

旧工业建筑的节能改造 ——花园坊绿色建筑展示

Energy-Saving Renovation of Old Industrial Buildings: Systematic Analysis of Green Garden Lane

撰文 朱中原 中元国际工程设计研究院（沪）

宋吴琼 同济大学建筑与城市规划学院

设计单位 中国中元国际工程公司、中元国际工程设计研究院（沪）

设计时间 2007.12~2009.3

竣工时间 2009.6

总建筑面积 46 118m²

建筑设计人员 赵崇新、朱中原、王冰

摘要 花园坊节能环保产业园是目前上海工业建筑改造中首个大规模的以绿色节能为主题的创意产业园，不仅在改造中运用了多项节能技术，而且在再利用的功能上以节能产品的展示和体验为主，具有节能产品和技术的市场推广和示范作用。主要介绍了按美国LEED节能金级标准设计的B1#、B2#建筑，阐述了花园坊的改造策略以及节能理念和新技术的应用。

关键词 工业建筑 更新 绿色建筑 节能 能耗



图1 改造前后对比



图2 总平面图

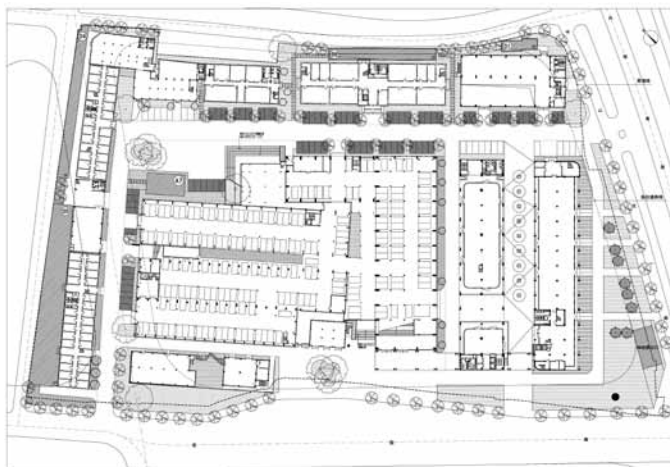


图3 一层平面图



图4 鸟瞰图

城市中心的大量旧工业建筑因功能置换面临着推倒重建的危机，但将其肆无忌惮的拆除势必破坏城市规划、肌理、文化、交通等。对旧工业建筑的改造再利用，一方面有效利用了已有的建筑资源，另一方面也减少了拆建对环境造成的污染，是可持续发展的一项重要举措。在此基础上，如何将旧工业建筑通过节能改造并在其使用过程中减少能耗，具有重要的探索意义。

上海乾通汽车附件厂是一片废弃的厂区，因其规模大、建筑群体多、建筑历史跨年代悠久（1954~1996年）、厂区交通便利、建筑的结构生命尚未完结，经多方论证，最终被保留、开发、利用，成为绿色节能展示建筑群（图1）。这个建筑群就是集绿色建筑、节能产品体验、节能产品展示于一体的上海花园坊节能技术环保产业园（以下简称花园坊）。

花园坊位于虹口区中山北一路121号，花园路127号，处于繁华商业圈。园区原有建筑24栋，包括高层、多层、单层建筑。设计时，根据园区“L”形道路特点和功能需求将园区建筑共分为四块区域：A区7栋建筑为展示区；B区8栋建筑为实践区；C区2栋建筑为设备区；D区4栋建筑为功能辅助区（图2, 3）。



