**说 明 书 摘 要**

本发明提供一种水下潜航器的双重粒子群多监测点访问路径规划方法，用于三维地形条件下水下潜航器对多个目标位置的最佳访问序列构造及其访问路线规划。该方法基于在线距离优化的方式，采用双重粒子群迭代优化方法实现快速的在线访问顺序与路线优化，并采用有效的避障策略来保证路径的最优性与可靠性。本发明面向三维地形下水下潜航器应用，提出一种基于粒子群优化技术的在线双重路径规划优化方法，用于在线快速搜索出水下潜航器访问多个监测点的最优访问巡航路线。

**摘 要 附 图**



**权 利 要 求 书**

1． 水下潜航器的双重粒子群多监测点访问路径规划，其特征在于监测点之间的路线优化与最优访问序列交替协同优化，其主要包括以下步骤：

S1：距离矩阵的初始化：通过读入三维地形数据和所有的监测点的空间坐标，对于这n个监测点，计算任意两点之间的欧几里得距离，然后得到一个初始距离矩阵*DistMatrix*；

S2：最优路径序列的反复构造，具体包括：

S2.1：构造种群，种群中每个粒子个体<，，…, >代表一种监测点访问序列，*i*=1,2,…,*m*，其中*m*是种群粒子数量，*n*代表访问序列中待监测点的数量，即粒子的维度数；然后随机初始化粒子的速度集，*Vi*为一些带概率的边组成的集合，即一些从全部监测点中随机选取的两点构成的二元组并附加一个(0,1)之间的概率值组成的集合，其中概率值表示一条边被选中用来构造新的访问序列的可能性大小；

S2.2：根据距离矩阵*DistMatrix*计算每个个体的路线总长度，然后记录每个个体的历史最优个体*pbest*；并选出使路线长度最短的全局最优个体gbest；

S2.3：按照公式来更新每个粒子的速度集：对于维度节点*j*（*j*=1,2,…,*n*），，首先生成一个随机数*ran*∈[0,1]，若*ran*大于预先设定的分界值*Pc*，则，即从自身历史最优个体学习并更新速度集，否则从种群中随机选择两个个体，取它们历史最优个体中总路线长度最短的那个个体作为来学习；然后从监测点访问序列和里前后相连的节点组成的边集中选择属于而不属于的边，再乘以当做边的概率值来构造出一个启发式速度集，其中*c*表示学习因子，是一个固定值；为介于(0,1)之间的随机数；最后将速度集中边的概率值乘以一个固定惯性权重*w*构成速度集，再将其与刚才的启发式速度集合并，构造出新的速度集；

S2.4：结合更新后的速度子集更新粒子个体的访问序列：首先构造一个空集*New*\_*Pi*，随机选择一个节点*t*作为访问起点加入空集，剔除掉速度集中概率较小的边；然后从速度集*vi*中查找与当前节点*t*相连的所有边中概率值最大的边，并将这条边另一个节点加入*New*\_*Pi*中；如果速度集*vi*不包含与节点*t*相连的边，则查看原路径序列中与节点*t*相连的节点是否已全部加入*New*\_*Pi*，若还有尚未加入的边节点，则选择与当前节点相连且距离最近的边节点加入 *New*\_*Pi* ；否则从其他种群个体中选择与当前节点距离最近且未纳入的节点加入*New*\_*Pi*；最后为刚加入的节点构造下一个访问点；重复上述过程，直到所有的监测点加入到新的路径序列*New*\_*Pi*为止；

S2.5：重复S2.3、S2.4两个步骤，直到到达最大迭代次数或连续若干代无法得到更好的解时即停止迭代；最后得到一条最优访问序列，完成实现第一重粒子群优化；

S3：路径点之间的路线优化：对上一步骤得到的最优访问序列中前后相连的路径点之间的距离和路线进行优化，利用优化后的距离值来更新之前的距离矩阵*DistMatrix*，并借此计算最优访问序列的路线总长度，更新并记录最优访问序列及其总路线长度；

S4：如果达到结束条件就终止整个算法，否则返回步骤S2；

S5：输出所有监测点的最佳访问序列、访问路线及其长度。

2． 根据权利要求1所述的水下潜航器的双重粒子群多监测点访问路径规划，其特征在于，所述方法中，以任意两点之间的欧几里得直线距离作为初始距离矩阵，是粒子群算法在寻找最优访问序列过程中评价种群粒子所代表的访问序列的质量并计算其总路线长度的前提条件；基于不同的距离矩阵，粒子群优化算法寻找的最优访问序列也不同；在距离矩阵得到更新优化后，优化收敛寻找到的最优访问序列质量也更好。

