



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114664122 B

(45) 授权公告日 2023.06.23

(21) 申请号 202210300075.6

G06Q 10/047 (2023.01)

(22) 申请日 2022.03.25

G06Q 50/30 (2012.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114664122 A

G06N 3/006 (2023.01)

G06N 3/126 (2023.01)

(43) 申请公布日 2022.06.24

(56) 对比文件

CN 108877298 A, 2018.11.23

(73) 专利权人 南京航空航天大学
地址 210016 江苏省南京市秦淮区御道街
29号

CN 111583724 A, 2020.08.25

US 2008059052 A1, 2008.03.06

(72) 发明人 徐满 徐子玥 胡明华 丁文浩
刘辉 陈楚玄

陈雨童; 胡明华; 杨磊; 张昊然; 赵征. 受限航
路空域自主航迹规划与冲突管理技术. 航空学
报. 2020, (第09期), 全文.

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) 32204

KNORR D等. Trajectory uncertainty and
the impact on sector complexity and
workload. <Proceedings of the SESAR
Innovation Days>. 2011, 全文.

专利代理师 张弛

审查员 庞丽丽

(51) Int. Cl.

G08G 5/00 (2006.01)

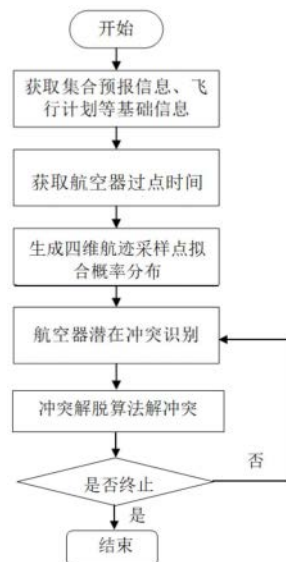
权利要求书4页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

一种考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法

(57) 摘要

本发明公开了一种考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法, 包括以下步骤: (1) 获取集合预报数据、航班飞行计划和航空器安全间隔标准; (2) 获取航路并提取航路点数据; (3) 获取航迹采样点的预计过点时间集合, 拟合预计过点时间分布; (4) 针对航空器飞行冲突初筛后再根据航空器安全间隔标准、预计过点时间分布进行冲突识别; (5) 将有冲突的航班放入同一小组内并针对各个小组分配不同的种群规模; (6) 针对每组航班, 采用调整各个航班的起飞时刻和飞行高度层来避免冲突, 通过各种群协同进化获得多航空器冲突最小化4D航迹; (7) 重复步骤4至步骤6, 直至达到最大迭代次数。本发明能够快速获取多航空器冲突最小化航迹规划。



1. 一种考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法,包括以下步骤:

(1) 获取风的集合预报数据、航班飞行计划和航空器安全间隔标准;

(2) 根据航班飞行计划获取航路并提取航路点数据;

(3) 根据集合预报数据,计算每个航班每航段的地速和飞行时间,获取航空器于各航路点的过点时间集合;选取若干航路点作为航迹采样点,获取航迹采样点的预计过点时间集合,拟合航空器在各航迹采样点上的预计过点时间分布;所述航迹采样点的预计过点时间集合与各航迹采样点高度、经纬度数据形成预测的航空器4D航迹;

(4) 基于预测的航空器4D航迹,利用网格化冲突探测方法进行航空器飞行冲突初筛;根据航空器安全间隔标准以及预计过点时间分布对航空器之间的冲突进行进一步识别,得到相互之间有冲突的航班;

(5) 根据动态分组规则将相互之间有冲突的航班放入同一小组内;根据小组内冲突数量及航空器数量为各个小组分配不同的种群规模,采用变种群规模算子,动态设计各种群规模大小;

(6) 针对每小组航班,采用调整该小组内各个航班的起飞时刻和飞行高度层来避免冲突,对各种群进行初始化;再采用遗传算法对各种群进行优化,获取各种群最优解;通过各个种群之间的协同进化获得多航空器冲突最小化4D航迹;

(7) 将多航空器冲突最小化4D航迹作为预测的航空器4D航迹,重复步骤4至步骤6,直至达到最大迭代次数N,输出多航空器冲突最小化4D航迹;

所述步骤(3)具体为:

(3.1) 针对风的集合预报数据进行预处理,获取每个航班每航段上任一点处的风值,并将该点风值分解为沿航迹方向的风和垂直于航迹方向的侧风;

(3.2) 获取航路点过点时间集合:

(3.2.1) 获取航空器地速:

$$V_{g, is}^{[m]}(r) = \sqrt{V^2 - w_{c, is}^{[m]}(r)^2} + w_{t, is}^{[m]}(r)$$

式中, $V_{g, is}^{[m]}(r)$ 表示航班*i*集合成员*m*在航段*s*上飞行距离为*r*时的地速; V 表示航空器的飞行速度; $w_{t, is}^{[m]}(r)$ 表示航班*i*集合成员*m*在航段*s*上飞行距离为*r*时任一点所受到的高空风的沿航迹方向的风值; $w_{c, is}^{[m]}(r)$ 表示航班*i*集合成员*m*在航段*s*上飞行距离为*r*时任一点所受到的高空风的沿垂直于航迹方向的侧风值; $i=1, 2, \dots, I$; $m=1, 2, \dots, M$; $s=1, 2, \dots, S$;

$$\bar{V}_{g, is}^{[m]} = \frac{1}{r_{is}} \int_0^{r_{is}} [\sqrt{V^2 - w_{c, is}^{[m]}(r)^2} + w_{t, is}^{[m]}(r)] dr$$

式中, $\bar{V}_{g, is}^{[m]}$ 表示航班*i*集合成员*m*在航段*s*上的平均地速; r_{is} 为航班*i*航段*s*的长度;

(3.2.2) 获取航空器飞行时间:

$$(\Delta t)_{is}^{[m]} = \frac{r_{is}}{\bar{V}_{g, is}^{[m]}}$$

式中, $(\Delta t)_{is}^{[m]}$ 为航班*i*航段*s*的飞行时间;

(3.2.3) 获取航空器于各航路点的过点时间集合:

$$t_{ip}^{[m]} = \begin{cases} t_{i_0} + \sum_{s=1}^p (\Delta t)_{is}^{[m]} = t_{i_0} + \sum_{s=1}^p \frac{r_{is}}{v_{g,is}^{[m]}} & p > 0 \\ t_{i_0} & p = 0 \end{cases}$$

式中, $t_{ip}^{[m]}$ 为航班 i 集合成员 m 经过各航路点 p 的过点时间, $p=0, 1, \dots, P$; $p=0$ 时该点为航班 i 的起时航路点; t_{i_0} 为航班 i 的预计起飞时间;

