DOI: 10.3901/JME.2020.17.029

闭链多足移动系统足地接触轮廓曲线设计方法^{*}

阮 强¹ 姚燕安¹ 武建昫²

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;

2. 清华大学机械工程学院 北京 100084)

摘要: 提出一种闭链多足移动系统的足地接触轮廓曲线设计方法, 用于补偿在行走过程中因闭链连杆机构的足端轨迹不可调整而导致的机身垂向位移波动, 从而有效提高移动速度并提升驱动效率。首先, 针对由曲柄驱动的闭链多足移动系统进行运动特性分析, 获得机身垂向位移波动与最大有效步频之间的函数关系, 确定机身垂向位移波动幅值为限制移动速度提升的关键因素。其次, 采用矢量环路法建立并求解机械腿的运动学模型, 基于反转法原理在小腿坐标系下构造与机身固定的虚拟地面, 由运动周期内小腿位姿随曲柄相位的连续变化形成虚拟地面直线簇, 求解包络线方程得到足地接触轮廓曲线。然后, 根据轮廓曲线的补偿相位进行闭链多足移动系统的整机布置设计, 并基于 ADAMS 软件进行垂向位移波动、行走速度和缓坡负重行走的动力学仿真分析。最后, 设计制作原理样机并开展平地测速试验和缓坡负重行走试验, 验证了应用所提足地接触轮廓曲线设计方法补偿机身垂向位移波动以提升行走速度和驱动效率的可行性。

关键词: 多足移动系统; 最大行走速度; 驱动效率; 虚拟地面; 轮廓曲线

中图分类号: TP242

Foot-ground Contact Contour Curve Design Method of Close-chain Multi-legged Mobile System

RUAN Qiang¹ YAO Yanan¹ WU Jianxu²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A foot-ground contact contour curve design method of close-chain multi-legged mobile system is proposed, which is used to compensate the vertical displacement fluctuation caused by the unadjustable leg-end trajectories of the close-chain mechanical legs, and to increase the walking speed and driving efficiency. Firstly, the movement characteristics of the crank driven mobile system is analyzed, and the functional relationship between the maximal effective step frequency and the vertical displacement fluctuation of the body is revealed. The vertical movement fluctuation of the body is identified as a key limitation of the walking speed. Secondly, the mathematical model of the mechanical leg is established and the kinematics is analyzed by solving the vector loop equations. The virtual fixed ground is built in the body reference frame, and with the rotary of the crank, the ground lines cluster in the lower leg reference frame is obtained based on the reversal method. The foot-ground contact contour curve is obtained by solving the envelope formed by the ground line cluster. Thirdly, the quadruped unit and the multi-legged mobile system is designed. The virtual prototype of the mobile system is built in ADAMS, and the vertical displacement fluctuation, the maximal speed and the power consumption are measured from the simulation results. Lastly, an experimental prototype is fabricated and tested. The flat ground walking speed experiment and the slope ground loaded experiment verify the effectiveness of the proposed foot-ground contact contour curve design method to increase the walking speed and driving efficiency.

Key words: multi-legged mobile system; maximal walking speed; driving efficiency; virtual ground; contour curve

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51735009)。20200428 收到初稿, 20200720 收到修改稿

0 前言

与轮式和履带式移动系统相比较,足式移动系统具有突出的运动灵活性和复杂地形适应能力,在野外勘探、山地运输、灾后救援以及军事侦察等领域具有广泛的应用前景^[1]。然而,足式移动系统的行走速度和驱动效率均相对较低,与轮式和履带式移动系统尚存在明显差距,使其任务范围受到严重局限,迟滞了其实用化进程。

考察足式移动系统,按其单腿的机构构型可分为串联开链机构式、并联机构式以及闭链连杆机构式三种类型。基于 Raibert^[2]的弹簧负载倒立摆模型,美国波士顿动力公司研制出具有串联开链机构式机械腿的系列四足移动系统,包括 BigDog^[3]、LS3^[4]、WildCat^[5]、Spot Classic 和 Spot^[6],除纯电驱动的 Spot 均采用液压驱动,其中 BigDog 自重 109 kg,载重 50 kg,高度 1 m,采用内燃机提供 11.2 kW 动力,实现了 11.1 km/h 的移动速度;WildCat 自重 154 kg,高度 1.17 m,采用甲醇发动机实现了 30.6 km/h 的移动速度;Spot 自重 30 kg,载重 14 kg,高度 1 m,实现了 5.8 km/h 的移动速度。麻省理工学院研制出具有串联开链式机械腿的系列四足移动系统,包括 Cheetah^[7]、Cheetah2^[8]、Cheetah3^[9]和 Mini Cheetah^[10]等,其中 Cheetah 实现了 48 km/h 的移动速度。荣学文^[11]研制的四足移动系统 Scalf,载重 50 kg,实现了 5.04 km/h 的移动速度。串联开链机构式机械腿的每个关节均需布置伺服驱动元件,单腿具有三个或更多自由度,其优势在于自由度多,动作灵活,可完成复杂动作并实现较高的移动速度,劣势在于系统复杂度较高,刚性和负载能力较弱,限制了可靠性和实用性。

