

# 基于价值工程的 BIM 能耗分析 ——以东营某汽车 4S 店为例\*

何清华 耿达飞

(同济大学经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于价值工程理论与 BIM 技术, 首先介绍了 BIM 相关文献研究现状和 BIM 实际应用经验; 其次从全生命周期视角, 提出基于价值工程方法的 BIM 建设项目设计方案优化及比选思路并建立了评价模型; 最后选择山东东营某汽车 4S 店项目为案例, 以项目中较为复杂的幕墙设计为对象, 运用 BIM 软件方法进行实证分析, 探索了价值工程与 BIM 的集成应用。

**关键词:** 价值工程; BIM; 能耗分析; 汽车 4S 店

## 0 引言

价值工程是一种为了实现产品必要功能以及降低成本而产生的系统的方法流程, 自从 21 世纪 40 年代被提出后, 在社会各个领域都有非常广泛的应用, 主要应用于方案的比选和优化。直到现在, 价值工程方法依然被人们反复研究和改进, 并应用于各种项目的规划实践。随着计算机技术的发展, 建筑信息模型 (Building Information Model, BIM) 通过 3D 模型以及全面综合的数据对建筑全生命周期进行模拟和优化管理, 为项目规划和实践提供帮助, 逐渐成为建筑行业里一种具有重要价值的概念和方法。

## 1 BIM 研究现状

目前, 学者对 BIM 的研究主要集中于理论层面。基于全生命周期视角, 斯坦福大学提出 BIM 可以通过“产品—组织—过程”(Product-Organization-Process, POP)<sup>[1]</sup>的信息集成来实现, 还有学者针对可持续设计管理<sup>[2]</sup>、组织界面管理<sup>[3]</sup>、合同风险变化等某个环节或角度进行了研究, 信息集成是 BIM 需要解决的本质问题, 其运作框架已经由 3D 向 4D、5D 的多维度发展<sup>[4]</sup>。基于 BIM/VDC 视角, 美国 John Barton 和 John Kunz 等学者提出产品—组织—流程三者相互集成的 VDC 项目模

型<sup>[5]</sup>, John Moebes 证明了 BIM/VDC 的应用可以直接减少 30% 的建筑成本和缩短 25% 的建设工期<sup>[6]</sup>。美国南加州大学土木与环境工程中心 (Department of Civil and Environmental Engineering, DCEE) 的调查充分表明, 业内人士普遍认为 BIM/VDC 适用于大型复杂工程项目<sup>[7]</sup>。在精益建设与 BIM 相结合方面, Sacks、Dave、Khanzode 等人利用矩阵、结构方程等方法研究了 BIM 和精益建设之间的协同关系, 证明了将它们联合应用于建设工程中将收到功能倍增的效果<sup>[8]</sup>。很多学者通过案例也证明了 BIM 对精益建设的积极作用<sup>[9]</sup>。在利用 BIM 技术实现精益建设方面, 过程模拟、计算机模拟、过程仿真等方法被用来研究工作流、拉式规划等因素对目标的影响, 提出过程改进和过程改造的方案<sup>[10]</sup>。国内外将 BIM 应用于设施管理阶段的研究还刚刚起步, Jordani 认为, BIM 与 FM 是实施项目全生命周期管理的门户<sup>[11]</sup>。基于 BIM 的设施管理思想已初步应用到项目实践当中, 如澳洲的标志性建筑悉尼歌剧院目前正在推进基于 BIM 并利用建筑编码系统 (Building Coding System, BCS) 和软件信息系统 (Software Information Systems, SIS) 为其设施管理提供庞大的信息支撑<sup>[12]</sup>。

在发达国家, BIM 在建筑行业内的应用已经十分普及, BIM 项目的数量已超过传统项目<sup>[13]</sup>。而中国的 BIM 尽管起步较晚, 普及率低, 但 BIM

\* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金“基于 BIM/VDC 的精益建设与设施管理集成化关键技术与应用研究 (1200219168)”。

在国内也越来越受到相关部门的重视,建设单位、设计院等都开始尝试这种全新的建设模式。

## 2 基于价值工程的 BIM 能耗分析模型构建

目前,运用价值工程理论进行设计方案优选,已经在中国很多项目实践中得到应用。但基于 BIM 模型的设计方案优选并不多见,笔者在阅读国内外针对建筑设计方案优选、节能和建筑材料研究文献以及采访业界专业人士的基础上,从外观形态、综合能耗、安全性能 3 个方面考察幕墙设计方案。按照可操作的原则选取外形、色彩、热负荷、冷负荷、结构抗性、防火性能 6 个评价指标,其结构体系如图 1 所示。

