

# 夏热冬暖地区某开敞式 大空间建筑的节能改造技术分析<sup>\*</sup>

广州市设计院 胡 婧<sup>☆</sup> 屈国伦 刘芳毅 谭海阳 李 颀

**摘要** 为了探讨夏热冬暖地区开敞式大空间建筑的节能改造措施,以广州市某实际工程为例,应用 Fluent 软件,对自然通风、置换通风、遮阳、屋顶淋水降温的节能效果进行了定性分析,并应用 DeST 软件模拟了全年能耗。分析了自然通风与空调系统联合工作时的室内温度和速度场,并给出了室内温湿度的实测数据。结果表明:在该工程中,自然通风、置换通风、遮阳挡板和屋面淋水技术可明显改善室内热环境,同时降低建筑能耗;下沉式地面有利于增强室内置换通风效果;通过采用被动节能技术合理设计后,建筑节能率达 61.9%。

**关键词** 夏热冬暖地区 开敞式 大空间建筑 被动节能技术 自然通风 置换通风 遮阳 屋顶淋水

## Analysis on energy saving techniques for retrofitting an open large space building in hot summer and warm winter zone

By Hu Jing<sup>★</sup>, Qu Guolun, Liu Fangyi, Tan Haiyang and Li Jin

**Abstract** To study the applicable measures of energy saving retrofitting for this kind of buildings, with an actual project as example, analyses qualitatively the energy saving effect of natural ventilation, displacement ventilation, shading and roof sprinkling by Fluent software, and analyses the annual energy consumption by DeST software. Presents the simulated distribution of temperature and velocity, and the tested temperature and relative humidity on the condition of natural ventilation combined with air conditioning. Concludes that natural ventilation, displacement ventilation, shading and roof sprinkling can improve the indoor environment and reduce the energy consumption distinctly; the sloping auditorium and sunk arena contributes to improving indoor displacement ventilation effect; the energy consumption can be decreased by 61.9 percent by passive energy saving technique.

**Keywords** hot summer and warm winter zone, open style, large space building, passive energy saving technique, natural ventilation, displacement ventilation, shading, roof sprinkling

★ Guangzhou Design Institute, Guangzhou, China

①

### 0 引言

目前国内存在很多开敞式大空间建筑,如剧场、体育馆等。与传统建筑相比,此类建筑通常采用轻质材料作为建筑外围护结构,且建筑不是全封闭的。采用开敞式大空间结构的既有建筑,通常没有设置空调系统,室内热环境较差,那么研究如何利用一些节能技术,改善开敞式大空间的热环境,

提高室内人员舒适性,从而节约建筑能耗,具有重大的意义。

本文以长隆月亮演艺广场为工程对象,从实际

☆ 胡婧,女,1985 年 5 月生,硕士研究生,助理工程师  
510620 广州市天河区体育东路体育东横街 3 号  
(0) 15099995340  
E-mail: 112829533@qq.com

收稿日期:2012-02-20

①修回日期:2012-04-01



应用的角度,着重探讨开敞式大空间改造项目中的被动节能技术。

## 1 项目简介

长隆月亮演艺广场位于国家级 5A 景区——长隆旅游度假区内,该广场拥有全球最大的专业马戏表演场。长隆月亮演艺广场是两片贝壳状造形的圆形穹顶大空间建筑,设计外观为纯白色,底面半径 53.75 m,占地面积 9 100 m<sup>2</sup> 左右。建筑屋顶为球状膜结构,中心高 32.5 m,屋顶上有 3 条圆环形开口,建筑底部为观众入口,为开敞式环形开口结构,高约 4 m,因此本建筑属于开敞式大空间建筑。观众席及表演舞台位于地面以下,最深处达 -11.13 m,舞台表演区约 1 000 m<sup>2</sup>,地下室地面为弧形碗状,最多可容纳 8 000 人观看表演。

