

文章编号: 1674-8190(2023)04-137-12

# 管制—飞行状态相依网络演化过程混沌性研究

刘武君<sup>1</sup>, 温祥西<sup>2</sup>, 范文广<sup>1</sup>, 段翔<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军 63898 部队, 济源 454650)

(2. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

**摘要:** 飞行员和管制员是空中交通管制系统中的关键角色, 对其关系进行演化分析能够得到管制系统的演化规律。依据航空器间飞行冲突情况、管制扇区间移交关系和管制员对航空器的指挥监视关系, 构建管制—飞行状态相依网络模型; 统计相依网络演化过程中节点的特性, 分析演化过程中管制员工作负荷和航空器飞行冲突的变化情况; 通过最大 Lyapunov 指数与相图分析法判别系统混沌性。结果表明: 管制扇区与航空器节点的特性能够反映管制系统变化的趋势, 管制系统演化规律具有混沌性、可预测性。

**关键词:** 相依网络; 网络演化; 混沌性分析; Lyapunov 指数; 奇异谱分析

中图分类号: V335

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.04.15

## Study on chaos during evolution process of control-aircraft state interdependence network

LIU Wujun<sup>1</sup>, WEN Xiangxi<sup>2</sup>, FAN Wenguang<sup>1</sup>, DUAN Xiang<sup>1</sup>

(1. 63898 Unit of the PLA, Jiyuan 454650, China)

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

**Abstract:** The pilots and controllers are the key roles in the air traffic control system, and the evolution rules of the control system can be obtained by analyzing the relationship between them. The control-aircraft state interdependence network is constructed according to the flight conflict among aircraft, handover relationship between control sectors, and command and monitoring relationship of aircraft. By counting the characteristics of nodes in the evolution process of the interdependence network, the changes of controller workload and aircraft flight conflict during the evolution process are analyzed. The maximum Lyapunov exponent and phase diagram analysis method are used to identify the chaos of the system. The results show that the characteristics of control sector and aircraft node can reflect the changing trend of the control system, and the evolution rules of the control system are chaotic and predictable.

**Key words:** interdependence network; network evolution; chaos analysis; Lyapunov exponent; singular spectrum analysis

收稿日期: 2022-07-08; 修回日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(71801221)

通信作者: 刘武君, 1670826468@qq.com

引用格式: 刘武君, 温祥西, 范文广, 等. 管制—飞行状态相依网络演化过程混沌性研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 137-148.

LIU Wujun, WEN Xiangxi, FAN Wenguang, et al. Study on chaos during evolution process of control-aircraft state interdependence network[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(4): 137-148. (in Chinese)

## 0 引言

空中交通管制系统作为一个包含多种要素的复杂系统,其运行演化由地面管制员、空中航空器等多个个体共同决定,其中飞行员和管制员之间的关系是管制系统最基本也是最主要的关系,对其关系的演化分析,能够得到整个管制系统的演化规律。通过现实经验得出,单个航空器在交通运行各阶段的状态和信息是确定性的,散落于各阶段管理人员、操作人员及隔离的信息系统之中。虽然个体的状态信息是确定的,但是作为一个交通群体,其演化导致系统特性可能随着时间的加长,发散性、波动性增大。如果能够分析出管制系统的演化规律,判断其具有可预测性,就可以帮助管制人员提前规划,将矛盾端口前移,提高系统运行安全稳定性。

空中交通管制系统是一个由多个网络组成的复杂系统,王红勇等<sup>[1-2]</sup>建立反映航空器复杂性影响关系的网络模型对空中交通复杂性进行研究;武喜萍等<sup>[3]</sup>提出了从复杂网络理论角度分析空中交通流量网络抗毁性和延误传播的方法;齐雁楠等<sup>[4]</sup>建立空域扇区网络从系统层面研究其抗毁性并提出优化策略。运用复杂网络理论对空中交通管制系统进行研究,只能以单一要素为节点,不能反映不同类型网络之间的相互影响。在空空中交通管制系统中,飞行员和管制员是关键角色,管制员向飞行员发布指令,飞行员按指令驾驶航空器,两者相互协作,存在依存关系,运用相依网络理论对其研究将更符合实际情况。2010年,S. V. Buldyrev等<sup>[5]</sup>首次提出了相依网络理论并建立了一种简单的相依网络模型,为分析耦合系统之间的关系提供了新思路;J. Shao等<sup>[6]</sup>基于各层网络之间的耦合方式,提出一对多相依网络模型;王兴隆等<sup>[7-9]</sup>构建了以机场、航路和管制扇区为子网络的静态空中交通相依网络模型,分别研究了不同失效模式下的网络结构和功能脆弱性的变化规律,故障在网络中传播的过程和机理,网络的弹性与拓扑结构和交通流量分布的关系等问题;李昂等<sup>[10-11]</sup>建立由管制网络和飞行状态网络相耦合的相依网络模型,反映了管制员和航空器之间的相互关系,并对相依网络特性和演化过程进行研究,

为提升空管运行安全等提供了理论基础。

判断管制系统演化规律是否具有可预测性,可以从混沌性角度考虑,混沌性具有短期预测性。对于混沌的判别,研究者提出了相图分析、最大 Lyapunov 指数、功率谱图等方法<sup>[12]</sup>。冯程等<sup>[13]</sup>、邹磊等<sup>[14]</sup>通过计算时间序列的最大 Lyapunov 指数来判断研究对象的混沌性;李士林等<sup>[15]</sup>采用相图分析法来判断系统是否处于混沌状态。

综合上述研究,本文以文献<sup>[10]</sup>建立的管制扇区—飞行状态相依网络为基础,选取适当的节点指标,分析演化过程中管制员工作负荷和航空器飞行冲突的变化情况,通过最大 Lyapunov 指数和相图法判断管制系统混沌性。

## 1 相依网络模型

管制—飞行状态相依网络主要包含管制网络和飞行状态网络两个子网络,如图 1 所示。

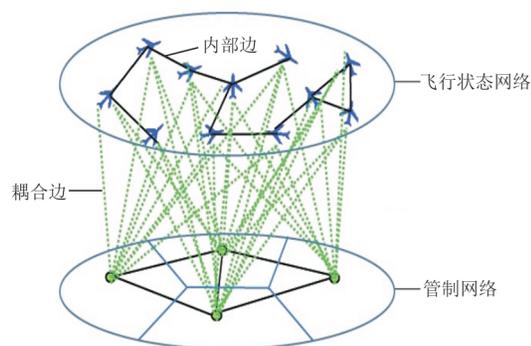


图 1 相依网络示意图<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of interdependent network<sup>[10]</sup>

管制网络中节点代表管制扇区,连边表示相邻扇区间航空器的移交关系。航空器的移交与接收对应同一种联系,相邻扇区工作量几乎相等,且管制移交是相邻扇区因工作需要而产生的逻辑关系,因此其为无向无权网络。

