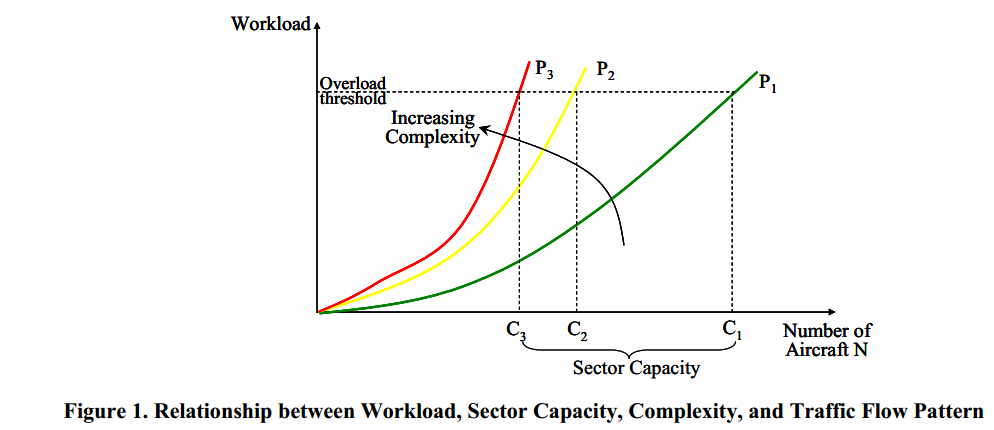
复杂度

1 引言

2013年，我国民航行业完成运输总周转量671.72吨公里，比上年增加10.1%，我国航空运输平均增长速度高出世界平均水平两倍多。民航业作为朝阳行业正在经历着快速发展。由于空中交通流量增长较快，出现了世界范围内空域拥挤，在机场、终端区以及航路的交叉点都不可避免地频繁出现飞行冲突，形成了空中交通网络的瓶颈，空中交通处在超负荷的状态，结果造成大量的航班延误。欧美航空业发达的国家和地区为解决航班延误问题，采取了一系列政策和措施。在政策上，积极开放民用可航区域；在措施上，都建立了非常高效的空中交通流量管理系统，这不仅对空中流量的控制管理起到了重要作用，而且大大提高了空域利用率，减小延误，提高飞行安全水平。空中交通流量管理系统（ATFM）的作用是平衡交通量需求与可利用的空域，来确保安全快速的交通流通过扇区。为了达到这一目的，需要同时预测交通需求量和空域容量。然而，空域容量很难评估和预测。扇区实际容量与扇区内交通流复杂度，以及是否有危险天气存在有关。在今天的美国空域系统中使用的增强交通流量管理系统（ETMS）提供了扇区拥挤预警功能，使用了十五分钟管制扇区可以安全有效处理的容量作为扇区拥挤告警指标（MAP，扇区告警门限）。MAP是一个运行触发信号，在告警的情况下即15分钟管制扇区流量达到或超过MAP时，需要流量管理者根据经验和对交通态势的认知来启动流量管理措施，改善空中交通管理系统效率。对于一个扇区来说，MAP值是固定不变的，而使用固定值作为预警触发信号有着运行上的限制。首先，MAP值不能够对扇区内瞬间航班架次进行绝对限制，同时，MAP值不能够随着交通流复杂度和危险天气的存在而变化。扇区容量不是管制员负荷极限值的唯一指标，因为管制员负荷不仅由航空器架次决定，**还有交通复杂度。**空域复杂度是当前空管领域的研究热点问题，但尚未形成成熟的理论，主要是因为空域复杂度并不是一维的概念，它是多层次、动态的，至少包含两方面复杂度，结构复杂度和交通复杂度。结构复杂度主要是由扇区物理结构引起的，例如可用空域，航路设置，导航设施等。交通复杂度由扇区内交通流引起，包括飞机数量，速度，航向等。图1给出了交通流模式、交通复杂度、管制员负荷和扇区容量的关系。在给定交通流的情况下（例如P1），随着扇区内航空器架次的增加，管制员负荷也单调增加。在给定扇区内航空器架次时，管制员负荷是交通复杂度的函数，不同的交通流模式代表了不同的交通复杂度。当管制员负荷达到极限值时，就得到了扇区容量。如图中所示，给定管制员负荷极限值时，对于不同的交通流模式扇区容量是不同的。因为交通流P3比交通流P2更为复杂，所以相应的C3小于C1。（Predicting Sector Capacity under Severe Weather Impact for Traffic Flow Management）也就是说，交通复杂度越高，达到管制员负荷极限值时，扇区容量越小。 航空运输业的高速发展对空中交通管理系统提出了更高要求，目前基于航空器架次的方法很难映射出交通态势、扇区结构及管制员负荷之间复杂关系，大多数研究机构建议采用更为合理的空域复杂度指标评估空域系统服务能力。描述空域复杂度是目前热点研究问题，最具代表性的研究方向包括动态密度、复杂系统建模、基于交通内禀属性、交通流扰动分析。

