



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

基于 DEMATEL-ANP 法的航空维修事故
人因分析与应对方法研究

Aviation maintenance Accident Based on
DEMATEL-ANP Method Human Factor Analysis
and Coping Methods Research

姓 名 李艺莹

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 魏志民

职 称 讲师

完成时间 2022 年 6 月 3 日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

基于 DEMATEL-ANP 法的航空维修事故
人因分析与应对方法研究

Aviation maintenance Accident Based on
DEMATEL-ANP Method Human Factor Analysis
and Coping Methods Research

姓 名 李艺莹

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 魏志民

职 称 讲师

完成时间 2022 年 6 月 3 日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	航空航天学院	申 报 人	姓 名	魏志民
专 业	飞行器制造工程		技术职务	中级
题目名称	基于 DEMATEL-ANP 法的航空维修事故人因分析与应对方法研究			
题目类型	自拟	题目来源	其他项目	
课题来源、背景及意义	<p>改革开放以来,我国民航事业伴随着社会的飞速发展一起取得了巨大的进步。民航维修作为民航业的物质前提,决定着民航飞行的安全和可靠性。据统计数据显示:世界民航维修事故中 80%与人因有关,所以研究民航维修中人因对于民航事业的发展具有十分重要的意义。在复杂的航空维修系统中,各人为因素相互之间存在着不同程度的依赖和反馈,但是目前大多数人为因素定量方法均假设各因素之间相互独立,从而不能有效地分析出关键的人为因素。</p> <p>本文通过 DEMATEL 法找到航空维修各人为因素的影响程度及方向,并确定各因素之间的网络结构,再采用 ANP 法决定各因素的相对重要性权重,最后结合关联度、权重及因果图,将各因素依照不同性质和重要性权重进行排序和分类,从而找出最为关键的人为因素。随后针对各个影响民航维修的人因环节展开理论分析,提出具体解决方案与建议,达到针对目前民航维修工作,特别是人因差错频发的现状,实现最大限度的提高维修工作安全水平的目的。</p>			
任务及要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 了解世界及我国民航事故及民航维修事故现状和人因分析常用方法; 2. 掌握 DEMATEL 和 ANP 的理论基础与使用方法,会用 Super Decision 软件对矩阵进行计算; 3. 用 DEMATEL 法和 ANP 法对民航维修人为因素进行分析; 4. 确定各人为因素之间的相互影响程度及相对重要性权重; 5. 掌握安全管理相关知识,对关键人为因素提出应对方法。 			
工作条件	电脑、Super Decision 软件、相关书籍资料			
知识与能力要求	具有查阅国内外相关文献的能力;熟知民航维修分类及基本流程;熟练使用 Super Decision 对矩阵进行计算;有人为因素,安全管理学等学科知识储备。			
系(教研室)审查意见:				
无				
负责人(签名): <u>张健</u> 2021 年 11 月 28 日				

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

随着航空业的不断发展，飞机设备故障方面引发的飞行事故率已经从 20 世纪初的 80%降低到了现在的 3%，人为因素却成了导致民航事故的主要原因。根据国际民航维修协会（IAMA）的统计资料显示，所有事故中有 80%与人为因素有关。传统上，民航安全人为因素大部分指向飞行机组人员，少量指向空中管制人员。但近年来通过许多失事案例的研究发现，检查及维修飞机的机务人员已经逐渐成为人为因素重要的一环。研究民航维修中的人为因素，分析人的可靠性，有助于从全新的角度，用全新的思维来思考民航维修人为因素新对策，对减少人为因素的负面影响，促进民航安全，具有重要现实意义。

在复杂的航空维修系统中，各人为因素相互之间存在着不同程度的依赖和反馈，但是目前大多数人为因素定量方法均假设各因素之间相互独立，从而不能有效地分析出关键的人为因素。本文通过 DEMATEL 法找到航空维修各人为因素的影响程度及方向，并确定各因素之间的网络结构，再采用 ANP 法决定各因素的相对重要性权重，最后结合关联度、权重及因果图，将各因素依照不同性质和重要性权重进行排序和分类，从而找出最为关键的人为因素，该方法综合考虑了航空维修系统各主要人为因素之间的相互作用，并基于因素之间的因果关系，确定了各影响因素的重要程度，更切合航空维修系统的复杂情况，可为制定预防和控制措施提供合理可靠的依据。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

1. 了解世界及我国民航事故及民航维修事故现状。
2. 了解人因分析常用研究方法。
3. 掌握 DEMATEL 和 ANP 的理论基础与方法，会用 Super Decision 软件对矩阵进行计算。
4. 用 DEMATEL 法找到航空维修各人为因素的影响程度及方向，并确定各因素之间的网络结构；用 ANP 法确定各因素的相对重要性权重。
5. 掌握安全管理相关知识，对关键人为因素提出应对方法。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

毕业设计论文一篇

4. 推荐参考资料：

[1] 人为因素和航空法规[M]:ME、AV/张铁纯,刘珂主编.-2版.-北京:清华大学出版社, 2017 (2020.1 重印)

[2] 王莲芬,蔡海鸥. 网络分析法(ANP)的理论与算法[C]//决策科学理论与方法——中国系统工程学会决策科学专业委员会第四届学术年会论文集.,2001:16-25.

[3] W N Tanjung,S S Asti,S Hidayat,E Ripmiatin,S A Atikah,R S Khodijah. Supply Chain Risk Management Analysis using the Development of Fuzzy Reasoning Methods and Analytical Network Process (ANP) at Wooden Toys Industries[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2019,528(1):

[4] 冯亮、民航安全与机务人因[J].江苏民航, 2008,(3):42-48.

[5] 吕春玉,方春花人因分析与分类系统 HFACS 及事故个例分析[J].中国民航大学学报, 2009,(2):37-40.

[6] 徐东毅,何峻,增强维修资源管理减少人为差错[J].民航维修与工程, 2013,26(5):32-37.

[7] 孙志强,史秀建,李欣欣,谢红卫.基于认知模型的人为差错分类方法[J].国防科技大学学报, 2008.

[8] 南波.人为差错在空中交通管制中的影响及其预防措施[J].科技创新导报, 2014.

[9] 董念清.中国通用航空发展现状、困境及对策探析[J].北京理工大学学报(社会科学

版),2014(1):110-117.

[10] 许凌洁我国通用航空的安全监管[J].中国民用航空,2013(11):42-43.

[11] 康永,周建民通用航空发展现状、趋势和对策分析[J].现代导航,2012(5):360-367.

[12] Tseng Ming-Lang,Ardaniah Viqi,Sujanto Raditia Yudistira,Fujii Minoru,Lim Ming K..

Multicriteria assessment of renewable energy sources under uncertainty: Barriers to adoption[J]. Technological Forecasting & Social Change,2021,171:

[13] 李纳纳. ANP 内部依赖矩阵构造方法的改进及其在项目评标中的应用[D].吉林大学,2010.

[14] 冯纓,唐慧,孙晓阳.基于 DEMATEL 的企业社交媒体信息效用的关键影响因素研究[J/OL].情报理论与实践:1-14[2021-11-29].

[15] 孙永河,黄子航,李阳.DEMATEL 复杂因素分析算法最新进展综述[J/OL].计算机科学与探索:1-12[2021-11-29].

[16] 吕淑然,田琦.基于 DEMATEL-ANP-GRA 的大型泵站运行安全综合评价[J/OL].安全与环境学报:1-8[2021-11-29].

[17] Surya Buyung Perdana,Sai Laila Refiana,Jenita ,Suwarno Suwarno,Wahab

Wirdayani,Medaline Onny,Rusmardiana Ana,Anriani Stepri,Bhawika Gita Widi,Mujanah Siti.

Use of Analytical Network Process Algorithm in the decision-making process[J]. Journal of Physics: Conference Series,2021,1933(1):

所在专业审查意见:

同意

负责人: 张健

2021 年 12 月 3 日



天津中德应用技术大学

Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计（论文）开题报告

题目：基于 DEMATEL-ANP 法的航空维修事
故人因分析与应对方法研究

学院：航空航天大学

专业：飞行器制造工程

学生姓名：李艺莹

学号：20414040212

起止日期：2021 年 12 月 3 日-2022 年 6 月 3 日

指导教师：魏志民

开题日期：2022 年 3 月 5 日

一、开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

（一）课题的目的和意义

随着航空业的不断发展，飞机设备故障方面引发的飞行事故率已经从 20 世纪初的 80%降低到了现在的 3%，人为因素却成了导致民航事故的主要原因。根据国际民航维修协会（IAMA）的统计资料显示，所有事故中有 80%与人为因素有关。传统上，民航安全人为因素大部分指向飞行机组人员，少量指向空中管制人员。但近年来通过许多失事案例的研究发现，检查及维修飞机的机务人员已经逐渐成为人为因素重要的一环。研究民航维修中的人为因素，分析人的可靠性，有助于从全新的角度，用全新的思维来思考民航维修人为因素新对策，对减少人为因素的负面影响，促进民航安全，具有重要现实意义。

（二）国内外研究情况：

研究解决航空从业人员人为表现问题，减少由人为因素引发的事故，一直以来都是全世界各国研究的焦点。国外对人为因素的研究起步较早，早在 20 世纪 40 年代时，国外就开始了人为因素研究。1949 年，英国建立了工效学会，确立了人为因素应有的学科地位，后又于 1959 年在此基础上成立了国际工效学会(IEA)。1957 年，美国建立了人为因素学会，后该学会并入了 IEA。1949 年，美国空军上尉工程师墨菲(Muphy)首次提出这样一个定理：如果任何事情能够发生，那么这种差错总是会发生的，这就是墨菲定律(Murphy's Law)。墨菲定律告诉我们，凡是对那些有可能出错的地方，就一定会有人出错，并且是以最坏的方式，发生在最不利时机。墨菲定律经历了近 60 年的实践，得到了很大发展，对保证飞行安全做出了贡献，它对消除维修中的维修差错具有现实和长远意义。1972 年 Elwyh Eduwards 教授提出了 SHEL 模型，确定了人为因素的基本要素—软件（Software）、硬件（Hardware）、环境（Environment）和生命件（Liveware）。1975 年 Frank Hawkins 对 SHEL 模型进行重要的发展和完善，建立了各要素之间的相互关系，并给出包括各元素、各元素关系及相互配合界面形象图形，SHEL 模型从此广泛应用在航空人为因素分析中。开创了航空人为因素研究的基础。在不同学者提出模型的同时，国际民航组织(ICAO)在其防止事故手册上提出了事故链概念。其观点认为事故的发生并不是由单一原因引起的，而是有许多因素像一个链串联起来的，避免事故的发生只要切断任意一个环节都能消除事故。William Rankin 等人利用维修差错决策辅助进程方法对民航维修差错进行了评估，Kara A. Latorella 等人对以往的航空人为维修差错进行了回顾和总结。与此同时各航空发达国家相继开发了一些人为因素数据收集和分析系统的软件，如由波音公司提出的维修失误决断方法(MEDA，即 Maintenance Error Decision Aid)方法；人为因素分析与分类系统(HFACS，即 Human Factors Analysis and Classification System)，欧盟第五模型计划(FP5)项目开发的民航器签派和维修安全中的人为因素(ADAMS)和美国海军航空维修人为因素分析和分类扩展系统(The Human Factors Analysis and Classification System-Maintenance Extension, HFACS-ME)

等一系列的分析工具和分析方法。这些均有助于改善维修人为因素状态，提高维修质量和系统安全水平。除了上述降低人为因素的措施，国外将维修人员的人为因素培训、工作文件设计、维修人员疲劳等问题的研究也达到了一定的高度。

我国民航事业由于起步较晚，在八十年代才开始进行航空人为因素的研究，但那时只侧重于环境对空勤的影响和空勤人员生理、心理方面的研究。九十年代中期，机务维修等系统开始对人为差错等人为因素进行研究。随着对人为因素认识的深入，九十年代末，民航总局制定了人为因素研究规划，开始在民航全行业开展航空人为因素的研究。具有重要意义的是，2000年4月3日，民航总局颁发了《关于开展人为因素研究的通知》，决定把“民用航空人为因素研究及其应用”项目列为民航系统的重要科研课题。国家有关部(委)非常支持民航人的因素研究项目，国家经济贸易委员会将其列入安全生产技术专项措施项目，科技部批准该项目正式列为科研项目。同年，民航总局还首次发行《维修差错管理体系》No. 71 适航信息。值得一提的是，2002年，民航总局又在全民航范围内开展了“加强职业道德，减少维修差错，争做二十一世纪优秀机务人”的主题活动，其目的就是提高机务维修人员的总体素质，增强工作责任心，倡导爱岗敬业精神，减少维修差错，开创机务维修保障工作的新局面。此外民航总局还翻译了并出版了多部关于人为因素在航空安全方面的著作，有效的促进了民航安全水平的提高。总体上来看我国民航人因研究还处于起步阶段，先前的科研项目局限于对民航人为因素问题的概括性研究，而对国外先进的人为因素研究理念仍缺乏足够认识，对一些先进的研究成果未能充分的吸收利用，还需要我们不断努力。

(三) 课题主要研究内容

在复杂的航空维修系统中，各人为因素相互之间存在着不同程度的依赖和反馈，但是目前大多数人为因素定量方法均假设各因素之间相互独立，从而不能有效地分析出关键的人为因素。因此，利用 DEMATEL-ANP 法的优势，针对航空维修系统的复杂情况，对航空维修人为因素进行分析与计算，可以得到各人为因素影响关系的结构和相对重要性权重，从而确定影响航空维修差错的主要人为因素。

研究内容 1: 多渠道收集民航维修人为因素，确定影响民航维修人为因素的指标体系。

研究内容 2: 使用 DEMATEL 法来找出航空维修时各人为因素影响的方向和程度，并对各个因素间网络的结构进行确定。

研究内容 3: 运用 Super decision 软件对 ANP 网络图进行绘制，以及加权超矩阵、极限超矩阵的处理，对各个因素的权重进行确定。

研究内容 4: 按照分析结果，把各个因素根据不同的重要性和性质进行分类和排列，进而找到最关键的因素，并提出相应的管控方案。

(四) 参考文献

[1] 冯乐然. 民航飞机维修中的人为因素研究[J]. 中国设备工程, 2022(05):19-21.


[2] 梁晓. 民航机务维修系统安全风险监测研究[J]. 中国航务周刊, 2022(05):58-59.

- [3] 陆杨. 民航维修质量与安全管理措施分析[J]. 中国设备工程, 2022(02):51-52.
- [4] Liu Xiahui, Deng Qianwang, Gong Guiliang, Zhao Xingdong, Li Kexin. Evaluating the interactions of multi-dimensional value for sustainable product-service system with grey DEMATEL-ANP approach[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 60.
- [5] Mirhosseini Seyed Armin, Kiani Mavi Reza, Kiani Mavi Neda, Abbasnejad Behzad, Rayani Farzaneh. Interrelations among Leadership Competencies of BIM Leaders: A Fuzzy DEMATEL-ANP Approach[J]. Sustainability, 2020, 12(18).
- [6] 范赵鹏, 张金金, 温玮, 李程瑜, 敬玉平. 网络层次分析法 (ANP) 分析工具的设计与实现 [J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(01):46-50.
- [7] Miriam F. Bongo, Kissy Mae S. Alimpangog, Jennifer F. Loar, Jason A. Montefalcon, Lanndon A. Ocampo. An application of DEMATEL-ANP and PROMETHEE II approach for air traffic controllers' workload stress problem: A case of Mactan Civil Aviation Authority of the Philippines[J]. Journal of Air Transport Management, 2018, 68.
- [8] Dragan Pamučar, Milan Mihajlović, Radojko Obradović, Predrag Atanasković. Novel approach to group multi-criteria decision making based on interval rough numbers: Hybrid DEMATEL-ANP-MAIRCA model[J]. Expert Systems With Applications, 2017, 88.
- [9] 夏爽. 利用 DEMATEL-ANP 法对航空维修中人为因素的分析[J]. 电子技术与软件工程, 2017(03):156.
- [10] 乔凯. 基于 REASON 模型的民航维修事故人因研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [11] 钟兆蕾. 浅谈民航机务维修中的 SMS 建设[J]. 科技创新导报, 2014, 11(21):42.
- [12] 胡祎程. 基于人因的工程项目现场安全标志有效性评价研究[D]. 安徽工程大学, 2014.
- [13] 孙铭忆. 层次分析法 (AHP) 与网络层次分析法 (ANP) 的比较[J]. 中外企业家, 2014(10):67-68.
- [14] 贺纯纯, 王应明. 网络层次分析法研究述评[J]. 科技管理研究, 2014, 34(03):204-208+213.
- [15] 王冀杭. 基于人因工程学的国内民航维修安全管理的应用研究[D]. 浙江工业大学, 2009.
- [16] 李晓璐, 李春雷. 基于人-机-环境的金属矿山通风系统模糊综合评价[J]. 中国矿业, 2007(01):66-68.

