

基于MMEM-ISM理论的配对进近运行分析

何 昕, 张凤飞

(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:为加快配对进近在我国近距平行跑道机场的实施,首先利用人机环管思想对配对进近运行中可能存在的风险因素进行研究,并分析了不同风险因素组合下的相互联系;然后建立解释结构模型对各种因素之间的关系进行研究;最后分析结果表明,人的因素是配对进近中最关键的因素。在配对进近程序的运行中,管制员是配对成功与否的核心因素,同时需要加强飞行员与管制员的沟通。

关键词:配对进近;人机环管;解释结构模型

中图分类号:V355.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2018)11-0076-06

目前,由于飞行流量的急剧增加,我国的部分大型机场开始建设多跑道,北京、上海、广州、重庆等多个城市的机场均已建立多跑道系统,平行跑道因其较高的利用率而得到大部分多跑道机场的青睐,但是由于城市土地资源的短缺、机场空域的限制、多跑道建设条件的要求、城市建设布局规划等因素,使得远距平行跑道的建设难以实施,从而多跑道机场中的相当一部分为近距平行跑道。因此,近距平行跑道成为我国机场多跑道系统的发展方向。

近距平行跑道(Closely Spaced Parallel Runway, CSPR)是指跑道中心线间距小于2 500 ft(762 m)的两条平行跑道,可以在一定程度上缓解起飞和着陆飞机流的冲突,从而提升机场运行的安全性和效率。然而,就目前的使用情况来看,近距平行跑道远未达到有效利用,所以如何提高近距平行跑道的利用率成为一大研究热点之一。其中,配对进近运行模式可以增加跑道容量,极大提高近距平行跑道的跑道利用率。配对进近(Paired Approach, PA)是指跑道间距在700 ft(213 m)和2 500 ft(762 m)之间的近距平行跑道上,在仪表气象条件下实施的类似于相关仪表进近的进近模式^[1-2],配对的两架航空器需要在避免碰撞和尾流的双重危险下,一前一后完成进近着陆的过程^[3]。该思想首先由美国的Stone R. S.等人在NASA召开的基于驾驶舱的平行跑道进近程序会议上提出^[4];2008年,Anand D等人通过分析美国空中交通管制系统的现有设备

对配对进近的运行条件进行了分析^[5];2013年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出了简化配对进近(Simplified Aircraft-Based Paired Approach, SAPA)的概念,对配对进近的整个运行程序进行了非常详细的介绍^[6];同年,陈亚青等人对近距平行跑道上的新技术进行了研究,对配对进近的条件作了分析^[7];2014年杜红兵和吴军采用人机环管和解释结构模型相结合的方法,对机场外来物的风险因素进行了分析^[8];2015年,韩丹以上海虹桥国际机场对配对进近程序的应用进行了详细的计算^[3];2016年,张兆宁等人分析了我国管制系统的风险因素,采用解释结构模型对各种因素的关系进行了研究^[9];2017年,宋斐对配对进近的机动避让程序做了研究,提出了在配对进近中发生错误进近时的航空器机动避让措施^[10]。

本文从人(Man)、机(Machine)、环境(Environment)和管理(Management)的角度(即“人机环管(MMEM)”),分析配对进近在我国近距平行跑道实施的可行性,研究各种因素对配对进近运行的影响,并运用解释结构模型对各因素之间的关系进行分析。

1 人机环管(MMEM)

“人、机、环、管”(MMEM)是指安全综合管理的四要素(如图1所示),最初是从工业制造企业管理中的“人机料法环”中引申而来^[11]。本文采用德尔非法,与机场、空管和航空公司等单位的专家进行

收稿日期:2018-08-31

基金项目:中国民用航空飞行学院创新团队支持项目计划(XM2628);2015年民航局科技创新引导项目(20150226)。

作者简介:何昕(1979—),女,浙江浦江人,中国民用航空飞行学院,副教授,研究方向:空中交通管理。

交流,经过整理分析,得到人机环管中人为因素包括:人的操作、指挥、职责、决策、身体、心理、其他等不安全因素;设备因素包括:设备的配备、选型、安装、维护、位置、有效性和其他不安全因素;其环境因素包括:地形环境、气象条件和其他工作环境的不安全因素等;管理因素包括:组织机构的完整性、规章制度的合理性、设计因素、岗位的划分和其他不安全因素等。

