



基于转矩优化分配的列车节能 控制方法研究

王越¹, 侯招文², 陈启会², 李远景², 刘建城¹, 赵旭峰²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为提高轨道交通车辆的能源效率, 推动绿色出行, 助力国家“双碳”目标, 文章以牵引效率为优化目标, 基于牵引电机效率场分布构建效率最优的转矩分配模型, 在满足列车转矩需求的前提下离线计算得到不同速度、不同手柄级位下的转矩分配关系, 并基于转矩优化分配特征得到一种便于工程应用的转矩简化分配方法。计算结果表明: 在电机效率偏小的中小手柄级位区间, 转矩优化分配方法能够有效提高电机等效效率; 动力单元数量越多, 转矩优化分配越精细, 越有利于提升系统效率; 转矩简化分配方法与效率最优的转矩优化分配方法在大部分工况下的等效效率相近; 同时, 文章以某市域线路为运营场景开展了仿真试验验证, 仿真结果表明: 与常规转矩平均分配方法相比, 优化后的转矩分配策略提升了系统效率, 站站停工况平均节能约0.40%, 不停站工况平均节能约2.29%。复查仿真运营数据, 站站停工况下系统长时间处于大级位运行, 节能率相对偏小; 不停站工况下系统大多处于中小手柄级位运行, 节能效果显著, 运营数据与计算结果吻合。研究结果为轨道交通车辆、智轨列车等领域的效率提升与节能降耗提供了参考。

关键词: 轨道交通车辆; 效率; 节能控制; 转矩优化分配; 高速列车

中图分类号: U268.8.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0165-08

0 引言

近年来, 我国轨道交通发展迅速, 极大地方便了人们出行, 促进了区域经济发展。随着技术的更新迭代, 列车增效节能成为关注热点, 先进的列车自动控制策略^[1-2]也成为研究的重要方向。其中, 文献[3]采用深度强化学习算法, 以安全性、准点性、停车精度和节能性加权组合作为奖励, 研究了列车的节能控制策略; 文献[4-5]提出一种基于动态规划的列车速度曲线优化方法, 对列车的运行时间、运行速度等进行动态规划, 兼顾了节能与实时性需求; 文献[6]提出通过长期积累的司机操纵数据提炼“舒适-准点-安全”三维专家规则, 基于专家知识与强化学习提升列车的节能率与准点率; 文献[7-8]将粒子群算法应用于城轨列车

节能驾驶优化模型, 开展了高速铁路列车群运行仿真技术研究; 文献[9]设计出基于递归思想的优化算法, 得到特定约束条件下的最优行驶控制策略; 文献[10]结合线路路况、区间限速及动车组牵引制动特性技术参数进行建模仿真, 得到节能运行控制策略。这些节能控制方法优化了在特定线路上的驾驶策略, 但未涉及转矩的二次分配。

在汽车领域, 相关学者也开展了驾驶策略优化方面的研究, 文献[11]提出一种最优生态驾驶策略, 通过优化速度轨迹减少燃油消耗, 实现节能驾驶; 文献[12]采用经济最优控制策略, 通过优化卡车速度与动力分配降低油耗; 文献[13]研究了功率分配与道路梯度协同控制策略, 降低了多辆电动车编队的总能耗。除了驾驶策略的优化, 也有学者开展了基于转矩优化分配的节能控制研究, 文献[14-15]研究了混合动力系统转矩优化

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2024RC3269)

通信作者: 陈启会, 男, 高级工程师, 主要从事轨道交通变流控制技术方面的研究; E-mail: chenqh5@csrzc.com

引用格式: 王越, 侯招文, 陈启会, 等. 基于转矩优化分配的列车节能控制方法研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 165-172. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.019.

Citation: WANG Yue, HOU Zhaowen, CHEN Qihui, et al. Research on energy-efficient train control based on optimized torque allocation[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 165-172. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.019.

分配,文献[16-18]通过基于效率优化的转矩分配实现了电动汽车牵引效率的提升,文献[19]提出一种适用于电动汽车多个牵引电机协同工作的基于粒子群优化算法的实时驱动转矩分配策略,文献[20]使用遗传算法使电机工作在高效区以实现更好的经济性。但是,由于电动汽车通常只有两套动力单元,转矩分配空间有限。

轨道交通车辆、智轨列车的牵引系统有多套动力单元,模块化设计的应用提升了其冗余性与可靠性。列车运行时,各套动力单元的牵引模块工作状态一致,按列车手柄级位大小发挥相同的牵引力与电制动力。然而,由于电机效率与电机转矩、速度的非线性关系,相同速度下,当电机转矩大小不同时,其效率也不同,因此将列车转矩需求在各套动力单元中进行二次分配可获得更高的牵引效率。轨道交通车辆一节动车具备4套动力单元,多编组列车的动力单元多达数十套,更适合转矩二次分配。在轨道交通领域,极少数地铁列车具备牵引力转移功能,但该功能仅为部分动力单元故障情况下的一种特殊应用。本文在满足列车转矩需求的前提下,以牵引系统效率为优化目标,开展转矩优化分配策略研究,以实现列车的增效节能,且该节能控制方法不影响列车的动力性能与ATO控制策略。

