



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

上海地区照明控制策略  
对办公建筑能耗的影响

姓名：姚远

学号：0820030155

所在院系：机械工程学院

学科门类：土木工程

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：潘毅群

二〇一一年十月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Engineering

**Impact of Lighting Control Strategies  
on Energy Consumption  
of Office Buildings in Shanghai**

Candidate: YAO Yuan  
Student Number: 0820030155  
School/Department: Mechanical Engineering  
Discipline: Civil Engineering  
Major: HVAC Engineering  
Supervisor: PAN Yiqun

October, 2011

上海地区照明控制策略对办公建筑能耗的影响

姚远

同济大学

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日



## 摘要

建筑能耗主要由照明、暖通、设备三个部分的能耗组成。使用适当的智能照明控制策略对照明系统有明显的节能降耗作用。加之照明散热与空调和采暖系统的能耗之间有密不可分的关系，所以照明控制是建筑节能领域一个重要问题。而在办公建筑中，最常见的光源就是荧光灯，本论文即围绕开敞式办公室的荧光灯照明控制策略展开。

论文首先总结不同的照明控制方式，分析两个重要因素——自然采光和使用者行为模式对照明能耗的影响；然后对一办公建筑内某开敞办公室进行日光利用潜力的静态和动态分析，并对原有的手动照明控制系统进行改造，搭建可实现多种控制策略的实验平台，包括日光相关的调光控制和人员探测的开关控制等，同时配备相应的照度和用电量采集监测、在线显示、自动记录系统，比较基准办公室和实验台在不同控制策略运行下的照明用电量差异；最后根据实验所得数据，采用建筑能耗模拟的方法，分析不同照明控制策略对建筑内各分项能耗的影响。

**关键词：**照明，控制策略，建筑能耗，办公建筑

## Abstract

Building energy consumption mainly consists of three components: lighting, HVAC and electrical equipment. Implementation of appropriate intelligent control strategies on lighting system could benefit energy saving significantly. Furthermore, energy demand of heating and cooling is closely related to the heat dissipation from lighting, so lighting control is very important for building energy saving. In office buildings, the most commonly used light source is fluorescent lamp. This thesis is about the study on lighting control strategies for fluorescent lighting system applied in open-plan offices.

Firstly, various lighting control modes and strategies are summarized; moreover, the impact of two important factors - daylighting and user behavior pattern - on lighting energy consumption is analyzed. Secondly, the daylight utilization potential of an open-plan office space is evaluated via simulation and site measurement. An intelligent lighting control test bed is established in this office. The original manually controlled lighting system is replaced by this test bed, which can realize various control strategies, including daylighting dimming control and on/off control by occupancy detection. Data of illuminance and power is monitored, displayed and recorded automatically by an online data acquisition system. Online tests were conducted on various lighting control strategies for a period of time and the energy use is compared to that of the lighting system in the baseline office. Finally, energy simulation model is developed using EnergyPlus and the experiment results are processed as the input of the model. The energy saving potential of various lighting control strategies, especially their impact on the end use components in buildings are simulated and analyzed.

**Key Words:** lighting, building energy saving, control strategy, office building



## 目录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 课题背景 .....	1
1.2 研究现状 .....	2
1.3 论文的研究目的及主要内容 .....	4
1.3.1 研究目的 .....	4
1.3.2 主要内容 .....	4
1.3.3 技术路线与结构框架 .....	4
第 2 章 照明控制与能耗综述 .....	7
2.1 控制方式 .....	7
2.1.1 时间表控制 (schedule control) .....	7
2.1.2 人员探测/来人探测控制 (occupancy detection/ motion sensor) .....	8
2.1.3 日光相关控制(daylight – linked control) .....	8
2.2 自然采光 .....	9
2.2.1 自然采光利用 .....	11
2.2.2 自然采光动态评价标准 .....	15
2.3 人员使用影响 .....	17
2.4 小结 .....	20
第 3 章 照明控制系统实验台 .....	21
3.1 实验台搭建背景 .....	21
3.1.1 实验台所在办公室原始情况 .....	21
3.1.2 日光利用潜力 .....	23
3.1.3 实验台照明系统 .....	28
3.2 测量和数据记录系统 .....	29
3.2.1 系统硬件组成 .....	30
3.2.2 相关程序 .....	33
3.3 实验设计 .....	35
3.4 实验步骤 .....	36
3.4.1 原照明系统测试 .....	36
3.4.2 初步实验 .....	36
3.4.3 比较实验 .....	36
第 4 章 实验数据分析 .....	39

4.1 初步实验.....	39
4.2 各策略动态性能简析.....	40
4.2.1 实验 1.....	41
4.2.2 实验 2.....	44
4.2.3 实验 3.....	46
4.2.5 实验 4.....	48
4.2.6 实验 5.....	50
4.2.7 实验 6.....	52
4.2.8 实验 7.....	55
4.2.9 实验 8.....	58
4.3 数据修正.....	60
4.4 控制策略比较.....	60
第 5 章 照明策略对建筑能耗的影响.....	65
5.1 建筑模型简介.....	65
5.1.1 地理位置和天气参数.....	65
5.1.2 建筑几何模型.....	65
5.1.3 建筑结构热工特性.....	66
5.1.4 室内负荷与运行时间.....	66
5.1.5 负荷计算与分区.....	67
5.1.6 新风量与漏风率.....	67
5.1.7 照明时间表设置.....	67
5.2 基准能耗模拟结果分析.....	70
5.3 不同照明策略对建筑能耗的影响.....	72
5.3.1 热负荷受到的影响.....	72
5.3.2 冷负荷受到的影响.....	73
5.3.3 建筑总能耗受到的影响.....	75
第 6 章 结论.....	79

# 第1章 引言

## 1.1 课题背景

人类社会的高速发展也推动着能耗的飞速上升。与人们的日常生活息息相关的首先是建筑能耗，这一部分在社会总能耗中占据着举足轻重的地位。如果保持现有的能耗与排放水平，2030年中国建筑行业的直接与间接碳排放总量将达到32亿吨，接近全国排放总量的1/3<sup>[1]</sup>。而在美国，商业建筑每年消耗社会一次能源总量也超过三分之一<sup>[2]</sup>。由于我国人均耗电量仍处于较低水平，随着人们生活水平的提高，在未来仍有很大的上升潜力。为减缓建筑能耗增长，总体上达到二氧化碳减排目标，各个国家都制定了相关节能标准。中国已于05年颁布实施GB50189—2005《公共建筑节能标准》，预期通过该标准的执行，以20世纪80年代改革开放初期建造的公共建筑为比较基准，达到全年采暖、通风、空气调节和照明的总能耗减少50%的目标<sup>[3]</sup>。

在建筑能耗中，用于空调制冷与采暖系统的比例约50%~60%，照明约20%~30%<sup>[3, 4]</sup>，在中国南方地区，如广州，甚至可达到40%<sup>[5]</sup>。这两部分是建筑能耗中最重要的方面。如果能够有效地减少照明电耗，对于以制冷为主的地区，由于照明散热减少，还可进一步降低其空调能耗，从而更大程度地提高建筑的运行能效。而且，照明能耗在全球能耗中占去19%的比例<sup>[6]</sup>，其降耗潜力不容忽视。

为推行照明降耗，全世界各国家和地区都根据自身需求制定了多项法律法规。如欧洲出台的指导性规范包括EuP (Eco-design Requirements for Energy-using Products Directive, 欧盟用能产品生态设计框架指令<sup>[7, 8]</sup>)，EPBD (Energy Performance of Buildings Directive<sup>[9]</sup>，建筑能效指令<sup>[10, 11]</sup>)等，都属于强制性法令。美国也独立推行了EPA Act (Energy Policy Act, 能源政策法案)，EISA (Energy Independence and Security Act, 能源独立与安全法案)及ARRA (American Recovery and Reinvestment Act, 美国复苏与再投资法案)等<sup>[6]</sup>要求。南非04年颁布能源策略，计划在2012年之前，将政府建筑内的白炽灯全部替换为节能灯，同时，到2014年实现政府建筑节能25%的目标。而我国也配合《公共建筑节能标准》<sup>[3]</sup>，在《照明设计标准》<sup>[12]</sup>中，通过对不同建筑、房间类型中的LPD (照明功率密度)和工作面照度的规定，为照明节能提供了设计标准，以实现十一五计划中单位GDP能耗降低20%的目标。此外，现在随着节能灯(紧凑型荧光灯)、LED灯等的普及、灯具和镇流器的发展，通过提高转化效率来实现照明降耗的

措施和技术已被广泛实施并取得良好效果。而采用适当的控制系统来实现照明降耗，由于初期投资较高，系统形式较为复杂，其应用受到限制。

由此可见，在建筑节能领域，采用适当方式进行照明节能无疑是一个重要方面。综合考虑各种建筑类型，公共建筑由于管理集中，节能潜力大，受到广泛关注。作为公共建筑的主要类型之一，办公建筑在建筑总面积中占有相当高的比例。据不完全统计<sup>[13]</sup>，平均每年新增办公楼面积在全国各地各不相同，如上海和北京约 40 万~50 万 m<sup>2</sup>，广州约为 30~35 万 m<sup>2</sup>，深圳约为 20 万 m<sup>2</sup>。相应的，办公建筑消耗的能量也逐年迅速上升。所以，不同的照明控制策略在办公建筑中节能效果如何，建筑其他部分能耗如空调采暖能耗会受到这些策略什么样的影响，这些策略对于建筑整体节能意义何在，又是否具有实用性，就成为亟待回答的问题。

## 1.2 研究现状

现在，生活中常用的照明形式主要还是已有一百多年历史的白炽灯，而办公建筑中，荧光灯占绝对优势。照明能效最受关注的因素包括：能量转换效率，日光利用，照明独立控制，光照质量，全生命周期的排放及总成本<sup>[6]</sup>。而多项调查结果表明，提高照明能效是一种经济性很高的二氧化碳减排方法，是节能潜力最大的领域之一<sup>[14]</sup>。这些照明节能措施最多的采用见于发展中国家，其次是其经济处于过渡期的国家，最后是工业化国家<sup>[6]</sup>。

要确定不同照明控制模式的区别，或比较不同建筑设计方案下某种控制模式的适用性，最好的方法当然是做实验。然而在建筑设计阶段，这种实验条件是不可能满足的，再加上照明能耗的影响因素非常多，因此，光环境模拟软件应运而生。用于静态模拟的较流行的软件有：Radiance、由 Radiance 衍生的 Desktop Radiance (RD)、Ecotect、AGi32 和 Dialux 等，Adeline<sup>[15]</sup>可用于自然采光计算；Daysim 可进行动态模拟；EnergyPlus、DOE2、TRNSYS 和 IES<VE>等，可用于建筑能耗的综合模拟。这些软件中采用的光照模型包括光线跟踪、光能传递和几何计算等。为统一自然光比较标准，国际照明委员会（CIE, International Commission on Illumination）确定了 15 种通用标准天空模型，常用的有均匀天空模型（Intermediate Sky）、全阴天模型（Overcast Sky）、晴天模型（Clear Sky）和 Perez 全气象条件天空模型（Perez All Weather Sky）等。其中，最后一种的天空亮度分布更为真实，可以根据直散射辐照度和其他相关数据计算天空亮度，从而获得全年动态自然光数据，弥补了传统模型只能针对特定天气情况的缺陷<sup>[16]</sup>。由于建筑与系统的影响因素众多，且在实际工程完成前只能进行预测，所以关于人工照明、自然采光以及建筑总能耗的研究中，很大比例的成果是基于模拟结

果得到的。值得一提的是，在动态模拟软件 Daysim 中，不仅对全年动态条件有比较好的覆盖，还定义了主动与被动式行为，将人对遮阳、照明的控制行为模式也结合到了照明能耗模拟计算中<sup>[17]</sup>。然而，这些工具在实际的工程中应用范围仍然较小。以新加坡为例，只有 25% 的建筑公司采用照明或采光模拟软件；而针对美、加、德三国 187 名设计员、工程师和研究人员的网络调查表明，其中只有 134 人在考虑自然采光的同时还使用了模拟软件进行结果预测<sup>[18]</sup>。

虽然增加智能照明控制，如根据自然光调节人工照明，对建筑节能应该是有利的，但现今在办公建筑中对这种系统的使用率还很低。阻碍其发展的原因之一，就是缺少确定控制方式节能潜力的计算工具，或者存在这种工具，但其使用起来非常复杂。比如前面提到的各种模拟软件，无论采用哪种光照模型，随着计算精度和输出结果（图像/数字，人工照明/自然采光）方面要求的提高，都会增加输入参数，延长计算时间。因此，不同照明控制方式的经济性很难在项目初期就得到确定。针对这个问题，很多研究者致力于简易评估方法的开发。Moncef Krarti<sup>[21]</sup>等人根据模拟结果整理出一个简化的评价公式，以室外照度水平、室内照度设定值、日光控制方式、窗户透光率和面积、外区面积和房间面积为输入，即可得出一个房间内采用日光控制的节能潜力，即全年采光满足率（DA，Daylight Autonomy）或称为“全自然采光时间百分比”。经模拟和实际验证，这种简易计算法绝对误差在 0.5% 以内。类似的，余琼等<sup>[19]</sup>以上述自然采光满足率为评价标准，用详细模拟软件回归分析，拟合出该值计算的的经验公式，从而建立模型，用于建筑方案设计阶段对使用基于自然光控制的照明系统能耗进行预测。

另一方面，由于照明能耗本身和建筑采光设计对采暖、空调能耗也有影响，所以如何平衡它们间的关系，降低建筑总能耗，学者们也进行了相关研究。文献<sup>[19]</sup>中即提到了建筑设计参数对总能耗的影响与照明控制方式有关。Christelle Franzetti<sup>[20]</sup>等人分析了建筑和系统中各要素之间的关系，比较其对建筑总能耗的影响后，认为窗地面积比是其中最敏感的因子。文献<sup>[21, 22]</sup>指出，照明密度对于建筑能耗的影响和当地的气候条件关系十分密切。在上海所处的夏热冬冷地区，其全年能耗对照明密度的敏感度比其他城市要高出许多，即照明能耗下降可导致建筑能耗较大幅度降低。香港城市大学 D.H.W. Li、J.C. Lam 等人对能耗预测进行了一系列研究<sup>[21-33]</sup>，他们使用 CA-SIS 和 LIGHT 先模拟室内单独使用日光照明时的亮度情况，再在特定照明控制方法下，如恒光照明控制，计算所需要的逐时照明功率；然后结合建筑热特性，预测建筑总体能耗值<sup>[22]</sup>。由于对室内照度模拟的精度较高，预测结果较为可信。在香港地区，自然光控制的调光照明系统可节约 30% 以上的照明电耗<sup>[29]</sup>，降低空调峰值负荷，节约设备初投资<sup>[33]</sup>，且在照度设定值较低时，仅用开关控制即可实现节能<sup>[29]</sup>。鉴于建筑负荷成因的复杂

性，自上世纪九十年代 Park 等人<sup>[34]</sup>提出用 ANN (artificial neural network, 人工神经网络) 预测电网负荷的方法后，便出现很多关于用类似方法预测建筑负荷的研究成果。Aydinalp Merih<sup>[35]</sup>和 Wong S L<sup>[36]</sup>分别针对住宅和办公建筑，挑选建筑能耗最敏感的几个因子，包括建筑参数，天气参数和建筑内的电器应用等，建立了建筑整体能耗预测模型，可分别输出建筑总能耗，采暖、制冷能耗和照明能耗。但这些模型都需要大量数据进行训练，才能输出较准确的预测值。

综上所述，关于自然采光和照明能耗间的关系主要通过模拟来确定，仍缺乏一定的实测数据支持。同时，在能耗预测模型的训练中，也需要这些数据的输入。所以，本文旨在获取实验数据，最终为工程应用提供支持，为不同的建筑类型或房间使用方式中照明控制策略的选择提供依据。

## 1.3 论文的研究目的及主要内容

### 1.3.1 研究目的

本文的研究目的是：通过实验的方法，获得具体数据，用其进行智能照明控制系统的不同策略在办公建筑中的节能作用的比较，最终确定直接导致的照明降耗和建筑总能耗（主要是空调和采暖）受到的影响。

### 1.3.2 主要内容

- 分析办公建筑的照明节能潜力，如日光的可利用度，人员的行为模式，原有照明控制等；
- 智能照明控制实验台搭建；
- 对不同照明控制策略的节电效果进行实验，并比较各个情况下的照度水平；
- 建立实验台所在办公室的建筑模型，利用实验数据作为输入，采用模拟的方法，分析不同照明控制策略对建筑各分项能耗的影响。

### 1.3.3 技术路线与结构框架

根据上述内容和研究目的，确定本文技术路线，如图 1-1 所示：

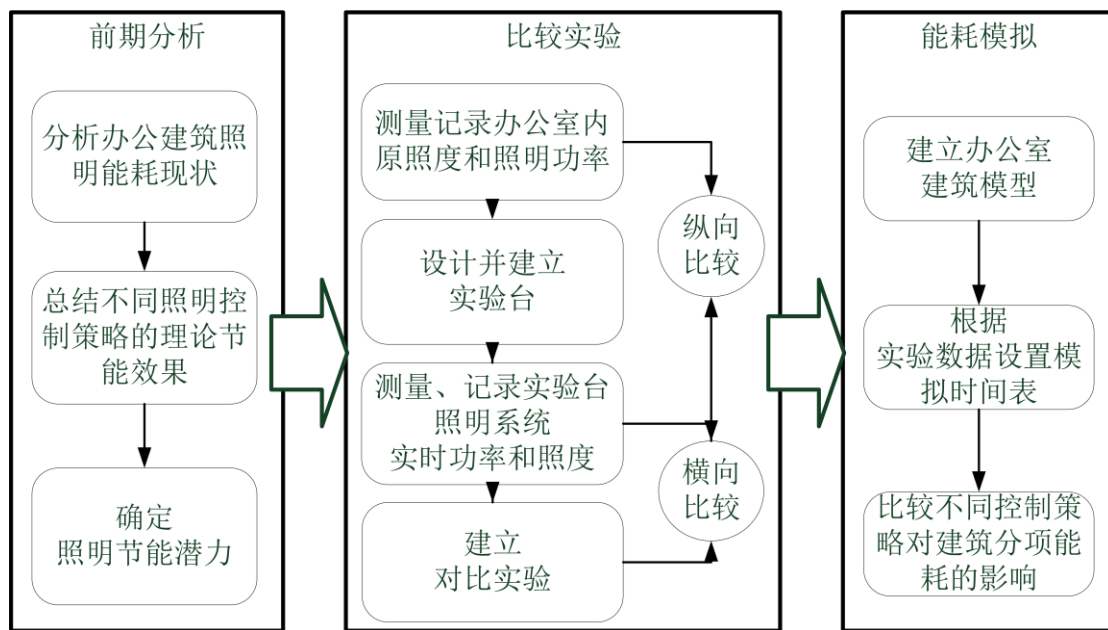


图 1-1 全文技术路线图





## 第2章 照明控制与能耗综述

本章为全文的理论基础概述，在简介照明控制方式和策略的基础上，分析关键因子，如日光、人员行为等，对不同控制方式效果的影响。

### 2.1 控制方式

由于全文所涉及系统均位于办公建筑内，所以这里所指的控制方式也以办公室适用的方式为主。照明的自动控制方式主要包括<sup>[37]</sup>通断控制和调光控制。按照控制的信号种类，可分为日光控制、时间控制、来人探测控制、场景控制等。将不同的控制方式进行组合，可形成不同的控制策略。图 2-1 为锐高公司的一项调查统计结果<sup>[37]</sup>，办公室内采用不同照明控制策略，节能效果不尽相同。图中绿色部分代表节能率。以高频电子镇流器的使用作为比较基准，使用电感镇流器会使照明能耗增加 30%，如红色柱形所示。而使用日光控制高频电子镇流器调光，结合来人探测和手动调光是最节能的控制方式，可节约照明能耗约 75%。

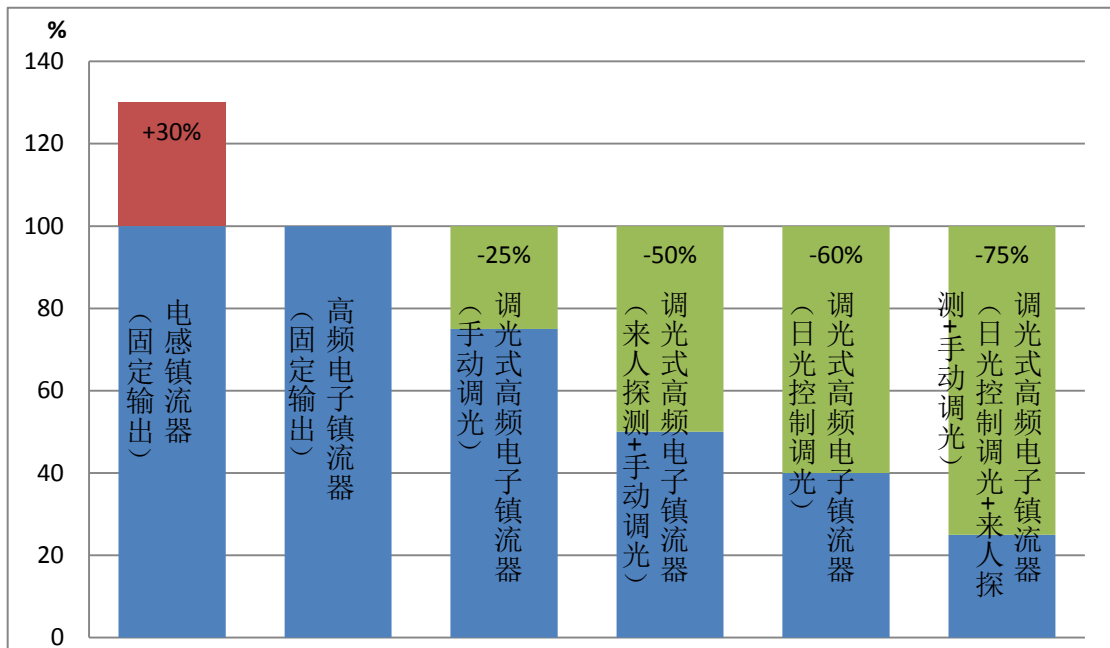


图 2-1 办公室不同照明策略节能百分比<sup>[37]</sup>

#### 2.1.1 时间表控制 (schedule control)

描述：预先设置亮灯或灭灯的时间，更常见于路灯等公共区域的照明控制，

办公室照明也可以采用。

这种控制方式既简单又有效，是很容易实现的一种基于节能考虑的控制方式。但缺点是忽视了使用者主动控制的需求，不够灵活。在预设的亮灯时间之外，可能无法满足室内人员对照明的需求。不需要安装传感器，任何有定时功能的控制装置都可实现。

### 2.1.2 人员探测/来人探测控制 (occupancy detection/ motion sensor)

描述：开灯信号为人员在室，关灯信号为人员离室。开灯或关灯动作可同时或选择其一依据人员信号来控制。

无人时关灯的控制模式，可以有效防止人员离室却忘记关灯情况下的电能浪费。常见于走廊等公共交通区域，也可应用于办公室照明。通常“来人开灯”为即时性动作，而“无人关灯”是延迟性动作。原因是大部分实际传感器都只能判断运动的人员这一动态信号，但人员静坐这一信号难以检测。所以，延迟关灯可以减少光源的频繁启停，延迟光源寿命，提高使用者的舒适性。

由于必须加装相应的传感器，所以初投资较高。且可能造成照明电路的频繁通断，所以控制策略和系统设计需特别注意，如延迟时间的确定等。这一点是这种控制方法的一个难点，可以利用时间序列的方法进行预测<sup>[38]</sup>。

### 2.1.3 日光相关控制(daylight – linked control)

描述：可以为开关或调光控制，在日照充足时，关闭全部或部分光源，或者调暗灯光；日照不足时，开启部分或全部光源，或者调亮灯光。办公室内通常以照度为恒控指标。在对视觉环境要求高的场所，还有亮度控制，以人工光源的补充来减小自然采光引起的过大的亮度差异。这种亮度控制在普通办公室内涉及较少，本章节内便不再赘述。

日光相关的控制方式旨在利用免费的自然光，降低人工照明平均用电量（调光控制）或运行时长（开关控制）。在采光充足的建筑中尤其适用，节能潜力很大。但由于必须配备相应的照度传感器和控制器，在调光控制时，还需要合适的可调光镇流器，投资较高，所以其经济性需在项目初期即加以考察。这就必须用到光环境模拟或建筑能耗模拟等相关软件对其进行预评估。当然，这些额外工作也会增加投资。

这种控制方式的节能效果的影响因素来自多方面，首先是建筑本体，包括遮阳设施、采光性能等。由该方式的节能原理也可得知，凡是影响自然采光的因素，

都同样是影响它节能潜力的因素。所以在下一节将具体讨论自然采光与照明节能之间的关系。其次，对它的影响还来自控制设置本身。比如桌面设定的照度值不同，选择开关控制和调光控制带来的节能量就非常不一样。以香港某个安装了照度传感器的教室为例，当所需照度值较低时（该实验中低于 150lux）采用开关控制方式反而有更好的节能效果<sup>[29]</sup>，如图 2-2 所示。由此可见，在某些情况下，可以采用开关控制这种更经济的方式实现节能潜力最大化。

通过采用调光方式对日光进行利用时，模拟结果表明，人工照明用电量可减少 20% 到 70%<sup>[39]</sup>。

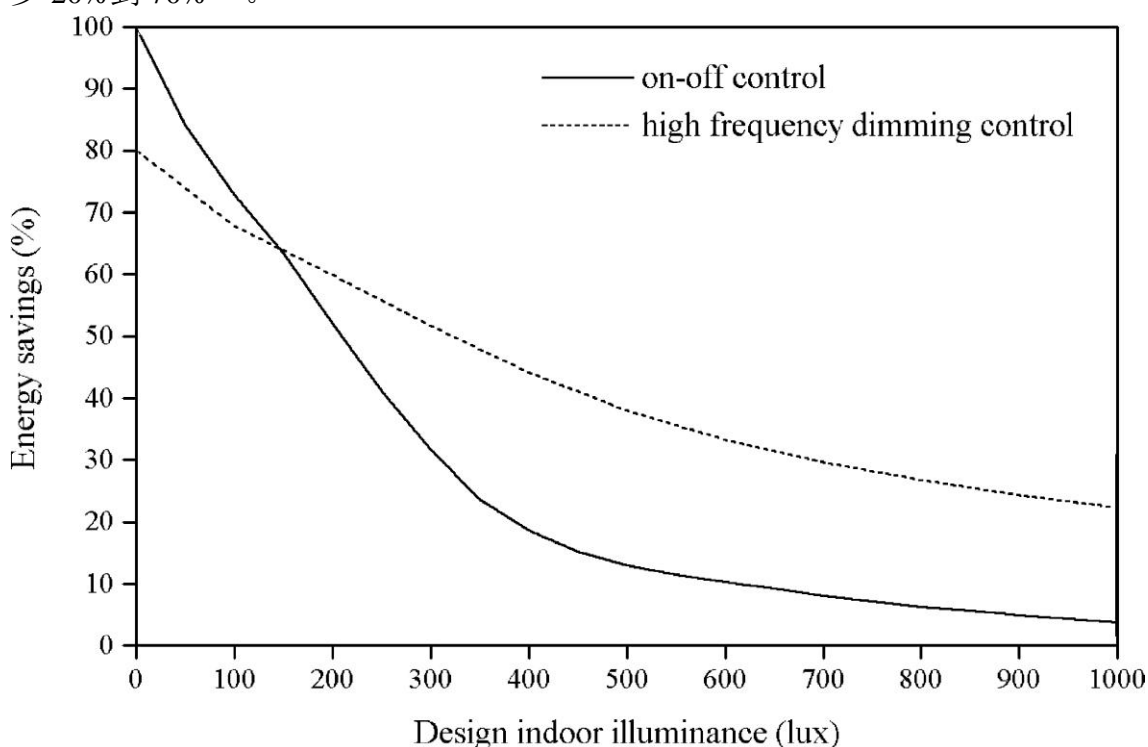


图 2-2 开关控制和调光控制方式下照明节能量<sup>[29]</sup>

实际工程中，由于室内安装的控制用传感器只能检测到人工照明和自然采光共同作用下的混合照度，所以很难实现照度充足时关闭照明的控制方法。这个问题可以通过模糊算法<sup>[40]</sup>以及自适应人工神经网络<sup>[41]</sup>的帮助来解决。

## 2.2 自然采光

对自然光的有效利用，在调光控制和日光传感器发展日趋成熟的今天，不失为一种值得推荐的照明节能设计方向。照明环境，尤其是白天，通常由自然采光和人工照明共同形成。自然光通过各种透光介质直接对室内照度起作用，而人工照明首先输入建筑的是电能，然后才转化为可见光，为室内照明做出贡献（见图 2-3）。所以，自然采光的利用有以下优点：

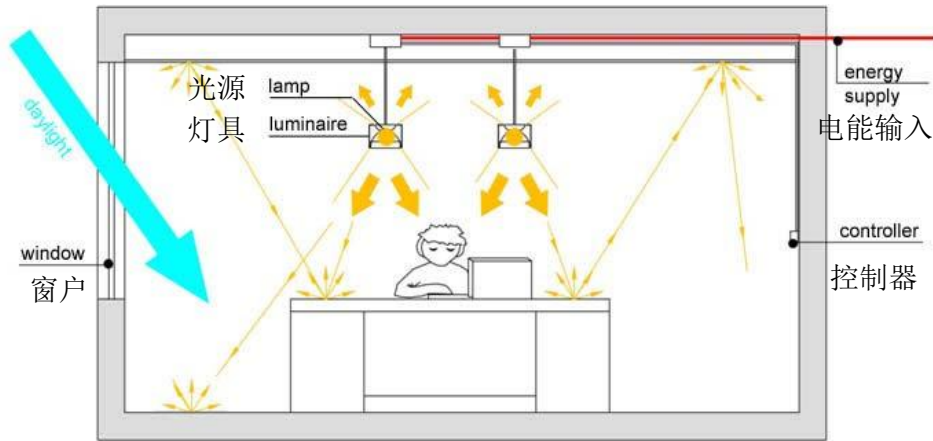


图 2-3 电能和自然光到照明的转化过程[6]

