

城市照明规划中光污染评价指标与方法研究

刘 鸣¹ 张宝刚² 潘晓寒¹ 袁 杰¹

(1. 大连理工大学建筑与艺术学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学建筑环境与新能源研究所, 大连 116024)

摘 要: 针对日益增长的城市夜间光污染问题进行研究, 讨论了科学化监测与评价光污染的必要性, 探讨了评价与监测指标, 提出光污染总体评价指标, 分别为环境亮度分区、熄灯时间、光色控制、区域间距控制、上射光比例、亮度平衡, 以及光污染监测技术指标, 即照度、光源闪烁度、有效光照区域、照射时间、眩光控制水平、天顶亮度。最后, 从城市夜景照明总体规划角度, 提出城市光污染评价程序, 以期建立完善的城市光环境规划、评价与保障体系。

关键词: 城市照明规划; 光污染; 全球变暖; 评价; 指标

Study on Evaluation Indexes and Methods of Light Pollution in Urban Lighting Planning

Liu Ming¹ Zhang Baogang² Pan Xiaohan¹ Yuan Jie¹

(1. School of Architecture and Fine Art, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Laboratory of Building Environment and New Energy Resources, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract

The growing urban light pollution problem was studied. The necessity and indexes of scientific monitoring and evaluation on the light pollution were discussed. Evaluation indexes were put forward, including luminance area, curfew, color light, minimum allowed distance, upward light and luminance balance. Light pollution monitoring technology indexes were put forward, including illumination, light flashing, exposure time, the effective illumination area, glare control level and the zenith luminance. Finally, from the aspect of urban lighting planning, the evaluation procedures were discussed in order to establish a perfect urban light environment planning, evaluation and security system.

Key words: urban lighting planning; light pollution; global warming; evaluation; indexes

1 前言

由于全球气候变化的影响, 目前低碳城市研究备受关注, 其中科学化规划城市夜间光环境对降低夜间城市耗电量、减少 CO₂ 排放量具有重要的实际意义。科学的、可持续的夜景照明要求人

造光环境对周围物理环境的影响应该是最小的^[1~3], 而光污染作为城市夜景照明中的副产品与可持续发展理念相违背。因此, 有必要结合城市规划与环境发展的建设情况, 建立有效的光污染评价方法和程序, 对在夜景照明规划和设计的前期或在建设时期有可能造成光污染的环节进行评价与监测, 以达到设计的优化与资源的合理配

项目来源: 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAC05B01), 国家自然科学基金(51008043), 住房和城乡建设部研究开发项目(2011-K6-14), 辽宁省建筑生态物理技术与评价重点实验室开放基金项目(JZ-200905)

置,将有害光减少到不对周围环境和人产生危害的水平。

光污染对城市环境、生态系统和社会生活都会造成不同程度的影响^[4~6],世界各国也渐渐意识到光污染危害的严重性(见图1)，“熄灯”让地球休息一下的活动也日益多起来,2009年3月28日和2011年3月26日的“地球一小时”是世界自然基金会向全球发出的倡议,全球不同时区的3900多个城市展开了关灯接力呼吁环保(见图2和图3),世界一些著名的城市的景观照明,如在澳大利亚以悉尼歌剧院为首的标志性建筑,法

国的巴黎埃菲尔铁塔,英国伦敦的皮卡迪里广场、白金汉宫、市议会大楼等著名景点以及我国的上海外滩、北京王府井等地方都进行了数十分钟集体熄灯的活动,以引起人们对温室气体排放导致全球变暖的关注。因此,在我国大力提倡低碳城市的背景下,对光污染评价指标的研究将具有重要的理论与应用价值。

