

## 重叠网格方法研究多子弹抛撒气动问题\*

张海瑞<sup>1,2</sup>,袁武<sup>2</sup>,范晶晶<sup>2</sup>,张为华<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:**子母弹抛撒气动问题是一类典型的有相对运动的多体气动问题,也是重叠网格方法最有价值的应用领域之一。采用 MI-Grid 重叠网格软件系统,耦合流体力学方程和动力学/运动学方程,研究子弹分离过程的气动性能和运动轨迹,并结合正交试验设计,讨论和评估了出舱条件及气动干扰对子弹分离运动的影响,指出子弹在抛撒流场中受激波干扰对姿态运动影响很大,单子弹抛撒时母弹激波扫射使子弹俯仰特性剧烈波动,多子弹抛撒时弹舱流动受子弹挤压反射激波使子弹姿态抬头。

**关键词:**子母弹;多体气动问题;重叠网格;计算流体力学

**中图分类号:**V211.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)05-015-06

## Investigation of cluster bomb projection aerodynamic problem using overset grid method

ZHANG Hairui<sup>1,2</sup>, YUAN Wu<sup>2</sup>, FAN Jingjing<sup>2</sup>, ZHANG Weihua<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Cluster bomb projection is a typical multi-body aerodynamic problem with relative motions, and is also a valuable application area for the overset grid method. The MI-GRID overset software, the fluid dynamic governing equation and the rigid body movement equations were employed to investigate the aerodynamic trajectory and movement characteristics in bomb separation process. The orthogonal experimental design was also employed to discuss even to assess the effect of the initial and aerodynamic interference on bomb separation movement. Results indicate that the bomb in projection flow field is greatly affected gesture motions by the shock interference. When a singular bomb is projected, the shock of the missile makes the pitching movement of the bomb vary abruptly. While the multiple bombs are projected, the reflection shock that is extracted by the bomb makes the bomb rise, which can affect the bomb bay's flowing.

**Key words:** cluster bomb; multi-body aerodynamics; overset grids; computational fluid dynamics

子母弹抛撒的空气动力学问题具有飞行马赫数高、相互干扰强烈、流动结构复杂多变等特点,并引起子弹、母弹的气动特性发生急剧变化,严重影响子弹飞行姿态、操稳特性和落点散布等,从而影响整个子母弹武器系统的安全和攻击效能。因此,研究母弹与子弹、子弹与子弹之间的多体干扰气动问题对子母弹抛撒方案设计具有重要意义。

空气动力学对子母弹一类多体气动问题的研究手段主要有飞行试验、风洞试验和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)。近三十年来,由于数值算法和硬件能力的迅速发展,以及航空航天等领域迫切需求的牵引,CFD在基础理论和工程实践上都取得了令人瞩目的成就。与飞行试验及风洞试验相比,CFD十分方便、快捷、经

济,可以给出细致的流场描述、深入分析流动结构、便于进行机理性研究和揭示规律性现象。因此,自20世纪90年代以后,CFD就已经成为国内外研究多体气动问题最主要的手段<sup>[1-2]</sup>。

### 1 重叠网格方法

网格生成是CFD模拟的前提条件和关键因素,具有复杂拓扑和边界运动的多体问题,更是对网格生成技术提出了巨大挑战:即使是看似简单的外形,通过一定组合后,所构成的空间拓扑也会异常复杂,当多体有相对运动时,网格还要随各物体相对位置关系变化而不断调整,传统的结构网格甚至成为不可能完成的任务。

因此,要实现CFD对多体气动问题的解算,必

\* 收稿日期:2014-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60903206)

作者简介:张海瑞(1972—),男,福建漳州人,研究员,硕士,E-mail:zhangcoors@sohu.com

须发展适用于复杂构型多体相对运动的网格技术,可以分为重构、变形和重叠 3 类:重构网格即在求解过程中实时进行网格的重生,要求网格能在无人干预下完全自动生成,对网格适应任意拓扑和复杂构型的能力有很高要求;变形网格是通过初始网格的伸缩扭转变形去匹配边界运动,网格变形能力和网格质量取决于控制网格变形的物理模型的构建;重叠网格是将计算区域划分成多个独立子区域,各子区域网格随部件作刚性运动,流场信息在网格重叠部分通过插值进行传递。

