

文章编号: 1000 8055(2008)10 1859-09

人椅系统绕流流场的数值模拟

宋保银¹, 张中刚^{1,2}, 牟 杰¹, 姚秋萍¹

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

2 集美大学 轮机工程学院, 厦门 361021)

摘 要: 以某种成熟型号的弹射座椅为研究对象, 对其进行合理简化、改进, 获得了接近实体的人椅系统几何模型. 借助 CFD 软件 FLUENT, 采用控制容积法, 对 N-S 方程、壁面函数、标准湍流方程进行了求解. 在验证计算数据与实验数据相吻合的基础上, 考察了马赫数为 0.2、0.6、1.2, 攻角为 $0^\circ \sim 60^\circ$, 偏转角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 条件下可压缩人椅系统绕流流场情况, 得到了人椅系统绕流流场的流速、压力、马赫数、表面压力及气动力参数分布情况和变化规律. 结果表明: 高马赫数、零攻角、大偏转角对人体造成的损害程度最大.

关 键 词: 人椅系统; 流场; 气动特性; 数值模拟

中图分类号: V244.2

文献标识码: A

Numerical simulation of the flowfield around the seat/occupant system

SONG Baoyin¹, ZHANG Zhong-gang^{1,2}, MOU Jie¹, YAO Qiu-ping¹

(1. College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2 Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The seat/occupant system was modeled geometrically and mathematically in this paper. The modified geometry model was closer to the real body. A numerical investigation using CFD technique was conducted. A three dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes code with standard turbulence model was used to describe the turbulent compressible flow field around the seat and occupant. The CFD code used was FLUENT, which is based on the control volume finite difference approach. The results were presented in the form of force and moment coefficients, and agree well with the experimental data obtained from wind tunnel test. The dynamic characteristics of the seat / occupant system for Mach number of 0.2, 0.6, and 1.2, at angles of attack from 0 to 60 degrees and the angles of sideslip from 0 to 30 degrees were investigated respectively. The results reveal that high Mach number, zero angle of the attack and large sideslip angle are the most dangerous state for the escaping pilot.

Key words: seat/occupant system; flow field; aerodynamic characteristic; numerical simulation

人椅系统的气动特性是进行弹射救生系统设计开发的重要依据之一. 弹射救生装置在弹射出舱后是一个外形极不规则的飞行器, 其绕流流场

非常复杂. 目前研究人椅系统气动特性常用方法主要包括实验方法和数值模拟方法两种^[1]. 实验研究方法在弹射救生领域中有着广泛的应用. 其

收稿日期: 2007 09 25; 修订日期: 2008 03 14

基金项目: 航空科学基金(03E52027)

作者简介: 宋保银(1956-), 男, 河北磁县人, 教授, 博士, 主要从事飞行器环境控制和生命保障、传热传质等方面研究.

手段主要是通过风洞、水洞、火箭撬滑轨和滑车、空中弹射、以及测试设备进行模型实验. 其优点在于, 能在与所研究的问题相同或大体相同的条件下, 进行模拟与观测, 因此所得结果较为真实、可靠. 但是, 该方法往往也会受到模型尺寸的限制和试验边界的影响, 此外测量的本身也会影响所得到的精度, 并且实验往往要消耗大量的人力和物力, 较长的实验周期. 相对于物理模拟而言, 数值模拟是弥补或替代的有效手段. 有些甚至由于实际条件的限制, 而只可能用数值模拟的手段来完成. 与实验研究相比, 它具有研究成本低、安全、流场信息详细、不需要实物样机和缩比模型、无干扰等优点.

早在上世纪 60、70 年代, 国外就开始了弹射座椅性能的计算研究, 目前已经采用计算流体力学(CFD)的方法来分析座椅和降落伞的气动性能. Caruso 和 Mendenhall 研究了二维 N-S 方程数值理论在弹射座椅上的应用^[2]; Wurtzler 应用稳态欧拉方程模拟 B-1A 舱盖的流场^[3]; Baum 和 Lohner 运用非稳态的欧拉方程研究人椅系统的瞬时流动效果^[4]; Habchi 研究过用 N-S 方程解决三维人椅系统的数值模拟^[5].

目前我国座椅气动参数主要靠大量吹风试验获得^[6], 可供设计研究的气动参数不多, 尤其缺乏座椅人体一些重要部位的气动数据. 自上世纪 70 年代以来, 我国主要采用三自由度简易数学模型, 忽略横侧向运动, 只近似计算人椅在纵向对称平面内的运动. 随着弹射救生技术研究不断发展, 加之双座弹射座椅的发散轨迹及侧向弹射等新技术的出现, 三自由度平面运动数学模型远不能满足要求, 因此有必要进行六自由度的研究. 目前六自由度的座椅气动研究在我国尚处于摸索阶段. 利用 CFD 技术模拟人椅系统的绕流流场, 是获得六自由度气动参数的重要手段之一. 国内利用 CFD 技术对座椅的气动特性进行数值研究方面的工作做的还很少, 近几年才多了起来, 姜南和雷华金^[7]用数值方法模拟了一个二维人椅系统在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 攻角下的流场; 陈德华^[8]等对大攻角范围内战斗机救生系统的数值模拟进行了研究.

