

基于改进引力搜索算法的高速并联 机器人轨迹优化

Trajectory optimization of high speed parallel robot based on
improved gravity search algorithm

徐 岩

XU Yan

(绥化学院, 黑龙江 绥化 152061)

(Suihua College, Suihua, Heilongjiang 152061, China)

摘要:目的:解决并联机器人在罐头食品拾放过程中刚性冲击大、运动稳定性差等问题。方法:基于高速并联机器人的体系结构,提出了一种运动轨迹规划方法用于高速并联机器人末端执行器的轨迹优化。建立多约束、多目标、非线性轨迹优化模型,并采用改进的引力搜索算法求解。通过仿真验证了所提方法的可行性。结果:与改进前的规划方法相比,所提规划方法能在较短的时间内完成拾放任务,一次操作的最短时间为 0.169 1 s。结论:该规划方法解决了传统并联机器人拾放过程中刚性冲击大、运动稳定性差等问题,具有一定的实用价值。

关键词:并联机器人;罐头食品;拾放;末端执行器;引力搜索算法;轨迹优化

Abstract: **Objective:** To solve the problems of large rigid impact and poor motion stability of parallel robot in the process of picking and placing canned food. **Methods:** Based on the architecture of high-speed parallel robot, a trajectory planning method was proposed for trajectory optimization of end effector of high-speed parallel robot. A multi constraint, multi-objective and non-linear trajectory optimization model was established and solved by an improved gravity search algorithm. The feasibility of the proposed method was verified by simulation. **Results:** Compared with the planned method, the proposed method can complete the task in the shortest time of 0.169 1 s. **Conclusion:** The planning method solves the problems of large rigid impact and poor motion stability in the picking and placing process of traditional parallel robot, and has certain practical value.

基金项目:黑龙江省教育厅基本科研业务费项目(编号:YWK10236200205, YWK10236200107);黑龙江省哲学社会科学研究规划项目(编号:20YSE288)

作者简介:徐岩(1980—),女,绥化学院讲师。

E-mail: xuai80@126.com

收稿日期:2021-12-26

Keywords: parallel robot; canned food; pick and place; end effector; gravity search algorithm; trajectory optimization

高速并联机器人被广泛应用于食品、医疗等诸多领域^[1-2]。为了提高生产线上高速并联机器人的工作效率,国内外学者对其运动轨迹的规划开展了大量的研究。张好剑等^[3]将改进遗传算法用于高速并联机器人的路径规划,发现其能有效降低分拣行程,而且平均分拣效率较优化前提高了 14.76%;解则晓等^[4]利用电机输入电能和机器人机械能消耗两个能耗指标,对 9 种轨迹优化方法参数进行了优化,发现 Bang-Bang 运动定律的分段多项式曲线是最优轨迹,具有时空可重复性;章鸿^[5]提出了一种基于三次样条函数的高速并联机器人轨迹规划方法,该法可以改善机器人的工作空间,提高机器人末端执行器的稳定性;郭俊等^[6]提出了一种基于蚁群算法的轨迹规划方法,减小了末端执行器的抖动,提高了设备运行的平稳性。上述方法可以生成满足各种复杂约束条件的运动轨迹,但计算效率低、稳定性差。

基于此,研究拟将运动轨迹规划方法用于高速并联机器人末端执行器的轨迹优化,旨在为高速并联机器人轨迹规划方法的研究提供依据。

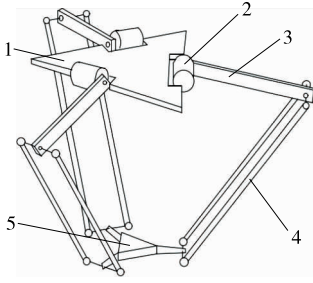
1 系统概述

图 1 为高速并联食物拾放机器人的结构,其主要由静平台、动平台、主动臂、从动臂、减速器及电机五部分组成^[7]。驱动电机固定在静平台上,从动臂通过球铰与动平台连接;主动臂和从动臂组成支链,动平台由主平台和辅助平台组成。