- 可以减少室内人工照明得热，降低室内暖通空调系统的制冷负荷，进而减小制冷设备的运行费用。对制冷负荷远大于加热负荷的建筑十分有效。
- 削减商业建筑白天，特别是午后的电力负荷高峰。
- 增加使用者满意度并提高工作效率<sup>[42]</sup>。
- 优化不同照明控制策略的节能效果<sup>[43]</sup>。如图 2-4 所示，不同控制方式下，建筑总能耗随天窗面积比的变化而变化，并存在一个峰值。当实际建筑的天窗面积符合峰值所示情况时，总能耗最低。

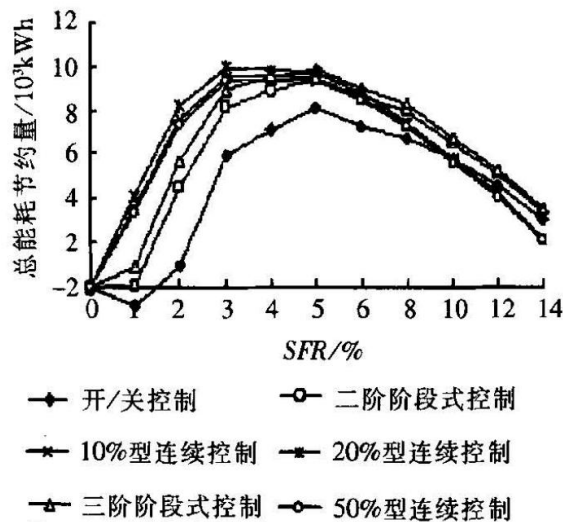


图 2-4 天窗面积比例对不同照明控制策略节能率的影响<sup>[43]</sup>

建筑本身如何影响自然采光，用什么指标可以判断日光相关控制的节能潜力，如何协调采光和照明的控制，都是本节需要讨论的问题。

## 2.2.1 自然采光利用

### 2.2.1.1 采光窗设计

从位置上,可将常见采光设计分为两类,即顶部采光(或称天窗采光),侧向采光(或称侧窗采光)和中庭采光等<sup>[44]</sup>。

#### (1) 顶部采光

优点是,光线自上而下,有利于获得较为充足与均匀的室外光线,光效果自然宜人,在现代建筑设计和室内设计中经常采用。但缺点是在直射阳光和辐射热的问题上有所不足,前者会对工作效率产生不利影响;后者则需要加强通风以解决夏日闷热现象。

天窗采光系统根据开窗形状可分为矩形天窗、锯齿形天窗、横向天窗、井形天窗和平天窗等类型。其中平天窗在公共建筑中应用较为广泛,如果使用合理,是使光线进入房间的最有效的方法。天窗通常布置成网格状,天窗之间的距离大约为地面到顶棚平面距离的1.5倍。最佳天窗窗地比可以从5%到10%或更高,具体数值根据玻璃的透射率、天窗设计的效率、需要的照度水平和顶棚的高度以及房间是否有机械空调系统而变化。大多数平天窗需要散射玻璃以控制太阳辐射,所以无法看到外面。

#### (2) 侧向采光

侧窗采光系统是在房间的一侧或两侧上开采光口,是最常用的一种采光系统。光线具有明确的方向性,有利于形成阴影,并可通过它看到室外风景,扩大视野。主要缺点是照度分布不均匀,靠近窗户的地方照度大,从窗户往里照度下降很快。一般房间的窗洞上口至房间深处的连线与地面所成的角度不小于26度,则可以保证自然光在房间进深方向的均匀性。高侧窗可以看作侧窗的特例,是一种非常好的使日光深入内部空间的方法。除了房间进深影响光线的均匀以外,建筑物的间距、窗户的面积、分布及形状都会影响房间的照度和均匀程度。

#### (3) 中庭采光

中庭最大的贡献在于提供了优良的光线和射入到平面进深最远处的可能性,使得进深较大的建筑能够自然采光,本身则成为一个自然光的收集器和分配器。而庭院、天井和建筑凹口等都可以看作中庭的特殊形式。

中庭的采光除了考虑直射光外,更主要的是光线在中庭内部界面反射形成的第二次或第三次漫反射光。中庭起了一个“光通道”的作用,面向使用空间的开口就是这条光通道的出口处,这条光通道四周的墙体决定了这一光线的强弱,以及有多少光线可照到中庭底部和进入建筑物底层房间的内部。

从单个窗的形式和辅助设施方面,又可分为带反射挡光板的采光窗,阳光凹井采光窗,水平遮阳百叶,采光高窗,棱镜窗,薄膜采光窗等。举例如下:

### (1) 带反射挡光板的采光窗

这是大面积侧面采光最常用的一种采光窗。这种窗的优点是能有效地把阳光反射到室内深处,提高靠内墙部位的照度,同时也起到降低靠窗口部位亮度,使整个室内光线分布更加均匀的作用。

### (2) 阳光凹井采光窗

这是一种接收由顶部或高侧窗入射的太阳光的比较有效的采光窗。阳光凹井分南向和北向两种。在一个内部可反射光的竖井上部或顶部开采光口,和挡光板采光窗一样将直射阳光经过反射转变成间接光。

### (3) 水平遮阳百叶

可以把太阳光直射到天花板上,增加自然光的透射深度,保证室内人员与外界的视觉沟通以及避免工作区亮度过高。

自动调节的遮阳百叶由电脑控制,可自动跟踪阳光,比较昂贵。这种窗的最大优点可自动控制射进室内的光量和热辐射。在太阳高度角比较低并且室内需要有一定热辐射的寒冷地区采用这种顶部采光窗的效果最佳。为了避免太阳直射,遮阳百叶需要频繁地转动,在太阳位置变化之后,也要及时地重新调节遮阳百叶。

#### 2.2.1.2 自然光的利用方法

对自然采光的利用主要分直接和间接两种形式。直接利用即通过某种传导方法使自然光进入建筑内部,并使其充分分配和发散,直接使用自然光满足室内视觉需求。采光窗就属于这一种,更高效的直接利用法还包括<sup>[45]</sup>:使用平面反射镜的一次反射法、导光管法、棱镜组多次反射法、光导纤维法、卫星反射法、高空聚光法等。

间接利用法是指不以太阳光原本的形式对其直接进行利用,而是存在一定的转换过程,将其转换为另外的能量形式。对太阳光的间接应用法主要有三种<sup>[45]</sup>:光—热—电—光转换法、光电效应法、太阳能高空发电法。

#### 2.2.1.3 天然采光影响因素

自然采光的影响因素主要分为两类,一类是天空条件,另一类是建筑本身条件。天空条件,主要包括时间、地点、辐射、天空亮度分布等,也就是所有与太阳辐射有关的天气参数和与太阳位置相关的地理位置信息。建筑条件,主要有建筑物的几何结构、材料的光学特性、人工照明和遮阳设施的设置、周边环境、大地反射率等。在计算自然采光时,这些因素都应予以考虑。以光环境模拟软件

Daysim 为例，如图 2-5 所示，其输入条件便包括所有这些影响因素在内。

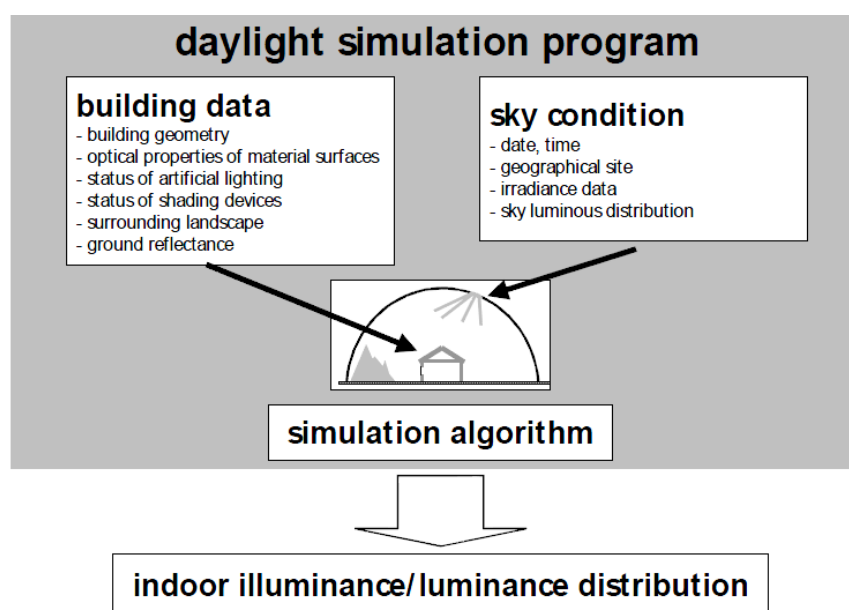


图 2-5 自然采光模拟程序输入参数<sup>[46]</sup>

为了解各个因素对于采光的影响，文献<sup>[44]</sup>分别模拟不同窗户透光率、窗台高度、窗墙面积比、窗户朝向和窗户外形情况下，阴天和晴天天空时，室内平均照度（I）随进深（D）变化的关系式，得到这些因素对室内天然光分布的影响，拟合出天然光平均照度随各参数的变化曲线，回归得到相应的方程，可知室内照度与进深基本呈 3 次方关系。而其他因素，可作为该关系中的一次或二次系数考虑。以窗台高度（H）为例，拟合公式为：

$$I = (68.83D^3 - 747.8D^2 + 2434.7D - 2236.4)H^2 + (-105.73D^3 + 1127.2D^2 - 3602.8D + 3383.4)H + 25.17D^3 - 228.28D^2 + 47.55D + 116.31 \quad (2-1)$$

I: 室内平均照度, lux

D: 进深, m

H: 窗台高度, m

这些影响因素中，窗墙比与透光率和采光平均照度是正相关的，而窗台高度与平均照度的关系中，存在临界值，在文献<sup>[44]</sup>中约为 1.2m 左右。当进深小于该值时，照度随窗台高度升高而降低。同样在小进深情况下，如果窗墙比保持不变，则采用高而窄的窗，采光条件较好。文献<sup>[13]</sup>对相同因素进行分析后，得到的结果与该结果类似。

根据上述采光分析，同样利用模拟结果，可以进一步分析得到各种情况下，利用自然光进行调光控制的节能量计算公式<sup>[2]</sup>：

$$f_d = b \left[ 1 - \exp \left( - \frac{a \tau_w A_w}{A_p} \right) \right] \frac{A_p}{A_f} \quad (2-2)$$

$f_d$  调光控制节能率%

$a, b$  综合系数

$\tau_w$  窗户可见光透过率

$A_w$  窗户采光面积  $m^2$

$A_p$  房间外区面积

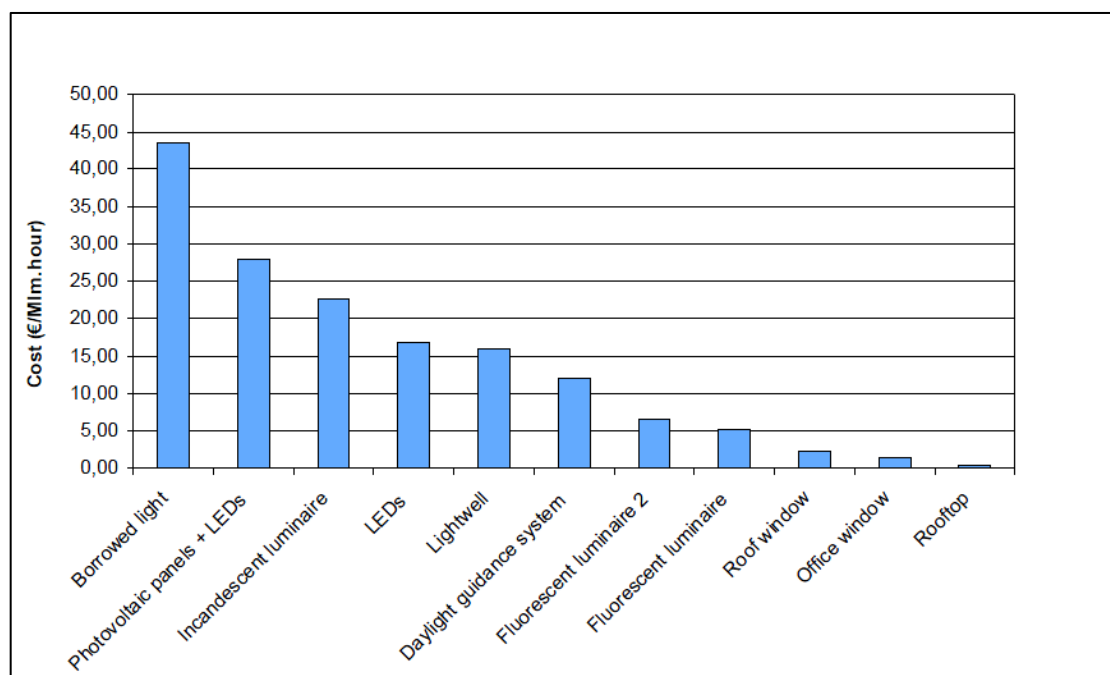
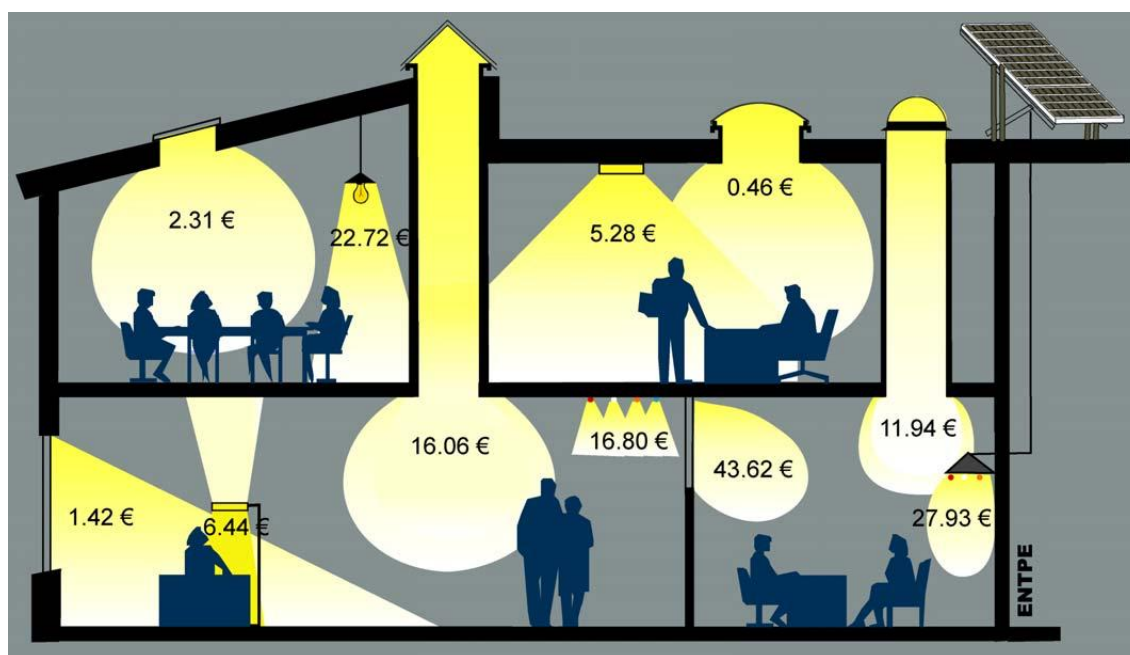
$A_f$  房间总面积

系数  $a$  和  $b$  可以根据具体情况，通过室外照度（如照度频率分布）、室内照度设定值和采光控制形式共同确定。这种方法对节能率的预测以及详细模拟结果和案例实测结果都证明<sup>[47]</sup>，在外区采光良好的系统中，调光控制节能率非常高，可达 60% 以上<sup>[47]</sup>。

#### 2.2.1.4 照明采光策略费用比较

图 2-6 和图 2-7 是研究人员对不同照明和自然采光形式进行调查后得到的运行成本比较结果。图 2-6 以柱形图形式，列举了对 11 种照明采光方案的年运行费用模拟结果，由此可知，直接采用传统的顶部采光配合采光罩，属于最经济的方式，仅需  $0.46 \text{ € / Mlm} \cdot \text{h}$ 。但这种方式只适合可以开天窗的顶层。而采光井（ $11.94 \text{ € / Mlm} \cdot \text{h}$ ）和光导系统（ $16.06 \text{ € / Mlm} \cdot \text{h}$ ）的应用方式，由于设计复杂，投资较高，折合的年运行成本仅次于使用 LED 照明（ $16.80 \text{ € / Mlm} \cdot \text{h}$ ）。其中“borrowed light”是指图 2-7 所示，采光窗所在房间的相邻房间，使用由该窗进入的自然光进行照明时的情况。其费用非常高，正说明合理进行采光设计是非常重要的，否则为照明付出的代价可能会很高。图 2-7 以图形方式，在同一栋建筑中，给出人们对以上各种照明采光方式的直观印象。



图 2-6 各种照明方案在工作平面形成有效照明的总费用<sup>[48]</sup>图 2-7 各种人工照明和自然采光技术的年运行费用<sup>[48]</sup>

## 2.2.2 自然采光动态评价标准

建筑里通过充分利用自然光究竟能够节约多少能量？或者说，某栋建筑内日光的可利用度有多高？常见的方法是使用采光系数（Daylight Factor, DF），即室内目标点上的照度与全阴天下室外水平面照度的比值，来评价采光条件。这一衡

量标准代表了全年中最不利的天气条件下对天然光的利用程度。

然而，该系数由于其定义所限，只代表建筑本身的形式对采光的作用，既与建筑的位置和朝向没有关系，也无法完全体现开口位置对采光效果的影响。所以，无法全面回答开头提出的问题，常作为复杂模拟中的辅助评价指标。

由此，产生了自然采光的动态评价标准来解决先前的问题。最常用的基本标准是用 Daylight Autonomy (DA)，即“全年采光满足率”，或称为“全自然采光时间百分比”来衡量。而 Daysim 等动态模拟软件，就是以该值作为预测“日光照明”节能量的标准的。该物理量定义为：建筑中某一点上，全年工作时间内单独依靠自然采光就能达到最小照度要求的时间百分比，最小照度对应于可以安全和舒适的完成某一特定任务所需的最小设计照度<sup>[16]</sup>。现在很多利用软件模拟进行节能潜力分析的文章基本都采用这一指标对日光相关开关控制方式进行节能分析。

由于该指标只能衡量理想情况下，开关控制时，由于日光充足而关闭人工照明的时间百分比，还不够全面。所以，由此又衍生出一些相关的动态评价指标<sup>1</sup>：

#### 2.2.2.1 有效全自然采光时间百分比 (Useful Daylight Autonomy, UDA)

定义：在自然采光条件下，工作平面照度在舒适区间内（如 100lux 以上，2000lux 以下）的时间百分比。

或称为 UDI，即 Useful Daylight Illuminance。使用该指标可以明确全自然采光时，照度不足、照度合适和可能发生眩光这三种情况的时间比例，单独评价采光有效的时间。

#### 2.2.2.2 最大全自然采光时间百分比 (Maximum Daylight Autonomy, DA<sub>max</sub>)

定义：以十倍于最小设计照度的值作为上限阈值，高于此阈值的时间占工作时间百分比。

使用该指标主要为了衡量固定位置上发生眩光的可能性，查找建筑中直射眩光出现频率最高的地方。

#### 2.2.2.3 连续全自然采光时间百分比 (Continuous Daylight Autonomy, DA<sub>con</sub>)

定义：在自然采光照度低于最小设计值时，采用权衡系数的方式综合考察其不满足程度。具体做法是用某点某时刻照度除以最小设计照度，描述此刻的采光效果。

---

<sup>1</sup> 动态评价指标均参考定义后译自英文名称，概念较新，中文名称还未统一，不同文献中可能不同。

使用该指标尤其对全采光时不满足照度设计值的情况有很好的衡量效果，可以代表自然光对视觉需求的贡献。其不足的部分，即是人工照明应补充的部分。调光控制时，是重要的判断标准。

#### 2.2.2.4 全年光暴露量 (Annual Light Exposure)

定义：室内某点在全年中所接受到的可见光总量，单位为勒克斯·时 (lx·h)。

主要用于对光线比较敏感的建筑，如博物馆等，衡量其接受日光辐射的总量，避免长时间、大剂量光照下会加速藏品老化。

我国现行的采光国家标准中，尚未对这些动态指标提出要求，但部分推荐性规范和可持续建筑认证标准中，例如 DGNB (Deutsche Gütesiegel für Nachhaltiges Bauen, 德国可持续建筑认证<sup>[49]</sup>) 等，已对某些指标提出要求，以便为可持续建筑和建筑节能明确设计方向。如 DGNB 新建建筑认证中，在视觉舒适一项里，要求固定工作位置上的全年连续全自然采光百分比在 45% 以上，若达 80% 则可获得最高分。

## 2.3 人员使用影响

建筑形式、天气状况、照明控制策略等，基本都是在设计阶段就已确定的照明能耗影响要素。作为电量的实际消耗者，即建筑使用者，几乎无法对这些要素进行控制。另一方面，使用者的“行为模式”又对照明实际耗电量有很大影响。建筑节能是由工程技术、文化理念、生活方式、社会公平等多方面问题综合影响的系统工程。在这些因素中，生活方式和人的行为对建筑能耗的影响占有极其重要的地位。虽然目前建筑节能领域的焦点很注重于技术和设备的堆砌，但是大量的事实已经说明单纯采用大集中、高效率、高技术（自动控制）和加入可再生能源的途径是无法有效达到节能减排的目的，甚至会适得其反<sup>[50]</sup>。因此，现在很多研究都开始将人为因素作为考虑对象，以寻找一条科学的、可持续发展的建筑节能路线。在实验研究方面，主要是对使用者进行长期监测观察，归纳行为模式；而理论研究方面，发展出了可用于建筑性能模拟的人员行为模式模拟的方法，对人的行为进行较为明确的定义和分类。

关于人的行为的实地测试比较多。T. Moore. BSc. 博士<sup>[51]</sup>等人，在对英国境内 14 个长期运行的开敞式办公室进行短期单次调查的基础上，选取其中 4 个，进行了为期 4-7 个月不等的长时间的观测记录。这些办公室的使用者对于照明系统有一定的控制可能性，包括手动开启、关闭照明、远程照明遥控启停、人员探测自动控制照明启/停、调整光照亮度等。长期调查的结果证实，照明的平均使

用率约为 54%。开灯的动作发生频率远高于关灯动作。一旦照明开启，用户便很少对照明系统进行关闭或调光的操作。对照度高低的接受情况也非常个人化，范围由 90 到 770lux 不等。

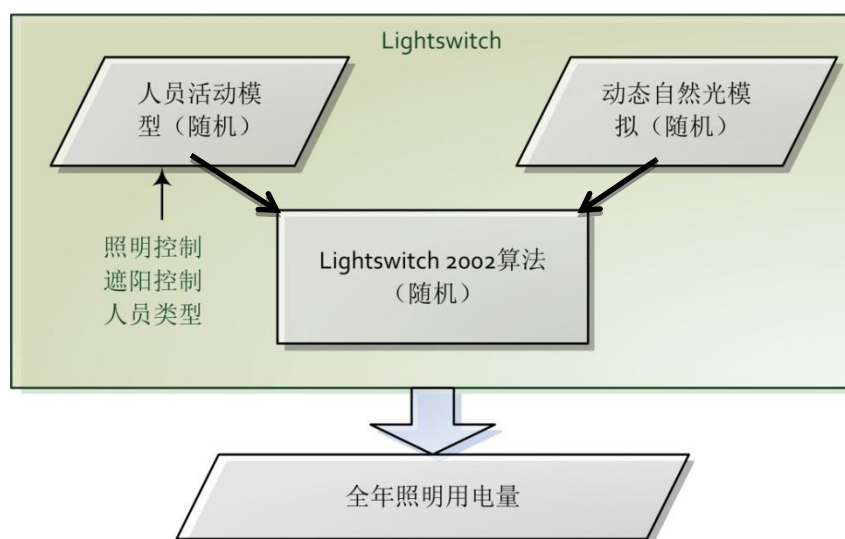
为了预测不同行为模式对照明能耗的影响，建筑性能模拟中已加入了行为模拟。简单常用的做法是以时间表为输入，体现不同时刻人员情况不同时，照明的相应变化。或者以随机数模拟人手动的控制行为，例如 ESP-r 中，就包含亨特随机算法（Hunt stochastic algorithm）<sup>[52]</sup>，用于模拟手动开灯、关灯。

以类似上述调查的实地研究，为人员行为的预测提供基础。这里的行为，包括调节光照水平、消除直射眩光以及根据物理条件进行节能控制等。人员行为模式是在建筑建成之后，唯一能够影响照明能耗的人为因素。所谓模式，也就是使用行为的习惯性。虽然用户对照明的控制方法和方式各不相同，但大都会保持一定的主动性和习惯性。以这种习惯性为基础，加拿大国家研究委员会（National Research Council Canada）<sup>[53]</sup>总结推出了一套行为模式算法 Lightswitch-2002，可以将人的行为生成时间表，用于建筑运行能耗计算。基本运算过程见图 2-8。

在这种算法中，定义了四种基本用户行为类型，如表 2-1 所列。

表 2-1 Lightswitch 中用户行为类型的定义<sup>[53]</sup>

照明控制	遮阳控制	用户行为类型定义
主动	主动	根据环境照明情况控制人工照明设施，早晨打开遮阳，而白天则视情况部分关闭以避免直射阳光
被动	主动	工作日白天一直保持人工照明设施处于开启状态，在早晨打开遮阳，而白天则视情况部分关闭以避免直射阳光
主动	被动	根据环境照明情况控制人工照明设施，全年中保持遮阳处于部分关闭状态以避免直射阳光
被动	被动	工作日全天一直保持人工照明设施处于开启状态，全年中保持遮阳处于部分关闭状态以避免直射阳光

图 2-8 Lightswitch-2002 模型基本计算过程<sup>[53]</sup>

这种算法已被开发为模型，应用于 Daysim 和 LightswitchWizard 中<sup>[17]</sup>，它不仅可用于人员对于遮阳设备和照明系统控制行为的定义输入，还可以与其他自动控制方式，如调光控制和人员检测自动控制相结合，进行比较全面的照明控制模拟。然而它也存在缺陷，那就是更适用于 1-2 人的小办公室。因为开敞办公室可能有多个控制分区，无法简单用 0 或 1 这样简单的数字描述清楚。通过启用这样的人员行为模拟，可以使模拟结果中的建筑总能耗减少约 60%<sup>[54]</sup>。

此外，基于“人行为是通过对室内的设备作用进而影响建筑能耗”的理念，有学者<sup>[50]</sup>提出另外一种的对人行为的定义标准，规定了可用于模拟的标准人行为定义文档格式。

明确研究对象为：房间里由人行为作用并会对建筑能耗产生影响的建筑设备，包括可以调节的建筑结构部分（如窗户、窗帘、遮阳），灯光和室内的设备等。

运行模式定义为：建筑中研究对象受人行为作用，状态发生不同类型的变化的规律。具体分为三类：

### 1. 开环模式（Open-loop）（Command）

研究对象状态的变化不受其产生的结果反馈的影响，通常依据确定的时间表，或者有固定的周期和频率。

### 2. 闭环模式（Closed-loop）（Control）

研究对象状态的变化受到其产生结果反馈的影响，将希望值与变化产生的结果进行比较，并根据之间的误差调整状态。通常有相应的希望值和反馈逻辑。

### 3. 随机模式（Random）

研究对象状态变化无确定规律，随机进行。

目前，该定义文档格式还仅限于住宅建筑内适用，它把研究对象从原来只有人的行为对建筑能耗的影响作为单一输入的“黑盒子”模式，改变为以建筑设备为核心或中间连接主体的更精确的方法。

对于行为的模拟，大致可分为三个级别，如图 2-9 所示。从简单到最复杂。前面提到的 Lightswitch 算法就属于第二级，运用模块 SHOCC，即 Sub-Hourly Occupancy Control（逐时人员控制）即可实现该算法。模块只涉及人员行为与环境参数的关系。图中的 USSU 是 User Simulation of Space Utilization（空间利用的人员模拟）的简称，可以比 SHOCC 更为精细、全面的进行人员模拟<sup>[55]</sup>。其依据是该空间用途、空间连接部分内人员的活动、主要使用者的工作性质等。

Resolution/complexity ↓ High	Low	<b>Simple user behavior</b>
		Standard user profiles (averaged values or minimum and maximum values)
	↓	<b>Advanced user behavior I</b>
		SHOCC (simulation of the interaction between the user and its environment)
		<b>Advanced user behavior II</b>
		SHOCC (simulation of the interaction between the user and its environment) + USSU (complex mobility prediction)

图 2-9 行为模拟级别<sup>[55]</sup>

## 2.4 小结

从这章分析可知，照明控制方式会影响照明系统的能耗。适当的控制方式会对照明降耗起到积极的作用。但相同的控制方式对不同建筑形式、不同建筑类型的照明能耗影响不尽相同。人员探测的控制方式首先会受到房间使用率的影响，其次，与其延迟关闭时间的长短也有关系。而日光相关控制的使用，则应同时考虑桌面照度设定值和自然采光条件的影响。当照度设定值较低时，采用开关控制即可；反之，应使用调光控制。利用自然采光的动态评价指标可以衡量某栋建筑或某个房间使用自然采光相关控制的节能率，并对自然光可能引起的眩光情况进行预测。此外，该控制模式也会受到用户行为模式的影响，如用户主动调光，或对遮阳进行操作等。总之，分析照明控制方式的节能率时，需要对具体建筑和具体使用情况进行全面考量，其中最重要的两个因素，就是自然采光情况和用户行为模式。

## 第3章 照明控制系统实验台

### 3.1 实验台搭建背景

随着节能压力的不断加大,智能照明控制系统因其优异的节能效果受到越来越广泛的重视。它不仅可实现对自然光的充分利用,还可以配合智能建筑系统,实现统一监测管理。另外,还有数据表明,采用照明节能措施是最经济的二氧化碳减排方式之一<sup>[6]</sup>。在这样的背景下,欧司朗公司决定资助同济大学进行一个实验项目,主要包括以下内容和目的:

1. 研究并应用智能照明控制系统;
2. 安装监测系统,长期跟踪记录智能照明控制系统能耗;
3. 后续计划:利用实验台对系统优化进行研究,推广到整栋建筑范围,建立节能示范建筑,验证实验结果。

为实现上述目标,决定选用同济大学综合楼某办公室为实验台场地,搭建智能照明系统实验台。实验台搭建之前,原照明系统为简单分区开关手动控制。实验台建成后,原有设备替换为新型节能的照明设备,包括光源、镇流器和灯具,并增加智能照明控制系统。所使用的产品包括 DALI MULTI 3 控制器、可调光荧光灯、可调光高频电子镇流器和专业型灯盘。同时分区配置人员感应及照度测量二合一传感器,为控制器提供输入信号,以实现自动控制策略。

#### 3.1.1 实验台所在办公室原始情况

用于搭建实验台的办公室位于建筑 8 楼西侧角落,分别朝西南、西北向开有平窗,双向侧采光。长宽均为 15m 左右。

整间办公室由三个区域组成:开敞型办公室,会议室和个人办公室。平面图见图 3-3。其中,开敞型办公室内灯盘吊顶安装,其他两区嵌入式吸顶安装。光源均为飞利浦直管日光型荧光灯,单只灯管功率 36W,每个灯盘内装三支灯管;门厅内 4 盏筒灯,各装 2 支 13W 紧凑型荧光灯。具体灯具分布如图 3-4 所示,包括紧凑型荧光灯,其装机总功率为 2.696kW,按照建筑总面积 216m<sup>2</sup> 计算,可知照明安装功率密度为 12.5W/m<sup>2</sup>,不包括镇流器。中国照明设计标准规定的功率密度是 11W/m<sup>2</sup>,且目标值为 9W/m<sup>2</sup>。可见该办公室的照明系统确有节能潜力。



图 3-1 开敞办公室原有照明



图 3-2 会议室原有照明

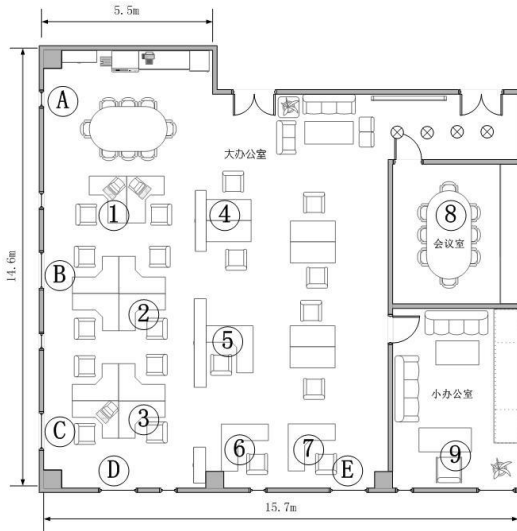


图 3-3 办公室平面图和照度测试点分布



图 3-4 灯具布置图

光源启停通过配电箱内闸刀开关手动控制，共分 7 个回路。会议室和小办公室内单独装有手动门铃开关，在闸刀开关联通时，可用于各自区域内照明的启停控制。

2009 年 3 月 28 日对桌面的照明水平用手持式照度仪进行了三次测试。当天为晴天。每次在室内选取 9 个测点，如图 3-3 所示 1-9；靠窗位置选取 5 个测点，即图 3-3 点 A 到 E。第一次开始于 16:10，照明全开，属于自然采光和人工照明的混合照明情况；第二次开始于 16:15，照明全关，纯自然采光；第三次开始于 18:00，此时室外已全黑，照明全开，未对窗户附近测点进行测试。结果证明，在人工照明正常运行时，作业面高度各处照度值均满足国家标准要求的 300lux<sup>[12]</sup>，详见表 3-1。



表 3-1 实验台搭建前工作面照度测试值

测试时间	16:10	16:15	18:00
1	447	57.7	387
2	373	16.2	325
3	500	107.7	435
4	389	4.0	354
5	342	7.3	379
6	574	29.7	510
7	555	4.4	520
8	469	1.2	474
9	541	32.0	430
A	1640		-
B	1630		-
C	1560		-
D	1748		-
E	1440		-

整个办公区域在所有灯开启的情况下,实测照明回路总功率为 3.1kW~3.2kW (波动为不同时刻供电电压、频率的差异所致),功率密度约为 13.7W/m<sup>2</sup>,包括镇流器。

### 3.1.2 日光利用潜力

由于自然采光对于照明策略的节能效果有很大影响,所以先对实验台搭建的办公室进行日光利用潜力的分析,包括实际数据的统计和动态光环境仿真两部分。

#### 3.1.2.1 实际数据统计

统计在关灯情况下全天的照度数据,可以得到办公室本身的自然采光的可利用程度。图 3-5 中的照度频率取自 2011.9.24-2011.10.30 期间,周六和周日完全没有人工照明时 8:00-16:59 的逐分钟数据。SW, NW 分别是西南向窗口和西北向窗口的照度传感器采集的数据。LUX\_1 到 LUX\_6 对应的传感器位置参见章节 3.2.1.2 中图 3-14。由图可见,在完全自然采光的情况下,传感器 4、5 所在的位置,由于离两边的窗户都较远,大部分时间内高于 300lux 的照明要求都无法得到满足。传感器 1、2、3、6 的位置,则只有约 20%的时间照度低于 300lux,需要补充人工照明,其余时间仅用日光即可达到要求。而其中传感器 1-3,随着到西南窗距离的减少,日光的可利用程度也越来越高。传感器 6 靠近西南窗,所以其采光情况主要取决于红色曲线 SW。而 NW 到这个位置有一定距离,中间还有

较高的家具阻隔，因此对其影响很小。总体上，室内日光的可利用程度很高。更详细的日光可用度分析由模拟计算完成。

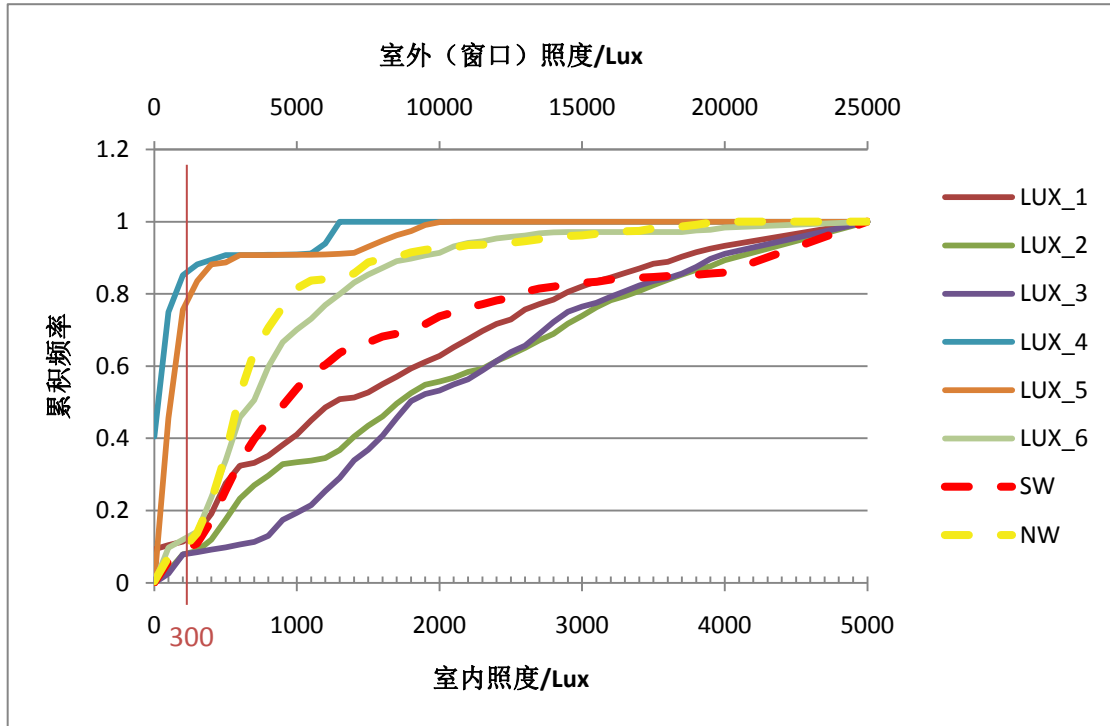


图 3-5 自然采光条件下的照度累积频率

### 3.1.2.2 采光情况模拟

根据搭建实验台的实际办公室，在 Ecotect 环境中，建立建筑模型。其中包括该办公室外围护结构上的采光部分，即窗口位置和尺寸，以及室内玻璃隔墙、会遮挡光线的家具等。然后利用 Ecotect 软件的导出功能，生成符合 Daysim 要求的输入文件，用 Daysim 进行模拟计算。该软件可以导入 epw 格式的完整天气文件，并生成步长为 5min（默认值，也可以自由选择最小为 1min 的其他值）的适于光环境模拟的 wea 格式文件。当然，也可以直接导入 wea 格式天气文件。本文中模拟用的天气参数选择 EnergyPlus 网站上提供的上海地区 CHN\_Shanghai.Shanghai.583620\_SWERA.epw。人的控制行为选项，设置为手动开关模式。

建筑平面内共有三个区域。开敞办公室为双向侧面采光，西南向 6 个窗，西北向 5 个。小办公室为西南向侧面采光，此外，可以接受一部分通过玻璃隔墙射入的来自大办公室的光线。会议室与小办公室间的隔墙不透光，但与大办公室之间为透明玻璃隔墙，所以也可利用部分自然采光。图 3-6 和图 3-7 分别为建筑模型平面图和三维视图。其中，在平面图里可看到三个区域的划分。由于书柜较高，约两米，对阳光有遮挡作用，所以，也在建模过程中对其加以考虑。

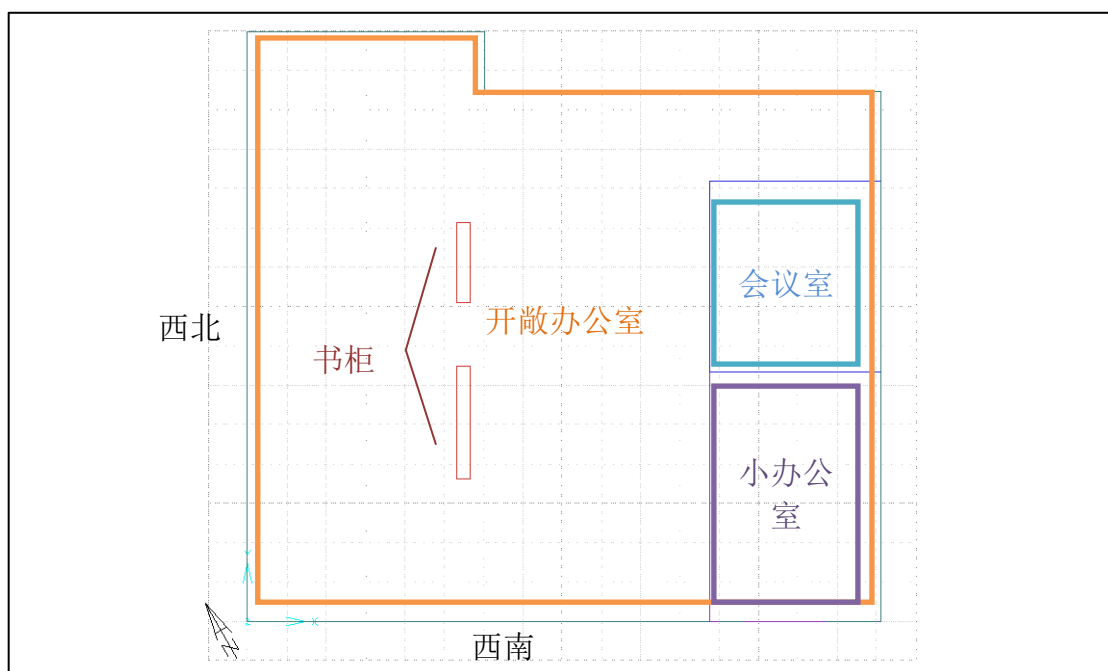


图 3-6 建筑模型平面分区示意图

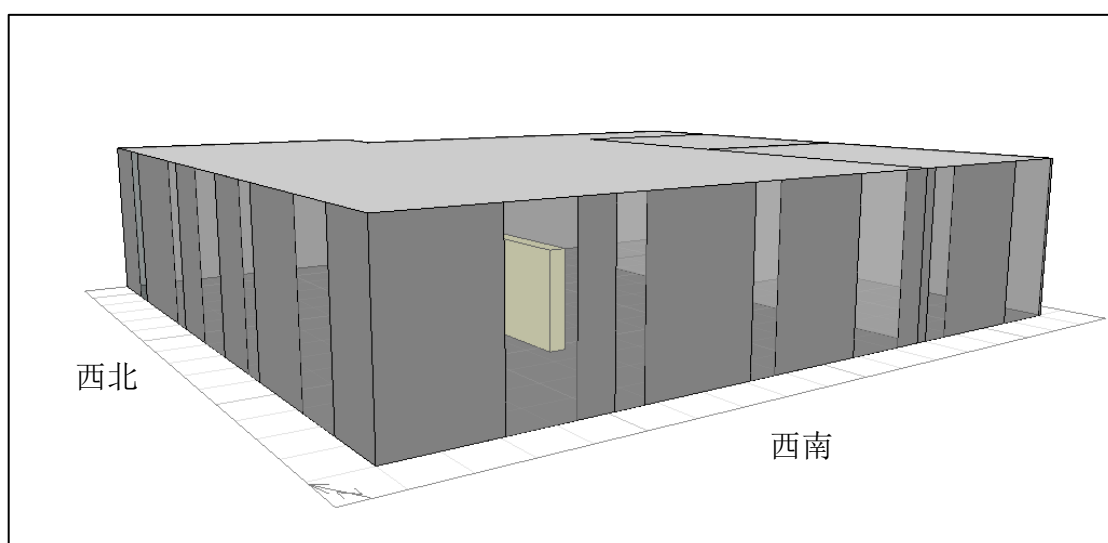


图 3-7 办公室的建筑模型，采光立面

按照《建筑照明设计标准》<sup>[12]</sup>，普通办公室内工作平面（作业面）上的维持平均照度值应为 300lux。实验台所在办公室的使用时间在早 8 点到晚 5 点之间。根据这两个条件计算出 Perez 天空模型下的动态采光评价指标结果显示于图 3-9 到图 3-11 中，分别对应全自然采光时间百分比（DA）、100 到 2000lux 有效全自然采光时间指数（UDI<sub>100-2000</sub>）以及最大全自然采光时间百分比（DA<sub>max</sub>）。静态指标采光系数（DF）的结果显示于图 3-8 中。各指标的定义详见第 2 章中“自然采光利用”一节。图 3-8 中编号与实验台测试用传感器位置相同（参见章节

3.2.1.2), 亦即对应于上一节重点 LUX\_1 至 LUX\_6。各位置上的模拟结果列于表 3-2 中。

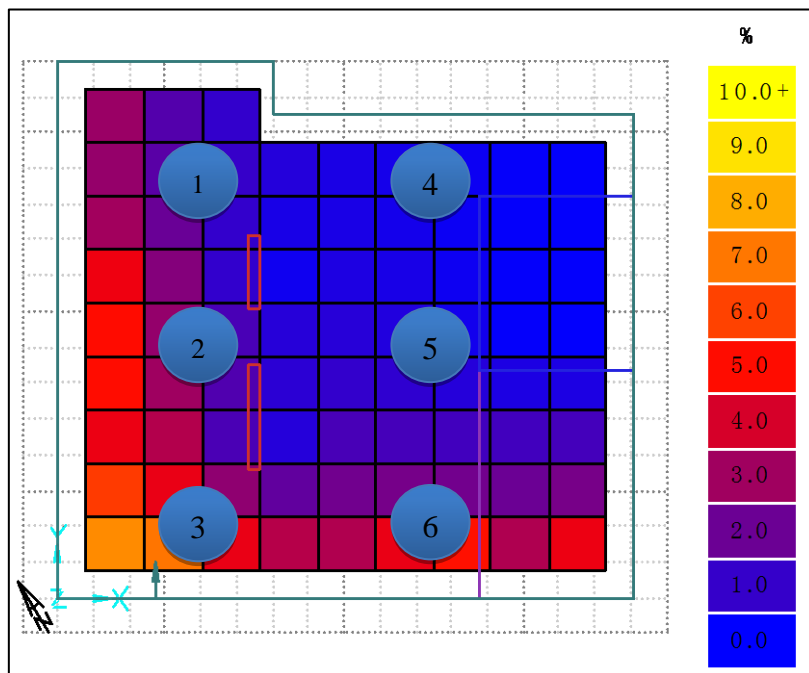


图 3-8 实验台所在办公室采光系数 (DF) 分布

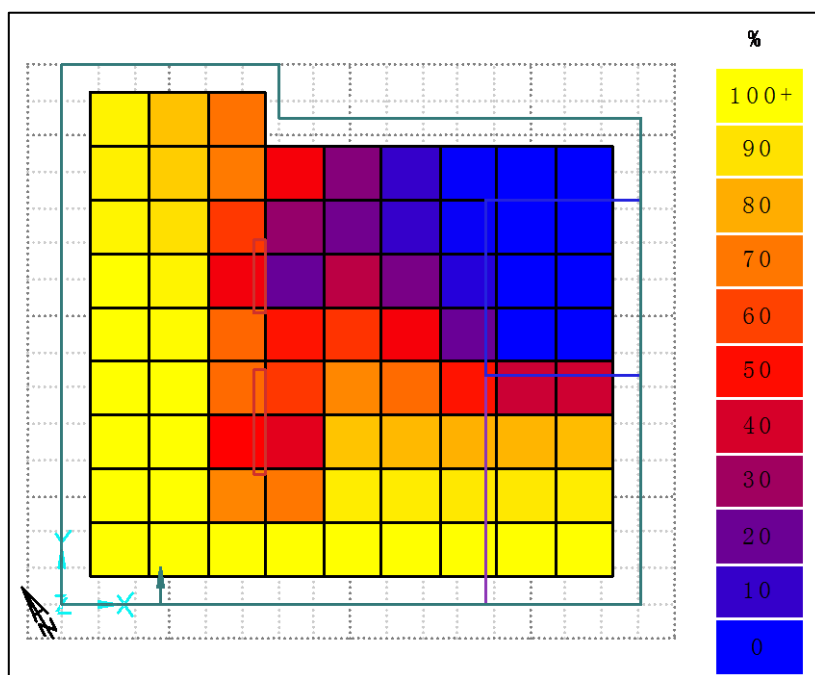


图 3-9 实验台所在办公室全自然采光满足率 (DA) 分布

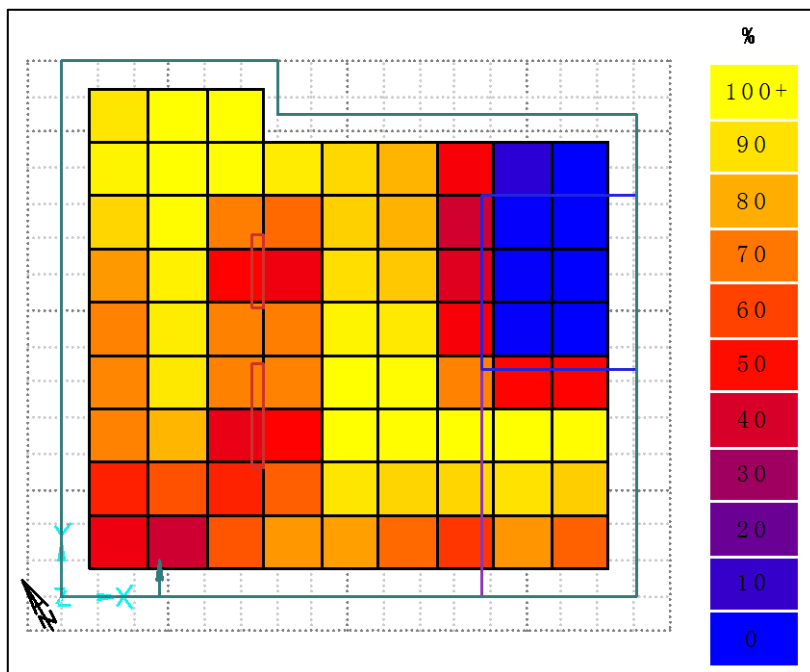


图 3-10 实验台所在办公室有效全自然采光时间指数 (UDI<sub>100-2000</sub>) 分布

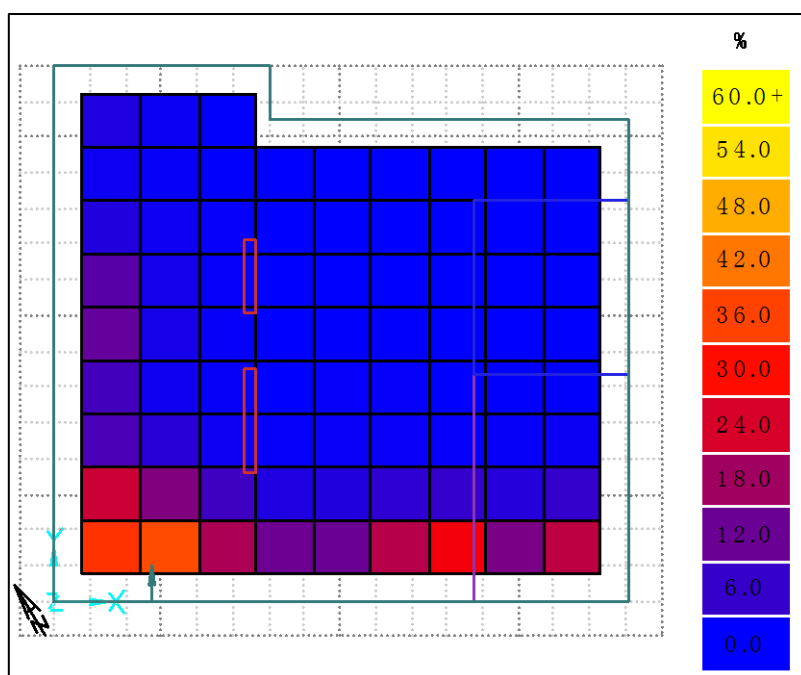


图 3-11 实验台所在办公室最大全自然采光时间百分比 (DA<sub>max</sub>) 分布

表 3-2 办公室可利用日光潜力

No.	DF [%]	DA [%]	DAcon [%]	DAmax [%]	UDI<100 [%]	UDI100-2000 [%]	UDI>2000 [%]	annual light exposure [lux·h]
1	1.3	82	93	1	3	95	3	2,239,592
2	2.3	94	97	2	1	95	4	3,636,473

3	4.5	98	99	17	1	58	42	8,605,041
4	0.4	13	64	0	15	85	0	746,283
5	0.8	63	86	1	5	93	2	1,580,455
6	2.7	95	98	6	1	85	13	5,108,322

总结自然采光模拟结果，只有 39% 的总面积内，采光系数 (DF) 达到 2% 以上。不满足 LEED-NC2.1 中第 8.1 条的要求<sup>[56]</sup>，采光系数达 2% 以上的面积未超过 75%。全自然采光时间百分比 (DA) 在 90% 以上的面积占整个办公室区域 45%。有效全自然采光时间百分比 (UDI<sub>100-2000</sub>) 高于 90% 的面积占 47%。外区部分，较多时间内 UDI>2000 的面积比例很高，可能因直射造成不舒适。连续全自然采光时间百分比 (DA<sub>con</sub>) 在 85% 面积范围内超过 80%。最大全自然采光时间百分比 (DA<sub>max</sub>) 超过 5% 的面积约有 30%，在这些区域内可能有眩光产生。

总体上，除北部角落处之外，该办公室内大部分面积都有很好的日光利用潜力，但存在自然采光不够均匀的问题，部分区域内可能有出现过强太阳光直射的危险。比较 DA 的模拟结果，外区部分，即传感器 1~3 和传感器 6 与图 3-5 中标示的实际测量值接近，均在 80% 以上。这一结果说明，在使用照度感应开关控制方式控制照明时，最理想的情况下，外区人工照明只需在办公室使用时间的 20% 时长内运行即可满足照明需求。

### 3.1.3 实验台照明系统

由日光利用潜力的分析可知，该办公室内利用自然光相关控制进行照明节能的潜力较大。所以，在搭建实验台时，不仅使用节能型高效灯具替换了原有照明设备，还配备了智能照明控制器，可以同时实现人员探测和日光相关控制的功能。

节能型灯具方面，用额定功率 18W 的 T5 灯管替换全部原有的 36W 灯管，紧凑型荧光灯不变。这样可使功率密度由原先的 12.5W/m<sup>2</sup> 降低至 9.8W/m<sup>2</sup>，低于标准规定的现行值 11W/m<sup>2</sup>，接近国标节能目标值 9W/m<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。简单计算，若控制方法保持不变，则可节能 20%。

控制系统方面，开放式办公区域内，根据进深和功能，分四个区安装 DALI MULTI 3 控制器，配合使用人员、照度二合一的传感器。每个控制分区内，使用 1~2 个不等的传感器作为反馈信号输入。每组传感器负责的控制分区如图 3-12。在默认的全自动控制模式下，若检测到人员在当前区域内，或当前照度低于预定设置值，则自动开灯。当区域内连续 15 分钟检测不到人员在场，或照度满足需求时，照明系统自动关闭。人员信号不共享，分散控制，即只有检测到人员信号的区域开启照明，其他区域的光源保持关闭。小办公室也采用同样的控制系统。

在会议室内，采用旋钮开关控制两盏灯的亮度。旋转旋钮即可调节光源亮度，

点按旋钮可实现开关功能。

原有系统的强电线路，除跳线合并至三相母线并加装测量用电表外，不做改动，仅增加控制、信号用弱电线路。

为了对比各种策略的效果，同时选择同一建筑7楼的房间，加装照明电路的智能电表，作为对比办公室。该办公室与实验台所在房间的分隔、朝向等完全一致，属于标准层同一位置的房间。照明系统也和实验台搭建以前，原有的照明系统完全相同。



图 3-12 照明控制分区及相应传感器

### 3.2 测量和数据记录系统

按照实验台的搭建计划，在全部照明设备安装好之后，扩展安装了实时监测系统。该系统能够满足以下要求：

1. 实时测量照明系统相关数据，并展示在显示屏幕上；
2. 定时记录数据，形成数据库，方便数据后期处理；
3. 为避免数据库过大，分析使用不便，制定自动输出程序，定期建立和保存新的存档数据表，同时清空原数据库；
4. 测量物理量包括：窗户附近照度、控制点照度、功率、总电量。

### 3.2.1 系统硬件组成

测试系统主要以 PLC 为数据采集核心，配合台式机进行实时记录和在线显示，实际测量由照度传感器和智能电表完成。系统组成示意图见图 3-13。

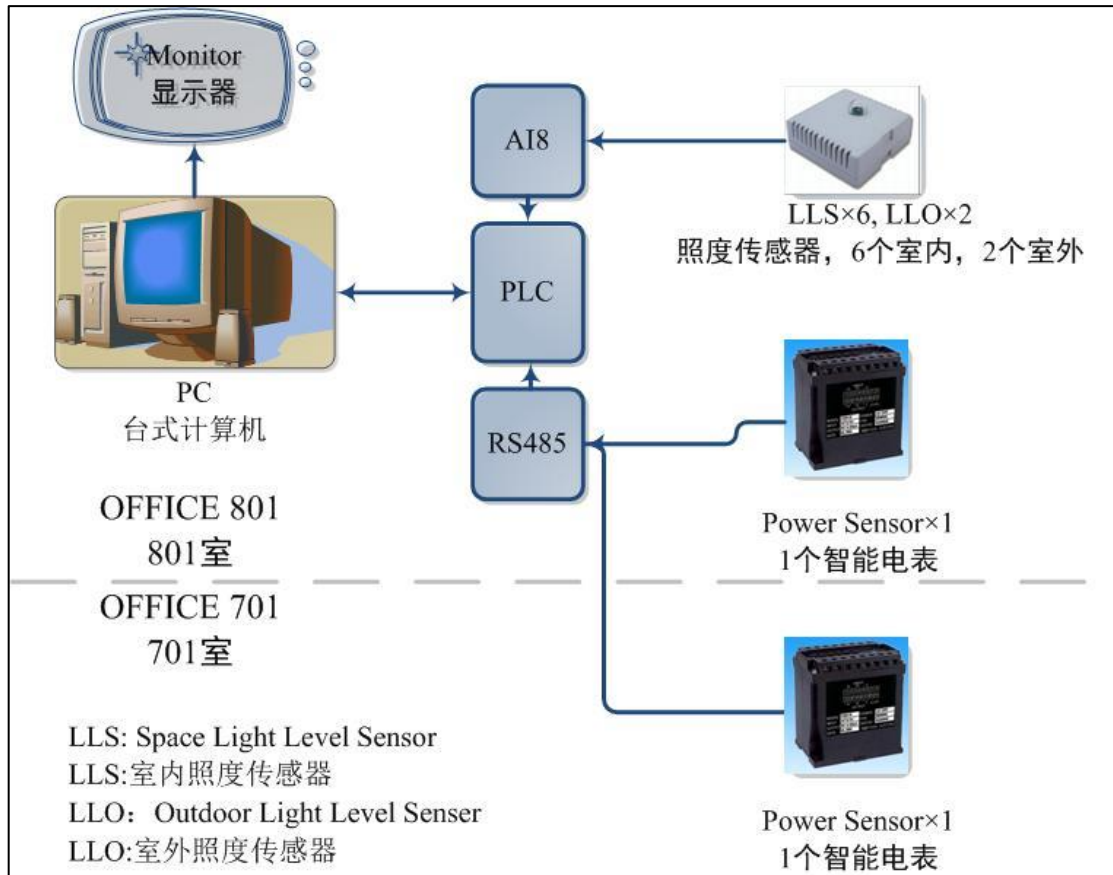


图 3-13 测试系统组成示意图

#### 3.2.1.1 数据采集核心

通常用于数据测量和记录的设备，都是商业化的成套数据采集系统，例如美国国家仪器有限公司（National Instruments，简称 NI）出品的 DAQ 系列设备，由于其可支持多种通用接口形式，进行数据采集时有全面的信号处理系统，可接受的输入信号范围很广，而且驱动程序完善易用，受到众多专家学者的青睐。和该系统配套使用的数据采集处理软件 LabView，更可谓是同类型软件中的佼佼者，操作界面友好，容易上手，可以生产多种形式的图表，对数据的比较和处理灵活多样。然而，该套系统的价格比较昂贵，即使配套使用国产的数据采集软件，总体成本仍较高。同时，市场上同类型的国产产品虽价格低廉，类似设备仅不到 NI 品牌的十分之一，多数厂商随产品附送数据处理的编程服务。但这些产品质量很难得到保证。所以，经过选择比较，决定选取 PLC 设备作为整个检测系统



