西北林学院学报 2019,34(4):268-272
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.04.41

基于 SA-PSO 算法采摘机械臂参数优化

庞国友,高自成*,李立君,赵凯杰,王晓晨

(中南林业科技大学 机电工程学院,湖南 长沙 410004)

摘　要:当前油茶果的采摘方式为人工采摘,采摘方式落后,采摘效率低,导致生产成本高,严重制约油茶产业的健康发展。为解决这一问题,实现油茶果机械化和自动化采摘,设计了一款振动式油茶果采摘机。油茶果采摘机工作过程中采摘机械臂的结构尺寸将会限制其工作的范围。为确保采摘机能高效率的采摘油茶果,对采摘机械臂进行参数优化,寻找最优参数。结合实地考察的结果,确定优化设计的变量为举升液压缸行程 S_j、伸缩液压缸行程 S_s、俯仰液压缸行程 S_f,建立目标函数,确定约束条件。基于 SA-PSO 算法,对油茶果采摘机械臂进行结构参数优化,得到最优参数解:举升液压缸行程为 $S_j=154$ mm,伸缩液压缸行程为 $S_s=320$ mm,俯仰液压缸形成为 $S_f=166$ mm,为采摘机的优化设计了提供了理论数据支持。

关键词:油茶果;机械臂;SA-PSO 算法;参数优化

中图分类号:S776　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)04-0268-05

Optimization of Picking Robot Arm Parameters Based on SA-PSO Algorithm

PANG Guo-you, GAO Zi-cheng*, LI Li-jun, ZHAO Kai-jie, WANG Xiao-chen

(*School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha* 410004, *Hunan, China*)

Abstract: At present, the harvest of camellia is accomplished by artificial method with low efficiency and high cost, which seriously restricts the healthy development of the camellia industry. In order to solve this problem and realize the mechanization and automatic picking of camellia, a vibrating camellia picking machine was designed. Based on the fact that during the working process of the camellia picking machine, the structural size of the picking arm limits the scope of its work, an optimization was conducted on the parameters of picking arm to ensure that the picking machine could extract the oil tea fruit efficiently. Combined with the results of the field investigation, the variables of the optimized design were determined as the lifting hydraulic cylinder stroke S_j, the telescopic hydraulic cylinders stroke S_s, and the pitch hydraulic cylinder stroke S_f, and the objective function was established to determine the constraint condition. Based on the SA-PSO algorithm, the structural parameters of the camellia picking robot arm were optimized, and the optimal parameter solution was obtained: $S_j=154$ mm, $S_s=320$ mm, and $S_f=166$ mm. The optimized design of the picking machine would provide theoretical data support for the optimization of the machine.

Key words: camellia fruit; robotic arm; SA-PSO algorithm; parameter optimization

油茶树是我国特有的木本食用油料树种,也是世界四大木本油料植物之一。近年来,中国油茶产业迅速发展,2014 年,湖南全省油茶林总面积达到 2 000万亩以上,茶油产量 20 万 t,产值 213 亿元,均居全国第一[1-2]。油茶果采摘周期短,而目前油茶果的采摘还是依靠人工手动的采摘方式完成,采摘效率低、劳动强度大、生产成本高,严重制约了油茶产业的健康发展。国外对于采摘机械的研发较早,上

收稿日期:2018-09-16　**修回日期**:2019-02-22
基金项目:湖南省重点研发计划(2018NK2065);湖南省科技计划重点研发项目(2016NK2142)。
作者简介:庞国友,男,在读硕士,研究方向:现代林业技术及装备。E-mail:838515741@qq.com
* **通信作者**:高自成,男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向:林业机械。E-mail:gzc1968@126.com

世纪 40 年代中期美国研发了用于采摘核桃和银杏的振摇式采摘机械[3]。自 20 世纪 60 年代以来,国外的果园机械发展迅速,研制出了多种果园专用的动力机械和作业机械,从而使果园作业逐渐向机械化作业转变[4-5]。

