

# 高速动车组列车牵引仿真计算技术研究

康 熊

(中国铁道科学研究院,北京 100081)

**[摘要]** 随着我国高速铁路的发展,高速动车组列车牵引仿真计算具有重要意义。对高速动车组的牵引仿真计算的方法进行了研究,分析了与普通列车牵引计算的区别及相关的理论。介绍了自主研发的牵引仿真系统的构成和功能。以京沪高速铁路为计算实例,对4种不同的运行方案进行了仿真计算,对线路中的电分相的设置和影响进行了计算分析,并以京沪高速铁路先导试验段的冲高速试验为对象进行了模拟仿真。多次实际应用表明提出的高速动车组牵引仿真计算的方法具有良好的仿真精度和实用意义,可以为我国高速铁路工程建设提供有效的手段,并据此提出了今后的发展方向。

**[关键词]** 高速;动车组;牵引;仿真计算

**[中图分类号]** U260.14 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2011)01-0062-07

## 1 研究目的

近年来,高速铁路在我国获得了飞速的发展。从2008年8月1日,京津城际铁路时速350 km/h的动车组投入运营,以及陆续开通运营的郑西、武广高速铁路,我国铁路正式进入了高速时代。在今后10年内,我国将建立由“四纵四横”的快速铁路干线与多条200~250 km/h速度级与300~350 km/h速度级客运专线构成的客运网络体系,其总长度将达到12 000 km以上,其中将包括5 457 km的300~350 km/h高速客运专线。

高速铁路的发展对我国铁路的基础和应用研究提出了更高的要求。高速列车牵引仿真技术是其中的重要环节,其重要意义在于:

1)高速动车组设计优化。在高速动车组设计和运用时,如果仅仅通过试验对其设计效果和系统性能进行评估、调整或优化,既需要很长的开发生产周期,还可能产生巨大的资金浪费。在高速动车组设计生产之前,可以通过仿真运算,确定高速动车组加速与减速性能、基本阻力要求,设计动力配置方案、牵引与制动特性曲线,并根据结果进行调整和优

化,提高设计质量和效率。

2)优化铁道线路设计。在线路设计施工之前,可以通过仿真计算,确定拟上线运行列车对线路参数的要求,对比分析不同的设计线路的优劣,做出优化的选择。还可以指导路网规划、选线设计、行车及信号设备布置。

3)优化列车运行时分、能耗等运营指标。在制定列车运行图时,可以通过仿真计算,获取在不同列车、不同线路组合下的运行时分和能耗,选择最合理的列车和线路搭配,并在缩短运行时分和节能操纵之间做出经济的选择。

4)线路试验的重要仿真计算手段。在列车线路试验之前进行不同列车编组、试验工况甚至装备条件的多方案比选和预测,从而可在事先优化试验方案和合理布置测点,以避免危险工况的试验风险和减少不必要的试验次数,例如在隧道内高速会车的试验条件保障;同时,仿真研究和线路试验又是相互验证的必要手段,仿真和综合试验具有不可分割的密切关系。

5)为挖潜提效和提速安全提供科学的依据。通过仿真计算,提前获知既有线是否还能提速、缺失

**[收稿日期]** 2010-11-10

**[作者简介]** 康 熊(1955—),男,甘肃武山人,中国铁道科学研究院研究员,主要从事铁路机车车辆方面的科研、试验、提速等工作;  
E-mail:zhoutkyjls@126.com

部分动力的列车能否继续运行、新型列车或线路能否满足运营要求等信息,确保合理可行,并可据此制定安全规章,进行事故分析。

6) 构建科学的高速铁路基础研究体系。高速动车组仿真研究工作的开展,可以提高我国高速动车组的设计制造水平,促进通信信号、线路设计、路网供电、运输组织等多方面的基础研究,构建高速铁路设计、生产制造和管理运用的科学研究体系,为进一步深化我国高速铁路自主创新提供科学基础。

在国际上,日本的东芝/三菱、德国的西门子公司都开发有与自己公司产品对应的高速动车组运行仿真软件,具有牵引动力配置、结构参数优化设计、列车运行仿真计算等多种功能。美国、南非和澳大利亚等重载运输较为发达的国家也开发和有相应的应用于重载的仿真计算软件。

