

文章编号:1674-8190(2021)02-064-08

运输机空投舱内压力动态变化数值模拟研究

柳伟兵,焦予秦,邹宏毅

(西北工业大学翼型、叶栅空气动力学重点实验室,西安710072)

摘要: 运输机重装空投时,机舱横截面方向堵塞度较大,快速移动的空投物会造成舱内压力剧烈变化,甚至损害舱内乘员的身体健康,因此,有必要对运输机空投舱内压力的变化展开数值模拟研究。以运输机机舱内大型货箱在牵引伞拉力、重力、摩擦力以及气动力共同作用下 x 方向的变加速直线运动这一流固耦合问题为研究对象,基于运动嵌套重叠网格,对运输机重装空投前舱动态压力变化进行数值模拟,分析模型尺寸、来流速度、机舱堵塞度、投放位置等参数对舱内动态压力的影响规律,进而提出运输机重装空投风洞试验时与舱内压力相关的相似准则。结果表明:运输机执行重装空投任务时,空投物距离前舱位置越近,来流速度越大,堵塞度越大,空投时前舱动态压力变化越大,反之越小;风洞试验时,用空投前舱压力值为参考量的舱内无量纲数是最准确、合适的舱内压力相似准则。

关键词: 风洞试验;相似准则;运输机;空投;数值模拟;嵌套网格

中图分类号: V271.2; V245.4

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.02.07

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Dynamic Pressure Change in Transport Aircraft Cabin with Airdrop

LIU Weibing, JIAO Yuqin, ZOU Hongyi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: When heavy equipment are airdropped, the cabin cross-section is largely blocked, and rapid moving of heavy equipment will cause drastic changes in cabin pressure and even damage the health of cabin crew. Therefore, it is necessary to carry out numerical simulation of the pressure change in the airdrop cabin of the transport aircraft, and to lay a foundation for further research. The fluid-solid coupling problem of variable acceleration linear motion in x direction under the combined action of traction pull of parachute, gravity, friction and aerodynamic force in the cabin of transport aircraft is taken as the research object. Based on the motion overset grid, numerical simulation of dynamic pressure variation in the forward compartment of a transport aircraft with heavy load airdrop is carried out. The influence of the model size, incoming velocity, cabin blockage and launching position on the dynamic pressure in the cabin is analyzed, and the similarity criterion related to the cabin pressure during the heavy equipment airdrop wind tunnel test is proposed. The results show that: the closer the airdrop object from the frontal wall cabin, the higher the flow velocity and the bigger the degree of cabin cross-section blockage, the bigger the dynamic pressure change in cabin, and vice versa. In the wind tunnel test, non-dimensional cabin pressure with reference of the front cabin pressure at the airdrop beginning is the most accurate and appropriate cabin pressure similarity criterion.

Key words: wind tunnel test; similarity criterion; transport aircraft; airdrops; numerical simulation; overset mesh

收稿日期: 2020-07-11; 修回日期: 2020-10-28

通信作者: 焦予秦, jiaoyuqin@nwpu.edu.cn

引用格式: 柳伟兵, 焦予秦, 邹宏毅. 运输机空投舱内压力动态变化数值模拟研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(2): 64-71.

LIU Weibing, JIAO Yuqin, ZOU Hongyi. Numerical simulation of dynamic pressure change in transport aircraft cabin with airdrop [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(2): 64-71. (in Chinese)

0 引言

空投就是用运输机装载装备或物资,到达指定目标地域后将它们投放出去,再借助降落伞等气动力减速器使它们安全降落到地面,这种方法可以在短时间内向指定地点送达所需物资。

在海湾战争、伊拉克战争等现代战争中,美英等西方国家正是通过空运和空投的方式出其不意地发起攻击进而迅速击溃敌人。空投今天不仅在军事领域发挥着重要作用,而且在自然灾害救援等民用领域也有着愈发广阔的应用空间。

重装空投是指运输机空投重型装备或大型救灾设备等体积大的物品。这些大型物品在机舱内会相对机舱横截面积形成百分之五十以上的堵塞度,当它们在外力作用下沿着舱内轨道做变加速运动时,前舱压力会随着大物体向舱外运动而显著降低。从航空航天医学的角度来看,空气压力变化过快会对人体肺部、胃肠以及耳部造成损伤,因此有必要对大物体空投过程舱内动态压力变化开展研究。

