

机坪管制人员安全绩效指标权重研究——基于层次分析法（AHP）

郭淼

上海民航职业技术学院

DOI:10.12238/er.v7i4.5025

摘 要：安全绩效是安全管理体系的重要组成部分。科学地制定安全绩效目标、安全绩效指标，并根据安全绩效测量结果对运行过程进行控制，将有助于安全管理工作从制度管理、监督管理转变为自我管理的良性循环，持续保证安全水平。本文对机坪管制人员安全绩效管理展开深入研究，通过采用不确定型层次分析法确定安全绩效指标体系的各指标权重，构建了灰色多层次评价模型，解决了绩效指标体系建立过程中专家评价因素的随机性、不确定性及模糊性，使得安全绩效指标更加准确有效，并最终建立了机坪管制人员安全绩效管理模型。

关键词：机坪管制；安全管理；安全绩效指标

中图分类号：V1 **文献标识码：**A

Research on Safety Performance Index Weight of Airport Controller based on Analytic Hierarchy Process

Miao Guo

Shanghai Civil Aviation College

Abstract: Safety performance is an important part of the safety management system. It is helpful for safety administration to change from system administration and supervise administration to self-administration and ensure the level of safety continuously to establish safety performance target and index scientifically and control the operation according to the result of a measurement. In this paper, the safety performance management of airport control personnel is studied deeply, and the weight of each index of safety performance index system is determined by using uncertain analytic hierarchy process. The grey multi-level evaluation model is constructed to solve the randomness, uncertainty and fuzziness of the expert evaluation factors in the process of establishing the performance index system, which makes the safety performance index more accurate and effective. Finally, the safety performance management model of apron controllers is established.

Keywords: Apron control; Safety management; Safety performance indicators

引言

科学制定安全绩效指标，并根据安全绩效测量结果对运行过程进行控制，有助于从制度管理、监督管理安全转变为自我管理的良性循环，持续保证安全水平。国际民航公约附件 19《安全管理》及指导材料 Doc9589《安全管理手册（SMM）》从国家航空安全方案（SSP）和安全管理体系（SMS）两个层面上提出了安全绩效管理的总体思路，明确了安全绩效指标设置与监控告警标准、安全绩效管理的基本内容。

2018 年，民航局在《航空器机坪管制移交工作总体方案》明确机场承接航空器机坪管制职责部门为机坪管制单位，全面负责统筹机坪运行保障、提高机坪运行效率。目前我国民用航空运输机场建立的安全管理体系仍处于由规章管理向

绩效管理转变的阶段，针对机坪管制单位安全绩效指标、安全绩效管理制度及程序的设置更不尽完善。其中，如何量化设定机坪管制人员安全绩效关键指标并设定指标权重是安全绩效管理中的难点。

1 机坪管制人员安全绩效指标体系架构

1.1 基于层次分析法（AHP）的安全绩效指标设计

安全绩效考核的结果是否科学、合理、公正，是否能够真实地反应安全管理工作中的成绩和不足，其关键在于绩效指标的选取和设计上。如何合理和准确地设计安全绩效指标，要依据科学的设计原则、清晰的设计思路以及合理的设计方法来实现。

层次分析法（AHP）的基本理论是把需要研究的无法定

量的复杂问题分解为不同的组成单元，并根据总目标的要求按相互关系影响划分成有序递层次结构图，构成两两比较矩阵，通过综合这些判断，决定各指标相对重要性的总排序。

1.2 机坪管制人员安全绩效指标的构成

机坪运行管理单位进行安全绩效管理的目的是为了厘清内部相关考核项目，制定系统、全面、科学、合理的安全绩效管理体系，从而做到对安全管理工作合理有效的监督、测评和持续改进。

1.2.1 安全绩效目标的制定

安全绩效管理的目的就是要系统、科学、合理监测并把握安全运行水平和安全运行状况，做到对安全管理工作合理有效的监督、测评和持续改进。安全绩效目标的制定是安全绩效管理的第一步，是保证安全绩效管理效果科学性与合理性的关键。