飞行状态网络为无向加权的网络,节点表示空中航空器,连边表示航空器间存在潜在飞行冲突,权值大小表示飞行冲突的严重程度。判断航空器之间是否存在潜在飞行冲突,主要关注航空器之间的水平距离,假设航空器都保持相同高度飞行,垂直距离作为管制员解决飞行冲突的调配方法。根据国际民航组织发布的 8168 号文件中的规定:机载防相撞系统(ACAS)询问其他装有应答

机的飞机范围为 26 km<sup>[16]</sup>。当两架航空器之间的距离小于 52 km 时,即认为两架航空器可以接收到对方发射的信号,两架航空器之间存在潜在的飞行冲突,其连边权值  $\omega_{ij}$  计算公式为

$$\omega_{ij} = 52/D_{ij} \quad (1)$$

式中: $D_{ij}$ 为航空器之间的距离。

用点强  $p_i$  表示航空器  $i$  的飞行冲突情况,其计算公式为

$$p_i = \sum_{j \in n_i} \omega_{ij} \quad (2)$$

式中: $n_i$ 为与航空器  $i$  相连的航空器的集合。

层间耦合边表示管制员对航空器的指挥监视情况,每个管制扇区节点要与本扇区和相邻扇区的航空器节点连接。耦合边分为两类,其权值计算方法有所不同。对于连接同一扇区内航空器节点与管制扇区节点的耦合边,管制员要对航空器进行直接指挥调配,工作量较大,其权值大小为航空器的点强,计算公式为

$$W_{ij} = p_i \quad (3)$$

对于连接位于相邻扇区的管制扇区节点与航空器节点的耦合边,管制员主要负责监视空中动态,不直接指挥航空器,工作量较小,其权值取对应航空器点强的  $1/10^{[10]}$ ,计算公式为

$$W'_{ij} = 0.1p_i \quad (4)$$

## 2 仿真实验

在管制—飞行状态相依网络模型中,飞行状态网络中航空器的位置随时间发生改变,由于相依网络的级联效应,航空器位置变化产生的影响会沿着连边传播,带动整个系统发生改变,为了描述航空器的运动情况对管制系统造成的影响,根据实际场景进行仿真实验。

用 MATLAB 软件,模拟在 300 km×300 km 大小的管制区域内生成由 50 架航空器和 9 个管制扇区组成的相依网络模型,航空器编号为 1~50,管制扇区编号为 51~59。在该网络模型中,注重考虑管制扇区间的移交关系,9 个管制扇区面积相同。航空器的位置、航向和速度随机生成,航空器飞行状态数据如表 1 所示, $x$ 、 $y$  表示航空器横纵坐标, $H$  表示航向, $V$  表示速度。相依网络模型如图 2 所示,蓝色圆圈表示航空器,绿线表示航空器间存在潜在飞行冲突。

表 1 航空器飞行数据  
Table 1 Aircraft flight data

节点编号	$x$ /km	$y$ /km	$H$ /( $^{\circ}$ )	$V$ /( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )
1	244.4	82.8	204.7	629.6
2	271.7	203.9	302.8	639.0
3	38.0	196.5	168.5	605.3
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
49	212.8	3.5	319.9	618.2
50	226.4	101.1	323.9	718.8

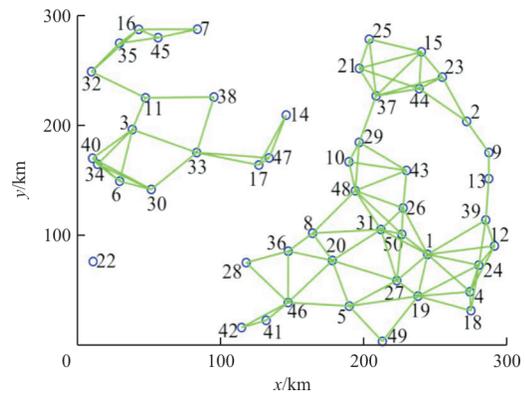


图 2  $t_1$  时刻相依网络模型

Fig. 2 Interdependent network model at  $t_1$

根据相依网络模型得到其加权邻接矩阵  $A_1$ 。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 3.07 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 34.84 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1.66 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 2.27 & 0 & \cdots & 0 \\ 3.07 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 32.45 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 2.76 \\ 0 & 0 & 2.27 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 1.66 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 34.84 & 0 & 0 & 32.45 & \cdots & 2.76 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

该矩阵为  $59 \times 59$  的方阵,可以分为四个部分,左上角  $50 \times 50$  的矩阵为飞行状态网络的加权邻接矩阵,右下角  $9 \times 9$  的矩阵为管制网络的邻接矩阵。左下角  $9 \times 50$  的矩阵和右上角  $50 \times 9$  的矩阵互为转置,表示航空器与管制扇区的连接关系,其数值大小为层间耦合边的权值,体现了航空器对管制员造成的工作负荷,值越大则航空器对管制员实施调配产生的工作负荷越大。

将上述生成的相依网络模型确定为初始状态,之后每架航空器根据自身的航向和速度开始运动,网络开始演化,以  $2\text{ s}$  的时间间隔对演化过程进行采样,将样本依次记为  $t_i (i = 1, 2, \dots, 200)$ 。依据管制员判别飞行冲突、实施指挥调配的一般时长,间隔  $40$  个样本,取相应时刻下的相依网络模型,如图 3~图 7 所示。

