



高速列车应急自走行建模与能耗机理分析

卓丛林¹, 朱雨桐², 杨雪松¹, 郭碧霄¹, 陈宇昊¹

(1. 北京纵横机电科技有限公司, 北京 100094;

2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 当高速列车因接触网故障等失去外部电源供电时, 利用车载储能装置作为动力源将列车牵引至就近车站成为一种自救援方式。由于车载电源容量有限, 通过减少应急运行过程中的能耗、确保剩余电能充足可提高自救援的成功率。文章针对应急定速巡航控车模式, 基于能量消耗组成, 构建应急自走行模型, 重点分析能耗随辅助功率与速度等级变化的规律, 进而揭示辅助功率与速度等级之间的最佳匹配关系; 同时提出一种等效简化分析方法, 并通过精细仿真验证了该方法的有效性。在动车组设计阶段, 文章相关研究成果可为应急自走行技术条件中的目标速度与列车辅助功率匹配设计及应急运行决策提供借鉴。

关键词: 高速列车; 应急运行; 自救援; 车载储能装置; 辅助功率; 速度等级; 节能

中图分类号: U292.91⁺4; U268.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)04-0054-09

0 引言

随着我国高速铁路网规模的持续扩大、运营里程的不断增加, 高压电缆脱落、接触网故障、供电系统故障等因素导致的接触网停电事故频发, 常造成列车动力缺失, 进而影响日常运营。针对列车牵引故障, 目前虽有回库等应急处理手段^[1], 但连挂救援等方案存在耗时长且流程繁琐的问题。为应对此类特殊场景需求, 搭载应急自走行车载储能设备的列车应运而生, 这种列车在无接触网供电状态下具备一定的应急自走行能力^[2]。动车组处于应急运行状态时, 车载储能装置不仅能为照明、通风、空调、制氧等辅助系统提供电能, 还可满足牵引传动系统的能量需求^[3]; 但受列车安装空间和车载储能装置能量密度的限制, 其容量和功率均存在上限。因此, 在应急自走行情况下分析列车运行能耗的影响因素及作用规律, 对合理利用有限能量、提高自救援成功率具有重要意义^[4]。

列车的应急自走行本质上属于列车节能优化问题, 但相较于常规列车的节能问题, 由于受车载储能输出

功率的约束, 列车牵引能力大幅下降, 应急自走行牵引特性仅为正常工况的1/5~1/4。此时, 辅助功率与牵引功率在数量级上相近, 无法忽略; 同时, 应急牵引运行能耗和辅助系统能耗均与运行速度、运行时间相关, 两者存在博弈关系^[5]。自走行辅助驾驶装置可在复杂线路条件下规划节能运行速度曲线, 这对提高自救援成功率具有重要参考价值^[6], 学界已围绕该领域开展了一系列研究。文献[7]针对储能系统与牵引供电网络的协同优化问题, 提出基于双层规划的混合整数非线性优化框架, 通过上层优化供电系统参数(如牵引变压器容量、接触网电压等级)与下层优化储能系统配置参数(如电池组拓扑结构、超级电容容量)的协同迭代, 有效提升了储能系统的能量吞吐效率; 文献[8]结合惰行节能原理与整数规划理论, 构建了包含单区间速度曲线动态规划模型与多区间时间分配网络流模型的混合整数线性规划模型, 并引入列车动力学约束、区间运行时间窗约束和储能系统充放电功率约束; 针对再生制动能量回收问题, 文献[9-10]采用多目标优化方法, 构建了以制动能量回收率、机械制动损耗、电池充能状态(state of charge, SOC)波动为优化目标的

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2023QT001)

通信作者: 卓丛林, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事牵引变流器设计方面的研究; E-mail: 623448719@qq.com

引用格式: 卓丛林, 朱雨桐, 杨雪松, 等. 高速列车应急自走行建模与能耗机理分析[J]. 机车电传动, 2025(4): 54-62. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.007.

Citation: ZHUO Conglin, ZHU Yutong, YANG Xuesong, et al. Modeling of emergency self-traction and analysis of energy-consumption mechanism for high-speed trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 54-62. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.007.

非线性约束优化模型, 通过动态调整制动速度曲线和制动力分配策略, 在提升混合动力系统能量回收效率的同时, 降低机械制动磨损率; 文献[11]针对城市轨道交通系统再生制动能量时空分布不均衡的问题, 提出一种基于轨旁储能装置 (wayside energy storage device, WESD) 与列车运行协同优化的混合控制策略, 在优化再生制动能量利用率的同时, 降低储能容量需求并实现列车节能运行; 文献[12]针对列车储能系统功率分配的强非线性与不确定性特征, 提出一种基于模糊逻辑的城轨列车储能系统能量管理策略; 文献[13]基于确定工况开展列车速度曲线优化, 并改进遗传算法提升解的搜寻效率; 文献[14]分析了电容与超级电容的元件特性, 提出储能元件功率动态分配最优策略; 文献[15]针对氢能混合储能系统, 以最小化氢能消耗与最大化电能消耗为优化目标进行运行优化, 取得显著效果; 文献[16]以高速列车为对象, 针对长大下坡场景列车再生制动能量利用的问题, 提出改进的模拟退火算法优化系统容量配置, 显著提升再生能量利用率; 针对车载蓄电池的能量限制问题, 文献[17]指出采用钛酸锂电池、双向充电机实现蓄电池能量回流是突破限制的有效途径, 我国在京张高铁智能型动车组上首次应用应急自走行技术, 该系统由动力蓄电池、双向充电机和应急自走行辅助装置组成^[18]。

