DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0011-06

基于线性二次型最优 PID 控制的独轮机器人平衡与行驶研究

缪文南, 刘朝山, 曹闹昌, 李加定
(广州城市理工学院 电子信息工程学院, 广州 510800)

摘　要:为解决双惯性飞轮独轮机器人在平衡与行驶控制中存在的强耦合、非线性及模型不确定性问题,提出一种基于线性二次型最优 PID 控制的系统设计方案。首先建立独轮机器人包含横滚、俯仰、偏航三通道的状态空间数学模型,并在平衡点附近进行线性化解耦处理,为控制器设计提供理论模型。在此基础上,结合 PID 控制的结构优势与线性二次型最优调节器的最优求解能力,设计线性二次型最优 PID 控制器。通过求解 Riccati 方程获取加权矩阵最优反馈增益,实现对机器人多自由度姿态及位置的协调控制。仿真阶段对比传统 PID 与所提控制器的阶跃响应和抗扰表现,结果表明优化后的控制器显著降低了超调量并缩短了调节时间。最终搭建以 STM32 为核心的双飞轮样机,开展静态自平衡、直线轨迹及 S 曲线轨迹跟踪实验。实测数据表明,样机可在约 2 s 内收敛至直立稳态,在施加外界扰动后可迅速回归平衡,动态行驶中姿态波动始终保持在安全范围,体现了良好的鲁棒性与轨迹跟踪能力。该方案为强耦合欠驱动机器人的稳定控制提供了可行的理论依据与工程参考。

关键词:独轮机器人;平衡控制;PID 控制器;线性二次型;轨迹跟踪;姿态控制
中图分类号: TP242;TP18;TP273　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-7241(2026)07-0011-06

Research on balancing and driving of unicycle robot based on linear quadratic optimal PID control

Miao Wennan, Liu Chaoshan, Cao Naochang, Li Jiading
(School of Electronic & Information Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

Abstract: To address the problems of strong coupling, nonlinearity, and model uncertainty in the balancing and driving control of a dual-inertia flywheel unicycle robot, a control scheme based on linear quadratic optimal PID control is proposed. A state-space mathematical model of the unicycle robot covering the roll, pitch, and yaw channels is first established, and linear decoupling is performed near the equilibrium point to provide a theoretical model for controller design. On this basis, a linear quadratic optimal PID controller is designed by combining the structural advantages of PID control with the optimal solution capability of a linear quadratic regulator. Optimal feedback gains are obtained by solving the Riccati equation to achieve coordinated control of multi-degree-of-freedom attitude and position. In the simulation stage, the step response and disturbance rejection performance of a conventional PID controller and the proposed controller are compared. Results show that the optimized controller significantly reduces overshoot and shortens settling time. Finally, a dual-flywheel prototype with an STM32 microcontroller is built, and experiments including static self-balancing, straight-line trajectory, and S-curve trajectory tracking are conducted. Measured data show that the prototype can converge to an upright steady state within about 2 s, quickly return to balance after an external disturbance is applied, and maintain attitude fluctuations within a safe range during dynamic driving, demonstrating favorable robustness and trajectory tracking capability. This scheme provides a feasible theoretical basis and engineering reference for stable control of strongly coupled underactuated robots.

Keywords: unicycle robot; balance control; PID controller; linear quadratic; trajectory tracking; attitude control

独轮机器人作为一种仿自行车自平衡机器人,以其结构简单、灵活性高、体积小、驱动关节少等显著特点[1-2],在机器人研究领域引起了广泛关注。其作为典型的欠驱动、强耦合、非线性控制系统,不仅为科研提供了理想的实验平台,更在机械结构设计、复杂的力学特性以及控制模型算法验证等方面[3-4],激发了国内外学者的深入探索。

Ozaka 等于 1980 年设计最早的独轮机器人,开启了这一领域的研究,卡内基梅隆大学的 Brown 等于 1996 年设计的 Gyorver 新型独轮机器人,通过陀螺运动控制单个轮子前进方向,方式新颖,但因其结构复杂且稳定性不强而存在一定局限性。进入 21 世纪,加州大学结合惯性倒立摆机理设计的 Unibot 独轮机器人,以及日本基于惯性飞轮控制设计的可骑乘独轮机器人等都展示了独轮机器人新进展,也反映了所面临的问题,如控制策略上数学模型复杂、转向控制灵活性不足、机械结构复杂等问题[5]。

独轮机器人在国内研究起步较晚,近些年北京工业大

收稿日期:2024-12-22;**录用日期**:2025-02-11
基金项目:广东省普通高校特色创新项目(2025KTSCX231);广东省普通高校重点领域专项(2022ZDZX1041)
作者简介:缪文南(1985—),男,硕士,副教授,研究方向为机器人技术及应用。
引用本文:缪文南, 刘朝山, 曹闹昌, 等. 基于线性二次型最优 PID 控制的独轮机器人平衡与行驶研究[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):11-16. (Miao Wennan, Liu Chaoshan, Cao Naochang, et al. Research on balancing and driving of unicycle robot based on linear quadratic optimal PID control[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):11-16.)

