

高速受电弓正反受流气动特性研究

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国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190)

摘要 利用脱体涡模拟的方法, 研究了高速列车受电弓在正反受流条件下不同的升、阻力特性。经过对受电弓正反受流气动特性的对比, 可以得出: 正反受流对于受电弓的气动特性有重要影响, 尤其对升力波动的影响明显。这可以为受电弓进一步优化结构设计和实现良好运行提供依据。

关键词 受电弓, 正反受流, 脱体涡模拟, 升力, 阻力

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把电能传递给列车的变压系统和牵引系统。因此, 受电弓和接触网之间的接触状态对于高速列车的受流有重要影响。而受电弓的气动性能是保证接触网和受电弓之间具有良好接触稳定性和跟随性的重要因素。受电弓和接触网之间的应该有良好的接触压力特性, 以保证受电弓不会与接触网发生分离从而影响列车的连续受流。如果接触压力不足, 受电弓跟随接触网的性能就会变坏, 接触电阻增大, 严重时还会导致分离、拉弧, 恶化受流质量并损坏接触网。而如果接触压力过大, 受电弓和接触网之间的磨损就会增大。真实受电弓的外形较为复杂, 而且随着高速列车速度不断提高, 受电弓会受到强烈的气流干扰, 强烈扰动的气流又会引起受电弓的振荡。由此, 受电弓的气动特性应该具有很明显的非定常性。

由于受电弓周围复杂的流场特性, 理论分析的方法很难对其进行研究。目前, 对于高速列车受电弓气动特性的研究工作主要就是实验研究方法和数值模拟方法。实验研究方法又包括实车测试和模型测试方法[1-3], 但这两种实验方法也各自有其问题和不足[4, 5]。而数值模拟可以快捷有效地对于这类问题进行研究, 因此得到广泛的应用。但是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[6-9], 而且研究模型也经过很大的简化, 这

样与实际的流场情况相距较远。国外在这方面的研究工作相对较少[10]。

针对以上情况, 本文主要进行了以下三项工作: 一是以真实的受电弓和车体为计算模型, 建立空间网格, 考虑了车体对于受电弓周围流场的影响; 二是利用脱体涡模拟方法, 对于非定常条件下受电弓所受的气动力特性进行了研究; 三是对比研究受电弓在正反受流不同条件下的气动特性。