2 末端执行器轨迹优化

2.1 运动轨迹模型

在末端执行器拾放操作过程中,拾放点的角速度和



1. 静平台 2. 减速器及电机 3. 主动臂 4. 从动臂 5. 动平台

图1 并联机器人结构

Figure 1 Parallel robot body

加速度为零,转角平滑,加速度连续^[8]。通过上述分析建立规划模型。以运动时间最低和加加速度变化最小为目标,以速度和加速度在合理范围内为约束条件,建立多约束、多目标、非线性高速并联机器人末端执行器规划模型,如式(1)和式(2)所示。

$$\min \begin{cases} f(t) = \sum_{i=1}^3 t_i \\ J = \max \{ \|\theta_i^{**}\|_1 \} \end{cases}, \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} \max |\theta_i| - V_{\max} \leq 0 \\ \max |\theta_i^{**}| - a_{\max} \leq 0 \\ \theta_{iA} = \theta_{iD} = 0 \\ \theta_{iA}^{**} = \theta_{iD}^{**} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

t_i —— 静平台上 3 个驱动电机的运动时间, s;

θ_i —— 静平台上 3 个驱动电机的旋转角度, rad;

θ_{iA} 和 θ_{iD} —— 始、末角速度, rad/s;

θ_{iA}^{**} 和 θ_{iD}^{**} —— 始、末角加速度, rad/s²;

$V_{\max}$ —— 关节最大角速度, rad/s;

$a_{\max}$ —— 关节最大加速度, rad/s²。

选取权重系数 k_1 和 k_2 , 根据特定的比例关系结合运动周期目标和加加速度目标, 然后用改进算法求解模型^[9]。

2.2 改进引力搜索算法

引力搜索算法(GSA)在处理优化问题的过程中, 种群中所有个体之间的信息按照万有引力定律进行传递, 使个体相互作用, 最终聚集在一起获得最优解^[10]。GSA 具有良好的全局搜索能力。然而, GSA 也存在一些问题, 如早熟收敛和求解精度差等问题^[11]。因此, 从初始种群优化、引力常数优化和个体逃逸优化 3 个方面进行了改进。

2.2.1 初始种群优化 初始种群分布均匀合理, 非常有利于算法求解。因此, 引入了一种用于初始种群选择的对立学习策略^[12]。

假设个体 $x \in [a, b]$, 在对立学习策略下对于个体为 $x^- = a + b - x$ 。这种关系被扩展到多维空间, 以优化初始种群选择。设一个解 $P(x_1, x_2, \dots, x_N)$, 有 $x_i \in$

$[a_i, b_i]$ ($i=1, 2, \dots, N$), 相反的解为 $P^- (x_1^-, x_2^-, \dots, x_N^-)$, 有 $x_i^- = a_i + b_i - x_i$ 。前期种群 R_x 中个体在种群中的位置如式(3)所示^[13]。

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iD})。 \quad (3)$$

其中, $x_{ij} \in [a_j, b_j]$, $i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, D$ 。

采用对立学习策略可以通过初始种群 R_x 获得对立种群 O_x , 如式(4)所示^[14]。

$$X_i^- = (x_{i1}^-, x_{i2}^-, \dots, x_{ij}^-, \dots, x_{iD}^-)。 \quad (4)$$

其中, 对立种群 O_x 每个对立个体 x_{ij} 与初始群体中的个体 x_{ij} 之间的关系如式(5)所示。

$$x_{ij}^- = a_j + b_j - x_{ij}。 \quad (5)$$

从原始种群中获得的对立种群 O_x 与原始种群 R_x 相结合, 形成新的初始种群 $\{R_x \cup O_x\}$ 。引入对立学习策略后, 种群适应度值的解不仅包括初始种群的解, 还包括对立种群的解, 提高了算法效率^[15]。

2.2.2 引力常数优化 参数 α 对 G 值有很大影响, 通过控制参数 α 的值, 可以间接影响加速度的变化, 以控制收敛速度。将模糊控制引入参数 α 的控制中, 具体步骤:

步骤 1: 对种群特征进行分析。引入种群丰富度 R_N 和发展度 A_N , 种群丰富度表示种群在解中的位置, 其与个体在解中的分布有关, R_N 越高越不易陷入局部极值, 在参数处理中, 引入 R_N 来评估搜索范围内个体的理想分布, 如式(6)所示^[16]。

$$R_N = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{\sum_{j=1}^D (X_{ij}^k - \bar{X}_j^k)^2}}{N \times R_L}, \quad (6)$$

式中:

N, D —— 个体数和维度;

R_L —— 最远两个个体之间的距离;

X —— 个体位置;

$\bar{X}$ —— 个体分布中心;

k —— 迭代次数;

R_N —— 种群丰富度, $(0, 1)$ 。

根据算法中的个体适应度值设计发展水平 A_N 。负值表示发展方向的偏离, 算法解偏离最优解。对于模糊控制, 需要评估 R_N, A_N, k 和 $\alpha(t-1)$, 以获得其结果 $\alpha(t)$ 。

步骤 2: 设定评估标准。根据需求, 将隶属度分为上、中、下三级。表 1 为参数 $R_N, A_N, k, \alpha(t-1)$ 的取值与隶属函数的关系。

步骤 3: 参数 α 模糊处理策略。根据步骤 1 和步骤 2 中选择的参数, 根据表 2 中的策略选择参数 α 值。

2.2.3 个体逃逸优化 在 GSA 优化过程中, 由于初始种群选择不足会使多个个体逃逸, 在限定区分布非常密集, 对算法的性能产生非常大的影响^[17]。因此, 在处理个体

表 1 不同等级参数取值范围

Table 1 Value range of different grade parameters

隶属度	R_N	A_N	k	$\alpha(t-1)$
上	(0.00,0.05)	$(-\infty,0)$	(0,15)	(10,15)
中	—	—	[15,25]	[15,20]
下	[0.50,1.00)	$[0,+\infty)$	(25,30)	(20,25)

表 2 取值规则表[†]

Table 2 Value rule table

参数	a	b	c	d
R_N	下	下	上	上
A_N	上	下	上	下
k	下	中	上	上
$\alpha(t-1)$	中	上	下	中
$\alpha(t)$	下	中	中	上

[†] R_N 、 A_N 、 k 为条件参数; $\alpha(t-1)$ 、 $\alpha(t)$ 为结果。

逃逸问题时,引入界限异变,逃逸个体 x_i 超过上限如式(7)所示,超过下限如式(8)所示^[18]。

$$x_i = \begin{cases} -u \times r_d \times x_{\max} + x_{\max}, & x_{\max} \geq 0 \\ u \times r_d \times x_{\max} + x_{\max}, & x_{\max} < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$x_i = \begin{cases} u \times r_d \times x_{\min} + x_{\min}, & x_{\min} \geq 0 \\ -u \times r_d \times x_{\min} + x_{\min}, & x_{\min} < 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中:

$x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ ——逃逸个体的位置上、下限,mm;

u ——异变参数(根据 $x_{\max}$ 与 $x_{\min}$ 进行选择);

r_d ——随机变量,[0,1]。

使用上述处理方法,当个体超过限值时,可以避免逃逸个体最终集中在界限上,分散算法的搜索方向,降低搜索速度。

图 2 为改进引力搜索算法的流程图。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数

仿真设备为华为 PC,操作系统为 windows 10 64 位旗舰,11 代酷睿 i7 CPU,主频 2.5 GHz,内存 16 GB,仿真平台为 MATLAB r2018a^[19]。表 3 为高速并联机器人的基本参数。

高速并联机器人拾放路径为高度 25 mm、长度 305 mm 的类门字型路径。算法约束:最大角速度 $V_{\max} = 10 \text{ rad/s}$,最大角加速度 $a_{\max} = 400 \text{ rad/s}^2$ 。初始种群中的个体数 $N = 40$,算法的最大迭代次数为 30,单次作业时长 0.01~0.20 s。食品拾放对工作效率要求较高,将权重系数设置为 $k_1 = 0.8, k_2 = 0.2$ 。

