

深潜救生艇的紧急信息传递装置设计

唐会林¹, 孙希勋²

(1. 中国人民解放军 92213 部队, 广东 湛江 524064; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 深潜救生艇在工作时存在一定的危险性, 随时可能需要传递紧急信息, 潜射无人机装置可用于深潜救生艇的紧急信息传递; 针对潜射无人机发射过程中的技术难题, 设计了一种可以适用于深潜救生艇使用的特种运载器; 首先, 根据无人机尺寸对特种运载器尺寸大小及外形结构进行设计, 由于弹射姿态要求与水面呈 72°角, 在筒壁上设计环状气囊; 然后, 对特种运载器壳体线型提出多种方案, 并利用 Fluent 软件进行阻力计算, 得出最优的壳体线性; 其次, 根据壳体线性对各设备放置位置进行调整, 计算其重心与浮心位置, 并对稳性进行计算校核; 最后对特种运载器硬件控制系统进行设计; 通过 Matlab, 对所设计的特种运载器进行航向改变仿真, 通过与普通滑模控制的对比, 证明了所设计算法的快速有效性; 该特种运载器把无人机运送到水面后弹射升空, 有效的解决了无人机防水及水下弹射等技术难题, 降低研发与弹射成本, 提高安全性。

关键词: 深潜救生艇; 潜射无人机; 特种运载器;

Design of Emergency Information Transmission Device for Deep Submergence Rescue Vessel

Tang Huilin¹, Sun Xixun²

(1. 92213 Army, Zhanjiang 524064, China;

2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: There is a certain degree of danger on the deep submergence rescue vessel (DSRV) working, at any time it may need to convey emergency information. Submarine-launched unmanned aerial vehicle (UAV) device can be used for emergency information transmission of the DSRV. In view of the technical problems in the process of submarine-launched unmanned aerial vehicle, designing a method that can be applied to submarines and underwater. The First of all, according to the size of the UAV size of the special carrier size and shape design, due to ejection attitude and water surface was 72 degrees angle, in the cylinder wall design of the annular balloon; and then the special carrier shell linear. According to the linearity of the shell, the position of each device is adjusted to calculate the center of gravity and the center of the floating heart, and the calculation of the stability is calculated and the calculation is carried out by using the Fluent software to calculate the resistance. Finally, the design of the special carrier hardware control system is carried out. Using Matlab to design the special carrier heading-keeping simulation, which proves the stability of the designed special carrier. The special carrier to the unmanned aerial vehicles transported to the surface after the ejection launch, effectively solve the UAV waterproof and underwater ejection and other technical problems, reduce R & D and ejection costs and improve safety.

Keywords: DSRV; submarine UAV; special carrier

0 引言

随着海洋的逐步开发, 人类的脚步渐渐迈进深海, 但是由于深海环境的复杂性, 各种海洋事故频发。深潜救生艇作为对深海设备及人员进行救援的主要设备, 应用越来越广泛^[1-3]。由于深潜救生艇工作在水下几百米的深度, 遇到紧急情况需要大量紧急信息传递时, 单靠声纳是明显不足的。因此, 设计一种用于深潜救生艇紧急信息传递的装置势在必行。

要实现无人机的潜射工作, 一般分为两种发射方式: 干式发射方式、湿式发射方式^[4]。

其中干式发射方式较为普遍^[5]; 无人机放入到特种运

载器的密封运载舱内, 在水下特种运载器过程中无人机不与水接触, 在整个弹射过程中无人机也是处在干燥的环境中的; 这种潜射方式不用考虑无人机的防水密封问题, 因此也降低了对于新的防水无人机的研发成本^[6]。

而湿式发射方式由于没有密封防水的特种运载器, 无人机在水中点火发射, 这样就需要考虑无人机的防水问题以及水中点火的技术难题; 这一种方法比较复杂不太适合于深潜救生艇发射无人机^[7]。

