

文章编号: 1674-8190(2021)01-048-08

基于 SNA 的航空发动机空中停车文献分析

徐吉辉, 刘宇, 陈玉金

(空军工程大学大学 装备管理与无人机工程学院, 西安 710038)

摘要: 由于发动机故障引起的空中停车存在高危险性和不确定性, 必须做好防范和处置。在 CNKI 数据库中以“空中停车”关键词检索相关研究文献, 应用 SATI3.2 软件对检索文献数据进行数据预处理, 获取高频关键词并构建共词矩阵; 应用 Ucinet6.0 软件对关键词进行社会网络分析和聚类分析。结果表明: 航空发动机空中停车研究领域热点集中于管理、维修、人员及企业运营等方面; 民用航空与军用航空在该领域的研究重点存在差异; 非常规类飞机的空中停车受到关注, 无人机空中停车研究将成为该领域的热点问题; 军用飞机空中停车研究成果相比民用飞机存在一定差距, 随着军用飞机适航工作的开展和推进, 军用飞机空中停车研究将在该领域占据重要地位。

关键词: 航空发动机; 空中停车; 社会网络分析; 聚类分析; 共词分析; 关键词

中图分类号: V263.6; G353.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis on Literature of Aero-engine in Flight Shut-down Based on Social Network Analysis

XU Jihui, LIU Yu, CHEN Yujin

(College of Equipment Management and UAV Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The in flight shut-down (IFSD) of the aero-engine caused by engine failure has high risk and uncertainty, so it is necessary to do a good job of prevention and disposal. Aiming at the problem of IFSD, the social network analysis (SNA) method is used to make a quantitative analysis of the research status of the aero-engine IFSD in China. In the CNKI database, IFSD is used as parallel keywords to search relevant research literature. The SATI3.2 software is used to preprocess the literature data to obtain the high-frequency keywords and construct the co-words matrix. The Ucinet6.0 software is used to conduct the social network analysis (SNA) and clustering analysis for key words. The results show that the hotspot of aero-engine IFSD research study focuses on the aspects of management, maintenance, staff and enterprise operation; the research emphasis of civil aviation and military aviation is different; the IFSD of unconventional aircraft is focused, and unmanned aerial vehicle IFSD research becomes the hot issue of this field; the research results of military aircraft and civil aircraft IFSD are different, with the development and advance of military aircraft airworthiness, the IFSD of military aircraft will take up the important position of this field.

Key words: aero-engine; in flight shut-down; social network analysis; clustering analysis; co-words analysis; key words

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-05-21

基金项目: 空军工程大学校长基金

通信作者: 刘宇, liuyu920101@126.com

引用格式: 徐吉辉, 刘宇, 陈玉金. 基于 SNA 的航空发动机空中停车文献分析[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 48-55.

XU Jihui, LIU Yu, CHEN Yujin. Analysis on literature of aero-engine in flight shut-down based on social network analysis[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 48-55. (in Chinese)

0 引言

航空发动机作为飞机“心脏”和动力之源,在保证安全飞行中具有举足轻重的地位。一旦发生故障,空中意外“抛锚”,轻则失去动力,重则机毁人亡。2015年9月19日晚,沈空航空兵某团在组织对抗空战训练过程中,一架某型单发战机突发空中停车故障,飞行员在发生故障到完成高度 351 m 惊险一跳的 198 s 内两次尝试空中启动、三次调整航向,但仍未能挽救战机,导致发生二等飞行事故。

由于航空发动机工作条件严酷,具有高温、高压、大流场、高转速的特点,导致故障易发、多发。发动机空中停车(以下简称空停)是对飞行安全影响最为显著的故障事件之一,被民航界视为飞行事故征候的重要考核指标^[1]。空停事件主要指飞行过程中发动机出现非指令性停车,属于发动机突发失效事件^[2],其主要诱因可分为发动机自身故障、外界干扰和飞行人员误操作等。随着航空发动机技术的发展成熟,以及维修理念变革和发动机管理经验的不断积累,能够保证每 1 000 fh 的空停率降低至 0.006 以下,但由于飞行总小时数的迅猛增长,空停事件的发生量仍达到每年近百起^[2]。

