

基于动网格模型的座椅碰撞模拟 试验台弹射装置动力学研究

上海电科电机科技有限公司 李怀珍

一、前言

座椅碰撞模拟试验台是用来将装有试验座椅的滑车加速到碰撞前速度 (40 ~ 60km/h) 并使之发生有效碰撞的装置。加速动力系统是碰撞试验台的核心部分,也是设计试验台的关键技术,目前采用的加速装置有橡皮绳拉伸弹射、液压蓄能弹射和机械储能方式。

气压传动是以压缩空气为介质驱动和控制各种机械设备以实现生产过程机械化和自动化的一种技术,是一种低成本的自动化技术,受至工业界的欢迎,其发展呈现急剧上升的趋势。然而由于气压传动定位精度较差、速度不易控制等原因,在碰撞试验台设备上一直未见采用气压蓄能弹射加速动力系统。

在研制头枕冲击试验机的过程中,我们首次采用气压蓄能方式完成了试验机的加速弹射过程。期间,巧妙解决了气压传动定位和稳速问题,积累了一定的经验。因而,在设计研制座椅碰撞模拟试验台时,我们也采用气压蓄能弹射完成滑车的加速弹射过程,设计了如图 1 所示的碰撞模拟试验台弹射装置。

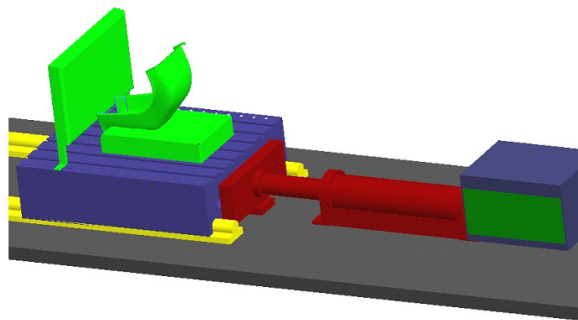


图 1 碰撞试验台弹射装置

二、理论基础

1、流体流动的控制方程

非稳态 N-S 方程组如下:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij})}{\partial x_j}$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j \tau_{ij} - q_j)$$

式中: τ_{ij} 为应力张量; q_j 为热通量向量; H 为总焓, 即:

$$\begin{aligned}\tau_{ij} &= \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ q_j &= -\frac{\partial T}{\partial x_j} \\ H &= h + \frac{1}{2} u_i^2\end{aligned}$$

上述方程组未知量的数目多于方程的个数, 显然方程组不封闭, 必须配合其他方程才能使方程组封闭, 进行求解, 下面介绍湍流模型中需要的方程。

2、湍流模型方程

弹射内弹道流场处于高湍流状态, RNG $k-\varepsilon$ 在壁面附近采用标准壁面函数法计算收敛较快、易收敛, 且与广泛采用的标准 $k-\varepsilon$ 模型比较, RNG $k-\varepsilon$ 模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动。因此, 最终确定湍流模型为 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 在壁面附近采用标准壁面函数法。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流方程:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon\end{aligned}$$

式中, G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 是由于浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 代表可压湍流中, 过度的扩散产生的波动; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 是常量; α_k , α_ε 是 k 方程和 ε 方程的 Prandtl 数; S_k 和 S_ε 是用户自定义源项。

3、动网格更新方法

由于弹射活塞在弹射缸内处于运动状态, 导致弹射缸内的计算区域也发生变化, 动网格技术就是为了适应计算区域的变化新发展出来的网格技术。它在每一个时间步迭代之前, 根据边界或物体的运动、变形更新和重新构建计算域的网格, 从而达到计算各种非定常的流固耦合、计算域随时间变形变化的问题, 主要是通过拉伸, 压缩网格或者增加、减少网格以及局部生成网格来适应计算区域的改变。动网格重新构建的计算方法有 3 种, 即弹性广顺法 (spring-base smoothing)、动态层技术 (dynamic layering) 和局部网格重

划法 (local remeshing)。

弹性广顺法是将网格系统看做是由节点之间用弹簧相互链接的网络系统, 初始网格就是系统保持平衡的弹簧网格系统。任意一个网格节点的位移都会导致与之相连的弹簧中产生弹性力, 进而导致网格节点上的力的平衡被打破。由此波及出去, 经过反复迭代, 最终整个弹簧网格系统达到新的平衡时, 就可以得到一个变形后的、新的网格系统。

动态层技术是根据边界的移动量动态地增加或减少边界上网格层的技术。如图 2 所示, 根据与运动边界相邻的第 j 层网格的高度 (h) 可以决定是将该层网格分割还是将其与第 i 层合并。在应用过程中定义一个理想高度, 当网格被拉伸或压缩的距离超过该高度的 α 倍时, 增加或者合并网格, α 对拉伸和压缩网格时分别称为切割因子和消亡因子。