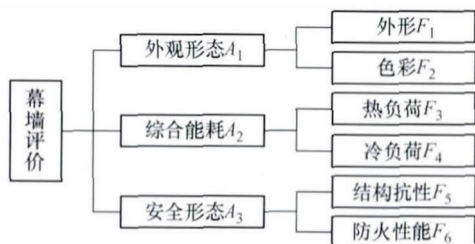


图1 幕墙设计方案评价体系

### 2.1 确定功能权重系数

运用 1~9 标度法,目标层对评价因素层的判断矩阵为  $B = (b_{ij})_{m \times m}$ ,评价因素层对评价指标层的判断矩阵为  $C = (c_{ij})_{n \times n}$ 。

确定功能权重系数的具体过程如下:

首先列出各层次的各指标并进行相互两两比较,判别其相对重要性及重要性程度,在比较两个指标  $i$  和  $j$  时,如果  $i$  比  $j$  重要,那么打分时要根据  $i$  比  $j$  重要的程度来判断(如 3 分表示  $i$  比  $j$  重要很多,2 分表示  $i$  比  $j$  重要,1 分表示  $i$  和  $j$  重要程度一样)。即判断矩阵  $B$ 、 $C$  为

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mm} \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix}$$

对于判断矩阵  $B$  和  $C$ ,  $\lambda_{b_{\max}}$  和  $\lambda_{c_{\max}}$  分别为其最大特征值,  $W_b$  和  $W_c$  分别为对应的特征向量,然后将  $W_b$  和  $W_c$  归一化,得出指标权重系数向量。具体做法如下:

第一步,计算上述判断矩阵各列元素之和为

$b_j$  ( $c_j$  同理,下同)。

第二步,将两两比较矩阵中的每个元素  $b_{ij}$  均除以其相应列的和  $b_j$ ,得  $W_{ij} = \frac{b_{ij}}{b_j}$ ,此时产生了标准化的判断矩阵

$$W_{ij} = \begin{pmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & \cdots & w_{mm} \end{pmatrix}$$

令目标层对评价因素层的权重系数向量为  $W_b = \left( \frac{\sum W_{1i}}{m}, \frac{\sum W_{2i}}{m}, \cdots, \frac{\sum W_{mi}}{m} \right)^T = (w_1, w_2, \cdots, w_m)^T$ 。同理对于判断矩阵  $C$  而言,因素层  $A_i$  对指标层  $F$  中  $k$  个指标的权重系数向量有  $W_{ck} = \left( \frac{\sum W_{1i}}{n}, \frac{\sum W_{2i}}{n}, \cdots, \frac{\sum W_{ni}}{n} \right)^T = (w_{1k}, w_{2k}, \cdots, w_{nk})^T$ 。

第三步,令向量  $A = BW_b = (a_1, a_2, \cdots, a_m)^T$ ,则有  $\lambda_{b_{\max}} = \frac{\sum \frac{a_i}{b_i}}{m}$ ,同理  $\lambda_{c_{\max}} = \frac{\sum \frac{a_i}{c_i}}{m}$ 。

第四步,则需要判断矩阵一致性及误差分析,设置一致性指标为  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ,其中,判断矩阵为  $n$  阶;矩阵的一致性指标为  $CI$ ;逆矩阵最大的特征值  $\lambda_{\max}$ ;一致性指标越大,特征矩阵一致性就越差。若  $CI \leq 0.1$ ,则表示特征矩阵在一致性方面满足要求,否则需对数据做出调整。

最后,由  $W_b$  和  $W_c$  组合而得到的目标层  $P$  对各评价指标层  $F$  的组合权重向量  $V$ 。如前文所述,假设目标层  $P$  对于评价因素层  $A$  的判断矩阵  $B$  的相对权重为  $W_b$ ,评价因素层  $A$  中各因素  $A_i$  对评价指标层  $F$  的  $k$  个指标的判断矩阵  $C$  的相对权重为  $W_c$ ,那么

$$W_b = (w_1, w_2, \cdots, w_m)^T \quad (1)$$

$$W_{ck} = (w_{1k}, w_{2k}, \cdots, w_{nk})^T \quad (2)$$

则其组合权重  $V = (v_1, v_2, \cdots, v_k)^T$  为  $F$  层各指标相对目标层的相对权重,其中  $v_n = \sum w_j w_{nj}$ 。