美国洛克希勒·马丁公司研制出了第一架适合于潜射的无人机“海上搜寻者”; 这种无人机的机翼可以折叠起来, 放入到潜水艇的鱼雷发射管内, 并加装相应的发射机构, 实现利用鱼雷发射管发射无人机。“海上搜寻者”上携带着各种侦查类传感器, 可以实现对海面侦查与目标的搜寻; 当潜艇把天线伸出水面, 通过无线电通信无人机就可以实时把水面情况传输给潜艇, 同时“海上搜寻者”还可以携带 10 kg 以内的炸药, 可以通过空中对目标进行打击。

收稿日期: 2018-04-03; 修回日期: 2018-05-07。

作者简介: 唐会林(1973-), 男, 江苏泰州人, 工程师, 主要从事海洋装备方向的研究。

随后在“阿什维尔”号潜艇上进行了相应的科研工作, 成功实现了设计目标。20 世纪末, 美国开始研制一种多用途的潜射无人机, 经过洛马公司多年的研究, 研制出了“鸬鹚”无人机, 该无人机的发射方式是利用潜艇发射弹道导弹的 2 110 mm 发射管实现无人机的弹射, 利用导弹发射管能够实现无人机在水面或者水下的发射任务, 同时也能够实现无人机回收工作, 保证了无人机的可重复使用。该无人机能够携带多种勘探与攻击装备, 从而可以实现海上侦查与攻击任务。

参考了国内外许多设计思路, 本文采用干式发射方式设计了一种的水下特种运载器。把无人机折叠好放入到一个专门的水下耐压筒子里面作为无人机从水下运送到水面空气中的特种运载器, 解决了无人机从水下到空气中的过度问题; 本文针对深潜救生艇需要紧急信息传递的情况所设计的潜射无人机的特种运载装置, 能够保证无人机安全有效的发射至水面, 进行信息传递。适用于深潜救生艇上搭载^[8]。

1 特种运载器整体机构

图 1 所示为潜射无人机发射过程, 展示了特种运载器与深潜救生艇分离、特种运载器自主航行到水面、保持好方向与角度、无人机与特种运载器分离、无人机飞向预定方向^[9]。

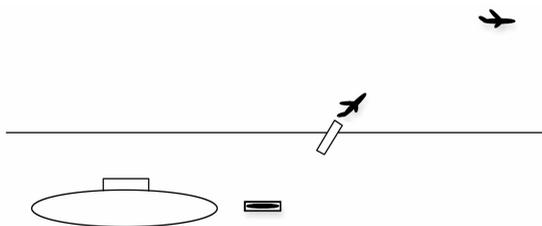


图 1 潜射无人机发射过程

本设计的特种运载器结构简图如图 2 所示。

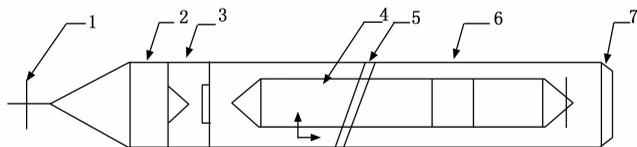


图 2 特种运载器整体结构简图

其中: 1 为矢量推进器; 2 为控制舱; 3 为弹射舱; 4 为折叠后的无人机; 5 为气囊; 6 为特种运载器本体; 7 为特种运载器端盖。

特种运载器整体主要分为两部分, 艏端为密封的铝合金舱体, 该舱体是不能进水的里面主要有折叠式无人机、无人机弹射装置、电池、检测与控制电路等。艉端为碳纤维制成的舱体, 该舱体是可以进水的, 里面主要安装有矢量推进器^[10]。

根据所设计的无人机的发射条件, 要求特种运载器到达水面后发射方向与水平面成 72° 夹角。运载器分为两种工作状态: 水下航行、水面发射, 因此特种运载器在水下航

行时需浮力近似于重力; 当到达水面以后浮力大于重力, 剩余浮力可以抵消弹射无人机时产生的反向推力, 防止海水进入舱体。通过多种方案的设计与论证, 设计了一种弹出气囊的方案解决浮力调节和与水平面呈 72° 角的姿态问题。如图 3 所示, 在特种运载器筒壁上设计一种与特种运载器轴向呈 72° 的环形气囊; 当特种运载器到达水面后弹出气囊以增加特种运载器的浮力, 同时随着气囊的展开, 特种运载器发射筒漏出水面并与水面呈 72° 角, 并保持运载器发射筒弹射前后的稳定性。

