doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.046

全向运动仿生腿尺寸参数优化与试验

徐毓泽　卢钟岳　朱一鸣　罗自荣
（国防科技大学智能科学学院，长沙 410073）

摘要： 本文设计一款驱动固定集中、足端无伴随转动特征且具有全向运动能力的腿部机构（全向运动仿生腿 OmnilLeg），以提升全向运动仿生腿性能为目的，提出一种多目标分层优化方法对其尺寸参数进行优化。给出了腿部机构的运动学和静力学模型，构建了 6 项性能评价指标，包括极限步长、极限步高、两项运动学性能指标（雅可比矩阵条件数均值、运动学性能波动情况）、两项静力学性能指标（力传递能力、力传递稳定性）。分析了全向运动仿生腿各尺寸参数对 6 项性能评价指标的影响程度和规律。结合蒙特卡洛法提出了以极限步长和极限步高为主要指标，以运动学性能和静力学性能为辅助指标，将优化目标分层的多目标尺寸参数优化方法，对全向运动仿生腿尺寸参数进行了优化。分析了全向运动仿生腿运动学和静力学性能，末端工作空间在 $-0.07\ \mathrm{m} \leqslant (x、y) \leqslant 0.07\ \mathrm{m}$、$5° \leqslant \gamma \leqslant 85°$ 的区域内时，全向运动仿生腿具备更好的运动学和静力学性能。基于优化所得的尺寸参数搭建了全向运动仿生腿原型样机，并搭建了单腿测试平台，通过末端加载试验验证了运动学和静力学性能。研究结果为全向运动仿生腿进一步研究奠定基础。

关键词： 全向运动仿生腿；多目标优化；尺寸参数优化；运动学性能；静力学性能
中图分类号： TP24　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2025)01-0484-13　　**OSID：**

Optimization of Dimensional Parameters and Performance of Bionic Leg Capable of Omnidirectional Legged Locomotion

XU Yuze　LU Zhongyue　ZHU Yiming　LUO Zirong
(*College of Intelligence Science and Technology*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410073, *China*)

Abstract: A leg mechanism with fixed and centralized drive, no corresponding rotational characteristics at the footand the same movement ability in all directions (OmnilLeg) was reported, in order to improve the performance of OmnilLeg, a multi-objective hierarchical optimization method was proposed to optimize its size parameters. The kinematic model and static model of the leg mechanism was built, six performance evaluation indexes were constructed, including limiting step length, limiting step height, two kinematic performance indexes (mean value of Jacobian matrix condition number, and fluctuation of kinematic performance), and two static performance indexes (ability of force transmission, and stability of force transmission). The influence degree and law of the dimension parameters of the omnidirectional motion bionic leg on the six performance evaluation indexes was analyzed. Combined with Monte Carlo method, a multi-objective dimensional parameter optimization method was proposed to stratify the optimization objectives by taking the ultimate step length and the ultimate step height as the main indexes and the kinematic and static performances as the auxiliary indexes, and the dimensional parameters of the OmnilLeg were optimized. The kinematic properties and static properties of the OmnilLeg were analyzed, and it can be seen that the omnidirectional motion bionic leg possessed better kinematic and hydrostatic performances when the end workspace was in the region of $-0.07\ \mathrm{m} \leqslant (x, y) \leqslant 0.07\ \mathrm{m}$, and $5° \leqslant \gamma \leqslant 85°$. A prototype of the OmniLeg was built based on the optimized dimensional parameters, a single-legged experimental platform was built, and the conclusions of the kinematic and static properties were verified by end-loading experiments. The research can provide a foundation for further research on the OmnilLeg.

Key words: bionic leg capable of omnidirectional legged locomotion; multi-objective optimization; optimization of dimensional parameters; kinematic properties; statics properties

收稿日期：2024-08-16　修回日期：2024-09-22
基金项目： 国家自然科学基金面上项目(52175069)
作者简介： 徐毓泽(1992—)，男，博士生，主要从事足式机器人机械设计与运动控制研究，E-mail：xuyuze_nudt@sina.com
通信作者： 罗自荣(1974—)，男，教授，博士生导师，主要从事智能无人系统平台与动力研究，E-mail：luozirong@nudt.edu.cn

0　引言

灵活、快速且轻量化的腿部机构是足式机器人实现高机动性、高通过性和高稳定性的核心部件。为提升足式机器人运动性能，国内外学者设计了大量腿部构型[1]，然而现有构型存在以下问题：腿部机构在不同方向上运动能力不一致，全向运动能力有限；足端在移动过程中具有伴随转动特征，姿态改变，运动控制复杂；电机随腿部运动而运动，转动惯量大，影响腿部运动灵活性和防护性。因此，设计一款驱动固定集中、足端无伴随转动特征且具有全向运动能力腿部机构十分必要。

腿部机构尺寸参数决定了其运动学、静力学、工作空间等性能。因此，对腿部机构尺寸参数进行优化，是腿部机构开发过程中的重要工作。根据优化目标数量，尺寸参数优化主要分为单目标优化和多目标优化两种。

单目标优化是以一项性能指标作为目标函数，对尺寸参数进行优化。如以具备更大的工作空间体积、提高腿部机构固有频率、降低机构质量、具有较好的扭矩输出能力和降低末端位移偏差等为优化目标进行尺寸参数优化[2-10]。单目标优化方法较为直观，但仅对一项性能指标进行优化，可能会导致腿部机构其他性能降低。

为解决单目标优化导致的腿部机构不同性能此消彼长的问题，研究者提出了多目标优化法对腿部机构尺寸参数进行优化。文献[11-15]采用基于性能图谱的蒙特卡洛法来解决多目标优化问题。该方法通过获取腿部机构各尺寸参数性能频率分布图，从而得到性能最优尺寸参数。随着计算机技术的发展，研究者提出了基于各种算法的优化方法，例如基于遗传算法[16-17]、基于沙猫群算法的均衡优化法[18]。基于算法的优化方法可以有效实现高精度寻优，但需要大量的编程过程，且通常以简单的多指标加权和为优化目标，难以确保算法收敛性。此外，张金柱[19]结合其提出的腿部机构的特点，分别对其驱动机构部分和行走机构部分尺寸参数进行优化选择。IBRAYEV 等[20]在对各向同性方程解进行分析的基础上进行优化。RUSSO 等[21]基于穷举法进行评估分析。张良安等[22]通过理想点法进行优化。综合来看，多目标优化法可使腿部机构具备更好的综合性能，其中应用最为广泛的方法是基于性能图谱的蒙特卡洛法，但该方法本质是基于概率统计理论，结果易出现偏差，且计算量大。

腿部机构运动学和静力学性能决定了基于其的足式机器人运动学和静力学性能。因此，对提出的新机构进行深入的运动学和静力学性能分析十分必要[23-27]。

本文设计一种驱动固定集中、足端无伴随转动特征且具有全向运动能力的三自由度腿部机构（全向运动仿生腿），给出腿部机构组成并建立腿部运动学和静力学理论模型。通过分析所提出的全向运动仿生腿尺寸参数对各性能指标的影响程度和规律，结合蒙特卡洛法，提出一种通过逐层分析的方式，以极限步长和极限步高作为主要指标，以运动学性能和静力学性能为辅助指标的多目标尺寸参数优化选择方法。基于优化得到的尺寸参数，对所提出的全向运动仿生腿进行运动学和静力学性能分析。设计全向运动仿生腿原型样机，通过末端加载试验验证运动学和静力学性能。

1　机构设计及运动学和静力学模型

图 1a 为全向运动仿生腿三维模型图，图 1b 为全向运动仿生腿机构运动简图。

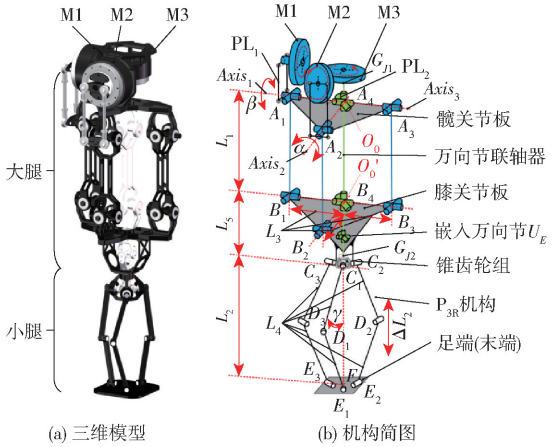


图 1　全向运动仿生腿三维模型

Fig. 1　3D-model of OmniLeg

全向运动仿生腿机构分为大腿和小腿两部分，大腿主体为空间双平行并联机构 $A_1B_1A_2B_2A_3B_3$，小腿主体为 P_{3R} 机构 $C_1D_1E_1C_2D_2E_2C_3D_3E_3$。电机 M1 和 M2 分别通过由鱼眼轴承组成的闭环四杆机构 PL_1 和 PL_2 与空间双平行并联机构 $A_1B_1A_2B_2A_3B_3$ 连接，驱动后者运动。电机 M3 通过万向节联轴器 $G_{J1}A_4B_4U_EG_{J2}$ 和锥齿轮组（传动比为 1∶1）将动力传递至 P_{3R} 机构 $C_1D_1E_1C_2D_2E_2C_3D_3E_3$，驱动小腿实现直线运动。万向节联轴器 $G_{J1}A_4B_4U_EG_{J2}$ 中的万向节 U_E 为可拆卸模块化结构，通过改变万向节 U_E 的角度使全向运动仿生腿小腿具备相对膝关节板转向能力。