空气动力学研究方面的方法有:理论研究、数值计算和风洞试验。当前,国内在运输机空投上取得的研究成果主要有:林轶群等^[1]对空投速度、飞机质量、货物质量、货物装载位置4种因素对飞机纵向动态特性的影响进行了详细分析,得出最佳空投状态;汤健华^[2]针对车载炮空投系统的空投过程建立相应的动力学方程并开展仿真分析;张喆等^[3]以货物和飞机为对象进行受力分析,推导了货物与飞机之间的相互作用力,建立了更加贴近实际的运输机单件货物空投和连续空投的动力学模型;刘日等^[4]以某型运输机地面飞行模拟器为平台,开发了重装空投模拟器仿真试验系统,进行了牵引系统失效及卡滞的特情仿真试验;高静等^[5]仿真分析了小型空投物资在载机尾流场影响下的下落轨迹;曹煜国等^[6]根据在空投时货物的运动特点对飞机在空投过程中的动态响应进行分析,根据分析结果和飞机气动特性,对飞机在不同空投质量时的动态响应进行了计算。国外,Y. Bury等^[7]对连续重装空投的操稳特性分析取得了研究成果;Chang R C等^[8]开展了运输机飞行品质评价方面的研究。

综上所述,当前国内外对运输机空投的研究方向主要有:针对在空投、空降过程中运输机的稳

定性控制和飞行过程中的安全而展开的研究,空投软件程序的开发应用,空投空降物体下落轨迹及着地冲击载荷的研究以及飞行品质研究等。但针对运输机大物体空投舱内压力变化的研究未见报道。

本文将运动嵌套网格黏性流动数值模拟方法与物体运动学、动力学方程相结合,用以模拟运输机空投时舱内空投物运动这一流固耦合问题和舱内压力变化。基于数值模拟结果,分析飞机模型尺寸、来流速度、机舱堵塞度以及投放物装载位置等参数对舱内动态压力的影响规律。

1 数值方法

1.1 模型处理

在实际空投过程中,货物与飞机的运动相互耦合,两者构成了一个高自由度的多体系统,货物的运动状态同飞机的运动状态都需要通过求解动力学方程来确定^[9]。运输机空投时,货物在飞机对称面内运动;牵引伞受运输机尾迹区的复杂流场影响不断摆动,牵引伞拉力不断变化,位置也不断变化。

研究空投时,为了简化这一复杂过程,通常采用以下假设:①货物在货舱内做匀加速运动^[10];②货物在飞机对称面内运动,即只研究纵向动态特性^[11]。本文基于货物在货舱内做变加速运动这一情况,另外给出以下假设:①运输机重装空投前舱动态压力变化主要受空投大物体 x 方向运动的影响;②牵引伞始终完全打开,牵引伞工作时始终处于飞机尾流区外,伞面始终同来流方向垂直。因此从定性分析的角度来说,将计算由三维情况简化为二维情况,只研究空投大物体的纵向动态特性并不会影响数值模拟过程中气动现象的产生与发展。机身及空投物模型相对位置示意图如图1所示。



图1 机身及空投物模型相对位置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of relative position of fuselage and airdrop model

鉴于运输机进行大物体投放时投放人员所处的位置是在大型投放物之前的一片区域内,本文

将大型投放物前端与运输机货舱前壁面之间的深色区域定义为前舱区域,如图 2 所示。



图 2 前舱区域定义示意图

Fig. 2 Forward compartment definition diagram

1.2 网格生成

本文所用的运动嵌套网格系统包括两套网格:一套是对大型空投物生成的 O 型网格,另一套是对包含机身、内舱和远场的区域生成的背景网格。在运动嵌套网格生成中包含背景网格洞单元识别、贡献单元搜索、嵌套网格之间的信息传递。生成的嵌套网格如图 3 所示,嵌套网格之间的信息传递是通过双线性插值实现的。

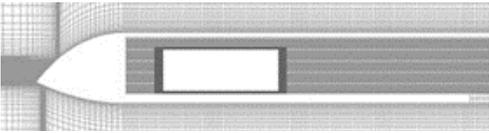


图 3 嵌套重叠网格示意图

Fig. 3 Schematic of the overset grids

1.3 流动控制方程

当运输机执行空投空降任务时,必须降低飞行速度至 $0.3Ma$ 左右,因此可以将此时运输机周围的流场看做不可压有黏流动,将坐标系建立在机身模型,坐标原点在机身前缘点,以模型头部指向尾部为 x 轴正方向,以垂直于 x 轴向上为 y 轴正方向。控制方程采用非定常积分形式的雷诺平均 Navier-Stokes(N-S)方程^[12]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_V \mathbf{W} dV + \oint_{\partial V} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = \oint_{\partial V} \mathbf{F}_v \cdot \mathbf{n} dS \quad (1)$$

