基础上, 引入经停站约束, 建立列车运行能耗和区间运行时分分配同步优化的非线性连续节能优化模型。通过离散化与线性变换, 将节能优化模型重构为混合整数规划模型, 并利用 Cplex 求解。以高速铁路线路为背景设计算例, 验证模型的有效性。仿真结果证明在列车优化操纵策略的基础上, 优化区间运行时分分配方案可以进一步降低列车总运行能耗。在不改变总运行时间的情况下, 运行总能耗可降低 1.03%。

关键词: 节能; 区间运行时分; 列车操纵策略; 混合整数规划

中图分类号: U238 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-8360.2020.02.002

Energy-saving Optimization of Multi-interstation High-speed Train with Mixed Integer Linear Programming

JIN Bo, SUN Pengfei, WANG Qingyuan, FENG Xiaoyun

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Nowadays, huge energy consumption has become a big challenge to the development of high-speed railway system, thus entailing the importance of energy-saving optimization. Considering both optimal train control and timetabling, this paper mainly discussed an energy-efficient train timetabling and its corresponding control strategy under the total travel time limit. First a nonlinear continuous model was given to describe both the energy-efficient train control and the train timetabling, based on the train motion state equation and under scheduled stop constraints. Then by discretizing and linearizing, the former model was reformulated into a mixed integer linear programming (MILP) model, which was solved by Cplex. Case studies of high-speed train were given to demonstrate the performance of this approach. The result shows that total train energy consumption can be further reduced by constructing the train timetabling that allows optimal train control most effectively. The total energy consumption can be reduced by 1.03% without changing the total travel time.

Key words: energy-saving; timetabling; optimal train control; MILP

随着我国铁路产业快速发展, 铁路系统规模不断扩大, 巨大的能源消耗成为不可忽视的问题, 其中列车运行能耗是铁路系统能耗的重要组成部分。以降低列车运行能耗为目标的优化方法主要可分成列车运行图优化、列车优化操纵以及设备低功耗升级 3 方面。列

车运行图优化主要关注列车开行间隔、区间运行时分分配方案以及停站方案等, 属于较顶层的优化。列车优化操纵依据线路条件与给定的区间运行时分, 计算区间运行速度曲线, 获得对应的列车操纵工况, 属于较底层的优化。国内外学者对两方面优化均做了大量研究工作, 取得了丰硕的理论成果。

对于给定运行时分的单区间列车优化操纵问题, 文献[1]基于简化的列车优化操纵模型, 提出列车节能操纵工况包括: 全力牵引、恒速、惰行、全力制动 4 种情

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2018-04-09
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1200502)
第一作者: 金 波(1995—), 男, 浙江绍兴人, 博士研究生。
E-mail: bjia@my.swjtu.edu.cn
通信作者: 孙鹏飞(1987—), 男, 河南郑州人, 讲师, 博士。
E-mail: spf0325@163.com

况。在此基础上,文献[2]利用极大值原理对工况转换点进行求解,同时对解的存在性与唯一性进行严格的数学证明。文献[3]以极大值原理为基础,依据高速列车特性计算最大运行速度与工况转换点。文献[4]设计离散化动态模型算法,对非线性的列车操纵优化问题进行求解。文献[5]用神经网络算法实现局部优化规律的数据组织,应用遗传算法进行全局优化计算。文献[6]通过分析列车进坡速度,并对线路进行预处理,给出列车节能运行的寻优策略。文献[7]探讨惰行距离与途中恒速运行速度波动对运行能耗的影响,基于运行仿真进行案例分析。相较于上述方法,本文对列车节能操纵优化模型进行离散化和线性变换处理,将其重构为混合整数规划模型^[8],模型架构便于引入约束,且求解高效,适用于求解线路较长,约束条件复杂的多区间列车节能操纵优化问题。

当从列车运行图优化角度出发,给定的区间运行时分可作为变量进行调整,通过合理分配区间运行时分可有效降低多区间运行能耗。文献[9]证明通过适度增加总运行时分并合理分配各区间运行时分可以有效降低能耗。文献[10]采用两阶段法,在惰行节能的基础上,通过优化列车运行恢复时间在各区间的分配,进一步降低能耗。文献[11]在计算得到列车各区间的“能耗-时间”曲线的基础上,通过数值算法规划最节能的列车运行时刻表。文献[12]建立位置、时间和速度三者的空间网络,对高速列车运行过程进行简化,通过动态规划求解节能优化的运行时刻表与运行速度曲线。文献[13]在单区间操纵优化的基础上,对区间运行时分与发车间隔进行优化,提高再生制动能量利用率,从而降低总运行能耗。上述研究大多以城市轨道交通为研究对象,列车操纵策略简单,不适用于高速铁路列车操纵优化,且对区间运行时分分配与区间节能操纵策略进行分层优化,部分研究增加了区间总运行时分。

