

应用 Monte-Carlo 算法的厦门高崎机场 进近管制区容量评估研究

杨 姝, 朱代武, 钟建华, 王冬冬

(中国民航飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:为了对建立了基于性能的导航(PBN)飞行程序的厦门高崎机场的进近管制区进行容量评估。本文采用 Monte-Carlo 算法,根据厦门高崎机场 PBN 飞行程序的特点进行了程序分析和数据收集,建立了以中间进近定位点(IF)为原点的 Monte-Carlo 计算模型,验证了此模型对基于 PBN 飞行程序的进近管制区进行容量评估的可行性。

关键词:基于性能的导航(PBN)、厦门高崎机场、Monte-Carlo 模型、容量

中图分类号:V355.1; **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2013)03-0029-03

厦门高崎机场基于性能的导航(PBN)^[1]飞行程序于 2012 年 3 月正式运行。本文通过采用 Monte-Carlo 随机方法,建立随机的模拟飞机流,通过获取实际运行中通过某个航路点的飞机流比率、机型混合比等统计数据,对运行 PBN 飞行程序的厦门高崎机场的进近管制区进行容量评估,以便于在中间进近定位点之前对进场的航班进行排序^[2]。

1 影响高崎机场进近管制区容量的因素

作为全国运输量排名第 10 位的厦门高崎国际机场^[3],影响其进近管制区容量的因素主要有:

1)危险区(图中以 D 表示)、限制区(图中以 R 表示)的分布情况,及其使用情况,厦门高崎机场的东、北、西三面有限制(危险)区,东南面是金门空域,如图 1 所示。

2)厦门高崎机场位于厦门岛内东北角,机场地势较高,地形较为平坦。东北端临海,地势较低,西南端人工建筑物较多、较高。

3)机场设施、设备齐全,跑道两个方向均安装有 I 类精密进近设备。

4)进近管制区实施雷达管制,飞行规则以仪表飞行规则为主。

5)传统的进场程序没有综合考虑进场程序与离场程序的分流问题,并且其所使用的导航设施精度不高,进离航线结构简单。

6)PBN 进场程序进行了进离场程序分流,并开

辟了东面的进场航线。

7)管制员的管制能力与工作负荷。

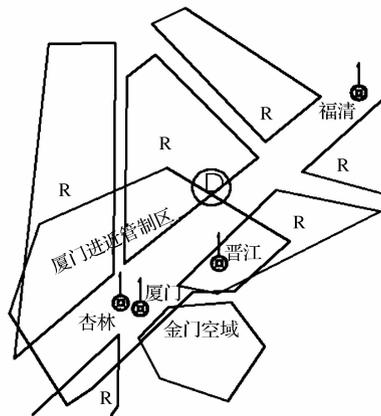


图 1 厦门高崎机场空域图

2 PBN 程序下的进近管制区容量评估模型

厦门高崎机场的 PBN 飞行程序设计规范,并且各条进场航线、进近航线、离场航线之间没有交叉点,在进近管制区范围内,通过使用高度限制和具有地理间隔的航线对进场和离场的飞机进行分流,减小其相互影响。另外,因使用了导航精度较高的区域导航技术,使得保护区范围更小,成功开辟了东面进场航线;并设计了通过限制区的航线,在限制区无活动的情况下,经协调允许可使用通过限制区的航线^[3]。

为简化其空域结构,以采用相对简单的数学模型

收稿日期:2013-01-09

作者简介:杨姝(1983—),女,四川绵阳人,中国民航飞行学院空中交通管理学院,助教,硕士,研究方向:空中交通管理、飞行程序设计。

进行容量分析,把复杂的进近区三维问题简化为二维问题,需进行以下假设:第一,不断有飞机进入其管制区域;第二,从不同入口进入的飞机,从入口到中间进近定位点(IF)共通过三个定位点,即以起始进近定位点之前的定位点为入口;飞机经过 3 个航段完成进近区的飞行,从几何特征的角度上看,这三个航段是相互连接的直线段;在实际运行中,不同入口的航段在中间进近定位点汇聚;第三,进近的飞机在三个航段上的速度和高度逐渐减小,每个航段间,飞机使用一个不变的速度,进入下一个航段时,飞机的速度才发生变化,且是瞬时变化,即不考虑速度变化的过程。

