

# 一种新型轮腿式机器人设计与分析

罗 洋 李奇敏 温皓宇

重庆大学,重庆,400044

**摘要:**设计了一种结构简单、承载能力强、越障性能好的新型轮腿式机器人——rolling-wolf。该机器人采用滚珠丝杠驱动轮腿运动,有效改善了以往轮腿式机器人的力学性能,提高了系统的承载能力以及轮腿机构的稳定性。首先将所设计的 rolling-wolf 和普通关节式轮腿机器人的力学特性进行了对比分析,分析结果表明 rolling-wolf 轮腿机构在力学特性上具有优越性。然后建立了 rolling-wolf 的运动学模型,并使用 MATLAB 对三种不同结构的 rolling-wolf 的轮腿运动包络域进行了求解。最后,根据对不同结构的 rolling-wolf 运动特性分析结果,选择了具有最佳运动特性的轮腿机构,完成了机器人整体结构设计。

**关键词:**轮腿;机器人;结构设计;rolling-wolf

**中图分类号:**TH122

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2013.22.008

## Design and Analysis of a New Kind of Wheel-legged Rover

Luo Yang Li Qimin Wen Haoyu

Chongqing University, Chongqing, 400044

**Abstract:** This paper presented a new kind of wheel-legged rover——rolling-wolf, which was simple but possessed strong structure stability, good load distribution and excellent motion performance. Rolling-wolf was driven by means of ball screws and sliders instead of the generally method of adding driving motors to the joints directly. The mechanical properties of rolling-wolf and the ordinary articulated wheel-legged robots were analyzed and compared at first. And then, the kinematic model of rolling-wolf was built, and three kinds of rolling-wolfs with different structure configurations were introduced. The motion envelope domains which evaluate their kinematic characteristics were solved in MATLAB based on the kinematic model. Finally, the overall structural design of rolling-wolf was finished based on the solution results.

**Key words:** wheel-legged rover; robot; structure design; rolling-wolf

## 0 引言

高性能移动机器人主要用于灾难搜救、星球探测、军事侦察、矿山开采等非结构化环境中,其移动系统可分为轮式、腿式、履带式以及轮腿结合式四类<sup>[1]</sup>。其中,轮腿式机器人不仅具备腿式机器人的高越障性能和对复杂地形的高适应性能,

还兼备轮式机器人在平整地面上滚动的高速高效性能,因而引起了众多研究者的兴趣。

国外对轮腿式机器人的研究比较多,如 JPL 的 Go-For 机器人<sup>[2]</sup>、日本 Tohoku 大学的 Chariot II<sup>[3]</sup>、赫尔辛基(Helsinki)大学的 Work-Partner<sup>[4]</sup>以及巴黎大学(UPMC)的 Hylos 机器人<sup>[5]</sup>等。国内近年对轮腿式机器人研究逐渐增多,典型的有北京航空航天大学的月球机器人、清

收稿日期:2012-07-24

Li Li, Yang Jikuang. Stimulation Study on Dynamic Response of Pedestrian in Vehicle Front Impact [J]. Computer Simulation, 2003, 20(7): 49-51.

[11] 高云凯,孙芳,余海燕. 基于 Kriging 模型的车身耐撞性优化设计[J]. 汽车工程, 2010, 32(1): 17-21.

Gao Yunkai, Sun Fang, Yu Haiyan. Crashworthiness Optimization of Car Body Based on Kriging Surrogate Model [J]. Automotive Engineering,

2010, 32(1): 17-21.

