

五连杆足式机器人腿部机构多目标优化算法

章永年 王美思 吴阳 卢伟 康敏 汪小昆

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 为了减小腿部转动惯量,提高承载能力,提出了一种电驱式2自由度平面五杆机构的腿部结构。然而杆件尺寸会对机器人性能产生影响,为了得到最优五杆尺寸参数,对腿部运动学和动力学进行分析,建立关节电机峰值扭矩、峰值角速度、单个步态周期内总能耗与五杆尺寸参数间的函数关系,构建面向机器人五杆尺寸参数设计的多目标优化模型,采用层次分析法确定各目标决策属性权重,将多目标优化问题转换为单目标优化问题,利用遗传算法得到机器人总体性能最优解。在ADAMS中建立优化前后的机器人腿部模型,进行行走仿真试验,并与理论计算结果进行对比,再根据优化结果进行电机选型,使机器人自重减少7.8%,有利于负载能力和续航能力的提高,从而验证了本文所提算法的正确性和有效性。

关键词: 五杆机构; 机器人腿部; 多目标优化; 电驱

中图分类号: TP237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0398-07

Multi-objective Optimization Algorithm of Robot Leg Based on Planar Five-bar Mechanism

Zhang Yongnian Wang Meisi Wu Yang Lu Wei Kang Min Wang Xiaochan

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: In view of the shortcomings of cable-driven and chain transmission mechanism with motor rotation direction changing frequently and large load, a novel electric-drive robot leg based on planar five-bar mechanism with dual freedoms was proposed to reduce the inertia of robot leg and enhance load capacity. Considering the close relationship between the dynamic performance of robot and the dimension parameters of planar five-bar mechanism, the kinematic and dynamic analyses of this mechanism was made, and the functional relationship between peak torque, peak angular velocity of joint motors, energy consumption in a gait period and dimension parameters were setup to get the optimal dimension parameters. In this way, a multi-objective optimization model of the dimension parameters was got. By determining the weight of the objectives based on analytic hierarchy process (AHP) method, the multi-objective optimization problem was transformed into single objective optimization problem. Then the genetic algorithm was applied to obtain the optimal solution. Finally, the virtual prototypes of robot leg before and after optimization were built via ADAMS to conduct the walking simulation test, and the comparison between simulation results and computation results was made. The motors were selected subsequently according to the optimization results, which made the robot weight decreased by 7.8%, which was beneficial to the improvement of load capacity and battery life. These results verified the correctness and validity of the proposed algorithm which can also be applicable to the selection of brushless DC motor.

Key words: five-bar mechanism; robot leg; multi-objective optimization; electric-drive

收稿日期: 2016-03-23 修回日期: 2016-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405239)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20130696)、南京农业大学青年科技创新基金项目(KJ2013042)和南京农业大学人才启动基金项目(Rcqd13-08)

作者简介: 章永年(1984—),男,讲师,博士,主要从事仿生机器人技术研究,E-mail: hczy@njau.edu.cn

通信作者: 汪小昆(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境模拟与控制 and 检测技术研究,E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn

引言

腿部机构作为四足机器人的关键部件,其自由度、布局形式、自重、工作空间等都对稳定性和步态产生较大影响^[1]。目前国际上具有代表性的四足机器人腿部驱动方式可以分为液压驱动方式和电机驱动方式。液压驱动的腿部机构采用多自由度串联式结构,其设计较为简单^[2-4],这类机器人具有较好的负重行走能力,但存在能源利用效率低下、噪音大、续航能力不足、运动速度较低等问题^[4]。鉴于电机驱动具有控制简单、控制精度高、工作噪声小等优点,越来越多的小型四足机器人采用与腿部各关节相连的电机驱动方式^[5],这类机器人腿部转动惯量大,在运动时需要髌关节电机输出较大的扭矩,不利于实现高速大负载运动。另外一种机器人将所有驱动电机布置在机身上^[6],髌关节电机直接带动大腿运动,膝关节电机采用传动装置将动力传递给小腿,这样可以有效降低腿部转动惯量。斯坦福大学的 KOLT 机器人^[7]和瑞士联邦理工学院的 Cheetah 机器人^[8]的膝关节均采用绳索驱动方式;瑞士联邦科技大学的 StarlETH 机器人^[9]采用链传动方式驱动小腿运动。考虑到绳传动、链传动在大负载、频繁换向时存在的不足,美国 MIT 仿生机器人实验室在研发高速奔跑的猎豹机器人^[10]时采用了连杆传动,其膝关节与髌关节电机均采用无框无刷直流力矩电机,其中膝关节电机的定子与髌关节电机的动子固定安装在一起,再通过四杆机构驱动小腿运动。这种设计结构紧凑,但是需要专门的机械结构固定两电机,并且对电机的尺寸要求苛刻,整个制造加工成本也比较昂贵。

