

基于流水避石原理的无人机三维航路规划

Three-Dimensional Path Planning for UAVs Based on Theory of Fluid Avoiding Obstacles

王宏伦^{1a,1b}, 姚鹏^{1a,1b}, 梁宵², 吕文涛³

(1. 北京航空航天大学, a. 自动化科学与电气工程学院; b. 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191; 2. 沈阳航空航天大学自动化学院, 沈阳 110136; 3. 中国电子科技集团第 28 研究所, 南京 210007)



王宏伦

博士, 教授、博士生导师。教育部新世纪优秀人才、北京航空航天大学蓝天学者特聘教授、教育部创新团队研究骨干。多年来一直从事无人机自主飞行的基础理论与关键技术研究, 主持多项重点无人机型号飞控系统关键技术攻关和系统研制、国防预研和重点基金、国家自然科学基金、航空基金、航天基金等。发表论文 70 余篇 (SCI/EI 50 余篇), 申请国家发明专利 37 项 (已授权 33 项), 获省部级以上科技成果奖励 5 项。主要研究方向为无人机自主控制与智能决策、复杂环境航路规划、高抗扰精准飞行控制等。

0 引言

航路规划技术是无人机实现自主飞行的关键技术之一。随着无人机的使用空域从中、高空不断向低空、甚至超低空拓展, 地形的影响逐渐成为航路规划需要考虑的关键因素, 此时传统的二维航路规划方法已无法满足需求。特别是对于执行低空突防任务的无人机, 为实现地

对一种新颖的基于流水避石原理的无人机三维航路规划技术进行了阐述。复杂地形条件下具有全局最优性的无人机三维航路规划问题, 不但要考虑地形对飞行安全的影响, 还要考虑无人机自身的性能约束, 最终规划出三维空间内可供无人机实际飞行的平滑航路。传统航路规划算法在计算复杂度、航路平滑性等方面难以令人满意。流水避石航路规划算法受自然界流水避开岩石并最终到达目标点的现象启发, 通过提取复杂地形条件下无人机飞行航路与流水避石现象的共性特征, 在流体力学相关理论的基础上, 建立能够揭示流水避石宏观规律的数学模型, 并根据一定的优化指标对流场中的流线进行优选, 最终获得满足飞行约束与环境约束的最优三维光滑可飞航路。

关键词: 无人机; 三维航路规划; 复杂地形; 流水避石

中图分类号: V249.1

文章编号: 1671-637X(2015)10-0001-06

形跟随、地形回避和威胁回避 (TF/TA²) 等任务需求, 必须得到三维空间的突防航路, 因此复杂地形条件下具有全局最优性的三维航路规划这个基础科学问题引起了国内外众多学者的关注。

航路规划问题本质上是一种优化问题, 多年来众多学者提出了一系列卓有成效的航路规划方法^[1-5]。这些方法按照规划环境建模方法可分为基于栅格的方法、基于图形的方法 (如 Voronoi 图法) 和基于势场的方法 (如人工势场法); 按照航路搜索方法大致可以分为决策型搜索方法 (如 A* 算法、D* 算法、动态规划算法) 和随机型搜索方法 (如粒子群优化算法、遗传算法等智能优化方法、快速扩展随机树法)。但上述算法应用到三维复杂环境时, 往往存在如下问题: 维数增加或地形环境较复杂时, 算法计算量产生爆炸式增长; 通过将

规划空间离散进行航路规划, 其航路的平滑性不尽如人意, 实际应用时往往需要额外的航路平滑策略^[6]。

基于流体计算的航路规划方法本质上是一种基于势场的方法, 其借鉴流体流动的性质使其具有独特的航路规划优势与特点。流体计算与航路规划相结合最初是从流函数法^[7-8]开始的, 利用该方法可解决单个障碍物以及障碍物移动时的路径规划问题, 并通过单个障碍物的流函数进行加权求和解决了多个障碍物时的路径规划问题。流函数法作为一种势场法, 具有规划速度快、路径平滑等优点, 但是由于流函数的概念只存在于二维流场, 因此无法用于三维航路规划。

