

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0092

小口径超空泡子弹头部外形的优化设计*

马文轩, 于 勇, 胡 俊

(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘要: 在水下高速运动时, 小口径射弹周围的水会发生空化现象, 阻力系数最优的弹头几何外形对应着射弹被空泡全包裹的超空泡状态。针对一种小口径射弹, 可以利用计算流体力学(CFD)数值方法模拟含空化现象的气液两相流动, 探究空泡形态和阻力系数与射弹头部几何外形的关系。选取三段锥形为基本射弹头形, 采用分步优化方式对射弹头部外形进行了优化。同时, 结合神经网络与序列二次规划(SQP)算法减少优化过程中的计算量, 缩短了优化工作所需的总时间。优化后的射弹阻力系数比优化前的减小约 30%, 且能够形成包裹全弹体的超空泡。

关键词: 超空泡射弹; 阻力系数; 分步优化; 神经网络; 序列二次规划算法

中图分类号: O359 国标学科代码: 1302564 文献标志码: A

Optimal design of the head shape of a small-caliber supercavitating projectile

MA Wenxuan, YU Yong, HU Jun

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: When a small-caliber projectile is moving underwater at a high speed, the water around the projectile will cavitate. The cavitation effect can greatly reduce the resistance of the moving vehicle, and the geometric shape of the warhead with the best drag coefficient corresponds to the supercavitating state where the projectile is completely enveloped by cavitation. Aiming at a small-caliber projectile, the computational fluid dynamics method is used to numerically simulate the gas-liquid two-phase flow with cavitation phenomenon, while the relationships of the cavitation shape and the drag coefficient with the geometry of the projectile's head shape are explored. The three-segment cone type is selected as the basic projectile type, and the shape of the projectile is optimized by step optimization method. First, seven parameters are used to describe the three-segment cone shape of the projectile, and then the projectile is optimized in the order of the first section cone, the second and the third section cone. This method is used because the seven parameters are not independent of each other, and it is difficult to quantitatively determine the relationship between an individual parameter and the performance of the projectile. At the same time, the neural network is employed to perform nonlinear fitting with a large number of CFD numerical simulation results as learning samples, and the approximate calculation model of the shape parameters-drag coefficient of the projectile is established by neural network. Finally, the sequential quadratic programming (SQP) algorithm is introduced to find the optimal solution of the approximate calculation model. The use of neural network and SQP algorithm reduces the amount of calculation in the optimization process and the total time required for optimization work. After two rounds of optimization, the optimized projectile has a better ability to form supercavitation, and its drag coefficient has also been significantly improved compared to the original projectile, with a reduction about 30% compared to the projectile before optimization.

Keywords: supercavitating projectile; drag coefficient; multi-step optimization; neural network; SQP algorithm

* 收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-09-17

第一作者: 马文轩(1997—), 男, 硕士研究生, 1443407530@qq.com

通信作者: 于 勇(1976—), 男, 博士, 副教授, yuyong@bit.edu.cn

近年来, 水下武器装备的研究成为重点, 鱼雷、水下导弹等技术迅速发展^[1]。小口径射弹的速度大、射频高、使用灵活^[2], 但通常入水阻力大、射程短等^[3], 目前很难应用于海军近程防御。因此, 在水陆都能造成有效杀伤的小口径超空泡射弹已成为两栖作战的重要需求。

在水中运动时, 高速射弹壁面附近的水会发生空化, 理想情况下会形成超空泡包裹射弹。20 世纪 60 年代, Logvinovich 提出超空泡截面独立扩张原理^[4]后, 经过 Savchenko 等^[5-6]的实验验证及分析对比, 超空泡理论确立并被广泛应用^[7-11]。在此机理的基础上, 对射弹的气动外形进行优化, 使优化后的射弹在水下运动时产生能够包裹弹体的超空泡, 从而减小优化射弹在水下运动时受到的阻力, 同时提高其射程、增加其稳定性。

现有常规方法是, 运用 CFD 软件对不同的弹形进行大量计算, 逐步对比与筛选。但弹形参数众多, 计算模型的建立及计算的复杂程度令过程繁琐而漫长。为了避免复杂而费时的数值计算流程, 可以在一定量的数值模拟结果的基础上, 通过训练神经网络建立弹体参数与阻力系数之间的近似函数关系替代长时间的模拟计算, 对弹体的阻力系数进行预测。进而, 通过优化算法求解阻力系数的最小值达成对射弹外形的优化。本文中, 用这种思路对一种 DBP87 原始射弹进行优化, 并使用数值模拟软件对优化结果进行验证, 以证明此优化设计方法的合理性。

1 数值计算模型与方法

1.1 控制方程

合理的控制方程可以准确求解水中射弹的多相流问题。射弹的水中运动属于气-液-蒸气三相问题, 同时涉及空化效应, 需要较精确的气-液交界面, 本文中选取 VOF 多相流模型。基本控制方程组为:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu_m + \mu_t)(\nabla \mathbf{v} + \nabla^T \mathbf{v})] \quad (2)$$

式中: \mathbf{v} 为速度矢量, ρ_m 、 μ_m 分别为混合介质密度和动力黏度, μ_t 为湍流黏性系数。

湍流模型采用 SST k - ω 湍流模型, 它考虑了湍流剪切应力的传输, 对于解决多种湍流问题具有很高的准确性和可信度^[12]。SST k - ω 湍流模型的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m k u_i) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho_m \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中: k 为湍流动能, ω 为湍流动能耗散率, $\nu_t = \mu_t / \rho$ 为流体动力黏性系数, σ_k 、 σ_ω 、 $\sigma_{\omega 2}$ 和 γ 为湍流模型常数。

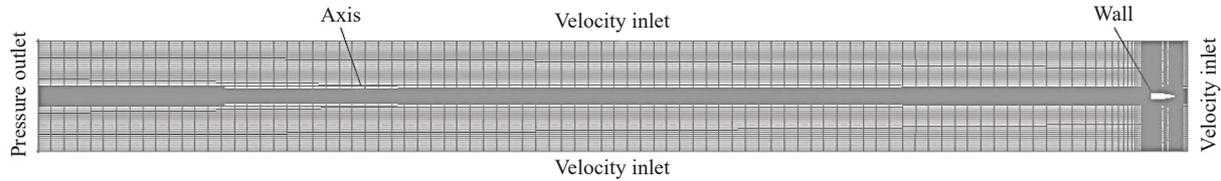
Schnerr-Sauer 空化模型与所有多相流模型兼容, 具有较高的计算稳定性^[13]。但原始 Schnerr-Sauer 模型未考虑非冷凝气体对空化过程的影响, 因此在模拟空化流场时存在一定的局限性。为解决此问题, 使用在蒸发项中引入非冷凝气体的 Schnerr-Sauer 空化模型^[14]进行计算, 其表达式为:

$$\dot{m} = \begin{cases} \dot{m}^+ = C_{\text{evap}} \frac{3(\alpha_V + \alpha_{\text{nuc}})(1 - \alpha_V) \rho_l \rho_v}{R_B \rho_m} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} & p < p_v \\ \dot{m}^- = C_{\text{cond}} \frac{3\alpha_V(1 - \alpha_V) \rho_l \rho_v}{R_B \rho_m} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} & p \geq p_v \end{cases} \quad (5)$$