国内已经有多家单位研制了适用于普通列车的列车牵引计算软件,在铁路系统内部广泛应用。2000年由中国铁道科学研究院开发的牵引电算软件 V2.5 版,通过多次应用和不断发展,不仅具有一般牵引计算功能,更重要的是可以实时动态显示列车运行全过程,而且可以模拟列车试验时的各种列车编组和线路条件,按照试验工况进行仿真计算。西南交通大学于 2000 年研制的列车牵引计算软件(简称 QYJS)也具备了同样的功能。

总地来讲,虽然国内部分仿真软件支持高速动车组的仿真计算,但都不能对高速动车组运行进行全面的仿真计算,主要局限于速度、运行时分的计算。国内制定有与列车的仿真计算相关的铁道部行业标准《列车牵引计算规程》<sup>[1]</sup>,但该标准中没有高速和动车组部分。目前国内关于高速动车组的计算技术标准尚处在空白阶段。

## 2 高速动车组牵引计算技术

高速动车组按牵引动力分布形式分为动力分散、动力集中式;按动力类型分为电力动车组、内燃动车组。高速动车组在列车编组、牵引及制动方式、列车操纵控制模式等方面与普通列车有较大区别。

在列车牵引计算中,机车和车辆间由车钩缓冲装置连接,构成一个多质点模型。当列车在某一段运行时,列车中的各个车辆处于不同的线路状态和受力状态。列车牵引计算方法有单质点的简化计算方法和多质点列车模型的详细计算方法。单质点计算功能有限,无法完成调速制动计算,也不能对

普通列车空电联合制动或高速动车组的复合制动方式进行计算,因此不能满足高速列车的计算要求,不能精确模拟实际列车的牵引和制动操纵运行。多质点列车模型将列车视为非刚性连接的多质点振动系统,并用节点分块计算各车辆的受力。由于多质点计算方法的上述特点,作为牵引计算的发展方向,已在国内外得到了日益广泛采用<sup>[2]</sup>。

1) 列车运行阻力计算。列车运行基本阻力包括列车自身及与钢轨之间的机械阻力、空气阻力。基本阻力主要取决于运行速度的大小。大量试验结果表明,机械阻力与运行速度成正比,而空气阻力与速度的平方成正比。因此,低速时,基本阻力的 90% 来自轴承摩擦阻力和滚动阻力;速度提高后,轮轨间的滑动摩擦、冲击和振动、空气阻力所占的比重逐渐增大。速度达到 120 km/h 时,空气阻力约占 50%;高速时,则以空气阻力为主,速度达到 200 km/h 时,空气阻力约占 80%;速度达到 300 km/h 时,空气阻力占 95% 以上<sup>[3]</sup>。

对于高速动车来讲,其基本阻力与列车外形、动拖车的结构和位置、编组和牵引质量、线路与气候条件、列车运行速度等密切相关。这些因素极为复杂,实际运用中很难用理论公式精确计算。通常方法是通过大量的试验,得出经验公式来计算<sup>[3]</sup>。列车阻力可以用式(1)表达:

$$W_0 = aM + (bM + c)(v + dv) + (dQ + e)(v + dv)^2 \quad (1)$$

式(1)中, $W_0$  为列车阻力; $M$  为列车质量; $Q$  为中间车辆数; $v$  为列车速度; $dv$  为逆风风速; $a, b, c$  为与机械阻力相关的系数; $d$  为与空气阻力相关的系数; $e$  为头尾车与空气阻力相关的阻力系数和。

列车基本阻力一般以单位基本阻力来表示:

$$\omega_0(v) = W_0/M, \text{单位为 N/kN。}$$

实际应用中,一般采取二次多项式来描述和计算单位基本阻力,举例来数,CRH3 动车组的单位基本阻力公式可以描述为:

$$\omega_0(v) = 7.75 + 0.062367v + 0.00113v^2 \quad (2)$$

也有采用下列公式形式的:

$$W_0 = aMg + bv + cv^2 \quad (3)$$

式(3)中: $g$  为重力加速度。这种形式的公式按照整列车计算基本阻力,公式中后两项与列车质量无关。

2) 坡道附加阻力和曲线附加阻力。坡道阻力是列车在坡道运行时,列车的重力沿轨道下坡方向的分力。单位坡道附加阻力在数值上等于坡道的坡

度千分数值。列车在曲线运行时遇到的阻力大于在同样条件下的直线运行时的阻力,引起曲线阻力的原因主要是由于列车在曲线运行时,轮轨间的纵向和横向滑动、轮缘与钢轨内侧面的摩擦增加等作用造成的<sup>[4,5]</sup>。由于曲线阻力的影响因素很多,目前难以用理论推导计算公式,所以《列车牵引计算规程》中规定,在标准轨距的圆曲线上运行的列车,其单位曲线附加阻力公式为: $\omega_c = 600/R$ ,式中: $\omega_c$ 为单位曲线附加阻力; $R$ 为曲线曲率半径。

3)隧道附加阻力。列车在隧道中运行时,空气阻力要比在空旷地带中大,导致的空气阻力增加的部分称为隧道附加阻力。隧道阻力与隧道长度、隧道截面积、列车外形、列车在隧道中的位置等很多因素有关<sup>[4]</sup>。对于高速动车组来说,隧道阻力在动车组高速通过时,隧道阻力大大高于普通列车,活塞效应非常明显。目前,隧道阻力的理论计算尚不成熟,国内这方面的研究刚刚起步,相信随着理论研究的深入,隧道阻力的仿真计算将日趋成熟、精确。

在没有相应试验数据和理论的支持下,通常采用经验公式替代,一般计算单位重量隧道附加阻力的公式采用:

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

式(4)中: $\omega_t$ 为单位隧道附加阻力; $L_t$ 为隧道长度。

4)列车牵引力。列车牵引力由牵引特性曲线决定,与速度和牵引级位有关。其计算方法是对应于每一时刻 $t$ ,根据该时刻机车运行速度 $v$ 和级位,由牵引特性曲线进行三点抛物线曲线插值计算出该时刻对应的机车牵引力<sup>[6]</sup>。

列车在运行中,司机需要根据牵引力的需求通过牵引手柄调整牵引力的大小。由于牵引力的发挥,最终都是通过电气和机械结构实现的,机械结构的执行速度远小于电气结构,所以牵引力的变化是渐进的,需要克服机械结构的惰性。根据特性曲线计算的机车牵引力是稳定工况下的额定值,在实际运行中,当机车操纵级位变化时,从原牵引力到新牵引力有一个过渡状态,通过一个 $\Delta t$ 时刻的逐步变化,机车才能进入新的稳定状态。理论与试验均表明,机车牵引力的上升与下降呈两种不同的曲线特性。在计算中,各国根据机车性能选用了不同的数学表达式来描述这种过渡特性,根据我国实际情况及数学上的合理性,选用S型二次曲线来描述牵引力增大或减少的过渡状态,包括牵引到动力制动的过渡。由于牵引特性曲线只输入了整数级位对应的

牵引力,对于无级机车,如果处于中间级位,则先计算出其临近的两个整数级位的牵引力数值,然后根据其中间级位数值做线性插值。

由于动车组采用分散牵引模式,在正常轨面状态下,启动时及低速范围的牵引力低于粘着限制较多,因此,在动车组的牵引计算中,通常不考虑粘着限制<sup>[3]</sup>。

5)列车制动力计算。随着微机技术、交流传动技术的发展和运用,高速列车的制动技术发展以微机控制、再生制动和大功率盘形制动为主要特征,制动系统更为准确、高效和轻量化。高速列车制动系统一般采用多种制动方式,采用微机控制的复合制动,以动力制动为主,空气制动为辅,按照减速度要求给定制动力。在设计制动控制时的原则是充分利用动力制动能力。在充分利用动力制动能力的前提下,配合控制各种制动方式,在制动时,优先采用动力制动,仍不能满足制动指令要求时,追加空气制动。

空气制动作为一种安全制动方式,在高速列车中是必不可少的。在高速列车的制动系统中,空气制动系统因其安全性,以及与其他普通列车的兼容性,便于救援,作为备用制动的一种方式。因此,在高速动车组的故障运行和模拟、事故分析中,空气制动的仿真计算依然非常重要。