其中,

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho(\mathbf{q} - \mathbf{q}_b) \\ \rho u(\mathbf{q} - \mathbf{q}_b) + pI_x \\ \rho v(\mathbf{q} - \mathbf{q}_b) + pI_y \\ \rho H(\mathbf{q} - \mathbf{q}_b) + p\mathbf{q}_b \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx}I_x + \tau_{xy}I_y \\ \tau_{xy}I_x + \tau_{yy}I_y \\ fI_x + gI_y \end{bmatrix}.$$

f, g 分别定义为

$$f = u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + k \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$g = u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + k \frac{\partial T}{\partial y}$$

式中: V 为控制体体积; S 为控制体表面积; \mathbf{W} 为守恒变量; \mathbf{F}, \mathbf{F}_v 分别为对流通量和黏性通量; \mathbf{n} 为控制体边界外法向单位向量; ρ 为流体密度; \mathbf{q} 为流体速度矢量; \mathbf{q}_b 为网格速度矢量; k 为热传导系数; T 为温度; E 为总能; H 为总焓。

为封闭 N-S 方程,引入状态方程:

$$p = (\gamma - 1) \left[\rho E - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \right] \quad (2)$$

对于理想气体,比热比 $\gamma = 1.4, \rho = 1.225$ 。

1.4 数值模拟方法

本文使用的湍流模型是剪切应力输运 $k-\omega$ 模型,简称 $k-\omega$ SST 模型,是一种二方程湍流模型^[13]。采用 Jameson 中心格式的有限体积法^[14] 对控制方程进行空间离散。在物理时间推进上采用 Jameson 提出的用于非定常计算的双时间推进法^[15]。采用多步 Runge-Kutta 格式进行伪时间推进,同时采用当地时间步长、隐式残差光滑技术和多重网格等加速收敛技术。

1.5 边界条件

(1) 物面边界条件:物面满足无滑移边界条件。

(2) 远场边界条件:在计算流体力学中,用于数值模拟的流场大小不可能无限大,因此有必要在计算流场的远场边界处假设无反射,其目的为使物体产生的扰动波在远场边界不被反射回流场,从而避免引入不必要的计算误差。在进行自由来流的数值模拟时,采用一维 Riemann 不变量^[16] 来处理远场边界。

(3) 入口、出口边界条件:为了更好更快地实现非定常计算的收敛,前方和下方边界设置为压力远场,即定义无穷远处自由来流速度 V_∞ 为流场入口速度;上方和后方边界设置为压力出口,目的是给出流场出口的静压。

1.6 空投物动力学运动方程

在运输机重装空投前舱动态压力的数值模拟

中,固定迎角下,空投物在机舱内的运动是一个流固耦合问题,因为它受到牵引伞拉力、模型重力(参考西安本地重力加速度 9.79 m/s^2)、滑动摩擦力(参考《常用材料滚动摩擦系数》给出铸铁-铸铁之间滚动摩擦系数为 0.05)、未知大小的气动力(大型空投物在机舱内做变加速运动时受到变化的前后压差阻力以及包括升力在内的其他未知大小的气动力)的共同作用(如图 4 所示)。

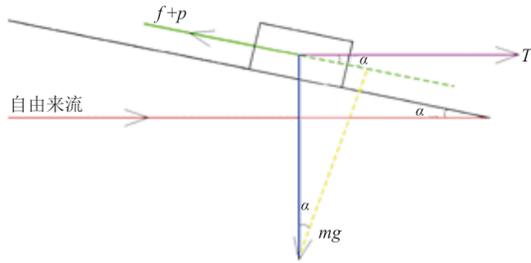


图 4 空投物舱内受力分析图

Fig. 4 Force analysis diagram of airdropped body in cabin

空投时大物体在舱内运动 x 方向的动力学方程:

$$F_i = mg \sin \alpha + \frac{1}{2} C_i \rho S V_\infty^2 \cos \alpha + F_p - k(mg \cos \alpha - \frac{1}{2} C_i \rho S V_\infty^2 \sin \alpha) \quad (3)$$

$$V_m = \frac{F_i}{m} \sum_{i=0}^n t_i \quad (4)$$

式中: F 为空投物受到的合外力; m 为空投物的质量; C_i 为牵引伞拉力系数; S 为牵引伞完全打开时伞面积; V_∞ 为自由来流速度; F_p 为投放物受到的气动力; k 为滑动摩擦阻力系数; α 为空投状态飞机的迎角; V_m 为空投物模型运动速度; i 为时间步数。

