

鲁棒自适应滑模虚拟执行器设计

付明玉, 宁继鹏[†], 魏玉石, 孙行衍

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了解决具有不确定性的非线性系统发生执行器故障后的安全运行问题, 针对未建模动态、外界扰动和参数不确定等各种不确定性的综合影响, 提出了一种鲁棒自适应滑模虚拟执行器控制重构策略. 该方法利用滑模控制具有鲁棒性的特点消除不确定性的影响, 采用参数自适应方法使得无须已知不确定项的上界, 同时具有虚拟执行器不改变标称控制器结构和参数的特点. 采用李雅普诺夫稳定性理论证明了闭环系统的稳定性和鲁棒性. 通过动力定位船仿真验证了该方法的有效性.

关键词: 非线性系统; 不确定性; 鲁棒性; 自适应; 滑模控制; 虚拟执行器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of virtual actuator with robust adaptive sliding mode

FU Ming-yu, NING Ji-peng[†], WEI Yu-shi, SUN Xing-yan

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: To maintain the safe operation for uncertain nonlinear systems after actuator failure, we consider the total effect from un-modeled dynamics, external disturbances and uncertain parameters, etc., and propose a virtual actuator control reconfiguration strategy with robust-adaptive sliding-mode. The robustness of sliding mode control is used to eliminate effects of uncertainties. Because of the parameter adaptive method, a priori knowledge of the uncertainty boundary is not required. The structure and parameters of nominal controller are unchanged by means of a virtual actuator. The stability and robustness of the closed-loop system is proved by using the Lyapunov stability theory. The validity of the proposed approach is investigated in the simulation of a dynamic positioning vessel.

Key words: nonlinear systems; uncertainty; robustness; adaptive; sliding mode control; virtual actuator

1 引言(Introduction)

控制系统中的某些部件发生故障后, 容错控制保证系统仍能按期望的性能指标完成控制任务. 容错控制涉及的方法很多, 如伪逆法^[1]、 H_∞ 控制^[2]、闭环特征结构^[3]、最优控制^[4]、模型预测控制^[5]等. 以上方法都需要放弃控制环路中的标称控制器, 但标称控制器是反复调试、测试的结果, 其中包含了关于设备的经验和知识, 放弃标称控制器, 它们也随之放弃. 相比之下, Lunze J 和Steffen T 提出利用“虚拟执行器”控制重构的概念, 标称控制器仍然在重构闭环中作为重构控制器的组成部分工作^[6]; Richter J H 等通过热流体过程验证了虚拟执行器的有效性^[7]; Lunze J 和Steffen T 通过干扰解耦法求解虚拟执行器, 并应用于直升机飞行模型中^[8]. 但已有的成果都是在以线性系统或是将非线性系统在工作点附近线性化为前提下实现的, 而实际系统大多是非线性的, 且某些系统动态是无法精确建模的, 有些系统甚至处于持续的未知非线性扰动之中; 同时, 系统模型中

的某些系统参数是未知的或不确定的, 因此已有线性系统的虚拟执行器重构方法难以满足实际工程需要.

在过去的几十年中, 有许多在不确定系统控制器的设计或改进方面的研究成果. 众所周知的主要非线性鲁棒控制方法有自适应控制^[9]、滑模控制^[10]、自适应与滑模控制的组合^[11]、无源性控制^[12]等. 在满足匹配条件时, 滑模控制的滑动模态与控制对象的参数变化和外界扰动无关, 因此滑模控制系统具有很好的鲁棒性, 同时加上其良好的暂态特性以及快速响应的特点, 使其自然受到各国学者的重视. 但为了保证系统能够达到切换面, 在设计控制律时通常要求不确定性范围已知. 为了克服该缺陷, 文献[13]针对一类不确定非线性系统的扰动估计问题进行了深入研究, 但主要问题仍未解决. 自适应滑模控制是解决参数不确定或时变参数系统控制问题的一种新型控制策略, 利用自适应控制估计动态系统的未知参数, 利用滑模控制克服未建模动

态和外界扰动.

本文以非线性系统为研究对象, 针对部分系统参数不确定以及非线性外界扰动未知的情况, 提出为虚拟执行器控制重构模块加入鲁棒自适应滑模控制的设计方法, 同时设计一种带有积分的滑动模态, 解决不确定非线性系统的控制重构容错问题, 并以某动力定位船为对象仿真验证其容错控制效果.

