

考虑关键点流量限制的多机场协同放行策略研究

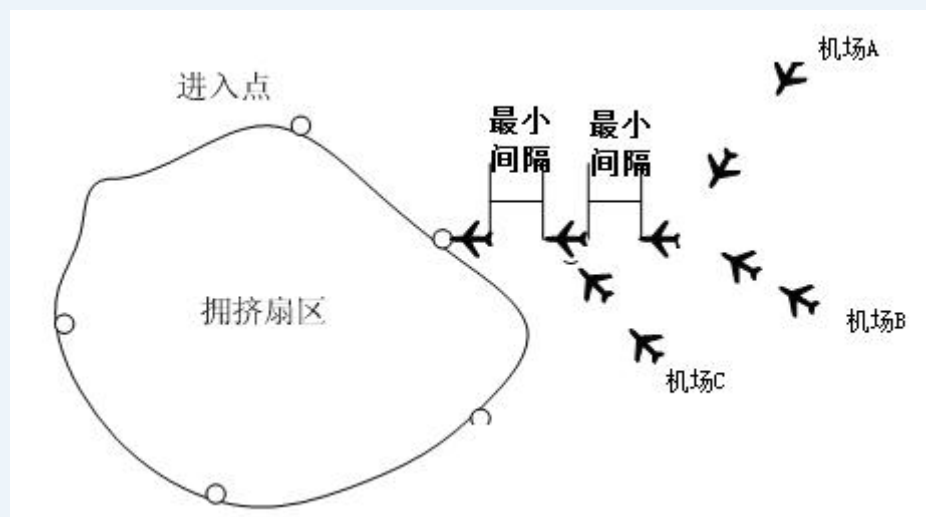


主讲教师： 康瑞

背景

■ 协同放行是指在某个时间段内，对预计引起流量拥挤的多个起飞机场的航班采取的一种共同协调、统一发布起飞时隙的流量管理机制。

■ 放行优化是解决空中交通流量拥挤的一种方法。



1. 提高航班延误分配的公平性
2. 考虑入界点的流量限制
3. 提高优化效率
4. 针对不同状态航班的分别处理

研究意义

- 本项目研究考协同放行策略是传统放行流量优化的一种改进：
 - 1、机场容量限制-->关键点入界限制；
 - 2、单一目标函数-->延误优化的同时兼顾机场正点率；
 - 3、仅考虑纵向间隔-->同时考虑纵向间隔和垂直间隔；

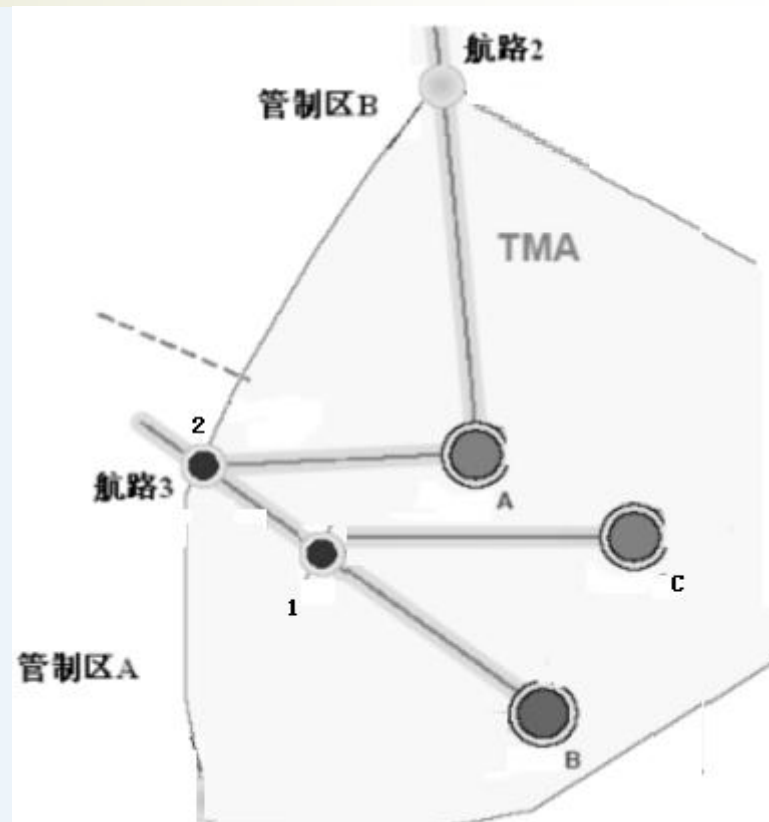
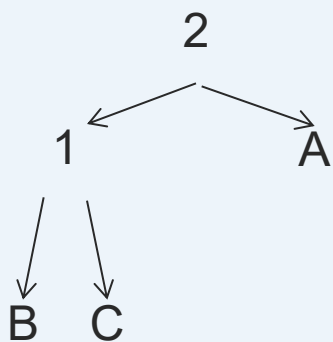
研究内容

- 理论研究——构造考虑关键点流量限制的多机场协同放行策略
 - 基于监视数据的多机场放行关键点识别方法
 - 基于关键点的多机场放行优化算法
- 应用验证——设计开发一套多机场协同放行原型系统，为多机场出发流优化提供决策支持工具。

构造考虑关键点流量限制的多机场协同放行策略

基于监视数据的多机场放行关键点识别方法

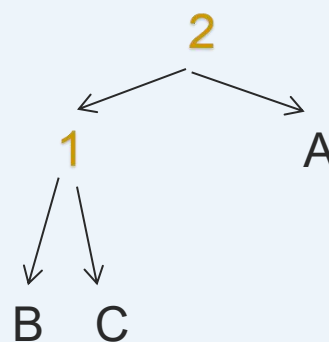
1. 构造多机场放行飞行航路的拓扑结构；
2. 以拥挤空域入界点为根，形成有向树；