SUGAHARA 等^[12]研制出具有并联机构式机械腿的载人双足移动系统 WL-16RV,采用 Stewart 并联机构作为机械腿,自重 60 kg,载重 80 kg,高度 1.4 m,最大步幅为 300 mm,步频为 0.50~1.25 Hz;潘阳^[13]研制出具有并联机构式机械腿的六足移动系统章鱼,采用 1-UP&2-UPS 并联机械腿,载重 200 kg,功率 7.2 kW,实现了 1.2 km/h 的移动速度。并联机构式足式移动系统的优势在于高刚度和良好负载能力,劣势在于移动速度和驱动效率较低。

JANSEN^[14]研制出具有闭链连杆式机械腿的多足移动系统 Strandbeests,采用一种单自由度闭链八杆机构作为机械腿,以风力进行驱动。陈柏宏^[15]、

CHEN 等^[16-18]分别研制出采用单自由度四连杆、六连杆、八连杆以及十连杆机构作为机械腿的多足移动系统。PARK 等^[19]研制的 WaterRunner 采用曲柄摇杆机构作为机械腿,以 6 r/s 的曲柄驱动转速实现了 0.8 m/s 的水面移动速度。PARK 等^[20]研制的双足移动系统 Raptor,单腿采用一种闭链八连杆机构,自重 3 kg,高度 0.47 m,在试验跑台上借助外力保持平衡的条件下达到 46 km/h 的移动速度。我们前期研制出具有闭链连杆式机械腿的系列多足移动系统,其中采用模块化腿组布局的 16 足移动系统^[21]自重 180 kg,载重 250 kg,实现了 8 km/h 的移动速度。闭链连杆式多足移动系统的优势在于充分发挥闭链连杆机构的少自由度和相应少动力机的特性,有效简化了控制系统,同时具有闭链机构的高刚度和良好负载能力。

以提升闭链多足移动系统的移动速度和驱动效率为目标,在机理层面进行最大移动速度的临界状态分析,获取限制移动速度提升的关键因素;进而在方法层面,提出一种新的足地接触轮廓曲线设计方法,通过补偿机身垂向位移波动以有效提高最大行走步频;最后进行仿真分析、样机分析以及试验验证。

1 提速机理分析

1.1 提速限制因素

对于采用闭链连杆机构式机械腿的多足移动系统,由于连杆机构为单自由度,足端轨迹恒定,故步幅为固定值。因此,欲提高其行走速度,需在腿部机构设计时采用步幅较大的连杆尺寸,或在行走控制时通过增加驱动曲柄的转速以提高步频的方式来实现。

在腿长相同的条件下考察闭链连杆机构式机械腿的步幅影响因素,由于受到整体尺寸和行走稳定性的限制,一般情况步幅小于腿长,难以进一步提高,因此提高步频为闭链多足平台提速重要的有效途径。

在速度较低的情况下,闭链多足移动系统通过加快曲柄转速来提高步频,行走速度会随着步频的提高而线性增加,比例系数由机构的构型以及连杆尺寸所决定。此时足端可以与地面始终保持良好的接触状态,不会出现腾空离地的现象,闭链多足移动系统可持续加速。然而当步频超过一定的阈值后,平均移动速度不再随着步频的提高继续线性增加,足式移动系统的动力学效应显著增强,若不加以抑

制, 则会发生打滑或腾空现象, 造成移动系统足端的牵引力部分或完全失效, 继而导致提速失效、冲击过大甚至失稳倾覆^[22]。

1.2 最大有效步频

对于如图 1 所示闭链多足移动系统中的四足单元, 在行走的过程中不可避免地会产生机身的周期性垂向位移变化。因此, 机身在地面坐标系下会生成周期性波动的弧线轨迹。

图 1 机身运动示意图

为对移动系统机身的运动进行分析, 做如下合理近似。

(1) 机身实际轨迹形状接近于多段圆弧, 每段曲线段在分析中以圆弧代替。以图 1 所示的连杆尺寸为例, 将机身实际运动轨迹的坐标点进行拟合, 得到具有较高相关系数 $R = 99.03\%$ 的参数方程

$$(x - 161.6)^2 + (y + 156.2)^2 = 159.7^2 \quad (1)$$

(2) 在不同时刻机身的运动速率变化幅度很小, 一般在平均速度的 $\pm 10\%$ 以内, 在分析中以平均速度代替。

(3) 单自由度闭链四足单元以机械方式耦合腿部零件, 大部分由于单个机械腿运动产生的惯性力与惯性力矩可在四足单元内部得到抵消, 且机械腿占整个移动系统总质量的百分比较小, 因此忽略机械腿杆件的运动带来的惯性力和力矩。