(3.3) 获取航空器在各航迹采样点的预计过点时间集合, 公式为:

$$t_{isq}^{[m]} = \frac{r_{isq}}{r_{is}} t_{ip}^{[m]}$$

式中, $t_{isq}^{[m]}$ 为航班 i 在航段 s 上第 q 个航迹采样点的过点时间, $q=0, 1, 2, \dots, Q, Q \subseteq P$; r_{isq} 为航班 i 在航段 s 上第 q 个航迹采样点到航段起始航路点的距离; r_{is} 为航班 i 航段 s 的长度;

(3.4) 通过假设航空器在各航迹采样点的预计过点时间集合服从正态分布, 拟合航空器在各航迹采样点上的预计过点时间概率分布;

所述步骤 (4) 具体为:

(4.1) 将航迹采样点的四维坐标离散化映射至到相应的单元网格 $A_{m,n,l,k}$ 中;

(4.2) 建立如下飞行冲突初筛方法对应的 4D 时空网格: 定义一个网格 $A_{m,n,l,k}$ 的邻域由其自身以及其在空间维度上的周围 $3^3 - 1 = 26$ 个网格单元, 记为:

$$C_{m,n,l,k} = [c_{m,n,l-1,k} \quad c_{m,n,l,k} \quad c_{m,n,l+1,k}]$$

其中:

$$c_{m,n,l-1,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l-1,k} & a_{m,n-1,l-1,k} & a_{m+1,n-1,l-1,k} \\ a_{m-1,n,l-1,k} & a_{m,n,l-1,k} & a_{m+1,n,l-1,k} \\ a_{m-1,n+1,l-1,k} & a_{m,n+1,l-1,k} & a_{m+1,n+1,l-1,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$c_{m,n,l,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l,k} & a_{m,n-1,l,k} & a_{m+1,n-1,l,k} \\ a_{m-1,n,l,k} & a_{m,n,l,k} & a_{m+1,n,l,k} \\ a_{m-1,n+1,l,k} & a_{m,n+1,l,k} & a_{m+1,n+1,l,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$c_{m,n,l+1,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l+1,k} & a_{m,n-1,l+1,k} & a_{m+1,n-1,l+1,k} \\ a_{m-1,n,l+1,k} & a_{m,n,l+1,k} & a_{m+1,n,l+1,k} \\ a_{m-1,n+1,l+1,k} & a_{m,n+1,l+1,k} & a_{m+1,n+1,l+1,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

式中, 矩阵 $c_{m,n,l,k}$ 表示本层的九网格邻域; 矩阵 $c_{m,n,l-1,k}$ 表示当前网格上层九网格邻域, $c_{m,n,l+1,k}$ 表示当前网格下层的九网格邻域; $a_{M,N,L,k}$ 表示坐标为 L, M, N, k 的网格, 其中 M 取 $m, m+1, m-1$; N 取 $n, n-1, n+1$; L 取 $l-1, l+1, l$;

依次检查网格 $A_{m,n,l,k}$ 邻域中的 27 个网格, 如果邻域中任意网格内存在其他航班的航迹采样点, 则表明存在潜在的飞行冲突, 则执行步骤 (4.3); 否则, 则表明不存在潜在的飞行冲突;

(4.3) 针对同一个网格中的两个不同航班的航迹采样点, 根据其坐标计算航空器之间

的垂直距离和水平距离,当垂直距离与水平距离同时违反航空器安全间隔标准时,执行步骤(4.4);

(4.4) 根据步骤(3)获得的航空器在各航迹采样点上的预计过点时间概率分布计算同一个网格中的两个不同航班的航迹采样点的冲突概率,公式为:

$$f(t_i^q, t_{i'}^{q'}) = f_{i_1}^{q_1}(t_i^q) \times f_{i_2}^{q_2}(t_{i'}^{q'})$$

$$t \in (\min(\Delta t_i^q - \Delta_i^q, \Delta t_{i'}^{q'} - \Delta_{i'}^{q'}), \max(\Delta t_i^q + \Delta_i^q, \Delta t_{i'}^{q'} + \Delta_{i'}^{q'}))$$

式中, $f_{i_1}^{q_1}(t_i^q)$, $t \in (\Delta t_i^q - \Delta_i^q, \Delta t_i^q + \Delta_i^q)$ 表示航班 i_1 过航迹点 q_1 的概率密度函数; $f_{i_2}^{q_2}(t_{i'}^{q'})$, $t \in (\Delta t_{i'}^{q'} - \Delta_{i'}^{q'}, \Delta t_{i'}^{q'} + \Delta_{i'}^{q'})$ 表示航班 i_2 过航迹点 q_2 的概率密度函数; $i \neq i'$, $i' = 1, 2, \dots, I$; $q \neq q'$, $q' = 0, 1, 2, \dots, Q$; Δt_i^q 表示航班 i 预计过点时间均值、 Δ_i^q 表示航班 i 预计过点时间与均值的最大偏差; $\Delta t_{i'}^{q'}$ 表示航班 i' 预计过点时间均值、 $\Delta_{i'}^{q'}$ 表示航班 i' 预计过点时间与均值的最大偏差;

若两个航迹采样点的冲突概率小于预定值,则认定为飞行冲突,得到相互间存在冲突的航班;

所述步骤(5)具体为:

(5.1) 采用动态分组策略将相互之间有冲突的航班放入同一小组之内,即满足如下相关性:

$$\forall i \neq i', i, i' \in F, \begin{cases} \forall F_k^i \in \text{group}_k, \exists F_k^{i'} \in \text{group}_k \Rightarrow C_{ii'} = 1 \\ \forall F_k^i \in \text{group}_k, \forall F_k^{i'} \in \text{group}_{l'} \Rightarrow C_{ii'} = 0 \end{cases}$$

其中, F 表示所有航班组成集合; group_k 表示第 k 组; F_k^i 和 $F_k^{i'}$ 分别为 group_k 中的第 i 和第 i' 个航班, $C_{ii'} = 1$ 表示航班 i 和 i' 存在冲突, $C_{ii'} = 0$ 表示航班 i 和 i' 无冲突;

(5.2) 根据小组内冲突数量及航空器数量为各个小组分配不同的种群规模,采用变种群规模算子,动态设计各种群规模大小;所述变种群规模算子如下:

$$s_k = \text{pop_size} \times \frac{C_k}{L_k} \times \frac{L}{C}$$

式中, s_k 为第 k 组种群规模, pop_size 为初始种群规模, C_k 表示第 k 组组内冲突数量, L_k 表示第 k 组组内航班数量, C 表示初始冲突数量; L 表示初始航班数量;

所述步骤(6)具体为:

(6.1) 对种群进行初始化;

(6.2) 针对初始化后的每个种群小组采用遗传算法进行优化,获取每个小组的最优解;所述的最优解是指适应度函数最大的值时对应的个体,所述适应度函数表达式如下:

$$\text{fitness} = \frac{1 - \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n \delta_{\max}}}{1 + C_k^i}$$

$$\delta_i = \lambda_{GH} \times \frac{t_i - t_{orig}}{T_{max}} + \lambda_{FL} \times \frac{fl_i - fl_{orig}}{FL_{max}}$$

