

弹射座椅气动参数的数值计算

郁 嘉, 林贵平

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083)

[摘要] 为了解决弹射座椅研究中风洞试验不足和气动参数缺乏的问题, 尝试了采用计算流体力学 (CFD) 方法, 利用 CFD 计算软件 Fluent 求解 N-S 方程, 对弹射座椅的外流场进行数值计算, 求得了弹射座椅不同姿态下的气动参数值, 并将部分气动参数与风洞试验的测量值进行了对比, 结果发现, 计算结果与试验值的变化趋势完全相同, 大多数计算值与试验值的误差都在 10% 以内, 能够满足工程计算的需要, 可以作为试验值的补充和替代。通过 CFD 方法在弹射座椅气动参数计算中的应用, 可以看到 CFD 方法在弹射座椅的研究中有着广阔的应用前景。

[关键词] 弹射座椅; 救生系统; 计算流体力学 (CFD); 气动参数计算

[中图分类号] O35; V244.21 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2007) 06-0053-05

随着航空科技的发展, 战斗机性能得到了很大提高。伴随飞机飞行性能的提高, 对弹射座椅救生性能的要求也越来越高, 对弹射座椅姿态轨迹控制的研究需要大量气动参数的支持。传统的获取气动参数的方法主要是对座椅进行风洞吹风试验测量, 耗费大量的人力物力, 而且受到试验条件和设备的制约, 所获得的气动参数的数量无法满足研究的需要。如何得到大量的气动参数已经成为弹射座椅姿态轨迹控制研究中亟需解决的首要问题。随着 20 世纪 90 年代以来计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术的发展, 利用数值模拟方法获得弹射座椅的气动参数成为可能。从 90 年代初开始, 国外就开始尝试用数值方法研究座椅气动特性, 其发展过程经历了从二维到三维、从求解欧拉方程、附面层的 N-S 方程到求解全流场 N-S 方程的数值方法。目前, CFD 已经成功用于座椅气动特性的计算, 包括亚声速、跨声速和超声速气动特性的计算。美国海军和英国 Martin-Baker 公司曾用 CFD 方法对 ACES-II 座椅气动性能^[1]、座舱抛盖过程、弹射过程中头盔的气动特性等专题^[2]做过

深入分析。除了研究定常流动和座椅在空中自由飞行状态以外, 还开展了座椅离机过程中机身与座椅之间的相互干扰以及非定常流动问题的研究。美国海军武器中心 (NAWC) 飞机局还资助 CFD 研究公司 (CFD Research Corporation) 具体承担飞机弹射救生系统气动数值模拟研究项目, 经过近 10 年的努力, 成功开发出两套基于 N-S 方程的弹射救生系统气动数值模拟与分析软件平台, 即 CFD-ACE 和 CFD-FASTRAN 和配套的前后置处理软件, 进行广泛的数值计算和具体型号应用, 现已投入工程应用, 在同类计算中处于领先水平^[3]。

国内在这方面还处于起步阶段, CFD 技术在弹射座椅气动特性上的研究基本上是个空白。笔者尝试将 CFD 技术应用到弹射座椅的气动特性研究中。

1 计算原理

1.1 计算原理及过程

用计算流体力学方法对弹射座椅的外流场进行计算就是采用数值计算的方法对描述弹射座椅外流场的控制方程进行求解。描述流体流动一般采用

[收稿日期] 2005-11-15; 修回日期 2006-07-17

[基金项目] 航空基础科学基金资助项目 (03E51048)

[作者简介] 郁 嘉 (1979-), 男, 上海市人, 北京航空航天大学博士研究生

Navier—Stokes 方程, 简称 N—S 方程。对 N—S 方程求解可使计算结果能够更好地反映真实的流场。

对 N—S 方程的求解采用有限容积法, 首先建立弹射座椅的几何外形, 在此基础上进行网格划分, 以每一个网格单元为一个控制容积, 通过对控制容积的积分得到离散方程, 然后对离散方程进行迭代求解。

