# [研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.05.003

# 可调足式机器人腿部机构设计

康 特, 王兴东<sup>\*</sup>, 孙 伟, 龚彩云

(武汉科技大学冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室,湖北武汉 430081)

摘 要:为实现腿部机构足端轨迹多样化以增强足式机器人地面适应性,同时提高其运动稳定性,课题组基于曲柄摇杆和曲柄滑块机构设计了一种可调整足式机器人腿部机构。采用解析法对该机构进行了运动学分析,建立了以理想的足端轨迹为设计要求的单目标优化模型,考虑了腿部机构运动过程中的平稳性,引入了速度波动指标,以轨迹-速度为设计目标,采用 NSGA-II 多目标优化方法对机构进行优化,对优化结果进行了对比分析;基于多目标优化结果建立了腿部机构的足端轨迹库,并进行腿部机构多步态分析;以该腿部机构构建4足机器人三维模型,运用 ADAMS 对整机进行运动仿真。研究结果表明:多目标优化比单目标优化的轨迹误差增大了 0.16%,而速度波动降低了 5.84%;多目标优化与已有相关研究相比,速度波动幅值降低了 25.44 mm/s。4 足机器人三维模型仿真结果验证了可调整腿部机构的设计具有可行性。

关键 词:足式机器人;可调腿部机构;足端轨迹;多目标优化;速度波动
 中图分类号:TH112;TP242
 文献标志码:A
 文章编号:1005-2895(2023)05-0013-09

## **Design of Adjustable Foot Robot Leg Mechanism**

KANG Te, WANG Xingdong\*, SUN Wei, GONG Caiyun

(Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to realize the diversification of the foot end trajectory of the leg mechanism to enhance the ground adaptability of the foot robot as well as to improve its motion stability, an adjustable foot robot leg mechanism was designed based on crank rocker and crank slider mechanism. The kinematics of the mechanism was analyzed by analytical method, and a single-objective optimization model was established with the ideal foot-end trajectory as the design requirement. The stability of the leg mechanism in the process of motion was considered, and the speed fluctuation index was introduced. The mechanism was optimized by NSGA-II multi-objective optimization method, and the optimization results were compared and analyzed. Based on the results of multi-objective optimization, the foot-end trajectory library of the leg mechanism was established, and the multi-gait analysis of the leg mechanism was carried out. The three-dimensional model of the quadruped robot was constructed with the leg mechanism, and the motion simulation of the whole machine was carried out by ADAMS. The results show that the trajectory error of multi-objective optimization, compared with existing relevant studies, the amplitude of velocity fluctuation is reduced by 25.44 mm/s. The simulation results of 3D model simulation of quadruped robot verify the feasibility of the design of adjustable leg mechanism.

Keywords: foot robot; adjustable leg mechanism; foot trajectory; multi-objective optimization; velocity fluctuation

收稿日期:2023-01-30;修回日期:2023-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51875418)。

**第一作者简介:**康特(1996),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为机构学。通信作者:王兴东(1970),男,湖北武汉人, 教授,博士,硕士生导师,主要研究方向为机构学与机器人学。E-mail:wxd\_wust\_edu@163.com

足式机器人采用离散的地面支撑,以非连续路径 模式行走,在不规则地形中相比轮式和履带式机器人 更有优势<sup>[1]</sup>。近年来,足式机器人在军事侦查、救灾、 运输、医疗和生活服务等方面应用广泛,一直以来是机 器人领域研究的热点<sup>[2]</sup>。在国外已经研制出了 Big Dog<sup>[3]</sup>、Little Dog<sup>[4]</sup>、Military Robotics<sup>[5]</sup>和 Spot Mini<sup>[6]</sup> 等足式机器人。由于这些机器人运动的自由度数较 多,明显增加了控制元件和系统的复杂性,特别是影响 了运动过程中机器人的可靠性。此外,单自由度的 Chebyshev<sup>[7]</sup>、Stephenson<sup>[8]</sup>、Klann<sup>[9]</sup>和 Jansen<sup>[10]</sup>等机 构的应用,使得足式机器人的控制简单且具有更好的 运动稳定性。但这些足式机器人腿部机构结构固定、 足端轨迹单一,降低了足式机器人行走的灵活性和对 地面的适应性。