国内在林果采摘方面的技术和手段比较落后,主要依靠人工上树采摘,不仅存在极大的安全问题,而且对树木的损伤也非常严重。我国对于振动式采收机的研究始于 20 世纪 80 年代。国内许多高校和科研机构对果蔬采摘方式进行了大量研究,取得了一些成果[6-12]。市场上还没有性能可靠、高效的油茶果采摘机。因此,研发高效、经济、实用的油茶果采摘机,对于促进油茶产业发展、促进林业经济发展有着非常重大的意义。本研究结合实际情况,对采摘机械臂进行了参数优化设计,寻找最优参数。

1　SA-PSO 算法简介

为了提高算法的综合性能,将 PSO 算法与模拟退火算法进行融合,形成新的模拟退火粒子群(SA-PSO)算法[13-15],并利用改进后的算法进行油茶果采摘机械臂参数优化(图 1)。

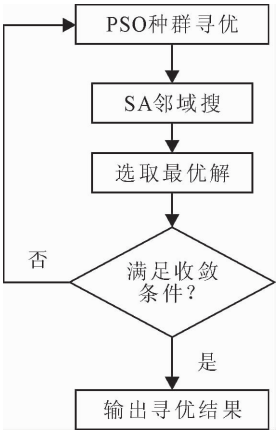


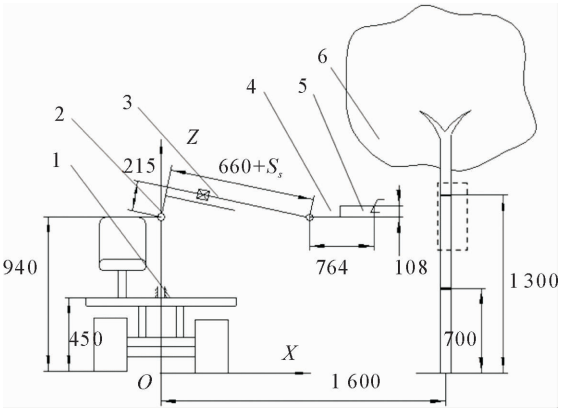
图 1　SA-PSO 算法流程

Fig. 1　SA-PSO algorithm flow chart

2　采摘机械臂参数优化

2.1　优化问题简化

通过多处油茶种植基地考察,发现规模化种植的油茶树行距为 3～3.4 m,湖南浏阳淳口镇鸭头村国家油茶示范基地的油茶林种植行距为 3.4 m[16],故此处以油茶树行距为 3.4 m 作为优化设计依据。根据油茶种植情况和油茶果采摘机底盘结构设计情况,规定颈部铰链中心距地面距离为 940 mm,底盘位置与两行油茶树的中间位置重合,采摘臂腰部立轴轴线与底盘中心重合,油茶树最优夹持位置距地面 700～1 300 mm,建立油茶果采摘机采摘示意图和坐标系(图 2)。



注:1. 采摘机底盘;2. 腰部立轴;3. 主臂;4. 伸缩副臂;5. 俯仰块与采摘头;6. 油茶树。

图 2　油茶果采摘示意

Fig. 2　Sketch map of oil-tea camellia fruit picking

2.2　优化设计变量的选取

通过采摘机械臂结构分析可知,机械臂工作时,须由举升液压缸、伸缩液压缸和俯仰液压缸联动方可完成机械臂末端采摘工作头的定位。

通过采摘机械臂的工作过程分析可知,在采摘工作头定位过程中,举升液压缸的伸缩决定主臂与水平方向的夹角;伸缩液压缸的伸缩决定采摘工作头与主臂末端的间距;俯仰液压缸的伸缩决定采摘工作头与水平方向的夹角。