长隆月亮演艺广场位于广州市番禺区,该地区为典型的夏热冬暖地区,广州市典型气象年的逐时室外温湿度见图 1、2。

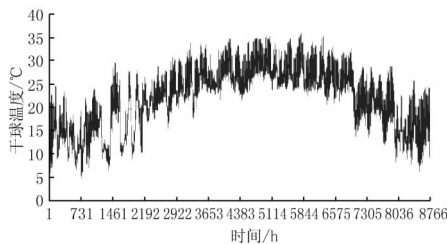


图 1 典型气象年全年逐时室外温度曲线图

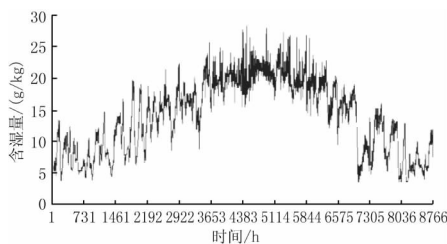


图 2 典型气象年全年逐时室外含湿量曲线图

该建筑为已经建成的开敞式大空间建筑,从使用角度考虑,为提高演艺广场室内的热舒适性,需对项目进行节能改造。该建筑具有如下显著特点:

- 1) 围护结构采用轻质膜结构,热工性能较差;
- 2) 使用时间,即表演时间为每天 19:30—21:00 和“五一”、“十一”节假日的每天 14:00—15:30;

3) 建筑入口及屋顶不同位置均设有开口,为开敞式建筑。建筑出入口位于该建筑空间中部,平时开敞,屋顶上部不同高度有 3 个环状开口,可开

启和关闭。

- 4) 舞台及观众席位于地面以下,呈碗形。

## 2 被动节能技术的应用

被动节能技术是指不额外增加能耗而只通过建筑自身的布局、材料、做法等使环境达到舒适与节能的技术。它不是把室内空间与自然相隔离,再用额外手段创造人工“宜人”环境,而是使建筑最大限度地适应周围环境,并尽可能因势利导,充分利用现有的自然条件。

本文主要应用 CFD 模拟手段,对长隆月亮演艺广场实际情况进行分析,通过研究遮阳、屋顶淋水降温、室内自然通风等被动技术对改善室内热环境的作用,给出了对开敞式大空间节能改造的建议。

### 2.1 室内自然通风技术

长隆月亮演艺广场采用膜结构作为建筑外围护结构,若采用常规空调系统设计,由于围护结构传热系数大,必定导致空调系统能耗较大。自然通风技术是建筑被动节能技术的重要举措之一,因此,考虑利用自然通风对大空间进行冷却除湿,可大大缩短空调系统运行时间,降低能耗。

#### 2.1.1 自然通风 CFD 模型

本文根据长隆月亮演艺广场建筑实际尺寸,以及参考实地检测的数据,建立 CFD 模型。模拟采用 Gambit 建模,并对边界条件进行简化,将灯光、人员负荷简化在地面及舞台负荷中,模型见图 3、4。

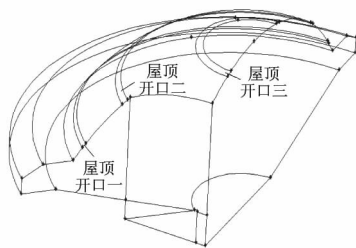


图 3 建筑的 CFD 三维简化模型

由于该建筑的复杂性,建模时应用三维模型,并采用四面体网格进行网格划分。求解时,采用分离式求解器,并加入了浮力项、能量方程、湍流模型及辐射模型。建筑在使用过程中受到自然对流、传热、辐射等因素影响,为分析建筑在使用过程中的温度场及速度场,对模型的各边界条件进行了相关设置。

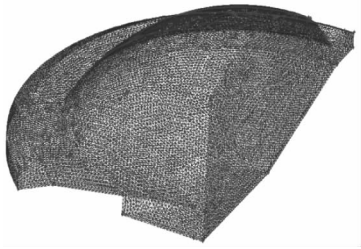


图 4 建筑的 CFD 网格划分模型

考虑到长隆月亮演艺广场的使用时间,分别对 19:00 和节假日 14:00 进行了模拟,并参考实测数据,将各边界条件的设置汇总如表 1 所示。

表 1 边界条件设置参数

项目		19:00
地面	类型	自然对流
	发热量/(W/m <sup>2</sup> )	225
舞台	类型	自然对流
	发热量/(W/m <sup>2</sup> )	194
屋顶	类型	常壁温
	温度	室外温度
进口	类型	压力入口
	压力/kPa	101.3
出口	类型	压力出口
	压力/kPa	101.3
壁面	类型	绝热
	对称面	对称面
空调风口	类型	速度入口