3.2 仿真分析

为了验证试验算法的可行性,采用标准引力搜索算



图 2 改进引力搜索算法流程

Figure 2 Improve gravitational search algorithm process

表 3 机器人基本参数

Table 3 Robot basic parameters

参数	单位	数值
静平台半径	mm	290
动平台半径	mm	50
关节角范围	(°)	2.9~112.8
主动臂长度	mm	260
从动臂长度	mm	850

法(GSA)和试验算法分别求解了 4-3-4 规划模型和 5-3-5 规划模型。分析单次作业时长 t (半运动周期)和加加速度的求解结果,对 20 次的结果进行记录,获得了单次操作的最短操作时间和平均操作时间,结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出,试验算法得到的 4-3-4 规划模型最短单次运行时间为 0.168 9 s,GSA 的最短单次运行时间为 0.172 2 s。相同算法下,4-3-4 规划模型得到的规划结果均优于 5-3-5 规划模型的。因此,试验算法得到的运动轨迹设计方案更符合预期要求,可以最大限度地提高机

表 4 不同算法的规划结果

Table 4 Planning results for different algorithms

求解算法	4-3-4 规划模型		5-3-5 规划模型	
	单次最短 作业时间	平均作业 时间	单次最短 作业时间	平均作业 时间
GSA	0.172 2	0.182 3	0.178 9	0.184 5
试验算法	0.168 9	0.175 8	0.171 3	0.180 2

机器人的性能,确保稳定性。

为了验证试验算法的优越性,在 4-3-4 规划模型下,进一步分析了运动周期与抑振效果的关系。加速度变化越小,对机构振动的抑制效果越明显,高速并联机器人运动越稳定。由于轨迹规划模型还包括运动周期的时长,有必要分析两者之间的关系。

设置不同的 k_1 和 k_2 系数,并将其代入模型中,通过改进算法求解模型,单次作业周期曲线和加加速度变化曲线如图 3 和图 4 所示。

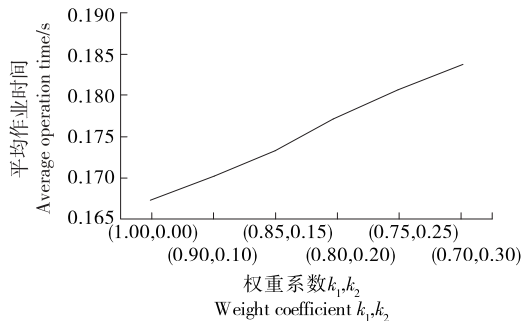


图 3 单次作业时长变化曲线

Figure 3 Single operation time change curve

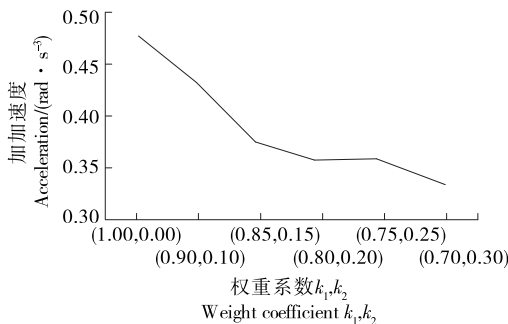


图 4 加加速度变化曲线

Figure 4 Acceleration curve

从图 3 和图 4 可以看出,在不同权重系数下获得的最优解结果存在一定的偏差。在相同的仿真条件下,缩短运动时间和抑制振动的效果为对偶关系。如果运动周期的权重因子较高,则抑制振动的效果较弱。如果加加速度的权重因子较高,则平均作业时间会在一定程度上增加,这会降低高速并联机器人拾放效率。因此,当对高速并联机器人的作业周期要求较高,而对拾放稳定性要求较低时,可以将 k_1 值设置得较大;当高速并联机器人拾放稳定性要求较高且作业周期要求宽松时,可将 k_2 值设置得较大。基于此,可以根据不同的操作要求灵活设定规划目标以满足不同的需求。

