

工程数值仿真与 CAE 算法

Numerical Simulation of Engineering and CAE Algorithm

文章编号:1006-0871(2012)05-0001-05

## 高速受电弓非定常气动特性分析

姚远, 郭迪龙, 姚拴宝, 杨国伟

(中国科学院力学研究所 高温气体动力学重点实验室 北京 100190)

**摘要:** 为保证高速列车受电弓与接触网之间具有良好的接触特性,针对强烈气流干扰会引起受电弓振荡的问题,用脱体涡模拟(Detached Eddy Simulation, DES)方法研究高速列车受电弓在开、闭口运行条件下的非定常抬升、阻力特性。结果表明,开、闭口运行对受电弓气动特性的影响有较大不同,尤其对受电弓及其滑板的抬升力波动影响明显。开口运行时整弓和滑板的抬升力波动幅度明显大于闭口运行;而开、闭口运行对整弓和滑板气动阻力的大小与波动幅度的影响很小。

**关键词:** 高速列车; 受电弓; 开口运行; 闭口运行; 脱体涡模拟; 非定常气动力; 滑板

**中图分类号:** U264.34; TB126; TB115.1 **文献标志码:** B

## Unsteady aerodynamic characteristics analysis of high speed pantograph

YAO Yuan, GUO Dilong, YAO Shuanbao, YANG Guowei

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** To ensure the good contact characteristics of pantograph and catenary of high speed train, as to the problem that pantograph will oscillate under the interference of strong air turbulence, the unsteady uplift and resistance characteristics of high speed pantograph in forward and backward movement are studied with Detached Eddy Simulation(DES) method. The results show that the forward and backward movements have large different effects on aerodynamic characteristics of pantograph, particularly on the uplift fluctuation of pantograph and its slider. The uplift fluctuations of pantograph and its slider in backward movement are larger than that in forward movement. However, forward and backward movements have little effect on the aerodynamic drag and fluctuations of pantograph and its slider.

**Key words:** high speed train; pantograph; backward movement; forward movement; detached eddy simulation; unsteady aerodynamic force; slider

### 0 引言

受电弓是高速列车的核心部件之一,高速列车通过受电弓从接触网获得电能并将电能传递给列车

的变压系统和牵引系统。为保证高速列车正常受流,受电弓与接触网之间应具有良好的接触特性。如果接触压力不足会导致接触电阻增大,可能发生弓网分离、产生电弧,从而恶化受流质量并损坏接触网;

收稿日期:2012-01-07 修回日期:2012-02-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划“九七三”计划(2011CB711100);国家科技支撑计划(2009BAG12A03)

作者简介:姚远(1988—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为计算流体力学。(E-mail) gulaodezhong@163.com

<http://www.chinacae.cn>

而接触压力过大,会导致受电弓与接触网之间的磨损增大.气动力是弓网间接触压力的重要组成部分,因此受电弓的气动性能是保证弓网间具有良好接触稳定性和跟随性的重要因素,必须着重考虑.另外,真实受电弓的外形较复杂,随着高速列车速度的不断提高,受电弓会受到强烈的气流干扰,引起振荡.由此可知,受电弓的气动特性具有明显的非定常性,研究受电弓非定常气动特性对列车正常受流意义重大.

受电弓周围流场特性复杂,很难用理论分析方法进行研究.目前,对高速列车受电弓气动特性的研究主要采用实验方法和数值模拟方法.实验方法包括实车测试和模型测试方法<sup>[1]</sup>,但这两种方法各有其问题和不足<sup>[2]</sup>;而数值模拟方法可快捷、有效地进行研究,因此应用广泛.受计算资源和时间的限制,目前国内的研究工作主要集中在定常状态下受电弓所受气动力的影响上<sup>[3-5]</sup>,而且研究模型也经过很大的简化,与实际的流场情况相距较远.另外,国外在这方面的研究工作也相对较少.<sup>[6]</sup>

针对上述情况,本文以真实的受电弓和车体为计算模型,建立空间网格,考虑车体对受电弓周围流场和受力的影响;利用脱体涡模拟(Detached Eddy Simulation, DES)方法研究非定常条件下受电弓及其滑板所受气动力的特性;对比研究受电弓在开、闭口运行不同条件下的气动特性.

