

非平衡负载下轮式移动机器人的抗扰PID控制

李高铭, 聂卓赞[†], 李兆洋, 郑义民, 罗继亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 在非平衡负载条件下, 轮式移动机器人(WMR)的前进、转向速度耦合, 影响着轨迹跟踪和避障等运动控制性能. 为此, 本文提出了一种基于抗扰PID(DR-PID)控制器的WMR速度调节主动抗扰(ADR)控制策略. 首先, 建立WMR的速度耦合模型, 引入解耦矩阵减小静态耦合作用; 然后, 基于一类改进干扰观测器(DOB)控制方法, 设计一种具有ADR能力的PID控制器, 即DR-PID, 用于WMR的速度分散调节. 进一步, 考虑高频增益不匹配/不确定性, 分析闭环系统稳定性条件. 所得结论揭示了PID控制器的抗扰机理; 最后, 在非平衡负载条件下开展WMR运动控制实验研究, 实验结果验证了所提方法的有效性.

关键词: 轮式移动机器人; 运动控制; 干扰观测器; 抗扰PID

引用格式: 李高铭, 聂卓赞, 李兆洋, 等. 非平衡负载下轮式移动机器人的抗扰PID控制. 控制理论与应用, 2021, 38(3): 398–406

DOI: 10.7641/CTA.2020.00237

Disturbance rejection PID control of wheeled mobile robot under non-equilibrium load

LI Gao-ming, NIE Zhuo-yun[†], LI Zhao-yang, ZHENG Yi-min, LUO Ji-liang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: Under the condition of non-equilibrium load, the coupling effect between the forward and steering speeds in the wheeled mobile robot (WMR) affects the motion control performance greatly, such as the trajectory tracking and obstacle avoidance. Therefore, this paper proposes an active disturbance rejection (ADR) control strategy for the speed tuning of WMR based on disturbance rejection PID (DR-PID) controller. Firstly, the speed coupling model of WMR is established to derive the decoupling matrix for static coupling reduction. Then, the design of PID controller with ADR capability, named DR-PID, is presented based on an improved disturbance observer control scheme. The DR-PID controller is utilized for the decentralized speed tuning in WMR. Furthermore, the closed-loop stability condition is investigated with the consideration of high-frequency gain unmatching/uncertainty. This result reveals the ADR mechanism of the standard PID controller. Finally, experimental study of WMR motion control is carried on with non-equilibrium load. The validity of the proposed method is verified by experimental results.

Key words: wheeled mobile robot; motion control; disturbance observer; disturbance rejection PID

Citation: LI Gaoming, NIE Zhuoyun, LI Zhaoyang, et al. Disturbance rejection PID control of wheeled mobile robot under non-equilibrium load. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(3): 398–406

1 引言

轮式移动机器人(wheeled mobile robot, WMR)在军事、工业等领域有广泛应用前景. 为提高运动控制精度, 一般需要加装激光雷达等传感器进行定位和位置、速度校正^[1–2], 另一种方式则是依靠高性能运动控制算法, 减小运动任务执行偏差^[3–4]. 由于存在左右轮负载不均衡与运动耦合等因素, WMR在运动过程中

产生较大偏差. 因此, 克服非平衡负载与运动耦合影响, 在提高WMR的运动控制精度中具有重要作用.

对于WMR运动控制问题, 涌现出很多非线性控制理论相关的控制方法, 例如: 滑模控制^[5]、反演法控制^[6–9]等. 文献[7]利用反演法设计全局自适应跟踪控制器, 解决存在参数和非参数不确定性的链式动态非完整机器人系统运动控制问题. 文献[9]提出一种用于

收稿日期: 2020–05–01; 录用日期: 2020–11–05.

[†]通信作者. E-mail: yezhuoyun2004@sina.com; Tel.: +86 18850174267.

本文责任编辑: 苏剑波.

国家自然科学基金项目(61403149), 福建省自然科学基金项目(2019J01053), 华侨大学研究生科研创新基金项目(18013082042)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61403149), the National Natural Science Foundation of Fujian Province (2019J01053) and the Subsidized Project for Postgraduates' Innovative Fund in Scientific Research of Huaqiao University (18013082042).

提升WMR瞬态性能和抑制跟踪误差能力的双时间尺度滤波技术, 并设计反演控制器实现目标跟踪. 这类非线性控制方法主要以期望运动学模型为跟踪目标, 构建基于姿态跟踪误差的跟踪控制器, 在稳定性条件与一致有界性下, 使跟踪误差收敛; 在速度控制上, 则主要基于动力学模型进行控制器设计, 而这这就要求对WMR系统进行精确的动力学建模, 较难在常规WMR上应用. 特别是, 当WMR具有非平衡负载时, WMR的动力学模型变化较大, 运动速度耦合对控制性能的影响也变得非常明显.

目前, 针对非平衡负载下WMR的控制问题, 主要采用静态解耦方法进行速度控制^[10-11], 或仅考虑电机转速/转矩控制^[3,6], 而将非平衡负载引起的前进/转向速度偏差, 置于轨迹跟踪控制回路中进行补偿. WMR的轨迹运动控制为一类具有非完整约束的非线性控制问题^[4,9], 上述方案无疑为轨迹跟踪控制器的设计提出了更高的要求.

主动抗扰(active disturbance rejection, ADR)控制是一类不需要对象精确模型的控制方法^[12-13], 通过构建观测器估计系统扰动, 并进行反馈补偿. 对于具有回路耦合的多输入多输出系统, ADR控制具有天然的解耦特性^[14]. 这类方法在机器人运动控制上取得了不错的效果^[15-19]. 为克服WMR系统的非完整约束、未知参数和耦合, 文献[17]利用高增益观测器估计WMR的前进速度和转向速度, 并设计基于自适应状态反馈的跟踪控制器. 文献[19]利用扩张状态观测器对系统扰动进行估计, 并在控制律中加入扰动补偿项以减小参数不确定性和外界扰动对系统的影响.

