

【航空科学与工程研究】

航空公司节能减排综合评价方法研究

褚双磊^{1,2}, 魏志强^{1,2}, 任 强^{1,2}, 刘 菲^{1,2}

(1. 中国民航大学 空中交通管理学院;
2. 中国民航大学 天津市空管运行规划与安全技术重点实验室, 天津 300300)

摘 要:民航交通运输的低碳运行迫在眉睫,航空公司必须尽快建立节能减排评价体系,更好地贯彻绿色环保可持续发展理念。分析了航空公司节能减排的具体实施方案,通过德尔菲法构建了航空公司节能减排初始指标体系,利用 DEMATEL 法去除影响较小的指标,形成影响节能减排的最终指标体系,该体系主要涵盖飞行重量、飞行时间、性能优化和飞行操纵四个方面。用层次分析法计算主观权重,熵权法计算客观权重,通过组合赋权法得到二级指标的组合权重和排序。利用灰色关联法对国内 15 家航空公司节能减排体系进行评价,得到了不同航空公司节能减排实施结果的灰色关联度和排序,验证了航空公司节能减排评价方法的可行性,为航空公司节能减排工作提供了参考和建议。

关键词:航空公司;节能减排;熵权法;组合权重;灰色关联度

中图分类号: F 562 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2022.06.001

0 引言

健全生态友好的绿色发展体系是我国民航“十四五”规划的重要目标之一。民航局明确指出,推动航空公司将绿色发展理念融入运营全链条、全过程,提升精细化管理水平;引导航空公司持续优化航线网络布局和机队结构,提高运力匹配度;推行燃油政策优化、二次放行、油量精准化管理、飞机性能监控和节油改装、飞机减重等管理和技术手段,提升机队燃油效率;增强飞行员节能意识,增加飞行员节能驾驶方法等相关知识培训,在保证安全的前提下实施节能操作。

在航空公司以减少运行成本为核心的节能减排实施方案中,减少航油消耗占有至关重要的地位。在减少燃油消耗方面,不同航空公司进行了不同角度的研究,得出了部分节能减排因素和有效方法。2010 年,徐金贵提出的节能减排措施有航路优选、极地运行、二次放行、临时航线和 APU 节油^[1]。Turgut 等最先提出了通过连续下降进近实施节能减排,单架客机由传统程序转换为 CDA 程序的燃油节省量最多可达 44.3 kg^[2]。Nikoleris 等研究发现,空转状态和匀速滑行状态或制动状态是燃料燃烧和排放的两个最大来源^[3]。国航主要使用的节油技术有合理制定飞行计划,飞行相关人员根据公司操作规定施行节能操作,缩短辅助动力装置使用时间,优选节油节能的航路航线,对气象条件良好、燃油充足的飞机施行二次放

收稿日期:2022-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目(U1933103);航空科学基金项目(20185567018);工业和信息化部民用飞机专项科研项目(MJ-2018-Y-60);中央高校基本科研业务费项目(3122014C021)

第一作者简介:褚双磊(1982—),男,天津人,讲师,博士,主要从事民用飞机可靠性、飞行性能和运行需求研究。

E-mail:chushuanglei@163.com

行,使用经济巡航模式并按照特定计算的成本指数控制飞机飞行速度,积极施行飞机减重新方法等^[4]。邵富强提出,在节能减排方面,南航制订了许多节油减排的新举措,如“动态指数飞行”“优化航线”“二次放行”“实行飞行剖面化管理”“控制飞机重量”等^[5]。Lin 等主要从飞行计划和飞行操作两个方面对节油作业进行了探讨^[6]。黄丽秋提出,航路结构的优化能够缩短航路距离,是节约运营成本、节能减排最直接、最有效的手段之一^[7]。樊澄等提出,降低燃油消耗主要体现在降低飞机重量、优化飞行操纵、节约飞行时间等方面,燃油效率的提升主要归结为:购买燃油效率更高的飞机、机队结构优化、飞机性能优化避免性能衰减,应用飞机、发动机新技术^[8]。王晓提出,航空公司节能减排的手段有飞机性能监控、飞机重心控制、减少飞机空重和减推力起飞^[9]。现有文献已经归纳总结了航空公司节能减排的有效因素,但是大多数集中在运行控制方面,较少提到机务维修保障、地面勤务、飞行操作。

