

DOI: 10.3901/JME.2020.20.174

# 基于自适应天牛须算法的航空发动机 管路布局优化\*

于嘉鹏<sup>1,2</sup> 袁鹤翔<sup>1</sup> 杨永华<sup>3</sup> 张硕<sup>1</sup> 费强<sup>1</sup>

- (1. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819;
2. 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室 沈阳 110819;
3. 中航工业沈阳发动机设计研究所 沈阳 110015)

**摘要:** 针对航空发动机外部管路系统设计过程中布局效率和空间利用率较低的问题, 提出一种基于自适应天牛须搜索算法的管路自动布局方法。该方法在原算法的基础上加入自适应变步长机制, 使其在具有高效性的同时能搜索到更优的解。在描述复杂空间障碍物时, 采用将附件和管路分开建模的方式, 一方面建立机匣附件的轴向包围盒, 并在包围盒内部构建小范围的附件栅格信息矩阵; 另一方面, 对已布局管路分段处理后采用线段求交的方式做出干涉性判断, 在此基础上根据某种度量选择本条管路的避障策略, 以达到充分利用敷设空间的目的。建立管路布局问题的数学模型, 并以管路长度和压力损失作为优化目标完成路径的规划过程。最后, 通过仿真实例证明所提方法的可行性。

**关键词:** 航空发动机; 管路布局; 天牛须算法; 线段求交; 避障策略

**中图分类号:** V23

## Aero-engine Pipe Layout Optimization Based on Adaptive Beetle Antennae Search Algorithm

YU Jiapeng<sup>1,2</sup> YUAN Hexiang<sup>1</sup> YANG Yonghua<sup>3</sup> ZHANG Shuo<sup>1</sup> FEI Qiang<sup>1</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819;
2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems Ministry of Education of China, Northeastern University, Shenyang 110819;
3. AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015)

**Abstract:** Aiming at the low layout efficiency and space utilization in the design process of aero-engine external pipeline system, an automatic pipe layout method based on adaptive beetle antennae search algorithm is proposed. This method adds an adaptive variable step size mechanism to the original Beetle Antennae Search algorithm, so that it could search for a better solution while retaining the advantage of high efficiency. A modeling method which process attachments and pipelines separately is proposed to describe obstacles in complex layout space. In this method, the axis-aligned bounding box of attachment is computed first, and the grid matrix of attachment in bounding box is constructed then. Specifically, the interference of pipes is judged by the method of line segment intersection, on this basis, choosing the obstacle avoidance strategy of the current pipe which could fully utilize the layout space. Pipeline length and pressure loss are selected as the optimization objectives to construct the mathematical model of pipe layout. Finally, the feasibility of the proposed method is demonstrated with a simulation instance.

**Key words:** aero-engine; pipe layout; BAS algorithm; line segment intersection; obstacle avoidance strategy

## 0 前言

管路作为机电产品中重要的组成部分, 广泛应

用于航空、船舶、汽车、石油化工等领域, 并且在机器正常运转过程中起着不可或缺的作用。管路布局质量的优劣很大程度上关系着产品的可靠性和可维修性, 美国通用电气公司曾对以往发生的多起发动机空中停车事故进行调查统计, 数据显示此类事故中的 50% 是由于发动机外部管路、传感器、线缆

\* 中央高校基本科研业务费(N2003025)和中航发(2019JX04H001)资助项目。20191012 收到初稿, 20200724 收到修改稿

被破坏导致<sup>[1]</sup>。航空发动机中管路数量众多, 通常在狭小的布管空间中存在上百条管路, 人工敷设的方式依赖于设计人员的经验, 且在布局过程中不仅要考虑布局的合理性, 而且要满足各种工程规则, 当面临数百条管路时布局效率大大降低, 因此管路设计已成为复杂产品设计中的关键环节。

管路自动布局的目的在于, 要在给定点之间避让障碍, 并得到若干条满足工程规则的最优路径, 在理论上属于 NP(Non-deterministic polynomial)难问题。近年来, 国内外学者对这一问题进行了大量研究, ZHU 等<sup>[2]</sup>通过类比机器人路径规划, 采用单元分解法分割周围空间, 并采用直接搜索算法完成二维环境和三维环境下的管路布局, 但这种方法局限于正交管路。ROURKE<sup>[3]</sup>采用迷宫算法完成二维环境下的管路布局, 这一方法可以保证路径最短, 但是布局效率较低, 且约束条件少。樊江等<sup>[4]</sup>通过对发动机模型进行网格划分, 生成一系列带有权值的点, 再利用改进的 LEE 算法和最小斯坦纳树生成法得到满足要求的布局结果, 该方法在小空间内具有较高的效率。赵柏萱等<sup>[5]</sup>采用快速扩展随机树和模拟退火算法, 分别完成管路的布局与优化过程, 并提出一种基于 ASP 推理机的评价方法完成对管路布局结果的综合评价。YIN 等<sup>[6]</sup>模仿人对三维障碍物处理的思维, 从人工智能的角度完成对航空发动机的管路布局。WANG 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于投影的启发式布管算法, 用于航空发动机的管路布局, 成功完成了在发动机曲面空间和三维空间的多根管路布局。刘佳顺等<sup>[8]</sup>提出一种结合任意时间算法和 RRT 算法的自动布线方法, 以线缆长度为优化目标完成初始路径的生成, 并在初始路径的基础上进行贴壁细化处理, 以满足布局的工程规则, 该方法在路径贴壁规划过程中可较好地实现跨越障碍物间狭小缝隙, 但采用包围盒对障碍物建模的方法并不精确。

智能算法作为一种新兴的演化计算技术已被广泛应用于管路布局问题当中, 陈志英等<sup>[9]</sup>采用遗传算法实现管路的路径寻优, 实现了管路自动避障且长度最短的要求。付宜利等<sup>[10]</sup>利用混沌技术实现对敷设空间预处理, 以此为基础采用改进的粒子群算法实现管路的自动布局, 这一方法降低了求解复杂度, 提高了管路布局效率。柳强等<sup>[11]</sup>通过建立障碍物的凸包模型, 以管路长度和管路平滑度为优化目标, 采用 NSGA-II 算法优化多个目标生成管路布局优化的 Pareto 解集, 得到可供选择的多个布局结果。范小宁等<sup>[12]</sup>通过改进模拟退火算法和遗传算法使管路布局成功率有了一定的提高。张禹等<sup>[13]</sup>提出一

