

二自由度七连杆机器人腿部机构优化设计

Optimum design of two degree freedom seven-bar robot leg mechanism

罗中华

LUO Zhong-hua

(上海建桥学院机电学院, 上海 201306)

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shanghai Jianqiao University, Shanghai 201306, China)

摘要:文章推导了二自由度七连杆机构运动分析计算公式,建立了七连杆机器人腿部机构优化设计的数学模型。以长半轴 100 mm、短半轴 40 mm 的椭圆曲线作为机器人足端的相对理想轨迹曲线,采用遗传算法对七连杆机器人腿部机构进行了优化设计。优化的七连杆机器人腿部机构足端的实际轨迹曲线几乎与理想轨迹曲线重合,足端点的最大、最小 x 坐标分别为 100.035, -100.036 mm, 最大、最小 y 坐标分别为 40.005, -40.009 mm, 与理想轨迹的椭圆长轴、短轴半径的最大相对误差仅为 0.036%。利用优化的七连杆机器人腿部机构,设计了 6 足仿真机器人,并采用 UG 软件对优化的七连杆机器人腿部机构和 6 足仿真机器人进行了运动仿真,运动仿真结果非常理想。

关键词:二自由度;机器人;腿部机构;优化设计

Abstract: In this paper, motion formulae of two degree freedom seven-bar mechanism are derived a mathematical model is established for optimal design of the seven-bar leg mechanism of mobile robot. The elliptic trajectory curve with the long half axis of 100 mm and the short half axis of 40 mm is selected as the relative ideal trajectory curve of robot foot endpoint. The two degree freedom seven-bar robot leg mechanism is optimized by using the genetic algorithm. The foot endpoint actual trajectory curve of the optimized seven-bar leg mechanism of robot almost coincides with the ideal elliptic trajectory curve. The maximum and minimum x coordinates of the foot endpoint are respectively 100.035 mm and -100.036 mm, and the maximum and minimum y coordinates are respectively 40.005 mm and -40.009 mm. The maximum relative error with the long axis and short axis radius of the ideal ellipse trajectory is only 0.036%. Applying the optimized two degree freedom seven-bar robot leg mechanism, the hexapod simu-

lation robot is designed. The motion simulation of the optimized seven-bar robot leg mechanism and the hexapod simulation robot are carried out by UG software, and the simulation result are satisfactory.

Keywords: two degree freedom; robot; leg mechanism; optimization design

工业机器人产业是中国智能制造领域的突破口和重要抓手,被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”,其研发、制造、应用是衡量一个国家高端制造业水平和科技创新能力的重要标志^[1-2]。移动机器人是机器人的一种类型,由计算机控制,具有移动、自动导航、多传感器控制、网络交互功能等。按运动方式的不同,移动机器人可分为轮式、履带式 and 足式机器人等,相比于轮式和履带式机器人,足式机器人对复杂地形和非结构化环境具有更强的适应性^[3-4]。移动机器人广泛应用于各个领域,在食品领域的应用包括食品加工、包装、分拣及码垛。在食品领域机器人中,应用多连杆机构和凸轮机构比较多^[5-7]。随着美国波士顿动力公司设计、制造的系列足式移动机器人的大规模应用,可移动式机器人的发展已进入了新时期。其应用范围拓展到了军事、灾害救援、地质勘探、核事故抢险、生活服务等领域^[8-9]。

多连杆机构广泛地应用于移动机器人腿部机构,目前已有单腿、双腿、4 腿、6 腿和 8 腿足式机器人^[10]。腿部运动机构是机器人实现预定动作及轨迹的关键部件之一^[11],有较多学者^[12-14]对腿部运动机构的尺寸参数进行了优化设计。但现有移动机器人腿部多连杆机构的优化设计研究不够完善,主要体现为优化设计的目标函数不够准确、约束条件不完整等,导致现有优化的多连杆机器人腿部机构足端的实际轨迹曲线与理想轨迹曲线误差较大。

章永年等^[13]对二自由度七连杆(文中称五连杆机构,实际为七连杆机构)机器人腿部机构进行了研究,优化设计的目标函数是关节电机电矩性能、节电机速度性能、电

基金项目:上海市教委工业机器人应用学位点建设与研究项目(编号:230001-17-13)

