

摘要

对空域扇区优化问题的研究是空管领域的一项重要的研究课题。该项研究对于保障空域容量和飞行安全均具有重要作用。本文在统计管制员工作负荷和建立空域拓扑结构数学模型的基础上，采用模拟退火算法（SA）实现了空域扇区优化设计。在对厦门管制区的优化结果进行分析的基础上，提出了基于有限元的优化方法。通过实际空域设计的算例计算，验证了扇区优化数学理论正确性，比较两种算法的优化结果，证明了改进的优化算法更具合理性。

关键词：管制工作负荷，空域拓扑结构，有限元，模拟退火算法，扇区划分

Abstract

The airspace's sector partition is an important of research problem at the domain of the air traffic management. It has the very important effect on ensuring airspace's capability and the security. This paper put to use simulated annealing algorithm (SA) to achieve the design about sector optimization based on the statistic method of the controller's workload and the mathematical model describing the airspace structure of the topology. We analyze the optimum result of Xiamen control airspace and put forward optimal algorithm based on the Finite Element method (FEM). By computing the example, it validated the correctness of the theoretic about sector optimum and compared two kind of optimal result. The improved algorithm is proved more rational.

Keyword: Control Workload, Airspace Structure of the Topology, the Finite Element, Simulated Annealing Algorithm, Sector Partition

第一章 绪论

1.1 前言

我国实行的改革开放政策为民航的发展提供了前所未有的机遇。国民经济持续快速增长，旅游外贸加速发展，人民生活水平不断提高，促进了航空运输需求的快速增长，我国民航事业得到长足的发展。最近 20 年，我国航空运输量以每年平均 20% 的速度增长。在生产规模方面，运输总周转量、旅客周转量、货邮周转量快速增长，不包括港、澳、台地区，2000 年全行业完成航空运输总周转量 1.225×10^{10} 吨公里，旅客运输量 6.722×10^7 人，货邮运输量 1.967×10^6 吨。中国民航在世界民航业中的排位稳步提高，2000 年运输总周转量排第 9 位。2000 年中国民航定期航线总数达到 1165 条，国内通航 126 个城市，国际通航 33 个国家 60 个城市。2000 年末全国民用运输机场 129 个。其中，2000 年首都机场旅客吞吐量突破 2×10^7 人次，成为亚洲最繁忙空港并跻身世界特别繁忙机场^[1]。

航空运输量的快速增长客观上要求我国民用航空的建设和管理与之相适应。而我国目前航空运输流量分布很不均衡。目前，民航旅客吞吐量的 95% 集中在 40 个主要机场，其中 30 个为全国省会、自治区首府和直辖市机场；10 个为深圳、厦门、大连、汕头、珠海、温州、宁波、桂林、青岛、重庆等经济特区、开放城市和旅游城市机场。随着旅客吞吐量和飞行运行总架次的日益增长，使我国空中交通系统面临着越来越严重的航线拥挤；此外，恶劣天气、导航设备故障也必然导致空域容量资源严重不足。因此，尽管我国的空中交通流量与发达国家相差甚远，但空中交通的拥挤状况却严重得多，并因此引起大量的航班延误，造成巨大的经济损失，而且埋下了事故的隐患^[2]。

由于上述空中交通现状存在，管制员在其管辖空域内的飞机数量越来越多，使得管制员工作负荷在不断增加。在我国的某些空域的空域管制工作的工作量之大，时常超出管制员所能承受的程度，对飞行安全带来不利影响。为了保证飞行安全，提高飞行效率和空域利用率，空管部门将空域划分为若干扇区，每个扇区设立一个管制席位，进行空中交通的指挥和协调工作。如何确保扇区划分的均衡、有效和合理，成为世界民航空中交通管制领域不少学者研究关注的一个重要课题。这方面研究对于增加空域容量，保证飞行安全，具有重要意义。

1.2 国内外相关工作研究的现状

在管制工作负荷和扇区优化方面，近些年来，国内外学者进行了一些理论研

究和系统开发,取得了一些成果。从所掌握文献来看,研究情况如下。

1.2.1 管制员工作负荷方面的研究情况

1978年,D.K.Schmidt^[8]提出了用排队论方法分析管制员工作负荷,讨论了管制员对例行事件的处理时间以及扇区的交通流量与航班延误之间的关系;1979年,A.Robertson^[5]等人在美国航空管理局(FAA)文档中对管制员工作负荷模型有效性给出论证;日本电子导航研究所的Noriyasu Tofukuji^{[4][15]}教授对日本东京机场进行了调查和统计分析,他根据在交通繁忙的情况下,管制员工作的完成情况来判断容量极限是否达到,从而推算出终端区管制扇区的实际最大容量。1989年,Reaux,R.A.^[9]等提出建立模型和评估工具(预测管制员分析模型PATCAM),预测管制员工作负荷。整套模型包括管制员行为模型、扇区环境模型和工作负荷模型等。1999年,在国际空管第44届技术和展览年会上,澳大利亚的Ambidji^[18]小组推出测量ATC工作负荷的工具,该软件工具可以设计扇区大小和确定扇区容量,实现空域和扇区的优化。

国内在管制员的工作负荷及空域规划方面的研究开展相对较晚。工作负荷方面的研究,主要是在人为因素方面的研究涉及对于管制员工作负荷,进行有关探讨。韩松臣^[22]等针对广州管制区,对于管制员工作负荷进行定量统计,采用国际上较为成熟的主观容量评估方法DORATASK方法,进行扇区容量评估实验,为本文进行的工作负荷量化研究提供借鉴。

1.2.2 国内外空域规划方面的研究情况

本文重点探讨的扇区优化问题是空域规划设计的一个重要方面,对于增加空域容量,保证飞行安全,具有重要意义。国际民航组织的文件对该方面的研究进行了阐述:Doc 8168-OPS/611^[24]根据空域安全间隔专家组的研究成果,制定了空域规划的方法和原则。此外,Doc 4444-RAC/501^[34]、Doc 9426/AN924^[20]和国际民航公约附件11也包含部分空域规划设计方面的内容。最近的空域规划文件是98年公布Doc 9689-AN/953^[31]总结了国际民航界在空域规划设计和空域安全性评估方面更广泛的量化研究成果,成为国际空中交通管理人员进行空域规划设计的理论依据。其中,Doc9426/AN924中对于扇区划分考虑的以下方面,是进行空域扇区划分研究必须遵循重要因素。在审查把空域划分为几个扇区的需要时,应考虑的因素:

- ①空中交通服务(ATS)航路网的形态;
- ②交通量及其混和情况;
- ③交通的地理分布;
- ④ATS人员(所能处理的)容量;

在评估 ATS 航路网形态时，应顾及下述因素：

- ①所服务的航路数；
- ②ATS 航路交叉点数；
- ③平飞的航空器和在爬升与下降的航空器的比例；
- ④重要航空器的性能特点。

依据以上相关的文件，国际上先后有多位学者进行了相关问题的探讨：进入 90 年代，由于空中交通流量的增加和空中交通系统复杂程度的提高，Crown Communication^[11] 于 1997 年提出动态扇区的概念；南斯拉夫贝尔格莱德大学学者 Obrad Babic^[19] 等在 1998 年提出利用模糊逻辑进行空域扇区的划分； Pawlak 等在 1997 年 NASA 中对动态划分扇区和航路的协调系统 (DIRECT) 给出评估。就扇区安全性分析来说，A. A. Trani 和 H. D. Sherali^[17] 等人 1998 年提出航空器冲突模型 (AEM) 和空域占有模型 (AOM) 两种计算机模型来解决空域及扇区冲突和评估扇区扇区容量。同时，就扇区容量评估方法来说，英国的运筹与分析理事会提出的 DORATASK 方法^{[10][16][20]} 是较为成熟的主观容量评估方法；就空域和扇区优化算法来讲，近些年来，有学者提出有限元方法^[6] (FEM) 和随机优化方法，该方面研究较活跃的一位学者是法国学者 Daniel Delahaye^{[3][6][12][13][14]}，他提出了基于随机优化（主要是遗传算法）结合计算几何的空域和扇区优化方法。

我国在空域规划研究方面的研究是：1999 年，胡明华、张志龙、杜骏^[30] 等人进行的对终端区容量的模型研究，建立了航路交叉点的容量估计模型，分析了不同的流量分配方案及机型混杂比对交叉点容量的影响，建立了终端区空域的容量估计模型，并用网络流理论分析了终端区的容量，以及走廊口的流量分配、交通流特征、空域结构、间隔规则对终端区容量的影响，较好的解决了空域主观容量的评估问题。2002 年，胡明华和蒋兵^[23] 就跑道、航路和终端区的具体情况建立了对应的容量评估模型，提出了其容量评估方法。

1.2.3 国外空域规划方面的产品介绍

如上所述，Reaux, R.A. 等提出建立模型和评估工具，A. A. Trani 和 J.C. Smith 等人 1998 年提出航空器冲突模型 (AEM) 和空域占有模型 (AOM)，这些相关软件，在实际的管制员工作负荷及空域规划的研究中，由于研究和运用的侧重点不一样，软件的相关功能各有不同之处。1988 年，澳大利亚的 Preston Group^[7] 开发成功“整个机场和空域评估模型” (TAAM) 第一代。目前，TAAM 发展到了第二代，是相互关联，功能强大的统一整体，现在已经运用在机场容量研究和设计，TRACON 及终端区进程的分析，工作负荷分析，空域设计，自由飞行问题的研究等等。未来的第三代 TAAM 性能将更强大，其中可以在 12 小时内模拟 60000 架飞机，空域冲突的预测算法的效率将是现在第二代的十倍以上。该系统是目前世界上比较先进，功能强大的空域评估系统软件。

1.3 本文主要研究内容

本文将对于空域规划方面的扇区优化问题展开讨论。主要论述如下内容：讨论了管制员工作负荷的量化工作。在 DORATASK 方法的基础上，给出了量化指标和量化统计结果，为扇区的优化提供数据。给出了空域航路的拓扑关系的数学描述和数学模型，为扇区优化提供数学基础。最终实现了扇区优化算法：模拟退火算法和基于有限元的随机优化算法。具体内容安排如下：

第二章详细分析了管制工作，主要是管制通信工作的特点和内容。介绍了早期管制员工作负荷的研究和 DORATASK 方法。在此基础上，提出了管制工作负荷的量化指标。在附录 1 中详细列出常用的管制用语的统计结果。

第三章主要介绍空域航路结构的拓扑关系的数学描述，扇区优化的理论基础和扇区优化的数学模型。

第四章介绍了基于模拟退火算法的扇区优化，给出优化结果和分析。

第五章介绍了有限元方法，及采用基于有限元的扇区优化方法解决空域扇区优化问题，并就此方法和第四章的模拟退火算法进行比较，得出结论。

最后，对所做的工作的总结，以及对于管制员工作负荷和扇区优化进一步研究的展望。

第二章 管制员工作负荷的分析

2.1 引言

人的能力是有限的，负荷过重或不足，都不利于人的能力的发挥。系统的工作负荷，典型的方法用计算机单位时间可处理的输入、输出量来表示。而人的工作负荷与系统的工作负荷不同，前者不能长时期保持不变，要考虑“实际紧迫”的影响。实际上不存在一种绝对不变的客观工作负荷，它与任务的性质、内容有关，与人的经验、技能有关。通常将工作负荷与任务要求相联系，与管理每一架飞机要做的事相关联。

工作负荷行为分为两类：可观察的（客观的）负荷和认知理解的（主观的）负荷。可观察的负荷可以量化表示，如需要工作的飞机的数量、需要的通信和协调量、数据输入量等，时间紧迫性以可用时间与需用时间之比来定量表示。工作负荷也与 ATC 设施有关，如工作台的显示器，操纵器，要求的手动输入，文件工作及与其他管制员的联络等。认知理解负荷，则是管制员个人对 ATC 环境和工作提出的要求，个人感受或主观的认知理解。认知负荷随扇区内飞机数量增加而增大。不同的管制员，由于训练、经验、技巧、疲劳等因素，对相同的、可观察的工作负荷，他们的认知负荷可能不同。认知负荷十分重要，因为减少了可观察负荷，不一定能减少认知负荷。认知负荷的增加有可能影响到空域的容量和安全，认知负荷不足，也易引起厌烦，单调情绪，降低能力。工作负荷评估的主要目的，是使人的信息处理能力在长时间不能过重，也不能过轻，要留有余地，以应付意外情况。因为认知工作量比较难定量计算，所以不可能有纯客观的工作负荷。只有通过比较改进前、后的工作负荷，才能得到这些改进对工作负荷的影响。

对于不同的管制员来说，客观工作负荷相同，主观工作负荷不同，这主要取决于他们训练、经历、技能、疲劳和其他因素。任何增加的主观工作负荷，都可能影响管制员对新系统的接受能力；过分减少主观工作负荷将引起人们对工作的厌倦和感觉工作单调，这将从反面影响管制员的业绩和使管制员处于满足状态。因此，评价工作负荷首要的目标是：在一定时间内，系统对管制员信息处理的能力保证即不超负荷工作，也不能轻负荷工作，因为超负荷和轻负荷都将影响管制员的工作业绩。

同时，管制员工作负荷与扇区容量密切相关。众所周知，容量估计问题是空中交通流量管理系统实施过程中，需要首先解决的关键技术问题，空域容量既取决于由通信导航设备、场地条件、空域结构、所在地气象条件等因素决定的客观容量，同时也取决于与管制员工作负荷等人的因素相关的主观容量。研究表明，空域容量在很大程度上取决于管制员的工作负荷，管制员的个人能力，如预测、

分析、理解、决策、应变、协调、自控、表达能力等都对空域扇区容量产生影响。由于个体之间的差异和个体状态变化，每个管制员管制下的扇区容量都不一样，同一管制员在不同条件状态下的管制扇区容量也不相同，只能获得一个平均值。一个管制员只有完全调动上述各方面能力，才能达到其最高的工作效率。考察扇区容量方法，可以考虑通过在正常的管制条件下和熟练程度下，管制员在单位时间所能处理的飞机数目来决定空域容量的大小。

为了研究空域的扇区优化问题，本文必须首先建立航路的网络拓扑结构，而确定网络拓扑结构，又必须先确定各个线段的权值，即管制员在此线段上的管制工作负荷。于是就引出了如何解决管制员工作负荷的统计问题，通过统计管制员工作负荷来确定航路网络拓扑关系中的权值问题，为形成完整的航路网络拓扑关系做准备。

2.2 国内外研究现状和 DORATASK 方法介绍

2.2.1 国内外研究现状

早期的研究发明了一种空中交通管理尺度如飞行密度用来联系空中交通量数据和工作负荷。将用模型预测的工作负荷和观测到管制员生理活动数据进行比较并提供一个良好的交互作用。这个模型的一个约束就是人的行为的重要成分是有可知性并且这点并未在以前的模型提及。因为认识行为建立模型很难，所以这里的方法是利用管制员实际的工作负荷的统计将空中交通流量特性和管制员工作负荷联系在一起的。一旦这种对应关系构成就可以用来预测管制员的工作负荷了。三种显著的方法被用于工作负荷的研究，第一种方法目的是测量空管的生理状况，这种测量包括电击皮肤的反应 (GSR)，心率，心电图 (ECG)，血压，体液的生物分析和行为症状。这种方法被工作负荷的压力指示器限制着。第二种方法目的是测量管制员工作负荷就在人机连接系统的方面的相互影响。这种测量包括按键的数目，单位时间的记录和通话。这些测量作为工作负荷尺度的主要困难在于这种方法假设空中交通管制工作总是在一个可知的自然行为上显示这种假设的。没有完全获得空管工作的主要认识和数据密集的特性，而不是自然和劳动密度的特性。为了生理和自然行为的测量方面的约束，第三种方法的目的是测量空管心理状况，被测量的是工作负荷在工作认识的程序和有效的心理能力方面。

以上研究^[32]是针对管制员的生理和心理特征，对其工作负荷进行的研究，各自有其侧重，无法直接应用于空域和扇区规划工作。

2.2.2 DORATASK 方法介绍

有关管制工作负荷的定性方面的研究相对较多, 而管制工作负荷定量研究开展, 比较著名的方法是英国运筹与分析理事会所提出的用于扇区容量评估的“DORATASK”方法^{[10][16][20]}。该方法在 DORA 第 8188 号暂时性报告, DORA 第 8916 号暂时性报告和 DORA 第 8927 号报告进行了阐述, 并对伦敦终端区扇区进行了实际的校准。

“DORATASK”方法着重对雷达管制员所承担的工作负荷的评估。一方面是把用在(看得见的)日常的和解决冲突的工作时间加在一起, 另一方面是(看不见的)思考计划的工作时间。管制员的工作, 除了这两个互有关系的组成部分外, 还有第三部分——恢复时间。这部分时间最少, 没有列入(看得见的和看不见的)指定工作时间之内, 但被认为是对扇区是安全运行极为重要。因此, 管制员的时间分为看得见的工作、看不见的工作和恢复时间。

看得见的工作是那些外界观察员容易记录和记时的工作, 看不见的工作是同繁忙的管制员的看得见的工作并行的, 几乎是连续地在做着那些工作, 通常是观察员不能直接予以记录或计算的。但是这些工作包括监控雷达屏幕和思考下一步指挥的预案, 这些对于扇区管制员的管制工作来说是很关键的。看不见的工作是根据计算在该扇区内每驾航空器要产生多少张进程单, 并且当它首次交给雷达管制员时, 已经有了多少张其他的进程单置放在进程板上, 还必须对它予以对照检查。然后, 把检查的次数乘以“每张进程单每次检查的时间”, 求得看不见的全部工作负荷。检查进程单的时间不被认为是体力工作的持续时间, 但在校正模型以反映全部计划所用的时间的时候可以作为一个计算因素。在交通流量高峰期, 这类工作负荷将显著增加。对一给定扇区和交通样本的工作负荷测计, 是看不见和看得见的工作时间之和。为了达到容量足以使该扇区能够持续安全运行, 需要确定管制员有一极小部分时间进行恢复。这项比例可能随着预期的一种以某一“容量”的流量率要持续的时间长度而增加。起初, 假定既不更换管制员, 也不减少交通量, 该扇区按其容量运行不到一小时的时间。再进一步研究, 把交通量定在较低的数量以便持续安全运行。当假定用在检查每一进程单的时间(它确定对计划的工作负荷的加权)为两秒钟时, 导得下述结论:

具有容量时的平均工作负荷必须小于总工作负荷的 80%, 并且 90% 的工作负荷不得超过总(工作)时间的 2.5%。

校正 DORATASK 模型分作两个部分进行。首先, 把在研究期间内的由模型所预计的工作负荷与观测到的工作负荷相比较, 调节模型的参数使两者匹配。其次, 对于若干小时的流量, 为两个扇区(它们的容量是事先用其他方法决定的)绘制工作负荷的曲线图。

估计扇区空域容量的 DORATASK 方法的原则, 不论把它们应用于航路中的扇区化部分或终端区(TMA)的扇区内, 基本上都是一样的。但在 TMA 扇区中

实施需作三项值得注意的变化：必须考虑涉及管制等待层的工作负荷；必须改变用来识别潜在冲突的条件，以便为某一 TMA 航线结构的更复杂情况做准备。最后，必须改变计划工作负荷的模型化方法以反映这一事实：即管制员主要是依靠雷达屏幕而不是进程板来察觉冲突的。

DORATASK 方法将管制员的管制负荷划分为看得见、看不见的和恢复时间。这是从管制负荷统计难易的角度划分。如果我们根据管制工作的内容来划分，又可以划分为三个部分：冲突负荷、协调负荷和航迹监控负荷。冲突负荷包括了管制员解决冲突的不同方法。协调负荷包括管制员和相邻扇区管制员、管制员和飞越扇区边界飞行员的信息交流。监控目的是核查在当前扇区内飞机飞行的不同轨迹并且减少工作负荷。

2.3 DORATASK 方法的应用实践

2.3.1 管制工作过程介绍和管制通信过程分析

介绍了管制工作负荷的概念和 DORATASK 方法，我们就应当知道究竟管制工作负荷包括那些具体内容。管制工作负荷主要内容是：通过观察雷达屏幕和填写进程单监控管制空域内飞机的飞行动态、利用无线电对讲机向飞行员发布指令并掌握飞机的状况和确认飞行员复述指令的正确性、对可能发生冲突的飞行器进行协调以及与相邻管制单位的协调移交工作等。与此同时，管制人员应当思考确定指挥预案，以便有效指挥管制区内的飞行器，保证飞行安全。

我们发现，管制工作分解成单个的管制动作，其实就是一个接受信息和处理信息的信息反馈系统，如图 2-1 所示。管制人员接受外界的原始信息，包括雷达显示的位置信息，飞行报文信息，机长传输的 VHF 飞行状态信息等等，对于这些数据信息，首先根据管制人员的实际管制经验和航管知识，进行信息加工，思考确定指挥预案，然后通过无线电等媒介分布指令，通过电话与相邻管制区协调，同时观察执行情况，及时反馈，对管制效果及时总结。

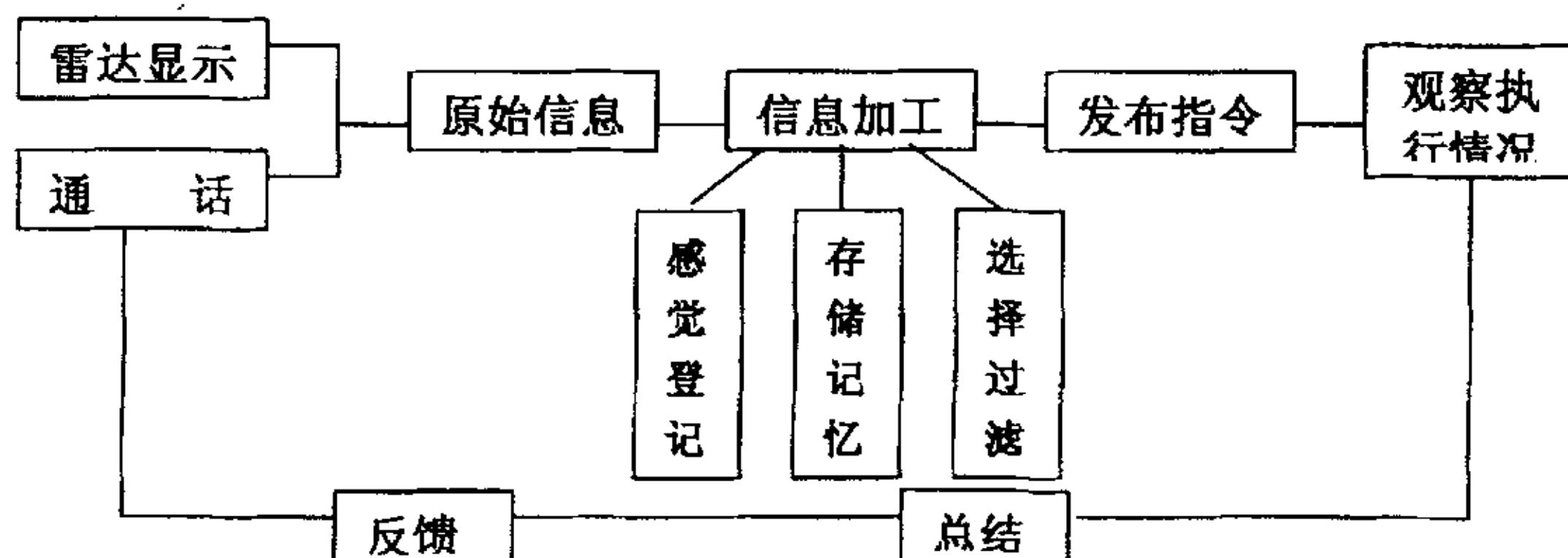


图 2-1 管制工作流程

上述的管制工作流程中，除了填写进程单和操作计算机等一些基本的工作外，大部分时间是通信工作。通信是现今空中交通管制的主要手段，也是管制员工作负荷的主要来源。

通信过程一般由以下几个单元组成：送讯者、受讯者、传输时间、通信时间、通信内容及其表达形式、传输手段与媒介，这些单元缺一不可。这些单元的质量通常都是不稳定的，往往会影响通信的成功率，通信失败也加剧了最重要的通信资源——时间的消耗。

通信内容及其表达形式，是人脑及各种感官活动的综合结果，各种感官接受外界的刺激通过大脑思考后做出的适当反应。例如管制员从雷达上看到一架飞机正在偏离航线，经思考找出正确的处理方法后，用无线电对讲机对机长发出警告及指令，这一过程中综合使用了视觉、听觉和思考。由于个体能力，或者说人这种资源的可用性、可靠性的不同，导致通信内容及其表达形式差别很大。

传输手段与媒介是一种依赖通信设施及环境的资源，它的可用性和可靠性主要依赖通信的技术水平，比如用无线电通信要看它的信噪比及频道数目。通信质量好，管制员的工作量会减少；反之说话就会变得不流畅，停顿及改正增多，加重了工作负荷的同时，也浪费了不少时间。用计算机通信同样也要看它的传输速率、带宽及纠错能力等。

前面提到的传输时间是最重要的资源，如果只是为了管制一架飞机，传输时间可以说是用之不尽，但实际上通常会有多架飞机同时占用这种资源，由于管制员在一次通信中的对象只能是单架飞机的特殊性，ATC 通信只能是分时通信。这样，如果一架飞机占用波道的时间太长，那么其它飞机就无法及时地和管制员联络。很明显，出现这种情况管制员在相同时间内处理的飞机数目就会减少，在增加了工作负荷的同时，降低了扇区容量。

2.3.2 管制员工作负荷的量化

由上文介绍的“DORATASK”方法，我们可以看出，通过工作时间的分析，将其分为看得见的工作负荷、看不见的工作负荷和恢复时间。构成我们评价工作负荷的三个部分，对于饱和的工作负荷，根据统计，规定平均工作负荷必须小于总工作负荷的 80%，而且大于 90% 的工作负荷时间应当不超过工作时间的 2.5%。尽管该方法是侧重与对雷达管制员工作负荷的扇区工作负荷研究，但对于雷达监视下的程序管制的扇区工作负荷研究，也具有借鉴作用。本文将借鉴 DORATASK 方法的思想，对管制员工作负荷给出具体量化方法。

通过计算机手段对空域容量和扇区优化的研究，我们首先应当考虑如何将管制员的管制工作负荷定量表达。管制员的管制工作主要是通过观察雷达屏幕和填写进程单监控管制空域内飞机的飞行动态、利用无线电对讲机向飞行员发布指令并掌握飞机的状况和确认飞行员复述指令的正确性、以及与相邻管制单位的协调

工作等。

根据 DORATASK 方法, 管制员工作负荷分为看得见、看不见部分和恢复时间。首先, 我们对于看得见部分进行统计。通过统计雷达、语音记录仪记录的历史数据或对实际管制工作进行记时和统计, 确定出相应通话种类的经验工作负荷指数的期望值(以时间长短衡量)。若第 K 种工作负荷经验负荷指数为 \bar{t}_k , 则

$$\bar{t}_k = \frac{\sum_{j=1}^N T_{kj}}{N} \quad (N > 50) \quad (2-1)$$

其中, T_{kj} 表示对第 K 类管制动作第 j 次持续时间的统计值, N 为对于此类管制动作的统计次数。参照上式, 对于厦门管制区较为繁忙时段的管制通话进行录音, 同时结合在厦门航管站, 对进近管制、塔台管制和区域管制的对话的现场统计, 首先按照《中国民用航空无线电通话手册》^[21]的常用管制用语, 对不同类型的管制进行分类, 然后对相同的管制指令进行加权平均, 求得期望值大小。如表 2-1 是对机场、进近和区域的部分常用无线电管制用语统计的结果。全部管制用语统计的结果见附录 1。

表 2-1 部分常用管制用语的工作负荷统计表

管制类别	管制种类	管制用语	工作负荷
一般用语	高度指令	上升/下降	1.6
一般用语	移交改频	在(单位呼号)(频率)上等待	4.2
一般用语	气象情报	能见度(距离)	4.3
一般用语	位置报告	下一次在(重要点)报告	5.1
机场管制	目视识别	打开着陆灯	3.1
机场管制	目视识别	摆动机翼	2.8
机场管制	开车程序	同意开车	2.6
机场管制	推出程序	推出时间自己掌握	3.7
机场管制	着陆	可以着陆	2.4
进近管制	离场指令	起飞后, 左转/右转, 航向(三位数)	7.4
进近管制	进近指令	可以沿(航线代号)飞行	5.2
区域管制	管制许可	ATC 许可(航空器呼号)	6.5
区域管制	高度保持	保持(高度)直到飞越(重要点)	7.2
区域管制	巡航高度规定	飞越(某点)高度(高度)/以下/以上	7.9
区域管制	间隔指令	在(某时)飞越(某点)	7.1

其中, 管制类别栏表示管制类别, 管制种类栏表示具体管制命令种类, 管制用语栏表示管制员发出的具体指令内容, 工作负荷栏表示统计的管制指令发出所

需时间，以时间秒为单位。

对于管制人员来说，较大一部分时间必须用在对雷达屏幕进行监视，对照进程单，思考制定指挥预案等。工作负荷如果始终处于看得见的部分，不仅管制任务是不完整的，而且使管制人员处于十分疲劳之中，对空域的安全不利。同时，留有一定的恢复时间，对于管制人员保持清醒的头脑和精力集中，很有益处。但在实际的统计过程中，统计这两部分管制工作负荷比较困难。因为这些负荷不是通过实际通话的时间长短来表示，并且经常是融入到看得见部分里去，量化难度较大。为了计算方便，我们假设看不见部分和恢复时间占整个工作负荷的 50% 左右。因此，总的工作负荷 S ，可表示如下：

$$S = 2 \sum_{k=1}^M \left(\sum_{j=1}^N T_{kj} \right) / N \quad (N > 50) \quad (2-2)$$

在求得 (2-1) 单一种类负荷值，将在时间段 M 种负荷值相加得到总的看得见部分工作负荷，再乘以系数 2，得到在时间段管制员总工作负荷 S 。

第三章 拓扑网络、扇区设计理论和优化数学模型

3.1 引言

在明确了管制员工作负荷的量化方法之后, 我们接下来需要确定航路的网络拓扑关系。因为通过计算机手段对空域的优化扇区工作, 首先必须建立管制空域结构的拓扑数学描述和对应的工作负荷计算模型。这是利用计算机解决此类问题所必须的数学基础。

3.2 网络拓扑理论在空域航路网络的应用

3.2.1 网络拓扑相关性与拓扑矩阵

拓扑学萌发于 17 世纪瑞士数学家 L. 欧拉发表关于求解哥尼斯堡七桥问题的论文, 19 世纪后该学科得到发展。拓扑学有多个研究方向, 早期分为一般拓扑学和代数拓扑学, 后来又出现了微分拓扑学和低维流形等研究方向。本文借鉴的拓扑学知识来源于代数拓扑学理论。

3.2.1.1 网络拓扑相关性

拓扑相关性分析^[29]是以几何六面体单元为对象, 对其节点—节点、节点—棱线、单元—单元之间的相互联系性的讨论。如果两节点有连线关系, 则这两个节点是相关的; 如果一个节点是某棱线上的一个端点, 则这个节点与该棱线是相关的; 如果两个单元是相邻的, 即有相同的节点 (或棱线), 则这两个单元是相关的。

节点相关性分析是要确定相对某节点 v_i , 所有与之相关的节点的集合以及相关棱边的集合, 若 $V_{adj}(v_i)$ 表示相对节点 v_i 与之相关节点的集合, $E_{adj}(v_i)$ 表示相对节点 v_i 与之相关棱边的集合, 则有

$$V_{adj}(v_i) = \{v_j \mid e_k = (v_i, v_j), v_i \neq v_j, i < j\} \quad (3-1)$$

$$E_{adj}(v_i) = \{e_k \mid e_k = (v_i, v_j), v_i \neq v_j, i < j\} \quad (3-2)$$

其中, v_i 表示节点, e_k 表示节点 v_i 和 v_j 之间的棱边。

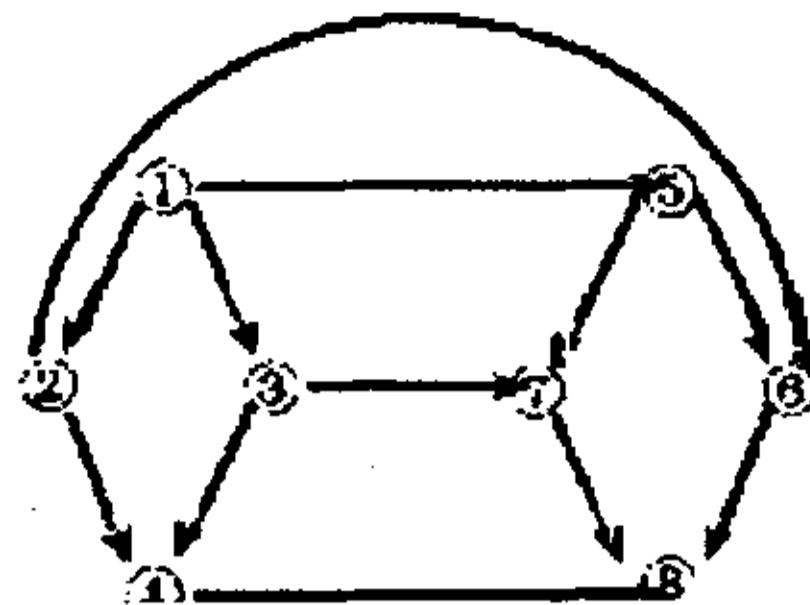


图 3-1 单元节点相关图

图 3-1 是节点相关图, 它直观地反映了单元节点间的相关性。单元相关性分析是要确定所有单元中彼此相关的单元集合, 若 G_i 表示单元, $G_{adj}(G_i)$ 表示与 G_i 相关的单元集合, 则有

$$G_{adj}(G_i) = \{G_j \mid G_i \cap G_j \neq \emptyset\} \quad (3-3)$$

其中, \emptyset 表示空集, \cap 表示交集。

若两个单元相关, 则在节点集合或棱线集合中必有相同的因素。设有 m 个单元, 任意两个单元求交有 $G_i \cap G_j (i \neq j, i, j = 1, \dots, m)$ 。若 $G_i \cap G_j = \emptyset$, 则单元 i 与单元 j 不相关; 若 $G_i \cap G_j \neq \emptyset$, 且当 $E_i \cap E_j \neq \emptyset$ 时, 则单元 i 与单元 j 为相关的。

3.2.1.2 拓扑矩阵

根据以上对单元六面体拓扑相关性的数学描述, 相应可以具体对几种拓扑矩阵进行描述。拓扑矩阵主要有以下几种: 单元节点—棱线拓扑矩阵, 单元节点拓扑矩阵, 整体节点拓扑矩阵等。

单元节点—棱线拓扑矩阵是用矩阵方法表示节点与棱线相关性的一种方法。设单元网格图中有 n 个节点, k 个棱线, 构成一个 $n \times k$ 阶矩阵, 记做

$$A = [a_{ij}] \quad (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k) \quad (3-4)$$

其中, $a_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{仅当 } v_i \text{ 与 } e_j \text{ 相关时,} \\ 0; & \text{当 } v_i \text{ 与 } e_j \text{ 不相关时。} \end{cases}$

矩阵 A 中第 i 行对应第 i 个节点, 第 j 列对应第 j 条棱线。当某元素为 1 时, 对应的节点与棱线相关, 当元素为 0 时, 对应的节点与棱线不相关。这样由矩阵

A 完全地确定了单元节点与棱线的拓扑关系。

单元节点拓扑矩阵是用矩阵方法表示单元节点间相关性的一种方法。设单元网格图中有 n 个节点, 构造一个 $n \times n$ 阶的矩阵, 记作

$$B = [b_{ij}] (i, j = 1, \dots, n; i < j) \quad (3-5)$$

其中, $b_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{如果 } i \text{ 和 } j \text{ 节点是相关的,} \\ 0; & \text{反之。} \end{cases}$

通过以上拓扑矩阵的分析, 可以便于对于空间和平面等研究对象通过拓扑关系数据库加以描述。

3.2.2 空域航路网络拓扑关系的数学表示

根据上面介绍的拓扑理论分析, 对实际航路的拓扑网络进行如下数学表示。

实际的管制空域包括导航台, 机场, 位置报告点和连接这些航路节点的航路组成的网络结构。我们通过对这些点和线段的描述, 建立拓扑网络数据库, 计算机通过读取数据库数据, 便能自动绘制网络图; 根据随机优化算法选择相关航路, 完成扇区优化。