在节能减排相关评价模型和方法方面,田乾乾首次选取了吨公里油耗和碳排放量作为衡量节能减排效率的综合性指标,基于数据分类和回归分析的数据挖掘算法构建了吨公里油耗模型^[10]。孙薇创建了我国航空公司节能减排现状评价指标体系,采用基于灰色关联度的模糊综合评价法对我国三大航空公司 2012 年节能减排现状进行了评价^[11]。贾海娟确定航空公司碳减排效率评价指标,并构建改进 DEA 综合交叉评价模型,对我国 15 家航空公司 2011 年碳减排效率情况进行评价^[12]。丁勇首次提出了一个在 ETS 视角下的航空公司节能减排效率分析模型,通过分析得出了天津民航业各航空公司的节能减排效率^[13]。田利军等首次采用因子分析法,以国内 22 家航空公司 2012 年的运营数据作为研究样本,从组织体系、数据统计、数据监测、绩效考核和制度设计五个维度构建航空公司节能减排评价体系,为建立航空公司节能减排评价指标奠定基础^[14]。罗凤娥等首次通过在燃油管理中引入统计过程控制理论,以油耗偏差为关键指标,对燃油管理的质量水平进行统计过程控制^[15]。上述研究主要是基于数理统计的方法,建立数值模型量化节能减排效果,而对航空公司节能减排综合评价模型和评价方法的研究较少。杨胜林构建了一套包括节能管理、能源、环境系统三方面的民航企业能评价指标体系,一级指标为节能管理、能源结构、能源利用、能源环境,对民航企业的能效与环保进行综合评估^[16]。马俊伟构建航空公司能源效率评估指标体系,然后用专家打分法对我国民航业的能源效率进行打分,最后选取航油消耗、员工人数、飞机数为投入指标,运输量、营业收入为产出指标,运用 DEA 的方法来对多家航空公司进行评价和分析^[17]。郑宇婷等将航空公司的运营过程分为能源利用与碳排放两个子过程,应用虚拟前沿面网络 SBM 模型测算亚太地区 13 家航空公司的总效率,计算能源与环境的单要素效率^[18]。李龙利用非期望 SBM 模型和 GML 生产指数对有代表性的 20 家航空公司 2010—2017 年的环境效率进行静态分析和动态分析,并进一步采用 Tobit 回归模型对影响航空公司环境效率的影响因素进行了实证分析^[19]。

随着欧盟碳排放交易体系的推进,我国航空公司针对节油采取了应对措施,逐渐积累了一定的工作经验。同时,对节能减排工作效果的评价已经成为学者的重要研究内容,常采用数据包络法和因子分析法对统计数据定量分析,但是我国民航节能减排工作考核评价方面工作起步较晚,至今没有完善的评价体系。由于航空公司节油运行复杂化、多样化,涉及多个主要业务部门,很难通过单个或者某几个指标对航空公司节能减排进行评价,需要以国内航空公司当前运营现状为基础,对内部节能减排影响因素进行理论分析。本文对当前节能减排措施进行分类,确定航空公司节能减排评价指标体系,建立适合的评价模型,对我国航空公司节能减排的成效进行评价排名。

1 航空公司节能减排评价指标体系构建

1.1 构建初始指标体系

参考民航行业节能减排规划和航空公司节能减排具体措施,应用德尔菲法初步构建了航空公司节能减排指标体系,得到飞机重量、飞行时间、性能优化、飞行操纵 4 个一级指标^[20],21 个二级指标。

21 个二级指标分别为加装轻型设备 N1、饮用水重量变化 N2、机供品重量变化 N3、减少机组携带重

量 N4、运行资料减重 N5、控制旅客随身携带行李 N6、提高巡航速度 N7、缩短平均滑行时间 N8、国际航线航路优选 N9、临时航路优化 N10、特殊运行 N11、平均重心位置 N12、发动机水洗 N13、计划业载优化 N14、机型更新和改装 N15、减少 APU 使用时间 N16、飞行高度优化 N17、桥载电源使用率 N18、终端区连续下降 N19、减推力起飞 N20、申请直飞 N21。

