

不确定因素下航空货物与运力协同调度研究 综述

郑煜, 张玉环*, 谢茹羽

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年5月20日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月28日

摘要

随着我国产业升级步伐的加快, 航空货物运输已成为适应当代国际贸易的重要物流方式。二十大倡导的“国内国际双循环”经济运行模式也对航空货物运输提出了新的挑战。航空运输的时刻资源有限且易受机场环境、飞机状态等因素的干扰, 因此不确定因素下的航空运力与货物协同调度成为一个亟待解决的重要课题。本研究主要采用文献研究的方法, 通过检索、整理与分析国内外有关“不确定因素下的航空货物与运力协同调度”的研究文献, 梳理了我国航空货运的发展历史与现状; 航空货运运营组织的特点及其与航空客运的区别与联系; 我国航空货运规划的传统决策方法; 运力、航班计划、运输需求三类不确定因素对传统航空货运决策方法的影响; 航空货运一体化决策概念、不确定因素下航空货运一体化决策问题的研究现状、不确定问题的鲁棒优化方法。

关键词

航空货运, 不确定因素, 协同调度, 鲁棒优化

Research Review of Collaborative Scheduling of Air Cargo and Transport Capacity under Uncertain Factors

Yu Zheng, Yuhuan Zhang*, Ruyi Xie

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 20th, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 28th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 郑煜, 张玉环, 谢茹羽. 不确定因素下航空货物与运力协同调度研究综述[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(3): 957-968. DOI: 10.12677/orf.2024.143331

Abstract

With the speeding up of industrial upgrading in China, air cargo transportation has become an important logistics mode to adapt to contemporary international trade. The “domestic and international dual cycle” economic operation policy advocated by the 20th National Congress of the Communist Party of China has also posed new challenges to air cargo transportation. The time resources of air transportation are limited and susceptible to interference from airport environment, aircraft status, and other factors. Therefore, collaborative scheduling of air transportation capacity and cargo under uncertain factors has become an important issue that needs to be addressed urgently. This study mainly adopts the method of literature research. By searching, organizing, and analyzing research literature on “collaborative scheduling of air cargo and transportation capacity under uncertain factors” at home and abroad, the development history and current situation of air cargo in China are sorted out; The characteristics of air cargo operation organizations and their differences and connections with air passenger transportation; Traditional decision-making methods for air cargo planning in China; The impact of three types of uncertain factors, namely transportation capacity, flight plan, and transportation demand, on traditional air freight decision-making methods; The concept of integrated decision-making for air cargo, the research status of integrated decision-making for air cargo under uncertain factors, and robust optimization methods for uncertain problems.

Keywords

Air Cargo Transportation, Uncertain Factor, Collaborative Scheduling, Robust Optimization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 我国航空货运的发展历史与现状

航空货运是现代物流中的重要组成部分，其快速、运距远、运输成本较高、运量较小的运输特点，满足了对时效性要求高、成本敏感度低，需要长距离运输的小批量货物的运输需求，是商品贸易中贵重物品、鲜活货物和精密仪器运输所不可缺的方式。国际航空运输协会的年度回顾显示，2022年航空公司运输了超过6000万吨货物，航空公司承担了全球贸易价值的三分之一，航空货运贡献了航空公司总收入的三分之一以上。波音公司预测，未来20年，全球航空货运量将以年均4.1%的速度增长，2041年，全球货运周转量达到6000亿吨公里。为了促进航空货运行业发展，中共中央、地方政府、民航等多方都对我国航空货运行业提供了强大的政策支持。

2022年2月，中国民航首次编制航空物流发展专项规划，印发了《“十四五”航空物流发展专项规划》。《规划》总结了“十三五”时期航空物流发展成绩，指出在新冠肺炎疫情影响下，2020年我国货邮运输量、货邮周转量规模仍然稳居全球第二，且年均增速分别高于全球年均增速2.2、6.5个百分点。

《规划》还明确了，改变以往重点支持客运的政策导向，实施“客货并重”发展策略，到2025年初步建成安全、智慧、高效、绿色的航空货运体系。2022年5月，时值习近平总书记提出“空中丝绸之路”战略构想五周年之际，民航局、国家发展改革委联合印发了《“十四五”时期推进“空中丝绸之路”建设

高质量发展实施方案》，强调航空货运基础设施的建设与发展将对畅通国内大循环、促进国内国际双循环，以及扩大内需、推动高质量发展的发挥重要作用。此外，为了发展航空经济、打造航空都市，多个地区都在积极发力。湖北省规划建设武汉城市圈航空港经济综合实验区，其中核心区范围内的鄂州机场还是亚洲第一个、世界第四个专业货运枢纽机场。郑州航空港实验区以郑州-卢森堡“空中丝绸之路”建设为引领，一直致力于打造航空大都市。四川成都双流区更是鲜明地提出了打造“中国航空经济之都”的目标。

航空货物可以由专门的货运飞机来运载，也可以由客机机腹在装完行李后的剩余容量来运载，我国的航空货运长期存在“重客轻货”的现象。在电子商务和快递业务迅速发展的当下，航空运输对散货的需求日益增长，某些特种货物，如鲜活易腐货物、危险品、体积超大或重量超重货物等不适合由客机机腹舱承运等原因，利用专用货机进行航空货物运输逐渐流行起来。随着越来越多的航空速运公司进入市场，其中包括：顺丰、申通、圆通、京东物流等。这些速运公司通过与民航管理局、机场等单位合作组建有自己的机队，运营着自己的货运航班时刻。以顺丰速运公司为例，其拥有中国最大、亚洲第五的全货运机队，顺丰速运公司拥有中国最大、亚洲第五的全货运机队，2021年顺丰国内货量占全国航空货邮运输量35.5%，已成为中国航空货运最大货主。这些航空速运公司在运营自营全货机的同时，也是中国主要航空公司的客户，通过自营、货代或三方合作等模式，向国内外航空公司获取的稳定的客机腹舱资源的航线。

