

控制与决策

Control and Decision

基于节能考虑的全向移动机器人鲁棒补偿轨迹跟踪控制

王义娜, 郑依伦, 杨俊友, 王硕玉

引用本文:

王义娜, 郑依伦, 杨俊友, 王硕玉. 基于节能考虑的全向移动机器人鲁棒补偿轨迹跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(11): 3065–3072.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0707>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于RBF神经网络的多关节机器人固定时间滑模控制

Fixed-time sliding mode control of multi-joint robot based on RBF neural network
控制与决策. 2022, 37(11): 2790–2798 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0421>

基于ESO的船舶航向鲁棒自适应控制

NESO based ship heading robust adaptive control
控制与决策. 2022, 37(8): 2157–2162 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0327>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定

Robust stabilization of planar Acrobot using linear active disturbance rejection control with immune optimization
控制与决策. 2020, 35(12): 3053–3058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0289>

基于节能考虑的全向移动机器人鲁棒补偿轨迹跟踪控制

王义娜[†], 郑依伦, 杨俊友, 王硕玉

(沈阳工业大学 电气工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 针对全向移动机器人在跟踪目标的过程中存在跟踪误差以及产生能量损耗的问题, 首先构建一种新型机器人能耗模型, 该模型能够有效预测机器人运行过程中各种能量消耗; 其次, 基于该能耗模型设置兼顾轨迹跟踪误差和能耗最小的性能指标函数, 在其约束下, 提出一种基于干扰鲁棒补偿的反馈节能控制器; 然后, 引入不确定性及干扰估计观测法, 构建鲁棒补偿项, 在满足能耗最优的前提下实现对外界干扰的有效抑制; 最后, 基于 Lyapunov 稳定性理论证明所提出的节能干扰鲁棒补偿控制系统是渐近稳定的. 通过将所提出的控制器与比例微分控制器、 H_∞ 控制以及节能补偿控制进行比较, 仿真结果表明, 所提出的控制方法其控制精度更高、能量损耗更低、具有更强的鲁棒性.

关键词: 全向移动机器人; 能耗模型; 性能指标; 能耗优化; 能量预测; 干扰鲁棒补偿

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0707

引用格式: 王义娜, 郑依伦, 杨俊友, 等. 基于节能考虑的全向移动机器人鲁棒补偿轨迹跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 3065-3072.

Robust compensation trajectory tracking control for omni-directional mobile robot based on energy saving

WANG Yi-na[†], ZHENG Yi-lun, YANG Jun-you, WANG Shuo-yu

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the tracking error and energy loss of an omni-directional mobile robot while tracking the predesigned target, this paper firstly constructs a novel robot energy consumption model which can effectively predict all kinds of energy consumption in the tracking task. Then, by taking the new energy consumption model into the performance index, a feedback energy-saving controller with disturbance robust compensation is proposed which orients to the minimum of trajectory tracking error and energy consumption. Additionally, a robust compensation term is introduced into the controller by employing an uncertainty and disturbance observer to cancel or minimum the effect of the the external disturbance under the premise of optimal energy consumption. Finally, the proposed energy-saving disturbance robust compensation control system is proved to be asymptotically stable based on the Lyapunov stability theory. The simulation results show that the proposed control method has higher control precision, lower energy loss and stronger robustness compared to the proportional derivative controller, the H_∞ controller and the normal energy saving compensation controller.

Keywords: omni-directional mobile robot; energy consumption model; performance index; energy consumption optimization; energy prediction; robust disturbance compensation

0 引言

全向移动机器人具有在狭窄地方灵活移动的优点, 在医疗康复、餐饮服务环境^[1-3]得到了广泛应用, 因此, 轨迹跟踪的控制精度^[4-12]至关重要. 另一方面, 大多数全向移动机器人通常由电池提供能源^[13], 在复杂的环境下, 不仅容易受到外力干扰加大控制律的输出, 还会在不改变方向的情况下频繁地躲避动态

障碍^[14], 电机电压会发生剧烈的变化. 此时, 机器人的能耗非常大, 严重影响工作效率. 因此, 研究考虑能量优化的全向移动机器人的轨迹跟踪控制策略具有重要的意义.

文献[4]提出了一种解决运动饱和问题的模糊规则控制器. 文献[5]利用系统误差模型, 解决了移动机器人系统中存在的参数不确定性问题. 文献[6]提出

收稿日期: 2021-04-23; 录用日期: 2021-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803273); 辽宁省教育厅服务地方项目(LFGD2020004).

[†]通讯作者. E-mail: wangyina0402@126.com.

了基于延迟神经网络的鲁棒模型预测控制策略. 文献[7]提出了基于柔化约束的模型预测方法. 文献[8]提出了一种考虑驱动故障的模型预测容错控制. 文献[9]提出了基于收缩约束模型预测控制的无人车辆路径跟踪. 文献[10]提出了一种耦合滑模控制方法, 能够切换不同的模式以适应不同的运行条件. 文献[11]针对自主地面车辆路径跟踪问题, 提出了一种层次改进的模糊动态滑模控制方法. 文献[12]提出了一种移动机器人的自适应鲁棒二阶滑模控制方法. 虽然, 文献[4-12]提出的控制器均达到了良好的轨迹跟踪效果, 但文献[4-9]没有考虑能量优化问题, 文献[10-12]采用的滑模控制器会在滑动模态面产生抖动, 加大能量的损耗.

