

# 水下发射超空泡射弹对 UUV 平台姿态影响分析

魏平, 侯健, 鲁春佳, 赵泽鹏, 荣里  
(海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

**摘要** 超空泡射弹武器能够突破普通射弹水中运动极限, 有效打击水雷等水下目标。针对水下发射超空泡射弹武器的平台适应性开展了初步研究, 建立了超空泡射弹武器及 UUV 搭载平台仿真模型, 计算分析了水下超空泡射弹武器在不同方位、不同角度发射时 UUV 平台姿态角的变化, 得到了水下发射超空泡射弹对 UUV 平台姿态的影响规律, 为水下超空泡射弹武器系统及其平台适配性研究提供了依据。

**关键词** 超空泡; 射弹; 平台; 仿真

中图分类号 TJ630 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2020)03-0230-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.03.010

## Analysis on Impact of Underwater-launched Supercavitation Projectile on Platform Attitude

WEI Ping, HOU Jian, LU Chunjia, ZHAO Zeping, RONG Li  
( Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China )

**Abstract** The supercavitation projectile weapon can break underwater motion limitation of ordinary projectiles, and effectively strike the underwater targets such as underwater mines. This paper preliminary studied the platform adaptability of supercavitation projectile weapon, established the six degrees of freedom simulation models of supercavitation projectile weapon and UUV platforms, analyzed the change of UUV platform attitude angle caused by the supercavitation projectile weapon launched in different locations and different angles, and obtained the impact rules of supercavitation projectile on UUV attitude. The results provide a theoretical basis for the study of underwater supercavitation projectile weapon systems and platforms adaptability.

**Key words** supercavitation, projectile, platform, simulation

## 0 引言

为提高水下攻防作战能力, 各军事强国都致力于高速水中兵器的研究。超空泡减阻技术可大幅减小水中兵器的运动阻力, 有效提高运动速度和射程, 具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。超空泡射弹武器是应用超空泡减阻技术研制的一种新概念武器, 能够突破普通射弹水中运动极限, 有效打击水雷等水下目标。美国、俄罗斯分别研制了基于机载平台及单兵

作战的超空泡射弹武器——机载快速灭雷系统和水下突击步枪, 但基于水下平台发射的超空泡射弹武器及其平台适应性研究鲜有报道<sup>[2-5]</sup>。随着 UUV 的快速发展, UUV 平台搭载水下超空泡高速射弹武器成为可能, 超空泡射弹武器水下发射时伴随强烈的振动冲击, 研究冲击力特性及其对 UUV 平台的影响规律具有重要的现实意义。本文主要针对基于水下发射平台的超空泡射弹武器开展平台适应性研究, 初步探索水下超空泡射弹武器在不同方

位、不同角度发射时对 UUV 平台姿态的影响规律。

## 1 建立模型

### 1.1 坐标系

建立如图 1 所示的固定坐标系 ( $o_0x_0y_0z_0$ ) 和移动坐标系 ( $oxy$ )。固定坐标系的原点  $o_0$  可以取水平面内任意一点,  $o_0z_0$  轴垂直于水平面指向地心,  $o_0x_0$  轴为水平面任意方向,  $o_0x_0y_0$  平行于水平面, 符合左手规则。移动坐标系的原点  $o$  在航行器的质心, 其坐标轴  $ox$ 、 $oy$ 、 $oz$  分别是经过的横切面、横剖面、纵中剖面的交线,  $ox$  轴指向航行器艉部,  $oz$  轴处在航行体对称面垂直于  $ox$  轴指向下方,  $oy$  轴垂直于  $oxz$  面, 符合左手规则。

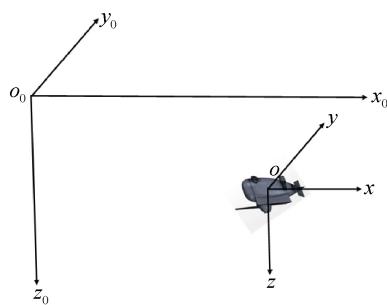


图 1 坐标系

Fig. 1 Coordinate system

### 1.2 仿真模型

应用 STAR CCM+ CFD 软件建立水下超空泡射弹武器及搭载 UUV 航行器平台的六自由度仿真模型<sup>[6-8]</sup>。如图 2 所示, 创建长方体背景区域, 6 个表面按块分割, 分别设置为速度进口、压力出口、顶部、底部、侧面和系统边界, 将长方体、包面及