当特种运载器浮到水面, 打开舱盖准备弹射无人机时, 特种运载器艏部需露出水面一定的体积, 防止海水流入到特种运载器舱内, 同时在弹射无人机的过程中会产生一个后坐力, 需要一定的浮力抵消这个力, 此时特种运载器的浮力应该大于重力, 且需要剩余浮力可以抵消弹射无人机时产生的后坐力, 露出水面的高度不至于让海水流入到特种运载器中。这样特种运载器在水下时浮力等于重力, 到达水面以后其浮力要求大于重力, 因此需要设计调节特种运载器浮力的装置。结合以上两点弹射无人机要求, 图 3 展示了特种运载器到达水面以后的姿态图。

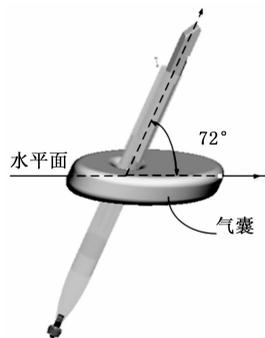


图 3 特种运载器上的环形气囊

特种运载器在流体中运行时主要受到流体对其的阻力, 为了节约能源、增加特种运载器的灵活性和速度, 需要对特种运载器壳体外形进行研究以减小特种运载器所受阻力; 参考流体力学相关知识^[11]得知, 特种运载器外形呈流线型有利于减小与流体的阻力; 参照水下无人航行器的外形设计, 呈流向回转体的外形能够减小特种运载器阻力, 同时由于回转体机械结构较为简单, 加工时较为方便。

根据无人机折叠以后的体积大小和弹射装置的体积要求对特种运载器整体外形大小进行设计; 无人机机身长度为 4 500 mm, 其横截面为 $470 \text{ mm} \times 328.5 \text{ mm}$; 无人机与特种运载器之间需要预留一定的间距, 同时在特种运载器内壁上也设计有无人机弹射滑道; 综合以上因素考虑特种运载器密闭舱体设计外径为 533 mm。根据长度要求粗略估算特种运载器密封舱体长度, 然后利用三维制图软件 ProE 画出密封舱体三维图, 这里需要补充的是: 为了满足耐压与弹射要求, 密封舱体厚度为 8 mm 的铝合金; 利用 ProE 软件可以算出密封舱外壁铝合金体积, 铝合金密度为 $2\,700 \text{ kg}$ 每立方米, 由此可知密封舱重量。根据无人机

满载荷重量大约为 320 kg，弹射装置为 200 kg，结合密封舱自身重量和体积要求，经过多次数值计算得出特种运载器密封舱合理长度为 5 330 mm，这个长度可以满足以上两点设计要求，此时密封舱浮力略大于重力；对于浮心与重心的计算在后面的内容进行介绍。

为了得到运载器良好的水动力特性，设计了、鱼雷型(图 4a)和圆柱 UUV 型(图 4b)两种不同线型的外形结构，然后利用 Fluent 仿真软件进行相应的阻力计算；主要分为以下几个过程：建立三维模型、设定边界条件、划分网格、设定求解数学模型与湍流模型、设定控制参数和迭代次数、开始计算。

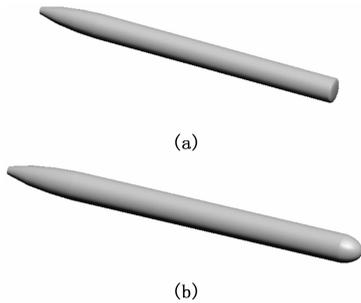


图 4 两种不同线型结构的运载器简图

如图 5 为鱼雷型(图 5a)和圆柱 UUV 型(图 5b)特种运载器所受到的表面压差阻力分布云图，图 6 为鱼雷型(图 6a)和圆柱 UUV 型(图 6b)特种运载器表面摩擦阻力分布图。