1.2.2 安全绩效指标的构成

通过分析机场机坪运行管理单位安全绩效考核现状，采用目标管理考核法（MBO）与关键业绩考核法（KPI）相结合的方法确定考核指标。MBO 指标偏向于以目标结果为导

向，通常为高严重后果指标，而 KPI 偏重于目标实现过程中的可量化指标，通常为低严重后果指标。将 MBO 与 KPI 相结合，既采用反映目标的结果性指标，也采用影响目标达成的过程性指标。

根据对机坪管制单位安全绩效考核现状的分析，安全绩效考核应包括三个方面：

（1）反映后果比较严重的事故和事故征候，以及差错和不安全事件的发生率等结果性指标；

（2）反映日常安全管理工作落实情况的过程性指标；

（3）反映运行单位安全生产运行状况的过程性指标，对以结果为导向的目标责任体系的充实和细化。

1.2.3 安全绩效指标权重设置

机坪管制人员安全绩效考核指标体系具有层次性，因此安全绩效考核指标权重计算适合采用层次分析法（AHP）。对不同的考核对象应制定不同的考核指标权重，突出不同的考核重点。使用 AHP 衡量指标重要程度并根据 Sadi 标度运用九分位方法进行比例标度，完成表 1.1 如下所示：

表 1.1 指标标度比较表

甲较乙	极重要	很重要	重要	略重要	相等	略不重要	不重要	很不重要	极不重要
比值	9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9

各指标比例	a	b	c	d
a	1	s	t	q
b	1/s	1	n	m
c	1/t	1/n	1	p
d	1/q	1/m	1/p	1

表 1.2 专家反馈意见

将专家的反馈信息构建判断矩阵 A，采用方根法或近似算法求出判断矩阵的权重向量。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & s & t & q \\ 1/s & 1 & n & m \\ 1/t & 1/n & 1 & p \\ 1/q & 1/m & 1/p & 1 \end{bmatrix}$$

确定每个机坪管制人员安全绩效指标的等级及其对应

的指标权重之后，由下式计算绩效考核总分 T：

$$T = \sum_{i=1}^N P_i \cdot G_i$$

式中，Pi 为各层次上每个安全绩效指标的等级，Gi 为其对应的权重值，N 为绩效指标的总数。计算得出安全绩效考核的总分之后，根据该值将考核结果划分为不同的等级。例如，按照考核满分 100 分计算，可以将考核等级划分为优秀（T≥95）、合格（80≤T<95）、不合格（T<80）等三级。

2 安全绩效指标体系设计

2.1 机坪管制单位安全绩效管理现状

机坪管制员在工作过程中需要持续监控并获取最新信息，对实时动态进行深入分析和评估，迅速决策并准确传达指令以确保航空器安全运行。因此，机坪管制员在思想、业务和心理素质上的任何不足，都将成为影响航空安全的关键因素。

