

# 管型航路的进出口位置规划

## The Enter and Exit Port Position Planning of Tube

戴福青 张标 / 中国民航大学空中交通管理学院

**摘要:** 阐述了管型航路的概念, 提出对管型航路进出位置的设计思想。分析了管型航路的加入策略, 并通过将管型航路分为若干段, 以区域内机场使用管型航路成本最优化为目标, 计算出管型航路的进出口位置, 给出航班延误成本与管型航路使用成本的比较策略。通过北京到广州方向的管型航路进出口位置规划, 得到管型航路的额外飞行成本低于航班延误成本, 验证了该规划方法的合理性与经济性。

**Abstract:** Based on the concept of tube, came up with the design idea of the enter and exit port position. Analyzed the join strategy of tube, divided the route into several segments, set the goal as all the airports' minimum cost in using this tube segment, calculated the enter and exit port position of the tube, compared the cost of the flight delay and using tube. Through the enter and exit port position planning of Beijing to Guangzhou, get that the cost of using tube was less than flight delay, verified the rationality and economy of this method.

**关键词:** 管型航路; 航路规划; 航班延误; 航线距离

**Keywords:** tube; path planning; flights delay; airline distance

## 0 引言

随着全球民航事业的快速发展, 有限的空域资源变得越来越拥挤, 航班延误现象累次增加。现有的常规航路结构已经不能够满足未来的空中交通流量。为了解决这个问题, 一些航空发达国家开始考虑变革空域和管制方式。因此, 一个新的概念“管型航路(Tube)”也叫“空中高速路”被提出来了。管型航路定义为: 在繁忙城市对间建立的形状类似于管道的单向、无交叉、有性能限制的动态高速航路。

目前对于管型航路的构建, 一些国家和学者已经开始了理论研究。国际上, 2005年, H Hering提出了欧洲的空中高速路网的设计, 定性地研究了空中高速路的结构<sup>[1]</sup>; 2006年, Sridhar B通过仿真表明: 管型航路网应连接主要机场群<sup>[2]</sup>。2008年, Hoffman R全面总结了管型航路从设计到运行需要解决的八

个大问题<sup>[3]</sup>。2009年, Chen J和Andrisani D研究了管型航路的动态使用问题<sup>[4]</sup>, Kotecha P和Hwang I研究了管型航路使用对周围的交通的影响<sup>[5]</sup>。国内也已开始对空中高速路的研究, 2012年, 王莉莉、刘兵等利用多目标决策方法建立空中高速路网的枢纽选择模型, 初步规划了空中高速路网<sup>[6]</sup>。王莉莉、张宏发、李雄飞等人还对高速路单航路单进匝口的延误情况进行了仿真和计算<sup>[7]</sup>。

目前管型航路研究还没有涉及具体某一条管型航路的覆盖范围、使用规则以及管型航路中间进出口位置, 本文首先分析了管型航路的加入策略, 给出了节点加入策略, 然后在考虑航班延误的原因上, 其损失等效为飞机在空中使用管型航路额外增加的飞行成本, 以此计算出飞机的额外飞行距离, 通过距离决策飞机是否使用管型航路。最后将管型航路划分

为不同的区域, 以区域内所有机场总成本最小为目标, 给出管型航路中间进出口位置。

## 1 管型航路的加入策略

### 1.1 加入策略分析

加入管型航路有两种设计策略, 一种是航空器只通过机场节点进出管型航路, 这种为机场节点加入策略; 另一种是航空器以小角度直接从离机场最近的距离位置点切入管型航路中, 这种为直接加入策略。

### 1.2 两种加入策略的优缺点分析

机场节点加入策略的优点是所有机场的飞机通过处在航路上的某一机场进出口加入管型航路, 以此可以减少进出口数量, 减轻管制员工作负荷, 提高管型航路内航空器流的流畅性。缺点是如果某一区域中没有节点机场, 则此区域中的机场起飞航班只能通过下一

个区域内的进出口加入管型航路,因而增加了飞行距离和成本。

直接加入策略的优点为单个机场加入管型航路的距离最短,最大化缩短航空器进入管型航路的距离,减少飞行成本。不足是需要为使用管型航路的每一个机场单独开设进出口,从而增加航路的复杂性和管制员工作负荷,影响管型航路内航空器流的顺畅性。