本文建立了列车运行能耗和区间运行时分分配同步优化多区间节能操纵优化模型。在不改变多区间总运行时分的情况下,以高速铁路线路为例建立仿真,将优化区间运行时分分配方案与给定区间运行时分分配方案所对应的操纵策略与运行能耗进行对比。

1 列车多区间节能优化问题的数学描述

1.1 问题描述

对于包含 K 个区间的列车运行路径 I ,列车在路径 I 上的运行时间为

$$T_r + T_d$$

式中: T_r 为列车在路径 I 的纯运行时间, s ; T_d 为列车在中间站的总停站时间, s 。

列车在路径 I 的纯运行时间为

$$T_r = \sum_{i=1}^K T_i \quad (1)$$

式中: T_i 为列车在第 i 个区间的运行时间, s 。

运行能耗为

$$J_r = \sum_{i=1}^K J_i \quad (2)$$

式中: J_r 为在路径 I 的运行能耗, kJ ; J_i 为列车在第 i 个区间的运行能耗, kJ 。

存在大量区间运行时分配方案满足路径总运行时分约束,寻找使得列车总运行能耗最低的区间运行时分配方案及其所对应的列车操作策略是本文所要解决的问题。

1.2 列车单区间节能操作优化模型

考虑再生制动的列车单区间节能操作优化模型目标函数为

$$\min J_r = \int_0^{T_r} \left[\frac{F(t)}{\eta} \cdot v(t) - \alpha B_E(t) \cdot v(t) \right] dt \quad (3)$$

式中: $F(t)$ 为 t 时刻的牵引力, kN ; η 为牵引工况下的整车机电效率等效值, $0 < \eta < 1$; $v(t)$ 为 t 时刻的运行速度, m/s ; α 为再生制动能量利用率, $0 < \alpha < 1$,本文中为降低模型的复杂度,假设 α 为常数; $B_E(t)$ 为 t 时刻的再生制动力, kN 。

列车操纵合力 C 为

$$C = F - B_E - B_A \quad (4)$$

式中: B_A 为列车空气制动力, kN 。

列车运行满足列车纵向动力学方程为

$$M(1+r) \frac{dv}{dt} = C(t) - W_0(v) - W_j(s) \quad (5)$$

$$ds/dt = v \quad (6)$$

式中: M 为列车总质量, t ; r 为列车回转质量系数; $W_0(v)$ 为随运行速度 v 变化的列车运行基本阻力, kN ; $W_j(s)$ 为随运行位置 s 变化的列车运行附加阻力, kN 。

区间线路条件是随着列车运行位置 s 的改变而改变,且列车运行附加阻力 $W_j(s)$ 以及线路限速 $v_{\max}(s)$ 关于列车运行位置 s 的映射,因此建立基于列车运行位置 s 连续化的列车操作优化模型较基于列车运行时间 t 连续化的模型要简单易行,并有助于混合整数规划模型的构建。引入单位动能 E

$$E = 0.5v^2 \quad (7)$$

以单位动能 E 和运行时间 t 为状态量,基于运行位置 s 连续化的列车节能操纵优化模型为

$$\min J_r = \int_{s_{\text{start}}}^{s_{\text{end}}} \left[\frac{F(s)}{\eta} - \alpha \cdot B_E(s) \right] ds \quad (8)$$

s.t.

$$\begin{cases} 0 \leq F(s) \leq F_{\max}(\sqrt{2E(s)}) \\ 0 \leq B_E(s) \leq B_{E,\max}(\sqrt{2E(s)}) \\ 0 \leq B_A(s) \leq B_{A,\max}(\sqrt{2E(s)}) \\ 0 \leq E(s) \leq E_{\max}(s) \\ E(s_{\text{start}}) = 0 \quad t(s_{\text{start}}) = 0 \\ E(s_{\text{end}}) = 0 \quad t(s_{\text{end}}) = T_r \\ E_{\max}(s) = 0.5v_{\max}(s)^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: s_{start} 、 s_{end} 分别为列车运行起点位置, m、终点位置; F_{\max} 、 $B_{E,\max}$ 和 $B_{A,\max}$ 分别为列车最大牵引力、最大再生制动力和最大空气制动力, kN; $v_{\max}(s)$ 为位置 s 处的限制速度, m/s。需要说明的是, 本文讨论的列车运行过程不包括列车在站停车过程。