PID控制器在工业系统中应用广泛, 相关分析与设计方法非常丰富. 但在实际应用中, 往往缺少对象的数学模型, PID控制仍以经验调参为主, 较难保证工程控制性能. 近年来, 基于ADR控制方法设计PID控制器受到广泛关注^[20-24], 所设计的PID控制器能实现参数快速整定, 且具有良好的鲁棒性与抗干扰能力. 文献[20]在自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)架构中采用降阶扩张状态观测器给出了PID设计原理; 文献[21]基于ADRC中的“总扰动”与微分跟踪器思想, 提出了一种自耦PID控制方法; 文献[22]给出了一种基于平坦滤波器的PID设计方法, 并讨论了PID控制器与滑模控制、ADRC的关联; 文献[23]阐述了二阶ADRC系统中PID控制器的存在形式与工作原理, 即将ADRC控制器等效为标准PID控制器与滤波器的串联形式; 文献[24]给出了基于一类改进干扰观测器(disturbance observer, DOB)^[25]的PID控制器设计方法, 进一步简化了PID参数整定. 上述研究建立了PID控制器参数与跟踪、抗扰性能之间的联

系, 使得参数调节具有明确物理意义, 为本文WMR运动控制设计, 提供了新思路.

本文着重解决非平衡负载下的WMR速度耦合控制问题, 建立一种基于抗扰PID(disturbance rejection PID, DR-PID)的WMR速度控制策略. 首先, 建立前进速度与转向速度的耦合模型, 并设计静态解耦矩阵. 在此基础上, 基于文献[25]研究高频增益不匹配下的DR-PID控制器设计及稳定性分析. 最后, 开展WMR运动控制实验, 验证所提方法的有效性.

2 问题描述

本文研究两轮差速WMR速度控制问题. 模型如图1所示, 其中: v_L , v_R 分别是左右驱动轮转速; G_L , G_R 分别是左、右两轮伺服驱动模型, 平衡负载下有 $G_L \approx G_R$; v 和 w 分别为前进速度和转向速度; r 是驱动轮的半径; b 是两个驱动轮几何中心的间距.

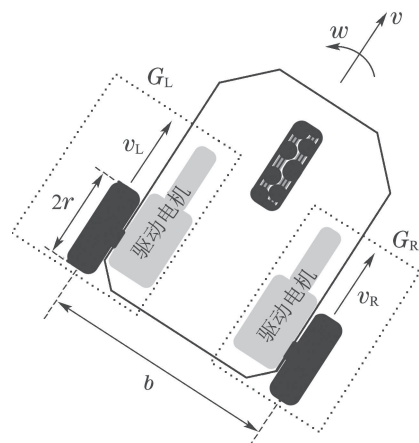


图1 两轮差速WMR模型

Fig. 1 Two-wheel differential WMR

电机转速与WMR运动速度之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ b^{-1} & -b^{-1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 B 为速度静态变换矩阵.

WMR两轮在伺服驱动系统作用下进行转速控制. 令期望转速分别为 v_{Lc} 和 v_{Rc} , 则WMR运动速度为

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} G_R & 0 \\ 0 & G_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Rc} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_R}{2} & \frac{G_L}{2} \\ \frac{G_R}{b} & -\frac{G_L}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Rc} \\ v_{Lc} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)表明两驱动轮转速与WMR运动速度之间存在较强的耦合关系.

为实现运动速度独立调节, 一种常规控制方案是假设 $G_L = G_R$, 并引入静态解耦矩阵 B^{-1} , 得到

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} G_R & 0 \\ 0 & G_L \end{bmatrix} B^{-1} \begin{bmatrix} u_v \\ u_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_R + G_L}{2} & \frac{b(G_R - G_L)}{4} \\ \frac{G_R - G_L}{b} & \frac{G_R + G_L}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_v \\ u_w \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 u_v 和 u_w 为给定输入. 这类控制方案在平衡负载且无扰情况下, 能实现WMR运动速度的独立调节. 然而, 在实际运行条件下, WMR左右伺服传动系统松紧程度不同, 或左右负载差异, 使得 G_L 与 G_R 存在较大差别. 因此, 速度控制受到耦合项 $G_R - G_L$ 的影响, 给WMR的轨迹跟踪、避障等带来较大困难.

为此, 本文考虑非平衡条件下WMR运动速度控制问题, 目标是使WMR前进速度 v 和转向速度 w 按照给定速度进行独立调节. 为达到控制目标, 本文在常规方案的基础上提出如图2所示控制方案. 该方案将运动速度的动态耦合当作系统的扰动^[14], 基于文献[25]设计具有抗扰能力的PID控制器, 实现两个回路运动速度的独立调节.

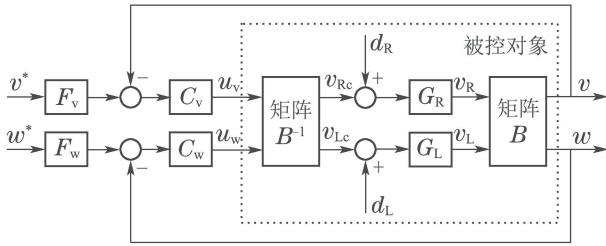


图2 WMR运动控制策略

Fig. 2 The motion control strategy for WMR

3 DR-PID设计

3.1 抗扰原理

考虑一类最小相位对象

$$G(s) = \frac{b_{n-l}s^{n-l} + b_{n-l-1}s^{n-l-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0}, \quad (4)$$

其中: n 和 l 都是正整数, l 为对象的相对阶次, 表示为 $l = r[G]$; $a_n \neq 0$, $b_{n-l} \neq 0$, 使得对象的相对阶次不发生变化.

