

Analysis on Energy Consumption and Energy-Saving Potential of the Main Teaching Building of a University in Beijing

Chenxia Suo¹, Wei Deng Solvang², Yong Yang³, Zhihui Zhang¹

¹School of Economics and Management, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing

²Narvik College University, Narvik, Norway

³College of Statistics and Mathematics, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou

Email: suchoenxia@bjpt.edu.cn, wds@hin.no, yangyonghebei@126.com

Received: Apr. 18th, 2014; revised: May 20th, 2014; accepted: Jun. 6th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The energy-saving transformation of buildings is an effective way to solve the energy shortage. The paper forecasts three situations about the energy consumption of the main teaching building of a university by using the scenario analysis method and IPAT equation and reaches the energy-saving potential of the main teaching building of the university through comparing the gap between the current situation and forecasting situations. Based on the case, the paper puts forward suggestions for the architectural design of Chinese colleges and universities and the prospect for the future building energy efficiency.

Keywords

Office Building, Energy Consumption, Scenario Analysis Method, IPAT Equation

某高校教学主楼能源使用现状及节能潜力分析

索晨霞¹, Wei Deng Solvang², 杨 勇³, 张志慧¹

¹北京石油化工学院经管学院, 北京

²纳尔维克工学院, 纳尔维克, 挪威

³浙江工商大学数理统计学院, 杭州

Email: suchoenxia@bjpt.edu.cn, wds@hin.no, yangyonghebei@126.com

收稿日期：2014年4月18日；修回日期：2014年5月20日；录用日期：2014年6月6日

摘要

建筑节能改造是解决能源短缺的有效办法。本文使用情景分析法及IPAT方程对某高校主教学楼的能源消耗进行三种情况的预测，通过比较现状与预测情况的差距，得出某高校主教学楼的建筑节能潜力。在此案例的基础上提出中国高校建筑设计的建议和未来建筑节能的展望。

关键词

教学楼，能源消耗，情景分析法，IPAT方程

1. 引言

在全球面临能源危机和经济危机的背景下，节能减排成为全球社会的主题而备受关注。我国作为一个处于高速经济发展期的发展中国家，面临巨大的能源及环境挑战。21世纪以来，我国高等教育规模迅速扩大，在校人数、建筑面积和教学设备等急剧增加。校园建筑数量庞大，建筑类型繁多。据统计，我国大学数量近2000余所，在校人数达2300多万，占全国人口的4.4%，消费着社会总能耗的8%；全国大学生生均能耗、水耗分别是全国居民人均能耗的4倍和2倍，大学校园间的能耗水平差异大、增长快、预示着校园蕴藏着的巨大的节能潜力。然而，校园建筑设施量大面广，基础数据严重缺失，能源管理水平低，严重制约着校园节能工作深入持久地开展。

高校建筑节能潜力巨大，高校建筑能源浪费现象较为普遍，这阻碍了高校节约型校园的建设。本文运用情景分析法并结合IPAT模型，对北京某高校教学主楼的能源消耗状况进行分析、预测，探究建筑能源消耗与节能之间的关系，对推动高校建筑节能减排计划有着重要意义。

2. 研究方法

能源消耗预测方法种类繁多，其中通过对IPAT方程进行情景分析，对北京某高校教学主楼的能源消耗状况进行分析、预测。

(1) IPAT^[1]方程是用于形容人类活动对环境影响的成因，是人口、富裕程度和技术因素共同作用的结果。IPAT方程是20世纪70年代由巴里·康门勒，保罗·R·埃利希和约翰·霍尔德伦等人提出的。他认为决定环境影响状况的因素主要有三种：人口(P)、富裕程度(A)和技术水平(T)，并由此建立了四个变量的恒等关系式：