同样地, 基于运行位置 s 连续化的列车纵向动力学模型为

$$M(1+r) \frac{dE}{ds} = C(s) - W_0(\sqrt{2E}) - W_j(s) \quad (10)$$

$$dt/ds = 1/\sqrt{2E} \quad (11)$$

1.3 列车多区间节能操作优化模型

对于包含 K 个区间的列车运行路径 I , 存在 $K+1$ 个车站, 第 j 个车站所对应的位置为 S_j , $m, j=1, \dots, K+1$ 。那么, 第 i 个区间的区间运行时分为

$$T_i = t(S_{j+1}) - t(S_j) \quad (12)$$

第 i 区间的区间运行能耗为

$$J_i = \int_{S_j}^{S_{j+1}} \left[\frac{F(s)}{\eta} - \alpha \cdot B_E(s) \right] ds \quad (13)$$

根据模型描述, 可以将中间站停车约束条件转化为车站位置的限速为零, 即

$$v_{\max}(S_j) = 0 \quad (14)$$

通过上述表述, 可以建立如下单列车多区间节能操作优化模型。

目标函数:

$$\min J_r = \sum_{j=1}^K \int_{S_j}^{S_{j+1}} \left[\frac{F(s)}{\eta} - \alpha \cdot B_E(s) \right] ds \quad (15)$$

约束条件: 式(9)的基础上添加

$$E(S_j) = 0 \quad j=1, \dots, K+1 \quad (16)$$

$$t(S_1) = 0 \quad t(S_{K+1}) = T_r \quad (17)$$

$$\begin{aligned} T_i - t_w &\leq t(S_{j+1}) - t(S_j) \leq T_i + t_w \\ i, j &= 1, \dots, K \end{aligned} \quad (18)$$

式中: t_w 为给定的时间窗约束参数, 具体数值需要根据列车追踪间隔以及车站能力确定, 当列车完全依照给定时刻表运行时, $t_w=0$ 。

式(16)表示列车经过路径 I 上中间站时的速度为

0, 满足停车约束; 式(17)表示路径 I 起点与终点的运行时刻约束; 考虑到前后列车追踪以及车站能力约束, 引入列车到达中间站的时间窗约束式(18)。

2 混合整数规划模型的构建

2.1 分段仿射变换

构建混合整数规划模型之前需要将模型中的非线性方程转化为线性方程。本文采用分段仿射变换进行线性处理, 通过列车牵引特性曲线的分段仿射变换来说明。

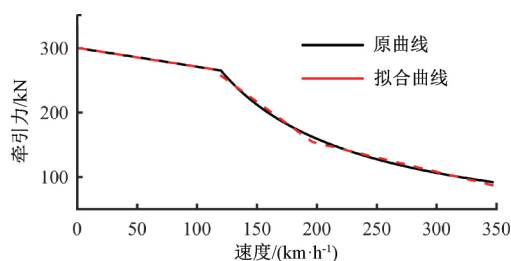


图1 列车牵引特性拟合曲线

图1中原曲线表示 CRH3C 型动车组牵引特性曲线, 拟合曲线表示分段线性函数, 通过三段式仿射变换得到。从图中可以看出拟合曲线与原曲线拟合程度高, 完全可以体现原曲线特征, 且误差较小。分段仿射可通过 Matlab 中的 fit 函数实现。

2.2 混合逻辑动态模型

将列车运行路径 I 依据线路限速、坡度、曲线等影响因素以及电分相位置划分为 N 个不等位置间隔, 并假设列车牵引力/制动力在任意位置间隔内为定值。 s_k 为第 k 个位置间隔的起点位置; s_{k+1} 为第 k 个位置间隔的终点位置; $\Delta s_k = [s_k, s_{k+1}]$ 为第 k 个位置间隔的长度, 其中 $k=1, \dots, N$ 。存在 $k \in \{1, \dots, N\}$, 使得 $s_k = S_j$, 对于 $j \in \{1, \dots, K\}$ 成立, 同时 $s_{N+1} = S_{K+1}$ 。

根据对列车运行路径的划分, 可以将目标函数式(15)重构为

$$\min J_r = \sum_{k=1}^N \left[\frac{F(k)}{\eta} - \alpha \cdot B_E(k) \right] \Delta s_k \quad (19)$$

