

中图分类号: U8

论文编号: 1028707 10-Z042

工 程 硕 士 学 位 论 文



长沙终端区空域优化的研究

学 号: 0907522

姓 名: 季晓龙

专业、领域: 交通运输工程

研 究 方 向: 空中交通管理系统

指 导 教 师: 韩松臣 教授

南京航空航天大学

研究生院 民航学院

二〇一〇年十二月

中图分类号: U8

论文编号: 102870710-Z042

工 程 硕 士 学 位 论 文



长沙终端区空域优化的研究

学 号: 0907522

姓 名: 季晓龙

专业、领域: 交通运输工程

研究 方 向: 空中交通管理系统

指 导 教 师: 韩松臣 教授

南 京 航 空 航 天 大 学

研究生院 民航学院

二〇一〇年十二月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of civil aviation

Airspace Optimization Research for Changsha Terminal Area

**A Thesis in
Traffic and Transportation Engineering
by**

Ji Xiaolong

Advised by

Prof. Han Songchen

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

December, 2010

承诺书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名： 李晓龙

日 期： 2011.1.4

摘 要

随着长沙黄花机场的扩建，旅客吞吐量的不断增长，长沙黄花机场对空域的需求量以及现有空域结构下的管制员工作负荷越来越大。本文以长沙终端区的空域结构优化为目的，采用线性回归分析方法预测了长沙终端区未来五年的飞行流量，分别得到了终端区各走廊口的流量分布以及高峰小时的流量。研究了长沙终端区运行的主要影响因素（跑道容量和管制员工作负荷），采用统计方法给出了在现有空域结构下未来管制员的工作负荷，得出了负荷值已经超出限制值的结论。最后，根据流量预测结果，依据管制工作负荷对扇区和航线进行调整，提出两套长沙终端区空域规划方案，并验证了新方案的管制员工作负荷相比于现有空域结构下的管制员工作负荷明显降低，且能够满足长沙终端区未来的空中交通流量需求。

关键词：终端区，空域优化，扇区，管制员工作负荷

Abstract

With the expansion of Changsha Huanghua international airport and the increase of passenger throughput, Changsha Huanghua Airport airspace demand on the existing airspace structure and the controller workload is increasing. For the optimization of terminal area airspace structure, flight traffic in Changsha terminal area of the next five years is computed using linear regression method. The flight flow distribution of every gate and rush-hour is provided. The influence factors for terminal area operation were analyzed, including runway capacity and controller workload. The corresponding workload is computed for future traffic demand under current airspace structure. The result indicated that it is bigger than the limit. Finally, according to traffic forecasts, based on workload control to adjust routes on the sector and proposed two Changsha terminal area planning programs, and validate a new program controller workload compared to the control of the existing airspace structure Workload was significantly decreased in Changsha to meet future air traffic terminal area needs.

Key words: Terminal area; airspace optimization; sector; controller workload

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	1
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 国外研究现状	2
1.3.2 国内研究现状	3
1.4 研究内容	4
第二章 长沙空中交通流量预测	6
2.1 长沙终端区的总流量预测	6
2.1.1 长沙终端区本场起降流量预测	6
2.1.2 长沙终端区飞越航班流量预测	12
2.1.3 长沙终端区总流量预测结果	13
2.2 终端区流量分布预测	13
2.2.1 本场起降航班流量分布预测	13
2.2.2 飞越航班的流量分布预测	14
2.2.3 终端区流量分布预测结果	14
2.3 高峰小时流量预测	14
2.4 本章小结	15
第三章 长沙终端空域影响因素分析	16
3.1 终端空域影响因素	16
3.1.1 机场布局	16
3.1.2 航路结构	17
3.1.3 人力资源	18
3.1.4 设备条件	18
3.1.5 用户要求	18
3.1.6 地理	19
3.1.7 噪声限制因素	19
3.2 跑道容量因素分析	19
3.2.1 单跑道容量分析	19
3.2.2 平行双跑道容量分析	22
3.2.3 三条平行跑道容量分析	23
3.2.4 跑道容量分析结果	23
3.3 管制员工作负荷分析	24
3.3.1 管制员工作负荷分析方法	24

3.3.2 管制员工作负荷分析结果	25
3.4 存在的问题	26
3.5 本章小结	26
第四章 空域优化方案	28
4.1 空域优化方案的形成方法	28
4.1.1 宏观方面	28
4.1.2 微观方面	28
4.2 方案一（军用机场迁址）	30
4.2.1 航路结构	31
4.2.2 扇区划分方案	32
4.3 方案二（灵活使用空域）	34
4.3.1 航路结构	35
4.3.2 扇区划分方案	36
4.4 两种方案下管制员工作负荷分析	37
4.5 结论	39
第五章 总结与展望	41
参考文献	42
致 谢	46
在学期间的研究成果及发表的学术论文	47
附录	48

