

# 一种三维建筑单管路自动布局方法设计

王长涛,王 哲,高治军,孙亮亮,朱 毅

(沈阳建筑大学信息与控制工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究单管路自动布局在建筑环境中的应用,为减少管路设计时间,提高建筑管道设计质量.方法 在三维空间管道正交敷设的前提下,提出一种基于概率选择的初始路径生成方法,改善的初始管道路径生成的质量,并设计面向管道布局的粒子群算法,进行全局路径优化,从而给出一种自动管道布局方法.结果 该管道自动布局方法,能够成功避开障碍物,达到管道合理自动布局.在初始路径生成方法研究方面,通过与基于中间点法的管道初始路径生成方法对比分析可知,基于概率选择的初始路径生成方法与全局优化算法配合能够取得管道长度更短、弯头数量更少、布局时间更快的优化效果.结论 在不影响建筑内环境的情况下,基于中间点法的管道初始路径生成方法的进行管道自动布局规划可行,基于概率选择的初始路径生成方法能够使管道自动布局做到美观、合理、经济、安全.

**关键词** 三维建筑管道;优化布局;粒子群算法;初始路径生成;概率选择

中图分类号 TU201.1 文献标志码 A

## Design on Automatic Layout of Single Pipe in Three Dimensional Building

WANG Changtao, WANG Zhe, GAO Zhijun, SUN Liangliang, ZHU Yi

(School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to short the design time and improve the quality of pipeline design, the application of automatic layout of single pipeline in buildings is studied. With the pipeline being laid orthogonally in three-dimensional space, a method for generating initial route based on probabilistic selection is proposed to improve the quality of the generation of initial route. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is applied to optimizing the route of pipelines, and an automatic pipeline layout method is presented. Using this method the obstacles can be avoided successfully and the pipeline can be reasonably laid out automatically. In the research of the initial route generation method, comparing with the method based on intermediate point, the proposed method based on probabilistic selection can short the pipe length, decrease the bends and make a quick layout. Without changing the internal environment of buildings, it is feasible that using the pipeline initial

route generation method based on the intermediate point to lay out the pipeline automatically, but the results of pipeline layout are not reasonable, economical, and safe enough. While the proposed method can make the layout of pipeline more decorated, reasonable, economical and safe.

**Key words:** three-dimensional building pipe; pipe optimization; particle swarm optimization algorithm; initial routegeneration; probability selection

建筑管道设计是非常重要的一个设计环节,其设计好坏与否会对整个建筑的经济成本以及质量产生巨大影响.由于BIM<sup>[1-3]</sup>技术的兴起,设计出的管道模型已变成三维立体.三维立体的建筑管路自动布局是提高管路敷设效率、降低管路敷设成本、减小施工返工率的重要途径.因此,我们需要在三维空间中设计出科学、合理的管道自动布局方式.

管路自动布局及优化问题目前主要应用领域有航空发动机、船舶、复杂电子产品<sup>[4-6]</sup>等. E. E. S. Calixto<sup>[7]</sup>在工厂管道设计中,提出了三维管道自动布局的可行性,节约了项目成本. I. Montalvo<sup>[8]</sup>在水利工程管道系统中,使用了一种专家系统计算机辅助设计. QU Yanfeng<sup>[9]</sup>提出了一种动态蚁群算法加快收敛速度.由于采用蚁群算法<sup>[10]</sup>解决三维管道路径自动布局中计算量大,所需时间长,求解速度慢的问题.为了达到在三维空间<sup>[11]</sup>中建筑管道全自动合理布局,笔者先对真实的建筑环境进行建模,然后采用一种中间点法,在三维空间中进行管道路径自动生成,再使用粒子群算法<sup>[12-17]</sup>对布局的管道路径进行优化;通过仿真实验发现自动布局的管道路径并不理想,从而提出了基于概率选择的初始路径生成方法,改进后的管道路径变得美观、合理、经济、安全.

## 1 建立模型

### 1.1 环境模型的建立

笔者将建筑环境设定在一个长方体空间中,其中长方体的四个立面模拟真实建筑环境的墙(见图1).在长方体空间中,放置各种立方体模块,来模拟在真实的建筑环境中柱、

梁、竖井的放置.其中长方体中间的立方体模块表示建筑环境中正常的施工空间即进行建筑使用的空间.

