

立方体机器人自抗扰平衡控制方法

陈志刚[†], 阮晓钢, 李 元

(1. 北京工业大学 信息学部, 北京 100124; 2. 计算智能与智能系统北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 针对立方体机器人动力学模型多变量、强耦合的问题, 提出一种基于自抗扰控制的平衡控制器设计方法. 引入虚拟控制量, 并在控制量与输出向量之间并行地嵌入多个自抗扰控制器, 从而实现对多变量系统的解耦控制, 将系统的动态耦合和外部扰动视为各自通道上的自抗扰控制器的总扰动, 在为期望姿态安排过渡过程基础上, 设计扩张状态观测器对总扰动进行估计并实时补偿. 综合采用经验试凑法和带宽法对控制器参数进行整定, 对自抗扰控制器系统进行稳定控制、姿态跟踪、抗扰性和鲁棒性实验, 并与 PID 控制系统进行定量对比分析. 仿真结果表明, 所设计的自抗扰控制器不仅能有效实现立方体机器人的平衡控制, 而且较 PID 控制器具有更好的响应速度、控制精度和强鲁棒性.

关键词: 自平衡机器人; 自平衡控制; 自抗扰控制; 参数整定; PID 控制; 姿态控制

中图分类号: TP242; N945.12

文献标志码: A

Dynamic modeling of a cubical robot balancing on its corner

CHEN Zhi-gang[†], RUAN Xiao-gang, LI Yuan

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Key Laboratory of Computational Intelligence and Intelligent System, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the problem of the dynamic model of a cubical robot is a multivariable system and with strong coupling. A balance controller is proposed based on the active disturbance rejection control. Decoupling control of the multivariable system is realized by introducing virtual control variables, and embedding multi active disturbance rejection controllers(ADRCs) between control variables and outputs. The dynamic coupling and external disturbance are regarded as total disturbances in each channel of the active disturbance rejection controller. After arranging the transient dynamics of the desired attitudes, we design an extended state observer to estimate and compensate for the total disturbances simultaneously. The parameter-tuning of the controller based on experience-based approximation technique and bandwidth turning method. A series of experiments are conducted by simulation, and comparative analysis between the ADRC and PID controller is made. Simulation results show that the ADRC not only can control the balance of the cubical robot effectively, but also with superior performance in response rate, control accuracy and strong coupling to the PID controller.

Keywords: self-balancing robot; self-balancing control; active disturbance rejection control; parameters tuning; PID control; attitude control

0 引 言

立方体机器人是一种由立方体壳体和内置的惯性轮或动力摆等力矩发生装置构成的机器人装置, 通过控制惯性轮或动力摆的运动, 可实现以棱边或角为支点的平衡. 立方体机器人可看作是一个多自由度空间倒立摆系统, 具有非线性、不稳定等特征, 是控制方法研究的理想验证平台^[1-2]. 此外, 立方体机器人还可应用于欠驱动系统的姿态控制^[3]、空间探索和多机

器人自组装等领域^[4].

立方体机器人以其新奇的特性受到了很多学者的关注. 它是一个复杂非线性、强耦合的系统, 属于多输入多输出系统, 其控制方法是控制领域研究的一个难点^[5]. 针对立方体机器人的平衡控制系统设计问题, 国内外学者主要采用 PID 控制、LQR 控制、反步法、模糊控制等控制方法进行研究. 经典的 PID 控制方法以其不依赖模型、成熟可靠的特点广泛应用于

收稿日期: 2017-11-19; 修回日期: 2018-05-07.

基金项目: 北京市自然科学基金项目(4174083); 国家自然科学基金项目(61375086); 北京市自然科学基金项目/北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201610005010).

责任编辑: 方勇纯.

[†]通讯作者. E-mail: chenzgbs@126.com.

各种控制领域. 对于立方体机器人欠驱动、非线性、强耦合的特点,经典的PID控制不能满足其动态性能指标. 基于经典PID控制方法,陈志刚等^[6]为一种由3个反作用轮实现姿态控制的立方体机器人设计了以棱边为支点平衡控制器, Muehlebach等^[7-8]对立方体机器人以角为支点平衡的控制系统进行了研究,实验结果表明,采用PID控制器的立方体机器人平衡控制调节时间长,超调量较大,且存在较大的稳定误差. 针对这些问题,田莉^[9]对一种内部安装有动力摆的立方体系统进行研究,采用模糊控制方法设计了平衡控制器;邱正斌^[10]基于该系统设计了非线性降维观测器;Gajamohan等^[11-12]采用LQR控制方法设计了立方体机器人以棱边为支点平衡的控制系统,基于LQR方法设计了立方体机器人以角点平衡的控制器;Muehlebach等^[13]分别采用反步法和反馈线性化的控制方法对立方体以角为支点平衡进行了研究. 上述LQR、模糊控制、反步法、反馈线性化等方法的控制性能很大程度依赖于模型的精度,但在实际应用中,模型精度受到多种因素的影响,为了解决此问题,自抗扰控制方法受到了普遍关注^[14].