种混沌人工鱼群协同进化算法用于航空发动机管路布局, 该方法仅限于正交管路。WANG 等<sup>[14]</sup>提出一种用于船舶管路布局的人机协同的蚁群算法, 并依据设计人员的经验在算法解的基础上添加人工解, 从而获得满足一定工程要求的布局结果。在分支管路方面, QU 等<sup>[15]</sup>通过建立发动机表面的三维连接图实现对敷设空间的预处理, 并提出一种并行最大最小蚁群算法完成若干条航空发动机直角分支管路的布局, 但并未考虑以布局管路作为障碍对后续管路的影响。柳强等<sup>[16]</sup>采用 MOPSO 算法, 以斯坦纳点数量和坐标为变量, 在可视图的基础上采用 Prim 算法得到最小生成树及树的“长度”, 并以长度和流阻为目标得到一组非支配解, 提供多个方案可供选择。

综上所述, 国内外学者对管路自动布局做出了大量研究并取得了一定的研究成果。研究中考虑的约束条件通常为避障、管路长度最短、弯曲角度最小等, 且对于敷设好的管路作为障碍描述时通常采用栅格法表达, 这种方法优点在于其通用性好, 它可以描述任何形状的障碍物, 但是如果精度要求较高时栅格划分较细, 导致在建立栅格矩阵和查询信息时非常耗时, 运算效率也随之降低, 且严格的分层敷设方式当面临分层较多且管路跨度较大时, 上层管路因距离发动机机匣表面较远而占用较大的空间, 且不利于卡箍的固定, 这使得较远距离处于悬空状态的管路振动特性变差, 从而导致管路过早失效。

针对以上问题, 本文采用基于三维空间线段求交和测地线段求交的方法来判断管路的干涉情况, 并仅对航空发动机机匣表面附件建立栅格信息矩阵以表达障碍物占据的空间, 而非对整个航空发动机进行栅格划分, 在此基础上提出一种新的跨管方式, 使待布管路能够在特定情况下跨越已布障碍管路, 并应用自适应天牛须 (Adaptive beetle antennae search, ABAS) 算法完成管路布局设计, 在所搭建的平台上完成管路敷设实例验证, 结果表明所提方法在解决管路布局这一问题中具有较高的效率。

## 1 问题描述与布置规则

### 1.1 管路布局的数学描述

管路的布局问题描述为在三维曲面空间内避开障碍物所占空间, 并通过计算自动寻找出一条满足要求的路径。本文主要以管路的长度和管路压力损失为优化目标, 分别为式(1)、(2)的  $f_1$  和  $f_2$

$$f_1 = \sum_{i=1}^N l_i \quad (1)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^N \Delta p_i \quad (2)$$

式中,  $l_i$  为管路中各管段节点间的距离,  $\Delta p_i$  为各管段的压力损失。其中压力损失包括沿程压力损失和局部压力损失。

沿程压力损失

$$p_f = \lambda \gamma \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{d} \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (3)$$

局部压力损失

$$p_j = \sum_{i=1}^{N-1} \gamma K_i \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (4)$$

$$K_i = k \frac{\theta_i}{90} \quad (5)$$

$$k = 0.131 + 0.159 \left( \frac{d}{R} \right)^{3.5} \quad (6)$$

式中,  $\lambda$  为沿程阻力系数;  $\gamma$  为重度;  $l_i$  为各管段长度;  $d$  为管径值;  $\bar{u}$  为平均流速;  $\theta_i$  为第  $i$  个折弯管段的折弯角度的补角, 单位为  $^\circ$ ;  $K_i$  为第  $i$  个折弯管段的局部阻力系数, 可由经验公式<sup>[17]</sup>(5)、(6) 获得;  $R$  为弯管中心线的曲率半径, 由于航空发动机机匣为曲面, 沿测地线分布的管段也存在局部压力损失, 其中  $\theta_i$  采用管段端点间的  $\Delta\theta$  近似替代。

设机匣表面曲线方程为

$$r(\theta) = (x(\theta), y(\theta), z(\theta)) \quad (7)$$

则测地线部分曲率半径<sup>[19]</sup>

$$R = \frac{|\dot{r}|^3}{|\dot{r} \times \ddot{r}|} \quad (8)$$

为简化计算, 采用近似的测地线方程表达

$$x(\theta) = \rho \cos(\theta) \quad (9)$$

$$y(\theta) = \rho \sin(\theta) \quad (10)$$

$$z(\theta) = z_1 + \frac{(z_2 - z_1)(\theta - \theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \quad (11)$$

联立式(7)~(11), 得出曲率半径

$$R = \frac{(z_2 - z_1)^2 + \rho^2 (\theta_2 - \theta_1)^2}{\rho (\theta_2 - \theta_1)^2} \quad (12)$$

式中,  $z_1$ 、 $z_2$  分别为管段两端点  $z$  轴方向的坐标;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为管段在柱坐标下的角度值;  $\rho$  取为  $z_1$ 、 $z_2$  中对应较大的值。

根据式(3)~(12)可得到管路的总压力损失

$$\sum_{i=1}^N \Delta p_i = \lambda \gamma \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{d} \frac{\bar{u}^2}{2g} + \sum_{i=1}^{N-1} \gamma K_i \frac{\bar{u}^2}{2g} + \sum_{i=1}^N \gamma K'_i \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (13)$$

式中,  $K_i$  为节点处局部阻力系数;  $K'_i$  为沿测地线分布管路的局部阻力系数。

目标函数采用线性加权的方式表示为

$$F = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + P n \quad (14)$$

式中,  $f_1$  和  $f_2$  分别为管路的长度和压力损失,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为管路长度和压力损失的加权系数,  $P$  为管路干涉的惩罚项,  $n$  为本条布局管路与已布局其他管路的干涉次数。

## 1.2 管路的布置规则

管路的布置要通过一系列的工程规则来约束, 从而使管路最终的布局结果与其他部分相互协调, 部分布置规则见表 1。

表 1 管路布置规则

序号	布置规则
1	管路布置应简单可靠, 使管路有较轻的重量
2	各管路之间应留有空隙, 以防管路在发动机运转过程中因变形而磨损
3	管路的布置应避免小角度弯曲, 最小弯曲角度不可小于 $90^\circ$
4	管路尽量沿内机匣敷设, 充分利用空间, 使外廓尺寸较小
5	管路应尽量避免从附件顶部绕过, 燃油管路应避开高温区域

其中, 对于规则 1, 同一管路密度和管径相同, 因此保证长度便保证了重量; 对于规则 2, 在处理初始空间障碍时可通过膨胀障碍物进行表达, 处理作为障碍的已布局管路可通过引入补偿值  $\delta$  的方法来避免管路发生碰撞; 规则 3 可通过添加惩罚项的方法, 使管路在弯曲角度小于  $90^\circ$  时目标函数值激增; 规则 4 可采用在两点间建立测地线的方法, 实现管路沿着机匣表面敷设; 规则 5 处理方法同规则 2, 膨胀范围通过设计人员指定。

