

文章编号: 1674-8190(2024)02-066-11

# 飞机维修路径研究热点与前沿——基于 CiteSpace 的可视化分析

袁媛, 于佳伟

(沈阳航空航天大学 经济与管理学院, 沈阳 110136)

**摘要:** 近年来,随着民航运输业的飞速发展,飞机维修路径规划研究越来越受到重视。为了探究飞机维修路径规划问题的研究现状、研究热点以及前沿趋势,以中国知网(CNKI)和 Web of Science 核心数据库 2000 年 1 月—2022 年 12 月收录的国内外飞机维修路径规划研究的相关文献作为分析数据,将 CiteSpace V 软件作为辅助研究工具,分析飞机维修路径规划研究领域的研究人员、研究机构及其合作关系,结合知识图谱与文献内容总结该领域的研究热点与研究前沿。考虑国内的飞机维修路径规划研究情况,针对我国在该领域的研究趋势及重点研究内容提出研究建议,为今后飞机维修路径规划研究提供参考。

**关键词:** 飞机维修路径规划;飞机排班;CiteSpace;知识图谱分析;研究热点

**中图分类号:** V267; G353.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.08

## Aircraft maintenance routing research hotspot, frontier-visual analysis based on CiteSpace

YUAN Yuan, YU Jiawei

(College of Economics and Management, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In recent years, with the rapid development of civil aviation transportation, the research of aircraft maintenance routing has been paid more and more attention. In order to explore the research status, hot spots and frontier trends of the aircraft maintenance routing problem, this paper takes the domestic and foreign literatures on aircraft maintenance routing collected in the core databases of China National Knowledge Network (CNKI) and Web of Science from 2000 to 2022 as the analysis data. The CiteSpace V software is used as a auxiliary research tool to analyze the scholars, institutions and cooperative relationships in the field of aircraft maintenance routing. Combining the knowledge maps and literature content, the hot spots and frontiers of research in this field are summarized. Considering the domestic aircraft maintenance routing research, research suggestions are put forward for the research trend and focused research content in this field in China, and the reference is provided for future aircraft maintenance routing research scholars.

**Key words:** aircraft maintenance routing planning; aircraft scheduling; CiteSpace; knowledge mapping analysis; research hotspots

**收稿日期:** 2023-01-30; **修回日期:** 2023-06-11

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目(71802141); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJKR0102)

**通信作者:** 袁媛(1986—),女,博士,副教授。E-mail: yy\_sau@163.com

**引用格式:** 袁媛,于佳伟.飞机维修路径研究热点与前沿——基于CiteSpace的可视化分析[J].航空工程进展,2024,15(2):66-76.

YUAN Yuan, YU Jiawei. Aircraft maintenance routing research hotspot, frontier-visual analysis based on CiteSpace[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 66-76. (in Chinese)

## 0 引言

航空公司运营调度计划决定着运营成本、收益和航空公司的市场竞争力。因此,最优的运营调度计划对于提高资源利用效率具有重要意义<sup>[1]</sup>。由于民航运输业的高度复杂性,航空公司通常将其航线调度计划划分为四个有序的子问题来解决:航班计划问题(Flight Scheduling Problem)、机型分配问题(Fleet Assignment Problem)、飞机维修路径规划问题(Aircraft Maintenance Routing Planning Problem)和机组匹配问题(Crew Pairing Problem)<sup>[2]</sup>。其中,飞机维修路径规划问题的主要目的是在考虑航空公司机队规模的情况下,为机队中的飞机分配航班任务或航班任务串,并满足民航规章和航空公司规定的飞机维修需求,以实现最优的资源配置<sup>[3]</sup>。飞机维修路径中既包含航班任务也包含维修任务,国内通常称该问题为飞机排班问题。

国外较早开始飞机维修路径规划研究,Feo等<sup>[4]</sup>是较早开展该问题研究的人员,他们同时考虑飞机维修路径规划与维修基地选址,并以此建立了一个以维修成本最小化为目标的混合整数规划模型;Sriram等<sup>[5]</sup>将文献[4]提出的模型拓展到考虑两种飞机维修类型,提出了一种启发式算法求解;Haouari等<sup>[6]</sup>提出了一个多项式大小的飞机维修路径非线性模型,并利用重拟线性化技术将模型线性化;Liang等<sup>[7-8]</sup>研究了以单日和以周为周期的飞机维修路径规划问题;Eltoukhy等<sup>[9]</sup>提出了一个多项式大小的0-1整数规划模型,利用蚁群算法、模拟退火算法、遗传算法来求解问题模型。在最近的研究中,强化学习算法<sup>[10]</sup>、逆差函数理论<sup>[11]</sup>被应用到飞机维修路径规划中。

我国飞机维修路径规划研究起步较晚,孙宏等<sup>[12-13]</sup>是较早开始研究的学者,他们首次提出航班节的概念,并研究了基于飞机调度指令、基于最少飞机数、基于飞机使用均衡的排班问题及算法;肖东喜等<sup>[14]</sup>研究了满足3天维修规则并以维修机会最大化为目标的飞机排班问题;李耀华等<sup>[15-16]</sup>研究了航班串优化编制和一体化飞机排班问题;在最近的研究中,吕宗磊等<sup>[17]</sup>建立了面向正常性的飞机排班模型,提出一种两阶段启发式算法进行求解;郭润夏等<sup>[18]</sup>建立了以维修间隔利用率最优为

目标的飞机排班模型,提出了基于强化学习的Q-Learning求解算法。

由于国内外飞机维修路径规划研究起点不同且航线网络存在差异,国内与国外飞机维修路径规划的研究成果、研究深度、研究进展与研究热点等有所差别,尚未查到有文献对国内外飞机维修路径规划研究做出多角度概述。为此,本文针对飞机维修路径规划问题,将中国知网(CNKI)和Web of Science(WOS)核心数据库2000—2022年收录的有关飞机维修路径研究文献作为分析数据,利用CiteSpace V软件,从发文量、文献作者、发文机构、发文期刊、关键词等角度出发,分析国内外飞机维修路径规划的研究现状、研究热点与前沿,并根据分析结果以及国内在飞机维修路径规划上的实际研究情况,指出我国在该领域未来研究的重点关注方向。

