

飞行程序运行评估的理论 与方法研究

——安全、经济、管制适用性
和环境影响分析

FEIXING CHENGXU YUNXING PINGGU DE LILUN
YU FANGFA YANJIU
ANQUAN JINGJI GUANZHI SHIYONGXING
HE HUANJING YINGXIANG FENXI

王超 著



航空工业出版社

飞行程序运行评估的理论与方法研究

——安全、经济、管制适用性和环境影响分析

王 超 著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书围绕飞行程序运行评估方法进行了卓有成效的研究。阐述了飞行程序运行评估问题所涉及的多种影响因素,介绍了飞行程序运行建模与仿真技术,对飞行程序运行评估中的安全风险、经济性、管制适用性和环境影响理论与方法进行了详细的论述。本书对所建立的相关模型进行了实例分析,直观与严谨相结合,并提供了详尽的参考文献。

本书可以作为空中交通运输规划与管理、空中交通信息与控制等相关专业研究生和高年级本科生的教材及参考资料,也可作为从事空中交通管理、空中交通系统分析与评估、空域规划以及飞行程序设计工作的研究人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

飞行程序运行评估的理论与方法研究:安全、经济、管制适用性和环境影响分析 / 王超著. — 北京:航空工业出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5165-0591-5

I. ①飞… II. ①王… III. ①民用航空—航空航线—程序设计—研究 IV. ①V412.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第228948号

飞行程序运行评估的理论与方法研究——安全、经济、管制适用性和环境影响分析
Feixing Chengxu Yunxing Pinggu de Lilun yu Fangfa Yanjiu
——Anquan Jingji Guanzhi Shiyongxing he Huanjing Yingxiang Fenxi

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010-84934379 010-84936343

北京忠信印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2014年10月第1版

2014年10月第1次印刷

开本: 787×1092

1/16

印张: 15

字数: 347千字

印数: 1—2000

定价: 48.00元



自从航空运输业诞生一个世纪以来,根据不同时代的科学技术发展水平,空中交通管理方式也经历了从目视飞行管制、程序管制到雷达管制等不同的发展阶段。历史总是呈现出一种螺旋上升的发展趋势,随着卫星导航技术、通信技术和计算机技术的不断进步,空中交通也呈现出转向基于轨迹运行(Trajectory Based Operation, TBO)的发展趋势。基于轨迹运行,又称基于程序运行(Procedure Based Operation, PBO),是依靠先进的卫星导航、通信及计算机处理技术,使航空器按照预先设定的4D轨迹精确航行,是实现空中交通高密度运行的重要技术基础。由此可见,尽管雷达管制曾赋予管制员更多的灵活性来实施主动的空中交通管理,但飞行程序作为空中交通运行的基本依据仍将一直延续下去。

飞行程序是以保障终端区内的交通安全与提高运行效率为目标,对起飞离场和进场着陆航径网络所进行的科学规划和合理设计。同时,飞行程序又是重要的空域资源,是空域规划、空中交通运行乃至机场建设的基本依据。飞行程序运行评估则是对飞行程序设计方案和运行效果进行全面审核、评价与认证的工作过程,是保证飞行程序科学性、可行性的必要环节。

飞行程序评估不仅需要检验设计方案是否符合现有飞行程序设计标准,更需要全面审视飞行程序设计方案的运行性能。一直以来,人们对空中交通系统的优化方法进行了重点研究,但对问题的优化目标和评价函数缺乏系统、深入的认识,缺乏一套完整、有效的指标来评价空中交通系统是否达到最优,以及接近优化的程度如何。本书所建立的飞行程序运行评估指标与模型填补了这一空白,是对空中交通系统优化问题研究的重要补充。

飞行程序运行评估问题涉及飞行程序设计、空中交通管制、概率论与数理统计、飞行动力学与飞行性能、计算机优化与仿真、交通安全、噪声影响和尾气排放等多个不同的学科内容,需要不同学科的交叉与融合,是一个站在理论前沿、极具有挑战性的研究方向。

本书共由7章组成。具体包括:第1章绪论;第2章飞行程序运行的建模和仿真;第3章飞行程序运行的安全风险;第4章飞行程序运行的经济性;第5章飞行程序运行的管制适用性;第6章飞行程序运行的环境影响;第7章总结与展望。