设进入进近区的飞机中,前机为 i ,从 k 入口进入;后机为 j ,从 l 入口进入,不同的机型之间相互独立,此情况出现的概率为:

$${}_{kl}P_{ij} = p_k p_{i/k} p_j p_{j/l} \quad (1)$$

其中:

P_k 是前机从 k 入口进入的概率;

P_l 是后机从 l 入口进入的概率;

$P_{i/k}$ 是在 k 入口进入的所有飞机中 i 类飞机的比率;

$P_{j/l}$ 是在 l 入口进入的所有飞机中 j 类飞机的比率;

那么,相继通过中间进近定位点 E 点的平均时间间隔为:

$$\begin{aligned} t_a &= \sum_{klij} {}_{kl}t_{ij} \cdot {}_{kl}P_{ij} \\ &= \sum_{klij} {}_{kl}t_{ij} \cdot p_k p_{i/k} p_j p_{j/l} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 ${}_{kl}t_{ij}$ 为前机 i 、后机 j 在最后一进近点的最小时间间隔。

则机场进近区的到达容量为:

$$C = 1/t_a \quad (3)$$

由式(3)可知,要求得容量 C ,即要求出 t_a 。因此,根据之前的假设对机场进近空域进行简化。以中间进近点(IF)E 点为原点、以跑道延长线为 X 轴(着陆方向为正方向)、在水平方向上与 X 轴垂直的方向为 Y 轴(面向跑道的右侧为正方向)。根据飞机性能数据、飞行程序结构可以求得飞机任意时刻相对于原点的坐标,从而可以求得任意两架飞机之间的距离和方位。

在如图 2 所示的二维平面中,两架飞机的飞行航迹,设前机 i 从终端区入口 k 进入,后机 j 从入口 l 进入,并且前机 i 到达入口点 k 时,后机 j 距入口 l 为 ${}_{kl}S_{ij0}$,则飞机 i 、 j 在中间进近定位点的时间间隔为:

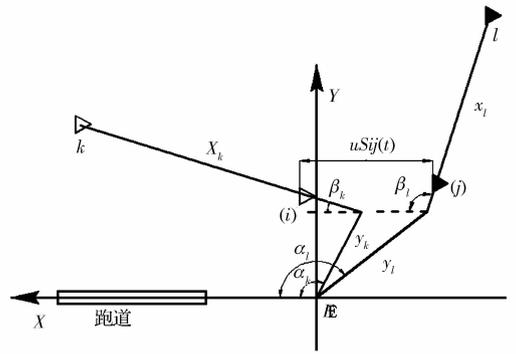


图 2 简化后的进近航线示意图

$${}_{kl}t_{ij} = \left(\frac{{}_{kl}S_{ij0} + x_l + y_l}{v_j} \right) - \left(\frac{x_k + y_k}{v_i} \right) \quad (4)$$

其中:

${}_{kl}S_{ij0}$ 是前机 i 到达 k 入口时,后机 j 距 l 入口的距离; x_k, x_l 是分别以 k, l 为进近航迹的第一段航段长度; y_k, y_l 是分别以 k, l 为进近航迹的第二段航段长度; v_i, v_j 为飞机分别在 x_k 与 x_l 上的平均速度; u_i, u_j 为飞机分别在 y_k, y_l 上的平均速度;

由式(4)可知, ${}_{kl}S_{ij0}$ 是决定时间间隔的重要因素,为使容量最大化,需要在整个进近区域内使用最小的时间间隔,在满足安全间隔的前提下使时间间隔最小。因此有:

$$\begin{aligned} \text{当 } t \in \left[0, \frac{x_k + y_k}{v_i} + \frac{y_l}{u_i} \right] \text{ 时, 求 } \min[{}_{kl}S_{ij}(t)], \text{ 且} \\ {}_{kl}S_{ij}(t) \geq \delta_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