图表目录

图 2.1 长沙旅客运输量（LK）增长趋势图 9

图 2.2 长沙旅客运输量回归预测拟合图 10

图 2.3 修正后长沙飞机架次趋势图 11

图 3.1 现有空域结构下 2015 年各个扇区管制工作负荷柱状图..... 25

图 4.1 长沙进近管制区域图 30

图 4.2 北京方向进出口示意图 31

图 4.3 上海方向进出口示意图 31

图 4.4 广州方向进出口示意图 32

图 4.5 昆明方向进出口示意图 32

图 4.6 长沙进近管制扇区示意图 33

图 4.7 方案二进离场示意图 35

图 4.8 方案二扇区示意图 37

图 4.9 方案一各扇区管制负荷均值 39

图 4.10 方案二各扇区管制负荷均值 39

表 2.1 长沙终端区总飞机架次和五个影响因素的历年数据统计表..... 7

表 2.2 共线性诊断表 8

表 2.3 长沙旅客运输量的时间一元线性回归分析预测（单位：吨） 9

表 2.4 长沙架次的旅客运输量一元线性回归分析预测表（单位：吨） 10

表 2.5 长沙机场航班架次预测结果表（单位：架次） 11

表 2.6 长沙终端区本场起降流量预测结果表（单位：架次） 12

表 2.7 四大周边机场飞机架次总量统计表(单位：架次)..... 12

表 2.8 四大周边机场预测结果表(单位：架次)..... 13

表 2.9 长沙终端区总流量预测小结表(单位：架次)..... 13

表 2.10 长沙机场 2015 年起降航班进离港流量预测结果表（单位：架次） 13

表 2.11 多元回归法和趋势外推法的评价指标..... 14

表 2.12 飞越航班各走廊口的流量分布预测结果表(单位：架次)..... 14

表 2.13 终端区各进离走廊口的总流量分布预测结果表(单位：架次)..... 14

表 2.14 长沙高峰小时统计表(单位：架次)..... 15

表 3.1 部分常用管制用语工作负荷统计 25

表 4.1 管制员填写进程单时间值统计 38

表 4.2 秒表计时推演统计表 38

表 4.3 各方案各扇区管制负荷均值（单位：秒） 39

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着湖南省政府长株潭(长沙市、株洲市、湘潭市)城市群经济一体化战略^[1]的实施,长沙机场正面临难得的发展机遇。2008年4月,湖南省机场管理集团出台了长沙机场总体规划^[2]。其中,飞行区规划:规划4条跑道,2009年启动向东新建一条间距2250米,长3800米的近距跑道前期工作,可满足2020年的需求。中远期(2040年)再向东建一条间距2000米,长3800米的第三跑道,以及间距760米,长3600米的第四跑道。(旅客吞吐量预测:预测2020年3450万人,2040年7350万人;货邮吞吐量预测:预测2020年40万吨,2040年149万吨)

目前,长沙地区民用机场5个(长沙黄花机场、张家界机场、桃花源机场、芷江机场、永州机场),军用机场3个。由于军用战斗机性能不断提高,对空域的使用要求也越来越高,导致长沙民用机场空域已略呈拥挤之势。今后,随着长沙黄花机场的扩建,旅客吞吐量的不断增长,起降架次的日益增多,以及通用航空等相关航空产业的不断发展,长沙黄花机场对空域的需求及使用要求势必越来越高。因此,对长沙地区空域进行结构上的调整以及灵活使用已势在必行。

1.2 研究意义

机场空域顺畅与否直接影响到飞行安全。近年来经济的高速发展,带动了航空运输事业的飞速前进,但随之而来的还有事故率的不断上升,其中相当一部分事故是由于空域拥挤,导致管制员超负荷工作而造成的。

长沙黄花机场东、南分别是A461和H24航路,间隔均不足40公里;西邻军用机场,直线距离30公里,两机场跑道方向平行,黄花机场进出港航班只能在跑道东侧建立起落航线。最近几年来,军民航飞行流量不断增加,导致飞行冲突日益明显,给军民航的飞行都带来了极大的安全隐患。