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021. 12. 3-2022. 1. 10	1. 制订研究方案	1. 方案科学、合理、完整、充分、实事求是。
2021. 1. 10-2022. 2. 5	2. 对 DEMATEL 和 ANP 两种数学模型进行深入学习了解，了解民航维修安全评估理论与方法。	2. 掌握两种数学模型的原理及应用方法。
2022. 2. 5-2022. 4. 5	3. 多渠道收集民航维修人为因素，确定影响民航维修人为因素的指标体系，制定专家打分表，收集后做数据分析。	3. 完成数据采集，通过数据结果确定各指标之间关系及权重。
2022. 4. 5-2022. 4. 15	4. 撰写论文。	4. 完成论文。
2022. 4. 15-2022. 6. 4	5. 论文查重和答辩。	5. 完成论文查重和答辩。
完成课题的现有条件	计算机、Super Decision 软件、知网文献等。	
指导教师 意见	同意开题 指导教师： <u>魏志民</u> <u>2022</u> 年 <u>3</u> 月 <u>5</u> 日	
开题答辩 小组意见	同意开题 组 长： <u>姚冀涛</u> <u>2022</u> 年 <u>3</u> 月 <u>5</u> 日	


天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名： 

2022年 6月 3日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名： 

2022年 6月 3日

摘要

航空维修是一项复杂的系统工程，具有系统高度综合和复杂精密部件的高科技设备。所处的是人、机、环、管诸多因素错综复杂、纵横交织及各类危险源遍布的工作环境，具化到维修过程中的维修人员安全意识淡薄、维修水平低、质量控制管理机制不严等诱因，导致维修失误频发，制约了飞机的安全使用，已成为困扰航空维修安全管理的顽疾。由于机务人员的失误具有模糊性、必然性、累积性和突发性等特征，影响人行为的因素是多层次的、复杂的。且各因素之间存在不同程度的依赖和反馈，而目前大多数人为因素定量方法假设各因素之间相互独立，很难找出主要的航空维修人为因素，使得管理工作有一定的难度。针对以上问题，本文提出一种基于 DEMATEL-ANP 法的航空维修事故人因分析与应对方法，探索为航空维修安全管理提供一个有效的分析方法。

本文首先识别并构建航空维修人为因素指标体系，然后将决策试验与评价实验室方法 (DEMATEL) 和网络层次分析法 (ANP) 相结合来研究航空维修关键人为因素之间的相互作用。实例研究结果表明：航空维修人为因素之间有着显著的相互作用以及自我动态反馈，并且在这些关键的人为因素中，防差错能力、安全政策、知识与技能、工作作风、规范工作、协作与配合扮演着重要的角色。该分析方法有助于更为准确地确定航空维修中关键的人为因素。

关键词：航空维修；人为因素；DEMATEL；ANP；Super Decision

ABSTRACT

Aviation maintenance is a complex system engineering with high-tech equipment with highly integrated systems and complex precision components. It is a working environment where people, machines, environment and management are intricate, intertwined, and all kinds of danger sources are all over the place. In the maintenance process, the maintenance personnel have weak safety awareness, low maintenance level, and lax quality control management mechanism. And other incentives, resulting in frequent maintenance errors, restricting the safe use of aircraft, has become a stubborn disease that plagues aviation maintenance safety management. Due to the characteristics of ambiguity, inevitability, accumulation and suddenness of the mistakes of the maintenance personnel, the factors affecting human behavior are multi-level and complex. And there are different degrees of dependence and feedback among various factors, and most of the current quantitative methods of human factors assume that each factor is independent of each other, it is difficult to find the main human factors of aviation maintenance, which makes the management work difficult. In view of the above problems, this paper proposes a human factor analysis and coping method for aviation maintenance accidents based on DEMATEL-ANP method, and explores to provide an effective analysis method for aviation maintenance safety management.

This paper firstly identifies and constructs the aviation maintenance human factors index system, and then combines the decision-making test and evaluation laboratory method (DEMATEL) and the Analytical Hierarchy Process (ANP) to study the interaction between the key human factors of aviation maintenance. The results of the case study show that there is a significant interaction and self-dynamic feedback among aviation maintenance human factors, and among these key human factors, error prevention, safety policy, knowledge and skills, work style, standard work, collaboration and cooperation play an important role. This analytical method helps to more accurately identify the key human factors in aviation maintenance.

Key Words: Aviation maintenance; human factor; DEMATEL; ANP; Super Decision

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 国外研究现状	1
1.2.2 国内研究现状	2
1.2.3 现有的航空人因安全评估方法	2
1.3 研究内容	3
第 2 章 人为因素基本理论及指标确定	4
2.1 人为因素的基本理论及模型	4
2.1.1 人为因素定义及研究内容	4
2.1.2 常用的人因模型	4
2.2 航空维修事故人因指标体系构建	7
2.2.1 指标体系建立原则	7
2.2.2 构建航空维修人为因素指标体系	7
2.3 本章小结	11
第 3 章 研究方法与应用流程	12
3.1 研究方法	12
3.1.1 DEMATEL 法	12
3.1.2 ANP 法及 SD 软件	13
3.2 DEMATEL-ANP 求混合权重	15
3.3 DEMATEL-ANP 法应用流程	15
3.4 本章小节	16
第 4 章 DEMATEL-ANP 法应用与分析	17
4.1 航空维修人为因素指标间影响关系及权重确立	17
4.1.1 基于 DEMATEL 法的航空维修人为因素指标间影响关系的确立	17
4.1.2 基于 ANP 法的航空维修人为因素指标权重确立	22
4.1.3 混合权重的确定	29
4.2 结果分析及管控建议	30
4.3 本章小结	32
结论	33
参考文献	34

附	录.....	36
致	谢.....	40

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

传统上,人们往往认为只有“飞行员”才属于与事故有直接关联的“人”。实际上,除了飞行员,还应包括设计、制造、维修和指挥等航空活动的所有从业人员。目前,全球范围内因使用航空设备而导致的飞机自身事故数量急剧下降,而维修引发的各类事故比例则显着上升。在我国民航事故中,1949-1989 年因维修不当造成的事故率为 7.9%,1989-1998 年为 16.7%。根据对中国航空近 50 年来发生的 120 起飞行事故的分析,有 94 起违规事件,占有航空事故的 72%。在 94 起事故中,71 起是由机组人员造成的,占 75.5%,11 起是由维修工作造成的,占 11.7%。根据美国空军作战司令部 (ACC) 事故调查,无论是在民用航空还是军用航空领域,导致飞机事故和事故征候的一大主要原因是航空维修失误。在全球所有航空事故的统计中,航班维修失误占 85%,而 20-30%的机上停车也与航班维修失误有关。为做好事事故预防工作,应将所有可能的事故源中的所有风险因素作为研究对象进行系统分析,其中维修人员因素尤为重要。加强人因研究和应用,减少人因不安全事件的发生,是保障航空业高质量发展的重要保障。由此可见,航空维修人因的研究水平有待提高。

航空业是一个对安全要求很高的行业。安全是飞行的生命线,是航空公司的立足之本。而航空维修是一项非常复杂的系统工程,面临系统集成度高、部件复杂精密的高科技装备,位于人、机、环境、管理等复杂相互依存的因素中,由于维修人员安全意识水平低、质量控制不严、管理机制不严等原因,维修差错和不安全事件时有发生,影响和限制了飞机的安全使用。如何有效提高安全管理和安全技术水平,运用先进的管理理念和管理方法,最大限度地减少和预防和控制飞机维修事故,是一个亟待研究和解决的重大现实问题。为减少飞行事故,保障飞行安全,积极采取措施防止航空维修中的人为失误具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

解决航空中的人为因素,减少人为因素造成的事故的研究一直是国际上的研究热点。国外早在 20 世纪 40 年代就开始了人为因素的研究。1949 年,英国成立了人体工学学会,确立了人因学相应的学科地位,1959 年又成立了国际人体工学学会 (IEA)。1957 年,美国成立了人因协会,后来并入 IEA。1949 年,美国空军上尉工程师墨菲(Murphy)首次提出这样一个定理:如果任何事情能够发生,那么这种差错总是会发生的,这就是墨菲定律(Murphy's Law)^[1]。墨菲定律告诉我们,如果事情可能发生,它就一定会发生,尤其是一些不好的事情,只要概率大于零,那么你就必须准备好应对那些不好的事情。墨菲

定律已经实践了近 60 年，经历了长足的发展，有助于确保飞行安全，对消除维修中的维修失误具有实际和长期的意义。1972 年，Elwyh Eduwards 教授提出 SHEL 模型^[2]，SHEL 模型认为事故发生是以人（L）为中心与硬件（H）、软件（S）、环境（E）、人（L）相联系并作用，综合起来就会形成某些结果而表现出来^[1]。此后，SHEL 模型被广泛用于航空中的人为因素分析。他奠定了航空人因研究的基础。1990 年，James Reason 教授提出了 Reason 模型^[3]。并出版了第一部关于人为差错的著作《Human Error》，REASON 模型的内在逻辑是：在分析事故过程时，不仅要考虑事故本身反应链的存在，还要考虑中转位置是否存在组织缺失。该模型已成为研究和分析飞机事故的重要理论模型之一。1997 年，美国 FAA 空中维修系统高级科技顾问 William B.Johnson 和美国科学家 Michael E. Maddox 提出了研究人因的新模型——PEAR 模型，主要用于人因培训中的维修人员。PEAR 模型的名称来自人员（P）、环境（E）、行动（A）和资源（R）四个组成部分的英文首字母缩写。PEAR 提供了如何识别和控制组织内潜在危险的方法，并且是维护航空人为因素评估调查的一个组成部分。还有美国联邦航空局提出和开发的“维修分析管理系统”（MRM）。除上述研究成果外，国外对维修人员疲劳度和工作文件设计的研究也达到了一定的高度。

1.2.2 国内研究现状

由于我国航空业起步较晚，在 80 年代才开始对航空中的人为因素的研究，但当时只关注环境对机组人员的影响以及对机组人员生理和心理方面的研究。90 年代中期，维护和维修等系统开始检查人为错误等人为因素。随着对人因的深入认识，90 年代末，航空总局制定了人因研究计划，开始开展航空业人因研究。具有重大意义的是，2000 年 4 月 3 日，航空总局下发《关于开展人因研究的通知》，决定将“民航人因研究及其应用”项目列为重要科研课题。在航空系统中。国家有关部委（委员会）大力支持航空要素研究项目：国家经贸委提出作为安全生产工程专项措施项目，科技部批准该项目为科研项目。同年，航空总局还首次发布了《维修差错管理制度》适航资料第 71 号。值得注意的是，2002 年，航空总局在整个航空业开展了“加强职业道德、减少维修差错、争创 21 世纪优秀维修人才”主题活动，旨在提高维修水平。人员综合素质，提高工作责任感，培养爱岗敬业精神，减少了维修失误，开创了维修工作安全新局面。此外，航空总局还翻译出版了多篇关于飞行安全中人为因素的论文，有力地促进了飞行安全水平的提高。

虽然我国在民航人因研究方面取得了一些进展，但总体上还处于起步阶段。以往的科研项目对国外先进的人因研究理念还缺乏足够的认识，仅限于通用民航人因的概括研究。因此，我国的航空人因研究还有很大的进步空间。

1.2.3 现有的航空人因安全评估方法

随着科学技术的不断进步，安全评价方法的分类也从最初的定性评价扩展到目前的定

量评价以及定性与定量的结合评价^[6]。目前在航空业国内外常用的安全评估方法有很多,诸如安全检查表法、故障树分析法、概率风险评价法、综合模糊评价法、事件树分析法、层次分析法、网络分析法、决策实验室法等。

航空中的人因研究通常有两种方法:一是基于专家的经验,如 AHP,简单直观,可以有效解决数据缺乏的难题;二是各种人为失误事件的统计,例如灰色关联分析、对应分析等,可以揭示失误原因之间的关系,但由于人们害怕会受到惩罚,有隐瞒事实的因素,为数据库的建立带来了不便。上述两种方法都有各自的不足:一是通常假设各个因素是独立的,但航空维修系统的人为因素有着不同程度的依赖、反馈,各自的权重也是不一样的,这样的分析结果也会失去其价值;其次,忽略了影响因素的关键作用,只确定了因素的相对重要性。事实证明,这些方法缺乏对人为因素及其关系的全面了解。

1.3 研究内容

本文的主要研究内容如下:

第一章简述了本文的研究背景及意义,并对国内外人因学研究现状进行了研究。介绍了目前航空人因研究中主要使用的评估方法的优缺点。

第二章介绍了航空领域中人因基础理论和常用的人为差错模型。分析确定了建立航空维修事故人因指标体系的基本原则,根据航空维修行业的实际情况,基于上述理论和模型,建立了航空维修人为因素指标体系。

第三章是飞机维修事故人因评估方法的研究,详细介绍了 DEMATEL 法和 ANP 法,以及 ANP 法的应用软件 Super Decisions,同时对 DEMATEL-ANP 法的结合使用进行了研究。

第四章是航空维修人为因素指标间影响关系及权重确立,首先采用 DEMATEL 方法找出指标间的综合影响关系,在此基础上采用 ANP 方法确定指标网络结构,确定权重,最后计算得到混合权重。对计算结果进行分析,找出能够提高航空维修安全水平的指标,为航空维修安全管理提供理论依据。

第 2 章 人为因素基本理论及指标确定

2.1 人为因素的基本理论及模型

2.1.1 人为因素定义及研究内容

人为因素是一门涉及心理学、生理学、人体测量学、工程学、医学、社会学和统计学等学科的边缘科学^[8]。对于航空领域，人类在航空活动中的表现是其主要研究目标。人是航空系统人、机、环中最活跃、最易受到影响的主体；研究手段是系统工程的思想和方法，这些方法对解决像航空系统这样的大型复杂系统的问题，达到系统的最佳整体效益十分有效；最终目的是提高飞行安全和效益，通过研究、分析人为差错，寻求预防和克服的方法，保障飞行安全，研究人与系统中的硬件、软件、环境和其他人的相互关系，改善设计、使用和维护和人的表现，提高整个系统的效益^[9]。

2.1.2 常用的人因模型

航空业使用以下分析模型来研究维修中人为差错的原因和解决方案。

1. SHEL 模型

SHEL 模型是由 Edwards 教授在 1972 年首先提出，后经 Hawkins 教授修改而成(如图 2-1 所示)，该模型被广泛应用于研究人为因素的框架，SHEL 模型由 Software(软件)、Hardware (硬件)、Envinonment (环境) 和 Liveware(人) 4 类模块构成^[10]。人是人因研究的中心，人是系统中最活跃、最关键的元素。人与其他元素之间的界面是复杂相交的，因此必须小心协调其他元素，以免它们之间产生压力，甚至是崩溃（事故）。