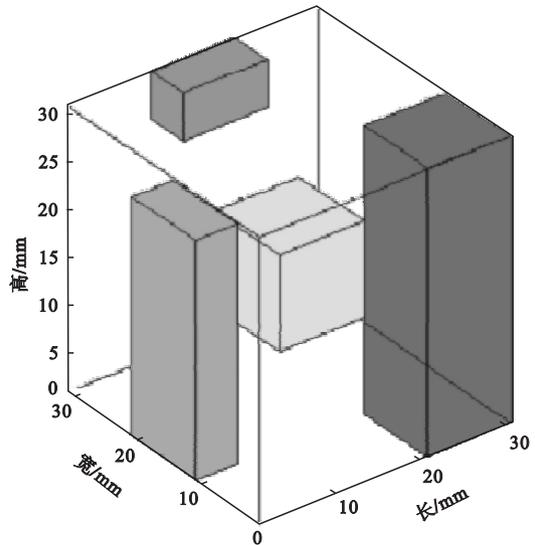


图1 建筑环境模型图

Fig.1 Building environment model

### 1.2 管道模型的建立

笔者主要研究以单管道为核心的自动布局,建筑管道模型建立是以端点、中间点、连接段组成.端点是管道的起点和终点.中间点分成关键点和插入点,后文会详细说明.连接段是点与点之间连接起来的直线段.

## 2 建筑管路自动生成的方法

在管路三维布局优化目前研究现状多采用栅格法<sup>[18-20]</sup>.但是在三维建筑管道自动布局研究中,栅格法简化了管路布局的路径要求,不能完全满足建筑环境的要求.所以笔者采用一种中间点法进行管道自动布局.

### 2.1 中间点法

在三维管道自动布局中,首先确定管道路径的端点,然后随机生成关键点,为了让自

动生成的管道正交,补入插入点;最后将这些关键点和插入点用连接段进行连接.其中关键点和插入点统称中间点,所以此管道布局的方法叫中间点法.中间点法管道布局的流程如图2所示.

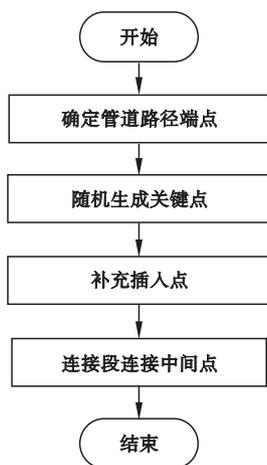


图2 管道路径生成方法

Fig. 2 Pipeline route generation method

## 2.2 产生中间点的方式

笔者设计的中间点法包括关键点的生成和插入点的生成,两种点组合在一起生成了设计的管道初始路径.

### 2.2.1 关键点的产生方式

关键点在终点和起点之间随机生成,关键点的数量与建筑环境模型的大小、高度、长度有关.

### 2.2.2 插入点的生成方式

由于真实建筑环境中的管道敷设大多都是“横平竖直”,关键点随机产生之后,连接起来的管路大多数都不正交.所以,以补入插入点的方式使自动生成的管路正交.

出现插入点的方式一共有3种:两个关键点在同一直线上时,不需要插入点;两个关键点在同一平面却不在同一直线时,需要一个插入点;两个关键点既不在同一直线也不在同一平面,需要2个不同的插入点.

## 3 粒子群算法在管路布局中应用研究

为了在建筑模型中得到最好的管道路径

规划.笔者在建筑模型中用所设计的中间点法生成多组管道路径,采用粒子群算法进行求解最优管道路径.

### 3.1 粒子群算法在管路布局应用要点分析

#### 3.1.1 粒子群的编码方式

笔者采用定长编码.编码长度为起点,关键点,插入点,终点.当没有插入点时,采用相邻关键点补充.

$$P = \{x_s, y_s, z_s; x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; x_3, y_3, z_3; \dots; x_e, y_e, z_e\}. \quad (1)$$

#### 3.1.2 去环操作

取环操作是为了更好地使管道的自动布局走最优路线,减少不必要的浪费.图3(a)为“重叠环”,是由于关键点重复布局导致.图3(b)为“乱序环”,是由于关键点的乱序排列导致.

