

非匹配条件下的非线性潜艇垂直面系统 L₂ 控制器设计

吴浩溶 胡大斌 林雄伟 肖剑波
(海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033)

摘 要 研究非匹配条件的非线性潜艇垂直面系统的信号跟踪控制问题。通过构造恰当的输入、输出及状态变量,将该问题转换为干扰抑制控制问题。基于相对阶的概念,给出了多输入多输出非线性系统的标准型及链式结构。以干扰抑制控制问题的定义为基础,提出并证明了不依赖于匹配条件的非线性链式结构系统的 L₂ 控制器设计定理;并以此设计了某型潜艇垂直面非线性系统的 L₂ 控制器。通过仿真验证了该控制器具有较好的动态性能和鲁棒性。

关键词 非线性系统 信号跟踪 非匹配条件 潜艇运动模型 L₂ 控制

中图分类号 U675.73 TP29; **文献标志码** A

潜艇的空间运动具有强耦合及强非线性等特点,同时还是多输入多输出模型。传统的 PID 控制器在设计针对多输入多输出模型的控制时较为困难;同时,各种线性控制器,如线性 H_∞ 控制器在设计过程中难以针对潜艇的强耦合性及强非线性进行设计。L₂ 控制器适用于非线性多输入多输出系统,其目标是使系统具有小于或等于某一数值的 L₂ 增益^[1]。现以潜艇的垂直面运动模型为例,对其进行分析,将其变换为标准型,设计适用于潜艇深度控制的 L₂ 控制器。

1 潜艇运动模型分析

潜艇的六自由度方程组参见文献[2]。该方程组描述了复杂的耦合非线性运动,但在众多的水动力系数中,只有少数几项起主导作用,因而在研究其模型时,忽略其中的次要项,简化模型的复杂度。因简化导致的模型误差由控制器的鲁棒性修正。

潜艇的深度控制针对的是潜艇的垂直面运动,因而忽略六自由度方程组中的横倾及水平面运动

参数,得简化后的垂直面运动方程^[3-5]

$$\begin{aligned} m(\dot{w} + uq) &= r_4(Z'_q \dot{q}) + \\ & r_3(Z'_w \dot{w} + Z'_q uq + Z'_{w|q}|w|q|) + \\ & r_2(Z'_0 u^2 + Z'_w uw + Z'_{w|w}|w|w| + \\ & Z'_{\delta_b} u^2 \delta_b + Z'_{\delta_s} u^2 \delta_s); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{yy} \dot{q} &= r_5(M'_q \dot{q} + M'_{q|q}|q|q|) + \\ & r_4(M'_w \dot{w} + M'_q uq + M'_{|w|q}|w|q|) + \\ & r_3(M'_0 u^2 + M'_w uw + M'_{w|w}|w|w| + \\ & M'_{\delta_b} u^2 \delta_b + M'_{\delta_s} u^2 \delta_s) \end{aligned}$$

可解得:

$$\begin{cases} \dot{w} = f_w + W_8 \delta_b + W_9 \delta_s \\ \dot{q} = f_q + Q_8 \delta_b + Q_9 \delta_s \\ f_w = W_1 q + W_2 w + W_3 q|q| + W_4 w|w| + \\ \quad W_5 |w|q + W_6 w|q| + W_7 \\ f_q = Q_1 q + Q_2 w + Q_3 q|q| + Q_4 w|w| + \\ \quad Q_5 |w|q + Q_6 w|q| + Q_7 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, m 为潜艇质量, w 为垂向速度, u 为纵向速度, q 为纵倾角速度, δ_b 为舳水平舵, δ_s 为艉水平舵,带下标的 r 、 Z 、 M 、 W 、 Q 为系数。

同时有辅助方程组:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = q \\ \dot{\zeta} = -u \sin \theta + w \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

2013 年 8 月 2 日收到,7 月 18 日修改
国家自然科学基金
项目(51179196)资助
第一作者简介:吴浩溶(1988—),男,硕士研究生,研究方向为舰船
机舱自动化与仿真技术,djmedle@163.com,15623487568。