1 建立模型与划分网格

1.1 几何模型

列车几何模型考虑采用三辆编组(头车、中间车厢和尾车), 受电弓和列车的几何模型均来自真实列车的 CAD 数据, 由此生成列车和受电弓的表面网格如图 1 和 2。

1.2 计算网格

空间网格采用笛卡尔正交网格方式, 空间网格总数约为 1000 万。最小网格尺度为 4cm, 在受电弓附近进行了网格加密, 如图 3 所示。

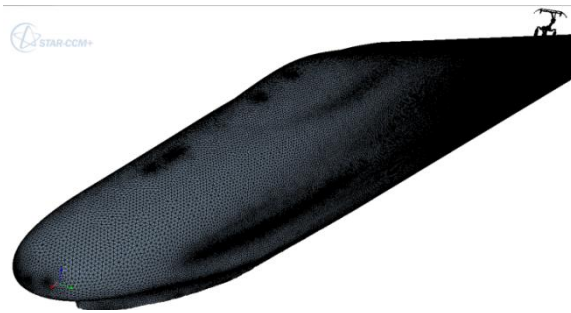


图 1 列车车体面网格

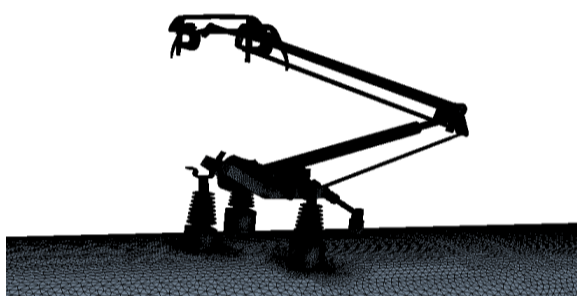


图2 列车受电弓面网格

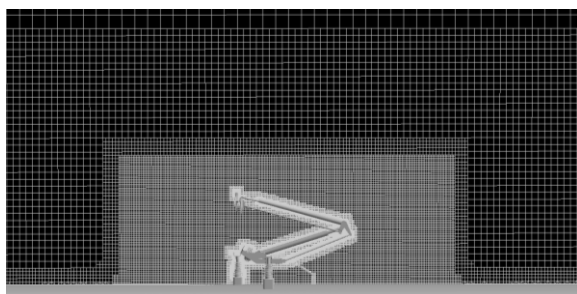


图3 列车受电弓附近空间网格加密

1.3 计算区域

由于高速列车空气动力学的控制方程为椭圆型方程，空间中任意点的扰动都会影响整个计算区域。因此需要尽量减小壁面对于计算域的影响，从而满足外部空间无穷大的假设。本次计算通过扩大计算区域的方法来使得壁面影响可以忽略。计算区域为：列车头部向前延伸100m，列车尾部向后延伸100m，列车左右各延伸50m，计算区域高为50m。如图4所示。



图4 计算区域

1.4 计算边界条件

计算区域的边界条件设定如下表1所示。

表1 计算边界条件

计算区域	边界条件
入口	速度入口边界， $v=300\text{km/h}$
出口	压力出口边界，出口压力为标准大气压
下地面	移动壁面边界条件，移动速度与列车运行速度相同
列车车身和受电弓	固壁边界条件
左、右和上表面	滑移边界条件

2 计算方法

受电弓的尾流场是一个复杂的湍流流场，其包含有各种不同尺度的旋涡结构。因此，要对受电弓尾流场进行准确地模拟，就需要较准确地捕捉尾流场中的旋涡结构，尤其是大尺度的旋涡结构。大涡模拟（LES）能够较好地反映流场中大尺度的旋涡结构，提供较详细的流场瞬态信息，但计算需要很大的网格量，特别是在近壁面附近网格量要求很高[11]。而雷诺平均数值模拟（RANS）相对于大涡模拟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，另外对于非定常的复杂流动也很难准确进行模拟，如振动和气动噪声等[11]。

为了能够以现有的计算条件，较为准确地模拟高雷诺数、大分离的流动过程，Spalart 于1997年提出了DES (Detached-eddy simulation) 方法[12]。DES是一种结合了RANS和LES优点的折中方法，其基本思想是通过模型内置开关，使得在近壁面附近采用RANS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；而在远离壁面的区域，自动调整为亚格子模型，用LES方法来模拟脱体涡运动。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RANS方法计算量小的优势，又可以在远离物面的区域对大尺度的脱体分离涡进行较好的模拟。目前，比较常用的DES方法有两种：一种是基于SA湍流模型的DES方法[12]；第二种是基于M-SST两方程模型的DES方法[13]。根据国内外的研究表明：通过构造合适的网格，

DES 方法对于地面车辆的流场[14-16]、机翼尾涡结构[17, 18]、飞行器大攻角飞行[19]等都获得比较好的计算结果。本文采用基于 M-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, 粘性项采用二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为 1×10^{-4} , 内迭代步数为 5 步。基于 M-SST 模型的 DES 方程为[20]:

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

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

F_1 为混合函数, F_1 在边界层内是 1, 模型为 $k-\omega$ 模型; 而 F_1 在远离壁面的区域转换为 0, 模型变为 $k-\epsilon$ 模型。以上模型方程中的参数 β , γ , σ_k , σ_ω 可以用 φ 来表示, 若用 φ_1 表示原始 $k-\omega$ 模型中的系数, 用 φ_2 表示转化的 $k-\epsilon$ 模型中的系数, 则 SST 模型中的常数 φ 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:

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \beta^* = 0.09, \gamma_1 = 0.5532$$

转化后的 $k-\epsilon$ 模型中的各系数为:

$$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09, \gamma_2 = 0.4404$$

涡粘性系数定义为:

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

式中, Ω 是涡量的绝对值, $\alpha_1 = 0.31$, F_2 为第二混合函数, 其可以表示为:

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

混合函数 F_1 定义为到最近壁面的距离 y 的函数:

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

式中, $C D_{k\omega}$ 代表了 $k-\omega$ 模型中的交叉扩散, 其表达式为:

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

基于 M-SST 两方程湍流模型的 DES 方法, 其基本思想是保持 M-SST 模型中的 ω 方程(式 2) 不变, 而在 k 方程(式 1) 的耗散项中引入湍流尺度参数 $l_{k-\omega}$, 由此模型 k 方程变为:

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

其中, $l_{k-\omega} = \frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega}$