自然界中的流水具有如下特征: 当无障碍物时, 水流沿直线流动, 当遇到障碍物时, 水流会平滑地绕过该障碍并最终流向终点。显而易见, 人

们期望的规划航路与水流轨迹从宏观上看有许多相似之处。本文阐述的基于流水避石原理的航路规划算法^[9-12],模拟自然界水流的这种宏观特征,针对航路规划的特定需求进行建模,通过流体力学方法对三维地形进行流场模拟,并综合考量无人机性能约束、飞行安全性等指标进行流线优选,最终得到满足无人机要求的最优三维光滑可飞航路。

1 流水避石航路规划方法

流水避石航路规划方法将航路规划与流体计算相结合,通过流体计算和流线优选得到满足无人机约束的多条光滑航路。由于水流必定能够找到入口和出口之间的路径,因此这种方法能够避免势场法容易陷入局部势场极小点的问题。

流体力学问题的求解主要有解析法和数值法^[9-10]。解析解用于分析揭示流体本质规律,适合简单物体绕流问题,计算量小、速度快,比较适合作为在线航路规划;数值解适合模拟真实流场,能解决复杂问题,但是计算过程较为繁琐,因此比较适合作为离线航路规划。此外,解析法计算的航路主要集中于由起点到终点的带状范围内,比较适合作为局部航路规划;而数值法的计算域是整个规划地形,并且适合多种不规则障碍,更适合作为全局航路规划。图1为理想流场中的绕流流线分布示意图,流线具有光滑的避障特性,且充满规划区域。

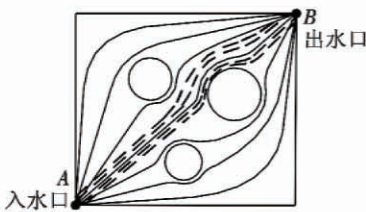


图1 流线分布示意图

Fig.1 Distribution of streamlines

1.1 解析法

1.1.1 单障碍避障航路计算

假设所采用的流体模型是不可

压缩理想流体。针对单个圆球障碍,理想情况下,圆球的绕流问题具有以下特点:流体的运动是对称的,同时只有速度势 Φ 方程满足拉普拉斯方程。假设无穷远处速度为 V_∞ 的均匀来流沿 x 轴正向、不脱体地绕半径为 a 的圆球流动,球心位于坐标原点处,则可得速度势 Φ 的解析形式为

$$\Phi = V_\infty r \cos \theta \left(1 + \frac{a^3}{2r^3}\right) \quad (1)$$

式中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, (x, y, z) 为流场中的一点, $\cos \theta = x/r$ 。对上式求梯度即得到流速沿 x, y 和 z 轴的分量 $\bar{u} = [\partial\Phi/\partial x, \partial\Phi/\partial y, \partial\Phi/\partial z]$,进而获得绕流流线即规划航路。从航路规划的角度来看,该方法在理论上能够保证航路最短且足够光滑,避免局部极小,并且具有很好的避障特性,其与人工势场法的思想相似,却优于人工势场法。

为了将上述计算得到的流线适于三维空间中任何来流方向,并且使多个障碍可以在三维空间任意分布,可以利用旋转平移矩阵 T 来解决。设障碍在坐标原点时的流线数据为矩阵 A ,每一行代表一个由4部分(x, y, z 坐标和单位1)组成的航路点,那么任意位置的流线矩阵 $A' = AT$ 。

采用该方法得到的单个圆球的绕流流线如图2所示。在理想情况下,流线不会脱离圆球,能够满足航路规划的避障要求,且计算量小。另外可看出,多条流线能很好地对圆球进行包围且十分光滑。

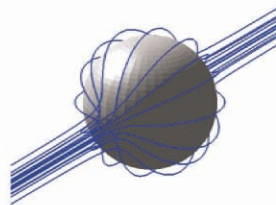


图2 圆球障碍的避障流线

Fig.2 Streamlines avoiding sphere obstacle

1.1.2 多障碍避障航路计算

当规划环境中存在 K 个圆球障

碍时,引入权重系数来综合计算障碍物产生的绕流流速。假设任意第 k 个球体的中心坐标为 $(x_{0,k}, y_{0,k}, z_{0,k})$,半径为 a_k ,权重系数定义为^[10]

$$\omega_k = \prod_{i=1, i \neq k}^K \frac{(D_i - 1)}{(D_k - 1) + (D_i - 1)} \quad (2)$$