在机车车辆的数据库中输入有关的制动装置参数,在编组时设定必要的初始条件,在制动计算过程主要是模拟列车系统中空气制动作用的传播特性,详细计算相应于司机各种操纵情况的机车和每辆车辆的制动力变化过程。根据列车编组情况和不同的空气制动机特性,包括制动波速,制动方式和制动缸压力的充排气时间,计算机车和每辆车辆在制动过程中的制动缸压力 $p_z$ ,然后计算实算闸瓦压力 $K$ ,同时计算实算摩擦系数 $\varphi_k$ ,从而可以得到实算的机车和每节车辆在制动过程中不同时刻的制动力变化情况<sup>[2]</sup>。

通过前面的受力分析,可以确定出列车所受的合力。作用在列车上的合力是列车总的牵引力、列车基本阻力、列车附加阻力以及列车制动力的代数和。

完成了列车受力情况的计算后,就可以进行列车运行加速度、速度、位移等运动学计算。计算时,任一时刻的加速度为:

$$a_i = C_i/M(1 + \gamma) \quad (5)$$

其中的  $\gamma$  为回转质量系数。

列车运行的加速度  $a$ 、速度  $v$  和运行距离  $s$  是通过逐步数值积分方法进行的。

对于高速动车组,回转质量系数对牵引计算指标的影响较大。回转质量系数是列车回转动能的折算质量与列车总质量的比值, $\gamma$  值由列车回转部分的转动惯量  $J$ 、列车质量  $M$  以及列车回转部分的转动半径  $R_0$  决定。对于动车组列车而言,一般规律是动车的  $\gamma$  值大于拖车,组成列车后,原则上  $\gamma$  值应按照质量加权平均,但通常考虑到动车与拖车所占比例范围不同,可参照试验及模拟计算进行取值。相关研究表明<sup>[7]</sup>:对于 CRH3 型 8 辆编组动车组列车, $\gamma$  值由 0.06 增大至 0.11,其运行时间增加 1.829%,平均速度减小 1.795%,总能耗增加了 0.562%。同时,随着停站数量的增大,列车频繁加减速,回转质量系数对结果的影响更加明显。回

转质量系数对于动力集中型动车组,一般取 0.06 ~ 0.08;对于动力分散型动车组,一般取 0.08 ~ 0.11。对于高速动车组而言,由于列车自身结构参数的不同,仍然按照传统经验值 0.06 考虑,将导致牵引计算结果的偏差。因此,为了更准确地进行高速动车组牵引计算仿真,在计算中应充分考虑回转质量系数的影响,根据模拟计算分析及实际经验,选取合适的高速动车组列车回转质量系数。

### 3 仿真计算功能设计

通过对高速列车牵引传动与制动系统的深入分析,结合高速动车组型式试验,收集整理高速列车及运行线路的数据,建立高速动车组力学、运动学、牵引、制动等模型,自主研发了高速动车组牵引仿真计算系统,其结构见图 1。

