

文章编号: 1004-2954(2026)05-0020-07

动车组列控车载设备的制动曲线设定参数研究

盛天一¹, 田志强^{2,3}, 沈通⁴

(1. 中国铁道科学研究院研究生部, 北京 100081; 2. 兰州交通大学交通运输学院, 兰州 730070; 3. 兰州交通大学高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室, 兰州 730070; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司科学技术信息研究所, 北京 100081)

摘要:【目的】围绕中国高铁系统中的列控车载设备(CTCS)及其自动列车保护系统(ATP),探讨列车制动效率及其对列车间隔时间的影响。指出不同ATP型号的防护效率差异较大,尤其在高速铁路上,ATP生成的制动距离冗余问题导致列车提速运行时的到达间隔显著增加,成为行车组织的瓶颈。【方法】为了提高列车的行车效率,分析现有欧标制动法,指出欧标制动法区间内的平均减速度取值可能引发安全隐患,且由于速度区间划分粗放,导致制动效率不高。为了解决上述问题,基于现有列控车载设备曲线计算规定,提出一种基于最小制动距离目标的改进ATP制动曲线计算模型,以最小制动距离和最小制动时间为目标,结合驾驶适应性等因素,应用遗传算法对某型列控车载设备的曲线设定参数进行优化。【结果】计算结果表明,新设计的列控车载设备优化模型计算结果优于原本设备的计算结果,最小制动距离目标和最小制动时间目标下分别比原设备结果最多提高10.14%和10.73%。【结论】研究成果为更高效率的动车组列控车载设备的制动曲线参数提供一种设计思路。

关键词:列控车载设备; 列车控制; 中国列车运行控制系统; 列车自动保护系统; 遗传算法; 欧标制动法

中图分类号:U291 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202409040002

Study on Braking Curve Setting Parameters of EMU Train Control On-Board Equipment

SHENG Tianyi¹, TIAN Zhiqiang^{2,3}, SHEN Tong⁴

(1. Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Intelligent Management and Control for Plateau Railway Transportation in the Railway Industry, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 4. Scientific and Technological Information Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] This study focused on the train control on-board equipment (CTCS) and its automatic train protection (ATP) system in China's high-speed railway system, and investigated train braking efficiency and its impact on train headway. It was pointed out that there were significant differences in protection efficiency among different ATP types, especially on high-speed railways, where the redundant braking distance generated by ATP led to a significant increase in train headway during acceleration, becoming a bottleneck in train operation organization. [Methods] To improve train operation efficiency, the existing European standard braking method was analyzed. It was pointed out that the average deceleration value within each interval might introduce potential safety hazards, and the coarse division of speed intervals resulted in low braking efficiency. To address the above problems, an improved ATP braking curve calculation model based on the objective of minimum braking distance was

proposed in accordance with existing calculation specifications of train control on-board equipment. With the objectives of minimum braking distance and minimum braking time, and considering factors such as driving adaptability, a genetic algorithm was applied to optimize the curve setting

收稿日期: 2024-09-04; 修回日期: 2024-10-30; 网络首发日期: 2025-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(71761023, 72161023); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023J022)

作者简介: 盛天一(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事行车组织研究工作, E-mail: bbb2210@gmail.com。

通信作者: 田志强(1981—), 男, 教授, 工学博士, 主要从事铁路运输组织优化与运行图编制研究工作, E-mail: tianzq@mail.lzjtu.cn。

parameters of a certain type of train control on-board equipment. [**Results**] The calculation results showed that, compared with the calculation results of the original equipment, the optimized model improved the minimum braking distance objective and the minimum braking time objective by up to 10.14% and 10.73%, respectively. [**Conclusion**] The research findings provide a design approach for the braking curve parameters of on-board equipment for train control of higher-efficiency multiple units.

Key words: train control on-board equipment; train control; China Train Control System; automatic train protection; genetic algorithm; European standard braking method

1 研究背景

高速列车在运行中需要列控车载设备作为安全防护措施。目前,我国高速铁路采用 CTCS-2 或 CTCS-3 级列控系统(China Train Control System),其中选用的列控车载设备是列车自动保护系统 ATP(Automatic Train Protection)。该系统可以实现对列车的超速防护以及对信号的冒进和冒出防护。通常,列车制动减速过程曲线与最高效率制动完全吻合;列车制动过急,会导致惰行时间过长;而列车制动不足,则会被 ATP 系统监测到并进行保护,从而变成制动过急的情况^[1]。不同型号的 ATP 在防护效率上存在显著差异,而动车组的制动性能随着速度的提升并未完全匹配。ATP 生成的制动距离通常存在冗余,导致在提速运行时列车到达间隔急剧增大,具体取决于车型和 ATP 型号的组合,最不利组合会成为行车组织的瓶颈。在沪杭高速铁路扩大 3 min 追踪间隔的列车开行范围与通过能力提升技术研究中,列车制动时间是一个难以压缩的参数。通过分析 ATP 制动参数设计的逻辑,在不对硬件进行改动的基础上,基于制动效率和驾驶舒适性,提出欧标 ATP 的优化方案和理论计算结果,使得进一步压缩高速铁路列车间隔时间成为可能。

此外,以 ATP 的制动减速度作为列车制动时的计算参数具有实际意义,可以计算出间隔时间的下限值,从而明确线路和车站的能力^[2]。而普速铁路的列车运行监控系统 LKJ 作为 ATP 的类似设备,实施列车运行防护,其防护曲线的生成方式与 ATP 相似,防护模式基本一致^[3]。基于这一特性,对自 1983 年以来尚未更新的普速铁路列车间隔时间查定办法^[4]具有一定参考意义。

