

基于 DEMATEL-TAISM 方法的军机飞行员 岗位能力影响因素及作用机制

孙振佳¹, 完颜笑如¹, 林贵平¹, 冯传宴², 刘娟³, 刘双¹

(1.北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;
2.杭州市北京航空航天大学国际创新研究院(北京航空航天大学国际创新研究院), 浙江 杭州 311115;
3.空军特色医学中心, 北京 100142)

摘要:高水平的军机飞行员岗位能力对于完成作战任务、保障飞行安全具有十分重要的意义。但是,目前关于军机飞行员岗位能力的影响因素及作用机制的研究却十分匮乏。为了构建军机飞行员岗位能力的影响因素指标体系,研究招募了30名合格军机飞行员以完成影响因素及其相互影响矩阵的调查,并综合应用决策试验与评估-综合对抗解释结构建模(decision making trial and evaluation-total adversarial interpretive structure modeling, DEMATEL-TAISM)方法进行分析。结果表明:①军机飞行员岗位能力影响因素指标体系由13项关键因素组成,可分成基础能力训练、理论知识训练、飞行训练和改装训练这4类一级指标;②多任务/场景切换的操控能力、基本飞行操控能力、特情处置驾驶操控能力、战术基础理论、自我管理技能、职业体能是6个至关重要的影响因素,前三者的中心度(与其他因素的关联)最高,后三者的原因度(对其他因素的影响)最大;③对于军机飞行员岗位能力的生成,自我管理技能、职业体能和战术基础理论是最根本原因,空中战术能力、飞行后讲评和改装飞行驾驶技术是最直接原因。研究结果可进一步应用于军机飞行员岗位能力评估系统的开发。

关键词:岗位能力;军机飞行员;影响因素指标体系;DEMATEL-TAISM;选拔训练;飞行安全
中图分类号:V7;R857.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2026)01-0058-12

研究表明,超过70%的军事和民用航空事故和事故征候可归咎于人的因素(简称人因)^[1-3]。与民用航空作业不同,军事飞行员常需主动触及飞行性能边界,其工作环境(超低空飞行、高强度对抗等)具有极高的不确定性和风险性^[4],这对军机飞行员的岗位能力提出了特殊且严苛的要求。我国空军在发展进程中曾经历多起涉及不同军用机型的飞行事故,付出了重大的人员与装备损失,同时也积累了宝贵的实践经验与安全教训。相关事故调查指出,飞

行员操作失误是军机事故的主要致因之一^[2],这与军机机型自身高动态、高复杂性的运行特点密切相关。一项国外研究也进一步指出,在军机飞行员操作失误中,相当一部分与飞行技能相关失误密切相关^[4-5]。由此可见,系统深入研究军机飞行员岗位能力的影响因素及训练考评体系,对提升军事飞行训练效能、保障飞行安全具有紧迫的现实意义。

针对军机飞行员岗位能力的影响因素,前人开展了一系列的探索。例如,Johnston等^[6]考察了认知能力、飞行经验和模拟在预测军机飞行员工作知识和飞行绩效方面的有效性。Tsifetakis等^[7]采用F16飞机编队的实际操作数据开展了军用航空非技术技能的分类和验证研究。Rozenberg等^[8]采用教学过程质量分析和人因分析方法,考察了1973年以来选定院校军事飞行员的航空教育课程。Qiu等^[9]探讨了心理弹性和毅力对军机飞行员自我效能感和

收稿日期:2025-06-10

基金项目:国家自然科学基金(52402507)、浙江省自然科学基金(ZCLMS26E0503)与“飞行人员身心机能提升科教协同创新中心”资助

作者简介:孙振佳(1985—),博士研究生

通信作者:冯传宴(1992—),副研究员

e-mail:fengchuanyan@buaa.edu.cn

特殊情境处理能力的中介和调节作用。尽管有上述探索,但针对这一主题的研究并不十分充足。此外,伴随着航空技术的发展,各类军用飞机的飞行性能、作战任务能力、系统/操作复杂度、传感器数量等方面得到了显著提升或增加。这使得飞行员操纵飞机完成各项任务的岗位能力要求也逐步攀升。因此,做好飞行员岗位能力培训面临较大挑战,这往往需要花费大量的资源投入并进行长期的训练与学习,尤其针对需要执行各种战斗任务的军用飞行员。在新时期军事装备快速更新迭代的背景下,目前尚缺乏对军机飞行员岗位能力的影响因素及训练效果考评的有效研究。

本研究的目的是确定影响军机飞行员岗位能力的关键影响因素,并分析这些因素之间的相互关系。首先在 2 轮德尔菲(Delphi)法构建的军机飞行员岗位能力影响因素指标体系的基础上,收集了相应的相互影响数据,以形成相互影响矩阵。进一步结合决策试验与评估-综合对抗解释结构建模(decision making trial and evaluation-total adversarial interpretive structure modeling,DEMATEL-TAISM)方法,开展影响因素之间的相互关系定量分析。在本研究中,DEMATEL 提供了一种定量比较因素重要性的方法^[10-11]。其以军机飞行员的认知结果(即对各因素之间相互影响程度的评价)为输入,计算不同因素的中心度(即关联属性)和原因度(即因果属性)。此外,本研究进一步结合 TAISM 探索了对抗性拓扑图,以揭示各因素之间的递进因果关系(层级图)和作用路径(拓扑图)。作为一种系统性的工具,DEMATEL-TAISM 方法量化并可视化了军机飞行员岗位能力影响因素之间的相互关系属性和相互作用机制。军机飞行员视角的研究结果可为提取军机飞行员岗位能力的重要影响因素和确定优先改进措施提供直接的参考和可行的决策支持。

1 方法

1.1 参试者

共招募 30 名男性军机飞行员(年龄范围 20~51 岁,平均年龄为 34.4 ± 13.88 岁;平均飞行时间为 1921.17 ± 2046.32 h(均值 \pm 标准差),执飞机型覆盖多型教练机与歼击机)参与本研究。其中 15 名飞行员完成了 2 轮德尔菲问卷调查^[12],另外 15 名飞行员完成了相互影响矩阵打分。本研究已经过北京航空航天大学与医学伦理委员会批准(批准号:BM20220176)。