## 1 文献数据来源与研究方法

### 1.1 文献数据来源

中文文献选自CNKI数据库,设置“主题”作为检索条件,以“飞机排班”“飞机指派”“飞机路径”“航班环”“航班串”为检索词,检索时间设置为2000—2022年,共检索到179篇学术文献,经手动筛选(去除研究内容不相关文献)后得到80篇有效文献,并以Refworks格式导出数据。英文文献选自WOS核心数据库,设置“主题(Topic)”作为检索条件,以“aircraft maintenance routing”“aircraft routing”“aircraft rotation”“tail assignment”“aircraft scheduling”“aircraft schedule”“airline planning”为检索词,检索时间为2000—2022年,共检索到350条结果,经手动筛选后得到158篇有效文献,并以纯文本格式导出全部记录数据。

### 1.2 研究方法

使用CiteSpace V软件,该软件是由美国德雷塞尔大学Chen团队研发的信息可视化分析软件<sup>[19]</sup>,以获得的文献作为研究数据,通过对文献的作者、机构、期刊以及关键词进行知识图谱分析,了解飞机维修路径规划问题的发文作者、研究机构,探析飞机维修路径规划研究的前沿热点和发

展脉络。对 CiteSpace V 软件运行参数设置如下：时间切片 (time slicing) 设置为 2000—2022 年，时间切片 (year per slice) 设置为“1”，节点类型 (node types) 选择“作者 (author)”“机构 (institution)”“期刊被引 (cited journal)”“关键词 (key word)”，阈值 (top N) 设置为 50。

## 2 飞机维修路径规划研究现状分析

### 2.1 文献发文量统计

对所得文献统计得到年度发文量趋势图，如图 1 所示，可以看出：对于 CNKI 中文文献分布，总体发文量较少，2001—2008 年发文量在 1~7 篇/年波动，2010—2018 年发文量在 4~9 篇/年波动，最高为 9 篇/年 (2012 年)，占比 11.25%，2020—2022 年发文量在 1~2 篇/年，2009 年与 2019 年没有相关中文文献发表；对于 WOS 英文文献分布，2000—2003 年发文逐年上升，但发文量不高，2004—2016 年发文量主要集中在 4~9 篇/年，且年发文量整体呈上升趋势，在 2017 年发文量达到最高 (17 篇，占比 10.7%)，近五年的研究热度较高，且近三年发文量在 10 篇/年及以上。

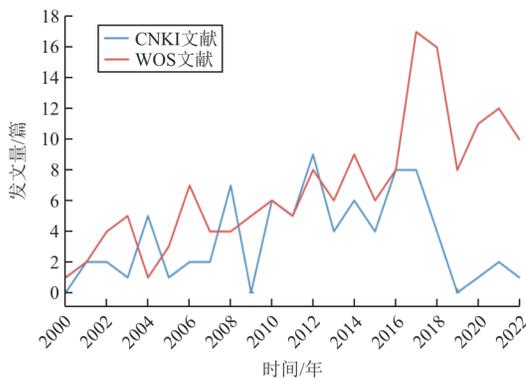


图 1 年度发文量趋势图

Fig. 1 Trend chart of annual published quantity

### 2.2 文献作者特征分析

利用 CiteSpace V 软件生成文献作者合作关系网络知识图谱 (如图 2~图 3 所示)，并统计发文量前 10 名作者 (如表 1 所示)。图谱中节点大小表示作者发文量的多少，节点间连线表示具有合作关系。CNKI 文献作者共现图谱如图 2 所示，共生成 114 个节点、124 条连线。

普赖斯定律：

$$M = 0.749 \times \sqrt{N_{\max}} \quad (1)$$

式中： $M$  为核心作者最低发文量； $\sqrt{N_{\max}}$  为最多发文作者的发文量。

根据式 (1) 计算得到中文文献核心作者有 13 位，其中孙宏发文量最多 (11 篇)，其次为李耀华 (10 篇)、朱金福 (7 篇)、高强 (6 篇)、夏洪山 (6 篇)、吴东华 (6 篇) 等。从作者合作关系来看，多数研究者在该领域具有合作关系，主要的合作团队有以孙宏、文军为核心的研究团队 (中国民用航空飞行学院)、以李耀华和贾宝惠为核心的研究团队 (中国民航大学)、以朱金福、朱星辉、高强为核心的研究团队 (南京航空航天大学) 等。整体来看，团队合作关系较多，合作关系较为分散，不同研究团队之间合作较少，团队间的合作交流有待于进一步加强。图谱中存在的一些孤立点说明一部分研究人员偏向于独立研究。

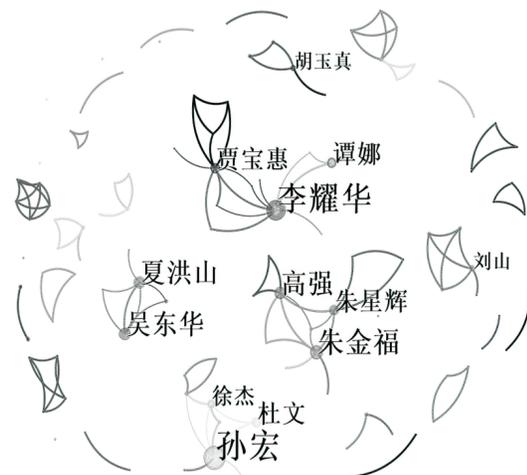


图 2 CNKI 文献作者共现图谱

Fig. 2 The authors co-occurrence map of CNKI literature

WOS 核心数据库文献作者及合作关系分析如图 3 所示，共生成 302 点、374 连线。根据式 (1) 计算得到外文文献核心作者有 24 位，其中 Haouari 的发文量最多 (12 篇)，其次为 Chan (10 篇)、Eltoukhy (8 篇)、Sherali (6 篇)、Chung (6 篇)，是飞机维修路径规划研究的主力军。从作者合作关系来看，团队合作关系较多，大部分研究者们具有合作关系且具有较大的合作团队规模。其中，Haouari 和 Sherali 等的研究团队、Chan 和 Eltoukhy 等的研究团队最为显著，是该领域的核心研究团队。图 3 中孤立节点较少，说明独立研究的人员较少，

