

基于模糊控制的无人水面艇直线路径跟踪方法

吴玉平, 王建华, 杨 剑

(上海海事大学 航运技术与控制工程交通行业重点实验室, 上海 201306)

摘要: 针对直流电机驱动固定双桨的无人水面艇, 提出一种基于模糊控制的直线路径跟踪方法; 利用无人水面艇到目标路径的垂直距离以及无人水面艇的实际航向与给定路径方向的差值来确定无人水面艇的当前状态, 根据模糊推理的方法实时调整左右两侧推进电机的输入电压, 进而改变无人水面艇的运动状态, 实现无人水面艇自主直线路径跟踪; 模糊控制器采用双输入双输出的控制结构, 无需建立精确的控制器模型, 在无人水面艇初始位置相对于跟踪直线的不同位置关系情况下进行了仿真实验, 并与 PID 控制器的性能进行了比较, 仿真结果表明: 在初始航向偏差角较大时, 如 $2\pi/3$ 、 π 时, 该方法克服了采用固定参数 PID 控制方法时出现的大迴转现象; 在初始航向偏差角较小时, 如 $\pi/4$ 、 $3\pi/7$ 、 $\pi/2$ 时, 该方法在超调量以及调节时间方面的直线跟踪性能优于固定参数 PID 控制方法。

关键词: 无人水面艇; 模糊控制; 直线跟踪; 推理规则;

Straight Path Tracking Method of an Unmanned Surface Vehicle Based on Fuzzy Control

Wu Yuping, Wang Jianhua, Yang Zhao

(Marine Technology & Control Engineering Key Laboratory, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A straight path tracking method of an Unmanned Surface Vehicle (USV) based on fuzzy control is presented in this paper for the electrically propelled USV, who was equipped with twin fixed propellers. We determine the current state of the USV by the distance of the USV to the target path and the difference between the actual heading direction and the given path. The fuzzy algorithm is used to adjust the input voltage of the right and left propulsion motor timely to change the motion state of the USV, so that the USV can track a straight line autonomously. The fuzzy controller has two inputs and two outputs, and accurate mathematical models needn't to be established. The simulating experiments in different cases of initial position and pose of the USV with respect to the straight line demonstrate the effectiveness of the method. By comparing with the PID method, The simulating experiments show that the proposed method can avoid the big gyration that appears when PID controller is used at large initial deviation of course angle, e. g. . In comparison with PID controller, the fuzzy PID has better performance in overshoot and regulation time at small initial angle deviations, e. g. $\pi/4$, $3\pi/7$, $\pi/2$.

Key words: unmanned surface vehicle; fuzzy control; linear tracking; reasoning rules

0 引言

目前多个国家都开展了对无人水面艇 (unmanned surface vessel, USV) 的相关研究, 美国和以色列在无人艇的研究和应用方面走在世界前列。20 世纪 90 年代国外关于 USV 的研究项目大量出现^[1-2], 如美国“斯巴达侦察兵”无人水面艇、以色列“保护者”无人水面艇。而国内无人水面艇的发展起步较晚, 多数还处于遥控设计阶段, 关键技术与美国等西方发达国家差距比较大。因此对无人水面艇智能化方面的前瞻性技术探索和研究不仅很有必要, 而且十分紧迫^[3]。

无人水面艇的路径跟踪问题是实现无人水面艇智能化的关键问题之一, 而直线跟踪是路径跟踪的基础^[4-5]。关于路径跟踪的研究已有较多文献, 文献 [6] 基于滑模控制理论和 Backstepping 法, 提出了一种反步自适应滑模控制律。文献 [7] 提出了一种采用 PID 控制实现无人艇的直线路径跟踪的方法。文献 [8] 提出了一种移动机器人路径跟踪的模糊控制

方法。文献 [9] 提出一种非线性动态神经模糊控制算法。文献 [10] 提出一种利用视觉反馈信息设计非完整移动机器人轨迹跟踪的模糊控制方法。文献 [11] 设计了基于 SDRE 方法的 UUV 水平面路径跟踪控制器。