图 2-1 SHEL 模型

2. 事故链理论

事故是多种不同因素的综合。在单纯考虑某个因素时,它或许看起来无关紧要,可是,如果和其他因素结合在一起时,就可能使表面上并不关联的事情产生“链”,也就是通过这个事情链,引发了一个事件。而根据事故链理论,一旦管理者采取措施,加强防线,只要把整个系统中某层面上相关的缺陷全部去掉,把链中任一个环节全部截断,就可以避免事件的出现(如图 2-2 所示)。

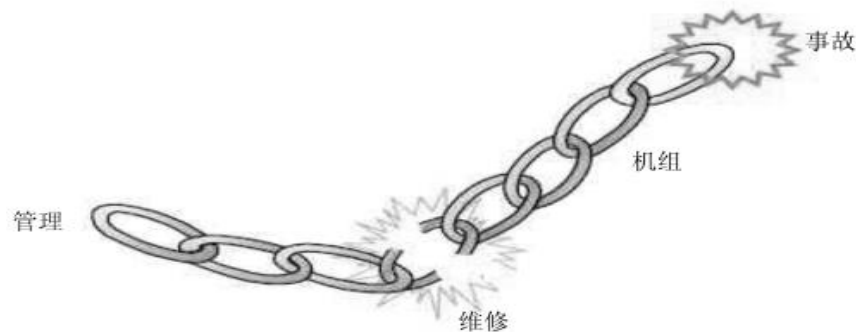


图 2-2 事故链

3. 圆盘漏洞理论

人、机、料、法、环像是五种穿在同一个轴上并按照相应的规则运行的圆盘，而各个圆盘之间又存有着各种各样的漏洞，不安全因素就像是光源，当通过了这种圆孔的组合之后，问题就会出现(如图 2-3 所示)。

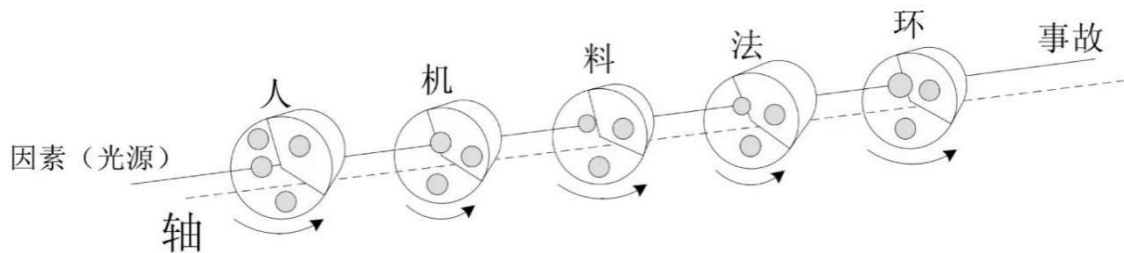


图 2-3 圆盘漏洞理论

4. Reason 模型

Lames Reason 教授在于 20 世纪 90 年代提出了 REASON 模型,这是一个将事件拆解成多层,以系统观的视野,研究不安全事件产生原因的事故调查模型(如图 2-4 所示),正如 REASON 模型中提到的,事故的原因不仅与与事件直接相关的参与者的行为(现行失效)有关,而且与远离事件的其他层面的活动和人员(潜在失效)有关^[12]。REASON 模型的分析逻辑是:事故的发生不仅有一个被穿透的组织缺陷集,同时还存在一个事件本身的反应链,组织各层面的缺陷和事故促发因素是长期存在并不断演化的,但这些组织缺陷

和事故促因不一定会造成不安全事件，只有当多个层级的组织缺陷在一个事故促发因子上多次或同时出现时，多层级的阻断作用被突破，从而发生不安全事件^[13]。该模型已成为用于分析和调查飞机事故的理论模型之一。

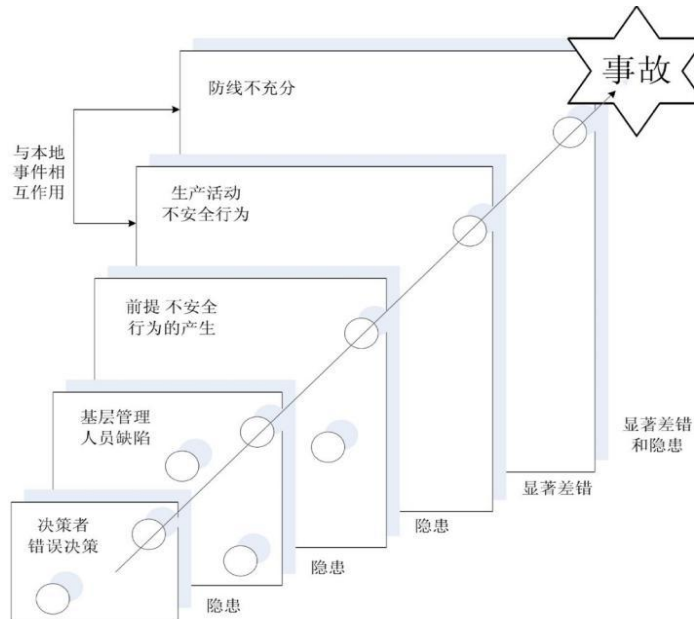


图 2-4 Reason 模型

5. 皮特森模型

安全学专家皮特森(Petersen)把人失误的原因归结为过负荷、决策错误和人机学 3 方面^[13] (如图 2-5 所示)。

负荷包括操作任务负荷、心理负荷、环境负荷等。一个人的承受力主要取决于精神状态、身体状况、疲劳程度和执行能力等。

人机学指人体工程学，主要包括导致对外部刺激的反应与该刺激所需的反应不匹配或导致任务与所需任务不一样的因素。

人们做出不当的行为可能是因为不知道怎样做才是正确的（例如教育、培训问题），或是因为决策错误，低估发生事故的可能性或其后果的严重性，这主要取决于个人的态度和性格。

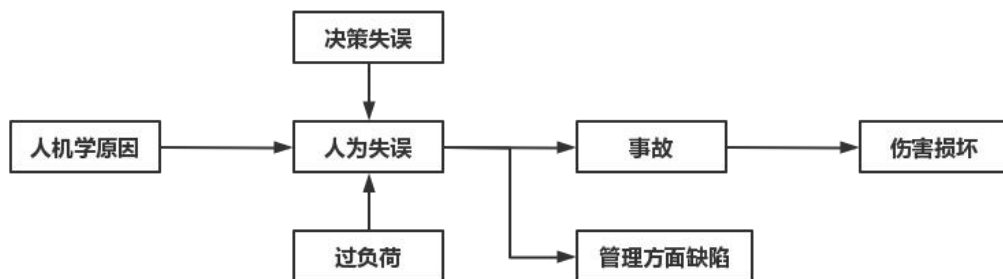


图 2-5 皮特森模型

2.2 航空维修事故人因指标体系构建

2.2.1 指标体系建立原则

框架的体系、类别、层次要科学、规范、清晰、准确，对于界面间可能出现模糊的地方，要加以说明或做出界定标准，避免发生误判，影响信息收集。通常，有关航空维修安全管理的指标体系的建立，需要通过广泛的调研与专家咨询。为了客观、全面、科学地构建航空维修人为因素指标体系时，应遵循以下原则：

1.科学性原则。主要强调的是所接收信息的可靠性和客观性，最终使企业安全管理评估的结果有效。

2.全面性原则。航空维修中的人为因素是一个相对复杂的系统，是由多个要素组成的，因此需要从多个角度进行分析去理解它。运用系统分析的原理和方法，从不同的角度选择指标，使指标更加科学、准确、全面的来反映和描述航空维修人为因素的基本特征。

3.独立性原则。独立性原则要求系统中的指标在满足全面性原则的前提下，尽可能地符合彼此的相对独立性。 总体而言，要求指标既简洁又全面。

2.2.2 构建航空维修人为因素指标体系

建立合理的航空维修人因指标体系是对航空事故人因管控的关键，而人的因素是多方面、多层次和错综复杂的，且各因素之间存在不同程度的依赖和反馈，所以建立合适的航空维修事故人因指标体系，是一项相当复杂的工作。

根据我国航空维修实践和经验，基于 SHELL 模型，同时借鉴 REASON 模型等理论，参考了大量文献资料、行业规范以及开展了专家咨询工作的基础上，将其指标体系分为六大方面（一级指标）：维修人员、软件、硬件、环境、其他人员，共 25 个指标（二级指标）。其层次结构如图 2-6 所示。下面分别对各指标进行详细阐述：

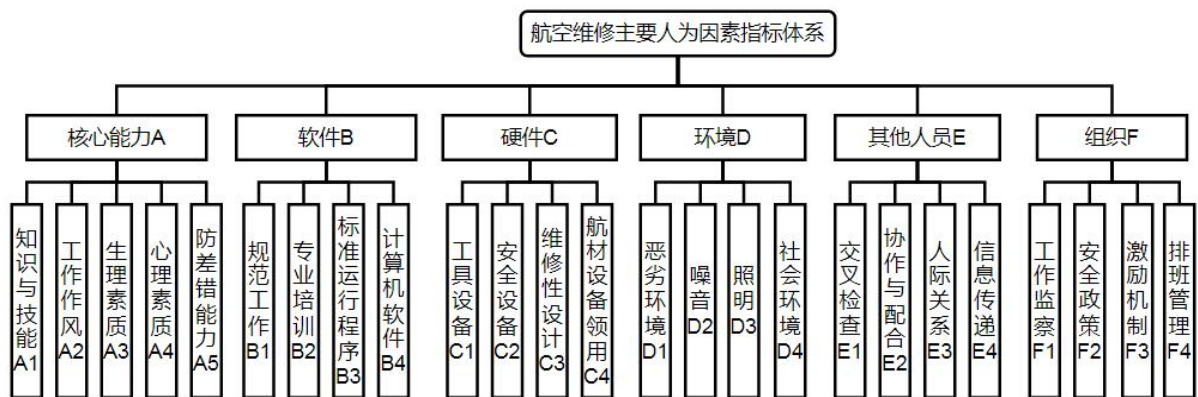


图 2-6 航空维修主要人为因素指标体系

1. 核心能力 (A)

每位维修人员的核心能力都是入职前需要考虑的关键因素,没有一定水平的专业技术和良好的品行,在实际工作中很难进行安全施工,极易引发生产安全事故或埋下隐患。

(A1) 知识与技能:航空设备维修人员的专业素质、专业知识和能力是确保不发生维修事故和隐患的重要基础。如果维修人员缺乏必要专业理论知识,对维修对象的基本结构和原理不明确,基本操作技能低,故障排除不彻底,操作不熟练等,就容易导致事故隐患的发生。

(A2) 工作作风:工作作风是维修人员在维修工作中逐渐养成的工作习惯和行为,与政治意识、文化素质、心理素质、职业道德和技术素质密切相关。机务工作中违反操作规程、规章制度以及有关规定最终导致维修事故的行为,大都并不是因为维修者不懂维修对象的工作原理、构造和操作方法,而是因为缺乏安全观念和安全意识、维护工作不扎实、工作责任心不强、不严格执行维修规定的缘故,这都是工作作风较差的体现。

(A3) 生理素质:指飞机维修人员的生物节律、体力和适应力。由于机务人员的工作性质,通宵夜班是在所难免的,身体超负荷工作、疲劳、疾病都是引起维修失误的原因,是否具备连续作战的精力,是否能够适应外部环境的各种变化,是每一位飞机维修人员需要评估的因素。

(A4) 心理素质:指飞机维修人员在复杂环境中的心理适应能力,主要与情感、意志和理性有关。保障航空系统的飞行安全,将机电设备万小时飞行事故率保持在 0.1 以下,飞机完好率保持在 85%以上,是每位机组成员的日常工作。作为维修质量高、保障能力强的安全技术人员,肩上的责任有多大,所承受的压力就有多大。

(A5) 防差错能力:主要指错、忘、漏。据近几年航空维修失误调查,大多数失误均是由机务人员无意识的差错引起,比如认知错误、遗忘重要的信息、将工具遗漏在飞机里、错报漏报重要信息等。人为差错是不可避免的,但导致人犯错的原因却是可以控制改善的。

2. 软件 (B):人与软件的关系指的是人员与其工作场所中的软件系统之间的关系,软件包括操作规程、工卡、安全检查表、手册、计算机应用程序等。人与软件关系的不匹配是导致事故发生的常见诱因,比如对检查单、符号的错误理解,不遵守操作程序等,这类事故的发生非常隐蔽,也很难解决。

(B1) 工作规范:在飞机维修工作中,不按手册、工卡等标准规程进行工作的现象频频发生,维修人员按照自己的想法或习惯性做法去进行维修,都会埋下巨大的维修事故隐患。

(B2) 专业培训:维修人员的工作,不仅需要书本上的理论知识,更需要实际工作经验的积累和良好工作作风的培养。他们所需要的培训也很多,技能、执照、放行、机型、英语、计算机等等,高质量的培训是高质量维修的前提。

(B3) 标准运行程序：是描述技术细节以指导特定流程的可操作性文件。实践证明，严格遵守操作规程的施工作业，可减少因操作失误造成的维修事故。

(B4) 计算机软件：开展飞机维修工作时，要利用计算机技术，通过建设科学信息资料平台实现资料查询，有效提高信息查询效率与准确性，为民航机务维修工作提供便捷。而未经测试或难以使用的计算机软件会适得其反。

3. 硬件 (C)：指人与硬件的关系，具体指人员和设备、设施、危险品存储场所之间的相互作用。它决定了人员如何与物理设备相互作用。人机系统中，人们常常不会意识到人与硬件关系设计上的缺陷，因为人具有适应人与硬件间不匹配关系的特质，从而将缺陷隐藏起来而不是消除。

(C1) 工具设备：因工具管理不规范、不到位导致的维修差错事件时有发生，给安全运行带来不利影响，轻则造成因寻找工具导致航班延误或航空器携带工具起飞，重则造成因工具遗漏在飞机的重要系统导致飞机部件发生损坏，飞机返航、中断起飞等的维修严重差错事件。

(C2) 安全设备：维修人员在维修时必须穿戴好确保个人安全的防护和设备，如安全帽、耳罩、护目镜、反光背心等。尤其是一些缺乏经验、安全保护意识比较薄弱的维修人员，因不愿意佩戴或使用错误的安全设备，在维修中造成生理上的不适，容易导致维修失误。

(C3) 飞机维修性设计：当飞机设计有缺陷，存在维修故障条件时，维修故障必然发生。不同机型的构造存在细微差别，而飞机构造的差异也会导致维修失误。因此，在分配维修任务时，应充分考虑维修性因素，研究维修件的可达性、可维修性、互换性、故障预防和配置差异。飞机可维修性是决定维修效率的基础，直接影响维修失误率指标。

(C4) 航材设备领用：航线维修人员在日常工作中，需要快速、准确地完成航材领料，才能更好的投入到日常维修及排故抢修工作中。维修人员对航材件、航材的柜门的模糊造成航材件号领错而造成错误安装是极大的维修事故。

4. 环境 (D)：指的是维修人员与内部、外部环境之间的关系，人与环境的差异往往导致事故的发生，环境通过对人的直接或间接影响来改变人的心理和行为，从而导致误判、操作失误等一系列错误。最初的解决方案往往是使人适应环境，然后逐渐趋向于对环境进行人性化的设计和改造，以实现更和谐的人与环境关系。

