

Operation Strategy Research on the Distributed Energy Supply System of Airport

Shiping Lin^{1, 2}, Bin Chen^{1, 2}

1. The College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan430070, China

2. ENN Energy Service limited company, Langfang065001, China

1.21LSP@21cn.com, 2.chenbin99@sina.com

Abstract: This article introduces the system configuration and process flow of distributed energy system of Huanghua international airport, and compares costs of different energy production modes combining project load characters and energy price. We optimized equipment utilization order of Design loads and part loads, and proposed Operation Strategy and optimization scheme of Economic high efficient cooling season and heating season on the premise of system security.

Keywords: distributed energy supply system of airport; combined cooling heating and power supply; Operation Strategy

机场分布式能源系统运行策略研究

林世平^{1, 2}, 陈斌^{1, 2}

1. 武汉理工大学资源与环境工程学院 武汉 430070

2. 新奥能源服务有限公司 廊坊 065001

1.21LSP@21cn.com, 2.chenbin99@sina.com

摘要: 介绍了黄花国际机场分布式能源系统所采用的系统配置和工艺流程，并结合项目负荷特点和能源价格对该系统不同能源生产方式的成本费用进行了比较，对设计负荷以及部分负荷情况的设备利用顺序进行了分析优化，在保证系统安全性的前提下，提出经济高效的制冷季和供热季运行策略和优化方案。

关键词: 机场分布式能源系统；冷热电三联供；运行策略

1 前言

机场使用热电冷三联产的优势在于同时具有大量电能和热能的需求，即使机场从电网购买电力，从运行安全出发，也需要拥有紧急备用发电机，以防电网瘫痪时急用。分布式能源系统的本质是“按需供能”，根据用户的负荷特点合理地组织能源的生产转换，除了满足能源使用量的需求外，还根据用户使用能源品味的不同实现能源的梯级利用。这就要求在机场分布式能源系统设计时应对其运行策略进行研究，保证系统能够在满足供能安全性的前提下，根据用户的负荷变化合理的调节和优化各能源生产设备的运行状态，实现系统高效、经济的运行。

黄花机场能源中心是以燃气冷热电三联供分布式能源技术为核心，结合项目具体条件配合电空调及蓄

能等多种能源回收、转换的利用技术，为航站楼提供电力和冷热用能。典型的工艺过程是燃气进入内燃发电机组发电，经并网柜与市电并网，电力不足部分由市网补充；在发电过程中产生的余热（烟气和缸套水）回收进入余热型直燃机，成为空调供应的动力源。调节发电量的同时可改变余热热量，若供应量不足，冬季采用燃气锅炉和直燃机补燃供热，夏季采用冰蓄水释冷、电空调和直燃机作为制冷补充。

系统运行策略分析和优化考虑三个主要因素：

(1) 系统安全性：保证系统设备出力满足航站楼负荷需求，并留有一定的余量，控制系统随时监控设备的参数、设备故障报警、诊断和处理、以及应急措施等；

(2) 经济性：根据负荷特点和机场的能源价格、

设备效率等因素调整优化设备的运行状态，保证系统经济效益。例如根据机场的电力、燃气价格确定水蓄冷释冷、电空调和直燃机作为制冷补充时的开机顺序和时间；

(3) 能源利用效率及环保效益：根据负荷情况调整优化设备的运行状态，保证系统能效和节能减排社会效益。例如运行时应优先使用自发电匹配负荷，不足部分以市电补充；运行时应优先使用余热产生的冷水/热水匹配负荷。

本文将以黄花国际机场分布式能源系统为基础，结合机场用能特点和系统优化运行要考虑的主要因素，研究在机场应用多联供分布式能源系统的系统配置和优化运行策略问题。

2 机场分布式能源系统构成及配置

机场分布式能源系统的主要系统配置为燃气内燃发电机直接对接热水烟气型余热直燃机供热制冷，调峰设备部分采用电空调+燃气锅炉，同时结合水蓄冷，满足最大冷热负荷需求，保证了系统的安全性，同时

