带翼潜航器动力学建模及动稳定性

叶 川 马东立

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 带翼潜航器具有面积较大的升力面,滚转运动是带翼潜航器的基本机动方式之一. 利用计算流体力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)方法研究了带翼潜航器的动导数,计算结果表明:粘性力以及主翼对机体和尾翼的干扰对加速度导数影响较大,不能将加速度导数简化为附加质量系数. 带翼潜航器水动力模型直接采用加速度导数,动力学和运动学方程组考虑滚转运动参数的影响. 利用小扰动假设将动力学和运动学方程组线性化,并将方程组分为纵向和横航向两组. 通过计算扰动运动方程组的模态研究了带翼潜航器的动稳定性. 提出的动力学模型及动稳定性分析方法可用于带翼潜航器的稳定性分析以及运动控制系统的设计.

关 键 词: 潜航器; 动力学模型; 动稳定性; 动导数; 模态

中图分类号: TP 242

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)09-1137-07

Dynamic modeling and stability analysis for underwater craft with wing

Ye Chuan Ma Dongli

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The underwater craft with wing has a large lifting surface. The rolling movement is one of its basic maneuver models. The dynamic derivatives of an underwater craft with wing were studied using the computational fluid dynamics(CFD) method. The result shows that the viscous force and the interference of the wing on the body and the tail are important for the acceleration derivatives in the heave, roll, and pitch directions. The acceleration derivatives could not be simplified as additional mass coefficients. The dynamic and kinematics equations were linearized using the small disturbance hypothesis. The equations were divided into longitude and lateral-directional equations. The dynamic stability of an underwater craft was studied by calculating the modes of the small disturbance equations. The dynamic model and stability analysis method could be used for dynamic stability analysis and motion control system design for the underwater craft with wing.

Key words: underwater craft; dynamic model; dynamic stability; dynamic derivatives; mode

带翼潜航器具有面积较大的翼面,在水下航行时综合利用浮力和升力来平衡重力. 动力学建模是进行动稳定性分析的基础. 仅有的若干文献在研究带翼潜航器的运动控制问题时大都采用常规潜航器的水动力模型及平面运动假设[1-3],但这种方法应用在带翼潜航器上存在一些问题.

在常规潜航器的水动力模型中通常人为地将水动力分为惯性力成分和粘性力成分,并忽略二者之间的相互影响. 一般认为常规潜航器加速运动时受到的力以惯性力成分为主,可以将加速度导数简化为附加质量系数. 但常规固定翼飞行器进行动稳定性分析时一般只考虑洗流时差力矩导数的影响,而不考虑附加质量的影响[4]. 带翼潜航器的加速度导数是否能够像常规潜航器那样忽略粘性力成分的影响则需要研究.

常规潜航器采用平面运动假设可将潜航器的空间运动分解为水平面和铅垂面两个平面内的运动[5]. 显然,平面运动假设忽略了横滚运动. 常规

收稿日期: 2012-09-27; **网络出版时间**: 2012-12-10 17:09

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121210.1709.003.html

作者简介: 叶 川(1985-),男,湖北武汉人,博士生,yechuan@ase.buaa.edu.cn.

潜航器展向尺寸小,也很少通过横滚运动来进行机动. 但带翼潜航器展向尺寸较大,也完全可以像固定翼飞行器那样通过横滚运动来改变航向和机动平面. 因此,带翼潜航器动力学模型不宜采用平面运动假设.

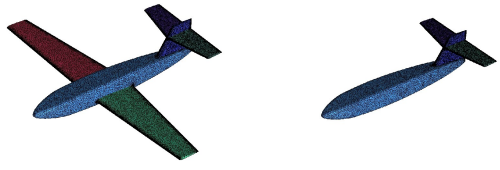
利用计算流体力学(CFD,Computational Fluid Dynamics)方法计算了一个带翼潜航器的动导数[6]. 计算结果表明,粘性力成分以及主翼面对机体和尾翼的干扰对带翼潜航器升沉、滚转和俯仰 3 个方向的加速度导数有重要影响,不能将加速度导数简化为附加质量系数. 因此带翼潜航器的水动力模型直接采用加速度导数.

建立了带翼潜航器的 6 自由度动力学模型. 利用小扰动方法将动力学和运动学方程组线性化,并分为纵向和横航向两个相互独立的一阶线性方程组. 求解了扰动运动方程组系数矩阵的特征根和特征模态. 根据特征模态计算结果对方程组进行了简化,推导了运动模态的稳定性条件. 带翼潜航器纵向具有一个周期较短的收敛模态和一个周期较长的收敛模态,横航向具有一个振荡收敛模态,一个单调收敛模态和一个缓慢发散模态.