的核心，负责数据初步采集工作，连接存储设备和传感器。使用这种设备，还可以取得比专用数据采集设备更强的扩展性，为将来增加更多的输入、输出设备提供可能，系统组成更灵活。

本实验台的 PLC 模块采用了菲尼克斯 ILC 130 ETH, 自带网线接口和 RS 232 接口用于与台式机通信, 另包含一路 DO 和两路 DI, 只支持本地 Inline 总线连接, 不支持远程 Interbus。根据测试点个数, 配置 AI8 模块一个, 用于照度传感器的电流信号输入。和该模块配合使用的编程软件是 PC Worx, 可通过程序、功能和功能块等的组合, 实现测试功能, 下装到 PLC 即可。

### 3.2.1.2 照度传感器

由于控制系统内的照度传感器是二合一的, 而且输出信号专用于 DALI 接口, 为数字信号, 不符合监测系统的要求, 所以需要另外加装照度传感器。这种传感器较难寻找, 与数据采集系统情况类似, 价格便宜的厂商大多数规模较小, 质量无法保证。另外, 市场上大多数的产品处于原器件级别, 无法直接输出标准信号, 甚至需自行标定且没有可用的包装。而用于照明控制的传感器, 大部分由照明控制器的厂商生产开发, 只适用于特定系统, 输出信号不符合测试的要求。本实验台最终选择了英国卓灵 (TREND) 的室外、室内照度传感器, 测试范围从 10lux 到 20000lux, 对应线性输出 4~20mA 标准信号, 工作电压为 24V 直流, 与 PLC 工作电压相同, 可共用交直流转换电源。安装位置紧邻控制用传感器, 另外两个装于窗玻璃室内侧, 一个朝西南, 一个朝西北。照度传感器的对应编号见图 3-14。NW 代表 northwest, 即西北方向的传感器, SW 代表 southwest, 即西南方向的传感器。在数据记录中, NW 和 SW 分别以 LUX\_7 和 LUX\_8 代替, 而在显示界面上 (参见图 3-17), 分别显示在 III. NW 和 III. SW 中。

由于室内的采光情况不仅与太阳对地球的辐射本身有关, 还与透明窗的尺寸、玻璃材质等有关系, 所以分析室外照度对室内情况影响的时候, 采取窗口旁的照度传感器读数代表实际有效的、透过窗户射进房间内的照度为参考标准。这样, 可以将窗户的透光率等因素直接考虑进去。所以, 数据记录中的 LUX\_7 (即 SW) 和 LUX\_8 (即 NW) 实际代表的是“有效室外照度”。



图 3-14 测试用传感器编号示意图

### 3.2.1.3 智能电表

智能电表用于测量、记录照明电路的用电情况。电表与台式机之间的通讯可通过屏蔽双绞线连接 RS-485 接口实现，以半双工形式在接获台式机的“请求数据”指令后，以“发送数据”给台式机作为响应。虽然电表也可以用标准电流信号的形式输出所测电路的实时功率，但电流信号在两个楼层间的远距离传递可能导致测量误差加大，且不包含总电能，相、线电压，功率因数等其他可用的电路信息，所以，选择使用 RS485 形式。

### 3.2.1.4 记录存储设备

台式计算机即为普通的个人电脑，长期运行，用于对 PLC 采集到的各物理量测试值进行实时记录。同时，将采集到的信号在显示器上进行可视化，便于监测。由于照明系统稳定运行时，功率变化并不剧烈，所以设置的采样周期较长，现在设为 1min。后台运行数据库，附带自动输出程序，负责自动存档备份并清空数据库的任务。

## 3.2.2 相关程序

具备测试硬件之后，还需要在台式机上，通过软件将 PLC 采集到的数据进行可视化处理和自动录入数据库的操作。

### 3.2.2.1 PC Worx

PC Worx 在系统中的功能是为 PLC 编写程序，为 PLC 调试和在线显示提供平台，驱动 AI8 模块和 RS485 端口模块，将原始信号转化为有意义的物理量。

AI8 方面，采用 AnalogTechnology 库文件中的 IL\_AI\_8\_V2 功能块对硬件进行设置，包括可用通道数，各通道测量范围（电压或电流，信号标准等）。

对 RS485 的端口设置较为复杂。首先，为保证主从设备间严格的半双工通讯条件，必须编写相应的发送和接收触发程序，避免运行错误。其次，根据通讯设备要求，本文中即智能电表的要求，采用 ModBus 通讯协议，故而选择通讯库 Communication 中的 IL\_RS485\_TRANSPAR\_V1\_00 对模块 IL\_RS485\_512x2048\_V1\_10 进行设置，其波特率、数据宽度等按照设备要求选择。

虽然该软件也可应用调试功能让传感器传来的数据在线显示，但无法生成单纯的显示界面。

### 3.2.2.2 Visu+

Visu+是菲尼克斯公司针对自家控制器开发的数据采集和处理用的组态软件。将 PLC 所用变量的 OPC 属性打钩，即可利用 OPC 将该变量读入 Visu+的程序中去。

数据自动记录也是通过 Visu+创建数据库并定时由相关联的 DataLogger 采集后保存进去的。

实验台的可视化界面主要显示实验所需的物理量实时值，现有界面如下：

界面 1，显示预设数据库内功率和总用电量的记录值。栏目 E701，E801，P701，P801，分别对应对比办公室和实验台的总电量，及两间办公室的历史照明功率。如图 3-15。当切换进该界面时，会自动与数据库重新连接，刷新数据显示；也可以通过 Fresh 按钮刷新当前数据显示。

Event Time	E701	E801	E701	E801
2011-11-20 22:02:00	0.0	0.0	0.0	0.0
2011-11-20 15:10:00	1876.696035	1342.269043	0.0	1.87
2011-11-20 15:09:00	1876.696035	1342.239014	0.0	1.87
2011-11-20 15:08:00	1876.696035	1342.209095	0.0	1.86
2011-11-20 15:07:00	1876.696035	1342.178955	0.0	0.75
2011-11-20 15:06:00	1876.696035	1342.178955	0.0	0.01
2011-11-20 15:05:00	1876.696035	1342.178955	0.0	0.01
2011-11-20 15:04:00	1876.696035	1342.178955	0.0	0.01
2011-11-20 15:03:00	1876.696035	1342.178955	0.0	0.01
2011-11-20 15:02:00	1876.696035	1342.178955	0.0	0.01
2011-11-20 15:01:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 15:00:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:59:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:58:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:57:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:56:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:55:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:54:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:53:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:52:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01
2011-11-20 14:51:00	1876.696035	1342.176025	0.0	0.01

图 3-15 测试界面 1，显示数据库中功率和总能耗记录

界面 2，显示预设数据库内照度的记录值。栏目 LUX\_1 到 LUX\_6(如图 3-16)，分别对应实验台上室内测试用照度传感器输入的照度历史数据，即控制用传感器的照度历史数据；LUX\_7 和 LUX\_8 则为窗旁照度历史数据，分别为西北和西南朝向窗。数据刷新方法与界面 1 相同。

Event Time	LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6	LUX_7	LUX_8
2011-11-20 22:02:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2011-11-20 15:10:00	1665.646682	2179.751709	3198.87207	734.151978	698.716675	1785.254883	12136.666992	11921.09092
2011-11-20 15:09:00	1661.874634	2187.04834	3208.716004	677.802031	665.450317	1780.831616	12238.666992	12226.202227
2011-11-20 15:08:00	1507.650061	2040.859983	3130.178223	339.841687	670.474304	1676.964966	12561.333008	12458.160156
2011-11-20 15:07:00	1302.664795	1879.511475	2889.661086	262.170319	373.24967	1438.279907	12767.333008	12577.508769
2011-11-20 15:06:00	959.634705	1592.33667	2582.659567	220.220679	301.994019	1243.508301	12825.333008	12467.637109
2011-11-20 15:05:00	958.118042	1571.59502	2637.76416	227.254208	308.177338	1273.201636	12884.0	12349.453125
2011-11-20 15:04:00	971.860708	1576.333274	2663.22995	232.351209	311.36287	1292.184946	13029.333008	13093.269625
2011-11-20 15:03:00	963.028015	1583.239621	2652.744114	234.659879	312.013986	1297.201616	13047.333008	13069.596494
2011-11-20 15:02:00	974.904724	1580.851621	2710.231834	242.277684	319.207343	1345.059937	13372.0	13342.150309
2011-11-20 15:01:00	990.514038	1606.538985	2780.288086	250.910359	327.49538	1385.088863	13742.0	13751.08872
2011-11-20 15:00:00	976.526805	1579.271638	2721.437888	248.470686	323.759358	1381.439912	13500.0	13138.524414
2011-11-20 14:59:00	1001.020388	1622.026661	2821.378977	263.064971	334.880183	1421.541636	14024.666992	13971.231286
2011-11-20 14:58:00	1018.3	1637.610381	2888.505859	269.114314	342.801673	1442.354883	14158.666992	14336.803711
2011-11-20 14:57:00	1030.308143	1650.028031	3009.684144	281.112817	356.892346	1528.77168	14698.333008	15038.501993
2011-11-20 14:56:00	1062.791992	1725.378933	3079.688164	291.655887	364.291981	1591.652337	15108.666992	15464.041993
2011-11-20 14:55:00	990.209999	1631.214177	2942.548145	273.330288	341.808324	1490.039987	14408.333008	13913.202366
2011-11-20 14:54:00	1000.684031	1628.114602	2988.48899	282.850387	341.709038	1542.369976	14834.666992	14107.729492
2011-11-20 14:53:00	1028.388988	1691.381872	3071.988871	299.816023	371.247348	1668.798839	16038.333008	16888.523289
2011-11-20 14:52:00	1087.023438	1726.81872	3148.187889	308.854981	379.83032	1728.883336	16178.666992	16427.387442
2011-11-20 14:51:00	1071.864102	1748.851652	3193.788084	310.02532	382.871979	1740.84834	16429.0	16696.919902
2011-11-20 14:50:00	1065.187358	1733.851646	3161.421873	307.022876	380.649996	1736.096680	16333.333008	16608.86568
2011-11-20 14:49:00	1078.062012	1789.73899	3218.201904	311.802008	388.802682	1778.881582	16622.666992	16915.862306

图 3-16 测试界面 2，显示数据库中照度记录

界面 3，实时数据的汇总。Indoor Illuminance 中 III1-III6 对应室内照度传感器；Near Win. Illuminance 为窗旁照度实时值，分别显示西南侧 (III. SW) 和西北侧 (III. NW)。右侧为电量显示区，上部 Present Power 中，以千瓦为单位，显示 7 楼对比办公室 (7.Floor) 和 8 楼实验台所在办公室的实时照明功率；下部 Energy Consumption 中，以度 (kWh) 为单位，显示两间办公室内的累积用电量。

使用界面底部的两个按钮，可实现向前或向后的界面切换。由于使用中文编制界面时，经常出现运行错误，所以，全部界面显示只使用英文字母和数字。

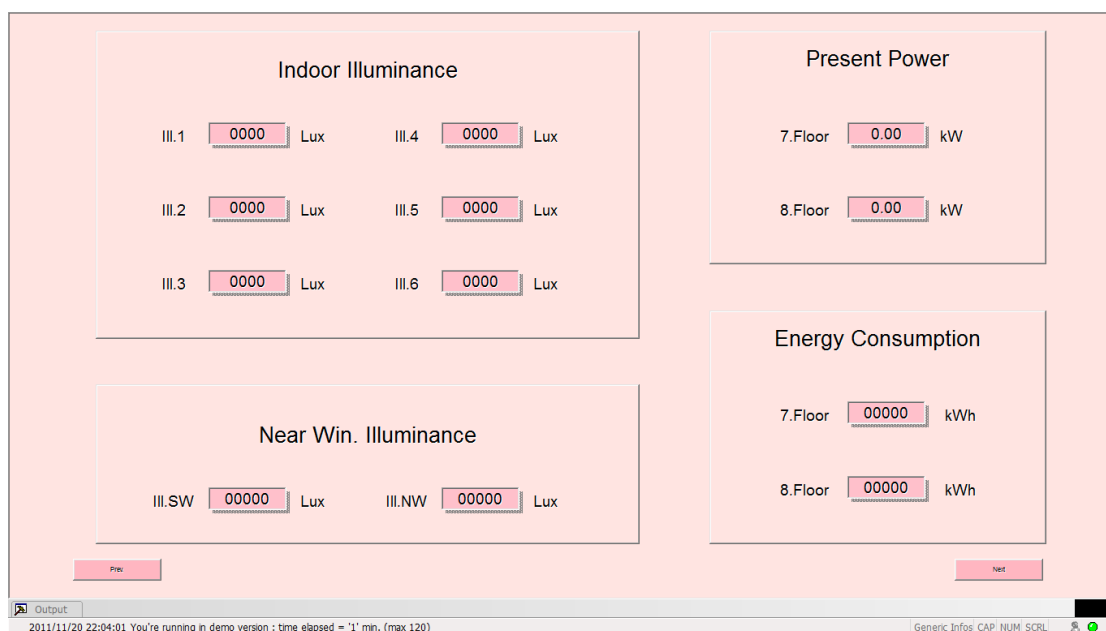


图 3-17 测试界面 3，在线显示实时照度、功率和总用电量

### 3.2.2.3 MS Access

由 Visu+创建的数据库选用了 Access 格式。测试系统设计时，希望能够实现自动记录并清空已备份的数据库内数据。因为 Visu+无法实现这些功能，所以在数据录入的 Access 数据库内建立简单的窗体外完善系统。窗口内事件触发选择定时器，时间间隔定为 60000ms，保证在每分钟内检查一次是否符合触发条件，即时间条件，此处为每周周一 0 点 59 分。若满足触发条件，则使用 DoCmd 对象的 Output 方法，将本周内，工作时间的数据输出为一个.xlsx 文件，而全部运行时间则输出为另外一个文件。若两次保存都没有报错，则执行清空数据库的动作。若其中有任何文件保存不成功，则自动重试 5 次，直至保存成功；若超出 4 次，则报错。该窗口需要始终处于运行状态，否则无法起到定期导出文件和清空数据库的作用。

## 3.3 实验设计

实验的目的是通过比较，证明不同智能照明控制策略的节能效果。所以，首先应该制定比较基准，在基准之上节省的电量再做互相比较。比较的基准首先是在安装节能照明器具和智能控制系统之前的原照明系统，即为时间上的纵向比较。其次，在 7 楼选取一间办公室，在实验期间同时运行，作为横向比较的基础，进行对比实验。该办公室在位置、朝向、房间尺寸和室内分隔方面，都与实验台所在办公室完全相同。从而可以直接排除由太阳位置、天气等因素引起的照明用电

差异。在这间办公室内安装一台智能电表，将原有的照明电路单独分出，接入其中。通过线缆，将符合 Modbus 协议的数据帧传送至 8 楼的数据采集设备中。

在理想条件下，每种实验，即每种照明控制策略，应在实验台上连续运行至少一年，成为一个完成的周期。但由于论文的时间限制，所以本文分析的数据，均来自以一周为周期的实验，其中包含 5 个工作日和 2 个休息日。重点关注工作日中的正常工作时间，即早 8 点到晚 5 点。该楼其他设备的运行时间也基本与此相同，如空调系统，在夏天的运行时间为 7:30 到 17:30。5 个工作日可认为是 5 次独立实验。实验期间，忽略由地球运动引起的太阳位置变化，认为日出日落时间始终相同。

### 3.4 实验步骤

根据需求，实验分 3 个阶段进行，分别为：1.原系统测试；2.初步实验；3.比较实验。

#### 3.4.1 原照明系统测试

为达到比较原有系统和实验台所用系统区别的目的，在实验台搭建之前，对原有照明系统进行一次测试。建筑本身方面，需要确定其遮阳形式、家具布置、采光窗尺寸、位置、房间净高等。照明系统方面，包括动力线连接、原控制分区、光源的功率、数量、布置形式、灯具和镇流器型号、实际用电特性如各相功率、功率因数等。此外，还需测量各工作平面上的实际照度。实验结果详见 3.1.1。

#### 3.4.2 初步实验

在实验台建成初期，进行为期一周的手动测试，详细数据结果见 4.1。这个阶段的实验可以初步确定实验台所用系统与原有系统相比时的优势。在全自动的控制策略下（实验 5 中的策略），测量照明总功率，对应实时照度，在室人员数量。对比办公室内，记录除照度外的相同项目。根据人员数量和实际工作时间进行折算后，确定该控制策略节能率。

#### 3.4.3 比较实验

该阶段实验为正式实验。在每周开始之前，通常为周五晚上，办公室空置时，

将开敞办公室内 4 个控制器的控制模式调为设定模式。如果该模式可以设定照度,则在选好模式后,根据手持式照度计的测量数据,将每个控制分区内工作平面上的照度设定值调节到 300lux,以便在比较用电量时有相同的基础,并满足国家标准要求的照度值。为简化这个调整照度的过程,并保证每次参考点在同一位置,所以选择桌面高度,测量传感器安装位置正下方为测量位置,调整其照度到 300lux 附近。

在持续一周后,更换控制策略,如此反复,直至选取的所有控制模式均经过测试为止。





## 第4章 实验数据分析

### 4.1 初步实验

在实验台的照明系统搭建完成之后，针对全自动的控制策略，手动进行了初步实验，为期一周。实验中除测量两间办公室的照明用电量（单位：kWh）外，还记录了人员数量（单位：个）。在实验台所在的八楼办公室，增加实时功率（单位：kW）的测量记录。每半小时记录一次数据，实测数据的平均值列于表 4-1。

表 4-1 采用和未采用智能照明控制系统的办公室内逐日实测用电量对比

	电能/kWh		工作时长/h		平均功率/kW	
	7 楼	8 楼	7 楼	8 楼	7 楼	8 楼
周一	9.72	9.45	8.5	9.0	1.14	1.10
周二	10.92	11.76	6.0	9.0	1.82	1.35
周三	12.60	5.91	8.5	9.0	1.48	0.77
周四	16.20	7.50	9.0	9.0	1.80	0.85
周五	14.34	11.61	9.0	9.0	1.59	1.22

实验台和对比办公室之间的主要不同之处在于使用时间和能够正常工作的光源数量。通常，七楼白天开始工作时间较早，下午下班时间也早，而灯管有部分损坏。为得到实际的节能量，需要把 7 楼的用电量，按照使用时长和正常照明安装功率折算后再进行比较。

$$E = E' \cdot \frac{t}{t'} \cdot \frac{p}{p'} \quad (4-1)$$

$E'$ ,  $E$ : 实际用电量，对应的折算后用电量，kWh;

$t'$ ,  $t$ : 实际照明使用时长，标准照明使用时长（9 小时/天），h

$p'$ ,  $p$ : 实际装机总功率，正常情况下总功率，W。

利用上式计算后得到，七楼当周总用电量可折算为 81.2kWh，而八楼实际用电量为 46.2kWh，节能率可达 40% 以上。初步实验期间，两个办公室都处于正常使用的状态，而办公性质也相同，都属于学院办公室，所以实验结果具有一定的说服力。

这种控制策略下的照明舒适度，简单以照度衡量时，经测试，也满足要求。原有照明系统中只使用人工照明时，作业面各处照度均满足 GB50034-2004《建

筑照明设计标准》<sup>[12]</sup>对普通办公室照明的要求，大于 300lux。某些范围内可达到 500lux 以上，最低为 325lux 详见表 4-2。测试点分布、编号及办公室平面布置如图 3-3。而搭建实验台时更换为节能系统后，除个别区域照度较低外，绝大部分区域均满足要求。由于两次测试间家具摆设发生过变化，照明情况也有一些改变。至于眩光，经目测和人员走访，未发现因系统变动而产生的新问题。

表 4-2 实验台搭建前后照度对比

测试点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
原系统	387	325	435	354	379	510	520	474	430
实验台系统	610	436	902	411	354	624	732	438	294

## 4.2 各策略动态性能简析

表 4-3 中所列的每种模式都对应一种照明控制策略，预设于所用的控制器中。通过控制器连接的门铃开关，可以方便的切换控制模式。之后的“实验 1”等标题中的数字，对应于表中的实验序号，并不代表实验在时间上的先后顺序。实验正式开始于 2011 年 8 月 22 日，结束于 2011 年 10 月 30 日，期间如遇假期，导致当周工作日少于五天，则顺延一周，当周数据弃用。

本节阐述各种策略的具体控制内容，分析各策略连续运行时的照明功率曲线。本节中各图表里，P801 代表 8 楼，即实验台所在办公室的照明总功率，P701 则代表 7 楼，即对比办公室内，照明的总功率。单位均为 kW。

表 4-3 控制器预置控制模式详表节选<sup>[57]</sup>

实验序号	人员探测	自然光相关控制
1	激活	未激活
2	激活，检测到人员活动时不自动开启	未激活
3	未激活	激活，日光不足时不自动开启照明
4	未激活	激活，日光充足时不自动停止照明
5	激活	激活
6	激活	激活，按照上次手动调光值控制
7	激活，检测到人员活动时不自动开启	激活
8	激活，检测到人员活动时不自动开启	激活，日光充足时不自动停止照明

说明：

### 1. 照度设置方法：

如未注明照度设定值的设置方法，则为默认标准方法，即将亮度调到所需水平时，连续快速双击控制器上连接的门铃开关，荧光灯会闪烁两次以示确认。特

殊设置法只适用于模式 4，这种模式下，照度设定值以最后一次手动调光对应照度为准，不需要、也不可以用连接两下的方式触发设定值确认功能。

#### 2. 人员探测：

激活：若无其他说明，代表照明开启和关闭采用人员探测信号控制，有人则开灯，无人则关灯。

未激活：代表对应策略中照明控制与该人员有无无关。

#### 3. 自然光相关控制：

激活：若无其他说明，代表该策略中，照度过低时开启照明，照度高时关闭照明，且按照照度设定值调节当前照明功率。

未激活：无自然光相关的开关控制和调光控制。

### 4.2.1 实验 1

实验初始时，各传感器处照度调整至如表 4-4 所示。

表 4-4 实验 1 设置条件

起止时间	10.24-10.28					
简述	人员信号控制自动开关，不可调光					
编号	LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
照度值	308	348	310	307	298	369

从这一策略的运行曲线可以看出单独采用人员信号探测进行控制时的效果，总体动态性能类似于手动启停照明的系统性能。整体输出功率的曲线较为平直，由于有些控制区域内，通常没有人常驻，但偶尔会有人经过，所以导致总体功率输出常常出现低谷值。

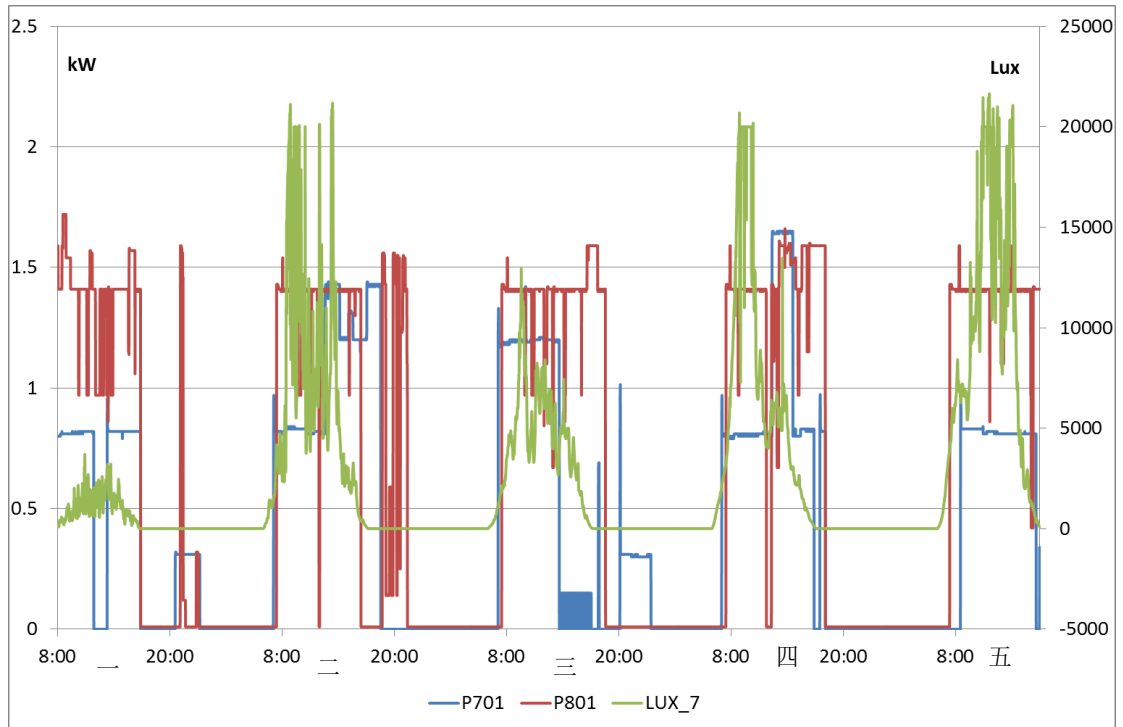


图 4-1 实验 1.人员检测自动开关，固定亮度模式连续记录

照度要求的满足度较高，所有位置的不满足率都不超过 11%（见表 4-5），但为此，照明系统的功率输出一直都很高，几乎没有改变。即便外区的传感器检测到照度已高达 1000lux 以上，如图 4-2 中曲线 LUX\_1 所示，也没有功率的减少或某个控制分区照明全部关闭的情况。

表 4-5 实验 1 照度不满足率

LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
0.02	0.01	0.02	0.11	0.11	0.04

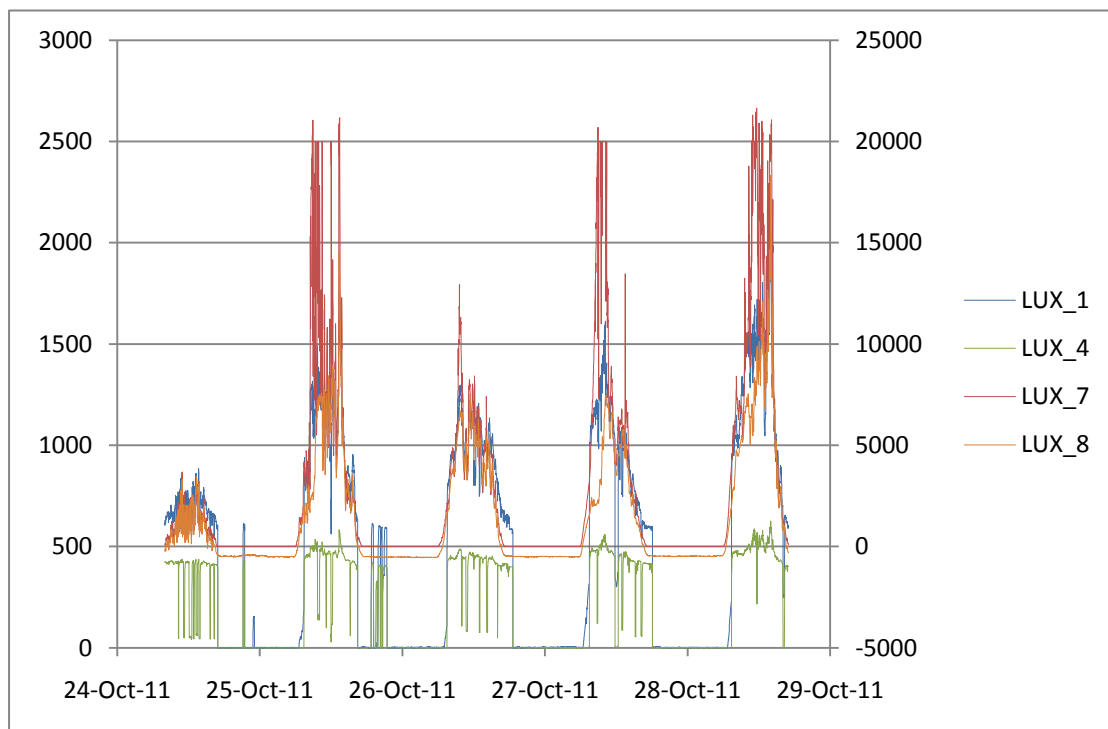


图 4-2 室内照度和室外照度在实验 1 中的特性曲线

### 4.2.2 实验 2

实验初始时，各传感器处照度调整至如表 4-6 所示。

表 4-6 实验 2 设置条件

起止时间	9.5-9.9					
简述	有人不自动开，不调光					
编号	LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
照度值	340	325	301	305	290	320

这一策略与实验 7 的区别在于恒定照度控制没有被激活，所以光源的输出功率非常平稳，光源亮度恒定其表现与 7 楼十分相似，但无人时可实现照明的延迟自动关闭。此外，在本次试验中，部分控制区域有明显的频繁启停情况出现，有损于光源的正常使用寿命；同时，照度由于光源得频繁启停而发生突变，容易引起使用者的不舒适。