在设备选择时考虑了使用天然气和电力两种能源增强了系统的保障呢能力。根据负荷分析以及项目的实际情况本方案考虑选择两台发电机组分别接入航站楼 2# 配电室两段 10kV 母线，通过对 2# 配电室的负荷分析，单台发电机组容量应在 800~1000kW，本方案按照两台单机出力为 836kWe 的燃气发电机组考虑。单台发电设备余热供冷量约为 900kW，余热供热量约为 800kW，两台发电机组余热各进入一台 4652kW 余热直燃机，直燃机设置全容量补燃，可以在发电设备停机的情况下利用天然气直燃满负荷运行；考虑到全年空调负荷的波动，蓄冷容量按照满足峰值电价时段冷负荷 50%考虑，蓄冷量 32000kWh 左右。余热供冷与蓄冷供冷、电制冷相结合应基本满足冷负荷要求，电制冷总容量约为 13200kW，选择 4571kW 离心机组 3 台。供热调峰设备采用燃气锅炉，其容量与上述余热供热、直燃机供热一起满足设计容量要求。本方案中夜间蓄冷时 1 台冷机即可满足蓄冷需求，另 2 台冷机仍可用于满足夜间冷负荷需求。

Table1. Equipment configuration
表 1. 设备配置

方案 836*2	发电容量/kW	制冷容量/kW	供热容量/kW	台数/台	制冷总量/kW	供热总量/kW
发电机组	836			2		
余热直燃机		4652	3582	2	9304	7164
燃气锅炉			5600	2		11200
电制冷		4571		3	13713	
蓄能		32900		1	4100	
合计	1672				27117	18364

3 机场分布式能源系统运行策略优化

3.1 运行费用分析

本燃气三联供分布式能源系统采取并网不上网的方式与市电并列运行，因此随着峰平谷电价的变化，不同时段从市电取电量的大小对系统运行费用有直接

影响；本项目包含燃气发电、发电机组余热利用、电空调、水蓄能等多种能源利用方式，各种方式的合理调度对于系统运行费用也有较大影响。因此要制定合理的运行方案，有必要充分考虑上述各种因素并进行系统运行费用的简单分析。

(1) 燃气发电费用分析

Table2. Generation cost analysis of generator
表 2. 发电机发电费用分析

项目	单位	100% of Rated	75% of Rated	50% of Rated
发电出力	kW	836	626	415
发电效率		39.9%	38.9%	36.7%
供冷	可利用余热率	44.4%	41.9%	39.7%
	发电耗气量	Nm3	216.9	166.9
			166.9	117.3

	发电燃料成本	元/kWh	0.662	0.680	0.721
	余热节约燃气	Nm ³	80.2	58.3	38.8
	余热节约成本	元/kWh	0.245	0.237	0.239
	发电成本 (折合余热)	元/kWh	0.417	0.442	0.482
	可利用余热率		43.6%	40.4%	37.6%
	发电耗气量	Nm ³	216.9	166.9	117.3
	发电燃料成本	元/kWh	0.662	0.680	0.721
供热	余热节约燃气	Nm ³	89.381	63.677	41.664
	余热节约成本	元/kWh	0.273	0.259	0.256
	发电成本 (折合余热)	元/kWh	0.389	0.420	0.465

注：余热只考虑缸套水和烟气的利用，其中制冷季余热机利用后的排烟温度 170℃，供热季余热机利用后的排烟温度 145℃。天然气热值 8400 大卡，价格 2.55 元/m³。

可见随着发电出力的降低引起发电效率的降低，从而发电燃料费用逐渐增加，虽然余热量有所增加，但与发电相比节约的费用相对较小，因此在实际运行中，应尽量满足发电机的最大出力以提高经济效益。

(2) 供冷费用分析

由于机场夜间还有部分冷负荷需求，因此除计算白天运行时段电价变化所带来供冷费用的变化外，还

需要计算夜间低谷电价时段供冷费用的变化。其中发电费用是纯燃料费用，另外还考虑了余热节约的燃料量所折算出的发电费用；白天单独释冷已综合考虑夜间蓄冷所增加的电空调耗电和水泵耗电（夜间用低谷电价）；在余热完全利用的基础上，直燃机还没有达到额定出力，因此还可通过进一步补燃供冷。

Table3. Cooling supply cost analysis
表 3. 供冷费用分析

项目	单位	电价					自发电	自发电并考虑余热利用	备注
		尖峰段	高峰段	平段	谷段	0.6615			
		1.2424	0.9249	0.6902	0.3106	0.6615	0.4169		
电空调机组单独供冷	元/kWh	0.3006	0.2303	0.1782	0.0938	0.1718	0.1175	夜间	
释冷单独供冷	元/kWh	0.1037	0.0988	0.0952	0.0894	0.0948	0.0910	蓄冷	
天然气直燃供冷	元/kWh	0.2511	0.2432	0.2373	0.2279	0.2366	0.2305	用低谷电	

