

城轨列车节能措施研究

吴晓波¹, 金泰木¹, 蒋露晴², 宋美玉², 林 飞²

(1. 国家高速列车技术创新中心, 山东 青岛 266000; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 城市轨道交通系统因其快速性、污染小和安全性高等特点而快速发展起来, 其能耗问题也备受关注。首先从列车和线路设计两个方面出发分析了影响城轨列车能耗的关键因素。针对于城轨列车能耗的现状, 分别提出了节能坡、减轻列车质量和提高牵引电动机效率三种节能措施。由于考虑列车在实际运行过程中受牵引供电系统的约束作用, 因此搭建了牵引供电系统模型及列车模型, 并基于牵引供电系统仿真模型分析了节能坡、减轻列车质量和提高牵引电动机效率等节能措施的节能效果, 供城轨列车节能优化运营参考与借鉴。

关键词: 能耗; 城轨系统; 节能坡; 牵引电动机; 牵引供电系统

Research on energy saving measures for urban rail trains

WU Xiaobo¹, JIN Taimu¹, JIANG Luqing², SONG Meiyu², LIN Fei²

(1. National Innovation Center of High Speed Train, Qingdao 266000, China;

2. School of Electrical Engineering, University of Beijing Jiaotong, Beijing 100044, China)

Abstract: The urban rail transit system has developed rapidly due to its rapidity, low pollution, high safety and reliability, and its energy consumption has also attracted much attention. First, the key factors affecting the energy consumption of urban rail trains are analyzed from two aspects of train and line design. In view of the current status of energy consumption of urban rail trains, three energy-saving measures are proposed, including energy-saving slope, reducing train quality and improving traction motor efficiency. Considering that the train is subject to the constraints of the urban rail traction power supply system during actual operation, the traction power supply system model and the train model are built, and based on the traction power supply system simulation model, the energy-saving slope is analyzed, the train quality is reduced, and the efficiency of the traction motor is improved. The energy-saving effect of energy-saving measures can be used as a reference and reference for the energy-saving and optimized operation of urban rail trains.

Key words: energy consumption; urban rail transit system; energy-saving slope; traction motor; traction power supply system

0 引言

随着我国人口快速增长, 城市轨道交通系统为满足运输需求而快速发展, 但同时其带来的能耗问题也日益显著。随着新建线路的增加,

总体能耗呈逐年增长趋势。截至2020年底, 城轨系统所用的总电能损耗达到172.4亿kW·h, 相比2019年增长了12.9%。其中用于列车牵引的能耗达84亿kW·h, 同比增长了6.3%。各个城市城轨

国家高速列车技术创新中心资助项目

系统单位平均人公里能耗0.016 kW·h，同比增加了约50%^[1]。因此建设绿色轨道交通，寻找高效牵引技术，对于我国城轨交通运输系统的发展意义重大。

目前，即使在车辆利用率很高的城市，其用电等级仍然不高^[2]，城轨列车在节能方面存在很大的节能空间。对于如何降低城轨列车的能耗将是未来车辆制造厂以及地铁公司的重点研究方向。

1 城轨列车能耗分析

城轨交通系统的总能耗可以分为以下两部分：列车运行能耗和站内运营能耗^[3]。站内运营能耗包括站内照明、空调器及电梯等能耗，由于本文主要考虑列车能耗，因此这部分能耗不予考虑。由于列车用于空调器、照明系统等辅助系统能耗值较为固定且占整车能耗的比值较小，本文也不考虑列车辅助能耗，而主要考虑列车运行过程中的牵引能耗。

不同的线路条件下，列车所提供的牵引力或者制动力不同。因此，考虑列车能耗时不仅要考虑列车牵引能耗，还要考虑线路条件这一因素。具体的能耗构成如图1所示。

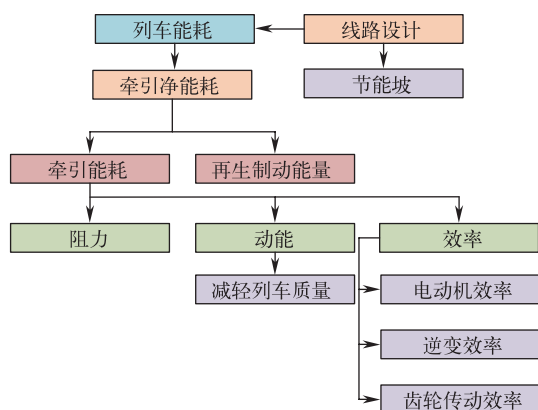


图1 城轨列车能耗组成

Fig. 1 Energy consumption composition of urban rail trains

牵引变电站发出的电能流经接触网，从第三轨或者受电弓供给到列车，用于列车牵引；供给列车牵引的另外一部分能量来自于制动列车回馈至接触网或第三轨的再生制动能量。计算公式如下

$$E_{\text{净}} = E_{\text{牵}} - E_{\text{制}} \quad (1)$$

式中， $E_{\text{净}}$ 为列车牵引净能耗； $E_{\text{牵}}$ 为列车牵引能耗； $E_{\text{制}}$ 为交互至牵引列车的再生制动能量。

