

基于牵引计算的储能式轨道交通列车牵引负载特性与模型技术研究*

赵海波¹ 袁 月² 肖冰语¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 北京交通大学电气工程学院, 100044, 北京//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 阐述了储能式轨道交通列车的牵引计算数学模型, 对列车牵引负载特性进行了分析。通过构建列车牵引负载仿真模型得到了列车运行工况曲线, 为列车的正向设计提供了参考依据。

关键词 储能式轨道交通列车; 牵引计算; 牵引负载特性; 数学模型

中图分类号 U260.13⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.02.003

Research on Traction Load Characteristics and Model Technology of Energy Storage Rail Transit Train Based on Traction Calculation

ZHAO Haibo, YUAN Yue, XIAO Bingyu

Abstract The traction calculation mathematical model of energy storage rail transit train is described and train traction load characteristics are analyzed. The train operation curve is obtained by constructing train traction load simulation model, which provides a basis for the forward design of the train.

Key words energy storage rail transit train; traction calculation; traction load characteristics; mathematical model

First-author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

常规的轨道交通车辆通过接触网获得能量。但接触网系统的建设和施工过程复杂, 使用和维护成本高, 因此, 储能式轨道交通车辆, 特别是低地板车辆在近几年得到了很大的推广和应用。储能式轨道交通车辆采用在站内或库内充电的运行方式, 在保证车辆正常运行的同时, 能够有效减少接触网等基础设施的建设和维护成本。但是储能式的供电方式因需要在轨道交通车辆上加装电池、电容, 或电池+电容等储能系统, 必然带来车辆质量增加、

维修维护难度大、车辆成本增加等问题。因此, 在满足运用需求, 特别是符合运行图计划的前提下, 设计合理的储能系统显得尤为重要。

本文对基于牵引计算的储能式轨道交通车辆的牵引负载特性与模型技术进行研究, 并对牵引计算、建模、运行约束条件的确定方式和依据进行了论述。

1 轨道交通列车牵引计算数学模型

1.1 牵引计算输出参数

根据 TB/T 1407—1998《列车牵引计算规程》, 通过建立数学模型达到对列车进行受力分析并且准确计算的目的。列车牵引计算所需要的基本参数为: AW3(满载)时的车重, 惯性系数(车重的占比), 最高运行速度, 轮径, 编组数, 轴数, 最大截面积, 电机侧变流器效率, 储能系统效率, 电机效率。

1.2 列车受力分析

列车受到的外力主要包括阻力、列车牵引力和制动力。本文将围绕这 3 种力进行牵引计算。

1.2.1 阻力

列车行驶过程中的基本阻力为:

$$F_0 = 6.4 m + 130 n + 0.14 mv + (0.46 + 0.006 5(N - 1))Av^2 \quad (1)$$

式中:

F_0 ——基本阻力, kN;

m ——列车质量, kg;

n ——轴数, 根;

N ——编组数, 节;

v ——当前车速, km/h;

A ——车辆的最大截面面积, m²。

起动阻力为列车起动时才存在的基本阻力。

* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1201600)

当车速低于 5 km/h 时,起动阻力 F_q 为:

$$F_q = kmg \quad (2)$$

式中:

k ——单位起动阻力,取 5 N/kN;

g ——重力加速度。

坡道附加阻力 F_i 为:

$$F_i = img/1\,000 \quad (3)$$

式中:

i ——坡道度数,‰,上坡取正值,下坡取负值。

弯道附加阻力 F_r 为:

$$F_r = jmg/1\,000 \quad (4)$$

式中:

j ——单位曲线的附加阻力,kN。

$$j = 600/r \quad l \leq r \quad (5)$$

式中:

l ——列车长度,m;

r ——弯道半径,m。

综上所述,列车运行中的总阻力 F_f 为:

$$\begin{cases} F_f = F_q + F_i(i) + F_r(r), v \leq 5 \text{ km/h} \\ F_f = F_0(v) + F_i(i) + F_r(r), v > 5 \text{ km/h} \end{cases} \quad (6)$$