学、桂林电子科技大学、重庆大学、哈尔滨工业大学、北京邮电大学等针对独轮机器人的机械结构设计、动力学模型分析和控制算法进行了大量的研究设计工作,并取得了显著成果[6-8]。目前大多数独轮机器人仍采用单个惯性飞轮垂直转子结构来实现平衡控制,这在一定程度上限制了其转向控制的灵活性和稳定性。近年来,双飞轮平衡控制进入研究者的视野,其在横滚、俯仰、偏航 3 个方向的控制表现优异[9]。

受此启发,本研究提出一种基于双惯性飞轮机械结构的独轮机器人设计方案,通过双惯性飞轮实现左右平衡和前后控制的解耦,进而提升机器人的转向控制灵活性。在控制器设计方面,本研究在 PID 控制器的基础上[10-12],结合线性二次型最优控制理论[13],设计了线性二次型最优 PID 控制器,旨在实现独轮机器人的位置与姿态精准控制,并验证系统力学模型和控制器的有效性和鲁棒性。

1 独轮机器人状态空间数学建模

目前大部分的独轮机器人是基于单个惯性飞轮的模型[6],本研究设计的是双惯性飞轮的独轮机器人模型,如图 1 所示,独轮机器人由车架、减速电机驱动、行驶车轮、两个惯性飞轮 4 部分组成。

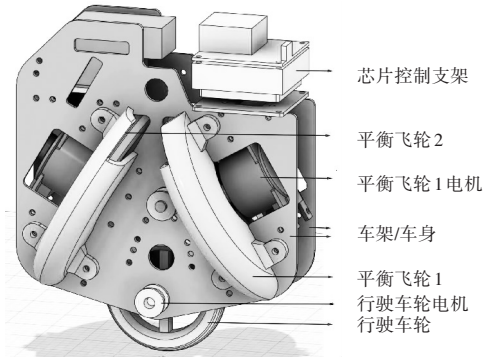


图 1 双惯性飞轮的独轮机器人三维模型

Fig. 1 3D model of the dual-inertia flywheel unicycle robot

1.1 横滚方向的状态空间模型

为了更好分析独轮自机器人的状态空间数学模型,忽略独轮机器人的横滚角、俯仰角、偏航角之间的耦合,为简化模型,将独轮机器人分为 3 个平面模型,即横滚方向、仰俯方向和偏航方向,如图 2 所示。各项参数及含义见表 1。

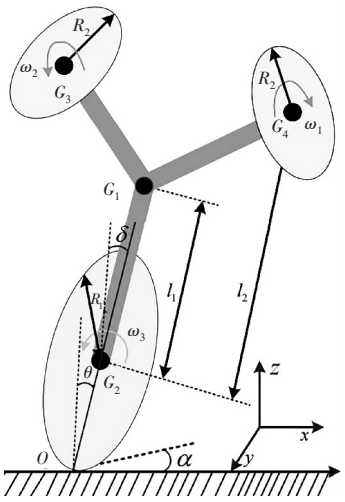


图 2 独轮机器人数学模型

Fig. 2 Mathematical model of the unicycle robot

根据力学原理可得,惯性飞轮的旋转方向与车轮倾斜方向夹角为 θ_2,那么独轮机器人的车身 G_1、车轮 G_2、惯性飞轮 G_3 和 G_4 的 X 轴方向倾斜一边的线速度分别为

$$\begin{cases} v_{G_1} = (R_1 + l_1)\dot{\theta}_1 \\ v_{G_2} = R_1\dot{\theta}_1 \\ v_{G_3} = (R_1 + l_1)\dot{\omega}_1\cos\theta_2 \\ v_{G_4} = (R_1 + l_1)\dot{\omega}_2\cos\theta_2 \end{cases} \tag{1}$$

