DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)08-0165-05

基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法研究

赵自奕
（中国核电工程有限公司,北京 100840）

摘　要: 为了优化核电管路布置优化效果,基于改进粒子群算法研究核电管路自动化布置优化方法。首先对核电管路离散节点数据进行降维处理,并结合仿真软件,对管路空间布局环境进行建模。其次对管路进行分段处理,并对管路的三维空间长度进行计算。最后以最短规划路径作为求解目标,构建出目标函数并对其进行求解,从而输出最优布置方案。对提出的方法进行布置优化效果的检验,测试结果表明,在采用基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法构建出的核电管路布置方案中,管路规划长度较短,具备较为理想的布置优化效果。

关键词: 粒子群算法;核电管路;布置优化;降维处理;自动优化方法
中图分类号: TP391　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1003-7241(2025)08-0165-05

Research on Optimization Method of Nuclear Power Pipeline Automatic Arrangement Based on Improved Particle Swarm Algorithm

ZHAO Ziyi
(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: In order to optimize the effect of nuclear power pipe layout optimization, this paper studies the method of nuclear power pipe automatic layout optimization based on improved particle swarm optimization algorithm. Firstly, the discrete node data of nuclear power pipeline are reduced in dimension, and combined with the simulation software, the spatial layout environment of the pipeline is modeled. Secondly, the pipeline is segmented, and the three-dimensional length of the pipeline is calculated. Finally, the shortest planning path is taken as the solution goal, the objective function is constructed and solved, so as to output the optimal layout scheme. In the experiment, the layout optimization effect of the proposed method is tested. The test results show that in the nuclear power pipeline automatic layout optimization method based on improved particle swarm optimization algorithm, the pipeline planning length is short, and it has a more ideal layout optimization effect.

Keywords: particle swarm algorithm; nuclear power piping; arrangement optimization; dimensionality reduction processing; automatic optimization methods

0　引言

核能作为一种高效、清洁的能源,其开发和利用越来越受到重视。其中,核电管路的布置优化是提高系统效率、降低运行成本、增强安全性的关键环节。核电管路布置问题的解决不仅涉及核电站的设计和建造,还对提高核电站的运行效率、降低事故风险、节省建造和运营成本等方面具有重要意义。

近年来,国内外学者针对核电管路布置优化问题开展了大量研究。苏锦成等[1]在结合了核电厂的厂房设备布局特点的基础上,考虑厂房大小、辐射屏蔽以及管道成本等约束,采用栅格法对核电厂厂房及设备进行空间离散,再应用A*(A-star)算法进行管路搜索,实现核电厂管道的优化布局。该方法得到的布局结果符合预期需求,但是该算法对于约束条件的界定不够精准,易导致管道布局出现局部不合理问题。李喆等[2]基于A星算法和遗传算法,对船舶管路进行智能布置,在建立布置空间模型的基础上,对传统遗传算法中引入A星算法进行改进,以提高对个体选择的精准性,将优化后的遗传算法应用于船舶管路布置问题上,该方法能够较为快速地获得最优解,提高了布置效率,但是普适性不强。林焰等[3]人基于协同进化算法和差分进化算法,提出了一种船舶分支管路的新型优化设计方法,该方法能够有效提高计算效率和全局搜索能力,但是其对于约束条件的考量较少,管路布局结果与预期结果存在一定的出入。

本文将改进粒子群算法应用于核电管路布置优化问题中,其在处理复杂、约束性强的优化问题时具有优势,为解决核电管路布置问题提供了一种新的有效途径[4]。

*基金项目:中国核电工程研发项目(KY21054)
收稿日期:2023-12-20

1 基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法研究

1.1 核电厂管路布局空间环境搭建

首先将核电管路的自动化布置优化环境设定在一个长方体空间中，对离散管路节点数据进行降维处理，再对布局空间结构进行搭建。首先假设核电管路离散数据均存储在数据组中，管路节点的高程数据以及空间数据分别为 Z、X、Y[5]，由此可以得到离散管路节点数据的空间表达式为

$$Z(m,n)=array(m,n) \tag{1}$$

$$\begin{cases}\left|X(m,n)-X(a,b)\right|=\dfrac{|m-a|}{p_1}\\ \left|Y(m,n)-Y(a,b)\right|=\dfrac{|n-b|}{p_1}\end{cases} \tag{2}$$