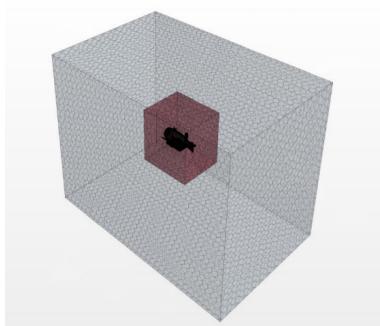


图 2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

背景过度区执行布尔减运算操作, 以加快计算收敛速度, 采用多面体网格划分。

### 1.3 边界条件

水下发射超空泡射弹武器对搭载平台姿态的影响主要是超空泡射弹武器发射后坐力载荷的作用。为方便计算, 将后坐力曲线做离散化处理, 如图 3 所示, 后坐力总作用时间为 4.2 ms, 其中 1.4 ms 时后坐力最大为 5 500 N, 2.8 ms 时后坐力降至 500 N, 4.2 ms 时降至最低值 50 N。水下超空泡射弹武器发射时的俯仰角为身管与平面  $oxy$  的夹角, 向下为正; 方位角为身管在  $oxy$  平面投影与  $ox$  轴负方向的夹角, 向左为正。为减少运算次数, 分别选择具有代表性的 0°、90°的俯仰角和 0°、30°的方位角进行仿真计算。

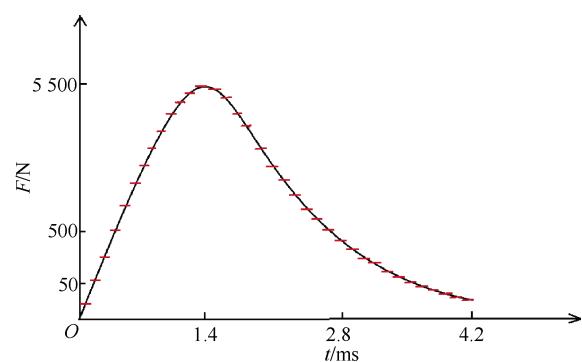


图 3 后坐力载荷

Fig. 3 Recoil load

## 2 仿真分析

分别选取 0°、90°的俯仰角和 0°、30°的方位角 4 种工况下发射超空泡射弹进行仿真计算。

### 1) 0°俯仰角、0°方位角发射。

航行器平台各轴速度变化仿真结果如图 4 所示。超空泡射弹发射后, 在后坐力的作用下, 平台  $x$  轴速度、 $z$  轴速度快速上升, 在 0.004 2 s 分别达到 0.059 7 m/s 和 0.054 57 m/s,  $y$  轴速度稍有变化, 在 0.004 2 s 增长至 -0.010 1 m/s, 见图 4(a); 随后, 弹丸出炮口, 后坐力消失, 平台  $x$  轴速度于 0.352 s 减小至 0,  $z$  轴速度于 0.318 s 减小至 0,  $y$  轴速度于 0.091 s 减小至 0, 见图 4(b)。