自抗扰控制为多变量系统的解耦控制提供了便捷的途径,通过在控制向量与输出向量之间并行嵌入多个自抗扰控制器实现多变量系统的解耦控制^[5]. 在飞行器控制、船舶控制、运动控制、电机控制、机器人控制、伺服系统控制等领域自抗扰控制方法得到了较广泛的应用^[15]. 刘一莎等^[16]针对四旋翼飞行器参数不确定性和外部干扰敏感的问题,基于自抗扰控制技术提出了一种控制系统设计方法;阮晓钢等^[17]基于自抗扰控制方法对独轮机器人控制进行了研究;方勇纯等^[18]针对无人直升机系统航向扰动大等问题,设计了自抗扰控制算法以提高系统控制性能;刘春强等^[19]为提高永磁同步电机伺服系统的抗负载扰动和参数摄动能力,设计了基于自抗扰控制的位置-电流双环控制策略.

在自抗扰控制器设计中可调参数较多,参数整定的优劣直接影响控制器的控制性能^[20-21]. 针对自抗扰控制器的参数整定问题,国内外学者先后提出了经验试凑法、带宽法/极点配置法、人工智能方法、时间尺度法和实用非线性ESO参数整定公式等整定方法^[15]. 其中,人工智能法有较好的整定效果,但运算复杂,受采样步长、噪声限制,较难在工程中应用;实用非线性ESO参数整定公式为参数整定提供了方便和参考,但在工程实际中需折中考虑带宽、噪声、扰

动幅值、采样步长等因素;经验试凑法和带宽法更方便工程应用^[15,22].

针对立方体机器人以角为支点平衡控制问题,本文以所设计的立方体机器人样机为具体研究对象,基于自抗扰控制技术,提出一种立方体机器人平衡控制方法. 首先,基于自抗扰控制器原理,设计立方体机器人控制系统结构及控制器具体算法;然后基于自抗扰设计的分离性原理,综合采用经验试凑法和带宽法对自抗扰控制器的参数整定;最后通过实验对比分析验证所设计自抗扰控制器的控制性能,检验控制系统的抗扰性、鲁棒性,并给出研究结论.

1 立方体机器人结构设计与动力学建模

本文所设计的立方体机器人由立方体本体、布置在本体3个面上的惯性轮、电机、传感器(陀螺仪、编码器和加速度计)和微处理器构成,具体如图1所示. 在微处理器的控制下,立方体本体受到惯性轮加减速转动产生的反作用力矩,传感器将系统参数反馈到控制器实现立方体机器人的姿态控制.

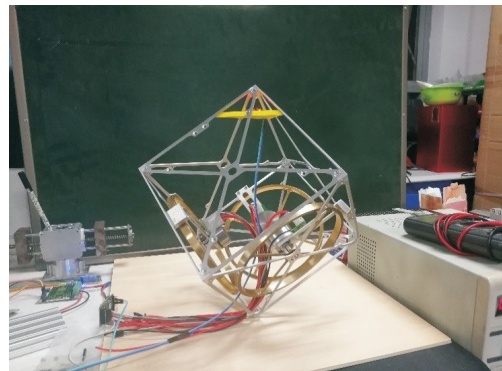


图1 立方体机器人样机

从建模的角度,立方体机器人由立方体箱体和布置在箱体3个面上的惯性轮共4个刚体构成,坐标系定义如图2所示. 分别以立方体角点 o 、立方体机器人的质心点 c 为原点,建立固定坐标系 $o-xyz$ 、机体坐标系 $o-x_b y_b z_b$ 和惯性轮坐标系 $o-x_f y_f z_f$,其中坐标轴 x_f 、 y_f 、 z_f 分别指向惯性轮 A 、 B 、 C 的回转轴. 定义 m 、 l 分别为立方体机器人的质量、质心 b 到角点 o 的距离, I_x 、 I_y 、 I_z 分别为立方体机器人绕机体坐标系 $o-x_b y_b z_b$ 三个轴的转动惯量, I_w 为惯性轮绕自身回转轴线的转动惯量, α 、 β 、 γ 分别为立方体的机体坐标系 $o-x_b y_b z_b$ 的三个轴相对于固定坐标系 $o-xyz$ 对应轴的偏转角, $\dot{\theta}_A$ 、 $\dot{\theta}_B$ 、 $\dot{\theta}_C$ 分别为惯性轮 A 、 B 、 C 的角速度, K_t 为电机电力矩常数, K_b 为反电动势常数, R_m 为电枢电阻, v_j 为电机电枢电压, $j = a, b, c$. 立方体机器人的主要结构参数如表1所示.