式中，a 和 b 分别代表平面数据的空间坐标，m 和 n 分别代表核电厂管路布局空间在水平方向以及垂直方向的分辨率，p_1 代表离散管路节点数据到空间坐标 (a,b) 的平均距离。将离散管路节点数据转化为二维映射，从而实现降维处理，则数据集合 D 表达式为

$$D=\{X_{\min},X_{\max},Y_{\min},Y_{\max},NumCol,NumRow\} \tag{3}$$

式中，X_{max} 和 X_{min} 分别代表整个布局空间中横轴数据的最大值和最小值，Y_{max} 和 Y_{min} 分别代表整个布局空间中纵轴数据的最大值和最小值，$NumCol$ 代表离散管路节点数据的总列数，$NumRow$ 代表离散管路节点数据的总行数。节点数据的二维映射结果可以表示为一个由 $NumCol$，$NumRow$ 组成的二维数组[6]，其具体表达式为

$$Node=\{Flag,Elevation,V_h,V_g,Parent\} \tag{4}$$

式中，$Node$ 代表节点总数，$Elevation$ 代表节点高程，$Flag$ 代表节点的标识信息，V_h 代表节点到布局终点的启发值，V_g 代表节点到起点的实际路程，$Parent$ 代表节点对应的上一级分支节点[7]。结合上述的降维结果，本文将降维后的离散节点数据输入到仿真软件中，由此构建出的管路布局空间示意图如图 1 所示。

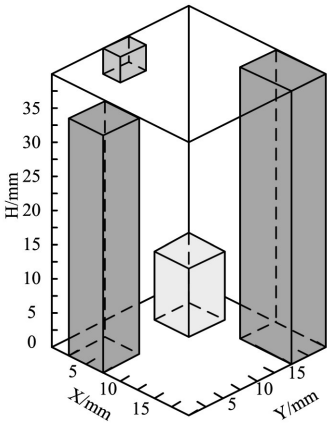


图 1 管路布局空间示意图

通过上述步骤即可完成对于核电厂管路布局空间环境的有效搭建，通过对核电管路离散节点数据进行降维处理，并结合仿真软件，对管路空间布局环境进行建模，为后续的管路自动化布置与优化提供空间。

1.2 核电管路三维长度以及坐标计算

针对上述构建出的核电管路布置空间，本文结合拉格朗日差值算法，对管路节点坐标进行锁定，在此基础上对三维长度进行计算，方便后续管路布置优化时能够以最短路径为目标构建出优化函数。

首先假设某段核电管路的起点以及终点坐标分别为 (x_1,y_1) 和 (x_n,y_n)，由此可以对该条管路上其他节点的坐标进行计算[8]，具体计算公式为

$$\begin{cases}x_i=x_{i-1}+\dfrac{(x_n-x_1)}{5}\\ y_i=y_{i-1}+\dfrac{(y_n-y_1)}{5}\end{cases} \tag{5}$$

假设在二元函数 $f(x,y)$ 中，x 的节点值为 x_i（i=1，2，…，m），y 的节点值分别为 y_j（j=1，2，…，m），且每个节点均可以在该函数中得到函数映射值，平面节点的高程为 Z_{ij}，那么结合拉格朗日差值算法，可以得到函数映射值与节点坐标之间的关系[9]，具体关系表达式为

$$f(x,y)=\frac{\sum_{i=p}^{p+2}\sum_{i=q}^{q+2}\left(\prod_{i=p}^{p+2}\dfrac{x_0-x_i}{x_i-x_i}\right)\times\left(\prod_{i=p}^{p+2}\dfrac{y_0-y_i}{y_i-y_i}\right)}{Z_{ij}} \tag{6}$$

式中，p 和 q 分别代表以 (x,y) 为中心的节点横纵坐标间距。根据上述表达式，即可对管路节点坐标进行计算。然后通过对管路进行划分，将其分为不同的段数，对三维长度进行计算[10]。则第一段的近似长度表达式为

$$L_1=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2} \tag{7}$$

式中，x_1，y_1，z_1 分别代表核电管路第一段起点的横纵坐标以及对应的管路高程，x_2，y_2，z_3 分别代表核电管路第一段终点坐标以及对应的管路高程。通过上述公式，对所有分段管道的近似长度进行计算，那么可以得到管路总长度，具体计算公式为

$$L=\sum_{i=1}^{n}L_i \tag{8}$$

通过上述步骤即可完成对于核电管路三维长度的求解，通过对管路进行分段处理，采用直线近似值的方式对其进行计算，从而提高管路长度的计算精度[11]。

1.3 基于改进粒子群算法的核电管路优化布置方案求解

针对上述计算出的核电管路三维长度，本文以长度最短作为优化目标，对管路优化布置目标函数进行构建，并结合粒子群算法对函数进行求解，从而输出最优布局

方案。假设核电管路实际起点与终点坐标分别为(X_1, Y_2, Z_3)和(X_n, Y_n, Z_n),(X_i, Y_i, Z_i)代表离散的管路节点数据,则目标函数表达式如下所示:

$$L_{\min}=\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\left(X_{i+1}-X_i\right)^2+\left(Y_{i+1}-Y_i\right)^2+\left(Z_{i+1}-Z_i\right)^2} \quad (9)$$