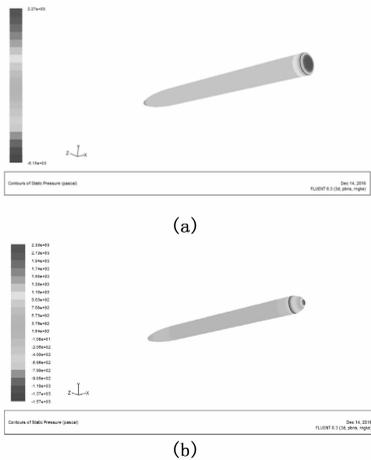


图 5 表面压差阻力分布云图

通过利用 FLUENT 对不同方案下阻力大小的计算，当航行速度为 4 节时，得到鱼雷型阻力大小为：压差阻力 28.45 N，摩擦阻力为 72.13 N，总阻力 100.58 N；圆柱 UUV 型阻力大小为：压差阻力 18.96 N，摩擦阻力 73.94 N，总阻力 92.9 N。从阻力大小可以看出，圆柱 UUV 型结构阻力更小，因此，本文采用圆柱 UUV 型作为特种运载器线型。

2 特种运载器稳性设计

2.1 重心、浮心估算

特种运载器在水下航行时为保证运行姿态和稳性，对

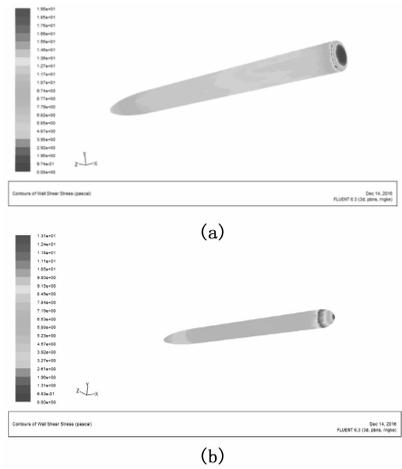


图 6 摩擦阻力分布图

特种运载器重心与浮心位置提出以下要求：浮力近似等于重力且在一条直线上，同时特种运载器浮心应略高于重心以增加特种运载器的稳性。

首先建立坐标系(单位：m)，坐标原点为特种运载器体心，水平面为 XOY 平面，艏向为 OX 轴，OZ 轴垂直向下。特种运载器总重量是 W，单位 kg，每个元件的重量分别为 W_i ，单位 kg，其中每个元件在上述坐标系中的重心坐标为 (x_i, y_i, z_i) ，那么特种运载器的总重量和重心坐标为：

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_G = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n W_i x_i \\ y_G = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n W_i y_i \\ z_G = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n W_i z_i \end{cases} \quad (2)$$

式中， n 为各个零部件的个数，特种运载器在水下运行时，姿态关于 XOZ 面与 XOY 面对称；把各零部件重量与重心坐标代入上式中，可得特种运载器的重心为 $(-0.734, 0, 0.113)$ ，单位 m。

特种运载器的浮心计算是通过每个排开水的零部件所受到的浮力叠加而得到，依然在上面计算重心时设定的坐标下，假定特种运载器整体浮心是 (x_b, y_b, z_b) ，那么其浮心计算公式为：

$$\begin{cases} x_b = \frac{\iiint x_j dV}{\iiint dV} \\ y_b = \frac{\iiint y_j dV}{\iiint dV} \\ z_b = \frac{\iiint z_j dV}{\iiint dV} \end{cases} \quad (3)$$

