

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0501

一种新型轮腿复合球形机器人及其运动性能分析

沈 轲¹, 柳 丽^{1,2*}, 张嘉泽¹, 景大程¹

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波大学 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为提升球腿复合式机器人在较为平坦地形上的运动性能, 提出一种轮腿复合球形机器人, 其集成球形、轮式和四足三种形态运动模式。首先通过建立球形、轮式形态的动力学模型分析了机器人最小转弯半径以及爬坡性能, 其次研究了腿部机构参数对机器人球形态运动性能的影响, 最后制作试验样机并测试其运动性能。结果表明, 所设计的轮腿复合球形机器人在平坦地形上具有较小转弯半径, 平均通行速度为 $1.935 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 爬坡角度可达 24° , 相比现有球腿复合式机器人具有明显优势。

关键词: 球形机器人; 轮腿复合; 构型设计; 动力学分析; 性能测试

中图分类号: TH242

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 03-0025-10

球腿复合式机器人结合了球形机器人快速、灵活的移动能力和腿足式机器人在复杂地形中的优越越障性能, 它既能在平坦环境下通过球形态高速移动, 又能在崎岖地形中展开腿部结构稳健行走, 极大地提高了适用范围和效率。因此, 球腿复合式机器人已成为当前研究的热点。

Mahboubi 等^[1]首次提出通过腿部运动来实现球形态滚动的概念, 为球腿复合式机器人奠定了初步的理论基础。Aoki 等^[2]设计的四足行走机器人“QRoSS”展示了具备球形外壳的机器人在紧急救援场景下的应用潜力。Phipps 等^[3]设计的 HEB 球腿复合机器人通过球壳的变形与腿部机构耦合实现了滚动与爬行两种运动模式间的切换, 探索了通过外壳变形来驱动的新途径。Halvorsen^[4]设计的 MorpHex 改进了球腿复合机器人的变形机构, 通过六足腿部模块来提升滚动与转向运动的流畅性。Gilles 等^[5]在 MorpHex 的基础上, 通过两半球都带有四条腿的底盘设计提升了机器人的运动性能。倪聪等^[6]针对球腿复合式机器人的承载能力与运动稳定性问题, 提出了一种基于 Klann 连杆机构的设

计方案。此外, Jia 等^[7]将偏心力矩式内部驱动与球腿复合机器人相结合, 展示了球腿机器人在不规则地形下的良好性能。

现有球腿复合式机器人根据滚动运动的实现方式可分为两大类。第一类是通过添加独立的滚动驱动来实现滚动运动。该类机器人涉及两种驱动机构的结合, 会在一定程度上妥协运动性能, 其运行速度通常不超过 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 爬坡能力限制在 15° 以内。第二类是将腿部机构与球壳耦合, 通过球壳变形来实现滚动运动。此类机器人虽然在设计上较为新颖, 但由于机械结构和控制算法的复杂性, 其运动速度、灵活性和爬坡能力等均不及第一类。概括来说, 以上两类球腿复合式机器人在设计理念上各有特点, 但都面临着性能不足的问题。

由此笔者提出一种新型轮腿复合式球形机器人, 集成球形态、轮式形态和四足形态三种运动模式, 旨在增强机器人在平坦或倾斜地面上的运动稳定性, 并提高机器人在速度和爬坡能力方面的性能, 为应对复杂地形和高效完成任务提供技术支撑。

收稿日期: 2024-05-01

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省高等教育“十四五”教改项目(JG20220169); 宁波大学教改项目(SXJXGG2023008)

第一作者: 沈 轲, 硕士研究生, 主要研究方向: 移动机器人机构学。E-mail: woshijames10@gmail.com

*通信作者: 柳 丽, 副教授, 主要研究方向: 机构设计与分析、增强现实。E-mail: liuli@nbu.edu.cn

1 方案设计

腿足式机器人腿部机构布置方式主要可分为仿哺乳类、仿昆虫类及仿爬行类三种^[8-9]。仿哺乳类动物机器人(如仿狗、猫等)设计重点在于提供较高的躯干净高和承载力,但存在直立平衡上的不足。与此相反,仿昆虫类机器人以甲虫为原型,通过扩大支撑面积来增强稳定性和平衡性,但牺牲了部分越障能力。仿爬行类机器人依照壁虎或蜥蜴等动物,通过腹部或尾巴接触地面以减轻腿部负担来增强支撑。考虑到仿昆虫类机器人具备在崎岖地形中稳定性较高的优势,笔者在设计腿部机构时采用该类动物骨骼结构为基础。在滚动驱动单元设计方面,采用基于偏心力矩^[10]的设计,利用球壳内配重体位置变化产生的偏心力矩来推动球壳滚动,以实现结构紧凑和高效运动。

设计的机器人总体方案如图1所示,主要构成包括两个轮腿复合模块、两个腿部模块、滚动模块。电控模块安装在滚动模块内,腿部模块为未安装滚轮的轮腿复合模块。通过改变轮腿复合模块的位置,机器人可以在球形态、轮式形态、四足形态间任意进行转换,实现更加灵活的运动行为,提高了地形适应能力。球形态自稳定性强、能耗低,非常适合在下坡路段或狭窄的空间中使用;轮式形态则在平坦或倾斜地面上提供了更高的稳定性与速度^[11];而四足形态能够跨越台阶或沟壑,展现了其卓越的运动稳定性和适应性^[12]。