(编辑 何成根)

**作者简介:**陈立娜,女,1988 年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室硕士研究生。主要研究方向为汽车被动安全技术、结构拓扑优化。张维刚,男,1967 年生。湖南大学机械与运载工程学院教授。

华大学的腿式变结构机器人以及大连理工大学的新型轮腿式机器人等<sup>[6]</sup>。

高性能移动机器人所行驶的路面工况恶劣,需具备灵活避障、越障和自动复位能力。虽然导航和控制技术可使机器人的避障能力得以加强,但其机动性和越障性的关键仍取决于自身的移动系统,如行走机构、传动系统以及驱动系统等<sup>[7]</sup>,因此有必要对机器人的移动机构和运动特性作进一步探索和研究。

国内外轮腿式机器人大多为关节处直接添加驱动电机来驱动轮腿的运动,此类轮腿式机器人载荷主要集中在各关节处,其载荷分布、承载能力、稳定性等方面有待改善。

针对以上问题,本文提出在机架和大腿上安装滚珠丝杠,使用滑块和连杆来驱动大小腿转动的方法,设计出了一种新型轮腿式机器人——rolling-wolf。

## 1 rolling-wolf 的机构设计与受力分析

rolling-wolf 在运行时要求具备较好的机动性能,确保能快速脱离险境,并且时刻保持车身的平稳,以保证车载检测传感装置的正常运行。因此,rolling-wolf 结构设计需满足以下几点要求:①轮腿结构简单,可以灵活实现轮腿抬升和推进运动,改变车体姿态;②提高整车越障性能;③使整车运行平稳可靠;④提高行驶效率。

根据以上设计要求,设计了整车尺寸为 $1000\text{mm} \times 600\text{mm} \times 450\text{mm}$ (长×宽×高)的rolling-wolf,其机构简图见图1。

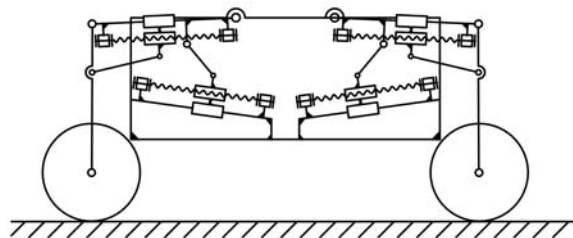


图1 rolling-wolf 机构简图

rolling-wolf 在野外执行任务时,不仅装载着自身运行所需的电气设备、电池组等,还需要携带众多检测设备、信号设备以及采集设备等。因此,设计要求 rolling-wolf 还需具有良好的负载能力和受力特性。将图1所示的 rolling-wolf 机构简化,并对其进行受力分析,得到图2所示的单个轮腿载荷工况。

如图2所示,设 rolling-wolf 以滚动模式行驶在水平地面上,四条轮腿姿态保持一致,车身以

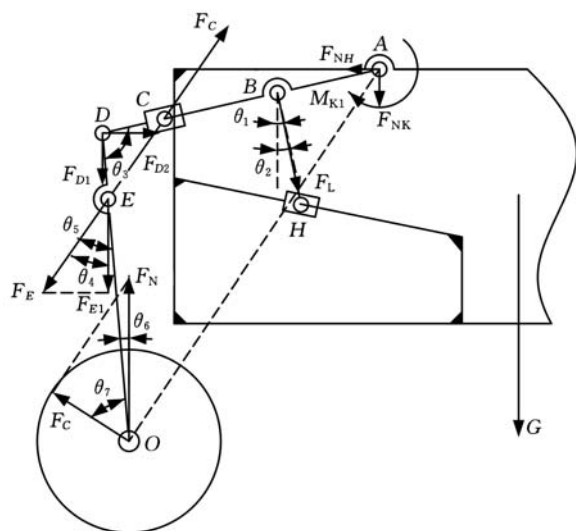


图2 rolling-wolf 单个轮腿受力分析简图

及所携带的各类设备的总重量为 $G$ ,不考虑轮腿的重量。则轮毂中心施于单个轮腿的反力 $F_N$ 为

$$F_N = \frac{1}{4}G \quad (1)$$

分析大腿端部A点受力时,可将A、D、O三点连接,并视为刚性三角形,则 $F_N$ 施于大腿A点处的转矩 $M_{K1}$ 为

$$M_{K1} = F_N L_{AO} \cos \theta_7 \quad (2)$$

其中, $\theta_7$ 为 $F_N$ 与 $F_C$ 之间的夹角, $L_{AO}$ 为O点和A点之间的距离,可由余弦公式计算得出:

$$L_{AO} = \sqrt{L_{AD}^2 + L_{DO}^2 - 2L_{AD}L_{DO} \cos \theta_3} \quad (3)$$

式中, $L_{AD}$ 为A点和D点之间的距离; $L_{DO}$ 为D点和O点之间的距离; $\theta_3$ 为大腿与小腿之间的夹角。

由于大腿根部A点为固定铰链支座,因此转矩 $M_{K1}$ 应与连杆BH产生的拉力 $F_L$ 对A点的转矩相平衡。故有

$$M_{K1} = F_L L_{AB} \cos \theta_1 \quad (4)$$

式中, $L_{AB}$ 为A点和B点之间的距离; $\theta_1$ 为拉力 $F_L$ 与大腿AD法线方向的夹角。

大腿在竖直方向上受力平衡,因此有

$$F_N - F_L \cos \theta_2 + F_{NK} = 0 \quad (5)$$

式中, $\theta_2$ 为拉力 $F_L$ 与垂线方向的夹角; $F_{NK}$ 为大腿在A点处铅垂方向的夹角。

分析小腿受力时,将大腿与机身视为一体,小腿在水平方向和垂直方向受力平衡。作用力 $F_N$ 对小腿根部D点处的转矩与连杆FE产生的推力 $F_E$ 对D点处的转矩相平衡。由此可得

$$\left. \begin{aligned} F_{D1} + F_{E1} &= F_N \\ F_{D2} &= F_E \sin \theta_4 \\ F_N \sin \theta_5 L_{DO} &= F_E L_{DE} \sin \theta_5 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, $F_{D1}$ 为关节D点垂直方向的分力; $F_{E1}$ 为小腿E点沿连杆方向的分力; $F_{D2}$ 为关节D点水平方向的分力; $L_{DE}$ 为点D、点E之间的距离; $\theta_4$ 为推力 $F_E$ 与垂线方向的夹角; $\theta_5$ 为推力 $F_E$ 与小腿DO之间的夹角; $\theta_6$ 为 $F_N$ 与小腿DO

之间的夹角。

根据式(6),可计算出小腿根部  $D$  点处所受  $F_{D1}$  和  $F_{D2}$  分别为

$$\left. \begin{aligned} F_{D1} &= F_N - F_E \cos \theta_4 \\ F_{D2} &= F_E \sin \theta_4 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对于普通的在关节处直接添加驱动电机以及减速器的轮腿式机器人,其受力分析如图 3 所示。

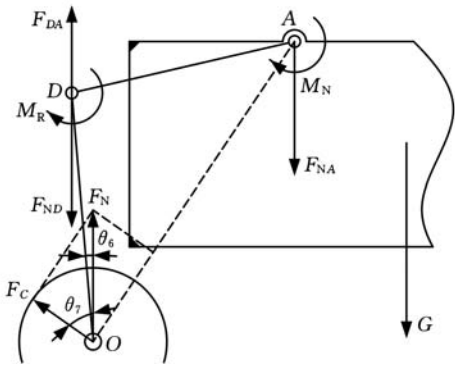


图 3 关节式轮腿式机器人轮腿受力分析图

在相同的工况条件下,关节式机器人大腿端部  $A$  点所承载荷为

$$\left. \begin{aligned} F_{NA} &= F_N = \frac{1}{4}G \\ M_N &= F_N L_{AO} \cos \theta_7 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

小腿端部  $D$  点所承载荷为

$$\left. \begin{aligned} F_{ND} &= F_N = \frac{1}{4}G \\ M_R &= F_N L_{DO} \sin \theta_6 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

从以上受力分析可以初步看出,关节式轮腿机器人载荷主要集中在关节处,并带有较大的反力矩。为了得到机器人两种不同运行模式(滚动模式、越障模式)下的实际载荷工况,根据以上分析,首先对机器人滚动模式下载荷工况进行计算。相关参量值如表 1、表 2 所示。