在 DES 方法中, 模型的长度尺度 $l_{k-\omega}$ 将由 DES 的尺度参数 $\min(l_{k-\omega}, C_{DES} \Delta)$ 来代替, 其中 Δ 为网格单元的最大边长, 即 $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。常数 C_{DES} 可以通过混合函数 F_1 得出:

$C_{DES} = (1 - F_1) C_{DES}^{k-\epsilon} + F_1 C_{DES}^{k-\omega}$, 其中 $C_{DES}^{k-\epsilon}$ 和 $C_{DES}^{k-\omega}$ 分别取为 0.61 和 0.78[13]。

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

3 计算工况

为了分析高速列车受电弓在正反受流的不同情况下, 受电弓滑板所受气动力的振荡特性, 本文分别计算了以下两种不同的工况。

表 2 计算工况

	受流情况	车速 (m/s)
工况一	正弓受流	83.33
工况二	反弓受流	83.33

4 计算结果与分析

列车在高速行驶时, 受电弓的正反运行状态对于气流的流场结构影响很大, 从而使得受电弓的受力有很大不同。经过计算, 受电弓正

反运行时所受力的极值和平均值可见表3和表4。从中可以看出：受电弓在正反受流的情况下，所受的阻力相差不大，可见受电弓的阻力并不受流时，所受的升力很小，而当正向受流时，升力相对较大，两者之间相差近5倍。另外，升力的波动值差别也很大，正向受流时，升力的波动值约为30%，而反向受流时，升力的波动值就达平均值的16.1倍，升力的波动对于受电弓的影响会很大。气动升力对于受电弓和接触网间的接触压力起着决定性的作用，因此，必须特别考虑升力的差异。从侧向力来看，正反受流的差别也较大，首先是两者都为负值，也就是都同时偏向同一方向，而且侧向力数值较大，这可能与受电弓底部气流结构复杂，尾涡已经出现非对称结构有关，这点可以从以下的图5和图6中看出。

表3 受电弓正向受流时所受的力

	最小值	平均值	最大值
升力 (N)	415	490	559
阻力 (N)	1968	2036	2114
侧向力 (N)	-239	-162	-76

表4 受电弓反向受流时所受的力

	最小值	平均值	最大值
升力 (N)	-71	10	90
阻力 (N)	2031	2103	2185
侧向力 (N)	-419	-357	-285

图5和图6分别为受电弓正反受流的Q等值面图(Q=5000)，其中Q的定义为 $Q = -\frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ，Q等值面可以很好地跟踪流场中涡的位置。从图中可以看出：流场中的旋涡结构被清晰地模拟出来，受电弓高速运行时，其后部形成一系列旋涡结构，这些旋涡结构不断向后方脱落、破裂，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。在300km/h的速度下，受电弓顶部滑板附近的流场对称性较好，而在受电

受正反运行的影响。而对于受电弓所受的升力，正反运行的影响十分明显，在受电弓反向运行时，受电弓底部流场结构复杂，旋涡结构呈现出非对称的特性。

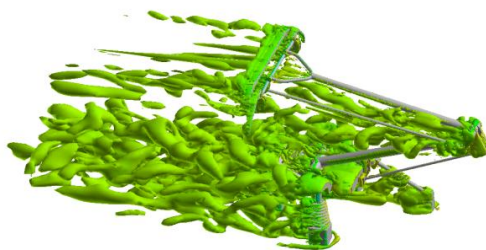


图5 受电弓正向受流瞬态Q等值面图(Q=5000)

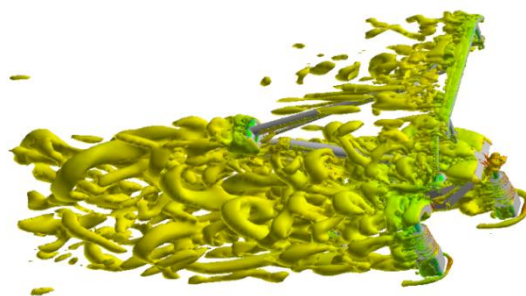


图6 受电弓反向受流瞬态Q等值面图(Q=5000)