${}_{kl}S_{ij}(t)$ 是在 t 时刻,飞机 i, j 之间的水平距离; δ_{ij} 是该区内两架飞机之间的最小水平间隔。

由图 2,根据简单几何关系,计算出飞机 i, j 的坐标分别为:

$$\begin{aligned} (i): \{ &y_k \cos \alpha_k + (x_k - v_i t) \cos \beta_k, \\ &y_k \sin \alpha_k + (x_k - v_i t) \sin \beta_k \} \\ (j): \{ &y_l \cos \alpha_l + ({}_{kl}S_{ij0} + x_l - v_j t) \cos \beta_l, \\ &y_l \sin \alpha_l + ({}_{kl}S_{ij0} + x_l - v_j t) \sin \beta_l \} \end{aligned}$$

在实际运行中,会在进场航路点根据程序的要求进行调速,因此,可以将不同类型的飞机的速度看作是相等的,即: $V_i = V_j = V$;根据进场、进近程序的要求,不同入口进场的飞机将在中间进近定位点(IF)汇聚,并且在中间进近定位点之前完成进场排序。

飞机 i, j 之间的距离为:

$${}_{kl}S_{ij}(t) = \sqrt{At^2 + Bt + C} \quad (6)$$

式中 A, B, C 三个常数分别为:

$$\begin{aligned}
 A &= 2 \times v^2 - 2 \times \cos(\beta_k - \beta_l) \times v^2 \\
 B &= 2v[(\cos\beta_k - \cos\beta_l) \times ({}_{kl}S_{ij0} \cos\beta_l \\
 &+ x_l \cos\beta_l - x_k \cos\beta_k - y_k \cos\alpha_k + y_l \cos\alpha_l) \\
 &+ (\sin\beta_k - \sin\beta_l) \times ({}_{kl}S_{ij0} \sin\beta_l + \\
 &x_l \sin\beta_l - x_k \sin\beta_k - y_k \sin\alpha_k + y_l \sin\alpha_l)] \\
 C &= ({}_{kl}S_{ij0} \sin\beta_l + x_l \sin\beta_l + y_l \sin\alpha_l \\
 &- x_k \sin\beta_k - y_k \sin\alpha_k)^2 + (x_k \cos\beta_k \\
 &+ y_k \cos\alpha_k - {}_{kl}S_{ij0} \cos\beta_l - x_l \cos\beta_l - y_l \cos\alpha_l)^2
 \end{aligned}$$

假设前机 i 到达入口 k 时有 $t=0$, 而 $t=t^*$ 时, i 、 j 之间的距离最小, 求式(6)的最小值, 则有:

$$t^* = -\frac{B}{2A} \quad (7)$$

$$\min[{}_{kl}S_{ij}(t)] = {}_{kl}S_{ij}(t^*) = \sqrt{\frac{4AC - B^2}{4A}} \quad (8)$$

为求得 i 、 j 在最后进近点的时间间隔 ${}_{kl}t_{ij}$ 的最小值, 需令:

$$\min[{}_{kl}S_{ij}(t)] = {}_{kl}S_{ij}(t^*) = \sqrt{\frac{4AC - B^2}{4A}} = \delta_{i,j} \quad (9)$$

将常数 A 、 B 、 C 代入式(9), 求解得出的 ${}_{kl}S_{ij0}$ 即为 $\min {}_{kl}S_{ij}$, 将它代入式(4), 便可求得 i 、 j 在中间进近定位点的最小时间间隔 ${}_{kl}t_{ij}$, 将它和实际运行中的其他概率值(P_k 、 $P_{i/k}$ 、 P_j 、 $P_{j/l}$)代入式(2)即可求得进近管制区内的到达容量 C 。

