

# 一维弹道修正弹的气动特性与修正量研究\*

雷文星<sup>1</sup>, 田晓丽<sup>1</sup>, 吴建萍<sup>2</sup>, 仝哲<sup>3</sup>, 赵书超<sup>1,4</sup>, 辛长范<sup>1</sup>, 魏志芳<sup>1</sup>

(1 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2 中船重工第710研究所, 湖北宜昌 443003;

3 徐工集团, 江苏徐州 221004; 4 国营732厂, 山东淄博 255201)

**摘要:**为提高弹箭射击密集度,采用增阻环进行纵向距离修正。用Fluent软件对3种头部形状的榴弹进行仿真,结果与风洞实验对比,两者得到的阻力系数变化规律相同,验证了模型及模拟软件的正确性和可靠性。进一步仿真分析阻力环在不同安装位置对空气动力特性的影响以获得对应的阻力系数。建立一维弹道修正弹数学模型,用VC++6.0编写弹道程序,并对阻力环机构在弹道不同位置作用时对应的射程修正量进行计算与分析。

**关键词:**弹道修正;阻力环;安装位置;射程修正量

**中图分类号:**TJ013 **文献标志码:**A

## The Study of One-dimension Trajectory Correction Projectile Aerodynamic Characteristic and Correction

LEI Wenxing<sup>1</sup>, TIAN Xiaoli<sup>1</sup>, WU Jianping<sup>2</sup>, TONG Zhe<sup>3</sup>, ZHAO Shuchao<sup>1,4</sup>, XIN Changfan<sup>1</sup>, WEI Zhifang<sup>1</sup>

(1 School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2 CSIC - 710, Hubei Yichang 443003, China;

3 Xugong Group, Jiangsu Xuzhou 221004, China; 4 No. 732 Factory, Shandong Zibo 255201, China)

**Abstract:** To improve the concentration of projectiles, drag brake was used to realize the longitudinal range correction. Fluent was applied to analyze three grenades with three different head shapes. The simulation results were contrasted with wind tunnel experimental, and showed that the rule of drag coefficient was identical, the consistency was got and the legitimacy of the model and FLUENT software were checked by the simulation. Based on it, in order to get the corresponding resistance coefficient, drag brake of different setting position has influence in aerodynamic characteristics. The mathematical model of one dimensional trajectory of correctional projectile was built and ballistics calculation program was compiled by VC++6.0. The corresponding amount range correction was calculated and analyzed by producing ballistic program when drag brake acting in different position on trajectory.

**Keywords:** trajectory correction; drag brake; setting position; range correction

## 0 引言

弹道修正弹是一种不需要长时间连续导向目标,只需要在普通弹上装上简单修正指令接收传递装置和相应的执行机构,并进行有限次不连续的修正就可以命中目标。因此,弹道修正弹在造价上远远低于导弹,是一种适合于现代战争低成本、高精度的常规弹药,前景十分广阔。在此利用CFD软件模拟计算弹道修正弹的绕流流场,分析其空气动力特性来揭示气动规律,以提高它的安全性和可靠性。

## 1 数学物理模型及模拟软件的验证

### 1.1 数学物理模型

研究的基本模型是3种不同头部形状的榴弹,即榴弹的头部采用圆锥形头部、平台形头部和半球形头部。其简化后外形结构如图1所示。

首先利用三维绘图软件Solidworks进行建模,再将建立好的模型导入GAMBIT中划分网格及定义边界类型,输出网格后导入Fluent软件,利用Fluent求解器对其进行求解计算,并进行后处理。