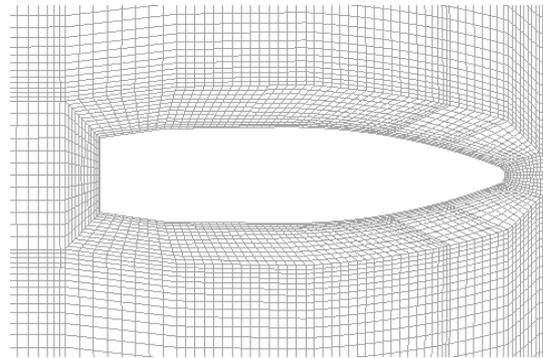
式中: \dot{m} 为气相质量变化率, R_B 为空化核半径, ρ_l 、 ρ_v 分别为液、气相密度, α_V 为气相体积分, α_{nuc} 为非冷凝气体体积分, C_{evap} 、 C_{cond} 分别为蒸发、冷凝的经验校准系数, p 为环境压力, 饱和蒸气压 p_v 取 3 540 Pa。

1.2 计算域、网格和边界条件

DBP87 射弹是轴对称的无翼小口径射弹, 射弹最大直径 6 mm。为了减轻计算量并简化模型, 采用二维轴对称旋转模型计算。计算域网格采用结构化网格, 网格的划分和边界条件如图 1 所示。计算域宽 0.05 m, 射弹顶端距计算域入口 0.01 m, 射弹尾端距计算域出口 1 m。取网格总数为 5 000、6 000、8 000、10 000 进行网格无关性验证, 最终取模型最小网格尺度为 0.1 mm, 总网格数为 6 174。



(a) Global meshes and boundary conditions



(b) Local meshes near projectile

图 1 计算域网格划分和边界条件

Fig. 1 Mesh generation and boundary conditions

采用 ANSYS Fluent 19.2, 基于压力求解器进行定常计算。计算中, 采用 SIMPLE 算法空间差分二阶迎风格式, 气液交界面几何重构采用 Compressive 格式。Hrubes 等^[15] 对不同的超空泡射弹进行了实验研究。本文中, 采用上述模型及方法分别对亚音速和跨音速状况的实验数据^[15] 进行了验证, 证明此数值方法是可信有效的。

在使用 CFD 方法寻找射弹头部外形的优化过程中, 对包含原弹形状在内的共 213 种不同的射弹头部外形进行了数值模拟计算, 获得对应的空泡形态与总阻力系数。

2 DBP87 普通弹分步优化

2.1 DBP87 普通弹参数

DBP87 普通弹是我国 5.8 mm 小口径枪弹中的主要弹种, 射弹模型由弹头段、弹身段和尾部段 3 部分构成, 尾部开有倒角^[16]。图 2 为 DBP87 普通弹外观及结构示意图, 其参数分别为: 口径 6 mm, 弹头质量 4.15 g, 弹头长 25 mm, 质心相对位置 39.8%, 初速 900 m/s。



(a) Overall look

(b) Warhead diagram

图 2 DBP87 普通弹

Fig. 2 DBP87 bullet

2.2 对射弹头部结构的调整

具有一定头部形状的射弹入水时, 会形成能够包裹射弹的超空泡, 射弹被空泡包裹的表面与密度和压力极低的水蒸气接触, 可使它受到的摩擦阻力大大减小。DBP87 普通弹头部为平头圆弧状结构, 此头部结构适用于空气中的运动, 但不适用于水下航行, 因此先要对射弹的头部结构进行调整。挪威 DSG 公司多环境弹 (multi-environment ammunition, MEA) 中的自然超空泡技术 (general purpose supercavitating, GPS) 水下枪弹为目前稳定性较好的跨介质入水射弹^[17], 在空气中的有效射程为 800 m, 在水下的最大射程为 60 m。图 3 为在 DSG 公司网站(<https://dsgtec.com/>)中获取的视频截图, 可见此枪弹采用了平头三段锥式的头部结构。

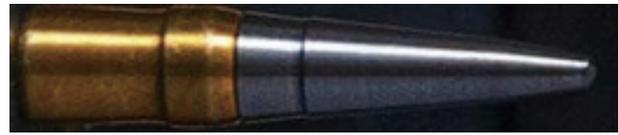


图 3 DSG 公司的自然超空泡技术水下枪弹

Fig. 3 DSG's general purpose supercavitating bullet

为了获得比原弹在水下表现更好、阻力系数更小的初始射弹外形, 在保持 DBP87 普通弹口径与长度不变的前提下, 参考 GPS 射弹^[17]的三段锥式头部结构, 对 DBP87 普通弹进行调整。如图 4 所示, 调整后的射弹头部可近似为三段锥结构, 有 7 个参数: 空化器直径 D_1 , 三段的倾斜角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 以及三段的长度 L_1 、 L_2 、 L_3 。

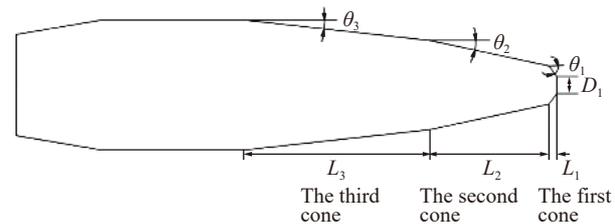


图 4 调整后的射弹头部及参数

Fig. 4 Projectile parameters after adjustment

设子弹最大直径和头部三段锥总长不变, 有:

$$2(L_1 \tan \theta_1 + L_2 \tan \theta_2 + L_3 \tan \theta_3) + D_1 = D \quad (6)$$

$$L_1 + L_2 + L_3 = L \quad (7)$$

式中: $D=6 \text{ mm}$, $L=14.5 \text{ mm}$, 与 DBP87 射弹一致。同时, 为避免射弹形状发生畸变, 其头部几何外形应为凸曲线, 则有:

$$\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 \quad (8)$$

由于 7 个参数互相耦合, 无法通过控制变量法逐个进行讨论来获取最优参数组, 所以利用数值模拟软件对射弹头部三段锥结构进行分步优化, 综合考虑射弹的空泡形态及阻力特性, 获得射弹头部外形设计空间, 并为神经网络的学习提供数据集。

2.3 对 DBP87 普通弹的分步优化

2.3.1 优化起始点

对调整前后的射弹外形进行模拟计算, 结果如图 5 所示。由空泡形态与阻力系数对比得知, DBP87 普通弹的头部结构不能产生包裹子弹的空泡, 这导致在水下运动时其压差阻力与黏滞阻力系数都显著增加。而将头部调整为三段锥后的射弹 (射弹 1) 则有较好的空泡形成能力, 同时其压差阻力系数和黏滞阻力系数也都低于 DBP87 普通弹。以射弹 1 弹形为优化起始点, 在此弹形的基础上改变其头部几何参数, 寻找阻力系数更小的射弹参数组。射弹 1 的形状参数见表 1。