3 高崎机场进近管制区容量计算

3.1 高崎机场的程序结构

在此, 我们仅对厦门高崎机场 05 号跑道的进场、进近程序进行分析和容量评估。如图 3 所示, B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 为起始进近定位点, A_0 、 A_1 、 A_2 为进场航路点, 不同方向的进场在中间进近定位点(IF)汇聚。每个航段的角度和距离如图 3 所示。另外, 05 号跑道 PBN 进场、进近程序要求在起始进近定位点的速度不得超过 $380\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, C 类飞机最后进近速度范围为 $215 \sim 295\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。中间进近航段和最后进近航段的长度为 20.34km , 假设中间、最后航段的平均速度 $240\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

从 A_2 点进场的飞机主要是来自北面和东面, 从 A_0 进场的飞机主要来自西面, 设通过 B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 进近的飞机比例分别为: 10% 、 20% 、 35% 、 50% 。

3.2 机型及间隔

厦门高崎机场的航班机型比例统计如表 1 所示。从表中可知, B737 机型所占的比例最大 (61.99%), 其次为 A320 (12.56%)。参照厦门高崎机场的机型比例统计数据, 可以得出现阶段厦门机场机队组成比

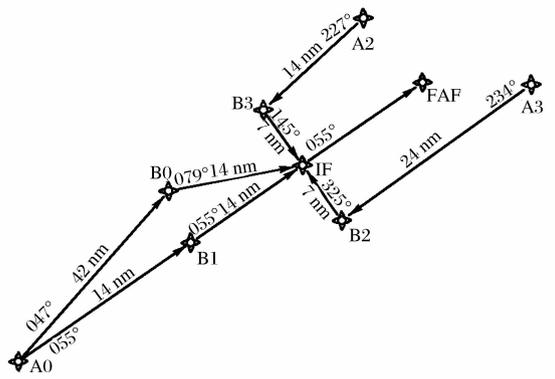


图 3 05 号跑道进场、进近程序示意图

例大约是: 重型机 10% 、中型机 80% 、轻型机 10% 。为计算出最大容量, 可设在高峰时段, 进入进近管制区内的都为中型机。根据《中国民用航空空中交通管理规则》^[4], 雷达最低水平间隔标准应按照如下规定: 进近管制不得小于 6 千米, 区域管制不得小于 10 千米。

表 1 厦门高崎机场航班机型比例

机型	比例 / %	机型	比例 / %	机型	比例 / %
A300	0.8	B747	0.99	A340	0.07
A319	4.09	B757	7.63	AS65	0
A320	12.56	B767	0.68	B737	61.99
A321	1.37	ERJ	3.19	MD90	3.23
A330	1.38	CRJ	1.74	MD11	0

3.3 容量计算及验证

当选取 A_2 - B_3 -IF 和 A_0 - B_1 -IF 进行计算时, 即: $k=2, l=0$ 。得出 $\min[{}_{2,0}S_{ij}(t)] = -23.4$, 由于 A_0 - B_1 -IF 段长 55 海里, A_2 - B_3 -IF 长 21 海里, 所以, 当前机位于 A_2 时, 后机可以飞入 A_0 之内 23.4 公里时, 能满足最小间隔。 ${}_{2,0}t_{ij} = 0.2472$ 。之后再分别计算其他进场航线的组合便可用公式(2)和公式(3)求得厦门高崎机场 05 号跑道 PBN 程序下的进近管制区容量 $C=33.6$ 架次/小时。

4 结论

PBN 飞行程序中进场航路是直线段, 比较适合使用以中间进近定位点为原点的 Monte-Carlo 计算模型进行容量评估。经计算, 厦门高崎机场 PBN 程序建立之后, 进近管制区容量较传统程序得到了明显提高。但是此算法进行容量评估, 比较侧重于程序本身, 而未考虑管制员的工作负荷, 也未考虑离场飞机流的影响, 具有一定的局限性。

(下转第 74 页)

产和技术上的经费投入比重是全球最高的。

新加坡 R&D 投入占了全球 R&D 总投入的 1%，而它的人口却只有 500 万。新加坡国内研发总支出(GERD)在过去 10 年里翻了近 3 倍，其 R&D 投入占 GDP 的比重从 1.9% 增加到了 2.7%，增长幅度超过了美国、英国和日本。新加坡拥有的科学和技术人员占全国人口的比重也是东南亚地区最高的。