鉴于上述状况, 本文以我国某型弹射座椅作为对象, 经过适当的简化、改进, 并结合人体尺寸, 用 Solid works 软件建立起人椅系统的三维几何模型. 将几何模型导入网格生成软件 Gambit 中, 在确定人椅系统的计算区域后, 生成四面体网格单元. 用 CFD 软件 FLUENT 对人椅系统在多种

状态下的流场进行了数值模拟, 获得了人椅系统的气动力参数, 为座椅的开发、设计提供了较充分的流场信息和理论依据.

1 人椅系统的几何、数学模型

1.1 人椅几何模型的建立

人椅系统的外形随着飞行员的个体差异以及个体防护装备的不同有较大差异. 为了使计算结果有一定的典型意义并使结果可以与实验作对比以检验计算的准确性, 座椅原始模型采用具有较为完整气动参数的国产某型座椅(见图 1). 根据 GJB 规定的第 50 百分位数的飞行员人体尺寸, 考虑到头部、躯干、下肢的尺寸, 并依据座椅结构, 经过简化和逐步完善, 设计出计算所用的人椅系统的几何模型. 采用 CAD 软件 Solid works 对所研究的人椅系统进行几何建模. 初步简化模型^[9]如图 2 所示. 经过圆整、加臂等完善和改进, 获得了改进后的人椅结构形状简化模型^[10](如图 3 所示). 明显可见改进后的人椅结构几何模型更接近实际情况, 与图 4 所示的 Habchi 和 Hufford 对 NACES(Navy aircrew common ejection seat) 型号座椅简化后的人椅模型^[5]相当.

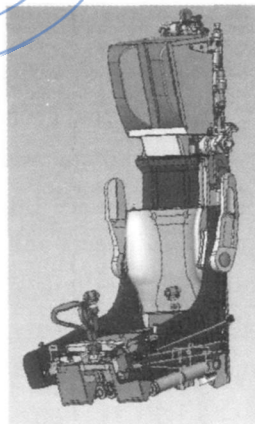


图 1 采用的座椅模型

Fig. 1 Real ejection seat

1.2 计算区域、计算状态的选择及其网格生成

本文所计算的为第 50 百分位冬装的情况, 确定人椅质心以后, 以质心为新坐标系的原点来确定人椅系统的计算区域. 人椅系统计算区域参考国外相关文献[5], 流场范围选取如下: 人椅系统模型高度为 H , 上下各取 $2H$, 左右 $1.6H$, 前方 $2H$, 后方 $3.75H$. H 可由 Solid works 软件直接测量得到, 文中 $H = 1\,660.55\text{ mm}$. 计算状态有: 侧滑角为 0° 时, 攻角分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 马赫数分别为 0.2, 0.6, 1.2 的状态; 攻角为 0° 时侧滑

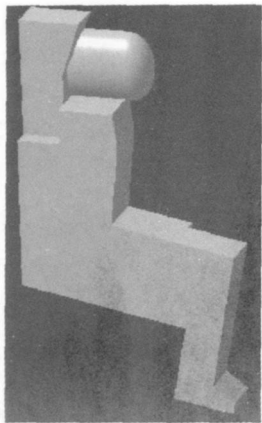


图 2 人椅初始简化模型
Fig. 2 Initial model for seat/occupant

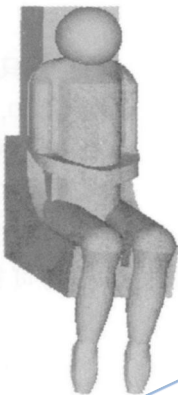


图 3 改进后的人椅简化模型
Fig. 3 Improved model for seat/occupant

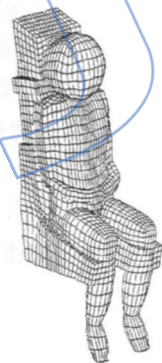


图 4 国外的简化模型
Fig. 4 American model

间网格示意图. 为了简化模型, 本文做了如下假设: ①将人体视作刚体, 忽略人的蠕动和柔性; ②流动为定常流动; ③流动介质为理想气体, 满足理想气体状态方程, 其它物性参数采用定值.

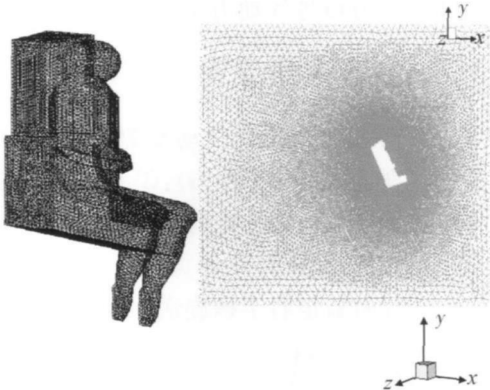


图 5 人椅系统网格
Fig. 5 Computational grids for seat/occupant system

1.3 人椅系统绕流场的数学模型

控制方程的动量方程为 N-S 方程. 湍流模型采用的是工程上常用的标准 $k-\epsilon$ 模型, 并在近壁区用标准壁面函数进行修正.

边界条件和初始条件

在数值模拟过程中, 对边界进行了如下处理. 流场的前、后、上、下、左、右侧边界取为压力远场边界. 由于人椅系统结构的对称性, 在考虑偏转角为零的情况时, 可以只取一半模型来进行数值模拟. 取人椅系统的纵向对称面为对称边界. 对于人椅系统表面, 取无滑移边界绝热壁面, 即壁面处流体速度和温度梯度均为零. 本文中令初始条件等于来流条件.