$$I = P \times A \times T = G \times T \quad (1)$$

式中 I 为环境负荷； P 为人口； A 为人均GDP； T 为单位GDP的环境负荷； G 为GDP总量。

如果以 E 表示自然资源生产率，则有：

$$I = P \times A / E = G / E \quad (2)$$

即 E 与 T 是倒数关系。环境负荷可以指各种能量物质资源的消耗量。以能耗为例，作为式(2)的特例，有

$$E_n = (1 + e)^n \text{ 或 } E = G / I \quad (3)$$

式中 I_i 为 i 年的能源消耗总量, G_i 为 i 年的 GDP, E_i 为 i 年的能源生产率。按照资源生产率与经济增长率的“脱钩”理论。如果用 g 代表 GDP 的年增长率, 用 e 代表自然资源生产率的年提高率, 研究表明有如下结果: (1) 若 $e < g$, 环境负荷必随 GDP 的增长而逐年上升, 且 e 与 g 之间的差值愈大, 环境负荷上升愈快。(2) 若 $e = g$, 环境负荷与经济增长“脱钩”(无论 GDP 怎样增长, 环境负荷或资源消耗也不会上升)。(3) 若 $e > g$, 环境负荷必在 GDP 增长过程中逐年下降, 且 e 与 g 之间的差值愈大, 环境负荷下降得愈快[2]。

(2) 情景分析法

情景分析法[3] (Scenario Analysis)是假定某种现象或某种趋势将持续到未来的前提下, 对预测对象可能出现的情况或引起的后果做出预测的方法。

情景分析法确定规划目标年份的环境负荷和生态效率, 此时一般需构建三种情景模式进行分析, 即当前模式(悲观的)、理想模式(乐观的)和适宜模式(现实的)。三种模式的具体内容如下:

① 当前模式。不改变目前的经济发展模式, 按照以往的发展速度继续向前发展, 即 GDP 和生态效率都维持以往增长速度不变, 任由规划期内的资源消耗和污染排放随着 GDP 和生态效率相应变化。

② 理想模式。是以国内外先进水平为标杆, 即大幅改变目前的经济发展模式, GDP 仍然维持快速增长, 同时资源消耗和污染排放改善状况达到国内外先进水平, 要求规划期内的生态效率增长速度能够解决经济快速增长和根本改善环境负荷带来的双重压力。理想模式即为上述的资源消耗与经济增长相“脱钩”的模式。

③ 适宜模式。此种模式是在国内外先进水平与历史发展趋势两个标杆之间根据自身实际选择的一条发展道路, 即逐步改变目前的经济发展模式, GDP 仍然维持快速增长, 同时实现生态效率比历史趋势有较大幅度提高, 资源消耗和污染排放状况得到明显改善。这种发展模式是通过发展循环经济, 同时适度开发资源和加强污染治理, 使未来一段时间既能保持经济快速增长又能保证环境质量有所改善。

用情景分析法确定规划目标年份的环境负荷和生态效率时, 通常作如下假定: 基准年为第 0 年, 其生态效率为 E_0 , 环境负荷为 I_0 , GDP 为 G_0 ; 规划目标年为第 sn 年, 其生态效率表示为 E_n , 环境负荷表示为 I_n , GDP 表示为 G_n 。由于生态效率可以作为循环经济发展的测度, 因此循环经济规划目标实质上就是基于 E_0 确定 E_n 。根据公式 $E = G/I$, 有 $E_n = G_n/I_n$, 其中 $G_n = G_0(1+g)^n$, $E_n = (1+e)^n$ (g 和 e 分别为 GDP 和生态效率的年增长率)。

3. 北京市某高校教学主楼用能现状分析

3.1. 教学主楼用能现状描述

教学主楼用能系统包括 HVAC 系统(供暖、空调和换气系统)和照明系统。

(1) 供暖系统

从建成到 2009 年, 校园由自己的热力站向全校区供热。2009 后整个校园供热系统并入联片集中供暖, 学校自己烧生活热水。供热站不向主楼提供生活用热水, 主楼内学生的饮用热水由放置在大门口的电热水器供应。每个热水器装机容量 5 千瓦。2009 年校区并入联片供暖时安装了热交换器。