国内田长海^[5]、张守帅^[6]、赵建勋^[7]、王高磊^[8]、张岳松^[9]等学者研究高速铁路追踪间隔时间时,均利用 ATP 的制动参数作为列车牵引计算的依据,建立全新的符合现况的高铁列车间隔时间查定办法,并校验理想路况、实际路况以及极端路况下计算结果的正确性。在后续普速铁路列车间隔时间研究中,朱子童^[10]、吕峰^[11]、田长海^[12]、赵建勋^[13-14]等又以普速铁

路列控设备 LKJ 的制动参数作为制动依据,综合普速铁路作业特征和风险要点,参考高速铁路列车间隔时间计算方法,制定普速铁路列车间隔时间计算办法,并验证其正确性;ZHOU 等^[15]设计时空状态网络,将列车运行图和列车牵引计算结合,尝试以精细化的列车制动路径嵌入列车运行图,获得相比平均速度法更加准确的列车运行图刻画;马驹^[16]对正晚点情况下高速铁路车站进路分配方案的优化和调整,发现当某列车晚点时,进路交叉严重,列车的制动轨迹需准确刻画;潘明轩^[17]、鲁工圆^[18]分别以总最小运营时间为目标,按列控参数等约束构建仿真模型,对高速列车追踪时空轨迹和高速铁路车站的间隔时间进行优化,相比原计算方法有明显提升;李壮^[19]则按照现有牵引制动参数,面向 3 min 追踪间隔对 400 km/h 高速列车追踪过程仿真分析,结果表明,400 km/h 高速列车需要进一步提高制动和牵引加速度,随着速度提高,列车的真实制动过程不仅与车辆参数有关,还与列控设备的制动防护有关。

上述研究表明,无论是普速铁路还是高速铁路,基于信号列控设备限制来计算列车运行是正确且必要的。在日常运用中,列控系统提供的制动曲线最紧凑。因此,对动车组 ATP 制动参数优化的研究,对于压缩高铁列车间隔时间具有重要意义。

1.1 欧标制动法原理

国内一般情况下列车实际减速度随速度变化,在制动初期速度高,制动减速度相对较小,列车速度降低后减速度逐渐增大。由于列车减速度最大也很少超过 1 m/s^2 ,为了计算方便并考虑实时性,欧标制动法将最不利制动条件下制动曲线简化为若干等效直线,如图 1 所示。在采用欧标制动法划分制动过程时,一般假定将速度区间 $[v_{\max}, 0]$ 划分为 n 段,对应的速度分界点分别为 $v_1, v_2, \dots, v_{n-1}$,且每个分段内的减速度 $a_{b1}, a_{b2}, \dots, a_{bn}$ 为简化最不利制动曲线后的减速度,相应区间的制动距离分别为 $s_1, s_2, \dots, s_n$, s_e 为考虑制动空走时间 t_e 和初速度 v_0 的附加制动距离,与减速度设置无关,则最大常用制动曲线 SBD 的制动距离 s 为

$$s = s_e + s_1 + s_2 + \dots + s_n = v_0 t_e +$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{v_0^2 - v_1^2}{a_{b1}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{a_{b2}} + \dots + \frac{v_{n-1}^2 - 0}{a_{bn}} \right) \quad (1)$$

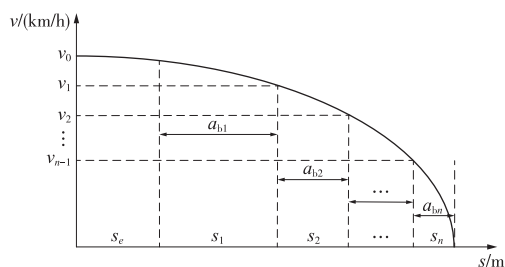


图 1 欧标制动法列车制动曲线

Fig. 1 Train braking curve based on European standard braking method

设 $a_i^{\max}$ 、 $a_i^{\min}$ 分别为对应速度区间内 $[v_{i-1}, v_i]$ 的最大减速度和最小减速度, 则当 $v_{i-1} \neq 0$ km/h 且 $\Delta v \leq 30$ km/h 时或 $v_{i-1} = 0$ km/h 且 $\Delta v \leq 40$ km/h 时应满足

$$|a_i^{\max} - a_i^{\min}| \leq 0.15 \text{ m/s}^2 \quad (2)$$

如果对于 $[v_{\max}, 0]$ 内的 $a_{\min}$ 和 $a_{\max}$, 有 $|a_{\max} - a_{\min}| \leq 0.15 \text{ m/s}^2$, 则应按照分区制动距离大致相等的原则划分出 2 个及以上区间。区间内的减速度值为

$$a_{bi} = \frac{v_i^2 - v_{i+1}^2}{2s_i} \quad (3)$$

式中, s_i 为列车速度由 v_i 降至 v_{i+1} 的制动距离, 由实验确定。

1.2 欧标制动法应用中的问题

经过国家高速铁路长时间运用积累的经验验证, 欧标制动法在实际过程中制动效率不高。

(1) 速度区间的划分方式较为粗放, 按照减速以固定间隔的方式进行划分, 使得计算出的制动曲线和车辆真实制动曲线存在较大差别, 每个速度区间内的制动效率不均衡, 影响司机制动操纵, 进而导致行车效率不高。