式中: $F(k)$ 为在第 k 个位置间隔内的列车牵引力, kN; $B_E(k)$ 为在第 k 个位置间隔内的列车再生制动力, kN。

同样地, 可以将列车纵向动力学模型重构为

$$M(1+r) \frac{dE}{ds} = C(k) - W_0[\sqrt{2E(k)}] - W_j(k) \quad (20)$$

式中: $E(k)$ 为在第 k 个位置间隔起点 s_k 处的单位动能 (m/s^2); $W_j(k)$ 为在第 k 个位置间隔内的附加运行阻力, kN。

列车基本运行阻力 W_0 与附加运行阻力 W_j 为

$$W_0 = M \times (a + bv^2) \times g \quad (21)$$

$$W_j = M \times w_j \times g \quad (22)$$

式中: a, b 和 c 为阻力常数, 根据固定车型确定; $a + bv^2$ 为列车单位基本运行阻力, 主要为避免 $a + bv + cv^2$ 中非线性参数 $v = \sqrt{2E}$ 的产生^[14]; g 为重力加速度; w_j 为列车单位附加运行阻力。

可以将式(20)转化为

$$M(1+r) \frac{dE}{ds} = C(k) - Mg[a + 2cE(k) + w_{j,k}] \quad (23)$$

式中: $w_{j,k}$ 为第 k 个位置间隔内的单位附加运行阻力, kN。

对式(23)进行简化, 得到

$$\frac{dE}{ds} = \frac{C(k)}{M(1+r)} - \frac{2cg}{1+r} E(k) - \frac{(a + w_{j,k})g}{1+r} \quad (24)$$

通过合理定义 a_k, b_k 以及 c_k , 可以将式(24)转化为^[8]

$$E(k) = a_k E(k) + b_k C(k) + c_k \quad (25)$$

其中存在 $E(1)=0, E(N+1)=0$ 。

式(25)为状态量 $E(k)$ 的递推公式。同样地, 需要对状态量 $t(k)$ 构建递推公式

$$t(k+1) = t(k) + \left[\frac{1}{2\sqrt{2E(k)}} + \frac{1}{2\sqrt{2E(k+1)}} \right] \Delta s_k \quad (26)$$

式中: $t(k)$ 为在第 k 个位置间隔起点 s_k 处的运行时刻, 存在 $t(1)=0, t(N+1)=T_r$ 。

显而易见, 递推关系式(26)为非线性方程, 通过定义函数 $f[E(k)] = 1/2\sqrt{2E(k)}$, 可将式(26)转化为线性方程

$$t(k+1) = t(k) + \{f[E(k)] + f[E(k+1)]\} \Delta s_k \quad (27)$$

对函数 $f[E(k)]$ 进行三段式仿射变换^[8], 可转化为

$$f[E(k)] = \begin{cases} \alpha_{1,k} E(k) + \beta_{1,k} & E_{0,k} \leq E(k) \leq E_{1,k} \\ \alpha_{2,k} E(k) + \beta_{2,k} & E_{1,k} < E(k) < E_{2,k} \\ \alpha_{3,k} E(k) + \beta_{3,k} & E_{2,k} \leq E(k) \leq E_{3,k} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $E_{0,k} = E_{\min}(k); E_{3,k} = E_{\max}(k)$; 参数 $\alpha_{1,k}, \alpha_{2,k}, \alpha_{3,k}, \beta_{1,k}, \beta_{2,k}, \beta_{3,k}, E_{1,k}$ 以及 $E_{2,k}$ 由函数特征确定。

基于分段仿射变换, 状态量 $t(k)$ 的递推公式转化为

$$t(k+1) = t(k) + [\alpha_{l,k} E(k) + \beta_{l,k}] \Delta s_k + [\alpha_{m,k+1} E(k+1) + \beta_{m,k+1}] \Delta s_k \quad (29)$$

式中: 存在 $l \in \{1, 2, 3\}$ 与 $m \in \{1, 2, 3\}$, 使得 $E_{l-1,k} \leq$

$E(k) \leq E_{l,k}$ 与 $E_{m-1,k+1} \leq E(k) \leq E_{m,k+1}$ 成立。

通过分段仿射变换构建状态量 $t(k)$ 的线性递推式(29), 但存在参数 l 和 m 的逻辑判断, 通过引入逻辑变量与辅助变量将其转化为线性不等式。

引入逻辑变量 $\delta_1(k), \delta_2(k) \in \{0, 1\}$, 定义

$$\begin{aligned} [E(k) \leq E_{1,k}] &\Leftrightarrow [\delta_1(k) = 1] \\ [E(k) \leq E_{2,k}] &\Leftrightarrow [\delta_2(k) = 0] \end{aligned} \quad (30)$$

