



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111583724 A
(43)申请公布日 2020.08.25

(21)申请号 202010381332.4

(22)申请日 2020.05.08

(71)申请人 中国电子科技集团公司第二十八研究所

地址 210007 江苏省南京市苜蓿园东街1号

(72)发明人 张阳 严勇杰 马龙彪 陈平
刘岩 储培 董斌

(74)专利代理机构 江苏圣典律师事务所 32237
代理人 于瀚文 胡建华

(51) Int. Cl.

G08G 5/00(2006.01)

G06Q 50/30(2012.01)

G06Q 10/04(2012.01)

权利要求书3页 说明书6页 附图2页

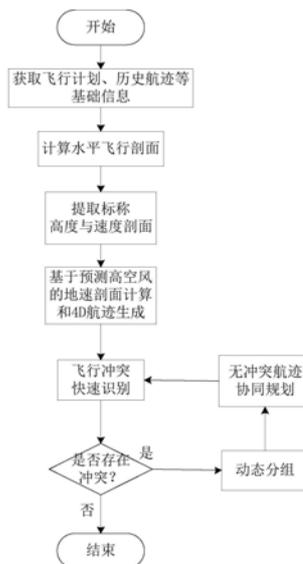
(54)发明名称

一种面向四维航迹运行的预战术阶段间隔管理方法

(57)摘要

本发明提供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。本发明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。

CN 111583724 A



1. 一种面向四维航迹运行的预战术阶段间隔管理方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤1: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;

步骤2:根据航班飞行计划提取航路点数据,计算航空器水平飞行剖面;

步骤3:利用同一航班的航迹历史数据和高空风历史数据,按照水平剖面中的关键点,逐航段地提取出具有代表性的标称高度剖面和真空速速度剖面;

步骤4:通过预测的高空风数据得到航空器每个航迹点的风速和风向与航路的夹角,根据相对运动关系计算得到预测的地速剖面,并与水平和高度剖面整合形成预测的航空器4D航迹;

步骤5:基于预测的航空器4D航迹,建立基于4D时空网格的飞行冲突初筛方法,并利用安全间隔标准对潜在的飞行冲突进行计算与识别,得到相互间有冲突的航班;

步骤6:对相互间有冲突的航班进行动态分组,即将相互之间存在冲突的航班归纳到同一个组中;

步骤7:针对每组航班,通过调整各航班的初始放行时刻和飞行高度来避免冲突,通过协同优化各分组航班获得多航空器无冲突4D航迹;

步骤8,重复步骤5~步骤7,直至不存在有冲突的航班。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,步骤2包括:设定飞机在各个航路点之间都是直线飞行,忽略航班的转弯过程,用各航路点经纬度坐标连线生成唯一的水平剖面 $D = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)]$,其中 (x_i, y_i) 为第*i*个航路点的经纬度坐标,*N*为航路点的总个数。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,步骤3包括:

对于标称高度剖面的提取,将高度转换点,作为虚拟航路点加入到高度剖面中,得到标称高度剖面 $H = [h_1, h_2, \dots, h_M]$,其中 h_i 为第*i*个航路点的高度,*M*为航路点的总个数,高度转换点即完成爬升或者下降过程转平飞的位置点;

对于标称真空速速度剖面的提取,将航迹历史数据中的地速值和高空风历史数据进行叠加,确定各航路点的历史真空速数据;

地速矢量 \vec{V}_G 、真空速矢量 \vec{V}_{TAS} 和高空风 \vec{V}_W 的关系为:

$$\vec{V}_G = \vec{V}_{TAS} + \vec{V}_W \quad (1)$$

在空间维度上选取与航路点距离最近的网格点高空风数据作为该航路点的高空风历史数据,其次在时间维度上选择与航迹历史数据中该航路点过点时间最接近的高空风历史数据 \vec{V}_W 用于该航路点历史真空速的计算,计算公式为: $\vec{V}_{TAS} = \vec{V}_G - \vec{V}_W$,

\vec{V}_G 为历史航迹点中该航路点的地速;

利用不同日期的航迹和高空风历史数据在每个航路点计算得到两个以上的历史真空速数据,计算两个以上的历史真空速数据的平均值作为航路点的标称真空速,通过逐一计算每个航路点的标称真空速最终得到航班的标称真空速速度剖面 $V = [v_1, v_2, \dots, v_M]$,其中 v_M 为第*M*个航路点的标称真空速。

4. 根据权利要求3所述的方法,其特征在于,步骤4包括:

利用步骤3中的公式(1)计算得到预测的地速剖面,通过整合水平剖面、标称高度剖面

和预测的地速剖面形成预测的航空器4D航迹；

在预测的航空器4D航迹计算过程中，每个航段的平均速度 \bar{v} 用起始点和结束点的预测地速的平均值表示，每个航路段的距离L为起始点和结束点的直线距离，每个航路段的飞行时间 $T = L/\bar{v}$ ，最终通过逐个航路段计算确定每个航路点的高度、速度和过点时间；

本步骤中的航路段划分与计算使用步骤3中加入虚拟航路点后的数据，即共M个航路点，航路点之间通过线性插值的方式确定中间航迹点的位置、高度和时间。

5. 根据权利要求4所述的方法，其特征在于，步骤5包括如下步骤：

步骤5-1，建立如下飞行冲突初筛方法对应的4D时空网格：定义航班i的第j个航迹点位于网格 A_{ij}^0 中，网格 A_{ij}^0 与其相邻的 $3^3-1=26$ 个网格共同构成了网格矩阵

$$\mathbf{A}_{ij} = [\mathbf{A}_{ij}^1 \quad \mathbf{A}_{ij}^2 \quad \mathbf{A}_{ij}^3],$$

其中：

$$\mathbf{A}_{ij}^1 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{111} & A_{ij}^{112} & A_{ij}^{113} \\ A_{ij}^{121} & A_{ij}^{122} & A_{ij}^{123} \\ A_{ij}^{131} & A_{ij}^{132} & A_{ij}^{133} \end{bmatrix}_{3 \times 3}, \quad \mathbf{A}_{ij}^2 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{211} & A_{ij}^{212} & A_{ij}^{213} \\ A_{ij}^{221} & A_{ij}^{222} & A_{ij}^{223} \\ A_{ij}^{231} & A_{ij}^{232} & A_{ij}^{233} \end{bmatrix}_{3 \times 3}, \quad \mathbf{A}_{ij}^3 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{311} & A_{ij}^{312} & A_{ij}^{313} \\ A_{ij}^{321} & A_{ij}^{322} & A_{ij}^{323} \\ A_{ij}^{331} & A_{ij}^{332} & A_{ij}^{333} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

矩阵 $\mathbf{A}_{ij}^1, \mathbf{A}_{ij}^3$ 分别表示网格 A_{ij}^0 上层和下层的九网格邻域， \mathbf{A}_{ij}^2 表示网格 A_{ij}^0 本层的九网格邻域； A_{ij}^{mnk} ($m, n, k \in \{1, 2, 3\}$)表示网格层 A_{ij}^m 中的 $3 \times 3 = 9$ 个网格的冲突标识，网格 A_{ij}^{222} 与 A_{ij}^0 是代表同一个网格；

定义一个网格中存在其他航空器时，则 $A_{ij}^{mnk} = 1$ ，其中 $m, n, k \in \{1, 2, 3\}$ ，当矩阵 $\mathbf{A}_{ij} = [\mathbf{A}_{ij}^1 \quad \mathbf{A}_{ij}^2 \quad \mathbf{A}_{ij}^3]$ 中任意元素为1时则表明可能存在飞行冲突，如果 $\sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \sum_{k=1}^3 A_{ij}^{mnk}$ 不为零，则说明存在潜在的冲突，对存在潜在冲突的航班执行步骤5-2，否则表示无冲突；

步骤5-2，对存在潜在冲突的航班进行进一步检测：根据步骤4中得到的预测的航空器4D航迹具体计算一时刻两个航空器之间的垂直距离和水平距离，当垂直距离和水平距离同时低于最小间隔时判定为飞行冲突，得到相互间存在飞行冲突的航班。

6. 根据权利要求5所述的方法，其特征在于，步骤6包括：

将相互间有冲突的航班组成集合F，将集合F中的一个航班分在第一组 $group_1$ ，此时如果集合F中剩余航班与第一组 $group_1$ 中航班有冲突，则将集合F中的冲突航班移到第一组 $group_1$ 中，当集合F中的航班都不与第一组 $group_1$ 中航班冲突时，则重复循环执行分组，直到集合F为空集。

7. 根据权利要求6所述的方法，其特征在于，步骤6中，采用的动态分组策略能够将相互间有冲突的航班划分在同一组中，相互间没有冲突的航班划分在不同的组中，即满足如下相关性：

$$\forall i \neq j, i, j \in F, \quad \begin{cases} \forall F_k^i \in group_k, \exists F_k^j \in group_k \Rightarrow C_{ij} = 1 \\ \forall F_k^i \in group_k, \forall F_k^j \in group_l \Rightarrow C_{ij} = 0 \end{cases}$$

其中 group_k 为第 k 个航班分组, F_k^i 和 F_k^j 分别为 group_k 组中第 i 个航班和第 j 个航班, C_{ij} 为冲突标识, 当 $C_{ij}=1$ 表示航班 i 和 j 存在冲突, $C_{ij}=0$ 表示航班 i 和 j 无冲突。

