

零碳建筑技术指南

Technical Guide of Zero Carbon Building

撰文 陈硕 零碳中心

摘要 通过介绍建筑碳排放的物理基础和减排量计算方法，为建筑减排量精确计算提供了工具。同时明晰了低碳、零碳和全生命周期碳排放的定义。在此基础上介绍了零碳中心在不同气候环境下的零碳建筑实践项目，以展示零碳技术与设计的结合。

关键词 碳排放 低碳 零碳技术 碳计量 零碳馆

0 引言

中国正处于气候变化的前沿地区。中国的城市扩张面积几乎等同于每年新增一个伦敦，在能源基础建设上相当于平均每周新增一座燃煤发电站。如果我们能够抢先他国利用巨大的国内市场实现低碳建筑和城市规模经济效应，并形成稳健的低碳排放工业供应链，不仅可节约我国在节能和可再生能源技术方面的投入，还可创造价值巨大的低碳建筑业出口市场。在研讨零碳与低碳建筑之前，我们将关注建筑到底如何排放二氧化碳，同时通过何种路径实现温室气体排放的减少。

1 一把伞的空间——宜居空间的数字定义

“滂沱大雨，灰蒙蒙的雨幕将天地连成混沌的一片。灰色的世界中跃然而出——一把红色的雨伞，伞下的空间干燥而温暖。”

从这样的含义上引申开来，从雨伞到雨棚，从茅屋到高楼大厦，建筑与城市最原初的功能是人类为遮风避雨而建造的庇护所。正因为有了不同的庇护所环境要求，才有了不同的建筑功能和构件。对于建筑而言其最基本的功能就是构筑一方宜居的空间。而这里提到的“宜居”应该是清晰而可度量的：

无论室外是炎炎夏日亦或是冰封寒夜，室内的温度应该在18℃~25℃之间；

无论室外是戈壁沙漠亦或是沼泽水乡，室内的湿度应该在30%~60%之间；

无论室外是日当正午亦或是皓月当空，室内的照度应当在炫光照度和微光照度即100~500lm之间。

正是这些数值构成了人类的建筑环境技术基础。凭借着这些要求建筑独立于大自然环境，营造宜居的室内环境。而环境的营造消耗的能源、水源和资源则构成了建筑二氧化碳的排放源。

2 如何计算建筑碳排放

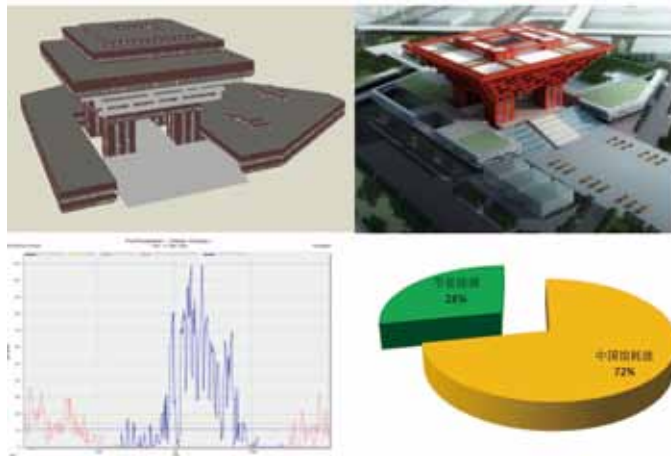
建筑的排放源包括来自于照明能耗、空调能耗、给排水能耗、设备能耗和废弃物处理形成的温室气体。碳计量方法学基本公式是：

$$\text{碳排放量} = \text{活动数据} \times \text{活动因子}$$

因此相对于照明能耗，一栋大楼的照明碳排放量就是这段时间内的照明能耗总量（活动数据）乘以每度电所排放的二氧化碳数量（活动因子）。建筑的碳计量标准依据《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》，依据国际认可的方法学，参考ISO14064-2：2006和CDM方法学组成整体建筑的碳减排方法学。