采用对比研究方法,用Fluent软件模拟3种不同头部形状的榴弹在不同工况下的绕流流场,将得到的

\* 收稿日期:2012-03-27

作者简介:雷文星(1985-),女,山西平遥人,硕士研究生,研究方向:弹药工程。

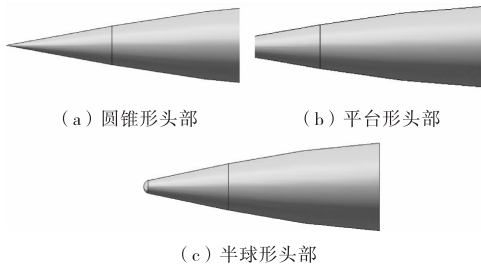


图 1 不同头部形状的榴弹结构简图

空气动力参数与风洞试验数据进行比较,来验证数值软件和数学模型的正确性。

### 1.2 数值模拟仿真

文中仿真 3 种不同头部形状的榴弹在不同马赫数时榴弹的压力等值线、等马赫线、等密度线以及尾部速度矢量。限于篇幅仅给出一个仿真图。

#### 1.2.1 圆锥头部榴弹三维流场数值模拟

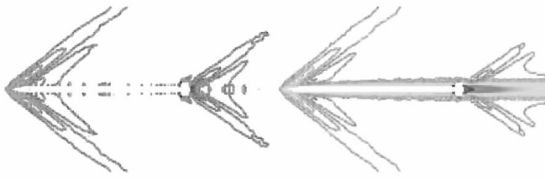


图 2  $Ma = 2.0$  时压力等值线和马赫数等值线

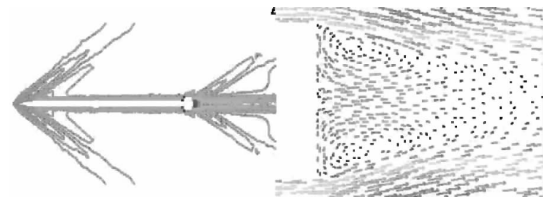


图 3  $Ma = 2.0$  时密度等值线和尾部速度矢量

#### 1.2.2 平台头部榴弹三维流场数值模拟

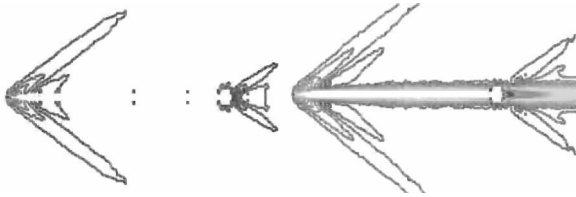


图 4  $Ma = 2.0$  时压力等值线和马赫数等值线

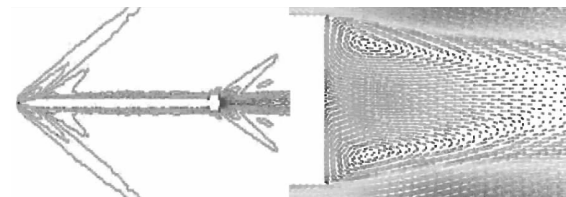


图 5  $Ma = 2.0$  时密度等值线和尾部速度矢量

#### 1.2.3 半球头部榴弹三维流场数值模拟

从图 6、图 7 可看出 3 种头部形状榴弹的流场马赫数、密度及压力的变化规律与理论相符。且在零攻角情况下,阻力系数最大的为平台形榴弹,其次是半

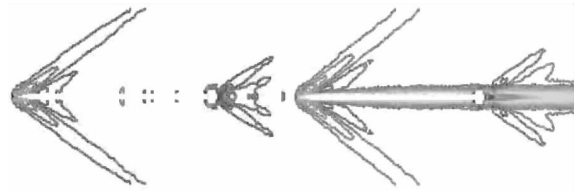


图 6  $Ma = 2.0$  时压力等值线和马赫数等值线

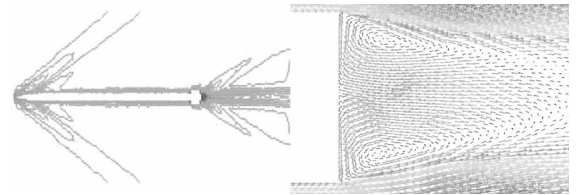


图 7  $Ma = 2.0$  时密度等值线和尾部速度矢量

球形榴弹,最小的是圆锥形榴弹。这一结果与榴弹外形越尖其阻力系数越小的理论是相吻合的。