列车的牵引能耗与列车动能相关，即与列车的质量相关。因此可以通过减轻列车质量降低列车牵引能耗。由于供给到列车的电能要流经列车中的变流器、感应电动机和动力传动装置，流经每一环节都存在能量损耗，提高电动机效率也可以达到降低列车牵引能耗的目的。

2 城轨列车常用节能措施

(1) 节能坡

地铁列车的能耗受线路条件的影响较大。由于实际中的线路不是理想的平直线路，线路的坡长、坡度和曲线半径等都会带来阻碍作用。由于这些因素的存在使得列车会在运行的过程中产生更高的能耗。目前对于节能坡的设计已经有了一些研究，研究较多集中在“V”形坡和“W”形坡的节能坡模型，也有学者通过设计“缓坡+陡坡”的形式研究其对列车节能的影响^[4]。

本文依照《地铁设计规范》，对北京地铁八通线的某站采用对称节能坡模型，研究不同坡长组合以及不同坡度对列车牵引能耗的影响。

图2为对称节能坡示意图，分别由出站坡、加速坡、中间坡、减速坡和进站坡组成。

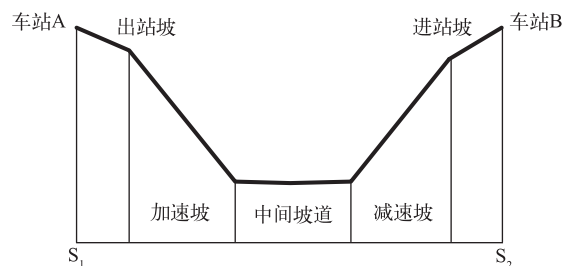


图2 对称节能坡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of symmetrical energy-saving slope

编程仿真以北京地铁八通线站间距为990 m的某站为研究对象，按照设计规范，将出站坡和进站坡的坡度值分别设定为2‰，长度设置为固定值150 m；加速坡和减速坡的坡度值在3‰~28‰之间，长度从100 m增加至250 m；中

间坡道的长度由区间长度和两侧的坡长决定。

(2) 列车轻量化

2018年9月,德国举办的柏林轨道交通技术展览会上,中车四方正式发布新一代碳纤维列车“CETROVO”。该车相比于传统的地铁车辆,其最大的特点是采用了新材料,即有着“轻量化之王”之称的碳纤维复合材料。该材料的使用使得整车的轻量化程度达到13%,据测算,该新一代列车可以综合节能15%以上。因此研究地铁的轻量化问题对于城轨系统降低能耗问题十分重要。

本文以北京地铁八通线的某五站为编程仿真对象,采用固定时分运行策略,研究地铁八通线列车运行在AW0~AW3工况下,列车轻量化程度从0~10%变化,列车轻量化程度对于列车牵引能耗的影响。

(3) 提高牵引电动机效率

提高牵引电动机的效率也是降低列车能耗的重要措施。目前广泛使用的是异步感应电动机,但由于异步感应电动机是由转子提供励磁磁场,因此在转子中会产生转子励磁损耗。永磁同步感应电动机使用永磁材料进行励磁,与异步感应电动机相比没有转子励磁损耗,电动机总损耗也相比降低了约50%^[5]。

图3为两种电动机在其最大牵引特性曲线包络线下的随转速变化的效率对比图。从图3中可以看出,低速区永磁同步电动机的效率较异步电动机的效率优势更加明显,提高10%以上;在高速区的效率约提高5%。

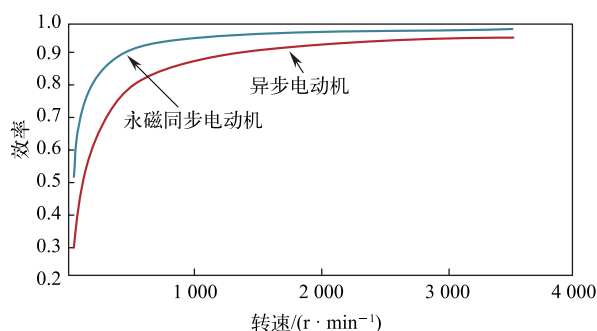


图3 永磁同步电动机与异步电动机效率对比图

Fig. 3 Comparison of the efficiency of permanent magnet synchronous motors and asynchronous motors