(2) 通风系统

在建筑物内没有安装机械通风系统。通风是通过打开窗户和门。

(3) 空调系统

此学校主教学楼没有中央空调系统。一些地方有独立的空调机。总共有 240 台, 524 千瓦的机组总容量。这些空调机安装年份不同和品牌不同。容量从 0.735 千瓦至 3.675 千瓦。

(4)照明系统

各教室在天花板安装了荧光灯。手动灯光开关。没有安装自动控制照明系统。有些地方的灯光设施在是大楼建成时安装的,有些是新安装的节能灯。单管和双管照明灯具并存使用。在安装新灯盒的地方没有安装新开关。

3.2. 教学主楼用能现状分析

从表 1 中,发现教学主楼的总能源消耗情况是 2009 年上升,到 2010 年下降。固定电力 2010 年比 2009 年节约能耗 20.59%,集中供暖 2012 年比 2009 年节约能耗 8.8%,总能耗 2010 年比 2009 年节能 11.79%。总之,2010 年节能情况较好,已初步有了节能意识。

3.3. 北京市某高校及其教学主楼能耗现状汇总分析

为了便于比较分析,本文将北京市 2001~2010 年的 GDP(当年价格)通过 GDP 换算公式(即:实际 GDP=名义 GDP/GDP 平减指数)折算为以 2000 年不变价格表示,并通过北京市常住人口、北京市某高校总人口数,计算出了按人数比例平摊到此高校的 GDP,如表 2 所示。

表 3 为根据公式 $E = G/I$ 和北京市某高校能源审计报告所求得的 2008~2010 年北京市某高校能源消

Table 1. The main teaching building of the energy consumption in 2008-2010

表 1. 教学主楼 2008~2010 年各项能耗

年份	能源消耗/kWh		
	2008	2009	2010
固定电力	638.00	850.00	675.00
煤	2340.00	—	—
集中供暖	—	2500.00	2280.00
总能源消耗	2978.00	3350.00	2955.00

数据来源:某学校审计资料。

Table 2. GDP, the growth rate of population

表 2. GDP、人口数及增长率现状

年份	以 2000 年不变价 计算的北京市 GDP/亿元	以 2000 年不变价 计算的北京市 GDP 增长率/%	北京市常 住人口/ 万人	北京市常 住人口增 长率/%	北京市某 高校总人 口数/人	北京市某高 校总人口数 增长率/%	按人数比例平 摊到此高校的 GDP/亿元	按人数比例平摊 到此高校的 GDP 增长率/%
	G 总				G 校			
2001	3722.39	—	1385.1	—				
2002	4530.31	21.70%	1423.2	2.75%				
2003	4907.26	8.32%	1456.4	2.33%				
2004	5985.41	21.97%	1492.7	2.49%				
2005	6935.17	15.87%	1538	3.03%				
2006	8166.07	17.75%	1581	2.80%				
2007	9702.56	18.82%	1633	3.29%				
2008	10829.46	11.61%	1695	3.80%	8397	—	5.365	—
2009	12967.31	19.74%	1755	3.54%	8695	3.55%	6.425	19.75%
2010	13576.07	4.69%	1961.9	11.79%	8704	0.10%	6.023	-6.25%
平均增长率		14.14%		3.98%		1.83%		6.75%

数据来源:北京统计年鉴及作者整理制作。

耗总量、按人数比例平摊到此高校的 GDP、北京市某高校能源生产率和这一时期的平均增长率。通过计算可以发现北京市某高校 2008~2010 年的能源生产率增长率平均为 6.22%。

4. 基于情景分析法的教学主楼能源消耗预测

4.1. 北京市 2012~2015 年及 2020 年经济总量、人口数、此高校人口数预测

经济总量的预测是情景分析法的基础,本文首先对北京市 2012~2015 年及 2020 年的 GDP 增长率及经济总量进行预测。预测的依据是《北京市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》中提出“十二五”时期北京市经济平稳较快发展,主要目标是地区生产总值年均增长 8%。那么 2012~2015 年及 2020 年 GDP 的数值如表 4 所示。

