

doi: 10.7690/bgzdh.2014.12.009

## 一种空中编队空间协同冲突检测方法

陈榕, 陈邓安, 韩玉龙

(海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对空中编队进攻作战过程中出现的飞行冲突检测问题, 提出一种基于三维 Delaunay 三角剖分模型的三维飞行冲突检测方法。利用三维 Delaunay 三角剖分模型优良的空间位置描述能力, 建立需检测编组矩阵和相邻编组矩阵, 通过制定飞行间隔标准及冲突判断, 对飞行中的编组进行冲突检测, 并进行案例分析。分析结果表明: 该方法避免了不必要的检测, 并为下一步冲突消解和编队指挥控制提供了辅助信息。

**关键词:** 空中编队; 飞行冲突检测; 相邻矩阵; 需检测矩阵

**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

## A Conflict Detection Method for Air Formation Space Coordination

Chen Rong, Chen Deng'an, Han Yulong

(Department of Command, Navy Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to solve the flight conflict problem of air formation in the progress of air offensive operation, the three-dimensional flight conflict detection method is put forward. It bases on the three-dimensional Delaunay triangulation model, which has excellent position description ability. The untested matrix and adjacent matrix of groups is built based on the Delaunay triangulation model of groups. Through make flight separation standard and conflict judgment, collision detection the groups in the progress of flying, and carries on the case analysis. Analyze result shows that the method can avoid the unnecessary detection, and the assistant information for further conflict treatment and air formation control is provided.

**Keywords:** air formation; flight conflict detection; adjacent matrix; untested matrix

### 0 引言

在作战实施过程中, 及时准确控制部队的作战行动十分重要<sup>[1]</sup>。协调空中编队不同编组之间的飞行冲突, 是作战控制的重要任务之一。但在目标地域(海域)上空, 不同编组之间的活动空间相互交织、重叠或邻近的情况难以避免, 严重影响编队的安全和协同作战能力的发挥; 因此, 及时地发现冲突, 提出告警, 为空中编队飞行的协调、控制提供辅助信息, 是当前迫切需要研究的重要课题。基于此, 笔者利用三维 Delaunay 三角剖分模型良好的空间数据表达能力, 提出一种新的三维飞行冲突检测方法, 避免不必要的检测, 并为飞行冲突的消解和空中编队的指挥控制提供辅助信息。

### 1 三维 Delaunay 三角剖分模型

目前, 三维 Delaunay 三角剖分在计算几何学、地理信息系统、计算机图形学、计算流体力学等领域得到了广泛的应用, 成为描述空间离散点之间相互关系最好、最简单的数据模型之一<sup>[2-5]</sup>。笔者根据二维 Delaunay 三角剖分的定义<sup>[6]</sup>, 给出三维 Delaunay 三角剖分的定义。

**定义 1** 三维单纯形: 三维欧氏空间中的 4 个顶点构成的凸壳称为三维单纯形, 亦称四面体。

**定义 2** 三维空间的三角剖分: 给定三维空间中的  $n$  个离散点集合  $PA$ , 其三角剖分  $TE^3$  是  $M$  个四面体的集合, 即

$$TE^3 = \{TE_1^3, TE_2^3, \dots, TE_M^3\} \quad (1)$$

且  $TE^3$  具有以下性质:

- 1)  $TE^3$  的顶点集为  $PA$ ;
- 2)  $PA$  的凸壳

$$CH(PA) = \bigcup TE_i^3 \quad (2)$$

3)  $TE^3$  中任意 2 个四面体的交集, 或者为空集, 或者为  $PA$  中的点, 或者为以  $PA$  中 2 点为端点的直线段, 或者为以  $PA$  中 3 点为端点的三角形。

**定义 3** 三维 Delaunay 三角剖分: 三维空间的三角剖分中, 若每个  $TE_i^3$  的外接球内都不包含  $PA$  中的任意其他点, 则称该三角剖分为三维 Delaunay 三角剖分, 且这种剖分是唯一的。

笔者将 1 个空中编组(1 架或多架飞机)作为一个整体研究对象, 而不关注编组内部飞机之间的飞行冲突(1 个编组通常保持特定的队形<sup>[7]</sup>)。一般情

收稿日期: 2014-07-04; 修回日期: 2014-08-29

作者简介: 陈榕(1984—), 男, 江西人, 博士, 讲师, 从事海军兵种战术研究。

况下,可用  $F_n(X,Y,Z,v,Cou)$  表示编号为  $n$  的编组飞行状态,其中:  $(X,Y,Z)$  表示编组的三维坐标;  $v$  表示飞行速度;  $Cou$  表示航向。将活动空域可能交叉、重叠的  $n$  个编组,看作三维空间  $n$  个离散的点,则可运用三维 Delaunay 三角剖分建立  $n$  个编组的空间关系数据模型。 $n$  个编组的三维 Delaunay 三角剖分模型可由下式所示的矩阵表示:

$$Tes = (tes)_{numtes \times 4} \quad (3)$$

矩阵  $Tes$  中的每一行由 4 个互不相同的编组编号组成,代表 1 个四面体,  $numtes$  为剖分得到的四面体个数,某个编组可能出现在  $Tes$  不同的行中。