(2) 区间减速度的计算结果实质上是区间内的平均减速度, 而不是最小减速度, 在雨雪天等不利条件下, 会存在一定安全风险。

假设, 对于区间 $[30 \text{ km/h}, 0]$, 列车制动设计减速度在 $[30 \text{ km/h}, 20 \text{ km/h})$ 区间为 0.85 m/s^2 , 在 $[20 \text{ km/h}, 0]$ 为 1 m/s^2 ; 但按欧标, 与速度区间 $[30 \text{ km/h}, 0]$ 对应的减速度为 $a = 0.910714 \text{ m/s}^2$ 。假定 ATP 从 30 km/h 打靶至 20 km/h , 按照欧标制动法计算出的打靶距离 $s_{\text{ATP}} = 21.1813 \text{ m}$, 车辆实际制动距离 $s_{\text{Train}} = 22.6943 \text{ m}$, 不满足任意速度下 $s_{\text{ATP}} > s_{\text{Train}}$ 均成立的安全要求^[20-21]。

1.3 CTCS 系统引入欧标制动模型后的改进

修改制动模型需要在保证安全前提下, 对制动模

型着手优化效率。本改进制动模型的优化要点如下。

(1) 安全保证

用速度区间内的最小减速度 $0.9a_{\min}$ 作为安全减速度代替平均减速度。这样对于任何速度区间, 由制动模型得到的制动距离均不小于真实距离, 保证安全。

(2) 效率保证

按各个初速度下对应的模型制动距离与真实制动距离的平方差之和最小的原则进行速度区间划分, 共有 6 个速度区间, 以求高的制动效率。

按照第 (2) 点的减速度设定原则可知, $s_{\text{ATP}} > s_{\text{Train}}$ 恒成立, 则 6 个区间上制动距离差的平方差之和最小, 与在区间 $[v_{\max}, 0]$ 上设定 6 个安全减速度后制动距离最短是同样目的。

只有当速度划分区间无限多时, 即两者都无限逼近列车真实制动距离时, 两者的结果相等价。

2 以最小制动距离为目标的 ATP 制动曲线计算模型

2.1 制动模型建立

分析原始欧标模型和 CTCS 改进欧标制动模型的不足, 前者的制动参数易偏大从而导致不安全, 而后者采用分段方式所生成的曲线可以保证安全, 但未必能得到 6 段等效后的最小制动距离。由于制动曲线涉及核心安全, 且多为底层逻辑, 任何微小的变化都可能带来安全风险, 所以长期以来相关变更极少, 需谨慎^[20]。解决上述问题的核心如下。

(1) 模型安全性分析

动车组最不利制动曲线 (含风阻) 是分段函数, 由需要设计制动模型车型的湿轨下制动曲线和列车风阻曲线相加而成, 常见车型最不利制动曲线的最大值与最小值差值为 $0.3 \sim 0.6 \text{ m/s}^2$, 某车型最不利制动曲线 (含风阻) 见图 2。

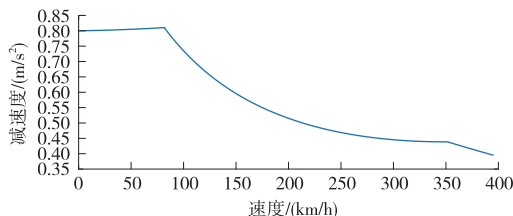


图 2 某型动车组最不利制动曲线 (含风阻)

Fig. 2 Least favorable braking curve of a certain EMU (including wind resistance)

当前使用的动车组制动曲线均为函数式制动曲线, 由制动单元 BCU 控制, 根据配载等情况去吻合制动曲线, 制动曲线近似分段线性, 而风阻曲线是一条二次函数且在速度 > 0 的区间均单调递增, 二者相加后也是分段单调的函数, 所以不会有极小值拐点。设最不

利制动曲线函数(含风阻)为 $a=f(v)$, 其上任意一点的制动减速度值 $a_0=f(v_0)$ 。由厂家提供的制动曲线函数和图2可知,在定义域 $[0, v_{\max}]$ 上 $f(v)$ 无极小值拐点,故对于 $v_i \geq v_{i+1}$, 在区间 $[v_i, v_{i+1}]$ 上, 直线 $y = \min\{f(v_i), f(v_{i+1})\}$ 一定内接曲线 $a=f(v)$, 即 $\min\{f(v_i), f(v_{i+1})\}$ 一定为区间 $[v_i, v_{i+1}]$ 上的最小值。所以在每个速度分区内,应用分区端点两个值中较小值作为该区间的减速度一定安全,并且从车辆设计的角度考量,当速度越来越大时,车辆的黏着系数快速下降,为了适应这种趋势,制动力越来越小,防止抱死发生。

(2) 建立 ATP 制动曲线计算模型

在欧标6段式划分的基础上,实际运用中不强调一定按照6段减速度划分,当集合变量 $x=0$ 时,速度分段点无效。设最大常用制动距离 S_{SBD} , 设速度区间分割点集合 $\{0, v_0, v_1, \dots, v_5, v_{\max}\}$, 有 $0 \leq v_0 \leq v_1 \leq \dots \leq v_5 \leq v_{\max}$, 对应的6段减速度集合为 $\{a_1, a_2, \dots, a_6\}$ 。对于区间 $[v_i, v_{i+1}]$ 上,车辆实际减速度的最大值 $a_i^{\max}$ 与区间端点最大值 $\max\{f(v_i), f(v_{i+1})\}$ 非常接近,内接曲线时这一点差距在实际计算时会被抛弃,并且在区间内搜索函数的最大、最小值资源消耗大,一般只能定步长搜索,计算开销极大。为了使得改进后模型减速度取值在整个速度的取值范围内足够分散,尽量在“紧贴制动曲线”同时,又保证司机驾驶舒适,避免在函数的拐点附近密集取值。当计算出较小的速度分段时,应当针对不同车型的特性限制减速度的变化,故对于本例设区间 $[v_{i-1}, v_i]$, 如果 $v_1 - 0 \leq 40 \text{ km/h}$ 或 $v_{i+1} - v_i \leq 30 \text{ km/h}$ 时,则相邻两速度区间上减速度的差距不应 $> 0.1 \text{ m/s}^2$, 即

