

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.01.021

基于复杂度分析的空域扇区划分

王莉莉 贾铨霏

(中国民航大学空中交通管理学院,天津,300300)

摘要:空中交通复杂度是对空域结构的客观衡量,是影响扇区规划的最主要因素之一。为了合理利用空域资源、提高空中交通运行效率,研究了基于复杂度分析的空域扇区划分问题。针对空域的内部结构与运行状态,深入分析扇区面积、航路结构、交叉点复杂性、机型混杂程度以及运行状态混合程度等影响因子的特性,建立了可量化计算的空中交通复杂度评估指标,定义了空中交通复杂度;基于空中交通复杂度来衡量管制员的工作负荷,以均衡管制员工作负荷为原则建立扇区规划模型,并采用生长算法进行求解。最后,选取珠江三角洲地区的空域进行实例分析,验证了本文扇区划分方法的有效性。

关键词:空中交通复杂度;管制员工作负荷;生长算法;扇区划分

中图分类号:V355 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2017)01-0140-07

Sector Planning Based on Complexity Analysis

WANG Lili, JIA Huafei

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: Airspace traffic complexity measures the airspace internal structure objectively, which is one of the main factors affecting the sector planning. In order to make use of the aerospace resource reasonably and improve the operational efficiency of air traffic, the sector planning problem is studied based on complexity analysis. By considering the aerospace internal structure and operating status, the characteristics of the sector area, airline construction, cross complexity, model and operation combination conditions are analyzed deeply. Then, the quantifiable evaluation index of airspace traffic complexity is established to define the airspace traffic complexity, which measures the controller's workload. The sector planning model is built based on the principles of balancing the controller's workload, and the model is solved by using the growth algorithm. Finally, taking the airspace of the Pearl River Delta region as a simulation example, result indicates the effectiveness of the method.

Key words: airspace traffic complexity; controller's workload; growth algorithm; sector planning

近几年,随着中国民航业的大踏步式发展,航空运输供不应求的矛盾逐渐显露出来,以往的空域扇区结构已经不能满足日益增长的交通需求,高密度、超负荷的管制员工作状态已然成为制约扇区容量的决定性因素。因此,如何科学合理地规划扇区

结构,均衡扇区内管制员的工作负荷,充分挖掘空域扇区的潜在容量,成为中国民航业发展研究的主要方向。

当前,国内外专家学者在扇区规划方面取得了丰富成果。国际民航组织提出衡量管制员工作负

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金(61179042)资助项目;民航局科技创新引导基金(20150231)资助项目;中央高校基本科研业务费(Y15-16)资助项目。

收稿日期:2015-10-19;**修订日期:**2016-04-18

通信作者:王莉莉,女,教授,博士,E-mail: llwang@cauc.edu.cn。

引用格式:王莉莉,贾铨霏. 基于复杂度分析的空域扇区划分[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(1):140-146.
WANG Lili, JIA Huafei. Sector planning based on complexity analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2017,49(1):140-146.

荷的“DORATASK”和“MBB”方法,提出将管制员工作负荷分为看得见的负荷(即可测量的管制时耗)与看不见的负荷(即管制员思考的时间)^[1-3];1996年,日本研究人员 Tofukuji 综合分析了“DORA”与“MBB”法,提出了改进的 MBB 法,即 MMBB 法^[4]。Lee 对影响空域扇区复杂度的因子进行了定性描述,并基于此重新定义了空域扇区复杂度^[5]。Prandini 引入了新空中交通管理系统的概念,并在深入分析该系统特征的基础上,建立了空中交通复杂度的相关评价指标^[6]。Kopardekar 着重分析了空域结构的三维特性,针对不同高度层上的复杂性进行了分析^[7]。Lupu 从空域运行的角度出发研究空域复杂度,评估了空域扇区的利用效率^[8]。

2006年,陈亚青等人^[9]应用 MMBB 模型,将进近管制工作划分为 18 个工作进程,通过对各个进程的分析,建立了进近管制员工作负荷模型。张明等人借鉴 SHELL 模型的思想,建立了影响管制员工作负荷的指标体系并确定等级,并将影响终端区管制员工作负荷的指标进行量化,建立了终端空域扇区规划模型^[10-11]。张琼方介绍了管制复杂性的 3 个主要因素,并阐述了管制员复杂度与工作负荷的内联关系^[12]。王莉莉提出了以复杂度均衡为原则建立扇区规划模型,最终找到了最优扇区边界^[13]。苏璟等人分析了影响扇区容量的相关因素,建立了综合因素影响下的区域扇区容量评估模型^[14-15]。

