

储能式有轨电车充电站布局优化研究^{*}

胡基贵 慕芳

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京//第一作者, 高级工程师)

摘要 车载储能装置与接触网搭配的混合供电方式已成为有轨电车供电技术的发展趋势。结合有轨电车线路实际条件与列车特征参数合理设计地面充电方案至关重要。提出了一种基于遗传算法的储能式有轨电车充电站布局优化方法。建立了有轨电车运行模型, 结合列车的区间运行过程对充电站布局进行分析。在此基础上, 依据充电站布局的优化目标和优化约束条件, 推导得到充电站布局的优化评价函数, 并结合实际有轨电车线路数据进行充电站布局优化仿真计算。在保证列车正常运行的情况下, 优化后的充电站数量仅为优化前的一半。仿真结果表明, 采用该优化方法能够极大地降低工程建设成本。

关键词 有轨电车; 充电站布局; 遗传算法

中图分类号 U482.1.9

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.05.004

Research on Layout Optimization of Charging Stations for Energy Storage Tram

HU Jigui, QI Fang

Abstract The hybrid power supply mode of vehicle energy storage device and catenary has become the development tendency in modern tram power supply technology. It is crucial to design the ground charging scheme reasonably, based on the actual line conditions and train characteristic parameters. A layout optimization method of the charging stations for energy storage tram based on genetic algorithm was proposed. Tram operating models were established. The layout of charging stations was analyzed based on the interval operation process of the train, on the foundation of which, according to the optimization objectives and constraints of the charging station layout, the optimization evaluation function of the charging station layout was then derived. Combined with the actual tram line data, optimization simulation of the charging station layout was calculated. In the premises of ensuring the normal operation of the train, the number of charging stations after optimization is only half of that before optimization. The simulation results have demonstrated great reduction in construction cost of the project.

Key words tram; layout of ground charging stations; genetic algorithm

Author's address CRRC Nanjing Puzhen Vehicle Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

传统接触网供电方式的有轨电车对线路净空高度有着严格要求, 不仅在市中心路段存在一定的安全隐患, 还会对未来线网的拓展产生不利影响。因此, 车载储能装置与接触网搭配的混合供电方式成为了当前有轨电车的发展趋势。目前, 国内外对于车载储能装置与接触网搭配的混合供电方式下的充电站布局研究还在起步阶段, 虽然科学合理地建立了现代有轨电车运行仿真模型, 但是在对充电站布局的优化研究中仅采用遍历法, 显然对于长线路并不适用。为此, 应当借助优化算法加快最优充电站布局的研究。本文在现有研究的基础上, 依据对充电站布局的优化目标和优化约束条件的分析, 推导得到充电站布局的优化评价函数, 建立了基于遗传算法的储能式有轨电车充电站布局优化方法, 为工程项目中地面充电方案的设计提供数据与理论支撑, 具有较高的使用价值和应用前景。

1 储能式有轨电车运行仿真建模

在运用遗传算法对充电站布局进行优化时, 需要依据储能式有轨电车运行模型对特定的充电站布局进行运行仿真评估。依据储能式有轨电车运行特征建立其运行仿真模型, 模型的总体结构如图1所示。

储能式有轨电车运行仿真模型的输入参数包括列车运行参数、线路数据、列车属性数据、超级电容属性数据以及充电机属性数据。其中, 列车运行参数包括牵引加速度、制动加速度、冲击极限、最大运行速度等, 用于控制列车的运行状态; 线路数据包

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201003-007)

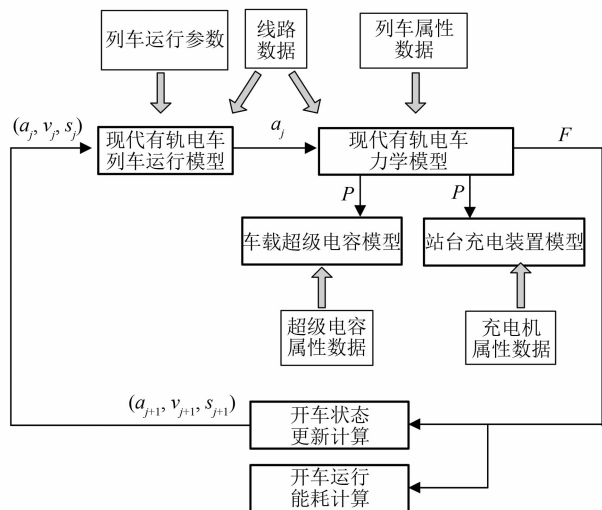


图1 储能式有轨电车运行仿真模型总体结构图

括坡道数据、弯道数据、限速数据、接触网布局以及地面充电方案,用于确定列车的运行环境;列车属性数据包括基本阻力系数、弯道阻力系数、电机最大牵引制动力等,用于建立列车的动力学模型;超级电容属性数据和充电机属性数据用于列车电气功率及运行能耗的计算。