1.2 调查步骤

调查分 2 个连续的步骤进行,均包含军机飞行员岗位能力影响因素的比较。首先,采用德尔菲方法^[13]完成了从模糊、不确定的因素集合到确定因素集合的转化。考虑德尔菲法无法揭示影响因素间作用机制,进一步采用 DEMATEL-TAISM 方法进行调查,使影响因素指标体系清晰有序,便于分析提取关键因素^[14]。为避免同一群人完成 2 个步骤可能存在的主观偏见/干扰,这 2 个步骤分别选取了不同的 15 名飞行员进行调查。

2 基于德尔菲方法的调查结果分析

首先针对飞行员岗位能力的影响因素开展了广泛的文献研究。在此基础上,结合焦点小组法确定初始的军机飞行员岗位能力影响因素指标体系。参与本次焦点小组讨论的专家包括飞行招飞人员、飞行员、飞行教员、飞行教学管理人员、工效学研究人员等。经过 2 轮德尔菲调查,最终确定了军机飞行员岗位能力影响因素指标体系,包括 4 个一级指标和 13 个二级指标。其中,4 个一级指标为基础能力训练、理论知识训练^[15-16]、飞行训练^[15-17]和改换装训练^[16-18],相关定义和解释见表 1。进一步,13 个二级指标的解释见表 2。

表 1 一级指标的定义和解释

| 一级指标 | 定义与解释 |
|-----------|---|
| A1 基础能力训练 | 即非技术技能(non-technical skills) ^[19] 的训练,包括认知、社会和个人资源技能,这些技能是对技术技能的补充。良好的非技术能力有助于安全、高效地完成任任务 ^[19] 。本研究中它包括了 B1 自我管理技能和 B2 职业体能这 2 个二级指标。 |

续表 1

| 一级指标 | 定义与解释 |
|-----------|--|
| A2 理论知识训练 | 即基础航空理论(basic aviation theory) ^[8,15-16] 的训练,指的是飞行员在开展飞行训练前应当掌握的飞行相关理论知识。相关内容必须体现既定的航空能力要求 ^[8] 。本研究中它包括了 B3 战术基础理论和 B4 飞行基础使用规则这 2 个二级指标。 |
| A3 飞行训练 | 即基本飞行训练(basic pilot training) ^[15-17] ,完成该项训练后军机飞行学员将获得单发喷气式战斗机或多发飞机的独飞资格。本研究其包括 B5 基本飞行操控能力、B6 多任务/场景切换的飞行操控能力、B7 特情处置的飞行操控能力、B8 偏差处置能力、B9 复杂气象条件任务执行能力、B10 空中战术能力、B11 飞行后讲评和 B12 模拟器训练这些二级指标。 |
| A4 改换装训练 | 改换装(type-rating) ^[16-18] 是飞行员执照上的一项授权,说明飞行员在某些机型上的特权或限制。本研究中指 B13 改装飞行驾驶技术。 |

表 2 二级指标的定义和解释

| 二级指标 | 定义与解释 |
|--------------------|---|
| B1 自我管理技能 | 自我管理定义为个体在行为、认知等方面采用的策略,用以管理其外在表征、优化绩效以及预防风险 ^[20] 。本研究关注的自我管理技能(self-management skills) ^[21] 包括自我意识、应激管理、情绪管理、警觉性与安全意识、抗干扰能力、抗挫折能力、决断力、战场心理压力调节能力、多任务管理能力、驾驶舱资源管理、空间知觉与定向能力、判断决策能力、注意力分配能力、记忆能力、自我准备、战斗精神培育和信息融合能力。 |
| B2 职业体能 | 职业身体能力(professional physical ability),简称职业体能(physical fitness) ^[22] 。指达到某种身体工作能力所需的体能训练量,可分为耐力、机动性、力量(包括核心力量)和柔韧性 ^[22] 。本研究中它包括了抗过载能力、抗眩晕能力和核心爆发力。 |
| B3 战术基础理论 | 战术基础理论(basic tactical theory)主要指为满足既定能力要求的航空教育科目 ^[8] ,关注战术基础理论方面。本研究中它包括空中领航学、空中射击学、飞行员认知心理、飞行安全、战术应用、战术技术和飞行模拟器。 |
| B4 飞行基础使用规则 | 飞行基础使用规则(basic flight rules)主要指为满足既定能力要求的航空教育科目 ^[8] ,关注飞行基础使用规则方面。本研究中它包括了空管规定、导航方法与应用、机载设备使用、空中遇险自救方法和技巧。 |
| B5 基本飞行操控能力 | 基本飞行操控能力(flight capability in routine situations)指一般场景下的飞行操控能力。本研究中包括了飞行程序的掌握能力、起降的技术/能力、昼夜简单气象下的基本飞行驾驶能力。 |
| B6 多任务/场景切换的飞行操控能力 | 多任务或多场景切换情境(flight capability in multi-task/scenario switching)是执行军事飞行任务经常需要应对的情况。本研究中多任务/场景切换的飞行操控能力包括高空飞行驾驶能力、超低空飞行驾驶能力、简单特技飞行驾驶能力、复杂特技飞行驾驶能力、双机编队简单特技飞行驾驶能力。 |
| B7 特情处置的飞行操控能力 | 良好的特殊情况处理能力(flight capability in emergencies)是保证飞行安全的前提 ^[9] 。本研究中它包括了发现攻击目标处置能力、被敌方目标锁定状况处置能力、对直线飞行目标水平攻击能力、对曲线飞行目标水平攻击能力、空中目标拦截与格斗能力、突发情况下应急设备使用技巧、飞机各系统失效处置能力。 |
| B8 偏差处置能力 | 偏差处置能力(error detection and recovery)是岗位能力培训的重点之一 ^[23-24] 。本研究中它包括了偏差识别和偏差修正能力。 |
| B9 复杂气象条件任务执行能力 | 复杂气象条件是执行飞行任务不可避免的外部飞行环境。本研究中复杂气象条件任务执行能力(flight capability in complex weather conditions)包括作战飞机昼间的复杂气象飞行能力、作战飞机夜间的复杂气象飞行能力及复杂气象条件航空生保能力。 |

