

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201812021



# 利用无风力矩智能镜面为建筑 增加日照的可行性实验

吴正旺<sup>1</sup>, 闫阳<sup>2</sup>, 狄岳<sup>3</sup>

(1. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021;

2. 北方工业大学 建筑与艺术学院, 北京 100144;

3. 加利福尼亚大学洛杉矶分校 建筑与城市设计学院, 加利福尼亚州 洛杉矶 90095)

**摘要:** 将计算机技术与建筑节能结合, 研制基于风力矩相互抵消及施加预应力的无风力矩智能镜面, 为寒冷地区建筑增加日照, 并以某建筑群为例进行可行性实验. 结果表明: 无风力矩智能镜面能长期、稳定地为建筑提供日照, 其光、热舒适性较高, 但杀菌能力尚不明确; 施加预应力后, 抗风性能较理想, 结构质量较轻, 更稳定可靠, 但在特定角度有一定炫光.

**关键词:** 无风力矩智能镜面; 太阳辐射; 节能; 镜面反射

**中图分类号:** TU 2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)03-0344-06

## Feasibility Experiment of Increasing Sunshine for Buildings Using Intelligent Mirror Without Wind Moment

WU Zhengwang<sup>1</sup>, YAN Yang<sup>2</sup>, DI Yue<sup>3</sup>

(1. School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

3. Architecture and Urban Design Department, University of California (Los Angeles), Los Angeles 90095, USA)

**Abstract:** Combining computer technology with building energy saving, based on wind moment mutual counteraction and prestress application, the intelligent mirror without wind moment is proposed. Taking a building complex as an example, the feasibility of increasing sunshine is discussed. The results show that the device can provide long-term and stable sunshine for buildings, and its light and thermal conditions are comfortable, but its sterilization ability is not yet clear. After prestressing, its wind-resistant performance increases, its structure weight decreases and becomes more stable, but the dazzle exists at a certain angle.

**Keywords:** intelligent mirror without wind moment; sunshine; energy saving; mirror reflection

获得日照是建筑采光<sup>[1]</sup>、卫生<sup>[2]</sup>、心理<sup>[3]</sup>的需要, 但在北方寒冷地区往往不易<sup>[4]</sup>, 尤其是城市中心人员密集、土地昂贵等地区, 其建筑的低层部分常常因为日照不足而阴冷<sup>[5]</sup>、昏暗<sup>[6-7]</sup>. 为此, 沈天行等<sup>[8]</sup>利用建筑阳台等空间, 使用反射材料固定在建筑立面上, 将日照反射进入其南向建筑的室内. 苟中华等<sup>[9]</sup>利用双弧面板将高空太阳辐射反射引入高层建筑的底层室内. 本文将信息技术与太阳能利用结合<sup>[10-11]</sup>, 研制无风力矩智能镜面(以下简称智能镜面)装置, 并进行可行性实验.

**收稿日期:** 2018-12-12

**通信作者:** 吴正旺(1972), 男, 教授, 博士后, 主要从事生态规划与设计的研究. E-mail: wuzhengwang@126.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51378018)

# 1 无风力矩智能镜面增加日照的基本原理

无风力矩智能镜面具有以下 3 个特点<sup>[12]</sup>. 1) 同时利用太阳的光和热. 2) 自动追踪、定向反射. 3) 近全光谱反射(普通镀银镜面的反射率可达 90% 以上; 普通玻璃透光率亦大于 90%、吸收率约 2%; 镜面的全光谱反射率最高能达到约 95%; 价格更低廉的镀铝镜面反射率也能达到 85% 左右). 为验证智能镜面在建筑中实际应用的可行性, 通过信息技术及太阳能利用的结合方式<sup>[10-11]</sup>, 研制无风力矩智能镜面装置. 2017 年 1 月—2018 年 10 月, 将无风力矩智能镜面安装在北京市北方工业大学第 4 教学楼第 5 层屋面上, 并进行相关实验及监测. 智能镜面为建筑增加日照的可行性实验示意图, 如图 1 所示.