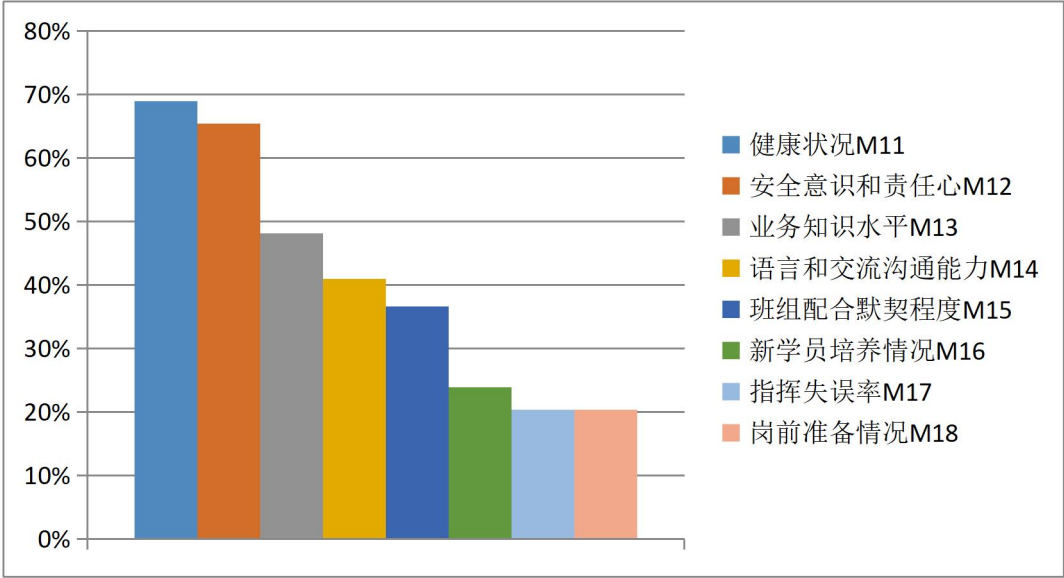


图 2.1 机坪运行安全人为因素调查结果

(1)人为因素 将这些因素分别标记为 M_{11} 至 M_{18} ，并将多组相关数据导入“相关分析”模块，得到以下这些因素之间的相关系数。

表 2.1 人为因素相关系数表

	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}	M_{17}	M_{18}
M_{11}	1.000							
M_{12}	0.159	1.000						
M_{13}	0.655	-0.641	1.000					
M_{14}	0.862	0.636	0.182	1.000				
M_{15}	-0.354	0.867	-0.438	0.182	1.000			
M_{16}	-0.738	0.192	-0.876	-0.633	0.655	1.000		
M_{17}	0.994	0.256	0.576	0.908	-0.258	-0.898	1.000	
M_{18}	-0.481	0.031	-0.786	-0.750	0.525	0.986	-0.957	1.000

相关性系数的取值范围在-1 至+1 之间，其中小于 0 的值表示两因素之间呈负相关；大于 0 的值则表示正相关，意味着两因素具有相同的线性变化趋势；越接近 0，其相关性越弱。为了更明确地界定相关性的强弱，我们设定了一个阈值：当相关性系数的绝对值超过 0.90 时，我们将其定义为较大的相关性。

(2)设备因素

各类新技术设备在机坪管制领域极大地提升了管制效率与能力，然而这种对自动化设备的过度依赖容易使操作人员形成固定的思维模式。这种思维定势在设备出现故障时，可能会对机坪管制的安全运行构成潜在风险。