本文在参考上述研究成果的基础上, 提出一种基于模糊控制的无人水面艇直线路径跟踪方法, 并与 PID 控制器的性能进行了比较, 仿真对比结果验证了所提出控制器的有效性。

1 控制对象

无人水面艇的直线路径跟踪模型原理图如图 1 所示, 目标直线路径为 AB, 起始点和终止点分别为 A (x_n, y_n), B (x_m, y_m)。通过对无人水面艇的受力分析, 其数学模型可表示如下:

$$m \cdot \dot{V} + f = F_l + F_r \quad (1)$$

$$J \cdot \dot{\omega} + k_\omega = \frac{d}{2}(F_r - F_l - f_r + f_l) \quad (2)$$

$$F_i = K_{F_i} \cdot \rho \cdot n_i^2 \cdot D_i^4 \quad (3)$$

$$T_i = K_{T_i} \cdot \rho \cdot n_i^2 \cdot D_i^5 \quad (4)$$

$$J_i \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right) \cdot \dot{n}_i + T_i = M_i \quad (5)$$

$$M_i = K_{M_i} \cdot I_i \quad (6)$$

$$L_i \cdot \dot{I}_i + K_{M_i} \cdot n_i + R_i \cdot I_i = U_i \quad (7)$$

式中, m 为无人水面艇的总质量, F_l 、 F_r 分别为左侧和右侧

收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-02-01。

基金项目: 上海市科技攻关项目(11dz1205600); 上海市教委科研创新项目(14YZ104)。

作者简介: 吴玉平(1986-), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事船舶与港口自动化技术方向的研究。

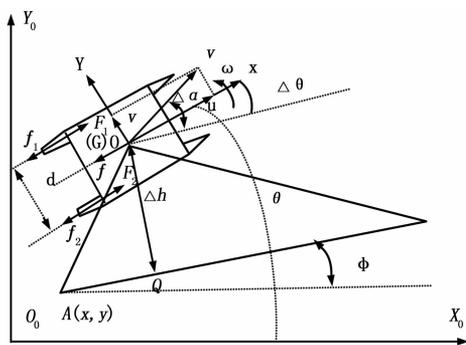


图 1 无人水面艇直线跟踪原理图

螺旋桨的推力。 f_l 、 f_r 分别为左侧和右侧船体的阻力，总阻力 $f = f_l + f_r$ 。 V 为无人水面艇的航速， $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ 为无人水面艇的加速度， K_ω 为转动的阻尼系数， J 为无人水面艇的转动惯量， ω 为无人水面艇转动的角速度， $\dot{\omega}$ 是无人水面艇转动的角加速度， $\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$ 。 i 为 l 或 r ，分别表示左侧和右侧， K_{Fi} 为螺旋桨推力系数， ρ 为周围水密度， n_i 为螺旋桨转速， D_i 为螺旋桨直径， K_{Ti} 为螺旋桨转矩系数， J_i 为螺旋桨转动惯量， M_i 为推进电机输出转矩， K_{Mi} 为转矩系数， I_i 为流过电枢的电流， L_i 为电机电枢的自感系数， K_{mi} 为电机的反电动势系数， R_i 电枢电阻， U_i 为控制输入电压。

