

绳驱型轮腿机器人

董文硕 王禹苒 韩 兴 李玲玲
辽宁科技大学 辽宁 鞍山 114010

摘要: 随着机器人技术的不断发展,腿部平衡机器人因其在复杂环境中高度灵活的移动能力而备受关注。本研究致力于设计和实现一种新型的绳驱动小型串联腿部轮腿平衡机器人,旨在提高机器人的稳定性、机动性和适应性。

关键词: 绳驱; 自适应; 机器人

本研究的创新之处在于采用绳驱动系统来实现腿部运动,为机器人提供了更大的灵活性和自由度。同时,串联腿部结构的引入使机器人能够更好地适应多样化的工作场景。我们相信这种设计将为机器人技术的发展开辟新的方向。研究的主要目的在于探索绳驱动系统在轮腿平衡机器人中的应用,并通过串联腿部结构实现更灵活的运动。在方法上,我们详细介绍了机器人的整体设计,特别着重于绳驱动系统的工作原理、腿部结构的串联设计以及轮腿平衡控制的关键算法。

1 串联腿轮机构概述

串联腿轮机构是一种新型的机器人行走机构,它通过将两个腿轮单元串联在一起,形成一个灵活的机械链。每个腿轮单元都可以独立地驱动和控制,从而实现小车的灵活行走和转向。相比于传统的轮式或履带式行

走机构,串联腿轮机构具有更强的地形适应性和更好的稳定性。

2 机械设计

机器人腿部采用两个串联连杆设计,由大腿电机控制大腿连杆运动姿态,小腿连杆的运动姿态由大腿电机和小腿电机共同驱动,大腿连杆采用电机直连的方式,小腿连杆的驱动是由小腿电机旋转带动聚乙烯纤维绳传动。这样间接传动的方式减少了机器人腿部结构大小与重量,将电机都集中在了车身上,平衡了整车的配重,并且可以缩小机器人整体的体积。传动绳材料的选择对机器人至关重要,因为腿部连杆要支撑整车的重量,所以要求传动绳能承受至少100N的拉力,因此传动绳选取聚乙烯纤维绳。同时连杆长度以及张紧结构也是机器人至关重要的一部分。具体结构如图1所示。