方程的求解

在应用非结构网格的流体力学计算方面, 主要使用控制容积法和有限元法. 本文对方程运用控制容积法和二阶迎风格式进行离散. 用隐式耦合解算器, 在当前解的基础上更新流场解; 用已更

角为 $15^\circ, 30^\circ$, 马赫数分别为 0.2, 0.6, 1.2 的状态. 根据所选择的矩形计算区域和状态, 为了保证来流方向在不同攻角和侧滑角下在计算区域的一致性和计算精度, 用 Gambit 软件共生成 7 个非结构网格文件, 分别是侧滑角为 0° 时攻角为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的网格文件, 攻角为 0° 时侧滑角为 $15^\circ, 30^\circ$ 的网格文件. 图 5 仅给出了人椅结构表面以及攻角为 30° 状态下对称平面和计算区域空

新的量求解那些通过源项、流体物性等影响流场的其它一些标量(如压力、湍流度等)的离散化方程;同时求解连续性方程及动量方程;检查是否收敛:监视解的收敛除了通过检查残差外,还需要检查升力、阻力、力矩等气动力系数是否收敛。

2 数值计算结果及分析

为方便对人椅系统的气动参数的描述,对坐标系进行了如下规定(见图6):①水平向右的方向为坐标系的 X 轴;②垂直向上的方向为坐标系的 Y 轴;③垂直纸面向外的方向为坐标系的 Z 轴; X, Y, Z 方向满足右手螺旋法则。

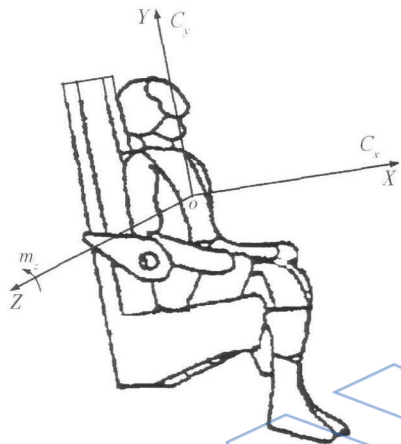


图6 人椅系统坐标示意图

Fig. 6 Body axis coordinate system

2.1 气动力参数的定义

在本文中用来描述人椅模型的气动力参数主要有三种,它们分别是升力系数、阻力系数和力矩系数,其定义如下:

座椅某一方向($i = x, y, z$)的气动力系数

$$C_i = \frac{F_i}{QS} \quad (1)$$

式中 $Q = \frac{1}{2} \rho_\infty u_\infty^2$ 为远方来流的动压, ρ_∞ 为自由来流的密度, u_∞ 为自由来流的速度; S 为座椅特征面积; $F_i = \sum_{j=1}^n (f_i)_j$ 为 i 方向的合力,其中 n 指人椅系统模型总的计算单元个数, i 表示 x, y, z 方向, f_i 为座椅表面单元 s 在 x, y, z 方向上的合力,即

$$f_i = \int_s \bar{p}_i n_i dA + \int_s \bar{\tau}_i t_i dA \quad (2)$$

式中 $\bar{p}_i$ 为 i 方向单元法向分量, $\bar{\tau}_i$ 为 i 方向上的单元切向分量, $\bar{p}$ 为 i 方向法向压力, $\bar{\tau}$ 为表面摩擦

力. 气动力矩系数

$$C_{M_i} = \frac{M_i}{QSD} \quad (3)$$

其中 M_i 为 i 方向的力矩, $D = \sqrt{4S/\pi}$ 为座椅特征长度。

针对所计算的模型和状态,由 $R = 287 \text{ J/(kmolK)}$, $\gamma = 1.4$, $T = 300 \text{ K}$, $p_0 = 101325 \text{ Pa}$, $\rho_0 = 1.177 \text{ kg/m}^3$, $S = 0.65 \text{ m}^2$, 得到: 当地声速 $a_0 = \sqrt{\gamma RT} = 347.2 \text{ m/s}$; 人椅特征长度 $D = \sqrt{4S/\pi} = 0.91 \text{ m}$. 人椅系统的阻力系数 $C_x = \frac{F_x}{QS}$,

升力系数 $C_y = \frac{F_y}{QS}$, 俯仰力矩系数 $C_m = \frac{M_i}{QSD}$.

2.2 模型验证

因为类似于此型号的座椅只有在环境温度为 300 K , 标准大气压, 马赫数为 0.2 , 侧滑角为 0° , 不同攻角情况下的气动力参数的风洞实验结果, 因此先用软件计算了这些状态下不同人椅简化模型的结果, 来与实验结果进行对比, 以便验证人椅简化模型和数值计算方法的可行性及对精度的影响。

计算结果是对模型用二阶迎风格式离散后计算得到的. 图7中 TEST 指由风洞实验所得到的数据, CFD2 指用改进模型所计算的结果, CFD1 指用初始模型所计算的结果. 从图7中可以看出, 用改进模型所得的计算结果无论从数值上还是规律上与实验数值符合得都比初始模型要好. 这主要归功于①改进后的人椅几何模型更接近实际人椅的几何形状和尺寸; ②改进的计算网格更合理, 对半个人椅模型及其计算区域, 改进模型共生成了 387152 个四面体网格单元, 并且绝大多数分布在人椅模型的周围, 而初始模型生成四面体网格单元为 180027 个, 改进后的网格单元数比初始网格单元数多了一倍(文献[5]证实 220000 个网格单元已能满足精度要求); ③改进的计算方法对不同的人椅姿态连同矩形区域分别生成不同计算网格. 而在初始模型中, 只给出攻角为 0° 情况下的计算区域, 其它状态用不同的来流条件来模拟。