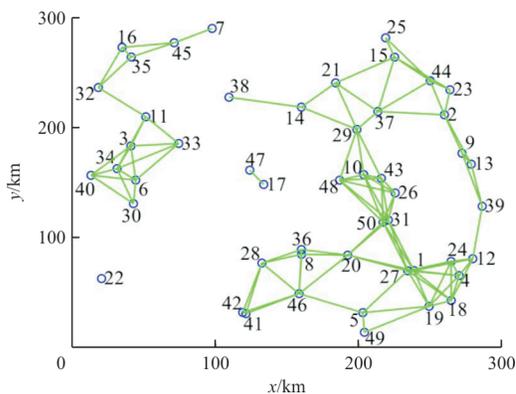


图 3  $t_{40}$ 时刻相依网络模型  
Fig. 3 Independent network model at  $t_{40}$

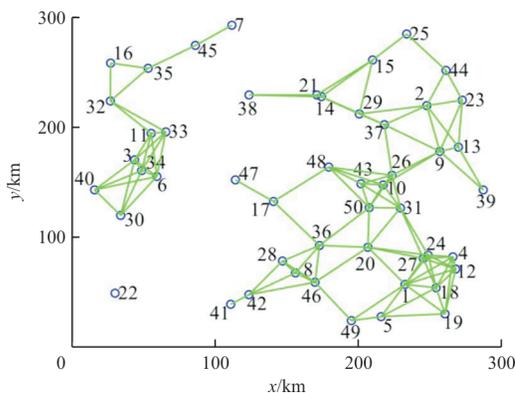


图 4  $t_{80}$ 时刻相依网络模型  
Fig. 4 Independent network model at  $t_{80}$

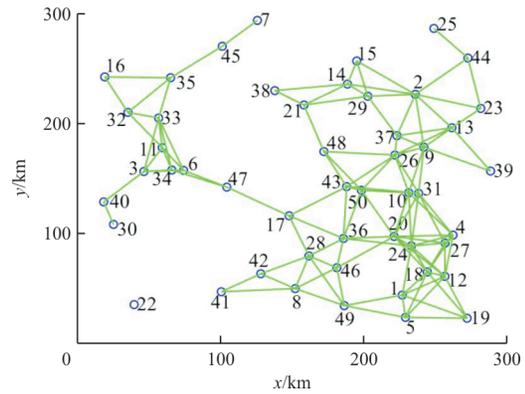


图 5  $t_{120}$ 时刻相依网络模型  
Fig. 5 Independent network model at  $t_{120}$

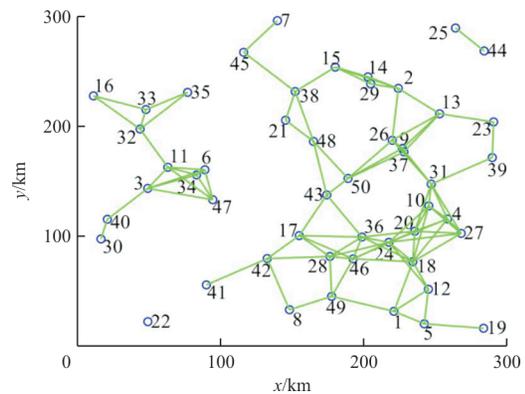


图 6  $t_{160}$ 时刻相依网络模型  
Fig. 6 Independent network model at  $t_{160}$

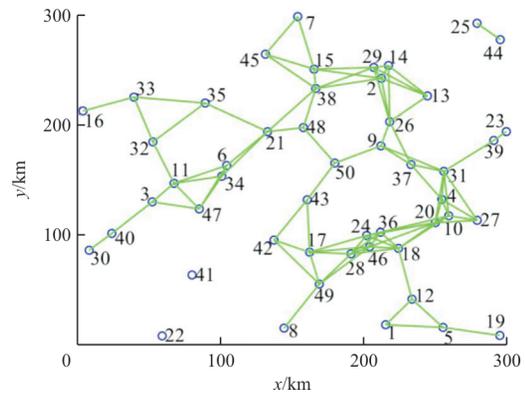


图 7  $t_{200}$ 时刻相依网络模型  
Fig. 7 Independent network model at  $t_{200}$

观察相依网络演化过程,通过航空器之间连边的变化和航空器的位置分布可以直观地看出,整个管制系统的运行状态,即航空器的飞行冲突状况与管制员的工作负荷发生了改变。通过计算相关数据指标,对演化过程进行具体分析。

### 3 节点特性分析

#### 3.1 节点度

节点度指与该节点相连的节点的个数。相依网络中,节点度等于该节点外度与内度之和。节点的度  $k_i$  的计算式为

$$k_i = k_i^{L_1} + k_i^{L_2} \quad (5)$$

式中: $k_i^{L_1}$ 为内度,即子网络内与节点  $i$  连边的数目; $k_i^{L_2}$ 为外度,即相连耦合边的数目。

节点度的大小主要体现飞行员或管制员需要关注的其他节点的个数,即人员精力分散程度。初始和结束时刻所有节点的度,如图 8~图 9 所示。

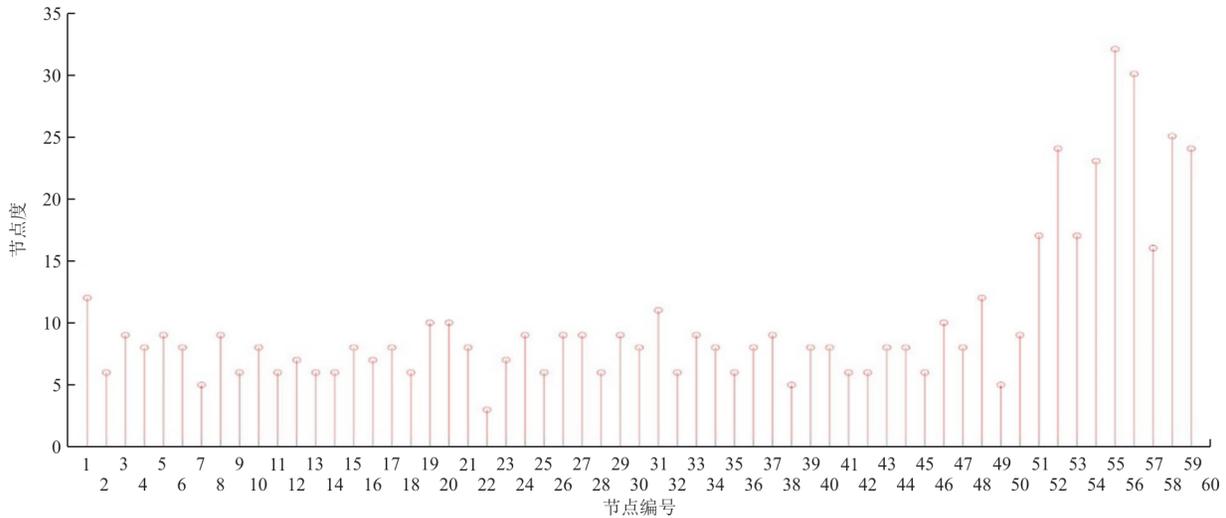


图 8  $t_1$ 时刻节点度  
Fig. 8 Node degrees at  $t_1$

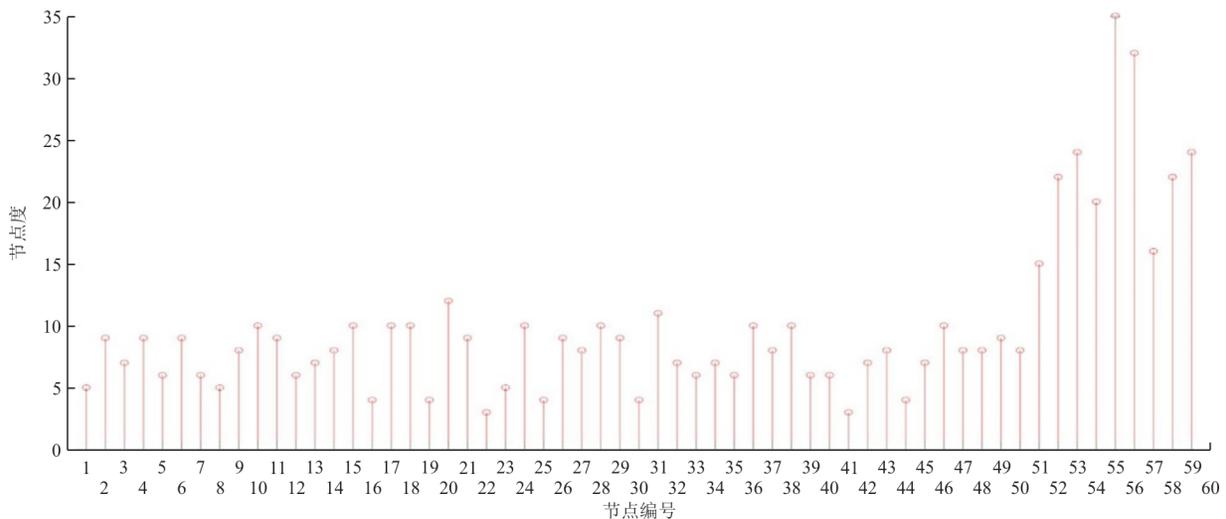


图 9  $t_{200}$ 时刻节点度  
Fig. 9 Node degrees at  $t_{200}$

管制扇区节点内度表示与其有管制移交关系的管制扇区个数,外度表示需要管制员进行指挥调配或监视的航空器的数量。对于某一个管制扇区节点,其内度是定值,因此管制扇区节点度的变化主要取决于其外度。外度越大,该扇区内管制员负责指挥和监视的航空器数量越多,管制员的