对于全向移动机器人的能量优化问题, 首先要分析机器人运动过程中各部分能耗之间的关系. 针对这一问题, 文献[15-16]提出了一种三轮全向移动机器人(three-wheel omni-directional mobile robot, TOMR)启动阶段的功耗建模方法. 文献[17]基于能耗模型提出了一种基于梯度投影法的力矩分配优化方法. 文献[18]利用电机模型建立了机器人的动力学方程. 文献[19]提出了一种高效的在线轨迹规划算法, 将实际成本函数最小化. 文献[20]提出了一种能量模型来估算2D带式机器人的电能消耗. 但是, 文献[15-16, 19]只建立了TOMR某一阶段的能耗模型, 不能充分体现TOMR复杂的运动特性. 文献[17, 20]的研究对象都不是TOMR. 文献[18]只建立了电池的能耗模型. 并且上述工作都没有基于机器人的运动特性提出能量优化算法.

文献[21]提出了一种考虑输入冗余和能量最小的轨迹跟踪算法. 文献[22]基于光伏面板清洁机器人的能耗模型, 提出了一种能量最优的路径规划算法. 文献[23]基于通过频域分析方法得到的能耗模型, 提出了一种新的能耗最优运动轨迹规划方法. 文献[24]基于Mecanum机器人的能耗模型, 提出了一种利用动态窗口法逼近局部轨迹规划的节能自主导航. 文献[25]基于高斯过程回归和已知车辆信息, 提出了一种预测未来路径能源成本的方法. 文献[26]提出了机器人在云环境中能耗最低的解决方案. 但是, 上述工作都是从路径规划的角度研究能量优化问题, 忽略了机器人跟踪路径时的运动特性.

本文的主要贡献如下:

1) 建立能够有效预测TOMR行进过程中能量变化的能耗模型, 并根据该能耗模型设置兼顾轨迹跟踪误差与能耗最小的性能指标函数.

2) 针对TOMR轨迹跟踪误差及能耗效率问题, 以误差模型为基础, 在性能指标函数的约束下, 提出节能鲁棒补偿控制策略(energy-saving robust control, ESRC), 以实现兼顾轨迹跟踪优化和能耗最小的目标. 并且引入基于不确定性和干扰估计(uncertainty and disturbance estimator, UDE)的观测方法, 有效地抑制了被控对象受参数不确定性和外界干扰的影响.

1 机器人的运动学和动力学建模

本文以TOMR为研究对象(见图1), 建立运动学模型.

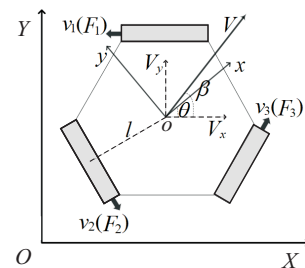


图1 TOMR的结构示意图

图1中: $\Sigma(X, O, Y)$ 是全局坐标系; $\Sigma(x, o, y)$ 是机器人坐标系; θ 是机器人姿势角; o 是机器人几何中心位置; l 是机器人中心到全向轮中心的距离; V 和 β 是机器人的速度和速度方向角; v_1 、 v_2 和 v_3 是各个全向轮的速度; F_1 、 F_2 和 F_3 是每个全向轮的驱动力.

基于图1所示坐标系的机器人运动学方程为

$$v = K_o^T(\theta) \dot{X}_o. \quad (1)$$

其中: $v = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T$, $\dot{X}_o = [\dot{x}_o \ \dot{y}_o \ \dot{\theta}]^T$, 而

$$K_o^T(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & l \\ \sin\theta & -\cos\theta & l \\ -\sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & l \end{bmatrix}.$$

这里: \dot{x}_o 和 \dot{y}_o 分别是机器人速度针对绝对坐标系 X 和 Y 轴方向的分解速度, $\dot{\theta}$ 是机器人的转动角速度.

基于图1构建TOMR的动力学方程为

$$M_o \ddot{X}_o = K_o(\theta) F. \quad (2)$$

其中

$$M_o = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \quad \ddot{X}_o = \begin{bmatrix} \ddot{x}_o \\ \ddot{y}_o \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}.$$

这里: M 是机器人质量, I 是转动惯量, $\ddot{\theta}$ 是机器人转动角加速度.

分析永磁直流电机特性^[27], 得到TOMR驱动力为

$$F = \frac{n \cdot k_t \cdot V_s}{r \cdot R_a} u - \left(\frac{h}{r^2} + \frac{n^2 \cdot k_t \cdot k_e}{r^2 \cdot R_a} \right) v. \quad (3)$$

其中: h 是电机齿轮间的粘性摩擦系数, k_t 是转矩常数, k_e 是反电动势常数, V_s 是电池电压, R_a 是电枢电阻, r 是全向轮半径, $u = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T$ 是电机的控制输入, n 是传动比.

将式(3)代入(2),整理得

$$M_o \ddot{X}_o + \left(\frac{h}{r^2} + \frac{n^2 \cdot k_t \cdot k_e}{r^2 \cdot R_a} \right) K_o(\theta) K_o^T(\theta) \dot{X}_o = \frac{n \cdot k_t \cdot V_s}{r \cdot R_a} K_o(\theta) u. \quad (4)$$

模型参数为: $M = 40 \text{ kg}$, $l = 0.423 \text{ m}$, $n = 1$, $h = 0.054 \text{ N}\cdot\text{m}(\text{rad}/\text{s})$, $R_a = 0.56 \ \Omega$, $r = 0.1 \text{ m}$, $k_t = 0.028 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$, $k_e = 0.028 \text{ V}(\text{rad}/\text{s})$.