因举升液压缸、伸缩液压缸和俯仰液压缸的参数均可影响采摘工作头末端的坐标,即机械臂工作空间,故本次优化设计取举升液压缸行程 S_j、伸缩液压缸行程 S_s、俯仰液压缸行程 S_f 作为优化设计变量。

$$x=[x(1)\ x(2)\ x(3)]=[S_j\ S_s\ S_f] \tag{1}$$

2.3　机械臂平面空间求解

根据采摘臂的结构设计和设计变量选取,可得出机械臂的各项参数,绘制机械臂机构简图(图 3)。

图 3 中,L_j 为举升缸长度;L_s 为铰链 B 与铰链 F 沿伸缩臂方向的间距;L_f 为俯仰缸长度;θ_j 为 BC 连线与 AB 连线的夹角,θ_f 为 DF 连线与 EF 连线的夹角,α 为臂架举升角,β 为工作头俯仰角。

设举升缸、伸缩缸、俯仰缸的活塞伸出长度分别为 S_{jt}、S_{st}、S_{ft},则:

$$L_j=L_{j0}+S_j+S_{jt} \tag{2}$$

$$L_s=80+L_{s0}+S_s+S_{st} \tag{3}$$

$$L_f=L_{f0}+S_f+S_{ft} \tag{4}$$

式(2)～式(4)中,$L_{j0}+S_j$、$L_{s0}+S_s$、$L_{f0}+S_f$ 分别为举升缸、伸缩缸、俯仰缸的安装距。根据结构设计,取举升缸、伸缩缸的缸径均为 50 mm,俯仰缸缸径为 63 mm,则:

$$L_{j\min}=280+S_j;L_{j\max}=280+2S_j$$
$$L_{s\min}=360+S_s;L_{s\max}=360+2S_s$$
$$L_{f\min}=295+S_f;L_{f\max}=295+2S_f$$

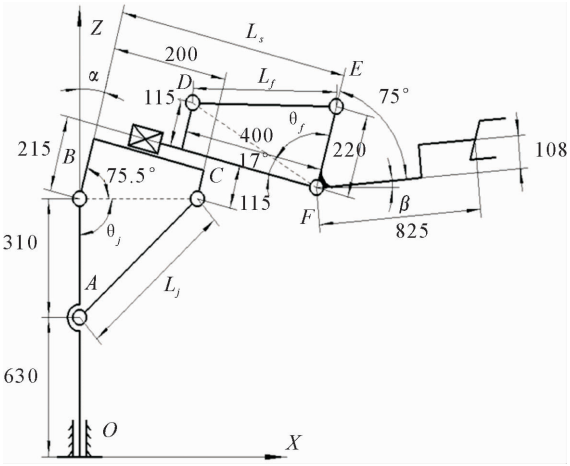


图 3 机械臂结构

Fig. 3 Mechanism of the manipulator

由图 3 可知，臂架举升角 α 和工作头俯仰角 β 分别为：

$$\alpha=\theta_j+75.5^\circ-180^\circ$$
$$\beta=180^\circ-(17^\circ+\theta_f+75^\circ)+\alpha=\alpha-\theta_f+88^\circ$$

由余弦定理解 ΔABC 和 ΔDEF 可得

$$\theta_j=\arccos\left(\frac{AB^2+BC^2-AC^2}{2AB\cdot BC}\right)=\arccos\left(\frac{143\ 325-L_j^2}{134\ 734.16}\right) \quad (5)$$

$$\theta_f=\arccos\left(\frac{DF^2+EF^2-DE^2}{2DF\cdot EF}\right)=\arccos\left(\frac{213\ 225-L_f^2}{183\ 129.35}\right) \quad (6)$$

根据采摘机械臂的结构参数，利用图解法绘制采摘工作头处于水平位置时的采摘机械臂平面工作空间(图 4)。

由图 4 可知，工作头处于水平状态时的采摘机械臂平面工作空间为 KJNM 围成的不规则扇形环区域。图 4 中，当举升液压缸、伸缩液压缸均处于最短状态时，采摘工作头末端位于图中的点 K 位置；当举升液压缸处于最短状态、伸缩液压缸处于最长状态时，采摘工作头末端处于图中的点 M 位置；当举升液压缸处于最长状态、伸缩液压缸处于最短状态时，采摘工作头末端处于图中的点 J 位置；当举升液压缸、伸缩液压缸均处于最长状态时，采摘工作头末端处于图中的点 N 位置；图中点 K'J'N'M'围成的矩形范围为油茶树干的夹持范围。