图 5 DBP87 和射弹 1 的空泡形态

Fig. 5 Cavitation shapes of DBP87 and projectile 1

表 1 射弹 1 的参数

Table 1 Parameters of projectile 1

$\theta_1/(\circ)$	L_1/mm	$\theta_2/(\circ)$	L_2/mm	$\theta_3/(\circ)$	L_3/mm	D_1/mm
50.054	0.480	12.555	2.315	7.404	11.704	0.780

射弹头部三段锥结构的 7 个形状参数与射弹在水中产生的空泡形态有直接关系, 但 7 个参数之间并非相互独立, 难以定量确定每个参数与空泡形态、阻力系数之间的关系。因此, 使用分步优化方法对射弹进行优化。在进行分步优化的过程中, 尝试了多种优化顺序, 发现优化顺序对最后得到的优化射弹外形有一定的影响, 而由衡量射弹性能的阻力系数看, 不同优化顺序得到的优化射弹阻力系数无明显差异。限于篇幅, 本文中仅选取一种具有代表性的优化顺序进行说明。

首先, 保持第三段锥的参数 θ_3 、 L_3 不变, 对第一段锥的 D_1 、 L_1 、 θ_1 进行优化, 此时第二段锥的 L_2 、 θ_2 随之变化, 得到能在第一段锥末尾处产生空泡的第一段锥结构。然后, 保持第一段锥的形状参数不变, 进行第二、三段锥的优化, 确定 L_2 、 θ_2 、 L_3 、 θ_3 的范围。分步优化过程中, 涉及的 213 组射弹参数组将作为神经网络学习样本, 在保证寻优的同时也兼顾了每个变量分布的均匀性与正交性, 在本文中仅选取部分射弹参数组, 详细叙述以说明分步优化过程。

2.3.2 对射弹第一段锥的优化

由射弹 1 出发, 对射弹第一段锥进行优化, 保持 L_1+L_2 不变、增大 θ_1 , 随之 L_1 减小、 L_2 增大, 当 θ_1 增大至 90° 时 L_1 与 D_1 重合。射弹 1 的 $\theta_1=50.054^\circ$, 而 θ_1 的最大值为 90° , 以 5° 为步长分别取 θ_1 为 55° 、 60° 、 65° 、 70° 、 75° 、 80° 、 85° 、 90° 。阻力系数变化图 6(a) 所示, 空泡形态变化如图 7(a)~(f) 所示。其中, C_p 为压差阻力系数, C_f 为黏滞阻力系数, C_d 为总阻力系数。注意, $\theta_1=55^\circ$ 的黏滞阻力有显著降低, 因此在 55° 附近补充 52° 与 58° 插值。

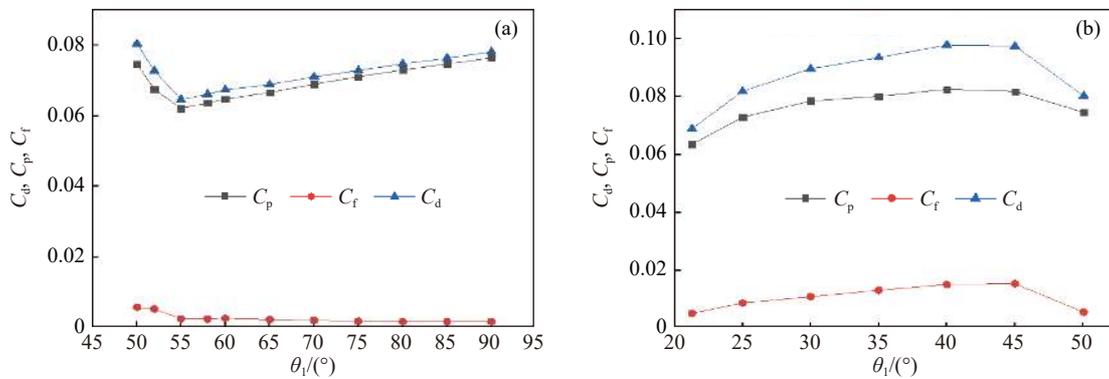


图 6 阻力系数随倾斜角 θ_1 的变化

Fig. 6 Resistance coefficients varying with θ_1

观察阻力系数和空泡形态可知, 射弹 1 的头部结构虽然产生了超空泡结构, 但空泡在第三段锥处断开。随着 θ_1 增大, L_1 减小、 L_2 增大, 空泡直径变化不明显。当 $\theta_1 \geq 55^\circ$ 时, 空泡近似完全包裹射弹。黏滞阻力系数随空泡形态变化有先减小后增加再减小的趋势。在 θ_1 增大至 55° 时取得黏滞阻力系数的最小值。同时, 随着 θ_1 增大, L_1 减小、 L_2 增大, 压差阻力系数先减小后增加, 在 $\theta_1=55^\circ$ 时取得最小值。由于黏滞阻力远小于压差阻力, 总阻力系数变化趋势基本与压差阻力系数保持一致。将总阻力系数最小的 $\theta_1=55^\circ$ 作为角度优化的优选结果, 为射弹 2。

由阻力系数曲线可见, 压差阻力随 θ_1 变化明显, 有固定变化趋势, 且压差阻力远大于黏滞阻力, 是阻碍弹体运动的主要因素。为寻找压差阻力系数最小的射弹参数组, 尝试减小 θ_1 。由射弹 1, 保持 L_1 、 L_2 不变。减小 θ_1 , θ_2 随之增大。当 θ_1 由 50.054° 减小至 21.281° 时, θ_2 增大至 21.282° , 此时第一、二段锥重

合。以 5° 为步长, 取 θ_1 为 45° 、 40° 、 35° 、 30° 、 25° 、 21.282° 。阻力系数变化如图 6(b) 所示, 空泡形态变化如图 7(g)~(l) 所示。

