

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.06.012

一种融合神经网络与熵权法的多用户飞行程序评价体系

沈志远^{1,2}, 李贺², 谢辉^{1,3}, 李云翔⁴

(1.南京航空航天大学民航学院,南京 211106; 2.中国电子科技集团有限公司第二十八研究所空管国家重点实验室,南京 210007; 3.中国人民解放军 73602 部队,南京 210041; 4.新疆机场(集团)有限责任公司空管业务部,乌鲁木齐 830015)

摘要:飞行程序设计主要依据国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)第 8168 号规章从飞行安全考虑,兼顾部分经济性指标进行程序设计。目前,飞行程序设计鲜有考虑所涉及的不同用户的需求。同时,对飞行程序的评价主要依据专家经验打分,缺少对客观因素的分析。本文面向飞行程序涉及的 4 个用户,提出了一种融合神经网络与熵权法的飞行程序评价体系。首先,分析了飞行员、民航管制员、军航管制员、机场和城市规划部门 4 个飞行程序用户对飞行程序的需求,从而基于多用户需求建立了飞行程序的三级评价体系。再次,通过利用基于神经网络计算的主观权重以及基于熵权法的客观权重,利用博弈论框架得到了一种综合性主客观权重的评价体系。最后,基于中国西部某军民合用机场的离场程序,对评估体系进行了实例验证,并对程序中的改进方向提出了建议。综合多用户需求的飞行程序将在空域资源受限条件下进一步提升空中飞行效率,降低延误。

关键词:交通运输;飞行程序设计;评价体系;神经网络;熵权法

中图分类号:U8 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2023)06-1055-10

Multi-user Evaluation Framework of Flight Procedure Based on Neural Network Combined with Entropy Weight Method

SHEN Zhiyuan^{1,2}, LI He², XIE Hui^{1,3}, LI Yunxiang⁴

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. State Key Laboratory of Air Traffic Control, The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China; 3. No. 73602 Troops of the People's Liberation Army of China, Nanjing 210041, China;

4. Air Traffic Control Business Department, Xinjiang Airport(Group) Co. Ltd., Urumqi, 830015, China)

Abstract: Flight procedure designers refer to the International Civil Aviation Organization (ICAO) Regulation 8168 from the perspective of flight safety and a few economic indicators. However, flight procedure designers rarely considers the needs of different users involved. Furthermore, the evaluation system of the flight procedure is mainly based on the experience of experts, which leads to a lack of the analysis of objective factors. In this paper, a novel evaluation system of flight procedure that combines neural networks with the entropy method is proposed to satisfy the four users involved in the flight procedure. Firstly, the demands of the flight procedure users, such as pilots, civil aviation controllers, military air traffic controllers, and airports and urban planning departments are analyzed. Secondly, to satisfy the needs of these mentioned users, a three-level evaluation index system for flight procedures is established. Thirdly, the subjective weights

基金项目:国家自然科学基金民航联合基金(U2233208);空中交通管理系统与技术国家重点实验室开放基金(SKLATm202006)。

收稿日期:2022-02-28;**修订日期:**2022-09-29

通信作者:沈志远,男,副教授,E-mail: shenzy@nuaa.edu.cn。

引用格式:沈志远,李贺,谢辉,等.一种融合神经网络与熵权法的多用户飞行程序评价体系[J].南京航空航天大学学报,2023,55(6):1055-1064. SHEN Zhiyuan, LI He, XIE Hui, et al. Multi-user evaluation framework of flight procedure based on neural network combined with entropy weight method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(6): 1055-1064.

obtained by the neural network computation and the objective weights calculated by the entropy method are fused to achieve a comprehensive subjective and objective weight evaluation system by using the game theory framework. Finally, based on the departure procedure of a military and civil aviation airport in western China, the evaluation system is verified. In addition, the suggestions are proposed for the improvement of the procedure. The flight procedure that integrates the needs of multiple users will further improve the efficiency of air flights under the conditions of limited airspace resources, and reduce delays.

Key words: traffic transportation; flight procedure design; evaluation system; neural network; entropy weight method

中国民用航空运输业的快速发展对飞行程序提出了更高的要求,飞行程序设计的优劣将直接影响该区域空域的运行效率,飞行程序是保障民航飞行安全进行的重要基础资料,包括航空器飞行所需的航路与机场资料,飞行程序的作用就是为航空器提供引导和保障,使得仪表发挥其最大作用。当前的飞行程序设计往往仅考虑“国际民航组织8168文件”对飞行安全的约束和要求,而忽略了军民航管制单位、飞行员和机场等飞行程序用户对其的效能和效率需求。近年来,“国际民航组织9906号文件”以及“中国民航飞行程序质量保证管理规定”都对飞行程序用户的人为因素提出了研究需求。

飞行程序的设计与评价是一个不可分割的整体,飞行程序的评价是在程序设计的基础上对程序进行反馈的过程。对于飞行程序的评价,相关学者已经展开了很多的研究,主要集中在安全性和经济性方面。飞行冲突探测方面,Reich提出了Reich碰撞模型,该模型的提出最初是针对北大西洋上空平行航路航空器之间的碰撞风险,定义了基于机体尺寸的碰撞盒,解决了一定的飞行间隔下碰撞风险的计算问题,Reich模型为飞行程序的安全性评估奠定了基础^[1-2]。焦江等^[3]将遗传算法引入飞行程序中同一航路中的两架飞机的冲突解脱模型。李永飞^[4]基于管制员角度开发了航空器冲突识别辅助决策工具。Bakker等^[5]借鉴碰撞吸收边界理论,提出了一种基于马尔可夫过程的航空器碰撞风险计算模型。航空器的冲突与碰撞模型也为飞行程序安全性评价奠定了基础,赵焜飞等^[6]基于调速的方法,以调速值最小为目标函数建立冲突调配模型,判断任意时刻两机距离与标准安全间隔间关系对飞行冲突进行预测并确定调速区间为飞行程序的安全性评价做出了进一步的研究。同时,Event模型能够有效地对航空器中的碰撞情况进行预测,同样为飞行程序的安全性评估奠定了一定的基础。其中,张兆宁等^[7]结合自由飞行特点,将Event模型中的碰撞盒改为球体,评估其碰撞风险。陈肯等^[8]对原模型碰撞盒进行改进,将原Event模型中的长方体、圆柱体以及椭球体碰撞盒改为两个拼接