精力将更加分散,一定程度上增大了管制员的工作负荷。

航空器节点内度表示与该航空器具有飞行冲突的航空器数量,外度指飞行员可以与地面建立正常通信联络的管制扇区个数。航空器节点度主要取决于其内度,内度越大,则说明与该航空器存

在潜在飞行冲突的航空器数量越多,发生不安全事件概率较大。

### 3.2 节点点强

在复杂网络中,点强等于与该节点相连的所有边的权值之和。点强  $s_i$  计算式为

$$s_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} w_{ij} \quad (6)$$

式中: $N$ 为节点总数; $a_{ij}$ 为节点  $i$  与  $j$  之间是否存在连边,有连边  $a_{ij}=1$ ,否则  $a_{ij}=0$ 。

在相依网络模型中,考虑到耦合边权值的大小主要体现航空器对管制扇区节点的影响,且管制网络为无权网络,因此管制扇区节点点强等于与该节点相连的所有耦合边的权值之和,其大小体现了管制员在对航空器进行管制指挥时工作负荷的大小。航空器节点点强的大小为  $p_i$ ,不包括耦合边的权值,其大小体现了航空器飞行冲突情况的复杂程度。

管制扇区节点点强变化情况如图 10 所示。

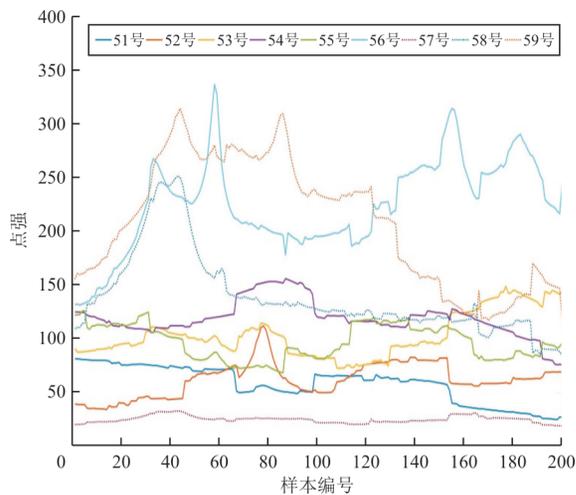


图 10 管制扇区节点点强变化情况

Fig. 10 The variation of control sector node point strength

从图 10 可以看出:56 和 59 号节点的点强远高于其他管制扇区节点,说明这两个扇区的管制员工作负荷较大,要高度集中注意力来指挥调配航空器。对于 57 号节点,其点强低于其他管制扇区节点,说明该扇区内管制员工作负荷小。从图 10 也可以看出:57 号节点内航空器数目远少于其他扇区,且扇区内航空器的飞行冲突情况简单。

由于航空器节点数量较多,选取部分初始时刻、结束时刻以及平均点强较大节点进行分析,其点强变化情况如图 11 所示。

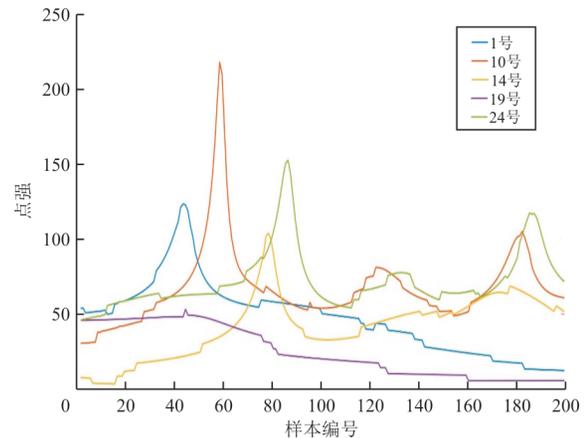


图 11 航空器节点点强变化情况

Fig. 11 The variation of aircraft node point strength

从图 11 可以看出:10 和 24 号节点点强较高,说明这两架航空器的飞行冲突情况比较复杂,管制员要对这两架航空器分配较多的精力,关注其飞行冲突发展变化情况,及时调配;对于 19 和 1 号节点,其点强由高到低,说明航空器的飞行冲突情况趋向于简单,管制员要在前期为其分配较多的精力,后期可将部分精力转移到其他飞行情况更复杂的航空器上;对于 14 号节点,其点强逐渐变大,说明其飞行冲突情况趋于复杂,管制员要增加对其飞行动态的关注。

### 3.3 加权聚类系数

聚类系数是指与该节点相连的所有节点之间实际存在的连边数目与理论上可以存在的最大连边数目的比值。考虑边的权值,即节点加权聚类系数,其计算公式为

$$c_i = \frac{1}{(k_i - 1) \times s_i} \times \sum_{m,n} \frac{\omega_{im} + \omega_{in}}{2} \times a_{im} a_{in} a_{mn} \quad (7)$$

式中: $k_i$ 为节点度; $s_i$ 为节点点强; $\omega_{im}, \omega_{in}$ 分别为节点  $i$  与节点  $m, n$  之间连边的权值; $a_{ij}$ 为节点  $i$  和  $j$  间的连接关系。

