

基于无线电能传输供电方式的有轨电车能耗分析研究*

李明

(北京市地铁运营有限公司, 100044, 北京//正高级工程师)

摘要 结合有轨电车实际运行工况与牵引动力系统效率等参数对车辆牵引动力系统能耗进行仿真分析研究。提出了有轨电车系统效率计算方法。结果表明,车辆基本运行阻力造成的能耗和车载辅助供电系统用电之和占车辆总能耗的2/3左右,其余能耗由车辆动力系统产生。定量分析了车辆运行中产生的各项能耗,为车辆能量利用效率的提升研究提供依据。

关键词 有轨电车;无线电能传输;能耗分析;能量利用率

中图分类号 U223.2;U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.007

Energy Consumption Analysis of Tram Based on Wireless Power Transmission Supply Mode

LI Ming

Abstract With parameters such as actual operating conditions and traction power system efficiency, simulation analysis is conducted to study the energy consumption of vehicle traction power system, and tram system efficiency calculation method is put forward. Research results show that the total of energy consumption caused by vehicle basic running resistance and power consumption of on-board auxiliary power supply system accounts for about two-thirds of the vehicle total energy consumption, and the rest is generated by vehicle power system. Energy consumption generated during vehicle operation is quantitatively analyzed, providing reference for the improvement of vehicle energy utilization efficiency.

Key words tram; wireless power transfer; energy consumption analysis; energy utilization rate

Author's address Beijing Metro Operation Co., Ltd., 100044, Beijing, China

有轨电车的供电接触网架空线会给城市环境造成视觉污染,不符合城市未来发展建设的要求^[1-2]。无线电能传输供电的新型有轨电车是未来极为重要的发展方向。当前无线电能传输供电型(以下简为“无线供电”)有轨电车的研究还处于初

期研究阶段。无线供电有轨电车在运行线路的地面中铺设了电磁线圈,在车辆底盘安装了感应线圈,二者构成电磁耦合系统。当有轨电车运行时,电磁耦合系统将电能从地面传输到车辆,实现无线供电。铺设在地面的电磁线圈在没有有轨电车经过时处于关闭状态,在有有轨电车经过时切换至工作状态。

无线供电有轨电车的关键部件为电磁耦合系统,其性能直接决定车辆的运行性能。目前能够实现的WPT(无线电能传输)技术主要有辐射式WPT、电场耦合式WPT及电磁耦合式WPT。不同技术方式对应的传输功率等级、效率及传输距离都不同。在WPT研究方面,文献[3-4]指出,大功率高频逆变器、分段供电技术、电磁耦合机构设计、系统优化和控制、谐振频率稳定控制等是WPT的关键技术;文献[5]基于传输距离对输出功率和传输效率的影响,进一步提出了最大输出功率点的具体计算方法。

本文基于无线供电有轨电车,分析无线供电有轨电车的能耗动态分布特性,并搭建无线供电有轨电车运行能耗数值模型,研究其各项能耗与供电系统各参数的耦合关系;通过不同运行工况下的列车各子系统能耗的过程解耦分析,建立列车全局效能评估指标体系,研究影响有轨电车系统能效的关键因素,分析计算有轨电车各部件的能耗及其效率,最终提出了有轨电车系统效率计算方法。

1 动力系统拓扑

无线供电有轨电车动力系统主要包括WPT系统及动力电池等。WPT系统由地面能量发射装置与车上接收装置构成,主要包括工频整流装置、高频逆变装置、谐振线圈及高频整流装置等。车辆能耗分析需要对车辆各系统能耗进行探究分析,研究

* 国家重点研发计划项目(2017YFB1201003)

影响车辆能耗的关键因素。

1.1 车辆参数

无线供电有轨电车采用两动两拖车厢结构,装配了 4 台额定功率为 150 kW 的永磁同步电机。有轨电车最高运行速度为 70 km/h。其车辆动力机构由 6 套额定功率为 100 kW 的 WPT 系统与 2 套动力电池构成。WPT 系统经由单向 DC/DC 直流斩波器与动力电池并联向车辆运行供电。

1.2 WPT 系统

每套 WPT 系统采用 1 套额定功率为 100 kW 的电能接收装置。每套接收装置由 2 个接收线圈,1 套整流装置及 1 套 DC/DC 直流斩波器构成。其结构如图 1 所示。

