

文章编号:1674-8190(2022)03-127-10

# 基于管制员工作负荷的扇区开合阀设置研究

何媛<sup>1</sup>,赵晓伟<sup>2</sup>,甘旭升<sup>3</sup>,杨丽薇<sup>3</sup>

(1.西京学院 会计学院,西安 710123)

(2.中船重工集团公司 第705研究所,西安 710077)

(3.空军工程大学 空管领航学院,西安 710051)

**摘要:**对扇区空域实施灵活的开合管理是当前提升空域利用率的主要方法之一,利用实时的空域容量和流量信息可为扇区的开合提供预警信息,提升人力资源的利用率和紧急情况下流量波动的应对能力。基于Wickens的信息处理与认知模型,构建管制员注意力资源与管制工作负荷的关系;基于仓室(SIR)模型,建立管制员注意力资源与管制工作负荷的动力学方程;通过李雅普诺夫稳定性定理证明方程在平衡点处的稳定性,并以此为算法基础,设计扇区运行的开合阀;通过数值模拟,验证管制员注意力资源和剩余工作负荷的演化规律。结果表明:设计的扇区开合阀能够为大流量、大容量环境提供分扇预警,并预测未来管制员的工作负荷情况。

**关键词:**扇区容量;管制员负荷;仓室模型;信息处理与认知;开合阀

中图分类号:V271.4

文献标识码:A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.03.14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Setting of Sector Opening and Closing Valve Based on Controller Workload

HE Yuan<sup>1</sup>, ZHAO Xiaowei<sup>2</sup>, GAN Xusheng<sup>3</sup>, YANG Liwei<sup>3</sup>

(1. School of Accounting, Xijing University, Xi'an 710123, China)

(2. The 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710077, China)

(3. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Flexible open and close management of sector airspace is one of the main methods to improve the utilization of airspace. The full use of real-time airspace capacity and traffic flow information can provide early warning information for sector opening and closing, so as to improve the utilization of human resources and the ability to cope with the huge fluctuation of flight flow in emergency. Based on Wickens' information processing and cognitive model, the relationship between attention resources and control workload is constructed. Based on the susceptible infected recovered (SIR) model, the dynamic equations of attention resources and control workload are established. The stability of the equation at the equilibrium point is proved by Lyapunov stability theorem. Based on this algorithm, the opening and closing valve for sector operation is designed. Through numerical simulation, the evolution rules of attention resources and residual workload of controllers are verified. The sector opening and closing valve can provide sector opening warning for large flow and capacity environment and predict the future workload of controllers.

**Key words:** sector capacity; controller workload; SIR model; information processing and cognition; opening and closing valve

收稿日期:2021-05-10; 修回日期:2021-09-29

基金项目:西京学院科研基金(XJ160222)

通信作者:甘旭升, gxsh15934896556@qq.com

引用格式:何媛,赵晓伟,甘旭升,等.基于管制员工作负荷的扇区开合阀设置研究[J].航空工程进展,2022,13(3):127-136.

HE Yuan, ZHAO Xiaowei, GAN Xusheng, et al. Research on setting of sector opening and closing valve based on controller workload[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 127-136. (in Chinese)

## 0 引言

随着我国经济建设和航空技术的发展,空中交通流量与日俱增,当前制约我国空中交通流量增长的最主要因素仍然是人为因素。由于飞行量的增长使得扇区内管制员的工作负荷加大,在过度疲劳的状况下人为差错发生的概率增加,不得不采取限流措施来确保空域运行整体安全性不受影响。在不影响空域容量的情况下,当前应对空域内交通流增长的最常用方法是对管制扇区进行分扇管理,从而分摊管制员的工作负荷。但目前扇区的分合管理往往是基于经验和定性的分析,会在一定程度上造成人力资源的浪费,且难以应对突发情况下的流量激增问题。通过研究管制员工作负荷和空域容量的关系,设置科学的扇区开合阀,可以有效避免人力资源的浪费,提升空域管理的灵活性,最终实现空域扩容的目的。

扇区空域的容量主要由空域可用率、管制员负荷、空域结构、运行标准等多方面因素决定,但在天气情况良好或空域可用率不受影响的情况下,制约空域容量的最主要因素为管制员的工作负荷<sup>[1]</sup>。国外,B. Edmons<sup>[2]</sup>发现空域态势的演变会对管制员的工作负荷产生较大影响,相对于按照程序指挥的固定管制指令,非固定管制指令是管制员认知能力的重要表现形式,是管制员工作负荷的主要来源之一;R. M. Harris<sup>[3]</sup>首次在构建空域容量计算模型的过程中引入了导航误差、人为因素和随机因素;D. Schmidt<sup>[4]</sup>从管制难度系数的角度出发,研究扇区管制员工作负荷和容量的关系,认为扇区容量受管制难度系数限制,要确保管制总工作负荷不超过设定的阈值;J. Welch等<sup>[5]</sup>将管制员工作负荷达到满负荷的80%时扇区的瞬时容量作为扇区容量值;J. Y. N. Cho等<sup>[6]</sup>对管制员的工作类型进行了分类,并提出了天气影响下的工作负荷模型;L. Liu<sup>[7]</sup>基于复杂网络理论,从管制员工作负荷的角度出发,对复杂天气下的终端区空中交通网络容量进行了评估计算。国内,董襄宁等<sup>[8]</sup>将管制员负荷分为通信负荷、非通信负荷及思考负荷,通过对历史数据的回归分析构建了管制员工作负荷与扇区容量之间的关系;赵征<sup>[9]</sup>考虑了非固定管制指令对管制员工作负荷的影响,进一步修正了管制员工作负荷与扇区容量之间的关系;令璐璐等<sup>[10]</sup>通过对西安终端区内各扇区管