其中, n 表示迭代次数; C_k^i 表示第 k 组第 i 架航空器的冲突数量; δ_{max} 表示最大的 δ_i ; λ_{GH} 表示地面延误成本系数, t_i 表示航空器起飞时刻, t_{orig} 表示航空器初始起飞时刻, T_{max} 表示最大允许延误; λ_{FL} 表示高度层调整成本系数, fl_i 表示航空器飞行高度层, fl_{orig} 表示航空器初始飞行高度层, FL_{max} 表示最大允许高度层调整量;

(6.3) 合并各个种群之间的最优解获得多航空器冲突最小化4D航迹;

所述步骤(6.1)具体为:

步骤(5)形成的每个小组中各个航班的飞行计划构成该小组的初始可行解,在该初始可行解中随机选择某一航班 i 并生成随机数 r , $0 < r < 1$; 判断该随机数 r 与采用地面等待策略解决冲突的概率 p_{GH} 进行比较,若随机数 r 小于采用地面等待策略解决冲突的概率 p_{GH} ,则调整该航班 i 的起飞时刻,否则,调整该航班 i 飞行高度层;每个小组独立重复运行 s_k 次,最终形成初始种群。

2. 根据权利要求1所述的考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法,其特征在于,步骤(4.1)中航迹采样点的四维坐标离散化映射至到相应的单元网格 $A_{m,n,l,k}$ 中具体公式为:

$$m = \left\lceil \frac{x_{i,q} - x_{min}}{N_h} \right\rceil_{\text{向上取整}} + 1$$

$$n = \left\lceil \frac{y_{i,q} - y_{min}}{N_h} \right\rceil_{\text{向上取整}} + 1$$

$$l = \left\lceil \frac{z_{i,q} - z_{min}}{N_v} \right\rceil_{\text{向上取整}} + 1$$

$$k = \left\lceil \frac{t_{i,q} - t_{min}}{\Delta t} \right\rceil_{\text{向上取整}} + 1$$

式中, x_{min} , y_{min} , z_{min} , t_{min} 为所研究空域在各个维度上的最小值; N_h 表示水平安全间隔; N_v 表示垂直安全间隔; Δt 表示采样时间间隔。

一种考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法

技术领域

[0001] 本发明空中交通管理技术领域,涉及一种考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法。

背景技术

[0002] 当前,随着民航运输业的不断发展,交通需求与交通供给之间的矛盾越来越突出,传统的空中交通管理方式逐渐显示出其落后性。目前,基于四维航迹的运行突破这一瓶颈提供了系统性的解决方案。现有的研究仅仅考虑在确定性条件下的冲突探测与解脱已不能满足未来发展需求。航空器在运行过程中受到各种不确定性因素的影响,在确定性条件下规划出的无冲突航迹在实际运行过程中会产生新的冲突,战术阶段的冲突解脱不仅会增加运营成本而且会增加管制员的工作负荷,影响空域整体运行效率。目前对于冲突解脱方法的研究聚焦于更高效的冲突解脱方法,冲突解脱算法的研究聚焦于更快速的求解算法。

[0003] 专利申请号为CN111583724A的申请公开了一种面向四维航迹运行的预战术阶段间隔管理方法,获取航班飞行计划、安全间隔标准、航迹历史数据、高空风历史和预测数据;利用航班飞行计划和历史数据生成标称水平、高度和空速速度剖面,并融合预测的高空风数据对航空器的计算生成地速剖面,生成航迹预测结果;基于安全间隔标准和预测的航空器4D航迹识别多航空器之间的潜在飞行冲突,采用基于动态分组策略的无冲突航迹规划方法,获得符合空管运行要求的无冲突4D航迹集,消除初始航迹中因未考虑与其它航空器的间隔约束而造成的冲突隐患。该方法为预战术阶段的航空器间隔管理提供了一种快速实现方法,为合理规划航迹、交通流间隔管理以及空域资源合理利用等方面提供技术支持,但仍对于冲突航班的识别还不够精准,最终的形成航班规划还不够完善。

发明内容

[0004] 发明目的:针对以上缺点,本发明公开一种考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法,考虑高空风的不确定性的基础上,快速获取多航空器冲突最小化航迹规划。

[0005] 技术方案:为解决上述问题,本发明公开一种考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法;包括以下步骤:

[0006] (1) 获取风的集合预报数据、航班飞行计划和航空器安全间隔标准;

[0007] (2) 根据航班飞行计划获取航路并提取航路点数据;

[0008] (3) 根据集合预报数据,计算每个航班每航段的地速和飞行时间,获取航空器于各航路点的过点时间集合;选取若干航路点作为航迹采样点,获取航迹采样点的预计过点时间集合,拟合航空器在各航迹采样点上的预计过点时间分布;所述航迹采样点的预计过点时间集合与各航迹采样点高度、经纬度数据形成预测的航空器4D航迹;

[0009] (4) 基于预测的航空器4D航迹,利用网格化冲突探测方法进行航空器飞行冲突初筛;根据航空器安全间隔标准以及预计过点时间分布对航空器之间的冲突进行进一步识别,得到相互之间有冲突的航班;

[0010] (5) 根据动态分组规则将相互之间有冲突的航班放入同一小组内;根据小组内冲突数量及航空器数量为各个小组分配不同的种群规模,采用变种群规模算子,动态设计各种群规模大小;

[0011] (6) 针对每小组航班,采用调整该小组内各个航班的起飞时刻和飞行高度层来避免冲突,对各种群进行初始化;再采用遗传算法对各种群进行优化,获取各种群最优解;通过各个种群之间的协同进化获得多航空器冲突最小化4D航迹;

[0012] (7) 将多航空器冲突最小化4D航迹作为预测的航空器4D航迹,重复步骤4至步骤6,直至达到最大迭代次数N,输出多航空器冲突最小化4D航迹;

[0013] 所述步骤(3)具体为:

[0014] (3.1) 针对风的集合预报数据进行预处理,获取每个航班每航段上任一点处的风值,并将该点风值分解为沿航迹方向的风和垂直于航迹方向的侧风;

[0015] (3.2) 获取航路点过点时间集合:

[0016] (3.2.1) 获取航空器地速:

$$[0017] \quad V_{g, is}^{[m]}(r) = \sqrt{V^2 - w_{c, is}^{[m]}(r)^2} + w_{t, is}^{[m]}(r)$$

[0018] 式中, $V_{g, is}^{[m]}(r)$ 表示航班i集合成员m在航段s上飞行距离为r时的地速;V表示航空器的飞行速度; $w_{t, is}^{[m]}(r)$ 表示航班i集合成员m在航段s上飞行距离为r时任一点所受到的高空风的沿航迹方向的风值; $w_{c, is}^{[m]}(r)$ 表示航班i集合成员m在航段s上飞行距离为r时任一点所受到的高空风的沿垂直于航迹方向的侧风值; $i=1, 2, \dots, I$; $m=1, 2, \dots, M$; $s=1, 2, \dots, S$;

$$[0019] \quad \bar{V}_{g, is}^{[m]} = \frac{1}{r_{is}} \int_0^{r_{is}} [\sqrt{V^2 - w_{c, is}^{[m]}(r)^2} + w_{t, is}^{[m]}(r)] dr$$