1.2 构建最终指标体系

构建的初始指标体系不够完善,某些指标之间存在相互影响和部分重叠现象,为了消除这种影响,使各个指标变为独立的指标,应用 DEMATEL 法对初始评价指标体系进行分析,邀请 10 位航空公司节能减排主管和部分资深性能工程师,对指标体系中的指标间影响关系进行打分,建立 21×21 的直接影响矩阵,依据 DEMATEL 算法对直接影响矩阵进行处理,通过依次计算规范化影响矩阵、单位矩阵的差矩阵、差矩阵的逆矩阵、逆矩阵和规范化影响矩阵的乘积,得出综合影响矩阵,进而得到各个指标的中心度和影响度,得出节能减排指标体系的综合影响关系,见表 1。

表 1 节能减排指标体系的综合影响关系表

| 指标 | 影响度 | 被影响度 | 中心度 | 原因度 | 指标 | 影响度 | 被影响度 | 中心度 | 原因度 |
|-----|--------|--------|--------|-----------|-----|--------|--------|--------|-----------|
| N1 | 0.4492 | 0.2061 | 0.6553 | 0.243 16 | N12 | 0.4416 | 0.5472 | 0.9888 | -0.105 60 |
| N2 | 0.1670 | 0.2147 | 0.3817 | -0.047 70 | N13 | 0.8233 | 0 | 0.8233 | 0.823 29 |
| N3 | 0.1102 | 0.2147 | 0.3249 | -0.104 50 | N14 | 0.5339 | 0.7150 | 1.2489 | -0.181 20 |
| N4 | 0.1102 | 0.4746 | 0.5848 | -0.364 40 | N15 | 1.0725 | 0 | 1.0725 | 1.072 51 |
| N5 | 0.1670 | 0.1481 | 0.3152 | 0.018 86 | N16 | 0.1804 | 0.2555 | 0.4360 | -0.075 10 |
| N6 | 0.2945 | 0.9402 | 1.2347 | -0.645 70 | N17 | 0.6862 | 0.8659 | 1.5521 | -0.179 70 |
| N7 | 0 | 0.9327 | 0.9327 | -0.932 70 | N18 | 0.2180 | 0.1860 | 0.4040 | 0.031 98 |
| N8 | 0.1749 | 0.1318 | 0.3067 | 0.043 10 | N19 | 0 | 0.2123 | 0.2123 | -0.212 30 |
| N9 | 1.2315 | 0.5357 | 1.7672 | 0.695 84 | N20 | 0.1973 | 0.2817 | 0.4791 | -0.084 40 |
| N10 | 0.4546 | 0.2189 | 0.6735 | 0.235 73 | N21 | 0.2896 | 0.2275 | 0.5171 | 0.062 06 |
| N11 | 0.2145 | 0.5076 | 0.7222 | -0.293 10 | | | | | |

根据中心度表示指标因素对系统的影响程度、原因度表示该指标对其他指标的影响程度两个原则,判断得出 N4,N6,N7,N19 的原因度较小,表明这 4 个指标受其他指标的影响较大,确定为非关键因素,从指标体系中剔除,保留原因度和中心度较高的二级指标,经过 DEMATEL 法分析最终构建出航空公司节能减排评价指标体系,见图 1。

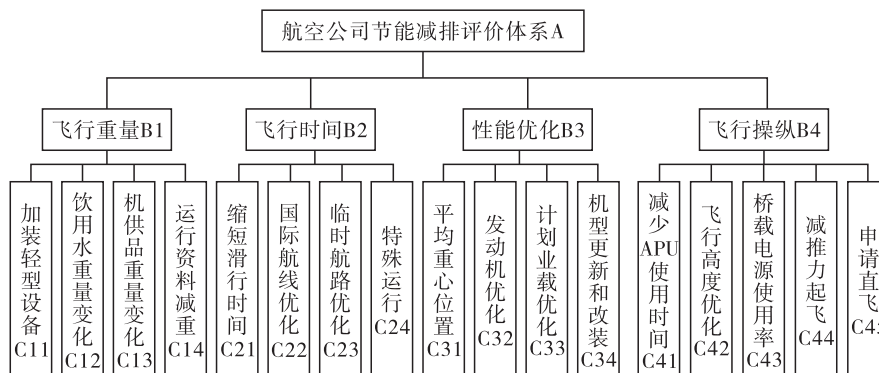


图 1 航空公司节能减排指标体系层次结构

飞机重量是飞行过程中重要的飞行参数,将对飞行的油量产生巨大的影响。航班飞行时间直接决定

飞行过程中燃油消耗的参数,减少飞行时间可以为航班节省大量燃油。飞机性能决定了飞机的燃油消耗率,改善飞机性能可以节省燃油。航班飞行的每个阶段都可以通过合适的飞行操纵来提升燃油效率达到节省燃油目的。