图7显示, 改进模型的计算结果与实验数据有较好的符合性, 能正确反映出不同状态下座椅特性参数的变化趋势。

2.3 计算结果及分析

图8给出了马赫数为 0.6 时, 攻角分别为 0° , 30° , 60° 下的人椅系统对称面上的速度分布情况。

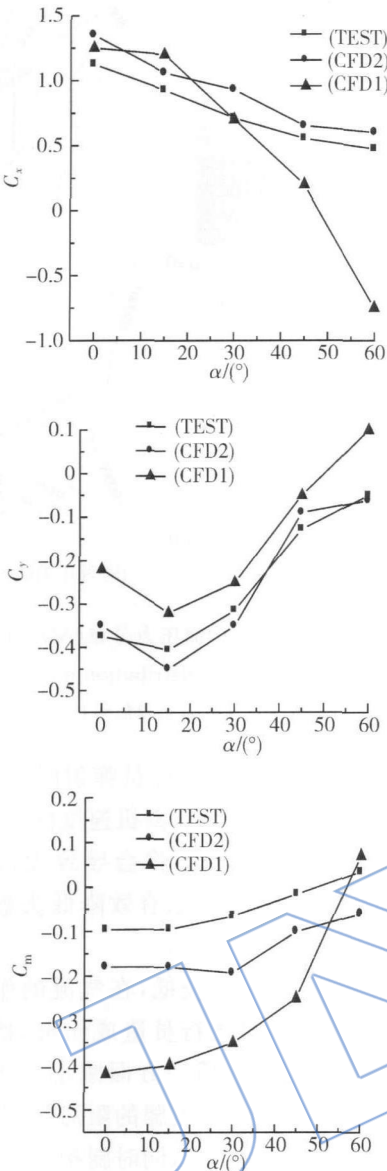


图 7 马赫数为 0.2 时不同攻角下的结果对比
Fig. 7 Comparisons of predicted and experimental data for different models at $Ma=0.2$

由图 8 可以看出人椅系统是一个大钝头体, 其后部有较大的尾迹流区, 且随着攻角的增大, 尾流区越来越小. 尾流按其流动特征可以分为涡流区和尾流区, 涡流区内的气体与来流速度方向(x 方向) 相反, 也称负压区; 涡流区后面是尾流区, 这个区域里的气体与自由流方向是一致的, 但流速要小于自由流^[11].

湍流尾流会影响气动减速器的充气特征和阻力特征. 负压涡流区会使降落伞不开伞或失效, 尾流则使降落伞的阻力减小, 工作性能下降^[12]. 为了解决因座椅尾流的影响而产生弹簧弹出的稳定伞被座椅尾流拉伸并与座椅缠绕的问题, MK 系列火箭弹射座椅上采用了用射伞枪拉出稳定伞

的开伞方式. 弹射座椅后面的尾流结构很复杂, 是当今研究的一项重要课题. 随着飞机速度的不断提高, 国外先进弹射座椅的稳定伞开伞装置——射伞枪的能量不断提高, 不仅能将稳定伞射出伞箱, 而且能把稳定伞送入自由流内开伞. 从模拟结果得出的尾流长度, 可以在工程设计时为伞椅连接装置(伞绳或稳定杆) 的长度及安装位置提供依据.

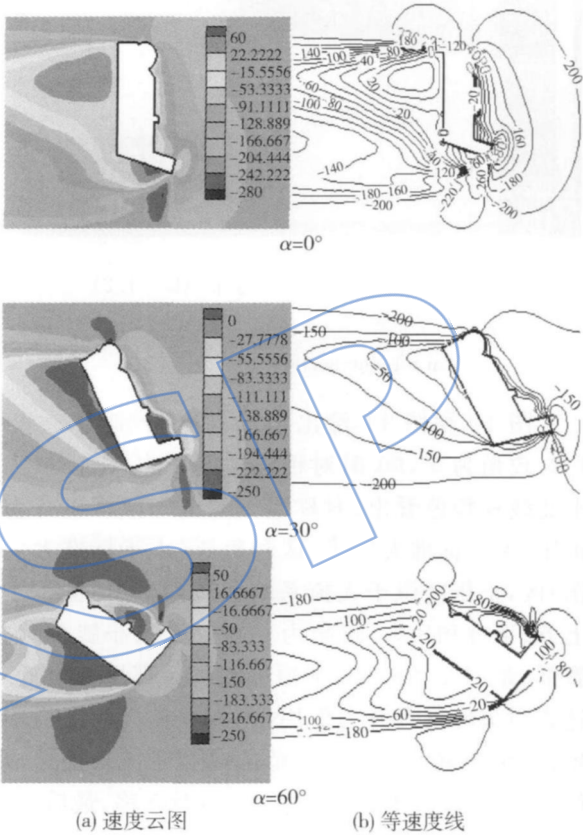


图 8 对称面上速度分布
Fig. 8 Velocity distribution on the symmetry plane for different attack angles

图 9 给出了 $Ma=1.2$ 、攻角和侧滑角为 0° 时横剖面的速度和压力分布情况. 从压力云图可以看出, 人椅侧面的压力很低(约 30 kPa), 这样在人体上肢处就产生了由内外压力差形成的外展力. 另外由速度矢量图可以看出, 躯干侧面斜后方的流速可以达到 450 m/s. 这些都是产生上肢电打的重要因素. 在大速度弹射时, 飞行员因受气流动压作用会发生肢体电打损伤. 美国空军弹射时的气流电打损伤发生率为 25% ~ 33%. 我国空军因大速度(大于 800 km/h) 弹射死亡者占总死亡人数的 20%^[13]. 随着战机速度的增加, 弹射时造成的肢体电打损伤将更加严重. 因此, 新一代弹射座椅必须解决上肢、头部、下肢的防护固定问题.