构造考虑关键点流量限制的多机场协同放行策略

基于关键点的多机场放行优化算法：

1. 构造多机场放行飞行航路的拓扑结构；
2. 以拥挤空域入界点为根，形成有向树；
3. 根节点其叶子节点的关键点；

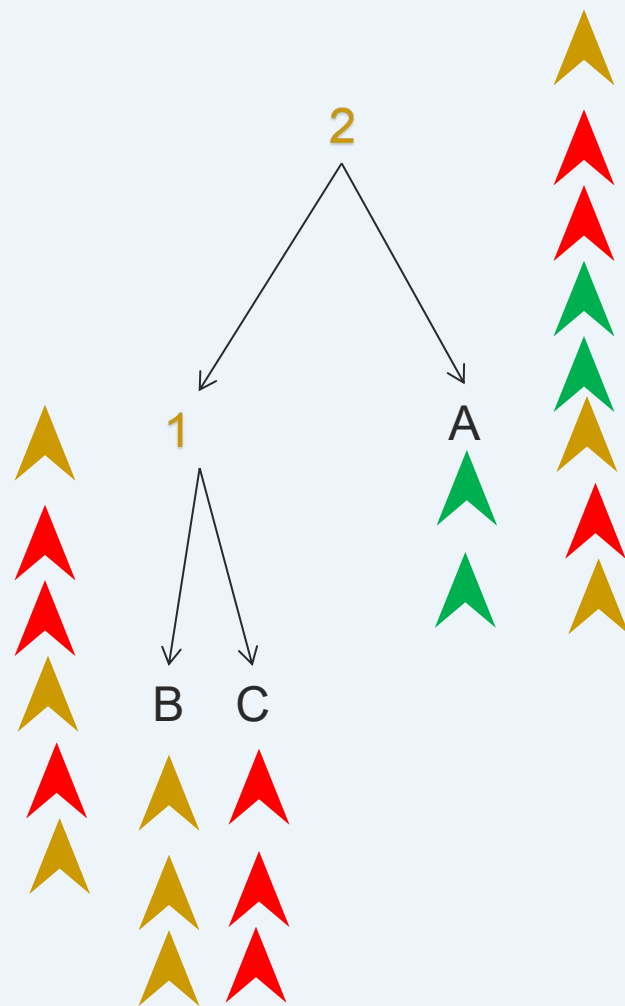


构造考虑关键点流量限制的多机场协同放行策略

基于关键点流量限制的多机场放行优化算法

1. 计算流程

从最底层叶子节点开始，为起飞机场航班分配到达父节点（最近关键点）的次序，并根据关键点流量限制（间隔限制），计算到达关键点时间。



构造考虑关键点流量限制的多机场协同放行策略

■ 基于关键点流量限制的多机场放行优化算法

$$f_i = \{\Delta t, ETD, STD, N, A_i, t_{delay}, C_t\} \quad \text{多元航班信息对象}$$

$$T_t^q \quad \text{关键点流量限制}$$

$$p_{i,n} \quad \text{排序优先级}$$

$$p_{i,n} = \omega_1 w'_{i,n} + \omega_2 C'_{i,n} + \omega_3 \mu'_i \quad C_{i,n} = \{C_a, C_g\}$$

平均延误时间、平均延误损失，延误航班个数。三者 in 决策中的重要性由权重调节

构造考虑关键点流量限制的多机场协同放行策略

- 为提高运算效率设计运行流程
利用顺序遍历代替枚举计算

逆序遍历终端节点，分配到最近关键点的次序和时间



距离入界点越远的航班，到达入界点延误程度越小

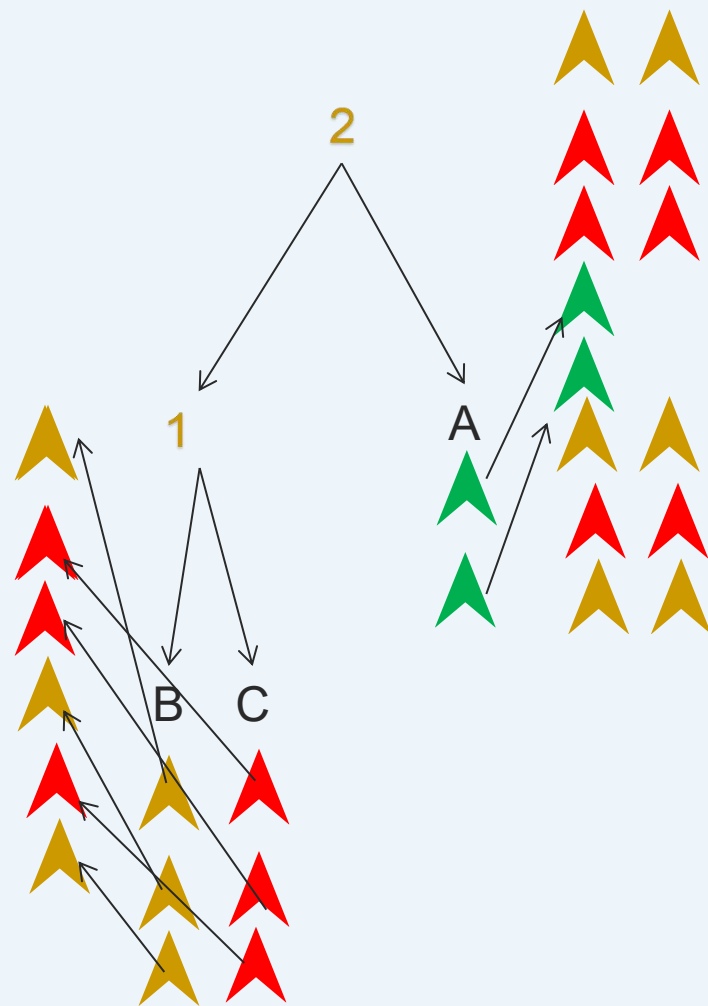
尽量将延误分配到还未起飞的航班上

顺序计算各叶子节点中航班优先级，优先级高的优先分配到达关键次序和时间。



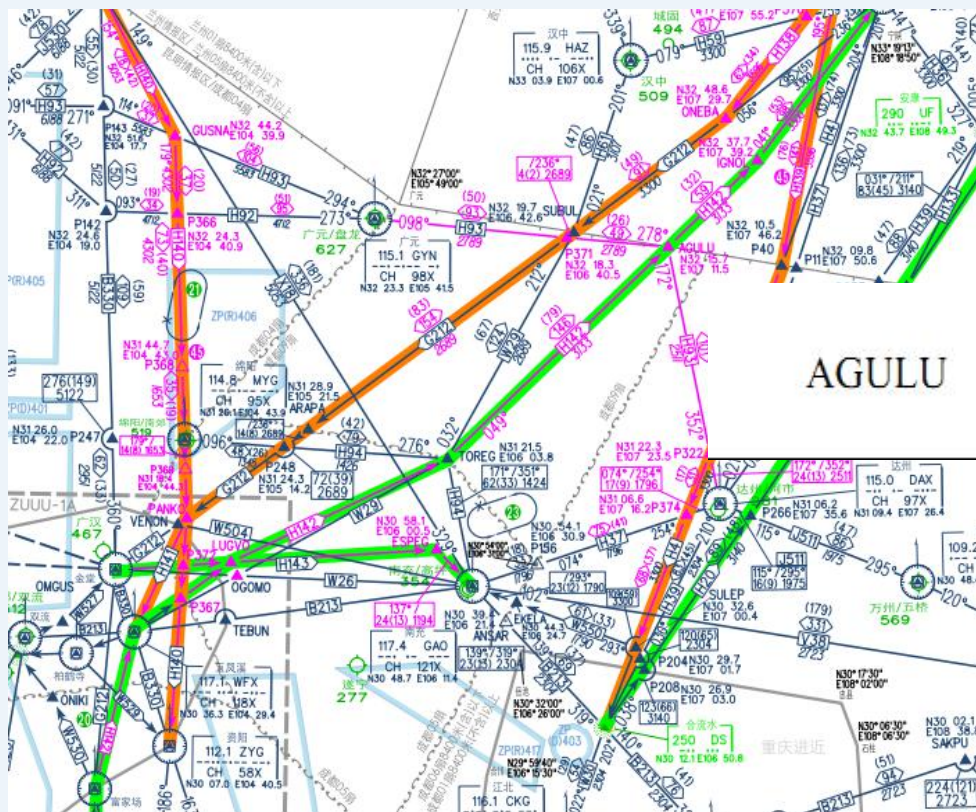
在单一机场放行序列中，基于FCFS进行放行

尽量使放行顺序和计划顺序偏差较小



应用验证

- ✓ 以成都等西南多机场经H142飞往华北、东北等24个机场的多机场放行航班为样本，验证算法。



N32°15'43"
E107°11'31"