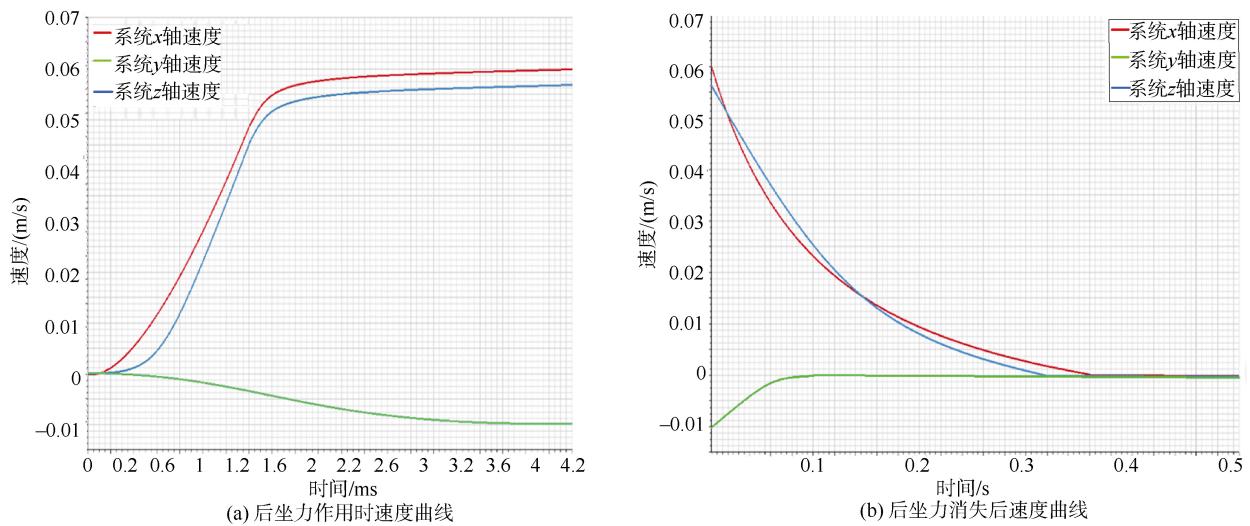


图 4 0°俯仰角、0°方位角发射平台各轴速度随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of axes' speed of launch platform under 0° pitch angle and 0° azimuth angle changing with time

航行器平台各轴角速度变化仿真结果如图 5 所示。超空泡射弹发射后，在后坐力的作用下，平台  $x$  轴角速度快速上升，在 0.004 2 s 达到 0.121 rad/s,  $y$  轴、 $z$  轴角速度稍有变化，见图 5(a)；

随后，弹丸出炮口，后坐力消失， $x$  轴角速度逐渐振荡减小，于 0.390 s 减小至 0,  $y$  轴角速度于 0.059 3 s 减小至 0,  $z$  轴角速度逐渐振荡减小，于 0.257 s 减小至 0，见图 5 (b)。

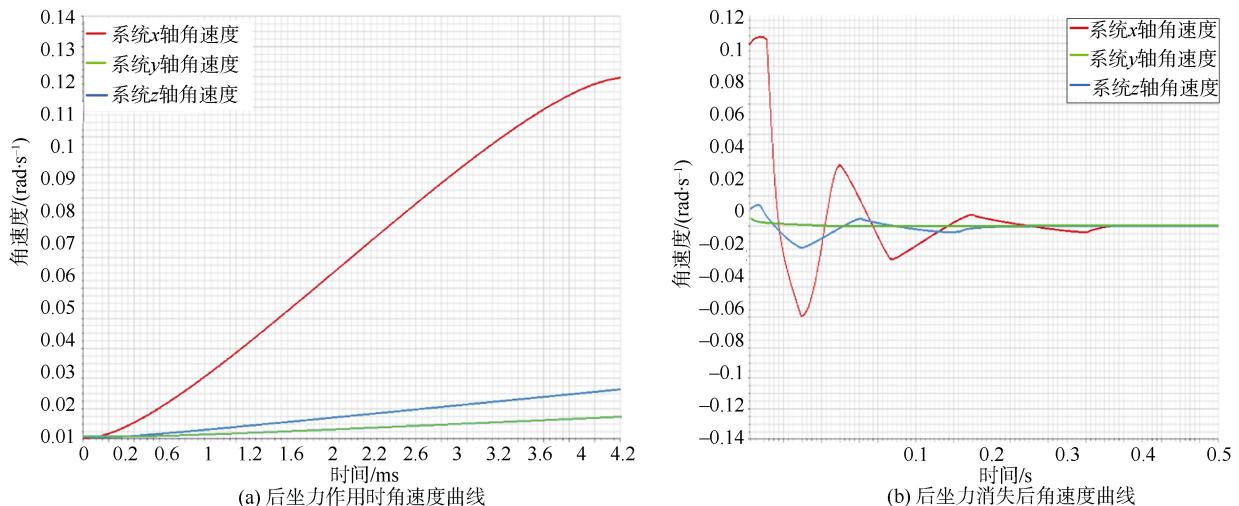


图 5 0°俯仰角、0°方位角发射平台各轴角速度随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of axes' angular speed of launch platform under 0° pitch angle and 0° azimuth angle changing with time