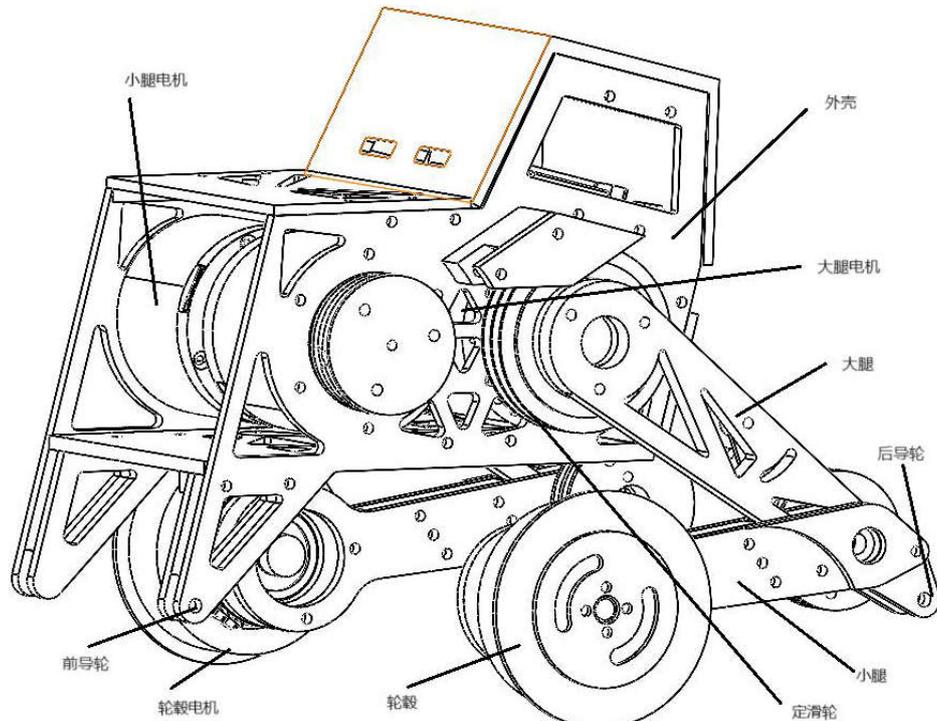


图1 机器人设计图

由于机器人的线长和连杆长度是固定的，为了使拉线更好的传递动力，需要在机器人腿部设计张紧轮。张紧轮采用碳板夹打印件的形式，并且在机器人大腿部分分开有滑槽，使张紧轮能够调节对线的张紧程度。张紧轮内部安有轴承，使得它能够转动，减少打印件与线材的摩擦如图3所示。同时带轮2内部也使用了轴承，使它能够围绕大腿电机转动，和拉线一起运动，防止了零件之间的磨损。

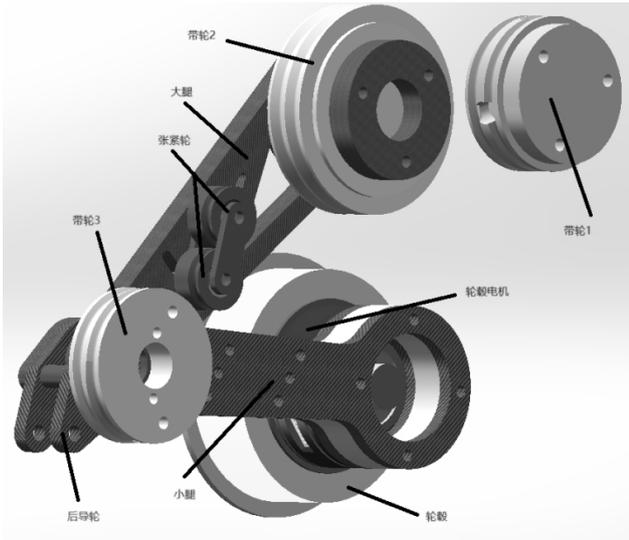


图2 腿部结构细节

对大腿零件进行几何建模、网格划分（划分有限元素）、定义材料属性、设定边界条件和载荷。然后通过高斯消元法、雅可比迭代法等求解由有限元离散化后得到的方程组。最后分析求解结果，包括生成应力、应变、变形等图表，并评估结构是否满足设计要求。如图3所示。

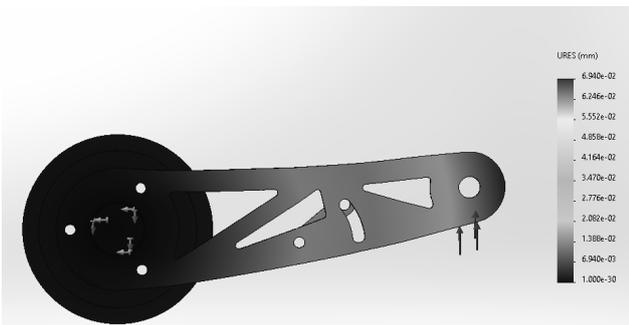


图3 大腿零件有限元分析

3 系统建模

为了更好地理解机器人的运动特性，进行了动力学建模。这涉及到机器人腿部的运动学分析，以及绳驱动对机器人整体动力学的影响。这些模型为控制系统的设计提供了关键参数和指导

将串联的腿部通过VMC（Virtual Model Control）简化成一根可伸缩杆，系统即简化成平面轮式二阶倒立摆。

串联杆的正运动学方程

$$\theta_2 = \text{realmotor3} - \text{ratio} * (\text{realmotor4});$$

$$\theta_1 = \pi/2 + \text{realmotor4};$$

$$x = -L_1 * \cos(\theta_1) - L_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2);$$

$$y = -L_1 * \sin(\theta_1) - L_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2);$$