综合分析国内外现状,可以得出以下几点不足之处:(1)大多数研究者在研究管制员工作负荷方面都是从管制员工作的主观因素上来考虑的,通过测算管制员对航空器的识别、指挥等一系列过程所花费的时间进行分析,量化出管制员的工作负荷。但是这种想法过于主观化,受管制员个人的能力影响大,结果的一致性较低。(2)大多文献从定性的角度研究复杂度指标,没有将其量化处理。(3)基于空域扇区结构研究扇区规划问题的文献少之又少。

基于此,从研究空中交通复杂度的角度出发,客观地衡量管制员工作负荷对空域扇区结构的影响,并基于 Voronoi 图分割的空域扇区单元图,利用生长算法进行模型求解。最后通过对珠江三角洲地区的管制空域实际数据进行实例仿真,验证本文提出方法的合理性。

1 复杂度因子影响程度分析

空中交通复杂度,即空域结构的复杂程度,受

扇区内的航班数量、扇区面积、航路面积、交叉点个数以及航空器的类型和飞行状态等一系列因素的影响,这里将这些因素量化为空域扇区复杂度因子进行分析。定义第 i 个扇区单元的交通复杂度 (Traffic complexity) TC_i 为

$$TC_i = \sum_{k=1}^5 \omega_k^i \times TCF_k^i \quad (1)$$

式中: ω_k^i 表示第 k 种复杂度因子所影响的程度; TCF_k^i 表示第 k 种复杂度因子。

1.1 扇区内部结构的影响因子

1.1.1 扇区面积影响因子

扇区面积由已使用面积,即航路面积,与未使用面积两部分构成。未使用面积象征着扇区在某些特殊管制情况下的可调配范围。定义扇区面积影响因子为扇区面积的利用率,扇区面积的利用率越高,可调配的空间就越小,扇区的复杂度也随着减小。

设第 i 个扇区单元内的航路数量为 L_i ,该扇区单元内第 θ 条航路的面积为 γ_θ^i ,则第 i 个扇区单元内的航路总面积 S_{L_i} 表示为

$$S_{L_i} = \sum_{\theta=1}^{L_i} \gamma_\theta^i \quad (2)$$

第 i 个扇区的面积利用率 φ_i 即表示为

$$\varphi_i = \frac{S_{L_i}}{S_i} \quad (3)$$

式中 S_i 表示第 i 个扇区单元的面积 ($i=1,2,\dots,n$)。

规划空域扇区单元的平均面积利用率 $\bar{\varphi}$ 表示为

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{n} \quad (4)$$

因此,扇区面积影响因子 TCF_1^i 表示为

$$TCF_1^i = \frac{\varphi_i}{\bar{\varphi}} \quad (5)$$

1.1.2 航路结构影响因子

航空器在扇区内沿着航路运行,因此扇区内航路的密集程度与航路数量都影响扇区的复杂程度。本文基于航路交叉角(航路交叉形成的锐角)定义航路的密集程度。设第 i 个扇区单元内航路交叉角数量为 δ_i ,该扇区单元内第 σ 个航路交叉角表示为 α_σ^i 。则第 i 个扇区单元内的航路交叉角影响程度 A_i 表示为

$$A_i = \sum_{\sigma=1}^{\delta_i} \frac{1}{x \cdot \tan \alpha_\sigma^i} \quad (6)$$

式中: x 表示在航路上以交叉点为一端点所取线段的长度,文中 x 取 1 km;定义 $x \cdot \tan \alpha_\sigma^i$ 表示有交叉点的两条航路的距离,距离越远,表示密集程度

