

基于流畅度的空中交通流量管理分析

李 俊, 唐卫贞, 杨明明

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:中国的空中交通流量管理业务由民用航空管理局空中交通管理局运行管理中心负责。当全国空中交通流量超过容量即临界值、预计管制员工作量过大时,运行管理中心对空中交通实行管制和限制,以防止流量超过容量的现象,但运行管理中心对全国流量进行管理控制的过程呈现出诸多不便。为此,对空中交通管制员在处理实际交通时的行为进行测量和分析,同时记录实际空中交通流量,并计算空中交通流畅度,最终确定交通流畅度和管制员工作负荷之间的关系。由此可见,在空中交通流量管理中,可以使用交通流畅度来为空中交通流量管理单位提供决策支持。

关键词:空中交通流量管理;流畅度;空中交通管制员;工作负荷;交通流

中图分类号:V355 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)07-0205-05

根据中国民航空管流量管理运行程序和中国民航空管流量管理运行规则,全国流量管理单位包括全国级、地区级和执行级。中国民航空管流量管理实施路线图明确了中国民航空管流量管理运行体系为“两级决策、一级执行”。中国民用航空局空中交通管理局运行管理中心作为全国级流量管理中心,以集中和协调的方式管理中国空域的空中交通流量,致力于在流量最大化的前提下尽可能减小空中交通延误。运行管理中心的决策是基于估计的交通量、交通负荷、天气状况预测等,在空管系统内部形成以空管局运行管理中心为中枢,以地区级流量管理室为支撑,以塔台、进近、区调执行级流量管理席位为延伸的覆盖全空管系统的垂直流量管理运行体系。在空管与航空公司、机场之间形成覆盖全民航系统的横向流量管理协同联动体系^[1]。预计繁忙的交通会造成管制员过重的工作负荷,对空中交通实施一些规定和限制可以防止这种情况。在寻找描述空中交通态势的客观通用指标的背景,最常使用的概念是交通复杂性^[2]。在计算交通复杂性时,扇区中的飞机数量、必须解决的冲突情况的数量和类型、航向和速度的变化仅仅是考虑的一些因素。关于这一主题的研究很多^[3-7]。然而,由

于考虑了许多复杂的问题,交通复杂性在实践中很难计算。本文对空中交通管制员在处理实际交通时的行为进行测量和分析,同时记录实际空中交通流量,并计算确定空中交通流畅度,确定交通流畅度和管制员工作负荷之间的关系。最后建议使用交通流畅度的概念作为触发流量管理决策的指标。

1 空中交通流畅度

交通流畅度的一般概念是基于这样的描述,即根据事先协议的计划执行的飞机,没有任何额外的机动飞行(顺畅交通),比需要计划和监视大量机动(非顺畅交通)的交通更容易服务。交通流畅度计算方法基于管制扇区的模型,即一组活动点和非活动点,其中交通由以下集合表示:

- 1) 飞行计划。包含有关预定航班的信息。
- 2) 当前飞行计划。根据空中交通管制员给出的许可进行变更的飞行计划。
- 3) 有利飞行计划。飞行参数采用安全值且从飞行经济角度来看是有益的飞行计划。

值得一提的是,这些集合并不相互排斥,因为有可能共存^[8]。例如,飞机正根据与有利飞行计划相同的当前飞行计划运行。这种方法允许通过将飞行计划与其当前和有利的同等计划进行比较,以

收稿日期:2023-01-29

基金项目:民航局 2021 年安全能力建设项目(0242126)。

作者简介:李俊(1995—),男(壮族),广西南宁人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为空中交通安全管理;唐卫贞(1977—),男,山东泰安人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,教授,硕士研究生导师,研究方向为空中交通安全管理;杨明明(1996—),男,河南信阳人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为空中交通安全管理。