2 运输机重装空投数值模拟

全尺寸二维机身模型总长 33.267 m, 机舱长度 27 m, 机舱高度 3.85 m, 空投物质量 7 300 kg, 牵引伞面积 14 m^2 , 机身模型迎角 4° 。在自由来流边界条件下进行数值计算。

2.1 运输机舱内不同投放位置重装空投

在运输机重装空投数值模拟时,大型空投物在运输机舱内的三个不同的装载位置分别是前位置(重心位置距离前舱壁面 13.5 m, 简称 FRO)、中位置(重心位置距离前舱壁面 17.16 m, 简称

MID)、后位置(重心位置距离前舱壁面 21.93 m, 简称 LAST), 其相对位置示意图如图 5 所示。

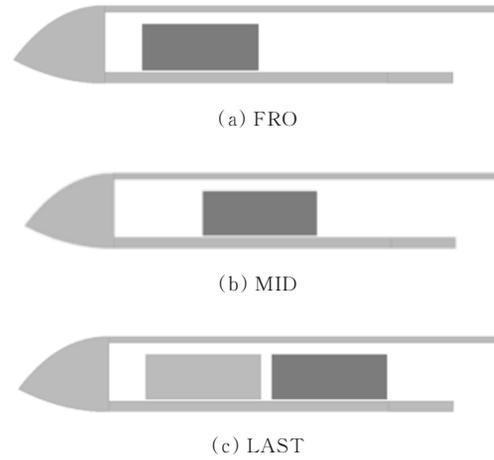


图 5 不同位置空投物示意图

Fig. 5 Schematic diagram of airdrops at different positions

在自由来流速度为 111.11 m/s , 空投物模型相对机舱堵塞度为 75% 的条件下前舱动态压力结果如图 6 所示, 可以看出: 前舱动态压力变化会随着空投物的位置而发生变化, 空投物位置距离机舱前壁面越近, 空投过程前舱动态压力变化越大。

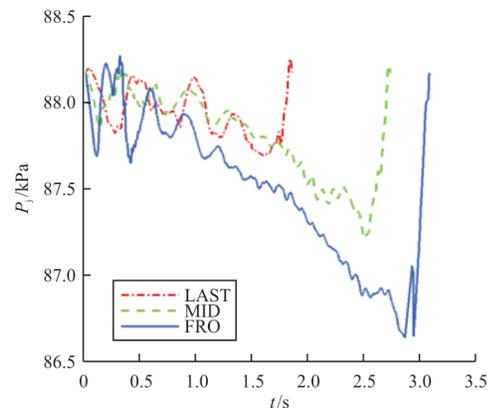


图 6 运输机不同投放位置重装空投前舱动态压力

Fig. 6 Dynamic pressure of forward compartment of transport aircraft at different dropping positions

2.2 变来流速度运输机舱内前位置重装空投

为和自由来流 111.11 m/s 条件下全尺寸机身大型空投物前位置空投前舱压力数值模拟结果(简称 V1)对比, 机舱内堵塞度为 75%, 改变无限

远处自由来流速度。鉴于在风洞试验中风速是飞行试验飞行速度的 $\sqrt{1/15}$ 倍,故在变来流速度运输机重装空投数值模拟中也采取这一来流速度,并简称为V15。另外,在V1和V15之间再设置两个速度,即分别改变无限远处自由来流速度为V1的 $\sqrt{1/5}$ 倍、 $\sqrt{1/10}$ 倍,并分别将它们简称为V5、V10。分别进行空投物前位置投放的数值计算,可得前舱压力变化如图7(a)所示;为了更直观地观察来流速度对前舱压力的影响,将V1、V5、V10、V15运动时间分别缩小为原来的1倍、 $\sqrt{1/5}$ 倍、 $\sqrt{1/10}$ 倍、 $\sqrt{1/15}$ 倍,时间换算后的前舱压力如图7(b)所示。