1 牵引系统基本工作原理

在轨道交通车辆中,牵引传动系统为车辆提供牵引力与电制动力,典型的交-直-交牵引传动系统拓扑图如图1所示。由图1可知,车辆通过受电弓从接触网获取AC 25 kV单相工频交流电,该交流电经牵引变压器降压,再经牵引变流器完成交-直-交变换后为牵引电机供电。

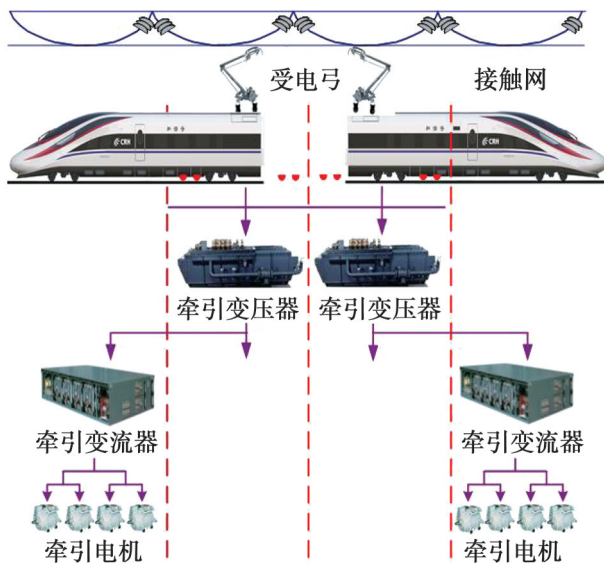


图1 牵引传动系统拓扑图

Fig. 1 Topology of traction drive system

牵引系统能量流动情况如图2所示。由图2可知,当列车处于牵引工况时,牵引电机将电能转换为机械能,驱动列车运行;当列车处于再生制动工况时,牵

引电机处于发电状态,将制动产生的电能回馈到电网,实现机械能到电能的转换。

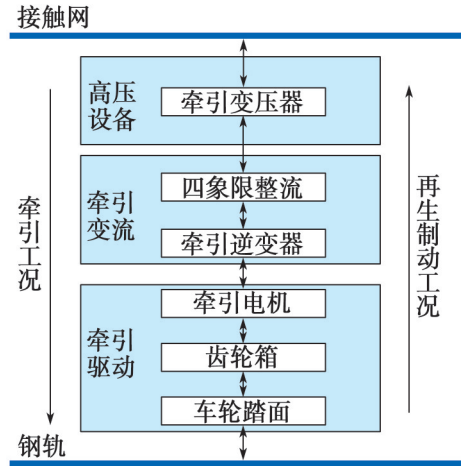


图2 能量流动关系

Fig. 2 Energy flow relationship

2 基于效率最优的转矩分配模型

电机效率场分布特性是电机的固有特性,通常永磁电机的整体效率比异步电机高,重载工况的效率比轻载高。本文基于电机效率场与电机转矩、速度的非线性关系,开展效率最优的转矩分配研究,使电机始终运行在高效区,从而实现列车的增效节能。

首先以A、B两套牵引动力单元为例,推导转矩优化分配模型。在牵引工况下,效率最优是指牵引系统输出相同的机械功率 P ,通过转矩优化分配使电机有功功率 P_D 最小,以实现能量利用率 $\eta_D = P/P_D$ 最大为目标。牵引工况下的转矩分配优化模型为

$$\min P_D = \frac{T_A k_A n_A}{9550 \eta_{mA} \eta_{cA}} + \frac{T_B k_B n_B}{9550 \eta_{mB} \eta_{cB}} \quad (1)$$

式中: T_A 、 T_B 分别为分配到动力单元A、B电机轴上的转矩; k_A 、 k_B 分别为A、B动力单元减速箱的传动比; n_A 、 n_B 分别为动力单元A、B输出轴的转速,不同的转速与转矩下系统具有不同的电机效率与减速箱传动效率; η_{mA} 、 η_{mB} 分别为动力单元A、B在 (n_A, T_A) 、 (n_B, T_B) 处的电机效率; η_{cA} 、 η_{cB} 分别为动力单元A、B在 (n_A, T_A) 、 (n_B, T_B) 处的减速箱传动效率。

在再生制动工况下,效率最优是指牵引系统输入相同的机械功率 P ,通过转矩优化分配使电机回馈功率 P_B 最大,以实现能量利用率 $\eta_B = P_B/P$ 最大为目标。再生制动工况下的转矩分配优化模型为

$$\max P_B = \frac{T_A k_A n_A \eta_{mA} \eta_{cA}}{9550} + \frac{T_B k_B n_B \eta_{mB} \eta_{cB}}{9550} \quad (2)$$

设车辆的手柄级位为 G_{req} ,分配到动力单元A、B的级位分别为 G_A 、 G_B ;考虑级位与转矩呈线性关系,设比例系数为 K ;假设A、B两套牵引动力单元完全相同,即电机的转速 n 、传动比 k 均相同;暂不考虑减速箱在不同

转速与转矩下传动效率的差异, 将其设为 η_c 。基于此, 转矩分配优化模型用手柄级位表示如下:

$$2G_{\text{req}} = G_A + G_B \quad (3)$$

$$\min P_D = \frac{knK}{9550\eta_c} \left(\frac{G_A}{\eta_{mA}} + \frac{G_B}{\eta_{mB}} \right) \quad (4)$$

$$\max P_B = \frac{knK\eta_c}{9550} (\eta_{mA}G_A + \eta_{mB}G_B) \quad (5)$$

根据优化模型寻找分配到动力单元 A、B 的级位 G_A 、 G_B , 使得能量利用率最大, 系统效率最高。其中, 级位 G_{req} 、 G_A 、 G_B 的取值范围为 0%~100%, 且转矩优化分配策略应满足式(3)要求。