在上述适用于多体问题的网格技术中,结构重叠网格既拥有结构网格逻辑关系简单、计算技术成熟、效率高、黏性模拟能力强等优点,更弥补了结构网格对复杂拓扑适应能力差的缺陷,极大地降低了网格生成的难度,因而自 1982 年由 Steger<sup>[3]</sup> 提出以来,在国外研究和应用非常迅速。迄今,国外发展的重叠网格程序及软件有 Pegasus<sup>[4]</sup>, Suggar<sup>[5]</sup>, Overgrid, Beggar<sup>[6]</sup> 等。Pegasus 是结构网格重叠程序, Suggar 包括了结构/非结构网格/混合格网重叠功能, Overgrid 和 Beggar 则集成了网格重叠、CFD 求解器和后处理模块, Beggar 还加入了运动学/动力学仿真部分,特别适合求解有相对运动的多体气动问题。

北京航空航天大学阎超课题组<sup>[7-11]</sup>从 2000 年开始,对重叠网格的基础理论开展了持续研究,编制了通用的结构重叠网格代码 MI-Grid,并集成了 CFD 核心求解器模块和六自由度(6 Degrees of Freedom, 6DOF)动力学/运动学模块,形成了一个完整的重叠网格 CFD 软件系统。作者单位 2011 年引进该软件系统,先后应用于某型号外挂物投放、火箭级间分离、子母弹抛壳抛弹等,解决了工程实际问题,取得了良好效果。

本文使用的主要数值方法<sup>[12]</sup>还包括:求解雷诺平均 NS 控制方程,空间离散采用 Roe 的通量差分(Flux Difference Splitting, FDS)格式,单调守恒格式(MUSCL)插值方法和 Van Albada 限制器用于获得二阶空间离散精度;湍流模型采用 SST 剪切应力运输模型;时间离散采用稳定性高的 LU-SGS 隐式计算方法。

## 2 计算模型和网格

本文研究的子母弹模型见图 1。母弹结构包括幂指曲线头部、弹舱和柱段弹身,子弹为尖拱形头部和柱段弹身。仿真初始时刻 8 枚子弹在弹舱周向边缘上均匀排布。仿真条件为:抛撒高度 4km,母弹飞行马赫数 4.6,攻角 0°,在抛撒启动

时受波纹管挤压,子弹以初始速度 20m/s ~ 40m/s,初始角速度 -500°/s ~ 500°/s,平飞出舱,主要研究子弹在 30ms 内的飞行轨迹和姿态。

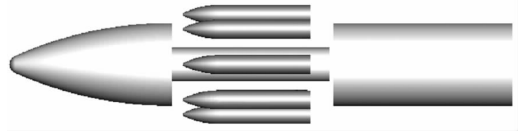
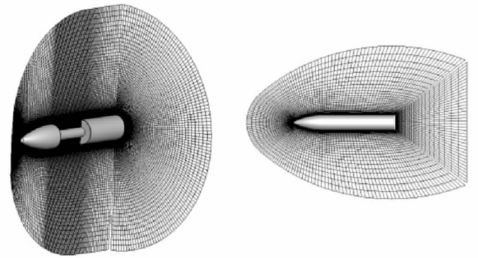


图 1 子母弹模型

Fig. 1 Cluster bomb model

图 2 是母弹和子弹网格示意,采用 O 型拓扑结构,网格在物面附近采用压缩技术按正切函数布置,由物面向远场光滑过渡,网格雷诺数小于 50。为保证网格对流场细节的分辨能力,特别是需要描述空间干扰流场,母弹网格数量约 400 万,单个子弹网格约 50 万,最大计算规模(8 子弹仿真)约 800 万。