作者简介:罗中华(1956—),男,上海建桥学院教授,博士。

E-mail: zhhu Luo@163.com

收稿日期:2020-01-06

机的总能耗、五杆总长最小;试验仅选取了 3 个机构参数作为设计变量、10 个约束条件,根据此约束条件不能保证机器人腿部足端点实现预先给定的理想轨迹曲线。由于没有给出驱动摆杆的摆动角度范围以及如何摆动,无法验证试验机器人腿部足端的实际轨迹曲线。

为了使机器人腿部足端的实际轨迹曲线与预先给定理想轨迹曲线尽量重合,试验拟对章永年等^[13]研究的二自由度七连杆机器人腿部机构优化设计进行了适当改进。增加两个机构角度尺寸参数;设计变量选用全部机构参数以及驱动曲柄 ED 与 x 轴的初始夹角 α_s 、驱动摇杆 AF 与 x 轴的初始夹角 β_s 和摇杆 AF 旋转角度 δ 等 16 个参数;目标函数是使足端相对实际轨迹曲线上 k 个点(优化数例 $k=72$)到足端相对理想轨迹曲线的最小距离的代数和最小;建立包含几何约束、性能约束和变量的上、下限约束等 42 个约束条件。以椭圆曲线作为机器人腿部足端相对理想轨迹曲线、驱动摇杆的来回摆动采用 STEP 运动函数,对二自由度七连杆机器人腿部机构进行优化设计。利用优化的七连杆机器人腿部机构,设计了 6 足仿真机器人,并采用 UG 软件对优化的七连杆机器人腿部机构和 6 足仿真机器人进行运动仿真。旨在为了验证七连杆机器人腿部机构优化设计的正确性和应用于 6 足机器人的可行性。

1 运动公式

七连杆机器人腿部机构如图 1 所示^[13]。七连杆机器人腿部机构活动构件数 $n=6$ 、低副数 $P_L=8$ 、高副数 $P_H=0$,机构的自由度为 2。驱动曲柄为杆 DE 、驱动摇杆为杆 AF 。为了便于后面机构优化,坐标原点未放在铰链点上。七连杆机构尺寸参数包括机构的杆长参数 l_1 、 l_2 、 $\dots$ 、 l_7 ,铰链点 A 、 E 的坐标分别为 (x_A, y_A) 、 (x_E, y_E) ,构件的角度参数 θ 和 ϕ ,以及驱动曲柄 ED 与

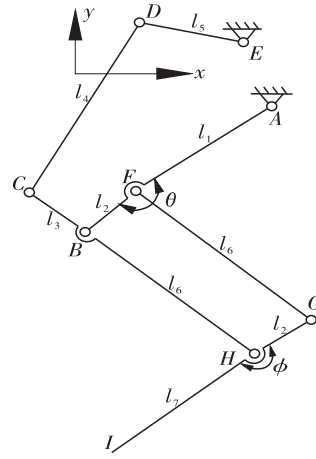


图 1 七连杆机器人腿部机构图

Figure 1 Diagram of seven-bar leg mechanism of mobile robot

x 轴的初始夹角 α_s 、驱动摇杆 AF 与 x 轴的初始夹角 β_s 和摇杆 AF 旋转角度 δ 。

设曲柄 DE 从初始角 θ 逆时针旋转 α (逆时针方向为正,下同),则 D 点坐标为:

$$\begin{cases} x_D = x_E + l_5 \cos(\alpha + \alpha_s) \\ y_D = y_E + l_5 \sin(\alpha + \alpha_s) \end{cases} \quad (1)$$

设摇杆 AF 与 x 轴的夹角为 β ($\beta \in [\beta_s, \beta_s + \delta]$),则 F 点坐标为:

$$\begin{cases} x_F = x_A + l_1 \cos\beta \\ y_F = y_A + l_1 \sin\beta \end{cases} \quad (2)$$

B 点坐标为:

$$\begin{cases} x_B = x_F + l_2 \cos(\beta + \pi - \theta) \\ y_B = y_F + l_2 \sin(\beta + \pi - \theta) \end{cases} \quad (3)$$

设摇杆 DB 与 x 轴的夹角为 φ ,则有:

$$\varphi = \begin{cases} \arctan[(y_B - y_D)/(x_B - x_D)] & x_B - x_D \geq 0, y_B - y_D \geq 0 \\ \arctan[(y_B - y_D)/(x_B - x_D)] + \pi & x_B - x_D < 0 \\ \arctan[(y_B - y_D)/(x_B - x_D)] + 2\pi & x_B - x_D > 0, y_B - y_D \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