2 问题描述(Problem description)

本文主要考虑由线性模型加上某个可能非线性、甚至可能是时变的模型不确定性描述的一类动态系统. 考虑的不确定非线性系统如下:

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + Bu(t) + Dd(x, t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (2)$$

$$x(0) = x_0, \quad (3)$$

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $y(t) \in \mathbb{R}^r$ 和 x_0 分别为系统的状态向量、输入向量、输出向量和初始状态向量; $f(x, t)$ 为未知的非线性函数; $d(x, t)$ 为有界的非线性外界扰动向量; B , C 和 D 为已知的输入矩阵、输出矩阵和扰动分布矩阵.

由于系统中不确定性和非线性的存在, 函数 $f(x, t)$ 可表示为

$$f(x, t) = Ax(t) + \Delta f(x, t), \quad (4)$$

式中: A 为适当维数的实常数矩阵, 描述了系统的名义模型, 即忽略了模型不确定性和非线性后得到的系统模型; $\Delta f(x, t)$ 为系统模型中的非线性部分和未知的不确定部分, 反映了模型不确定性的结构. 令所有的非线性和不确定部分以及外界扰动归结为

$$F(x, t) = \Delta f(x, t) + Dd(x, t), \quad (5)$$

则式(1)变为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F(x, t). \quad (6)$$

执行器发生故障的建模是通过改变输入矩阵 B 为 B_f 来实现的. 由此, 执行器故障后的系统为

$$\dot{x}_f(t) = Ax_f(t) + B_f u_f(t) + F(x_f, t), \quad (7)$$

$$y_f(t) = Cx_f(t), \quad (8)$$

$$x_f(0) = x_{f0}, \quad (9)$$

式中: $B_f = BL$, $L = \text{diag}\{l_1, \dots, l_m\}$, 且 l_i 满足 $0 \leq l_i \leq 1, i = 1, \dots, m$. 当 $l_i = 1$ 时, 表示第 i 个执行器工作正常; 当 $l_i = 0$ 时, 表示第 i 个执行器完全失效; 当 $0 < l_i < 1$ 时, 表示第 i 个执行器发生故障.

本文的控制重构策略建立在系统故障模型已知的前提下, 即假定故障诊断已经完成, 且系统进程中包含所有可用的输入和输出信号, 甚至包括标称控制器没有用到的部分, 不同于传统的设计问题, 输入和输出矩阵可以是非满秩的.

3 不确定非线性系统的控制重构(Control reconfiguration of uncertain nonlinear systems)

3.1 虚拟执行器的主要思想(Idea of a virtual actuator)

当系统发生严重故障, 甚至是完全失效时, 系统中标称控制器将不再保证系统的正常运行. 为了保持正常运行, 必须采用不同的控制信号以达到控制任务. 一旦选择了新的控制结构, 就必须找到新的控制器参数, 但是控制器的设计是一个长时间的调试、测试过程, 因此在故障发生后, 无法在线完成重新设计.

虚拟执行器控制重构的主要思想, 是针对执行器故障(甚至完全失效)情况, 在故障到达设备输出前消除故障影响, 在故障设备与标称控制器之间设置合适的模块来重构被控对象, 使得重构后的设备的输出仍然保持正常设备的特征, 而无需进行标称控制器的重新调整和重构. 模块附加到标称控制器上组成重构后的容错控制器. 由于该模块的作用与故障执行器一致, 只是通过其他执行器的控制输入取代该执行器故障造成的影响, 因此该模块称为“虚拟执行器”, 如图1所示.

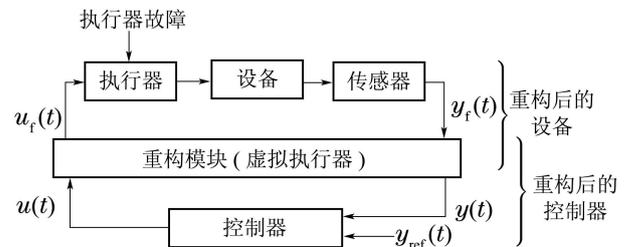


图1 执行器故障控制重构原理

Fig. 1 Principle of control reconfiguration for actuator fault

根据图1可以看出, 虚拟执行器控制重构是通过构造重构模块使得故障设备适应标称控制器, 而不是传统的令控制器去适应故障设备. 故障设备与重构模块一起产生与标称设备相同的(或近似的)输出 $y(t)$. 因此, 标称控制器“认为”设备是与故障前一致的, 因此同故障前一样工作. 而标称控制器与重构模块一起组成了重构后的容错控制器作用于故障系统.