2 航空公司节能减排指标权重计算

2.1 基于层析分析法的主观权重计算

根据图 1 建立的评价指标体系,发放调查问卷,邀请行业内节能减排主管人员采用 1~9 标度法对两两指标间的相对重要性打分,建立判断矩阵,进行方根法、归一化计算,经过一致性检验,得到单层优先级向量即为相对权重,一级指标相对权重和二级指标相对权重相乘可以得到二级指标的绝对权重,见表 2。

表 2 层次分析法主观权重大小

| 一级指标 | 一级权重 | 二级指标 | 相对权重 | 绝对权重 | 一级指标 | 一级权重 | 二级指标 | 相对权重 | 绝对权重 |
|------|--------|------|--------|--------|------|--------|------|--------|--------|
| B1 | 0.0736 | C11 | 0.2903 | 0.0214 | B3 | 0.3207 | C31 | 0.094 | 0.0301 |
| | | C12 | 0.1754 | 0.0129 | | | C32 | 0.3029 | 0.0971 |
| | | C13 | 0.0587 | 0.0043 | | | C33 | 0.1428 | 0.0458 |
| | | C14 | 0.4756 | 0.0350 | | | C34 | 0.4603 | 0.1476 |
| B2 | 0.1723 | C21 | 0.1472 | 0.0254 | B4 | 0.4334 | C41 | 0.3688 | 0.1598 |
| | | C22 | 0.2304 | 0.0397 | | | C42 | 0.2923 | 0.1267 |
| | | C23 | 0.4287 | 0.0739 | | | C43 | 0.0813 | 0.0352 |
| | | C24 | 0.1937 | 0.0334 | | | C44 | 0.1096 | 0.0475 |
| | | | | | | | C45 | 0.1480 | 0.0642 |

2.2 基于熵权法的客观权重计算

熵权法是一种客观赋权法,原理为如果某个指标的熵值越小,系统不确定性越小,则说明指标的有序程度越低,或者说指标的变异程度越大,提供的信息量越多,在综合评价中该指标起的作用越大,其权重应该越大。由一级指标的相对熵权与二级指标的相对熵权相乘得到二级指标的绝对熵权,见表 3。

表 3 指标体系的熵权法客观权重大小

| 一级指标 | 一级熵权 | 二级指标 | 相对熵权 | 绝对熵权 | 一级指标 | 一级熵权 | 二级指标 | 相对熵权 | 绝对熵权 |
|------|--------|------|--------|--------|------|--------|------|--------|--------|
| B1 | 0.2444 | C11 | 0.3405 | 0.0832 | B3 | 0.2363 | C31 | 0.1517 | 0.0358 |
| | | C12 | 0.2808 | 0.0686 | | | C32 | 0.3098 | 0.0732 |
| | | C13 | 0.2343 | 0.0573 | | | C33 | 0.2049 | 0.0484 |
| | | C14 | 0.1444 | 0.0353 | | | C34 | 0.3336 | 0.0788 |
| B2 | 0.2332 | C21 | 0.1997 | 0.0466 | B4 | 0.2861 | C41 | 0.1298 | 0.0371 |
| | | C22 | 0.2820 | 0.0658 | | | C42 | 0.2993 | 0.0856 |
| | | C23 | 0.1797 | 0.0419 | | | C43 | 0.1515 | 0.0433 |
| | | C24 | 0.3386 | 0.0790 | | | C44 | 0.1193 | 0.0341 |
| | | | | | | | C45 | 0.3001 | 0.0859 |

利用信息熵计算各指标的客观权重。通过专家的评价数据形成原始数据矩阵,进行归一化处理,利用熵计算公式 $H = - \sum_{i=1}^n e_{ij} \ln e_{ij}$ 计算指标的熵值和差异性系数,最后得到相对熵权。