针对上述构建出的管道布局优化函数,采用管路弹性弯曲性能对其进行约束。假设管路转角为α,管路外径为D,具体约束表达式如下所示:

$$R\geq 3600\sqrt[3]{\frac{1-\cos\frac{\alpha}{2}}{\alpha^4}D^2} \quad (10)$$

式中,R代表核电管路在弯曲条件下对应的弹性曲率半径。

由此,本文构建出的目标函数求解流程如图2所示。

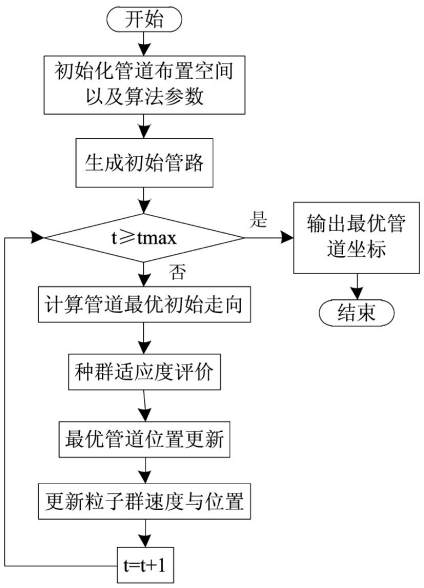


图2 基于改进粒子群算法的核电管路优化布置方案求解流程

通过上述核电管路优化布置方案求解流程可以看出,本文首先对包括迭代次数、粒子群数量在内的算法参数进行初始化处理。针对构建出的管路布局空间,采用栅格法将其划分为体积相等的小方块,并根据布局设备信息,将障碍物以及初始管路位置放置在管路布局空间中。然后通过对管路进行编码,生成初始的管路种群,假设粒子维度为d,那么管路的编码方式如下所示:

$$v=((0,0,0),v_2,v_3,v_4,(0,0,0)) \quad (11)$$

$$p=(x_{start},x_2,x_3,x_4,x_{end}) \quad (12)$$

式中,v和p分别代表坐标以及长度的编码结果,x_{start} x_{end}代表管道整体的起点坐标与终点坐标,x_2,x_3,x_4代表管路中转弯处的坐标。

通过不断迭代对目标函数进行求解,并判断种群内每条核电管路的具体长度,对种群适应度进行评价,从而推动种群达到收敛[12]。同时还需要对历史管路位置以及最优位置进行记录,粒子会以历史最优解以及全局最优解作为迭代目标,进行不断收敛与更新。对此,本文对常规的粒子群算法进行改进,通过加入位置修正系数x_λ以及速度修正系数v_λ,由此得到的算法迭代表达式如下所示:

$$v_i(t+1)=x_\lambda\cdot wv_i(t)+c_1r_1(p_{best}(t)-x_i(t))+wv_i(t)+c_2r_2(g_{best}(t)-x_i(t)) \quad (13)$$

$$x_i(t+1)=x_i(t)+v_\lambda v_i(t+1) \quad (14)$$

式中,$p_{best}(t)$指粒子个体最优搜索方向,$g_{best}(t)$指所有粒子个体最优位置。$v_i(t+1)$和$x_i(t+1)$分别代表粒子速度$v_i(t)$以及位置$x_i(t)$的迭代结果,c_1c_2代表加速因子,r_1r_2代表随机数,w代表惯性权重,t代表当前迭代次数。

通过上述步骤即可完成对于最优管路位置的迭代处理,然后判断当前迭代次数是否满足最高迭代次数,如果结果为是,代表当前迭代效果已经达到收敛,此时粒子最优位置即为最优管道目标的编码结果。根据最优管道的具体坐标,即可输出最优布置方案。

通过上述步骤即可完成对于核电管路最优布置方案的求解,通过以管路布置路径最短作为目标,构建出目标优化函数,并结合粒子群算法对其进行迭代求解。将本节内容与上文提到的布局空间建模以及管路三维长度计算等相关内容进行结合,至此,基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法设计完成。

2 实验论证

为了证明本文提出的基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法在实际监控效果方面优于常规的核电管路自动化布置优化方法,通过实验对基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法的实际布置效果进行检验。

2.1 实验说明

为验证本文提出的基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法在实际布置效果方面的优越性,本次实验选取了两组常规的核电管路自动化布置优化方法作为对比对象,分别为基于A*算法的核电厂工艺管道自动布局方法,以及采用A*结合遗传算法的船舶管路智能布置方法。通过构建实验平台,采用3种方法对同一个核电厂厂房进行建模分析,对比不同布置算法下的实际布控效果。