文献[25]针对这类对象 $G(s)$, 提出一种改进型DOB控制方案, 其控制结构如图3所示. 图中 $K(s)$ 为前置补偿器; $H_R(s)$ 为期望模型, 且保持与 $G(s)K(s)$ 的阶次匹配, 有

$$r[K] + r[G] = r[H_R]. \quad (5)$$

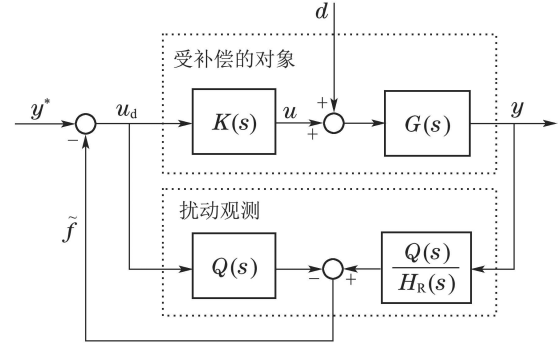


图3 改进的DOB控制结构

Fig. 3 The control structure of the improved DOB scheme

在改进型DOB方案中, 用 $H_R(s)$ 代替 $G(s)K(s)$, 有

$$\begin{aligned} y &= G(u + d) = \\ &H_R u_d + (GK - H_R)u_d + Gd = \\ &H_R(u_d + f), \end{aligned} \quad (6)$$

其中: u , d 和 y 分别为控制输入量、外部扰动和对象输出; $u = Ku_d$; f 为总扰动, 它包含了内部扰动 f_1 和外部扰动 f_2 两部分:

$$\begin{cases} f = f_1 + f_2, \\ f_1 = H_R^{-1}(GK - H_R)u_d, \\ f_2 = H_R^{-1}Gd. \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表明, 内部扰动由 GK 和 H_R 之间的模型不匹配产生.

这种改进方式, 有如下特点: 1) 避免 $G(s)$ 的求逆; 2) 通过引入前置补偿 $K(s)$, 减小内部扰动、减轻扰动估计器负担; 3) 控制结构简单, 易于实现.

结合DOB原理, 扰动估计为

$$\tilde{f} = Q(H_R^{-1}y - u_d),$$

并构建反馈补偿 $u_d = y^* - \tilde{f}$. 其中 $Q(\tau_q s)$ 是以 τ_q 为时间常数的低通滤波器, 使得 $Q(\tau_q s)H_R^{-1}(s)$ 满足正则条件, 且 $Q(j0) = 1$. 为简化设计, 指定 $Q(\tau_q s) = (\tau_q s + 1)^{-m}$, m 为正整数.

在改进型DOB控制方案中, 从扰动 f 到估计值 $\tilde{f}$ 的传递函数为 $Q(s)$, 有

$$\tilde{f} = Q\left(\underbrace{\frac{GK - H_R}{H_R K}u + \frac{G}{H_R}d}_{f}\right).$$

$Q(s)$ 在带宽范围内为单位增益, 可对 f 进行估计. 若 $G(s)K(s)$ 与 $H_R(s)$ 能在高频完全匹配, 则 f 的高频成分较小, 通过 $Q(s)$ 能得到准确的扰动观测.

在图3中, 从 y^* 到 y 的传递函数为

$$G_{y^* \rightarrow y}(s) = \frac{H_R(s)K(s)G(s)}{(1 - Q(s))H_R(s) + Q(s)K(s)G(s)}.$$

在带宽范围内, 若 $|1 - Q(j\omega)| \approx 0$ 或 $|Q(j\omega)| \approx 1$, 则闭环系统近似为期望模型, 有 $G_{y^* \rightarrow y}(s) \approx H_R(s)$.

将 $G(s)$, $K(s)$, $H_R(s)$, $Q(s)$ 表示为互质多项式分数, 有

$$G(s) = b_g(s)/a_g(s),$$

$$K(s) = b_k(s)/a_k(s),$$

$$H_R(s) = b_h(s)/a_h(s)$$

和 $Q(\tau_q s) = b_q(\tau_q s)/a_q(\tau_q s)$. 结合内稳定条件^[26], 分析系统特征方程

$$p_c(s, \tau_q) = a_q(\tau_q s) a_k(s) a_g(s) b_h(s) (a_q(\tau_q s) - b_q(\tau_q s)) + a_q(\tau_q s) b_k(s) b_g(s) b_q(\tau_q s) a_h(s).$$

当 $\tau_q = 0$ 时, $p_c(s, 0) = a_q(0) b_q(0) b_k(s) b_g(s) a_h(s)$ 为Hurwitz多项式, 系统稳定. 文献[25]给出如下稳定性条件:

定理 1^[25] 存在一个最大值 $\bar{\tau}_q$, 对所有 $0 < \tau_q < \bar{\tau}_q$, 如果满足以下条件, 则DOB控制系统稳定:

- 1) 阶次匹配式(5)成立;
- 2) $b_g(s)$ 是Hurwitz多项式;
- 3) $b_k(s)$ 是Hurwitz多项式;
- 4) $\phi(S)$ 是Hurwitz多项式.

其中:

$$S = \tau_q s, \phi(S) = [\gamma(1 - Q(S)) + 1] a_q(S),$$

$$\gamma = \lim_{s \rightarrow \infty} [H_R(s)/G(s)K(s) - 1].$$

注 1 在定理1中, γ 可视为 $G(s)K(s)$ 与 $H_R(s)$ 的高频增益匹配系数, 主要由 $G(s)$ 的高频增益 a_n/b_{n-l} 决定. 如果 a_n/b_{n-l} 已知, 则能通过设计 $K(s)$ 使 $\gamma = 0$, 从而减小系统内部扰动的高频分量; 如果 a_n/b_{n-l} 存在较大不确定性, 使得 $\gamma \neq 0$, 则系统中可能存在较大高频扰动, 而这就对滤波器 $Q(\tau_q s)$ 的快速性提出了较高要求.

3.2 DR-PID及稳定性分析

考虑相对阶次 $l = 2$ 的一类最小相位系统(4). 结合DOB抗扰控制原理, 选取低阶期望模型和低通滤波器以构建等效PID控制器, 有

$$H_R(s) = \frac{1}{\tau_c s + 1}, \quad (8)$$

$$Q(s) = \frac{1}{\tau_q s + 1}, \quad (9)$$

其中: $\tau_c > 0$ 为控制时间常数; $\tau_q > 0$ 为观测器时间常数. 选取 $K(s) = k_{pd}(1 + k_d s)$, 实现 GK 与 H_R 的阶次匹配.