## 2) 0°俯仰角、30°方位角发射。

航行器平台各轴速度变化仿真结果如图 6 所示。超空泡射弹发射后，在后坐力的作用下，平台  $x$  轴速度、 $y$  轴、 $z$  轴速度快速上升，在 0.004 2 s 分别达到 0.046 1 m/s、0.049 53 m/s、0.029 1 m/s，见图 6 (a)；随后，弹丸出炮口，后坐力消失，平台  $x$  轴速度于 0.272 s 减小至 0,  $y$  轴速度于 0.31 s

减小至 0,  $z$  轴速度于 0.158 s 减小至 0，见图 6 (b)。

航行器平台各轴角速度变化仿真结果如图 7 所示。超空泡射弹发射后，在后坐力的作用下，平台  $x$  轴角速度快速上升，在 0.004 2 s 达到 0.145 1 rad/s,  $y$  轴、 $z$  轴角速度稍有变化，见图 7 (a)；随后，弹丸出炮口，后坐力消失， $x$  轴角速度逐渐振荡减小，于 0.441 s 减小至 0，见图 7 (b)。

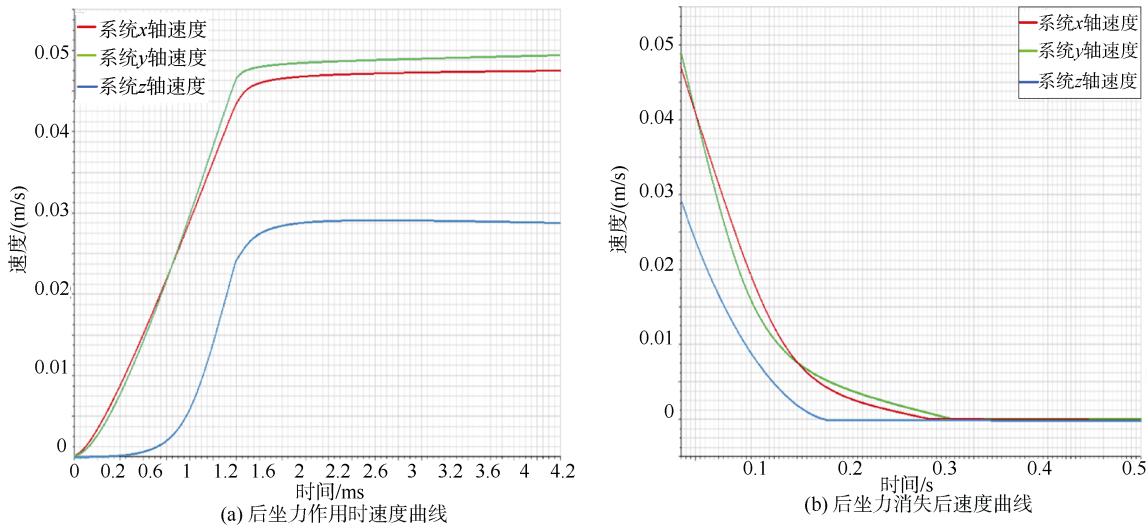


图 6 0°俯仰角、30°方位角发射平台各轴速度随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of axes' speed of launch platform under 0° pitch angle and 30° azimuth angle changing with time