数字方式定义该领域的空中交通流畅度，它是根据距离、飞行高度和飞行时间确定的干扰数值得出的，见表 1。

对于第 j 架飞机，从飞行计划和当前飞行计划获得的点之间的距离标记 d_j ，从飞行计划和有利飞行计划获得的点之间的距离标记为 e_j ，从有利飞行计划和当前飞行计划获得的点之间的距离标记为 f_j 。根据扇形区域模型中指定的活动点和非活动点的网格密度定义上述变量，则飞机流畅度的计算包括在分析的每一步中比较和组合变量 d_j 、 e_j 和 f_j 的值。表 2 给出了将评估值合并为流畅度值的方法。

表 1 飞行参数干扰数值评测表

参数	取值			
距离/n mile	0~4	5~9	10~19	>20
飞行高度层/ft	0~9	10~19	20~29	>30
时间/min	0~0.9	1~1.9	2~2.9	>3
干扰数值	0	1	2	3

注：1 n mile=1.852 km；1 ft=30.48 cm。

表 2 评估值与空中交通流畅度的转换表

d_j	0	0	1	1	1	1	2	0	2	2
e_j	0	1	1	0	2	1	1	2	2	0
f_j	0	1	0	1	1	2	1	2	0	2
流畅度 $s_j/\%$	100	85	80	75	55	50	45	25	20	15

如果 d_j 、 e_j 或 f_j 参数中的任何一个达到 3 或更大的值，则流畅度等于 0。表 2 给出的规则允许确定第 j 架飞机 $s_j(d_j, e_j, f_j, t_i)$ 在每一步测量点 t_i 的流畅度。该动作对所考虑扇区内的所有飞机重复进行。将每一步接收到的结果进行求和并除以飞机总数 j ，并给出给定步骤 t_i 中的平均流畅度的公式：

$$S(t_i) = \frac{\sum_{j=1}^J s_j(d_j, e_j, f_j, t_i)}{J}$$

(1)

式中： J 为纳入计算的飞机总数。

接下来，将所有步骤的流畅度值相加，并除以飞机数量。最终，在所研究的时间段内，该区段中的交通流畅度的公式为

$$F = \frac{\sum_{i=1}^I S(t_i)}{I}$$

(2)

式中： F 为空域的平均空中交通流畅度； I 为空域内扇区总数。

这种方法允许考虑所有重要参数：飞行方向、飞行高度和通过时间。步长(测量点)的选择取决于所用扇形模型中有效和无效点网格的粒度。

2 空中交通管制扇区容量

管制扇区具有多面体的形状，具有定义的垂直和水平边界，其中飞机飞行操作由空中交通管制员监视。其容量被定义为在某一时间可以安全进入该区域的飞机数量。管制部门的能力取决于许多因素，如其内部结构、气象条件、团队资源、管理组织等^[9]。一般而言，空域容量评估的对象有机场容量、终端区容量和高空管制空域容量。空域容量评估的常用方法有基于数学计算模型的容量评估、基于计算机仿真系统的容量评估和基于历史统计数据的容量评估^[10]。国际上，空中交通管理发展迅速且较为完善的欧洲，经常使用 CAPAN(空中交通管制员容量分析工具)方法来估计容量，本质上属于基于计算机仿真系统的容量评估。它是基于对给定空中交通强度的空中交通管制员工作负荷的模拟计算^[11]。将工作负荷定义为用于所有管制员任务的总时间，作为该区域的实际容量，使用与可接受的工作负荷阈值相对应的飞机数量(最常用的是 70%，即每 1 小时 42 分钟)。本文中，借鉴 CAPAN 方法的基本思想来分析管制员的工作负荷，该方法已经通过将工作量以及交通量与其流畅度相关联而进行了修改。

3 管制员工作负荷对交通量和交通流畅度的依赖性

区域管制中心负责确保飞行航路阶段的安全。管制实行双岗制^[12]：一名管制员担任主班管制员，主要负责提供空中交通管制服务过程中对航空器进行直接的管制，其对应席位称为指挥席；另一名管制员担任助理管制员，负责监听主班管制员发布的指令、许可是否正确，及为主班管制员提供必要的支持和协助，其对应席位称为监控席。管制员监视或指挥其辖区内的飞机是通过无线电陆空通信。为了确保飞机之间配备安全的间隔，机组人员一般按照飞行计划执行航班的飞行^[13]。