2 能耗建模

在复杂环境应用时,由于 TOMR 特殊的三角结构和运动特性,其实际运动过程中 3 个电机的驱动力不仅会存在相互抵消的情况,还会频繁发生反接制动现象. 这些现象会加大不必要的能量损耗,严重影响机器人的工作时间. 因此,建立能够准确反映 TOMR 功耗关系的能耗模型,是预测机器人能耗最优并保证轨迹跟踪精度的前提条件和设计基础.

根据电机学,通过分析机器人运动过程,建立 TOMR 的能耗方程,本文将能量损耗分为 5 部分,即

$$E_m = E_{R_a} + E_{F_1} + E_{F_2} + E_k + E_e, \quad (5)$$

其中 E_m 是各电机电枢电阻消耗的总能量.

$$\begin{aligned} E_{R_a} &= \int_0^t I_a^T R_a I_a dt = \\ &= \int_0^t \left(\frac{V_s u_s - n k_e \omega}{R_a} \right)^T R_a \left(\frac{V_s u_s - n k_e \omega}{R_a} \right) dt = \\ &= \int_0^t \left[\frac{V_s^2}{R_a} u_s^T u_s - \frac{2 \cdot k_e \cdot V_s}{r \cdot R_a} (K_o^T C x_e)^T u_s + \right. \\ &\quad \left. \frac{n^2 \cdot k_e^2}{r^2 \cdot R_a} (K_o^T C x_e)^T (K_o^T C x_e) \right] dt. \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $C = [0 \ I_3]^T$, $\mathbf{0}$ 和 I_3 分别是 0 矩阵和单位阵, $I_a = [i_1 \ i_2 \ i_3]^T$ 是每个电机的电枢电流, u_s 是节能控制补偿部分, $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^T$ 是电机转动角速度.

E_{F_1} 是 3 个电机驱动力垂直于速度方向抵消的能量,有

$$\begin{aligned} E_{F_1} &= \\ &= \int_0^t (|F_1 \sin \sigma_1 \cdot v_1 \sin \sigma_1| + |F_2 \sin \sigma_2 \cdot v_2 \sin \sigma_2| + \\ &|F_3 \sin \sigma_3 \cdot v_3 \sin \sigma_3| - |F_1 \sin \sigma_1 \cdot v_1 \sin \sigma_1 + \\ &F_2 \sin \sigma_2 \cdot v_2 \sin \sigma_2 + F_3 \sin \sigma_3 \cdot v_3 \sin \sigma_3|) dt. \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $\sigma_1 = \theta + \frac{5\pi}{6} - \beta$, $\sigma_2 = \theta - \frac{\pi}{2} - \beta$, $\sigma_3 = \theta + \frac{\pi}{6} - \beta$.

E_{F_2} 是 3 个电机驱动力平行于速度方向抵消的能量,有

$$\begin{aligned} E_{F_2} &= \\ &= \int_0^t (|F_1 \cos \sigma_1 \cdot v_1 \cos \sigma_1| + |F_2 \cos \sigma_2 \cdot v_2 \cos \sigma_2| + \\ &|F_3 \cos \sigma_3 \cdot v_3 \cos \sigma_3| - |F_1 \cos \sigma_1 \cdot v_1 \cos \sigma_1 + \\ &F_2 \cos \sigma_2 \cdot v_2 \cos \sigma_2 + F_3 \cos \sigma_3 \cdot v_3 \cos \sigma_3|) dt. \end{aligned} \quad (8)$$

E_k 是机器人的动能,有

$$E_k = \frac{1}{2} M v^2. \quad (9)$$

E_e 是机器人电机齿轮之间的机械损耗,有

$$E_e = \int_0^t (P_1 + P_2 + P_3) dt. \quad (10)$$

其中

$$P_i = \begin{cases} h \omega_i^2, & u_i \omega_i \leq 0; \\ -h \omega_i^2, & u_i \omega_i > 0; \end{cases} \quad i = 1, 2, 3.$$

h 是电机齿轮间的粘性摩擦系数.

3 节能控制器设计

分析机器人系统,并考虑总干扰,将系统模型(4)简化改写为

$$M_1 \ddot{X}_o + M_2 \dot{X}_o + \delta = u. \quad (11)$$

其中: δ 是总干扰的有界函数,而

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{r \cdot R_a}{n \cdot k_t \cdot V_s} K_o^{-1}(\theta) M_o, \\ M_2 &= \left(\frac{h \cdot R_a}{r \cdot n \cdot k_t \cdot V_s} + \frac{n \cdot k_e}{r \cdot V_s} \right) K_o^T(\theta). \end{aligned}$$

针对系统简化模型(11),提出如下控制器:

$$u = M_1 (\ddot{X}_{od} - K_P e - K_D \dot{e}) + M_2 \dot{X}_o + u_0. \quad (12)$$

其中: K_P 和 K_D 是设计参数, $e = X_{od} - X_o$ 是期望轨迹 X_{od} 与实际轨迹 X_o 之差, u_0 是节能鲁棒补偿项.