表 1 rolling-wolf 轮腿参数 mm

$L_{AB}$	$L_{BD}$	$L_{DO}$	$L_{AD}$	$L_{DE}$
100	230	326	330	130

表中, $L_{BD}$ 为点  $B$  与点  $D$  之间的距离。

表 2 rolling-wolf 水平滚动运行时角度参数 (°)

$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$
1.1	11.9	98.1	35.0	39.9	4.9	66.0

设 rolling-wolf 车身以及所携带的各类设备的总重量  $G=2000\text{N}$ ,根据式(1)~式(9)及表 1、表 2 所示各参量值,可求解出 rolling-wolf 以及关节式轮腿机器人在水平地面滚动运行时的载荷工况,如表 3 和表 4 所示。

表 3 rolling-wolf 轮腿载荷计算值

$F_L(\text{N})$	$F_{NK}(\text{N})$	$F_{NH}(\text{N})$	$F_A(\text{N})$
1086.16	486.51	207.84	529.05
$F_E(\text{N})$	$F_{D1}(\text{N})$	$F_{D2}(\text{N})$	$M_{K1}(\text{N}\cdot\text{m})$
166.96	363.20	95.80	108.00

表中  $F_A$  为  $A$  点所受合力; $F_{NH}$ 为大腿在  $A$  点处水平方向的分力。

表 4 关节式轮腿机器人各载荷计算值

$F_{NA}(\text{N})$	$M_N(\text{N}\cdot\text{m})$	$F_{ND}(\text{N})$	$M_R(\text{N}\cdot\text{m})$
500.00	108.00	500.00	13.90

在越障模式下,为保持机身水平,机器人轮腿姿态将根据地形变化作出调整。设两机器人在某地形下的越障姿态分别如图 4 和图 5 所示。两机器人在该姿态下的各角度参数如表 5 所示。

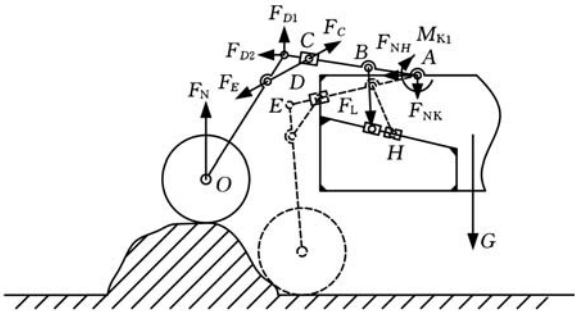


图 4 rolling-wolf 越障姿态及轮腿受力分析

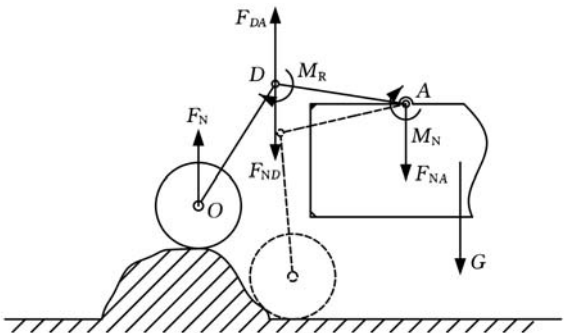


图 5 关节式轮腿机器人越障姿态及轮腿受力分析

表 5 rolling-wolf 在越障时轮腿各角度参数 (°)

$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$
11.5	2.7	113.5	61.2	28.9	32.3	26.1

根据式(1)~式(9)、表 1、表 5 所示各参量值,可求解出 rolling-wolf 以及关节式轮腿机器人在该越障工况下的载荷值,结果如表 6 和表 7 所示。

表 6 rolling-wolf 轮腿越障工况载荷计算值

$F_L(\text{N})$	$F_{NK}(\text{N})$	$F_{NH}(\text{N})$	$F_A(\text{N})$
2513.57	2010.78	118.38	2014.26
$F_E(\text{N})$	$F_{D1}(\text{N})$	$F_{D2}(\text{N})$	$M_{K1}(\text{N}\cdot\text{M})$
1386.35	-168.12	1214.73	246.31