根据经典旋量理论建立全向运动仿生腿末端位置正解 ${}^{O_0}\boldsymbol{P}_F$ 模型

$$\begin{cases} {}^{O_0}P_{Fx} = \dfrac{L_1 \sin\beta}{\sqrt{1+\cos^2\beta\tan^2\alpha}} \\ {}^{O_0}P_{Fy} = -\dfrac{L_1 \cos\beta\tan\alpha}{\sqrt{1+\cos^2\beta\tan^2\alpha}} \\ {}^{O_0}P_{Fz} = \dfrac{L_1 \cos\beta}{\sqrt{1+\cos^2\beta\tan^2\alpha}} + 2L_4\cos\gamma + L_5 \end{cases} \tag{1}$$

式中 α——大腿绕冠状轴转角

β——大腿绕矢状轴转角

L_1——大腿长度

L_4——小腿连杆长度

γ——小腿转角

L_5——膝关节板高度

根据数值解法，得到末端位置反解模型为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan({}^{O_0}P_{Fy}/f) \\ \beta = \arctan({}^{O_0}P_{Fx}/f) \\ \gamma = \arccos({}^{O_0}P_{Fz} - L_5 - f/2L_4) \end{cases} \tag{2}$$

其中 $$f = \sqrt{L_1^2 - ({}^{O_0}P_{Fx}^2 + {}^{O_0}P_{Fy}^2)}$$

对式(1)求偏导即可得到速度映射关系为

$${}^{O_0}\boldsymbol{\nu}_F = \boldsymbol{J}_{vF}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fx}}{\partial\alpha} & \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fx}}{\partial\beta} & \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fx}}{\partial\gamma} \\ \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fy}}{\partial\alpha} & \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fy}}{\partial\beta} & \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fy}}{\partial\gamma} \\ \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fz}}{\partial\alpha} & \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fz}}{\partial\beta} & \dfrac{\partial {}^{O_0}P_{Fz}}{\partial\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{J}_{vF}$——速度雅可比矩阵

θ——电机转角

根据虚功原理，机构广义输入力虚功总和等于机构足端输出广义力虚功之和

$$\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}\,O_0}\boldsymbol{\nu}_F = \boldsymbol{\tau}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\eta}_v \tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{\tau}$——电机扭矩 $\boldsymbol{\eta}_v$——电机转速

$\boldsymbol{F}$——足端输出力

进一步得到足端输出力与关节扭矩关系为

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{J}_{fF}\boldsymbol{\tau} = (\boldsymbol{J}_{vF}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{\tau} \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{J}_{fF}$——力传递矩阵

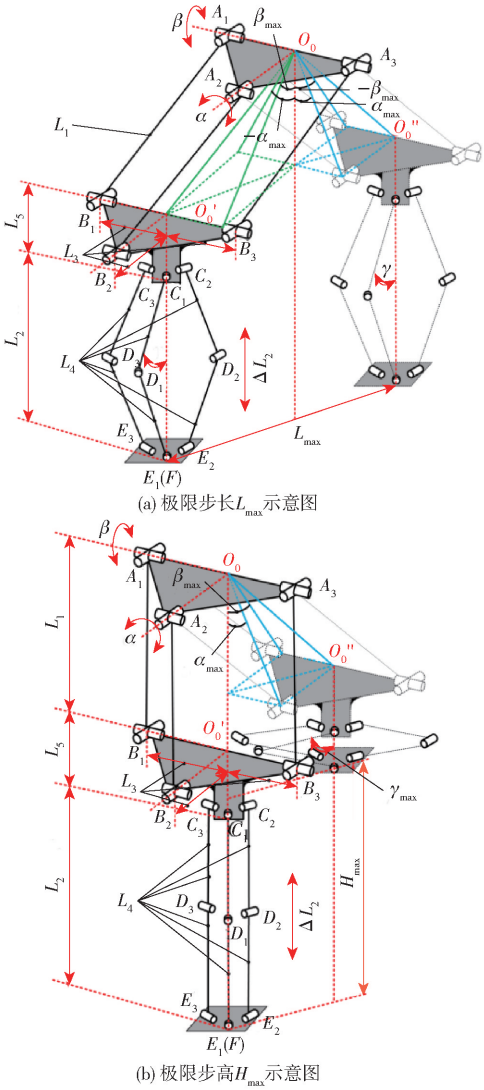
2 全向运动仿生腿尺寸参数优化

设定全向运动仿生腿的整体尺寸设计目标为：腿长 $L_{Omni} \leqslant 0.5$ m（$L_{Omni} = L_1 + L_{2\max} + L_5 \leqslant 0.5$ m，$L_{2\max} = 2L_4$）。根据文献[28]，人员密集区域楼梯设计指标为宽度大于 0.28 m、高度小于 0.165 m。设定全向运动仿生腿极限步长 $L_{\max}$ 不小于 0.28 m，极限步高 $H_{\max}$ 不小于 0.165 m。

为消除量纲不同导致不具备可比性，文献[29－30]等将全向运动仿生腿长度尺寸参数无量纲化。基于归一化的思想，设定无量纲参数 L_1、$L_{2\max}$（$2L_4$）与 L_5 和为 0.5，等比计算得，极限步长无量纲参数 $L_{\max}$ 应大于 0.28，极限步高无量纲参数 $H_{\max}$ 应大于 0.165，腿长无量纲参数 L_{Omni} 应小于 0.5（$L_{Omni} = L_1 + L_{2\max} + L_5 \leqslant 0.5$，$L_{2\max} = 2L_4$）。

2.1 尺寸参数对极限步长和极限步高的影响

图 2 为全向运动仿生腿极限步长 $L_{\max}$ 和极限步高 $H_{\max}$ 示意图。



(a) 极限步长$L_{\max}$示意图

(b) 极限步高$H_{\max}$示意图

图 2 全向运动仿生腿的极限步长和极限步高示意图

Fig. 2 Extreme step length and extreme step height of OmniLeg

设定 $\alpha_{\max}$、$\beta_{\max}$ 分别为 α、β 最大值。由图 2a 可得，实线模型表示 α、β 分别为 $-\alpha_{\max}$、$\beta_{\max}$ 时全向运动仿生腿位姿，虚线模型表示 α、β 分别为 $\alpha_{\max}$、$-\beta_{\max}$ 时全向运动仿生腿位姿，即 $L_{\max}$ 表示全向运动仿生腿极限步长。由图 2b 可得，实线模型表示 α、β 和 γ 均为 0°时全向运动仿生的位姿，虚线模型表示 α、β 分别为 $\alpha_{\max}$、$-\beta_{\max}$ 且 P_{3R} 机构处于完全收缩状态时全向运动仿生腿的位姿，即 $H_{\max}$ 表示全向运动仿生腿极限步高。全向运动仿生腿极限步长和极限

步高由 L_1、L_4、γ_{max}（γ 的极限值）、α_{max}（α 的极限值）和 β_{max}（β 的极限值）5 个参数决定。根据三角函数定理，推得极限步长 L_{max}、极限步高 H_{max} 与 L_1、L_4、α_{max}、β_{max}、γ_{max} 的关系式为

$$\begin{cases} L_{max} = 2L_1\sqrt{\dfrac{\tan^2\alpha_{max} + \tan^2\beta_{max}}{1 + \tan^2\alpha_{max} + \tan^2\beta_{max}}} \\ H_{max} = \Delta L_{2max} + L_1 - L_1\sqrt{\dfrac{1}{1 + \tan^2\alpha_{max} + \tan^2\beta_{max}}} \end{cases} \tag{6}$$

通过单变量分析法来分析各尺寸参数对极限步长 L_{max}、极限步高 H_{max} 的影响规律。

预选 1 组无量纲尺寸参数：$L_1 = 0.2$、$L_4 = 0.1$、$L_5 = 0.1$、$\gamma_{max} = 85°$、$\alpha_{max} = 45°$ 和 $\beta_{max} = 45°$。根据上述，得到各尺寸参数（L_1、L_4、α_{max}、β_{max} 和 γ_{max}）对全向运动仿生腿无量纲极限步长 L_{max} 和极限步高 H_{max} 的影响规律，如图 3 所示。

由图 3a 可得，L_1 与极限步长 L_{max}、极限步高 H_{max} 之间均呈线性正相关，且 L_1 对极限步长 L_{max} 的影响能力显著大于对极限步高 H_{max} 的影响能力。从图 3b、3c 可得，随着 α_{max}、β_{max} 增大，极限步长 L_{max} 和极限步高 H_{max} 均逐渐增大。当 α_{max}、β_{max} 为 50°～70° 时极限步长 L_{max} 的增幅较大（60°时最大），极限步高 H_{max} 的增幅则随着 α_{max}、β_{max} 的增大呈持续增大趋势。由图 3d 可得，L_4 与极限步高 H_{max} 呈线性正相关。对比图 3a 和图 3d 可以看出，L_4 对极限步高 H_{max} 的影响大于 L_1。图 3e 表明 γ_{max} 与极限步高 H_{max} 呈正相关，且随着 γ_{max} 的增大，极限步高 H_{max} 的增幅持续增大。