式(2)中 ζ 为深度, θ 为纵倾, 同时设 ζ_0 为指令深度, 为 θ_0 指令纵倾。

考察仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1(x)\omega + g_2(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 x 为状态向量, ω 为干扰向量, u 为控制向量, y 为输出向量。针对潜艇垂直面运动系统, 取状态向量为 $x = [\zeta \ \theta \ \zeta_0 \ \theta_0 \ w \ q]^T$, 控制向量为 $u = \delta = [\delta_b \ \delta_s]^T$ 。潜艇深度控制是一个信号跟踪

控制问题, 通过选取干扰向量为 $\begin{bmatrix} \dot{\zeta}_0 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix}$, 输出向量为

$$\begin{bmatrix} \Delta_\zeta \\ \Delta_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_0 - \zeta \\ \theta_0 - \theta \end{bmatrix}, \text{ 则信号跟踪控制问题可以转化为}$$

干扰抑制控制问题。

定义 1 针对如式(3)的仿射型非线性系统, 给定一正数 γ , 非线性 L_2 增益干扰抑制控制问题是设计一适当的控制器 u 使

$$\int_0^T \|y\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|\omega\|^2 dt + V(x_0), \quad \forall \omega \in L_2[0, T], T \geq 0 \quad (4)$$

式(4)称为 γ 耗散不等式^[6]。其中, x_0 是系统状态初值, $V(\bullet)$ 是待定的系统能量存储函数, $\|\bullet\|$ 是 Euclidean 范数。

当存储函数 $V(x)$ 光滑可微时, 其等价于其微分形式

$$\dot{V}(x) |_{(1)} \leq \frac{1}{2}(\gamma^2 \|\omega\|^2 - \|z\|^2), \quad \forall T \geq 0 \quad (5)$$

针对潜艇垂直面运动系统, 根据状态向量、控制向量、干扰向量及输出向量的选取, 有

$$f(x) = [-u \sin \theta + w \cos \theta \ q \ 0 \ 0 \ f_w \ f_q]^T \quad (6)$$

$$g_1(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & W_8 & Q_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_9 & Q_9 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} \zeta_0 - \zeta \\ \theta_0 - \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

易知控制输入通道和干扰输入通道不满足匹配

条件, 即不存在适当的函数矩阵 $\hat{g}_1(x)$, 使 $g_1(x) = g_2(x)\hat{g}_1(x)$ 成立, 因而干扰输入的影响无法通过增加控制输入的增益来抵消, 不能直接设计 L_2 控制器。

2 潜艇垂直面运动系统的标准型

为设计潜艇深度控制 L_2 控制器, 需建立潜艇垂直面运动系统的标准型及其链式结构。首先, 引入相对阶、标准型及链式结构的定义。

定义 2 如果在 $x = x_0$ 的某一邻域内有

$$\begin{cases} L_{g_2} L_f^k h(x) = 0, \forall 0 \leq k < r-1 \\ L_{g_2} L_f^{r-1} h(x) \neq 0. \end{cases}$$

则称系统式(3)在 $x = x_0$ 具有相对阶 r , 其中 $L_f^k h(x) = L_f[L_f^{k-1} h(x)]; L_f^0 h(x) = h(x)$ 。

定义 3 若系统(3)具有相对阶 $r(r < n)$, n 为系统的维数且存在 $n-r$ 维向量函数 $t(x) = [t_1(x) \ t_2(x) \ \cdots \ t_{n-r}(x)]^T$, 使 $L_{g_2} t_i(x) = 0$ 成立, 则系统式(3)与系统

$$\begin{cases} \dot{z} = \hat{f}(z, \hat{y}_1, \dots, \hat{y}_r) + \hat{g}_0 \omega \\ \dot{\hat{y}}_1 = \hat{y}_2 + \hat{g}_1 \omega \\ \vdots \\ \dot{\hat{y}}_r = \hat{v} + \hat{g}_r \omega \end{cases} \quad (10)$$

反馈等价。系统(10)就称为系统式(3)的标准型。其结构图如图 1 所示。

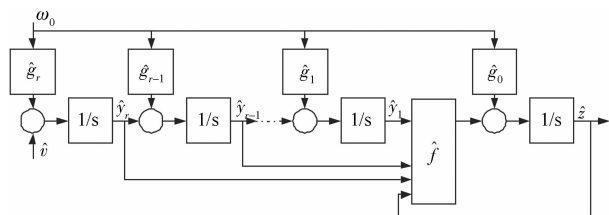


图 1 非线性标准型系统

定义 4 若系统(3)具有相对阶 $r(r < n)$, n 为系统的维数且存在 $n-r$ 维向量函数 $t(x) = [t_1(x) \ t_2(x) \ \cdots \ t_{n-r}(x)]^T$, 使

$$\begin{aligned} & \frac{\partial t_i}{\partial x} [g_2(x) \ ad_f g_2(x) \ ad_f^2 g_2(x) \ \cdots \\ & ad_f^{r-1} g_2(x)] = 0 \end{aligned}$$