(D1) 恶劣天气：春夏秋冬，严寒暴雨，总会在风雨中见到机务人员的身影，只要航班要飞，就必须坚守在零上零下几十度的环境中。户外工作时的恶劣天气、高温或低温环境、不适宜的温度和湿度，使人容易出现记忆力减退、注意力不集中、思维迟缓、反应速度慢等认知问题。结合身体和心理的能量消耗，就可能会出现不安全的行为。

(D2) 噪音：噪音是一种人们不想要的声音，会让人感到厌烦，影响工作表现和认知能力，进而影响人的行为，使不安全行为容易发生。嘈杂的环境影响维修人员的正常运

作，对其信息处理能力、记忆力、注意力和反应速度产生重大影响。

(D3) 照明：在光线不足、光照不佳的环境条件下，人们容易出现认知缺陷，进而影响观察、思考、记忆和想象的能力，导致行为缺陷；照明是否充足，工作台面暴露在光线下是否均匀，照明过多或过少都会导致不同的疲劳症状。

(D4) 社会环境：人的思想、素质、道德观念、精神状态和安全意识等因素影响着人们的不安全行为，人们生活在社会环境中，社会环境不可避免地会影响人们。维修人员所处的社会环境，他们的思想观念、生活态度和价值观会随着社会环境而改变，优越的工作环境促进了良好职业素质的发展。

5. 其他人员 (E)：指的是维修工作场所中人与人之间的关系，如：设备维修人员、质量检验人员等。按照传统惯例，技术能力测试是在个人基础上进行的，如果每个小组成员都非常合格，那么这些成员的小组也将被认为是有效和有能力的。飞行机组、空中交通管制、机务维修人员和其他管理人员作为团队成员，必须能够相互配合、关系和谐。

(E1) 交叉检查：交叉检查即互检，是督促各项工作健康有序开展的一种有效形式。通过交叉检查可以相互交流经验，同时检查人员通过比较，充分发现工作中存在的问题和不足。维修人员之间交叉检查不充分，很容易导致安全生产事故或者埋下隐患。

(E2) 协作与配合：航空维修人员之间配合的好坏，是团队工作是否能够和谐有序，积极配合的关键。

(E3) 人际关系：人们在社会生产中与他人进行交往的关系体系的总和，叫做人际关系。航空维修人员也是如此，在维修过程中必须与员工或集体进行各种接触、交流。如果空中维修人员的人际关系不好，就会影响他们的工作，如果人际关系紧张，也可能会出现失误或事故。

(E4) 信息传递：依靠纸张交接和人际面对面交流的信息的传递，由于主要靠人来完成，重要信息的传递是否及时，是否存在迟报、漏报、瞒报，是提高工作效率与确保飞行安全的重要因素。

6. 组织 (F)：上级的行为直接影响到个人的安全氛围：如果上级高度重视安全，相应的员工也会表现出对安全的承诺。不幸的是，这个层面的问题很容易被忽视。在分析维修中的人为因素时，应特别注意此方面的调查。

(F1) 工作监察：工作监察是现场安全管理的重要组成部分，意味着检查每项维护工作的进度是否按计划进行，是否符合所给予的指示和既定原则。如果工作监察不到位，未能及时发现问题，及时协调解决问题，过程很容易失控，一旦出现问题，后果会非常严重。

(F2) 安全政策：即通过落实安全生产责任制、出台各种安全管理规章制度等，强调安全在组织中的重要性，来影响人们的不安全行为，这些政策会对管理者和员工的安全行为产生影响。

(F3) 激励机制：对员工工作具有鼓励助长作用的手段。运用系统、有效的激励机制，充分的激发维修人员工作的潜力和积极性。

(F4) 排班管理：人手不足，工作时间过长，休息时间不充分，就很容易导致事故隐患的产生。排班员应考虑过夜机场、置位等的选择及过站时间等业务因素，在分配过程中更多地考虑维修人员的资质、可用时间、搭配等，降低疲劳保障飞行安全，公平分配提高满意度。

2.3 本章小结

本章介绍了人为因素基本理论及模型，确定了建立航空维修事故人因评价指标体系的基本原则，并通过结合人因理论、差错模型及专家意见，将航空维修事故人因评价指标体系划分为维修人员、软件、硬件、环境、其他人员六个方面，共 25 个指标，并对每个指标展开解释。

第 3 章 研究方法与应用流程

3.1 研究方法

3.1.1 DEMATEL 法

DEMATEL (Decision making trial and evaluation laboratory, 决策实验室法)^[6]是在 20 世纪 70 年代由日内瓦研究中心的 Gabus 和 Fontela 两位教授提出的, 用于分析复杂系统的因素, 解决现实世界中的复杂难题。DEMATEL 算法通过建立解析结构模型, 确定复杂系统因素之间的逻辑关系和直接影响关系。基于图论和矩阵运算, 一方面评估因素的直接影响关系的存在和强度。另一方面, 计算各因素对其他因素的总体影响和影响程度, 计算各因素的中心性和因果关系, 确定关键因素^[14]。这种方法恰恰切合航空维修系统中的各人为因素之间存在不同程度的依赖和反馈的复杂情况。其实施步骤如下:

1. 直接影响矩阵

专家填写问卷, 对两个项目之间的影响程度进行打分, 分为 5 个打分量度, 0 表示没有影响, 1 表示影响不大, 2 表示影响中等, 3 表示影响很大, 4 表示有影响非常高。每位打分者创建一个直接影响矩阵, 通过平均每个打分者的直接影响矩阵中的相应因素, 形成一个直接影响平均矩阵 D , 如公式 3-1 所示:

$$D_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

2. 规范直接影响矩阵

定义 D 中的值用 d_{ij} 表示: $D = (d_{ij})_{n \times n}$ 在矩阵中即每一行求和, 在这些值中取出最大值, 如公式 3-2 所示:

$$\text{Max var} = \text{Max} \left(\sum_{j=1}^n d_{ij} \right) \quad (3-2)$$

规范直接影响矩阵定义为 N , 如公式 3-3 所示:

$$N = \left(\frac{d_{ij}}{\text{Max var}} \right)_{n \times n} \quad (3-3)$$

3. 综合影响矩阵

要素之间增加的间接影响用规范直接影响矩阵的自乘来表示, 将所有的间接影响都加起来, 如公式 3-4 所示:

$$T = (N + N^2 + N^3 + \dots + N^K) = \sum_{k=1}^{\infty} N^k \rightarrow T = N(I - N)^{-1} \quad (3-4)$$

注： I 为单位矩阵。

4. 各类指标值

(1) 影响度 B

表示各行指标对其他指标的综合影响值，即对 T 各行的值求和，即影响度，具体如公式 3-5 所示：

$$B_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3-5)$$

(2) 被影响度 C

表示各列指标受到其他指标的综合影响值，即对 T 各列的值求和，即被影响度，具体如公式 3-6 所示：

$$C_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3-6)$$

(3) 中心度 M

表示该指标在系统中的作用的大小。为指标 i 的影响度加被影响度，记作 M_i ，具体如公式 3-7 所示：

$$M_i = B_i + C_i \quad (3-7)$$

(4) 原因度 R

指标 i 的影响度减被影响度得到原因度，记作 R_i 。若大于 0，表明该指标影响其他指标，为原因要素；若小于 0，为结果因素。具体如公式 3-8 所示：

$$R_i = B_i - C_i \quad (3-8)$$

5. 因果图绘制

以横坐标为中心度 $B+C$ 值，纵坐标为原因度 $B-C$ 值绘制因果图，中轴为中心度的平均值，将因果图分为四个象限。

第一象限代表中心度和原因度均高，即要素重要性高且为原因因素；

第二象限代表中心度低和原因度高，即要素重要性低且为原因因素；

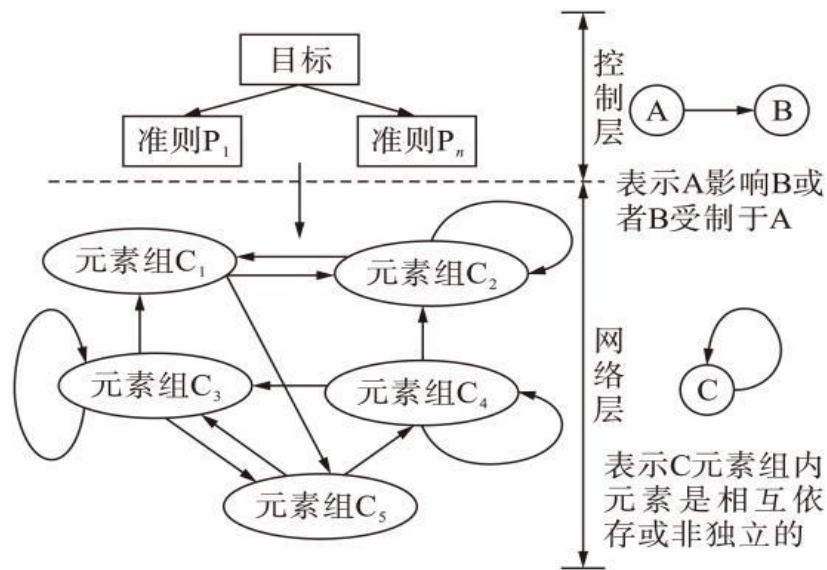
第三象限代表中心度和原因度均低，即要素重要性低且为结果因素；

第四象限代表中心度高和原因度低，即要素重要性高且为结果因素。

3.1.2 ANP 法及 SD 软件

网络分析法 (ANP) 是美国匹兹堡大学的 T.L.Saaty 教授于 1996 年提出的一种适应非

独立的递阶层次结构的决策方法，它是在层次分析法的基础上发展形成的一种新的实用决策方法^[15]。ANP 最初将系统元素分为两部分：第一部分是控制元素层，包含问题目标和决策标准。所有标准都被认为是独立的，仅由目标因素决定。一个控制元素可以没有标准，但必须有一个或多个目标，控制层中每个标准的权重可以使用 AHP 检索。第二部分是网络层，它由控制层所有元素组成。元素占主导地位并且相互依赖，元素和层次之间不是相互独立的，层次结构中的每个标准都由相互依赖的反馈网络结构控制，而不是由简单的内部独立元素控制。控制层和网络层组成为典型 ANP 网络层次结构，见图 3-1。



(图 3-1 ANP 网络层次结构)

SD 软件 (Super Decisions, 超级决策软件) 是美国的 Rozann W.Saaty 和 William Adams 首次提出的，该软件成功地将 ANP 的计算程序化，已成为 ANP 强大的计算工具^[19]。由于 ANP 考虑了同层次指标间的互相依赖关系和不同层次指标间的反馈，计算起来非常复杂，但强大的 SD 软件可以解决这个问题。ANP 用法用 SD 软件实施步骤如下：

1. 构建网络结构

由于关联度较小的指标对相对权重的计算影响较小，因此通过设置阈值 (threshold) 来删除关联度较小的关联。使用上述 DEMATEL 法计算出的综合影响关系矩阵 T 并删除小于阈值的指标，然后根据剩下的关系来绘制网络图。

2. 创建问卷

强大的 SD 软件根据网络结构自动建立各准则下元素的影响判断矩阵，如果同一层的元素之间没有影响关系，则不做两两比较。导出需要进行比较的指标制作成问卷，并按照表 3-1 所示 1~9 尺度进行成对比较打分，输入 SD 软件，输入法一般采用问答式和矩阵式。

表 3-1 ANP 法比较尺度表

标度	意义
1	i 因素与 j 因素同等重要
3	i 因素比 j 因素稍微重要
5	i 因素比 j 因素显著重要
7	i 因素比 j 因素特别重要
9	i 因素比 j 因素超级重要
2、4、6、8	介于上述两相邻判断尺度中间

3. 一致性检验

输入问卷数据后，SD 软件可以快速计算出特征值向量和一致性检验结果，每输入一组数据，就会进行一次一致性检验，一致性检验结果必须符合要求，才能够进行下一组数据的输入。

4. 输出结果

一致性检验完成后，就可以得到整体的未加权超矩阵、加权超矩阵、极限超矩阵，极限超矩阵中的每一行数值都是相同的，任意一列的值即为各元素的权重值。此外，SD 软件具有丰富的输出功能。例如，未加权超矩阵、加权超矩阵、极限值超矩阵的数据可以复制到 Excel 中打开，可以以图表的形式查看优越的结果数据和灵敏度变化，使用极为方便。

3.2 DEMATEL-ANP 求混合权重

运用 DEMATEL 方法虽能计算各指标间的影响强度和因果关系，但是计算过程却视各个指标权重都相同，没有考虑到各指标间权重有高低之分的情形^{[16][17]}。

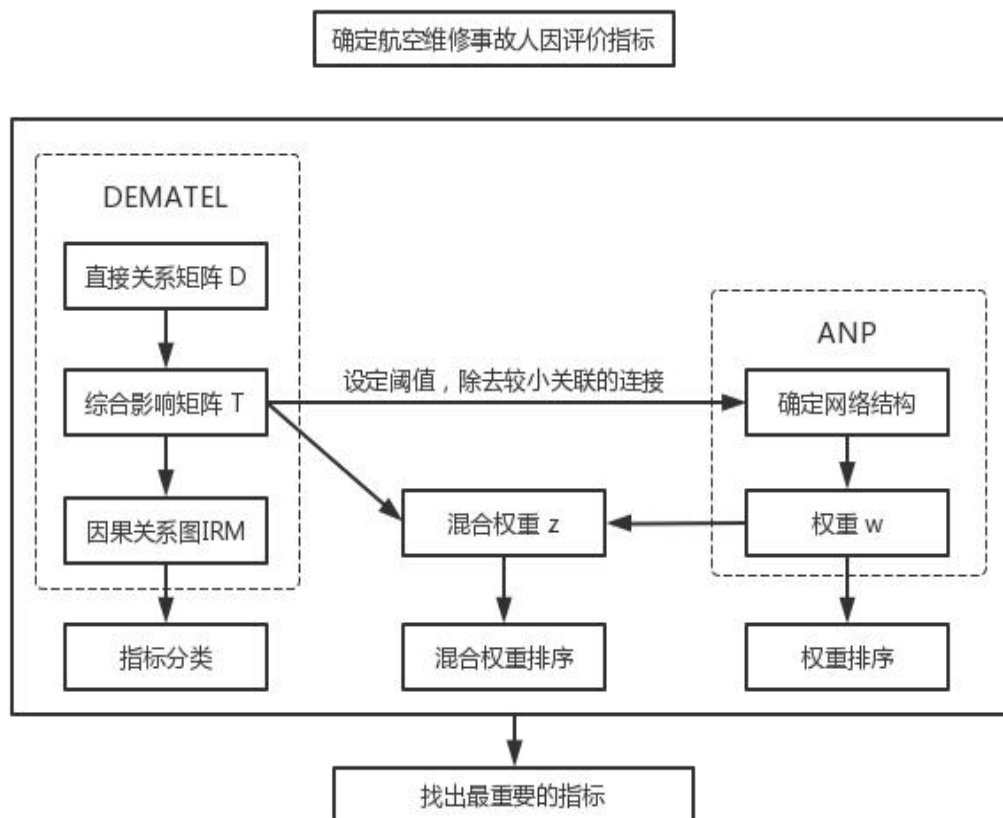
为了解决这个问题，在 DEMATEL 方法中，引进了一个混合权重概念^[18]，用 z 表示。其使用步骤如下：假设有一个决策系统是由 n 个元素组成的，元素间的关联关系即 DEMATEL 方法中的综合影响矩阵 T ，用 w 表示用 ANP 方法得到的各个元素的权重。则混合权重如公式 3-9 所示：

$$z = w + T \times w = (I + T) \times w \quad (3-9)$$

混合权重提供了一种方法来反映每个元素的权重和每个元素的影响程度，从而得出每个元素的优先级^[6]。

3.3 DEMATEL-ANP 法应用流程

本文 DEMATEL 方法与 ANP 方法结合思路如图 3-2 所示：



(图 3-2 Dematel-ANP 法应用流程图)