考虑下界 $E_{0,k}$ 和上界 $E_{2,k}$ 可转化为

$$\begin{cases} (E_{3,k} - E_{1,k})\delta_1(k) \leq E_{3,k} - E(k) \\ (E_{0,k} - E_{1,k} - \epsilon)\delta_1(k) \leq E(k) - E_{1,k} - \epsilon \\ (E_{3,k} - E_{2,k})\delta_2(k) \leq E_{3,k} - E(k) \\ (E_{0,k} - E_{2,k} - \epsilon)\delta_2(k) \leq E(k) - E_{2,k} - \epsilon \end{cases} \quad (31)$$

式中: ϵ 为极小正值, 为了保证非严格不等式成立, 使得符合混合整数规划模型的框架。

同时, 引入逻辑变量 $\delta_3(k) \in \{0, 1\}$, 来表示 $\delta_1(k)$ 与 $\delta_2(k)$ 的乘积, 即

$$\begin{cases} -\delta_1(k) + \delta_3(k) \leq 0 \\ -\delta_2(k) + \delta_3(k) \leq 0 \\ \delta_1(k) + \delta_2(k) - \delta_3(k) \leq 1 \end{cases} \quad (32)$$

辅助变量 $z(k) = \delta(k)E(k)$ 为

$$\begin{cases} z_p(k) \leq E_{3,k}\delta_p(k) \\ z_p(k) \geq E_{0,k}\delta_p(k) \\ z_p(k) \leq E(k) - E_{0,k}[1 - \delta_p(k)] \\ z_p(k) \geq E(k) - E_{3,k}[1 - \delta_p(k)] \end{cases} \quad (33)$$

式(33)对于 $p=1, 2, 3$ 均成立。

式(29)中的 $\alpha_l E(k) + \beta_l$ 为

$$\begin{aligned} \alpha_l E(k) + \beta_l &= [-\alpha_3 \quad \alpha_2 - \alpha_3 \quad \alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3] \mathbf{z}(k) + \\ &\quad [-\beta_3 \quad \beta_2 - \beta_3 \quad \beta_1 - \beta_2 + \beta_3] \boldsymbol{\delta}(k) + \\ &\quad \alpha_3 E(k) + \beta_3 \\ \mathbf{z}(k) &= [z_1(k) \quad z_2(k) \quad z_3(k)]^T \\ \boldsymbol{\delta}(k) &= [\delta_1(k) \quad \delta_2(k) \quad \delta_3(k)]^T \end{aligned}$$

代入式(29)即可得到状态量 $t(k)$ 的递推关系式, 将其与状态量 $E(k)$ 递推公式(25)整合, 可表述为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}_k \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_k C(k) + \mathbf{C}_{1,k} \boldsymbol{\delta}(k) + \\ &\quad \mathbf{C}_{2,k} \boldsymbol{\delta}(k+1) + \mathbf{D}_{1,k} \mathbf{z}(k) + \mathbf{D}_{2,k} \mathbf{z}(k+1) + \mathbf{e}_k \\ \mathbf{x}(k) &= [E(k) \quad t(k)]^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} a_k & 0 \\ \Delta s_k \alpha_3 (a_k + 1) & 1 \end{bmatrix}$$

同样地可以推导得到 $\mathbf{B}_k, \mathbf{C}_{1,k}, \mathbf{C}_{2,k}, \mathbf{D}_{1,k}, \mathbf{D}_{2,k}, \mathbf{e}_k$ 。按照上述过程, 通过分段仿射变换, 以及引入逻辑变量与辅助量, 对列车牵引力约束方程进行线性处理

$$F[E(k)] \leq \alpha_{l,k} E(k) + \beta_{l,k} \quad (34)$$

式(34)中,存在 $l \in \{4, 5, 6\}$,使得 $E_{l-1,k} \leq E(k) \leq E_{l,k}$ 成立,并引入逻辑变量与辅助变量进行转换。同样地,对于列车再生制动力 B_A 以及空气制动力 B_E 可以建立如式(34)的约束。

对于列车过电分相状态,本文采用惰行过电分相。可描述为:存在位置间隔

$$\Delta s_k = [s_k, s_{k+1}] \quad k = S_{\text{ESD}}$$

式中: S_{ESD} 为电分相所在位置间隔。

使得下式成立

$$F(k) = B_E(k) = B_A(k) = 0 \tag{35}$$

结合列车过电分相约束(35),整合约束式(4)、式(9)、式(16)~式(18)、式(31)~式(34)可以得到^[8]