为了实现灵活输出和多种功能以满足人类的要 求,具有各种可控机构的现代机器人不断涌现。Sheba 等<sup>[11]</sup>提出了一种可重构 Kann 腿部机构的设计,使用 6 个线性驱动调节杆长和 1 个角度驱动调节产生 5 种 不同的步态模式。Nansai 等<sup>[12]</sup>改进了单自由度 Theo Jansen 腿机构,利用销接拓扑切换到具有 4 个滑块关 节的 5 自由度机构,可以产生多种不同的步态轨迹。 Shin 等<sup>[13]</sup>使用 8 连杆的 Jansen 机构调整 2 个连杆来 匹配通用的步态轨迹以适应各种步态模式。Wu 等<sup>[14]</sup> 采用可重构方法增加 1 个杆长调节自由度实现轨迹灵 活性。臧红彬等<sup>[15]</sup>基于 Jansen-leg 机构将 1 个固定的 铰接点设计为上、下运动铰接点,实现了多样的运动轨 迹。王森等<sup>[16]</sup>基于单自由度的 Klann 机构,增加 1 个 自由度来实现机架的铰链旋转,获得了足端轨迹的连 续变化。

近年来足式机器人的研究向高平稳性、多步态和 高适应性发展,课题组基于曲柄摇杆和曲柄滑块机构 设计了一种可调整足式机器人腿部机构。对该机构进 行了运动学分析,建立了以足端轨迹为设计要求的优 化模型,考虑足式机器人运动过程中的平稳性,以轨 迹-速度为优化目标对腿部机构进行优化。

## 1 可调腿部机构设计与分析

1.1 腿部机构设计

可调机构随着杆长或角度的变化,其足端轨迹也

会相应地变化。足式机器人的腿部机构在实际运动中 不可能调整全部的杆件长度或角度,否则会导致控制 运动的难度增大,整机结构也会因此变得更加复杂,从 而增加足式机器人的能量损耗。

为了减少控制组件,在对足式机器人设计时,需要 减少腿部机构自由度。课题组以曲柄摇杆机构为可调 构型的设计原型,将摇杆与机架杆处的铰接副替换为 移动副,同时增加了控制滑块运动的曲柄滑块机构,通 过曲柄滑块机构调整曲柄的角度、改变滑块的位置,从 而改变足端位置。图1所示为设计的腿部机构简图。





该腿部机构包括 2 个运动链:一个运动链是由曲柄 2(FG)、连杆(DF)及滑块 D 和机架组成的曲柄滑块机构;另一个运动链为曲柄1(AB)、小腿杆(BE)、大腿杆(CD)和机架组成的曲柄摇杆机构。电动机驱动曲柄1带动小腿杆生成抬腿运动,该腿部机构在行走前根据地形可调节曲柄2 的角度,行走时为单自由度机构。

#### 1.2 运动学分析

课题组采用解析法对腿部机构进行运动学分析, 求得腿部机构足端轨迹方程,建立的直角坐标系如图 2 所示。 $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$  和  $L_6$  分别为杆 BD, AB, BC, CE, CD, FG 和 FD 的长度, α 为曲柄 AB 的初始角 度, $\beta$ , $\gamma$  和  $\varphi_1$  分别为 FG, FD, BD 与 x 轴的夹角,  $\varphi_2$  为  $\angle BDC_{\circ}$ 



图2 腿部机构坐标系

Figure 2 Coordinate system of leg mechanism

在曲柄滑块 *DFG*中,有:  

$$L_5 \cos \beta + L_6 \cos \gamma = S;$$
  
 $L_5 \sin \beta + e = L_6 \sin \gamma_\circ$ 

$$(1)$$

式中:S为滑块的行程;e为G点和A点在垂直面的距离,即曲柄滑块机构的偏置距离。

可得:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{e + L_5 \sin\beta}{L_6}\right)_{\circ}$$
(2)