1 带翼潜航器加速度导数研究

1.1 计算模型

为了研究面积较大的主翼面对带翼潜航器加速度导数的影响,计算了带翼潜航器各个方向的水动力导数,并与不带主翼外形的计算结果进行了比较(图 1). 潜航器翼面布置为正常式布局,尾翼为十字型尾翼,机体长 2.4 m,翼展 3.4 m,设计水下巡航速度为 2 m/s.



带主翼　　无主翼

图 1　潜航器表面网格

采用 CFD 方法计算潜航器的动导数. 利用动网格模拟物体作小幅强迫振荡运动. 动导数计算求解非定常连续方程和雷诺平均 N-S(Navier-Stokes)方程,求解器为 CFD 软件 Fluent. 以等速直航状态作为基准,物体作某一自由度的强迫振荡运动. 得到物体强迫振荡过程中力和力矩随时间变化的曲线之后,通过最小二乘拟合方法可以得到速度导数和加速度导数.

1.2 计算结果及分析

计算得到了带翼潜航器各方向的动导数. 在计算过程中,单独记录机体、主翼、平尾和垂尾等部件的受力随时间的变化,得到了每个部件的动导数,如表 1 所示.

表 1　潜航器加速度导数

动导数	无主翼外形	带翼潜航器	带主翼和无主翼的比值/%
$X'_{\dot{u}}$	−0.001 236	−0.002 464	199.35
$Y'_{\dot{v}}$	−0.021 753	−0.017 491	80.41
$Z'_{\dot{w}}$	−0.023 094	−0.025 966	112.44
$L'_{\dot{p}}$	−0.000 136	−0.003 010	2 213.24
$M'_{\dot{q}}$	−0.001 840	−0.004 430	240.76
$N'_{\dot{r}}$	−0.001 715	−0.001 668	97.26

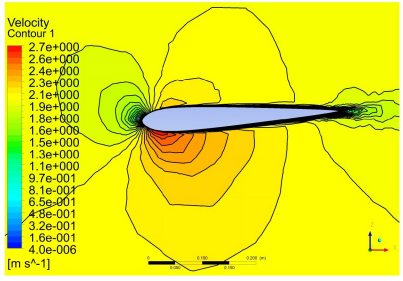
带翼潜航器的滚转角加速度导数较无主翼外形增大了约 21 倍,俯仰角加速度导数增大了 1.4 倍,纵荡加速度导数增大了 1 倍,升沉加速度导数增大了 12%. 带翼潜航器横荡加速度导数减小至无主翼外形的 4/5,偏航角加速度导数略微减小.

粘性力成分以及主翼面对机体和尾翼的干扰对加速度导数的影响在升沉、滚转和俯仰 3 个方向的加速度导数中表现得比较明显,以升沉加速度导数为例进行说明.

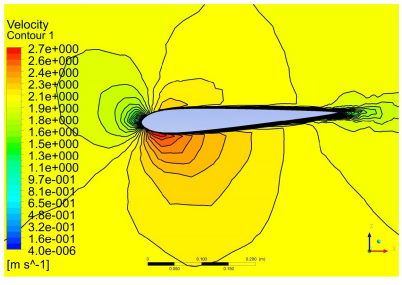
带翼潜航器升沉加速度导数较无主翼外形变化不大,但平尾升沉加速度导数的变化非常明显. 平尾的升沉加速度导数符号为负,数值较无主翼外形增大了 19 倍. 而带翼潜航器主翼的升沉加速度导数符号为正,这两种影响相互抵消.

带翼潜航器主翼面升沉加速度导数符号为正的原因是加速度引起的粘性力的影响大于惯性力. 如图 2 所示,升沉振荡 1/4 周期时刻主翼面的速度为 0,具有向下的加速度. 主翼面升沉加速度导数符号为正,表明此时主翼面受力与定常状态相比具有向下的增量. 同理,升沉振荡 3/4 周期时刻主翼面的速度为 0,具有向上的加速度,主翼面受力与定常状态相比具有向上的增量. 由主翼面剖面速度分布云图可见,1/4 周期时刻与 3/4 周期时刻相比,主翼面上表面速度减小,而下表面速度增大. 速度分布不同导致压强分布的不同,即 1/4 周期时刻主翼面上具有一个由加速度引起的向下的力的增量. 这个向下的力是粘性作用造成的. 惯性力的作用是阻碍物体的加速运动,当主翼面向下加速运动时,惯性力方向朝上. 当主翼面向下加速时,主翼面的迎角不断增大,但由于边界层的迟滞作用,1/4 周期时刻主翼面的迎角小于定常状态的迎角,主翼面受到的向下的力大于定常状态. 综上所述,加速度引起的粘性力和惯性力方向相反,但粘性力的影响较大.