## 1 几何模型和网格划分

### 1.1 几何模型

列车几何模型采用头车、中间车厢和尾车三辆编组.列车的风挡和底部转向架对受电弓部位的流场影响较小,对其简化处理.所选受电弓的几何模型与实际外形基本一致,见图1.

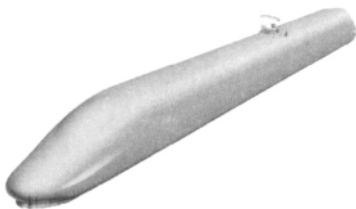


图1 列车车体和受电弓几何外形

Fig.1 Geometry profiles of vehicle and pantograph

### 1.2 计算网格

空间网格采用笛卡尔正交网格方式,总数约为1 300万个.最小网格尺度为1.5 cm,在受电弓附近进行网格加密.闭口运行时的受电弓面网格见图2,

受电弓附近加密的空间网格见图3.

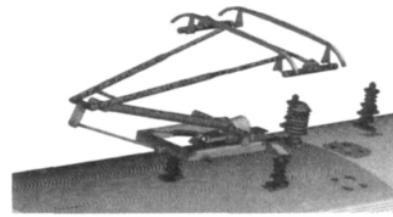


图2 受电弓面网格(闭口运行)

Fig.2 Surface mesh of pantograph (forward movement)

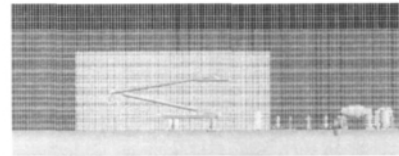


图3 受电弓附近加密的空间网格

Fig.3 Refined spatial mesh around pantograph

### 1.3 计算区域

高速列车流场为亚声速流动,空间中任意点的扰动都会影响到全场,需尽量减小壁面对计算区域的影响,满足外部空间无穷大的假设.本文通过扩大计算区域的方法减小壁面影响,计算区域(见图4)以列车车长 $H$ 为参考:列车头部向前延伸 $1.5H$ ,列车尾部向后延伸 $1.5H$ ,列车左右各延伸 $H$ ,计算区域高为 $H$ .

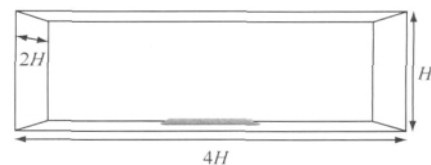


图4 计算区域

Fig.4 Computation domain

## 2 计算方法和计算边界条件

受电弓流场具有明显的非定常特性,为探究受电弓及其滑板所受的非定常气动力,需进行非定常计算.非定常的计算方法包括直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS),大涡模拟(Large Eddy System, LES),DES和非定常雷诺平均(Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes, URANS)等方法. DNS方法所要求的网格数量和计算时间十分巨大,不能用于工程计算. LES方法能较好地反映流场中大尺度的旋涡结构,并提供较详细的流场瞬态信息,但计算所需的网格数量仍然很大,特别是在近壁面附近.<sup>[7]</sup> URANS方法具有计算量小的优点,但很难准确模拟具有大分离的流动,如高速列车的尾流场;

另外也很难准确模拟非定常的复杂流动,如振动和气动噪声等。<sup>[7]</sup> DES 方法结合 URANS 方法和 LES 方法的优点,通过模型内置开关,在近壁面附近采用 URANS 方法,用雷诺平均的湍流模型模拟近壁面处小尺度的脉动运动;在远离壁面区域自动调整为亚格子模型,用 LES 方法模拟脱体涡运动。通过这种根据当地网格自动调整的方法,既可以在边界层内发挥 URANS 方法计算量小的优势,又可以在远离壁面的区域模拟大尺度脱体分离涡。