### 1.3 指定进出口节点加入策略

综合考虑两种加入策略的优缺点,本文考虑策略为:在管型航路首末端位置以外的机场,飞机均从首末端机场节点进出口进离,在航路中间覆盖范围内的机场沿管型航路划分为几个区域,以区域内总飞行成本最小为目标选择区域内管型航路的进出口位置,该位置是航路上的某一点(不必是机场)保证此区域内所有机场使用管型航路的总经济效益最优化,如图1所示。

$O_1 \sim O_9$  为机场,  $T_{首}$ 、 $T_{末}$  分别是管型航路的首末端进出口(机场节点),  $T_1$ 、 $T_2$  为管型航路的中间进出口(指定节点)。航路外的机场不论数量均通过  $T_{首}$  加入管型航路,  $O_4$ 、 $O_5$ 、 $O_6$  视为同一区域内的机场,选择  $T_1$  为进出口。之后是建立成本等效模型求解出航路中间进出口  $T_1$ 、 $T_2$  的位置。

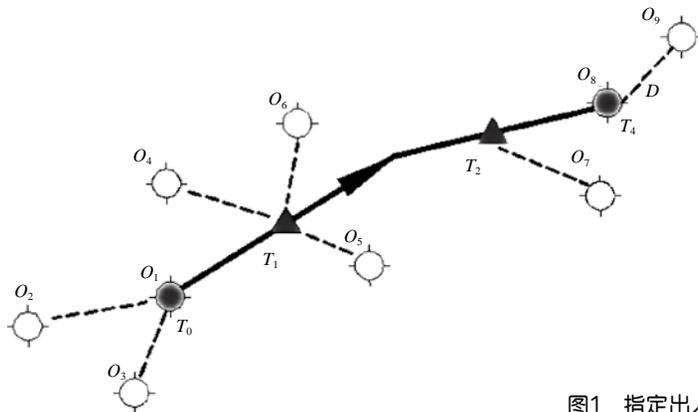


图1 指定进出口节点加入策略

## 2 进出口位置成本模型

### 2.1 航班延误损失

航班延误损失主要包括地面延误损失和空中延误损失。本文假设前提是航空器无需等待即可加入管型航路并且在航路中高效无延误的运行,但管型航路不能解决由机场终端区盘旋等待和绕飞雷雨产生的空中延误损失。所以本文考虑的航班延误损失主要是地面延误损失通过将地面延误损失转化为空中飞行距离。地面延误损失指旅客登机后,由于跑道或空域繁忙,航班无法起飞,在地面等待而发生的成本,航班所选机型不同造成的延误损失成本也有很大差异。地面延误损失  $C_g$  可通过下式计算得出:

$$C_g = W_g \cdot T_g \quad (1)$$

式中  $W_g$  为某种机型单位时间地面延误损失,  $T_g$  为航班地面延误时间。

### 2.2 进出口位置设定

为了便于建模和计算,将整个管型航路和机场经纬位置分区域转化为平面直角坐标系中的  $x, y$  坐标。转换后的区域中管型航路视为直线处理。

设机场  $i$  是属于  $k$  区域内的机场,  $n$  是  $k$  区域内的机场数量,  $W_{id}$  是机场  $i$  中某机型  $d$  到目的地机场群的年航班起降量,  $V_{id}$  是某机型  $d$  单位距离的飞行成本,  $P$  是机型种类数量。  $(a_i, b_i)$  为机场经纬坐

标经过转换后的平面坐标,  $(x, y)$  是平面直角坐标系中航路上进出位置点。

考虑上述距离成本,则区域中所有机场通过进出口位置进出管型航路的总成本模型为:

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^p V_{id} W_{id} \sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}$$

$$s.t. \begin{cases} \frac{y-y_{k首}}{y_{k末}-y_{k首}} = \frac{x-x_{k首}}{x_{k末}-x_{k首}} \\ x_{k首} \leq x \leq x_{k末} \\ y_{k首} \leq y \leq y_{k末} \end{cases} \quad (2)$$