本文提出一种 2 自由度五连杆的四足机器人腿部机构,在充分分析五杆机构运动学和动力学特性的基础上,综合考虑四足机器人的峰值力矩、峰值角速度、总能耗和五杆杆长之间的耦合关系,通过层次分析法确定各决策属性权重,将多目标优化问题转换为单目标优化问题,利用遗传算法模拟生物进化过程,以种群方式进行优化设计。

1 腿部结构设计

为了减小腿部转动惯量,提高机器人动态特性^[11],一方面需要选用轻质材料并在设计时考虑减重问题,另一方面,应尽量将驱动电机布置在机器人机身上。为此本文采用如图 1 所示的平面五杆机构来实现机器人腿部 2 自由度运动。其中 A、E 处固定在机器人机身上,分别固连髌关节和膝关节电机,ABCDE 构成平面五杆机构,AB、CF、IG 分别为机器

人大腿、小腿及足部,小腿采用缩放式结构 BFIH 以增加腿部刚度。

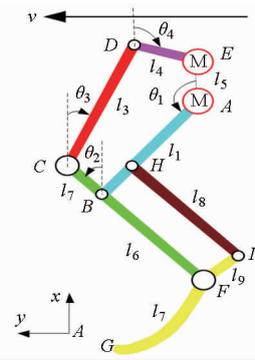


图 1 机器人腿部模型

Fig. 1 Designed model of robot leg

2 运动学及动力学分析

为了实现四足机器人的移动控制,必须得到机器人的运动学方程^[12]。对于图 1 所示的机器人腿部模型,建立图示坐标系,其中 x 轴通过机架,坐标原点位于髌关节电机的转动中心 A 处。

考虑杆 1、2、6、7、8、9 构成的连杆机构,建立 D-H 坐标系可以求出髌关节角度 θ_1 、膝关节角度 θ_2 与足端轨迹 G 的运动学反解公式

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_G - \arccos \frac{L_G^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_G} \\ \theta_2 = \theta_G - \arccos \frac{L_G^2 + L_2^2 - L_1^2}{2L_2L_G} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $L_1 = l_1 + l_7$ $L_2 = l_6$

$$\theta_G = \arctan(x_G, y_G) \quad L_G = \sqrt{x_G^2 + y_G^2}$$

列写 2 自由度五杆机构 ABCDE 封闭矢量方程,并在 x 、 y 两个方向进行投影可得

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 + l_4 \cos \theta_4 - l_5 = 0 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 + l_4 \sin \theta_4 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

联立式(1)、(2),消去 θ_3 ,即可得到髌关节、膝关节电机的转动角 θ_1 、 θ_4 。

取广义关节变量 $\mathbf{q} = (\theta_1, \theta_4)$,利用拉格朗日方程可以得到相应的广义驱动力 \mathbf{F}

$$F_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

式中 E_k ——系统总动能

E_p ——系统总势能

q_i ——广义坐标

记机器人足端矢量为 \mathbf{P}_C ,重力加速度矢量为 \mathbf{g} ,各连杆质心矢量为 \mathbf{P}_i ,质量为 m_i ,质心速度矢量为 \mathbf{v}_i ,角速度矢量为 $\boldsymbol{\omega}_i$,惯性张量为 \mathbf{I}_i 。则整个系统总动能是各个连杆动能之和,将腿部各杆件进行均质化处理,计算质心坐标,求导后即可得到

$$E_k = 0.5 \sum_{i=1}^n (m_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i + \boldsymbol{\omega}_i^T \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i) \quad (4)$$