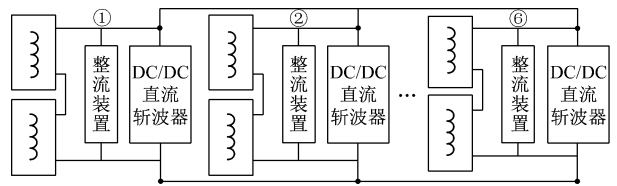


图 1 无线供电有轨电车的电能接收装置结构示意图

1.3 动力电池参数

无线供电有轨电车采用 2 套动力电池并联连接。每套动力电池参数如表 1 所示。

表 1 动力电池参数	
参数	取值
电压范围/V	700 ~ 900
电芯并联数/个	3
电芯串联数/个	360
标称容量/kWh	49.68
额定充放电电流/A	450
额定充放电功率/kW	372
3 min 峰值充放电功率/kW	696

2 有轨电车各动力系统的能耗

2.1 WPT 系统能耗

WPT 系统的能量传输效率主要取决于工频整流装置、高频逆变装置、谐振线圈及高频整流装置的传输效率。其中,工频整流装置、高频逆变装置与高频整流装置的传输效率可以根据其自身参数求得。本文将这三者效率设为 95%。而谐振线圈传输效率影响因素较多,其中主要影响因素为频率特性、位置特性^[6-9]。在已有的无线传能有轨电车

内,线圈的最佳谐振频率一般通过实际测算确定为常数。位置特性包含了感应线圈间的相对距离以及相对中心位置,其同有轨电车的地盘线圈分布及线路线圈分布有关。可见,WPT 系统的能量传输效率将由线圈的工作频率及线圈间的耦合系数决定。

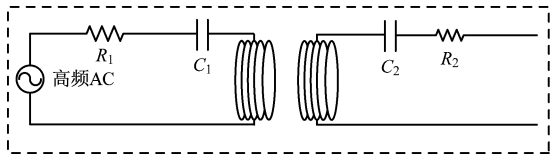


图 2 谐振线圈

图 2 谐振线圈结构的效率计算为:

$$\begin{cases} Z_1 = R_s + R_1 + j\omega(L_1 - M) + \frac{1}{j\omega C_1} \\ Z_2 = R_L + R_2 + j\omega(L_2 - M) + \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_1 = \frac{U_s}{Z_1 + \omega^2 M^2 / Z_2} \\ I_2 = \frac{j\omega M U_s / Z_2}{Z_1 + \omega^2 M^2 / Z_1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q_1 = \omega L_1 / (R_1 + R_2) \\ Q_1 = \omega L_2 / (R_2 + R_L) \end{cases} \quad (3)$$

$$\eta = \left| \frac{P_L}{P_s} \right| = \left| \frac{I_2^2 R_L}{U_s I_1} \right| = \frac{U_s^2}{R_1 + R_s} \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + k^2 Q_1 Q_2} \cdot \frac{R_L}{R_2 + R_L} = \frac{R_L}{R_2 + R_L} \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + k^2 Q_1 Q_2} \quad (4)$$

式中:

- ω ——高频电源角频率;
- M ——谐振线圈互感;
- U_s ——高频电源等效电压;
- k ——谐振线圈耦合系数;
- η ——谐振线圈效率;
- R_1 ——能量供给侧线圈等效电阻;
- L_1 ——能量供给侧线圈等效电感;
- C_1 ——能量供给侧线圈等效电容;
- Z_1 ——能量供给侧线圈等效阻抗;
- I_1 ——能量供给侧线圈等效电流;
- Q_1 ——能量供给侧线圈品质因数;
- R_2 ——能量接收侧线圈等效电阻;
- L_2 ——能量接收侧线圈等效电感;
- C_2 ——能量接收侧线圈等效电容;
- Z_2 ——能量接收侧线圈等效阻抗;
- I_2 ——能量接收侧线圈等效电流;
- Q_2 ——能量接收侧线圈品质因数;

R_L ——负载等效电阻;

P_L ——负载等效消耗能量;

R_S ——电源等效电阻;

P_S ——电源提供能量。

2.2 动力电池能耗

当动力电池处于恒流充电模式时, U_0 为动力电池电压初始值, R 为动力电池充放电内阻, I 为动力电池充放电电流。则动力电池的 Rint 模型如图 3 所示。

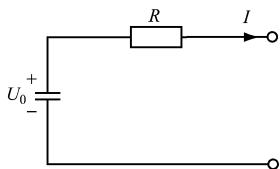


图3 动力电池简化模型

由图 3 有:

$$U = U_0 - IR \quad (5)$$

动力电池充放电效率可根据充放电功率、开路电压及充放电内阻计算得到。其中, 充放电内阻与开路电压需要实际测量获得, 不同的电池电量对应不同的充放电内阻与开路电压, 其充电效率 η_{chg} 及放电效率 η_{dis} 为:

$$\begin{cases} \eta_{\text{chg}} = 2 / \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4RP_{\text{bat}}}{U_{\text{ocv}}^2}} \right) & P_{\text{bat}} < 0 \\ \eta_{\text{dis}} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4RP_{\text{bat}}}{U_{\text{ocv}}^2}} \right) & P_{\text{bat}} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:

P_{bat} ——动力电池的充放电功率, W; $P_{\text{bat}} < 0$ 时为充电, $P_{\text{bat}} \geq 0$ 时为放电;

R ——动力电池的内阻, Ω ;

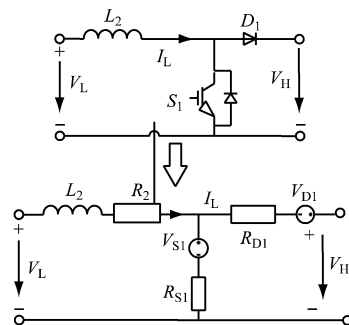
U_{ocv} ——动力电池的开路电压, V。

2.3 单向 DC/DC 能耗

车载 DC/DC 斩波器是单向升压变换器, 其功率损耗主要包括开关损耗和通态损耗两部分。因大型功率变换器件开关频率相对较低, 故开关损耗占据总损耗的比重较小, 故而可忽略开关损耗。图 4 为升压变换器原理图及等效模型。

在本文的模型中, V_L 及 I_L 分别为 WPT 系统输出(低压侧)的电压及电流, V_H 为动力电池的端电压(母线电压, 为高压侧)。

根据升压变换器的等效模型, 可以得出 DC/DC 变换器的功率损耗为:



注: V_{D1} 为二极管 $D1$ 的导通压降; R_{D1} 为 $D1$ 的导通电阻; V_{S1} 为开关管 $S1$ 的导通压降; R_{S1} 为 $S1$ 的导通电阻; V_L 为低压侧电压, I_L 为低压侧电流; V_H 为高压侧的电压。

图4 升压变换器原理图及等效模型

$$P_{\text{loss}} = I_L^2 R_L + I_L^2 R_{S1} D_{\text{boost}} + I_L V_{S1} D_{\text{boost}} + (I_L^2 R_{D1} + I_L V_{D1})(1 - D_{\text{boost}}) \quad (7)$$

式中:

D_{boost} ——当 DC/DC 变换器处于升压模式时, 开关管 $S1$ 的占空比。

2.4 永磁同步电机能耗

无线供电有轨电车的牵引电机采用三相永磁同步电机。该同步电机的转子与旋转磁场都以同步转速旋转, 两者之间没有相对运动, 不会在转子铁芯产生铁损耗。因此, 铁损耗只包含电枢中的铁损耗, 而转子绕组中的铁损耗是归到励磁系统中考虑的。永磁同步电机中的空载损耗包括电枢铁损耗 P_{Fe} 、机械损耗 P_{Me} 和附加损耗 P_{ad} 。空载损耗需通过对电机进行空载试验, 并根据电机参数及电机功率来计算永磁同步电机铜损耗:

$$P_0 = P_{\text{Fe}} + P_{\text{ad}} + P_{\text{Me}} \quad (8)$$

$$P_{\text{cu}} = 3R_1 I_1^2 \quad (9)$$

式中:

P_0 ——牵引电机空载功率损耗;

P_{cu} ——牵引电机空载铜耗;

R_1 ——牵引电机等效电阻;

I_1 ——牵引电机电流;

X_s ——牵引电机等效电感。

2.5 机械制动能耗

在有轨电车制动过程中, 当车速下降到一定速度后, 电制动逐渐减弱, 因此在低速段需要补加机械制动。机械制动消耗的列车动能为

$$E_{\text{mec}} = \frac{Mv_2^2}{2} \quad (10)$$

式中:

M ——车辆质量;

v_2 ——车辆电制动消失时的车辆速度。

2.6 车辆运行能耗

按行驶过程,车辆运行能耗可以分为牵引及匀速运行能耗,以及制动能耗。

2.6.1 牵引及匀速运行能耗

WPT 系统能耗为:

$$E_{\text{wireloss}} = \int (1 - \eta_{\text{wireloss}}(t)) P_{\text{wireless}}(t) dt \quad (11)$$

式中:

η_{wireless} ——WPT 系统效率;
 P_{wireless} ——WPT 系统输出功率;
 E_{wireloss} ——WPT 系统能耗;
 t ——时间。