当手柄级位为 100% 时, 动力单元 A 与 B 均应按 100% 级位运行, 此时仅此一种转矩分配策略, 这也意味着级位越大时转矩分配优化的空间越小; 当手柄级位为 80% 时, 动力单元 A 与 B 可以按 (100%, 60%)、(90%, 70%)、(80%, 80%) 等不同方式进行转矩分配, 此时可通过模型找出效率最优的转矩分配策略; 当不同的转矩分配策略同时具有最优效率时, 本文选择优先将转矩集中分配, 此时空载电机通过停机或弱磁控制来降低待机损耗。

基于上述分析, 当列车具备 N 套牵引动力单元时, 效率最优的转矩分配模型如下:

$$NG_{\text{req}} = \sum_{i=1}^N G_i \quad (6)$$

$$\min P_D = \frac{knK}{9550\eta_c} \sum_{i=1}^N \frac{G_i}{\eta_{mi}} \quad (7)$$

$$\max P_B = \frac{knK\eta_c}{9550} \sum_{i=1}^N \eta_{mi} G_i \quad (8)$$

在该模型公式中, 式(7)、式(8)为优化目标函数, 式(6)为约束条件, 级位 G_i 的取值范围为 0%~100%。

3 基于效率最优的转矩分配计算

针对某型号列车 8 套牵引动力单元, 本文基于效率最优的转矩分配模型, 通过枚举法进行全局寻优, 开展转矩优化分配计算。

3.1 转矩优化分配计算

在高速列车牵引工况下, 优化后的 8 套牵引动力单元的手柄级位分配如图 3 所示。从图 3 可以发现, 随着手柄级位需求的减小, 部分动力单元分配的级位为零,

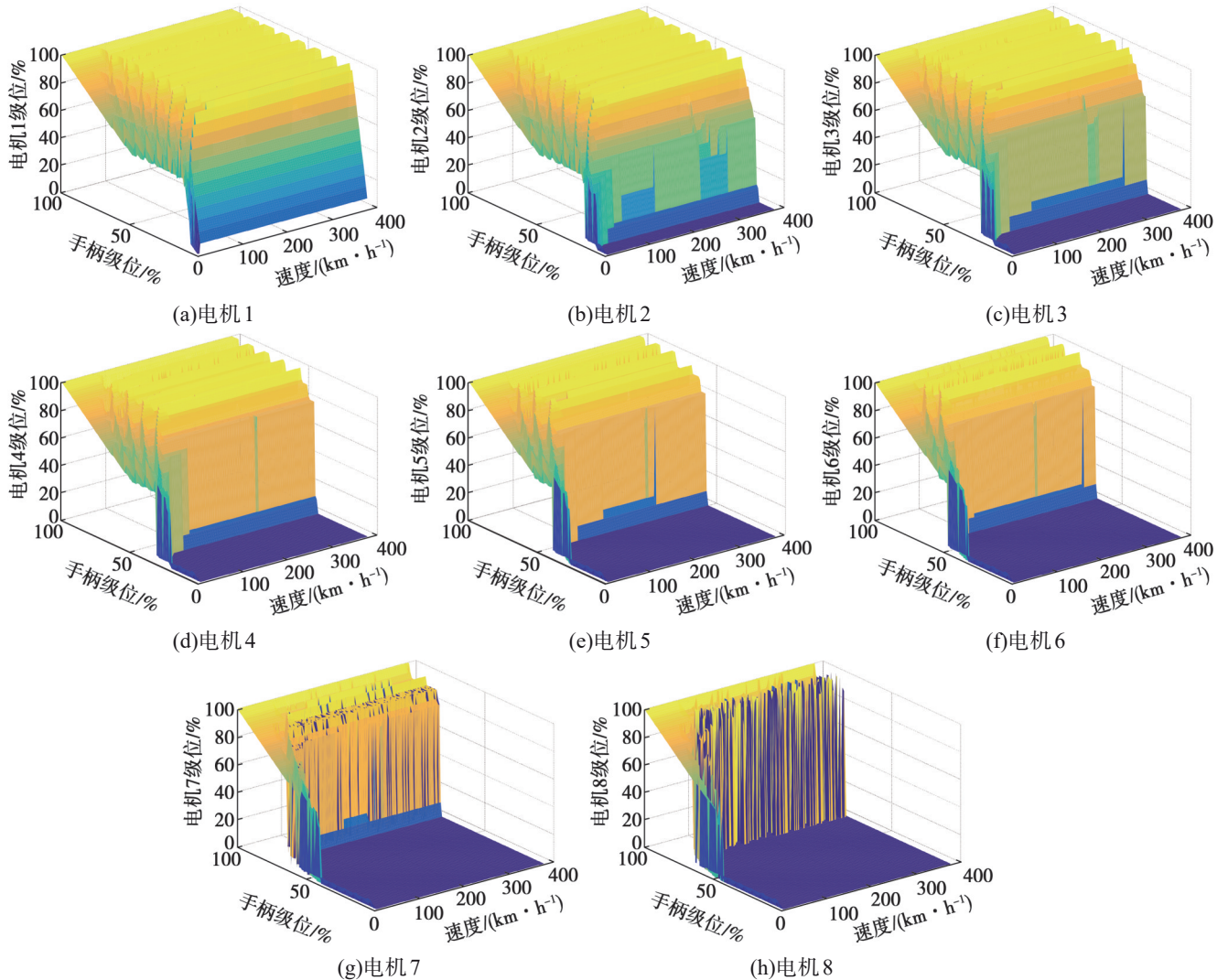
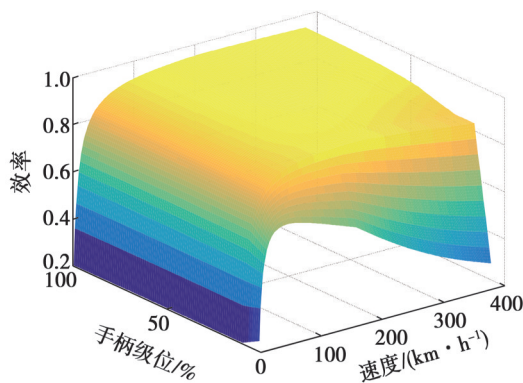