$$|a_i - a_{i+1}| \leq 0.1 \text{ m/s}^2 \quad (4)$$

建立模型(M1)目标函数,即

$$\min S_{\text{SBD}} = \frac{1}{0.9 \times 2 \times 3.6^2} \times \left(\frac{v_1^2 - 0}{a_1} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{a_2} + \frac{v_3^2 - v_2^2}{a_3} + \frac{v_4^2 - v_3^2}{a_4} + \frac{v_5^2 - v_4^2}{a_5} + \frac{v_{\max}^2 - v_5^2}{a_6} \right) \quad (5)$$

其中

(1) 减速度计算

$$\begin{cases} a_1 = \min\{f(0), f(v_1)\} \\ a_2 = \min\{f(v_1), f(v_2)\} \\ a_3 = \min\{f(v_2), f(v_3)\} \\ a_4 = \min\{f(v_3), f(v_4)\} \\ a_5 = \min\{f(v_4), f(v_5)\} \\ a_6 = \min\{f(v_5), f(v_{\max})\} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 速度间隔约束

$$\begin{cases} x_1 \cdot x_2 \cdot |a_1 - a_2| \leq 0.15 \text{ m/s}^2 \\ x_3 \cdot |a_2 - a_3| \leq 0.15 \text{ m/s}^2 \\ x_4 \cdot |a_4 - a_3| \leq 0.15 \text{ m/s}^2 \\ x_5 \cdot |a_5 - a_4| \leq 0.15 \text{ m/s}^2 \\ x_6 \cdot |a_5 - a_6| \leq 0.15 \text{ m/s}^2 \end{cases} \quad (7)$$

(3) 速度区间大小的逻辑约束

$$\begin{cases} x_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } (v_1 - 0 \leq 40 \text{ km/h}) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \\ x_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } (v_2 - v_1 \leq 30 \text{ km/h}) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \\ x_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } (v_3 - v_2 \leq 30 \text{ km/h}) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \\ x_4 = \begin{cases} 1 & \text{if } (v_4 - v_3 \leq 30 \text{ km/h}) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \\ x_5 = \begin{cases} 1 & \text{if } (v_5 - v_4 \leq 30 \text{ km/h}) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \\ x_6 = \begin{cases} 1 & \text{if } (v_{\max} - v_5 \leq 30 \text{ km/h}) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

(4) 速度分区端点的约束

$$\begin{cases} v_1 \geq 0 \\ v_1 \leq v_2 \\ v_2 \leq v_3 \\ v_3 \leq v_4 \\ v_4 \leq v_5 \\ v_5 \leq v_{\max} \\ v_i \in N, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 改进模型求解与结果分析

该模型本质上是用6条直线内接最不利制动曲线,由制动曲线可知,模型的可行域为非凸集合。且内接直线的速度分割点,按规定内接直线速度分割点应为 5 km/h 的整数倍点,加之区间大小的逻辑约束为0-1变量,即为高度非线性的混合整数规划问题。本模型约束条件中有较多的绝对值运算、取小运算和布尔运算,使用分支定界求解需要相当的技巧,如果日后列控车载安全计算机算力提升,速度分区分界点值不再需要为5的倍数甚至不再需要为整数时,原方法将失效,则研究结果失去延续性,为此设计使用更广泛的遗传算法求解该模型^[22]。

(1) 染色体编码

本模型的决策变量为速度分区端点,都为整数且有大小顺序要求。如果使用二进制编码,交叉时产生大量不可行解,解空间也会变得狭窄。M1模型的精

度要求要达到 10^{-3} 级,故使用实数编码,用变量的真实值直接作为编码。由于分界点速度均是 5 km/h 的整倍数点,所以令 $v'_i = v_i/5$,使得 v'_i 的范围缩小为 $[0, 0.2v_{\max}]$ 。

(2) 初始种群生成

对于该问题,设定 3 组计算样本,种群大小分别为 20、50 和 100,在 $[0, 0.2v_{\max}]$ 区间随机生成整数作为初始种群。

(3) 计算种群适应度函数

由于构建模型为非凸模型,在处理约束时使用增广拉格朗日函数增加凸性。考虑到目标函数的值在 10~20 之间,设初始惩罚函数值为 500,惩罚因子为 1 000,将约束和目标函数组合,可排除不可行解。又因该模型为最小化问题,直接将个体值乘 5 后代入增广拉格朗日函数计算适应度。

(4) 更新种群

该处的选择方法是在种群中使用均匀分布的随机数选择个体的父代;因该处染色体编码为实数编码,故采用算数交叉,父代种群选取个体进行线性组合交叉产生后代;变异则采用逐渐变小趋于收敛,但是求和后不收敛的变异率,该处使用调和级数。