2010年8月，零碳中心与上海市环科院、同济大学联合承担了上海市科委关于“低碳世博”的研究课题——中国2010年上海世博会环境跟踪评估研究。零碳中心承担其中一轴（世博轴）四馆（中国馆、主题馆、世博中心、文化中心）的碳盘查。这是中国首次基于大型项目和长期项目的碳盘查。这个项目的碳盘查过程是先建立计算机模型对建筑物能耗进行精确模拟，下图为实际建筑的能耗模拟。在建模过程中借助了精确的物理模型开发获取2005年情况下同体量、同等建筑功能、同等气候条件下建筑的排放量作为减排量基准线。建筑的碳减排量为碳排放量与碳基准线排放量的差额，基本公式是：

$$\text{碳减排量} = \text{碳排放量} - \text{碳基准线排放量}$$



2011年第四季度，通过零碳中心碳减排方法学得出“一轴四馆”的碳减排方法和结果均得到了联合国环境规划署（UNEP）的审核认可，经审核中国馆的2010年运营期间碳排放减少量609t。中国馆与基准建筑相比较，节能减碳达27.9%

民用建筑碳计量方法学已经获得住建部科技司立项，并获得“世博科技先进集体”称号，试用版在www.co2book.com上开放。

3 如何实现低碳建筑

基于碳排放的基本计算公式，建筑实现低碳的方法基本归为两类：开源和节流。

$$\text{减排} = \text{开源} + \text{节流} = \text{主动式节能} + \text{被动式节能} + \text{高效手段}$$

“开源”通过替换碳排放源，实现更小的碳排放活动因子。在建筑中的应用是通过建筑新能源设备收集自然界的可再生能源并转

化为可替代的建筑能源形成主动式节能。包括风力发电机、水利涡轮和太阳能光伏板将风能、水能和太阳能转化为电能。

“节流”通过提高设备效率，实现更小的碳排放活动数据。在建筑中的应用一方面通过被动式节能来实现，即通过建筑的布局和构造等方式使其对人造建筑环境和建筑设备的要求最小化；另一方面通过高效能设备提高效率实现更小的碳排放数据，主要的应用手段包括地源热泵、节能灯等高效能手段。

根据国际通用的碳排放理论而言，只要建筑的设计排放量相较于2005年每平方米排放基准线有所减少，就可以称为低碳建筑，减排1%和减排99%的建筑都可称为低碳建筑。为了区别不同，英国2006年出台的建筑法规Part L要求所有建筑都要标注碳减排比率。

4 如何实现零碳建筑

基于碳计量的基本计算公式如下：

碳排放量=活动数据×活动因子

建筑实现零碳排放的方法有两个：“活动数据为零”或者“活动因子为零”。碳活动数据为零的情况基于没有任何能源消耗产生，因此18世纪前的建筑可以认为都是零碳建筑（油灯除外），而现代建筑基本不可能在此范畴内。

碳排放活动因子为零则要求全部排放源由零排放方式实现。一个建筑的全部能源由可再生能源提供，由于避免了传统火电能源生产过程中的燃烧和碳排放，能源供给活动排放因子为零；

建筑的全部废弃物由可靠的垃圾分拣处理并且局部进行本地销毁和再利用，避免了传统垃圾焚烧生产过程中的燃烧和碳排放以及垃圾填埋过程中产生的温室气体排放，垃圾处理供给活动排放因子为零；

建筑的全部水源由雨水和中水提供，避免了传统水资源生产过程中温室气体的排放，水源供给活动排放因子为零。以上三大条件构成了零碳建筑的基本定义性条件。

从实际项目的经济性操作角度而言，满足全部排放源由可再生能源提供建立在建筑的能耗足够优化以减少可再生能源的提供的基础上。对于无法实现以上三大定义条件，而通过绿化和植被等碳汇手段实现光合作用减排平衡额外碳排放量则定义为相对零碳。

5 如何实现全生命周期零碳建筑

在零碳和低碳领域时常出现一个辩论就是运营零碳和全生命周期零碳的区别。严格的全生命周期碳排放包括每一样产品的原料生产、加工、运输、使用和销毁全生命周期的碳排放。

全生命周期排放量=原料碳排放量+加工碳排放量+运输碳排放量+使用碳排放量+销毁碳排放量

建筑传统的“零碳”是建筑运营周期的温室气体排放为零，且运营周期的碳排放占全生命周期的2/3以上。全生命周期的零碳建筑目前还没有严谨的实践，但是建材的全生命周期零碳已经有了尝试。