图3 转矩优化分配后牵引级位分配

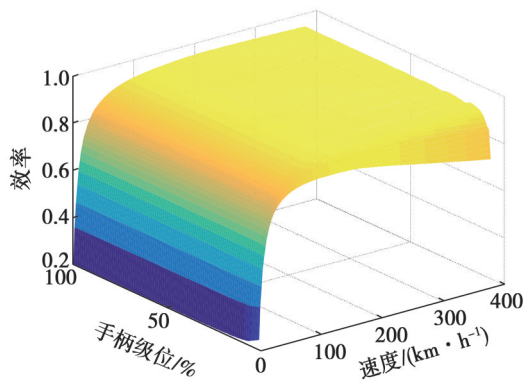
Fig. 3 Traction notch distribution after torque allocation optimization

即转矩优化分配后可逐渐关闭一些动力单元的转矩输出,其级位需求由剩余的动力单元平均分配。

根据优化后的牵引级位分配与电机原始效率,计算得到优化后的电机等效效率,效率对比如图4所示。由图4可知,在中小级位轻载工况下,电机等效效率提升显著。



(a) 电机效率



(b) 等效效率

图4 优化前后牵引工况效率对比

Fig. 4 Comparison of traction efficiency before and after optimization

计算得到的再生制动工况下的级位分配规律与牵引工况总体类似,仅部分速度区间因电机原始制动效率不同稍有差异,此处不再赘述。

3.2 转矩优化分配特征

根据3.1节的优化计算结果,可计算得到 N 套动力

单元效率最优的转矩分配表,实际应用时可通过查表或拟合等方式建立映射关系。本文根据优化后的手柄级位分配特征,给出一种转矩简化分配方法,进一步方便工程应用,具体如下:当级位需求大于 $(N-1)/N$ 时,转矩平均分配至所有动力单元;当级位需求在 $(N-1)/N \sim (N-2)/N$ 区间时,其中一套动力单元转矩分配为零,总的转矩需求由剩余 $N-1$ 套动力单元平均分配;随着级位需求每下降 $1/N$,转矩分配为零的动力单元即可增加1套,总的转矩需求再次重新平均分配;当级位需求在 $1/N \sim 0$ 区间时,总的转矩需求完全分配到1套动力单元。

该方法的数学表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} G_{(1-i)} &= \frac{NG_{\text{req}}}{i}, G_{(i+1-N)}=0, \frac{i-1}{N} \leq G_{\text{req}} \leq \frac{i}{N}, i \in [1 \sim N-1] \\ G_{(1-N)} &= G_{\text{req}}, G_{\text{req}} > \frac{N-1}{N} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将8套与4套动力单元的高速列车按上述简化分配方法分别得到的电机等效效率、8套动力单元列车采用优化分配方法得到的电机等效效率以及电机原始效率进行对比,结果如图5和图6所示。

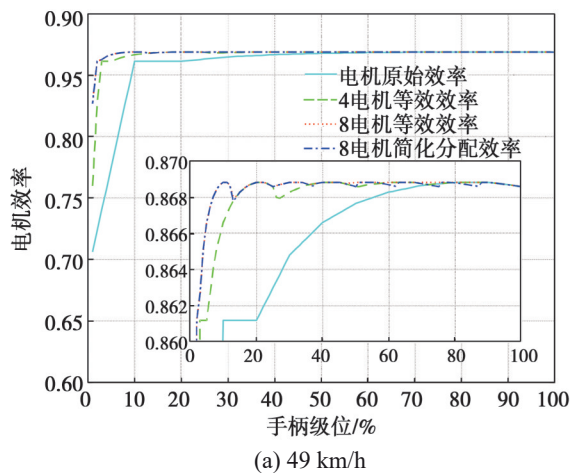
分析效率对比图得出以下结论:

①动力单元的数量越多,转矩优化分配越精细,越有利于提升系统效率。

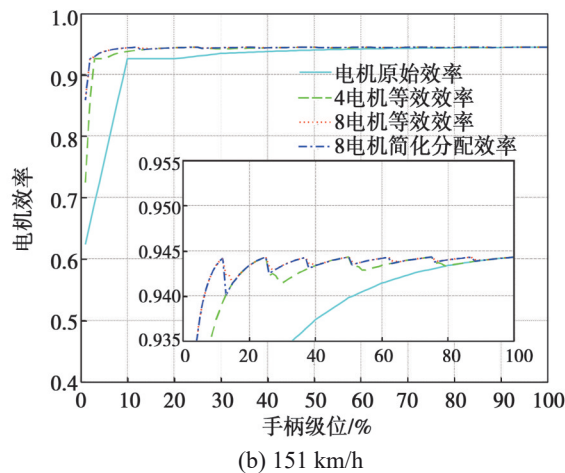
②中小级位轻载区间,电机原始效率下降越大,转矩优化分配后电机等效效率提升越大。

③速度相同、级位较小时,转矩优化分配后电机等效效率提升较大。以250 km/h牵引工况为例,级位需求为40%时,等效效率从0.938提升至0.951,提升1.39%;级位需求为80%时,效率几乎没有提升。

④级位相同,速度较高时,转矩优化分配后电机等效效率提升较大。以40%级位牵引工况为例,速度为150 km/h时,等效效率从0.937提升至0.943,提升0.64%;速度为350 km/h时,效率从0.919提升至0.945,提升2.83%。