3.2 控制重构目标(Reconfiguration goal)

针对已知系统, 应建立一个重构模块, 其在故障存在的情况下, 仍可恢复控制环路的性能. 如果重构的系统(包括重构模块和故障系统)满足以下两个特性, 则认为该系统的重构是成功的.

- 1) 重构的系统与故障前的系统具有相同的输出, 即 $y_f(t) = y(t)$;
- 2) 重构的系统是可镇定的.

3.3 虚拟执行器重构模块设计(Design of control reconfiguration using virtual actuator)

对于执行器故障,本文利用虚拟执行器作为重构模块进行控制重构以满足上节提出的控制重构目标.根据前文描述的故障前、后不确定非线性系统,又根据重构目标1可得到如下偏差模型:

$$\dot{x}(t) - \dot{x}_f(t) = A(x(t) - x_f(t)) + Bu(t) - B_f u_f(t) + F(x, t) - F(x_f, t), \quad (10)$$

$$y(t) - y_f(t) = C(x(t) - x_f(t)). \quad (11)$$

定义 $x_\Delta(t) = x(t) - x_f(t)$ 表示故障前、后系统状态偏差向量; $y_\Delta(t) = y(t) - y_f(t)$ 表示故障前、后系统输出偏差向量; $F_\Delta(x, x_f, t) = F(x, t) - F(x_f, t)$ 表示故障前、后系统非线性、不确定性以及外界扰动的偏差向量.则可得到虚拟执行器重构模块:

$$\dot{x}_\Delta(t) = Ax_\Delta(t) + Bu(t) - B_f u_f(t) + F_\Delta(x, x_f, t), \quad (12)$$

$$y_\Delta(t) = Cx_\Delta(t), \quad (13)$$

$$x_\Delta(0) = x_{\Delta 0}. \quad (14)$$

3.4 鲁棒自适应滑模控制器设计(Design of robust adaptive sliding mode controller)

为了满足重构目标1,即使得故障系统输出跟踪故障前系统输出($y_\Delta = 0$),并消除系统的非线性、不确定性以及外界扰动的偏差向量,可采用滑模控制方法将系统轨迹保持在滑动面 $s(t) = 0$ 上.设计积分滑动模态如下:

$$s(t) = \lambda(x_\Delta(t) - \int_0^t (A - B_f G)x_\Delta(t) dt), \quad (15)$$

式中: λ 为正常数, G 为状态反馈增益矩阵.

当系统状态处于滑模面上时,有 $s(t) = \dot{s}(t) = 0$,即

$$\dot{x}_\Delta(t) = (A - B_f G)x_\Delta(t). \quad (16)$$

此时,通过合理设计状态反馈增益矩阵 G ,可达到理想的控制效果,且满足重构目标1.采用线性二次型调节器(LQR),最小化如下性能指标可得到矩阵 G :

$$J = \int_0^\infty (x_\Delta^T Q x_\Delta + u_\Delta^T R u_\Delta) dt, \quad (17)$$

式中: $R = R^T > 0$ 和 $Q = Q^T > 0$ 为权值矩阵.最终得到最优解 $u_\Delta(t) = -R^{-1} B_f^T P x_\Delta(t)$,即

$$G = R^{-1} B_f^T P, \quad (18)$$

其中 P 为对称正定矩阵,且满足

$$PA + A^T P - PB_f R^{-1} B_f^T P + Q = 0. \quad (19)$$

在控制器设计中,引入基于系统状态偏差向量 $x_\Delta(t)$ 的反馈控制以镇定系统,并保持标称控制器

$u(t)$ 不变加入到前馈控制中,同时加入消除不确定部分的滑模项,设计的鲁棒滑模控制器如下:

$$u_f(t) = Gx_\Delta(t) + Hu(t) + B_f^+(ks(t) + \rho(x, x_f, t)\text{sgn}(s(t))), \quad (20)$$

式中: H 为前馈矩阵; $\rho(x, x_f, t)$ 为总不确定部分 $F_\Delta(x, x_f, t)$ 的上界.