国外研究者更倾向于合作研究。

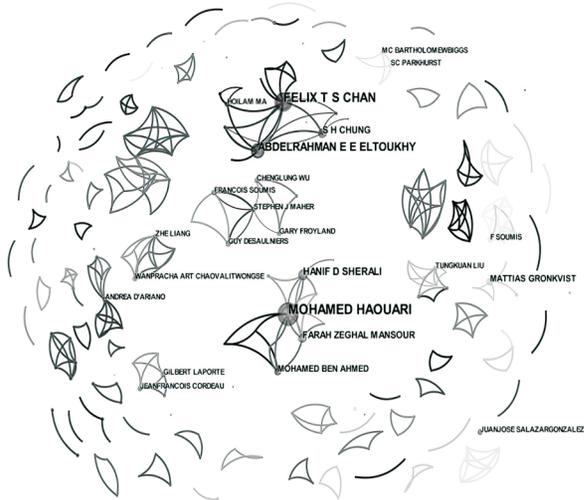


图 3 WOS 文献作者共现图谱

Fig. 3 The authors co-occurrence map of WOS literature

表 1 发文量前 10 作者列表

Table 1 The list of the top 10 authors by published quantity

序号	CNKI		WOS	
	核心作者	发文量/篇	核心作者	发文量/篇
1	孙宏	11	Haouari	12
2	李耀华	10	Chan	10
3	朱金福	7	Eltoukhy	8
4	高强	6	Sherali	6
5	夏洪山	6	Chung	6
6	吴东华	6	Mansour	5
7	谭娜	5	Gronkvist	5
8	杜文	5	Ahmed	4
9	朱星辉	5	Maher	3
10	贾宝惠	5	Liang	3

### 2.3 研究机构分析

将隶属于同一机构的二级机构进行合并,并利用 CiteSpace V 软件分别对所提取的 CNKI、WOS 文献数据进行研究机构分析统计,绘制机构共现图谱如图 4~图 5 所示,并分别对发文量前 5 的机构进行汇总(如表 2 所示)。图中节点代表发文机构,节点大小代表机构发文量的多少,连线代表不同机构之间具有合作关系。

图 4 包含 32 个节点、14 条连线,网络密度 0.028。从图 4 可以看出:中文文献发文机构主要以高校为主,其中中国民航大学和南京航空航天大学最多,发文量分别为 24 篇和 19 篇;从合作关

系上看,同一机构内部的二级机构合作较多,不同机构间缺乏合作关系且合作发文较少,多数机构偏向于独立研究,有待于进一步加强研究机构间的合作。



图 4 CNKI 文献发文机构共现图谱

Fig. 4 The co-occurrence map of CNKI literature publication institutions

图 5 包含 201 个节点、251 条连线,网络密度 0.012。其中,香港理工大学(14 篇)、卡尔塔大学(9 篇)、巴黎综合理工学院(7 篇)、弗吉尼亚理工大学(7 篇)是飞机维修路径规划研究的核心研究机构;从合作关系上看,多数机构间具有合作关系,其中以香港理工大学为核心、以巴黎综合理工学院为核心、以卡尔塔大学为核心、以佐治亚理工学院为核心的合作机构网络最为显著,且具有较大的合作关系网络。

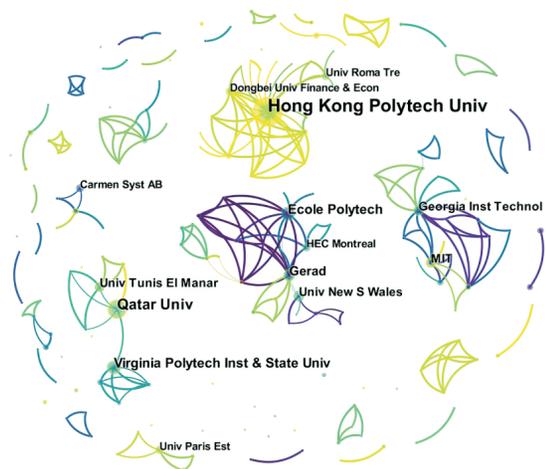


图 5 WOS 文献发文机构共现图谱

Fig. 5 The co-occurrence map of WOS literature publication institutions

表2 发文量前5机构列表  
Table 2 The list of the top 5 institutions by published quantity

序号	CNKI		WOS	
	发文量/篇	发文机构	发文量/篇	发文机构
1	24	中国民航大学 (Civil Aviation University of China)	14	香港理工大学 (The Hong Kong Polytechnic University)
2	19	南京航空航天大学 (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)	9	卡尔塔大学 (Qatar University)
3	7	中国民用航空飞行学院 (Civil Aviation Flight University of China)	7	巴黎综合理工学院 (École Polytechnique)
4	5	西南交通大学 (Southwest Jiaotong University)	7	弗吉尼亚理工大学 (Virginia Polytechnic Institute and State University)
5	3	哈尔滨工程大学 (Harbin Engineering University)	6	加拿大决策分析研究机构 (Gerad)

## 2.4 期刊共被引分析

期刊共被引分析可以了解一个领域中具有影响力的期刊。由于CNKI文献数据不包含参考文献,故只对外文文献数据进行分析。利用CiteSpace V软件生成WOS期刊共被引知识图谱(如图6所示),图中包含504个节点、2453条连线,其中节点代表期刊,节点大小代表被引频次高低,连线代表所连接的两个期刊被同一篇文章引用。可以看出:飞机维修路径规划研究领域中最具影响力的前5种期刊分别是《Transportation Science》(被引130次)、《European Journal of Operational Research》(被引110次)、《Operations Research》(被引108次)、《Computers & Operations Research》(被引104次)、《Annals of Operations Research》(被引84次)。期刊类别主要以运筹研究类和交通运输类为主,这些期刊在飞机维修路径规划研究领域占据核心地位,是相关研究者在研究过程中所参考的重要文献来源。