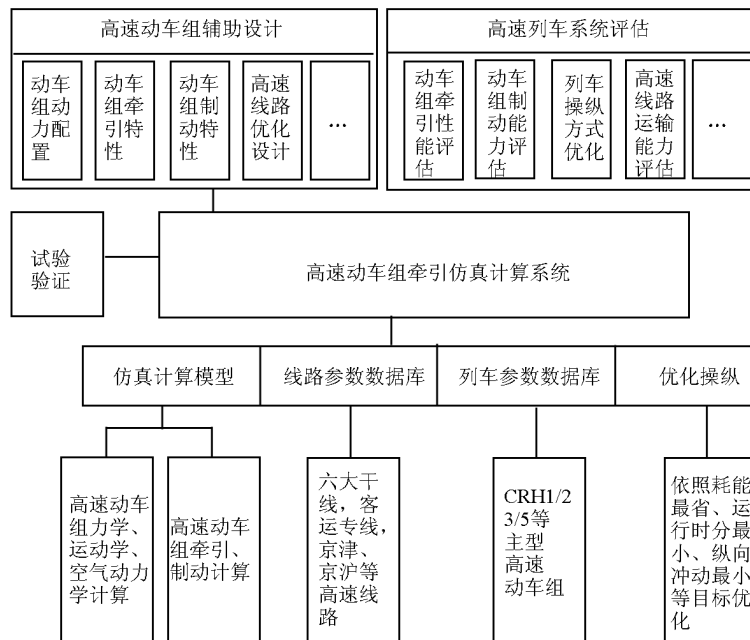


图 1 高速动车组牵引仿真计算系统结构图

Fig. 1 Train traction simulation system structure of high speed motor train set

将动车组的结构描述参数、各种特性曲线及线路数据集成到列车仿真计算过程中。根据线路设施、各种限速、信号系统、运行时分、停站时间、起点终点车站等列车实际运行条件,结合优秀司机的操纵经验、优化控制策略和控制算法等模拟高速动车组驾驶员的驾驶操纵,根据该操纵指令及列车所处的外部实际环境对牵引制动系统各部分的性能进行

仿真。

开发人机交互接口,提供输入及仿真结果输出。通过人机界面实现参数与运行工况的设置、基本公式编辑及特殊工况模拟;设置不同数据格式之间的灵活转换;能够自动完成仿真结果的数据输出、图表输出、曲线输出等用户需求的各种仿真报告。

## 4 应用实例

### 4.1 京沪高速线不同运行方案仿真计算和比较分析

#### 4.1.1 线路总体情况

计算线路为京沪高速铁路下行方向,线路起终点车站之间总长度 1 311 km,车站 23 个。

#### 4.1.2 计算方案

线路全程最高限速分为 350 km/h 和 380 km/h 两种,隧道限速分为 300 km/h 和 350 km/h 两种,采用了下面 4 种计算方案:

方案 1:线路全程最高限速 350 km/h,隧道限速 300 km/h;

方案 2:线路全程最高限速 350 km/h,隧道限速 350 km/h;

方案 3:线路全程最高限速 380 km/h,隧道限速

300 km/h;

方案 4:线路全程最高限速 380 km/h,隧道限速 350 km/h;

线路中还有多处区段限速。

#### 4.1.3 动车组特性参数

采用 CRH3-350 高速动车组,4 动 4 拖编组,总计算重量 495 t,总计算长度 200.6 m。CRH3-350 高速动车组的牵引和制动特性曲线中,最大牵引力和制动力分别为 280 kN 和 495 kN。

#### 4.1.4 计算结果

仿真计算时,充分利用动车组的牵引和制动能力,尽量按照线路允许限速值运行;调速和停站均采用 FSB 级位,分别计算 4 种运行方案的结果。

图 2 为方案 4 在北京南站启动加速区段的仿真计算结果。

4 种运行方案的仿真计算结果数据见表 1。

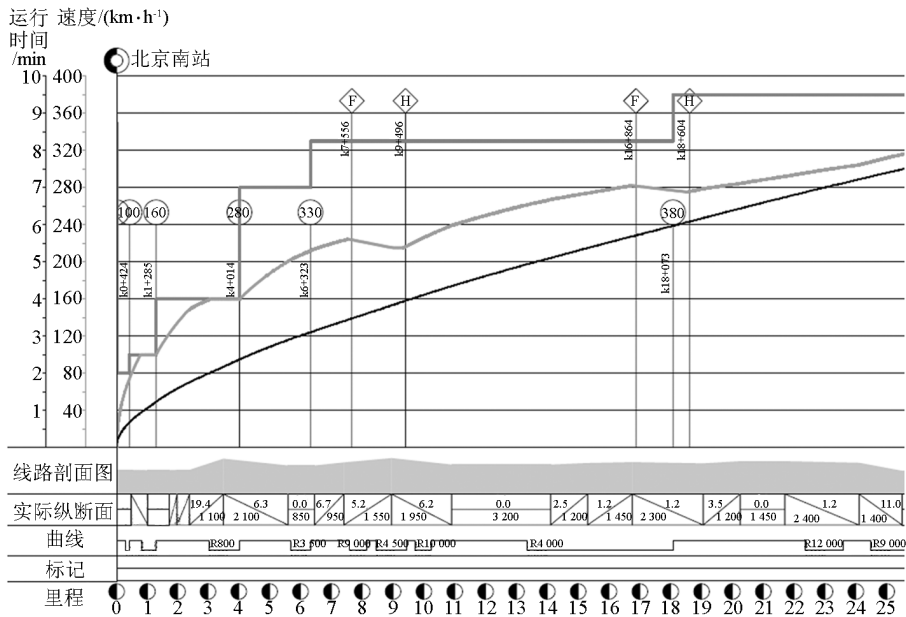


图 2 启动加速区段的仿真计算结果

Fig. 2 Simulation result of train start-up and speedup section

#### 4.1.5 仿真结果分析

对于方案 1 和 2,除在部分线路大坡道外,动车组均能达到限速,同时基本达到平衡速度,所以动车组牵引能力基本满足需求,运行总时分主要受限速限制;相对方案 1,改用限速方案 2 时,全程运行时间提高 4 min 左右。