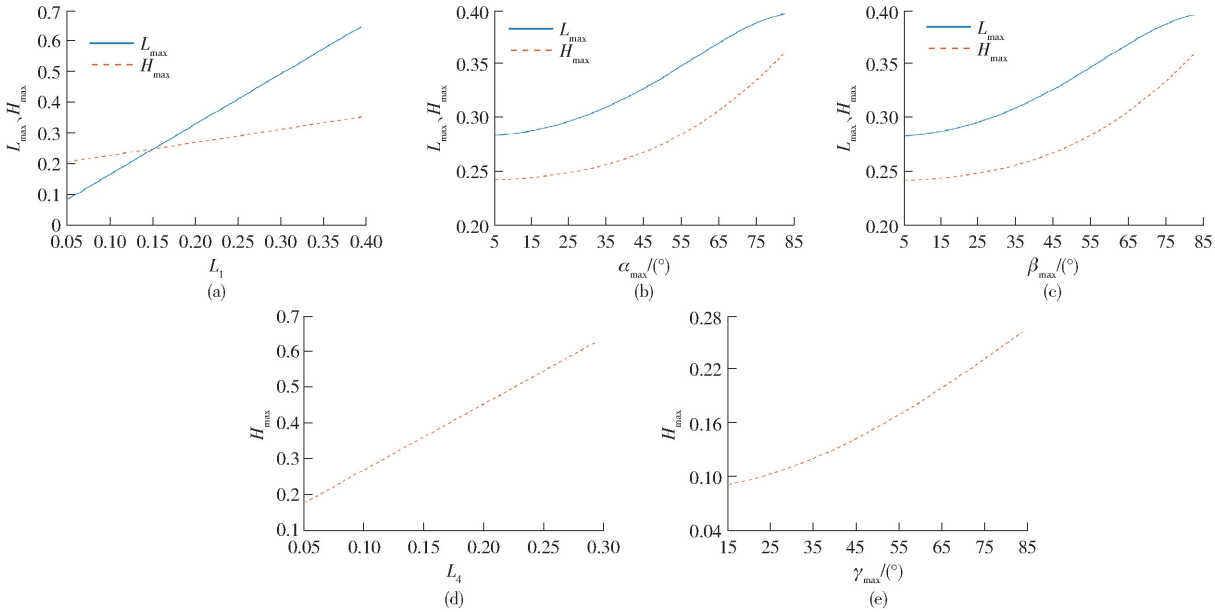


图 3　尺寸参数对无量纲极限步长 L_{max} 和极限步高 H_{max} 的影响规律

Fig. 3　Influence law of dimensional parameters on extreme step length and extreme step height

根据上述，各尺寸参数对 2 项工作空间性能指标参数的影响规律较为明确。

2.2　尺寸参数对运动学性能的影响

参照文献[31－32]，速度雅可比矩阵条件数可以有效表征机构的运动学性能，即

$$k(\boldsymbol{J}_{vF}) = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \tag{7}$$

式中　$k(\boldsymbol{J}_{vF})$——全向运动仿生腿速度雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_{vF}$（式(3)）的条件数

σ_{max}、σ_{min}——全向运动仿生腿速度雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_{vF}$ 最大和最小奇异值

指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$ 越小表示全向运动仿生腿运动学性能越好。

定义速度雅可比矩阵条件数在工作空间内的均值 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 作为全向运动仿生腿全局运动学性能评价指标，即

$$k_a(\boldsymbol{J}_{vF}) = \frac{\int k(\boldsymbol{J}_{vF})\,\mathrm{d}S}{S} \tag{8}$$

式中　S——全向运动仿生腿工作空间体积

指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 越小，对应的尺寸参数可以使全向运动仿生腿具有更好的运动学性能。

定义速度雅可比矩阵条件数在工作空间内的标准差 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 作为全向运动仿生腿运动学性能的波动变化情况的评价指标，即

$$k_f(\boldsymbol{J}_{vF}) = \frac{\sqrt{\int (k(\boldsymbol{J}_{vF}) - k_a(\boldsymbol{J}_{vF}))^2\,\mathrm{d}S}}{S} \tag{9}$$

指标 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 越小，对应的尺寸参数可以使全向运动仿生腿在工作空间内整体的运动学性能更均

匀。同样采用单变量法,得到全向运动仿生腿各尺寸参数对上述 2 个运动学性能评价指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 的影响规律(图 4)。

从图 4a 可得,随 L_1 的增大,指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和指标 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 均呈先快速减小后快速增大的趋势。由图 4b、4c 可得,当 $\alpha_{\max}$ 和 $\beta_{\max}$ 小于 65°时,指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和指标 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 变化较小,当 $\alpha_{\max}$ 和 $\beta_{\max}$ 大于 65°时,指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和指标 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 快速增加。根据图 4d,随着 L_4 增加,指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和指标 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 呈先快速减小后缓慢增加的趋势。根据图 4e,随着 $\gamma_{\max}$ 增加,指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和指标 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 同样呈先快速减小后缓慢增加趋势。

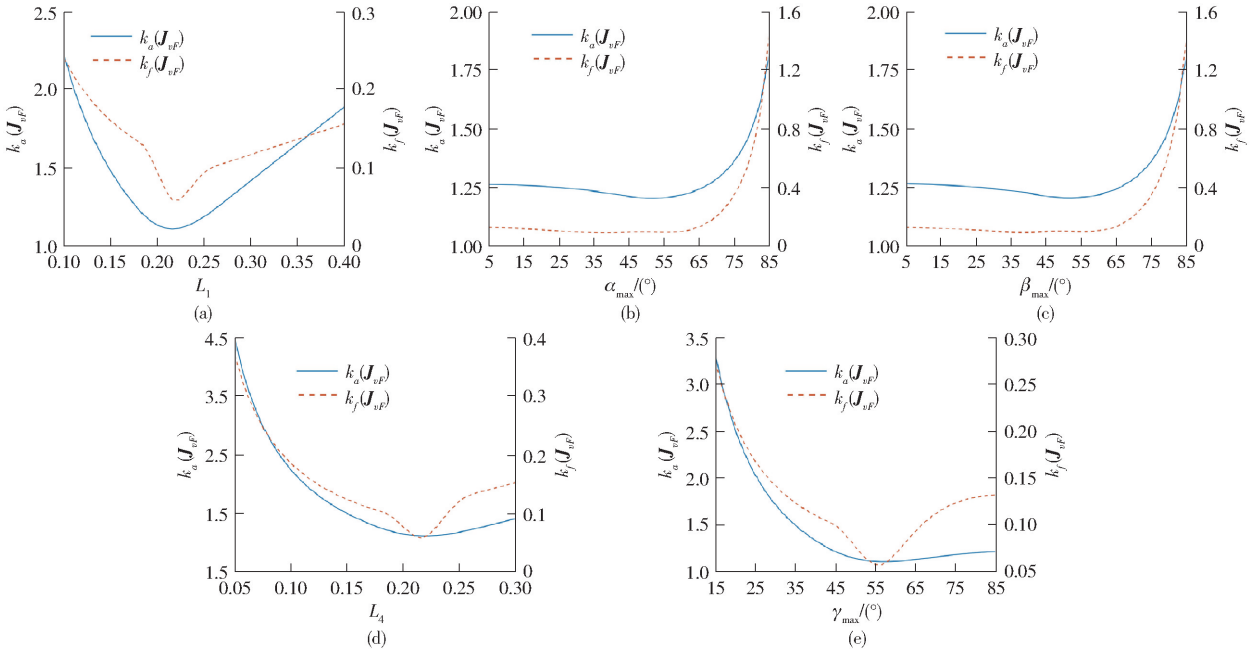


图 4 各尺寸参数对运动学性能评价指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和 $k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$ 的影响规律

Fig. 4 Influence law of dimensional parameters on kinematic performance evaluation indexes

综上,2 项运动学参数随各尺寸参数的变化十分复杂,难以直接通过观察判断性能较优取值。

2.3 尺寸参数对静力学性能的影响

式(5)已给出全向运动仿生腿广义输入力与足端广义输出力的关系。参照文献[11-12],根据范数理论建立全向运动仿生腿输出力极值条件式。首先,对式(5)两侧取 2 范数可得

$$\|\boldsymbol{F}\|^2 = \boldsymbol{\tau}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{fF}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{fF}\boldsymbol{\tau} \tag{10}$$

设定输入为单位矢量,$\boldsymbol{\tau}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\tau}=1$。应用拉格朗日乘数法,引用拉格朗日乘子

$$L_f = \boldsymbol{\tau}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{fF}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{fF})\boldsymbol{\tau} - \kappa_{ff}(\boldsymbol{\tau}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\tau}-1) \tag{11}$$

式中 κ_{ff}——拉格朗日乘子

进一步,求偏导可得全向运动仿生腿足端广义输出力的极值条件式

$$\partial L_f/\partial\boldsymbol{\tau} = (\boldsymbol{J}_{fF}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{fF})\boldsymbol{\tau} - \kappa_f\boldsymbol{\tau} = 0 \tag{12}$$

式中 κ_f——$\boldsymbol{J}_{fF}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{fF}$ 的特征值

进而得到全向运动仿生腿在工作空间内任意位姿时足端广义输出力极大、极小值为

$$\begin{cases} \|\boldsymbol{F}\|_{\max} = \sqrt{\kappa_{f\max}} \\ \|\boldsymbol{F}\|_{\min} = \sqrt{\kappa_{f\min}} \end{cases} \tag{13}$$

定义足端广义输出力极大值 $\|\boldsymbol{F}\|_{\max}$ 为全向运动仿生腿力传递性能评价指标

$$\chi_e(\boldsymbol{J}_{fF}) = \|\boldsymbol{F}\|_{\max} \tag{14}$$

参照文献[11],利用极大值 $\|\boldsymbol{F}\|_{\max}$ 与极小值 $\|\boldsymbol{F}\|_{\min}$ 的差与极大值 $\|\boldsymbol{F}\|_{\max}$ 的比值作为一组性能指标来表征其力传递稳定性

$$\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF}) = (\|\boldsymbol{F}\|_{\max} - \|\boldsymbol{F}\|_{\min})/\|\boldsymbol{F}\|_{\max} \tag{15}$$

输入条件不变情况下,指标 $\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})$ 越小,全向运动仿生腿力传递稳定性越好。

定义指标 $\chi_e(\boldsymbol{J}_{fF})$ 和指标 $\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})$ 在工作空间内均值作为全向运动仿生腿的两项全局静力学性能评价指标

$$\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF}) = \frac{\int\chi_e(\boldsymbol{J}_{fF})\,\mathrm{d}S}{S} \tag{16}$$

$$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF}) = \frac{\int\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})\,\mathrm{d}S}{S} \tag{17}$$

同样根据单变量法,得到全向运动仿生腿各尺寸参数与上述 2 个静力学性能评价指标 $\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$、$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 的关系(图 5)。