(a) 49 km/h



(b) 151 km/h

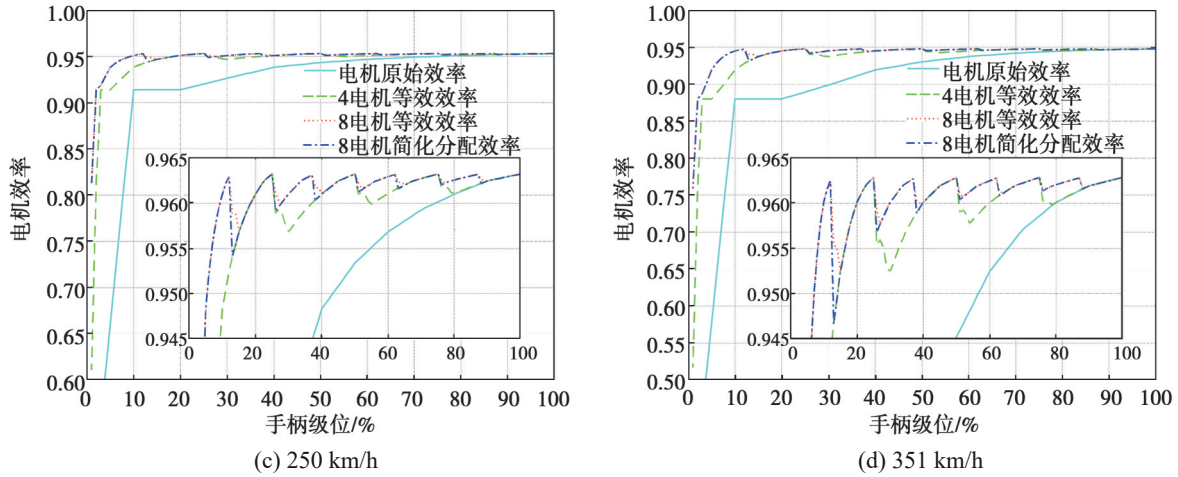


图5 不同速度下的牵引工况效率对比

Fig. 5 Comparison of traction efficiency at different speeds

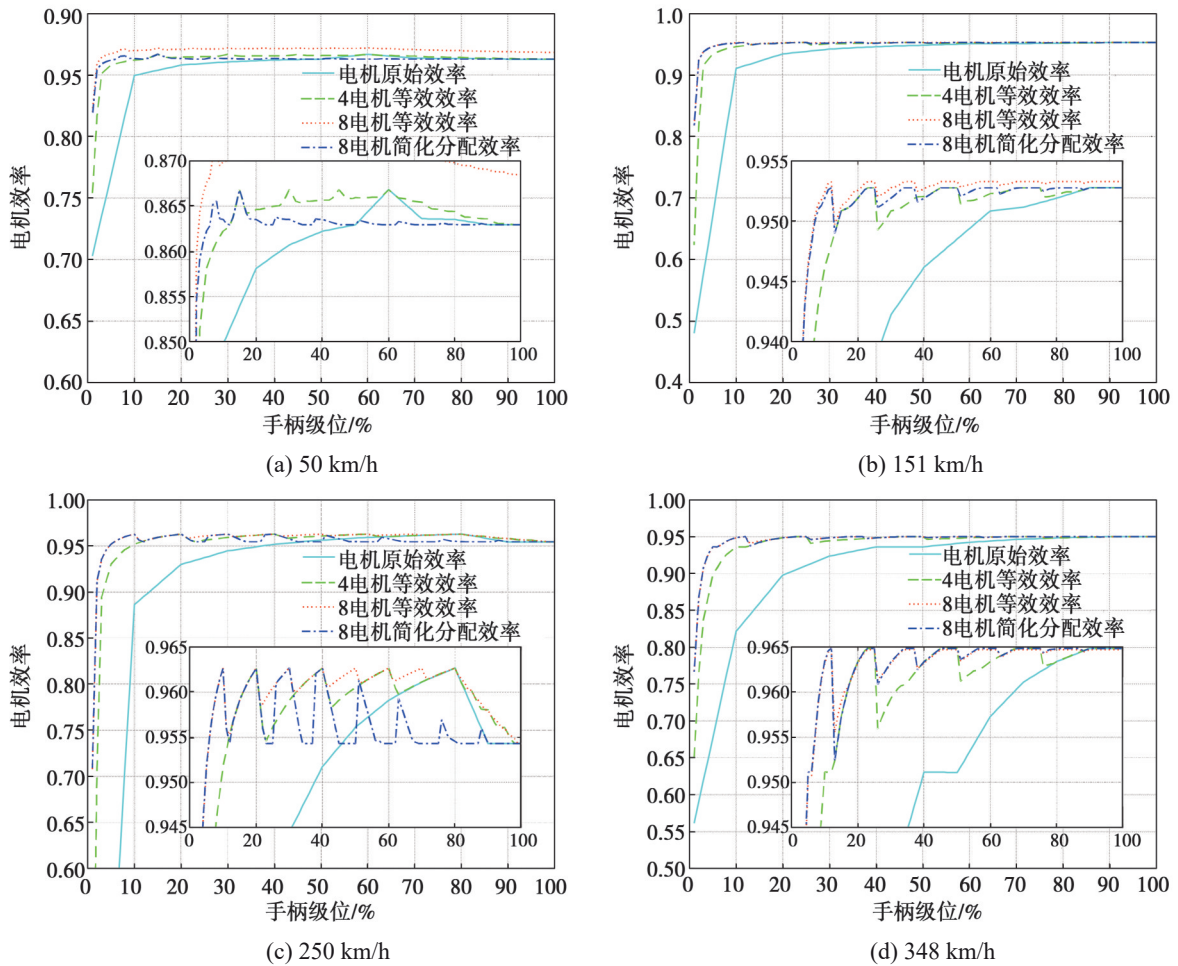


图6 不同速度下的制动工况效率对比

Fig. 6 Comparison of braking efficiency at different speeds

⑤简化分配与优化分配的等效效率在大部分工况下相近, 尤其是牵引工况, 简化分配方法可以作为一种简单有效的工程应用方法。

3.3 动力投入与切除分析

列车平稳舒适运行的要求为非紧急工况下的冲击率不大于 0.75 m/s^3 。为响应不断变化的手柄级位指令, 各动力单元应在转矩优化分配的基础上, 确保动力的

投入与切除优先满足冲击率要求, 以实现动力平滑过渡。

动力投入与切除示意如图7所示, 前10 s内, 手柄级位在冲击率限制范围内变化, 各动力单元的投入与切除没有超过最大冲击率限制, 且整车动力可实时满足手柄级位需求; 第10 s时, 手柄级位快速回零, 冲击率超出限制, 此时各动力单元按最大冲击率限制进行切除。

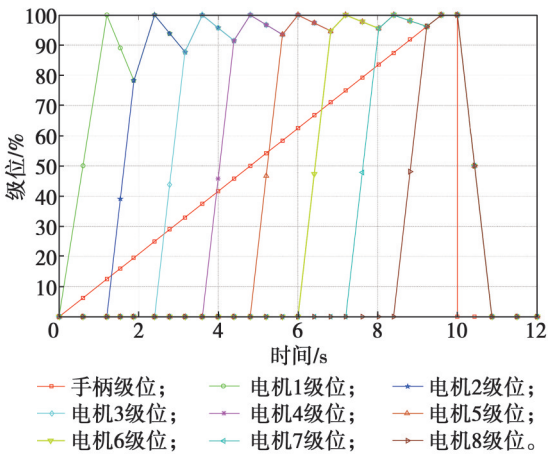


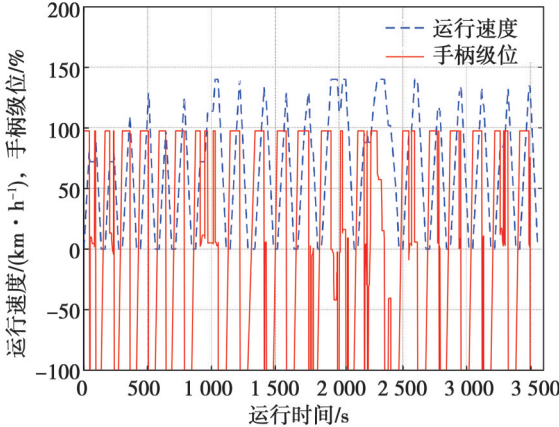
图7 动力投入与切除

Fig. 7 Power engagement and disengagement

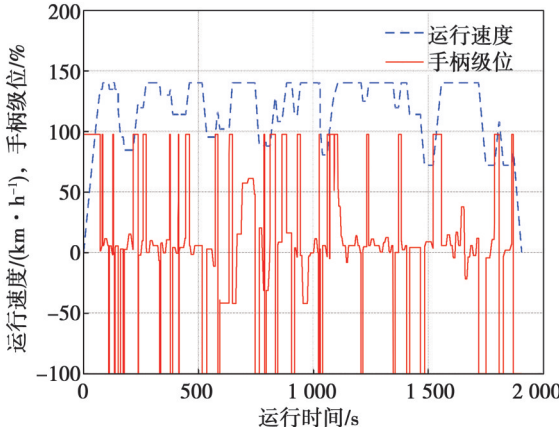
4 仿真试验验证

根据转矩优化分配方法，以某市域线路为运营场景开展运营仿真试验，优化前后的试验能耗对比如表1所示。由表1可知，站站停工况下的平均节能率约为0.40%，不停站工况下的平均节能率约为2.29%，节能率差距明显。

