

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2023.06.040

# 双行走机构机器人交互机构的技术现状与发展

金承珂<sup>a,b</sup>, 郭铁铮<sup>a,b</sup>, 郑亦峰<sup>a,b</sup>, 汪超<sup>a,b</sup>, 尹越<sup>a,b</sup>

(南京工程学院 a. 工业中心; b. 创新创业学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:**特种机器人适于在废墟、沼泽、灌木丛等恶劣环境下工作,可以替代人们完成危险的任务,在军事、反恐、消防等方面具有良好的应用前景。多行走机构作为一种新型的特种机器人底盘结构,与传统的单行走机构底盘相比,可以在多种所需的行走机构之间灵活切换,兼具轮式的快速节能性与履带式的高越障性与腿式的高灵活性。通过对采用复合式行走机构、耦合式行走机构、叠加式行走机构3种常见的多行走机构机器人底盘进行优、缺点分析,得出性能较好、可行性较高的几种结构,基于成本与可靠性提出未来特种机器人的结构发展趋势。

**关键词:**特种机器人;行走机构;轮履耦合;轮腿耦合;交互机构

**中图分类号:**TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0160-04

## Current Status and Development of Interactive Mechanisms for Dual-walking Robots

JIN Chengke<sup>a,b</sup>, GUO Tiezheng<sup>a,b</sup>, ZHENG Yifeng<sup>a,b</sup>, WANG Chao<sup>a,b</sup>, YIN Yue<sup>a,b</sup>

(a. Industrial Center; b. College of Innovation and Entrepreneurship, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** Special robots, suitable for working in ruins, swamps, bushes and other harsh environments, and capable of replacing people to undertake dangerous tasks, have a good application prospect in military, anti-terrorism, fire fighting and other aspects. Comparing with the traditional single walking mechanism chassis, the multi-walking mechanism, as a new type of special robot chassis structure, can flexibly switch between a variety of required walking mechanism and has the rapid energy saving characteristics of the wheel type and the crawler type of high obstacle crossing and high flexibility of leg type. This paper analyzes the advantages and disadvantages of the robot chassis adopting compound walking mechanism, coupling walking mechanism and superposition walking mechanism, obtains several structures with better performance and higher feasibility, and proposes the development trend of future special robots based on cost and reliability.

**Keywords:** specialized robot; running gear; wheel-track coupling; wheel-leg coupling; interaction mechanism

## 0 引言

随着特种机器人的应用越来越广泛,各种多行走机构机器人的优势逐渐体现出来。常用的移动机器人按其行走机构可以分为轮式机器人<sup>[1]</sup>、履带式机器人<sup>[2-5]</sup>、步行(足式)机器人<sup>[6-7]</sup>、复合式机器人<sup>[8-14]</sup>、耦合式机器人<sup>[15-18]</sup>、叠加式机器人<sup>[19-20]</sup>。轮式、履带式、足式机器人作为单行走机构的机器人由于结构相对简单而广泛运用。

单行走机构机器人通常仅适应某几种地形,在不适应的地形中并不能很好地运行,甚至无法运行。而复合式机器人与耦合式机器人作为多行走机构的机器人,可在多种环境内自由行动,例如轮履耦合(复合)式机器人既可在平地高速运动,也可在恶劣环境内依靠履带进行越障。另外叠加式机器人通常可用于克服某种机器人的缺点,例如轮履叠加(半履带)用于解决单原动机履带结构内主传

动机构过于复杂的问题。除此之外还有一些特殊的行走机构,例如柔性行走机构、刚柔耦合行走机构等等,由于这些特殊的行走机构研究较少,目前技术还不成熟,故此文不做赘述。

## 1 各种行走机构的结构特点

### 1.1 单行走机构特点

单行走机构由于结构简单、可靠性高,故使用最为广泛,例如轮式、履带式,利用轮胎或履带提供着地力,由于末端执行机构通常为一个构件(轮毂)或种类较少的构件(履带)的组合,故可根据需求自由设计,例如军用履带车辆会使用金属挂胶履带,但大部分轮履耦合结构无法使用金属挂胶履带,甚至必须使用可伸长和收缩的特制履带。