从图 5a 可以看出,随着 L_1 增加,指标 $\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 逐渐减小,减幅也逐渐减小,指标 $\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 则呈先快速减小,后快速增加趋势。由图 5b、5c 可得,随着 $\alpha_{\max}$ 和 $\beta_{\max}$ 的增加,指标 $\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 先缓慢增加,$\alpha_{\max}$ 和

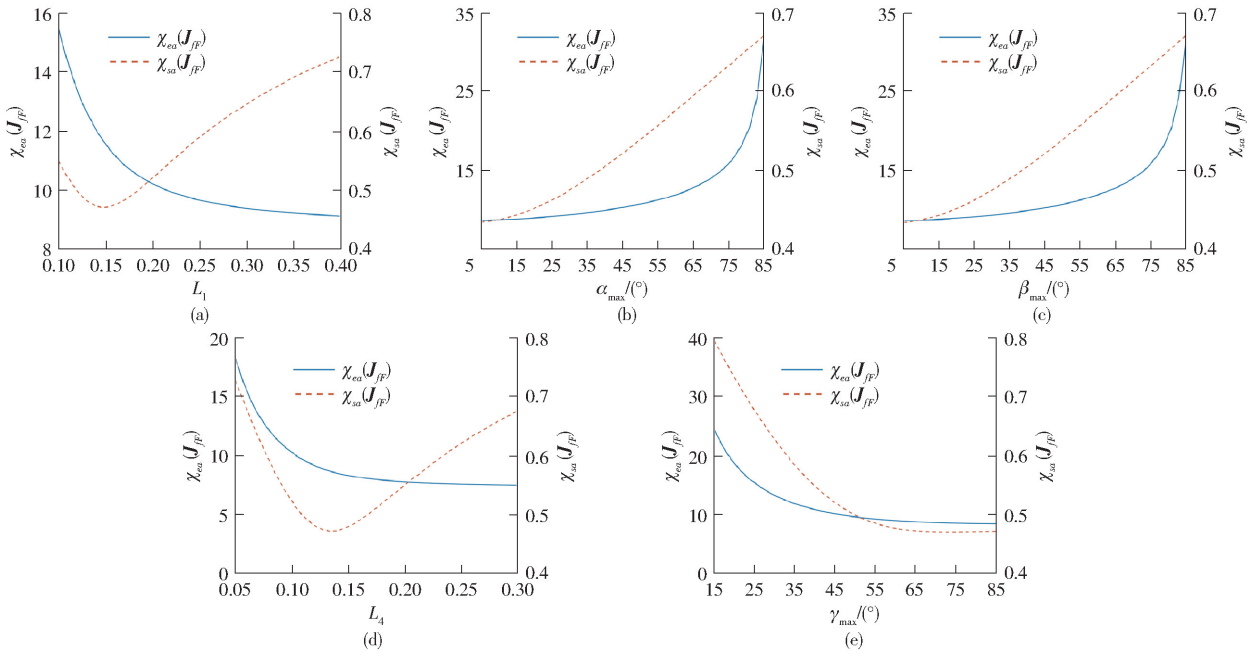


图 5　各尺寸参数对静力学性能评价指标的影响规律

Fig. 5　Influence law of dimensional parameters on static performance evaluation indexes

β_{max}大于65°后快速增加，指标$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$则呈持续快速增加趋势。根据图 5d，随着 L_4增加，指标$\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$逐渐减小，减幅也逐渐减小，指标$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$则呈现先快速减小后快速增加的趋势。根据图 5e，随着 γ_{max}增加，指标$\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$和指标$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$均呈持续减小趋势，但大于 55°后，变化较小。

2 项静力学参数随全向运动仿生腿各尺寸参数的变化十分复杂，同样难以直接通过观察判断性能较优取值。

2.4　多目标尺寸参数优化

根据前述分析，腿的极限步长和极限步高仅由其尺寸参数决定且影响规律较为明确，而运动学和静力学指标变化规律复杂，不易于直观判断。同时，在尺寸受限的情况下，令腿部在实现设计目标给定的极限步长的条件下获得更大的极限步高，可以有效提升其在复杂且狭小环境内的越障能力和适应性。

根据上述，考虑尺寸参数对全向运动仿生腿不同性能指标的影响程度和影响规律，及不同性能指标对全向运动仿生腿的运动性能的重要性，提出一种以极限步长和极限步高为主要指标，以运动学性能和静力学性能为辅助指标的逐层分析的多目标尺寸参数优化方法，对全向运动仿生腿尺寸参数进行优化。

以获得更好的运动学性能和静力学性能为优化目标，即

$$\begin{cases} k_a(\boldsymbol{J}_{vF}) \to \min \\ k_f(\boldsymbol{J}_{vF}) \to \min \\ \chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF}) \to \max \\ \chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF}) \to \min \end{cases} \tag{18}$$

以各尺寸参数范围为约束条件，采用基于性能图谱的蒙特卡洛法进行优化，得到各尺寸参数运动学和静力学性能较好时的取值范围。

以同时实现更大的极限步长和极限步高为优化目标，即

$$\begin{cases} f_1 = L_{max}(x_{deg}) \to \max \\ f_2 = H_{max}(x_{deg}) \to \max \end{cases} \tag{19}$$

式中　x_{deg}——各角度尺寸参数

以得到的各尺寸参数运动学和静力学性能较好时取值范围为约束条件，结合各尺寸参数对极限步长和极限步高影响规律，选取各角度尺寸参数 x_{deg}。

以在实现极限步长设计目标的情况下获得更大极限步高为优化目标

$$f_3 = H_{max}(x_{line}) \mid L_{max} \geqslant 0.28 \to \max \tag{20}$$

式中　x_{line}——各长度尺寸参数

以得到的各尺寸参数运动学和静力学性能较好时的取值范围及角度尺寸参数为约束条件，结合各尺寸参数对极限步长和极限步高的影响规律，选取各长度尺寸参数 x_{line}。各长度尺寸参数需在前述较优取值范围内（若不在范围内，则在满足设计目标的情况下，将较优取值范围中与选取值最接近的值作为最终结果）。具体尺寸参数优化方法见图 6。

综合考虑机加工、装配工艺及全向运动仿生腿尺寸设计要求等，给出全向运动仿生腿各尺寸参数约束范围，如表 1 所示。

参照文献[11－13]将各运动学和静力学性能指标的中间值作为对应尺寸参数优化的频率模型，

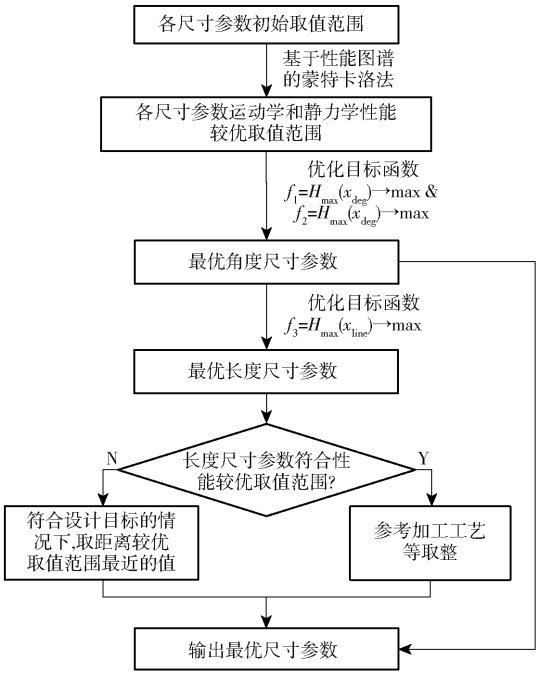


图 6 尺寸参数优化方法流程图

Fig. 6 Flowchart of proposed dimensional parameter optimization method

表 1 全向运动仿生腿尺寸参数约束范围

Tab. 1 Range of dimension parameters of OmniLeg

参数	L_1	L_4	α_{max}/(°)	β_{max}/(°)	γ_{max}/(°)
数值	0.05 ~ 0.40	0.05 ~ 0.30	5 ~ 85	5 ~ 85	5 ~ 85

根据基于性能图谱的蒙特卡洛法得到各尺寸参数较优取值范围。从图 4、5 可知各运动学和静力学性能指标的中间值分别为：$k_a(\boldsymbol{J}_{vF})_m=2.79$，$k_f(\boldsymbol{J}_{vF})_m=0.744\,6$，$\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})_m=19.505$，$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})_m=0.615$。因此设定约束条件为

$$\begin{cases} k_a(\boldsymbol{J}_{vF})<2.79 \\ k_f(\boldsymbol{J}_{vF})<0.744\,6 \\ \chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})>19.505 \\ \chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})<0.615 \end{cases} \tag{21}$$

满足式(21)约束条件时，各项指标性能较优。在表 1 给出的全向运动仿生腿各尺寸参数变化范围内，对全向运动仿生腿各尺寸参数进行抽样，并计算对应性能指标值，判断是否满足式(21)，统计各尺寸参数满足设定条件分布频率，分布频率越大，性能越好。取分布频率在均值以上的尺寸参数区域作为运动学和静力学性能较优取值范围。

根据上述，通过 Matlab 进行编程，通过循环计算得到各尺寸参数分布频率(图 7)。

尺寸参数 L_1、L_4、α_{max}、β_{max} 和 γ_{max} 的分布频率均值分别为 0.558 8、0.521 2、0.570 2、0.570 2 和 0.620 1，取分布频率在均值以上的区域作为运动学和静力学性能良好区域，如表 2 所示。