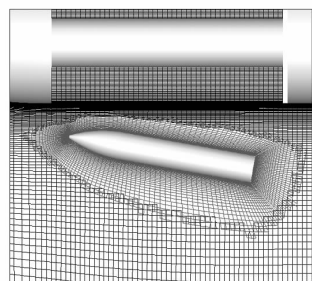


(a) 母弹网格 (b) 子弹网格

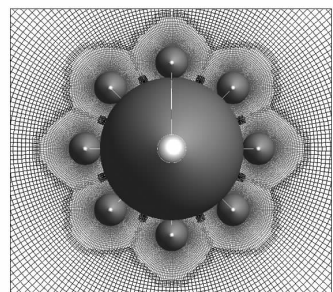
图 2 子母弹计算网格

Fig. 2 Computing grids of a cluster bomb

图 3 是网格重叠结果示意图,可知重叠边界



(a) 对称面重叠结果



(b) 截面重叠结果

图 3 子母弹网格重叠效果

Fig. 3 Overset grids of a cluster bomb

整齐干净,重叠区网格匹配良好,多子弹重叠形式合理。由下文流场图例也可知,重叠区等值线过渡光滑,流场计算结果正确。

### 3 子弹抛撒模型研究

首先研究子弹抛撒模型,认识子弹分离运动的基本规律,并评估出舱条件和气动干扰的影响。

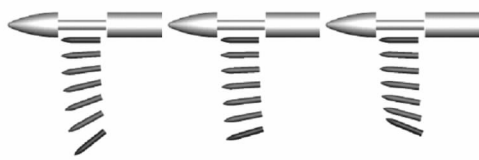
图4、图5是子弹在母弹干扰流场中受空气动力作用下运动轨迹效果图,相邻子弹绘制间隔5ms。可以定性得知,出舱速度对子弹分离距离影响较大,出舱角速度对姿态运动影响较大,负的俯仰角速率有利于径向快速分离。注意到子弹在出舱角速度 $0^\circ/s$ 时受气动干扰作用有低头动作,反映了气动干扰使子弹有朝低头方向运动的趋势。



(a)  $\omega = -500^\circ$  (c)  $\omega = 0^\circ$  (e)  $\omega = 500^\circ$

图4 子弹分离轨迹,出舱速度 20m/s

Fig. 4 Separation trajectories of a single bomb with the chamber leaving speed at 20m/s



(a)  $\omega = -500^\circ$  (c)  $\omega = 0^\circ$  (e)  $\omega = 500^\circ$

图5 子弹分离轨迹,出舱速度 40m/s

Fig. 5 Separation trajectories of a single bomb with the chamber leaving speed at 40m/s

对子弹受干扰气动力作用和该状态无干扰性能进行比较,如图6所示。后者是由计算轨迹按姿态从无干扰子弹气动数据库中进行样条插值获得,对应图中虚线状态。 $Y$ 轴变量采用的是俯仰角加速度,避免面对无量纲系数难以直观理解。由图6可知,在分离初期,母弹对子弹性能干扰剧烈,不同出舱速度和出舱角速度条件下的干扰力矩均呈大幅度、相位接近的波动态势,其积分效应有利于建立负姿态即低头方向。并注意到,由图中干扰性能曲线和无干扰性能曲线重合点看,子弹在较短时间,约20ms即脱离母弹干扰区域。

为解释图6中干扰力矩波动的原因,图7仿照风洞试验中网格测力方法,研究了子弹以 $-10^\circ$ 姿态角在距母弹不同相对位置时的干扰流场结构,图8则给出了相应状态子弹上表面压力分布,并与无干扰子弹进行了比较。可知,子弹呈负的俯仰姿态,此时母弹激波和子弹有较大夹角,相交

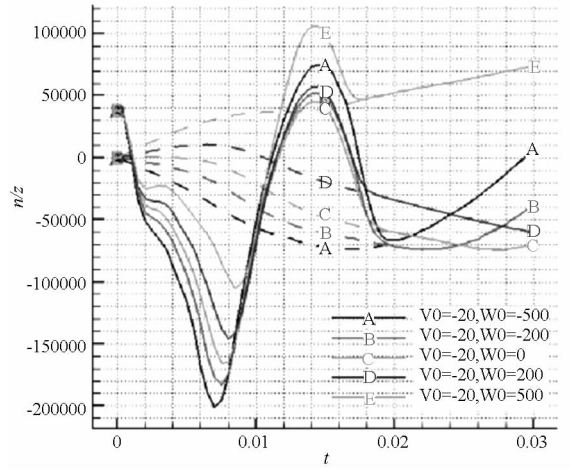


图6 有/无干扰子弹俯仰特性比较

Fig. 6 Comparison of properties of pitch for bombs with/without interferences

激波在子弹上反射,使子弹上表面局部压力有明显跃升。则子弹在远离母弹、经历母弹激波扫射的过程中,压力增量作用点逐渐后移,进而在俯仰上产生图6所示先低头后抬头的干扰特性。