由动态密度的研究我们得出，在低交通密度下，管制员工作负荷与航空器架次具有很强的相关性。但因为管制员负荷难以测度和采样数据的不确定性，在空域容量评估与预测中，考虑管制员负荷因素一直是个难题。而在未来预计交通运输需求剧增的背景下，需要更为合适的空域复杂度指标评估空域容量，为了满足扇区高密度的交通量，ATFM需要全自动冲突解脱算法作为决策支持工具。本文主要研究目的是通过自动冲突解脱算法定义空域复杂度，这一方法实时预测一定空域结构、交通需求下空域复杂度，可以作为ATFM预测和决策工具。

2 飞行冲突探测与解脱

2.1 安全间隔与航空器保护区间隔

根据中国民用航空空中交通管理规则，雷达最低水平间隔标准应当按照如下规定：进近管制不得小于6千米，区域管制不得小于10千米。因为本文研究航路扇区同高度层，则采用10千米（5海里）水平安全间隔，根据10千米（5海里）间隔标准，对航空器建立圆形保护区，保护区半径为5千米（2.5海里），即某一高度层以航空器为圆心，水平安全间隔为直径的圆的范围为航空器保护区，如果一架航空器进入其它航空器的保护区，认为存在潜在飞行冲突，需要进行冲突解脱。

2.2 飞行冲突探测

目前扇区使用的空域受限，民航飞机只能沿航路飞行且使用的高度层有限，不可避免的使用同高度层，根据我国高度层东单西双的配备原则，对于同一高度层主要存在的冲突是同向追赶冲突和汇聚飞行冲突，主要采用改变速度调配间隔，避免冲突。根据实际情况，本文主要研究同高度层交叉航线上飞行冲突与解脱，采用相对运动方法进行飞行冲突探测，改变速度解决冲突。对飞行在同一高度层交叉航线上的两飞机而言，假设：（1）飞机在扇区飞行中，被模拟成一个有方向的质点，飞行航向即为运动方向；（2）飞机沿航线飞行，不考虑沿航迹误差、垂直航迹误差及风向、风速等随机因素；（3）飞机之间为避免潜在冲突，提前改变速度大小进行冲突解脱，不改变航向，且飞机调速过程瞬间完成。

两架飞机在同高度层飞行，正东方向为x轴，正北方向为y轴，建立直角坐标系。在某一时刻t，设飞机Ai的初始位置为(xi,yi)，Ai速度为***Vi***，飞机Aj的初始位置为(xj,yj), Aj速度为***Vj***。相对运动方法如下。图1是飞机运动矢量关系和冲突探测示意图。设水平安全间隔s=10km，如图1所示以飞机为圆心，以s为直径的圆表示飞机保护区。根据相对运动物理知识，将飞机Ai看作是参照物，即Ai静止，则飞机Aj相对于飞机Ai的相对速度是***VR***（***VR***=***Vj***-***Vi***）。作两条平行于矢量***VR***且与飞机Aj的保护区圆相切的直线，与x轴夹角为θ，即相对速度***VR***与x轴夹角为θ，则在***VR***的方向上形成一块分割域，称为飞机Aj相对Ai运动的影子（shadow）。飞机Aj以***VR***在影子里移动，飞机Ai静止，可得：若飞机Ai的保护区与Aj的影子有交叉，则必然发生冲突，反之亦然。在图2中给出了飞机Ai与Aj没有冲突的临界条件，设飞机Aj的影子相切于飞机保护区后方时影子与x轴夹角为α，若Aj的影子与x轴夹角θ大于α，即Aj的影子不与的Aj保护区交叉，则两飞机不会发生冲突。同理，设飞机Aj的影子相切于飞机保护区前方时影子与x轴夹角为β，若不发生冲突，影子与x轴夹角θ须小于β。故没有冲突的基本条件为：θ≥α或θ≤β。已知两飞机Ai和Aj之间的距离D，相对夹角为γ，两飞机连线与水平轴夹角设为λ，由图2可得：