主翼面对尾翼的干扰对升沉振荡中平尾的加速度导数的影响很大. 与无主翼外形相比,带翼潜航器平尾受到洗流时差的作用[7],阻尼作用增大,升沉加速度导数增大了 19 倍.



a　1/4 周期时刻



b　3/4 周期时刻

图 2　升沉振荡 1/4 和 3/4 周期时刻翼型剖面速度云图

2　带翼潜航器动力学模型

建立带翼潜航器动力学模型时采用国际水池会议推荐的和造船与轮机工程学会术语公报的体系. 坐标系是固定于地球的固定坐标系 $E\text{-}\xi\eta\zeta$ 以及随潜航器一起运动的运动坐标系 $G\text{-}xyz$ 两种右手系. 带翼潜航器左右对称,惯性积 $I_{xy}=I_{yz}=0$,但 $I_{xz}\neq 0$.

2.1　动力学和运动学方程组

根据刚体动力学理论,在动系上投影的 6 自由度动力学方程组如下:

$$\left.\begin{aligned} &m(\dot{u}+qw-rv)=X\\ &m(\dot{v}+ru-pw)=Y\\ &m(\dot{w}+pv-qu)=Z\\ &I_x\dot{p}+(I_z-I_y)qr-I_{zx}(pq+\dot{r})=K\\ &I_y\dot{q}+(I_x-I_z)rp+I_{zx}(p^2-r^2)=M\\ &I_z\dot{r}+(I_y-I_x)pq+I_{zx}(qr-\dot{p})=N \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中,m 为质量;I_x,I_y 和 I_z 分别为对 x,y 和 z 轴的惯性矩. 方程组右边是带翼潜航器所受力(矩)在动系上的投影. 主要考虑水动力、浮力、重力和动力等外力. 绕重心转动的运动学方程组为

$$\left.\begin{aligned} &\dot{\phi}=p+\tan\theta(q\sin\phi+r\cos\phi)\\ &\dot{\theta}=q\cos\phi-r\sin\phi\\ &\dot{\psi}=\sec\theta(q\sin\phi+r\cos\phi) \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中,ϕ,θ 和 ψ 分别为滚转角,俯仰角和偏航角.

2.2　方程组线性化

利用小扰动假设将动力学方程组和运动学方程组线性化. 选择铅垂面内对称定直航行作为基准状态. 式(1)的线性化小扰动表达式为

$$\left.\begin{aligned} &m(\Delta\dot{u}+q_*\Delta w+w_*\Delta q-r_*\Delta v-v_*\Delta r)=\Delta X\\ &m(\Delta\dot{v}+r_*\Delta u+u_*\Delta r-p_*\Delta w-w_*\Delta p)=\Delta Y\\ &m(\Delta\dot{w}+p_*\Delta v+v_*\Delta p-q_*\Delta u-u_*\Delta q)=\Delta Z\\ &I_x\Delta\dot{p}+(I_z-I_y)q_*\Delta r+(I_z-I_y)r_*\Delta q-\\ &\quad I_{zx}(p_*\Delta q+q_*\Delta p+\Delta\dot{r})=\Delta K\\ &I_y\Delta\dot{q}+(I_x-I_z)r_*\Delta p+(I_x-I_z)p_*\Delta r+\\ &\quad I_{zx}(2p_*\Delta p-2r_*\Delta r)=\Delta M\\ &I_z\Delta\dot{r}+(I_y-I_x)p_*\Delta q+(I_y-I_x)q_*\Delta p+\\ &\quad I_{zx}(q_*\Delta r+r_*\Delta q-\Delta\dot{p})=\Delta N \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中,带“ * ”下标的变量为基准运动参数,带“Δ”的变量为小扰动增量. 基准状态为铅垂面内对称定直航行,有

$$p_*=q_*=r_*=v_*=0 \tag{4}$$

于是方程组(3)可简化为

$$\left.\begin{aligned} &m(\Delta\dot{u}+w_*\Delta q)=\Delta X\\ &m(\Delta\dot{v}+u_*\Delta r-w_*\Delta p)=\Delta Y\\ &m(\Delta\dot{w}-u_*\Delta q)=\Delta Z\\ &I_x\Delta\dot{p}-I_{zx}\Delta\dot{r}=\Delta K\\ &I_y\Delta\dot{q}=\Delta M\\ &I_z\Delta\dot{r}-I_{zx}\Delta\dot{p}=\Delta N \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