越低,复杂度越小。

空域航路的平均交叉程度 \bar{A} 为

$$\bar{A} = \frac{\sum_1^n A_i}{n} \quad (7)$$

扇区单元内航路数量越多,扇区单元结构越复杂。设第 i 个扇区单元内的航路数量为 L_i ,规划空域航路数量的平均值 \bar{L} 为

$$\bar{L} = \frac{\sum_1^n L_i}{n} \quad (8)$$

航路结构影响因子 TCF_2^i 表示为

$$TCF_2^i = \frac{L_i}{L} + \frac{A_i}{A} \quad (9)$$

1.1.3 交叉点影响因子

交叉点是扇区内产生冲突程度最高的部分,从扇区单元内交叉点的数量与繁忙程度两个方面加以考虑。

设第 i 个扇区单元内的交叉点数量为 C_i ,该扇区单元内第 μ 个交叉点所连接的航路数量为 β_μ^i ,定义 a 为同一交叉点每增加一条航路对交叉点复杂度的影响系数(经调研统计,该值常取1.65)。

第 i 个扇区单元交叉点繁忙程度 τ_i 表示为

$$\tau_i = \sum_{\mu=1}^{C_i} \beta_\mu^i \cdot a^{\beta_\mu^i} \quad (10)$$

平均交叉点繁忙程度 $\bar{\tau}$ 表示为

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_1^n \tau_i}{n} \quad (11)$$

因此,交叉点影响因子 TCF_3^i 表示为

$$TCF_3^i = \frac{\tau_i}{\bar{\tau}} \quad (12)$$

1.2 扇区内运行状态的影响因子

1.2.1 机型的混合程度

由于不同机型在尾流、速度与间隔方面的要求与规范都不尽相同,因此,机型的混合程度是影响扇区复杂度的一项重要因素。

航空器按照尾流划分为重型机、中型机和轻型机,设单位时间内扇区单元 i 内重型机、中型机与轻型机的所占的比例分别为 p_h^i, p_m^i, p_l^i 。则第 i 个扇区单元的机型混合比 γ_i 表示为

$$\gamma_i = Q_i \cdot (p_h^i \cdot p_m^i + p_h^i \cdot p_l^i + p_m^i \cdot p_l^i) \quad (13)$$

式中 Q_i 表示第 i 个扇区单元的航空器数量。

平均机型混合比 $\bar{\gamma}$ 表示为

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_1^n \gamma_i}{n} \quad (14)$$

扇区机型混合影响因子 TCF_4^i 表示为

$$TCF_4^i = \frac{\gamma_i}{\bar{\gamma}} \quad (15)$$

1.2.2 行状态混合程度

通常情况下,同一扇区内都会存在不同运行状态的航空器,直接影响着扇区的复杂度。

设扇区爬升、下降和平飞的航空器比例分别为 p_u^i, p_d^i, p_k^i ,扇区的飞行状态混合程度 ξ_i 表示为

$$\xi_i = Q_i \cdot (p_u^i \cdot p_d^i + p_u^i \cdot p_k^i + p_d^i \cdot p_k^i) \quad (16)$$

平均飞行状态混合比 $\bar{\xi}$ 表示为

$$\bar{\xi} = \frac{\sum_1^n \xi_i}{n} \quad (17)$$

扇区飞行状态混合因子 TCF_5^i 表示为

$$TCF_5^i = \frac{\xi_i}{\bar{\xi}} \quad (18)$$

2 管制员工作负荷模型

扇区内管制员的工作负荷表示为

$$W_i = TC_i = \sum_{k=1}^5 \omega_k^i \cdot TCF_k^i \quad (19)$$

$$\widehat{W}_I = \sum_1^n x_i^I \cdot W_i \quad (20)$$

式中: W_i 表示所划分的第 i 个扇区单元管制员的工作负荷; ω_k^i 表示第 k 种复杂度因子所影响的程度; \widehat{W}_I 表示所划分的第 I 个扇区的工作负荷($I=1,2,\dots,N$); x_i^I 为0-1决策变量,若第 i 个扇区单元属于所规划的第 I 个扇区,则 x_i^I 取值1,否则取0,表示为

$$x_i^I = \begin{cases} 1 & i \in I \\ 0 & i \notin I \end{cases} \quad (21)$$

本文以均衡各扇区管制员工作负荷为目标函数,建立以下数学模型。

目标函数

$$z = \min \sum_p^N \sum_q^N |\widehat{W}_p - \widehat{W}_q| \quad (22)$$

式中: N 表示所划扇区个数; $\widehat{W}_p, \widehat{W}_q$ 分别表示所划分的第 p 与 q 个扇区的工作负荷。

约束条件

$$x_{ab} \leq 1 \quad (23)$$

$$d \geq v \cdot (t_1 + t_2) + s \quad (24)$$

$$T \geq 2 \times t_2 \quad (25)$$

式(23)体现了扇区为凸型约束,表示为同一航空器至多一次进入同一个扇区;式(24)体现了冲突点距离扇区边界约束;式(25)体现了最短扇区穿越时间约束。约束条件中各参数含义见表1。

