



引用格式:岳仁田, 韩 娜. 基于灰色聚类的管制扇区运行健康识别方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6697-6702

Yue Rentian, Han Na. Health identification of sector control operation based on gray clustering method [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(16): 6697-6702

基于灰色聚类的管制扇区运行健康识别方法

岳仁田, 韩 娜

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要 对不同健康程度的管制扇区运行状态识别有助于全面把握交通运行情况, 对空管安全评估、扇区划分、流量管理具有一定的应用价值。深入分析管制扇区交通时空运行特性, 基于实际运行数据建立了管制扇区运行健康识别方法。建立饱和度、瞬时饱和度、滞留度、未来 15 min 流量、管制工作负荷程度 5 项管制扇区运行健康评估指标, 利用主客观组合赋权法确定各评估指标权重, 基于灰色聚类方法对管制扇区运行健康状态等级进行识别。以厦门 1 号扇区的交通数据进行了实例分析, 结果表明: 管制扇区运行健康态势是交通宏观动态特征和微观复杂特征相互作用的结果, 提出的管制运行健康识别方法有效, 计算过程简单可行。

关键词 安全管理工程; 管制运行; 健康识别; 灰色聚类; 组合赋权

中图法分类号 X949; 文献标志码 A

Health Identification of Sector Control Operation Based on Gray Clustering Method

YUE Ren-tian, HAN Na

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

[Abstract] The health status identification of sector control operation can help to comprehensively understand air traffic operation situation. It also has certain application value in ATC (air traffic control) safety assessment, sector division and air traffic flow management. Based on the temporal and spatial characteristics of traffic flow, a sector control operation health identification method was established with the actual operational data. Firstly, five health evaluation indicators for sector control operation were proposed, such as saturation degree, instantaneous saturation degree, retention degree, traffic demand of next 15 minutes, and ATC workload level. Then, the subjective and objective combination weighting method was used to determine the weight of each evaluation indicator. Furthermore, the health identification method of the sector control operation was built with gray clustering theory. Finally, the operational data of Xiamen No. 1 sector was used for numerical simulations. The results show that the health status is the result of the interaction between macroscopic dynamic characteristics and complicated microscopic features. The proposed method is effective and the calculation process is simple and feasible.

[Key words] safety management engineering; control operation; health identification; gray clustering; combination weighting

持续增长的空中交通流量、纷繁多变的空域限制导致当前管制运行系统的复杂程度激增、安全压力加大, 管制员长时间处于超负荷工作。研究管制扇区运行健康状态的优劣, 可以全面掌握空中交通运行情况, 有助于实时地控制交通流量, 降低管制员工作负荷程度。

在空管运行安全方面, Djokic^[1]最早从静态、动态和外部风险角度, 构建了空管运行安全风险指标体系。姚登凯等^[2]创新性地引入逆向搜索方法对模糊 Petri 网改进, 有效而快速地评估了空管系统安全状态。张婧婷^[3]提出了基于管制工作负荷的扇

区运行安全评估方法。张亮^[4]建立了基于博弈论赋权的管制扇区风险集对评价模型。Jacek^[5]创新性地采用模糊风险矩阵仿真了空中交通事故的发生概率和严重程度。Michal 等^[6]利用人为因素分析和分类系统学(human factors analysis and classification system, HFACS)增强了系统理论事故模型与过程(system-theoretic accident model and progress, STAMP)的错误分类。王龙^[7]最先建立了面向扇区的管制运行亚健康状态诊断方法, 认为表征管制运行亚健康状态的影响元素有交通流分布不均衡度、管制原因小于规定间隔频次和管制员工作负荷。

收稿日期: 2019-09-17; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 民航联合基金(U1533112); 国家自然科学基金面上项目(61571441); 科技部国家重点研发计划(2016YFB0502405)

第一作者: 岳仁田(1978—), 男, 汉族, 山东日照人, 博士, 副研究员。研究方向: 交通运输规划与管理。E-mail: nhanna@163.com

岳仁田等^[8-9]从人员、设备、环境、管理和运行方面构建了空管运行亚健康评估指标体系,利用 ward 系统聚类方法将管制运行状态划分为管制运行健康状态和管制运行亚健康状态。综上,现有研究主要侧重于管制运行风险评估,涉及不同管制运行健康状态的分类研究较少,且管制运行健康评估指标还未十分完善。