力(矩)小扰动表达式为

$$\Delta\boldsymbol{F}=\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{G}}+\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}+\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{H}}+\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{T}}$$

式中,$\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{G}}$,$\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}$,$\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{H}}$ 和 $\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{T}}$ 分别为重力、浮力、水动力和动力的小扰动增量. 暂不考虑动力增量的影响. 重力和浮力的小扰动增量之和为

$$\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{G}}+\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{B}}=\begin{bmatrix} -mg\cos\theta_*\Delta\theta+B\cos\theta_*\Delta\theta\\ mg\cos\theta_*\Delta\phi-B\cos\theta_*\Delta\theta\\ -mg\sin\theta_*\Delta\theta+B\sin\theta_*\Delta\theta\\ B\cos\theta_*z_{\mathrm{B}}\Delta\phi\\ B(\cos\theta_*z_{\mathrm{B}}-\sin\theta_*x_{\mathrm{B}})\Delta\theta-B\cos\theta_*x_{\mathrm{B}}\Delta\phi \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中,g 为重力加速度;B 为浮力;x_{B} 和 z_{B} 分别表示浮心的 x 坐标和 z 坐标.

流体动力为潜航器运动参数的函数,有

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{H}}=f(u,v,w,p,q,r,\dot{u},\dot{v},\dot{w},\dot{p},\dot{q},\dot{r}) \tag{7}$$

假设纵向水动力(x 轴受力,z 轴受力以及俯仰力矩)只与纵向运动参数有关,横航向水动力(y 轴受力,滚转力矩以及偏航力矩)只与横航向运动参数有关. 具有 xz 对称面的外形的附加质量矩阵中所有下标之和为奇数的项都为 0,即纵向运动参数不会产生横航向的惯性力(矩),横航向运动参数亦不会产生纵向惯性力(矩). 对于左右对称的潜航器,当纵向扰动出现时,在不太大的迎角范围内,流动的对称性并不破坏,通常不会产生横航向水动力和力矩.

于是纵向水动力的小扰动增量可表示为

$$\Delta X_{\mathrm{H}} = X_u\Delta u + X_w\Delta w + X_q\Delta q + X_{\dot u}\Delta\dot u + X_{\dot w}\Delta\dot w + X_{\dot q}\Delta\dot q$$

$$\Delta Z_{\mathrm{H}} = Z_u\Delta u + Z_w\Delta w + Z_q\Delta q + Z_{\dot u}\Delta\dot u + Z_{\dot w}\Delta\dot w + Z_{\dot q}\Delta\dot q$$

$$\Delta M_{\mathrm{H}} = M_u\Delta u + M_w\Delta w + M_q\Delta q + M_{\dot u}\Delta\dot u + M_{\dot w}\Delta\dot w + M_{\dot q}\Delta\dot q$$

横航向水动力的小扰动增量可表示为

$$\Delta Y_{\mathrm{H}} = Y_v\Delta v + Y_p\Delta p + Y_r\Delta r + Y_{\dot v}\Delta\dot v + Y_{\dot p}\Delta\dot p + Y_{\dot r}\Delta\dot r$$

$$\Delta K_{\mathrm{H}} = K_v\Delta v + K_p\Delta p + K_r\Delta r + K_{\dot v}\Delta\dot v + K_{\dot p}\Delta\dot p + K_{\dot r}\Delta\dot r$$

$$\Delta N_{\mathrm{H}} = N_v\Delta v + N_p\Delta p + N_r\Delta r + N_{\dot v}\Delta\dot v + N_{\dot p}\Delta\dot p + N_{\dot r}\Delta\dot r$$

利用小扰动假设线性化的运动学方程组为

$$\left.\begin{aligned}\Delta q &= \Delta\dot\theta\\ \Delta p &= \Delta\dot\phi - \Delta r\tan\theta_*\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