由上式可得出特种运载器的浮心为 $(-0.214, 0, 0)$; 根据上面重心计算结果可知, 重心与浮心在 OX 轴上不重合, 因此需要在特种运载器艏部非密封舱内加入一定量的浮力材料, 同时在特种运载器艏部的舱盖内加入一定量的铅块, 使重心与浮心在 OX 轴上保持重合。重心与浮心在 OZ 轴上的距离为 0.113 米, 符合《船舶稳性规范》中浮心与重心的要求, 达到稳性要求; 当特种运载器在水下航行时能够保持稳定的姿态要求。

当特种运载器到达水面以后弹出气囊, 整个特种运载器姿态发生了变化, 浮心的位置也改变; 根据船舶设计要求, 浮心应高于重心至少 15 cm; 因此需要对气囊的大小和形状进行调整和计算。

2.2 初稳性计算

当特种运载器到达水面展开气囊后, 特种运载器左右对称, 但是前后并不对称; 在海面容易受到风浪的干扰, 影响弹射无人机对于特种运载器的姿态要求, 因此需要对特种运载器的稳性进行计算、分析, 下面对特种运载器的横稳心高和纵稳心高进行计算。如图 7 所示, 当特种运载器产生一个小的横倾角时重心、浮心的变化。

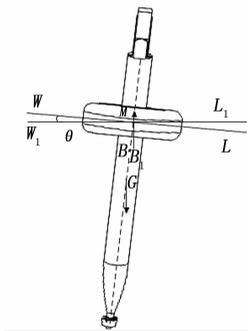


图 7 特种运载器的横向稳性

假设此时水平面为, 特种运载器重心为 G , 浮心为 B ; 当特种运载器受到海风、海浪的干扰时, 在横向将产生一个小角度的倾斜角, 水面则是, 此时特种运载器的重心没有改变还是 G , 但是浮心发生了变化为, 此时浮力作用线与特种运载器的中心轴线的交点是 M , 则点 M 为特种运载器的稳心。

由图 7 所示, 当特种运载器产生倾角 θ 时, 在重力与浮力的相互作用下产生一个恢复力矩 M_1 , 可以使特种运载器抗击干扰力恢复到平衡位置, 该恢复力矩的大小为:

$$M_1 = \rho g \cdot \overline{GM} \cdot \sin\theta \quad (4)$$

其中: ρ 是海水密度, g 是重力加速度, \overline{GM} 是特种运载器的横向初稳心高, 其大小是 0.44 m。

在计算特种运载器纵向初稳心高度时, 方法与上面计算横向初稳心的方法一致, 能够得出特种运载器纵向初稳心高度为 0.56 m。

2.3 固有频率计算

在海面上, 海浪的传播具有一定频率传播的, 因此为了减小海浪对特种运载器的干扰, 应使特种运载器的固有

频率应避开海浪的主频率。根据《BUOY ENGEERING》对于船舶设计中介绍的固有频率的研究, 可以套用船舶的计算公式如下:

$$\omega_x = \sqrt{\frac{I_{xx}}{G GM_x}} \quad (5)$$

$$\omega_y = \sqrt{\frac{I_{yy}}{G GM_y}} \quad (6)$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{c}{m_v}} \quad (7)$$

其中: $c = \rho g A$, A 代表特种运载器的底面积, 单位 m^2 ; $m_v = m + m^1$, m 代表特种运载器总质量, m^1 代表特种运载器为附连质量, 单位均为 kg; I_{xx} 代表特种运载器在绕 x 轴上产生的惯性矩以及附加质量惯性矩的加和, 单位 N·m; \overline{GM}_x 为特种运载器横向初稳心高, 单位 m; T_{yy} 代表特种运载器在绕 y 轴上产生的惯性矩以及附加质量惯性矩的加和, 单位 N·m; \overline{GM}_y 为式 (4) 中计算的特种运载器纵向初稳心高, 单位 m; 根据以上计算公式, 可以得出其固有频率为: $\omega_x = 1.42 \text{ rad/s}$, $\omega_y = 1.04 \text{ rad/s}$, $\omega_z = 12.26 \text{ rad/s}$ 。

