文章编号:1005-0523(2017)01-0073-06

航路网络流量波动行为分析

谢道仪,胡明华,谢 华,田 文,周雨凡

(南京航空航天大学国家空管飞行流量管理技术重点实验室,江苏 南京 211106)

摘要:空中交通系统是一个动态的复杂系统,各种因素导致的网络流量变化引起网络结构的改变,进而影响网络功能并造成延误与拥堵。为缓解我国空中交通延误较大的现状,需要深入分析航路网络流量的波动行为。以我国中南地区实际网络数据构建航路网络模型,分析节点流量的波动特性和动态特征。研究表明,该航路网络节点流量对时间的均值和标准差满足幂率且幂指数在1/2到1之间,并且在不同的时间和空间尺度下动态特性各异,意味着其波动性是内外影响因素共同作用的结果。并且将影响航路网络流量波动行为的内部影响因素从外部影响因素中分离出来,定量确定波动性的来源。最后,给出内外影响因素主导地位在观测尺度上的转换点。

关键词:航空运输;波动性;复杂网络;航路网络;幂率

中图分类号:V355.1 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.012

空中交通系统是一个由“人-机-环-管”构成的动态巨复杂系统,包含了丰富的宏观和微观特性,传统的研究方法分别针对如机场、航路点、航路/航线等具体的空域单元进行考量,却忽略了系统角度下空中交通系统的运行机理。目前我国针对航路网络的运行状态进行分析时,往往只着眼于某些繁忙航路点,制定如MIT(miles in tile)等相对粗放的流量管理策略,没有考虑到航路网络效应以及网络外的供需变化对网络运行造成的影响,导致流量管理效率低下,延误状况难以缓解。而在民航发达国家和地区,航路网络的运营与分析为关注的重点,如Eurocontrol建立了网络运行中心,提出网络化运行的概念并定期发布网络运行分析报告[1],但这些统计分析并未在原有效能分析的基础上突出网络特性的影响。亟需一种立足于系统角度的航路网络分析方法,剖析航路网络流量的动态波动行为,制定合理的流量管理策略,以提升航路网络的运行效率。

复杂网络理论是对复杂系统的抽象描述,强调了复杂系统的拓扑特性,为深入研究航路网络作为空中交通系统承载体所表现出的动态行为和演化过程奠定了理论基础[2]。Menezes和Barabasi在复杂网络理论的基础上针对不同的观测尺度考察各节点流量的波动特性,并且可以分离出流量波动的因素来源[3-4]。基于这个方法,国内已有学者对机场网络进行了实证研究。Zhang Hai-Tian等构建了机场网络波动模型,分析了中国、美国等真实机场网络的动态行为[5]。Li Shan-Mei分析了美国航空网络的波动特性,得到了不同观测尺度下网络流量波动的驱动因素[6]。然而我国空域资源严重受限,延误与拥堵的症结处并不完全在机场方。就航路网络来说,目前的研究成果多聚焦于航路网络的静态统计特性,从整体上分析网络结构。Wang分析了中国航路网络的度分布、平均路径长度和聚集系数,发现其具有无标度特性[7]。蔡开泉等引入了航班计划给中国航路网络节点赋权,揭示其节点强度服从指数分布[8]。Gurtner等研究了欧洲航路网络的点度和点强度分布,并分析了网络社团结构[9]。但是,单纯的结构分析无助于寻找致使网络呈现各种状态的原因,亦不能有助于流量管理策略的制定。而且静态统计粗放的时间粒度划分,未考虑实际网络的结构和功能会受流量的影

收稿日期:2016-08-11

基金项目:国家自然科学基金(71301074);国家自然科学基金民航联合研究基金重点项目(U1333202);中央高校基本科研业务费专项基金(NJ20150029)

作者简介:谢道仪(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为交通运输规划与管理。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

响呈现时变特性,致使分析结果的不准确。由于流量管理是个长期过程,不同阶段的流量管理具有不同的作用时间范围。亟需深入分析我国航路网络流量的波动的原因,寻找分析网络特性的最佳观测尺度。