### 2.2 确定功能评价系数

运用专家打分法,对 BIM 分析对象进行功能

评价,分多次对各个功能指标层  $F$  进行打分,各项指标评分结果取算术平均值,得出各项指标的实施效果得分。假设各项功能系数指标打分结果为

$$f = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T \quad (3)$$

式中,  $f_i$  是第  $i$  个指标在功能结构指标体系的效果评判得分值 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 那么 BIM 幕墙选取决策模型的功能评判得分向量  $F$  为

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_n)^T \quad (4)$$

式中,  $F_i = f_i v_i$ ,  $v_i$  是功能指标层  $F$  对目标层  $P$  的相对权重系数。

将特征向量  $F$  做同一化处理,可以得到功能指标的评判向量  $F$

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_n)^T = \left( \frac{F_1}{\sum F_i}, \frac{F_2}{\sum F_i}, \dots, \frac{F_n}{\sum F_i} \right)^T \quad (5)$$

### 2.3 确定成本系数

功能与投入成本有着重要的关系。当功能得到提升时,应当关注相应成本增长的速度,判断为此付出的成本是否有价值。基于价值工程原理,成本分析的目标是为获取各指标的相应成本系数,即

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_n)^T = \left( \frac{C_1}{\sum C_i}, \frac{C_2}{\sum C_i}, \dots, \frac{C_n}{\sum C_i} \right)^T \quad (6)$$

进一步地,在项目全生命周期内,考虑资金的时间价值,每个方案对应的成本  $C$  应有

$$C = WLCC = C_0 + \sum_{i=1}^n (R + E + M) / (1 + r)^i \quad (7)$$

式中,  $C_0$  为初始成本,  $R$  为运营期内的资源替换成本,  $E$  为能耗成本,  $M$  为维护维修成本,  $r$  为折现率,  $n$  为研究期。

### 2.4 确定价值系数

根据价值工程公式  $V = F/C$ , 结合功能与成本的评分,就能得到各备选方案价值系数,根据价值系数,选择价值更高的方案,即可得到方案最优解。

## 3 山东东营某汽车 4S 店价值工程 BIM 能耗分析应用案例

### 3.1 案例介绍

山东东营某汽车 4S 店项目是由德国 KAB 建筑师事务所的优秀建筑师主笔设计的,并依照 Autohaus250 规格建造。项目位于东营市西城区北二路 9 号,紧邻 S316、S228 省道,距东青高速 10km,总占地面积约 10 000m<sup>2</sup>,其中建筑面积约为 6 500m<sup>2</sup>。项目为二类建筑,结构类型为钢框架结构及管桁架结构,设计使用年限 50 年,地震烈度 7 度设防,耐火等级二级。设计师在获得一手工程资料及设计施工图样,并深入理解工程的建筑、结构设计及施工图样后,利用 Revit 进行 3D 建模,如图 2、图 3 所示。