注:节假日 14:00 边界条件除屋顶室外温度为 331 K 之外,其余与 19:00 相同。

2.1.2 自然通风效果分析

1) 14:00 自然通风效果分析

由于剧场只在节假日 14:00 开放,因此气象参数采用 10 月 1 日的室外温度,对模型输入节假日 14:00 时的各边界条件参数,得出模拟结果见图 5, 6。从图 5 可以看出,温度场分层较明显。空气从舞台后台入口处及剧场入口进入,由于重力作用,从剧场入口处进入的空气沿着地面向下流动。由于人员散热和灯光负荷的作用,靠近地面的空气逐

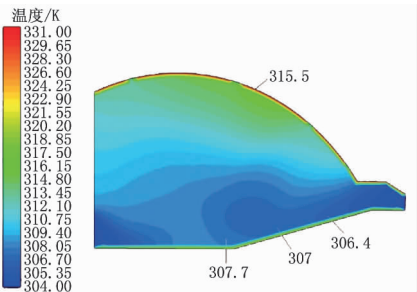


图 5 14:00 时自然通风室内温度场

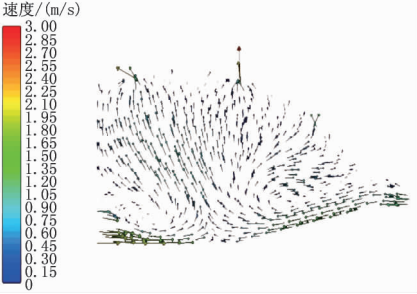


图 6 14:00 时自然通风室内速度场

渐被加热,并开始上升,最终从屋顶上部的开口流出。建筑内空气热压作用非常明显。

室外较冷空气进入室内,带走了一部分的室内冷负荷,室内温度大部分为 34℃ 左右,虽不满足人员舒适度的要求,但大大降低了空调负荷,有利于降低空调能耗。

另外,屋顶由于太阳辐射及传热的原因,温度很高,且屋顶上部空气由于烟囱效应和屋顶温度本身较高的原因,其温度可达到 42.5℃,会对下部空间产生较大的辐射热量。

2) 19:00 自然通风效果分析

由于剧场全年 19:00 开放,因此此时气象参数选取全年最热月 19:00 的平均温度作为室外温度,通过对模型输入 19:00 的各边界条件,得出模拟结果见图 7, 8。从图中可以看出,19:00 的模拟结果接近于 14:00,大空间的热压作用很明显,自然通风可带走部分室内冷负荷。

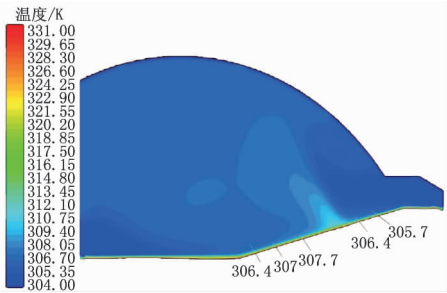


图 7 19:00 时自然通风室内温度场

在最热月 19:00,剧场开放时段室内温度在 34℃ 左右,需设空调系统对室内进行冷却除湿。但在冬季及过渡季节,室外温度较低,剧场内部只通过自然通风便可以满足人员舒适度要求。从全年考虑,可大大缩短空调开启时间,降低能耗。