1.2.2 牵引力

牵引力指由动力装置产生的与列车运动方向相同的力,用 F 表示。牵引阶段牵引力一般可分为恒转矩区、恒功率区和自然特性区,相应的牵引力公式为:

$$\begin{cases} F_1 = m(1 + \lambda) \times a(1 + 0.05) + F_f \\ F_2 = F_1 v_1 / v_2 \\ F_3 = F_2 v_2^2 / v_3^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中:

F_1 ——恒转矩区列车的牵引力,kN;

F_2 ——恒功率区列车的牵引力,kN;

F_3 ——自然特性区列车的牵引力,kN;

λ ——列车的惯性系数;

a ——列车加速度, m/s^2 ;

v_1 ——恒转矩区列车的截止速度, m/s ;

v_2 ——恒功率区列车的截止速度, m/s ;

v_3 ——自然特性区列车的截止速度, m/s 。

1.2.3 制动力

制动力指由列车制动装置产生的与列车运动方向相反的力,用 B 表示。因制动力远大于运行阻力,所以列车在制动过程中主要靠制动装置产生的制动力降速。设列车在最高运行速度下的制动力等于当时的牵引力,先按照恒功率制动,直至制动

力增加到最大值并保持不变,此时列车处于恒转矩区。不同阶段的制动力为:

$$\begin{cases} B_1 = fm_d g \\ B_3 = F_3 \end{cases} \quad (8)$$

式中:

B_1 ——恒制动力;

B_3 ——列车从最高速开始制动时的制动力;

m_d ——动车质量;

f ——最大黏着系数。

1.2.4 牵引计算

恒转矩区列车的牵引功率 P_v 为:

$$P_v = F_1 v / 3.6 \quad (9)$$

列车电机牵引计算的结果如下:

$$\begin{cases} P = (P_v / Y) / \eta_g \\ N_n = 30 \times 60 \times \gamma / (3.6 \times D \times \pi) \\ N_m = 80 \times 60 \times \gamma / (3.6 \times D \times \pi) \\ T_n = P \times 30\,000 / (\pi N_n) \\ I_n = ((P \times 1\,000 / \cos \varphi) / \eta_m) / U_m / \sqrt{3} \\ I_L = ((P \times 2 \times 1\,000 / \eta_m) / \cos \varphi) / \eta_i / U_L \end{cases} \quad (10)$$

式中:

P ——电机牵引功率,kW;

N_n ——电机额定转速,r/min;

N_m ——电机最高转速,r/min;

I_n ——电机额定电流,A;

I_L ——网侧电流,A;

Y ——电机台数,台;

γ ——齿轮箱传动比;

D ——轮径,mm;

η_m ——电机效率;

η_g ——齿轮箱传动效率;

η_i ——变流器效率;

U_m ——电机额定电压,kV;

U_L ——网侧电压,kV;

T_n ——电机扭矩,Nm;

$\cos \varphi$ ——电机功率因素。

直流母线侧功率 P_{dc} 为:

$$P_{dc} = (P_v / \eta_m) / \eta_i + P_a \quad (11)$$

式中:

P_a ——辅助功率,kW。

在制动工况下,设利用最大黏着为 0.18;为减小施加制动力引起的纵向冲动,设列车在最高运行速

度下的制动力等于当时的牵引力 F_3 。当到达某一速度后列车开始以恒制动力制动,直至运行速度为 5 km/h 时机械制动逐渐代替电气制动。列车制动的计算公式如下:

$$\begin{cases} B_1 = 0.18 m_d g \\ B_3 = F_3 \\ V_2 = 70 B_3 / B_1 \\ a = B_1 / (m(1 + \lambda)) \\ P_v = B_1 V_2 / 3.6 \end{cases} \quad (12)$$

式中:

V_2 ——列车从最高速制动到恒制动力时对应的转折速度, m/s;

a ——制动减速度, m/s^2 。

电机制动的计算结果如下:

$$P = P_v \eta_g / Y$$

$$I = ((P \times 1000 \times \eta_m / \cos \varphi) / V_m) / \sqrt{3}$$

$$I_L = (P \times 2 \times 1000 \times \eta_m \times \eta_i / \cos \varphi) / V_L \quad (13)$$

式中:

I ——电机电流, A。

直流母线侧功率 P_{dc} 为:

$$P_{dc} = P_v \eta_m \eta_i + P_0 \quad (14)$$

式中:

P_0 ——电机制动功率, kW。

1.3 列车运行工况分析

列车在既定线路下运行时会根据限速条件和牵引特性改变自身的运行状态,即在相应位置合理地转换列车的运行工况,从而在满足运行要求下完成全线路列车的正常和安全运行。根据列车所受阻力、牵引力和制动力的不同,列车的运行工况主要分为 3 种,分别是牵引工况、惰行工况和制动工况。列车典型运行图如图 1 所示。

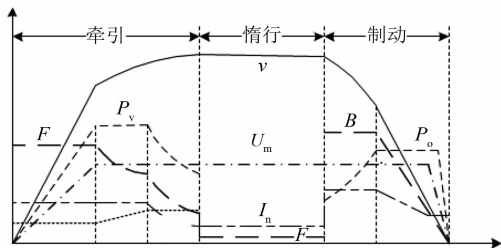


图1 轨道交通列车典型运行工况图

2 列车牵引负载特性研究

列车运营商通常会根据客流信息和安全运行

要求,对列车的运行加速度、减速度、最高速度、平均旅行速度,以及在不同损失动力条件下的坡道启动提出要求。列车运行特性曲线的设计往往需要满足以上要求。列车运行特性曲线往往决定了如何设计牵引电机、变流器以及储能供电系统的能量配置,因此,只有先设计列车运行特性曲线,才能确定列车牵引电机的牵引以及制动曲线^[1]。

列车的运行特性曲线通常由很多因素决定,例如列车运行的最高限速、起动加速度和制动减速度等。其中,加速度的大小主要由牵引力决定,减速度的大小主要由制动力决定。这两个因素是影响列车运行的主要指标,一定程度上决定了列车运行的安全稳定。考虑到乘客的乘车舒适度,加速度的取值不宜过大,一般以不超过 $(1/8)g$ 为设计原则。考虑到列车制动过程中的驾驶安全,减速度的取值同样不宜过大,但可以比加速度的最大值稍大,一般情况下介于 1.3 m/s^2 和 1.4 m/s^2 之间;在紧急制动时可以允许其值略大一些,通常介于 2 m/s^2 和 3 m/s^2 之间。

设某型号轨道交通列车的最高运行速度为 70 km/h。在牵引工况下,列车先后工作于恒转矩区、恒功率区和自然特性区,其中恒转矩区牵引力的大小围绕需要的牵引加速度进行设计,对应的速度约为 0~30 km/h,且在满足运行需求条件下可以结合实际情况加以调整。设计恒功率区和自然特性区时,需分别考虑列车平均旅行速度和最高运行速度下对列车加速能力的要求。基于以上分析和上述牵引计算绘制如图 2 所示的列车牵引特性曲线,其中,阻力主要包括起动阻力和运行阻力。

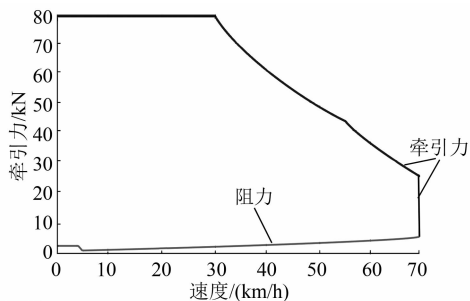


图2 列车牵引特性曲线

列车制动特性曲线绘制时需保证列车的最大制动力能够利用列车与轨面间的最大黏着力。设计列车在最高运行速度下的制动力到最大值时可以遵循以下两种方式,分别是按恒功率曲线设计以及按自然特性曲线设计。按恒功率曲线设计时,列

车从最高运行速度到最大制动力期间,可控制制动功率的大小保持不变,且高速下列车的初始制动力较小,可以减小施加制动力引起的纵向冲动,但制动力达到最大值所需的时间较长;按自然特性曲线设计时,可缩短列车从最高速度到最大制动力的时间,与此同时制动功率会不断增加,当制动力达到最大值时对应的制动功率亦达到最大值。实际中可以根据列车运行需求决定采用恒功率曲线还是自然特性曲线进行设计。本文主要采用恒功率曲线的方式设计列车的制动特性曲线,如图3所示。图3中,当车速较低(低于5 km/h)时,机械制动逐渐代替电气制动。

