

# 连续线路条件下高速列车负载模拟平台

李珂 方晓春 杨中平 易泽宇

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

**摘要:** 列车牵引电机负载模拟系统是为了在实验室条件下, 研究列车牵引电机的运行特性, 电传动系统的控制方法而提出的。但一般的负载模拟平台仅能模拟单一情况下或简单线路条件下的运行情况, 本文应用 CAN 总线在原有的负载模拟平台的基础上实现与上位机的互联, 通过上位机的列车运行仿真系统, 控制交流电机负载模拟平台的运行, 解决了原有平台数据输入不便的问题, 并能利用负载模拟平台模拟多种工况及线路条件下列车运行过程, 能够满足系统控制及实验要求。

**关键词:** 列车运行仿真 CAN 总线 负载模拟

## 1 引言

高速列车运行仿真平台是利用列车信息及线路信息对列车的运行状态进行仿真计算, 通过对列车每个时刻的受力分析模拟计算出列车在线路中的运行状态<sup>[1]</sup>。列车牵引电机负载模拟系统是为了在实验室条件下研究列车牵引电机的运行特性和传动系统的控制方法而提出的。其利用两台对拖的电机, 通过模拟列车在不同运行工况下的负载变化, 可以得到相应工况下传动系统中关键物理量的变化, 有利于牵引传动系统及电机控制的研究。但原有的负载模拟平台在模拟过程中一次仅能模拟一种线路情况, 或有限的几种工况, 不能连续的大范围模拟列车在线路运行中的情况, 若要进行连续线路多种线路情况下的模拟运行, 则需要结合运行仿真平台的列车运行仿真计算结果。

本文利用列车运行仿真平台通过列车牵引计算, 计算出列车的实时工况, 并利用 CAN 总线通信技术, 将列车运行的工况传送到负载电机及牵引电机的控制部分, 利用仿真平台计算出的工况数据控制负载模拟平台的运行, 使负载模拟平台能够完整的模拟整条线路的运行工况。这在分析电机能耗, 容量配置, 及变流器温升, 牵引电机控制方法等诸多与牵引传动系统相关的研究中都具有重要的作用。

## 2 列车运行仿真平台

列车在运行过程中主要受牵引力、制动力和阻

力的影响, 其中阻力又可以细分为基本阻力与附加阻力<sup>[2]</sup>。

### 2.1 列车牵引力和制动力特性

现代电机控制多采用矢量控制, 电机输出转矩的最大值与电机转速相关, 因此列车牵引力及制动力均与列车速度相关, 这里进行简化认为列车的牵引力  $F(v)$  为所有轮轴所产生的牵引力的总和, 制动力  $B(v)$  为所有轮轴产生的制动力的总和。牵引力特性及制动力典型特性分别如图 1、图 2 所示。

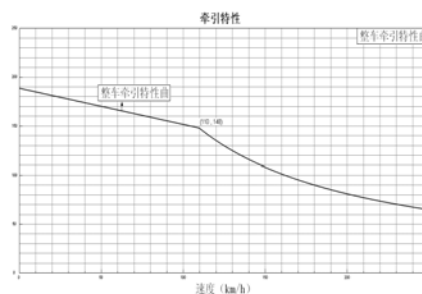


图 1 列车牵引特性

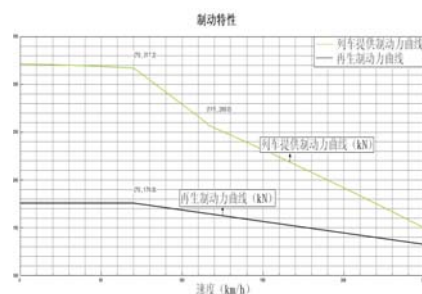


图 2 列车制动特性

### 2.2 列车阻力特性

列车在运行过程受到的阻力可分为基本阻力及附加阻力, 其中附加阻力包括坡道阻力、曲线附加

阻力、隧道附加阻力。列车的阻力计算一般采用经验公式，列车的基本阻力的通用形式如公式（1）

$$R_r = a + bv + cv^2 \quad (1)$$

其中， $v$  为列车速度 (km/h)， $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为阻力系数。