## 2 避障过程

由于航空发动机体型庞大、管路数量众多, 因此对航空发动机整体进行栅格划分势必会造成计算机存储量和运算量过大。为此, 本文将机匣附件和管路视为两类障碍, 并分别采用栅格法和线段求交的方法完成避障过程。

### 2.1 基于栅格信息的附件避障

目前的研究对空间障碍建模的方法主要有最小包围盒法、凸包法、单元分解法、栅格法等。最小包围盒法可极大提高避障过程的效率, 但对不规则

障碍很难精确表达；栅格法可相对精确地表达障碍所占空间，但是当栅格划分较细且划分空间庞大时，栅格的划分效率将大大降低且占用计算机大量内存；凸包法目的在于求取障碍物的最小包容多面体，该方法亦可较精确地描述障碍物的空间信息，但是当障碍物形状极不规则时，建立凸包需要大量的采样点，且生成的凸包面数较多。为此，本文提出一种基于包围盒的栅格建模方法，即首先建立障碍附件的轴向包围盒(Axis-aligned bounding box, AABB)，之后在包围盒中建立该附件的栅格信息矩阵，建模及避障步骤如下。

步骤 1：分别建立机匣表面各附件的 AABB 包围盒。

步骤 2：设定栅格划分粒度为  $C_l$ ，根据包围盒各边界长度分别求出 X、Y、Z 方向需要划分的栅格数量  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$ 。

步骤 3：建立一尺寸为  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  的三维矩阵，确定包围盒内各点与障碍物的关系，点在障碍物内或边界上则矩阵元素值为 1，否则为 0。

步骤 4：如图 1 所示，三维点阵每相邻的八个点构成一个栅格，根据每个栅格的信息构造出栅格信息矩阵。图中包围盒的顶点坐标为  $P_0(x_0, y_0, z_0)$ ，设管路离散点坐标为  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ，分别判断  $P_1$  点在 X、Y、Z 三个方向与  $P_0$  点的距离  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ，进而求得三个方向距离的等效单元格数量，并与  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  做比较，如果不在包围盒范围内，则该管路不与障碍物干涉；否则，根据该序号对应栅格信息矩阵的元素值断定该离散点是否与障碍物发生干涉，值为 1 表明干涉，否则不干涉。

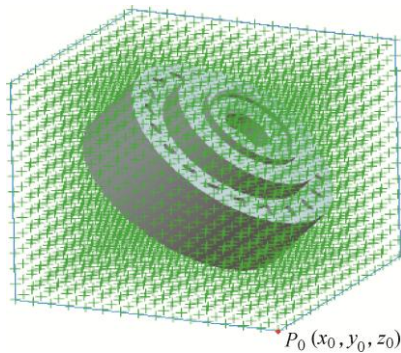


图 1 栅格划分结果

这种仅对附件栅格建立栅格信息矩阵的方法在划分栅格时，其粒度的大小不受管径的制约，对不同的附件可采用不同的粒度，且对于形状规整的附件可采用较大的粒度进行划分，因此，该方法可在保证精度的前提下大大提高栅格划分以及后期路径的搜索效率。

## 2.2 基于线段求交的三维空间避障

在判断管路干涉的问题上，提出了一种基于线段求交的方法。

如图 2 所示， $A_0B_0$  和  $CD$  分别为空间两管段的中心线，首先判断两管段中心线  $A_0B_0$  和  $CD$  的距离  $d$  与二者半径之和  $R_{p1} + R_{p2}$  的大小关系，若  $d < R_{p1} + R_{p2} + \delta$ ，则两者之间便存在干涉的可能性；之后将欲布管段的中心线  $A_0B_0$  投影到以矢量  $A_0B_0$  和矢量  $CD$  公法线为法矢量并经过已布管段中心线  $CD$  的平面上，进而将三维空间干涉问题转化为判断二维线段  $AB$  和  $CD$  的相交问题。

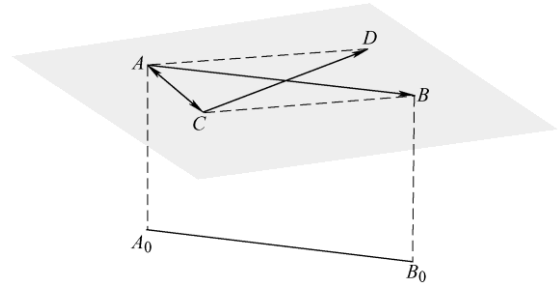


图 2 管路中心线投影

由于算法包含多层循环，如通过解方程组判断方程组是否存在实数解的方法来判断两线段是否相交的话必定会使运算量极大，从而导致运算效率过低，本文采用一种不解方程的方法<sup>[18]</sup>来判断线段相交问题。如图 2 所示，若投影线段  $AB$  和已布管段中心线  $CD$  相交，则线段端点  $A$ 、 $B$  分别位于线段  $CD$  的两侧，且端点  $C$ 、 $D$  位于线段  $AB$  的两侧，根据右手定则可知矢量  $AB \times AD$  和矢量  $AB \times AC$  反向，同理可得矢量  $CD \times CA$  和矢量  $CD \times CB$  反向，因此可得出三维管路干涉的充分必要条件

$$d < R_{p1} + R_{p2} + \delta \quad (15)$$

$$[AB, AD, AC \times AD] \cdot [AB, AC, AC \times AD] \leq 0 \quad (16)$$

$$[CD, CA, CA \times CB] \cdot [CD, CB, CA \times CB] \leq 0 \quad (17)$$

## 2.3 基于线段求交的曲面空间空间避障

在机匣母线提取若干个点并通过 Matlab 拟合得到母线方程  $\rho = f(z)$ ，据此建立管段中心线的参数方程

$$\theta = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \cdot t \quad (18)$$

$$z = z_1 + (z_2 - z_1) \cdot t \quad (19)$$

$$\rho = \max(\rho(z_1), \rho(z_2)) + R_{p1} + \delta \quad (20)$$

式中， $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $z_1$ 、 $z_2$  分别为管段两端点在柱坐标系下的角度和纵坐标， $t$  为参数且  $0 \leq t \leq 1$ ， $\delta$  为管路最小间隙。