综上所述, 目前针对储能列车的优化控制已取得诸多成果, 但上述研究多基于特定条件开展。本文将从更具普适性的视角出发, 分析列车应急自走行过程中的能耗影响因素, 从列车运行速度与辅助能耗两方面分析能耗影响机理, 并从目标巡航速度与辅助功率匹配优化的角度探究二者的定量关系, 以期列车应急运行相关技术条件中的目标巡航速度与辅助功率匹配设计以及实际运营决策提供参考。

1 应急自走行分析与建模

1.1 应急自走行能耗

列车应急自走行能量流如图1所示。

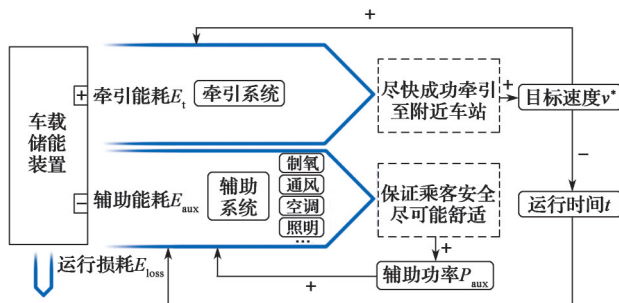


图1 列车应急自走行能量流

Fig. 1 Train energy flow during emergency self-traction

由图1可知, 列车应急状态下的能耗 E 均由车载储能装置提供, 包括应急牵引能耗 E_t 与辅助能耗 E_{aux} , 能

耗表达式为

$$E = E_t + E_{aux} \quad (1)$$

应急自走行工况通常采用定速巡航模式, 不因线路梯度变化而调节速度等级。该模式可简化为满级牵引、恒速运行、满级制动3个过程 (如图2所示), 其中满级牵引与满级制动均指列车切换至应急自走行模式后, 发挥100%的应急牵引/制动能力, 而非正常工况下的牵引/制动能力。

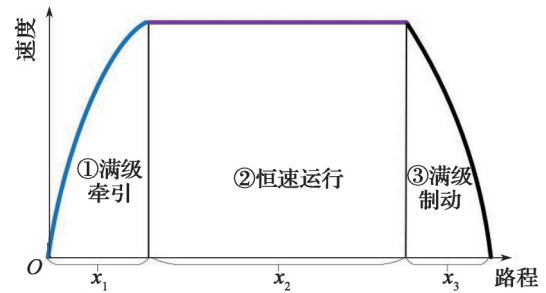


图2 列车应急运行时的巡航控制速度曲线

Fig. 2 Cruise control speed curve during emergency train operation

若不考虑制动时的能量回收, 则应急牵引能耗 E_t 包括两部分: ①满级牵引阶段克服运行阻力所做的功及列车在目标速度下的动能; ②恒速运行阶段为维持目标速度、克服运行阻力所做的功。本文暂假设线路为单一坡道, 坡道附加阻力 W_{ramp} 为常数。

列车基本阻力表达式为

$$W_0(v) = a_0 + b_0 v + c_0 v^2 \quad (2)$$

式中: $W_0(v)$ 为列车基本运行阻力, kN; a_0 、 b_0 、 c_0 为列车基本运行阻力系数; v 为列车速度, km/h。

为便于公式推导, 引入两个速度概念: 将列车恒速阶段的恒速目标速度设定为 v^* , 最节能运行的恒速目标速度设定为 v_e 。

由式(2)及动能与速度的平方关系可知: 应急牵引能耗 E_t 与目标速度 v^* 有关, 运行速度越高, 牵引系统克服运行阻力所做的功就越多, 列车在目标速度 v^* 下具备的动能也越大, 即应急牵引能耗 E_t 越高。列车辅助能耗 E_{aux} 为辅助功率 P_{aux} 与运行时间 t 的乘积, 在应急自走行区间长度一定的情况下, 目标速度 v^* 的提高会缩短运行时间 t , 由此可知各能耗随速度等级的变化趋势如图3所示。由图3可定性推测: 在不同辅助功率等级下, 存在可使总能耗最低的运行速度 v_e 与之匹配。下文将从定量角度分析应急自走行全过程总能耗最低时, 运行速度 v_e 与辅助功率的匹配关系。

1.2 列车应急能耗解析模型

1) 牵引能耗

不考虑制动时的能量回收, 列车应急牵引能耗 E_t 为满级牵引段与恒速运行段的能耗之和。当列车运行区间为平直线路或近似单一坡道, 且列车采用定速巡航策略时, 列车运行曲线唯一, 因此可结合应急牵引

特性 $F_t(v)$ 、应急制动特性 $F_b(v)$ 和式(2)所示的基本阻力, 建立应急牵引能耗模型。

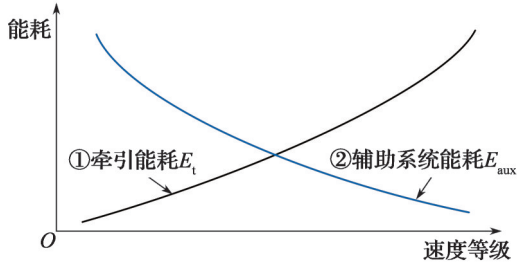


图3 运行距离确定时各能耗随速度等级变化示意

Fig. 3 Variation in energy consumption with speed grade for fixed operating distance

根据运动学原理, 结合列车牵引特性曲线和列车运行基本阻力可得

$$M \frac{dv}{dt} = F_t(v) - (a_0 + b_0 v + c_0 v^2) - W_{\text{ramp}} \quad (3)$$