3． 根据权利要求1所述的水下潜航器的双重粒子群多监测点访问路径规划，其特征在于，所述方法中，监测点距离矩阵与最优路径访问序列的两重优化是交替往复进行的；构造最优访问序列的过程依赖当前的监测点距离矩阵，为减少更新任意两个监测点之间的路线和距离所带来的巨大时间开销，距离矩阵的更新又依赖于当前构造出的最优路径序列中前后相连的监测点信息，这两个过程相互依赖，交互在线进行优化。

**说 明 书**

**水下潜航器的双重粒子群多监测点访问路径规划方法**

**技术领域**

本发明涉及三维地形下水下潜航器路径规划和粒子群优化算法两大领域，更具体地，涉及一种运用双重粒子群优化算法在三维地形中优化潜航器对多个监测目标的访问顺序及运行路径的方法。

**背景技术**

自然界中海底地形崎岖不平、复杂多变，在这样的地形环境下进行路径规划与躲避障碍物充满了挑战性。要实现对多个目标位置进行访问探测，涉及到这些监测点的访问顺序以及这些监测点之间的访问路线优化这两个方面。

三维地形条件下两点之间的路线优化的关键在于保证路线长度或行驶时间尽可能短的同时能够有效躲避地形障碍物的干扰。在复杂的三维地形环境下，运行路线与障碍物的关系无法用空间几何的位置关系来度量，这是许多以圆柱、椎体和球体等这样形状规则的物体作为障碍物来构造环境的研究方法的局限所在。

三维地形环境下的多监测点访问顺序研究类似于旅行商（TSP）问题，这类问题的优化目标的是找到一条不重复的最佳访问序列使得总路线长度最短或耗时最少。这种最优序列的构造问题是公认的一个NP完全问题，也就是说无法在多项式的计算时间内得到问题的解。在求解三维地形环境下的多监测点访问问题时，传统方法都倾向首先计算出所有监测点任意两点之间的路线及距离，在得到一个距离矩阵后，用一些离散类型的粒子群算法、蚁群算法和遗传算法优化出较好的访问序列。但这类方法将路线优化与访问序列优化两大步骤割裂开，使得前期路线优化时间过于漫长，以至于无法快速高效的解决问题。

针对传统方法前期耗时太长的缺陷，很自然的需要一种实时在线的处理方法来解决问题。在原始的TSP问题中， 许多能够给出有效解决方案的算法都使用了贪心策略的思想——即对于当前点，在构造下一个访问点时，都倾向于选择距离自身较近的监测点。基于这样的启发式特点，对于那些原本直线距离就较远的监测点之间的路线不一定需要进行优化，这样就可以省略大量时间了。如果从构造所有监测点的一个距离矩阵出发，只计算每一次迭代优化得到的访问序列所包含的监测点之间的路线，随后不断更新距离矩阵并重复这两个步骤，这样的做法可以算作一种在线解决方案。

**发明内容**

针对传统方法在路线优化和躲避障碍物干扰方面，无法应对复杂的三维海底环境；而在对多个监测目标的访问顺序优化时，将路线优化与访问序列优化两大步骤割裂开来，造成前期优化时间过于漫长；复杂三维地形以及不规则的障碍物对障碍位置判断造成困难这些问题，本发明面向三维地形下水下潜航器应用，提出一种基于粒子群优化技术的在线双重路径规划优化方法，用于在线快速搜索出水下潜航器访问多个监测点的最优访问巡航路线。

本发明提出的用于三维地形条件下水下潜航器对多个目标位置访问的最佳访问路线规划技术，该技术基于在线距离优化的方式，采用双重粒子群迭代优化方法实现快速的在线访问顺序与路线优化，并采用有效的避障策略，保证路径的最优性与可靠性。主要方法的执行步骤如下：

S1：距离矩阵的初始化：通过读入三维地形数据和所有的监测点的空间坐标，对于这n个监测点，计算任意两点之间的欧几里得距离，然后得到一个初始距离矩阵*DistMatrix*；

S2：最优路径序列的反复构造，具体包括：

S2.1：构造种群，种群中每个粒子个体<，，…, >代表一种监测点访问序列，*i*=1,2,…,*m*，其中*m*是种群粒子数量，*n*代表访问序列中待监测点的数量，即粒子的维度数；然后随机初始化粒子的速度集，*Vi*为一些带概率的边组成的集合，即一些从全部监测点中随机选取的两点构成的二元组并附加一个(0,1)之间的概率值组成的集合，其中概率值表示一条边被选中用来构造新的访问序列的可能性大小；

