

高速列车电气综合仿真软件设计

随着高速列车的蓬勃发展，建立高速列车综合仿真平台具有十分重要的意义。就高速列车牵引/制动特性、电气特性以及运行策略进行分析和设计，从而研发出一款高速列车电气综合仿真软件。该款软件从列车顶层指标入手，构建了仿真的整体框架，同时为其他模块提供了良好的接口，是一款集设计、验证和展示于一体的综合软件。软件可以实现列车牵引/制动性能设计、电动机特性设计、牵引传动系统容量设计以及运行时分仿真等功能，对于高速列车特性设计、功能验证以及展示起到一定的作用。

王 晗/中国中车中央研究院 李 珂/北京交通大学电气工程学院



王 晗/教授级高工

高速列车是极其庞大复杂的现代化系统工程，融合了机械工程、现代控制、电子、电气、材料与结构、通信以及计算机等多个学科一系列高新技术。针对如此复杂的系统，开发优化设计仿真平台，前期良好的功能定位以及开发进程规划至关重要。

限于高速列车的系统复杂性，仿真平台很难一蹴而就，而是需要足够大的时间跨度。仿真平台必须具备良好的可扩展性和兼容性。开发初期，专注于熟悉的子系统建模和有能力实现的仿真模块搭建，并以之为主线，为其他功能模块规划拓展接口，构建仿真平台的整体框架。

关键词/Keywords

高速列车·
综合仿真·
电气特性·
牵引·
制动·

目前国内外关于高速列车综合仿真软件的研究比较少，而一套整体的电气综合仿真软件确实有一定的难度，浙江大学曾经就高速列车的牵引传动系统建立了基于Simulink和VC++混合编程的仿真软件，但是由于需要两者之间的数据交互和仿真，且仿真周期比较长，同时只是针对牵引传动系统进行仿真，并没有结合列车实际的运行状态，因此仿真

距离列车实际运行依然存在着一一定的差异^[1-2]。

本文基于列车顶层指标^[3-4]，针对高速列车的电气特性设计以及运行策略进行了分析，并且搭建了一套集设计、验证与展示为一体的电气综合仿真平台。同时，优化设计仿真平台还要能够支持高速列车的相关技术研究，搭建成为技术研究平台。

平台框架

优化设计仿真软件结构框架如图1所示。仿真软件主要包括基本数据设定、列车内部子系统建模、综合仿真、接口以及结果分析五部分。

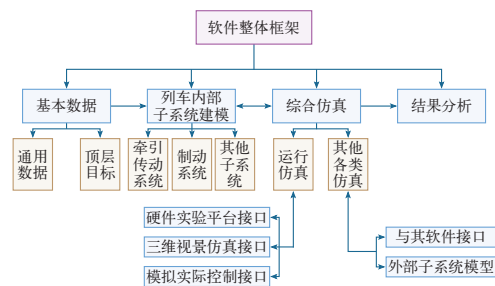


图1 优化设计仿真软件结构框架

1) 基本数据设定。定义列车名称和基本编组信息，并对优化设计列车的顶层目标值进行设定。

2) 列车内部子系统建模。通过参数设计完成列车子系统的搭建，包括牵引传动子系统和制动系统；其他子系统随着仿真的深入，将逐步进行搭建。牵引传动子系统建模包括列车牵引与制动特性曲线设计、牵引电动机电气特性与机械特性匹配、传动系统容量计算与匹配、变流器控制模型搭建以及热仿真模

型搭建；制动系统建模包括制动力的分配和复合制动模拟。

3) 综合仿真。针对建立的列车模型进行多样化仿真，并验证列车性能，根据仿真结果优化列车模型，包括列车运行仿真。随着平台的完善，可进行的仿真逐渐增加，如轮轨关系动力学仿真、车体与空气的流固耦合仿真等。