现实复杂系统网络的发展与演化是众多因素共同作用的结果,故实验从实际网络的数据统计结果出发,选用网络流量这一特征指标,分析导致其发生波动的内外因素。将航路网络看作一个整体性的复杂系统,天气、拥堵等均是直接对网络自身的容量造成影响,属于造成流量波动的内部因素;网络外各种原因导致的需求的变化,不直接作用于网络容量,则认为是造成流量波动的外部因素。网络内外影响因素以不同的作用方式和特点,影响着网络的运行状态,需要分开考虑。针对航路网络的分析,首先需要依据流量的波动以区分网络内外影响因素对网络的影响,探寻网络结构演化的原因。

1 基础理论

1.1 幂律与流量波动因素

Menezes 和 Barabasi 在文献[3]中指出,网络中每个节点 $i(i=1,2,\cdots,n)$ 在给定统计时间粒度 $\triangle t$ 下,第 t $(t=1,2,\cdots,T)$ 个时间片内的流量 $q_i^{\triangle t}(t)$ 对 T 取得的均值 $\bar{q}_i$ 和标准差 σ_i 之间存在幂率关系

$$\sigma_i \propto (\bar{q}_i)^{\alpha} \tag{1}$$

其中

$$\bar{q}_i=\sum_{t=1}^{T} q_i^{\triangle t}(t),\ \sigma_i=\sqrt{(\sum_{t=1}^{n}(q_i^{\triangle t}(t)-\bar{q}_i))^2}$$

研究表明通过波动性分析:当幂指数 $\alpha\approx 0.5$ 时网络系统的流量波动具有内源性,在航路网络中体现为节点流量的随机性及节点间的相互限制与影响;当 $\alpha\approx 1$ 时该系统为传动系统,节点的流量波动由外部驱动因素起主要作用。Menezes 等人还发现在大多数实际网络中的幂指数 α 均处于 $[0.5,1]$ 内,并且 α 值随着外部因素强度及观测窗口的增大而增大。由于流量管理是一个长期的过程,不同的观测窗口针对不同阶段的流量管理效能分析均具有重要意义。

1.2 流量波动因素分离

上述实验文献定性分析了内外因素强度的变化趋势,但是当驱动网络系统流量波动的内外因素强度相对较为均衡时,难以划设平衡点且无法定量计算其强度比值。这里参考了 Menezes 等在文献[4]中提出的一套将内部驱动因素从整体中分离出来的方法,系统性的定量寻找波动性的来源。

1) 假设网络系统中节点的流量可以分解为由内部和外部驱动因素分别产生的流量的线性组合

$$q_i(t)=q_i^{\text{ext}}(t)+q_i^{\text{int}}(t) \tag{2}$$

其中:$q_i^{\text{ext}}(t)$ 和 $q_i^{\text{int}}(t)$ 分别表示由外部和内部因素产生的流量。

2) 设网络内共有 N 个节点,A_i 为节点 i 在给定观测尺度 $\triangle t$ 下,统计时间段 $t\in[1,T]$ 内的总流量与所有 N 个节点流量的比值

$$A_i=\frac{\sum_{t=1}^{T} q_i(t)}{\sum_{i=1}^{T}\sum_{t=1}^{T} q_i(t)} \tag{3}$$

则该网络内外驱动因素所产生的流量可以分别表示为

$$q_i^{\text{ext}}(t)=A_i\sum_{t=1}^{T} q_i(t) \tag{4}$$

$$q_i^{\text{int}}(t)=q_i^{\text{int}}(t)-A_i\sum_{t=1}^{T} q_i(t) \tag{5}$$

3) 定义 η_i 来衡量节点 i 内外驱动因素作用强度的比值,当 $\eta\gg 1$ 表明该网络系统的动态波动性受外部因素支配,$\eta\ll 1$ 则代表内部驱动因素强度超过了外部因素

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\eta_i=\frac{\sigma_i^{\text{ext}}}{\sigma_i^{\text{int}}} \tag{6}$$

其中：σ_i^{ext} 和 σ_i^{int} 分别为节点 i 外部和内部驱动因素所产生流量的标准差。

2　航路网络数据来源与选取依据

我国中南珠三角地区航班量巨大且空间狭小，是世界上最繁忙的终端区之一。网络静态结构数据来源为 NAIP，动态数据采用在中南空中交通管理局实地采集的 2014 年 5 月二次雷达数据。基于 SQL&VS2010 编写程序，通过雷达点航段归属统计航路点飞行流量，以验证航路网络的波动特性并分析其在时空维度上的变化趋势。