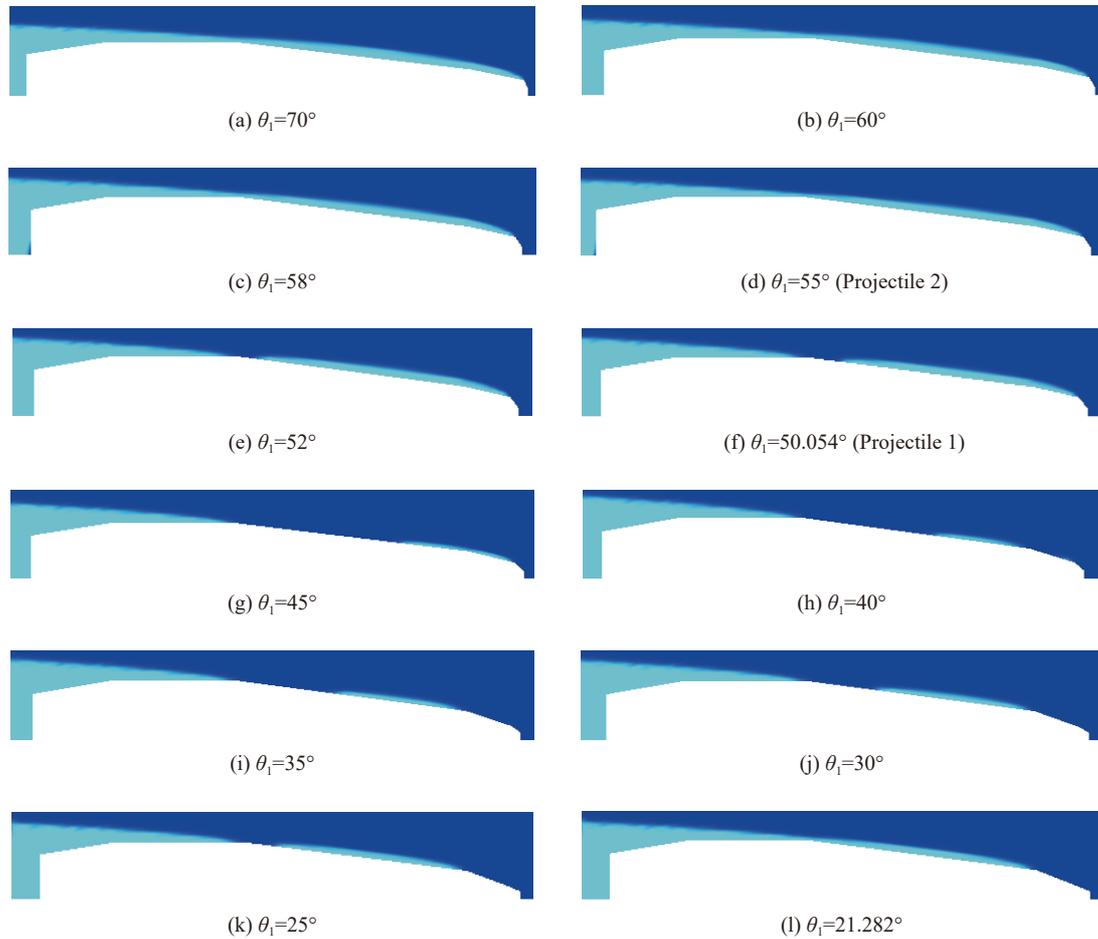


图 7 空泡形态随倾斜角 θ_1 的变化
 Fig. 7 Cavitation shapes varying with θ_1

观察阻力系数变化与空泡形态, 当 $\theta_1=45^\circ$ 时, 射弹头部产生的空泡长度极短, 且此时压差阻力与黏滞阻力都取得最大值。随着 θ_1 的减小与 θ_2 的增大, 空泡长度缓慢增加, 且压差阻力与黏滞阻力都呈下降趋势。当 $\theta_1=\theta_2=21.282^\circ$ 时, 第一、二段锥合并, 此时压差阻力与黏滞阻力都有显著降低; 但直至第一、二段锥合并时, 总阻力系数依然大于射弹 2 的阻力系数, 没有优于射弹 2 的射弹参数组出现。

在射弹 1 的基础上, 对第一段锥的空化器直径 D_1 进行优化。 D_1 初值为 0.78 mm , 在 0.78 mm 附近分别取 D_1 为 0.26 、 0.52 、 0.70 、 0.90 、 1.00 、 1.10 mm , θ_1 随空化器直径增加而减小, 在 $45^\circ\sim 65^\circ$ 之间, 其余参数与射弹 1 保持一致。阻力系数变化如图 8 所示, 空泡形态变化如图 9 所示。

对比观察空泡形态与阻力系数可以发现, 空化器头部直径影响了空泡形态。当空泡形态完整未断开时, 黏滞阻力逐渐增加, 压差阻力逐渐减小, 总阻力系数下降。当 $D_1 > 0.78\text{ mm}$ 时,

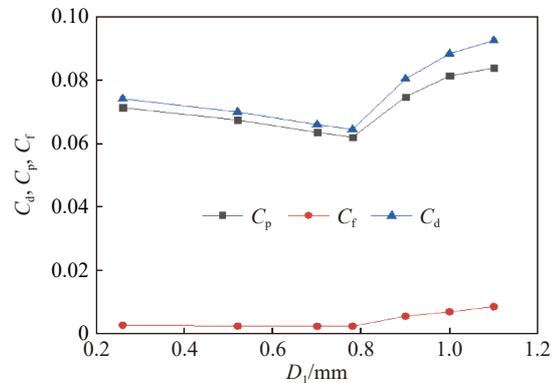


图 8 阻力系数随空化器直径 D_1 的变化
 Fig. 8 Resistance coefficients varying with D_1

超空泡中断为局部空泡, 此时压差阻力与黏滞阻力显著上升, 且随着 D_1 增大而继续增加。当 $D_1=0.78$ mm 时, 总阻力系数取得最小值, 射弹 2 仍为最优选。

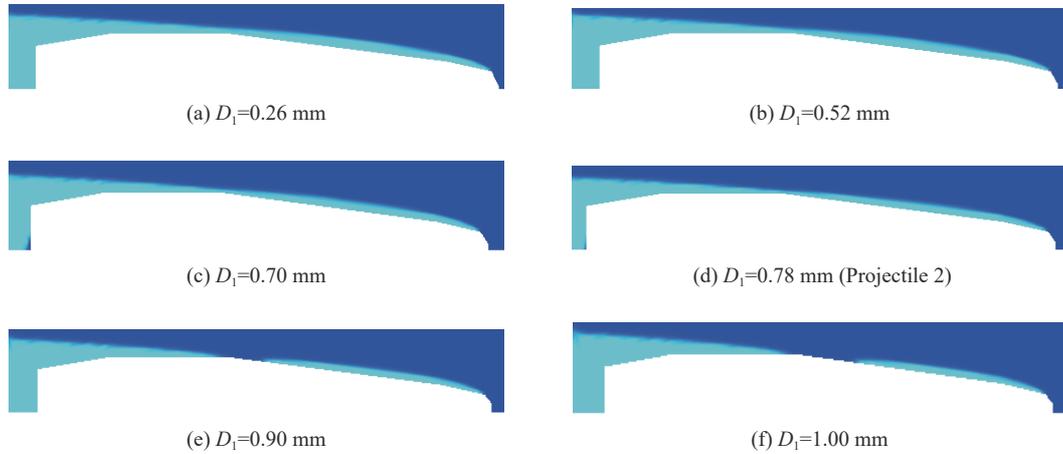


图 9 空泡形态随空化器直径 D_1 的变化

Fig. 9 Cavitation shapes varying with D_1

综合对比可以发现, 压差阻力与空化器顶部锥角、局部空泡覆盖面积有关。在未形成覆盖全弹体的超空泡时, 产生空泡段的锥角减小, 弹体头部局部空泡覆盖面积增大, 压差阻力随之明显下降; 在形成覆盖全弹体的超空泡时, 压差阻力随着空化器顶部锥角的减小而减小。而空化器直径也会对空泡形态产生影响, 当空化器取得最佳值时, 局部空泡可以恰好发展为超空泡, 此时总阻力系数取得最小值。在对第一段锥进行优化时, 暂取射弹 2 为优化终值, 在此基础上对第二、三段锥进行优化。射弹 2 的形状参数见表 2。

表 2 射弹 2 的参数

Table 2 Parameters of projectile 2

$\theta_1/(\circ)$	L_1/mm	$\theta_2/(\circ)$	L_2/mm	$\theta_3/(\circ)$	L_3/mm	D_1/mm
55.000	0.387	12.555	2.409	7.404	11.704	0.780