则 F 点的坐标为:

$$x_F = x_G + L_5 \cos \beta; y_F = y_G + L_5 \sin \beta_\circ$$
 (3)

于是 D 点坐标为:

$$\begin{array}{l} x_D = x_F + L_6 \cos\left(2\pi - \gamma\right); \\ y_D = y_F + L_6 \sin\left(2\pi - \gamma\right)_{\circ} \end{array} \right\}$$
(4)

在曲柄摇杆 ABCDE 中, B 点坐标为:

$$\left. \begin{array}{l} x_B = x_A + L_1 \cos \left( \left. \theta + \alpha \right) \right; \\ y_B = y_A + L_1 \sin \left( \left. \theta + \alpha \right) \right|_{\circ} \end{array} \right\}$$
(5)

式中 θ 表示曲柄转角。

由2点间的距离公式可得:

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{y_B - y_A}{L_0}\right)_{\circ} \tag{7}$$

在△BCD中,由余弦定理可得:

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{L_0^2 + L_4^2 - L_2^2}{2L_0L_4}\right)_{\circ}$$
 (8)

在整个腿部机构运动的周期中, $\angle ADB$ 始终为锐角。当B点在AD上方时, $\varphi_1 > 0$ ;当B点在AD下方时, $\varphi_1 < 0$ 。

$$\theta_{2i} = \varphi_2 - \varphi_{1\circ} \tag{9}$$

式中  $\theta_{2i}$ 表示大腿杆与 x 轴负方向的夹角。

则 C 点的坐标为:

$$x_{c} = x_{D} + L_{4} \cos \left( \theta_{2i} + \pi \right);$$

$$\gamma_{c} = \gamma_{D} + L_{4} \sin \left( \theta_{2i} + \pi \right)_{0}$$

$$(10)$$

于是求得 E 点的坐标表达式为:

$$x_{E} = x_{C} + \frac{L_{3}(x_{C} - x_{B})}{L_{2}};$$

$$y_{E} = y_{C} + \frac{L_{3}(y_{C} - y_{B})}{L_{2}} \circ$$
(11)

# 2 足端轨迹分析及优化设计

#### 2.1 足端轨迹分析

不同的足端轨迹具有不同的运动稳定性,并且足端轨迹会影响运动速度。一般足式机器人会采用多项式曲线、抛物线、正弦曲线和摆线<sup>[17-19]</sup>作为足端轨迹。 文献[1]中椭圆轨迹无突变和尖点,速度曲线连续,从 而可以减小对腿部机构冲击。

课题组考虑了足端轨迹对机器人运动性能的影响,选用文献[1]中椭圆轨迹为目标轨迹,轨迹如图 3 所示。足端轨迹步长 *L* = 140 mm、步高 *H* = 40 mm,轨 迹表达式为:

$$x = \frac{L}{2}\cos\varphi + 35;$$

$$y = \frac{H}{2}\sin\varphi - 160_{\circ}$$
(12)

换腿点为2腿足端点在水平位置时的点,如图3 中 a 点和 b 点所示,2个点在水平面内的距离为步长。

抬腿高度为椭圆足端轨迹短半轴与长轴交点的距离,即图 3 中 cd 所示。

足端轨迹体现了足式机器人的运动能力,其2个 重要参数为步长和步高。步长表征足式机器人行走能 力,步高则表示足式机器人越障的能力。由于单自由 度腿部机构无法调整步长和步高,所以行走和越障的





# 图3 足端轨迹曲线



功能不足。

腿部在行走过程中依次完成抬起、前伸和着地的 周期性动作,按照运动状态整个运动轨迹可分为抬腿 轨迹与支撑轨迹2部分。抬腿轨迹指腿部悬空运动足 端所运动轨迹;支撑轨迹指足端着地且相对于地面静 止,身体相对于地面移动。

