

基于天空模型的公共场所照明智能控制

宗卫周, 余建波

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 公共场所照明具有全天候、多应用、能耗大的特点; 掌握任意时间的天空亮度分布情况是充分利用自然光、实现智能照明的基础; 基于国际照明委员会(CIE)给出的天空亮度计算公式, 建立自然光对公共照明区域产生的天空照度模型; 引入数学和光学相关原理建立公共场所人造光和自然光的混合模型; 利用改进蚁群算法求解模型, 得出最佳的灯具亮度组合, 实现舒适和及节能的综合最优; 最后, 选择典型的大跨度带天窗建筑物为采光对象完成仿真实验, 实验结果验证该策略的有效性。

关键词: 智能照明; 天空模型; 蚁群算法; 节能

Intelligent Control Strategy of Illumination in Locus Public Based on Sky Model

Zong Weizhou, Yu Jianbo

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Locus lighting has the characteristics of all-weather operation, variable demand and large energy consumption. Knowing the distribution of sky luminance at any time is the foundation to make full use of natural light and realize intelligent lighting. Sky illumination model was established based upon formula for calculating sky brightness from the International Commission on Illumination (CIE). A hybrid model of combining artificial light with natural light was established using optical principles. The best combination of lighting fixtures luminance is solved out by use of the improved ant colony algorithm, hence realizing the comprehensive optimum of comfort and energy-saving. Finally, the effectiveness of control strategy was verified by simulation of large span building.

Keywords: intelligent lighting; sky model; ant colony algorithm; energy-saving

0 引言

公共照明是指大空间内全面的、基本的照明, 其特点是光线比较均匀, 适用于学校、体育场、会议厅、农业大棚、候机厅、隧道等场所。大多数情况下, 公共照明中基础照明作为整体处理, 然后在一些需要突出强调的地方加以局部照明。随着城市化进程的加快, 各种大型公共场馆的建立, 照明设施使用频率越来越高, 如此众多的设备每天需要专门的人员管理控制, 效率低下, 人力浪费。目前, 全球的照明能耗大约占据整个电力资源消耗的五分之一。公共照明因其空间大、全天候的特点, 引入自然光具有极大的节能潜能。同时自然光对室内人员的视觉舒适、视野景观范围、身心健康和工作效率都有很大影响。因此混合照明智能控制系统可以改善滞后的照明管理方式, 降低能源消耗, 优化照明环境。国内外学者结合自然光和人造光混合照明的研究做了较多工作: 1) 冯冬青^[1]根据太阳高度以及窗户的方位角建立窗帘调控模型, 当自然光不足需要人工补光时, 利用改进的粒子群算法求出最佳的亮度组合;

2) Hertog^[2]根据自然光和人造光的光谱成分和波长的差别不同, 利用优化算法使二者的混合照明效果最有效于人体的健康, 节约了能耗; 3) Tsuei^[3]等开发了这样的照明系统: 聚光灯收集的太阳光被分光器分为可见光和非可见光, 可见光通过光导进入一个灯箱, 它与LED灯混合, 最终由漫反射器提供均一照明, 非可见光被太阳能光伏吸收, 为LED提供电能; 4) 蔡金林^[4]着眼于终端配光装置, 设计了一种基于反射器/透镜结构的照明灯具, 通过导光装置引入室外的自然光, 采用自由曲面透镜对自然光进行配光调制, 实现自然光和LED光源混合照明; 5) Yin^[5]从控制算法入手, 在混合照明控制系统中提出了一种分数阶自适应能量认知照明控制策略, 该策略组合了两种控制器: 极值搜索控制器用于减少能源消耗, PID控制器用于优化光环境舒适性; 6) 袁宗南^[6]针对管式天然光导入系统的性能预评估方法, 分析了彩色照度图法、天然光渗透系数法、Sky Vison模拟法、Carter法和Tsangrassoulis法的优缺点, 对选择光导入器材有重要指导意义。上述研究从策略、算法、光质、终端器具、光导入系统等层面推进了混合照明的发展。但是如何根据自然光动态的亮度变化及其分布, 根据照明场所对光质光色的需要, 实时调整人造光源的光强, 使人造光和自然光智能融合, 到达最佳照明效果。这一课题目前较少学者对其研究。对自然光天空亮度分布描述的模型有Perez模型、Igawa模型和国际照明委员会(CIE)标准天空模型。CIE模型以其精确性成为行业标准。