2.3.3 对射弹第二、三段锥的优化

在第一段锥优化结果的基础上, 对射弹 2 的第二、三段锥的参数 θ_2 、 θ_3 、 L_2 、 L_3 进行优化。在 L_2 、 L_3 不变时, 对第二段锥的 θ_2 进行优化, θ_3 随之改变。在射弹 2 中, 有 $\theta_2=12.555^\circ$, 而当 $\theta_2=8.2942^\circ$ 时, θ_3 也变为 8.2942° , 此时第二、三段锥角度相同合并。因此, 在 12.555° 左右, θ_2 分别为 8.2942° 、 10° 、 11° 、 14° 、 15.5° 和 17° 。由模拟结果可见, $\theta_2=12.555^\circ$ 为拐点, 所以在其附近插入 $\theta_2=12^\circ, 13^\circ$, 最终阻力系数变化如图 10 所示, 空泡形态变化如图 11 所示。

由空泡形态对比可知, 在射弹头部第一段锥产生空泡的情况下, 第二段锥的 θ_2 对空泡形态也存在很大影响。在 $\theta_2 > 11^\circ$ 或 $\theta_2 < 17^\circ$ 时, 超空泡都在第三段锥中段提前断裂为局部空泡, 结合阻力系数变化分析可得, 随着 θ_2 从 8.29° 开始增加, 空泡包裹长度随之增加, 压差阻力呈

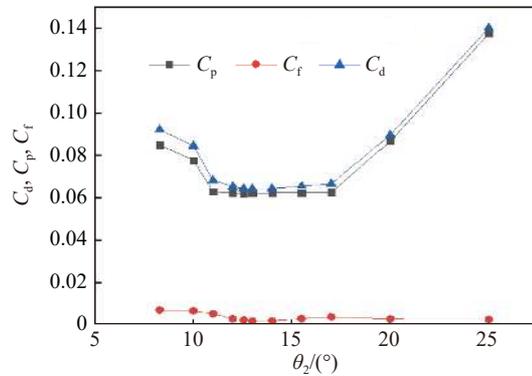


图 10 阻力系数随倾斜角 θ_2 的变化

Fig. 10 Resistance coefficients varying with θ_2

现减小趋势, 当空泡完全包裹弹身后, 压差阻力趋于平稳, 而随着 θ_2 继续增加, 空泡再次断裂, 压差阻力显著增大。而黏滞阻力则先减小后增加再减小, 但总体变化较小, 由于压差阻力显著大于黏滞阻力, 总阻力系数的变化趋势基本与压差阻力系数保持一致。当 $\theta_2=13^\circ$ 时, 压差阻力相比射弹 2 略微增加, 但黏滞阻力有所减小, 总阻力系数小于射弹 2。因此, 将 $\theta_2=13^\circ$ 的射弹记为射弹 3, 其参数见表 3。

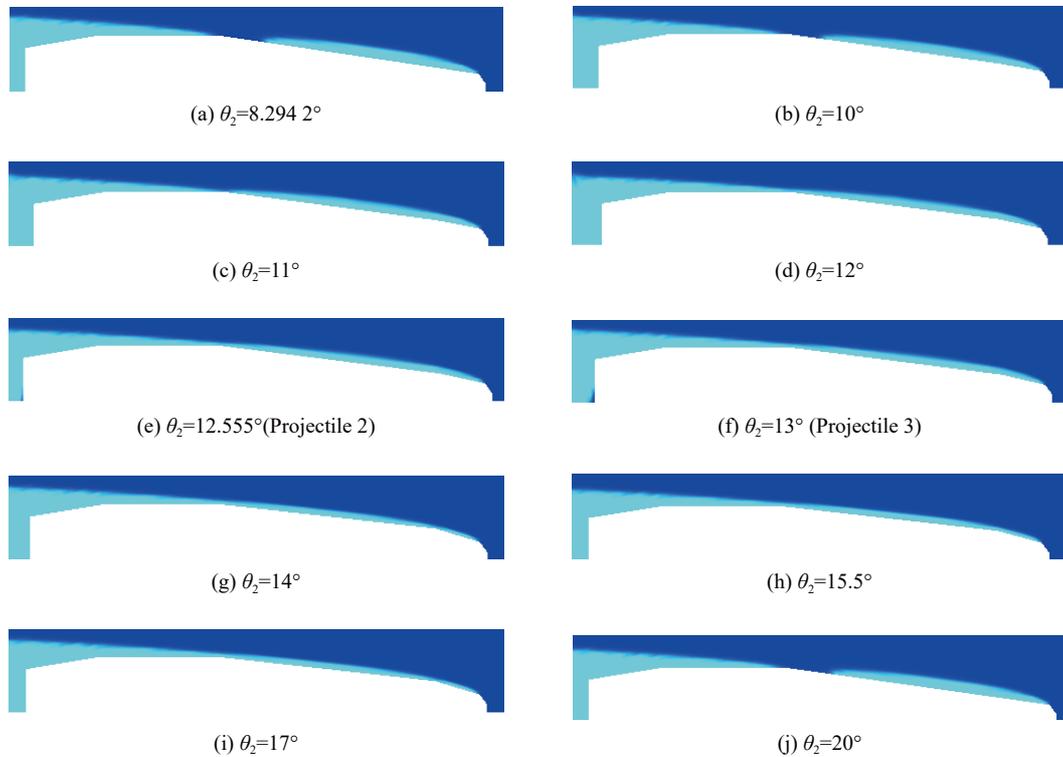


图 11 空泡形态随倾斜角 θ_2 的变化
Fig. 11 Cavitation shapes varying with θ_2

表 3 射弹 3 的参数

Table 3 Parameters of projectile 3

$\theta_1/^\circ$	L_1/mm	$\theta_2/^\circ$	L_2/mm	$\theta_3/^\circ$	L_3/mm	D_1/mm
55.000	0.387	13.000	2.409	7.309	11.704	0.780

在保持第二段锥 $\theta_2=13^\circ$ 的基础上, 对第二段锥长度 L_2 进行优化。由于射弹 3 的 L_2 初值为 2.409 mm, 而在 θ_2 不变时, 减小 L_2 将使得空泡直径相对增加, 致使射弹所受总阻力增加, 不利于射弹的进一步减阻。所以, 考虑 L_2 的增加, 取 $L_2=2.0$ 、2.8、3.2、3.5、4.0 和 4.5 mm。阻力系数变化如图 12 所示, 空泡形态变化如图 13 所示。

由空泡形态与阻力系数变化可知, 随着 L_2 的增加, 空泡的直径随之减小, 在空泡完整的情况下, 黏滞阻力与压差阻力变化不明显, 但总阻力系数随空泡直径减小略微减小。而当 L_2 大于 4.0 mm 时, 空泡中段有断开趋势, 此时黏滞阻