式中, $D_k = ((x - x_{0,k})^2 + (y - y_{0,k})^2 + (z - z_{0,k})^2)^{1/2} - a_k$ 表示无人机与第 k 个球体表面的距离。多障碍情况下的流速表示为

$$\bar{u} = \sum_{k=1}^K \omega_k \bar{u}_k \quad (3)$$

其中, \bar{u}_k 为按1.1.1节求得的单障碍绕流流速。

经过流场计算得到的流线有多条,通过对飞行约束的处理,主要包括无人机的转弯半径、最大爬升高度、最大爬升角和最大水平转弯角等,可以剔除不满足无人机约束的流线,得到可飞航路集合。

1.2 数值法

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)作为流体力学的研究方法之一,其采用独特的数值模拟方法来研究流体运动的物理特性。可以使用CFD方法对整个规划空间进行数值求解得到三维流线,其计算过程涉及流体模型、网格划分与数值求解方法等。

首先,分析适合流水避石航路规划算法的流体计算模型;其次,预处理地形环境,并使用Gambit自适应生成一般化的网格;然后,采用SIMPLEC算法进行并行数值求解,通过猜测的压力场求解动量方程得到速度场,之后求解通过质量方程建立的压力修正方程,得到压力场的修正值,并用此修正值更新速度场和压力场,随着迭代的进行,压力和速度分量逐渐逼近真实解;最后,利用CFD可视化软件Tecplot将计算得到的流线复现出来,并引入无人机约束进一步处理,最终得到三维可飞航路。数值计算方法的流程如图3所示。

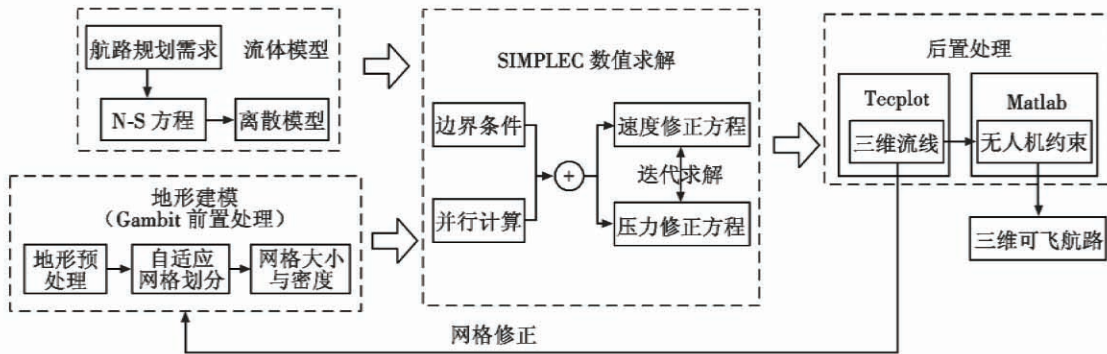


图3 数值计算方法流程图

Fig.3 Flow chart of numerical computation method

1.3 基于泛化模糊竞争神经网络的航路综合评价方法

解析法与数值法计算出的可飞航路是集合形式,并且有多条,其在空间中是离散分布的而且没有交叉。多条可飞航路需要按照一定的标准进行评估,使无人机能够选择较优的航路飞行。本文提出一种泛化的模糊竞争神经网络 (Generalized Fuzzy Competitive Neural Network, G-FCNN) 来解决航路评估和优选问题。

首先,根据航路的特征,设计4种代表航路特征的子目标函数作为评价指标:航路长度、安全避障距离、纵向机动次数、横侧向机动次数。之后,采用G-FCNN进行航路评估与筛选。利用人工神经网络,结合模糊推理和竞争学习,并通过学习算法与样本训练过程,使G-FCNN具备一定的专家经验,最终给出该领域的航路评级意见,供无人机地面操作人员参考。G-FCNN网络结构模型如图4所示。