四棱锥,计算改进前后扩展碰撞盒的面积比,建立新的碰撞风险计算公式,从而得到改进后的碰撞风险。飞行程序的经济性由于影响航空公司燃油消耗而成为控制成本的关键因素。在2009—2019年期间,全球范围内各航空公司的燃油成本占总运营成本的28.2%^[9]。航空运输业的目标就是在保证安全的前提下,以最低的成本完成运输任务^[10]。BADA数据库^[11]是燃油消耗计算模型的基础,BADA模型包括许多商用飞机的性能数据和运营数据,每个数据由质量、发动机推力、空气动力学数据和燃油流量等组成。运用BADA数据库中关于航空器进场平飞和下降阶段的燃油消耗率模型,进而建立航班的燃油消耗模型,可得到不同飞行程序所需的燃油消耗量及燃油成本,从而对飞行程序的经济性评价奠定了基础。赵焜飞等^[12]参考连续下降运行概念,结合水平方向的效率指标,比较航班实际飞行航迹与最优运行航迹的燃油消耗差别,构建了基于燃油消耗的航迹效率指标,并对终端区航迹效率的影响因素进行分析,从而达到提高飞行程序运行效率的同时又保证了飞行程序的经济性。Abdelghany等^[13]提出在飞机上使用更多的燃料不仅会增加飞机的重量,还会缩短发动机的使用寿命。Irrgang等^[14]将飞机的磨损程度加入燃油计算模型。Huang等^[15]基于AFBM算法建立了Simmod油耗计算模型,虽然Simmod模型可以计算燃油消耗,但是大多数学者还是认为BADA模型具有更好的应用效果。Khan等^[16]通过自组织构造性神经网络来确定航班燃油。Li等^[17]开发了OTASSM模型,将飞行员、管制员和航空器的活动放在微观层面上进行分析。由此可见,相关学者采用了不同的算法和模型,从飞行程序的安全性和经济性的角度对飞行程序进行评价,提出了多种解决飞行程序冲突和飞机燃油消耗的模型,积累了丰富的研究成果。

除了安全性和经济性的评价,飞行程序还具备环保性、简便性和适用性等其他特性。在机场综合环境中,飞行程序不同的用户具有不同的需求侧重,所以针对不同用户需求需要对飞行程序的多个

特性进行联合评价,建立飞行程序评价体系时也需要考虑多用户的需求。

指标体系建立后需要对指标进行赋权,飞行程序评价指标赋权是指标体系研究的重要步骤,传统的指标赋权方法可以分为客观赋权方法与主观赋权方法,单一的评价方法具有片面性,不能全面考虑主观因素和客观因素的影响。主观赋权方法比较常见的有层次分析法、主成分分析法和模糊综合评价方法等,其大量借助了专家和学者的经验。层次分析法中主要的问题就是评判矩阵的一致性,学者 Saaty 创立的使用 CR 一致性对比率对评判矩阵进行一致性检验是目前认可度较高的方法。穆永铮等^[18]在方案综合评价过程中应用了改进层次分析法,结合区间数与模糊数来确定判断矩阵的模糊值,以此来进行指标赋权。文献[19]应用主成分分析法,利用评价体系中的总方差贡献率计算各主成分的权重值,实现指标简化。与主观方法不同的是,客观方法摒除了主观经验的影响,直接通过大量的数据得到最终权重分配结果,其中应用较为广泛并具有代表性的是熵权法。Zhao 等^[20]提出一种结构型熵权法,改进了传统熵权法在指标权重接近 1 的时候发生骤变的问题。文献[21]将熵权法与 TOPSIS 方法结合得到评价指标的权重分配,但是处理过程较为复杂。单一的主观赋权方法容易受个人主观意念的干扰,而单纯的客观分析方法需要庞大的数据集,为了克服单一赋权方法的片面性,发展出主客观权重相结合的组合赋权方法,组合赋权方法既可以体现专家的经验又可以反映少量原始数据的客观属性,基于博弈论的组合赋权方法具有简单高效的特点,被广泛应用于组合赋权。文献[22]将博弈论方法应用到评价体系研究过程中,将因子分析法得到的客观权重与层次分析法得到的主观权重进行组合赋权,并进行实例验证,结果表明该赋权方法具有可行性。

当前飞行程序的设计人员,在设计中只考虑安全性,而没有考虑其用户甚至是多用户的需求。因此,构建一个融合多用户,包括飞行员、民航管制、军航管制、机场和城市规划部门需求的飞行程序评价体系成为一个很有价值的研究问题。传统的飞行程序更关注安全性评估和经济性评估。评估的方法往往是纯主观评分或者完全依靠燃油消耗的计算结果。组合赋权是比较科学的一种赋权方法,既可以融合专家学者的主观经验,又可以利用客观数据避免过于主观。飞行程序评价体系是一个包含主客观因素的多层级体系,对于其中的指标权重分配应采取组合赋权的方法。本文提出一种基于

神经网络的逆向权重分配方法,将通过神经网络得到的权重与熵权法得到的权重进行组合赋权,进而实现了主客观评价方法的融合。

1 飞行程序的多用户分析

飞行程序设计是在分析终端区净空条件和空域布局的基础上,根据航空器的飞行性能,确定航空器的飞行路径及有关限制的一门科学。飞行程序主要由起飞离场、航路飞行、进场、进近和等待 5 个阶段组成,其中进近程序又包括起始进近阶段、中间进近阶段、最后进近阶段以及复飞阶段,它是机场运行的基本条件之一,是组织实施飞行、提供空中交通服务、建设导航设施的重要依据,同时也是航空器飞行安全和提高运行效率的重要保障。在进行飞行程序设计时,要保证航空器与障碍物之间有足够的安全余度并与当地的飞机流向相一致,且不同飞行阶段应尽量使用不同的飞行航线,当不同的飞行阶段的航空器必须使用同一飞行航线时,应尽可能使起飞离场的航空器在进场、进近的航空器之上飞行。