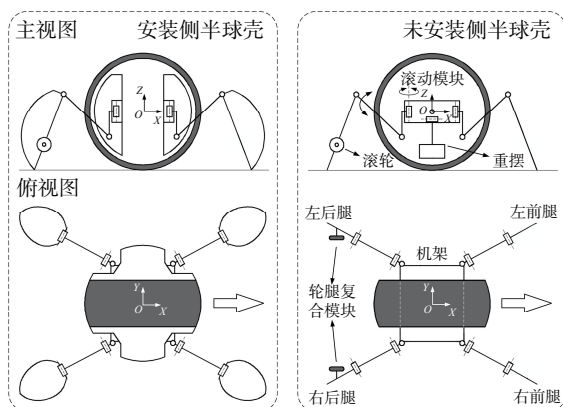


图1 总体方案

1.1 滚动模块设计

对于偏心力矩驱动式球形机器人来说,配重比(重摆与系统总质量的比值)是影响其运动性能

的关键点^[13]。通常情况下,配重比越大的球形机器人直行与转向性能越好。同时,由于球形复合式机器人在球形态下需要将腿部机构收纳至球壳内部,因此滚动模块中转动球壳的固定方案和电机安装位置就显得尤为关键,应最大可能地在为其他模块预留空间的同时来提高其配重比,从而提升系统的整体运动性能。

设计的滚动模块方案如图2所示。长轴电机安装于内框底部,通过齿轮传动来直接带动球壳运动。左右侧半球壳通过主梁相互连接,安装于主梁上的短轴电机与由电池组构成的重摆直接连接。通过摆动重摆来改变滚动模块的质心,利用重力矩驱动机器人系统实现转向运动。带有内齿的转动球壳通过三个均布于内框的支撑轮相对固定。支撑轮可绕穿过内框的轴进行转动,转动轴、左右侧半球壳均固定于内框。以上设计最大程度预留了球壳内部空间来布置轮腿复合模块、电控模块、传感器组件等模块组件。

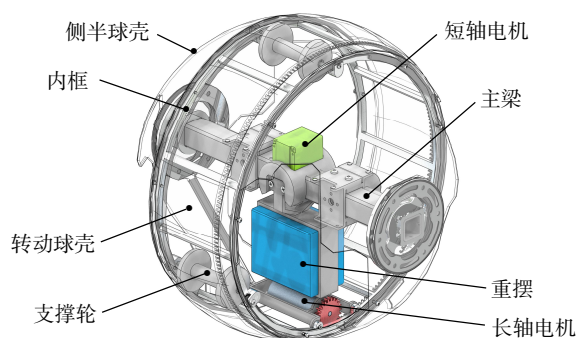


图2 滚动模块设计

1.2 轮腿复合模块设计

如图3所示,轮腿复合模块小腿部分采用闭链五杆结构,与髋关节电机串联,以增强承载能力。

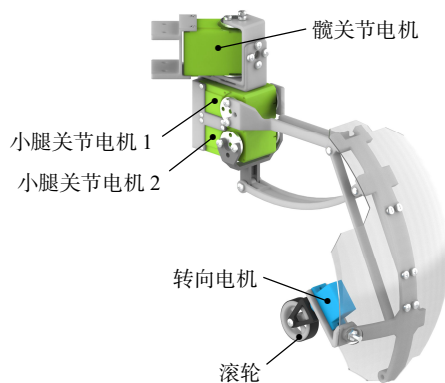


图3 腿部机构结构

腿部末端装有转向电机和滚轮,当腿部机构达到极限伸展时,此时的滚轮处于贴地状态,使机器人切换至轮式模式,随即通过调整电机输入角度实现行走和转向功能。

轮腿复合模块整体结构安装于机架下方^[14],具体方案如图4所示。

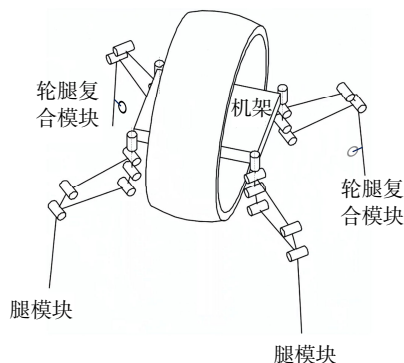


图4 轮腿复合模块安装方案

2 机器人系统运动分析

对机器人进行运动分析是实现其在非结构环境下运动的重要环节^[15]。本节基于上文所设计的轮腿复合球形机器人,从球形态以及轮式形态运动模式入手来分析和评估其相应的运动性能。

2.1 球形态运动模式分析

当腿部模块全部收拢至球壳内时,机器人转换至球形态。建立其简化模型如图5所示,点 D 、 F 、 S 分别为重摆、长轴电机和腿部模块的质心,相关各项参数见表1。

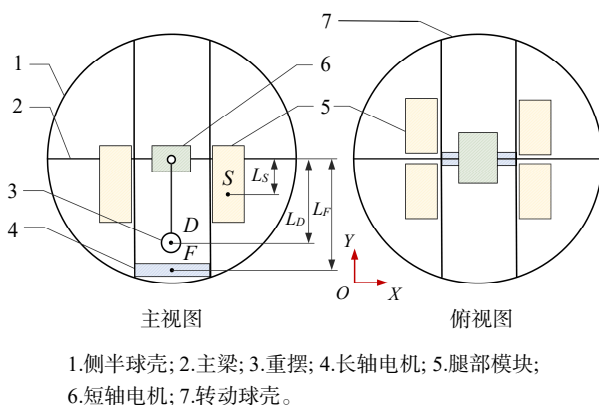


图5 机器人球形态简化模型

在进行物理建模时,做出以下假设^[16]:

(1) 球形机器人符合刚体滚动,且在滚动过程中不会出现打滑现象。

表1 球形机器人参数

参数名称	符号	单位	数值
样机总质量	m	kg	2.52
重摆质量	m_D	kg	0.45
重摆摆长	L_D	mm	55
主梁质量	m_U	kg	0.03
腿部模块质量	m_S	kg	0.182
腿部模块距主梁距离	L_S	mm	45
短轴电机质量	m_H	kg	0.052
长轴电机质量	m_F	kg	0.05
长轴电机距主梁距离	L_F	mm	102
转动球壳半径	R	mm	140
转动球壳质量	m_K	kg	0.13