在航空安全研究领域,空停一直是研究的热点。J. Miyano^[3]针对 XF-2 单发飞机的空中启动进行试验研究,结果表明该机型空中启动点火时间、推力恢复时间和最大废气温度符合相关标准要求,验证了其在空中停车情况下再启动的安全性;P. T. Roger 等^[4]设计出针对传感器系统故障的自动化诊断系统,能够对降低空中停车率起到良好作用;黄郁华^[5]对空中停车的故障种类及原因进行了研究,并从适航审定和发动机状态监控故障诊断方面提出预防措施;张永^[1]从发动机工程管理体系建设的角度对预防发动机空中停车进行研究,在对空停原因分析的基础上,对发动机工程管理、航空公司运营管理、一线生产部门和飞行机组分别提出具

体工作内容,具有实际指导意义;孙超等^[6]利用 Bow-tie 模型对空停事故进行分析,以供油系统故障为主要研究对象,找到薄弱环节的根本原因及可能导致的后果,达到降低事故发生概率、减少事故发生造成损失的目的;张辛^[7]以川航发动机工程管理等为例,初创新风险分级和动态管控方法结合的发动机空停风险评价和动态管控体系,有效防范空停风险,降低空停率;李书明等^[8]利用 CBR-模糊综合评判法对空中停车率进行预测研究,在充分利用数据信息的基础上实现航空发动机设计初期的空中停车率预测。以上文献均是运用特定的方法选取专题对航空发动机空停问题进行研究,但对发动机空停开展全维度、综合性分析的文献还不多见。

本文从大数据角度开展文献研究,应用 SATI3.2 软件^[9]对文献关键词矩阵化处理,应用 Ucinet6.0 软件进行社会网络分析和聚类分析,通过社会密度分析、中心性分析、聚类分析以及核心—边缘等分析方法,对航空发动机空停研究领域内的主题进行分类,并对研究现状及发展趋势进行深度挖掘和预测分析。

1 数据来源及研究方法

本文以中国知网(CNKI.net)——高级检索路径下有关航空发动机空中停车研究的文献作为统计数据来源,以主题“空中停车”为检索词,不限统计年限,截至日期为 2020 年 4 月 10 日,共检索出文献 162 篇,经过筛选甄别,剔除与研究主题无关的文献资料,共得到 157 篇研究文献,以此作为研究数据。选取文献发表年限统计情况如图 1 所示,可以看出:文献总体分布呈波动上升趋势,在 1994 年之前研究尚处于起步阶段,成果相对较少;随着空停发生频次增加,相关研究日益受到关注,研究成果不断涌现。由于部分文献以具体空停事件为主要研究内容,因此文献数量与空停事件的发生存在相对明显的相关性。

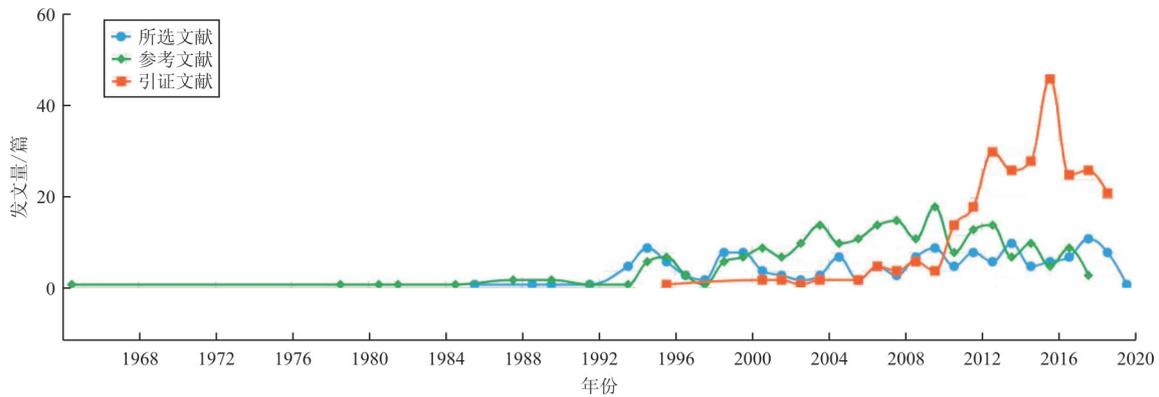


图 1 文献发表年限统计

Fig. 1 Statistics of published literature by years

应用 SATI3.2 软件对选取文献的关键词进行频次统计分析,并按频次进行逆序排列,选取前 50 位的关键词进行社会网络图分析,其中前 30 位高频关键词词频统计结果如表 1 所示。