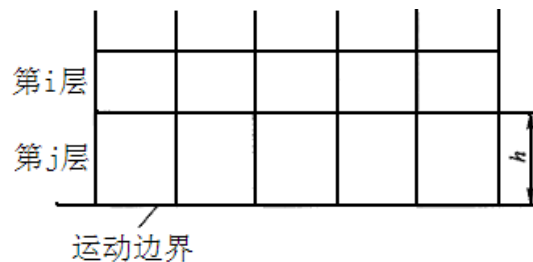


图 2 动网格技术示意图

局部网格重划法是对弹性光顺法的补充, 其基本思路去掉原来网格系统中经过弹性光顺后得到的畸变网格, 在被去掉网格的位置上重新划分新的网格。

比较以上三种网格更新方法, 弹性光顺法不适用于大变形情况, 当计算区域变形较大时, 变形后的网格会产生较大的倾斜变形, 使网格质量变差, 影响计算精度; 动态分层法在生成网格方面具有快速的优势, 但是它要求运动边界附近的网格为六面体或楔形, 不适用于复杂外形的流场区域; 局部网格重划法只会对运动边界附近区域的网格起作用, 要求网格为三角形 (二维) 或四面体 (三维)。

三、弹射装置内弹道数值模拟

1、计算模型与条件

由于弹射活塞在弹射气缸内的运动轨迹为一条直线, 且位移较大。弹射活塞在弹射缸内处于运动状态, 导致弹射缸内的计算区域也发生变化, 因此须采用动网格技术完成模拟弹射装置内弹道计算。忽略气控阀组的影响, 则计算区域为弹射气缸无杆腔区域, 包括储气罐、管道部分和弹射气缸尾

部区域。划分好的计算网格模型如图 3 所示。

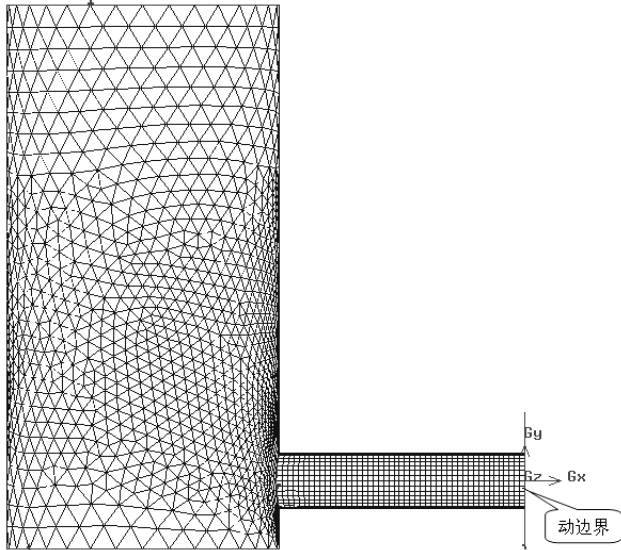


图 3 计算模型

采用用户自定义程序 UDF 定义刚体的运动规律，UDF 程序如下所示：

```
DEFINE_CG_MOTION(piston, dt, vel, omega, time, dtime)
{
    Thread *t;
    face_t f;
    real NV_VEC(A);
    real dv;
    /*reset velocities*/
    NV_S(vel,=,0.0);
    NV_S(omega,=,0.0);
    if(!Data_Valid_P())
        return;
    /*get the thread pointer for which this motion is
    defined*/
    t=DT_THREAD((Dynamic_Thread*)dt);
    /*computer pressure force on body by looping through
    all faces*/
    force=0.0;
    Ff=0.0;
    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_AREA(A,f,t);
        force+=F_P(f,t)*NV_MAG(A);
    }
}
```

```
end_f_loop(f,t)
/*computer change in velocity ,i.e.,dv=F*dt/mass
velocity update using explicit euler formula*/
if (force-p_0*pi*r*r>0 && v_prev<=0)
{
    Ff=kj*m*g+kj1*m1*g;
    a_prev=(force-p_0*pi*r*r-Ff)/m;
}
else if (force-p_0*pi*r*r>0 && v_prev>0 && v_
prev<vd)
{
    Ff=kj*m*g+kj1*m1*g-kv1*v_prev;
    a_prev=(force-101300*pi*r*r-Ff)/m;
}
else if (force-p_0*pi*r*r>0 && v_prev>vd)
{
    Ff=kj*m*g+kj1*m1*g-kv1*vd+kv2*(v_
prev-vd);
    a_prev=(force-101300*pi*r*r-Ff)/m;
}
else
{
    Ff=0;
    a_prev=0;
}
dv=dtime*a_prev;
v_prev = v_prev + dv;
loc = loc + v_prev * dtime;
/*set x-component of velocity*/
vel[0]=v_prev;
}
```