(2) 球形机器人壳体是一个等效质量分布均匀的薄壁球壳。

(3) 在静止状态下,球形机器人的质心与其几何中心重合。

(4) 在运动状态下,球形机器人的主要摩擦力是壳体与地面之间的动摩擦力,忽略内部机械部件之间的摩擦力。

2.1.1 坡面前向滚动动力学模型

如图5所示,在球形态下的长轴电机驱动机器人绕主梁轴滚动实现直行,而短轴舵机控制机器人绕垂直于主梁的轴进行旋转,从而实现转向。由于长短轴电机的耦合程度较低,因此可以采用分离法处理,将复杂运动分解为更简单的滚动和转向两个独立运动单元,将三维形态的机器人模型投射至二维平面,从而简化动力学模型。平面的前向滚动运动即为坡面倾角为 0° 的特例。

规定坐标系 $\Sigma_o\{X, Y, Z\}$ 为与大地固连的惯性坐标系,垂直坡面向上的方向为 $+Z$,机器人在起始时刻的滚动前进方向为 $+Y$ 。坐标系 $\Sigma_c\{X_c, Y_c, Z_c\}$ 为机体动坐标系,坐标原点与球体中心 C 点重合,机器人当前时刻的滚动前进方向为 $+Y_c$,向上方向为 $+Z_c$ 。球形态在坡面的前向滚动运动简化平面模型如图6所示。简化靠近主梁(重心与主梁在同一水平面)的腿部模块部分、主梁与短轴电机为机架,机架中心与 C 点重合,机架质量 $m_c = 4/3m_s + m_H + m_U$,简化远离主梁(重心与主梁不在同一水平面)的腿部模块、长轴电机与重摆为质点 P ,质点 P 质量 $m_p = 8/3m_s + m_D + m_F$,质

点 P 距主梁中心的距离 L_P 可以根据质心的定义予以求解:

$$L_P = \frac{8m_S L_S / 3 + m_D L_D + m_F L_F}{8m_S / 3 + m_D + m_F} \quad (1)$$

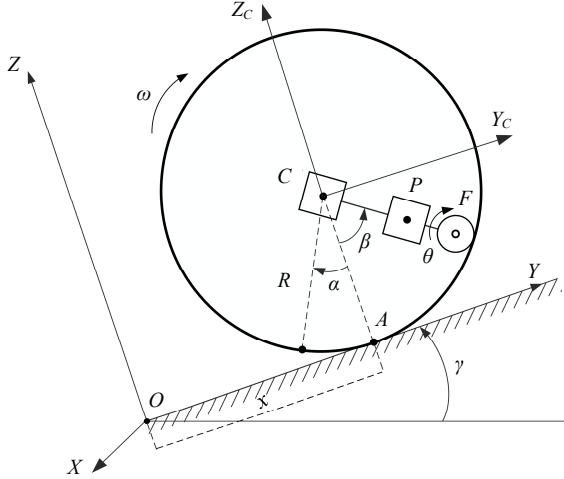


图6 机器人球形态坡面运动简化模型

初始位置时,球形机器人与地面的接触点 A 与坐标系 Σ_O 的坐标原点重合,球体中心 C 点坐标为 $C(0, R)$, 质点 P 的坐标为 $P(0, R - L_P)$ 。

机器人前进距离 x 时,重摆相对初始位置转过角度为 β ,转动球壳相对初始位置转过角度为 α ,长轴电机控制的齿轮相对初始位置转过角度为 θ ,坡面角度为 γ 。

球形态机器人在平面、坡面的前向滚动运动简化平面模型是具有完整约束的非保守欠驱动系统,因此可以利用非保守场、欠驱动系统中的拉格朗日方程来推导球形机器人的动力学方程^[17-18]。具体表示为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = T_i \quad (2)$$

式中: q_i 代表系统质点系中相互独立的广义坐标; T_i 代表广义力; 拉格朗日函数 $L = E - V$, E 为系统总动能, V 为系统总势能。

选取系统的广义坐标 q_1 和 q_2 为 α 、 β 。为计算机器人的拉格朗日函数 L , 需先分别分析系统的总动能 E 与总势能 V 。

(1) 系统总动能(E)。系统总动能 E 由转动球壳动能、机架动能、质点 P 动能三部分组成, 即

$$E = \frac{1}{2} R^2 \dot{\alpha}^2 \left(\frac{1}{2} m_K R^2 + \frac{1}{2} m_C R^2 \right) + \frac{1}{2} I_K \dot{\alpha}^2 +$$

$$\frac{1}{2} I_C \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} m_P (R^2 \dot{\alpha}^2 + L_P^2 \dot{\beta}^2) + m_P R L_P \dot{\alpha} \dot{\beta} \cos \beta \quad (3)$$

式中: I_K 、 I_C 分别为转动球壳与机架相对其几何中心的转动惯量。

(2) 系统总势能(V)。系统总势能 V 由转动球壳势能、机架势能、质点 P 的势能三部分组成。选取水平面为系统零势能面, 系统总势能 V 为

$$V = m_K g h_C + m_C g h_C + m_P g h_P \quad (4)$$

式中: $h_C = R(\cos \gamma + \alpha \sin \gamma)$, $h_P = h_C - L_P \cos(\beta + \gamma)$ 。

