

摘要 可变建筑表皮通过对表皮上可变化构件的动态控制,调节建筑的太阳辐射得热量、通风量、蓄热量和传热系数,从而实现对室内热环境的调节,以适应不断变化的建筑外界环境。依据上述四个调节因素,对国际太阳能十项全能竞赛参赛作品中基于热环境调控的可变建筑表皮进行归类,并分析其设计策略,以期可为可变建筑表皮在建筑实践中的应用提供参考。

关键词 可变建筑表皮 热环境 动态调控 气候适应性 国际太阳能十项全能竞赛

ABSTRACT The changeable building skins adjust the buildings' solar heat gain, the air exchange rate, the heat storage capacity and the heat transfer coefficient by dynamically controlling the changeable components to adjust the indoor thermal environment against the changing external environment. According to the four adjustment factors above, the changeable building skins based on thermal environment control in the entries of the Solar Decathlon are classified. The control strategies are analyzed respectively in order to provide a reference for the practice and application of the changeable building skin.

KEY WORDS changeable building skin, thermal environment, dynamic control, climate adaptability, Solar Decathlon

DOI 10.12069/j.na.201902097

中图分类号 TU201 **文献标志码** A **文章编号** 1000-3959 (2019) 02-0097-05

基金项目 国家自然科学基金面上项目(51778549);福建省自然科学基金面上项目(2017J01102);华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目(2018ZB15)

石峰 郑伟伟 金伟
SHI Feng ZHENG Weiwei JIN Wei

可变建筑表皮的热环境调控策略分析

An Analysis of Thermal Environment Control Strategy of Changeable Building Skin

1 热环境调节原理示意

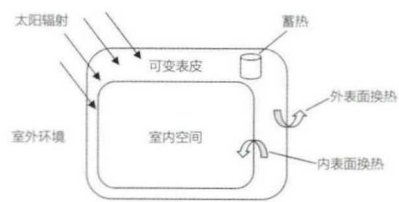


表1 各项被动式节能技术对应的可调节因素

节能技术	调节因素			
	太阳辐射得热量	通风量	蓄热量	传热系数
温室效应	●			
遮阳措施	●			
自然通风		●		
表皮材料				●
蒸发冷却			●	
相变材料			●	
特朗伯墙	●		●	
双层皮幕墙	●	●		
通风墙				●

随着诸多生态问题受到重视,建筑师开始以更积极的姿态探讨建筑与环境之间的关系。建筑表皮是建筑与外部环境间的临界界面,发挥着调节建筑内部物理环境的重要功能。可变建筑表皮可针对外界环境的变化,通过对表皮上的可变化构件的动态控制,对建筑内部各项环境因素进行调节,使建筑更好地满足气候适应性的要求。

欧美国家对可变建筑表皮已经进行了一定的研究。欧洲的COST Action TU1403是一个专门研究适应性表皮网络(Adaptive Facades Network)的研究组织,致力于推动、分享与适应性表皮相关的学术研究和工业应用^[1-3];美国哈佛大学(Harvard University)开展了热力学建筑(Thermal Dynamic Building)、环境智能建筑等设计实践和研究,其中包含了多个与可变建筑表皮相关的研究课题,研究内容包括案例分析、使用评价、建筑能耗、控制方法、优化算法等^[4-7];在

设计方法的研究上,由伦敦大学学院(UCL)学者鲁艾利·格林(Ruairi Glynn)主持的交互建筑实验室(Interactive Architecture Lab)对交互式建筑的理论研究和设计实践做了诸多尝试^[8-10];荷兰代尔夫特理工大学(Technische Universiteit Delft)的建筑界面研究小组(FRG)聚焦基于气候适应性的建筑界面研究,提出了“环境参数化”的表皮设计方法,并据此展开了多层复合可变建筑表皮的设计探索和实验研究^[11-13]。在国内,李保峰对建筑表皮中的可变化部件,如百叶窗、双层皮玻璃幕墙、采光顶等进行了实测研究,探讨了适应夏热冬冷气候区的可变建筑表皮设计策略^[14];吕爱民提出了“应变建筑”的设计理念,研究了我国大陆性气候区中,建筑如何动态地适应气候变化^[15];宋晔皓通过研究模块化、参数化等设计方法和数控建造技术的应用,为建筑表皮的形态实现提供了更多的可能性^[16-18];舒欣在前人研究基础上重点关注