航路网络的功能与性能由网络自身的结构决定，若将航路网络节点比作网络结构的骨架，网络中的流量则为网络结构的血肉。网络流量的变化引起结构的改变，进而使得网络性能产生变化，故引起流量波动的原因也是网络功能改变的原因。航路网络的功能是将航班安全、有序、高效的运输到目的地，一旦网络功能改变后偏离了原有的设计，便会产生拥堵和延误甚至引发安全事故。针对航路网络流量波动的研究有助于寻找网络功能偏离的原因，为不同阶段的流量管理策略制定提供依据。

3　实验结果分析

3.1　不同时空观测尺度上的流量波动

选取 ZGGGAP 扇区内的航路点构建航路网络 A，基于上文 1.1 节中所述的方法分析 2014 年 5 月航路网络各航路点 $\bar{q}_i$ 和 σ_i 之间的关系。观测尺度 $\triangle t$ 分别选取 15 min，1 h，6 h 和 12 h，均为 24 h 的约数，以实现对航路网络交通流量固有周期完整性的保留，以减小固有周期的波动影响。

实验结果如图 1 所示，航路网络节点流量均值 $\bar{q}_i$ 与标准差 σ_i 之间幂率显著，且幂指数 $\alpha\in(0.5,1)$ 意味着航路网络系统的运行状态同时受到内部和外部因素的影响。随着观测尺度的增加 α 值也随之增大，表示航路网络流量波动的驱动因素由内部向外部转变，可以理解为：航路网络与城市道路交通网络类似，由于受限于二维的地理空间，网络规模相对较小，航路点之间的距离较近，在较小观测尺度下，网络状态主要由航路点间的相互影响起主导作用（例如航班到达受天气、流量控制等影响所体现出的随机性，航路点处的排队及拥堵等）；在观测尺度较大时，流量的波动则主要是受到网络结构及网络外部流量需求的变化等影响，呈现一定的宏观特性。

扩大网络的覆盖范围，选取 ZGGGAP、ZGSDAP、ZGGGAR01 等 10 个扇区内的航路点，构建航路网络 B，覆盖珠三角终端区。试验结果显示波动幂率在此航路网络中仍然成立，两个网络的 $\triangle t$，α 对比如图 2 所示：两组数据直观上均呈现出分段特性，网络 A 和网络 B 各自的分段点分别在 $\triangle t\in(3,6)$ 和 $\triangle t\in(8,12)$ 之间，分段点后 α 的变化率有明显增加，即随着网络规模的扩大其内部因素的强度随之增加。从抽象的能量守恒角度来看，这个现象可以解释为当航路网络在有限空间范围内演化时，空间范围的扩大将原有的外部驱动因素吸收为内部因素，即将原先的外部需求转化为了内部的相互作用力，使得节点之间的相互影响与限制得到增强。因为网络 A 为中南地区最繁忙的广州白云机场进近扇区并且包含在网络 B 中，即网络 A 节点的流量波动内部因素强于网络 B 中其余部分，导致两组数据在较小时（内部影响因素主导）重合度较高，具有类似的内外驱动强度比例。

流量波动幂率存在于航路网络当中，越小的观测尺度越能体现网络内部作用力的影响。例如中南地区进行网络效能评估时，应尽可能小的选择观测尺度以反应网络的内部影响。

3.2　内外因素分离

实验处理了网络 A 和网络 B 中的节点流量数据，分离出各个节点的 $q_i^{\text{ext}}(t)$ 和 $q_i^{\text{int}}(t)$。以 GYA 点为例，取 $\triangle t$=1 小时，结果如图 3 所示，与航空网络等复杂网络类似，$q_i^{\text{ext}}(t)$ 呈现出 $q(t)$ 与类似以天为周期的变化特性；$q_i^{\text{int}}(t)$ 则呈高频变化趋势，振幅也较小，航路网络流量波动的内部因素仅在较小的观测尺度下会有所体现。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