根据图6可知

$$\alpha + \beta = \mu \theta \quad (5)$$

式中: μ 为齿轮传动比。

假设电机驱动力矩为 T , 根据虚功原理推算出系统所受广义力 T_α 、 T_β 为

$$T_\alpha = T_\beta = \frac{T}{\mu} \quad (6)$$

(3) 系统方程。联立式(2)~(6), 可得机器人系统的动力学方程, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} (m_K R + I_K + m_P R^2) \ddot{\alpha} + (\ddot{\beta} \cos \beta - \dot{\beta}^2 \sin \beta) \cdot \\ m_P R L_P - (m_K + m_C + m_P) R g \sin \gamma = T / \mu \\ (m_C R + I_C + m_P L_P^2) \ddot{\beta} + (\ddot{\alpha} \cos \beta - 2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \beta) \cdot \\ m_P R L_P + (\cos \beta - \sin \beta) m_P g L_P = T / \mu \end{cases} \quad (7)$$

2.1.2 平面转向动力学模型

球形机器人在平面上的转向运动简化为平面模型如图7所示。其中, φ 为球形机器人与水平面夹角, r 为转向半径。简化远离主梁的腿部模块部分与长轴电机为质点 B , 其质量 $m_B = 8 / 3 m_S + m_F$, 并且通过长度为 L_B 的零质量杆与球形机器人的本

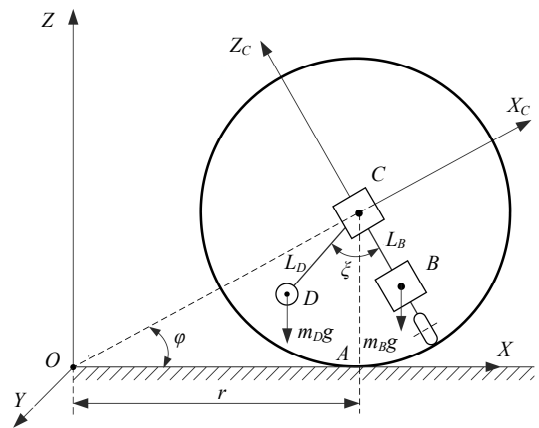


图7 机器人球形态转向运动简化模型

体动坐标系 Σ_C 原点进行固连。 L_B 则可以根据质心的定义予以求解:

$$L_B = \frac{m_S L_S / 3 + m_F L_F}{8m_S / 3 + m_F} \quad (8)$$

简化重摆质点为 D , 质量为 m_D , 摆长为 L_D 。设定重摆相对质点 B 的夹角为 ξ 。当球形机器人系统处于保持某倾斜角度不变的平衡状态时, 质点 B 与重摆产生的重力绕机体坐标系 Y_C 的力矩分别为 M_B 和 M_D , 通过力矩平衡条件可得

$$M_D - M_B + F_f R = 0 \quad (9)$$

式中: F_f 为地面对球壳施加的摩擦力。

根据牛顿第三定律, M_B 、 M_D 可表达为

$$\begin{cases} M_B = m_B g L_B \sin \varphi \\ M_D = m_D g L_D \sin(\xi - \varphi) \end{cases} \quad (10)$$

联立式(9)、(10)可得在球形机器人转向过程中, ξ 、 φ 、 m_B 、 L_B 等参数之间满足如下约束关系:

$$r = \frac{m_B g L_B \sin \varphi - m_D g L_D \sin(\xi - \varphi)}{F_f \tan \varphi} \quad (11)$$

2.1.3 爬坡与转向性能分析

爬坡和转向能力是球形机器人的两个关键性能指标, 较大的爬坡角度能增强其在崎岖地形中的作业能力, 而较小的转向半径可使其在规避障碍时更加灵活。

(1) 对于爬坡运动, 选取系统在坡面上保持静止的平衡状态进行分析, 即

$$\dot{x} = \ddot{x} = \dot{\beta} = \ddot{\beta} = \dot{\alpha} = \ddot{\alpha} = 0 \quad (12)$$

将式(12)代入式(7), 整理可得

$$\begin{cases} (m_K + m_C + m_P) R g \sin \gamma = T_0 / \mu \\ m_P g L_P \sin(\beta_0 + \gamma) = T_0 / \mu \end{cases} \quad (13)$$

式中: β_0 为重摆的临界摆角; T_0 为长轴电机的临界扭矩。

对式(13)进一步整理, 可得机器人坡面性能参数:

$$\gamma \leq \arcsin\left(\frac{m_P}{m_C + m_K + m_P} \frac{L_P}{R}\right) \quad (14)$$

(2) 对于转向运动, 根据 φ 与 r 的关系, 将式(11)转换为如下形式:

$$\tan \varphi = \frac{m_D g L_D \sin \xi}{m_B g L_B + m_D g L_D \cos \xi} \quad (15)$$

选取系统在地面保持静止时的平衡状态进行分析, 取 $\xi_{\min}$ 为夹角 ξ 的临界摆角, 代入式(15)中,

整理可得机器人最小转向半径:

$$r_{\min} = \frac{R(m_B g L_B + m_D g L_D \cos \xi_{\min})}{m_D g L_D \sin \xi_{\min}} \quad (16)$$

将表 1 参数代入式(14)、(16), 可以得到所设计机器人球形态下的最大爬坡角度为 14.86° , 最小转向半径为 691.45 mm 。

2.1.4 腿部模块参数对球形态运动性能影响

根据式(14)、(16), 通过 MATLAB 得出腿部模块参数与机器人最大爬坡坡度 $\gamma_{\max}$ 、最小转向半径 $r_{\min}$ 的关系如图 8 与图 9 所示。