设摇杆 DC 与 x 轴的夹角为 φ_1 ,则有:

$$\varphi_1 = \varphi - \arccos\left(\frac{l_{BD}^2 + l_4^2 - l_3^2}{2l_{BD}l_4}\right), \quad (5)$$

其中,

$$l_{BD} = \sqrt{(x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2}.$$

C 点坐标为:

$$\varphi_2 = \begin{cases} \arctan[(y_H - y_F)/(x_H - x_F)] & x_H - x_F \geq 0, y_H - y_F \geq 0 \\ \arctan[(y_H - y_F)/(x_H - x_F)] + \pi & x_H - x_F < 0 \\ \arctan[(y_H - y_F)/(x_H - x_F)] + 2\pi & x_H - x_F > 0, y_H - y_F \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_C = x_D + l_4 \cos\varphi_1 \\ y_C = y_D + l_4 \sin\varphi_1 \end{cases} \quad (6)$$

H 点坐标为:

$$\begin{cases} x_H = x_C + (l_3 + l_6)(x_B - x_C)/l_3 \\ y_H = y_C + (l_3 + l_6)(y_B - y_C)/l_3 \end{cases} \quad (7)$$

设摇杆 FH 与 x 轴的夹角为 φ_2 ,则有:

设摇杆 FG 与 x 轴的夹角为 φ_3 , 则有:

$$\varphi_3 = \varphi_2 + \arccos\left(\frac{l_{FH}^2 + l_6^2 - l_7^2}{2l_{FH}l_6}\right), \quad (9)$$

其中, $l_{FH} = \sqrt{(x_H - x_F)^2 + (y_H - y_F)^2}$ 。

$$\varphi_4 = \begin{cases} \arctan[(y_G - y_H)/(x_G - x_H)] & x_G - x_H \geq 0, y_G - y_H \geq 0 \\ \arctan[(y_G - y_H)/(x_G - x_H)] + \pi & x_G - x_H < 0 \\ \arctan[(y_G - y_H)/(x_G - x_H)] + 2\pi & x_G - x_H > 0, y_G - y_H \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

I 点坐标为:

$$\begin{cases} x_I = x_H + l_7 \cos(\varphi_4 - \phi) \\ y_I = y_H + l_7 \sin(\varphi_4 - \phi) \end{cases} \quad (12)$$

2 机构优化设计

2.1 足端理想轨迹曲线

现有文献^[4,14-15]常见的机器人足端理想轨迹曲线有矩形曲线、椭圆、抛物线、摆线(修正摆线)、心形线、组合线段等。这些足端理想轨迹曲线中,有封闭曲线和非封闭曲线两种。机器人腿部按足端是否与地面有相对运动分为摆动相和支撑相。支撑相的腿部足端相对于地面是静止不动的,而支撑相腿部机构的其他部位是运动的,从而推动机器人机身向前运动。同时,摆动相的腿足端的绝对运动是机器人机身的牵连运动和足端相对于机器人机身的相对运动的合成运动。按机身是否运动,将机器人腿部足端轨迹曲线分为相对轨迹曲线和实际轨迹曲线。当驱动曲柄旋转一周,足端相对轨迹曲线一定是一条封闭的曲线,足端实际轨迹曲线一定是一条非封闭的曲线。因此,机器人腿部机构优化设计时,足端理想轨迹曲线应分为相对理想轨迹曲线和实际理想轨迹曲线,足端实际轨迹曲线应分为相对实际轨迹曲线和实际轨迹曲线。

在机构优化设计时,很难求得机器人机身的牵连运动和腿部足端的实际轨迹,因此,对机构优化设计时,足端理想轨迹曲线选用相对理想轨迹曲线。定义机器人左右两边、前后同一位置的两条腿分别为 A 腿和 B 腿。当足端相对理想轨迹曲线为椭圆曲线时,并假设上半个椭圆曲线和下半个椭圆曲线准确地分别为摆动相和支撑相,图 2 为机器人腿部机构足端的实际理想轨迹曲线。理论上,跨障高度为椭圆短半轴的 2 倍,机器人单步步长为椭圆长半轴的 4 倍。但实际上,因为连杆机构基本上