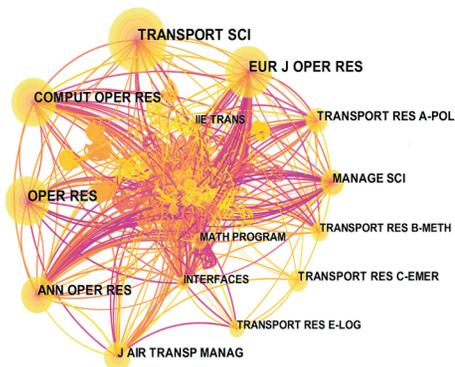


图6 WOS文献期刊共被引图谱  
Fig. 6 The journal co-citation map of WOS literatures

## 3 飞机维修路径规划研究热点与前沿分析

### 3.1 研究热点分析

关键词是一篇文献资料内容的浓缩与精华所在,出现频率越高的关键词则越被研究人员所关注,因此能够充分反映出相关领域的研究热点。为了保证分析的准确性,将意思相近的关键词进行合并处理,利用CiteSpace V软件生成的CNKI中文文献、WOS英文文献关键词共现图谱如图7~图8所示,同时统计CNKI和WOS文献数据中出现频次排名前10的关键词,如表3所示。图谱中节点代表关键词,节点越大则该节点关键词频次越高,表示越受关注,连线表示所连接的两个关键词出现于同一篇文章中,中心度表示关键词的受关注程度。

图7包含183个节点、378条连线,网络密度0.022。关键词“飞机排班”节点最为显著,一共出现了38次,其次是“航班环”“遗传算法”“列生成算法”“多目标优化”等高频关键词。结合文献研究内容,CNKI文献的研究热点主要聚焦于以下两点:

1) 飞机排班最优化模型的创新和建立:国内现有航线网络主要是“点对点(point to point)”模式,在这种模式下,国内研究者大多考虑航班之间的衔接问题,以生成的航班串或航班环为基础建立飞机维修路径规划优化模型,为飞机指派飞行任务。模型优化目标主要以相关成本最小化<sup>[20-22]</sup>、

使用飞机数量最小化<sup>[23]</sup>、飞机使用率最大化<sup>[24-25]</sup>等为主。中文研究文献的模型复杂性与综合性不高,在相关约束上,如飞机飞行限制、维修需求以及相关维修资源限制等的考虑不足。

2) 列生成算法、遗传算法等启发式算法的改进与应用:飞机维修路径规划问题属于 NP-hard 优化问题,部分模型具有指数式增长的变量,因此国内部分研究人员使用列生成算法来求解问题,如肖东喜等<sup>[14]</sup>利用列生成算法寻找满足三天维修规则飞行路径,朱星辉等<sup>[20]</sup>利用动态列生成算法寻找成本最小的飞机维修路径,周琨等<sup>[23]</sup>和朱星辉等<sup>[26]</sup>利用分支定价算法(列生成算法与分支定价算法结合)求解问题。采用精确算法来求解 NP-hard 问题非常困难,精确算法可能无法在合理的计算时间内找到最优的解决方案,故国内部分研究人员聚焦于利用遗传算法<sup>[16,27]</sup>、粒子群算法<sup>[22]</sup>等启发式算法来解决问题,这类算法求解时间较快,可以在多项式时间内找到较优解。

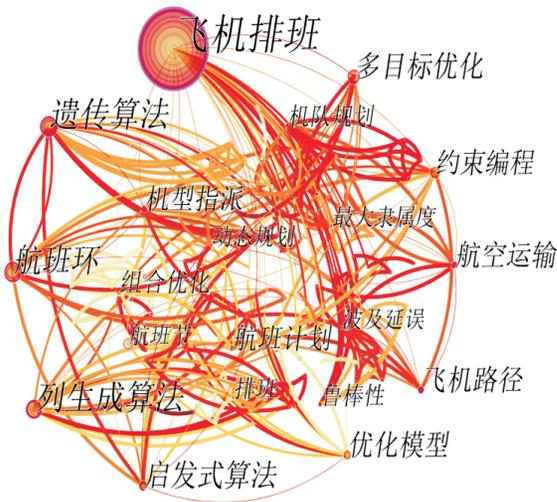


图 7 CNKI 文献关键词共现图谱

Fig. 7 The co-occurrence map of CNKI keywords

图 8 包含 327 个节点,1 293 条连线,网络密度 0.024,关键词之间联系紧密,其中关键词“aircraft (maintenance) routing”节点最为显著,共出现 73 次,其次是“model(模型)”“fleet assignment(机型分配)”“Benders decomposition(Benders 分解)”“optimization(最优化)”“robustness(鲁棒性)”“algorithm(算法)”等高频关键词。结合文献研究内

容,WOS 文献研究热点主要聚焦于以下四点:

1) 飞机维修路径规划最优化模型的创新和建立:不同于国内,国外现有的航线网络主要是“轮辐式(Hub-and-Spoke)模式”,在此模式下建立的模型侧重于对飞机进行维修路径安排,模型的综合程度相对较高,对飞机飞行限制、维修需求的考虑较为重视。模型的构建主要基于以下三种网络结构:

① 串(String)<sup>[28-29]</sup>:串是由一系列可相连的航段组成,串的起始航段与终止航段均为维修机场。基于该网络的模型中,变量会随着航班数量的增加呈指数级增长,研究人员大多利用基于列生成的算法来求解此类模型。

② 时空网络<sup>[7-8]</sup>(Time-Space Network,如图 9 所示):地面弧代表机场,地面弧上的节点代表飞机在该机场的起飞或到达时间,机场间的飞行弧表示该航班的起飞机场与降落机场。该网络下模型的变量规模是多项式级别的。

③ 连接网络<sup>[1,9]</sup>(Connection Network,如图 10 所示):网络中包含起始节点、终止节点、航段节点,节点之间的连接弧代表航段间可行连接,可行连接需满足空间条件(后继航段的起飞机场与前继航段的降落机场相同)、时间条件(后继航段的起飞时间与前继航段的降落时间差满足飞机周转时间或维修时间要求)。基于该网络的模型变量规模同样是多项式级别的。