续表 2

| 二级指标 | 定义与解释 |
|--------------|--|
| B10 空中战术能力 | 空中战术能力(aerial tactics capability)指在空中运用武装力量战胜敌人的能力。本研究中空中战术能力 ^[7] 包括战斗基本规则与方法、单机战术能力和协同战术能力。 |
| B11 飞行后讲评 | 讲评(debriefing)是分析飞行中遇到的问题、识别偏差和检查根本原因的能力 ^[7] 。本研究中飞行后讲评(post-flight debrief) ^[7] 指飞行复盘能力。 |
| B12 模拟器训练 | 模拟器训练是一种可行的方法,可以训练在复杂情境中执行任务所需的能力 ^[25] 。本研究中它包括了科目进入前训练、科目进行中训练和特定任务训练。 |
| B13 改装飞行驾驶技术 | 改装装训练,或称改型培训(type-rating training) ^[26] 是军机飞行员培训的最后环节。本研究中它包括了“改装机型的性能、功能及使用对比差异”,主要强调学习并熟悉机型改装后的性能对比,主要功能变化和使用对比差异。改装机型的飞行驾驶技巧、改装机型的任务执行技巧、改装机型的适应性。 |

3 基于 DEMATEL-TAISM 方法的军机飞行员岗位能力影响因素分析

在前述由第一组 15 名军机飞行员的 2 轮德尔非法获得的军机飞行员岗位能力影响因素指标体系基础上,重点对二级指标开展了基于 DEMATEL-TAISM 方法的影响因素分析。

3.1 基于 DEMATEL 方法的因果属性分析

第二组 15 名军机飞行员被邀请进行相互影响矩阵的问卷调查。本次共发放 15 份问卷,回收 15 份问卷。首先基于图论和矩阵工具计算军机飞行员岗位能力的各个影响因素的影响度、被影响度、中心度和原因度,具体步骤如图 1 所示。由此可以确定各因素的相互关系属性,其包括以中心度为代表的关联属性和以原因度为代表的因果属性。这有助于揭示值得优先关注的重要因素。

1) 构建直接影响矩阵 O

作为 DEMATEL 方法的初始输入,各影响因素之间的相互影响(记作 n)通过第二组飞行员的调查结果进行确认,从而建立初始的直接影响矩阵 $O = (x_{ij})_{n \times n}$ (其中 $n = 4$ (一级指标)或 13 (二级指标)),如表 3 ~ 4 所示。具体来说,通过开展因素间的两两比较,即因素 F_i 与因素 F_j 之间进行 2 次比较,分别是因素 F_i 对因素 F_j 的直接影响值(该值记为 x_{ij})和因素 F_j 对因素 F_i 的直接影响值(该值记为 x_{ji})。即 15 名飞行员对 x_{ij} 和 x_{ji} 的评分进行平均,得到最终的矩阵 O 。采用五点李克特量表进行模糊评价,分别是 0 分(无影响)、1 分(非常低)、2 分(低)、3 分

(高)和 4 分(非常高)。

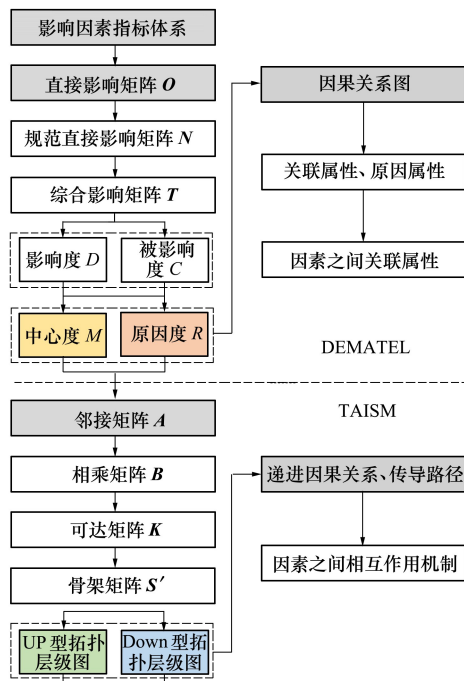


图 1 DEMATEL-TAISM 方法计算框架

表 3 一级指标直接影响矩阵

| 一级指标 | A1 | A2 | A3 | A4 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| A1 | 0.000 | 1.600 | 3.267 | 2.800 |
| A2 | 1.733 | 0.000 | 3.800 | 3.333 |
| A3 | 2.267 | 2.267 | 0.000 | 3.429 |
| A4 | 2.200 | 2.267 | 3.000 | 0.000 |

表 4 二级指标直接影响矩阵

| 二级指标 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 | B11 | B12 | B13 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B1 | 0.000 | 2.133 | 2.333 | 1.800 | 2.200 | 2.733 | 3.000 | 2.933 | 2.800 | 2.733 | 2.600 | 2.800 | 2.800 |
| B2 | 2.000 | 0.000 | 1.467 | 1.067 | 2.867 | 3.133 | 3.267 | 2.733 | 2.733 | 2.800 | 2.400 | 2.667 | 2.800 |
| B3 | 1.533 | 1.333 | 0.000 | 2.400 | 3.000 | 2.867 | 2.667 | 2.600 | 3.133 | 3.400 | 2.933 | 3.000 | 3.133 |
| B4 | 1.600 | 1.133 | 2.000 | 0.000 | 2.600 | 2.267 | 2.533 | 2.600 | 2.467 | 2.133 | 2.200 | 2.400 | 2.467 |
| B5 | 2.400 | 2.733 | 2.133 | 1.533 | 0.000 | 3.200 | 3.400 | 3.133 | 3.267 | 3.267 | 2.533 | 2.867 | 2.933 |
| B6 | 2.200 | 2.000 | 2.000 | 1.333 | 2.400 | 0.000 | 3.733 | 2.933 | 3.133 | 3.467 | 2.867 | 3.067 | 3.067 |
| B7 | 2.400 | 2.267 | 1.533 | 1.667 | 2.667 | 2.867 | 0.000 | 3.133 | 2.933 | 2.667 | 2.600 | 2.600 | 2.933 |
| B8 | 1.800 | 1.867 | 2.000 | 1.600 | 2.600 | 2.733 | 2.533 | 0.000 | 3.200 | 2.667 | 2.200 | 2.667 | 2.400 |
| B9 | 1.933 | 2.467 | 1.800 | 1.867 | 2.800 | 2.667 | 2.467 | 2.733 | 0.000 | 2.200 | 2.333 | 2.600 | 2.933 |
| B10 | 2.333 | 2.000 | 2.467 | 1.733 | 2.200 | 2.133 | 2.400 | 1.667 | 2.067 | 0.000 | 2.200 | 1.800 | 2.467 |
| B11 | 1.867 | 1.733 | 2.200 | 2.133 | 2.400 | 2.667 | 2.333 | 2.133 | 2.533 | 2.857 | 0.000 | 2.333 | 2.467 |
| B12 | 2.267 | 2.600 | 2.467 | 2.000 | 2.867 | 3.133 | 3.200 | 2.867 | 2.667 | 2.533 | 2.667 | 0.000 | 3.267 |
| B13 | 1.733 | 2.000 | 1.933 | 2.267 | 2.667 | 2.333 | 2.400 | 2.400 | 2.200 | 2.200 | 2.267 | 2.467 | 0.000 |