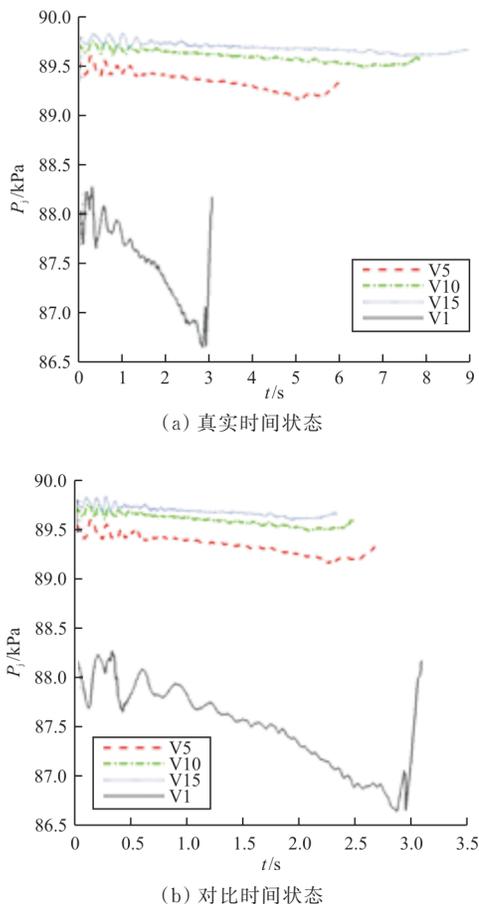


图7 变来流速度运输机重装空投前舱动态压力

Fig. 7 Dynamic pressure of the forward compartment of the transport aircraft with variable inflow velocity when airdrop

从图7可以看出:来流速度的改变不仅会影响前舱动态压力的变化,还会影响空投物在机舱内的运动时间;来流速度越大,牵引伞对空投物的拉

力越大,空投物的运动加速度越大,导致前舱动态压力变化越大,同时投放时前舱初始压力值也越小。

2.3 变堵塞度运输机舱内前位置重装空投

大小不同的空投物在机舱内造成的堵塞度是不同的,这会大物体空投时前舱动态压力变化造成影响。另外,将二维问题简化为三维问题时会致使堵塞度变大,因此需要研究空投物对机舱堵塞度对前舱动态压力的影响。

本文大物体空投数值模拟中空投物在舱内堵塞度为75%,简称D75,在此基础上通过改变空投物模型的高度来改变机舱堵塞度。自由来流速度为111.11 m/s,分别对机舱堵塞度60%、50%、25%的空投物模型(分别简称D60、D50、D25)的前位置空投进行数值模拟,前舱动态压力曲线结果如图8所示。

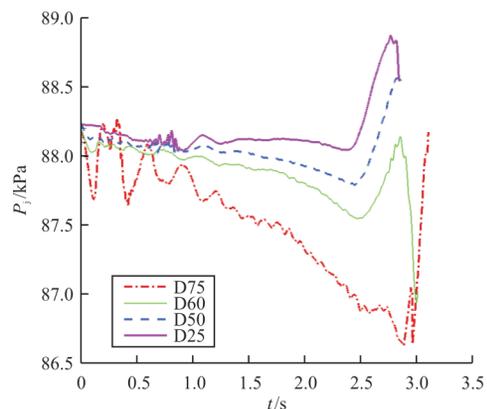


图8 变堵塞度运输机重装空投前舱动态压力

Fig. 8 Dynamic pressure of forward compartment of transport aircraft with variable clogging when airdrop

从图8可以看出:来流风速为111.11 m/s,全尺寸模型在1000 m高空前位置空投条件下,当机舱内堵塞度为75%时,前舱动态压力变化值最大为-1541.26 Pa,压力降的梯度变化率最大为-536.06 Pa/s;当机舱内堵塞度为60%时,前舱动态压力变化值为-627.687 Pa,压力降的梯度变化率为-254.95 Pa/s;当机舱内堵塞度为50%时,前舱动态压力变化值为-428.504 Pa,压力降的梯度变化率为-175.76 Pa/s;当机舱内堵塞度为25%时,前舱动态压力变化值为-182.553 Pa,压力降的梯度变化率为-77.16 Pa/s。50%和25%的机舱堵塞度在三维实际运输机空投中也存在,故而