将式(12)代入(11),得到轨迹跟踪误差方程

$$\dot{x}_e = A x_e + B(u_0 - \delta). \quad (13)$$

其中

$$\dot{x}_e = \begin{bmatrix} \dot{e} \\ \ddot{e} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I_3 \\ K_P & K_D \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_1^{-1} \end{bmatrix}.$$

为了抑制 δ 对节能控制策略 (energy-saving control, ESC) 的影响,使用如下补偿控制器的形式:

$$u_0 = u_s + u_d. \quad (14)$$

其中: u_s 是 ESC 补偿部分, u_d 是干扰鲁棒补偿部分.

3.1 ESC 补偿

为了保证在良好的轨迹跟踪精度情况下,尽可能地减小没有必要的能量损耗,性能指标中的能量约束应考虑能耗模型中无效损耗部分:式(6)、(7)、(8)和

(10). 但是, 轨迹跟踪的期望轨迹方位角是已知的, 式(7)和(8)在性能指标中无法起到作用. 因此, 将性能指标函数设置为如下形式:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [x_e^T(t) Q x_e(t) + I_a^T(t) R_a I_a(t) + h \omega^T \omega] dt, \quad (15)$$

其中 Q 为半正定矩阵.

结合式(13)和(15), 整理可得

$$\begin{aligned} H = & \lambda^T (A x_e + B u_s) + \frac{1}{2} x_e^T Q x_e + \\ & \frac{1}{2} \left[\frac{V_s^2}{R_a} u_s^T u_s + \frac{n^2 \cdot k_e^2}{r^2 \cdot R_a} (K_o^T C x_e)^T (K_o^T C x_e) - \right. \\ & \left. \frac{2k_e \cdot V_s}{r \cdot R_a} (K_o^T C x_e)^T u_s + (K_o^T C x_e)^T \frac{h}{r^2} (K_o^T C x_e) \right], \end{aligned} \quad (16)$$

其中 λ 是 Lagrange 函数乘子. 将式(16)对 u_s 求导, 预测机器人运动过程中的功率变化趋势, 有

$$\frac{\partial H}{\partial u_s} = \frac{V_s^2}{R_a} u_s - \frac{n \cdot k_e \cdot V_s}{r \cdot R_a} K_o^T C x_e + B^T \lambda = 0, \quad (17)$$

\Rightarrow

$$u_s = \frac{R_a}{V_s^2} \left(\frac{n \cdot k_e \cdot V_s}{r \cdot R_a} K_o^T C x_e - B^T \lambda \right). \quad (18)$$

由于 $\frac{R_a}{V_s^2}$ 正定, $\frac{\partial^2 H}{\partial^2 u_s} = \frac{R_a}{V_s^2} > 0$, u_s 能够使 H 有极小值. 令

$$\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x_e} = -A^T \lambda - Q x_e. \quad (19)$$

式(19)是 x_e 与 λ 相关的线性齐次方程. 所以在任何时刻均有线性关系, 即 $\lambda = P x_e$, P 是一个对称矩阵. 将式(18)和 λ 代入(16), 整理后对所有的非零 $x_e(t)$ 均成立, 故最优目标函数 J 的问题转化为下式 Riccati 代数方程的解:

$$\begin{aligned} P \left(A + \frac{n \cdot k_e}{r \cdot V_s} B K_o^T C \right) + \left(A + \frac{n \cdot k_e}{r \cdot V_s} B K_o^T C \right)^T P - \\ \frac{R_a}{V_s^2} P B B^T P + \left[Q + C^T K_o \left(\frac{h}{r^2} \right) K_o^T C \right] = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

将式(20)的解代入(18), 即可得到节能补偿部分

$$u_s = K x_e = \frac{R_a}{V_s^2} \left(\frac{n \cdot k_e \cdot V_s}{r \cdot R_a} K_o^T C - B^T P \right) x_e. \quad (21)$$

3.2 干扰鲁棒补偿

机器人实际运动过程中存在参数不确定性和未知外界干扰. 由于 δ 是无法获得的, 本文采用一种基于 UDE 的控制方法对总干扰进行估计. 将式(21)代入(13), 整理后可改写成

$$\dot{\delta} = B^{-1}(sI - A - BK)x_e. \quad (22)$$

为了避免应用测量信号 x_e 的微分, 令

$$u_d = \hat{\delta} = \frac{L}{s+L} \delta. \quad (23)$$

将式(22)代入(23), 整理得

$$\begin{cases} \dot{\eta} = -L\eta + B^{-1}(A + BK + LI)x_e, \\ u_d = L(B^{-1}x_e - \eta), \end{cases} \quad (24)$$

其中 L 是一正常数的鲁棒滤波器参数. 当 L 足够大时, 鲁棒滤波器的带宽足够宽, 干扰鲁棒补偿使 $u_d - \delta \approx 0$, 因此可以实现鲁棒最优控制.

4 稳定性分析

定理1 对于机器人系统采用式(24)的 UDE 方法且选择足够宽的低通滤波器带宽 L , 当系统稳定及总干扰 δ 有界且变化率 $\dot{\delta}$ 相对于系统变化率为 0 时, 选择恰当的误差反馈增益 K , 满足干扰估计误差 $\tilde{\delta} = \delta - \hat{\delta}$ 以指数形式收敛趋近于 0.