成立, 则系统(3)与系统

$$\begin{cases} \dot{z} = \tilde{f}(z, y_1) + \tilde{g}_0 \omega \\ \dot{y}_1 = y_2 + \tilde{g}_1 \omega \\ \vdots \\ \dot{y}_r = v + \tilde{g}_r \omega \end{cases} \quad (11)$$

反馈等价。系统(11)就称为系统(3)的链式结构。其结构图如图2所示。

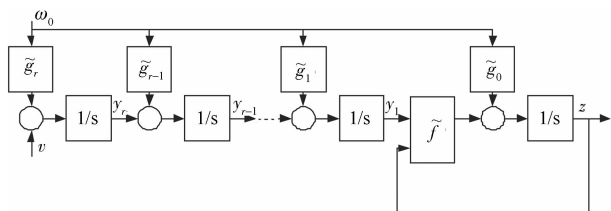


图2 非线性链式系统

考虑上一节得到的潜艇垂直面运动系统,易得:

$$L_{g_2} L_f^0 h(x) = L_{g_2} h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} g_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$L_{g_2} L_f^1 h(x) = L_{g_2} \left[\frac{\partial h}{\partial x} \cdot f \right] =$$

$$\begin{aligned} & L_{g_2} \begin{bmatrix} u \sin \theta - w \cos \theta \\ -q \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} -W_8 \cos \theta & -W_9 \cos \theta \\ -Q_8 & -Q_9 \end{bmatrix} \neq 0. \end{aligned}$$

因此潜艇垂直面运动系统的相对阶为2。

选取

$$\begin{cases} y_1 = y = h(x) = \begin{bmatrix} \zeta_0 - \zeta \\ \theta_0 - \theta \end{bmatrix} \\ y_2 = \dot{y} = L_f h(x) = \begin{bmatrix} u \sin \theta - w \cos \theta \\ -q \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

及2维的函数 $t(x)$ 使

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} z \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \varphi(x) = \begin{bmatrix} t(x) \\ h(x) \\ L_f h(x) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} t(x) \\ \zeta_0 - \zeta \\ \theta_0 - \theta \\ u \sin \theta - w \cos \theta \\ -q \end{bmatrix} \quad \text{为微分同胚变换,则在变换}$$

$\varphi(x)$ 下,原系统变换为

$$\begin{cases} \dot{z} = \tilde{f} + \tilde{g}_0 \omega_0 + \tilde{g}_\delta \delta = \\ L_f t(x) + L_{g_1} t(x) \omega + L_{g_2} t(x) \delta \\ \dot{y}_1 = y_2 + \tilde{g}_1 \omega \\ \dot{y}_2 = a(z, y_1, y_2) + \tilde{g}_2 \omega + c(z, y_1, y_2) \delta. \end{cases}$$

根据标准型的定义,寻找使 $\tilde{g}_2(z, y_1, y_2) =$

$L_{g_2} t(x) = 0$ 的 $t(x)$ 。设 $\frac{\partial t}{\partial x} =$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} & \sigma_{15} & \sigma_{16} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} & \sigma_{25} & \sigma_{26} \end{bmatrix}, \text{ 则}$$

$$L_{g_2} t(x) =$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{15} W_8 + \sigma_{16} Q_8 & \sigma_{15} W_9 + \sigma_{16} Q_9 \\ \sigma_{25} W_8 + \sigma_{26} Q_8 & \sigma_{25} W_9 + \sigma_{26} Q_9 \end{bmatrix} = 0.$$

$$\text{得 } \sigma_{15} = \sigma_{16} = \sigma_{25} = \sigma_{26} = 0.$$

在经过标准型变换,再变换至链式结构后,可

发现,当取 $t(x) = \begin{bmatrix} \zeta_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}$ 时,系统直接变换为链式结