除此之外,扇区划设一定要满足扇区的连续性约束,即扇区单元的组合都是以增加相邻扇区单元的方式来实现。

表2 扇区结构数据统计

Tab.2 Sector construction data

扇区单元	扇区面积/ km ²	航路面积/ km ²	航路数量/ 个	交叉点 数量/个
5	1 108.89	208.68	2	1
16	616.05	210.90	3	2
24	739.26	137.64	4	1

表3 扇区运行状态数据统计

Tab.3 Sector running state data

扇区单元	上升	下降	平飞	重型	中型	轻型
5	0	9	7	7	9	0
16	1	0	5	2	4	0
24	0	2	4	1	5	0

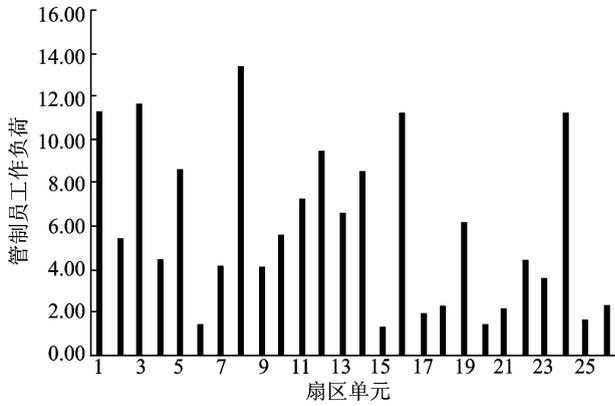


图4 各扇区单元管制员工作负荷

Fig.4 Controller's workload of sector units

根据本文提出的算法,将该空域划分为3个扇区,具体如图5所示。01号扇区由扇区单元1~9构成;02号扇区由扇区单元7,11~13,16,21,22构成;03号扇区由扇区单元10,14,15,17~20,23~26构成。对所生成的 Voronoi 图进行叠加航路,得出扇区规划图,如图6所示。

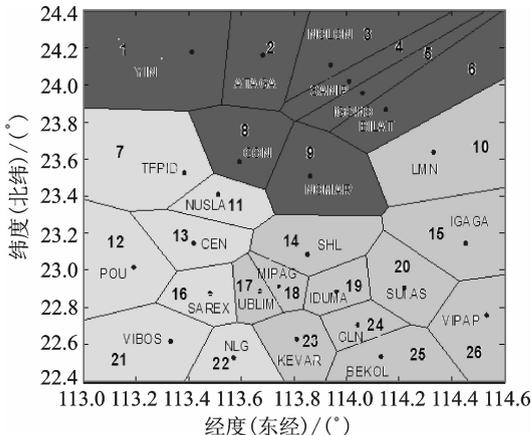


图5 珠江三角洲地区扇区单元组合图

Fig.5 Sector unit combinations of Pearl River Delta region

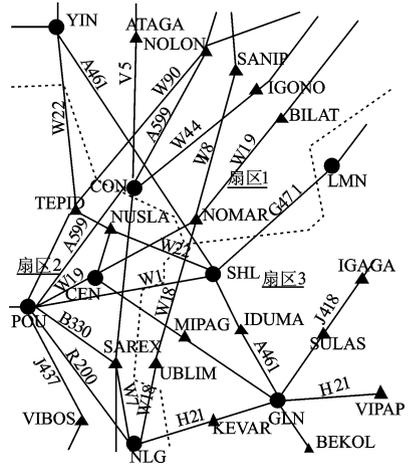


图6 珠江三角洲扇区划分图

Fig.6 Sector planning of Pearl River Delta region

4.2 几何修正

如图6所示的规划方案不符合约束条件式(23),需要进行几何修正,修正后该地区所划分的3个扇区的复杂度值如表4所示。因此,珠江三角洲地区的最优扇区规划方案如图7所示。