则独轮机器人总动能 T_s、车身 T_{G_1}、车轮 T_{G_2}、惯性飞轮 T_{G_3} 和 T_{G_4} 的动能为

$$\begin{cases} T_s = T_{G_1} + T_{G_2} + T_{G_3} + T_{G_4} \\ T_{G_1} = \dfrac{1}{2}I_{1x}\dot{\theta}_1^2 + \dfrac{1}{2}m_1(R_1 + l_1)^2\dot{\theta}_1^2 \\ T_{G_2} = \dfrac{1}{2}I_{2x}\dot{\theta}_1^2 + \dfrac{1}{2}m_2R_1^2\dot{\theta}_1^2 \\ T_{G_3} = \dfrac{1}{2}I_{3x}(\dot{\omega}_1\cos\theta_2 + \dot{\theta}_1)^2 + \dfrac{1}{2}m_3(R_1 + l_2)^2\dot{\omega}_1^2\cos^2\theta_2 \\ T_{G4} = \dfrac{1}{2}I_{4x}(\dot{\omega}_2\cos\theta_2 + \dot{\theta}_1)^2 + \dfrac{1}{2}m_4(R_1 + l_2)^2\dot{\omega}_2^2\cos^2\theta_2 \end{cases} \tag{2}$$

表 1 独轮机器人相关参数及含义

Tab. 1 Relevant parameters and their meanings of the unicycle robot

符号	含义(单位)	符号	含义(单位)
θ_1	车身的横滚角(rad)	θ_2	惯性飞轮与垂直轴的方向角
δ	车身前后方向俯仰角	α	车行驶的偏航角
ω_1	惯性飞轮 1 的角速度	ω_2	惯性飞轮 2 的角速度
ω_3	车轮行驶角速度	O	车身与地面的接触点
G_1	车身的质心	G_2	车轮的质心
G_3	惯性飞轮 1 的质心	G_4	惯性飞轮 2 的质心
l_1	车身质心到地面距离	l_2	惯性飞轮质心到地面的距离
R_1	车轮半径	R_2	惯性飞轮半径
m_1	车身质量	m_2	车轮质量
m_3	惯性飞轮 1 的质量	m_4	惯性飞轮 1 的质量

式中，I_{1x}、I_{2x}、I_{3x}、I_{4x} 分别表示车身、车轮、惯性飞轮 1 及惯性飞轮 2 绕 X 轴的转动惯量。其中，$I_{3x}=I_{4x}$，$m_3=m_4$。同理可获得系统的横滚方向的势能 H_s 为

$$\begin{cases} H_s = H_{G_1} + H_{G_2} + H_{G_3} + H_{G_4} \\ H_{G_1} = m_1 g(R_1 + l_1) R_1 \cos\theta_1 \\ H_{G_2} = \dfrac{1}{2} m_2 g R_1 \cos\theta_1 \\ H_{G_3} = \dfrac{1}{2} m_3 (R_1 + l_2) \cos\theta_1 \\ H_{G_4} = \dfrac{1}{2} m_4 (R_1 + l_2) \cos\theta_1 \end{cases} \tag{3}$$

忽略系统俯仰角和偏航角的变化，由拉格朗日函数和拉格朗日方程推导出横滚方向的动力方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}\right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_1}\right) = Q \tag{4}$$

其中，横滚方向的系统广义坐标为 $q_1=[\theta_1,\omega]$，那么系统的广义力为 $Q_1=[0,\tau_1]$，拉格朗日函数 $L=T_s-H_s$，其中，T_s 为系统总动能，H_s 为系统总势能。将式(2)，(3)代入式(4)并简化后可得

$$\begin{cases} M_1\ddot{\theta}_1 + I_{3x}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\omega}_1\cos\theta_2) + I_{3x}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\omega}_2\cos\theta_2) - N_1\theta = 0 \\ I_{3x}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\omega}_1\cos\theta_2) + I_{3x}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\omega}_2\cos\theta_2) = \tau_1 \end{cases} \tag{5}$$

其中，$M_1=m_1(R_1+l_1)^2+m_2R_1^2+m_3(R_1+l_2)^2+m_4(R_1+l_2)^2+I_{1x}+I_{2x}+I_{3x}+I_{4x}$，$N_1=m_1(R_1+l_1)+m_2R_1+m_3(R_1+l_2)+m_4(R_1+l_2)$。

1.2　俯仰方向的状态空间模型

根据力学原理可得，底部车轮通过滚动保持车身平衡，则车身的俯仰方向与直立车身方向夹角为 δ，车轮的行驶角度 ω_3，为那可以求得车轮的线速度为

$$v_{\omega_3} = \dot{\omega}_3 R_1 \tag{6}$$

则车身的质心线速度为

$$v_s = \sqrt{(v_{\omega_3} + l_1\dot{\delta}\cos\delta)^2 + (l_1\dot{\delta}\sin\delta)^2} \tag{7}$$