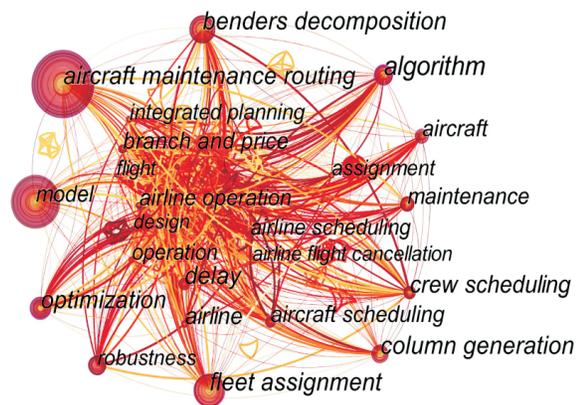


图 8 WOS 文献关键词共现图谱

Fig. 8 The co-occurrence map of WOS keywords

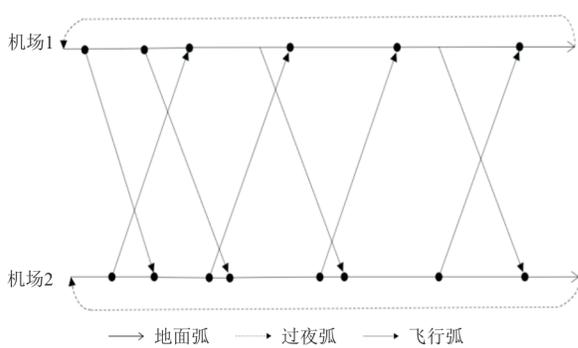


图 9 时空网络

Fig. 9 Time-space network

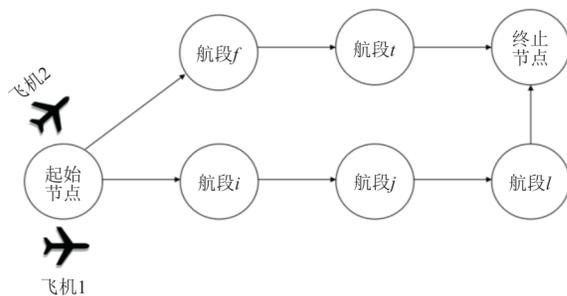


图 10 连接网络

Fig. 10 Connection network

在优化目标方面,多目标优化并不常见,模型大多考虑的是单目标,目标函数主要以最小化相关成本<sup>[30-31]</sup>、最大化总连接价值(Through Value)<sup>[3,10]</sup>、最大化飞机使用率<sup>[32-33]</sup>、最小化延误风险<sup>[34-35]</sup>等为主。

2) Benders分解算法、列生成算法、启发式算法等的改进、应用与创新:Benders分解算法<sup>[36]</sup>与列生成算法<sup>[37]</sup>作为解决大规模线性优化问题的高效算法,常被国外应用于飞机维修路径规划问题研究中。为了进一步提高求解效率,该领域研究者将Benders分解—列生成算法<sup>[29]</sup>和列生成—启发式算法<sup>[35]</sup>应用其中。国外同样重视启发式算法在飞机维修路径规划上的应用,如压缩退火算法<sup>[32]</sup>、变邻域搜索算法<sup>[33]</sup>、非支配排序遗传算法<sup>[38]</sup>等。

在算法的创新上,部分研究人员针对其所研究的飞机维修路径规划问题特征及模型特点开发了高效的启发式算法<sup>[8,11]</sup>。

3) 集成相关问题研究:机型分配问题通常在飞机维修路径规划问题之前得以解决,其结果会影响飞机维修路径规划的可行性或最优性,进而

影响机组匹配结果。机组匹配问题通常在飞机维修路径规划问题之后解决,飞机维修路径规划问题的结果会影响到机组分配问题的可行性或最优性。

考虑到计算复杂性,航空公司通常按顺序进行调度规划,但这忽略了各个阶段间的相互依赖性,可能会导致某一调度阶段的次优解甚至不可行解的产生,因此国外部分研究人员将研究重心放在航班计划—机型分配—飞机维修路径规划的集成问题<sup>[39-40]</sup>、飞机维修路径规划—机型分配的集成问题<sup>[8,41]</sup>、飞机维修路径规划—机组匹配的集成问题<sup>[42-43]</sup>以及机型分配—飞机维修路径规划—机组匹配的集成问题<sup>[44-45]</sup>上。考虑到整合问题模型变量、约束的规模巨大以及模型结构复杂,基于分解的方法(如Benders分解法、Dantzig-Wolfe分解法等)和启发式方法多被应用于解决此类问题。

4) 飞机维修路径规划鲁棒性研究:随着航线网络规模逐渐扩大,由于不确定因素(如天气变化、机场拥堵等)导致的延误航班数量也随之增加,航班延误导致航空业年收入损失超过63亿美元<sup>[46]</sup>,同时也会给乘客带来不便和经济损失。为了降低航班延误风险,增强飞机维修路径规划对航班延误或取消的抗干扰、稳健的能力,部分研究人员将研究重心放在飞机维修路径规划鲁棒性研究上。总结相关研究内容可以发现,研究者们主要通过以下四种方式提高飞机维修路径的鲁棒性:

① 缓冲时间分配<sup>[35,47]</sup>(buffer time allocation):为飞机分配足够的缓冲时间以“吸收”延误,降低航班延误风险。

② 航班起飞时刻调整<sup>[34,48]</sup>(departure retiming approach):调整航班起飞时刻,并保证起飞时刻在规定的时间内。

③ 基于场景的随机规划<sup>[49]</sup>(scenario-based stochastic programming):根据航空公司的历史数据生成一定数量的场景,基于这些场景预测未来可能发生的中断,并以此生成延误风险最低的飞机维修路径。

④ 中断恢复<sup>[29,50-51]</sup>(interruption recovery):当发生航班中断时,通过交换飞机(尾号)、飞机改

道、航班取消等方式重新为飞机安排飞行任务,使 中断得到恢复。

表 3 频次排名前 10 关键词  
Table 3 Top 10 keywords by frequency

序号	CNKI				WOS			
	关键词	词频/次	中心度	年份	关键词	词频/次	中心度	年份
1	飞机排班	38	0.73	2002	aircraft maintenance routing (飞机维修路径)	73	0.11	2001
2	航班环	12	0.12	2006	model (模型)	57	0.04	2006
3	遗传算法	11	0.10	2008	fleet assignment (机型分配)	40	0.10	2001
4	列生成算法	11	0.18	2007	Benders decomposition (Benders 分解)	34	0.04	2005
5	多目标优化	7	0.08	2012	optimization (优化)	28	0.20	2002
6	启发式算法	7	0.07	2006	algorithm (算法)	25	0.21	2006
7	航班节	7	0.19	2001	robustness (鲁棒性)	24	0.04	2006
8	约束编程	7	0.06	2010	column generation (列生成)	23	0.09	2004
9	优化模型	5	0.06	2004	maintenance (维修)	21	0.08	2001
10	飞机路径	5	0.10	2012	crew scheduling (机组调度)	18	0.08	2005