图5 EIFS外保温构造

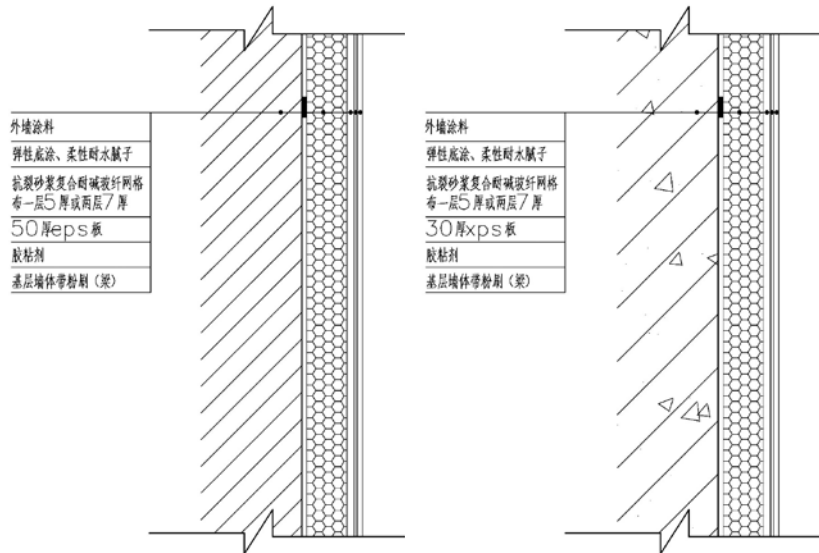


图6 外墙外保温一般节点做法

1 团队协作制定节能改造标准

建筑在其全寿命周期中存在三个生命：能够屹立的结构生命、承载文脉的文化生命、提供使用的功能生命。花园坊作为老厂房的功能生命已经结束，但其结构生命和反映工业历史的文化生命仍然存在。上海市建筑科学研究院通过对建筑单体结构生命的检测和现状的客观描述，肯定了建筑单体的继续使用（除A2#楼需要部分加固外）。建筑设计单位根据开发商提供的原有归档手绘图纸，制作成初步电子图文，然后打印出图纸到现场进行反复核对，最终绘制出符合现状的电子文档。中美合作上海太平洋能源中心和美国ETI（Eco-tech International）机构提供了绿色节能的技术支持。

经过各设计团队和政府的通力合作，最终达成共识：将绿色节能植入建筑群体中，充分利用现有的技术、工艺、材料特别是国内外先进的节能理念，对园区的场地和建筑单体以多级节能标准进行改造，使花园坊成为长三角地区乃至全国的示范窗口（图4）。

花园坊绿色节能设计，采用了4种标准进行改造：1）按照美国LEED（Leadership in Energy & Environmental Design）节能金级标准^[1]设计的B1#、B2#建筑，目前资料报批已全部通过，经评定B1#楼45分、B2#楼40分；2）按中国绿色建筑评价三星标准设计的A1#、A2#建筑，资料正在准备中，待上报审批；3）按现行的公共建筑节能标准设计的A3#、A4#、A5#、A6#、A7#建筑；4）园区内其余建筑根据成本核算，不做太多的投资，基本保留原有建筑的形态。从而实现同一园区内不同标准的可对比性。本文着重介绍已通过美国LEED节能金级标准的B1#、B2#建筑。

2 B1#、B2#建筑节能展示

B1#、B2#建筑位于整个园区的东北角，B1#原为汽油泵活塞销车间，改造后建筑面积为4 681.5m²，4层、局部8层的钢筋混凝土结构建筑；B2#原为技术大楼，改造后建筑面积为3 001m²，3层混合结构建筑。改造之初，按照业主要求（通过美国LEED节能金级标准），参照《ASHRAE STANDARD》（90.1-2004）和《公共建筑节能设计标准》（GB 50189-2005），依据上海市2008年的能源价格^[2]，通过软件EQUEST^[3]模拟实验，初步计算改造后B1#、B2#设备能耗情况，详见表1。

表1 B1#、B2#改造后设备能耗

建筑楼号	年耗电总量（MW·h）	年天然气耗量（Nm ³ /Therm）	年总能耗费用（万元）
B1#	357.29	27 746/9 357	37.62
B2#	262.23	29 590/9 477	31.16

设计根据美国LEED节能金级标准及目前国内外先进的理念、技术、材料、工艺，对B1#、B2#建筑主要运用了以下节能措施。

(1) 墙体保温

外维护结构能耗约占整个建筑使用能耗的1/3，外墙和屋面保温是老建筑改造的关键。B1#、B2#原外墙均为240mm厚砖墙，传热系数大，远不符合标准要求。设计根据建筑本身特点，拆除B1#外墙，保留框架结构，用小型空心混凝土砌块代替砌筑，一方面减轻原有结构负荷，另一方面起到一定的保温作用。新砌外墙采用复合墙体系统（EIFS）（图5，6），能够明显降低K值，消除冷、热桥，防止内外墙结露，维持室内气候平稳，提高人体舒适度，节省空调能耗。而B2#具有中式传统坡屋顶建筑风格（建于1954年），正在申请上海市保护建筑，设计对其采取立面保护的策略，在每个房间内均采用内保温。

对B1#、B2#各个立面来说，为了达到节材的目的，根据EQUEST模拟实验，其保温层厚度也完全不同，东南、西南XPS板为40mm厚，而东北、西北为50mm厚（表2）。此种方式的内、外墙体保温能使B1#、B2#建筑全年能耗费用节约率达2.00%、4.76%（表3）。