通过关联矩阵描述各节点与线段, 线段与航线之间的关系: 其中, 若设 V 为节点集合, E 为线段集合, 则有

$$V = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_n]^T \quad (3-6)$$

$$E = [e_1, e_2, e_3, \dots, e_m] \quad (3-7)$$

若 G 为 $m \times n$ 阶节点和航段的关联矩阵, 则按照式 (3-4) 的定义有

$$G = [g_{ij}] \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n) \quad (3-8)$$

其中, 矩阵 G 的元素 $g_{ij} \in \{0, 1\}$, $g_{ij} = 1$ 表示航路点 v_j 是航段 e_i 的端点之一; $g_{ij} = 0$ 表示航段 e_i 与航路点 v_j 不相关, m, n 分别是分析空域中的航段数和航路点数。

同时, 如果我们根据飞行计划, 确定各个航线的航段组成, 则航段和航线的关联矩阵可以表示如下:

$$R = [r_{ij}] \quad (i = 1, \dots, l; j = 1, \dots, m) \quad (3-9)$$

其中, 矩阵 R 的元素 $r_{ij} \in \{0, 1\}$, $r_{ij} = 1$ 表示飞行计划的路线 c_i 与航段 e_j 相关; $r_{ij} = 0$ 表示飞行计划的路线 c_i 与航段 e_j 不相关, m, l 分别是分析空域中的直线航

段数和分析时段的航班数。

若用 C 表示航线集合, 用 Q_c 表示航线上流量, 即飞机数, D 表示不同航段上的流量矩阵, 则有

$$C = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_r] \quad (3-10)$$

$$Q_c = [q_{c1}, q_{c2}, \dots, q_{cr}]^T \quad (3-11)$$

$$D = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_m]^T \quad (3-12)$$

其中, q_{ci} 表示第 i 航线的飞机数, d_j 表示第 j 航段的飞机数。由式 (3-9)、式 (3-11) 和式 (3-12), 航线和航段存在如下关系:

$$Q_c = RD \quad (3-13)$$

设 F 为 $1 \times m$ 的工作负荷矩阵:

$$F = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_m] \quad (3-14)$$

其中, f_i 表示在第 i 航段, 管制员指挥一架飞机的负荷矩阵。 F 表明 m 个航段, 管制人员指挥一架飞机的负荷矩阵。由 (3-14) 和 (3-12), 可得总工作负荷为:

$$W = FD = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_m] [d_1, d_2, d_3, \dots, d_m]^T = \sum f_i \times d_i \quad (3-15)$$

3.3 影响扇区优化设计的主要因素

空中交通管制(ATC)系统必须能够适应暂时的或较为长久的空中交通量及其组成的变化。通常空中交通的增长导致管制员工作负荷的增加, 并且如果预期重新发生长时期的超负荷的情况, 可能需要重新分配职责。因此, 可能要把空域划分为几个扇区, 其中空中交通管制服务可能由一个或几个工作席位提供。通常, 扇区是管制区的一部分。

我们在实际扇区设计过程中, 应当考虑以下规则:

(1) 不允许航路的交通汇合在靠近边界处或在雷达显示屏边缘发生。这会使管制员不得不在管制马上要转移和移交之前执行战术动作。这种安排出现出错的机会高。而且, 如果扇区最繁忙的部分远离显示中心, 则管制员可能在注意力集中到显示屏外边缘时不能观察整个空域。

(2) 在繁忙的机场位置上最好给出一个 ACC (区域管制) 扇区来处理从 APP (进场管制) 移交直到到达爬升顶点而到巡航高度的出港飞机。对于一个繁忙机

场的进港飞机，同样有一个 ACC 扇区对进港飞机从下降顶点一直到移交到 APP 进行处理。这样安排使管制员把注意力集中到单项任务上。处理从巡航高度下来的进港飞机的管制员可协助交通中的飞机排好顺序来协助 APP（进场管制）。设计的一个扇区用来支持出港，这可使管制员加快交通中的飞机飞到它们的指定航路上，因而排除了高度限制。

(3)在评价扇区设计时，空域规划设计人员必须测定在所规划扇区中交通高峰时间的需要。这是通过观察实际运行和管制员的工作量来完成的。工作量不一定与扇区内一次或一小时的飞机飞行数量相关。较好测定法是知道所需的无线电或电话接触和管制动作是多少。减少过重的工作量的解决方法之一是将空域进行垂直分隔。即产生一个扇区来处理某巡航高度上的交通而下层的扇区处理低于此高度的交通。这是减少扇区工作量最通常的方法，而且在分繁忙的区域内几乎总是这样做的。但是，当在机场周围这样做时，可能会增加管制员协调和工作量，除非采用缓和程序才可避免。不应使飞机停止爬升或下降，提早管制移交可避免这种情况。

(4)始终要研究已规划扇区设计的雷达和直接无线电通信覆盖范围。这些系统必须能支持该扇区的预定管制功能。

(5)如果在一扇区内的引导在另一扇区边界附近：要记住飞行不得接近边界多于规定雷达间隔的二分之一。此标准的采用是当相邻扇区也采用雷达标准时，由于这条规则，建议在受到影响的区域增加扇区的尺寸。

其它影响空域边界/扇区设计的因素：

- ①在一个单一控制功能下的备降/ 多个机场；
- ②毗连的 TMA/ TCA 管制动作；
- ③特别的军事操作/ 训练机场/区域；
- ④地形。

3.4 数学模型的建立

根据 DORATASK 方法，实际扇区的工作负荷为管制员工作负荷的 80%。在确保扇区设计的负荷满足以上原则的基础上，我们在进行扇区优化的时候尽量减少扇区的数目。设计的扇区数目满足以下关系：

$$N_s = \begin{cases} \text{INT}\left(\frac{W_T}{S \times 80\%}\right) + 1, & \frac{W_T}{S \times 80\%} \neq \text{INT}\left(\frac{W_T}{S \times 80\%}\right) \\ \text{INT}\left(\frac{W_T}{S \times 80\%}\right), & \frac{W_T}{S \times 80\%} = \text{INT}\left(\frac{W_T}{S \times 80\%}\right) \end{cases} \quad (3-16)$$

其中， W_T 为空域总工作负荷，用时间表示。 S 为管制员在某一时间段的总

工作负荷，采用时间表示。当 $\left(\frac{W_T}{S \times 80\%}\right)$ 计算结果不为整数，对计算结果取整数加一（INT 符号为取整符号），得到 N_s 为最小扇区数；如果 $\left(\frac{W_T}{S \times 80\%}\right)$ 计算结果为整数，直接得到 N_s 为最小扇区数。

在满足扇区数最小化的前提下，我们还应当保证使扇区之间的工作负荷较为均衡。建立如下扇区优化的数学模型：

目标函数：

$$J = \min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |Z_i - Z_j| \right) \quad (3-17)$$

约束条件：

根据节点和航段的拓扑关系，保证随机搜索得到的扇区连续性。

第四章 扇区优化系统设计

在介绍了工作负荷量化工作, 空域航路网络拓扑的数学描述, 空域扇区划分的理论基础和扇区优化的数学模型, 我们下面将详细介绍有关模拟退火算法和基于此算法的优化系统。

本系统采用面向对象的高级编程语言 Microsoft Visual C++6.0 构造了整个软件系统框架。该语言的最大技术特点是采用了近年来风靡软件编程界的面向对象编程技术(Object Oriented Programming)。该技术在“类—对象—成员”的体系下以模块化的方式进行编程。

4.1 系统总体结构与界面设计

4.1.1 系统总体结构

整个系统由数据库、主控模块、优化算法模块、航路图生成模块、工作负荷计算模块、和结果输出模块及连接它们的接口模块组成。数据库主要包括完成工作负荷计算和航路图绘制等功能的相应的数据库组成。数据库的构建是本系统的基础。主控模块是系统调用各个模块, 便于进行数据传输和调用等功能的模块。算法模块是解决采集得到的航段负荷, 如何进行扇区优化的, 接受数据模块的工作负荷信息, 进行随机优化处理, 然后输出优化结果给结果输出模块, 该模块是优化系统的核心模块。结果输出模块接受优化结果, 输出优化后的数据, 给出直方图、饼状图、折面图、点阵图、实体图和二维三维转换图, 直观优化显示结果。它们的相互关系如图显示:

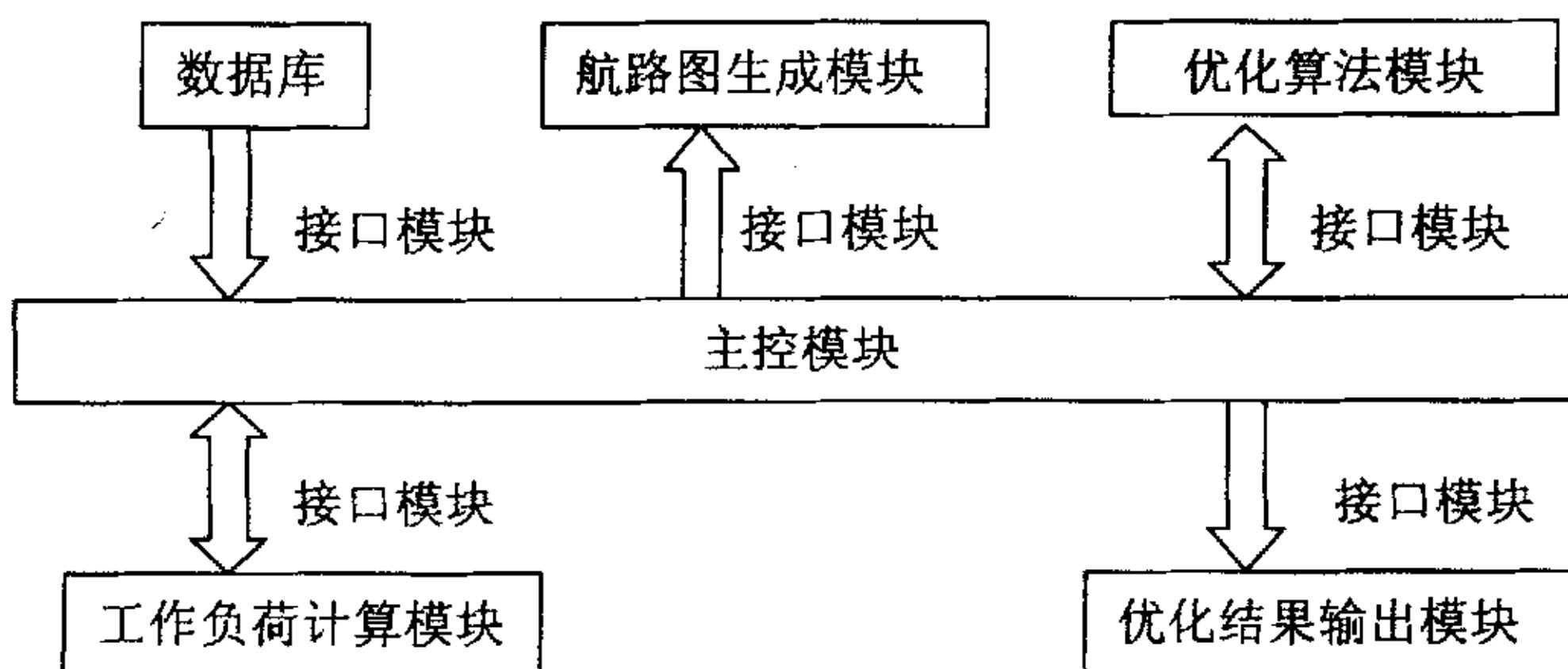


图 4-1 优化系统结构

4.1.2 系统总体界面设计

本界面采用 WINDOWS XP 风格设计。菜单，状态条，工具条，浮动菜单，对话框，按钮，界面色彩等都为 WINDOWS XP 风格。

(1)系统的启动采用程序通常的屏幕闪现功能，显示系统名称，开发单位等文字信息。系统采用全屏显示功能，完全覆盖其它窗口信息。系统界面左侧可以显示对话框栏，重要的操作指令只需要点击相应按钮就可以实现。

(2)系统界面下面的状态条有以下功能：

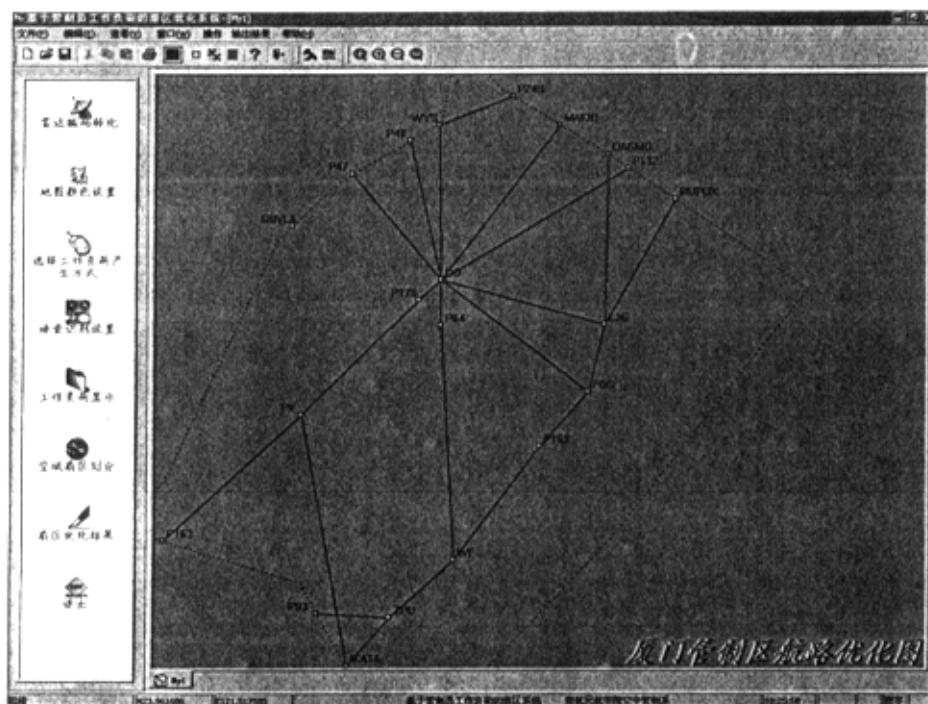
- ①显示界面指令的状态信息。
- ②显示鼠标所在界面客户区的经纬度坐标信息。
- ③滚动文字显示系统相关信息。
- ④显示系统时间。

(3)本系统采用多文档形式，系统采用 TAB 标签形式，便于几个视图之间的切换，比如可以同时打开几个管制区视图，实现相互切换。

(4)系统可以实现视图的背景色和字体颜色的选择。

(5)系统读取雷达数据库信息，列表显示航班信息。

(6)系统的关于对话框，可以显示通过伸缩对话框显示星空荣誉信息，本信息可以滚动显示系统名称，版本号，开发单位等。



因为导航台、机场和报告点为 21 个, 相应的航路网络为 21×21 的矩阵表示。矩阵行列交叉点上的元素若为 0, 表示该两点间没有连通, 反之若为 1 则代表两点之间的航路相通。

4.2.3 管制工作负荷数据库

根据 2.3 节管制员工作负荷量化方法, 对于《中国民用航空无线电通话手册》中机场管制、进近管制和区域管制的常用的 182 条无线电用语进行统计, 根据附录 1 的统计结果, 建立管制工作负荷数据库, 如图 4-6 所示。在图中, 字段“序号”和航班管制负荷数据库中的各个记录内容相对应。字段“名称”是实际的管制用语指令。字段“工作负荷”, 是指发出管制指令所需时间, 单位是时间秒。

序号	名称	工作负荷
92	准备好起飞时报告	4.3
93	准备好(起飞)了吗?	3.8
94	进跑道是否立即起飞?	4.3
95	若不能发出起飞许可时: 等待	2.1
96	进跑道并等待起飞许可的指令: 进跑道	2.1
97	准备立即起飞, 可以进跑道	4.7
98	(前提条件)进跑道	5.9
99	可以起飞【离地报告】	7.4
100	当起飞许可未被执行时 立即起飞, 否则退出跑道	4.7
101	立即起飞, 否则在跑道外等待	4.7
102	取消起飞许可(航空器处于静止状态)	3.8
103	在紧急情况下, 终止航空器的起飞(航空器已开始滑跑)	5.2
104	同意右/左转	2.3
105	听我指挥右/左转	2.4
106	起飞时间(时间)	4.7
107	通过(高度)以后、(指令)	5.3
108	直线上升(指令)	3.8
109	加入(起落航线的位置), (号码)跑道, 地面风	4.6
110	直接进近, (号码)跑道	4.7
111	在有航站自动情报服务的机场, 加入(起落航线的位置)	5.2
112	跟在(机型和位置)后面, 第…个落地	4.8
113	延长三边	3.2
114	四边/五边/长五边报告	3.6
115	继续进近	3.3
116	可以着陆	2.4
117	多条跑道时 可以落地、(号码)跑道	3.2
118	可以连续	3.4
119	落地后全停	4.2

图 4-6 管制工作负荷数据库

4.2.4 航班航段数据库

在对厦门管制区 5 月 17 号上午 10 点 10 分到 10 点 16 分 43 秒的 14 个航班进行统计基础上, 确定其所经历的航段路径, 建立以下航班航段数据库如图 4-7 所示。表中的数值代表各个航段的代号, 如表 4-1 所示。如果值为非 0, 表示航班经历该航段序号; 为 0, 表示不再经历管制区航段。

表 4-1 航段名称代号对应表

代号	航段名	代号	航段名	代号	航段名
1	P163-PV	9	P169-FQG	17	WYS-DO
2	PV-IKATA	10	FQG-DO	18	P48-DO
3	PV-P176	11	FQG-LJG	19	P47-DO
4	IKATA-ZPU	12	LJG-DO	20	IKATA-GUVLA
5	ZPU-P93	13	LJG-DAGMO	21	P176-DO
6	ZPU-WF	14	LJG-RUPOX	22	P84-DO
7	WF-P84	15	P132-DO	23	WYS-P249
8	WF-P169	16	MAKIB-DO		

ID	航班名	航段1	航段2	航段3	航段4
1	东航5965	15	19	0	0
2	东航592	16	21	3	1
3	海南7269	23	17	22	7
4	南方3515	4	6	8	9
5	上航803	14	11	9	8
6	上航855	2	3	11	19
7	深航8117	18	12	11	0
8	厦航8367	5	5	0	0
9	上航308	20	0	0	0
10	东航531	16	10	9	8
11	东航5316	6	4	20	0
12	国航6327	17	15	0	0
13	南航3537	5	6	0	0
14	厦航8337	8	9	10	19
	(自动编号)	0	0	0	0