4) 接口。为实现与硬件实验平台三维视景仿真、司机模拟控制台、外部系统模型以及其他软件平台进行数据交互和联合仿真，在综合仿真部分留有系列接口。

5) 结果分析。以实时展示和设计报告等多种形式对仿真结果进行分析，并对设计结果进行总结。

电气特性设计

1. 牵引/制动特性曲线设计

列车牵引特性曲线的设计，是在对列车性能有明确要求的基础上，得到一条满足列车各项运行指标的列车牵引力—运行速度曲线^[5]。

高速列车牵引特性曲线设计计算示意图如图2所示。

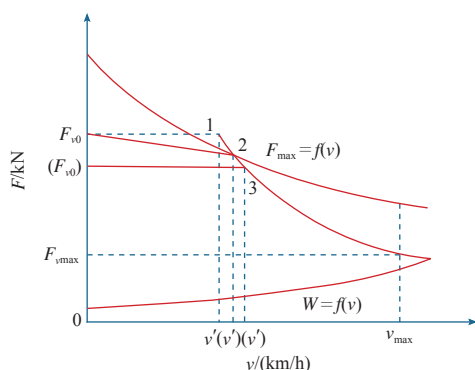


图2 牵引特性曲线设计计算示意图

图2中，横坐标为列车运行速度，纵坐标为列车牵引力。所画三条曲线在图中由上往下依次是列车黏着限制曲线 $F_{\max}=f(v)$ 、待求的列车牵引特性曲线 $F=f(v)$ 以及列车基本阻力曲线 $W=f(v)$ 。列车黏着限制曲线 $F_{\max}=f(v)$ 及列车基本阻力曲线 $W=f(v)$ 作为已知函数，两者相交速度大于列车最高运行速度。

根据列车相关参数，如列车动车和拖车辆数、

每辆车整备质量、每辆车的定员、单位乘客体重、每辆车的轴数、轴上电动机数、列车运行最大速度、列车运行基本阻力、列车起动阻力、惯性系数以及最高运行速度时剩余加速度等，计算列车牵引特性相关参数。将列车牵引特性曲线 $F=f(v)$ 的设计流程分为以下四步：

1) 求解列车最高运行速度时的牵引力，先计算出最大运行速度时的列车牵引功率为

$$p_k = \frac{[M\omega_0 + (1+\gamma)M\Delta a \times 10^3](v_{\max} + \Delta v) \times 10^{-3}}{3.6} \quad (1)$$

式中， p_k 为最高时速运行时的列车牵引功率； M 为列车质量； ω_0 为列车基本阻力； γ 为列车惯性系数； Δv 为列车最高时速运行时的逆风速度； Δa 为列车最高速度运行时的剩余加速度； $v_{\max}$ 为列车运行时的最高时速。

根据牵引力、列车运行速度及牵引功率的关系，求解出此时列车牵引力为

$$F_{v\max} = 3.6 p_k / v_{\max} \quad (2)$$

式中， $F_{v\max}$ 为列车最高时速运行时的牵引力。

2) 计算起动（即速度为0）时列车牵引力

$$F_{v0} = [a_0(1+\gamma)M \times 10^3 + M\omega_q] \times 10^{-3} + Mg\theta_0 \quad (3)$$

式中， F_{v0} 为列车起动时的牵引力； a_0 为列车起动加速度； ω_q 为列车起动时的阻力； θ_0 为列车起动时的坡度。

3) 求解列车牵引特性曲线恒转矩区间和恒功率区间的交点速度

$$v' = F_{v\max} v_{\max} / F_{v0} \quad (4)$$

引入黏着限制，修正 v' 。计算出 v' 时列车动车单轴所能提供的最大牵引力为

$$F_{\max} = M_{Z\min} g \mu = f(x) \quad (5)$$

式中， $M_{Z\min}$ 为列车最小轴重； μ 为黏着系数。

目前国内采用日本黏着公式如下^[6-7]

$$(\text{湿轨}) \quad \mu = 13.6 / (85 + v) \quad (6)$$

$$(\text{干轨}) \quad \mu = 27.2 / (85 + v) \quad (7)$$

将 $F_{\max}(v')$ 和分配到各动车轴上的起动牵引 F_{v0Z} 进行比较：若 $F_{\max}(v') > F_{v0Z}$ ，则直线连接 (v_0, F_{v0}) 点和 (v', F_{v0}) ，反比例曲线连接 (v', F_{v0}) 和 $(v_{\max}, F_{v\max})$ 点构成列车牵引特性曲线；若 $F_{\max}(v') < F_{v0Z}$ ，则所求 v' 点超出黏着限制，重新求解 v' ，重