证明 为了抑制 δ 的影响, 使用式(14)的补偿律

$$\dot{x}_e = A x_e + B u_s + B(u_d - \delta), \quad (25)$$

$$\tilde{\delta} = \delta - u_d = \delta - \hat{\delta}. \quad (26)$$

由式(23)可得

$$\dot{\hat{\delta}} + \frac{1}{L} \hat{\delta} = \delta, \quad (27)$$

$$\dot{\tilde{\delta}} = \dot{\delta} - \dot{\hat{\delta}} = \dot{\delta} - L\tilde{\delta}. \quad (28)$$

由式(25)和(28)构造新的状态空间方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{\tilde{\delta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + BK & -B \\ 0 & -LI_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ \tilde{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_3 \end{bmatrix} \dot{\delta}. \quad (29)$$

为了保证误差状态空间方程的稳定性, 必须保证系统矩阵的特征值在系统的左半部分, 即

$$[sI - (A + BK)](s + L)^3 = 0, \quad (30)$$

则系统稳定的最终条件为 $L > 0$. 当 $L > 0$ 时, 式(29)的状态空间方程是稳定的, 总干扰 δ 有界且变化率 $\dot{\delta}$ 相对于系统变化率为 0, 即由式(28)可得

$$\tilde{\delta}(t) = e^{-Lt} \tilde{\delta}(0). \quad (31)$$

因此, 基于 UDE 的干扰估计误差以指数形式收敛于 0. \square

定理2 对于理想状态下(没有总干扰 δ)的 TOMR 动态模型(11), 在反馈控制器(12)的作用下, 基于跟踪误差模型(13)和能耗约束的目标函数(15), 通过预测能量的变化, 求得节能补偿输入 u_s , 使得跟踪误差模型(13)渐近稳定.

证明 定义如下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = x_e^T(t) P x_e(t) > 0. \quad (32)$$

不考虑干扰 δ , 将式(21)代入(13), 得

$$\dot{x}_e = A x_e + B u_0. \quad (33)$$

将式(20)和(33)代入(32),并对时间 t 求导,有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \dot{x}_e^T(t)Px_e(t) + x_e^T(t)P\dot{x}_e(t) = \\ & [Ax_e(t)+Bu_s]^T Px_e(t) + x_e^T(t)P[Ax_e(t)+Bu_s] = \\ & -x_e^T(t)\left[Q + C^T K_o\left(\frac{h}{r^2}\right)K_o^T C\right]x_e(t) \leq \\ & -x_e^T(t)Qx_e(t) < 0. \end{aligned} \quad (34)$$

基于Lyapunov函数稳定性定理,由式(32)和(34)可知,ESC闭环系统渐近稳定. □

定理3 考虑系统参数不确定和未知外界干扰,基于定理2引入UDE,求得干扰鲁棒补偿 u_d ,使ESRC系统存在总干扰 δ 时渐近稳定.

证明 定义如下Lyapunov函数:

$$V(t) = x_e^T(t)Px_e(t) + \tilde{\delta}^T \tilde{\delta} > 0. \quad (35)$$

将式(20)、(25)、(26)和(28)代入(35),并令 $\dot{\delta} = 0$,对时间 t 求导,有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \dot{x}_e^T(t)Px_e(t) + x_e^T(t)P\dot{x}_e(t) + \tilde{\delta}^T \dot{\tilde{\delta}} + \tilde{\delta}^T \dot{\tilde{\delta}} = \\ & [Ax_e(t) + Bu_0 - B\delta]^T Px_e(t) + \\ & x_e^T(t)P[Ax_e(t) + Bu_0 - B\delta] + \\ & (\dot{\delta} - L\tilde{\delta})^T \tilde{\delta} + \tilde{\delta}^T (\dot{\delta} - L\tilde{\delta}) = \\ & -x_e^T(t)\left[Q + C^T K_o\left(\frac{h}{r^2}\right)K_o^T C\right]x_e(t) + \\ & \left[x_e^T(t)C^T K_o\left(\frac{h}{r^2}\right)K_o^T Cx_e(t) + \right. \\ & \left. \frac{r^2}{h}\tilde{\delta}^T \tilde{\delta}\right] - 2L\tilde{\delta}^T \tilde{\delta} - \\ & \left\| \frac{\sqrt{h}}{r} K_o^T Cx_e(t) - \frac{r}{\sqrt{h}} \tilde{\delta} \right\|_1^2 \leq \\ & -x_e^T(t)Qx_e(t) + \frac{r^2}{h}\tilde{\delta}^T \tilde{\delta} - 2L\tilde{\delta}^T \tilde{\delta}. \end{aligned} \quad (36)$$

其中:当 $2L \geq L^2/h$ 时, $\dot{V}(t) \leq 0$,基于Lyapunov函数稳定性定理可知,ESRC闭环系统渐近稳定. □

5 仿真研究

5.1 仿真验证

为了验证所提出节能干扰鲁棒补偿控制器的有效性,分别与比例微分控制(proportional derivative control, PDC)^[2]、 H_∞ 控制^[1]和ESC利用Matlab2019a进行仿真分析对比.