飞行程序的设计水平将直接影响终端区的运行效率,尤其对于军民航合用机场,飞行程序可能造成军民航飞行穿插,这都会增加事故征候发生的概率。本文主要针对航空器离场阶段基于飞行程序的实际运行状况和使用需求,对飞行程序的多用户需求进行分析,其中将飞行程序的多用户确定为:飞行员、军航管制员、民航管制员、机场和城市规划部门,基于飞行程序的 4 大用户关系如图 1 所示。

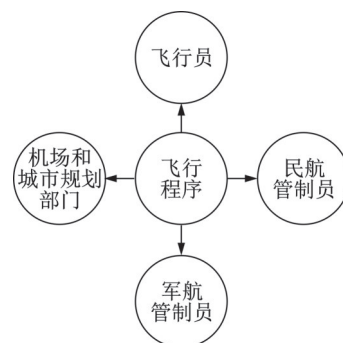


图1 基于多用户需求飞行程序用户体系示意图

Fig.1 Schematic diagram of flight procedure user system based on multi-user requirements

飞行程序用户的需求定义为:在特定的飞行程序条件下,用户根据自身的需要,对飞行程序具有的不同要求。经过与飞行程序用户座谈访问调查,4类用户的需求如表1所示。

表1 飞行程序多用户分析

Table 1 Multi-user analysis of flight procedures

相关用户	需求说明	需求关注点
飞行员	飞行员作为飞行程序的第一使用者,飞行程序贯穿着飞行员执行飞行任务的整个过程,起飞前飞行员必须根据签派员提供的各项资料来提前了解所要执飞的航班的各种信息,对其中的不明确信息要做出补充说明	程序简洁明了
民航管制员	管制员作为机场终端区的飞行程序使用者,飞行程序会影响管制员的工作负荷,管制员需要同时指挥多架飞机,对于繁忙机场来说,飞机的间隔都非常接近安全间隔最小值,这就压缩了管制员的冲突调配时间	减少程序交叉冲突点
军航管制员	军航管制用户主要是针对特殊的军民航合用机场的民航飞行程序,由于军民航合用机场的特殊要求,飞行程序必须满足军航限制区域要求,在可以使用的空域内进行设计与使用,并且尽量避免与军航飞行轨迹造成穿插	军民航冲突
机场和城市规划部门	机场和城市发展用户指的是城市发展规划有关部门,由于机场占地面积大对城市产生的影响也很大,所以随着城市化进程的加快和机场周边的土地资源紧张,机场周围的城市规划需要及时更新改变,绿色民航是发展的趋势	噪音影响和程序环保性

2 基于多用户需求的飞行程序评估指标体系

2.1 指标选取原则

飞行程序指标体系的建立需要按照一定的方法与原则,首先需要确定其方法,为了全面考虑飞行程序的多个用户,本文采用分级的方法进行指标建立。评价指标选取的原则是以尽量少的指标,反映最主要和最全面的信息。飞行程序是一个复杂的系统,评价飞行程序也是一个多指标体系,分别针对飞行程序的多个用户:飞行员、军航管制员、民航管制员和机场城市规划部门,建立多层级的指标体系。在评估指标的选择上,不仅要考虑其可行性,同时还要考虑指标的数量。评估指标数量过少会导致评估的片面性;而评估指标数量过多,则会造成指标的冗杂,制定以下原则来进行飞行程序评价指标的建立。

(1)专业性原则。评估指标需要符合飞行程序

设计的行业标准,需经过飞行程序领域相关专家审核,选取符合飞行程序实际情况的指标,避免指标的冗杂性。

(2)可量化原则。评估指标需要具有清晰的度量方式,便于采集和量化,同时满足数据格式的规范,尽量选取可以量化的指标。

(3)全面性原则。指标在构建过程中,指标应该可以概括飞行程序的各个要点,使得指标体系可以全面展现飞行程序的设计水平与使用效果。

(4)可操作性原则。由于本研究是针对航图中的飞行程序进行评估,需要实现对图中信息的有效识别与提取,所以所构建的指标体系需要切实可行,能够直接获取到。

2.2 指标体系

本文使用层层递进的指标体系构建方案。构建飞行程序评估指标体系时,需要分析飞行程序各指标之间的关联与区别,将指标进行分类、分层。此外,构建的评估指标体系还需要对飞行程序特点有着充分的展示,方便各指标量化计算,使得评估结果一目了然。

通过收集和分析军民航管制单位、机场和航空公司等用户对飞行程序运行需求,根据国内外飞行程序设计相关规定,考虑复杂空域(军民航合用机场)情况下飞行员反应时间、冲突预判时间、特情指令等多个复杂因素,初步建立基于多用户需求的飞行程序评估指标体系,4个因素层分别为:飞行员评价指标层、民航管制员评价指标层、军航管制评价指标层、机场和城市规划部门评价指标层。

考虑专业性和可量化性等原则,指标集合从以下几个方面建立:

(1)简便性指标,基于飞行员需求的指标。据调查,在飞行员使用飞行程序过程中,程序设计是否简便清晰将大大影响飞行员的操作与工作负荷。设计人员需要站在程序使用者的角度,简化航空器离场转弯位置与拟加入的航路点之间衔接方式,并控制不同发散方向可能的冲突,使机组能够便捷地加入航路,其中包括速度限制、转弯角度大小和离场类型。

(2)驾驶难度指标,基于飞行员需求的指标。在使用飞行程序的过程中,驾驶难度将影响飞行员的操控难度。一个是离场航路天气条件的好坏将直接影响驾驶员对航空器进行起飞操控时的难度,经常遇到恶劣气象的影响,结合跑道RVR设计标准,容易造成不满足离场条件;另一个是跑道起飞末端到重要离场点的距离,结合不同的机型爬升性能不同,过短或过长的爬升阶段会使得驾驶员难以高效的加入航路。此外,过少以及模糊的航路标识