得到滑模虚拟执行器如下:

$$\dot{x}_\Delta(t) = A_\Delta x_\Delta(t) + B_\Delta u(t) + F_\Delta(x, x_f, t) - ks(t) - \rho(x, x_f, t)\text{sgn}(s(t)), \quad (21)$$

式中: $A_\Delta = A - B_f G$, $B_\Delta = B - B_f H$.

此时,滑模虚拟执行器与标称控制器构成了重构后的控制器(即式(20)),与故障设备构成了重构后的设备(即式(11)和式(13)).

根据前面反馈矩阵 G 的设计,重构目标2是满足的.为了满足重构目标1,下面设计前馈矩阵 H .

利用虚拟执行器的可观测矩阵

$$S_o = \begin{bmatrix} C \\ CA_\Delta \\ \vdots \\ CA_\Delta^{n-1} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

通过解如下最优问题确定矩阵 $H^{[7]}$:

$$H = \underset{H}{\operatorname{argmin}} \|S_o B_f H - S_o B\|, \quad (23)$$

得到解

$$H = (S_o B_f)^+ S_o B. \quad (24)$$

由于该控制器采用指数趋近律,因此通过调整指数趋近律的参数 k 和 ρ ,既可以保证滑动模态到达过程的动态品质(趋近速度从一较大值逐步减小到零,不仅缩短了趋近时间,而且使运动点到达切换面时的速度很小),又可以减弱控制信号的高频抖振(增大 k 的同时减小 ρ).

模型的不确定部分尽管是未知的,但总可以假定它们在某个有界的范围内变化,这个变化范围的大小直接影响到系统性能的确切.假设 $\rho(x, x_f, t)$ 为 $F_\Delta(x, x_f, t)$ 的上界,则满足下式约束:

$$\|F_\Delta(x, x_f, t)\| \leq \rho(x, x_f, t). \quad (25)$$

由于在实际控制中,总不确定部分 $F_\Delta(x, x_f, t)$ (系统非线性、不确定性以及外界扰动的偏差向量)的上界 $\rho(x, x_f, t)$ 很难得到.为此,需要采用自适应控制方法,实现对 $F_\Delta(x, x_f, t)$ 上界的自适应估计.

定义 $\hat{\rho}(x, x_f, t)$ 为 $F_\Delta(x, x_f, t)$ 上界 $\rho(x, x_f, t)$ 的估计值,则可将式(20)变为

$$u_f(t) = Gx_\Delta(t) + Hu(t) + B_f^+(ks(t) + \hat{\rho}(x, x_f, t)\text{sgn}(s(t))). \quad (26)$$

为鲁棒滑模控制器设计如下自适应律:

$$\dot{\hat{\rho}}(x, x_f, t) = \frac{1}{\alpha} |\lambda s(t)|, \quad (27)$$

式中: α 为自适应项的增益, 且 $\alpha > 0$.

综上, 得到鲁棒自适应滑模虚拟执行器, 即式(12)–(15)(26)–(27).

3.5 稳定性和鲁棒性分析(Stability and robustness analyses)

根据分离原理, 重构后的闭环系统由重构后的设备和控制器组成. 由于设备在故障前的动态是稳定的, 如果滑模虚拟执行器的状态 $x_{\Delta}(t)$ 是可镇定的, 那么整个重构回路的稳定性将会立即随着原控制回路的稳定性而得到.

为了证明提出的鲁棒自适应滑模控制器的稳定性和鲁棒性, 提出以下李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} \alpha \tilde{\rho}^2, \quad (28)$$

其中 $\tilde{\rho} = \hat{\rho} - \rho$ 为上界的估计误差, 则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \alpha\tilde{\rho}\dot{\tilde{\rho}} = \\ &= s\lambda(\dot{x}_{\Delta} - (A - B_f G)x_{\Delta}) + \alpha\tilde{\rho}(\dot{\hat{\rho}} - \dot{\rho}) = \\ &= s\lambda((B - B_f H)u - ks - \hat{\rho}\text{sgn } s + F_{\Delta}) + \\ &= \alpha\tilde{\rho}\left(\frac{1}{\alpha}|\lambda s| - \dot{\rho}\right) = \\ &= \lambda((B - B_f H)us - ks^2 - \hat{\rho}|s| + sF_{\Delta} + \\ &= \hat{\rho}|s|) - \alpha\tilde{\rho}\dot{\rho} = \\ &= \lambda((B - B_f H)us - ks^2 - \rho|s| + sF_{\Delta}) - \alpha\tilde{\rho}\dot{\rho}. \end{aligned} \quad (29)$$