则独轮机器人俯仰角方向总动能 T_h、车轮 T_{Gh1}、车身 T_{Gh2} 的动能为

$$\begin{cases} T_h = T_{Gh1} + T_{Gh2} \\ T_{Gh1} = \dfrac{1}{2} m_1 v_{\omega 3}^2 + \dfrac{1}{2} I_{1y} \dot{w}_3^2 \\ T_{Gh2} = \dfrac{1}{2} m_2 v_s^2 + \dfrac{1}{2} I_{2y} \dot{\delta}^2 \end{cases} \tag{8}$$

系统在俯仰角方向的总势能 H_h、车轮 H_{Gh1}、车身 H_{Gh2} 的势能为

$$\begin{cases} H_h = H_{Gh1} + H_{Gh2} \\ H_{Gh1} = m_1 g R_1 \\ H_{Gh2} = m_2 g l_1 \cos\delta + mgR_1 \end{cases} \tag{9}$$

独轮机器人俯仰方向的广义力坐标为 $q_2=[\delta,\omega_3]$，系统的广义力为 $Q_2=[0,\tau_2]$，$L=T_h-V_h$，将式(8)，(9)代入拉格朗日方程式(4)并简化后可得

$$\begin{cases} A\ddot{\delta} - B\sin\dot{\delta} + C\ddot{\omega}_3 = 0 \\ C\ddot{\delta} + D\ddot{\omega}_3 = \tau_2 \end{cases} \tag{10}$$

式中，$A=m_2l_1^2+I_{1y}$，$B=m_2gl_1$，$C=m_2l_1R_1$，$D=m_1R_1^2+m_2R_1^2+I_{2y}$。其中，$I_{1y}$、$I_{2y}$ 为车身和车轮绕 y 轴的转动惯量。

1.3　偏航角方向的状态空间模型

同上述横滚角和俯仰角状态空间模型同理可得，独轮机器人偏航角的广义力坐标为 $q_3=\alpha$，系统的广义力为 $Q_3=0$。根据拉格朗日方程式并简化可得

$$A\ddot{\alpha} + B\omega_3\dot{\alpha} = 0 \tag{11}$$

式中，$A=I_{2x}+I_{1x}+2l_2^2M_1$，$B=-(m_1R_1^2+I_{1z}+m_2R_1^2+I_{2z}+2R_1^2m_3)+m_2R_1l_1+2R_1l_1m_3$。其中，$I_{1z}$、$I_{2z}$ 为车身和车轮绕 z 轴的转动惯量。

2　独轮机器人控制策略设计

基于前述独轮机器人数学状态空间建模，得到了动力学方程。接下来深入进行控制器分析与设计。独轮机器人的数学模型涵盖了 XOZ 和 YOZ 两个正交平面的运动特性，如图 1 所示。为了实现对机器人 XYZ 3 个方向运动的精确控制，构建了 4 个 PID 控制器，分别针对车轮位置、滚动方向、俯仰方向和偏航方向，整个流程见图 3。

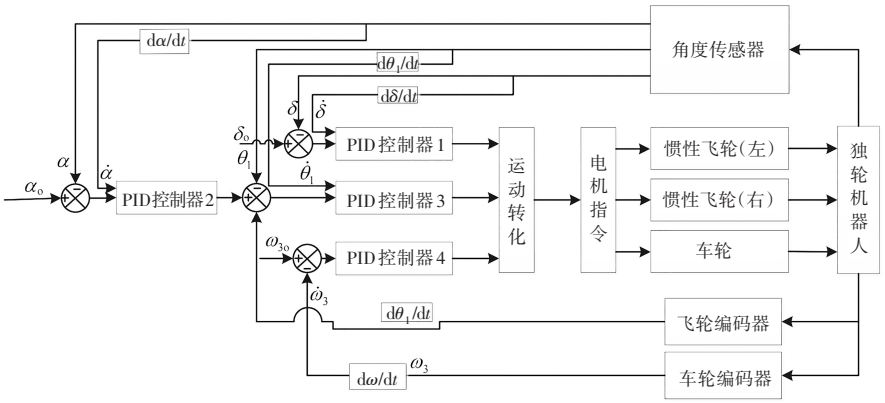


图 3　独轮机器人系统控制器设计图

Fig. 3　Controller design diagram of the unicycle robot system

首先，基于角度传感器的 9 轴数据，运用四元素法，通过卡尔曼滤波与互补融合，精确算出 X 轴(横滚角)方向的 θ_1 和 $\dot{\theta}_1$，Y 轴(俯仰角)方向的 δ 和 $\dot{\delta}$，Z 轴(偏航角)方向的 α 和 $\dot{\alpha}$，当机器人行驶过程中输入独