图 4-7 航班航段数据库

4.2.5 航班管制负荷数据库

如何考察实际航班通过各个航段的工作负荷呢？需要建立航线负荷数据库。该数据库针对 14 个航班，在每一航段发出若干条指令。该数据库将一个航段的负荷设置成 5 个字段，代表航班经过此航段，管制员发出的几种指令。如：下图第一行，表示东航 5965 在通过第一个航段时，发出的指令是编号为 13, 14, 23。此编号即为管制工作负荷数据库中的序号值，读取该数据库序号，也就知道了航段和航线负荷值大小。表中如果为 0，表示不发出指令。

航线名	航段1A	航段1B	航段1C	航段1D	航段1E	航段2A	航段2B	航段2C	航段2D	航段2E	航段3A
东航5965	13	14	23	0	0	21	0	0	0	0	0
东航592	8	12	13	0	0	13	14	15	0	0	15
海南7269	2	12	32	0	0	13	20	143	169	0	12
南方3515	7	20	27	0	0	3	0	0	0	0	37
上航803	19	38	0	0	0	40	0	0	0	0	14
上航855	33	36	28	15	0	36	0	0	0	0	0
深圳917	1	0	0	0	0	20	25	0	0	0	171
厦航8367	9	0	0	0	0	25	26	0	0	0	176
上航308	12	14	16	0	0	0	0	0	0	0	0
东航531	16	22	20	0	0	23	27	0	0	0	15
东航5316	38	0	0	0	0	21	36	22	0	0	24
国航6327	173	180	34	0	0	37	13	23	0	0	0
南航3537	2	20	0	0	0	36	0	0	0	0	0
厦航8337	15	17	0	0	0	26	0	0	0	0	11

图 4-8 航班管制负荷数据库

4.2.6 数据库之间相互关系

应用程序在完成相应功能时，需要调用相关的数据库，比如绘制管制区域航路结构图，需要调用航路网络节点位置数据库、航路网络拓扑结构数据库、航班航段数据库、航班管制负荷数据库和管制工作负荷数据库。以下图4-9是统计航段负荷值并在屏幕显示航段负荷值大小时，各个数据库之间的关系：

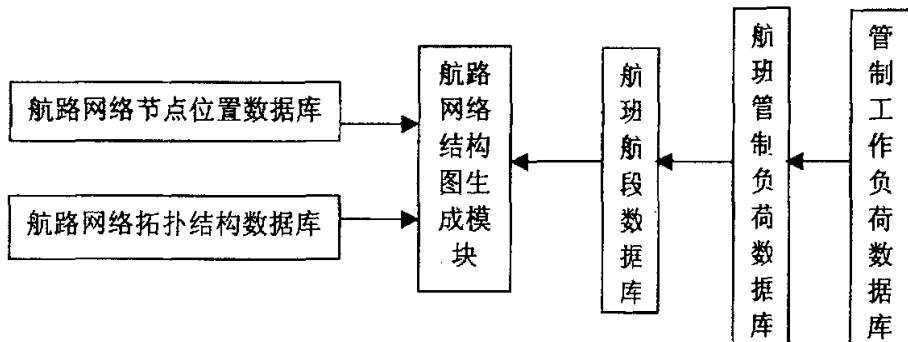


图 4-9 数据库之间关系图

4.3 系统功能模块

4.3.1 航路图生成模块

航路图生成模块主要解决以下问题：①在屏幕绘制管制区航路结构图；②绘制各个网络节点，并标注节点名称；③对各个航段标注负荷值；④绘制管制区边

界线。

如图 4-9 所示, 航路图生成模块需要读取管制工作负荷数据库、航线负荷数据库、航班航段数据库、航路网络节点数据库和航路网络拓扑结构数据库。但由于图 4-4 航路网络节点数据库通过的坐标为经纬度坐标, 因而地理坐标和屏幕坐标的转化问题, 首先必须解决。

4.3.1.1 坐标系统转化

本系统通过在 CMyView 类里面设有两个函数 `conx(double org)` 和 `cony(double org)` 来完成坐标系统的转化。这两个函数就是分别转化横坐标和纵坐标的。

坐标系统的转化公式如下:

$$\begin{cases} x = 370 + (x_0 - 118.12) \times 130.77 \\ y = 600 - (y_0 - 24.53) \times 173.13 \end{cases} \quad (4-1)$$

其中, x_0 是输入的经度值, y_0 为输入的纬度值, 370 和 600 是厦门这一点的屏幕坐标, 118.12 和 24.53 分别是厦门的经纬度坐标, 130.77 和 173.13 分别是地理坐标与屏幕坐标在 x 方向和 y 方向上的比例。它是这样得来的, 事先得到两点的屏幕坐标和地理经纬度, 比如说青州和厦门, 厦门的地理坐标是 (118.12, 24.53), 青州的地理坐标是 (117.99, 26.54), 在 1024×768 分辨率的屏幕上, 厦门的屏幕坐标是 (370, 600), 青州的屏幕坐标是 (353, 252), 就可得出屏幕上的 x 方向上一个像素等于地理上的 $(370 - 353) / (118.12 - 117.99)$ 经度。这个值就是 130.77, 所以, 式子 $370 + (x_0 - 118.12) \times 130.77$ 就表示以厦门为基准点, 经度值 x_0 所代表的屏幕坐标上的 x 值。 y 方向道理和它一样。

另外, 有了这个转化关系以后, 从屏幕坐标反求地理坐标也没问题了, 就把这个式子反解出来就行了。

根据坐标之间的转化关系, 可以很容易地实现显示鼠标所在位置的地理坐标的功能和在计算机屏幕上绘制航路图的功能。

4.3.1.2 航路图生成模块具体问题的解决

解决了坐标的转化问题后, 对于该模块需要解决的四个方面的问题可以迎刃而解了。

- ① 该模块对于在屏幕绘制管制区航路结构图问题的解决是调用航路网络拓扑结构数据库, 运用 Visual C++ 的绘图函数功能, 在视图上绘制成

网络结构图。

- ② 绘制各个网络节点。通过调用航路网络节点位置数据库和坐标转化函数，编写绘制小方形节点的函数 DrawRect()，结合 VC++的绘图功能，完成节点绘制。
- ③ 对各个航段标注负荷值。实现调用工作负荷计算模块对各个航段的计算结果，读取航路网络拓扑结构数据库和航路网络节点位置数据库，确定各个航段的中点位置，写入负荷值大小。通过菜单，可以显示或隐藏负荷值的大小。
- ④ 绘制管制区边界线。调用航路网络节点位置数据库和坐标转化函数，运用 VC++绘图功能，绘制管制区边界线。

4.3.2 工作负荷计算模块

工作负荷计算模块主要是通过调用数据库，完成各个航段负荷的计算，输出计算结果给优化算法模块和航路图生成模块，作为进行优化工作的数据来源。工作负荷计算模块需要调用管制工作负荷数据库、航班管制负荷数据库和航班航段数据库。

如 4.2 节中对于数据库的介绍，航班管制负荷数据库中各个记录的内容是通过调用管制工作负荷数据库，通过管制工作负荷数据库的序号对应负荷值，可以计算得到各个航班经过的航段的负荷大小。通过读取航班航段数据库，计算在该时段整个管制区的各个航段负荷值大小。

4.3.3 优化算法模块

目前比较成熟的随机优化算法主要有模拟退火算法和遗传算法等，其它的传统优化算法还有随机试验法、随机方向法、复合形法等弱搜索方法以及拉格朗日乘子法、惩罚函数法等强搜索方法。

弱搜索方法是利用计算机产生的伪随机数随机抽样进行搜索，其搜索效率低下。强搜索方法则是利用梯度等确定性信息引导搜索，其优点是搜索效率高，缺点是容易陷入局部解。遗传算法优于弱搜索方法在于利用基因遗传算子能启发式地自适应搜索到全局最优点的区域；但遗传算法对于求解多解问题的时候，算法容易过早收敛，另外当种群规模较大，一般 50~100，耗费时间太多，难以解决象大型结构优化问题等。

模拟退火算法介于弱搜索方法与强搜索方法之间。该算法具有以下优点：①全局性，可搜索到全局近似最优解。②健壮性，最终解的质量与初始解的选取无关，且搜索过程不易蜕变。③通用性，对不同的问题均有良好的适用性。对于模拟退火算法缺乏记忆能力，当规模较大的时候，搜索效率不高等问题，可以通过

对于加温过程,记忆能力返回搜索过程,回火功能等环节的算法功能的改进和变异,达到克服上述算法的缺陷。

4.3.3.1 模拟退火算法的介绍

模拟退火算法(Simulated Annealing 以下简称 SA)^{[25][26][27]}是 1953 年 N. Metropolis 等人在研究二维相变时提出的,该方法将组合优化问题与统计力学中的热平衡问题相类比,通过模拟退火过程对优化问题进行求解。由于该算法在理论上可保证找到问题的全局最优解或全局近似最优解,故其具有相当广泛的应用前景。

SA 算法用于解决组合优化问题的出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题间的相似性。固化的物质体系所具有的能级或能态随内部原子或晶体排列的不同而不同,而冷却速率决定着系统的内部物理结构。如果系统以较快的速率冷却,固化物质内部将具有准稳态的非有序结构,并具有较高的能级,相对于最低能量的基态它只能是局部最小的能态。为达到更稳定的全局最低的能级,需先将固体物质加热到一个较高的温度,使其中的原子可自由地运动,然后慢慢冷却。这样原子有足够的空间进行最佳的排列使得内部势能极小化。若在凝结点附近的温度下降速度足够慢,则固体物质会形成最低能量基态。根据 Metropolis 准则,粒子在温度 T 时趋于平衡的几率为 $e^{-\Delta E/(kT)}$,其中 E 为温度 T 时的内能, ΔE 为其改变量, k 为 Boltzmann 常数。

用固体退火模拟组合优化问题,将内能 E 模拟为目标函数 f ,温度 T 演化为控制参数 t ,即得到解组合优化问题的模拟退火算法:由初始解 i 和控制参数初值 t 开始,对当前解重复“产生新解→计算目标函数差→判断是否接受→接受或舍弃”的迭代,并逐步衰减 t 值,算法终止时的当前解即为所得近似最优解。退火过程由冷却进度表 (Cooling Schedule) 控制,包括控制参数的初值 t 及其衰减因子 Δt 、每个 t 值时的迭代次数 (称为一个 Mapkob 链的长度) L 和停止条件 S 。

数学模型由解空间、目标函数和初始解三部分组成。解空间是指对所有可能解均为可行解的集合,或允许包含不可行解但在目标函数中用罚函数 (Penalty Function) 惩罚以致最终完全排除不可行解;目标函数是指对优化目标的量化描述,是解空间到某个数集的一个映射,通常表为若干优化目标的一个和式,应正确体现问题的整体优化要求且较易计算,当解空间包含不可行解时还应包括罚函数项;初始解是算法迭代的起点,试验表明,模拟退火算法是健壮的 (Robust),即最终解的求得不十分依赖初始解的选取,从而可任意选取一个初始解。新解的产生和接受机制由四个步骤构成:

首先，按某种随机机制由当前解产生一个新解，通常通过简单变换（如对部分元素的置换、互换或反演等）产生，可能产生的新解构成当前解的邻域。

其次，计算新解伴随的目标函数差，一般由变换的改变部分直接求得。

第三，由接受准则，即新解更优，或恶化但满足 Metropolis 准则，判断是否接受新解，对有不可行解而限定解空间仅包含可行解时，还需要判断可行性。

最后，满足接受准则时进行当前解和目标函数的迭代，否则舍弃新解。

SA 算法用 Metropolis 准则产生优化问题解的序列，并由与 Metropolis 准则相对应的转移概率确定是否从当前解 i 到新解 j 的转移。如下是其概率计算公式：

$$P_i(i \Rightarrow j) = \begin{cases} 1 & f(i) \leq f(j) \\ \exp\left[\frac{f(i) - f(j)}{t}\right] & \text{其它} \end{cases} \quad (4-2)$$

SA 算法依据 Metropolis 准则接受新解，因此除接受优化解外，还在一个限定范围内接受恶化解，这正是模拟退火算法优于局部搜索算法的本质区别所在。开始时， t 的值较大，可能接受较差的恶化解，随着 t 的减小，只能接受较好的恶化解，最后在 t 趋于零时，就不再接受任何恶化解了。这就使模拟退火算法可以从局部最优的陷阱中跳出，最后求出整体最优解。

4.3.3.2 优化原则

优化划分的每个扇区必须是连续的，保持扇区的连续性是最重要的优化准则。为了保持优化划分的连续性，我们根据两节点纬度值，高纬度节点搜索的下个节点优先选择高纬度节点，低纬度节点下一个节点优先选择低纬度节点，然后再按照都优先选择经度较小的下一个节点。如果搜索到的节点的经度相同，设置随机数，随机选择下一个节点。如果搜索到网络的末端，需要返回搜索，需要记录上一个已经历的节点及它的相邻节点域，下次搜索从搜索过的节点的相邻节点域中选择新的节点（当然，必须排除已搜索过的节点），将搜索选择了的线段存入数组中。每次搜索都进行扇区负荷值的计算。如果新搜索到的线段在另一扇区已经被搜索并纳入其中，将结合目标函数，重新决定该线段的归属。本次搜索的目标值与上次目标值之差根据式 (4-2)，决定是否进行状态和目标值的迭代。最后，当满足终止条件，输出三扇区负荷大小，及三扇区包括的航段。终止条件为当本次迭代目标值小于管制区总负荷的二十三分之一大小且本次温度值减小到总工作负荷的千分之一。

4.3.3.3 变量介绍

表 4-2 优化变量表

	变量	含义
1	areaworkload1, areaworkload2, areaworkload3	分别为每次搜索的扇区工作负荷大小
2	allworkload	为空域总工作负荷值
3	T	退火温度, 设为 $T = allworkload/2$
4	col[temp1][0], col[temp1][1]	分别为 temp1 点的经纬度坐标值
5	app	为设置的中止条件 $app = allworkload/23$
6	ya 和 yb	分别为上次和本次搜索的目标值大小
7	delta	为 $yb - ya$ 的差值
8	maxx 和 maxy	分别为上次搜索确定的节点中比较高纬度的节点的经纬度坐标值
9	minx 和 miny	分别为上次搜索确定的节点比较低纬度的节点的经纬度坐标值
10	pp 和 qq	分别为上次搜索确定的高纬度节点和低纬度节点根据拓扑关系确定的相关联的节点序号的一维数组
11	ss 和 aa	分别为 pp 和 qq 的数组大小 (即相邻节点的个数)
12	temp1, temp2	分别为上次搜索确定的高纬度和低纬度节点的序号值 (即上次搜索到的 pp 和 qq 数组中的值)
13	temp3, temp4	分别为本次将要搜索的高纬度和低纬度节点序号值
14	load	为空域位置拓扑关系数据库的二维数组对象, 通过读取该数据库, 可以确定各个节点的拓扑关系及各个节点的相邻节点的序号
15	oo1 和 oo2	分别为一次搜索确定的高纬度和低纬度扇区线段序号, 存储在这两个一维数组中
16	ap 和 aq	当上次搜索到网络的末端, 必须回头进行搜索, 它们分别是退回上一个节点所对应的拓扑关系确定的相关联节点的序号构成的一维数组
17	truetemp1 和 truetemp2	分别是退回的上一节点的节点序号
18	ccd 和 ccx	分别为 ap 和 aq 数组的大小

4.3.3.4 优化流程图

优化算法模块的流程图如图 4-10 所示:

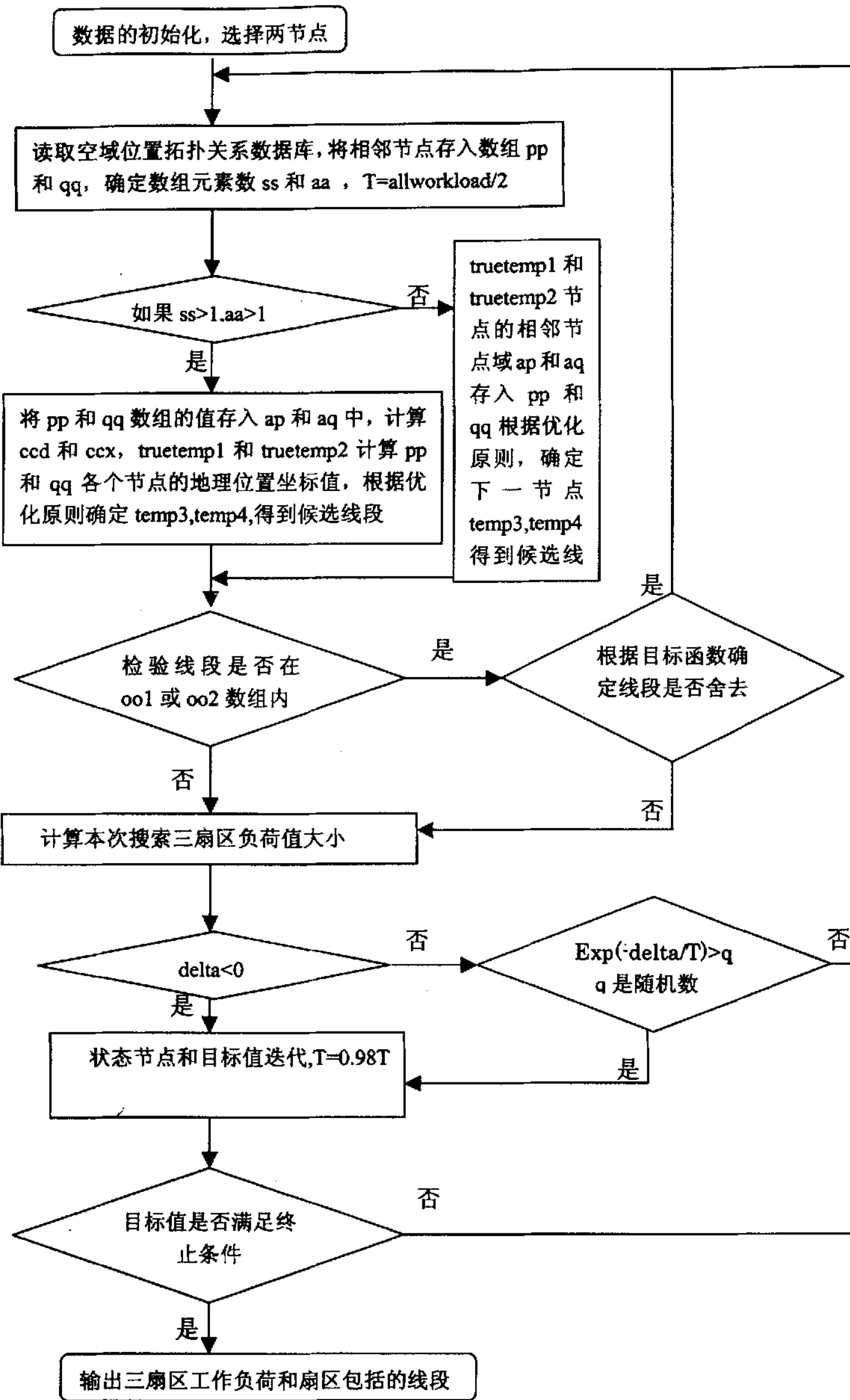


图 4-10 空域扇区优化中模拟退火算法流程图

4.3.4 结果输出模块

随机优化模块得到的优化结果,通过接口模块将空域总工作负荷,三个扇区工作负荷值,扇区的划分,最优状态等参数传递给优化结果模块。优化结果模块将接收到的参数值,通过对话框和视图显示结果,对话框可以通过二维和三维相互转化的直方图,饼状图、折面图、点阵图和实体图,显示优化结果。如图所示。