### 2.2 轨迹单目标优化

2.2.1 设计变量与目标函数

驱动曲柄 *AB* 带动小腿杆完成腿部行走,因此曲 柄的转角与足端轨迹点一一对应。曲柄匀速转动过程 中在足端轨迹上均匀取 *n* 个关键点(文中取 *n* = 12), 则每个点之间的角度差为 π/6。

由 1.2 节可知,腿部机构足端位置由组成该机构 的杆长与曲柄转角决定,故设计变量取为:

 $X = [L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, \alpha, \beta, x_A, x_G, y_A, y_G]_{\circ}$ (13)

腿部运动依次经过目标轨迹离散的 12 个点,曲柄 位置从初始角度 0°开始取值,每次转过的角度差为  $\Delta\theta$ ,则 $\Delta\theta = 2\pi(i-1)/n, i = 1, 2, \dots, n_{\circ}$ 

要使足端按照规划的椭圆轨迹运动,以腿部足端运动的实际坐标值与目标轨迹均匀离散点的坐标值之间的均方差最小化建立目标函数*f*<sub>1</sub>,即:

$$f_{1} = \sum_{i=1}^{n} \left[ \left( x_{E_{i}} - x_{i} \right)^{2} + \left( y_{E_{i}} - y_{i} \right)^{2} \right]_{\circ} \quad (14)$$

式中: $x_i$ , $y_i$ 为目标轨迹上第i个点的坐标; $x_{E_i}$ , $y_{E_i}$ 是腿 部运动足端运动E点第i个实际点的坐标。

目标点坐标如表1所示。

	Table 1 Target point coordinates						
i	$x_i/mm$	$y_i/mm$					
1	105.00	- 160.00					
2	95.62	- 150.00					
3	70.00	-142.68					
4	35.00	- 140.00					
5	0.00	- 142.68					
6	-25.62	- 150.00					
7	-35.00	-160.00					
8	-25.62	-170.00					
9	0.00	- 177.32					
10	35.00	- 180.00					
11	70.00	- 177.32					
12	95.62	- 170.00					

目标点坐标

表 1

2.2.2 约束条件

1) 根据四杆机构曲柄存在条件有:

$$L_{1} - L_{2} - L_{4} + L_{AD} \leq 0;$$

$$L_{1} - L_{2} + L_{4} - L_{AD} \leq 0;$$

$$L_{1} + L_{2} - L_{4} - L_{AD} \leq 0;$$

$$L_{1} - \min (L_{2}, L_{4}, L_{AD}) \leq 0;$$

$$L_{5} + e - L_{6} \leq 0_{\circ}$$
(15)

式中L<sub>AD</sub>表示A点与D点的水平距离。

2) 曲柄 AB 连续条件为:

$$\theta(i+1) > \theta_i, i=1,2,\cdots,n-1_{\circ}$$
 (16)

3)根据腿部机构杆件之间防止干涉及杆件位置 布置情况,尺寸与角度的限制范围为:

20 mm $\leq L_i \leq 100$ mm, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6;$		
$0^{\circ} \leq \alpha \leq 360^{\circ};$		
$0^{\circ} \leq \beta \leq 180^{\circ};$		
$-70 \text{ mm} \leq x_A \leq -30 \text{ mm};$	ł	(17)
$0 \text{ mm} \leq x_G \leq 20 \text{ mm};$		
$-20 \text{ mm} \leq y_A \leq 0 \text{ mm};$		
$0 \text{ mm} \leq \gamma_c \leq 20 \text{ mm}_{\circ}$	J	

由式(13)~(17)组成了以理想的足端轨迹为设 计要求的单目标优化模型。

2.2.3 单目标优化结果

课题组采用 MATLAB 优化工具箱中的遗传算法 对该非线性优化模型进行优化,优化流程如图4 所示。 单目标轨迹优化的结果为:

 $X = [L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, \alpha, \beta, x_A, x_G, y_A, y_G] =$ 

[38.02,87.88,89.96,88.01,22.14,54.10,295.03, 129.92, -52.77, -12.29,11.49,10.16]。