本文初步提出总体评价指标、监测技术指标以及从城市夜景照明总体规划角度提出一种光污染评价程序,力求构建较为完备的光污染防治、监测和光环境规划的保障评价系统。

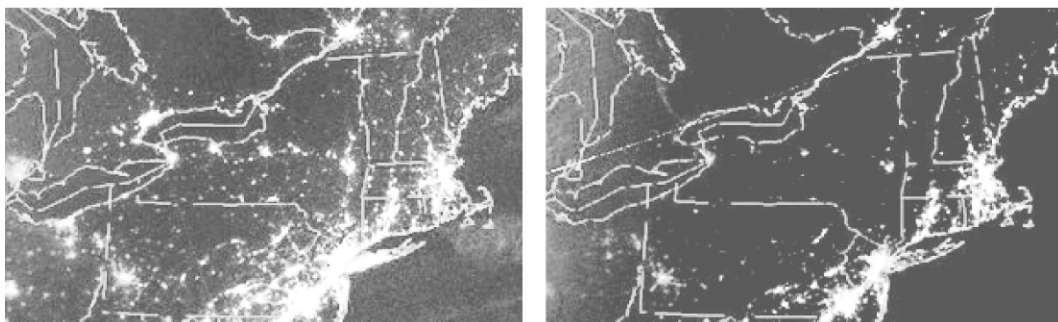


图1 2003年纽约熄灯前后的城市空间亮度分布地图

资料来源: <http://www.noaa.gov/stories/s2015.htm>



图2 2009年悉尼熄灯前城市轮廓效果



图3 2009年悉尼熄灯后城市轮廓效果

资料来源: <http://tech.sina.com.cn/d/focus/2009EarthHour/index.shtml>,“地球一小时”是世界自然基金会向全球发出的倡议,呼吁公众在3月28日晚20:30熄灯一小时。全世界有3000多座城市、约10亿人共同参与该活动。

2 总体评价指标

随着城市低碳发展,对于夜间城市照明空间的

科学分析,首先需要从城市的大视角进行光污染问题的针对性剖析与评价。光污染作为学术问题要有科学依据和逻辑上的严密性,将光所造成的不良后果通过定性与定量化后,用设定的等级来判定光污

染的严重程度，此时处理就有了依据，也有了可操作性^[5~7]。本文从城市夜景照明总体规划角度综合评定城市光污染程度。

2.1 环境亮度分区

分区规则已成为建立环境规划的一个基础元素，分区的好处就是一旦污染行为是不可避免的，分区能够缩小污染的状况，使其不会障害到其它环境区域。分区控制并不能完全终止环境污染，但是它能为防治环境污染的法律法规制定提供一定的参考依据。针对每一个区域，还可以再细分子区域，以便更好地进行照明的规划、设计和光污染的防治。表 1 为根据 CIE 分区系统进行的环境亮度分区^[4,8]。表 2 是国内地方标准《室外照明光干扰限制规范》中，根据城市区位的功能性质，将其按照环境亮度进行划分，对应环境亮度的区域划分^[4,8]。

表 1 根据 CIE 分区系统进行的环境亮度分区

区域	环境特征	子区域	举例
E1	自然的，黑暗区域	E1a	自然保护区
		E1b	国家公园
		E1c	自然景观出众的地区
E2	乡村，低亮度区域	城市的外围区域和乡村居住区	
E3	郊区，中等亮度区域	E3a	城市郊区居住区
		E3b	城市居住区
E4	城区，高亮度区	E4a	晚上具有适当活动功能的城区商业区、工业区、混合型住宅区
		E4b	晚上具有高度丰富活动功能的都市商业区、商住混合区

注：根据参考文献 [4, 8] 整理。

表 2 城市环境亮度的区域划分

环境亮度类型	无照明区域	低亮度区域	中等亮度区域	高亮度区域
区域代号	E1	E2	E3	E4
对应的区域	森林公园、天文台周边、自然保护区	居住区、医院等	一般公共区	城市中心区、商业区

2.2 光色控制

考虑到夜间城市的和谐化与可持续化，光污染监测应将光色考虑在内。城市中的霓虹灯、红绿蓝等饱和度灯箱、色彩识别性强的广告牌等这些形式过杂、色彩过多的光，易造成城市夜景缺乏美感；而在道路照明却应采用单一色光或少量色光，防止交通信号淹没在色彩斑斓的广告背景当中，根据对