### 3.2 研究前沿分析

突现词是指在某个时间段内词频突然明显增多的关键词,能够反映相关领域的研究前沿动态。因 WOS 文献数量较多且研究较为前沿,故只对 WOS 文献做关键词突现分析(如图 11 所示),红色线条表示关键词的突现时期。可以看出:“robustness(鲁棒性)”“ant colony optimization(蚁群优化算法)”“optimization(优化)”“model(模型)”“heuristic algorithm(启发式算法)”等关键词在近几年突现明显,由此总结出三方面研究前沿:

1) 在飞机维修路径规划问题的研究过程中,人们提出了相应的整数规划模型、混合整数规划模型、非线性规划模型。随着航空业规模的不断扩大及航空公司之间竞争的加剧,会有更多或更为复杂的优化目标和约束条件需要考虑。在以往飞机维修路径规划研究中,很少有研究模型同时考虑多种飞机飞行限制(飞行天数、飞行时间、起落架次等)和维修资源可用性约束(机库容量、维修人员数量、零部件库存等)。因此,对于飞机维修路径规划模型的优化及创新仍将是飞机维修路径规划研究前沿之一。

2) 航空运营过程中发生的不确定性事件可能会影响机队飞机的调度,导致航班任务中断或运营成本增加,可能需要频繁、快速地对飞机进行维修路径规划。因此将快速高效地解决算法应用到飞机维修路径规划问题中具有重要的现实意义。一些大型航空公司的飞机数量及航班数量是巨大的,对于这类大规模实例来说,精确算法难以在合理的时间内给出满意的解决方案,故很多研究人员利用启发式算法或混合启发式的方法来解决飞机维修路径规划问题,其优点在于可以在合理的时间内得到高质量的解。即对于飞机维修路径规划问题的启发式求解算法的改进、创新与应用是该研究的前沿之一。

3) “robustness(鲁棒性)”突现强度最大,这表明近几年对于飞机维修路径规划的鲁棒性研究较为重视。随着航空业的发展,航空公司运营调度过程中的不确定因素逐渐增加,导致航班延误率升高,航班延误会对航空公司造成巨大的经济损失,一个稳健且抗干扰能力强的飞行路径显得格外重要。因此,对飞机维修路径规划鲁棒性方法的改进与创新将会是未来研究的重点与热点。

### Top 20 Keywords with the Strongest Citation Bursts

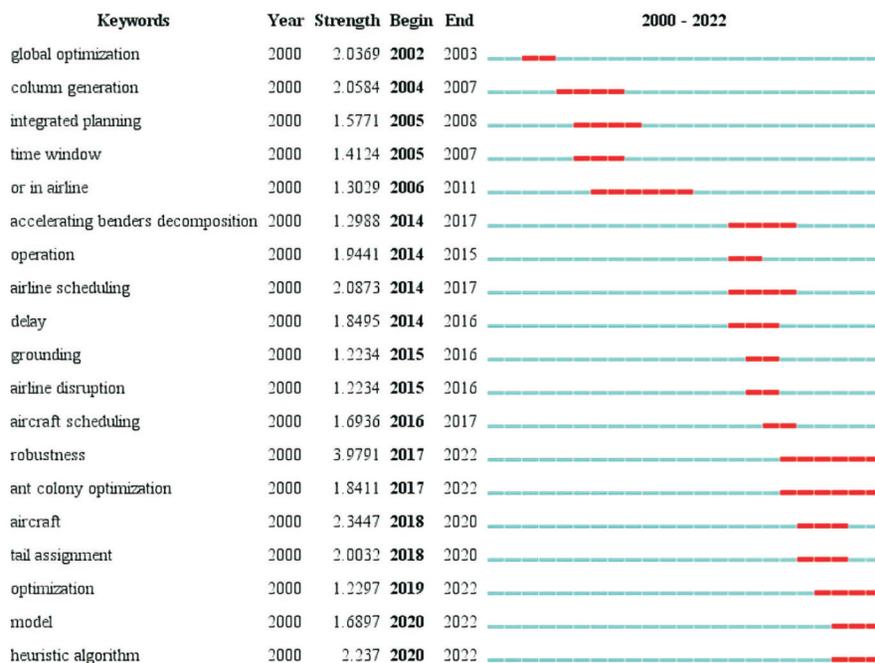


图 11 WOS文献关键词突现图谱

Fig. 11 The map of WOS burst terms

## 4 结 论

1) 关于飞机维修路径规划研究的外文文献较多且研究较充分,近三年外文文献发文量在9篇/年以上,研究热度较高。中文文献发文量较少,研究不足,近三年发文量在1~2篇/年,研究热度较低。国内飞机维修路径规划研究成果不多,由于国内外航线网络的不同,国外研究成果不完全适用于我国,建议加强飞机维修路径规划研究,提高研究热度,提出适合我国航空公司运营模式的飞机维修路径规划方法,提高航空公司运营效率,促进我国航空运输业的发展。

2) 外文文献发文机构间合作关系较多且具有较大的合作机构网络规模,中文文献发文机构主要以中国民航大学和南京航空航天大学为主。当前国内飞机维修路径规划研究机构之间的合作关系较为分散,机构间缺乏合作关系,建议加强研究机构之间的科研合作,促进航空公司与高校之间交流协作,组建合作团队,共同推进国内飞机维修路径规划研究。