图7和图8分别展示了受电弓在正反受流条件下所受升力在时域上的变化。受电弓由于受到非定常气流流场的作用，其所受的气动力在不断地振荡。由于升力对于弓网接触压力有重要影响，因此，主要关心受电弓所受升力在时域上的振荡特性。流场中的旋涡脱落和破裂对于受电弓升力有重要影响，如果流场中的旋涡结构较小并呈现出有规律的脱落现象，则受电弓所受的升力也会出现有规律的周期性的振荡；而如果流场结构十分复杂，旋涡脱落和破裂毫无规律，则受电弓所受升力的振荡频率会明显增大，振荡周期会明显减小。

图7 受电弓正向受流时的升力时域图

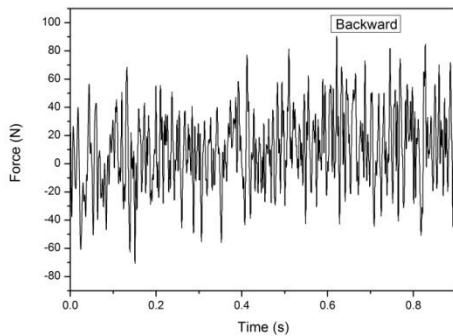
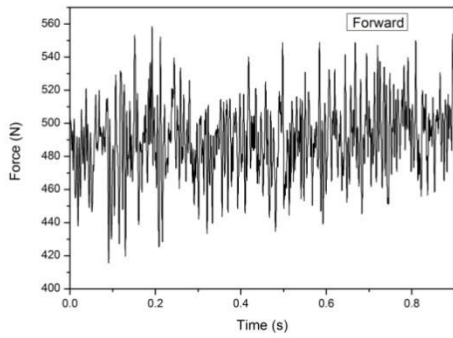


图8 受电弓反向受流时的升力时域图

图9和图10为受电弓在正反受流情况下,升力的功率谱密度分布图。其中横轴为斯特劳哈尔数 St , 斯特劳哈尔数定义为 $St=fH/U_\infty$, f 为受电弓升力的振荡频率, H 为特征长度(在此取为 1m)。从图中可以看出:受电弓在非定常气流流场的作用下,斯特劳哈尔数的主要峰值集中在 $0\sim 3$ 之间,在一些地方出现明显的峰值,这说明受电弓所受脉动升力的能量主要集中在某些频率下,而这与尾流场内旋涡脱落和破裂的频率相关。受电弓在反向受流时,升力振荡的主频表现明显;而在正向受流时,升力振荡则没有明显的主频,这可能与受电弓的不同部位涡脱落和破裂的频率不同有关。

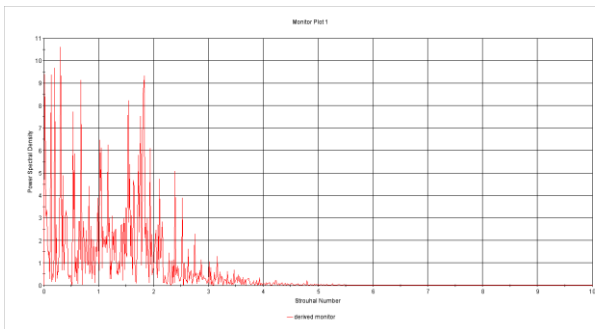


图9 受电弓正向受流升力的功率谱密度

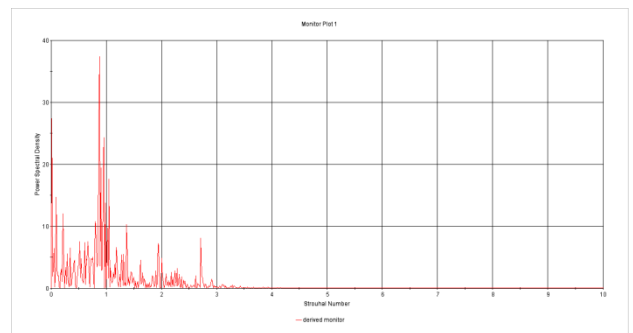


图10 受电弓反向受流升力的功率谱密度

5 结论

经过对于计算结果的分析,可以得出以下结论:

(1)列车在 300km/h 的运行速度下,受电弓正反受流时的阻力波动幅度均为 7% 左右,相差较小;受电弓正向受流时的升力波动幅度为 30% ,侧向力波动幅度为 101% ;受电弓反向受流时的升力波动幅度为平均值的 16.1 倍,侧向力波动幅度为 38% 。受电弓的升力波动幅度在正反受流情况下相差很大,反向受流升力波动剧烈,这会对弓网接触造成不利影响。