新求解的 v' 是牵引力恒功率区间和列车动车单轴所能提供最大牵引力曲线的交点。联立方程组为

$$F_{\max} = \mu(v')W_{Z\min}g \quad (8)$$

$$F_{\max}v' = \frac{F_{v\max}v_{\max}}{n_M n_Z} \quad (9)$$

4) 计算出 v' 。直线连接 (v_0, F_{v0}) 点和 $(v', n_M n_Z F_{\max}(v'))$ ，反比例曲线连接 $(v', n_M n_Z F_{\max}(v'))$ 和 $(v_{\max}, F_{v\max})$ 点构成列车牵引特性曲线。

综上所述，列车牵引特性曲线方程为

$$\begin{cases} \frac{(F_v - F_{v0})}{v} = \frac{(F_{v'} - F_{v0})}{v'} & 0 \leq v < v' \\ F_v v = F_{v\max} v_{\max} & v' \leq v < v_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

若要得到单电轴输出牵引力，只需将整车牵引力除以列车动车数和动车轴数的乘积即可，表达式为

$$F_Z = F / (n_Z n_M) \quad (11)$$

2. 电气特性分析

(1) V/f 曲线选择

通过两个输入量来确定电压曲线：①恒压频比终端速度 v_{ZD} ；②恒压端电压 U_H 。那么电压函数可确定为

$$\begin{cases} U = f(v) = \frac{U_H}{v_{ZD}} v & 0 \leq v \leq v_{ZD} \\ U = f(v) = U_H & v_{ZD} < v \leq v_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

根据 V/f 曲线末端速度 v_{ZD} 设计原则，采用 $v_0 > v_1$ 设计方法，其具体图形如图3所示。

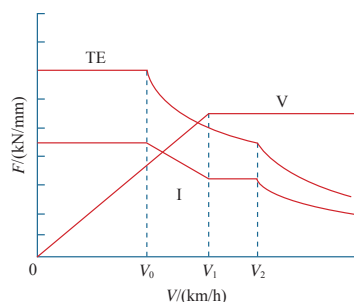


图3 $v_0 > v_1$ 原则

由图3可知， V/f 斜率大，磁通密度小，要求铁心小，电动机可以轻量化，但起动电流大，元器件应力大，电动机重量最轻。

(2) 异步牵引电动机特性设计

异步牵引电动机特性曲线计算的依据是根据

传动比和轮径将机车特性曲线转换成电动机的转矩-转速特性曲线，确定电动机的恒功率、恒功范围、起动转矩、最高转速、最大转矩、电动机电流和定子漏感等参数。牵引电动机转矩和最大转矩曲线如图4、图5所示。

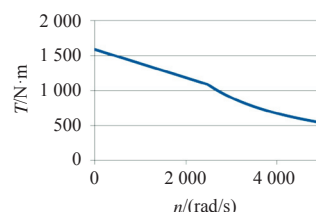


图4 牵引电动机转矩曲线示例

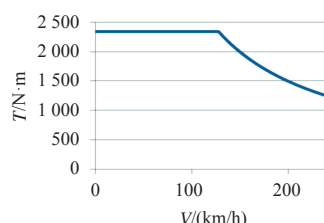


图5 牵引电动机最大转矩曲线示例

(3) 牵引传动系统容量设计

动车组牵引时，将电能转换成机械能，能量转化和传递途径如下：接触网高压交流电→受电弓→机车变压器（低压交流电）→整流器（直流电）→逆变器（VVVF）→牵引电动机→齿轮→旋转力矩→轮轨间粘着作用→机车牵引力。而再生制动时，轮轨间粘着作用提供给动车组制动力，其能量转化和传递途径与牵引时相反。