储能式有轨电车运行仿真流程如下:假设当前为第 j 个仿真步长,当前列车的运行时间为 t_j ,速度为 v_j ,位移为 s_j ,即状态量为 (t_j, v_j, s_j) ;工况状态机依据预先输入的列车运行参数、线路数据以及当前列车的运行状态计算出列车目标加速度为 a_j ;列车模块根据输入的目标加速度 a_j 计算电机转矩、电机转速、轮端牵引制动力以及电机功率等参数,同时依据接触网段架设情况以及地面充电方案确定功率流向及各部分的电气功率;列车能耗计算模块依据列车及超级电容的电气功率进行能耗计算并统计当前区间各项能耗数据;列车状态更新计算模块依据仿真步长 Δt 计算出列车的速度为 v_{j+1} ,位移为 s_{j+1} ,即状态量更新为 $(t_{j+1}, v_{j+1}, s_{j+1})$;之后开始第 $j+1$ 个仿真步长的计算。

2 储能式有轨电车充电站布局分析

2.1 充电站布局优化约束条件分析

充电站布局优化的主要约束条件为超级电容充放电电流约束和地面充电站数量及安装位置约束。

1) 超级电容充放电电流约束。列车牵引时的最大功率必须要小于等于超级电容所能提供的最

大功率,因此必须要限制超级电容的放电电流 I_{sc_out} 小于等于超级电容最大放电流 $I_{sc_out_max}$ 。此外,超级电容在充电时的电流 I_{sc_in} 必须要小于等于超级电容的短时最大充电电流 $I_{sc_in_max}$ 。

2) 地面充电站数量及安装位置约束。地面充电站的数量 N 须小于等于站台总数量 N_{total} 。

系统的优化目标是在满足以上约束条件下,安装最少的地面充电站,同时尽可能提高列车运行过程中的超级电容最低电压,以便保证较高的续航冗余。

综上所述,目标函数必须要满足以下几点:确保列车能在全线正常运行;设置较少的充电站;确保较高的续航冗余。

2.2 充电站布局优化方法分析

1) 列车区间运行能力分析。以站台为分界对运行线路全线进行区间划分,假设全线共设有 M 座车站,则区间数量为 $M-1$;假设当前列车正在从第 $i-1$ 站向第 i 站行驶,即在区间 $i-1$ 内行驶。 $E_{i-1, start}$ 为列车从 $i-1$ 站出发时的储能电量, $E_{i, end}$ 为列车抵达 i 站时的储能电量。

假定 P_i 为区间 i 的车辆续航情况,如果当前区段为接触网段,则 P_i 为1;如果当前区段为非接触网段,若列车在区间 i 内行驶的任意 t 时刻的储能电量 $E_{i, t}$ 大于等于0,则列车能够正常行驶过此区间, P_i 为1,否则 P_i 为0。

考虑到坡道对于列车运行能耗的影响,对充电站布局优化方法的研究不应该只考虑单个运行方向,应当综合考虑下行运行和上行运行,保证列车能在全线正常行驶,因此本优化方法中以一次连续的下行运行和上行运行为研究对象。

2) 充电站布局设置分析。假设当前线路共有 n 座车站,因为每站都只有安装或不安装充电装置的2个选项,则一共有 2^n 种选择。采用二进制编码方式,共计 n 位,1为设置充电装置,0为不设置充电装置,记充电站设置的总数为 x 。

3) 列车续航冗余能力分析。假设当前列车正在从 $i-1$ 站向第 i 站行驶,即在区间 i 内行驶, $E_{i-1, start}$ 为列车从 $i-1$ 站出发时的储能电量, $E_{i, end}$ 为列车抵达 i 站时的储能电量。 $E_{extra} = \min \{ E_{2, end}, E_{3, end}, \dots, E_{M, end} \} / E_{ess}$ (E_{extra} 为超级电容的能量最低点的百分比, E_{ess} 为超级电容额定有效能量)即为全线运行时车载储能能量最低点的百分值,当充电站数量不能减少时应该尽可能地提高 E_{extra} 的值以便

