

求解变电站巡视路径问题的改进粒子群算法研究

钟 成

(广西电网有限责任公司北海供电局, 广西 北海 536000)

摘要: 随着电网设备规模日益扩大, 利用智能机器人巡视变电站设备的技术得以广泛应用。而优化变电站设备巡视路径是降低智能巡视机器人能耗, 提高机器人工作效率的有效手段。提出了一种改进粒子群算法, 通过引进进化变异粒子个体, 并且对惯性权重进行自适应调整, 实现了粒子种群的动态更新。既解决了传统算法的早期容易收敛于局部最优解的问题, 又能在运算的后期快速求得全局最优解, 提高计算速度, 并通过Matlab仿真应用于优化某500 kV变电站设备巡视路径, 计算结果证明了该算法能高效求得最优路径。

关键词: 巡视路径; 改进粒子群算法; Matlab仿真

Study on improved particle swarm optimization for substation patrol path problem

ZHONG Cheng

(Beihai Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co.,Ltd., Beihai 536000, China)

Abstract: With the increasing scale of power grid equipment, the technology of using intelligent robot to patrol substation equipment has been widely used. Optimizing the circuit path of substation equipment is an effective means to reduce energy consumption of intelligent patrol robot and improve its working efficiency. An improved particle swarm optimization algorithm is proposed, which can dynamically update the population of particles by introducing the evolutionary variation of individual particles and adjusting the inertia weight adaptively. It not only solves the problem that the traditional algorithm is easy to converge to the local optimal solution in the early stage, but also can quickly obtain the global optimal solution in the late stage of the operation and improve the calculation speed, then the Matlab simulation is applied to optimize the patrol path of a 500 kV substation equipment. The calculation results prove that the algorithm can efficiently obtain the optimal path.

Key words: patrol path; improved particle swarm optimization; Matlab simulation

0 引言

近年来电网设备规模日趋庞大, 智能巡视机器人得到了广泛应用。利用机器人巡视变电站,

可以大幅减轻巡维人员的工作压力, 解放劳动力, 使巡维人员从事更加专业的工作, 对于化解电力设备数量不断增长与巡维人员不足之间的矛盾有重要意义。优化变电站设备巡视路径是降低智能巡视机器人能耗, 提高机器人效率的有效手

广西电网有限责任公司科技项目 (GXKJXM20180241)

段。变电站设备巡视路径优化问题可以描述为：给定 l 个设备间隔以及各设备间隔的平面位置坐标，求解一条经过各设备间隔的最短路径。其数学模型为：假设 l 个设备间隔的集合 $G=\{G_1, G_2, \dots, G_l\}$ ，且每两个设备间隔的距离为 $d(G_i, G_j)$ ，要求解一条Hamilton回路，使 $\sum_{i,j=1}^l d(G_i, G_j)$ 的值最小。这是一个典型的优化问题，随着问题规模的扩大（设备间隔数目增加），该问题的求解结果会呈现指数级增加，造成求解过程越来越复杂，所需的计算时间也越来越长，因此该问题属于组合优化NP问题（Non-Deterministic Polynomial Problems，存在多项式算法能够解决的非决定性问题）^[1]。若采用传统的算法，例如穷举搜索法、线性规划法是难以实现的，所以需要找到更优化的算法来求解此问题。

粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）是一种进化计算技术，其于1995年由Eberhart和Kennedy提出，源于对鸟群捕食的行为研究^[1-2]。该算法最初是受到飞鸟集群活动的规律性启发，进而利用群体智能建立的一个简化模型。PSO算法是建立在对动物集群行为观察的基础上，利用集群中个体对信息的共享，使整个集群的运动规律在求解空间中产生有规则可循的演化过程，进而求出最优解。

1 PSO算法基本原理

PSO优化算法对鸟群的捕食行为进行模拟，设想这样一个场景：一群鸟在某区域内随机搜索食物，但在该区域里有且仅有一块食物，所有的鸟都不知道食物的具体位置，但它们知道当前的位置离食物还有多远，因此找到食物的最优策略是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域，从而获悉食物位置^[3]。PSO算法中每个粒子代表问题的潜在解，并且每个粒子对应于由适应度函数确定的适应度值。粒子的速度决定了粒子移动的方向和距离，速度随自身及其他粒子的移动经验进行动态调整，进而实现个体在可解空间中的寻优。

假定在一个 m 维的空间中，有 n 个粒子组成粒子群 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，其中，第 i 个粒子的位置向量为 $X_i=(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$ ，速度向量为 $V_i=(V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})$ ，该粒子在 m 维空间移动过程中历经的最优位置为 $P_i=(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in})$ 。将全部粒子经过的最优位置用 P_G 表示，则 $P_G=(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn})$ 。粒子在每次迭代后的速度与位置评价函数分别用式（1）、式（2）表示，即

$$V_i(k+1) = wV_i(k) + c_1r_1[P_i - X_i(k)] + c_2r_2[P_G - X_i(k)] \quad (1)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1) \quad (2)$$