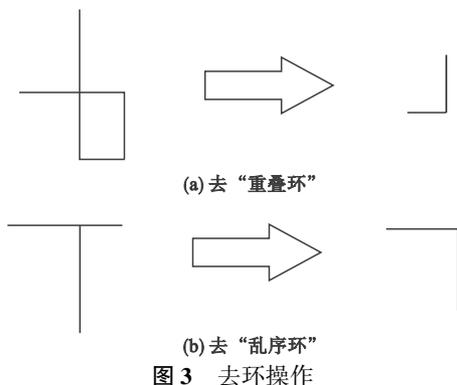


图3 去环操作

Fig. 3 Loop cancellation

#### 3.1.3 适应度函数的设计

在三维管道自动布局中,求解目标为管道直线段长度尽可能长,弯头少,沿能量值低的地方自动布局.约束条件为不与障碍物发生碰撞.粒子群算法是求解最小值问题,故适应度函数设计如式(2)所示:

$$f(p)_{\text{ps0}} = a \times L(p) + b \times B(p) + c \times E(p). \quad (2)$$

其中, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为权重系数; $L(p) = \sum_{i=1}^{n-1} l_{i,i+1}$ ,为路径 $P$ 的总长, $l_{i,i+1}$ 为相邻中间点间的距离,采用欧氏距离(euclidean metric)公式进行计算; $B(p)$ 为路径 $P$ 的总弯头数;

$E(p) = \sum_{i=1}^n E_i$ , 为路径  $P$  总的能量值,  $E_i$  为路径  $P$  上所有能量格点的能量值之和,  $E(p)$  为路径  $P$  的能量函数. 笔者将三维建筑模型进行栅格化处理, 将空间划分为  $M \times N \times L$  的栅格每一个栅格赋予相应的能量值. 关键点、插入点的能量值与所在栅格的能量值相同.

在管路自动生成的过程中, 使管道自动布局的路径尽可能的沿能量值低的地方敷设. 自动布局的管道经过建筑环境内的模型时, 将相应的建筑模型能量值赋予管道, 作为管道能量值. 在仿真实验中, 将障碍物、设备、梁、板、竖井等管道不适合敷设的地方能量值调高. 墙壁等管道敷设合理的地方能量值调整相对低. 能量值的分配如表 1 所示.

表 1 能量函数值的分配

Table 1 Distribution of energy function values

空间属性	能量函数值
障碍物	100
设备	100
墙壁	10
施工空间	70
梁、板、竖井	100
其他	30

### 3.2 面向管路布局的粒子群算法实现步骤

Step1: 初始化设置参数, 微粒规模  $m = 40$ , 惯性权重  $w_1 = 0.8$ ,  $w_2 = 1.2$ , 学习因子  $c_1 = 2$ ,  $c_2 = 2$ ;

Step2: 将建筑模型栅格化处理, 生成  $n$  个网格节点, 再按照笔者设计的中间点法随机生成多组管道路径;

Step3: 按照式(2)计算每个所生成管道路径的适应度, 并记录粒子的历史最好位置, 历史最好值, 种群中的全局最好位置, 全局最好值;

Step4: 对每个生成的管道路径适应值和历史最好值进行比较, 若较好, 最当前值作为历史最好值;

Step5: 对生成的管道路径的历史最好值

与全局最好值进行比较, 若较好, 当前值作为全局最好值;

Step6: 对微粒的速度和位置进行更新;

Step7: 未达到结束条件返回 Step3;

Step8: 达到结束条件, 算法结束.

### 3.3 面向管路布局的粒子群算法仿真实验分析

采用基于中间点法的管道初始路径生成方法, 再结合粒子群算法, 仿真实验结果如图 4 所示. 由图可知: 管道路径长度为 170 mm, 弯头个数为 13 个, 管道能量值为 2 050, 布局时间仅为 9 s. 初步达到了三维建筑管路自动布局的要求, 有效地避开了所有障碍物. 但是自动布局的管路弯头过多, 在管道布局复杂, 并没有达到完全合理、科学的布局.

