

交通流量增长下的空中管制安全风险预警及阈值确定

罗帆, 杨智

武汉理工大学管理学院, 武汉 430070

摘要 中国民用航空运输量逐年增长, 交通管制面对的安全风险压力不断上升。由于空中交通流量持续增加下安全风险的产生是一个相互作用、协同耦合的过程, 因而具有明显的非线性、开放及动态特征, 为实现预警管理的动态性和直观反映风险变量的系统关联性, 利用系统动力学在时变性及非线性建模上的优势, 构建空管安全风险动态预警模型。模型以管制飞行器流量增长为始点, 以管制风险为终端界定内部指标变量, 在结合实际调研及访谈的基础上, 运用 Vensim 软件进行仿真分析。仿真实例有效预测了空管安全风险的预警状态值, 并直观显示了相关影响因素在系统中的变化情况, 在此基础上确定了主要预警指标的风险阈值。结果表明, 运用系统动力学 (SD) 构建空中交通管制安全风险预警模型, 可满足预警的动态性和系统性要求。

关键词 空中交通流量; 管制安全; 风险预警; 阈值界定; 系统动力学

中图分类号 X923

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.04.009

ATC Safety Risks Early Warning and Threshold Value Determination Under the Growth of Air Traffic Flow

LUO Fan, YANG Zhi

School of Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract Under the circumstance of China's civil aviation transportation volume increased year by year, a continuous increase in air traffic flow, so traffic control safety risks faced by rising and practical pressure. As the air traffic flow under increasing security risk is generated from an interaction and coupling process, it has obvious characteristics such as nonlinear, open and dynamic. To realize the dynamic early warning management and intuitionist, which reflects the system relevance of risk variables. This paper uses the dynamics system in the changeable and nonlinear model to build dynamic ATC safety risk early warning model. In order to reflect the dynamic nature of the monitoring indicators and systems association, this article constructs ATC safety risk dynamic early warning models on the basis of the system dynamics. The above model looks for the growth of air traffic flow as the starting point and the control risk to define internal indicator variables as terminal. Based on actual research and interviews, this paper uses the Vensim to simulate and analysis. As simulated examples can predict ATC safety risk warning status values effectively and visualize the changes of related factors in the system, it is reasonable to determine the risk threshold of the key early warning indicators. Results show that the use of SD to construct ATC safety risks warning model, which can meet the model of the dynamic and systemic.

Keywords air traffic flow; control of safety risks; dynamic early warning; determine threshold value; system dynamics

0 引言

自 20 世纪初飞机诞生之日起, 航空业就开始探索如何保障飞行安全, 特别是在针对如何规避各种飞行错误或失误方面^[1]。20 世纪 90 年代中后期, 美国联邦航空局 (FAA) 重新审视传统的以规章制度为中心的管理体系, 认识到民航

行业规章只是航空运输业的最低运行标准, 即便完全按照规章的要求运行, 各种事故和事故征候还是难以避免^[2]。随后, 国际民航组织 (ICAO) 提出了系统安全目标, 制定全球航空安全战略, 提出要通过积极主动的管理方式实施安全风险管理, 把安全管理的重点转移到事故预防的事前管理阶段^[3], 使

收稿日期: 2012-01-08; 修回日期: 2012-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (70971104)