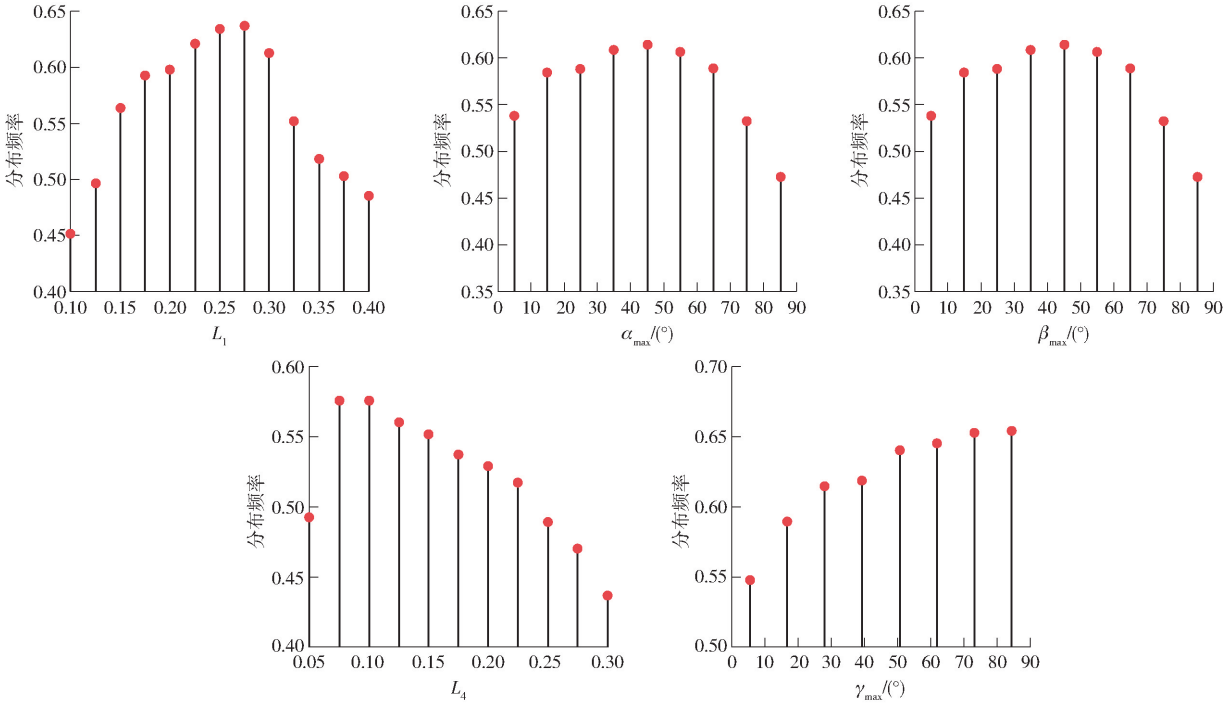


图 7 各尺寸参数分布频率柱状图(4 项性能指标)

Fig. 7 Histograms of frequency of distribution of dimensional parameters(four performance indicators)

3 项角度尺寸参数(α_{max}、β_{max} 和 γ_{max})的优化目标为同时实现更大的极限步长和极限步高。根据 2.1 节结果，极限步长 L_{max} 和极限步高 H_{max} 与 3 项角度尺寸参数(α_{max}、β_{max} 和 γ_{max})均呈现正相关，结合表 2 中 3 项角度尺寸参数(α_{max}、β_{max} 和 γ_{max})的取值范围，最终确定 $\alpha_{max}=65°$，$\beta_{max}=65°$，$\gamma_{max}=85°$。

表 2　具有良好运动学和静力学性能时尺寸参数取值范围

Tab. 2　Range of dimension parameters of OmniLeg with good kinematic and static properties

参数	L_1	L_4	α_{max}/(°)	β_{max}/(°)	γ_{max}/(°)
数值	0.15 ~ 0.3	0.075 ~ 0.2	15 ~ 65	15 ~ 65	55 ~ 85

2 项长度尺寸参数(L_1和 L_4)的优化目标为在使极限步长实现设计目标的基础之上,获得更大的极限步高。根据式(6)可推得 L_1计算式为

$$L_1 = \frac{L_{max}}{2}\sqrt{\frac{1+\tan^2\alpha_{max}+\tan^2\beta_{max}}{\tan^2\alpha_{max}+\tan^2\beta_{max}}} \tag{22}$$

已知 α_{max}和 β_{max},根据式(22)可知,在满足设计目标极限步长 $L_{max} \geqslant 0.28$ 的情况下,L_1 最小为 0.147 4。根据第 2.1 节结果,L_4对极限步高 H_{max}的影响能力大于 L_1,因而在参数 L_1可以满足基本设计要求情况下,尽可能增大 L_4可有效增大极限步高 H_{max}。由于计算所得,L_1不处于表 2 中 L_1的较优取值范围,为满足极限步长设计目标,L_1应大于 0.147 4,结合 L_1较优取值范围,最终选定 L_1为 0.15。

根据腿长设计目标 $L_1 + L_{2max} + L_5 \leqslant 0.5$,已知 $L_1 = 0.15$,故 L_{2max}与 L_5的和需小于等于 0.35。长度 L_5由万向节 U_E决定,通过三维设计并结合实际工程经验,给定 L_5为 0.16 m,按等比关系,将其无量纲化为 0.16。计算得 L_{2max}为 0.19。根据 $L_{2max} = 2L_4$,计算得长度 L_4为 0.095,处于表 2 中 L_4的较优取值范围。

上述已确定无量纲参数长度 L_1和 L_4,通过等比计算可得,在腿长 L_{Omni}为 0.5 m 时,$L_1 = 0.15$ m,$L_4 = 0.095$ m。为保证全向运动仿生腿在运动过程中,大腿的杆件之间没有干涉,经过机械三维设计,长度 L_3最终确定为 0.075 m。最终得到 1 组全向运动仿生腿各尺寸参数值(表 3)。根据式(6),计算得腿部机构的极限步长 L_{max}为 0.284 9 m,极限步高 H_{max}为 0.276 5 m,均满足设计目标。

表 3　优化后全向运动仿生腿各尺寸参数

Tab. 3　Optimized dimension parameters of OmniLeg

参数	L_1/m	L_2/m	L_3/m	L_4/m
数值	0.15	0.017 ~ 0.19	0.075	0.095
参数	L_5/m	α/(°)	β/(°)	γ/(°)
数值	0.160	0 ~ 65	0 ~ 65	0 ~ 85

若全向运动仿生腿的设计目标有所改变,可基于上述所提出的方法对全向运动仿生腿各尺寸参数进行重新优化。

2.5　尺寸参数优化结果对比

根据设计目标,无量纲参数 L_{max}应大于 0.28,H_{max}应大于 0.165。故在设定的约束条件(式(21))基础之上,增加两条约束条件:$L_{max} > 0.28$,$H_{max} > 0.165$,得到 6 项约束条件为

$$\begin{cases} k_a(\boldsymbol{J}_{vF}) < 2.79 \\ k_f(\boldsymbol{J}_{vF}) < 0.744\,6 \\ \chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF}) > 19.505 \\ \chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF}) < 0.61 \\ L_{max} > 0.28 \\ H_{max} > 0.165 \end{cases} \tag{23}$$

与上一节所使用方法相同,得到各尺寸参数分布频率,并取频率最大的值为最终参数取值。据此,得到 1 组全向运动仿生腿尺寸参数:$\alpha_{max} = 55°$、$\beta_{max} = 55°$、$\gamma_{max} = 75°$、$L_1 = 0.16$ m、$L_4 = 0.09$ m。

如表 4 所示,为本文所提出方法所得尺寸参数、蒙特卡洛法所得尺寸参数及初始尺寸参数计算得到的极限步长 L_{max}、极限步高 H_{max}、运动学性能指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$和$k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$及静力学性能指标 $\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$和 $\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$的值。可以看出,根据所提出的方法得到的尺寸参数在 H_{max}、$k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$、$\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$和$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$4 项指标上优于初始值,使用蒙特卡洛法得到的尺寸参数在 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$、$k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$、$\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$和$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$4 项指标上优于初始值,即两种方法均对全向运动仿生腿的尺寸参数进行了有效的优化。对比所提出的方法和蒙特卡洛法,可以看出,两者极限步长 L_{max}差距很小(仅 1.8 mm),但前者可有效获得更大的极限步高 H_{max}(相差 54.1 mm),且具有更好的指标 $k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$和$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$。

表 4　性能指标对比

Tab. 4　Comparison of performance indicators

指标	L_{max}	H_{max}	$k_a(\boldsymbol{J}_{vF})$
所提出的方法	0.284 9	0.276 5	1.194 5
蒙特卡洛法	0.286 7	0.222 4	1.233 1
初始值	0.326 6	0.267 1	1.243 3
指标	$k_f(\boldsymbol{J}_{vF})$	$\chi_{ea}(\boldsymbol{J}_{fF})$	$\chi_{sa}(\boldsymbol{J}_{fF})$
所提出的方法	0.141 3	14.57	0.556 4
蒙特卡洛法	0.117 4	15.49	0.596 6
初始值	0.121 2	12.49	0.599 8

可以看出,本文所提出的尺寸参数优化方法科学、可行,且使用所提出的方法对全向运动仿生腿进行尺寸参数优化更加有效。同时,本文所提出的方法使用基于 4 项性能指标的蒙特卡洛法选取运动学和静力学性能较好的尺寸参数取值范围,避免了使用基于 6 项性能指标的蒙特卡洛法直接进行尺寸参数优化时可能出现偏差,并降低了计算量。

3　全向运动仿生腿运动学和静力学性能

全向运动仿生腿工作空间由相同的球弧面叠加而成,首先通过分析在不同的球弧面上腿部机构的

运动学和静力学性能来得到 z 轴方向上性能较强的工作空间区域;然后选取部分具有代表性的球弧面,分析球弧面内运动学和静力学性能,以得到在 x 轴和 y 轴方向上性能较强工作空间区域。