从图中还可看出,19:00 时由于热压作用减弱,部分室外冷空气从屋顶较低位置的开口处流出,导致短路,因此建议晚上可将此开口关闭,以增

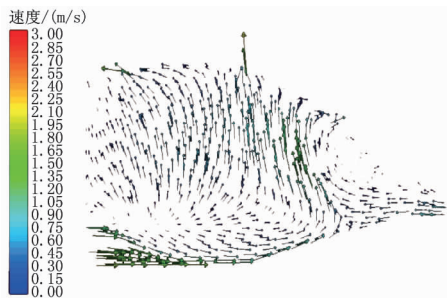


图8 19:00时自然通风室内速度场

加高低位开口的高差,增强热压作用。

### 2.1.3 建议

1) 白天时,由于围护结构为轻质膜结构,由屋面对室内传热和热辐射引起的冷负荷较大,建议采用屋面降温和遮阳措施降低屋面冷负荷。

2) 冬季及过渡季的晚上,可利用自然通风对室内降温,缩短空调系统开启时间,降低能耗。

3) 晚上进行自然通风时,宜关闭屋顶低位窗,以增强热压作用,增加自然通风量。

## 2.2 置换通风技术

置换通风是指空气通过末端以低风速直接送入室内活动区,送入的较冷的新鲜空气因密度大在重力作用下下沉,随后慢慢扩散,在地板上形成一层很薄的空气层,当遇到热源时被加热,以自然对流的形式慢慢上升,并不断卷吸周围空气。热浊气流上升过程中,在卷吸作用和后续新风的推动作用以及排风口的抽吸作用下,覆盖在地板上的新鲜空气也缓缓向上移动,形成类似向上的活塞流,同时污染物也被携带向房间的上部或侧上部移动,最后将余热和污染物由排风口直接排出。

由自然通风模拟的结果可以看出,由于大空间开敞,在底部及上部均有开口,在热压及风压作用下,室外空气从下部入口进入大空间建筑,由于室外空气温度低于室内温度,在重力作用下,室外冷空气沿逐渐降低的观众席地面流向室内,经人员、灯光散热等加热升温后上升,最终由屋顶开口处流出室外。由此形成直流置换通风系统,室外自然风带走大量室内的余热余湿,使室内维持舒适的温湿度。

值得注意的是,本文所述长隆月亮演绎广场的观众席及舞台均设置在地面以下,且观众席地面自外向内逐渐降低,由于冷空气的密度大于热空气密度,在重力作用下,从室外进入的冷空气

会沿地面下沉,并聚集在建筑底部,经由人员、灯光散热等加热升温后上升,由此形成很好的置换通风效果。

### 2.3 遮阳技术

开敞式大空间建筑围护结构传热快,热惰性小,从 14:00 自然通风模拟结果可以看出,围护结构表面温度高,从而导致对室内空间的辐射散热量较大。为减少辐射热,可采取在屋顶下设置辐射挡板的方式,阻挡屋顶的辐射热到达观众区。

为了削减屋顶对地面的辐射,根据演艺广场建筑实际情况,建议在屋顶下部加辐射遮挡板,如一定开孔率的钢丝网,可以阻挡大部分的热辐射,同时允许空气流过。通过自然通风模拟对比,分析加辐射遮阳板对敞开大空间自然通风及室内热湿环境的影响。

模拟结果见图 9,10。从图 9 中可以看出,与不加挡板的情况相比,室内温度降低  $0.6^{\circ}\text{C}$  左右。温度由观众核心区的  $34.1^{\circ}\text{C}$  降低到入口处的  $32^{\circ}\text{C}$  左右。由于有挡板的存在,对空气上升产生阻挡作用,但并不影响热压作用,空气顺着挡板向上移动,从屋顶底部开口流出。

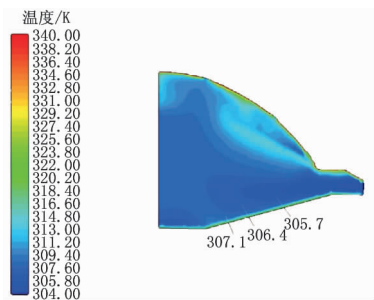


图9 14:00时屋顶下部加辐射挡板时室内温度场

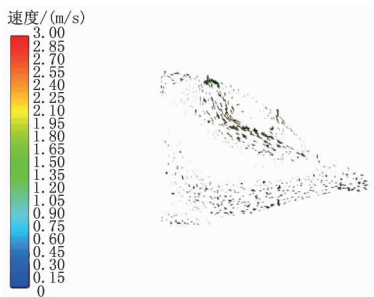


图10 14:00时屋顶下部加辐射挡板时室内速度场

### 2.4 屋顶淋水降温技术

为降低通过屋顶进入室内的负荷,可采取措施降低屋顶温度,本文建议采用对屋顶进行淋水的



措施。

在 14:00 时,屋顶温度比较高,未采用屋顶淋水降温技术时,屋面平均温度达 58℃,屋顶对室内的热辐射易导致人员产生不舒适感。利用屋顶淋水措施降低屋顶温度,可降低屋顶辐射量,改善室内热环境,提高人员舒适度。假定在自然通风的情况下,通过在屋顶喷一定量的水,使屋顶平均温度降低至 48℃,在该条件下,应用 Fluent 进行模拟,模拟结果见图 11、12。