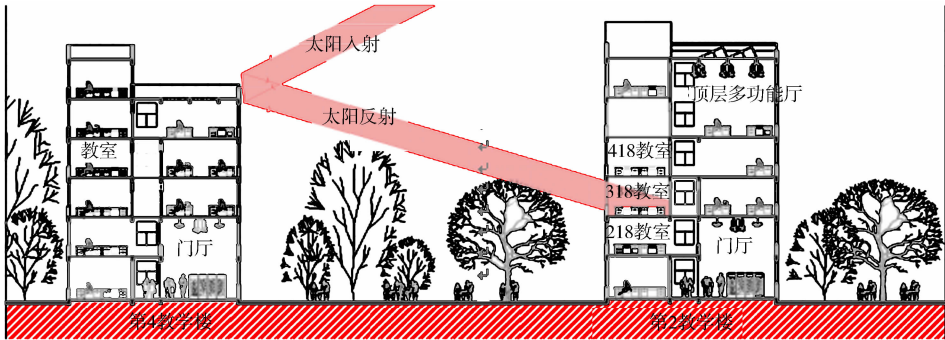


图 1 智能镜面为建筑增加日照的可行性实验示意图

Fig. 1 Feasibility Experiment of increasing sunshine for buildings using intelligent mirror

利用智能镜面为建筑增加日照的基本原理是: 将太阳辐射自动、定向反射进入建筑室内, 使其阴冷昏暗的北朝向房间获得充沛日照, 改善自然采光并减少能耗, 实质是信息技术+太阳能利用. 主要有以下 3 个步骤. 1) 根据太阳运行轨迹自动计算出太阳、镜面、建筑北窗的相对关系<sup>[13]</sup>, 实时推算出镜面法线所需调整的方位角、俯仰角<sup>[14]</sup>. 2) 以步进电机+减速机精确控制、调整镜面<sup>[15]</sup>. 3) 将太阳辐射(光+热)反射至建筑北朝向的阴冷空间.

# 2 利用智能镜面增加日照的实验

1) 实验对象. 选取北方工业大学第 2 教学楼的 318, 320, 316, 325 等教室及第 2 教学楼北侧约 40.5 m 处的第 4 教学楼第 5 层屋面(外墙安装智能镜面装置一套), 2 幢教学楼高均为 5 层.

2) 实验方法. 选取采暖季、过渡季的晴天、多云、阴天、雾霾等典型天气, 对智能镜面进行抗风、定向反射、采光、温湿度等的监测、比较.

3) 实验设备. 自制智能镜面系统 1 套; 上海宝工工具有限公司生产的 ProsKit 温湿度计 4 台, 温度灵敏度为 0.1℃, 湿度灵敏度为 1%; KONICA ILLUMINANCE METER T-10 型照度计 4 台, 精度为 1 lx; 宾得 R-400 型全能全站仪 1 台, 测距精度为 0.1 mm, 角度精度为 2".

4) 实验内容. 准确性实验、抗风性能实验、光热舒适性实验, 以及不同反射材料条件下的太阳辐射利用率实验.

# 3 抗风性能及准确性的分析

实验中, 智能镜面最长从 2017 年 9 月 16—19 日共连续准确运行 96 h, 每日开机运行 8 h, 有个别元器件(霍尔接近开关等)不稳定. 要长期、稳定地为建筑提供日照, 关键是准确控制镜面. 因此, 实验要提高智能镜面镜面控制准确性, 主要措施有如下 4 点. 1) 基于步进电机+减速机的传动机构. 2) 简化传动结构, 减少自质量, 将镜面的重心完全贴近垂直转动轴, 以风力矩相互抵消来增强稳定性. 3) 将镜面位置贴近垂直方向转动轴, 以减少镜面与目标窗之间因转动轴未重合而产生的误差. 4) 以皮筋模拟发条机构给镜面施加一定预应力, 以减少镜面在风力作用下可能产生的晃动.