(5) 判断终止条件

判断适应度若变化 $<10^{-3}$,则根据《列车牵引计算规程》(以下简称“《牵规》”)的要求,输出保留 3 位小数计算结果;否则返回步骤(3)。

按照《铁路技术管理规程》(高速铁路)规定^[3]:完全监控模式下 CTCS-3 级列控车载设备(含 CTCS-2 级后备功能)应按高于 5 km/h 常用制动设置模式曲线,考虑到该车型长期限速使用,故令 $v_{\max}$ 为 315, 355 km/h 和厂方给出的最大速度 395 km/h,分别求解常用制动减速度参数和制动距离。在 macOS 12.6.9 系统上使用 MATLAB 作为计算平台,在处理器为 i9-9880H,运行内存 16G 的 MacBook Pro 上,对每个组合求解 10 次,记录最优、次优和第三优结果。求解结果见表 1。

表 1 优化前后对比

Tab. 1 Comparison before and after optimization

求解背景条件	制动初速度 305 km/h 的计算距离/km	制动效率/%
最不利制动情况	7.584	90.00*
ATP 原设参数	9.539	71.56
$v_{\max} = 315$ km/h	8.770	77.83
$v_{\max} = 395$ km/h	8.865	76.99

注: * 为依照列车牵引计算要求^[21],计算制动距离需要预留 10% 的裕量。

每次计算收敛时,计算迭代均在 100 次以内,计算

时间 <10 s。由计算结果可知,当种群数量为 20 时,计算结果相比 50 与 100 较差,并且随着制动初速度的提高,种群为 20 的计算结果出现较大差异,每次得到的结果不稳定。而种群数量为 100 时,计算结果稳定且优秀,故后续算例使用 100 作为种群参数。如图 3~图 6 显示优化计算后的结果。

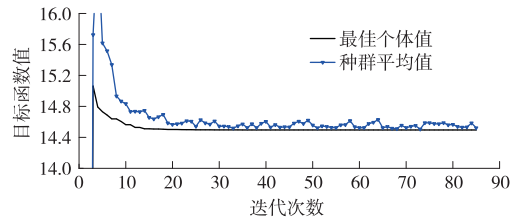


图 3 算法迭代收敛曲线

Fig. 3 Convergence curves of algorithm iteration

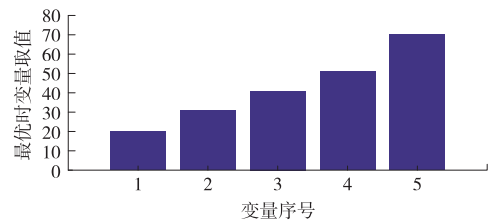


图 4 取得最佳结果时各变量取值

Fig. 4 Values of variables at optimal solution

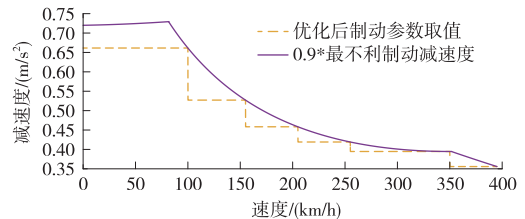


图 5 优化后 $v_{\max} = 395$ km/h 制动等效图

Fig. 5 Equivalent braking diagram for $v_{\max} = 395$ km/h after optimization

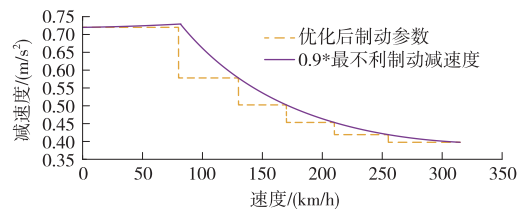


图 6 优化后 $v_{\max} = 315$ km/h 制动等效图

Fig. 6 Equivalent braking diagram for $v_{\max} = 315$ km/h after optimization

经过 86 次迭代后触发算法的终止条件,此时种群内个体的平均适应度和最佳值差距为 0.21%,决策变量 v'_i 的取值集合为 $\{20, 31, 41, 51, 70\}$,即对应的分界点分别为 100, 155, 205, 255, 350 km/h 时,此时取到的 6 段减速度可以使计算出的制动距离达到最小,即

14.495 km,6 段制动参数如图 5 所示。

需讨论的是该车型长期限速 310 km/h,并且当 ATP 处于顶棚速度监控状态下,超速 5 km/h 则触发常用制动,超速 15 km/h 则触发紧急制动,换言之列车速度达到 315 km/h 以上时则转为紧急制动曲线监控,常用制动曲线只需要按照最大 315 km/h 设定。因此不计算 $v_{\max}=365$ km/h 的条件。由表 1 可知, $v_{\max}=315$ km/h 条件下,求解得到的 6 段减速度,明显好于 $v_{\max}=395$ km/h,如图 6 所示。

3 以最小制动时间为目标的计算模型和参数取值

3.1 最小制动时间为目标的模型建立

M1 模型相较于 ATP 原始结果已有明显优化,但是 M1 模型基于最小制动距离考虑,由高速铁路列车间隔时间计算模型可知^[22],最低的制动时间可以带来最小的区间追踪间隔以及其他间隔时间,而最小制动距离条件下参数未必是最小制动时间的参数,二者的最优解不一定相同,故提出 M1 的改进模型 M2,将 M1 的目标函数由最小制动距离 S_{SBD} 改为最小制动时间 T_{SBD} ,即

$$\min T_{\text{SBD}} = \frac{1}{0.9 \times 3.6} \times \left(\frac{v_1 - 0}{a_1} + \frac{v_2 - v_1}{a_2} + \frac{v_3 - v_2}{a_3} + \frac{v_4 - v_3}{a_4} + \frac{v_5 - v_4}{a_5} + \frac{v_{\max} - v_5}{a_6} \right) \quad (10)$$