目前,常用的 DES 方法<sup>[8]</sup>分别为基于 SA 湍流模型的 DES 方法和基于 SST 两方程模型的 DES 方

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = \gamma \frac{\omega}{k} P_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $U_i$  为沿  $i$  方向的平均流速分量;  $k$  为湍流运动的湍动能;  $P_k$  表示湍动能的生成项  $P_k = \tau_{ij} \partial U_i / \partial x_j$ ,  $\tau_{ij}$  为雷诺应力;  $\omega$  为湍流比耗散率;  $\mu$  为动力黏性系数;  $\mu_t$  为涡黏性  $\mu_t = \rho k / \omega$ ;  $F_1$  为混合函数,  $F_1$  在边界层内是 1, 模型为  $k-\omega$  模型, 在远离壁面的区域转换为 0, 模型变为  $k-\varepsilon$  模型。  $\beta^*$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\sigma_k$  和  $\sigma_\omega$  都可以用  $\varphi$  表示, 若用  $\varphi_1$  表示原始  $k-\omega$  模型中的因数, 用  $\varphi_2$  表示转化的  $k-\varepsilon$  模型中的因数, 则 SST 两方程模型中的常数  $\varphi$  可表示为

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2 \quad (3)$$

其中  $k-\omega$  模型中的各系数为

$$\sigma_{k_1} = 0.85 \quad \sigma_{\omega_1} = 0.5 \quad \beta_1 = 0.075, \quad \beta^* = 0.09 \quad \gamma_1 = 0.5532$$

转化后的  $k-\varepsilon$  模型中的各系数为

$$\sigma_{k_2} = 1.0 \quad \sigma_{\omega_2} = 0.856 \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \beta^* = 0.09 \quad \gamma_2 = 0.4404$$

涡黏性系数

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (4)$$

式中:  $\Omega$  为涡量的绝对值;  $\alpha_1 = 0.31$ ;  $F_2$  为第二混合函数,

$$F_2 = \tanh \left( \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0.99 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right) \quad (5)$$

混合函数  $F_1$  定义为到最近壁面的距离  $y$  的函数,

$$F_1 = \tanh \left( \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.99 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega_2} k}{D_{C_{k-\omega}} y^2} \right) \right) \quad (6)$$

式中:  $D_{C_{k-\omega}}$  为  $k-\omega$  模型中的交叉扩散,

$$D_{C_{k-\omega}} = \max \left( 2 \rho \sigma_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right) \quad (7)$$

法等。国内外研究<sup>[9-11]</sup>表明: 通过构造合适的网格, 对于地面车辆的流场、机翼尾涡结构和飞行器大攻角飞行等, 采用 DES 方法都获得较好的计算结果。本文采用基于 SST 两方程模型的 DES 方法, 控制方程为非定常 N-S 方程, 方程的离散采用有限体积法。对流项采用 Roe 格式进行离散, 并加入限制函数提高差值的精度。黏性项采用 2 阶中心差分进行离散, 时间项采用 LU-SGS 方法进行离散。非定常计算时间步长取  $1 \times 10^{-4}$  s, 内迭代步数为 5 步。基于 SST 两方程模型的 DES 方程<sup>[12]</sup>为

基于 SST 两方程模型的 DES 方法基本思想是保持 SST 两方程模型中的  $\omega$  方程 (式 (2)) 不变, 在  $k$  方程 (式 (1)) 的耗散项中引入湍流尺度参数  $l_{k-\omega}$ , 故式 (1) 变为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = P_k - \frac{\rho k^{1.5}}{l_{k-\omega}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

式中:  $l_{k-\omega} = \frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega}$ 。

在 DES 方法中,  $l_{k-\omega}$  由尺度参数  $\min(l_{k-\omega}, C_{DES} \Delta)$  代替, 其中  $\Delta$  为网格单元的最大边长, 即  $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。常数  $C_{DES}$  可通过  $F_1$  得出,  $C_{DES} = (1 - F_1) C_{DES}^{k-\varepsilon} + F_1 C_{DES}^{k-\omega}$ , 其中,  $C_{DES}^{k-\varepsilon}$  和  $C_{DES}^{k-\omega}$  分别取 0.61 和 0.78。<sup>[8]</sup>