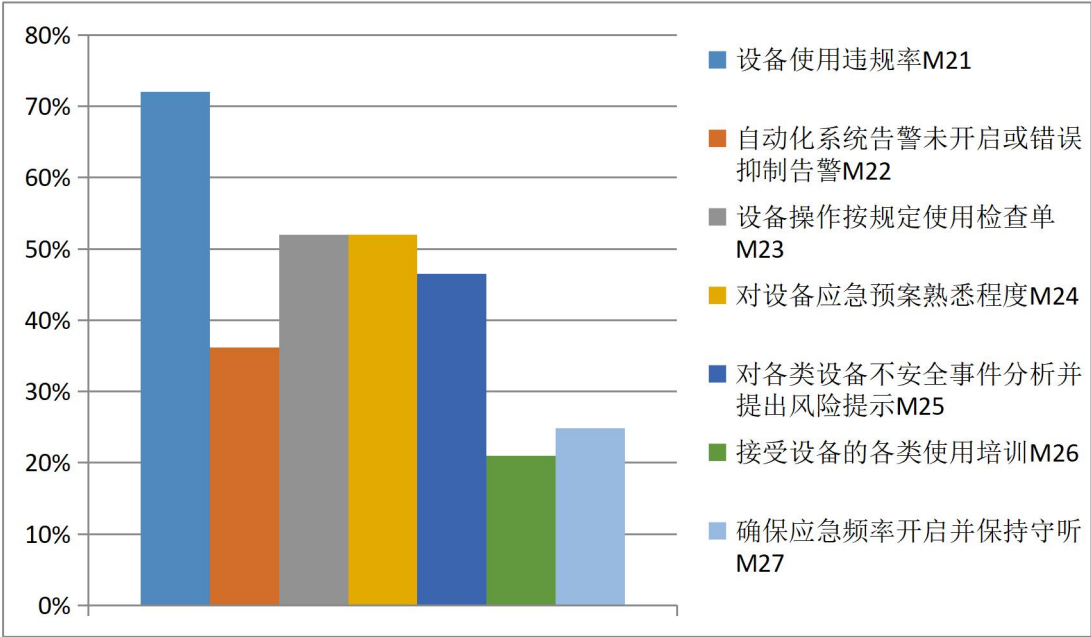


图 2.2 机坪管制运行安全设备因素调查结果

从统计结果来看，“设备使用违规率”是考量能否正确度”以及“设备操作按规定使用检查单”也是影响机坪管制操作管制设施设备的因素。而“对设备应急预案熟悉程度”也是影响机坪管制员正确操作设施设备的重要因素。

表 2.2 设备因素相关系数表

	M ₂₁	M ₂₂	M ₂₃	M ₂₄	M ₂₅	M ₂₆	M ₂₇
M ₂₁	1.000						
M ₂₂	-0.217	1.000					
M ₂₃	-0.412	-0.799	1.000				
M ₂₄	0.587	-0.917	0.494	1.000			
M ₂₅	0.997	-0.141	-0.481	0.523	1.000		
M ₂₆	-0.996	0.140	0.482	-0.522	-0.972	1.000	
M ₂₇	-0.475	-0.755	-0.994	0.433	-0.541	0.542	1.000

经过数据分析可以看出：M₂₁与M₂₅之间具有显著的正向线性相关性，显示出二者具有相似的变化趋势。然而，与此相反，M₂₃与M₂₇之间则呈现出明显的负向线性相关性，显示出二者在变化趋势上的对立性。M₂₁与M₂₆以及M₂₅与M₂₆之间均存在较为显著的负相关性。