第1章较全面地回顾了飞行程序设计与飞行程序运行评价问题的历史发展,总结了有关方面的最新研究成果,创新性地提出了由安全风险、经济效率、管制适用性和环境影响四个方面组成的飞行程序运行评价理论体系。

第2章提出了飞行程序运行仿真的体系架构,详细阐述了飞行程序运行仿真中的垂直剖面性能计算的飞行力学模型和水平剖面导航制导的运动学模型,介绍了飞行程序运行仿真

的基本原理。

第3章从多侧面、多阶段和多层次对飞行程序运行安全风险展开系统的研究。安全风险主要包括飞行过程中的近地风险和空中交通冲突风险两个侧面。其中,近地风险又包括两个阶段,第一阶段针对离场飞行程序以及进场飞行程序的起始/中间进近阶段,建立了航空器运行过程中穿透超障高度的累积概率模型;第二阶段针对 ILS 进近过程,分析航空器与多个不同位置关系的建筑物间的总体碰撞概率。冲突风险从宏观和微观两个层次对多航空器运行中争抢时空资源而发生交通冲突的现象展开研究。从预测飞行程序运行冲突的总体状态角度出发,推导出由冲突频次表示的宏观冲突风险模型。从冲突发展演化过程的角度出发,提出了面向微观冲突分析的冲突严重度、冲突强度和累积冲突风险模型。

第4章指明飞行程序运行经济效率分析在于发现提升飞行程序经济性的潜在空间和优化方向。结合航空器运动模型、飞行成本指数和燃油消耗模型,提出飞行程序运行成本的概念及其计算模型。提出了具体空域条件下的受限运行航迹和基准运行航迹的模型,分别计算基准运行成本和受限运行成本,进一步将两者的比值作为飞行程序运行的经济效率评估指标。

第5章论述了飞行程序运行的管制适用性问题。在对航空器历史轨迹数据进行特征分析的基础上,利用层次聚类法对航空器轨迹数据进行聚类分析,研究了平均飞行轨迹的构建方法;提出了飞行程序运行管制适用性的评价指标和测度方法,包括纵向偏离度、侧向偏离度以及非常规航迹比例等。

第6章研究了飞行程序运行的噪声影响和气体排放。针对噪声影响评价,介绍了几种常用的噪声评价量模型及其限值标准。针对我国机场噪声评价指标体系的不足,提出了适用于飞行程序运行噪声影响分析的评价量及其限值。基于模糊理论建立了噪声影响、飞行成本和导航约束的满意度评价函数,提出了应用改进模拟退火算法的离场飞行程序减噪优化方法。针对国际民航组织提出的排放指数模型的不足,改进提出一种能较准确计算 HC、CO_x 和 NO_x 排放量的修正模型,提出了一种气体排放效率分析模型。

综上所述,本书研究了飞行程序运行仿真的原理和模型,对飞行程序运行评估的理论方法进行了比较全面、系统与深入的研究,所建立的评价指标及其测度模型具有较强的针对性和可操作性,并结合具体模型进行了大量的实例分析与验证,不仅完善了飞行程序运行评估的理论与方法,也弥补了我国在该领域的仿真验证研究方面基础相对薄弱的不足。

值得指出的是,虽然本书是以飞行程序为研究对象提出的理论方法和应用技术,但所涉及的安全风险、经济性、管制适用性和环境影响问题乃是空中交通运输系统性能分析中普遍关注的重要内容,在进行空中交通系统运行分析时,可根据需要加以灵活应用。

本书是在作者的博士学位论文的基础上完成的。本书的出版得到了国家 863 计划课题“协同流量管理核心技术”(2006AA12A105)、国家科技支撑计划重点项目“航路(航线)和终端区动态设计与评估平台”(2011BAH24B08)、国家自然科学基金项目“空管运行智

能服务的基础理论与关键技术研究”(61039001)以及中央高校基本科研业务费专项基金资助项目“飞行程序运行评价理论方法与仿真分析平台研究”(3122011A002)的支持,在此表示感谢!