1.2. 航空货运运营组织的特点及其与航空客运的区别与联系

货运需求的不断攀升、国家政策的大力支持、以及全货机运力的多方改善使得航空货物运输业务发展迅速，优势日益凸显。航空货运与航空客运的过程虽然在很多方面十分相似，也仍然有一些不可忽略的区别。首先，航空货物路径更具灵活性。由于乘客比货物更具有时间敏感性，这意味着乘客更喜欢直达航班，而货物只要能在合同规定的期限前交付即可，不会对特定的航线有所偏好。在规划过程中，货物路径对总运输时间和通过连接的次数没有要求，可以多次转运。但是，由于转运设备的特殊性，货物只能在枢纽中转，而乘客可以在任何机场中转，因此货物转运比旅客中转更具挑战性。其次，航空货物运输的成本更高。货机调度要考虑更多的成本，如出发地机场的库存成本、货物转运成本，甚至在货运航空公司运力不足的情况下，还要考虑租赁服务的成本。第三，航空货物运输更容易受到不确定因素的影响。航班延误、转运地面作业延误、设备故障等都会影响货物的运输，并且由于航空货物的价值较高，相对于客运航空公司在做出航班延误决策时主要考虑的是飞机或机组连接而非乘客连接，货运航空公司更倾向于等待货物。航空货运与航空客运之间的区别使得航空客运组织运营方案不太适用于航空货物运输。面对多批次、小批量、运输要求各异的航空货物运输需求以及大规模、具有不同服务属性的客机腹舱与纯货机航空运输资源，从货物运输需求与运力资源两个维度对航空货物运输进行综合管理，协同优化货物调度与运力调度，实现二者的高度适配，提高整体运输效率与运输收益已成为当务之急。因此，考虑客机腹舱与纯货机两种运输模式的不确定因素下的航空货物与运力协同调度问题是当前需要解决的重要问题。

1.3. 我国航空货运规划的传统决策方法

航空速运公司的货物运输方案的制定是多部门参与、序贯决策的结果。市场和销售部门每天预测不同源地和目的地对的需求。飞机维修部门和机组人员部门在运营前三到七天制定飞机尾部分配(或飞机路径规划)和机组人员调度方案。同时，由于货物托运方需要在实际运行前2~3天确认货运订单，货物部门将动态规划货物行程，一直持续到实际运营前一天。由于飞机、机组人员和货物的调度方案在实际运营

前两天公布,因此在这之后的 48 小时内发生飞机机型再调整的阶段通常被称为恢复期。如图 1 所示,上一部门做的决策结果作为决策依据传输到下一部门,帮助其做下一个环节的决策,整个过程是一个按照需求预测 - 机型分配 - 货物调度 - 恢复期机型再分配的先后顺序执行的自上到下的决策过程。

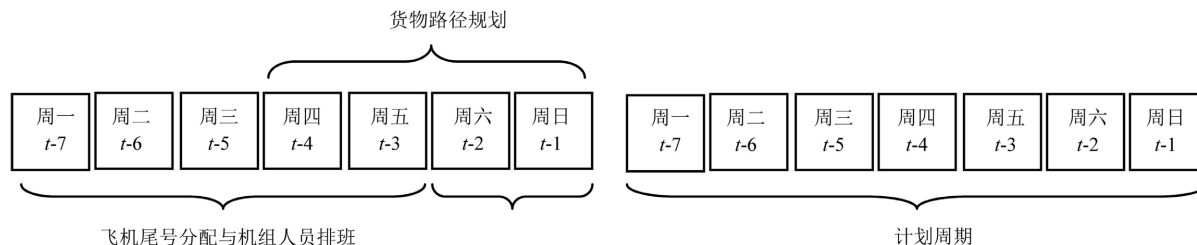


Figure 1. Sequential decision making in traditional air cargo planning
图 1. 传统航空货运规划的序贯决策

然而,在实际业务中,由于运力、航班计划、运输需求三类不确定因素的存在,给这种序贯决策方式带来了诸多挑战。

1.4. 运力、航班计划、运输需求三类不确定因素对传统航空货运决策方法的影响

运力的不确定性包括突发事件下公共安全保障、货机机械故障、工作人员因疾病或上游时间表中断而缺勤等因素导致的航班取消与飞机无法使用。现阶段中国航空货物运输的运载方式主要还是腹舱载货,我国腹舱货运运输量约占总运输量的 70%,根据国家民航总局统计,2020 年 2 月,疫情暴发造成全国范围内客运航班大量取消,客运航班执行比例仅为 30%左右,这导致客机腹舱运力被大幅削减,落货现象频繁发生,严重影响了航空货运物流的盈利。

航班计划的不确定性主要来自于航空流量管制、恶劣的自然环境等因素造成的无法按照既定的飞行计划执行任务的航班。2020~2022 年我国境内机场整体出港准点率分别为 79.52%, 88.03%, 90.43%, 出港平均延误时长为 20.9, 22.79, 12.31 分钟。航班延误会造成时间、人力和物力等方面的大量损失。美国联邦航空管理局统计数据 displays 2016~2019 年的直接延误成本超过 200 亿美元。

运输需求的不确定性包括由于政治、经济波动、自然环境影响、市场形势变化等造成的货物需求的波动。例如新冠疫情形势复杂多变、俄乌冲突的地缘政治,能源、粮食供应格局调整下的通货膨胀压力等,都会引发我国国际/国内航空货运需求较大的不确定性。