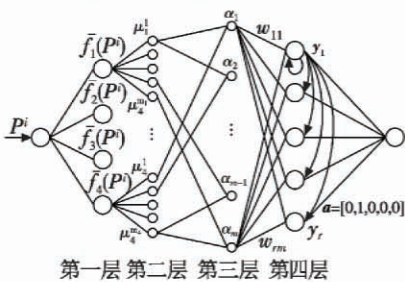


图4 G-FCNN网络结构模型

Fig.4 Structural model of G-FCNN

1.4 仿真分析

规划空间中存在多个球形障碍

物时,分别采用解析法和数值法进行航路规划,结果如图5所示,基于流体计算的解析方法和数值方法均能够规划出满足无人机约束的可飞航路。



图5 多障碍时的航路对比

Fig.5 Comparison of paths with multiple obstacles

图6中的流线是采用解析方法得到的从起始点到目标点的避障流线集合,图7显示的是该集合中满足无人机约束的可飞航路集合,并且经过G-FCNN评价后的结果。

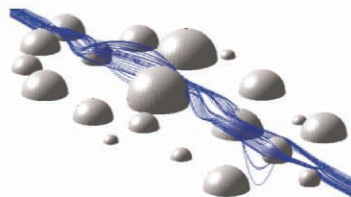


图6 解析法三维避障流线

Fig.6 3-D paths by analytical method



图7 解析法可飞航路的综合评价

Fig.7 Comprehensive assessments of flyable paths

图7中18条不适合无人机飞行

的航路已经被剔除,其余的16条满足无人机约束的航路利用G-FCNN进行航路评价。最终可飞航路被分成了红色、黄色、绿色、蓝色和黑色5级分别对应I~V级的航路,其中,I级为最优航路。

2 流水避石航路规划方法的改进

2.1 扰动流体动态系统方法

通过对地形环境的建模,三维航路规划问题转化为地形约束下的流场流线求解问题,而基本流水避石方法中的解析法与数值法均存在一定局限性。从航路规划的角度讲,对于更为复杂的障碍物,可以放宽对流体物理性质的限制,重点关注流体的避障特性,从而降低方程求解的难度。因此,提出了扰动流体动态系统方法 (Interfered Fluid Dynamical System, IFDS)^[11],该算法以解析法为基础,但避免了求解带有复杂边界条件的流体方程,便于处理复杂的地形和不同形状的障碍物。规划航路不仅具有仿流水避石的自然特性,而且环境建模简单,计算量小,大大拓展了流水避石方法的适用范围。

为了使无人机能从起始点运动至目标点,在目标点处加入初始流场——汇,汇是一种以恒定的流量从四周流入目标点的流体,即流场流线均为直线。因此,当规划空间中不存在障碍物时,无人机沿直线

到达目标点。当规划空间内存在障碍物时,用修正矩阵量化表示障碍物对流的扰动作用,从而得到扰动流场。该扰动流场仍是稳定的,即流场流线能够绕开障碍物并最终到达目标点。

首先,建立圆球、圆柱、圆锥、平行六面体等典型障碍形状的统一数学表达式;并定义汇流为初始流场,其流速为 \mathbf{u} ;然后,将障碍物对初始流场的扰动用修正矩阵 $\bar{\mathbf{M}}$ 量化表示;最后,修正初始流场流速,得到扰动流场流速 $\bar{\mathbf{u}} = \bar{\mathbf{M}}\mathbf{u}$ 。

上述障碍物方程可统一表示为^[11]

$$\Gamma = \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^{2p} + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^{2q} + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^{2r} \quad (4)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 表示障碍物中心;系数 a, b 和 c 决定了障碍物大小;系数 p, q 和 r 决定了障碍物形状。通过组合上述系数,即可表示多种典型障碍。比如,当 $p=1, q=1, r=1$ 且 $a=b=c$ 时,障碍物为圆球;当 $p=1, q=1, r>1$ 且 $a=b$ 时,障碍物近似为圆柱;当 $p=1, q=1, 0<r<1$ 且 $a=b$ 时,障碍物近似为圆锥;当 $p>1, q>1, r>1$ 时,障碍物近似为长方体。