空域单元的交通数据能体现出交通服务水平、交通流复杂性、管制员工作负荷等。因此,详细分析管制扇区运行规律和空域交通流时空分布特性,为开展管制扇区运行健康识别研究,构建了 5 项管制运行健康评估指标,采取层次分析法和熵权法确定评估指标的权重,选用基于中心点混合三角白化权函数的灰色聚类评估模型对管制运行健康状态等级进行识别。研究路线如图 1 流程图所示。



图 1 管制扇区运行健康识别流程

Fig. 1 Identification process on sector control operation health

1 管制扇区运行健康状态

1.1 管制扇区运行健康状态的定义

从空中交通流层面出发,提出了管制扇区运行健康状态的定义:指在一定时间和空间范围内,扇区内交通流稳定有序、管制工作负荷低于最大正常负荷值、交通服务水平良好。当交通流复杂性增强、交通流量趋于饱和、管制工作处于超负荷时,管制运行会从健康状态逐渐趋于亚健康状态,此时扇区交通发生拥挤,会导致某种程度的紊乱和无序,交通流稳定性减弱,且管制员容易出现“错、忘、漏”现象,可能会致使某种事故症候或不安全事件发生。当出现管制运行亚健康状态时,若不及时做出管控措施,随着亚健康程度的加深,最终必然导致管制扇区运行状态越来越差,此时空中交通的运行安全性能下降、运行效率下降、管制员指挥能力下降。

对管制扇区运行健康状态进行合理划分,判断某些扇区或扇区的某些时刻交通运行是否良好,有助于全面把握空中交通运行特征,对管制员排班管

理、管制扇区动态容量管理提供依据。通过基于灰色聚类的管制扇区运行健康识别方法对交通数据进行计算,得到的分析结果对于量化评价扇区交通运行状态、合理评估空中交通管制员工作负荷有一定参考意义。

1.2 管制扇区运行健康评估指标

在空管运行安全文献的基础上,根据管制扇区运行特性和交通流数据,考虑指标的可测性、准确性、适用性等原则,确定了饱和度、瞬时饱和度、滞留度、未来 15 min 流量、管制工作负荷程度 5 项管制运行健康评估指标,以此识别管制运行健康状态等级。

1.2.1 饱和度

饱和度定义为扇区内某时段的当量交通量与扇区公布容量的比值。该指标反映了交通需求与容量之间的不平衡程度,表征了扇区运行的交通负荷程度,可以用来评估管制扇区运行的健康程度。当饱和度值越小时,扇区交通流越稳定,飞机飞行自由度和速度较大,管制运行趋于健康状态;反之,扇区交通流趋向不稳定化,飞机飞行的自由度较小,速度受到限制,管制运行会朝向亚健康状态发展。饱和度 C_1 的计算公式为

$$C_1 = q_i/c \quad (1)$$

式(1)中: q_i 为第 i 时段扇区运行的当量交通量; c 为扇区容量限制阈值,采用空管局的容量评估值。

1.2.2 瞬时饱和度

瞬时饱和度定义为某时段内单位分钟航空器数量峰值与瞬时容量的比值。瞬时容量定义为平均扇区飞行时间与单架航空器管制负荷的比值,平均扇区飞行时间为所有航空器飞行时间之和与航空器数量的比值,本文中单架航空器管制负荷为 36 s^[10],从而制定了平均扇区飞行时间与瞬时容量的对照表(表 1)。当扇区瞬时交通流量接近或超过瞬时容量时,应当适时进行调整,尽可能提高扇区的运行效率。瞬时饱和度反映了交通高峰时段的管制工作负荷,对管制运行健康状态的转变具有决定性作用,可以用来评估管制扇区运行健康状态等级。因此,瞬时饱和度 C_2 的计算公式为

$$\bar{t}_i = \frac{1}{n_i} \sum_j (t_j^{\text{out}} - t_j^{\text{in}}) \quad (2)$$

$$c_i^* = \bar{t}_i/\tau \quad (3)$$

$$C_2 = p_i/c_i^* \quad (4)$$

式中: \bar{t}_i 为第 i 时段的平均飞行时间; n_i 为第 i 时段的扇区交通流量; t_j^{out} 为第 i 时段内第 j 架航空器离开扇区的时刻, t_j^{in} 为第 i 时段内第 j 架航空器进入扇区的时刻; c_i^* 为第 i 时段的瞬时容量(根据 \bar{t}_i 由