智能镜面剖正俯视图及可行性实验实景, 分别如图 2, 3 所示. 由图 2, 3 可知; 智能镜面运行稳定, 反射光斑均长期、稳定位于入射窗内.

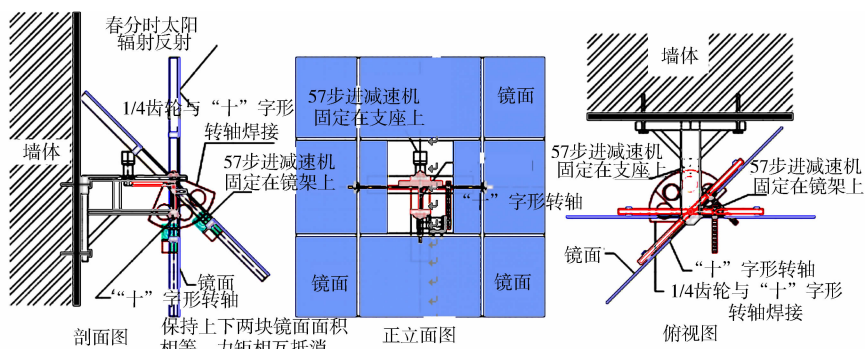
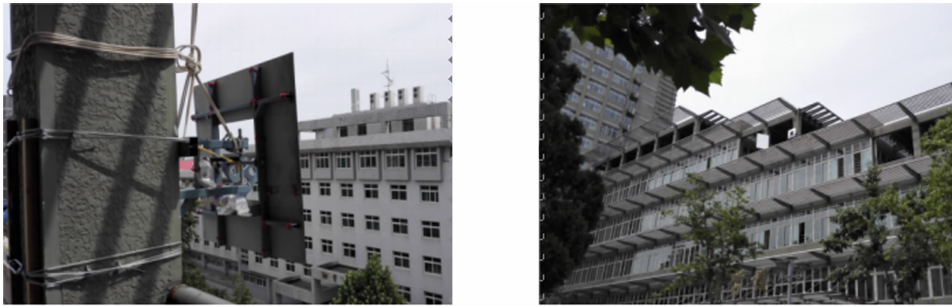


图 2 智能镜面剖正俯视图

Fig. 2 Top view of intelligent mirror profile



(a) 背面实景

(b) 远景

图 3 智能镜面可行性实验实景

Fig. 3 Feasibility experiment scene of intelligent mirror

要可靠地为建筑提供日照,关键还在于其抗风性能。由实验可知;智能镜面的水平方位角及俯仰角的调节机构、整体装置的结构强度满足日常使用要求,可在 6 级以下风力条件下稳定运行,并在 10 级大风条件下保持结构稳定,但在 7 级以上阵风时可能产生轻微晃动。

智能镜面采取了以下 3 个抗风措施:1) 将镜面对称布置在纵向转轴两侧,以抵消绝大部分任意方向风力产生的力矩。2) 以发条机构对镜面施加预应力,防止镜面在微小风力矩作用下产生轻微晃动,试验以皮筋代替发条,如图 4 所示。3) 将水平方向、垂直方向上转动轴位置紧邻,形成“十”字形转轴,并将其设置在支座的 2 根支架之间,这样镜架即可简化为直线,结构进一步简化、结构强度则进一步增大。



(a) “十”字形转轴

(b) 预应力皮筋

图 4 智能镜面利用施加预应力增强的抗风性能

Fig. 4 Improvement of intelligent mirror wind-resistant performance by prestress

2017 年 4 月 1 日对智能镜面的 1 : 10 模型进行户外抗风实验,在 9:53—10:25 共计 32 min 的时间段内,对称布局的镜面在 3~4 级风力作用下,无论正面或侧面迎风,装置都保持了相对稳定,其风力矩大部分被有效地相互抵消,效果明显。在 2~6 级大风天气条件下,智能镜面在 2017 年 10 月 21,10 月 30 日,11 月 7 日,11 月 8 日,11 月 10 日,11 月 11 日等最大光斑偏移量约为 20 cm。施加的预应力大小是关键,预应力过小则易晃动,过大则难以驱动镜面。2017 年 9 月 21 日及 10 月 21 日发生的轻微晃动通过加大皮筋施加预应力后均得以明显改善,如表 1 所示。