经过以上模型的构造, 在靠近壁面的边界层内, 由于  $\omega$  值相当大, 而  $k$  值有限,  $l_{k-\omega}$  远小于网格单元尺度, SST 两方程模型起作用, 可采用雷诺平均的算法; 在远离壁面的区域,  $\omega$  值减小, 当  $l_{k-\omega}$  大于  $C_{DES} \Delta$  时, 模型转换为大涡模拟的亚格子雷诺应力模型。

计算边界条件具体设置为: 入口为速度入口边界条件, 来流速度设为 350 km/h; 出口为压力出口条件; 外场采用滑移壁面条件; 另外, 为尽量模拟真实的流场特性, 考虑列车与地面间的相对运动, 地面采用移动壁面条件, 其移动速度与列车车速相同。

本文利用中国科学院力学研究所高性能计算平台进行计算, 每种情况采用 120 个 CPU 并行计算, 计算时长约为 200 h。

### 3 计算结果和分析

列车在高速行驶时, 受电弓的开、闭口运行状态

对气流流场结构影响较大,从而使受电弓及其滑板的受力有所不同,见表1.

表1 开、闭口运行时受电弓及其滑板所受气动力

Tab.1 Aerodynamic forces on pantograph and its slider in backward and forward movements

N

状态	受电弓及其滑板	抬升力			阻力			侧向力		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
开口运行	整弓	-53	413	166	1 769	2 085	1 920	-87	123	-21
	滑板	-101	200	44	891	1 000	945	-45	31	-8
闭口运行	整弓	46	344	194	1 877	2 102	1 998	-69	53	-14
	滑板	-51	145	55	893	964	927	-20	5	-7

对于整弓受力情况,由表1可知,受电弓在开、闭口运行时所受到的气动阻力相差不大,可见受电弓阻力不受开、闭口运行方式影响.这是由于受电弓在开、闭口运行时迎风面积相对较大,所受阻力很大,大部分来自于迎风面较高的滞止压力.在开、闭口运行情况下,滞止压力和迎风面积基本不变,因此阻力也相差不大.另外,阻力的波动幅度也相差不大.对于整弓所受的气动抬升力,开、闭口运行方式的差异比较明显,闭口运行时的抬升力比开口运行稍大,且闭口运行抬升力的波动幅度(154%)比开口运行(281%)小很多,这是由来流方向不同以及流场受绝缘子扰动不同引起的.由于受电弓外形基本为对称结构,因此所受侧向力较小.

受电弓与接触网相接触的部位只是受电弓滑板部分,因此如果考虑弓网间相互作用,那么单独统计受电弓滑板所受到的气动力会更准确.由表1可知,两种运行方式下受电弓滑板与整弓所受气动力的振荡特性基本相同,开口运行下的气动力波动幅度皆大于闭口运行,在抬升力方面表现得尤为明显.由于抬升力对受电弓与接触网间的接触压力波动起决定性作用,必须特别考虑受电弓整弓与滑板抬升力振荡的差异.由表1可知,开口运行时受电弓整弓和滑板的抬升力波动幅度均大于闭口运行,且在开口运行条件下,受电弓整弓和滑板的抬升力最小值均为负值,会造成弓网分离并引起局部放电,恶化受流质量.因此,受电弓闭口运行比开口运行更加稳定.图5为开、闭口运行时受电弓瞬态 $Q$ 等值面图( $Q = 10\ 000$ )

其中, $Q = -\frac{1}{2} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ , $Q$ 等值面可以很好地捕捉流场中涡的位置.由图5可知,受电弓高速运行时,其后部形成一系列旋涡结构,这些旋涡结构沿着受电弓迎风面的边缘生成,并不断向后方脱落、破灭,涡脱落的频率与受电弓所受气动力的振动频率有直接关系.对比图5(a)与5(b)可知,受电弓在开口运行时流场明显受到绝缘子的强烈干扰而变得十

分紊乱.无论开、闭口运行,从受电弓滑板处脱落的旋涡结构都较为规则.