中国城市居民光色偏好的研究，选用暖黄色、暖白色的灯光较为合适；天文台附近的道路照明应采用单色光，低压钠灯只放射窄范围的黄色光比较容易用望远镜上的滤光片去除。可见，光污染监测中应衡量光形、光色、光亮等元素的适“度”性问题，按照区域属性进行光色控制，如商业为主的区域光色规划进行弱控制，办公为主的区域进行较强控制等等，以满足人们功能性和审美性的要求。因此，夜间城市的光色规划不容忽视，防止光色泛滥、色彩单调、光色误导或光色失衡等给城市居民带来新的光污染和新烦恼。

2.3 区域间距控制

某特殊区域内某一位置（可称为控制点，如多指天文台、国家公园等地方）的光污染程度不仅与本区域内的照明有关，而且周围区域的室外照明也会增加该区域的光污染和光干扰。因此限制不同区域间的距离可有效的控制区域间光污染的相互影响，特别是从整体上可以防治商业区、工业区对临近的居住区的光污染。目前对区域间距离的研究还在不断的发展和更新。对于人口稀少，地域辽阔的地方区域边界线间的最小距离推荐值见表 3，而对于人口密集的国家或地区很难按此标准进行，因此意大利国家标准又进行了规定，见表 4。因此在我国，可以根据本国的实际国情参考或制定限制区域边界线间的最小距离推荐值，以便评价和限制光污染和光干扰。

表 3 参考点与区域边界线间最小距离推荐值

控制点的区域类型	周围区域类型		
	E1 ~ E2	E2 ~ E3	E3 ~ E4
	最小距离推荐值 (km)		
E1	1	10	100
E2		1	10
E3			1
E4			无限制

注：根据参考文献 [4, 8] 整理。

表 4 参考点与区域边界线间最小允许距离

控制点的区域类型	周围区域类型		
	E1 ~ E2	E2 ~ E3	E3 ~ E4
	最小允许距离 (km)		
E1	1	5	10
E2		1	5
E3			1
E4			无限制

注：根据参考文献 [8, 9] 整理。

2.4 上射光比例

上射光是引起城市天空发亮的主要光污染类型，其中灯具形式、城市表面反射特性是影响上射光比例大小的主要因素，因此可从这两方面进行城市照明中上射光定量化的评价。对此世界上很多国家都有明确的规定，如表 5 中 CIE 和英国对不同性质区域中使用的灯具的上射光线占灯具总光通的比例做了明确的规定^[8,11]。

表 5 英国对灯具上射光线占灯具总光通的比例限定

区域	上射光的输出比率（最大值%）	天文观察活动
E1	0	国家级天文台观测
E2	0~5	进行科研活动
E3	0~15	业余爱好者观察
E4	0~25	随意性的天空观察

注：1. 根据参考文献 [8, 9] 整理。
2. 各区域定义与表 1 相同。

日本根据不同性质区域和照明的等级对上射光线占灯具总光通的比例规定如表 6。

表 6 日本对灯具上射光占灯具总光通的比例的限定

区域划分	安全性道路 照明上射光线 比例最大值	景观性道路照明上射光 比例最大值	
		临时性照明 设备	长期性照明 设备
区域 1（公共 绿地）	0%	—	—
区域 2（其他 城区和农村居住 区）	0~5%	—	—
区域 3（城区 居住区）	0~5%	0~15%	0~15%
区域 4（城区 混合型居住区， 有夜市的商业区 内的住宅）	0~5%	0~20%	0~15%

注：根据参考文献 [8, 10] 整理。

但是由于各国城市环境，灯具利用形式的差异，照明上射光线比例也会存在一定差别，因此制定适宜我国国情的关于上射光比例的标准，还有待于进一步的研究。另外，目前对某一区域内全部上射光比例的估算方法、分布状况和定量化指标的研究还不完善。

2.5 熄灯时间

可通过限制熄灯时间来控制照明时间^[4]。在现代生活中，夜晚关闭全部灯具是不可能，对于社会生产和生活中某些重要方面，在熄灯后照明是仍然需要

的。熄灯时间是人类的活动变化的一个标志和界限，因此通过调光器或智能化控制系统可在熄灯后关掉一些不需要的灯。许多法规，标准可以依据熄灯时间作为界限来进行规定。熄灯时间对商业、工业混合居住区居民的正常休息和夜间环境保护起着重要的作用。