由于经济发展的带动,加之对未来的预期,以及机场的扩建规划,客观上决定了长沙黄花机场旅客吞吐量增长的必然性。现有空域和与之相关的配套程序已不能满足这种增长的需求,二者之间的矛盾日渐凸显。

综上所述,为了保证军民航的飞行安全,兼顾经济发展和国防建设的共同需要,长沙地区空域改革都将具有深远的现实意义。

1.3 国内外研究现状

空域结构调整的理论依据是对空域进行的容量评估,要做好空域结构调整的研究关键是要做好容量评估的研究。而容量评估又包含了跑道、扇区、区域和航路的容量评估,这些都是空域结构调整的重要指标。终端区空域是指围绕某个机场以提供空中交通管制服务的区域。此种空域的规划需要考虑的问题很多,由于各个机场所处的位置不同而不可避免地使终端空域划分的方案都不尽相同。但是所有的终端区空域规划在研究过程中所依据的基本资料是相同的,包括有《民用航空公约附件2—空中规则》^[3]、《民用航空公约附件11—空中交通服务》、ICAO Doc 4444-RAC《空中规则和空中交通服务》^[4]、ICAO Doc 9426-AN《空中交通服务计划手册》^[5]、ICAO Doc 8168-OPS《航空器运行》^[6]等。这些资料在空中交通服务空域分类、空中交通服务的责任界定、程序设计方面、终端空域结构的架构等四个方面做出具体的规定。这些规定是各种交通密度水平的终端空域的设计基础,而各国民航当局在这些基础上更形成具体的操作方法,包括我国的CCAR71部《民用航空使用空域办法》^[7]、欧洲航行安全组织的《终端空域设计操作方法指导材料》^[8]等。

本文在空域规划中依据CCAR71部《民用航空使用空域办法》的有关规定,在飞行程序设计等方面遵循了国际民航组织的Doc 8168等相关文件的规定要求,同时借鉴了欧洲航行安全起草的《终端空域设计操作方法指导材料》的有关定义,使得最终形成的终端空域划分方案能够符合国际民航组织的标准,符合中国民用航空总局的规章要求。

1.3.1 国外研究现状

空域规划设计方面, Obrad Babic等^[9]尝试使用模糊数学的方法来明确空域内扇区的数量。Pawlak^[10]等人研究了扇区随空中交通流变化的动态划分之间的问题。法国学者D Delahaye^[11,12]将计算几何和遗传算法相结合,提出空域的优化方法等。Daniel Delahaye^[13-15]将空域看成一个平面,在这个平面中随机确定节点,形成划分平面空域的有限元,并利用遗传算法对扇区优化进行研究。该方法的不足之处是节点的随机选定将导致各有限元内的管制负荷难以统计,因而,无法在实际中直接应用。

扇区优化方面,世界空管领域的很多学者致力于扇区优化问题的钻研,日本电子导航研究所的N Tofuku ji^[16]根据在空中交通繁忙的情况下,管制员工作的完成状况来判断容量是否达到极限,从而推算出终端扇区的最大实际容量;1977年, K.Schimdt采用排队论的方法分析了管制员的工作负荷问题,讨论

了管制人员对例行事件的处理时间及相应扇区的空中交通流量和航班延误之间存在的关系^[17],反映除了管制员之外,其它因素对空域容量的影响程度。1999年,在第44届国际空中交通管制技术和展览年会上,Ambidji^[18]推出了测量空中交通管制工作负荷的工具,进而实现扇区和空域的优化;2001年,Manning.C.A^[19]等开发了POWER软件,该软件充分运用空域系统和系统分析记录产生的数据对管制员工作负荷及工作效率进行量算,并将管制员工作负荷和扇区划分联系起来;1992年Stamp^[20]提出了DORATASK方法,至今在扇区划分方面仍被广泛应用;1999年EUROCONTROL^[21]指出任务时间的定义,采用任务时间做为基础进行了仿真,进而测量出有关空域的容量;Arad^[22]研究指出管制员平时工作量对空中交通流的扇区边界位置存在很大的影响;1973年,Couluris和Schmidt^[23]指出受扇区边界位置影响的相关扇区划分成本是额外的工作量。