特种运载器需要在 3 级海况能够完成预定的任务, 其中 3 级海况下海浪主能量频率为 2.62 rad/s, 与上面特种运载器固有频率计算结果相比较可知, 固有频率避开了海浪频率, 因此本设计特种运载器具有一定的耐波性。

3 矢量推进器特性分析

为了对矢量推进器进行研究, 建立如图 8 坐标系; 假设特种运载器为刚体的, 且海面平静, 忽略风浪流的干扰^[12]。

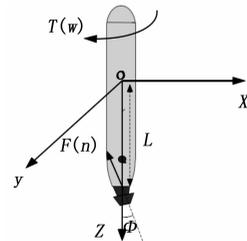


图 8 矢量推进器转向受力分析图

根据特种运载器的受力情况, 建立如下运动学方程和动力学方程:

$$F(n) \cdot \sin\varphi \cdot L - T(\omega) = I\beta \quad (8)$$

$$F(n) \cdot \cos\varphi - f(v) = ma \quad (9)$$

式中, $F(n)$ 是矢量推进器提供的总推力, 单位 N, $F(n)$ 与该推进器转速 n 有关; φ 为推进器与特种运载器夹角, 即偏转角, 单位: $^\circ$; L 为主推进器产生的推力作用点到特种运载器重心的距离, 单位 m; $T(\omega)$ 是受到的阻力力矩, 单位 N·m, 其中 ω 是转向角速度, 单位 rad/s; I 是对应的转动惯量, 单位 kg/m^2 , β 是角加速度, 单位 rad/s^2 , $f(v)$ 是所受阻力^[13], 单位 N。

推进器的推力是通过尾部的螺旋桨转动而提供的, 由螺旋桨推进理论可知, 矢量推进器提供的推力是:

$$F(n) = K_i(J_o)\rho n^2 D^4 \quad (10)$$

式中, K_i 为推进器的推力系数, ρ 是流体密度, 单位 kg/m^3 , D 是推进器桨叶的直径, 单位 m 。

由势流理论可知, 特种运载器受到的阻力为:

$$f(v) = 0.5\rho C_d A v^2 \quad (11)$$

其中: C_d 是特种运载器所受的阻力系数, A 是特种运载器和流体接触的最大横截面积, 单位 m^2 。

根据上面对矢量推进器的分析与公式推导可知, 转向力矩 $F(n)$ 与特种运载器的航行速度 v 没有关系, 航行速度不会影响转向力矩, 这也是矢量推进器与普通使用舵的推进器的最大区别, 矢量推进的特种运载器在速度较低时也能够有足够的力矩实现其转向, 使特种运载器的运行更加灵活^[14]。

当特种运载器到达水面以后其航行速度几乎为零, 为了满足迎风发射的姿态需求, 需要对特种运载器的舵向进行调节, 此时普通推进器将不能有效的进行姿态调节, 而矢量推进器的优点将显现出来; 而且矢量推进器也更适合工作与狭小的空间, 具有较好的操控性和避碰性。

4 控制电路设计

特种运载器硬件控制系统如图 9 所示, 整个控制系统包括 ARM 控制电路, 电流、电压信息采集电路, 过流保护电路, 漏水检测电路, 爆炸螺栓控制电路, 霍尔开关位置检测电路, RS232、RS422、CAN 电平转换电路以及风速风向系统。

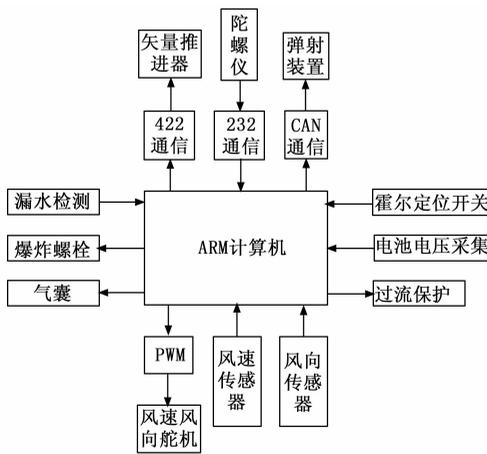


图 9 特种运载器控制系统组成

整体的主控制器选用三星公司生产的 S3C2440A 芯片^[15], 这个型号的芯片采用 ARM920T 内核, 为 32 位的芯片, 其主频最高可达 400 MHz, 而且片上资源丰富, 而且其运算能力出众, 具有较好的实时中断能力, 功耗很低。使用 Linux 作为 ARM 的操作系统, 有了 Linux 操作系统在程序设计时就可以实现多线程、多进程编程, 简化了程序设计, 提高了工作效率^[16]。