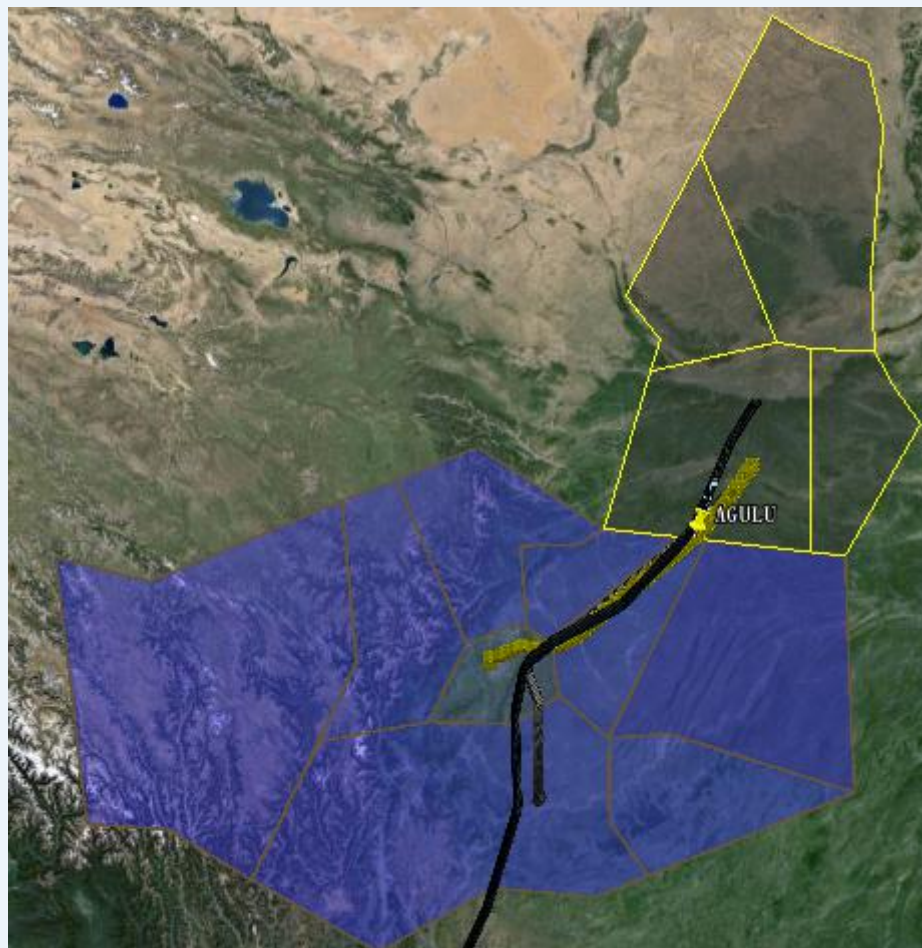
新 H93 与 H142 的
交点

应用验证

移交点	高度范围	航路、线	备注
AGULU	S0920（不含）以上	H142	成都与 ZLXYAR05 移交
	S0920（含）以下	H142	成都与 ZLXYAR03 移交

2.4.3 双方都实施雷达管制时,在高度标准气压 6000 米（含）-12500 米（含）之间通过移交点的同高度飞行航空器移交水平间隔为 30 公里;

2.5.1.1 由成都区域经 AGULU 飞越西安区域的航空器主用 9500 米、10100 米、11300 米的高度层。



应用验证

- ✓ 以西南9机场起飞，经过H142以AGULU点入界，进入ZLXYAR05扇区，飞往华北、东北等24个机场的航班飞行计划如下表

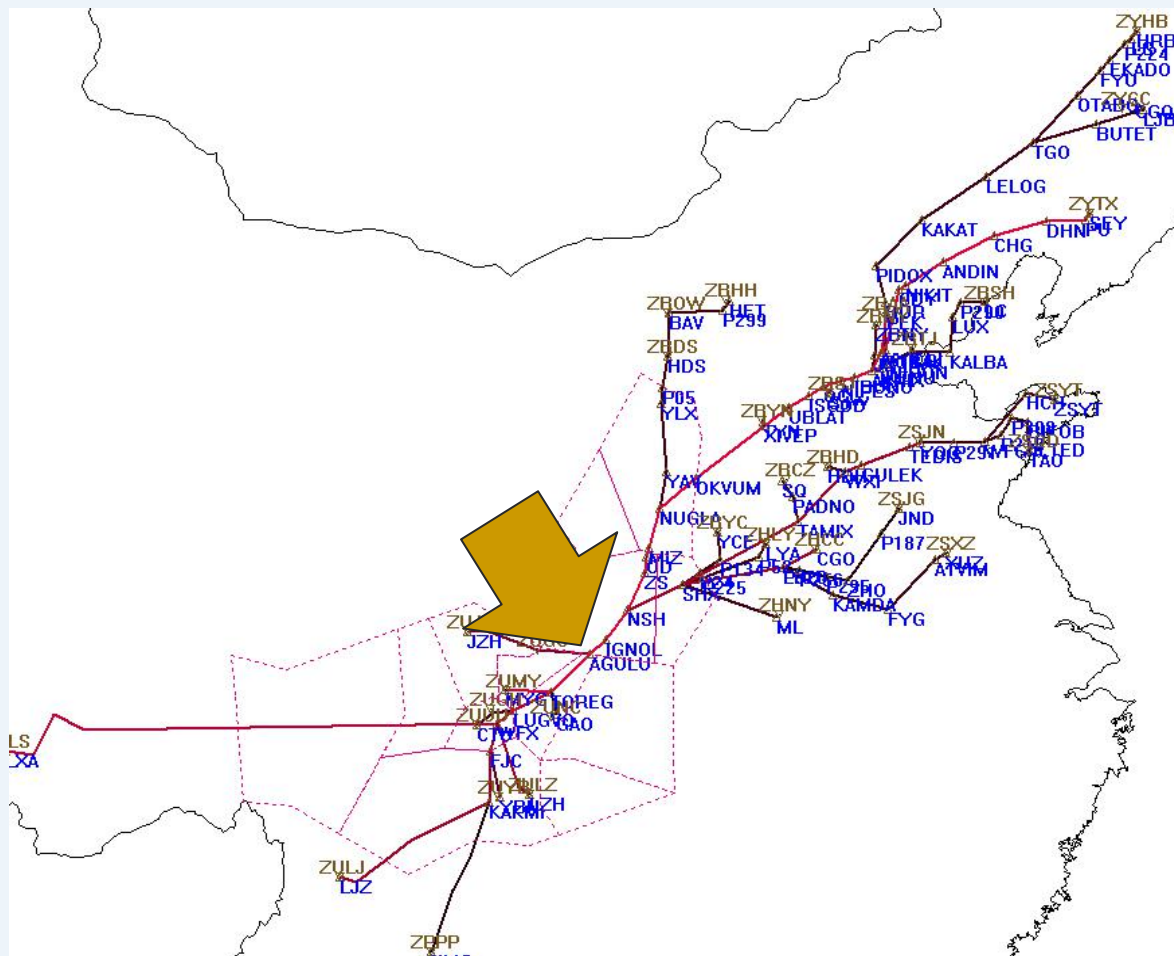
航班	航线	航路
ZUNC-ZBAA	南航-北京	GAO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, BOBAK, PEK
ZUGU-ZBAA	广航-北京	GYN, P371, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, BOBAK, PEK
ZUGH-ZULY	广航-沈阳	JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, P225, P52, LYA
ZPPP-ZBAA	昆明-北京	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, BOBAK, PEK
ZPPP-ZBSJ	昆明-石家庄	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, SJW
ZPPP-ZBTJ	昆明-天津	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, NIKON
ZPPP-ZBYN	昆明-太原	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, TYN
ZPPP-ZHCC	昆明-郑州	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, P320, CGO
ZPPP-ZSJN	昆明-南京	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, TAMIX, WXI, GULEK, TEDIS, YQG
ZPPP-ZSQD	昆明-青岛	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, TAMIX, WXI, GULEK, TEDIS, YQG, P291, WFG, P218, P308, BIKOB, ALTED, TAO
ZPPP-ZSJC	昆明-长沙	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, LRU, P256, P295, ZHO, P187, JND
ZPPP-ZYTX	昆明-沈阳	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, VVK
ZPPP-ZYHB	昆明-哈尔滨	KMG, DADOL, ZAT, ENTOW, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, VVK
ZUUU-ZBAA	成都-北京	HUR, PIDOX, KAKAT, LELOC, TOO, OTABO, FTU, EKADO, P224, LS, HMB
ZUUU-ZBZC	成都-长春	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, TAMIX, PABVO, SQ
ZUUU-ZBDS	成都-鄂尔多斯	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, YAV, YLK, P05, HDS
ZUUU-ZBHD	成都-邯郸	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, TAMIX, WXI, HDH
ZUUU-ZBHH	成都-呼和浩特	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, YAV, YLK, P05, HDS, BAV
ZUUU-ZBHY	成都-南昌	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, JB, ZBNY
ZUUU-ZBOW	成都-包头	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, YAV, YLK, P05, HDS, BAV, P299, HET
ZUUU-ZBSJ	成都-石家庄	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, SJW
ZUUU-ZBSH	成都-秦皇岛	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, NIKON, CG, KALBA, LUX, P290, LC
ZUUU-ZBTJ	成都-天津	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, NIKON, CG, TAJ
ZUUU-ZBYC	成都-运城	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, P24, P134, YCE
ZUUU-ZBYN	成都-太原	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, TYN
ZUUU-ZHCC	成都-郑州	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, P320, CGO
ZUUU-ZHNY	成都-沈阳	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, P225, P52, LYA
ZUUU-ZJNZ	成都-南阳	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, M
ZUUU-ZSJC	成都-长沙	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, TAMIX, WXI, GULEK, YQG
ZUUU-ZSQD	成都-青岛	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, TAMIX, WXI, GULEK, TEDIS, YQG, P291, WFG, P218, P308, BIKOB, ALTED, TAO
ZUUU-ZSJC	成都-烟台	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, LRU, P256, P295, ZHO, P187, JND
ZUUU-ZSYT	成都-烟台	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, TAMIX, WXI, GULEK, TEDIS, YQG, P291, WFG, HCH, ZSYT
ZUUU-ZYCC	成都-长春	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, VVK, HUR, PIDOX, KAKAT, LELOC, TOO
ZUUU-ZYTX	成都-沈阳	BUTET, LJB, CGQ CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, VVK, CGV, NIKIT, ANDIN, CHG, DNN, PU, SEY
ZUUU-ZYHB	成都-哈尔滨	CTU, JTG, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, VVK, HUR, PIDOX, KAKAT, LELOC, TOO
ZUYB-ZBAA	金鹰-北京	OTABO, FTU, EKADO, P224, LS, HMB
ZUIJ-ZBAA	金鹰-北京	YEN, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, BOBAK, PEK
ZULZ-ZBAA	泸州-北京	IZH, P143, GYN, P371, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, BOBAK, PEK
ZULJ-ZBAA	丽江-北京	LZH, P78, ZYG, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, BOBAK, PEK
ZULJ-ZHCC	丽江-郑州	LJZ, CHH, P267, SB, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, P320, CGO
ZULJ-ZBSJ	丽江-石家庄	LJZ, CHH, P267, SB, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, SJW
ZULJ-ZSJN	丽江-南京	LJZ, CHH, P267, SB, KAKMI, FJC, WFX, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, SHK, TAMIX, WXI, GULEK, TEDIS, YQG
ZULS-ZBAA	拉萨-北京	LJA, DM, OKVUM, XIVEP, LUGVO, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, BOBAK, PEK
ZULJ-ZBYN	丽江-太原	MYG, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, TYN
ZUMY-ZYTX	绵阳-沈阳	MYG, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, IKENU, VVK, CGV, NIKIT, ANDIN, CHG, DNN, PU, SEY
ZUMY-ZBAA	绵阳-北京	MYG, TOREG, AGULU, IGNOL, NSH, ZS, OD, MIZ, NUGLA, OKVUM, XIVEP, UBLAT, ISGOD, OC, NIPES, IBUNO, AVNIX, BOBAK, PEK