机器人行走时应该尽量满足行走平稳、关节冲击小、跨步迅速、轨迹圆滑等要求,因此足端轨迹选用北京理工大学提出的一种零冲击足端轨迹^[13],步态采用速度快、稳定性好的对角步态。对角步态中,机器人同时有两只腿着地,记单腿所受地面的支持力为 N ,机器人质量为 M ,地面支持力 N 近似认为支撑相时大小固定不变,即 $N = -\eta Mg$ ($\eta = 0.5 \sim 2$),腾空相为 0,可以将其等效为重力势能考虑,则系统总势能可表示为

$$E_p = \sum_{i=1}^n (-m_i g \mathbf{P}_i - NP_C) \quad (5)$$

联立式(3)~(5)即可得到对应的关节力矩

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ ——机器人腿部的惯性矩阵

$\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ——离心力科氏力矢量

$\mathbf{G}(\mathbf{q})$ ——重力矢量

记机器人步态周期为 T ,机器人单腿在一个步态周期内的总能耗可表示为

$$E = \int_0^T \boldsymbol{\tau} \dot{\mathbf{q}} dt \quad (7)$$

3 多目标优化模型建立及分析

与单目标优化问题一样,多目标优化问题包括目标函数、决策变量和约束条件^[14],其一般结构为

$$\begin{cases} \min f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) & (m = 1, 2, \dots, M) \\ \text{s. t. } g_k(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 & (k = 1, 2, \dots, K) \\ h_l(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 & (l = 1, 2, \dots, L) \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U & (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{X} \subset \mathbf{R}^n$ 为决策空间, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbf{X}$, x_i^L, x_i^U 为变量 x_i 上下界。同时该多目标问题的可行域集合 $\boldsymbol{\Omega} = \{\mathbf{x} | g_k(\mathbf{x}) \geq 0, h_l(\mathbf{x}) = 0, x_i^L \leq x_i \leq x_i^U\}$, 显然可行域 $\boldsymbol{\Omega} \subseteq \mathbf{X}$ 。

3.1 设计变量

对于图 1 所示的机器人三段式腿部结构,有研究表明人及大型的四足动物腿部结构中大腿、小腿、足部的腿节比例为 0.39:0.45:0.16^[15],小型哺乳类动物常见的腿节比例为 0.33:0.33:0.33^[16],这样的构形配置可以为它们带来较大的工作空间及较好的加速性能。因此本文也采用这样的腿节比例,即 $l_1 = l_6 = l_8 = l_7 + l_9$,据此可以确定杆 l_1, l_6, l_7, l_8, l_9 。参考市面上常见伺服电机尺寸,确定两电机间的安装距离 l_5 。因此,该机器人腿部结构参数设计的多目标问题的设计量为 $\mathbf{x} = (l_2, l_3, l_4)$ 。

3.2 约束条件

(1) 边界约束

边界约束需要保证在常规的机器人设计和最终性能要求之下,能够满足机器人的各机构参数的范围,同时估计最优解可能出现的范围,根据参考的尺寸进行边界约束,建立边界约束条件为

$$l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max} \quad (i = 2, 3, 4) \quad (9)$$

(2) 几何约束

五杆机构能够自由运动的前提是满足装配条件。由三角形边长定理可得

$$|l_2 - l_3| \leq l_{BD} \leq l_2 + l_3 \quad (10)$$

其中 $l_{BD}^2 = l_1^2 + l_4^2 + l_5^2 + 2l_4l_5 \cos\theta_4 - 2l_1l_5 \cos\theta_1 - 2l_1l_4 \cos(\theta_1 - \theta_4)$

(3) 动力学约束

在五杆机构的运动过程中为了保证机构的传力性能良好,应保证最小传动角 γ_{\min} 大于许用传动角 $[\gamma]$,即

$$\gamma_{\min} \geq [\gamma] \quad (11)$$

3.3 目标函数

(1) 力矩性能

伺服电机的力矩性能^[17]是限制四足机器人运动的一项重要因素。在关节电机选型时,需要保证电机峰值扭矩大于负载峰值扭矩,因此在相同的条件下降低负载峰值扭矩能选质量更小的电机,从而利于机器人行走性能、负载能力和续航性能的提高。于是机器人关节电机力矩性能子目标函数为

$$\begin{cases} \min f_1(\mathbf{x}) = \min \tau_{1\max} \\ \min f_2(\mathbf{x}) = \min \tau_{4\max} \end{cases} \quad (12)$$

(2) 速度性能

髋、膝关节的关节最大速度也是电机选型的重要依据。一般伺服电机无法做到高转速高力矩的能量输出,所以必须平衡力矩与转速之间的关系,应使电机的角速度在一个步态周期内尽可能小,这样既可以降低对电机的性能要求,又可以避免因角速度过大,而造成电机伺服系统无法及时作出反应使控制失真的情况。于是机器人关节电机速度性能^[18]子目标函数为

$$\begin{cases} \min f_3(\mathbf{x}) = \min \dot{\theta}_{1\max} \\ \min f_4(\mathbf{x}) = \min \dot{\theta}_{4\max} \end{cases} \quad (13)$$