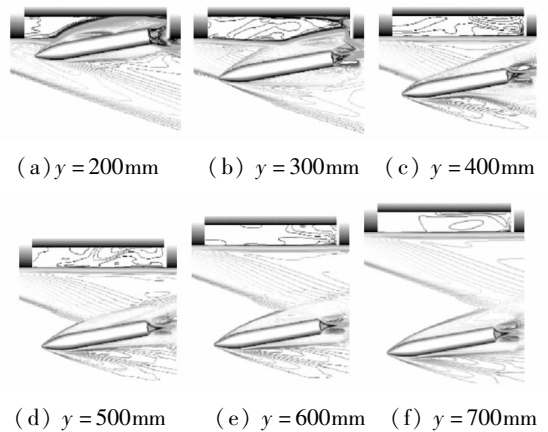


图7 不同空间位置状态马赫数流场

Fig. 7 Mach flow fields with different spacial locations

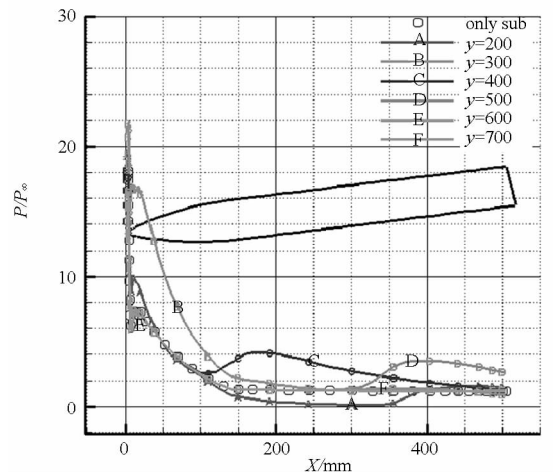


图8 子弹上表面压力分布比较

Fig. 8 Comparison of pressure distributions on the upper surface of bombs

### 4 多子弹抛撒模型研究

子弹在抛撒过程中,不仅受母弹气动力作用,子弹之间也存在相互作用,上文按单个子弹抛撒所得结论,是否能在多子弹抛撒中应用,仍需进一步研究。设子弹出舱条件分别取边界值:出舱速度为  $-20\text{m/s}$  和  $-40\text{m/s}$ ,出舱角速度为  $-500^\circ/\text{s}$  和  $500^\circ/\text{s}$ ,则可能的出舱状态有 4 种情况,见表 1。

表 1 子弹出舱状态

Tab. 1 Status of bombs when leaving chamber

	出舱速度(m/s)	出舱角速度( $^\circ/\text{s}$ )
状态 1	-20	-500
状态 2	-20	+500
状态 3	-40	-500
状态 4	-40	+500

多子弹抛撒中,认为子弹主要受两侧相邻子弹干扰严重,其余子弹干扰相对较小。具体研究某子弹抛撒情况,需要考虑 3 个因素,分别为左侧子弹、子弹、右侧子弹,每个因素由表 1 所示 4 个状态,组合状态共计  $4^3 = 64$  种。

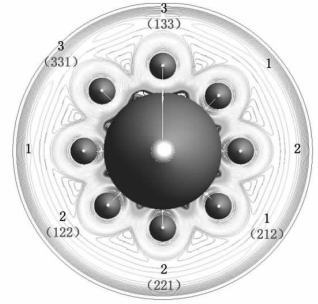
减少试验次数的一种有效思想是采取正交试验法。按正交试验方法设计,试验点及试验组合具有均衡分散和整齐可比的特性,十分有利于综合比较研究各因素各水平对试验指标的影响情况。常用的正交表已由数学工作者制定出来,供进行正交设计时选用。这里,我们选取与所考虑因素及水平最为接近的  $L_{16}(4^5)$ ,见表 2,表中未列出两空列。表中试验因素 A、B、C 分别代表当子弹面朝母弹方向时的左侧子弹、子弹和右侧子弹,因素水平即表 1 所列 4 种状态。

表 2 三因素四水平正交试验设计方案

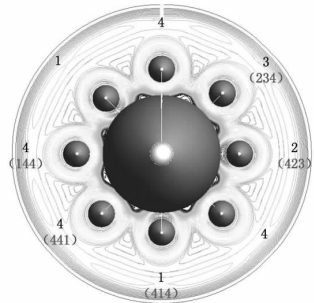
Tab. 2 Design of the 3 - factor 4 - level orthogonal test