1.2 建立弹射座椅几何模型

弹射座椅的几何外形非常复杂, 因此弹射座椅的几何建模采用了工程 CAD 软件, 借助 CAD 软件强大的几何建模功能, 可以很方便地建立弹射座椅的几何模型。由于弹射座椅外形复杂, 为了后面的网格划分和流场计算, 必须对模型进行适当的简化, 去掉一些不必要的细小部件, 只保留那些对流场影响较大的部分。另外, 将座椅近似看成左右对称的模型, 以方便模型的建立。图 1 是用 CAD 软件建立的弹射座椅几何模型。

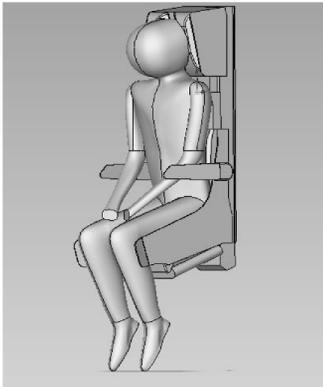


图 1 弹射座椅 CAD 几何模型

Fig.1 CAD model of ejection seat

1.3 网格划分

网格划分采用专用网格划分软件。由于弹射座椅的外形非常复杂, 网格划分采用了三维非结构化网格。网格的质量对数值模拟的结果影响很大, 过密和过疏都不利于计算。网格过疏往往得到不精确甚至完全错误的解, 有时还会造成计算结果不收敛; 而过密的网格会大幅度增加计算量, 不仅对计算机硬件的要求较高, 而且增加了计算时间。因此, 确定一个合理的网格数目和网格分布是网格划分的关键, 需要根据计算结果反复调整网格数目, 直到网格数目的增加对计算结果不再有显著的影响。在流场梯度 (速度梯度、压力梯度等) 较大的区域需要足够细密的网格; 而在流场梯度较小的区

域则使用比较粗的网格, 在保证网格整体质量的前提下尽量减小网格数目, 以减少计算量及收敛的稳定性。网格从密到疏的过程要缓和, 以保证物理量的光滑过渡。在此原则下最终划分出来的网格单元数约为 120×10^4 。弹射座椅的表面网格见图 2。

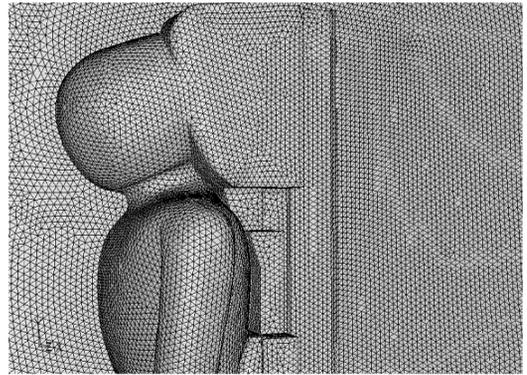


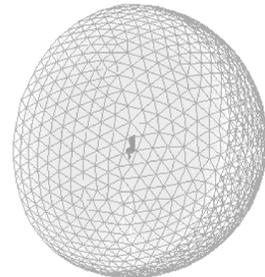
图 2 弹射座椅的表面网格

Fig.2 Surface mesh of ejection seat

1.4 边界条件和计算方法

边界条件是在求解区域上求解的变量或其一阶导数随地点和时间的变化规律。

由于是对弹射座椅的外流场进行计算, 因此计算流域采用了球形, 流场区域见图 3。为了减少计算量, 计算域的取得要尽可能小, 在所取区域的边界上需要给定何时的边界条件, 它要求在数学上满足适定性, 在物理上具有明显而确切的意义。笔者在数值计算时取计算域为参考长度的 8 倍左右, 在远场边界上采用远场 Riemann 不变量无反射边界条件, 即扰动波不会反射回流场。所有与流体相接触的弹射座椅壁面都采用了无滑移的固壁边界条件, 并在近壁面区采用标准壁面函数^[4]。计算中忽略了重力对流场的影响。



Grid Aug 02, 2003 FLUENT 6.1 (3d, segregated, 2kw)