以不同的 γ 作为自变量来分析工作空间在 z 轴方向上性能变化情况。参考式(8)、(9)定义球弧面内全局运动学性能指标 $k_{ai}(\boldsymbol{J}_{vF})$ 为

$$k_{ai}(\boldsymbol{J}_{vF}) = \frac{\int k(\boldsymbol{J}_{vF})\mathrm{d}A}{A} \tag{24}$$

式中 $k_{ai}(\boldsymbol{J}_{vF})$——指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$(式(7))在不同 γ 对应的球弧面内的均值

A——不同 γ 对应的球弧面面积

定义球弧面内全局运动学性能的波动变化情况 $k_{fi}(\boldsymbol{J}_{vF})$ 为

$$k_{fi}(\boldsymbol{J}_{vF}) = \frac{\sqrt{\int (k(\boldsymbol{J}_{vF}) - k_{ai}(\boldsymbol{J}_{vF}))^2\mathrm{d}A}}{A} \tag{25}$$

式中 $k_{fi}(\boldsymbol{J}_{vF})$——指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$(式(7))在不同 γ 对应的球弧面内的标准差

分析结果见图 8a。

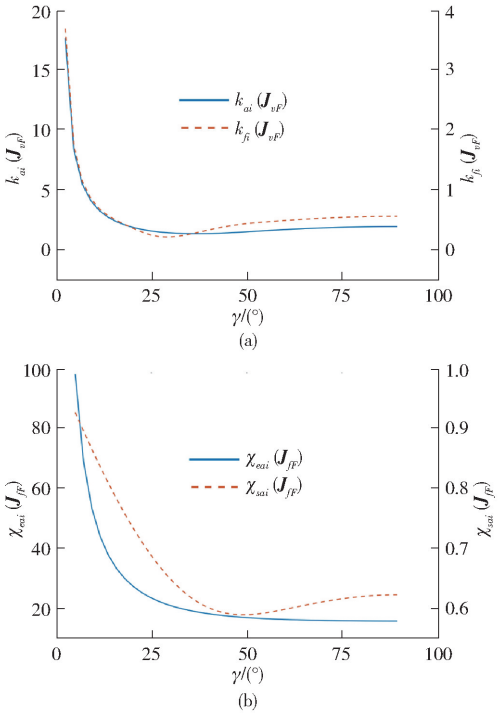


图 8 工作空间 z 轴方向上(γ 不同)的运动学性能和静力学性能变化曲线

Fig. 8 Variations of kinematic performances and static performances in z-axis direction of workspace

参考式(16)、(17)定义球弧面内全局力传递性能指标 $\chi_{eai}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 为

$$\chi_{eai}(\boldsymbol{J}_{fF}) = \frac{\int \chi_e(\boldsymbol{J}_{fF})\mathrm{d}A}{A} \tag{26}$$

式中 $\chi_{eai}(\boldsymbol{J}_{fF})$——指标 $\chi_e(\boldsymbol{J}_{fF})$(式(14))在不同 γ 对应的球弧面内均值

定义球弧面内全局力传递稳定性性能指标 $\chi_{sai}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 为

$$\chi_{sai}(\boldsymbol{J}_{fF}) = \frac{\int \chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})\mathrm{d}A}{A} \tag{27}$$

式中 $\chi_{sai}(\boldsymbol{J}_{fF})$——指标 $\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})$(式(15))在不同 γ 对应的球弧面内的均值

分析结果见图 8b。

由图 8a 可得,当 γ 大于 20°时,指标 $k_{ai}(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和指标 $k_{fi}(\boldsymbol{J}_{vF})$ 均处于相对较小的区域,全向运动仿生腿的运动学性能较好。由图 8b 可得,当 γ 在 0°~30°时,指标 $\chi_{eai}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 快速减小,机构力传递能力下降;γ 大于 30°后,指标 $\chi_{eai}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 的减幅放缓;γ 大于 30°后,指标 $\chi_{sai}(\boldsymbol{J}_{fF})$ 处于较低水平,力传递稳定性较好。同时,从图 8 可以看出,当 γ 小于 5°时,指标 $k_{ai}(\boldsymbol{J}_{vF})$ 和指标 $k_{fi}(\boldsymbol{J}_{vF})$ 均极大,运动学性能极差。为保证全向运动仿生腿具有较好的运动学性能,在对腿部进行运动规划时 γ 需大于 5°。

以 γ 分别为 15°和 60°时的工作空间球弧面为代表进行分析。引用式(7)分析各球弧面内的运动学性能变化情况,结果见图 9。利用式(14)、(15)分析各球弧面内静力学性能变化情况,结果见图 10 和图 11。

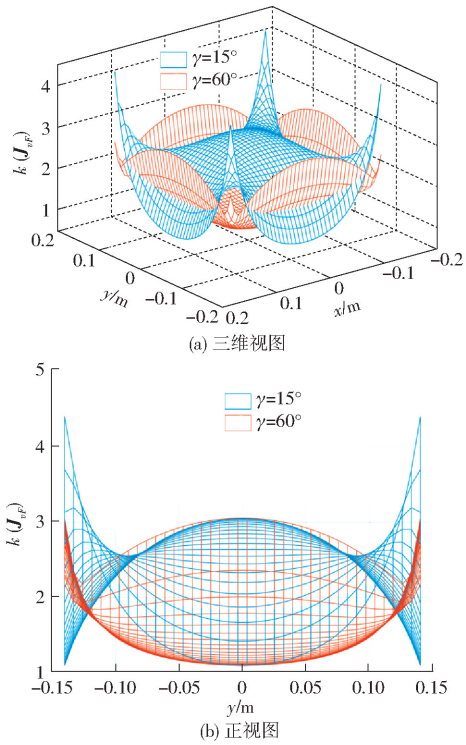
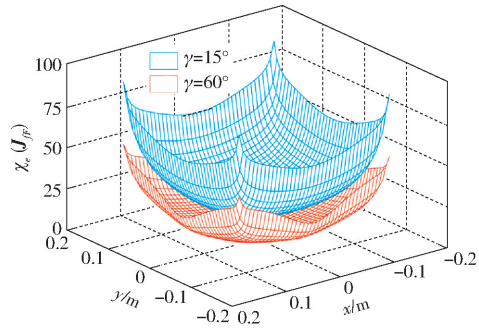
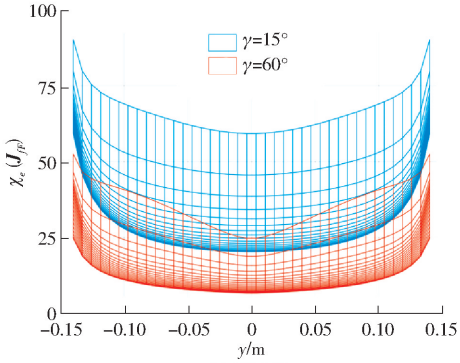


图 9 不同球弧面内指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$ 的变化情况

Fig. 9 Variation of indicator $k(\boldsymbol{J}_{vF})$ in different spherical arcs



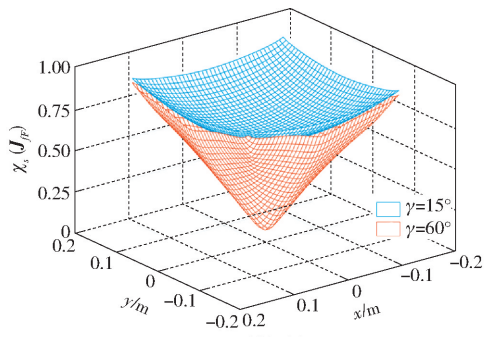
(a) 三维视图



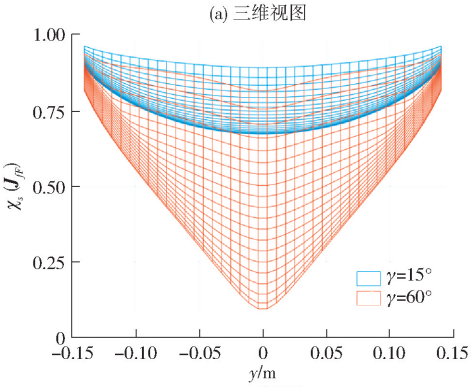
(b) 正视图

图 10　不同球弧面内指标 $\chi_e(\boldsymbol{J}_{fF})$ 的变化情况

Fig. 10　Variation of indicator $\chi_e(\boldsymbol{J}_{fF})$ in different spherical arcs



(a) 三维视图



(b) 正视图

图 11　不同球弧面内指标 $\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})$ 的变化情况

Fig. 11　Variation of indicator $\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})$ in different spherical arcs

从图 9 ~ 11 可看出，不同球弧面内运动学性能指标和静力学性能指标的值对称，说明全向运动仿生腿沿不同方向的速度和力具有较好的一致性。证明在运动学和静力学两方面，全向运动仿生腿具有全向特性。

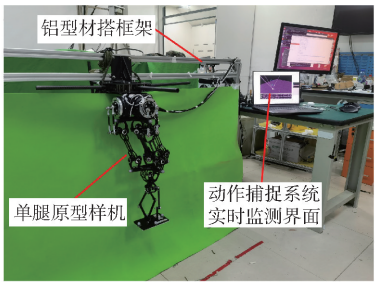
由图 9 可得，$\gamma=15°$时，指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$ 变化较为复杂，但在 $-0.07\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.07\ \mathrm{m}$ 的中心区域内，指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$ 居中且变化幅度较小，可认为腿部在该区域内的运动学性能中等但一致性较好。$\gamma=60°$ 时，随着 $|x|$ 和 $|y|$ 的增大，指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$ 逐渐增大，在 $-0.07\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.07\ \mathrm{m}$ 的区域内，指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$ 更接近 1 且变化较缓，运动学性能较好。总体来看，在区域 $-0.07\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.07\ \mathrm{m}$ 内，全向运动仿生腿可以具有较好的运动学性能。同时，在区域 $-0.07\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.07\ \mathrm{m}$ 内，$\gamma=15°$ 时指标 $k(\boldsymbol{J}_{vF})$ 值整体上大于 $\gamma=60°$时，即 $\gamma=60°$时全向运动仿生腿可以具有更好的运动学性能，这与前述 γ 对腿部运动学性能影响的分析结果一致。