照明差异化是节能的另一重要途径, 可以避免恒定均一照明带来的能源的浪费, 同时满足同一场所不同使用区域多样化照明需求。如足球场馆的球场区和观众席, 温室大棚内不同农

收稿日期: 2017-02-02; 修回日期: 2017-02-27。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375290, 71001060); 上海航天科技创新基金(SAST2015054); 中央高校基本科研业务费学科交叉一面上项目(1000219176)。

作者简介: 宗卫周(1992-), 男, 宣城人, 在读硕士生, 主要从事智能照明方向的研究。

余建波(1978-), 男, 上海人, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事智能楼宇、故障诊断、模式识别等方向的研究。

作物种植区, 工厂中不同工位与工序等。

本文基于 CIE 天空模型, 通过照度学有关知识和原理, 建立人造光和自然光混合照明模型, 目的使公共区域不同取光空间达到最适照度, 提高照明的智能和节能水平。

1 模型的建立

天空模型是 CIE 根据不同国家和地区所做的相关基础研究, 将不同天空亮度总结成 15 种不同的标准天空类型, 如表 1, 可精确计算出不同时空下亮度分布。图 1 用来描述 CIE 模型三维结构及变量:

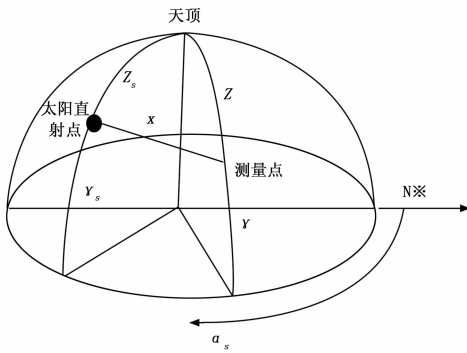


图 1 天空模型的示意图

α_s 为太阳方位角, 指本地子午线与太阳光线在地平面的投影的夹角, 方位角以正南方向为零, 向东变小, 向西扩大。 γ_s 为太阳高度角, 即当地经线与太阳光线在水平投影形成的夹角。 χ 指太阳为测量点之间最短距离。 γ 为测量点高度角, 即当地经线与测量点在水平投影形成的夹角, 当测量点选定后, γ 为固定值。 Z 为测量点与天顶的角距离。 Z_s 为太阳直射点与天顶的角距离。他们之间的关系根据几何定理有:

$$Z = \frac{\pi}{2} - \gamma \tag{1}$$

$$Z_s = \frac{\pi}{2} - \gamma_s \tag{2}$$

$$\lambda = \arccos[\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos(\alpha - \alpha_s)] \tag{3}$$

此外, 刘春艳提供通过空间模型测量点的照度比值的确定 CIE 标准一般天空类型方法^[7]。吴玉香基于提出了一种基于 CIE 天空模型计算任意天空亮度分布方法^[8]。他们的研究工作为利用自然光实现智能照明奠定了基础。

1.1 天空模型计算太阳直射点照度

太阳平行光源下, 根据立体角投影定律, 被照点照度与亮度的关系有如下公式描述:

$$E_{ik} = L_{\gamma_i} \frac{G_i \cdot \cos \varepsilon_i}{d_i^2} \cos \theta_i \tag{4}$$