2.6 亮度平衡

亮度平衡的目的是缩小光环境中明暗的亮度间距，主要考察光环境中的光分布均匀性和亮度对比度出发。对于夜间光环境，不仅要有足够的照度水平，还必须具备良好的光照分布，其中环境中景观要素的亮度平衡极为重要。如果夜间环境中亮度比过大，不仅易形成眩光，还易引起光干扰，光溢散和能源浪费等等。舒适的亮度比一般在 3:1~5:1。为了将人们的视线吸引到视觉焦点上，可以将亮度比提高为 10:1~100:1，但要增加中间层次的亮度过渡^[8,12]。

3 监测技术指标

3.1 照度^[7]

光对被照对象“造成不良后果”的严重程度，照度是一个很重要因素，即在单位面积上光通量愈大，则光污染就愈严重。光照度可以用照度仪来测试并用勒克斯（lx）单位来量化。

3.2 光源闪烁度

光的闪烁是灯具在交流电源情况下，灯管两端不断改变电压极性，随着电流的变化，光通量随之波动，由此产生的闪烁感。光的闪烁会引发视觉疲劳、偏头痛，造成人眼分辨能力下降，视力下降，还会引发心跳过速等，这种现象称为频闪效应（或闪烁现象）。有时光源的发光强度并不大，但它不断闪烁，造成视觉混乱，产生了光污染。光的闪烁度可用每秒所闪烁的次数（次/秒）来计量^[13,14]。人眼最敏感的闪烁频率是 8.8Hz，当闪烁 40Hz 以上感觉就不灵敏，至 50Hz 以上时则完全感觉不到。

3.3 有效光照区域

考察有效光照区域的目的是在适当的区域科学合理的进行城市照明。有效光照区域是从照明的空间上进行监测分析，也就是说在制作或安装照明设备时，把光集中在需要照明的方向，把射向其他方向的光遮挡掉或者反射到需要的方向，提高光照的有效性，减少无用光。这样既能以更加少的能量确保必要的照度，又能削减能量的使用。

3.4 照射时间

考察照射时间的目的是在适当的时间科学合理的进行城市照明。与其他环境污染相比，光污染的可控性较强，停止光源，光污染也就消失，即光污染除了与照度有关，还与照度×照射时间有关。在一定的光强下，照射时间愈长，光污染的累积效应也就愈严重。反之，即使光很强，但只是一闪而已，也许并不

会造成光污染^[7]。因此，对照射时间的控制就是在需要照明时开启灯具，不需要时关掉，即使是道路照明也不一定要整夜开启，可以通过各种方式进行控制。所以，照射时间是控制光污染中一个不可忽视的因素，照明时间以小时（h）计算。表 7 显示了照明时间的权重系数，即根据区域属性的重要性，在熄灯时间范围内，设定灯具的启闭时间。

表 7 照明时间的权重系数

区域	道路	公园	广场空地	商业周围	停车场	景观	广告标识	其他	备注
公路照明	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	道路 20:00 ~ 22:00 后进行 20% 的调光
警卫照明	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	大多数夜晚是整夜开启
高杆照明	0.50	1.00	1.00	0.35	1.00	1.00	1.00	0.50	熄灯在 21:00 到 22:00 之间
着陆照明	0.35	0.50	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	熄灯在 21:00 到 22:00 之间
HID 照明	0.35	0.35	0.35	0.35	0.50	0.40	0.40	0.35	熄灯在 21:00 到 22:00 之间
泛光照明	0.35	0.35	0.35	0.35	0.50	0.40	0.40	0.35	熄灯在 21:00 到 22:00 之间
壁灯照明	0.35	0.35	0.50	0.50	0.50	0.40	0.40	0.50	夜间关闭时候多
其他	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	—