和导航方式的精确性也将增加飞行员对航路飞行进行判断的难度,例如飞测距仪(Distance measuring equipment, DME)弧线对驾驶员技术要求高,因此基于驾驶难度方面的飞行员需求指标因素包括:大气条件、航路标识和导航方式(传统方式飞行员压力大)。

(3)经济性指标,基于飞行员需求的指标。经济性指标主要是以燃油消耗量来衡量,飞行程序直接决定本次飞行的燃油消耗,除了固定的里程数,飞行程序中不同的限制与操作要求都会对油耗产生影响,飞行程序的经济性会直接影响到航空公司的决策,飞行员作为航空公司的职员,也有适当的节油奖励。跑道起飞末端到重要离场点的距离,以及转弯离场点的个数对整个起飞阶段的燃油消耗有着重要的影响,结合不同的机型爬升性能不同,过短或过长的爬升阶段会使得大功率时间较长或者爬升到巡航阶段时间较长,因此基于经济性指标方面的飞行员需求指标因素包括离场大角度转弯次数和平均航段距离。

(4)管制适用性指标,基于管制员需求的指标。在复杂终端区,飞行程序的优劣将直接影响管制员的工作难度和强度。进离场分类航路对离场指挥有着重要的意义,其极大程度上减少了对头冲突,相互穿越高度。其中包括进离场程序是否分离、离场点的数量、是否受军航限制、离场时是否可以连续上升、同一方向离场程序的数量和程序交叉汇聚点个数。

(5)噪声影响程度指标,基于机场航务需求的指标。起飞阶段对地面的噪声影响非常明显,目前越来越多的国家开始重视声音污染,航空器的噪声污染将是其中重点。机场周边群众对噪音的敏感性直接诉求单位是当地机场。因此机场对于离场和进近程序下方是否包含大面积居民区有着重要的关注。因此包括昼、夜时间段平均架次比、观测点到航段的最短距离。

(6)飞行区域重合度指标,基于军航管制需求的指标。对于军民航可能发生冲突的情况,我国采取的是民航绝对避让军航,所以只要有冲突发生的可能,民航都要服从军航的安排。

(7)限制性指标,基于城市发展需求的指标。随着经济社会的不断发展,城市用地日渐紧张,机场周边有着严格的障碍物限高,这会影响到城市发展规划。尤其在离场阶段,航空器处于离地高度增加的过程,程序设计既要满足当地的发展,也要保障其越障的安全性。其中包括离场程序范围内城市限制障碍物高。

(8)环保性指标,基于城市发展需求的指标。

着机场周边城市化进程的加快和土地资源的紧张,民航作为 3 大传统交通行业之一,机场体系对城市的发展具有重要影响,降低对环境的影响是绿色民航发展的必经之路,飞行程序的优化设计可以降低航空器的污染物排放影响。

本文根据上述原则,构建完善有效的评估指标体系如表 2 所示。表 2 中 PBN 为基于性能的导航。

表 2 飞行程序评估指标量化说明

Table 2 Quantitative explanation of flight procedure evaluation metrics

一级指标层	二级指标层	符号表示	指标量化说明
飞行员评价 指标 X_1	速度限制	X_{11}	速度限制次数/次
	程序类型	X_{12}	输入 0/1
	大角度转弯	X_{13}	大角度转弯次数/次
	大气条件	X_{14}	机场标高/米
	航路标识	X_{15}	航路标识密度/组
	导航方式	X_{16}	传统导航为 0, PBN 为 1
民航管制 员评价指 标 X_2	进离场点	X_{21}	进离场点的数量/个
	同一方向进离场程序	X_{22}	同一方向进离场程序的数量/个
	程序交叉汇聚情况	X_{23}	程序交叉汇聚点的数量/个
	进离场程序是否分离	X_{24}	是为 1, 否为 0
	是否可以连续上升/下降	X_{25}	是为 1, 否为 0
军航管制 员评价指 标 X_3	航线周围是否有空军训练区	X_{31}	是为 1, 否为 0
机场和城 市规划部 门评价指 标 X_4	程序下方城市限制障碍物高	X_{41}	跑道中心点周围 15 km 范围内最高障碍物高度/米
	飞行程序绿色环保性	X_{42}	跑道与最近航路点的距离/米

下面对指标体系中需要定义的指标进行说明,尤其是定性指标:进近程序类型分为精密进近与非精密进近,离场程序类型分为直线离场程序和转弯离场程序,其输入量化值如表 3 所示。

表 3 程序类型输入值划分

Table 3 Dividing input values of procedure types

程序类型	指标输入数值	程序类型	指标输入数值
精密进近程序	1	非精密进近程序	0
直线离场程序	1	转弯离场程序	0

3 融合极速学习机神经网络与熵权法的指标权重计算方法

评价指标赋权是评价类问题的首要步骤^[18],鉴于本文的数据集特性,采取主客观权重相结合的组合赋权方法,克服单一赋权方法的片面性。组合赋权方法既可以体现专家的经验又可以反映少量原始数据的客观属性,但是传统求解方法十分烦

琐,每次求解都要经过大量的计算,而神经网络具有良好的非线性映射能力,本文采用神经网络方法来求解主观权重,通过模型训练使之能较好体现指标数据与飞程序评分之间的非线性关系,将多层神经网络训练好的权重进行结合,相较于传统方法来说更加具有泛化能力,求得的权重分配更加科学合理。

3.1 基于ELM单隐层神经网络的权重

传统飞程序评价问题缺少标准的量化等级划分,本文采用专家评判方法邀请10名飞程序相关领域专家对100套不同机场的飞程序图进行主观打分,将打分结果作为神经网络的输出,从图中读取的飞程序指标数据作为极速学习机(Extreme learning machine, ELM)的输入,以此建立神经网络模型来存储专家经验。神经网络通过对参数的不断调整,以达到训练要求精度,在参数调整过程中,各层之间的权值也在不断调整,区别以往将神经网络内部看作黑盒的看法,本文注重对各层之间权值矩阵的提取,将权值矩阵进行内积,得到的综合权重矩阵作为基于主观评价的权重。