徐肖豪教授是作者的博士导师,长期关心和支持作者的工作,对本书的撰写提出了许多宝贵的意见。魏志强副教授在飞行性能计算、王飞博士在水平宏观冲突的概率分析和CRM模型等方面开展了卓有成效的研究工作,戴福青教授在百忙之中审阅了本书。另外有多名同事和研究人员为本书的材料准备和校稿给予了帮助,在此深表感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和错误,欢迎读者不吝指正。

王 超

2013年9月于中国民航大学



目 录

注释表清单	1
字母和符号注释	1
缩略语表	3
第 1 章 绪 论	5
1.1 背景和意义	5
1.1.1 背景	5
1.1.2 意义	7
1.2 从飞行程序设计到飞行程序运行评估	8
1.2.1 飞行程序的发展和构成	8
1.2.2 飞行程序设计	14
1.2.3 飞行程序运行评估	16
1.3 国内外研究现状	19
1.3.1 飞行程序设计研究现状	19
1.3.2 飞行程序运行评估研究现状	20
1.3.3 存在的不足	25
1.4 主要内容和章节安排	26
1.4.1 研究内容	26
1.4.2 章节安排	28
第 2 章 飞行程序运行的建模与仿真	30
2.1 飞行程序运行仿真与模型体系架构	30
2.1.1 空中交通仿真与飞行程序运行仿真	30
2.1.2 飞行程序运行模型的体系架构	32
2.2 垂直剖面的飞行性能模型	35
2.2.1 基础飞行性能计算	35
2.2.2 起飞离场阶段的性能计算	41
2.2.3 平飞巡航阶段的性能计算	44
2.2.4 下降阶段的性能计算	45

2.3 水平剖面的导航制导模型	47
2.3.1 地图投影	47
2.3.2 航向的计算	49
2.3.3 转弯轨迹的计算	52
2.3.4 下降顶点的计算	55
2.4 飞行程序运行仿真的基本原理	58
2.4.1 事件	59
2.4.2 时钟推进方式	59
2.4.3 未来事件表	60
2.4.4 随机数发生器	61
2.5 实例分析	62
2.5.1 试验条件	62
2.5.2 仿真结果分析	64
2.6 本章小结	67
第3章 飞行程序运行的安全风险	69
3.1 飞行程序运行的安全风险概述	69
3.1.1 近地风险	69
3.1.2 冲突风险	70
3.2 飞行程序运行的近地风险评估	71
3.2.1 航空器位置误差分析	71
3.2.2 航空器与障碍物的接近风险	73
3.2.3 实例分析	75
3.3 航空器与障碍物的碰撞风险	76
3.3.1 CRM 模型	76
3.3.2 航空器与单障碍物的碰撞风险	78
3.3.3 航空器与多障碍物的碰撞风险	84
3.3.4 实例分析	86
3.4 水平宏观冲突的概率分析	91
3.4.1 交叉交通流冲突风险	92
3.4.2 汇聚交通流冲突风险	97
3.4.3 实例分析	100
3.5 考虑垂直冲突的总体冲突风险评估 ^[104]	104
3.5.1 总体冲突频次的概念	104
3.5.2 实例分析	113

3.6 飞行程序运行的微观冲突风险评估	114
3.6.1 椭球保护区模型	115
3.6.2 微观冲突风险的基础指标分析	116
3.6.3 交通流微观冲突风险评估	118
3.6.4 实例分析	120
3.7 本章小结	125
第4章 飞行程序运行的经济性	126
4.1 飞行程序运行经济性概念	126
4.1.1 飞行程序运行成本	126
4.1.2 成本指数	127
4.2 燃油消耗模型	129
4.2.1 爬升阶段燃油流率	129
4.2.2 下降阶段的燃油流率	130
4.2.3 平飞阶段的燃油流率	130
4.2.4 燃油消耗总量	130
4.3 进离场航线和进近程序模式	131
4.3.1 进离场航线的选择	131
4.3.2 常见的进近程序	135
4.4 基于成本指数的飞行程序运行经济效率评估	140
4.4.1 进场与进近飞行程序经济效率分析	140
4.4.2 离场程序经济效率分析	145
4.5 算例分析	147
4.5.1 CDA 基准运行航迹运行成本	147
4.5.2 飞行程序经济效率评估	148
4.6 本章小结	149
第5章 飞行程序运行的管制适用性	151
5.1 飞行程序运行管制适用性概念	151
5.2 基于层次聚类的终端区航空器飞行轨迹分析	152
5.2.1 轨迹数据的特征分析	153
5.2.2 轨迹相似度的度量方法	155
5.2.3 基于分层聚类的轨迹分析	158
5.2.4 平均轨迹构造	161
5.3 飞行程序运行的管制适用性分析	164
5.3.1 轨迹纵向偏离度	164