确保较高的续航冗余。

2.3 充电站布局优化目标函数分析

默认优化目标函数极大值点为最优解,依据 2.1 节和 2.2 节中的分析,优化目标为列车能够行驶过所有区间、充电站的数量最少且超级电容的能量最低点最大,因此优化目标函数由如下 3 部分组成:① $\sum_{i=0}^{2n_{\text{section}}} P_i (n_{\text{station}} + 1)$,其中 n_{section} 为区间数量, n_{station} 为待设充电站数量;② $-x$ (目标函数的数值越大则此地面充电方案越优秀,设置为 $-x$ 是作为惩罚因子,设置的充电站数量越多则此地面充电方案越低劣);③ E_{extra} 。

第一部分用于保证列车能够行驶过上下行所有的区间。因为列车是连续的上下行运行,故区间数量为 $2n_{\text{section}}$ 。用 $P_i (n_{\text{station}} + 1)$ 表示区间 i 的车辆续航情况,其目的是优先保证列车能够行驶过所有的区间,之后再考虑减少充电站的设置数量和增加续航冗余。

第二部分用于确保设置较少数量的充电站。第三部分用于确保列车具有较高的续航冗余,如果超级电容能量最低点为其额定有效能量的 20%,则 E_{extra} 为 0.2。使用百分值的目的是不对前两部分目标函数产生影响,仅在充电站数量无法再进一步减少的情况下再考虑提高 E_{extra} ,从而能在充电站数量相同的布局方案中寻找更优布局。

综上分析,优化目标函数的表达式为:

$$f(x) = \sum_{i=0}^{n_{\text{section}}} P_i (n_{\text{station}} + 2) - x + E_{\text{extra}}$$

$(0 \leq x \leq n_{\text{station}})$

当函数 $f(x)$ 取得最大值时,即车辆能够行驶过所有区间、充电站的数量最少且超级电容的能量最低点最大,即取得充电站的最优布局。

3 储能式有轨电车充电站布局优化方法

现有充电站布局的优化研究中均采用遍历法,遍历法仅适用于站台数较少的短线路,对于站台数较多的长线路并不适用,应当借助优化算法加快最优充电站布局的搜索速度。

本文拟采用遗传算法优化储能式有轨电车充电站布局。遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。

采用遗传算法对充电站的布局进行遗传编码,具体的编码规则、适应度函数、选择因子、交叉算子、变异概率设置如下:

- 1) 编码规则。假设当前线路共有 n 座车站,采用二进制编码方式,共计 n 位,1 为设置充电装置,0 为不设置充电装置。
- 2) 适应度函数。选取 2.3 节中的优化目标函数作为适应度函数。
- 3) 选择因子。采用轮赌法。
- 4) 交叉算子。采用单点交叉,交叉率为 0.50~0.95。
- 5) 变异概率。采用单点变异,变异率为 0.01~0.20。

遗传算法迭代流程如图 2 所示,其中 t 为迭代次数, P_t 即为第 t 代种群。

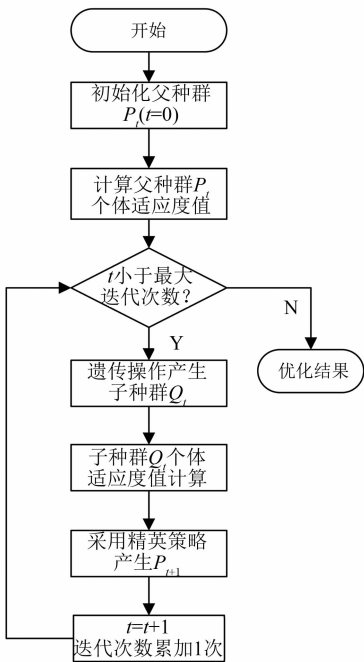


图 2 遗传算法迭代过程

4 储能式有轨电车充电站布局优化仿真分析

4.1 仿真计算

采用前文中所提出的充电站布局优化方法,针对某现代有轨电车运行线路的充电站布局进行仿真。此线路全线共设有 10 座车站,运行列车特性参数及超级电容特性参数如表 1 及表 2 所示,原有的充电站布局如表 3 所示。工程设计时,所有车站站台都设有充电站,列车停站时为车载储能装置充电。