### 1.3 仿真数据与实验进行比较

风洞实验数据来源于某项目的靶场实验。实验数据符合阻力系数规律,适用于一维弹道修正策略,且提高了射击精度。在此将仿真结果与实验值进行了比较,这里

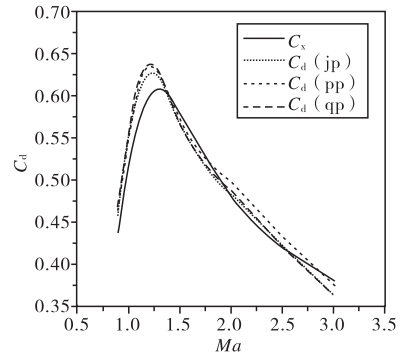


图 8 实验值与仿真值的比较

主要是指阻力系数。具体结果见图 8 (j 表示圆锥形头部;p 表示平台形头部;q 表示半球形头部)。

从图 8 可以看出三种头部形状的榴弹仿真得到的阻力系数误差在合理的范围之内,验证了仿真使用的数学物理模型及模拟软件的正确性和可靠性。

## 2 弹道修正弹与普通榴弹数值模拟

为了弥补风洞实验的一些不足之处,即风洞实验难以准确反映弹丸的实际飞行情况,对于动态情况下的气动力测定较困难,且由于模型支撑杆件的干扰和洞壁反射。在验证了仿真使用的数学物理模型及模拟软件的正确性和可靠性的基础上,应用 Fluent 软件仿真分析阻力环在不同安装位置对空气动力特性的影响以获得对应的阻力系数。从而对弹道修正弹更准确的修正。在此选阻力系数大的平台形头部榴弹继续仿真研究。

文中研究所使用的基本模型是 130mm 榴弹,如

图9所示,在此基础上添加阻力环,安装位置分别距离头部170mm、210mm和220mm,如图10(a)、图10(b)、图10(c)所示。

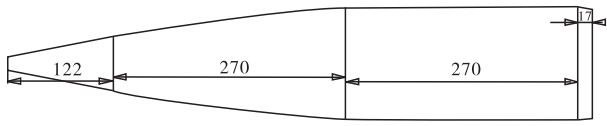


图9 普通榴弹结构图

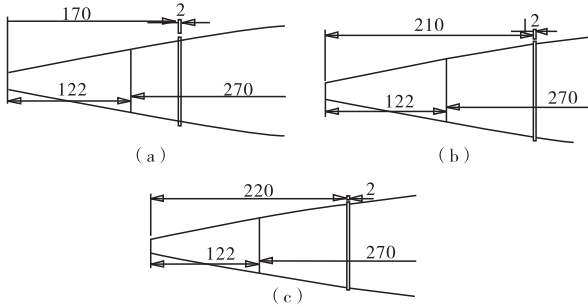


图10 阻力环在不同安装位置的结构图

主要研究一维弹道修正炮弹在阻力片展开后的弹体绕流流场。先仿真阻力环在不同安装位置普通制式炮弹弹形的绕流流场,并进行对比分析,普通炮弹和3种修正弹的仿真图在此不一一列举,仅给出一个代表图如图11~图14所示。

普通炮弹 M0 的三维流场数值仿真图:

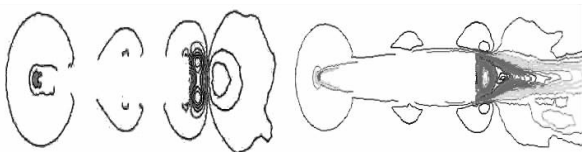


图11  $Ma = 0.588$  普通炮弹的压力等值线、等马赫线图  
修正弹 M1 三维流场数值仿真图:

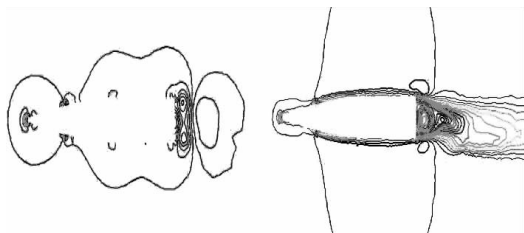


图12  $Ma = 0.588$  修正弹 M1 的压力等值线、等马赫线图  
修正弹 M2 三维流场数值仿真图:

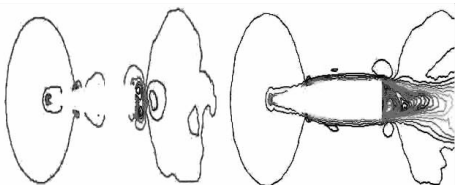


图13  $Ma = 0.588$  修正弹 M2 的压力等值线、等马赫线图  
修正弹 M3 三维流场数值仿真图:

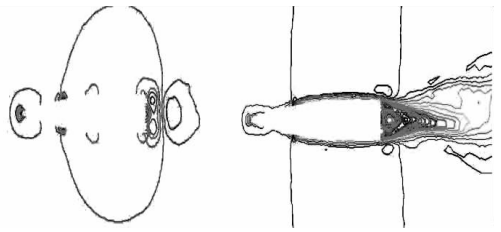


图14  $Ma = 0.588$  修正弹 M3 的压力等值线、等马赫线图

由仿真可知,无论是普通炮弹还是弹道修正弹,从其对称轴的压力等值线图和等马赫数线图可以看出,弹丸的绕流流场都成对称结构。并通过 origin 软件把各弹的阻力系数画图进行分析比较,如图15。

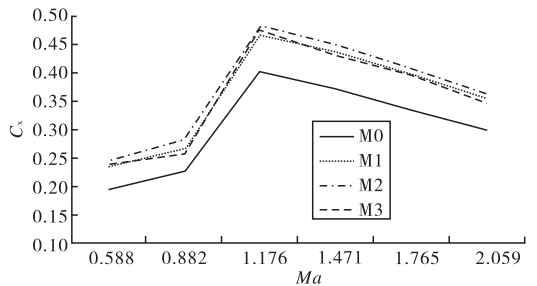


图5 攻角为零时阻力系数随马赫数  $Ma$  的变化曲线

由上图可以看出,阻力环的展开并没有改变阻力系数随马赫数  $Ma$  变化的规律。阻力环展开后比展开前的阻力系数大,说明安装阻力环以后有明显的增阻效果。且阻力环安在距弹头部 210mm (M2) 时增阻效果达到最大,距弹头部 170mm (M1) 和 220mm (M3) 时的增阻效果基本上相同,说明阻力环的安装位置对增阻效果也有明显影响,且阻力环不是安装越靠后增阻效果就越大。因为它还受其他因素的影响。例如阻力环的展开面积,两个因素之间有一定的相互影响。

### 3 射程修正量计算与分析

#### 3.1 VC++ 的程序界面

VC++ 编程序时,弹道方程的数值解法采用龙格-库塔法,该算法精度高,而且程序简单,改变步长方便,缺点是重复计算量大,但这对于现在的计算机已不是什么大问题,而阿当姆斯方法改变步长较麻烦,需又一次转入龙格-库塔法,这使得程序结构复杂。VC++ 的程序界面如图16。



图16 VC++ 的程序界面

从图 16VC ++ 的程序界面可以很直观地分析一定参数的榴弹对应的阻力系数的计算结果报告,阶段特殊点报告,单步结果显示,以及曲线显示。其中曲线显示如图 17。

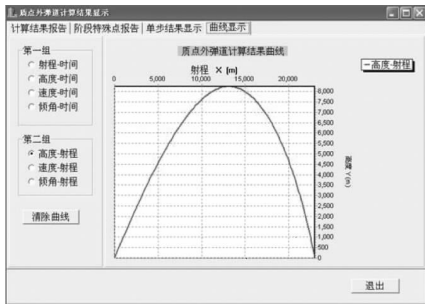


图 17 曲线结果显示

### 3.2 射程修正量

射角  $\theta_0 = 45^\circ$  时,3 种阻力环不同安装位置时的射程修正量变化结果如表 1。其中  $t_{on}$  为阻力环打开时刻,  $\Delta X_1$ 、 $\Delta X_2$  和  $\Delta X_3$  分别为 M1、M2 和 M3 在不同时刻的射程修正量,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  和  $\delta_3$  分别为 M1、M2 和 M3 在不同时刻的修正百分比。