约束条件同 M1。 T_{SBD} 基于 ATP 的最小制动时间计算。

3.2 M2 模型求解与结果分析

对于 M2 模型,仅需稍加改动 M1 模型的目标函数和惩罚函数,即可直接计算 M2。此处依然令 $v_{\max}$ 为 315 km/h 和 395 km/h,分别求解常用制动减速度参数和制动时间,根据《牵规》要求,保留一位小数后结果见表 2。

表 2 目标为最小制动时间的优化对比

Tab.2 Comparison of optimization results with objective of minimizing braking time

求解背景条件	制动初速度 305 km/h 的计算时间/s	以时间为基准的 制动效率/%
最不利制动情况	159	90.00
ATP 原设参数	207	69.07
$v_{\max}=315$ km/h	184	77.74
$v_{\max}=355$ km/h	185	77.44
$v_{\max}=395$ km/h	186	76.82

可以看出本模型对制动时间优化明显,优化后的制动效率仍然比 ATP 原设计高 5% 以上。表 3 显示在不同目标下,同目标速度时的制动时间和制动距离的比较。

表 3 最小制动时间与最小制动距离优化结果对比

Tab.3 Comparison of optimization results between minimum braking time and minimum braking distance

最大目标速度 /(km/h)	优化目标	制动距离 /km	差距 /%	制动时间 /s	差距 /%
395	S_{SBD}	14.495	10.14	263	10.73
	T_{SBD}	16.131		235	
355	S_{SBD}	11.180	10.11	225	10.35
	T_{SBD}	12.438		202	
315	S_{SBD}	8.494	10.12	193	10.42
	T_{SBD}	9.450		173	
315(ATP)	—	10.240	—	215	—

由表 3 可知,不同优化目标下,两者的最优解不等价,对于行车组织工作而言,更小的制动时间意味着更高的效率,并且在更小制动时间的情况下,高速铁路站间距也不会影响车站接发列车的效率。

在高速铁路行车时,司机视线达不到列车制动距离,一旦司机瞭望时发现异常,需要紧急制动,ATP 制动防护对该情况无帮助。当发生信号突跳等故障时,触发 ATP 紧急制动,以最小制动时间计算出的制动距离要大于以最小制动距离的计算值,给司机留出更多的制动调整空间,实际上更加安全,所以应当推荐以最小制动时间作为计算目标。

3.3 改进模型的求解与结果分析

前文 M1 和 M2 模型的决策变量 v_i 为整数变量,且为 5 的整数倍,故决策变量的可行搜索集合 D_1 较小,对于 $v_{\max}=395$ km/h 的情况,一共有 $C_{79-1}^5=2.21 \times 10^7$ 种组合;如果将决策变量 v_i 的约束改为整数,则搜索集合 D_2 将明显扩大,且 $D_1 \subseteq D_2$ 。对于 $v_{\max}=395$ km/h 的情况,则有 $C_{395-1}^5=7.71 \times 10^{10}$;如果将决策变量 v_i 的约束改为连续变量,精度为 10^{-4} ,则搜索集合 D_3 出现急速增长,有 $C_{3\,950\,000-1}^5=8.01 \times 10^{30}$ 种组合,有利于找出更好的速度分区和制动参数集合。

利用已设计好的遗传算法框架,此处仅将决策变量的约束变为普通整数约束和浮点数,成为新的模型 M3(A,B)和 M4(A,B),分别以 S_{SBD} 和 T_{SBD} 为目标,设 $v_{\max}=395$ km/h 进行求解,不进行修约的结果见表 4。

表 4 松弛变量后的优化结果

Tab.4 Optimization results after introducing slack variables

模型	优化目标	制动距离/km	制动时间/s
M3A	S_{SBD}	14.480	—
M3B	T_{SBD}	—	234
M4A	S_{SBD}	14.480	—
M4B	T_{SBD}	—	234

M1 和 M2 模型结果进行对比见表 5。
进一步优化的 M3 和 M4 模型在结果上的确更优,但是优化幅度均在 0.1% 附近,完全可以忽略。在计

算效率上,M3 模型使用整数约束,和 M1、M2 效率基本相等,计算时间无明显变化,求解出的制动距离和制动时间均为比较优秀的结果。但是松弛掉整数约束的 M4 模型,搜索空间急剧增加,且变量为浮点数,导致计算时间急剧增加,每次迭代都远超过 5 s,而修约后的实用计算结果和 M3 完全一致,所以 M4 模型没有意义,M3 模型可以作为最终优化结果。

表 5 各模型优化结果对比

Tab. 5 Comparison of optimization results across different models

模型	优化目标	制动距离/km	制动时间/s	优化幅度/%
M1	S_{SBD}	14.495	263	—
M2	T_{SBD}	16.131	235	—
M3A	S_{SBD}	14.480	236	0.10
M3B	T_{SBD}	14.498	234	0.13
M4A	S_{SBD}	14.480	236	0.10
M4B	T_{SBD}	14.498	234	0.13

4 结论与展望

列控车载设备计算出的制动距离是列车制动性能的重要参照,司机必须遵守防护曲线的限速值进行制动,该防护曲线决定了列车制动时的效率,司机无法超越该曲线实现更高效率的制动,主要结论如下。

(1)当 ATP 制动参数按照本文模型优化后,则可压缩制动时间,对应的列车追踪间隔时间、列车到达间隔时间等与列车制动有关的间隔时间,均可相应压缩。

(2)在检算高速铁路列车间隔时间时,以 ATP 产生常用制动曲线的参数作为制动参数计算列车制动时间可以得到间隔时间的下限值,与实用中运行时间的统计分析结果加以比较,实现精确计算间隔时间可行值。

欧标法及改进的制动法采用等效后的制动参数与坡道相加,两者皆有损失,面对山区高速铁路限速值偏低的事实,可以考虑以不同的最大速度设定 ATP 制动参数,计算优化参数时的消耗时间较小,随着移动闭塞和高密度行车的深入研究,动态制动参数配合移动闭塞将有望进一步提升行车密度,挖掘线路能力。

参考文献:

[1] 崔佳诺. 基于高铁 C2+ATO 的市域铁路列控系统研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(12):176-181.
CUI Jianuo. Research on Urban Railway Train Control System Based on High Speed Railway C2+ATO[J]. Railway Standard Design, 2024,68(12):176-181.