构,为简练起见,中间的标准型变换不进行表述。由

$$\begin{bmatrix} z \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_0 \\ \theta_0 \\ \zeta_0 - \zeta \\ \theta_0 - \theta \\ u \sin \theta - w \cos \theta \\ -q \end{bmatrix} \quad (13)$$

得

$$\begin{bmatrix} \zeta \\ \theta \\ \zeta_0 \\ \theta_0 \\ w \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1 \ 0](z - y_1) \\ [0 \ 1](z - y_1) \\ [1 \ 0]z \\ [0 \ 1]z \\ \frac{u \sin [0 \ 1](z - y_1) - [1 \ 0]y_2}{\cos [0 \ 1](z - y_1)} \\ -[0 \ 1]y_2 \end{bmatrix}. \quad \text{在此变}$$

换下,原系统变换为

$$\begin{cases} \dot{z} = 0 + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \omega \\ \dot{y}_1 = y_2 + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \omega \\ \dot{y}_2 = [-[0 \quad 1]y_2(ucos[0 \quad 1](z - y_1) + \\ \frac{usin[0 \quad 1](z - y_1) - [1 \quad 0]y_2}{cos[0 \quad 1](z - y_1)} \\ sin[0 \quad 1](z - y_1)) - \tilde{f}_\omega cos[0 \quad 1](z - y_1) - \\ \tilde{f}_q] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \omega + \\ [-W_8 cos[0 \quad 1](z - y_1) \quad -W_9 cos[0 \quad 1](z - y_1)] \delta_0 \\ -Q_8 \quad -Q_9 \end{cases}$$

若令

$$\dot{y}_2 = v + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \omega \quad (14)$$

得系统的链式结构为

$$\begin{cases} \dot{z} = 0 + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \omega \\ \dot{y}_1 = y_2 + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \omega \\ \dot{y}_2 = v + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \omega \\ \tilde{h}(x) = y_1 \end{cases} \quad (15)$$

3 L₂控制器设计

根据 La Salle 不变集原理,为了使闭环系统在反馈控制器作用下在 $x = 0$ 是渐进稳定的,需要系统是零状态可检测的^[7]。

令 $\tilde{h}(x) = y_1 = 0, v = [0 \quad 0]^T, \omega = [0 \quad 0]^T$, 则 $z = y_2 = 0$, 即系统是零状态可检测的。

对于非线性链式系统,有下述定理

定理1 若非线性链式系统(11)是零状态可检测的,且存在函数 $\alpha(x)$ 及 Lyapunov 函数 $V(x)$, 使

$$\frac{\partial V}{\partial x} \begin{bmatrix} f \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{r-1} \\ \alpha \end{bmatrix} \leq -\frac{1}{2} y_1^T y_1。$$

成立,则其 L₂控制器为

$$v = \alpha(x) - \frac{1}{2\gamma^2} \varphi_r^{-1} \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right) \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right)^T \quad (16)$$

式(6)中 φ_i 为 $V(x)$ 对 x_i 的偏导数。

证明 沿系统式(11)的状态轨迹,求 $V(x)$ 对时间的微分,设 $v = \alpha + \beta$, 得

$$\dot{V}(\tilde{x})|_{(13)} = \frac{\partial V}{\partial x} \left(\begin{bmatrix} \tilde{f} \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{r-1} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{g}_0 \\ \tilde{g}_1 \\ \vdots \\ \tilde{g}_{r-1} \\ \tilde{g}_r \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ v \end{bmatrix} \right) =$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial \tilde{x}} \begin{bmatrix} \tilde{f} \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{r-1} \\ \alpha \end{bmatrix} + \frac{\partial V}{\partial \tilde{x}} \left(\begin{bmatrix} \tilde{g}_0 \\ \tilde{g}_1 \\ \vdots \\ \tilde{g}_{r-1} \\ \tilde{g}_r \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \beta \end{bmatrix} \right) \leq \\ & -\frac{1}{2} y_1^T y_1 + \frac{1}{2\gamma^2} \frac{\partial V}{\partial x} \begin{bmatrix} \tilde{g}_0 \\ \tilde{g}_1 \\ \vdots \\ \tilde{g}_{r-1} \\ \tilde{g}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{g}_0 \\ \tilde{g}_1 \\ \vdots \\ \tilde{g}_{r-1} \\ \tilde{g}_r \end{bmatrix}^T \frac{\partial^T V}{\partial x} - \frac{1}{2\gamma^2} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left\| \begin{bmatrix} \tilde{g}_0 \\ \tilde{g}_1 \\ \vdots \\ \tilde{g}_{r-1} \\ \tilde{g}_r \end{bmatrix}^T \frac{\partial^T V}{\partial x} - \gamma^2 \omega \right\|^2 + \frac{\partial V}{\partial x} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \beta \end{bmatrix} + \frac{\gamma^2}{2} \omega^T \omega = \\ & -\frac{1}{2} y_1^T y_1 + \frac{1}{2\gamma^2} \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right) \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right)^T - \frac{1}{2\gamma^2} \\ & \left\| \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right)^T - \gamma^2 \omega \right\|^2 + \varphi_r \beta + \frac{\gamma^2}{2} \omega^T \omega \leq \\ & -\frac{1}{2} h^T h + \frac{\gamma^2}{2} \omega^T \omega + [\varphi_r \beta + \frac{1}{2\gamma^2} \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right) \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right)^T]。 \end{aligned}$$