3.4 本章小节

本章主要简单介绍了 DEMATEL 法和 ANP 法以及 SD 软件，并介绍了将两者结合求混合权重的方法及应用流程。

第 4 章 DEMATEL-ANP 法应用与分析

4.1 航空维修人为因素指标间影响关系及权重确立

4.1.1 基于 DEMATEL 法的航空维修人为因素指标间影响关系的确立

根据第三章的方法，编制了航空维修人为因素的影响关系调查问卷（见附录 1），以矩阵的形式，对 25 个二级指标进行成对影响程度评分。问卷方式以 EXCEL 表格方式发放，接受问卷调查的专家包括东航四川分公司，江西航空，天津航空，厦门航空，河北航空，凌云（宜昌）航空工程有限公司等单位的十余位相关专家，最终选定 10 位专家的收回问卷，满足 DEMATEL 方法 8-15 名专家的要求。他们专业经验丰富，问卷结果具有较高的可信度。

收回问卷后，将所有调查问卷矩阵内对应元素相加，求取平均数得到直接关系矩阵，即直接关系矩阵 D（见表 4-1）。

使用 MATLAB 对直接关系矩阵进行计算，得到规范直接影响矩阵 N（见表 4-2）和综合影响矩阵 T（见表 4-3），以及 DEMATEL 各类指标值（见表 4-4）。

DEMATEL 法用 MATLAB 计算的程序如下：

```
clear;clc;
D=[直接关系矩阵];
[m,n]=size(D); % 归一化
N=D/max(sum(D,2)); % 规范直接影响矩阵
T=N*inv(eye(m)-N); % 综合影响矩阵
for i=1:m
    for j=1:m
        B(i)=sum(T(i,:)); % 影响度
        C(j)=sum(T(:,j)); % 被影响度
    end
end
M=B+C; % 中心度
R=B-C; % 原因度
```

表 4-1 直接影响矩阵 D

		A					B				C				D				E				F			
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4	F1	F2	F3	F4
A	A1	0	1.2	1.2	2	3.6	2.8	2.6	3.4	1.4	1.2	1.2	1.8	3	0	0	0	1.4	2.8	2.6	0.8	2.4	1.4	1.8	1	2.2
	A2	2	0	1.2	1.8	3	3.6	2	3.6	0.8	1.2	1.8	0.4	2.2	0	0	0	1.6	3.4	3	2	3.2	2.8	2.8	1.8	2
	A3	1.6	1.6	0	2.2	2.8	2.4	2.2	1.8	0.8	0.6	0.8	0.4	1.4	0	0	0	0.4	2	2	1.6	1.6	1.6	1.6	1	1.4
	A4	1.4	2	1.2	0	2.8	3	1.6	1.8	1.2	0.4	0.6	0.4	0.8	0	0	0	0.8	2	2.8	2.2	1.8	1.4	1.2	0.4	0.6
	A5	2.2	2	1.4	2.6	0	3.2	1.8	3.2	1.2	0.8	0.8	0.6	3	0	0	0	0.6	3.2	2.4	1.6	3.6	2	2.4	1.6	1.2
B	B1	1.6	2.8	1.2	2	3.8	0	1.4	3.2	1.6	2	1.8	0.6	3.4	0.2	0.4	0.4	1	3.4	3.2	1.6	3	1.6	2	1.6	0.8
	B2	4	3.4	1.8	2.6	4	3.6	0	3.4	2.2	2.4	2.6	1.4	3.2	0.6	0.6	1	1	3.2	3	1.2	3.4	2	2.6	0.6	0.8
	B3	1.8	3	1.2	1.8	3.6	3.8	1	0	1.4	2.6	2.4	0.8	3	0.2	0.2	0.2	0.6	3.6	3.2	0.6	2.8	2.2	2	1.2	1
	B4	2.4	0.8	0.8	1	2.4	2.6	1.6	2	0	0	0	0.4	1	0	0	0	0.4	1.6	1.4	0	1.2	0.8	1.2	0.2	1.2
C	C1	1.8	1.8	1.6	1.2	2.8	3.8	1.6	2.4	1.4	0	1	1.6	1.8	0.6	1	1	1.2	2	2.4	1	0.8	0.6	1	0.8	0.2
	C2	1.6	2.8	2.8	2.6	2.8	3.2	1.6	1.6	0.4	0.8	0	0.8	0.2	1.4	0.8	0.8	1.8	1.2	1.8	0.4	0.4	0.2	1.8	1.8	0.2
	C3	2.4	2	2	1.6	3.4	3.2	1.8	1.6	1.8	1.8	1.2	0	1.4	1.8	1.8	2	1.2	2.6	2.4	0.8	1.2	1.4	0.8	0.6	0.4
	C4	1	1.2	0.6	0.6	1.8	2.4	0.6	2.6	1.2	1.4	1.6	0.8	0	0.6	0.6	0.6	0.8	1.6	2	0.6	1.2	0.6	1.2	0.8	0.4
D	D1	2.6	2.8	3.8	3.4	3.4	3.6	1.8	2.6	0.2	1	1.6	0.4	0.6	0	1.2	1.6	0	3	3.2	1.4	2.8	2.8	1.8	0.2	2
	D2	2.6	2.8	3.8	2.8	3.2	3.4	1.8	2.2	0.2	0.6	1.6	0.4	0.6	0.2	0	0.2	0	3	3.2	1.6	3.2	2.4	1.4	0.2	1.2
	D3	2.6	2.8	3.2	2.6	3.4	3.6	1.8	2.6	0.2	0.6	1.6	0.6	1.4	0.2	0.2	0	0	3	3	1.4	2.2	2.8	1.4	0.2	1.2
	D4	2.4	3	2.4	3	2.6	3.2	2	2	0.8	0.8	1.2	0.4	1	0.2	0.2	0	0	1.8	2.6	2.6	1.8	1.6	1.8	0.8	0.8
E	E1	1.2	2	1	1.6	3.4	3.2	0.8	2.2	0.8	1.6	1.6	0.6	2.4	0.2	0.2	0.2	0.4	0	3.6	1.6	1.8	1.6	1	0.8	1.6
	E2	1.4	2.2	2	1.8	3.6	3	0.8	1.8	0.8	2	1.8	0.6	2	0.2	0.2	0.6	1.2	3.4	0	1.6	2.8	1.6	1.2	0.8	2.6
	E3	0.8	2	1.4	2.2	2.4	2.8	1.2	1.2	0.6	1	1.2	0.2	1.4	0.2	0.2	0.2	1.2	2.8	3	0	2.2	1.2	1	0.4	2.8
	E4	1.6	2.2	1	1.2	3	2.8	0.8	2	0.8	1	1.2	0.8	2.6	0.2	0.2	0.2	0.4	2.8	3	2.6	0	1.8	1	0.6	1
F	F1	1.8	3	0.6	2.4	3.2	3.6	1.8	2.8	1.4	1.8	2.2	0.4	2.8	0.6	1.2	1.2	1.6	2.8	2.6	1.6	1.8	0	2.8	1.4	1
	F2	2	3	1.6	1.8	3	3	2.2	2.8	1.8	1.6	2.8	0.6	2.2	1.4	1.4	1.6	2.6	2.2	2.4	1.6	1.4	3.2	0	3	2.6
	F3	2.8	3.4	1.6	2.4	2.8	3	2.2	2.6	1.6	1	1.4	0.2	2	0.4	0.4	0.4	1.6	2.2	2.2	2.2	1.4	2.2	2.6	0	2.2
	F4	1.6	2.6	2.8	2.2	2.6	2.6	1.8	2	0.2	0.4	0.6	0.2	1.6	0.8	0.4	0.4	1.4	2.8	2.8	1.8	1.2	1.2	1.6	2	0

表 4-2 规范直接影响矩阵 N

		A					B					C					D					E					F				
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4	F1	F2	F3	F4					
A	A1	0	0.071	0.054	0.071	0.071	0.071	0.036	0.071	0.018	0.036	0.036	0.054	0.071	0	0	0	0	0.071	0.071	0	0.036	0	0.018	0.018	0.054					
	A2	0.036	0	0.036	0.071	0.071	0.071	0.054	0.054	0	0	0	0	0.036	0	0	0	0.071	0.054	0.054	0.018	0.036	0.054	0.071	0	0					
	A3	0.054	0	0	0	0.036	0.036	0.036	0	0	0	0.036	0	0	0	0	0	0	0.054	0.036	0	0.018	0	0.054	0	0.071					
	A4	0.054	0.071	0.018	0	0.054	0.054	0.018	0.018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.036	0.036	0.054	0.018	0	0.054	0.071	0.054					
	A5	0.071	0.036	0	0.036	0	0.018	0	0.071	0	0	0.036	0.036	0.071	0	0	0	0	0.071	0.054	0	0.054	0	0.036	0.036	0.018					
B	B1	0.018	0.036	0	0.036	0.071	0	0	0.071	0	0.036	0	0.036	0	0	0	0	0	0.054	0.054	0	0.054	0	0.018	0.036	0					
	B2	0.071	0.054	0.036	0.036	0.071	0.071	0	0.054	0.054	0.054	0.036	0.054	0.071	0	0	0	0	0.071	0.054	0	0.054	0	0.054	0.018	0					
	B3	0	0	0	0.018	0.071	0.054	0.018	0	0.054	0.018	0.036	0.054	0.071	0	0	0	0	0.054	0.054	0	0.036	0.036	0.054	0	0.036					
	B4	0	0	0	0	0.018	0.018	0.018	0.036	0	0	0	0	0.036	0	0	0	0	0.018	0.018	0	0	0.018	0.018	0	0					
C	C1	0.018	0.018	0	0	0.018	0.054	0.018	0.036	0	0.018	0	0	0	0	0.054	0.054	0	0.036	0.036	0	0	0	0	0.036	0					
	C2	0.071	0.036	0.036	0.036	0.036	0.054	0.036	0.036	0	0.018	0	0	0	0	0.018	0.018	0	0.036	0.054	0	0.018	0.036	0.071	0	0					
	C3	0.071	0	0	0	0.054	0.036	0.036	0.018	0	0.036	0.054	0	0.054	0	0	0.054	0	0.036	0.054	0	0	0.036	0.036	0	0.018					
	C4	0	0	0	0	0.036	0	0.036	0.036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.018	0.018	0	0	0	0	0	0.018					
D	D1	0.071	0	0.054	0.036	0.071	0.054	0.018	0.036	0	0.018	0.036	0	0	0	0	0.054	0	0.054	0.036	0	0.054	0.036	0.054	0	0.036					
	D2	0.071	0	0.054	0.036	0.071	0.054	0	0.018	0	0.018	0.071	0.018	0	0.036	0	0	0	0.054	0.036	0	0.071	0.054	0.036	0	0.036					
	D3	0.071	0	0.054	0.036	0.071	0.054	0	0.018	0	0.018	0.071	0.018	0	0.036	0	0	0	0.054	0.036	0	0	0.036	0.018	0	0.036					
	D4	0.018	0.036	0	0.071	0	0.018	0.018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.054	0.071	0.018	0.018	0.054	0.071	0.018					
E	E1	0.071	0.036	0	0.036	0.054	0.018	0	0.054	0	0.036	0.036	0.018	0.018	0	0	0	0	0	0.018	0.018	0.054	0.018	0.036	0	0.018					
	E2	0.071	0	0.036	0.054	0.054	0.054	0	0.054	0	0.036	0.054	0.036	0.036	0	0	0	0.054	0.054	0	0.036	0.054	0.036	0.036	0	0.054					
	E3	0	0.054	0	0.071	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.071	0.018	0	0	0.018	0.036	0.036	0	0.036					
	E4	0	0	0	0.018	0.071	0.036	0	0.054	0	0	0	0	0.036	0	0	0	0.018	0.071	0.018	0.036	0	0.036	0	0	0.036					
F	F1	0.071	0.054	0	0.036	0.071	0.071	0.054	0.071	0.018	0.036	0.018	0.036	0.036	0	0	0	0	0.054	0.036	0.054	0	0.036	0	0.036	0.054					
	F2	0.036	0.071	0.018	0.036	0.036	0.036	0.071	0.036	0.018	0	0.071	0.018	0.018	0.071	0.071	0.071	0.054	0.036	0.036	0	0.018	0.071	0	0.054	0.054					
	F3	0.054	0.071	0	0.036	0.036	0.054	0.018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.071	0	0.054	0.071	0	0.054	0.036	0	0.036					
	F4	0.036	0	0.071	0.054	0.071	0.018	0	0.054	0.036	0	0	0	0	0	0	0	0.018	0.054	0.036	0.036	0.054	0.018	0	0.036	0					