(3) 续航性能

四足机器人在动态行走过程中,其消耗的能量主要为驱动各关节转动所需的能量。机器人能量的消耗直接决定了机器人的续航能力。

因此,为了提高续航能力^[19],一方面要考虑一

个步态周期内关节电机的总能耗,另一方面要考虑机器人的轻质要求,使五杆总长最小,这样既可以减轻腿部质量,降低运动能耗,又可以减少机构空间,便于布局,所以建立机器人续航能力目标函数

$$\begin{cases} \min f_5(\mathbf{x}) = \min E \\ \min f_6(\mathbf{x}) = \min(l_2 + l_3 + l_4) \end{cases} \quad (14)$$

基于上述的约束条件和子目标函数的分析,建立 2 自由度五连杆式机器人腿部的多目标优化模型

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{x}) = \min[f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}), \\ f_4(\mathbf{x}), f_5(\mathbf{x}), f_6(\mathbf{x})] \\ \mathbf{x} = (l_2, l_3, l_4) \end{cases} \quad (15)$$

4 基于层次分析法的遗传算法

在多目标优化设计中,机器人五杆机构的尺寸参数对各性能子目标函数存在着耦合关系,单一改变某一参数会导致不同的子目标性能函数向着不同的方向改变,为了衡量两方案,这里采用层次分析法求取每个性能指数的相对权重系数^[20]从而将各指数综合为一个评价标准。

4.1 归一化处理

首先对各个独立的分目标函数求最大值和最小值,再将实际的目标函数转换为 0~1 之间的一个无量纲数。即

$$f_i^*(\mathbf{x}) = \frac{f_i(\mathbf{x}) - \min f_i(\mathbf{x})}{\max f_i(\mathbf{x}) - \min f_i(\mathbf{x})} \quad (16)$$

4.2 权重计算

为了将不同的性能因素在目标衡量中的相对重要程度量化,引用数字 1~9 及其倒数按照标度定义表对两两性能进行重要性的比对示值^[21],本文中设定髋关节电机力矩性能重要性,等于膝关节电机力矩性能重要性,等于髋关节电机速度性能重要性,等于膝关节电机力矩性能重要性,大于电机总能耗重要性,等于杆长轻质化重要性,进而可以建立以下判断矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

再采用算术平均法进行权重计算,记 W_i 为几种性能指标的权比,即

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij}}{\sum_{k=1}^n R_{kj}} \quad (18)$$

将式(17)代入式(18)中,计算得到四足机器人

的 $f_1(\mathbf{x}) \sim f_6(\mathbf{x})$ 权重依次为 0.187 5、0.187 5、0.187 5、0.187 5、0.125、0.125。这样统一的目标函数为

$$\min F^*(\mathbf{x}) = \min \sum_{i=1}^n W_i f_i^*(\mathbf{x}) \quad (19)$$

4.3 遗传算法

待优化单目标函数式是一个非线性优化问题,运用标准优化算法很难解决,本文采用遗传算法来求解。遗传算法^[22]是依照自然界生物之间相互选择,交叉繁衍,不断变异,逐步进化的过程,利用初始种群,每次迭代,随机产生一个群体,使其接近最优解。

4.4 优化结果与分析

此前,课题组采用常规的理想点法,对机器人腿部进行了初步的优化设计,得到了一组五杆机构尺寸参数,并加工出物理样机,如图 2 所示,其具体的尺寸为: $l_1 = l_6 = l_8 = 80$ mm, $l_5 = 40$ mm, $l_7 = 65$ mm, $l_9 = 15$ mm, $l_2 = 29$ mm, $l_3 = 124$ mm, $l_4 = 43.5$ mm。

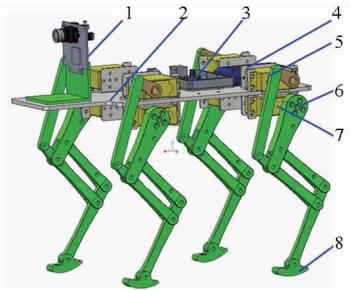


图 2 机器人样机模型

Fig. 2 Robot prototype

1. 视觉模块 2. 机身 3. 控制板 4. 电源 5. 膝关节舵机
6. 腿 7. 髋关节舵机 8. 足

该机器人由视觉模块、控制板、机械本体等构成。控制板采用 Arduino 2560 主控板,它具有 SPI 通讯功能,可以与视觉传感器、红外遥控器进行实时通信,拥有 12 路 PWM 输出,可以实时对本系统的 8 路舵机进行位置控制。机械本体部分由基座和 4 条相同结构的腿部构成。各模块质量如表 1 所示。