表 1 有轨电车列车特性参数

参数名称	数值
整车质量/t	48
动车数量/辆	2
逆变器效率/%	95
最高牵引电压/V	900
拖车回转质量系数	0.1
能量回收系数	1
牵引最大粘着系数	0.2
制动最大粘着系数	0.2

表 2 超级电容特性参数

参数名称	数值
额定容量/F	583
额定储存能量/kWh	19
工作区间有效能量/kWh	9.5
最高工作电压/V	547
最低工作电压/V	410
能量转换效率/%	97
最大充电电流(充电时间为 30 s)/A	600
最大放电电流(放电时间为 30 s)/A	600

表 3 优化前后有轨电车线路充电站布局对比

车站站台	优化前布局	优化后布局
A	设置	设置
B	设置	设置
C	设置	不设置
D	设置	设置
E	设置	不设置
F	设置	不设置
G	设置	设置
H	设置	不设置
I	设置	不设置
J	设置	设置

仿真时,设置遗传代数为 30 代,每代种群有 10 个个体,交叉率为 0.7,变异率为 0.1;考虑到列车安全行驶的需要,规定超级电容剩余有效能量不能低于 35%。仿真结果如图 3 所示。

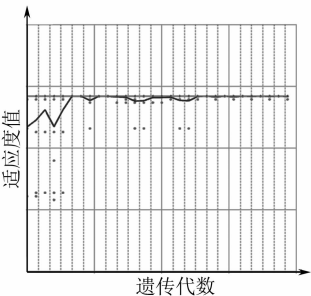


图 3 有轨电车充电站布局优化仿真计算结果

由仿真结果可知,最佳排布的二进制编码为 1101001001。对优化前后充电站布局进行对比,结

果如表 3 所示。

4.2 仿真结果验证

为了对优化仿真得到的最佳排布进行验证,保持车辆的特性数据及线路参数等数据不变,按照表 3 中的最优充电站排布分别对上行线和下行线进行仿真,优化前后车载超级电容运行状态对比如表 4 和表 5 所示。

表 4 下行线优化前后超级电容运行状态对比

站台	优化前		优化后	
	电容 SOC/%	电容电压/V	电容 SOC/%	电容电压/V
A	100.00	547.000	100.00	547.000
B	88.37	532.883	88.37	532.883
C	84.31	527.858	84.29	527.834
D	80.24	522.782	74.29	515.273
E	77.54	519.386	71.49	511.695
F	75.42	516.698	63.52	501.374
G	75.27	516.509	57.57	493.532
H	73.01	513.637	55.03	490.158
I	70.30	510.162	46.53	478.656
J	67.68	506.785	38.19	467.082

注: SOC 为超级电容器的荷电状态

表 5 上行线优化前后超级电容运行状态对比

站台	优化前		优化后	
	电容 SOC/%	电容电压/V	电容 SOC/%	电容电压/V
J	100.00	547.000	100.00	547.000
I	95.44	541.507	95.44	541.507
H	91.92	537.229	85.45	529.275
G	88.38	532.892	76.62	518.223
F	87.67	532.018	75.13	516.335
E	84.35	527.911	66.73	505.558
D	80.04	522.532	55.86	491.261
C	76.75	518.388	51.31	485.151
B	71.53	511.744	46.11	478.073
A	62.14	499.570	36.71	465.005

注: SOC 为超级电容器的荷电状态

由表 4、表 5 可知,优化后下行线和上行线的超级电容电压最低点分别为 467.082 V 和 465.005 V,此时的超级电容能量分别为其额定有效能量的 38.19%和36.71%,符合有效能量最低点不低于其额定有效能量 35%的要求。优化前需要设置 10 台充电装置,优化后仅需设置 5 台充电装置。保证列车正常运行的同时极大地降低了项目成本,证明了充电站布局优化方法具有一定的工程指导意义。

5 结语

本文在分析储能式有轨电车运行原理的基础上

(下转第 22 页)

受 1 463 V 正向导通电压的晶闸管 T_2 受到触发开始正向导通,直到接触器常开触点闭合时才截止,持续导通时间近似等于 10.000 ms。

晶闸管的浪涌电流 I_{TSM} 定义为 10.000 ms 持续时间内正向通过晶闸管中电流的峰值。由表 4 可知,流过晶闸管 T_2 中最大的电流为 33.7 kA,所以可以取晶闸管 T_2 的浪涌电流 $I_{TSM2} = 33.7$ kA,其断态不重复峰值电压 $U_{DSM2} = 1\ 463$ V,其反向不重复峰值电压 $U_{RSM2} = 195$ V;晶闸管 T_1 和晶闸管 T_2 的工作过程相同,流过晶闸管 T_1 最大的电流为 130 A,所以可以取晶闸管 T_1 的浪涌电流 $I_{TSM1} = 130$ A,其断态不重复峰值电压 $U_{DSM1} = 195$ V,其反向不重复峰值电压 $U_{RSM1} = 1\ 463$ V。