对于方案 3 和 4,动车组在速度超过 360 km/h

左右时,牵引力基本与运行阻力达到平衡,剩余加速能力接近 0,在部分下坡道和长平直道区间可以达到限制速度,所以动车组牵引能力在高速时略显不足。运行总时间同时受限速和动车组牵引能力限制;相对方案 3,改用限速方案 4 时,全程运行时间提高 6 min 左右。

表 1 仿真计算结果数据

Table 1 Result data of simulation

方案	方案说明	全程运行时间	平均运行速度/(km·h <sup>-1</sup> )
方案 1	全程最高限速 350 km/h, 隧道限速 300 km/h	3 h 58 min 25 s	330
方案 2	全程最高限速 350 km/h, 隧道限速 350 km/h	3 h 54 min 4 s	336
方案 3	全程最高限速 380 km/h, 隧道限速 300 km/h	3 h 49 min 46 s	342
方案 4	全程最高限速 380 km/h, 隧道限速 350 km/h	3 h 43 min 33 s	352

4.2 高速动车组过电分相时的速度仿真分析

我国目前存在 3 种过分相模式:手动过分相、半自动过分相、全自动过分相。不同的过分相方式,对高速动车组的速度有不同的影响。通过计算仿真过分相时的速度变化,对列车的运行时间、司机的合理操纵、线路设计时的电分相的位置设置等有较强的指导意义。

采用与 4.1 同样的动车组列车和线路,对高速动车组过电分相时的速度变化进行仿真分析。经过统计,计算线路的电分相主断路器的断与合之间的平均距离为 1.75 km。选择平直线路,设置电分相主断路器的断与合之间的平均距离为 1.75 km,设置列车初速度为 350 km/h,在电分相主断处提前 20 m 开始计算,惰行,在电分相主断合处延后 20 m 恢复牵引,速度接近 350 km/h 时停止计算,计算结果曲线见图 3。

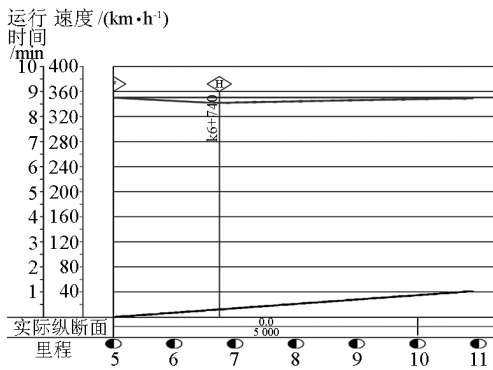


图 3 高速动车组过电分相的速度仿真分析

Fig. 3 Simulation analysis of high speed motor train set passing contact wire neutral section

仿真计算结果表明:在平直道上,在过电分相前的初速度为 350 km/h 时,经过电分相后,速度最低降为 341.5 km/h,最大降速为 8.5 km/h,速度恢复至 350 km/h 的运行距离为 5.9 km。

4.3 京沪高速铁路先导试验段的冲高速试验模拟仿真

采用与 4.1 同样的动车组列车和线路,仿真模拟计算京沪高速铁路先导试验段冲高速试验,试验区段为枣庄西站至蚌埠南站之间,区间距离 220.494 km。计算能达到的最高速度和区段位置。为了进行该项试验,动车组生产厂提出了试验动力方案,动车组功率从 371 km/h 开始,短时过载,在速度 406 km/h 时功率由 18 400 kW 提高至 20 153 kW,冲击高速。过载区段见图 4,仿真计算结果见图 5。