[作者单位] 石峰:厦门大学建筑与土木工程学院(福建,361005);华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室(广州,510640)
郑伟伟:厦门市万科企业有限公司(福建,361007)
金伟:温州建正节能科技有限公司(浙江,325003)

了“气候适应性建筑表皮”^[19]；此外，天津大学的学者展开了系列课题研究，王嘉亮基于仿生学的启示，探讨了“动态建筑表皮”的设计思路，重点讨论了动态建筑表皮在建筑能耗和光环境舒适度方面的性能优化^[20]，苗展堂、冯刚等分析总结了动态建筑表皮的基本类型及特点，并对动态建筑表皮可变单元的设计策略进行了探讨^[21, 22]。

随着研究的深入，可变建筑表皮已从实验研究走向实际应用，如法国阿拉伯世界研究所、韩国2012世博会主题馆、德国Q1总部大楼，阿布扎比Al-Bahar大厦等代表性建筑，以及Adaptive Building Initiative、Ernst Giselbrecht + Partner、Kiefer Technic Showroom等专门从事适应性表皮设计的公司的出现；美国能源部发起和主办的国际太阳能十项全能竞赛（Solar Decathlon，简称SD竞赛²）中，也出现了许多应用可变建筑表皮的实验性住宅案例。近年来，可变建筑表皮正逐渐成为建筑设计中的一个前沿的实践方向。

相对国外而言，国内可变表皮的研究和实践尚处于发展的初期阶段，实践案例很少，且缺乏对国内外相关案例的系统整理。此外，国内的建筑实践往往偏重于建筑的功能与造型，缺少对环境因素的考量，因此在建筑表皮的设计上，少有基于气候环境的可变表皮技术应用。综上，有必要对已有的可变建筑表皮案例进行分析整理，为后续的研究及实践厘清思路、提供参考。

根据功能特征，可变建筑表皮可分为以环境因素、空间需求、交互体验和视觉传达为导向的四个类别^[23]。其中，以环境因素为导向的可变建筑表皮具有良好的气候适应性，生态效益较强。根据其调节的主要环境因素，这类表皮又可分为热环境因素调节、光环境因素调节、太阳能因素调节和综合因素调节等四类^[24]。而在诸多环境因素中，热环境因素对建筑能耗和人体热舒适感受的影响最为直接；以这一因素为导向的可变建筑表皮由于更具环境生态效益和广泛的应用潜力，具有独特的现实意义，故而对其理论内涵的探索、实践案例的归纳整理是本文的重点所在。

一 可变建筑表皮热环境调控原理

建筑外围护结构将人们的生活与工作空间分为室外和室内两部分，建筑热环境也相应地分为室外热环境和室内热环境。

室外热环境是指作用在建筑外围护结构上的一切热湿物理量的总称^[25]，包括空气温度、湿度、太阳辐射、风、降水、积雪、日照等诸多因素。建筑外围护结构的功能之一便是抵抗或利用室外热湿作用，在房间内创造舒适的热环境。室外热环境评价指标种类较多^[26, 27]，常见的有湿黑球温度

WBGT、生理等效温度PET、温湿指数THI，以及近年来应用较多的通用热气候指数UTCI^[28-32]。

室内热环境的设计目标是舒适、健康、高效。舒适的室内热环境是维护人体健康的重要条件，也是人们得以正常工作、学习、生活的基本保证。在诸多室内换热评价指标中，由丹麦学者范格（Fanger）提出的热舒适指数PMV被国内外众多标准采用^[33]，它建立在热舒适平衡方程基础上，考虑了室内空气温度、空气湿度、气流状况、平均辐射温度等四个环境因素，以及人体新陈代谢率和衣着热阻两个人体因素。

由上可知，建筑师应能通过技术措施，有效处理室内外热湿作用，合理地解决房屋的保温、隔热、防潮等问题，在创造良好的室内热环境的同时节约能耗，而建筑表皮设计正是实现这一目标的关键所在。建筑表皮包括墙体、门窗、屋面等建筑表层构件，是建筑与外部环境发生热量交换的主要部位，如同人体的皮肤一样，发挥着调节建筑内部环境的功能。可变建筑表皮模仿人体的热调节机理，通过对建筑表皮的动态控制，充分利用自然通风、自然采光、蒸发冷却、可控遮阳、相变储能等被动式节能技术，调节室内热环境，从而更好地适应多变的气候环境，提高建筑环境的舒适性，同时降低建筑的能耗。随着计算机技术、智能控制技术的发展和新材料的应用，能对气候环境的变化进行响应的、智能可变的建筑表皮系统逐渐出现，并具有一定的应用潜力。可变建筑表皮设计策略的核心在于通过建筑表皮的不同功能模式，来适应不同的室内外环境状况，即通过对功能模式的动态控制来适应环境条件的变化，并利用各种被动式技术来提高建筑的环境舒适度和节能效率。