将重力、浮力和水动力的小扰动增量表达式代入式(5),加上线性化的运动学方程组,得到有 8 个方程的方程组. 将方程组分为纵向和横航向两组. 纵向和横向扰动运动方程组分别为

$$\begin{bmatrix} X_{\dot u}-m & X_{\dot w} & X_{\dot q} & 0\\ Z_{\dot u} & Z_{\dot w}-m & Z_{\dot q} & 0\\ M_{\dot u} & M_{\dot w} & M_{\dot q}-I_y & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot u\\ \Delta\dot w\\ \Delta\dot q\\ \Delta\dot\theta\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_u & X_w & X_q-mw_* & (B-mg)\cos\theta_*\\ Z_u & Z_w & Z_q+mu_* & (B-mg)\sin\theta_*\\ M_u & M_w & M_q & B(\cos\theta_* z_{\mathrm{b}}-\sin\theta_* x_{\mathrm{b}})\\ 0 & 0 & -1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta u\\ \Delta w\\ \Delta q\\ \Delta\theta\end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{\dot v}-m & Y_{\dot p} & Y_{\dot r} & 0\\ K_{\dot v} & K_{\dot p}-I_x & K_{\dot r}+I_{zx} & 0\\ N_{\dot v} & N_{\dot p}+I_{zx} & N_{\dot r}-I_z & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\dot v\\ \Delta\dot p\\ \Delta\dot r\\ \Delta\dot\phi\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_v & Y_p+mw_* & Y_r-mu_* & (mg-B)\cos\theta_*\\ K_v & K_p & K_r & B\cos\theta_* z_b\\ N_v & N_p & N_r & -B\cos\theta_* x_b\\ 0 & -1 & -\tan\theta_* & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta v\\ \Delta p\\ \Delta r\\ \Delta\phi\end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{10}$$

纵向和横航向方程组可表示为

$$\boldsymbol{A}_1\dot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x} = \mathbf{0}$$

即

$$\dot{\boldsymbol{x}} = -\boldsymbol{A}_1^{-1}\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}$$

式中,$\boldsymbol{A}_1$,$\boldsymbol{A}_2$ 和 $\boldsymbol{A}$ 都为系数矩阵. 要判断带翼潜航器的动稳定性,需要计算系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的的特征根.

3 带翼潜航器动稳定性分析

3.1 纵向模态计算结果

带翼潜航器纵向是静不稳定的. 将带翼潜航器的重量分布以及纵向水动力导数数据代入方程组(9),得到纵向方程组系数矩阵的特征根为

$$\lambda_{1,2} = -3.2582 \pm 21.0434\mathrm{i}$$

$$\lambda_{3,4} = -0.0901 \pm 0.2076\mathrm{i}$$

第 1 组共轭复根对应的特征矢量为

$$\begin{bmatrix} -0.0444+0.0252\mathrm{i} & -0.0444-0.0252\mathrm{i}\\ -0.1340+0.1296\mathrm{i} & -0.1340-0.1296\mathrm{i}\\ 0.9801 & 0.9801\\ -0.0070-0.0455\mathrm{i} & -0.0070+0.0455\mathrm{i}\end{bmatrix}$$

第 2 组共轭复根对应的特征矢量为

$$\begin{bmatrix} 0.9958 & 0.9958\\ 0.0104+0.0010\mathrm{i} & 0.0104-0.0010\mathrm{i}\\ -0.0173-0.0102\mathrm{i} & -0.0173+0.0102\mathrm{i}\\ -0.0109+0.0880\mathrm{i} & -0.0109-0.0880\mathrm{i}\end{bmatrix}$$

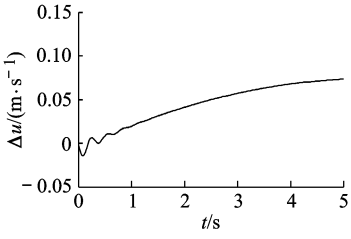
纵向方程组特征根实部符号为负,表明带翼潜航器纵向是动稳定的. 带翼潜航器纵向扰动运动具有两个模态,其中一个为周期短、衰减快的模态,另一个为周期长、衰减慢的模态. 由特征矢量计算结果可见,周期短的模态中俯仰角速度和迎角量级较大,纵向速度和俯仰角量级较小. 周期长的模态中纵向速度的量级较大,其次是俯仰角,迎角和俯仰角速度的量级较小.

3.2　纵向受扰后的响应

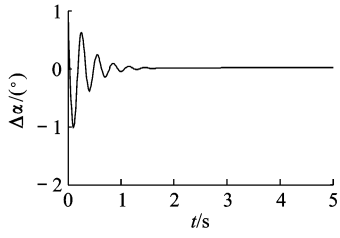
在纵向施加一个小扰动:

$$[\Delta u \quad \Delta\alpha \quad \Delta q \quad \Delta\theta] = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]'$$

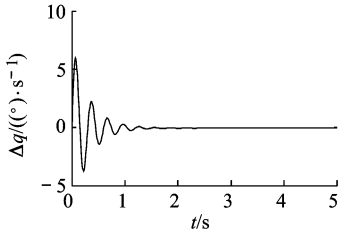
在 5 s 内纵向运动参数的响应如图 3 所示. 迎角和俯仰角速度在 2 s 内就基本恢复到未受扰动的原平衡状态,结果见图 3.