在研究牵引电动机效率对于列车节能的影响时,需对电动机的效率进行建模。本文采用简化后的两种电动机的效率模型。

异步电动机的效率模型

$$\eta_{\text{asyn}} = \begin{cases} 40\% & 0 \leq v < 5 \\ 70\% & 5 \leq v < 10 \\ 80\% & 10 \leq v < 15 \\ 85\% & 15 \leq v < 30 \\ 88\% & 30 \leq v < 50 \\ 94\% & 50 \leq v < 80 \end{cases} \quad (2)$$

永磁同步电动机的效率模型

$$\eta_{\text{syn}} = \begin{cases} 65\% & 0 \leq v < 5 \\ 88\% & 5 \leq v < 10 \\ 92\% & 10 \leq v < 15 \\ 95\% & 15 \leq v < 30 \\ 96\% & 30 \leq v < 50 \\ 97\% & 50 \leq v < 80 \end{cases} \quad (3)$$

3 牵引供电系统及列车模型

列车在运行过程中,受到牵引供电系统的约束,因此需要考虑牵引供电系统模型。牵引供电系统由牵引变电站、馈线、接触网、列车、钢轨及回流线组成。由于列车运行过程中位置、功率是随时间而变化的,考虑到列车从牵引网受取的电流大小受网压的限制,一般情况下将列车等效成受控电流源模型^[6]。

列车模型如图4所示。

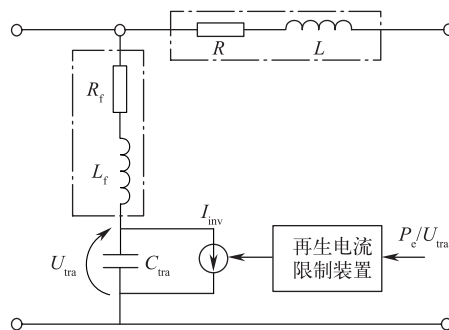


图4 列车模型

Fig. 4 Train model

图4中, R 和 L 代表线路电阻和电感; R_f 和 L_f 代表列车等效电阻和电感; C_{tra} 代表列车支撑电容; U_{tra} 代表其两端电压; P_c 代表列车电功率; I_{inv} 代表逆变器直流侧的电流。

牵引供电系统的模型需要对牵引变电站和牵引网分别建模。变电站所采用的整流机组多为24脉波整流机组，一般将其等效为恒定电压源串联内阻和二极管的形式。列车在城轨系统运行的过程中，列车左右的线路阻抗大小会随着列车位置的改变而改变。根据均匀传输线理论，每段线路都采用 π 形等效电路^[7]。整个牵引供电系统模型如图5所示。以上行线为例， R_1 、 R_2 为上行线接触网电阻； L_1 、 L_2 为上行线接触网电感； R_3 、 R_4 为上行线钢轨电阻； L_3 、 L_4 为上行线钢轨电感； $C_1 \sim C_6$ 为线路对地电容。

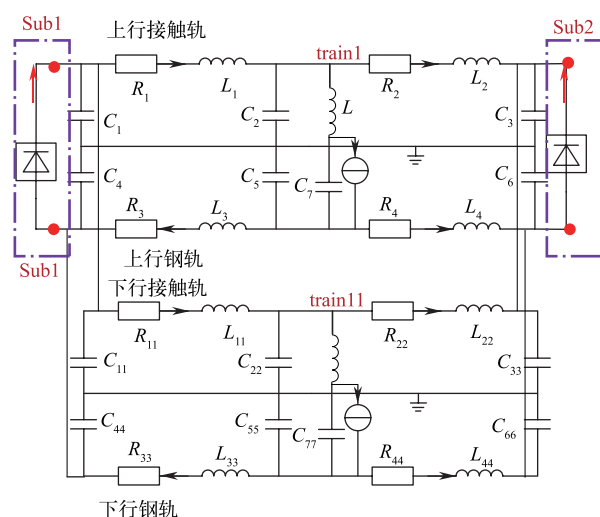


图5 牵引供电系统模型

Fig. 5 Traction power supply system model

4 常用节能措施效果

本文仿真模型是在部分八通线线路（果园站-九棵松站-梨园站-临河里站-土桥站共5站地）的基础上建立的，表1和表2分别为八通线的车辆与部分线路参数（以上行线为例）。

表1 北京地铁八通线列车数据

Tab. 1 Beijing metro Batong line train data

工况	质量/t			GT/t	GD/t
	M	T	Tc		
AW0	35	29	33	200	210.15
AW1	37.16	31.16	35.52	214.4	229.65
AW2	48.56	42.56	48.24	288.08	303.33
AW3	52.4	46.4	52.5	312.8	328.05

表2 北京地铁八通线部分线路车站数据

Tab. 2 Station data of some lines on the Batong line of Beijing metro

车站	目的地	站间距 /m
1	果园	-
2	九棵松	990
3	梨园	1 225
4	临河里	1 257
5	土桥	776

首先是验证节能坡这一节能措施的节能效果，该节能措施是以果园站至九棵松站（站间距为990 m）作为仿真区间，按照表3对称节能坡的不同坡长组合进行程序编写。得到的仿真结果如图6所示。