**基金项目:**国家级大学生创新创业训练计划支持项目(202111276009Z);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(21)1007);浙江省农作物收获装备技术重点实验室开放课题项目(2021KY03, 2021KY04);江苏省研究生科研创新实践活动项目(SJCX21\_0933, SJCX21\_0940)

**第一作者简介:**金承珂,(2001—),男,江苏常熟人,本科,研究方向为特种机器人,2686122650@qq.com。

## 1.2 复合式行走机构特点

复合式行走机构通常由同时使用某两种行走机构并添加一个转换机构构成,比较常见的是轮履复合,其结构是基于履带式底盘设计,利用一套液压系统将轮式结构顶出,并将动力与履带主动轮脱离,同时与轮式相接。而轮腿复合结构类似,这里不做赘述。

复合式行走机构相对与单行走机构的优点主要体现在可在不同的地形使用不同种类的行走机构。

## 1.3 耦合式行走机构特点

与复合式行走机构不同的是,耦合式行走机构通常为两套行走机构并可利用变形、重组、分离等方法进行行走模式的切换。其中变形或重组的方式会导致末端执行机构过于复杂,通常表现为轮子不够圆整、履带需要收缩、腿式需要较高自由度和较长的脚尖行程。这难免出现离合器或相似结构,导致结构臃肿、成本过高、可靠性差。另外用于末端执行器变形所需相应的连杆机构会占用部分车体空间。

耦合机构通过分离进行行走机构变换的结构中,可以只存在一种常规行走机构与一套转换机构,利用转换机构将常规行走机构的一部分分离。此结构虽然有结构简单可靠、占用车体空间较少等优点,但可使用的范围较小。因为3种基础行走机构中只有履带式结构包含轮式所需结构。

## 1.4 叠加式行走机构特点

叠加式行走机构通常指轮履叠加(也有与气垫结构叠加的)。因为单原动机履带结构内需要一个方向控制来提供转向自由度,故传动机构比较复杂,而双原动机履带结构由于原动机冗余结构限制,或是功率较小,或是机械效率较低,无法满足一些大马力履带机械的要求。故可利用轮式结构常用的阿克曼转向结构进行转向,以简化结构,提高可靠性。但此种结构越障性能弱于履带车辆,而最高速度又低于轮式车辆,此结构在20世纪运用非常广泛,现在由于双传动履带结构件的标准化使用而逐渐减少。

另外因为腿式与其他行走机构叠加会导致行走机构不但无法得到腿式结构灵活性高的优点,还会使得腿式结构控制较难,故此结构较少见,通常运用于例如管道检修等场景。

## 2 交互结构分析

### 2.1 常用复合式交互结构分析

复合式行走机构是利用顶升机构将其中一套行走机构顶出,然后利用离合器的结构将动力分至所需的行走机构上。其中轮履复合结构如图1所示,虽然结构臃肿,但结构可靠、成本较低。也有少数小型机器人动力不分离,虽然结构简单,但也产生了较多的功率浪费,尤其是行走机构中包含有较厚橡胶履带结构的机器人。



图1 轮履复合结构

腿履复合(腿式自由度 $\geq 2$ )机构则可将腿式作为顶出机构,且此时无需离合器,但腿式结构本身就可末端安装履带(轮式),即履(轮)腿耦合,故有腿式参与的复合机构较少。

综上所述,复合机构中轮履复合结构较多,是为了解决机器人在各地形的机动性和通过性的问题,且结构比较成熟,故运用较为广泛。而履腿式的复合机构通常用于单自由度的腿式结构,例如 Jansen 机构,但由于性能有限,故运用较少。

### 2.2 常用耦合式交互结构分析

耦合式行走机构通常有变形、重组、分离3种变换行走机构的方式。其中通过变形或重组的行走机构通常会基于一种基础行走机构,例如轮履耦合会基于轮式或基于履带式设计。其中基于轮式的耦合机构会利用连杆等结构改变车轮外轮廓的形状,如图2所示。此种方法虽然可使结构可靠,但由于是基于轮式设计的,外轮廓线长度并没有发生变化,且履带状态时外轮廓为三角形,接地面积较小。故即使在履带状态下,越障能力依然有限,比较适合于越野环境并不是很复杂的情形。