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}_{1,k}C(k) + \mathbf{R}_{2,k}\delta(k) + \mathbf{R}_{3,k}z(k) + \mathbf{R}_{4,k}F(k) \\ & + \mathbf{R}_{5,k}B_E(k) + \mathbf{R}_{6,k}B_A(k) \leq \mathbf{R}_{7,k}x(k) + \mathbf{R}_{8,k} \end{aligned} \tag{36}$$

式中: $\mathbf{R}_{q,k}$ 为矩阵, $q = 1, \dots, 8$,可由约束条件推导。

2.3 混合整数规划模型

模型中的变量包含逻辑变量 δ ,辅助变量 z ,实数变量 C 、 F 、 B_E 以及 B_A ,每一个变量对应于不同位置间隔有着不同的取值。定义变量集 $\mathbf{V} = [C \ \delta \ z \ F \ B_E \ B_A]^T$,单列车多区间节能操纵优化模型可以被重构为混合整数规划模型。

目标函数:

$$\min C_J \mathbf{V} \tag{37}$$

约束条件:

$$\mathbf{F}_1 \mathbf{V} \leq \mathbf{F}_2 \mathbf{x}(1) + \mathbf{f}_3 \tag{38}$$

其中:根据目标函数(19)以及 \mathbf{V} 的定义,可推导得:

$$C_J = \begin{bmatrix} 0 \cdots 0 & \frac{1}{\eta} \Delta s_1 \cdots \frac{1}{\eta} \Delta s_N & \alpha \Delta s_1 \cdots \alpha \Delta s_N & 0 \cdots 0 \end{bmatrix};$$

式(38)中包含的 $x(k)$ 可以通过 $x(1)$ 递推得到^[8]。

混合整数规划模型可在 Matlab 环境下利用 Cplex 求解器进行求解。

3 模型求解

以速度 300 km/h 高速铁路线路为例,选取动车组型号为 CRH3C,参数见表 1 与图 2,进行案例仿真,验证基于混合整数规划的列车多区间节能操纵优化模型的可行性。

表 1 仿真列车参数

参数	数值
编组	4M4T
定员编组质量/t	475
列车回转质量系数	0.09
最高运行速度/(km·h ⁻¹)	350
单位基本运行阻力/(N·kN ⁻¹)	0.525+0.00177v ²
牵引工况机电效率	0.90
再生制动能量利用率	0.65

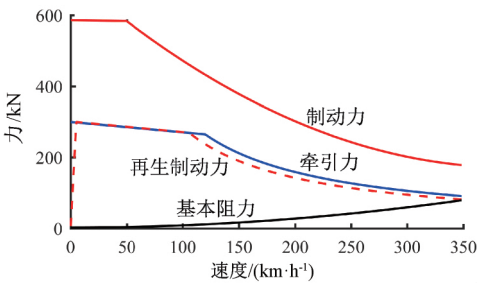


图 2 列车牵引/制动特性与基本阻力特性

选取武广高速线中武汉至岳阳东区段为研究对象,线路全长 209.753 km,存在 8 处电分相,该区段线路运行基本参数见表 2。

表 2 武汉至岳阳东区段运行基本参数

区间	距离/km	运行时分/s
武汉—咸宁北	84.908	1 320
咸宁北—赤壁北	42.895	720
赤壁北—岳阳东	81.950	1 140

按照表 2 给定的时刻表区间运行时分进行列车运行速度曲线进行优化,即不对区间运行时分进行优化。取 $t_w = 4 \text{ min}$,在时间窗约束下,对区间运行时分分配方案和列车运行速度曲线进行同步优化。两者的运行速度曲线见图 3,运行能耗与时分仿真结果见表 3。

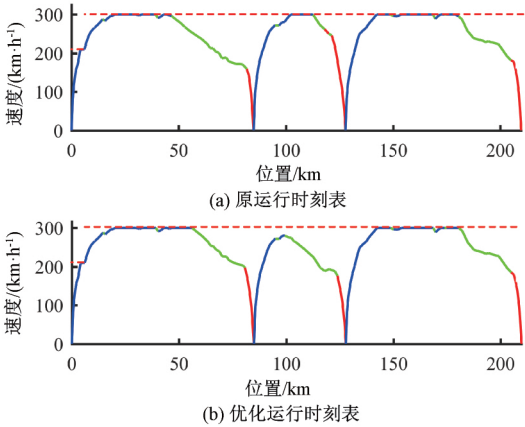


图 3 武汉至岳阳东区段列车运行速度曲线

表 3 武汉至岳阳东区段运行能耗与时分仿真结果

区间	运行能耗/kW·h		运行时分/s	
	优化前	优化后	优化前	优化后
武汉—咸宁北	1 204.3	1 355.0	1 320	1 130
咸宁北—赤壁北	760.2	561.5	720	926
赤壁北—岳阳东	1 308.0	1 321.3	1 140	1 124
合计	3 271.5	3 237.8	3 180	3 180