PDC、ESC和 H_∞ 控制律分别为

$$u = M_1(\ddot{X}_{od} - K_P e - K_D \dot{e}) + M_2 \dot{X}_o, \quad (37)$$

$$u = M_1(\ddot{X}_{od} - K_P e - K_D \dot{e}) + M_2 \dot{X}_o + u_s, \quad (38)$$

$$u = M_1(\ddot{X}_{od} - K_P e - K_D \dot{e}) + M_2 \dot{X}_o -$$

$$M_1 R^{-1} B_1^T P x_e. \quad (39)$$

4个控制器的反馈控制参数均为

$$\begin{aligned} K_{Px} &= 0.8 \text{ mg/s}^2, K_{Py} = 0.7 \text{ mg/s}^2, \\ K_{P\theta} &= 4.18 \text{ mg/s}^2, K_{Dx} = 1.18 \text{ mg/s}, \\ K_{Dy} &= 1.17 \text{ mg/s}, K_{D\theta} = 2.18 \text{ N}\cdot\text{m/A}. \end{aligned}$$

H_∞ 、ESC和ESRC的节能补偿部分参数均为

$$\begin{aligned} Q &= \text{diag}\{120, 130, 18.4, 303, 303, 18\}, \\ R &= 257.143. \end{aligned}$$

H_∞ 和ESRC的干扰鲁棒补偿部分参数分别为

$$\gamma = \text{diag}\{2, 2, 2, 2, 2, 2\}, L = 7.$$

设TOMR的初始位置为 $X_o(0) = [0 \ 2 \ 0]^T$,仿真时间为180s,未知干扰为 $\delta = 4 \sin t$,期望轨迹为

$$\begin{cases} X_{od} = -4 \sin^3(0.1t); \\ Y_{od} = 4 \cos^3(0.1t); \\ \theta = \begin{cases} 0.1t, & 0 < t < 72; \\ 7.2, & 72 \leq t \leq 180. \end{cases} \end{cases} \quad (40)$$

仿真结果如图2~图4所示.

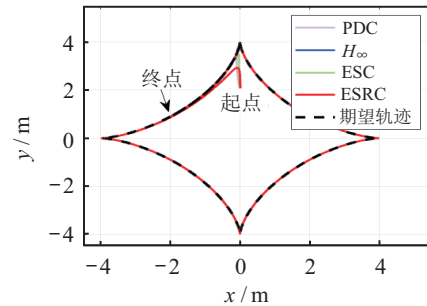


图2 星型轨迹跟踪

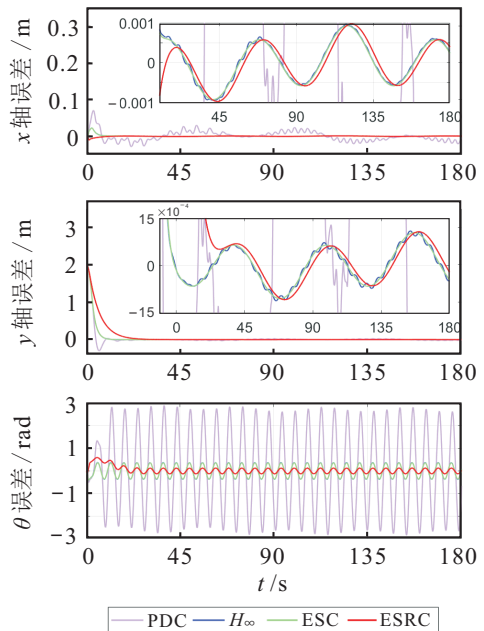


图3 轨迹跟踪误差

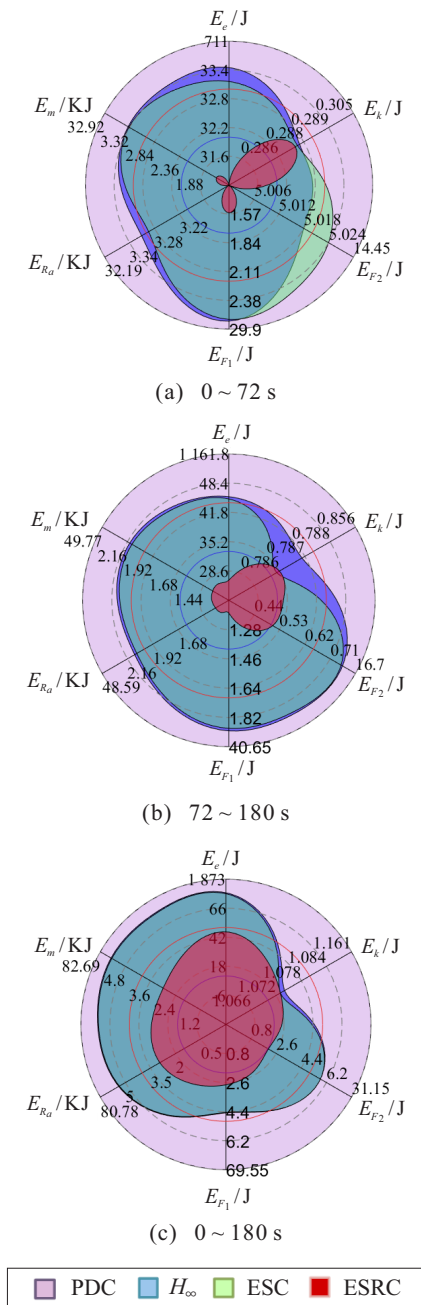


图4 机器人运动过程中的能耗对比

TOMR(有总干扰)在0~72s时发生自转,在72~180s时方位角为固定值。由图2可知,4种控制器均实现了对期望轨迹的跟踪。由图3轨迹跟踪误差对比可知,ESRC、ESC和 H_∞ 控制的纵横坐标跟踪精度都达到了0.001m以下,方位角跟踪精度在0.01rad以下,相比于PDC具有更高的跟踪性能。但是,ESC、 H_∞ 控制和PDC的方位角跟踪精度受干扰影响较大。由图4能耗对比可知,虽然ESRC、ESC和 H_∞ 控制的能耗较小,但由于所提出的ESRC加入了UDE方法,使得ESRC受 δ 的影响更小,方位角跟踪精度更高。并且ESC比 H_∞ 控制总能耗更低(节省了37J),控制精度更高,跟踪轨迹更加平滑。