如前所述，在热环境调节方面，可变建筑表皮中有诸多可用的被动式节能技术。但从热环境调节机理来看，这些被动式技术都是通过调节表皮的性能状态，来控制建筑室内外的换热速率（图1）。可以通过建筑表皮的变化进行调节的状态因素主要有表皮的太阳辐射得热量、通风量、蓄热量和传热系数。依据对这四个因素的调节能力，可以对各项被动式技术进行归类：如温室效应和可控遮阳主要是对太阳辐射得热量的调节；建筑通风降温可视为调节室内的通风量；相变储能则是通过改变表皮构件自身的蓄热性能调节建筑表皮的蓄热量（表1）。以下主要使用这四个调节因素描述可变建筑表皮的状态，分析其与室内外环境参数的相互关系，并探讨各调节因素之间的耦合关系。

二 SD竞赛参赛作品可变建筑表皮的热环境调控策略分析

SD竞赛是由美国能源部发起并主办，全球高

校参赛的太阳能建筑科技竞赛。竞赛要求以一体化的方式紧密结合太阳能、节能与建筑设计，设计建造并运行一座功能完善、舒适宜居、体现可持续发展理念的零能耗住宅。因其前瞻性、实践性与综合性，SD竞赛体现着建筑技术的发展前沿。在已举办的15届SD竞赛中，有许多参赛作品采用了基于热环境调控的可变建筑表皮技术。这些作品融合了技术创新和设计创意，致力于应对不断变化的气候环境问题。

在建筑中通过可变建筑表皮的设计策略来适应室外热环境的变化，可以减少建筑使用过程中的能耗，具有较好的生态效应，同时也能为建筑立面形式创新提供依据。以下将针对SD竞赛中基于热环境动态调控的若干可变建筑表皮案例，依据前文中提到的四个热环境调节因素，在对其具体策略归类分析的基础上分项详述（表2），以期能为可变建筑表皮技术在建筑实践中的应用提供参考。

1 太阳辐射得热量调节

进入室内的太阳辐射得热量是建筑热负荷的重要组成部分，目前对其进行调控的常见方法主要有窗帘、百叶、遮阳幕布等相对简单的技术手段。但由于太阳辐射强度的变化很快，且调节太阳辐射常常会影响室内采光，因此采用智能控制系统，根据室外太阳辐射强度以及其他环境因素的变化，对可变表皮进行实时控制，可以实现更理想的调节效果。

加泰罗尼亚理工队（Team UPC）在SDE2012参赛作品(e)co Project中采取了“盒中盒”的设计策略，建造了一个具有环境适应性的，由外表皮、内表皮、缓冲空间、蓄热体四部分组成的复合表皮系统（图2）。建筑外表皮采用钢结构框架，覆以蜂窝聚碳酸酯预制板，并设滑动门、电动高窗、遮阳网等动态构件；内表皮由具有良好热工性能的有机材料构成；缓冲空间介于两层表皮之间，用于室内外的热交换空间，以及功能空间的过渡；蓄热体主要由蓄热能力较强的砾石组成，位于建筑主体北侧。

夏季白天，室内的遮阳网完全展开，可避免缓冲空间接收过多的太阳辐射；光伏盖板和立面高窗大面积开启，使遮阳网和聚碳酸酯板之间形成温度较高区域，与缓冲空间形成一定的温差而促进热压通风；同时，内表皮保持关闭，因其良好的保温隔热能力，加之北侧低温砾石蓄热体吸收室内热量，功能模块内空间得以维持相对舒适且较为稳定的热环境。夏季夜晚，遮阳网收起，光伏盖板与立面高窗开启，保持通风；内表皮朝缓冲空间局部打开以促进热量交换；打开蓄热体盖板，使其冷却以供次日使用。这样，该建筑便可在一定程度上不依赖空调制冷，仅依靠复合表皮系统来维持功能模块内相