判断测地线段相交方法见文献[19], 本文不再赘述。由于管路有一定的外径, 因此管路干涉问题与测地线段相交问题并不完全等同, 判断管路干涉与否则需要另外的条件。

在测地线段不相交的条件下(图 3), 根据两管段在竖直方向的投影, 管段的空间位置关系存在如图 3 中三种情况, 因此可通过判断两管段中心线的最短距离来判断该管段是否与其他管段相互干涉。以图 3a 为例, 两个管段共四个端点分别为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ , 管段的最短距离即为四点中的中间两点向对面管段中心线投影的最短距离的最小值。在  $P_1$ 、 $P_2$  上任取一点  $P_0(\rho, \theta, z)$ , 该点到对面端点的距离

$$d(\theta) = \sqrt{\left(z_1 - z_0 + \frac{(\theta - \theta_1)(z_1 - z_2)}{\theta_1 - \theta_2}\right)^2 + \frac{\rho^2 \pi^2 (\theta - \theta_0)^2}{32400}} \quad (21)$$

对  $\theta$  求导, 并令  $d'(\theta) = 0$ , 解得

$$\theta = \frac{\rho^2 \theta_0 \pi^2 (\theta_2 - \theta_1)^2}{32400(z_1 - z_2)^2 + \rho^2 \pi^2 (\theta_1 - \theta_2)^2} + \frac{(z_1 - z_2)(\theta_1 z_0 - \theta_2 z_0 - \theta_1 z_2 + \theta_2 z_1)}{(z_1 - z_2)^2 + 3 \times 10^{-5} \rho^2 \pi^2 (\theta_1 - \theta_2)^2} \quad (22)$$

将  $\theta$  代入式(21)中, 解得管段距离

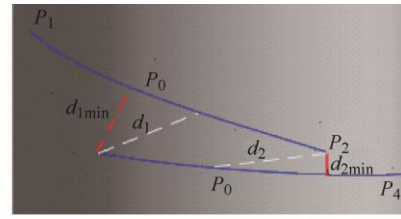
$$d_{1min} = z_1 - z_0 + \left(\frac{(\theta - \theta_1)(z_1 - z_2)}{\theta_1 - \theta_2}\right)^2 + 32400\rho^2\pi^2 \left(\theta_0 - \frac{\rho^2 \theta_0 \pi^2 (\theta_1 - \theta_2)^2}{(z_1 - z_2)^2 + \rho^2 \pi^2 (\theta_1 - \theta_2)^2} + \frac{32400(z_1 - z_2)}{(z_1 - z_2)^2 + \rho^2 \pi^2 (\theta_1 - \theta_2)^2} (\theta_1 z_0 - \theta_2 z_0 - \theta_1 z_2 + \theta_2 z_1)\right)^2 \quad (23)$$

式中,  $z_0$ 、 $z_1$ 、 $z_2$  和  $\theta_0$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为中心线两端点  $P_3$ 、 $P_1$ 、 $P_2$  在柱坐标系下的纵坐标和角度值,  $\rho$  根据式(20)确定。

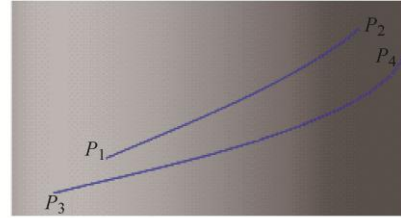
同理可得  $d_{2min}$ , 而  $\min(d_{1min}, d_{2min})$  即为此种情况两管段的最短距离, 其他两种情况以同样的方法均可得出, 若  $\min(d_{1min}, d_{2min}) < R_1 + R_2 + \delta$ , 则管路发生干涉, 否则不干涉。

以往对于沿航空发动机机匣曲面布局的管路多采用分层敷设的方法, 该方法将问题简化为在相隔一定距离不同层面的多次敷设, 同一层管路与机匣径向距离相同, 这种方法很好地解决了沿机匣曲面布管这一复杂问题, 与此同时带来的问题就是上层

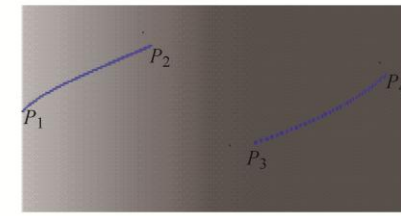
整根管路距离发动机表面较远, 使管路不便固定, 且振动特性变差。



(a) 两管路中心线沿轴线投影互相重叠



(b) 一条管路中心线沿轴线投影完全重叠于另一条



(c) 两管路中心线沿轴线投影无重叠

图 3 曲面空间管段位置的存在形式

针对这一问题, 本文提出一种跨管机制, 使所有管路根据周围障碍物分布复杂程度分为多轮敷设。假定所有管路都可在同一层面完成敷设, 即所有管路距离机匣的径向距离均为  $\delta$ , 在这种情况下待布局管路只能从已布局管路周围绕过, 如图 4 中的管路 2 和管路 3, 但是当管路在这一层面的布局十分密集时, 待布局管路的绕行将十分困难, 且布局出的管路结果往往不能满足实际要求。

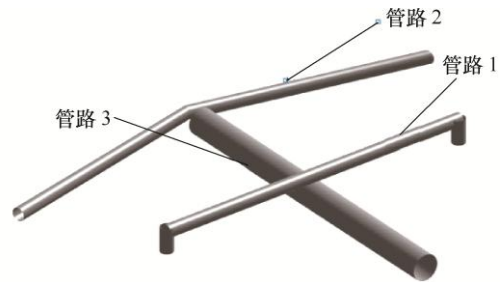


图 4 分层敷设处理管路障碍

为此, 引入一个跨管临界比值  $p_c$ ,  $p = l/l_{min}$ , 其中  $l$  为该管路在本层敷设的长度,  $l_{min}$  为该管路忽略所有障碍时沿机匣表面的最短测地线长度。若  $p < p_c$ , 则本管路可在本轮完成布局, 否则本轮布局跳过此管路, 并将该管路加入失败管路集合中等



待下一轮的布局。在下一轮布局过程中，管路障碍分为前几轮已完成布局的管路集合  $\text{TabuList}_0$  和本轮已完成布局的管路集合  $\text{TabuList}_1$ ，在本轮布局过程中仅将  $\text{TabuList}_0$  作为障碍，在本轮布局结束后将符合要求的管路以一定长度离散化，并将离散后的各管段与  $\text{TabuList}_1$  中的管路分别进行干涉性的判断，之后将干涉管段两端点沿径向平移长度为  $R_{p1} + R_{p2} + \delta$  的距离，以此类推进行多轮布局，直至失败管路集合为空。以图 5 为例，管路 2 和管路 3 为算法在同一轮完成布局的管路，而对于管路 1，由于该管路  $p \geq p_c$ ，因此采用跨管的方式进行避障。相对于对航空发动机整体建立栅格的方法，采用线段求交的跨管过程在描述不同管径的障碍管路时简便许多。经试验，多数情况下两轮即可完成所有管路的布局。