本文的照明场所选取带有弧形顶棚的建筑物, 如图 2, 建筑物弧形顶棚用 G 表示, 太阳光直射其上, 为发光面, $G_k(x_k, y_k, z_k)$ 为 G 分割成的小微元。 H 是室内作业面, 为被照面, H_i 为 H 上面的一点, E_{ik} 为发光微元 G_k 对 H_i 形成的照度。 L_{γ_i} 为室内作业面上的 H_i 点透过微元 G_k 所看到的天空元亮度。

$$L_{\gamma_i} = \frac{\left\{ 1 + c \left[\exp(d \cdot \chi) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \right\} \cdot \left[1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \right]}{\left\{ 1 + c \left[\exp(d \cdot Z) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z \right\} \cdot \left[1 + a \cdot \exp b \right]} \cdot L_z \tag{5}$$

在式 (5) 中, L_z 为计算点天顶亮度。 L_z 的值可以使用测量仪器去测量; a, b, c, d, e 为 CIE 标准 15 中天空类型中的参数, 可通过查找表 1 取值。表 1 基本涵盖不同天气下的天空状态。

太阳高度角 γ_s 计算如下:

$$\gamma_s = \arcsin(\sin \delta \sin \eta + \cos \delta \cos \eta \cos t) \tag{6}$$

$$\eta = 0.3723 + 23.2567 \sin \phi + 0.1149 \sin 2\phi - 0.1712 \sin 3\phi - 0.758 \cos \phi + 0.3656 \cos 2\phi + 0.0201 \cos 3\phi \tag{7}$$

$$\phi = 2\pi \{ N_1 - 79.86 + 0.24 \times (Y - 1985) - \text{INT}[(Y - 1985)/4] \} / 365.24 \tag{8}$$

在式 (6) ~ (8) 中, δ 表示建筑物所在地区的纬度, 定位确定后可查, 北纬为正, 南纬为负; η 表示太阳的纬度; t 表示太阳时间的角度, t 等于 15° 与距离正午小时数的乘积; N_1 为

表 1 15 种天气类型的分类方法

类型	a	b	c	d	e	天空亮度分布
1	4.0	-0.70	0	-1.0	0	CIE 标准阴天空, 亮度色调极速变化, 解决天顶, 方位角一致
2	4.0	-0.70	2	-1.5	0.15	阴天, 亮度色调急剧变化, 并稍微发亮, 接近太阳
3	1.1	-0.8	0	-1.0	0	阴天, 适度渐次变化, 方位角一致
4	1.1	-0.8	2	-1.5	0.15	阴天, 适度渐次变化, 稍微发亮, 接近太阳
5	0	-1.0	0	-1.0	0	均匀亮度天空
6	0	-1.0	2	-1.5	0.15	局部多云天空, 无色调接近天顶, 稍微发亮, 接近太阳
7	0	-1.0	5	-2.5	0.30	局部多云天空, 无色调接近天顶, 太阳周围区域更亮
8	0	-1.0	10	-3.0	0.45	局部多云天空, 无色调接近天顶, 清晰日冕
9	-1.0	-0.55	2	-1.5	0.15	局部多云天空, 暗淡无光的太阳
10	-1.0	-0.55	5	-2.5	0.30	局部多云天空, 更亮的太阳周围区域
11	-1.0	-0.55	10	-3.0	0.45	白蓝天空, 清晰日冕
12	-1.0	-0.32	10	-3.0	0.45	CIE 标准晴天空, 低亮度混浊
13	-1.0	-0.32	16	-3.0	0.30	CIE 标准晴天空, 大气混浊
14	-1.0	-0.15	16	-3.0	0.30	无云混浊天空, 完全日冕
15	-1.0	-0.15	24	-2.8	0.15	白蓝混浊天空, 完全日冕

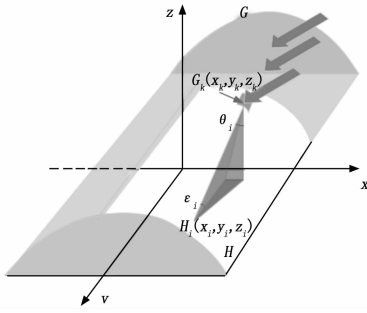


图 2 天空模型产生照度示意图

累积天数, Y 为年份, INT 表示取整数部分。

方位角计算公式如下:

$$\alpha_s = \arccos\left(\frac{\sin\gamma_s \sin\delta - \sin\eta}{\cos\gamma_s \cos\delta}\right) \quad (9)$$