在同高度层飞行时，若首先探测到飞机与其他飞机之间的距离逐渐变小，则可以根据上述条件判断飞机之间是否存在冲突。设已知飞行基本参数[Xi(0),Yi(0),Vi(0),Фi(0)],依次表示为初始横、纵坐标，初始速度及航向角，则任意时刻两飞机坐标可表示为Ai(Xi(t),Yi(t)),Aj(Xj(t),Yj(t)),其中：

相对速度VR与水平轴夹角θ，因为为避免冲突只改变速度大小，航向不变，所以：

结合上述判断，若两飞机之间无冲突，需满足：



2.3飞行冲突解脱

如图几所示，CB、CF、BF分别表示Vi、Vj和VR，过B点作飞机Aj的影子与飞机Ai的保护区切线的平行线，分别交直线BF与点D和点E。当改变飞机Aj的速度大小来避免冲突时，θ角度必将发生变化。若飞机Aj计划减小速度时，则Vj大小必须小于BD，才能满足θ≥α；若飞机Aj计划增大速度时，则Vj大小必须大于BE，才能满足θ≤β，说明冲突已经解决。设△V为Vj速度改变量，假设调速瞬间完成，则调速后θij为：

飞行冲突调配后，需满足：

飞机在扇区内飞行有一定的调速范围Vmin≤V+△V≤Vmax，结合（几），可以求解出飞机调速区间：aj≤△Vj≤bj，j=1，2，3,…,n。为避免冲突，且满足旅客安全、舒适度高的要求，选取目标函数为使速度改变量最小，则：

3 空域复杂度



3.1 建立扇区-航班流

对扇区空域的扰动分析首先需要建立一个扇区-航班流模型，扇区内不存在航空器时，空域复杂度是无法体现的，对空中交通管理系统的扰动分析是以航班流进入扇区的行为为基础的。为接近实际本模型中将扇区形状设置为凸多边形，且只考虑飞机的水平运动，本文主要研究同高度层交叉航路上飞行冲突与解脱，在凸多边形扇区中设置交叉航路。扇区边界点设置需要手动输入参数，如图。

在区域管制扇区实际运行中，飞机到达扇区的时间点是随机的，所以本文通过随机产生满足扇区放行间隔标准的航班流。飞机从扇区边界点进入扇区，则飞机进入扇区的横纵坐标已知，进入扇区后固定航路飞行，穿越扇区过程中航向角始终不变，则描述进入航空器的初始状态需要三个参数，进入航向角，进入速度，进入时刻。飞机速度单位为海里/小时，速度大小根据实际情况设定，常用值为360海里/小时～504海里/小时，设相同航路上飞机流速度大小相同，本例中设置一个小时内共有10架飞机，每条航路五架飞机，生成时刻随机的航班流。

3.2计算空域复杂度

飞机在固定高度层飞行，假设某一时刻扇区内共有n架飞机，分别为A1，A2，…，Ai，…，Aj，…，An，对其中的任意两架飞机Ai和Aj采用相对运动方法进行冲突探测，共判断次，就能判断出该扇区内所有飞机冲突情况，对存在飞行冲突的飞机Ai和Aj进行调速，进而解决这一时刻扇区内的飞行冲突，假设所有冲突解脱瞬时完成，航路飞行只可以改变速度避免冲突。本文认为在交叉航路扇区，进入飞机流的潜在冲突是造成空域复杂度的主要原因，管制员主要工作是调配飞机间隔，判断潜在冲突，调配冲突，仅用冲突发生次数来评估复杂度显然是不合适的，冲突调配的难度也是复杂度的一部分。那么在某一时刻扇区内发生冲突次数越多，调配的速度越大，对应的空域复杂度越高。本文用相对运动方法进行冲突判断和解脱，根据这一方法，定义复杂度为某一时刻为避免冲突所有飞机速度改变之和，则：

根据文献[航路飞行冲突避让方法研究-胡光华]，当两架飞机之间距离D大于6倍水平安全间隔s时，调速法可以有效进行冲突解脱。算法设计及程序实现使用MATLAB开发环境编写，程序主要分为随机航班流生成、飞行冲突探测与解脱和复杂度结果输出三大模块，整体流程如图。



3.3 复杂度结果输出