(3)环境因素

机坪运行环境的复杂性体现在多个方面，包括机场所在地域的地形地貌特征、机坪管制室内部环境的实际状况，以及运行过程中可能涉及到的自然环境因素和相关的规章要求。

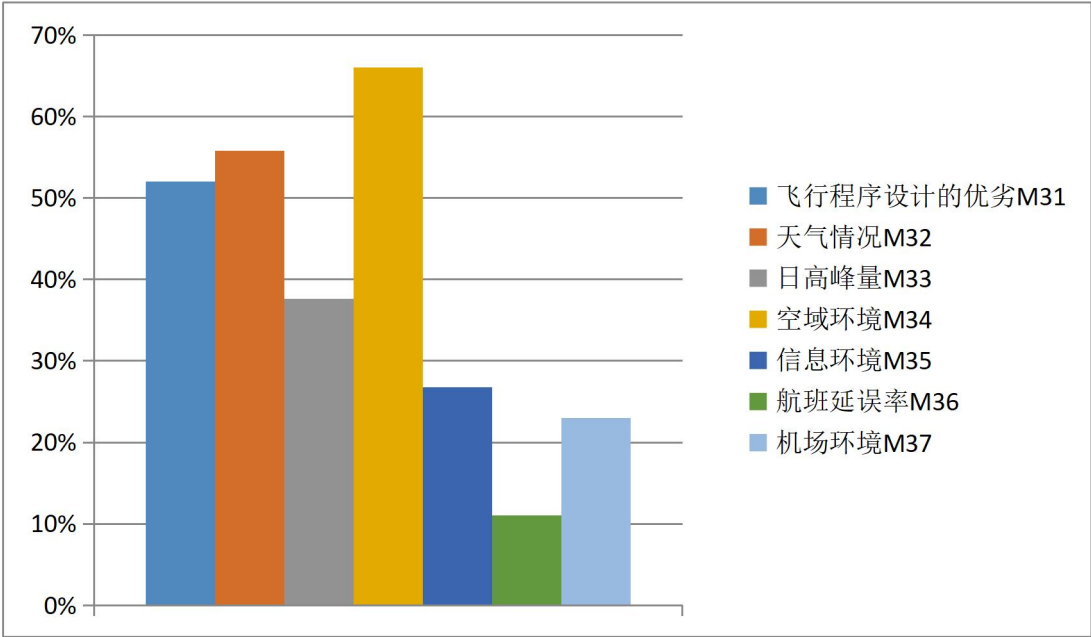


图 2.3 机坪管制运行安全环境因素调查结果

基于数据分析可以发现“空域环境”、“天气情况”以及“飞行程序设计优劣”是影响机坪运行安全的关键因素。

表 2.3 环境因素相关系数表

	M ₃₁	M ₃₂	M ₃₃	M ₃₄	M ₃₅	M ₃₆	M ₃₇
M ₃₁	1.000						
M ₃₂	-0.424	1.000					
M ₃₃	-0.994	0.326	1.000				
M ₃₄	0.206	0.798	-0.308	1.000			
M ₃₅	0.217	0.790	-0.319	0.999	1.000		
M ₃₆	-0.897	0.780	0.846	0.245	0.234	1.000	
M ₃₇	-0.927	0.731	0.883	0.173	0.161	0.997	1.000

（4）管理因素

在机坪运行需要细致、规范化和系统化的方向管理手段和方法以确保工作的严密性和高效性。大量不安全事件案例

也表明导致安全状况不稳定的根源往往可以追溯到管理上的波动和失误。

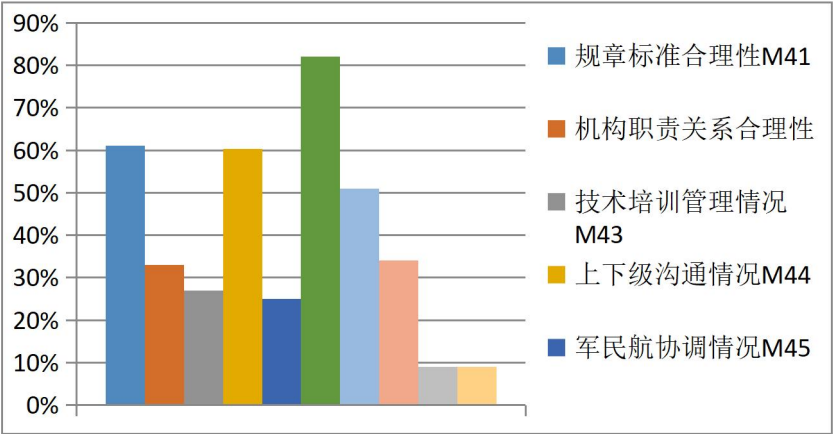


图 2.4 机坪管制运行安全管理因素调查结果

“规章标准的合理性”作为实际工作的重要参照与运行紧密相连。若规章标准存在不合理或脱离实际的情况，其潜在的长期负面影响是不容忽视。此外，“上下级沟通情况”反映了部门内部普遍存在的沟通问题。

表 2.4 管理因素相关系数表

	M ₄₁	M ₄₂	M ₄₃	M ₄₄	M ₄₅	M ₄₆	M ₄₇	M ₄₈	M ₄₉	M ₄₁₀
M ₄₁	1.000									
M ₄₂	0.580	1.000								
M ₄₃	0.935	0.256	1.000							
M ₄₄	0.876	0.117	0.689	1.000						
M ₄₅	0.652	0.695	-0.343	-0.2076	1.000					
M ₄₆	0.932	0.835	0.745	0.6441	-0.882	1.000				
M ₄₇	0.912	0.196	0.598	0.996	0.284	-0.702	1.000			
M ₄₈	0.841	0.048	-0.977	0.497	-0.1390	0.589	-0.988	1.000		
M ₄₉	0.848	0.923	-0.607	-0.489	0.954	-0.382	0.556	-0.427	1.000	
M ₄₁₀	0.917	0.856	-0.719	-0.613	0.899	0.999	0.674	-0.557	0.988	1.000