借助三维 Delaunay 三角剖分模型  $Tes$ , 便能够便捷地得到某编组所有邻近编组的信息。因此,三维 Delaunay 三角剖分模型非常适于编组飞行冲突的检测,并可为飞行冲突的消解和编队控制提供辅助信息。

## 2 飞行间隔标准及冲突判断

### 2.1 飞行间隔标准

不论在民航领域还是军航领域,飞行器之间都必须保持一定的间隔<sup>[8]</sup>。飞行间隔标准是编组之间应当保持的最低飞行安全间隔。飞行间隔标准分为横向间隔标准、纵向间隔标准以及垂直间隔标准。根据相关标准和规定,不同航迹、不同高度、不同速度、不同空域的间隔标准各不相同。

编组飞行冲突存在于空中进攻作战的全过程中,特别是在接敌、突防以及突击阶段,编组之间的飞行冲突最为复杂、激烈和多见。因此,笔者主要研究出航之后、返航之前的编组飞行冲突检测。由于该过程中,编组活动高度和指示空速一般在一定范围之内,为便于后续研究,将编组飞行的间隔标准统一规定如下:

- 1) 同航迹、同高度,纵向间隔为  $X_A$ ;
- 2) 不同航迹、同高度,横向间隔为  $X_B$ ;
- 3) 不同高度,垂直间隔为  $X_C$ 。

### 2.2 飞行冲突判断

定义 4 飞行冲突:若飞行过程中,空中编组间的实际间隔(包括纵向间隔、横向间隔、垂直间隔)小于规定的间隔标准,则称编组间存在飞行冲突。

由编组飞行间隔和飞行冲突定义可知,编组飞行冲突类型主要有以下几类:

- 1) A 型冲突:同航迹、同高度飞行的编组之间

的纵向间隔小于纵向间隔标准;

- 2) B 型冲突:同高度、不同航迹飞行的编组之间的横向间隔小于横向间隔标准;

- 3) C 型冲突:不同高度飞行的编组之间的垂直间隔小于垂直间隔标准。

## 3 飞行冲突检测

定义 5 飞行冲突检测:对飞行中的编组实际间隔(纵向间隔、横向间隔、垂直间隔)进行检测,判断其是否小于间隔标准的过程,称为编组飞行冲突检测。

编组飞行检测的实质是检测编组之间的相对位置关系是否符合相应的要求。 $n$  个编组之间不存在飞行冲突的充要条件是任意 2 个编组之间不存在飞行冲突,而  $n$  个编组可以组合成  $n \times (n-1)/2$  对编组。传统的检测方法是检测所有  $n \times (n-1)/2$  对编组之间的冲突情况。因此,其需要检测的次数为

$$C_n^2 = n \times (n-1)/2 \quad (4)$$

而实际情况中,那些不相邻的编组之间飞行冲突无需检测。

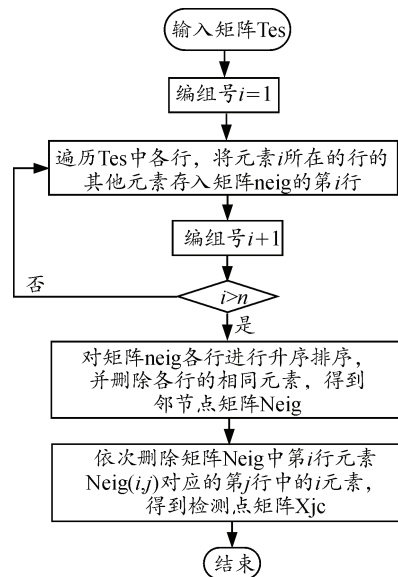


图 1 相邻编组矩阵和需检测编组矩阵产生流程

由定义 3 可知,任一编组仅跟矩阵  $Tes$  中该编组所在的行中其他编组相邻。换言之,判断某编组与其他编组的冲突时,只需检测该编组与所在的行中其他编组的冲突情况。可以采取如图 1 所示方法得到相邻编组矩阵  $Neig$  和需检测编组矩阵  $Xjc$ 。其中,相邻编组矩阵  $Neig$  的第  $i$  行元素表示与编组  $i$  相邻的编组;需检测编组矩阵  $Xjc$  的第  $i$  行元素表示需与编组  $i$  进行冲突检测的编组。得到矩阵  $Xjc$  之