式中: M 为列车满载质量, t ; W_{ramp} 为单一坡道附加阻力, kN 。

满级牵引段的运行时间 t_1 与运行距离 x_1 、 v^* 的关系如下:

$$t_1(v^*) = \int_0^{v^*} \frac{M}{F_t(v) - (a_0 + b_0 v + c_0 v^2) - W_{\text{ramp}}} dv \quad (4)$$

$$x_1(v^*) = \int_0^{v^*} v dt_1(v) \quad (5)$$

同理可得满级制动段的运行时间 $t_3(v^*)$ 和运行距离 $x_3(v^*)$ 。

设应急牵引特性为“恒转矩-恒功率”两段式, 由 $t_1(v^*)$ 和 $x_1(v^*)$ 可得满级牵引段能耗 E_{t1} 为

$$E_{t1}(v^*) = \begin{cases} T_t x_1(v^*), & v^* \leq v_t \\ T_t x_1(v_t) + P_t [t_1(v^*) - t_1(v_t)], & v_t < v^* \leq v_{\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_{max} 为列车应急牵引特性最高牵引运行速度, km/h ; v_t 为应急牵引特性恒转矩区终止速度, km/h ; T_t 为列车应急牵引特性恒转矩区公式系数; P_t 为列车应急牵引特性恒功率区公式系数。

由恒速运行阶段列车发挥的牵引力和基本阻力可得应急牵引能耗 E_{t2} 为

$$E_{t2}(v^*) = [W_0(v^*) + W_{\text{ramp}}] \cdot [L - x_1(v^*) - x_3(v^*)] \quad (7)$$

式中: L 为列车应急运行距离, km 。

本文不考虑 L 对列车能耗的影响, 因此 L 设定为已知量。

2) 辅助能耗

由 L 、 $t_1(v^*)$ 、 $t_3(v^*)$ 、 $x_1(v^*)$ 和 $x_3(v^*)$ 可得辅助能耗 E_{aux} 关于目标速度 v^* 与辅助功率 P_{aux} 的表达式为

$$E_{\text{aux}}(v^*, P_{\text{aux}}) = P_{\text{aux}} \left[t_1(v^*) + t_3(v^*) + \frac{L - x_1(v^*) - x_3(v^*)}{v^*} \right] \quad (8)$$

3) 应急运行总能耗

综上可得列车应急运行总能耗 E 的表达式为

$$E(v^*, P_{\text{aux}}) = E_{t1}(v^*) + E_{t2}(v^*) + E_{\text{aux}}(v^*, P_{\text{aux}}) \quad (9)$$

1.3 等效计算公式

理论推导得到的能耗解析模型虽然连续, 但需多次积分、计算过程繁琐, 实际应用不便, 因此可通过拟合仿真数据建立总能耗的等效简化能耗模型。在列车应急运行过程中, 将满级牵引段合并至恒速运行段, 应急牵引能耗主要用于克服运行阻力做功, 则

$$F_t(v) = W_0(v) + W_{\text{ramp}} \quad (10)$$

应急牵引能耗表达式可简化为

$$E_t = [W_0(v^*) + W_{\text{ramp}}] L \quad (11)$$

由于起车加速阶段用时在总运行时间中占比较小, 辅助能耗表达式可简化为

$$E_{\text{aux}} = P_{\text{aux}} \cdot t = \frac{P_{\text{aux}} \cdot L}{v^*} \quad (12)$$

总能耗表达式为

$$E(v^*, P_{\text{aux}}) = E_{\text{aux}} + E_t = (a + bv^* + cv^{*2}) + d \frac{P_{\text{aux}}}{v^*} \quad (13)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 为关于已知距离 L 的拟合待定系数。

上述拟合假设仅适用于满级牵引段运行距离 $x_1(v^*)$ 占应急自走行距离 L 比例较小的情形 (如应急自走行路程较长或速度等级较低)。若应急自走行距离较短或速度等级较高, 则满级牵引段运行距离 $x_1(v^*)$ 占比增大, 此时, 列车产生的动能不可忽略。

从 $E(v^*, P_{\text{aux}})$ 的形式可初步判断, 总能耗随速度 v^* 的变化可能呈现先降低后增加的趋势, 对 v^* 求偏导并令其为 0, 可进一步得出能耗极小值对应的速度等级, 如式(14)所示。

$$\frac{b}{d} v^{*2} + \frac{2c}{d} v^{*3} = P_{\text{aux}} \quad (14)$$

2 模型验证及速度等级-辅助功率匹配分析

2.1 能耗模型验证

为验证列车应急自走行总能耗模型的准确性, 设计仿真试验对比应急能耗解析模型数据与列车模拟平台的应急能耗仿真数据。以某型号高速动车组列车为例进行仿真计算, 列车基本参数如表 1 所示。

表 1 列车基本参数

Table 1 Basic train parameters

列车参数	数值
列车定员质量/t	520
编组长度/m	201.4
最高运行速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	250
回转质量系数	0.06
DC/DC 变换器效率	0.9
牵引/制动机电效率	0.9

列车在应急自走行时的牵引特性选择为

$$F_t(v)=\begin{cases} 110, & 0\leq v\leq 13.09 \\ \frac{1440}{v}, & 13.09<v\leq 110 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $F_t(v)$ 为应急牵引力, kN。