2 基于模糊控制的无人水面艇直线路径跟踪方法

2.1 系统结构

模糊控制器原理框图如图 2 所示。

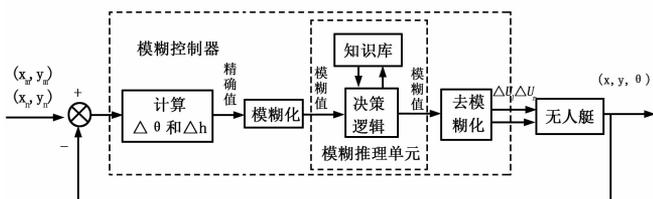


图 2 模糊控制器

其中 (x_n, y_n) 为目标路径的起始点， (x_m, y_m) 为目标路径的终止点， Δh 即无人水面艇与目标路径的距离误差， $\Delta\theta$ 即无人水面艇的实际航向角与给定路径方向的差值。模糊控制器利用距离偏差 Δh 以及航向角误差 $\Delta\theta$ 为输入，经过模糊化，模糊推理，去模糊化，分别得出无人水面艇左、右侧推进电机的电压变化值 ΔU_l 、 ΔU_r 。无人水面艇的当前状态 (x, y, θ) 作为反馈环节返回到输入端。

2.2 距离、角度误差及两侧推进电机的电压计算

2.2.1 距离误差计算

利用向量叉积方法计算距离误差。如图 2 所示，目标路径起始点 $A(x_n, y_n)$ ，终止点 $B(x_m, y_m)$ ，无人水面艇质心坐标 $O(x, y)$ ，则

$$\vec{AB} \times \vec{AO} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_m - x_n & y_m - y_n & 0 \\ x - x_n & y - y_n & 0 \end{bmatrix} = ((x_m - x_n)(y - y_n) - (x - x_n)(y_m - y_n))\vec{k} \quad (8)$$

按照右手定则，如果 ABO 三点是顺时针方向分布，则 \vec{AB}

$\times \vec{AO}$ 为负值，逆时针分布为正值。在直线跟踪中我们可以根据结果的符号来判断无人水面艇在路径的左侧还是右侧，当 $\vec{AB} \times \vec{AO}$ 为负值时，代表无人水面艇在路径的右侧，当 $\vec{AB} \times \vec{AO}$ 时代表无人水面艇在路径的左侧；同时又可以根据三点面积来判断无人水面艇与目标路径的距离误差 Δh ，计算公式如下：

$$\Delta h = - \frac{\vec{AB} \times \vec{AO}}{|\vec{AB}|} \quad (9)$$

2.2.2 角度误差计算

利用向量点积方法计算目标路径 AB 与 x 轴的夹角 ϕ ，设沿 x 轴的单位向量为 $\vec{a}(1, 0)$ ，目标路径起始点 $A(x_n, y_n)$ ，终止点 $B(x_m, y_m)$ ，向量 $\vec{AB}(x_m - x_n, y_m - y_n)$ ， ϕ 计算公式如下：

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{AB}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{AB}|} \right) \quad (y_m - y_n \geq 0) \quad (10)$$

$$\phi = 2\pi - \cos^{-1} \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{AB}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{AB}|} \right) \quad (y_m - y_n < 0) \quad (11)$$

$\Delta\theta$ 为无人水面艇的实际航行方向与给定路径方向的差值。计算公式如下所示：

$$\Delta\theta = \theta - \phi \quad (12)$$

2.2.3 两侧推进电机的电压计算

左右两侧推进电机的输入电压计算公式如下：

$$U_l = 12 + \Delta U_l \quad (13)$$

$$U_r = 12 + \Delta U_r \quad (14)$$

式中， U_l 为左侧推进电机的电压值， ΔU_l 为左侧推进电机的电压变化值， U_r 为右侧推进电机的电压值， ΔU_r 为右侧推进电机的电压变化值。 ΔU_l 和 ΔU_r 为模糊控制器输出的无人水面艇左、右侧推进电机的电压变化量。

2.3 模糊控制器的设计

输入变量的选择：根据目标路径 AB 及无人水面艇的当前状态 (x, y, θ) ，求解无人水面艇与目标路径的距离误差 Δh ，无人水面艇的实际航行方向与给定路径方向的差值 $\Delta\theta$ ，将其作为模糊控制器的两个输入变量， Δh 基本论域为 $[-20, 20]$ ，单位为 m 。 $\Delta\theta$ 的基本论域为 $[-\pi, \pi]$ ，单位为弧度。 ΔU_l 、 ΔU_r 为模糊控制器的输出变量， ΔU_l 、 ΔU_r 的基本论域均为 $[-12, 12]$ ，单位为 V 。