3) 中文文献的研究热点聚焦在模型与算法上,外文文献的研究热点除模型与算法外,还包括集成相关问题以及飞机维修路径鲁棒性研究等。

研究前沿主要集中在飞机维修路径规划模型的创新、优化算法的改进与创新、飞机维修路径规划鲁棒性研究。目前我国在飞机维修路径规划的相关集成问题研究成果非常少,考虑到多问题分阶段解决导致的次优性,建议加强集成问题研究,实现全局化决策,降低航空公司运营成本。随着我国民航业数字化、智能化发展的不断深入,建议加强不确定性环境下的飞机维修路径规划研究,利用机器学习以及大数据等技术来应对航空运输过程中的不确定环境,充分结合航空公司与机场的运营数据,在不同因素导致的实时决策场景中提供智能决策。

### 参 考 文 献

- [1] CUI R Y, DONG X Y, LIN Y F. Models for aircraft maintenance routing problem with consideration of remaining time and robustness [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 137: 106045.
- [2] CHAOVALITWONGSE W A. Optimization and logistics challenges in the enterprise [M]. Berlin: Springer, 2009: 327-348.
- [3] BULBUL K G, REFAIL K. Augmented lagrangian based hybrid subgradient method for solving aircraft maintenance routing problem [J]. Computers & Operations Research, 2021, 132: 105294.
- [4] FEO T A, BARD J F. Flight scheduling and maintenance

- base planning [J]. *Management Science*, 1989, 35(12): 1415-1432.
- [5] SRIRAM C, HAGHANI A. An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment [J]. *Transportation Research Part A*, 2003, 37(1): 29-48.
- [6] HAOUARI M, SHAO S Z, SHERALI H D. A lifted compact formulation for the daily aircraft maintenance routing problem [J]. *Transportation Science*, 2013, 47(4): 508-525.
- [7] LIANG Z, CHAOVALITWONGSE W A, HUANG H C, et al. On a new rotational tour network model for aircraft maintenance routing problem [J]. *Transportation Science*, 2011, 45(1): 109-120.
- [8] LIANG Z, CHAOVALITWONGSE W A. A network-based model for the integrated weekly aircraft maintenance routing and fleet assignment problem [J]. *Transportation Science*, 2013, 47(4): 493-507.
- [9] ELTOUKHY A E E, CHAN F T S, CHUNG S H, et al. Heuristic approaches for operational aircraft maintenance routing problem with maximum flying hours and man-power availability considerations [J]. *Industrial Management & Data Systems*, 2017, 117(10): 2142-2170.
- [10] RUAN J H, WANG Z X, CHAN F T S, et al. A reinforcement learning-based algorithm for the aircraft maintenance routing problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 169: 114399.
- [11] SALTZMAN R M, STERN H I. The multi-day aircraft maintenance routing problem [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2022, 102: 102224.
- [12] 孙宏, 杜文. 航空公司飞机排班问题的排序模型及算法 [J]. *系统工程理论方法应用*, 2002(3): 244-247.  
SUN Hong, DU Wen. Fixed job scheduling model and algorithm of airline aircraft dispatching problem [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2002(3): 244-247. (in Chinese)
- [13] 孙宏, 杜文. 飞机排班数学规划模型 [J]. *交通运输工程学报*, 2004(3): 117-120.  
SUN Hong, DU Wen. Mathematical programming model of aircraft assignment [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2004(3): 117-120. (in Chinese)
- [14] 肖东喜, 朱金福. 飞机排班中航班环的动态构建方法 [J]. *系统工程*, 2007(11): 19-25.  
XIAO Dongxi, ZHU Jinfu. Flight-loops dynamic construction method in aircraft scheduling [J]. *Systems Engineering*, 2007(11): 19-25. (in Chinese)
- [15] 李耀华, 谭娜, 郝贵和. 飞机排班航班串编制模型及算法研究 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 160(3): 612-615.  
LI Yaohua, TAN Na, HAO Guihe. Study on flight string model and algorithm in flight scheduling [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 160(3): 612-615. (in Chinese)
- [16] 李耀华, 谭娜. 基于遗传算法的飞机一体化排班优化方法 [J]. *控制工程*, 2017, 24(2): 435-440.  
LI Yaohua, TAN Na. Optimization method of aircraft integrated planning based on genetic algorithm [J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(2): 435-440. (in Chinese)
- [17] 吕宗磊, 王舳. 面向正常性的飞机排班优化算法 [J]. *计算机工程与设计*, 2021, 42(3): 890-895.  
LYU Zonglei, WANG Zhu. Aircraft scheduling algorithm aiming at flight punctual rate [J]. *Computer Engineering and Design*, 2021, 42(3): 890-895. (in Chinese)
- [18] 郭润夏, 王一府. 以维修间隔利用率最优为目标的飞机派遣方法 [J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(9): 1985-1999.  
GUO Runxia, WANG Yifu. Aircraft assignment method for optimal utilization of maintenance intervals [J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(9): 1985-1999. (in Chinese)
- [19] CHEN C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2005, 57(3): 359-377.
- [20] 朱星辉, 朱金福, 高强. 基于动态列生成算法的飞机排班问题研究 [J]. *数学的实践与认识*, 2014, 44(19): 23-30.  
ZHU Xinghui, ZHU Jinfu, GAO Qiang. Aircraft scheduling problem based on dynamic column generation algorithms [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2014, 44(19): 23-30. (in Chinese)
- [21] 吴东华, 夏洪山. 基于航空公司成本最小化的飞机排班问题模型与算法 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(1): 109-116, 137.  
WU Donghua, XIA Hongshan. Model and algorithm for fleet assignment problem based on airlines cost minimization [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(1): 109-116, 137. (in Chinese)
- [22] 贾宝惠, 逯艳华, 李耀华. 基于交叉粒子群算法的飞机指派问题研究 [J]. *中国民航大学学报*, 2015, 33(4): 6-9.  
JIA Baohui, LU Yanhua, LI Yaohua. Research on aircraft assignment based on cross particle swarm algorithm [J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2015, 33(4): 6-9. (in Chinese)
- [23] 周琨, 夏洪山. 基于协同多任务分配的飞机排班模型与算法 [J]. *航空学报*, 2011, 32(12): 2293-2302.  
ZHOU Kun, XIA Hongshan. Optimization model and algorithm for aircraft scheduling problem based on cooperative multi-task assignment [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(12): 2293-2302. (in Chinese)
- [24] 刘婧, 贾宝惠. 基于启发式算法的飞机指派优化模型及算法 [J]. *系统仿真技术*, 2016, 12(2): 79-82, 94.  
LIU Jing, JIA Baohui. Study on optimization model and algorithm of flight assignment based on heuristic algorithm [J]. *System Simulation Technology*, 2016, 12(2): 79-82, 94. (in Chinese)
- [25] 蓝伯雄, 王童妹. 飞机维修短期计划模型及其算法研究 [J]. *运筹与管理*, 2016, 25(3): 1-10.  
LAN Boxiong, WANG Tongshu. Aircrafts maintenance routing model and algorithm [J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(3): 1-10. (in Chinese)
- [26] 朱星辉, 吴薇薇, 戚彦龙. 基于延误传播的飞机排班一体化鲁棒优化模型 [J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50(2): 375-381.  
ZHU Xinghui, WU Weiwei, QI Yanlong. Robust optimiza-