4 结论

基于高速并联机器人的体系结构,提出了一种运动轨迹规划方法用于高速并联机器人末端执行器的轨迹优

化。建立多约束、多目标、非线性轨迹优化模型,并通过改进的引力搜索算法求解。结果表明,与改进前的规划方法相比,所提方法效率更高,能够在较短的时间内完成拾放任务,单次操作的最短时间为 0.169 1 s。鉴于目前的试验设备和数据规模,高速并联机器人相关技术的研究尚处于起步阶段,试验仅研究了高速并联机器人末端执行器的运动轨迹规划方法,未对其动力学和控制系统进行研究。在后期阶段,应不断完善高速并联机器人的相关功能,以适应未来不断变化的应用环境。

参考文献

- [1] 严培培. 面向非典型食品生产的高速机器人分拣系统设计[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 94-97.
YAN Pei-pei. Design of high speed robot sorting system for atypical food production[J]. Food & Machinery, 2016, 32(2): 94-97.
- [2] 胡国喜, 王超, 刘宇珩. 基于改进光滑滑模阻抗控制的水果分拣机械人夹持机构控制方法[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 123-126.
HU Guo-xi, WANG Chao, LIU Yu-heng. Control method of fruit sorting robot clamping mechanism based on improved smooth sliding mode impedance control[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 123-126.
- [3] 张好剑, 苏婷婷, 吴少泓, 等. 基于改进遗传算法的并联机器人分拣路径优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(10): 93-99.
ZHANG Hao-jian, SU Ting-ting, WU Shao-hong, et al. Sorting path optimization of parallel robot based on improved genetic algorithm[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(10): 93-99.
- [4] 解则晓, 李斌, 任凭. 基于能量指标的 Delta 并联机器人拾放轨迹参数优化及验证[J]. 计算机集成计算系统, 2018, 24(12): 3 073-3 081.
XIE Ze-xiao, LI Bin, REN Ping. Optimization and verification of picking and placing trajectory parameters of Delta Parallel Robot Based on energy index[J]. Computer Integrated Computing System, 2018, 24(12): 3 073-3 081.
- [5] 章鸿. Delta 快速分拣机器人轨迹优化算法研究[J]. 机械设计与制造, 2021, 12(6): 288-295.
ZHANG Hong. Research on trajectory optimization algorithm of delta rapid sorting robot[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021, 12(6): 288-295.
- [6] 郭俊, 王新. 食品拾放的 3-PUU 并联机器人轨迹规划[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 223-226.
GUO Jun, WANG Xin. Trajectory planning of 3-PUU parallel robot for food picking and placing[J]. Food Industry, 2021, 42(2): 223-226.
- [7] LI Wei, XIONG Rong. A hybrid visual servo control method for simultaneously controlling a nonholonomic mobile and a manipulator[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic

- Engineering, 2021, 22(2): 141-154.
- [8] 史亚贝. 基于 DSP 的三自由度采摘机械手控制系统研究[J]. 农机化研究, 2022, 12(2): 34-38.
- SHI Ya-bei. Research on control system of 3-DOF picking manipulator based on DSP[J]. Agricultural Mechanization Research, 2022, 12(2): 34-38.
- [9] 李光, 章晓峰, 杨加超, 等. 基于残差 BP 神经网络的 6 自由度机器人视觉标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 366-374.
- LI Guang, ZHANG Xiao-feng, YANG Jia-chao, et al. Vision calibration of 6-DOF robot based on residual BP neural network[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 366-374.
- [10] MA Wei-ping, LI Wen-xin, SUN Jin-chuan, et al. Binocular vision target location method based on coarse fine stereo matching[J]. Computer Applications, 2020, 40(1): 227-232.
- [11] 宋海涛, 何文浩, 原魁. 一种基于 SIFT 特征的机器人环境感知双目立体视觉系统[J]. 控制与决策, 2019, 34(7): 1 545-1 552.
- SONG Hai-tao, HE Wen-hao, YUAN Kui. A robot environment perception binocular stereo vision system based on SIFT feature[J]. Control and Decision, 2019, 34(7): 1 545-1 552.
- [12] AHANDANI M A, ALAVIRAD H. Opposition-based learning in the shuffled differential evolution algorithm[J]. Soft Computing, 2016, 26: 64-85.
- [13] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in hadoop map reduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [14] 赵利平, 吴德刚. 基于小波与模糊相融合的苹果分级算法[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 142-145.
- ZHAO Li-ping, WU De-gang. Apple grading algorithm based on Wavelet and fuzzy fusion[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 142-145.
- [15] AZUMAYA C M, DAYS E L, VINSON P N, et al. Screening for AMPA receptor auxiliary subunit specific modulators[J]. PLoS One, 2017, 12(3): 1 523-1 538.
- [16] 贺禹强, 刘故帅, 肖昇瑶, 等. 基于改进 GA-PSO 混合算法的变电站选址优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 143-150.
- HE Yu-qiang, LIU Gu-shai, XIAO Yi-yao, et al. Substation location optimization based on improved GA-PSO hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 143-150.
- [17] 朱光耀. 基于无标定视觉伺服的全向移动机械臂跟踪控制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(23): 23-29.
- ZHU Guang-yao. Tracking control of omnidirectional mobile manipulator based on uncalibrated visual servo[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(23): 23-29.
- [18] 王志中. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2018, 12(1): 242-244.
- WANG Zhi-zhong. Research on mobile robot path planning based on improved ant colony algorithm[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2018, 12(1): 242-244.
- [19] 于文妍, 杨坤林. 四旋翼无人机串级模糊自适应 PID 控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2019, 12(1): 227-231.
- YU Wen-yan, YANG Kun-lin. Design of cascade fuzzy adaptive PID control system for quadrotor UAV[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2019, 12(1): 227-231.

(上接第 42 页)

- [22] 嵇林娜, 刘石雪, 汪凤玲, 等. 酸水解法测定脂肪的研究及方法优化[J]. 现代食品, 2020(21): 180-183.
- ZHUO Lin-na, LIU Shi-xue, WANG Feng-ling, et al. Study on the determination of fat by acid hydrolysis method and its optimization[J]. Modern Food, 2020(21): 180-183.
- [23] 何曼君, 陈维孝, 董西侠. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001: 137-139.
- HE Man-jun, CHEN Wei-xiao, DONG Xi-xiang. Polymer physics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001: 137-139.
- [24] HEMAR Y, HORNE D S. Electrostatic interactions in adsorbed protein layers probed by a sedimentation technique[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, 206(1): 138-145.
- [25] ISABELLE B, SERGE P. Molecular basis of Ca^{2+} -induced gelation in alginates and pectins: The egg-box model revisited[J]. Biomacromolecules, 2001, 2: 1 089-1 096.
- [26] 杜柏桥. 羧甲基纤维素钠(CMC)与酪蛋白的相互作用及其稳定性乳体系机理的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 47-52.
- DU Bo-qiao. The interaction between carboxymethylcellulose (CMC) and casein micelle and the stabilization mechanism of acidified milk drinks induced by CMC[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008: 47-52.

(上接第 81 页)

- [9] 张红岩, 王永志, 刘庆红. 图像识别技术在食品包装缺陷检测中的应用[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 225-228.
- ZHANG Hong-yan, WANG Yong-zhi, LIU Qing-hong. Application of image recognition technology in food packaging defect detection[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 225-228.
- [10] CORTES C, VAPNIK V N. Support-vector networks[J]. Machine Learnig, 1995, 20(3): 273-297.
- [11] VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer, 1995: 133-135.
- [12] 梁礼明, 冯新刚, 陈云嫩, 等. 基于样本分布特征的核函数选择方法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(1): 323-328.
- LIANG Li-ming, FENG Xin-gang, CHEN Yun-nen, et al. Research on kernel function selection method based on sample distribution characteristics[J]. Computer Simulation, 2013, 30(1): 323-328.
- [13] 王文剑, 田萌. 核选择研究进展[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 460-471.
- WANG Wen-jian, TIAN Meng. Advances in kernel selection research[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2017, 40(3): 460-471.