作者简介: 罗帆, 教授, 研究方向为风险管理, 组织与人力资源管理, 电子信箱: sailluof@126.com

航空安全风险预警管理得到迅速发展。空中交通管理系统作为民航系统的三大重要组成部分之一,其安全风险管理水平的高低直接制约着航空风险管理的成效。

近年来,在空管安全风险预警模型的研究中,Stamatelatos^[4]利用贝叶斯定理计算风险事件发生频率和设备出现的故障,分析了飞机的失效分布,通过故障树建模和不确定分析实现了基于概率的风险预警;但该方法受限于数据的有效统计及概率确定的准确性。万健等^[5]通过分析国内外民航安全风险监测的研究现状,提出了基于径向基函数(RBF)网在线建模的安全风险监测仿真系统,为航空安全风险快速实时预警提供了新的方法;但神经网络固有的黑箱性,致使风险要素之间的耦合作用及动态关系无法直观描述。Stroeve等^[6]证明了蒙特卡洛模拟对系统性风险事故预警是一种可行的方法,并对与安全有关的空中交通情况进行仿真。结果显示,人为因素是重要预警监控对象;但该方法对历史数据要求较高,且不能将专家经验有效运用于模型中。综合而言,当前研究有效提升了人们对于空管安全风险的认识及风险预警的精度,但在人、机、环境、管理4个方面系统性分析各因素之间的相互作用,建立预警模型方面的研究尚未形成新的突破。这样一方面可能致使预警模型建构系统关联性不强;另一方面指标阈值的界定与预警模型出现分离,不利于在整体视角下设定风险阈值。

由于航空运输量的持续增长,2009年以来,中国民航空管系统全年保障各类航班起降首次突破500万架次,同比增长15.9%;完成校验飞行2204架次,同比增长4.1%。空中交通管制因飞行流量增长而面临的安全压力正不断上升。因此,针对当前空中交通运输量逐年增长与空中交通管制服务供给瓶颈之间的矛盾,分析流量增长下的安全风险因素对管制安全风险的影响,构建风险预警模型并合理确定风险指标的告警阈值,对于完善当前空管安全风险预警管理水平具有理论与现实意义。由于飞行流量增长下的安全风险具有明显的非线性、开放、动态特征,致使通常的预警方法已难以处理。针对这些特点,本文选用复杂科学中的系统动力学(SD)方法建构空中交通流量增长下的管制安全风险预警模型,并在仿真模拟中对各重要的风险指标阈值进行合理确定。

1 研究方法

1.1 系统动力学在空管安全风险预警模型建构中的优势

系统动力学作为一门分析研究信息反馈科学的学科,运用系统结构决定系统功能的原理,将整个系统构成结构、功能的因果关系模型,并利用反馈、调节及控制的原理进一步设计反映系统行为的反馈回路,因而能有效认识和解决高阶、非线性和时变的复杂系统问题^[7]。借助于系统动力学软件进行仿真,可定量研究复杂系统各变量的变化规律,因而将系统动力学应用于飞行流量增长下的空中交通管制安全风险的预警模型构建,具有传统预警方法无法比拟的优势。首

先,传统的基于统计的计量预警模型需要大量的历史数据,而空管安全领域的数据库仍在完善的过程中,而利用系统动力学在数据匮乏的基础上仍能对系统的行为进行有效的系统分析;其次,系统动力学中的函数关系灵活,可有效利用统计、拟合、综合评价等方法,将其综合应用于系统内部的函数关系确立上;再次,应用系统动力学建构的因果关系及系统流图,能直观描述流量增长下的各管制安全风险因素的作用规律及变化趋势,因而有利于在实践领域的拓展应用;最后,应用系统动力学对各预警指标进行仿真预测时,可以结合专家意见、政策预期等主观因素,从而可对安全风险管控手段进行效果模拟。

1.2 基于系统动力学的安全风险预警模型的建构方法及步骤

在交通流量增长的情境下,利用系统动力学构建安全风险预警模型,首先需要进行深入调研,获取有效的资料与数据信息,根据流量增长情境中的各种安全隐患所处状态,合理提出研究假设,通过选取需要研究的主要风险对象确定模型边界,在对风险因素因果反馈关系分析的基础上绘制系统流图,并根据数据来源与完善程度选用有效的函数关系建立动力学方程,从而在流图的基础上直观地建立管制安全风险预警模型。再利用数据进行仿真调试,并针对仿真结果进行分析,以验证预警模型的操作性及实用性。利用系统动力学构建管制安全风险预警模型的方法及步骤如图1所示。