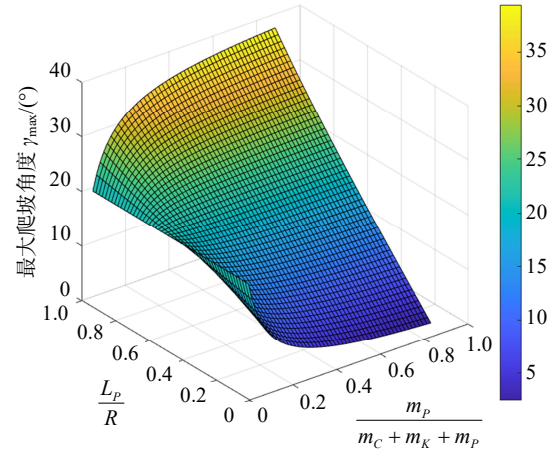


图 8 腿部模块参数与最大爬坡角度间关系

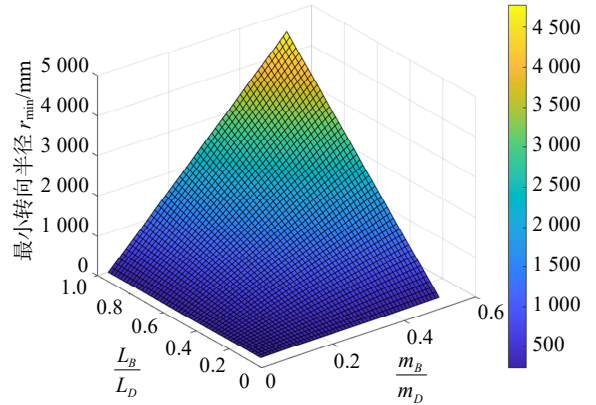


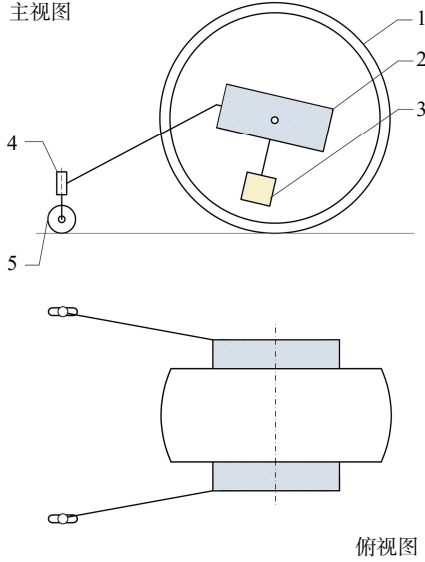
图 9 腿部模块参数与最小转向半径间关系

分析图 8 和图 9 可知, 当腿部模块质量固定时, 与主梁中心的距离愈远, 机器人爬坡能力愈强, 但其转向能力却相应减弱。因此, 在设计过程中可通过调整腿部模块重心与主梁中心的相对距离, 在提升转向与爬坡性能间取得平衡, 进而增强机器人的整体运动性能。

2.2 轮式形态运动模式分析

当机器人两后腿伸展至极限, 两前腿收拢在

球壳内时,此时的机器人处于轮式形态,对应的简化模型如图 10 所示。



1.转动球壳;2.主梁;3.重摆与腿部模块;4.转向电机;5.滚轮。

图 10 机器人轮式运动模式简化模型

轮式形态下,长轴电机将动力输出至转动球壳,从而实现机器人的直线滚动行为;位于腿部末端的两个转向电机则负责调节机器人的运动方向。在进行物理建模时,做出以下假设:

(1) 轮式机器人的车体和轮子均符合刚体的条件,即在运动过程中不发生形变。

(2) 假设轮式机器人在运动过程中,轮子与地面之间不存在滑动。

(3) 假设在运动状态下,轮式机器人的主要摩擦力来源于轮子与地面之间的接触摩擦力,忽略机械部件内部的摩擦和空气阻力。

2.2.1 坡面前向运动动力学模型

为描述轮式形态在坡面的前向运动,建立如图 11 所示的爬坡运动模型,转动球壳与坡面相切于点 A_1 ,滚轮与坡面相切于点 A_2 。转动球壳质量为 m_k ,半径为 R ,质心与几何中心 C 点重合。简化主梁、腿部模块、长轴电机与短轴电机质量为框架,质量为 m_e ,质心与 C 点重合。滚轮质量为 m_g ,半径为 r_g ,质心位于点 G ,质量为 m_l 的连杆连接转动球壳与滚轮,与坡面夹角为 θ_l 。当球形机器人处于初始位置时,点 A_2 与惯性坐标系的坐标原点重合,框架与转动球壳的质心 C 点坐标为 (L_l, R) ,滚轮质心 G 点坐标为 $(0, r_g)$ 。机器人前进距离 x 时,

转动球壳、滚轮相对初始位置转过的角度为 α 、 ψ 。定义转动球壳、滚轮、框架相对其几何中心的转动惯量分别为 I_k 、 I_g 、 I_e 。

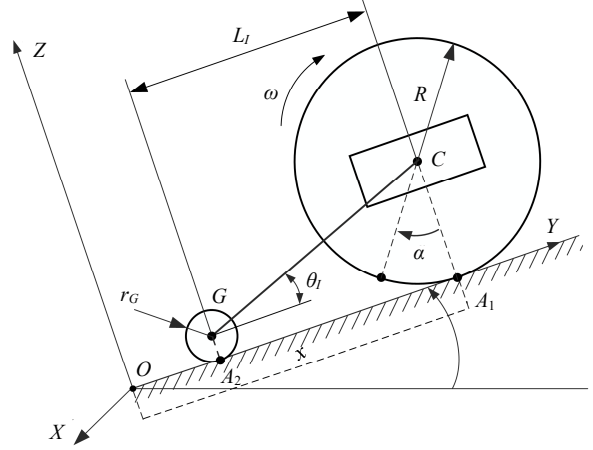


图 11 机器人轮式形态爬坡运动模型

轮式形态的坡面简化模型具有完整约束的非保守系统,因此利用含外力的欧拉-拉格朗日方程推导其动力学方程。选取系统广义坐标 q_1 为 α 。

对于机器人在坡面的前向运动,分别分析系统的总动能 E 与总势能 V 。

(1) 系统总动能(E)。系统主要由转动球壳、滚轮、框架以及连杆四部分组成。系统总动能由转动球壳质心平移引起的动能 E_{ks} 、转动球壳转动引起的动能 E_{kr} 、框架质心平移引起的动能 E_{es} 、滚轮质心平移引起的动能 E_{gs} 、滚轮转动引起的动能 E_{gr} 以及连杆质心平移引起的动能 E_{ls} 组成。因此系统总动能可表达为

$$E = E_{ks} + E_{kr} + E_{es} + E_{gs} + E_{gr} + E_{ls} = \frac{1}{2} m_k R^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I_k \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_e R^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_g r_g^2 \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} I_g \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} m_l R^2 \dot{\alpha}^2 \quad (17)$$