步幅 L 为单个机械腿处于单个支撑相时移动系统向前行进的位移, 弦高 h 为机身垂向位移波动幅值。设 r 为机身做近似圆周运动的半径, 根据几何关系可以得到

$$\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (r - h)^2 = r^2 \quad (2)$$

即

$$r = \frac{4h^2 + L^2}{8h} \quad (3)$$

在临界腾空的状态下, 机身处于最高点。此时移动系统受到地面的支撑反力 $N = 0$ N, 重力加速度完全用作为向心加速度。设其沿水平方向的速度

为 $v = v_{\max}$, 则

$$v_{\max} = \sqrt{gr} = \sqrt{\frac{g}{2} \left(h + \frac{L^2}{4h} \right)} \quad (4)$$

当闭链多足移动系统以小于 $v_{\max}$ 的速度行走时, 足地始终保持接触, 足端可以时刻提供牵引力。此时对应的步频称之为最大有效步频 $f_{e\max}$, 当步频超过 $f_{e\max}$ 时, 即使曲柄转速继续增加, 由于出现腾空状态而无法保证有效牵引, 提速幅度大为减小甚至使移动系统降速。最大有效步频 $f_{e\max}$ 的表达式为

$$f_{e\max} = \frac{v_{\max}}{L} = \sqrt{\frac{g}{2} \left(\frac{h}{L^2} + \frac{1}{4h} \right)} \quad (5)$$

最大有效步频 $f_{e\max}$ 随步幅 L 与机身垂向位移波动幅值 h 的函数关系绘制如图 2 所示。

图 2 最大有效步频分析

在轨迹设计的过程中, 为了保证行走稳定性, 均会有 $h \ll L$ 。由函数关系可以得到, 当步幅为 $200 \sim 1000$ mm、机身垂向位移波动幅值在 80 mm 以内时, 步幅对最大步频的影响较小。机身垂向位移波动幅值对最大步频的影响则很大, 尤其当其值小于 10 mm 时, 最大步频随着垂向位移波动幅值的减小而大幅增加。由此得到, 对于相同尺寸的机械腿, 机身垂向位移波动幅值为提高闭链多足移动系统行走速度的主要限制因素。

2 足地接触轮廓曲线

在现有闭链多足移动系统的设计与分析方法中, 为简化对机械腿运动的分析和整机移动性能的研究, 均潜在假设将足端简化为小腿上的某一个点, 而不计其具体细节的轮廓形状。提出以足地接触轮廓曲线代替现有点式足端的设计思想, 主动地进行足端

轮廓的精细化设计, 并由此准确评估该曲线轮廓对于机身垂向位移波动的影响和贡献, 以期获得更高速移动的特性。

2.1 运动学分析

机械腿的构型为具有(6,7)运动链的瓦特链机构, 如图3所示。机构中的连杆参数在图中已标出。机构通过曲柄 OF 整周旋转完成迈步动作。 O 为曲柄的转动中心, 以 O 为原点建立机身坐标系 xOy 。所有杆件长度以及 θ_{52} , θ_{61} , θ_{74} 均为常量, θ 为曲柄的方向角, $\theta_i (i=1,2,\dots,7)$ 为对应矢量的方向角, 均为以 θ 为参数的变量。

图3 机械腿构型

经求解得到各个未知变量的表达式为

$$\theta_i = 2 \arctan \left(\frac{p_{i2} + \sqrt{p_{i1}^2 + p_{i2}^2 - p_{i3}^2}}{p_{i1} - p_{i3}} \right) \quad i=1,3 \quad (6)$$

$$\theta_i = 2 \arctan \left(\frac{p_{i2} - \sqrt{p_{i1}^2 + p_{i2}^2 - p_{i3}^2}}{p_{i1} - p_{i3}} \right) \quad i=2,4 \quad (7)$$

$$\theta_i = \theta_j + \theta_{ij} \quad (i,j)=(5,2),(6,1),(7,4) \quad (8)$$

其中包含的中间变量为

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2v_2q_{11} & 2v_2q_{21} & q_{11}^2 + q_{21}^2 - q_{31} \\ -2v_1q_{11} & -2v_1q_{21} & q_{11}^2 + q_{21}^2 + q_{31} \\ 2v_4q_{12} & 2v_4q_{22} & q_{12}^2 + q_{22}^2 - q_{32} \\ -2v_3q_{12} & -2v_3q_{22} & q_{12}^2 + q_{22}^2 + q_{32} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \\ q_{31} & q_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{cr} \cos \theta_{cr} - v_b \cos \theta_b & v_6 \cos \theta_6 - v_5 \cos \theta_5 \\ v_{cr} \sin \theta_{cr} - v_b \sin \theta_b & v_6 \sin \theta_6 - v_5 \sin \theta_5 \\ v_1^2 - v_2^2 & v_3^2 - v_4^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