- tion model for integrated aircraft scheduling based on delay propagation [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(2): 375-381. (in Chinese)
- [27] 李耀华, 王磊. 基于改进遗传算法的飞机排班优化方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(3): 620-626.  
LI Yaohua, WANG Lei. Study on aircraft scheduling optimization based on improved genetic algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(3): 620-626. (in Chinese)
- [28] BARNHART C, BOLAND N L, CLARKE L W, et al. Flight string models for aircraft fleet and routing [J]. *Transportation Science*, 1998, 32(3): 208-220.
- [29] FROYLAND G, MAHER S, WU C. The recoverable robust tail assignment problem [J]. *Transportation Science*, 2014, 48(3): 351-372.
- [30] BABAR A, KAMAL K, USMAN M, et al. Optimization of aircraft maintenance routing using uninformed and informed search algorithms [J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2019, 8(1): 141-145.
- [31] BARRETO E A P, ABRAHAO F T M T M, VIANNA W O L. Aircraft routing problem model for fractional fleets using fault prognostics [J]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2021, 27(3): 517-536.
- [32] BASDERE M, BILGE U. Operational aircraft maintenance routing problem with remaining time consideration[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(1): 315-328.
- [33] AL-THANI N A, AHMED M B, HAOUARI M. A model and optimization-based heuristic for the operational aircraft maintenance routing problem [J]. *Transportation Research Part C*, 2016, 72: 29-44.
- [34] LAN S, CLARKE J P, BRANHART C. Planning for robust airline operations: optimizing aircraft routings and flight departure times to minimize passenger disruptions[J]. *Transportation Science*, 2006, 40(1): 15-28.
- [35] LIANG Z, FENG Y, ZHANG X N, et al. Robust weekly aircraft maintenance routing problem and the extension to the tail assignment problem [J]. *Transportation Research Part B*, 2015, 78: 238-259.
- [36] MERCIER A, CORDEAU J F, FRANCOIS S. A computational study of Benders decomposition for the integrated aircraft routing and crew scheduling problem [J]. *Computers and Operations Research*, 2003, 32(6): 1451-1476.
- [37] WEN X, SUN X T, MA H L, et al. A column generation approach for operational flight scheduling and aircraft maintenance routing [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2022, 105: 102270.
- [38] ESMAEILZADEH H, KOMIJAN A R, KAZEMIPOOR H, et al. A bi-objective aircraft maintenance routing problem based on flying hours to efficient use of available fleet [J]. *Journal of Facilities Management*, 2022, 22(2): 325-344.
- [39] SHERALI H D, BAE K H, HAOUARI M. An integrated approach for airline flight selection and timing, fleet assignment, and aircraft routing [J]. *Transportation Science*, 2013, 47(4): 455-476.
- [40] GURKAN H, GUREL S, AKTURK M S. An integrated approach for airline scheduling, aircraft fleet and routing with cruise speed control[J]. *Transportation Research Part C*, 2016, 68: 38-57.
- [41] ZEGHAL F M, HAOUARI M, SHERALI H D, et al. Flexible aircraft fleet and routing at "Tunis Air"[J]. *The Journal of the Operational Research Society*, 2011, 62(2): 368-380.
- [42] MASOUMEH M, KOMIJAN A R, ALIREZA K. An integrated model for aircraft routing and crew scheduling: Lagrangian relaxation and metaheuristic algorithm[J]. *WPOM-Working Papers on Operations Management*, 2020, 11(1): 25-38.
- [43] MOHAMED N F, ZAINUDDIN Z M, SALHI S, et al. The integrated aircraft routing and crew pairing problem: ILP based formulations [J]. *Journal of Teknolgi*, 2016, 78(5/6): 79-85.
- [44] SHAO S Z, SHERALI H D, HAOUARI M. A novel model and decomposition approach for the Integrated airline fleet assignment, aircraft routing, and crew pairing problem [J]. *Transportation Science*, 2015, 51(1): 1-17.
- [45] MOHAMED B A, MARYIA H, MAGNUS H L, et al. A matheuristic for the robust integrated airline fleet assignment, aircraft routing, and crew pairing problem [J]. *Computers and Operations Research*, 2022, 137: 10551.
- [46] KENAN N, JEBALI A, DIABAT A. The integrated aircraft routing problem with optional flights and delay considerations [J]. *Transportation Research Part E*, 2018, 118: 355-375.
- [47] JAMILI A. A robust mathematical model and heuristic algorithms for integrated aircraft routing and scheduling, with consideration of fleet assignment problem [J]. *Air Transport Management*, 2017, 58: 21-30.
- [48] AHMED M B, GHROUBI W, HAOUARI M, et al. A hybrid optimization-simulation approach for robust weekly aircraft routing and retiming [J]. *Transportation Research Part C*, 2017, 84: 1-20.
- [49] ELTOUKHY A E E, WANG Z X, CHAN F T S, et al. Joint optimization using a leader-follower Stackelberg game for coordinated configuration of stochastic operational aircraft maintenance routing and maintenance staffing [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 125: 46-68.
- [50] HU Y Z, XU B G, BARD J F, et al. Optimization of multi-fleet aircraft routing considering passenger transiting under airline disruption [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 80: 132-144.
- [51] KAMMOUN M A, REZG N. An efficient hybrid approach for resolving the aircraft routing and rescheduling problem [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2018, 71: 73-87.