[2] 张守帅,李微,卢万胜,等. 沪杭高速铁路列车间隔时间取值计算与试验分析[J]. 铁道运输与经济,2021,43(10):1-7.
ZHANG Shoushuai, LI Wei, LU Wansheng, et al. Calculation and Test Analysis of Train Headway of Shanghai-Hangzhou High Speed Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2021,43(10):1-7.

[3] 中国铁路总公司. 铁路技术管理规程:TG/01—2014[S]. 北京:中国铁道出版社,2014:19-20.

[4] 杨晓. 高速铁路列车追踪间隔影响因素及测试方法研究[J]. 铁道运输与经济,2017,39(6):22-26.
YANG Xiao. Study on Influence Factors and Test Methods of High-speed Train Tracking Interval[J]. Railway Transport and Economy, 2017,39(6):22-26.

[5] 田长海. 发展中的我国铁路列车速度、密度、重量[J]. 中国铁道科学,2020,41(4):127-135.
TIAN Changhai. China's Railway Train Speed, Density and Weight in Developing[J]. China Railway Science, 2020,41(4):127-135.

[6] 张守帅,田长海. 高速铁路长大下坡地段列车运行速度相关问题研究[J]. 中国铁道科学,2017,38(3):124-129.
ZHANG Shoushuai, TIAN Changhai. Study on Related Problems of Train Operation Speed on Long Heavy down Grade of High Speed Railway[J]. China Railway Science, 2017,38(3):124-129.

[7] 赵建勋,田长海,张守帅. 基于闭塞时间的高速铁路列车间隔时间研究[J]. 铁道运输与经济,2020,42(S1):37-46,59.
ZHAO Jianxun, TIAN Changhai, ZHANG Shoushuai. A Study on the Train Headway of High-speed Railway Based on the Theory of Blocking Time[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(S1):37-46,59.

[8] 王高磊,田长海,张守帅. 基于 UIC406 的铁路区段通过能力计算方法研究[J]. 铁道运输与经济,2019,41(4):20-27.
WANG Gaolei, TIAN Changhai, ZHANG Shoushuai. A Study on a Calculation Method of Railway Section Passing Capacity Based on UIC406[J]. Railway Transport and Economy, 2019,41(4):20-27.

[9] 张岳松,田长海,姜昕良,等. 高速铁路列车间隔时间的计算方法[J]. 中国铁道科学,2013,34(5):120-125.
ZHANG Yuesong, TIAN Changhai, JIANG Xinliang, et al. Calculation Method for Train Headway of High Speed Railway[J]. China Railway Science, 2013,34(5):120-125.

[10] 朱子童,田长海,邓捷航,等. 双线自动闭塞区段扣除系数法计算铁路通过能力再研究[J]. 铁道运输与经济,2023,45(5):16-21,66.
ZHU Zitong, TIAN Changhai, DENG Jiehang, et al. Restudy on Calculation of Railway Passing Capacity by Using Deduction Coefficient Method at Double-line Automatic Block Section[J]. Railway Transport and Economy, 2023,45(5):16-21,66.

[11] 吕峰,王高磊,赵建勋,等. 基于 CTCS-2 级常态灭灯区段的动车组列车 ATP 故障后控车模式选择研究[J]. 铁道运输与经济,2023,45(8):136-144.
LYU Feng, WANG Gaolei, ZHAO Jianxun, et al. Train Control Mode Selection after ATP Failure of EMU Trains Based on CTCS-2 Normal Light-off Section[J]. Railway Transport and Economy, 2023,45(8):136-144.

[12] 田长海,姜博,赵建勋,等. 普速铁路列车追踪间隔时间计算方法研究[J]. 铁道学报,2022,44(11):1-9.
TIAN Changhai, JIANG Bo, ZHAO Jianxun, et al. Research on Calculation Method of Conventional Railway Headway at Automatic Block Section[J]. Journal of the China Railway Society, 2022,44(11):1-9.