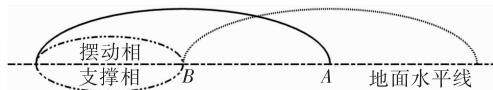


图 2 机器人腿部足端理想轨迹曲线

Figure 2 Ideal trajectory curve of robot foot endpoint

G 点坐标为:

$$\begin{cases} x_G = x_F + l_6 \cos \varphi_3 \\ y_G = y_F + l_6 \sin \varphi_3 \end{cases} \quad (10)$$

设摇杆 HG 与 x 轴的夹角为 φ_4 , 则有:

不能准确地使上半个椭圆曲线和下半个椭圆曲线分别为摆动相和支撑相,实际步长与理论步长存在一定误差。

2.2 优化设计数学模型

2.2.1 设计变数 选取二自由度七连杆机器人腿部机构全部 16 个参数作为优化设计变数,即

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{16})^T = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, x_A, y_A, x_E, y_E, \theta, \phi, \alpha_s, \beta_s, \delta)^T \quad (13)$$

2.2.2 目标函数 二自由度七连杆机器人腿部机构的优化设计的目标是使足端相对实际轨迹曲线尽量与足端相对理想轨迹曲线重合。选用足端相对实际轨迹曲线上 k 个点到相对理想轨迹曲线的最小距离的代数和最小作为七连杆机构优化设计的目标函数^[16],即

$$\min f(X) = \sum_{i=1}^k d_i, \quad (14)$$

式中:

d_i ——足端相对实际轨迹上的第 i 个点足端相对理想轨迹曲线的最小距离。

2.2.3 约束条件 机构应满足几何约束条件和传动角约束条件。根据七连杆机器人腿部机构尺寸参数,建立二自由度七连杆机器人腿部机构的约束条件为:

$$\begin{aligned} l_{BD\max} &\leq x_3 + x_4, x_3 \leq l_{BD\min} + x_4, x_4 \leq l_{BD\min} + x_3; \\ x_3^2 + x_4^2 - l_{BD\min}^2 &\leq 2x_3x_4 \cos(\gamma_{\min}); \\ x_3^2 + x_4^2 - l_{BD\max}^2 &\geq 2x_3x_4 \cos(\pi - \gamma_{\min}); \\ l_{FH\max} &\leq x_2 + x_6, x_2 \leq l_{FH\min} + x_6, x_6 \leq l_{FH\min} + x_2; \\ x_2^2 + x_6^2 - l_{FH\min}^2 &\leq 2x_2x_6 \cos(\gamma_{\min}); \\ x_2^2 + x_6^2 - l_{FH\max}^2 &\geq 2x_2x_6 \cos(\pi - \gamma_{\min}), \end{aligned} \quad (15)$$

式中:

$l_{BD\min}, l_{BD\max}$ ——点 B 与 D 之间的最小和最大距离;

$l_{FH\min}, l_{FH\max}$ ——点 F 与 H 之间的最小和最大距离;

$\gamma_{\min}$ ——机构的最小传动角。

设各变量下限值 $x_{i\min}$ 和上限值 $x_{i\max}$, 变量下限和上限约束条件为:

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max} \quad (i = 1, 2, \dots, 16). \quad (16)$$

综上,二自由度七连杆机器人腿部机构优化设计为 16 个设计变量、42 个约束条件的约束优化设计问题。二自由度七连杆机器人腿部机构优化设计的标准形式为:

$$\begin{cases} \min f(X) & X \in R^{16} \\ s.t. & g_i(X) \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 42) \end{cases} \quad (17)$$

2.3 遗传算法

遗传算法(GA)是美国 Michigan 大学 John Holland 教授 1975 年首先提出、基于 1858 年达尔文的自然选择原理、自然遗传机制、优胜劣汰和适者生存的生物遗传和进化的规律而形成的一种随机搜索优化算法。该算法的主要步骤^[17]：

- ① 随机产生一组初始个体构成初始群体；
- ② 计算群体中个体的适应度；
- ③ 判断算法收敛准则是否满足，若满足则输出搜索结果并停止运算，否则转下一步；
- ④ 选择运算，按优胜劣汰执行复制操作；
- ⑤ 交叉运算，按一定的方式进行交叉操作；
- ⑥ 变异运算，按一定的规律执行变异操作；
- ⑦ 转步骤②。

