

文章编号: 1000-8055(2009)01-0116-06

匀速及加速行驶时带后视镜轿车气动噪声的研究

蓝 天, 康 宁, 郑 昊, 胡长安

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 应用计算流体力学软件 FLUENT 对带后视镜简化直背式轿车外部流场及车外某接收点处的气动噪声进行了数值计算和分析。脉动流场计算采用大涡模拟湍流模型, 动量方程的离散格式采用有限中心差分格式。分别对两种匀速运动情况和一种加速运动进行了计算, 由此研究不同车速、匀速和加速运动对接收点处脉动流场和气动噪声的影响。对于匀速运动, 车速越大, 接收点处流速越大, 压力越小, 脉动压力的脉动幅度越大, 在每个频率上所对应的声压级基本上越大, 总声压级也越大; 在同一行驶速度下, 加速运动比匀速运动在接收点处的流速要大, 压力要小, 在每个频率上所对应的声压级基本上要大, 总声压级要大, 声压级随频率的变化情况与匀速运动一样。

关 键 词: 气动噪声; 汽车外部流场; 数值计算; 大涡模拟; 加速行驶

中图分类号: U461.1

文献标识码: A

Study on the aerodynamic noise of a fastback car with rear view mirrors in uniform motion and accelerated motion

LAN Tian, KANG Ning, ZHENG Hao, HU Chang-an

(School of Transportation Science and Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The flow field around a simplified fastback car with rear view mirrors and aerodynamic noise at some receiving point were numerically simulated and analyzed using CFD (Computational fluid dynamics) software FLUENT. The pulsating flow field was simulated by the large eddy turbulence model and the momentum equations were discretized with the unbounded central difference scheme. The calculations were performed under three conditions: uniform motion with two running speeds and accelerated motion. The influences of pulsating flow field and aerodynamic noise by uniform motion speed, uniform and accelerated motions were investigated. The results show that with the increase of uniform motion speed, the velocity, amplitude of pulsating pressure, sound pressure level corresponding to each frequency and total sound pressure level at the receiving point become bigger, the pressure becomes smaller; at the same motion speed, the velocity, sound pressure level corresponding to each frequency and total sound pressure level in accelerated motion are greater than those in uniform motion, the pressure is smaller.

Key words: aerodynamic noise; outflow field of a car; numerical simulation;
large eddy simulation; accelerated motion

收稿日期: 2007-10-16; **修订日期:** 2008-06-19

作者简介: 蓝天(1980-), 男, 天津人, 硕士生, 主要从事汽车空气动力学方向的研究。

汽车在行驶过程中,周围气流与车身撞击会产生气动噪声.在驾驶员附近后视镜,由于突出在车身外表面上,在后视镜尾流区会出现旋涡生成和脱落现象,由此产生较大气动噪声,并直接影响驾驶员的驾驶舒适度.因此有必要对加装后视镜轿车气动噪声问题进行研究.

1999 年 Ono 等采用数值计算和风洞实验方法对后视镜及 A 柱附近流场进行了研究,用 Lighthill-Curle 方程对远场声压进行了计算,由此研究了后视镜及 A 柱形状对远处气动噪声的影响^[1].2004 年 Dolek 等用风洞实验方法对后视镜后的动压进行了测量,研究结果表明后视镜表面曲率突变及流动分离会产生较大的压强脉动^[2].2004 年北京大学安亦然等对北京 Jeep 后视镜的风噪声进行了计算分析^[3].2005 年 Niceno 等用大涡模拟方法对后视镜周围流动现象进行了研究^[4].2005 年奇瑞公司杨万里等用大涡模拟模型计算了某乘用车的瞬态外流场,并以后视镜及 A 柱区域为噪声源,预测了车外场点的噪声特性,模拟值与测量值在高频范围内比较符合^[5].同年吉林大学的肖军生等人对简化汽车模型外流场进行了数值模拟,并分析得到汽车外流场气动现象和气动噪声情况,结果与实验基本相符^[6].2008 年 Afgan 采用多面体网格大涡模拟方法对后视镜周围脉动压强进行了计算,结果表明采用非结构多面体网格比结构网格可节省较多的计算时间^[7].