变量模糊化： Δh 、 $\Delta\theta$ 、 ΔU_l 、 ΔU_r 都是精确量，其对应的模糊变量分别为 E 、 EC 和 ΔU_l 、 ΔU_r 。

E 被模糊化为 {负大，负中 2，负中 1，负小，零，正小，正中 1，正中 2，正大}，表示为 {NB, NM2, NM1, NS, Z, PS, PM1, PM2, PB}。

EC 被模糊化为 {负大，负中 2，负中 1，负小 2，负小 1，零，正小 1，正小 2，正中 1，正中 2，正大}，表示为 {NB, NM2, NM1, NS2, NS1, Z, PS1, PS2, PM1, PM2, PB}。

ΔU_l 、 ΔU_r 均被模糊化为 {负大，负中 2，负中 1，负小 2，负小 1，零，正小 1，正小 2，正中 1，正中 2，正大}， ΔU_l 、 ΔU_r 的模糊集均为 {NB, NM2, NM1, NS2, NS1, Z, PS1, PS2, PM1, PM2, PB}。

以左侧电机调压为例建立推理规则表，如表 1 所示。

3 仿真实验

仿真对象为直流电机驱动固定双桨的无人水面艇，如图 1 所示，其数学模型如公式 (1) ~ (7) 所示，通过调整左、右两侧推进电机的输入电压调整无人水面艇的航向。本文只考虑电机正转的情况，当无人水面艇左侧螺旋桨的电压 $U_l = 24 V$ ，

表 1 模糊推理规则表

E	NB	NM2	NM1	NS	Z	PS	PM1	PM2	PB
EC	NB	PS1	PM1	PS2	PB	PB	PB	PB	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NM2	PS1	PM1	PS2	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NM1	NB	PS1	PS2	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NS2	NB	NB	PS2	PM2	PB	PB	PB	PB	PB
NS1	NB	NB	NB	NB	PB	PB	PB	PB	PB
Z	NB	NB	NB	NB	Z	PB	PB	PB	PB
PS1	NB	NB	NB	NB	NB	NM2	PB	PB	PB
PS2	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NS2	PB	NS1
PM1	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NS2	NS1	NB
PM2	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NS2	NM1	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

同时右侧螺旋桨的电压 $U_r = 0$ 时，无人水面艇将做圆周运动，半径 R 大约为 15 m。因此，该无人水面艇的最小转弯半径为 15 m，这是本文的约束条件。

为了验证所述方法的有效性，分别取直线斜率为正、为负、0 和无穷大四种情况，在每种情况下无人水面艇起点分别在直线两侧，并设起始位置的偏差角 $\Delta\theta$ 分别为 $-\pi/4$ 、0、 $\pi/4$ ，仿真结果如图 3 所示。