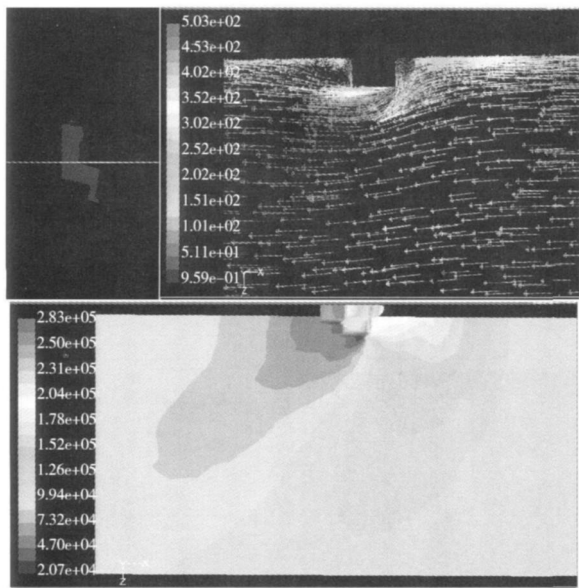


图 9 横剖面速度、压力分布($Ma = 1.2$)

Fig. 9 Velocity and pressure distributions on a plane section at $Ma = 1.2$

图 10 和图 11 给出了马赫数分别为 0.6, 1.2, 攻角为 $0^\circ, 60^\circ$ 时对称面上的压力分布. 由图中曲线和颜色看出, 对称面上的压力区可以分为正压(大于标准大气压)区和负压(小于标准大气压)区, 正压区位于人椅系统迎风面, 负压区位于上方、下方和后方. 攻角为 0° 时, 脚背、小腿部位、胸腹部、颈部压力较大, 头顶部和脚后部压力较低. 这表明头部会有升力作用, 胸部有较大的压力作用, 这些作用力超过一定范围时会对飞行员造成伤害. 随着攻角的增加, 高压区逐渐下移. 最后

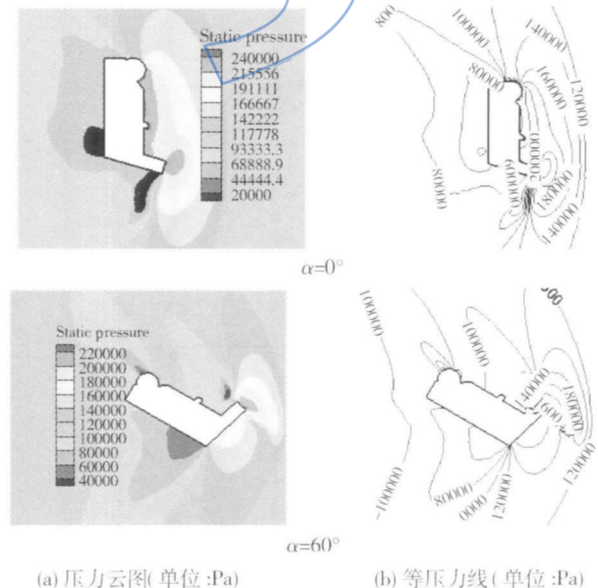


图 10 人椅系统对称面压力分布($Ma = 0.6$)

Fig. 10 Pressure distribution on the symmetry plane at $Ma = 0.6$

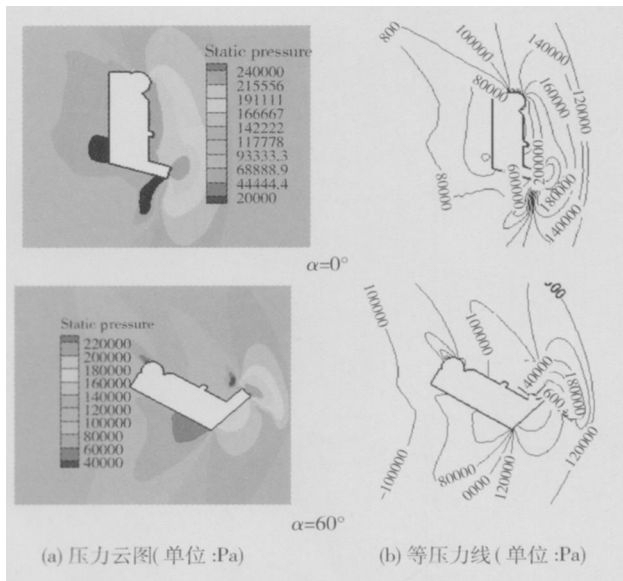


图 11 人椅系统对称面压力分布($Ma = 1.2$)

Fig. 11 Velocity distribution on the symmetry plane at $Ma = 1.2$

集中于小腿部位. 此外, 飞行员弹射时, 气流会在头盔上产生升力. 随着弹射离机速度的增大, 高速气流在头盔上产生的升力将会导致飞行员的伤亡, 因此头盔的设计应考虑有效降低头盔上部的负压, 如留有圆孔等^[14].