制指令的时长统计,评估了终端区内的负荷分布情况,并采用遗传算法对扇区进行了重新规划,达到了平衡扇区管制负荷的目的;刘继新等<sup>[11]</sup>在考虑管制员负荷和天气影响交通指数(Weather Impact Traffic Index,简称WITI)的情况下,使用神经网络方法评估扇区容量,可实现多种复杂天气下的容量预测;沈志远等<sup>[12]</sup>对国内外管制员负荷评测方法研究进展进行了综述,指出语音疲劳检测是主要研究方向之一。综上所述,当前对管制员工作负荷与扇区容量关系的研究已有一定基础,但这种对应关系呈现显著的静态特性,对于扇区变结构下的管制员工作负荷变化的研究未见报道。

本文基于Wickens的信息处理与认知模型、空室模型构建管制员注意力资源和工作负荷的动力学方程,建立扇区容量和管制员注意力资源的动态转化关系,对扇区开合下管制员工作负荷的变化展开研究,并以管制员注意力资源为标准设置扇区的开合阀,通过数值模拟验证开合阀的有效性。

## 1 管制员负荷模型

现有研究中对管制员负荷的分类主要有通信负荷、非通信负荷及思考负荷。通信负荷主要包括无线电陆空通话和电话协同;非通信负荷包括飞行进程单的书写、飞行动态的监控和值班操作系统的操作行为;思考负荷指管制指令发布前或操作执行前的决策行为。管制员的工作负荷为三类负荷的相加值,如式(1)所示。

$$\begin{cases} WL = WL^{\text{com}} + WL^{\text{uncom}} + WL^{\text{think}} \\ WL^{\text{com}} = \left( \sum_i k_i \cdot N_i + m \cdot N \right) \cdot Q \\ WL^{\text{uncom}} = \sum_i l_i \cdot N_i + WL^{\text{sys}} + WL^{\text{monit}} \\ WL^{\text{sys}} = N \cdot R \\ WL^{\text{think}} = \omega l^{\text{heading}} \cdot n_1 + \omega l^{\text{speed}} \cdot n_2 + \omega l^{\text{altitude}} \cdot n_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $WL^{\text{com}}$ 为通信负荷; $WL^{\text{uncom}}$ 为非通信负荷; $WL^{\text{think}}$ 为思考负荷; $k_i$ 为扇区内航路*i*上程序报告点的数量; $N_i$ 为扇区内航路*i*上单位时间段内进入的航空器数量; $m$ 为航空器进行管制交接需要的平均指令数; $N$ 为扇区内单位时间段内进入的航空器数量; $Q$ 为每条指令消耗的平均负荷; $l_i$ 为扇区内航路*i*上每架航空器书写进程单的负荷消耗; $WL^{\text{sys}}$ 为系统操作消耗的管制负荷; $R$ 为平均每架航空器

需要的系统操作负荷;  $WL^{monit}$  为监控负荷, 与扇区内航空器数量呈非线性关系,  $WL^{monit} = \frac{N}{N_e} sa$ ;  $wl^{heading}$  为指挥飞机航向变化的工作负荷;  $wl^{speed}$  为指挥速度变化的工作负荷;  $wl^{altitude}$  为指挥高度变化的工作负荷;  $n_1, n_2, n_3$  为相应的管制指令数量。

但该模型仍存在一定的缺陷, 一是通信指令数量与航空器数量并非呈线性关系; 二是管制员的思考行为与一系列的执行行为多为并行推进, 很难分离计算, 模型中的工作负荷会比真实值偏大; 三是管制员负荷的计算模型中只考虑了负荷与空域容量的关系, 并没有考虑管制员自身精力的恢复和工作负荷的承载能力, 因此需要对模型做出进一步改进。为了建立起管制员与空域容量的关系, 本文以管制员注意力资源为入手, 构建“注意力—工作负荷—扇区容量”之间的动态转化关系。

### 1.1 管制员注意力耗损模型

#### 1.1.1 Wickens 的信息处理认知模型

2000年, C. D. Wickens 首先提出了人的“信息处理认知”模型, 该模型将人的认知和决策过程划分为四个阶段, 分别为信息接收、信息分析、决策与计划以及执行阶段<sup>[13-14]</sup>。在模型中, 人作为信息处理器存在, 在接受外界信息的基础上开展信息的分析, 并在对信息进行一定的处理和理解后作出决策和规划, 最后按照决策和规划执行相关操作。人在进行这一系列信息处理过程中, 注意力和记忆力资源都起到了辅助作用, 信息处理的每一阶段都需要消耗一定的注意力和记忆力资源。具体过程如图 1 所示。