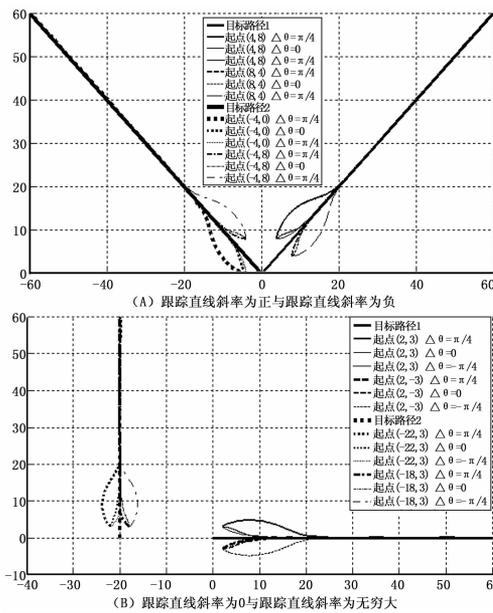


图 3 不同情况下仿真实验结果

从仿真结果可以看出，本方法在直线斜率、USV 起点及起始角不同的情况下都有很好的跟踪效果，表明了该算法的有效性，能平稳、准确跟踪目标路径。

在以上仿真的基础上，将本文的算法与 PID 算法^[12]进行比较，当偏差角 $\Delta\theta$ 比较大时，如图 4 所示，起始点坐标 (3, 2)，偏差角 $\Delta\theta$ 取 $2\pi/3$ 时，路径 1 与路径 2 对比，显然路径 1 走的弯路要多于路径 2，起始点坐标 (3, -2)，偏差角 $\Delta\theta$ 取 π 时，路径 3 与路径 4 进行对比，可以发现路径 3 出现比较大的迴转现象。由此可见本文的算法要优于 PID 算法。

当偏差角 $\Delta\theta$ 比较小时，进行定量分析，如图 5 所示，路径 1、2、3 利用 PID 算法，路径 4、5、6 利用模糊控制算法。

无人水面艇初始位置为 (3, 18)，起始位置的偏差角 $\Delta\theta$ 分别为 $\pi/4$ 、 $3\pi/7$ 、 $\pi/2$ 时的跟踪路线，性能指标对比如表 2 所示。

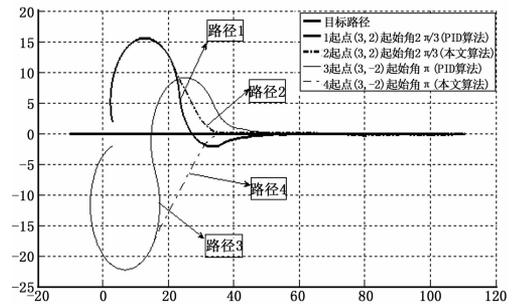


图 4 仿真图

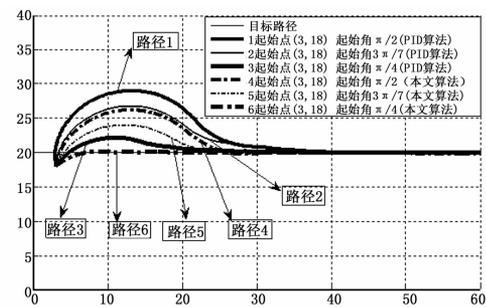


图 5 仿真图

表 2 性能指标对比

方法	模糊控制方法			PID 方法		
	$\Delta\theta = \frac{\pi}{4}$	$\Delta\theta = \frac{3\pi}{7}$	$\Delta\theta = \frac{\pi}{2}$	$\Delta\theta = \frac{\pi}{4}$	$\Delta\theta = \frac{3\pi}{7}$	$\Delta\theta = \frac{\pi}{2}$
超调量 (%)	0	20.33	31.25	6.06	28.31	45.22
调整时间 (s)	3.84	13.10	15.11	6.75	15.34	22.88

由图表可看出模糊控制方法与 PID 方法相比降低了超调量并且缩短了调节时间。

探究模糊控制算法优于 PID 算法的原因，模糊控制算法能根据无人艇的当前状态，利用模糊规则实时调整无人艇的运动状态，实现过程类似于人工智能，响应速度快，控制相对精准。而 PID 算法各项参数固定，不能实时调整，所以单纯的 PID 算法适应性比较差，整体效果没有模糊控制算法好。

4 结束语

本文采用模糊控制的方法进行无人艇的直线路径跟踪。利用点积法计算目标路径与 x 轴的夹角，叉积法计算无人艇与目标路径的偏差，再将距离误差及航向角偏差作为模糊控制器的输入，利用模糊推理规则调整左右两侧推进电机的电压，进而调整无人艇的运动姿态，经过仿真表明该方法能够精确地跟踪直线目标路径，并且适应性较强，无人艇的起点不必在目标轨迹上，可任意初始航向角，能跟踪任意直线路径，并且避免了 PID 算法出现的大超调现象和大迂回现象。

参考文献:

[1] Breivik M, Hovstein V E, Fossen T I. Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles [J]. Modeling, Identification and Control, 2008, 29 (4): 131-149.
 [2] Caccia M, Bibuli M, Bono R, et al. Basic navigation, guidance and

control of an unmanned surface vehicle [J]. *Autonomous Robots*, 2008, 25 (4): 349-365.

