

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0037- 05

# 超空泡航行体锥形空化器优化设计\*

林明东, 胡 凡, 张为华

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 分析比较超空泡外形计算的不同经验公式, 结果表明 Guzevsky 模型具有较好的精度与适用范围。建立了以减小阻力、增大空化数、增加舱内容积为优化目标的超空泡航行体锥形空化器设计模型, 以权重因子法和遗传算法求解了优化问题, 验证性计算结果与已有文献吻合。研究了空化数、航行体长径比等因素对超空泡航行体空化器设计的影响规律, 结果表明空化数是影响航行阻力的首要因素, 空化数决定了超空泡长径比并使之与航行体外形匹配, 通过优化设计能够在不增加阻力的情况下有效提升航行体舱内容积。

**关键词:** 超空泡; 空化器; 权重因子法; 遗传算法; 优化设计

中图分类号: TV131 文献标识码: A

## Optimal Design of Conical Cavitator of Supercavitating Vehicles

LIN Ming-dong, HU Fan, ZHANG Wei-hua

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Different empirical formulae in the calculation of the supercavity shape were analyzed, showing that the Guzevsky formulae has good precision and scope of application. Targeting on reducing the drag, enhancing the cavitation number and enlarging the volume of the supercavitating vehicle, an optimal design model of the conical supercavitator was built based on the Guzevsky formulae. The weight method and genetic algorithm were applied in solving the optimal problem. The results are consistent with the current theory. Effect of aspect ratios, cavitation numbers in the design process were studied. The results indicate that cavitation number is the most important factor that affects the dimension of the supercavity and the volume of the vehicle has been increased significantly through the optimal design process.

**Key words:** supercavitation; cavitator; weight method; genetic algorithm; optimal design

水下超空泡航行过程中, 航行体所受表面摩擦阻力几乎可以忽略, 能够显著降低航行阻力, 提高水下航速。以俄罗斯“暴风”鱼雷为代表的新一代水下超空泡武器航速超过 200Kn, 从根本上改变了水下航行模式, 是未来水下兵器及航行技术的重要发展方向<sup>[1-2]</sup>。空化器是水下高速运动时产生并维持超空泡的重要器件, 是超空泡航行体设计中的关键技术之一。

目前针对空化器的研究以试验手段为主, 分析其超空泡形态及相关受力特性与变化规律。Kuklinski<sup>[3]</sup>对不同外形空化器(主要为圆盘、圆锥)的空化效果及控制性能进行了拖曳水池试验研究, 对空化器锥角、加装升力面等因素对航行阻力及控制特性的影响进行了系统比较; 贾力平<sup>[4]</sup>等通过水洞试验研究了空化器参数(直径、锥顶角)对超空泡外形的影响, 为空化器参数设计提供了试验依据。Alyanak<sup>[5]</sup>等考虑尺度、外形、结构等因素, 对超空泡鱼雷进行了初步总体外形的设计与优化, 研究了可变形空化器在超空泡航行过程中的减阻效果及设计方法; Choi<sup>[6]</sup>运用势流理论对不同外形空化器所产生的超空泡进行计算, 得到最小阻力系数条件下的空化器外形。

本文立足于超空泡航行体总体设计需求, 通过分析不同超空泡外形计算公式的适用范围及精度特点, 建立基于航行阻力、空化数、航行体有效容积的锥形空化器多目标优化设计模型, 并采用权重因子法与遗传算法对优化模型进行求解。优化设计模型清晰, 求解过程运算量小, 结果可靠, 能够便捷有效地应用于超空泡航行体空化器设计。

\* 收稿日期: 2010- 03- 22

作者简介: 林明东(1982-), 男, 博士生。

## 1 超空泡模型比较

空化数是描述水下空化现象的最重要参数,其定义为

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_c}{0.5\rho V_\infty^2} \quad (1)$$

其中,  $p_\infty$  为流场特征压强,  $p_c$  为空泡内压,  $V_\infty$  为特征速度,  $\rho$  为流体密度。

超空泡减阻技术通过提高航行体航速或采用泡内人工通气的办法,降低物体航行时的空化数,在水下生成包裹整个航行体的超空泡,实现固-液边界分离,大幅度降低水下航行时的表面摩擦阻力。对于圆盘或圆锥形空化器,假设流场为轴对称情形,空泡外形是空化数、空化器直径、锥角的函数,即  $L_c/D_c = f(\sigma, D_n, \alpha)$ 。Serebryakov<sup>[7]</sup>对超空泡流体力学的相关研究进行了比较全面的概括与展望,给出了若干不同的超空泡模型与经验公式。