[0020] 式中, $\bar{V}_{g, is}^{[m]}$ 表示航班i集合成员m在航段s上的平均地速; r_{is} 为航班i航段s的长度;

[0021] (3.2.2) 获取航空器飞行时间:

$$[0022] \quad (\Delta t)_{is}^{[m]} = \frac{r_{is}}{\bar{V}_{g, is}^{[m]}}$$

[0023] 式中, $(\Delta t)_{is}^{[m]}$ 为航班i航段s的飞行时间;

[0024] (3.2.3) 获取航空器于各航路点的过点时间集合:

$$[0025] \quad t_{ip}^{[m]} = \begin{cases} t_{i_0} + \sum_{s=1}^p (\Delta t)_{is}^{[m]} = t_{i_0} + \sum_{s=1}^p \frac{r_{is}}{\bar{V}_{g, is}^{[m]}} & p > 0 \\ t_{i_0} & p = 0 \end{cases}$$

[0026] 式中, $t_{ip}^{[m]}$ 为航班i集合成员m经过各航路点p的过点时间, $p=0, 1, \dots, P$; $p=0$ 时该点为航班i的起时航路点; t_{i_0} 为航班i的预计起飞时间;

[0027] (3.3) 获取航空器在各航迹采样点的预计过点时间集合,公式为:

$$[0028] \quad t_{isq}^{[m]} = \frac{r_{isq}}{r_{is}} t_{ip}^{[m]}$$

[0029] 式中, $t_{isq}^{[m]}$ 为航班 i 在航段 s 上第 q 个航迹采样点的过点时间, $q=0, 1, 2, \dots, Q$, $Q \subseteq P$; r_{isq} 为航班 i 在航段 s 上第 q 个航迹采样点到航段起始航路点的距离; r_{is} 为航班 i 航段 s 的长度;

[0030] (3.4) 通过假设航空器在各航迹采样点的预计过点时间集合服从正态分布, 拟合航空器在各航迹采样点上的预计过点时间概率分布;

[0031] 所述步骤(4)具体为:

[0032] (4.1) 将航迹采样点的四维坐标离散化映射至到相应的单元网格 $A_{m,n,l,k}$ 中;

[0033] (4.2) 建立如下飞行冲突初筛方法对应的4D时空网格: 定义一个网格 $A_{m,n,l,k}$ 的邻域由其自身以及其在空间维度上的周围 $3^3-1=26$ 个网格单元, 记为:

$$[0034] \quad C_{m,n,l,k} = [c_{m,n,l-1,k} \quad c_{m,n,l,k} \quad c_{m,n,l+1,k}]$$

[0035] 其中:

$$[0036] \quad c_{m,n,l-1,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l-1,k} & a_{m,n-1,l-1,k} & a_{m+1,n-1,l-1,k} \\ a_{m-1,n,l-1,k} & a_{m,n,l-1,k} & a_{m+1,n,l-1,k} \\ a_{m-1,n+1,l-1,k} & a_{m,n+1,l-1,k} & a_{m+1,n+1,l-1,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$[0037] \quad c_{m,n,l,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l,k} & a_{m,n-1,l,k} & a_{m+1,n-1,l,k} \\ a_{m-1,n,l,k} & a_{m,n,l,k} & a_{m+1,n,l,k} \\ a_{m-1,n+1,l,k} & a_{m,n+1,l,k} & a_{m+1,n+1,l,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$[0038] \quad c_{m,n,l+1,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l+1,k} & a_{m,n-1,l+1,k} & a_{m+1,n-1,l+1,k} \\ a_{m-1,n,l+1,k} & a_{m,n,l+1,k} & a_{m+1,n,l+1,k} \\ a_{m-1,n+1,l+1,k} & a_{m,n+1,l+1,k} & a_{m+1,n+1,l+1,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

[0039] 式中, 矩阵 $c_{m,n,l,k}$ 表示本层的九网格邻域; 矩阵 $c_{m,n,l-1,k}$ 表示当前网格上层九网格邻域, $c_{m,n,l+1,k}$ 表示当前网格下层的九网格邻域; $a_{M,N,L,k}$ 表示坐标为 L, M, N, k 的网格, 其中 M 取 $m, m+1, m-1$; N 取 $n, n-1, n+1$; L 取 $l-1, l+1, l$;

[0040] 依次检查网格 $A_{m,n,l,k}$ 邻域中的27个网格, 如果邻域中任意网格内存在其他航班的航迹采样点, 则表明存在潜在的飞行冲突, 则执行步骤(4.3); 否则, 则表明不存在潜在的飞行冲突;

[0041] (4.3) 针对同一个网格中的两个不同航班的航迹采样点, 根据其坐标计算航空器之间的垂直距离和水平距离, 当垂直距离与水平距离同时违反航空器安全间隔标准时, 执行步骤(4.4);

[0042] (4.4) 根据步骤(3)获得的航空器在各航迹采样点上的预计过点时间概率分布计算同一个网格中的两个不同航班的航迹采样点的冲突概率, 公式为:

$$[0043] \quad f(t_i^q, t_{i'}^{q'}) = f_{i_1}^{q_1}(t_i^q) \times f_{i_2}^{q_2}(t_{i'}^{q'})$$

$$t \in (\min(\Delta t_i^q - \Delta_i^q, \Delta t_{i'}^{q'} - \Delta_{i'}^{q'}), \max(\Delta t_i^q + \Delta_i^q, \Delta t_{i'}^{q'} + \Delta_{i'}^{q'}))$$

[0044] 式中, $f_{i_1}^{q_1}(t_i^q)$, $t \in (\Delta t_i^q - \Delta_i^q, \Delta t_i^q + \Delta_i^q)$ 表示航班 i_1 过航迹点 q_1 的概率密度函数; $f_{i_2}^{q_2}(t_{i'}^{q'})$, $t \in (\Delta t_{i'}^{q'} - \Delta_{i'}^{q'}, \Delta t_{i'}^{q'} + \Delta_{i'}^{q'})$ 表示航班 i_2 过航迹点 q_2 的概率密度函数; $i \neq i'$,

$i' = 1, 2, \dots, I; q \neq q', q' = 0, 1, 2, \dots, Q; \Delta t_i^q$ 表示航班 i 预计过点时间均值、 Δ_i^q 表示航班 i 预计过点时间与均值的最大偏差; $\Delta t_{i'}^{q'}$ 表示航班 i' 预计过点时间均值、 $\Delta_{i'}^{q'}$ 表示航班 i' 预计过点时间与均值的最大偏差;

[0045] 若两个航迹采样点的冲突概率小于预定值,则认定为飞行冲突,得到相互间存在冲突的航班;

[0046] 所述步骤(5)具体为:

[0047] (5.1) 采用动态分组策略将相互之间有冲突的航班放入同一小组之内,即满足如下相关性:

$$[0048] \quad \forall i \neq i', i, i' \in F, \begin{cases} \forall F_k^i \in \text{group}_k, \exists F_k^{i'} \in \text{group}_k \Rightarrow C_{ii'} = 1 \\ \forall F_k^i \in \text{group}_k, \forall F_k^{i'} \in \text{group}_l \Rightarrow C_{ii'} = 0 \end{cases},$$

[0049] 其中, F 表示所有航班组成集合; group_k 表式第 k 组; F_k^i 和 $F_k^{i'}$ 分别为 group_k 中的第 i 和第 i' 个航班, $C_{ii'} = 1$ 表示航班 i 和 i' 存在冲突, $C_{ii'} = 0$ 表示航班 i 和 i' 无冲突;

[0050] (5.2) 根据小组内冲突数量及航空器数量为各个小组分配不同的种群规模,采用变种群规模算子,动态设计各种群规模大小;所述变种群规模算子如下:

$$[0051] \quad s_k = \text{pop_size} \times \frac{C_k}{L_k} \times \frac{L}{C}$$

[0052] 式中, s_k 为第 k 组种群规模, pop_size 为初始种群规模, C_k 表示第 k 组组内冲突数量, L_k 表示第 k 组组内航班数量, C 表示初始冲突数量; L 表示初始航班数量;

[0053] 所述步骤(6)具体为:

[0054] (6.1) 对种群进行初始化:

[0055] (6.2) 针对初始化后的每个种群小组采用遗传算法进行优化,获取每个小组的最优解;所述的最优解是指适应度函数最大的值时对应的个体,所述适应度函数表达式如下:

$$[0056] \quad \text{fitness} = \frac{1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i}{1 + C_k^i}$$

$$[0057] \quad \delta_i = \lambda_{GH} \times \frac{t_i - t_{orig}}{T_{max}} + \lambda_{FL} \times \frac{fl_i - fl_{orig}}{FL_{max}}$$

[0058] 其中, n 表示迭代次数; C_k^i 表示第 k 组第 i 架航空器的冲突数量; δ_{max} 表示最大的 δ_i ; λ_{GH} 表示地面延误成本系数, t_i 表示航空器起飞时刻, t_{orig} 表示航空器初始起飞时刻, T_{max} 表示最大允许延误; λ_{FL} 表示高度层调整成本系数, fl_i 表示航空器飞行高度层, fl_{orig} 表示航空器初始飞行高度层, FL_{max} 表示最大允许高度层调整量;

[0059] (6.3) 合并各个种群之间的最优解获得多航空器冲突最小化4D航迹;

[0060] 所述步骤(6.1)具体为:

[0061] 步骤(5)形成的每个小组中各个航班的飞行计划构成该小组的初始可行解,在该初始可行解中随机选择某一航班 i 并生成随机数 $r, 0 < r < 1$; 判断该随机数 r 与采用地面等待策略解决冲突的概率 p_{GH} 进行比较,若随机数 r 小于采用地面等待策略解决冲突的概率 p_{GH} , 则调整该航班 i 的起飞时刻, 否则, 调整该航班 i 飞行高度层; 每个小组独立重复运行 s_k 次,

最终形成初始种群。

[0062] 进一步的,步骤(4.1)中航迹采样点的四维坐标离散化映射至到相应的单元网格 $A_{m,n,l,k}$ 中具体公式为:

$$[0063] \quad m = \left\lfloor \frac{x_{i,q} - x_{\min}}{N_h} \right\rfloor_{\text{向上取整}} + 1$$

$$[0064] \quad n = \left\lfloor \frac{y_{i,q} - y_{\min}}{N_h} \right\rfloor_{\text{向上取整}} + 1$$

$$[0065] \quad l = \left\lfloor \frac{z_{i,q} - z_{\min}}{N_v} \right\rfloor_{\text{向上取整}} + 1$$

$$[0066] \quad k = \left\lfloor \frac{t_{i,q} - t_{\min}}{\Delta t} \right\rfloor_{\text{向上取整}} + 1$$

[0067] 式中, $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}, t_{\min}$ 为所研究空域在各个维度上的最小值; N_h 表示水平安全间隔; N_v 表示垂直安全间隔; Δt 表示采样时间间隔;

[0068] 有益效果:本发明相对于现有技术,其显著优点是:1、考虑高空风的不确定性,获取航空器在各个航迹点上的预计过点集合分布;在网格化冲突探测方法进行初步筛选的基础上,利用航空器安全间隔的标准以及预计过点集合分布来进一步的进行多航空器的冲突的判断,从而获取更明确的航空器冲突分组;2、运用概率选择的方法选择冲突解脱方式进行种群的初始化;采用变种群规模算子,动态设计种群规模大小并且结合遗传优化算法从而获取冲突最小化航迹规划方法。

附图说明

[0069] 图1是本发明所述方法流程示意图;

[0070] 图2是本发明中基于动态分组的变种群规模合作协同进化算法流程图;

[0071] 图3是本发明中种群初始化的流程图;

[0072] 图4是本发明中风的矢量三角形示意图。

具体实施方式

[0073] 下面结合附图对本发明的技术方案进一步说明。

[0074] 如图1所示,本发明所述的一种考虑高空风不确定性的冲突最小化航迹规划方法,具体包括一下步骤:

[0075] 步骤一、获取风的集合预报数据、航班飞行计划、航路网络数据和航空器安全间隔标准;

[0076] 步骤二、根据历史航班飞行计划数据(FPL)获取航班的飞行计划航路,假设航空器沿该计划航路飞行,得到该航迹上各航路点的高度以及经纬度坐标数据。

[0077] 步骤三、考虑风预报不确定性的集合进行轨迹预测。

[0078] 本文假设航空器以恒定空速,保持恒定高度飞行,则风的不确定性导致地速的不确定性,进一步表现为航空器过点时间的不确定性,通过航空器过点时间的不确定性进一步的轨迹预测。

[0079] (1) 不确定性风值的预处理:根据步骤一中获取的风的集合预报数据,通过线性插值和投影的方法,得到任一点处的风值(风向、风速)集合;如图4所示,航班 i ($i = 1, 2, \dots$,

I) 集合成员 m ($m=1, 2, \dots, M$) 在航段 s ($s=1, 2, \dots, S$) 上任一点所受到的高空风 $w_{is}^{[m]}(r)$, r 为航空器在该航段上的飞行距离, 可分解为沿航迹的风 $w_{t,is}^{[m]}(r)$, 垂直于航迹的侧风 $w_{c,is}^{[m]}(r)$ 。

[0080] (2) 考虑风不确定性的航迹预测——本文在构建点质量模型预测航迹时, 不考虑横向动力学, 将侧风转化为等效逆风。依据风的矢量三角形原理, 得到航空器的地速。求解点质量模型, 进一步计算得到航空器在该航段上的飞行时间。以计划起飞时间为起始点, 累积飞行时间, 得到航空器在各航路点的过点时间集合。