注：上表中的费用计算只考虑直接燃料费用，均不考虑运行维护、设备折旧等费用。

(3) 供热费用分析

计算电价变化所带来供热费用的变化，其中发电

费用是纯燃料费用，同时还考虑了余热节约的燃料量所折算出的发电费用。

Table4. Heating cost analysis
表 4. 供热费用分析

项目	单位	电价					自发电	自发电并考虑余热利用
		尖峰段	高峰段	平段	谷段	0.6615		
		1.2424	0.9249	0.6902	0.3106	0.6615	0.3889	
天然气直燃供热	元/kWh	0.3012	0.2992	0.2978	0.2954	0.2977	0.2960	

注：上表中的费用计算只考虑直接燃料费用，均不考虑运行维护、设备折旧等费用。

3.2 运行方案优化

从上述费用分析可以看到，在峰平电价时段，燃气发电结合余热的成本均低于市网电价，因此在这个时段只要用户端有足够负荷需求，发电机组在考虑能源综合利用率的前提下应尽可能多发电。

在空调季冷、热负荷较大，但部分时刻发电机组满负荷运行余热也不能完全消耗，因此发电机组的运行主要根据冷热负荷变化调节和优化。过渡季电负荷远低于空调季电负荷，为避免发电机组在低效区运行，此时发电机停机。

各发电机组的运行优化应紧密结合电负荷变化趋势及与市网的连接情况决定。如与市电并网运行（不上网），可以较为灵活的实现发电机组高效运行；如局部区域孤网运行，则发电机组只能跟踪电负荷变化运行，此时通过完善的控制系统实现各发电机组间的切换和并机等运行状态，尽量使发电机组运行在高效区。

3.2.1 制冷季运行方案

(1) 在有负荷的时段，发电机都开机运行，优先采用发电机余热通过烟气热水型余热直燃机组满足冷负荷需求。

(2) 当冷负荷较大时，根据尖峰时段（19~22 时）的电价政策，此时电空调直接供冷的成本最高，因此

可优先利用夜间所蓄的全部冷量满足尖峰时段的冷负荷需求，不足的冷量再考虑利用余热机燃天然气补充，多余的蓄冷量可在其余峰段释冷。

(3) 除尖峰时段外，电空调供冷成本均低于直燃机，因此除余热和蓄冷池释放冷外，不足调峰供冷优先采用电空调机组，若还不能满足冷负荷需要，再启动天然气补燃供冷。

(4) 通过蓄冷池释放供冷时，为保证系统经济效益在余热供冷基础上在尖峰电价时段以最大释冷能力运行，优先用于满足峰值电价时段的冷负荷，剩余冷量在平值电价时段根据负荷分配，以保证完全用掉为原则。

由于本项目夜间少数时段仍有冷负荷，考虑到夜间电价较低，优先利用电空调满足全部冷负荷需求，多余的电空调机组容量利用低谷电蓄冷。蓄冷容量应根据对未来的负荷预测确定，其运行原则一般为保证第二天的放冷可以完全消耗掉前一天的蓄冷量。由于通过蓄冷的成本低于直燃及电制冷直接供冷成本，因此应根据对负荷的分析判断在电空调机组总容量允许的范围尽量增加蓄冷量。

根据对本项目的负荷计算，由于电空调机组的装机容量较大，因此即使在夜间冷负荷较大的时段，基本上也能保证有一台机组用于蓄冷，在整个制冷季各机组的制冷装机容量和年供冷量如下表所示：

Table5. Cooling conditions comparison of different refrigerating method units
表 5. 不同制冷方式机组供冷情况比较

	余热量	电空调量	直燃机补燃量	蓄冷量
制冷装机容量比例 (%)	6.1	50.5	28.1	15.2
年供冷比例 (%)	16.8	64.5	3.0	15.7

各种负荷工况下各制冷主机的运行工况及供能量如下图所示：

(1) 在 100%冷负荷设计日下，三联供系统的发电机出力大多处于额定工况，可充分利用余热满足 9.7%的日总冷量需求，而水蓄冷释冷供冷占总冷量的 9.6%，电空调供冷占日总冷量 64.1%，直燃机补燃供冷占总冷量 16.6%。