三种不确定性因素对于航空货物运输规划的作用时间和影响机制各不相同。运输需求不确定性贯穿于 1) 飞机路径规划任务、2) 货物运输路径规划任务、3) 货物运输执行三个任务之间。从任务(1)到任务(2)时间段内发生的需求波动使得任务(1)与任务(2)的决策结果不匹配:任务(1)按照原始的货物运输需求预测结果进行机型分配,若实际货物运输需求变动较大,则当任务(2)做货物路径规划时,原始机型分配已经不匹配当前的货物需求。从任务(2)到任务(3)时间段内发生的需求波动使得在做好飞机尾号分配与货物路径规划后,对货物执行调度之前的一、两天里,有需求突增或者需求骤降的情况发生,使得飞机容量不够(货物溢出)或飞机载重率过低(货物空载),需要在恢复期进行机型分配、路径选择的重新规划。

运力的不确定性贯穿于 1) 飞机路径规划任务、2) 货物运输路径规划任务、3) 货物运输执行三个任务之间。从任务(1)到任务(2)时间段内发生的运力衰减使得任务(1)与任务(2)的决策结果不匹配。在忽略运力衰减的情况下,任务(2)默认所有客机腹舱航班与纯货机航班按既定计划运行,飞机飞行路径包含运力已经发生衰减的航班,在做货物路径规划时,货物会被分配到运力大幅衰减或被取消的航班上,使得货运需求与运力供给不匹配。从任务(2)到任务(3)时间段内,即在公布飞机尾号分配与货物路径规划之后,

对货物进行实际调度之前的一、两天(恢复期)里,若有飞机航班突然取消或客机运力骤减的情况发生,则公布的货物行程将失效、货物被落货,需要在恢复期进行机型再分配、货物路径重新规划。

航班计划的不确定性作用于货物运输执行期内,使得在实际运输货物时,运载货物的航班在其出发机场或降落机场由于天气因素、安全管制、流量控制等原因发生延误,这会导致延误沿原先规划的货物路径的继续传播或者货物路径的失效。

不同任务的决策时间的不同步,是不确定因素引发不同任务决策结果不匹配的重要原因。因此,可以通过同步决策时间以消除不确定因素的影响。但是由于机型尾号分配与货物路径规划的结果需要至少提前两天公布,导致机型尾号分配任务、货物路径规划任务与货物运输任务不可能完全同步,只能通过同步机型尾号分配任务与货物路径规划任务,最大程度消除不确定因素影响。因此,在对货物与运力协同调度的基础上,进一步消除货物与运力协同调度与货物运输任务之间存在的 uncertain 因素的影响,是实现 uncertain 因素下航空货物与运力协同调度的重点。

一般有两种思路实现这一目的。一是在对货物与运力协同调度的基础上,于恢复期进行机型再分配、路径重新规划,这属于航班应急调度问题,该问题具有规模大、不确定场景多、相关约束复杂、应急恢复时间要求较快等特点,问题的构建与求解均比较复杂,同时由于是事后分析与恢复,会花费较大的成本。另一种思路是,定义 uncertain 集,将 uncertain 性预先纳入 uncertain 集的数学表达式中,再将 uncertain 集融入货物与运力协同调度模型中,这样货物与运力协同调度阶段的优化模型求得的结果仍然是存在 uncertain 因素干扰下的最优解。

综上所述,研究 uncertain 环境下航空货物运输一体化决策,可以为航空物流从业者提供 uncertain 场景下的运营组织的管理理论支撑与方法指导,保障航空货物的可靠运输、提高航空货运运输效率、增加航空货运总收益,助力航空货物运输系统的可持续发展。

2. 航空货运一体化决策概念

尽管众多专家学者对航空客运的一体化决策问题进行了广泛的研究[1]-[7],但对航空货运问题的研究数量非常有限,航空货运一体化决策问题的研究则更为少见。广义的航空货物运输包括从出发地到目的地的一系列服务,Feng 等人[8]在 2015 年对航空货运做出了系统的概述,对航空货运业务的各个环节进行了详细的描述,航空货物运输通过托运人、货运代理商、道路运输商、航空公司(或承运人)和取货人将货物运输到目的地。发货人需要以低成本和所需的服务水平将商品送到世界任何地方,货运代理商是托运人和航空公司之间的“中间人”,道路运输公司需要提供空运前后的地面运输服务,航空公司负责接收、储存、转移、跟踪、装卸货物,并分配和管理运力,最后由收货人接收货物。本课题的航空货物调度仅涉及整个系列服务中航空公司的部分。Marsten 和 Muller [9]是最早研究航空货运问题的学者,他们在 1980 年提出了一个混合整数模型来解决轴辐式网络的航线设计和机队规划的联合优化问题。随后,航空货运问题逐渐进入研究人员的视野。Lin 和 Chen 在 2003 年[10]构建了一个多商品流问题,该问题利用客运航班的腹舱空间,设计连接内地和台湾地区最低成本的货运飞行网络,并选择合适的过境机场。Li 等人于 2006 年[11]同时考虑了乘客和货物的需求,将货物路径纳入客运机队分配问题,并提出了基于 Benders 分解的算法解决该问题。Yan 等人于 2006 年[12]提出了一个整合货运航空公司航线设计和机队分配战略过程的模型,用于短期内的机场选择、机队路线和时间表设置。在后续的研究中他们将航空公司间的联盟关系加入该模型,做了进一步拓展[13]。Tang 等人于 2008 年[14]设计了客运、货运和组合航班航线设计的整合模型,该问题被表述为一个混合整数规划问题,并通过一系列的启发式方法进行求解。Derigs 等人在 2009 年[15]采用一种同时优化航班选择、飞机轮换和货物路由的方法来解决货运航线规划,他们强调通过改变航班选择来逐步改善规划,继续沿着这个思路,Derigs 和 Friederichs 于 2013 年[16]提