表 1 智能镜面在有风天气条件下的运行实验  
Tab.1 Intelligent mirror operation experiments under windy weather

实验日期	风力	最大水平偏移	最大垂直偏移	镜面晃动概况	原因分析
2017 年 9 月 21 日	阵风 2~3 级	20 cm,偶发	不明显	偶发水平方向晃动	单条皮筋施加的预应力过小
2017 年 10 月 21 日	阵风 3 级	20 cm,偶发	不明显	偶发水平方向晃动	齿轮之间咬合松动及单条皮筋施加的预应力过小
2017 年 10 月 30 日	阵风 3 级	未见明显偏移	未见明显偏移	未见明显晃动,阵风时偶见轻微晃动	皮筋施加的预应力加大,齿轮紧固
2018 年 5 月 13 日	阵风 5~6 级	未见明显偏移	未见明显偏移	未见明显晃动,阵风时偶见轻微晃动	皮筋施加的预应力适当,阵风时风力较大

4 室内光和热的舒适性

获智能镜面辅助的 318 教室在采光、节能方面具有以下 4 个特点.

1) 一般天气条件下,镜面水平方位角、垂直俯仰角控制精度高,光线定向入射稳定,人眼未察觉到明显晃动.

2) 在风力较大、阵风较强(风力 6 级以上)的天气条件下,预应力较小时,光斑仍有轻微晃动,最大光斑偏移量约为 20 cm;若预应力适中,则未见明显晃动.

3) 温度、照度舒适性较高,在多云天气条件下,获镜面反射的教室,其温度高于普通教室约 0.6 ℃.一套智能镜面为一间约 90 m<sup>2</sup> 的 70 人大教室提供日照,室内外气温比较,如表 2 所示.除非辐射特别强烈,室内照度均在舒适度范围之内,2017 年 10 月 6 日各教室照度比较及 2017 年 10 月 8 日各教室温度比较,分别如图 5,6 所示.图 5 中:325 教室为南向教室;318 教室为获得反射的北向教室;其余为北向普通教室.

表 2 智能镜面辅助下室内外温度比较  
Tab.2 Comparison between indoor and outdoor temperatures with help of intelligent mirror

监测季节	监测日期	室外温度/℃	温度/℃			当日天气情况
			318 教室(获反射教室)	316 教室(无反射教室)		
秋季	2017 年 10 月 6 日	19	21.5	20.9		多云,南风 1~2 级
秋季	2017 年 10 月 8 日	18	20.6	20.5		小雨,东北风 1~2 级