(2) 在 75%冷负荷设计日下，三联供系统余热制冷占日总冷量的 12.2%，而释冷供冷占 12.0%，电空调供冷占 71.6%。直燃机补燃供冷占 4.2%。

(3) 在 50%冷负荷设计日下，三联供系统余热供冷占日总冷量的 18.1%，而释冷供冷占 17.9%，其余全为电空调供冷。

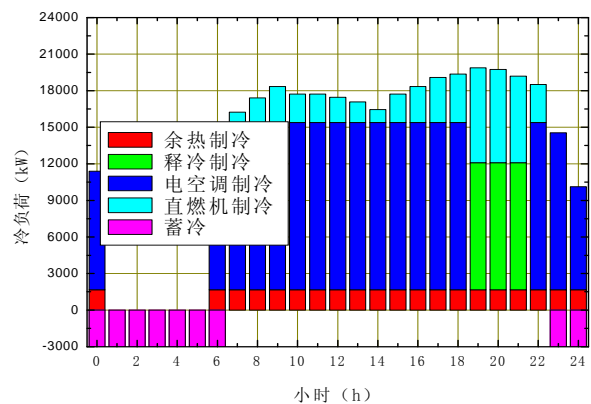


Figure 1. Cooling supply condition of 100% cooling load
图 1.100%冷负荷供冷工况分布图

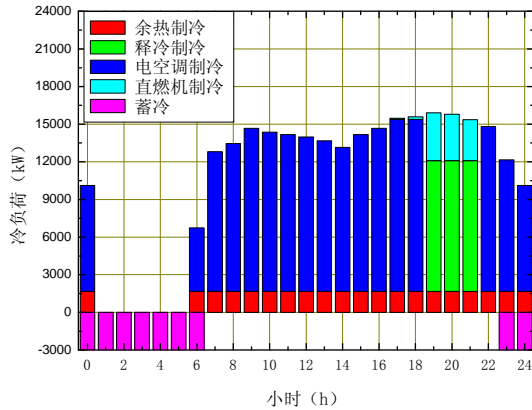


Figure 2. Cooling supply condition of 75% cooling load
图 2.75%冷负荷供冷工况分布图

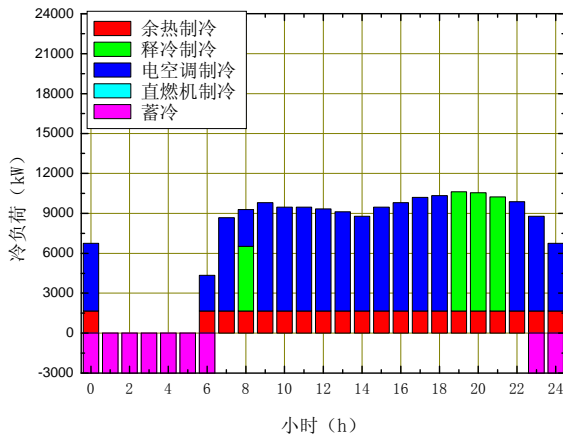


Figure 3. Cooling supply condition of 50% cooling load
图 3.50%冷负荷供冷工况分布图

(4) 在 25%冷负荷设计日下，三联供系统余热供冷占日总冷量的 35.5%，而释冷供冷占 35.0%，其余全为电空调供冷。

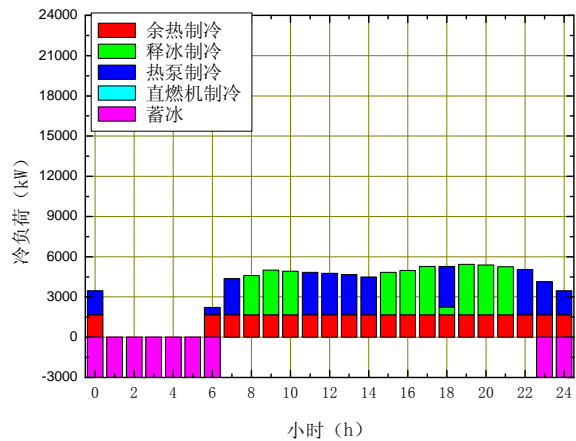


Figure 4. Cooling supply condition of 25% cooling load
图 4.25%冷负荷供冷工况分布图

3.2.2 制热季运行方案

供热系统相对简单，冬季优先利用发电机组高温冷却水换热器和余热吸收式冷温水机组加热回水，其次开启直燃机补燃供热，最后如热负荷较大启动燃气锅炉供热。

根据对本项目的负荷计算，在整个供热季各机组的制热装机容量和年供热量如下表所示：

Table6. Heating conditions comparison of different heating mode units
表 6. 不同供热方式机组供热比较