列车制动特性选择为

$$F_b(v)=180, \quad 0\leq v\leq 110 \quad (16)$$

式中: $F_b(v)$ 为应急制动力, kN。

由于列车应急自走行的线路条件随机性较大, 暂设线路为平直道, 坡道附加阻力 W_{ramp} 为0, 验证列车速度与辅助能耗对列车总能耗的影响。列车基本运行阻力为

$$W_0(v)=4+0.0117v+0.00067v^2 \quad (17)$$

式中: $W_0(v)$ 为基本运行阻力, kN。

考虑应急牵引能力受车载电池功率的限制, 列车应急运行仿真速度域设定为0~100 km/h; 辅助系统仅考虑通风、照明等低功率系统, 功率域设定为0~200 kW。其中, 列车模拟平台的应急能耗仿真在设定的速度域中采用10 km/h步长, 在功率域中采用25 kW步长。考虑到最大仿真速度已达到100 km/h, 为覆盖较高速度等级, 本文选用长度为35 km的平直道进行仿真计算。

通过列车模拟平台得到应急自走行能耗统计结果如表2所示。应急能耗解析模型数据与模拟应急自走行能耗数据的可视化对比结果如图4和图5所示, 二者的高贴合度验证了能耗模型的准确性。

表2 仿真能耗数据

Table 2 Simulated energy consumption data

辅助功率/kW	各速度下的能耗数据/(kW·h)									
	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
0	43.91	49.11	56.98	67.37	80.22	95.38	112.55	131.27	150.70	169.10
25	130.34	91.55	85.26	88.74	97.54	110.08	125.49	142.99	161.63	179.58
50	216.76	134.00	113.55	110.12	114.86	124.78	138.43	154.71	172.56	190.07
75	300.87	173.86	138.83	127.95	127.95	134.47	145.44	159.52	175.56	191.66
100	387.29	216.30	167.12	149.32	145.27	149.17	158.38	171.25	186.49	202.15
125	473.71	258.74	195.40	170.70	162.59	163.87	171.32	182.97	197.42	212.63
150	560.13	301.19	223.69	192.07	179.90	178.57	184.26	194.69	208.35	223.12
175	646.56	343.63	251.97	213.45	197.22	193.28	197.20	206.41	219.28	233.61
200	732.98	386.08	280.26	234.82	214.54	207.98	210.14	218.13	230.21	244.10

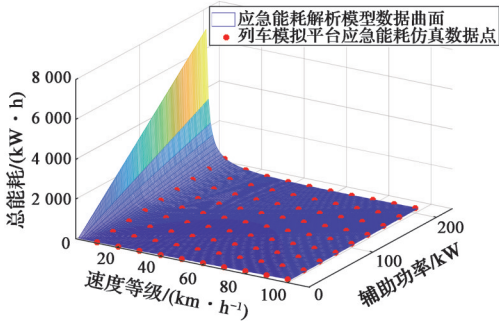


图4 能耗模型验证曲面

Fig. 4 Validation surface of energy consumption model

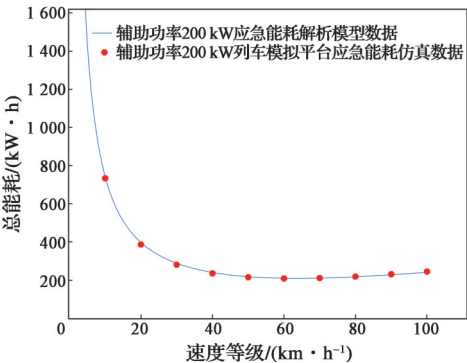


图5 能耗模型验证曲线

Fig. 5 Validation curve of energy consumption model

由表2可知, 在同一辅助功率下, 总能耗均随速度等级呈先降低后缓慢上升的趋势, 即存在与辅助功率匹配的最节能速度 v_e , 且最节能速度随着辅助功率的增加呈上升趋势。

2.2 拟合计算公式应用

按照1.3节拟合假设的应急自走行能耗计算公式计算得到的结果为

$$E(v^*,P_{\text{aux}})=35.9+0.3239v^{*}+0.0107v^{*2}+34.55\frac{P_{\text{aux}}}{v^{*}} \quad (18)$$

拟合结果的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为3.397, 表明在速度为0~100 km/h、功率为0~200 kW时拟合结果良好。由运行仿真平台的应急能耗仿真数据与解析模型可知, 式(18)存在极小值点; 由式(14)可推导出列车最低运行能耗所对应的功率 P_{aux} 与速度 v^* 的匹配关系, 具体如式(19)所示。