Reichardt 在 20 世纪 40 年代对人工通气超空泡进行试验研究,给出了圆盘状空化器产生的超空泡外形计算公式

$$L_c = \frac{L_c}{D_n} = \frac{(\sigma + 0.008) \sqrt{C_x}}{k\sigma \sqrt{0.066 + 1.7\sigma}}, \quad D_c = \frac{D_c}{D_n} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{C_x}{\sigma}} \quad (2)$$

其中,  $k = 1 - 0.132\sigma$ ,  $L_c$  为以空化器直径进行无量纲化的相对空泡长度,  $D_c$  为空泡最大相对直径,  $C_x$  是与空化器外形及空化数相关的阻力系数。

Logvinovich 在大量理论分析与试验研究基础上,建立了空泡截面独立扩张原理<sup>[8]</sup>:水下物体高速运动形成的超空泡,其任意固定横截面都相对于空化物体中心运动轨迹按相同的规律扩张,该扩张规律只与空化物体经过该截面时的运动状态相关,并与之前或之后的运动状态无关(图 1)。

超空泡流体理论与试验结果均证明,以具有锐利边缘的钝头型空化器较容易形成空泡,其基本外形与空化数、空化器阻力系数、空化器最大截面有关。Logvinovich 给出圆盘空化器生成的空泡长度与长径比公式分别为

$$L_c = \frac{1.92 - 3\sigma}{\sigma}, \quad D_c = \sqrt{\frac{C_{x0}(1 + \sigma)}{k\sigma}} \quad (3)$$

其中,  $k$  与空泡外的流场扰动速度有关,是空间坐标与空化数的弱函数,取值范围为 0.875~1。当空化数  $\sigma < 0.03$  时,可选取  $k = 0.96$ ,  $C_{x0}$  为圆盘空化器在空化数  $\sigma = 0$  时的阻力系数,对于圆盘状空化器,通常取  $C_{x0} = 0.82$ 。

Garabedian 得到了圆盘空化器情形下超空泡尺度的渐进解

$$L_c = \frac{1}{\sigma} \sqrt{C_x \ln \frac{1}{\sigma}}, \quad D_c = \sqrt{\frac{C_x}{\sigma}} \quad (4)$$

Savchenko 针对小空化数情况下的自然超空泡进行了试验研究,给出其外形公式

$$L_c = \frac{1}{2} \left[ 4.0 + \frac{3.595}{\sigma} \right], \quad D_c = \sqrt{3.659 + \frac{0.761}{\sigma}} \quad (5)$$

Epstein 给出了适用于圆盘与圆锥形空化器的空泡计算公式

$$L_c = \frac{1.67}{\sigma} \sqrt{\frac{c_{x0}}{k}}, \quad D_c = \sqrt{\frac{c_{x0}(1 + \sigma)}{k\sigma}} \quad (6)$$

其中,锥顶角满足  $120^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$  时,  $c_{x0} = 0.13 + \sqrt{0.0036\beta - 0.1719}$ 。

Guzevsky 通过数值求解超空泡势流方程,给出了半锥角为  $\alpha\pi$  空化器的超空泡外形计算公式

$$L_c = \left[ \frac{1.1}{\sigma} - \frac{4(1 - 2\alpha)}{1 + 144\alpha^2} \right] \sqrt{C_x \ln \frac{1}{\sigma}}, \quad D_c = \sqrt{\frac{C_x}{k\sigma}} \quad (7)$$

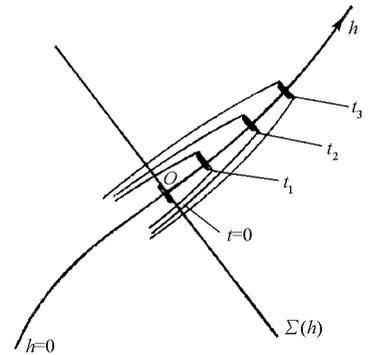


图 1 空泡界面独立扩张原理  
Fig. 1 The principle of independence of the cavity section expansion