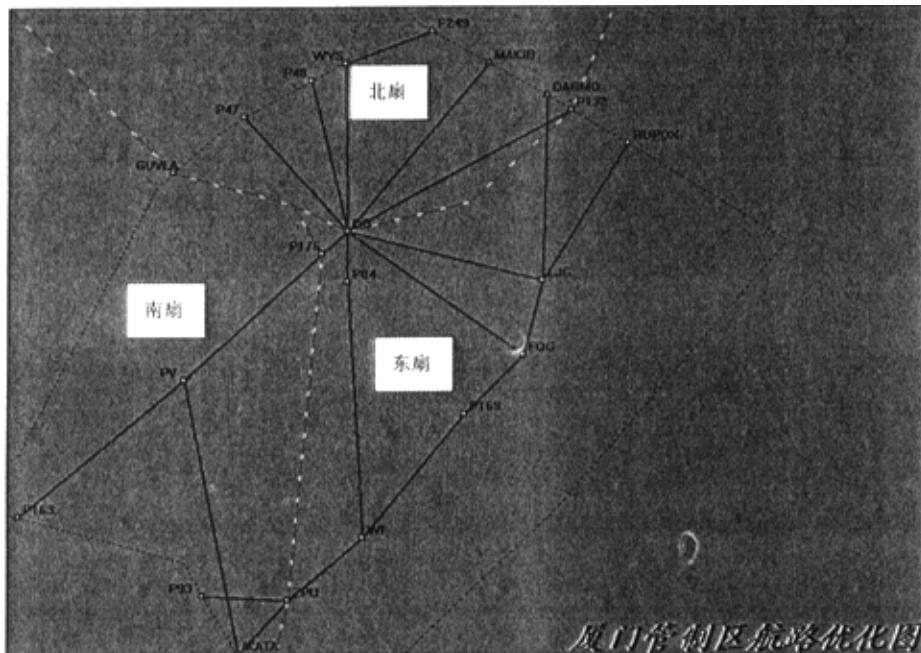


图 4-11 优化结果视图

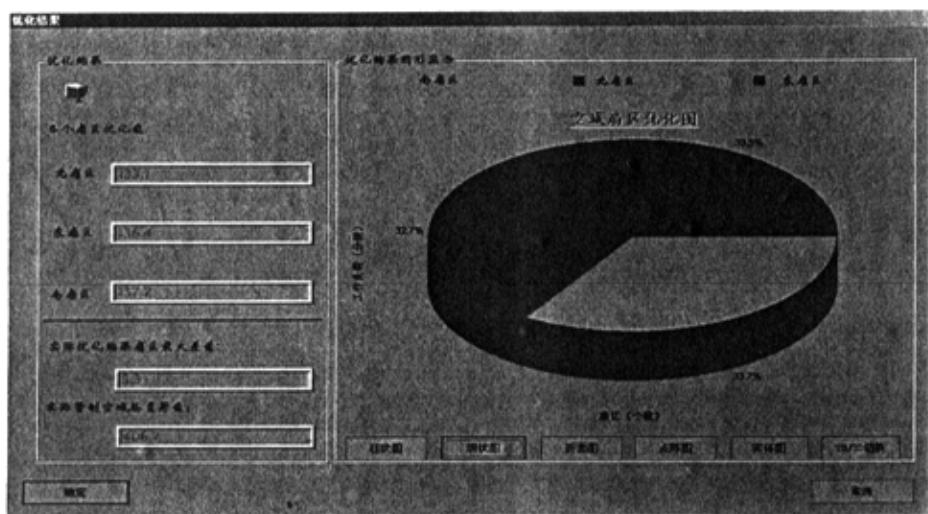


图 4-12 优化结果对话框图

4.4 算例及优化结果分析

对厦门管制区高空中航路结构图进行了优化，在设置的几组数据，优化结果均满足终止条件。表 4-3 是根据 5 月 17 号上午 10 点 10 分到 10 点 16 分 43 秒统计计算得到的一组航段工作负荷值（包括看得见、看不见部分和恢复时间之和）。（其中工作负荷单位为秒）

表 4-3 厦门管制区航段工作负荷表

航段	工作负荷	航段	工作负荷	航段	工作负荷
IKATA-PV	27.1	LJG-RUPOX	7.2	IKATA-GUVIA	0
IKATA-ZPU	27.4	D0-MAKIB	31.5	P93-ZPU	22.6
ZPU-WF	18.9	WYS-P249	22.1	WF-P84	10.1
WF--P169	34.1	P47--D0	11.7	P169--FQG	10.3
FQG--LJG	9.1	P176--PV	41.3	FQG-D0	14.0
P84--D0	10.1	P163--PV	18.8	D0--P132	17.8
P48--D0	11.9	P176--D0	0	D0-WYS	38.1
LJG--D0	9.3	LJG--DAGMO	10.2		

我们对于这组值进行空域扇区优化，根据扇区优化结果进行扇区划分。图 4-11 为空域扇区优化图。图中实线为管制区航路网，虚线为管制区域边界线，点划线为优化后的扇区边界，将空域划分为南扇区、东扇区和北扇区，根据优化原则，该扇区优化是最优划分。优化后北扇区的工作负荷值为 133.1 秒，东扇区工作负荷为 133.3 秒，南扇区工作负荷值为 137.2 秒，扇区之间差为 4.1 秒，同时 $T = 6.7$ ，均满足规定的终止条件总负荷值的二十三分之一，即 17.5 秒的要求。同时，对厦门管制区实际统计的扇区限定总工作负荷值 S 为 173 秒，则 $80\%S$ 为 138.4 秒，优化结果满足约束条件。图 4-13 说明采用模拟退火算法，目标函数值变化曲线。图 4-14 表示在优化过程中，三个扇区负荷值变化曲线图。图 4-15 显示优化结果，采用饼状图表示南扇区，东扇区和北扇区的工作负荷所占比例关系。通过优化，我们发现，在终止条件和约束条件下，在此空域扇区优化中已达到最优。

厦门管制区现在的实际区域管制扇区划分如图 4-16 所示。依据表 4-3 所示的工作负荷，南扇区工作负荷为 200.3 秒，北扇区为 203.3 秒，尽管扇区差满足优化的要求，但由于统计的扇区总负荷值 S 为 173 秒， $80\%S$ 为 138.4 秒。显然，实际的扇区工作负荷远远大于限定的管制员正常工作负荷值。因而，在表 4-3 的工作负荷条件下，厦门管制区如本优化结果，设置为三扇区，可以使管制员在正常的工作状态下，完成管制工作。

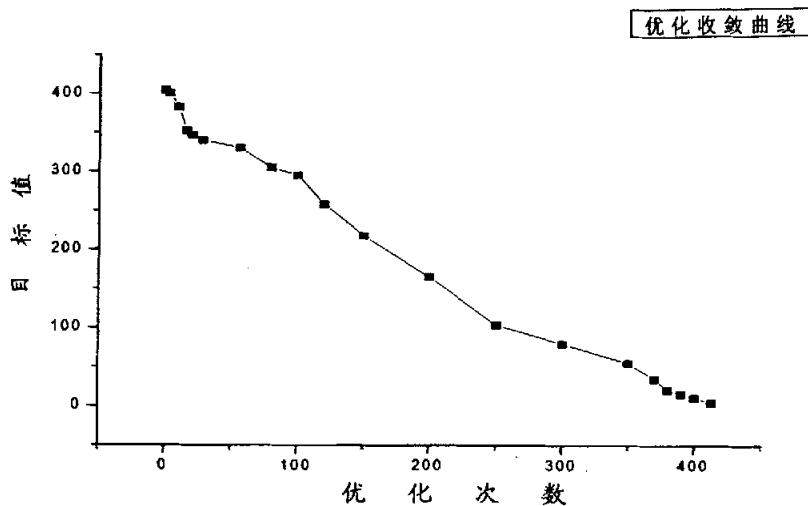


图 4-13 扇区优化收敛曲线图

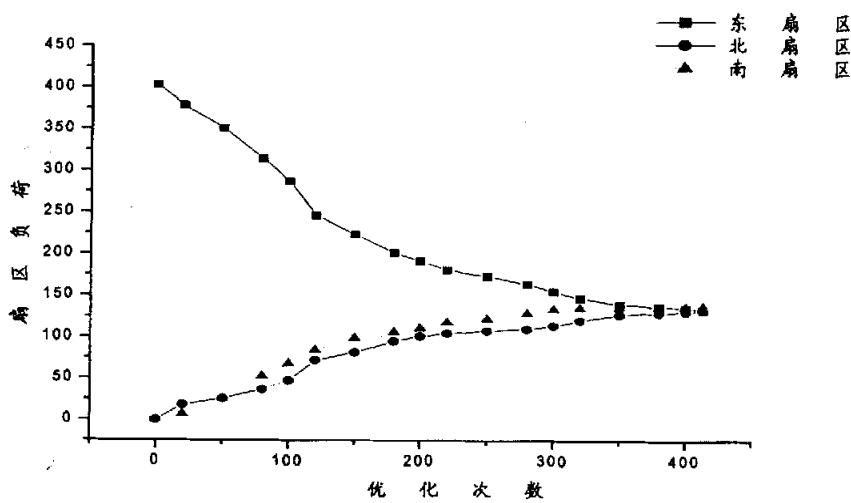


图 4-14 扇区优化负荷变化曲线图

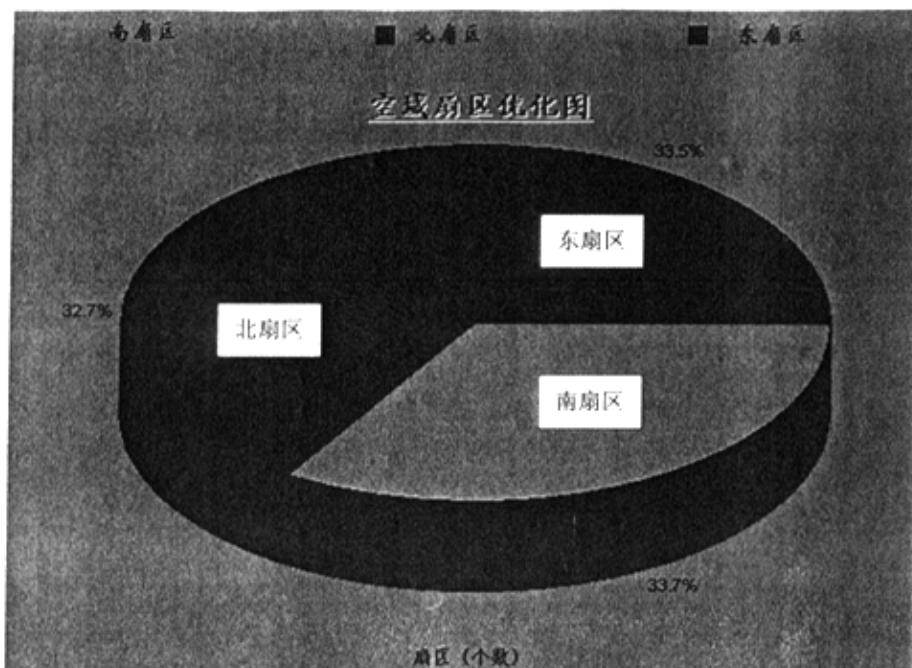


图 4-15 厦门管制区扇区优化结果图

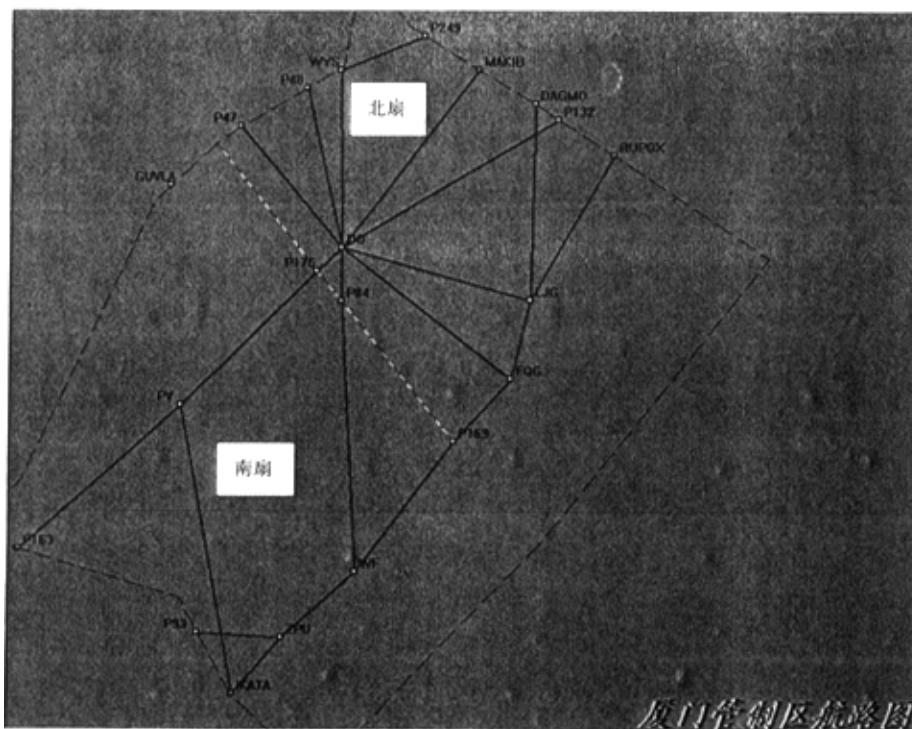


图 4-16 厦门管制区域管制实际扇区划分图

第五章 基于有限元划分的扇区优化

5.1 该算法提出的背景

对于第四章采用模拟退火算法用于解决扇区优化，分析结果发现，存在以下几点问题：第一，扇区优化的边界线直接穿过各个节点。当管制员在处理冲突时，他需要在最短时间内思考制定出指挥预案。同时，当飞行器在节点附近，管制员工作负荷过重。各个扇区的节点或者是强制报告点，或者是导航台，它可能是各个航路的交接点，如果扇区划分在节点上，管制员在节点处进行扇区移交，管制人员一方面处理扇区移交工作，另一方面需要进行节点处飞行器冲突的协调工作，扇区边缘区域的工作负荷比较大，这和前面 3.3 节介绍的扇区优化的理论是不相符的。第二，如果航空器一个节点距离扇区的边界比较短，管制员仍然没有足够的时间进行思考和制定预案。通过有限元的划分可以克服上述问题，从而使得优化结果更符合空管实际。

基于以上对于空管实际的考虑，本章对算法改进，基于有限元方法基础上，进行扇区优化。

5.2 有限元方法介绍

5.2.1 有限元方法主要思想

有限元法^[28](FEM)起源于五十年代航空工程中的结构矩阵分析方法。这一方法最初要解决的是复杂的杆系结构中力与位移的关系。为此它先把整个杆系结构分解开来。对每个杆件用材料力学或结构力学进行分析以得出其力学特性。然后再把这些杆件的力学特性借助于数学中的矩阵方法综合起来，以得出整个结构的力学特性。这种把结构“化整为零”，再把力学特性“积零为整”的思想在杆系结构的分析中取得了很大的成功。这种处理问题的思路，在五十年代后期开始被用来处理弹性力学中的连续体问题，并开始采用“有限单元法”这一术语，简称有限元法。这一方法的出现与发展为力学带来革命性的变化。现在该方法已广泛深入到固体力学、流体力学、热传导及电磁场等各种领域。该方法的主要优点是：①物理概念清晰，容易掌握；②方法灵活通用；③应用范围广；④可充分利用计算机。

5.2.2 Voronoi 图和 Delaunay 三角划分

Voronoi 图^[33]是把图论和几何求解混合起来的一种图案。它把空间的邻接定义为多边形的邻接,采用等距离原则确定任一物体所处 Voronoi 多边形的边界线,从而使地图的三种基本图形数据点、线和面纳入某种邻接物的集合。

定义 1 没有空间目标簇 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\} \subseteq R^N$, $V(p_i) = \{y \mid Dist(y, p_i) \leq Dist(y, p_j) \text{ 对所有 } j\}$, 式中 $Dist(y, p_i)$ 点 y 到 p_i 的最小距离, $V(p_i)$ 被称为空间目标的 Voronoi 多边形, $V(p) = \{V(p_1), V(p_2), \dots, V(p_n)\}$ 则被称为 Voronoi 图。

根据以上定义,可知 $V(p_i)$ 是由这些点构成的,这些点到 p_i 的距离比到 p_j ($i, j = 1, \dots, n, j \neq i$) 的距离要近,从而可以构造出点、线、面作为生成元的不同 Voronoi 图。要注意的是点源和线源、面源,线源和面源之间的 Voronoi 多边形边界线是抛物线,而点源与点源之间,线源和线源之间的 Voronoi 多边形边界线是直线。