图2 基于轮式设计的轮履重构结构

基于履带式结构的耦合式机器人则通常靠连杆机构展开履带,如图3所示,但此种机构通常会设置可伸缩履带,或依靠连杆机构将履带夹住<sup>[21-22]</sup>,如图4所示,并以此来补偿履带和轮式外轮廓线长度的变化,虽然接地面积较大但是成本较高或可靠性较差,故适用范围有限。



图3 基于履带式设计的轮履耦合结构

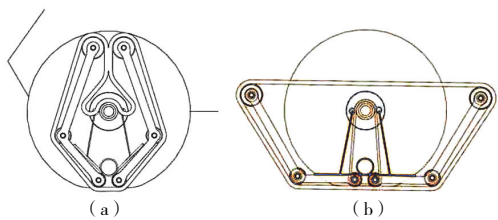


图 4 夹持履带式结构的轮履耦合结构

依靠分离机构的轮履耦合机构则是基于履带式结构设计,利用拨叉或其他结构将履带与地面脱离,并挂到附近的挂轮上<sup>[23]</sup>,故避免了内部连杆及离合器的使用,较为可靠且成本低,如图 5 所示。轮式运行时依靠主动轮与承重轮之间的链传动带动承重轮提供牵引力,并依靠张紧机构保持轮式运行时履带不接触地面,依靠承重轮前端靠车体侧的下挂轮可使履带接入角的可用范围增大。另外可以安装悬挂,且结构与履带机器人相似,故簧下质量较小,运行更加平稳。

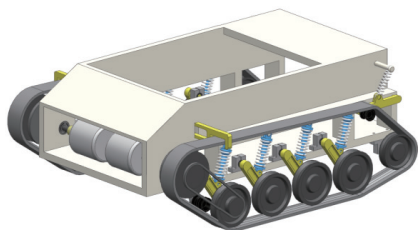


图 5 基于分离履带结构的轮履耦合结构

综上所述,以轮履耦合为例,基于轮式或履带式的、依靠连杆结构进行重组变换的机器人非标结构较多,且运动学模型较复杂,故而成本较高,优化较困难,并不适合大规模的运用。而基于分离履带结构的轮履耦合越野机器人具备了各个地形中的较高通过性,且结构简单可靠,可用于如侦察、反恐等工作。

### 3 交互结构传动机构分析

#### 3.1 内部传动链分析

复合式行走机构与耦合式行走机构的内部传动链并不相同,其中复合行走机构由于有两套基本行走机构,故内部传动链并不复杂,从原动机输出以后连接到一个用于转换末端执行机构的离合器即可,而后利用控制系统同时控制顶升机构与离合器的开合即可完成行走模式的切换,如图 6 所示。而复合机构中带有双自由度及以上腿式结构的则可依靠腿式结构的收缩代替顶升机构。

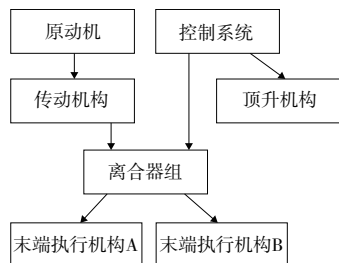


图 6 复合式行走机构内部传动流程图

上述传动路线虽然装入机器人中会比较臃肿,但是便于设计、安装与调试,故可靠性较高。

耦合式行走机构可分为串联结构与并联结构。其中串联机构通常用于轮腿或履腿等结构无耦合的底盘,此时无实际内部传动链,取而代之的是舵机、电机的叠加安置,机械结构简单,行走机构切换主要依靠控制系统直接切换至动力输出元件,甚至可以同时输出动力,以提高越野性能。而并联结构不同,当常规的轮履耦合由于内部元件的相互耦合无法实现串联布置时,需要一个用于实现履带运行的履带架以及改变履带架结构的连杆组,另外与轮履复合输出方式相同,也需要一套控制输出元件的离合器(此离合器由于要与车体和连杆结构连接,故有时做成离合器组,结构相较轮履复合的离合器更为复杂),另外轮式运行有的会直接依靠履带架作为轮子运行,故动力传输不一定经过履带架,轮履变换则利用控制系统控制连杆组与离合器达到轮履变换的目的,如图 7 所示。

