

# 交通复杂度因素对空中交通管制员脑力 负荷与情境意识的影响\*

杨家忠\*\*<sup>1</sup> Esa M. Rantanen<sup>2</sup> 张侃<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国民航飞行学院航空人因与工效学实验室, 广汉, 618307)(<sup>2</sup> Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA)

(<sup>3</sup> 中国科学院心理研究所, 北京, 100101)

**摘要** 采用雷达管制模拟任务,综合考察两个交通复杂度因素:管制扇区内航空器的动态变化特性,如飞行速度、飞行高度与航向的变化,以及扇区内的航空器数量,及其交互作用对管制员作业表现的影响。结果表明,同管制扇区内航空器的数量一样,航空器的动态变化特性也会显著增加管制员的脑力负荷,降低管制员的情境意识,导致管制员化解冲突的时间延长。研究结果提示,随着飞行流量的稳步增长及空中交通动态变化特性的日趋增强,在采用流量管理、扇区的灵活划分及自由飞行等策略时,应充分考虑航空器数量之外的一些交通复杂度因素。

**关键词** 交通复杂度 空中交通管制员 脑力负荷 情境意识 冲突化解

随着全球及各地区飞行流量的稳步增长,空中交通动态变化的特性日趋增强,空管系统面临的压力越来越大<sup>[1][2]</sup>。流量控制是目前空中交通管制系统采用的主要应对策略,即特定扇区的航空器数量将达到限定值时,就表明管制员可能超负荷工作,流量管理系统就发出红色警报<sup>[1]</sup>。许多研究以管制扇区内航空器的数量来预测管制员脑力负荷,发现航空器的数量是最有效的指标<sup>[1][3][4]</sup>。

航空器的数量能充分反映管制员在特定的时间内需要执行的常规任务数,航空器飞行过程的一些动态特性,如航空器的高度或航向处于过渡状态,以及冲突角等因素则在某种程度上决定任务的难度,是交通复杂度的另一重要来源,同样会导致管制员脑力负荷与操作差错的增加<sup>[4][5][6]</sup>。

越来越多的研究者认为情境意识也可以用来标识管制员的作业表现,情境意识不好的管制员会出现更多的技术差错(如复诵高度错误)和认知差错(如知觉错误与记忆错误)<sup>[7]</sup>,失去情境意识而不能完成复杂的认知任务可能会导致灾难性的后果<sup>[8]</sup>。

以往的研究更多集中于扇区内的航空器数对脑力负荷的影响,综合两种交通复杂度变量全面考察

对管制员作业表现影响的研究尚比较缺乏。本研究综合考察航空器的动态飞行特性与管制扇区内的航空器数对管制员的脑力负荷、情境意识,以及冲突探测的影响。

## 1 方法

1.1 被试 空中交通管制专业 51 名男生参加实验,年龄在 20—24 岁之间( $M = 22.02$  岁,  $SD = 0.79$  岁)。被试都接受过相同时间的雷达管制模拟训练,熟悉雷达管制操作,知道航空器在区域飞行时的间隔标准。

1.2 实验仪器 雷达管制模拟任务用 C++ 编写,程序运行在 IBM 兼容机上,使用 19 寸彩色显示器,显示分辨率为  $1280 \times 1024$  像素,刷新频率 75Hz。程序可以较为逼真地模拟雷达管制环境,能够以时间序列的形式记录管制员在任务过程中的所有键盘与鼠标操作行为。

1.3 任务情境 实验采用 2(情境难度:易和难)  $\times$  2(同时处于扇区内的航空器数:少和多)被试内设计,因此研究设计了 4 个管制情境,实验情境的具体设计参数见表 1。

表 1 实验情境的参数设计

参数	情境 1	情境 2	情境 3	情境 4
总计航空器(架)	17(少)	30(多)	21(少)	37(多)
情境难度	易	易	难	难
扇区内的航空器(平均:架)	4.59	8.38	4.31	8.79
扇区内的航空器(最多:架)	7	11	6	11
爬升/下降航空器的比例	0.00	0.00	0.40	0.43
航空器的地速(平均:海里)	329.59	319.67	427.14	436.89
垂直间隔标准(米)	300	300	600	600
高度请求(次)	6	6	6	6
潜在冲突数(个)	5	8	13	21