采用分离隐式算法计算非稳态弹射过程。

2、数值模拟结果分析

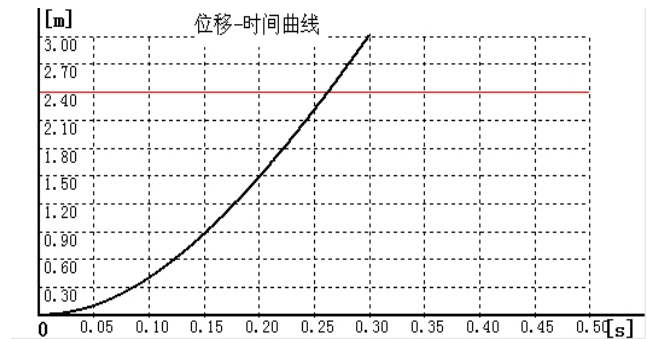


图 4 位移变化曲线

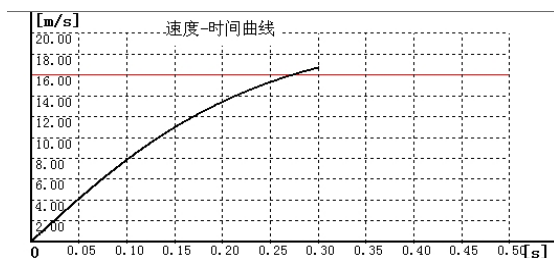


图 5 速度变化曲线

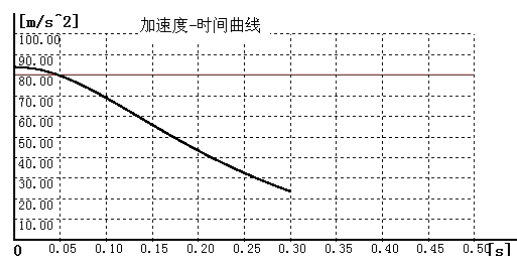


图 6 加速度变化曲线

综合以上计算结果,可以看出,在弹射缸径为 250mm 的情况下,要在 0.8Mpa 的压力下达到 60km/h 的弹射速度,弹射气缸的最短长度为 3.0m,如图 4、图 5、图 6 所示。

经过反复多次试验,要进行 49 ± 1 km/h 的座椅模拟碰撞试验,计算结果如图 7、图 8、图 9、图 10 所示。

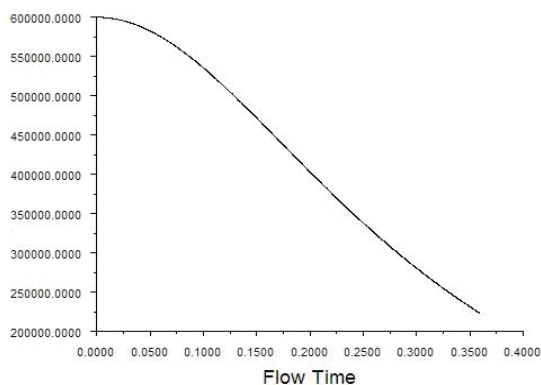


图 7 压力变化曲线

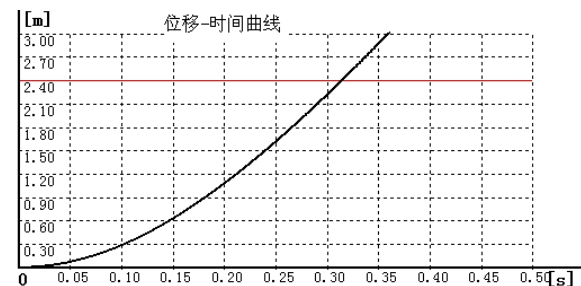


图 8 位移变化曲线

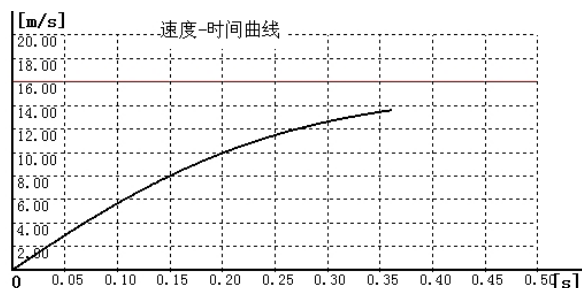


图 9 速度变化曲线

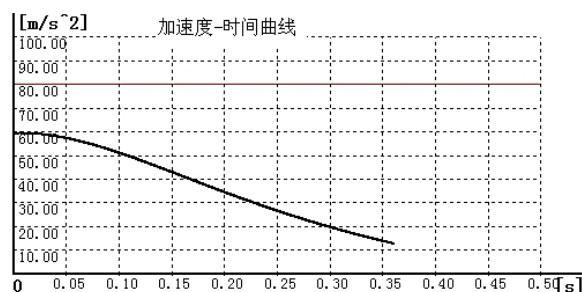


图 10 加速度变化曲线

经计算,弹射装置的工作压力与弹射速度之间的关系如表 1 所示,从表中可以看出,随着压力的增大,速度的增加趋势趋于平缓。

表 1 工作压力与弹射速度关系

工作压力 (Mpa)	弹射速度 (m/s)
0.50	11.65
0.60	13.54
0.70	15.19
0.80	16.67

四、结束语

本文采用 CFD 软件 FLUENT 完成了座椅碰撞模拟试验台弹射装置动力学的计算和分析研究,计算结果为座椅模拟碰撞试验台弹射装置的研制提供了较好的参考价值。