由式(24)得 $B = B_f H$, 式(25)得 $-\rho|s| + sF_{\Delta} \leq 0$, 最终可得

$$\lambda((B - B_f H)us - ks^2 - \rho|s| + sF_{\Delta}) \leq 0. \quad (30)$$

因此稳定性分析将在以下两种不同的假设下进行:

- 1) 慢时变的不确定性, 可以保证渐近稳定性;
- 2) 快时变的不确定性, 可以实现在状态空间原点邻域内的有界性和收敛性.

假设 1 不确定部分是任意大且随时间缓慢变化的.

该假设适用于大部分应用, 即 $\dot{\rho}$ 为零或是可忽略的, 那么 $\dot{V} = \lambda((B - B_f H)us - ks^2 - \rho|s| + sF_{\Delta}) \leq 0$. 这说明系统轨迹可从任意非零初始偏差位置逐渐收敛至面 $s(t) = 0$ 上, 且保证闭环系统的鲁棒稳定性.

假设 2 不确定部分是任意大且随时间快速变化的, 但仍是模有界的.

在这种情况下, $\dot{V} \leq 0$ 的充分条件为 $\alpha\tilde{\rho}\dot{\rho} \geq 0$, 这将保证渐近稳定性, 其可使得系统状态更快收敛至平衡点. 对于该情况, 假设1的结论也是适用的.

如果出现最坏的情况, 即 $\alpha\tilde{\rho}\dot{\rho} < 0$, 那么可以保证一致最终有界, 且可通过设计参数 k 和 α 任意减小跟踪误差^[14].

综上所述, 通过合理设计参数, $\dot{V} \leq 0$ 是始终满足的, 根据李雅普诺夫稳定性理论, 加之滑模控制所具有的鲁棒性, 可证明鲁棒自适应滑模控制器的渐近鲁棒稳定性, 从而满足重构目标2.

4 仿真试验(Simulation experiments)

为了验证所设计的鲁棒自适应滑模虚拟执行器的有效性, 本文对船舶动力定位过程进行仿真分析. 由于海上船舶具有典型的非线性, 且处于风、浪、流等不确定外界扰动之中, 船模本身具有不确定参数项, 因此为典型的不确定非线性系统. 本文以某海洋救助船为研究对象, 该海洋救助船是我国“十五”期间研发的重要海上救助装备, 该船的主要数据如表1所示.

表1 海洋救助船的主要尺度

Table 1 Marine rescue vessel features

名称	数值
船舶总长	98/m
两柱间长	88/m
排水量	4405.885/t
设计吃水深度	5.6/m
船宽	15.2/m
型深	7.6/m

根据文献[15], 通常, 3自由度的船舶运动可以由下述向量来描述: $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ 和 $\nu = [u \ v \ r]^T$. 其中: (x, y) 和 ψ 表示船舶在固定坐标系下的位置和艏向角; (u, v, r) 表示船舶在随船坐标系下的纵荡、横荡和艏摇速度. 两坐标系的相互转换关系为

$$\dot{\eta} = J(\psi)\nu. \quad (31)$$

式中转换矩阵为

$$J(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J^{-1}(\psi) = J^T(\psi). \quad (32)$$

动力定位船舶低频运动模型为

$$M\dot{\nu} + D\nu = \tau + J^T(\psi)b, \quad (33)$$

$$\tau = Bu = TKu. \quad (34)$$

式中: $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示包括附加质量的船舶惯性矩阵; $D \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示水动力系数矩阵; $\tau \in \mathbb{R}^3$ 表示由推进器产生的推力和力矩组成的控制输入向量; $b \in \mathbb{R}^3$ 表示未建模的风、浪、流等外部环境作用力和力矩向量, 以及不确定部分; $u \in \mathbb{R}^r$ 表示推进器的控制输入向量; $T \in \mathbb{R}^{3 \times r}$ 表示推进器配置矩阵;