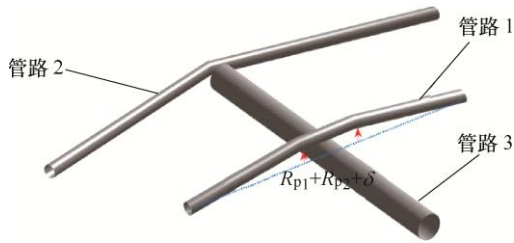


图 5 跨管绕障处理管路障碍

### 3 管路布局算法

#### 3.1 基本 BAS 算法

天牛须搜索算法 (Beetle antennae search algorithm, BAS)<sup>[21]</sup> 是一种生物启发式算法，与其他智能优化算法类似，BAS 在复杂优化问题方面也有着较好的表现力，不同的是这种算法仅需要一个天牛个体便可完成最优值的搜索，这使得算法在处理复杂优化问题上有着较高的效率。

BAS 算法通过模仿天牛觅食行为完成对优化问题的求解。在觅食过程中，天牛无法感知目标食物的具体位置，而是通过触角接收食物发出的气味信号实现搜索过程。该过程中天牛左右触角均能接收到食物的气味信号，且天牛倾向于沿着气味信号较强的方向探索，如果左右触角接收到的气味信号强弱相当，则保持当前探索方向，如此往复探索直至食物源被找到。在天牛觅食过程中，食物的气味信号相当于目标函数，而天牛的任务就是寻找整个空间内气味值最大的点。算法将天牛简化为一个质点，两须对称分布在质点的两侧，其实现流程如下。

步骤 1：初始化天牛位置，根据问题的要求确定搜索空间和维数  $n$ ，并在搜索空间内产生随机产生一组  $n$  维矢量  $\mathbf{x}$  作为天牛的初始位置。

步骤 2：产生一组  $n$  维随机矢量  $\mathbf{b}$  并将其单位化，用作计算天牛个体的左须和右须位置，将单位化后的矢量记为  $\hat{\mathbf{b}}$ ，天牛两须间距记为  $d$ ，则天牛的右须位置为

$$\mathbf{x}_r = \mathbf{x} + \frac{d}{2} \times \hat{\mathbf{b}} \quad (24)$$

左须位置为

$$\mathbf{x}_l = \mathbf{x} - \frac{d}{2} \times \hat{\mathbf{b}} \quad (25)$$

步骤 3：设  $f(x)$  为目标函数， $\delta$  为天牛的飞行步长，对于极小值问题  $x$  的下次位置可表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{x} + \delta \operatorname{sgn}(f(\mathbf{x}_l) - f(\mathbf{x}_r)) \cdot \hat{\mathbf{b}} \quad (26)$$

步骤 4：随着迭代次数的增多，天牛步长和两须间距呈指数减小，目的在于提高后期的精确搜索能力，步长和须间距由式(27)、(28)确定

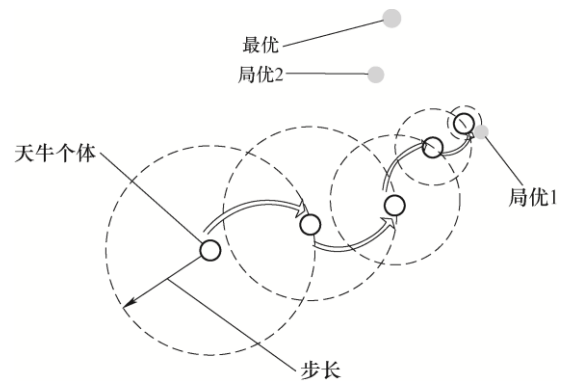
$$d = 0.95d + 0.01 \quad (27)$$

$$\delta = 0.95\delta \quad (28)$$

步骤 5：判断是否符合迭代条件，符合则结束，不符合则返回步骤 1 继续迭代。

#### 3.2 ABAS 算法

基本 BAS 具有结构简单、计算效率高的优点，且一般采用实数编码，但是如图 6 中在高维、大空间搜索的过程中，由于步长  $\delta$  呈指数下降，迭代后期其步长值必然会变得非常小，导致个体停留在一个小范围而不能继续搜索，进而出现早熟和陷入局优的现象。



为了使算法在保证计算效率较高的同时克服上述两个缺点,本文提出一种自适应步长的方法改善算法的性能。如图7所示,在算法执行的过程中,可通过步长 $\delta$ 判断其收敛程度, $\delta$ 越小说明算法越趋于收敛,反之则说明算法处于随机搜索阶段。通过定义 $k$ 的值来限制 $\delta$ 的最小值,使算法跳出局优,即当 $\delta < k$ 时,则增大步长,且每次增大后的步长应随变化次数的增多逐渐变小,以使算法从广域搜索过渡到局部精确搜索,图8为基于ABAS算法的管路布局流程图。图8中 $Size$ 为布局管路的总数量, $P$ 为当前已完成布局管路数量, $G$ 为算法的迭代次数, $T$ 为当前迭代的代数, $N$ 和 $pc$ 分别为布局的轮数和跨管临界比值。

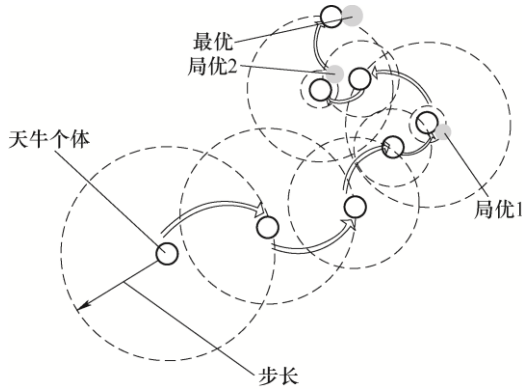


图7 ABAS 搜索示意图

步长变化如式(29)、(30)所示

$$\delta = \left| \frac{\delta_0}{times} - temp \right| \quad (29)$$

$$d = \frac{\delta}{5} \quad (30)$$

式中, $\delta_0$ 是算法初始的最大步长,为使个体能在整个空间搜索, $\delta_0$ 应取在区间范围附近或与区间范围相等, $times$ 为 $\delta < k$ 的次数,即 $\delta$ 每小于 $k$ 一次, $times$ 便增加一次, $temp$ 为补偿值,目的在于使 $\delta$ 在后期能够在小范围内精确搜索。