$$P_{\text{aux}}=0.000619v^{*3}+0.00938v^{*2} \quad (19)$$

表2、图5中所体现的最节能速度随辅助功率增加而上升的规律, 均能通过式(19)所示的定量匹配关系得到验证。不同辅助功率下的总能耗-速度等级曲线簇如图6所示。

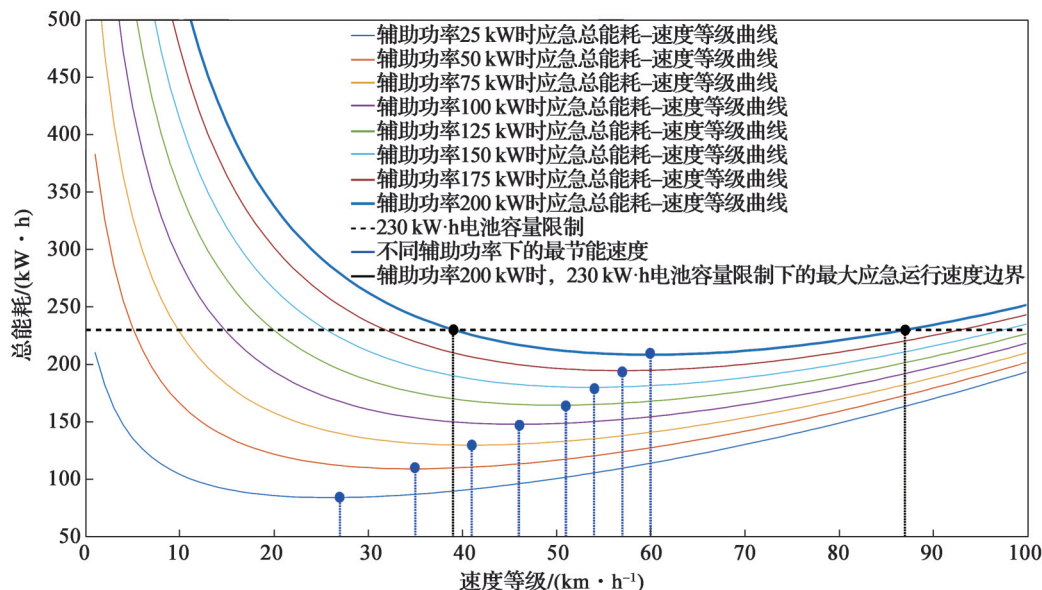


图6 不同辅助功率下总能耗与速度等级的关系

Fig. 6 Relationship between total energy consumption and speed grade at different auxiliary power levels

为探究坡道对列车应急总能耗的影响,在其他条件不变、辅助功率为 150 kW 的情况下,计算不同单一坡道下的应急自走行总能耗,能耗曲线簇如图 7 所示。

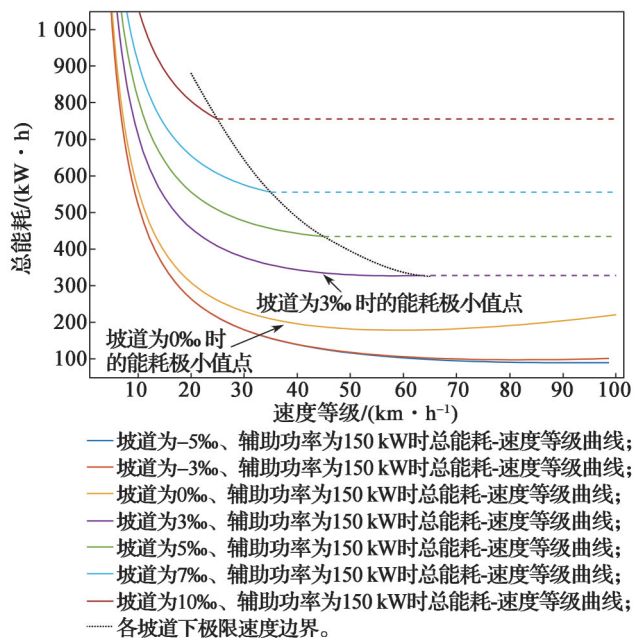


图7 不同梯度的单一坡道下总能耗与速度等级关系

Fig. 7 Relationship between total energy consumption and speed grade on single slope at different gradients

由图 6 和图 7 可得出:

①最大应急运行速度上下边界。以辅助功率 200 kW 为例,结合假设的 230 kW·h 电池容量限制,可得到应急运行速度 v^* 的下限 v_{k1} ,当列车应急运行速度低于该下限值时,由于应急运行时间过长,辅助功率耗能过大,无法完成应急自走行;同理,应急运行速度

v^* 也存在上限 v_{k2} ,当列车速度高于该上限值时,由于基本阻力做功过大,牵引系统能耗过高,同样无法完成应急自走行。

②最佳运行速度值和车载储能容量下限。同样以辅助功率 200 kW 为例,当列车应急运行速度为 v_c 时,牵引和辅助总能耗最低,此时电池剩余电量最大,可提升自救援成功率。从另一角度看,在辅助功率一定的情况下,电池容量设计存在下限,若车载储能容量低于该下限,则无法支撑列车完成全程自走行。

③运输效率与剩余电量的效能综合决策。由图 6 可知,当速度等级超过最节能速度 v_c 时,总能耗的上升趋势较为缓慢,此时进一步提高 v^* ,可在总能耗增幅可控的前提下提升自走行效率(即缩短自走行时间);同时,剩余电量越多,应急自走行成功率越能得到保障。因此,合理确定速度等级对提升应急自走行综合效能至关重要。

④单一坡道下的能耗与速度等级关系。由图 7 可知,当列车在不同梯度的单一坡道运行时,总能耗变化规律存在差异:受应急牵引特性限制,随着梯度的增加,列车极限运行速度降低;当梯度较大时,曲线极小值点消失,总能耗随速度等级提升呈单调递减趋势;随着梯度的增加,列车总能耗整体呈上升趋势。因此,车载储能容量设计需综合考量不同坡道下总能耗与速度等级的关系。

2.3 复杂线路仿真

以复杂线路拉林铁路中贡嘎-扎囊区段为研究对象开展仿真试验,并与平直道区段进行对比。设定恒速 $v^*=55$ km/h,列车应急自救援区段与成功救援区段速度曲线如图 8、图 9 所示。

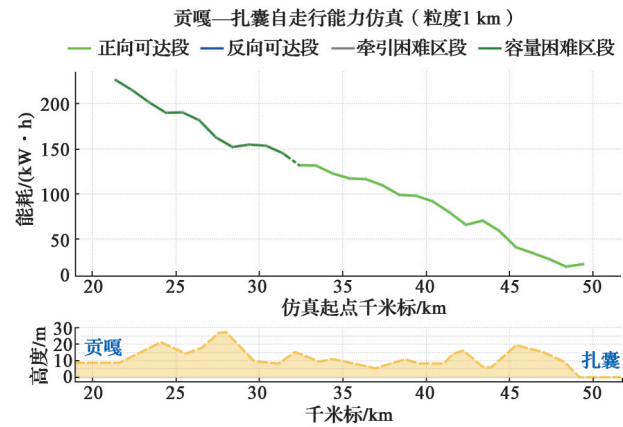


图8 贡嘎—扎囊区段恒速为55 km/h时列车
应急自救援区段示意

Fig. 8 Emergency self-rescue section of the train from Gongga to Zhanang at the constant speed of 55 km/h