表 4-3 综合影响矩阵 T

	A					B					C					D					E					F				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4	F1	F2	F3	F4					
A	0.095	0.133	0.09	0.146	0.189	0.16	0.08	0.169	0.04	0.077	0.088	0.094	0.134	0.008	0.013	0.018	0.036	0.175	0.163	0.034	0.109	0.049	0.098	0.056	0.115					
	0.12	0.068	0.066	0.145	0.175	0.152	0.095	0.142	0.021	0.037	0.05	0.041	0.094	0.011	0.013	0.016	0.106	0.146	0.138	0.051	0.104	0.096	0.142	0.043	0.063					
	0.105	0.038	0.026	0.046	0.099	0.083	0.058	0.057	0.014	0.023	0.066	0.025	0.035	0.007	0.009	0.011	0.019	0.11	0.085	0.017	0.061	0.026	0.091	0.023	0.104					
	0.118	0.125	0.047	0.066	0.136	0.118	0.05	0.088	0.016	0.026	0.037	0.03	0.045	0.009	0.01	0.012	0.038	0.109	0.103	0.081	0.072	0.04	0.108	0.1	0.1					
	0.135	0.084	0.028	0.092	0.088	0.084	0.035	0.141	0.016	0.032	0.074	0.066	0.118	0.007	0.009	0.013	0.028	0.144	0.12	0.026	0.104	0.039	0.09	0.061	0.066					
B	0.074	0.074	0.019	0.081	0.139	0.055	0.025	0.128	0.013	0.06	0.033	0.06	0.042	0.005	0.008	0.012	0.024	0.115	0.108	0.022	0.096	0.032	0.065	0.057	0.039					
	0.159	0.117	0.07	0.109	0.185	0.159	0.047	0.152	0.072	0.094	0.089	0.094	0.136	0.01	0.016	0.021	0.035	0.173	0.145	0.029	0.122	0.049	0.128	0.053	0.062					
	0.065	0.044	0.023	0.068	0.148	0.112	0.048	0.072	0.067	0.08	0.057	0.063	0.097	0.008	0.013	0.016	0.025	0.123	0.114	0.02	0.084	0.068	0.102	0.026	0.076					
	0.02	0.014	0.007	0.016	0.044	0.037	0.028	0.058	0.007	0.011	0.013	0.011	0.051	0.003	0.003	0.004	0.008	0.04	0.038	0.005	0.017	0.028	0.034	0.008	0.014					
C	0.067	0.048	0.023	0.04	0.078	0.099	0.038	0.083	0.011	0.023	0.051	0.023	0.029	0.01	0.061	0.063	0.017	0.088	0.081	0.012	0.039	0.028	0.073	0.017	0.031					
	0.144	0.09	0.067	0.098	0.128	0.127	0.072	0.113	0.018	0.051	0.047	0.036	0.051	0.012	0.031	0.033	0.03	0.118	0.126	0.022	0.076	0.074	0.13	0.031	0.053					
	0.139	0.048	0.031	0.056	0.135	0.101	0.067	0.09	0.016	0.067	0.096	0.033	0.099	0.009	0.012	0.067	0.023	0.11	0.119	0.018	0.051	0.068	0.088	0.025	0.062					
	0.019	0.012	0.008	0.015	0.058	0.018	0.042	0.055	0.007	0.01	0.011	0.01	0.016	0.001	0.002	0.002	0.006	0.039	0.036	0.006	0.017	0.009	0.016	0.007	0.029					
D	0.152	0.058	0.089	0.102	0.172	0.131	0.055	0.121	0.019	0.053	0.086	0.038	0.054	0.011	0.013	0.069	0.028	0.145	0.115	0.025	0.116	0.075	0.116	0.033	0.094					
	0.154	0.059	0.088	0.103	0.172	0.132	0.039	0.106	0.017	0.052	0.119	0.054	0.054	0.044	0.012	0.017	0.029	0.146	0.116	0.026	0.135	0.093	0.101	0.033	0.094					
	0.146	0.052	0.085	0.095	0.157	0.122	0.034	0.093	0.015	0.049	0.113	0.05	0.046	0.042	0.01	0.015	0.023	0.132	0.107	0.021	0.057	0.068	0.077	0.029	0.085					
	0.069	0.083	0.022	0.121	0.062	0.07	0.044	0.049	0.011	0.018	0.027	0.02	0.03	0.008	0.008	0.01	0.035	0.053	0.102	0.097	0.056	0.051	0.097	0.097	0.058					
E	0.125	0.079	0.025	0.086	0.126	0.077	0.03	0.116	0.015	0.06	0.068	0.044	0.061	0.007	0.01	0.013	0.024	0.068	0.077	0.037	0.097	0.049	0.083	0.024	0.059					
	0.149	0.062	0.068	0.123	0.153	0.13	0.04	0.137	0.019	0.07	0.098	0.07	0.088	0.008	0.013	0.017	0.083	0.142	0.083	0.066	0.115	0.077	0.103	0.038	0.111					
	0.037	0.085	0.016	0.108	0.046	0.038	0.021	0.036	0.008	0.011	0.018	0.012	0.021	0.005	0.006	0.007	0.092	0.055	0.038	0.022	0.046	0.057	0.069	0.024	0.063					
	0.041	0.031	0.014	0.055	0.121	0.071	0.017	0.098	0.011	0.019	0.022	0.019	0.064	0.003	0.004	0.005	0.035	0.115	0.058	0.051	0.036	0.055	0.034	0.018	0.064					
F	0.155	0.117	0.038	0.114	0.181	0.156	0.095	0.166	0.041	0.058	0.084	0.06	0.099	0.009	0.012	0.016	0.087	0.135	0.143	0.033	0.107	0.046	0.109	0.041	0.11					
	0.157	0.149	0.074	0.135	0.179	0.151	0.124	0.148	0.044	0.048	0.138	0.065	0.088	0.085	0.084	0.092	0.099	0.158	0.149	0.04	0.108	0.133	0.098	0.097	0.129					
	0.116	0.125	0.029	0.103	0.114	0.117	0.051	0.068	0.015	0.025	0.035	0.029	0.043	0.007	0.009	0.011	0.108	0.07	0.119	0.1	0.053	0.089	0.092	0.034	0.082					
	0.092	0.043	0.09	0.101	0.14	0.072	0.025	0.111	0.048	0.023	0.031	0.025	0.04	0.004	0.005	0.007	0.042	0.117	0.091	0.06	0.098	0.047	0.05	0.06	0.046					

表 4-4 DEMATEL 各类指标值

指标	影响度 B 值	被影响度 C 值	中心度 M 值	原因度 R 值
A1 知识与技能	2.416	2.299	4.715	0.117
A2 工作作风	1.963	1.771	3.734	0.192
A3 生理素质	1.176	0.927	2.103	0.249
A4 心理素质	1.447	2.077	3.524	-0.629
A5 防差错能力	1.538	2.98	4.518	-1.442
B1 规范工作	2.157	1.795	3.952	0.363
B2 专业培训	2.029	1.466	3.495	0.564
B3 标准运行程序	1.364	2.367	3.731	-1.003
B4 计算机软件	0.728	0.461	1.189	0.267
C1 工具设备	1.045	0.907	1.953	0.138
C2 安全设备	1.683	1.597	3.28	0.086
C3 维修性设计	1.444	0.967	2.411	0.477
C4 航材设备领用	0.394	1.526	1.92	-1.133
D1 恶劣天气	1.816	0.346	2.162	1.47
D2 噪音	1.811	0.357	2.168	1.453
D3 照明	1.565	0.526	2.091	1.04
D4 社会环境	1.182	1.022	2.204	0.16
E1 交叉检查	1.3	2.754	4.053	-1.454
E2 协作与配合	1.769	2.599	4.368	-0.829
E3 人际关系	1.028	0.865	1.893	0.163
E4 信息传递	0.977	2.059	3.037	-1.082
F1 工作监察	2.041	1.445	3.486	0.597
F2 安全政策	2.514	2.191	4.706	0.323
F3 激励机制	1.533	1.028	2.561	0.505
F4 排班管理	1.288	1.88	3.168	-0.592

根据表 4-4 的数据，以中心度 M 值为横坐标，原因度 R 值为纵坐标，绘制因果图，中轴为中心度的平均值 3.06，将因果图分为四个象限。如图 4-1 所示。

因果图的第一、二象限指标原因度（纵坐标）为正，则代表此类指标是原因类，其可调整改善的弹性很大；第三、四象限指标原因度（纵坐标）为负，说明该指标偏向于被影响因素，是导致类，没有很大的改善空间。但该类因素极易被其他因素的影响，因此当其他因素发生异常，应提防该类因素也可能会出现差错。

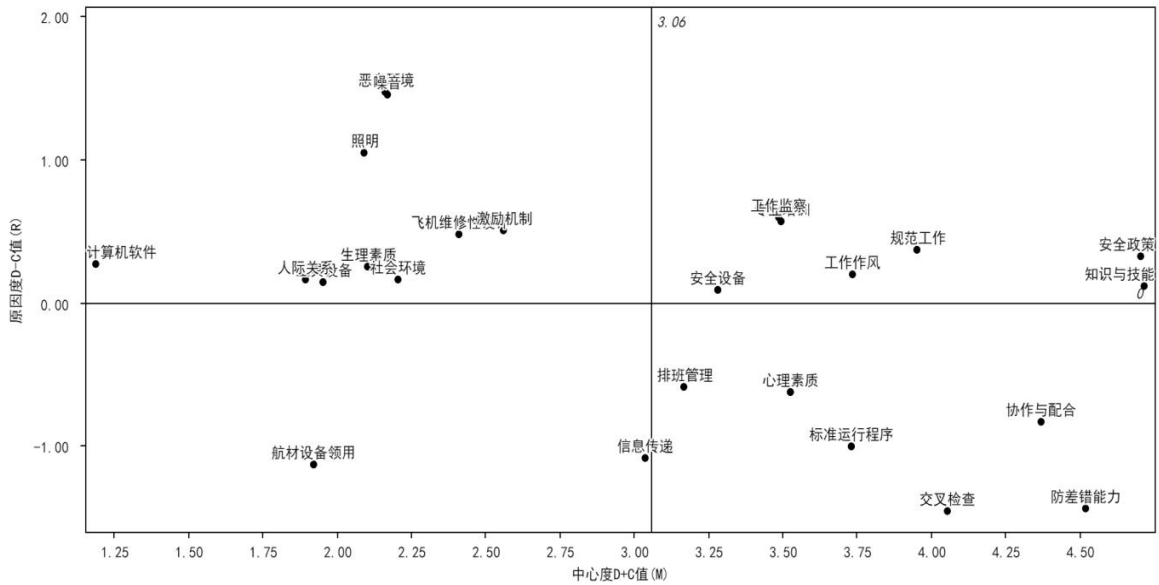


图 4-1 因果图

4.1.2 基于 ANP 法的航空维修人为因素指标权重确立

首先将航空维修人为因素指标体系输入 SD 软件，流程如下：

1. 点击软件左上角“+”（Add new Cluster），创建一个簇（Cluster），在 Name 栏输入“A 核心能力”，点击 Save 即可得到第一个簇，如图 4-2 所示：

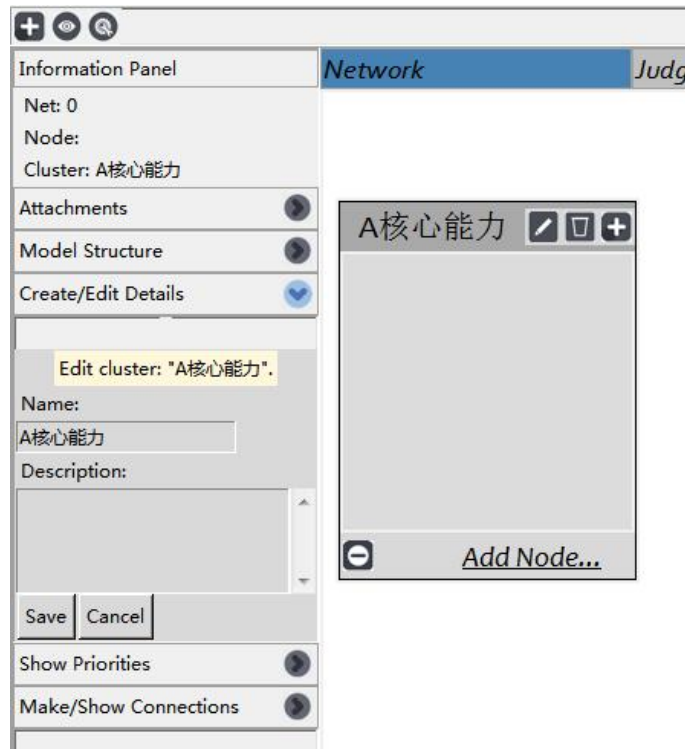


图 4-2 簇的创建

重复此步骤，创建指标体系的 6 个一级指标（簇），如图 4-3 所示：

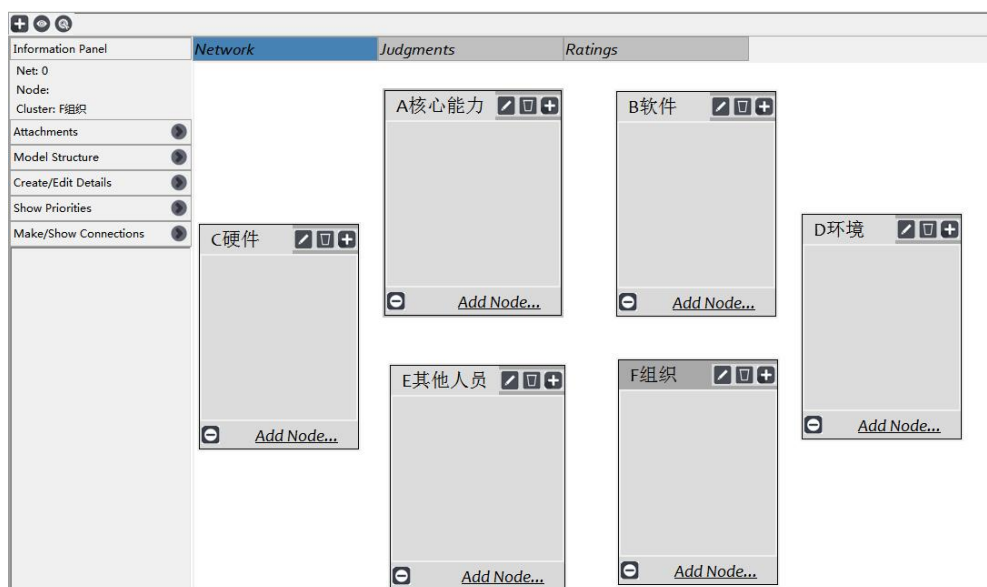


图 4-3 所有簇的创建

2. 点击簇下方的“Add Node”按钮，为每个簇创建新的节点（Node），在 Name 栏输入“A1 知识与技能”，点击 Save 即可得到簇中第一个节点，如图 4-4 所示：

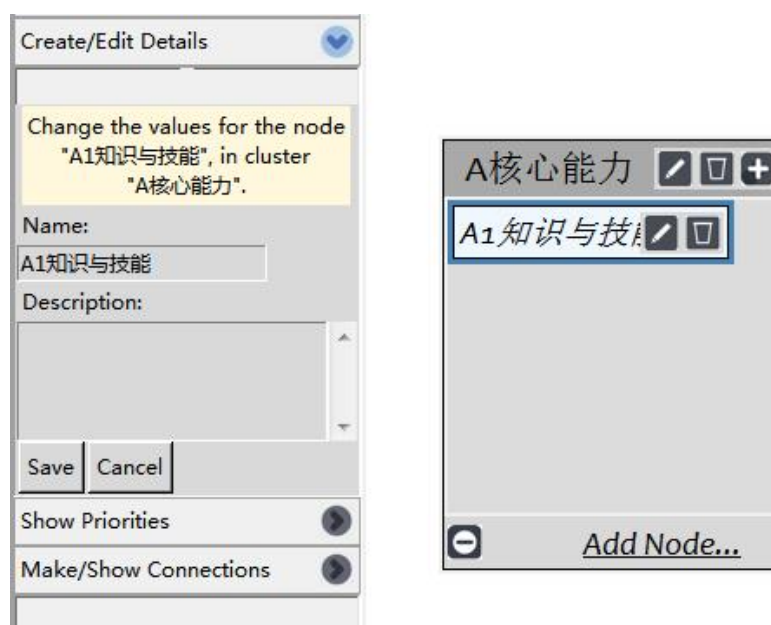


图 4-4 节点的创建

重复此步骤，按照图 2-6，将各个簇中节点添加完成，如图 4-5 所示：

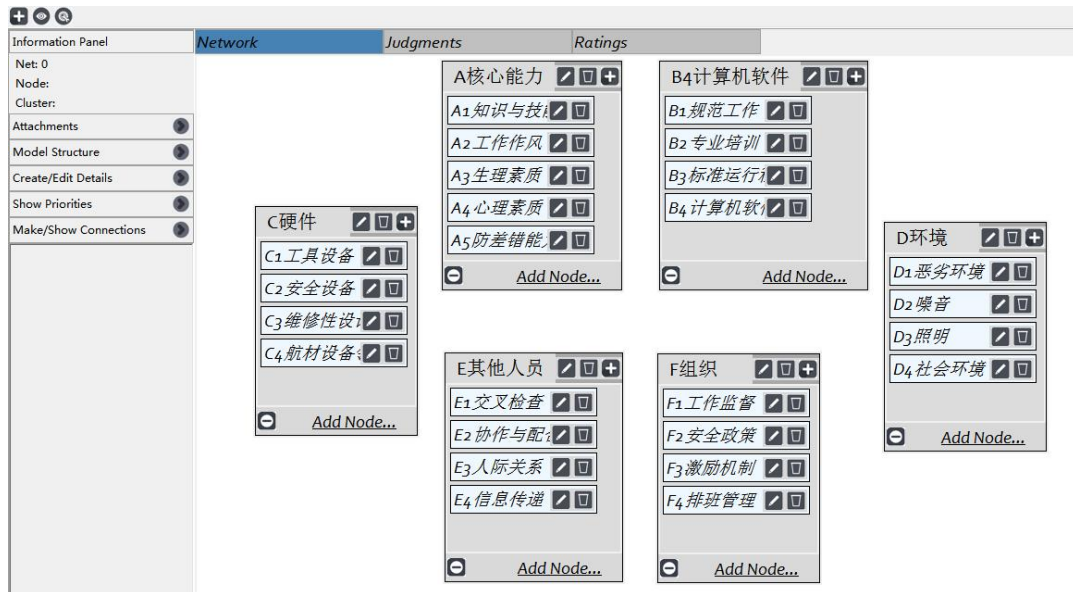


图 4-5 完整的指标模型

3. 网络的创建。

利用上述 DEMATEL 方法计算出的综合影响矩阵 T，根据反复试验得出阈值 $\text{threshold}=0.097$ ，利用 Excel 筛选功能，筛选出 ≥ 0.097 的指标值，以 A1 为例（如图 4-6），去掉影响可以忽略不计的关联关系。