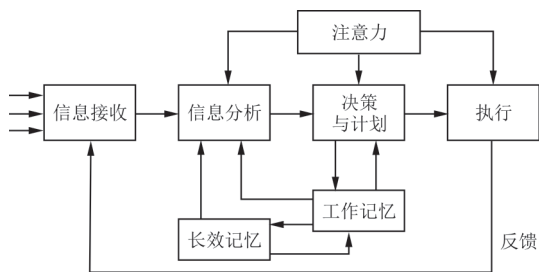


图 1 信息处理认知模型

Fig. 1 Information processing and cognitive model

#### 1.1.2 管制员信息处理与认知模型

管制员在管制值班过程中的系列行为同样符合信息处理认知模型描述。信息接收过程主要

指航行情报信息的接收和空中动态信息的掌握, 在信息接收基础上, 管制员需要将其进行理解消化, 并转化为空中态势的认知。在转化过程中, 需要及时提取一系列的关键信息, 主要包括航空器的空中位置、运行趋势和潜在的飞行冲突等。在态势认知的基础上, 管制员需要对飞行冲突的调配进行决策, 实现冲突的解脱, 同时对航空器下一时刻的飞行方法进行规划。最后, 管制员按照预先构想发布一系列指令信息, 按规定书写进程单, 并对达到扇区边界的航空器实施管制移交。在管制指令发布后, 管制员会持续监控空中动态, 进入下一轮信息处理过程。本文暂不考虑管制员记忆力资源的消耗以及记忆力资源与注意力资源之间的相关性, 认为两者是相互独立的, 重点对注意力资源的耗损过程展开建模分析。在工作过程中, 管制员需要不断对信息进行处理、决策和执行, 这一过程会不断消耗注意力资源, 注意力资源的消耗与空中航空器数量有直接关系。当管制员注意力资源低于一定阈值时, 人为差错产生的概率会增大, 需要及时调整管制员班组, 控制管制运行的风险等级。管制员信息处理认知模型如图 2 所示。Wickens 的信息处理模型描述的是广义的人的信息处理过程, 对信息来源的描述有缺失, 单纯基于该模型很难开展具体化的分析, 尤其是无法进行量化的建模分析。图 2 根据管制员的具体工作过程对模型进行了拓展和丰富, 能够更为具体地描述管制员的信息接收来源、信息处理过程及操作行为, 便于下一步开展更为详细的定量分析。

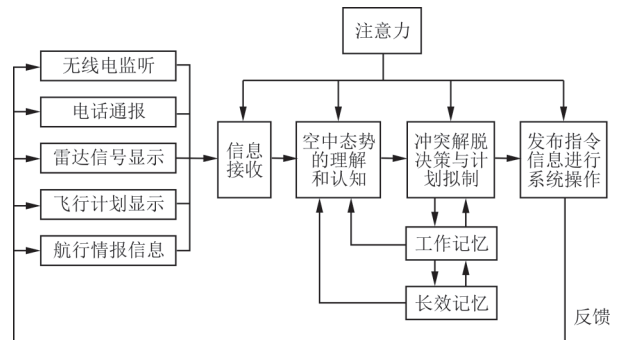


图 2 管制员信息处理认知模型

Fig. 2 Controller's information processing and cognitive model

### 1.2 基于容量的管制员工作负荷计算方式

管制员的工作负荷与空域容量有巨大关联,

而通信负荷又占据了较大部分。管制员的通信工作负荷主要来自于航空器的管制指挥,包括程序性的固定管制指令和实施飞行冲突解脱的非固定管制指令。程序性的管制指挥主要包括管制指挥移交、强制报告点的报告及按计划对航行诸元的调整。固定管制指令是每架航空器都需要执行的程序性动作,管制工作负荷与空中航空器呈简单线性关系。由于每架航空器在指挥交接时均需要进行程序性的管制协调与交接,将电话和陆空通话中的管制协调与移交工作均纳入固定指令的范畴之内。非固定管制指令则是因为扇区区域内航空器数量的增加,航空器间的飞行冲突增多,由此产生进行冲突解脱调配的管制指令。非固定管制指令与航空器数量不呈简单线性关系。根据一项研究的统计信息显示<sup>[9]</sup>,我国终端区内非固定指令数量的增长与飞行流量呈现三个阶段的变化关系。

起始阶段,扇区空域内航空器的数量较少,飞行冲突的产生概率较低,随着航空器数量的增加,非固定指令的增长与航空器数量呈简单线性增长关系,关系式为

$$I_1 = K_{11} \cdot N + h \quad (2)$$

式中: $I_1$ 为起始阶段非固定指令数; $K_{11}$ 为常数; $h$ 为小于零的常数,表示航空器数量较少时,非固定指令仍然可能为零。

平稳增长阶段,扇区内航空器数量适中,此时非固定管制指令与航空器数量仍然呈一次线性关系,但斜率更小,非固定指令数量增长放缓,如式(3)所示。

$$I_2 = K_{12} \cdot N + I_{j2} \quad (3)$$

式中: $I_2$ 为平稳增长阶段非固定指令数; $K_{12}$ 为常数; $I_{j2}$ 为起始阶段结束时非固定指令的数量。

快速增长阶段,扇区内航空器数量较多,呈现拥堵趋势,飞行冲突发生概率显著加大,且增速有加快趋势,此时管制员需要频繁地干预航空器的程序性飞行。当扇区内航空器数量达到一定数值,非固定指令数量过于庞大,超出管制员的处理能力,空中交通秩序趋于崩溃。快速增长阶段非固定指令与航空器数量变化如式(4)所示。

$$I_3 = K_{13} \cdot N^2 + K_{14} \cdot N + I_{j3} \quad (4)$$

式中: $I_3$ 为快速增长阶段非固定指令数; $K_{14}$ 为常数; $I_{j3}$ 为平稳增长阶段结束时非固定指令的数量。

由此可得,非固定指令数与航空器数量的变化关系。由于扇区内航空器的数量与固定指令数呈线性关系,且综合指令数量为固定指令数与非固定指令数的线性叠加,因此可得出指令数与空中航空器的变化关系式为

$$\begin{cases} I = K_{11} \cdot N + h + K_{15} \cdot N & (N \leq N_1) \\ I = K_{12} \cdot N + I_{j2} + K_{15} \cdot N & (N_1 < N \leq N_2) \\ I = K_{13} \cdot N^2 + K_{14} \cdot N + I_{j3} + K_{15} \cdot N & (N_2 < N) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K_{15}$ 为固定指令的增长斜率,为常数; $N_1$ 和 $N_2$ 分别为第一阶段和第二阶段的航空器瞬时容量。