$(x_{k首}, y_{k首}), (x_{k末}, y_{k末})$  分别为  $k$  区域内该段管型航路起始点和结束点转化为直角坐标系中的值,使用 Matlab 编程遍历从  $(x_{k首}, y_{k首})$  到  $(x_{k末}, y_{k末})$  的所有点,找出一得到  $F$  的最小值,将  $(x, y)$  再转换为经纬度坐标即为此区域内管型航路进出口位置。

### 2.3 航线距离成本

由航班延误损失等效为飞机在空中的飞行成本继而可求出飞行距离  $\phi$ :

$$\phi = \frac{C_g}{V_e} \cdot v \quad (3)$$

$V_e$  为某机型的单位飞行成本,飞机的飞行成本主要包括人工成本、燃油成本、拥有飞机费用以及飞机、发动机维修费用和其他间接成本,  $v$  为飞机的巡航速度。

航空器加入管型航路相对于传统航路会额外飞行一段距离,可由下式得出:

$$\varepsilon = \alpha + \delta - \sigma \quad (4)$$

$\alpha$  是航空器在管型航路中的飞行距离,  $\delta$  是进出航路的飞行距离,  $\sigma$  是传统航路需要飞行的距离。  $\varepsilon$  是负值则说明通过管型航路的飞行距离要少于传统航路的距离。

如果  $\varepsilon < \phi$ , 则说明飞机加入管型航路额外产生的飞行成本是低于延误成



图2 北京与广州间的管型航路

表1

机场	天津	石家庄	济南	郑州	阜阳	武汉	襄阳	长沙	井冈山	赣州
航班量	28	11	35	39	1	36	3	10	2	2

本的,即管型航路的进出口位置的设计合理并符合航空公司经济性。

因此进出口位置关系到各机场航班使用管型航路的成本问题,要在考虑所有机场使用管型航路的成本上合理确定进出口位置。

### 3 实例分析

根据2012年全国民用机场吞吐量排名,京津冀机场群和珠三角机场群年旅客吞吐量分别处在第一、二位。所以实例以北京到广州方向建立一条管型航路,设计出管型航路的进出口位置。

表2

机场群区域划分	进出口位置坐标	进出口名称
北京 天津	N39 13 5.80 E116 34 25	$T_{\text{首}}$
石家庄 济南	N37 26 18 E115 31 49	$T_1$
郑州	N34 18 06 E114 42 54	$T_2$
武汉 襄阳 阜阳	N30 43 21 E114 07 21	$T_3$
长沙	N28 08 38 E113 36 38	$T_4$
广州 深圳 珠海 香港 澳门	N23 32 06 E113 23 06	$T_{\text{末}}$

#### 3.1 航空公司的延误成本计算

国内航线通常由中型机执飞,本文以常见的波音737-300作为实例,为了便于计算只考虑这一种机型。根据北京机场2月17-19号三天的航班数据统计,使用A461航路的航班平均延误时间为25min。737-300单位时间的地面延误损失约为1.61万元/小时<sup>[8]</sup>。根据式(1)算得的航班平均延误成本约6667元。737-300的平均耗油量为2.5t/h。巡航速度为848km/h,平均单位时间飞行成本为36000元/小时<sup>[9]</sup>。根据式(3)由等待延误耗费的损失等效为飞行成本,计算后得到飞行距离约为157km,即 $\phi=157$ 。

因而将管型航路中心线两侧各延伸150km为覆盖范围,此范围内的机场都可以初步考虑作为加入管型航路的可用机场,如图2所示。

在管型航路的覆盖范围内可以考虑加入航路的机场有:天津,石家庄,济南,郑州,阜阳,武汉,襄阳,长沙,井冈山,赣州。

#### 3.2 航班量大小统计

根据2013年6月25日一天的航班数据统计出各个起始机场到珠三角机场群(广州、深圳、珠海、香港、澳门)的航班数量,如表1所示。从经济利益上的考虑,管型航路进出口的位置会依据机场航班量大小,靠近流量大的机场。