修正矩阵 $\bar{\mathbf{M}}$ 的定义是该算法的关键,假设环境中存在 K 个障碍物,则 $\bar{\mathbf{M}}$ 定义为

$$\bar{\mathbf{M}} = \sum_{k=1}^K \omega_k \bar{\mathbf{M}}_k \quad (5)$$

式中, $\bar{\mathbf{M}}_k$ 表示第 k 个障碍物的修正矩阵,即

$$\bar{\mathbf{M}}_k = \mathbf{I} + \frac{1}{\Gamma_k^{\frac{1}{\rho_k}} \mathbf{n}_k^T \mathbf{n}_k} (\mathbf{n}_k^T \mathbf{n}_k \mathbf{I} - 2\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^T) \quad (6)$$

障碍权重系数 ω_k 可重新定义为

$$\omega_k = \prod_{i=1, i \neq k}^K \frac{(\Gamma_i - 1)}{(\Gamma_k - 1) + (\Gamma_i - 1)} \quad (7)$$

其中: \mathbf{I} 为三阶单位矩阵; ρ_k 为排斥系数; $\mathbf{n}_k = \left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x}, \frac{\partial \Gamma_k}{\partial y}, \frac{\partial \Gamma_k}{\partial z}\right)^T$ 表示障碍物的单位外法向量, Γ_k 为按式(4)确定的第 k 个障碍物方程。通常修正矩阵与障碍物的排斥系数密切相关,排斥系数越大,流场流线躲避障碍的

时机就越早,因此可通过调节排斥系数获得不同形状的流线。

IFDS 算法生成的流线符合流水避石的一般特性:1) 流线可躲避各个障碍,即能够保证对所有障碍物的不穿透特性;2) 流线最终到达目标点,即在所有障碍物外的任意一点都有非零的且指向原点的速度分量;3) 在障碍物外部不存在局部极小点即 $\bar{\mathbf{u}} \neq 0$;4) 流线有较好的地形回避/跟随特性。

当规划空间中存在多个障碍物时,每个障碍物的扰动矩阵均对应一个排斥系数。当障碍物的大小、形状和位置固定时,通过选取不同的排斥系数,可以得到多条形状各异的流线。在这些流线中,有些流线并不满足无人机机动约束,无法保证可飞性;有些流线需要消耗更大的代价来完成避障,不符合实际需求。为此需要对排斥系数进行优化,从众多流线中筛选出既满足无人机约束,又保证某一指标下最优的飞行航路。可利用遗传算法对扰动矩阵中的排斥系数进行寻优,以航路距离、飞行高度、航路平滑度和航路安全度等作为子目标,得到最优三维可飞航路。

2.2 改进的扰动流体动态系统方法

在 IFDS 算法中,由于扰动流速仅由吸引速度与排斥速度组成,因此流线分布不够广泛,在某些特殊情况下,即使调整排斥系数,扰动流线仍难以满足无人机飞行约束^[12]。因此,提出了一种改进的扰动流体动态系统方法(Improved Interfered Fluid Dynamical System, IIFDS)^[12],通过引入切向速度,拓宽了流体的物理特性,使扰动流线更适应于无人机飞行。

在 IFDS 算法的基础上,引入切向矩阵,则障碍物扰动矩阵可重新定义为

$$\bar{\mathbf{M}}_k = \mathbf{I} - \frac{\mathbf{n}_k \mathbf{n}_k^T}{\Gamma_k^{\frac{1}{\rho_k}} \mathbf{n}_k^T \mathbf{n}_k} + \frac{\tau_k \mathbf{t}_k \mathbf{n}_k^T}{\Gamma_k^{\frac{1}{\sigma_k}} \|\mathbf{t}_k\| \|\mathbf{n}_k\|} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{t}_k = \left(\frac{\partial \Gamma_k}{\partial y}, -\frac{\partial \Gamma_k}{\partial x}, 0\right)^T$ 为水平切向量; ρ_k 为排斥系数; σ_k 为切向系数; τ_k 为饱和函数,它决定了水平切向量的方向。障碍物各向量的定义如图 8 所示。