[0081] (2.1) 获取航空器地速:

$$[0082] \quad V_{g,is}^{[m]}(r) = \sqrt{V^2 - w_{c,is}^{[m]}(r)^2 + w_{t,is}^{[m]}(r)}$$

[0083] 式中, $V_{g,is}^{[m]}(r)$ 表示航班 i 集合成员 m 在航段 s 上飞行距离为 r 时的地速; V 表示航空器的飞行速度; $w_{t,is}^{[m]}(r)$ 表示航班 i 集合成员 m 在航段 s 上飞行距离为 r 时任一点所受到的高空风的沿航迹方向的风值; $w_{c,is}^{[m]}(r)$ 表示航班 i 集合成员 m 在航段 s 上飞行距离为 r 时任一点所受到的高空风的沿垂直于航迹方向的侧风值;

$$[0084] \quad \bar{V}_{g,is}^{[m]} = \frac{1}{r_{is}} \int_0^{r_{is}} [\sqrt{V^2 - w_{c,is}^{[m]}(r)^2 + w_{t,is}^{[m]}(r)}] dr$$

[0085] 式中, $\bar{V}_{g,is}^{[m]}$ 表示航班 i 集合成员 m 在航段 s 上的平均地速; r_{is} 为航班 i 航段 s 的长度;

[0086] (2.2) 获取航空器飞行时间:

$$[0087] \quad (\Delta t)_{is}^{[m]} = \frac{r_{is}}{\bar{V}_{g,is}^{[m]}}$$

[0088] 式中, $(\Delta t)_{is}^{[m]}$ 为航班 i 航段 s 的飞行时间;

[0089] (2.3) 航空器于各航路点的过点时间集合:

$$[0090] \quad t_{ip}^{[m]} = \begin{cases} t_{i_0} + \sum_{s=1}^p (\Delta t)_{is}^{[m]} = t_{i_0} + \sum_{s=1}^p \frac{r_{is}}{\bar{V}_{g,is}^{[m]}} & p > 0 \\ t_{i_0} & p = 0 \end{cases}$$

[0091] 式中, $t_{ip}^{[m]}$ 为航班 i 集合成员 m 经过各航路点 p 的过点时间, $p=0, 1, \dots, P$; $p=0$ 时该点为航班 i 的起时航路点; t_{i_0} 为航班 i 的预计起飞时间;

[0092] (3) 根据航路点确定若干航迹采样点, 获取航迹采样点的预计过点时间集合, 拟合航空器在各航迹采样点上的预计过点时间分布;

[0093] (3.1) 获取航空器在各航迹采样点的预计过点时间集合, 公式为:

$$[0094] \quad t_{isq}^{[m]} = \frac{r_{isq}}{r_{is}} t_{ip}^{[m]}$$

[0095] 式中, $t_{isq}^{[m]}$ 为航班 i 在航段 s 上第 q 个航迹采样点的过点时间, $q=0, 1, 2, \dots, Q$, $Q \subseteq P$; r_{isq} 为航班 i 在航段 s 上第 q 个航迹采样点到航段起始航路点的距离; r_{is} 为航班 i 航段 s 的长度;

[0096] (3.2) 假设航空器在各航迹采样点的预计过点时间集合服从正态分布,通过卡方检验,验证该假设的有效性。根据各航迹采样点的过点时间集合,拟合航空器在各航迹采样点上的预计过点时间概率分布。

[0097] 步骤四、根据步骤三获取的航迹采样点的预计过点时间集合与各航迹采样点高度、经纬度数据形成预测的航空器4D航迹进行航班冲突的识别。

[0098] (1) 利用步骤三中预测的航空器航迹采样点的过点时间集合,将航空器四维航迹离散化存入网格中时。具体的,将航迹采样点的过点时间区间按照时间步长离散化,其中,航迹采样点为 $q(x, y, z, t)$, $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ 。根据其四维坐标映射到相应的网格单元 $A_{m,n,l,k}$ 中,计算方法如下:

$$[0099] \quad m = \left\lfloor \frac{x_{i,q} - x_{\min}}{N_h} \right\rfloor_{\text{向上取整}} + 1$$

$$[0100] \quad n = \left\lfloor \frac{y_{i,q} - y_{\min}}{N_h} \right\rfloor_{\text{向上取整}} + 1$$

$$[0101] \quad l = \left\lfloor \frac{z_{i,q} - z_{\min}}{N_v} \right\rfloor_{\text{向上取整}} + 1$$

$$[0102] \quad k = \left\lfloor \frac{t_{i,q} - t_{\min}}{\Delta t} \right\rfloor_{\text{向上取整}} + 1$$

[0103] 式中, $x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}, t_{\min}$ 为所研究空域在各个维度上的最小值; N_h 表示水平安全间隔; N_v 表示垂直安全间隔; Δt 表示采样时间间隔;

[0104] (2) 采用网格化冲突探测方法进行航空器飞行冲突初筛;

[0105] 建立如下飞行冲突初筛方法对应的4D时空网格:定义一个网格 $A_{m,n,l,k}$ 的邻域由其自身以及其在空间维度上的周围 $3^3 - 1 = 26$ 个网格单元,记为:

$$[0106] \quad C_{m,n,l,k} = [c_{m,n,l-1,k} \quad c_{m,n,l,k} \quad c_{m,n,l+1,k}]$$

[0107] 其中:

$$[0108] \quad c_{m,n,l-1,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l-1,k} & a_{m,n-1,l-1,k} & a_{m+1,n-1,l-1,k} \\ a_{m-1,n,l-1,k} & a_{m,n,l-1,k} & a_{m+1,n,l-1,k} \\ a_{m-1,n+1,l-1,k} & a_{m,n+1,l-1,k} & a_{m+1,n+1,l-1,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$[0109] \quad c_{m,n,l,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l,k} & a_{m,n-1,l,k} & a_{m+1,n-1,l,k} \\ a_{m-1,n,l,k} & a_{m,n,l,k} & a_{m+1,n,l,k} \\ a_{m-1,n+1,l,k} & a_{m,n+1,l,k} & a_{m+1,n+1,l,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$[0110] \quad c_{m,n,l+1,k} = \begin{bmatrix} a_{m-1,n-1,l+1,k} & a_{m,n-1,l+1,k} & a_{m+1,n-1,l+1,k} \\ a_{m-1,n,l+1,k} & a_{m,n,l+1,k} & a_{m+1,n,l+1,k} \\ a_{m-1,n+1,l+1,k} & a_{m,n+1,l+1,k} & a_{m+1,n+1,l+1,k} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

[0111] 式中,矩阵 $c_{m,n,l,k}$ 表示本层的九网格邻域;矩阵 $c_{m,n,l-1,k}$ 表示当前网格上层九网格邻域, $c_{m,n,l+1,k}$ 表示当前网格下层的九网格邻域; $a_{M,N,L,k}$ 表示坐标为 L, M, N, k 的网格,其中 M 取 $m, m+1, m-1$; N 取 $n, n-1, n+1$; L 取 $l-1, l+1, l$;