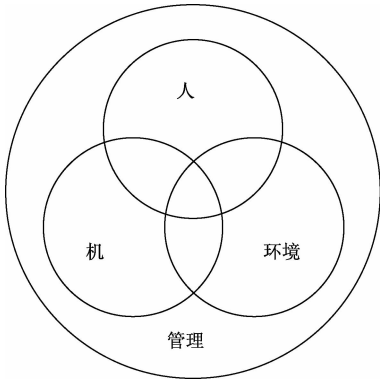


图 1 MMEM 系统组成

1.1 人为因素

人的因素是指在配对进近过程中与安全相关的所有人员。现代航空运输体系是以人为决策的系统,人是空中交通安全中最积极、最活跃、最主动的影响因素,也是最难以把握的因素。而在配对进近中,管制员和飞行员能否密切配合更是配对进近成功与否的关键,也是运行安全最重要的保障。配对进近程序在最后一进近定位点实施配对,在到达最后一进近定位点之前,管制员需要根据两架航空器的位置和最后一进近速度对飞机进行排序和引导,并确定配对前机和配对后机;而飞行员需要在起飞 30 分钟后将预计到达最后一进近定位点的时间和速度告知相关管制单位,将最后一进近速度输入机载自动驾驶系统中。在到达最后一进近定位点之后,管制员需对两架航空器下达相关指令,保证在初始配对阶段两架航空器的垂直间隔至少为 1 000 ft,并对之后的两架航空器进行密切的监控;此时飞行员操作航空器在指定高度飞行直至截获各自的下滑道,之后沿各自的下滑道完成进近着陆^[3]。管制员和飞行员对配对进近的影响因素如表 1 示。

1.2 设备因素

设备因素主要是指航空器与机场跑道地面相关的各种设备的配置及其完好性、利用率等。包括各种

无线电通话系统、各种监视和导航系统、机载设备、告警系统以及机场的各种助航设施等。与配对进近相关的设备因素见表 2。

表 1 人对配对进近的影响因素

管制员	x_1 遗忘某架航空器、某条指令等
	x_2 沟通失误
	x_3 错误判断航空器间隔或位置
	x_4 错误辨别航空器
飞行员	x_5 未正确执行管制员指令
	x_6 未对航空器做出正确操控

表 2 设备对配对进近的影响因素

助航设备	x_7 设备精度不够
	x_8 通信、导航设备故障
航空器	x_9 航空器操作性能

1.3 环境因素

环境因素分为外环境因素和内环境因素。外环境因素主要包括天气因素、空域资源、军方训练、其他航空器的活动等。内环境因素包括人机界面、管制室和机舱内的湿度温度以及嘈杂度等,见表 3。

表 3 环境对配对进近的影响因素

机场地形的影响	x_{10} 地形海拔较高
	x_{11} 存在障碍物
场面天气状况	x_{12} 能见度低
	x_{13} 存在恶劣天气
昼夜环境影响	x_{14} 光线的变化
	x_{15} 温度湿度的变化
空域的使用	x_{16} 空域存在军机或其他航空器活动
	x_{17} 机场空域环境的合理性

1.4 管理因素

管理因素通过对航空运输系统的运行实施、拟定运行计划以及实时监控等,实现对管制员、飞行员、各种设备以及气象等环境因素的控制与管理,并用法律法规、程序以及方法等覆盖人、机、环境要素以及它们的交互区,实现对航空运输系统的统筹规划,具体见表 4。

表 4 管理对配对进近的影响因素

规章制度的制定和执行	x_{18} 规章制度的合理性和可行性
	x_{19} 规章制度的执行力度
设计因素	x_{20} 飞行程序设计的影响
运行模式	x_{21} 机场跑道的运行模式

1.5 各因素之间的关系

除去人、机、环境、管理这四大因素对配对进近的影响,各因素之间也存在着相关影响。①人与设备:包括管制员与飞行员对设备运用的熟悉程度和各种设备对管制员、飞行员的影响;②人与环境:能见度、光线等环境因素分别对飞行员和管制员有较大的影响,反之还有飞行员和管制员对环境的适应性;③环境与设备:包括恶劣气象条件下环境对各种设备的性能、质量等的影响和设备在使用中的环保问题;④综合:实际运行中人、设备、环境之间的关系错综复杂,同时管理因素几乎覆盖到管制员、飞行员、设备和环境等各个方面^[12]。

2 解释结构模型(ISM)

解释结构模型(Interpretative Structural Modeling Method, ISM)是将复杂的系统分解为若干子系统要素,利用人们的实践经验和知识以及计算机的帮