(2) 系统总势能(V)。选取水平面为系统零势能面,则系统总势能由转动球壳势能、框架势能、滚轮势能以及连杆势能组成。系统总势能可表达为

$$V = m_k g h_k + m_e g h_e + m_g g h_g + m_l g h_l \quad (18)$$

其中:

$$h_k = h_e = (\alpha R \sin \gamma + r_g \cos \gamma) + \frac{L_l}{\cos \theta} \sin(\theta_l + \gamma)$$

$$h_l = (\alpha R \sin \gamma + r_g \cos \gamma) + \frac{L_l}{2 \cos \theta} \sin(\theta_l + \gamma)$$

$$h_g = (\alpha R \sin \gamma + r_g \cos \gamma)$$

(3) 系统方程。将式(17)、(18)代入式(2), 可以得到机器人轮式形态在坡面前向滚动运动的动力学方程:

$$\left(m_K + \left(\frac{I_K}{R} \right)^2 + 2m_E + \left(\frac{I_G}{r_G} \right)^2 + m_I \right) R^2 \ddot{\alpha} + Rg \sin \gamma (m_K + m_E + m_G + m_I) = T \quad (19)$$

将坡面因素 γ 取为 0, 式(19)将转变为机器人在平地运动的动力学微分方程。

2.2.2 转向运动学分析

轮式形态下机器人转向运动模型如图 12 所示。假设左、右后腿至转向中心的距离为 R_L 、 r_R , 左、右后腿的转动角度为 α_L 、 α_R , 机架长度、宽度分别为 L_M 、 L_L 。根据阿克曼转向原理^[19]可得:

$$\begin{cases} \cot \alpha_L - \cot \alpha_R = L_M / L_L \\ r = L_M / 2 + L_L \cot \alpha_L \end{cases} \quad (20)$$

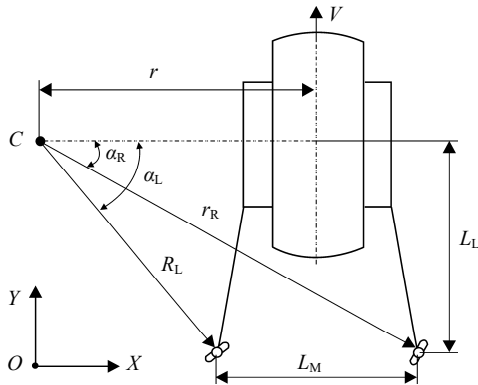


图 12 轮式形态转向运动模型

当给定转向半径 r 为 500 mm, 机架长度 L_M 为 242 mm, 机架宽度 L_L 为 256 mm 时, 根据式(20)可得左、右后腿转向角度 α_L 、 α_R 分别为 33°与 21°。

2.2.3 爬坡性能分析

对于爬坡运动, 同样选取系统在坡面上保持静止时的平衡状态进行分析。取式(19)中的 $\ddot{\alpha}$ 为 0, 整理可得

$$\gamma_{\max} = \arcsin \frac{T_{\max}}{Rg(m_K + m_E + m_G + m_I)} \quad (21)$$

式中: $T_{\max}$ 是能够施加在机器人上而不使其开始滑动的最大广义力(此时是转矩), $T_{\max} = f(m_K + m_E + m_G + m_I) \cos \gamma Rg$ 。

可得到影响轮式机器人最大爬坡角度参数:

$$\gamma_{\max} = \arctan f \quad (22)$$

式中: f 为静摩擦系数。

取 $f = 0.5$, 可得轮式形态下机器人的理论最大爬坡角度 $\gamma_{\max}$ 为 26.56°。

3 机器人性能测试

根据设计方案进行样机研制(图 13)。为验证设计方案的有效性以及理论模型的正确性, 需对机器人样机性能进行测试^[20]。测量得到机器人转动球壳直径为 280 mm, 总质量为 2.54 kg。

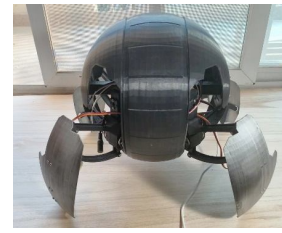


图 13 样机模型

3.1 球形态性能测试

3.1.1 最小转向半径测试

测试在摩擦系数约为 0.5 的木制地板上进行。首先启动短轴电机, 将重摆摆至右侧极限位置, 并使其保持在此状态; 随后启动长轴电机, 让机器人以极慢速度在平地上进行转向运动, 以此消除速度波动对最小转向半径的影响。分别记录当时机器人的具体位置(图 14)。当球形机器人转过半个圆弧时, 视为完成 1 次转向。经多次试验与测量, 获得表 2 数据, 从表中数据可知, 机器人球形态下的最小转向半径为 692 mm。