2.2 实验对象

本实验以某市的核电厂厂房作为建模对象,对环境图进行模拟。实验建立了一个规整的立方体厂房,并采用栅格法对厂房空间进行离散化处理,从而将其划分为不同的小立方体,立方体厂房的三个方向所填充的网格数量均保持一致。在整个厂房空间设置了10台核电设备,各个设备的顶点坐标如表1所示。

表1 核电设备顶点坐标

核电设备编号	顶点坐标
01	(5,0,0)
02	(15,10,25)
03	(20,0,5)
04	(27,10,7)
05	(50,10,25)
06	(8,25,30)
07	(14,30,19)
08	(23,25,5)
09	(30,32,15)
10	(45,18,29)

对此,本次实验构建出的厂房空间平面图如图3所示。

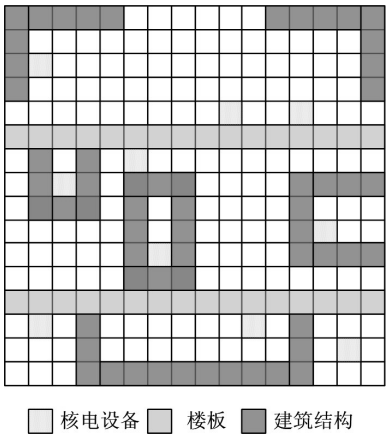


图3 核电厂房空间平面图

通过采用三种管路布局方式对现有管路进行布局处理,待布局完成后,记录下不同布局方法下的管路最长路径,从而比较出不同方法的实际布置效果。

2.3 布局效果对比结果

采用基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法得到的核电管路自动布置优化结果如图4所示。

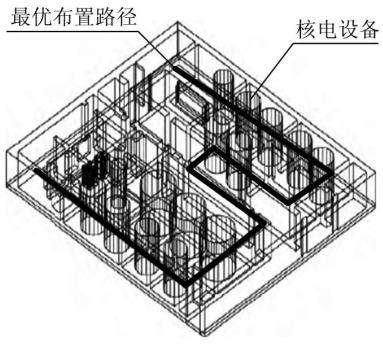


图4 基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法下的核电管路自动化布置优化结果

对此,基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法所得到的核电厂管路坐标如表2所示。

为提高实验结果的对比性,本次实验以不同布局方法下的管路总长度作为对比指标,用于衡量不同方法的实际布置优化效果,具体实验结果如图5所示。

表2 本文规划方法下的核电厂管路坐标

序号	坐标	序号	坐标
1	(5.35,5)	9	(6,30,5)
2	(5,34,5)	10	(6,30,4)
3	(5,36,5)	11	(6,32,5)
4	(5,37,5)	12	(5,32,4)
5	(6,36,7)	13	(5,32,5)
6	(6,35,7)	14	(5,30,1)
7	(7,34,7)	15	(5,28,4)
8	(7,35,6)		

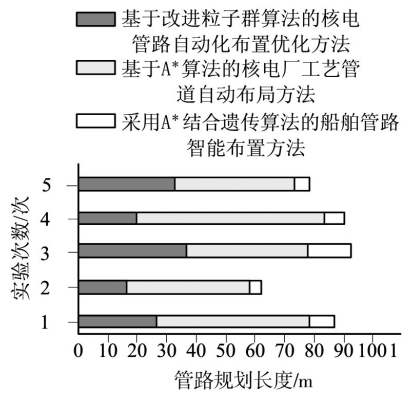


图5 不同方法下的管路规划长度对比结果

通过上述实验结果可以看出,基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法所规划出的核电管路布置方案中,管路长度明显低于两种常规的规划方法,由此可以证明基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法的布置优化效果更好。

3 结束语

研究结果表明,基于改进粒子群算法的核电管路自动化布置优化方法在求解此类问题时具有显著的优势和较高的价值。该方法能够快速、准确地找到最优解,提高了核电站的设计和建造效率,降低了运行成本,增强了安全性。此外,该方法还可以为其他类似复杂布局问题的解决提供借鉴和参考。

参考文献:

[1] 苏锦成, 王振中, 贾小攀, 等. 基于A~*算法的核电厂工艺管道自动布局方法[J]. 核科学与工程, 2022, 42(1): 129-135.

[2] 李喆, 吴君, 王顺森, 等. 采用A星-遗传算法的船舶管路智能布置[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(6): 172-180.

[3] 林焰, 卞璇屹, 董宗然, 等. 基于协同差分进化算法的船舶分支管路布局优化设计[J]. 中国造船, 2023, 64(4): 194-206.

[4] 陈璐, 胡昊, 周杨俊冉, 等. 基于LSTM算法的城市分布式源网荷储调度优化技术[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(12): 22-24, 49.

(下转第188页)