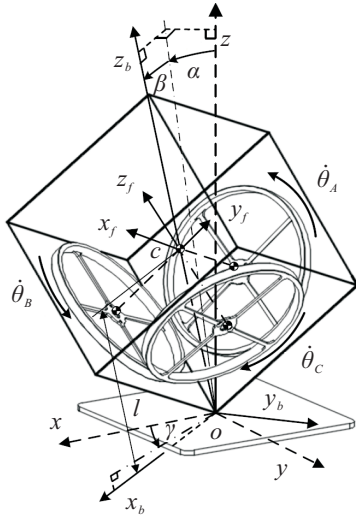


图2 立方体机器人坐标系定义

表1 立方体机器人样机主要参数

符号	数值	符号	数值
m/kg	1.4	$I_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.001 55
l/m	0.135	$K_t/(\text{N}\cdot\text{m}/\text{A})$	0.025 1
$I_x/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.034 7	R_m/Ω	0.046 4
$I_y/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.034 7	$g/(\text{m}/\text{s}^2)$	9.81
$I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.011 6	—	—

立方体机器人的动力学方程可表述为

$$\ddot{\alpha} = \frac{mgl \sin \alpha \cos \beta}{(I_w - I_y)} + \frac{\sqrt{6}K_t[v_b + v_c - 2v_a + K_t(2\dot{\theta}_A - \dot{\theta}_B - \dot{\theta}_C)]}{6(I_w - I_y)R_m},$$

$$\ddot{\beta} = -K_1 mgl R_m \cos \alpha \sin \beta + \frac{\sqrt{2}}{2} K_1 K_t [(v_b - v_c) - K_t(\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_C)],$$

$$\ddot{\gamma} = \frac{\sqrt{3}}{3} K_1 K_t [(v_a + v_b + v_c) - K_t(\dot{\theta}_A + \dot{\theta}_B + \dot{\theta}_C)],$$

$$\ddot{\theta}_A = \frac{\sqrt{6}mgl \sin \alpha \cos \beta}{3(I_w - I_y)(I_w - I_z)} + K_2 \{ 3I_y I_z v_a + K_t [I_w(2I_y + I_z) - 3I_y I_z] \dot{\theta}_A - I_w I_y (2v_a - v_b - v_c) + I_w I_z (v_a + v_b + v_c) - K_t I_w (I_y - I_z) (\dot{\theta}_B + \dot{\theta}_C) \},$$

$$\ddot{\theta}_B = K_3 [K_4 + K_6 (v_b - K_t \dot{\theta}_B) + K_7 (v_c - K_t \dot{\theta}_C)],$$

$$\ddot{\theta}_C = K_3 [K_5 + K_7 (v_b - K_t \dot{\theta}_B) + K_6 (v_c - K_t \dot{\theta}_C)]. \quad (1)$$

其中

$$K_1 = 1/(I_w - I_x)R_m,$$

$$K_2 = K_t/[3I_w(I_w - I_y)(I_w - I_z)R_m],$$

$$K_3 = 1/[6I_w(I_w - I_x)(I_w - I_y)(I_w - I_z)R_m],$$

$$K_4 = 2K_t I_w (I_w - I_x)(I_w - I_z)(v_a - K_t \dot{\theta}_A) +$$

$$\sqrt{6}mgl I_w R_m [\sqrt{3}(I_w - I_y) \cos \alpha \sin \beta - (I_w - I_x) \sin \alpha \cos \beta],$$

$$K_5 = 2K_t I_w (I_w - I_x)(I_y - I_z)(v_a - K_t \dot{\theta}_A) - \sqrt{6}mgl I_w R_m [\sqrt{3}(I_w - I_y) \cos \alpha \sin \beta + (I_w - I_x) \sin \alpha \cos \beta],$$

$$K_6 = -6I_x I_y I_z - I_w^2 (3I_x + I_y + 2I_z) + I_w (4I_x I_y + 5I_x I_z + 3I_y I_z),$$

$$K_7 = K_t I_w [I_w (3I_x - I_y) - 2I_x I_y - (2I_w + I_x - 3I_y) I_z].$$

2 基于自抗扰控制器的立方体机器人控制系统设计

2.1 自抗扰控制原理

自抗扰控制是以系统设定值、系统被控输出和上一步计算出的控制量为其输入,确定出新的控制量的控制方法^[5],由跟踪微分器、扩张状态观测器和非线性状态误差反馈构成。自抗扰的机理在于将作用于被控对象的所有不确定因素归结为扰动,利用对象的输入输出数据对总扰动进行估计补偿^[15]。自抗扰控制器结构如图3所示。

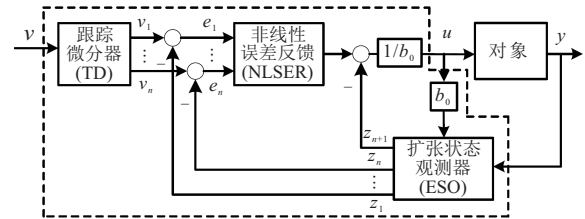


图3 自抗扰控制器结构

跟踪微分器为输入信号安排过渡过程,降低初始阶段对系统的冲击,有效解决超调与快速性的矛盾,并增强控制器的适应性;扩张状态观测器在状态观测器中把作用于开环系统的加速度实时作用量扩充为新的状态变量,将原来的非线性控制系统变为线性的积分器串联型控制系统,对系统的内扰和外扰进行动态估计补偿,是自抗扰控制中的最核心技术;非线性状态误差反馈对跟踪微分器的跟踪信号、跟踪微分信号与扩张状态观测器的观测信号的误差进行非线性组合并抵消ESO的动态补偿量,得到系统的控制量。

2.2 控制系统设计方案

从立方体机器人的动力学方程可以看出,立方体机器人在滚动(α)、俯仰(β)和偏航(γ)3个通道控制量相互耦合,是典型的多输入多输出的耦合系统,而自抗扰控制技术可用于多变量系统的解耦控制,且具有很好的鲁棒性^[5]。引入虚拟控制量,并在控制量与

输出向量之间并行地嵌入多个自抗扰控制器,从而实现多变量系统的解耦控制,系统动态耦合作用作为各自通道上的总扰动来估计并补偿掉.立方体机器人控制系统可分为3个独立回路,在每个回路中嵌入一个自抗扰控制器,如图4所示.