以往较少对带后视镜轿车的风噪声进行研究,本文对不带后视镜及带后视镜简化直背式轿车模型做匀速及加速运动情况进行数值计算,研究后视镜对车外脉动流场及某接收点处的气动噪声的影响.

1 流场控制方程及计算模型

通常情况下,车身周围外部流动可按不可压流动处理.汽车在行驶过程中的外部流场可视为等温、非定常不可压流动,且空气介质的物性参数为常数.非定常不可压 N-S 方程组为

连续方程 $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ (1)

动量方程 $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v}$ (2)

式中 $\mathbf{v}$ 为速度矢量, p 为压力, ρ 为密度, μ 为动力粘性系数.

本文采用模型为简化直背式轿车模型,该模型与文献[8]完全一样,为 1 :8 缩尺模型,但加装

了一对后视镜(见图 1).模型长 L 为 512 mm,宽 W 为 206 mm,高 H 为 138 mm.后视镜尺寸约为 25 mm ×20 mm ×5 mm.

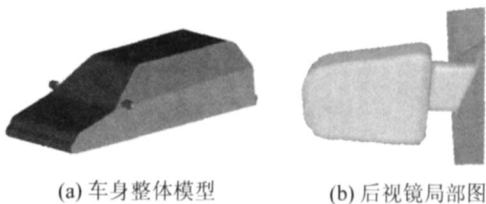


图 1 带后视镜简化直背式轿车模型
Fig. 1 Simplified fastback car model with rear view mirrors

2 计算域建立及网格划分

计算域为包围汽车模型的长方体.文献[9]研究了计算域大小对计算结果的影响,根据文献[9]计算域长约 5 L ,宽约 5 W ,高约 4 H ,如图 2 所示.计算域在车前 1 L ,车侧 2 W ,车后 3 L ,车身离地面距离 20 mm.进行噪声分析设定的接收点 R 在驾驶员左耳外侧.该点位于车身表面外侧,坐标为 (230 mm, 86 mm, 104 mm),距车身外表面垂直距离约 2 mm.

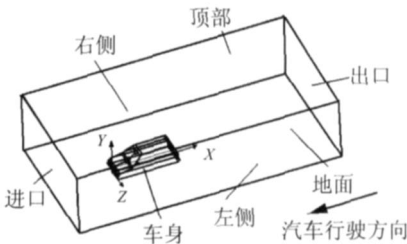


图 2 计算域示意图
Fig. 2 Computational domain

用六面体结构网格对计算域进行网格划分.在车身表面及后视镜附近对网格进行了加密.网格数目约为 85 万.图 3 为车身纵向对称面的网格分布图.

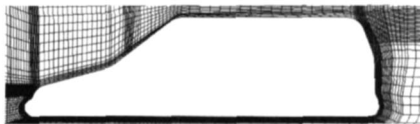


图 3 车身纵向对称面内的网格分布图
Fig. 3 Grid distribution at longitudinal cross section of symmetry

3 计算方法

3.1 边界条件及初始条件

进口:位于汽车前端约 $1L$ 处,为入流边界,速度大小为汽车匀速或加速行驶速度(见图2)。出口:距汽车后端约 $3L$ 处,为出流边界,流向梯度为零。地面:为无流边界,采用无滑移边界条件,速度与进口速度相同。车身:为无流边界,采用无滑移边界条件,速度为零。其它面(左侧、右侧和顶部):均采用滑移边界条件,即零剪切力滑移壁面,速度与进口速度相同。

初始时整个计算域中均为空气介质,压强为一个标准大气压,流场速度分布均为汽车行驶速度。

3.2 流场计算方案

本文对两种运动情况进行计算:匀速和加速运动。其中匀速车速为 126 km/h ;加速初速度为 90 km/h ,加速度为 5 m/s^2 ,时间为 0.1 s ,加速后车速为 91.8 km/h 。对于加速运动,由于计算时间限制,只计算了 0.1 s 。