北京市常住人口数和某高校人口数的预测依据是各自平均增长率的情况。根据表 2 北京市常住人口平均增长率为 3.98%,北京市某高校总人口平均增长率为 1.83%,那么 2012~2015 年及 2020 年的北京市常住人口、北京市某高校总人口分别可以计算求得,如表 5 所示。

4.2. 按人数比例平摊到此高校的 GDP 预测

按人数比例平摊到此高校的 GDP 的预测依据是平均增长率的情况和公式按人数比例平摊到此高校的 GDP = 北京市 GDP/北京市常住人口数 × 此高校人口数及以上预测数据。根据表 2 按人数比例平摊到

Table 3. Energy consumption, per capita energy consumption, GDP, energy productivity
表 3. 能源消耗、人均能源消耗、GDP、能源生产率及增长率现状

年份	北京市某 高校能源 消耗总量/ 吨标准煤	北京市某 高校能源 消耗总量 增长率/%	人均此高 校能源消 耗总量/(吨 标准煤/人)	人均此高 校能源消 耗总量增 长率/%	按人数比 例平摊到 此高校的 GDP/亿元	按人数比例 平摊到此高 校的 GDP 增 长率/%	北京市某高校 能源生产率/(元 /吨标准煤)	北京市某高 校能源生产 率增长率/%	教学主楼能 源消耗总量/ 吨标准煤
	I 校				G 校		E 校		I 楼
2008	4250.99		0.5063		5.365		126205.90		1725.35
2009	5051.02	18.82%	0.5809	14.75%	6.425	19.75%	127202.03	0.79%	2035.78
2010	4241.20	-16.03%	0.4873	-16.12%	6.023	-6.25%	142011.69	11.64%	1696.48
平均增长率		1.39%		-0.69%		6.75%		6.22%	

数据来源:北京统计年鉴及作者整理制作。

Table 4. Prediction of GDP in Beijing in 2020 (Unit: Billion yuan)
表 4. 北京市 2012~2015 年及 2020 年 GDP 预测(单位:亿元)

年份	2010	2012	2013	2014	2015	2020
GDP (2000 年不变价格)	13576.07	15835.13	17101.94	18470.09	19947.70	29309.72

资料来源:作者计算整理。

Table 5. The forecast 2020 Beijing city resident population and the total number of a university
表 5. 2012~2015 年及 2020 年北京市常住人口、某高校总人口预测

年份	2010	2012	2013	2014	2015	2020
北京市常住人口/万人	1961.9	2121.175	2205.598	2293.381	2384.657	2898.511
北京市某高校总人口/人	8704	9025.48	9190.648	9358.836	9530.103	10434.612

资料来源:作者计算整理。

此高校的 GDP 平均增长率为 6.75%，可以得到 2012-2015 年及 2020 年按人数比例平摊到此高校的 GDP，ss 如表 6 所示。

4.3. 情景选择

(1) 当前模式：以 2006~2010 年北京市能源消耗、北京市某高校能源消耗及此高校主教学楼能源消耗现状为依据，对 2012~2015 年及 2020 年此高校主教学楼能源消耗进行预测。

(2) 理想模式：以经济发展与能源消耗的“脱钩”理论为依据，对 2012~2015 年及 2020 年此高校主教学楼能源消耗进行预测。

(3) 适宜模式：以北京市“十二五”规划的大型公共建筑能源消耗约束性指标为依据，对 2012~2015 年及 2020 年此高校主教学楼能源消耗进行预测。

4.4. 情景分析

(1) 如果教学主楼的能源消耗量采用当前的经济发展模式[4]，即：教学主楼能源生产率的预测依据是平均增长率的情况。根据表 3 北京市某高校能源生产率平均增长率为 6.22%。那么 2012~2015 年及 2020 年教学主楼能源生产率预测值，如表 7 所示(我们在此假设全校的能源生产率约等于教学主楼的能源生产率)。