由图 4 和图 3 的机构参数，可计算出点 K、J、N、M 的坐标、圆弧段 KJ、MN 和直线 JN、KM 的方程。由图 4 可得：

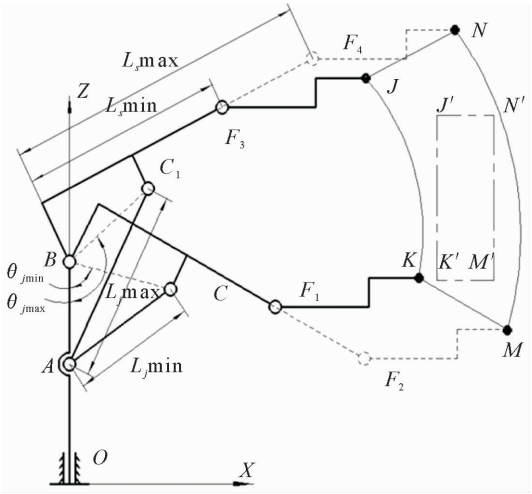


图 4 采摘机械臂平面工作空间

Fig. 4 The plane work-space of the picking manipulator

$$\theta_{j\min}=arc\cos\left(\frac{143\ 325-L_{j\min}{}^2}{134\ 734.16}\right) \quad (7)$$

$$\theta_{j\max}=arc\cos\left(\frac{143\ 325-L_{j\max}{}^2}{134\ 734.16}\right) \quad (8)$$

则对应的举升角分别为：

$$\alpha_1=\theta_{j\min}+75.5^\circ-180^\circ$$
$$\alpha_2=\theta_{j\max}+75.5^\circ-180^\circ \quad (9)$$

各点的坐标分别为：

$$\begin{cases}x_K=-200\sin\alpha_1+L_{s\min}\cos\alpha_1+825\\ z_K=200\cos\alpha_1+L_{s\min}\sin\alpha_1+940\end{cases}$$
$$\begin{cases}x_J=-200\sin\alpha_2+L_{s\min}\cos\alpha_2+825\\ z_J=200\cos\alpha_2+L_{s\min}\sin\alpha_2+940\end{cases}$$
$$\begin{cases}x_M=-200\sin\alpha_1+L_{s\max}\cos\alpha_1+825\\ z_M=200\cos\alpha_1+L_{s\max}\sin\alpha_1+940\end{cases}$$
$$\begin{cases}x_N=-200\sin\alpha_2+L_{s\max}\cos\alpha_2+825\\ z_N=200\cos\alpha_2+L_{s\max}\sin\alpha_2+940\end{cases}$$

圆弧段 KJ、MN 的方程为：

$$(x_{KJ}-825)^2+(z_{KJ}-110)^2=R_{KJ}{}^2$$
$$x_{KJ}\in(x_J,x_K)\cup(x_K,825+R_{KJ}),\quad z_{KJ}\in(x_K,x_J) \quad (10)$$
$$(x_{MN}-825)^2+(z_{MN}-110)^2=R_{MN}{}^2$$
$$x_{MN}\in(x_N,x_M)\cup(x_M,825+R_{MN}),\quad z_{KJ}\in(x_M,x_N) \quad (11)$$

式(10)、式(11)中，R_{KJ}、R_{MN} 分别为圆弧段 KJ、MN 的半径。

$$R_{KJ}=\sqrt{200^2+L_{s\min}{}^2} \quad (12)$$
$$R_{MN}=\sqrt{200^2+L_{s\max}{}^2} \quad (13)$$

直线 KM、JN 的方程为：

$$z_{KM}-z_K=\frac{z_M-z_K}{x_M-x_K}(x_{KM}-x_K) \quad (14)$$

$$z_{JN}-z_J=\frac{z_N-z_J}{x_N-x_J}(x_{JN}-x_J) \quad (15)$$

由图 2 可得点 K′、J′、N′、M′的坐标分别为:

K′(1400,700);J′(1400,1300)

N′(1800,1300);M′(1800,700)

3　机械臂结构参数优化

3.1　目标函数的建立

为提高油茶果采摘机机械臂的作业效率,机械臂作业空间应满足在包容夹持范围 K′J′N′M′的前提下,工作头处于水平状态的工作空间 KJNM(以下简称"工作空间")面积尽量减小,从而缩短机械臂末端采摘工作头的夹持定位时间。因此,此处取工作空间的面积为目标函数。

因工作空间为不规则扇形环,现将其进行分割,如图 5 所示。

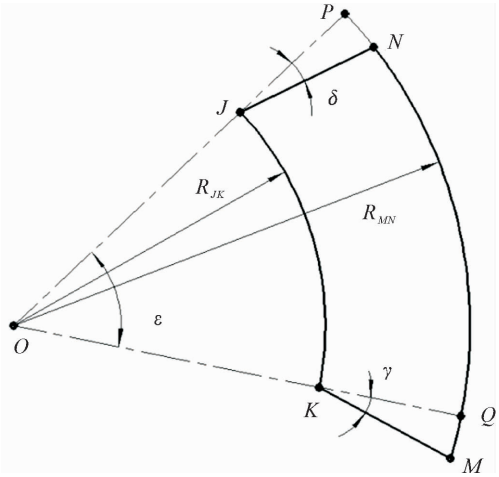


图 5　工作空间分割

Fig. 5　Partition map of the work-space

图 5 中,点 $KJNM$ 所围成的不规则扇形为工作空间;点 O 为圆弧 JK、NM 的圆心;ε 为圆弧段 KJ 的圆心角;点 P 为圆弧 KJ 的半径 OJ 的延长线与圆弧 MN 延长线的交点;点 Q 为圆弧 KJ 的半径 OK 的延长线与圆弧 MN 的交点。

根据图 4 和图 5,可得以下结论:

(1) $X_O=825, Z_O=1050$;

(2) $L_{JP}=L_{KQ}=R_{MN}-R_{KJ}$;

(3) $\gamma=\delta=arc\tan\left(\frac{200}{L_{s\min}}\right)$;

(4) $L_{JN}=L_{KM}=S_s$;

(5) $\varepsilon=\alpha_2-\alpha_1$。

故不规则扇形 KQM 与不规则扇形 JPN 全等,工作空间 KJNM 的面积与扇形环 KJPQ 的面积相等。

由以上推导可得目标函数为:

$$\min f(x)=S_{KJPQ}=\frac{\varepsilon}{360}\pi(R_{MN}{}^2-R_{KJ}{}^2) \quad (16)$$

3.2　约束条件的确定

为了使油茶果采摘机机械臂满足工作要求,需令工作空间 $KJNM$ 包容夹持范围 $K'J'N'M'$。将其转换为约束条件:(1)当 $z_{KJ}=1\ 050$ 时,须满足 $x_{KJ}=825+R_{KJ}\leqslant 1400$;(2)当 $x_{MN}=1\ 800$ 时,若 $z_{MN}>1\ 050$,须满足 $z_{MN}\geqslant 1\ 300$;若 $z_{MN}<1050$,须满足 $z_{MN}\leqslant 700$;(3)当 $x_{KM}=1\ 400$ 时,须满足 $z_{KM}\leqslant 700$,$z_{JN}\geqslant 1\ 300$。

为满足倾斜树干的夹持,须满足机械臂在任意姿态时,采摘作业头均能在水平方向附近小角度俯仰摆动,取摆动角度为±20°。将其转换为约束条件:(1)在举升液压缸长度最短时,即 $L_j=280+S_j$,此时活塞处于举升液压缸内最下面的位置,须保证:$\beta\geqslant 20°$,此时 $\alpha=\alpha_1$;(2)在举升液压缸长度最长时,即 $L_j=280+2S_j$,此时活塞处于举升液压缸内最上面的位置,须保证:$\beta\leqslant -20°$,此时 $\alpha=\alpha_2$。