通过相关性分析可以发现 M410 与 M46 以及 M49 之间存在正向关联。另一方面，M44 与 M47 呈现出较强的相似线性变化趋势，这意味着良好的上下级沟通往往伴随着员工对工作满意度的提升。M4 与 M48 之间，以及 M47 与 M48 之间，均显示出显著的负相关性。

确定绩效指标权重首先需要专家根据工作经验和专业技术知识从而做出客观的、科学的判断，完成不确定型层次分析所需的区间判断矩阵构建。之后构建相应的区间数判断矩阵。下面以环境因素为例，说明如何确定各模块中的各因素指标的权重，表 2.5 是某位专家对环境因素给出的调查表。

2.2 机坪管制单位安全绩效指标体系的设定

表 2.5 某机场机坪管制运行环境因素的专家调查表

环境因素	飞行程序设计 优劣	天气情况	日高峰 量	空域环境	信息环境
------	--------------	------	----------	------	------

飞行程序设计 计优劣	[1,1]	[0.4,0.5]	[0.2,0.3]	[2,3]	[0.1,0.25]
天气情况	--	[1,1]	[0.3,0.35]	[4,5.5]	[0.3,0.35]
日高峰量	--	--	[1,1]	[4,.5,6]	[0.4,0.6]
空域环境	--	--	--	[1,1]	[0.1,0.2]
信息环境	--	--	--	--	[1,1]

则构造的区间判断矩阵为：

$$A = (a_{ij})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} [1,1] & [0.4,0.5] & [0.2,0.3] & [2,3] & [0.1,0.25] \\ [2,2.5] & [1,1] & [0.3,0.35] & [4, 5.5] & [0.3,0.25] \\ [3.33,5] & [2.86,3.33] & [1,1] & [4,5.6] & [0.4,0.6] \\ [0.33,0.5] & [0.18,0.25] & [0.16,0.22] & [1,1] & [0.1,0.2] \\ [4,10] & [2.85,3.3] & [1.66,2.5] & [5,10] & [1,1] \end{bmatrix}$$

将 A 进行一致性逼近，取 $m_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \frac{a_{ik}b_{jk}}{a_{jk}b_{ik}}\right)^{\frac{1}{2n}}$ ，构造 $M = (m_{ij})_{m \times n}$ 为互反性的一致性数字矩阵，可得：

$$M = (m_{ij})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 1 & 0.81 & 0.66 & 1.19 & 0.58 \\ 1.22 & 1 & 0.81 & 1.47 & 0.70 \\ 1.51 & 1.23 & 1 & 1.81 & 0.87 \\ 0.83 & 0.68 & 0.55 & 1 & 0.48 \\ 1.73 & 1.41 & 1.45 & 2.08 & 1 \end{bmatrix}$$

令 M 的权重向量为 $W = (W_1, W_2, ..., W_n)$ ，其中

$$W_j = \frac{(\prod_{k=1}^n a_{jk}b_{jk})^{\frac{1}{2n}}}{\sum_{j=1}^n (\prod_{k=1}^n a_{jk}b_{jk})^{\frac{1}{2n}}}, j = 1, 2, ..., n$$
$$W = [0.16, 0.19, 0.24, 0.13, 0.27]$$

其极差矩阵为：

$$\Delta_1 M = \begin{bmatrix} 0 & 0.42 & 0.46 & -0.80 & 0.47 \\ -0.77 & 0 & 0.51 & -2.53 & 0.41 \\ -1.82 & -1.62 & 0 & -2.68 & 0.47 \\ 0.50 & 0.49 & 0.38 & 0 & 0.38 \\ -2.26 & -1.4 & -5.2 & -2.9 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta_2 M = \begin{bmatrix} 0 & -0.31 & -0.36 & 1.80 & -0.32 \\ 1.27 & 0 & -0.46 & 4.03 & -0.35 \\ 3.48 & 2.09 & 0 & 4.18 & -0.27 \\ -0.33 & -0.43 & -3.2 & 0 & -0.28 \\ 8.26 & 1.91 & 1.35 & 7.92 & 0 \end{bmatrix}$$