试验号	试验因素			试验号	试验因素		
	A	B	C		A	B	C
1	1	1	1	9	3	1	3
2	1	2	2	10	3	2	4
3	1	3	3	11	3	3	1
4	1	4	4	12	3	4	2
5	2	1	2	13	4	1	4
6	2	2	1	14	4	2	3
7	2	3	4	15	4	3	2
8	2	4	3	16	4	4	1

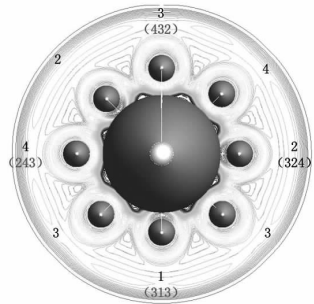
希望在一次组合状态的计算中尽可能多地排布表 2 所列试验状态,通过尝试,给出图 9 所示计算状态,图 9 中与各枚子弹联系的数字表示表 1 所列出舱条件序号,括弧内数字表示表 2 所列正交试验状态。通过 4 次组合的 8 子弹抛撒仿真,即可获得正交试验分析所需全部试验点。图中同时给出了各状态在计算 1ms 后截面流场等马赫线图,可以清晰看到子弹截面激波相交,以及与弹舱流动的不对称作用。



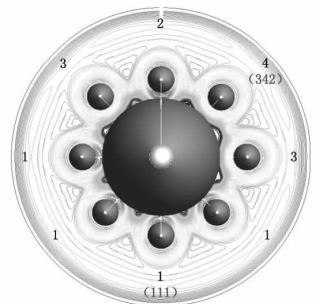
(a) 8 子弹组合 1



(b) 8 子弹组合 2



(c) 8 子弹组合 3



(d) 8 子弹组合 4

图 9 多子弹抛撒方案设计状态

Fig. 9 Designing plans of multiple bombs projection

图 10、图 11 是在相同出舱条件下,单子弹抛撒与组合状态抛撒的质心运动和姿态运动参数比较。由图中曲线的紧密程度可知,各组合状态彼此差异很小,但与单子弹抛撒状态有差别,可以推测相邻子弹干扰只存在有、无的区别,而何种组合形式影响很小。组合状态下俯仰姿态相对单子弹状态有正值的增量,即抬头效应,增量不超过  $3^\circ$ 。

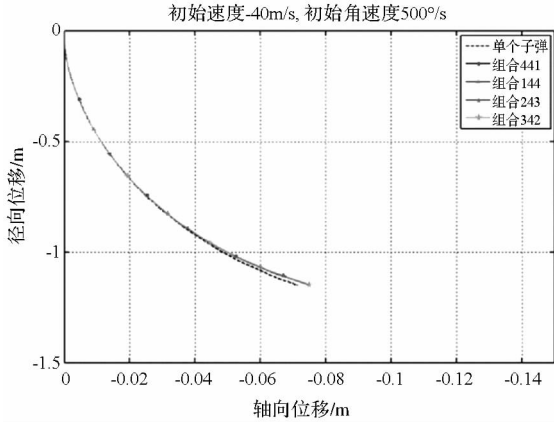


图 10 单子弹抛撒和组合抛撒质心运动对比  
Fig. 10 Comparison of mass center motions for the single bomb projection and combined projection

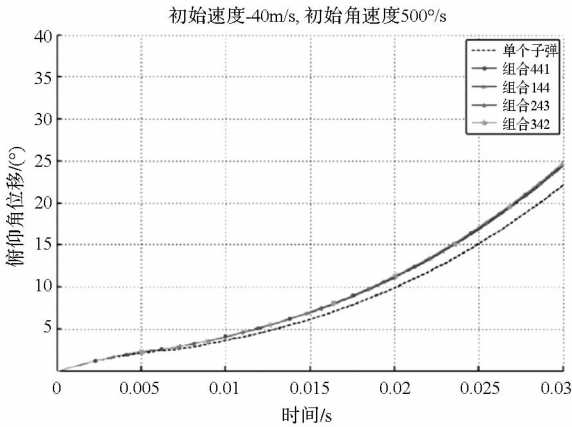


图 11 单子弹抛撒和组合抛撒姿态运动对比  
Fig. 11 Comparison of gesture motions for the single bomb projection and combined projection