根据实际结构设计情况,选取优化前各液压缸的行程范围,并将其转换为约束条件:$0<S_j<300$ mm;$0<S_s<500$ mm;$0<S_f<300$ mm。

3.3　基于 SA-PSO 算法参数优化

根据目标函数和约束条件,利用模拟退火粒子群算法,对油茶果采摘机机械臂进行结构参数优化。优化收敛曲线如图 6 所示。

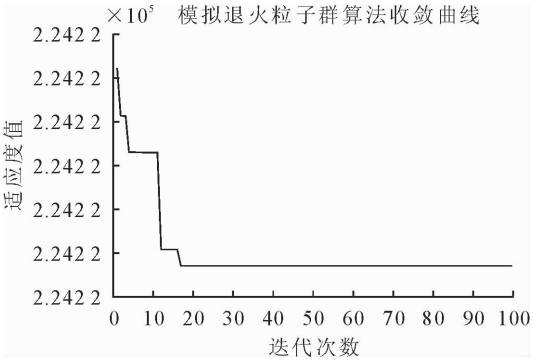


图 6　优化收敛曲线

Fig. 6　The optimal convergence curve

由图 6 可知,算法迭代至第 17 代,产生最优解,为:

$$x_{\min 0}=[153.281\ 2\quad 319.254\ 9\quad 165.217\ 1]$$

最优适应度值为 $f(x)_{\min}=224\ 220\ \text{mm}^2$。

将最优解进行圆整,取为:

$$x_{\min}=[154\quad 320\quad 166]$$

因此,取举升液压缸行程 $S_j=154$ mm、伸缩液压缸行程 $S_s=320$ mm、俯仰液压缸形成 $S_f=166$ mm 作为最优液压缸参数。

4　结论

将油茶果采摘机机械臂参数优化问题进行了简

化，确定了优化设计变量；利用图解法确定了采摘工作头处于水平位置时采摘机械臂的工作空间，推导了工作空间各边界的曲线方程；确定了优化目标函数为工作空间面积，利用工作空间包容夹持范围、工作头在水平位置上下俯仰 15°、液压缸行程初定范围 3 个条件确定了最优化问题的约束条件，利用模拟退火粒子群（SA-PSO）算法进行了采摘机械臂参数优化，得出了机械臂最优参数。

通过以上工作，得到了机械臂的最优参数为 $x_{\min}=[154 \quad 320 \quad 166]$，为后续的油茶果采摘机改进提供了理论依据。

参考文献：

[1] 王瑞，陈永忠. 我国油茶产业的发展现状及提升思路[J]. 林业科技开发，2015，29(4)：6-10.

[2] 张晓涛. 湖南省油茶产业综合效益评估研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2016.

[3] 刘洋，曲振兴，汤晶宇，等. 油茶机械化作业现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工装备，2015，43(10)：6-8.

[4] Loghavi M，Mohseni S. The effects of shaking frequency and amplitude on detachment of lime fruit[J]. Iran Agriculture Research，2006，25(1)：27-38.

[5] Safdari A，Ghassemzadeh H R. Design，construction and evaluation of portable limb shaker for almond tree[J]. AJAE，2010，1(5)：179-183.

[6] 王朋辉，李立君，高自成，等. 摆动式林果采摘头设计与分析[J]. 西北林学院学报，2015，30(5)：288-291.
WANG P H，LI L J，GAO Z C. The design and analysis of oscillating fruit picking head[J]. Journal of Northwest Forest University，2015，30(5)：288-291. (in Chinese)

[7] 徐丽明，陈俊威，吴刚，等. 梳刷振动式枸杞收获装置设计与运行参数优化[J]. 农业工程学报，2018，34(9)：75-82.
XU L M，CHEN J W，WU G，*et al*. Design and operation parameters optimization of comb brush vibratory harvesting device for wolfberry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2018，34(9)：75-82. (in Chinese)

[8] 朱广飞，任嘉嘉，王振，等. 油茶果脱壳机的设计与工作参数优化[J]. 农业工程学报，2016，32(7)：19-27.
ZHU G F，REN J J，WANG Z，*et al*. Designof shelling machine for camellia oleifera fruit and operating parameter optimization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2016，32(7)：19-27. (in Chinese)

[9] 张最，肖宏儒，丁文芹，等. 振动式枸杞采摘机理仿真分析与样机试验[J]. 农业工程学报，2015，31(10)：20-28.