一种面向四维航迹运行的预战术阶段间隔管理方法

技术领域

[0001] 本发明属于空中交通管理领域,特别涉及一种面向四维航迹运行的预战术阶段间隔管理方法

背景技术

[0002] 当前,全球航空运输业的快速发展与空域资源有限的矛盾日益突出,在空中交通流密集空域仍然采用飞行计划结合基于经验的间隔调配逐渐显示出其落后性,具体表现在:(1)飞行计划并未为航空器配置精确的空管间隔,容易造成空域交通流战术管理拥挤,降低空域安全性;(2)空中交通管制工作仍然侧重于保持单个航空器之间的安全间隔,很难上升到对交通流进行战略管理的高度。国际民航界正在推动新一轮的空管系统技术变革,基于四维航迹的运行被一致认为是突破现有空管系统保障能力瓶颈的全新系统性解决方案。

[0003] 现有研究仅仅考虑单一航空器的航迹运行间隔管理已不能满足未来发展需求。尽管有部分研究将单架或多架航空器的航迹进行局部调配,但实际运行中往往会受到管制或其他航空器的影响,缺乏从全局的角度考虑每一架航空器的运行状况,容易导致不理想的间隔管理结果,影响整体运行效率。目前已有的研究方法主要是针对航空器战术阶段间隔管理中的冲突探测与解脱方面的问题研究比较多,而且解脱方法主要是针对具体的冲突情形进行研究,缺乏一种面向预战术阶段全空域内大批量航空器无冲突航迹管理方法的研究,在指导实践与应用方面存在不足,因此需要从全局和系统的角度出发,对多航空器预战术阶段的间隔管理方法进行研究。

发明内容

[0004] 发明目的:本发明要解决的技术问题是针对下一代空管系统向基于4D航迹运行理念发展的需求,从合理规划航迹、航空器安全间隔管理方面出发,研究基于4D航迹的航空器预战术阶段间隔管理策略与方法。

[0005] 为了解决上述技术问题,本发明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,

[0006] 包括如下步骤:

[0007] 步骤1: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;

[0008] 步骤2:根据航班飞行计划提取航路点数据,计算航空器水平飞行剖面;

[0009] 步骤3:利用同一航班的航迹历史数据和高空风历史数据,按照水平剖面中的关键点,逐航段地提取出具有代表性的标称高度剖面和真空速速度剖面;

[0010] 步骤4:通过预测的高空风数据得到航空器每个航迹点的风速和风向与航路的夹角,根据相对运动关系计算得到预测的地速剖面,并与水平和高度剖面整合形成预测的航空器4D航迹;

[0011] 步骤5:基于预测的航空器4D航迹,建立基于4D时空网格的飞行冲突初筛方法,并利用安全间隔标准对潜在的飞行冲突进行计算与识别,得到相互间有冲突的航班;

[0012] 步骤6:对相互间有冲突的航班进行动态分组,即将相互之间存在冲突的航班归纳到同一个组中;

[0013] 步骤7:针对每组航班,通过调整各航班的初始放行时刻和飞行高度来避免冲突,通过协同优化各分组航班获得多航空器无冲突4D航迹;

[0014] 步骤8,重复步骤5~步骤7,直至不存在有冲突的航班。

[0015] 步骤2包括:设定飞机在各个航路点之间都是直线飞行,忽略航班的转弯过程,用各航路点经纬度坐标连线生成唯一的水平剖面 $D = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)]$,其中 (x_i, y_i) 为第 i 个航路点的经纬度坐标, N 为航路点的总个数。

[0016] 步骤3包括:

[0017] 对于标称高度剖面的提取,将高度转换点,作为虚拟航路点加入到高度剖面中,得到标称高度剖面 $H = [h_1, h_2, \dots, h_M]$,其中 h_i 为第 i 个航路点的高度, M 为航路点的总个数,高度转换点即完成爬升或者下降过程转平飞的位置点;

[0018] 对于标称真空速速度剖面的提取,将航迹历史数据中的地速值和高空风历史数据进行叠加,确定各航路点的历史真空速数据;