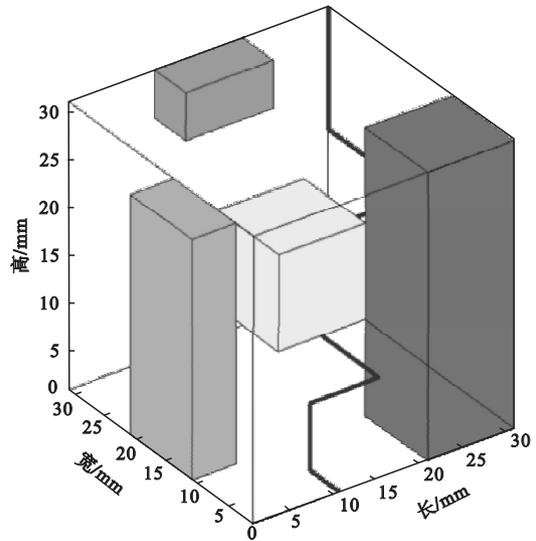


图 4 基于中间点法的管道初始路径生成方法路径图

Fig. 4 Pipeline diagram generated by initial path generation method based on intermediate point method

## 4 面向管路布局的粒子群算法初始路径存在的问题

从图 4 中可以直观地看出, 管道路径自动布局可以成功地避开障碍物, 但生成的管路无法在实际的建筑环境中应用, 最终生成的管道路径并不完美. 虽然笔者采用中间点

法,既可以让生成的管道正交,又有效地避开了所有的障碍物,完成了管道布局的最基本的要求,但是由于中间点法中的关键点是在建筑空间中随机生成,生成的关键点过于离散,生成的管道初始路径质量不高.最后求解出的最优管道路径并不理想.

为了进一步在三维建筑空间进行合理的自动管路布局.笔者提出一种基于概率选择的初始路径生成方法,改善初始管道路径的质量.

## 5 基于概率选择的初始路径生成方法

在上述的三维自动管路布局中,笔者设计出以基于概率选择的关键点生成,减少初始管道路径的离散性,从而使随机生成的关键点,尽可能在合理的管路自动布局正常路线上.其中概率选择设计如下.

### 5.1 接近终点的评价标准

生成当前关键点之后,将要布局关键点是以前关键点的6个方向进行不同的概率赋值之后随机生成.在概率设计上,将指向终点的方向概率设为 $2/9$ ,与终点相反的方向概率设为 $1/9$ .其中指向终点的方向有3个,与终点相反的方向也有3个,6个方向的概率和为1.

### 5.2 是否产生弯头的评价标准

在三维管路的自动布局中,不产生弯头的将要布局关键点选择上赋予较高概率值.自动布局的路径上产生弯头,将要布局关键点的选择上赋予较低概率值.在当前关键点的6个方向上,只有一个方向不会产生弯头方向概率为 $3/13$ ,其余5个方向的概率为 $2/13$ ,6个方向的概率和为1.

### 5.3 直线段长短的距离评价标准

直线段无障碍路径是完整管路路径中一条无弯头直线管路.通过计算直线段无障碍路径终点与完整管道自动布局的终点之间的距离来确定概率的大小.式(3)表示某一方向上最长距离直线无障碍路径的终点与管道路

径的终点距离.

$$PL_n = 1 - \frac{\sqrt{(a-d)^2 + (b-e)^2 + (c-f)^2}}{\sum_{n=1}^6 \sqrt{(a-d)^2 + (b-e)^2 + (c-f)^2}}. \quad (3)$$

其中, $PL_n$ 为概率大小, $n=1,2,\dots,6$ ; $(a,b,c)$ 为直线无障碍路径的终点; $(d,e,f)$ 为管道自动布局路径的终点.

### 5.4 能量大小的评价标准

用能量均值表征在直线无障碍路径上单位长度能量值大小.计算式为

$$PE_n = 1 - \frac{\frac{L_n}{E_n}}{\sum_{i=1}^6 \frac{L_n}{E_n}}. \quad (4)$$

式中: $L_n$ 为在方向 $n$ 上直线段无障碍路径的长度; $E_n$ 为在方向 $n$ 上,直线段无障碍路径的能量值.