ELM有着更高的学习效率和更少参数要求,其结构如图2所示。

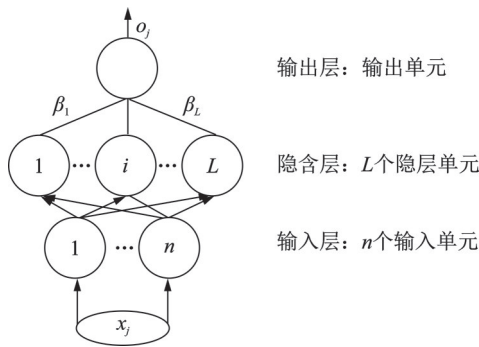


图2 ELM结构图

Fig.2 Architecture diagram of ELM

ELM是包含 \$n\$ 个输入单元的输入层和 \$L\$ 个隐层单元的隐层的单隐层模型, \$X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \in \mathbb{R}^n, t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}]^T \in \mathbb{R}^m\$, 样本集的属性特征个数为 \$n\$, 类别个数为 \$m\$。对于一个有 \$L\$ 个隐层神经元的单隐层神经网络, 预测结果可以表示为 \$\sum_{i=1}^L \beta_i g(W_i \cdot X_j + b_i) = o_j, j = 1, 2, \dots, N\$。式中: \$g(x)\$ 为隐含层的激活函数, \$W_i\$ 和 \$\beta_i\$ 分别为隐含层第 \$i\$ 个神经元的输入权重和输出权重, \$b_i\$ 为隐含层第 \$i\$ 个神经元的偏置。

训练单隐层神经网络模型的目的是使得输出误差不断减小,直至达到训练精度的要求,表示为^[22]

$$\sum_{j=1}^N o_j - t_j = 0 \tag{1}$$

即存在 \$\beta_i, W_i\$ 和 \$b_i\$, 使得^[22]

$$\sum_{i=1}^L \beta_i g(W_i \cdot X_j + b_i) = t_j \quad j = 1, 2, \dots, N \tag{2}$$

用矩阵的形式表示式(2)为^[22]

$$C\beta = T \tag{3}$$

式中: \$C\$ 和 \$\beta\$ 而分别表示隐含层神经元的输出矩阵和输出权重, \$T\$ 为期望值, 展开如下^[22]

$$C(W_1, W_2, \dots, W_L, b_1, b_2, \dots, b_L, X_1, X_2, \dots, X_L) = \begin{bmatrix} g(W_1 \cdot X_1 + b_1) & \dots & g(W_L \cdot X_1 + b_L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(W_1 \cdot X_N + b_1) & \dots & g(W_L \cdot X_N + b_L) \end{bmatrix}_{N \times L} \tag{4}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \beta_2^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{L \times m}, T = \begin{bmatrix} T_1^T \\ T_2^T \\ \vdots \\ T_N^T \end{bmatrix}_{N \times m} \tag{5}$$

通过对该单隐层神经网络模型进行训练, 希望可以得到 \$\hat{\beta}_i, \hat{W}_i\$ 和 \$\hat{b}_i\$, 使得^[22]

$$\|C(\hat{W}_i, \hat{b}_i)\hat{\beta}_i - T\| = \min_{w, b, \beta} \|C(W_i, b_i)\beta_i - T\| \tag{6}$$

式中 \$i = 1, 2, \dots, L\$, 等价于将损失函数最小化^[22]。

$$E = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^L \beta_i g(W_i \cdot X_j + b_i) - t_j \right)^2 \tag{7}$$

在ELM算法模型中, 只要随机确定了隐含层的输入权重 \$W_i\$ 和偏置 \$b_i\$, 就可以得到确定的输出矩阵 \$C\$, 将参数问题转化为求解线性关系 \$C\beta = T\$, 其中 \$T\$ 是已知的, 最终可以确定输出权重为

$$\hat{\beta} = C^+ T \tag{8}$$

将隐含层的输入权重 \$W_{n \times L}\$ 矩阵与输出权重 \$\beta_{L \times 1}\$ 矩阵相乘, 得到主观权重 \$\omega_j^*\$, 表示为

$$\omega_j^* = W_j^E \cdot \beta_j \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{9}$$

3.2 基于熵值赋权法的客观权重

熵是热力学的一种概念, 用来描述物质运动不可逆现象^[19-20]。熵值赋权法后来被大量应用于评价方法中, 是一种简单有效的客观赋权方法。具体步骤如下。

(1) 计算熵值 \$H_i\$

假设有 \$n\$ 个飞程序评价对象和 \$m\$ 个飞程序指标, 该指标的熵值为^[19]

$$\begin{cases} H_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln r_{ij} \\ r_{ij} = \frac{r_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n r_{ij}^*} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n \tag{10}$$

式中: $\frac{1}{\ln n} > 0$, r_{ij}^* 表示评价数值, r_{ij} 为第 j 个评估对象在第 i 个指标下的贡献值。

(2) 指标归一化

因为指标存在量纲差异化的问题,无法直接进行计算,需要对评价数值进行预处理,消除量纲的影响。具体操作是在值域已知的情况下,通过线性变换使数据都处于 $[0, 1]$ 的区间内,以消除量纲^[19],标准化公式为

$$r_{ij}^* = \frac{r_{ij} - r_{\min}^j}{r_{\max}^j - r_{\min}^j} \quad (11)$$

式中: r_{ij} 表示第 i 个样本的第 j 个指标的数值, r_{\max}^j 和 r_{\min}^j 分别表示指标的最大值和最小值。

(3) 计算熵权值 $W_j^{S[19]}$

传统熵权法的各个指标的熵权值为

$$W_j^S = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} \quad (12)$$

3.3 基于博弈论的组合赋权方法

为了降低神经网络中的专家主观因素的影响,将熵权法得到的客观权重与神经网络得到的权重进行组合赋权^[21],从而避免指标权重的片面性。经过调整得到权重的差异最小^[19]。本文首先采用 ELM 算法训练神经网络,得到基于专家评判的主观权重,再由熵值法求得客观权重,根据博弈论组合赋权公式计算二者的最优组合系数。