表1查得); τ 为单架航空器管制负荷(36 s); p_i 为第 i 时段单位分钟的最大航空器数量。

表1 平均扇区飞行时间与瞬时容量对照
Table 1 Comparison of average sector flight time and instantaneous capacity

| 平均扇区飞行时间/min | 瞬时容量/架 |
|--------------|--------|
| 3或更短 | 5 |
| 4 | 7 |
| 5 | 8 |
| 6 | 10 |
| 7 | 12 |
| 8 | 13 |
| 9 | 15 |
| 10 | 17 |
| 11 | 18 |
| 12或更长 | 18 |

1.2.3 滞留度

滞留度^[11]定义为某时段进入扇区的航空器与离开扇区的航空器数量之差与离开扇区航空器数量的比值。该指标反映了扇区交通服务水平的高低, 表征了扇区交通流的有序与无序。当滞留度越大时, 扇区交通流会出现某种程度的紊乱, 交通运行质量下降, 管制运行趋于亚健康状态。此指标不仅能反映扇区当前交通运行状态, 还能反映飞机流的形成和消散过程, 在本质上表征了扇区交通运行态势的运动学特征, 可以评估管制运行健康状态的时变趋势。滞留度 C_3 的计算公式为

$$C_3 = (q_i^{\text{in}} - q_i^{\text{out}}) / q_i^{\text{out}} \quad (5)$$

式(5)中: q_i^{in} 为第 i 时段扇区的流入交通量; q_i^{out} 为第 i 时段扇区的流出交通量。

1.2.4 未来 15 min 流量

航空器进入扇区 15 min 之前会将其各项信息发送到管制员工作平台, 这对管制员的心理和思想造成了一定的压力, 会影响当前交通流的指挥质量。未来 15 min 内进入扇区的航空器数量越多, 交通流复杂性也会增强。因此, 未来 15 min 的流量^[12] C_4 可用来评估管制扇区运行健康程度。

1.2.5 管制工作负荷程度

管制工作负荷程度定义为管制工作负荷与统计时段时长的比值。管制工作负荷定义在雷达管制方式下, 管制员在实施管制任务期间, 通信工作负荷、非通信工作负荷和思考工作负荷的总和(用时间来度量, 单位 s)。贾天琪^[9]基于管制工作负荷提取了 5 项管制运行系统亚健康态的评价指标, 分析了管制运行系统亚健康态的特征。当管制员工作负荷超过正常工作负荷时, 管制指挥能力下降; 若管制工作负荷长时间处于超负荷, 发生不安全事

件的概率也会随之增加, 因此, 管制员工作负荷程度可用来评估管制扇区运行健康程度。管制工作负荷程度 C_5 的计算公式为

$$C_5 = T_i^w / T \quad (6)$$

式(6)中: T_i^w 为管制工作负荷, T 为统计时段时长, 如统计时段为 15 min, 则 $T = 900$ s。

2 管制扇区运行健康的灰色聚类识别

由于管制扇区运行健康评估指标具有非线性特性, 管制运行系统是一个灰色系统; 另外, 健康是一个人为感知的概念, 健康状态等级的识别具有一定不确定性和模糊性, 各健康评估指标与健康状态等级的关系不确定。基于这两点, 很难去建立精确的数学模型来描述管制扇区运行健康状态。而灰色聚类对于具有不确定性、模糊性的灰色系统, 能够模仿人脑表达过渡性界限或定性知识经验, 实现对不确定概念的判断^[13], 且计算过程简单, 易于操作。因此, 建立了基于灰色聚类的管制运行健康识别方法。

2.1 基于灰色聚类的管制扇区运行健康识别步骤

根据灰色定权聚类的计算步骤, 包括确定灰色聚类评估体系、建立评价矩阵、确定聚类权、确定白化权函数、计算聚类系数、判定对象所属灰类。管制扇区运行健康状态识别的具体步骤如下。