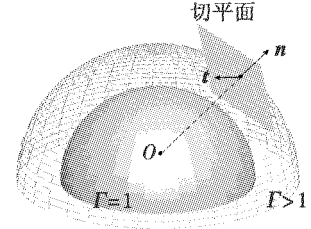


图 8 向量示意图

Fig. 8 Illustration of vectors

按式(8)确定的扰动矩阵可依次分解为吸引矩阵、排斥矩阵与切向矩阵,相应地扰动速度可看作吸引速度、排斥速度与切向速度这 3 种速度的叠加。经分析可知,排斥速度随排斥系数的增大而增大,切向速度随切向系数的增大而增大。因此可通过组合排斥系数或切向系数,调整流线形状,获得更广泛分布的流线,进而很容易找到一条满足飞行约束的航线。

2.3 轨迹延拓

针对传统航路规划方法大多对于无人机动力学约束考虑较少,难以实现航路精确跟踪的问题,将轨迹延拓融入流体扰动算法,为精确跟踪规划的航路并提高飞行安全性奠定了基础。

为了判断航路是否可飞,需确保飞行器沿航路飞行的各主要状态(如动压、迎角、滚转角等)连续变化、满足给定的约束且在不同阶段航路的连接点处能够匹配。采取轨迹延拓^[12-13]来进行轨迹分析,该方法考虑无人机的动力学模型,通过迭代求解,不但可得到能够同时满足给定轨迹约束和飞行器动力学约束的各状态变量剖面,同时还能给出制导指令。轨迹延拓实际上是在给定轨迹约束的前提下,求解飞行器动力学微分方程的过程。此外,

采用轨迹延拓算法解算出的相关变量,能对排斥系数或切向系数的调整提供参考。假设无人机躲避球形威胁,经分析可知,排斥系数越大,扰动速度中的垂直分量越大,而切向系数越大,扰动速度中的水平分量越大。因此,假设飞行爬升角或迎角超出约束范围,说明扰动速度中的垂直分量过大,排斥系数需减小或切向系数需增大;假设转弯角速率太大,说明扰动速度中的水平分量过大,排斥系数需增大或切向系数需减小。

2.4 仿真分析

为了验证 IFDS 航路规划方法的有效性,将该方法分别同解析法和数值法进行对比仿真。这里所得到的航路并未经过排斥系数的优化,只是选取一组排斥系数下求得的满足无人机机动约束的可飞航路。由图 9 可知,尽管 IFDS 方法并没有通过直接求解 Laplace 方程的方式获得航路,但是航路仍然具有解析法的航路特性。从图 10 中可以看出,尽管数值法更加精确地模拟了理想流体的绕流流场,但是从地形跟随和航路最优性的角度讲,IFDS 法相比于数值法求得的航路更加适合于无人机飞行。

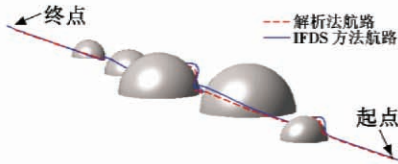


图 9 IFDS 方法与解析法的对比
Fig.9 Comparison between IFDS and analytical method

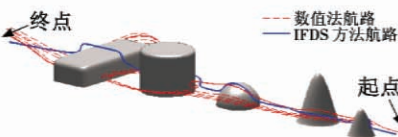


图 10 IFDS 方法与数值法的对比
Fig.10 Comparison between IFDS and numerical method

在复杂地形环境下对 IFDS 方法进行仿真研究,并通过排斥系数

寻优得到满足机动约束的最优航路。仿真得到的三维航路如图 11 所示,图中 5 条航路是通过组合不同的排斥系数得到的,其中航路 I ~ IV 是未经排斥系数优化得到的几条典型三维航路,航路 V 是利用遗传算法对排斥系数优化后得到的最优航路。利用遗传算法对排斥系数进行优化,可以避免参数选择的盲目性,优化后的航路既能保证可飞性,又能满足航路的最优性。