坡道附加阻力的经验公式如公式（2）

$$W_i = mg \cdot \sin \theta \quad (2)$$

式中  $W_i$  为坡道附加阻力(kN)； $m$  为列车质量(t)； $g$  为重力加速度(m/s)。

曲线附加阻力的经验公式如公式（3）：

$$W_r = \frac{600}{R} \quad (3)$$

式中  $W_r$  为单位重量曲线附加阻力(N/kN)； $R$  为曲线半径(m)。

隧道附加阻力的经验公式如公式（4）所示

$$W_s = 0.00013L \quad (4)$$

式中  $W_s$  为单位重量隧道附加阻力(N/kN)；

因此列车单位重量附加阻力的计算可以用公式（5）来表示<sup>[3]</sup>：

$$W_j = W_i / mg + W_r + W_s \quad (5)$$

### 2.3 运行仿真

在得到列车运行阻力与牵引力的基础上利用牛顿第二定律得出列车的运动方程式，从而得到列车的运行速度与运行距离。

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F(v) - B(v) - R_r - W_j}{m(1 + \gamma)} \quad (6)$$

其中  $\gamma$  为列车转动惯性系数  
速度递推公式：

$$v_i = a\Delta t + v_{i-1} \quad (7)$$

距离递推公式：

$$s_i = \{(v_i + v_{i-1}) / 2\} \Delta t + s_{i-1} \quad (8)$$

$v_i$ ：当前时刻速度 (m/s)； $v_{i-1}$ ：上个时刻速度 (m/s)； $a$ ：当前时刻加速度 (m/s<sup>2</sup>)； $s_i$ ：

当前时刻距离 (m)； $s_{i-1}$ ：上个时刻距离 (m)，由上述牵引计算的递推公式经过积分就可以得到列车运行距离及运行时间。

### 2.4 运行策略

在能够计算列车运行状态的基础上我们引入列车的牵引策略，例如最小时刻的策略<sup>[4]</sup>，即让列车最大程度的发挥其牵引力和制动力的能力，在尽量少的时间里完成整个线路的运行。增加了运行模式后，再结合运行仿真的计算部分，以及线路数据，就能够完整的模拟列车在一段线路上的运行过程。由此能够得到列车在一条线路上各个点的运行状态，同时得到列车在线路上各点的牵引力、制动力及阻力信息。以此为基础就能够计算出在整条线路运行的情况下的控制负载模拟平台电机运行所需要的数据信息。

## 3 负载模拟平台

牵引电机负载模拟平台是通过负载电机为牵引电机加载模拟电机的实际运行工况，以此来模拟真实的电机运行环境，在实验室条件下获取接近实际运行时牵引电机的运行环境，避免了真车实验成本高，可行性低等不利条件<sup>[6]</sup>。

牵引电机及负载电机的控制框图如图 3 所示

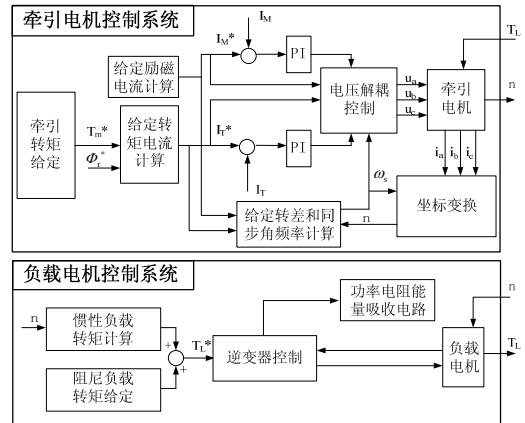


图 3 控制模型<sup>[6]</sup>

负载电机转矩包括阻尼转矩部分及惯性转矩部分，分别模拟由阻力产生的反向力矩，及由惯性产生的反向力矩，其表达式如下：

$$T_L = T_{Lf} + T_{Ld} \quad (9)$$

$$\text{其中 } T_{Lf} = \frac{R(R_r + W_j)}{N \cdot \eta_{Gear} \cdot i_g} \quad (10)$$

$$T_{Ld} = \left[ \frac{MR^2}{\eta_{Gear}(1+\gamma)N \cdot i_g^2} + \frac{J_w}{\eta_{Gear} \cdot i_g^2} \right] \frac{d\omega_m}{dt} \quad (11)$$