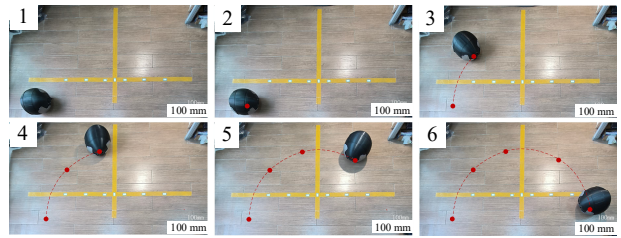


图 14 球形态转向试验

表 2 球形态最小转向半径测试数据 单位: mm

测试序号	转向半径	测试序号	转向半径
1	694	6	710
2	703	7	692
3	714	8	707
4	696	9	699
5	704	10	713

以机器人球形态下理论最小转向半径 692 mm

为基础,计算出理论值与测试值相对误差为 1.7%。相对误差产生的主要原因是未对速度进行精确控制。在功率保持恒定情况下,球形机器人速度的波动不可避免。速度增加产生离心力,使机器人质心向外偏移,进而增大转向半径;相反,速度减少引发质心恢复,进而产生运动轨迹的误差。由于试验中设定了极慢的速度,减少了速度波动对结果的影响,所以相对误差较小,也证实了理论模型的准确性。

3.1.2 爬坡性能测试

在测试中,坡面材质为木制复合板(摩擦系数约为 0.3~0.6),坡面角度范围为 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。将机器人静止放在设置好的坡面前,设定重摆位置保持竖直向下,然后启动长轴电机,让机器人沿着坡面进行运动。如图 15 所示,每间隔 1° 进行测试试验,记录机器人在坡面运动 10 s 的距离,相关坡面数据见表 3。由表 3 数据可知,机器人可以克服 $11^{\circ}\sim 13^{\circ}$ 的坡面,但在 14° 坡面上产生滑移,此时机器人运动已经非常困难,并且在 15° 坡面上已无法正常运行。因此,机器人能克服的实际最大坡面约为 14° ,与理论结果一致。



图 15 球形态爬坡试验

表 3 球形态爬坡数据

测试序号	坡面坡度/ $^{\circ}$	前进距离/mm
1	11	719
2	12	641
3	13	433
4	14	249
5	15	-21

3.2 轮式形态性能测试

3.2.1 运动速度测试

在木制地板上对轮式形态下的机器人进行全速运动测试。设定长轴电机最大转速为 $22\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,机器人起点标点为 0 m,终点标点为 1.00 m。如图 16 所示,记录滚动过程中每 0.25 m 所需时间,经多次试验与测量获得表 4 所示数据。



图 16 轮式形态直线运动试验

表 4 轮式形态不同滚动距离及速度状况

序号	0.25 m 距离/s	0.50 m 距离/s	0.75 m 距离/s	1.00 m 距离/s	速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	0.133	0.258	0.389	0.517	1.934
2	0.135	0.260	0.386	0.515	1.942
3	0.132	0.255	0.391	0.520	1.923
4	0.128	0.250	0.380	0.507	1.972
5	0.140	0.265	0.393	0.525	1.904

经过测试发现,在全速运行状态下,机器人的轮式形态能达到 $1.935\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的平均速度。与现有球腿复合式机器人相比,轮式形态能够通过较为简单的系统控制实现高速的匀速运动,速度提升幅度约为 96.7%,显著优于前者。

3.2.2 转向测试

测试在木制地板上进行。调整滚轮转向电机,使左后腿与右后腿的转向角度分别为 33° 与 21° ,保持试验与理论模型参数一致。启动长轴电机,以较慢速度在平地上进行半径转向运动。如图 17 所示,进行多次的试验与测量,获得表 5 所示数据。

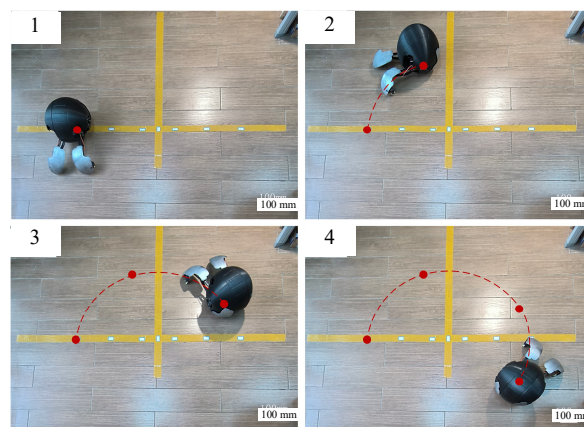


图 17 轮式形态转向试验

由表 5 可知,机器人轮式形态下的平均转向半径为 533.9 mm,由于理论设定转向半径为 500 mm,

因此误差率为 6.35%。具体原因是在理论模型建立过程中, 未考虑转动球壳、滚轮与地面之间的摩擦; 并且在建立机器人模型时, 将所有部件均视为刚体, 忽略了实际运动过程中零部件产生的相对偏移与形变。并且在实际运动过程中, 能观察到腿部机构有明显的侧向弯曲, 也由此进一步说明模型简化所带来的误差。

表 5 轮式形态转向半径测试数据 单位: mm

测试序号	转向半径	测试序号	转向半径
1	527	6	545
2	533	7	530
3	540	8	534
4	535	9	542
5	528	10	525

由式(20)可知, 在几何尺寸确定的前提下, 机器人轮式形态的转向半径与左、右后腿的转向角度紧密相关。随着转向角度增加, 机器人转向半径将会相应地减小, 即在轮式形态下, 机器人的最小转向半径将低于试验观测值。说明相较于球形态, 轮式形态下的最小转向半径更小。因此, 对于需要更精细转向控制的应用场合, 轮式形态提供了更为显著的优势。

3.2.3 爬坡性能测试

以复合木板搭建坡面, 对轮式形态下的机器人进行爬坡性能试验。如图 18 所示, 坡面角度设置为 20°~30°, 记录机器人在不同坡度上运动 10 s 后前进的距离, 相关数据见表 6。