根据博弈论组合赋权的基本思想,假设有 L 种方法对指标分别赋权得到了 L 种指标权重,记指标权重集合记为 $\omega_k = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$ ($k = 1, 2, \dots, L$), 则 L 种权重集合任意线性组合可表示为^[23]

$$\omega_j = \sum_{k=1}^L \beta_k \omega_k^T \quad \beta_k > 0 \quad (13)$$

式中: ω_j 为组合权重, L 表示组合权重集的总数, k 为叠加系数, β_k 表示第 k 类权重的组合系数, ω_k 表示第 k 类权重向量集。博弈论组合赋权模型本质上可归结为一个多人优化问题,其基本思想是在各种权重之间寻找一致和妥协,即最小化可能的权重跟各个基本权重之间的各自偏差,寻找最满意的权向量 ω_j , 因此要寻找最满意的权向量,可以归结为对式(13)中的现行组合向量进行优化,使得最优权向量 ω_j 与其他所有 ω_k 的极差总和最小化^[23], 有

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \beta_k \omega_k^T - \omega_g \right\|_2 \quad (14)$$

式中 ω_g 表示第 g 种方式计算得出的权重集合。

根据矩阵微分性质,求解最优组合系数 β_k , 即对式(15)求解^[23]。

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T & \dots & \omega_1 \omega_L^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T & \dots & \omega_2 \omega_L^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_L \omega_1^T & \omega_L \omega_2^T & \dots & \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \\ \vdots \\ \omega_L \omega_L^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

求出该解 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$, 进行归一化处理,得到组合权重 $\omega_o^{[23]}$ 。

$$\begin{cases} \beta'_k = \frac{\beta_k}{\sum_{k=1}^L \beta_k} \\ \omega'_j = \sum_{k=1}^L \beta'_k \omega_k^T \end{cases} \quad (16)$$

3.4 算例仿真

利用式(11)对底层指标数值进行归一化处理。将归一化后的数值与组合权重进行加权求和,求得的价值便是本次飞行程序评价最终的结果。具体计算步骤如下:

步骤 1 利用 ELM 算法求解神经网络获得指标集的权重,对本文研究的 13 个指标进行主观赋权。

由于飞行程序的评定等级还未有成熟的评分体系,现需要利用专家的专业储备和主观经验对飞行程序进行评分制定。专家打分法是依靠专家的专业知识储备和主观感觉,对问题做出评判、评价和预测的一种主观确定权重的方法^[24]。本文研究邀请了 12 位来自飞行程序领域的专家和相关专业人士来进行主观评价,其中包括飞行程序的使用用户:空客 A320 机长、军航管制员、民航管制员、航空公司签派员以及机场航务管理员。各位专家运用 10 分制(保留整数)对 100 套飞行程序图进行主观评分,其中包括进场图、离场图和进近图。

对于指标数据,采用手动提取的方法,并且按照式(11)进行归一化处理,消除不同量纲的影响,处理后的数据见表 4。

将表归一化后的 100 套飞行程序指标数据作为神经网络的输入,专家对 100 套飞行程序评判得分作为神经网络的输出,按照 7:3 的比例随机划分训练集合测试集。输入层神经元个数为 12 个,得到输出个数为 1 的结果。激活函数选择双曲正切 S 函数,经过 600 次迭代,网络精度达到 90% 时停止迭代。神经网络预测结果如图 3 所示。

基于上述参数根据式(9)将隐含层的输入权重矩阵 W_j^e 与输出权重 β_j 矩阵相乘,即得到基于 ELM 单隐层神经网络的主观权重 E_j^* , 得到神经网络模型中的权重见表 5。

步骤 2 将归一化后的指标按照式(10~12)计算得到熵值 H_j 及评价数值 r_{ij} , 从而基于熵值赋权法得到该 100 套飞行程序的客观权重 W_j , 结果见表 5。

表4 指标数据与评分

Table 4 Indicator data and scoring

飞行程序方案	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{31}	X_{41}	X_{42}	实际评分
1	0.25	0	1.00	0.55	0.89	1	0.67	0.67	1.00	1	0	0	0.74	0.36	7.1
2	0.00	0	1.00	0.31	0.61	0	0.33	0.67	1.00	1	0	1	0.77	0.43	6.8
3	0.75	1	0.25	0.66	0.79	1	0.00	0.33	0.33	1	1	1	0.83	0.22	8.7
4	0.75	1	0.25	0.67	0.33	1	0.33	0.67	0.67	0	0	0	0.49	0.63	7.8
5	1.00	1	0.75	0.95	0.26	0	1.00	1.00	0.67	1	0	0	0.83	0.18	8.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
96	0.75	1	0.75	0.18	0.44	1	0.33	0.33	1.00	1	0	1	0.47	0.69	8.3
97	1.00	0	0.75	0.86	0.70	0	0.33	0.33	0.33	0	1	0	0.77	0.88	6.2
98	1.00	1	0.50	0.33	0.85	0	0.67	0.67	0.67	0	0	1	0.38	0.75	6.9
99	0.50	1	0.25	0.20	0.37	1	0.67	0.67	0.67	1	1	0	0.62	0.59	7.2
100	1.00	0	1.00	0.43	0.79	1	1.00	0.67	0	1	0	0	0.80	0.82	5.8