θ_i 为光线在被照面 H_i 的入射角, 计算公式为:

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{|z_k - z_i|}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}} \quad (10)$$

ϵ_i 为光线在发光面 G_i 的出射角, 计算公式为:

$$\epsilon_i = \arctan \frac{\sqrt{(z_k - z_i)^2 + (y_k - y_i)^2}}{x_k - x_i} \quad (11)$$

对公式 (1) 积分, 即可得到整个露天发光面 (图中曲面) G 在 H_i 处产生的照度:

$$E_{ai} = \iint E_{ik}(x_k, y_k, z_k) dG \quad (12)$$

1.2 自然光和人造光混合模型建立

点光源的定义: 近似圆形发光体, 如果自身直径小于其达到照射平面距离的 1/5, 可视为点光源。以采用点光源的灯具为前提, 假设室内各个墙面的反射光所产生的照度对检测点照度的影响很小。如图 3, 由光学基本知识, 有:

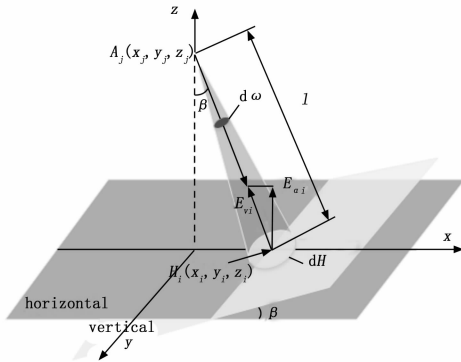


图 3 点光源产生照度模型

$$d\omega = \frac{dH_i}{l_{ij}^2} \quad (13)$$

$$I_{\beta_{ij}} = \frac{d\Phi_{ij}}{d\omega} \quad (14)$$

其中: $d\omega$ 为光源 $A_j(x_j, y_j, z_j)$ 对面元 $dH_i(x_i, y_i, z_i)$ 所形成的立体角, l_{ij} 为 A_j 至被照点 H_i 的距离, β_{ij} 为 A_j 的入射方向, $I_{\beta_{ij}}$ 为 A_j 入射方向的光强, $d\Phi_{ij}$ 为面元 dH 范围内的光通量。由点光源直射照度的距离平方反比定律知: A_j 在 H_i 点所产生的法向方向的照度为:

$$E_{aij} = \frac{d\Phi_{ij}}{dH} = \frac{I_{\beta_{ij}} d\omega}{dH} = I_{\beta_{ij}} \frac{dH/l_{ij}^2}{dH} = \frac{I_{\beta_{ij}}}{l_{ij}^2} \quad (15)$$

A_j 在 H_i 点所产生的水平方向的照度为 E_{aij} 在法线方向的投影:

$$E_{aij} = E_{aij} \cos\beta_{ij} \quad (16)$$

由立体几何知识有:

$$\cos\beta_{ij} = \frac{|z_j - z_i|}{\sqrt{[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2]}} \quad (17)$$

室内 J 个灯具在 dH_i 处产生的照度为各个灯具在该处产生的水平照度的线性组合:

$$E_{ai} = \sum_{j=1}^J E_{ij} \quad (18)$$

综合日光和人造光得到室内取光面内点 dH_i 最终照度:

$$E_{ai} = E_{ai} + \mu E_{si} \quad (19)$$

μ 为材料的透光率: 即设备材料的透光的效率, 是光透过半透明和透明材料后的光通量与其入射光线光通量的百分比, 根据不同材料而定^[9], 无任何材料其透光率为 1。同理, 照度与光通量成正比, 光线经过材料折射后, 照度的衰减程度同光通量。