2.4 数例

取足端相对理想轨迹曲线为长半轴 100 mm、短半轴 40 mm 的椭圆曲线，椭圆的中心为坐标原点。机构的最小传动角 $\gamma_{\min} = 30^\circ$ ，各变量下限和上限取值约束为： $30 \text{ mm} \leq l_1 \leq 50 \text{ mm}$ 、 $20 \text{ mm} \leq l_2 \leq 40 \text{ mm}$ 、 $30 \text{ mm} \leq l_3 \leq 90 \text{ mm}$ 、 $120 \text{ mm} \leq l_4 \leq 220 \text{ mm}$ 、 $15 \text{ mm} \leq l_5 \leq 60 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm} \leq l_6 \leq 160 \text{ mm}$ 、 $140 \text{ mm} \leq l_7 \leq 180 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm} \leq x_A \leq 35 \text{ mm}$ 、 $220 \text{ mm} \leq y_A \leq 400 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm} \leq x_E \leq 25 \text{ mm}$ 、 $200 \text{ mm} \leq y_E \leq 380 \text{ mm}$ 、 $120^\circ \leq \theta \leq 250^\circ$ 、 $100^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ 、 $0^\circ \leq \alpha_s \leq 360^\circ$ 、 $210^\circ \leq \beta_s \leq 270^\circ$ 、 $20^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$ ，相对实际轨迹上取 $k=72$ 个点。驱动曲柄采用匀速转动，即 $\omega = -180^\circ/\text{s}$ ，经驱动摇杆分别采用匀速往复摆动和 STEP 运动函数往复运动对机构进行优化设计，发现 STEP 运动函数往复运动优化设计效果好，故驱动摇杆采用 STEP 运动函数^[18]，即 $\text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 1, \delta) + \text{STEP}(\text{time}, 1, 0, 2, -\delta)$ 。选用遗传算法作为优化方法，编写二自由度七连杆机器人腿部机构优化设计程序。用编写的优化设计程序求得

的七连杆机器人腿部机构的最优解为 $l_1 = 44.654 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 38.360 \text{ mm}$ 、 $l_3 = 84.848 \text{ mm}$ 、 $l_4 = 120.005 \text{ mm}$ 、 $l_5 = 44.498 \text{ mm}$ 、 $l_6 = 119.231 \text{ mm}$ 、 $l_7 = 150.672 \text{ mm}$ 、 $x_A = 10.328 \text{ mm}$ 、 $y_A = 296.586 \text{ mm}$ 、 $x_E = 19.729 \text{ mm}$ 、 $y_E = 355.336 \text{ mm}$ 、 $\theta = 193.475^\circ$ 、 $\varphi = 134.729^\circ$ 、 $\alpha_s = 118.259^\circ$ 、 $\beta_s = 210.128^\circ$ 、 $\delta = 42.5304^\circ$ 、 $f(X^*) = 29.0619 \text{ mm}$ 。优化的七连杆机器人腿部机构运动仿真如图 3 所示。驱动曲柄每 1° 为一个等分点进行仿真，足端最大、最小的 x 坐标分别为 100.035 mm 和 -100.036 mm ，足端最大、最小的 y 坐标分别为 40.005 mm 和 -40.009 mm ，与理想的椭圆的长、短轴半径的最大相对误差仅为 0.036% 。足端的实际轨迹平均每点与理想椭圆轨迹曲线的绝对误差约为 0.40 mm ，最大误差的点的绝对误差约为 1.45 mm 。从图 3 可以看出，优化的七连杆机器人腿部机构足端相对实际轨迹曲线几乎完全与相对理想轨迹曲线重合。因此，文中七连杆机器人腿部机构的优化结果是十分理想的。

设 A 腿和 B 腿的七连杆机构曲柄相位角相差 180° ，当 A 腿和 B 腿的两足端的 y 坐标相等时，两腿的两足端与地面接触，随后一腿为支撑相，另一腿为摆动相。根据 A 腿和 B 腿足端的仿真数据，采用 Excel 绘制优化的七连杆机器人腿部机构两腿足端的实际轨迹曲线如图 4 所示。由图 4 可知，机器人实际步长约为 393.9 mm ，跨障高度约为 80 mm 。步长略小于 400 mm 的主要原因是两腿足端的 y 坐标相等时， y 不为零($y=6.023 \text{ mm}$)所致。即足端支撑相和摆动相，机构的曲柄不是各转 180° 所致。