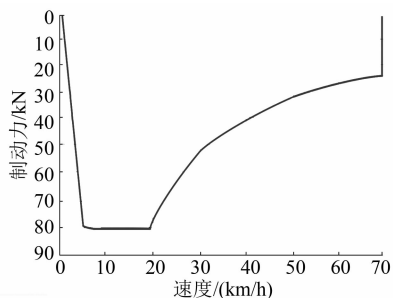


图3 列车制动特性曲线

列车在满足全工况运行的线路上按照设计的牵引特性曲线和制动特性曲线运行时,先从站内静止起动,在最大牵引力下逐渐加速至最高速度,然后维持最高运行速度不变,最后在进站停车前按照自然特性曲线方式在较短时间内达到最大制动力,然后降低车速直至停车。

研究列车的牵引负载特性有助于分析列车在实际线路运行下的需求,根据需求设计出列车的牵引特性曲线和制动特性曲线,最后在满足列车运行和电气性能要求的前提下,结合列车自身参数和运行线路数据构建列车牵引负载模型。

对列车的运行曲线进行模拟,模拟条件如下:

1) 列车的运行过程按照牵引工况、惰行工况和制动工况依次运行,且列车以最大牵引力运行工况运行。

2) 在牵引工况下,列车速度逐渐增加,此时列车受阻力(起动阻力/运行阻力/坡道阻力/弯道阻力)和牵引力作用。在惰行工况下,列车保持匀速行驶,此时列车所受牵引力等于阻力,合力为零。在制动工况下,列车速度逐渐减小,此时列车受阻力(运行阻力/坡道阻力/弯道阻力)和制动力作用。

3) 当两站距离较远时,列车起动后按照设定牵

引力逐渐加速至列车的最高运行速度,然后保持这一速度匀速运行,最后按照设定制动力进行减速,直至到站时速度刚好为零;当两站距离较近时,这样的线路条件不允许列车起动后加速至最高运行速度,只能加速至某一设定速度,同时为了尽可能满足舒适性、稳定性的运行要求,列车还将以这一速度匀速运行一段时间,再通过制动力进行减速,直至到站时速度刚好为零。

4) 列车在过弯道时应提前制动减速,使其进入弯道的速度不大于弯道的最高限速。列车最高限速随着弯道半径的减小而降低,过弯道后列车再进行加速。

3 列车牵引负载模型构建

基于前述对牵引计算理论基础的研究,以及对列车特性曲线的设计和运行曲线的模拟,对列车牵引负载模型进行了构建。

3.1 仿真模块的需求

构建列车牵引负载模型的主要目的是将列车的牵引计算独立化和便捷化,利用算法编写将公式固定化,实现对于不同列车和运行线路,仅需要更改仿真界面的参数即可完成牵引计算^[2],避免重复性计算,方便后续对列车储能供电系统的设计和控制展开研究。在构建模型时主要考虑以下需求:

3.1.1 数据需求

列车数据主要包括基本参数和特性曲线两部分。其中,基本参数具体指列车质量、列车编组数、变流器效率、电机效率、齿轮箱传动效率、辅助功率、基本阻力系数等;特性曲线包括牵引曲线和制动曲线,主要指牵引力特性数据和制动力特性数据。

线路数据指列车实际运行线路上的各个属性参数,包括区间限速和线路实际数据。其中线路参数一般包括坡道数据、弯道数据以及车站数据等。

3.1.2 功能需求

列车牵引负载模型满足输入界面管理、运行仿真计算、输出功率流等基本功能,具体包括以下几个方面。

1) 合理的界面显示与操作功能。数据输入作为完成牵引计算的根本,应具备编辑和修改功能,满足方便手动设置的基本要求,便于对不同列车及其所运行的不同线路进行参数更改,为后续的运行仿真计算做好准备。