由于照明对象在各个区域由于使用功能不同而导致需要的照度也不同, 且在一定的上限和下限内, 即产生的模型约束条件, 为:

$$E_{maxi} \leq E_{ai} \leq E_{mini} \quad (20)$$

同一种光源, 功率越高, 光通量越大, 因此光通量可以间接反映光源的能量消耗。为了使照明能耗最低, 以照明系统各灯具总光通量最小为评价指标:

$$Fit = \min \sum_{i=1}^J \Phi_j \quad (21)$$

式中, Fit 为区域内各灯具光通量的最小值; Φ_j 为第 j 个灯具的光通量; J 为大棚内灯具的总数。

由光学基本知识: 光强为光源在单位立体角内的光通量, 而点光源的立体角是球面积与球半径平方之比, 所以有:

$$\Phi_j = 4\pi I_{\beta_j} \quad (22)$$

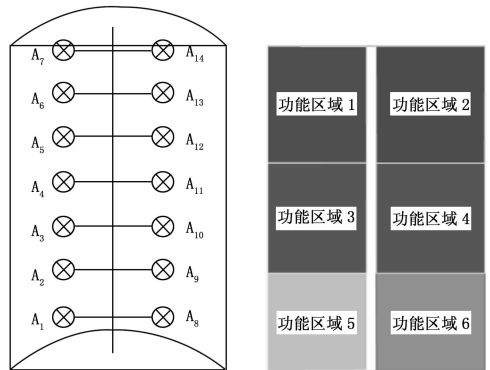


图 4 室内灯具及功能照明区域分布图

2 改进蚁群算法求解智能调光模型

2.1 蚁群算法及改进

蚁群算法是由意大利学者 M. Dorigo 等人于 20 世纪 90 年代初提出的一种新的模拟进化算法, 其真实地模拟了自然界蚂蚁群体的觅食行为。蚁群算法概念简单, 需要设置的参数少,

已成功应用在背包问题、测试集优化、物联网节点配置、路径规划等领域^[7-8]。蚂蚁 $k(k=1,2,\dots,m)$ 根据各个城市间连接路径上的信息素浓度决定其下一个访问城市, $P_{ij}^k(t)$ 表示 t 时刻蚂蚁 k 从城市 i 转移到城市 j 的概率, 其计算公式为:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\chi \cdot [\eta_{ij}(t)]^\delta}{\sum_s [\tau_{is}(t)]^\chi \cdot [\eta_{is}(t)]^\delta}, & s \in allow_k \\ 0, & s \notin allow_k \end{cases} \quad (23)$$

其中: $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数, $\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}}$, 表示蚂蚁从城市 i 转移到城市 j 的期望程度; $allow_k(k=1,2,\dots,m)$ 为蚂蚁 k 待访问城市的集合。 χ 为信息素重要程度因子, 其值越大, 表示信息素的浓度在转移中起的作用越大; δ 为启发函数重要程度因子, 其值越大, 表示启发式函数在转移中的作用越大, 即蚂蚁会以较大的概率转移到距离短的城市。蚁群算法的计算时间复杂度为:

$$T(n) = O(N_c \cdot n^2 \cdot m) \quad (24)$$

N_c 为循环次数, m 为蚂蚁个数, n 为城市数量, 本文为灯具的个数。在蚁群算法中, 寻址路径最长的蚂蚁释放的信息素将导致算法的搜索陷入局部解。为提高收敛速度, 避免算法陷入局部最优解, 提出改进规则 1:

规则 1: 一轮蚂蚁寻优结束后, 比较各条路径对应信息素总和的大小, 只对本轮中信息素浓度最大的蚂蚁路径进行更新, 这样就稀释了路径较差的蚂蚁信息素对选择路径的影响, 避免陷入了局部最优。经测试, 大大提高寻找最优解的概率。