由图 10 可得，在 $-0.1\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.1\ \mathrm{m}$ 区域内，尽管指标 $\chi_e(\boldsymbol{J}_{fF})$ 的数值相对边缘区域较低，但变化情况较缓，力传递性能的一致性较好。根据图 11，在 $-0.1\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.1\ \mathrm{m}$ 的中心区域内，指标 $\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})$ 小于边缘区域，力传递的稳定性较强。综上，在 $-0.1\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.1\ \mathrm{m}$ 区域内，全向运动仿生腿的静力学性能更好，可以更好的满足全向运动仿生腿对力学的要求。同时，在 $-0.1\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.1\ \mathrm{m}$ 区域内，$\gamma=15°$时指标 $\chi_e(\boldsymbol{J}_{fF})$ 和 $\chi_s(\boldsymbol{J}_{fF})$ 整体上大于 $\gamma=60°$时，即 $\gamma=15°$时全向运动仿生腿具有更好的力传递性能，$\gamma=60°$时全向运动仿生腿具有更好的力传递稳定性，这与前述 γ 对腿部静力学性能影响的分析结果一致。

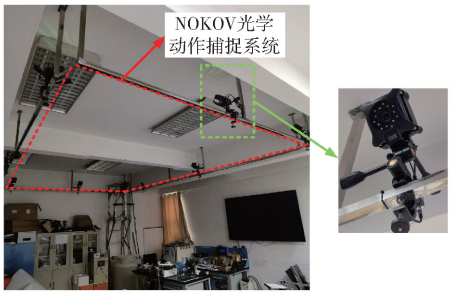
当工作空间为 $-0.07\ \mathrm{m}\leqslant(x、y)\leqslant0.07\ \mathrm{m}$，$5°\leqslant\gamma\leqslant85°$时，全向运动仿生腿具备更好的运动学和静力学性能。因全向运动仿生腿腿部机构的特殊性，γ 仅影响在 z 方向上的力传递能力，即承载能力，故可以按照不同的 γ 取值范围，将上述区域分为两个适用于不同运动形式的部分：①在 $5°\leqslant\gamma\leqslant30°$的范围内，机器人适合做低速中高负载运动。②在 $30°\leqslant\gamma\leqslant85°$的范围内，机器人适合做高速中低负载运动。

4　全向运动仿生腿原型样机试验

搭建如图 12a 所示的单腿测试平台，通过监测样机在有无负载情况下运动时的足端误差变化，来验证运动学和静力学性能。如图 12b 所示，腿部足端的运动状态通过北京度量科技有限公司生产的 NOKOV 光学动作捕捉系统进行监测。NOKOV 光学动作捕捉系统由 8 台 Mars2H 动作捕捉镜头组成，并悬挂在长 × 宽 × 高为 4.8 m × 3.6 m × 3 m 的钢制桁架之上，系统监测精度为 ±0.15 mm。



(a) 原型样机



(b) NOKOV光学动作捕捉系统

图 12 单腿样机及试验设备

Fig. 12 Prototype of OmniLeg and experimental equipment

试验共设置 6 组,单腿试验平台分别在无负载和负载 4 kg(单腿样机电机及机架质量和约为 4 kg)情况下沿 3 个不同的足端高度进行直线运动(如图 13 所示的 3 条红色直线)。

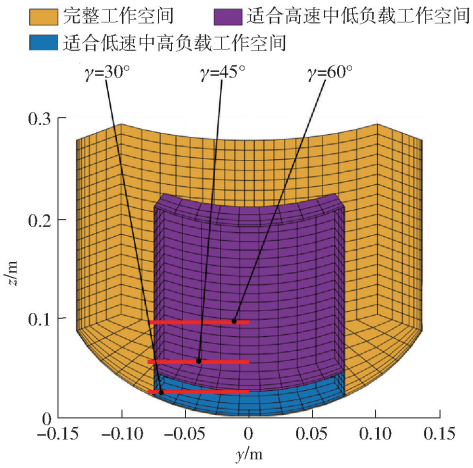


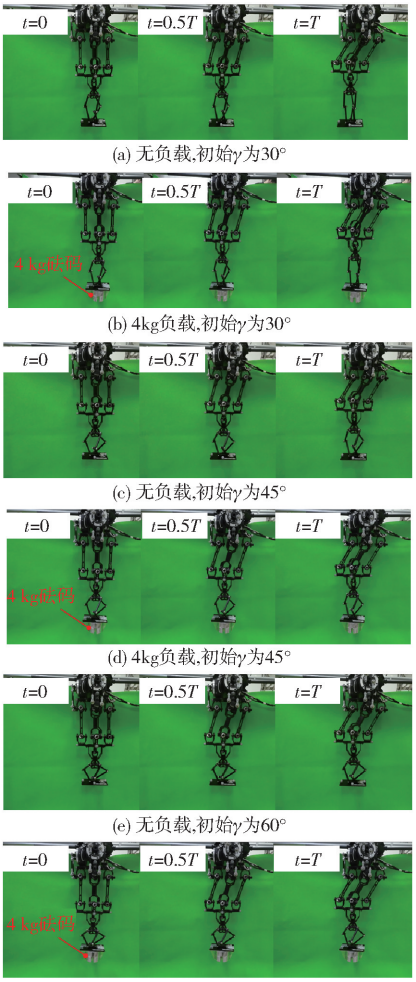
图 13 工作空间内试验足端轨迹

Fig. 13 Trajectory of endpoint in workspace

腿部在 3 个不同足端高度运动时初始 γ 分别为 30°、45°和 60°。足端运动轨迹为

$$\begin{cases} x = L_h\left(\dfrac{6t^5}{T^5} - \dfrac{15t^4}{T^4} + \dfrac{10t^3}{T^3}\right) \\ y = L\left(\dfrac{6t^5}{T^5} - \dfrac{15t^4}{T^4} + \dfrac{10t^3}{T^3}\right) \\ z = H\left(-\dfrac{64t^6}{T^6} + \dfrac{192t^5}{T^5} - \dfrac{192t^4}{T^4} + \dfrac{64t^3}{T^3}\right) \end{cases} \tag{28}$$

根据运动学逆解式(2)得到电机运动公式,从而控制电机转动实现腿部运动。设定运动参数:y 方向步长 L 为 0.08 m,步高 H 为 0 m,x 方向步长 L_h 为 0 m,迈步周期 T 为 2 s。试验过程见图 14。



(a) 无负载,初始γ为30°

(b) 4kg负载,初始γ为30°

(c) 无负载,初始γ为45°

(d) 4kg负载,初始γ为45°

(e) 无负载,初始γ为60°

(f) 4kg负载,初始γ为60°

图 14 运动学和静力学性能分析验证试验过程

Fig. 14 Kinematic and static performance analysis validation experiments

通过动作捕捉系统监测得到样机足端在 y 和 z 方向上运动误差,如图 15 所示。各组试验足端运动误差范围统计情况见表 5,可以看出,在无负载 3 组试验中,样机足端在 y 和 z 方向上运动误差较小。在负载 4 kg 3 组试验中,随着 γ 增加,样机足端在 y 和 z 方向上的运动误差范围越大,当 $\gamma = 30°$时,即足端轨迹规划在适合低速中高负载工作空间时,足端运动误差与无负载时差距较小。证明了全向运动仿生腿运动学和静力学性能分析中,按照不同 γ 划分适用于不同运动形式的工作空间(低速中高负载运动,高速中低负载运动)的科学性。从图 15 可以看出,在负载 4 kg 2 组试验中($\gamma = 45°$和 $\gamma = 60°$),当 ΔL(沿 y 方向运动步长 L 的变化量)小于 0.05 m 时,样机足端运动误差变化较小。当 ΔL 大于 0.05 m 后,样机足端的运动误差开始持续增加。证明了足端在工作空间中心区域时力速性能较好,在边缘区域时力速性能较差。由于样机加工装配误差等问题,试验所得的运动学和静力学性能较优区域

小于理论计算所得区域。

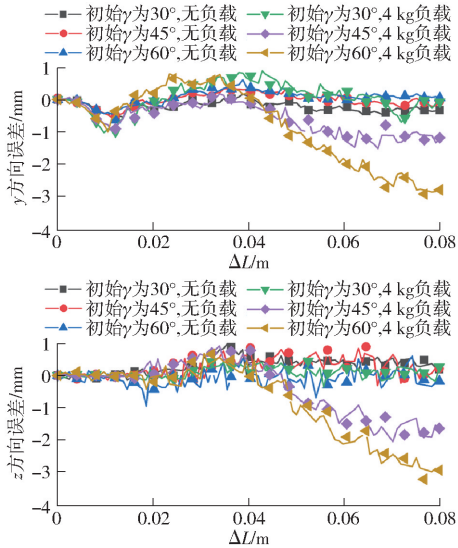


图 15　足端运动误差变化曲线

Fig. 15　Motion error of endpoint

5　结论

（1）阐述了一种驱动固定集中、足端无伴随转动特征且具有全向运动能力的三自由度腿部机构——全向运动仿生腿（OmniLeg）。并建立了三维模型及运动学模型。

表 5　各组试验足端运动误差范围

Tab. 5　Range of motion error of endpoint　mm

实验组	y 方向运动误差	z 方向运动误差
无负载，初始 γ 为 30°	−0.56 ~ 0.17	−0.19 ~ 0.99
无负载，初始 γ 为 45°	−0.55 ~ 0.34	−0.32 ~ 0.89
无负载，初始 γ 为 60°	−0.63 ~ 0.61	−0.96 ~ 0.61
4 kg 负载，初始 γ 为 30°	−1.03 ~ 0.90	−0.36 ~ 0.57
4 kg 负载，初始 γ 为 45°	−1.53 ~ 0.18	−2.07 ~ 0.92
4 kg 负载，初始 γ 为 60°	−2.95 ~ 0.82	−3.23 ~ 0.68