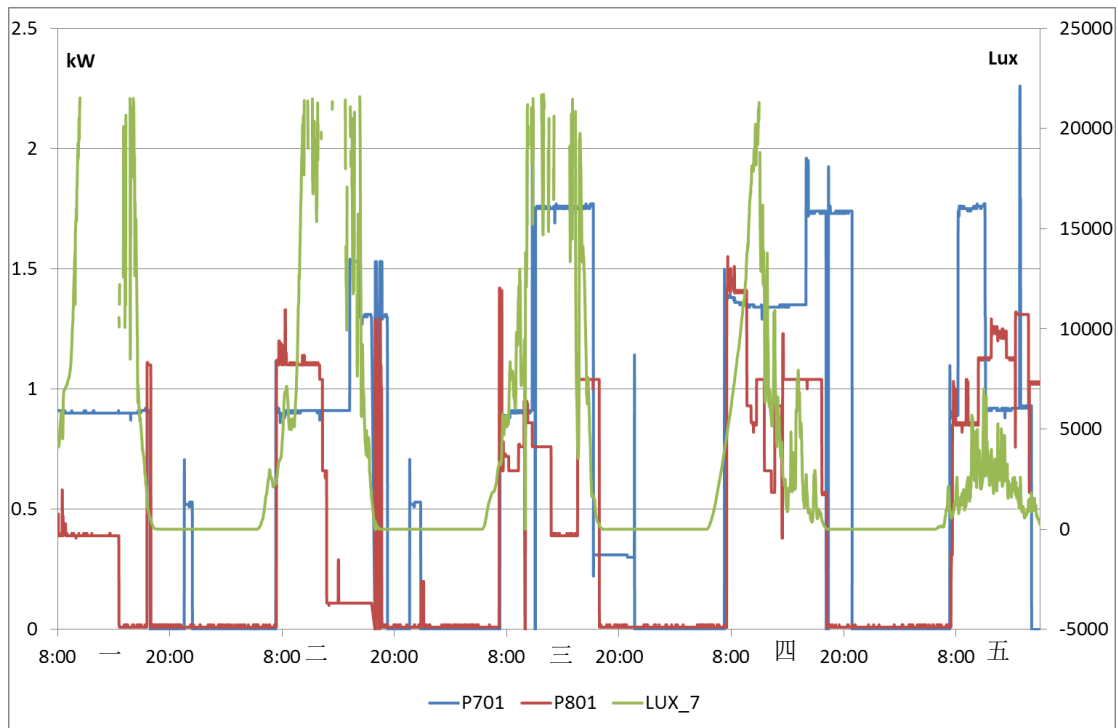


图 4-3 实验 2.手动开灯，固定亮度模式连续记录

室外日照的情况在这种控制策略下对照明总功率几乎没有影响，由上图即可得知，在日照充足的情况下，照明功率甚至可以和有效室外照度同时达到最高值，几乎没有相关性。

表 4-7 实验 2 照度不满足率

LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
0.05	0.03	0.00	0.28	0.43	0.00

由照度不满足位置个数与有效室外照度和照明功率的关系图可以看出,室内照明情况与功率和天气几乎都没有关系,仅由室内使用者控制。

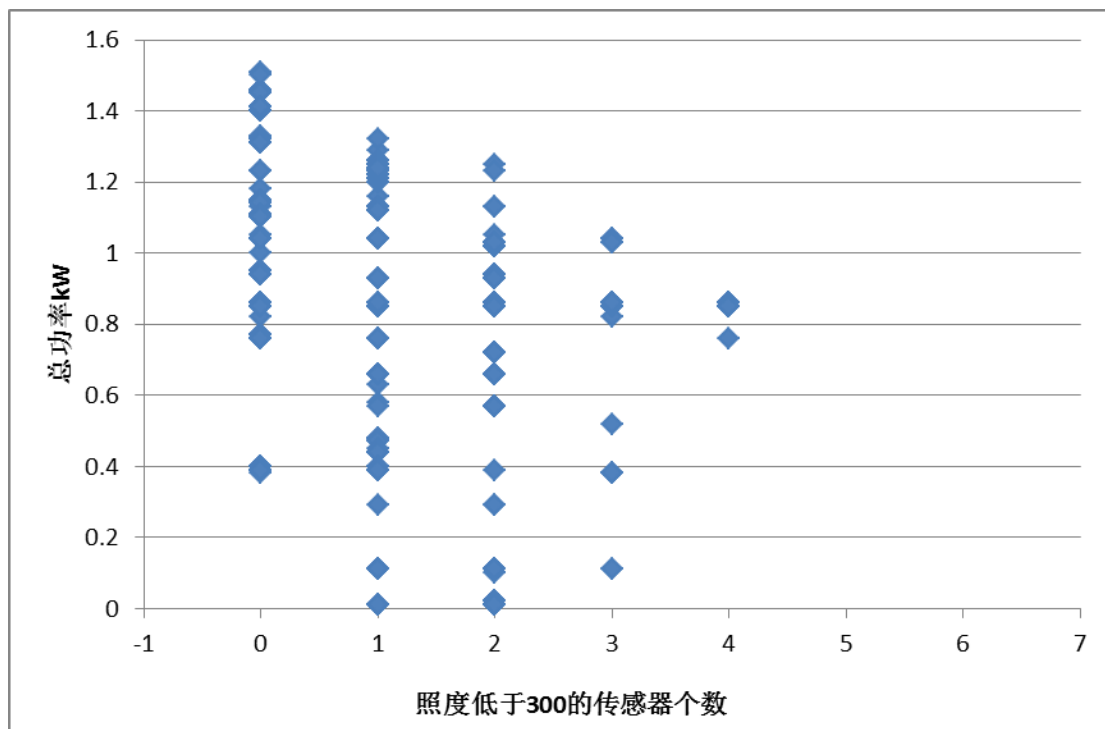


图 4-4 实验 2 中照度低于 300lux 的位置个数与照明总功率的关系

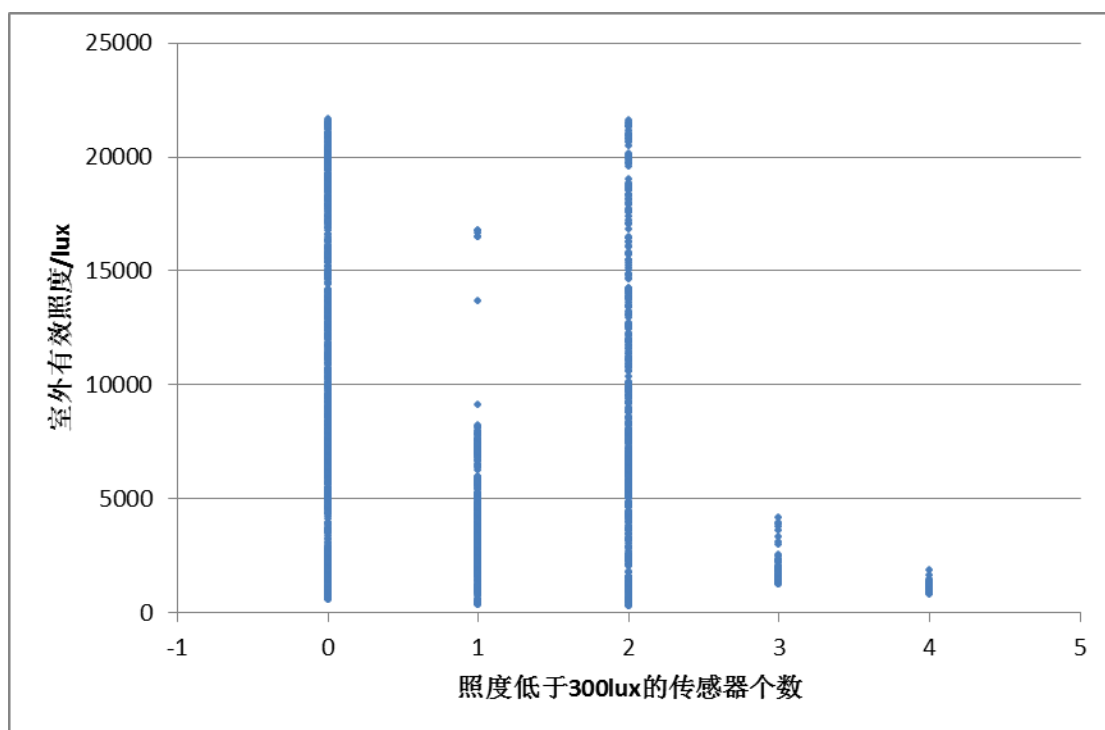


图 4-5 实验 2 中照度低于 300lux 的位置个数与有效室外照度的关系

### 4.2.3 实验 3

实验初始时，各传感器处照度调整至如表 4-8 所示。

表 4-8 实验 3 设置条件

起止时间	9.19-9.23					
简述	无人员探测，可调光，照度不足时不自动开					
编号	LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
照度值	240	215	240	326	249	230

这种策略下，人员检测的自动启停控制未激活，使用者可以通过手动方式开启或关闭照明。当照明输出功率降到最低，而照度需求仍然满足时，灯会自动关闭。所以，在早晨全部照明被手动打开后，总会经过一段时间，如图中红色箭头所标注，发生功率突降，即某控制分区内照明被自动关闭。在下班时，若手动关灯的错误操作，则可能导致把原先处于关闭状态的控制区域内光源错误开启，进而令照明系统彻夜运行，形成浪费。所以，该策略运行下，必须让使用人员对照明控制系统有详细了解，避免误操作。照度相关的自动关闭，在晚上无法起到节能作用。

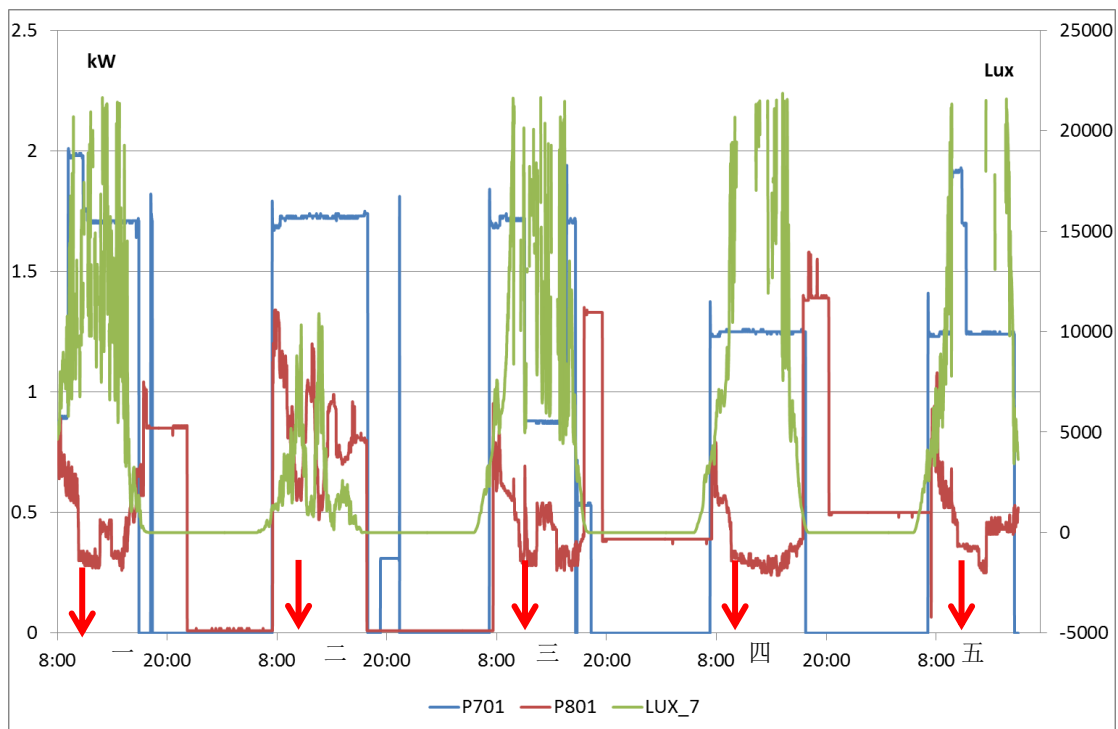


图 4-6 实验 3.恒定照度+照度相关自动关灯，无人员检测模式连续记录

图 4-7 中用橙色箭头标出，由于某个控制区域的照度传感器检测到照度满足需求，所以被关闭。最内区的 4 号传感器位置照度基本恒定，



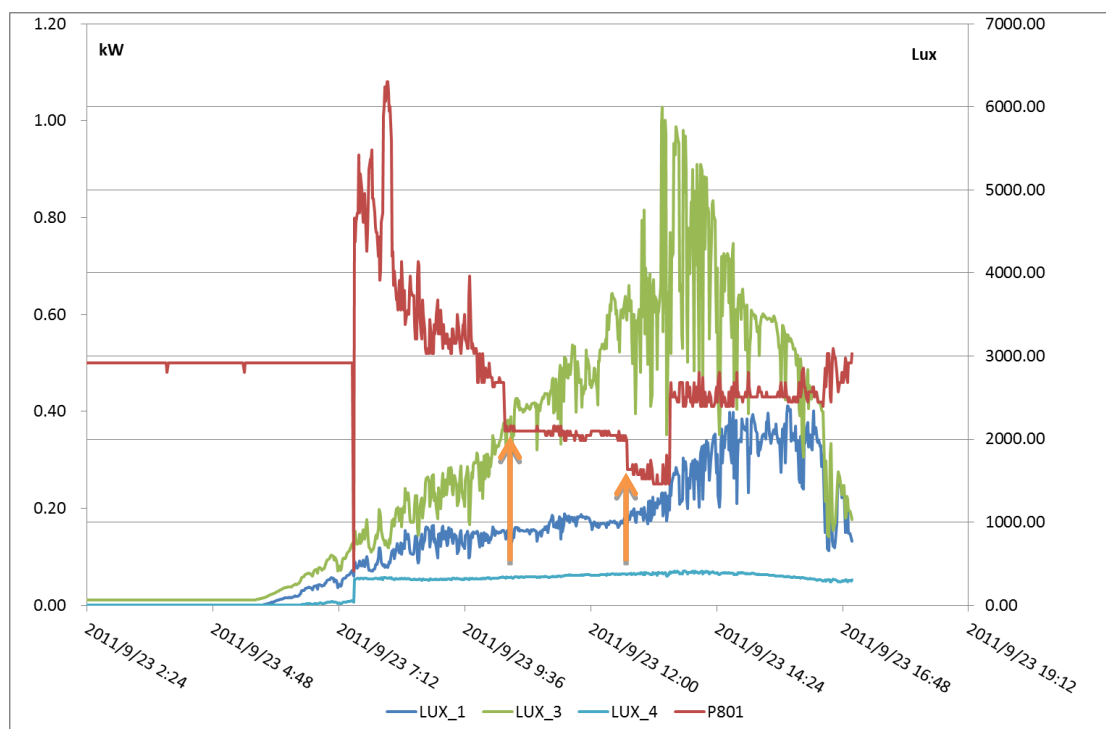


图 4-7 实验 3 中功率随照度的动态变化

照度基本都满足要求，大部分传感器位置照度不满足率都在 10% 以下，只有在 5 号传感器的位置，与其他控制策略下情况相同，偏低。

表 4-9 实验 3 照度不满足率

LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
0.07	0.05	0.04	0.06	0.60	0.12

### 4.2.5 实验 4

实验初始时，各传感器处照度调整至如表 4-10 所示。

表 4-10 实验 4 设置条件

起止时间	9.26-9.30					
简述	无人员探测，可调光，照度充足时不自动关					
编号	LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
照度值	308	301	305	300	247	337

该实验中的策略与实验 3 类似，但根据照度信号，控制的是灯光是否开启，而不是是否关闭。当人手动开启灯光后，无论当前照度如何变化，系统都不会自动关闭光源。所以，可以看到功率曲线较为连续，有明显的恒照度控制特征，根据太阳光强弱程度，输出不同功率，且不会有功率突然降低，某个控制分区内灯光完全熄灭的情况出现。当照度满足要求时，控制器会维持光源的最小输出，而不会将其关闭。这样对避免光源频繁启停，延长设备寿命是有好处的，但会影响其节能效果。

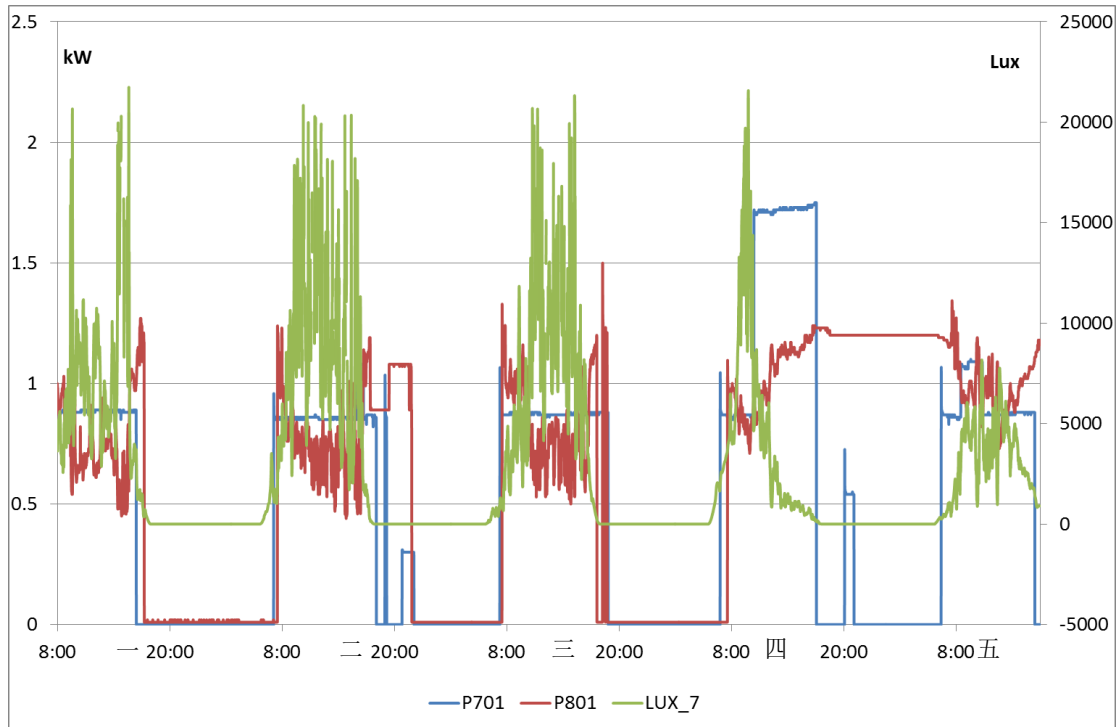


图 4-8 实验 4.恒定照度+照度充足不自动开灯，无人员检测开关模式连续记录

实验过程中，内区使用率很低，照度在满足要求范围内的时间比例很低，而外区，即传感器 1-3 和传感器 6 完全符合照明要求。

表 4-11 实验 4 照度不满足率

LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
-------	-------	-------	-------	-------	-------

0.00	0.00	0.00	0.67	0.85	0.00
------	------	------	------	------	------

由于没有部分区域的自动关闭,所以平均照度和室外照度间呈现较强的相关性(如图4-9)。其实工作平面照度应在人工照明的调整下保持基本不变,但与控制用的专业传感器不同,用于实验测量的照度传感器无法避免自然光的影响,所以室内照度总显示为超出所设定的300lux,实际是传感器接受了除工作面反射外的自然光所致。

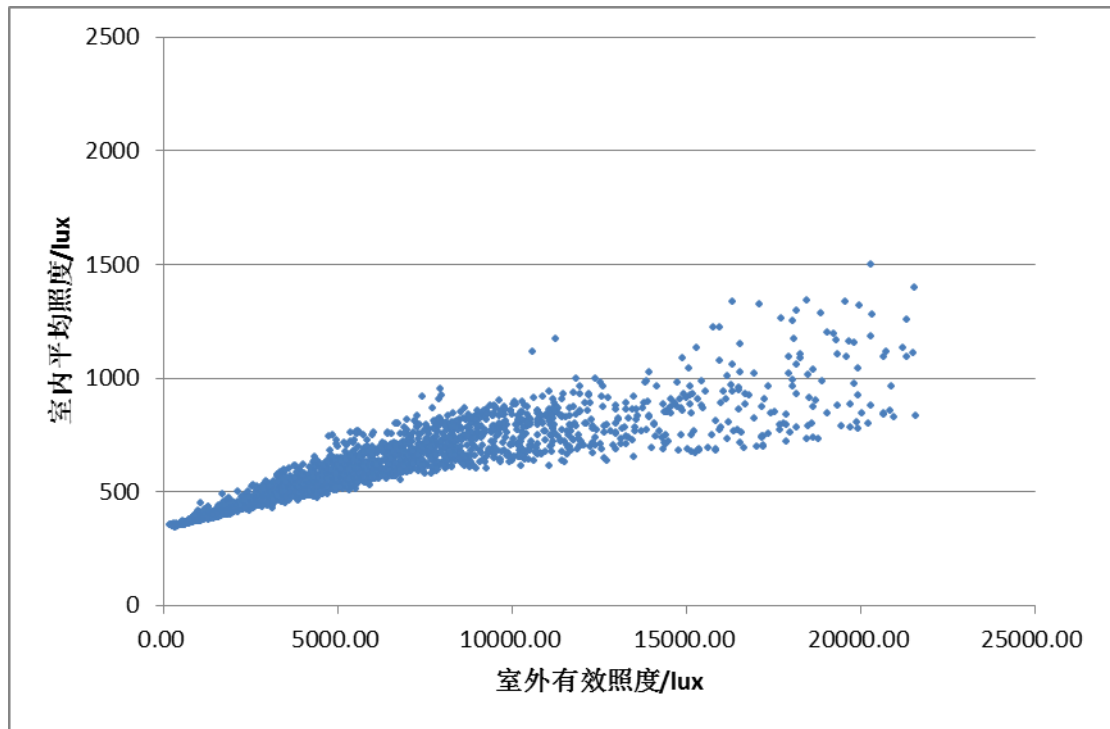


图 4-9 实验 4 中室内平均照度和室外照度的关系

### 4.2.6 实验 5

实验初始时，各传感器处照度调整至如表 4-12 所示。

表 4-12 实验 5 设置条件

起止时间	8.22-8.26					
简述	全自动					
编号	LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
照度值	337	306	350	305	330	296



图 4-10 实验 5.全自动模式连续记录

这种控制策略是应用控制技术最多最全面的一种，将所有可以实现的控制方式组合起来。由连续运行性能图（图 4-10）可见，虽然无人关灯这一功能经一段时间延时才会动作，但仍无法避免室内人员静坐时，照明的错误关闭。同时，某些控制区域没有人员常驻，有人经过时，便会启动照明。而通常，这部分照明不一定必要，反而增加了光源的启停次数，有损节能效果。由于这部分区域的频繁启停，根据自然光进行恒照度控制的节能效果体现不明显。

图 4-10 右侧的纵轴，显示 LUX\_7 为西南向“有效室外照度”。总体上，有效室外照度与照明功率间，在恒照度调光控制下，呈现一定的相关性。

统计 6 个室内照度传感器在工作时间内，即周一到周五每天早 8 点到晚 5 点的照度测量值，可以得到每个位置上，照度低于 300 的时间百分比均未超过 1%，这可以证明，照度基本符合照明设计标准的要求。

表 4-13 实验 5 照度不满足率

LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
0.10	0.08	0.07	0.11	0.76	0.15

由图 4-11 可以看出，在照度不满足的位置数目较多时，功率也相对较低，也就是说，照度不满足要求时，大部分情况，照明并未完全开启，有部分区域由于无人，已停止照明。

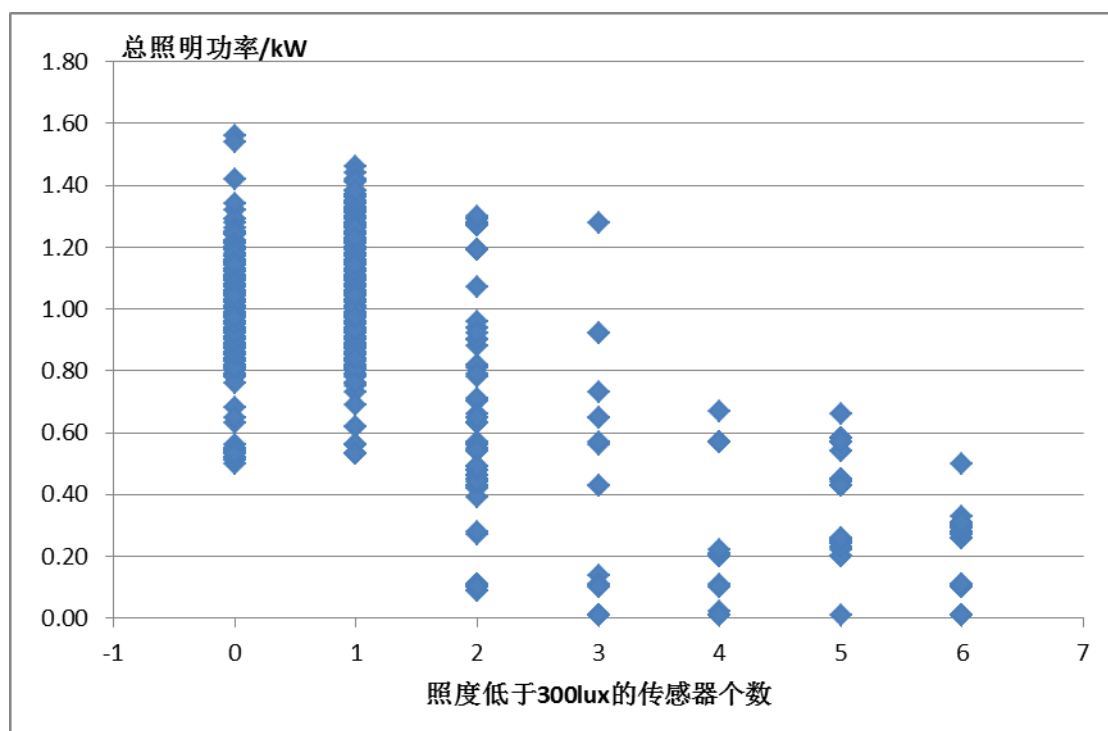


图 4-11 实验 5 中照度不足的位置个数与总照明功率的关系

#### 4.2.7 实验 6

实验初始时，由于无法使用双击的明确形式确认照度设定值，所以未调整工作面照度，其他信息如表 4-14 所示。

表 4-14 实验 6 设置条件

起止时间	11.7-11.11; 11.14-11.18
简述	全自动，调光以最后一次手动调光值为准

这一策略与实验 5 中的策略唯一区别在于照度设定值的设置方式。在实验 5 中，当调光至所需照度时，连接两次门铃开关，即可确认照度设定值已更改为当前值。系统在之后的运行过程中，即使因用户手动调节光源亮度而令当前照度发生改变，在光源重新启动后，系统仍默认照度设定值未发生改变，除非用户进行连接两次的操作。而实验 6 中，照度设定值的更改是动态的、自动的、不易确认的。每次用户对光源亮度的调节，即使不连接两次开关，也会导致当前系统预设照度发生改变。

该控制策略运行了两周。第一周的图像显示，使用者需要对这种模式有一定的适应时间。两周开始后，系统进入正常运行阶段，调光特征明显。每天开始启动的功率差距很大，证明照度设定值是动态变化的。其曲线基本与实验 5 的全自动模式相同。使用者的个性化需求更容易得到满足，但操作不够方便，用户常常不能确定是否已将照度设定完成。图 4-14 中外区传感器 1 和内区传感器 4 都显示照度设定不稳定，每天都不相同。但由于采用了调光控制方式，仍具有很大节能潜力。