轮的速度 v_{ω_3} 和偏航角 α，这些 PID 控制器便通过数学模型的运动转化，实现独轮机器人的直立静态控制和轨迹跟踪控制[14]。

鉴于独轮机器人系统复杂的动力学模型以及内部的不确定性，为确保系统控制器的设计效率与计算精度，同时有效减少扰动对机器人姿态控制和运动控制的不利影响，采用了线性二次型最优控制策略对 PID 控制器进行优化设计。这一策略旨在提高系统的最优控制和鲁棒性。

在平衡点附近，假设系统的横滚方向和俯仰方向变化较小，偏航角和双飞轮的角速度也保持在较低水平。基于此，忽略与广义坐标高阶次项和广义坐标间的耦合项，从而将独轮机器人的状态空间方程简化为二次线性数学模型。简化后的二次线性方程为后续的控制器设计提供理论基础[15-16]。

根据系统方程，独轮机器人可以分为 3 个子系统，即横滚方向系统、俯仰方向系统和偏航角方向。

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{AX} + \boldsymbol{Bu}$$
$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{CX} + \boldsymbol{Du} \tag{12}$$

部分机械结构的相关参数值如表 2。

表 2 机器人机械结构参数

Tab. 2 Mechanical structure parameters of the robot

参数	m_1/ kg	m_2/ kg	m_3/ kg	m_4/ kg	R_1/ mm	R_2/ mm	l_1/ mm	l_2/ mm
取值	0.89	0.09	0.08	0.08	96	103	78	118

1）横滚方向系统

横滚系统方向的状态变量为 $\boldsymbol{X} = [\theta_1, \dot{\theta}_1, \omega, \dot{\omega}]^{\mathrm{T}}$，其中 ω 是 ω_1 和 ω_2 的耦合，将表 2 参数代入二次线性方程及动力学方程，即可获得

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 52.365 & 0 & 6.832 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 143.252 & 0 & 60.4673 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ 5.2123 \\ 0 \\ 30.261 \end{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{X} \end{cases} \tag{13}$$

式中，$\boldsymbol{u}$ 表示系统的标量控制输入。

2）俯仰方向系统

俯仰方向系统的状态变量为 $\boldsymbol{X} = [\delta, \dot{\delta}, \omega_3, \dot{\omega}_3]^{\mathrm{T}}$，将表 2 参数代入二次线性方程及动力学方程，即可获得

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -170.565 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 86.536 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ 38.398 \\ 0 \\ -15.684 \end{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{X} \end{cases} \tag{14}$$

3）偏航角方向系统

偏航角方向系统的变量为 $\boldsymbol{X} = [\alpha, \dot{\alpha}]^{\mathrm{T}}$，将表 2 的参数代入二次线性方程及动力学方程，即可获得

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.986 \end{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{Y} = [1 \quad 0] \boldsymbol{X} \end{cases} \tag{15}$$

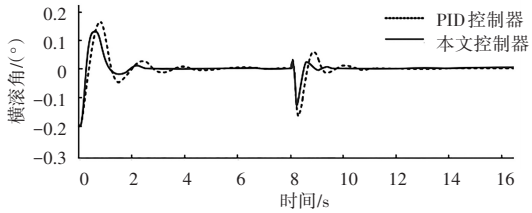
从上述二次线性系统方程中，通过特征方程直接求出状态方程和所有极点，同时，引入最小性能指标方程

$$J = \int_0^{\infty} (\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{QX} + \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{RU}) \, \mathrm{d}t \tag{16}$$

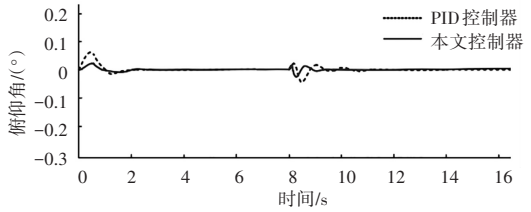
其中，$\boldsymbol{U}$ 表示控制输入向量。结合方程 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{PA} - \boldsymbol{PB}^{-1}\boldsymbol{BP} + \boldsymbol{Q} = 0$，寻求最优解矩阵 $\boldsymbol{P}$（$\boldsymbol{P}$ 为满足 Riccati 方程的唯一正定对称解），将 $\boldsymbol{P}$ 代入 $\boldsymbol{K} = \boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$ 方程，计算反馈矩阵 $\boldsymbol{K}$，获取闭环系统控制器的最优控制参数，并判断系统的能控性和能观性[17]。设计合适的 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 为加权矩阵，利用 MATLAB 可准确计算出反馈矩阵 $\boldsymbol{K}$ 值。