	余热量	直燃机补燃量	锅炉量
制热装机容量比例 (%)	8.1	31.8	60.1
年供热比例 (%)	34.4	53.8	11.8

各种负荷工况下各供热主机的运行工况及供能量如下图所示：

(1) 在 100%热负荷设计日下，三联供系统的发电机出力基本处与额定工况，可充分利用余热满足 14.1%的日热需求量，而直燃机补燃供热占 82.5%，锅炉供热占 3.5%。

(2) 在 75%热负荷设计日下，余热供热满足 17.7%的日热需求量，其余全为直燃机供热。

(3) 在 50%热负荷设计日下，余热供热满足 28.2%的日热需求量，其余全为直燃机供热。

(4) 在 25%热负荷设计日下，余热供热能满足 53.7%的日热需求量，其余全为直燃机供热。

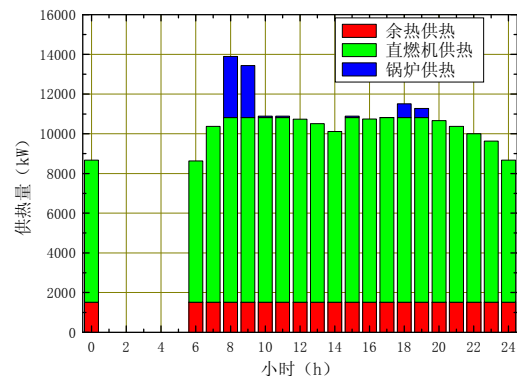


Figure 5. Heat supply condition of 100% heat load
图 5.100%热负荷供热工况分布图

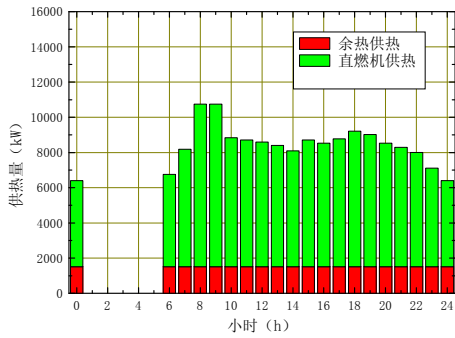


Figure 6. Heat supply condition of 75% heat load
图 6.75%热负荷供热工况分布图

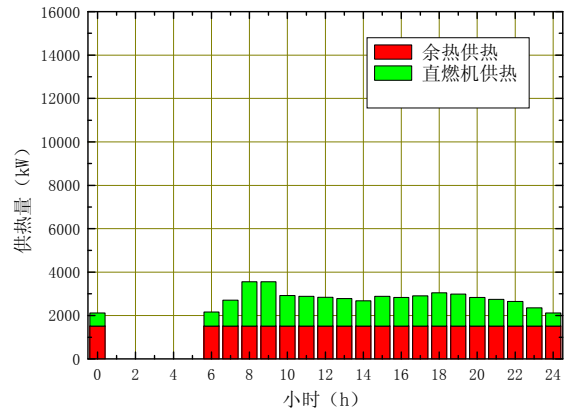


Figure 8. Heat supply condition of 25% heat load
图 8.25%热负荷供热工况分布图

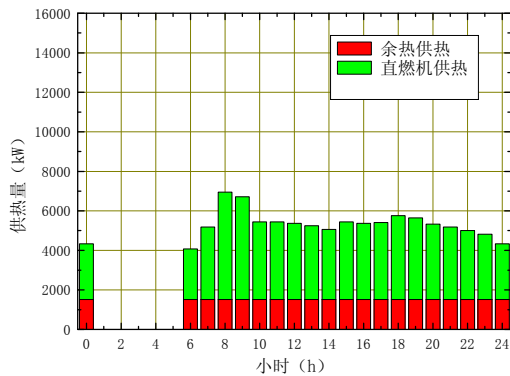


Figure 7. Heat supply condition of 50% heat load
图 7.50%热负荷供热工况分布图

4 分布式能源系统冷热电逐时负荷分析

根据上述运行策略模拟分析航站楼建筑年冷热电负荷与燃气冷热电联产系统出力的逐时变化分析图如下:

从图中可以看出,三联供系统自发电能满足全年航站楼发电机组并网范围内用电量需求的60%,以及航站楼冷需求的19%,热需求的44%。

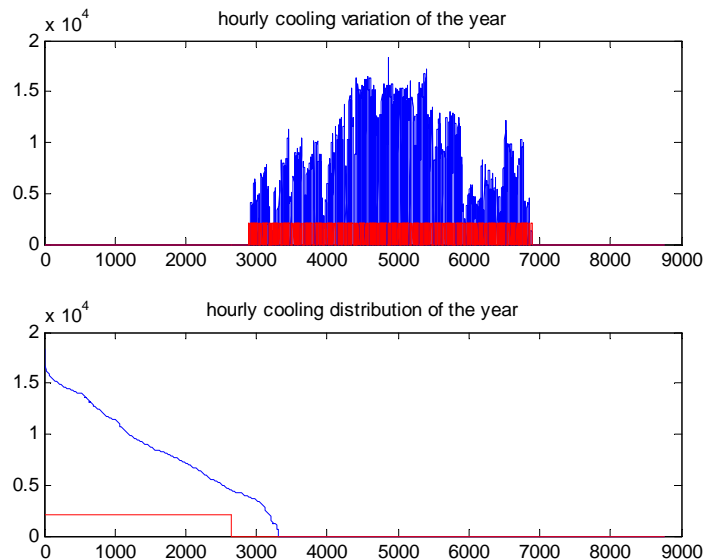


Figure 9. Annual cooling supply and distribution curve of the system

(Blue: Annual cooling load curve of airport building, red: waste heat for cooling supply curve of gas cooling-heating-power system)

图 9.系统年供冷变化及分布曲线

(蓝色: 航站楼年冷负荷曲线, 红色: 燃气冷热电系统余热供冷曲线)

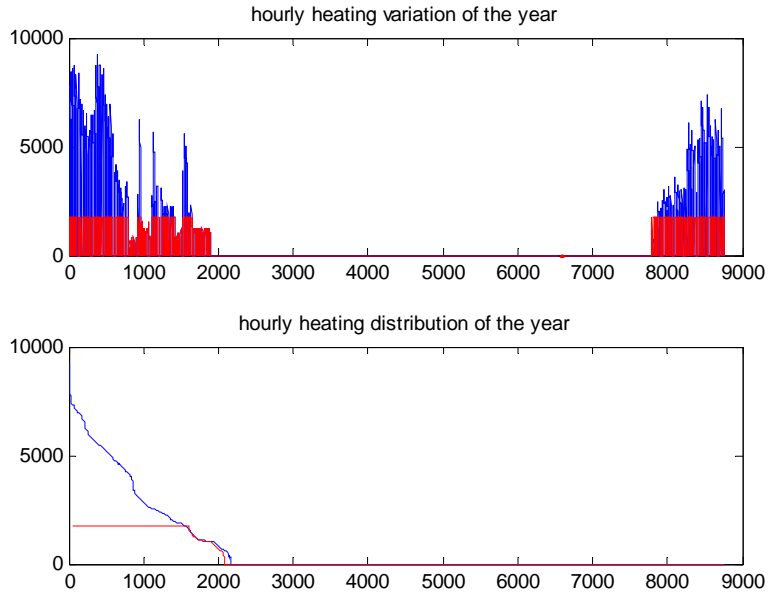


Figure 10. Annual heat supply and distribution curve of the system

(Blue: Annual heat load curve of airport building, red: waste heat for heat supply curve of gas cooling-heating-power system)

图 10.系统年供热变化及分布曲线
(蓝色: 航站楼年热负荷曲线, 红色: 燃气冷热电系统余热制热曲线)