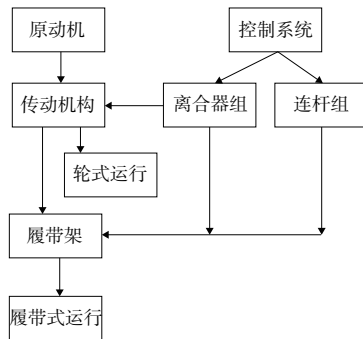


图 7 常用轮履耦合内部传动流程图

上述传动路线是变形或重组的通用结构,虽然性能好,但设计、安装与调试皆较复杂,且在越过沼泽、废墟等地形时杂物如进入机体结构(尤其是轮履变换结构)会导致故障,而可靠性与成本皆制约了此种机器人的广泛运用。

#### 3.2 末端执行机构分析

复合式行走机构与耦合式行走机构的动力输出结构也不相同。复合行走机构的末端执行元件与单行走机构相同,这里便不再赘述。

耦合结构的末端执行元件分为几种情况,其中串联式的轮腿、履腿结构并不特殊,而非串联式的轮腿或履腿耦合目前研究较少。相比之下,并联式的轮履耦合结构目前研究较多,但都大同小异,其中轮式结构或是依靠履带架上的小承重轮作为行走机构主体,或是直接将履带架作为轮子运行。

履带式最常用的方式是可伸缩的履带从履带架内伸出,依靠连杆机构张紧;其次则是基于轮式结构的越野机器人,其结构是利用履带架变形形成平面,而履带仍然包在履带架外缘,从而得到履带运行的形式。

### 4 交互结构辅助部分分析

#### 4.1 悬挂布置分析

以轮履交互机构为例,轮履复合机构通常对其中一种

行走机构的悬挂没有额外的要求,而另一种行走机构有时需根据举升机构。为使结构更紧凑,可将举升机构作为悬挂布置。例如履带结构设计,可利用液压系统将轮胎从底部顶出,此时即可将液压系统配合阻尼孔与限制器,将蓄能器作为弹性元件,加上原有的导向机构,从而形成一套完整的悬挂系统。此结构性价比高,但由于结构受顶升机构的限制,性能有限。

另外也有结构较紧凑的,令两种行走机构共用一套悬挂系统,其中运用较多的是轮腿耦合机器人,如图8所示。此种机器人可直接利用腿式结构的自由度作为悬挂自由度,性能较好。但对腿式结构的程序控制与机器人的闭环控制要求较高。

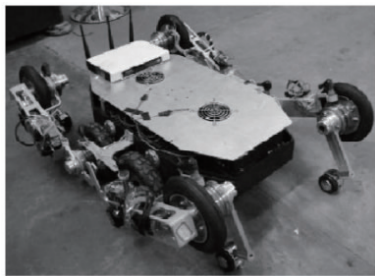


图8 轮腿耦合机器人

在并联型的耦合机构中,基于变形与重组结构的悬挂系统较难布置。因为要同时考虑两种行走方式,且有多条主传动链的存在,另外转换机构与行走机构较近,若要布置悬挂,则悬挂需将整套行走机构、转换机构与车体隔开,这会导致结构复杂,可靠性差,同时难以避免簧下质量过大,减震效果也就相应变差。而分离结构的耦合结构则与单行走机构结构相同,并不会产生多余的簧下质量。

## 4.2 所需控制及转向系统分析

在复合行走机构与耦合行走机构中,中大型机器人底盘中需控制的部分通常以常规的动力输入控制、末端执行件的选择控制(通常为离合器与连杆组,部分机器人没有此部件)以及是否需要变换行走模式控制(全自动机器人)这3种为主。