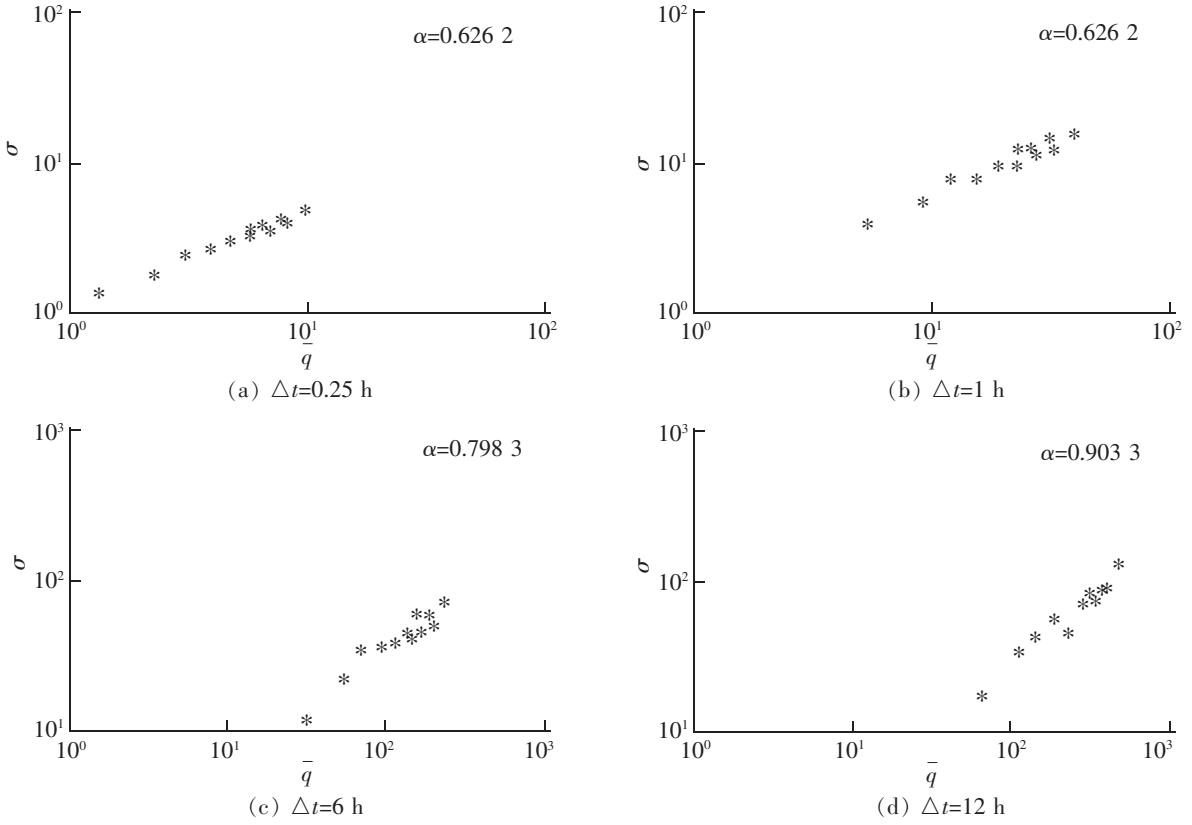

图1 航路网络节点流量均值与标准差间的幂率关系

Fig.1 Power law between mean value and standard deviation of flow in air route network

内外因素分离后幂率仍然分别成立:航路网络节点外部成分的波动幂率必定存在且 $\alpha=1$;内部成分的数据点相较于整体流量分布的较为松散,航路网络内部驱动因素导致的波动幂率较弱。选取不同的 $\triangle t$,重复实验后得到图4所示的 η 频率分布直方图。当 $\triangle t=1$ h,频率分布的高峰位于 $\eta=1$ 附近,说明当前环境下内外因素的强度相当;随着 $\triangle t$ 的增加,频率分布的高峰逐渐右移且增大,航路网络节点个体间内外因素的差异性减小。结合图2,可知 $\triangle t=12$ h,外部驱动因素在网络节点流量波动中占据了绝对的主导地位,进一步掩盖了内部因素的影响力,使得各个节点的驱动因素较其他 $\triangle t$ 下趋向同质性。