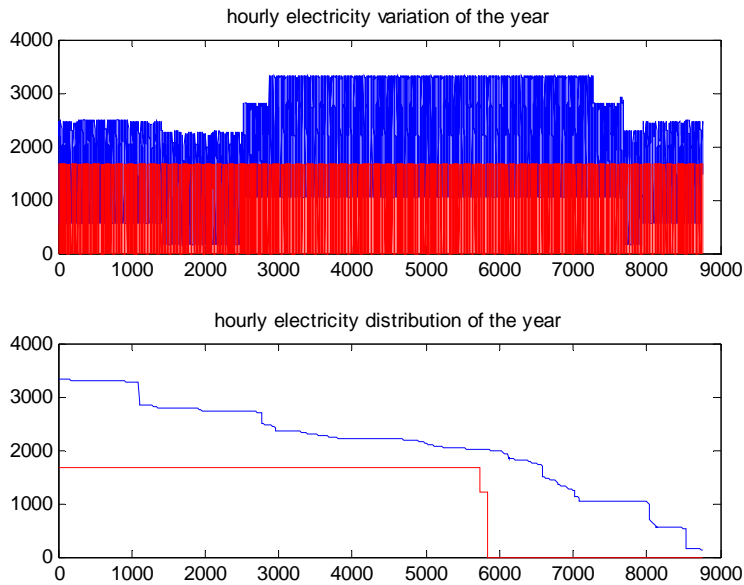


Figure 11. Annual power supply and distribution curve of the system

(Blue: Annual power load curve of airport building, red: spontaneous electrical curve of gas cooling-heating-power system)

图 11.系统年供电变化及分布曲线
(蓝色: 航站楼年电负荷曲线, 红色: 燃气冷热电系统自发电曲线)

Table7. Distribution of system energy supply quantity
表 7. 系统供能量分布

	内容	单位	数量
1	年能源供应量		
	年三联供发电量	万 kWh	971
	年供冷量	万 kWh	2828
	其中余热供冷量	万 kWh	543
	蓄冷放冷量	万 kWh	438
	电空调供冷量	万 kWh	1769
	补燃供冷量	万 kWh	79
	年供热量	万 kWh	704
	其中余热供热量	万 kWh	307
	锅炉供热量	万 kWh	397
2	发电机组满发时数	H	5807
3	发电机组热效率	%	73
4	余热供冷比例	%	19.2
	蓄冷供冷比例	%	15.5
	电空调供冷比例	%	62.5
	补燃供冷比例	%	2.8
5	余热供热比例	%	43.6
	补燃供热比例	%	56.4

在上述运行模式下，该项目采用燃气分布式能源系统与采用直燃机方案相比能源节约率可达 33%。

5 结论

本文首先对黄花国际机场分布式能源系统的设备配置和工艺流程进行了概述，提出了系统运行策略分析需要考虑的主要因素，然后对系统内不同能源生产方式的发电费用、供热费用及制冷费用进行了定量分析，对设计负荷以及部分负荷情况下的设备利用顺序进行了分析。提出了系统优化运行策略，即优先利用发电余热制冷，然后依次利用水蓄冷释冷、电空调制冷、燃气制冷的制冷季运行方案；优先利用余热供热，依次利用直燃机补燃和燃气锅炉供热的采暖季运行方案，为项目控制系统的设计奠定了基础，为项目高效和经济运营提供了保障。

References (参考文献)

- [1] Huanghua international airport multi-generation energy supply system feasibility study report[R], 2009
《黄花国际机场多联供能源供应系统可行性研究报告》[R], 2009.
- [2] Li Bin, Huang Xing-hua, Integrated Optimization of Scheme and Operation Strategy for CCHP System[J], Journal of Power Engineering, 2006, 26(6), P894-898
李贇, 黄兴华, 冷热电三联供系统配置与运行策略的优化[J], 动力工程, 2006, 26(6), P894-898(Ch).
- [3] Liu Qing-rong, Ruan Ying-jun, Zhu Qun-zhi etc., Analysis of Operating Characteristics in a Distributed Energy System[J], Journal of Shanghai University of Electric Power, 2009, 25(5), P427-432.
刘青荣, 阮应君, 朱群志等. 分布式能源系统及其运行特性分析[J], 上海电力学院学报, 2009, 25(5), P427-432(Ch).
- [4] Neil Strachan, Alexander Farrell. Emission from distributed vs. centralized generation: The importance of system performance[J], Energy Policy, 2006 (34), 2677-2 689.