此时图3所示的改进DOB控制系统等效为图4所示的二自由度PID控制结构, 包括PID控制器 $C(s)$ 和输入滤波器 $F(s)$, 有

$$C(s) = \frac{Q(s)}{H_R(s)} \frac{K(s)}{1 - Q(s)} =$$

$$k_{pi}(1 + k_i \frac{1}{s}) k_{pd}(1 + k_d s) =$$

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (10)$$

$$F(s) = \frac{H_R(s)}{Q(s)}, \quad (11)$$

其中: $k_{pi} = \tau_c/\tau_q$, $k_i = 1/\tau_c$.

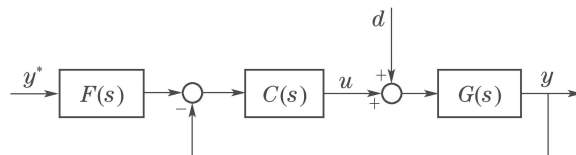


图4 二自由度PID控制结构

Fig. 4 Two degree-of-freedom PID control structure

下面给出PID控制系统的稳定性条件.

定理 2 针对图4所示二自由度PID控制系统, 考虑 $l = 2$ 的最小相位对象(4), 在PID控制器(10)中, 给定 $k_d > 0$ 和 $\tau_c > 0$, 如果满足以下两个条件之一:

- 1) $\gamma > -1$;
- 2) $a_n/b_{n-l} k_{pd} k_d > 0$,

则存在一个最大值 $\bar{\tau}_q$, 对所有 $0 < \tau_q < \bar{\tau}_q$, PID控制系统稳定.

证 在给定制式(8)–(9)和 $K(s) = k_{pd}(1 + k_d s)$ 条件下, 二自由度PID控制结构与改进DOB控制等效. 此时, 系统阶次匹配条件成立; 最小相位对象(4)满足 $b_g(s)$ Hurwitz 多项式条件; $k_d > 0$, 满足 $b_k(s)$ Hurwitz 多项式条件.

将 $Q(s)$ 代入 $\phi(S)$ 得到 $\phi(S) = (\gamma + 1)S + 1$, $\phi(S)$ 为Hurwitz多项式的条件为 $\gamma > -1$. 进一步, 将 $H_R(s)$, $G(s)$ 和 $K(s)$ 代入 γ 得到

$$\gamma = \lim_{s \rightarrow \infty} [H_R(s)/G(s)K(s) - 1] = \frac{a_n}{b_{n-l} \tau_c k_{pd} k_d} - 1,$$

$a_n/b_{n-l} k_{pd} k_d > 0$ 即可保证 $\phi(S)$ 满足Hurwitz条件. γ 为高频增益匹配系数. 若 $\gamma = 0$, 则表明 $G(s)K(s)$ 与 $H_R(s)$ 在高频完全匹配.

因此, 定理2的两个条件均与 $\phi(S)$ 是Hurwitz多项式等价. 根据定理1, 存在一个最大值 $\bar{\tau}_q$, 对所有 $0 < \tau_q < \bar{\tau}_q$, PID控制系统稳定. 证毕.

注 2 通过设计 k_{pd} , k_d 满足 $a_n/b_{n-l} k_{pd} k_d > 0$ 或 $\gamma > -1$, 上述稳定性分析中表明: 即使系统高频增益 a_n/b_{n-l} 存在较大的不确定性(只要符号保持不变), 该稳定性条件依然成立. 可见, 针对高频增益 a_n/b_{n-l} 不确定性, 该稳定性条件具有强鲁棒性.

设计中, 取 $k_d = \lambda > 0$, 有

$$k_{pd} = \frac{a_n}{b_{n-l} \tau_c \lambda (1 + \gamma)}.$$

式(10)中PID控制器表示为

$$\begin{cases} K_p = \frac{a_n}{b_{n-l}\tau_q(1+\gamma)}\left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\tau_c}\right) = \\ K_d\left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\tau_c}\right), \\ K_i = \frac{a_n}{b_{n-l}\tau_c\tau_q\lambda(1+\gamma)} = K_d\frac{1}{\tau_c\lambda}, \\ K_d = \frac{a_n}{b_{n-l}\tau_q(1+\gamma)}. \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 K_p 与 K_i 的表达式均含有 K_d , 可将 K_d 作为控制器增益, 则PID控制器(10)可写成

$$C(s) = K_d\left[\left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\tau_c}\right) + \frac{1}{\tau_c\lambda} \frac{1}{s} + s\right]. \quad (13)$$

式(12)和(13)所得PID控制器是由一类ADR控制策略等效而成, 揭示了理想PID控制器的ADR机理^[24]:

1) PID三项权重, 由对象自身快慢特性及期望性能决定. τ_c 代表闭环响应速度(期望目标), λ 代表系统的相位超前补偿, 两个参数均与对象 $G(s)$ 的快慢特性相匹配. 对快系统, τ_c 和 λ 取小; 对慢系统, τ_c 和 λ 取大. 文中推荐 λ 正比于 τ_c .

2) 闭环控制系统逼近理想性能的能力由PID增益 K_d 决定. 根据改进DOB抗扰原理^[25]和带宽调节法^[27], 在理想情况下, $K_d(1/\tau_q)$ 越大控制性能越好、鲁棒性越强. 此时, 系统的不确定性(高频增益不匹配、内部扰动)和外部扰动都将得到抑制; 可认为 λ 与控制器增益 K_d 是实现期望目标的调节手段.

3) 文中所讨论PID控制器的ADR机理适用于无不稳定零点、相对阶为2的线性时不变定常对象, 对非最小相位、时滞系统等, 其DR-PID的设计仍需进一步讨论.