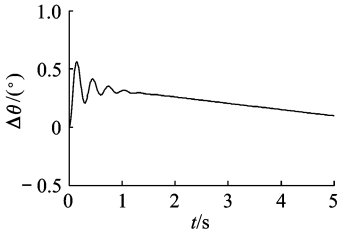
a　纵向速度



b　迎角



c　俯仰角速度



d　俯仰角

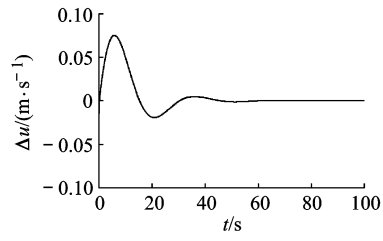
图 3　受扰后 5 s 内纵向运动参数的响应

在 100 s 内纵向运动参数的响应如图 4 所示. 在较长时间尺度内主要是速度和俯仰角的变化.

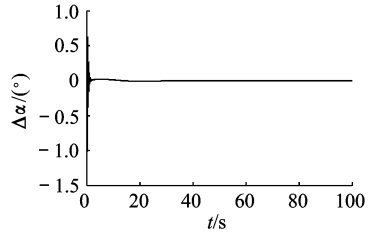
3.3　纵向简化方程组

周期短的模态纵向速度和俯仰角量级较小,忽略纵向力和俯仰角方程,得到主要反映周期短的模态特性的近似方程:

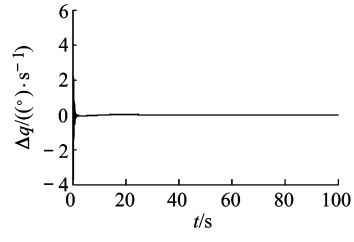
$$\begin{bmatrix} Z_{\dot w}-m & Z_{\dot q} \\ M_{\dot w} & M_{\dot q}-I_y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta\dot w \\ \Delta\dot q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_w & Z_q+mu_* \\ M_w & M_q \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta w \\ \Delta q \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{11}$$



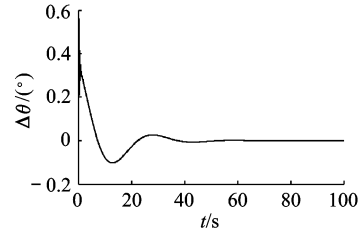
a　纵向速度



b　迎角



c　俯仰角速度



d　俯仰角

图 4　受扰后 100 s 内纵向运动参数的响应

式(11)的特征根为 $\lambda = -3.3138 \pm 21.1144\mathrm{i}$,与未简化方程组计算得到的特征根接近.

式(11)可改写为

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot w \\ \Delta\dot q \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}\begin{bmatrix} \Delta w \\ \Delta q \end{bmatrix} \tag{12}$$

系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为

$$\boldsymbol{A} = -\begin{bmatrix} Z_{\dot w}-m & Z_{\dot q} \\ M_{\dot w} & M_{\dot q}-I_y \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} Z_w & Z_q+mu_* \\ M_w & M_q \end{bmatrix} \tag{13}$$

根据稳定性判据,周期短的模态稳定的条件为

$$\begin{cases} [(M_{\dot q}-I_y)Z_w - Z_{\dot q}M_w + \\ (Z_{\dot w}-m)M_q - M_{\dot w}(Z_q+mu_*)]/ \\ \quad [(Z_{\dot w}-m)(M_{\dot q}-I_y) - Z_{\dot q}M_{\dot w}] > 0 \\ [(Z_{\dot w}-m)(M_{\dot q}-I_y) - Z_{\dot q}M_{\dot w}]\cdot \\ \quad [Z_wM_q - (Z_q+mu_*)M_w] > 0 \end{cases}$$

在周期长的模态中,迎角很快就恢复到未受扰动前的平衡状态. 因此周期长的模态的简化可去掉法向力方程,保留切向力和俯仰力矩方程,并认为 $\Delta w=0$,得到的简化方程组为

$$\begin{bmatrix} X_{\dot{u}}-m & X_q-mw_* \\ M_{\dot{u}} & M_q \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta\dot{u} \\ \Delta\dot{\theta} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} X_u & (B-mg)\cos\theta_* \\ M_u & B(\cos\theta_* z_b-\sin\theta_* x_b) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta\theta \end{bmatrix}=\mathbf{0}$$

利用此简化方程计算得到的短周期特征根为 $\lambda=-0.0836\pm0.2254\mathrm{i}$,与未简化方程组计算结果接近.