图4 单目标优化流程图



根据优化结果,绘制足端 E 点的优化轨迹与目标 轨迹如图 5 所示。图 5 中可以看出优化轨迹的步高较 目标轨迹的步高增加了 2.14 mm,步长减小了 1.03 mm,优化得到的轨迹满足腿部机构设计要求。与文献 [1]中的 2 自由度腿部机构相比,课题组研究的可调 整腿部机构在未进行调整的单自由度状态下可以完成 同样的运动轨迹。



图 5 目标轨迹和优化轨迹对比 Figure 5 Comparison between target trajectory and optimized trajectory

#### 2.3 轨迹-速度多目标优化

为提高足式机器人运动稳定性,减小腿部机构运

动过程中的速度波动,使得腿部机构在接近给定的运 动轨迹条件下满足一定速度要求,课题组在以足端轨 迹为设计目标的同时,引入速度指标进行轨迹-速度多 目标优化设计,即以足端轨迹离散点的实际速度对其 平均速度的均方差建立目标函数 f<sub>2</sub>,得到更加符合运 动平稳性要求的腿部机构。

$$f_{2} = \sum_{i=1}^{n} \left[ \left( v_{x_{i}} - \bar{v}_{x} \right)^{2} + \left( v_{y_{i}} - \bar{v}_{y} \right)^{2} \right]_{\circ} \quad (18)$$
$$\bar{v} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left[ v_{i}(\theta(i)) \right]_{\circ}$$

$$\left. \begin{array}{c} v_x = -n & \sum_{i=1}^{n} \left[ v_x(\theta(i)) \right]; \\ \\ \bar{v}_y = \frac{1}{n} & \sum_{i=1}^{n} \left[ v_y(\theta(i)) \right]_{\circ} \end{array} \right\}$$
(19)

式中: $v_{x_i}$ 和  $v_{y_i}$ 为足端 *E* 点在 *x* 轴和 *y* 轴方向的实际速度; $v_x$ 和  $v_y$ 是足端 *E* 点在 *x* 轴和 *y* 轴方向平均速度。

- 综上,考虑速度要求的多目标优化模型表述如下:
- 1)设计变量和约束条件同单目标优化模型。
- 2) 目标函数为:

$$\begin{array}{c} \min f_1;\\ \min f_2 \circ \end{array} \right\} \tag{20}$$

式(13)~(20)组成了多目标优化模型。

采用快速非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)<sup>[20]</sup>多目标优化, 最大进化代数设为 300,种群规模设为 200,停止代数 设为 200,最优个体系数设为 0.3,得到 Pareto 最优解 集如图 6 所示。



图 6 Pareto 最优解

Figure 6 Pareto optimal solution

在 Pareto 前沿面上,一个目标值增大必然会引起 另一个目标的减小,没有某一种方案使得优化的 2 个 目标值同时达到最小,设计者可以权衡每个目标的相 对优势选择最优解:

1) 若对2个优化目标没有特殊偏好,则最优解应 在II 区选择;

2) 若对轨迹目标要求较高,则最优解可在 I 区 选择;

 3)若对相速度目标有严格限制,则应在Ⅲ区选择 最优解。 课题组设计的腿部机构在最逼近给定的运动轨迹 条件下要提高足式机器人运动稳定性能,于是在 I 区 选择腿部机构设计参数的最优解。

3 优化结果与腿部调整分析

#### 3.1 优化结果对比分析

表 2 所示为腿部机构轨迹单目标和轨迹-速度多 目标优化参数求解结果。

表2 优化结果

轻工机械 Light Industry Machinery

Table 2	Ontimination	nogulta
Table 2	Optimization	results

优化目标	$L_1/\mathrm{mm}$	$L_2/\mathrm{mm}$	$L_3/\mathrm{mm}$	$L_4/\mathrm{mm}$	$L_5/\mathrm{mm}$	$L_6/\mathrm{mm}$	α⁄(°)	<b>β</b> ∕(°)	$x_A/\mathrm{mm}$	$y_A/\mathrm{mm}$	$x_G/mm$	y <sub>G</sub> ∕mm
单目标	38.02	87.88	89.96	88.01	22.14	54.10	295.03	129.92	- 52.77	- 12.29	11.94	10.16
多目标	35.79	89.02	90.10	90.12	20.11	50.04	293.30	130.54	-48.32	-9.07	11.07	7.12