为缩短计算时间,对匀速情况采用如下三阶段流场计算方案:第一阶段(定常流场阶段),采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行定常计算,使计算域内流场情况接近于汽车平稳行驶情况;第二阶段(非定常流场阶段),当第一阶段计算接近收敛时,用同样湍流模型进行非定常流场计算;第三阶段(脉动流场阶段),采用大涡模拟湍流模型对匀速运动的脉动流场进行计算,以便得到接收点处脉动压力,进行噪声分析。

对于加速运动情况,在 90 km/h 匀速运动第一和第二阶段计算结果基础上,采用大涡模拟湍流模型对加速运动脉动流场进行计算。加速运动过程设定一个变进口速度,其它参数均与匀速运动第三阶段相同。

匀速运动三个阶段及加速运动均采用分离式求解器的隐式解法和 SIMPLE 速度和压力耦合处理方法。动量方程离散格式在匀速运动第一和第二阶段采用二阶迎风格式,在匀速运动第三阶段和加速运动中采用有限中心差分格式。有限中心差分格式是由纯中心差分格式、中心差分和二阶迎风组成的混合格式以及一阶迎风格式组成,是 FLUENT 软件中用大涡模拟计算的缺省格式。在时间积分方案上,匀速运动第二和第三阶段及加速运动均采用二阶精度方案。

定常流场计算结果已由试验结果进行了验证,具体见文献[8]。

4 计算结果分析

4.1 匀速运动情况

4.1.1 第一阶段(定常流场阶段)

在第一阶段中,为易于对所研究匀速车速下计算结果进行比较,统一设置定常计算迭代次数为 800 次。图4和图5为两种匀速运动车速下,第一阶段汽车模型阻力系数 C_d 随迭代步数和时间的变化情况。由这两图可看出,阻力系数在开始时波动,随后逐渐下降,接近稳定,约为 0.5,变化趋势基本合理。

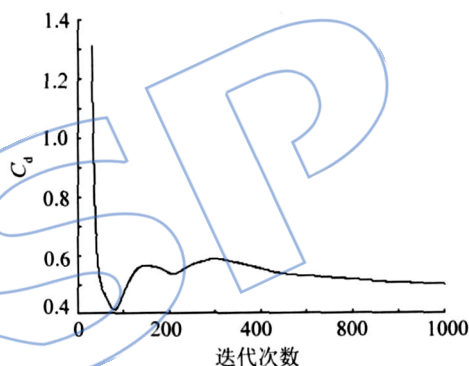


图4 阻力系数(第一阶段, 126 km/h)

Fig. 4 Drag coefficient (First stage, 126 km/h)

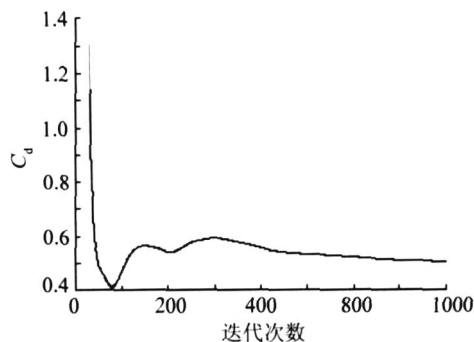


图5 阻力系数(第一阶段, 91.8 km/h)

Fig. 5 Drag coefficient (First stage, 91.8 km/h)

4.1.2 第二阶段(非定常流场阶段)

经验表明,在 1000 个时间步内计算结果可达到给定收敛标准,阻力系数趋于某一定值。具体迭代时间步长为 0.0001 s ,步数为 1000 步,时间总计 0.1 s 。

图6和图7分别为第二阶段两种车速条件下阻力系数 C_d 随时间变化情况。从这两图可看出,两种车速下阻力系数 C_d 在非定常流场计算开始

后 0.01 s 内发生波动,随后开始下降并逐渐趋于稳定.两种车速下气动阻力系数均收敛于 0.4871.