根据空域结构的不同,式(5)各系数会有一些的差异。结合管制员工作负荷的计算方法,可以实现扇区容量、航空器数量及管制员工作负荷的相互转化。监控工作负荷较为特殊,不同于其他类型的工作负荷,其具有不可堆积的特性。无论是程序性的管制指挥指令还是飞行冲突的调配指令,或是管制协同工作,其都是可堆积累加的。但监控工作却不同,其只与空中态势的复杂度有关,即使管制员当前掌握了动态,在下一时刻仍需要继续实施监控行为,且工作负荷并不会减轻。空中动态监视的负荷不仅与空中航空器数量相关,还与管制员自身精力相关,当航空器数量大于一定阈值,监控负荷达到饱和,大量监控信息将无法被管制员接收。监控工作负荷如(6)式所示。

$$\begin{cases} WL^{\text{monit}} = \frac{N}{N_e} sa & (0 \leq N \leq N_e) \\ WL^{\text{monit}} = sa & (N > N_e) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $N_e$ 为管制员监控负荷达到饱和时的航空器数量; $s$ 为常数,代表监控工作负荷耗损率; $a$ 为管制员当前的注意力水平。

将管制工作负荷分为可堆积工作负荷和不可堆积工作负荷,可堆积工作负荷既可以累计,也可以被消耗;不可堆积工作负荷与管制员注意力状态和空中态势相关,既不会累加,也不会被消耗。新的管制工作负荷计算公式如式(7)所示。

$$\begin{cases} WL = WL^{\text{com}} + WL^{\text{uncom}} \\ WL^{\text{com}} = IQ \\ WL^{\text{uncom}} = bIQ + WL^{\text{sys}} + WL^{\text{monit}} \\ WL^{\text{sys}} = NR \\ WL^{\text{monit}} = \frac{N}{N_e} sa \end{cases} \quad (7)$$

式中: $b$ 为不考虑非固定指令条件下单架航空器的飞行进程单平均工作负荷与通信负荷之比。

思考负荷主要体现为管制员作出每一个决策指令的工作消耗,由于没有具体的行为体现,因此思考负荷的大小很难被准确地观测到,在大多数情况下是基于管制员的主观经验得出。本文对管制员思考负荷并不单独列出,而是认为其与管制指令的形成紧密结合,在观测管制指令的负荷大小的同时,按一定比例扩大了 $Q$ 值。在管制员的具体指挥过程中,管制指令的发送需要同步进行飞行进程单的登记。例如:从管制移交的确认、高度层的改变、速度的变化、报高点的确认等,均需要在飞行进程单中体现。因此,在不考虑程序性指挥以外的空地交流工作负荷的情况下,可假设飞行进程单工作负荷与通信负荷成比例增长。程序性指挥以外的空地交流往往伴随一些特殊情况,且数量较少,很难列入一并计算,因此论文暂不考虑。

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = \Lambda - \frac{N}{N_e} sa - NR\beta - bIQ\beta - Q\beta I \\ \frac{dI}{dt} = [I(N) - I(N - N_{\text{flow}})]Q - \beta I \\ \frac{dWL}{dt} = N_{\text{flow}}R + (1+b)[I(N) - I(N - N_{\text{flow}})]Q - NR\beta - \beta(1+b)I \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中关于工作负荷的计算可通过前两式解耦,故本文重点分析前两式的转化关系。在管制扇区的运行中,通常希望将扇区内的航空器数量、管制员的注意力状态、空中剩余工作负荷维持在一个稳定的状态。当航空器数量过多时,及时发布流量控制预警信息,避免扇区内的拥堵;当航空器数量开始减少时,则及时解除流量控制,直至当日飞行计划全部实施。因此假设某时段内扇区内航空器数量维持在 $N$ ,单位时间内进出扇区的航空器数量为常数 $N_{\text{flow}}$ ,单位时间间隔足够小,空中非固定指令数量未发生阶段性改变。则可将管制员注意力资源和空中剩余指令方程记为

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = W - ra - (b+1)\beta QI \\ \frac{dI}{dt} = M - \beta I \end{cases} \quad (9)$$

$$W = \Lambda - NR\beta \quad (10)$$

### 1.3 考虑注意力恢复率的管制工作负荷模型

本文基于仓室模型<sup>[15-17]</sup>构建管制员注意力资源与工作负荷之间的动力学方程。SIR模型能够很好得建立起各个仓室之间转化的动力学关系,同样可被用于管制员注意力资源与管制工作负荷的转化过程研究。将管制员的注意力资源与未被执行的工作负荷视为两个隔离的仓室。管制员在刚上岗值班时注意力资源处于充沛状态;在值班工程中,信息的接收、理解、决策、执行等行为都需要消耗注意力资源。同时,管制员的注意力资源具有一定的恢复能力,在工作负荷较小的情况下,管制员能够始终保持较好的精力状态;在空域内航空器数量较多,工作负荷较大的情况下,管制员的注意力资源趋于枯竭,疲劳感逐渐上升,不但指令的执行效率会降低,且人为差错发生的概率增加,进而影响空域的容量判断。管制员注意力资源和空中剩余工作负荷转化动力学方程为

$$r = \frac{N}{N_e} s \quad (11)$$

$$\begin{cases} M = K_{11}N_{\text{flow}} + K_{15}N_{\text{flow}} & (N < N_1) \\ M = K_{12}N_{\text{flow}} + K_{15}N_{\text{flow}} & (N_1 \leq N < N_2) \\ M = 2K_{13}NN_{\text{flow}} + K_{14}N_{\text{flow}} + K_{15}N_{\text{flow}} & (N_2 \leq N) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $N_1$ 为第一阶段非固定指令阈值, $N_2$ 为第二阶段非固定指令阈值, $N_1, N_2$ 的衡量标准为航空器的瞬时容量。