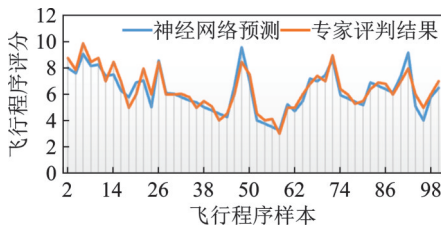


图3 神经网络预测值对比

Fig.3 Comparison of predicted values by neural networks

表5 评价指标权重

Table 5 Weight of evaluation metrics

指标	神经网络权重 ω_j^*	熵权法权重 W_j	基于博弈论思想的组合权重 ω_j^*
X_{11}	0.070	0.073	0.076
X_{12}	0.078	0.066	0.077
X_{13}	0.069	0.081	0.075
X_{14}	0.057	0.069	0.060
X_{15}	0.078	0.069	0.065
X_{16}	0.079	0.070	0.075
X_{21}	0.075	0.077	0.079
X_{22}	0.065	0.083	0.078
X_{23}	0.060	0.052	0.057
X_{24}	0.075	0.060	0.069
X_{25}	0.077	0.071	0.078
X_{31}	0.076	0.064	0.070
X_{41}	0.063	0.066	0.065
X_{42}	0.073	0.078	0.076

步骤3 利用博弈论组合赋权的基本思想根据式(13~16)的博弈论计算公式依次得到权重集合任意线性组合和最满意的权向量并进行归一化处理,进而计算出指标的主观权重与客观权重的组合权重 ω_j^* 。

对本文研究的14个二级指标,利用主客观相结合的方法求出各个指标的组合权重后,将提取的

指标样本数据进行归一化处理,并与组合赋权法得到的权重加权,得到期望输出评价等级。

查阅相关文献^[25],按照飞行程序最终评分将飞行程序评估等级划分为5级,如表6所示。

表6 评估等级划分

Table 6 Assessment of grading schemes

评估等级	分数划分
I级	(0.8, 1]
II级	(0.6, 0.8]
III级	(0.4, 0.6]
IV级	(0.2, 0.4]
V级	(0, 0.2]

图4所示的西部某军民航合用机场的程序图代入上述训练好的模型进行评估验证。

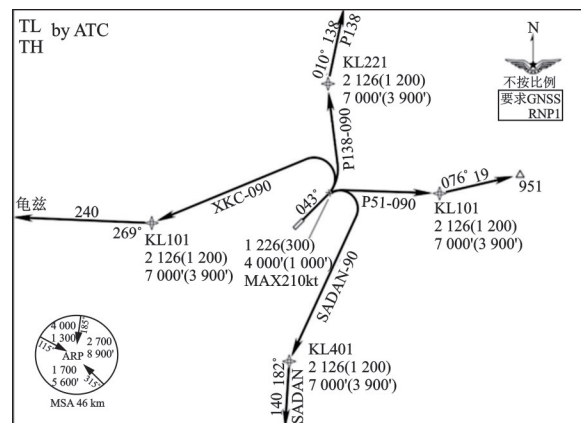


图4 西部某军民航合用机场04号跑道RNAV离场程序

Fig.4 Bilingual military-civilian shared-use airport in western region: Runway 04 RNAV departure procedure

对指标进行手动提取,并按照式(11)归一化处理。对离场程序图中的评价指标进行读取,结果如表7所示。

表 7 西部某军民航合用机场 04 号跑道离场程序图指标
Table 7 Indicators for departure procedures on runway 04 at a joint military-civilian airport in the western region

指标层	指标层	符号表示	指标读取情况	指标量化值	组合权重	等级
飞行员评价指标 X ₁	速度限制	X ₁₁	1 次	0.25	0.076	II
	程序类型	X ₁₂	转弯离场程序	0.00	0.077	
	大角度转弯	X ₁₃	2 次	0.50	0.075	
	大气条件	X ₁₄	926.2 m	0.71	0.060	
	航路标识	X ₁₅	19 组	0.47	0.065	
	导航方式	X ₁₆	PBN 导航	1.00	0.075	
管制员评价指标 X ₂	进离场点	X ₂₁	1 个	0.33	0.079	II
	同一方向进离场程序	X ₂₂	1 个	1.00	0.078	
	程序交叉汇聚情况	X ₂₃	1 个	0.67	0.057	
	进离场程序是否分离	X ₂₄	是	1.00	0.069	
	是否可以连续上升/下降	X ₂₅	否	0.00	0.078	
军航管制评价指标 X ₃	航线周围是否有空军训练区	X ₃₁	是	0.00	0.070	II
城市发展指标 X ₄	程序下方城市限制障碍物高	X ₄₁	1 179	0.68	0.065	II
	飞行程序绿色环保性	X ₄₂	1 044	0.73	0.076	

将指标量化值与组合权重进行过加权求和,求得最终评分为 7.6,根据表 6 的等级划分,确定该程序图的评价等级为 II 级。从指标读取结果可以看出,西部某军民航合用机场终端区的飞行条件较好,机场是平原机场,且进离场航线较少,但是由于空军飞行活动的影响,西部某军民航合用机场的飞行程序受空军飞行活动影响较大。可以发现,4 个评价等级均为 II 级,在此情况下,飞行员作为飞行程序的最主要使用者,可以作为优化的主要目标。因此对改进建议进行了扩充,减少飞行员指标中大角度转弯的次数并增加航路标识的数量等措施手段来提高飞行程序的评分等级。

4 结 论

本文首先介绍了当前飞行程序设计的对安全性单一指标的考量架构。针对离场程序,建立了飞行程序多用户的定义与分类。通过考虑飞行员、民航管制、军航管制、机场和城市规划部门 4 个用户对飞行程序的综合需求,提出了一种博弈论组合赋权的方法,其通过神经网络逆向求解得到的基于 ELM 神经网络的权重与熵权法得到的权重进行组

合赋权,得到了多用户飞行程序评价体系权重分配方案。通过对西部某军民航合用机场的离场程序作为实例加以验证分析,得到了当前离场程序的评价等级为 II 级,并根据评价的飞行程序不足处,给出了相应的飞行程序优化建议。

下一步的研究将从如下 2 个方面考虑:(1)拓展指标集到进场和进近程序;(2)通过对当前设计的多个机场的离场进行评估,并与实际运行效果加以对比分析,扩充中国飞行程序设计规范的要求,进一步为飞行程序的优化提供指导,逐渐达到民航的高效运行要求。

参考文献:

[1] 武文涛. 非合作大型无人机飞行冲突预测与解脱[D]. 天津:中国民航大学,2020.
WU Wentao. Prediction and resolution of non-cooperative large-scale unmanned aerial vehicle flight conflicts [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.