- [3] 中国尚在起步阶段智能是最大难点 [N]. *科学时报*, 2008-10-31.
- [4] By Marco Bibuli, Massimo Caccia, Lionel Lapierre, and Gabriele Bruzzone. *Guidance of Unmanned Surface Vehicles* [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, 9: 92-102.
- [5] Bibuli M, Bruzzone G, Caccia M, et al. Line following guidance control: Application to the Charlie unmanned surface vehicle [A]. *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on [C], IEEE, 2008; 3641-3646.*
- [6] 廖煜雷, 万磊. 欠驱动船舶直线航迹的滑模控制方法 [J]. *应用科技*, 2011, 38 (11): 13-17.

(上接第 1393 页)

$$c_{i0} = \lim_{s \rightarrow 0} s c_i = \frac{1/k_{ii}(1 - k_{12}k_{21}/k_{11}k_{22})}{2\lambda_i - \alpha_i + \theta_i} \quad (42)$$

由式 (41) 得期望控制器高频幅值为:

$$c_{i\infty} = \lim_{s = j\omega \rightarrow \infty} c_{i\infty} = \frac{\alpha_i T_{ii}}{\lambda_i^2 k_{ii} (1 - \gamma)} \quad (43)$$

式中, $\gamma = k_{12}k_{21}T_{11}T_{22}/k_{11}k_{22}T_{12}T_{21} = -0.8617$ 。

由数值计算法绘出期望控制器特性式 (41) 的伯德图可容易地得到幅频特性极值特征。例如, $\alpha_1 = 2.1424$, $\lambda_1 = 1.2$, $\alpha_2 = 1.7298$ 以及 $\lambda_2 = 1.2$ 时有 $\omega_{1m} = 2.0544$, $c_{1m} = 0.1079$, $\omega_{2m} = 2.4302$ 和 $c_{2m} = 0.1470$ 。此时, PID 控制器的参数为: $KcTiTdTf12 = [0.1079, 2.2913, 0.1034, 0.0699; 0.1470, 1.2875, 0.1315, 0.0965]$, 期望控制器和 PID 控制器的幅频特性如图 4 所示, 控制系统的设定值和扰动阶跃响应如图 5 所示。

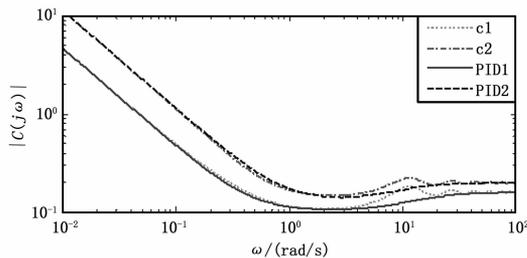


图 4 期望控制和 PID 实现的幅值频率特性

图 5 比较了本解耦 PID 控制 (this D-PID) 与期望解耦控制 (desired D-control), 同时示意了 Juan 等^[1]集中逆解耦控制 (Juan Inverted control)。