Voronoi 图存在一个互为对偶的几何结构,即所谓的 Delaunay 三角剖分。在点集 S 中连接所有相邻节点即可得到 Delaunay 三角剖分,如图 5-1 中虚线所示。对于给定的平面点集,利用 Delaunay 三角剖分能够得到整体最优的三角形网格,因此非常适用于生成有限元网格。

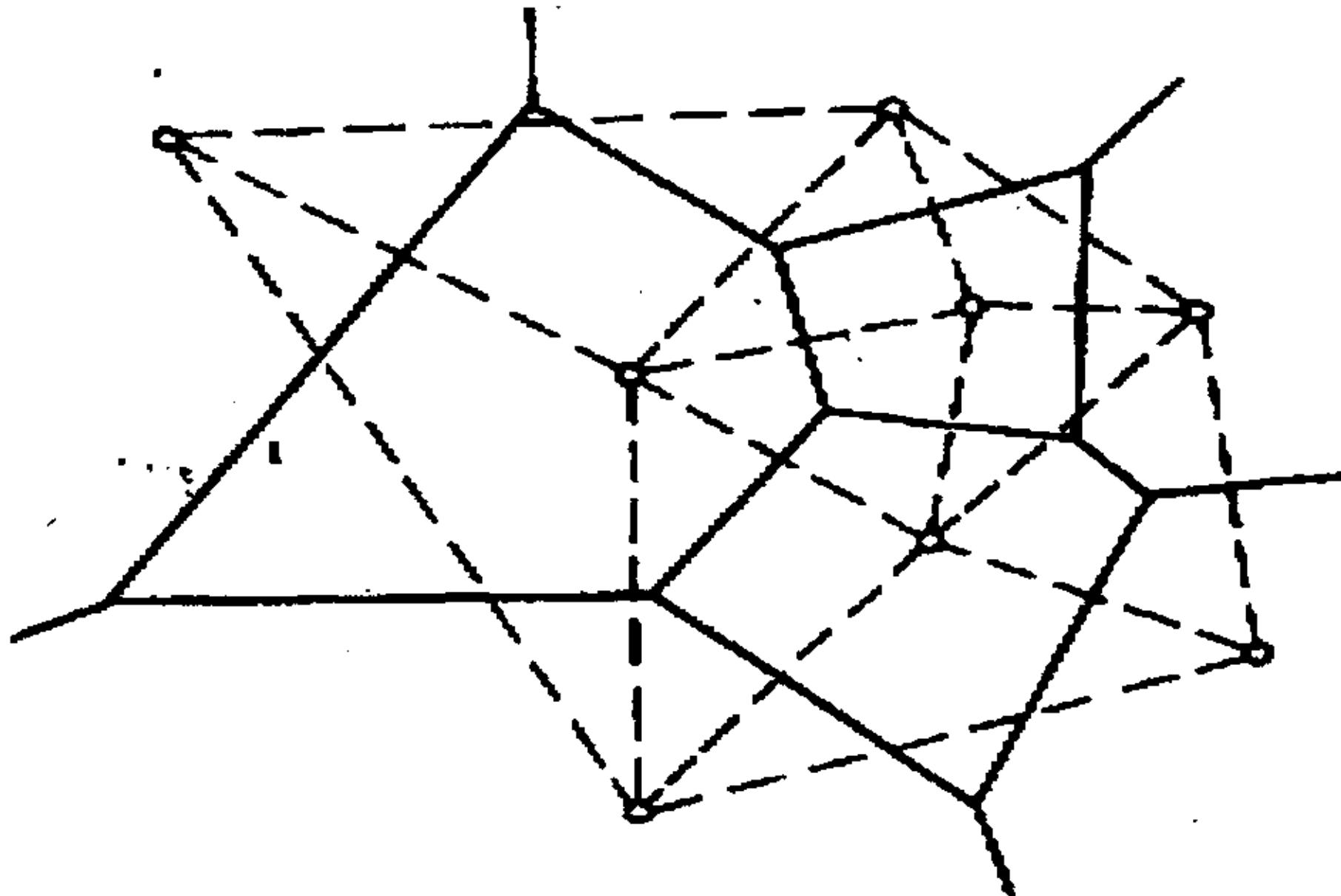


图 5-1 点集 S 的 Voronoi 图 (实线) 及对偶的 Delaunay 三角剖分 (虚线)

5.2.3 有限元方法用于空域航路分析

5.2.3.1 该算法的优化思路

本文的算法优化分为两步完成。第一步，根据管制工作的实际情况，设定约束，在此约束下，采用有限元方法针对空域确定单元。第二步，对得到的单元按照模拟退火算法进行随机优化，确定扇区划分。

对上面两步，应当解决的重要问题是：①实际的扇区设计，需要考虑某些固定航线的连续性问题，即尽量保证一些重要固定航线在一个扇区内，因而有限元分析中需要考虑该因素；②和第四章模拟退火算法一样，该算法仍需要保证扇区优化划分的连续性问题，即根据单元之间的拓扑关系，保证随机搜索得到是扇区的连续性。

(一) 根据实际管制工作性质确定优化约束

由 5.1 节所述，我们可以看出，在实际的管制工作中，应当尽量减少扇区边界处协调飞行器冲突的工作负荷，只保留监视工作负荷和扇区移交工作负荷。因此，根据对厦门管制区管制工作的统计，我们认为当航段两端点之间距离大于 8.5 公里时，管制指挥工作较为从容有序。根据此距离大小，可以确定航路网任意连通的两点之间的距离是否小于此距离。同时，对于中低空空域，需要考虑仪表进近航线、进离场航线的连续性，尽量不将同一航线划归不同扇区管理。如何确定不同航段的长度大小？下面将介绍根据经纬度坐标确定两点间距离的方法。

(二) 通过经纬度坐标确定两个地理位置的距离

地理坐标系统采用的是地球经纬度，目的是为了准确表示各个机场、导航台以及各架飞行航班的精确位置。以经度值为横坐标，以纬度值为纵坐标，并且经纬度的单位都用弧度来表示。地理坐标系建立之后，确定机场、导航台的位置很简单，因为它们的经纬度都是已知值。而要确定飞行航班在任意时刻的经纬度就比较麻烦了，但是可以通过估算的方法求出任意时刻的航班位置。因为航班都是在两个导航台之间飞行的，知道这两个导航台的经纬度，又知道航班的飞行速度、时间，用一个简单比例关系就可得出任意时刻的经纬度。但是这里必须要求初任意两个已知经纬度地点的距离。可以用几何的方法，得到了一个求地球上任意两点的大圆距离的公式，证明如下：

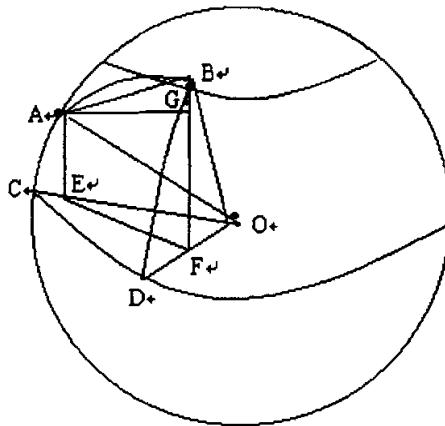


图5-2 地球大圆弧长计算示意图

如图5-2, 已知A、B两点经纬度, 要求地球大圆弧AB的长度或者 $\angle AOB$ 的大小。设A、B两点经度差为 $\angle COD$ 为, A点纬度为 $\angle AOC$, B点纬度为 $\angle BOD$, 以下证明:

$$\cos \angle AOB = \sin \angle AOC \times \sin \angle BOD + \cos \angle AOC \times \cos \angle BOD \times \cos \angle COD$$

分别过A点、B点作赤道面垂线，分别交CO、DO于E点、F点，在过A作BF的垂线AG。

$\therefore OE = AO \cos \angle COA, OF = BO \cos \angle BOD;$
 $AO = BO = R;$
 $\therefore EF^2 = R^2 \times \cos^2 \angle COA + R^2 \times \cos^2 \angle BOD = AG^2; \text{ (AEFO为矩形)}$
 $\text{又} \because BG = BF - AE = R \times \sin \angle BOD - R \times \sin \angle AOC;$
 $\therefore AB^2 = AG^2 + BG^2$
 $= 2R^2(1 - \sin \angle AOC \times \sin \angle BOD - \cos \angle AOC \times \cos \angle BOD \times \cos \angle COD);$
 $\therefore \cos \angle AOB = (R^2 + R^2 - AB^2) / 2R^2$
 $= \sin \angle AOC \times \sin \angle BOD + \cos \angle AOC \times \cos \angle BOD \times \cos \angle COD$

得证

得出 $\angle AOB$ 的弧度值后再乘以地球半径便可得到大圆弧AB的长度。对于飞行航班,由于其飞行高度和地球半径不在同一个数量级上,所以根据本系统的近段要求,可以忽略不计。

说明：以上证明过程需要的前提是：A、B两点必须同在北半球或南半球，否则， $BG = BF - AE$ 不成立。但对经度没有类似要求。而我国所有版图均处于北半球，所以以上公式可以用于计算我国的任意两点间的地球大圆距离。

（三）、确定连通两点的距离

根据以上证明,我们可以很方便的计算出管制区各个位置点之间的大圆距离。根据上述确定的两点之间最小距离,对厦门管制区的23个航段进行计算,

有如下航段小于该最小距离: P93-ZPU,IKATA-ZPU,DO-P176,DO-P84。

5.2.3.2 有限元对航路结构的分析

前面 5.1 节讨论了第四章空域的扇区优化方法存在的不足。在上述优化约束要求的基础上，下面给出具体有限元划分方法。

具体对航路结构有限元分析如下：

- ① 确定航路网络中各个航段满足大于 8.5 公里约束要求的航段。小于该长度的航段将看作一个节点。
 - ② 确定航路网络中是否存在固定的进离场航线，对其各个航段视同一个航段（防止扇区划分时将航线分割在不同的两个扇区，增加协调过多的工作负荷）。
 - ③ 将满足上面两点约束条件的航段，作其垂直平分线，将各个垂直平分线段围成的封闭多边形作为有限元单元。

按照上述有限元分析方法,借鉴上述 Voronoi 图的划分方法,本文对厦门管制区航路结构进行了有限元分析。具体有限元分析结果图如下所示:

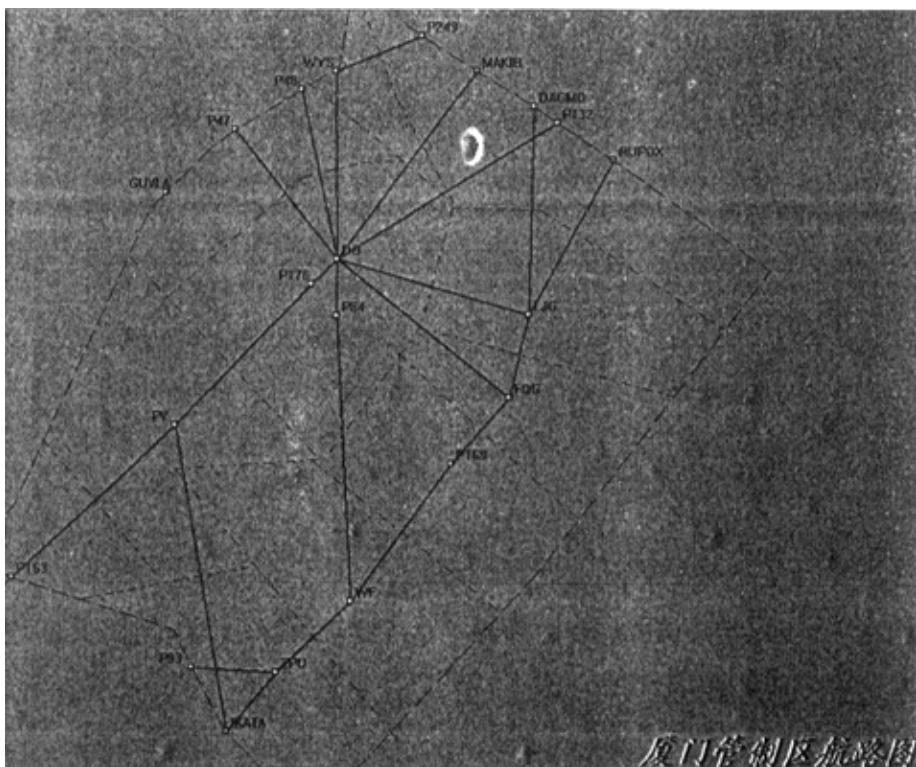


图 5-3 空域有限元分析图

在图 5-3 的基础上, 建立各个单元拓扑关系数据库, 如图 5-4 所示:

单元名	ZPU	WT	F169	F9G	LJG	DAGMO	WTS	FAT	TV	F163	DO	单元名
ZPU	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	WT
WT	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	F169
F169	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	F9G
F9G	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	LJG
LJG	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	DAGMO
DAGMO	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	WTS
WTS	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	FAT
FAT	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	TV
TV	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	F163
F163	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	DO
DO	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	

图 5-4 空域单元拓扑关系数据库

上图中, 由于空域单元数为 11, 因而, 其拓扑关系数据库为 11×11 的网络, 图中 1 表示为两单元相邻, 如果为 0 表示两单元不相邻。图中的以单元包含点代表单元名。

建立该数据库, 可以反映各个单元之间的拓扑关系, 为随机优化搜索过程提供依据。

5.2.3.3 相关研究与本文研究之不同

采用有限元进行航路的分析, 国外的学者曾经使用过。法国学者 Daniel Delahaye 在《遗传算法在空域扇区划分中的应用》一文中, 采用 Voronoi 图将空域中的若干节点构建成许多 Delaunay 三角形, 将这些 Delaunay 三角形作为单元, 对单元采用遗传算法进行随机搜索, 得出空域扇区划分。但本文使用有限元的背景有所不同, Daniel Delahaye 在研究中将空域节点抽象为 324 个节点, 没有考虑实际的航路网络结构, 缺乏对实际空域结构的优化算例, 应看作是对空域扇区优化理论探讨。而本文将对于厦门管制空域进行优化, 需要考虑实际的空域航路结构和管制工作的特点。这是本文较之 Daniel Delahaye 的扇区优化研究, 在扇区优化方面的改进之处。

5.2.4 依据有限元思想, 采用模拟退火算法进行扇区优化

5.2.4.1 优化原则

根据以上有限元方法对于空域的划分原则, 对空域的“元”进行模拟退火算法随机优化。优化采用以下原则: 首先, 取两个元和其余部分作为初始状态, 计算其目标函数值。搜索的过程应当考虑, 第一, 是否出现同时有两个扇区搜索到同一个元, 如果有, 需要根据目标函数, 决定这个元的归属; 第二, 将搜索到的

各个元存入数组 oo1 和 oo2 中，作为搜索结果。第三，在搜索的各个扇区必须保持连续性的原则下，尽可能保证搜索结果达到各个扇区值大小相当。

5.2.4.2 变量介绍

表 5-1 算法模块变量表

	变量	含义
1	oo1 和 oo2	存储搜索选中的单元编号的数组
2	areaworkload1, areawirkload2, areakirkload3	分别为本次计算的三个扇区大小
3	allworkload	空域总负荷大小
4	loadyuan	存储各个单元负荷大小的数组
5	T	模拟温度值，初始温度 $T=allworkload$
6	ppp 和 qqq	分别存储两搜索扇区相邻元的编号的数组
7	yuanwork	表示各个元之间的拓扑关系的二维数组
8	aload,bload,cload	确定为迭代的三个扇区的大小
9	l,v	两扇区包含的元的数目
10	aa,ss	分别表示 ppp 和 qqq 数组的大小
11	ppu,qqu	分别表示上次迭代搜索的元代号
12	ppt,qqt	分别表示本次迭代搜索的元代号
13	c,d	分别为两扇区搜索的随机数，
14	q	根据 Metropolis 准则设置的随机数
15	ya,yb,delta	上次目标值，本次目标值，和这两次的差值

5.2.4.3 优化流程图

根据上面介绍的优化原则和变量介绍，我们可以确定优化流程，如图 5-5 所示：

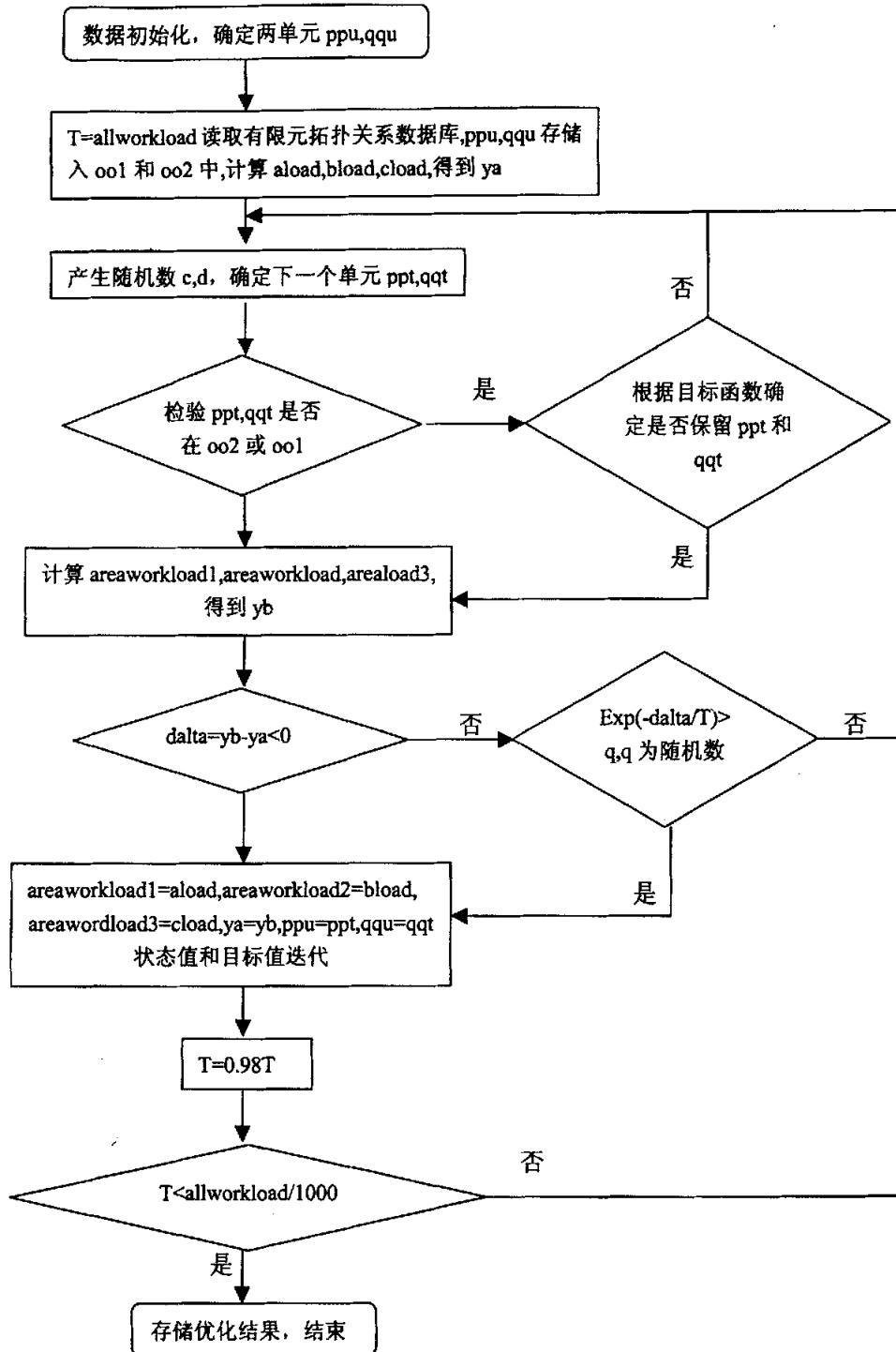


图 5-5 算法模块流程图

5.3 该算法的计算机实现及和模拟退火算法的比较

5.3.1 该算法的结果分析

根据第四章采用模拟退火算法对厦门管制区优化的各组数据,对该算法分析优化结果。根据 5.2 对空域的有限元的划分,通过读取工作负荷数据库、航线负荷数据库和航线航段数据库,得出各个“元”负荷大小如表 5-2 所示。