容量评估方面: Bowen和Pearcelf早在1948年就提出假定服从泊松分布的到达流模型^[24]; Blumstein^[25]对地面跑道的容量问题作了进一步的分析,研究了跑道的降落容量与间隔要求、飞机速度、下滑的长度之间的关系。Newell于1979年研究了起飞流与达到流之间的关系,并对凸状容量曲线进行了总结。1998年,Gerald Shapiro和David A.Lee,Coroline Nelson总结了前人的经验基础,提出了机场容量和延迟模型,并应用于美国数十个机场的实际容量评估中,取得了预期的效果^[26]。对于航路容量和区域容量的研究工作相对而言不多,出现也比较晚,如Marner和Gene在1970年首次将针对跑道容量的概念推广到终端区及航路上,初步探讨了终端区以及航路的容量评估和流量管理问题,但是他们没有给出相应的计算方法^[27],最终也没为空域划分所采用。Vojin Tomic和Milan Janic在此基础上,在1981年对终端区容量评估问题做了初步的探讨研究。他们对空域结构作了不小程度的抽象和简化,建立了终端区容量的评估模型^[28]。

1.3.2 国内研究现状

国内关于空域规划方面的研究有韩松臣^[29]等人在2003年依据管制员工作负荷对扇区优化的影响,分析并确定了管制空域结构拓扑描述的数学模型、管制工作负荷计算的数学模型、管制员的管制工作负荷统计方法等扇区优化设计工作的理论基础,创建了扇区划分的数学算法,并编制了基于管制工作负荷的扇区优化的应用软件,实际算例的计算结果进一步验证了应用软件和扇区优化数学理论基础的正确性,为后来人们研究空域优化、航路调整等提供了重要的理论依据。在此基础上,张明^[30]针对厦门管制区,拟用各个扇区工作负荷均衡为优化原则,应用模拟退火随机优化算法对管制扇区最优化问题进行分析求解,并使优化的结论满足空域划分的优先搜索、扇区数最少和扇区连续性原则,进

一步验证了韩教授的结论。而在机场容量以及终端区的容量评估方面，南京航空航天大学胡明华教授研究了单跑道的三种使用策略（降落、起飞、起飞/降落）下的确定性容量模型与随机性容量模型，并利用上海虹桥机场为背景进行仿真，验证了模型的实用性与正确性^[31]。1999-2000年，胡明华等人对终端区容量模型进行分析研究。他们讨论了影响空管系统容量的诸多因素；建立了应用于航路交叉点的容量估计模型，先后利用网络流理论^[32]与仿真^[33]等方法研究了终端区的容量。很好的解决了空域主观容量与客观容量的评估问题，后来又主持设计了北京机场容量评估系统，对首都机场的改、扩建工程起到了一定的指导性作用。

综上所述，国内外学者在理论研究和实际应用上都取得了一定的突破，有的研究成果为后来的科研提供了理论基础，有的科研成果对实际空域的优化调整还起到了一定的指导性作用。但长沙地区，空域结构调整除了需要诸如以上容量评估方面的理论依据之外，还局限于它自身的特点，比如机场所处位置的局限性。本文正是基于此特点加以论证分析，对长沙地区空域结构调整提出相关意见措施。

1.4 研究内容

本文主要是针对长沙终端区飞行流量猛增，管制工作负荷大，现有扇区划设已不能很好的满足流量增长需求的现状，分析预测了长沙终端区未来五年的流量、管制工作负荷以及跑道容量。并依据预测的数据对长沙终端区重新划扇，调整航路结构，以达到满足未来五年终端区流量的需求。

本文具体安排如下：

第一章为绪论，主要介绍本课题的研究背景，研究意义，对国内外研究现状做了简单介绍，并提出了本文的研究内容。

第二章是对长沙终端区交通流量的预测，采用回归分析法预测未来五年长沙终端区的飞行流量，利用 SPSS 统计软件分析相关因素，并得出方程，最后计算出长沙终端区本场起降流量、飞越航班流量、高峰小时流量，得出预测结果。

第三章对长沙终端区空域的影响因素进行分析，重点采用秒表计时的方法推算管制员工作负荷，分析得出了现有空域结构下 2015 年长沙终端区的管制工作负荷值。并根据相关分析结果，查找未来五年需要改进的影响终端区划分的相关因素。

第四章根据前面两章所预测的结果，依据管制员工作负荷对长沙终端区的扇区和航路进行调整，提出了两种空域划设计方案，并通过秒表计时、图上推

演的方法对新方案的管制工作负荷进行推算，最终验证了新方案的可行性，得出结论。

第五章是对全文的总结以及对未来的展望，在总结全文的基础上，提出在长沙空域优化方面继续研究的几点建议。

第二章 长沙空中交通流量预测

在分析问题阶段，预测是至关重要的步骤，预测的结果准确与否，将直接影响到问题分析的准确性，也决定了采用什么样的方法解决问题。

类似的预测方法有很多，例如：回归分析^[34]、趋势外推^[35]、指数平滑^[36]等。根据长沙地区的特色和本课题分析问题的需要，本文采用四阶段的方法对未来长沙终端区交通流进行预测，四阶段法和OD分布预测的思想，大量应用在公路交通的研究中^[37-39]，如此，不仅对长沙总的飞行流量进行了预测，而且能够预测出未来交通流在长沙终端区的分布情况，从而可以更加有助于掌握未来交通流量的具体情况，分析出问题的关键所在。