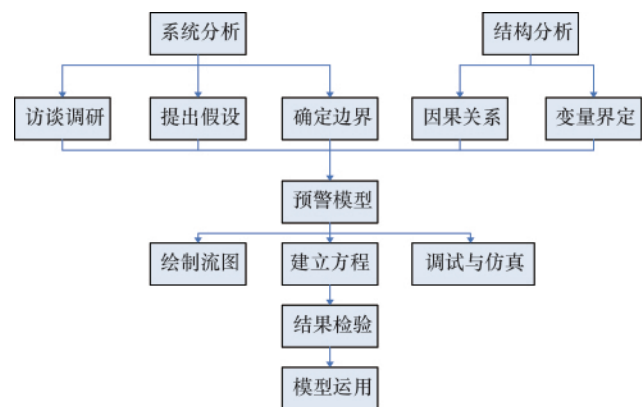


图1 基于系统动力学的安全风险预警模型建构方法

Fig. 1 Model construction methods based on systems dynamics

1.3 安全风险指标告警阈值的确定方法

风险阈值通常分为单指标告警阈值和系统整体风险评估阈值两类。单指标预警时,其报警原理是根据设定的告警值域和风险值的变化趋势,发出不同程度的警告,而预警指标的风险衡量指数曲线在信号区间内的变动,取决于阈值的合理设定。通常阈值的设定是根据专家的经验或实际情况以调研或试验的方法获取,但这些风险告警阈值的设定方式或主观性较强,或成本太高而对其适用性产生一定的影响。运

用系统动力学则可以利用模型仿真,在整体风险状态警级判定的基础上,通过时间的变化,将整体风险阈值与单指标风险阈值相结合,从而直观地确定不同关联风险因素的指标告警阈值。这种方法的客观性较强而成本较低,有利于在实践中的推广应用。为合理确定流量增长下的管制安全风险告警阈值,本文引入系统平衡裕度的概念。杜志明^[9]提出了系统平衡裕度的概念,即平衡域内任意一点到其边界的最短距离称为该点所代表系统平衡状态的平衡裕度,系统平衡状态点的集合称为系统的平衡域。平衡裕度指出,系统在失去平衡态时,各重点指标的状态值构成了系统风险的预警信号集合。结合系统平衡裕度及关键指标风险衡量指数的概念,可先将流量增长下的管制安全的系统整体风险告警值域设定为4级,即正常[0—1],轻警(1—2],中警(2—3],重警(3—4];然后,分析对系统整体风险产生影响的各单指标因素,从而形成一个平衡域集合。即在系统风险状态监测过程中,根据衡量管制安全风险的整体状态与各子系统关键指标值组合成的平衡域集合来动态确定风险阈值。当整个系统风险状态 Y_t 突破阈值时,即对平衡域 $Y_t=\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 集合中各单指标在不同时段所处风险状态进行监测,从而实现对整个系统风险指标全部运行状态进行告警阈值的综合确定。

2 空中交通管制安全风险的动力学预警模型构建

2.1 空中交通管制安全风险预警模型假设及系统边界确定

在飞行流量增长的情境下,为了进一步简化分析过程,合理确定系统内外部变量,针对空管安全风险类型提出预警模型构建的基本假设。

假设1:在当前预测的航空运输量年增长率的基础上,管制单位需要管制的航空器飞行流量以管制空域利用率及空域管理能力为约束条件,在预设的时间范围内保持增长。

假设2:管制风险作为系统整体风险的最终状态变量为非量纲性变量,只考虑风险流在系统要素内的变化对其施加的累加或累减效应,不考虑系统外其他风险防范措施的影响程度。

假设3:环境及管理子系统相关变量只作为辅助变量计量,不作为状态变量计量。

假设4:管制行为的实现相对于飞行流量的增长均具有不同程度的延迟。

在模型假设的基础上,以人、机、环、管各子系统风险划分为基础,按风险流在系统中传导、演化等运动规律,以行为管制差错为风险终端,界定系统模型边界。通常,确定模型边界的一般原则是先选择有关的状态变量,并将状态确定的载体进行归类、排列,确定所要研究的变量是受哪些状态变量控制。由于认知的局限性,不可能对一个无所不包的模型进行分析。因此,可通过内生、外生及不考虑因素3个部分界定空管安全风险的系统动力学模型边界,如图2所示。