表 7 关节式轮腿机器人越障工况载荷计算值

$F_{NA}(\text{N})$	$M_N(\text{N}\cdot\text{M})$	$F_{ND}(\text{N})$	$M_R(\text{N})$
500.00	246.31	500.00	87.10

从表 3、表 4、表 6、表 7 计算出的两类机器人两种不同工况下轮腿载荷分布结果中可以看出：

(1)在水平地面正常行驶工况下,rolling-wolf 机身载荷  $G$  施于单个轮腿的负荷  $F_N$  主要被连杆  $BH$  产生的拉力  $F_L$  所平衡。rolling-wolf 关节  $A$ 、 $D$  处无扭矩,各载荷主要体现为连杆的拉力或压力。

(2)在越障工况下,两类机器人各受力点受力情况均有明显变化。rolling-wolf 的小腿受力变化较大,连杆受到较大的拉力。关节式轮腿机器人载荷变化主要体现在关节处扭矩值的成倍增加,大腿端部所受扭矩增加为  $246.31\text{N}\cdot\text{m}$ ,这对关节减速器以及驱动电机提出了较高的要求。

从以上两类机器人不同工况下载荷计算值和结果分析中可以看出:rolling-wolf 的轮腿载荷被分布到轮腿各处,并最终由大腿连杆  $BH$  和关节铰接点( $A$  点)传递到机架上。轮腿使用连杆  $BH$  和  $CE$  传递载荷和动力,增大了驱动力作用于轮腿的力臂,从而减小了驱动轮腿所需转矩。此外,rolling-wolf 的小腿、大腿以及连杆  $CE$  之间构成一个稳定的三角形结构,使得轮腿机构在受到冲击载荷或高负重状态下稳定性得到加强。

## 2 rolling-wolf 的运动学分析

rolling-wolf 采用四轮独立驱动,差速转向方式。共四条轮腿,每条轮腿有机架滑块的移动、大腿滑块的移动以及驱动轮的转动三个自由度,整车共 12 个自由度。

在确定四条轮腿初始姿态时,有多种方案可供选择,如图 6 所示。

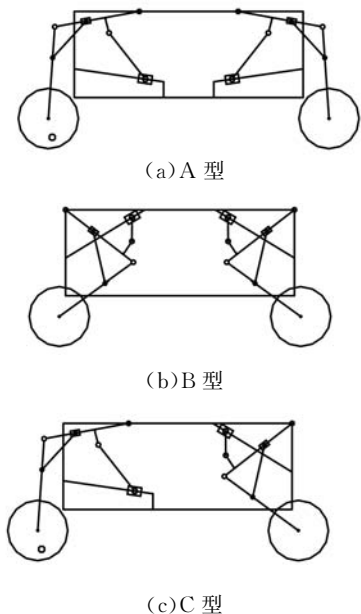


图 6 不同构型的 rolling-wolf

为分析以上三种不同结构的 rolling-wolf 运动特性,以大腿根部为坐标原点  $O$ ,建立如图 7 所示的轮腿坐标系来求解 rolling-wolf 的运动学模型。

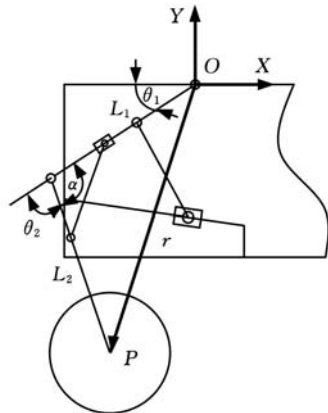


图 7 rolling-wolf 的运动学坐标系

图 7 中,定义大腿长度为  $L_1$ ,小腿长度为  $L_2$ ,大腿与机架夹角为  $\theta_1$ ,小腿与大腿延长线之间的夹角为  $\theta_2$ ,小腿与大腿之间的夹角为  $\alpha$ ,原点  $O$  到轮心  $P$  的位置矢量为  $r$ ,引入关节矢量  $\theta^{[8-9]}$ ,则有

$$\begin{aligned} r &= \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ \theta &= \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