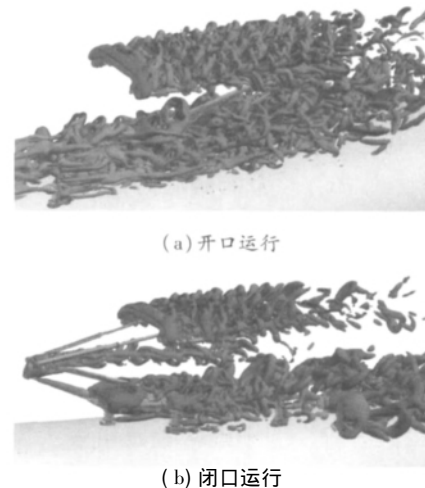


图5 开、闭口运行时受电弓瞬态 $Q$ 等值面( $Q = 10\ 000$ )  
Fig.5 Transient  $Q$  isosurface of pantograph in backward and forward movements( $Q = 10\ 000$ )

开、闭口运行时受电弓对称面瞬态涡量见图6.

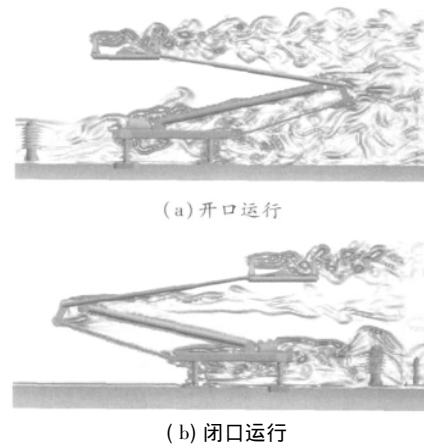


图6 开、闭口运行时受电弓对称面瞬态涡量  
Fig.6 Transient vortices on symmetry plane of pantograph in backward and forward movements

由图 6 可知绝缘子在开口运行时对受电弓流场起干扰作用. 另外, 在开、闭口运行时从受电弓滑板脱落的旋涡结构很有规律, 旋涡脱落频率应该含有一定的主频, 且与受电弓滑板所受的气动力振荡频率相关.

在开、闭口运行时受电弓滑板所受抬升力时域历程见图 7.

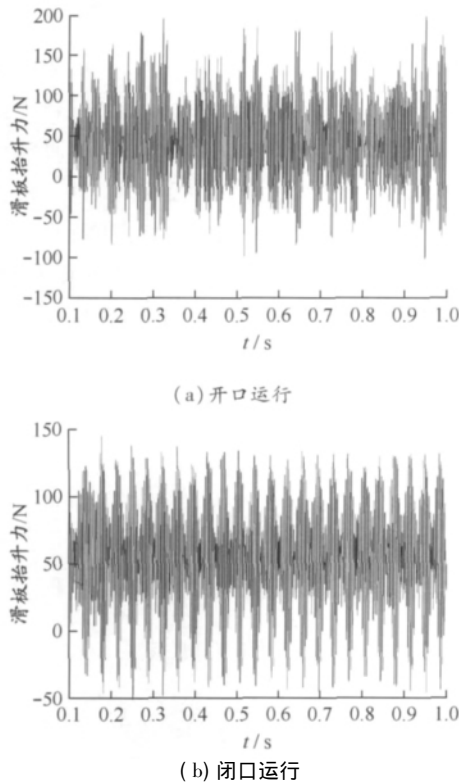


图 7 开、闭口运行时受电弓滑板所受抬升力时域历程  
Fig. 7 Time history of uplift on pantograph slider in backward and forward movements

由于受到非定常气流的作用, 受电弓所受的气动力不断振荡. 受电弓滑板所受抬升力对弓网接触压力有重要影响, 因此主要关心受电弓滑板所受抬升力在时域上的振荡特性. 流场中的旋涡脱落和破裂对受电弓滑板抬升力有重要影响, 如果流场中的旋涡结构较小并呈现出有规律的脱落现象, 那么受电弓滑板所受的抬升力也会出现有规律的周期性振荡; 而如果流场结构十分复杂, 旋涡脱落毫无规律, 那么受电弓滑板所受抬升力的振荡频率分布就比较分散, 不会呈现明显的主频.