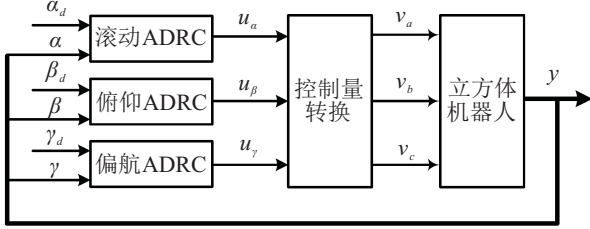


图4 基于自抗扰控制器的控制系统结构

将立方体机器人动力学方程(1)改写为与自抗扰控制理论相对应的形式,即

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = f_\alpha(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, \gamma, \dot{\gamma}) + \omega_\alpha + k_\alpha u_\alpha, \\ \dot{\beta} = f_\beta(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, \gamma, \dot{\gamma}) + \omega_\beta + k_\beta u_\beta, \\ \dot{\gamma} = f_\gamma(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, \gamma, \dot{\gamma}) + \omega_\gamma + k_\gamma u_\gamma. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $f_i(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, \gamma, \dot{\gamma})$ 为系统内部扰动; ω_i 为各通道的外部扰动; u_i 为系统输入; $i = \alpha, \beta, \gamma$; $k_\alpha, k_\beta, k_\gamma$ 等参数定义如下:

$$\begin{aligned} k_\alpha &= \frac{\sqrt{6}K_t}{6(I_w - I_y)R_m}, \quad k_\beta = \frac{\sqrt{2}K_t}{2(I_w - I_x)R_m}, \\ k_\gamma &= \frac{\sqrt{3}K_t}{3(I_w - I_z)R_m}, \quad u_\alpha = v_b + v_c - 2v_a, \\ u_\beta &= v_b - v_c, \quad u_\gamma = v_a + v_b + v_c. \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 自抗扰控制器算法

由式(2)可知受控对象均为二阶系统,需设计二阶自抗扰控制器对其进行控制.3个通道的自抗扰控制器可采用相同的设计方法进行设计,以偏航通道为例,给出其离散形式的自抗扰控制算法.被控对象为

$$\ddot{\gamma} = f_\gamma(\alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}, \gamma, \dot{\gamma}) + \omega_\gamma + k_\gamma u_\gamma. \quad (4)$$

1) 跟踪微分器 γ_d 为航向角的设定值,有

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k), \\ v_2(k+1) = \\ v_2(k) + hfhan(v_1(k) - \gamma_d(k), v_2(k), r_0, h_0). \end{cases} \quad (5)$$

2) 扩张状态观测器

$$\epsilon_1 = z_1(k) - y(k), \quad (6)$$

$$\begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}\epsilon_1), \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \\ \beta_{02}fal(\epsilon_1, \alpha_1, \delta) + bu(k)), \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03}fal(\epsilon_1, \alpha_2, \delta). \end{cases} \quad (7)$$

3) 非线性误差反馈

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k), \\ e_2 = v_2(k) + z_2(k), \\ u_0(k) = -fhan(e_1, ce_1, r, h), \\ u(k) = (u_0(k) - z_3(k))/b_{01}. \end{cases} \quad (8)$$

其中两个非线性函数 $fal(x, \alpha, d)$ 和 $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 分别定义为

$$fal(x, \alpha, d) = \begin{cases} x/d^{1-\alpha}, & |x| \leq d; \\ |x|^\alpha \text{sign}(x), & |x| > d. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} d = rh^2, \quad a_0 = hx_2, \quad y = x_1 + a_0, \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)}, \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2, \\ s_y = (\text{sign}(y + d) - \text{sign}(y - d))/2, \\ a = (a_{02} + y - a_2)s_y + a_2, \\ s_a = (\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d))/2, \\ fhan = -r(a/d - \text{sign}(a))s_a - r\text{sign}(a). \end{cases} \quad (10)$$

在跟踪微分器中, h 为积分步长, r_0 为速度因子, h_0 为滤波因子, r_0, h_0 分别影响微分跟踪器的跟踪速度和滤波性能; $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 为扩张状态观测器状态误差反馈的反馈增益,影响扩张状态观测器的收敛速度, δ 为函数 $fal(\cdot)$ 在原点附近的线性区间宽度, $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.25$; 在非线性误差反馈中, c 为阻尼系数, r 为控制量增益, h_1 为精度因子, b_{01} 为补偿系数. 该控制算法只需要对象的输入数据 $u(k)$ 和输出数据 $y(k)$.