[10] 刘银辉，油茶果采摘机虚拟样机设计及动力学分析[D]. 长沙：中南林业科技大学，2012.

[11] 左二兵. 油茶果采摘机执行机构设计及工作空间优化[D]. 长沙：中南林业科技大学，2012.

[12] 高自成，李立君，刘银辉. 油茶果采摘机采摘机械臂的机构设计及运动仿真[J]. 西北林学院学报，2012，27(2)：40-42.
GAO Z C，LI L J，LIU Y H. The Mechanism design and movement simulation for the mechanical arm of the oiltea camellia fruit picking machine[J]. Journal of Northwest Forest University，2012，27(2)：266-268. (in Chinese)

[13] 张捷，田袁，邓绍江. SA-PSO 算法在 CNN 边缘提取模板设计中的应用[J]. 重庆大学学报，2016，39(4)：147-153.
ZHANG J，TIAN Y，DENG S J. The application of SA-PSO to CNN edge detection template design [J]. Journal of Chongqing University，2016，39(4)：147-153. (in Chinese)

[14] 张院生，高永涛，王喆，等. 基于 SA-PSO 混合算法的微震定位研究[J]. 现代隧道技术，2016，53(3)：137-145.

[15] 唐斌，江浩斌，陈龙，等. 基于改进型 PSO 算法的汽车转阀参数优化[J]. 农业机械学报，2015，46(8)：319-326.
TANG B，JIANG H B，CHEN L，*et al*. Optimization of rotary valve parameters based on improved PSO algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(8)：319-326. (in Chinese)

[16] 高自成，李立君，李昕，等. 齿梳式油茶果采摘机采摘执行机构的研制与试验[J]. 农业工程学报，2013，29(10)：19-25.

（上接第 254 页）

[6] 徐建林，沈初见. 样方法调查草地中某种双子叶植物的种群密度[J]. 生物学通报，2006，41(9)：32-34.

[7] 高仲元. 长春的物候季节与自然历（1984－1988 年）[J]. 东北师大学报：自然科学版，1991(3)：91-97.

[8] 客佰慧. 寒地植物色彩搭配设计应用研究[D]. 长春：吉林建筑大学，2015.

[9] 倪黎. 城市园林植物景观设计的色彩应用研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2007.

[10] 朱慧，张宇东. 基于实验心理学的色彩心理探究[J]. 中国包装工业，2008，7：48-51.

[11] 杨敏娣. 北京市主要园林木本植物叶色构成与应用研究[D]. 北京：北京林业大学，2012.

[12] 王美丽. 福州市春季植物花色色彩分析与景观应用[D]. 福州：福建农林大学，2015.

[13] 周道瑛. 园林植物种植设计[M]. 北京：中国林业出版社，2008.

[14] 孙亚美. 北京地区常用秋色叶树种色彩量化与评价研究[D]. 北京：北京林业大学，2015.

[15] 崔晓燕，段渊古，陆瑛. 杭州市区秋季植物季相与景观特色探析[J]. 西北林学院学报，2016，31(6)：289-294.
CUI X Y，DUAN Y G，LU Y，*et al*. Ornamental value and landscape characteristics of the seasonal aspects in autumn in Hangzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University，2016，31(6)：289-294. (in Chinese)

[16] 陈少鹏，代新竹，郭太君，等. 长春市主要园林树木物候相及其在植物配置中的应用[J]. 吉林农业大学学报，2011，33(2)：189-194.
CHEN S P，DAI X Z，GUO T J，*et al*. Phenophase of landscape trees and its application in disposition of plants in Changchun City[J]. Journal of Jilin Agricultural University，2011，33(2)：189-194. (in Chinese)