2.3 基于组合赋权法的组合权重计算

层次分析法属于主观赋权法,利用专家意见对比各指标间的重要性建立判断矩阵得到相对权重,能够发挥专家的主观能动性。熵权法作为客观赋权法,能够减少层次分析法存在的主观性对分析结果的影响。组合赋权法综合了层次分析法和熵权法的优点,减少了层次分析法的主观因素和熵权法太过于依赖数据对指标权重的影响。

为了使组合权重更加合理可信,本研究通过计算组合权重距离层次分析法权重和熵权法权重两者偏差平方和最小的方法,将层次分析法和熵权法的权重系数分别设置为 0.5,最终得到组合权重大小,见表 4 和表 5。

表 4 准则层 B 相对于目标层 A 的组合权重

| A | 层析分析法主观权重 | 熵权法客观权重 | 一级组合权重 | 一级排序 |
|----|-----------|---------|--------|------|
| B1 | 0.0736 | 0.2444 | 0.1590 | 4 |
| B2 | 0.1723 | 0.2332 | 0.2028 | 3 |
| B3 | 0.3207 | 0.2363 | 0.2785 | 2 |
| B4 | 0.4334 | 0.2861 | 0.3597 | 1 |

由表 4 可知,一级指标的组合权重排序结果为飞行操纵 B4>性能优化 B3>飞行时间 B2>飞行重量 B1,飞行操纵 B4 和性能优化 B3 的权重相对较大,超过了平均值 0.25,所以飞行操纵和性能优化是 4 个一级指标中较为重要的两个指标。而飞行重量和飞行时间两个指标的影响就相对较小。所以航空公司实施节能减排过程中可以重点考虑飞行操纵和性能优化方面的影响因素,从这两个方面寻找具体的节能减排措施可以取得更好的效果。

表 5 方案层二级指标的组合权重

| 二级指标 | 层次分析法主观权重 | 熵权法客观权重 | 二级组合权重 | 二级绝对排序 | 二级指标 | 层次分析法主观权重 | 熵权法客观权重 | 二级组合权重 | 二级绝对排序 |
|------|-----------|---------|--------|--------|------|-----------|---------|--------|--------|
| C11 | 0.0214 | 0.0832 | 0.0523 | 9 | C32 | 0.0971 | 0.0732 | 0.0852 | 4 |
| C12 | 0.0129 | 0.0686 | 0.0408 | 12 | C33 | 0.0458 | 0.0484 | 0.0471 | 10 |
| C13 | 0.0043 | 0.0573 | 0.0308 | 17 | C34 | 0.1476 | 0.0788 | 0.1132 | 1 |
| C14 | 0.0350 | 0.0353 | 0.0352 | 15 | C41 | 0.1598 | 0.0371 | 0.0985 | 3 |
| C21 | 0.0254 | 0.0466 | 0.0360 | 14 | C42 | 0.1267 | 0.0856 | 0.1061 | 2 |
| C22 | 0.0397 | 0.0658 | 0.0527 | 8 | C43 | 0.0352 | 0.0434 | 0.0393 | 13 |
| C23 | 0.0739 | 0.0419 | 0.0579 | 6 | C44 | 0.0475 | 0.0341 | 0.0408 | 11 |
| C24 | 0.0334 | 0.0790 | 0.0562 | 7 | C45 | 0.0642 | 0.0858 | 0.0750 | 5 |
| C31 | 0.0301 | 0.0358 | 0.0330 | 16 | | | | | |

二级指标权重排在前 5 位的分别为机型更新和改装 C34、飞行高度优化 C42、减少 APU 使用时间 C41、发动机水洗 C32、申请直飞 C45。机型的更新与改装、飞行高度优化、减少 APU 使用时间、发动机水洗和申请直飞是比较重要的节能减排指标,对航空公司节能减排整体效果影响较大。航空公司实施节能减排工作时,应重点关注以上指标所对应的节能减排措施,以提高航空公司节能减排效率。而机供品重量变化、平均重心位置和运行资料减重等指标相对来说重要性较小,航空公司节能减排工作中可以不做重点关注。

3 基于灰色关联法模型的航空公司节能减排综合评价

3.1 灰色关联分析法计算原理和基本流程

灰色关联分析法模型是通过灰色关联度来分析和确定评价因素间的影响程度或者评价因素对评价系统贡献测度的一种方法。灰色关联分析法的基本思想是根据评价因素间指标的相似程度来判断其联系是否紧密,评价指标越接近,相应评价因素之间的关联度越大,反之越小;灰色关联度越大,两因素变化态势越一致。本研究计算了各航空公司节能减排效果与理想值的关联度,关联度越大,说明节能减排的效果越好。