从表 3 的数据中可以看出,在区段总运行时分不变的情况下,通过调整各区间运行时分,可降低区段总运行能耗。将优化运行时刻表与原运行时刻表所对应

仿真结果进行对比,武汉至咸宁北区间运行时分降低 190 s,区间运行能耗增加 114.7 kW·h;咸宁北至赤壁北区间运行时分增加 206 s,区间运行能耗降低 198.7 kW·h;赤壁北至岳阳东区间运行时分降低 16 s,区间运行能耗增加 13.3 kW·h。综合看来,区段总运行时分不变,区段总运行能耗降低 1.03%。该能耗降低比例是将区间运行时分与运行速度曲线同步优化结果与仅优化运行速度曲线结果进行对比得到,若与基于原时刻表且按司机经验操作的运行结果进行比较,节能效果将更加明显。

为进一步说明通过优化区间运行时分可降低区段运行能耗,讨论缓冲时间在不同区间分布情况下对区段总运行能耗的影响。以高速铁路线路汨罗东至耒阳西区段为研究对象,线路全长 270.181 km,存在 10 处电分相,该区段线路运行基本参数见表 4。

表 4 汨罗东至耒阳西区段运行基本参数

区间	距离/km	运行时分/s
汨罗东—长沙南	67.640	1 140
长沙南—衡阳东	147.915	2 100
衡阳东—耒阳西	54.626	840

取缓冲时间为 2 min,对将其分布在区间汨罗东至长沙南,长沙南至衡阳东和衡阳东至耒阳西,以及在各区间进行优化分配,这四种情况进行对比分析。取 $t_w=4$ min,运行速度曲线见图 4,运行能耗与运行时间见表 5、表 6。

由表 5、表 6 可知,在总运行时分不变的情况下,将缓冲时间分配到不同运行区间所产生的区段总运行能耗有所不同,且将缓冲时间合理地分配到各区间可进一步降低区段总运行能耗。仿真结果进一步说明,通过合理分配区间运行时分可降低区段运行能耗。本文中不讨论缓冲时间分配对列车运行管理所产生的影响。

表 5 缓冲时间不同分配方案运行能耗仿真结果

缓冲时间分配区间	各区间运行能耗/kW·h
汨罗东—长沙南	878.5+2 192.9+973.7=4 045.1
长沙南—衡阳东	967.1+2 119.5+973.7=4 060.3
衡阳东—耒阳西	967.1+2 192.9+868.0=4 028.0
优化分配	875.5+2 386.2+748.5=4 010.2

表 6 缓冲时间不同分配方案运行时分仿真结果

缓冲时间分配区间	各区间运行时分/s
汨罗东—长沙南	1 260+2 100+840=4 200
长沙南—衡阳东	1 140+2 220+840=4 200
衡阳东—耒阳西	1 140+2 100+960=4 200
优化分配	1 264+1 820+1 116=4 200