这样，运用 IPAT 方程式的派生方程 $I = G/E$ ，就可以测算出 2012~2015 年及 2020 年教学主楼能源消耗总量，如表 9 所示。

(2) 如果教学主楼能源生产率平均增长率达到 14.14%，即教学主楼能源生产率增长率等于北京市 GDP 平均增长率，那么资源消耗与经济增长将实现“脱钩”。则 2012~2015 年及 2020 年的能源生产率如表 8 所示。

这样测算出 2012~2015 年及 2020 年教学主楼能源消耗总量，如表 9 所示。

(3) 如果按照 2012 年北京市发布的公共建筑节能指标，人均综合能耗下降 3.5%来进行预测，那么结合表 2、表 3 的 2010 年北京市某高校人均能耗量、高校人数和节能指标，可以求得 2012~2015 年及 2020

Table 6. Predict 2020 the GDP of the university (Unit: Billion yuan)

表 6. 2012~2015 年及 2020 年按人数比例平摊到此高校的 GDP 预测(单位: 亿元)

年份	2010	2012	2013	2014	2015	2020
按人数比例平摊到此高校的 GDP	6.023	6.864	7.327	7.821	8.349	11.574

资料来源：作者计算整理。

Table 7. Predict 2020 teaching building energy productivity in situation I (Unit: yuan/tons of standard coal)

表 7. 2012~2015 年及 2020 年情况 I 的教学主楼能源生产率预测(单位: 元/吨标准煤)

年份	2010	2012	2013	2014	2015	2020
教学主楼能源生产率 E I	142011.69	160227.36	170193.51	180779.54	192024.03	259649.25

资料来源：作者计算整理。

Table 8. Predict 2020 teaching building energy productivity in situation II (Unit: yuan/tons of standard coal)

表 8. 2012~2015 年及 2020 年情况 II 的教学主楼能源生产率预测(单位: 元/吨标准煤)

年份	2010	2012	2013	2014	2015	2020
教学主楼能源生产率 E II	142011.69	185011.97	211172.66	241032.48	275114.47	532970.02

资料来源：作者计算整理。

年的能源消耗量，如表 9 所示。

4.5. 教学主楼节能潜力分析

通过表 10，对三种模式的数据进行对比，可以发现当前模式即当前的发展模式预测出的 2012~2015 年及 2020 年的教学主楼能耗量分别为 4283.91 吨标准煤、4305.10 吨标准煤、4326.26 吨标准煤、4347.89

Table 9. Scenario analysis of energy consumption of the main teaching building
表 9. 教学主楼能源消耗情景分析

年份	指标	教学主楼能源消耗预测的三种情况		
		I	II	III
2010	G0/亿元	6.023	6.023	6.023
	E0/(元/吨标煤)	142011.69	142011.69	142011.69
	I0/吨标煤	4241.20	4241.20	4241.20
2012	G1/亿元	6.864	6.864	6.864
	E1/(元/吨标煤)	160227.36	185011.97	—
	I1/吨标煤	4283.91	3710.03	3949.51
2013	G2/亿元	7.327	7.327	7.327
	E2/(元/吨标煤)	170193.51	211172.66	—
	I2/吨标煤	4305.10	3469.67	3811.28
2014	G3/亿元	7.821	7.821	7.821
	E3/(元/吨标煤)	180779.54	241032.48	—
	I3/吨标煤	4326.26	3244.79	3677.88
2015	G4/亿元	8.349	8.349	8.349
	E4/(元/吨标煤)	192024.03	275114.47	—
	I4/吨标煤	4347.89	3034.74	3549.16
2020	G5/亿元	11.574	11.574	11.574
	E5/(元/吨标煤)	259649.25	532970.02	—
	I5/吨标煤	4457.55	2171.60	3412.27

资料来源：作者计算整理。

Table 10. Energy consumption saving of the main teaching building (Unit: tons of standard coal)
表 10. 教学主楼能源消耗潜力(单位：吨标准煤)