式中， k 为迭代次数； w 为惯性权重； c_1 、 c_2 为加速因子； r_1 、 r_2 为在区间 $[0,1]$ 内服从均匀分布的随机数； $wV_i(k)$ 为动量部分，为粒子提供一个初始动量，使之可根据初速度进行惯性运动； $c_1r_1[P_i - X_i(k)]$ 为认知部分，表示粒子自身的记忆行为，激发粒子向自身曾发现的最优位置移动； $c_2r_2[P_G - X_i(k)]$ 为社会部分，表示粒子间的相互影响，引导其他粒子向粒子群的最优解移动^[4-7]。

三部分的平衡约束决定了PSO算法的性能。在迭代计算的过程中，为了防止粒子超速盲目搜索，还要对粒子的速度加以限制，一般将粒子的位置限制在区间 $[-X_{imax}, X_{imax}]$ 内。

2 改进策略

由于传统的粒子群算法存在早熟收敛于局部最优解和收敛速度较慢的问题^[8-9]，本文提出了以下改进。

2.1 进化变异粒子个体

变异操作是增加种群多样性的重要方法，适当的变异既可以使种群多样化，又能提高局部区域探索能力。本文引入进化变异算子，当多样性低时，增加变异因素，使算法探索更广阔的空间；当多样性较强时，削弱变异因素，使算法在小范围内精确求解。

用 S_{ij} 表示粒子 X_i 、 X_j 的相似度，即

$$S_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta \quad (3)$$

式中, m 表示粒子空间维数。

$$\delta = \begin{cases} 1 & X_{ik} = X_{jk} \\ 0 & X_{ik} \neq X_{jk} \end{cases} \quad (4)$$

当 $X_{ik}=X_{jk}$ 时, 表示粒子 X_i 与 X_j 在第 k 个位置的值相等。 $S_{ij} \in [0, 1]$, 若 $S_{ij}=1$, 则表示 X_i 、 X_j 完全相同。

定义第 i 个粒子的多样性 D_i

$$D_i = (S_{i,P_i} + S_{i,P_G} S_{P,P_G}) / 3 \quad (5)$$

式中, P_i 为第 i 个粒子的最优解; P_G 为全部粒子的最优解。

将粒子种群多样性定义为单个粒子多样性的平均值, 即

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (6)$$

当 $D \leq 0.3$ 时, 执行该变异进化, 并采用顺序交换法将粒子 $X_i=(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$ 中随机产生的 X_{ij} 、 X_{ik} 两个变异位置进行交换, 得到新粒子 $X_i=(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij-1}, X_{ik}, X_{ij+1}, \dots, X_{ik-1}, X_{ij}, X_{ik+1}, \dots, X_{is})$ 。

2.2 自适应调整惯性权重

在粒子群优化的过程中, 按照适应度的大小对当前的粒子群 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 进行降序排序, 并相应形成一个排好序的新粒子群 $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$, 令 f_i 为种群规模为 n 的粒子群中, 第 i 个粒子的适应度, $Y_i \in \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, $1 \leq i \leq n$ 。由于新粒子群中排列第一的粒子适应度最强, 因此将其称之为最优粒子, 相应的把新粒子群中第 i 个粒子与最优粒子的距离称为最优粒子距 d_i 。

隶属函数是模糊集合论中的一个基础概念, 是模糊集合理论与方法具体应用的基石。因此, 如何建立某个模糊概念的较为合适的隶属函数, 是用模糊集合的方法能否较好地解决问题的关键。通过引入最优粒子距的概念, 隶属函数 $u(d_i, x)$ 的表达式为

$$u(d_i, x) = \begin{cases} 1 + \alpha & d_i \leq t_1 n \\ 1 & t_1 n \leq d_i \leq t_2 n \\ 1 + \beta & d_i \geq t_2 n \end{cases} \quad (7)$$

式中, n 为粒子群规模; t_1 、 t_2 为控制参数; α 、 β 为调整系数; 并且满足条件 $t_1 \leq t_2 \leq 1$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ 。

通过上述隶属函数的映射关系, 可知个体粒子在粒子群中的隶属度, 根据每个粒子的隶属度, 可以建立如下惯性权重自适应调整函数 $w(i, x)$

$$w(i, x) = u(d_i, x) [w_s + (w_e - w_s) T / T_{\max}] \quad (8)$$

式中, T 为当前迭代次数; $T_{\max}$ 为最大迭代次数; w_s 、 w_e 分别为惯性权重 w 的初始值和结束值。

3 仿真研究

本文应用的实例为某500 kV变电站, 根据该变电站的电气总平面布置图构建平面直角坐标系, 并列出该变电站需巡视的52个设备间隔的平面直角坐标值。采用Matlab R2013a进行仿真测试, 改进粒子群算法的参数设置如下: 加速因子 $c_1=1.4$, $c_2=1.6$; 控制参数 $t_1=0.4$, $t_2=0.6$; 调整系数 $\alpha=0$, $\beta=2$ 。