由于脚后部的压力较低, 在气流的作用下可能会发生电打从而对飞行员造成伤害, 抬腿机构可以解决该问题. 抬腿后一方面减小了飞行员大腿和躯干的夹角, 加大了大腿的阻滞作用, 减小气流对胸腹部和头部的作用, 同时腿抬高后, 小腿的后部、脚与椅盆充分接触, 减小了被电打的可能.

由图 10 与图 12 可以看出, 亚声速时, 沿着来流方向, 压力逐渐增大, 马赫数逐渐减小, 然后气流加速绕流过人椅系统, 并在头顶和座椅底部产生流动分离, 在椅后产生低马赫数区.

由图 9、图 11 与图 13 可以看出, 超声速时, 在人椅前方产生了弓形激波而在尾迹外侧生成反射激波($Ma = 1$). 气流在弓形激波后急剧减速增压, 致使更大的压力作用于人椅表面. 然后加速绕流过人椅系统并产生流动分离, 在对称面的上下侧黄红色袋状区域和横截面的侧后方区域形成超声速流动, 在椅后形成较大的尾迹流区域.

图 14 给出了人椅模型在不同状态下的表面压力图. 为简单起见, 只将马赫数为 0.2 和 1.2 状态下的结果进行对比. 对照一下左右两边的图, 可以看出人椅表面的静压大小与人椅系统的速度关系很大, 它随着人椅速度的增加而急剧增大; 其次

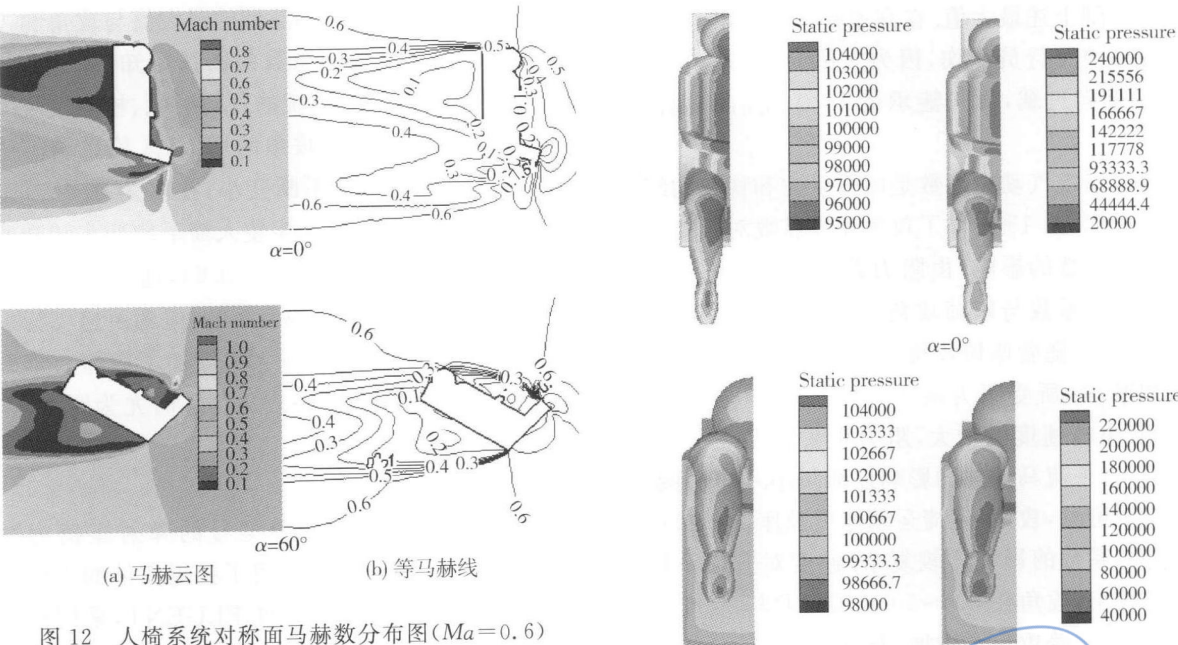


图 12 人椅系统对称面马赫数分布图($Ma=0.6$)

Fig. 12 Mach number distribution on the symmetry plane at $Ma=0.6$

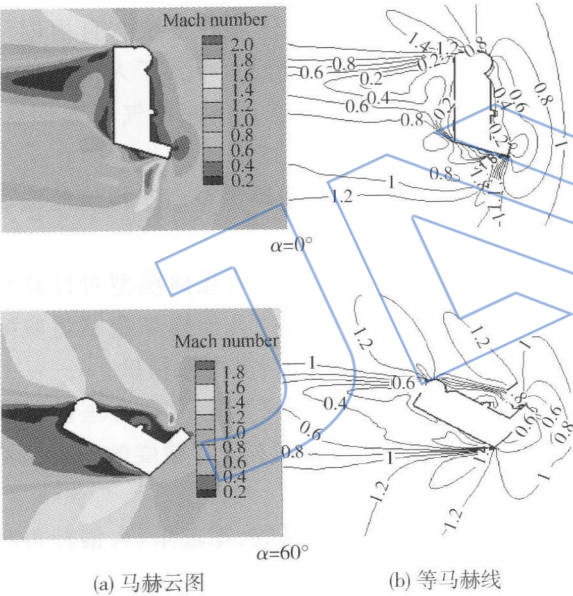


图 13 人椅系统对称面马赫数分布图($Ma=1.2$)