表 1 空中停车文献高频关键词

Table 1 High frequency keywords of IFSD

关键词	频次	关键词	频次
空中停车	86	飞行试验	5
发动机	53	无人机	4
航空发动机	14	双发飞机	4
飞机	11	预防措施	4
可靠性	10	机务维修	4
航空公司	8	直升机	4
飞机发动机	8	涡扇发动机	4
航空运输企业	7	飞行员	4
波音	7	状态监控	4
机队	7	双发延程飞行	4
故障	6	维修成本	4
故障分析	6	压气机	4
飞行人员	5	飞行	3
试飞	5	分析	3
普惠公司	5	飞行安全	3

在词频分析的基础上,根据共词分析原理构建共词矩阵,应用 Ucinet6.0 软件的变换—对分功能

将共词矩阵转化为 0-1 共词矩阵。利用 0-1 共词矩阵开展航空发动机空停领域研究文献关键词的社会密度分析、中心性分析、凝聚子群分析以及核心—边缘分析,进而分析本研究领域的研究热点和发展趋势。

2 关键词分析

在得到 0-1 共词矩阵基础上,应用 Ucinet6.0 软件的可视化—NetDraw 功能绘制关键词社会网络分析图谱,如图 2 所示,其中方框代表文献关键词,且方框越大表示其中心性和关键性越强;方框间的连线表示关键词之间的关联性,且连线越粗表示关联性越强;双线表示关联词出现在同一篇文章。

2.1 社会密度及中心性分析

社会网络分析中的网络密度指的是网络中各节点之间联系的紧密度,可通过网络图中实际存在的关系数与理论上最多可能存在的关系数相比得到,其取值范围为 $[0,1]$,且取值越大代表节点联系越紧密^[10]。根据 Ucinet6.0 软件计算出的网络密度值结果为 0.189 4,属于密度低的网络图,表明发动机空中停车研究领域的关键词之间的联系不密切,说明该领域的研究内容广泛,但研究深度尚有待加强。

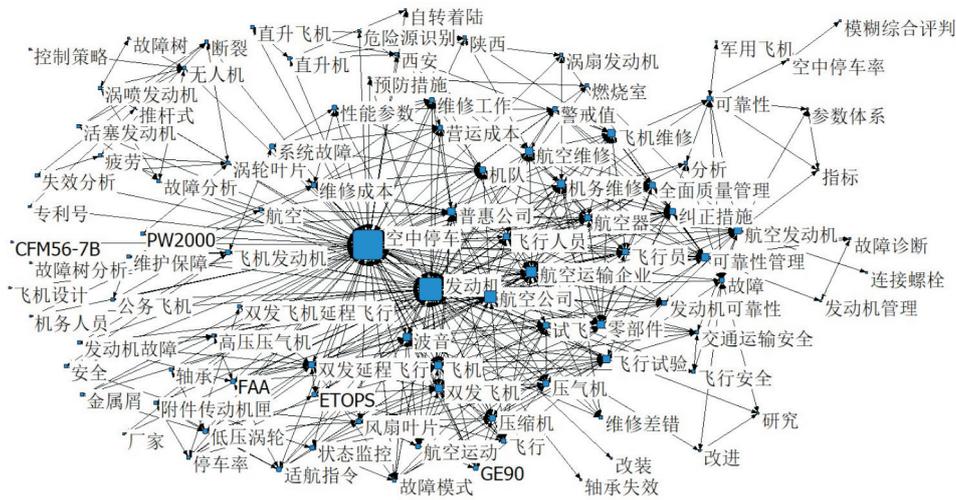


图 2 关键词社会网络分析图

Fig. 2 Social network analysis of key words

中心性是度量整个网络中心化程度的重要指标,越处于中心位置的节点对网络的影响力越大,网络中心性可以分为点度中心度、接近中心度和中间中心度三个指标。在关键词网络图中,处于中心位置的关键词对该研究领域的影响程度更大,更有

可能成为研究重点,因此中心性分析方法也被广泛应用于研究趋势预测。应用 Ucinet6.0 软件分析得到的网络中心性分析结果,如表 2 所示,该表以点度中心度、中间中心度、接近中心度、特征根向量为顺序参考对关键词进行排列。