表 1 机器人各模块质量

Tab. 1 Quality of each robot module

模块	质量/g
Arduino 2560 控制板	37
视觉模块	70
舵机 8 个	$8 \times 72 = 576$
机器人腿部 4 个	$4 \times 61 = 244$
基座	135
移动电源 1 个	90
其他(支架、连接件等)	80
合计	1 232

考虑后期机器人工作负载为 1 kg,令机器人质量 $M = 1.23 + 1 = 2.23$ kg, $\eta = 0.7$, 设置 $l_{2\min} = 10$ mm, $l_{2\max} = 50$ mm, $l_{3\min} = 80$ mm, $l_{3\max} = 140$ mm, $l_{4\min} = 10$ mm, $l_{4\max} = 60$ mm, 初始化种群数量为 400, 一般遗传算法正常迭代数在 100 ~ 200 左右, 为了追求计算的精确, 这里设置迭代次数 1 000, 为了避免早收敛的问题, 对初始种群的生成分别采用随机分布和高斯分布进行多次试验, 设置交叉概率 0.8, 变异概率 0.5, 以保证种群多样性, 设置交叉分布系数、变异分布系数均为 20。其优化收敛过程如图 3 所示。

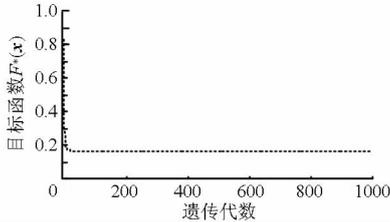


图 3 最优解收敛过程

Fig. 3 Convergence process of optimal solution

最理想的最优解是满足式的值为零时的情况, 然而对于实际问题, 不同的子目标性能函数基本不可能同时达到最优状态。从图 3 可以看出, $F^*(x)$ 在开始迭代的 100 代内收敛迅速, 迅速降低到 0.17 附近, 200 代以后 $F^*(x)$ 基本稳定在 0.169 4 左右, 基本接近于零。该最优解对应的设计变量为 $l_2 = 31.784$ mm, $l_3 = 95.978$ mm, $l_4 = 38.856$ mm。考虑实际加工时方便, 将杆长分别进行圆整各得到 3 组数据, 如表 2 所示。

表 2 最优解圆整数据

Tab. 2 Fixed data of optimal solution mm

杆长	I	II	III
杆 2 杆长 l_2	31.0	31.5	32.0
杆 3 杆长 l_3	95.5	96.0	96.5
杆 4 杆长 l_4	38.5	39.0	39.5

对上述圆整后数据的 27 种组合逐一计算, 分别求取相应的 $F^*(x)$ 值, 取其中 $F^*(x)$ 最小的一组作为最优解, 即 $l_2 = 31.5$ mm, $l_3 = 95.5$ mm, $l_4 = 39$ mm。

4.5 仿真实验

为了验证所提算法的有效性, 在 ADAMS 中分别建立优化前后两组不同尺寸的单腿模型, 施加相同的运动约束如图 4 所示。

对 2 种不同尺寸的机器人腿部依次进行仿真, 设置仿真步数为 500, 时间为一个步态周期 0.25 s, 测量机器人行走中的髌、膝关节力矩、速度及瞬时能耗并与理论计算得到的结果进行对比, 分别如图 5、图 6 所示。