2.1.1 确定灰色聚类评估体系

聚类对象 m 为各管制运行健康评价时段, $m \in M = \{1, 2, \dots, u\}$; 聚类指标 n 为各管制运行健康评估指标(即饱和度、瞬时饱和度、滞留度、未来 15 min 流量、管制工作负荷程度), $n \in N = \{1, 2, \dots, 5\}$; 灰类 k 为各管制运行健康状态等级, $k \in K = \{1, 2, 3, 4\}$, k 取 1~4 分别对应管制运行健康状态、轻度亚健康状态、中度亚健康、重度亚健康状态; 由此可得, 灰色聚类对象集合为 M , 聚类指标集合为 N , 灰类集合为 K , 则灰色聚类评估体系为 $\{M, N, K\}$ 。

2.1.2 构建评价样本矩阵

对于 m 个评价时段, n 个管制运行健康评估指标, 评价样本矩阵 $X = [x_{mn}]_{u \times v}$ ($m = 1, 2, \dots, u$; $n = 1, 2, \dots, v$, $v = 5$), 其中 x_{mn} 为采集初始数据的归一化值。

2.1.3 确定各指标的聚类权重

选择层次分析法和熵权法计算组合权重 $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ ($n = 1, 2, \dots, 5$), w_n 为评估指标 n 的权重。

2.1.4 确定白化权函数

将管制运行健康状态等级 k 看作形态灰类, 在

认知平面上,以灰类的样本(白化值) x_{mn} 为横坐标,第 n 个管制运行健康评估指标值对健康状态等级 k 的白化权函数为 f_n^k 。

2.1.5 计算聚类系数

评价时段 m 属于第 k 个管制运行健康状态等级的灰色聚类系数为

$$\sigma_m^k = \sum_{n=1}^5 f_n^k(x_{mn}) w_n \quad (7)$$

式(7)中: $\sigma_m^k = (\sigma_m^1, \sigma_m^2, \dots, \sigma_m^s)$ 为时段 m 的聚类系数向量; s 为灰类的个数, $s=4$ 。

2.1.6 判定评价时段的管制运行健康状态等级

若 $\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_m^k\} = \sigma_m^{k^*}$, 则判定时段 m 属于管制运行健康状态等级 k^* 。

2.2 指标权重的确定

2.2.1 层次分析法赋权

层次分析法将定性和定量相结合, 是一种被广泛应用的确定指标权重的有效方法。计算详细步骤见文献[14]。针对多数评估问题中的权重确定, 层次分析法能够根据评估指标的变化趋势实时调整各项指标赋权, 具有实用性强和实时性高等优势。

2.2.2 熵权法赋权

熵是度量系统无序程度的测度, 熵值越大, 系统的无序程度越高, 提供的信息就越少^[15]。各评估指标权重的熵体现了该指标在管制扇区运行健康状态等级识别中提供有用信息的多少, 能够反映出各评估指标的相对重要程度, 故可以使用熵权法对管制运行健康评估指标进行赋权。计算步骤如下: 根据 2.1 节中的评价样本矩阵 X 。计算各管制运行健康评估指标 n 的熵值 E_n , 然后用熵测度来表示第 n 个管制运行健康评估指标的权重系数。 E_n 计算公式为

$$E_n = -\frac{1}{\ln m} \sum_{m=1}^u r_{mn} \ln r_{mn} \quad (8)$$

式(8)中: 比重 $r_{mn} = x_{mn} / \sum_{m=1}^u x_{mn}$ 。 W_n 计算公式为

$$w_n = \frac{1 - E_n}{\sum_v (1 - E_n)} \quad (9)$$

2.2.3 组合赋权

为使管制运行健康评估指标的权重更加符合实际情况, 结合层次分析法和熵权法的优点, 将主观客观赋权法确定的权重进行线性组合, 以此计算出更加科学合理的权重。因此, 指标 n 的组合赋权计算公式为

$$w_n = \theta w_n^\alpha + (1 - \theta) w_n^\beta \quad (10)$$

式(10)中: θ 为层次分析法权重占组合权重的比

例; $1 - \theta$ 为熵权法权重占组合权重的比例; w_n^α 为指标 n 的层次分析法所求权重; w_n^β 为指标 n 的熵权法所求权重。

2.3 白化权函数的确定

灰色聚类模型的白化权函数选取基于中心点混合三角白化权函数, 包括上限测度、适中测度、下限测度三种基本类型。将管制扇区运行健康状态划分为 4 个等级(健康、轻度亚健康、中度亚健康、重度亚健康), 等级 1 采用下限测度白化权函数 $f_n^1[-, -, \lambda_n^1, \lambda_n^2]$, 等级 2 和等级 3 采用适中测度白化权函数 $f_n^2[\lambda_n^{k-1}, \lambda_n^k, -, \lambda_n^{k+1}]$, 等级 4 采用上限测度白化权函数 $f_n^4[\lambda_n^3, \lambda_n^4, -, -]$, 建立的白化权函数如图 2 所示。