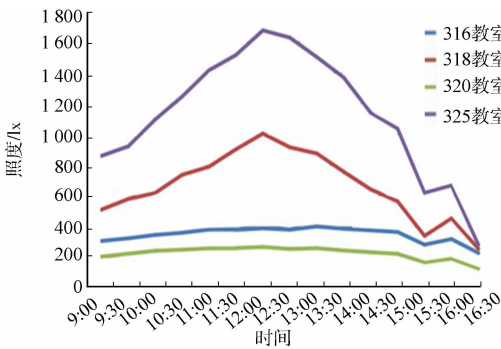


图 5 2017 年 10 月 6 日各教室照度比较

Fig. 5 Illumination comparison of classrooms on October 6, 2017

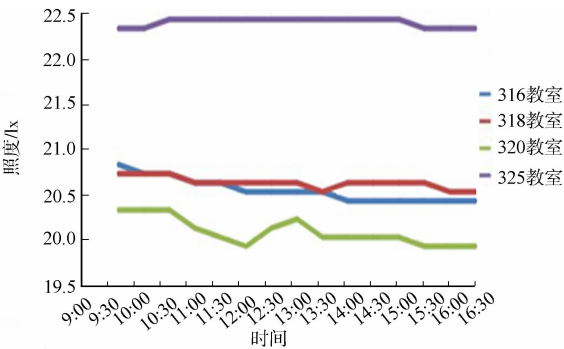


图 6 2017 年 10 月 8 日各教室温度比较

Fig. 6 Temperature comparison of classrooms on October 8, 2017

4) 眩光. 与南向室内相似,室内任一受到反射的位置均可感受到点状光源(镜面),其余位置则不明显.若镜面位置过低(如 418 教室)或在入射范围内向镜面处观看,则炫光明显,建议镜面与室内人眼所成之俯仰角宜大于 14°,且宜从使用者左后方入射,则炫光明显改善,如图 7 所示.

在实际使用中,智能镜面可早于实际供暖日期.当太阳高度角逐渐增大,室内墙体、家具等皆可蓄





图 7 智能镜面辅助下的室内炫光实景

Fig. 7 Indoor dazzle distribution with intelligent mirror

热,使气温平滑过渡,舒适性提高.以北京为例,实际运行时,可从 9 月 20 日前后始至次年 5 月 2 日底结束,全年共约 250 d。

智能镜面的单位照度约相当于南向教室的 40%~48%,如表 3 所示.由于智能镜面能为建筑提供长达 6~8 h 日照,因此,其总照度大约相当于同面积南向窗户的 2.8 倍,可显著改善室内天然采光,但是否满足杀菌等卫生要求,则尚需深入研究。

5 不同镜面材料智能镜面的太阳辐射光和热利用效率

智能镜面对太阳辐射的有效利用率为太阳辐射入射角度折减系数×镜面反射率×第一层窗户玻璃透光率×第二层窗户玻璃透光率,冬季(太阳高度角为 24°)为 91%×90%×90%×90%=64.6%;夏季(太阳高度角为 45°)为 70.7%×90%×90%×90%=51.5%。

2018 年 3—4 月,选取北方工业大学第 2 教学楼南北 2 间相似的教室做比较,监测其室内外照度之比值(将其作为光、热利用率的参考).实验采用普通玻璃镀银镜面及上海吉祥牌镜面铝板,在 2018 年 4 月 18 日测试中,采用 4 台 ILLUMINANCE METER T-10 型照度计,对 318 教室(镜面反射)、室外、南向教室、北向教室(无镜面反射)等 4 个测点同时进行监测,其结果如表 3 所示。

表 3 不同反射材料的反射照度比较

Tab. 3 Comparison of reflectivity of different reflective materials

监测时间	室外日照 照度/lx	反射材料	室内照度/lx	
			第 2 教学楼 318 教室 (获得反射的北向教室)	第 2 教学楼 325 教室 (无反射的南向教室)
2018 年 4 月 18 日 11:20	78 500	玻璃镀银镜面	15 460	31 600
		镜面铝板	12 500	
2018 年 4 月 18 日 11:40	81 600	玻璃镀银镜面	16 460	31 850
		镜面铝板		13 740

由表 3 可知:太阳辐射穿过普通双层玻璃后,其照度从 78 500 lx 降低至 31 600 lx,降幅为 40.3%,略低于理论计算的 51.5%;经玻璃镀银镜面反射后,再入射至建筑室内的太阳辐射照度从 81 600 lx 降低至 16 460 lx,降幅为 20.2%,约为太阳辐射直接入射的 50.1%;镜面铝板反射后再入射至建筑室内的太阳辐射照度从 8 1600 lx 降低至 13 740 lx,降幅为 16.8%,约为玻璃镀银镜面的 83.4%。

实验还发现,积灰对太阳能利用具有较大影响.以 2018 年 10 月 30 日及 10 月 31 日为例,在对各用房窗户玻璃进行清洁后,获得入射的 320 教室室内外照度比从 10%提高至 13%,显示出窗户玻璃的清洁对其太阳辐射的利用率的影响约为 30%,如表 4 所示.