表2 SD竞赛作品中可变建筑表皮的热环境调控策略

类别	战队	作品名称	调节手段	调节周期			控制模式			建筑外观
				季节	昼夜	实时	手动	电动	智能	
太阳辐射得热量调节	SDE2012 西班牙UPC队	(e)co Project	由外表皮、内表皮、缓冲空间、蓄热体组成的复合表皮系统	●	●	●	●	●	●	
	SDC2018 “家+”队	Nature Between	由檐廊遮阳百叶、南侧中庭天窗、室内电动窗帘等构件组成的复合表皮系统	●	●	●	●	●	●	
	SDA2011 新西兰First Light队	First Light	电动天窗卷帘			●		●		
通风量调节	SDE2010 西班牙UPC队	LOW3	由外表皮、内表皮、缓冲空间组成的复合表皮系统	●	●		●	●		
	SDA2011 诺斯维尔田纳西大学队	Living Light	集成了可调百叶的双层外表皮，冬夏采用不同的通风模式	●			●			
蓄热量调节	SDA2011 同济大学队	Y-container	集成了相变材料的屋面玻璃集热腔	●	●			●		
	SDC2013 厦门大学队	Sunny Inside	相变通风系统	●	●			●		
传热系数调节	SDE2010 弗吉尼亚理工大学暨州立大学队	LumenHAUS	由金属百叶屏、半透明聚碳酸酯面板、滑动钢纱窗、滑动玻璃门、滑动薄纱窗组成的复合表皮系统			●	●	●	●	
	SDA2013 澳大利亚队	LISI House	可展开的帘状外表皮	●	●		●			
	SDA2009 爱荷华州立大学队	Interlock House	墙体外可旋转百叶	●	●		●			

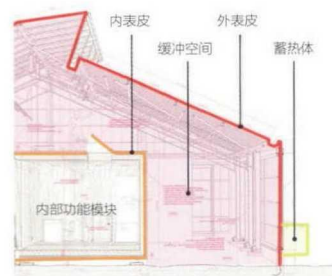
资料来源：根据SDE、SDA、SDC官方网站上各战队Project Manual整理绘制；LumenHAUS案例图片引自<https://lumenhouse.com>

对凉爽的热环境（图3a）。

冬季白天，遮阳网收起，利用外表皮聚碳酸酯板的半透明特性，形成温室效应，使缓冲空间气温上升；光伏盖板和立面高窗保持关闭，防止热量流失；内表皮面向缓冲空间完全开启以接收更多的热量；打开砾石蓄热体盖板，吸收太阳辐射用于夜间换热。冬季夜晚，遮阳网完全展开，光伏盖板和立面高窗均保持关闭，外表皮作为屏障抵御室外严寒，防止室内热量流失；内表皮完全关闭，充分发挥其保温和隔热性能；砾石蓄热体通过一个小型换气扇向室内输送白天积蓄的热量。这样，该建筑可在一定程度上无须借用采暖设备，仅依靠表皮系统来维持功能模块内相对温暖的热环境（图3b）。

过渡季节白天，智能控制系统将根据使用者的偏好设置和室内环境参数监测，调节遮阳网的覆盖比例、光伏盖板的倾角、立面高窗和内表皮的开闭以及加湿器参数，从而使室内保持一个舒适宜人的热环境。过渡季节夜晚，缓冲空间和砾石蓄热体利用其蓄热能力，减少室外环境波动对室内环境的影响（图3c）。