θ_1 θ_2 为中间变量 ratio为电机工作过程中传动比对原始关节角处求雅克比矩阵

$$J = \text{jacobian}(\text{position_vector}, [\text{realmotor4}, \text{realmotor3}]);$$

根据虚功原理映射到关节力矩即 $T = J^T * R * \begin{bmatrix} FT \\ F \end{bmatrix}$,

FT为伸缩杆推力，F为所需扭矩T/L，R为旋转矩阵。据此可根据简化模型所需要力矩映射成电机实际扭矩；使用拉格朗日方程进行建模，拉格朗日方程是描述多体系统动力学的一种方法，其基本形式如下：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q_i$$

其中，L是拉格朗日算子，q是广义坐标， \dot{q} 是广义速度， Q_i 是广义力。拉格朗日算子为 $L = T - V$

(1) 对摆杆

$$v_{x\text{pendulum}} = \dot{\theta} * l_{\text{pendulum}} * \cos(\theta) + (\text{wheel_speed} * r);$$

$$v_{y\text{pendulum}} = -(\dot{\theta} * l_{\text{pendulum}} * \sin(\theta));$$

$$EK_{\text{pendulum}} = 1/2 * m_{\text{pendulum}} * (v_{x\text{pendulum}}^2 + v_{y\text{pendulum}}^2) + 1/2 * I_{\theta} * \dot{\theta}^2;$$

$$Ep_{\text{pendulum}} = m_{\text{pendulum}} * g * l_{\text{pendulum}} * \cos(\theta);$$

(2) 对车体

$$v_{bodyx} = (\dot{\theta} * \cos(\theta) * 2 * l_{\text{pendulum}} + \phi_{\text{dot}} * \cos(\phi) * L_{\text{car}}) + (\text{wheel_speed} * r);$$

$$v_{bodyy} = -(\dot{\theta} * 2 * l_{\text{pendulum}} * \sin(\theta) + \phi_{\text{dot}} * L_{\text{car}} * \sin(\phi));$$

$$EK_{\text{BODY}} = 1/2 * m_{\text{car}} * (v_{bodyx}^2 + v_{bodyy}^2) + 1/2 * I_{\text{car}} * \phi_{\text{dot}}^2;$$

$$Ep_{\text{BODY}} = (2 * l_{\text{pendulum}} * \cos(\theta) + 1/2 * L_{\text{car}} * \cos(\phi)) * g * m_{\text{car}};$$

(3) 对驱动轮

$$EK_{\text{Rwheel}} = 1/2 * I_{\text{wheel}} * \text{wheel_speed}^2 + 1/2 * m_{\text{wheel}} * (\text{wheel_speed} * r_{\text{wheel}})^2;$$

根据拉格朗日方程求出系统 $\ddot{\theta}$, $\ddot{\omega}$, $\ddot{\phi}$ 的解

该模型具有具有高阶次、非线性的特点，我们对非线性模型平衡点进行线性化处理，来达到控制目的构建状态空间方程

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{\omega} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \omega \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \end{bmatrix}$$

A, B矩阵为对平衡点进行雅克比线性化处理 $f(x, u) \approx f(x_0, u_0) + A(x-x_0) + B(u-u_0)$; $f(x, u)$ 对状态变量逐一求偏导, 再带入平衡点状态变量和控制变量, 最终得到数值矩阵A, B。即状态 $\dot{x} = A(x-x_0) + B(u-u_0)$ 。通过代入不同的腿长, 拟合AB中的每一项, 看作是是与腿长L相关的线性函数。在具体应用中, 当腿长发生变化时, 可以动态地更新A(L)和B(L)矩阵, 以保持控制系统的有效性。这样的设计使得机器人系统更容易适应不同的工作条件和环境, 提高了系统的鲁棒性和灵活性。

系统的可控性是指是否存在一种控制输入, 使得系统在有限时间内可以从任意初始状态到达任意目标状态。可控性是一个重要的系统性质, 对于控制系统设计和性能评估非常关键。系统的可控性可以通过可控性矩阵来判断。模型做简化, 但均在控制算法承受的阈值内。