图 3 流场区域网格

Fig.3 Mesh of fluid region

由于弹射座椅的外流场是高雷诺数下的流动，需要考虑湍流脉动的影响。为了更准确地模拟湍流流动，并使雷诺平均 N-S 计算方程封闭，需要在计算中引入湍流模型，为此采用了使用最为广泛的标准 $k-\epsilon$ 二方程模型，湍流粘度按下式确定^[5]：

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon,$$

式中 C_μ 为常数； k 为湍流动能； ϵ 为湍流能耗散率。

湍流动能输运方程为

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon;$$

流动能耗散率输运方程为

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{C_1 \epsilon}{k} \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}.$$

式中 $\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t}$ 为非稳态项； $\rho u_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k}$ 为对流项；

$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right]$ 为扩散项；

$\frac{C_1 \epsilon}{k} \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 为产生项；

$C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$ 为消失项。

采用 $k-\epsilon$ 模型求解湍流流动问题时，控制方程有连续方程、动量方程、能量方程、 $k-\epsilon$ 方程和湍流粘度方程。这一方程组引入了 3 个系数 C_1 、 C_2 、 C_μ 和 2 个常数 σ_k 、 σ_ϵ 。这里 C_1 、 C_2 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ϵ 均取常数^[5]： $C_1=1.44$ ； $C_2=1.92$ ； $C_\mu=0.09$ ； $\sigma_k=1.0$ ； $\sigma_\epsilon=1.3$ 。

2 计算结果及分析

2.1 流场计算结果

笔者对国内现役的某型弹射座椅在不同马赫数和攻角状态下的气动参数进行了计算。每一个状态用双 AthlonMP CPU，2G 内存的计算机计算耗时约 8 h。图 4、图 5 为计算所得到的流场流线图。由于弹射座椅为钝体外形，因此在流场中会产生比较严重的气流分离。从图中可以看到座椅不同攻角下的气流分离情况。图 6 为 $Ma=0.6$ ，攻角为 0° 时的对称面静压分布。

2.2 气动参数计算结果分析

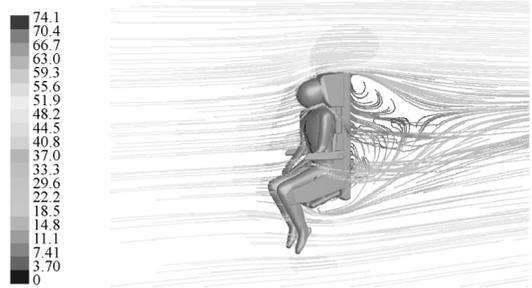


图 4 攻角为 0° 时的流场流线图

Fig.4 Attack angle 0° path line

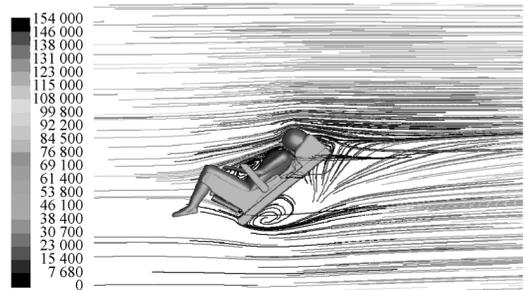


图 5 攻角为 45° 时的流场流线图

Fig.5 Attack angle 45° path line

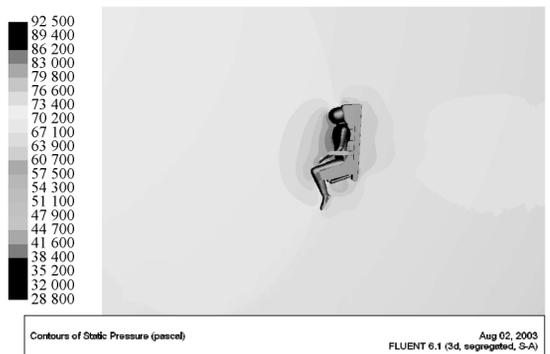


图 6 $Ma=0.6$ ，攻角为 0° 时的对称面静压分布

Fig.6 $Ma=0.6$, attack angle 0° static pressure contour on symmetry face

图 7、图 8、图 9 分别表示速度为 50 m/s 和无侧滑情况下的阻力系数、升力系数、俯仰力矩系数的计算值与试验值的比较。从图中可以看到，利用 CFD 计算所得到的气动参数与风洞吹风所得到的结果随攻角变化的趋势是基本一致的，都接近于正弦变化。