3.1 管制员活动的测量

研究过程中分别对同一管制过程中的指挥席及协助席两名管制员进行独立分析。

用于分析管制员工作负荷的数据收集自 G 空管分局的管制雷达监视系统，通过实地考察调研获取。记录与交通协调和管制相关的所有活动来监控实际占用情况，这些观察结果与空管部门的实际交通量有关^[14]。该系统中，交通量由以下两个值表示：

1)交通负荷(TL)。由单位时间内飞入扇区的

飞机数量决定,实际上通常是 1 h 交通负荷(TL60)或 20 min 交通负荷(TL20)。

2)交通密度。由扇区控制下的飞机数量决定,标记为 OCC(占用率,交通密度)。

上述两个值共同描述管制员的工作负荷^[15]。在测量过程中,采集了 48 h 的样本,样本平均划分为1 h 的时间切片,共 48 个切片,其中两个用于本文:①世界协调时 2020 年 7 月 28 日 9:00—10:00;②世界协调时 2020 年 7 月 30 日 23:00—24:00。

确定每小时的管制员工作负荷需要识别基本操作,这些操作构成飞机操纵程序以及与其他部门程序的协调。样本 2 的结果见表 3。

表 3 指挥席管制员基本操作用时

基本操作	发生次数	总时间/s
识别航空器	31	290
雷达移交	31	301
直接航向改变	14	110
协调航向改变	5	53
高度层改变	10	78
减速	1	20
跳过	1	5
改变二次应答机编码	1	10
与副班管制员协调	22	209
电话协调	1	10
雷达连线	149	470
合计	266	1 556

3.2 与交通量和交通流畅度相关的管制员工作负荷

根据所进行的测量,对测量样本进行了指挥席管制员和监控席管制员工作负荷的分析,结果见表 4所示。

实践中经常使用的工作量水平的定性解释是根据欧洲航行安全组织(EuroControl,欧控)得出的,见表 5。

为了实际使用所获得的结果,将管制员的工作负荷与扇区内的交通量进行比较是很重要的。对于接受的测量样本,交通量见表 6。使用 TL60 和 OCC 两个参数来表示交通量。扇区容量和实际通行流量见表 6。

对于这些测试样本,根据式(2)计算交通流畅度。根据这种方法,最大流畅度为 100,最小流畅度为 0。计算结果见表 7。

表 4 指挥席管制员和监控席管制员工作负荷的分析

样本 编号	占用时间/min		工作负荷/%		解释	
	指挥席	监控席	指挥席	监控席	指挥席	监控席
1	23	15	38	25	中等强度	轻强度
2	26	17	43	28	中等强度	轻强度

表 5 EuroControl 对于管制员工作量的解释

工作负荷/%	解释
>70	超负荷
54~69	强负荷
30~53	中等负荷
18~29	轻负荷
0~17	微负荷

表 6 扇区容量及实际通行流量 单位:架

样本 编号	扇区容量		实际通行流量	
	用 TL60 衡量	用 OCC 衡量	用 TL60 衡量	用 OCC 衡量
1	42	14~16	39	7
2	45	12~14	31	7

表 7 平均空中交通流畅度

测试样本	平均空中交通流畅度
1	18.2
2	14.9

4 分析及结论

在介绍空中交通流畅度的概念后,联合分析了交通量、交通流畅度和管制员工作负荷 3 个变量,并评估了空中流畅度的方法对于空中交通流量管理的适用性。不难发现,运行管理中心进行流量管理的依据是:如果流量过大,管制员的工作负荷就会过大,从而采取措施来防止这种情况的发生。实际问题是确定临界交通流量,超过这一临界值就必须采取行动。此外还发现,不论使用交通负荷还是交通密度来衡量,实施空中交通流量管理行动的标准均不确定。表 6 标明了官方认可的两个扇区的容量值。