以色列是世界上唯一一个 R&D 投入占 GDP 比重超过 4% 的国家(4.2%)。2013 年，以色列 R&D 经费投入约为 106 亿美元，其中很大的一部分资金将用于国防研发。

综上所述，2013 年全球 R&D 投入仍将继续增长，亚洲的发展速度之快，崭露引领全球经济发展的势头，尤其是中国，经过近几年的快速发展，中国在 R&D 投入方面大有赶超美国之势，前景可期。

然而，中国的 R&D 经费投入虽然保持着快速增长，却仍存在一些问题影响着中国科研领域的快速发展。例如，R&D 投入总量虽大，但强度不够^[2]，发达国家 R&D 经费占 GDP 的比重普遍在 2.5% 左右甚

至更高，而中国的这一比值 2011 年为 1.84%^[3]。另外，中国的基础研究投入偏低^[4]，近年来，基础研究投入强度一直处于 5% 左右的较低水平，导致基础研究为后续的应用研究和试验开发提供发展后劲的功能不足，影响了中国整体的科研水平。

因此，对于中国而言，应当加强 R&D 投入强度、提高基础研究投入并适时推进国家相关制度改革，以增强国家整体科技竞争实力，进而推进创新型国家建设。

参考文献

- [1] BATTELLE MEMORIAL INSTITUTE. R&D MAGAZINE. 2013 Global R&D Funding Forecast [R]. 2012.
- [2] 郑文范, 刘晓宇. 我国 R&D 经费投入现状及“十二五”期间投入目标探析[J]. 科技进步与对策, 2010(27)21:32-37.
- [3] 国家科学技术部. 中国科技统计数据(2011)[EB/OL]. <http://www.sts.org.cn/sjkl/kjtjdt/data2011/科技统计数据2011.pdf>
- [4] 金银哲. 国内外基础研究强度的调查研究[J]. 中国校外教育, 2011(10): 14-15.

2013 Global R&D Investment Analysis

WANG Lin, MU Guang-yuan

(Institute of Science and Technology Information of Shanxi, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Global R&D investment in 2013 will show a continuing growth trend, Asia will lead the global R&D investment growth. The article based on report for "2013 Global R&D Funding Forecast" of Battelle Memorial Institute and R&D Magazine, analysed the 2013 global R&D investment in major countries and regions, in order to promote the development of Chinese R&D investment.

Key words: global; China; R&D funds; investment and analysis

(上接第 31 页)

参考文献

- [1] Performance-based Navigation (PBN) Manual[Z]. ICAO (DOC. 9613), 2008: 15-30.
- [2] 杨妹, 朱代武, 等. 基于区域导航的进场航班排序[J]. 中国

科技纵横, 2009(10 下): 144-145.

- [3] 朱代武. 应用 PBN 飞行程序实现厦门高崎机场空域灵活使用[G]// 专家论文集及工作成果汇编, 2012: 155-164.
- [4] 中国民用航空总局. 中国民用航空空中交通管理规则[Z]. 中国民用航空总局令第 86 号, 2000-01: 53-55.

Research of using Monte-Carlo Method to Assess the Capacity in Xiamen Approach Area

YANG Shu, ZHU Dai-wu, ZHONG Jian-hua, WANG Dong-dong

(Air Traffic Management College, CAFUC, Guanghan Sichuan 618307, China)

Abstract: In order to assess the capacity of approach area in Xiamen GAOqi aerodrome, which had set up Performance Based on Navigation (PBN) flight procedure, this article used the Monte-Carlo method, analyzed the procedure, collected the flight data in accordance with the traits of PBN flight procedure, and built the Monte-Carlo calculating model whose origin was Intermediate Fix (IF). This article also tested the feasibility of using the model to assess the capacity in approach area based on PBN flight procedure.

Key words: Performance Based on Navigation (PBN); Xiamen aerodrome; Monte-Carlo model; capacity