出了行程设计、机队分配以及飞机和货物路线的整合模型，该模型产生的计划仅限于外部预先定义的强制性和可选性航班清单，后者仅在产生利润的情况下被纳入。Azadian 等人于 2012 年[17]基于历史数据和实时信息，为时间敏感的航空货物提出了一个基于马尔科夫决策的动态航空网络路径模型，采用逆向归纳法进行求解。Canrong Zhang 于 2017 年[18]提出了航空货物运输的枢纽位置和飞机分配问题，通过改变每个 O-D (Origin-Destination) 对的访问枢纽数量构建了两个混合整数模型。Carman K. M. Lee 于 2019 年[19]提出了一个同时考虑货物飞行网络设计和机队路线选择的航空货物运输综合模型，设计基于蜂群智能的算法进行求解，并比较了点对点网络和轮辐式网络下不同运输模式的求解结果。Xiao 等人于 2022 年[20]提出了直联联运和短直联联运的概念，构建基于连接的模型和基于串的模式两种飞机路线和货物路径的一体化决策模型，设计两阶段列生成方法进行求解。在 Xiao 的航空货物与纯货机协同调度的研究基础上，考虑纯货机运输与客机腹舱货运两种模式、构建混合航空物流网络，优化客机腹舱与纯货机的货物分配，是未来重要的研究方向。

3. 不确定因素下航空货运一体化决策问题的研究现状

目前，不确定因素下的客运航空公司的航班中断管理已有较为丰富的文献，不确定因素主要包括需求波动、航班延误，而研究航空货运不确定性问题的文献比较少见，航空客运不确定问题的研究成果对于航空货运不确定问题的解决具有一定的启发意义。

在航空客运问题研究中，当由于需求波动、航班延误引发航班中断时，通常采取两类策略消除航班计划和实际需求之间的不匹配，1) 提高航线的灵活性，即提供更方便的调整机会，使终端的航线更易于恢复，例如顺延航班、取消航班、飞机交换等，这属于事后分析方案；2) 稳健的计划方法，即提前对可能发生的航班中断进行事前调整与控制——提高航线的稳定性，减少延误的干扰，例如增加计划过站时间、减少航班串的长度等，这属于事前分析方案。下面针对需求波动、航班延误、运力衰减等不确定性因素下的航空客运/货运问题的研究进行总结与分析。

3.1. 需求波动下的航空客运/货运问题研究

1) 事后分析方案

Berge 和 Hopperstad [21]在 1993 年提出了面向航空客运的需求驱动调度(D3, Demand-Driven-Dispatch)方案，也称为机队重分配(Close-In Refleeting)方案，这是一种基于收益管理系统提供的需求信息调整机队分配的方法。该方法建议在飞机按计划出发前 30 至 14 天寻找飞机交换的可能性，并利用当前预订、预测的剩余需求和航班的空座率等信息来评估采取飞机交换方案对于总收益的影响。后续的专家学者将 D3 问题进行了拓展，后来的研究涉及了：最佳飞机交换机会的识别[22] (Talluri, 1996)、机队重分配与航班时刻表优化的联合决策[23] (Jiang 和 Barnhart, 2006)、机队重分配算法的改进[24] (Sherali 等人, 2005)以及机队重分配问题的随机规划方法的应用[25] (Pilla 等人, 2008)。以上都是需求波动下的航空客运问题相关的事后分析方法研究，与需求波动下的航空货运问题相关的事后分析方法研究目前仅有：Delgado 等人[26]在 2020 年提出了一个综合框架来同时解决飞机和货物的改道问题，其中考虑了需求的不确定性和三种不同的机组管理政策，提出了一个基于弧线的模型来重新设计航空货运网络中的运营时间表。次年，Delgado 和 Mora [27]通过自动调整航班时刻表进一步扩展了综合恢复模型，利用列生成方法求解该问题。

2) 事前分析方案

由于需求和票价高度不确定性，Kenan 等人[28]在 2018 年为航空客运的航班调度和机队分配开发了一个两阶段随机规划模型：第一阶段决定分配给每个预定航班航段的机队族，第二阶段根据需求和票价实现情况决定分配给每个航段的具体机队类型，并首次提出使用样本平均近似(SAA)算法来解决该问题，

案例分析结果表明,对 100 种情况下的随机场景进行建模足以捕捉需求和票价不确定性的影响,并可以在合理的计算时间内提供最优性差距小于 1% 的解决方案。

Cadarso 等人[29]于 2013 年考虑需求的波动性,开发了一种综合方法,联合优化时刻表规划、机队分配和乘客使用,减少不同决策之间的不匹配,从而降低成本。通过西班牙伊比利亚航空公司实际案例研究表明,制定稳健的行程规划可以降低需求波动下由于航班连接失败造成的乘客溢出的数量。Wang 等人[30]在 2014 年针对航线网络效应及旅客需求不确定性问题,将旅客组合优化模型加入机队规划问题,借鉴运力优化分配方法,建立了旅客需求不确定情景下的机队随机规划模型,并用情景汇聚算法求解该模型。李玉等[31]的 2008 年的研究把货物需求分为协议和自由销售两类需求类型,利用收益管理舱位分配的思想,基于协议销售与自由销售在订舱提前期的需求,提出随机需求下货物舱位分配的随机规划模型,并应用稳健优化方法求解模型。该研究的航空货运网络是基于点对点的客机航空运输网络,不涉及到需求不确定下的货运调度与运力调度的一体化决策。综上,需求波动下的航空客运/货运问题相关的事前分析主要采用随机规划方法进行研究,而需求不确定下的货运调度与运力调度的一体化决策研究较为稀缺。