利用误差传递公式的：

$$\Delta_1 W = [0.076, 0.085, 0.054, 0.0837, 0.065]$$

$$\Delta_2 W = [0.027, 0.109, 0.087, 0.175, 0.471]$$

因此，环境因素的五个指标权重区间为：

$$A_{31} = [0.08, 0.38], A_{32} = [0.10, 0.30]$$

$$A_{33} = [0.18, 0.32], A_{34} = [0.04, 0.31], A_{35} = [0.21, 0.32]$$

根据上述算法可以计算出环境因素区间指标权重，以飞行程序设计优劣（M₃₁）为例：

表 2.6 环境因素区间指标权重

	专家 1（N ₁ ）	专家 2（N ₂ ）	专家 3（N ₃ ）	专家 4（N ₄ ）
区间权重	[0.08,0.38]	[0.10,0.30]	[0.18,0.32]	[0.21,0.32]

可得飞行程序设计优劣（W₃₁）的权重值 A₃₁=0.211。效评价体系第二和第三层指标权重值为：

因此根据上述计算步骤可计算出机坪运行安全管理绩效

表 2.7 机坪管制安全绩效指标体系二级、三级指标权重

二级指标	权重	三级指标	权重
M ₁	0.338	M ₁₁	0.180
		M ₁₂	0.147
		M ₁₃	0.158
		M ₁₄	0.174
		M ₁₅	0.153
		M ₁₆	0.189
M ₂	0.265	M ₂₁	0.216
		M ₂₂	0.176
		M ₂₃	0.184
		M ₂₄	0.224
		M ₂₅	0.200
M ₃	0.193	M ₃₁	0.211
		M ₃₂	0.290
		M ₃₃	0.156
		M ₃₄	0.197
		M ₃₅	0.142
M ₄	0.203	M ₄₁	0.100
		M ₄₂	0.122
		M ₄₃	0.166
		M ₄₄	0.123
		M ₄₅	0.146
		M ₄₆	0.098
		M ₄₇	0.093
		M ₄₈	0.115

3. 机坪管制单位安全绩效指标体系的验证与分析

3.1 安全绩效指标体系的验证

本节将在已构建的机坪管制人员安全绩效管理指标体

系基础上，选取东北地区 A 机坪管制单位为测试对象，对已建立的安全绩效指标体系进行比较。因疫情期间起降架次数波动原因，选取 2018 年、2019 年以及 2023 年数据作为对比。

表 3.1 参考机坪管制单位与 A 机坪管制单位运行情况比较（航班起降架次）

航班起降架次	2018 年	2019 年	2023 年	2023 年同比增长（%）
参考单位	341057	372472	420612	12.92
A 机坪管制单位	504617	566885	604317	6.60

表 3.2 参考机坪管制单位与 A 机坪管制单位不安全事件统计表

	2018 年		2019 年		2023 年	
	数量	万架次率	数量	万架次率	数量	万架次率
参考单位	349	10.29	399	9.53	376	8.96
A 机坪管制单位	417	8.28	704	12.43	610	10.18

为对比验证安全绩效管理指标体系在东北地区 A 机坪管制单位的适用性，首先同样对确定的各绩效指标按照评分，

根据已建立的安全绩效指标体系进行计算，得出两个机坪管制运行单位 2018 年、2019 年以及 2023 年的安全状态等级分

数。

表 3.3 参考机坪管制单位与 A 机坪管制单位历史安全绩效预估分数表

时间		2018 年	2019 年	2023 年
评价结果	参考单位	$Y_{11}=78.16$	$Y_{12}=81.04$	$Y_{13}=84.91$
	A 机坪管制单位	$Y_{22}=79.65$	$Y_{22}=79.65$	$Y_{23}=82.29$