陀螺仪采用荷兰 Xsens 公司生产的 MTi-G, 该陀螺仪集成了 GPS, 因此可以同时提供位置信息与姿态信息, 而

且该陀螺仪体积小、精度高、价格便宜, 在以前的多个工程项目中使用过, 可靠性可以保证。风速风向舵机依靠风速传感器和风向传感器所传递回来的信息, 通过 ARM 计算机进行处理, 得到所需要改变的舵角大小。

5 舵向改变仿真验证

为了消除特种运载器模型不确定与环境干扰对特种运载器舵向控制的影响, 采用自适应模糊滑模控制方法; 滑模控制的优点是当控制参数不决定时, 可以很好的完成舵向控制, 由于参数误差的影响, 需要有较大的控制输入才能保证最后的控制性能, 但是这样会使特种运载器的鲁棒性降低, 这里引入自适应算法来提高控制性能, 同时利用模糊算法对特种运载器动态系统中存在的非线性函数进行模糊逼近处理, 从而对消除特种运载器模型不确定和环境干扰对特种运载器舵向控制的影响。

特种运载器舵向控制的动态方程为:

$$(I_z - N_{\dot{\psi}})\ddot{\psi} + N_{\dot{\psi}}\dot{\psi} = L \cdot T \sin(\delta_{\gamma}) + d \quad (12)$$

其中: ψ 为特种运载器航向角, I_z 、 $N_{\dot{\psi}}$ 为特种运载器的模型参数, T 为矢量推进器推力, L 为推进器最用点与特种运载器中心点距离, d 为外界干扰。

当特种运载器到达水面以后, 开始采集风向信息与自身姿态信息, 通过控制矢量推进器的角度从而控制特种运载器的舵向角, 使特种运载器舵向朝向迎风方向, 从而保证无人机发射要求; 为了能够充分体现本章设计的 AFSMC 控制器控制能力与控制精度, 下面对特种运载器的舵向改变控制进行仿真实验, 相关值为 $I_z = 3.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $N_{\dot{\psi}} = -4.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}$, $L = 2300 \text{ mm}$ 。

假设特种运载器初始位置的舵向角为 0 度, 需要改变特种运载器的舵向角为 30 度, 此时需要调节矢量推进器夹角, 从而调节特种运载器舵向角, 从而满足发射对舵向角度的要求; 为了验证在 AFSMC 控制下的舵向控制效果, 这里在相同的控制参数与同一个环境中采用单纯的滑模控制作为对比实验; 其仿真结果图 10 所示。

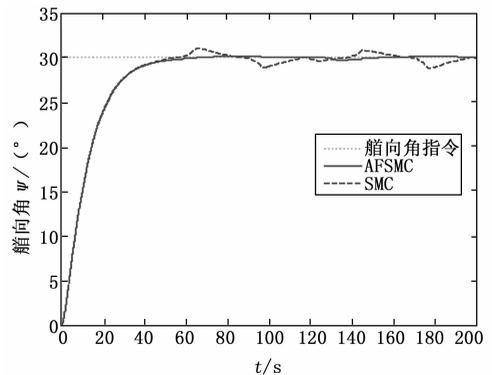


图 10 特种运载器舵向角的变化

由图 10 与 11 所示, 为特种运载器航向由 0 度变化到 30 度过程中舵向与矢量推进器夹角 δ_{γ} 的变化曲线, 其中红色曲线 AFSMC 为在自适应模糊滑模控制器下输出曲线,