其中,  $K = \frac{1 + 50\sigma}{1 + 56.2\sigma}$  为理论修正系数,  $C_x$  为相应的阻力系数, 其计算式为

$$C_x = 0.5 + 1.81(\alpha - 0.25) - 2(\alpha - 0.25)^2 + \alpha(0.524 + 0.672\alpha) \quad (8)$$

该公式在  $0 \leq \sigma \leq 0.25$ ,  $1/12 \leq \alpha \leq 1/2$  时成立。

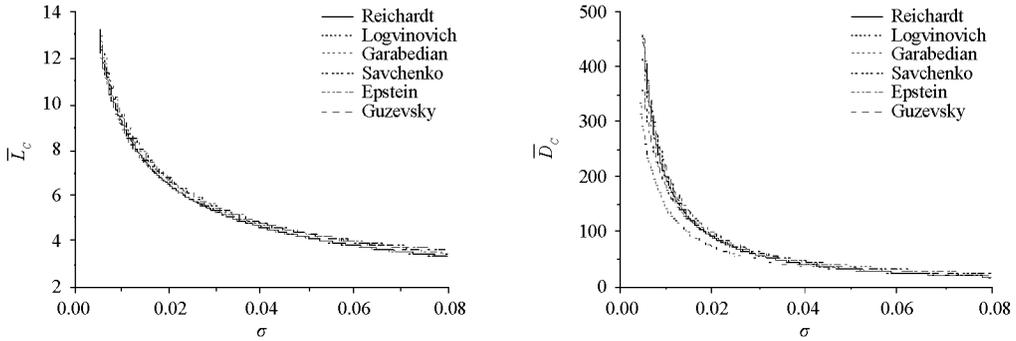


图2 不同超空泡模型计算结果

Fig. 2 Results of different supercavity formulae

图2给出上述各超空泡外形计算公式在圆盘空化器情形时的对比结果。可以看出,不同的超空泡计算公式在圆盘空化器情形下的计算结果基本一致。无量纲化空泡尺度只与空化数有关,采用人工通气降低空化数同样能够增大超空泡尺寸。Epstein与Guzevsky模型同时适用于锥形与圆盘形空化器,前者在小空化数时得到的空泡长度偏小,后者适用范围更广。总体而言,以上经验公式均可用于超空泡外形工程估算,Guzevsky公式更具普适性。

## 2 空化器优化设计模型

与传统水下航行体钝头型或水滴形设计相比,超空泡航行体前段通常为圆锥形,它通过在头部安装空化器产生并维持超空泡,大幅度降低阻力而高速航行。航行体建模通常划分为四部分:空化器、头锥段、圆柱段、尾段。假设超空泡航行体最大直径为 $D_B$ ,长度为 $L_B$ ,长径比为 $\lambda_B$ ,航速指标为 $V_0$ ,如图3所示。

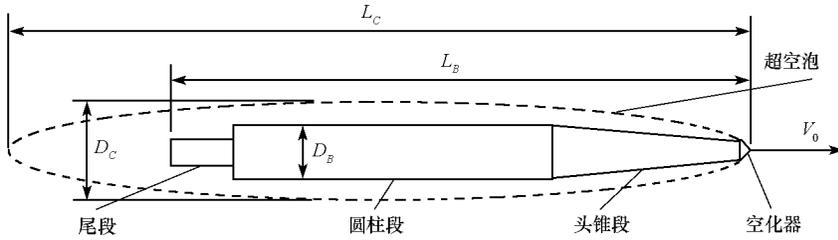


图3 超空泡航行体结构图

Fig. 3 Sketch of supercavitating vehicle and supercavity

空化器设计是超空泡航行体设计的关键环节,其设计结果直接决定航行时的阻力特性、人工通气系统指标以及航行体有效容积。然而上述不同指标之间存在显著矛盾:

(1) 为降低航行阻力,应同时减小空化器直径、锥顶角、空化数,从而减小阻力系数及特征截面积;

(2) 人工通气方式能够降低空化数,然而通气量过大将诱发空泡失稳,空化数存在下限;