3.4 横航向模态计算结果

带翼潜航器的横向和航向都是静稳定的. 将带翼潜航器的重量分布以及横航向水动力导数数据代入方程组(10),得到横航向方程组系数矩阵的特征根为

$$\lambda_{1,2}=-1.5790\pm5.2457\mathrm{i}$$

$$\lambda_3=-1.0232,\ \lambda_4=0.0004$$

特征根对应的特征矢量矩阵为

$$\begin{bmatrix} 0.38-0.81\mathrm{i} & 0.38+0..81\mathrm{i} & 25.74 & -34.74 \\ 9.41-58.18\mathrm{i} & 9.41+58.18\mathrm{i} & 8.92 & 00.04 \\ 80.06 & 80.06 & 95.82 & -24.84 \\ -10.66-1.42\mathrm{i} & -10.66+1.42\mathrm{i} & -8.72 & 90.42 \end{bmatrix}\times10^{-2}$$

带翼潜航器横航向受扰运动的特征根包括一组实部为负的共轭根,一个较大的负实根以及一个很小的正实根.

带翼潜航器对应共轭复根的模态 3 个角变量中 β 比 ϕ 和 ψ 小 2 个量级,影响水动力的 3 个变量中 β 比 p 和 r 小 2 个量级. 此模态主要由滚转和偏航运动组成.

带翼潜航器对应负实根的模态 3 个角变量的比值为 $\beta:\phi:\psi=-0.2794:0.0931:1$,影响水动力的 3 个变量的比值为 $\beta:p:r=0.2686:0.0931:1$. 在角变量中滚转角的量级较小,在影响水动力的变量中同样是滚转角速度的量级较小. 但在这个模态中滚转运动的影响并不能忽略.

带翼潜航器对应正实根的模态 3 个角变量的比值为 $\beta:\phi:\psi=0.0006:-0.0015:1$,影响水动力的 3 个变量的比值为 $\beta:p:r=1:-0.0012:0.715$. 这一模态以偏航运动为主,滚转和侧滑都接近 0. 影响水动力的变量中量级最大是侧滑角 β. 但 β 与偏航角相比小得可以忽略,因此这一模态的水动力的影响较小.

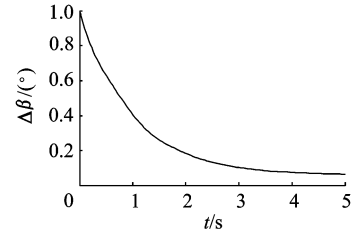
3.5 横航向受扰后的响应

在横航向施加一个小扰动:

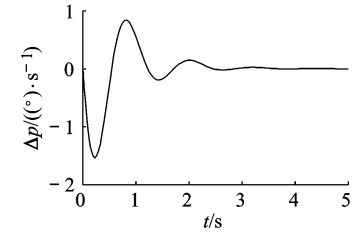
$$[\Delta\beta\quad\Delta p\quad\Delta r\quad\Delta\phi]=[1\quad0\quad0\quad0]'$$

在 5 s 内横航向运动参数的响应如图 5 所示. 滚转角速度和偏航角速度在 5 s 内就基本恢复到未受扰动的原平衡状态. 由于在对应共轭复根的模态中侧滑角 β 的量级较其他运动参数小 2 个量级,因此侧滑角 β 的变化并没体现除这个模态振荡收敛的特点,而是呈现出单调变化的趋势.

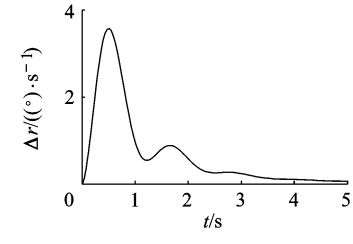
在 100 s 内横航向运动参数的响应如图 6 所示. 在较长时间尺度内体现出对应很小的正实根的缓慢发散模态的影响,侧滑角和滚转角并未恢复到受扰前的平衡状态.