注释表清单

字母和符号注释

$D(t)$	t 时刻飞机在地面投影位置与地面障碍物之间距离
$\varepsilon(t)$	与飞行有关的定位误差
$P(t)$	t 时刻飞机和障碍物发生碰撞事故的概率
P_G	飞机穿透单个障碍物 MOC 的概率
P_c	累积接近风险
$P(O_k)$	飞机与障碍物 k 的碰撞风险
P_{lat}	横向碰撞风险
P_{ver}	垂直碰撞风险
N_c	在时间段 t 内产生的冲突次数
λ_i	交通流 i 的流率 (架/时)
$E(N_c)$	冲突次数的数学期望
$Var(N_c)$	冲突频率分布的方差
$\varepsilon_{i,j}(t)$	航空器对 i 和 j 之间的椭圆距离
CS_i	飞机 i 的冲突强度
$CR_{l/d}^i$	航空器 i 在其飞行的一段时间内的累积风险
μ_c	ΔT 时间段内飞程序冲突率
CI_{avg}	飞程序运行平均冲突强度
CS_{ij}	交通流中航空器 i 和航空器 j 之间的冲突严重程度
CRI	平均累积风险强度
C_o	飞程序运行成本
C_f	燃油消耗成本
C_t	飞行时间成本
η	单位推力燃油消耗量

f_{nom}	单个发动机的燃油流率
F_{p_i}	飞行程序 p_i 的总燃油消耗
T_{LOT}	受限运行航迹
D_{LOT}	受限运行航迹的长度
V_C	表速
V_T	真空速
E_i	飞行程序运行的经济效率
t_i	某一条进离场飞行航迹
n_T	表示航迹总条数
st	进场飞行程序的标准航迹线
$p_{(i,j)}$	某一个航迹点
F_i	某一个定位点
φ	航迹角
$R_{(i,k)}$	两条航迹 t_i 和 t_k 的相似度系数
C^T	由原始航迹数据集 T 经过层次聚类之后所得到的航迹聚类集
mt	平均航迹的航迹点数据集
λ	航迹纵向偏离度
δ	航迹侧向偏离度
μ	非常规航迹比例
p_{rms}	声压
L_p	表示平方根声压级
L_{SE}	表示声暴露级
L_{PN}	感觉噪声级
L_{EPN}	有效感觉噪声级
L_{WECPNL}	计权等效连续感觉噪声级
S	飞行状态矢量
C	飞行控制矢量
$J_c(z_i)$	离场航迹 z_i 运行成本函数
$\mu_{\bar{C}_i}(z)$	隶属函数
$E_{\text{e,avg}}(m)$	飞行程序运行平均排放量, 飞行程序运行的第 m 种排放物的平均排放率

缩略语表

ILS	Instrument Landing System	仪表着陆系统
MLS	Microwave Landing System	微波着陆系统
PAR	Precision Approach Radar	精密进近雷达
VOR	VHF Omnidirectional Radio Range	甚高频全方向无线电信标台
NDB	Non-Directional Beacon	无方向性信标
PBN	Performance Based Navigation	基于性能的导航
RNP	Required Navigation Performance	所需导航性能
ATM	Air Traffic Management	空中交通管理
SID	Standard Instrument Departure	标准仪表离场
IAF	Initial Approach Fix	起始进近定位点
IF	Intermediate Fix	中间进近定位点
FAP	Final Approach Point	最后进近点
FAF	Final Approach Fix	最后进近定位点
MAPt	Missed Approach Point	复飞点
MOC	Minimum Obstacle Clearance	最小超障余度
RNAV	Area Navigation	区域导航
FAA	Federal Aviation Administration	美国联邦航空局
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
FPDAM	Flight Procedure Design and Management	飞行程序设计与管理
CAD	Computer Aided Design	计算机辅助设计
BADA	Base of Aircraft Data	基于基本飞行数据
LTO	Landing and Take Off	起飞着陆
SAE	Society of Automotive Engineers	自动机工程师协会
ECAC	European Civil Aviation Conference	欧洲民用航空会议
CDA	Continuous Descent Approach	连续下降
CCD	Continuous Climb Departure	连续爬升离场
OCA	Obstacle Clearance Altitude	穿透超障高度
OCH	Obstacle Clearance Height	穿透超障高度
CRM	Collision Risk Model	碰撞风险模型
LOT	Limited Operating Trajectory	受限运行航迹
LOC	Limited Operating Cost	受限运行成本
SPL	Sound Pressure Level	声压级