3.2. 航班延误下的航空客运/货运问题研究

1) 事后分析方案

考虑航班延误对航空客运运营的影响,Ageeva 于 2000 年[32]通过在航线之间创造更多的交换机会来提高时刻表的稳健性,并提出了一种启发式方法来求解该问题。Rosenberger 等人在 2004 年[33]构建了一个基于串的机队分配模型,该模型通过增加短周期航班环有效防止了一系列航班的取消,同时通过减弱枢纽连接性将中断隔离到特定的枢纽,Smith 和 Johnson 于 2006 年[34]提出“机场纯度”的概念,限制每个机场的机队数量,为飞机和机组交换提供更多的可能性。在后续的研究中[35],他们继续利用这一概念,将机型指派问题与机组排班问题整合进模型中,验证了所生成的解具有鲁棒性。2010 年 Burke 等人[36]提出增加飞机交换机会的战略,最大化飞机交换机会以生成稳健的飞机路线。Froyland 等人于 2014 年[37]提出了两阶段的飞机航线随机规划模型,第一阶段为飞机航线决策,第二阶段包括航班取消、延误和飞机交换在内的航班恢复操作。Liang 等人于 2018 年[38]将飞机维修的灵活性纳入了恢复模型中,计算实验表明这一设计将降低 20% 到 60% 的恢复成本。

2) 事前分析方案

Lan 等人于 2006 年[39]基于历史数据将第一阶段以最小化总预期传播延误设计飞机路线,第二阶段以最小化可能被扰动影响的旅客总数量确定航班离港时间。2007 年 Lee L. H. 等人[40]建立了一个多目标规划模型,运用了多目标遗传算法进行求解,通过调整航班时间来提高航班计划鲁棒性。Dunbar 等人于 2012 年[41]提出了飞机路径和机组规划整合模型,该模型以最小化飞机和机组人员引起的总传播延误为目标,同时提高飞机路线和机组的鲁棒性。Mohamed 等人于 2013 年[42]提出了一种基于过站时间裕度的量化矩阵的全新的鲁棒性测量方式作为目标函数,并采用了一种网络流规划形式从而避免了复杂的分支定界求解过程。Liang 等人于 2015 年[43]提出了飞机航线预期传播延误的精确计算方法,他们证明了预期传播延误的一个紧凑的下界,并提出了一种两阶段列生成方法,利用下界来加速求解过程。Yan 等人于 2018 年[44]采用最小化最大值的原理构建了飞机航线的鲁棒优化模型,将最大延误时间最小化,不仅考虑了单个航段的延误,还考虑了航段间的相互影响。

货物运输是航空货运公司生产活动的基础和核心,在面对航班延误等不确定性时,规划稳健的货物运输路线是航空公司降低航班延误损失的最有效手段,它不仅可以削弱航班延误的传播效应,当航班延误实际发生后,也可提高部门恢复不正常航班的效率。

3.3. 航空运力衰减下的航空客运/货运问题研究

目前航空运力衰减下的航空客运/货运问题的研究非常少, 与之最相关的是张锦等于 2022 年[45]提出的新冠疫情背景下航空物流网络鲁棒优化研究, 该研究基于全货机和客机腹舱共用的现状, 考虑了航段上客机减少对航空物流网络产生的影响, 构建了二阶段鲁棒优化模型, 并分别用 Benders 分解[46]、行与列生成(C&CG) [47]两种算法框架对该问题进行了求解。张锦的研究是基于航线网络层面的宏观机队规划法, 其货运需求是基于航段的长周期预测得到, 与日常运营中的基于 O-D 对的实际需求还有较大差距, 且在航线规划阶段定义的不确定集不能够准确把握临近航班执行前的航空运力状态。因此, 从微观层面研究客机腹舱运力衰减下的航空货物与运力协同调度问题, 将更加贴近真实的航空运营环境, 有更强的指导意义。

4. 不确定问题的鲁棒优化方法

Table 1. Uncertainty description and advantages and disadvantages of pre-analysis methods

表 1. 事前分析方法的不确定性描述及其优缺点

优化方法	不确定性描述	优势	缺点
随机优化	随机场景	计算简单、求解结果有保证	求解对场景数敏感 概率函数难以准确获取
机会约束规划	概率分布	等效成易于求解的确定性优化	仅适用于特定分布函数
区间规划	区间边界	建模容易, 所需数据少	区间调度计划难以直接采用
鲁棒优化	不确定性集合	不确定性参数易获取 调度计划适用所有场景	保守性强 求解较复杂

在实际生活中不确定性广泛存在, 为了更加合理的对不确定问题进行准确描述, 不确定性优化逐渐被学界重视。最早在 20 世纪 50 年代 Bellman、Zadeh 和 Charnes 等人[48] [49]便开始对不确定性优化进行了研究。由于不确定性问题模型中的一些参数我们很难事先确定, 因此不确定问题的优化求解就变得十分重要[50]。以 Bellman 等人的工作为开端, 相关学者提出了一系列的求解优化方法, 诸如: 随机规划[51] (Birge and Louveaux, 2011)、机会约束规划[48] (Charnes A, 1959)、鲁棒优化[52] (Ben-Tal *et al.*, 2009)、灵敏度分析[52] (Ben-Tal *et al.*, 2009)、模糊规划[53] (刘宝碇, 1998)等。不确定性优化的理论和方法不断地被开发出来。不确定性优化的理论也依据分析阶段的不同被分为事前分析方法和事后分析方法两大类。其中模糊规划、随机规划、机会约束规划、鲁棒优化属于事前分析方法, 灵敏度分析是典型的事后分析方法。下表列出了几种主要的事前分析方法的不确定性描述及其优缺点。