注：根据参考文献 [15] 整理。

3.5 眩光控制水平

眩光在室外照明中是最常见的，由于视场中视觉目标太亮，或者空间上、时间上亮度对比太大造成的观察者的视觉不适，视觉作业水平下降或在短时间内无法看清目标的现象^[16,17]。眩光分为失能眩光和不舒适眩光。失能眩光用阈值增量（TI）度量。阈值增量 TI 是指，为了弥补由于眩光源造成的观察者视觉分辨率能力的降低，应当相应地提高多少百分比的水平亮度。不舒适眩光常用国际照明委员会推出的统一眩光等级（UGR）来评价，其他还有英国的眩光指数系统 GI，美国的视觉不舒适概率系统 VCP 等眩光指数或眩光等级。

3.6 天顶亮度

由于天空亮度是由天边逐渐向天顶方向延伸，天顶亮度越高，说明城市光污染越严重，因此天顶亮度可作为评价光污染的重要指标之一。某一处的夜天空亮度是由该处及周围环境光的光线累加上射的结果，给出夜天空分级（见表 8）^[19] 或天顶亮度值将有利于定性和量化的对比分析和综合评价地面上光溢散程度和进程，也便于为天文爱好者和天文学家进行各种不同场合下的天文观测或天体拍摄等等提供择址依据。对于自然背景辐射下的原始夜天空，目视星等为 21.6 mag/□”，相当于 $3.52 \times 10^{-4} \text{cd/m}^2$ 的亮度。利用表 8 的夜天空的分级法是目视比较和评价夜天空光污染程度最简单、最直接的方法。

表 8 John Bortle（约翰·波特尔）的城市夜天空分级

天空等级	位置	天空颜色
第 1 级	原始的黑暗天空	黑
第 2 级	典型的真正黑暗观测地	灰
第 3 级	乡村的星空	蓝
第 4 级	乡村/郊区的过渡	绿
第 5 级	郊区的天空	黄
第 6 级	明亮郊区的天空	橙
第 7 级	郊区/城市过渡	浅红
第 8 级	城市天空	红
第 9 级	市中心的天空	

注：根据参考文献^[19]整理。

4 评价程序探讨

基于上文评价指标的讨论与分析以及 CIE 的相关标准（CIE Publication 150：2003；CIE 126—1997）^[20,21]，本文从城市夜景照明总体规划的角度，针对光污染产生前期总体光环境规划、光污染过程中引起的不良影响以及光污染产生后期所应采取的防治工艺技术三个层面提出了光污染的评价程序，见图 4。城市夜间光污染问题是个复杂以及涉及面比较广泛的内容，在定性评价上，光污染对城市、社会和人造成哪些影响，缺乏相关程序和依据可以遵循；在定量评价上，侵害程度是否达到“光污染”，应当承担什么责任，缺乏规范、法规可以依据。有效的光污染评价方法，就是将评价指标和评

价程序相结合，对在夜景照明的设计前期或建设时期有可能造成光污染的环节进行评价与监测，以达到设计的优化与资源的合理配置，将有害光减少到不对周围环境和人产生危害的水平。