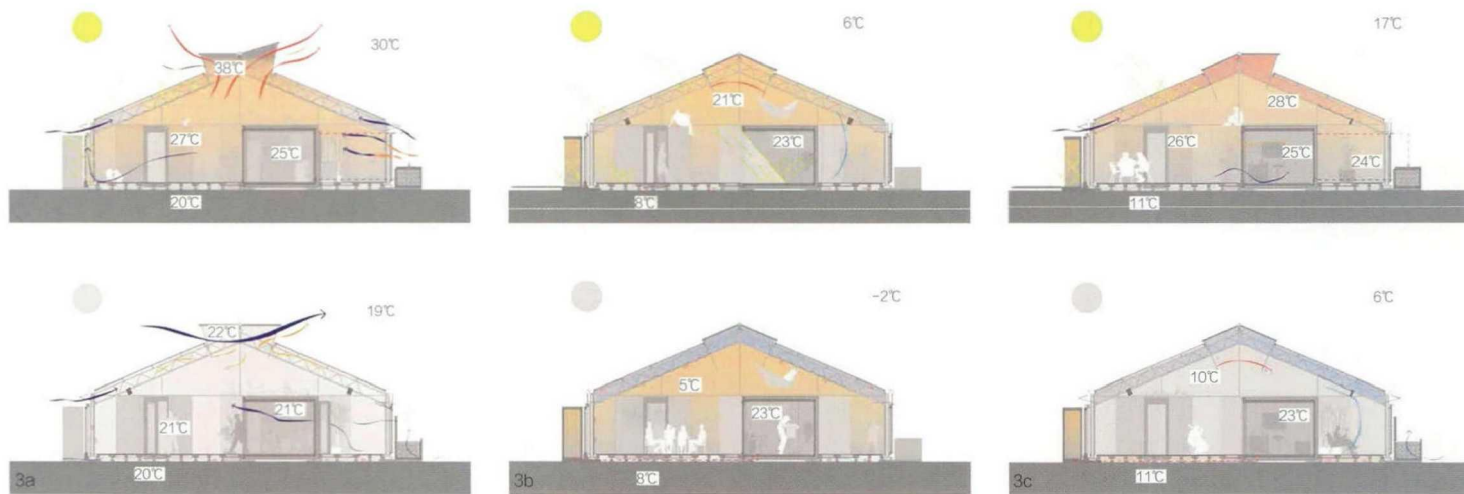
由于太阳辐射得热对室内热环境的影响很大，且常与其他环境因素相互耦合，因此在可变建筑表皮的设计实践中，应综合考虑室内外温湿度、照度、风速、蓄热能力等相关因素，合理控制进入室



2 (e)co Project复合表皮系统的四个组成部分

3 (e)co Project复合表皮系统太阳辐射得热量调节示意

a 夏季 b 冬季 c 过渡季节



内的太阳辐射得热量。(e)co Project中的复合表皮系统便是一个较好的参考案例(表3)。

2 通风量调节

在可变建筑表皮的设计中,对通风量进行调节也是一项有效的技术策略。良好的风环境能改善室内空气品质,带走室内多余的热量,并通过有效降低空调、电扇等耗能设备的使用时间来降低能耗。可变建筑表皮的通风量调节主要通过热压通风和风压通风两种方式实现。

加泰罗尼亚理工队SDE2010的参赛作品LOW3,同样采用了复合(双层)表皮的建筑形式,与(e)co Project一样,两层表皮之间也有一个缓冲空间。该建筑以“在低造价的前提下,建造低能耗、低环境影响的生态建筑”为宗旨,通过独具匠心的建筑设计和生态技术落地实现,并凭借独特的建筑形式、适宜的生态策略和较为低廉的成本,获得了该年度竞赛建筑设计单项最高分。以下简述LOW3双层表皮调控热环境的原理。

夏季白天,LOW3北侧屋盖开启,遮阳的同时引入新风,保证室内空间一定的通风量;通过室内外植被的蒸腾作用和蓄热性能,形成相对舒适的微气候区;当缓冲空间过热时,开启水雾喷头,利用喷雾蒸发冷却进行降温;隔热性能良好的内表皮保持关闭;内部功能空间利用空调降温,达到舒适温度。夏季夜晚,因室外环境较为舒适,可开启建筑南立面表皮、北侧屋盖、北立面窗户和内表皮,充分利用自然通风为建筑降温,保持室内环境舒适度

(图4a)。

冬季白天,关闭北侧屋盖,防止热量流失;内表皮朝向缓冲空间开启,吸收太阳辐射;北立面窗户向外开启引入新风。冬季夜晚,关闭建筑南立面表皮、北侧屋盖、北立面窗户,防止热量流失;内部功能空间使用空调来达到舒适温度,内表皮保持关闭以避免热量流失(图4b)。

3 蓄热量调节

同济大学队(Team China, Tongji University) SDA2011参赛作品Y-containter,在中庭屋面的上方设置了一个玻璃顶的小集热腔,能将白天接收到的太阳辐射热量储存在相变点温度为50℃的相变材料中。因相变材料良好的储热性能,集热腔内的温度可保持在50℃左右,与室内温度(22℃—25℃)形成较大温差,从而促进热压通风。为了应对不同季节的使用要求,集热腔内装有可升降的通风口、可旋转开闭的对外/对内开口。

夏季白天,使用空调制冷将室内温度维持在22℃—25℃,关闭集热腔对内开口以减少热量流入室内,开启通风口、对外开口以促进腔内通风,防止热量在集热腔内聚集;夏季夜晚,关闭对外开口,打开通风口、对内开口以促进室内通风散热。冬季白天,通风口、对外开口关闭,对内开口打开,利用温室效应使室内升温;冬季夜晚,三个开口均关闭,双层皮的形式有利于保温,而相变材料释放白天蓄存的热量给室内供热。在过渡季节,对外开口关闭,通风口、内部开口打开,并根据室内