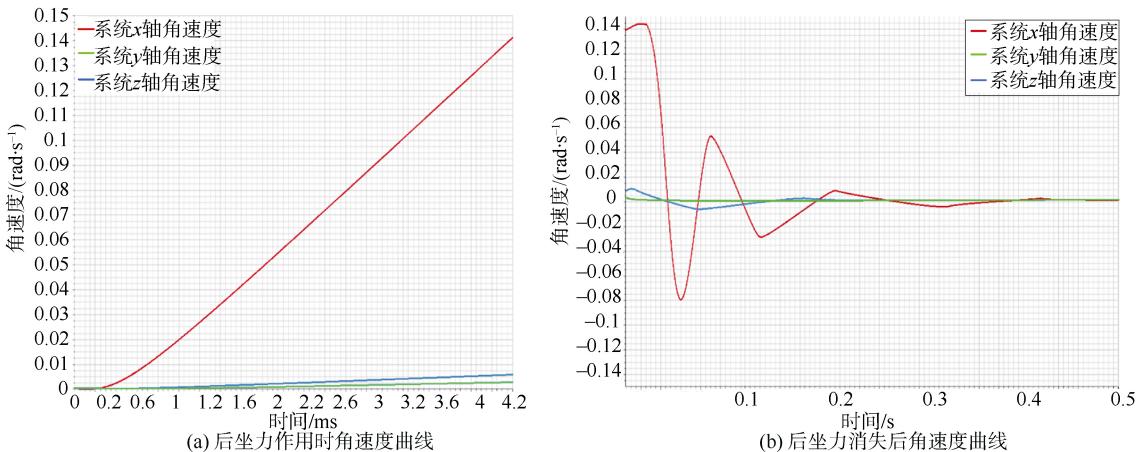


图 7 0°俯仰角、30°方位角发射平台各轴角速度随时间变化曲线

Fig. 7 Curves of axes' angular speed of launch platform under 0° pitch angle and 30° azimuth angle changing with time

## 3) 90° 俯仰角、0° 方位角发射。

航行器平台各轴速度变化仿真结果如图 8 所示。超空泡射弹发射后, 在后坐力的作用下, 平台  $z$  轴速度快速变化, 在 0.004 2 s 达到  $-0.032\ 54\text{ m/s}$ ,  $x$  轴速度和  $y$  轴速度基本不变, 见图 8 (a); 随后, 弹丸出炮口, 后坐力消失, 平台  $z$  轴速度于 0.202 3 s 减小至 0, 见图 8 (b)。

航行器平台各轴角速度变化仿真结果如图 9 所示。超空泡射弹发射后, 在后坐力的作用下, 平台  $x$  轴角速度快速上升, 在 0.004 2 s 达到

$0.191\ 4\text{ rad/s}$ ,  $y$  轴、 $z$  轴角速度稍有变化, 见图 9 (a); 随后, 弹丸出炮口, 后坐力消失,  $x$  轴角速度逐渐振荡减小, 于 0.465 s 减小至 0, 见图 9 (b)。

## 4) 90° 俯仰角、30° 方位角发射。

航行器平台各轴速度变化仿真结果如图 10 所示。超空泡射弹发射后, 在后坐力的作用下, 平台  $y$  轴和  $z$  轴速度快速变化, 在 0.004 2 s 分别达到  $0.025\ 3\text{ m/s}$  和  $-0.030\ 2\text{ m/s}$ ,  $x$  轴速度基本不变, 见图 10 (a); 随后, 弹丸出炮口, 后坐力消失,  $y$  轴速度于 0.146 s 减小至 0,  $z$  轴速度于 0.196 s 减小至 0, 见图 10 (b)。

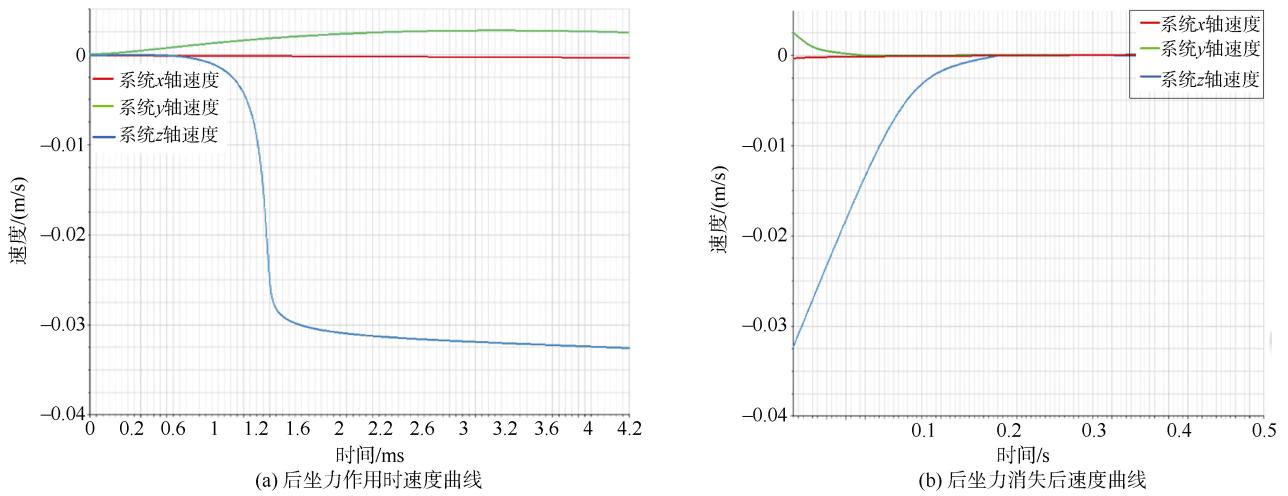


图 8 90°俯仰角、0°方位角发射平台各轴速度随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of axes' speed of launch platform under 90° pitch angle and 0° azimuth angle changing with time