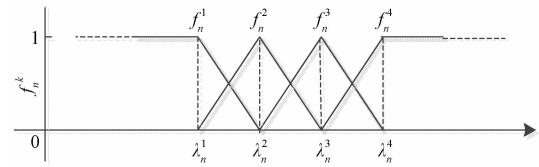


图 2 白化权函数

Fig. 2 The whitening weight function

对于管制运行健康评估指标 n , 分别对应 4 个管制运行健康状态等级建立白化权函数:

$$f_n^1(x) = \begin{cases} 0, & x > \lambda_n^2 \\ 1, & x < \lambda_n^1 \\ \frac{\lambda_n^2 - x}{\lambda_n^2 - \lambda_n^1}, & \lambda_n^1 < x < \lambda_n^2 \end{cases} \quad (11)$$

$$f_n^2(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [\lambda_n^1, \lambda_n^3] \\ \frac{x - \lambda_n^1}{\lambda_n^2 - \lambda_n^1}, & \lambda_n^1 < x < \lambda_n^2 \\ \frac{\lambda_n^3 - x}{\lambda_n^3 - \lambda_n^2}, & \lambda_n^2 < x < \lambda_n^3 \end{cases} \quad (12)$$

$$f_n^3(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [\lambda_n^2, \lambda_n^4] \\ \frac{x - \lambda_n^2}{\lambda_n^3 - \lambda_n^2}, & \lambda_n^2 < x < \lambda_n^3 \\ \frac{\lambda_n^4 - x}{\lambda_n^4 - \lambda_n^3}, & \lambda_n^3 < x < \lambda_n^4 \end{cases} \quad (13)$$

$$f_n^4(x) = \begin{cases} 0, & x < \lambda_n^3 \\ \frac{x - \lambda_n^3}{\lambda_n^4 - \lambda_n^3}, & \lambda_n^3 < x < \lambda_n^4 \\ 1, & x > \lambda_n^4 \end{cases} \quad (14)$$

在管制运行健康状态等级识别时, 根据扇区管制运行特性及专家咨询和经验数据等进行综合确定各管制运行健康评估指标的分类标准, 不同扇区

不同时段同一管制运行健康评估指标的分类标准也会有所不同。

3 实例分析

为验证管制扇区运行健康识别方法的有效性,选取厦门1号扇区2013年10月1日8:00—10:00时间段的交通数据,以15 min为一个统计间隔,对管制扇区运行健康状态等级进行识别。表2为各时间段统计的各聚类指标的初始值。

首先,对5个聚类指标进行归一化处理。然后使用层次分析法和熵权法对管制运行健康评估指标赋权,并利用组合赋权式(8)将主客观权重进行组合,根据专家经验,当 θ 取0.3时,可以结合主观赋权法的优势,并削弱其不利因素影响^[14]。由此,计算出管制运行健康状态等级识别的聚类指标权重,如表3所示。

邀请空管专家对各管制运行健康评估指标的不同健康状态等级进行打分评价,将打分结果进行综合处理,并结合管制人员的知识经验和管制扇区运行实际交通历史数据,确定聚类指标的分类标准,如表4所示。

根据式(7)计算各时段的灰色聚类系数,由 $\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_m^k\} = \sigma_m^{k^*}$ 判断时段m的管制运行健康状态等级,如表5所示。

表2 聚类指标的初始值

Table 2 Initial value of the clustering indicators

| 时段 | 饱和度 | 瞬时饱和度 | 滞留度 | 未来15 min流量 | 管制工作负荷程度 |
|-----------|------|-------|-------|------------|----------|
| 8:00—8:14 | 0.75 | 0.75 | 0.71 | 11 | 0.63 |
| 8:15—8:29 | 1.00 | 0.83 | 0.10 | 10 | 0.84 |
| 8:30—8:44 | 1.00 | 1.00 | -0.09 | 10 | 0.85 |
| 8:45—8:59 | 0.76 | 0.90 | 0.43 | 9 | 0.64 |
| 9:00—9:14 | 0.77 | 1.00 | 0.13 | 15 | 0.97 |
| 9:15—9:29 | 1.03 | 1.50 | 0.25 | 9 | 1.30 |
| 9:30—9:44 | 1.34 | 1.08 | -0.36 | 12 | 1.69 |
| 9:45—9:59 | 0.75 | 1.38 | 0.33 | 8 | 0.94 |