SEL	Sound Exposure Level	声暴露级
NNI	Noise and Number Index	事件数指数
NEF	Noise Exposure Forecast	噪声暴露预报
DNL	Day-night Average Sound Level	昼夜等效声级
CNEL	Community Noise Equivalent Level	社区噪声等效级
AI	Annoyance Index	烦恼指数
CI	Cost Index	成本指数
ANEF	Australian Noise Exposure Forecast	澳大利亚的噪声暴露预报
CNR	Composite Noise Rating	复合噪声评价
RA	Restricted Airspace	限制使用空域
SA	Simulated Annealing	模拟退火

第 1 章 绪 论

1.1 背景和意义

1.1.1 背景

飞行程序是为航空器运行划设的“空中高速公路”，是一种重要的空域资源，是空管运行和机场建设的基本条件之一，是组织实施飞行、提供空中交通服务、建设导航设施的基本依据^[1]。同时，飞行程序又是空域设计和管理的基础，是保障航空器飞行安全 and 提高运行效率的重要支撑。

根据所采用的地面和机载导航设备和定位方式，飞行程序可以划分为目视飞行程序和仪表飞行程序两种。在 20 世纪初航空器出现早期是没有仪表飞行程序的，航空器的飞行主要是依靠磁罗盘引导的目视飞行。随着无线电导航设备的出现，空中交通流量的不断增加和飞行难度的提高，出现了引导航空器飞行的仪表飞行程序，它成为了现代航空器飞行和空中交通管理的基础并使用至今。建立飞行程序的目的，是保证航空器按规定程序安全而有秩序地飞行，避免在起飞离场和进近着陆的过程中，航空器与地面障碍物、航空器与航空器之间相撞^[2]。确保飞行安全，提高经济效益，便于管制指挥、航班调配和飞行操纵，是建立每一个飞行程序所必须达到的要求。目前，运输航空器主要按照仪表飞行程序飞行，因此本书只针对仪表飞行程序的评估进行研究，若无特别说明，本书后续内容中的飞行程序就是指仪表飞行程序。

目前，我国 183 个民用运输机场共有仪表飞行程序近 1400 余个，包括仪表进场程序 300 余个、仪表离场程序 300 余个、仪表着陆系统（Instrument Landing System, ILS）进近程序 230 余个、甚高频全方向无线电信标台（VHF Omnidirectional Radio Range, VOR）仪表进近程序 240 余个、无方向性信标（Non-Directional Beacon, NDB）仪表进近程序 260 余个。另外，多数机场近年来又设计了基于性能导航（Performance Based Navigation, PBN）的飞行程序，西南地区的拉萨和林芝等机场还设计了航空公司特定机型专用的基于所需导航性能（Required Navigation Performance, RNP）的仪表进近程序。目前，我国正处在机场建设高速发展时期，预计到 2020 年，我国民用机场将达到 244 个，仪表飞行程

序的数量也会随之大幅增加。飞行程序在空中交通管理 (Air Traffic Management, ATM) 中发挥着举足轻重的作用^[3], 具体表现在以下几个方面。