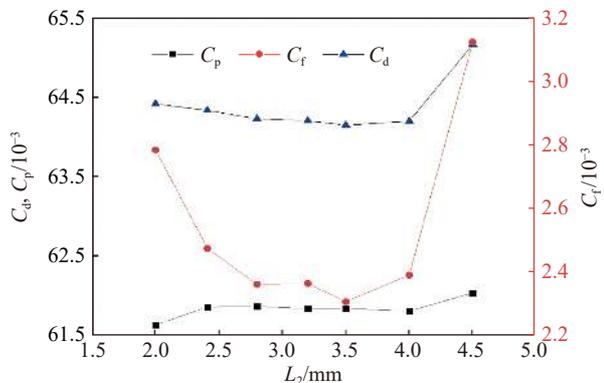


图 12 阻力系数随长度 L_2 的变化
Fig. 12 Resistance coefficients varying with L_2

力与压差阻力都有明显增加。选取总阻力系数最小的射弹参数组为优化的局部最优解, 即 $L_2=3.5$ mm, 记为射弹 4, 其参数见表 4。

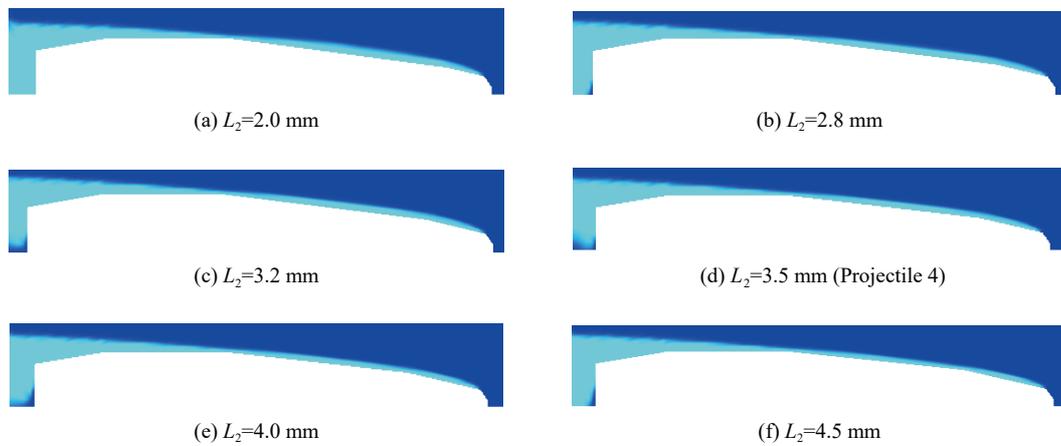


图 13 空泡形态随长度 L_2 的变化

Fig. 13 Cavitation shapes varying with L_2

表 4 射弹 4 的参数

Table 4 Parameters of projectile 4

$\theta_1/(\circ)$	L_1/mm	$\theta_2/(\circ)$	L_2/mm	$\theta_3/(\circ)$	L_3/mm	D_1/mm
55.000	0.387	13.000	3.500	6.704	10.596	0.780

2.3.4 分步优化结论

以空泡形态和阻力系数为优化目标, 在对射弹进行了三步优化后, 得到了所有射弹参数组中总阻力系数最小的优选弹形射弹 4, 并总结了射弹阻力的影响因素, 可为射弹优化工作提供参考。

平头三段锥式头部结构射弹水下航行时, 弹体头部能够产生超空泡, 使黏滞阻力极大减小。黏滞阻力主要与空泡形态相关, 当空泡完全包裹弹身时黏滞阻力远小于空泡在弹身中段断裂的。同时, 超空泡完全包裹弹身后, 直径变化对黏滞阻力影响不再明显。

压差阻力与空化器顶部锥角、局部空泡覆盖面积有关。在未形成覆盖全弹体的超空泡时, 产生空泡段的锥角减小, 弹体头部局部空泡覆盖面积增大, 压差阻力明显下降; 在形成覆盖全弹体的超空泡时, 压差阻力随着空化器顶部锥角的减小而减小。

空化器直径也对空泡形态产生影响, 当空化器直径取得一定值时, 局部空泡可以恰好发展为覆盖全弹体的超空泡, 此时压差阻力与黏滞阻力取得局部最小值。

3 使用神经网络与 SQP 算法的优化

在优化射弹的过程中, 对射弹头部外形参数进行调整的每一步, 都需要反复调用 Fluent 软件进行计算, 过程繁琐, 也不可能覆盖三段锥 7 个外形参数的所有取值范围。

近年来, 随着神经网络的发展, 它在流体力学领域的应用也越来越广泛^[18]。对射弹的分步优化工作中, 涉及的数值计算结果共计 213 组, 将作为神经网络的学习数据集, 通过训练出的神经网络近似计算模型, 可使用优化算法对射弹进行再次优化。

3.1 基于神经网络的阻力系数近似计算模型

对多维函数和系统, 神经网络是最优的非线性逼近器^[19], 任何函数都可以用一个足够大、足够深的网络来近似^[20]。因此, 可以在现有模拟数据的基础上, 训练神经网络建立弹体参数与阻力系数之间的近似函数关系, 对弹体的阻力系数进行预测。并通过反推阻力系数的最小值, 达成对弹形的几何优化。

使用具有 S 形隐神经元和线性输出神经元的两层前馈型网络(BP 神经网络), 以射弹头部的 7 个形状参数作为神经网络模型的输入层, 射弹阻力系数(C_p, C_f, C_d)为神经网络模型的输出层, 建立 BP 神经网络计算模型, 如图 14 所示。

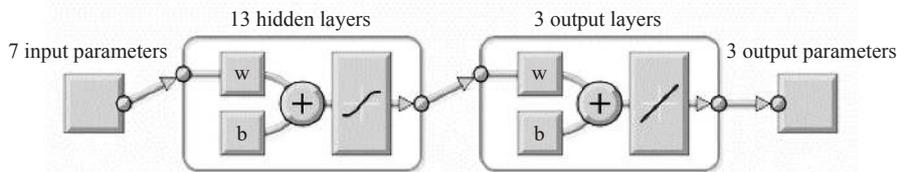


图 14 BP 神经网络近似计算模型

Fig. 14 Approximate calculation model of BP neural network

神经网络的学习数据为分步优化阶段获取的 213 组数值计算射弹参数组及其结果, 按照 75%、15%、15% 的比例划分为训练集、测试集、验证集 3 部分, 使用莱文贝格-马夸特(Levenberg-Marquardt algorithm, L-M 算法)方法训练。在神经网络的应用中, L-M 算法的训练次数及准确度明显优于共轭梯度法及变学习率的前馈算法^[21]。学习过程属于有监督学习, 将样本点的预测误差均方差作为误差函数, 即:

$$e = \frac{1}{2} \sum_{o=1}^q (d_o(k) - y_o(k))^2 \quad (9)$$

通过误差函数控制算法的迭代次数, 并在迭代过程中修正权值大小。当误差满足预期时, 神经网络模型终止迭代, 得到可靠性较高的目标函数和设计变量近似计算模型。

3.2 使用 SQP 算法寻优

3.2.1 射弹优化模型

使用神经网络进行机器学习的过程, 可以被公式化为使用有限数量的观测来估计系统的输入、输出和参数之间的关联的过程^[22]。训练神经网络所建立的弹体形状参数-射弹阻力系数近似计算模型可由函数表述:

$$F(\theta_1, L_1, \theta_2, L_2, \theta_3, L_3, D_1) = (C_p, C_f, C_d) \quad (10)$$