下表统计了采用所提出的改进PSO算法, 求解变电站设备巡视路径优化问题时, 分别于10次、50次、100次以及200次迭代后得出的最优解情况。由此可见, 随着迭代次数的增加, 最短巡视路径的路程也逐渐减少, 求解结果收敛于最优。

表 改进粒子群算法求解变电站设备巡视路径问题结果

Tab. Improved particle swarm optimization algorithm to solve the problem of patrol path of substation equipment

迭代次数 N_c	平均距离/m	最短距离/m
10	1 783	1 427
50	1 762	1 361
100	1 757	1 342
200	1 754	1 331

图1~图4分别展示了各次迭代进化后所求得的最优路径情况。从路径的形状可见, 早期求得的最优路径错综复杂, 存在一定的迂回折返现象, 致使总路程较长, 而经过一定数量的迭代后, 算法逐渐寻求到更优解, 路径也变得更加简洁, 因此总路程也随之变短。

图5显示了改进粒子群算法求解变电站设备巡视路径问题最优解的演化过程, 即迭代次数与最优解之间的关系, 说明随着迭代次数的增加, 最优解结果也逐渐趋向于最短。

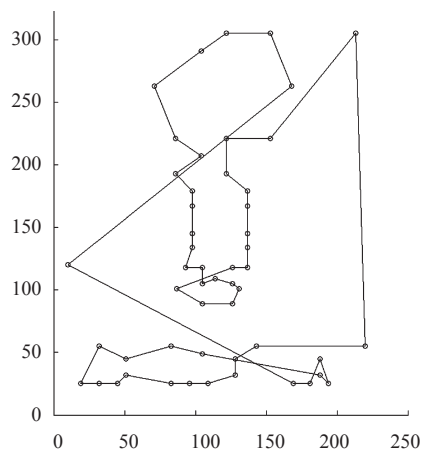


图1 迭代计算10次变电设备巡视最优路径

Fig. 1 Iterative calculation of 10 times of power transformer inspection of the optimal path

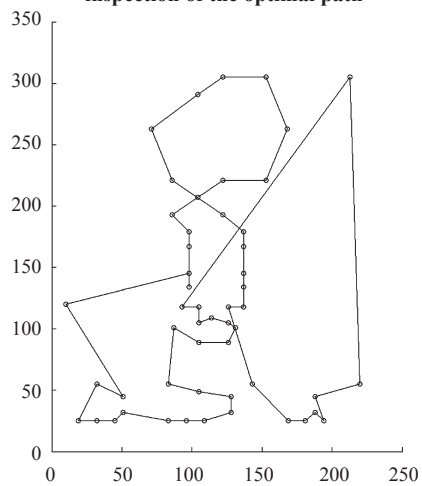


图2 迭代计算50次变电设备巡视最优路径

Fig. 2 Iterative calculation of 50 times of power transformer inspection of the optimal path

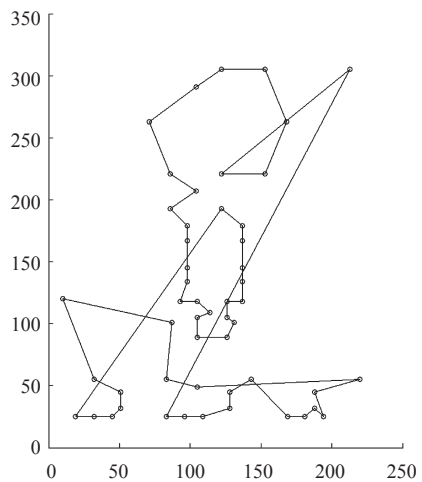


图3 迭代计算100次变电设备巡视最优路径

Fig. 3 Iterative calculation of 100 times of power transformer inspection of the optimal path

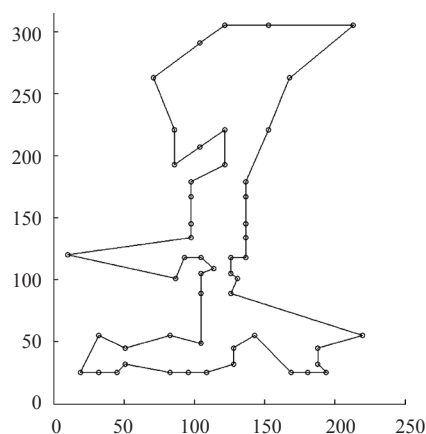


图4 迭代计算200次变电设备巡视最优路径

Fig. 4 Iterative calculation of 200 times of power transformer inspection of the optimal path