2.2 虚拟地面运动包络

小腿杆在运动的过程中, 不仅存在足端点横纵坐标的变化, 同时小腿杆的姿态角 θ_4 也在随着曲柄的转动而进行周期性的摆动。利用小腿杆周期性

往复转动角度, 配合足端合理的外形轮廓, 以抵消机身垂向位移波动。如图4所示, 建立固定于机械腿机身的直角坐标系 xOy 与固定于小腿杆的直角坐标系 $x'B'y'$ 。为保持机身相对地垂向位移不变, 在机身坐标系 xOy 中, 构建相对于机身固定的虚拟地面, 给定 G_1 与 G_2 为地面上两个不同点, $l_g = \text{Line}(G_1, G_2)$ 为虚拟地面所在的固定直线, 设小腿上曲线段 l_c 为与虚拟地面接触的部分的轮廓。

图4 足地接触示意图

在小腿坐标系 $x'B'y'$ 中观察, 虚拟地面的位置和姿态随着曲柄的转动周期性变化。当曲柄相位为 θ 时, 虚拟地面所在的直线在小腿坐标系中表示为

$$l_{gB} = \text{Line}(G_{1B}, G_{2B}) \quad (11)$$

$$G_{iB} = (G_i - OB) \text{Rot}(-\theta_4) \quad (i=1,2) \quad (12)$$

式中, $\text{Rot}()$ 为平面旋转矩阵, (x_B, y_B) 为点 B 在坐标系 xOy 中的坐标。 θ_4 为矢量 v_4 的方向角, G_{1B} 与 G_{2B} 是 G_1 与 G_2 在小腿坐标系中的坐标, 均为以 θ 为自变量的函数。

曲线段 l_c 在小腿坐标系 $x'B'y'$ 中是固定的。设 K 为坐标系 $x'B'y'$ 中的足地接触点, 在该机械腿处于支撑地面的任意时刻, 应满足曲线段 l_c 与直线 l_g 相外切, 切点为 K , 即

$$\begin{cases} K = l_c \cap l_{gB} \\ k(l_c | K) = k(l_{gB}) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $k(l_c | K)$ 为曲线段 l_c 在 K 点的切线斜率。随着自变量 θ 取不同值时, 会得到直线簇 $\{l_{gB} | \theta \in [0, 2\pi]\}$ 。由于曲线簇中任意直线均与曲线段 l_c 相切, 则 l_c 为直线簇 $\{l_{gB} | \theta \in [0, 2\pi]\}$ 形成的包络线的子集。

将 l_{gB} 用参数方程表达为

$$\frac{x - x_{G_{2B}}}{x_{G_{1B}} - x_{G_{2B}}} = \frac{y - y_{G_{2B}}}{y_{G_{1B}} - y_{G_{2B}}} \quad (14)$$

构造函数 $F(x, y, \theta)$, 使得

$$F(x, y, \theta) = \frac{x - x_{G_{2B}}}{x_{G_{1B}} - x_{G_{2B}}} - \frac{y - y_{G_{2B}}}{y_{G_{1B}} - y_{G_{2B}}} \quad (15)$$

设点 K 在小腿坐标系 $x'B'y'$ 下的坐标为 (x_K, y_K) , 则 (x_K, y_K) 满足如下方程组

$$\begin{cases} F(x_K, y_K, \theta) = 0 \\ \frac{\partial F(x_K, y_K, \theta)}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

经过求解得到 x_K 与 y_K 关于 θ 的参数方程

$$\begin{cases} x_K = -\frac{a_2(x_{G_{2B}}y_{G_{1B}} - x_{G_{1B}}y_{G_{2B}}) + a_3(x_{G_{1B}} - x_{G_{2B}})}{a_1(x_{G_{1B}} - x_{G_{2B}}) + a_2(y_{G_{1B}} - y_{G_{2B}})} \\ y_K = -\frac{a_1(x_{G_{2B}}y_{G_{1B}} - x_{G_{1B}}y_{G_{2B}}) + a_3(y_{G_{1B}} - y_{G_{2B}})}{a_1(x_{G_{1B}} - x_{G_{2B}}) + a_2(y_{G_{1B}} - y_{G_{2B}})} \end{cases} \quad (17)$$

其中中间变量为

$$a_1 = \frac{x'_{G_{1B}} - x'_{G_{2B}}}{(x_{G_{1B}} - x_{G_{2B}})^2} \quad (18)$$

$$a_2 = \frac{-y'_{G_{1B}} + y'_{G_{2B}}}{(y_{G_{1B}} - y_{G_{2B}})^2} \quad (19)$$

$$a_3 = \frac{x'_{G_{2B}}x_{G_{1B}} - x'_{G_{1B}}x_{G_{2B}}}{(x_{G_{1B}} - x_{G_{2B}})^2} - \frac{y'_{G_{2B}}y_{G_{1B}} - y'_{G_{1B}}y_{G_{2B}}}{(y_{G_{1B}} - y_{G_{2B}})^2} \quad (20)$$