[2] REICH P G. Analysis of long-range air traffic systems—Separation standards I [J]. Journal of Navigation, 1966, 19(1): 88-98.

[3] 焦江, 刘星, 陈都. 遗传算法在飞行冲突解脱中的应用分析[J]. 飞机设计, 2012, 32(4): 10-12.
JIAO Jiang, LIU Xing, CHEN Du. Application analysis of genetic algorithm in flight conflict resolution[J]. Aircraft Design, 2012, 32(4): 10-12.

[4] 李永飞. 基于机器学习的空管冲突识别与调配技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.
LI Yongfei. Research on air traffic control conflict identification and deployment technology based on machine learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[5] BAKKER G J, BLOM H A P. Air traffic collision risk modelling[C]//Proceedings of the 32nd IEEE Conference.[S.l.]: IEEE, 1993: 1464-1469.

[6] 赵焱飞, 陈琳, 王红勇. 基于调速法的交叉航路冲突解脱时机研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(31): 9252-9257.
ZHAO Yifei, CHEN Lin, WANG Hongyong. Research on relief timing of cross route conflicts based on speed adjustment method[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(31): 9252-9257.

[7] 张兆宁, 时瑞军. 自由飞行下改进的 Event 碰撞风险计算模型[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(7): 35-40.
ZHANG Zhaoning, SHI Ruijun. Improved event collision risk calculation model under free flight[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(7): 35-40.

[8] 陈肯, 杨晓刚. 基于改进 Event 模型的航路垂直方向碰撞研究[J]. 航空计算技术, 2021, 51(5): 15-18.

- CHEN Ken, YANG Xiaogang. Research on vertical directional collisions of routes based on improved event model[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2021, 51(5): 15-18.
- [9] IATA. Industry facts and statistics[EB/OL]. (2019-11-12) [2021-12-11]. <https://bfdogplmndidlpjhoijck-pakkdjkkil/pdf/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.iata.org%2Fen%2Fiata-repository%2Fpublications%2Feconomic-reports%2Fairline-industry-economic-performance-december-2019-report%2F>.
- [10] 左凌. 飞行程序优化设计关键技术探讨[J]. *内燃机与配件*, 2017(11): 124-125.
- ZUO Ling. Discussion on key technologies of flight program optimization design[J]. *Internal Combustion Engines and Accessories*, 2017(11): 124-125.
- [11] NUIC A. User manual for the base of aircraft data Revision 3.6[EB/OL]. (2004-07-01)[2021-12-11]. <https://www.eurocontrol.int/publication/user-manual-base-aircraft-data-bada>.
- [12] 赵巍飞, 王梦琦. 基于燃油消耗的终端区进场航迹效率指标研究[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(6): 1-10.
- ZHAO Yifei, WANG Mengqi. Research on the arrival trajectory efficiency metric based on the fuel consumption in the terminal area[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(6): 1-10.
- [13] ABDELGHANY K, ABDELGHANY A, RAINA S. A model for the airlines' fuel management strategies [J]. *Air Transportation Management*, 2005, 11: 199-206.
- [14] IRRGANG M E, KAUL C E, HALL A E, et al. Aircraft fuel optimization analytics: US 2015/0279218 A1[P]. 2015-02-11.
- [15] HUANG C, XU Y, JOHNSON M E. Statistical modeling of the fuel flow rate of GA piston engine aircraft using flight operational data[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 53: 50-62.
- [16] KHAN W A, CHUNG S H, MA H L, et al. A novel self-organizing constructive neural network for estimating aircraft trip fuel consumption[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 132: 72-96.
- [17] LI T, WAN Y. A fuel savings and benefit analysis of reducing separation standards in the oceanic airspace managed by the New York air route traffic control center[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 152: 102407.
- [18] 穆永铮, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价体系[J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 23-28.
- MU Yongzheng, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Comprehensive evaluation index system of power grid safety and benefit based on multi operator analytic hierarchy process and fuzzy evaluation[J]. *Power Grid Technology*, 2015, 39(1): 23-28.
- [19] ROH J H, SHAHIDEHPOUR M, WU L. Market-based generation and transmission planning with uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(3): 1587-1598.
- [20] ZHAO J, TIAN J, MENG F, et al. Safety assessment method for storage tank farm based on the combination of structure entropy weight method and cloud model[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 75: 104709.
- [21] LI Z, LUO Z, WANG Y, et al. Suitability evaluation system for the shallow geothermal energy implementation in region by entropy weight method and TOPSIS method[J]. *Renewable Energy*, 2022, 184: 564-576.
- [22] 蒲彩霞. 基于博弈论组合赋权的师范生信息化教学能力评价研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2019.
- PU Caixia. Research on the evaluation of normal students' informatization teaching ability based on the combination weighting of game theory[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2019.
- [23] 王润东, 潘卫军, 陈晓光, 等. 基于博弈论集对分析模型的机坪管制运行风险评价[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(30): 12636-12643.
- WANG Rundong, PAN Weijun, CHEN Xiaoguang, et al. Risk assessment of apron control operation based on game theory set pair analysis model[J]. *Science, Technology and Engineering*, 2020, 20(30): 12636-12643.
- [24] 刘智, 端木京顺, 王强. 基于熵权多目标决策的方案评估方法研究[J]. *数学的实践与认识*, 2005, 35(10): 114-119.
- LIU Zhi, DUANMU Jingshun, WANG Qiang. Research on scheme evaluation method based on entropy weight multi-objective decision-making[J]. *Practice and Understanding of Mathematics*, 2005, 35(10): 114-119.
- [25] ERKAN T E, ELSHARIDA W M. Combining AHP and ROC with GIS for airport site selection: A case study in Libya[J]. *International Journal of Geo-information*, 2020, 9(5): 312.

(编辑: 刘彦东)