助,最终构成一个多级递阶的结构模型。ISM 最初是由美国的 War Field 在 1973 年为分析复杂的社会经济系统相关问题而提出的理论模型,该模型通过一定的规则,将系统各个元素之间的关系划分为不同级的递阶结构。具体步骤大致如下:首先利用原始矩阵、影响因素以及有向图体现系统的组成,然后对矩阵进行转置、相乘等运算得到可达集合、结果集合等,计算出可达矩阵;进而对可达矩阵进行计算;最后对矩阵、有向图等进行判断和拆分,将具有复杂关系的系统分解成多级递阶结构,最终完成层级结构模型^[9,13-14]。

2.1 各因素之间相关关系的分析

根据上一节中列出的因素,分别对每两个因素之间的关系进行分析,如果两者存在直接关系,则用 1 表示,反之,用 0 表示。根据各个专家对两两因素组合之间关系的分析,从而建立邻接矩阵 A:

$$A = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} & x_{18} & x_{19} & x_{20} & x_{21} \\ x_1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_3 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_4 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_8 & 0 \\ x_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{11} & 0 \\ x_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ x_{13} & 0 \\ x_{14} & 0 & 1 \\ x_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{18} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{19} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{20} & 0 \\ x_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i \text{ 直接影响 } x_j \\ 0 & x_i \text{ 不直接影响 } x_j \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

2.2 可达矩阵的生成

记 I 为单位矩阵,将邻接矩阵 A 与单位矩阵 I 进

行求和运算,然后根据按照布尔矩阵运算法则,使用 Matlab 进行矩阵的运算,使得(2)式成立,从而得到可达矩阵 M。

$$M = (A + I)^{n+1} = (A + I)^n \neq (A + I)^{n-1} \quad (2)$$

表 5 要素层级结构的确定

要素序号	可达集 $P(x_i)$	先行集 $Q(x_i)$	交集 $P(x_i) \cap Q(x_i)$
1	1,2,3,4,5,6,8,9,10,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	1,2,3,4	1,2,3,4
2	1,2,3,4,5,6,8,9,10,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	1,2,3,4	1,2,3,4
3	1,2,3,4,5,6,8,9,10,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	1,2,3,4	1,2,3,4
4	1,2,3,4,5,6,8,9,10,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	1,2,3,4	1,2,3,4
5	5,6,10,13,14,16,17,19,20,21	1,2,3,4,5	5
6	6,13,14,20,21	1,2,3,4,5,6	6
7	7,8,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21	7	6
8	8	1,2,3,4,7,8,12	8
9	9,15,16,17,18,19	1,2,3,4,9	9
10	10,16,17,19	1,2,3,4,5,7,10,12	10
11	11	7,11,12	11
12	8,10,11,12,13,16,17,19	7,12	12
13	13	1,2,3,4,5,6,7,12,13,14,21	13
14	13,14,20,21	1,2,3,4,5,6,7,14,21	14,21
15	15,16,17,18,19	1,2,3,4,7,9,15,18	15,18
16	16,17	1,2,3,4,5,7,9,10,12,15,16,17,18,19	16,17
17	16,17	1,2,3,4,5,7,9,10,12,15,16,17,18,19	16,17
18	15,16,17,18,19	1,2,3,4,7,9,15,18	15,18
19	16,17,19	1,2,3,4,5,7,9,10,12,15,18,19	19
20	20	1,2,3,4,5,6,7,14,20,21	20
21	13,14,20,21	1,2,3,4,5,6,7,14,21	21