式中, $x'_{G_i} = \frac{\partial x_{G_i}}{\partial \theta}$, $y'_{G_i} = \frac{\partial y_{G_i}}{\partial \theta}$ $i \in 1$ 。当

$\theta \in [0, \pi]$ 时, 点 $K(x_K, y_K)$ 所得到的图形即为直线簇 $\{l_{gB} | \theta \in [0, 2\pi]\}$ 的包络线, 绘制如图 5 所示。

图 5 虚拟地面移动包络

包络线包括上下两段无限长度的曲线分支 b_u 与 b_d 。由图 4 可得到, 只有靠近腿式机构一侧的包络线上分支 b_u 可以满足与地面相切。包络线的 b_u 分支具有两条渐近线, 分别为切出渐近线 l_{in} 与切入渐近线 l_{out} 。两条渐近线均为直线簇中的元素, 设 θ_{in} 与 θ_{out} 为两条渐近线所对应的曲柄相位, 则

θ_{in} 与 θ_{out} 满足

$$\theta_4 |_{\theta=\theta_{in}} = \max_{0 \leq \theta < 2\pi} \theta_4 \quad (21)$$

$$\theta_4 |_{\theta=\theta_{out}} = \min_{0 \leq \theta < 2\pi} \theta_4 \quad (22)$$

经过计算得到, 可以满足形成 b_u 分支的曲柄相位范围为

$$\theta \in [\theta_{out}, \theta_{in}] = [0.656\pi, 1.411\pi] \quad (23)$$

2.3 轮廓曲线截取

由于包络线的 b_u 分支的两端是无限延伸的, 因此需要从中截取适当曲线段作为小腿与地面接触段的轮廓, 即可实现单腿在支撑地面的每个时刻, 机身垂向位移保持恒定。设实际截取后的曲线段对应的相位 $\theta^* \in [\theta_{out}^*, \theta_{in}^*]$, 则有

$$[\theta_{out}^*, \theta_{in}^*] \subset [\theta_{out}, \theta_{in}] \quad (24)$$

经过对包络线上各点及对应相位的分析, 足端触地曲线段截取遵循如下原则。

(1) 曲柄相位全周期机身垂向位移补偿原则。对于同向布置的多足单元, 各个机械腿的相位将圆周均分, 形成轮廓的包络线对应的曲柄相位区间的跨度应满足

$$\theta_{in}^* - \theta_{out}^* \geq \frac{2\pi}{n} \quad (25)$$

式中, n 为多足单元中机械腿的数量。由于包络线的最大区间范围为 $\theta_{in} - \theta_{out} < \pi$, 对于典型的对称式腿组单元布局, 有 $n \geq 4$, 即至少以四足单元形式实现全周期的机身垂向位移波动补偿。

(2) 触地轮廓尺寸最小原则。在满足原则(1)的基础上, 为了以尽可能小的足端尺寸实现足够的相位区间跨度, 曲线截取时要选对应的直线簇密集且包络线曲率半径较小的区域。

综上, 最终得到包络线段对应的相位范围为 $\theta^* \in [0.75\pi, 1.35\pi]$, 如图 6 所示。根据以上计算数

图 6 足端轮廓截取

据进行足端的设计并进行验证, 如图 7 所示。

图7 足端轮廓验证

经过验证,在足端接触地面的轮廓对应的相位区间范围内,足端始终与地面接触,且接触点与曲柄转动中心的垂向位移恒定不变。

3 四足单元布置

单个机械腿无法完成一个步行周期,需要多个机械腿协调以完成完整迈步运动。经论证得知,若实现全行走周期机身垂向位移补偿与对称性,每个单元中至少包含由4个机械腿。

在单个机械腿设计的基础上,进行四足模块布局。典型的四足布置方式包括外膝式和同向式,如图8所示。

图8 典型四足单元布置形式

针对两种典型的四足布置方式进行步态相位分析。定义恒高相位区间为机械腿的足端接触地面时,足地接触点位于包络线上,且满足接触点与机身垂向位移恒定不变的曲柄相位的集合。对于构型、尺寸和足端形状相同的单个机械腿,其恒高相位区间为固定值。将机械腿布置成四足单元时,约定机械腿1的相位即为四足单元的相位。为了实现各腿轮换触地,其他机械腿的相位与四足单元的相位存在一定的对应关系。令 θ_{Li} ($i=1,2,3,4$)为机械腿 i 的相位, θ 为四足单元的相位,对于外膝式四足单元布置,对应关系为

$$(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{L3}, \theta_{L4}) = (\theta, \pi + \theta, \pi - \theta, 2\pi - \theta) \quad (26)$$

对于同向式布置的四足单元,对应关系为

$$(\theta_{L1}, \theta_{L2}, \theta_{L3}, \theta_{L4}) = \left(\theta, \pi + \theta, \frac{\pi}{2} + \theta, \frac{3\pi}{2} + \theta \right) \quad (27)$$