表 2 中心性分析结果

Table 2 Results of centrality analysis

编号	关键词	点度中心度	中间中心度	接近中心度	特征根向量	编号	关键词	点度中心度	中间中心度	接近中心度	特征根向量
1	空中停车	46.000	571.860	94.231	0.378	11	故障	7.000	4.400	53.261	0.082
2	发动机	38.000	233.270	79.032	0.351	50	警戒值	7.000	1.333	52.128	0.106
6	航空公司	20.000	27.571	61.250	0.252	30	飞行安全	7.000	1.067	52.688	0.095
8	航空运输企业	20.000	27.571	61.250	0.252	33	交通运输安全	7.000	1.067	52.688	0.095
18	双发飞机	14.000	8.621	56.322	0.174	5	可靠性	6.000	48.667	52.688	0.070
3	航空发动机	13.000	61.236	56.977	0.131	26	维修成本	5.000	0.667	51.042	0.077
4	飞机	13.000	13.986	59.184	0.144	42	停车率	5.000	0.667	51.042	0.076
15	普惠公司	13.000	11.986	56.322	0.161	35	低压涡轮	5.000	0.667	51.042	0.069
16	飞行试验	13.000	10.119	56.322	0.140	24	状态监控	5.000	0.500	51.042	0.075
13	飞行人员	13.000	4.250	55.682	0.187	29	分析	5.000	0.400	51.579	0.071
14	试飞	12.000	10.119	55.682	0.132	17	无人机	4.000	23.500	51.042	0.032
20	机务维修	12.000	4.833	55.056	0.176	49	涡喷发动机	4.000	23.500	51.042	0.032
9	波音	12.000	3.888	55.056	0.164	12	故障分析	4.000	1.500	51.042	0.055
23	飞行员	12.000	1.750	55.056	0.183	34	涡轮叶片	4.000	1.000	50.515	0.064
36	航空器	12.000	1.400	55.056	0.181	47	附件传动机匣	4.000	0.333	50.515	0.060
41	飞机维修	12.000	1.000	55.056	0.180	7	飞机发动机	4.000	0.000	50.515	0.074
37	可靠性管理	12.000	1.000	55.056	0.180	48	轴承	4.000	0.000	50.515	0.065
45	全面质量管理	12.000	1.000	55.056	0.180	43	自转着陆	3.000	0.500	50.000	0.037
38	航空维修	12.000	1.000	55.056	0.180	22	涡扇发动机	3.000	0.333	50.000	0.044
27	压气机	9.000	3.088	53.846	0.114	19	预防措施	2.000	0.000	49.495	0.050
25	双发延程飞行	9.000	1.917	53.261	0.133	31	断裂	2.000	0.000	49.495	0.031
10	机队	8.000	2.367	53.261	0.123	21	直升机	2.000	0.000	49.495	0.029
39	压缩机	8.000	1.236	52.688	0.105	40	故障树	2.000	0.000	34.266	0.004
32	航空运动	8.000	0.417	52.688	0.127	44	连接螺栓	1.000	0.000	36.567	0.009
28	飞行	8.000	0.417	52.688	0.127	46	军用飞机	1.000	0.000	34.752	0.005

对表 2 参数进行分析如下:

(1) 点度中心度表示节点在网络中的联结数目,表征节点在网络中所处地位^[11],中心度越高的节点在网络中越处于核心地位,对其他节点的影响程度越大。排除“空中停车”及其他与航空发动机、飞机相关的关键词影响后,航空公司、航空运输企业、双发飞机、普惠公司、飞行试验、飞行人员、试飞、机务维修、波音、飞行员、飞机维修、可靠性管理、全面质量管理、航空维修等关键词的点度中心度较高,说明它们相对处于网络中心位置,对整体网络的构成起到核心关键作用,确保网络中各节点的相互连接,这表明以上关键词在航空发动机空中停车研究领域受到的关注度高。通过对相关文献进行跟踪分析可以看出,航空公司与航空运输企业在相应文献中同时出现的概率大,文献主要内容集中于双发延程飞行、减少维修差错、提升发动机可靠性及建设发动机工程管理体系^[12]。航空公司和航空运输企业作为航空发动机的使用维护单位,空停事件对其造成的经济损失巨大,因此对空中停车故障的关注度较高。双发飞机成为关键节点的原因在于双发飞机延程飞行的研究,双发飞机延程飞行在型号设计方面审定主要是依据发动机的可靠性、飞机系统设计和可靠性、有效性验证飞行进行的,而在发动机可靠性衡量指标上选取的是空中停车率^[13]。例如,120 min 的延程飞行其发动机需要满足空中停车率小于 5×10^{-5} 次/飞行小时;180 min 的延程飞行需要满足空中停车率小于 2×10^{-5} 次/飞行小时。飞行人员作为直接参与飞行的机组人员,包括驾驶员(飞行员)、副驾驶、飞行工程师、领航员、通信员等,受到空停事件的直接影响,也是处置空停事件的首要参与人员。空停事件发生后,飞行员的正确处置是保证人员和航空器安全的首要条件。发动机的空中启动能力是飞行安全的重要保障,根据发动机定型试飞要求,飞行试验时需要发动机空中热启动和冷启动能力进行验证^[14]。普惠公司作为世界上著名的航空发动机供应商之一,为美国空军和民航提供大量涡喷和涡扇发动机。通过文献分析可以看出,国内文献研究内容主要集中于对普惠公司生产的经典型号发