### 5.5 综合以上4种评价标准进行选择

按照式(3)、(4)和设定好的方向选择概率和弯头选择概率,将4种选择概率综合起来.构建一个初始路径选择概率代价 $P_n$ , $PD_n$ 为接近终点的方向概率, $PW_n$ 为是否产生弯头的方向概率.式(5)表示关键点选择方向 $n$ 的概率代价.权重 $a,b,c,d$ 为正整数.

$$P_n = a \times PD_n + b \times PW_n + c \times PL_n + d \times PE_n. \quad (5)$$

计算出每个方向的综合概率值,采用转盘赌法选择出方向.然后再选出的方向上进行合理的长度布局.

采用以上方法主要是对生成的初始路径的质量进行了改进.笔者设计的基于概率代价生成的初始路径,主要应用在算法流程中的Step2,使用基于概率选择的初始路径生成方法替代基于中间点法的管道初始路径生成方法.

### 5.6 基于概率选择的初始管道路径生成方法仿真实验

采用基于概率选择的初始管道路径生成方法之后,仍采用粒子群算法进行求解.经过

仿真实验,结果如图5所示。

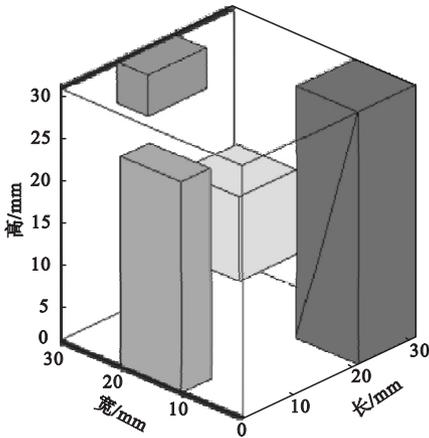


图5 基于概率选择的初始管道路径生成方法路径图

Fig.5 Pipeline diagram generated by initial path generation method based on probabilistic selection

表2 对比分析

Table 2 Comparative analysis

初始路径生成方法	管道长度/mm	管道弯头/个	能量值	布局时间/s
基于中间点法的管道初始路径生成方法	170	13	2 050	9
基于概率选择的初始路径生成方法	90	2	1 080	5

## 6 结论

基于中间点法的管道初始路径生成粒子群算法的实验结果并不理想,不适合使用在真正的建筑环境中。由于中间点法的关键点生成过于离散,而笔者提出一种概率选择的方法提高了初始路径的质量,对关键点的分布有了极大的改善。基于概率选择的初始路径生成粒子群算法在弯头个数、布局时间、能量值等方面都有一定程度上的优化。基于中间点法的管道初始路径生成方法的进行管道自动布局规划可行,而基于概率选择的初始路径生成方法能够使得管道自动布局做到美观、合理、经济、安全。笔者所提出的基于概率选择的初始路径设计方法为以后在三维建筑空间中多管道以及分支管道等自动布局提供了一定的参考价值。

由图5可知:管道路径的长度为90 mm,弯头为2个,管道能量值为1 080,布局时间为5 s。从实验后的数据可以看出基于概率选择的初始路径生成方法的管道自动布局速度快,布局效果好。

图4所示为基于中间点法的管道初始路径生成方法管路自动布局有效地避开障碍物,实现了基本的管路自动布局要求,具有可行性。但是由于生成的关键点过于离散,自动生成的管路并不理想。笔者设计的基于概率选择的初始路径生成方法,图5所示自动布局的管路弯头少,布局时间短,能量值低,沿墙敷设。对比分析如表2所示,基于概率选择的初始路径生成方法比基于中间点法的管道初始路径在管道长度更短、弯头数量更少、布局时间更快。

## 参考文献

- [1] BOSCHÉ F, AHMED M, TURKAN Y, et al. The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: the case of cylindrical MEP components[J]. Automation in construction, 2015, 49(4): 201-213.
- [2] 陈辰, 李庆平. 基于BIM技术的三维管线综合[J]. 土木建筑工程信息技术, 2012(3): 83-86.  
(CHEN Chen, LI Qingping. 3D Pipelines comprehensive design technology based on BIM [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2012(3): 83-86.)
- [3] ZHANG S, SULANKIVI K, KIVINIEMI M, et al. BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning[J]. Safety science, 2015, 72(8): 31-45.
- [4] 王锋. 船舶管路综合布局优化探究[J]. 中国水运, 2015, 15(5): 86-87.  
(WANG Feng. Research on optimization of