在开、闭口运行时受电弓滑板抬升力的功率谱密度见图 8. 图 8 中, 横轴为斯特劳哈尔数  $Sr$ ,  $Sr = fh/U_\infty$ .  $f$  为受电弓升力的振荡频率,  $h$  为特征长度 (此处取 1 m),  $U_\infty$  为来流速度. 由图 8 可知, 在非定常气流流场的作用下, 受电弓滑板抬升力功率谱密

度峰值主要集中在  $Sr$  为 2 ~ 3 处, 说明受电弓所受脉动升力的能量主要集中在某些主要频率下, 与尾流场内旋涡脱落的频率有关. 在闭口运行时, 受电弓滑板抬升力振荡的主频表现明显, 主要有 214 Hz ( $Sr = 2.2$ ) 和 238 Hz ( $Sr = 2.4$ ) 2 个峰值; 而在开口运行时, 受电弓滑板抬升力振荡的主频为 240 Hz ( $Sr = 2.5$ ) 相对于闭口运行的主频稍高, 且分布较分散, 这与开口运行时的受电弓流场受绝缘子干扰有关.

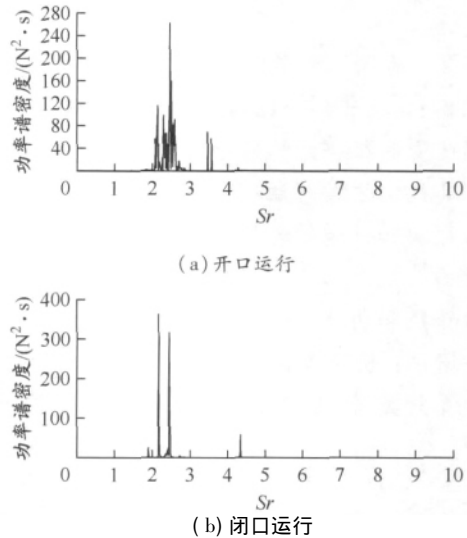


图 8 开、闭口运行时受电弓滑板抬升力的功率谱密度  
Fig. 8 Power spectral density of uplift on pantograph slider in backward and forward movements

### 4 结 论

通过对高速受电弓开、闭口运行非定常气动力的计算结果进行分析, 可得以下结论:

(1) 列车在 350 km/h 的运行速度下, 开、闭口运行对受电弓及其滑板的阻力影响不大, 二者阻力波动均值和波动幅度都很接近.

(2) 列车在 350 km/h 的运行速度下, 对于整弓所受的抬升力, 闭口运行的均值比开口运行稍大, 开口运行的波动幅度比闭口运行大; 受电弓滑板所受抬升力也有相同趋势, 相对于闭口运行, 开口运行条件下滑板抬升力的波动幅度会很大. 在开口运行时, 受电弓滑板所受抬升力的波动幅度剧烈, 会对弓网接触造成不利影响. 因此, 闭口运行比开口运行更加稳定, 建议受电弓采用闭口运行方式.

(3) 受电弓尾流场具有明显的非定常特性. 受电弓所受气动力与流场中旋涡结构脱落有重要关系, 为减小受电弓波动幅度, 尤其是垂直方向的波动, 需对受电弓进行优化设计以控制尾流场的激扰.