因此,当 $\beta = -\varphi_r^{-1} \frac{1}{2\gamma^2} \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right) \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right)^T$

时, $V(x)$ 满足式耗散不等式。根据 La Salle 不变集原理, 当 $\omega = 0$ 时, 由零状态可检测条件及耗散不等式, 可得 $x = 0$ 的渐进稳定性。

故

$$v = \alpha(x) - \frac{1}{2\gamma^2} \varphi_r^{-1} \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right) \left(\sum_{i=0}^r \varphi_i g_i \right)^T$$

是系统(11)的 L_2 控制器。证毕。

将潜艇垂直面运动系统标准型带入上述定理,

$$\text{取 } V(x) = \frac{z^2 + y_1^2 + y_2^2}{2}, \text{ 令 } z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, y_1 = \begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{12} \end{bmatrix},$$

$$y_2 = \begin{bmatrix} y_{21} \\ y_{22} \end{bmatrix}, \text{ 得 } L_2 \text{ 控制器为}$$

$$v = \begin{bmatrix} - \left(\frac{y_{11}^2}{2y_{21}} + y_{11} + \frac{(z_1 + y_{11})^2 + (z_2 + y_{12})^2}{2\gamma^2 y_{21}} \right) \\ - \left(\frac{y_{12}^2}{2y_{22}} + y_{12} + \frac{(z_1 + y_{11})^2 + (z_2 + y_{12})^2}{2\gamma^2 y_{22}} \right) \end{bmatrix}。$$

再由式(13)、式(14)得潜艇垂直面运动系统的 L_2 控制器。

$$\delta = - \begin{bmatrix} -W_8 \cos \theta & -W_9 \cos \theta \\ -Q_8 & -Q_9 \end{bmatrix}^{-1} \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{f_{db}}{2\gamma^2(usin\theta - wcos\theta)} + uqcos\theta + wqsine\theta - f_wcos\theta \\ \frac{f_{ds}}{-2\gamma^2q} - f_q \end{bmatrix}。$$

其中

$$\begin{aligned} f_{db} &= \gamma^2(\zeta_0 - \zeta)2 + (\zeta_0 - \zeta)2 + (2\theta_0 - \theta)^2 + \\ &\quad 2\gamma^2(usin\theta - wcos\theta)(\zeta_0 - \zeta); \\ f_{ds} &= \gamma^2(\theta_0 - \theta)^2 + (2\zeta_0 - \zeta)^2 + \\ &\quad (2\theta_0 - \theta)2 - 2\gamma^2q(\theta_0 - \theta)。 \end{aligned}$$

4 仿真分析

在 Simulink 中, 建立潜艇的六自由度模型, 分别加入 PID 控制器、线性 H_∞ 控制器和 L_2 控制器进行调控仿真。在前 300 s 时, 输入信号为 100 m, 而后输入信号为 20 m, 仿真对比如图 3 所示。

从图中可见, 在初始深度为 20 m, 指令深度为 100 m 的条件下, L_2 控制器能够完成系统的信号跟踪任务。与 PID 控制器和线性 H_∞ 控制器相比, 在