在工程应用中, 选定期望目标 τ_c 后, PID控制器的设计是ADR机理与非理想条件(例如系统可能存在高阶动态特性、时滞、非最小相位零点、非线性, 或者带宽受限等)的折中, 主要体现在相位超前补偿 λ 与PID增益 K_d 的选取上. 此时, 可先根据系统快慢特性选择 λ , 进而确定PID三项比值, 然后逐步增大PID增益 K_d , 直到控制性能符合折中需求. 此外, 为了克服量测噪声影响, 可在控制回路中引入滤波器, 适应工程应用.

文献[14]分析了ADR控制策略具有的天然解耦特性, 即: ADR控制能对多输入多输出系统回路间的耦合作用进行主动估计补偿. 为此, 本文针对式(3)构建的两输入两输出系统, 应用DR-PID实现WMR的前进、转向速度独立控制.

4 实验与分析

4.1 实验平台

本文使用的实验平台是一款两轮差速WMR, 如图5所示. 两轮独立驱动, 采用带500线AB相光电编码器的减速直流有刷伺服电机, 电机减速比为1: 27; 电

机驱动电路板是一款采用BTN7971芯片的三路驱动模块, 使用PWM方式对电机进行调速; STM32F1开发板集成了ESP8266WiFi模块, 在对WMR进行控制的同时, 通过WiFi模块向PC端发送WMR的运行数据; 系统的采样控制周期为2 ms; 使用5 AH, 22.2 V锂电池为WMR系统供电; 全向从动轮使WMR可保持平衡以及平稳转向; 驱动轮几何中心的间距 $b = 0.33$ m, 车轮直径为0.127 m.

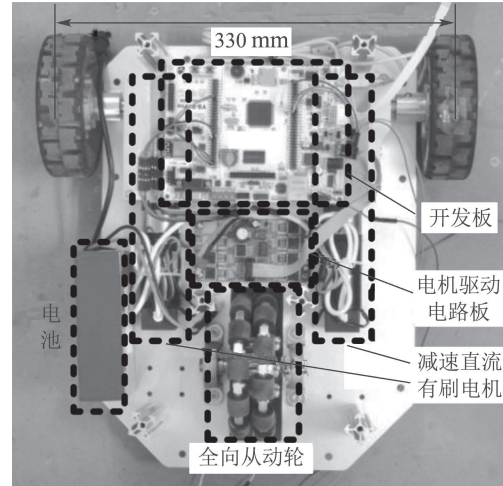


图5 实验平台实物图

Fig. 5 The physical picture of experimental platform

4.2 控制器设计与仿真分析

构建静态解耦矩阵 B^{-1} 矩阵, 可得到式(3)系统模型. 分别给定系统直线前进指令和转向指令, 辨识式(3)中对角元素, 有

$$\frac{G_R + G_L}{2} \approx \frac{10.79}{s^2 + 8.668s + 10.79}. \quad (14)$$

在模型(3)中, 由于 $b = 0.33$ m相对较小, 有

$$\left\| \frac{G_R - G_L}{b} \right\| \gg \left\| \frac{b(G_R - G_L)}{4} \right\|.$$

可见, 前进速度 v 控制回路对转向速度 w 影响较大. 从ADR控制角度来看, 要求转向速度 w 控制的抗扰抑制能力强于前进速度 v 回路, 即 $\tau_{qw} < \tau_{qv}$, 相应的 $\tau_{cw} < \tau_{cv}$. 根据上述原则, 选取两个回路的抗扰控制器参数在表1中给出. 所得前进速度控制回路的控制器 $C_v(s)$ 和输入滤波器 $F_v(s)$ 分别为

$$\begin{cases} C_v(s) = 5.4062 + \frac{7.7232}{s} + 0.9268s, \\ F_v(s) = \frac{0.1s + 1}{0.4s + 1}. \end{cases}$$

所得转向速度控制回路的控制器 $C_w(s)$ 和输入滤波器 $F_w(s)$ 分别为

$$\begin{cases} C_w(s) = 10.2976 + \frac{17.1627}{s} + 1.5446s, \\ F_w(s) = \frac{0.06s + 1}{0.3s + 1}. \end{cases}$$

表1 DR-PID的参数选取

Table 1 The parameter selection of DR-PID

参数名称	v 控制回路	w 控制回路
b_{n-l}/a_n	10.79	10.79
τ_c	0.4	0.3
τ_q	0.1	0.06
λ	0.3	0.3

对辨识模型(14)进行单回路控制仿真分析. 两个回路的给定输入为

$$\begin{cases} v^* = 0.6(1 - e^{-5t}) \text{ (单位: m/s)}, \\ w^* = 0.6(1 - e^{-5t}) \text{ (单位: rad/s)}. \end{cases}$$

在 $t = 8$ s时加入幅值为0.2的扰动, 仿真结果如图6所示.

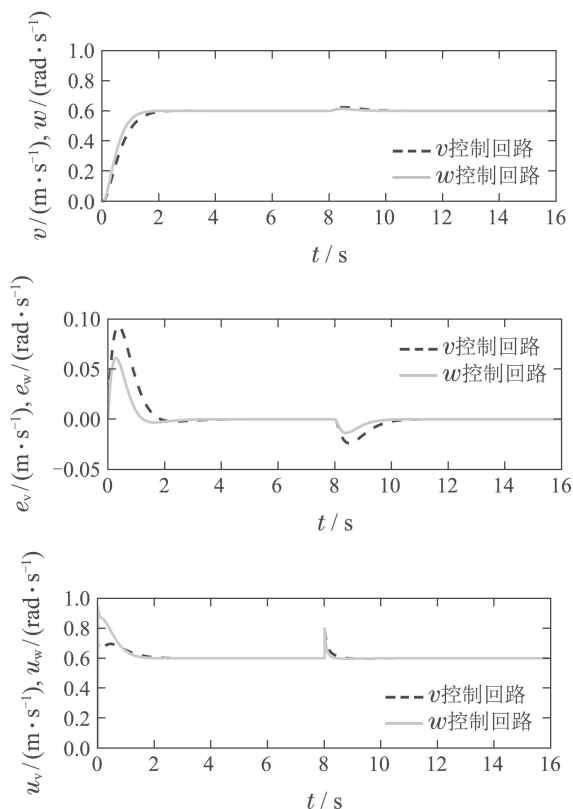


图6 仿真结果

Fig. 6 The simulation results

仿真结果表明: 1) DR-PID具备优良的扰动抑制效果, 参数带宽调节效果显著; 2) 通过带宽分配, 转向速度 w 回路的扰动抑制能力强于前进速度 v 回路, 达到预期效果.