3 6 足仿真机器人设计

以优化的二自由度七连杆机器人腿部机构尺寸参数为依据，设计了 6 足仿真机器人。文中所谓仿真机器人是指只考虑运动分析正确性的机器人，而不考虑具体机构的结构设计和提供驱动的动力装置。6 足仿真机器人如图 5 所示，其 3 条腿为一组。将 3 条腿固定于下机身固定板，如图 5(a) 所示，另 3 条腿固定于上机身固定板，如

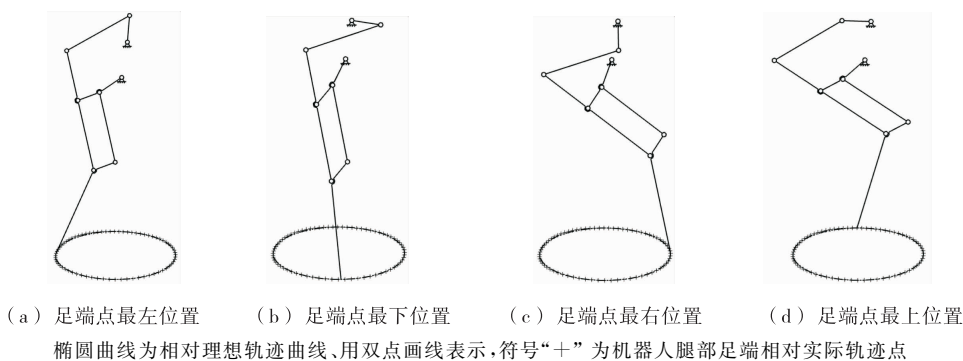
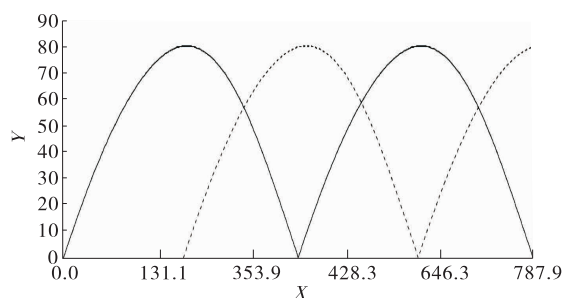


图 3 优化的七连杆机器人腿部机构运动仿真

Figure 3 Motion simulation of the optimized seven-bar robot leg mechanism

图 5(b)所示。上、下机身固定板用转动副连接,使机器人具有转弯的功能,完整的 6 足仿真机器人如图 5(c)所示。



实线为 A 腿足端的实际轨迹曲线,虚线为 B 腿足端的实际轨迹曲线

图 4 优化的七连杆机器人腿部机构足端实际轨迹曲线

Figure 4 Foot endpoint actual trajectory curve of the optimized seven-bar leg mechanism of robot

当一组 3 条腿为摆动相时,上、下机身固定板之间的转动副相对转动,使摆动相 3 条腿的固定板向左或向右转过一定的角度;当摆动相 3 条腿变为支撑相时,转动副再相对转动,从而实现 6 足机器人转弯功能。

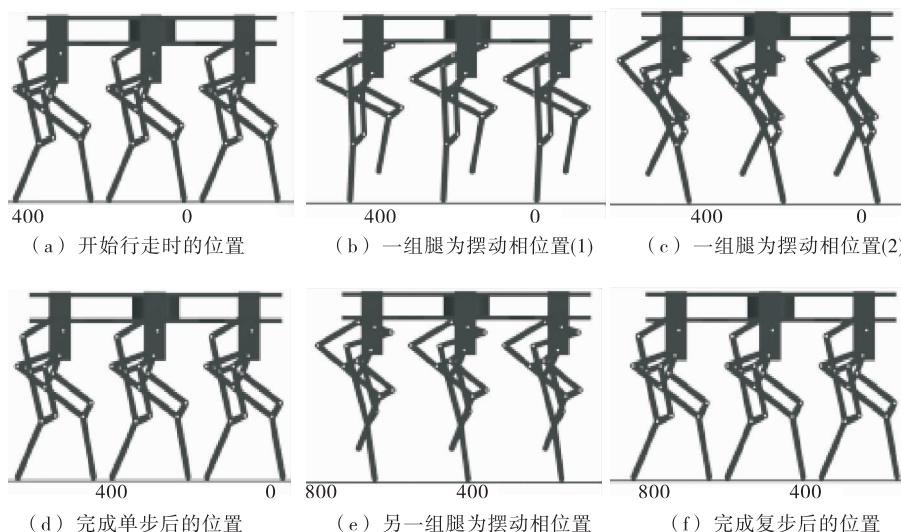
A 腿和 B 腿七连杆机器人腿部机构曲柄相位角相差 180° ,由图 6 可知,一组腿完成一个单步步长约 400 mm,另一组腿完成一个单步步长约 400 mm,与优化设计的单步步长非常吻合,说明 6 足仿真机器人运动仿真结果可靠。