动机的防空停设计^[15-16]及提高可靠性设计^[17]进行研究分析。波音公司作为世界上最大的民用和军用飞机制造商之一,对航空发动机的使用需求是巨大的,为了确保生产飞机的可靠性和安全性,波音公司对空停更加关注和重视^[17-19]。飞机维修、机务维修及航空维修都是为了保证飞行安全而对飞机及其技术装备进行一系列维护和修理的行为,这也是保持发动机良好工作状态,避免发生空停事件的前提条件^[20]。可靠性管理和全面质量管理是从发动机全寿命周期角度出发,以可靠性和质量管理为重要关注点,避免空停事件的发生^[21-23]。

(2) 中间中心度表示节点的媒介程度,即节点在网络中的中继联结作用^[11]。在排除搜索关键词的影响后,排序相对靠前的关键词分别为:可靠性、航空公司、航空运输企业、涡喷发动机、无人机、普惠公司、飞行试验、试飞、双发飞机、机务维修、故障、飞行人员、波音、压气机等。可以看出绝大部分关键词与点度中心度分析结果相同,表明这些关键词不仅作为网络的核心组成,也是连接网络整体的重要桥梁,在网络中发挥重要作用。新增加的关键词主要在网络中发挥连接作用,保证网络的整体性,此类关键词主要有:可靠性、涡喷发动机、无人机、故障、压气机等。相反,中间中心度为 0 的节点则代表其在网络中必须依赖其内部的某个节点来与其他节点发生联系。根据计算结果,此类关键词主要有:故障树、预防措施、直升机、军用飞机、轴承、断裂、连接螺栓。综合此类关键词可以看出,其与空中停车的联系较为紧密,但从分类上看主要是定义飞机类型、具体分析方法及确定的失效部位和模式,在发动机空停研究领域缺乏广泛性和代表性,导致其在网络中处于较边缘化的位置,无法起到明显媒介作用。

(3) 接近中心度表示节点不受其他节点影响的测度,即相应节点与所有其他节点的接近性程度^[11]。排序相对靠前的关键词分别是:航空公司、航空运输企业、飞行试验、普惠公司、双发飞机、飞行人员、试飞、飞机维修、波音、飞行员、可靠性管理、机务维修、全面质量管理、航空维修等。可以看出绝大部分关键词与点度中心度和中间中心度分

析结果相同,尤其是与点度中心度关键词全部重合。上述核心关键词在整体网络中与自身之外的其他所有节点接近性程度高,与其他关键词之间的联系路径最短,处于网络中心位置。

(4) 特征根向量是刻画节点中心度以及网络中心势的一种标准化测度,能够在网络结构整体上确定出最核心的节点,其取值越大说明节点在网络中越靠近中心位置^[8]。排序相对靠前的关键词分别是:航空公司、航空运输企业、飞行人员、飞行员、可靠性管理、航空维修、飞机维修、全面质量管理、机务维修、双发飞机、波音、普惠公司、飞行试验、双发延程飞行、试飞等。与前述点度中心度、中间中心度和接近中心度分析结果相比较,大部分关键词均出现重复。这说明上述关键词在网络中属于较为核心的关键词,相比而言更接近中心位置。

2.2 凝聚子群分析

在社会网络分析中存在某些联系紧密以至于结合成次级团体的节点,这种团体被称为凝聚子群。凝聚子群分析就是分析网络中存在凝聚子群的数目、子群内部各节点之间关系特点及子群之间关系特点等。通过 Ucinet 软件中的 CONCOR 法进行凝聚子群分析,利用树形图表达各个位置之间的结构对等性程度,并且标记出各个位置拥有的网络成员,输出结果如图 3 所示,其中纵向项目为关键词及其序号,横向数字为聚类级别。