初始和结束时刻各节点的加权聚类系数,如图 12~图 13 所示。

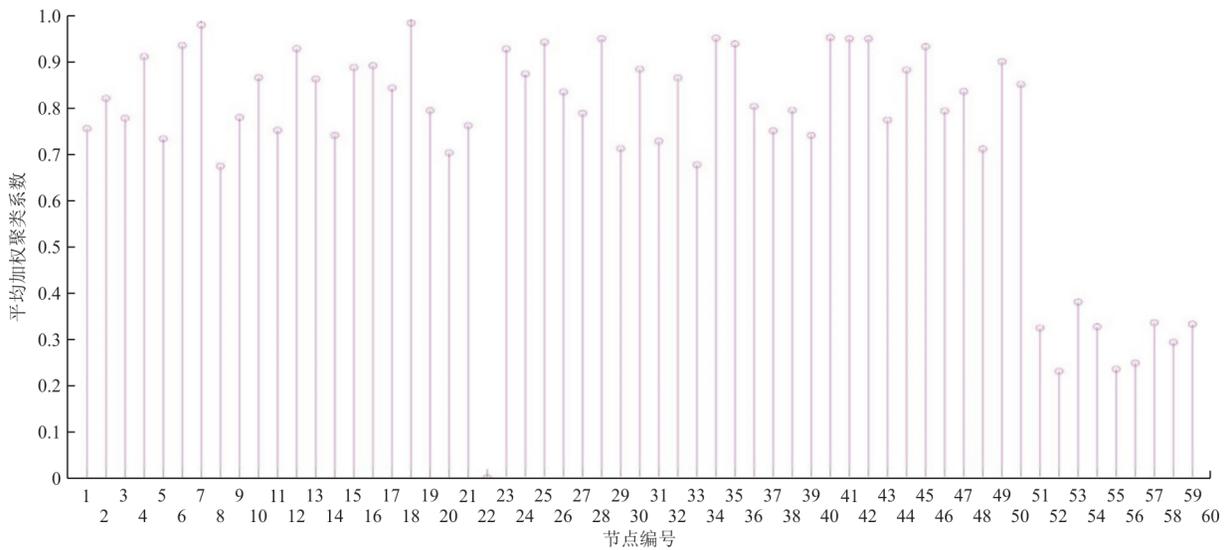


图 12  $t_1$ 时刻节点加权聚类系数  
Fig. 12 Weighted clustering coefficient of nodes at  $t_1$

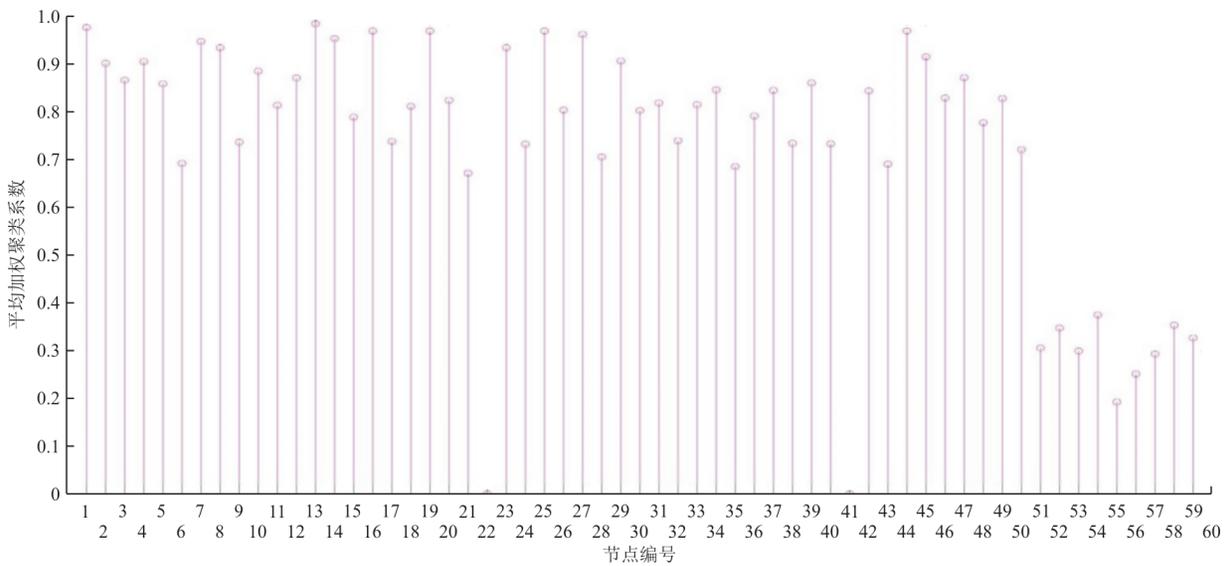


图 13  $t_{200}$ 时刻节点加权聚类系数  
Fig. 13 Weighted clustering coefficient of nodes at  $t_{200}$

管制扇区节点的加权聚类系数反映了该管制扇区以及其相邻管制扇区在内的所有航空器的密集程度。航空器节点的加权聚类系数表示航空器周围航空器的密集程度,值越大则说明该航空器周围航空器分布密度越大,具有飞行冲突的航空器对数越多,飞行冲突情况更为复杂。

从图 12~图 13 可以看出:航空器节点(编号 1~50)的加权聚类系数要比管制扇区节点(编号 51~59)的加权聚类系数大得多。这主要是因为虽然管制扇区节点连接的航空器节点数目较多,但航空器分布比较疏散,位于不同的管制扇区内,所

以航空器节点之间的连边数目较少;而在空中飞行的航空器比较密集,与同一架航空器发生冲突的其他航空器之间大概率也会存在飞行冲突。加权聚类系数为 0 表示航空器为孤立节点,不存在飞行冲突。其中 22 号节点始终是孤立节点,41 号节点则是在演化过程中转化为孤立节点,从网络演化过程中可以看出这两个节点的变化情况。

#### 4 混沌性分析

混沌是指看似随机的、无规则的但实际上却有规律可循的一种复杂的运动形态,可用于研究

非线性动态系统。混沌系统介于确定性和随机性、有序和无序之间,对初值具有敏感性,具有短期可预测性和长期不可预测性。对于管制系统演化规律混沌性的分析,从最大 Lyapunov 指数和相图两方面进行。

#### 4.1 节点特性序列分析

Lyapunov 指数可以描述两个具有相近初值所产生的轨道,随着时间的推移分离或是收缩的快慢, Lyapunov 指数大于 0, 轨道分离, 对初始条件敏感, 系统具有混沌性; 小于 0, 轨道收缩, 对初始条件不敏感, 系统不具有混沌性。对于同一系统, 可以计算得到多个 Lyapunov 指数, 需要找到 Lyapu-

nov 指数谱中的最大值, 当最大 Lyapunov 指数大于 0 时, 认为系统具有混沌性。

本文采用 Wolf 算法计算最大 Lyapunov 指数: 从一条参考轨迹上找一个起始点, 计算相邻轨迹之间的距离  $d_0, d_t$ , 当  $d_t$  按指数增长时, 便得到最大 Lyapunov 指数  $\gamma^{[17]}$ , 其值为

$$\gamma = \frac{1}{t_n - t_0} \sum_{i=1}^n \ln \frac{d_{(t_i)}}{d_{0(t_{i-1})}} \quad (8)$$