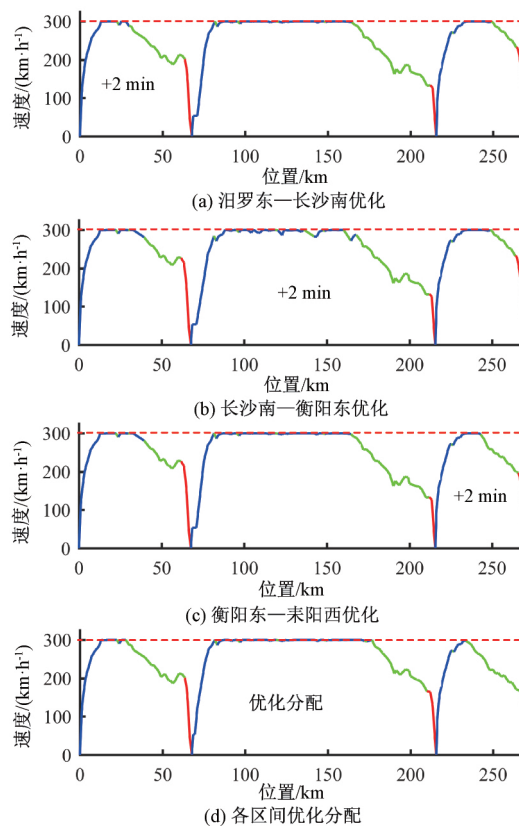


图 4 缓冲时间不同分配方案列车运行速度曲线

4 结论

提出基于混合整数规划方法的列车多区间节能操纵优化模型,在模型的构建过程中考虑再生制动能量反馈,列车过电分相等因素,使得模型更加符合国内高速铁路列车实际运行状态;利用混合整数规划方法可对线路距离长,约束条件复杂的多区间节能操纵问题进行高效求解。此外,本文以速度 300 km/h 的高速线路进行案例仿真,仿真结果表明在多区间总运行时分不变的情况下,本文提出的优化方法可有效降低区间总运行能耗,并获得区间运行时分分配方案与列车操作策略,为运行图的编制以及动车组驾驶操作提供参考。但是,本文采用的离散化与分段仿射在提高求解效率的同时对模型产生了不可避免的误差,且本文没有考虑再生制动能量利用率随列车位置与工况是动态变化的,以及多列车追踪运行下列车到站时间窗约束的动态变化。因此,结合区间运行时分分配优化下的多列车多区间追踪节能优化,将是本文接下来的研究方向与重点。

参考文献:

- [1] ISHIKAWA K. Application of Optimization Theory for Bounded State Variable Problems to the Operation of

- Trains[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 1968, 11(47):857-865.
- [2] HOWLETT P G. An Optimal Strategy for the Control of a Train [J]. The Journal of the Australian Mathematical Society B: Applied Mathematics, 1990, 31(4):454-471.
- [3] 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, 36(10):7-12.
- LIU Jianqiang, WEI Yuanle, HU Hui. Research on Optimization Control Method of Energy-saving Operation of High-speed Trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(10):7-12.
- [4] FRANKE R, TERWIESCH P, MEYER M. An Algorithm for the Optimal Control of the Driving of Trains [C]// Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney, 2000:2123-2128.
- [5] 金炜东, 靳蕃, 李崇维, 等. 列车优化操纵速度模式曲线生成的智能计算研究[J]. 铁道学报, 1998, 20(5):47-52.
- JIN Weidong, JIN Fan, LI Chongwei, et al. Study on Intelligent Computation of Velocity Schema Curve of Optimization Operation for Train [J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(5):47-52.
- [6] 王自力. 列车节能运行优化操纵的研究[J]. 西南交通大学学报, 1994, 29(3):275-280.
- WANG Zili. An Optimal Operation Method of Train Running for Saving Energy [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1994, 29(3):275-280.
- [7] 柏赞, 毛保华, 周方明, 等. 基于功耗分析的货物列车节能运行控制方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(3):43-50.
- BAI Yun, MAO Baohua, ZHOU Fangming, et al. Energy-efficient Driving Strategy for Freight Trains Based on Power Consumption Analysis [J]. Journal of Transportation System Engineering and Information Technology, 2009, 9(3):43-50.
- [8] WANG Y, DE SCHUTTER B, NING B, et al. Optimal Trajectory Planning for Trains Using Mixed Integer Linear Programming [C]// Proceeding of the 14th ITSC. Washington, 2011:1598-1603.
- [9] 李姗, 苗建瑞, 孟令云, 等. 面向节能的城轨列车区间运行时分优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8):1630-1635.
- LI Shan, MIAO Jianrui, MENG Lingyun, et al. Optimization of Urban Rail Transit Segment Running Time Based on Energy Saving [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8):1630-1635.
- [10] 丁勇, 刘海东, 柏赞, 等. 地铁列车节能运行的两阶段优化模型算法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(1):96-101.
- DING Yong, LIU Haidong, BAI Yun, et al. A Two-level Optimization Model and Algorithm for Energy-efficient Urban Train Operation [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(1):96-101.
- [11] SU S, LI X, TANG T, et al. A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-efficient Operation Strategy [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2):883-893.
- [12] ZHOU L S, TONG L, CHEN J H, et al. Joint Optimization of High-speed Train Timetables and Speed Profiles: a Unified Modeling Approach Using Space-time-speed Networks [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 97: 157-181.
- [13] ZHAO N, ROBERTS C, HILLMANSEN S, et al. An Integrated Metro Operation Optimization to Minimize Energy Consumption [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 75: 168-182.
- [14] ROCHARD B P, SCHMID F. A Review of Methods to Measure and Calculate Train Resistances [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2000, 214(4): 185-199.

(责任编辑 张 航)