2009年，零碳中心协助中国地板控股达成了世界上第一款零碳建材。通过在原料生产、加工、运输、使用和销毁全生命周期的碳排放计量可得2010年每平方米强化地板的全生命周期碳排放为7.66kg。通过森林碳汇的补偿，实现综合的零碳地板。

如果一个建筑全部的建材均可实现零碳，亦或结余的碳排放能够通过额外的碳汇达到平衡，就可以实现全生命周期的零碳建筑。

6 零碳建筑的20项建议

在建筑师的零碳实践中往往要和工程师以及设备提供商紧密合作。我们给出零碳建筑的20项建议。由于中国幅员辽阔，建筑师遇

到的问题和挑战不一而同，因此我们建议读者因地制宜的考察策略。

（1）阳光房。对于北半球的建筑主要窗口南向、北向窗户较小的联排建筑是最理想的被动太阳能设计。可以通过南向高处窗户在冬季利用入射角度较低的太阳光进行被动式采暖。

（2）遮阳板。南向遮阳板对于夏热冬暖地区而言是一种调节太阳辐射的工具。夏季太阳高度角较高光照将落在遮阳板上方，化为电能和热能；冬季太阳角度较低太阳辐射将射入低度角的阳光房。遮阳板外挑深度3.6m，反射系数0.74。

（3）蓄热体。当房间温度升高时，墙面和地面自动吸热，而当温度降低时放热实现热量平衡。夜间通过窗户的启闭来补充冷量。

（4）保温墙体。没有室内供暖装置，却能在大多数温带气候地区的冬季保持舒适的室内温度。

墙体由内而外构造为13mm抹灰层+140mm混凝土砌块+300mmXPS+外墙面材料墙体，保温U值为0.11~0.3W/m²K。

（5）中空low-e玻璃。窗框利用热断桥进行设计。外部和内部框架是被隔开的，紧固件不连通断热桥，使框架热性能降低到接近玻璃中心性能值水平，U值为1.6W/m²K。

（6）粉煤灰混凝土结构。混凝土砌块可就地取材，将高炉矿渣混凝土和可再生骨料相结合。零碳项目墙体材料以火电厂煤燃烧产生的粉煤灰作为原材料，以粉煤灰的比例为55%配比而成。