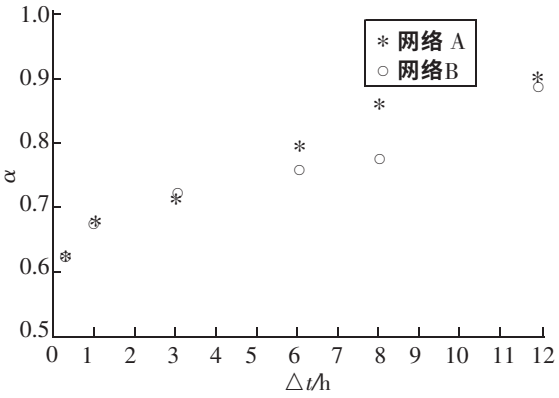

图2 不同范围航路网络波动行为

Fig.2 Fluctuation behavior of air route network in different geographical scopes

表1中给出了网络A和网络B中所有节点 η_i 均值 $\overline{\eta}$ 随 $\triangle t$ 改变的变化趋势,网络A的 $\overline{\eta}$ 值在给定 $\triangle t$ 下均大于网络B,当 $\triangle t$ 在 $\triangle t\in(0,12)$ 范围内增大时,外部影响因素对于网络节点流量波动性的影响不断加强,再次验证了上文所得到的结论。网络A和网络B中,$\triangle t=0.25$ h与 $\triangle t=1$ h为观测尺度全分割日周期情况下,$\overline{\eta}$ 最接近1的点,即内外驱动因素主导地位的转换点。我们将这个阈值 η',作为网络动态行分析时不同侧重点下观测尺度的选取标准,流量的改变带动网络结构和功能的改变,因此想要精确分析网络内部影响下的网络效能用以优化网络结构和流量管理策略,必须要进行波动性分析并寻找恰当的观测尺度。例如,分析网络A的网络运行效能需要选取15 min以下的观测尺度才能得到由网络内部影响较强的网络数据,以得到精确的结论。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

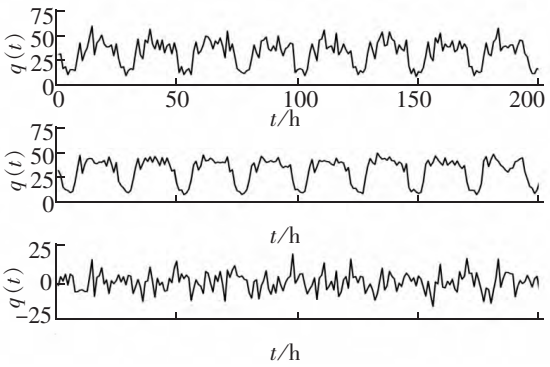

图 3　航路网络节点波动内外因素分离

Fig.3　Separation of the internal and external factors of fluctuation for air route network

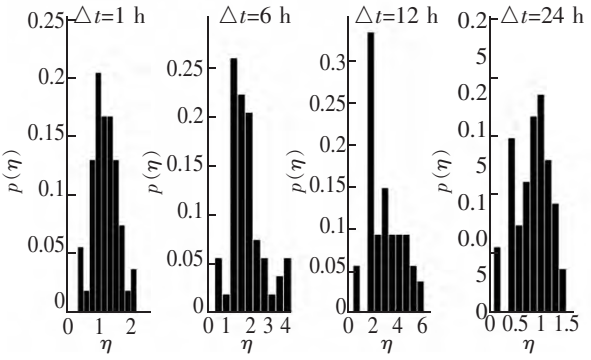

图 4　频率分布直方图

Fig.4　Frequency distribution histogram

表 2　不同网络的随观测尺度的变化关系

Tab.2　Changes of scale in different network

观测尺度△t/h	0.25	1	2	3	4	6	8	12
网络 A 的 $\bar{\eta}$	0.989 0	1.501 3	1.751 4	1.856 8	2.095 9	1.952 7	2.785 6	3.464 6
网络 B 的 $\bar{\eta}$	0.865 2	1.054 0	1.294 3	1.453 6	1.695 4	1.700 7	2.250 0	2.761 5