年份	教学主楼能源消耗预测的三种情况					
	I		II		III	
	能耗量	增长率	能耗量	节能率	能耗量	节能率
2010	4241.20	—	4241.20	—	4241.20	—
2012	4283.91	—	3710.03	—	3949.51	—
2013	4305.10	0.49%	3469.67	6.48%	3811.28	3.50%
2014	4326.26	0.49%	3244.79	6.48%	3677.88	3.50%
2015	4347.89	0.50%	3034.74	6.47%	3549.16	3.50%
2020	4457.55	—	2171.60	—	3412.27	—

资料来源：作者计算整理。

吨标准煤和 4457.55 吨标准煤。适宜模式即为按北京市节能指标进行预测的, 预测出的 2012~2015 年及 2020 年的教学主楼能耗量分别为 3949.51 吨标准煤、3811.28 吨标准煤、3677.88 吨标准煤、3549.16 吨标准煤和 3412.27 吨标准煤。而理想模式即按“脱钩”理论预测出的 2012~2015 年及 2020 年的教学主楼能耗量分别为 3710.03 吨标准煤、3469.67 吨标准煤、3244.79 吨标准煤、3034.74 吨标准煤和 2171.60 吨标准煤。我们可以发现按当前模式发展, 虽然能耗量的增长率很低, 只有大约 0.5%, 但是不能够达到节能的目的。按适宜模式发展, 节能率为 3.5%, 而按经济发展与能耗相脱钩的理论, 节能率能达到 6.48%。

5. 结论

从上述该校教学主楼能源利用现状及节能潜力分析, 可以看到高校的节能空间大、节能量更大, 无论从经济上、环境上, 还是从社会上, 高校建筑节能都具有极其重大的意义。

(1) 高校建筑节能改造建议

国家和政府层面应出台支持高校建筑节能工作的政策和相关措施, 从政策上引导、在经济上帮助、在技术上支持高校搞好建筑节能工作。加强校园内建筑室外热环境的气候适应性设计。通过建筑合理的朝向和布局等技术措施强化教学楼、办公楼建筑群、学生宿舍群及教工住宅小区的通风。同时, 降低室外硬地率, 硬化地面遮阳率不宜低于 30%。

做好校园内公共及居住建筑的屋顶、外墙隔热及外窗遮阳, 有效组织室内自然通风, 改善建筑室内热环境。

(2) 未来高校建筑节能展望

完善建筑节能设计的节能理念。建筑节能应该向“低密、高容、立体化”可持续发展理念发展。在不提高密度的前提下, 适当提高容积率, 向空中与地下发展建设, 是一个较好的对策。建筑节能设计向经济性理念发展, 建筑节能设计必须考虑建筑初期投资和运营投资的经济性。

改进建筑节能设计方法。首先, 优化建筑设计。建筑造型及围护结构形式对建筑物性能有决定性影响。直接的影响包括建筑物与外环境的换热量、自然通风状况和自然采光水平等。

其次, 应用新型建筑围护结构材料。开发新的建筑围护结构部件, 以更好的满足保温、隔热、透光、通风等各种需求, 甚至可根据变化了外界条件随时改变其物理性能, 达到维持室内良好的物理环境同时降低能源消耗的目的。

最后, 应用可再生能源技术, 使开发利用可再生能源是持续发展战略的重要组成部分[5]。

项目基金

教育部人文社科规划项目(10YJA630139)资助。

参考文献 (References)

- [1] York, R., Rosa, E.A. and Dietz, T. (2003) STIRPAT, IPAT and ImpACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts. *Ecological Economics*, **46**, 351-365.
- [2] 于红霞, 钱荣 (2006) 解读未来发展不确定性的情景分析法. *未来与发展*, **2**, 12-15.
- [3] 宗蓓华 (1994) 战略预测中的情景分析法. *预测*, **2**, 50-55.
- [4] Lee Gilbert, A. (2000) Using Multiple Scenario Analysis to Map the Competitive Futurescape: A Practice-based Perspective. *Competitive Intelligence Review*, **11**, 12-19.
- [5] 徐伟, 邹瑜 (2010) 公共建筑节能改造技术指南. 中国建筑工业出版社, 北京.