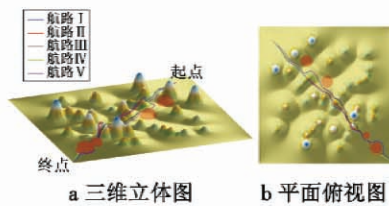


图 11 IFDS 不同排斥系数下的三维航路
Fig.11 Paths with different reactive parameters of IFDS

为了验证 IIFDS 航路规划方法 (Method II) 的有效性,将该方法同 IFDS 方法 (Method I) 进行对比仿真。在规划空间中随机生成静态障碍,每个障碍的排斥系数与切向系数均取为 1.0 和 2.0,两种方法规划的航路如图 12 所示。轨迹延拓解算出的相应状态变量如图 13 所示。两种方法均具有良好的光滑特性与避障特性,但 IIFDS 规划的航路在可飞性方面优于 IFDS 方法规划的航路。

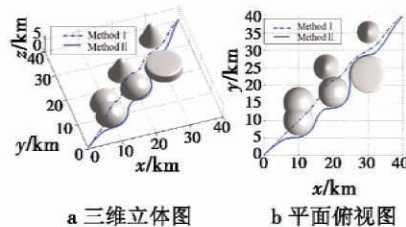


图 12 IFDS 法与 IIFDS 法的对比
Fig.12 Comparison between IFDS and IIFDS

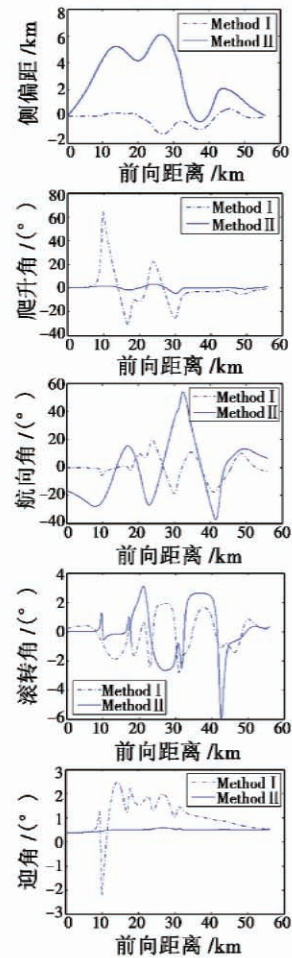
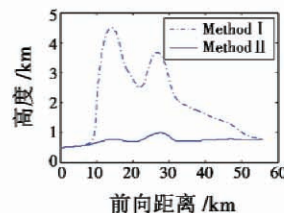


图 13 轨迹延拓解算出的状态变量
Fig.13 State variables resolved by trajectory propagation

假设规划空间存在一个球形、圆锥、圆柱障碍,采用 IIFDS 算法时,不同排斥系数与切向系数下的规划航路如图 14 所示,系数越大,航路躲避障碍的时机越早且绕流幅度越大。

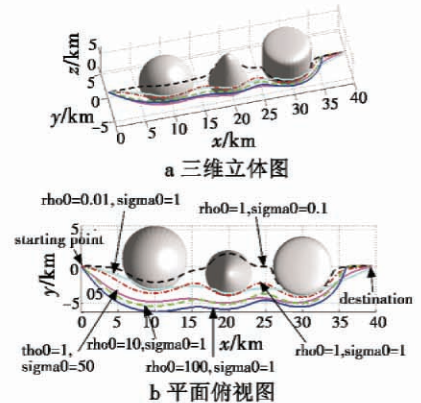


图 14 IIFDS 取不同反应系数时的规划航路
Fig.14 Paths with different reactive parameters of IIFDS

3 结束语

本文阐述了基于流水避石原理的复杂地形条件下无人机三维航路规划技术。在航路规划和流体力学相关研究成果的基础上,通过学科的交叉融合,直接针对三维的复杂地形进行建模,模拟自然界流水避石、汇集成河,在山谷中穿行并最终到达目的地的过程,具有全局优化、可并行计算、规划出的航路更加平滑、适用于不规则障碍和复杂地形等显著特点。该算法较好地解决了传统航路规划算法中存在的计算效率与航路平滑问题,为无人机或其他飞行器的航路规划以及机器人的路径规划提供了一种全新的理论和方法,并进一步拓展了流体力学的应用领域,具有重要的理论意义和工程应用价值。