（7）热反射外墙涂层。



阳光房



遮阳板



蓄热体



保温墙体



中空low-e玻璃



粉煤灰混凝土



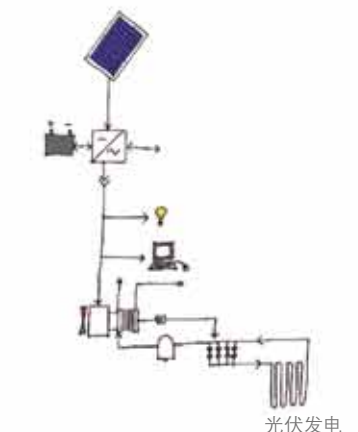
热反射外墙涂层



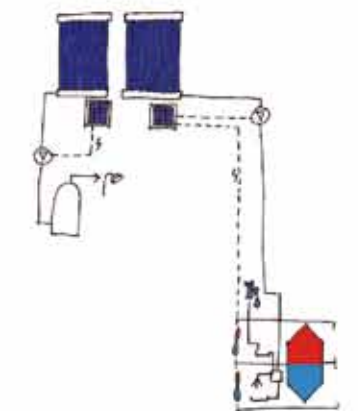
零碳地板



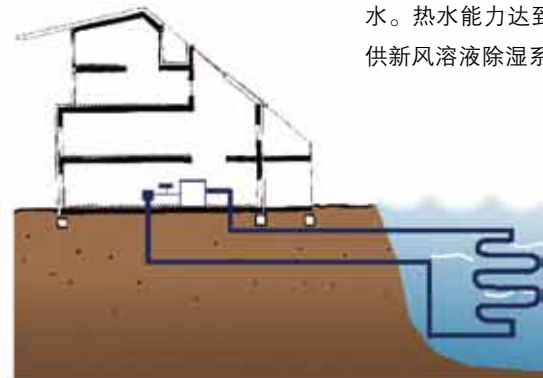
屋顶绿化



光伏发电



太阳能热水器



江水源热泵系统

当室外热量和能量辐射进入到纳米热反射涂层时, 92%的非可见光会被反射, 而不会进入室内。通过这样的涂料, 实现室内外环境温差, 达到冬暖夏凉的效果。

(8) 零碳地板。零碳馆内所有木质地板选用符合FSC标准(加拿大森林管理委员会所制定的标准)的木材, 通过碳中和实现零碳, 每平方厘米释放7个负氧离子。

(9) 屋顶绿化。零碳馆北侧屋面种植蔬菜香料等作物。在烈日下具有遮热、断热与冷却的作用。由于植物蒸腾作用带走室内热量实现降温作用。滴灌系统设计流量 $0.5\text{L/d} \cdot \text{m}^2$, 每天使用2小时。

(10) 光伏发电。零碳馆太阳能电池板将太阳的辐射能力转换为电能, 利用光电效应将太阳辐射能直接转换成电能。装机容量64KW。建筑电力能源无法输入国家电网。

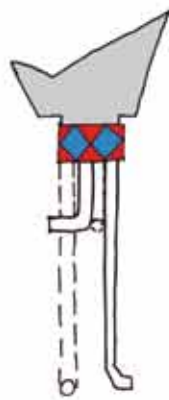
因此新产生的能源输入电池组和逆变器组成的局域微电网。除了供应本身建筑的能源外能够储存供3天持续使用的电力确保用电安全, 其余部分输送入微电网给周边建筑供应电力。

(11) 太阳能热水器。零碳馆南侧屋顶高处放置 29m^2 太阳能热水器。太阳热水器依靠玻璃真空集热管, 把太阳能转换成热能。热能提供给馆内生活热水和溶液除湿需要的热量。

集热管受阳光照射面温度高, 背阳面温度低, 管内水便产生温差, 利用热水上浮、冷水下沉的原理使水产生微循环而达到所需热水。热水能力达到 6t/d (天)并提供新风溶液除湿系统的再生溶液。

(12) 江水源热泵系统。

零碳馆需要的冷水和热源由黄浦江的江水源热泵提供。通过输入少量高品位能源, 实现低温位



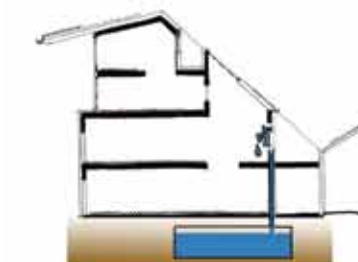
风帽



溶液除湿



雨水回收



给水系统



毛细管辐射

热能向高温位转移。在夏季将建筑物中的热量释放到水体中去。以达到给建筑物室内制冷的目的; 冬季通过热泵机组从水源中提取热能, 实现采暖。能效比COP为4~6。

(14) 风帽。零碳馆屋顶北侧上部安装了22个无动力风帽。风帽是一种安装在屋顶的风驱动热回收装置, 通过自主风力寻向装置确定建筑周边风力的主要方向, 并且将室外风动力转化为室内建筑通风的动力, 从而免去了传统空调通风系统的能耗同时回收70%的显热和潜热。风帽旋转体通过风动力自主寻找风向双向通风, 室外风速 2.5m/s 时, 新排风量 $450\text{m}^3/\text{h}$, 全热效率大于50%。

(15) 溶液除湿。零碳馆溶液除湿将空气和易吸湿的盐溶液接触, 使空气中的水蒸气吸附于盐溶液中而实现的空气除湿过程。除湿后溶液自身会变稀, 需要再生。零碳馆利用太阳能热能驱动溶液再生, 溶液除湿再生量为 10kg/h 。

(16) 雨水回收。屋面及阳台雨水经专用管道收集后排入设置于南楼北边的地下雨水贮水池, 经过集成式雨水处理设备处理后, 贮存于雨水清水池, 处理后的雨水加压采用变频系统, 提供建筑用水量。零碳馆雨水回收系统每年可收集到雨水大约 $1\ 880\text{m}^3$, 可以满足建筑用水60%的需求。