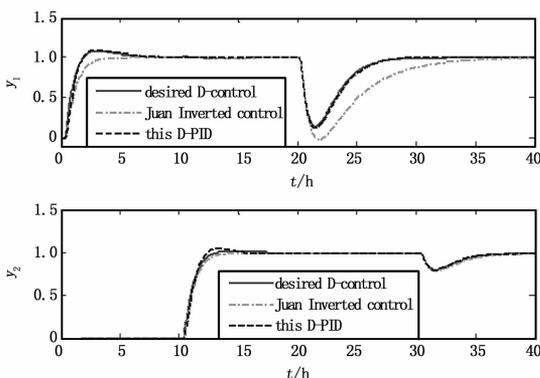


图 5 两种解耦控制系统的设定值和扰动阶跃响应

- [7] 张晓杰, 冯海涛, 熊亚洲, 等. 一种双电力推进无人水面艇的非线性建模、仿真和实验 [J]. *船舶工程*, 2012, 34 (2): 39-42.
- [8] 刘今越. 基于模糊控制的移动机器人路径跟踪 [J]. *河北工业大学学报*, 2009, 38 (6): 6-9.
- [9] 汪洋, 郭晨. 建模参数不确定的欠驱动船舶路径跟踪控制 [J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45 (33): 186-188.
- [10] 孙妍, 王朝立, 杨亚民. 基于模糊控制的移动机器人视觉反馈跟踪 [J]. *计算机工程*, 2011, 37 (14): 175-177.
- [11] 严浙平, 张彦超, 高鹏, 等. 水下无人航行器水平面路径跟踪控制方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2011, 19 (12): 2985-2988.

5 结语

介绍了一种简单的多变量解耦控制 PID 设计方法。基于前馈解耦, 通过简单选择主对角解耦环节, 可保证解耦器稳定性和物理实现性。通过对解耦后单回路模型的简单分析, 能够提出满足单回路系统跟踪特性、扰动抑制特性和稳定性需要的期望闭环特性, 或者得到期望控制器, 由此依据其特征信息容易地获得 PID 控制参数。依期望控制函数的频率特征确定 PID 控制器参数这一方法简单有效, 比内模解耦法少一次复杂的模型降阶运算, 而且能够保证控制器参数的合理性, 不会出现微分时间常数为负的情形。仿真表明该解耦多变量 PID 设计法是有效的。

参考文献:

- [1] Garrido J, Vazquez F, Morilla F. An extended approach of inverted decoupling [J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21 (1): 55-68.
- [2] Huang H P, Jeng J C, Chiang C H, et al. A direct method for multi-loop PI/PID controller design [J]. *Journal of Process Control*, 2003, 13 (8): 769-786.
- [3] Bao J, Forbes J F, McLellan P J. Robust multiloop PID controller design: a successive semi definite programming approach [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, 38 (9): 3407-3419.
- [4] Truong Nguyen Luan Vu, Lee M Y. Independent design of multi-loop PI/PID controllers for interacting multivariable processes [J]. *Journal of Process Control*, 2010, 20 (8): 922-933.
- [5] Huang H P, Lin F Y. Decoupling multivariable control with two degrees of freedom [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006, 45 (9): 3161-3173.
- [6] 李兴春, 刘智勇, 李兴高. 多变量多时滞系统的前馈补偿解耦及 IMC-PID 控制 [J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20 (4): 982-986.
- [7] 王全良, 甄新平, 潘立登, 等. 多变量系统解耦内模控制及其 PID 转化应用方法的研究 [J]. *北京化工大学学报*, 2005, 32 (6): 87-89.
- [8] Vijay Kumar V, Rao V S R, Chidambaram M. Centralized PI controllers for interacting multivariable processes by synthesis method [J]. *ISA Transactions*, 2012, 51: 400-409.
- [9] 薛美盛, 白东进, 王川. 基于 Pade 近似一般形式的 IMC-PID 控制器设计 [J]. *控制工程*, 2010, 17 (6): 715-718.
- [10] 陈娟, 潘立登, 曹柳林. 多变量时滞过程的解耦内模控制及应用 [J]. *北京化工大学学报*, 2007, 34 (3): 313-317.
- [11] Alcantara S, Zhang W D, Pedret C, et al. IMC-like analytical H_∞ design with S/SP mixed sensitivity consideration: Utility in PID tuning guidance [J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21 (6): 976-985.