基于流水避石原理的三维航路规划技术,还有一些问题需解决或优化。比如,如何将流体计算与无人机的动力学方程更直接地结合,实现航路规划与控制的一体化设计等。

参考文献

- [1] 柳长安. 无人机航路规划方法研究 [D]. 西安:西北工业大学,2003. (LIU C A. Study on UAV path planning method [D]. Xi'an; Northwestern Polytechnical University, 2003.)
- [2] CHOSSET H, BURDICK J. Sensor-based exploration; the hierarchical generalized Voronoi graph [J]. The International Journal of Robotics Re-

- search, 2000, 19(2):96-125.
- [3] 刘伟,郑征,蔡开元,等. 快速平滑收敛策略下基于 QS-RRT 的 UAV 运动规划 [J]. 中国科学:信息科学,2012, 42(11):1403-1422. (LIU W, ZHENG Z, CAI K Y, et al. QS-RRT based motion planning for unmanned aerial vehicles using quick and smooth convergence strategies [J]. Science China: Information Science, 2012, 42(11):1403-1422.)
- [4] CHEN M, WU Q, JIANG C. A modified ant optimization algorithm for path planning of UCAV [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(4):1712-1718.
- [5] VINCENT R, MOHAMMED T, GILLES L. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning [J]. IEEE Transactions on Industrial Information, 2013, 9(1):132-141.
- [6] ZHANG X Y, DUAN H B. An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning [J]. Applied Soft Computing, 2015, 26(1):270-284.
- [7] 曹梦磊,王宏伦,梁宵. 采用改进流函数法的无人机航路规划 [J]. 电光与控制, 2012, 19(2):1-4, 16. (CAO M L, WANG H L, LIANG X. Route planning for UAVs using improved stream function method [J]. Electronics Optics and Control, 2012, 19(2):1-4, 16.)
- [8] SULLIVAN J, WAYDO S, CAMPBELL M. Using stream functions for complex behavior and path generation [C]//

AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2003:1-9.

- [9] 梁宵,王宏伦,李大伟,等. 基于流水避石原理的无人机三维航路规划算法 [J]. 航空学报, 2013, 34(7):1670-1681. (LIANG X, WANG H L, LI D W, et al. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicles based on principles of stream avoiding obstacles [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(7):1670-1681.)
- [10] LIANG X, WANG H L, LI D W, et al. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicles based on fluid flow [C]//2014 IEEE Aerospace Conference, 2014:1-13.
- [11] WANG H L, LYU W T, YAO P. Three-dimensional path planning for unmanned aerial vehicle based on interfered fluid dynamical system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(1):229-239.
- [12] YAO P, WANG H L, SU Z K. UAV feasible path planning based on disturbed fluid and trajectory propagation [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(4):1163-1177.
- [13] 王宏伦,苏子康,裴云峰. 考虑交接误差的 RLV 进场着陆轨迹和安全交接区设计 [J]. 航空学报, 2014, 35(11):3092-3105. (WANG H L, SU Z K, PEI Y F. Design of landing trajectory and safe interface area for RLV with initial interface errors [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(11):3092-3105.)

Abstract: This paper introduces a novel path planning algorithm for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based on theory of fluid avoiding obstacles. To the problem of path planning which aims at the global optimum, not only the influence of terrain constraints on path safety but also the performance constraints of UAV should be taken into consideration, thus a feasible and smooth path will be planned in the three-dimensional space. The computation complexity and the path quality by traditional algorithms are usually unsatisfactory, hence we propose the method inspired by the phenomenon that water can avoid rocks and reach the destination. The common features between this phenomenon and the path planning problem are extracted and analyzed, and then the mathematical model generalizing the phenomenon is constructed on the basis of theory of fluid mechanics. By selecting the optimal streamline from the fluid field under the evaluation index, the three-dimensional optimal path under flight and environment constraints is obtained eventually.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle(UAV); three-dimensional path planning; complex terrain; fluid avoiding obstacles