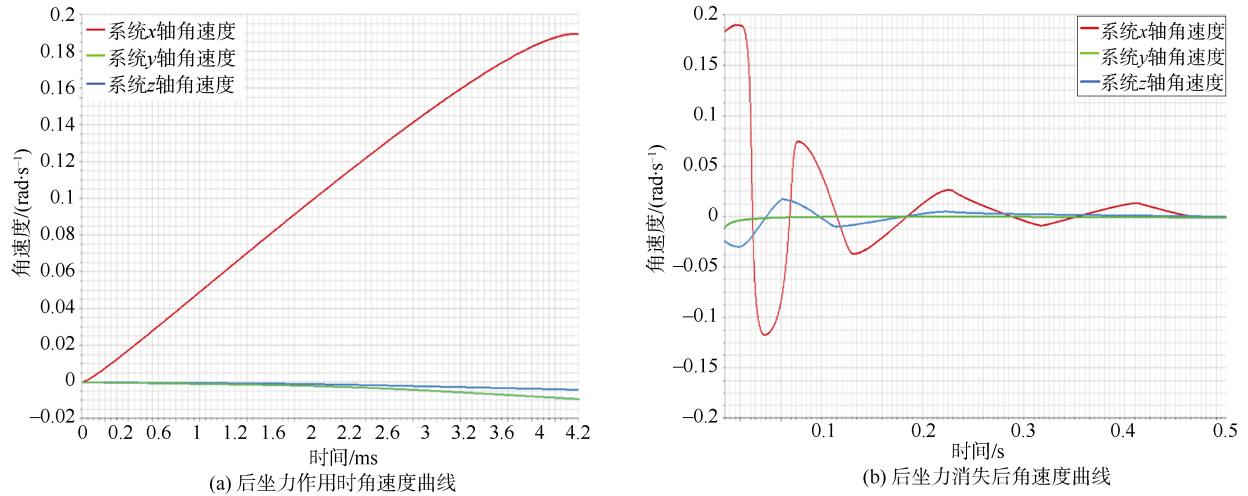


图 9 90°俯仰角、0°方位角发射平台各轴角速度随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of axes' angular speed of launch platform under 90° pitch angle and 0° azimuth angle changing with time

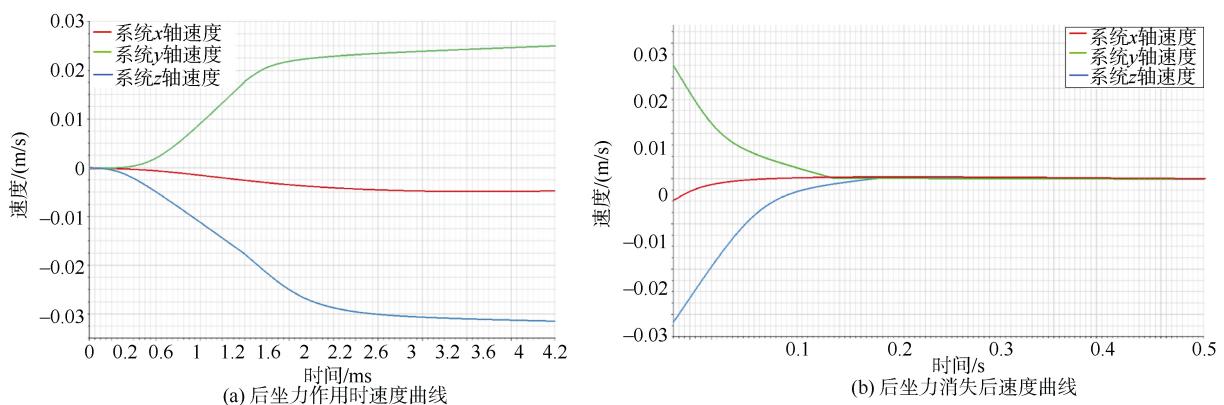


图 10 90°俯仰角、30°方位角发射平台各轴角速度随时间变化曲线

Fig. 10 Curves of axes' speed of launch platform under 90° pitch angle and 30° azimuth angle changing with time