复查该市域线路的运营速度与级位数据，具体如图8所示。为方便分析，令正级位表示牵引工况，负级位表示制动工况。由图8可知，由于站站停工况下列车的启停次数较多，长时间工作在大级位工况，而大级位工况下电机等效效率提升较小，因此节能率偏低；在不停站工况下，列车速度稳定，长时间维持在中小级位运行，而中小级位下电机效率较低，转矩优化分



(a)站站停



(b)不停站

图8 某市域线路空载运行数据

Fig. 8 Operational data of a suburban rail line in no-load conditions

配后等效效率提升较大，因此节能率提高。

表1 优化前后运营能耗对比

Table 1 Comparison of operational energy consumption before and after optimization

载荷	优化	站停方式	上行/下行	平均速度/ (km·h ⁻¹)	牵引能耗/ (kW·h)	再生能耗/ (kW·h)	总能耗/ (kW·h)	节省能耗/ (kW·h)	节能率/ %
满载	优化前	站站停	上行	60.5	2 260.9	745.0	1 515.9	—	—
			下行	59.9	2 340.1	748.1	1 592.0	—	—
		不站停	上行	115.9	1 188.9	355.3	833.6	—	—
			下行	115.2	1 231.9	387.0	844.9	—	—
	优化后	站站停	上行	60.5	2 256.6	746.1	1 510.5	5.4	0.36
			下行	59.9	2 336.0	748.9	1 587.1	4.9	0.31
		不站停	上行	115.9	1 173.8	358.7	815.1	18.5	2.27
			下行	115.2	1 217.9	390.3	827.6	17.3	2.09
空载	优化前	站站停	上行	63.2	2 120.3	695.1	1 425.2	—	—
			下行	62.7	2 189.9	702.2	1 487.7	—	—
		不站停	上行	116.9	1 091.8	326.6	765.2	—	—
			下行	116.5	1 127.1	342.1	785.0	—	—
	优化后	站站停	上行	63.2	2 114.3	696.2	1 418.1	7.1	0.50
			下行	62.7	2 184.4	703.1	1 481.3	6.4	0.43
		不站停	上行	116.9	1 075.3	329.4	745.9	19.3	2.59
			下行	116.5	1 111.4	344.9	766.5	18.5	2.41

5 结束语

本文从牵引转矩二次优化分配的角度提出了基于效率最优的转矩分配模型, 通过该模型对转矩进行优化分配, 计算结果表明: 动力单元数量越多, 转矩优化分配越精细, 大级位工况下转矩二次分配的空间小, 效率几乎无提升; 中小级位轻载工况下电机原始效率低, 转矩优化分配后效率提升明显。

以某市域线路为运营场景进行仿真验证, 仿真结果表明: 转矩优化分配方法具备不同程度的节能效果, 不停站工况下的平均节能率约为2.29%, 与其长时间运行在中小级位工况下的数据相吻合, 验证了转矩优化分配方法的有效性。