起飞机场	降落机场		
ZUNC	ZBAA	ZYTX	ZBYC
ZPPP	ZULY	ZYHB	ZHLY
ZUUU	ZBSJ	ZBCZ	ZHNY
ZUYB	ZBTJ	ZBDS	ZSXZ
ZUIJZ	ZBYN	ZBHD	ZSYT
ZULZ	ZHCC	ZBHH	ZYCC
ZULJ	ZSJN	ZBNY	
ZULS	ZSQD	ZBOW	
ZUMY	ZSJG	ZBSH	

飞行航路拓扑结构分析

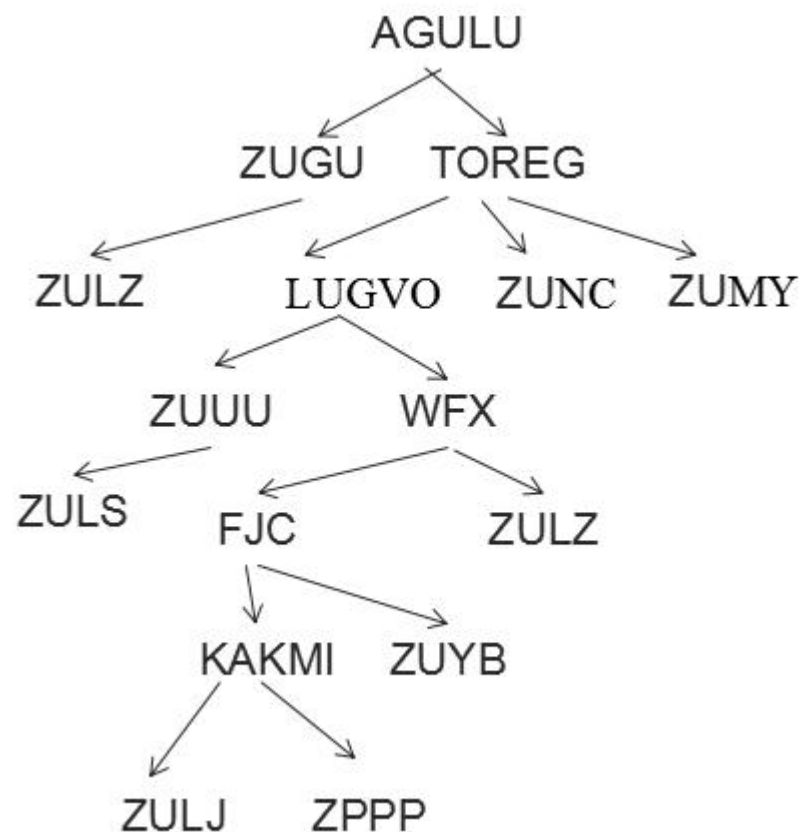
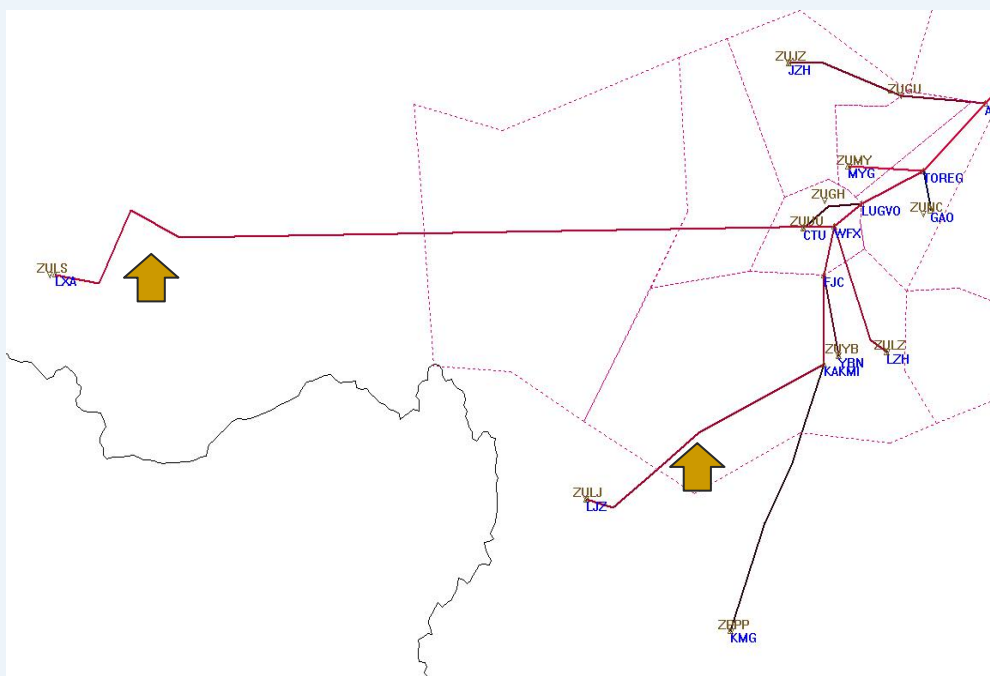