从图 3 可以看出:3 级聚类分析结果共 8 个凝聚子群,剔除与空停研究关联性较低的分组后剩下 6 个凝聚子群,分别为:①航空运输企业、航空公司、机队;②航空器、全面质量管理、飞机维修、飞行员、可靠性管理、飞行人员、航空维修、警戒值、机务维修、飞机发动机;③军用飞机、故障、分析、航空发动机、可靠性、链接螺栓;④普惠公司、双发飞机、停车率、压气机、飞机、飞行安全、试飞、波音、飞行试验、状态监控、双发延程飞行、压缩机、交通运输安全;⑤故障树、故障分析、涡喷发动机、无人机;⑥涡扇发动机、涡轮叶片、断裂、预防措施、直升机、附件传动机匣、轴承、自传着陆、维修成本。在 2 级聚类分析结果中总共有 3 个凝聚子群,分别为{①②}、{③④}、{⑤⑥}。

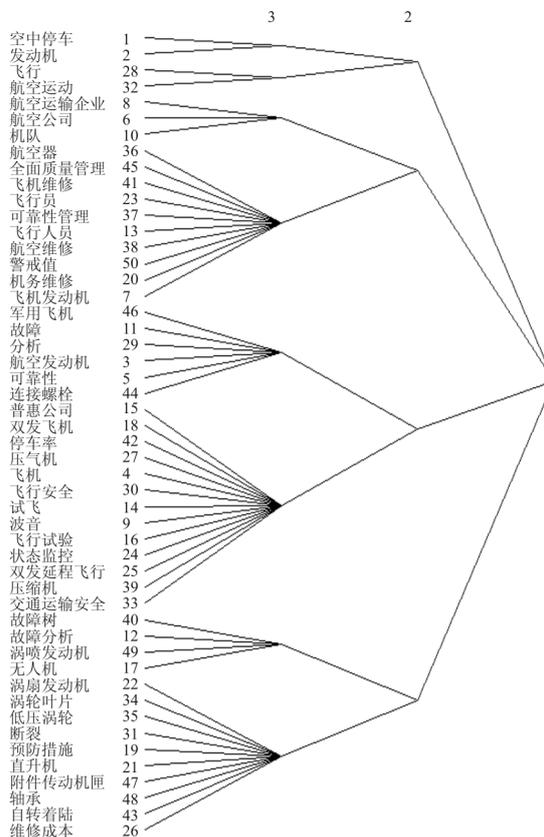


图 3 凝聚子群分析树状图

Fig. 3 Condensed subgroup analysis dendrogram

结合对样本文献的分析研究,通过凝聚子群分析可以得出以下结果:

(1) 在 3 级聚类级别下子群内关键词数量差异较大,但在 2 级聚类级别下,子群内关键词数量趋于平均。

(2) 子群①中关键词数量仅为 3 个,均属于广泛意义上的发动机使用单位;子群②中关键词主要集中于发动机管理及维修方面;在 2 级聚类级别下组合{①②}表明航空发动机的使用单位侧重于从维修的角度开展空停研究。

(3) 子群③中关键词侧重于军用飞机的可靠性和空停故障分析;子群④中关键词数量最多,达到 13 个,主要侧重于双发延程飞行中发动机的可靠性研究,且研究关注点在于发动机的试验验证,以确保飞行安全;在 2 级聚类级别下组合{③④}表明发动机空停研究在民航和军用航空领域均受到关注,但两者在关注点上的侧重有所不同,军用航空领域研究成果更倾向于对特定空停事件的分析研究,而民航领域研究成果则更倾向于对特定发动机型号的防空停设计进行分析及发动机定型试飞

试验研究分析。

(4) 子群⑤中关键词数量相对较少,为 4 个,主要侧重于涡喷发动机、无人机空停故障分析;子群⑥中关键词侧重于涡扇发动机、直升机空停故障研究,且研究成果更为具体,多为针对具体空停事件或具体某一型号发动机的研究分析,研究结论具体到发现引发空停故障的部附件;在 2 级聚类级别下组合{⑤⑥}表明在无人机、直升机等类别的航空器中空停研究也受到关注,且相关研究方法及深度存在差异。