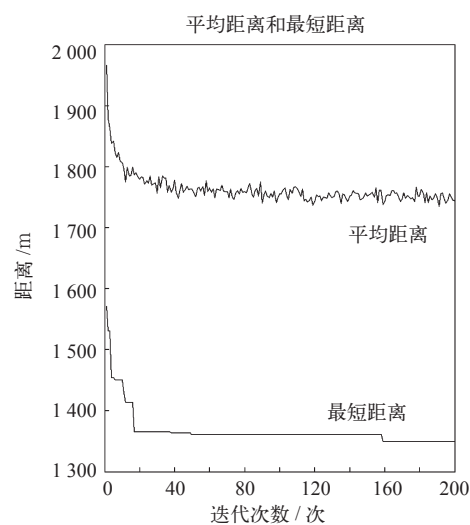


图5 改进粒子群算法求解变电站设备巡视路径最优解过程

Fig. 5 Improved particle swarm optimization algorithm to find the optimal solution of the inspection path of substation equipment

4 结束语

提出了一种PSO算法求解变电站设备巡视路径优化问题的方法，通过引进进化变异粒子个体，并且对惯性权重进行自适应调整，实现了粒子种群的动力学更新。既能够在运算的早期提高算法的探索能力，避免运算停滞，又能在运算的后期找到最优解并迅速收敛，提高求解速度。通过仿真实例说明了该PSO算法是成功的，能高效求解变电站设备巡视路径优化问题。

参考文献

- [1] 王文峰, 刘光远, 温万惠. 求解TSP问题的自逃

- 逸混合离散粒子群算法研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(8): 143-144.
- WANG Wenfeng, LIU Guangyuan, WEN Wanhui. Study of a self escape hybrid discrete particle swarm optimization for TSP[J]. Computer Science, 2007, 34(8): 143-144.
- [2] 郭文忠, 陈国龙. 求解TSP问题的模糊自适应粒子群算法[J]. 计算机科学, 2006, 33(6): 161-162.
- GUO Wenzhong, CHEN Guolong. Fuzzy self adapted particle swarm optimization algorithm for traveling salesman problems[J]. Computer Science, 2006, 33(6): 161-162.
- [3] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particles swarm theory[C]. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995: 39-43.
- [4] 钱玉良, 张浩, 彭道刚, 等. 基于新的广义粒子群方法的发电机组轴心轨迹提纯[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(2): 130-137.
- QIAN Yuliang, ZHANG Hao, PENG Daogang, et al. Orbit purification of generator unit based on a new generalized particle swarm optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(2): 130-137.
- [5] 王东, 吴湘滨, 毛先成, 等. 一种改进的求解TSP混合粒子群优化算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(6): 185-187.
- WANG Dong, WU Xiangbin, MAO Xiancheng, et al. Improved hybrid particle swarm optimization algorithm for solving TSP[J]. Computer Engineering, 2008, 34(6): 185-187.
- [6] 熊伟, 张江维, 张火林. 求解TSP问题的增强型自探索粒子群算法[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(6): 69-74.
- XIONG Wei, ZHANG Jiangwei, ZHANG Huolin. Enhanced self-tentative particle swarm optimization algorithm for TSP[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(6): 69-74.
- [7] 谢旻. 一种混合粒子群优化算法在TSP中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2013, 44(4): 506-509.
- XIE Min. An improved hybrid particle swarm optimization algorithm for TSP[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, 44(4): 506-509.
- [8] 高海兵, 周驰, 高亮. 广义粒子群优化模型[J]. 计算机学报, 2005, 28(12): 1980-1987.
- GAO Haibing, ZHOU Chi, GAO Liang. General particle swarm optimization model[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(12): 1980-1987.
- [9] 康朝海, 李鹏娜, 张永丰, 等. 基于混合蛙跳粒子群算法的TSP问题求解[J]. 吉林大学学报, 2017, 35(5): 498-506.
- KANG Chaohai, LI Pengna, ZHANG Yongfeng, et al. Solving travelling salesman problem based on shuff-led frog leaping algorithm and particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Jilin University, 2017, 35(5): 498-506.
- [10] PARASOPOULOS K E, VRAHATIS M N. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. Natural Computing, 2002, 1(2): 235-306.
- [11] 刘福才, 贾亚飞, 任丽娜. 基于混沌粒子群优化算法的异结构混沌反同步自抗扰控制[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 91-98.
- LIU Fucui, JIA Yafei, REN Lina. Anti-synchronizing different chaotic systems using active disturbance rejection controller based on the chaos particle swarm optimization algorithm [J]. Acta Phsica Sinica, 2013, 62(12): 91-98.

作者简介



钟成

钟成(1988-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事变电运行与安全生产管理方面的工作。

(收稿日期: 2019-03-10) **EA**