4 系统仿真测试

基于所构建的控制器模型，独轮机器人的控制核心聚焦于其自立静态平衡控制与位置控制。为全面验证机器人控制系统的效能与鲁棒性，采用传统 PID 控制器与本研究设计的线性二次型最优 PID 控制器进行对比测试[15]。系统初始状态设定参数 $X_0 = [\theta_{10} \quad \delta_0 \quad \alpha_0 \quad \omega_{30}] = [0.2 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$，系统启动后 6 s，输入干扰脉冲信号。观察系统自平衡的仿真曲线如图 4(a) 和图 4(b)，以及实验数据如表 3 所示，可以清晰地分析两种控制器的性能差异。



(a) 横滚角响应曲线



(b) 俯仰角响应曲线

图 4 独轮机器人自平衡仿真响应曲线

Fig. 4 Self-balancing simulation response curves of the unicycle robot

表 3 两种控制器的仿真测试结果

Tab. 3 Simulation test results of the two controllers

方位角	控制器类型	启动阶段		启动阶段	
		调节时间 t_m/ s	超调量 m_p/ rad	调节时间 t_m/ s	超调量 m_p/ rad
横滚角 θ	PID 控制	3.1	0.19	1.1	0.18
	本文控制	1.9	0.13	1.6	0.16
俯仰角 δ	PID 控制	1.4	0.09	1.6	0.06
	本文控制器	1.0	0.03	0.09	0.03

从仿真曲线及实验数据中可观察到,在启动瞬间及外部干扰条件下,采用本文所设计算法的独轮机器人在横滚角和俯仰角的调节时间、超调量方面均显著优于传统 PID 控制。具体而言,优化后的控制器不仅响应时间更短,超调量更小,而且在抗干扰能力方面表现出更强的稳定性,能够迅速恢复到自平衡状态。这一结果表明:本研究设计的线性二次型最优 PID 控制器在独轮机器人静态自立平衡控制中展现出更优异的鲁棒性。

5 样机测试

图 5 展示了所设计的独轮机器人实验样机,表 2 详细列出了实验样机中各项机械构件的具体参数。系统以 STM32 微处理器为核心,通过惯性单元实时采集机器人的姿态数据信息,并将其传输至处理器进行解析和计算。随后,通过设计的控制器算法驱动双飞轮电机,实现机器人的姿态自平衡控制。同时,PC 端上位机可输入行驶速度和偏航角指令,驱动电机以完成机器人的轨迹跟踪控制。接下来从静态自平衡和轨迹跟踪两方面进行测试来验证实验样机的稳定性。

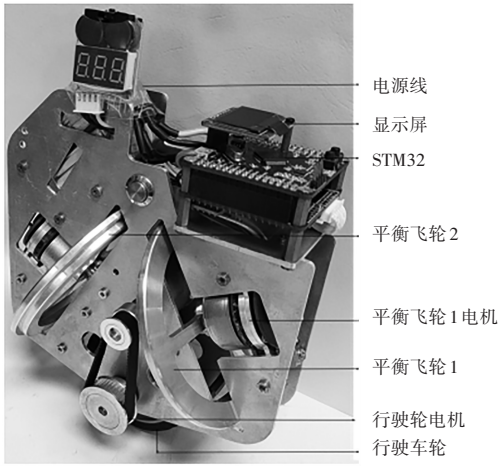


图 5 独轮机器人实验样机图

Fig. 5 Experimental prototype of the unicycle robot

5.1 机器人静态平衡控制测试

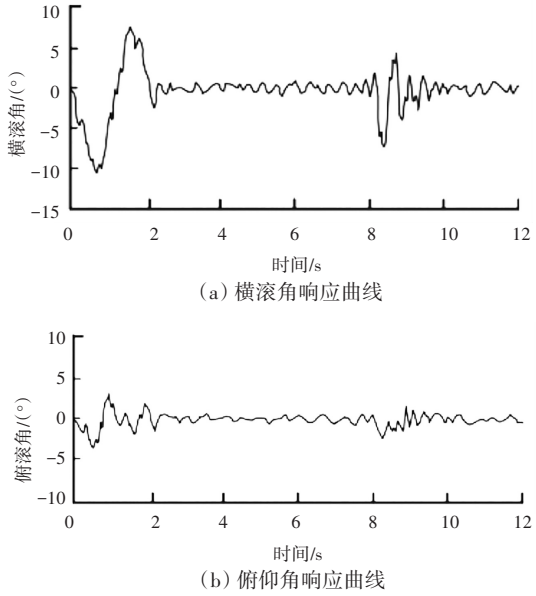
通过图 6(a)和图 6(b)中的横滚角和俯仰角响应曲线可见,实验样机在启动时,在惯性飞轮和行驶轮的相互作用下,横滚角和俯仰角逐渐收敛至动态静止直立状态,这个时间约为 2 s。随后横滚角在[-0.3°,0.3°]变化,俯仰角在[-0.1°,0.1°]变化。