[0019] 地速矢量 \vec{V}_G 、真空速矢量 \vec{V}_{TAS} 和高空风 \vec{V}_W 的关系为:

$$[0020] \quad \vec{V}_G = \vec{V}_{TAS} + \vec{V}_W \quad (1)$$

[0021] 高空风历史数据中的网格点并不一定是航路点,同时航迹历史数据的过点时间与历史高空风的时间也不是一一对应的,因此本方法首先在空间维度上选取与航路点距离最近网格点的高空风数据作为该航路点的高空风历史数据,其次在时间维度上选取与航迹历史中航路点过点时间最接近的高空风历史数据 \vec{V}_W 用于该航路点历史真空速的计算,计算公式为:

$$[0022] \quad \vec{V}_{TAS} = \vec{V}_G - \vec{V}_W,$$

[0023] \vec{V}_G 为历史航迹点中该航路点的地速。

[0024] 利用不同日期的航迹和高空风历史数据在每个航路点计算得到两个以上的历史真空速数据,计算两个以上的历史真空速数据的平均值作为航路点的标称真空速,通过逐一计算每个航路点的标称真空速最终得到航班的标称真空速速度剖面 $V = [v_1, v_2, \dots, v_M]$,其中 v_M 为第 M 个航路点的标称真空速。

[0025] 步骤4包括:

[0026] 利用步骤3中的公式(1)计算得到预测的地速剖面,通过整合水平剖面、标称高度剖面 and 预测的地速剖面形成预测的航空器4D航迹;

[0027] 在预测的航空器4D航迹计算过程中,每个航段的平均速度 \bar{v} 用起始点和结束点的预测地速的平均值表示,每个航路段的距离 L 为起始点和结束点的直线距离,每个航路段的飞行时间 $T = L/\bar{v}$,最终通过逐个航路段计算确定每个航路点的高度、速度和过点时间。本步骤中的航路段划分与计算使用步骤3中加入虚拟航路点后的数据,即共 M 个航路点,航路点之间通过线性插值的方式确定中间航迹点的位置、高度和时间。

[0028] 步骤5包括如下步骤:

[0029] 步骤5-1,建立如下飞行冲突初筛方法对应的4D时空网格:定义航班i的第j个航迹点位于网格 A_{ij}^0 中,网格 A_{ij}^0 与其相邻的 $3^3-1=26$ 个网格共同构成了网格矩阵

$$[0030] \quad \mathbf{A}_{ij} = [\mathbf{A}_{ij}^1 \quad \mathbf{A}_{ij}^2 \quad \mathbf{A}_{ij}^3],$$

[0031] 其中:

$$[0032] \quad \mathbf{A}_{ij}^1 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{111} & A_{ij}^{112} & A_{ij}^{113} \\ A_{ij}^{121} & A_{ij}^{122} & A_{ij}^{123} \\ A_{ij}^{131} & A_{ij}^{132} & A_{ij}^{133} \end{bmatrix}_{3 \times 3}, \mathbf{A}_{ij}^2 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{211} & A_{ij}^{212} & A_{ij}^{213} \\ A_{ij}^{221} & A_{ij}^{222} & A_{ij}^{223} \\ A_{ij}^{231} & A_{ij}^{232} & A_{ij}^{233} \end{bmatrix}_{3 \times 3}, \mathbf{A}_{ij}^3 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{311} & A_{ij}^{312} & A_{ij}^{313} \\ A_{ij}^{321} & A_{ij}^{322} & A_{ij}^{323} \\ A_{ij}^{331} & A_{ij}^{332} & A_{ij}^{333} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

[0033] 矩阵 $\mathbf{A}_{ij}^1, \mathbf{A}_{ij}^3$ 分别表示网格 A_{ij}^0 上层和下层的九网格邻域, \mathbf{A}_{ij}^2 表示网格 A_{ij}^0 本层的九网格邻域; A_{ij}^{mnk} ($m, n, k \in \{1, 2, 3\}$) 表示网格层 A_{ij}^m 中的 $3 \times 3 = 9$ 个网格的冲突标识, 网格 A_{ij}^{222} 与 A_{ij}^0 是代表同一个网格。

[0034] 定义一个网格中存在其他航空器时, 则 $A_{ij}^{mnk} = 1$, 其中 $m, n, k \in \{1, 2, 3\}$, 当矩阵 $\mathbf{A}_{ij} = [\mathbf{A}_{ij}^1 \quad \mathbf{A}_{ij}^2 \quad \mathbf{A}_{ij}^3]$ 中任意元素为1时则表明可能存在飞行冲突, 如果 $\sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \sum_{k=1}^3 A_{ij}^{mnk}$ 不为零, 则说明存在潜在的冲突, 对存在潜在冲突的航班执行步骤5-2, 否则表示无冲突;

[0035] 步骤5-2, 对存在潜在冲突的航班进行进一步检测: 根据步骤4中得到的预测的航空器4D航迹具体计算在某一时刻两个航空器之间的垂直距离和水平距离, 当垂直距离和水平距离同时低于最小间隔时判定为飞行冲突, 得到相互间存在飞行冲突的航班。

[0036] 步骤6包括:

[0037] 将相互间有冲突的航班组成集合F, 将集合F中的一个航班分在第一组 $group_1$, 此时如果集合F中剩余航班与第一组 $group_1$ 中航班有冲突, 则将集合F中的冲突航班移到第一组 $group_1$ 中, 当集合F中的航班都不与第一组 $group_1$ 中航班冲突时, 则重复循环执行分组, 直到集合F为空集;

[0038] 步骤6中, 采用的动态分组策略能够将相互间有冲突的航班划分在同一组中, 相互间没有冲突的航班划分在不同的组中, 即满足如下相关性:

$$[0039] \quad \forall i \neq j, i, j \in F, \begin{cases} \forall F_k^i \in group_k, \exists F_k^j \in group_k \Rightarrow C_{ij} = 1 \\ \forall F_k^i \in group_k, \forall F_k^j \in group_l \Rightarrow C_{ij} = 0 \end{cases}$$

[0040] 其中 $group_k$ 为第k个航班分组, F_k^i 和 F_k^j 分别为 $group_k$ 组中第i个航班和第j个航班, C_{ij} 为冲突标识, 当 $C_{ij} = 1$ 表示航班i和j存在冲突, $C_{ij} = 0$ 表示航班i和j无冲突。本发明具有如下技术效果:

[0041] 1、本发明为预战术阶段的航空器的间隔管理提供了一种快速实现方法;

[0042] 2、本发明为合理规划航迹、航空器流间隔管理以及空域资源合理利用等方面提供了技术支持;

[0043] 3、为支持基于四维航迹运行的空管系统与决策工具研发提供技术支撑。

附图说明

[0044] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做更进一步的具体说明,本发明的上述和/或其他方面的优点将会变得更加清楚。

[0045] 图1为本发明的方法流程图。

[0046] 图2基于动态分组策略的协同无冲突航迹规划流程图。

具体实施方式

[0047] 如图1所示,本发明公开了一种面向四维航迹运行的航空器预战术间隔管理方法,属于空中交通管理领域。该方法首先获取航班飞行计划、安全间隔标准、航迹历史数据、高空风历史和预测数据等作为基础数据;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,快速生成准确的航迹预测结果;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,同时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

[0048] 本发明主要针对面向四维航迹运行的航空器预战术间隔管理方法,为合理规划航迹、航空器流间隔管理以及空域资源合理利用等方面提供了技术支持,具体步骤如下:

[0049] 步骤1: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,作为本方法的基本输入;飞行计划中的起降机场和航路点用于计算水平剖面,安全间隔标准用于飞行冲突识别,航迹和高空风历史数据用于标称高度剖面和速度剖面的提取,高空风预测数据用于速度剖面的修正。

[0050] 步骤2:根据航班飞行计划提取航路点数据,计算航空器水平飞行剖面,即飞行航迹在水平面的投影。为:降低大批量航空器预战术间隔管理时的计算量,本方法设定飞机在各个航路点之间都是直线飞行,忽略航班的转弯过程,用各航路点经纬度坐标连线生成唯一的水平剖面 $D = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)]$,其中 (x_i, y_i) 为第 i 个航路点的经纬度坐标, N 为航路点的总个数。

[0051] 步骤3:利用同一航班的航迹历史数据和高空风历史数据,按照水平剖面中的航路点,逐航段地提取出具有代表性的标称高度剖面和真空速速度剖面。

[0052] 对于标称高度剖面的提取,本方法首先将水平剖面中关键点航迹历史数据中的飞行高度值映射到相应的飞行高度层,根据中华人民共和国飞行基本规定,空域内600米至8400米,每隔300米为一个高度层;8400米至8900米,隔500米为一个高度层;8900米至12500米,每隔300米为一个高度层;12500米以上,每隔600米为一个高度层。接下来根据历史飞行高度层的众数确定该点的标称高度,即选择出现次数最多的历史高度层数据作为标称高度。在高度转化过程中,采用先爬升/下降,再平飞的策略,根据商业航空器的平均性能,本方法采用1500英尺/分钟的默认爬升/下降率,同时将高度转换点,即完成爬升/下降过程转平飞的位置点,作为虚拟航路点加入到高度剖面中,得到标称高度剖面 $H = [h_1, h_2, \dots, h_M]$,其中 h_i 为第 i 个航路点的高度, M 为航路点的总个数,由于存在高度转换生成的虚拟航路点,故 $M \geq N$ 。