灰色关联分析法的具体计算流程如下:首先构建原始数据的初始矩阵,根据正负指标建立标准化矩阵;其次确定参考数列和比较数列,求解灰色关联系数,然后得出二级灰色关联度;最后按照系统关联度(一级灰色关联度)对样本进行排序,选出最佳方案,得到最终评价结果。

3.2 实例分析

本文根据专家对国内 15 家航空公司的节能减排各指标的打分数据,对各公司的节能减排情况进行分析评估。由于该节能减排指标体系中有 17 个二级指标,航空公司样本数量为 15 个,原始数据矩阵是一个 17×15 的初始矩阵,见表 6。

表 6 原始数据的初始矩阵

| 指标 | NO.1 | NO.2 | NO.3 | NO.4 | NO.5 | NO.6 | NO.7 | NO.8 | NO.9 | NO.10 | NO.11 | NO.12 | NO.13 | NO.14 | NO.15 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C11 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 5 | 4 | 4 | 4 | 2 |
| C12 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 |
| C13 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| C14 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 2 |
| C21 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | 5 | 4 | 2 |
| C22 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 2 |
| C23 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 3 | 3 | 2 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 |
| C24 | 5 | 3 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| C31 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| C32 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 2 |
| C33 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 |
| C34 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 5 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| C41 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 3 |
| C42 | 5 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 3 | 2 |
| C43 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| C44 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 |
| C45 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 |

17 个二级指标参考数列的值为(5,4,4,5,5,5,5,5,4,5,5,5,5,5,5,5)^T。求参考数列与比较数列的灰色关联系数 Ψ, Ψ 的计算公式为

$$\Psi = \frac{\min \min |x_j(k) - x_i(k)| + \rho \max \max |x_j(k) - x_i(k)|}{|x_j(k) - x_i(k)| + \rho \max \max |x_j(k) - x_i(k)|}$$

灰色关联系数计算结果,见表 7。

表 7 灰色关联系数矩阵

| 指标 | NO.1 | NO.2 | NO.3 | NO.4 | NO.5 | NO.6 | NO.7 | NO.8 | NO.9 | NO.10 | NO.11 | NO.12 | NO.13 | NO.14 | NO.15 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C11 | 0.33 | 0.43 | 0.33 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.33 | 0.33 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.33 |
| C12 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 0.43 | 0.43 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.43 |
| C13 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.60 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.43 |
| C14 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.33 |
| C21 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 1.00 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.33 |
| C22 | 1.00 | 0.43 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.43 | 1.00 | 0.60 | 0.33 | 0.43 | 1.00 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 0.33 |
| C23 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 1.00 | 0.43 | 0.43 | 0.33 | 0.60 | 1.00 | 0.43 | 0.60 | 0.43 |
| C24 | 1.00 | 0.43 | 0.43 | 1.00 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 0.43 | 0.33 | 0.43 | 1.00 | 0.60 | 0.43 | 0.33 | 0.33 |
| C31 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 |
| C32 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.33 |
| C33 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.43 |
| C34 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.43 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 1.00 | 0.43 | 0.60 | 0.43 | 0.43 |
| C41 | 0.43 | 0.43 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.43 |
| C42 | 1.00 | 0.60 | 0.43 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 1.00 | 1.00 | 0.43 | 0.43 | 0.33 |
| C43 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.43 | 0.43 |
| C44 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 1.00 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.43 |
| C45 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 1.00 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.33 | 0.33 | 0.60 | 0.43 | 0.60 | 0.43 | 0.33 |