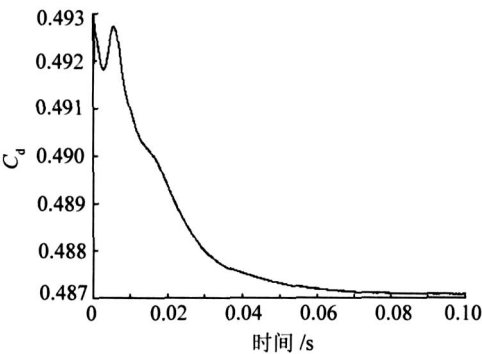


图 6 阻力系数(第二阶段,126 km/h)

Fig.6 Drag coefficient (Second stage , 126 km/h)

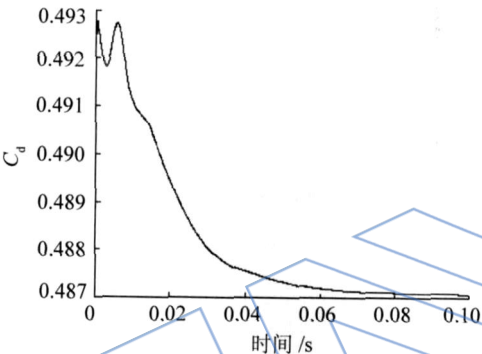


图 7 阻力系数(第二阶段,91.8 km/h)

Fig.7 Drag coefficient (Second stage , 91.8 km/h)

4.1.3 第三阶段(脉动流场阶段)

由于用大涡模拟计算脉动流场,所以时间步长大小是决定模拟结果的一个重要因素.经验表明,当频率超过 5000 Hz 时,表面脉动压力和远场噪声能量均已相对较小,可取计算值的最高频率为 5000 Hz,时间步长满足 $\delta t < 1/f = 1/5000 = 0.0002\text{ s}$.为满足这一要求,根据采样定律,采样频率就大于或等于 10000 Hz,为此计算时间步长为 0.0001 s,每一步记录一下接收点压力,共计算 1000 个时间步,计算总时间为 0.1 s.

1) 接收点处流速

图 8 和图 9 为两种车速下第三阶段结束时车身表面速度矢量图,图 10 为 126 km/h 车速下后视镜表面速度矢量图.由于后视镜存在,在其背风处有明显尾涡存在.两种速度下接收点处空气流速,91.8 km/h 速度下为 16.5 m/s,126 km/h 速度下为 23.1 m/s,增加了 28.6 %.可见车速越高,接收点处流速越大.

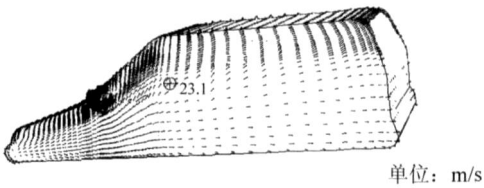


图 8 车身表面速度矢量图(匀速,126 km/h)
Fig.8 Vector velocity field on the surface of car model (Uniform motion , 126 km/h)

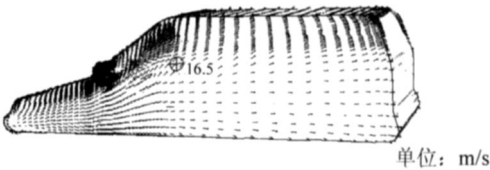


图 9 车身表面速度矢量图(匀速,91.8 km/h)
Fig.9 Vector velocity field on the surface of car model (Uniform motion , 91.8 km/h)

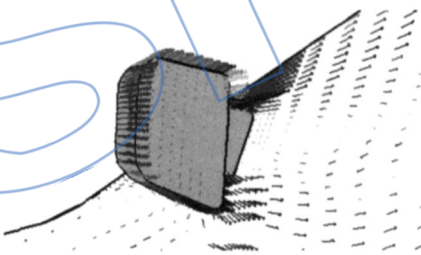


图 10 后视镜表面速度矢量图(匀速,126 km/h)
Fig.10 Vector velocity field on the surface of rear view mirror (Uniform motion , 126 km/h)

2) 接收点处压力

图 11 和图 12 为两种车速下第三阶段结束时车身表面压力分布图.在接收点处,91.8 km/h 车速下压力为 - 169 Pa,126 km/h 车速下为 - 242 Pa.可见,车速越高,接收点处压力越小,下降了 73 Pa.