实验结果表明,ESRC与PDC、 H_∞ 控制和ESC

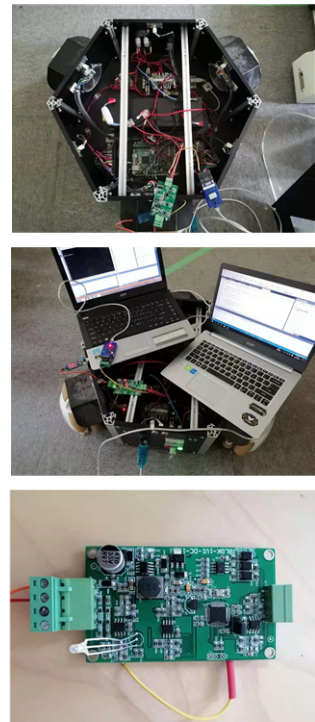
相比,在0~72s机器人自转时,总能量消耗分别节省了31274J,1703J和1687J,电机铜损耗分别节省了30567J,1688J和1671J。在72~180s机器人固定方位角时,总能量分别节省了48417J,768J和765J,电机铜损耗分别节省了47264J、766J和746J。因此,ESRC具有较强的抗干扰能力,控制精度更高,能耗更低。

5.2 实物验证

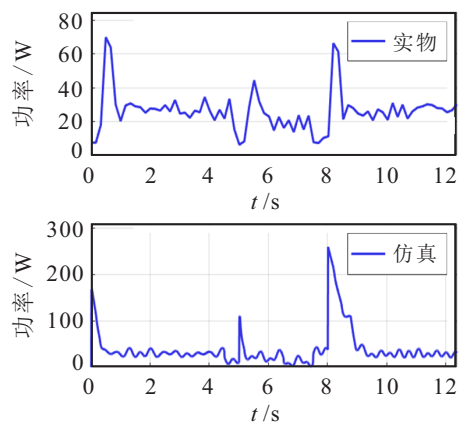
为了验证能耗模型的有效性,进行真实机器人实物验证。通过下式所示机器人总能耗对所提出能耗模型(5)的有效性进行验证:

$$E_m = V_s \int_0^t I_a^T u dt. \quad (41)$$

通过三角移动平台(如图5),基于跟踪路径(以同一姿势直线运动2.5m,原地旋转180°,再以同一姿势



(a) 机器人和功率传感器



(b) 仿真实验功率对比

图5 机器人及仿真实验功率对比

直线运动返回到启动点)进行仿真和实验功率对比验证. 实验通过JBEILAI公司的直流电压电流采集器JBLGK-1VI-DC(如图5)测取电池端电压电流,计算出电池的输出功率 P_m .

因为实体机器人电机的具体参数与仿真中的不同,所以图5中两条曲线的数值存在差异.但是,从图5中可以看出,实物机器人与仿真的电池输出功率变化趋势一致.因此,通过预估机器人行进过程中能量的变化验证了该能耗模型的有效性.

6 结论

针对全向移动机器人在跟踪目标过程中存在的跟踪误差及产生的能量损耗问题,本文建立了一个能够充分预测全向移动机器人运动过程中能量变化的能耗模型,提出了将反馈控制与改进的鲁棒补偿控制相结合,并在性能指标函数的约束下,通过预测机器人运动过程中的能量变化,求出兼顾轨迹跟踪优化和能耗最小的最优控制调节器输入.并且引入UDE的观测方法,求出对未知干扰有明显抑制效果的干扰鲁棒补偿输入.仿真实验结果表明,面对复杂的期望轨迹,相对于PDC、 H_∞ 控制和ESC,ESRC精度更高,能耗更低,只有2999J,电源总能耗分别节省了79691J,2489J和2452J,充分体现了该算法在节能方面的有效性.

参考文献(References)