从图 5、图 6 可以看到, 0 ~ 0.125 s 时机器人处

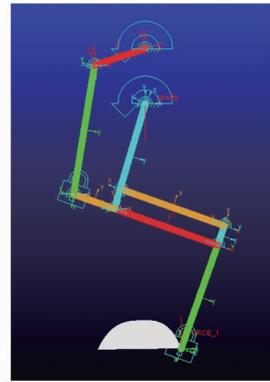


图 4 机器人单腿仿真模型

Fig. 4 Virtual prototype of robot leg

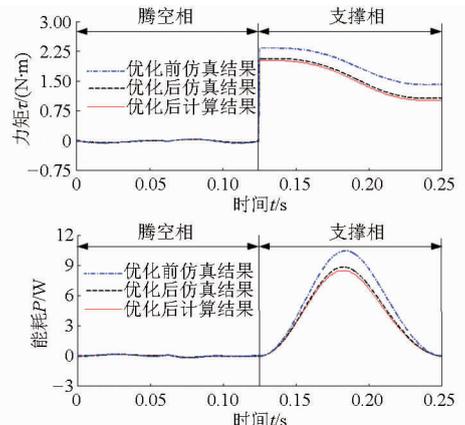


图 5 髌关节电机力矩及瞬时能耗对比

Fig. 5 Comparisons of torque and energy consumption of elbow motor

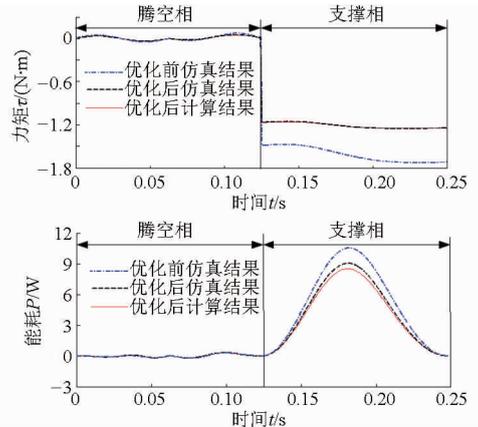


图 6 膝关节电机力矩及瞬时能耗对比

Fig. 6 Comparisons of torque and energy consumption of knee motor

于腾空相, 此时两关节电机扭矩、能耗较小, 基本为 0; 而 0.125 ~ 0.25 s 支撑相时电机扭矩、能耗急剧增加。从图中优化后的计算结果与仿真结果对比可以看出, 两组数据变化趋势一致, 在腾空相时数据曲线基本重合, 在支撑相时扭矩、能耗的计算结果略小于仿真结果, 且两者差值基本为某一固定值。主要原因可能是理论计算时没有考虑关节铰链副之间的摩擦力影响。由于误差基本恒定, 因此该误差对机器

人腿部的优化结果没有影响。

从图 5 和图 6 优化前后的仿真结果可以看出优化后的力矩、能耗均比优化前小,性能对比如表 3 所示。

表 3 优化前后性能对比

Tab. 3 Performance comparison before and after optimization

性能	优化前	优化后
髋关节峰值力矩 $\tau_{1\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$	2.335 2	2.070 0
膝关节峰值力矩 $\tau_{4\max}/(\text{N}\cdot\text{m})$	1.715 2	1.242 9
单个步态周期内总能耗 E/J	1.182 0	1.025 7
膝关节峰值角速度 $\dot{\theta}_{4\max}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	8.873 2	10.957 4
杆件总长 $l_2 + l_3 + l_4/\text{mm}$	196.5	166.0

从表 3 中可看出,使用优化后的五杆尺寸,膝关节电机的峰值角速度从 8.873 2 rad/s(转速 84 r/min)上升到 10.957 4 rad/s(转速 104 r/min),升高 23.49%,峰值力矩从 1.715 2 N·m 降低到 1.242 9 N·m,降幅达到 27.54%。而髋关节电机的角速度由足端轨迹确定,在优化前后并未发生变化,均为 6.013 0 rad/s(转速 57 r/min),峰值力矩从 2.335 2 N·m 降低到 2.07 N·m,降低了 11.36%;一个步态周期内电机的总能耗从 1.182 0 J 下降到 1.025 7 J,相比较降低了 13.22%;五杆杆长总和从 196.5 mm 减少到 166 mm,减少了 15.52%;单腿质量从 61 g(采用 ABS 材料)减小到 57 g,减小了 4.9%,减幅小于杆长的减幅,这是由于优化前后机器人的大腿、小腿尺寸并未发生变化。

据此得到的峰值力矩、峰值角速度进行电机选型,为了减小机器人质量,提高续航能力,在优化前后均选用了 JX SERVO 公司生产的能质比较高的舵机。其具体型号如表 4 所示。

表 4 优化前后舵机选型

Tab. 4 Motor selection before and after optimization

电机参数	优化前	优化后	优化前	优化后
	髋关节	髋关节	膝关节	膝关节
型号	PDI-HV 7232MG	BLS-HV 6122MG	PDI-HV 7232MG	PDI-HV 5915MG
峰值转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	111	91	111	105
峰值扭矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$	3.087	2.162	3.087	1.551
质量 m/g	72	61	72	59