(2)受电弓的尾流场具有明显的非定常特性。受电弓所受的气动力与流场中旋涡结构的脱落和破裂有重要关系,因此要减小受电弓的振动幅度,尤其是垂直方向的振动,就需要对尾流进行控制,对受电弓进行优化设计。

参考文献

- 1 张建辉, 杨炯, 姚勇. 高速列车受电弓减阻的风洞试验研究. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(6): 116~121

- 2 蔡国华. 高速列车受电弓低速风洞试验技术. 铁道工程学报, 2006, 94 (4) : 67~70
- 3 Ikeda M, Yoshida K, Suzuki M. A flow control technique utilizing air blowing to modify the aerodynamic characteristics of pantograph for high-speed train. Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 2008, 1 (3) : 264~271
- 4 Seo SI, Cho YH, Mok JY. A study on the measurement of contact force of pantograph on high speed train. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006, 20 (10) : 1548~1556
- 5 Kim JS. An experimental study of the dynamic characteristics of the catenary-pantograph interface in high speed trains. Journal of Mechanical Science and Technology, 21 (2007) : 2108~2116
- 6 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. 电气化铁道, 2010 (1) : 28~32
- 7 宋伟, 徐海东. 空气动力对弓网接触压力影响的研究. 电气化铁道, 2010 (6) : 31~33
- 8 杨楨. 基于空气动力学的受电弓高速受流研究. 电气化铁道, 2009 (3) : 17~20
- 9 吴燕, 吴俊勇, 郑积浩. 基于有限元和空气动力学模型的高速受电弓动态性能仿真. 西南交通大学学报, 2009, 44 (6) : 855~859
- 10 Bocciolone M, Resta F, Rocchi D etc. Pantograph aerodynamic effects on the pantograph-catenary interaction. Vehicle System Dynamics, 2006, 44 (Supplement) : 560~570
- 11 Spalart PR. Detached-eddy simulation. Annual Review of Fluid Mechanics, 2009, 41: 181~202
- 12 Spalart PR, Jou WH, Strelets M etc. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. In: Advances in DES/LES, C. Liu and Z. Liu Eds. 1997-8-4~8. Columbus, OH, USA: Greyden press, 1997. 137~147
- 13 Strelets M. Detached eddy simulation of massively separated flow. In: AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2001-1-8~11. Pap. No. AIAA-2001-879.
- 14 Kapadia S, Roy S. Detached eddy simulation over a reference Ahmed car model. In: AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2003-1-6~9. Pap. No. AIAA-2003-857.
- 15 Sreenivas K, Pankajakshan R, Nichols DS etc. Aerodynamic simulation of heavy trucks with rotating wheels. In: AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2006-1-6~12. Pap. No. AIAA-2006-1394.
- 16 Sreenivas K, Nichols DS, Hyams DG etc. Computational simulation of heavy trucks. In: AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, 2007-1-8~11. Pap. No. AIAA-2007-1087.
- 17 Mitchell AM, Morton SA, Forsythe JR etc. Analysis of delta-wing vortical substructures using detached-eddy simulation. AIAA Journal, 2006, 44 (5) : 964~972.
- 18 Holl T, Alexander Kabat vel Job, Giacopinelli P etc. Detached-eddy simulation of pulsed blowing actuation on the flap of a high-lift configuration. In: 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, Hawaii, 2011-6-27~30. Pap. No. AIAA-2011-3174.
- 19 Forsythe JR, Squires KD, Wurtzler KE etc. Detached-eddy simulation of the F-15E at high alpha. Journal of Aircraft, 2004, 41 (2) : 193~200.
- 20 Menter FR, Kuntz M, Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya, Turkey, 2003-10-12~17. Begell House, Inc.

Aerodynamic Characteristics of High-speed Pantograph in Forward and Backward Current Collection

YAO Yuan GUO Dilong YAO Shuanbao YANG Guowei

(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Rd, Beijing 100190, China)

Abstract The lift and drag characteristics of high-speed pantograph in forward and backward movement are studied with detached-eddy simulation(DES). After comparison, it can be concluded that the forward and backward movement has a great effect on the aerodynamic characteristics of high-speed pantograph, especially on the lift fluctuation. This study can provide a reference for the further optimization and operation.

Key words pantograph, forward and backward current collection, DES, lift, drag