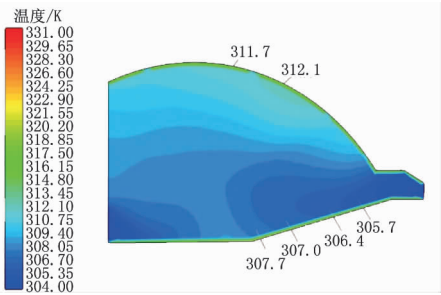


图 11 14:00 时屋顶喷水时室内温度场

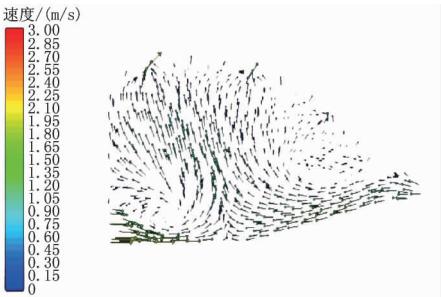


图 12 14:00 时屋顶喷水时室内速度场

从图 11 可以看出,温度场分布和未加屋顶喷水时室内温度场相似,热压作用明显。单纯依靠屋顶淋水降温,室内温度降低至 32.7℃。此时室内温度虽不满足热舒适要求,但可大大降低室内冷负荷,减小空调装机容量,且屋顶淋水降温技术与遮阳技术结合使用,可进一步改善室内热环境,降低室内温度,优化空调运行时间,最终达到节能目的。

同时,降低屋顶温度可降低屋顶对周围环境的热辐射,有利于提高人员舒适性的要求。

3 自然通风与空调系统联合工作

从通风模拟结果看出,在炎热的夏季,虽利用自然通风、遮阳、屋顶淋水降温可降低室内温湿度,增加室内人员舒适性,但是还需加设空调系统对室内进行冷却除湿。

由于本建筑为开敞式,且建筑条件不利于设置回风口,故宜采用全新风空调系统(直流系统)对大空间进行降温除湿。根据建筑特征,本文沿观众席边缘均匀设置喷口对大空间送风。通过 CFD 建模,对空调运行状态进行模拟,模拟结果如图 13、14 所示。

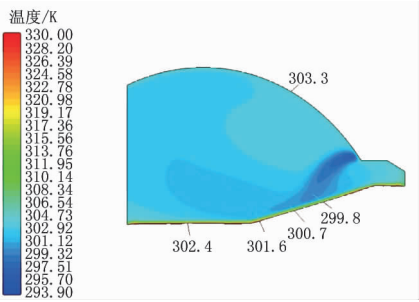


图 13 19:00 时空调运行时室内温度场

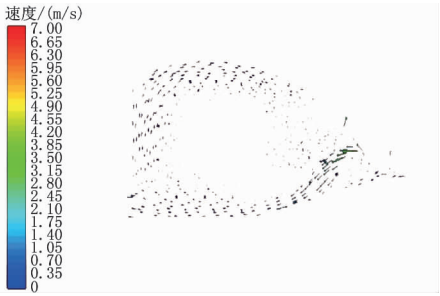


图 14 19:00 时空调运行时室内速度场

由图中可以看出,空调送出的冷风由于重力作用沿观众席地面下沉,经观众席的散热加热后升温,逐渐上升后,最终经屋顶开口排除,满足置换通风效果。同时,长隆月亮演艺广场大空间建筑的自然通风效果同样符合置换通风效果,自然通风可增大空调送风距离,产生接力送风的效果,使得大空间内气流组织更好,同时可降低空调系统风机的输送能耗。

增加空调系统后室内温湿度实测数据见表 2。

4 全年能耗分析

采用上述被动节能技术对长隆月亮演艺广场进行改造后,大大改善了大空间室内热环境,降低了室内温度,从而会降低空调冷负荷,缩短空调的使用时间。为了对长隆月亮演艺广场的动态能耗进行准确预测,笔者应用动态能耗分析软件 DeST 对长隆月亮演艺广场进行了全年逐时能耗计算模拟,通过对长隆月亮演艺广场建筑进行简化处理,建立的模型如图 15 所示。