综上所述,在各通道的自抗扰控制器设计中,需要分别对各模块参数进行整定,即跟踪微分器 h, r_0, h_0 , 扩展状态观测器 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$, 非线性误差反馈 c, r, h_1, b_{01} .

2.4 自抗扰控制器的参数整定

根据自抗扰设计的分离性原理,分别对自抗扰控制器 TD、ESO 和 NLSEF 三个模块进行独立设计.基于以上模块在设计上的独立性,综合采用经验试凑法和带宽法对每个模块参数单独整定,再综合调整^[23].

1) 微分跟踪器.

在跟踪微分器中需要整定 h, r_0, h_0 , 采用经验试凑法整定参数. h 与采样时间有关,根据立方体机器人的电器硬件处理速度,采用 10ms 采样及处理周期可以满足控制要求,取 $h = 0.01$; 微分跟踪器的跟踪速度 r_0 影响系统的跟踪精度和过渡过程时间,如图5所示, r_0 过大会使过渡过程太短,跟踪信号无限逼近

输入信号, r_0 过小则过渡过程较长, 影响系统的响应速度, 通常取 $r_0 = 0.0001/h^2$; 增大的滤波因子 h_0 可提高滤波效果, 但同时会使跟踪信号的相位滞后, 通常取 $h_0 = 20h$.

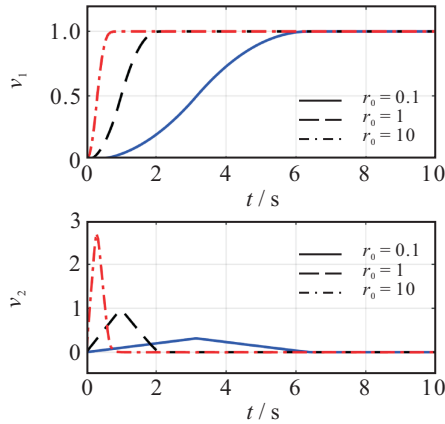


图5 r_0 取不同值时的微分跟踪器响应

2) 扩张状态观测器.

在扩张状态观测器中, 需要整定参数 $\delta, \beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$. δ 为函数 $\text{fal}(\cdot)$ 在原点附近的线性区间宽度, δ 过小容易出现原点附近的高频震颤, δ 过大会减弱 ESO 对非线性信号的逼近能力, 一般取 $\delta = 0.01$. ESO 是自抗扰控制技术的最关键、最核心模块, 参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 的整定效果决定自抗扰控制器的控制性能^[24]. 根据文献[25]提出的基于带宽的参数整定方法, 将控制器参数转换为带宽的函数, 根据观测器带宽 ω_o , 给定 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 的整定值满足

$$\beta_{01} = 3\omega_o, \beta_{02} = 3\omega_o^2, \beta_{03} = \omega_o^3. \quad (11)$$

通过选择合理的观测器带宽 ω_o , 可同时确定反馈增益参数, 有效减少了调节参数的数量.

3) 非线性误差反馈.

在非线性误差反馈中, 需要整定 c, r, h_1, b_{01} . 根据积分步长, 阻尼系数 $c = 0.5$, 控制量增益 r 满足

$$r = c/h^\alpha, \alpha = 1.5 - 0.5\text{sign}(1 - h). \quad (12)$$

精度因子 h_1 取值越小, 控制精度越高, 但过大会引起系统抖振现象. 不同 h_1 下平衡控制响应曲线如图6所示, 根据阻尼系数 c , 精度因子取值满足

$$h_1 = ch. \quad (13)$$

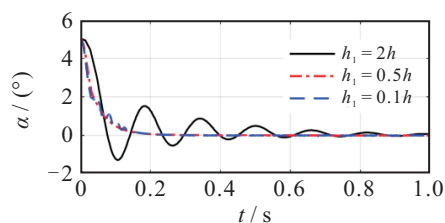


图6 h_1 取不同值时的控制效果

补偿系数 b_{01} 不同的取值决定了总扰动的实时估计值在不同的范围内变化, 补偿分量也随之发生变化. 如图7所示, 根据实验 $b_{01} = 0.8$ 可取得较好的控制效果.

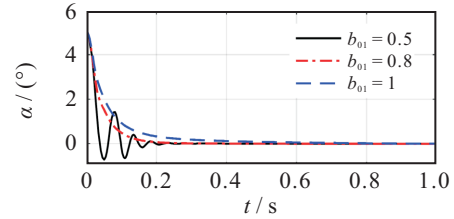


图7 b_{01} 取不同值时的控制效果

本文根据以上整定方法对各模块参数进行整定, 获得的系统自抗扰控制器参数如表2所示.

表2 自抗扰控制器参数 (滚动/俯仰/偏航)

符号	数值	符号	数值
α	0.25/0.25/0.25	b_0	0.8/0.8/0.8
r_0	1.0/1.0/1.0	a	0.5/0.5/0.5
h_0	0.2/0.2/0.2	δ	0.01/0.01/0.01
c	0.5/0.5/0.5	β_{01}	-0.55/-0.55/-0.1
r	5/5/5	β_{02}	-0.1/-0.1/-0.033
h_1	0.0001/0.001/0.001	β_{03}	-0.006/0.006/-0.000037

3 仿真分析

3.1 稳定控制实验

首先验证自抗扰控制对立方体机器人的平衡控制效果. 设定立方体机器人的初始状态为 $x_0 = [5^\circ, 0, -5^\circ, 0, 20^\circ, 0, 0, 0, 0]^\text{T}$, 控制目标为使立方体机器人平衡, 即 $x = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^\text{T}$, 仿真结果如图8所示.