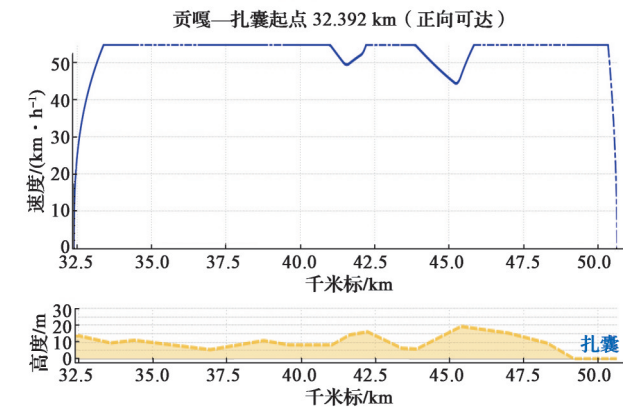


图9 贡嘎—扎囊区段恒速为55 km/h时列车
应急自救援速度曲线

Fig. 9 Emergency self-rescue speed curve of the train from Gongga to Zhanang at the constant speed of 55 km/h

设定恒速 $v^*=100$ km/h, 列车应急自救援区段与成功救援区段速度曲线如图10、图11所示。

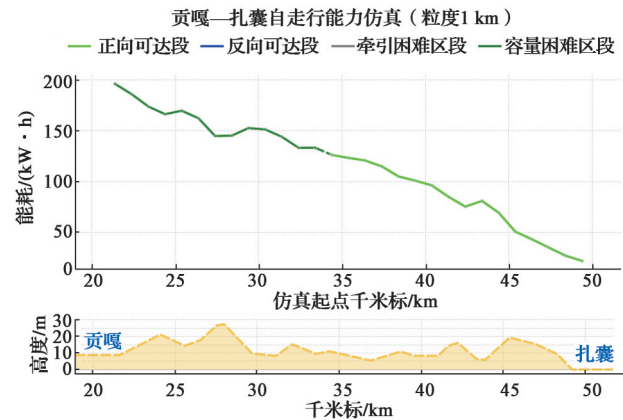


图10 贡嘎—扎囊区段恒速为100 km/h时列车应
急自救援区段示意

Fig. 10 Emergency self-rescue section of the train from Gongga to Zhanang section at the constant speed of 100 km/h

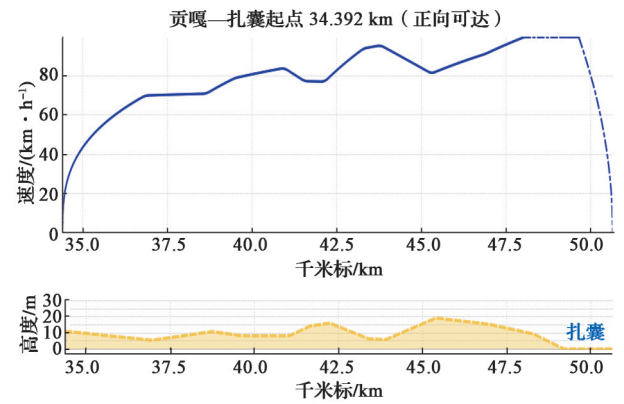


图11 贡嘎—扎囊区段恒速为100 km/h时列
车应急自救援速度曲线

Fig. 11 Emergency self-rescue speed curve of the train from Gongga to Zhanang at the constant speed of 100 km/h

设定恒速 $v^*=40$ km/h, 列车应急自救援区段与成功救援区段速度曲线如图12、图13所示。

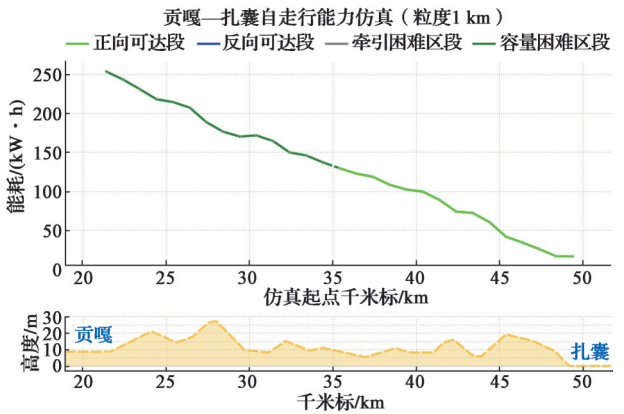


图12 贡嘎—扎囊区段恒速为40 km/h时列车应急自救援区
段示意

Fig. 12 Emergency self-rescue section of the train from Gongga to Zhanang at the constant speed of 40 km/h