图 18 轮式形态爬坡试验

表 6 轮式形态爬坡数据

测试序号	坡面坡度/(°)	前进距离/mm
1	21	1 219
2	22	843
3	23	662
4	24	369
5	25	-76

试验发现, 当坡度为 24°时, 机器人还能沿坡面向上运动; 而当坡度为 25°时, 机器人出现在坡面静止并下滑的现象。可见轮式形态下机器人的最大爬坡角度约为 24°, 相比现有球腿复合式机器人提升了约 9°, 提升率为 60%。

4 总结

(1) 提出了一种兼具球形态、轮式形态和四足形态三种运动模式的轮腿复合球形机器人结构方案, 在理论分析基础上, 对研制样机进行了性能测试。结果表明在较为平坦地形时, 该方案可通过转换为轮式形态来提高机器人运动性能。

(2) 分析了腿部机构参数对机器人球形态运动性能的影响, 对后续优化球腿复合式机器人性能具有指导意义。

参考文献:

[1] MAHBOUBI S, FAKHRABADI M M S, GHANBARI A. Design and implementation of a novel hybrid quadruped spherical mobile robot[J]. Robotics and autonomous systems, 2013, 61(2):184-194.

[2] AOKI T, ASAMI K, ITO S, et al. Development of quadruped walking robot with spherical shell: improvement of climbing over a step[J]. Robomech journal, 2020, 7(1):1-12.

[3] PHIPPS C C, MINOR M A. Introducing the hex-a-ball, a hybrid locomotion terrain adaptive walking and rolling robot[M]//TOKHI M O, VIRK G S, HOSSAIN M A. Climbing and walking robots. Berlin: Springer, 2006: 525-532.

[4] HALVORSEN K. MorpHex becomes boca bearing company's 2012 innovation contest winner[EB/OL]. [2023-04-14]. <http://zentasrobots.com/robot-projects/morphex-mkii/>.

[5] GILLES S. Design and development of a morphing spherical robot[D]. Edwardsville, USA: Southern Illinois University Edwardsville, 2022.

[6] 倪聪, 杨崇倡, 刘香玉, 等. 基于 Klann 连杆的球腿复合机器人的设计与研究[J]. 机器人, 2020, 42(4):436-447.

[7] JIA W, HUANG Z, SUN Y, et al. Toward a novel deformable robot mechanism to transition between spherical rolling and quadruped walking[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Macao, China. IEEE, 2017:1539-1544.

- [8] ZHONG Y H, WANG R X, FENG H S, et al. Analysis and research of quadruped robot's legs: a comprehensive review[J]. International journal of advanced robotic systems, 2019, 16(3):4148.
- [9] BISWAL P, MOHANTY P K. Development of quadruped walking robots: a review[J]. Ain shams engineering journal, 2021, 12(2):2017-2031.
- [10] LI M G, SUN H X, MA L, et al. Special spherical mobile robot for planetary surface exploration: a review[J]. International journal of advanced robotic systems, 2023, 20(2):162207.
- [11] TAGLIAVINI L, COLUCCI G, BOTTA A, et al. Wheeled mobile robots: state of the art overview and kinematic comparison among three omnidirectional locomotion strategies[J]. Journal of intelligent & robotic systems, 2022, 106(3):57.
- [12] CHEN Z H, LI J H, WANG S K, et al. Flexible gait transition for six wheel-legged robot with unstructured terrains[J]. Robotics and autonomous systems, 2022, 150: 103989.
- [13] 于源, 吴怀松, 焦志伟, 等. 滚-跳多运动模式球形机器人的动力学仿真研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2023, 50(1):89-96.
- [14] NI L W, WU L, ZHANG H S. Parameters uncertainty analysis of posture control of a four-wheel-legged robot with series slow active suspension system[J]. Mechanism and machine theory, 2022, 175:104966.
- [15] 董小闵, 安国鹏, 于建强, 等. 四足机器人五杆单腿机构性能分析及轨迹规划[J]. 机械设计与制造, 2022, 378(8):292-296.
- [16] 曾鹏, 许逵, 郑功倍, 等. 双轮驱动球形机器人的动力学建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(4):276-280, 301.
- [17] WANG F T, LI C G, NIU S H, et al. Design and analysis of a spherical robot with rolling and jumping modes for deep space exploration[J]. Machines, 2022, 10(2):126.
- [18] LIU Y F, WANG Y X, GUAN X Q, et al. Multi-terrain velocity control of the spherical robot by online obtaining the uncertainties in the dynamics[J]. IEEE robotics and automation letters, 2022, 7(2):2732-2739.
- [19] PATEL S, RAWAT R, SHANTANU, et al. Study of steering system for an electric trike ackerman steering [C]//RAO V V, KUMARASWAMY A, KALRA S, et al. Computational and Experimental Methods in Mechanical Engineering: Proceedings of ICCEMME 2021. Springer Singapore, 2022:9-18.
- [20] 马龙, 孙汉旭, 李明刚, 等. 质心径向可变球形机器人的设计与运动分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5):44-56.

A novel wheel-legged spherical robot and its mobility performance analysis

SHEN Ke¹, LIU Li^{1,2}, ZHANG Jiaze¹, JING Dacheng¹

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To enhance the mobility performance of legged spherical robots on relatively flat terrains, this paper proposes a wheel-legged spherical robot that integrates three modes of locomotion: spherical, wheeled, and quadrupedal. Firstly, dynamic models of the spherical and wheeled modes are established to analyze the robot's minimum turning radius and climbing abilities. Secondly, the study investigates the impact of leg mechanism parameters on the mobility performance of the robot in its spherical mode. Finally, a prototype is manufactured for the performance test of its locomotion. The results demonstrate that the designed robot possesses a smaller turning radius, average traversal speed of $1.935\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and can climb slopes of up to 24° . This shows a significant advantage over existing legged spherical robots.

Keywords: spherical robot; wheel-legged composite; configuration design; dynamic analysis; performance testing

(责任编辑 章践立)