一般情况 $temp=0\sim 2$ , $d$ 为须间距,与 $\delta$ 比值为一个常量。为使算法在初期进行广域搜索、后期进行精确搜索, $k$ 值应呈递减变化

$$k = \eta \times k \quad (31)$$

式中, $\eta$ 取 $0\sim 1$ 靠近1的值,经验证 $\eta=0.980\sim 0.995$ 效果较好。

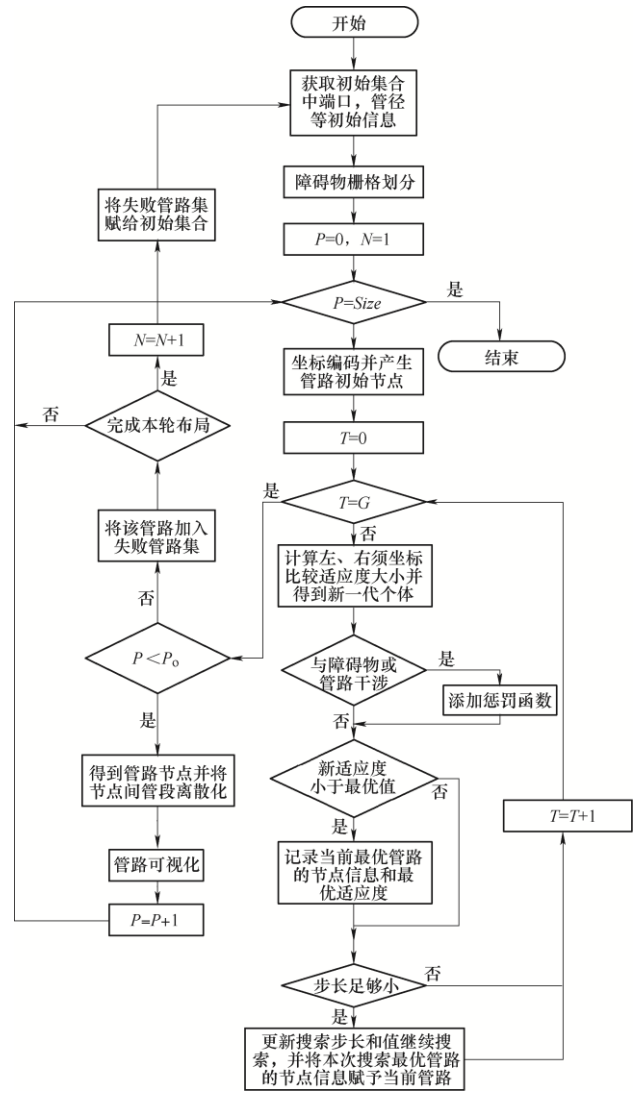


图8 基于ABAS的管路布局流程图

### 3.3 算法测试

下面分别通过如下四个典型的测试函数和管路敷设算例来测试算法的可行性,并与天牛须搜索算法和粒子群算法<sup>[22]</sup>进行对比,测试计算机硬件环境:CPU 2.50 GHz Inter(R)Core(TM) i5-3210M,内存4 G,显卡为AMD Radeon R5 M200,测试软件为MATLAB R2015b。

Sphere

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{10} x_i^2 \quad -100 \leq x_i \leq 100 \quad (32)$$

Rastrigrin

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{10} [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10] \quad -100 \leq x_i \leq 100 \quad (33)$$

Goldstein-Price

$$f_3(x) = \left( 1 + (x_1 + x_2 + 1)^2 \left( 19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + \right) \right) \times \left( 30 + (2x_1 - 3x_2)^2 \left( 19 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2 \right) \right) - 5 \leq x_i \leq 5 \quad (34)$$

Rosenbrock

$$f_4(x) = \sum_{i=1}^9 \left[ 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right] \quad -100 \leq x_i \leq 100 \quad (35)$$

其中 Sphere 函数是一个单峰二次函数；Rastrigrin 函数是一个多峰值函数，小区间范围内极小点极多，很难查找出全局最优值；Goldstein-Price 函数是原 BAS 算法提出者所用的测试函数，该函数只有一个全局极小点；Rosenbrock 函数的全局极小值点附近非常平滑，变量的微小变化会使函数值发生很大的变化，因此很难极小化。

试验参数设置如下：在如下四个函数中粒子群算法种群数量均为 40，BAS 是单个种群搜索，因此采用时间来描述测试函数的适应度变化情况。表 2 列出了三种算法运行 10 次的平均最优解。

表 2 四种测试函数运行 10 次的平均最优解

函数	BAS	PSO	ABAS	参数
Sphere	5.042	0.121	$6.307 \times 10^6$	$k=10, \eta=0.992, temp=0.2$
Rastrigrin	130.144	85.136	18.130	$k=2, \eta=0.992, temp=0.2$
Goldstein-Price	3	15.853	3	$k=0, \eta=0.992, temp=0$
Rosenbrock	$9.58 \times 10^4$	384.557	50.668	$k=2, \eta=0.98, temo=0$

从表 2 和图 9 可以看出，对于这四个测试函数在相同的运行时间下，ABAS 算法得到的平均最优值均优于粒子群算法和 BAS 算法，且跳出局优、克服早熟收敛的能力大大加强，通过对比原算法文献<sup>[21]</sup>的 Goldstein-Price 测试函数可以发现 ABAS 不但在高维大空间有较强的搜索能力，在低维小空间仍保

留着原 BAS 算法的优异性能，且在极短的时间内就搜索到了 Goldstein-Price 函数的理论最优值。由于在大搜索空间函数适应度变化范围较大，为了便于比较，图 9 中各图像的横坐标用时间表示，纵坐标均采用适应度的对数值表示。