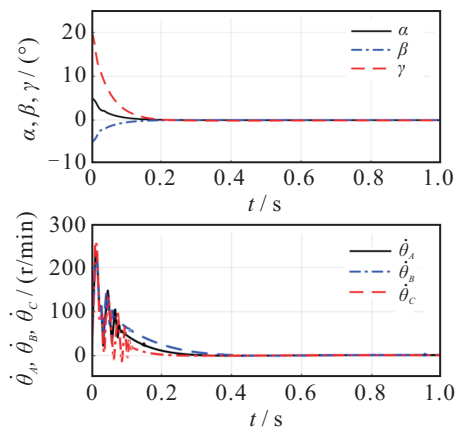


图8 稳定控制响应曲线

由图8可以看出, 立方体机器人姿态角由初始位置快速平稳地达到了期望值, 过程中没有振荡, 立方体在0.2s内实现平衡, 惯性轮的转速在0.2s内减速到零转速附近, 调节时间短, 超调量小, 系统具有较强的稳定性.

3.2 ADRC与PID控制器对比实验

分别采用ADRC控制器和PID控制器,对立方体机器人进行姿态跟踪实验、抗扰性实验和鲁棒性实验对比,以检验控制器的快速响应能力、抗扰性和鲁棒性,经优化后确定的PID控制器参数如表3所示.

表3 PID控制器参数

	P	I	D
滚动通道	2	0	0.3
俯仰通道	2	0	0.3
偏航通道	0.1	0.05	0.1

3.2.1 姿态角跟踪实验

设定立方体机器人初始状态均为零,即

$$x = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T,$$

滚动、俯仰通道输入指令为频率50Hz、脉宽1s、增益2°的方波信号,偏航通道输入指令为增益20°的方波信号.采用以上两种控制器分别进行控制,系统响应曲线如图9所示,偏航通道的跟踪性能指标见表4.

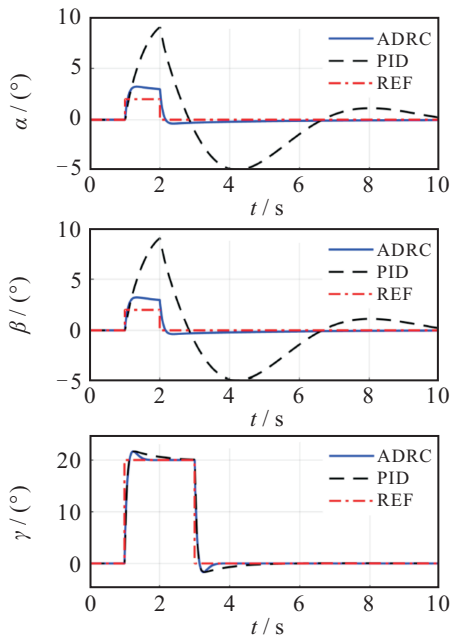


图9 跟踪方波信号实验响应曲线

表4 偏航通道的跟踪实验性能指标

控制器	超调量/%	调整时间/s
ADRC	8.35	0.8
PID	8.2	2

由图9和表4可见,在两种控制器下的偏转角响应曲线都能跟踪期望值,但自抗扰控制器响应速度在滚动和俯仰通道的超调量和调整时间明显小于PID控制器,在偏航通道超调量略大但调整时间明显小于PID控制器,可见自抗扰控制器在响应速度和跟踪精

度方面明显优于PID控制器.

3.2.2 抗扰性实验

实际系统会受到多种干扰的影响,如传感器噪声、外部扰动突变等.在实验中,分别在各通道反馈回路加入高斯白噪声、短时方波信号来模拟系统噪声和外部扰动对控制系统的干扰,以测试控制系统的抗扰能力.两种控制方法下系统的输出响应曲线如图10所示.

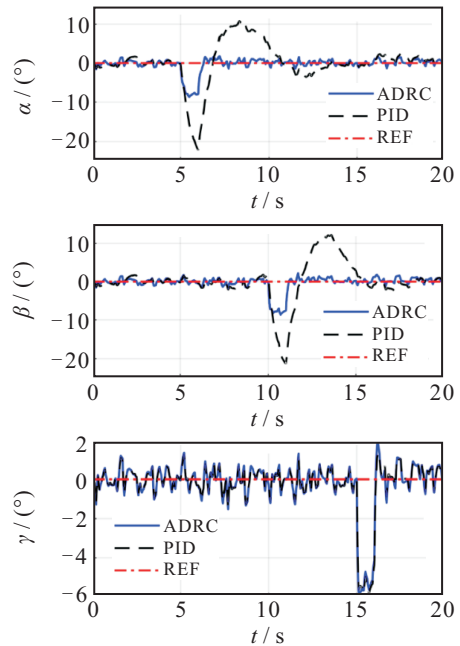


图10 跟踪方波信号实验响应曲线

由图10可见:对于外部扰动和噪声干扰,两种控制器都可以使立方体机器人回到平衡状态,都有一定的抗干扰能力;在偏航通道控制效果基本一致,但在滚动和俯仰通道自抗扰控制器具有更优的抗扰性能;在相同的外部扰动作用下,自抗扰控制器能使立方体机器人的超调量控制在9°以内,在1.5s内回到平衡位置,而PID控制器只能使其控制在22°的范围内,且调节时间超过8s.