也具有参考价值。空投物堵塞度在影响前舱动态压力变化的同时还影响空投物在机舱内的运动时间,空投物堵塞度越大,前舱动态压力变化越大,空投物在舱内运动时间越长。

3 相似准则初步研究

虽然计算流体力学在空气动力研究中有着广泛的应用,但风洞试验仍然是气动研究中不可或缺的重要组成部分。对于运输机重装空投试验来说,前舱动态压力的相似准则并不明确。

3.1 运输机重装空投风洞试验方法

在开展运输机重装空投前舱动态压力变化试验时,在投放物模型外形相似条件下,实践证明马赫数(Ma)和雷诺数(Re)对试验的影响是基本可以忽略的,首先要满足模型的弗劳德数(Fr)和实物相同,同时保证质量、气动力(力矩)满足动力相似准则,初始速度、初始角速度满足相应的关系就能做到模型投放后的轨迹与原飞机空投一致。

按照模型和实物 Fr 相等:

$$\frac{v_m^2}{l_m g_m} = \frac{v_s^2}{l_s g_s} \quad (5)$$

因为 $g_m = g_s$, 可得模型速度:

$$v_m = \sqrt{k_l} v_s \quad (6)$$

按照动力相似条件,投放物模型所受重力和实物所受重力之比与相应气动力之比相等,有:

$$\frac{G_m}{1/2\rho_m v_m^2 S_m c_{Rm}} = \frac{G_s}{1/2\rho_s v_s^2 S_s c_{Rs}} \quad (7)$$

因为气动力系数 $c_{Rm} = c_{Rs}$, 可得:

$$G_m = k_\rho k_l^3 G_s \quad (8)$$

式中: $k_\rho = \rho_m / \rho_s$ 和 $k_l = l_m / l_s$ 分别为试验和飞行空气密度比例和模型比例。

3.2 变尺寸运输机重装空投前舱动态压力

在满足自由来流边界,空投物模型相对机舱堵塞度为 75%,机身模型迎角 4° 条件下,进行变尺寸运输机舱内前位置重装空投的数值模拟,通过参考风洞试验将模型缩小为全尺寸模型的 1/15,并简称 M15, M15 来流速度由弗劳德数确定为全尺寸模型的 $\sqrt{1/15}$,空投物模型质量为原模型的 1/3 375,牵引伞面积为原来的 1/225。另外,模型质量和牵引伞面积均需除以模型宽度。将 M1 和

M15 模型的重装空投数值模拟结果进行对比,其中 M15 的运动时间按照满足弗劳德数进行放大,如式(9)所示,得到前舱动态压力曲线如图 9 所示。

$$t_m = \sqrt{k_l} t_s \quad (9)$$

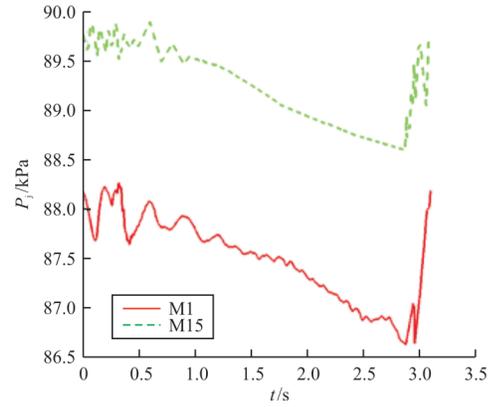


图9 变尺寸运输机重装空投前舱动态压力

Fig. 9 Dynamic pressure of forward compartment of variable size transport aircraft when airdrop

3.3 运输机重装空投风洞试验压力相似准则

以风洞试验的手段研究运输机重装空投前舱动态压力变化就必须给出压力相关的相似准则。根据以往风洞试验经验,压力系数是最好的压力无量纲化方法。

本文给出三种无量纲压力系数定义:

第一种压力系数的定义为

$$C_p = \frac{P_i - P_\infty}{1/2\rho_\infty v_\infty^2} \quad (10)$$

这种定义是常见的压力系数计算方法。

第二种压力系数的定义为

$$C_1 = \frac{P_i}{P_\infty} \quad (11)$$

第三种压力系数定义为

$$C_2 = \frac{P_i}{P_1} \quad (12)$$

式中: P_i 为前舱瞬时静压值; P_∞ 为 1 000 m 高度无穷远处大气静压值; ρ_∞ 为 1 000 m 高度无穷远处大气密度; v_∞ 为大气与飞行器的相对速度; P_1 为空投开始时前舱静压值。