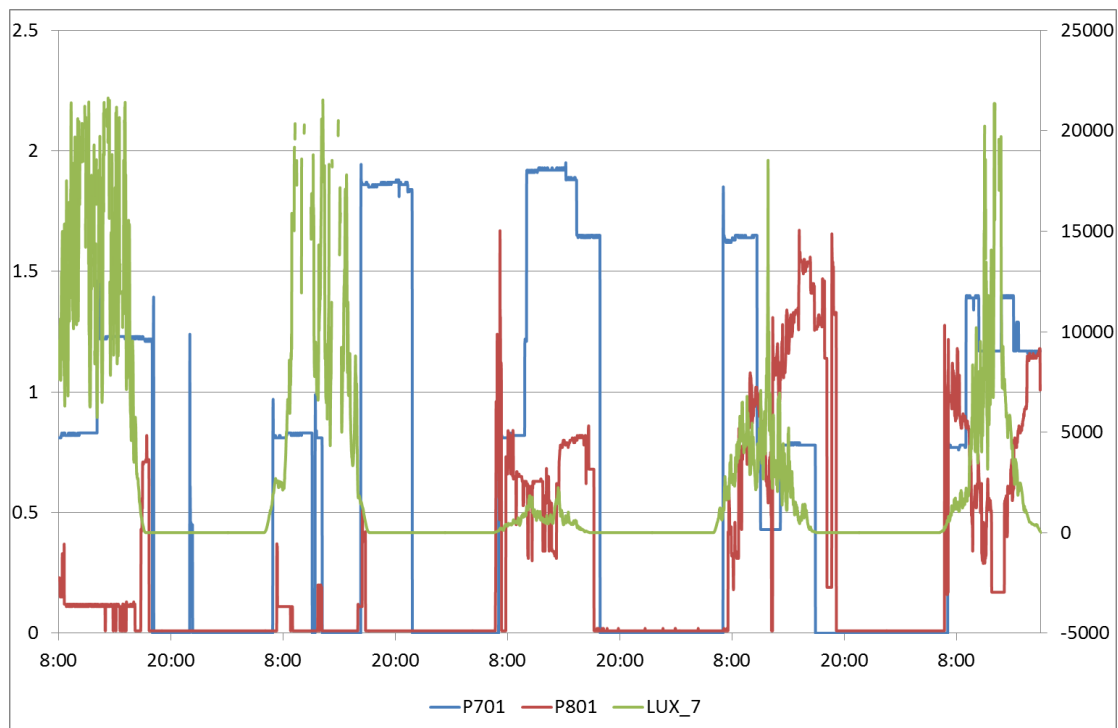


图 4-12 实验 6.全自动控制，照度设定值以上次手动调光为准，第一周

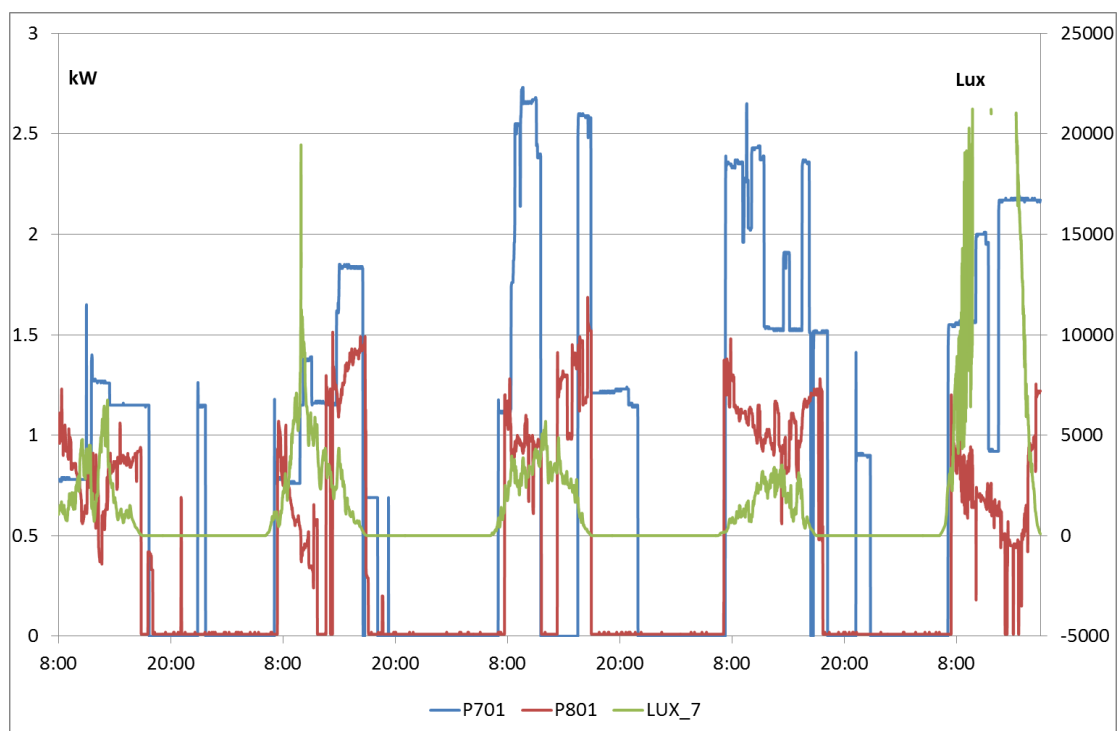


图 4-13 实验 6.全自动控制，照度设定值以上次手动调光为准，第二周

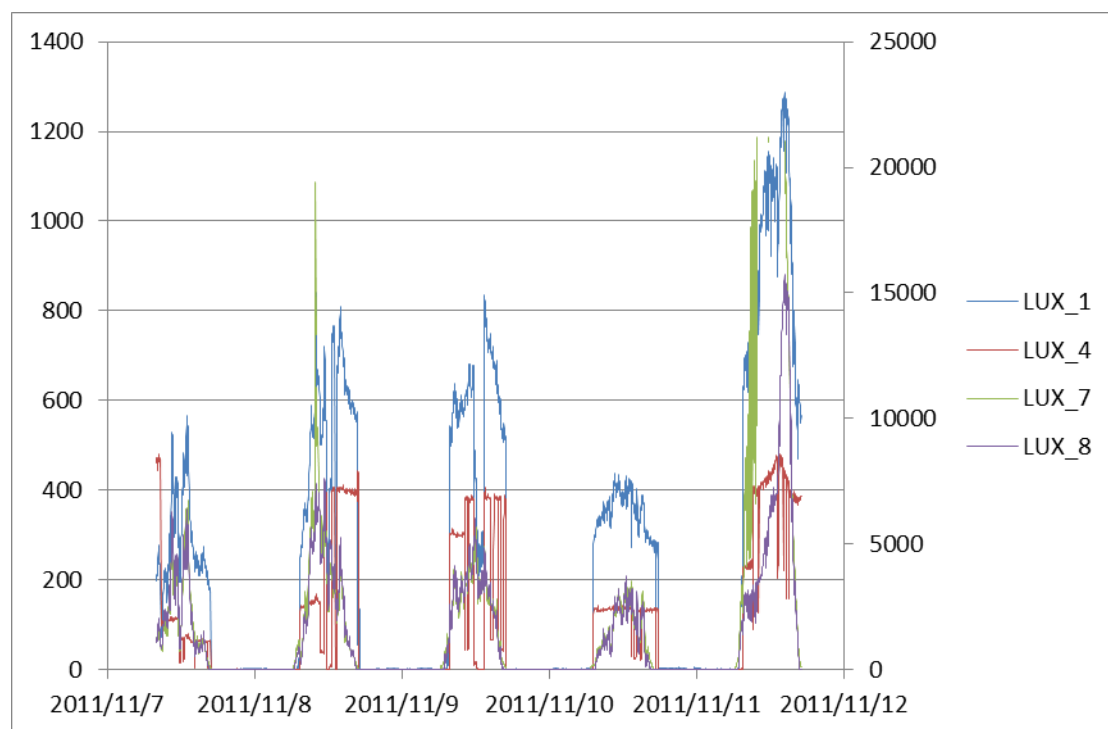


图 4-14 实验 6 中内外区照度与室外照度变化过程

结合图 4-14 与表 4-15，以 4 号传感器为例，其照度值每天都不同，由于用户自行调节的设定值并不会主动参照工作平面 300lux 的标准，较为随机，所以该处照度不满足率仍然很高，约为 60%。

表 4-15 实验 6 照度不满足率

LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
0.20	0.06	0.01	0.60	0.72	0.43



## 4.2.8 实验 7

实验初始时，各传感器处照度调整至如表 4-16 所示。

表 4-16 实验 7 设置条件

起止时间	8.29-9.2					
简述	有人不自动开，可调光					
编号	LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
照度值	300	270	300	310	250	310

该策略与实验 5 相比只有一点不同，即“有人自动开灯”的功能未激活，需手动开启照明。所以，观察 P801 曲线可见，每天开始上班时，照明用电量很大；而随着时间推移，往往在中午及午后出现低谷值，自然采光的节能效果非常明显。而接近下班时间时，由于日照不足，在感到照明不足时，人们又会自觉开启荧光灯。这种手动开灯的情况基本在照度的不足已达到人们能够感知的程度时才会发生。这周内的日照情况良好，有效室外照度多数为超量程情况的 20000lux。调光控制明显起到了节能作用，随日光峰值的出现，照明功率常降至谷值。

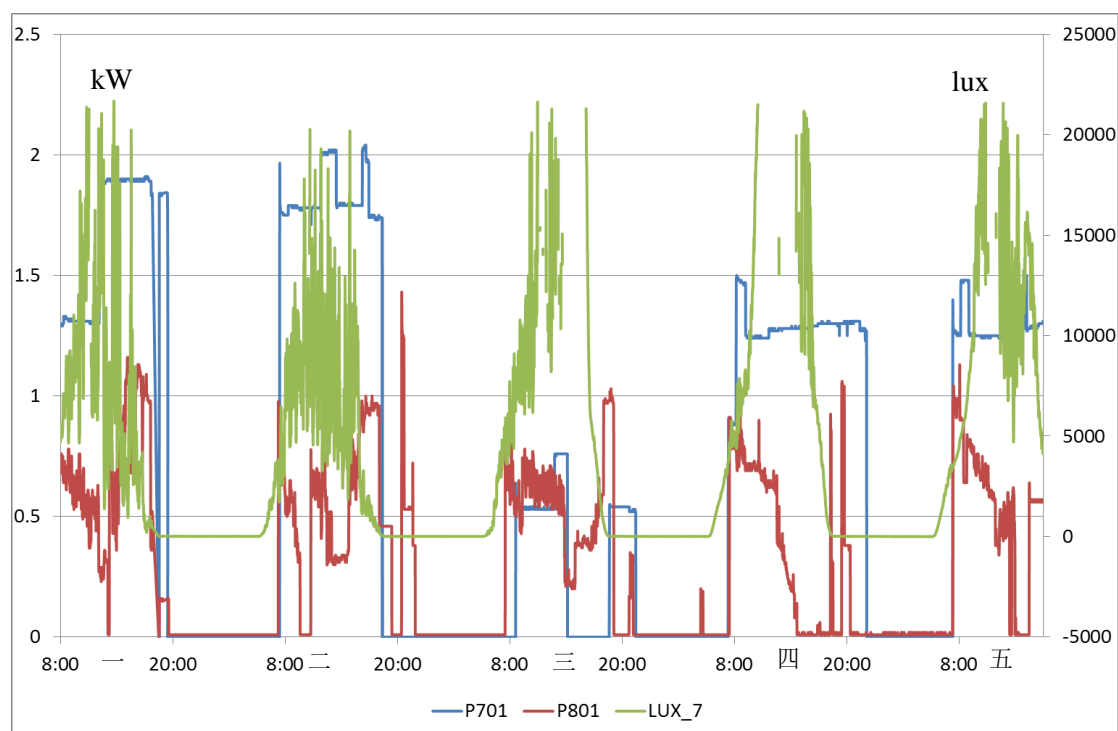


图 4-15 实验 7.手动开灯模式连续记录

该实验中，内区使用频率很低，离采光口又距离较远，所以照度不满足的时间比例非常高。而沿窗分布的外区内传感器数据显示，在自然采光和人工照明的配合下，照度完全满足要求。

表 4-17 实验 7 照度不满足率

LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
0.01	0.00	0.00	0.81	0.71	0.03

由于关灯的时间比较多，如图 4-15 所示，在很多时候总功率为零，所以，室内照度和有效室外照度呈很强的相关性。这种相关性可以从图 4-16 看出，随着室外照度的升高，室内照明需求得到满足的区域范围扩大。与此同时，由于调光作用的存在，又从一定程度上减少了室内照度对室外照度的依赖性，所以出现如图 4-17 的照度关系曲线。在有效室外照度超过 10000lux 时，数据点趋向于一条水平线。尤其是图的上部有一排孤点，呈水平线状。对比数据时间可知，这些点都处于同一天，当天房间使用率高，平均照度也高，但受室外照度影响不大。

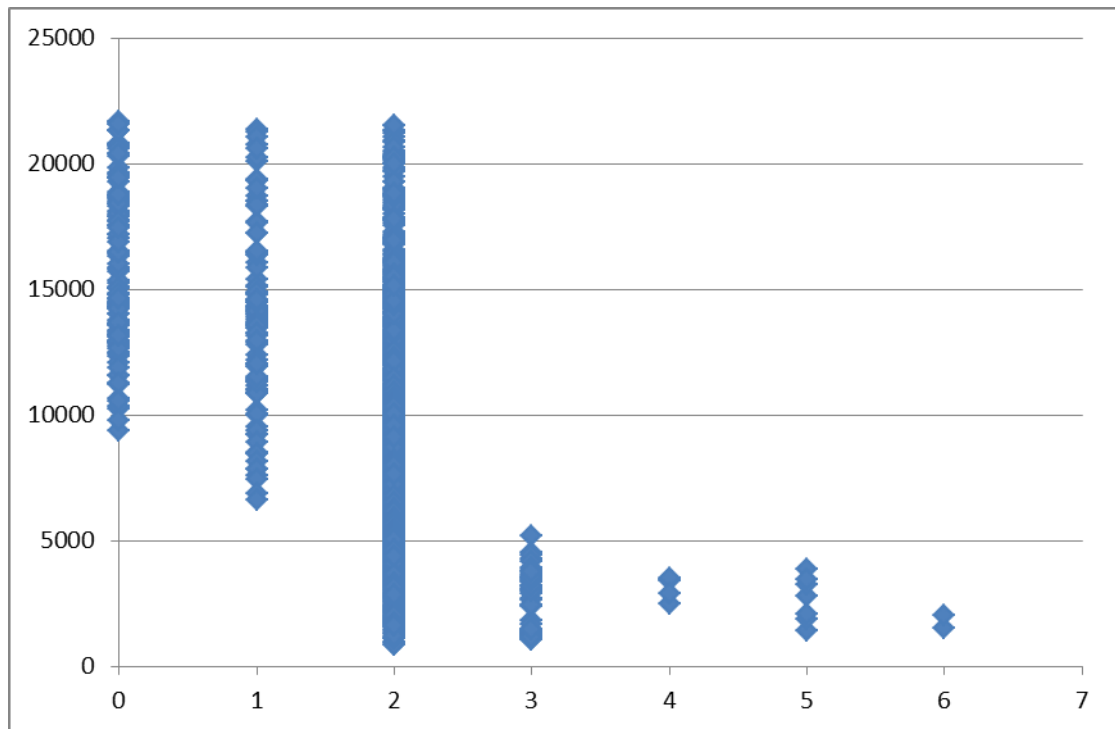


图 4-16 实验 7 中照度低于 300 的位置个数与有效室外照度的关系

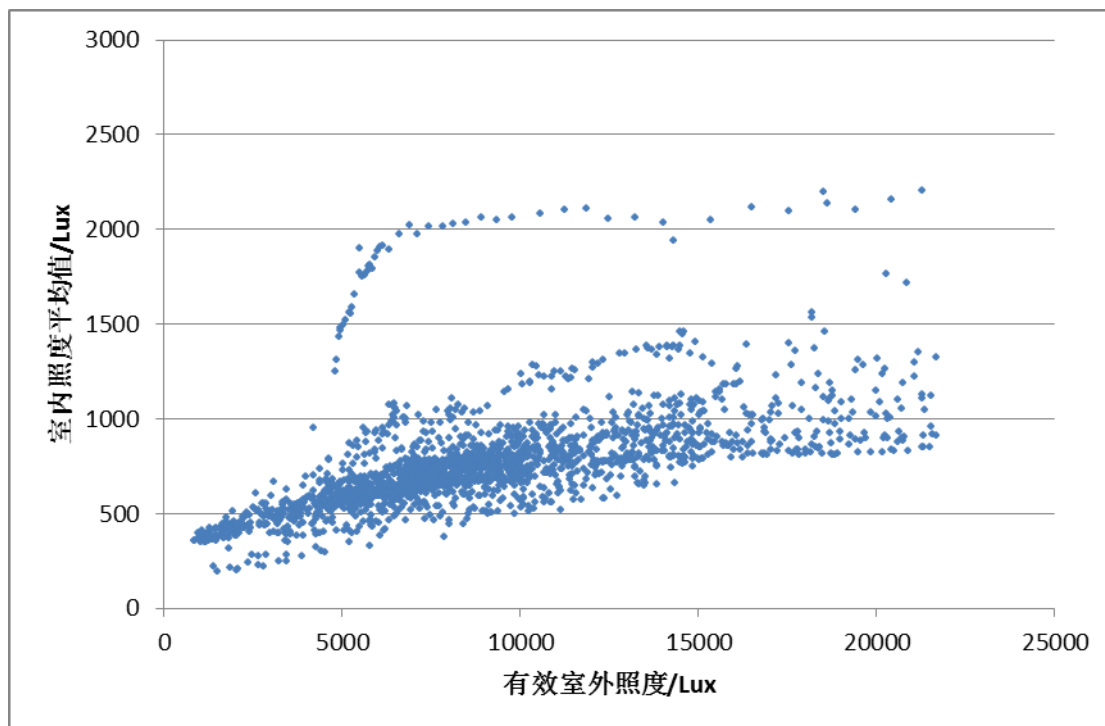


图 4-17 实验 7 中室内平均照度和室外照度的关系

### 4.2.9 实验 8

实验初始时，各传感器处照度调整至如表 4-18 所示。

表 4-18 实验 8 设置条件

起止时间	10.17-10.21					
简述	有人不自动开，可调光，照度足够时不自动关					
编号	LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
照度值	303	286	306	324	240	324

这种策略中，开灯需手动，而检测不到人员信号时，经延迟即自动关闭光源，有效避免通宵开灯的情况。但日光充足时不会自动关闭光源，所以，功率突降会发生，但出现时刻较为随机，主要由检测不到人员活动引起。午后常在低谷后突升，出现峰值，原因使用者长期静坐可能导致照明误关闭，自然光不断减少直至令使用者感受到照明不足时，照明被主动开启。

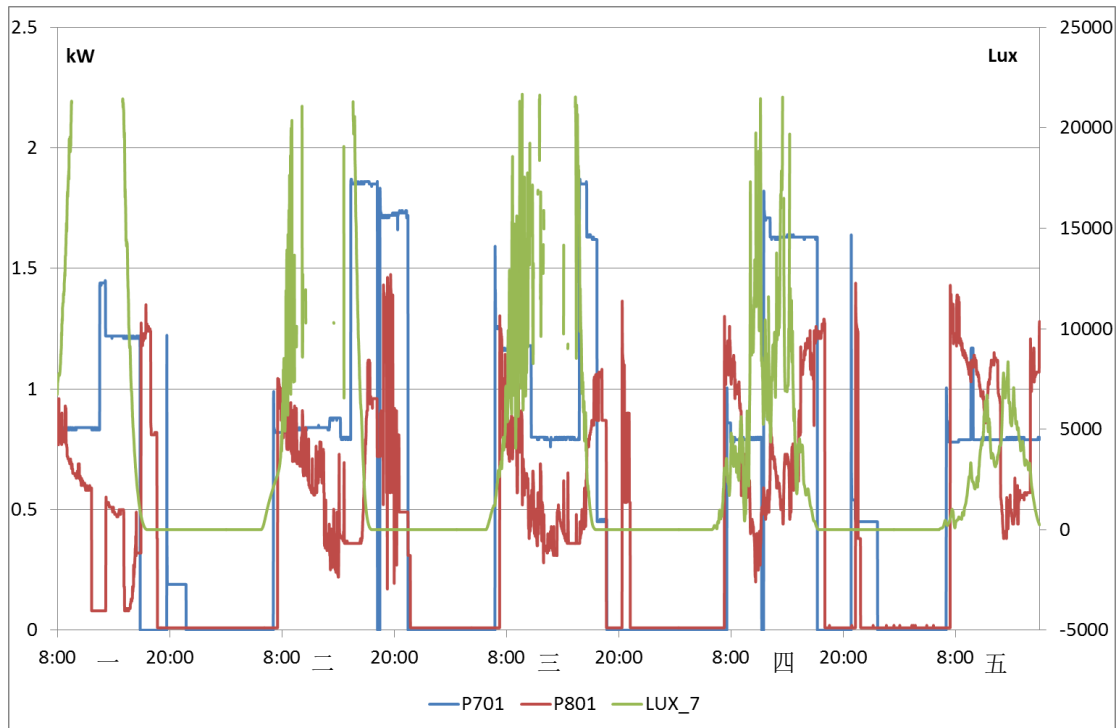


图 4-18 实验 8.手动开灯+恒定照度+照度充足不自动关灯模式连续记录

图 4-19 中，位于橙色横线，即 300lux 照度附近的时间段很少，就证明在内区，照明使用频率依然很低，几乎不会用到。因此，表 4-19 显示出传感器 4 和 5 位置上，照度满足时间比例很低。

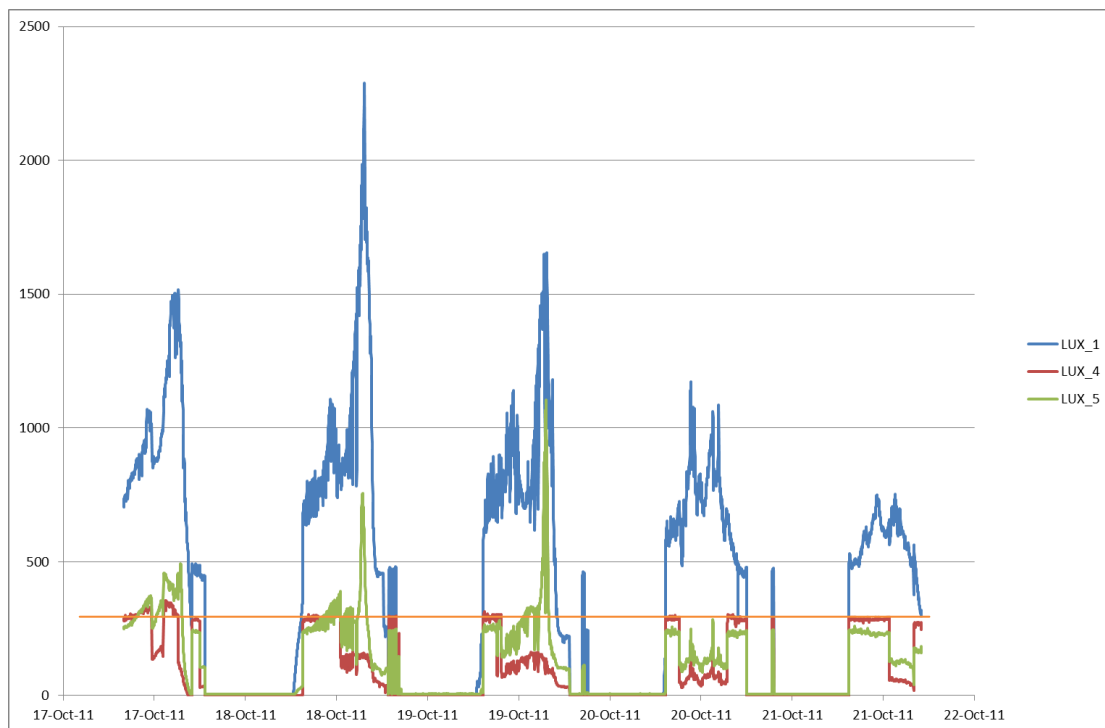


图 4-19 实验 8 中内区照度与单向采光区域照度动态记录

表 4-19 实验 8 照度不满足率

LUX_1	LUX_2	LUX_3	LUX_4	LUX_5	LUX_6
0.00	0.00	0.00	0.55	0.56	0.05

### 4.3 数据修正

实验得到的功率数据,由于对比办公室和实验台所在办公室照明系统有所不同,所以为了统一比较基准,先对所有得到的实时功率值进行了修正,将其变为百分比。最终的所有策略比较分析,都建立在相对值的比较基础之上。

两间办公室的总照明安装功率密度不相同,而且7楼的对比办公室内有数盏灯损坏,无法正常运行。所以需对7楼原应有的照明总功率进行修正。经实地统计,荧光灯管损坏16只,均位于开敞办公室内;门廊筒灯内损坏节能灯7只。实际测量显示,当开敞办公室内可用光影全部正常运行时,总功率为1.79kW;连同小办公室、会议室一起,即办公区域全部照明开启时,总功率为2.25kW,此即7楼对比办公室内的最大照明功率;上述两者相减,得到小办公室和会议室的总照明功率为0.46kW。在运行过程中,最常用到的是开敞办公室,相反,小办公室和会议室很少使用。再考虑到照明系统的设备额定功率为荧光灯36W/个,节能灯13W/个,计算可得总功率为667W,遂按照以下公式修正所得到的实际功率值:

当实际功率  $P > 1.79\text{kW}$  时,假定开敞办公室的照明已全开,直接累加已损坏的照明设备应有功率,

$$P' = P + a \quad (4-2)$$

当实际功率  $P \leq 1.79\text{kW}$  时,假定开敞办公室尚未完全投入使用,按比例放大为全部光源正常运行时的功率值,

$$P' = P \cdot (1 + a/1.79) \quad (4-3)$$

- $P'$ : 修正后实际功率, kW
- $P$ : 实际测量功率值, kW
- $a$ : 已损坏的灯管总功率, 为0.667kW

而实验台所在8楼办公室实测功率不需修正。因在实验台搭建过程中,将原有灯光全部替换成为了功率更低的T5灯管,所以总安装功率比7楼的办公室低,为2.12kW。7楼总功率按照实测最大功率叠加已损坏灯管的总功率,即2.917kW计算。4.4节中的比较所用的“功率百分数”,实际等于修正后的功率(7楼)或实际功率(8楼)在各自总安装功率中所占的比例。

### 4.4 控制策略比较

在观察分析所有的功率数据后可知,虽然上述实验持续时间约3个月,期间日照时间有所变化,但实际每天的照明运行总时间没有明显的相关性变化。所以,

以每天9小时连续运行时间作为对比办公室内手动控制的比较基础是可行的。

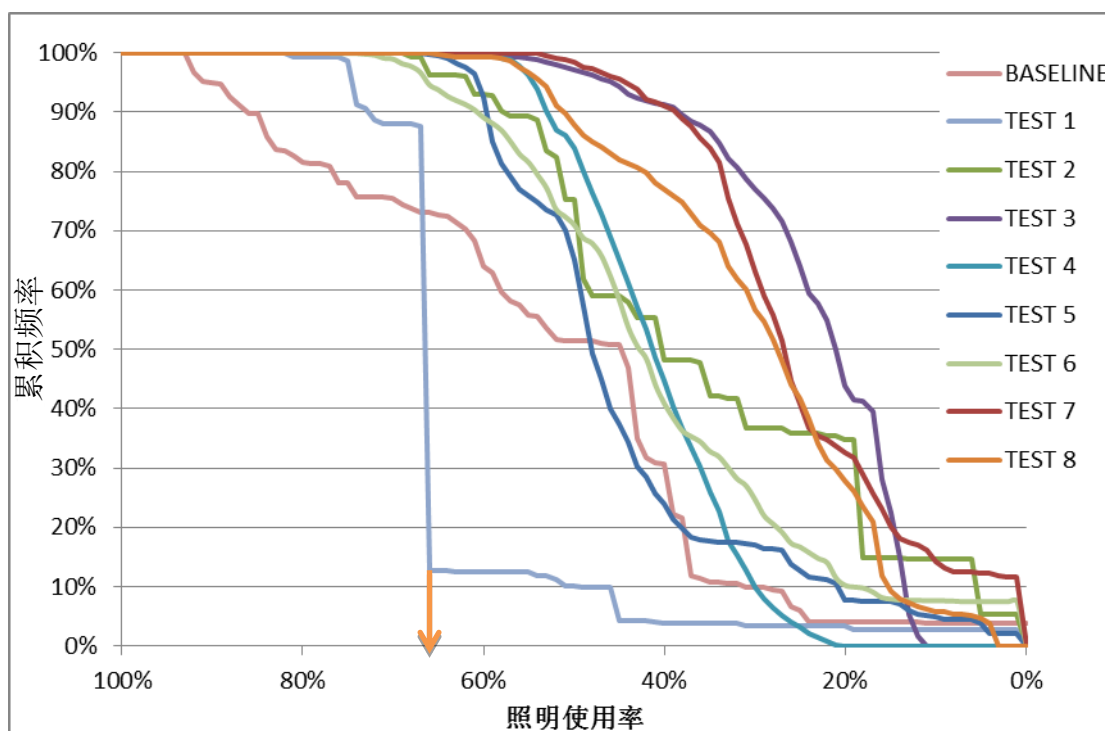


图 4-20 不同控制策略下照明功率百分比的累积频率

图 4-20 列举了所有实验中所用控制策略下照明功率百分比的累积频率。横轴代表某一个时刻的功率百分数，即该时刻照明总功率占该办公室照明安装总功率的百分比，部分负荷率，或称使用率。而纵轴坐标，则代表低于某一功率值的时间，在全部运行时间中占据的比例。BASELINE 对应 7 楼的对比办公室；TEST1~TEST8 分别对应实验 1~8 中的 8 种照明控制策略。

由粉色 BASELINE 曲线可看出，其功率百分比较高，曲线靠左。证明在大多数情况下，负荷率高，利用率高，自然用电量也大。由于各控制分组的输出功率固定，无法调功，而且其中几组灯使用频率比较固定，所以曲线可见明显的台阶形。以低于 80% 的总功率进行照明时，只能满足 80% 时间内的照明需求。与之相反，曲线越靠右，照明系统的负荷率越低，在更大比例的工作时间内，采用较低强度的照明，所以策略 3 和 7 应为能耗最低的策略。图 4-21 和图 4-22 也证明了这一点。

曲线 TEST 1 的特征则是功率百分比（照明使用率）集中于两极，在 67% 处（如箭头标注）发生突变，之后累积频率即接近 100% 的水平。说明系统主要处在 67% 左右负荷率的工作状态。这一结论和图 4-1 给出的信息相同，输出功率平稳，基本不变。

将工作日期间 8:00-17:00 的照明逐分钟功率累加，可以得到表 4-20 中列出的照明用电结果。减少量为实验台用电对比基准用电少用的电量；节能率为减

少量占对比基准用电的百分比。由于实验台与对比基准办公室内的照明装机容量并不相同，所以在单独衡量控制策略节能量的时候，需要根据各自装机总功率统一之后再比较绝对值。所以策略节能率采用以下公式：

$$\text{策略节能率} = 1 - \frac{\text{满负荷当量小时数}}{\text{基准满负荷当量小时数}} = 1 - \frac{\frac{\text{实验台用电}}{\text{实验总功率}}}{\frac{\text{基准用电}}{\text{基准总功率}}} \quad (4-4)$$

在实验进行期间最后一周的某个时刻，用做对比基准的办公室内，原先无法正常运行的光源得到了修复。所以，在最后一周进行的实验 6 中，实际的“基准总功率”比其他实验中的多出 0.667kW，提高到了 2.92kW。策略节能率的采用了相应值计算其总功率值。

表 4-20 各组实验中实际用电比较和策略节能率

实验编号		1	2	3	4	5	6	7	8
实验台用电	kWh	61	33	23	39	42	38	24	28
基准用电	kWh	39	54	65	45	51	67	59	47
减少量	kWh	-21	21	43	6	8	29	35	18
节能率	%	-54.3	38.1	65.3	13.6	16.6	42.6	59.9	39.5
实验台总功率	kW	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12
基准总功率	kW	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.92	2.25	2.25
满负荷当量小时数	$\frac{\text{kWh}}{\text{kW}}$	28.6	15.8	10.6	18.5	20.0	18.1	11.1	13.3
基准满负荷当量小时数	$\frac{\text{kWh}}{\text{kW}}$	17.5	24.0	28.9	20.2	22.6	22.9	26.1	20.8
策略节能率	%	-63.7	34.3	63.2	8.3	11.5	39.1	57.5	35.8

图 4-21 为能耗百分比图。将照明系统可能输出的最大功率在工作时间内连续运行作为能耗比较基础，百分比为某种控制策略下，使用的电量在该比较基础中所占的比例。百分比越低，节能效果越好。该值亦即等价于平均照明使用率。由下图可见，策略 3,7,8 节能效果最明显，能显著降低人工照明的使用比例。而 BASELINE 的数据显示，即使在纯手动控制模式下，由于使用频率等人为或其它因素的作用，照明平均使用率也只有安装功率（即设计值）的一半左右。图中的 BASELINE 数据取自全部 8 周实验中，对比办公室的所有实时功率平均值。