根据单个机械腿的恒高相位区间分别对两种不同布置形式的四足单元进行恒高相位区间分析,如图9、10所示。

图9 外膝式布置

图10 同向式布置

由分析得到,对于外膝式布置,无法实现四足单元在全周期的相位上实现机身垂向位移保持不变,因此仍然难以实现高速行走。对于同向式布置的四足单元,由于四个机械腿的曲柄同向转动且均匀布置,四足单元在整个周期的相位上都可以实现机身垂向位移保持不变,相比于外膝式的布置形式,预期具有更大的高速行走的潜力。

4 仿真分析

闭链式多足移动系统整机采用4×4的布局方式,即四个四足单元分别布置于矩形机身的四个角上,且方向相同。根据同向式四足单元中机械腿的布置形式,建立用于仿真的虚拟样机模型如图11a所示。建立对照模型如图11b所示。

仿真分析在多体动力学仿真软件 MSC ADAMS 环境中进行。腿部连杆之间、连杆与机身之间按照构型的拓扑连接关系添加转动副。机身的精确外形

对仿真结果很小, 将虚拟样机的机身简化为“工”字形的杆件以便于运动观察, 如图 11 中零件所示。外载、机身、电机以及减速机的质量统一计入到“工”字形的杆件中。虚拟样机试验模型与对照模型的唯一差别为不同的足端形式。对照虚拟样机模型的足端为小腿杆件上的以固定点, 即与地面接触近似为点接触; 试验虚拟样机模型的足端为前文分析得到的包络线轮廓, 即为曲线式足端。为减小由于外形带来的质量和惯量的差别, 分别将两不同的小腿杆进行减重设计, 使两种不同的足端具有相近的质量与转动惯量。此外, 机械腿零部件的材质均具有与实际相符的密度和质量。

图 11 虚拟样机模型

两模型的仿真参数相同, 见表 1。

表 1 仿真与模型参数设置

模型基本参数	数值	足地接触参数	数值
移动系统总质量/kg	10	静摩擦因数	0.70
移动系统总体尺寸/(m×m×m)	0.6×0.5×0.2	动摩擦因数	0.55
四足单元质量/kg	2.2	刚度系数/(N/mm)	30
四足单元前后间距/m	0.15	阻尼系数/(N·s/mm)	2.5
四足单元左右间距/m	0.15	穿透深度/mm	2

4.1 行走速度仿真

首先进行极限速度测试。每个虚拟样机模型以静止的初始状态, 曲柄从零开始加速转动, 机身随之向前运动。以曲柄转动角速度 ω_{cr} 作为移动系统运动输入, 则 $\omega_{cr} = \alpha t$, 其中 α 为曲柄旋转的角加速度。为了减少由于过快的加速造成的足地滑移, 以较小的加速度缓慢提速, 取 $\alpha = 0.5\pi(\text{rad/s}^2)$ 。仿真中移动系统负载质量为 10 kg, 加载在机身上。机身垂向位移波动幅值与行走速度的仿真结果如图 12、13 所示。

由仿真结果可以看出, 相比于点式足端, 曲线式足端在降低机身垂向位移波动幅值以及提升行走速度方面, 具有明显的优势。对于曲线式足端, 曲柄转速在 30 r/s 以内保持平顺的状态行走, 机身垂向位移波动幅值不超过 0.3 mm; 行走速度达到

图 12 机身垂向位移仿真结果

图 13 行走速度仿真结果

7.482 m/s, 且其行走速度与曲柄转速输入具有很好的线性关系。以 ω 表示曲柄角速度, v 表示行走速度, 得到线性相关系数 $R=97.8\%$ 的线性关系

$$v = 0.232\omega - 0.00327 \quad (28)$$

对照仿真中, 当曲柄转速在 3 r/s 内时, 机身垂向位移波动幅值保持在 5 mm 附近, 当转速更高时, 机身垂向位移波动幅值明显增大, 并出现腾空状态, 造成行走稳定性急剧下降, 牵引力部分失效, 行走速度无法随曲柄转速的提高而线性增加。

4.2 缓坡负重仿真

在 10° 缓坡上进行负重工况下的曲柄扭矩测试, 两个虚拟样机的负载质量均为 20 kg。用于仿真的模型与参数与速度仿真保持一致。在仿真中测量功耗进行对比。仿真结果如图 14 所示。

图 14 驱动功率仿真结果

由仿真结果可知, 采用曲线式足端有效降低了负重行走时的电机功耗。相比于点式足端, 在负载相同时, 曲线式足端行走时更加节能。在相同行走速度和负重的情况下, 根据仿真结果, 以 10° 纵坡、曲柄转速 3 r/s 及负载 20 kg 为例, 采用曲线式足