下文将对组合子弹俯仰运动的抬头现象进行分析。首先不难理解的是,子弹间的干扰主要存在于分离初始阶段,此时多枚子弹沿周向排布较为紧密,子弹间激波有相交反射,舱内流动受挤压产生形变再反作用于子弹上,也与单子弹时形态不同。当分离一段距离后,子弹排布的周向密度较稀疏,由超音速禁讯原理,子弹间不存在相互干扰。图 12 给出了各状态在 5ms 时刻截面马赫数流场,由图可知,分离初始阶段,各子弹存在激波相互作用,并通过挤压弹舱流体传递影响,5ms 时刻子弹激波锥面彼此分开,且各子弹均脱离弹舱影响区域,因

此可以认为,5ms 后子弹间无相互干扰。

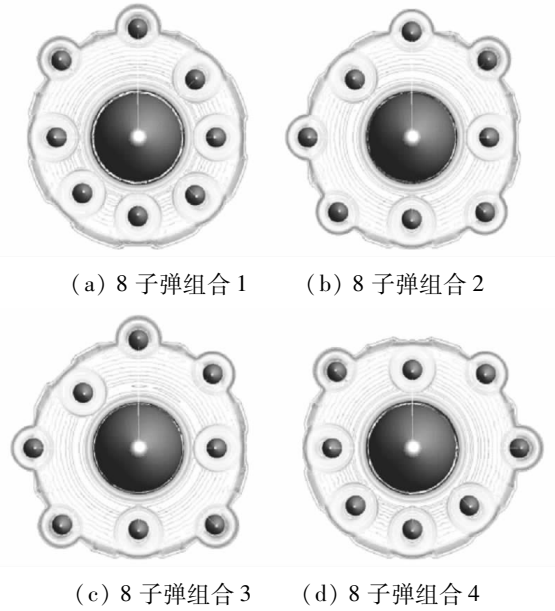


图 12 组合抛撒状态 5ms 时刻截面马赫数流场  
Fig. 12 Mach flow fields at the stage of 5ms for several combined projections

因此着重讨论 0 ~ 5ms 时间段内子弹分离运动,该时间段内各状态的子弹姿态和相对位置近似相等,在时间序列上具有可比性。图 13 给出了组合子弹和单子弹角加速度的比较情况,除初始极短时间内子弹与舱内流动干扰外,组合子弹受气动力矩作用有明显的正值增量,结合数据可知,该力矩增量反映在姿态运动参数上,使角速度增加了  $30^\circ/\text{s} \sim 70^\circ/\text{s}$ 。

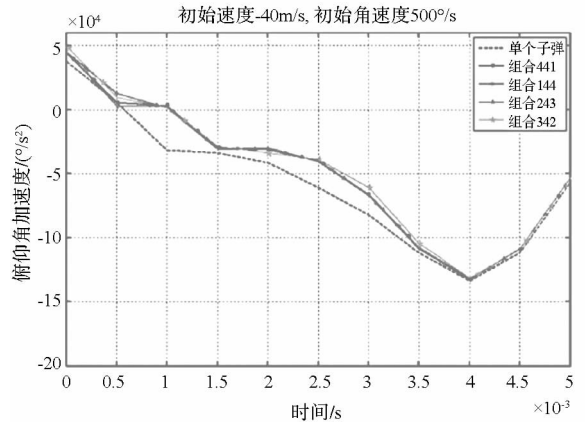


图 13 组合状态子弹与单子弹俯仰特性比较  
Fig. 13 Comparison of properties of pitch for the combined bomb and the single bomb

从流场上讨论组合子弹俯仰力矩干扰特性变化的原因。图 14、图 15 分别给出了某工况下单子弹抛撒和组合状态抛撒对称面马赫数流场,图 16 ~ 18 分别给出了 2 种抛撒状态下子弹的表面压力分布云图。由图 16 ~ 18 可知,弹舱流体受挤压后形态不同是子弹姿态有区别的主要原因,单

子弹时,弹舱自由界面在子弹头部激波作用下内凹,并反射膨胀波系至子弹上表面,由对称面压力流场可知,膨胀波系在子弹上表面发生二次反射,产生弱的激波,使子弹后端压力略有升高;多子弹时,由于弹舱流体受多枚子弹挤压,舱内压力相比单子弹时增加,自由界面变形后恢复能力增强,使子弹与自由界面间流道急剧收缩,并反射激波至子弹中段位置,同时形成强度较大的二次激波,使子弹中后段压力跃升,进而产生大的抬头力矩增量。由子弹下表面压力分布还可以看到,相邻子

受母弹激波扫射,上表面产生局部压力增量使作用点逐渐后移,引起俯仰力矩剧烈波动,其积分效果使子弹有低头趋势。

2) 多子弹抛撒模型研究表明,子弹在较短时间内脱离相邻子弹干扰区域,弹舱流体受挤压形态不同使子弹在脱离相邻子弹干扰时有正值俯仰角速度增量,使组合子弹相对单子弹略有抬头,径向分离能力稍弱。从正交试验结果看,不同组合的相邻子弹干扰量值无差别。

参考文献 (References)

[1] Liever P, Habchi S. Separation analysis of launch vehicle crew escape systems[R]. AIAA Paper, 2004 -4726, 2004.