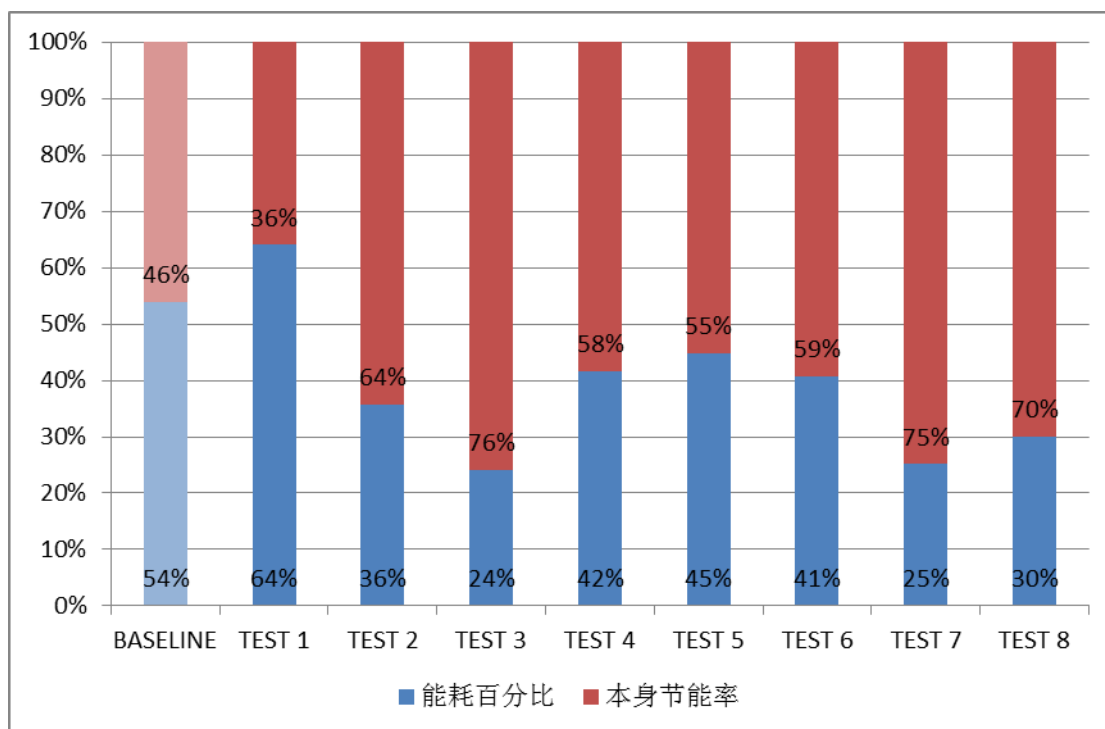


图 4-21 以安装功率为基准的照明能耗百分比/节能率

与图 4-21 有所不同，图 4-22 中采用的比较基础是对比办公室 701 的能耗百分比。假设两间办公室内的人员使用情况和窗帘位置等情况都相同，图中的数值就代表使用某种智能控制策略后，比单纯使用手动控制可减少的电量消耗比例。策略 1 比手动控制能耗高也是可以解释的，由于两间办公室并不处在完全充分使用的状态，有些照明控制区域内，只是偶尔有人经过。在手动控制情况下，这些区域的照明可以由周边有人常驻的区域内正常运行的光源代替，使用者不会另行开启该区域内照明。而人员检测自动控制中，这种情况下也会开启照明，并在人员离开一段时间后才关闭。

比较表 4-20 和图 4-22 可以观察到各策略的节能率并不相同，尤其是 TEST1 中，差值明显不同。其原因是两种比较方法的比较基础不一样，前者是同一时段内的运行总能耗做平行横向比较，和后者则是不同实验阶段对对比基准的时间方向上的纵向比较。在对比办公室内每周照明情况变化很剧烈的时候，两种比较会有较大差别。对比基准的总用电量在 TEST1 进行过程中恰巧出现谷值，比其均值约低 25%，而实验台当时使用率也较高，所以表面上得出的结果与节能预期不符。假设对比办公室内的每天的照明使用情况，以照明用电量为特征值，是独立同分布的，则使用总体平均值，即图 4-22 中的比较结果，可信度更高。

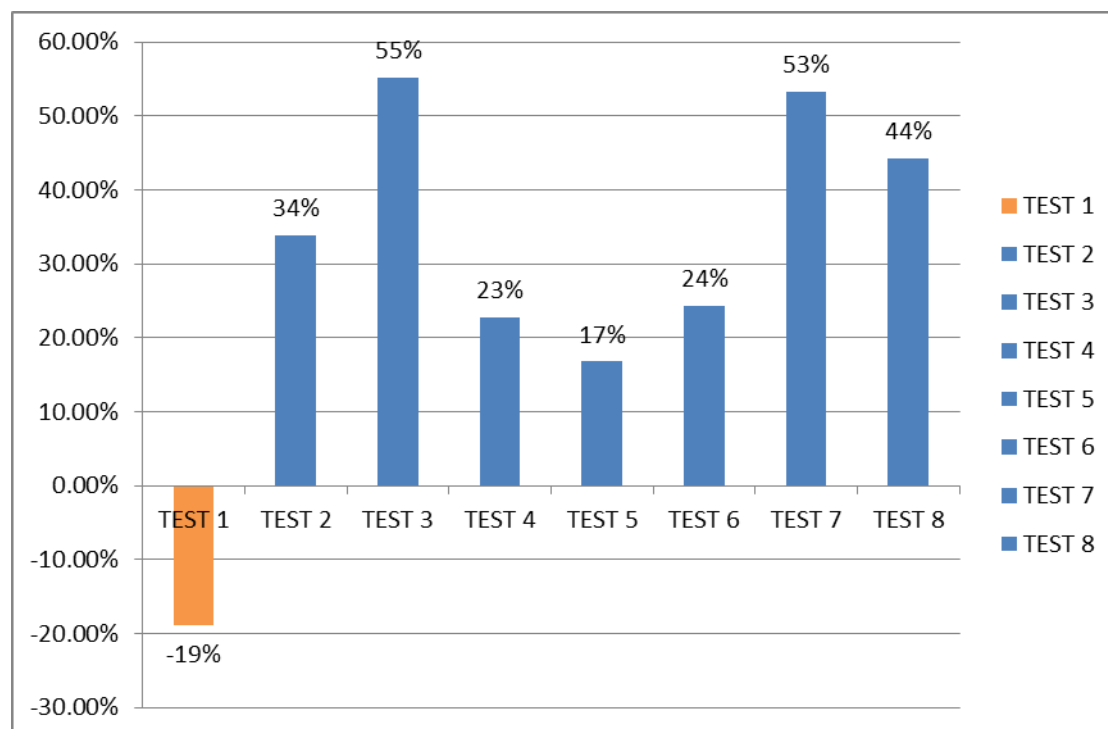


图 4-22 以对比办公室平均值为基准的能耗百分比

单纯从节能量上考虑，实验 3 和实验 7 所用的策略，即手动开启+无人自动关闭+完全调光策略和手动启停+自然光充足则自动关闭的调光策略，对实验台所在的办公室来说最为适宜。这是由该办公室的人员行为模式和建筑采光程度共同决定的。

## 第5章 照明策略对建筑能耗的影响

### 5.1 建筑模型简介

为了确定照明策略对建筑运行中其他分项能耗的影响,将上一章中的实验结果输入到 EnergyPlus 中建立的建筑模型中,进行模拟计算。这一模型输入参数根据综合楼实际情况设置。照明控制策略的运用,体现在照明时间表的设置上。

#### 5.1.1 地理位置和天气参数

上海,纬度  $31.12^{\circ}$ ,经度  $-121.26^{\circ}$ ,时区 GMT+8。天气参数采用的是 EnergyPlus 网站上提供的 CHN\_Shanghai.Shanghai.583620\_SWERA.epw 文件。

#### 5.1.2 建筑几何模型

模型的建筑几何尺寸参考同济大学综合楼实际状况并进行简化后确定,共3层,标准层长宽均为 49.5m,面积  $2450\text{ m}^2$ 。主要研究对象为8楼 01 区域,即根据实验台所在办公室搭建的区域模型,长 15.67m,宽 14.44m,面积  $226\text{ m}^2$ 。其余区域均简化为全空调区。由于照明功率的实测值是针对整个办公室,包括会议室和小办公室,所以将整个办公室建成一个区,不分内外区。平面图如图 5-1 所示,每层均分为 01 和 02 两个区;建筑立面见图 5-2,黄色区域为研究对象办公室 801 的位置。

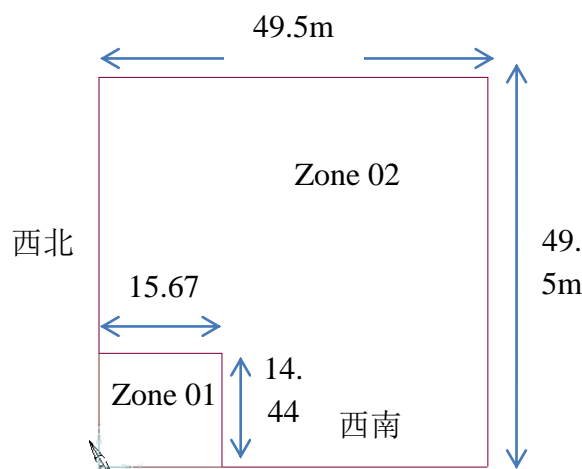


图 5-1 分区示意平面图

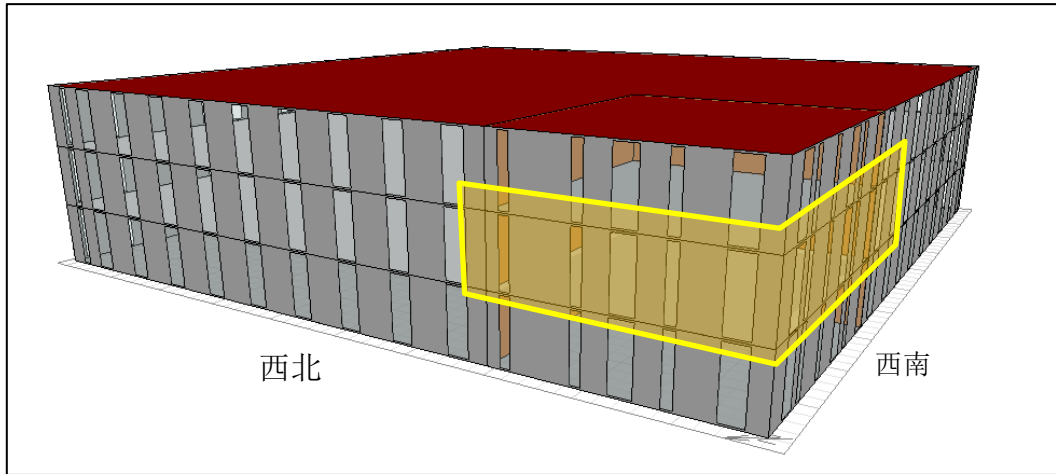


图 5-2 建筑模型立体示意图

### 5.1.3 建筑结构热工特性

建筑结构的热工特性如下表所示，均满足节能设计标准。

表 5-1 建筑模型热工特性

结构	参数	单位	值	公建标准
外墙	传热系数 U 值	$W/m^2 \cdot K$	0.944	1.0
屋顶	传热系数 U 值	$W/m^2 \cdot K$	0.556	0.7
外窗	传热系数 U 值	$W/m^2 \cdot K$	2.465	3.0
	日射的热系数 SHGC 值	--	0.461	0.5
内墙	传热系数 U 值	$W/m^2 \cdot K$	0.220	--

### 5.1.4 室内负荷与运行时间

室内负荷由照明、设备和人员负荷构成。模型中的室内负荷时间表参考《公共建筑节能设计标准 GB50189—2005》<sup>[3]</sup>的相关规定进行设定。其中照明功率密度取自《建筑照明设计标准》<sup>[12]</sup>，设备功率密度根据两间办公室实际调查数据取平均值，人员按照通常的使用情况进行估计，输入参数如表 5-2

表 5-2 办公楼基本模型中室内负荷设定

夏季设定温度	冬季设定温度	运行时间	照明	设备	人员
$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	h~h	$W/m^2$	$W/m^2$	$m^2/人$
24	20	8:00~17:00	11	7.6	15

### 5.1.5 负荷计算与分区

重点研究对象为单个房间的冷热负荷，冷热源及空调形式未进行配置。模拟中采用 Ideal Loads Air System 模块计算冷热负荷。

表 5-3 空调系统输入参数

供冷设定温度	24℃
供热设定温度	20℃
夏季送风温度	16℃

### 5.1.6 新风量与漏风率

新风量为每人 9.4L/s。房间漏风率按照  $0.2 \text{ h}^{-1}$  计，空调系统开启时，因房间呈正压，漏风率为零。

### 5.1.7 照明时间表设置

为形成统一的比较基准，建筑模型的照明功率密度如上一节所讲，根据节能标准确定。实验结果以百分比的形式作为周时间表输入到模型中。从实际功率折算到百分比的方法，参见 60 页 4.3 节。

原实验记录数据为照明功率以 1 分钟为周期的采样值，若作为模拟输出，需转变为逐时值的格式。经过比较，采用半小时间隔的平均值和一小时间隔的平均值作为时间表，对能耗模拟结果和照明计算结果本身并无太大差异。所以，统一使用各自的逐时平均值，作为基准模型和各种照明控制策略的照明运行时间表。每个时间表以周为单位，周一到周五以实际工作日 8:00-16:59 的数据逐时平均值为时间表 (Schedule) 一项中逐时 (Hourly) 的设定值，周六周日设为全关，夏季和冬季负荷计算日分别设定为 24 小时照明全开和照明全关。实验一到实验八的模拟用照明运行周时间表如下：

表 5-4 实验一照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
8:00	0.73	0.67	0.67	0.64	0.67
9:00	0.69	0.61	0.66	0.67	0.66
10:00	0.65	0.65	0.60	0.66	0.66
11:00	0.64	0.61	0.66	0.52	0.66
12:00	0.54	0.59	0.59	0.42	0.65
13:00	0.58	0.66	0.65	0.70	0.64

14:00	0.67	0.66	0.63	0.73	0.66
15:00	0.68	0.65	0.66	0.68	0.66
16:00	0.63	0.31	0.69	0.71	0.55

表 5-5 实验二照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
8:00	0.20	0.53	0.32	0.67	0.40
9:00	0.18	0.52	0.35	0.59	0.42
10:00	0.18	0.52	0.40	0.43	0.48
11:00	0.18	0.52	0.36	0.41	0.54
12:00	0.18	0.31	0.32	0.34	0.58
13:00	0.18	0.05	0.18	0.45	0.55
14:00	0.11	0.06	0.18	0.49	0.58
15:00	0.01	0.05	0.31	0.49	0.58
16:00	0.01	0.05	0.49	0.49	0.48

表 5-6 实验三照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
8:00	0.33	0.55	0.31	0.26	0.33
9:00	0.29	0.40	0.27	0.21	0.26
10:00	0.19	0.30	0.18	0.15	0.19
11:00	0.14	0.47	0.17	0.14	0.17
12:00	0.16	0.31	0.20	0.14	0.16
13:00	0.20	0.37	0.24	0.13	0.16
14:00	0.15	0.40	0.18	0.13	0.20
15:00	0.19	0.34	0.15	0.14	0.20
16:00	0.27	0.39	0.15	0.17	0.22

表 5-7 实验四照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
8:00	0.43	0.41	0.47	0.44	0.48
9:00	0.36	0.38	0.47	0.39	0.45
10:00	0.31	0.36	0.39	0.40	0.46
11:00	0.35	0.32	0.33	0.45	0.47
12:00	0.35	0.32	0.35	0.50	0.40
13:00	0.35	0.33	0.34	0.53	0.42
14:00	0.28	0.35	0.33	0.53	0.45
15:00	0.34	0.41	0.38	0.54	0.48
16:00	0.51	0.39	0.39	0.56	0.52

表 5-8 实验五照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
----	-----	-----	-----	-----	-----

8:00	0.45	0.33	0.42	0.23	0.29
9:00	0.50	0.47	0.49	0.41	0.47
10:00	0.59	0.37	0.50	0.40	0.59
11:00	0.63	0.22	0.50	0.31	0.54
12:00	0.56	0.40	0.25	0.53	0.47
13:00	0.49	0.41	0.46	0.58	0.48
14:00	0.58	0.14	0.50	0.59	0.39
15:00	0.52	0.33	0.49	0.60	0.32
16:00	0.44	0.41	0.24	0.60	0.45

表 5-9 实验六照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
8:00	0.47	0.38	0.48	0.52	0.43
9:00	0.42	0.27	0.46	0.52	0.35
10:00	0.32	0.20	0.44	0.50	0.32
11:00	0.36	0.15	0.28	0.46	0.31
12:00	0.27	0.22	0.00	0.49	0.28
13:00	0.37	0.45	0.40	0.42	0.17
14:00	0.41	0.59	0.54	0.47	0.19
15:00	0.41	0.66	0.66	0.49	0.33
16:00	0.37	0.61	0.62	0.56	0.51

表 5-10 实验七照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
8:00	0.33	0.26	0.28	0.37	0.38
9:00	0.30	0.12	0.29	0.34	0.36
10:00	0.28	0.07	0.31	0.33	0.32
11:00	0.24	0.29	0.28	0.30	0.27
12:00	0.15	0.25	0.29	0.25	0.21
13:00	0.24	0.15	0.24	0.14	0.19
14:00	0.37	0.19	0.10	0.05	0.01
15:00	0.48	0.35	0.18	0.00	0.13
16:00	0.49	0.44	0.18	0.01	0.27

表 5-11 实验八照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
8:00	0.38	0.41	0.38	0.48	0.58
9:00	0.32	0.36	0.36	0.31	0.52
10:00	0.30	0.32	0.26	0.18	0.49
11:00	0.20	0.29	0.22	0.23	0.47
12:00	0.04	0.25	0.16	0.32	0.46
13:00	0.21	0.15	0.19	0.28	0.21

14:00	0.23	0.18	0.19	0.31	0.24
15:00	0.07	0.17	0.17	0.45	0.27
16:00	0.15	0.22	0.29	0.54	0.52

作为比较基础的 BASELINE 模型时间表，根据对比办公室内 8 周实验时间内的全部功率数据设置。选取相同天内同一小时所有值做平均，形成整周逐时时间表。

表 5-12 基准照明时间表

小时	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五
8:00	0.42	0.49	0.55	0.53	0.57
9:00	0.48	0.50	0.55	0.53	0.62
10:00	0.49	0.52	0.54	0.55	0.62
11:00	0.36	0.41	0.42	0.48	0.57
12:00	0.30	0.46	0.33	0.55	0.64
13:00	0.38	0.54	0.24	0.60	0.66
14:00	0.40	0.55	0.18	0.51	0.66
15:00	0.40	0.55	0.38	0.50	0.65
16:00	0.40	0.48	0.45	0.47	0.61

## 5.2 基准能耗模拟结果分析

上述模型进行模拟计算后，可以得到作为对比基准的房间内全年用能情况。其中包括该房间的耗冷量和耗热量，以及照明和其他电器的总耗电量，如表 5-13 中能耗需求一栏。这里的空调和采暖能耗需求分别以房间内全年耗冷量和耗热量代表。

根据对典型办公建筑的模拟结果<sup>2</sup>，假设使用额定 COP 为 5.58 的离心式水冷机组作为冷源，可得其全年运行时的平均 COP 约为 4.9。同时配备一台冷却塔，每提供 1kWh 冷量冷却塔需耗电 0.037kWh，并考虑水泵能耗，可得综合 COP 约为 3.9。由此折算出空调系统所需终端电耗。

采暖方面，热源假设为燃气锅炉，制热效率 0.8，再考虑热水环路上循环水泵等能耗及输配中的散热损失，采用综合系数 0.6。由此折算出采暖系统终端耗热量。

供电煤耗取 339gce/kWh，天然气折标煤系数<sup>[58]</sup>取 1.330 kgce/ m<sup>3</sup>，低位热值取 38.9MJ/m<sup>3</sup>，折算后得到所用的建筑模型分项一次能耗及其所占比例列于表

<sup>2</sup> 同济大学中德工程学院建筑性能与技术研究所. 上海市既有公共建筑节能改造体系研究总报告（初稿）. 2007.



5-13 中，参见图 5-3。

表 5-13 建筑模型全年能耗

项目		空调	采暖	照明	其他
能耗需求	MJ	29284	372.8	10002	11321
一次能耗标煤用量	kgce	700	212	941	1066
单位面积标煤用量	kgce/m <sup>2</sup>	3.10	0.94	4.17	4.72
一次能耗比例	%	24	7	32	37

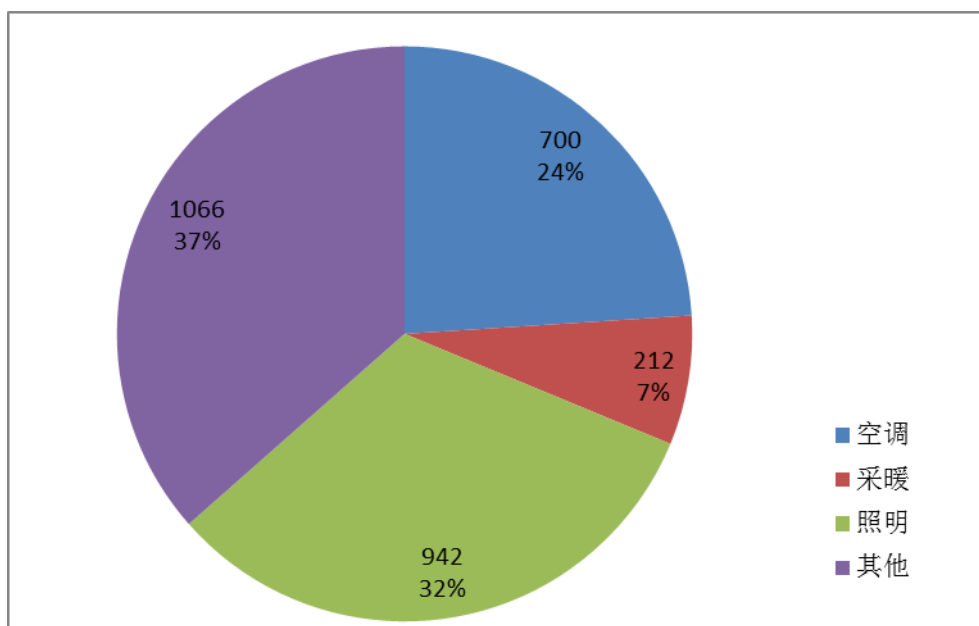


图 5-3 建筑模型全年分项一次能耗比例饼图（单位：kgce）

由分项能耗的比例可以看出，该建筑模型中，除去固定的电器设备用电，照明用电比例是最高的，约占 1/3，而空调和采暖能耗总共约占 1/3。空调能耗又比采暖能耗高出 2 倍。

本章中涉及建筑总能耗或类似概念时，都如本节所述，包含根据房间的耗热量和耗冷量计算得出的采暖和制冷的一次能耗，同时包含照明及室内电器的能耗。但不包含其他未说明的建筑内能耗，如电梯。

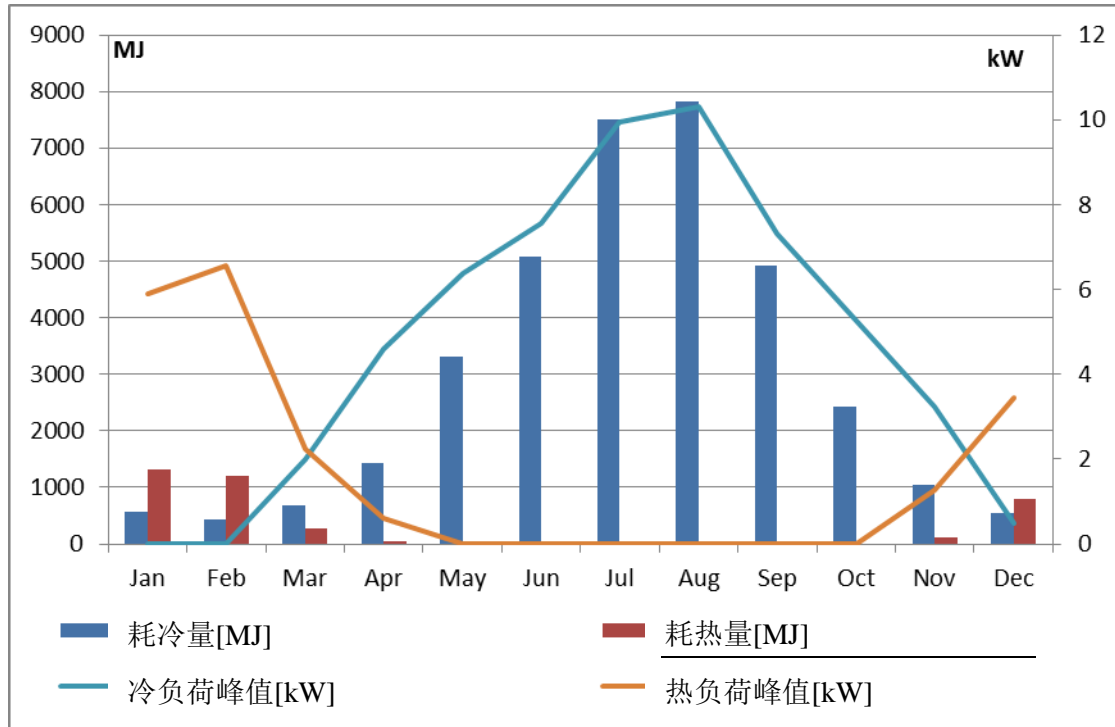


图 5-4 逐月冷、热消耗量及负荷峰值

图 5-4 中显示了使用理想负荷空气系统 (Ideal Loads Air System) 模块计算得到的耗冷量和耗热量的逐月情况。耗冷量最高的月份是 8 月, 约 7700MJ; 而冷负荷峰值的出现时间也在 8 月, 负荷值接近 11kW。房间对于采暖的需求远低于对供冷的需求, 耗热量最高的月份是 1、2 月份, 各约 1000MJ; 热负荷峰值出现在二月, 在 600W 以上。

### 5.3 不同照明策略对建筑能耗的影响

本节分析在上述建筑模型中, 加入实验数据所得的照明时间表后, 各部分能耗受到的影响。

#### 5.3.1 热负荷受到的影响

由于照明负荷的减少, 房间内照明得热减少, 逐月耗热量和全年耗热量均有所增加。比较采暖季 1 月、2 月和 12 月中, 控制策略实施下的耗热量和基准耗热量, 可得如图 5-5 所示逐月耗热量的增加比例。在 1 月和 12 月, 增幅达到 7-8%。而策略 1 可降低逐月耗热量 4%。