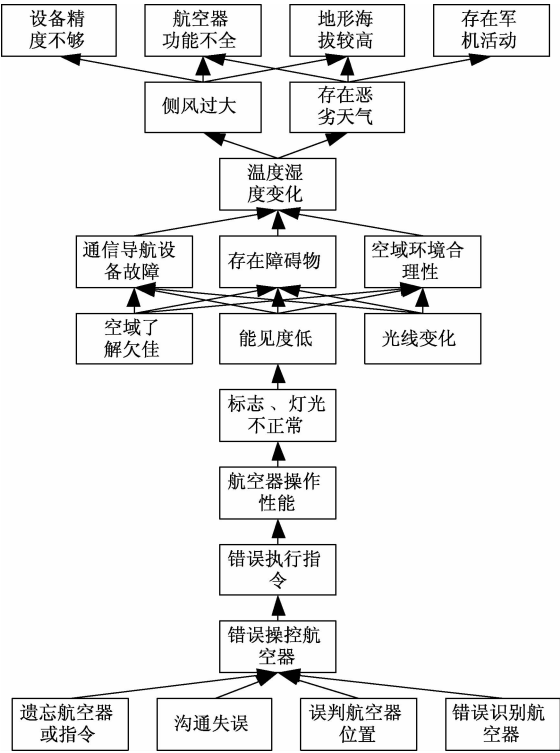


图 3 风险因素解释结构模型

1)管制员的工作在配对进近中具有至关重要的作用。遗忘某架航空器某条指令、与飞行员沟通失误、错误判断航空器的位置和间隔和错误识别航空器对于配对进近的运行具有极其关键的影响。因此,首先管制员必须非常熟悉配对进近的程序,并且提高其管制工作能力,减小错误率,这是实现配对进近程序的基础;

2)飞行员与管制员的密切配合。在配对进近程序的实施中,飞行员在密切配合管制员的同时,必须按照管制员的要求正确的完成配对进近中的指令;

3)完善相关基础设施建设和合理规划空域环境等,从而为配对进近程序的实施提供合适的运行环境。

3 结论

运用人机环管(MMEM)的方法,对配对进近中的风险因素进行分析,得到了 21 个风险因素。运用解释结构模型(ISM)对各种因素的层级结构和不同因素之间的相互作用关系进行了分析,得到 10 个层级结构,并通过计算建立了解释结构模型。

通过对各种风险因素的分析,在配对进近中,需要进一步提高管制员的工作能力,加强飞行员和管制员的沟通和配合能力,从而加快配对进近在我国近距平行跑道的运行。

参考文献

- [1] AD MUNDRA, WWJ COOPER, AP SMITH, et al. Potential benefits of a paired approach procedure to closely spaced parallel runways in instrument and marginal visual conditions [J]. IEEE, 2008, 3. C. 4—1—3. C. 4. 16.
- [2] R BONE, A MUNDRA, BO OLMOS. Paired approach operational concept[C]. Process of the 20th Digital Avionics Systems Conference, Daytona Beach, FL, 2001.
- [3] 韩丹. 上海虹桥机场近距平行跑道配对进近的可行性研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2016.
- [4] 陈亚青, 韩丹, 何昕, 等. 近距平行跑道配对进近方式探讨[J]. 中国民航航空, 2017(5): 51—52.
- [5] ANAND D MUNDRA, WAYNE W COOPER, SMITH A P, et al. Potential benefits of a paired approach procedure to closely spaced parallel runways in instrument and marginal visual conditions[C]. Digital Avionics Systems Conference, 2008: 10—27.
- [6] SC JOHNSON, GW LOHR, BT MCKISSICK, et al. Simplified aircraft-based paired approach: concept definition and Initial analysis[R]. National Aeronautics and Space Administration, NASA/TP—2013—217994, 2013.
- [7] 陈亚青, 罗亮, 詹建明. 窄距平行跑道运行新技术探讨[J]. 中国民用航空, 2013(12): 39—40.
- [8] 杜红兵, 吴军. 基于 MMEM-ISM 方法的机场外来物风险影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2014, 14(6): 8—11.
- [9] 张兆宁, 金伟伟, 崔文建. 终端区管制系统运行风险的解释结构模型研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(7): 798—803.
- [10] 宋斐. 配对进近模式的安全区域研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2017.
- [11] 海曲世元. 什么是人机环管[EB/OL]. (2018—04—01). <https://zhidao.baidu.com/question/1116646452293949499.html>.
- [12] 张兆宁, 王莉莉, 顾平辉, 等. 机场多跑道安全运行理论[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [13] JN WARFIELD. Participative methodology for public system planning [J]. Computers & Electrical Engineering, 1973, 1(2): 187—210.
- [14] 席酉民, 樊耘. 战略管理教程及学习指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] 韩传峰, 刘亮. 基于解释结构模型的应急机制系统分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 154—158.

Analysis of Paired Approach Operation Based on MMEM-ISM Theory

HE Xin, ZHANG Feng-fei

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

Abstract: In order to accelerate the implementation of the paired approach in the closed spaced parallel runway airport in China, the human-machine loop thought is first used to study the possible risk factors in the paired approach operation, and the relationship between different risk factors is analyzed. Then the relationship is established. Explain the structural model to study the relationship between various factors. The final analysis shows that the human factor is the most critical factor in the pairing approach. In the operation of the pairing approach procedure, the controller is the core factor in the success of the pairing, and the communication between the pilot and the controller needs to be strengthened.

Key words: paired approach; human-machine loop; interpret structural model