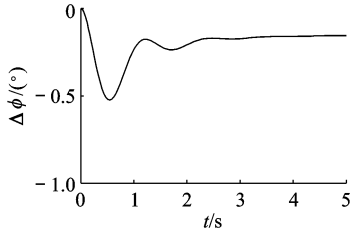
a 侧滑角



b 滚转角速度

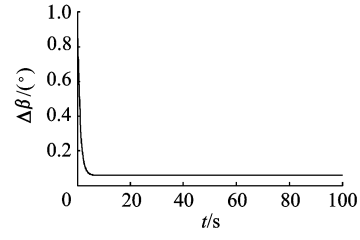


c 偏航角速度

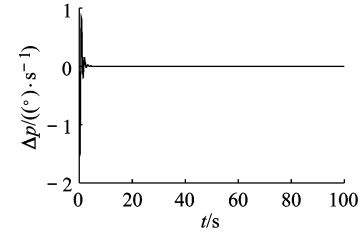


d 滚转角

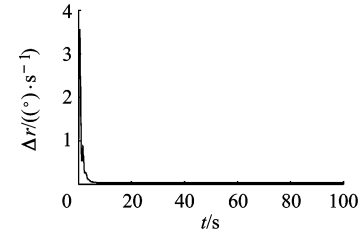
图 5 5 s 内横航向运动参数的响应



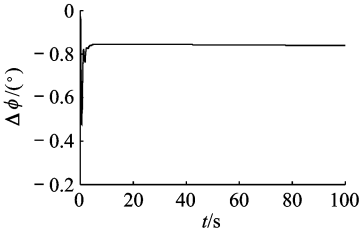
a　侧滑角



b　滚转角速度



c　偏航角速度



d　滚转角

图 6　100 s 内横航向运动参数的响应

3.6　横航向简化方程组

根据特征矢量计算结果,带翼潜航器对应共轭复根的模态中 β 的量级较小,因此可去掉侧力方程,得到的简化方程组为

$$\begin{bmatrix} K_{\dot{p}} - I_x & K_{\dot{r}} + I_{zx} \\ N_{\dot{v}} & N_{\dot{r}} - I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\dot{p} \\ \Delta\dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_p & K_r \\ N_v & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta r \end{bmatrix} = 0$$

利用此简化方程得到的特征根为 $\lambda_{1,2} = -1.2270 \pm 4.9826\mathrm{i}$. 虽然 β 的量级较小,但并未小到可完全忽略的程度,因此简化方程计算结果与精确结果存在一定误差.

带翼潜航器对应负实根的模态虽然滚转角和滚转角速度的量级较小,但同样并未小到可以忽略的程度,因此去掉滚转运动方程的简化方程特征根计算结果与精确结果存在明显误差. 带翼潜航器对应较小正实根的模态理论上可以利用特征根很小的条件,只保留特征方程中阶次最低的两项进行简化,但由于系数矩阵的表达式较为复杂,推导简化方程的表达式较为困难.

4　结 束 语

带翼潜航器的升沉、滚转和俯仰动导数中粘性力成分以及部件干扰的影响较大,不能将加速度导数简化为附加质量系数. 研究的带翼潜航器纵向是静不稳定的,但是动稳定的. 横航向是静稳定的,横航向中有一个模态缓慢发散,比较容易控制. 提出的动力学模型及动稳定性分析方法可用于带翼潜航器的稳定性分析以及运动控制系统的设计.

参考文献 (References)

[1] 李晔,刘建成,徐玉如. 带翼水下机器人运动控制的动力学建模[J]. 机器人,2005,27(2):128-131
Li Ye, Liu Jiancheng, Xu Yuru. Dynamics modeling for motion control of underwater craft with wing[J]. Robot,2005,27(2):128-131(in Chinese)

[2] 边宇枢,高志慧,贠超. 6 自由度水下机器人动力学分析与运动控制[J]. 机械工程学报,2007,43(7):87-92
Bian Yushu, Gao Zhihui, Yun Chao. Dynamic analysis and motion control of 6-DOF underwater robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2007,43(7):87-92(in Chinese)

[3] Graver J G. Underwater gliders: dynamics, control and design [D]. Princeton: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University,2005

[4] B 埃特肯. 大气飞行动力学[M]. 何植岱译. 北京:科学出版社,1979:278-286
B Etkin. Dynamics of atmospheric flight[M]. Translated by He Zhidai. Beijing: Science Press,1979:278-286(in Chinese)

[5] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京:国防工业出版社,1995:11-14
Shi Shengda. Submarine maneuverability[M]. Beijing: National Defense Industry Press,1995:11-14 (in Chinese)

[6] 李刚,段文洋,郭志彬. 复杂构型潜器附加质量的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(7):1145-1148
Li Gang, Duan Wenyang, Guo Zhibin. Added mass of submerged vehicles with complex shape[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2010,42(7):1145-1148(in Chinese)

[7] 方振平,陈万春,张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:223-224
Fang Zhenping, Chen Wanchun, Zhang Shuguang. Aircraft flight dynamics[M]. Beijing: Behang University Press,2005:223-224 (in Chinese)

(编　辑:李　晶)