1.4 实验任务 实验过程中,被试需要以数据链通讯的方式执行如下的五项管制任务:

\* 本研究得到国家自然科学基金项目(60472113/F01 与 30700237/C010905)的资助。

\*\* 通讯作者: 杨家忠。E-mail: jiazhongyang@msn.com

(1)接受移交:在航空器飞越扇区进入点之前,被试应该通过点击航空器的呼号接受移交,在点击航空器的呼号后,在其当前的飞行高度数字前会出现“R”,表示该航空器已处在管制之下。(2)发送移交指令:在点击航空器呼号后,其标牌开始闪烁。在下一个扇区的管制员接管该航空器后,数据标签停止闪烁,在标牌的第4行出现通话频率。(3)陆空通话:在标牌的第四行出现通话频率后,被试应该点击通话频率与飞行员通话,要求飞行员与该频率的管制区联系。(4)冲突化解:如果两架航空器在最接近点时的侧向间隔小于10公里,或飞行高度在8,400米以下时,垂直间隔小于300米,或飞行高度在8,400米以上时,垂直间隔小于600米,就会发生冲突。被试可以通过三种方式来解除潜在的冲突:a.改变高度;b.改变航向;c.改变速度。(5)处理高度请求:在每一情境模拟中,大约每间隔4-6分钟,飞行员会通过数据链提出改变飞行高度的请求,此时航空器的呼号右边会出现一个向下的箭头,提示目前有请求需要处理,被试可以给予许可、拒绝或要求等待。情境模拟过程中,共有6次高度请求。

1.5 实验程序 实验之前先向被试讲解并演示实验任务30分钟,然后按照实际实验时的流程完成一个30分钟的练习任务。在正式实验前,要求被试填写雷达管制模拟任务练习后问卷,以10点评定的方式了解被试对实验任务操作的熟悉程度,以及实验前的练习是否充分,如果评定低于8,就重新向被试讲解操作方法。同时要求被试评定雷达管制模拟程序的逼真度。

每一模拟管制情境持续30分钟,采用顺序平衡的方式进行。实验分两次进行,被试每次完成2个情境任务,持续时间约为1.5小时。

实验开始后首先让被试对NASA脑力负荷问卷涉及的六个元素进行配对比较,以确定每一元素的权重<sup>[9]</sup>。在实验过程中,每间隔5分钟左右,即在高度请求事件之前或之后的1分钟,在任务情境的右侧浮现10点评定标尺,要求被试在不降低管制作业表现的前提下,评定知觉到该标尺时的脑力负荷水平,这种方法称为管制负荷实时评定技术(Air Traffic Workload Input Technique, ATWIT),它可

以实时地评定管制负荷,具有信度高、干扰性低的特点<sup>[10]</sup>。在30分钟的模拟任务过程中,共进行6次ATWIT评定。

在任务情境结束后,被试在电脑上完成NASA脑力负荷评定,填写Taylor的三维情境意识评价量表(SART 3D),从注意资源的需求、注意资源的供给及情境理解三个方面对任务情境进行评价<sup>[11]</sup>。

1.6 实验设计 用来评价管制员作业表现的因变量包括如下三类:

(1)采用SART 3D评定技术得到的情境意识评分,被试的情境意识总分由公式:SA = 情境理解 - (注意资源需求 - 注意资源供给)计算<sup>[11]</sup>。

(2)采用NASA问卷得到的脑力负荷总分; ATWIT实时脑力负荷评定分。

NASA脑力负荷评定采用Likert七点量表,情境意识评定采用100mm线法。采用David和Laura提到的方法<sup>[12]</sup>,根据被试在NASA脑力负荷6个维度上的评分及每个维度的权重计算总的脑力负荷,

即 workload =  $\frac{\sum_{i=1}^6 e_i \times w_i}{15}$  (e表示NASA TLX中的维度评分, w表示该维度的权重)。

(3)被试的作业表现有两个指标:被试在管制作业中出现的冲突数(Loss of Separation, 简称为LOS),以及冲突化解时间(Time to Loss of Separation, 简称为TLOS)。