记 $x_1 = a, x_2 = I$ ,则方程(9)可改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = W - rx_1 - (b+1)\beta Qx_2 \\ \dot{x}_2 = M - \beta x_2 \end{cases} \quad (13)$$

方程平衡点的研究对管制员班组资源的管理非常重要,通常希望能将工作负荷和管制员注意力资源维持在适中的条件下。令 $\dot{x} = 0$ ,则可得到方程平衡点为

$$\begin{cases} x_{01} = \frac{W - (b+1)QM}{r} \\ x_{02} = \frac{M}{\beta} \end{cases} \quad (14)$$

根据李雅普诺夫稳定性判定方法<sup>[18]</sup>,该平衡点是大范围渐进稳定的,证明方法如下。

将坐标原点移至平衡点处,令:

$$\begin{cases} x_1^* + \frac{W - (b+1)QM}{r} = x_1 \\ x_2^* + \frac{M}{\beta} = x_2 \end{cases}$$

则可得新的状态方程:

$$\dot{x}^* = \begin{bmatrix} -r & -(b+1)Q\beta \\ 0 & -\beta \end{bmatrix} x^* \quad (15)$$

根据式(15)中的系统矩阵,可构造下式:

$$A^T P + PA = -I \quad (16)$$

式中: $A$ 为式(15)的系统矩阵; $P$ 为构造的正定的实对称矩阵。

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{2r} & \frac{-(b+1)Q\beta}{2r(\beta+r)} \\ \frac{-(b+1)Q\beta}{2r(\beta+r)} & \frac{(b+1)^2 Q^2 \beta^2 + r(r+\beta)}{2r(\beta+r)\beta} \end{bmatrix}$$

使用 Sylvester 定理判定其正定性:

$$p_{11} = \frac{1}{2r} > 0$$

$\det|P| =$

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{2r} & \frac{-(b+1)Q\beta}{2r(\beta+r)} \\ \frac{-(b+1)Q\beta}{2r(\beta+r)} & \frac{(b+1)^2 Q^2 \beta^2 + r(r+\beta)}{2r(\beta+r)\beta} \end{vmatrix} = \frac{(\beta+r)^2 + (b+1)^2 Q^2 \beta^2}{4r(\beta+r)^2 \beta}$$

由于  $1 > \beta > 0, 1 > r > 0$ , 故  $\det|P| > 0$ , 存在这样的正定实对称矩阵使式(16)成立。因此系统(式(13))的平衡点  $(x_{01}, x_{02})$  不但是唯一的平衡点,而且大范围渐进稳定。由于随着时间的推移,管制员的注意力资源和空中剩余工作负荷都将稳定在平衡点附近,因此,通过控制平衡点的位置和收敛速度,可对扇区容量的管控和班组资源的管理起到很大的帮助作用。

## 2 扇区开合阀的设置

### 2.1 扇区开合下管制工作负荷变化

在扇区整体空间范围不变的情况下,分扇的管理并不能改变原有工作负荷的大小,只是将责任区域分割后,由更多的管制员分摊原有工作负荷。由于分扇面积小,程序性指挥工作减少,监控范围变小,可实现分扇内工作负荷的降低。但在交通流不变的情况下,由于分扇间需进行管制交接,因此总工作量会有所上涨。分扇后,扇区  $i$  的管制员注意力资源和剩余指令的动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{da_i}{dt} = W_i - r_i a_i - (b+1)Q\beta I_i \\ \frac{dI_i}{dt} = \frac{kcN_{\text{flow}}}{2} + m_i M - \beta I_i \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, z) \quad (17)$$

$$r_i = p_i \frac{N}{N_e} s \quad (18)$$

$$k = \frac{\sum_j N_{\text{flow}_j}}{N_{\text{flow}}} \quad (19)$$

式中: $p_i$ 为子扇区  $i$  内的航空器所占比例,该占比越大,则该子扇区管制员监控负荷越大; $m_i$ 为分扇后,扇区  $i$  内的流量所占比例,比例越大,剩余指令生成速率越快; $k$ 为子扇区之间需要管制交接的航路  $j$  上的飞行流量与扇区总流量之比; $c$ 为管制交接所需的平均指令数。

此时子扇区的平衡点为

$$\begin{cases} x_{01_i} = \frac{W_i - (b+1)Q(m_i M + \frac{kcN_{\text{flow}}}{2})}{r_i} \\ x_{02_i} = \frac{m_i M + \frac{kcN_{\text{flow}}}{2}}{\beta} \end{cases} \quad (20)$$

从式(20)平衡点的变化可以看出:在保持原有交通流不变的情况下,分扇后子扇区内管制员班组的注意力资源将维持在更高的水平,而空中剩余工作负荷的数量会维持在更低水平,从而实现扩容的目的。

### 2.2 扇区开合标准的设置

本文对扇区开合标准的设置基于管制员工作负荷的标准划分。有关管制员工作负荷的划分和

实际运行标准,国际上已有相关的建议标准<sup>[8]</sup>。欧洲航行安全组织(Eurocontrol)在有关扇区空域容量评估的技术报告中给出了欧洲扇区空域运行中管制工作负荷阈值的建议,如表 1 所示。