2.2 空中交通管制安全风险系统流程图构建

系统动力学流程图的绘制是预警模型构建的关键环节,需

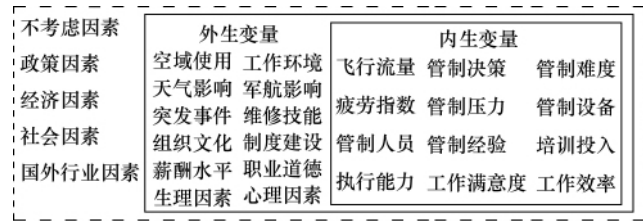


图2 系统模型边界

Fig. 2 System model boundary

要在访谈调研的基础上,对系统运行状态进行更细致和深入描述,以刻画风险要素之间的逻辑关系,明确变量性质,从而实现通过反馈与控制反映系统行为,并对影响系统行为的风险变量进行预警监控。结合空管安全风险类型、特征、模型边界点的设置,根据空管安全风险人、机、环、管相互作用,在空管安全风险流运动的规律上,即以飞行器流量增长导致的风险状态变化为始点,以管制差错导致的管制风险为终点,构建系统流图。其中流位变量6个,流速变量9个,辅助变量28个。飞行流量增长下的空中交通管制安全风险系统流图如图3所示。

根据绘制的系统流图,通过Vensim软件可以得到所有的反馈回路。由于模型中的风险关联因素众多,本文对3条关键反馈回路进行分析。变量前的符号表示它与前一变量的相关性方向。

(1) 管制飞行器数量→+管制人员数量→-人均培训费用→+管制工作能力→-管制差错速率→+管制风险→+管制差错速率→+管制压力→+空域内飞行流量限制→-管制飞行器数量;

(2) 管制设备需求→+管制设备供给→+管制设备使用→+管制设备的不良使用率→+设备故障率→+管制工作的差错率→-管制设备需求;

(3) 管制风险→+管制差错速率→+管制经验→+管制工作能力→-管制难度→-空域飞行流量→+增加管制飞行器数量→+管制难度→+管制压力→+疲劳指数→+管制差错速率→+管制风险。

由上述关键反馈回路可以看出3个重要的反馈关系:回路(1)表示在管制飞行器增加的情况下,管制人员的需求数量加大,在目标预算的约束下,人均培训费用减少,使得管制人员平均工作能力下降,致使管制风险增加,这将导致管制压力加大,从而又进一步限制管制飞行器的流量增加,为负反馈回路;回路(2)表示在飞行流量增长情况下,管制设备需求的加大导致管制设备供给的增加,设备供给的增加又会使管制设备使用数量增加,而使用数量的增加将导致更多不良使用情况的增加,这又将增加设备的故障率从而使管制工作的差错增加,在没有提高设备使用效率及熟练程度的情况下,又进一步减少了设备使用的需求力度,该条回路为负反馈回路;回路(3)表示管制风险的加大使得管制差错增加,而工作差错的增加反而使管制人员的管制经验增加,使管制人员的工作能力得到增长,管制能力的增长使管制难度因管制