此时, 对弹形的优化问题转化为对近似计算模型的最小值求解, 属于非线性规划问题。为确保射弹外形为凸曲线且不发生畸变, 以及优化后射弹基本参数与 DBP87 原弹保持一致, 将 DBP87 射弹的最大直径和头部长度作为约束条件, 同时添加角度约束。最终得到射弹头部几何外形优化模型:

$$\begin{aligned} \min F(X) \quad X = (\theta_1, L_1, \theta_2, L_2, \theta_3, L_3, D_1) \quad (11) \\ G = \begin{cases} G_1 = D - [2(L_1 \tan \theta_1 + L_2 \tan \theta_2 + L_3 \tan \theta_3) + D_1] = 0 \\ G_2 = L - (L_1 + L_2 + L_3) = 0 \\ G_3 = \theta_1 - \theta_2 \geq 0 \\ G_4 = \theta_2 - \theta_3 \geq 0 \end{cases} \quad (12) \end{aligned}$$

式中: $F(X)$ 为神经网络构建的弹体形状参数-射弹阻力系数近似计算模型, G 为优化计算时所涉及的约束条件。

3.2.2 使用 SQP 算法进行优化

目前, SQP 算法是求解中小规模非线性优化问题公认最有效的方法之一^[23]。其基本思想是基于拉格朗日函数的二次规划来构造 QP 子问题。如果子问题存在最优解, 则认为是原非线性问题的局部最优解, 否则用近似解代替构成一个新的二次规划问题继续迭代。对任意求解最小值的问题 $\min f(x)$, 拉格朗日函数为:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) \quad (13)$$

通过把非线性约束线性化可得到 QP 子问题, 其目标函数为:

$$\min\left(\frac{1}{2}\mathbf{d}^T\mathbf{H}_k\mathbf{d}+\nabla f(\mathbf{x}_k^T)\mathbf{d}\right) \quad (14)$$

线性约束条件为:

$$\nabla g_i(\mathbf{x}_k^T)\mathbf{d}+g_i(\mathbf{x}_k)=0 \quad i=1,\dots,m_e \quad (15)$$

非线性约束条件为:

$$\nabla g_i(\mathbf{x}_k^T)\mathbf{d}+g_i(\mathbf{x}_k)\leq 0 \quad i=m_e+1,\dots,m \quad (16)$$

此子问题可使用任何 QP 算法求解, 其解用于进行新的迭代:

$$\mathbf{x}_{k+1}=\mathbf{x}_k+\alpha_k\mathbf{d}_k \quad (17)$$

式中: \mathbf{d} 为全变量搜索方向, 而步长参数 α_k 由优化器进行线性搜索自动确定。

对于射弹优化问题, 目标函数设置为射弹优化模型 $\min F(\mathbf{X})$ (见式 (11)), 约束条件有 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 (见式 (12))。最大迭代步数取 1 000, 自变量 \mathbf{X} 的元素容差均取 10^{-10} , 函数容差和约束容差均取 10^{-6} 。经过 55 次的迭代优化, 得到了较理想的射弹头部参数。将优化后的射弹记为射弹 5, 其头部外形参数见表 5。

表 5 射弹 5 的参数

Table 5 Parameters of projectile 5

$\theta_1/(\circ)$	L_1/mm	$\theta_2/(\circ)$	L_2/mm	$\theta_3/(\circ)$	L_3/mm	D_1/mm
55.000	0.404	13.000	4.000	6.387	10.096	0.780

4 优化结果分析

对射弹的分步优化与神经网络的二次优化后, 得到了射弹 4、5 两种较理想的射弹外形, 与优化前的射弹头部外形对比, 如图 15 所示。

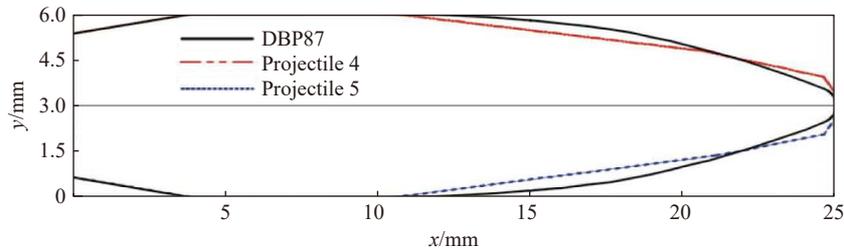


图 15 优化后的射弹与原始射弹的外形对比

Fig. 15 Shape comparisons of the optimized projectiles with the original projectile

为验证优化后射弹在水下航行时的性能, 使用计算流体力学方法, 计算了相同射弹速度下射弹 4~5 和原始射弹的空泡形态, 结果如图 16~18 所示。优化后的射弹 4~5 均有较好的形成空泡的能力, 在水下的阻力系数相对原始射弹都有较大改善, 达到了优化的目的。在不同速度下, 射弹 4~5 均能有效产生形态完整的超空泡。

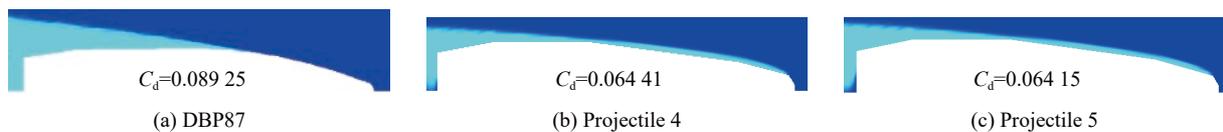


图 16 射弹速度 900 m/s 时优化后的射弹与原始射弹的空泡形态对比

Fig. 16 Cavitation shape comparisons of the optimized projectiles with the original projectiles at 900 m/s

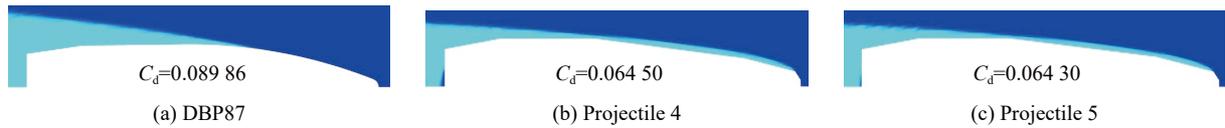


图 17 射弹速度 600 m/s 时优化后的射弹与原始射弹的空泡形态对比

Fig. 17 Cavitation shape comparisons of the optimized projectiles with the original projectiles at 600 m/s

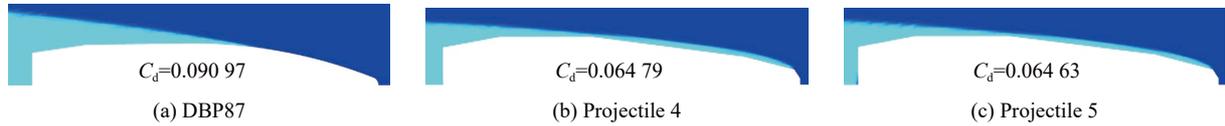


图 18 射弹速度 400 m/s 时优化后的射弹与原始射弹的空泡形态对比

Fig. 18 Cavitation shape comparisons of the optimized projectiles with the original projectiles at 400 m/s