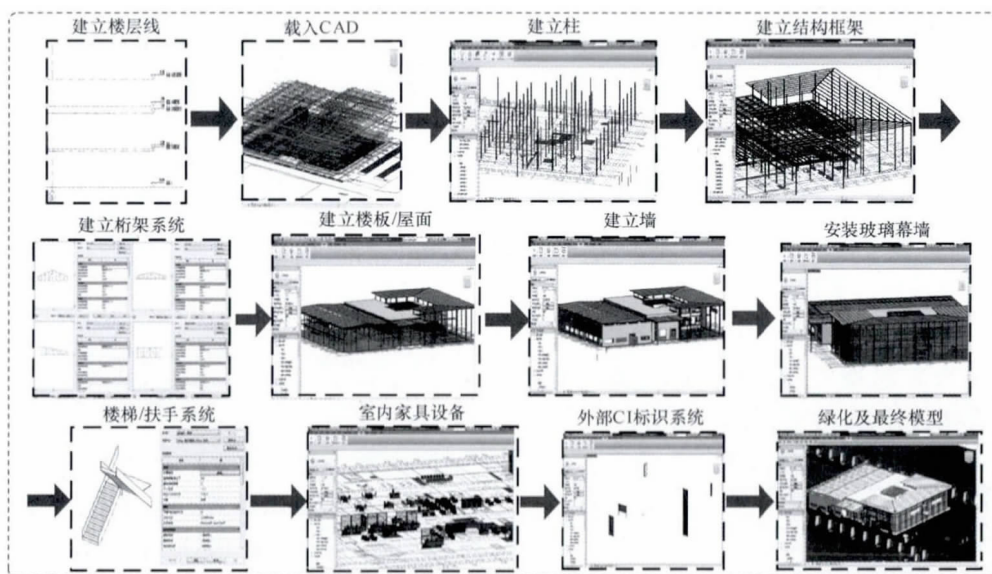


图2 东营某汽车 4S 店项目 BIM 建立流程

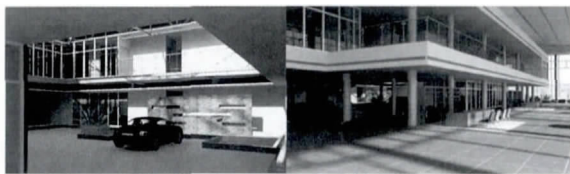


图3 东营某汽车4S店项目BIM效果图

建筑幕墙是围护的主体,具有影响外观、保温、安全等几个基本功能,在本项目中,可比方案主要在保温能耗上有所区别。对于幕墙节能设计而言,提高外幕墙的保温性能可有效减少建筑的取暖能耗,但相应的幕墙建设成本会有所提高,但是保温层的使用寿命有限,因此也不能以无限增加保温层厚度的方式降低能耗费用,而是要选取合理的保温层厚度,保证幕墙在保温层生命期内的采暖能耗价值与保温层造价系数之比最高。两个可选方案如图4所示。

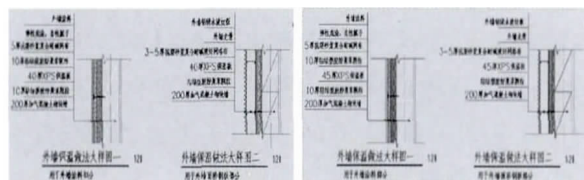


图4 BIM幕墙设计的两个可选方案

### 3.2 确定功能权重

首先列出外观形态、综合能耗、安全性能三个因素,进行相互两两比较,运用德尔菲法,目标层 $P$ 对评价因素层 $A$ 的专家意见判断矩阵 $B$ 为

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

经过计算,该矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.009$ ,则 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0045$ , $CR = CI/RI = 0.0045/0.58 = 0.0077 < 0.1$ ,符合一致性要求。

同样,能够得到因素层 $A$ 对指标层 $F$ 的相关指标及判断矩阵,如表1~表3所示。

从表1~表3数据可知, $\lambda_{\max} = 2$ , $CI = 0$ , $CR = 0$ 皆符合一致性条件。

表1 判断矩阵 $A_1 - F$ 

$A_1$	$F_1$	$F_2$	$W$	指标
$F_1$	1	2	0.67	$\lambda_{\max} = 2$ $CI = 0$ $CR = 0$
$F_2$	1/2	1	0.33	

表2 判断矩阵 $A_2 - F$ 

$A_2$	$F_3$	$F_4$	$W$	指标
$F_3$	1	1	0.5	$\lambda_{\max} = 2$ $CI = 0$ $CR = 0$
$F_4$	1	1	0.5	

表3 判断矩阵 $A_3 - F$ 

$A_3$	$F_5$	$F_6$	$W$	指标
$F_5$	1	3	0.75	$\lambda_{\max} = 2$ $CI = 0$ $CR = 0$
$F_6$	1/3	1	0.25	

最后得出评价因素 $F$ 相对于目标层 $P$ 的权重系数见表4。

表4 权重系数列表

$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
0.199	0.099	0.269	0.269	0.123	0.041

### 3.3 确定功能系数

基于本项目可选方案的特点,幕墙的外观形态和安全性能是没有区别的。因此,只需重点研究建筑的综合能耗。本项目小组成员应用BIM软件进行能耗分析,分析可得,可选方案A全年总冷热负荷为2 594 499 840Wh,而可选方案B全年总冷热负荷为2 592 989 440Wh。

本文邀请了5位专家进行专家打分。5位专家分别为BIM及全生命周期工程管理专家两名、BIM技术应用专家一名、汽车4S店项目部工程管理专家两名。将5位专家的打分计算平均数并取整,最终得到的可选方案A、B的功能系数如表5所示。

表5 可选方案A、B的功能评分

评价指标		方案A		方案B	
功能指标	权重	评分	最终得分	评分	最终得分
$F_1$	0.199	9	1.791	9	1.791
$F_2$	0.099	8	0.792	8	0.792
$F_3$	0.269	7	1.883	9	2.421
$F_4$	0.269	7	1.883	9	2.421
$F_5$	0.123	9	1.107	9	1.107
$F_6$	0.041	8	0.328	9	0.369
方案总分		7.784		8.901	
功能评价指数		0.466		0.534	