（2）分析了全向仿生腿各尺寸参数对极限步长、极限步高、运动学性能和静力学性能的影响规律，根据尺寸参数对全向运动仿生腿不同性能指标的影响程度和影响规律，及不同性能指标对全向运动仿生腿的运动性能的影响。

（3）提出一种以极限步长和极限步高为主要指标，以运动学性能和静力学性能为辅助指标的逐层分析的多目标尺寸参数优化方法，对全向运动仿生腿尺寸参数进行优化。该方法可以避免基于性能图谱的蒙特卡洛法可能出现的偏差，并降低了计算量。

（4）对全向运动仿生腿进行了运动学和静力学性能分析，认为在工作空间中心区域（$-0.07\ \mathrm{m} \leqslant (x, y) \leqslant 0.07\ \mathrm{m}$）运动时，全向运动仿生腿具有更好的性能。并通过负载试验验证了运动学和静力学性能。

参　考　文　献

[1] 张庆，潘烤鑫，王振宇，等. 复杂地形下仿生轮腿式机器人位姿控制研究[J]. 农业机械学报，2024，55(6)：380－391，403.
ZHANG Qing，PAN Kaoxin，WANG Zhenyu，et al. Pose control of biomimetic wheel-legged robots in complex terrain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(6)：380－391，403.（in Chinese）

[2] WANG L，WANG C，DU W，et al. Parameter optimization of a four-legged robot to improve motion trajectory accuracy using signal-to-noise ratio theory[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing，2018，51：85－96.

[3] 牛建业. 基于串并混联机构的四轮足步行机器人研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2018.
NIU Jianye. Reaearch on wheel-legged quadruped walking robot based on series-parallel mechainsm[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2018.（in Chinese）

[4] NAMAZIAN P，MASOULEH M T，ZAKERZADEH M R. SPAR-leg：serial-parallel anthropomorphic robotic leg[C]//2023 11th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics（ICRoM），2023：876－883.

[5] 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.
WANG Xiaolei，WANG Xuetao，SUN Dandan，et al. Optimization of structural parameters of leg mechanism for a new type of wheel legged quadruped robot[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine，2022，39(4)：547－553.（in Chinese）

[6] YANG Q J，ZHU R，NIU Z G，et al. Natural frequency analysis of hydraulic quadruped robot and structural optimization of the leg[J]. Journal of Dynamic Systems，Measurement，and Control，2020，142(1)：011009.

[7] DING H，SHI Z，HU Y，et al. Lightweight design optimization for legs of bipedal humanoid robot[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization，2021，64(4)：2749－2762.

[8] MA X，GAO J，QIU X，et al. Design of an impact-resistant elbow mechanism for wheel-legged robot crawling[C]//2023 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation（WRC SARA），2023：520－525.

[9] 王伟，刘丹丹. 双轮腿机器人腿部四连杆机构优化[J]. 盐城工学院学报(自然科学版)，2024，37(1)：26－30.
WANG Wei，LIU Dandan. Optimization of the four link mechanism of the legs of a double-wheeled legged robot[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition)，2024，37(1)：26－30.（in Chinese）

[10] 张国利，汪永明. 双闭链式步行腿机构的设计与分析[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版)，2021，38(3)：290－296.
ZHANG Guoli，WANG Yongming. Design and analysis of double closed chain walking leg mechanism[J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science)，2021，38(3)：290－296.（in Chinese）

[11] 王晓磊. 基于串并混联机械腿的四足机器人机构分析与设计[D]. 秦皇岛：燕山大学，2019.
WANG Xiaolei. Analysis and design of quadruped robot mechanism based on serial-parallel hybrid mechanical leg[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2019.（in Chinese）

[12] 荣誉. 基于并联机械腿的六足机器人分析与设计[D]. 秦皇岛：燕山大学，2015.
RONG Yu. Analysis and design for hexapod robots with parallel mechanical legs[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2015.（in Chinese）
[13] 曲梦可. 变胞变尺度轮腿混合四足机器人研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017.
QU Mengke. Research on wheeled and legged hybrid quadruped robot based on metamorphic and variable metric mehcanism[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2017.（in Chinese）
[14] WANG G，LIU K，MA X，et al. Optimal design and implementation of an amphibious bionic legged robot[J]. Ocean Engineering，2023，272：113823.
[15] 李研彪，刘毅，李景敏，等. 新型拟人机械腿的参数优化[J]. 中国机械工程，2013，24(9)：1239－1245.
LI Yanbiao，LIU Yi，LI Jingmin，et al. Parameter optimization for a novel mechanical leg[J]. China Mechanical Engineering，2013，24(9)：1239－1245.（in Chinese）
[16] DU X，LI Y，WANG P，et al. Design and optimization of solar tracker with U－PRU－PUS parallel mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory，2021，155：104107.
[17] XIA Z，ZHANG D，CHEN Y，et al. A novel 6 DOFs generalized parallel manipulator design and analysis based on humanoid leg[J]. Mechanism and Machine Theory，2022，176：105029.
[18] 杨洪涛，单翔飞，沈梅，等. 对称悬架混联轮腿机器人结构设计与参数优化[J]. 机械设计，2024，41(3)：65－74.
YANG Hongtao，SHAN Xiangfei，SHEN Mei，et al. Structural design and parameter optimization of symmetric suspension hybrid wheel-legged robot[J]. Journal of Machine Design，2024，41(3)：65－74.（in Chinese）
[19] 张金柱. 易防护机械腿六足机器人机构学研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2018.
ZHANG Jinzhu. Mechanism research of a hexapod robot with protectable mechanical legs[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2018.（in Chinese）
[20] IBRAYEV S，IBRAYEVA A，JAMALOV N，et al. Optimization of the walking robot parameters on the basis of isotropy criteria[J]. IEEE Access，2022，10：113969－113979.
[21] RUSSO M，HERRERO S，ALTUZARRA O，et al. Kinematic analysis and multi-objective optimization of a 3－UPR parallel mechanism for a robotic leg[J]. Mechanism and Machine Theory，2018，120：192－202.
[22] 张良安，唐锴，赵永杰，等. 四足激光除草机器人腿部结构参数优化[J]. 农业工程学报，2020，36(2)：7－15.
ZHANG Liang'an，TANG Kai，ZHAO Yongjie，et al. Optimization of leg structure parameter of quadruped laser weeding robot[J]. Transactions of the CSAE，2020，36(2)：7－15.（in Chinese）
[23] 王才东，崔光珍，王新杰，等. 3－2H2S 并联机器人运动学和动力学性能分析[J]. 机床与液压，2020，48(18)：163－171.
WANG Caidong，CUI Guangzhen，WANG Xinjie，et al. Kinematics and dynamic performance analysis of a 3－2H2S parallel robot[J]. Machine Tool & Hydraulics，2020，48(18)：163－171.（in Chinese）
[24] 王晓磊，金振林，李晓丹. 串并混联仿生机械腿静力学性能分析[J]. 农业机械学报，2019，50(1)：383－389.
WANG Xiaolei，JIN Zhenlin，LI Xiaodan. Analysis of static performance of serial-parallel hybrid bionic mechanical leg[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(1)：383－389.（in Chinese）
[25] 胡旺宁. 两种构型码垛机器人运动学与静力学对比分析[J]. 机械设计与制造工程，2022，51(2)：47－51.
HU Wangning. Comparative analyses in kinematics and statics of two configurations of palletizing robots[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering，2022，51(2)：47－51.（in Chinese）
[26] 伞红军，杨晓园，陈久朋，等. Delta 并联机器人运动学性能分析与结构参数优化[J]. 农业机械学报，2024，55(8)：446－458.
SAN Hongjun，YANG Xiaoyuan，CHEN Jiupeng，et al. Kinematic performance analysis and structural parameter optimization of Delta parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(8)：446－458.（in Chinese）
[27] 李永泉，蔡俊，李玉昆，等. 运动分岔并联机构运动学性能分析[J]. 农业机械学报，2023，54(4)：447－458.
LI Yongquan，CAI Jun，LI Yukun，et al. Kinematics performance analysis of bifurcation parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(4)：447－458.（in Chinese）
[28] GB 50352—2019 民用建筑设计统一标准[S]. 2019.
[29] 王晓磊，金振林，李晓丹，等. 三自由度并联仿生机械腿尺度分析与优化[J]. 机械传动，2018，42(11)：62－66.
WANG Xiaolei，JIN Zhenlin，LI Xiaodan，et al. Dimensional analysis and optimization of 3－DOF parallel bionic mechanical leg[J]. Journal of Mechanical Transmission，2018，42(11)：62－66.（in Chinese）
[30] 南文虎，宋宝，唐小琦. 基于最大工作空间的 DELTA 机器人尺寸综合与优化[J]. 组合机床与自动化加工技术，2014(7)：38－41.
NAN Wenhu，SONG Bao，TANG Xiaoqi. Optimization and dimension synthesis of the DELTA robot based on the maximum size of working space[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique，2014(7)：38－41.（in Chinese）
[31] GOSSELIN C，ANGELES J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators[J]. Journal of Mechanical Design，1991，113(3)：220－226.
[32] HUANG T，GOSSELIN C M，WHITEHOUSE D J，et al. Analytical approach for optimal design of a type of spherical parallel manipulator using dexterous performance indices[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part C：Journal of Mechanical Engineering Science，2003，217(4)：447－455.