#### 3.3 进出口位置

根据机场的位置分布和航班量大小,将航班量大的机场视为枢纽,以300km为半径覆盖范围,分为6个区域机场群,北京区域从管型航路的首端入口进入航路,广东区域从管型航路的末端出口离开航路,其他四个区域均从航路中间设置的进出口进出航路。井冈山和赣州机场距离广州机场很近而且航班量不多,不再使用管型航路。已知各机场经纬坐标,根据式(2)计算得出 $(x, y)$ 值再转化经纬坐标,其中 $T_{\text{首}}$ 和 $T_{\text{末}}$ 是首都机场和广州机场的进出口位置,如表2所示。

#### 3.4 进出口位置经济性验证

从航路图中量得航空器使用传统航路的航线距离 $\alpha$ 。已知机场经纬坐标和进出口位置经纬坐标,根据等角航线距离公式可计算出机场至管型航路进出口位置的距离 $\delta$ ,根据式(4)计算得到飞机使用管型航路的额外飞行距离 $e$ ,见表3。由于本文考虑管型航路为单向,即北京飞往珠三角方向,所以香港、澳门、深圳等机场视为目的机场不再考虑加入管型航路的成本。



图3 管型航路进出口位置分布

表3

机场	天津	石家庄	济南	郑州	武汉	襄阳	阜阳	长沙
进出口	$T_{首}$	$T_1$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_3$	$T_3$	$T_4$
$a/\text{km}$	1789	1571	1571	1207	805	805	805	511
$\delta/\text{km}$	67	118	163	84	11	235	284	38
$\sigma/\text{km}$	1843	1655	1656	1265	820	1015	1030	550
$\epsilon/\text{km}$	13	34	78	26	-4	25	59	-1

以上机场所得 $\epsilon$ 值均小于 $\phi$ ,说明这些机场航班可以加入到管型航路中,加入管型航路的额外飞行成本均低于传统航路的延误成本。

#### 4 结论

本文主要针对管道航路的进出口位置选择问题,基于管型航路的自身特点,依据航班延误成本,航线距离成本和航班量大小,将航路的覆盖范围与可加入机场的选择问题结合设计出管型航路进出口位置,并以北京至广州的管型航路为例,将航路分为六个区域,规划了六个进出口位置,计算得到,区域内机场的 $\epsilon$ 均小于 $\phi$ ,验证了进出口位置的经济性及合理性。

本文实际上做了一个初步探索工作,定性的设计了单向管型航路的进出口位置,为将来管型航路实际规划和应用提供了一定的理论参考依据。航路的加入与离开还要考虑更多更详尽的问题,比如考虑禁区、危险区和限制区的约束,管型航路内航空器的流量密度,空挡穿插的概率,管型空域之内几条航路之间的航空器移动问题和加入航路后对航空器流的影响问题等等,这些问题都需要继续更深入的了解和研究。

AST

#### 参考文献

[1] Hering H. Air traffic freeway system for Europe[J]. EUROCONT ROL

Experimental Centre Technical Note, 2005,3(5):29-36.

[2] Sridhar B. Initial study of tube networks for flexible airspace utilization[R]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Chicago: 2006.

[3] Hoffman R, Ph.D. Principles of airspace tube design for dynamic air space configuration [R].The 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), USA:2008.

[4] Chen J, Andrisani D. Flexible tube-based network control[R]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago: AIAA, 2009.

[5] Kotecha P, Hwang I. Optimization based tube network design for the Next Generation Air Transportation System (NextGen) [R]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago:2009.

[6] 王莉莉,李秋伟,刘兵. 我国空中高速路网设计方法研究[C].地球科学与遥感国际学术会议,2012,30:484-491.

[7] 王莉莉,李宏发,张雄飞. 空中高速路匝口排序延误研究[J].中国民航大学学报,2011,29(6):1-3.

[8] 李雄,刘光才,颜明池,张玮. 航班延误引发的航空公司及旅客经济损失[J].系统工程,2007,25(13):20-22.

[9] 石丽娜. 利用飞机成本指数降低机队规划成本[J].上海工程技术大学学报,2003,17(3):228-231.

#### 作者简介

戴福青,工学硕士,教授,研究方向为空域规划与飞行程序设计。