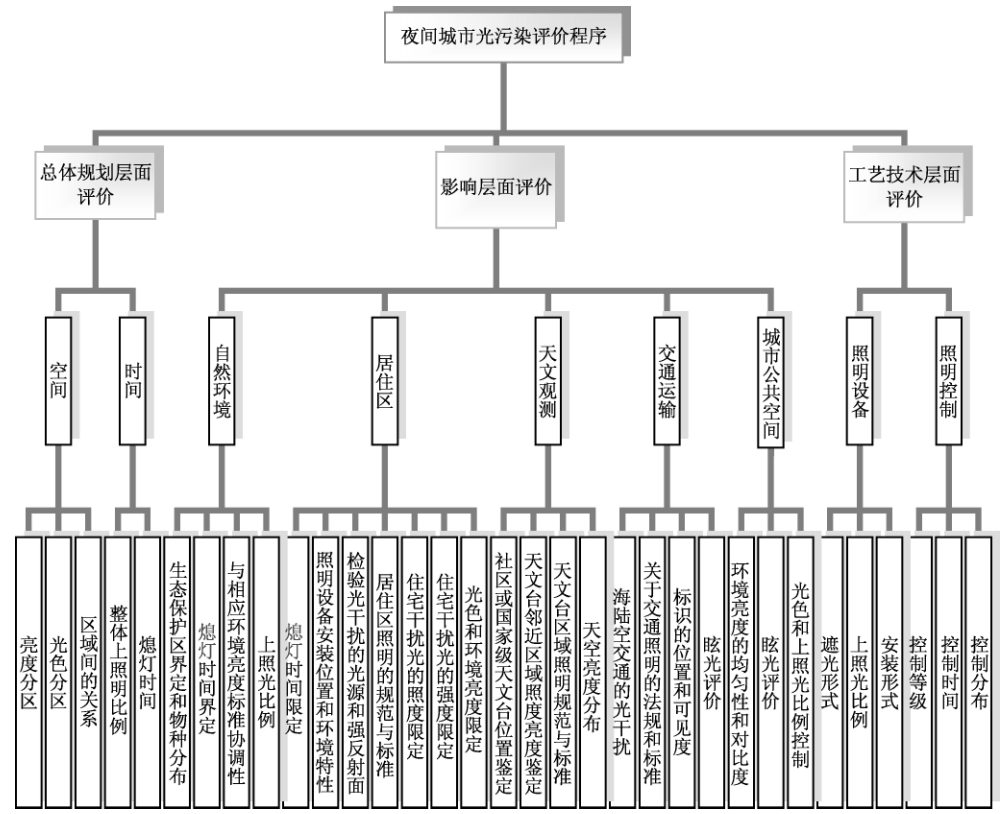


图 4 光污染评价程序

5 结束语

近年来，研究与控制光污染已成为国际学术界特别关注的涉及全球环境的学术问题。光污染作为城市夜景照明中的副产品，具有表现形式多、影响范围广和传播速度快等特点，如果城市缺乏良好的规划、设计与监控，“光”将进一步加深对城市夜间环境的污染，已有研究表明^[5 6 8]，夜空亮度每年的增长速度不会低于 3%，如果按此速度增长，23 年后夜空亮度将还会增加一倍。因此建立光污染评价体系，通过科学化的评价指标进行控制与监测是城市夜间光环境科学发展的必由之路，用设定的等级来判定光污染的严重程度，才能够使城市夜间光环境的规划与管理具有可操作性，该评价程序的制定对实现和谐的、低碳的、可持续性的夜间城市空间具有时代意义。

参 考 文 献

[1] 刘鸣，马剑，张宝刚. 城市夜景照明中的光污染和夜空保护的研究. 城市规划，2008，32（8）：70～73.

[2] 王爱英，时刚. 城市夜景照明中的光污染. 城市规划，2003，27（4）：95～96.

[3] 胡华，马剑. 可持续照明设计理念初探. 照明工程学报，2003，14（1）：46～50.

[4] Cinzano P（editor）. IDA European Meeting Report，Italy：Light Pollution Science and Technology Institute，2002.

[5] Cinzano P，Elvidge C D. Night Sky Brightness at Sites from DMAP-OLS Satellite Measurements. Mon. Not. R. Astron. Soc. 2004，（353）：1107～1116.

[6] David L. Crawford. Light pollution，an environmental problem for astronomy and for mankind. Journal of the Italian Astronomical Society. 2001，71（1）. 11～15.

[7] 徐晓星. 关于光污染概念问题的探讨. 光源与照明，2005，82（3）：23～24.

[8] Kohei Narisada，Duco Schreuder. Light Pollution Handbook，Berlin：Springer publisher，2004.

[9] UNI. Illuminazione pubblica-Requisiti per lalimitazione della dispersione delflusso luminoso direttoverso il cielo.（Road lighting-Prescriptions on the limitation of the luminous flux emitted towards the sky）. UNI Norm 10819，1999.