3.2.3 鲁棒性实验

测试控制系统保持不变情况下,控制对象参数发生变化时的控制能力.设定立方体机器人的初始状态为 $x_0 = [5^\circ, 0, -5^\circ, 0, 20^\circ, 0, 0, 0, 0]^T$,控制目标为使立方体机器人平衡,即 $x = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$,在保持自抗扰控制器参数不变,立方体机器人的质量和转动惯量变化±20%的实验响应曲线如图11所示.

由图11可见,在相同的自抗扰控制器作用下,尽管被控对象参数发生变化,但立方体机器人各通道的动态响应保持一致,验证了所设计的自抗扰控制器对立方体机器人参数的不确定性有很强的鲁棒性,鲁棒

性能指标高于PID控制器。

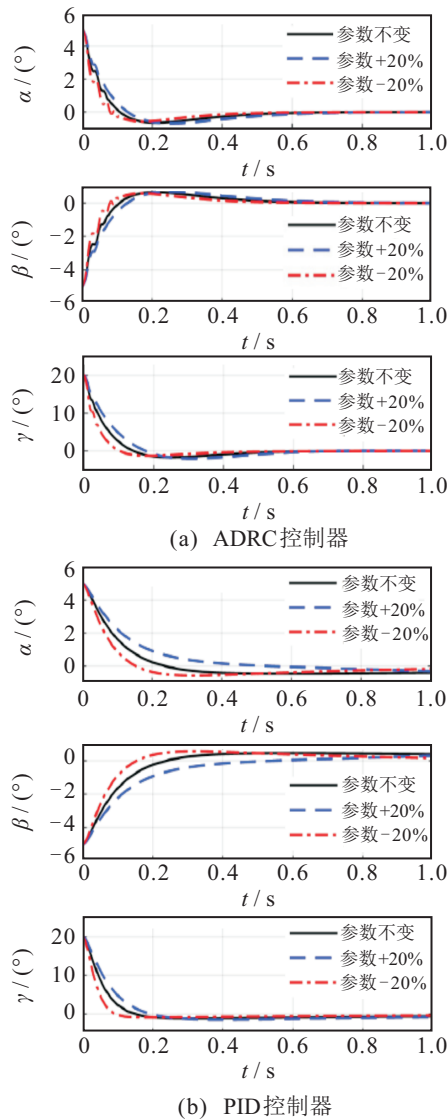


图 11 不同参数下平衡实验响应曲线

上述实验研究表明,与PID控制器相比,本文所设计的自抗扰控制器在立方体机器人的平衡控制中具有响应速度快、控制精度高、强鲁棒性的特点。

4 结论

本文着重解决立方体机器人动力学模型多变量、强耦合系统的解耦控制器的设计问题,提出了一种基于自抗扰的平衡控制方法,综合采用经验试凑法和带宽法实现了对控制器参数进行整定.数值仿真实验验证了所提出方法在响应速度、控制精度、抗扰动能力和鲁棒性能上的优越性.今后的工作将继续对自抗扰控制的参数整定问题进行研究,进一步提高自抗扰控制器的性能。

参考文献(References)

[1] 王家军, 刘栋良, 王宝军. X-Z倒立摆的一种饱和非线性稳定控制方法的研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(1):

92-96.
 (Wang J J, Liu D L, Wang B J. Research on one type of saturated nonlinear stabilization control method of X-Z inverted pendulum[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(1): 92-96.)

[2] 张永立. 空间多级倒立摆非线性控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 2011: 8-33.
 (Zhang Y L. Research on nonlinear control technique for spherical multi-rod inverted pendulum system[D]. Dalian: Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, 2013: 8-33.)

[3] 阮晓钢, 王旭, 陈志刚. 独轮机器人的建模与自抗扰控制算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(12): 2253-2258.
 (Ruan X G, Wang X, Chen Z G. Modeling and active disturbance rejection algorithm of single wheel robot [J]. Control and Decision, 2015, 30(12): 2253-2258.)

[4] 杨振, 付庄, 管恩广, 等. M-Lattice模块机器人的运动学分析及构型优化[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(10): 1153-1159.
 (Yang Z, Fu Z, Guan E G, et al. The kinematic analysis and structure optimization of m-Lattice modular robot[J]. J of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(10): 1153-1159.)

[5] 韩京清. 自抗扰控制技术-估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 288-296.
 (Han J Q. Active disturbance rejection control technique-the technique for estimating and compensating the uncertainties[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 288-296.)