由弹射座椅的几何外形可知，攻角为 0° 、 180° 、 360° 时，来流吹袭座椅正面或背部，座椅的迎风面积最大，相对应的阻力系数也是最大的。当

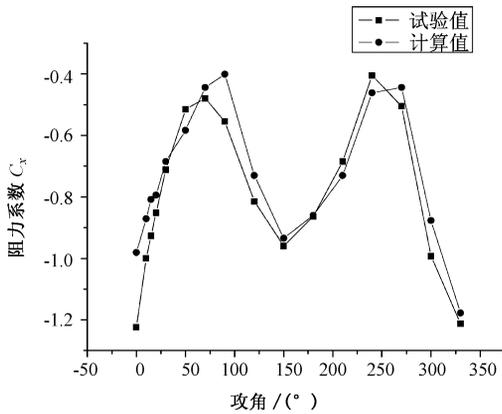


图7 阻力系数计算值与试验值比较

Fig.7 Drag coefficient as function of attack angle, comparing computation and experiment

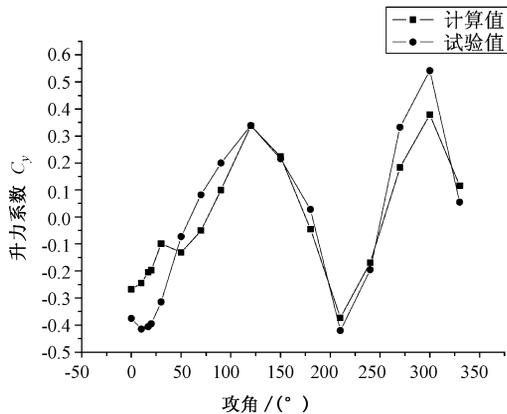


图8 升力系数计算值与试验值比较

Fig.8 Lift coefficient as function of attack angle, comparing computation and experiment

攻角为 90° 、 270° 时，来流吹袭座椅底部或顶部，座椅的迎风面积最小，相对应的阻力系数也最小。攻角改变时座椅迎风面积发生变化，迎风面积越大阻力系数也越大；迎风面积越小阻力系数也越小。

升力系数大小是由座椅上下表面压差决定的。由于弹射座椅钝体外形所造成的气流分离，导致攻角在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 和 $180^\circ \sim 240^\circ$ 范围内时，座椅上表面压力大于下表面压力，此时升力系数为负值；当攻角在 $60^\circ \sim 160^\circ$ 和 $260^\circ \sim 340^\circ$ 时，座椅上表面压力小于下表面压力，所以此时压力系数为正值。

座椅的俯仰力矩是升力和阻力共同作用的结果，因此结合阻力系数和升力系数可以看出，俯仰力矩系数与升力系数和阻力系数的变化趋势应该是基本一致的。

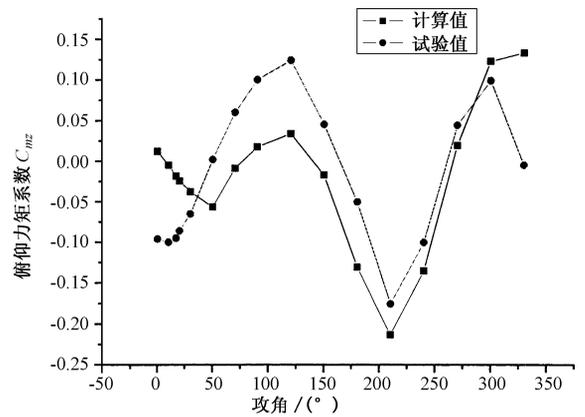


图9 俯仰力矩系数计算值与试验值比较

Fig.9 Pitch moment coefficient as function of attack angle, comparing computation and experiment