$K \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 表示力系数矩阵,通常为对角阵; r 表示推进器的数量。

船舶的高频运动主要是由于一阶波浪力引起的,并且认为纵荡、横荡和艏摇3个自由度上的高频运动是没有耦合的,且任一自由度上的一阶波浪频率可建模为一个二阶线性系统:

$$h_i(s) = \frac{\eta_{\omega i}(s)}{\omega_{\omega}} = \frac{k_{\omega i} s}{s^2 + 2\zeta_i \omega_{0i} s + \omega_{0i}^2}, \quad (35)$$

式中: ω_{0i} ($i = 1, 2, 3$)为海浪主要频率, ζ_i ($i = 1, 2, 3$)为相对阻尼比, $k_{\omega i}$ ($i = 1, 2, 3$)为相对海浪强度参数. 转换为关于 $\xi = [\xi_{\eta}^T \ \eta_{\omega}^T]^T = [\xi_x \ \xi_y \ \xi_{\psi} \ x_{\omega} \ y_{\omega} \ \psi_{\omega}]^T$ 的状态空间形式为

$$\dot{\xi} = A_{\omega} \xi + E_{\omega} \omega_{\omega}, \quad (36)$$

$$\eta_{\omega} = C_{\omega} \xi, \quad (37)$$

式中:

$$A_{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -\Lambda \end{bmatrix}, E_{\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Sigma \end{bmatrix}, C_{\omega} = [0 \quad I],$$

其中:

$$\Omega = \text{diag}\{\omega_{01}^2, \omega_{02}^2, \omega_{03}^2\}, \Sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\},$$

$$\Lambda = \text{diag}\{2\zeta_1 \omega_{01}, 2\zeta_2 \omega_{02}, 2\zeta_3 \omega_{03}\},$$

对于一般船舶来说,仅有位置和艏向是可测的,因此测量方程可以表示为

$$y = \eta + \eta_{\omega} + \omega_y, \quad (38)$$

式中: η_{ω} 为由于一阶波浪力引起的船舶高频运动; $\omega_y \in \mathbb{R}^3$ 为零均值高斯测量白噪声。

推进器故障后的动力定位船舶运动模型为

$$\dot{\eta}_f = J(y_{3f}) \nu_f, \quad (39)$$

$$M \dot{\nu}_f + D \nu_f = T K_f u_f + J^T(y_{3f}) b, \quad (40)$$

$$y_f = \eta_f + C_{\omega} \xi + \omega_y. \quad (41)$$

根据上文介绍,可得到虚拟推进器重构模块:

$$\dot{\nu}_{\Delta} = -M^{-1} D \nu_{\Delta} + M^{-1} T K u - M^{-1} T K_f u_f + F_{\Delta}, \quad (42)$$

$$\dot{\eta}_{\Delta} = J(y_{3f}) \nu_{\Delta}, \quad (43)$$

其中: F_{Δ} 表示故障前、后系统非线性、外界扰动的偏差向量以及不确定性部分。

积分滑动模态设计如下:

$$s = \lambda(\nu_{\Delta} + \int_0^t M^{-1}(D + T K_f G) \nu_{\Delta} dt). \quad (44)$$

鲁棒自适应滑模控制器设计如下:

$$u_f = G \nu_{\Delta} + H u + (M^{-1} T K_f)^+ (k s + \hat{\rho} \text{sgn } s), \quad (45)$$

$$\dot{\hat{\rho}} = \frac{1}{\alpha} |\lambda s|. \quad (46)$$

最终设计的鲁棒自适应滑模虚拟推进器为式

(42)–(46). 其中船舶惯性矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 4.6567 \times 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 8.6781 \times 10^7 & 9.6979 \times 10^8 \\ 0 & 9.6979 \times 10^8 & 1.0724 \times 10^{11} \end{bmatrix}. \quad (47)$$

该船配备有3个槽道推进器和2个主推进器,推进器的布置如图2所示。

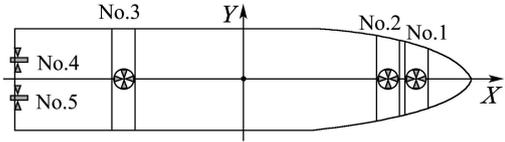


图2 海洋救助船推进器的布置

Fig. 2 The configuration of marine rescue vessel's thrusters

推进器的配置矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 36.25 & 34.15 & -33.5 & 2.8 & -2.8 \end{bmatrix}. \quad (48)$$

力系数矩阵

$$K = \text{diag}\{K_1, \dots, K_5\},$$

且 K_i 满足 $0 \leq K_i \leq 1, i = 1, \dots, 5$. 当推进器正常工作时, $K_i = 1$; 当第 i 个推进器完全失效时, $K_i = 0$.