根据二级相对组合权重和二级指标灰色关联系数矩阵,求出子系统灰色关联度,见表 8。

表 8 各一级指标灰色关联度

| 指标 | NO.1 | NO.2 | NO.3 | NO.4 | NO.5 | NO.6 | NO.7 | NO.8 | NO.9 | NO.10 | NO.11 | NO.12 | NO.13 | NO.14 | NO.15 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B1 | 0.540 | 0.446 | 0.416 | 0.570 | 0.632 | 0.446 | 0.608 | 0.446 | 0.416 | 0.454 | 1.000 | 0.687 | 0.677 | 0.563 | 0.333 |
| B2 | 0.779 | 0.481 | 0.525 | 0.809 | 0.600 | 0.429 | 0.794 | 0.472 | 0.379 | 0.400 | 0.878 | 0.722 | 0.528 | 0.529 | 0.362 |
| B3 | 0.709 | 0.481 | 0.458 | 0.791 | 0.510 | 0.391 | 0.791 | 0.481 | 0.429 | 0.415 | 0.913 | 0.613 | 0.510 | 0.444 | 0.333 |
| B4 | 0.744 | 0.568 | 0.501 | 0.817 | 0.729 | 0.568 | 0.609 | 0.482 | 0.362 | 0.422 | 0.910 | 0.689 | 0.626 | 0.443 | 0.333 |

根据一级指标相对组合权重和一级灰色关联度求得最终灰色关联度,见表 9。

表 9 灰色关联度

| 指标 | NO.1 | NO.2 | NO.3 | NO.4 | NO.5 | NO.6 | NO.7 | NO.8 | NO.9 | NO.10 | NO.11 | NO.12 | NO.13 | NO.14 | NO.15 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 灰色 关联度 | 0.709 | 0.507 | 0.480 | 0.769 | 0.626 | 0.471 | 0.697 | 0.474 | 0.392 | 0.421 | 0.919 | 0.674 | 0.582 | 0.480 | 0.339 |
| 排序 | 3 | 8 | 9 | 2 | 6 | 12 | 4 | 11 | 14 | 13 | 1 | 5 | 7 | 10 | 15 |

3.3 结果分析

由表 9 可以看出,NO.11 的各个子关联度以及总的综合关联度都是最好的,说明该航空公司节能减排的各个方面都做得相对更好,所以与理想航空公司的关联度最大。NO.1 和 NO.4 在飞行时间、性能优

化、飞行操纵三个方面的关联度比较靠前,说明它们的主要节能减排精力都在这三个权重比较大的方面,而飞行重量方面则是相对不足,但是不影响它们综合关联度的靠前。NO. 7 在飞行时间、性能优化两个方面关联度较大,而飞行重量和飞行操纵方面关联度较小,所以综合关联度不及 NO. 4 和 NO. 1。NO. 5 与 NO. 7 恰好相反,在飞行重量与飞行操纵方面关联度较大,但是综合关联度不及 NO. 7,位于 NO. 12 之后。而 NO. 12 则是四个方面都表现得比较均衡,因此比只有两个方面突出的 NO. 5 综合关联度更大。

由各个航空公司节能减排的评价可以看出,NO. 11 综合关联度最大是因为各个子关联度都是最大的。而 NO. 4 和 NO. 1 综合关联度占据二三主要是因为它们在飞行时间、性能优化、飞行操纵三个指标权重最大的方面的子关联度除了 NO. 11 外最大。而 NO. 7 则是因为在飞行时间和性能优化两个方面子关联度较大而占据第四。而 NO. 5 更是凭借着飞行操纵方面的子关联度较大,紧追其余三方面都优于它的 NO. 12。所以航空公司要想获得更好的节能减排效果,除了面面俱到外,就只有在飞行操纵和性能优化这两个权重相对较大的方面多花精力。

4 结论

(1)运用德尔菲法确定了航空公司节能减排评价初步指标体系,采用 DEMATEL 法对初始指标体系进行计算,消除指标间的影响,简化指标体系,最终形成包含 4 个一级指标,17 个二级指标的航空公司节能减排指标体系。

(2)运用层析分析法、熵权法从主观和客观两个方面对指标权重值进行计算,最终通过组合赋权法得到组合权重,提出了一种定量与定性结合、主观和客观相辅的指标权重计算方法,进而得到更加符合实际的指标权重。

(3)基于灰色关联分析法建立航空公司节能减排综合评估模型。选取国内 15 家典型航空公司进行评价,得到 15 家航空公司的灰色关联度大小和排序情况,实现了航空公司节能减排的综合评估。实例分析表明,得到的灰色关联度结果与实际运行情况相符,说明该指标体系和综合评价模型具有一定的可行性和实用性,可以得到待评价航空公司节能减排效果和薄弱环节,为基于航空公司运行需要的节能减排评价工作提供理论依据和实际应用价值。