动车组牵引传动系统简图如图6所示。

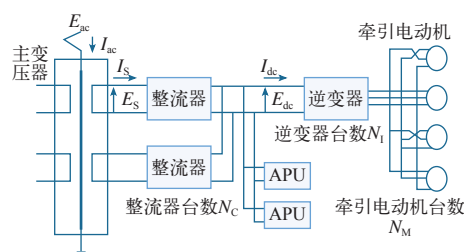


图6 牵引传动系统

动车组牵引传动系统各部分容量关系如下表所示。表中既有牵引过程又有再生制动过程。各电动机的台数、功率因数和效率都是已知条件，在表中进行了定义。

表 牵引传动系统计算表

已知		计算
项目	功率因数 效率	计算公式
主变压器	一次绕组 $P_{f_{TR1}}$	主变压器输入功率 $S_{TR1} = E_{ac} I_{ac} = S_{TR2} / \eta_{TR} N_W$
		再生时 $S_{TR1} = S_{TR2} \eta_{TR} N_W$
	二次绕组 (个数 N_W)	主变压器输出功率 $S_{TR2} = E_S I_S = P_C / \eta_{CONV} / P_{f_{TR2}} / N_C$
		再生时 $S_{TR2} = P_C \eta_{CONV} / P_{f_{TR2}} / N_C$
牵引变流器	整流器 (台数 N_C)	整流器输出功率 $P_C = E_{dc} I_{dc} N_1 + P_{APU}$ $= S_1 P_{f_{MM}} / \eta_{INV} N_1 + P_{APU}$
		再生时 $P_C = S_1 P_{f_{MM}} \eta_{INV} N_1 - P_{APU}$
	逆变器 (台数 N_I)	逆变器输出功率 $S_1 = \sqrt{3} E_M I_M N_M = P_{MI} N_{MM} / P_{f_{MM}}$
		主电动机电压 $E_M \leq \sqrt{6} / \pi E_{dc}$
主电动机	主电动机 (台数 N_M)	主电动机输入功率 $P_{MI} = S_1 P_{f_{MM}}$
		主电动机输出功率 $P_{MO} = P_{MI} \eta_{MM}$
		再生时 $P_{MO} = P_{MI} / \eta_{MM}$
		踏面输出功率 $P = P_{MO} \eta_{GEAR}$ 再生时 $P = P_{MO} / \eta_{GEAR}$

运行仿真策略

1. 最小时分运行策略

列车运行过程计算是一个复杂的过程，因为有大量约束条件需要满足，其中有些是具有较强动态特性的约束，难以在计算过程中充分、迅速兼顾；因此难以建立一般解释性的优化模型。

为提高计算效率，避免传统模拟算法中经常发生的“退回重算”，本系统在初始化过程中利用已有信息，充分考虑各种设置方案，将各处限速尽量计算清楚，从而可大大提高模拟速度。

初始化完成后，系统将显示线路与车站设置，并将根据线路限速、特殊限速及列车制动力计算出系统限速并显示出来。初始化后的系统是列车运行的基础。

列车最小时分的基本运行模式是以最大牵引力牵引到第一限速区，接着在任意限速路线段，最大可能地采用限制曲线匀速运行；在任一限速

提高过渡段，给出最低限速段后用最大牵引过渡到高限速段；在任一减速过渡路段，在最迟的时间采用最大制动实现速度的过渡；在停车点前，采用最大制动力进行反推。

2. 固定时分运行策略

针对固定时分运行策略，需将整段线路进行分段处理，可以大大减小计算工作量。这样问题可转化为求局部段落的固定时分运行，即如何进行局部段落的划分以及如何确定局部段落的限制条件。实际线路中有很多可供分段的节点，这里选择限速及过分相的节点作为分段的节点，这样做的优点是有益于算法的构建以及数据的查找。

当固定时分运行时，还需确定每个分段区间的运行时间。而每个分段采用固定的时间，会导致一定的误差，最终无法满足准确度的要求，可以利用时间和距离的关系，每到一个分段的开始节点就对分段时间进行计算，具体如下

$$\begin{aligned}
 T_{\text{extra}} &= T - T_{\min} \\
 \sum_{i=1}^n T_{\text{extra}(i)} &= T_{\text{extra}} \\
 \sum_{i=1}^n T_{\min(i)} &= T_{\min} \\
 T_{\text{extra}(i)} &= \frac{S_i}{S} (T - T_{\min}) \\
 T_i &= T_{\text{extra}(i)} + T_{\min(i)}
 \end{aligned} \quad (13)$$

式中， T 为从分段的开始节点算起的剩余给定时间； $T_{\min}$ 为剩余最短时分运行时所用的总时间； T_{extra} 为剩余富裕时间； $T_{\text{extra}(i)}$ 为单个分段的富裕时间； $T_{\min(i)}$ 为单个分段的最短运行时分； T_i 为单个分段的给定的时间。

这种策略采用距离分配整个线路段的富裕时间，单个分段的给定时间为该分段最短时分的运行时间与该分段根据距离分配出的时间之和，需要注意的是富裕时间一定为正，否则就按照最短时分运行。采用该种策略可以很好地保证列车固定时分的运行。