(1) 飞行程序与机场建设

安全、合理的仪表飞行程序是机场及航空器正常运行的必要条件。因此, 在机场建设的选址阶段, 仪表飞行程序设计就是需要考虑的重要影响因素之一; 机场场址是否满足仪表飞行程序运行的要求, 将直接影响机场建设项目的可行性以及建设完成后的经济效益。在地形和空域复杂的地区, 飞行程序设计方案还会影响机场的净空处理乃至机场的投资规模, 例如: 在我国西南高原多山地区的林芝机场建设中, 设计的 PBN 飞行程序在机场建设过程中发挥了关键作用。此外, 在机场建设的论证阶段, 仪表飞行程序方案还可能直接影响陆基导航设施设备的布局与建设。

(2) 飞行程序与空域规划

仪表飞行程序是空域规划的核心内容, 保障仪表飞行程序顺畅运行也是空域规划的目的, 因此, 仪表飞行程序和空域规划二者相辅相成。在机场建设初期, 飞行程序设计和空域规划的工作就需要同步开展。首先, 需要依据基本空域和地形条件来设计仪表飞行程序。仪表飞行程序设计方案所规划的飞行路线加上仪表程序的保护区, 通常就是仪表飞行所需的空域规划范围, 因此, 仪表飞行程序设计方案也是空域规划的依据与前提。

然后, 空域规划人员依据飞行程序设计方案与有关单位进行沟通协商, 尽量满足飞行程序设计方案的要求。在空域规划不能满足飞行程序要求的情况下, 则根据空域的限制和地形特征, 对飞行程序设计方案进行适当的调整或修正。

无论是航班流量较大的机场还是流量较小的机场, 飞行程序设计方案均必须与空域规划工作密切配合。另外, 空域规划还包括机场终端区的外围航路航线的划设, 即还需要综合考虑周边空域的需求, 通过合理规划机场终端空域的进出点, 有效分配进出机场的航班流量, 来保障进离场飞行程序的顺畅运行。

(3) 飞行程序与管制指挥

仪表飞行程序是飞行人员实施飞行和空中交通管理人员提供空中交通服务的基本依据, 是保障飞行安全的关键和战略性基础工作, 直接关系到航空器的运行安全。目前, 虽然许多机场终端区已经实施了雷达管制, 但仪表进离场程序依然是管制指挥的基础。充分 and 正确运用仪表飞行程序可以有效减少管制员实施雷达引导的工作负荷, 有利于提高空中交通运行的有序性, 从而从根本上保障空中交通安全。

随着空中交通状况的不断发展变化, 原有的飞行程序还会出现不适应空中交通流量的迅速增长以及交通复杂度增加的情况, 而通过对管制指挥的实际运行状况分析可以发现仪表飞行程序的不足, 并反馈给飞行程序设计人员, 对飞行程序及时进行优化调整, 以便更好地为管制指挥服务。

(4) 飞行程序与环境保护

航空运输过程中所产生的环境噪声以及所排放的各类有害气体对区域及全球环境造成了较大的负面影响,通过设计合理的飞行程序,可以有效地减少航空器运行过程中的噪声扰民问题,控制有害气体的排放量,提高航空器运行的质量。如:航空运输业产生的大量温室气体 CO_2 , 占世界范围内人造 CO_2 排放量的 2%^[4], 预计这一比例到 2050 年将提高至 3%。国际航空运输协会于 2009 年 12 月在哥本哈根气候会议上代表民航业提出了减排目标:在 2050 年 CO_2 排放量将比 2005 年减少 50%。欧盟已将航空公司的二氧化碳排放纳入其碳排放交易体系中,并要求超标排放的航空公司通过市场手段购买排放权或交纳罚款^[5]。

机场周边的噪声污染主要来自于离场航班,其原因在于航空器起飞离场时是使用最大油门的全推力起飞,而在进场时航空器则是不断收小油门,噪声影响相对较小,因此,可以通过改变离场飞行程序的路线以及要求航空器驾驶员使用降噪程序来降低噪声对机场周边环境的影响。尤其是随着更高精度的导航定位技术的出现(如 PBN),可以利用航路点坐标来灵活、合理地规划飞行路线,使得离场航线绕飞噪声敏感区,从而有效降低机场周边地区的噪声污染程度。