优化结果对应的参数无明显差别,在不考虑速度 波动的单目标优化时其轨迹误差值 $f_1$ 为107.32 mm, 计算此时各位置的实际速度对其平均速度的均方差值  $f_2$ 为10875.69 mm/s;而多目标优化结果得到的轨迹 误差值 $f_1$ 为107.49 mm,实际速度对其平均速度的均 方差值 $f_2$ 为10240.81 mm/s。

通过单目标与多目标优化结果对比发现:多目标 优化的轨迹误差比单目标的轨迹误差增大了 0.16%, 但速度误差值降低了 5.84%,即速度波动降低了 5.84%。多目标优化损失的轨迹精度较小,速度稳定 性的提升远远大于损失的轨迹精度。

课题组设计的腿部机构单目标优化、多目标优化 与文献[21]中腿部机构在平地行走2个轨迹周期内足 端速度变化曲线如图7所示。由图7可见,多目标优化 结果和单目标优化结果速度变化的趋势一致,但多目标 优化足端速度波动略小于单目标优化足端速度波动。

多目标优化足端速度在 0~1 s 产生 1 个速度波 峰,其速度最小值为 17.32 mm/s,最大值为 129.54 mm/s,速度波动幅值为 112.22 mm/s;而在 1~2 s 运 动速度趋于平缓。文献[21]腿部机构速度曲线在 0~ 2 s 产生 2 个速度波峰,其速度最小值为 59.31 m/s,最 大值为 196.97 m/s,速度波动幅值为 137.66 m/s。多 目标优化和文献[21]的优化方法相比,速度波动幅值 降低了 25.44 mm/s。

课题组设计的腿部机构速度波动小于文献[21]





中腿部机构的速度波动,2种腿部机构速度曲线的对 比说明了课题组设计的腿部机构平稳性较好。

腿部机构的多目标优化设计不仅可以满足运动轨 迹,还可以降低腿部机构运行过程中的速度波动,提高 腿部机构运动平稳性。

#### 3.2 腿部机构多步态分析

腿部机构通过调整曲柄2与x轴的角度β得到不同的足端轨迹。调整时曲柄1未驱动,腿部机构此时 是单自由度的状态,调整后曲柄2与x轴角度固定不动,曲柄1驱动,腿部机构此时也是单自由度的状态,因此调整前后不会影响腿部运动的稳定性。 根据 1.2 节运动学公式,运用 MATLAB 软件在调整范围内取值,以多目标优化求解得到的轨迹为基础, 每隔 5°绘制 1 次足端轨迹,建立腿部机构的足端轨迹 库如图 8 所示,图中β在 130°时为本文多目标优化方 法得到的足端轨迹。合理的足端轨迹是 1 条光滑且无 交叉的封闭曲线,通过分析,调整曲柄角度β在 0°~ 130°时符合轨迹要求。



Figure 8 Foot-end trajectory library of adjustable leg mechanism

由图 8 可见, β 为0°时, 抬腿高度最大, 步长最短, 机器人跨越障碍的能力较强。随着β增大, 足端的抬 腿高度减小, 行走的步长增加。当β为130°时, 抬腿 高度最小, 步长最长, 机器人此时的行走效率较高。

连续变化的足端轨迹构成了腿部机构的可选轨迹 库,足式机器人在运动过程中调整腿部机构以适应不 同路面环境。

## 4 仿真实验与分析

4 足机器人在运动性能和负载能力方面优于 2 足 机器人,相对 6 足、8 足等多足机器人结构简单且易于 控制。以可调整腿部机构为构型,根据优化结果中的 参数建立 4 足机器人三维模型。