另外,

$$k = \text{diag}\{9 \times 10^7, 8 \times 10^7, 8 \times 10^7\},$$

$\lambda = 2, \alpha = 10$, 矩阵 G 和 H 的计算如第3.4节所述。

试验将目标船设定为从起始位置 $\eta_0 = (0, 0, 0)^T$ 定位至目标位置 $\eta_{\text{ref}} = (5, 5, 0)^T$. 由于推进器的完全失效对于船舶影响更大, 对于验证容错控制效果的意义更大, 且可以涵盖推进器部分失效的故障情况, 因此试验中将推进器故障设置为在150s时3号推进器突然完全失效(即 $K_3 = 0$), 在20s后基于鲁棒自适应滑模虚拟推进器的控制重构加入控制回路进行容错控制, 仿真结果如图3–4所示. (控制重构加入时间可根据故障诊断时间适当调整, 本文假定为20s).

由仿真结果可看出, 船舶由起点经定位过程到达设定的定位位置并进行位置保持, 在发生推进器故障后, 船舶位置丢失, 最远大约至点 $(-1, -2)$, 20s后控制重构容错进入, 船舶最终恢复至设定定位位置. 整个过程证明该方法最终使得故障船舶在具有非线性及不确定性, 且不确定性范围未知的情况下, 恢复故障前的预定位置并最终达到稳定状态. 另外, 因为3号推进器主要作用在横荡和艏摇两个自由度上, 对横荡位置和艏向角的影响更大, 因此船舶北向位置恢复用时更短, 振荡更小。

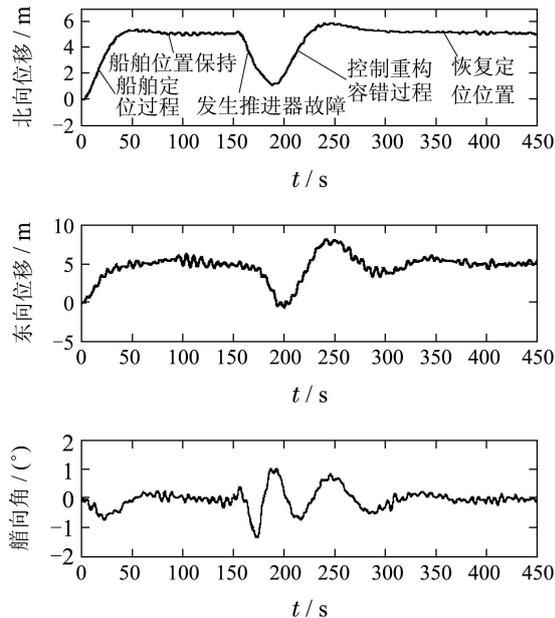


图3 北-东坐标系下3个自由度上的船舶位置

Fig. 3 Vessel position in 3 DOF in north-east-down coordinate system

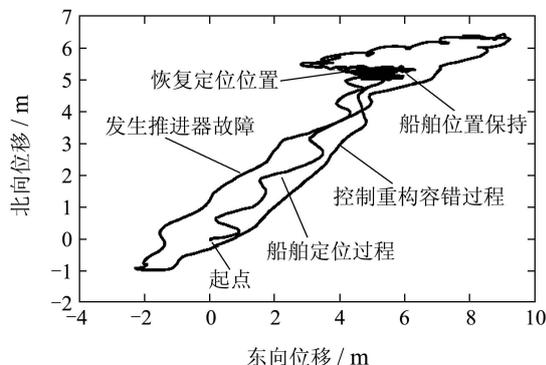


图4 北-东坐标系下的船舶位置

Fig. 4 Vessel position in north-east-down coordinate system

5 结论(Conclusions)

本文针对不确定非线性系统提出基于鲁棒自适应滑模虚拟执行器的控制重构方法,用于执行器故障后的系统容错控制.该方法在虚拟执行器保持标称控制器不变的基础上设计容错控制器,同时利用滑模控制消除不确定性影响,并通过自适应方法解决了不确定性上确界问题.对设计的控制器进行了稳定性和鲁棒性分析,并以某海洋救助船动力定位系统的推进器故障为例进行了仿真试验,仿真结果证明该方法可以有效地镇定故障后的船舶,并使船舶恢复至故障前位置,对于系统的非线性、不确定性和外界扰动具有鲁棒性,并且取得了满意的容错控制性能,达到了重构目标.