[0053] 对于标称真空速速度剖面的提取,本方法首先将航迹历史数据中的地速值和高空风历史数据进行叠加,确定各航路点的历史真空速数据。地速矢量 \vec{V}_G 、真空速矢量 \vec{V}_{TAS} 和高空风 \vec{V}_W 的关系为:

$$[0054] \quad \vec{V}_G = \vec{V}_{TAS} + \vec{V}_W \quad (1)$$

[0055] 考虑到高空风历史数据中的网格点并不一定是航路点,同时历史航迹数据的过点时间与历史高空风的时间也不是一一对应的,因此本方法首先在空间维度上选取与航路点距离最近网格点的高空风数据作为该航路点的高空风历史数据,其次在时间维度上选取与历史航迹中航路点过点时间最接近的高空风历史数据 \vec{V}_W 用于该航路点历史真空速的计算,计算公式为 $\vec{V}_{TAS} = \vec{V}_G - \vec{V}_W$, \vec{V}_G 为历史航迹数据中该航路点的地速。利用不同日期的航迹和高空风历史数据可以在每个航路点计算得到多个历史真空速,本方法计算其平均值作为航路点的标称真空速。通过逐一计算每个航路点的标称真空速最终得到航班的标称真空速度剖面 $V = [v_1, v_2, \dots, v_M]$,其中 v_M 为第M个航路点的标称真空速。

[0056] 步骤4:通过预测的高空风数据和标称空速,利用步骤3中的公式(1)计算得到预测的地速剖面。通过整合水平剖面、标称高度剖面和预测的地速剖面形成预测的航空器4D航迹。在预测的航空器4D航迹计算过程中,每个航段的平均速度 \bar{v} 用起始点和结束点的预测地速的平均值表示,每个航路段的距离L为起始点和结束点的直线距离,每个航路段的飞行时间 $T = L/\bar{v}$,最终通过逐个航路段计算确定每个航路点的高度、速度和过点时间。本步骤中的航路段划分与计算使用步骤3中加入虚拟航路点后的数据,即共M个航路点,航路点之间通过线性插值的方式确定中间航迹点的位置、高度和时间。步骤5:基于预测的航空器4D航迹,建立基于4D时空网格的飞行冲突初筛方法,并利用安全间隔标准对潜在的飞行冲突进行计算与识别,得到相互间有冲突的航班。

[0057] 首先定义航班i的第j个航迹点位于网格 A_{ij}^0 中,网格 A_{ij}^0 与其相邻的 $3^3-1=26$ 个网格共同构成了网格矩阵 $\mathbf{A}_{ij} = [\mathbf{A}_{ij}^1 \quad \mathbf{A}_{ij}^2 \quad \mathbf{A}_{ij}^3]$,其中:

$$[0058] \quad \mathbf{A}_{ij}^1 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{111} & A_{ij}^{112} & A_{ij}^{113} \\ A_{ij}^{121} & A_{ij}^{122} & A_{ij}^{123} \\ A_{ij}^{131} & A_{ij}^{132} & A_{ij}^{133} \end{bmatrix}_{3 \times 3}, \mathbf{A}_{ij}^2 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{211} & A_{ij}^{212} & A_{ij}^{213} \\ A_{ij}^{221} & A_{ij}^{222} & A_{ij}^{223} \\ A_{ij}^{231} & A_{ij}^{232} & A_{ij}^{233} \end{bmatrix}_{3 \times 3}, \mathbf{A}_{ij}^3 = \begin{bmatrix} A_{ij}^{311} & A_{ij}^{312} & A_{ij}^{313} \\ A_{ij}^{321} & A_{ij}^{322} & A_{ij}^{323} \\ A_{ij}^{331} & A_{ij}^{332} & A_{ij}^{333} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

[0059] 矩阵 $\mathbf{A}_{ij}^1, \mathbf{A}_{ij}^3$ 分别表示网格 A_{ij}^0 上层和下层的九网格邻域, \mathbf{A}_{ij}^2 表示网格 A_{ij}^0 本层的九网格邻域; $A_{ij}^{mnk} (m, n, k \in \{1, 2, 3\})$ 表示网格层 A_{ij}^m 中的 $3 \times 3 = 9$ 个网格的冲突标识,网格 A_{ij}^{222} 与 A_{ij}^0 是代表同一个网格。定义某个网格中存在其他航空器时,则 $A_{ij}^{mnk} = 1$,其中 $m, n, k \in \{1, 2, 3\}$ 。那么当矩阵 $\mathbf{A}_{ij} = [\mathbf{A}_{ij}^1 \quad \mathbf{A}_{ij}^2 \quad \mathbf{A}_{ij}^3]$ 中任意元素为1时则表明可能存在飞行冲突,如果

$\sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \sum_{k=1}^3 A_{ij}^{mnk}$ 不为零,则说明可能存在潜在的冲突,需要进行更精细的冲突识别;