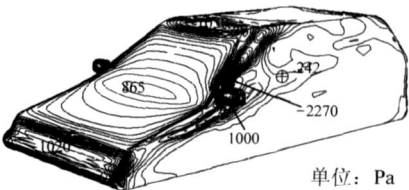


图 11 车身表面压力分布图(匀速,126 km/h)
Fig.11 Pressure distribution on the surface of car model (Uniform motion , 126 km/h)

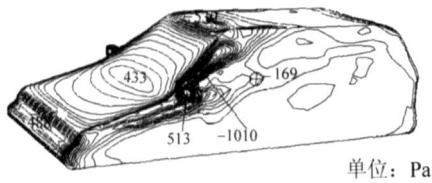


图 12 车身表面压力分布图(匀速,91.8 km/h)
Fig. 12 Pressure distribution on the surface of car model (Uniform motion , 91.8 km/h)

4.1.4 气动噪声分析

图 13 和图 14 给出了两种车速下接收点处声压级与频率关系曲线.随着频率增加,91.8 km/h 车速下接收点处声压级约从 123 dB 开始下降,约在 40 dB 左右波动;126 km/h 车速下约从 125 dB 开始下降,基本在 46 dB 上下波动,增大了 6 dB.可见,车速越高,整个频域内脉动声压级整体上越大.

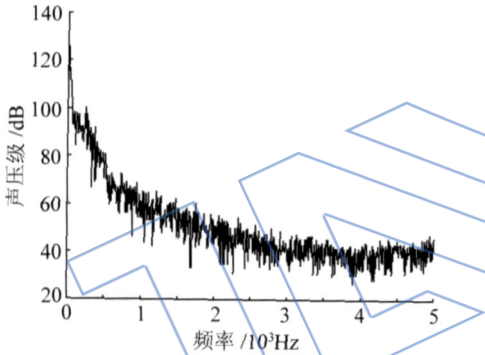


图 13 接收点处声压级频域图(匀速,126 km/h)
Fig. 13 Sound pressure level at receiving point (Uniform motion , 126 km/h)

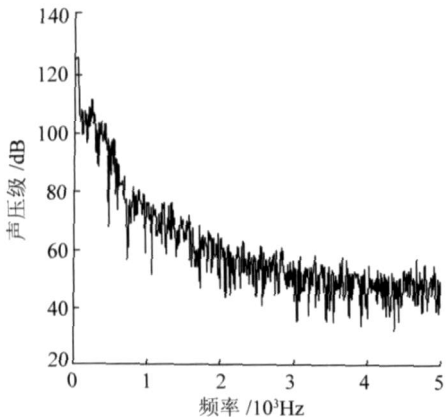


图 14 接收点处声压级频域图(匀速,91.8 km/h)
Fig. 14 Sound pressure level at receiving point (Uniform motion , 91.8 km/h)

接收点处总声压级,91.8 km/h 速度下总声

压级为 125 dB,126 km/h 速度下为 148 dB,增加了 23 dB.可知,车速越大,接收点处总声压级越大.

4.2 加速运动情况

4.2.1 流场分析

1) 接收点处流速

图 15 给出了加速 0.1 s 后车身及后视镜表面速度矢量图.加速过程中车身表面速度分布情况与匀速运动基本相似.在接收点附近,空气流速约为 17.3 m/s.与 91.8 km/h 匀速情况相比,流速大了 0.8 m/s,增加 4.6 %;可见,同一速度下,加速运动比匀速运动接收点处的流速大.

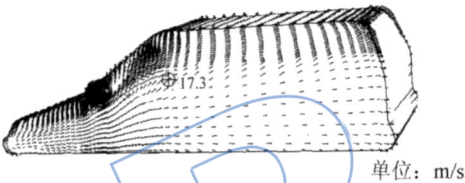


图 15 车身表面速度矢量图(加速)
Fig. 15 Vector velocity field on the surface of car model (Accelerated motion)

2) 接收点处压力

图 16 给出了汽车加速过程中车身表面压力分布图.从图中可以看出,加速过程中车身整体表面(包括后视镜)压力分布情况与匀速运动基本相似.接收点处压力约为 - 175 Pa,比匀速情况小了约 6 Pa.可知,加速运动比匀速运动接收点处压力小.