端的整机平均功耗为 45.3 W, 采用点式足端时的整机平均功耗达到 533.2 W, 相比之下, 曲线式足端设计节省了 91.50% 的能耗。

5 样机试验

5.1 原理样机

设计并制作一台闭链多足移动系统原理样机。样机具有四个四足单元并布置于机身的四角。每个四足单元由单个直流电机提供动力。四足单元内的各个曲柄通过两组 45° 螺旋圆柱斜齿轮传动, 以实现曲柄转速的同步与相位的协调, 如图 15 所示。利用 3D 打印技术, 四足单元与机架采用柔性橡胶零件连接, 以进行减震缓冲。行走机构采用 ABS 作为主要材料, 销轴的材质为 304 不锈钢, 足地接触面包覆兼具良好附着力、耐磨性及缓冲效果的橡胶材质。机身骨架为轻质铝型材, 在提供足够的机械强度的同时进行减重。由于移动系统行走速度快, 潜在的冲击振动较为剧烈。因此, 机械腿采用对称的分层方式, 以尽量使得杆件与销轴均匀受力, 如图 16 所示。转动关节采用具有自润滑功能

图 15 四足单元传动系统

图 16 机械腿分层布局

的石墨镶嵌铜轴承以减小转动阻力。样机采用锂电池提供电能, 采用无线方式进行操控。移动系统样机参数汇总如表 2 和表 3 所示。

表 2 试验样机机的械设计参数

总体参数	内容	四足单元参数	内容
行走速度/(km/h)	12	连杆材质	ABS
总质量/kg	10	销轴材质	304 不锈钢
外形尺寸/(m×m×m)	0.6×0.5×0.2	减震方式	橡胶连接
载重/kg	20	转动关节	石墨轴承

表 3 试验样机的动力与控制设计参数

动力参数	内容	控制参数	内容
动力电池	12V12Ah10C	操控方式	遥操作
驱动电动机	775 电动机×4	控制器	SAM3X8E
减速比	4:1	调速方式	PWM
最大功率/W	320	响应延迟/ms	<14
额定转速/(r/min)	1 000	通信距离/m	>1 000

搭建的样机如图 17 所示。

图 17 试验样机

5.2 速度试验

首先进行移动系统速度测试, 试验样机在平坦路面上由静止的初始状态逐渐加速, 行走过程中由编码器检测曲柄转速信息, 以地面固定的拉线位移传感器记录行走速度。试验数据如图 18 所示。

图 18 平直地面行走试验结果

当曲柄转速由 0 不断增加时行走速度也随之增大。当曲柄的转速达到 16 r/s 时, 行走速度为 3.5 m/s。试验过程中, 试验样机在试验中的各个

速度下均行走稳定, 无可见机身垂向位移波动。限于选取的电机额定转速 1000 r/min , 曲柄转速无法继续增加。经过对原始数据分析发现, 在测试的速度范围内, 行走速度关于曲柄转速的变化趋势接近于线性, 以 ω 表示曲柄角速度, v 表示行走速度, 进行线性拟合得到

$$v = 0.225\omega - 0.0045 \quad (29)$$

线性相关系数 $R=98.8\%$ 。样机试验结果与仿真结果相近, 同时也进一步验证了在曲柄转速 16 r/s 的范围内, 足端和地面始终保持良好的接触。

5.3 缓坡负重试验

在 10° 纵坡坡面上进行不同速度和负载下的行走试验。为得到行走整机功率, 采用数字式直流电功率计进行数据采集和记录, 试验结果如图 19 所示。

图 19 缓坡(10°)行走整机功率试验结果

试验过程中, 多足移动系统试验样机在不同速度和负重的工况下均行走平稳且平顺。整机功耗会随着行走速度和总质量的增加而变大。由于以电参数进行功率的测量与计算存在能量转化率等因素, 故以能量转化效率 75% 进行估计, 结果与仿真分析基本吻合。

速度试验与缓坡负重试验结果表明, 采用所提出的足地接触轮廓曲线设计方法得到的曲线式足端可使闭链多足移动系统样机在较高的步频下实现快速移动。曲柄转速与移动速度呈线性关系表明在行走时足地之间始终保持良好接触, 样机处于良好的支撑与牵引状态。在移动速度方面, 该样机移动速度与机身高度的比值达到了 $62.64 \left(\frac{\text{km/h}}{\text{m}} \right)$, 获得了快速移动能力。

6 结论

(1) 提出一种闭链多足移动系统的足地接触轮廓曲线设计方法。基于临界状态分析, 得到机身垂

向位移波动幅值为限值最大有效步频及驱动效率的关键因素; 构造固定于机身的虚拟地面, 在小腿坐标系中进行虚拟地面移动包络, 求解包络线的解析表达式, 得到了足地接触轮廓曲线。

(2) 进行闭链四足单元及闭链多足移动系统的布局与设计。根据足地接触轮廓曲线对应的曲柄相位范围, 开展两种典型布局形式下的步态对比分析, 并以优选的机械腿同向布局的方式设计了闭链四足单元及闭链多足移动系统。