软件功能

1. 列车模型与线路条件设定

该软件可以进行较为详细的列车编组数据设

定。单节车辆为最小模块，动力单元由少量动车和拖车组成，连接多个动力单元构建列车模型，如图7所示。细致的列车建模，使在牵引和制动性能上能够区别不同动力单元和不同车辆；同时可以对线路条件进行详细的编辑，能够完成线路坡道、曲线以及其他标记数据的编辑，作为运行仿真的线路数据。软件中的线路模型如图8所示。

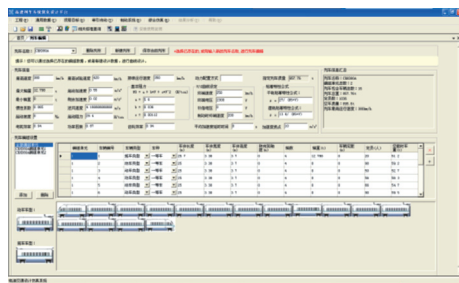


图7 软件列车模型

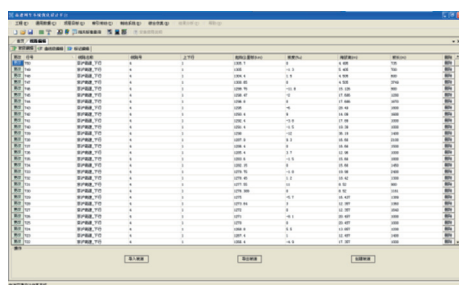


图8 软件中的线路模型

2. 牵引与制动特性匹配

根据列车编组条件，可提供列车牵引特性曲线的参考值；同时还可以对列车的牵引特性曲线进行编辑。而牵引加速距离、加速时间和平均加速度在此模块中可以得到验算。操作界面以及显示方式具有较强的适用性。其具体界面如图9、图10所示。

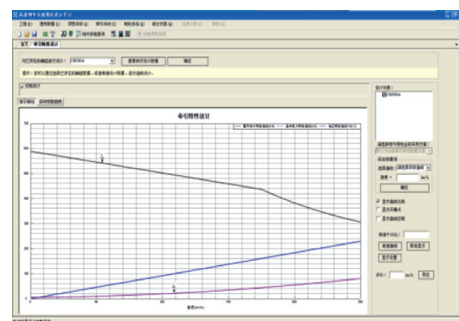


图9 牵引曲线

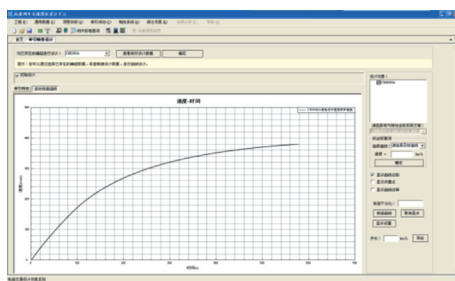


图10 牵引能力验算曲线

软件可以完成制动特性曲线设计，并对制动距离、制动时间等进行验算。其具体界面如图11、图12所示。

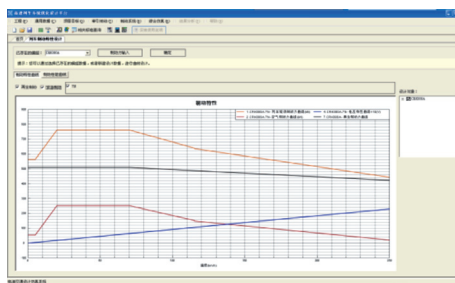


图11 制动特性曲线

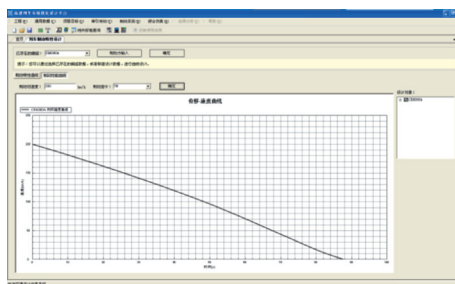


图12 制动能力验算曲线

同时软件还提供了传动系统容量计算功能，给出传动系统各主部件的电气容量参考值。其具体界面如图13所示。

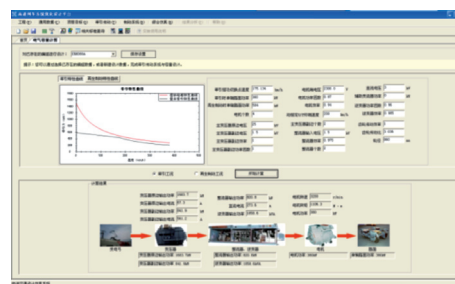


图13 传动系统容量计算界面

3. 运行仿真

软件建立了功能比较完善的牵引计算模型，以京沪线实际线路数据为线路模型，可采用最小时分、常态运行和固定时分三种仿真策略进行列车运行模拟。计算输出运行速度、时分、电动机电力、功率和全程能耗等数据。常态运行仿真结果如图14所示。