其中  $T_L$  为负载力矩,  $T_{Lf}$  为阻尼转矩,  $T_{Ld}$  为惯性转矩;  $N$  为列车总的电机台数;  $\eta_{Gear}$  为齿轮效率;  $i_g$  为齿轮传动比;  $R$  为轮径。公式 (9) ~ (11) 的推证过程在文献[6]中有详细的描述, 这里不再赘述。

#### 4 连续条件下负载模拟

平台的系统结构如图 4 所示, 平台实物图如图 5 所示。运行仿真系统在线路数据及车型选定之后, 结合运行仿真的运行策略就能得到列车在整条线路中不同位置点的牵引力状态, 由此能够计算出列车电机在的转矩情况。

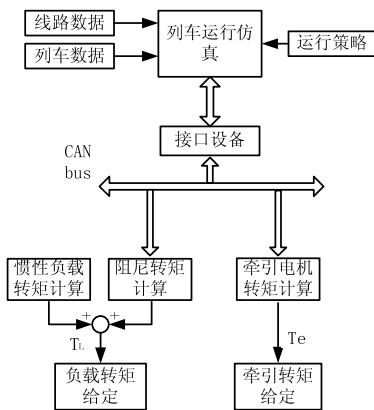


图 4 系统结构

由运行仿真计算出的转矩信号通过接口设备转换为 CAN 总线的帧信号, 每一帧内携带一个转矩转速信息, 转矩信号可以根据不同的精度需求调节帧的长短, 本文是将转矩信号转化为标准的 float 型数据进行传输。

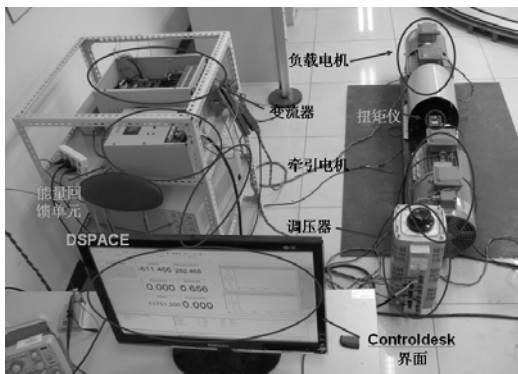


图 5 平台实物图

由于信号传输过程为一定间隔传输一帧数据,

因此通信过程必定会存在延迟, 经试验测试其传输延迟约为 10ms, 考虑到负载侧的惯性转矩部分要求响应速度较快, 但阻尼转矩由于仅受到线路条件及列车速度的影响, 其要求的响应速度较慢, 因此给定转矩指令过程中, 惯性转矩部分的计算及给定由负载电机的控制模块进行计算, 而将阻尼转矩由上位机通过通信总线给定, 即公式 (10) 中  $(R_f + W_j)$  项由上位机通过 CAN 总线实时给定, 阻尼转矩经过保持环节后再与惯性转矩求和, 以此作为总的负载电机的转矩给定。

由于负载模拟的原理是通过对实际电机进行一定程度的等效, 使之能够在实验室条件下模拟实际电机的运行, 但运行仿真系统计算出的数据反映的是实际电机的运行过程, 因此仿真数据不能直接应用来控制牵引电机运行。列车单轴的输出的牵引力可以表示为

$$F_d = \frac{F(v)}{N} \quad (12)$$

考虑到列车的机械效率以及齿轮比, 到实验室运行时的缩放系数, 则牵引侧电机输出的转矩可表示为

$$T_e = k_T \frac{R \cdot F(v)}{N \cdot \eta_{Gear} \cdot i_g} \quad (13)$$

其中  $N$  为列车总的电机台数;  $\eta_{Gear}$  为齿轮效率;  $i_g$  为齿轮传动比;  $R$  为轮径;  $F(v)$  为列车牵引力;  $T_e$  为牵引电机转矩;  $k_T$  为转矩缩放系数。经由公式 (13) 计算出的转矩作为负载模拟平台的转矩给定, 其控制部分的框图如图 3 所示, 综上所述列就能利用运行仿真计算出的列车运行信息控制负载模拟平台的运行, 使之能够模拟连续线路条件下列车的运行。