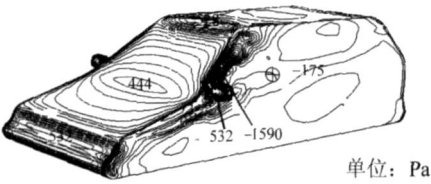


图 16 车身表面压力分布图(加速)
Fig. 16 Pressure distribution on the surface of car model (Accelerated motion)

4.2.2 气动噪声分析

图 17 为汽车加速过程中接收点处声压级频域图.在加速过程中,脉动声压级同样随频率增加从 130 dB 开始下降,并在 2000 Hz 以上变化较缓,基本上在 42 dB 左右波动,比 91.8 km/h 匀速运动大了约 2 dB.接收点处总声压级为 128 dB,比匀速情况总声压级高 3 dB.可知,在同一行驶速度下,加速运动比匀速运动,在整个频域内脉动声压

级整体上要大,总声压级也大。

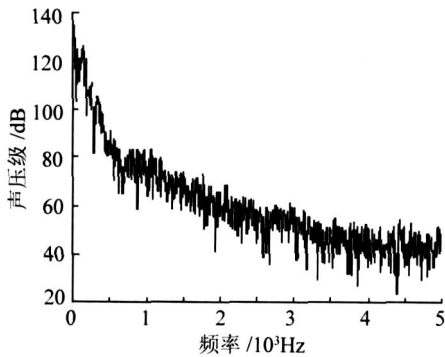


图 17 接收点声压级频域图(加速)

Fig.17 Sound pressure level at receiving point
(Accelerated motion)

5 结 论

匀速运动车速越大,接收点处流速越大,压力越小,脉动压力的脉动幅度越大,整个频域内脉动声压级整体越上,总声压级也越大;在同一行驶速度下,加速运动比匀速运动在接收点处的流速要大,压力要小,整个频域内脉动声压级整体上要大,总声压级大,声压级随频率的变化情况与匀速运动一样。

参考文献:

- [1] Ono K, Himeno R, Fukushima T. Prediction of wind noise radiated from passenger cars and its evaluation based on auralization [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81:403-419.
- [2] Dolek O, Ozkan G, Ozdemir B. Structure of flow around a full scale mirror of a car with relevance to aerodynamic noise [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical

Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(D10):1085-1097.

- [3] 安亦然,丁祎,张群峰,等. CFD 软件在汽车设计中的应用为本 [J]. 水动力学研究与进展, 2004, A19(1):6-12. AN Yiran, DING Yi, ZHANG Qunfeng, et al. Application of CFD code for car aerodynamic design [J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, A19(1):6-12. (in Chinese)
- [4] Niceno B, Hanjalic K, Basara B. Unstructured large-eddy simulation for vehicle-components aerodynamics: flow over an idealised car mirror [J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2005, 5(8):427-443.
- [5] 杨万里,李明江,刘国庆. 乘用车风噪声模拟研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(11):77-79. YANG Wanli, LI Mingjiang, LIU Guoqing. Wind noise simulation of passenger car[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2005, 33(11):77-79. (in Chinese)
- [6] 肖军生,傅立敏. 高速轿车外流场气动噪声研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006. XIAO Junsheng, FU Limin. Study of aerodynamic noise for the vehicle with high speed in the exterior flow[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [7] Afgan I, Moulinec C, Laurence D. Numerical simulation of generic side mirror of a car using large eddy simulation with polyhedral meshes [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2008, 56(8):1107-1113.
- [8] 蓝天,康宁,郑昊. 直背式轿车起动过程中气动现象的研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11):1868-1873. LAN Tian, KANG Ning, ZHENG Hao. Atudy of aerodynamic characteristics of fastback car in starting process [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11):1868-1873. (in Chinese)
- [9] 李广辉. 带行李架的旅行车的空气动力学计算与分析 [D]. 北京:北京航空航天大学. 2006. LI Guanghui. The aerodynamic calculation and analysis of the beach wagon with carrier[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)