表 3 关键词核心—边缘分析结果

Table 3 Core-edge analysis results of keywords

类别	特征根向量的值 λ 评判标准	关键词
核心关键词	$\lambda \geq 0.15$	空中停车、发动机、航空公司、航空运输企业、飞行人员、飞行员、航空器、可靠性管理、航空维修、飞机维修、全面质量管理、机务维修、双发飞机、波音、普惠公司
半边缘关键词	$0.05 \leq \lambda < 0.15$	飞机、飞行试验、双发延程飞行、试飞、航空发动机、飞行、航空运动、机队、压气机、警戒值、压缩机、飞行安全、交通运输安全、故障、维修成本、停车率、状态监控、飞机发动机、分析、可靠性、低压涡轮、轴承、涡轮叶片、附件传动机匣、故障分析、预防措施
边缘关键词	$\lambda < 0.05$	涡扇发动机、自转着陆、无人机、涡喷发动机、断裂、直升机、连接螺栓、军用飞机、故障树

注:本研究提取关键词数量共 547 个,网络图中仅表示了频次出现较高的前 50 位,导致该表中边缘关键词数量少于核心关键词。

3 结 论

(1) 通过本文分析得到了发动机空中停车研究领域主要关键词,其在社会网络图中处于核心关键地位,对其他节点的影响程度较大。

(2) 针对空中停车研究的侧重点有所不同,空中停车研究在民航和军用航空中均受到关注,但两者的研究侧重点有所差异,其中民航领域主要倾向于发动机防空停设计研究及验证,军用航空领域研究成果多集中于对具体空停事件的分析研究;同时,对于发动机使用维护单位则侧重于从维修的角度开展防空停研究。

(3) 空中停车研究在无人机、直升机等非常规类飞机中也受到了关注,在研究方法和研究深度上存在差异。随着无人机的快速发展趋势,可以预见无人机防空停研究将成为空停研究领域的热点问题。

(4) 通过对文献的整体考量,我国军机防空停研究成果与民航相比存在一定差距。随着军机适航工作的开展,在军用航空领域的发动机防空停设计研究与验证工作将会占有越来越重要的地位。

2.3 核心—边缘分析

核心—边缘分析是根据网络中节点之间联系的紧密程度,利用量化关键词的方式确定其在网络中所处的位置,一般分为以下三种:核心位置、半边缘位置、边缘位置^[24]。本文以特征根向量的值作为评判标准,具体分析结果如表 3 所示,可以看出:核心关键词均为点度中心度较高的关键词,验证了分析结果的正确性。

参考文献

- [1] 张永. 基于发动机空中停车事件论发动机工程管理的体系建设[J]. 航空维修与工程, 2010(2): 73-75.
ZHANG Yong. On building up of proactive engineering management to prevent engine in-flight shutdown[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2010(2): 73-75. (in Chinese)
- [2] 葛忠汉. 飞机发动机空停事件及预防[J]. 航空维修与工程, 2009(1): 46-48.
GE Zhonghan. In flight shut-down event and the preventive measures[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2009(1): 46-48. (in Chinese)
- [3] MIYANO J. The engine air-start test of XF-2[C]// 2001 IEEE Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2001: 1-7.
- [4] ROGER P T, JOHN D L. Self diagnostic accelerometer ground testing on a C-17 aircraft engine[C]// Proceedings of 2001 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE, 2001: 1-8.
- [5] 黄郁华. 发动机空中停车的故障分析与预防措施[J]. 民航经济与技术, 1996(5): 35-37.
HUANG Yuhua. Trouble analysis and prevention of in-flight shutdown[J]. Civil Aviation Economics & Technology, 1996(5): 35-37. (in Chinese)
- [6] 孙超, 王瑛, 崔利杰, 等. 基于 Bow-tie 模型的发动机空中停车事故分析与预防[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(1): 27-31.
SUN Chao, WANG Ying, CUI Lijie, et al. Research on analysis and prevention of in-flight shutdown based on bow-