[0112] 依次检查网格 $A_{m,n,l,k}$ 邻域中的27个网格,如果邻域中任意网格内存在其他航班的航迹采样点,则表明存在潜在的飞行冲突,则执行步骤(3);否则,则表明不存在潜在的飞行

冲突；

[0113] (3) 对于航班之间的潜在冲突进行精确探测：针对同一个网格中的两个不同航班的航迹采样点 q 和 q' ，根据其坐标计算在航班预计过点时间集合内航空器之间的垂直距离和水平距离，当垂直距离与水平距离同时违反航空器安全间隔时，执行步骤(4)；

[0114] (4) 根据步骤三获得的航空器在各航迹采样点上的预计过点时间概率分布计算同一个网格中的两个不同航班的航迹采样点的冲突概率；计算公式为：

$$f(t_i^q, t_{i'}^{q'}) = f_{i_1}^{q_1}(t_i^q) \times f_{i_2}^{q_2}(t_{i'}^{q'}) t$$

$$\in (\min(\Delta t_i^q - \Delta_i^q, \Delta t_{i'}^{q'} - \Delta_{i'}^{q'}), \max(\Delta t_i^q + \Delta_i^q, \Delta t_{i'}^{q'} + \Delta_{i'}^{q'}))$$

[0116] 式中， $f_{i_1}^{q_1}(t_i^q)$ ， $t \in (\Delta t_i^q - \Delta_i^q, \Delta t_i^q + \Delta_i^q)$ 表示航班 i_1 过航迹点 q_1 的概率密度函数； $f_{i_2}^{q_2}(t_{i'}^{q'})$ ， $t \in (\Delta t_{i'}^{q'} - \Delta_{i'}^{q'}, \Delta t_{i'}^{q'} + \Delta_{i'}^{q'})$ 表示航班 i_2 过航迹点 q_2 的概率密度函数； $i \neq i'$ ， $i' = 1, 2, \dots, I$ ； $q \neq q'$ ， $q' = 0, 1, 2, \dots, Q$ ； Δt_i^q 表示航班 i 预计过点时间均值、 Δ_i^q 表示航班 i 预计过点时间与均值的最大偏差； $\Delta t_{i'}^{q'}$ 表示航班 i' 预计过点时间均值、 $\Delta_{i'}^{q'}$ 表示航班 i' 预计过点时间与均值的最大偏差；

[0117] 若两个航迹采样点的冲突概率小于预定值，则认定为飞行冲突，得到相互间存在冲突的航班。

[0118] 步骤五、采用动态分组策略将相互之间有冲突的航班放入同一小组之内。如图2所示，各小组之间独立进化，在进化过程中，根据小组内冲突数量及航空器数量的多少，采用变种群规模算子，动态设计种群规模大小。

[0119] (1) 将所有航班组成集合 F ，将集合 F 中的第一架航班放入第一组 $group_1$ 中，此时遍历集合 F 中的剩余航班，若航班与 $group_1$ 中的航班存在相互影响，则将该航班放入 $group_1$ 中；当集合 F 中的航班不与 $group_1$ 中航班冲突时，此时生成一个新的组 $group_i$ ，重复执行该分组策略，直至集合 F 为空集。采用动态分组策略能够将相互之间有冲突的航班放入同一小组之内，小组内部的航班一定是相互影响的，组与组之间的航班相互之间没有影响，即满足如下相关性：

$$[0120] \quad \forall i \neq i', i, i' \in F, \begin{cases} \forall F_k^i \in group_k, \exists F_k^{i'} \in group_k \Rightarrow C_{ii'} = 1 \\ \forall F_k^i \in group_k, \forall F_k^{i'} \in group_l \Rightarrow C_{ii'} = 0 \end{cases},$$

[0121] 其中， F 表示所有航班组成集合； $group_k$ 表示第 k 组； F_k^i 和 $F_k^{i'}$ 分别为 $group_k$ 中的第 i 和第 i' 个航班， $C_{ii'} = 1$ 表示航班 i 和 i' 存在冲突， $C_{ii'} = 0$ 表示航班 i 和 i' 无冲突；

[0122] (2) 根据小组内冲突数量及航空器数量为各个小组分配不同的种群规模，采用变种群规模算子，动态设计各种群规模大小；所述变种群规模算子如下：

$$[0123] \quad s_k = pop_size \times \frac{C_k}{L_k} \times \frac{L}{C}$$

[0124] 式中， s_k 为第 k 组种群规模， pop_size 为初始种群规模， C_k 表示第 k 组组内冲突数量， L_k 表示第 k 组组内航班数量， C 表示初始冲突数量； L 表示初始航班数量。

[0125] 步骤六、针对每组航班,采用地面等待以及垂直高度层分配的方法解决航空器之间的冲突,通过各个小组之间的协同进化来获取多航空器冲突最小化4D航迹;

[0126] (1)如图3所示,针对每组航班,采用调整各个航班的起飞时刻和飞行高度层来避免冲突,对各种群进行初始化;

[0127] 首先,步骤五中形成的每个小组中各个航班的飞行计划构成该小组的初始可行解 $X_{initial}$;在该初始可行解 $X_{initial}$ 中随机选择某一航班 i 并生成随机数 r , $0 < r < 1$;判断该随机数 r 与采用地面等待策略解决冲突的概率 p_{GH} 进行比较,若随机数 r 小于采用地面等待策略解决冲突的概率 p_{GH} ,则调整该航班 i 的起飞时刻,否则,调整该航班 i 的飞行高度层;每个小组独立重复运行 s_k 次,最终形成初始种群。本发明采用地面等待策略解决冲突的概率 p_{GH} 为0.7,对应的修改飞行高度层解决冲突的概率为0.3。

[0128] (2)在对每个小组进行优化时,采用遗传算法进行优化,在对种群中每个染色体进行评价时,其适应度函数表达式如下:

$$[0129] \quad fitness = \frac{1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i}{1 + C_k^i}$$

$$[0130] \quad \delta_i = \lambda_{GH} \times \frac{t_i - t_{orig}}{T_{max}} + \lambda_{FL} \times \frac{fl_i - fl_{orig}}{FL_{max}}$$

[0131] 其中, n 表示迭代次数; C_k^i 表示第 k 组第 i 架航空器的冲突数量; δ_{max} 表示最大的 δ_i ; λ_{GH} 表示地面延误成本系数, t_i 表示航空器起飞时刻, t_{orig} 表示航空器初始起飞时刻, T_{max} 表示最大允许延误; λ_{FL} 表示高度层调整成本系数, fl_i 表示航空器飞行高度层, fl_{orig} 表示航空器初始飞行高度层, FL_{max} 表示最大允许高度层调整量;