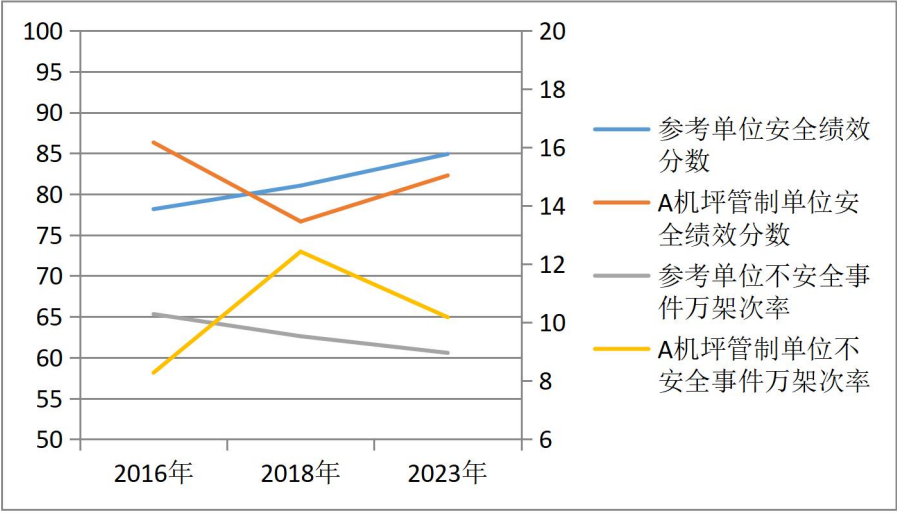


图 3.1 参考单位与 A 机坪管制单位安全绩效与不安全事件对比图

参考单位与 A 机坪管制单位在 2016 年、2018 年及 2023 年安全绩效与不安全事件对比可以发现，参考单位安全绩效分数在 2016 年-2017 年期间逐渐提升，相应不安全事件发生万架次率逐年降低。由此可见，安全绩效管理指标体系较能准确反映出运行单位的安全状况，安全绩效管理指标体系在不同机坪管制单位中与安全状况均有较高的匹配度。

3.2 基于指标权重的分析

指标是评价对象的客观反映，指标的权重不仅仅反映了各指标之间的内在关系，其大小还可以反映出各指标对整个评价对象中的重要程度，也可由此明确安全管理重点。从本章指标权重表中可以发现影响管制运行安全影响最大的前三个指标如下：

系统整体：人为因素（0.338）、设备因素（0.180）、管理因素（0.203）。

人为因素子系统：健康状况（0.180）、交流沟通能力（0.174）、新员工培养情况（0.189）。

设备因素子系统：设备使用违规率（0.216）、自动化系统未开启或错误抑制告警（0.224）、设备可靠性（0.200）。

环境因素子系统：天气情况（0.290）、飞行程序设计优劣（0.211）、空域环境（0.197）。

管理因素子系统：技术培训管理（0.166）、上下级沟通（0.123）、军民航协调（0.146）。

作为一个运行系统，内部各因素、各子系统之间有机联系，相互制约，相互作用。因此，还应全面重视各绩效指标所反映的具体情况，安全评价的各因素、各子系统之间相互协调，以进一步改善并提高系统整体安全状况。

4 结论与展望

结合广泛深入的访谈和问卷调查，通过与机场机坪运行管制单位工作人员的交流 and 探讨，本文搜集了大量与安全绩效相关的一手资料，并获取了真实的一线数据。基于国内外安全绩效等相关理论研究成果，本文建立了安全绩效指标体系的架构及其构建目标的原则，包括安全绩效评价方式、内容及结果应用，形成了完整的针对机坪管制人员的安全绩效管理体系架构，为机场机坪管制单位安全绩效考核制度的建立提供了思路。

参考文献

[1]中国民用航空局空管行业管理办公室.空管单位安全绩效管理应用指导材料[EB/OL], 2016.

[2]施和平.空中交通系统安全管理[M].厦门:厦门大学出版社,2003:23-28.

[3]张鑫.民航空管安全体系研究[D].天津:天津大学,2005.