根据以上三种压力系数定义,计算全尺寸模型 M1 和 M15 模型下前舱动态压力的压力系数,如

图 10 所示,图中时间轴均按照满足 Fr 条件换算到飞行状态。

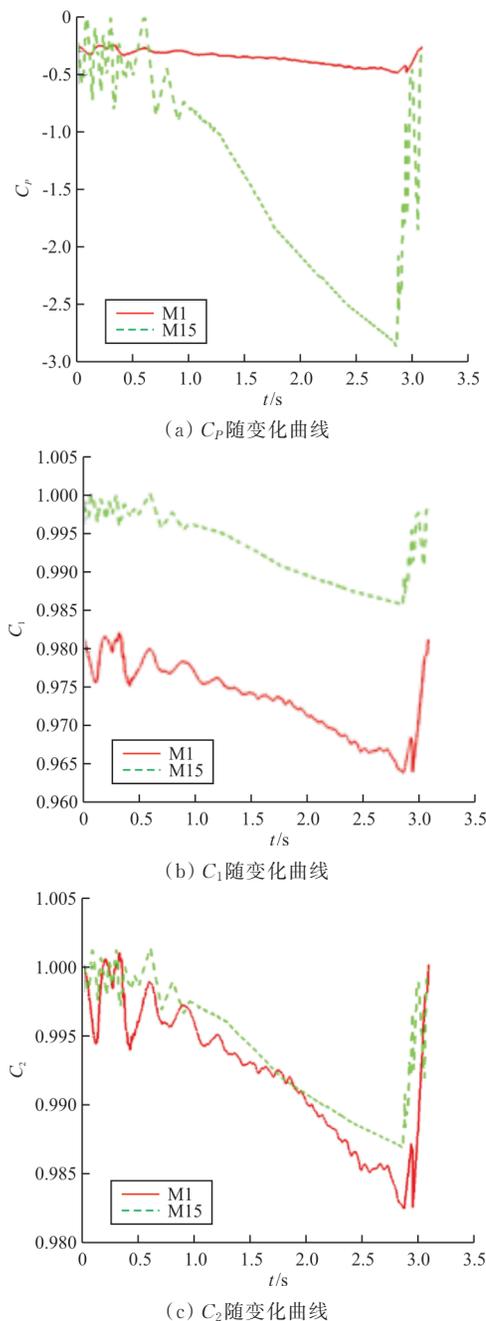


图 10 三种定义的压力系数图

Fig. 10 Pressure coefficients of three definition

从图 10 可以看出:第二种和第三种定义的压力系数,即前舱动态压力与无穷远处压力的比值 C_1 和前舱动态压力与空投物投放前的前舱动态压力的比值 C_2 所定义的压力系数,对于原尺寸计算结果和缩比 1/15 模型的计算结果具有更好的一致性。图 10 中舱内堵塞度为 50% 数值模拟结果不

仅与飞行试验结果 -222.22 Pa/s 接近,而且同风洞试验压力数据采取压力相似准则 C_1 或 C_2 换算到飞行状态后的前舱动态压力结果 -138.89 Pa/s 也很接近。因此,第二种和第三种定义的压力系数 C_1 和 C_2 是大物体空投前舱动态压力风洞试验的更适合的压力相似准则,其中 C_2 最好。

4 结 论

(1) 基于运动嵌套重叠网格的数值模拟方法能够有效模拟运输机重装空投舱内动态压力变化这一流固耦合问题。

(2) 以空投前舱压力值为参考量得到的无量纲数 C_2 是大物体空投前舱动态压力风洞试验的更适合的压力相似准则,它误差更小、更精确。

(3) 空投物位置距离机舱前壁面越近,空投过程前舱动态压力变化越大;来流速度越大,前舱动态压力变化越大;空投物堵塞度越大,前舱动态压力变化越大。

(4) 对运输飞机前舱工作人员来说,在已知的空投作业条件下,当大型空投物在机舱内运动时,身体健康不会受到前舱压力下降的影响,但空投大物体的出舱瞬间应该会有瞬时不舒适感,因此前舱工作人员应做好航空医学上的防护。