式中:  $n$  为循环次数;  $t_0$  为初始时刻;  $d_{(t_i)}$  为  $t_n$  时刻相邻轨迹之间的距离。

根据节点特性时间序列, 计算其最大 Lyapunov 指数, 结果如图 14 所示。

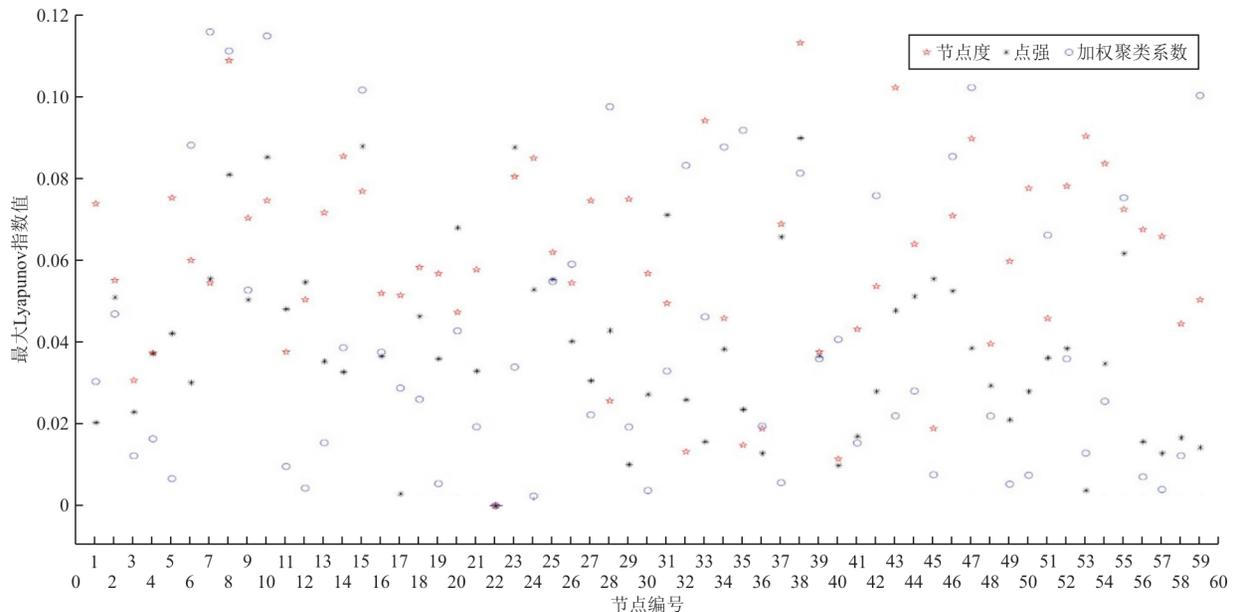


图 14 节点特性最大李雅普诺夫指数

Fig. 14 Node characteristics maximum Lyapunov index

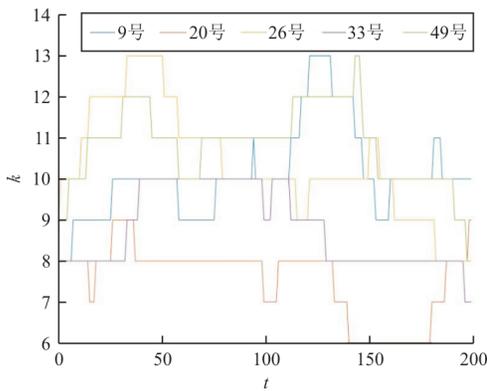
从图 14 可以看出: 除 22 号节点, 其他节点特性时间序列的最大 Lyapunov 指数都大于 0, 说明节点特性时间序列具有混沌性, 即管制系统演化规律的变化是可预测的。其中, 22 号节点最大 Lyapunov 指数为 0, 因为其在演化过程中为孤立节点, 状态稳定。

为了使实验结果更具有统计意义, 随机设置初始的航空器数量与位置, 增加实验次数, 统计不同实验中得到的最大 Lyapunov 指数, 如表 2 所示。

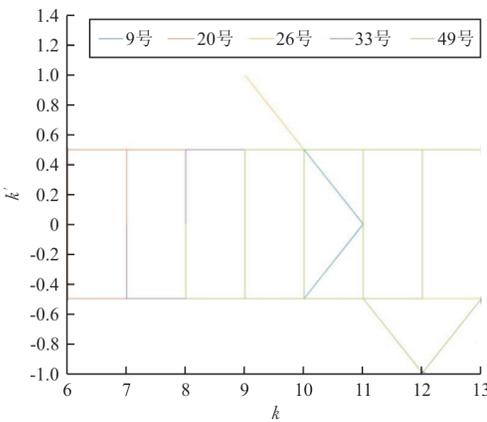
表 2 不同实验中节点特性的最大 Lyapunov 指数  
Table 2 Maximum Lyapunov exponent of node characteristics in different experiments

实验序号	节点度	点强	加权聚类系数
1	0.034	0.037	0.021
2	0.071	0.015	0.026
3	0.079	0.027	0.060
4	0.118	0.032	0.066
5	0.082	0.022	0.028
6	0.067	0.026	0.041

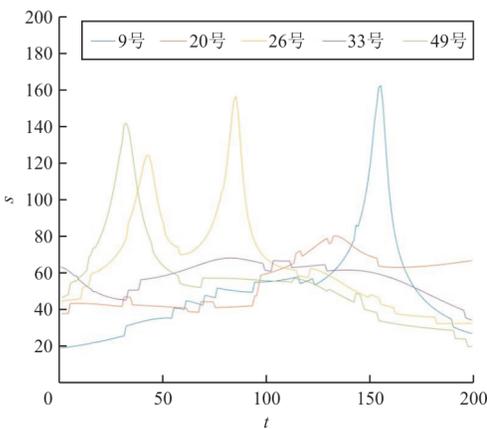
通过最大 Lyapunov 指数判断系统混沌性,不能直接观察其规律,因此用相图法作进一步分析。在相空间中,混沌运动对应的图形为在一定区域内随机分布的不封闭的曲线。以最大 Lyapunov 指数为参考,选取部分节点进行分析。根据节点特性时间序列,绘制原始数据序列图,利用差分方程解析构造二维相图,如图 15 所示, $k'$ 、 $s'$ 、 $w'$  表示节点度、点强、加权聚类系数的二阶中心差分的值。