可控性矩阵为 $CO = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$ 。使用ctrb(A, B)求得系统的可控性矩阵Co, 矩阵Co的秩等于系统的阶次, 即 $rank(Co) = 6$, 则系统可控。

在控制理论中, 一个系统是可观的, 意味着系统的状态可以通过测量系统的输出来唯一确定。使用obsv(A, C)函数计算可观性矩阵, 并且检验其秩等于系统维度为系统可观。

为快速而有效地调整机器人的姿态, 使其保持平衡。全车使用状态反馈lqr算法进行控制, LQR(线性二次型调节)是一种经典的线性控制算法, 可以用于设计稳定的控制器。LQR的基本思想是通过最小化系统状态的二次型代价函数设计控制器

$$J = \int (X^T Q X + U^T R U) dt$$

Q和R为权重矩阵。通过求解出最优的控制量为 $u = -kx$, 为跟踪输入并解决一定的模型误差加入反馈, 并积

注: 辽宁省辽宁科技大学大学生创新创业训练计划(24年立项)

作者简介: 董文硕(2003—), 男, 就读于辽宁科技大学机械能与自动化学院。

王禹茜(2003—), 男, 就读于辽宁科技大学机械能与自动化学院。

李玲玲(1965—), 女, 吉林桦甸人, 工学硕士, 副教授, 主要从事机械设计及理论的教学与研究工作。

分作用于系统的输入。

考虑系统中的重力对腿长的影响。通过引入重力前馈, 以抵消重力引起的影响, 使得系统更为稳定。通过补偿roll角到两腿长度, 以实现主动悬挂功能和提高上层结构的平稳性。

4 总结

机械方面: 优化电机的选型, 优化机器人的结构和材料, 以减轻重量, 提高机动性和效率。进一步优化腿部和云台的机械结构, 以提高机器人的结构强度和耐久性。通过改进腿部设计, 提高机器人的运动学性能, 使其能够更自由、稳定地移动。模块化设计, 设计模块化的机械结构, 以便更容易进行维护、升级和替换。

控制方面: 目前所作控制算法在倒地后会大程度偏离所线性化的平衡点, 会存在一定无法启动问题, 需要进一步提升控制方法使用非线性等控制方法, 后续对车体进行空间上建模以适应更复杂和动态的环境。考虑引入高级的控制算法, 例如模型预测控制(MPC)。设计控制算法以实现机械结构变化和环境变化的自适应, 确保机器人在不同条件下都能保持稳定性和性能。考虑引入更高阶的非线性控制算法, 进一步控制身体姿态, 以更准确地捕捉机器人动力学的非线性特性以完成跳跃等动作。

5 结论与展望

本文提出了一种基于串联腿轮机构设计方案, 并对其结构特点、运动原理、控制系统设计等方面进行了详细阐述。通过实验验证, 该设计方案具有良好的地形适应性和稳定的行走能力。未来我们将继续深入研究该领域的相关问题进一步优化设计方案提高其性能和智能化水平为实际应用提供更加优质的技术支持。

参考文献

- [1]郑春雷, 殷宝麟, 杨锡军等. 轮腿式机器人的设计与运动仿真[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2022, 40(05): 75-77.
- [2]董晋安. 一种新型轮腿机构的拓扑结构设计与分析[D]. 太原科技大学, 2023. DOI: 10.27721/d.cnki.gyzjc.2023.000345.
- [3]陆军. 基于PID和LQR控制的两轮自平衡小车研究[D]. 西南交通大学, 2012.
- [4]陈阳, 王洪玺, 张兰勇. 轮腿式平衡机器人控制[J]. 信息与控制, 2023, 52(05): 648-659. DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2023.2533.
- [5]常昊天, 李小兵, 钟伟杰. 基于自适应模糊PID的二级倒立摆控制方法[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(02): 108-113.