4　结论与应用

航路网络模型是以航路点为节点、航段为边构建的网络，航路网络运行状态分析实质上是研究网络中流量的动态行为所造成的影响。科学有效的流量管理策略需要考虑其作用时间范围下，网络结构与功能动态性的影响因素来源。基于我国中南珠三角地区航路网络实测数据进行分析，验证了波动性分析在航路网络上的可用性，网络中节点的流量均值与标准差存在幂率现象且幂指数 $\alpha \in (0.5,1)$，随着观测尺度的增加总体呈上升趋势，但在不同空间覆盖范围下呈各异的演化过程。决定这一演化过程的是导致航路网络流量产生波动的内部和外部因素作用力的相对强度变化，例如天气等原因导致的局部容量下降、航班拥堵等内部因素和网络外需求变化为主的外部因素。

综合上述的研究成果，给出优化后的航路网络流量管理策略制定流程，如图 5 所示。

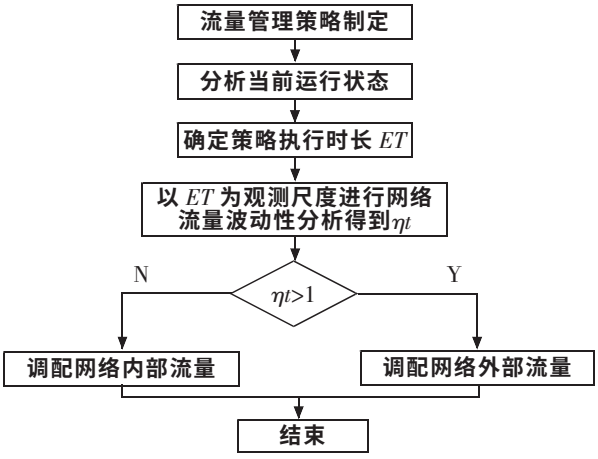

图 5　基于波动性分析的流量管理流程

Fig.5　Flow chart of traffic flow management based on fluctuation analysis

参考文献：

[1] Network Manager of Eurocontrol. Monthly Network Operations Report [S]. Brussels：Eurocontrol，2016.

[2] 汪小帆，李翔，陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006.

[3] MENEZES M A，BARABASI A L. Fluctuations in network dynamics[J]. Physical Review Letters，2004，92(2)：028701.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[4] MENEZES M A, BARABASI A L. Separating internal and external dynamics of complex systems[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(6): 068701.
[5] ZHANG HAI-TIAN, TAO YUA, SANG JIAN-PING, et al. Dynamic fluctuation model of complex networks with weight scaling behavior and its application to airport networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014: 590-599.
[6] LI SHAN-MEI, XU XIAO-HAO, MENG LING-HANG. Fluctuations in airport arrival and departure traffic: A network analysis[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(8): 088901.
[7] WANG HONGYONG, WEN RUIYING. Analysis of Air Traffic Network of China[C]//哈尔滨: 东北大学、IEEE 工业电子分会、IEEE 控制系统协会哈尔滨分会, 第 24 届中国控制与决策会议论文集, 2012.
[8] 蔡开泉, 张军, 杜文博, 等. Analysis of the Chinese air route network as a complex network[J]. Chinese Physics B, 2012(2): 608-614.
[9] GURTNER G, VITALI S, CIPOLLA M, et al. Multi-scale analysis of the European airspace using network community detection[J]. Plos One, 2014, 9(5): e94414.

Analysis of Fluctuations in Air-Route Network Flow

Xie Daoyi, Hu Minghua, Xie Hua, Tian Wen, Zhou Yufan

(National Key Laboratory of Air Traffic Flow Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: Air traffic system is a complex dynamic system, in which temporal and spatial variation of aircraft in route network may affect the network dynamics. In order to alleviate the current situation of China's air traffic delays, we need to analyze the fluctuation behavior of the air-route network. Taking the south central China waypoint as the node, air route segment as the edge, this paper creates a route network model to analyze the fluctuation and dynamic characteristics of route network node flow. It showed that the mean and standard deviation of time for node flow met power law and its power index was between 0.5-1, and the dynamic characteristics differed in various time and spatial scale, which means the fluctuation was caused by both internal and external factors. Then, it separated the internal factors affecting variable behavior of route network flow from external factors to determine the source of fluctuation quantitatively. It provides theoretical foundation and methodological support for scientific analysis of operating state of route network and effective formulation of management policy of flow.

Key words: air transportation; fluctuation; complex network; air-route network; power law

(责任编辑　姜红贵)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net