Fig. 13 Mach number distribution on the symmetry plane at $Ma=1.2$

在 $\alpha=0^\circ$ 时, 人椅表面的高压区主要位于面部、颈部、胸腹部、膝盖处和脚部。随着攻角的增大高压区逐渐下移; 在有侧滑角的情况下人椅系统所承受的高压区主要在受气流吹袭的一侧。当飞行员进行应急弹射救生时人椅系统几乎是与飞机相同的运动速度被弹射的, 飞行员立即暴露在强大的高速气流中, 很容易造成飞行员身体各部位的损伤。由于头盔的形状, 人体的头部会受到一个向上的升力, 这个升力有可能造成人体颈部拉伤; 在

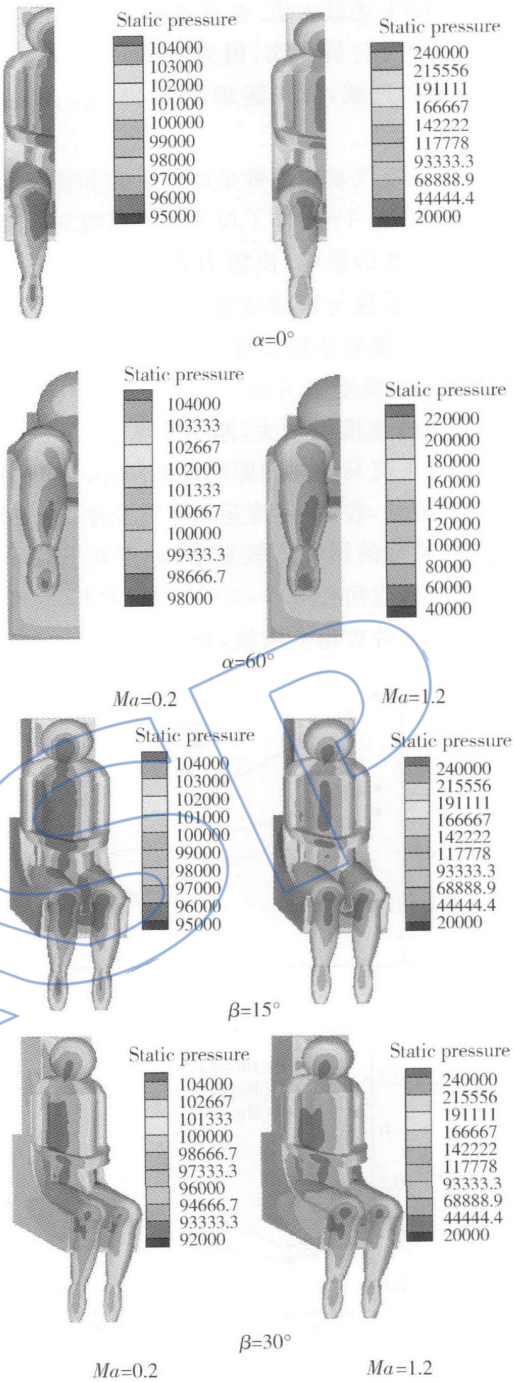


图 14 人椅系统表面的压力分布(单位: Pa)

Fig. 14 Pressure distribution on the surface of seat/occupant system

有侧滑角的情况下, 人体的肋部和头部一侧受力很大, 也有可能造成颈部扭伤。由于头颈部是人体生命中枢所在, 这些伤往往是重伤, 甚至是致命伤。另外人体的四肢在高速气流吹袭下可能造成电打伤, 因此必须对人体四肢施加约束。在 $Ma=1.2$ 、攻角和侧滑角为 0° 时, 人体正面尤其是颈部、胸腹部和膝部受力最大值可达到 240 kPa; 当侧滑角为 30° 时, 人体头部、肋部和小腿处的侧向

力也可达到上述最大值。在高速弹射过程中,侧向力更容易使飞行员受伤,因为人体大约可以承受35 G的前向过载,而只能承受15 G左右的侧向过载^[5]。

人椅系统气动参数是座椅受力和稳定的综合性能指标。图15给出了攻角和马赫数对人椅系统气动参数的影响。由阻力系数的曲线可以看出座椅阻力系数与座椅攻角、座椅运动速度及座椅形状有关。随着座椅攻角的增大,座椅来流向投影面积减少,所受阻力减小,阻力系数也因之减小。随着座椅速度的增大,阻力系数增大。随着攻角的增大,来流马赫数的影响逐渐减小。由升力系数的曲线可见,攻角、座椅运动速度及座椅形状对座椅升力系数的影响比较复杂。速度对升力系数的影响较小,攻角在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 范围内尤其在 30° 时影响明显。随着攻角的增加,升力系数先缓慢增大

再快速减小。变化速率和达到的最大值与攻角和飞行马赫数有关。由力矩系数的曲线可知,人椅系统的俯仰力矩系数与其系统的几何形状、相对气流的位置等因素有关。随着攻角的增大,人椅系统的俯仰力矩系数的绝对值不断变小;在攻角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内为负值,负值表示产生使人椅系统低头转动的力矩。在亚声速范围内($Ma=0.6$),速度对人椅系统的俯仰力矩系数几乎没有影响,但超声速飞行引起激波后的迅速减速增压大大增加了俯仰力矩系数的绝对值,这种效应在攻角为零时尤为明显。