4.3 抗扰控制实验

采用所设计的DR-PID控制器, 验证WMR在空载、左侧负载和右侧负载的抗扰性能. 负载为12 kg重物, 达到WMR负载能力的48%. 此时, WMR一侧驱动

电机重载, 一侧驱动电机接近空载, 处于严重负载不平衡状况.

给定的WMR期望速度信号为

$$\begin{cases} 0 \leq t < 6: \begin{cases} v^* = 0.5(1 - e^{-5t}) \text{ (单位: m/s)}, \\ w^* = 0 \text{ (单位: rad/s)}; \end{cases} \\ 6 \leq t < 12: \begin{cases} v^* = 0.5(1 - e^{-5t}) \text{ (单位: m/s)}, \\ w^* = 1 - e^{-5(t-6)} \text{ (单位: rad/s)}. \end{cases} \end{cases}$$

在 $t = 3$ s和 $t = 9$ s时, 对两伺服电机分别施加扰动

$$\begin{cases} d_L = -0.2 \cdot 1(t - 9), \\ d_R = 0.2 \cdot 1(t - 3). \end{cases}$$

为克服测量噪声影响, 在反馈通道添加低通滤波器 $F_f(s) = 1/(0.02s + 1)$. 图7-9给出WMR抗扰控制效果图, 可看到, 不论WMR处于空载还是非平衡负载情况, 两个回路在速度调节过程中的相互影响都非常小, 且系统受到的外部扰动, 也能够迅速的进行补偿. 实验结果表明, 在本文提出的DR-PID控制下, WMR的前进速度与转向速度几乎实现独立调节, 具备较强抗干扰能力.

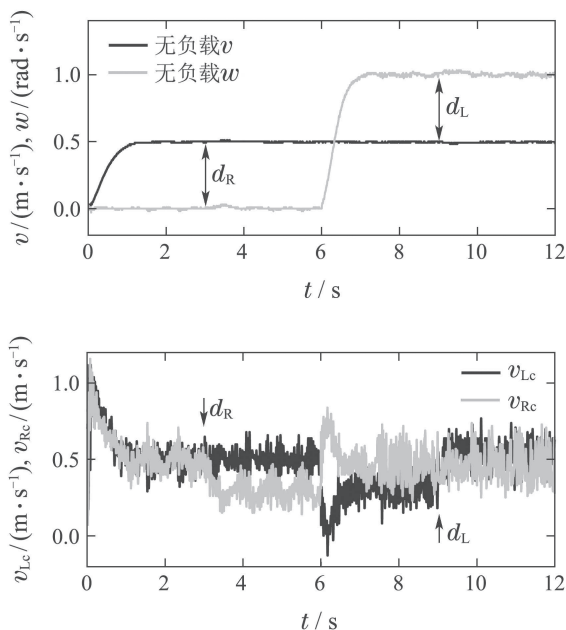
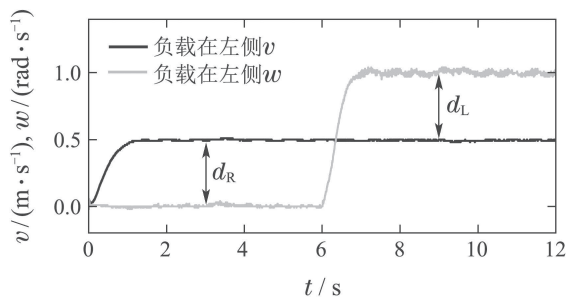


图7 抗扰控制实验结果—无负载

Fig. 7 The disturbance rejection control experimental results — no load



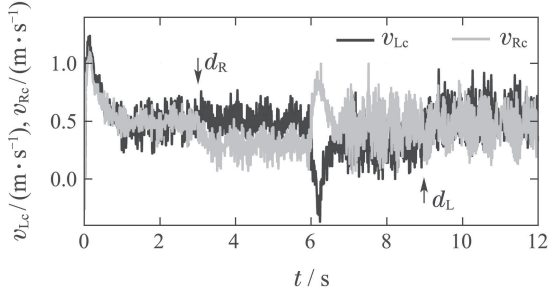


图8 抗扰控制实验结果——左侧负载

Fig. 8 The disturbance rejection control experimental results — load on left

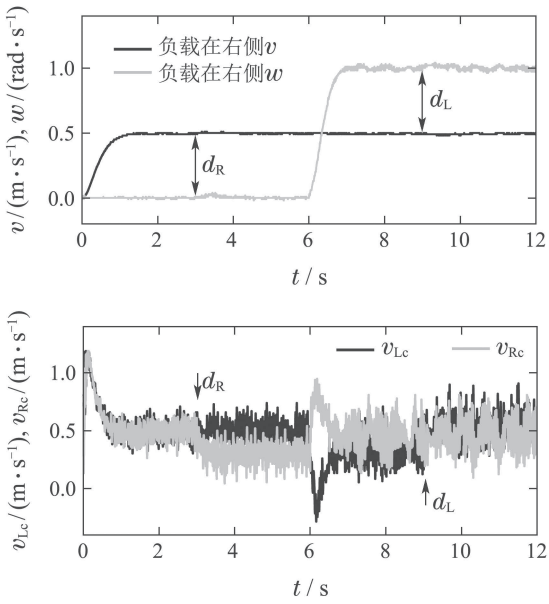


图9 抗扰控制实验结果——右侧负载

Fig. 9 The disturbance rejection control experimental results — load on right

4.4 时变速度跟踪控制实验

WMR在执行应用任务时,一般要求运行轨迹不受负载影响,即在空载和负载情况下轨迹应该保持重合.作者在WMR上一侧增加12 kg的非平衡负载,仅在速度控制情况下,测试WMR的轨迹偏差.