轮心位置矢量  $r$  按几何关系可表示为

$$r = f(\theta) = \begin{bmatrix} x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于丝杠行程和实际结构零件等限制,轮腿夹角  $\theta$  需满足如下约束条件:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1\min} &\leq \theta_1 \leq \theta_{1\max} \\ \theta_{2\min} &\leq \theta_2 \leq \theta_{2\max} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

## 3 rolling-wolf 的轮腿包络域分析

将各参量统一赋值,轮腿参数如表 1 所示。样机丝杠实际行程为 200mm,A 型 rolling-wolf 轮腿夹角  $\theta$  约束值为下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1\min} &= -5^\circ & \theta_{1\max} &= 73^\circ \\ \theta_{2\min} &= 20^\circ & \theta_{2\max} &= 148^\circ \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

B 型 rolling-wolf 轮腿夹角  $\theta$  约束值为

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1\min} &= 35^\circ & \theta_{1\max} &= 110^\circ \\ \theta_{2\min} &= 20^\circ & \theta_{2\max} &= 148^\circ \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

以大腿根部为原点,将各参量和约束条件赋值后,利用 MATLAB 对 rolling-wolf 运动学模型进行求解,得到两种不同轮腿结构的 rolling-wolf 的轮心运动包络图,如图 8 所示。

图 8 中,面积较大的 A 区域为 A 型 rolling-wolf 轮腿的运动包络域,面积较小的 B 区域为 C 型 rolling-wolf 轮腿的运动包络域。从图 8 可



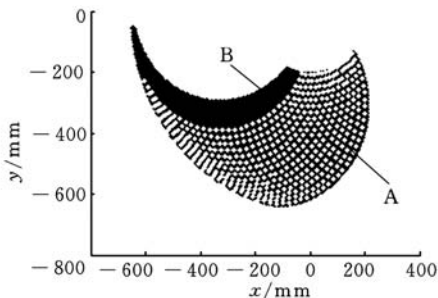
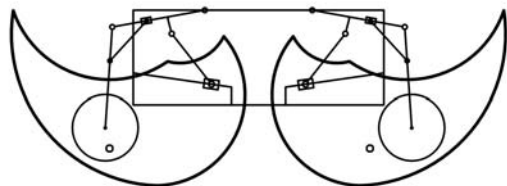


图 8 两种结构的轮腿运动包络图

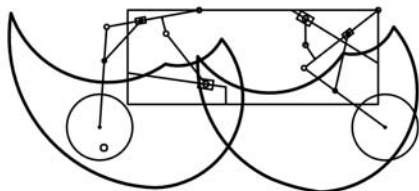
以看出,A 型 rolling-wolf 轮腿包络域高度约为 600mm,C 型包络域高度为 500mm,表明最大能爬越的障碍物高度分别为 600mm 及 500mm,当样机车轮直径设计为  $D=200\text{mm}$  时,A 型 rolling-wolf 最高能爬越 3 倍车轮直径的障碍。

将图 8 所示数据绘制到 CAD 中,得到图 9 所示的三种 rolling-wolf 轮腿运动包络域与机身关系图。

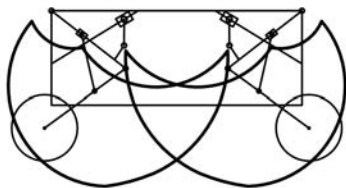
从图 9 可以看出,A 型 rolling-wolf 的轮腿包络域面积相对 B 型和 C 型包络域面积更大,表明在相同的机构参数下,A 型 rolling-wolf 的运动范围更大。由于 A 型 rolling-wolf 车体完全



(a) A 型结构的轮心包络图



(b) B 型结构的轮心包络图



(c) C 型结构轮心的包络图

图 9 不同构型的 rolling-wolf 轮心的包络图

对称,其左右轮腿的包络图也呈镜像分布,表明整车前后两组轮腿能抬到同样的高度,这使得 A 型 rolling-wolf 不管向前或向后,都具有同样的运动特性,这对轮腿的姿态和控制系统设计带来极大的便利。