正因为飞行程序有着如此重要的作用,所以有必要对新建立的飞行程序进行实施前的评估。同时,随着空中交通运行条件的改变,正在使用中的飞行程序也需要重新进行评估。因此,飞行程序运行评估是实施飞行程序过程中必不可少的步骤,关系到乘客的人身安全、航空公司的经济效益、居民的生活环境等方方面面,已经受到越来越多的关注和重视。尤其是近年来我国空域系统中出现了越来越多的大流量和复杂运行环境,人们对飞行程序的各个方面提出了更高的要求,使得飞行程序运行评估成为目前空中交通管理领域的一个研究热点。

飞行程序设计及评估是一个科学问题,应有一套系统的理论方法来保障这一过程的科学性。但是,目前对飞行程序的研究大多集中在飞行程序设计中的保护区的划设,忽略了飞行程序运行的其他特性,尚未形成系统的飞行程序设计与运行阶段的评估理论、评价体系以及评价指标的数学模型,因而迫切需要对飞行程序运行评估的理论方法进行深入研究。此外,理论方法需要通过仿真实验来检验其可行性和正确性,但是目前主要还是依靠具有资深经验的人员对飞行程序进行设计和评估,尚未出现针对飞行程序运行仿真评估的软件系统,因此,飞行程序运行仿真模型也是亟待研究的重要内容。

1.1.2 意义

为适应我国空中交通持续发展需要,实现飞行的安全、经济、环保等要求,本书深入展开了飞行程序运行评估的理论方法及仿真应用研究,具有非常重要的理论意义和应用价值。

理论上,建立飞行程序运行评估的理论方法体系,创新性地提出飞行程序运行评估的指标体系和模型以及有关指标的测度方法,将加速我国民航航空管领域热点问题的深入研究,弥补我国在该领域研究基础薄弱的不足,推动形成飞行程序运行评估的理论体系,直

接指导空域设计和优化工作,为今后“新一代国家空中交通管理系统”中基于航迹运行的具体实践奠定理论基础。

长期以来,我国民航业往往直接使用国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)制定的国际技术标准,缺乏对相关技术的基础研究。本书中对飞行程序运行评估的基础理论和技术方法的深入研究,有助于深刻理解飞行程序设计技术标准制定的依据和原理,为我国在相关领域制定技术标准奠定基础。

应用上,将理论方法与仿真平台相结合,对飞行程序运行进行仿真与分析,能有效地解决飞行程序设计和审核过程中缺乏应用数据支撑环境的不足,有利于进行机场科学选址、航迹优化,进而推动减少航班延误,降低空中交通对环境的影响,保证空中交通运行的安全和顺畅,提高空域的利用效率。

1.2 从飞行程序设计到飞行程序运行评估

飞行程序运行评估的对象包括两类。第一类是新设计的飞行程序,在其实施之前需要进行评估;第二类是虽然已经实施运行,但其运行条件发生了变化,也需要重新进行评估,并根据评估结果对飞行程序设计方案进行调整,可见飞行程序运行评估与飞行程序设计密切相关。

本节以飞行程序设计的概念、需要考虑的影响因素和基本要求为出发点,归纳总结了飞行程序设计需要遵循的基本原则,论述了飞行程序运行评估的概念和内涵,揭示了飞行程序运行评估需要遵循的冲突风险、经济性、管制适用性和环境影响四项基本原则。

1.2.1 飞行程序的发展和构成

本节从飞行程序的发展和结构组成两个方面阐述飞行程序和飞行程序运行的基本概念。

1.2.1.1 飞行程序的发展

作为保障现代航空运输飞行安全和实施空中交通管理的基础,飞行程序与现代导航、监视和计算机技术的发展密不可分。其发展主要经历了以下几个阶段。

(1) 在 20 世纪 30 年代以前,航空器仅能在天气良好的情况下按照目视飞行规则飞行。机场交通管制人员通过信号灯来控制飞机的起飞和降落,从而保证空中交通的安全和有序运行,这一阶段称为目视管制阶段。在这一历史阶段主要依赖目视飞行程序来保障空中交通运行。

(2) 在 1934 至 1945 年,航空器性能的提高以及无线电通信导航设备的使用,促进了航空运输的快速发展。航空发达国家设立了空中交通管理机构,制定了仪表飞行规则和仪表飞行程序。飞行员按照管制员指定的标准仪表进离场程序飞行,管制员通过飞行计划和