3 结 论

本文以我国某种成熟型号的弹射座椅为对象,对其进行合理简化,获得了接近实体的人椅系统几何模型。借助CFD软件FLUENT,采用控制容积法,对N-S方程、壁面函数、湍流方程进行了求解。在获得与实验数据相吻合结果的基础上,考察了马赫数分别为0.2、0.6、1.2,攻角为 $0^\circ \sim 60^\circ$,偏转角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 条件下的三维六自由度可压缩人椅系统绕流流场情况,得到了人椅系统表面压力分布以及多种状态下的座椅气动参数。通过以上研究,得出如下结论:

- 1) 将CFD技术用于模拟弹射座椅绕流流场特性是可行的;
- 2) 用于数值计算的人椅几何模型对计算结果有着关键性的影响。简化几何模型愈接近实际模型,所得结果的规律和精度则愈精确;
- 3) 所生成的计算网格的密度和合理性以及计算区域边界条件的处理对计算精度的提高起辅助作用;
- 4) 结果表明,高马赫数、零攻角、大偏转角对人体造成的损害程度最大。

基于大量的数值计算,揭示的不同马赫数、不同攻角及侧滑角下的三维六自由度人椅系统绕流流场结构,给出的流场中物理量分布规律,以及多种因素对气动参数的影响等,对于座椅设计、提高座椅防护性能均有借鉴价值。

参考文献:

- [1] 朱自强.应用计算流体力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,1998.
- [2] Caruso S C, Mendenhall M R. Computational analysis of high speed ejection seats[R]. AIAA-92-0403, Jan 1990.
- [3] Wurtzler K. Application of an Euler code to the B 1A escape capsule[R]. AIAA-90-0431, Jan 1990.
- [4] Baum J D, Lohner R. Numerical simulation of pilot/seat e

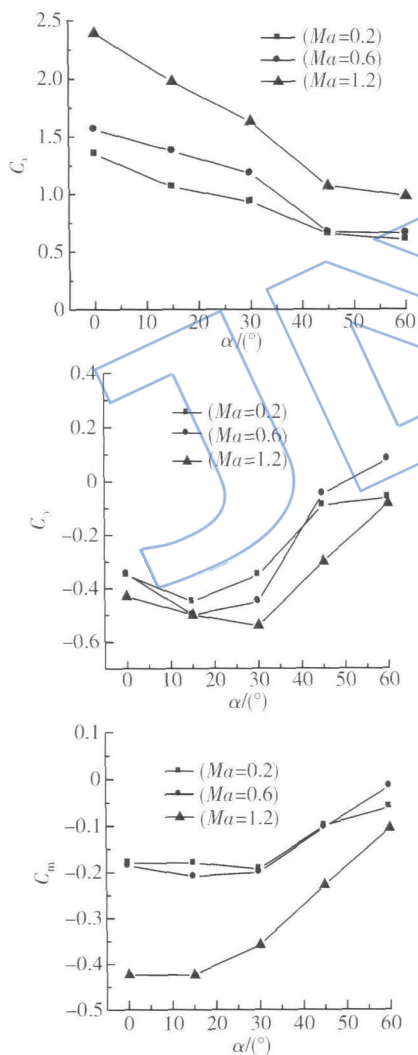


图15 攻角和马赫数对人椅系统气动参数的影响

Fig. 15 Effects of attack angle and Mach number on force and moment coefficients

- jection from an F 16[R]. AIAA-93-0783, 1993.
- [5] Habchi S D, Hufford G S. Computational aerodynamic analysis of the navy aircrew common ejection seat [R]. AIAA-94-0395, Jan 1994.
- [6] 胡国才, 向锦武. 弹射座椅救生性能研究[J]. 飞行力学, 2000, 18(4): 80-84.
- HU Guocai, XIANG Jinwu. A study of the life support performance of ejection seats[J]. Flight Dynamics, 2000, 18(4): 80-84. (in Chinese)
- [7] 姜南, 雷华金. 人/椅系统外流场的数值模拟[J]. 中航救生, 2004, (3): 22-29.
- JIANG Nan, LEI Huajin. Numerical simulation of the flow field around the occupant/seat[J]. China Aeronautical and Astronautical Life Support, 2004, (3): 22-29. (in Chinese)
- [8] 陈德华, 吴文华, 王晋军. 战斗机弹射救生系统数值模拟研究[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 778-783.
- CHEN Dehua, WU Wenhua, Wang Jinjun. Numerical simulation research of the fighter ejection escape system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 778-783. (in Chinese)
- [9] 牟杰. 弹射座椅绕流流场数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- MOU Jie. Numerical simulation of the flow field around the ejection seat[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [10] 张中刚. 人椅系统流场特性的数值研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- ZHANG Zhonggang. Numerical approach to the dynamic characteristic of the ejection seat/occupant system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [11] 夏雪瀚, 邓学釜. 工程分离流动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.
- [12] 王利荣. 降落伞理论与应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1997.
- [13] 张汉镔. 飞行器安全救生[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.
- [14] 王伟. 浅析 21 世纪战机的安全救生问题[J]. 海军医学杂志, 1999, 20(2): 165-167.
- WANG Wei. Analysis of the issue of safe escape in fighters in 21st century[J]. Navy Medicine, 1999, 20(2): 165-167. (in Chinese)