在施加外界干扰后,如第 8 s,横滚角最大接近 10°,俯仰角接近 4°,样机能够通过控制器调节,在 1.8 s 后恢复至动态自平衡稳定状态,验证了控制器的鲁棒性。

5.2 机器人轨迹跟踪控制测试

1) 机器人直线轨迹跟踪测试

如图 6 所示,在直线行驶测试中,机器人启动 2 s 后,独轮机器人能够在行驶过程中根据车身、惯性飞轮和车轮的相互作用力进行自我调节,横滚角保持在[-2°,2°],俯仰角在[-1.7°,1.5°],两者均趋向于 0°,这是合理的范围,确保了行驶过程中的稳定性。



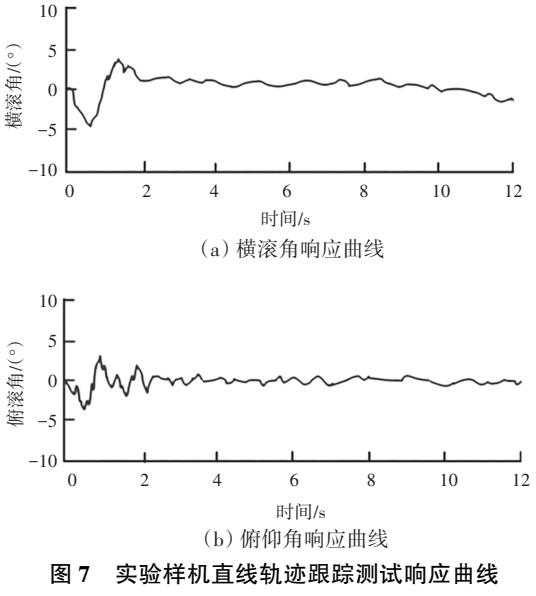
(a) 横滚角响应曲线

(b) 俯仰角响应曲线

图 6 实验样机自平衡测试响应曲线

Fig. 6 Self-balancing test response curves of the experimental prototype

如图 7 所示。机器人启动 2 s 后,上位机对行驶轮输入一定的速度,观察独轮机器人直线行驶状态。独轮机器人在行驶过程中,在车身、惯性飞轮和车轮的作用力和反作用力下,横滚角始终在[-2°,2°]范围内根据行驶的速度进行自身调节,俯仰角始终在[-1.7°,1.5°]范围内调整,在行驶过程中趋向 0°保持直立稳定。



(a) 横滚角响应曲线

(b) 俯仰角响应曲线

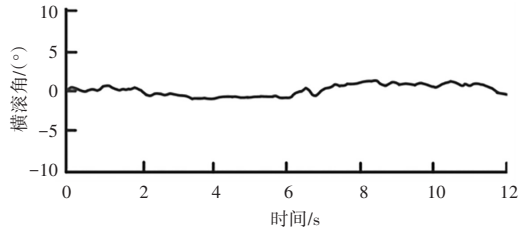
图 7 实验样机直线轨迹跟踪测试响应曲线

Fig. 7 Straight-line trajectory tracking test response curves of the experimental prototype

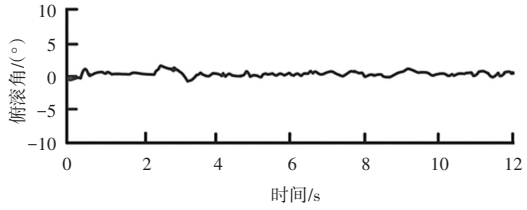
2) 机器人 S 曲线轨迹跟踪测

在直线行驶行驶过程中上位机输入一定的偏航角,使得车身按照 S 曲线行驶轨迹行驶,本测试是在系统启动后 2 s 后,实时输入偏航角在[-10°,10°]之间变化,行驶的轨迹呈现 S 曲线轨迹,见图 8(c)。在行驶过程中,横滚角保持在[-1.2°,2°]内自动调节,俯仰角保持在