动力电池放电能耗为:

$$E_{\text{batloss}} = \int (1 - \eta_{\text{dis}}(t)) P_{\text{bat}}(t) dt \quad (12)$$

式中:

η_{dis} ——动力电池放电效率;
 P_{bat} ——动力电池输出功率;
 E_{batloss} ——动力电池充放电能耗。
 基本运行阻力能耗:

$$E_{\text{floss}} = \int P_{\text{floss}}(t) dt \quad (13)$$

式中:

P_{floss} ——克服基本阻力输出功率;
 E_{floss} ——基本运行阻力能耗。
 电机能耗:

$$E_{\text{mloss}} = \int (1 - \eta_{\text{moter}}(t)) P_{\text{moter}} dt \quad (14)$$

式中:

η_{moter} ——牵引电机效率;
 P_{moter} ——牵引电机功率输出;
 E_{mloss} ——牵引电机能耗。
 DC/AC 逆变器能耗:

$$E_{\text{DAloss}} = \int (1 - \eta_{\text{DC/AC}}(t)) P_{\text{DC/AC}} dt \quad (15)$$

式中:

$\eta_{\text{DC/AC}}$ ——DC/AC(直流/交流)转换效率;
 $P_{\text{DC/AC}}$ ——DC/AC(直流/交流)功率输出;
 E_{DAloss} ——DC/AC(直流/交流)逆变器能耗。
 辅助系统能耗:

$$E_{\text{auxloss}} = \int P_{\text{auxloss}}(t) dt \quad (16)$$

式中:

P_{auxloss} ——系统辅机功率输出;

E_{auxloss} ——系统辅机能耗。

牵引及匀速运行时动能:

$$E_{\text{kinetic}} = \frac{Mv_1^2}{2} \quad (17)$$

式中:

v_1 ——机车牵引或匀速时的速度;
 E_{kinetic} ——机车牵引或匀速时的动能。
 满足能量平衡关系:

$$E_{\text{supply}} = E_{\text{floss}} + E_{\text{DAloss}} + E_{\text{mloss}} + E_{\text{kinetic}} \quad (18)$$

式中:

E_{supply} ——机车牵引或匀速时的需求能量。

2.6.2 制动过程能耗

制运过程中的动力电池充电能耗、机械制动能耗、基本运行阻力能耗、电机能耗、DC/AC 逆变器能耗、辅助系统能耗可参见式(12)~式(17)。

满足能量平衡关系:

$$E_{\text{kinetic}} = E_{\text{floss}} + E_{\text{DAloss}} + E_{\text{mloss}} + E_{\text{mecloss}} + E_{\text{re}} \quad (19)$$

式中:

E_{re} ——回收制动能量。

2.7 有轨电车系统效率

在牵引过程中,有轨电车系统效率为列车到达一定速度所具有的动能与动力系统提供的总能量之比。在制动过程中,制动能量被动力电池吸收,故有轨电车系统效率 η_{sys} 定义为电池吸收能量与动能之比。动力系统、WPT 系统与动力电池向车辆牵引系统、辅机系统供电。

$$\eta_{\text{sys}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{kinetic}}}{P_{\text{wireless}} + \frac{P_{\text{bat}}}{\eta_{\text{wireless_avg}} \eta_{\text{dis}} \eta_{\text{chg_avg}}}}, & \text{牵引时} \\ \frac{P_{\text{bat}}}{P_{\text{kinetic}}} = \eta_{\text{chg}} \eta_{\text{moter}} \eta_{\text{DC/AC}}, & \text{制动时} \end{cases} \quad (20)$$

式中:

P_{kinetic} ——列车到达一定速度所需要的功率;
 $\eta_{\text{wireless_avg}}$ ——WPT 系统效率;
 $\eta_{\text{chg_avg}}$ ——动力电池平均充电效率。

3 有轨电车能耗的仿真计算

有轨电车能耗分析需要对其动力系统各项能耗进行仿真计算。本文根据车辆具体参数建立有轨电车动力学模型,结合实际运行工况与动力系统各项能耗搭建仿真模型,对各项能耗进行仿真研究。图 5 为车辆动力控制系统仿真模型,图 6 为仿真得到的车辆动力系统的能耗功率。