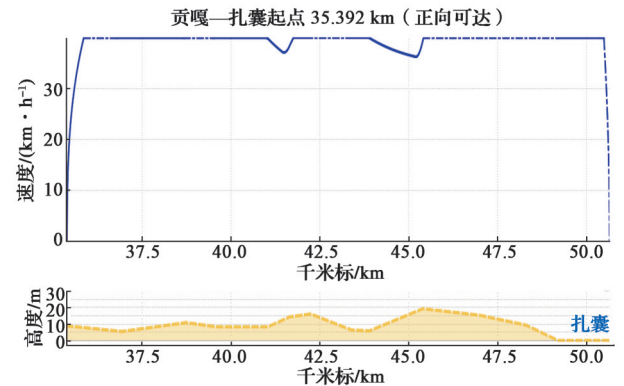


图13 贡嘎—扎囊区段恒速为40 km/h时列车应急自救援速
度曲线

Fig. 13 Emergency self-rescue speed curve of the train from Gongga to Zhanang at the constant speed of 40 km/h

改变线路条件, 以30 km平直道为场景, 分别设定恒速 v^* 为40 km/h、55 km/h、100 km/h, 得到列车应急自救援区段如图14所示。

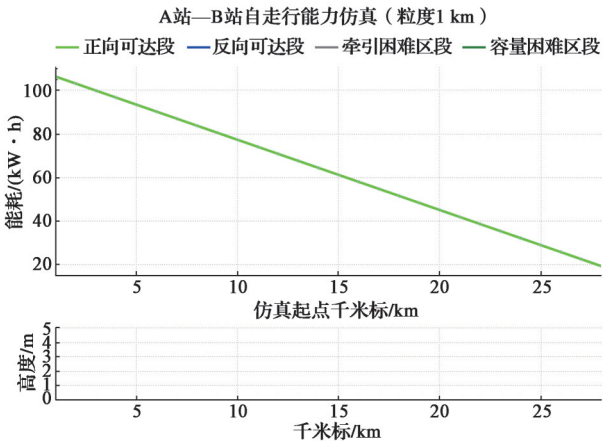


图 14 平直道列车应急自救援区段示意
Fig. 14 Schematic diagram of the emergency self-rescue section for the train on level and straight track

由图 8~图 14 的仿真结果可知：①列车的应急自救援情况在理想平直道与实际线路运行时存在较大差异。在除线路条件不同外其他仿真参数均一致的前提下，列车在平直道运行时无电池容量困难区段，不同速度等级下均能完成全线路区段自救援；在实际线路区段运行时，存在不同规模的电池容量困难区段。②在复杂线路中，不同恒速等级直接影响列车最终的自救援区间长度。不同恒速等级下列车应急自救援可达点数据如表 3 所示。由表 3 可知，当恒速为 55 km/h 时，列车自救援区间长度最大；当速度高于或低于该值时，区间长度均会缩短。这与 2.2 节的结论一致，既进一步验证了结论的正确性，又表明该结论具有较强的普适性。

表 3 贡嘎—扎囊区段不同恒速等级下列车应急自救援可达点对比

Table 3 Comparison of reachable points for emergency self-rescue of trains under different constant speed grades in the Gongga to Zhanang section

恒速/ (km·h ⁻¹)	列车可成功应急自救援区段 千米标/km
40	35.392 0 ~ 50.642 1
55	32.392 0 ~ 50.642 1
100	34.392 0 ~ 50.642 1

3 结束语

本文针对车载储能容量有限的列车应急自走行过程，开展了理论建模、等效分析和能耗影响机理研究，探讨了针对速度等级、辅助功率与车载储能容量之间匹配关系的定量分析方法，提出了应急运行速度等级上下边界、最佳值等参数的确定方法。该研究可为列车技术条件制定以及应急运行相关的动力学与储能装备参数确定提供参考。

需要注意的是，本文能耗解析模型存在局限性。在列车实际运营中，应急自救援的时空随机性和车机联控调度的决策等因素均会产生动态影响，且应急自走行在实际启动时的剩余电量也存在不确定性。因此，深入研究列车应急自走行的高效节能辅助驾驶在线优化技术，有助于形成兼顾运输效率与自救援成功率率的综合决策。

参考文献：

[1] 刘剑. CRH380B 动车组行车中牵引系统故障的应急处理和回库解决[C]//中国铁道学会. 2015 年铁道牵引动力学学术年会论文集. 北京: 中国铁道学会, 2015: 120-123.
LIU Jian. Emergency treatment and recall problem solvement of running CRH380B EMU due to traction system failure[C]//China Railway Society. Proceedings of the 2015 Academic Conference on Railway Traction Power. Beijing: China Railway Society, 2015: 120-123.

[2] 徐广伟, 刘建城, 陈东, 等. 动车组蓄电池供电的应急牵引和应急空调制冷系统[J]. 机车电传动, 2019(5): 116-120.
XU Guangwei, LIU Jiancheng, CHEN Dong, et al. Emergency traction and emergency air conditioning refrigeration system for battery power supply of EMUs[J]. Electric drive for locomotives, 2019(5): 116-120.

[3] 冯晓云, 冯佳辉, 孙鹏飞, 等. 列车车载储能设备的储能能量设计方法: CN202110578034.9[P]. 2021-05-26.
FENG Xiaoyun, FENG Jiahui, SUN Pengfei, et al. The design method of energy storage capacity for on-board energy storage equipment on trains: CN202110578034.9[P]. 2021-05-26.

[4] 陈磊, 冉昕晨, 刘葛辉. 节能坡与编组方案影响下的地铁列车运行能耗分析[J]. 山东科学, 2020(1): 99-108.
CHEN Lei, RAN Xincheng, LIU Gehui. Energy consumption of rail-transit trains considering energy-saving slope and train marshaling scheme[J]. Shandong science, 2020(1): 99-108.