- [1] Wang Y N, Xiong W Q, Yang J Y, et al. A robust feedback path tracking control algorithm for an indoor carrier robot considering energy optimization[J]. *Energies*, 2019, 12(10): 2010.
- [2] Wang Y N, Yang J Y, Wang S Y. Path tracking control of an indoor transportation robot utilizing future information of the desired trajectory[J]. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 2018, 14(2): 561-572.
- [3] Delgado R, Choi B. Network-oriented real-time embedded system considering synchronous joint space motion for an omnidirectional mobile robot[J]. *Electronics*, 2019, 8(3): 317.
- [4] Hacene N, Mendil B. Motion analysis and control of three-wheeled omnidirectional mobile robot[J]. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2019, 30(2): 194-213.
- [5] 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[J]. *控制与决策*, 2019, 34(1): 81-88.
(Gu W L, Hu Y F, Gong X, et al. Trajectory tracking control of mobile robot with parameter uncertainties[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(1): 81-88.)
- [6] Wang D L, Wei W, Yeboah Y, et al. A robust model predictive control strategy for trajectory tracking of omni-directional mobile robots[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 98(2): 439-453.
- [7] Yang H J, Guo M C, Xia Y Q, et al. Trajectory tracking for wheeled mobile robots via model predictive control with softening constraints[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2018, 12(2): 206-214.
- [8] Karras G C, Furlas G K. Model predictive fault tolerant control for omni-directional mobile robots[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, 97(3/4): 635-655.
- [9] 王志文, 辛鹏, 孙洪涛, 等. 基于收缩约束模型预测控制的无人车辆路径跟踪[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 625-634.
(Wang Z W, Xin P, Sun H T, et al. Unmanned vehicle path tracking based on contraction constraint model predictive control[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(3): 625-634.)
- [10] Xie Y L, Zhang X L, Meng W, et al. Coupled sliding mode control of an omnidirectional mobile robot with variable modes[C]. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Boston, 2020: 1792-1797.
- [11] Hwang C L, Yang C C, Hung J Y. Path tracking of an autonomous ground vehicle with different payloads by hierarchical improved fuzzy dynamic sliding-mode control[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(2): 899-914.
- [12] Alakshendra V, Chiddarwar S S. Adaptive robust control of Mecanum-wheeled mobile robot with uncertainties[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 87(4): 2147-2169.
- [13] 白文波, 伊晓波. 我国蓄电池行业发展现状与趋势分析[J]. *电器工业*, 2020(9): 12-16.
(Bai W B, Yi X B. Analysis of the development status and trend of China's battery industry[J]. *China Electrical Equipment Industry*, 2020(9): 12-16.)
- [14] Alshorman A M, Alshorman O, Irfan M, et al. Fuzzy-based fault-tolerant control for omnidirectional mobile robot[J]. *Machines*, 2020, 8(3): 55.
- [15] Hou L F, Zhang L, Kim J. Energy modeling and power measurement for mobile robots[J]. *Energies*, 2018, 12(1): 27.
- [16] Hou L F, Zhang L, Kim J. Energy modeling and power measurement for three-wheeled omnidirectional mobile robots for path planning[J]. *Electronics*, 2019, 8(8): 843.
- [17] Jia W, Yang G, Wang C, et al. Energy-efficient torque distribution optimization for an omnidirectional mobile robot with powered caster wheels[J]. *Energies*, 2019, 12(23): 4417.

- [18] Wang J B, Yang Y M, Li J. A minimum-energy consumption control algorithm for omni-directional mobile robots[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 291/292/293/294: 2408-2411.
- [19] Kim H, Kim B K. Online minimum-energy trajectory planning and control on a straight-line path for three-wheeled omnidirectional mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4771-4779.
- [20] Glorieux E, Parthasarathy P, Svensson B, et al. Energy model for motion planning of 2D-belt press line tending robots[J]. International Journal of Manufacturing Research, 2020, 15(1): 52.
- [21] Wang J B, Chen J P, Xiao Q J. A minimum-energy trajectory tracking controller for four-wheeled omni-directional mobile robot[C]. The 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). Singapore, 2018: 48-53.
- [22] 钱振. 光伏面板清洁机器人能量优化的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
(Qian Z. Research on energy optimization for photovoltaic panels cleaning robots[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.)
- [23] 高志伟, 代学武, 郑志达. 基于运动控制和频域分析的移动机器人能耗最优轨迹规划[J]. 自动化学报, 2020, 46(5): 934-945.
(Gao Z W, Dai X W, Zheng Z D. Optimal energy consumption trajectory planning for mobile robot based on motion control and frequency domain analysis[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(5): 934-945.)
- [24] Xie L, Henkel C, Stol K, et al. Power-minimization and energy-reduction autonomous navigation of an omnidirectional mecanum robot via the dynamic window approach local trajectory planning[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(1): 172988141875456.
- [25] Quann M, Ojeda L, Smith W, et al. Off-road ground robot path energy cost prediction through probabilistic spatial mapping[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(3): 421-439.
- [26] Wang L H, Mohammed A, Wang X V, et al. Energy-efficient robot applications towards sustainable manufacturing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(8): 692-700.
- [27] Koech W, Rotich S, Rotich T, et al. Dynamic model of a DC motor-gear-alternator (MGA) system[J]. Asian Research Journal of Mathematics, 2016, 1(4): 1-16.

作者简介

王义娜(1986—), 女, 副教授, 博士生导师, 从事福祉机器人的运动控制及智能化等研究, E-mail: wangyina0402@126.com;

郑依伦(1994—), 男, 硕士生, 从事移动机器人节能运动控制的研究, E-mail: 845488913@qq.com;

杨俊友(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能福祉机器人、智能电网、特种电机及其控制等研究, E-mail: junyouyang@sut.edu.cn;

王硕玉(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能福祉机器人等研究, E-mail: wang.shuoyu@kochi-tech.ac.jp.

(责任编辑: 李君玲)

下 期 要 目

- 面向复杂产品研制的MBSE体系架构及其发展趋势研究.....王文跃, 等
- 多智能体深度强化学习及其可扩展性与可迁移性研究综述.....闫超, 等
- 非线性主动悬架系统自适应最优控制.....黄英博, 等
- 非结构化环境中基于拓扑约束的地面无人驾驶路径规划算法.....刘东升, 等
- 基于深度学习的复杂背景下目标检测.....王红梅, 等
- 约束非线性车辆队列分布式多目标模型预测控制.....陈龙, 等
- 基于通道信息对齐的素描行人重识别.....李艳, 等
- 基于强化学习的地铁站空调系统节能控制.....焦焕炎, 等
- 基于双重约束期望改进策略的多目标并行代理优化方法.....林成龙, 等