表3 聚类指标权重

Table 3 Weights of the clustering index

| 权重 | 饱和度 | 瞬时饱和度 | 滞留度 | 未来15 min管制工作流量 | 负荷程度 |
|-------|---------|---------|---------|----------------|---------|
| 层次分析法 | 0.329 3 | 0.181 8 | 0.064 4 | 0.108 0 | 0.316 5 |
| 熵权法 | 0.329 9 | 0.169 8 | 0.103 2 | 0.170 7 | 0.226 4 |
| 组合权重 | 0.329 7 | 0.173 4 | 0.091 6 | 0.151 9 | 0.253 4 |

表4 聚类指标分类标准

Table 4 Classification criteria of the clustering index

| 灰类/指标 | 饱和度 | 瞬时饱和度 | 滞留度 | 未来15 min流量 | 管制工作负荷程度 |
|-------|------|-------|------|------------|----------|
| 健康 | 0.14 | 0.20 | 0.17 | 0.24 | 0.15 |
| 轻度亚健康 | 0.25 | 0.45 | 0.33 | 0.35 | 0.34 |
| 中度亚健康 | 0.50 | 0.72 | 0.67 | 0.57 | 0.56 |
| 重度亚健康 | 0.70 | 0.90 | 0.83 | 0.70 | 0.75 |

由表5可见,8:30—8:44、9:00—9:14和9:45—9:59三个时间段的管制扇区运行处于轻度亚健康状态,9:15—9:29时间段的管制扇区运行处于中度亚健康状态,9:30—9:44时间段的管制扇区运行处于重度亚健康状态。其中,9:15—9:29与8:30—8:44相比,瞬时饱和度较大,管制工作负荷程度较高,反映出此时段交通流过饱和,交通稳定性减弱,且管制员超负荷工作,所以9:15—9:29判定为管制运行中度亚健康状态。9:30—9:44与9:15—9:29相比,饱和度较大,管制工作负荷程度较高,未来15 min流量较大,瞬时饱和度和滞留度较低,但瞬时饱和度和滞留度的权重较小,因此,9:30—9:44判定为管制运行重度亚健康状态,此时管制扇区的交通需求大于容量,管制员长时间超负荷工作,交通流无序性有减弱趋势。此外,在8:45—9:59,管制扇区运行状态由健康状态发展为亚健康状态,且随着时间的增长,亚健康状态的程度越来越严重,最终在9:45—9:59转变为轻度亚健康状态,可见管制运行健康状态随着空中交通流和管制状况随时间变化。该实例进一步说明了管制扇区运行健康识别方法的可行性。另外,本文所提方法

表5 灰色聚类系数及归属类划分

Table 5 Gray clustering coefficient and classification of attribution categories

| 时段 | 灰色聚类系数 | | | | 归属类 | 专家评判结果 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|-------|--------|
| | 健康 | 轻度亚健康 | 中度亚健康 | 重度亚健康 | | |
| 8:00—8:14 | 0.426 8 | 0.097 6 | 0.054 2 | 0.091 6 | 健康 | 健康 |
| 8:15—8:29 | 0.360 4 | 0.296 4 | 0.254 4 | 0 | 健康 | 健康 |
| 8:30—8:44 | 0.309 3 | 0.362 5 | 0.239 5 | 0 | 轻度亚健康 | 轻度亚健康 |
| 8:45—8:59 | 0.426 8 | 0 | 0.055 3 | 0.036 2 | 健康 | 健康 |
| 9:00—9:14 | 0.110 3 | 0.375 8 | 0.032 3 | 0.1519 | 轻度亚健康 | 轻度亚健康 |
| 9:15—9:29 | 0 | 0.057 7 | 0.522 6 | 0.267 8 | 中度亚健康 | 中度亚健康 |
| 9:30—9:44 | 0.101 3 | 0.163 6 | 0.150 2 | 0.584 8 | 重度亚健康 | 重度亚健康 |
| 9:45—9:59 | 0.061 1 | 0.199 2 | 0.148 9 | 0.109 2 | 轻度亚健康 | 轻度亚健康 |