- ship piping layout[J]. *China water transport*, 2015, 15(5):86-87.)
- [5] 邹玉堂,任光,路慧彪. 船舶管路布置仿真模型简化[J]. *上海海事大学学报*, 2010, 31(1):72-76.  
(ZOU Yutang, REN Guang, LU Huibiao. Simulation model simplification for pipe route design of ship [J]. *Journal of Shanghai maritime university*, 2010, 31(1):72-76.)
- [6] 董宗然,林焰. 基于协同进化和并行计算的船舶管路布置方法[J]. *大连理工大学学报*, 2016, 56(4):367-374.  
(DONG Zongran, LIN Yan. Method of ship pipe routing based on co-evolution and parallel computing[J]. *Journal of Dalian university of technology*, 2016, 56(4):367-374.)
- [7] CALIXTO E E S, BORDEIRA P G, CALAZANS H T, et al. Plant design project automation using an automatic pipe routing routine[J]. *Computer aided chemical engineering*, 2014, 27(9):807-812.
- [8] MONTALVO I, IZQUIERDO J, PÉREZ-GARCÍA A R, et al. Water distribution system computer-aided design by agent swarm optimization[J]. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 2014, 29(6):433-448.
- [9] QU Yanfeng, JIANG D. Three-dimensional pipe path planning based on dynamic ant colony algorithm[J]. *Journal of donghua university*, 2011, 37(4):387-391.
- [10] LIM K K, ONG Y S, MENG H L, et al. Hybrid ant colony algorithms for path planning in sparse graphs[J]. *Soft computing*, 2008, 12(10):981-994.
- [11] FURUHOLMEN M, GLETTE K, HOVIN M, et al. Evolutionary approaches to the three-dimensional multi-pipe routing problem: a comparative study using direct encodings[C]//European conference on evolutionary computation in combinatorial optimization. Lausanne, Switzerland: Springer-Verlag, 2010:71-82.
- [12] JIANG Y, HU T, HUANG C C, et al. An improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Applied mathematics & computation*, 2012, 195/196(1):231-239.
- [13] ZHAN Z H, ZHANG J, LI Y, et al. Adaptive particle swarm optimization[J]. *Progress in natural science(materials international)*, 2008, 39(12):1362.
- [14] JIANG W Y, LIN Y, CHEN M, et al. An optimization approach based on particle swarm optimization and ant colony optimization for arrangement of marine engine room[J]. *Journal of Shanghai jiaotong university*, 2014, 48(4):502-507.
- [15] LIN S W, YING K C, CHEN S C, et al. Particle swarm optimization for parameter determination and feature selection of support vector machines[J]. *Expert systems with applications*, 2008, 35(4):1817-1824.
- [16] 陈家照,罗寅生. 改进粒子群三维空间路径规划研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(33):39-42.  
(CHEN Jiazhao, LUO Yinsheng. Research on improved particle swarm optimization for path planning in 3-D space[J]. *Computer engineering and applications*, 2010, 46(33):39-42.)
- [17] COUCEIRO M S, RUI P R, FERREIRA N M F. A novel multi-robot exploration approach based on Particle Swarm Optimization algorithms[C]//9th IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics. Kyoto, Japan: IEEE Robotics and Automation Society, 2011:327-332.
- [18] 范小宁. 船舶管路布局优化方法及应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.  
(FAN Xiaoning. A study of optimization methods for ship pipe routing design and applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.)
- [19] LIEN F. A pressure-based unstructured grid method for all-speed flows[J]. *International journal for numerical methods in fluids*, 2015, 33(3):355-374.
- [20] WENNEKER I, SEGAL A, WESSELING P. A mach-uniform unstructured staggered grid method[J]. *International journal for numerical methods in fluids*, 2010, 40(9):1209-1235.