(a) 3条腿固定于下 (b) 3条腿固定于上 (c) 整体仿真机器人机身固定板

图 5 6 足仿真机器人

Figure 5 Hexapod simulation robot



数字 0,400,800 表示地板位置尺寸,单位:mm

图 6 6 足仿真机器人运动仿真

Figure 6 Motion simulation of hexapod simulation robot

4 结论

推导了二自由度七连杆机器人腿部机构运动分析计算公式,并建立了二自由度七连杆机器人腿部机构优化设计数学模型;以椭圆曲线作为相对理想轨迹曲线,对具体的二自由度七连杆机器人腿部机构进行了优化设计。优化的七连杆机器人腿部机构足端相对实际轨迹曲线几乎与相对理想轨迹曲线完全重合,优化结果十分理想,能较准确地实现机器人预定的步长和跨高。试验机构优化设计追求的是使足端相对实际轨迹与相对理想轨迹尽量重合,而足端实际轨迹与实际理想轨迹尽量重合有待进一步研究。此外,调整两组腿部机构的曲柄不是相差 180° ,而是使整个机器人的足端支撑相和摆动相曲柄各转

180° ,从而消除用足端相对实际轨迹与相对理想轨迹尽量接近作为目标函数所引起的误差。

参考文献

- [1] 钱敏,张兴国. 模块化电子气动工业机器人系统设计[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 71-73.
- [2] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13.
- [3] SEMINI C, TSAGARAKIS N G, GUGLIELMINO E, et al. Design of HyQ: A hydraulically and electrically actuated quadruped robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2011, 225(6): 831-849.

(下转第 186 页)