二维航路 拓扑结构



基于监视数据的多机场放行关键点识别

飞行航路拓扑结构分析



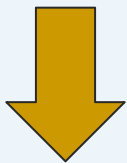
基于监视数据的多机场放行关键点识别

飞行航路拓扑结构分析

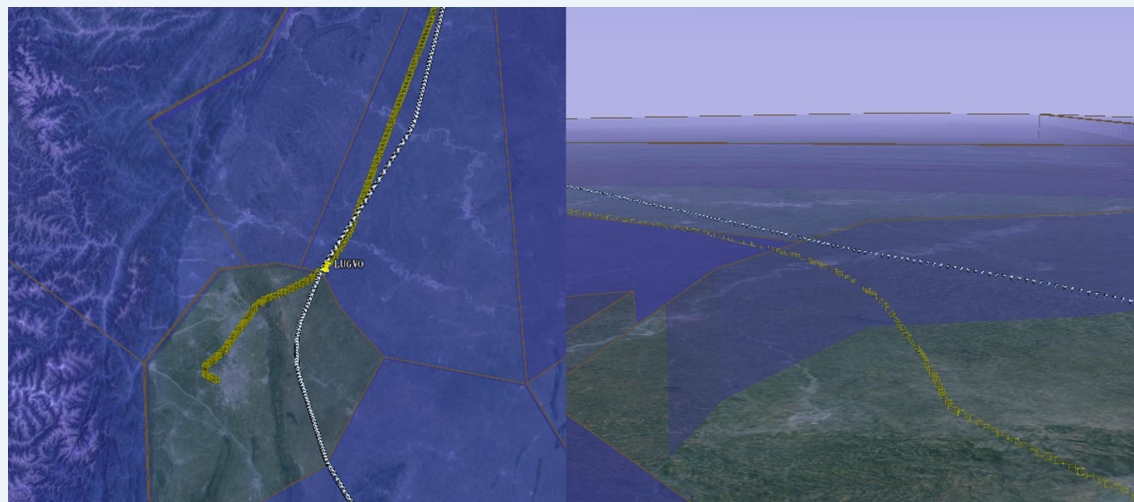
多机场离场
航班雷达数
据处理



过点高度统
计分析

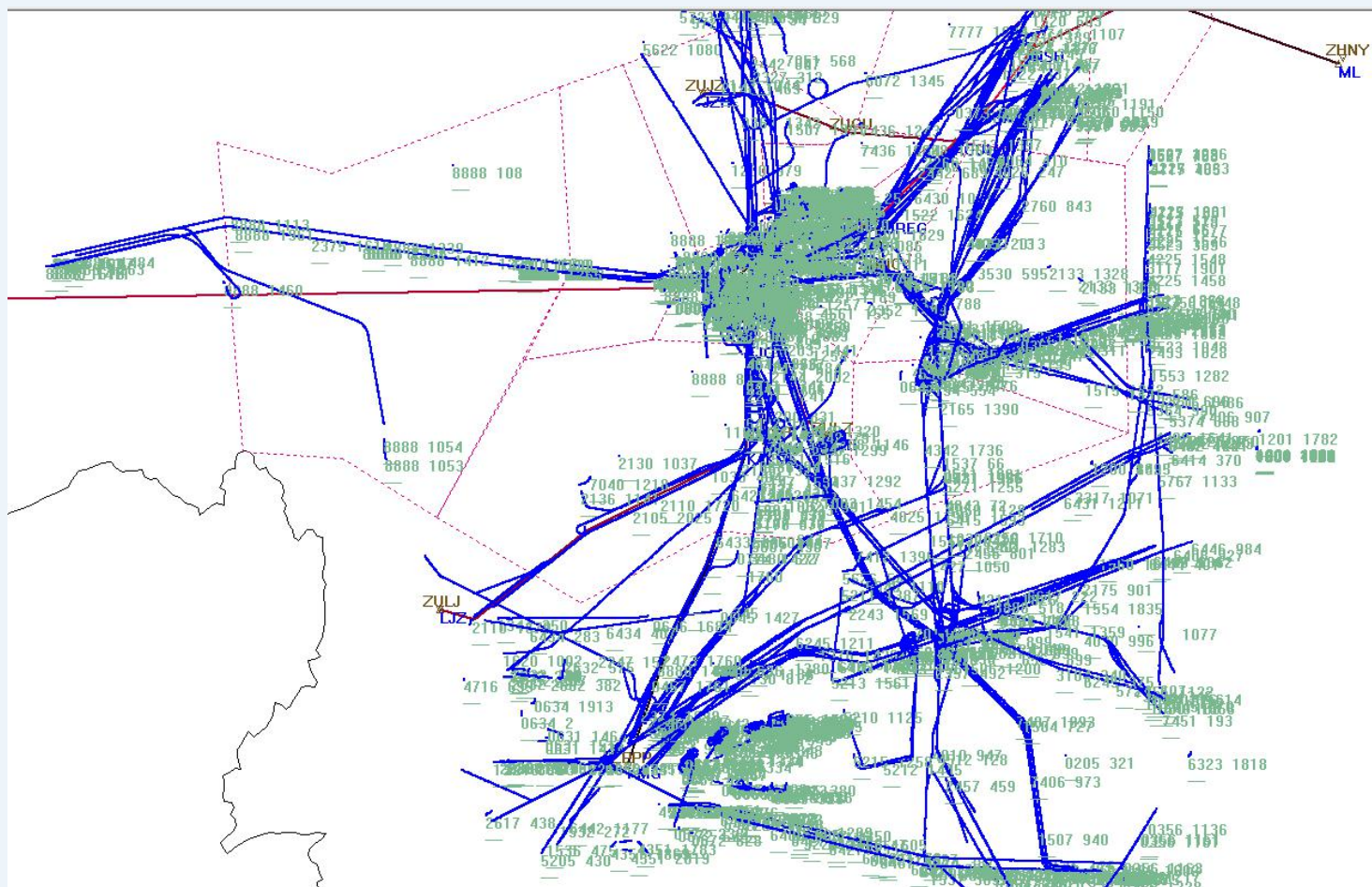


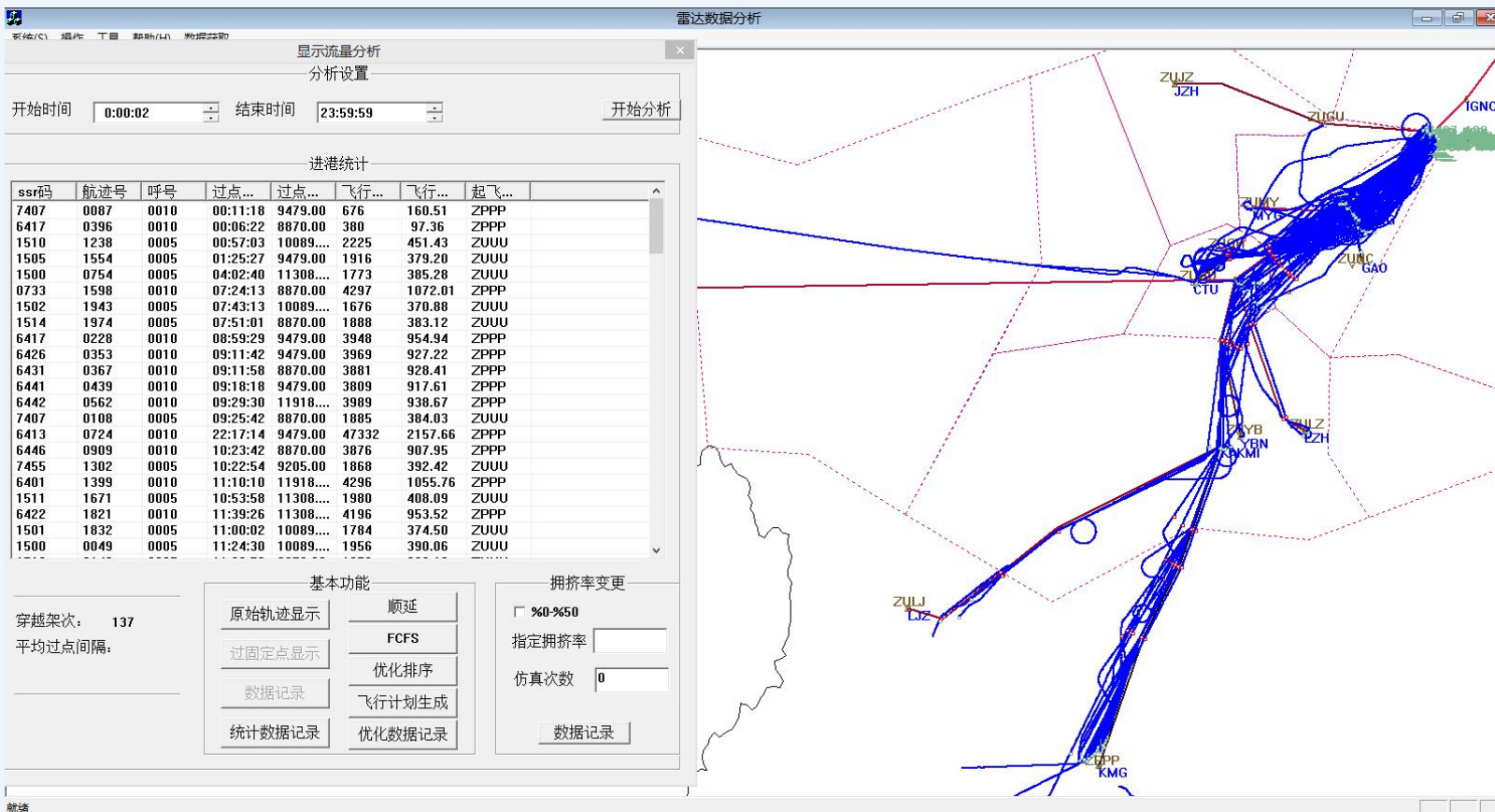
飞行航路三
维拓扑结构



航段名称	平均飞行距离	飞行距离标准差	平均飞行时间	飞行时间标准差	平均高度	高度标准差	架次
CTU_TOREG	241.21	13.77	1245.7	81.32	5532.77	401.94	67
GYN_AGULU	226.23	83.21	1172	356	5905.97	1010.92	2
KAKMI_WFX	214.76	17.53	878.92	76.27	10055.43	1007.44	59