表2 墙体内、外保温做法

朝向	原外墙		改造外墙	
	结构	传热系数 (W/(m ² ·K))	结构	传热系数 (W/(m ² ·K))
东南、西南	240厚砖墙	2.6	240厚砖墙+40厚XPS板	0.619
东北、西北	240厚砖墙	2.6	240厚砖墙+50厚XPS板	0.517

表3 墙体保温对能耗的影响

费用(元)	楼号	改造前	改造后	节能率	楼号	改造前	改造后	节能率
电	B1#	270 780	268 955	0.67%	B2#	199 284	193 978	2.7%
气		105 451	99 745	5.41%		112 284	102 762	8.5%
总		376 231	368 700	2.00%		311 568	296 740	4.76%

(2) 节能门窗

为达到外窗传热系数K值≤2.00W/(m²·K)，B1#楼采用断桥铝合金双层中空Low-E玻璃窗。Low-E玻璃能阻挡太阳红外线辐射，减少室内得热，起到很好的隔热、遮阳作用。通过对窗框材料的改造和增加空气间层的宽度，最终达到外窗传热系数K=1.80W/(m²·K)的良好效果，对整个建筑的节能有很大提高（图7，8）。



图7 双层木窗

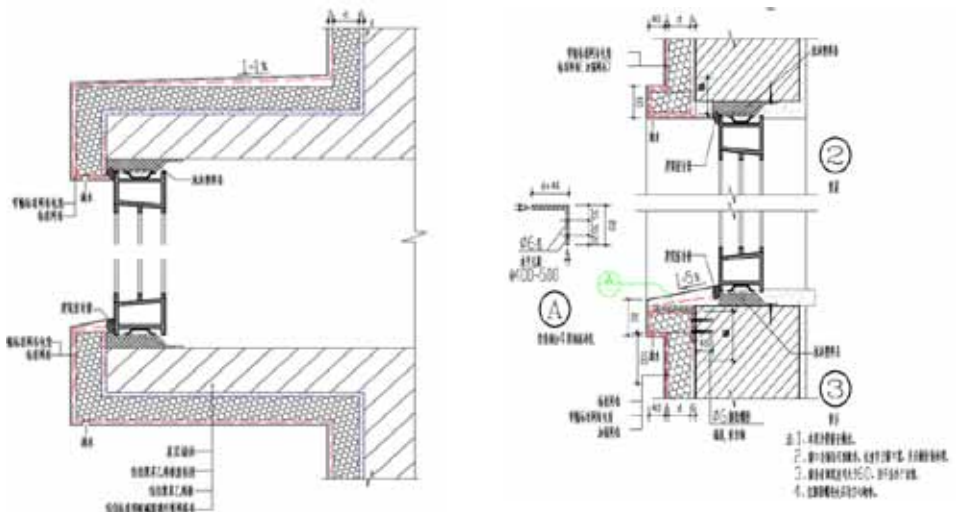


图8 外墙外保温窗户做法

表4 B1#外窗改造后的性能参数和对能耗的影响

朝向	东北、西北	东南、西南	费用(元)	改造前	改造后	节能率
U (W/(m ² ·K))	2	3	电	268 955	267 164	0.67%
Sc	0.46	0.23	气	99 745	95 572	4.18%
VT	0.7	0.5	总	368 700	362 736	1.62%

B2#楼的改造方式为保护性改造，不能破坏外立面的原貌，设计时将每个外木窗的内侧增置双层Low-E玻璃内开木窗，新加的木窗框与原有外窗框只有外框相同，其余细部省去。在炎热的夏季，可以将外窗外开并固定一定角度，由于蒸腾作用形成通风，从而降低内窗接受到的外表面温度，起到隔热作用（表5）。

表5 B2#外窗改造后的性能参数和对能耗的影响

朝向	东北、西北	东南、西南	费用(元)	改造前	改造后	节能率
U (W/(m ² ·K))	1.53	1.53	电	193 978	185 013	4.62%
Sc	0.2	0.2	气	102 762	89 208	13.19%
VT	0.4	0.4	总	296 740	274 221	7.59%

(3) 外遮阳

B1#楼东南立面和西南立面窗墙比较大，采用可收缩的悬挂式外遮阳方式，夏季打开遮阳，冬季收起，能明显降低空调能耗。EQUEST模拟了挑出50cm、开启角度为60°的帆布遮阳，所得到的结果见表6。如果想达到更好的节能效果，可以增大遮阳板的出挑宽度或减少遮阳板与窗户的夹角。