与空管专家打分得到的评判结果相一致,表明本文建立的识别方法准确率高,识别性能好。

4 结论

(1)从管制运行特性的角度提出了管制运行健康评估指标,建立了基于灰色聚类的管制扇区运行健康识别方法。

(2)实例分析表明,本文方法的识别准确率较高,且易于操作,容易编程实现。在实际运行中,该方法可使空管人员对管制运行健康状态等级及早识别,预防管制运行健康状态向管制运行亚健康状态转变。

(3)根据所提的管制扇区运行健康评估指标,分析不同空域单元的管制运行特性,下一步研究其他空域单元(如机场、终端区)的管制运行健康识别方法。

参 考 文 献

- 1 Dtokic J. Investigation into ATC safety indicators (subjective assessment)[D]. Belgrade: University of Belgrade, 2005.
- 2 姚登凯,王晴昊,甘旭升.改进模糊Petri网在空管安全风险评估中的应用[J].安全与环境学报,2018,18(2):413-417.
Yao Dengkai, Wang Qinghao, Gan Xusheng. Safety risk assessment on the air traffic control via the improved fuzzy Petri net[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 413-417.
- 3 张婧婷.基于管制负荷的扇区运行安全评估研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
Zhang Jingting. Research on sector operation safety assessment based on control workload[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- 4 张亮.基于博弈论赋权的管制扇区风险集对评价模型[J].安全与环境学报,2018,18(5):1896-1901.
Zhang Liang. An evaluation model for the set pair of the air traffic control sector risk based on the game theory weight[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5): 1896-1901.
- 5 Jacek S. The simulation-fuzzy method of assessing the risk of air traffic accidents using the fuzzy risk matrix[J]. Safety Science, 2016, 88: 76-87.
- 6 Michal L, Jan M, Jacek S. A System-theoretic accident model and process with human factors analysis and classification system taxonomy [J]. Safety Science, 2018, 110: 393-410.
- 7 王龙.面向扇区的空管运行亚健康状态诊断方法研究[D].天津:中国民航大学,2017.
Wang Long. Study on the diagnostic methods of air traffic control operation sub-health status for sector[D]. Tianjin: China Civil Aviation University, 2017.
- 8 岳仁田,韩亚雄,赵巍飞.基于灰色层次分析法的空管运行亚健康评价研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2019,41(1):12-16.
Yue Rentian, Han Yaxiong, Zhap Yifei. Research on sub-health evaluation of air traffic control based on grey analytic hierarchy process[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2019, 41(1): 12-16.
- 9 岳仁田,贾天琪.管制运行亚健康状态的Ward系统聚类及分析[J].中国民航大学学报,2018,36(4):15-19.
Yue Rentian, Jia Tianqi. Ward system clustering and analysis of control operation sub-health state[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(4): 15-19.
- 10 叶志坚,王莉莉,孟令航,等.分阶段调整增加扇区通行能力策略[J].系统工程,2014,32(6):51-57.
Ye Zhijian, Wang Lili, Meng Linghang, et al. Phased adjustment strategies to improve en-route sector capacity[J]. System Engineering, 2014, 32(6): 51-57.
- 11 李善梅,徐肖豪,王超,等.基于灰色聚类的交叉航路拥挤识别方法[J].西南交通大学学报,2015,50(1):189-197.
Li Shanmei, Xu Xiaohao, Wang Chao, et al. Congestion indemnification of crossing air routes based on gray clustering method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 189-197.
- 12 Djokic J, Lorenz B, Fricke H. Air traffic control complexity as workload driver [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(6): 930-936.
- 13 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2007:74-83.
Liu Sifeng, Dang Yaoguo, Fang Zhigeng, et al. Grey system theory and Its application[M]. Beijing: Science Press, 2007: 74-83.
- 14 崔建国,林泽力,吕瑞,等.基于模糊灰色聚类和组合赋权法的飞机健康状态综合评估方法[J].航空学报,2014,35(3):764-772.
Cui Jianguo, Lin Zeli, Lü Rui, et al. Comprehensive assessment method of aircraft health status based on fuzzy gray clustering and combination weighting[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 764-772.
- 15 苏飞.城市道路路网交通运行状态分析方法及应用研究[D].北京:北京交通大学,2017.
Su Fei. Study on analysis of urban road network traffic with applications[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.