表 1 欧洲扇区空域运行中管制工作负荷阈值建议  
Table 1 Suggestions on the threshold of controller workload in the operation of European sector airspace

管制负荷阈值	负荷等级	1 小时内工作时间/min
0%~17%	超轻度负荷状态	0~10
18%~29%	轻度负荷状态	11~17
30%~53%	中度负荷状态	18~31
54%~69%	高度负荷状态	32~41
70%(含)以上	超负荷状态	42~60

扇区开合阀设置的目的主要在于提前对可能发生的超负荷工作状态进行预警,从而能及时对班组人员进行加强,降低单个管制员的工作强度,

减小人为差错发生概率。但扇区开合阈值的设定也会影响管制员班组资源的利用率。若阈值设置过低,虽能够留有较大的安全裕度,但管制员群体的总体工作时间增加,需要更多的财力投入和设备损耗,增加了运行成本。若扇区阈值设置过高,则会使管制员过早进入到高度负荷和超负荷状态,影响空域运行的整体安全水平。但扇区开合阈值的评估又是一个较为复杂的问题,涉及设备运行成本、流量增加所产生的效益、人力运行成本及风险水平的计算。受篇幅限制,本文主要讨论扇区开合阀的自动开合预警技术,不对开合阈值的评估展开研究。参考 Eurocontrol 的标准,本文将扇区的管制员工作高度负荷下限,即 32 min 作为扇区开合的阈值标准。扇区开合阀设置如图 3 所示。

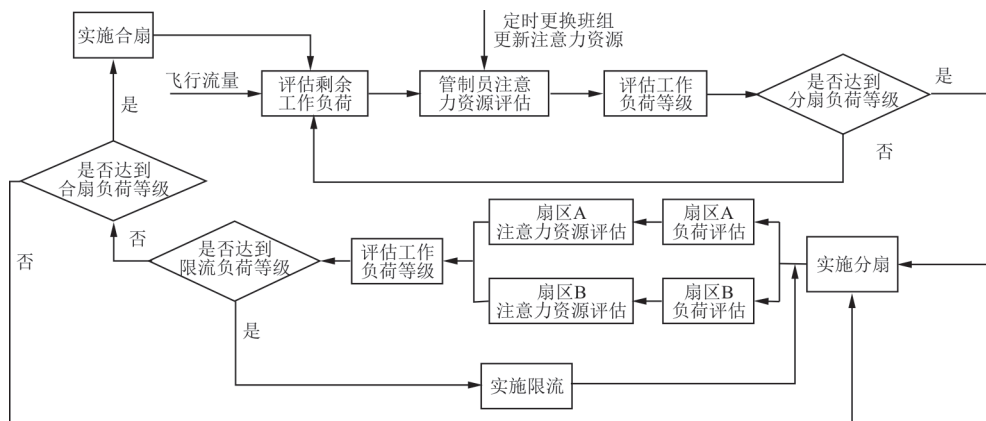


图 3 扇区开合阀工作框架

Fig. 3 Working frame of sector opening and closing valve

扇区的开合标准是基于管制员的注意力资源状态制定的,而从式(20)可以看出:注意力资源的稳定点状态与扇区流量关系巨大。当单位时间段内的流量较大时,管制员注意力资源会稳定在更低的状态,工作负荷会加重。当达到分扇阈值时,系统提出分扇建议告警。在实施分扇后,管制员仍然面临不断增大的飞行流态势,若再次达到某一子扇区的限流标准,则系统提示及时发布流控告警,控制管制员工作负荷。当飞行流量高峰期渡过,交通流量逐渐回落至合扇标准,则系统再次提示进行合扇,并解除限流措施。

### 3 仿真实证

通过管制员注意力资源与空中剩余指令动力

学方程的构建,本文将管制员工作负荷、管制员精力状态与扇区航空器数量三者之间建立起了转化关系,通过扇区开合阀的使用可控制管制员的注意力资源消耗,使空中交通流稳定在合理范围内。算法中部分系数会随着空域结构的不同产生差异,需要根据实际情况进行统计和数据拟合后确定,特别是固定指令、非固定指令与航空器数量的线性变化关系需要根据历史数据进行拟合后确定。但部分文献已做了大量相关的工作,因此,参考已有文献数据统计信息展开仿真研究。在赵征<sup>[9]</sup>的研究中,对上海进近管制区航空器 15 min 内进离港的历史数据进行处理后,得到的三个阶段航空器数量和管制工作负荷变化曲线系数如表 2 所示。

表2 扇区内航空器数量与管制员工作负荷关联表  
Table 2 Correlation table between the number of aircraft in the sector and the workload of controllers

增长阶段	架数/架	工作负荷饱和值/s	关系式系数
起始阶段	1~8	393	70.43
平稳增长阶段	9~11	472	30.86
快速增长阶段	11架以上	900	3.23

空中剩余指令工作负荷表达式为

$$\begin{cases} I = 70.43N - 170.44 & (N \leq 8) \\ I = 30.86N + 132.54 & (8 < N \leq 11) \\ I = 3.23N^2 + 23.02N - 172.05 & (11 < N) \end{cases} \quad (21)$$

从式(21)可得:在 15 min 内,若扇区的平均容量达到 15 架航空器,管制员工作负荷将达到饱和。基于此式可开展管制员注意力资源与空中剩余工作负荷的仿真模拟。

### 3.1 合扇下的管制工作负荷变化

在假设管制员注意力恢复率恒定的情况下,通常可认为经过 30 min 的休息可完全恢复状态。区域一级管制员的班组更换时间为 2 h,因此可将注意力资源的上限设置为 7 200 s,每分钟恢复的数值为 4,具体参数设置如表 3 所示。