本文提出的方法在不影响列车动力性能的前提下实现了列车增效节能, 对轨道交通车辆、智轨列车等具有普遍参考价值, 尤其适用于轻载运营场景。在后续研究中, 该转矩分配方法还可与先进的自动驾驶策略结合使用, 进一步提升列车节能效果。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 2020年中国内地城市轨道交通线路概况[J]. 现代城市轨道交通, 2021(2): 101.
China association of metros. Overview of urban rail transit routes in China in 2020[J]. Modern urban transit, 2021(2): 101.
- [2] SINGH P, DULEBENETS M A, PASHA J, et al. Deployment of autonomous trains in rail transportation: current trends and existing challenges[J]. IEEE access, 2021, 9: 91427-91461.
- [3] 武晓春, 金则灵. 基于DDPG算法的列车节能控制策略研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 483-493.
WU Xiaochun, JIN Zeling. Research on train energy saving control strategy based on DDPG algorithm[J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(2): 483-493.
- [4] 高豪, 张亚东, 郭进, 等. 基于动态规划的列车节能操纵优化方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 76-84.
GAO Hao, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. Optimization of energy-efficient train operation based on dynamic programming approach[J]. Journal of the China railway society, 2020, 42(8): 76-84.
- [5] HAAHR J T, PISINGER D, SABBAGHIAN M. A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points[J]. Transportation research part B-methodological, 2017, 99: 167-182.
- [6] ZHOU K C, SONG S J, XUE A K, et al. Smart train operation algorithms based on expert knowledge and reinforcement learning[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems, 2022, 52(2): 716-727.
- [7] 黄友能, 宫少丰, 曹源, 等. 基于粒子群算法的城轨列车节能驾驶优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2): 118-124.
HUANG Youneng, GONG Shaofeng, CAO Yuan, et al. Optimization model of energy-efficient driving for train in urban rail transit based on particle swarm algorithm[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2016, 16(2): 118-124.
- [8] 李和璧. 高速铁路列车群运行仿真系统技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
LI Hebi. Research on technology of high-speed railway train group operation simulation system[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2021.
- [9] 宋勤潇, 李杰, 张洪广. 一种城市轨道交通节能优化控制算法设计[J]. 机车电传动, 2017(2): 101-105.
SONG Mengxiao, LI Jie, ZHANG Hongguang. Design of urban rail transit operation energy saving optimal control method[J]. Electric drive for locomotives, 2017(2): 101-105.
- [10] 张杰, 张倩, 韦永全, 等. 动车组节能运行控制策略仿真分析[J]. 机车电传动, 2018(5): 34-37.
ZHANG Jie, ZHANG Qian, WEI Yongquan, et al. Simulation analysis on control strategy of energy-saving operation for EMUs[J]. Electric drive for locomotives, 2018(5): 34-37.
- [11] SHARMA N K, HAMEDNIA A, MURGOVSKI N, et al. Optimal eco-driving of a heavy-duty vehicle behind a leading heavy-duty vehicle[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2021, 22(12): 7792-7803.
- [12] BOREK J, GROELKE B, EARNHARDT C, et al. Economic optimal control for minimizing fuel consumption of heavy-duty trucks in a highway environment[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2020, 28(5): 1652-1664.
- [13] ZHAI C J, LUO F, LIU Y G. Cooperative power split optimization for a group of intelligent electric vehicles travelling on a highway with varying slopes[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(6): 4993-5005.
- [14] 王锋, 冒晓建, 卓斌. ISG并联混合动力轿车最优转矩分配策略[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2008, 31(5): 499-504.
WANG Feng, MAO Xiaojian, ZHUO Bin. Torque distribution for an integrated starter generator parallel hybrid electric car[J]. Journal of Chongqing university(natural science edition), 2008, 31(5): 499-504.
- [15] 徐梁飞, 李相俊, 华剑锋, 等. 燃料电池混合动力参数辨识及整车控制策略优化[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 56-61.
XU Liangfei, LI Xiangjun, HUA Jianfeng, et al. Parameter identification and control strategy optimization of hybrid fuel cell powertrain[J]. Journal of mechanical engineering, 2009, 45(2): 56-61.
- [16] 谷成, 刘浩, 陈辛波. 基于效率优化的四轮独立驱动电动车转矩分配[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 1550-1556.
GU Cheng, LIU Hao, CHEN Xinbo. Torque distribution

- based on efficiency optimization of four-wheel independent drive electric vehicle[J]. Journal of Tongji university(natural science), 2015, 43(10): 1550-1556.
- [17] 卢东斌, 欧阳明高, 谷靖, 等. 四轮驱动电动汽车永磁无刷轮毂电机转矩分配[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(4): 451-456.
- LU Dongbin, OUYANG Minggao, GU Jing, et al. Torque distribution algorithm for a permanent brushless DC hub motor for four-wheel drive electric vehicles[J]. Journal of Tsinghua university(science and technology), 2012, 52(4): 451-456.
- [18] 漆星, 王群京, 陈龙, 等. 前后轴双电机电动汽车转矩分配优化策略[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3): 62-70.
- QI Xing, WANG Qunjing, CHEN Long, et al. Optimization strategies of torque distribution for front and rear dual motor driven electric vehicles[J]. Electric machines and control, 2020, 24(3): 62-70.
- [19] YANG Y P, SHIH Y C, CHEN J M. Real-time driving strategy for a pure electric vehicle with multiple traction motors by particle swarm optimization[J]. IET electrical systems in transportation, 2016, 6(2): 76-87.
- [20] 陈黎卿, 谭雨点, 吴荣, 等. 基于遗传算法的电动四驱汽车轴间扭矩分配控制策略[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 361-367.
- CHEN Liqing, TAN Yudian, WU Rong, et al. Torque distribution control strategy of electronically controlled four-wheel drive axle based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(7): 361-367.

Research on energy-efficient train control based on optimized torque allocation

WANG Yue¹, HOU Zhaowen², CHEN Qihui², LI Yuanjing², LIU Jiancheng¹, ZHAO Xufeng²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Improving energy efficiency of rail transit vehicles promotes green mobility and supports China's dual-carbon goals. This paper develops an efficiency-optimal torque-allocation model based on the efficiency field distribution of traction motors to improve traction efficiency. Subject to train torque demand constraints, torque allocation relationships across speeds and control handle notches were computed offline. From the resulting optimized torque allocation patterns, a simplified allocation scheme suitable for engineering application was derived. Numerical results show that in low- and medium-notch regions, where motor efficiency is typically low, the proposed allocation approach raises equivalent motor efficiency appreciably. Using a larger number of power units enables finer allocation and further improves system efficiency across the full notch range. The simplified scheme achieves virtually the same equivalent efficiency as the efficiency-optimal method in most conditions. Simulations on a suburban line indicate that, compared with the conventional equal-sharing strategy, the optimized approach improves overall traction efficiency, yielding average energy savings of approximately 0.4 % during stop-at-all-stations operation and approximately 2.29 % under non-stop conditions. Analysis of operational data confirms these findings: the system operates dominantly at high notches under stop-at-all-stations conditions, producing limited energy savings, whereas it operates mainly at low-to-medium notches under non-stop conditions, with pronounced energy savings. The findings provide a practical reference for efficiency enhancement and energy conservation in rail-transit vehicles, including autonomous-rail rapid transit trains.

Keywords: rail transit vehicle; efficiency; energy-efficient control; optimized torque allocation; high-speed train