外环境参数调节热压通风强度,以形成舒适的室内热环境(图5)。

4 传热系数调节

调节建筑表皮的热工性能是指通过技术手段,改变围护结构的热阻、热反射率等热工性能指标,以此来调节建筑室内外的热量交换,即可在建筑中采用活动的多层复合表皮,通过不同层次表皮间的组合,对表皮整体的热工性能进行调节,适应外界环境的变化。

弗吉尼亚理工学院暨州立大学队(Team Virginia Tech)在SDE2010参赛作品LumenHAUS中设置了Eclipsis System智能控制系统,以及由金属百叶屏、半透明聚碳酸酯面板、滑动钢纱窗、滑动玻璃门、滑动薄纱窗组成的复合表皮。其中,智能控制系统通过收集气象站实时监测到的室外环境参数,结合用户自定义配置,通过优化算法实现对复合表皮的动态调控,进而实现对遮阳、通风、能耗等需求的综合协调;LumenHAUS复合表皮的金属百叶屏设有可旋转的金属圆片,在智能控制系统下可动态调控建筑的遮阳与通风;半透明聚碳酸酯面板填充了纳米凝胶,保温隔热性能好;滑动钢纱窗可使室内免于蚊虫困扰并调节采光;在需要时可手动打开滑动玻璃门,为室内提供更多的新鲜空气;滑动薄纱窗的设置则能很好地保护用户的隐私。此外,通过不同功能表皮的组合,表皮自身以及表皮之间的空气间层还能形成不同的热阻,从而实现对传热系数的调节。

澳大利亚队(Team Australia)在SDA2013参赛作品LISI House的建筑外围设置了一圈可展开的帘状外表皮。夏季白天,展开的表皮因其材质特性及材料表面颜色,可为围护结构提供较好的热反射性能。而帘状表皮与外墙之间形成通风层,可减少建筑室内空间的得热量。

三 结语

本文对历届SD参赛作品中的可变建筑表皮的应用情况进行了分析,将可变建筑表皮的热环境调控策略分为太阳辐射得热量调节、通风量调节、蓄热量调节、传热系数调节四个类别,并通过案例分别阐述其特点。

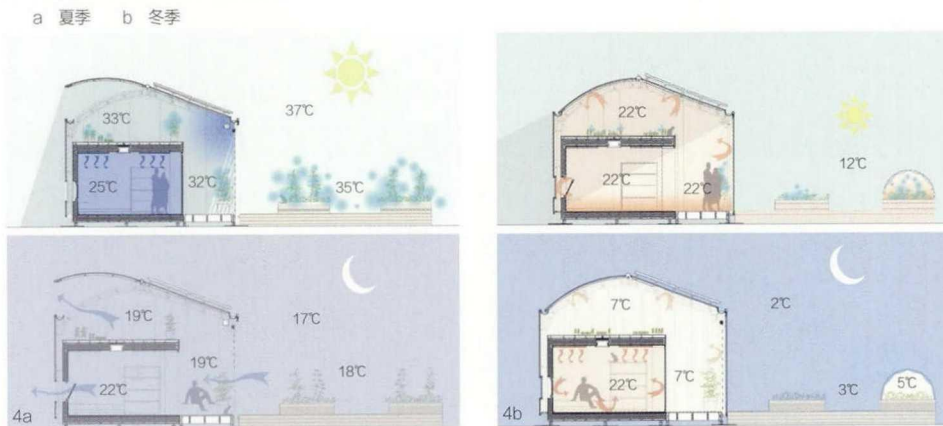
以上分析结果表明:①从建筑气候适应性和生态性能表现来看,可变建筑表皮相较于静态表皮具有一定的优势,有助于营造舒适的室内热环境并降低建筑能耗,是一种绿色生态可持续的技术手段。②可变建筑表皮的热环境调控策略主要包括:夏季白天以隔热为主,夏季夜晚以通风散热为主;冬季白天以蓄热为主导,冬季夜晚以保温为主导;过渡季节以综合控温为主导。在实际应用中,可变建筑表皮具体的调控策略及相应的技术措施,还应在充