KMG_KAKMI	419.09	16.23	1798.92	88.84	9222.53	748.81	53
LJZ_KAKMI	421.42	38.82	1768.83	164.38	9072.7	852.69	6
LXA_WFX	628.25	318.88	2604	1320	10107.21	742.21	2
LZH_WFX	219.9	8.51	1096	104	6187.75	198.53	2
TOREG_AGULU	150.03	12.49	612.56	55.36	9878.97	940.72	133
WFX_TOREG	185.66	137.33	694.83	89.53	10073.78	919.17	65
YBN_WFX	200.74	0	1149	0	3050.48	0	1

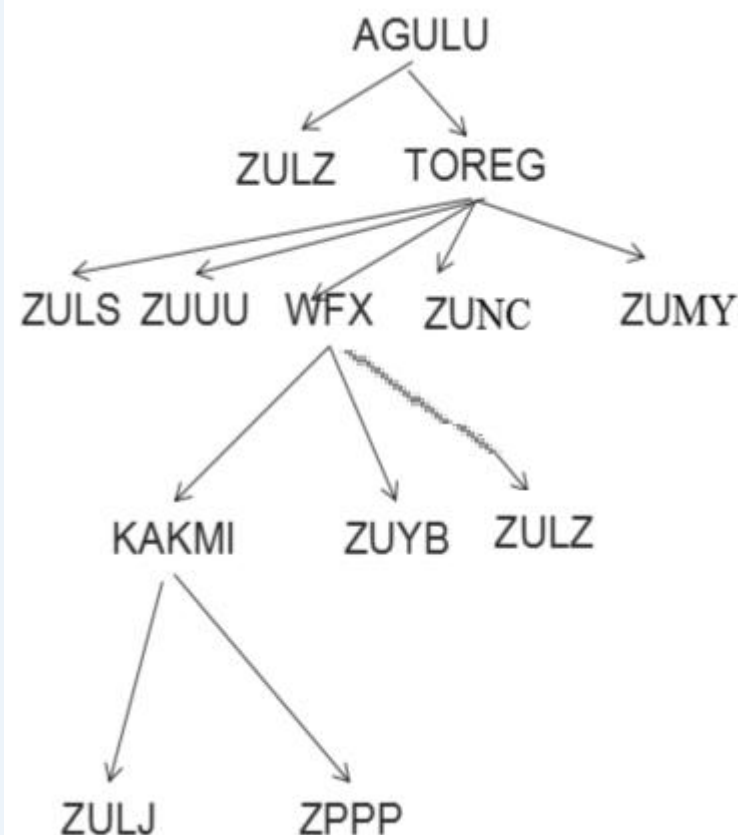
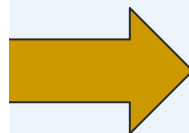
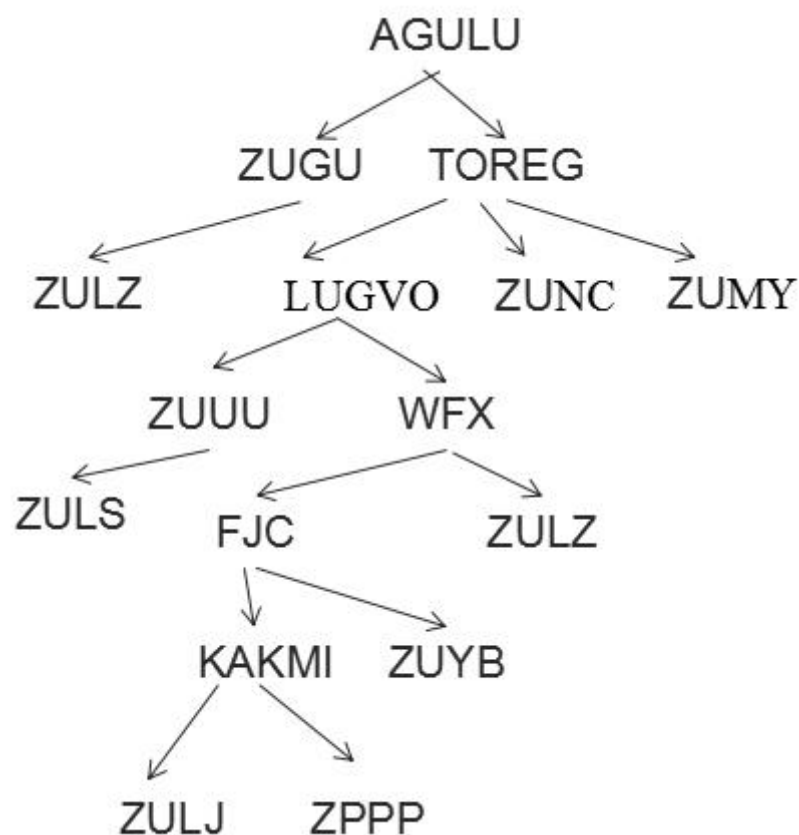
基于监视数据的多机场放行关键点识别 飞行航路拓扑结构分析