(17) 给水系统。零碳馆生活用水通过加压供水, 采用变频给水方式提供三、四层住宅及一、二层展馆生活用水。通过全变频调整, 满足水量及压力变化要求。生活水池有效总容积按最高日用水量的25%选取, 为 2.6m^3 。供水点压力为 $0.10\sim 0.35\text{MPa}$ 。

(18) 毛细管辐射。零碳馆采用冷辐射毛细管末端

将江水源热泵制取的中温冷水或低温热水经传输系统转化为冷辐射。通过辐射的方式直接与室内环境和用户进行冷热交换。这种以辐射方式为主的冷热交换极大简化了能量从冷热泵到终端用户（室内环境）之间的传递过程，大大减少了不可逆损失，提高了低品质自然冷热源的效率。冷辐射量为 $70\text{W}/\text{m}^2$ 。

（19）能耗监控系统。能耗监控系统能够监视能耗和建筑使用情况并且协助建筑智能做出决策。系统可直接连接电表、水表、燃气表、流量计算机，实现高效的能量计量现场采集，同时支持以有线和无线以太网方式实时传输，并且耗能设备远程集中控制和管理。

（20）生物质能源。零碳馆生物能锅炉将来自餐厅的剩饭剩菜和废弃物进行控制性厌氧发酵，产生出的生物气体进行发电和发热。生物气体是各种有机物在隔绝空气时经过厌氧微生物的分解代谢而产生的一种可燃性气体。零碳馆生物能锅炉在正常运转后将实



板。三四层南立面的玻璃阳光间将冬季的阳光引入室内，南向挑出的3m深的屋檐将夏季的高角度太阳辐射挡于室外，北向的坡度最小化了对于后排建筑的日照影响。

北向屋顶上种植蔬菜和立体绿化，实现了食品的本地化供应。北侧屋顶上的天窗通过北向天光实现整体的室内照明。利用大坡度的斜面收集雨水，达成雨水的回收利用。

零碳馆采用江水源热泵系统，从黄浦江水中获取冷热源，COP效率达到6，相比传统COP=1的空调节能5/6。制冷的回风由太阳能溶液进行除湿，能源消耗仅为溶液泵，而传统冷冻除湿节能在极端季节消耗空调能量2/3。风帽在风速在 $2.5\text{m}/\text{s}$ 的环境下自动捕捉风向，利用风力通风省去传统新风系统的风扇能耗。辐射板系统通过辐射进行热交换，减少风机盘管通过传导和蒸腾实现热交换的能耗。

北向屋顶灵活转动的22个风帽利用风能驱动室内的通风和热回收。由风帽和吸收式制冷系统相结合的体系同时提供循环风的解决方案，提高了访客的热舒适度。

零碳馆的保温系统在全截面上进行考虑，零碳馆使用回收骨料的混凝土结构充当蓄热体，当房间温度升高时，墙面和楼板自动吸热。

南向屋顶的多晶硅太阳能电池板将太阳的辐射能力转换为电能并且储存在磷酸铁锂电池中，富余的部分输入微电网。电力储存使用的电池和电力汽车使用的电池相同，可以为电动车充电。

综合以上技术的应用，零碳馆全面展示基于中国气候和经济条件下的零碳实践，向全球彰显中国在节能减排方面的努力和成果。



现剩余能源需求的自给自足。

7 能源收集机——世博会零碳馆伦敦案例

零碳馆位于上海世博会园区城市最佳实践区，总建筑面积为 $2\,657\text{m}^2$ ，由南北两栋4层的连体建筑构成。零碳馆是中国第一栋零二氧化碳公共展示性建筑。该项目由零碳中心、同济大学设计院、Bill Dunster先生和Mott McDonald 事务所联合完成。

零碳馆结合上海当地气候特征，利用国产的技术和材料实现零碳。零碳馆的形体设计最大化优化对于太阳能的利用和最小化热量的散失。南向的屋顶和三层平台按照最佳的太阳角度布置太阳能

8 “冰箱和奶酪”——万科建筑研究基地展示中心

2009年，零碳中心受委托改造设计万科建研基地展示中心。该中心位于广东省东莞市，属亚热带季风气候，温差振幅小，季风明显。该项目占地约 $1\,999.89\text{m}^2$ ，地上2层。设计的目标是建设成为中国被动式节能的典范，同时以最小改造达到节能改建目的。