给定WMR的变速输入信号为

$$\begin{cases} v^* = 0.3 - \frac{3\pi^2 e^{-5t}}{10\pi^2 + 4000} - \frac{120 \cos(\pi t/4) + 6\pi \sin(\pi t/4)}{\pi^2 + 400} \text{ (单位: m/s),} \\ w^* = 0.6 - \frac{6\pi^2 e^{-5t}}{10\pi^2 + 4000} - \frac{240 \cos(\pi t/4)}{\pi^2 + 400} - \frac{12\pi \sin(\pi t/4)}{\pi^2 + 400} \text{ (单位: rad/s).} \end{cases}$$

在期望速度下, WMR将在圆形轨迹上运动.

首先,采用常规控制方案(3).此时, WMR在电机转速伺服控制下运行,通过静态解耦矩阵进行前进速度和转向速度调节.由于WMR受到非平衡负载,系统

的内部耦合严重.如图10(a)所示,转向速度受到负载影响较大,使得图11(a)中的轨迹与无负载情况存在明显偏差.

然后,采用本文提出的DR-PID控制策略.图10(b)给出的运动速度控制表明,非平衡负载条件下运动速度控制依然良好,且运动轨迹在图11(b)中也几乎与无负载情况重合.可见,本文提出的DR-PID控制方法,能很好地实现WMR的运动速度控制,具有很强的抗干扰能力,在WMR高精度运动控制上具有重要作用和意义.

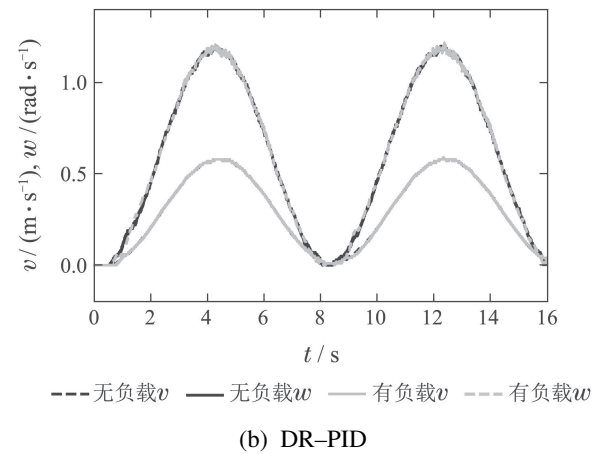
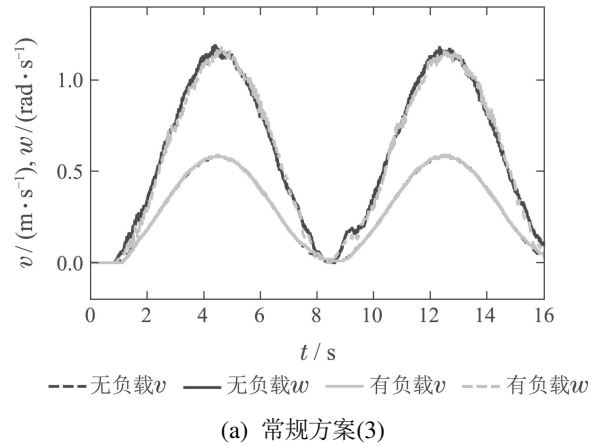
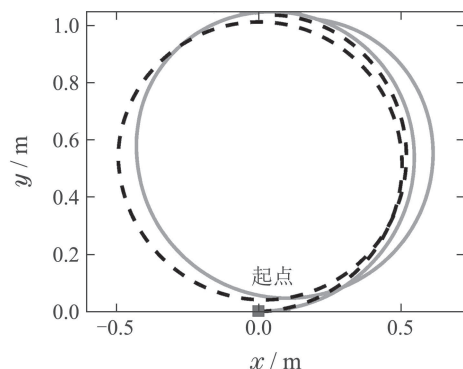
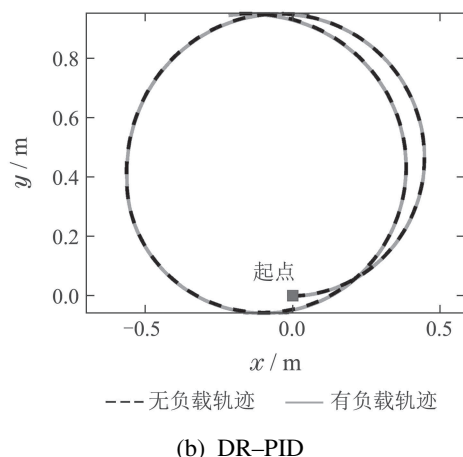


图10 速度控制实验结果

Fig. 10 The speed control experimental results





(b) DR-PID

图 11 WMR的运动轨迹

Fig. 11 The trajectories of WMR

5 结语

在非平衡负载下, WMR的前进、转向速度耦合严重, 对运动控制性能产生较大影响. 为解决这类问题, 本文提出一种基于DR-PID的WMR运动控制方法. 通过建立运动耦合模型, 在前进、转向速度控制回路中引入静态解耦矩阵, 减小回路间的静态耦合作用; 进一步, 提出了一种DR-PID控制器设计方法, 建立了闭环系统的稳定条件, 并揭示了PID控制器的抗扰原理. 这类DR-PID具有ADR能力, 对系统的高频增益不确定性具有强鲁棒性, 能很好地克服WMR的动态耦合; 最后, 在一类WMR上开展了实验研究, 采用本文提出控制策略后, 非平衡负载产生的耦合影响得到了有效抑制, 从而验证了本文方法的有效性.