(3) 超空泡尺度必须包裹整个航行体,根据Guzevsky空泡模型,空化器的直径与锥顶角不能同时减小;

(4) 航行体头锥段有效容积与空化器直径密切相关,增大空化器直径有利于增大航行体有效容积。

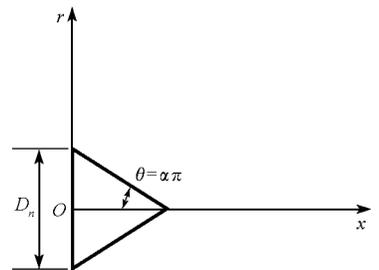


图4 空化器模型

Fig. 4 Model of Cavitator

基于上述分析,可建立锥形空化器外形模型(图4),其中 $\theta = \alpha\pi$ 为空化器半锥顶角,当 $\alpha = 1/2$ 时对应圆盘状空化器, $D_n$ 为空化器直径。式(9)给出综合考虑阻力、空化数、头锥段容积的空化器优化设计目标函数,根据上节所分析的超空泡模型,式(10)给出了优化问题的约束条件。

$$\min \begin{cases} \omega_1 \frac{F_d}{F_{d0}} - \omega_2 \frac{\sigma}{\sigma_0} - \omega_3 \frac{V_B}{V_{B0}} \\ L_c(D_n, \alpha, \sigma) \geq a_1 L_B \\ D_c(D_n, \alpha, \sigma) \geq a_2 D_B \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} 0 \leq \sigma \leq 0.1 \\ 1/12 \leq \alpha \leq 1/2 \\ 0 \leq D_n/D_B \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中,航行阻力 $F_d$ 、空化数 $\sigma$ 、航行体头锥段容积 $V_B$ 分别以相应参考值进行无量纲化; $\Omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]$ ,  $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$ 为不同优化指标的权重系数向量; $a_1, a_2$ 作为超空泡设计的下限指标,是超空泡最小尺度与航行体尺寸的比值。优化过程以权重法将多目标优化问题转化为单目标函数,采用MATLAB遗传算法工具箱进行最优解搜索。

### 3 优化结果与分析

文献[5]中给出了超空泡鱼雷优化设计部分结果,其中 $D_B = 0.4433\text{m}$ ,  $\lambda = 13.084$ 。设定 $\sigma = 0.0077$ ,航行体仅位于超空泡前半段,因此空泡最大直径与航行体直径基本相同。采用本文优化模型进行空化器二次设计,对比结果如表1所示。优化结果1、优化结果2对应锥顶角不同的两种备选空化器方案,随着空化器顶角减小,底部横截面积增大,对应航行体头锥段有效容积显著增长。

表1 文献[5]算例优化结果

Tab. 1 Optimized results with setting from literature[5]

	$D_n/\text{m}$	$\theta/\pi$	$D_d/\text{m}$	$L_c/\text{m}$	$F_d/\text{N}$	$\Delta V_B/V_{B0}$
文献[5]	0.0419	0.5	0.4435	12.06	8985.4	0
优化结果1	0.0740	0.13889	0.4434	11.98	8980.8	8.3%
优化结果2	0.0997	0.08333	0.4435	11.92	8983.1	15.6%

以文献[9]大长径比超空泡航行体模型尺寸为例,航行体长径比为 $\lambda = 17.717$ ,设定空化数 $\sigma = 0.03$ 。优化结果见表2。结果对比表明,对于大长径比超空泡航行体,在不改变空化数前提下,通过优化设计能够在不增大航行阻力的同时增加头部容积约10%。若适当放宽阻力要求,航行体容积能够获得显著增大,对航行体结构布局与总体设计极有益处。上述算例同时验证了算法的有效性。

表2 文献[9]算例优化结果

Tab. 2 Optimized results with setting from literature[9]

	$D_n/\text{m}$	$\theta/\pi$	$D_d/\text{m}$	$L_c/\text{m}$	$F_d/\text{N}$	$\Delta V_B/V_{B0}$
文献[9]	0.0382	0.5	0.21117	2.4228	2750.5	0
优化结果1	0.0459	0.29167	0.21104	2.4125	2746.1	9.3%
优化结果2	0.0592	0.17056	0.21321	2.4125	2804.3	26.9%