由于其零部件多且机构相对复杂,对4 足机器人 结构进行简化后,导入 ADAMS 仿真软件中,如图9 所 示。整机只需要4个动力输入和1个调整输入,4 条 腿分别由4个电机驱动,1个驱动通过带轮同时实现4 条腿的调整。



图 9 4 足机器人三维模型 Figure 9 3D model of quadruped robot

课题组选用最常见的对角步态验证可调整腿部机 构的可行性与稳定性,4 足机器人行走的步态变换及 腿部调整过程如图 10 所示。



(a) 初始姿态



(b) 姿态调整



(c) 对角步态行走



(d) 换腿



图 10 运动仿真过程 Figure 10 Motion simulation process

4 足机器人在初始条件下保持站立姿态如图 10 (a)所示。运动时,首先由初始站立的姿态调整至对 角步态,经过姿态调整后如图 10(b)所示;右前和左后 腿抬起,左前腿和右后腿此时处于支撑位置,且2 对角 位置相位差为 180°,继续运动双腿着地如图 10(c)所 示;紧接着左前腿和右后腿抬起如图 10(d)所示;继续 运动双腿着地如图 10(e)所示;在运动过程中可以调 整腿部机构的角度如图 10(f)所示,通过调整腿部机 构角度可实现不同的运动轨迹。

运动过程足端轨迹和质心在 x,y,z 方向的位移和 速度变化如图 11 所示。每条腿的轨迹形状是一致的, 绘制左前腿足端轨迹曲线如图 11(a)所示,可以看出 运动轨迹在 10.0~10.2 s 时步长和步高发生了明显 改变。4 足机器人质心的位移变化情况如图 11(b)所 示,在0.0~2.5 s 机器人进行姿态调整后,在 x 方向上 质心曲线为线性减小的,在 y 方向上周期性连续变化, z 方向水平没有位移偏移,说明机器人在运动过程中 没有倾倒与停留,并始终保持匀速运行。质心速度变 化如图 11(c)所示,在 0.0~2.5 s 机器人进行姿态调 整,2.5 s 后开始移动,整机质心的速度波动无突变情 况,明显变化的时刻 10.0~10.2 s 为腿部调整阶段, 之后速度继续保持周期性变化,4 足机器人运动的整 个过程稳定性良好。



图 11 4 足机器人仿真运动曲线



## 5 结语

课题组设计了一种可调整的足式机器人腿部机 构,运用少量的调整驱动实现足式机器人腿部的柔性 调节,该腿部机构能够实现多样化的轨迹,可满足机器 人在不同环境下的运动需求。相对于腿部机构单目标 优化设计,多目标优化设计方法不仅能够满足单目标 优化的轨迹要求,同时有效地降低了运动过程中的速 度波动。以该腿部机构为构型建立4足机器人三维模 型,运用 ADAMS 对整机进行运动仿真,仿真结果表明 机器人可以达到稳定行走和轨迹调整,验证了可调整 腿部机构设计的可行性。

后续将针对机器人的控制系统与智能化进行研究, 机器人的运动需要感知外界信息,将传感设备与机器人 的行走相结合,可提升机器人在不同环境下的适应性。 参考文献:

- [1] 柏龙,龙樟,陈晓红,等.连续电驱动四足机器人腿部机构设计与 分析[J].机器人,2018,40(2):136-145.
- [2] 郭建,赵易,陈景聪.基于步态规划的四足机器人运动学分析和仿

真[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(7):6.