2) 构建规范直接影响矩阵 N

将矩阵 O 进行归一化得到规范直接影响矩阵 N 。取矩阵 O 的行和最大值取倒数后乘以矩阵 O 得到 N , 即 $N = \frac{O}{\bar{a}}$ 。

$$\bar{a} = \max a_j = \max \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \right) \quad (1)$$

3) 构建综合影响矩阵 T

综合影响矩阵 T 考虑了各因素之间相互作用的直接和间接影响。其中直接影响由前述矩阵 N 表示, 间接影响由矩阵 N 的乘法表示, 则

$$T = \sum_{k=1}^{\infty} N^k = N(I - N)^{-1} \quad (2)$$

式中, I 为 $n \times n$ 的单位矩阵。

4) 计算影响度 D 、被影响度 C 、中心度 M 和原因度 R

影响度 D_i 为矩阵 T 中第 i 行元素之和, 即 $D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}$, 表示因素 F_i 对其他所有因素的综合影响, t_{ij} 为矩阵中第 i 行第 j 列元素。被影响度 C_j 为矩阵 T 中 j 列元素之和, 即 $C_j = \sum_{i=1}^n t_{ij}$, 表示其他所有因素对因素 F_j 的综合影响。因素 F_i 的中心度 M_i 为 D_i 和 C_i 之和。 M_i 作为一个正向指标, 表示因素 F_i 与其他因素相互作用总和的大小, 即本研究中的关联属性。因素 F_i 的原因度 R_i 计算为 D_i 和 C_i 之差。 R_i 反映了因素 F_i 对于其他所有因素的因果属性。如果一个因素的因果关系是正向的, 那么这个因素对其他因

素的影响就超过了其他因素对它的影响, 因此可以认为是一个原因因素。相反, 如果一个因素的因果关系为负, 则该因素可视为结果因素。一、二级指标的 D, C, M 和 R 的结果如表 5~6 和图 2 所示。

表 5 一级指标的影响度、被影响度、中心度和原因度结果

| 一级指标 | D | C | M | R |
|------|-------|--------|--------|--------|
| A1 | 8.352 | 7.211 | 15.563 | 1.141 |
| A2 | 9.433 | 7.177 | 16.610 | 2.256 |
| A3 | 8.633 | 10.258 | 18.891 | -1.624 |
| A4 | 8.247 | 10.020 | 18.267 | -1.773 |

表 6 二级指标的影响度、被影响度、中心度和原因度结果

| 二级指标 | D | C | M | R |
|------|-------|-------|--------|--------|
| B1 | 8.057 | 6.442 | 14.500 | 1.614 |
| B2 | 7.854 | 6.534 | 14.390 | 1.320 |
| B3 | 8.309 | 6.453 | 14.760 | 1.857 |
| B4 | 6.962 | 5.712 | 12.670 | 1.250 |
| B5 | 8.676 | 8.145 | 16.820 | 0.531 |
| B6 | 8.363 | 8.504 | 16.870 | -0.140 |
| B7 | 7.906 | 8.793 | 16.700 | -0.890 |
| B8 | 7.438 | 8.292 | 15.730 | -0.850 |
| B9 | 7.567 | 8.601 | 16.170 | -1.030 |
| B10 | 6.742 | 8.552 | 15.290 | -1.810 |
| B11 | 7.263 | 7.792 | 15.050 | -0.530 |
| B12 | 8.476 | 8.135 | 16.610 | 0.341 |
| B13 | 7.087 | 8.745 | 15.830 | -1.660 |

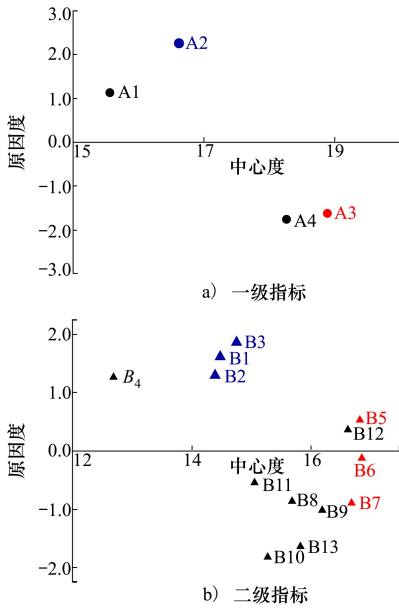


图 2 一级和二级指标中由中心度和原因度组成的因果关系图

3.2 基于 TAISM 方法的相互作用机制分析

DEMATEL 方法对中心度和原因度进行了综合,提供了一种确定影响因素相互关系属性的方法。然而,各因素之间的相互作用机制尚不清楚。因此,可以联合使用 TAISM 方法(如图 1 所示)提供对抗性拓扑层级图,直观地呈现各因素之间的递进因果关系和作用路径,从而分析影响飞行员岗位能力各个因素之间的相互作用机制。具体来说包括以下几个步骤。

1) 邻接矩阵 A

通过设置阈值,由综合影响矩阵 T 得到邻接矩阵 A 。设置阈值 λ 的目的是忽略影响程度较小的因素之间的关系,突出关键影响因素,从而简化系统结构。 λ 值越大,系统层级越简单,但影响因素之间的相互作用难以清晰描述; λ 值越小,系统层级越复杂,但缺乏整体性。因此,需要对阈值 λ 进行多次分析和验证,以获得最佳的系统结构模型^[27]。通过文献调研与实际验证,取 $\lambda = \mu + 0.5\sigma = 0.6427$,其中 μ 为综合影响矩阵 T 所有元素的均值, σ 为综合影响矩阵 T 所有元素的标准差^[28-29]。则邻接矩阵 A 的元素 a_{ij} 可表示为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & t_{ij} \geq \lambda \\ 0, & t_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 13; j = 1, 2, \dots, 13) \quad (3)$$