表 1 不同位置、不同修正时刻的射程修正量及百分比

$t_{on}$	$\Delta X_1$	$\Delta X_2$	$\Delta X_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
10	19538	17797	18103	15.1%	22.6%	21.3%
15	19762	18434	18693	14.1%	19.9%	18.8%
20	20245	19101	19340	12.0%	17.0%	15.9%
25	20783	19648	19867	9.66%	14.6%	13.7%
30	21139	20159	20348	8.12%	12.4%	11.6%
35	21521	20731	20893	6.46%	9.90%	9.19%
40	22038	21277	21415	4.21%	7.52%	6.92%
45	22377	21788	21903	2.74%	5.30%	4.80%
50	22620	22242	22331	1.68%	3.33%	2.94%
55	22673	22581	22637	1.45%	1.85%	1.61%
60	22790	22802	22832	0.94%	0.89%	0.76%

#### 3.2.1 阻力环不同位置的射程修正量分析

为了便于分析,利用计算数据用 Matlab 软件绘制曲线图 18 ~ 图 20。图 18 为不同安装位置相同展开面积的阻力环的射程修正量  $\Delta X$  随阻力环打开时刻

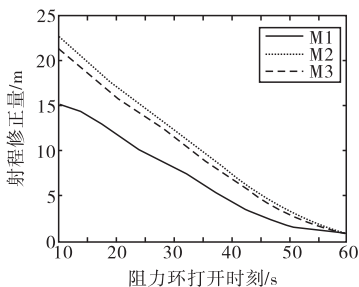


图 18 阻力环在不同位置修正量  $\Delta X$  随时间  $t_{on}$  的变化曲线

M1 的阻力环在不同时刻打开的修正弹道示意图;图 20 为不同射角下的弹道修正示意图。

从图 18 可以看出阻力环在 3 种不同位置的修正量  $\Delta X$  随打开时间  $t_{on}$  的变化曲线规律近似相同,若阻力环在弹丸飞行的前半时间内打开,射程修正量  $\Delta X$  变化较快,且随阻力环打开时刻的推迟衰减也变快,而若阻力环在弹丸飞行的后半时间内打开,射程修正量  $\Delta X$  变化平缓,且随阻力环打开时刻的延迟衰减程度明显减缓,基本近似相等。

#### 3.2.2 阻力环不同打开时刻的射程修正量分析

下面以修正弹 M1 为例,分析阻力环不同打开时刻的射程修正量变化。

计算的初始条件为:射角  $\theta_0 = 45^\circ$ ,弹丸初速  $v_0 = 850\text{m/s}$ 。弹丸在无修正时,即阻力环没有打开时的最大射程为  $X = 23007\text{m}$ ,飞行时间为  $t = 81\text{s}$ ,落速为  $v = 324\text{m/s}$ ,弹道倾角  $\theta = -64.7^\circ$ 。

从图 19 可看出,阻力环打开得越早,修正弹道和无修正弹道相差越大,当  $t_{on} = 10\text{s}$  时,此时弹丸处于升弧段,修正弹道顶点比无修正时的弹道顶点低了 900m,所以随着打开时间的推迟,修正效果变得不明显,当在降弧段开始修正时,修正能力已明显减弱。当  $t_{on} = 45\text{s}$  时,修正弹道和无修正弹道已相差很小,阻力环的修正能力已经很小。

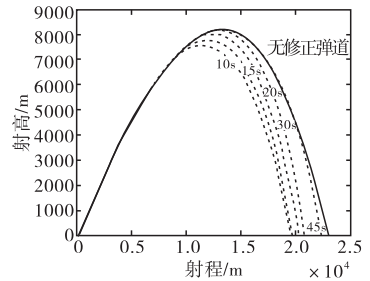


图 19 M1 的阻力环在不同时刻打开的修正弹道示意图

因此,当需要很大的修正量的时候,可以较早的在升弧段打开阻力环,此时修正能力很强。而在降弧段的后 20 几秒打开阻力环时,修正能力已很小。

因此,当需要很大的修正量的时候,可以较早的在升弧段打开阻力环,此时修正能力很强。而在降弧段的后 20 几秒打开阻力环时,修正能力已很小。

#### 3.2.3 不同射角下的射程修正量分析

从图 20 可以看出射程小于 10km 时,射高随着射角的增大而增大,但射角从  $45^\circ$  增大到  $47^\circ$  时射高增大已不明显,而当射程大于