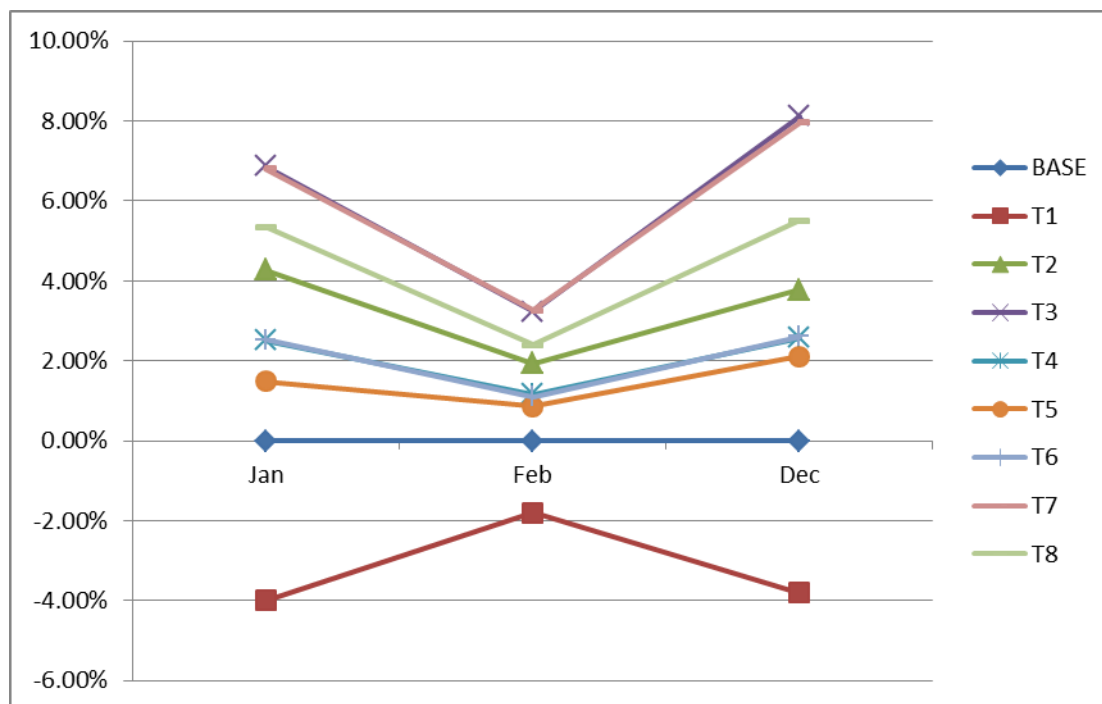


图 5-5 不同照明控制策略下逐月耗热量增加率

从图 5-6 全年耗热量来看，照明节能带来的耗热总量增加，最多为 6.6%。而对热负荷峰值的影响基本相同，约提高至多 4.7%。

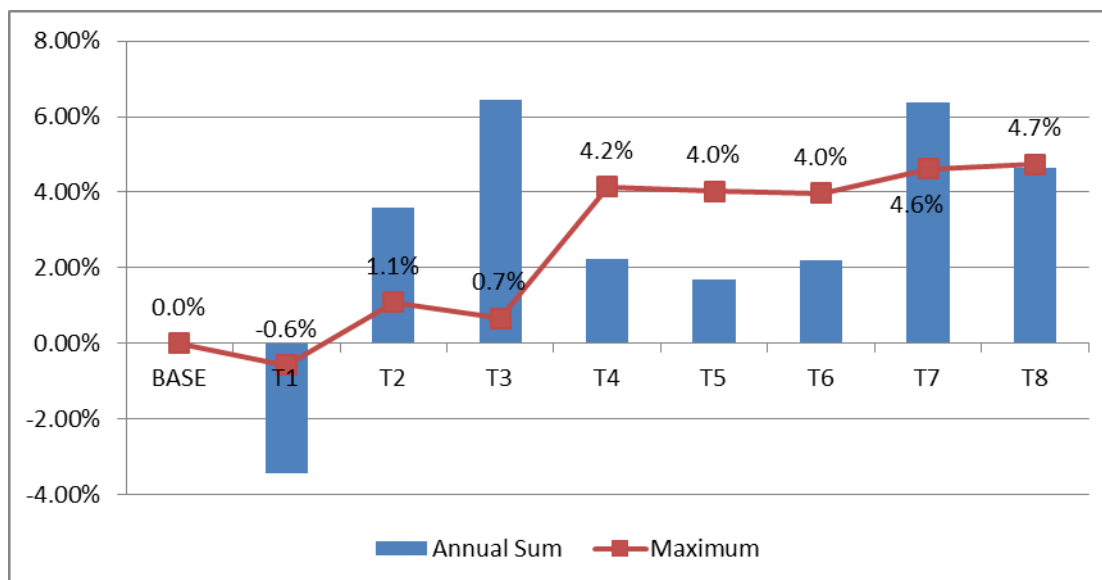


图 5-6 年耗热量与热负荷峰值增加率

### 5.3.2 冷负荷受到的影响

照明负荷减少时，最大约可减少 4% 的空调逐月耗冷量。比例上，小于耗热

量的增加。而照明能耗增加时，耗冷量增加不超过 3%。总体上，空调负荷随照明负荷的变化不如采暖负荷敏感。

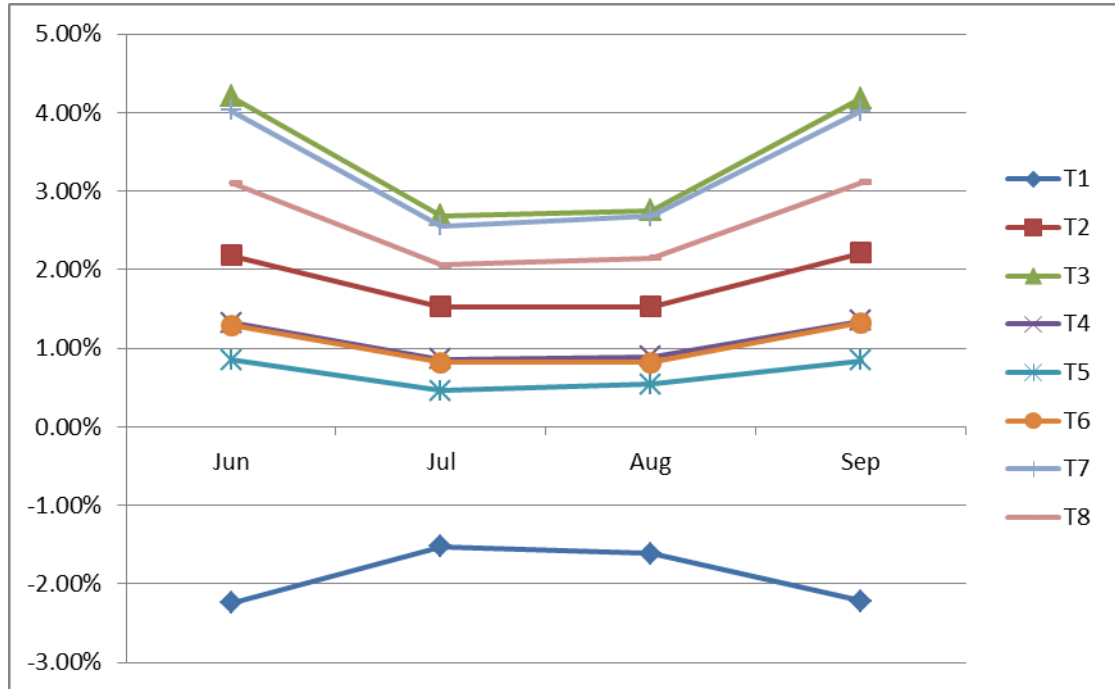


图 5-7 不同策略下逐月制冷需求减少率

冷负荷峰值和总耗冷量所受到的来自照明控制策略的影响是相同的，降低照明散热，在减少总耗冷量的同时，也可以降低冷负荷峰值，削峰填谷，减少设备设计容量。峰值减少的趋势和总耗冷量减少趋势相同。

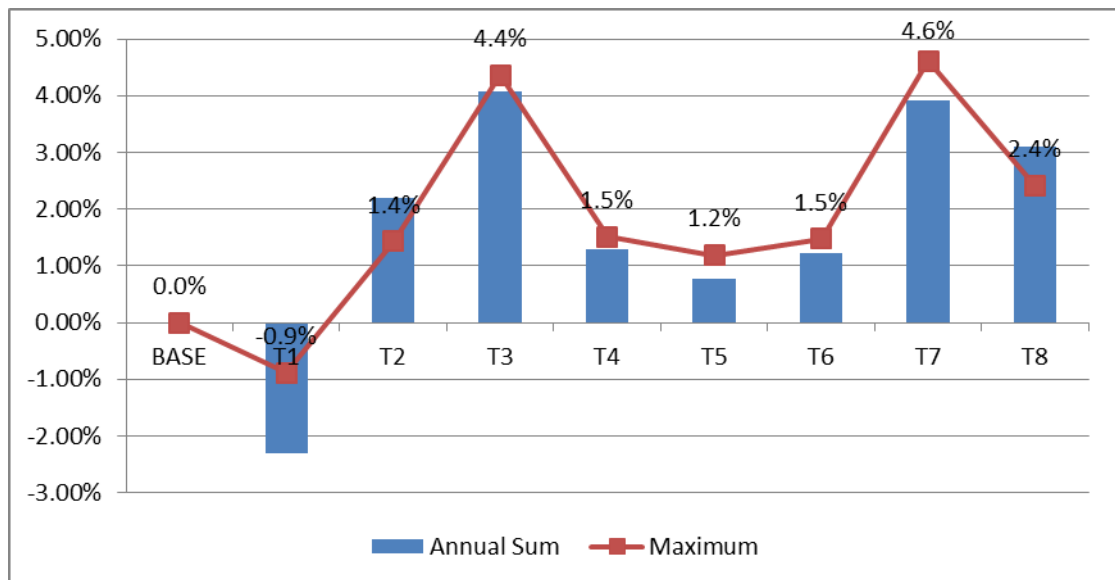


图 5-8 年制冷需求和制冷负荷峰值减少率

### 5.3.3 建筑总能耗受到的影响

如 5.2 节中说明相同，本节中涉及建筑总能耗或类似概念时，只包含根据房间的耗热量和耗冷量计算得出的采暖和制冷的一次能耗，以及照明和室内电器的能耗。但不包含其他未说明的建筑内能耗，如电梯。

受照明控制策略影响，照明能耗发生改变，建筑内各分项能耗所占的比例也随之发生变化。鉴于该原建筑模型中照明用电比例很高，所以，随着照明总能耗的降低，空调和采暖的比例都有所提高，但采暖方面表现较不明显。图 5-9 显示不同策略运行后，建筑内分项能耗比例的重新分配。总体上，除实验 1 之外照明能耗比例都是减少的，而这部分份额首先转移至电器设备用电，其次影响制冷，最后由供热能耗比例提高来弥补。

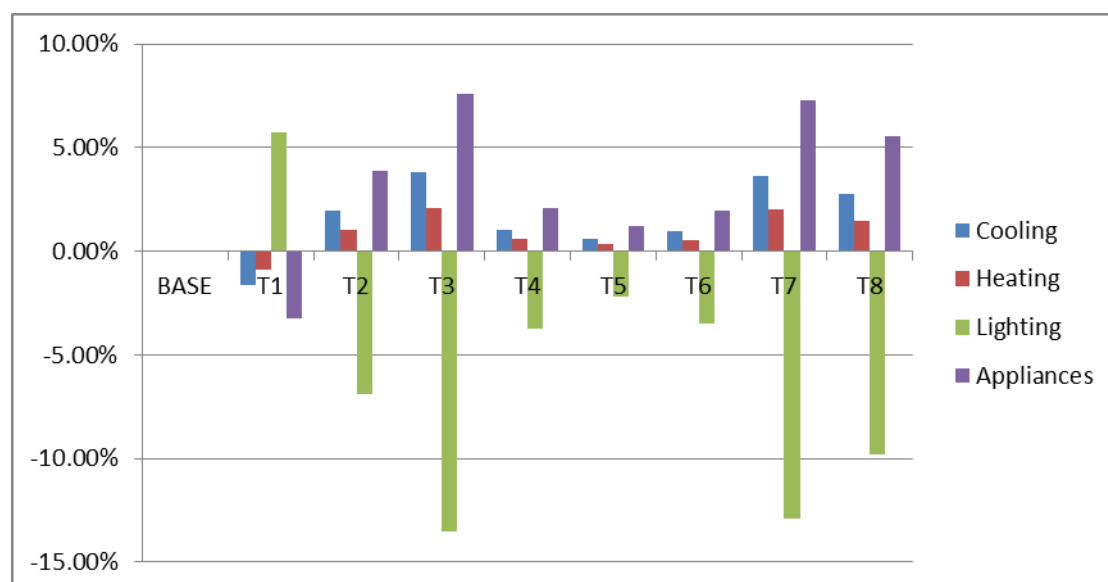


图 5-9 建筑总能耗中各分项所占比例的变化

综合的观察表 5-14 和图 5-10 中建筑总能耗可以发现，使用智能控制策略降低照明能耗的同时，整体能耗也是随之降低的。这个结果首先的原因是原照明能耗比例就比较高，其次是因为在上海地区，耗冷量远远高于耗热量。所以，以实验 5 为例，照明本身减少 16.8%（见图 4-22）的情况下，可以带来建筑总能耗 3.2% 的节能率。

表 5-14 单位面积建筑总能耗及分项能耗（单位：kgce/m<sup>2</sup>）

	空调	采暖	照明	其他电器	总能耗	总能耗减少率
BASE	3.24	0.983	4.36	4.94	13.52	--
T1	3.32	0.949	5.63	4.94	14.83	-9.7%

T2	3.17	1.018	3.10	4.94	12.23	9.6%
T3	3.11	1.046	2.10	4.94	11.19	17.2%
T4	3.20	1.004	3.65	4.94	12.79	5.4%
T5	3.22	0.999	3.93	4.94	13.08	3.2%
T6	3.20	1.004	3.70	4.94	12.84	5.0%
T7	3.12	1.045	2.18	4.94	11.28	16.6%
T8	3.14	1.028	2.63	4.94	11.74	13.2%

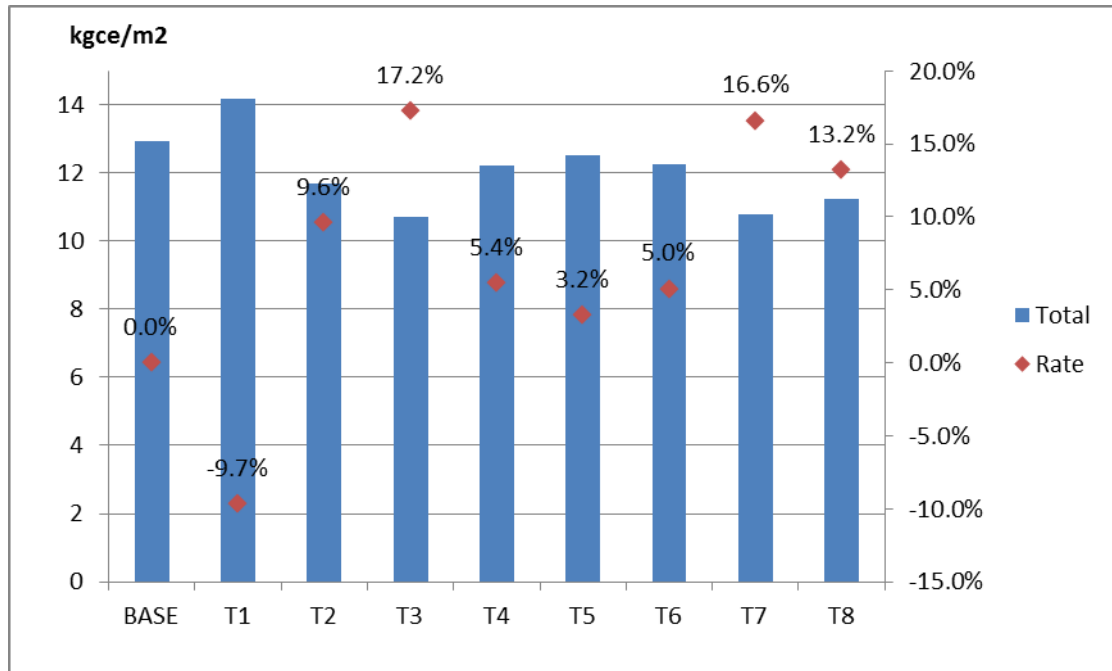


图 5-10 不同控制策略对建筑总能耗及其总节能率

而照明控制策略在对建筑能耗减少的积极作用在图 5-11 中更能充分得到证实。图中柱形高度代表对应照明控制策略下的模拟结果中，某分项能耗相比基准模型的减少幅度。以 TEST1 为例，照明能耗提高 28%，由此导致耗冷量提高了 3%，耗热量降低 4%，同时总能耗增加 10%。各分项能耗对照明能耗的敏感程度不同，照明节能会带来采暖能耗较大幅度的升高，而空调能耗下降幅度低于该升高幅度。但总体上，由于照明能耗本身节能量显著，且上海地区采暖负荷远小于制冷负荷，所以总能耗，如蓝色柱形所示，仍可从其中受益。

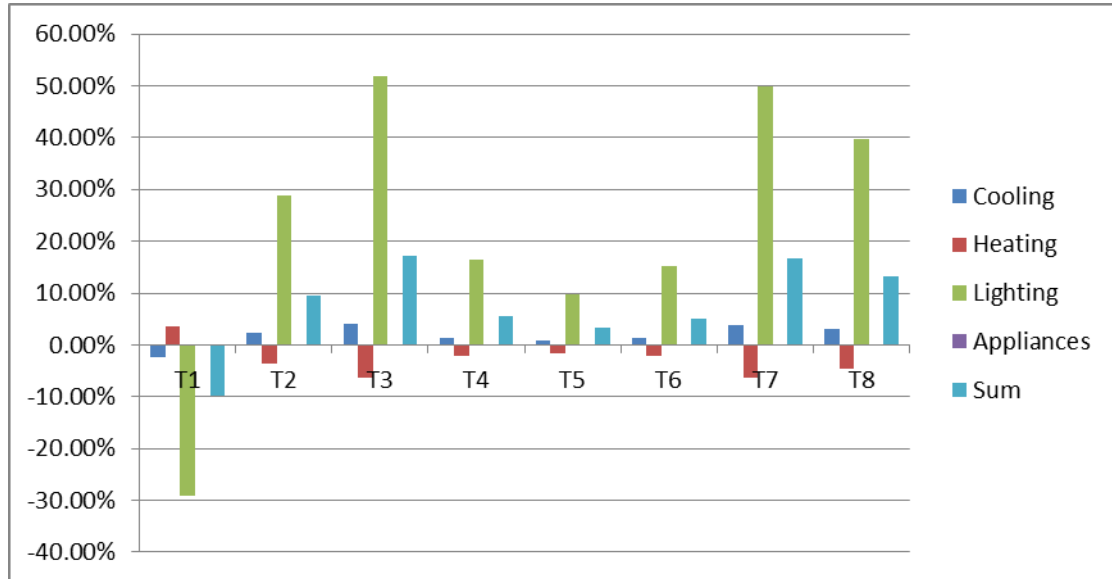


图 5-11 各分项能耗在不同策略下的减少比例





## 第6章 结论

总结各国学者的研究成果可以知道,建筑总能耗的影响因素非常之多。然而照明作为其中占很大份额的一项,同时又与采暖和制冷能耗密切相关,一直都是学者们关注的重点节能领域。

针对某办公室的调查表明,设计照度值在人工照明情况下基本可以得到满足,但以照明功率密度作为节能衡量指标时,仍有较大的节能潜力。按照实际建筑进行采光模拟的结果以及对实际全天自然采光下室内照度的统计结果都证明,该办公室内可利用的自然光资源较为充足。另外,该办公室的使用率较低,若采用人员探测进行照明控制,也可降低部分区域内照明的运行时间,从而实现照明节能。基于这些条件的考虑之上,在办公室内搭建了照明控制系统实验台,不仅采用高效灯具替换原有灯具,而且配备预置多种模式的照明控制系统,为照明控制策略研究提供基础。此外,建立了相应的监测平台,具备数据采集、在线显示和自动记录的功能,为照明策略实验提供完整的数据支持。

在该实验台上对不同智能照明控制策略进行实际验证后,可以得出以下结论:

1. 采光良好的办公室中,适宜采用包含自然光相关调光控制的智能照明控制策略,可实现很高的节能率。恒照度控制策略下,照明功耗和自然采光强度相关性非常强,可以很好的利用天然光节约照明能耗。在现代技术的高频电子镇流器帮助下,调光曲线平滑,不会有明显的主观感觉,没有由此引发视觉不舒适的风险。

2. 采用手动开启光源的方式似乎比由人员探测信号自动开灯的方式更为实用。尤其在开敞区域照明分区控制,且部分控制区内没有固定人员活动的情况下。这种方式虽然会增加使用者的“工作量”,可能带来不便,但避免了无人常驻区内光源不必要的开启,其节能效果非常显著,有效降低了整个区域内的平均功率,提高全自然采光时间比例。实验7的结果也说明,如果使用人员探测信号作为开灯依据,很可能反而造成电能的浪费。

3. 无人时自动关闭是非常值得推荐的控制方法。以本文所涉及的控制系統为例,当人们对该系统仍不熟悉时,对如何正确关闭光源不甚了解,或者单纯只是在下班时遗忘了关灯,这些都会导致难以避免的通宵亮灯情况。而这种无人自动关灯的控制方式可以完全阻止这种情况发生。只是在实际工程中,用于人员信号探测的传感器还无法做到精确判断其覆盖范围内是否有人,常将人员长时间静坐误判为无人信号,引起照明系统误关闭,给使用者带来一定的麻烦。这一缺陷现在通常依靠延迟动作来弥补一部分,只能期待相关技术产品的质量提高将其改

善。

4. 总体上，照明控制若采用手动开启、自动关闭的方式，可以实现照明节能率的最大化。适当使用人员探测的控制策略，可节约照明能耗 30% 以上；而单独使用自然光相关控制时，照明能耗至少可降低 23%；两者结合使用，可实现约 50% 的节能率。

5. 上述控制方式组合而成的不同智能控制策略，对照明节能都有很好的积极效果，而建筑节能方面由此受到的益处也是显而易见的。虽然相对于采暖能耗的增加，制冷能耗减少对照明能耗减少的敏感程度低很多，但照明本身节能率远高出采暖能耗升高比例一倍多，所以，不仅在以制冷为主的气候区内，只要建筑分项能耗中，采暖能耗不比制冷和照明能耗总量高太多，都可以通过采用适当的智能照明策略，实现建筑整体节能。

6. 在实验数据的处理过程中，如何选取比较基准是个值得深思的问题。最理想的条件当然是：在使用情况完全相同，照明系统也相同的两栋相同的建筑内，同时运行手动控制和智能控制策略，进行以年为周期的比较实验，以期用大样本得出可信度高的结果，排除用户行为的随机性和天气状况的随机性、周期性影响。但这个条件几乎无法满足，所以只能用有限的参数做简单数据修正，使用相对值进行比较。这也是很多文献和研究成果都以模拟结果为基础的原因，并同时促进了人员行为模式模拟技术的发展。

由于时间和条件限制，该论文仍有较多不足之处，有待后续工作继续完善：

1. 建立更大规模的实验平台，如扩展至某办公建筑的一个层面，或整栋建筑，使实验结果更具普遍性、代表性；
2. 在实验平台搭建之前，对手动控制模式下的照明系统使用率、人员行为模式等，进行更充分的长期调查，以便为将来的实验数据比较提供基础；
3. 分析现有数据，归纳总结对工程更为实用的照明控制方式节能率的算法；
4. 增加建筑总能耗的监测系统，通过实验的方法，确定照明控制策略给建筑总能耗或各分项能耗带来的影响。

## 致谢

上学接近 20 年，仅在同济就待了 7 年半。现在回想起来，最后的这一个月恐怕比高考之前还要紧张。多谢经常陪在我身边的师弟师妹们，有你们，工作室里赶论文的我才不会太孤单。多谢多次被我电话骚扰的同门黄森，给我很多建设性的意见和精神上的鼓励。多谢师姐李玉明，在模拟的道路上给我指明方向。多谢左师兄和陈博士，让对编程几乎陌生的我最终学会如何使硬件按照指令运行。多谢公司的同事们，启发我利用最少的资源实现最大的收益。多谢欧司朗公司，提供这个难得的实验机会。

一篇论文的成就，绝对不是一人之力即可实现的。最后尤其要感谢的，是对我严格要求又关怀备至的潘老师和黄老师，还有远在山西却像就在我身边的父亲母亲。

还有很多值得感谢的人，衷心希望在将来，也能得到大家的帮助，更希望自己未来踏上社会的作为，不会辜负大家对我的厚爱。

## 参考文献

- [1] 丁肇文. 2010年气候变化绿皮书:北京单位GDP能耗全国最低[EB/OL]. [http://www.ce.cn/cysc/newmain/jdpc/hb/201011/23/t20101123\\_20549405.shtml](http://www.ce.cn/cysc/newmain/jdpc/hb/201011/23/t20101123_20549405.shtml). 访问日期: 2011.11.10.
- [2] Krarti M, Erickson P M, Hillman T C. A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting[J]. *Building and Environment*, 2005,40(6):747-754.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50189-2005 公共建筑节能设计标准[S]. 中国建筑工业出版社, 2005.
- [4] 许旺发, 张旭. 办公建筑能耗动态模拟研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2006(1):15-18.
- [5] 宋玮. 广州地区公共建筑能耗调查与研究[D]. 广州大学, 2006.
- [6] Halonen L, Tetri E, Bhusal P. Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings[J]. Espoo: Aalto University School of Science and Technology. Saatavissa: [http://www.ecbcs.org/docs/ECBCS\\_Annex\\_45\\_Guidebook.pdf](http://www.ecbcs.org/docs/ECBCS_Annex_45_Guidebook.pdf) [viitattu 1.12. 2010], 2010.
- [7] 王领. 欧盟EuP指令实施动态及应对策略[J]. *标准科学*, 2009(4):94-96.
- [8] 陈琦. 欧盟EuP指令与我国绿色制造技术发展的趋势[J]. *轻工机械*, 2007,25(2):1-5.
- [9] The European Parliament And Union. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings[J]. *Official Journal of the European Communities*, 2003.
- [10] 杨玉兰, 李百战, 姚润明. 政策法规对建筑节能的作用——欧盟经验参考[J]. *暖通空调*, 2007,37(4):52-56.
- [11] 高恬云, 于尔格 托特里. 浅析新欧盟标准EN15232:建筑自控与建筑管理系统对建筑能效的影响[J]. *智能建筑电气技术*, 2007,1(3):80-84.
- [12] 中国建筑科学研究院. GB 50034-2004 建筑照明设计标准[S]. 国家质检总局, 2004.
- [13] 王凡. 办公建筑中遮阳、照明与空调协调控制的机理探讨[D]. 同济大学, 2008.
- [14] 李玉明, 潘毅群, 陈晨. 上海市既有办公建筑节能改造适用技术研究[J]. *建设科技*, 2009(12):58-59.
- [15] FIZ Karlsruhe. Tageslichtnutzung in Gebäuden [J]. *Themen-Info/BINE Informationsdienst*, 2002.
- [16] 云朋. 建筑光环境模拟[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] Bourgeois D, Christoph R, Iain M. Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control[J]. *Energy and Buildings*, 2006,38(7):814-823.
- [18] 罗涛, 王书晓, 林若慈. 天然光光环境模拟技术综述[J]. *照明工程学报*, 2010(5):1-6.
- [19] 余琼, 林波荣, 周潇儒. 办公建筑方案设计阶段照明能耗预测模型的研究:全国暖通空调专业委员会空调模拟分析学组学术交流会, 北京, 2009[C].
- [20] Franzetti C, Fraisse G, Achard G. Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2004,36(2):117-126.
- [21] Lam J C, Wan K K W, Tsang C L, et al. Building energy efficiency in different climates[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008,49(8):2354-2366.

- [22] Lam J C, Tsang C L, Yang L. Impacts of lighting density on heating and cooling loads in different climates in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006,47(13-14):1942-1953.
- [23] Lam J C, Danny H W L. An analysis of daylighting and solar heat for cooling-dominated office buildings[J]. *Solar Energy*, 1999,65(4):251-262.
- [24] Li D H W, Lam J C. Evaluation of lighting performance in office buildings with daylighting controls[J]. *Energy and Buildings*, 2001,33(8):793-803.
- [25] Li D H W, Joseph C L. An analysis of lighting energy savings and switching frequency for a daylighted corridor under various indoor design illuminance levels[J]. *Applied Energy*, 2003, 76(4):363-378.
- [26] Li D H W, Joseph C L, Chris C S L, et al. Lighting and energy performance of solar film coating in air-conditioned cellular offices[J]. *Renewable Energy*, 2004,29(6):921-937.
- [27] Wan K K W, Cheung K L, Liu D, et al. Impact of modelled global solar radiation on simulated building heating and cooling loads[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009,50(3):662-667.
- [28] Li D H W, Ernest K W T. An analysis of measured and simulated daylight illuminance and lighting savings in a daylighted corridor[J]. *Building and Environment*, 2005,40(7):973-982.
- [29] Li D H W, Lam T N T, Wong S L. Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006,47(9-10): 1133-1145.
- [30] Li D H W, Lam T N T, Wong S L, et al. Lighting and cooling energy consumption in an open-plan office using solar film coating[J]. *Energy*, 2008,33(8):1288-1297.
- [31] Li D H W, Ernest K W T. An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong[J]. *Building and Environment*, 2008,43(9):1446-1458.
- [32] Li D H W. A review of daylight illuminance determinations and energy implications[J]. *Applied Energy*, 2010,87(7):2109-2118.
- [33] Li D H W, Lam J C, Wong S L. Daylighting and its effects on peak load determination[J]. *Energy*, 2005,30(10):1817-1831.
- [34] Park D C, El-Sharkawi M A, Marks R J, et al. Electric load forecasting using an artificial neural network[J]. *Power Systems*, 1991,6(2):442-449.
- [35] Aydinalp M, Ismet Ugursal V, Fung A S. Modeling of the appliance, lighting, and space-cooling energy consumptions in the residential sector using neural networks[J]. *Applied Energy*, 2002,71(2):87-110.
- [36] Wong S L, Wan K K W, Lam T N T. Artificial neural networks for energy analysis of office buildings with daylighting[J]. *Applied Energy*, 2010,87(2):551-557.
- [37] 刘木清, 周小丽. 照明自动控制技术[M]. 2008.
- [38] Thananchai L. Adaptive Occupancy-based Lighting Control via Grey Prediction[J]. *Building and Environment*, 2005,40(7):881-886.
- [39] Bodart M, De Herde A. Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting[J]. *Energy and Buildings*, 2002,34(5):421-429.
- [40] Trobec Lah M, Zupančič B, Petermelj J, et al. Daylight illuminance control with fuzzy logic[J]. *Solar Energy*, 2006,80(3):307-321.

- [41] 高小敬. 基于智能控制策略的采光与照明技术研究[D]. 同济大学, 2005.
- [42] Choi U, Johnson R, Selkowitz S. The Impact of Daylighting on Peak Electrical Demand[J]. 1984,6(1):387-399.
- [43] 彭鹏, 郑洁. 天然采光对建筑能耗影响的研究[J]. 太阳能学报, 2007(12):1375-1379.
- [44] 陈红兵. 办公建筑的天然采光与能耗分析[D]. 天津大学, 2004.
- [45] 肖辉乾. 节能促进了建筑采光技术的发展[J]. 照明工程学报, 1992(4):20-26.
- [46] Reinhart C F. Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design[M]. 2010.
- [47] Ihm P, Nemri A, Krarti M. Estimation of lighting energy savings from daylighting[J]. Building and Environment, 2009,44(3):509-514.
- [48] Fontoynt M. Long term assessment of costs associated with lighting and daylighting techniques, 2005[C].
- [49] Deutsche Gesellschaft Für Nachhaltiges Bauen e. V., Handbuch: Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude[M]. 2009.
- [50] 周欣, 彭琛, 王闯, 等. 人行为标准定义及案例分析: 全国暖通空调制冷2010年学术年会, 中国浙江杭州, 2010[C].
- [51] Moore T, Carter D J, Slater A I. Long-term patterns of use of occupant controlled office lighting[J]. Lighting Research and Technology, 2003,35(1):43.
- [52] Hunt D R G. The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy[J]. Building and Environment, 1979,14(1):21-33.
- [53] Reinhart C F. Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds[J]. Solar Energy, 2004,77(1):15-28.
- [54] Bourgeois D, Reinhart C, Macdonald I A. Assessing the total energy impact of occupant behavioural response to manual and automated lighting systems, 2005[C].
- [55] Hoes P, Hensen J L M, Loomans M G L C, et al. User behavior in whole building simulation[J]. Energy and Buildings, 2009,41(3):295-302.
- [56] U.S. Green Building Council, LEED for New Construction & Major Renovations, v2.1[M]. 2003
- [57] OSRAM GmbH, Operating instructions: DALI MULTI 3 - Control unit[Z]. 2007.
- [58] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 [M]. 2008.

## 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

姚远, 女, 1986年3月生

2008年毕业于同济大学建筑设施智能技术专业, 获学士学位。2008年同济大学机械工程学院供热、供燃气、通风及空调专业攻读硕士研究生。

2010年赴德国慕尼黑工业大学交流学习

### 已发表论文:

[1] 姚远, 潘毅群, 黄治钟. 智能照明系统在办公建筑中的应用. 建筑节能, 2012, Vol.(1)