表 5-2 有限元负荷表

单元序号	负荷大小(秒)	包含节点	相邻单元序号
0	73	ZPU, IKATA, P93	1,8,9
1	47.35	WF	0,2,8
2	22.2	P169	1,3,10
3	16.7	FQG	2,4,10
4	12.8	LJG	3,5,10
5	23.55	DAGMO, P132, RUPOX, P249	4,6,10
6	35.7	WYS,	5,7,10
7	25.85	P47, P48, GUVLA	6,8,10
8	43.6	PV	0,1,7,9,10
9	3.6	P163	0,8
10	79.03	DO, P176, P84	2,3,4,5,6,7,8

采用模拟退火算法对各元随机优化,得到扇区优化结果如图 5-6 所示。

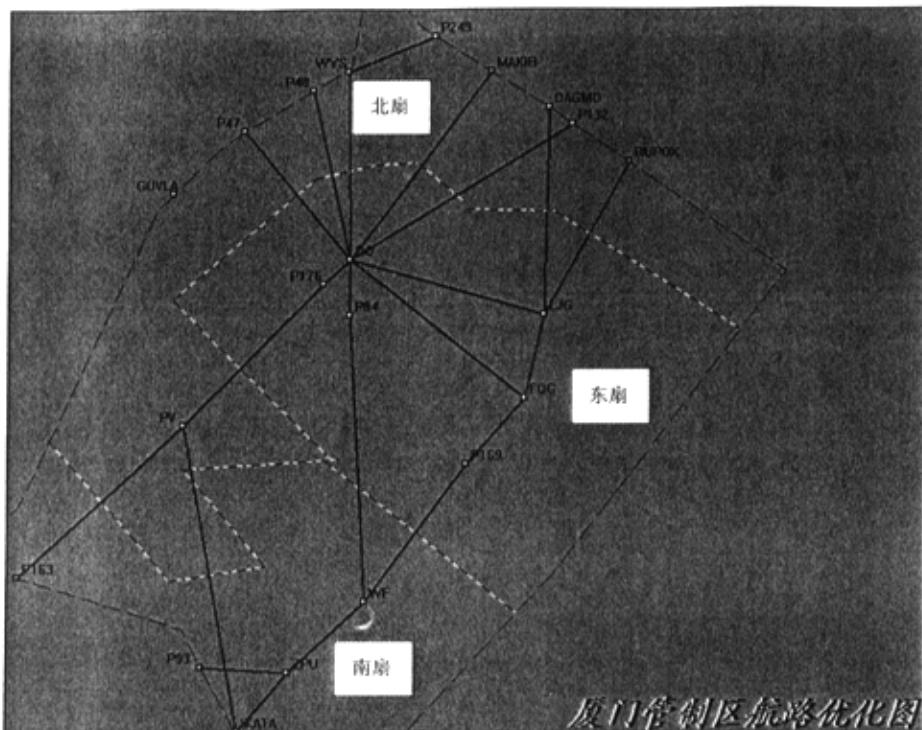


图 5-6 基于有限元的扇区优化图

图中实线表示航路网,虚线表示管制区边界线,点划线表示划分的扇区边界,将空域划分为三个部分。其中,北扇区工作负荷为 128.7 秒,南扇区工作负荷为 123.95 秒,东扇区工作负荷为 130.75 秒,扇区之间最大差为 6.8 秒,而 80%S 为 138.4 秒, T 为 0.376, 优化结果满足终止条件。图 5-7 表示使用该算法,扇区优化目标函数的收敛曲线。图 5-8 表示三个扇区工作负荷变化曲线。图 5-9 表示使用该算法扇区优化结果图。由于划分有限元,考虑了节点之间的间距的约束。因此,该算法的扇区优化克服了模拟退火算法进行优化中出现的与管制工作有关规则不符的弊端,优化结果较为满意。

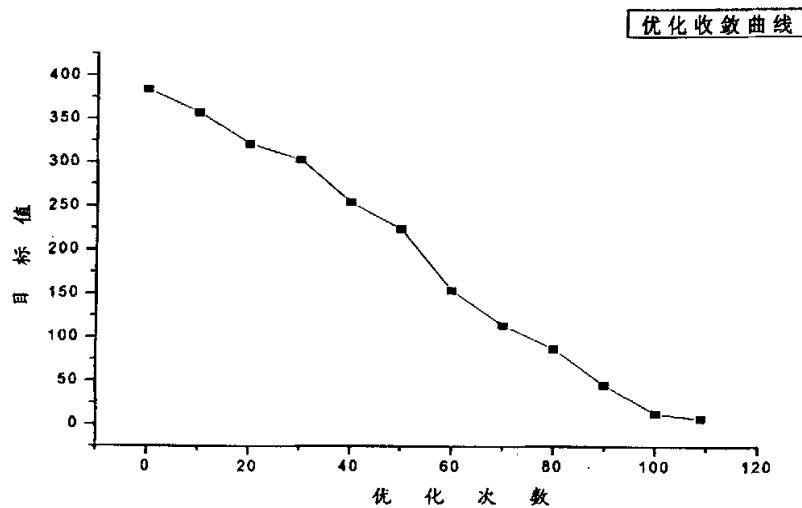


图 5-7 扇区优化目标函数收敛曲线

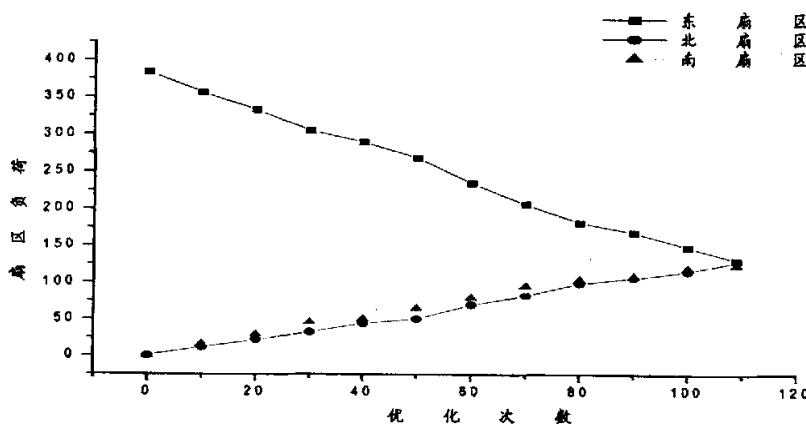


图 5-8 三扇区工作负荷变化曲线

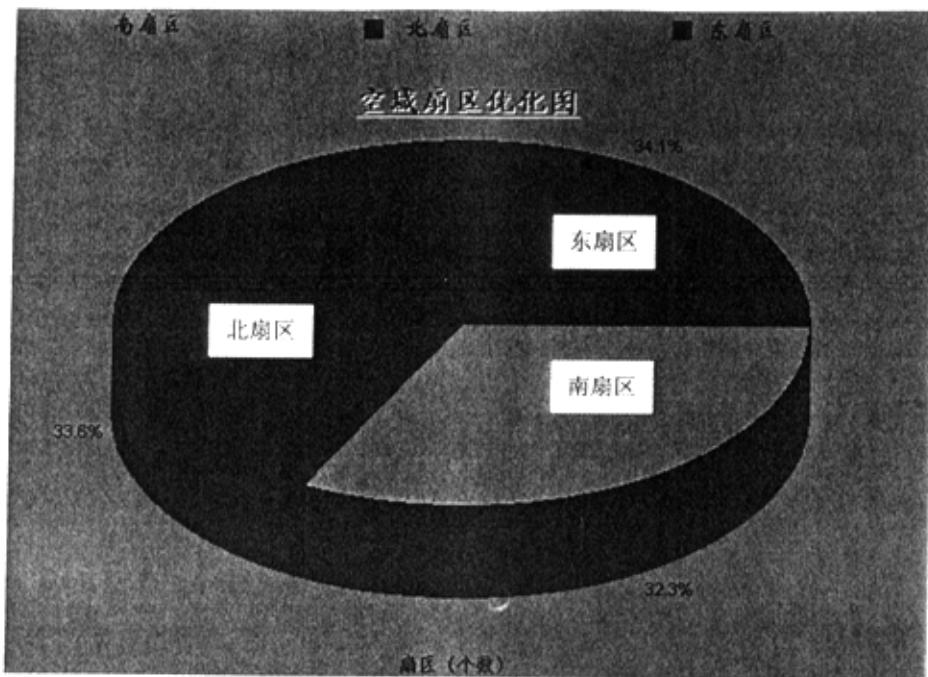


图 5-9 厦门管制区优化结果图

5.3.2 该算法与模拟退火算法比较

在对本章和第四章两种方法对扇区优化的结果进行比较分析, 可以发现有限元结合模拟退火算法对厦门管制区进行的优化结果具有如下几点优势:

第一, 优化结果比较负荷管制工作实际。如本章开头对本算法提出背景的分析。

采用本算法可以成功克服了扇区边缘管制工作负荷过重, 空域节点距离扇区边界较近, 增加了管制难度等方面的弊端, 对于缓解扇区边界管制员负荷过重, 保证飞行安全有较明显的作用。

第二, 扇区的有限元分析, 可以根据空域特点, 如对于中低空域, 对于起始进近航线, 扇区划分应当尽量保证其完整性, 有限元分析, 就可以将此航线作为一个单元考虑。

第三, 此算法计算量比较小, 优化速度大大提高。由于将空域先进行了有限元分析, 因而单元数比实际航段数小了很多。

然而, 该方法存在的一点不足是, 由于预先进行了有限元分析, 对于产生的单元进行优化, 会造成优化的扇区均衡性相对差些。但是, 在允许的扇区差值范围内, 使用该算法具有实用性和优化速度快等优点。

研究结论及展望

空域规划领域的研究，特别是管制员工作负荷的量化和扇区优化方面的研究，目前国内尚处于起步阶段。通过检索的文献研究发现，国外相关领域的研究，也只是处于理论研究阶段。本文在国内率先在该研究领域进行了研究，取得了以下几个方面的成果：

(1)对于管制员工作负荷量化的研究。人的行为表现极其复杂。如何对管制员的工作负荷进行量化，对于我们进行空管领域的定量研究工作，尤其是通过计算机进行扇区的优化设计工作尤为重要。本文在英国运筹理事会提出的 DORATASK 方法的基础上，提出了具体量化标准，并对厦门管制区的熟练管制员在机场管制、进近管制和区域管制所用的无线电通话进行分析，统计了常用的 182 条语句所使用的时间，为扇区优化工作提供定量分析的依据。

(2)拓扑学作为数学的一个分支学科，发展较为成熟，已经广泛应用于计算机科学和地理信息系统等学科当中。本文借鉴拓扑学原理，对空域航路拓扑网络结构，进行相关性分析，并给出数学公式，为扇区优化工作提供了理论基础。

(3)通过对影响扇区设计的主要因素的分析，以各个扇区负荷均衡为目标，建立较为完善的扇区优化的方法。

(4)模拟退火算法由于其鲁棒性和收敛性，成为随机优化算法中比较成熟的算法。本文率先将该算法应用于航路网络的优化中，通过算例分析证明，取得了比较理想的优化结果。

(5)为了使用计算机扇区优化工作，建立了厦门管制区的航路网络节点位置数据库，航路网络拓扑结构数据库，管制员工作负荷数据库，航班航段数据库和航班管制负荷数据库，运用 Microsoft VC++6.0 高级计算机语言，设计了扇区优化系统。通过测试，系统具有较好的稳定性，可操作性和界面的友好性。

(6)为了弥补国内外文献中缺乏针对实际空域航路结构算例的研究，本文针对厦门管制区的空域航路结构，进行随机优化。为了避免扇区边界直接通过航路网络节点造成的管制员在边界处协调负荷过重的问题，本文借鉴有限元思想，对空域确定若干单元，然后对各个单元进行随机优化，取得较为理想的优化结果。

本文通过对扇区优化系统的开发设计尝试，认为有以下两个可以改进的方面：

(1)使用计算机进行管制员工作负荷统计。本系统对工作负荷统计，是通

过静态的数据库进行的。工作负荷信息存储在数据库中，直接调用即可。而要实现工作负荷的动态采集，则可以考虑采用语音识别技术，同时结合雷达信息和电报信息，实现工作负荷与各个航段和航班信息的耦合，可以实现工作负荷信息的采集和信息处理完全自动化。这项工作不仅对于本系统优化有利，而且对于空域容量评估研究来说，具有重要意义。首先，应当选择比较高识别率的语音识别软件。目前，IBM 的 VIAVOICE 无疑是语音识别领域的优秀产品，基于其 SDK 开发的语音识别产品很多。根据其 SDK 开发出识别率比较高的管制员汉语语音识别功能是接下来需要解决的难题。因为和管制员通话的机长是随机产生的，发出的语音不固定，必然造成识别率不高。因而，需要开发出高识别率的非特定人的连续语音识别系统。

(2)通过计算机，实现语音信息和雷达信息的耦合。随机优化的前提，需要知道各个航段的权值。语音信息可以统计出工作负荷的大小，而雷达信息可以确定飞行器的地理位置，两者的耦合，可以确定在某一时段航路网络各个航段的权值。但是，雷达信息本身只给出二次雷达编码，语音信息中只存在航班呼号，因此二次雷达编码必须和航班号相互对应。实际管制工作中，在不同的时段，同一个二次雷达编码对应不同的航班号，而且编码和航班号的对应在一定的编码段范围内，管制人员将其对应可以是随意的。另外，飞越航班的二次雷达编码和航班号的对应，是相邻管制区通过电话临时通知。这就给系统雷达信息和航班号(也就是语音信息)的耦合带来的很大的困难。针对这个技术难题，本文认为可能的解决方法是以一个较短的时段(比如十分钟为一个时段)作为信息耦合的限制时间，避免了在不同的时段，同一个二次雷达编码对应不同的航班号的问题。同时，建立不同时段的二次雷达编码和航班号对应关系的数据库，管制人员尽量规范二次编码和航班号的对应关系，这样可以避免人为造成的二次雷达编码和航班号对应混乱的问题。飞越航班的航班号和二次雷达编码对应关系，可以通过随时修改航班号和编码对应关系数据库等方法解决，避免出现区域管制中飞越航班二次雷达编码无相应航班号对应的情况。

本文相关的研究工作，今后应当着重解决以上两方面的技术难题。

致 谢

本论文撰写和课题研究的整个过程中，韩松臣老师倾注了大量的心血。作为他的研究生，在我在平时的学习过程中得到了他的全力支持和帮助。进入课题研究阶段后，他更是给予了我无微不致的关怀。他渊博的学识，严谨的态度和诲人不倦的作风，使我不仅顺利的完成了课题，增长了知识，也懂得了许多做人的道理，这些都将使我终身受益。

厦门航务管理站航气处处长施和平高级工程师，在我去厦门调研期间，对我的调研给予很大的帮助，对课题提出许多宝贵的建议，开阔了我的思路，使我受益匪浅。此外，厦门航管站的张站波工程师和中国民航学院的赵巍飞老师也对我的课题的进展和实际航管知识提供了许多帮助和启发。

另外，教研室的胡明华老师、隋东老师、刘星老师、刘继新老师、董襄宁老师和田勇老师等在空管专业专业知识方面也给我提供了许多宝贵意见，使我顺利的完成了课题研究工作。我的同学黄卫芳、童俊敏在课题进展之中，也对我的课题提供了有益的帮助。这里我向他们致以诚挚的谢意。

我的父母、姐姐和姐夫也给予了我巨大的支持和帮助，我衷心地感谢他们。

在校期间研究成果

- 【1】 张明, 韩松臣, 施和平, 基于管制员工作负荷的扇区优化系统开发及研究, 中国民航空中交通管理人为因素研讨会, 2002 年 6 月
- 【2】 张明, 韩松臣, 黄卫芳, 基于管制员工作负荷扇区划分的优化方法, 南京航空航天大学第四界研究生学术会议, 2002 年 10 月
- 【3】 韩松臣, 张明, 黄卫芳, 管制扇区优化划分的方法及计算机实现技术, 交通运输工程学报, (已发出)
- 【4】 韩松臣, 张明, 黄卫芳, 管制扇区优化划分的方法及计算机实现技术, 中国民航空中交通管理人为因素研讨会, 2002 年 6 月

参考文献

- 【1】 杨国庆, 中国民航发展展望, 交通运输工程学报, 2001 年 12 月, 第一卷第四期
- 【2】 刘英, 我国民航空中交通流量分布特点, 民航经济与技术, 1997 年 4 月: 13-14
- 【3】 Daniel Delahaye, Marc Schoenauer, Jean Marc Alliot, "Airspace Sector by Evolutionary Computation", in *Evolutionary Computation Proceedings*, IEEE 1998.
- 【4】 Noriyasu Tofukuji, "An Enroute ATC Simulation Experiment for Sector Capacity Estimation", *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 1993.
- 【5】 A. Robertson, M. Grossberg, " J. Richards, Validation of Air Traffic Controller Workload Models ", FAA-RD-76-146, 1979, 12
- 【6】 Pawlak, William S., " Comparison of algorithms for the dynamic resectorization of airspace ", *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Boston, MA, Aug. 10-12, 1998, Collection of Technical Papers. Pt. 1 (A98-37001 10-63), Reston, VA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998, pp67-74
- 【7】 Dr. Alexander Klein, "TAAM: Designing An Object-Oriented, Open Model for Airport and Airspace Simulation ", *42nd Annual Air Traffic Control Association Conference Proceedings* Washington, DC USA September 28 - October 2, 1997
- 【8】 D. K. Schmidt, "A queuing Analysis Of the Air Traffic Controller' s Workload ", *IEEE Transaction On Systems, Man, And Cybernetics*, Vol. SMC-8, No. 3, 1978. 6:pp492-498
- 【9】 Reaux, R. A. /Murphy, E. D. /Stewart, L. J. /Gresh, J. L. /Bruce, K., " Building a modeling and simulation analysis tool to predict air traffic controller workload and performance", *Proceedings of the Human Factors Society 33rd Annual Meeting. Perspectives*, 2 vol. xxi+1543, 1989
- 【10】 G. C. Richmond, "An interim description of the DORATASK methodology the assessment of sector capacity", *Civil Aviation Authority*, London, Dec. 1998.