表3 管制员注意力资源消耗模型参数设置  
Table 3 Parameter setting of controller attention resource consumption model

序号	名称	数值
1	注意力初始值 $a_0/s$	7 200
2	剩余指令初始值 $I_0/s$	800
3	注意力恢复速率 $\Lambda$	4
4	飞行流量 $N_{flow}/[架 \cdot (15 \text{ min})^{-1}]$	10
5	指令执行代价 $Q$	4
6	动态监控注意力耗损率 $s$	0.000 5
7	剩余指令执行率 $\beta$	0.005
8	最大监控航空器数量 $N_c/架$	14
9	进程单注意力消耗比 $b$	0.4
10	系统操作负荷 $R$	1

通过数值模拟,可得出管制员的注意力变化曲线如图 4 所示。

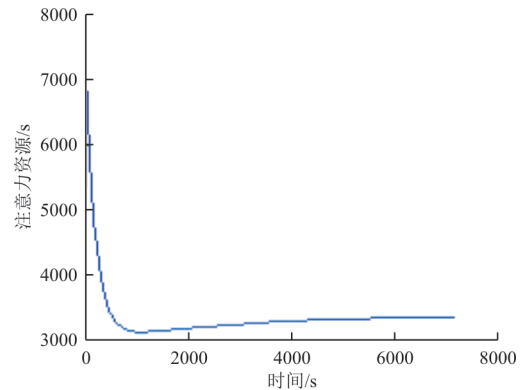


图4 管制员注意力资源变化曲线

Fig. 4 Curve of controller's attention resources change

空中剩余指令工作负荷变化曲线如图 5 所示。

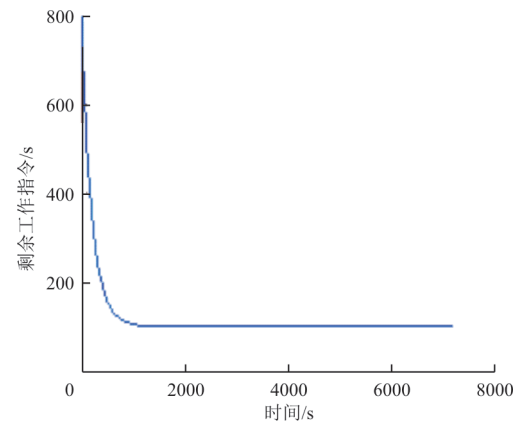


图5 剩余指令工作负荷变化曲线

Fig. 5 Residual command workload change curve

在该状态下,平衡点为(3 377.205 3, 98),工作时间占比为 53.1%,达到中度负荷的上限值。若飞行流量继续上涨,需要及时采取分扇措施,分流工作负荷。

### 3.2 扇区开合阀工作下的管制工作负荷变化

在飞行流量持续增大的情况下,原有扇区班组人员工作负荷持续增大,由中度负荷向高度负荷和超负荷转变,管制员疲劳感上升,需要立即实施分扇运行。

假设原有扇区流量增大为 14 架次(每 15 min),瞬时容量同样达到 14 架次,显然管制员工作负荷即将达到饱和状态,在实际工作中无法运行。分扇后变为 A 扇区和 B 扇区,具体参数设置



如表4所示。

表4 分扇条件下管制员注意力资源消耗模型参数设置  
Table 4 Parameter setting of controller's attention resource consumption model under sector separation condition

序号	名称	数值
1	注意力初始值 $a_0/s$	7 200
2	剩余指令初始值 $I_0/s$	663
3	注意力恢复速率 $\Lambda$	4
4	总飞行流量 $N_{flow}/[\text{架} \cdot (15 \text{ min})^{-1}]$	14
5	初始航空器数量 $N_0/\text{架}$	14
5	扇区A飞行流量占比 $m_1$	0.5
6	扇区B飞行流量占比 $m_2$	0.5
7	扇区A航空器占比 $p_1$	0.5
8	扇区B航空器占比 $p_2$	0.5
9	子扇区间管制交接流量比 $k$	0.4
10	管制交接所需指令数 $c/\text{条}$	3

其余参数设置与合扇情况一致,当管制员注意力资源突破中度负荷阈值时,扇区实施分扇运行,分扇的阈值为3 312 s。采用开合阀后的扇区管制员注意力资源变化运行曲线如图6所示。

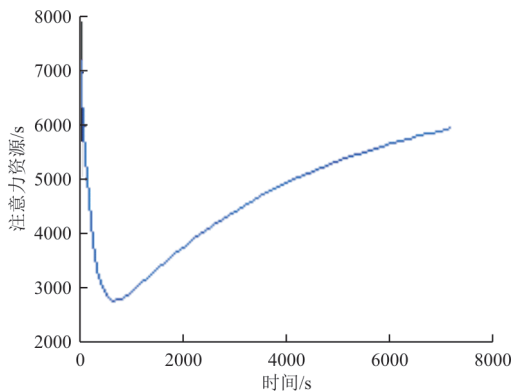


图6 扇区开合阀工作下管制员注意力资源变化曲线  
Fig. 6 Curve of controller's attention resources change under the operation of sector opening and closing valve

从图6可以看出:在起始阶段,由于还未进行分扇运行,管制员在高强度工作状态下注意力资源迅速被消耗;在3312 s时,扇区开合阀达到阈值,而后转换为分扇模式运行;在695 s处,管制员注意力资源将为最低值2 700 s,为高度负荷状态;分扇之后,管制员注意力资源在很快迎来拐点并呈上