表4 修正后扇区的管制员工作负荷值

Tab.4 Controller's workload of sector units

扇区	1	2	3
工作负荷	52.75	49.32	50.67

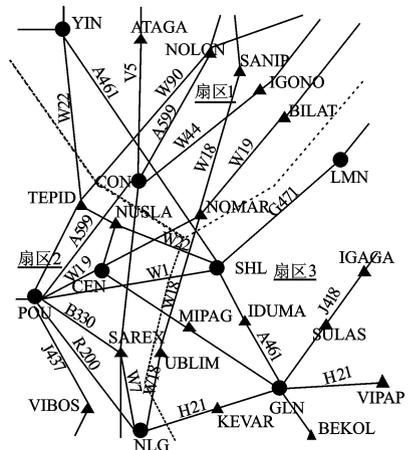


图7 珠江三角洲最优扇区划分方案

Fig.7 Optimal sector planning of Pearl River Delta region

4.3 结果分析

依据流量角度划分的空域扇区方案(几何修正后),如图8所示。

从空域利用率和扇区运行效率两方面出发,针对以上两种方案进行对比分析,数值结果如表5,6所示。对比两种方案,本文提出的划分方案较单纯考虑交通流量划分方案,无论在利用率方面,还是运行效率方面都更加均衡,体现出本方法的合理与高效性。

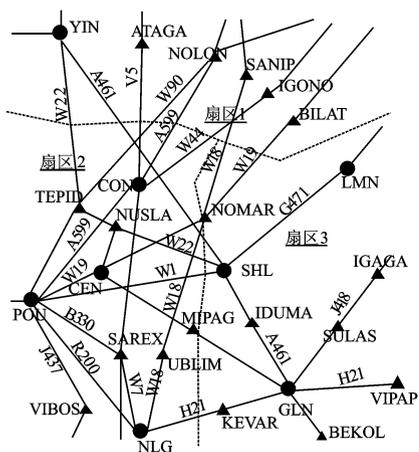


图 8 基于流量的珠江三角洲扇区划分图

Fig. 8 Sector planning of Pearl River Delta region based on air flow

表 5 基于复杂度的评价结果分析

Tab. 5 Evaluation analysis based on complexity

扇区	空域利用率/%	扇区运行效率		
		移交点数量/个	交叉点数量/个	航路数量/条
1	33.39	7	9	11
2	35.46	8	13	15
3	31.15	6	10	12

表 6 基于流量的评价结果分析

Tab. 6 Evaluation analysis based on air flow

扇区	空域利用率/%	扇区运行效率		
		移交点数量/个	交叉点数量/个	航路数量/条
1	30.26	8	4	10
2	44.85	14	22	19
3	24.89	10	8	9

5 结束语

从扇区内部结构与扇区运行状态两方面出发,分别对扇区面积调配能力、航路结构复杂程度、交叉点繁忙情况、扇区航空器类型与运行状态的混杂状况进行分析量化。基于此构建管制员工作模型,利用生长算法进行求解。最后进行实例仿真验证本文提出的方法的可行性,并将本文方法与基于流量分析的划分方案进行对比分析,验证基于复杂度分析的扇区规划方案更加合理与高效。

参考文献:

[1] PAWLAK W S, GOEL V, ROTHENBERG D B.

Comparison of algorithms for the dynamic resectorization of airspace[C]/AIAA Guidance Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998: 67-74.

[2] LAUDEMAN I V, SHELDEN S G, BRANSTROM R. Dynamic density: An air traffic management metric[R]. NASA TM-1998-112226, 1998:62-64.

[3] ZRNIC D S. Estimation of spectral moments for weather echos[J]. IEEE Trans Geosci Electron, 1979,GE-17(4):113-128.

[4] TOFUKUJI N. An airspace design and evaluation of en-route sector by air traffic control simulation experiments[J]. Electronics and Communications in Japan, 1996,79(8):35-38.

[5] LEE K, FERON E, PRITCHETT A R. Describing airspace complexity: Airspace response to disturbances[J]. Journal of Guidance,Control, and Dynamics, 2009,32(1): 210-222.