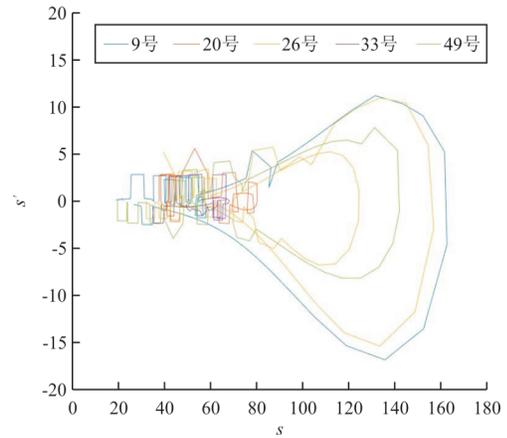
(a) 节点度



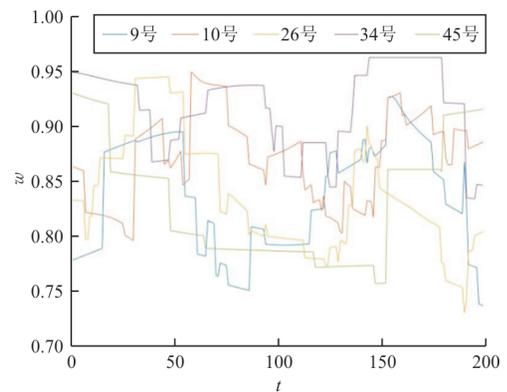
(b) 度的二维相图



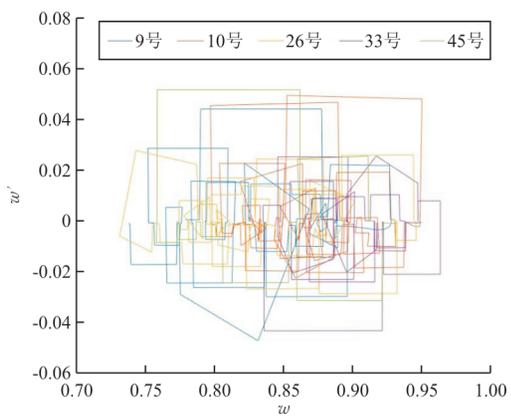
(c) 点强



(d) 点强的二维相图



(e) 加权聚类系数



(f) 加权聚类系数的二维相图

图 15 原始节点特性序列及二维相图

Fig. 15 Original node characteristic sequence and two-dimensional phase diagram

二阶中心差分值的计算式为

$$f'_{(x_0)} = \frac{f_{(x_0+t)} - f_{(x_0-t)}}{2t} \quad (9)$$

式中: $t$ 为时间间隔; $f_{(x_0+t)}$ 、 $f_{(x_0-t)}$ 为 $f_{(x_0)}$ 前后相邻时刻的值。

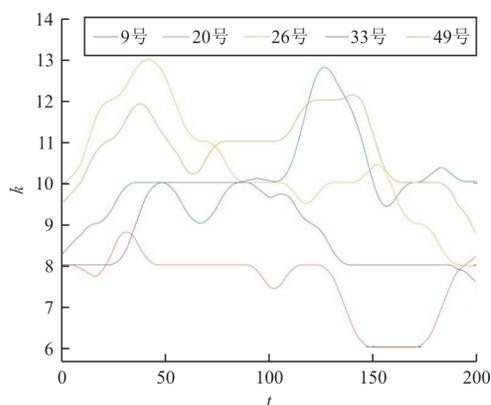
从图 15 可以看出:原始节点特性时间序列能够准确反映节点特性的即时变化,但整体上不够平滑,存在较多明显的转折点,难以准确判断其变化趋势;其对应的二维相图整体上有了一定的规律性,但曲线变化规律并不明显,图形显示比较混乱,平滑度较低。在图 15(b)中,图形存在较多的重叠,造成部分节点图形被遮盖显示不全,难以进行观察分析。对于上述存在的问题,分析其原因主要是节点特性数据由实验计算得出,受管制系统内部混沌性的影响,所得到的数据不可避免地会含有一定的噪声,因此可以对原始数据进行降噪处理,降低噪声的影响,便于观察分析。

## 4.2 节点特性序列降噪

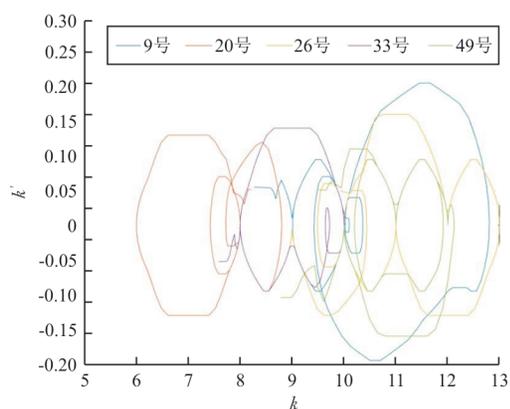
对原始数据降噪处理,减少干扰,提取有用信息,更有利于对系统混沌性的分析。对于数据降噪的方法有小波分析、滤波器、影子定理、奇异谱分析等<sup>[18]</sup>。本文采用奇异谱分析法对原始数据进行降噪处理。

奇异谱分析是一种应用广泛的研究非线性时间序列数据的方法,适用于分析一维时间序列。奇异谱分析根据所研究的时间序列构造出轨迹矩阵,对轨迹矩阵进行分解,提取原时间序列中不同成分的序列,较大的特征值对应着信号的有效成分,其余较小的特征值为噪声,通过保留原信号较大的特征值分量,去除较小的特征值分量,实现对原时间序列的降噪<sup>[19]</sup>。奇异谱分析主要包含四个步骤:嵌入、分解、分组、重构。

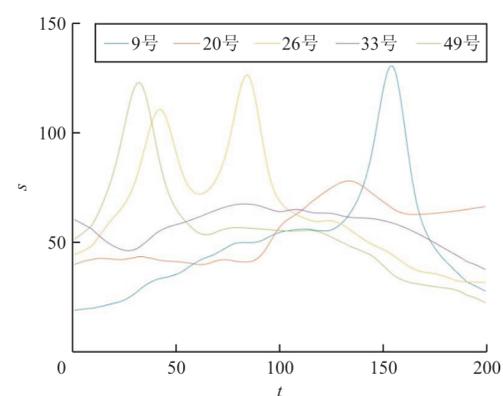
运用奇异谱分析法,对原始数据进行降噪处理,获得降噪后的节点特性序列和二维相图,如图 16 所示。



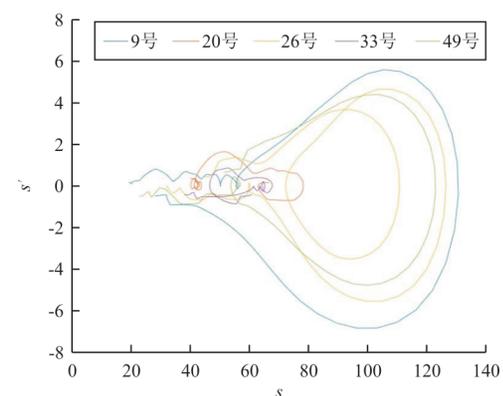
(a) 节点度



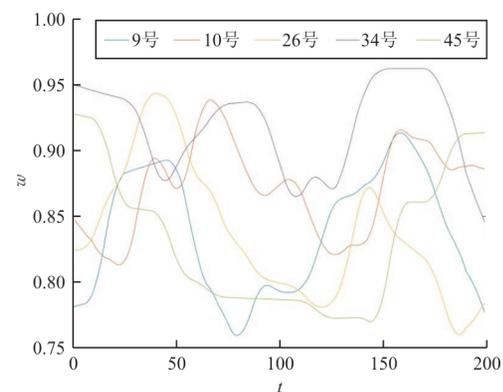
(b) 度的二维相图



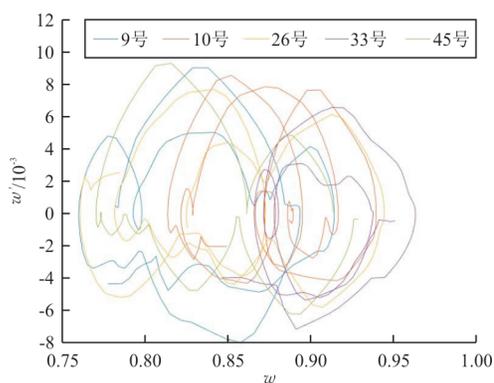
(c) 点强



(d) 点强的二维相图



(e) 加权聚类系数



(f) 加权聚类系数的二维相图

图16 降噪后节点特性序列及二维相图

Fig. 16 Nodal characteristic sequence and two-dimensional phase diagram after noise reduction