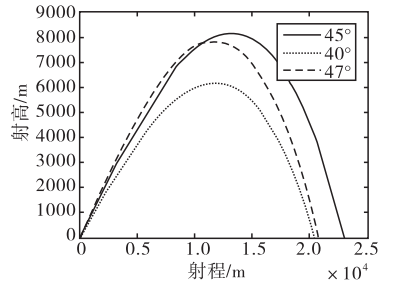


图 20 不同射角下的弹道修正示意图

10km 时,射角从  $45^\circ$  增大到  $47^\circ$  时射高反而减小,这说明该弹的最大射角是  $45^\circ$ 。

## 4 结论

文中对一维弹道修正弹的气动特性及其射程修正量进行分析研究,通过研究得到以下结论:

1)在攻角为零时,无论是普通炮弹还是弹道修正弹,其绕流流场结构都是对称的。

2)各马赫数下,并不是阻力环安装位置越靠后,修正弹的阻力系数越大;阻力环的安装位置靠后到一定位置就不起增阻作用。

3)阻力环展开时刻越早,射程修正量越大。并且在弹丸处于上升弧段展开时的修正量比较明显,在下降弧段展开时的修正量明显减弱。

4)该榴弹的最大射角是 $45^\circ$ ,且在弹丸的最大射角展开时,其修正量最大。

5)通过弹道计算表明,阻力环的射程修正能力显

著,修正效果明显。

### 参考文献:

- [1] 王永周,刘明喜,赵小侠.一维弹道修正弹阻力执行机构开启时间确定算法[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(6): 165-168.
- [2] 王志军,尹建平. 弹药学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [3] 李树常. 弹箭空气动力学[M]. 北京:兵器工业出版社,1989.
- [4] 裔萍. 一维弹道修正弹的气动力特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.
- [5] 尚勇. 一维弹道修正机构设计和修正规律研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
- [6] 黄义,汪德虎,由大德. 一维弹道修正弹对海上目标射击误差及射程扩展量研究[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(1):149-150.

(上接第127页)

差别不大,其他气动参数随攻角变化无明显规律性;沿展向位置,不同挂位侧向力随攻角变化均增大,而且沿展向侧向力也增大,翼稍附近侧向力达到最大;沿垂直位置,随着外挂物远离飞机,外挂物受飞机的干扰逐渐减小。

### 参考文献:

- [1] Benek J A, Buning P G, Steger J L. A 3-D chimera grid embedding technique, AIAA 85-1523[R]. 1985.
- [2] Nakahashi K, Togashi F, Sharov D. An intergrid-boundary definition method for overset unstructured grid approach, AIAA-99-3304-CP[R]. 1999.

(上接第130页)

文中对发射管内流场进行了数值模拟研究,并与有关资料中提供的试验、计算数据进行了分析比较,符合性比较好。发射管内流场的分析结果可以应用在水下航行体的结构设计与优化中。

### 参考文献:

- [1] 黄景泉,张宇文. 鱼雷流体力学[M]. 西安:西北工业大

- [3] Dougherty F C, Kuan J H. Transonic store separation using a tree-dimensional chimera grid scheme, AIAA 89-0673[R]. 1989.
- [4] Slotnick J P, An M Y, et al. Navier-Stokes analysis of a high wing transport high-lift configuration with externally blown flaps, AIAA-2000-4219[R]. 2000.
- [5] 王立强,董国国. 外挂物干扰流场特性数值仿真研究[J]. 航空计算技术,2012,42(1):57-60.
- [6] Sharov D, Nakahashi K. Reordering of 3-D hybrid unstructured grids for vectorized LU-SGS Navier-Stokes computations, AIAA 97-2102, 1997.

学出版社,1989.

- [2] 李人宪. 高速磁悬浮列车纵向及垂向气动力数值分析[J]. 中国铁道科学,2004,25(1):8-12.
- [3] 殷崇一,张宇文,刘乐华,等. 导弹水下发射内流场的数值研究[J]. 弹箭与制导学报,2003,23(3):56-58.