表6 外遮阳对能耗的影响

费用(元)	改造前	改造后	节能率
电	267 164	265 087	0.78%
气	95 572	95 572	0.00%
总	362 736	360 659	0.57%

(4) 屋顶绿化和通风屋脊

B1#为平屋顶，采用屋顶绿化（图9，10），屋面植物采用需水较少的植被如佛甲草，能够吸附空气中大量的尘埃、吸收二氧化碳，有效地隔热保温（隔热保温5~7℃），减少了热胀冷缩对屋面结构的损坏，大大延长了屋面尤其是防水层的使用寿命。屋顶草坪采用两种种植方式：在改造后的屋顶上直接种植的散播式和将在模块中已种植好的植物搬迁到屋顶铺设的模块式。B2#楼为坡屋顶，设有通风屋脊，有效降低了室内温度。改造时保留原有设计特点，对已破坏的吊顶做修补，在吊顶上部铺设100mmXPS板保温，并更换两侧的通风木百叶窗，使其通风顺畅。



图9 屋顶花园

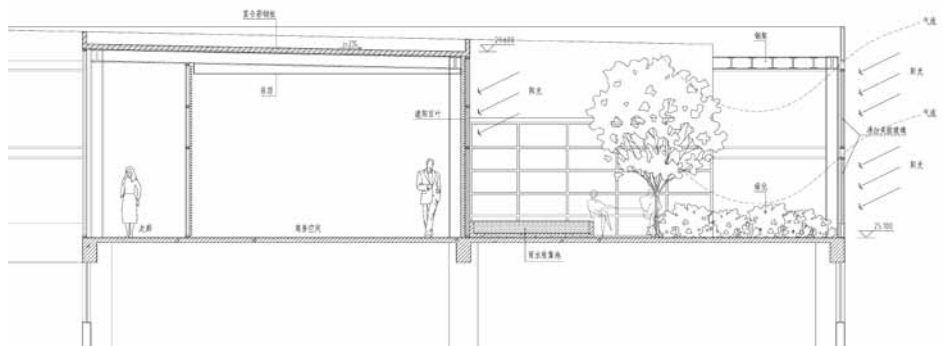


图10 屋顶花园室内外剖面节点构造

(5) 地源热泵系统

地源热泵属于清洁的可再生能源利用技术，利用地球表面地壳层恒温带的地下水（上海地区恒温带温度17~19℃），夏季恒温带相对温度低作为空调冷源，冬季相对温度高作为采暖热源，通过输入少量的电能，即可实现能量的相互转移。B1#、B2#两栋建筑使用了该项技术，其末端装置为分体式水环热泵机组。经计算，此两栋建筑地源热泵机组的电力消耗，夏季为17.2kW（采用系统cop4.4、系统cop3.6），冬季为8.6kW（采用系统cop4.6、系统3.7），年节煤量可达390t。

(6) 太阳能热水系统

B1#屋顶设置了太阳能热水器，集热面积43.04m²，日产热水6t，为整个园区供应生活热水。

(7) 雨水回收系统

园区内A1#、A2#、A3#、A4#、A5#、B1#、B2#屋面采用雨水回收系统，收集雨水面积达到10 848m²，年平均收集水量1.3万m³。收集到的雨水除用于消防功能外，还用于场地景观绿化的灌溉、园区道路洒水、景观水体补充及A1#、B1#、B2#冲厕。

(8) 照明

B1#、B2#建筑在对基准建筑照明功率密度参照的基础上，结合节能照明先进的技术经验，对照明密度进行调整，采用高效节能荧光灯，平均照明功率密度为7W/m²，从而降低建筑能耗的影响（表7，8）。

表7 基准建筑和设计建筑的照明功率密度（W/m²）

	基准建筑	设计建筑
办公室	12	6
会议室	14	10
走廊	5	3
大堂	14	10
设备房	16	3

表8 照明功率密度对建筑能耗的影响

费用（元）	楼号	改造前	改造后	节能率	楼号	改造前	改造后	节能率
电	B1#	265 087	217 891	17.80%	B2#	185 013	145 700	21.25%
气		95 572	103 478	-8.27%		89 208	88 060	1.28%
总		360 659	321 369	10.89%		274 221	233 760	14.75%

表9 照明控制对建筑能耗的影响

费用（元）	楼号	改造前	改造后	节能率	楼号	改造前	改造后	节能率
电	B1#	217 891	210 934	3.19%	B2#	145 700	144 029	1.15%
气		103 478	104 040	-0.54%		88 060	74 611	15.3%
总		321 369	314 974	1.99%		233 760	218 640	6.47%