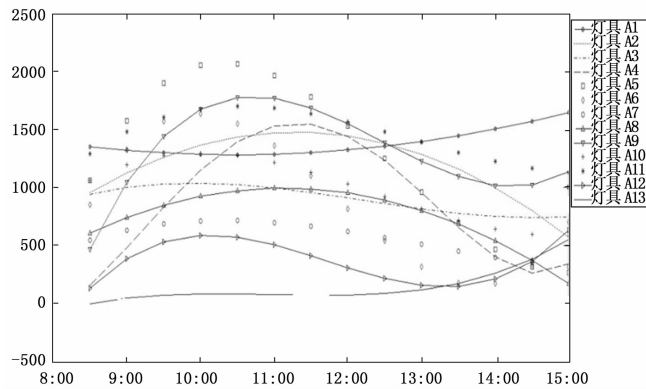


图 5 各灯具照度调整曲线

由于大型场所的照明灯具数量较多, 对应需要的种群规模也较大, 这样搜索时间长的问题尤为突出。为降低算法的时间复杂度, 减少运行时间, 提出改进规则 2:

规则 2: 将每个节点放置一个蚂蚁改为在任意一个节点放置一只蚂蚁。在每次算法循环中, 起点是被随机选择的。这避免了蚂蚁与节点的冗余。经测试, 可降低时间复杂度。

改进蚁群算法解决多目标优化的步骤如下:

Step1: 初始化模型参数。

Step2: 构造解空间。将各个蚂蚁随机地置于不同的位置, 对每一个蚂蚁通过公式 (23) 判断下一个访问的城市。

Step3: 更新信息素。计算各个蚂蚁经过的路径长度, 保存最近一次迭代的最优解。同时, 对各条路径上的信息素进行更新。

Step4: 判断是否终止。根据当前迭代的次数与是否达到

初始化设置迭代次数的上限。如无, 清空路径记录表, 如有, 则停止计算, 输出最优解。

2.2 仿真研究

本文选择地理位置为 121.59 N、东经 31.07 E 建筑物为仿真对象, 建筑物顶部为大跨度弧形透明天窗, 自然光可以从屋顶和窗户透射进来。建筑物的体积参数为: 东西 15 m, 南北宽 6 m, 顶高 6 m, 侧高 1 m, 建筑物的顶部为圆弧形, 弧度 1.25 rad。建筑物内部各照明区域如图 4 所示: 灯与采光面的垂直高度为 2 m, 横向布置 2 盏灯, 2 盏灯的间距为 3 m, 纵向两行灯间距离为 2 m。灯具最大亮度为 6 000 lm, 灯具内部可以实现 0~6 000 lm 多级调光, 实验中将灯具分 6 000 级调光。假设各个照明区域的采光照度分布如下: 55~60 klx、40~45 klx、30~50 klx、30~35 klx、25~30 klx。以上午 9:00 点为例, 选择 CIE 标准一般天空类型 6: 部分存在云的天空, 朝向天顶无渐变。设置初始蚂蚁的数量为 m 为 31 个, 信息素重要程度因子 χ 为 1, 启发函数重要程度因子 δ 为 5, 信息素挥发因子 ρ 为 0.1, 最大迭代次数 $iter_max$ 为 50。