[0132] 适应度函数的值越大,表明该染色体更优。各个小组独立进行优化,在独立进化 n 代时,组内进化终止,利用适应度函数评价种群中的个体,选择适应度最大的个体作为组内最优解。

[0133] (3)通过各个种群之间的协同进化获得多航空器冲突最小化4D航迹;

[0134] 在获取了每个小组的最优解后,由于每个小组获得的只是组内航班的飞行计划,因此需要将各个小组的最优解进行组合形成完备解,将此完备解作为下一轮迭代的初始航迹。

[0135] 步骤七、重复步骤4至步骤6,直至达到最大迭代次数 N 。

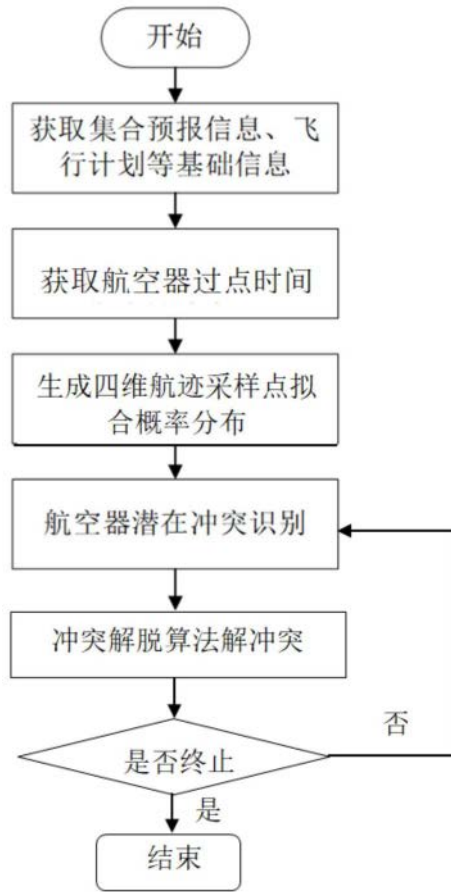


图1

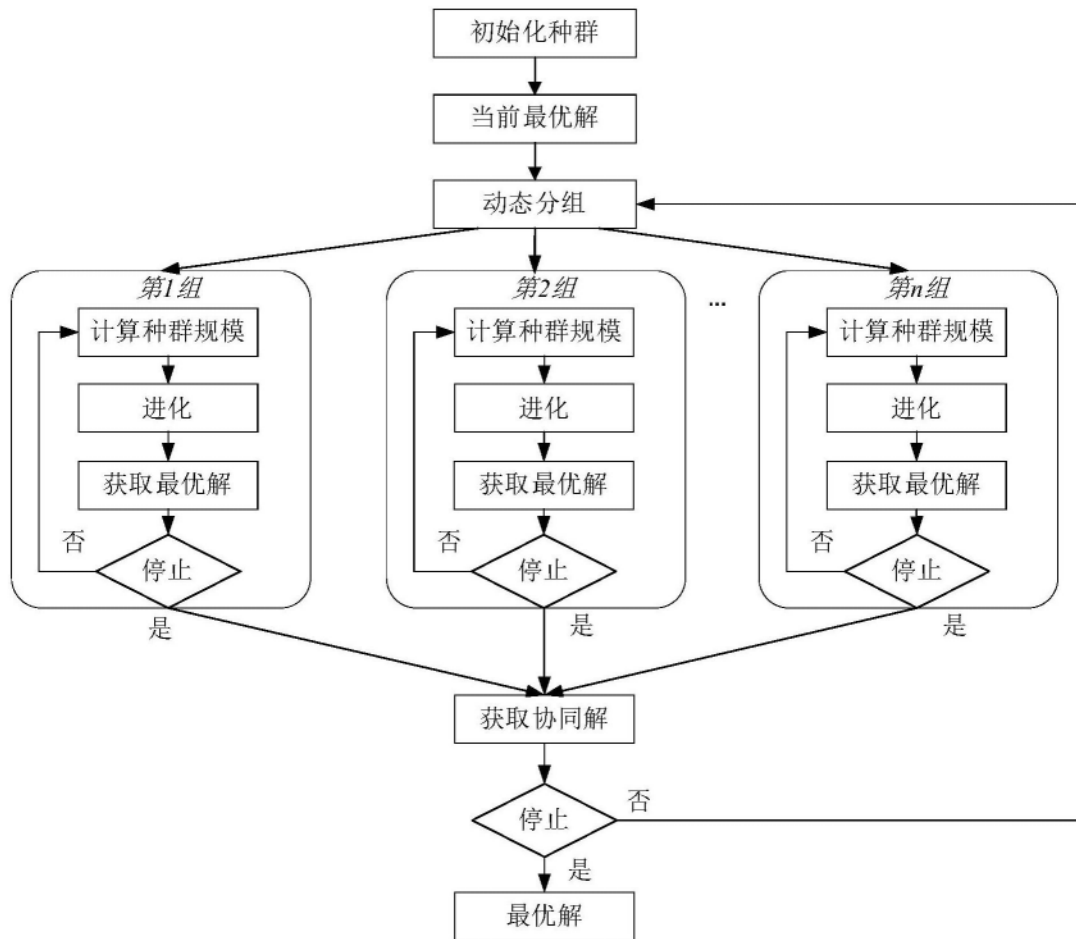


图2

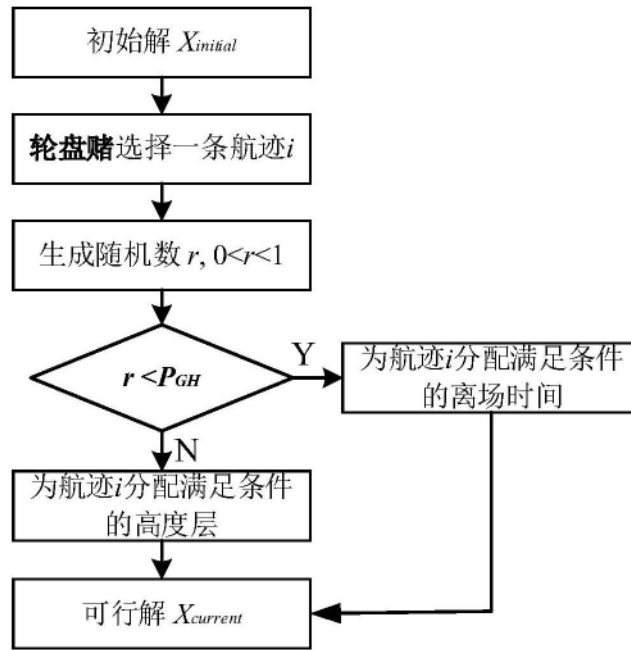


图3

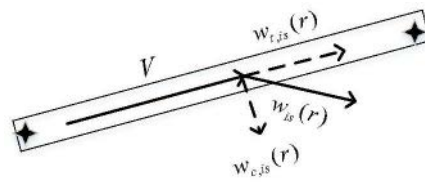


图4