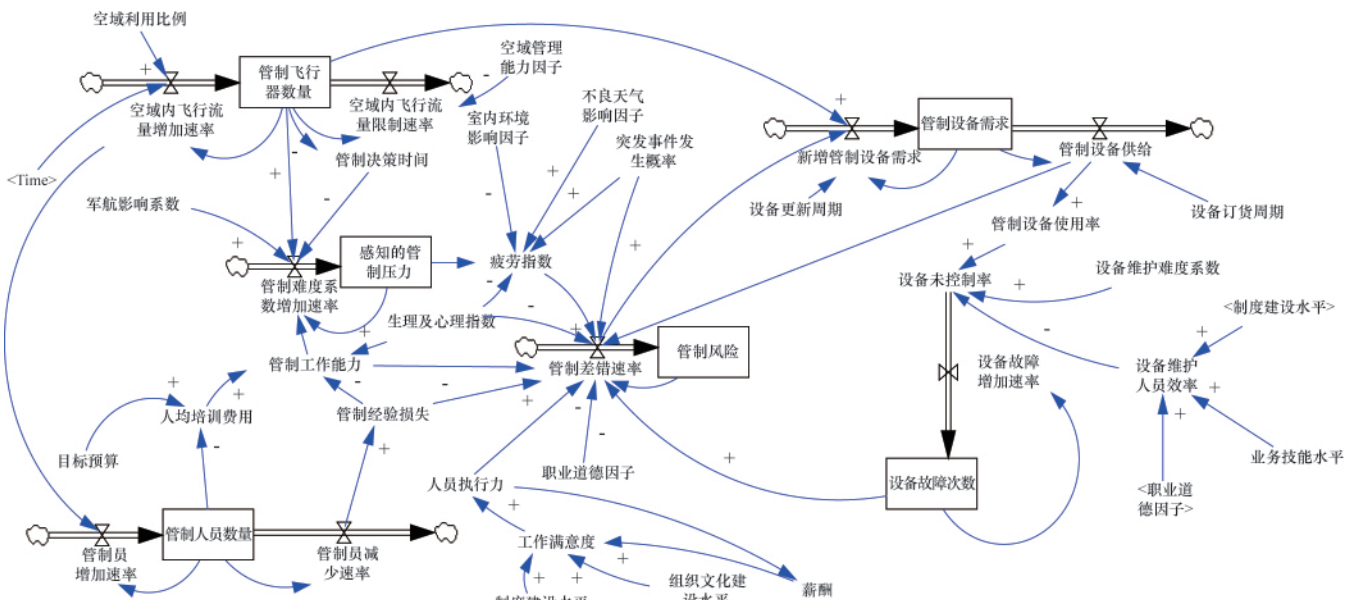


图3 空管安全风险系统流图

Fig. 3 System flow diagram of ATC safety risks

人员的数量提高而减少,从而缓解管制压力,降低了管制人员的疲劳指数,致使管制差错率下降,最后导致管制风险的降低,该条回路为正反馈回路。

2.3 空中交通管制安全风险动力学预警模型的关键参数确定

根据系统流图中的43个变量及其类型,选取10个关键指标,其参数定义如表1所示。

表1 关键预警监测指标参数

Table 1 Key early warning monitoring indicators

序号	变量名称	性质	单位	指标说明
1	空域内管制飞行器增加率	流量	架次/月	以塔台管制室内飞行器起降为计数对象
2	感知的管制压力	存量	倍	以访谈中的压力测试为基数计量
3	管制设备供给	流量	台	根据需求变动后的实际供给量为对象
4	设备故障增加率	流量	次	以时段内的平均故障增加次数为对象
5	设备维护人员效率	辅助	%	按绩效分值计量,具有延迟
6	疲劳指数	辅助	无量纲	以波动状态为监控特征,具有延迟
7	空域利用比例	辅助	无量纲	测试航线标准及管制方法的可利用程度
8	管制决策时间	辅助	s	管制员人均飞行器管制决策反应时间
9	管制难度增加系数	流量	无量纲	无量纲变量,仅说明难度变化的趋势
10	管制风险值	存量	无量纲	按单指标预警值域测定,划分为4级

2.4 系统动力学预警模型中变量函数关系的确定方法

模型中参数的确定是对各相关变量作用关系的精确界定,是模型运用及仿真的基础。飞行流量增长下的空管安全风险预警模型的变量关系主要采用以下4种方法确定。

(1) 基本存量及速率变量参数确定。

水平方程是系统动力学的基本方程,是描述系统动力学模型中存量变化的方程。根据存量和流量的关系,存量是流量变化对时间的积累,可用积分公式描述,即状态变量在t时刻的值等于状态变量的初始值加上[0,t]这段时间净流量变化对时间的积累。为便于计算,通常用差分方程的形式描述,即 $L_k = L_{j,t} + (\sum R_{in,jk} - \sum R_{out,jk}) \cdot DT$ 。其中, L_k 表示状态变量L在K时