升趋势,但在换班前并未达到平衡态,分扇后的平衡点为(6 895.192, 81.284)。空中剩余工作负荷的变化趋势如图7所示。

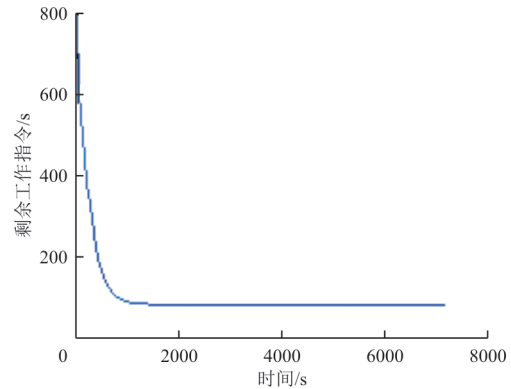


图7 扇区开合阀工作下空中剩余工作指令负荷变化曲线  
Fig. 7 Variation curve of air residual work command load under the operation of sector opening and closing valve

## 4 结 论

(1) 在管制员注意力资源恢复率恒定的情况下,仓储模型在平衡点处是大范围渐进稳定的,与初始状态无关,因此可通过对平衡点的调控来管理管制员的工作负荷水平。

(2) 基于Wickens和SIR模型构建的管制员注意力资源消耗模型具有工作负荷的预测能力,工作负荷的预测主要基于空中的容量和流量信息,基于此模型构建的扇区开合阀能够为管制员班组资源和空域的动态管理提供决策咨询。

(3) 从管制员工作负荷的角度来看,分扇对容量的提升是相当显著的,但在实际工作中,受空域结构和空域可用率等因素影响,分扇不一定能够起到扩容作用,此时应及时采取限流或分流等措施避免管制员注意力资源过度损耗而影响飞行安全。

## 参考文献

- [1] 董襄宁. 扇区容量评估及复杂性分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.  
DONG Xiangning. Sector capacity evaluation and complexity analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [2] EDMONS B. Syntactic measures of complexity[D]. Man-

- chester: University of Manchester, 1999.
- [3] HARRIS R M. Models for runway capacity analysis[J]. Defense Technology Information Center, 1972, 3: 1-129.
- [4] SCHMIDT D. On modeling ATC work load and sector capacity[J]. Journal of Aircraft, 1976, 13(7): 531-537.
- [5] WELCH J, ANDREWS J, MARTIN B D. Macroscopic workload model for estimating en route sector capacity[C]// 7th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Spain: NASA, 2007: 1-10.
- [6] CHO J Y N, WELCH J D, UNDERHILL N K. Analytical workload model for estimating en route sector capacity in convective weather[C]// 9th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. Berlin: [s. n. ], 2011: 1-10.
- [7] LIU L. Terminal airspace capacity evaluation model under weather condition from perspective of a controller[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018(5): 1-9.
- [8] 董襄宁, 胡明华, 苏璟. 基于管制员工作负荷的终端区容量评估[J]. 航空计算技术, 2011, 41(1): 5-9.  
DONG Xiangning, HU Minghua, SU Jing. Terminal capacity assessment based on workload of ATC[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(1): 5-9. (in Chinese)
- [9] 赵征. 空域容量评估与预测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
ZHAO Zheng. Research on airspace capacity assessment and forecast[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [10] 令璐璐, 罗军. 基于管制员负荷的西安终端区扇区优化[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 293-298.  
LING Lulu, LUO Jun. Research on Xi'an terminal sector optimization on controller workload[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 293-298. (in Chinese)
- [11] 刘继新, 朱学华, 吴懿君, 等. 考虑 WITI 与管制员工作负荷的扇区容量评估[J]. 航空计算技术, 2018, 48(6): 11-15.  
LIU Jixin, ZHU Xuehua, WU Yijun, et al. Sector capacity assessment based on WITI and controllers' workload[J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(6): 11-15. (in Chinese)
- [12] 沈志远, 魏义涛, 闫永刚, 等. 空中交通管制员疲劳检测与管理综述[J]. 航空工程进展, 2021, 12(6): 26-38.  
SHEN Zhiyuan, WEI Yitao, YAN Yonggang, et al. A review on fatigue detection and management for air traffic controllers[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(6): 26-38. (in Chinese)
- [13] WICKENS C D, HOLLANDS J G. Engineering psychology and human performance [M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall Press, 2000.
- [14] 郝红勋. 民航飞行员人因失误评价模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.  
HAO Hongxun. Study on human error evaluation models for civil aviation pilots[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 崔玉美, 陈姗姗, 傅新楚. 几类传染病模型中基本再生数的计算[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(4): 14-31.  
CUI Yumei, CHEN Shanshan, FU Xinchu. The thresholds of some epidemic models[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14(4): 14-31. (in Chinese)
- [16] KERMACK W O, MCKENDRICK A G. Contribution to the mathematical theory of epidemics[J]. Proceeding of the Royal Society A, 1927, 115: 700-721.
- [17] LEE J, KIM J, KWON H D. Optimal control of an influenza model with seasonal forcing and age-dependent transmission rates[J]. Journal of Theoretical Biology, 2013, 317: 310-320.
- [18] 张嗣瀛, 高立群. 现代控制理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
ZHANG Siying, GAO Liqun. Modern control theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)

#### 作者简介:

何 媛(1987—),女,硕士,讲师。主要研究方向:非线性系统建模。

赵晓伟(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:非线性系统建模。

甘旭升(1971—),男,博士,副教授。主要研究方向:空域管理。

杨丽薇(1985—),女,博士,副教授。主要研究方向:空域管理。

(编辑:马文静)