式中, t_{ij} 表示综合影响矩阵 T 的元素。

2) 可达矩阵 K 和骨架矩阵 S'

将邻接矩阵 A 与单位矩阵 I 相加,得到相乘矩阵 B 。将 B 与自身进行连乘若干次直到结果不变,即 $B^{k-1} \neq B^k = B^{k+1} = K$,得到可达矩阵 K 。

对于可达矩阵 K 进行缩点操作,具体是将矩阵中的环路视为一个点,从而删除重复路径,得到缩点可达矩阵 K' 。分析可达矩阵 K , B5-B9、B12 构成一个环路,将其视为一个点。进一步,依据(4)式,对缩点可达矩阵 K' 进行缩边得到骨架矩阵 $S' =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{从而得到各影响因素}$$

对其他因素的作用,矩阵元素为 1 代表有影响,矩阵元素为 0 代表无影响。

$$S' = K' - (K' - I)^2 - I \quad (4)$$

需要指出,此处的运算同样为布尔运算,各个矩阵均为布尔方阵。

根据骨架矩阵 S' 对因素间的影响程度大小进一步量化,将骨架矩阵 S' 中取 1 的元素用综合影响矩阵 T 中对应位置元素值代替,对于 2 个元素合并后的点则采用对应位置元素均值进行代替,从而得到影响权值矩阵 $W_{S'}$ 。

3) 逐层提取规则

对于上述布尔矩阵,存在可达集 R 、先验集 Q 和公共集 $T = R \cap Q$ 。以可达矩阵 K 中的元素 e_i 为例,上述集合分别定义为:

- (1) 可达集 $R(e_i)$ 为行值 1 对应的所有元素的集合;
- (2) 先验集 $Q(e_i)$ 为列值 1 对应的所有元素的集合;
- (3) 公共集 $T(e_i) = R(e_i) \cap Q(e_i)$ 。

4) 对抗性拓扑层级图

对抗性拓扑层级图由 UP 型和 DOWN 型拓扑层级组成。UP 型拓扑层级结构,也称为结果优先层级结构提取,遵循提取规则 $T(e_i) = R(e_i)$ 。首先提取最终结果因素并将其放在顶层,然后类推提取其他下层的因素。DOWN 型拓扑层级结构为原因优先层级结构,提取遵循提取规则 $T(e_i) = Q(e_i)$ 。反之,

先将根本原因提取出来放在底层,再类推提取其他上层的因素。UP 型和 DOWN 型拓扑层级图中,下层因素表示原因,上层因素表示结果。因此,将影响飞行员岗位能力主观感受的因素分为 3 组:直接影响因素(顶层)、中间影响因素(中层)和根本影响因素(底层)。直接影响因素对飞行员岗位能力的影响最为直接。中间影响因素是介于直接影响因素和根本影响因素之间的中介。根本影响因素具有最本

质的影响,是理论上最应该优先考虑的帕累托最优因素。在缩点可达矩阵 K' 的基础上,通过逐层抽取获得 UP 型和 DOWN 型拓扑层级图。一级指标的 UP 型和 DOWN 型对抗层级拓扑图相同,具体表现为,A1 基础能力训练为最底层,A2 理论知识训练、A3 飞行训练和 A4 改换装训练为表层。结合综合影响矩阵 T 中各二级指标之间的相互作用进行标注,相应的拓扑图如图 3 所示。

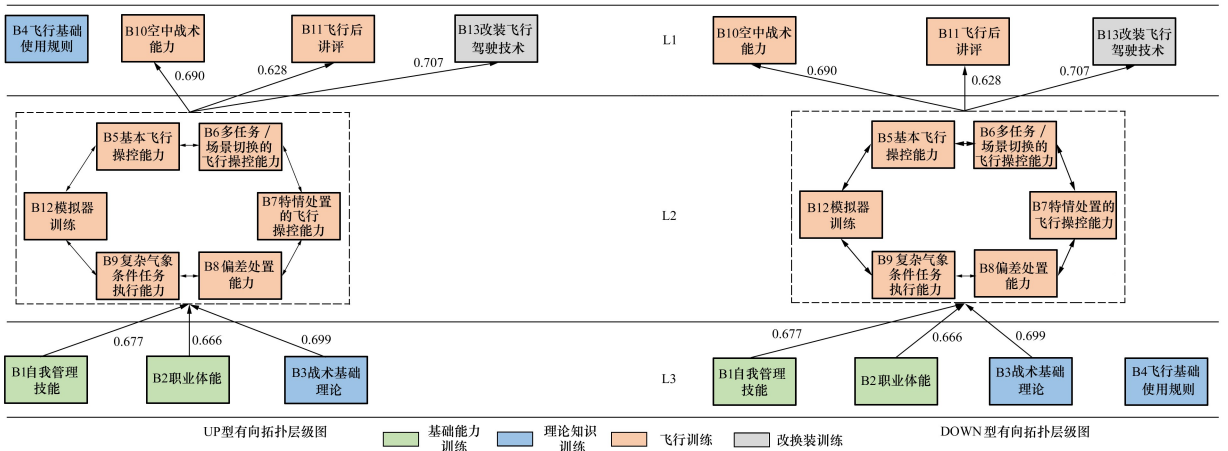


图 3 二级指标的 UP 型和 DOWN 型对抗层级拓扑图

4 讨论

在新时期军机快速更新迭代的背景下,建立一套完善的军机飞行员岗位能力指标体系并开展有效的训练效果评估对于提升军机飞行员岗位能力训练质量^[30-32]、降低由人因引发的飞行事故具有重要意义。本研究首先基于第一组 15 名军机飞行员采用德尔菲调查法确定军机飞行员岗位能力影响因素指标体系,获得了 4 个类别共 13 个影响因素。进一步,选取第二组 15 名军机飞行员完成了一级和二级评估指标的相互影响矩阵评分。然后,采用 DEMATEL-TAISM 方法获得了因果关系图 and 对抗拓扑层级图。最后,通过因素相互关系属性和相互作用机制分析提取了影响军机飞行员岗位能力的主要因素。