基于监视数据的多机场放行关键点识别

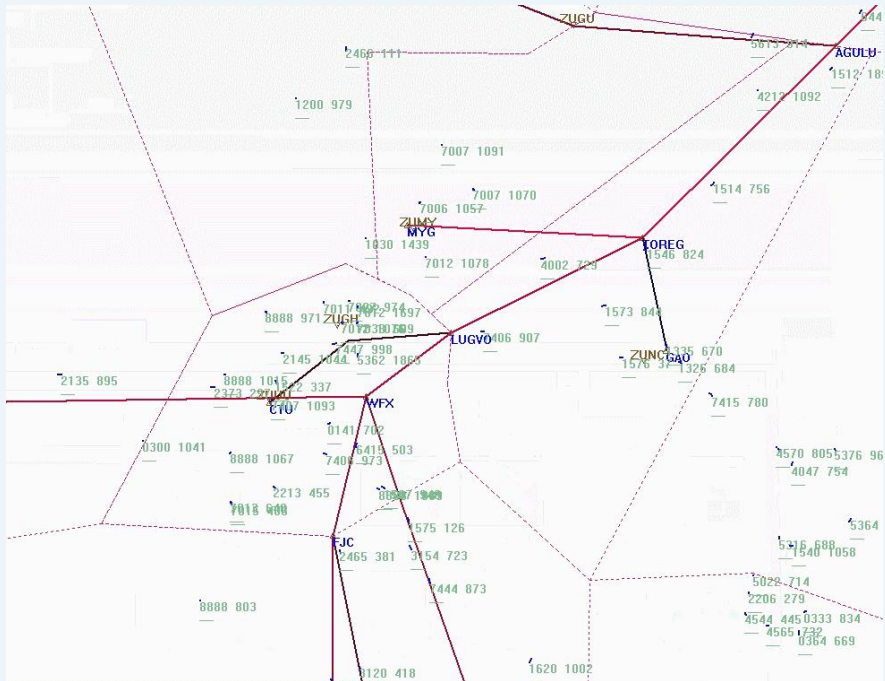
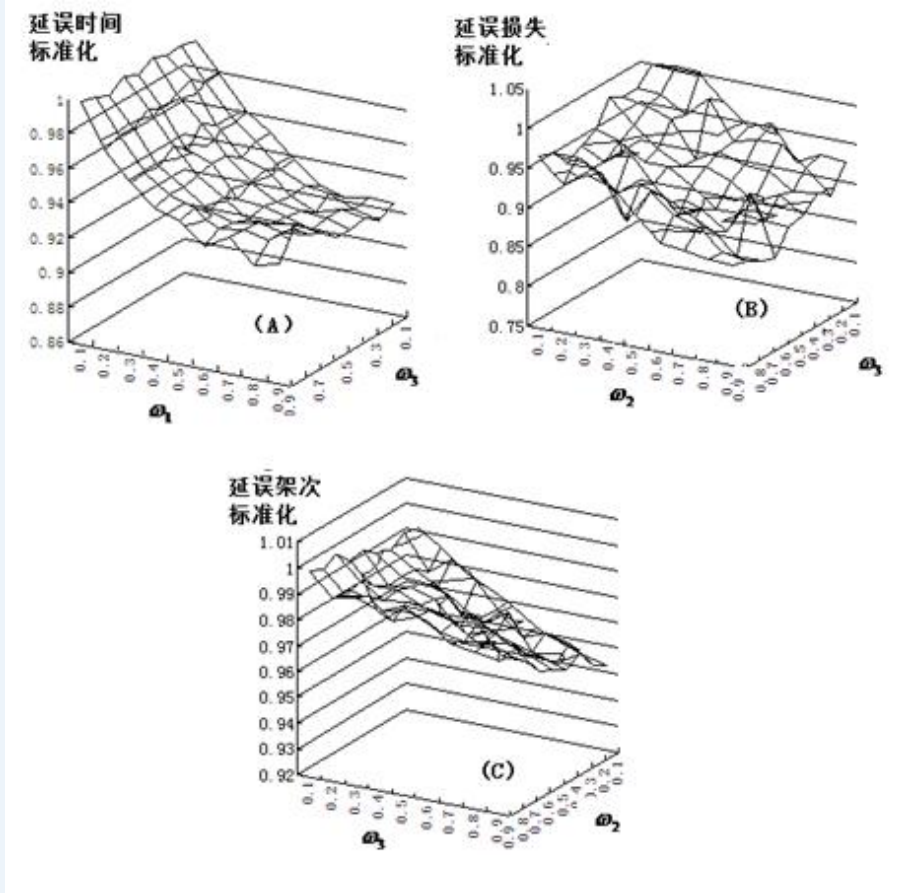
飞行航路拓扑结构分析