当两架航空器存在潜在冲突时,管制员首先要能探测出来(conflict detection),然后采取适当的方式使之化解(conflict resolution)。冲突化解时间(TLOS)指当两架航空器存在潜在冲突,管制员在该潜在冲突演变为实际冲突前多长时间开始采取行动,管制员越是能更早地对潜在冲突进行管理,避免冲突发生或更有效地解决冲突的可能性就越大。

## 2 结果与分析

计算被试6次ATWIT负荷评定的平均数,飞行冲突数(LOS),冲突化解时间(TLOS),用统计分析软件SPSS 13对数据进行重复测量方差分析,因变量的描述性统计结果见表2。

表2 四种条件下因变量的描述性统计分析

情境难度	航空器数	ATWIT 评定	NASA TLX	情境意识	冲突数(次)	冲突化解时间(分钟)
易	少	1.70(0.57)	2.77(0.93)	118.92(32.96)	0.86(0.85)	4.08(0.55)
	多	3.03(1.23)	3.89(1.03)	83.04(24.42)	2.91(1.35)	3.00(0.19)
难	少	2.93(1.13)	4.16(0.71)	72.63(23.09)	5.16(2.39)	3.16(0.16)
	多	5.23(1.60)	5.20(0.80)	30.13(26.42)	18.16(4.00)	2.59(0.16)

2.1 脑力负荷 (Air Traffic Workload Input Technique, ATWIT)

情境难度主效应显著,  $F(1, 50) = 228.65, p <$

.001;航空器数主效应显著,  $F(1, 50) = 168.08, p <$  .001;两个因素的交互作用显著,  $F(1, 50) = 25.52, p <$  .001。由于交互作用显著,因此进行简

单效应分析。结果表明:不管是在易情境任务还是难情境任务,随着管制扇区内航空器数的增加,管制负荷显著增大。在难情境任务下,随着航空器的增加,管制负荷增加的幅度要比在易情境任务下大;在少与多航空器条件下,情境难度的增加都会导致管制负荷的显著增加。

## 2.2 脑力负荷(NASA)

情境难度的主效应显著,  $F(1, 50) = 131.08, p < 0.001$ ; 航空器数的主效应显著,  $F(1, 50) = 181.43, p < 0.001$ ; 两个因素的交互作用不显著,  $F(1, 50) = 0.35, p = 0.56$ 。结合表2可知,被试在难情境任务的脑力负荷显著大于易情境任务,多航空器情境下的负荷显著大于少航空器情境。

## 2.3 情境意识

根据公式情境意识 = 情境理解 (注意资源需求 - 注意资源供给) 计算被试在四个管制情境中的情境意识总分。重复测量方差分析表明,情境难度的主效应显著,  $F(1, 50) = 207.97, p < 0.001$ ; 航空器数量的主效应显著,  $F(1, 50) = 163.67, p < 0.001$ ; 两个因素的交互作用不显著,  $F(1, 50) = 1.97, p = 0.17$ 。结合表2可知,被试在难情境下的情境意识得分显著差于易情境,多航空器条件下被试的情境意识显著差于少航空器。

## 2.4 飞行冲突(Loss of separation, LOS)

重复测量方差分析表明,情境难度的主效应显著,  $F(1, 50) = 639.78, p < 0.001$ ; 航空器的主效应显著,  $F(1, 50) = 751.09, p < 0.001$ 。从表2可见,易情境任务的飞行冲突明显少于难情境任务,少航空器情境的飞行冲突显著少于多航空器情境。情境难度与航空器数存在显著的交互作用,  $F(1, 50) = 266.85, p < 0.001$ 。简单效应分析表明,在易与难情境下,随着航空器的增加,发生的飞行冲突明显增多;不管是在多航空器条件还是少航空器条件,情境难度的增加都会造成飞行冲突的显著增加。