在叠加行走机构中,仅需多套常规的动力输入控制。但与单行走机构不同,由于单个机器人中仅需要一套转向机构即可以达到所需的转向自由度,例如阿克曼转向结构、差速轮、可控制转速差的两条履带。考虑到结构的复杂程度,其中最常用阿克曼转向结构,差速轮通常用于仓储AGV的转向结构中,而需大功率的可控转速差的两条履带由于较复杂则较少使用。剩下的轮胎或履带等则仅需由差速器分配动力。复合或耦合行走机构中转向自由度由各自结构提供。

## 5 结语

通过对各种双行走机构机器人的结构、传动链、末端执行机构、控制方式与转向机构的分析,得出了各种双行走机构机器人的优缺点、常用结构与适用范围。

对于轮履耦合结构,提出了变形、重组、分离3种变换行走机构的方式,并分别根据轮式或履带式的设计分析了

其优缺点与适用范围,得出轮履耦合中利用分离结构进行行走机构切换的方式性价比最高的结论。

另外根据相应性能、可靠性与成本分析得到了未来多行走机构的特种机器人性价比较高的结构发展方向和趋势。

### 参考文献:

- [1] 欧屹. 特种地面移动机器人机械系统设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [2] 王伟东. 面向复杂地面环境的作业型履带式移动机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [3] 王明强, 陈锦, 方海峰, 等. 新型多履带全向爬壁机器人结构设计[J]. 机械设计与制造, 2021(5): 208-211, 216.
- [4] 郑超, 赵言正, 付庄. 一种小型履带机器人结构设计与实现[J]. 机电一体化, 2007, 13(4): 70-72.
- [5] 刘静, 赵晓光, 谭民. 腿式机器人的研究综述[J]. 机器人, 2006, 28(1): 81-88.
- [6] 熊蓉. 仿生腿足式机器人的发展——浙江大学控制学院机器人实验室熊蓉教授谈国内外腿足式机器人研究情况[J]. 机器人技术与应用, 2017(2): 29-36.
- [7] 徐兆红. 腿式跳跃机器人运动规划与稳定性恢复研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [8] 周凯强, 谢霞, 郑波, 等. 基于液压驱动的轮履复合式变形轮设计[J]. 军事交通学院学报, 2020, 22(5): 41-46.
- [9] 邓乐, 田慕. 轮履复合式机器人移动平台转向性能分析[J]. 煤炭技术, 2016, 35(4): 220-223.
- [10] 杨超. 轮履复合式爬梯助残机器人设计与优化[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [11] 陈庆武. 轮履复合无人移动平台控制系统设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [12] 潘胜. 轮履切换式自动爬梯轮椅的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [13] SUN C L, XU X J, WANG L H, et al. Research on hydrodynamic performance of a blended wheel-track amphibious truck using experimental and simulation approaches [J]. Ocean Engineering, 2021, 228: 108969.
- [14] 田慕. 轮履复合式搜救机器人移动平台运动学与动力学研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
- [15] 王冬晓, 高学山, 刘云辉. 轮/履耦合式无障碍轮椅系统设计及运动分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(4): 55-59.
- [16] LI Z Q, MA S G, LI B, et al. Analysis of the constraint relation between ground and self-adaptive mobile mechanism of a transformable wheel-track robot [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(3): 610-624.
- [17] RAHMAN N. Development and motion analysis of miniature wheel-track-legged mobile robot [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(3): 24-28.
- [18] 郭文增. 具有轮/履耦合机构的移动机器人及其相关技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [19] 徐玉龙, 张俊三, 李远良. 牧神4LZ-8A型自走式半履带谷物联合收割机的研制[J]. 新疆农机化, 2020(2): 11-12, 16.
- [20] 张跃革, 罗哲, 陈静, 等. 软地面半履带式气垫车的功率分析[J]. 农业机械学报, 2000, 31(1): 26-29.
- [21] 金承珂, 黄嘉昕, 温秀平. 一种轮履耦合式车轮: 中国, CN112373585B[P]. 2021-08-13.
- [22] 金承珂, 张晓龙, 温秀平, 等. 一种新型轮履耦合机构的研究及其运用[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4): 188-191.
- [23] 金承珂, 金雷浩, 汪超, 等. 一种基于分离履带结构的轮履耦合机器人底盘: 中国, CN114537544A[P]. 2022-05-27.

收稿日期: 2022-04-19