（下转第 55 页）

原型,我们还可以从现在的电影里发现,比如张艺谋的《满城尽带黄金甲》。

原型是具有基因编码性质的东西,也许是一种原理结构,一种类型,甚至一种组织方式,或者观念。如同蒲公英的种子,它是可以穿越时间与空间,传播和落地发芽生根的。在半导体照明系统研究与创新设计的项目中,垂直对流的散热模式是一个符合科学原理的“结构原型”,它可以应用于路灯、筒灯、吊灯等各种照明产品中。不管从“物质性”的角度还是“人性”的角度出发,我们的原型创新都是一种“最初的创造”。从原理到结构再到造型,从人的动机到行为再到对象物的千变万化,只有真正的“原型创新”才能赋予产品 DNA 的特性。

因此,我们也可以更深一步的理解,“原型创新”更是一种观念,一种思维方法,一种工作方式,一条研究途径,一种创新的组织模式,一个美好的学术愿景。

设计是一门强调组合的学问,因此,任何知识都可能成为“设计内”的知识。在本项目中,蜂窝煤或者烟囱的知识来自于日常生活,属于常识性知识,但是却蕴含了最基本的物理学。此外,冷挤压的纯铝成型工艺、DFMA、电路的爬电距离、IP67 的防水等级、PC 透镜的老化等等一系列知识,这些都是关于“物质性”的知识,它们是相互关联的;而人、光、环境、行为等侧面,则属于“人性”的知识。这些知识都需要在最终的产品中得以体现。因此,可以说设计整合的是“人”的知识系统与

“物”的知识系统。

当前,我们国家过分的强调科学与技术创新,而忽视了设计创新的重要性。设计是风,科学技术则是蒲公英的种子,只有在风的带引下它们才会找到社会、人文的土壤,才会变成产品,生根发芽。因此,设计师的职责就在于打破专业壁垒,将各个学科的知识融会贯通,创新出真正适合人类生活方式的产品。因此,创新的过程亦即知识整合的过程。

参 考 文 献

- [1] Cross, N. *Designerly Ways of Knowing* (Board of International Research in Design). Basel: Birkhäuser, 2007.
- [2] Lois Frankel, Martin Racine. *The Complex Field of Research: for Design, through Design, and about Design*. DRS2010 Conference Proceedings, 2010. <http://www.drs2010.umontreal.ca/proceedings.php>.
- [3] Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Anthony Knight. *Product design for manufacture and assembly*. New York: M. Dekker, 2002.
- [4] Friedman, K. *Creating Design Knowledge: from research into practice*. Paper presented at the IDATER 2000 (International Conference on Design and Technology Educational research and Curriculum Development), 2000.
- [5] Lawson, B. *How Designers Think*. Fourth Edition: The Design Process Demystified. Boston: Architectural Press, 2003.
- [6] Lawson, B. *What designers know*. Architectural Press, Elsevier, Oxford, 2004.
- [7] 周太明编著. 高效照明系统设计指南. 上海: 复旦大学出版社, 2004.
- [8] 谭徽松, 岑学奋. 光污染和光学天文台址保护. 天文学进展, 2002, 20 (1): 1~6.
- [9] Bortle JE. Introducing the Bortle dark-sky scale. Sky and Telescope, 2001, 101 (2): 126~129.
- [10] CIE Publication 150-2003, Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations, Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage CIE, 2003.
- [11] CIE 2007, Proceedings of CIE 26th Session. Vienna Austria: CIE Central Bureau, 2007.
- [12] 室外照明干扰光限制规范. 北京市地方标准, DB11/T 731-2010.
- [13] 李奇峰, 肖辉, 俞丽华等. 关于光污染. 照明工程学报, 14 (2): 28~33.
- [14] D. A. Schreuder. Lighting near astronomical observatories. Proceedings of the 22nd Session, 1992.
- [15] 郝洛西. 城市照明设计. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2005.
- [16] 余希湖, 蒋涌潮. 光源闪烁对视觉影响的研究. 照明工程学报, 1996, 7 (2): 22~26.
- [17] 袁星. 光源闪烁及电气照明设计之对策. 建筑电气, 2005, (6): 291~294.
- [18] 日本环境厅. 光害対策による二酸化炭素排出量抑制効果に関する調査報告書, 1996: 63.
- [19] 庞蕴繁. 视觉与照明. 北京: 中国铁道出版社, 1993.

(上接第 27 页)