[6] 陈志刚, 阮晓钢, 李元. 自平衡立方体机器人动力学建模[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(3): 376-381.
 (Chen Z G, Ruan X G, Li Y. Dynamic modeling of a self-balancing cubical robot[J]. J of Beijing University of Technology, 2018, 44(3): 376-381.)

[7] Muehlebach M, Gajamohan M, D'Andrea R. Nonlinear analysis and control of a reaction wheel-based 3D inverted pendulum[C]. The 52nd IEEE Conf on Decision and Control. Florence: IEEE, 2013: 1283-1288.

[8] Chen Z G, Ruan X G, Li Y. Dynamic modeling of a cubical robot balancing on its corner[C]. The 3rd Int Conf on Mechanical, Electronic and Information Technology Engineering. Paris: EDP Sciences, 2017: 1-5.

[9] 田莉. 立方体系统的模糊控制算法研究[D]. 南京: 南京理工大学自动化学院, 2006.
 (Tian L. Research on fuzzy control algorithm of cube system[D]. Nanjing: School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, 2006.)

[10] 邱振彬. 基于观测器的立方体系统控制研究[D]. 南京:

- 南京理工大学自动化学院, 2009.
(Qiu Z B. Research on control of cube system based on observer[D]. Nanjing: School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, 2009.)
- [11] Gajamohan M, Merz M, Thommen I, et al. The Cubli: A cube that can jump up and balance[C]. IEEE/RS Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Algarve: IEEE, 2012: 3722-3727.
- [12] Gajamohan M, Muehlebach M, Widmer T, et al. The cubli: A reaction wheel based 3D inverted pendulum[C]. European Control Conf. Zurich: IEEE, 2013: 268-274.
- [13] Muehlebach M, D'Andrea R. Nonlinear analysis and control of a reaction-wheel-based 3-D inverted pendulum[J]. IEEE Trans on Control System Technology, 2017, 25(1): 235-246.
- [14] Xia Y Q, Fu M Y, Deng Z H, et al. Recent developments in sliding mode control and active disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(2): 137-147.
- [15] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281-295.
(Li J, Qi X H, Wan H, et al. Active disturbance rejection control theoretical results summary and future researches[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(3): 281-295.)
- [16] 刘一莎, 杨晟萱, 王伟. 四旋翼飞行器的自抗扰飞行控制方法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1351-1360.
(Liu Y S, Yang S X, Wang W. An active disturbance-rejection flight control method for quad-door unmanned aerial vehicles[J]. Control Theory and Applications, 2015, 32(10): 1351-1360.)
- [17] 阮晓钢, 王旭, 陈志刚. 独轮机器人的建模与自抗扰控制算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(12): 2253-2258.
(Ruan X G, Wang X, Chen Z G. Modeling and active disturbance active rejection algorithm of single wheel robot[J]. Control and Decision, 2015, 30(12): 2253-2258.)
- [18] 方勇纯, 申辉, 孙秀云, 等. 无人直升机航向自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(2): 238-243.
(Fang Y C, Shen H, Sun X Y, et al. Active disturbance rejection control for heading of unmanned helicopter[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(2): 238-243.)
- [19] 刘春强, 骆光照, 涂文聪, 等. 基于自抗扰控制的双环伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 7032-7039.
(Liu C Q, Luo G Z, Tu W C, et al. Servo systems with double closed-loops based on active disturbance rejection controllers[J]. Proc of the CSEE, 2017, 37(23): 7032-7039.)
- [20] 葛立明, 李宗刚, 王世伟, 等. 基于调节/观测时间的自抗扰控制器参数整定[J]. 控制与决策, 2017, 32(7): 1333-1337.
(Ge L M, Li Z G, Wang S W, et al. Parameter-tuning of active disturbance rejection control based on settling/observing time[J]. Control and Decision, 2017, 32(7): 1133-1137.)
- [21] 杨晟萱. 四旋翼飞行器自抗扰控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 2014.
(Yang S X. Research on active disturbance rejection control method for quadrotor UAV[D]. Dalian: Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, 2014.)
- [22] 李述清, 张胜修, 刘毅男, 等. 根据系统时间尺度整定自抗扰控制器参数[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(1): 125-129.
(Li S Q, Zhang S X, Liu Y N, et al. Parameter-tuning in active disturbance rejection controller using time scale[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(1): 125-129.)
- [23] 王德爽. 基于自抗扰算法的导弹制导系统设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2012.
(Wang D S. Missile guidance system design based on active disturbance rejection control algorithm[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2012.)
- [24] 叶镭, 夏元清, 付梦印, 等. 无人炮塔炮控系统自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1580-1588.
(Ye L, Xia Y Q, Fu M Y, et al. Active disturbance rejection control for gun control system of unmanned turret[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(11): 1580-1588.)
- [25] Gao Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]. Proc of the American Control Conf. New York: IEEE, 2003: 4989-4996.

作者简介

陈志刚(1987—), 男, 博士生, 从事机器人设计和控制的研究, E-mail: chenzgbs@126.com;

阮晓钢(1958—), 男, 教授, 博士, 从事模式识别、智能系统等研究, E-mail: adrxg@bjut.edu.cn;

李元(1990—), 男, 硕士生, 从事机器人的研究, E-mail: 3156230@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)