表 4 清洁玻璃后监测不同反射材料的反射照度比较  
Tab. 4 Comparison of reflectivity of different reflective materials after glass cleaning

监测时间	室外日照 照度/lx	反射材料	室内照度/lx		
			318 教室(获得反射, 清洁玻璃前)	318 教室(获得反射, 清洁玻璃后)	325 教室(无反射 的南向教室)
2018 年 10 月 30 日	62 800	玻璃镀银镜面	6 509	8 240	1 514
		镜面铝板	1 252	1 689	
2018 年 10 月 31 日	54 700	玻璃镀银镜面	5 123	7 240	1 442
		镜面铝板	1 011	1 269	

6 结论

智能镜面以风力矩相互抵消方式改善稳定性,施加预应力较好地解决了镜面晃动问题.步进电机+减速机的镜面控制方式显著提高定向反射的准确性,缩减了结构尺寸,铝板、玻璃等镜面材料的太阳辐射利用率均较高,皆可为建筑提供良好的光、热舒适性.但镜面之积灰对太阳辐射入射、反射均有一定影响,大量镜面安装在建筑立面上还需要解决美观问题.

实验表明,利用智能镜面可为建筑稳定、长期地提供日照,其光、热舒适性较高但卫生要求尚不明确,在建筑采光及节能设计中具有一定的推广价值.

参考文献:

[1] 秦旋,刘倩昆.厦门市公共建筑能耗影响因素与节能潜力分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2015,36(5):575-580. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.05.0575.

[2] 黄明强,崔胜辉,李秀芳.建筑节能产品推广应用影响因素结构方程模型分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2016,37(4):447-450. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201604011.

[3] 张播,赵文凯.国外建筑日照标准的对比研究[J]. 城市规划,2010(11):70-74.

[4] 张浩然.日照间距约束、人口密度与中国城市增长[J]. 经济学,2018,17(1):333-354. DOI:10.13821/j.cnki.ceq.2017.04.13.

[5] 赵弘野.哈尔滨行列式住宅日照分析线性数学模型研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2015.

[6] 王丽方.取消日照间距政策 节约土地资源[J]. 团结,2007(4):43-44.

[7] 薛立新,徐苏宁.城市住宅建筑日照标准适用性研究:以黑龙江省为例[J]. 城市规划,2006(9):61-65.

[8] 沈天行,袁磊.将日光引入北向建筑底层的技术[J]. 建筑学报,2004(4):78-79.

[9] 苟中华,刘少瑜,巴哈鲁丁.高层高密度居住环境中的自然采光系统:ANIDOLIC 技术应用初探[J]. 建筑学报,2010(3):24-26.

[10] 王劲,陈林.智能采光实时追日的电能管理系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2009(7):53-56.

[11] 王映梅.绿色建筑中的采光与照明设计[J]. 中国高新技术企业,2011(27):153-155.

[12] 吴正旺,吴彦强.利用“镜面反射”减少日照间距并节能节地的可行性论证[J]. 华中建筑,2016(11):58-61. DOI:10.13942/j.cnki.hzjz.2016.11.014.

[13] 李宗涛,李志刚,于存贵,等.基于单片机的太阳追踪系统的设计[J]. 电子设计工程,2014,22(2):188-190. DOI:10.14022/j.cnki.dzsjgc.2014.02.015.

[14] 黄杭昌,俞磊,唐晓晨,等.高精度太阳追踪系统研究与实现[J]. 电子技术应用,2016,42(8):70-73. DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.2016.08.016.

[15] 许芬,王凯迪.基于 UKF 的定日镜姿态角最优估计研究[J]. 太阳能学报,2012,33(7):1226-1234.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)