- Degradation on Vertical Stability of CRTSII Slab Ballastless Track [J]. Construction and Building Materials, 2023,363:129812.
- [18] HE A, LIU Y, SUN X D, et al. A New Elastic T-shape Joint of Longitudinally Connected Slab Ballastless Track Structure for Releasing Thermal Stress Caused by Non-uniform Temperature Loads [J]. Construction and Building Materials, 2024,416:134997.
- [19] 蔡嘉升,陈进杰,王建西,等. 弱纵连下 CRTS II 型板式无砟轨道解锁温度研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(5):1533-1542.
CAI Jiasheng, CHEN Jinjie, WANG Jianxi, et al. Unlocking Temperature of CRTS II Slab Track with Weak Longitudinal Connection [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023,20(5):1533-1542.
- [20] 梁延科,徐凌雁,寇胜宇,等. 柔性材料在 CRTS II 型轨道板上拱整治中的应用[J]. 铁道建筑,2021,61(1):105-108.
LIANG Yanke, XU Lingyan, KOU Shengyu, et al. Application of Flexible Material in the Upward Regulation of CRTS II Track Slab [J]. Railway Engineering, 2021,61(1):105-108.
- [21] 曹毅杰,蒋典佑,刘钰,等. 接缝弱化后纵连板式无砟轨道温度效应研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(3):72-80.
CAO Yijie, JIANG Dianyou, LIU Yu, et al. Study on Temperature Effect of Longitudinally Connected Slab Ballastless Track after Joints Weakening [J]. Railway Standard Design, 2024,68(3):72-80.
- [22] 蒋典佑,林锦镇,曹毅杰,等. 高速铁路解锁后纵连式无砟轨道纵向温度应力及界面损伤研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(1):65-71.
JIANG Dianyou, LIN Jinzhen, CAO Yijie, et al. Study on Longitudinal Temperature Stress and Interface Damage of Longitudinal Ballastless Track after Unlocking of High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2024,68(1):65-71.
- [23] 林锦镇,蒋典佑,刘钰,等. 单元化纵连无砟轨道在限位条件下的温度变形及损伤研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(2):45-51.
LIN Jinzhen, JIANG Dianyou, LIU Yu, et al. Research on Temperature Deformation and Damage of Unitization of Longitudinally Connected Slab Ballastless Track under Limiting Condition [J]. Railway Standard Design, 2024,68(2):45-51.
- [24] 蔡嘉升,陈进杰,王建西,等. 单元化后高速铁路桥上 CRTS II 型板式无砟轨道结构纵向力分布规律研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(9):45-51.
CAI Jiasheng, CHEN Jinjie, WANG Jianxi, et al. Research on Longitudinal Force Distribution of Unitized CRTSII Slab Ballastless Track on Bridge [J]. Railway Standard Design, 2021,65(9):45-51.
- [25] 钟阳龙,朱建华,高亮,等. 桥上 CRTS II 型板式无砟轨道温度力释放整治研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(5):36-40,64.
ZHONG Yanglong, ZHU Jianhua, GAO Liang, et al. Research on the Treatment of Temperature Force Release of CRTS II Slab Ballastless Track on Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021,38(5):36-40,64.

(编辑:夏梦然)

(上接第26页)

- [13] 赵建勋. 普速铁路列车间隔时间计算理论研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2023.
ZHAO Jianxun. Research on the Calculation Theory of Train Interval Time of Conventional Railway [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2023.
- [14] 赵建勋,田长海,张守帅,等. 普速铁路列车间隔时间计算方法对比研究[J]. 铁道运输与经济,2023,45(10):99-108.
ZHAO Jianxun, TIAN Changhai, ZHANG Shoushuai, et al. Comparison of Train Headway Calculation Methods in Conventional Railway [J]. Railway Transport and Economy, 2023,45(10):99-108.
- [15] 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 Grid Networks [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017,97:157-181.
- [16] 马骊,孙建康,鲁工圆. 高速铁路车站列车进路分配方案的优化与调整[J]. 中国铁道科学,2018,39(1):122-130.
MA Si, SUN Jiankang, LU Gongyuan. Optimization and Adjustment of Train Route Allocation Scheme for High Speed Railway Station [J]. China Railway Science, 2018,39(1):122-130.
- [17] 潘明轩,宁佳,鲁工圆,等. 面向到达间隔时间压缩的高速铁路车站到发线运用优化研究[J]. 铁道运输与经济,2021,43(7):8-15.
PAN Mingxuan, NING Jia, LU Gongyuan, et al. Compressing Arrival Interval by Optimizing Arrival-Departure Tracks of High Speed Railway Station [J]. Railway Transport and Economy, 2021,43(7):8-15.
- [18] 鲁工圆,王超宇,沈子力,等. 面向追踪间隔压缩的高速铁路列车运行时空轨迹优化[J]. 铁道学报,2021,43(7):10-18.
LU Gongyuan, WANG Chaoyu, SHEN Zili, et al. Headway Compression Oriented Space-time Trajectory Optimization for High-speed Railway Trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2021,43(7):10-18.
- [19] 李壮,张宏翔,鲁工圆,等. 面向3 min 追踪间隔的400 km/h 高速列车追踪过程仿真分析[J]. 铁道运输与经济,2024,46(9):15-25,32.
LI Zhuang, ZHANG Hongxiang, LU Gongyuan, et al. Simulation Analysis of 400 km/h High Speed Train Tracking Process for 3 Min Headway [J]. Railway Transport and Economy, 2024,46(9):15-25,32.
- [20] 黄卫中,季学胜,刘岭,等. CTCS-3 级列控车载设备高速适应性关键技术[J]. 中国铁道科学,2010,31(3):87-92.
HUANG Weizhong, JI Xuesheng, LIU Ling, et al. Several Crucial Techniques for the High Speed Adaptability of CTCS-3 Train Control Onboard Equipment [J]. China Railway Science, 2010,31(3):87-92.
- [21] 贺广宇. 列控车载设备的控车核心算法[J]. 中国铁道科学,2018,39(3):110-116.
HE Guangyu. Core Algorithm for Train Control Onboard Equipment [J]. China Railway Science, 2018,39(3):110-116.
- [22] 田长海,张守帅,张岳松,等. 高速铁路列车追踪间隔时间研究[J]. 铁道学报,2015,37(10):1-6.
TIAN Changhai, ZHANG Shoushuai, ZHANG Yuesong, et al. Study on the Train Headway on Automatic Block Sections of High Speed Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2015,37(10):1-6.

(编辑:夏梦然)