第一阶段：出行生成，对长沙终端区的流量的总体需求进行预测；

第二阶段：出行划分，对长沙终端区内的交通流实现了分布预测；

第三阶段：方式划分，本课题仅选择航空运输方式；

第四阶段：交通分配，把长沙终端区的交通流具体分配在具体的交通网络上。

2.1 长沙终端区的总流量预测

对于长沙终端区总量的预测比较成熟的方法是采用回归分析法。通过查阅《从统计看民航》^[40]（2001年至2008年，中国民用航空总局规划发展财务司编，中国民航出版社）和各省市的《统计公报》^[41]和《统计年鉴》^[42]，结合中南空管局调研，机场调研等手段收集各方面历史数据。利用SPSS^[43]数据分析软件，采用回归分析法和趋势外推法两种方法进行预测，并通过大量的衡量指标对预测结果进行验证，从而最大程度的降低预测的误差。

2.1.1 长沙终端区本场起降流量预测

（1）回归分析法预测

多元线性回归模型是指含有多个解释变量的线性回归模型，用于揭示被解释变量和其他多个解释变量之间的线性关系。

多元回归模型如下：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + e \quad (2-1)$$

其中， $x_j (j=1, 2, \dots, k)$ 是飞机流量的影响因子， $\beta_i (i=0, 1, \dots, p)$ 为回归系数， e 是随机误差项， $E(e) = 0, D(e) = \sigma^2$ 。

首先综合分析影响长沙终端区总流量的各个影响因素，利用不同的影响因素对长沙飞机架次进行一元线性回归分析。从而筛选它们当中与飞机架次线性相关拟合度较好的五个影响因素：历年飞机架次(Y)、长沙旅客运输量(LK)、长沙GDP(GDP)、长沙第三产业GDP(GDP3)、历年运输飞机数(FJS)和长沙货邮运输量(HW)。

综合考虑各个影响因素之间的相关性，不采用逐个因素分别对飞机架次进行一元回归，再对每个结果进行简单加权求和的方法。而采用多元回归分析的方法，综合考虑到各个相关变量之间的相关关系，并且通过不同的方法，来消除各变量之间的共线性。

(I) 飞机总架次（历年）和五个影响因素的历史数据的收集

通过机场调研、查阅历史数据等多种手段，采集长沙飞机架次及五个相关因素的历年数据，如表2.1所示。

表 2.1 长沙终端区总飞机架次和五个影响因素的历年数据统计表

	飞机架次 (架次)	长沙 GDP (亿 元)	长沙第三 产业 GDP	长沙旅客运 输量 (人)	长沙货邮运 输量 (吨)	运输飞机 数 (架)
2001	38500	1311.65	633.66	4548656	251939.8	170
2002	38900	1483.72	734.76	5561043	289633.9	172
2003	45100	1616.95	803.27	5563470	264821.7	185
2004	51500	1769.59	885.28	7904930	324957	197
2005	58400	2050.27	975.70	8952003	432609	218
2006	63700	2450.09	1155.11	11636974	612065.7	247
2007	75300	3014.65	1496.13	13487444	705571.7	284
2008	85300	3098.66	1701.78	15041701	810551.3	329
2009	110000	3729.62	2102.83	16851131	949383.3	374

(II) 应用SPSS统计预测分析软件对上述五个影响因素和飞机总架次多元回归分析；分别对每个因素进行F检验和拟合度检验，分析出的五个影响因素的拟合度R都在0.96以上，都非常接近于1，有比较强的拟合优度，这说明都是与飞机架次有比较强的线性相关性。

分析上述五个影响因素之间的相互线性相关的程度（多重共线性问题的判断）。利用SPSS软件对五个影响因素和飞机总架次进行相关性分析。可见，LK、FJS、GDP、GDP3和HW五个影响因素之间相关系数Pearson Correlation的值都很接近1，有较强的线性相关性。

依次看每一个特征根的CI（condition index）指标，只有两个特征根的CI值是小于35的，其他四个都大于35，这说明五个影响因素之间有比较强的多重共线性特征。