## 2.5 冲突化解时间(Time to Loss Of Separation, TLOS)

方差分析表明,情境难度的主效应显著,  $F(1, 50) = 239.92, p < 0.001$ ; 航空器数的主效应显著,  $F(1, 50) = 330.14, p < 0.001$ 。结合表2可知,易情境任务的 TLOS 明显长于难情境任务,少航空器情境的 TLOS 显著大于多航空器情境。这就是说,在易情境、少航空器条件下,管制员能够更早地探测到潜在的飞行冲突。情境难度与航空器数存在显著的交互作用,  $F(1, 50) = 34.39, p < 0.001$ 。简单效应分析发现,在易与难情境下,随着航空器的增加, TLOS 明显减少;不管是在多航空器条件还是少航空器条件,情境难度的增加都会造成 TLOS 的显著减少。

## 3 讨论

### 3.1 脑力负荷

研究使用了两种不同的方法测量被试在作业过程的脑力负荷,结果表明,随着管制扇区内航空器的增多,情境难度的增大,被试在 ATWIT 与 NASA TLX 上的负荷评定也随之显著加大。被试需要完成的航空器接受、移交、陆空通话任务与管制扇区内的航空器成正比,在多航空器条件下,冲突探测与冲突化解的频次与难度也要更高一些。理论上,脑力负荷可以用信息加工所需要的时间与可以用来加工这些信息的时间之比表示<sup>[13]</sup>。这样,被试在多航空器条件下的时间需求更高。Lamoureux 的研究发现,航空器处于过渡状态会增加航空器对之间关系的复杂度,会导致脑力负荷增大<sup>[14]</sup>。Remington 等发现,当两架航空器处于同高度时,随着冲突角的增加,冲突探测的准确性下降,反应时变大,其原因可能是冲突角增加会使航空器对在雷达上的物理距离加大,从而给知觉带来困难<sup>[4]</sup>。本研究中,难任务情境中,40%的航空器存在高度过渡,大冲突角的潜在冲突也要比易任务情境中多一些,这就必然导致脑力负荷的增加。

### 3.2 情境意识

结果表明,管制扇区内航空器的增多,情境难度的增大,会显著增加被试保持情境意识的难度。随着扇区内航空器量的增加,情境难度的增大,被试需要知觉与加工的信息也随之增加,注意资源的需求增大,视觉负荷加大,难以进行良好的注意分配;大量的管制信息在被知觉后,就储存在工作记忆中,冲突探测与冲突化解也在很大程度上依赖空间工作记忆<sup>[2]</sup>,被试的空间工作记忆因此很容易出现过载;信息的增加也使得空间视觉化雷达信息变得困难,显然会影响被试对情境中元素的知觉与理解。这些因素显然不利于被试维持更高水平的情境意识。

分析表明,情境难度与航空器数之间的交互作用对注意资源需求的影响不显著,对注意资源供给及情境理解有显著影响。冲突探测与化解是管制员最重要的任务,如果扇区内的航空器的动态变化特性较高,即在情境难度较大的情况下,需要被试持续监视处于动态变化之中(如高度、速度或航向)的航空器,并持续判断这些航空器对之间,以及这些航空器与其他航空器之间是否存在冲突,并化解冲突。在这种情况下,扇区内航空器的增加,将导致被试在完成作业过程中,需要接受与理解的信息急剧增加,冲突探测与化解的难度会成倍增大,被试所感受到的注意资源的供给,以及对情境的动态理解则急剧下降。

### 3.3 作业绩效

研究表明,扇区内的航空器数与情境难度会导致更多的飞行冲突发生,管制员化解冲突需要更多的时间。在多航空器条件下,被试对飞行冲突的探测更晚一些;在难情境任务下,结果也是如此。这与被试在多航空器条件与难任务情境下更高的脑力负荷与更低的情境意识密切相关。对这两个作业绩效变量的分析也表明,航空器数与情境难度之间的交互作用显著,揭示出在多航空器条件下,情境难度的增加会导致作业绩效大幅下降。

#### 4 结论

研究证明,同管制扇区内航空器的数量一样,航空器的动态飞行特性也会显著增加管制员的脑力负荷,降低管制员的情境意识与作业绩效。这说明,在扇区内航空器的动态变化特性(如飞行高度层改变)增大的情况下,采用扇区动态调整、自由飞行、重新设计空域及流量控制策略时,同时考虑航空器数量与动态变化特性两个指标显得更为科学。