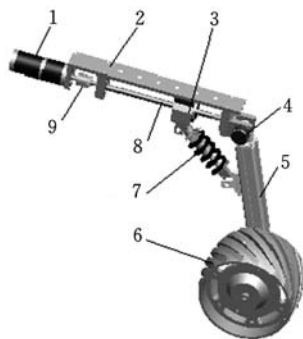
此外,C 型 rolling-wolf 单腿包络域也呈对

称分部,但包络域面积较 A 型的小,故轮腿的运动范围将小于 A 型 rolling-wolf 的运动范围。而且,C 型 rolling-wolf 包络域相对机身而言伸展范围也比 A 型的小,其轮腿运动范围主要集中在机身底部,使得机器人整体稳定性低于 A 型。

图 9 所示的 B 型 rolling-wolf 左侧轮腿与 A 型相似,因此具有 A 型同样的包络域,而右边的轮腿包络域面积较左边部分小。由于右侧轮腿包络域高度低于左侧轮腿包络域高度,使得 rolling-wolf 在极限越障时,右侧轮腿无法抬至左侧轮腿高度,这将降低 rolling-wolf 的越障性能。

#### 4 rolling-wolf 的结构设计

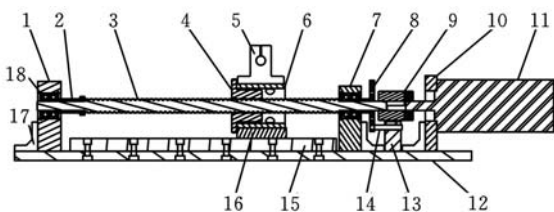
本次样机试制及研究选为 A 型结构。在 Pro/E 中建立的轮腿三维模型如图 10 所示。



1. 驱动电机 2. 大腿 3. 丝杠滑块 4. 角度传感器 5. 小腿  
6. 车轮 7. 弹簧减振器 8. 丝杠 9. 联轴器

图 10 rolling-wolf 轮腿三维模型

根据整车的越障性能要求以及实体零件防干涉要求,所设计的 rolling-wolf 的大腿连杆长度为 100mm,小腿连杆长度为 180mm,大腿滑块与机架滑块行程均为 200mm,其中机架滑块的滑移线与水平面成  $12^\circ$  倾角。丝杠导轨一体化机构如图 11 所示。

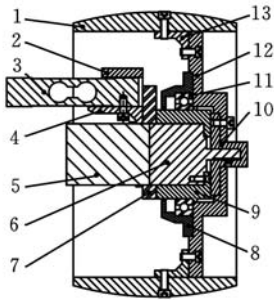


1. 轴端固定板 2. 止推套筒 3. 滚珠丝杠 4. 丝杠螺母  
5. 轴座 6. 轴座连接件 7. 轴端固定板 8. 制动盘  
9. 联轴器 10. 电机固定板 11. 伺服电机 12. 底板  
13. 止推轴座 14. 止推轴 15. 直线导轨  
16. 导轨滑块 17. 加强角件 18. 轴承

图 11 大腿丝杠导轨一体化机构的结构图

rolling-wolf 驱动轮采用自包含式设计,即将驱动系统和控制系统都做在轮体内。自包含式驱动轮结构既能减少电机、减速器与驱动轮之间

传递部件的数目,又能充分利用驱动轮内部空间,使整个驱动系统结构紧凑,这样也更易于解决电机和减速器在复杂环境下的密封问题<sup>[7]</sup>,具体结构如图 12 所示。



1. 车轮外圈 2. 传感器定位块 3. 压力传感器 4. 固定角件  
5. 电机 6. 减速器 7. 固定安装板 8. 密封端盖  
9. 固定法兰 10. 传动法兰 11. 轴承 12. 轮毂 13. 角件