参考文献:

- [1] DING Wendong, XU De, LIU Xilong, et al. Review on visual odometry for mobile robots. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(3): 385 – 400.
(丁文东, 徐德, 刘希龙, 等. 移动机器人视觉里程计综述. 自动化学报, 2018, 44(3): 385 – 400.)
- [2] CHUNG H Y, HOU C C, CHEN Y S. Indoor intelligent mobile robot localization using fuzzy compensation and Kalman filter to fuse the data of gyroscope and magnetometer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(10): 6436 – 6447.
- [3] PARK B S, YOO S J, PARK J B, et al. A simple adaptive control approach for trajectory tracking of electrically driven nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(5): 1199 – 1206.
- [4] ZHANG X B, WANG R H, FANG Y C, et al. Acceleration-level pseudo-dynamic visual servoing of mobile robots with backstepping and dynamic surface control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(10): 2071 – 2081.
- [5] CHEN Z Y, LI Z H, YE Y J, et al. Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots. *Mechatronics*, 2009, 19(2): 156 – 166.
- [6] CHWA D. Tracking control of differential-drive wheeled mobile robots using a backstepping-like feedback linearization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2010, 40(6): 1285 – 1295.
- [7] SHOJAEI K, SHAHRI A M. Adaptive robust time-varying control of uncertain non-holonomic robotic systems. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6(1): 90 – 102.
- [8] YU Hao, SU Hao, YANG Xue, et al. Guidance angle based trajectory tracking for wheeled mobile robots. *Control and Decision*, 2015, 30(4): 635 – 639.
(于浩, 宿浩, 杨雪, 等. 基于引导角的轮式移动机器人轨迹跟踪控制. 控制与决策, 2015, 30(4): 635 – 639.)
- [9] SUN W C, TANG S Y, GAO H J, et al. Two time-scale tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(6): 2059 – 2069.
- [10] GU Wanli, HU Yunfeng, GONG Xun, et al. Trajectory tracking control of mobile robot with parameter uncertainties. *Control and Decision*, 2019, 34(1): 84 – 91.
(顾万里, 胡云峰, 宫洵, 等. 考虑参数不确定性的移动机器人轨迹跟踪控制. 控制与决策, 2019, 34(1): 84 – 91.)
- [11] LI W H, YANG N, WANG J F, et al. Kinematic teleoperation of wheeled mobile robot with slippage compensation on soft terrains. *IEEE Access*, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924558.
- [12] GAO Zhiqiang. On the foundation of active disturbance rejection control. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1498 – 1510.
(高志强. 自抗扰控制思想探究. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498 – 1510.)
- [13] LI Jie, QI Xiaohui, WAN Hui, et al. Active disturbance rejection control: theoretical results summary and future researches. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(3): 281 – 295.
(李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281 – 295.)
- [14] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [15] SUN Z Q, XIA Y Q, DAI L, et al. Disturbance rejection MPC for tracking of wheeled mobile robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(6): 2576 – 2587.
- [16] WANG L, SU J B. Robust disturbance rejection control for attitude tracking of an aircraft. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(6): 2361 – 2368.
- [17] HUANG J S, WEN C Y, WANG W, et al. Adaptive output feedback tracking control of a nonholonomic mobile robot. *Automatica*, 2014, 50(3): 821 – 831.
- [18] PENG S Y, SHI W X. Adaptive fuzzy output feedback control of a nonholonomic wheeled mobile robot. *IEEE Access*, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2862163.
- [19] MA Shugen, ZHAO Jialiang, REN Chao. Passivity-based active disturbance rejection control of an omni-directional mobile robot. *Control and Decision*, 2018, 33(6): 116 – 121.
(马书根, 赵珈靓, 任超. 基于无源性的全方位移动机器人自抗扰控制. 控制与决策, 2018, 33(6): 116 – 121.)
- [20] ZHONG S, HUANG Y, GUO L. A parameter formula connecting PID and ADRC. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(9): 175 – 187.
- [21] ZENG Zhezhao, LIU Wenjue. Self-coupling PID controllers. *Acta Automatica Sinica*, 2019, doi: 10.16383/j.aas.c180290.
(曾喆昭, 刘文珏. 自耦PID控制器. 自动化学报, 2019, doi: 10.16383/j.aas.c180290.)

- [22] SIRA-RAMIREZ H, ZURITA-BUSTAMANTE E W, HUANG C. E-equivalence among flat filters, dirty derivative-based PID controllers, ADRC, and integral reconstructor-based sliding mode control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(5): 1696 – 1710.
- [23] JIN H Y, SONG J C, LAN W Y, et al. On the characteristics of ADRC: a PID interpretation. *Science China Information Sciences*, 2020, doi: 10.1007/s11432-018-9647-6.
- [24] NIE Z Y, ZHU C, WANG Q G, et al. Design, analysis and application of a new disturbance rejection PID for uncertain systems. *ISA Transactions*, 2020, doi: 10.1016/j.isatra.2020.01.022.
- [25] NIE Z Y, WANG Q G, SHE J H, et al. New results on the robust stability of control systems with a generalized disturbance observer. *Asian Journal of Control*, 2019, doi: 10.1002/asjc.2188.
- [26] WANG Q G, LEE T H, HE J B. Internal stability of interconnected systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(3): 593 – 596.
- [27] ZHENG Q, GAO L Q, GAO Z Q. On validation of extended state observer through analysis and experimentation. *Journal of Dynamic Systems*, 2012, doi: 10.1115/1.4005364.

作者简介:

李高铭 硕士研究生, 目前研究方向为抗扰控制与数据驱动控制,

E-mail: hy03586187@126.com;

聂卓赞 副教授, 目前研究方向为先进控制理论与应用、机器人与智能系统, E-mail: yezhuyun2004@sina.com;

李兆洋 硕士研究生, 目前研究方向为高性能控制器与接口技术, E-mail: sea-kid@foxmail.com;

郑义民 讲师, 目前研究方向为系统辨识, E-mail: zh.even@sina.com;

罗继亮 教授, 目前研究方向为智能制造与机器人、离散事件和混杂系统的优化, E-mail: luojiliang77@gmail.com.