刻的取值, L_j 表示状态变量L在J时刻的取值, $R_{in,jk}$ 表示流入速率变量 R_{in} 在JK区间内的取值, $R_{out,jk}$ 表示流出速率变量 R_{out} 在JK区间内的取值, DT 表示差分步长。速率方程则是定义一个单位时间间隔内流量形成的方程式,其实质是流量变化的自然规律或调节存量的决策规则。速率方程是状态变量和常量的函数,即 $R=f(L, Constant)$ 。

(2) 表函数关系为表征的变量参数确定。

表函数是用于描述某变量对另一变量的影响以建立两个变量之间的非线性关系的函数,特别是软变量之间的关系。表函数的确立较为复杂,主要通过文献总结、专家经验及仿真调试确立。通常可将两个变量先归一化,或者先规整化,再根据

经验给出大致的关系图, 这样设计的变量通常为无量纲变量。

(3) 以赋权法进行的函数关系确定。

对于系统流图中的无量纲定性指标变量, 其相互作用关系可依据综合赋权的方法进行函数关系界定, 以便于将定性指标量化用于模型求解。为了突出指标变量赋权的原始信息直接来源于客观环境, 本文选用熵值法建立函数关系。

(4) 以统计回归进行的变量关系确定。

在有大量历史统计数据的情况下, 利用多元回归进行相关关系的拟合, 观测数据拟合的变量和影响其变化的变量之间线性关系式, 通过检验影响因素的显著程度和比较它们的作用大小, 为动力学预警模型提供支持。

3 仿真结果及阈值确定

3.1 实例仿真及结果分析

通过对湖北某空管分局进行调研, 结合当年数据、访谈资料及变量数学关系形式, 设置模型参数。模型初始参数设置为 FINAL TIME:36, TIME STEP:1, UNITS FOR TIME: MONTH。仿真结果如下。

(1) 管制风险状态值变动趋势及预警时点如图 4 所示。仿真结果显示, 该空管单位的管制安全风险在模拟初期呈振荡上升趋势, 在 12 个月左右便达到重警的警戒值域。这与该管制单位在飞行流量增加、新增管制员比例加大及新设备投入使用后, 管制难度、管制压力及管制效率等因素的综合影响有密切关系。但随着时间的延伸, 管制人员参加培训, 新增设备等投入加大, 管制工作人员逐渐适应新设备, 在管制技能提高的情况下, 管制难度先升后降, 系统运行在一种自组织调节的作用下, 管制风险状态值逐渐呈现出震荡减小的趋势, 并在 30 个月后逐渐回复到正常水平。由图 4 可以看出, 整个管制安全风险的告警点主要分布在 6、12、14、24、28 这几个月, 此时警度均达到中警及其以上告警警级。

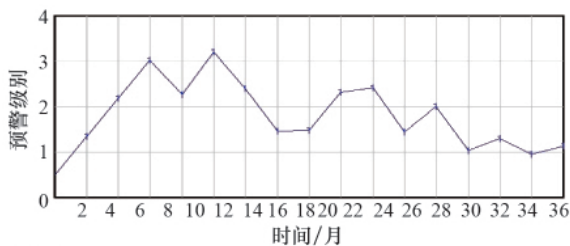


图 4 管制安全风险警级变化趋势图
Fig. 4 Change trends of safety risks

(2) 管制飞行器变化情况如图 5—图 7 所示。结果显示, 该管制单位在未来近 3a 的时间内, 空域内的管制飞行器呈振荡上升的趋势; 空域利用比例在当前的航线设计及管制标准体系下, 短期内就达到自身极限值, 并保持稳态; 月平均可管制飞行器数量在空域利用比例约束下, 有明显的先降后升的变化趋势。