应用验证——基于关键点流量限制的多机场放行优化算法

■ 某日136架次为例进行验证分析。ZUUU起飞67架次，ZPPP起飞55架次。

NO.	trackno	ssr	ETD	ATD	地面延误	ETA	ATA	空中延误	高度层	起飞机场
0	87	7407	23:04:56	23:15:26	630	0:11:18	0:11:18	0	10100	ZPPP
1	396	6417	23:00:00	23:03:52	232	0:06:22	0:06:22	0	8900	ZPPP
2	1238	1510	0:19:58	0:19:58	0	0:50:55	0:57:03	368	11300	ZUUU
3	1554	1505	0:53:31	0:53:31	0	1:24:28	1:25:27	59	10100	ZUUU
4	754	1500	3:31:43	3:33:07	84	4:02:40	4:02:40	0	11900	ZUUU
5	1598	733	6:17:51	6:19:24	93	7:24:13	7:24:13	0	8900	ZPPP
6	1943	1502	7:12:16	7:15:17	181	7:43:13	7:43:13	0	11300	ZUUU
7	1974	1514	7:19:33	7:19:33	0	7:50:30	7:51:01	31	8900	ZUUU
8	228	6417	7:53:07	7:53:41	34	8:59:29	8:59:29	0	10100	ZPPP
9	353	6426	8:05:20	8:05:33	13	9:11:42	9:11:42	0	10100	ZPPP
10	367	6431	8:05:36	8:07:17	101	9:11:58	9:11:58	0	8900	ZPPP
11	439	6441	8:11:56	8:14:49	173	9:18:18	9:18:18	0	9500	ZPPP
12	562	6442	8:23:01	8:23:01	0	9:29:23	9:29:30	7	11900	ZPPP
13	108	7407	8:54:17	8:54:17	0	9:25:14	9:25:42	28	8900	ZUUU
14	724	6413	21:08:38	21:08:38	0	22:15:00	22:17:14	134	10100	ZPPP
15	909	6446	9:17:20	9:19:06	106	10:23:42	10:23:42	0	9500	ZPPP
16	1302	7455	9:51:46	9:51:46	0	10:22:43	10:22:54	11	10100	ZUUU
17	1399	6401	9:58:34	9:58:34	0	11:04:56	11:10:10	314	11900	ZPPP
18	1671	1511	10:20:58	10:20:58	0	10:51:55	10:53:58	123	11900	ZUUU
19	1821	6422	10:29:34	10:29:34	0	11:35:56	11:39:26	210	11300	ZPPP
20	1832	1501	10:29:05	10:30:18	73	11:00:02	11:00:02	0	11300	ZUUU



动态仿真运行

应用验证——基于关键点流量限制的多机场放行优化算法

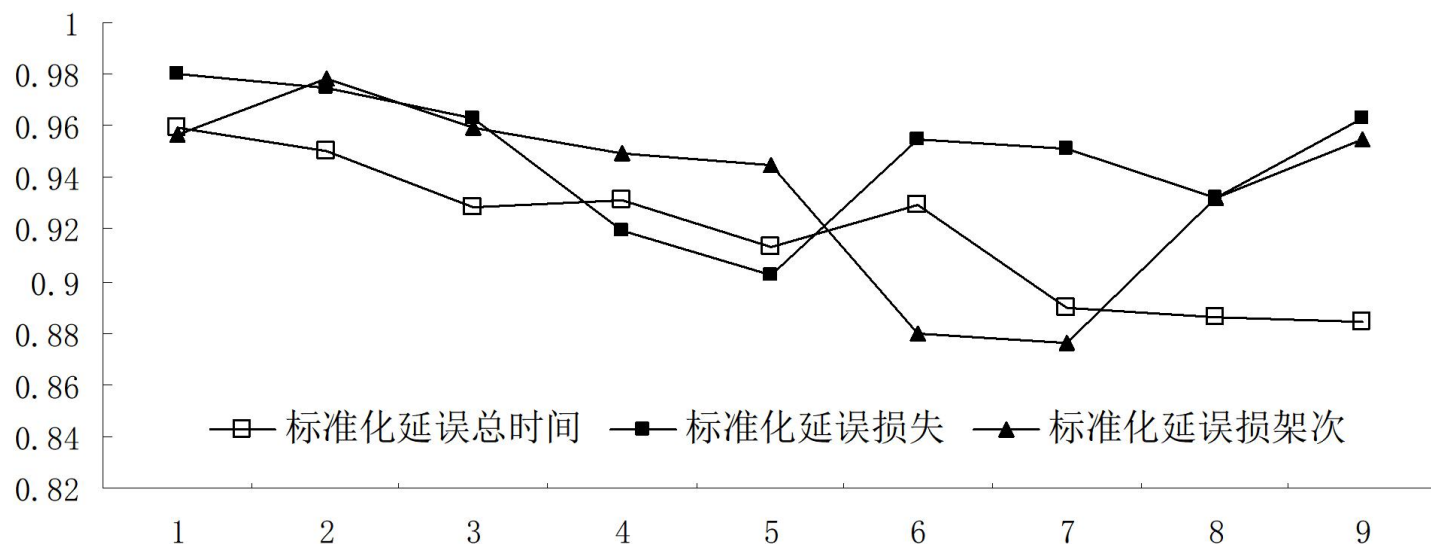


表 2 不同机型航班的最小小时延误损失

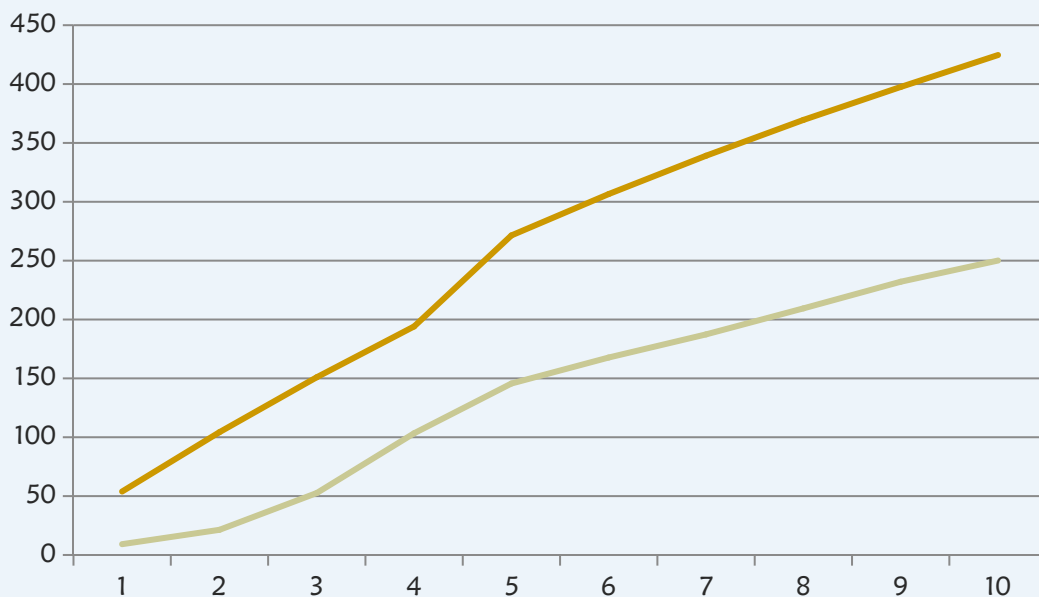
Tab.2 Minimum delay damages per hour of different flight's aircraft models

数据	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ω_1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.33	0.3	0.6	0.6	0.8
ω_2	0.1	0.3	0.6	0.6	0.33	0.1	0.1	0.3	0.1
ω_3	0.8	0.6	0.3	0.1	0.33	0.6	0.3	0.1	0.1

应用验证——基于关键点流量限制的多机场放行优化算法

	本项目算法	先来先服务
延误时间	1131	7826
延误平均时间	8.255474453	57.12408759
高度层变化	19200	30000
平均高度层变化	140.1459854	218.9781022

本项目算法	先来先服务
53.920586	65.181824
104.301361	88.36367
150.974304	79.636429
194.106857	103.363617
271.432373	145.636322
306.581085	167.727325
339.119781	187.363617
369.520294	209.454498
397.535461	232.090759
424.644836	250.090836



评估参数	算法	成都	昆明	标准差	
平均延误时间 (秒)	本项目算法	2406	1500	304.718	
	先来先服务	2738	1860	448.830	
平均延误损失 (元)	本文算法	2111	1521.7	156.129	
	先来先服务	2332	1955.3	128.339881	