	T
A2	0.12
A3	0.105
A4	0.118
A5	0.135
B2	0.159
C2	0.144
C3	0.139
D1	0.152
D2	0.154
D3	0.146
E1	0.125
E2	0.149
F1	0.155
F2	0.157
F3	0.116

图 4-6 A1 指标筛选后剩余指标

通过“Make/Show Connections”功能框将筛选后的指标一一对应输入，以 A1 指标为例（如图 4-7）建立指标间相互影响关系。

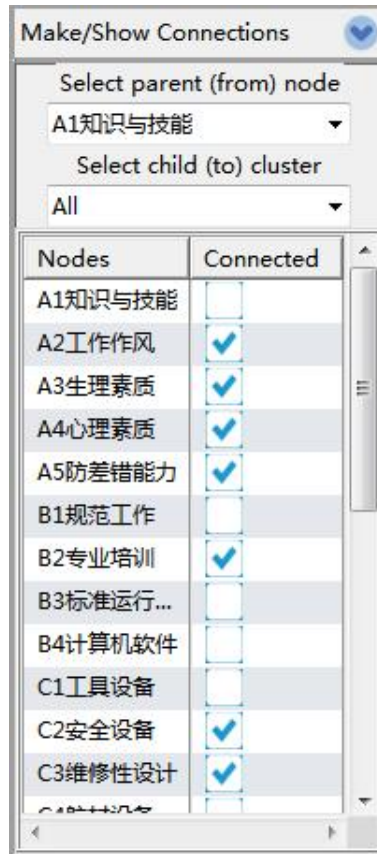


图 4-7 创建 A1 与其他指标间的关系（由于软件原因未完全显示）

重复此步骤，建立完整的网络结构图，单向箭头末端指标对首端指标存在影响，双向箭头代表互相影响，箭头指向自己则表示准则内部存在反馈。如图 4-8 所示。

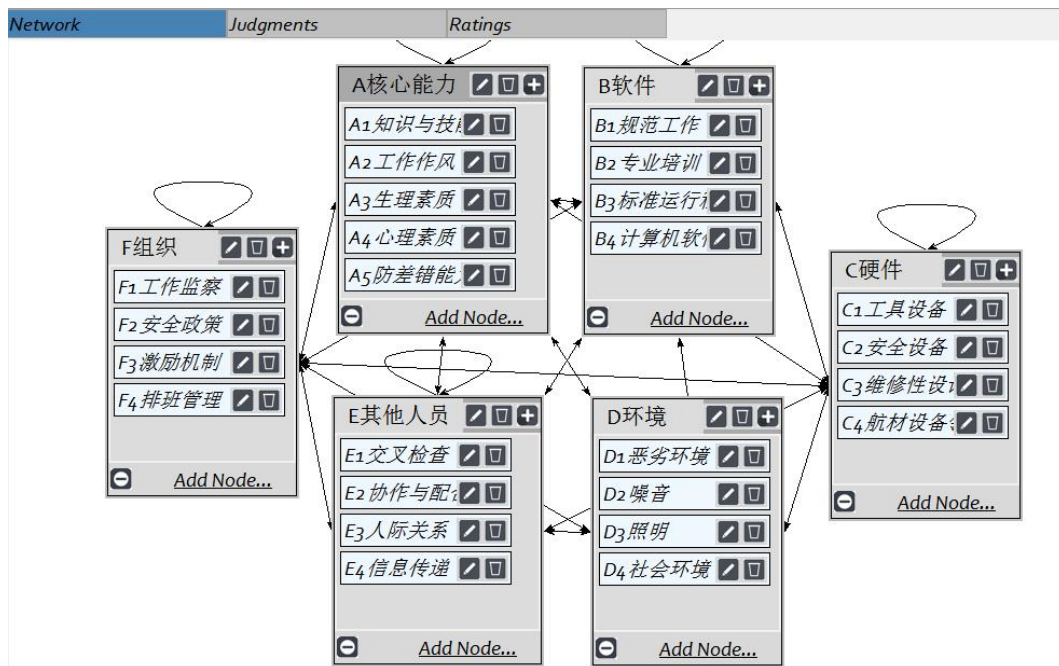


图 4-8 航空维修人为因素网络图

4. 强大的 Super Decision 软件可根据网络结构自动建立各准则下元素的影响判断矩阵。此处将需要比较的指标通过问卷星的形式制作成专家问卷（见附录 2），收集后输入软件中，例如图 4-9 是核心能力准则下的知识与技能元素的判断矩阵。



图 4-9 核心能力准则下的知识与技能元素的判断矩阵

根据上述判断矩阵输入的权重数值可产生图 4-10 所示的规范工作权重图，其一致性检验（Inconsistency）结果为 $0.08881 < 0.1$ ，满足要求，一致性检验在可接受范围内。每完成一组数据的比较都需要进行一致性检验，检验通过才可以进行下一组数据的判断。

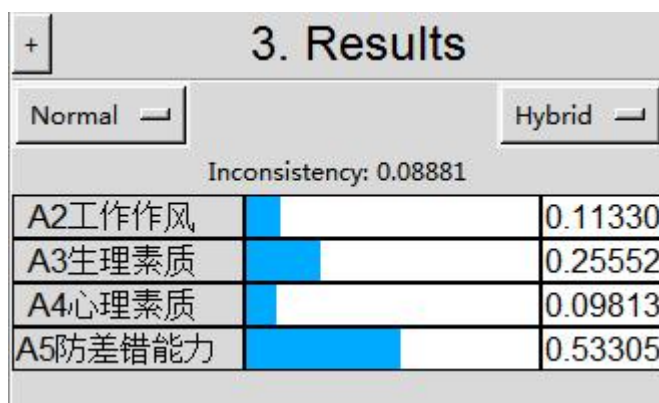


图 4-10 判断矩阵权重

依次选择要评估的标准和要素，反复构建评估矩阵并确定其权重。当输入所有比较数据时，构建所有评分矩阵，SD 软件即可自动生成未加权超矩阵、加权超矩阵、极限超矩阵，分别如图 4-11、图 4-12、图 4-13 所示。

由于软件显示范围有限，图片仅显示矩阵局部的数值，需重点关注的是极限超矩阵，极限超矩阵每一行数值都是相同的，则任意一列即为各元素的权重值。

Main Network: 民航维修人为因素ANP权重.sdmod: ratings: Unweighted Super Matrix

Clusters	Nodes	A1知识与技能	A2工作作风	A3生理素质	A4心理素质	A5防差错能力	B1规范工作
A核心能力	A1知识与技能	0.000000	0.098884	0.125000	0.527836	0.609814	0.214221
	A2工作作风	0.113297	0.000000	0.000000	0.139648	0.000000	0.619656
	A3生理素质	0.255516	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.058224
	A4心理素质	0.098133	0.536825	0.000000	0.000000	0.165529	0.000000
	A5防差错能力	0.533054	0.364292	0.875000	0.332516	0.224657	0.107899
B软件	B1规范工作	0.833333	0.683340	0.000000	1.000000	0.000000	0.250000
	B2专业培训	0.000000	0.116850	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	B3标准运行程序	0.166667	0.199810	0.000000	0.000000	1.000000	0.750000
	B4计算机软件	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
C硬件	C1工具设备	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.673811
	C2安全设备	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	C3维修性设计	0.857143	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.225535
	C4航材设备领用	0.142857	1.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.100654
D环境	D1恶劣环境	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Done

图 4-11 未加权超矩阵

Main Network: 民航维修人为因素ANP权重.sdmod: ratings: Weighted Super Matrix

Clusters	Nodes	A1知识与技能	A2工作作风	A3生理素质	A4心理素质	A5防差错能力	B1规范工作
A核心能力	A1知识与技能	0.000000	0.035405	0.056298	0.211231	0.235385	0.081231
	A2工作作风	0.043732	0.000000	0.000000	0.055885	0.000000	0.211231
	A3生理素质	0.098628	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.027710
	A4心理素质	0.037879	0.192206	0.000000	0.000000	0.063893	0.055778
	A5防差错能力	0.205756	0.130432	0.394087	0.133067	0.086717	0.047599
B软件	B1规范工作	0.089593	0.068147	0.000000	0.111464	0.000000	0.014349
	B2专业培训	0.000000	0.011653	0.000000	0.000000	0.000000	0.006796
	B3标准运行程序	0.017919	0.019926	0.000000	0.000000	0.107512	0.047599
	B4计算机软件	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000964
C硬件	C1工具设备	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.001392
	C2安全设备	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.006932
	C3维修性设计	0.030389	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.003427
	C4航材设备领用	0.005065	0.032887	0.000000	0.000000	0.035454	0.014349
D环境	D1恶劣环境	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.007902

Done

图 4-12 加权超矩阵

Main Network: 民航维修人为因素ANP权重.sdmod: ratings: Limit Matrix

Clusters	Nodes	A1知识与技能	A2工作作风	A3生理素质	A4心理素质	A5防差错能力	B1规范工作
A核心能力	A1知识与技能	0.098520	0.098520	0.098520	0.098520	0.098520	0.0985
	A2工作作风	0.047599	0.047599	0.047599	0.047599	0.047599	0.0475
	A3生理素质	0.027710	0.027710	0.027710	0.027710	0.027710	0.0277
	A4心理素质	0.055778	0.055778	0.055778	0.055778	0.055778	0.0557
	A5防差错能力	0.218275	0.218275	0.218275	0.218275	0.218275	0.2182
B软件	B1规范工作	0.028657	0.028657	0.028657	0.028657	0.028657	0.0286
	B2专业培训	0.006796	0.006796	0.006796	0.006796	0.006796	0.0067
	B3标准运行程序	0.055065	0.055065	0.055065	0.055065	0.055065	0.0550
	B4计算机软件	0.000964	0.000964	0.000964	0.000964	0.000964	0.0009
C硬件	C1工具设备	0.001392	0.001392	0.001392	0.001392	0.001392	0.0013
	C2安全设备	0.006932	0.006932	0.006932	0.006932	0.006932	0.0069
	C3维修性设计	0.003427	0.003427	0.003427	0.003427	0.003427	0.0034
	C4航材设备领用	0.014349	0.014349	0.014349	0.014349	0.014349	0.0143
D环境	D1恶劣环境	0.007902	0.007902	0.007902	0.007902	0.007902	0.0079
	D2噪音	0.003015	0.003015	0.003015	0.003015	0.003015	0.0030

Done

图 4-13 极限超矩阵

根据极限超矩阵的结果，得出航空维修人为因素评价指标权重结果如表 4-5 所示。

表 4-5 航空维修人为因素评价指标权重

一级指标	二级指标	权重
核心能力 A (0.44789)	知识与技能 A1	0.09852
	工作作风 A2	0.0476
	生理素质 A3	0.02771
	心理素质 A4	0.05578
	防差错能力 A5	0.21828
软件 B (0.09149)	规范工作 B1	0.02866
	专业培训 B2	0.00680
	标准运行程序 B3	0.05507
	计算机软件 B4	0.00096
硬件 C (0.0261)	工具设备 C1	0.00139
	安全设备 C2	0.00693
	飞机维修性设计 C3	0.00343
	航材设备领用 C4	0.01435
环境 D (0.01829)	恶劣天气 D1	0.00790
	噪音 D2	0.00301
	照明 D3	0.00173
	社会环境 D4	0.00565
其他人员 E (0.19754)	交叉检查 E1	0.07397
	协作与配合 E2	0.05589
	人际关系 E3	0.00295
	信息传递 E4	0.06473
组织 F (0.2187)	工作监察 F1	0.02775
	安全政策 F2	0.11989
	激励机制 F3	0.01496
	排班管理 F4	0.05610

4.1.3 混合权重的确定

本节由 ANP 所计算出的结果当作元素的权重，利用 Tamura et. al^[20]提出的混和重要程度的方法，利用公式 3-15 计算混合权重关系 z ，如表 4-6 所示：

表 4-6 混合矩阵 z 的值

指标	混合权重
A1 知识与技能	0.23263
A2 工作作风	0.16531
A3 生理素质	0.10333
A4 心理素质	0.14386
A5 防差错能力	0.30524
B1 规范工作	0.15991
B2 专业培训	0.12721
B3 标准运行程序	0.13700
B4 计算机软件	0.04342
C1 工具设备	0.05909
C2 安全设备	0.10902
C3 飞机维修性设计	0.08771
C4 航材设备领用	0.04153
D1 恶劣天气	0.12111
D2 噪音	0.11460
D3 照明	0.09809
D4 社会环境	0.06827
E1 交叉检查	0.15549
E2 协作与配合	0.15889
E3 人际关系	0.05803
E4 信息传递	0.12771
F1 工作监察	0.14894
F2 安全政策	0.24625
F3 激励机制	0.10084
F4 排班管理	0.13750

将 z 矩阵使用 MATLAB 工具进行归一化处理并进行排序，如表 4-7 所示：

表 4-7 混合权重归一化排序结果

指标	混合权重	排序
A5 防差错能力	0.09389	1
F2 安全政策	0.07575	2
A1 知识与技能	0.07156	3
A2 工作作风	0.05085	4
B1 规范工作	0.04919	5
E2 协作与配合	0.04887	6
E1 交叉检查	0.04783	7
F1 工作监察	0.04581	8
A4 心理素质	0.04425	9
F4 排班管理	0.04230	10
B3 标准运行程序	0.04214	11
E4 信息传递	0.03928	12
B2 专业培训	0.03913	13
D1 恶劣天气	0.03725	14
D2 噪音	0.03525	15
C2 安全设备	0.03353	16
A3 生理素质	0.03178	17
F3 激励机制	0.03102	18
D3 照明	0.03017	19
C3 维修性设计	0.02698	20
D4 社会环境	0.02100	21
C1 工具设备	0.01818	22
E3 人际关系	0.01785	23
B4 计算机软件	0.01336	24
C4 航材设备领用	0.01277	25

4.2 结果分析及管控建议

本节以 DEMATEL 法中的因果图（图 4-1）、各类指标值（表 4-4）和混合权重（表

4-6) 为依据, 对重要的航空维修人因指标进行分析。具体分析如下:

1. 根据混合权重排序结果, 防差错能力排在第一位, 参照 DEMATEL 各类指标值 (表 4-4), 该因素位于因果图第四象限, 中心度高, 为结果因素, 这与近几年维修事故调查结果相符合, 大多数事故征候均是由机务人员无意识的差错引起, 比如认知错误、遗忘重要的信息、将工具遗漏在飞机里、错报漏报重要信息等。计算数据显示该因素极易受到其他因素的影响, 所以, 当其他因素发生改变时, 应注意此因素也会受到影响, 比如在恶劣天气下或是噪音过大的环境中工作, 应注意维修人员可能会发生无意识的差错。虽然人为差错是不可避免的, 但可以通过控制其他因素, 达到改善该因素的目的。

2. 根据混合权重排序结果, 安全政策排在第二位, 参照表 4-4, 该因素中心度在原因因素中仅次于知识与技能, 这意味着安全政策会影响其他大部分因素。因此, 通过落实安全生产责任制、出台各种安全管理规章制度等, 不断优化企业的安全政策, 强调安全在组织中的重要性, 当安全政策得到改善时, 如标准运行程序、交叉检查等这些被影响的因素也会随之得到改善。