4.1 岗位能力影响因素的相互关系属性分析

首先基于 DEMATEL 方法对相互关系属性的中心度结果进行了分析。如图 2 所示,最右侧为中心

度最大的影响因素,前 20% 的因素分别是 B6、B5 和 B7,后 20% 的因素分别为 B1、B2 和 B4。以上结果表明,多任务/场景变换的操控能力对军机飞行员岗位能力的影响最为显著。这一发现与相关研究保持一致。即有效的多任务/场景变换的操控能力有利于训练在复杂环境中执行任务所必需的能力和绩效^[25,33]。因此,可以减少高风险、突发情况下由人误引发的灾难发生^[34]。有研究指出未来的军事飞行员训练将广泛采用模拟器练习不同类型的战斗飞行^[35],而多任务/场景变换是其中的重点之一。此外,良好的基本飞行操控能力是其他飞行技术的基础,尤其在自动化技术高速发展而飞行员的手动操作技巧出现退化的情境下显得更为重要^[36-37]。因此,应当对这一因素加以重视并进行强化^[38]。特情处置驾驶操控能力是飞行员岗位能力(胜任力)的核心组成要素之一,其目标在于达成高效的绩效^[7]。相比之下,优化自我管理能力和职业体能、飞行基础使用规则的努力可能对提高军机飞行员岗位能力的效果有限。这与相关研究的发现是吻合的^[8],即相关课程(如人的效能和限制、身体准备、

航空规章等)所占的培训比重或培训小时数已经大幅度削减。

然后对相互关系属性的原因度结果进行了分析。如图 2 所示,最顶端为原因度最大的影响因素前 20% 的因素分别是 B3、B1 和 B2,均属于原因因素。后 20% 的因素分别为 B9、B13 和 B10,均属于结果因素。实际上,战术基础理论内容的选择反映了军机飞行员岗位能力的既定要求^[8],从而直接影响军机飞行员岗位能力的生成。对其投资往往会获得更全面的回报^[39]。从 Rozenberg 等^[8]列出的军机飞行员学习大纲变化可以看出,军机飞行员课程大纲会不断出现变化以适应科技发展及斗争形势。但需要注意的是,从课程的更改到最终的岗位能力生成可能是一个耗时较长的过程。军机飞行员培训应重视自我管理技能和职业体能的提升或保持,从而支持岗位能力的生成。这得到相关研究的支持,即基础能力训练元素通常被用于预测战术和技术岗位能力^[7],有助于提升作业效能并保障安全^[19]。很典型的,对于自我管理技能的培训通常可以显著提升任务绩效^[40]。此外,也有研究发现职业体能(如核心爆发力)与绩效显著相关^[41]。另外,复杂气象条件任务执行能力、改装飞行驾驶技术和战术能力最容易受到其他因素影响。其中战术能力更是被视为 7 个使命必需能力(mission essential competences)之一^[7]。这提示军机飞行员训练中加强这些能力时,应特别考虑其他因素对它们的影响。

4.2 岗位能力影响因素之间的相互作用机制

采用 TAISM 法得到的解释结构模型分为 3 层,如图 3 所示,根本影响因素为 B1、B2、B3。这与之前的一些研究保持一致^[7],表明加强自我管理技能、职业体能和战术基础理论可以有效地促进军机飞行员岗位能力的生成。TAISM 对抗层级拓扑图显示了军机飞行员岗位能力影响因素之间的作用路径,如 B1/B2/B3→(B5~B9, B12)→B10/B11/B13,反映了影响因素之间复杂的相互作用^[42-43]。中间层影响因素在根本影响因素向军机飞行员岗位能力的传递过程中起中介作用。例如,B5~B9, B12 等因素位于与根本因素层 L1 相邻的中间层(L2)。这表明,为了促进 B1 自我管理技能、B2 职业体能、B3 战术基础理论对军机飞行员岗位能力的支持,需要在训练中提高军机飞行员的 B5~B9, B12。该路径清晰地揭示了通过扎实的基础素养和理论根基(B1~B3)培养,B5~B9 等专项技能才可支持高效的空中

战术能力等的形成,影响最终的飞行员岗位能力。

B10/B11/B13 位于结果层(L1),这表明加强空中战术能力、飞行后讲评和改装飞行驾驶技术是提高军机飞行员岗位能力的最直接手段,但也是最易受其他因素影响的因素,因此后续培训课程安排上有待进一步考量。B5~B9 最终可通过空中飞行战术等进行集成运用与检验,实现军机飞行员岗位能力的转化。为了开发军机飞行员岗位能力训练系统,应进行特定的训练方案设计。对于直接原因层(L1)的指标(如空中战术能力),可进行短周期训练的方案设计,以快速生成岗位能力;而对于根本原因层(L3)的指标(B1 自我管理技能、B2 职业体能、B3 战术基础理论),可采用理论与能力/技术相结合的复训方案设计,以达成全面的训练效果。

本研究所构建的飞行员岗位能力影响因素指标体系,可用于为军机飞行员岗位能力评估系统的开发提供依据。具体而言,从影响岗位能力生成的 4 个类别 13 个影响因素入手,开设相应的训练科目并制定考评策略,实现系统性的能力培养。以飞行后讲评这一指标为例,在完成多个特定科目的飞行训练后,开展飞行复盘,对复盘中所体现的问题识别、偏差识别、根本原因检查等方面进行考核打分并开展针对性的强化训练,从而支撑高效的飞行员岗位能力达成。

本研究从军机飞行员的视角系统性地提出了提高军机飞行员岗位能力的优先措施,其对于军机飞行员岗位能力训练的多准则决策具有重要意义^[44-45]。相应研究结果可为从基础能力训练、理论知识训练、飞行训练、改换装训练等方面提高军机飞行员岗位能力指明具体的努力方向。此外,本研究仍存在一些局限性。首先,对评估指标之间的相互影响分析尚不充分,有待进一步细化指标的层级。其次,本次参试者主要为教练机与歼击机飞行员,考虑到不同的机型、飞行科目对于飞行员岗位能力存在差异化的要求,后续研究需针对不同机型、不同飞行科目开展专项探讨,以增强研究结果的针对性。最后,DEMATEL-TAISM 方法的结果缺乏统计验证,其作用路径的可解释性相对有限^[43]。后续可引入人因显著性分析等定量方法,从而提高研究结论的信效度^[46-47]。

5 结 论

本研究从军机飞行员角度确定了影响军机飞行员岗位能力的因素,并采用 DEMATEL-TAISM 方法分析了影响因素之间的相互关系属性和相互作用机制。主要结论如下:

1) 军机飞行员岗位能力影响因素指标体系由 13 个关键因素组成,可分成基础能力训练、理论知识训练、飞行训练和改换装训练 4 类。

2) 多任务/场景切换的操控能力、基本飞行操控能力、特情处置驾驶操控能力、战术基础理论、自我管理技能、职业体能是 6 个至关重要的影响因素。

前三者的中心度(与其他因素的关联)最高,后三者的原因度(对其他因素的影响)最大。

3) 自我管理技能、职业体能、战术基础理论是最根本原因,空中战术能力、飞行后讲评和改装飞行驾驶技术是最直接原因。本研究结果可进一步应用于军机飞行员岗位能力评估系统的开发。

综上,本研究构建的指标体系可直接用于指导军机飞行员岗位能力评估系统的开发;此外,影响因素之间的作用机制研究结果可为军机飞行员岗位能力的快速生成提供参考。本研究可从飞行员岗位能力视角出发为军机飞行员的选拔与训练提供重要依据。

参考文献:

- [1] Mathavara K, Ramachandran G. Role of human factors in preventing aviation accidents: an insight[M]. London: Intechopen, 2022: 1-26.
- [2] Shappell S A, Wiegmann D A. HFACS analysis of military and civilian aviation accidents: a North American comparison[C]// Proceedings of the Annual Meeting of the International Society of Air Safety Investigators, Gold Coast Australia, 2004: 2-8.
- [3] 冯传宴, 完颜笑如, 刘双, 等. 负荷条件下注意力分配策略对情境意识的影响[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 129-138. Feng Chuanyan, Wanyan Xiaoru, Liu Shuang, et al. Influence of different attention allocation strategies under workloads on situation awareness[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 129-138. (in Chinese)
- [4] Pamplona D A, Alves C J P. Does a fighter pilot live in the danger zone? A risk assessment applied to military aviation[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2020, 5: 100114.
- [5] Wiegmann D A, Shappell S A. A human error approach to aviation accident analysis: the human factors analysis and classification system[M]. England: Ashgate Publishing Limited, 2003.
- [6] Johnston P J, Catano V M. Investigating the validity of previous flying experience, both actual and simulated, in predicting initial and advanced military pilot training performance[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2013, 23(3): 227-244.
- [7] Tsifetakis E, Kontogiannis T. Evaluating non-technical skills and mission essential competencies of pilots in military aviation environments[J]. Ergonomics, 2019, 62(2): 204-218.
- [8] Rozenberg R, Durco S, Kal'avsky P, et al. Human factors and analysis of aviation education content of military pilots[C]// 2019 New Trends in Aviation Development, Chlumec nad Cidlinou, Czech Republic, 2019: 139-144.
- [9] Qiu R, Gong Y, Cao Y, et al. Influence of self-efficacy on male military pilots' capability to handle special situations: a moderated mediation model[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 10794.
- [10] 张凡, 魏法杰, 李权葆. 复杂装备研制项目的风险源识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(5): 975-980. Zhang Fan, Wei Fajie, Li Quanbao. Risk source identification of complex equipment development project[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(5): 975-980. (in Chinese)
- [11] 许继平, 张博洋, 张新, 等. 基于 DEMATEL-ISM 的粮油质量安全区块链优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 412-423. Xu Jiping, Zhang Boyang, Zhang Xin, et al. Optimization of grain and oil quality and safety blockchain based on DEMATEL-ISM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 412-423. (in Chinese)
- [12] Hsu C C, Sandford B A. The delphi technique: making sense of consensus[J]. Practical Assessment, Research, and Evaluation, 2007, 12: 10.

- [13] 王黎静, 向维, 何雪丽, 等. 机组工作负荷评价新方法及其应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(7): 915-919.
Wang Lijing, Xiang Wei, He Xueli, et al. New method to evaluate crew workload and application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(7): 915-919. (in Chinese)
- [14] 郭峰, 李媛媛, 彭晓菁, 等. 基于 DEMATEL-AISM 的铁路工程建设风险识别影响因素与优化策略研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(2): 802-811.
Guo Feng, Li Yuanyuan, Peng Xiaojing, et al. Research on influencing factors and optimization strategy of railway construction risk identification based on DEMATEL-AISM[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(2): 802-811. (in Chinese)
- [15] Martinussen M, Langree O C, Mjoen H, et al. Predicting commercial pilot training performance[J]. Aviation Psychology and Applied Human Factors, 2022, 12(2): 109-118.
- [16] 谢洪. 变革中的中国空军飞行员培养[J]. 教练机, 2012(3): 3-6.
Xie Hong. Training and education of PLA air force pilots in reform[J]. Trainer, 2012(3): 3-6. (in Chinese)
- [17] Hari B. Prevention of loss of control accidents in flight(LOC-I) through implementation of evidence based training in basic pilot training and type rating courses[D]. London: City University of London, 2015.
- [18] Sommer K J. Pilot training: what can surgeons learn from it? [J]. Arab Journal of Urology, 2014, 12(1): 32-35.
- [19] Thomas M J W. Training and assessing non-technical skills a practical guide [M]. Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.
- [20] Roberge C, Meunier S. Development and initial validation of a questionnaire measuring self-management strategies that promote psychological health at work[J]. Journal of Occupational Rehabilitation, 2024, 34(1): 238-250.
- [21] Lorig K R, Holman H R. Self-management education: history, definition, outcomes, and mechanisms[J]. Annals of Behavioral Medicine, 2003, 26(1): 1-7.
- [22] Roy T C, Springer B A, McNulty Y V, et al. Physical fitness[J]. Military Medicine, 2010, 175(8): 14-20.
- [23] Militello L G, Wagner E, Winner J, et al. Error recovery training literature review: implications for emergency field medicine [C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2021: 495-499.
- [24] Naikar N, Saunders A. Crossing the boundaries of safe operation: training for error detection and error recovery[C]//21st European Conference on Human Decision Making and Control, 2002.
- [25] Oser R L. A structured approach for scenario-based training[C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 1999: 1138-1142.
- [26] Steinman Y, Oord M H A H V D, Frings-Dresen M H W, et al. Flight performance aspects during military helicopter flights[J]. Aerospace Medicine and Human Performance, 2019, 90(4): 389-395.
- [27] Leveson N G. Applying systems thinking to analyze and learn from events[J]. Safety Science, 2011, 49(1): 55-64.
- [28] Liu H, Yu H, Zhou H, et al. Research on the influencing factors of construction enterprises' digital transformation based on DEMATEL-TAISM[J]. Sustainability, 2023, 15(12): 9251.
- [29] Lan Z, Pau K, Mohd Y H, et al. Hierarchical topological model of the factors influencing adolescents' non-suicidal self-injury behavior based on the DEMATEL-TAISM method[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 17238.
- [30] Tillberg L V, Kaulio M, Tillberg P, et al. Military competence-in-use in the expeditionary era: a swedish example from missions abroad[J]. Armed Forces & Society, 2024, 50(2): 476-496.
- [31] 刘浩, 王昊, 孟光磊, 等. 基于动态贝叶斯网络和模糊灰度理论的飞行训练评估[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 250-261.
Liu Hao, Wang Hao, Meng Guanglei, et al. Flight training evaluation based on dynamic Bayesian network and fuzzy gray theory [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 250-261. (in Chinese)
- [32] 姚裕盛, 徐开俊. 基于 BP 神经网络的飞行训练品质评估[J]. 航空学报, 2017, 38(增刊 1): 24-32.
Yao Yusheng, Xu Kaijun. Quality assessment of flight training based on BP neural network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(S1): 24-32. (in Chinese)
- [33] Salas E, Priest H A, Wilson K A, et al. Scenario-based training: improving military mission performance and adaptability[M]. Santa Barbara: Praeger Security International, 2006: 32-53.
- [34] Moats J B, Chermack T J, Dooley L M. Using scenarios to develop crisis managers: applications of scenario planning and scenario-based training[J]. Advances in Developing Human Resources, 2008, 10(3): 397-424.