[6] PRANDINI M, PIRODDI L, PUECHMOREL S, et al. Air traffic complexity assessment in new generation air traffic management systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011,12(3):809-818.

[7] KOPARDEKAR P, PREVOT T, JASTRZEBSKI M. Traffic complexity measurement under higher levels of automation and higher traffic densities[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2009, 17(2): 125-148.

[8] LUPU M, FERON E, MAO Z. Influence of aircraft maneuver preference variability on airspace usage[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4):1446-1461.

[9] 陈亚青,孙宏. 进近管制员工作进程分类及工作负荷研究[J]. 中国安全科学学报,2006,16(2):65-68. CHEN Yaqing, SUN Hong. Study on classification of work processes and workload of approaching controller[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(2):65-68.

[10] 张明,韩松臣. 基于可拓学的管制员工作负荷综合评价[J]. 南京航空航天大学学报,2008,40(6):840-844. ZHANG Ming, HAN Songchen. Integrated evaluation of controller workload based on extenics [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2008,40(6): 840-844.

[11] 张明. 终端区空域扇区规划及运行管理关键问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

- ZHANG Ming. Research on key problems of terminal airspace's sector planning and operation management[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010.
- [12] 张琼方. 基于管制员复杂度的扇区繁忙等级划分研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- ZHANG Qiongfang. Research on classifying sector busy level based on air traffic control complexity[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014.
- [13] 王莉莉, 胡婧, 高峰. 基于复杂度加权的 Voronoi 图扇区边界划分研究[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(3): 23-27.
- WANG Lili, HU Jing, GAO Zheng. Research of sector boundary demarcation based on weighted complexity Voronoi diagram[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2014, 32(3): 23-27.
- [14] 苏璟. 综合因素影响下的区域扇区容量评估技术研究[M]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- SU Jing. Area sector capacity evaluation based on multi factors influence[M]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011.
- [15] 胡明华, 马园园, 田文, 等. 复杂终端区进场交通流优化排序方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(4): 459-466.
- HU Minghua, MA Yuanyuan, TIAN Wen, et al. Optimized sequencing and scheduling approach for arrival traffic flow at complex terminal area[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(4): 459-466.

第十三届国际真空绝热材料会议通知

第十三届国际真空绝热材料会议(13th International Vacuum Insulation Symposium, IVIS2017)将于 2017 年 9 月 20—21 日在法国巴黎举行, 会议网址 <http://www.ivisparis2017.org/>。本次大会由 CSTB 德国建筑科学院主办。会议接收论文将在《Energy and Buildings》《Vacuum》和《International Journal of Refrigeration》期刊出版。

会议主要议题

1. 表征(微结构、热性能、内压、气体渗透、气体扩散、气体吸附)
2. 热、空气与湿度从材料到建筑的转移
3. 老化(膜材、芯材、板材)
4. 封装袋-膜材
5. 先进多孔材料-芯材(纤维毡、蜂窝泡沫、多孔二氧化硅等)
6. 寿命周期评价
7. 应用: 建筑、冰箱、运输
8. 性能和标准评价

会议早期报名时间

2017 年 3 月 1 日~2017 年 5 月 31 日

IEA-EBC Annex65 Workshop 国际项目会时间

2017 年 9 月 19 日

会议特邀报告

1. 南京航空航天大学陈照峰教授: VIP 在中国建筑的应用和发展趋势
2. 瑞典 Chalmers University 查尔姆斯大学 Holger Wallbaum 教授: 绝热材料的寿命周期评价
3. 法国 Ecole des Mines 巴黎高等矿业大学 Arnaud Rigacci 教授: 超级绝热材料-气凝胶
4. 德国 Saint Gobain 圣戈班 Ulrich Passon 博士: 基于 VIP 的产品标准
5. 美国 Thermal Visions 热视公司 Dwight Musgrave 博士: VIP: 昨天、今天和明天

IVIS 会议在 1998~2003 年连续举办 7 次(每年举办一次), 并从 2005 年开始每两年举办一次, 迄今为止共举办了 12 届, 是绝热材料行业的盛会。IVIS 会议推动了绝热材料在建筑、冰箱等全球冷链行业的应用, 并有力促进制造企业与研究机构之间的合作。