3. 根据混合权重排序结果, 知识与技能排在第三位, 参照表 4-4, 该因素的中心度值在 25 个因素中排在首位, 且位于因果图第一象限, 为原因因素, 这意味着该因素影响了其他大部分因素。这与现实相符合, 航空设备维修人员的专业素质、专业知识和能力是确保不发生维修事故和隐患的重要基础。如果维修人员缺乏必要专业理论知识, 对维修对象的基本结构和原理不明确, 基本操作技能低, 故障排除不彻底, 操作不熟练等, 就容易导致事故隐患的发生。因此, 保证定期的技能考试, 高质量的专业培训是非常有必要的, 这极有益于提高航空维修整体的安全水平。

4. 根据混合权重排序结果, 工作作风排在第四位, 参照表 4-4, 它的中心度大于平均值, 且位于第一象限, 为原因因素, 这说明工作作风在系统扮演着非常重要的角色, 也意味着由于该因素这一结论与事故的定性分析相吻合。例如机务人员在工作中违反操作规程、规章制度以及有关规定最终导致维修事故的行为, 都是因为缺乏安全观念和安全意识、维护工作不扎实、工作责任心不强、不严格执行维修规定, 这些不良的工作作风都可能会导致一起事故或者事故征候。可见, 培养航空维修人员良好的的工作作风, 才能更好的实现安全生产目标。

5. 根据混合权重排序结果, 规范工作排在第五位, 参照表 4-4, 它的中心度大于平均值, 位于第一象限, 为原因因素, 这意味着该因素影响其他因素。在飞机维修工作中, 机务人员不按手册、工卡等标准规程进行工作的现象频频发生, 机务人员按照自己的想法或习惯性做法去进行维修, 都会埋下巨大的维修事故隐患。因此, 这说明一些人为因素的情况可以通过提高工作的标准化程度来改善, 这与实际情况是一致的。。

6. 根据混合权重排序结果, 协作与配合排在第六位, 参照表 4-4, 其中心度排在第 4 位, 且位于因果图的第四象限, 是结果因素, 意味着该因素极易被其他人为因素影响。例

如，当社会环境、人际关系等因素发生异常时，应多加注意机务人员协作与配合工作的表现，以及维修工作完成的质量。

4.3 本章小结

本章首先利用 DEMATEL 方法找出各指标之间的综合影响关系、各类指标值及因果图。利用 T 构建 ANP 网络结构，确定指标权重，最后获得各指标的混合权重。根据得到的各评价指标的因果关系图、混合权重对各评价指标进行分析，找出航空维修系统中最重要的人为因素，分别是：防差错能力、安全政策、知识与技能、工作作风、规范工作、协作与配合。

结论

总结

本文立足于航空维修人因为背景，在总结国内外该领域研究现状的基础上，对基本的人因理论和模型进行简要考察。本文立足于航空维修的实际情况，对航空维修中的人为因素进行分析，建立基于专家意见的航空维修中的人为因素指标体系。研究了 DEMATEL 法与 ANP 法相结合的方法，提出了 DEMATEL 法与 ANP 法相结合的优点和方法。创建问卷，收集数据，使用 DEMATEL 方法得到的因果关系图，确认 ANP 网络结构，使用 ANP 方法确定各指标的权重，得到权重，再得到混合权重。综合分析了航空维修中最重要的为人因素，对航空维修安全管理具有重要的现实意义。

展望

航空维修人因管控是一项复杂的系统工程，影响人为失误的因素很多，无论是人的不安全行为还是事物的不安全状态，都对航空维修系统产生了很大的影响。因此，本文所考察的只是初步的理论讨论。通过总结全文，发现还有以下几个方面的不足之处：

1. 本文的在研究过程中，DEMATEL-ANP 方法判断或多或少取决于专家的经验和个人喜好，而且 DEMATEL 法打分表（附录 1）由于指标过多，专家打分时容易麻木，导致判断失误，所以，降低评估的主观性是未来研究的主要重点之一。

2 本文采用 ANP 方法来确定各个指标的权重，虽然 ANP 方法比 AHP 方法有很大的改进，并且充分考虑了指标之间的依赖和反馈，但它仍然有自己潜在的缺点，因此可以考虑采用其他方法确定指标权重以获得更好的结果，例如，综合模糊评估方法。

3. 航空维修人为因素的管控是一项不确定因素多、关联因素多的复杂系统工程，对其定性、定量是一项非常困难的工作。因此，对于指标的设计工作还需要不断地完善和改进。

参考文献

- [1] 王岩峰. 基于人为因素的民航维修安全分析与评估研究[D]. 江苏:南京航空航天大学,2009.
- [2] Frank H Hawkins.Human Factors in Flight[M].England:Ashgate Publishing Limited 1987:22-25,46-47.
- [3] Reason J.Human Errors[M].London:Cambridge University Press,Cambridge,1990.
- [4] 李艳,谢晖,孙婷,等. Reason 模型及其在医疗领域中的应用现状[J]. 解放军护理杂志,2016,33(11):29-32.
- [5] 刘洋,王永刚. 一种解释航空维修中人为因素的模型——PEAR 模型介绍[J]. 航空维修与工程,2010(5):81-82.
- [6] 李莹. 基于 DEMATEL-ANP 水电施工现场安全评价模型研究[D]. 湖北:华中科技大学,2011.
- [7] 张晓全,王欢,燕春光. 基于 DEMATEL-ANP 法的航空维修人为因素分析[J]. 安全与环境工程,2014,21(1):128-133.
- [8] 人为因素总数据库课题组.人为因素总数据库研究报告[R].天津:中国民航学院民航安全科学研究所,2003.
- [9] 张伟报. 基于 DECIDE 模型的空管人为因素分析研究[J]. 大科技(科技天地),2010(8):104-105.
- [10] 国际民用航空组织 (ICAO).安全管理手册 (SMM[Z]).国际民航组织,2009:2-13
- [11] 余肖,杨家忠.基于 REASON 模型的复兴航空 GE791 事故分析[J].现代计算机,2021,27(32):65-68.
- [12] 梁广,张勇军,黎浩,凌毅.变电运行人因事故分析的拟 REASON 模型[J].继电器,2008(03):23-26.
- [13] 周刚,程卫民,诸葛福民,等. 人因失误与人不安全行为相关原理的分析与探讨[J]. 中国安全科学学报,2008,18(3):10-14.
- [14] 张思雨. 专家交互情境下基于新标度的群组 DEMATEL 决策方法研究[D].昆明理工大学,2020.
- [15] 唐小丽,冯俊文,王雪荣.基于网络分析法的项目风险管理[J].统计与决策,2005,(16):147-148.
- [16] Shouming Chen, Jie Li. Assessing the Architectural Design Services by Using DEMATEL Approach. Computational Intelligence and Natural Computing, 2009,(2):463-463.
- [17] Fang C H, Cheng Y S, Chen G L. Application of DEMATEL in discussion of key competency of talents in manufacturing industries. Management of Innovation and Technology, 2008, (9) 249-249.
- [18] Hiroyuki Tamura, Katsuhiko Akazawa. Structural modeling and systems analysis of uneasy factors for realizing safe, secure and reliable society. Journal of Telecommunications and Information Technology, 2005, (3):64-72.
- [19] 刘睿,余建星,孙宏才,田平.基于 ANP 的超级决策软件介绍及其应用[J].系统工程理论与实践,2003(08):141-143.

- [20] Hiroyuki Tamura, Katsuhiro Akazawa. Structural modeling and systems analysis of uneasy factors for realizing safe, secure and reliable society. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2005, (3):64-72.
- [21] 任建国. 安全评价在我国的发展历程[J]. *安防科技*,2005(1):28-30.
- [22] 孙宏才,田平. 网络层次分析法(ANP)浅析[C]. //中国系统工程学会第12届学术年会论文集.北京:海洋出版社, 2002:440-445.
- [23] Mirhosseini Seyed Armin,Kiani Mavi Reza,Kiani Mavi Neda,Abbasnejad Behzad,Rayani Farzaneh. Interrelations among Leadership Competencies of BIM Leaders: A Fuzzy DEMATEL-ANP Approach[J]. *Sustainability*,2020,12(18).
- [24] 范赵鹏,张金金,温玮,李程瑜,敬玉平.网络层次分析法(ANP)分析工具的设计与实现[J].*计算机与数字工程*,2020,48(01):46-50.
- [25] 陆杨.民航维修质量与安全管理措施分析[J].*中国设备工程*,2022(02):51-52.
- [26] Dragan Pamučar,Milan Mihajlović,Radojko Obradović,Predrag Atanasković. Novel approach to group multi-criteria decision making based on interval rough numbers: Hybrid DEMATEL-ANP-MAIRCA model[J]. *Expert Systems With Applications*,2017,88.
- [27] 胡祎程. 基于人因的工程项目现场安全标志有效性评价研究[D].安徽工程大学,2014.
- [28] 孙铭忆.层次分析法(AHP)与网络层次分析法(ANP)的比较[J].*中外企业家*,2014(10):67-68.
- [29] 李晓璐,李春雷.基于人-机-环境的金属矿山通风系统模糊综合评价[J].*中国矿业*,2007(01):66-68.
- [30]]Miriam F. Bongo,Kissy Mae S. Alimpangog,Jennifer F. Loar,Jason A. Montefalcon,Lanndon A. Ocampo. An application of DEMATEL-ANP and PROMETHEE II approach for air traffic controllers' workload stress problem: A case of Mactan Civil Aviation Authority of the Philippines[J]. *Journal of Air Transport Management*,2018,68.
- [31] 梁晓.民航机务维修系统安全风险监测研究[J].*中国航务周刊*,2022(05):58-59.

附录

附录 1：航空维修人为因素评估系统专家问卷（Excel 形式）

航空维修人为因素评估系统专家问卷

您好：

首先，感谢您参与本问卷的填答，这是一份学术性的问卷，目的在于评估航空维修各人为因素之间的影响程度，您的问卷对于本研究能否完成十分重要，请直接依个人意见填答，您所填答的资料将仅供整体分析之用，绝不会对外公布，敬请安心作答，由衷感谢您的帮忙。

敬祝平安顺利

填写说明：请您知悉本次问卷的主要指标内容（sheet2），并结合您的工作经验，量化各指标之间的相互关系，对判断矩阵（sheet3）进行打分。本次打分采用 5 级标度，即取 0-4 的方法来度量。0 分代表没有影响，1 分代表低度影响，2 分代表中度影响，3 分代表高度影响，4 分代表极高度影响。

举例：如果**知识与技能**对**生理素质**有低度影响，则填写 1
如果**工作作风**能够对**规范工作**产生极大影响，则填写 4
要素自身则不需要比较，即矩阵的对角线上的值用 0 来表示

	知识与技能	工作作风	生理素质	心理素质	防差错能力	规范工作
知识与技能	0		1			
工作作风		0				4

被动影响项

主动影响项

◀ < > ▶

说明

指标

打分表

+

民航维修主要人为因素指标确定

A. 维修人员 核心表现	<p>知识与技能：专业的技能和知识水平</p> <p>工作作风：诚信意识，规章底线，心存侥幸，马虎大意。</p> <p>生理素质：疲劳、疾病、生物节律、体力和适应力，是否具备连续作战的精力，是否能够适应外部环境的各种变化。</p> <p>心理素质：在复杂的环境中的心理抗压能力，认知能力、情绪、意志、理智等方面。</p> <p>防差错能力：错（遗忘重要信息）、忘（记忆力）、漏（遗漏工具）。</p>
B. 维修人员 与软件之间的 关系	<p>规范工作：是否按手册、工卡等标准规程进行工作。</p> <p>专业培训：与维修工作相关的培训。</p> <p>标准运行程序：是否按相关规章做维修记录，规范填写检查单等。</p> <p>计算机软件：未经测试或难以使用的计算机软件。</p>
C. 维修人员 与硬件之间的 关系	<p>工具设备：工具设备老旧、破损、失修失效。</p> <p>安全设备：确保个人安全的防护和设备，如安全绳、安全帽、反光背心等。</p> <p>飞机维修性设计：维修件的可接近性、标签正确性、构件差异和操作信息等。</p> <p>航材设备领用：维修人员对航材件的模糊造成航材件号领错。</p>
D. 维修人员 与环境之间的 关系	<p>恶劣环境：不适宜的温度和湿度，室外工作遇恶劣天气。</p> <p>噪音：嘈杂的环境会影响维修人员工作能力正常发挥，对加工信息的能力、注意力、记忆及反应速度产生很大影响</p> <p>照明：照度是否适宜，作业面受光是否均匀，照明度太强或太弱都会引起不同程度的疲劳</p> <p>社会环境：机务人员的思想观念，人生观和价值观会随社会环境而改变；优越的工作环境会促进好的职业素质养成。</p>
E. 维修人员 与其他人员 之间的关系	<p>交叉检查：维修人员之间交叉检查不充分。</p> <p>协作与配合：团队工作是否能够和谐有序，积极配合。</p> <p>人际关系：维修人员与协作人员或集体间的沟通等各种联系。</p> <p>信息传递：信息传递不及时，迟报 漏报 瞒报。</p>
F. 维修人员 与组织之间的 关系	<p>工作监察：对维修工作质量的监督和纠察。</p> <p>安全政策：组织内对安全重视程度；风险管理、隐患排查等政策。</p> <p>激励机制：对员工工作具有鼓励助长作用的手段。</p> <p>排班管理：人手不足，工作时间过长，休息时间不充分。</p>

<<
>>
|
说明
指标
打分表
+

附录 2：航空维修人为因素指标权重专家问卷（问卷星形式）

本问卷主要是为了运用 ANP 方法而设计的调查问卷，填写问卷时，需要判断某一个准则（如 A）下另外两个元素（例如 B 与 C）之间的相对重要程度。如果 B 比 C 更重要，则在左侧相应的重要程度打“√”；如果 C 比 B 重要，则在右侧相应的重要程度打“√”；如果 B 和 C 同等重要，则在中间“1”处打“√”。问卷采用 1-9 标度法，数字标度的含义及说明如下：

ANP 法比较尺度表

标度	意义
1	i 因素与 j 因素同等重要
3	i 因素比 j 因素略微重要
5	i 因素比 j 因素明显重要
7	i 因素比 j 因素非常重要
9	i 因素比 j 因素绝对重要
2、4、6、8	介于上述两相邻判断尺度中间

“A1 知识与技能”在“A 核心能力”准则下具有相关性的指标间两两重要性比较

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A2工作作风																		A3生理素质
A2工作作风																		A4心理素质
A2工作作风																		A5防差错能力
A3生理素质																		A4心理素质
A3生理素质																		A5防差错能力
A4心理素质																		A5防差错能力

注：由于本研究所涉及的 ANP 对判断矩阵较多，因此附录仅以一个指标在一个准则下的比较矩阵进行展示。

致 谢

寒来暑往，春收冬藏。始于 2020 年秋，终于 2022 年夏。

春风化雨，诲人不倦。首先，我要特别感谢我的指导教师魏志民老师。从论文选题到方案设计，从专业知识的耐心讲解到专家问卷的收集，从论文初稿的逐字逐句到定稿的完美呈现，都离不开魏老师的悉心指导。在魏老师的帮助下，我写作的思路和逻辑一次比一次清晰，让我从论文小白的困扰中解脱，慢慢有了写好论文的信心。其次，我要感谢帮助过我给予我善意与温柔的所有老师，一日为师，终身为师，衷心祝愿各位老师万事顺意，身体健康！

焉得萱草，言树之背。感谢父母二十余载的悉心培养与教育，感谢我最爱的家人们在我求学之路上的支持与付出。祝愿我的家人们身体健康，万事胜意！

道阻且长，行则将至。我还要感谢努力的自己，见过寒冬清晨的校园，走过图书馆的每一个角落，这都将成为最美好的回忆。我始终坚信学无止境，天道酬勤，未来可期！

生逢盛世，无愧时代，无愧青春！