2) 仿真计算功能。将列车相关的牵引计算过

程通过编程语言写入仿真模块中,使其能够进行列车的牵引计算。牵引计算内容包括列车运行距离、运行时间、需求功率等。

3) 结果输出功能。仿真模型应能实现根据列车的参数和运行要求计算出负载的需求功率这一最终目标,以便开展后续研究。

3.1.3 性能需求

列车牵引负载模型应具备精确性,即在进行列车牵引计算过程中应确保仿真计算的可靠性。仿真计算的基础是列车的基本参数和运行线路数据,因此需保证数据的准确性;仿真计算的结果受仿真步长的影响,仿真步长越小,对应的计算结果越准确,反之则越不准确,但仿真步长影响软件的计算速度,因此需结合实际在这两者间加以平衡。

如图4所示为列车牵引计算的流程图,该流程图基本阐述了构建列车牵引负载模型的思路。

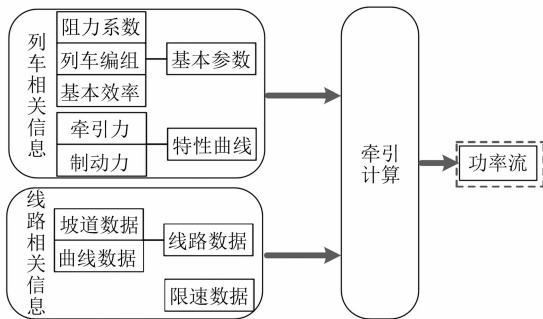


图4 列车牵引计算流程图

3.2 仿真结果

基于列车牵引计算数学模型和对列车运行工况的分析,在仿真环境中搭建列车牵引负载模型^[3-4]。模型参数输入界面截图如图5所示。

结合列车参数,在平均站间距为600 m的线路上进行循环工况下的牵引计算,得到列车的功率需求曲线,如图6所示。

4 结语

“安全、可靠、绿色、智能”已经成为轨道交通车辆可持续发展的主要方向^[5]。如何选取合适的牵引系统和制动系统参数决定了列车运行的舒适性和

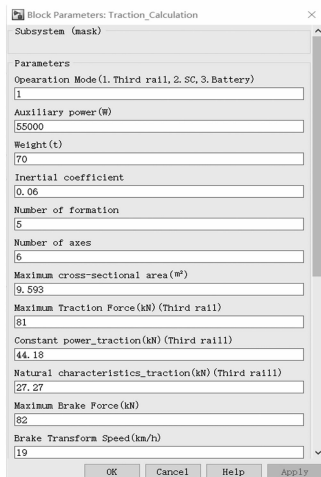


图5 模型参数输入界面截图

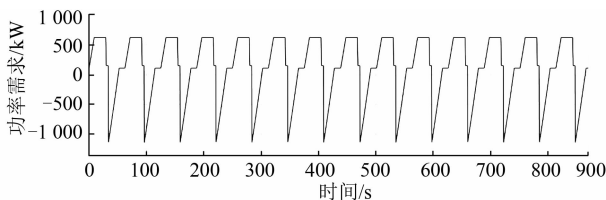


图6 列车功率需求曲线

经济性。储能式列车在降低基础设施建设成本和周期的同时,必然会牺牲列车的质量、设备布局等性能,因此,通过分析负载特性并建立相对固化的模型,通过计算评估列车的运行性能,能够有效地提升列车的设计水平。

参考文献

- [1] 李哲峰. 100%低地板车牵引传动系统分析与控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [2] 邱国俊. 列车牵引计算及操纵示意图计算机软件的开发[J]. 现代信息科技,2018(6): 107.
- [3] DIAO L J, DU H Q, SHU Z, et al. A comparative study between AI-HM and SPD-HM for railway auxiliary inverter with pulsating DC link[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5816.
- [4] DIAO L J, WANG L, DU H Q, et al. AI-HM based zero portion effects and phase-shift optimization for railway auxiliary inverter with pulsating DC-link[J]. IEEE Access, 2017, 5: 7444.
- [5] 赵海波,李雪昆,付丽. 轨道客车节能技术研究与应用[J]. 城市轨道交通研究,2019(2): 112.

(收稿日期:2020-09-05)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址:tougao.umat1998.com