鲁棒优化作为一种建模方法, 通常用于在一个有界闭集中考虑不确定性, 其目标是在该不确定性参数集合中寻求一个最坏情形下的最优解。鲁棒优化方法自提出以来便受到广泛关注, 也不断地被各个领域的学者应用到各行各业中, 如: 供需不确定下的车辆路径问题、库存管理问题、成本不确定下的资源分配问题等。大量研究中的鲁棒优化方法是围绕 Bertsimas [54]在 2005 年的研究工作展开的, Bertsimas 提出了鲁棒优化的基本流程图, 如图 2 所示。

目前, 鲁棒优化的研究方向主要体现在不确定集的选取及鲁棒对等转换理论上:

1) **不确定集的选取。**如何选取合适的不确定集对不确定参数进行准确的描述, 直接影响了模型的优化结果, 而且不同的不确定集所对应的鲁棒对等问题也不同。特别地, 多面体不确定集是一种具有线性结构且易于控制不确定度的鲁棒构架, 相较于盒式不确定集——另一种线性结构不确定集, 要求不确定

参数在相同时刻均到达波动最严重的情况，多面体不确定集降低了优化策略的保守度，更符合实际情况。相较于其他非线性结构的不确定集，如椭球不确定集，它们在进行鲁棒对等转换时会转化为二阶锥规划，求解比较繁琐。

2) **鲁棒对等转换理论**。如何把已经构建好的鲁棒优化模型转化为一个在计算上可通过一般商业优化软件直接求解的模型，直接影响了优化时间和优化结果。利用对偶理论对原始鲁棒优化模型进行转换是比较常用的方法，也是经典的单阶段鲁棒优化方法、近年来提出的两阶段鲁棒优化方法[47]中使用的鲁棒对等转换方法。本课题研究的不确定场景下的航空运力调度与货物调度的协同鲁棒优化问题的对偶问题使用一般商业优化软件直接求解较为困难，这是因为有的不确定场景下的对偶模型属于大规模复杂线性或非线性规划，尚未有通用、高效的算法帮助求解；有的不确定场景下的对偶模型无法用数学规划显性表达，难以用求解器求解。为了避免对鲁棒优化问题的对偶问题的直接求解，应当对不确定性场景进行深入分析，选择合适的确定集，为不同的不确定场景设计有针对性的高效算法。

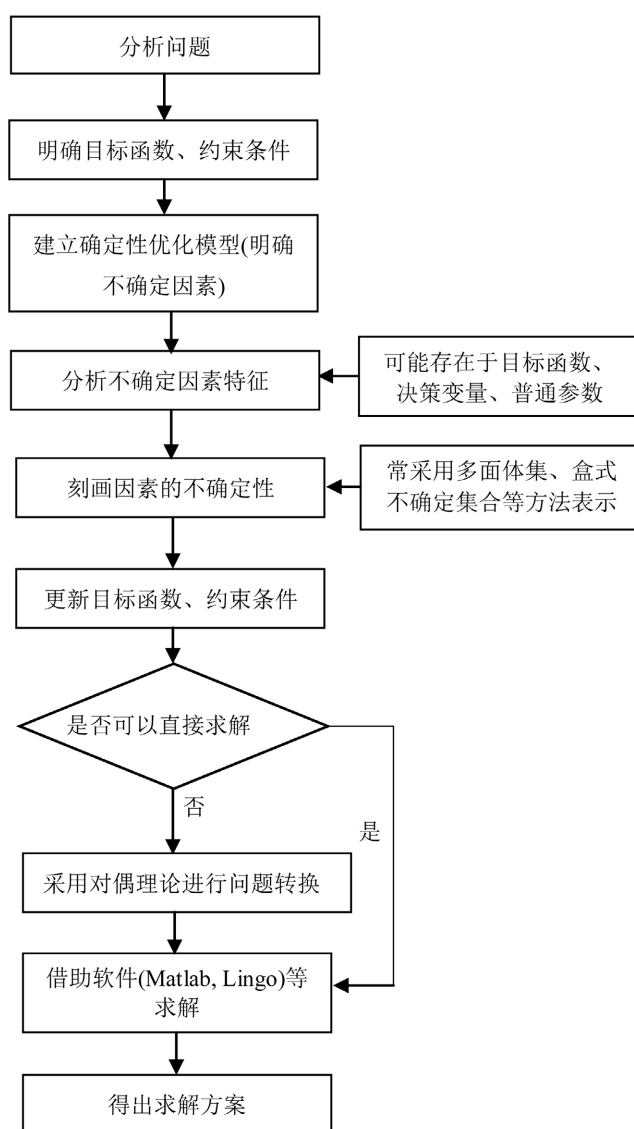


Figure 2. Diagram of the basic flowchart of robust optimization
图 2. 鲁棒优化的基本流程图

5. 研究评述与未来展望

纵览国内外的研究现状与进展, 航空货物调度与运力调度的一体化决策研究正受到越来越多的专家学者们的关注, 但结合“客货并举”的现实状况、考虑客机腹舱与纯货机两种运输模式混合的航空货物调度与运力调度的一体化决策还比较少见。此外, 目前不确定因素下的航空货运问题研究的事前分析方案较少, 且主要采用随机规划方法描述和解决问题。由于随机规划方法对场景数敏感且概率函数难以准确获取, 采用鲁棒优化方法解决不确定因素下航空货物与运力协同调度问题更具可行性。但是, 由于鲁棒优化问题的求解比较复杂, 需要对每个不确定性场景进行深入分析, 为不同的不确定场景设计有针对性的高效求解算法, 这是不确定因素下航空货物与运力协同调度的未来的重要研究方向。