- 【11】Crown Communications. "Development and Modeling of the Dynamic Sector Concept", *NASA-Ames Advanced Air Transportation Technologies (AATT) Program Final Report*. Moffett Field, CA: National Aeronautics and Space Administration. April 1997.
- 【12】Delahaye D., Alliot J. -M., Schoenauer, m., and Farges, J. -L. "Genetic Algorithms for Partitioning Air Space. "Paper Presented at *Tenth IEEE Conference on Artificial Intelligence for Applications. CAIA*, 1994.
- 【13】Oussedik, S., Delahaye, D., Schoenauer, M., " Alternative flight route generator by genetic algorithms ", this paper appears in: *Evolutionary Computation*, 2000. Proceedings of the 2000 Congress on page(s): 896 - 901 vol. 2, pp16-19 July 2000
- 【14】Oussedik, S., Delahaye, D., Schoenauer, M., " Dynamic air traffic planning by genetic algorithms", this paper appears in: *Evolutionary Computation*, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on - 1117 Vol. 2 6-9 July 1999, Washington, DC, USA
- 【15】N. Tofukuji, "An airspace design and evaluation of en-route sector by air traffic control simulation experiments", *Electronics and Communications in Japan, Part 1 (Communications)* , vol. 79, no. 8, Aug. 1996
- 【16】Richmond, "An interim description of the DORATASK methodology the assessment of sector capacity", *Civil Aviation Authority*, London, Dec. 1998.
- 【17】A. A. Trani, H. D. Sherali, "Development of Airspace Sector and Encounter Models to Support the Analysis of Aircraft Separation and Collision Risk", *Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA 24061*, Nov. 1998
- 【18】Gahan, M., " Development of an air traffic controller workload model ", *44th Annual Air Traffic Control Association Conference Proceedings*. Fall 1999
- 【19】Babic O., Krstic T., " Airspace daily operational sectorization by fuzzy logic ", 2000 Published by *Elsevier Science B. V.*, pp 49-64
- 【20】国际民航组织, 空中交通服务计划手册 ICAO 9426-AN/924 文件, 1992 年修订版, 中国民用航空总局空中交通管理局出版, 第二部分 19—21, 115—117
- 【21】中国民用航空局, 中国民用航空无线电通话手册, 第一版, 中国民用航空总局空中交通管理局出版, 1992年六月: 15—30

- 【22】韩松臣、胡明华等, 扇区容量与管制员工作负荷的关系研究, 中国民航空中交通管理人为因素学术研讨会:271—275
- 【23】蒋兵, 空域评估模型与方法研究, 南京航空航天大学硕士论文, 2002年3月:1—30
- 【24】国际民用航空组织, 航空器飞行Doc8168-OPS/611第一卷, 中国民用航空总局空中交通管理局出版, 1997年: 1—118
- 【25】康立山, 谢云, 尤矢勇, 罗祖华, 非数值并行算法第一册——模拟退火算法, 科学出版社, 1997年:1—210
- 【26】谢云, 模拟退火算法的原理及实现, 高等学校计算数学学报, 1999年9月, 第3期
- 【27】杨庆之, 无约束问题模拟退火算法的改进, 高等学校计算数学学报, 2001年6月, 第2期
- 【28】王生洪, 吴家麟, 谢惠明, 有限元法基础及应用, 国防科技大学出版社, 1990年:1—37
- 【29】郝永平, 有限元网格图拓扑分析, 计算机辅助设计与图形学学报, 1994年1月, 第1期
- 【30】杜骏, 终端区空中交通容量估计系统研究, 南京航空航天大学硕士毕业论文, 2001年3月: 1—56
- 【31】国际民航组织, Doc9689-AN/953, 中国民用航空总局空中交通管理局出版, 2000年
- 【32】Gano B. Chatterji, Banavar Sridhar, "Neural Network Based Air Traffic Controller workload Prediction", *Proceeding of the Control Conference, San Diego, California, June 1999* AACC 2620—2624
- 【33】丁永祥, 夏巨谌, Voronoi图和Delaunay三角剖分的计算及应用, 华中理工大学学报, 第24卷增刊, 1996年2月
- 【34】国际民航组织, 空中规则与空中交通服务Doc4444-RAC/501, 中国民用航空总局空中交通管理局出版, 2000年1月20日, 第三、四、五、十部分

附录 1

民航常用管制用语工作负荷统计表

项目	种类	管制用语	工作负荷(秒)
一	一般用语		
	1 高度指令		
	1 上升 / 下降		1.6
	2 梯级上升, (航空器识别标志) 在你上面 / 在你下面		5.2
	3 在 (时间 / 重要点), 向 (单位) 请求改变高度		4.8
	4 在 (高度) 停止上升 / 下降		4.5
	5 继续上升 / 下降到 (高度)		4.7
	6 【在通过 (高度) 之前】加大上升率 / 下降率		4.8
	7 准备好, 上升 / 下降到 (高度), 离开 (高度) 报告		4.9
	8 预计在 (时间) 下降		3.4
	9 通过 (重要点) 后立即上升/下降		4.3
	10 在 (高度) 以上/以下自行保持间隔和目视条件		7.8
	11 无法照办		2.1
	2 管制移交及改频		
	12 联系 (单位呼号) (频率)		3.3
	13 在 / 过 (时间 / 地点) 联络 (单位呼号) (频率)		5.4
	14 如果联系不上(备份指令)		4.1
	15 在 (单位呼号) (频率) 上等待		4.2
	16 请求改换到 (频率)		3.7
	17 同意改频		2.1
	18 在 (单位呼号) (频率) 上守听		5.3
	19 正在 (频率) 上守听		4.3
	20 准备好, 联系 (单位呼号) (频率)		4.5
	21 保持现频率		2.7
	3 呼号的改变		
	22 【在得到进一步通知前】将你的呼号改为 (新呼号)		6.3
	23 【在 (重要点)】, 恢复到飞行计划中的呼号 (呼号)		5.3
	4 活动通报		
	24 没有得到活动报告		3.5
	25 没有发现【原因】		3.7
	26 有向 (方向) 飞行的活动, (机型)、(高度), 预计 / 过 (重要点) (时间)		10.6

	5 气象情报		
27	(数值)度风 (数值) (单位)	5.3	
28	能见度 (距离)	4.3	
29	【(号码) 跑道】跑道视程 / RVR (距离)	5.3	
30	【(号码) 跑道】跑道视程 (第一段) (距离), (第二段)空缺, (第三段) (距离)	7.4	
31	现行天气 (详细内容)	9.3	
32	(云量)【云状】云 (高度) / 晴空	6.4	
33	CAVOK 读作 CAV-O-KAY		
34	温度【负】(数值), 露点【负】(数值)	6.3	
35	QNH / QFE(数值) (单位)	4.9	
36	【云中】中度 / 严重积冰 / 颠簸 (区域)	6.7	
37	报告飞行条件	3.8	
6 位置报告			
38	下一次在 (重要点) 报告	5.1	
39	【在过规定位置点前】, 省略位置报告	5.2	
40	通过 (VOR 名称) VOR (三个数字) 径向线报告	6.9	
41	报告离 (DME 台名称) DME 的距离	4.8	
7 机场情报			
42	(号码) 跑道 (情况)	4.5	
43	着陆道面 (情况)	5.6	
44	注意 (地点) 的施工	7.3	
45	注意跑道右侧 / 左侧 / 两侧 (说明原因)	9.8	
46	注意正在施工 / 障碍物 (位置及必要的建议)	8.9	
47	(观测时间) 报告、(号码) 跑道 (凝结物种类) 达到 (沉积物厚度) 毫米。刹车效应好/较好/中/较差/差不可靠。【刹车系数 (设备及数值)】	7.8	
48	(机型) 在 (时间) 报告的刹车效应好 / 中 / 差	6.7	
49	跑道 / 滑行道是湿的【潮的, 有块状积水, 被水淹没 (厚度) / (在可能的情况下说明长度和宽度) 积雪已清除 / 已经处理 / 被块状干雪 / 湿雪 / 硬雪 / 雪水 / 冻雪水 / 冰 / 冰和雪覆盖】	8.9	
8 助航设备工作状况			
50	(号码) 跑道 (目视 / 非目视助航设备说明) (不正常工作情况描述)	7.9	
51	(类别) 灯光 (不能提供服务)	5.2	
52	(类别) 类 ILS (工作状况)	7.2	
53	滑行道灯光 (不正常工作情况说明)	7.4	
54	(号码) 跑道的 (目视进近坡度指示器类别) (不正常工作情况说明)	6.8	
55	没有备份电源	3.5	
二	机场管制		

	1 对航空器的目视识别		
56	打开着陆灯	3.1	
57	摆动副翼 / 方向舵	3.6	
58	摆动机翼	2.8	
59	闪烁着陆灯	3.4	
2 开车程序			
60	同意开车	2.6	
61	在 (时间) 开车	4.1	
62	预计在 (时间) 开车	4.8	
63	开车时间自己掌握	5.2	
64	预计起飞时间 (时间), 开车时间自己掌握	6.4	
3 推出程序			
65	同意推出	2.8	
66	稍等	2.1	
67	推出时间自己掌握	3.7	
4 牵引程序			
68	同意经 / 从 (指明线路) 拖引	6.4	
69	原地等待	2.3	
70	稍等	2.1	
5 起飞条件			
71	跑道, 风 (方向和速度), 海压 / 场压 (详述); 【能见度 / 跑道视程 (详述)】	8.9	
6 滑行程序			
72	滑到 (数字) 等待点 【(号码) 跑道】 【现在时间 (分钟)】	9.3	
73	通过 (路线) 滑到等待点 【(号码) 跑道】 【现在时间 (分钟)】	9.3	
74	前面第一 / 二个道口, 左 / 右转	4.2	
75	沿 (滑行道) 滑行	3.8	
76	沿 (号码) 跑道滑行	4.4	
77	候机楼 (或其它位置) 【停机位 (数字)】	5.8	
78	同意跑道一百八	4.5	
79	在 (号码) 跑道上作一百八转弯	4.6	
80	一直往前滑	2.6	
81	滑行时注意	2.6	
82	给 (另外航空器的位置和描述) 让路	4.5	
83	跟在 (另外的航空器或车辆的描述) 后面	4.7	
84	脱离跑道	4.2	
85	滑快一点 【原因】	6.4	
86	【注意】滑慢一点 【原因】	6.5	
7 等待			
87	在 (位置、跑道等) 的 (方向) 等待	5.7	

88	原地等待	2.5
89	在距 (位置) (距离) 处等待	4.1
90	在 (位置) 外等待	3.1
8 穿越跑道		
91	可以穿越 (号码) 跑道【脱离跑道报告】	7.9
92	快点穿越 (号码) 跑道, 五边 (距离) 公里有飞机	9.2
9 起飞前准备		
93	准备好起飞时报告	4.3
94	准备好 (起飞) 了吗?	3.8
95	进跑道能否立即起飞?	4.3
96	若不能发出起飞许可时: 等待	2.1
97	进跑道并等待起飞许可的指令: 进跑道	2.1
98	准备立即起飞, 可以进跑道	4.7
99	(前提条件) 进跑道	5.9
10 起飞许可		
100	可以起飞【离地报告】	7.4
101	当起飞许可未被执行时 立即起飞, 否则退出跑道	4.7
102	立即起飞, 否则在跑道外等待	4.7
103	取消起飞许可 (航空器处于静止状态)	3.8
104	在紧急情况下, 终止航空器的起飞 (航空器已开始滑跑)	5.2
11 起飞后		
105	同意右 / 左转	2.3
106	听我指挥右 / 左转	2.4
107	起飞时间 (时间)	4.7
108	通过 (高度) 以后、(指令)	5.3
109	直线上升 (指令)	3.8
12 加入起落航线		
110	加入 (起落航线的位置), (号码) 跑道, 地面风 (方向和速度), 【温度 (摄氏度), 海压 / 场压 (详述)】	4.6
111	直接进近, (号码) 跑道, 【地面风 (方向和速度), 温度 (摄氏度), 海压 / 场压 (详述)】【活动通报 (详述)】	4.7
112	在有航站自动情报服务的机场, 加入 (起落航线的位置), (号码) 跑道,	5.2
13. 起落航线飞行		
113	跟在 (机型和位置) 后面, 第…个落地	4.8
14. 进近指令		

	114	延长三边	3.2
	115	四边 / 五边 / 长五边报告	3.6
	116	继续进近	3.3
	15. 着陆		
	117	可以着陆	2.4
	118	多条跑道时 可以落地、(号码) 跑道	3.2
	119	可以连续	3.4
	120	落地后全停	4.1
	121	为了使地面人员目视检查,航空器低高度通过管制塔台或另外的观察点	7.4
	122	可以低高度通过,【(号码) 跑道】,【高度限制(复飞指令)】	6.8
	16. 推迟着陆时间		
	123	绕场飞行	3.1
	124	【从现在的位置】向左 / 右转圈	5.7
	125	再飞一次航线	3.4
	17. 复飞		
	126	复飞	2.1
	18. 与航空器有关的情报		
	127	起落架看上去已经放下	4.3
	128	右/左/前轮看上去已收上/放下	4.5
	129	轮子看上去已收上	4.8
	130	右/左/前轮看上去没有收上/放下	4.5
	131	注意尾流	3.1
	132	在停机坪或滑行道上: 注意喷流	3.4
	19. 着陆后		
	133	联系地面(频率)	5.2
	134	脱离跑道后, 联系地面(频率)	5.5
	135	动作快点脱离跑道	4.4
	136	停机位/门(标志号)	5.3
	137	前面第一/二个道口左/右转, 联系地面(频率)	6.8
三	进近管制		
	1 离场指令		
	138	起飞后, 右转/左转, 航向(三位数)	7.4
	139	右转/左转 航向(三位数)	4.7
	140	在(时间/或到达定位点/重要点/高度)前【改变航向前】，以(三个数字)度【磁/真】航迹飞向/离开(重要点)	9.3
	141	在(时间)改变航向, 或在(时间)前/后改变航向	5.6
	142	在(时间)改航飞向/直飞(重要点), 或, 在(时间)	7.2

		以前/改航飞向/直飞(重要点)	
143	到达/通过/(高度/重要点), 改航【直飞】(重要点)	6.3	
144	可以沿(航线代号)飞行	4.3	
2 进近指令			
145	可以沿(航线代号)飞行	5.2	
146	可以沿(航线代号)到(许可界限)	6.4	
147	可以沿(所飞航线的详细描述)	6.9	
148	可以(进近类别)进近【(号码)跑道】	8.3	
149	可以进近,【(号码)跑道】	6.7	
150	(时间)开始进近	5.3	
151	(重要点)入航/出航报告	8.7	
152	可以直接进近,【(号码)跑道】	7.3	
153	能见报告	3.2	
154	看到跑道【灯】报告	4.3	
155	可以能见进近, (号码)跑道	6.4	
156	请求按目视气象条件下降	5.5	
157	自行保持间隔	4.2	
158	保持目视间隔	4.2	
159	你熟悉(名称)进近程序吗?	5.3	
3 等待指令			
160	在(位置)【上空】/(两个显著地标)间目视等待	8.9	
161	(高度)在(重要点/导航设施/定位点)等待, 预计(时间)进近/发布进一步许可	9.3	
4 预计进近时间			
162	没有延误	3.2	
163	预计进近时间(时间)	5.4	
164	修改预计进近时间到(时间)	7.4	
165	延误时间不定(原因)	9.8	
四 区域管制			
1 管制许可			
166	ATC 许可(航空器呼号)	6.5	
167	(航空器呼号)可以	5.3	
168	ATC 更新许可(航空器呼号)(修改后的内容)	6.3	
2 航线及许可界限的表述			
169	从(某地)到(某地)	5.3	
170	直飞, 或经(某点、某航路), 或经计划航路, 飞向(某地)	4.3	
3 特定高度的保持			
171	保持(高度)	4.1	

	172	保持(高度)直到飞越(重要点)	7.2
	173	保持(高度)等待(单位)的通知	8.2
	174	保持(高度)直到(时间)	8.1
	175	保持(高度)等待进一步通知	8.1
	4 巡航高度的规定		
	176	飞越(某点)高度(高度)/以下/以上	7.9
	177	在(两高度层)之间/(高度)以上做巡航爬高	8.1
	5 紧急下降		
	178	紧急下降	3.1
	179	有航空器在(重要点)紧急下降,所以在(该处)附近、高度在(高度)以下的航空器立即离开(重要点、高度、航线等)	7.9
	6 在不能按请求立即发布管制许可时的用语		
	180	预计在(时间)发布管制许可	7.9
	7 间隔指令		
	181	在(某时)飞越(某点)	7.1
	182	如不能在(时间)飞越(重要点),请通知我	8.8