针对不同航行体长径比及优化权重指标,利用该方法可得到不同的空化器构型方案。不同长径比下的部分优化设计结果见表3。其中,航速指标设定为100m/s,阻力改写为以航行体最大截面定义的阻力系数。

表3 不同长径比超空泡航行体空化器优化设计结果

Tab. 3 Optimized results considering different vehicle aspect ratios

$\lambda$	$D_n/D_B$	$\theta/\pi$	$\sigma$	$C_d$
5	0.2710	0.0957	0.0080	0.0131
5	0.2058	0.4482	0.0216	0.0338
10	0.2634	0.1018	0.0082	0.0134
10	0.2198	0.2065	0.0156	0.0250
15	0.1821	0.2009	0.0084	0.0137
15	0.3019	0.1348	0.0128	0.0206
20	0.3040	0.0960	0.0100	0.0166
20	0.2975	0.0834	0.0080	0.0131

表3的优化计算结果表明, 针对相同优化目标函数的空化器设计方案可能存在差异, 其主要原因是权重系数选取不同。超空泡航行体的阻力水平主要取决于空化数, 因此超空泡航行体设计初期应根据航速指标、超空泡流体动力学、推进系统等综合因素确定空化数水平。航行体长径比对空泡尺度有不同要求, 大长径比设计要求航行空化数小, 对应大尺度超空泡。采用锥形空化器方案能够有效增加航行体头锥段内部空间, 有利于提升总体技术指标。

## 4 结论

超空泡航行体空化器设计涉及航行减阻、降低人工通气系统设计难度、增强布局设计灵活性等多方面要求, 本文针对超空泡航行体的空化器优化设计问题, 考虑减阻及雷体有效容积等多方面因素, 建立了锥形空化器多目标优化数学模型, 以权重因子法及遗传算法进行计算, 得到优化结果。通过与部分文献数据对比验证了模型及计算结果。本文计算结果可作为超空泡航行体空化器设计及相关试验验证工作的参考, 具有较强的借鉴与指导意义。

研究表明, 采用 Guzevsky 经验拟合公式对超空泡外形进行估计具有较高精度, 锥形空化器能够很好满足超空泡航行体设计的多方面要求。空化器设计结果表明, 空化数是影响航行阻力的关键因素, 在相同空化数前提下不同设计方案的阻力比较接近; 在推进装置技术水平允许的前提下, 空化数指标允许适当放宽, 有助于增强大尺度空泡稳定性; 采用锥形空化器能够有效增加航行体头锥段容积, 从而提高航行体总体布局设计灵活性。

## 参考文献:

- [1] Ashley S. Warp Drive Underwater[J]. Scientific American Special Online Issue, 2002(2): 28-36.
- [2] 陈兢. 新概念武器——超空泡水下高速武器[J]. 飞航导弹, 2004(10): 34-37.
- [3] Kuklinski R, Fredette A, Henoeh C, et al. Experimental Studies in the Control of Cavitating Bodies[C]//Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado, USA: AIAA, 2006.
- [4] 贾力平, 王聪, 于开平, 等. 空化器参数对通气超空泡形态影响的实验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 159-164.
- [5] Alyanak E, Grandhi R, Pennetsa R. Optimum Design of a Supercavitating Torpedo Considering Overall Size, Shape, and Structural Configuration[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43: 642-657.
- [6] Choi J H, Pennetsa R C, Grandhi R V. Shape Optimization of the Cavitator for a Supercavitating Torpedo[J]. Struct Multidisc Optim, 2005, 29: 159-167.
- [7] Serebryakov V. Problems of Hydrodynamics for High Speed Motion in Water with Supercavitation[C]//Sixth International Symposium on Cavitation, Wageningen, The Netherlands, 2006.
- [8] Garabedian P R. The Principle of Independence of the Cavity Section Expansion (Logvinovich's Principle) as the Basis for Investigation on Cavitation Flows[C]//RTO/NATO Lecture Series 005 Supercavitating Flows, France, 2002.
- [9] Dzielski J, Kurdila A. A Benchmark Control Problem for Supercavitating Vehicles and an Initial Investigation of Solutions[J]. Journal of Vibration and Control, 2003, 9: 791-804.