从表 4 中可以看出,进行优化后电机总质量从原来的 $8 \times 72 = 576 \text{ g}$ 减小到 $4 \times 61 + 4 \times 59 = 480 \text{ g}$,再加上腿部也减小了 $4 \times (61 - 57) = 16 \text{ g}$,这样机器人一共减质 96 g,减幅达到 7.8%。这样一方面可以增加负载质量,另一方面在相同的负载情况下可以增加续航时间。

采用本文的优化腿部尺寸及优化后的电机构建机器人样机,设置步距 100 mm,步高 40 mm,负载 1 kg,采用零冲击足端轨迹进行 trot 步态行走试验,其中单个步态周期内间隔 0.02 s 的机器人行走过程如图 7 所示,从图中可以看出,试验样机在行走过程足端轨迹较为平滑,步态连续平稳,躯体波动起伏较小,运动平稳。

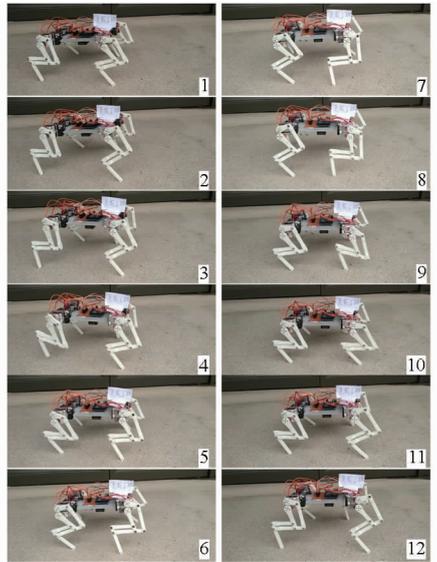


图 7 机器人样机负载行走试验

Fig. 7 Walking experiment of robot bearing weight

采用 7.4 V、2 200 mA·h 的锂电池作为机载电源,在相同的路面情况对优化前后的机器人续航能力进行对比测试,优化前机器人能稳定行走 27.1 min,优化后机器人能稳定行走 30.3 min,续航能力提高 11.8%,但实测续航结果比理论计算略低,这是由于该电源除了给舵机供电外,还需要给控制板供电,另外支撑相的受力情况也与仿真假设的略有不同。

尽管目前机器人采用的是轻质、低成本的舵机控制,但本文所提算法依然适用于无刷直流大力矩电机直驱的情况,这也是后期课题组进一步的努力方向。

5 结论

(1) 针对电驱机器人提出了一种 2 自由度五连杆的腿部机构,具有结构简单、加工方便、运动惯性小、承载能力强的优点。

(2) 建立了机器人负载峰值力矩、峰值角速度、单个步态周期内的总能耗以及设计总杆长与五杆尺寸参数之间的多目标优化模型,采用层次分析法确定目标属性权重,利用遗传算法获取最优解。