(下转第 48 页)

## 参考文献:

- [1] 梁韞. 气囊与安全带对乘员胸部性能的影响因素[C]//MADYMO 用户大会论文集. 上海, 2007.
- [2] 朱海涛, 孙振东, 白鹏, 等. 汽车正面碰撞中乘员的胸部伤害分析[J]. 交通标准化, 2009(198): 23-28.  
ZHU Haitao, SUN Zhendong, BAI Peng, *et al.* Passenger chest injury analysis in vehicle frontal impact [J]. Transport Standardization, 2009(198): 23-28.
- [3] IYOTA Teru, ISHIKAWA Toshihiro. The effect of occupant protection by controlling airbag and seat belt [C]// Proc 18th Int Tech Conf Enhanced Safety Vehicles. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2003.
- [4] 黄柏, 张君缘. 应用 MADYMO 进行新型约束系统部件的开发 [C]//MADYMO 用户大会论文集. 上海, 2005.
- [5] 张学荣, 刘学军. MADYMO 安全带建模及正面碰撞应用 [C]//MADYMO 用户大会论文集. 上海, 2005.
- [6] 姜峻岭, 朱大勇, 沈海东. 面向 C-NCAP 的轿车乘员约束系统性能改进研究 [J]. 汽车工程, 2010, 32(3): 217-219.  
JIANG Junling, ZHU Dayong, SHEN Haidong. A study on the performance improvement of occupant restrain system for C-NCAP [J]. Automotive Eng, 2010, 32(3): 217-219. (编辑 于杰)

## (上接第 5 页)

## 参考文献:

- [1] IKEDA M, YOSHIDA K, SUZUKI M. A flow control technique utilizing air blowing to modify the aerodynamic characteristics of pantograph for high-speed train [J]. J Mech Systems Transportation & Logistics, 2008, 1(3): 264-271.
- [2] SEO S I, CHO Y H, MOK J Y. A study on the measurement of contact force of pantograph on high speed train [J]. J Mech Sci & Technol, 2006, 20(10): 1548-1556.
- [3] 宋洪磊, 吴俊勇, 吴燕, 等. 空气动力作用对高速受电弓受流特性影响研究 [J]. 电气化铁道, 2010(1): 28-32.  
SONG Honglei, WU Junyong, WU Yan, *et al.* Influence of aerodynamic to high speed pantograph current collection characteristics [J]. Electr Railway, 2010(1): 28-32.
- [4] 宋伟, 徐海东. 空气动力对弓网接触压力影响的研究 [J]. 电气化铁道, 2010(6): 31-33.  
SONG Wei, XU Haidong. Research on influence to contact forces between overhead contact system and pantograph caused by aerodynamics [J]. Electr Railway, 2010(6): 31-33.
- [5] 杨桢. 基于空气动力学的受电弓高速受流研究 [J]. 电气化铁道, 2009(3): 17-20.  
YANG Zhen. Aerodynamics based study of pantograph high-speed current collection [J]. Electr Railway, 2009(3): 17-20.
- [6] BOCCIOLONE M, RESTA F, ROCCHI D, *et al.* Pantograph aerodynamic effects on the pantograph-catenary interaction [J]. Vehicle Syst Dynamics, 2006, 44(S1): 560-570.
- [7] SPALART P R. Detached eddy simulation [J]. Annu Rev Fluid Mech, 2009(41): 181-202.
- [8] STRELETS M. Detached eddy simulation of massively separated flow [C]//Proc 39th AIAA Aerospace Sci Meeting & Exhibit, AIAA-2001-879, Reno: AIAA, 2001.
- [9] SREENIVAS K, NICHOLS D S, HYAMS D G. Computational simulation of heavy trucks [C]//Proc 45th AIAA Aerospace Sci Meeting & Exhibit, AIAA-2007-4087, Reno: AIAA, 2007.
- [10] MITCHELL A M, MORTON S A, FORSYTHE J R, *et al.* Analysis of delta-wing vortical substructures using detached-eddy simulation [J]. AIAA J, 2006, 44(5): 964-972.
- [11] HOLL T, ALEXANDER K, GIACOPINELLI P, *et al.* Detached-eddy simulation of pulsed blowing actuation on the flap of a high-lift configuration [C]//Proc 29th AIAA Applied Aerodynamics Conf, AIAA-2011-3174, Honolulu: AIAA, 2011.
- [12] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model [C]//Proc Fourth Int Symp Turbulence, Antalya: Begell House, Inc, 2003. (编辑 于杰)