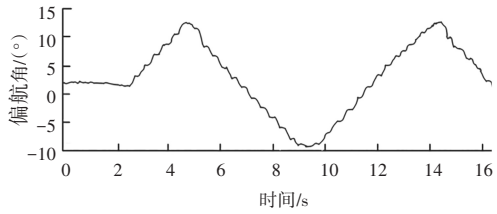
[-1.0°,1.5°]范围内自动调节,从而保障了行驶过程中独轮机器人的稳定性,见图 8(a)和图 8(b)。由此可见,横滚角和俯仰角的变化对机器人行驶轨迹的影响微小。



(a) 横滚角响应曲线



(b) 俯仰角响应曲线



(c) 偏航角响应曲线

图 8 实验样机 S 曲线轨迹跟踪测试响应曲线

Fig. 8 S-curve trajectory tracking test response curves of the experimental prototype

上述实验样机的实验测试结果表明,双飞轮独轮机器人无论静态自平衡测试还是轨迹跟踪(直线行驶和 S 曲线行驶)都具有良好的动态特性,即使施加干扰,也能较快恢复到平衡的状态,这也说明了优化后的控制器,验证了独轮机器人静态和动态测试的有效性和鲁棒性。

6 结论

深入探讨了双飞轮控制的独轮机器人结构模型及其控制策略后,本研究不仅为独轮机器人的设计与控制提供了新的视角与理论依据,还通过仿真与实验验证了所提方案的可行性与优越性。这一过程中,深刻体会到机械结构创新与控制算法优化的紧密结合对于提升机器人性能的重要性。双飞轮的设计有效增强了机器人的稳定性与灵活性,而线性二次型最优 PID 控制器的应用则进一步提升了系统的响应速度与精度。展望未来,随着 AI、机器视觉及传感技术的进步,独轮机器人应用将更广泛。优化机械结构,减轻重量、提高能效;探索高效算法融合,如深度学习控制,提升智能与自适应能力;研究鲁棒控制策略与故障检测,确保极端环境下的稳定运行;这 3 个方面依然是未来研究的重点和方向。

参考文献

[1]赵广营, 黄卫华, 章政, 等. 基于变结构 ESKF 的航姿参考系统噪声处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3): 112-121.
[2]李敏, 唐维伟, 刘俊, 等. 独轮机器人实验平台[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(8): 119-124.
[3]庄未, 章坤, 张瑞欣, 等. 独轮车机器人直线定位控制的分析与实验[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(6): 29-34.
[4]李文良, 王子豪, 徐媛媛, 等. 独轮机器人姿态控制与惯性导航的设计与实现[J]. 电子制作, 2024, 32(7): 19-22.
[5]张舰栋. 一种基于 T-S 模糊模型的立方体机器人自平衡控制系统[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
[6]宋海云. 基于双陀螺转子平衡的独轮机器人研制[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
[7]Yang Z, Hongzhe J, Binluan W, et al. Balancing control of a unicycle robot with double gyroscopes using adaptive fuzzy controller[J]. Mechatronics, 2022, 88:102908.
[8]Hongzhe J, Yang Z, Hui Z, et al. Steering control method for an underactuated unicycle robot based on dynamic model[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018: 1-13.
[9]庄未, 孙兵, 李高明, 等. 独轮车机器人原地定位的平衡控制分析[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(5): 31-36
[10]任明, 汪志锋, 徐洁, 等. 基于遗传算法在反应釜模糊 PID 控制中的优化[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(6): 22-27.
[11]赵子豪, 彭称称, 张维海. 基于强化学习的合作线性二次微分博弈研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2025, 44(4): 121-130.
[12]傅坚, 任浩瀚, 周彬, 等. 风机叶片在线修复机器人姿态控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(2): 12-16, 68.
[13]徐鑫, 刘彬, 刘东洋. 基于线性二次调节器算法的两轮自平衡机器人最优控制方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8957-8964.
[14]Karkoub M, Atunç G, Stipanovic D, et al. Trajectory tracking control of unicycle robots with collision avoidance and connectivity maintenance[J]. Journal of Intelligent Robotic Systems, 2019, 96: 331-343.
[15]张智超, 闵淑辉, 廖凯, 等. 基于改进模糊 PID 果园双轮移动机器人运动控制[J]. 农机化研究, 2024, 46(7):14-20.
[16]张洋. 双陀螺独轮机器人的平衡与欠驱动转弯控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2024.
[17]赵丹. 基于机器学习的轮式机器人关节爬坡运动轨迹控制方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(1): 36-40.