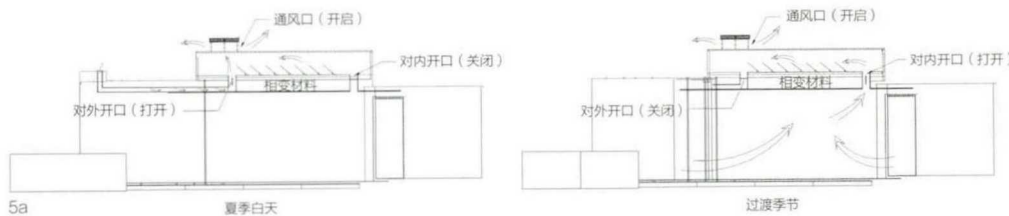
表3 (e)co Project复合表皮系统调控策略

调控时段	表皮措施				
	遮阳网	立面高窗	光伏盖板	内表皮	蓄热体
夏季白天	完全展开	大面积打开	大面积打开	完全关闭	吸收室内热量
夏季夜晚	完全收起	局部打开	局部打开	局部打开	持续向室外释放热量以获冷却
冬季白天	完全收起	完全关闭	完全关闭	大面积打开	持续吸收太阳辐射
冬季夜晚	完全展开	完全关闭	完全关闭	完全关闭	通过小换气扇向室内输送热量
过渡季白天	智能调控	智能调控	智能调控	智能调控	持续吸收太阳辐射
过渡季夜晚	完全展开	完全关闭	完全关闭	完全关闭	向室内输送热量

资料来源:根据SDE2012加泰罗尼亚理工队Project Manual整理绘制

4 LOW3双层表皮系统通风量调节示意





5 Y-container的通风调节系统
a 调节策略示意 b 通风口开启效果

分考虑气候环境、建筑方案、智能化技术等多方因素后进行综合决策。

由于SD竞赛的参赛作品以小型单体住宅为主，本文所整理的可变建筑表皮设计策略主要适用于小体量建筑。在实际应用场景中，针对不同规模体量的建筑不同的环境需求，建筑师应根据实际情况进行相应的调整和取舍。□

图片来源：图2—4根据SDE官方网站<http://www.sdeurope.org>中SDE2012加泰罗尼亚理工队Project Manual整理绘制；图5根据SDA官方网站<http://www.solardecathlon.gov>中SDA2011同济大学队Project Manual整理绘制；其余图片由作者拍摄或绘制。

注释

- ① 参见：<http://www.ruainglynn.co.uk/>。
- ② SDE代表欧洲太阳能十项全能竞赛，SDA代表美国太阳能十项全能竞赛，SDC代表中国太阳能十项全能竞赛，后面的数字表示竞赛年份。SDC官方网站为<http://www.sdchina.org.cn>；SDA官方网站为<http://www.solardecathlon.gov>；SDE官方网站为<http://www.sdeurope.org>；各官网收录了历届参赛作品的图纸和说明文本（Project Manual）。

参考文献

- [1] AELENEI D, AELENEI L, VIEIRA C P. Adaptive Façade: Concept, Applications, Research Questions[J]. Energy Procedia, 2016, 91: 269-275.
- [2] ATTIA S, BILIR S, SAFY T, et al. Current Trends and Future Challenges in the Performance Assessment of Adaptive Façade Systems[J]. Energy and Buildings, 2018, 179: 165-182.
- [3] GOIA F, ROMEO M, PERINO M. Simplified Metrics for Advanced Window Systems. Effects on the Estimation of Energy Use for Space Heating and Cooling[J]. Energy Procedia, 2017, 122: 613-618.
- [4] CRAIG S, GRINHAM J. Breathing Walls: The Design of Porous Materials for Heat Exchange and Decentralized Ventilation[J]. Energy and Buildings, 2017, 149: 246-259.
- [5] LEE Y S, MALKAWI A. Simulating Multiple Occupant Behaviors in Buildings: An Agent-based Modeling Approach[J]. Energy and Buildings, 2014, 69: 407-416.
- [6] WANG B, MALKAWI A. Design-based Natural Ventilation Evaluation in Early Stage for High Performance Buildings[J]. Sustainable Cities and

Society, 2019, 45: 25-37.