(9) 照明控制

为进一步降低照明对建筑能耗的影响，在适当的位置添加日光感应器，根据自然光进入室内的强度来控制靠近窗户的灯具的照度，节能率详见表9。

(10) 智能化管理系统

园区采用全区域覆盖智能化控制，将建筑内部能耗控制在合理的范围内。B1#、B2#建筑及其他建筑采取不同的控制开发策略，以确保建筑内部的安装成本、运行成本、能量消耗、室内气候质量及建筑的可持续发展等各方面达到一个平衡。门禁系统实现单点控制、多点联网、集中管理的分体式、一体化管理模式，营造安全、高效、智能的环境；监控系统实现全园区24小时监控系统覆盖，涵盖消防、安全、跟踪、处理等流程，起到“实施预防”的效果；数字覆盖采用电信、移动、网通、有线电视、无限网络等先进技术^[4]。



图11 利用废弃木头制作的背景墙



图12 利用园区构建制成的工艺品



图13 保留原有绿化

(11) 材料再利用

B1#拆除的粘土砖用于卫生间导墙、垃圾站、设备间及含水率比较高的场所，还有一部分铺设于地下，用以保护地源热泵管道。B2#木屋顶废弃的木梁经过砸碎、粗加工、压膜成型，作为B8#会所的背景墙（图11）。另外，充分利用工业建筑遗留的元件，制作成工艺品在园区展示（图12）。

(12) 保留原有绿化、防止土壤流失

本工程属于改造项目，虽然整个园区的绿化率不高，但就B1#、B2#区域来说，其绿化覆盖率高、保存完好（图13）。在施工过程中，尽量保存B1#、B2#西侧大面积绿化，并安排专人进行养护，对影响外墙施工搭脚手架的大型植物经向绿化主管部门提出申请，待批准后由专业公司负责移植，并最终移回供园区使用。

(13) 倡导绿色节能理念

引导绿色出行：随着国家节能减排的进一步深化，新能源的研发和使用也相继增多，国家计划投入1 000

亿元换取新能源汽车产业的发展。在B1#前面设置8个优先停车位，供新能源汽车免费使用。园区周边交通便利，对一些上班较远的工作人员提倡利用公共交通工具，而对另一些上班较近的工作人员提倡利用自行车或步行上班。在B2#建筑后设置500多辆自行车车位。同时，在B1#楼内设置淋浴，利用屋顶太阳能热水供上班的工作人员使用。

宣传示范：场地还通过设置标识、科普廊的方式，大力提倡利用再生资源。利用原有大型植被进行竖向绿化。在B2#和B3#之间设置金属、玻璃、塑料、硬纸板、办公纸张等五类垃圾箱，对垃圾进行分类回收。

设计节能：对园区的一些既有建筑，通过策划、评估、设计、少许改造和投资，成为节能产品的孵化基地。为使用者提供更为宽松的功能平台，对单体建筑只提供公共部分的装修，具体使用功能待客户签订合同后自行装修，防止二次装修造成的浪费。

(14) 改造成果

改造后B1#为上海环境交易所，B2#供节能企业办公使用。通过采取以上的节能措施，B1#、B2#建筑全年的能耗费用约节省35.5%。

3 其他建筑节能展示及政府节能机构入驻

(1) 太阳能光伏发电

光伏发电作为可再生能源的利用具有广泛的发展前景，在公共建筑中应用光伏发电具有宣传示范作用。园区应用了独立光伏系统和并网光伏系统。

独立光伏系统：根据整个园区的照明设计和预期达到的照明效果，在A1#屋顶设置太阳能路灯，使用节能高效的新型光源，采用控制装置，使各组成部件自动进行开关、保护、协调工作。同时考虑上海的气候特点，设定路灯在持续阴雨日的工作能力、损耗等，做到太阳能蓄电不足时用常规电做补充。

并网光伏系统：园区在A1#建筑立面和屋顶铺设了太阳能光伏电板，供A1#、A2#的公共空间使用。光伏建筑一体化可有效利用围护结构表面，无需占用土地，对建筑本身还有遮阳、保温、隔热的作用。