从图16可以看出:降噪后节点特性序列及二维相图整体上更加清晰简洁,便于观察分析;节点特性时间序列曲线变化更加平滑,趋于平稳,消除了之前存在的明显的转折点;对于降噪处理后的二维相图,图形混乱程度降低,不同节点的图形相互干扰减少,规律性更加明显。在降噪后的二维相图中,不同节点的图形具有几何自相似性,说明了系统在演化过程中不是完全随机的,其变化存在一定的规律,因此管制系统具有混沌性。

## 5 结论

1) 对管制扇区与航空器节点特性的分析,可以尽快掌握管制扇区节点的工作状态和航空器节点飞行冲突情况,通过增派管制员人数或调整管制员注意力分配,及时调配航空器飞行,避免发生飞行危险事件。

2) 通过计算最大Lyapunov指数、分析二维相图,判断管制系统演化规律具有混沌性,是可预测的。

后期可以基于本文对管制系统混沌性的研究,对空中交通态势进行评估与预测,为管制员调配指挥提供更准确的状态信息。

### 参考文献

- [1] 王红勇,赵焱飞,温瑞英. 基于复杂网络的空中交通复杂性度量方法[J]. 系统工程, 2014, 32(3): 112-118.  
WANG Hongyong, ZHAO Yifei, WEN Ruiying. Air traffic complexity metrics based on complex networks[J]. Systems Engineering, 2014, 32(3): 112-118. (in Chinese)
- [2] 王红勇,张加豪,温瑞英. 空中交通复杂性研究进展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 36-46.  
WANG Hongyong, ZHANG Jiahao, WEN Ruiying. Research progress of air traffic complexity [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 36-46. (in Chinese)
- [3] 武喜萍,杨红雨,韩松臣. 基于复杂网络的空中交通特征与延误传播分析[J]. 航空学报, 2017, 38(s1): 113-119.  
WU Xiping, YANG Hongyu, HAN Songchen. Analysis of properties and delay propagation of air traffic based on complex network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(s1): 113-119. (in Chinese)
- [4] 齐雁楠,高经东. 空域扇区网络级联失效抗毁性及优化策略研究[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 356-364.  
QI Yannan, GAO Jingdong. Cascading failure invulnerability and optimization strategy of airspace sector network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 356-364. (in Chinese)
- [5] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks [J]. Nature, 2010, 464: 1025-1028.
- [6] SHAO J, BULDYREV S V, HAVLIN S, et al. Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations [J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2011, 83(3): 036116.
- [7] 王兴隆,潘维煌,赵末. 空中交通相依网络的脆弱性研究[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 268-277.  
WANG Xinglong, PAN Weihuang, ZHAO Mo. Vulnerability of air traffic interdependent network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 268-277. (in Chinese)
- [8] 王兴隆,潘维煌,赵末. 航空相依网络故障传播机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(6): 41-46.  
WANG Xinglong, PAN Weihuang, ZHAO Mo. Research on fault propagation mechanism of aviation interdependent network [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(6): 41-46. (in Chinese)
- [9] 王兴隆,潘维煌. 航空相依网络的弹性测度与分析[J]. 计算机真, 2019, 36(11): 41-46.  
WANG Xinglong, PAN Weihuang. The resilience measurement and analysis of aeronautical interdependent network [J]. Computer Simulation, 2019, 36(11): 41-46. (in Chinese)
- [10] 李昂,聂党民,温祥西,等. 管制—飞行状态相依网络模型及特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1204-1213.

- LI Ang, NIE Dangmin, WEN Xiangxi, et al. Control-aircraft state interdependent network model and characteristic analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1204-1213. (in Chinese)
- [11] 李昂, 聂党民, 温祥西, 等. 管制—飞行状态相依网络演化过程研究[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 481-493.  
LI Ang, NIE Dangmin, WEN Xiangxi, et al. Study on evolution process of control-aircraft state interdependent network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 481-493. (in Chinese)
- [12] 姜万录, 李宁宁, 朱勇. 居于小波基线的混沌运动识别新方法[J]. 燕山大学学报, 2013, 37(6): 499-506.  
JIANG Wanlu, LI Ningning, ZHU Yong. Wavelet ridge-based novel method for chaotic motion identification [J]. Journal of Yanshan University, 2013, 37(6): 499-506. (in Chinese)
- [13] 冯程, 刘姝含, 巩倩. 管制扇区交通指标的混沌特性分析[J]. 中国民航大学学报, 2018, 36(4): 11-14.  
FENG Cheng, LIU Shuhan, GONG Qian. Chaotic characteristic analysis of control sector traffic indices[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(4): 11-14. (in Chinese)
- [14] 邹磊, 郑林华, 林嘉宇, 等. 混沌理论在混沌跳频序列分析中的应用研究[J]. 微处理机, 2013, 34(3): 26-30.  
ZOU Lei, ZHENG Linhua, LIN Jiayu, et al. Research on application of chaos theory in chaotic frequency hopping sequence[J]. Microprocessors, 2013, 34(3): 26-30. (in Chinese)
- [15] 李士林, 尹成群, 尚秋峰, 等. 基于图像识别理论的混沌特性判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2003(10): 47-50.  
LI Shilin, YIN Chengqun, SHANG Qiufeng, et al. A method of identifying chaotic nature based on image recognition[J]. Proceedings of the CESS, 2003(10): 47-50. (in Chinese)
- [16] ICAO. Control navigation service procedures: aircraft operation (8168)[S]. Montreal, Canada: ICAO, 2018.
- [17] 杨智春, 张蕊丽. 基于最大李雅普诺夫指数的壁板热颤振特性分析[J]. 西北工业大学学报, 2009, 27(6): 770-776.  
YANG Zhichun, ZHANG Ruili. Analysis of panel thermal flutter using maximum Lyapunov exponent [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27(6): 770-776. (in Chinese)
- [18] 项牧. 混沌时间序列的非线性去噪方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
XIANG Mu. The study of nonlinear noise reduction for chaotic time series[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [19] 孙中皋, 程爽, 王菲, 等. 基于SSA的时间序列交叉相关分析中指数趋势的去除[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(2): 192-200.  
SUN Zhonggao, CHENG Shuang, WANG Fei, et al. Remove the effect of exponential trends in cross-correlation analysis of time series based on singular spectrum analysis [J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2018, 41(2): 192-200. (in Chinese)

#### 作者简介:

刘武君(1997—),男,学士,助理工程师。主要研究方向:航空管制。

温祥西(1984—),男,博士,副教授。主要研究方向:空管运行规划与安全管理。

范文广(1985—),男,学士,工程师。主要研究方向:航空管制。

段翔(1998—),男,学士,助理工程师。主要研究方向:航空管制。

(编辑:丛艳娟)