在夏季的南方，最节能的模式应考虑双模式运行，即在气候适应的季节采用自然通风和采光的“奶酪模式”；在气候较恶劣的季节应当选择封闭的“冰箱模式”，并且集中供热和供冷。

奶酪模式下，建筑通过通风管确保建筑在气候温和的季节（春



万科建研基地展示中心



中科院光伏产业化研究中心

季、秋季）能够获得足够大的换热面积和效率。二楼展厅高处布置聚乙烯彩色塑料风道将能够保证南向的风压和新风传递到建筑大进深的开放区间。导光管在夏季的适宜季节能够实现建筑的短截面采光。

冰箱模式能够确保在空气温度湿度不理想的季节（冬季、夏季）建筑室内的冷量和热量不至于流失，实现建筑在极端气候条件下需要确保的保温和气密性。建筑使用水源热泵结合地道风、新风温度处理实现建筑在暖通空调方面的低碳排放。

建筑设计的考量严格遵循零碳的物理需求，将能源机制和装饰风格结合。一楼大堂内的4个红色空间雕塑将室外的天光导入室内以提供自然采光。二楼展览厅中的彩色风管连接外墙上的圆形开窗，将室外空气动力转化为室内新风。在建筑的形体设计中，尽可能利用被动式的太阳能，各向角度都针对能源收集方式做了优化。南向立面透过阳光间将太阳能转化为室内热能，南向屋顶通过太阳能板将太阳能转化为电能，北向屋顶通过漫射太阳光培育绿色屋顶植

被，同时高出屋面的通风采光窗为室内提供了自然采光。通过该项目的实践，我们探索了中国南部地区气候条件下的零碳模式。

9 零碳综合体——中科院光伏产业化研究中心

2009年零碳中心受委托建造设计了中科院光伏产业化研究中心。该项目位于苏州昆山新能源基地，建筑面积3万 m^2 ，功能包括办公楼、接待中心、展示中心生产基地、中试基地、研究中心等。

对于大型综合体项目，不同的功能启用时间不同，能源强度不同，热量产生的周期也有所不同。在项目中，大空间通过不同功能之间的高峰用电差实现热量分布，平衡室内热环境。在建筑的顶部通过14个大型的风帽实现通风和热回收。

建筑的南向立面通过三层高的玻璃幕墙实现阳光间。建筑整体屋面向南倾斜，构筑了1.6MW的太阳能屋顶，启用后将作为中国第二大光伏屋顶。建筑北向布置停车场的地下布置了大量的地源热泵取热管，通过地源热泵供应建筑的冷热源。



作者简介

陈硕，零碳中心总裁，剑桥大学建筑与城市可持续发展专业硕士，英国建筑能耗标准评议员，世博会伦敦馆馆长，国际展览局银质奖章获得者。毕业于剑桥大学建筑与城市可持续发展专业，曾在国际低碳领袖企业长年从事理论和实践工作。2008年受伦敦市长办公室委托建设和管理2010上海世博会伦敦案例零碳馆，建成中国第一座零二氧化碳排放的示范建筑。其主持的规划项目包括北京通州低碳城市方案、海南博鳌亚洲论坛二期太阳与水示范区等，建筑项目包括万科地产零碳示范楼、万科地产东莞建研基地主体、万通原型屋、中科院光伏产业化研究基地、国家新能源展示基地等。

零碳中心简介

在2010上海世博会中，零碳中心设计运营了世博会历史上第一个零二氧化碳排放的展览馆，之后与万科集团合作建设了万科零宅项目、万科建筑研究基地展示中心。此外，零碳中心与中国的13个城市开展了低碳合作，提供包括财务方面的低碳整体解决方案；对海南博鳌亚洲论坛旁的万泉乐城和上海迪斯尼乐园配套区域进行了低碳城市规划；与中国的标准机构合作，开发了适应中国国情的城市运营、建筑运营、建材全生命周期温室气体排放的检测方法和标准。通过一系列的低碳实践，零碳中心探索出一条为中国的低碳城市提供低碳启动区、基建、为产业项目提供资金投资和发展的模式。