- [35] Plachynda T, Nevzorov R, Baranovska L, et al. Future military pilots' professional competence formation[J]. *Revista Romaneasca Pentru Educatie Multidimensionala*, 2020, 12(4): 357-368.
- [36] Ebbatson M. The loss of manual flying skills in pilots of highly automated airliners[D]. Cranfield: Cranfield University, 2009.
- [37] Said H. Aircraft handling and manual flying skills report[EB/OL]. (2020-08-27)[2025-02-01]. <https://www.iata.org/contentassets/d0e499e4b2824d4d867a8e07800b14bd/iata-report-aircraft-handling-manual-flying-skills.pdf>.
- [38] Hanusch M. Manual flying skills-airline procedures and their effect on pilot proficiency[D]. London: City University of London, 2017.
- [39] Wang L, Cao Q, Zhou L. Research on the influencing factors in coal mine production safety based on the combination of DEMATEL and ISM[J]. *Safety Science*, 2018, 103: 51-61.
- [40] Frayne C A, Geringer J M. Self-management training for improving job performance: a field experiment involving salespeople[J]. *Journal of Applied Psychology*, 2000, 85(3): 361-372.
- [41] Myhre L G, Tucker D M, Bauer D H, et al. Relationship between selected measures of physical fitness and performance of a simulated fire fighting emergency task[R]. AL/CF-TR-1996-0143, 1997.
- [42] Meng B, Lu N, Lin C, et al. Study on the influencing factors of the flight crew's TSA based on DEMATEL-ISM method[J]. *Cognition, Technology & Work*, 2022, 24(2): 275-289.
- [43] Trivedi A, Jakhar S K, Sinha D. Analyzing barriers to inland waterways as a sustainable transportation mode in India: a dematel-ISM based approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126301.
- [44] Kumar A, Dixit G. An analysis of barriers affecting the implementation of e-waste management practices in India: a novel ISM-DEMATEL approach[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2018, 14: 36-52.
- [45] Mohammadfam I, Aliabadi M M, Soltanian A R, et al. Investigating interactions among vital variables affecting situation awareness based on fuzzy DEMATEL method[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2019, 74: 102842.
- [46] Li F, Wang W, Dubljevic S, et al. Analysis on accident-causing factors of urban buried gas pipeline network by combining DEMATEL, ISM and BN methods[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 61: 49-57.
- [47] Yazdi M, Khan F, Abbassi R, et al. Improved DEMATEL methodology for effective safety management decision-making[J]. *Safety Science*, 2020, 127: 104705.

Influencing factors and intrinsic mechanism of military pilot's professional competence based on DEMATEL-TAISM method

Sun Zhenjia¹, Wanyan Xiaoru¹, Lin Guiping¹, Feng Chuanyan²,
Liu Juan³, Liu Shuang¹

(1.School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2.Hangzhou International Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou 311115, China;
3.Air Force Medical Center, Beijing 100142, China)

Abstract: Military pilot's professional competence is crucial for accomplishing combat missions and ensuring flight safety. However, relative research on influencing factors and interrelationship of military pilot's professional competence is limited. In the development of the influencing factor index system for military pilot's professional competence, thirty qualified military pilots were recruited to conduct surveys on the influencing factors and the direct influence matrix, and the decision making trial and evaluation-total adversarial interpretive structure modeling (DEMATEL-TAISM) method was then applied for analysis. The results indicate that: ①The influencing factor index system comprises 13 critical factors, categorized into four groups; non-technical skills, basic aviation theory, flight training, and type rating. ②Flight capabilities in multi-task/scenario switching, flight capabilities in routine situations, flight capabilities in emergencies, basic tactical theory, self-management skills, and physical fitness are the most crucial six influencing factors. The former three have the highest centrality (association with other factors), while the latter three have the greatest causality (likely to affect other factors). ③For the generation of military pilot's professional competence, self-management skills, physical fitness, and basic tactical theory constitute the most fundamental determinants, whereas aerial tactical capability, post-flight debriefing, and type-rating flight skills represent the most direct determinants. In conclusion, the influencing factor index system can be directly used to guide the development of military pilot's professional competence evaluation system.

Keywords: professional competence; military pilot; influencing factor index system; DEMATEL-TAISM; selection and training; flight safety

引用格式:孙振佳, 完颜笑如, 林贵平, 等. 基于 DEMATEL-TAISM 方法的军机飞行员岗位能力影响因素及作用机制[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44(1): 58-69.

Sun Zhenjia, Wanyan Xiaoru, Lin Guiping, et al. Influencing factors and intrinsic mechanism of military pilot's professional competence based on DEMATEL-TAISM method[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44(1): 58-69. (in Chinese)