本研究以扇区内的航空器数与情境难度来描述交通复杂度,没有量化出每一具体管制情境的交通复杂度,也就不能精确地解释每种管制情境下管制员的脑力负荷与情境意识,或量化交通复杂度与脑力负荷、情境意识之间的关系。因此,寻求量化交通复杂度的方法对更好地利用空域非常有帮助。

#### 5 参考文献

- 1 Kopardekar P, Magyarits S. Measurement and prediction of dynamic density. 5th Eurocontrol/FAA ATM R&D Seminar. Available at <http://www.tc.faa.gov/acb300/techreports/DD-ATM2003-7-03.pdf>, 2003
- 2 Wickens CD, Mavor AS, McGee JP. Flight to the future: Human factors in air traffic control. Washington, DC: National Academy Press, 1997
- 3 Hurst MW, Rose RM. Objective job difficulty, behavioral response, and sector characteristics in air route traffic control centers. *Ergonomics*, 1978, 21(9), 697-708
- 4 Remington RW, Johnston JC, Ruthruff E, et al. Visual search in complex displays: Factors affecting conflict detection by air traffic controllers, *Human Factors*, 2000, 42(3), 349-366
- 5 Majumdar A, Ochieng W, Mcauley G, et al. The factors effecting airspace capacity in Europe: A cross sectional time-series analysis using simulated controller workload data. *The Journal of Navigation*, 2004, 57(3), 385-405
- 6 Mogford RH, Guttman J, Morrow SL, et al. The complexity construct in air traffic control: A review and synthesis of the literature (DOT/FAA/CT-TN95/22). Atlantic City: FAA William Hughes Technical Center, 1995
- 7 Rodgers MD, Mogford RH, Strauch B. Post-hoc assessment of situation awareness in air traffic control incidents and major aircraft accidents. In: MR Endsley, DJ Garland (Eds.). *Situation awareness analysis and measurement*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, 2000. 73-111
- 8 Durso FT, Gronlund SD. Situation awareness. In: FT Durso, RS Nickerson, RW Schvaneveldt, et al. (Eds.). *The handbook of applied cognition*. New York: Wiley, 1999. 283-314
- 9 Hart SG, Staveland LE. Development of the NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research. In: PA Hancock, N Meshkati, (Eds.). *Human mental workload*. Amsterdam: North-Holland, 1988. 139-183
- 10 Stein ES. Air traffic controller workload: An examination of a workload probe (DOT/FAA/CT-TN84/24). Atlantic City, NJ: Federal Aviation Administration, 1985
- 11 杨家忠, 张侃. 数据-笔墨比率对过程监控任务绩效的影响. *心理科学*, 2005, 28(2): 264-268
- 12 David B, Laura S. Age differences in perceived workload across a short vigil. *Ergonomics*, 2002, 45(13):949-960
- 13 Hendy KC, Liao J, Milgram P. Combining time and intensity effects in assessing operator information-processing load. *Human Factors*, 1997, 39(1), 30-47
- 14 Lamoureux T. The influence of aircraft proximity data on the subjective mental workload of controllers on the air traffic control task. *Ergonomics*, 1999, 42(11), 1482-1491

## The Impact of Traffic Complexity Factors on Air Traffic Controller Mental Workload and Situation Awareness

Yang Jiazhong<sup>1</sup>, Esa M. Rantanen<sup>2</sup>, Zhang Kan<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Aviation Human Factors and Ergonomics Lab, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, 618307)

(<sup>2</sup>Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA)(<sup>3</sup>Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101)

**Abstract** Four radar control simulation scenarios were designed to examine the impact of aircraft dynamic characteristics such as change of airspeed, altitude, or heading, aircraft count in the sector, and their interactions on controller performance. The result showed that like aircraft count, aircraft dynamic characteristics produced higher mental workload, lower situation awareness and worse performance. It reveals that with the steady increase of air flow and dynamic characteristics in the sector, more traffic complexity factors should be taken into account when coping strategies, such as flow control, flexible sector partition and free flight are used.

**Key words** traffic complexity, air traffic controller, mental workload, situation awareness, conflict resolution