本文研究存在的主要问题和后续应进一步开展的工作是:(1) 将此方法应用到三维实际运输机空投情况;(2) 空投过程中外流场动压、投放物移动、空隙进入三者的具体联系以及相互影响。

参 考 文 献

- [1] 林铁群, 张海妮, 方自立. 运输机重装空投系统仿真与分析[J]. 飞机设计, 2015, 35(2): 67-71.
LIN Yiqun, ZHANG Haini, FANG Zilli. Simulation and analysis of the transport-airplane heavy cargo airdrop [J]. Aircraft Design, 2015, 35(2): 67-71. (in Chinese)
- [2] 汤健华. 车载炮空投系统动力学仿真计算[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
TANG Jianhua. Research on wheel mounted artillery air-drop system dynamic simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [3] 张喆, 刘亚辉, 刘智汉, 等. 运输机空投货物建模与任务性能影响因素研究[J]. 飞行力学, 2017, 35(3): 6-10.
ZHANG Zhe, LIU Yahui, LIU Zhihan, et al. Study of transport aircraft cargo airdrop modeling and mission performance influence factors[J]. Flight Dynamics, 2017, 35(3): 6-10. (in Chinese)

- [4] 刘日, 徐明, 姜巍, 等. 重装空投过程的模拟器仿真试验[J]. 飞机设计, 2018, 38(5): 61-66.
LIU Ri, XU Ming, JIANG Wei, et al. Heavy-weight airdrop simulation experiment using flight simulator[J]. Aircraft Design, 2018, 38(5): 61-66. (in Chinese)
- [5] 高静, 洪冠新. 运输机尾流场的小型空投物资下落轨迹仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(2): 273-278.
GAO Jing, HONG Guanxin. The research on the track of the light cargo airdrop under the influence of the wake flow field[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(2): 273-278. (in Chinese)
- [6] 曹煜国, 周伟, 史继斌. 运输机空投时动态响应分析[J]. 中国设备工程, 2020(5): 174-175.
CAO Yuguo, ZHOU Wei, SHI Jibin. Dynamic response analysis of transport aircraft cargo airdrop[J]. China Plant Engineering, 2020(5): 174-175. (in Chinese)
- [7] BURY Y, MORTON S, CHARLES R. Experimental investigation of the flow field in the close wake of a simplified C-130 shape: a model approach of airflow influence on airdrop[C]// 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Honolulu, Hawaii, USA: AIAA, 2008: 092407.
- [8] CHANG R C, YE C E. Flying qualities for a twin-jet transport in severe atmospheric turbulence[J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(5): 1673-168.
- [9] 杨妙升, 屈香菊. 运输机空投的飞行动力学建模及仿真[J]. 飞行力学, 2010, 28(3): 9-12.
YANG Miaosheng, QU Xiangju. Flight dynamic modeling and simulation for transport airdrop[J]. Flight Dynamics, 2010, 28(3): 9-12. (in Chinese)
- [10] 胡兆丰, 肖业伦. 货物在货舱内移动时飞机运动的研究方法: BH-B550[R]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1980.
HU Zhaofeng, XIAO Yelun. Research method of aircraft motion when cargo moves in transport cabin: BH-B550. [R]. Beijing: Beihang University Press, 1980. (in Chinese)
- [11] CHEN Jie, SHI Zhongke. Aircraft modeling and simulation with cargo moving inside[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 191-197.
- [12] 阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 15-17.
YAN Chao. Method and application of computational fluid-dynamics [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 15-17. (in Chinese)
- [13] MENTER F R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows[J]. AIAA Paper, 1993: 2906.
- [14] JAMESON A, TURKEL E. Numerical solutions of the Euler equations by finite volume methods using Runge-Kutta time-stepping schemes[J]. AIAA Journal, 1981, 19(4): 1259.
- [15] JAMESON A. Time dependent calculations using multi-grid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings [C] // 10th Computational Fluid Dynamics Conference. Honolulu, HI, USA: AIAA, 1991: 1596-1601.
- [16] SINGH K P' Baysal. Unstructured method for flows past bodies in general three dimensional relative motion [J]. AIAA Journal, 2001, 39(2): 219-224.

作者简介:

柳伟兵(1996—),男,硕士。主要研究方向:实验流体力学。

焦予秦(1965—),男,博士,副教授。主要研究方向:实验流体力学、计算流体力学、空气动力学。

邹宏毅(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:实验流体力学。

(编辑:马文静)