(3) 优化后关节电机峰值力矩、能耗、杆长均有所降低,进行电机选型后,机器人自重降低 7.8%,提高了机器人的续航能力和负载能力。

参 考 文 献

- 1 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.
LIU Jing, ZHAO Xiaoguang, TAN Min. Legged robot: a review[J]. Robot, 2006, 28(1): 81-88. (in Chinese)
- 2 RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot[C]//Proceedings of the 17th World Congress, IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- 3 SEMINI C, TSAGARAKIS N G, VANDERBORGHT B, et al. HyQ-hydraulically actuated quadruped robot: hopping leg prototype [C]//2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2008: 593-599.
- 4 柴汇,孟健,荣学文,等. 高性能液压驱动四足机器人 SCalf 的设计与实现[J]. 机器人, 2014, 36(4): 385-391.
CHAI Hui, MENG Jian, RONG Xuwen, et al. Design and implementation of SCalf, an advanced hydraulic quadruped robot[J]. Robot, 2014, 36(4): 385-391. (in Chinese)
- 5 ESTREMER J, WALDRON K J. Thrust control, stabilization and energetics of a quadruped running robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2008, 27(10): 1135-1151.
- 6 盛沙,王建中,潘少鹏,等. 十二自由度四足机器人的腿机构设计与步行实验[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(3): 344-347.
SHENG Sha, WANG Jianzhong, PAN Shaopeng, et al. The design and walking experiment for leg mechanism of a quadrupedal robot with 12 degrees of freedom[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(3): 344-347. (in Chinese)
- 7 董礼港,陈伟海,张建斌,等. 一种混合式绳驱动机器人的运动学分析与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(17): 4007-4011.
DONG Ligang, CHEN Weihai, ZHANG Jianbin, et al. Kinematic analysis and simulation for hybrid type cable-driven manipulator [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(17): 4007-4011. (in Chinese)
- 8 SPROWITZ A, TULEU A, VESPIGNANI M, et al. Towards dynamic trot gait locomotion: design, control, and experiments with cheetah-cub, a compliant quadruped robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(8): 932-950.
- 9 HUTTER M, GEHRING C, BLOESCH M, et al. StarLETH: a compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion [C]//15th International Conference on Climbing and Walking Robot-CLAWAR 2012, 2012.
- 10 SEOK S, WANG A, CHUAH M Y, et al. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT cheetah robot[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013: 3307-3312.
- 11 李满天,蒋振宇,郭伟,等. 四足仿生机器人单腿系统[J]. 机器人, 2014, 36(1): 21-28.
LI Mantian, JIANG Zhenyu, GUO Wei, et al. Leg prototype of a bio-inspired quadruped robot[J]. Robot, 2014, 36(1): 21-28. (in Chinese)
- 12 孟健,李贻斌,李彬. 四足机器人对角小跑步态全方位移动控制方法及其实现[J]. 机器人, 2015, 37(1): 74-84.
MENG Jian, LI Yibin, LI Bin. Control method and its implementation of quadruped robot in omni-directional trotting gait[J]. Robot, 2015, 37(1): 74-84. (in Chinese)
- 13 王立鹏,王军政,汪首坤,等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 39-44.
WANG Lipeng, WANG Junzheng, WANG Shoukun, et al. Strategy of foot trajectory generation for hydraulic quadruped robots gait planning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 39-44. (in Chinese)
- 14 李楠,王明辉,马书根,等. 基于多目标遗传算法的水陆两栖可变形机器人结构参数设计方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 10-20.
LI Nan, WANG Minghui, MA Shugen, et al. Mechanism-parameters design method of an amphibious transformable robot based on multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 10-20. (in Chinese)
- 15 BLICKHAN R, SEYFARTH A, GEYER H, et al. Intelligence by mechanics[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365(1850): 199-220.
- 16 FISCHER M S, BLICKHAN R. The tri-segmented limbs of therian mammals: kinematics, dynamics, and self-stabilization—a review[J]. Journal of Experimental Zoology Part A: Comparative Experimental Biology, 2006, 305(11): 935-952.
- 17 鲁文其,胡育文,梁骄雁,等. 永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 75-81.
LU Wenqi, HU Yuwen, LIANG Jiaoyan, et al. Anti-disturbance adaptive control for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 75-81. (in Chinese)
- 18 郭希娟,耿清甲. 串联机器人加速度性能指标分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 56-60.
GUO Xijuan, GENG Qingjia. Analysis for acceleration performance indices of serial robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 56-60. (in Chinese)
- 19 田苗,王鹏新,张树誉,等. 基于条件植被温度指数的冬小麦产量预测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 239-245.
TIAN Miao, WANG Pengxin, ZHANG Shuyu, et al. Winter wheat yield forecasting based on vegetation temperature condition index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 239-245. (in Chinese)
- 20 田润,宋轶民,孙涛,等. 一种新型轮腿式移动机器人的参数设计与实验研究[J]. 机器人, 2015, 37(5): 537-545.
TIAN Run, SONG Yimin, SUN Tao, et al. Parameter design and experiment of a novel wheel-legged mobile robot[J]. Robot, 2015, 37(5): 537-545. (in Chinese)
- 21 袁尚南,强茂山,温祺,等. 基于模糊层次分析法的建设项目组织效能评价模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2015, 55(6): 616-623.
YUAN Shangnan, QIANG Maoshan, WEN Qi, et al. Organizational effectiveness evaluation model for construction projects based on fuzzy-analytic hierarchy processes[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2015, 55(6): 616-623. (in Chinese)
- 22 孟庆宽,张漫,仇瑞承,等. 基于改进遗传算法的农机具视觉导航线检测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 39-46.
MENG Qingkuan, ZHANG Man, QIU Ruicheng, et al. Navigation line detection for farm machinery based on improved genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 39-46. (in Chinese)