S2.2：根据距离矩阵*DistMatrix*计算每个个体的路线总长度，然后记录每个个体的历史最优个体*pbest*；并选出使路线长度最短的全局最优个体gbest；

S2.3：按照公式来更新每个粒子的速度集：对于维度节点*j*（*j*=1,2,…,*n*），，首先生成一个随机数*ran*∈[0,1]，若*ran*大于预先设定的分界值*Pc*，则，即从自身历史最优个体学习并更新速度集，否则从种群中随机选择两个个体，取它们历史最优个体中总路线长度最短的那个个体作为来学习；然后从监测点访问序列和里前后相连的节点组成的边集中选择属于而不属于的边，再乘以当做边的概率值来构造出一个启发式速度集，其中*c*表示学习因子，是一个固定值；为介于(0,1)之间的随机数；最后将速度集中边的概率值乘以一个固定惯性权重*w*构成速度集，再将其与刚才的启发式速度集合并，构造出新的速度集；

S2.4：结合更新后的速度子集更新粒子个体的访问序列：首先构造一个空集*New*\_*Pi*，随机选择一个节点*t*作为访问起点加入空集，剔除掉速度集中概率较小的边；然后从速度集*vi*中查找与当前节点*t*相连的所有边中概率值最大的边，并将这条边另一个节点加入*New*\_*Pi*中；如果速度集*vi*不包含与节点*t*相连的边，则查看原路径序列中与节点*t*相连的节点是否已全部加入*New*\_*Pi*，若还有尚未加入的边节点，则选择与当前节点相连且距离最近的边节点加入 *New*\_*Pi* ；否则从其他种群个体中选择与当前节点距离最近且未纳入的节点加入*New*\_*Pi*；最后为刚加入的节点构造下一个访问点；重复上述过程，直到所有的监测点加入到新的路径序列*New*\_*Pi*为止；

S2.5：重复S2.3、S2.4两个步骤，直到到达最大迭代次数或连续若干代无法得到更好的解时即停止迭代；最后得到一条最优访问序列，完成实现第一重粒子群优化；

S3：路径点之间的路线优化：对上一步骤得到的最优访问序列中前后相连的路径点之间的距离和路线进行优化，利用优化后的距离值来更新之前的距离矩阵*DistMatrix*，并借此计算最优访问序列的路线总长度，更新并记录最优访问序列及其总路线长度；

S4：如果达到结束条件就终止整个算法，否则返回步骤S2；

S5：输出所有监测点的最佳访问序列、访问路线及其长度。

提出的方法包括三种机制：距离矩阵的初始化与更新，最优访问序列与距离矩阵的共同优化和路径点之间的路线优化。在这种环境下的路线规划上，这些机制使得提出的方法能进一步优化最佳访问序列和行驶路线。

机制1：距离矩阵的初始化和更新。本发明提出在两点之间最优路径长度在事先不知道的情况下，以两点之间的欧几里得直线距离作为距离矩阵中的初始值，这样可避免优化并计算任意两点之间的路线所带来的巨大时间开销。在运用集合型粒子群优化算法构造最优访问路径序列的过程中，对种群粒子的路线长度计算需要用到所有监测点之间的距离矩阵。只有不断更新优化更好距离矩阵，才能构造出的路线可靠且长度更短访问路径。

机制2：最优访问序列与距离矩阵的交替优化。基于不同的距离矩阵，构造出的路径序列一般都不相同。在计算每次构造出来的最优访问序列的路线及总长度时，只对它需要的访问序列中前后相连的目标点的路线及距离进行优化，并以此更新优化距离矩阵。在得到新的距离矩阵后，往往能够优化出路线可靠且总路线长度更短的访问序列，然后重复上诉过程，反复构造最优访问序列和更新距离矩阵就能使得两者都朝着更好的方向发展。

机制3：路径点之间的路线优化。在三维地形环境下的任意两个监测点之间的最优路线往往由于地形和障碍的存在，不是直线相连，它们之间的路线需要躲避地形障碍物干扰。但优化任意监测点之间的路线优化是非常耗时的，因此本发明提出只需优化最后构造出的最优访问序列前后相连的监测点之间的路线，并随着最优路径序列的反复构造，对相同的目标点之间的路线进行优化更新。

与现有技术相比，本发明技术方案的有益效果是：本发明针对传统方法在路线优化和躲避障碍物干扰方面，无法应对复杂的三维海底环境；而在对多个监测目标的访问顺序优化时，将路线优化与访问序列优化两大步骤割裂开来，造成前期优化时间过于漫长；复杂三维地形以及不规则的障碍物对障碍位置判断造成困难这些问题。本发明面向三维地形下水下潜航器应用，提出一种基于粒子群优化技术的在线双重路径规划优化方法，用于在线快速搜索出水下潜航器访问多个监测点的最优访问巡航路线。