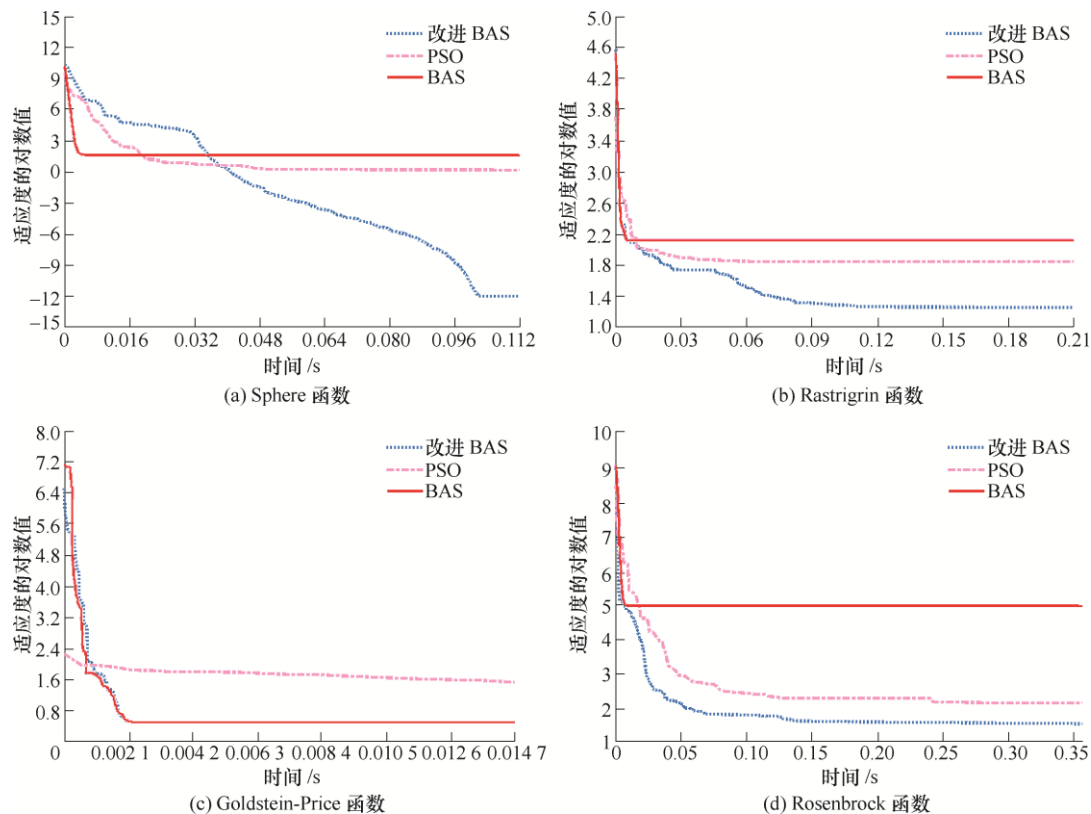


图 9 四种测试函数平均最佳适应度进化曲线



## 4 管路仿真测试

为验证本文所提方法的有效性,以航空发动机外部管路为例,利用基于 Visual C# 的 UG NX 二次开发技术,在图 10 中具有 15 个附件的机匣外围敷设 55 条管路,其中有 45 条管路为沿机匣曲面敷设的管路,另有 10 条是不受机匣曲面约束的空间管路,为方便表述,本节将以上两类管路分别称为 I 类管路和 II 类管路。流体和管路参数如下:本文测试采用两种不同规格的导管<sup>[23]</sup>,管径信息分别为 $(D-d)20-18\text{ mm}$  和  $30-28\text{ mm}$ ,流体重度  $\gamma=850\cdot g=8\,330\text{ N/m}^3$ ,运动黏度  $\nu=40\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ,流速  $u=10\text{ m/s}$ ,沿程阻力系数  $\lambda$  根据  $Re$  值范围确定。

将管路中心线的节点坐标作为算法个体编码,其中 I 类管采用极坐标编码,编码方式为  $\{\theta_1, z_1, \theta_2, z_2, \dots, \theta_n, z_n\}$ ,  $\rho$  根据机匣母线方程  $\rho=f(\theta, z)$  确定;II 类管路采用直角坐标编码,编码方式为  $\{x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n\}$ ,每条管路五个节点,即分为四个管段,其中起点和终点坐标已知。算法参数设置如下:步长应随管路端口坐标变化,取为起、终点各坐标的最大差值,迭代系数  $\eta=0.8$ ,补偿值  $temp$  取为 2,  $k=1$ ,种群数量为 1,迭代 3 000 次;目标函数参数设置如下:其中管路长度权重系数  $\omega_1=1$ ,压力损失权重系数

$\omega_2=0.01$ ,干涉惩罚项  $P=10^5$ 。定义端口信息和障碍信息后,得到 55 条管路的布局结果如图 10 所示,其中上方主图为 I 类管路布局结果,下方的局部放大图为 II 类管路布局结果。布局过程共耗时 2.05 min,其中建立 15 个附件的栅格信息矩阵花费 56 s,管路路径规划过程耗时 67 s。相比文献[20]中采用曲面可视图算法在具有 8 个障碍附件的机匣表面用时 191.2 min 布局 20 条管路,以及自适应曲面可视图算法在相同条件下花费 3.3 min 布局 20 条管路的布局结果,本文所提方法的布局效率有很大的提高。最终生成管路的长度和压力损失信息列于表 3 中,限于篇幅仅列出前 10 条管路的信息。

表 3 部分管路长度和压力损失信息

管路序号	管路长度/mm	压力损失/Pa
1	836.505	57 381.063
2	835.220	53 176.599
3	576.367	33 367.153
4	731.794	47 668.929
5	631.885	38 224.741
6	794.725	44 622.617
7	1 123.392	61 720.443
8	565.401	35 974.405
9	909.132	30 419.445
10	1 287.305	72 683.468

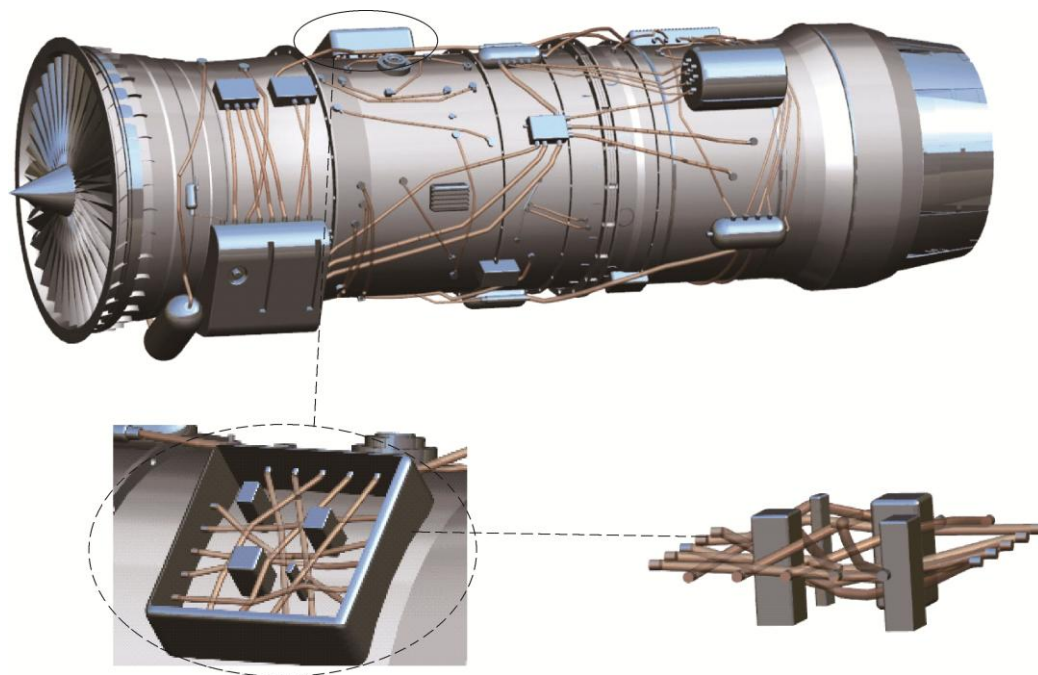


图 10 航空发动机机匣表面管路布局结果

## 5 结论

(1) 首次将天牛须算法应用于航空发动机外部管路敷设, 提出一种基于 ABAS 算法的管路自动布局方法, 该算法在原有基础上引入自适应变步长机制, 均衡了算法的广域搜索能力与收敛性, 并以管路长度和压力损失为优化目标完成布局, 最终通过实例证明了所提方法的有效性。