表3 对称节能坡不同坡长组合

Tab. 3 Symmetrical energy-saving slopes with different slope length combinations

组合编号	车站坡坡长 /m	加减速坡坡长 /m	中间坡道坡长 /m	坡度 (‰)
1	150	100	490	3 ~ 28
2	150	150	390	
3	150	200	290	
4	150	250	190	

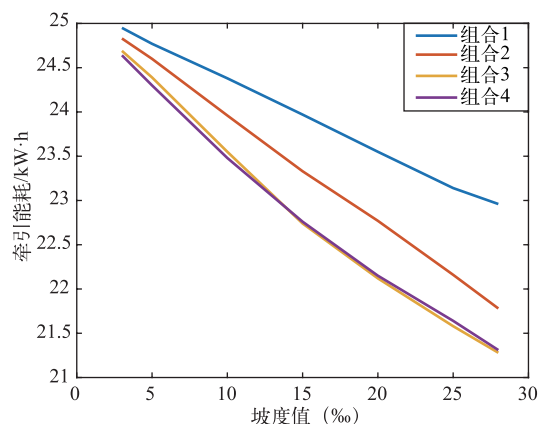


图6 对称节能坡不同坡长组合仿真结果

Fig. 6 Simulation results of symmetrical energy-saving slopes with different slope length combinations

仿真结果表明，在其他条件相同的情况下，一定范围内，随着加减速坡坡长越长，坡度值越大，列车牵引能耗越小。但对比组合3与组合4的结果可知，当加减速坡坡长增加到一定值时，坡度值对列车牵引能耗的影响不再明显。

其次是验证列车轻量化这一节能措施的节能效果,该节能措施是对AW0~AW3工况下不同列车轻量化程度对于牵引能耗的影响进行程序仿真。得到的仿真结果如图7所示。

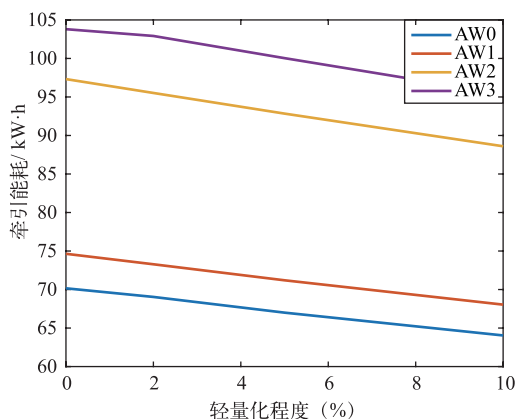


图7 AW0~AW3工况不同轻量化程度仿真结果

Fig. 7 AW0 ~ AW3 simulation results of different degrees of lightweight

仿真结果表明,在线路等其他条件相同的情况下,列车的载客量越少,轻量化程度越高,列车的牵引能耗越小。

最后是验证改善牵引电动机效率这一节能措施的节能效果,该节能措施是利用异步电动机和永磁同步电动机简化效率模型进行程序仿真。得到的仿真结果如表4所示。

表4 不同电机仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation results of different motors

牵引电动机	异步电动机	永磁同步电动机
牵引能耗 /kW·h	93.44	88.04
节能率 (%)	-	5.78

仿真结果表明,在车辆、线路等其他条件相同的情况下,相比异步电动机而言,使用永磁同步电动机进行列车牵引,能耗减小5.4 kW·h,节能率为5.78%。

5 结束语

本文通过研究城轨列车能耗的组成,分析了

节能坡、列车轻量化以及提高牵引电动机效率三种节能措施,通过分析牵引供电系统的组成,搭建牵引供电系统模型,并在牵引供电系统模型的基础上验证三种节能措施的节能效果,为后续研究提供参考和借鉴。**EA**

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2020年度统计和分析报告[EB/OL]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/7647>.
- [2] 唐飞龙, 韩庆军. 地铁车辆能耗分析及节能措施研究[J]. 机车电传动, 2020(4): 138-141.
- [3] LU S, WESTON P, HILLMANSEN S, et al. Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2506-2515.
- [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, 33(1): 99-108.
- [5] 刘良杰, 陈文光, 刘雄, 等. 地铁永磁同步牵引系统节能技术研究[J]. 机车电传动, 2018(6): 23-25, 41.
- [6] 王彬. 城轨交通地面式超级电容储能系统容量配置优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [7] 赵莹莹. 考虑再生制动能量利用的城轨交通多列车节能运行研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

作者简介



吴晓波

吴晓波(1988—),男,硕士,工程师,研究方向为能源与动力系统优化、牵引供电系统能效研究。

(收稿日期: 2021-06-30)