参 考 文 献:

- [1] 徐金贵. 民航飞机运行节能减排增效措施介绍[J]. 今日科苑, 2010(22):126.
- [2] TURGUT E T, USANMAZ O, CANARSLANLAR A O, et al. Energy and emission assessments of continuous descent approach[J]. Aircraft engineering and aerospace technology, 2010, 82(1): 32 - 38.
- [3] NIKOLERIS T, GUPTA G, KISTLER M. Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2011, 16(4): 302 - 308.
- [4] 中国国际航空公司节能减排工作经验[J]. 空运商务, 2011(2): 11 - 13.
- [5] 邵富强. 南航“节能减排”有成效“绿色飞行”赢赞誉[J]. 空运商务, 2011(22): 43 - 46.
- [6] LIN C E, LIAO Y C. Economic flight operation from FOQA database using correlation analysis [C]//2011 IEEE forum on integrated and sustainable transportation systems. IEEE, 2011: 67 - 72.
- [7] 黄丽秋. 优化航路结构, 推进航空公司节能减排[J]. 中国民用航空, 2013(5): 20 - 22.
- [8] 樊澄, 林鹏. 航空公司节能减排管理分析与思考[J]. 中国民用航空, 2014(1): 10 - 13.
- [9] 王晓. 飞机性能在节能减排中的应用[J]. 空运商务, 2017(12): 56 - 58.
- [10] 田乾乾. 基于数据挖掘的民航节能减排决策支持系统的研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2012.

- [11] 孙薇.我国航空公司业节能减排形势评估与措施建议研究[D].天津:中国民航大学,2014.
- [12] 贾海娟.航空公司碳减排效率评估方法研究[D].天津:中国民航大学,2014.
- [13] 丁勇,葛翔.ETS视角下的天津机场起降航班节能减排效率评价方法研究[J].郑州航空工业管理学院学报,2014,32(2):59-66.
- [14] 田利军,赵凤彩.基于因子分析法的航空公司节能减排评价体系研究[J].财会通讯,2015(18):115-118.
- [15] 罗凤娥,陈海川,杨杰.基于SPC的航空公司节能减排策略研究[J].现代商贸工业,2017(10):37-39.
- [16] 杨胜林.民航企业能效评价与动态监控方法研究[D].天津:中国民航大学,2017.
- [17] 马骏伟.基于DEA的航空公司能源效率评价及改善研究[D].天津:中国民航大学,2018.
- [18] 郑宇婷,赵碧玲.亚太地区航空公司能源效率与环境效率研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2020,42(5):446-452.
- [19] 李龙.航空公司环境效率测度及其影响因素研究[D].天津:中国民航大学,2020.
- [20] 刘炳成,褚双磊,刘蕾,等.基于运行数据的绿色航空公司节能减排现状分析[J].长沙航空职业技术学院学报,2017,17(1):64-68.

Research on Evaluation Method of Energy Saving and Emission Reduction for Airlines

CHU Shuang-lei^{1,2}, WEI Zhi-qiang^{1,2}, REN Qiang^{1,2}, LIU Fei^{1,2}

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China;

2. Tianjin Key Laboratory of Operation Programming and Safety Technology of
Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The low-carbon operation of civil aviation transportation is imminent. Airlines must establish the evaluation system of energy saving and emission reduction as soon as possible, and the concept of sustainable development and green environmental protection must be realized. The specific implementation plan of energy saving and emission reduction for airlines is analyzed, and the initial index system of energy saving and emission reduction for airlines is constructed by Delphi method. DEMATEL method is used to remove the less influential indicators, and the final index system of energy saving and emission reduction is formed, including four aspects of flight weight, flight time, performance optimization and flight control. Subjective weights is calculated by using the AHP method, and objective weights is calculated by using entropy weight method. According to the combination weighting method, the combined weight size and ordering are obtained. The energy saving and emission reduction system of 15 domestic airlines is evaluated by grey correlation method. The grey correlation degree and ranking of the implementation results of energy saving and emission reduction for different airlines are obtained. The feasibility of airline energy saving and emission reduction evaluation method is verified, which provides references and suggestions for airline energy saving and emission reduction work.

Keywords: airlines; energy conservation and emission reduction; entropy weight method; combined weight; grey correlation degree

(责任编辑:唐立平)