### 3.4 确定成本系数及方案比选

利用Autodesk Revit Architecture软件以及BIM模型,直接导出山东东营某汽车4S店项目

幕墙明细表,见表6。

根据山东东营某汽车 4S 店项目相关资料, XPS 保温板造价为 800 元/m<sup>3</sup>, 方案 A 幕墙造价为 806 元/m<sup>2</sup>, 方案 B 的幕墙造价为 850 元/m<sup>2</sup>。方案的研究期为 50 年, 不考虑残值。根据相关幕墙设计经验以及保温防火相关材料使用寿命数据, 取 25 年为平均寿命, 以得到资源更替费用 (不考虑维修维护费用)。根据山东省电力部门数据, 取每度电 0.6 元, 根据现有银行贷款利率, 折现率为 6%。

表6 幕墙造价表

B_ 外墙明细表		
族与类型	面积/m <sup>2</sup>	体积/m <sup>3</sup>
幕墙: 1 楼玻璃隔断 1 000mm	152. 01	0. 00
幕墙: 1 楼玻璃隔断 1 025mm	61. 20	0. 00
幕墙: 1 楼玻璃隔断 950	16. 95	0. 00
幕墙: 东连接幕墙	34. 68	0. 00
幕墙: 南门幕墙	12. 41	0. 00
幕墙: 幕墙	769. 72	0. 00
幕墙: 幕墙-南 1-4	251. 96	0. 00
幕墙: 幕墙-西 4	63. 92	0. 00
幕墙: 店面	22. 44	0. 00
幕墙: 店面 2	72. 24	0. 00
幕墙: 西南弧墙	86. 29	0. 00
总计: 36	1 544. 81	0. 00

方案 A:  $C = WLCC$

$$\begin{aligned}
 &= C_0 + \sum_{i=1}^n (R + E + M) / (1 + r)^i \\
 &= 1\,245\,116.86 + \sum_{i=1}^{50} (2\,513\,864 \times \\
 &\quad 0.6) / (1 + 0.06)^i + 1\,245\,116.86 / \\
 &\quad (1 + 0.06)^{25} \\
 &= 26\,071\,777 \text{ (元)}
 \end{aligned}$$

方案 B:  $C = WLCC$

$$\begin{aligned}
 &= C_0 + \sum_{i=1}^n (R + E + M) / (1 + r)^i \\
 &= 1\,313\,088.5 + \sum_{i=1}^{50} (2\,592\,989 \times \\
 &\quad 0.6) / (1 + 0.06)^i + 1\,313\,088.5 / \\
 &\quad (1 + 0.06)^{25} \\
 &= 26\,141\,298 \text{ (元)}
 \end{aligned}$$

表7 幕墙方案优选结果

	方案 A	方案 B
功能系数	0. 466	0. 534
成本系数	0. 499 34	0. 500 66
价值系数	0. 933 2	1. 066 6

从表7可以看出, 方案 B 的价值系数大于 1, 且最高, 因此认为方案 B 在全生命周期内有更好的节能、安全及外观功能价值比, 是幕墙设计方案的最优选择。

## 4 结语

价值工程是建设项目规划设计方案优化与论证的关键理论与方法, BIM 是当前建筑项目设计与建造的变革性技术。但是, 两者的综合研究目前较为缺乏。本文基于价值工程理论与 BIM 应用技术, 根据相关文献研究和 BIM 实际应用经验, 从全生命周期视角, 提出价值工程方法在基于 BIM 的建设项目规划设计方案优化及比选应用思路, 并选择山东东营某汽车 4S 店项目为研究案例, 以其中较为复杂的幕墙设计为对象, 运用 BIM 软件方法进行实证, 探索了价值工程与 BIM 的集成应用, 并选取了案例的最佳幕墙设计方案。

## 参考文献

- [1] Arto K. Requirements management interface to building product models [D]. Stanford: Stanford University, 2005.
- [2] Sang Hyun Lee, Feniosky Pena-Mora. Dynamic planning and control methodology for strategic and operational construction project management [J]. Automation in Construction, 2006 (15): 84-97.
- [3] Pavit T C, Gibb A. Interface Management within Construction: In Particular, Building Facade [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2003 (1): 8-16.
- [4] John Barton. BIM/VDC Promises and Barriers [EB/OL]. [2011-04-20]. <http://www.stanford.edu/class/cee320/CEE320C/JohnBartonPresentation.pdf>.
- [5] Henry L Green, Dana K Smith, David Morris. BIM and FM: The Portal to lifecycle Facility Management [J]. Journal of BIM, 2010 (1): 13-16. **PMT**

收稿日期: 2013-10-11