此外，通过比较计算值与试验值可以看出，计算得到的气动参数与风洞吹风得到的气动参数在数值上也是比较吻合的。由于对几何模型进行了简化以及网格划分和计算所带来的误差等原因，计算值与试验值仍然会有一些偏差。比较3个气动参数的计算值与试验值的偏差发现，俯仰力矩系数的偏差比较大，除了是由于俯仰力矩系数的计算误差是由升力系数和阻力系数的计算误差共同影响的结果外，计算时所用的重心位置与试验时的重心位置不一致也是俯仰力矩系数误差较大的重要原因。

3 结论

1) 通过将 CFD 计算得到的气动参数的计算值与风洞吹风试验得到的试验值进行对比和分析可以看到，计算结果基本上是正确的，符合物理实际的；计算精度也比较高，可以满足工程计算的需要，用来替代和补充部分的试验值。

2) 为了进一步提高精度，需要合理地简化几何模型，尽量使几何模型接近实际，而又不增加计算的难度和计算量；还需要进一步地提高网格划分的质量，以使计算精度进一步提高。这些都需要在以后做进一步的研究。此外，对计算误差的评估也是一个需要研究的问题。由于试验值都是在风洞中吹风得到的，风洞的壁面效应和弹射座椅的支撑结构对流场的影响使得试验值也会有一定的误差，所以在误差评估中，要将这些误差因素也放进来综合考虑。

3) 将 CFD 计算应用于弹射座椅的研究是可行的，并且有着非常广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Rock S G, Habchi S D. Computational Investigation of Wind Tunnel Support Interference for an Ejection Seat Test [R]. AIAA-99-3184, 1999
- [2] Hufford G S, Habchi S D. Validation of CFD Methodology for Ejection Seat Applications [R]. AIAA-94-0751, 1994
- [3] Rock S G, Habchi S D. Validation of an Automated Chimera Methodology for Aircraft Escape Systems Analysis [R]. AIAA-98-0767, 1998
- [4] 刘导治. 计算流体力学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社
- [5] 朱自强, 吴子牛, 李 津, 等. 应用计算流体力学 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1998

Numerical Computational Aerodynamics Coefficient for Ejection Seat

Yu Jia, Lin Guiping

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

[Abstract] The traditional method for obtaining aerodynamics coefficient for ejection seat is wind tunnel experiment. To research the feasibility of the application of computational aerodynamics coefficient for ejection seat on general CFD software, aerodynamics coefficient of ejection seat was computed using general CFD software. Through resolving fluid field, the result is obtained. The average difference of the result compared with the experiment data is less than 10 % and in the range of permission. It shows that CFD methodologies can be used instead of wind tunnel experiment for the ejection seat research. CFD methodologies can be applied widely to ejection seat research.

[Key words] ejection seat; escape system; computational fluid dynamics; aerodynamic coefficient

(cont. from p.52)

- [7] Barraza G A, Back W E. Probabilistic monitoring of project performance using ss-curves [J]. Journal of Construction Engineering and Management. ASCE, 2000, 126(2): 142~148
- [8] Barraza G A, Back W E. Probabilistic forecasting of project performance using stochastic S curves [J]. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 2004, 130(1): 25~32

Study on Construction Schedule Analysis and Control of Tunnel Engineering Based on Visual Simulation

Yang Guowen^{1,2}, Song Yang¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Yunnan Electric Power Invest Limited Company, Kunming 650021, China)

[Abstract] The methodology of visual simulation for tunnel engineering construction schedule is presented in this thesis. Visualization of founding model, calculation and result of construction schedule simulation are realized. The simulate model of tunnel engineering construction schedule is founded. Risk analysis and decision_making method of tunnel engineering construction schedule based on visual simulation are presented. The resource optimization is conducted. On the basis of studying the S curve theory and method of schedule management, tunnel engineering construction schedule S curve real time management and control method based on visual simulation are presented. Practical engineering analysis is made.

[Key words] visual simulation; tunnel construction; optimization analysis; real time control