在射弹速度 900 m/s 下, 射弹 4~5 相对于原始射弹总阻力系数分别下降了 27.7%、28.1%; 在射弹速度 600 m/s 下, 射弹 4~5 相对于原始射弹总阻力系数分别下降了 28.2%、28.4%; 在射弹速度 400 m/s 下, 射弹 4~5 相对于原始射弹总阻力系数分别下降了 28.8%、29.0%。

5 结 论

(1) 使用计算流体力学方法, 采取分步优化法, 对 DBP87 普通弹的头部外形进行了优化, 使它在水下行进时能产生包裹全弹体的超空泡, 达到减阻与提高运动稳定性的效果。并根据计算结果, 总结了射弹头部外形对超空泡形态与阻力系数的影响, 为其他种类的射弹优化问题提供了参考。

(2) 采用神经网络与 SQP 优化算法相结合的方式, 对射弹进行了二次优化, 此方法可以避免求解优化问题时繁琐而费时的数值模拟计算过程, 减少优化工作所需的总时间。优化后射弹的模拟计算结果更优秀, 验证了此优化方法在射弹优化问题上的有效性, 具有较好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 赵卫. 超空泡高速鱼雷技术综合分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005: 51-59.
ZHAO W. General analyse of superspeed supercavitating torpedo technique [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005: 51-59.
- [2] 牟晴, 赵潇雨, 周维. 超空泡技术在小口径炮弹上的应用 [J]. *四川兵工学报*, 2010, 31(4): 31-33. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0707.2010.04.011.
- [3] 鲁林旺. 复杂结构体射弹出入水时超空泡流特性的研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019: 31-35.
LU L W. Research on supercavitation flows characteristics of projectiles with complex structure water exit and entry [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019: 31-35
- [4] 罗格维诺维奇 T B. 自由边界流动的水动力学 [M]. 施红辉, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2012: 283-290.
- [5] SAVCHENKO Y N. Experimental investigation of supercavitating motion of bodies [Z] // VAN DEN BRAEMBUSSCHE. VKI Special Course on Supercavitating Flows. Brussels, Belgium, 2001.
- [6] SAVCHENKO Y N, VLASENKO Y D, SEMENENKO V N. Experimental studies of high-speed cavitated flows [J]. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 1999, 26(3): 365-374. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v26.i3.80.
- [7] 张学伟, 张亮, 王聪, 等. 基于 Logvinovich 独立膨胀原理的超空泡形态计算方法 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(3): 361-365. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.03.021.
ZHANG X W, ZHANG L, WANG C, et al. A calculation method for supercavity shape based on the Logvinovich independence principle of the cavity section expansion [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(3): 361-365. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.03.021.
- [8] 施红辉, 周素云, 张晓萍, 等. 水下超空泡流体机械的机理和技术研究综述 [C] // 第十五届全国激波与激波管学术会议论文集 (下册). 杭州: 中国力学学会, 2012: 554-564.

- [9] 王云, 袁绪龙, 吕策. 弹体高速入水弯曲弹道实验研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(12): 1998–2002. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.12.010.
WANG Y, YUAN X L, LYU C. Experimental research on curved trajectory of high-speed water-entry missile [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(12): 1998–2002. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.12.010.
- [10] 孙士明, 颜开, 褚学森, 等. 射弹高速斜入水过程的数值仿真 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(S1): 122–127. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S1.018.
SUN S M, YAN K, CHU X S, et al. Numerical simulation of high-speed oblique water entry of a projectile [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(S1): 122–127. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S1.018.
- [11] 陈伟善, 郭则庆, 刘如石, 等. 空化器形状对超空泡射弹尾拍运动影响的数值研究 [J]. *工程力学*, 2020, 37(4): 248–256. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.06.0328.
CHEN W S, GUO Q Z, LIU R S, et al. Numerical simulation on the influence of cavitator shapes on the tail-slap of supercavitating projectiles [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(4): 248–256. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.06.0328.
- [12] 郜冶, 刘乾坤, 陈宇翔. FBM 湍流模型水翼空化绕流数值研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2013, 34(1): 92–97. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.201206013.
GAO Y, LIU Q K, CHEN Y X. Numerical simulation on cavitating flow around hydrofoil with filter-based turbulence model [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(1): 92–97. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.201206013.
- [13] 卢炳举, 罗松, 朱珠, 等. 高速射弹入水空泡多相流场数值模拟 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(12): 242–246. DOI: 10.11809/scbgxb2017.12.053.
LU B J, LUO S, ZHU Z, et al. Numerical simulation of multiphase flow field of high velocity projectile entering water [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(12): 242–246. DOI: 10.11809/scbgxb2017.12.053.
- [14] 胡俊, 侯夏伊, 于勇. 基于当地流动特征的 Schnerr-Sauer 空化模型改进研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2021, 41(1): 9–15. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.272.
HU J, HOU X Y, YU Y. A modified Schnerr-Sauer cavitation model with local flow properties [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(1): 9–15. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.272.
- [15] HRUBES J D. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles [J]. *Experiments in Fluids*, 2001, 30(1): 57–64. DOI: 10.1007/s003480000135.
- [16] 范伟. 小口径弹药的“奇葩”: 中国 DBP87 式 5.8 毫米普通弹 [J]. *兵器知识*, 2000(10): 30–32.
- [17] 三土, 明光. 让枪弹飞行于水陆间: 挪威 DSG 公司多环境弹药系统 [J]. *轻兵器*, 2012(20): 35–39.
- [18] BRUNTON S L, NOACK B R, KOUMOUTSAKOS P. Machine learning for fluid mechanics [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2020, 52: 477–508. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010719-060214.
- [19] BÖLCSKEI H, GROHS P, KUTYNIOK G, et al. Optimal approximation with sparsely connected deep neural networks [J]. *SIAM Journal on Mathematics of Data Science*, 2019, 1(1): 8–45. DOI: 10.1137/18M118709X.
- [20] HORNIK K, STINCHCOMBE M, WHITE H. Multilayer feedforward networks are universal approximators [J]. *Neural Networks*, 1989, 2(5): 359–366. DOI: 10.1016/0893-6080(89)90020-8.
- [21] 赵弘, 周瑞祥, 林廷圻. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的神经网络监督控制 [J]. *西安交通大学学报*, 2002, 36(5): 523–527. DOI: 10.3321/j.issn:0253-987X.2002.05.020.
ZHAO H, ZHOU R X, LIN T Q. Neural network supervised control based on Levenberg-Marquardt algorithm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 36(5): 523–527. DOI: 10.3321/j.issn:0253-987X.2002.05.020.
- [22] WECHSLER H. Learning from data: concepts, theory and methods, Vladimir Cherkassky and Filip Mulier, John Wiley, New York, 1998 [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2000, 10(9): 747–748. DOI: 10.1002/1099-1239(20000730)10:9<747::AID-RNC507>3.0.CO;2-5.
- [23] 张菊亮, 章祥荪. 不等式约束最优化的非光滑精确罚函数的一个光滑近似 [J]. *系统科学与数学*, 2000, 20(4): 499–505. DOI: 10.12341/jssms09839.
ZHANG J L, ZHANG X S. A smoothing approximation to the exact penalty function for optimization with inequality constraints [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2000, 20(4): 499–505. DOI: 10.12341/jssms09839.

(责任编辑 丁峰)