表 2  空调系统开启前、中、后实测温湿度值

时刻		室外	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	室内平均
18:40	温度/℃	28.2	28.8	29.0	27.5	28.1	28.4
	相对湿度/%	57	51	55	55	55	54
20:00	温度/℃	27.6	27.3	27.7	27.0	27.1	27.3
	相对湿度/%	57	53	57	56	57	56
21:10	温度/℃	27.0	27.2	27.5	26.9	27.0	27.2
	相对湿度/%	56	56	55	54	54	55

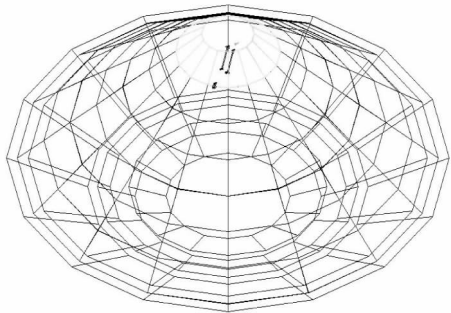


图 15  月亮演艺广场 DeST 分析模型

根据 GB 50189—2005《公共建筑节能设计标准》,参照建筑默认为节能 50%,因此可依据参照建筑来计算基准建筑的全年能耗。分别建立参照建筑和现有建筑的能耗分析模型,参照建筑和设计建筑的建筑热工特性参数如表 3 所示。主要功能

房间的空调相关设计参数如表 4 所示。

表 3  参照建筑和设计建筑热工参数对比

	参照建筑	设计建筑
屋顶传热系数 $K/(W/(m^2 \cdot K))$	0.9	4.99
外墙传热系数 $K/(W/(m^2 \cdot K))$	1.5	4.99
外墙及屋面表面吸收系数 $\rho$	0.8	0.55

表 4  主要功能房间空调参数设置

	参照建筑	设计建筑
温度/℃	24~30	24~30
新风量/ $(m^3/(人 \cdot h))$	30	30
相对湿度/%	50~75	50~75
照明密度/ $(W/m^2)$	22	22
人员/ $(人/m^2)$	0.8	0.8
设备/ $(W/m^2)$	0	0
空调运行时间	18:00—21:00	实际计算
开馆时间	12:00—22:00	12:00—22:00

计算得出的参照建筑、基准建筑与设计建筑全年能耗特性比较见表 5。

表 5  全年能耗计算参数对比

	基准建筑	参照建筑	未采用被动节能技术的建筑	设计建筑
全年累计热负荷/ $(kW \cdot h/m^2)$	151.78	75.89	112.56	70.76
全年累计冷负荷/ $(kW \cdot h/m^2)$	497.78	248.89	258.28	176.89
全年能耗/ $(kW \cdot h/m^2)$	649.56	324.78	370.84	247.65
比基准建筑节能率/%		50	42.9	61.9

通过 DeST 进行模拟计算得出,经过节能改造后的长隆月亮演艺广场的全年能耗为 247.65  $kW \cdot h/m^2$ ,节能率达 61.9%,节能效益显著。与未采用被动节能技术的建筑相比,节能 33.2%。

5  结论

5.1  采用自然通风、置换通风、遮阳挡板、屋面淋水等被动节能技术,可大大改善长隆月亮演艺广场等开敞式大空间建筑的室内热环境,增加人体舒适度,减少空调使用时间,大大降低建筑能耗。

5.2  下沉式地面有利于增强室内置换通风效果。

5.3  采用空调系统后,自然通风与空调送风叠加形成置换通风的效果,自然通风可增加空调送风距离,降低空调系统风机的输送能耗。

5.4  通过对建筑进行全年能耗分析得出,通过合

理设计,长隆月亮演艺广场建筑节能率达 61.9%。与未采用被动节能技术的建筑相比,节能 33.2%。

5.5  长隆月亮演艺广场节能改造中应用的被动节能技术,适用于南方地区同类大空间建筑,除对既有建筑进行改造外,对新建开敞式大空间建筑也具有借鉴意义。而对北方地区开敞式大空间的节能效果,需进一步探讨研究。

6  建议

对南方地区开敞式大空间节能改造设计,除应用被动节能技术外,还可进一步研究主动节能技术,如在空调系统设计中,优化送风形式,对喷口送风技术、接力送风技术、风幕技术、局部送风技术等进行研究,提高空调系统能效比,采用空调群控系统,使得开敞式大空间更加节能。