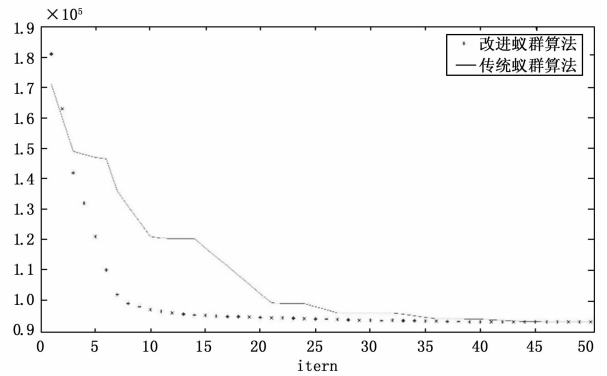


图 6 改进蚁群算法进化过程图

分别用传统蚁群算法和改进蚁群算法求模型最优解。如图 6, 改进的蚁群算法的仿真结果能够保证目标函数稳定快速收敛, 从目标函数值来看随着蚂蚁对路径的不断选择, 目标函数的值越来越小, 当迭代次数进行不到 30 次时, 目标函数改善十分缓慢, 基本接近最优解。此时, 对应的各灯具在检测点的照度为: 499lx, 499lx, 1506lx, 410lx, 396lx, 398lx, 373lx, 231lx, 1219lx, 229lx, 890lx, 763lx, 922lx, 562lx。而传统的蚁群算法则收敛速度相对缓慢, 当迭代次数差不多在 40 此以后, 才开始收敛于最优解。对应的各灯具在检测点的照度为: 488lx, 503lx, 1306lx, 434lx, 382lx, 390lx, 401lx, 311lx, 921lx, 209lx, 800lx, 666lx, 1011lx, 382lx。与此同时, 统计两种算法在同一 CPU 上的运行时间: 传统的蚁群算法耗时 145 分钟, 改进的蚁群算法 56 分追, 时间复杂度降低了一倍多。仿真结果验证了改进蚁群算法的有效性和先进性。

每隔 30 分钟计算天空模型在建筑屋顶的亮度分布, 利用改进蚁群算法求出一天内各灯具亮度随时间调整曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出, 在有日光照明的时刻, 随着太阳高度角的变化, 太阳光线在室内产生的照度也随之变化。同时由于室内的不同作业区域对照明标准要求不同, 为使照度恒定地满足标准, 抵消日光变化的影响, 室内灯具也会实时调整自身亮度。在这样的自然光与人造光混合照明系统内, 光强的变换均

(下转第 67 页)

而简化了温度信号的调理检测电路,有效避免了器件温漂带来的影响。分别以 20 套控制器在室温环境为 16℃ 条件下选用 K 型热电偶测量 100℃ 开水的温度进行试验,文献 [2] 所述方案的测量结果偏差为 ±3℃,而采用本方案设计的控制器测量的结果偏差在 ±1℃ 之内,可以明显看出在测量的一致性方面有明显提升,基本可以省去对每个控制器进行零点校准的步骤。

虽然放大电路部分在硬件成本方面明显需要增加一定的投入(大约为 7RMB),但是由于本方案采用文献 [5] 中所述拟合公式计算替代查表方式对温度信号进行转换能够大幅度减少主控芯片所需的存储空间(原先使用带有 512KB 高速 Flash 的 LPC2138 可以使用带有 64 kB 高速 Flash 的 LPC2132 替换),相应减少的硬件成本也完全可以弥补放大电路部分的增加投入,并且本设计方案能够适用更多类型的热电偶。

再对两款温度控制器最终的温度控制效果进行比较,设定值温度均定为 200℃,分别选用 1.5 kW、2 kW 以及 4 kW 的烫刀作为被控对象,在使用相同的初始参数条件下,基于本设计方案的控制稳态误差平均要小 1℃,此外控制的上升时间和超调量等特性均有一定的改善,整体控制效果得到了明显的提升。

综合考虑控制器的温度检测和控制效果以及整体成本核算

(上接第 53 页)

而缓慢的,丝毫不影响用户体验。同时,时间间隔(计算自然光的频率)的大小可以随具体的天气状况设置。这种根据多样化的照明需求和动态的日光变化而自适应调整灯具照明强度,在满足照明目标保证照明舒适性的同时,使能量总消耗最小,大大节省了电能。

3 结论

首先,应用 CIE 天空模型计算太阳光在公共照明区域内亮度分布,将亮度值映射成照度值。运用立体几何、投影定律、光学相关知识原理构建混合照明模型。然后提出改进蚁群算法求解模型最优解,利用其实现舒适度和节能的综合最优。最后,通过实验仿真验证了控制策略的有效性。本文的研究成果可应用于大雾天气的道路照明,智能大厦以及普通的办公室照明、露天体育场馆、农业大棚等需要自然光采光的场合。基于天空模型的公共场所照明智能控制策略在满足智能化和信息化的同时,实现了电能的节约。

参考文献:

- [1] 冯冬青,潘磊. 基于改进粒子群算法的智能照明控制策略研究[J]. 郑州大学学报, 2013, 34 (3): 14-18.
- [2] Hertog W, Llenas A, Carreras J. Optimizing indoor illumination quality and energy efficiency using a spectrally tunable lighting system to augment natural daylight [J]. Applied optics 2014, 14 (12): 4207-4215.
- [3] Tsuei C H, Sun W X, Kuo C C. Hybrid sunlight/LED illumination and renewable solar energy saving concepts for indoor lighting [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 19 (4): 640-653.
- [4] 蔡金林,葛爱明,陈镜羽,等. 基于折反射组合的混合光照明灯具的设计[J]. 照明工程学报, 2016, 27 (3): 87-106.

可知,基于本方案设计的多通道温度控制器在继续保持了友好的人机交互功能基础上,有效提高了控制精度,提升了控制器的整体性价比。

参考文献:

- [1] 唐洪富,张兴波. 基于 STC 系列单片机的智能温度控制器设计[J]. 电子技术应用, 2013 (5): 86-88.
- [2] 翟阳,曹亦轩,肖永松. 热封切制袋机中多通道温控系统的设计[J]. 包装工程, 2013 (17): 68-71.
- [3] 罗浩,刘尚武,王书易,等. 基于 STC12C5A60S 多路温度监控系统设计[J]. 信阳师范学院学报自然科学版, 2014 (1): 106-110.
- [4] 邬琦,杨江涛. 一种恒温箱温度控制系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2014 (8): 2455-2458.
- [5] 赵修文. 铂铑 10-铂及镍铬-镍硅热电偶特性曲线的最佳拟合公式[J]. 化工自动化及仪表, 1992 (3): 38-42.
- [6] 杨久红,王小增. 积分分离 PID 算法的电阻炉温度控制系统[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (1): 66-69.
- [7] 刘兆坤,李焯,王亚刚,等. 基于阶跃辨识的 PID 自整定研究及软件开发[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (7): 2306-2308.
- [8] 房耀,董学平,张薛礼. 基于数据驱动的 PID 自整定方法的研究[J]. 合肥工业大学学报自然科学版, 2016, 39 (1): 46-49.
- [5] Yin C, Stark B, Chen Y Q, et al. Fractional-order adaptive minimum energy cognitive lighting control strategy for the hybrid lighting system [J]. Energy and Buildings, 2015, 87 (1): 176-184.
- [6] 袁宗南,张昕,詹庆旋. 管式天然光导入系统的性能预评估方法研究综述[J]. 照明工程学报, 2010, 21 (1): 7-11.
- [7] 刘春燕,吴玉香,王孝洪,等. 基于空间模型测量点的照度比值的 CIE 标准一般天空类型选择[J]. 发光学报, 2015, 36 (10): 1201-1204.
- [8] 吴玉香,刘春燕,文尚胜,等. 基于 CIE 天空模型计算任意时间天空亮度分布[J]. 光学学报, 2014, 34 (11): 11040101-1-11040101-7.
- [9] 丁小明,周长吉. 温室透光覆盖材料透光特性的测试[J]. 农业工程学报, 2008, 24 (8): 210-213.
- [10] National standardization Technical Committee. GB/T 20148-2006. Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [11] Fernando E B, Fretias A A, Johnson C G. A new sequential covering strategy for inducing classification rules with ant colony algorithms [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2013, 17 (1): 64-76.
- [12] Gao Y Q, Guan H B, Qi Z W. A multi-objective ant colony system algorithm for virtual machine placement in cloud computing [J]. Journal of Computer and System Sciences, 2013, 79 (8): 1230-1242.
- [13] Hua S, Wang G Y, Sun X M, et al. Optimal node deployment strategy for wireless sensor networks based on dynamic ant colony algorithm [A]. Control and Decision Conference [C]. 2016, 8 (23): 178-184.
- [14] Saidi-Mebrabad M, Dehnavi-Arani S, Evazabadian F, et al. An ant colony algorithm (ACA) for solving the new integrated model of job shop scheduling and conflict-free routing of AGVs [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 22 (2): 2-13.