基金项目

国家自然科学基金项目(72301175); 国家自然科学基金项目(72274125)。

参考文献

- [1] Barnhart, C., Kniker, T.S. and Lohatepanont, M. (2002) Itinerary-Based Airline Fleet Assignment. *Transportation Science*, **36**, 199-217. <https://doi.org/10.1287/trsc.36.2.199.566>
- [2] Lohatepanont, M. and Barnhart, C. (2004) Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment. *Transportation Science*, **38**, 19-32. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0026>
- [3] Tang, C., Yan, S. and Chen, Y. (2008) An Integrated Model and Solution Algorithms for Passenger, Cargo, and Combi Flight Scheduling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **44**, 1004-1024. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.02.002>
- [4] Sherali, H.D., Bae, K. and Haouari, M. (2013) An Integrated Approach for Airline Flight Selection and Timing, Fleet Assignment, and Aircraft Routing. *Transportation Science*, **47**, 455-476. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0460>
- [5] Zhang, D., Yu, C., Desai, J. and Lau, H.Y.K.H. (2016) A Math-Heuristic Algorithm for the Integrated Air Service Recovery. *Transportation Research Part B: Methodological*, **84**, 211-236. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.11.016>
- [6] Kenan, N., Diabat, A. and Jebali, A. (2018) Codeshare Agreements in the Integrated Aircraft Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, **117**, 272-295. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.08.008>
- [7] Xu, Y., Wandelt, S. and Sun, X. (2021) Airline Integrated Robust Scheduling with a Variable Neighborhood Search Based Heuristic. *Transportation Research Part B: Methodological*, **149**, 181-203. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.05.005>
- [8] Feng, B., Li, Y. and Shen, Z.M. (2015) Air Cargo Operations: Literature Review and Comparison with Practices. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **56**, 263-280. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.028>
- [9] Marsten, R.E. and Muller, M.R. (1980) A Mixed-Integer Programming Approach to Air Cargo Fleet Planning. *Management Science*, **26**, 1096-1107. <https://doi.org/10.1287/mnsc.26.11.1096>
- [10] Lin, C. and Chen, Y. (2003) The Integration of Taiwanese and Chinese Air Networks for Direct Air Cargo Services. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **37**, 629-647. [https://doi.org/10.1016/s0965-8564\(03\)00010-7](https://doi.org/10.1016/s0965-8564(03)00010-7)
- [11] Li, D., Huang, H.C., Morton, A.D. and Chew, E.P. (2006) Simultaneous Fleet Assignment and Cargo Routing Using Benders Decomposition. *OR Spectrum*, **28**, 319-335. <https://doi.org/10.1007/s00291-006-0041-8>
- [12] Yan, S., Chen, S. and Chen, C. (2006) Air Cargo Fleet Routing and Timetable Setting with Multiple On-Time Demands. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **42**, 409-430. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.02.002>
- [13] Yan, S. and Chen, C. (2007) Coordinated Scheduling Models for Allied Airlines. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **15**, 246-264. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.05.002>
- [14] Tang, C., Yan, S. and Chen, Y. (2008) An Integrated Model and Solution Algorithms for Passenger, Cargo, and Combi Flight Scheduling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **44**, 1004-1024. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.02.002>
- [15] Derigs, U., Friederichs, S. and Schäfer, S. (2009) A New Approach for Air Cargo Network Planning. *Transportation Science*, **43**, 370-380. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0282>
- [16] Derigs, U. and Friederichs, S. (2012) Air Cargo Scheduling: Integrated Models and Solution Procedures. *OR Spectrum*,