(2) 提出了对机匣附件和已布局管路分别建模的方法。在单独对附件进行栅格划分时, 对于形状规整的障碍物可使用较大的粒度进行划分, 栅格粒度不受管径大小的制约, 因而缩短了同一栅格粒度下的栅格划分时间, 降低了计算机的内存消耗和运算量。

(3) 在避障过程中引入一种基于线段求交方法的跨管机制, 提高了布局效率, 而且可使整体布局更加紧凑, 方便后期安装时管路的固定。

(4) 布局过程中, 卡箍和安装座的位置和数量将对管路的布局结果和振动特性产生一定影响, 后续将在算法中进一步融入卡箍参数作为优化目标。

## 参 考 文 献

- [1] 樊江, 陈志英, 王荣桥. 航空发动机外部管路多 Agent 协同设计系统框架[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 186-189.  
FAN Jiang, CHEN Zhiying, WANG Rongqiao. A framework of cooperated aero-engine pipe routing multi-agent system[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 186-189.
- [2] ZHU D, LATOMBE J C. Pipe routing-path planing(with many constraints)[C]//Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D C, USA: IEEE, 1991: 1940-1947.
- [3] ROURKE P W. Development of a three-dimensional pipe routing algorithm[D]. Bethlehem: Lehigh University, 1975.
- [4] 樊江, 马枚, 杨晓光. 航空发动机外部管路自动敷设研究[J]. 机械设计, 2003, 20(7): 21-23.  
FAN Jiang, MA Mei, YANG Xiaoguang. Research on automatic pipeline laying of aero-engines[J]. Journal of Machine Design, 2003, 20(7): 21-23.
- [5] 赵柏萱, 刘检华, 宁汝新, 等. 一种基于工程规则的管路自动布局与综合优化技术[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 121-131.
- ZHAO Boxuan, LIU Jianhua, NING Ruxin, et al. An automatic pipe routing and optimization technology based on engineering constraints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 121-131.
- [6] YIN Y H, ZHOU C, ZHU J Y. A pipe route design methodology by imitating human imaginal thinking[J]. CIRP Annals- Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 167-170.
- [7] WANG C, LIU Q. Projection and geodesic-based pipe routing algorithm[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2011, 8(3): 641-645.
- [8] 刘佳顺, 刘检华, 张之敬, 等. 基于任意时间 RRT 算法的三维自动布线技术[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 156-165.  
LIU Jiashun, LIU Jianhua, ZHANG Zhijing, et al. Anytime RRT based cable automatic routing under three-dimensional environment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 156-165.
- [9] 陈志英, 樊江, 蔡兵兵, 等. 基于遗传算法的管路智能敷设应用研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(8): 932-934.  
CHEN Zhiying, FAN Jiang, CAI Pangpang, et al. Research on automatic pipe routing algorithm based on genetic algorithm[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(8): 932-934.
- [10] 付宜利, 封海波, 孙建勋, 等. 机电产品管路自动敷设的粒子群算法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 194-198.  
FU Yili, FENG Haibo, SUN Jianxun, et al. Automatic pipe-routing particle swarm optimization algorithm in electromechanical products[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 194-198.
- [11] 柳强, 焦国帅. 基于改进 NSGA-II 的航空发动机管路多目标布局优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(5): 1217-1227.  
LIU Qiang, JIAO Guoshuai. Multi-objective pipe layout for aero-engine based on improved NSGA-II[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(5): 1217-1227.
- [12] 范小宁, 林焰, 纪卓尚. 基于自适应退火遗传算法的船舶管路布局优化方法[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(2): 215-220.  
FAN Xiaoning, LIN Yan, JI Zhuoshang. Approach of ship pipe paths routing optimization based on adaptive annealing genetic algorithm[J]. Journal of Dalian

- University of Technology, 2007, 47(2): 215-220.
- [13] 张禹, 白晓兰. 基于 CAFSC 算法的航空发动机多管路智能布局[J]. 东北大学学报, 2016, 37(5): 683-687.  
ZHANG Yu, BAI Xiaolan. Intelligent multi-pipes layout for aero-engine based on CAFSC algorithm[J]. Journal of Northeastern University, 2016, 37(5): 683-687.
- [14] WANG Y, YU Y, LI K, et al. A human-computer cooperation improved ant colony optimization for ship pipe route design[J]. Ocean Engineering, 2018, 150(15): 12-20.
- [15] QU Y, JIANG D, YANG Q. Branch pipe routing based on 3D connection graph and concurrent ant colony optimization algorithm[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(7): 1647-1657.
- [16] 柳强, 毛莉. 基于 MOPSO 的航空发动机分支管路多目标布局优化[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 197-203.  
LIU Qiang, MAO Li. Multi-objective layout optimization for branch pipe of aero-engine based on MOPSO[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(19): 197-203.
- [17] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
LI Wei. Hydraulic calculation manual[M]. Beijing: China Water&Power Press, 2006.
- [18] 李永红, 华一新. 一种快速判断线段相交的方法[J]. 测绘通报, 2003(7): 30-31.  
LI Yonghong, HUA Yixin. A method to quickly assessing the intersection of line segments[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2003(7): 30-31.
- [19] 陈维恒. 微分几何[M]. 北京: 北京大学出版社, 2017.  
CHEN Weiheng. Differential geometry[M]. Beijing: Peking University Press, 2017.
- [20] 柳强. 管路布局规划优化算法与系统开发[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
LIU Qiang. Pipeline layout planning optimization algorithm and system development[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [21] JIANG X, LI S. BAS: Beetle antennae search algorithm for optimization problems[J]. International Journal of Robotics and Control, 2018, 1(1): 1-4.
- [22] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
WANG Dingwei, WANG Junwei, WANG Hongfeng, et al. Intelligent optimization method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [23] 李振水. 飞机液压系统管路解析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2018.  
LI Zhenshui. Aircraft hydraulic system pipeline analysis[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2018.
- 
- 作者简介: 于嘉鹏, 男, 1980年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为航空发动机装配规划与管路自动敷设技术、数字化设计与制造。  
E-mail: yujiapeng@mail.neu.edu.cn
- 袁鹤翔(通信作者), 男, 1996年出生, 硕士研究生。主要研究方向为航空发动机管路自动布局及优化。  
E-mail: neuyhx1996@qq.com