[5] 刘成. 带有车载储能设备的动车组应急自走行方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
LIU Cheng. Study on emergency self-propelled scheme of EMU with vehicle-mounted energy storage equipment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[6] 沈迪, 王青元, 夏菲, 等. 高速列车应急自走行辅助驾驶研究[J]. 机车电传动, 2021(1): 91-97.
SHEN Di, WANG Qingyuan, XIA Fei, et al. Research on urgent operation assistant driving for high-speed train[J]. Electric drive for locomotives, 2021(1): 91-97.

[7] 诸斐琴, 杨中平, 林飞, 等. 城轨交通牵引供电系统参数与储能系统容量配置综合优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 579-588.
ZHU Feiqin, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Synthetic optimization of traction power parameters and energy storage systems in urban rail transit[J]. Transactions of China elec-

- trotechnical society, 2019, 34(3): 579-588.
- [8] 徐茂峻, 肖壮, 毛畅海, 等. 关于储能式有轨电车节能优化控制研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(2): 88-94.
XU Maojun, XIAO Zhuang, MAO Changhai, et al. Energy efficient optimization of multiple intervals for energy storage tram[J]. Computer simulation, 2019, 36(2): 88-94.
- [9] 黄文强, 李奇, 陈维荣, 等. 基于制动速度优化策略的新型供电方式有轨电车再生制动能量回收方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5406-5414.
HUANG Wenqiang, LI Qi, CHEN Weirong, et al. A regenerative braking energy recovery method based on braking speed optimization strategy for novel power supply model tram[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5406-5414.
- [10] 李奇, 尚伟林, 燕雨, 等. 新型供电方式下的有轨电车制动力分配与制动能量回收优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2285-2294.
LI Qi, SHANG Weilin, YAN Yu, et al. Research on braking distribution and braking energy recovery for novel power supply model tram[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2285-2294.
- [11] 张耘嘉, 亢佳俊, 崔东亮, 等. 基于轨旁储能的多列车协同节能运行优化[J]. 控制工程, 2025, 32(10): 1773-1783.
ZHANG Yunjia, KANG Jiajun, CUI Dongliang, et al. Collaborative energy-saving operation optimization of multiple trains based on wayside energy storage[J]. Control engineering of China, 2025, 32(10): 1773-1783.
- [12] 何文辉. 轨道交通列车车载动力电池储能系统关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
HE Wenhui. Research on key technologies of on-board power battery energy storage system for rail transit trains[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [13] 赵东升, 赵鹏, 姚向明, 等. 基于工况序列寻优的列车节能操纵策略优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(2): 157-165.
ZHAO Dongsheng, ZHAO Peng, YAO Xiangming, et al. An energy-efficient train driving strategy based on regime sequences optimization[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2024, 24(2): 157-165.
- [14] 杨浩丰, 刘冲, 李彬, 等. 基于列车运行工况的城轨地面式混合储能系统控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊1): 168-178.
YANG Haofeng, LIU Chong, LI Bin, et al. Research on control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on train operating condition[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(Suppl 1): 168-178.
- [15] 高锋阳, 张浩然, 王文祥, 等. 氢燃料电池有轨电车混合储能系统的节能运行优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 686-696.
GAO Fengyang, ZHANG Haoran, WANG Wenxiang, et al. Energy saving operation optimization of hybrid energy storage system for hydrogen fuel cell tram[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2022, 37(3): 686-696.
- [16] 李欣, 卢景涛, 肖林润, 等. 高速铁路列车长大坡道混合储能系统容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5645-5660.
LI Xin, LU Jingtao, XIAO Linrun, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for long steep slope of high-speed railway[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(20): 5645-5660.
- [17] 马升潘, 冯庆鹏, 周建升, 等. 关于动车组蓄电池供电自走行技术的研究[J]. 铁道车辆, 2021, 59(2): 46-49.
MA Shengpan, FENG Qingpeng, ZHOU Jiansheng, et al. Research on self-propulsion technology powered by storage battery on multiple units[J]. Rolling stock, 2021, 59(2): 46-49.
- [18] 孔羽姝, 于明远. 京张高铁智能型动车组应急自走行系统组成及功能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2): 71-74.
KONG Yushu, YU Mingyuan. Composition and functionality analysis of the emergency self-propelled system of the jingzhang high-speed railway intelligent EMU[J]. Urban mass transit, 2020, 23(2): 71-74.

Modeling of emergency self-traction and analysis of energy-consumption mechanism for high-speed trains

ZHUO Conglin¹, ZHU Yutong², YANG Xuesong¹, GUO Bixiao¹, CHEN Yuhao¹

- (1. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China;
- 2. State Key Laboratory of Traction and Control System of EMU and Locomotive, Beijing 100081, China)

Abstract: For high-speed trains disconnected from external power supply due to faults in the overhead contact system (OCS) and other incidents, using the on-board energy storage devices as power sources to tow these trains to the nearest station is a common self-rescue method. Because on-board power sources have limited capacity, reducing energy consumption during emergency operation to preserve sufficient state of charge (SOC) can increase the success rate of self-rescue. This paper presents an emergency self-traction model for the emergency constant-speed cruise control mode based on the composition of energy consumption. The study focused on analyzing patterns in energy consumption variations with changes in auxiliary power level and speed grade, and identifying the optimal matching relationship between auxiliary power levels and speed grades. This paper also proposed an equivalent simplified analysis method, which was validated through fine simulation. The research results provide reference for the matching design between the target speed and train auxiliary power as part of technical specifications for emergency self-traction in the design stage of EMUs and support subsequent emergency operation decision-making.

Keywords: high-speed train; emergency operation; self-rescue; on-board energy storage device; auxiliary power; speed grade; energy-saving

收稿日期：2024-09-20；修回日期：2025-03-10