[0060] 对存在潜在冲突的航空器进行进一步检测,步骤4中得到的预测的航空器4D航迹

具体计算在某一时刻两个航空器之间的垂直距离和水平距离,,通过与最小间隔的比较得到相互间存在飞行冲突的航班。本方法中根据空管运行规则,垂直方向最小间隔设置为300米,水平方向最小间隔设置为5海里,当垂直距离和水平距离同时低于最小间隔时判定为飞行冲突。

[0061] 步骤6:对相互间有冲突的航班进行动态分组,即将相互之间存在冲突的航班归纳到同一个组中。动态分组的具体分组步骤:首先将全体航班集合F中的某一个航班分在第一组,记为group₁,此时如果集合F中剩余航班与组group₁中航班有冲突,则将集合F中的冲突航班移到组group₁中,当集合F中的航班都不与组group₁中航班冲突时,则对集合F中的剩余航班重复上述的分组过程,生成航班分组group₂,以此类推,直到集合F为空集。最终分组满足的规则如下:

$$[0062] \quad \forall i \neq j, i, j \in F, \begin{cases} \forall F_k^i \in group_k, \exists F_k^j \in group_k \Rightarrow C_{ij} = 1 \\ \forall F_k^i \in group_k, \forall F_k^j \in group_l \Rightarrow C_{ij} = 0 \end{cases}$$

[0063] 其中F为所有航班的集合,group_k为第k个航班分组, F_k^i 和 F_k^j 分别group_k组中第i和第j个航班, C_{ij} 为冲突标识,当 $C_{ij}=1$ 表示航班i和j存在冲突, $C_{ij}=0$ 表示航班i和j无冲突。分组的

[0064] 步骤7:针对每组航班,通过调整各航班的初始放行时刻和飞行高度来避免冲突,通过协同优化各分组航班获得多航空器无冲突4D航迹;冲突解脱过程中优先调整航班的初始放行时间;当航班延误(调整后的放行时刻与初始放行时刻之差)超过20分钟时,考虑调整放行时间和飞行高度相结合的方式。放行时间和飞行高度的最小调整步长为1分钟和600米(遵循“东单西双”的高度层使用规则)。图2从整体上描述了基于动态分组策略的协同无冲突航迹规划流程。

[0065] 步骤8:重复步骤5~步骤7,直至不存在有飞行冲突的航班,或潜在冲突的航班数达到可接受的水平,具体可根据实际运行需求和航班量规模进行综合考虑。

[0066] 本发明提供了一种面向四维航迹运行的预战术阶段间隔管理方法,通过历史数据提取了飞行计划中没有包含的管制运行规则相关信息,同时轨迹计算复杂度相对较低,可以支撑基于航迹的空管流量管理和自动化系统研制,支持预战术阶段航班无冲突飞行轨迹的生成。