系,表明牡丹籽多酚有可能成为一种新的天然抗氧化剂。后续可对“凤丹”牡丹籽多酚的代谢途径、单体种类及功能特性进行研究。

参考文献

- [1] 冯汉宇,江颖,张立全,等.油用牡丹‘凤丹’在北京引种栽培研究初报[J].中国农学通报,2018,34(4):65-70.
- [2] 宋媛媛,杨瑞金,张文斌,等.牡丹籽油乙醇辅助水酶法提取工艺优化及品质分析[J].食品与机械,2018,34(4):180-185.
- [3] 高婷婷,王亚芸,任建武.GC-MS 法分析牡丹籽油的成分及其防晒效果的评定[J].食品科技,2013,38(6):296-299.
- [4] 李静,姚茂君,王旭东,等.牡丹籽油自氧化及抗氧化性能的研究[J].食品工业科技,2013,34(22):84-87.
- [5] 吴悠,李梅青,孙强,等.超声辅助提取凤丹籽总黄酮的工艺研究[J].天然产物研究与开发,2012,24(10):1454-1457.
- [6] 牛红军,李军,李建文,等.超声技术在植物多酚提取中的应用进展[J].农学学报,2014,4(7):92-95.
- [7] KANG N J, SHIN S H, LEE H J, et al. Polyphenols as small molecular inhibitors of signaling cascades in carcinogenesis[J]. Pharmacology & Therapeutics, 2011, 130(3): 310-324.
- [8] JIA Q, LIU X, WU X, et al. Hypoglycemic activity of a polyphenolic oligomer-rich extract of *Cinnamomum parthenoxylon* bark in normal and streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Phytomedicine, 2009, 16(8): 744-750.
- [9] 王彦阳,张中润,郑晓端,等.腰果叶多酚超声波辅助提取工艺及其抗氧化能力测定[J].食品研究与开发,2020,41(3):53-58.
- [10] 魏春红,何丽娜,丁闻浩,等.酶法辅助提取小米多酚的工艺研究[J].中国粮油学报,2019,34(1):93-98.
- [11] 吕蒙蒙,张健,武忆寒,等.响应面法优化超声波-微波协同萃取杉木球果鳞片多酚提取工艺[J].江西农业大学学报,2019,41(6):221-221.
- [12] 朱素英.牡丹花多酚提取优化与抗氧化性[J].生物技术,2014,24(3):78-82.
- [13] 陈程,王海坤,张存芳,等.响应面法优化超声辅助提取牡丹籽粕中多酚工艺[J].中国油脂,2017,42(3):127-130.
- [14] 赵聪.核桃种皮多酚的提纯鉴定及抗氧化活性研究[D].天津市:天津科技大学,2016:14.
- [15] 李加兴,房惠芳,陈选,等.牡丹籽粕蛋白提取工艺优化及其等电点分析[J].食品与机械,2014,30(3):147-150.
- [16] 吕长鑫,李萌萌,徐晓明,等.响应面分析法优化纤维素酶提取紫苏多糖工艺[J].食品科学,2013,34(2):6-10.
- [17] LI Xi-can, LIN Jing, GAO Yao-xiang, et al. Antioxidant activity and mechanism of Rhizoma Cimicifugae[J]. Chemistry Central Journal, 2012, 6(1): 140.
- [18] 朱洁,王红宝,孔佳君,等.梨幼果多酚的纯化及其抗氧化性[J].食品科学,2017,38(5):14-20.
- [19] 刘柏华,殷钟意,郑旭熙.超声波辅助提取牡丹籽粕中油脂的工艺研究[J].食品研究与开发,2016,37(8):40-44.
- [20] 李珍.苹果皮渣多酚提取、纯化及抗氧化活性研究[D].北京:中国农业科学院,2014:15.
- [21] 陈洪彬,宋露露,金瑾萱,等.坛紫菜多酚提取工艺及体外抗氧化与抑菌活性研究[J].食品与机械,2018,34(9):157-161.
- [22] 许英一,徐艳霞,王宇,等.玉米须多酚预热结合超声辅助提取工艺及抗氧化性研究[J].食品与机械,2019,35(1):153-158.
- [23] 汪泽,崔丽红,唐冰,等.响应面优化菠萝叶纤维多酚提取工艺[J].食品工业科技,2017(1):213-217.
- [24] 陈洪彬,杨敏,宋露露,等.龙须菜多酚提取工艺优化及其体外抗氧化活性[J].食品与机械,2017,33(4):139-143,194.
- [25] 王春霞,蒲彪,蒋燕,等.藤椒冷榨油饼粕中黄酮类物质的提取及体外抗氧化活性研究[J].食品与机械,2017,33(1):137-143,154.
- (上接第 91 页)
- [4] 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.
- [5] 余剑武,舒新,罗红,等.灌装机中弧面凸轮建模与造型研究[J].食品与机械,2016,32(6):77-82.
- [6] 席晓燕.推料机构凸轮轮廓曲线设计仿真及误差分析[J].食品与机械,2017,33(2):77-80.
- [7] 赵漫漫,吴佳,何雪明,等.高速凸轮变系数多项式凸轮曲线的研究[J].食品与机械,2018,34(3):98-102.
- [8] 曲梦可.变胞变尺度腿混合四足机器人研究[D].秦皇岛:燕山大学,2017:1-4.
- [9] 高峰,郭为忠.中国机器人的发展战略思考[J].机械工程学报,2016,52(7):1-5.
- [10] 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.
- [11] 陈奇,张祺,姚志刚,等.面向足式机器人腿部运动的组合机构反求设计[J].机械与电子,2018,36(5):71-74,80.
- [12] 张陈曦,吴胜权,何永,等.仿生步行机器人腿部八连杆机构轨迹优化[J].机械传动,2018,42(6):39-43.
- [13] 章永年,王美思,吴阳,等.五连杆足式机器人腿部机构多目标优化算法[J].农业机械学报,2016,47(10):398-404.
- [14] 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.
- [15] 李满宏,张小俊,张建华,等.面向给定轨迹的六足机器人多足协调控制[J].华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(4):32-37.
- [16] 罗中华,杨雨.揉面机四杆机构的优化设计[J].机械设计,2013,30(6):44-47.
- [17] 王小平,曹立明.遗传算法:理论、应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002:155-156.
- [18] 北京兆迪科技有限公司.UG NX10.0 运动仿真与分析教程[M].北京:机械工业出版社,2015:135-139.