**附图说明**

图1为路径优化方法流程图。

图2为三维地形环境示意图。

图3为多监测点访问路线示意图。

**具体实施方式**

以下结合附图对发明的方法作进一步的描述。

三维环境下的多监测点访问的目的是构造出一条最佳访问序列。构造粒子种群并运用集合型粒子群算法寻找最优序列的过程中，需要对粒子的路线长度进行计算。因此在调用此算法求解之前，需要事先已知一个监测点之间的距离矩阵，但是对所有监测点任意两点之间的路线进行优化并计算其路线长度非常耗时。可以只计算所有监测点之间的直线距离，从构造一个初始的距离矩阵出发，然后运用集合型粒子群优化算法寻找最优路径序列，再调用量子粒子群算法来优化这条最优访问序列包含的路径点之间的路线并更新距离矩阵。最后再重复这两个过程，这样可以使得最优路径序列和距离矩阵都能进一步得到优化。图1为本发明的路径优化方法流程图。

如图2所示，读入地形数据构造三维地形环境。对于含有*n*个监测点的访问优化问题，首先不考虑地形障碍物的干扰，计算出所有监测点之间的直线距离，构造出一个初始距离矩阵。随后随机初始化数目为*m*的粒子种群，每个种群个体代表一条访问序列<，，…, >，*i*=1,2,…,*m* 。刚开始粒子代表的路线都非常差，若要得到更好的解，粒子要结合他们各自的“速度”来更新，粒子的速度是由一些附带概率的边组成的集合，粒子速度的定义如下

(*j*=1,2,…,*n*)

其中*e*为两个监测点组成的边，*Ej*表示与可以结点*j*相连的其他节点组成的边的集合，相同的两个监测点组成的边具有一致性，即与代表同一条边。表示边的概率且，的值越大表示选择这条边来构造路径的可能性越大。

粒子的速度子集在每一次迭代过程中都需要更新，然后才能构造出新的粒子序列，粒子速度的更新遵循下面的公式



其中*w*为惯性权重，*c*为学习因子,它们都是固定常量，为一个介于0到1之间的随机数，它们均用来衡量更新来源的影响程度。表示第*j*个维度的学习对象的历史最优个体，为种群中的一个个体，它的确定方法为——首先生成一个随机数,如果*ran*大于一个固定概率值*Pc*，那么，否则随机选择种群中其他两个个体，取它们的历史最优个体中适应度值最小的那个个体。该过程在粒子跟随一个历史最优个体连续7代仍未优化出更好的解才进行一次。

不同于连续粒子群优化算法，基于集合的速度更新不是简单的相加减。表示速度集的差集，即选择属于被减数而不属于减数的边来构成新的集合，其定义为



例如,，那么；再乘以系数添加概率值，需保证，即>1, =1。同理集合里边的概率值也要遵循这样的规定。

同理，若给定两个带概率的速度集*V*1和*V*2,则他们加法操作的定义如下



即取他们的速度集合并集，若存在相同的边，则选择概率值较大的边概率。

速度更新完成后才可以构造出粒子新的路径序列，粒子的更新来自三个方面——自身的速度集、原始路径序列和种群的原始路径序列，并且他们的优先级依次递减。粒子在构造新的路径序列时首先生成一个空集，然后按照优先级顺序从更新来源选择下一节点，即当优先级较高的更新来源无法找到与当前节点相连的下一节点时，才会选择从下一个更新来源尝试选择下一节点。具体更新过程的伪代码如下

**输入：**粒子的速度集 

父代种群序列 

**过程：**函数 

构造空集

随机生成初始节点*j*

剔除概率较小的边 

while <n do

if 

从 选择概率最大的边包含的另一个节点

else if **中与当前节点*j*相连的节点未加入

选择与当前节点*j*相连的节点中概率较大的节点

else

从种群其他个体序列中查找与当前节点j距离最近

且尚未加入*New*\_*Pi*的节点

end if

将选择的节点加入，并且置新加入的节点为当前节点j



end while

**输出**：新的路径序列*New*\_*Pi*

将粒子速度更新与路径序列经过一定次数的重复迭代，可以得到一条基于当前距离矩阵的一条最佳访问序列。由于第一次运行集合型粒子群算法是基于直线距离矩阵的，所有运行场景和最终路线都类似于原始的旅行商问题。