后，只需依次检测第  $i$  行中的编组与编组  $i$  的实际间隔是否小于相关间隔标准即可。

根据飞行冲突类型和需检测编组矩阵  $X_{jc}$ ，提出如图 2 所示的检测方法。

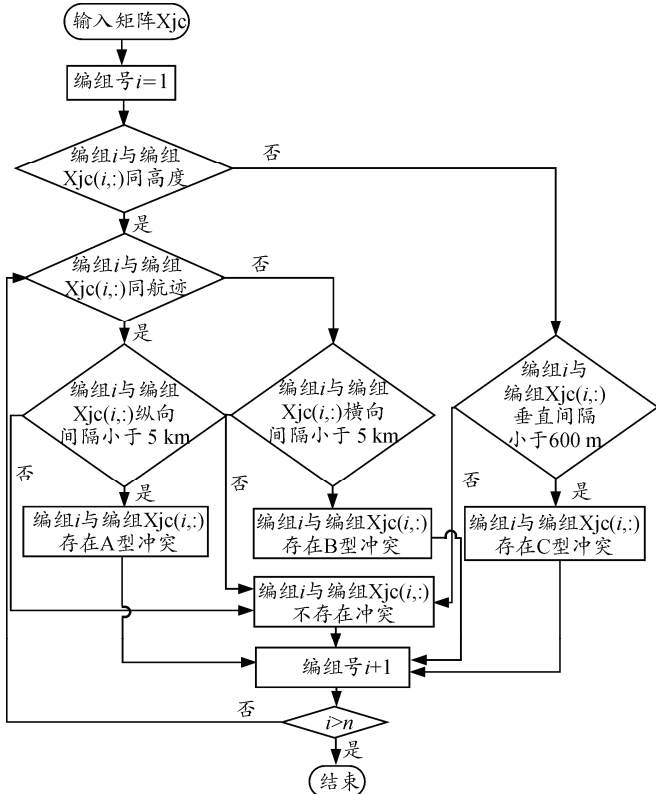


图 2 编组飞行冲突检测方法

### 4 案例分析

假定以目标为坐标原点，我 6 个担负不同任务的空中编组（编号分别为 1-6）在目标附近空域活动，某时刻的坐标依次为（坐标：km，速度：km/h，航向： $^{\circ}$ ）：(50,45,6,854,45)，(51,48,3,804,44)，(48,45,3,824,110)，(43,48,3,843,108)，(49,53,6,787,90)，(52,53,6,838,110)。建立其三维 Delaunay 三角剖分模型如图 3 所示。

图 3 中，共有 4 个四面体，可由式 (5) 表示。

$$T_{es} = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 4 \\ 2 & 5 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 5 & 6 \\ 2 & 1 & 5 & 3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

相邻编组矩阵

$$Neig = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 4 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 5 & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 6 \\ 1 & 2 & 5 & 6 & 6 \end{pmatrix} \quad (6)$$

需检测编组矩阵

$$X_{jc} = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 3 & 4 & 5 & 6 \\ 4 & 5 \\ 5 \\ 6 \end{pmatrix} \quad (7)$$

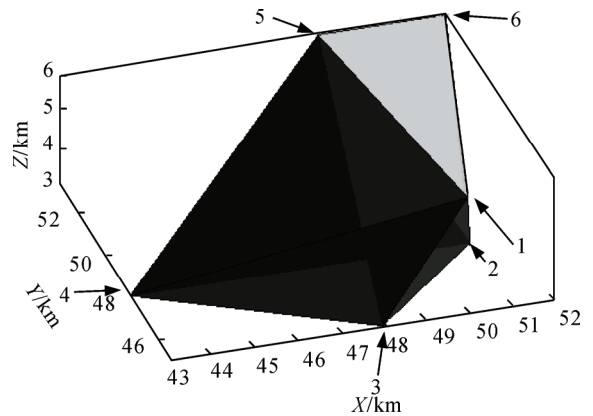


图 3 6 编组三维 Delaunay 剖分

那么，根据图 2 所示的检测方法即可对飞行冲突进行检测，此处不赘述。由式 (7) 可知共需检测  $5+4+2+1+1=13$  次，比传统方法的  $6 \times 5 / 2 = 15$  次有所减少。且由式 (6) 可全面掌握编组相邻情况信息。

### 5 结束语

由以上研究可知：利用三维 Delaunay 三角剖分模型检测飞行冲突不但可避免不相邻编组之间的检测，而且还能得到全面的编组相邻信息，既为编组飞行冲突的检测节约了宝贵的时间，又为下一步冲突消解和空中编队指挥控制提供了辅助决策信息。

### 参考文献：

- [1] 徐洗. 空军作战运筹[M]. 北京：空军指挥学院出版社，2002：28-32.
- [2] 周培德. 计算几何——算法分析与设计[M]. 北京：清华大学出版社，1999：1-5.
- [3] 陈军. Voronoi 动态空间数据模型[M]. 北京：测绘出版社，2002：3-8.
- [4] 周长发，译. 计算机图形学几何工具算法详解[M]. 北京：电子工业出版社，2005：2-4.
- [5] 刘岩，关振群，张洪武，等. 面向大规模科学计算的三维 Delaunay 快速插点算法[J]. 中国科学：物理学 力学 天文学，2012，42(2)：192-198.
- [6] 陈定造. 空间散乱点集 Delaunay 三角剖分的算法优化及实现[D]. 广州：广东工业大学，2008.
- [7] 军事科学院. 中国人民解放军军语[S]. 北京：军事科学出版社，2011.
- [8] 国务院、中央军委空中交通管制委员会. 飞行间隔规定[S]. 2002：5-6.