- [7] LI X, MALKAWI A. Multi-objective Optimization for Thermal Mass Model Predictive Control in Small and Medium Size Commercial Buildings Under Summer Weather Conditions[J]. Energy, 2016, 112: 1194-1206.
- [8] GLYNN R. Animating Architecture: Coupling High-Definition Sensing with High-Definition Actuation[J]. Architectural Design, 2014, 84: 100-105.
- [9] ELASHRY K, GLYNN R. An Approach to Automated Construction Using Adaptive Programming[M/OL]//MCGEE W, PONCE DE LEON M. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design. Springer, Cham, 2014: 51-66. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-04663-1#toc>.
- [10] FOX M, KEMP M. Interactive Architecture: Adaptive World[M]. New York: Princeton Architectural Press, 2016.
- [11] BILORIA N, SUMINI V. Performative Building Skin Systems: A Morphogenomic Approach Towards Developing Real-time Adaptive Building Skin Systems[J]. International Journal of Architectural Computing, 2009, 7(4): 643-675.
- [12] BILORIA N. Adaptive Building Skin Systems: A Morphogenomic Framework for Developing Real-time Interactive Building Skin Systems[C]// Proceedings of the 2009 Computation World: Future Computing, Service Computation, Cognitive, Adaptive, Content, Patterns. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 119-125.
- [13] LOONEN R C G M, TRCKA M, C Ó STOLA D, et al. Climate Adaptive Building Shells: State-of-the-Art and Future Challenges[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 25(5): 483-493.
- [14] 李保峰. 适应夏热冬冷地区气候的建筑表皮之可变化设计策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [15] 吕爱民. 应变建筑[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [16] 宋晔皓, 王嘉亮, 卡尔达斯, 等. 节能与舒适: 表皮材料的建筑性能表现及其设计应用[J]. 时代建筑, 2014 (3): 77-81.
- [17] 林正豪, 宋晔皓, 孙菁芬, 等. 气候应答式的模块化建筑表皮设计策略——以清控人居科技示范楼项目为例[J]. 动感: 生态城市与绿色建筑, 2015 (2): 54-61.
- [18] 宋晔皓, 金龙林, 孙菁芬, 等. 贵安新区清控人居科技示范楼可持续整体设计思考[J]. 动感: 生态城市与绿色建筑, 2015 (2): 36-40.
- [19] 舒欣. 气候适应性建筑表皮——应对气候变化的设计研

究[J]. 新建筑, 2018 (6): 92-96.

- [20] 王嘉亮. 仿生·动态·可持续[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [21] 冯刚, 陈达, 苗展堂. “动态封装”——可变建筑表皮系统设计研究[J]. 建筑师, 2018 (1): 116-123.
- [22] 苗展堂, 冯刚, 郭炳利. 响应外部环境变化的可变建筑表皮设计研究[J]. 动感: 生态城市与绿色建筑, 2016 (4): 48-55.
- [23] 郑伟伟. 基于热环境动态调控的气候适应性可变建筑表皮设计研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [24] 石峰, 胡赤, 郑伟伟. 基于环境因素动态调控的可变建筑表皮设计策略分析——以国际太阳能十项全能竞赛作品为例[J]. 新建筑, 2017 (2): 54-59.
- [25] 刘加平. 建筑物理[M]. 第4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [26] EMMANUEL M R. An Approach to Climate-sensitive Design[M]. London and New York: Spon Press, 2005.
- [27] LIU L, LIN Y, WANG D. Quantitative Analysis of the Outdoor Thermal Comfort in the Fast-growing, Subtropical City of Shenzhen, China[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 24(2): 30-38.
- [28] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋, 等. 1960—2014年北京户外感知温度变化特征及其敏感性分析[J]. 资源科学, 2016 (1): 175-184.
- [29] 唐进时, 申双和, 华荣强, 等. 热气候指数评价中国南方城市夏季舒适度[J]. 气象科学, 2015 (6): 769-774.
- [30] PANTAVOU K, THEOCHARATOS G, SANTAMOURIS M, et al. Outdoor Thermal Sensation of Pedestrians in a Mediterranean Climate and a Comparison with UTCI[J]. Building and Environment, 2013, 66: 82-95.
- [31] BLAZEJCZYK K, JENDRITZKY G, BRODE P, et al. An Introduction to the Universal Thermal Climate Index(UTCI)[J]. Geographia Polonica, 2013, 86(1): 5-10.
- [32] 孔钦钦, 葛全胜, 席建超, 等. 中国重点旅游城市气候舒适度及其变化趋势[J]. 地理研究, 2015 (12): 2238-2246.
- [33] 叶海, 钱锋. 室外热环境评价指标及其可视化应用探讨[C]//中国城市科学研究会. 2018国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 北京: 中国城市出版社, 2018: 1-6.

收稿日期 2018-12-20

编辑: 方磊