航行器平台各轴角速度变化仿真结果如图 11 所示。超空泡射弹发射后, 在后坐力的作用下, 平台  $x$  轴角速度快速上升, 在 0.004 2 s 达到 0.184 8 rad/s,  $y$  轴、 $z$  轴角速度基本不变, 见图 11(a); 随后, 弹丸出炮口, 后坐力消失,  $x$  轴角速度逐渐振荡减小, 于 0.459 6 s 减小至 0, 见图 11(b)。

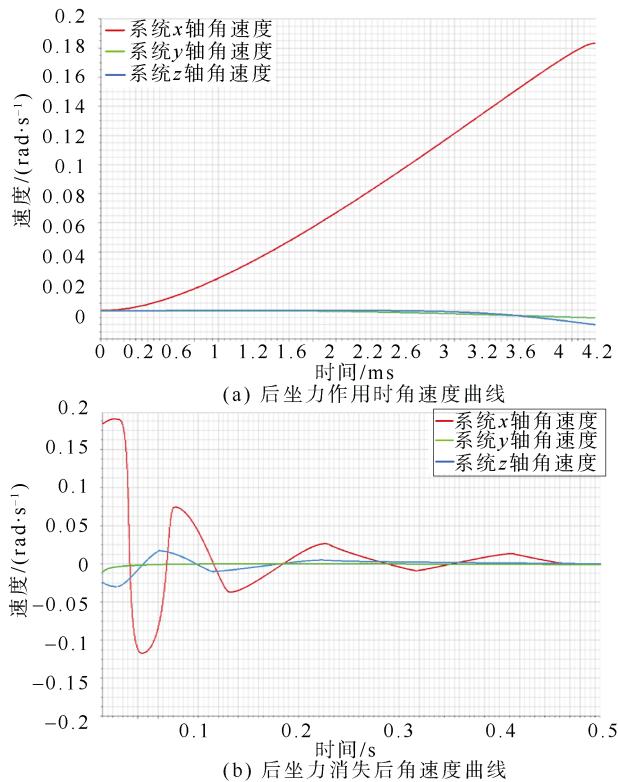


图 11 90°俯仰角、30°方位角发射平台各轴角速度随时间变化曲线

Fig. 11 Curves of axes' angular speed of launch platform under 90° pitch angle and 30° azimuth angle changing with time

### 3 结束语

通过对超空泡射弹武器在 90°俯仰角 30°方位角、90°俯仰角 0°方位角、0°俯仰角 30°方位角、0°俯仰角 0°方位角 4 种状态下发射的仿真结果可以看出: 由于水下发射时超空泡射弹武器后坐力作用时间很短 (4.2 ms), 同时受到水阻力的影响, 搭载平台各轴的速度和角速度变化很小 (速度最大为 0°俯仰角 0°方位角发射时 0.059 7 m/s, 角速度最大为 90°俯仰角 0°方位角发射时 0.191 4 rad/s), 且都可在 0.5 s 内恢复稳定, 水下发射超空泡射弹对搭载 UUV 平台姿态的影响很小。

### 参考文献

- [1] 魏平, 侯健, 杨柯. 超空泡射弹研究综述[J]. 舰船电子工程, 2008, 28 (4): 13-17.
- [2] 魏平, 侯健, 陈汀峰. 高速射弹超空泡的形态特性[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24 (5): 108-112.
- [3] 王蓬. 军用 UUV 的发展与应用前景展望[J]. 鱼雷技术, 2009, 17 (1): 5-9.
- [4] 王建斌, 王志敏. UUV 发展、应用及关键技术[J]. 信息与电子工程, 2007, 5 (6): 476-480.
- [5] 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.
- [6] 邵宏伟. 波浪中船舶六自由度操纵/摇荡耦合运动仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [7] 徐静. 船舶在波浪中的六自由度操纵运动模型研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [8] 孙梦瑶. 水下滑翔机粘性水动力数值模拟方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

(责任编辑: 曹晓霖)