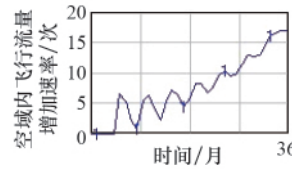


图 5 飞行架次增加率
Fig. 5 Increase rate of flight

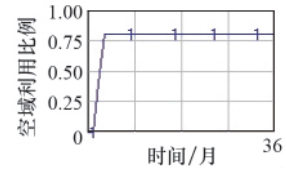


图 6 空域利用比例
Fig. 6 Proportion of airspace use

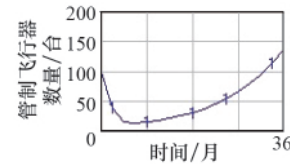


图 7 仿真阶段飞行器变化量
Fig. 7 Vehicle change

(3) 管制设备子系统变化情况如图 8 和图 9 所示。结果显示, 随着平均管制飞行器流量的逐渐加大, 管制设备的需求及供给力度同时增大; 设备维护人员的工作效率在短期内得到快速提高, 但很快遭遇效率提升瓶颈, 管制效率在 80% 左右成为该管制单位的稳态值, 而很难再次突破; 设备故障增加率则在缓慢的上升趋势中逐渐向稳态发展, 达到 100 次左右的稳态值。即在维护人员现有的正常工作效率下, 每月仍会有近 20 次的设备故障出现, 从而以故障率的存量形式积累设备子系统的安全风险隐患。这一现象一方面说明需要利用培训、激励等手段进一步提高维护人员工作效率; 另一方面, 则需要对设备本身的更新、换代等硬件投入进行分析, 以做到尽量降低设备风险隐患。

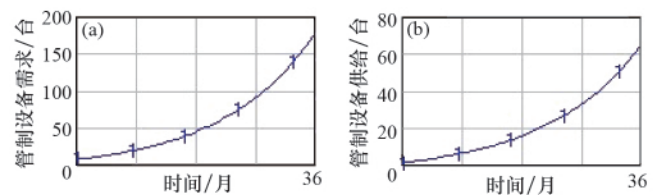


图 8 设备需求(a)及供给(b)变化
Fig. 8 Equipment demand (a) and supply (b) change

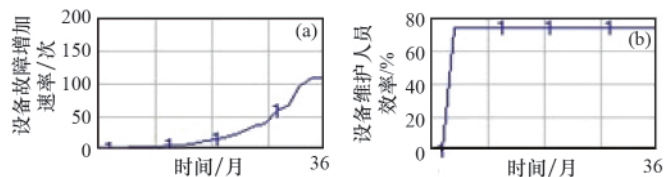


图 9 设备故障率(a)及维护人员工作效率(b)
Fig. 9 Equipment failure rate (a) and work efficiency (b)

(3) 管制人员子系统变化情况如图 10—图 13 所示。根据该管制单位人员在短期内, 新增管制员增多, 老管制员离岗或转岗的实际情况, 由图可知, 该管制单位管制工作人员,

随着平均管制飞行器的增加,单位飞行器管制决策时间逐渐减少,从而使得管制人员的工作压力呈倍数上升。一方面,在管制压力的作用下,管制员疲劳指数出现较大幅度的振荡波动,管制难度系数呈现脉冲式变化,从而增加了管制风险程度;另一方面,由于新增管制设备及管制人员投入的增加,使得管制人员虽然在管制压力值不断上升的情况下,人员的疲劳状态及管制难度系数均在随后的8、9个月的时间里逐渐回复为较正常的状态值。