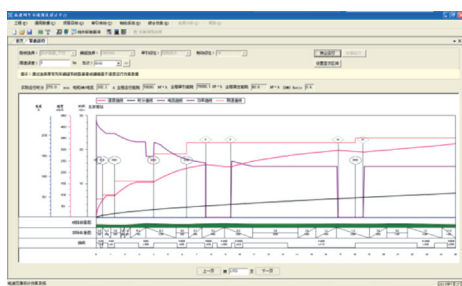


图14 常态运行仿真结果

4. 多样化仿真

为方便用户的使用，在之前的仿真基础上，还提供了列车运行仿真结果的动画显示，如图15所示。随着屏幕上方小车前行，牵引力、速度、时间和电流等曲线将实时变化。

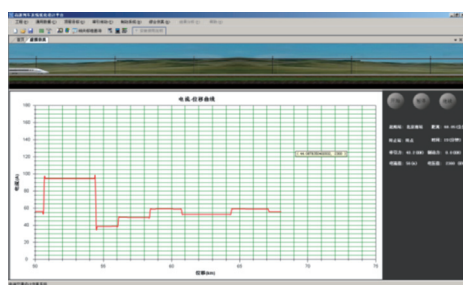


图15 运行仿真动画显示界面

同时加入了三维仿真界面，其效果如图16所示。增加了用户软件使用的真实感，可以实时观测列车运行情况。通过运行仿真计算模块启动三

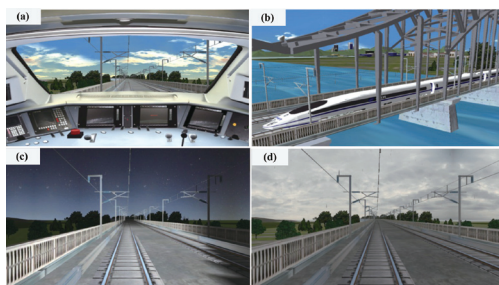


图16 三维仿真效果

维仿真显示界面。三维动画运行中的线路条件、运行速度根据运行仿真计算实时变化；声音根据线路条件、列车速度变化，通过处理武广高铁实录声音得到，真实性较强。同时可以实现列车不同位置的视角切换以及天气切换。

结束语

本文根据高速列车电气特性的设计、验证与展示，研发了一套高速列车综合仿真软件，该软件可以实现对列车牵引制动特性、列车电气特性以及运行策略的仿真分析，也可以实现对不同种类高速列车的仿真分析和验证；同时详细介绍了高速列车牵引制动性能、列车 V/f 曲线、电动机特性以及牵引传动系统各部分容量设计的具体方法。在列车运行策略方面，介绍了列车最小时分运行和固定时分运行条件下的运行策略计算流程。最终完成了高速列车电气综合仿真软件的设计，软件除实现牵引/制动曲线设计、传动系统容量计算及列车常态运行仿真外，还能增添运行仿真动画显示和三维仿真的动态显示界面，同时增加了用户操作的趣味性和真实感。

参考文献

- [1] 董继维, 汪斌, 卢琴芬, 等. 基于Simulink和VC++混合编程的高速列车牵引传动系统仿真软件[J]. 机电工程, 2011, 28(12): 1519-1522.
- [2] 汪斌. 列车牵引传动系统性能分析和仿真技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [3] 张曙光. 京沪高速铁路系统优化研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [4] 王月明. 动车组制动技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [5] 渡边朝纪, 福田典子. 高速列车机车车辆的牵引性能[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 32-36.
- [6] 黄问盈. 铁道轮轨黏着系数[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(5): 17-25, 33.
- [7] 朱文卿, 吴晓彪. 关于高速列车紧急制动平均减速度的探讨[J]. 铁道车辆, 2013, 51(9): 8-9, 16.

(收稿日期: 2015-04-27) EA