对于样本 1,如果用 TL60 指标衡量,扇区容量等于 42 架飞机;同样地,如果用 OCC 指标衡量,扇区容量等于 14~16 架飞机。但是对于样本 2,TL60 衡量得出的扇区容量略高,为 45 架飞机,OCC 衡量得出的扇区容量略低,为 12~14 架飞机。这种差异表明,使用交通量来确定触发流量管理的规定阈值可能是不准确的,甚至是困难的。

另一方面,在结果中可以观察到交通流畅度和管制员工作负荷之间存在直观的预期相关性。样本 1 中的流畅度比样本 2 高约 18%。同时,样本 1 中的管制员工作负荷比样本 2 低约 12%。考虑到管制员工作负荷对交通量和交通流畅度具有依赖性,需要进一步研究来确认观察到的定性关系以及确定具体的定量关系,预计需要对 12 h 的运行数据进行记录和分析,但鉴于实际运行难度比观察条件大,加之长时间进入管制科室可能对管制员值勤产生负面影响,当中还应该包括协调分析和最终计算。

空中交通流畅度是一个具有前瞻性的指标,交通流畅度和管制员工作负荷之间亦有明确的数量关系,加之以往有学者提出确定流畅度的计算方法,可用于空中交通管理部门对于飞机流量的运行管理。

基于以上分析,将空域扇区容量和对应空域扇区的空中交通流畅度二者结合,作为评判空中交通拥挤程度的标准,并以此对空中交通管制员的工作提出调整或优化建议较为客观,且从交通流畅度的角度来确定实施流量管理的触发条件,设定流量管理的触发阈值则更为可靠。

5 发展建议与研究前景

5.1 发展建议

引入空中交通流畅度对空中交通流的态势进行定量判断,确是一种较为可行的方法,而实际运行过程中仍需考虑诸如空域扇区容量公布值的变化、空域结构的调整等客观条件^[14],因此提出以下建议:

1) 配备性能良好的硬件设备和软件设备。针对空中交通流畅度概念的阐述和相关过程的运算,发现其对于计算机运算速度和计算机计算精度有一定的要求。对于有关部门而言,掌握空中交通流畅度意味着需要配备性能良好的计算机设备,以避免运作过程中发生的偶然性事件和较大误差事件。

2) 对相关业务人员进行专业培训。空中交通管理涉及气象、设备维护维修、空中交通管制等方向,空中交通流量管理属于空中交通管制员的职责之一,其职责属性与气象、设备维护维修人员有所区别。为保证空中交通管理部门依赖空中交通流畅度对空中交通管理作出决策时有据可依,须对不同方向的业务人员进行差异化补充培训或者专业培训,以保证其对于空中交通流畅度有理性的理解,能利用空中交通流畅度感知空中交通的态势,不致发生误读、误解等。

3) 排除外部因素干扰。空中交通流畅度的计算除了依赖性能良好的硬件和软件设备外,对空域环境的要求颇为严格,如雷暴等恶劣天气下尽管空中交通流畅度高,但实际上管制员也因指挥航空器驾驶员进行天气绕飞而负荷加重,亦反作用于空中交通流畅度,这种耦合称为外部因素干扰,会使得空中交通流畅度的应用不尽客观。

4) 适时进行政策调整。在民用航空业,任何一项新技术或者新应用的引入都需要得到严格的验

证,以证明其排除了偶然性和临时性。行业内外相关部门可以根据技术的验证情况,调整政策以推广其应用,使技术在已被验证有效的情况下更具有普适性。

5.2 研究前景

由于国外空域的性质特点,近年来,基于空中交通流畅度对空中交通流量管理的分析已经受到国外学者的密切关注,这对国内的相关研究具有指导意义,根据现有的问题和未来的研究趋势,可以作出如下展望:

不同于航空器进离场优化及排序等战术流量管理(也称飞行前流量管理)、减少地面等待延误和空中等待延误等实时流量管理(也称动态流量管理),基于空中交通流畅度对空中交通流量管理的实施可以很大程度实现战略流量管理(也称先期流量管理),故将来需要更深入的研究来确定空中交通流畅度和空中交通流量管理的定量关系,以作为空中交通流量管理的一个备份方案。

此外,空中交通流畅度的概念在实验环境下具有一定的信度和效度,但尚未取得有关局方的备案和资质鉴定,不能保证其在真实运行环境下具有鲁棒性,因此这一概念和技术路线在国内普遍适用仍需时日,相应的验证和优化亟待探索。未来,借助新一代空中交通管理的自动化系统和空中交通管理的培训改革,相信这一思路的推广阻力会减小。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 中国民航空管流量管理运行规则[EB/OL]. <http://ats.atmb.net.cn/UploadFiles/20210121163248706.pdf>, 2020-11/2023-01.
- [2] 沈爱华. 基于空中交通复杂度的管制员认知负荷测度[J]. 无线互联科技, 2020, 17(20): 155-156.
- [3] 王红勇, 张加豪, 温瑞英. 空中交通复杂性研究进展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 36-46.
- [4] 霍达, 丛玮, 谢道仪. 基于二阶聚类的空域飞行冲突危险性分级评估[J]. 科技和产业, 2021, 21(6): 264-269.
- [5] 朱承元, 惠雅婷, 王毅鹏. 基于模拟机的空中交通管制复杂度预测模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7790-7796.
- [6] 吴明功, 叶泽龙, 温祥西, 等. 基于复杂网络的空中交通复杂性识别方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(5): 839-850.
- [7] 王霞, 孙石磊. 基于空中交通复杂度的管制员认知负荷测度[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1881-1885.
- [8] 辛峰. 基于知识的空中交通管制决策模型研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2017, 28(2): 35-39.
- [9] 陈飞. 扇区容量影响因素[J]. 科技风, 2013(17): 21.

[10] 宋夏芝,武丁杰,钟进威,等. 空管单元动态容量评估研究综述[J]. 科技和产业,2022,22(10):334-340.

[11] MASCIO P D,CARRARA R,FRASACCO L,et al. Influence of tower air traffic controller workload and airport layout on airport capacity [J]. Journal of Airport Management,2021(4):15.

[12] 李虎,罗军. 基于双岗制的管制员工作负荷评估[J]. 科技和产业,2020,20(12):205-209.

[13] 王梦琦. 从空难角度分析飞行规则及空中交通管制规章发展[J]. 综合运输,2020,42(9):11-15.

[14] 王洁宁,王鹤龙. 基于灰色关联的空管监视系统安全风险研究[J]. 综合运输,2015,37(12):51-56.

[15] Eurocontrol. Airport capacity methodology assessment [EB/OL]. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/nom-apt-acap-acamman-v1-1.pdf>, 2016-11/2023-01.

Analysis of Air Traffic Flow Management Based on Air Traffic Smoothness

LI Jun, TANG Weizhen, YANG Mingming

(College of Air Traffic Management,Civil Aviation Flight University of China,Guanghan 618307,Sichuan,China)

Abstract: China's air traffic flow management business is in the charge of the Operation Management Center of the Air Traffic Management Bureau affiliated by the Civil Aviation Administration of China. When the national air traffic flow exceeds the capacity (the critical value), and the workload of controllers is expected to be too large, the Operation Management Center will control and limit the air traffic to prevent the flow from exceeding the capacity. While the Operation Management Center also presents many inconveniences in the process of managing and controlling the national traffic. Therefore,the behavior of air traffic controllers in dealing with actual traffic is measured and analyzed, the actual air traffic flow is recorded as well,the air traffic smoothness is also calculated, flinally, the relationship between the traffic fluency and the workload of air traffic controllers is determined. It follows that, it can be concluded that in air traffic flow management, air traffic smoothness could be used to provide decision-making support for air traffic flow management units.

Keywords: air traffic flow management;smoothness;air traffic controller;workload;traffic flow