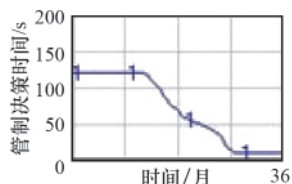


图 10 管制员决策反应时间
Fig. 10 Controller decision-reaction time

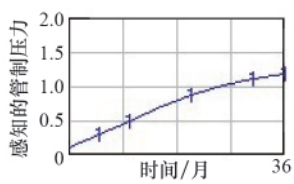


图 11 管制员感知的压力值
Fig. 11 The pressure felt by controllers perceive value

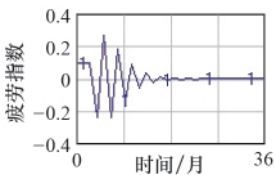


图 12 管制人员疲劳指数
Fig. 12 Controlling officer fatigue index

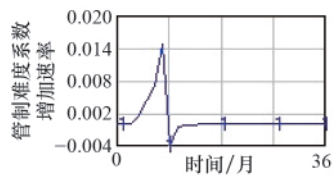


图 13 管制难度变化比率
Fig. 13 Change ratio of control difficulty

3.2 安全风险指标阈值的确定

根据管制风险告警时点,将需要关注的重要风险指标组成平衡域集合 $Y_i = \{X: X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$,即管制安全风险在上述告警时点时,针对重点监测指标在告警点时的取值,即可确立相应指标的告警阈值,并在时间动态影响下进行管制安全风险的整体预警监测。部分重要指标告警阈值如表 2 所示。

表 2 部分重要风险指标告警阈值
Table 2 Some important risk indicator alarm thresholds

指标	风险阈值			
	正常	轻度风险	中度风险	严重风险
管制压力	≤ 0.5	0.5—0.1	1—1.5	> 1.5
设备故障率/%	≤ 0.1	0.1—0.2	0.2—0.5	> 0.5
飞行器流量	≤ 50	50—100	100—150	> 150
疲劳指数	0	0—0.2	0.2—0.4	$> 0.4 $
管制员决策时间/s	> 150	100—150	50—100	≤ 50

4 结论

(1) 基于系统动力学的空管安全风险预警模型,可以针对空管系统安全风险的状态值进行有效监测,并在基于时间

的模拟中体现风险监控的动态性,从而实现在不同的时间节点上进行预警。

(2) 将单指标警戒值域与系统平衡裕度相结合,可以在时间节点选取中,通过空管安全风险值在不同时点的警情发展情况,将单指标警戒值域与系统平衡裕度相结合,针对突破平衡裕度风险值时相关监测指标的实际数值,进行预警信号输出。实现系统整体视角下的空管安全风险预警监控,提高监测时的系统关联性。

(3) 通过系统动力学构建空管安全风险动态预警模型,可以借助计算机及信息科学技术,将其与信息管理系统相结合,从而使其具有较大的实际应用价值。

参考文献(References)

- [1] Hicks M, de Brito G. Civil aircraft warning systems: Who's calling the shots?[J]. *Air & Space Europe*, 1999, 1(1): 45-47.
- [2] Eherts D M. Lessons learned from aviation safety [J]. *Journal of Safety Research*, 2008, 39(2): 141-142.
- [3] Hsu Y-L. From reactive to proactive: Using safety survey to assess effectiveness of airline SMS [J]. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 2008(3): 41-48.
- [4] Stamatelatos M. Probabilistic risk assessment procedures guide for NASA Managers and Practitioners Reliability [J]. *Engineering & System Safety*, 2007, 11(1): 609-618.
- [5] 万健, 李敬, 王衍洋. 基于径向基函数(RBF)网在线建模的民航安全风险监测仿真系统设计与实现[J]. *中国安全科学学报*, 2008, 18(10): 45-49. Wan Jian, Li Jing, Wang Yanyang. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(10): 45-49.
- [6] Stroeve S H, Blom H A P. Systemic accident risk assessment in air traffic by monte carlo stimulation[J]. *Safety Science*, 2009, 47(2): 238-249.
- [7] 崔啸, 周克成, 曹冬冰, 等. 北京市商品住宅系统动力学模型构建及其在预警中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(4): 672-678. Cui Xiao, Zhou Kecheng, Cao Dongbing, et al. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2011, 31(4): 672-678.
- [8] 杜志明. 系统平衡裕度分析方法及其应用实例[J]. *北京理工大学学报*, 2005, 25(10): 926-930. Du Zhiming. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(10): 926-930.

(责任编辑 安莹,刘志远)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。