[2] Kim J, Park S, Yu Y. Euler and navier - stokes simulations of helicopter rotor blade in forward flight using an overlapped grid solver[R]. AIAA Paper 2009 -4268, 2009.

[3] Steger J, Dougherty F, Benek J. A chimera grid scheme[C]. ASME Mini-Symposium on Advances in Grid Generation,1982.

[4] Suhs N, Rogers S, Dietz W. Pegasus 5: an automated pre-processor for overset-grid CFD[R]. AIAA Paper 2002 -3186, 2002.

[5] Noack R. Resolution appropriate overset grid assembly for structured and unstructured grids[C]. 16th AIAA Computational Fluid Dynamic Conference, Paper 2003 -4123, 2003.

[6] Belk D, Maple R. Automated assembly of structured grids for moving body problems [ C ]. Proceedings of 12th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA Paper 95 -1680 -CP,1995.

[7] 李亭鹤. 重叠网格自动生成方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2004.

LI Tinghe. Researches on overset grid automatic generation methods [ D ]. Beijing: Beihang University, 2004. ( in Chinese)

[8] 范晶晶. 复杂重叠网格方法研究及多体运动的非定常流动模拟[D]. 北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院,2010.

FAN Jingjing. Researches on complicated overset grid methods and unsteady flow simulation of multi-body motion [ D ]. Beijing: Beihang University, 2010. ( in Chinese)

[9] 袁武. 新型重叠网格方法研究及其在复杂多体气动问题中的应用[D]. 北京:北京航空航天大学, 2013.

YUAN Wu. Investigations on novel chimera grid methods and its applications to complex multi-body aerodynamic problems[D]. Beijing: Beihang University, 2013. ( in Chinese)

[10] Yan C, Li T, Xie L. Enhancements of the cut-paste algorithm in overlapping grid generation[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(2): 672 -674.

[11] Fan J J, Yan C. Enhancement and application of overset grid assembly [ J ]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(6): 631 -638.

[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, 2006:245 -248.

YAN Chao. Computational fluid dynamics methods and applications[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 245 -248. ( in Chinese)

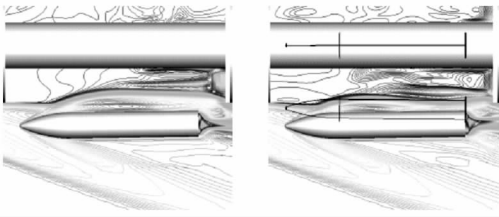


图 14 单子弹和组合子弹某工况马赫数流场  
Fig. 14 Mach flow fields in a certain condition for the single bomb and the combined bomb

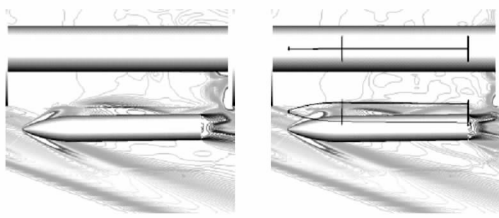


图 15 单子弹和组合子弹某工况压力流场  
Fig. 15 Pressure flow fields in a certain condition for the single bomb and the combined bomb



图 16 单子弹/组合子弹上表面压力云图  
Fig. 16 Plot of upper surface pressure cloud for the single bomb/the combined bomb



图 17 单子弹/组合子弹侧表面压力云图  
Fig. 17 Plot of lateral surface pressure cloud for the single bomb/the combined bomb



图 18 单子弹/组合子弹下表面压力云图  
Fig. 18 Plot of under surface pressure cloud for the single bomb/the combined bomb

弹激波入射至子弹后端,使后侧下方压力升高,小部分抵偿了抬头力矩增量。

5 结论

1) 单子弹抛撒模型研究表明,子弹在飞离母弹过程中,姿态运动受气动干扰影响较大。子弹