- 35, 325-362. <https://doi.org/10.1007/s00291-012-0299-y>
- [17] Azadian, F., Murat, A.E. and Chinnam, R.B. (2012) Dynamic Routing of Time-Sensitive Air Cargo Using Real-Time Information. *Transportation Research Part E*, **48**, 355-372.
- [18] Azadian, F., Murat, A.E. and Chinnam, R.B. (2012) Dynamic Routing of Time-Sensitive Air Cargo Using Real-Time Information. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **48**, 355-372. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.07.004>
- [19] Lee, C.K.M., Zhang, S. and Ng, K.K.H. (2019) Design of an Integration Model for Air Cargo Transportation Network Design and Flight Route Selection. *Sustainability*, **11**, Article 5197. <https://doi.org/10.3390/su11195197>
- [20] Xiao, F., Guo, S., Huang, L., Huang, L. and Liang, Z. (2022) Integrated Aircraft Tail Assignment and Cargo Routing Problem with through Cargo Consideration. *Transportation Research Part B: Methodological*, **162**, 328-351. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2022.06.005>
- [21] Berge, M.E. and Hopperstad, C.A. (1993) Demand Driven Dispatch: A Method for Dynamic Aircraft Capacity Assignment, Models and Algorithms. *Operations Research*, **41**, 153-168. <https://doi.org/10.1287/opre.41.1.153>
- [22] Talluri, K.T. (1996) Swapping Applications in a Daily Airline Fleet Assignment. *Transportation Science*, **30**, 237-248. <https://doi.org/10.1287/trsc.30.3.237>
- [23] Jiang, H. and Barnhart, C. (2006) Dynamic Airline Scheduling. *Transportation Science*, **43**, 267-406.
- [24] Sherali, H.D., Bish, E.K. and Zhu, X. (2005) Polyhedral Analysis and Algorithms for a Demand-Driven Reflecting Model for Aircraft Assignment. *Transportation Science*, **39**, 349-366. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0090>
- [25] Pilla, V.L., Rosenberger, J.M., Chen, V.C.P. and Smith, B. (2008) A Statistical Computer Experiments Approach to Airline Fleet Assignment. *IIE Transactions*, **40**, 524-537. <https://doi.org/10.1080/07408170701759734>
- [26] Delgado, F., Sirhan, C., Katscher, M. and Larrain, H. (2020) Recovering from Demand Disruptions on an Air Cargo Network. *Journal of Air Transport Management*, **85**, Article ID: 101799. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101799>
- [27] Delgado, F. and Mora, J. (2021) A Matheuristic Approach to the Air-Cargo Recovery Problem under Demand Disruption. *Journal of Air Transport Management*, **90**, Article ID: 101939. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101939>
- [28] Kenan, N., Jebali, A. and Diabat, A. (2018) An Integrated Flight Scheduling and Fleet Assignment Problem under Uncertainty. *Computers & Operations Research*, **100**, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.08.014>
- [29] Cadarso, L. and Marín, Á. (2013) Robust Passenger Oriented Timetable and Fleet Assignment Integration in Airline Planning. *Journal of Air Transport Management*, **26**, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.10.004>
- [30] Wang, Y., Zhu, J.F. and Ge, W. (2014) Airline Fleet Robust Optimization Approach under Stochastic Demand with Route Network Effects. *Journal of Southwest Jiaotong University*, **27**, 727-733. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.2014.04.026>
- [31] 李玉, 罗利. 随机需求下航空货运收益管理舱位分配优化模型研究[J]. 统计与决策, 2008(18): 68-70.
- [32] Ageeva, Y. (2000) Approaches to Incorporating Robustness into Airline Scheduling. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [33] Rosenberger, J.M., Johnson, E.L. and Nemhauser, G.L. (2004) A Robust Fleet-Assignment Model with Hub Isolation and Short Cycles. *Transportation Science*, **38**, 357-368. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0038>
- [34] Smith, B.C. and Johnson, E.L. (2006) Robust Airline Fleet Assignment: Imposing Station Purity Using Station Decomposition. *Transportation Science*, **40**, 497-516. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0153>
- [35] Jacobs, T.L., Smith, B.C. and Johnson, E.L. (2008) Incorporating Network Flow Effects into the Airline Fleet Assignment Process. *Transportation Science*, **42**, 514-529. <https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0242>
- [36] Burke, E.K., De Causmaecker, P., De Maere, G., Mulder, J., Paelinck, M. and Vanden Berghe, G. (2010) A Multi-Objective Approach for Robust Airline Scheduling. *Computers & Operations Research*, **37**, 822-832. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.026>
- [37] Dunbar, M., Froyland, G. and Wu, C. (2014) An Integrated Scenario-Based Approach for Robust Aircraft Routing, Crew Pairing and Re-Timing. *Computers & Operations Research*, **45**, 68-86. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.12.003>
- [38] Liang, Z., Xiao, F., Qian, X., Zhou, L., Jin, X., Lu, X., et al. (2018) A Column Generation-Based Heuristic for Aircraft Recovery Problem with Airport Capacity Constraints and Maintenance Flexibility. *Transportation Research Part B: Methodological*, **113**, 70-90. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.05.007>
- [39] Lan, S., Clarke, J. and Barnhart, C. (2006) Planning for Robust Airline Operations: Optimizing Aircraft Routings and Flight Departure Times to Minimize Passenger Disruptions. *Transportation Science*, **40**, 15-28. <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0134>
- [40] Lee, L.H., Lee, C.U. and Tan, Y.P. (2007) A Multi-Objective Genetic Algorithm for Robust Flight Scheduling Using

- Simulation. *European Journal of Operational Research*, **177**, 1948-1968. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.014>
- [41] Dunbar, M., Froyland, G. and Wu, C. (2012) Robust Airline Schedule Planning: Minimizing Propagated Delay in an Integrated Routing and Crewing Framework. *Transportation Science*, **46**, 204-216. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0395>
- [42] Aloulou, M.A., Haouari, M. and Zeghal Mansour, F. (2013) A Model for Enhancing Robustness of Aircraft and Passenger Connections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **32**, 48-60. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.03.008>
- [43] Liang, Z., Feng, Y., Zhang, X., Wu, T. and Chaovalitwongse, W.A. (2015) Robust Weekly Aircraft Maintenance Routing Problem and the Extension to the Tail Assignment Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, **78**, 238-259. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.013>
- [44] Yan, C. and Kung, J. (2018) Robust Aircraft Routing. *Transportation Science*, **52**, 118-133. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0657>
- [45] 张锦, 张哲睿, 洪治潮, 等. 新冠疫情背景下航空物流网络的鲁棒优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(9): 2218-2226.
- [46] Ling, A., Sun, J., Xiu, N. and Yang, X. (2017) Robust Two-Stage Stochastic Linear Optimization with Risk Aversion. *European Journal of Operational Research*, **256**, 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.017>
- [47] Martins de Sá, E., Morabito, R. and de Camargo, R.S. (2018) Benders Decomposition Applied to a Robust Multiple Allocation Incomplete Hub Location Problem. *Computers & Operations Research*, **89**, 31-50. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.08.001>
- [48] Cooper, W.W. and Chames, A. (1959) Chance-Constrained Programming. INFORMS.
- [49] Bellman, R.E. and Zadeh, L.A. (1970) Decision-Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, **17**, B-141-B-164. <https://doi.org/10.1287/mnsc.17.4.b141>
- [50] El Ghaoui, L., Oustry, F. and Lebret, H. (1998) Robust Solutions to Uncertain Semidefinite Programs. *SIAM Journal on Optimization*, **9**, 33-52. <https://doi.org/10.1137/s1052623496305717>
- [51] John, R.B. and Francois, L. (2011) Introduction to Stochastic Programming, Springer.
- [52] Ben-Tal, A., Ghaoui, L.E. and Nemirovski, A. (2009) Robust Optimization. Princeton University Press.
- [53] 刘宝碇. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [54] Bertsimas, D. and Sim, M. (2004) The Price of Robustness. *Operations Research*, **52**, 35-53. <https://doi.org/10.1287/opre.1030.0065>