4 结语

在供电臂接触网的各种短路状态下,OVPD 保护装置都会动作,通过 OVPD 装置短接保护点对地电位能够达到限制钢轨对地电位的目的。任何一种形式的接触网短路都是危险的,OVPD 保护装置处电位最低达到 185 V,最高达到 1 463 V,这对于人身安全是致命的威胁。

OVPD 保护装置中起短接作用的有接触器的主触点和晶闸管,其中晶闸管工作方式是采用两个并联的晶闸管反接。由于大功率的晶闸管成本相对

较高,所以通过电路模拟仿真得出晶闸管两端的断态不重复峰值电压 U_{DSM} 、反向不重复峰值电压 U_{RSM} 和流过晶闸管的浪涌电流等参数,可以在考虑安全系数情况下正确选择晶闸管型号。

接触网短路情况下,决定短路电流大小的因素有接触网纵向电阻、钢轨纵向电阻、钢轨对地过渡电阻和变压器容量等,但是在正极负极、正极对地短路情况下,上述因数对短路电流大小影响不大,OVPD 保护装置都会动作。维护运行人员要按照安全规范定期检查接触网整流器正极和负极,正极和排流网(地)之间的绝缘,确保出现不出现极端的短路故障,保证接触网正常运行。

参考文献

- [1] 潘宇辉.浅谈地铁钢轨过渡电阻的测试[J].技术与市场,2011,18(4): 46.
- [2] 胡传,毕林.地铁轨道系统电阻对杂散电流的影响分析[J].现代城市轨道交通,2018(10): 47.
- [3] 于松伟,杨兴山,韩连祥,等.城市轨道交通供电系统设计原理及应用[M].成都:西南交通大学出版社,2008.
- [4] 陈超录,杨洋,解培金,等.城市轨道交通钢轨电位限制技术研究[J].机车电传动,2018(6): 97.
- [5] 北京市地下铁道科学技术研究所.地铁杂散电流腐蚀防护技术规程:CJJ 49—1992[S].北京:中国标准出版社,1992.

(收稿日期:2019-08-10)

(上接第 18 页)

上对有轨电车充电站布局进行了初步研究,提出了一种基于遗传算法的充电站布局优化方法。结合实际有轨电车线路数据的仿真分析结果,证明了该优化算法具有良好的收敛性以及可靠性。研究成果为科学选择充电站布局提供了可靠的数据及理论支撑,具有一定的工程意义。

参考文献

- [1] 李雪飞,王占国,马泽宇.基于锂离子电池的双动力动车组电池系统设计[J].中国铁路,2013(7): 73.
- [2] 宋强.低地板轻轨列车混合动力储能系统研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [3] 陈彦秋,宋鹏云,张继业.混合动力列车运行仿真平台的研究与开发[J].计算机仿真,2014(2): 221.
- [4] 蒋捷.现代有轨电车载系统的仿真研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [5] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach[J]. Applied Energy, 2015, 139: 151.

- [6] 胡远江.混合动力列车车载储能与地面充电方案系统优化研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [7] 单金生,吴立锋,关永,等.超级电容建模现状及展望[J].电子元件与材料,2013(8): 5.
- [8] 卢怡.储能式有轨电车电源系统的参数匹配与能量管理研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [9] 杨奇,胡文斌,余轩,等.现代城市储能式有轨电车运行建模与仿真研究[J].电气化铁道,2019(3): 72.
- [10] 雷霄.有轨电车燃料电池/超级电容混合动力系统建模与仿真[D].成都:西南交通大学,2015.
- [11] 滕靖,潘炜维,王园园,等.现代有轨电车一体化仿真系统设计与实现[J].都市轨道交通,2018(3): 32.
- [12] 吴杰.混合动力动车组动力集成方案设计与评估仿真平台[D].成都:西南交通大学,2015.
- [13] 陈磊.基于列车运行仿真的 ATO 速度命令节能设计研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [14] 胡远江.混合动力列车车载储能与地面充电方案系统优化研究[D].成都:西南交通大学,2017.

(收稿日期:2020-01-21)