(3) 建立虚拟样机对照模型, 并设计制作出一台闭链多足移动系统试验样机, 在仿真环境及实际工况下进行平地行走以及坡地负重行走试验等多项测试。所得到的仿真与样机试验结果的数据均与理论分析相吻合, 共同验证了所提出的足地接触轮廓曲线设计方法的有效性, 以及曲线式足端对于降低机身垂向位移波动幅值、提高移动系统行走速度与提升驱动效率等方面起到的关键作用。

参 考 文 献

- [1] PAN Yang, GAO Feng, QI Chenkun, et al. Human-tracking strategies for a six-legged rescue robot based on distance and view[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 30(2): 219-230.
- [2] RAIBERT M H, TELLO E R. Legged robots that balance[M]. Cambridge: MIT Press, 1986.
- [3] RAIBERT M H, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [4] SAPATY P. Military robotics: Latest trends and spatial grasp solutions[J]. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 2015, 4(4): 9-18.
- [5] 丁良宏. BigDog 四足机器人关键技术分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 1-23.
- [6] DING Lianghong. Key technology analysis of BigDog quadruped robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 1-23.
- [6] 刘京运. 从 Big Dog 到 Spot Mini: 波士顿动力四足机器人进化史[J]. 机器人产业, 2018(2): 109-116.
- [7] LIU Jingyun. From BigDog to Spot Mini: Evolution of Boston Dynamics quadrupeds[J]. Robot Industry, 2018, 2018(2): 109-116.
- [7] HYUN D J, SEOK S, LEE J, et al. High speed trotting: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Chee-tah[J]. The International Journal of Robotics Research,

- 2014, 33(11): 1417-1445.
- [8] PARK H W, PARK S, KIM S. Variable-speed quadrupedal bounding using impulse planning: Untethered high-speed 3D Running of MIT Cheetah 2[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015: 5163-5170.
- [9] BLEDT G, POWELL M J, KATZ B, et al. MIT cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot[C]// 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018: 2245-2252.
- [10] BENJAMIN K, JARED D C, SANGBAE K. Mini Cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control[C]// 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 6295-6301.
- [11] 荣学文. SCalf 液压驱动四足机器人的机构设计与运动分析[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- RONG Xuwen. Mechanism design and kinematics analysis of a hydraulically actuated quadruped robot SCalf[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [12] SUGAHARA Y, OHTA A, HASHIMOTO K, et al. Walking up and down stairs carrying a human by a biped locomotor with parallel mechanism[C]// 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2005: 1489-1494.
- [13] 潘阳. P-P 结构六足机器人性能设计与控制实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- PAN Yang. Performance design and control experiment of a novel hexapod robot with P-P structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [14] JANSEN T. The great pretender[M]. 010 Publishers, 2007.
- [15] 陈柏宏. 四连杆与六连杆型木车马之机构设计[D]. 中国台湾, 台南: 成功大学, 1998.
- CHEN Baihong. Design of wood horses with 4-link and 6-link mechanism[D]. China Taiwan, Tainan: Cheng Kung University, 1998.
- [16] CHEN Yugang, YAN Hongsen. On the design of a quadruped walking machine with a single actuator[D]. China Taiwan, Tainan: Cheng Kung University, 2003.
- [17] 黄凯. 最佳八连杆型机器马之研究[D]. 中国台湾, 台南: 成功大学, 1997.
- HUANG Kai. Design of the optimal 8-link mechanical horse[D]. China Taiwan, Tainan: Cheng Kung University, 1997.
- [18] 黄智勇. 可自行平衡具十连杆型腿部机构四足步行机器之设计[D]. 中国台湾, 台南: 成功大学, 2006.
- HUANG Zhiyong. Design of the self-balancing quadruped with 10-link mechanical legs[D]. China Taiwan, Tainan: Cheng Kung University, 2006.
- [19] PARK H S, FLOYD S, SITTI M. Roll and pitch motion analysis of a biologically inspired quadruped water runner robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29(10): 1281-1297.
- [20] PARK J W, KIM K S, KIM S. Design of a cat-inspired robotic leg for fast running[J]. Advanced Robotics, 2014, 28(23): 1587-1598.
- [21] 武建昫. 连杆式整体闭链多足载运平台的设计与应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- WU Jianxu. Design and application research on linkage-based multi-legged carrying platform with whole closed-chain mechanism[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [22] 徐小景. 少动力闭链弹性仿生腿的设计与奔跑运动研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- XU Xiaojing. Design and running motion research of less power closed-chain elastic bionic legs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

作者简介: 阮强, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机构学与机器人。

E-mail: ruan_qiang@bjtu.edu.cn

姚燕安(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构学与机器人。

E-mail: yayao@bjtu.edu.cn

武建昫, 男, 1989 年出生, 博士后。主要研究方向为机构学与机器人。

E-mail: 13116343@bjtu.edu.cn