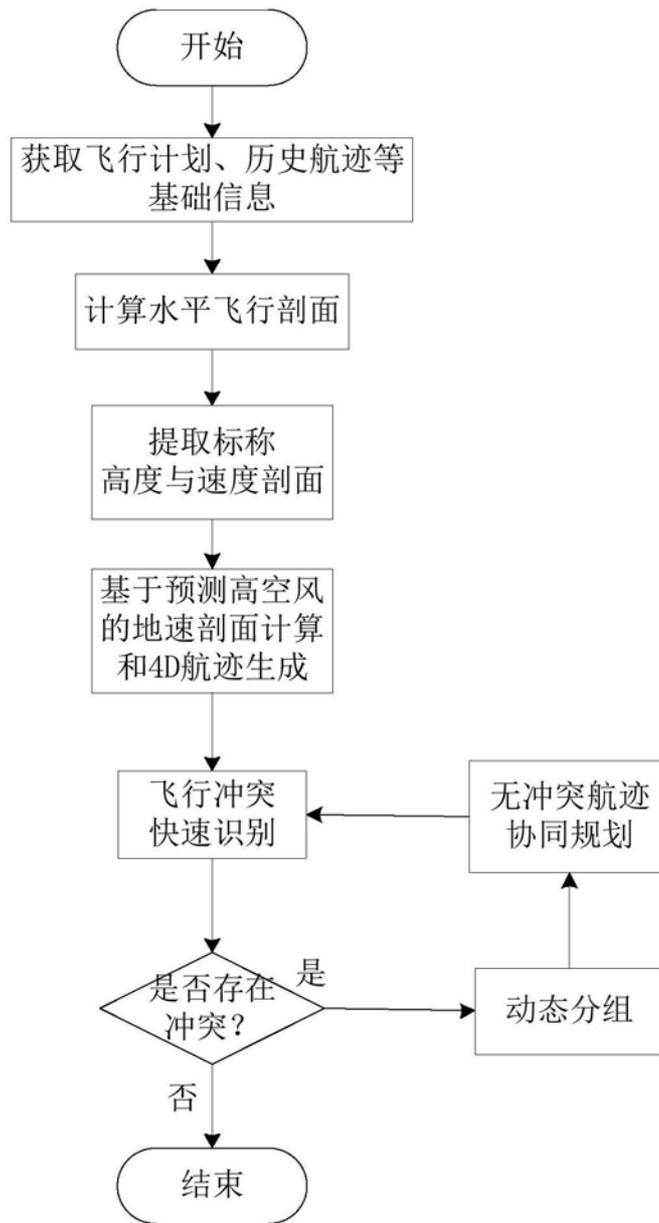


图1

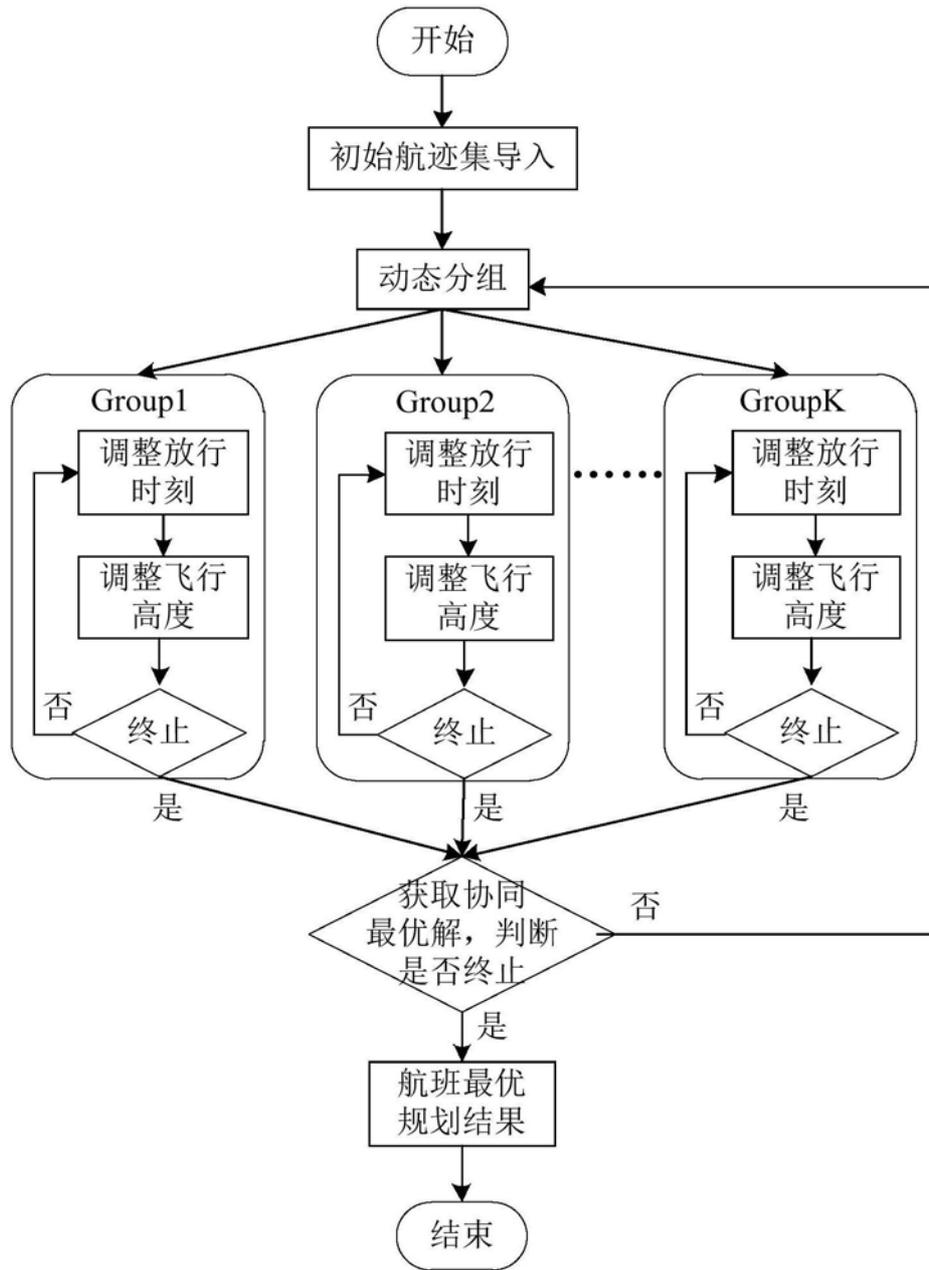


图2