- tie[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(1): 27-31. (in Chinese)
- [7] 张辛. 创新风险分级和动态管控方法在预防发动机空中停车方面的应用[J]. 科学技术创新, 2018(26): 11-12.
ZHANG Xin. Application of innovation risk classification and dynamic control method in preventing air engine shutdown[J]. Science and Technology Innovation, 2018(26): 11-12. (in Chinese)
- [8] 李书明, 嵇炳翰, 张鸿, 等. 基于 CBR-模糊综合评判的空中停车率预测研究[J]. 航空维修与工程, 2019(5): 62-65.
LI Shuming, JI Binghan, ZHANG Hong, et al. Research on prediction of IFSD based on CBR-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(5): 62-65. (in Chinese)
- [9] 刘启元, 叶鹰. 文献题录信息挖掘技术方法及其软件 SATI 的实现: 以中外图书情报学为例[J]. 信息资源管理学报, 2012, 2(1): 50-58.
LIU Qiyuan, YE Ying. A study on mining bibliographic records by designed software SATI: case study on library and information science[J]. Journal of Information Resources Management, 2012, 2(1): 50-58. (in Chinese)
- [10] 程程, 徐吉辉. 社会网络分析在国内航空安全管理体系研究现状的应用与分析[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 405-410.
CHENG Cheng, XU Jihui. Application and analysis of social network analysis in review of aviation safety management system (SMS) research[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 405-410. (in Chinese)
- [11] 黄广发. 大学生群体网络舆情管理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
HUANG Guangfa. A research on the management of online public opinion of college students[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 杨霄, 陈亚隆. 浅谈航空公司机队发动机管理[J]. 科技视界, 2016(12): 124-125.
YANG Xiao, CHEN Yalong. On aircraft fleet engine management of airlines[J]. Science & Technology Vision, 2016(12): 124-125. (in Chinese)
- [13] 高宇, 李楠. 延程运行的发展与运用[J]. 中国民用航空, 2011(12): 24-27.
GAO Yu, LI Nan. Development and application of extended range operations[J]. China Civil Aviation, 2011(12): 24-27. (in Chinese)
- [14] 张媛, 郭斌. 某型发动机空中启动试验方法研究[J]. 工程与试验, 2013, 53(4): 46-48.
ZHANG Yuan, GUO Bin. Research on test method for air-start of an aero-engine[J]. Engineering & Test, 2013, 53(4): 46-48. (in Chinese)
- [15] 陈光. PW2000“降温型”发动机的发展与设计特点[J]. 民航经济与技术, 1997(10): 13-14.
CHEN Guang. Development and design characteristics of PW2000 “cooling” engine[J]. Civil Aviation Economics & Technology, 1997(10): 13-14. (in Chinese)
- [16] 志芳. PW4084 的 8 点设计发展计划[J]. 国际航空, 1995(2): 35-37.
ZHI Fang. 8-point design development plan for PW4084 [J]. International Aviation, 1995(2): 35-37. (in Chinese)
- [17] 陈光. 提高商用飞机发动机可靠性的措施[J]. 国际航空, 1996(6): 12-14.
CHEN Guang. Measures to improve the reliability of commercial aircraft engines[J]. International Aviation, 1996(6): 12-14. (in Chinese)
- [18] 陈光. GENx 发动机的故障分析[J]. 航空动力, 2018(4): 32-35.
CHEN Guang. Fault analysis of GENx engine[J]. Aerodynamics, 2018(4): 32-35. (in Chinese)
- [19] 西蒙. 梦想飞机的“梦幻”结冰[J]. 大飞机, 2016(3): 102-103.
Simon. The “dream” of the dreamliner freezes[J]. Big Plane, 2016(3): 102-103. (in Chinese)
- [20] 薛茹. 涡扇发动机空中停车的机务维修风险管理研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
XUE Ru. Research on aircraft maintenance risk management of turbofan engine airborne shutdown[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)
- [21] 李杨. 航空公司机队设备可靠性管理应用研究[D]. 天津: 中国民用航空飞行学院, 2018.
LI Yang. Applied research on reliability management of aviation fleet equipment[D]. Tianjin: Civil Aviation Flight University of China, 2018. (in Chinese)
- [22] 沈加元. 以可靠性为中心的飞机维修理论[J]. 民航经济与技术, 1995(5): 61-63.
SHEN Jiayuan. Theory of aircraft maintenance centering on reliability[J]. Civil Aviation Economics & Technology, 1995(5): 61-63. (in Chinese)
- [23] 王军辉. 浅谈现代机务维修思想: 可靠性管理维修[J]. 中国民用航空, 2007(12): 58-59.
WANG Junhui. A brief discussion on modern aircraft maintenance thoughts-reliability management and maintenance [J]. China Civil Aviation, 2007(12): 58-59. (in Chinese)
- [24] 章磊, 张铮敏, 闫莉, 等. 基于社会网络分析的国内军民融合研究综述: 2000—2014 年文献计量证据[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(3): 11-16.
ZHANG Lei, ZHANG Zhengmin, YAN Li, et al. Review of China’s civil-military integration research based on social network analysis: bibliometric evidence from 2000 to 2014 [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2016, 30(3): 11-16. (in Chinese)

作者简介:

徐吉辉(1974—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:装备安全、适航管理。

刘宇(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:装备安全、适航管理。

陈玉金(1992—),男,博士研究生。主要研究方向:装备安全、适航管理。

(编辑:丛艳娟)