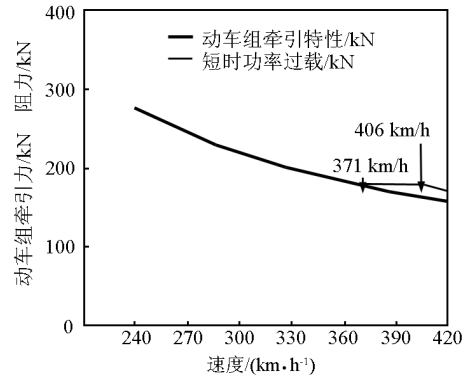


图 4 仿真计算动车组过载参数

Fig. 4 Motor train set power over-load parameters for simulation

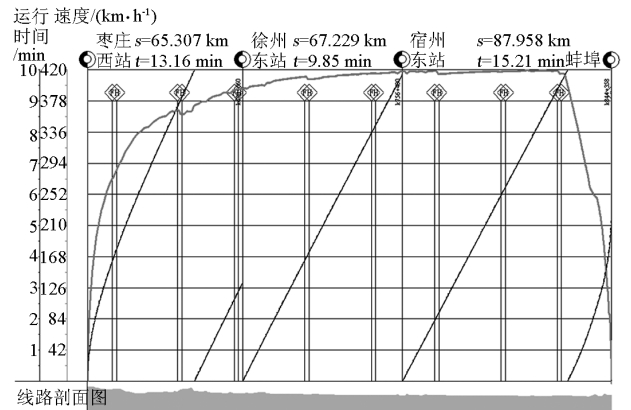


图 5 冲击高速试验仿真计算结果

Fig. 5 Utmost speed test simulation result

仿真计算结果表明:区段高速试验全程运行时间 38 min 17 s。区段最高速度 419.6 km/h,在宿州东站至蚌埠南站之间 km809 + 163 处。区段高速试验计算结果见表 2。

表2 区段高速试验仿真结果数据

Table 2 Result data of utmost speed test simulation

序号	车站名称	运行时间	区间距离/m	区间运行时间	平均速度/(km·h <sup>-1</sup> )
10	枣庄西站	—			
11	徐州东站	13 min 10 s	65 307	13 min 10 s	298
12	宿州东站	23 min 1 s	67 229	9 min 51 s	410
13	蚌埠南站	38 min 17 s	87 958	15 min 16 s	346
合计			220 494	38 min 17 s	346

## 5 结语

1) 提出的高速动车组牵引仿真计算的方法具有良好的仿真精度和实用意义,可以为我国高速铁路工程建设提供有效的手段。

2) 仿真计算中,需要充分考虑高速动车组计算方法有别于普通列车的特点。

3) 随着研究的深入,高速动车组牵引仿真计算将深入到部件级仿真,进一步进行列车牵引电机、变

压器、变压器的温升仿真计算;牵引供电的仿真计算;列车群的计算仿真,更好地服务于我国高速铁路的发展。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国铁道部. 列车牵引计算规程[S]. TB/T1407-1998.
- [2] 马大炜, 康熊, 王成国, 等. 关于列车牵引计算的研究[J]. 中国铁路, 2001(9): 15-20.
- [3] 张曙光. 铁路高速列车应用基础理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 孙中央. 列车牵引计算实用教程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [5] 周锋. 动车组牵引计算建模及软件仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [6] 王月仙, 王成国, 马大炜, 等. 高速动车组自动运行仿真研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2009, 32(4): 7-10.
- [7] 宋锴, 牛会想. 回转质量系数对高速列车牵引电算的影响[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(3): 56-59.

# Study on train traction simulation of high speed motor train set

Kang Xiong

(China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

[Abstract] Train traction simulation of high speed motor train set has significant role with the rapid development of our country's high speed railway. The calculation method of train traction simulation of high speed motor train set is studied and its differences with general train traction calculation and its relative key theories are provided. The structure and functions of our independently developed traction simulation system are introduced afterwards. The actual applications of Beijing—Shanghai high speed railway include: calculation of four different train running projects; calculation and analysis of position and effect for a contact wire neutral section; simulation of utmost speed test in leading part of Beijing—Shanghai high speed railway. It is concluded by applications that the method of train traction simulation of high speed motor train set has good simulation precision and practical usage. It provided an efficient way to our country's high speed project constructions. The development direction based on it are proposed in the end.

[Key words] high speed; motor train set; traction; simulation