(2) 风能的利用

园区在A1#建筑的屋顶处设置一个小型风力发电机，供A1#屋顶部分灯光用（不适合上海使用），起到风力发电的示范作用。整个园区采用了两种通风的模式：风压和热压相结合的自然通风系统和机械辅助通风系统（图14）。风压和热压相结合的自然通风系统设置在A3#和A4#，A4#和A5#单体建筑之间，共有3个洞口。洞口的开设为一层停车库提供了采光、通风，属半开放式空间。减少了以往室内车库的加压送风、机械排烟所需要的设备费用及电能（图15，16）。A3#、A4#、A5#原为车间，层高在12~18m之间，上部设有传统模



图14 展厅自然通风



图15 车库洞口



图16 车库自然通风



图17 A3#室内空间

式的气窗。设计时，拆除单层玻璃钢窗，更换为断热铝合金双层中空玻璃窗，并增加机械装置，能自动按需求开启，提供新鲜、洁净的自然空气（图17）。

（3）景观水体

A1#楼前沿中山北一路设置宽6m、长88m的景观水体，有效降低了周边的空气温度，增加了空气湿度，提供较舒适的园区环境。水池内养殖观赏鱼类和睡莲，增加景观趣味的同时防止眩光。在潜水泵前端增加电解装置，对水中微生物进行分解，分解物可供鱼类食用，从而保证了水体的长期清洁，降低了维护成本（图18）。

（4）设备节能

花园坊主要采用了3种灯具形式：高效节能荧光灯用于办公室，截光型灯具用于园区道路照明，LED灯具主要用于园区指示牌。另外还采取了酒精炉辅助取热（A3#楼大空间）、智能化箱体泵站系统、临时高压系统、消防控制系统、不同方式的遮阳百叶、无水小便斗、节水型大的小便斗、室内红外线感应照明系统、远程电表数据传送、稳高压系统等。

（5）政府节能机构的入驻

上海市科学节能展示馆位于A1#、A2#建筑一层及两个建筑的连廊处（2009年12月26日开馆），是目前国内展示面积最大、展项最全、展示节能技术最先进的公益性节能和新能源技术产品科普常年展示平台（图19）。整个展示围绕“发展无限、资源有限、节能无限”的理念，展示推广建筑、交通、工业和新能源等领域各类最新节能产品和技术成果，宣传先进的绿色节能理念、知识、管理经验和企业的社会责任，促进高效节能技术的发展和产品的推广应用^[5]。

B1#楼为上海环境交易所（2008年8月5日正式成立），反映了在当前我国转变经济增长方式、绿色节能需求逐步被激发出来的背景下，有关机构已经发现环境权益交易的巨大市场前景。环境交易所市场化的手段与政府的行政手段相结合，也将进一步推动中国绿色节能的发展。



图18 景观水体



图19 上海科学节能展示馆

在园区A3#建筑内设置面积为2 500m²国际节能会议中心，将重点举办各类绿色节能行业的国际国内论坛、技术交流会、专家评审会、节能环保职业培训等。

4 结语

上海花园坊节能技术环保产业园是一个中国能效项目示范点，是一个绿色节能的缩影，是一个相对集中的节能建筑群和节能产品展示和体验场所。通过对园区的示范性项目改造进行经验总结，希望园区的绿色节能改造方案能给国内97%以上的高耗能建筑提供参考借鉴，从而将节能新技术、节能新产品加以应用和推广。

致谢：中国中元国际工程公司孙宗列先生、李海欣先生、李锋亮先生对本文进行了悉心指正，特此感谢！

注释和参考文献

- [1] 《美国LEED-NC 绿色建筑评估体系2.2版》分四个等级：认证级（26—32分）；银级（33—38分）；金级（39—51分）；白金级（52—69分）。
- [2] 电力价格：峰时段（8:00—11:00、18:00—21:00），1.002元/KWh；平时段（6:00—8:00、11:00—18:00、21:00—22:00），0.676元/KWh；谷时段（22:00—次日6:00），0.297元/KWh。天然气价格：3.8元/Nm³。
- [3] EQUEST是在美国能源部（U.S. Department of Energy）和电力研究院的资助下，由美国劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）和J.J. Hirsch及其联盟（Associates）共同开发，是基于DOES的软件中最为优秀的一款。其最大的特点和优势在于对空调、控制等机电系统的模拟，因而特别适合机电或能源工程师分析各种设备的节能潜力和全年运行状况，以确定合适的节能策略和最佳的节能方案。
- [4] 上海花园坊节能技术环保产业园宣传册。
- [5] “上海科学节能展示馆年前开馆”新闻报道.上海节能,2010,(1).
- [6] 上海花园坊B1、B2、A1、A2楼建筑能耗模拟分析.美国ETI编制。