- [3] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. Big dog, the rough-terrain quadruped robot [C]// Proceedings of the 17th Internatio-nal Federation of Automatic Control Congress. Seoul, Korea:IFAC,2008:10822-10825.
- [4] MURPHY M P, SAUNDERS A, MOREIRA C, et al. The little dog robot[J]. International Journal of Robotics Research, 2011, 30(2): 145-149.
- [5] SAPATY P. Military robotics: latest trends and spatial grasp solutions
   [J]. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 2015, 4(4):9-18.
- [6] NIQUILLE S C. Regarding the pain of SpotMini; or what a robot's struggle to learn reveals about the built environment[J]. Architectural Design, 2019, 89(1):84 - 91.
- [7] LIANG C, CECCARELLI M, TAKEDA Y. Operation analysis of a Chebyshev-Pantograph leg mechanism for a single DOF biped robot
   [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2012, 7(4):357 - 370.
- [8] PLECNIK M M, MCCARTHY J M. Design of Stephenson linkages that guide a point along a specified trajectory [J]. Mechanism & Machine Theory, 2016, 96:38 - 51.
- [9] LOKHANDE N G, EMCHE V B. Mechanical spider by using Klann mechanism[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Computer Applications, 2013, 1(5):13-16.
- [10] NANSAI S, ELARA M R, IWASE M. Dynamic analysis and modeling of Jansen mechanism[J]. Procedia Engineering, 2013, 64: 1562-1571.
- [11] SHEBA J K, ELARA M R, MARTINEZ-GARCIA E, et al. Synthesizing reconfigurable foot traces using a Klann mechanism[J].

Robotica, 2017, 35(1):189 - 205.

- [12] NANSAI S, ROJAS N, ELARA M R, et al. On a Jansen leg with multiple gait patterns for reconfigurable walking platforms [J].
   Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(3):1-18.
- [13] SHIN S Y, DESHPANDE A D, SULZER J. Design of a single degree of freedom, adaptable electromechanical gait trainer for people with neurological injury[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2018, 10(4):7.
- [14] WU J X, YAO Y A, LI Y B, et al. Design and analysis of a sixteenlegged vehicle with reconfigurable close-chain leg mechanisms [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(5):1.
- [15] 臧红彬,沈连婠. Theo Jansen 仿生腿研究及其机构优化设计[J]. 机械工程学报,2017,53(15):109.
- [16] 王森,姚燕安,武建昫.一种新型可调整闭链多足机器人的设计 与分析[J].机械工程学报,2020,56(19):9.
- [17] 王鹏,董人全,孙铁成,等.四足机器人爬行凸起上坡的运动仿真研究[J].机电工程,2021,38(5):639-644.
- [18] 高建设,王玉闯,刘德平,等.新型四足步行机器人串并混联腿的轨迹规划与仿真研究[J].郑州大学学报:工学版,2018,39(2):
   6.
- [19] 王晓磊,王雪涛,孙丹丹,等.一种新型轮腿四足机器人腿部机构 结构参数优化[J].机电工程,2022,39(4):547-553.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective gene-tic algorithm: NSGA-II [ J ]. IEEE Transactions on Evolutionary Comput-ation, 2002,6(2):182 – 197.
- [21] 龙樟.连续电驱动四足机器人设计与分析[D].重庆:重庆大学, 2018:86.

#### (上接第12页)

- [4] 佟金戈,贺建芸,李嘉维,等.基于光固化微压印制备仿生荷叶疏
   水薄膜的研究[J].塑料工业,2019,47(10):139-142.
- [5] DUOSS E B, WEISGRABER T H, HEARON K, et al. Three dimensional printing of elastomeric, cellular architectures with negative stiffness[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(31): 4905-4913.
- [6] 阎海亮.3D 直写式打印柔性可拉伸电子材料的研究[D].北京: 北京工业大学,2017:13-14.
- [7] FRIEDRICH L, BEGLEY M. In situ characterization of low-viscosity direct ink writing: stability, wetting, and rotational flows[J]. Journal

of Colloid and Interface Science, 2018, 529:599-609.

- [8] OBER T J, FORESTI D, LEWIS J A. Active mixing of complex fluids at the microscale [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112 (40): 12293 – 12298.
- [9] GOLOBIC A M, DURBAN M D, FISHER S E, et al. Active mixing of reactive materials for 3D printing [J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(8):1900147.
- [10] LI W B, ARMANI A, MARTIN A, et al. Extrusion-based additive manufacturing of functionally graded ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(3):2049 – 2057.