得到最佳访问序列后，它所包含的路径点之间的路线及距离矩阵都需要进一步优化。优化过程采用量子粒子群优化算法，这种算法为连续粒子群优化算法的一种改进版，它模拟量子的运动状态，具有参数少、随机性小和比传统粒子群优化算法更快的收敛速度。

对于给定的两个监测点，我们首先初始化数目为*t*的种群，路径点的数量为k(包括这两个监测点),每个个体表示两点之间路径点序列。序列中路径点表示当前地形环境下的随机点{X,Y,Z},这些路径点可以构造出一条路线。

起初这些路线质量都较差，都有可能穿过地形障碍物并且路线长度很大。种群只有不断更新才能优化出更好的路线，种群个体更新过程遵从下面的公式



其中、*b*和*u*为介于0和1之间的随机数，且当*b*>0.5时取+，否则取-。为粒子的历史最优个体，即到目前为止记录的最好个体值。为种群历代的全局最优个体，为所有粒子在各个维度的平均值组成的个体。

显然，记录和更新这些个体需要对种群中每个个体做出评价。个体的评价标准包括路线长度、与障碍物碰撞的风险系数以及路径点之间的转角所带来的速度损失。

需要说明的是，判断种群个体与障碍物碰撞的风险程度，在不规则的地形条件下，用传统的空间几何数学方法是不能判断它与障碍物的碰撞关系的。一种简单而有效的方法为在任意两个路径点之间做垂直切面，然后取固定数目的等分点来比较等分点的高度与该坐标下的地形的高度，最后根据所有等分点与其位置地形高度的最小高度差，就可以判断该直线路段是否与障碍物发生碰撞。

量子粒子群优化算法的关键部分在于种群个体的适应度评价函数上，它对于种群更新迭代过程和最终的输出解影响很大。这部分程序的伪代码如下

**函数** 

while *i< k* do

while *p< k* do

if 路径点可以与直线相连

break；

end if

p=p+1

end while

计算路径点和的距离，

计算路径点和的碰撞风险系数

计算前一个路径点处的转角引起的速度损失

*i=p;p=t+*1*;*

end while

**输出： 粒子****的适应度值**

为了得到安全可靠且路程较短的路线，同样需要对种群进行迭代更新，直到达到最大迭代数或长时间无法优化出更好的解即停止迭代，然后输出最优路径点序列及其长度。

集合型粒子群优化算法基于当前距离矩阵，寻找一条最优路径序列；为避免优化全部监测点之间的路线带来的巨大时间开销，只需对最优路径序列中前后相连的监测点之间的路线进行更新，这是相互依赖的两个过程。因此不断进行最佳路径序列的构造和距离矩阵的更新这两个过程，才能使最终优化出的访问路线足够安全稳定且总长度较短。以51个监测点的访问问题为例，其最终的访问路线如图3所示。

本发明优化三维地形环境下多监测点访问顺序的完整流程图如图 3所示。以5个不同数目的监测点访问案列为例，对本文提出的优化算法进行测试。将发明的方法在整体上能得到更好的解，并且能在前期就能得到一条比较满意的解决方案。总上所述，发明的方法在三维地形环境下多监测点访问问题的求解过程中是高效而快速的。

**说 明 书 附 图**



图1

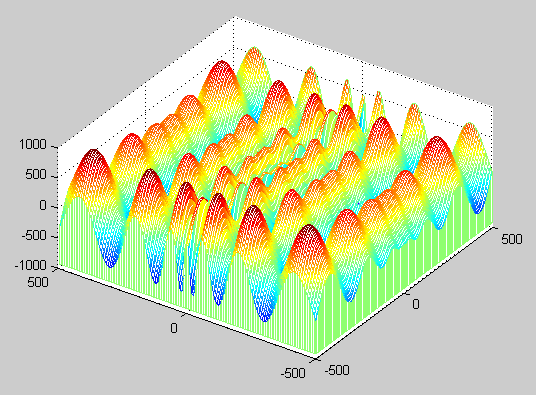


图2

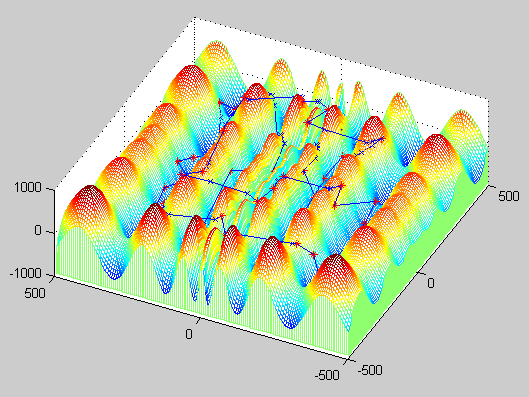


图2