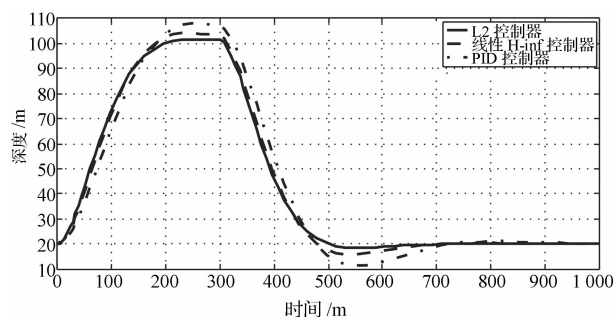


图3 仿真结果

L_2 控制器的调控下, 系统的动态响应好, 其超调量相对于其他两种控制器降低了 3% ~ 8%。

为验证控制器的鲁棒性, 向六自由度模型引入持续的外部随机信号干扰, 并用 L_2 控制器进行调控仿真。仿真结果如图 4。

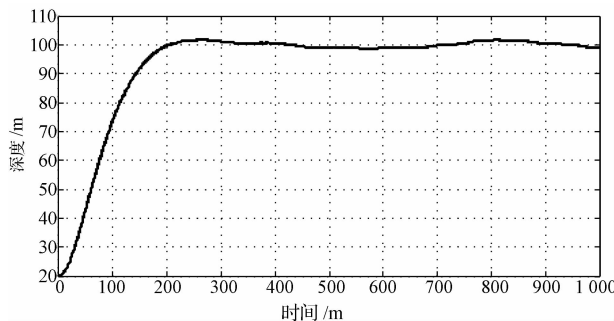


图4 仿真结果

从图中可以看出, 当向系统模型引入外部干扰时, L_2 控制器能够正确的保持模型的深度, 说明 L_2 控制器具有良好的鲁棒性。

L_2 控制器之所以具有较好的动态性能和鲁棒性能, 是因为 L_2 控制器在设计过程中未对垂直面运动系统做近似线性化处理, 完整地保留了系统的非线性特性, 在解算控制信号的过程中充分地考虑了系统的非线性项。

5 结语

从潜艇的垂直面运动模型出发, 经过坐标变换, 将一个非标准的、不满足匹配条件的系统变换为一个链式结构的、满足匹配条件的系统, 而后提出并证明了不依赖于匹配条件的非线性链式结构系统的 L_2 控制器设计定理, 利用该定理设计了潜艇垂直面运动模型的 L_2 控制器。经过仿真验证, 可以

看出该控制器在控制效果上优于传统的PID控制器和线性 H_∞ 控制器,且具备良好的鲁棒性。该控制器设计定理不依赖匹配条件,适用范围广,可以推广到如卫星姿态控制等非线性系统。

参 考 文 献

1 侯晓丽. 非线性时滞系统鲁棒 L_2 控制器设计. 微计算机信息 (测控自动化),2009;7(1):60—62
2 施生达. 潜艇操纵性. 北京:国防工业出版社,1995:45—50

3 游江,赵国良,罗耀华,等. 深潜艇推进电动机的 H_∞ 控制研究. 船舶工程,2006;28(6):12—17
4 赵国良,季鲁慧. 潜艇空间运动的模型和仿真. 船舶工程,1999(4):23—31
5 杨冬成. 潜艇空间运动的控制问题研究. 沈阳,东北大学,2009
6 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用. 北京:清华大学出版社,2008:47—130
7 Wang K W, Chung C Y, Tse C T, *et al.* Multimachine eigenvalue sensitivities of power system parameters. IEEE Transactions on Power System, 2000;15(2):741—747

Design of L_2 Control for Nonlinear Submarine Vertical System Under Mismatched Conditions

WU Hao-rong, HU Da-bin, LIN Xiong-wei, XIAO Jian-bo

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, P. R. China)

[Abstract] The signal tracking control problem of the nonlinear submarine vertical system under mismatched conditions is addressed. By constructing proper input, output, and state variable, the problem is converted to interference suppression control problem. By introducing the canonical form and the chain structure for nonlinear multi-input multi-output system based on the relative degree concept, the theorem of nonlinear chain structure system L_2 controller independent of matched conditions is presented and proven. A L_2 controller for a nonlinear submarine vertical system is designed based on the theorem. The simulation shows that the L_2 controller has good performance in dynamic properties and robustness.

[Key words] nonlinear systems signal tracking mismatched conditions submarine motion model
 L_2 control