#### 5 运行结果

采用的参数基于 CRH2A 型车, 其具体参数如表 1 所示。

图 6 为在加速阶段运行仿真结果, 图 7 为在软件平台控制下的负载模拟平台的运行结果, 通过两个结果相对比可以看出, 负载模拟平台产生的转速曲线能够完整的再现运行仿真中的线路状况的影响, 电机转速的波形能够在连续的线路条件下进行仿真, 该系统能够达到预期目的。

表 1 CRH2A型车参数<sup>[7]</sup>

车型	CRH2A
编组条件	8 辆编组 4M4T
最高实验速度	250 km/h
最高运行速度	200 km/h
牵引功率	4800 kW
列车标准定员质量	411 t
基本阻力公式	$a=8.63; b=0.07295; c=0.00112$
电机个数	16
牵引转矩切换点速度	175km/h
制动转矩切换点速度	70km/h
牵引时单轴踏面功率	285kw
齿轮传动效率	0.95
齿轮传动比	3.036
新轮直径	860mm

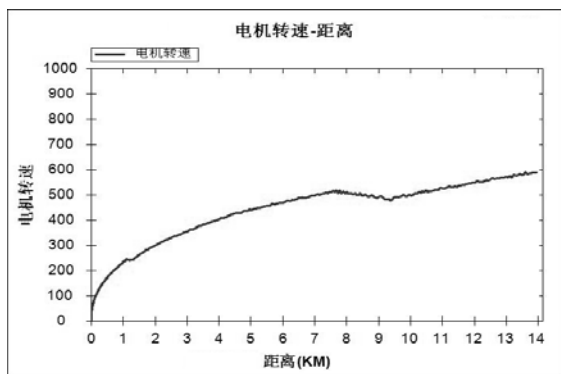


图 6 运行仿真结果

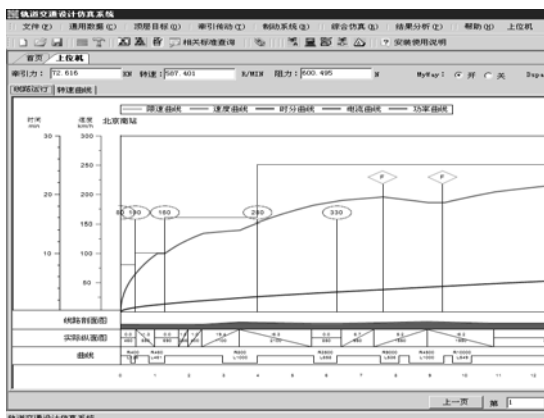


图 7 电机转速波形

## 6 结论

连续线路条件下的负载模拟系统，利用上位机的运行仿真模块及 CAN 总线通信技术，在原有的负载模拟平台的基础上，实现整条线路情况的负载模拟。

从波形上看，电机转速能够很好的反映线路条件及操纵方式对电机的影响，由于电机在运行时对周围的通信设备有一定影响，因此系统会出现偶然的通信中断现象，因此该系统需要进一步增加错误处理环节，使系统能够更加稳定。

### 参考文献

- [1] 周峰.动车组牵引计算建模及软件仿真[D].西南交通大学.2007.
- [2] 张中央.列车牵引计算[M].中国铁道出版社.2010.
- [3] 曾剑群.动车组牵引计算仿真系统的研究[D].北京交通大学.2009.
- [4] 周家猷 唐涛.列车自动驾驶系统算法研究[J].中国科技信息,2008,13 期.
- [5] 黄云鹏.轨道车辆牵引电机负载模拟控制的研究[D].北京.北京交通大学,2009.
- [6] 李思杰.牵引电机负载模拟系统的转矩控制方法[J].电气传动, 2010, 40 卷: 52-60.
- [7] 张曙光.高速列车设计方法研究[M].中国铁道出版社.2009.
- [8] 张曙光.CRH2A 型动车组(中国高速铁路技术丛书)[M].北京:中国铁道出版社,2008.
- [9] 朱金陵 李会超 王青元等.列车节能控制优化分析[J].中国铁道科学,2008,2 期.
- [10] 余进.多目标列车运行过程优化及控制策略研究[D].西南交通大学 2005.