图 12 rolling-wolf 的自包含式驱动轮结构图

所设计的 rolling-wolf 整车原理样机如图 13 所示。

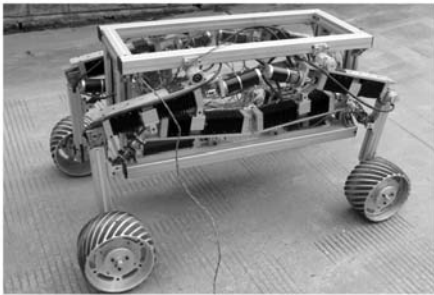


图 13 rolling-wolf 样机实物图

## 5 结论

本文对 rolling-wolf 的载荷工况、运动学模型、轮腿包络域以及结构设计进行了详细阐述。所设计的 rolling-wolf 采用滚珠丝杠来驱动轮腿运动,改变自身姿态,避免了关节处添加大扭矩驱动电机以及大传动比减速器。

rolling-wolf 受力分析表明,使用连杆驱动大小腿运动不仅能有效增大驱动力作用于轮腿的力臂,降低驱动系统的驱动力矩,还能将载荷分布到轮腿多个地方进行综合受力,使得整个机构承载能力得到加强。对不同结构的 rolling-wolf 轮腿包络域求解分析表明,所设计的 rolling-wolf 能爬越高度约为 600mm 障碍。

## 参考文献:

[1] 丁希仑,徐坤.一种新型变结构轮腿式机器人的设计与分析[J].中南大学学报,2009,40(增刊1):91-101.  
Ding Xilun,Xu Kun. Design and Analysis of a Novel Metamorphic Wheel-legged Rover Mechanism[J].

Journal of Central South University,2009,40(S1): 91-101.  
[2] Sreenivasan S V,Wilcox B H. Stability and Traction Control of an Actively Actuated Micro-rover[J]. Journal of Robotic Systems,1994,11(6):487-502.  
[3] Matsumoto K,Komoriya K. Flexible Locomotion Control of a Self-contained Biped Leg Wheeled System[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, New York:2002,3: 2599-2604.  
[4] Sami Y,Aarne H. Further Development and Testing of the Hybrid Locomotion of Work Partner Robot [R]. Espoo,Finland: Automation Technology Laboratory,Helsinki University of Technology,2010.  
[5] Christophe G,Faiz B,Frédéric P. Motion Kinematics Analysis of Wheeled-legged Rover over 3D Surface with Posture Adaptation[J]. Mechanism and Machine Theory,2010,45:477-495.  
[6] 罗庆生,刘玮玮,牛锴,等.新型轮腿式机器人研究[J].大连理工大学学报,2011,51(增刊1):1000-8608.  
Luo Qingsheng,Liu Yiwei,Niu Kai,et al. Research of a New Kind of Wheel-legged Robot[J]. Dalian University of Technology,2011,51(S1):1000-8608.  
[7] 高海波,邓宗全,胡明,等.行星轮式月球车移动系统的关键技术[J].机械工程学报,2005,41(12):156-161.  
Gao Haibo,Deng Zongquan,Hu Ming,et al. The Key Technologies of the Planetary Wheel Lunar Rover Mobile Systems[J]. Journal of Mechanical Engineering,2005,41(12):156-161.  
[8] 魏航信,刘明治,王淑艳,等.仿人型跑步机器人的运动学分析[J].中国机械工程,2006,17(7):13-17.  
Wei Hangxin,Liu Mingzhi,Wang Shuyan,et al. Analysis of Kinematics of Humanoid Running Robot [J]. China Mechanical Engineering,2006,17(7):13-17.  
[9] 陈浩,丁希仑.四足变结构机器人的运动学分析[J].北京科技大学学报,2012,34(1):53-58.  
Chen Hao,Ding Xilun. Quadruped Variable Structure Robot Kinematics Analysis[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology,2012,34 (1):53-58.

(编辑 王艳丽)

作者简介:罗 洋,男,1988 年生。重庆大学机械工程学院硕士研究生。主要研究方向为机器人和垂直轴风力发电机。授权专利 12 项。李奇敏,男,1976 年生。重庆大学机械工程学院副教授、博士。温皓宇,男,1990 年生。重庆大学机械工程学院学士。