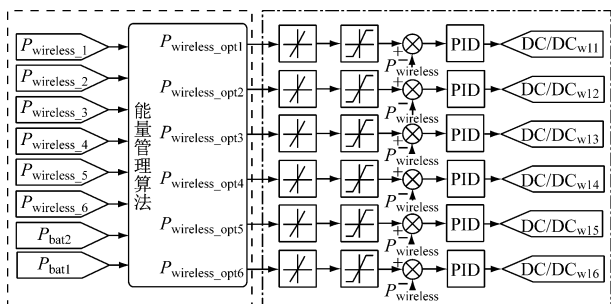


图 5 车辆动力控制系统模型

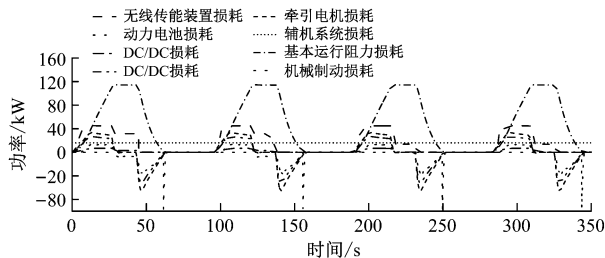


图 6 车辆各项动力能耗功率

分析各项能耗发现,辅助系统及运行阻力能耗较多,为车辆主要能耗。其中,辅助系统能耗包括车辆照明空调及控制系统的总能耗,运行阻力能耗由车辆运行风阻能耗及车辆滚动摩擦阻力能耗组成。其余能耗主要为 WPT 系统能耗、电机能耗、DC/AC 逆变器能耗及 DC/DC 变换器能耗。在车辆制动过程中,机械制动在车速降到 5 km/h 后才施加,虽其能耗占比较小,但其功率瞬时值却比较大。而较大的机械制动瞬时功率对闸瓦的影响非常严重。因此,在制动时优先使用电制动能有效延长闸瓦的使用寿命。

图 7 为有轨电车各项能耗。

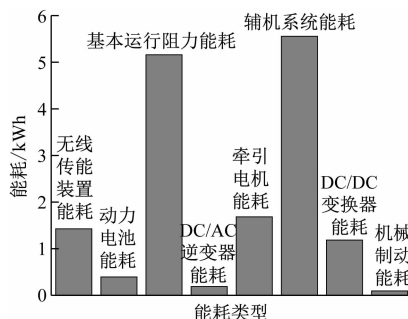


图 7 有轨电车各项能耗

由图 7 可知,在列车运行过程中,列车能耗的主要影响因素为空调及照明等辅助设备引起的能耗,

其次为车辆运行基本阻力引起的能耗。这 2 种能耗占列车总能耗的 2/3 左右。其余能耗均为车辆动力系统能耗。可以看出,在动力系统能耗中,WPT 系统能耗与牵引电机能耗占主要部分。

4 结语

本文搭建了列车动力系统仿真模型,结合有轨电车实际运行参数及各动力系统实际效率对基于无线传能系统与动力电池供电的有轨电车运行能耗进行仿真研究。研究表明:列车运行过程中影响列车能耗的主要因素为辅助系统能耗,大约占总能耗的 34% 左右;列车第二大能耗为车辆基本运行阻力引起的能耗,约占总能耗的 29% 左右;这两项所占能耗超过车辆总能耗的 2/3;其余能耗均为车辆动力系统能耗;在所有动力系统器件产生的能耗中,WPT 系统能耗与牵引电机的能耗占主要部分。

参考文献

- [1] 张献,杨庆新,陈海燕,等. 电磁耦合谐振式传能系统的频率分裂特性研究[J]. 中国电机工程学报,2012(9): 167.
- [2] LIU C, HU A P, WANG B, et al. A capacitively coupled contactless matrix charging platform with soft switched transformer control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 249-260.
- [3] 麦瑞坤,李勇,何正友,等. 无线电能传输技术及其在轨道交通中研究进展[J]. 西南交通大学学报,2016(3): 446.
- [4] 李勇,麦瑞坤,马林森,等. 一种双初级线圈并绕的感应电能传输系统及其功率分配方法[J]. 中国电机工程学报,2015(17): 4454.
- [5] 童军,杨星晨. 无线电能传输系统最大输出功率点分析[J]. 电力电子技术,2019(7): 63.
- [6] 封阿明. 基于全桥谐振变换器的非接触电能传输系统基本特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2011.
- [7] 张献,杨庆新,陈海燕,等. 电磁耦合谐振式传能系统的频率分裂特性研究[J]. 中国电机工程学报,2012(9): 167.
- [8] 戴欣,余奎,孙跃. CLC 谐振型感应电能传输系统的 H_{∞} 控制[J]. 中国电机工程学报,2010(30): 47.
- [9] ZHONG W X, CHI K L, HUI S Y. Wireless power domino-resonator systems with noncoaxial axes and circular structures[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4750-4762.

(收稿日期:2019-10-15)