参考文献(References):

[1] GAO Z, ANTSAKLIS P J. Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems [J]. *International Journal of Control*, 1991, 53(3): 717 – 729.

- [2] JONCKHEERE E A, YU G R. Propulsion control of crippled aircraft by H_{∞} model matching [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, 7(2): 142 – 159.
- [3] ASHARI A E, SEDIGH A K, YAZDANPANAH M J. Reconfigurable control system design using eigenstructure assignment: static, dynamic and robust approaches [J]. *International Journal of Control*, 2005, 78(13): 1005 – 1016.
- [4] HARKEGARD O, GLAD S T. Resolving actuator redundancy-optimal control vs control allocation [J]. *Automatica*, 2005, 41(1): 137 – 144.
- [5] MACIEJOWSKI J M. Modelling and predictive control: enabling technology for reconfiguration [J]. *Annual Reviews in Control*, 1999, 23(1): 13 – 23.
- [6] LUNZE J, STEFFEN T. Control reconfiguration by means of a virtual actuator [C] // *International Federation of Automatic Control*. Washington DC: IFAC, 2003: 131 – 136.
- [7] RICHTER J H, THORSTEN S, JAN L. Control reconfiguration of a thermofluid process by means of a virtual actuator [J]. *The Institution of Engineering and Technology*, 2007, 1(6): 1606 – 1620.
- [8] JAN L Z, THOMAS S. Control reconfiguration after actuator failures using disturbance decoupling methods [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(10): 1590 – 1600.
- [9] 富月, 柴天佑. 一类非线性最小相位系统的直接自适应控制 [J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(6): 886 – 890.
(FU Yue, CHAI Tianyou. Direct adaptive control for a class of nonlinear non-minimum phase systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(6): 886 – 890.)
- [10] 肖会敏, 赵林, 王春花. 不确定时滞切换系统的鲁棒滑模控制 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(11): 1621 – 1626.
(XIAO Huimin, ZHAO Lin, WANG Chunhua. Robust sliding-mode control for a class of uncertain switched systems with time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(11): 1621 – 1626.)
- [11] 管成, 朱善安. 电液伺服系统的多滑模鲁棒自适应控制 [J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(6): 931 – 938.
(GUAN Cheng, ZHU Shan'an. Multiple sliding mode robust adaptive control of an electro-hydraulic servo system [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 931 – 938.)
- [12] SASAKI M, UEDA T, INOUE Y, et al. Passivity-based control of rotational and translational timoshenko arms [J]. *Advances in Acoustics and Vibration*. DOI: 10.1155/2012/174816, 2012: 1 – 6.
- [13] QU Z. Robust control of nonlinear systems by estimating time variant uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(1): 115 – 121.
- [14] ZEINALI M, NOTASH L. Adaptive sliding mode control with uncertainty estimator for robot manipulators [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009, 2010, 45(1): 80 – 90.
- [15] SØRENSEN A J, SAGATUN S I, FOSSEN T I. Design of a dynamic positioning system using model-based control [J]. *Control Engineering Practice*, 1996, 4(3): 359 – 368.

作者简介:

付明玉 (1964-), 女, 教授, 目前研究方向为海洋环境与船舶特性、先进控制理论应用等, E-mail: fumingyu@hrbeu.edu.cn;

宁继鹏 (1983-), 男, 博士研究生, 目前研究方向为船舶动力定位控制、容错控制、变结构控制等, E-mail: mkn13@126.com;

魏玉石 (1979-), 男, 博士研究生, 目前研究方向为船舶动力定位控制、推进器系统、推力分配、推力估计等, E-mail: weiyushi2007@126.com;

孙行衍 (1982-), 男, 博士研究生, 目前研究方向为船舶动力定位控制、预测控制等, E-mail: mason_heu@126.com.