

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.061

# 楼阁式古塔建筑夜景照明视觉评价体系

侯万钧<sup>1,2</sup>, 贾铁<sup>2</sup>, 王立雄<sup>1</sup>, 杨若楠<sup>3</sup>, 邢文路<sup>4</sup>

(1. 天津大学建筑学院, 天津 300072; 2. 河北工程大学建筑与艺术学院, 河北邯郸 056000; 3. 河北大学经济学院, 河北保定 071000; 4. 河北工业大学建筑与艺术设计学院, 天津 300132)

**摘要:**随着城市夜景生活的丰富多彩,人们对城市标志性建筑照明效果的要求也越来越高。以楼阁式古塔这一类东方典型建筑为例,现阶段夜景照明效果满意度较低,相关研究也较少。文中通过大量的考察、测量和研究,梳理和分析了楼阁式古塔夜景照明美感表现的人眼视觉感受评价要素;再利用结构方程模型处理变量及其相互间关系的能力,运用 AMOS 软件对影响楼阁式古塔建筑夜景照明效果的视觉感受评价因素及因素间相互关系进行分析,构建了影响因素间关系的量化分析模型,通过对所构建模型的拟合调整和分析验证,深化了对各核心要素潜在关系的诠释,并从定量的角度阐述和剖析了各核心评价要素。最后,构建出可供实际应用且客观合理的楼阁式古塔夜景照明视觉评价体系,为古塔类建筑夜景照明设计和工程项目规划建设提供数据和评价标准参考。

**关键词:**夜景照明; SEM; 楼阁式古塔; AMOS; 评价

中图分类号: TU113

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)08-101-11

## Visual evaluation system for night lighting of tower-style ancient pagoda buildings

HOU Wanjun<sup>1,2</sup>, JIA Tie<sup>2</sup>, WANG Lixiong<sup>1</sup>, YANG Ruonan<sup>3</sup>, XING Wenlu<sup>4</sup>

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China; 2. College of Architecture and Art, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056000, P. R. China; 3. School of Economics, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, P. R. China; 4. School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, P. R. China)

**Abstract:** With the rapid development of urban nightlife, there is an increasing demand for the lighting effects of landmark buildings in the core areas. One such landmark is the ancient tower, which represents a typical oriental architectural style. However, the current satisfaction level with the night lighting effect of the ancient tower is low, and there is a lack of relevant studies in this area. This study begins with extensive investigations, measurements and research visits in the early stage to identify and analyze the factors that influence human visual perception of the aesthetic appeal of night lighting in ancient towers. Then, structural equation modeling and the AMOS software are used to analyze the relationships between variables and evaluate the factors influencing the visual perception of night lighting effect in ancient tower buildings. A quantitative analysis is constructed to understand

收稿日期: 2021-09-21 网络出版日期: 2022-01-29

基金项目: 河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2019079); 河北省社科联资助项目(2019031305005)。

Supported by the Hebei Province Graduate Student Innovation Ability Development Funding Project (CXZZSS2019079), and the Hebei Federation of Social Sciences (2019031305005).

作者简介: 侯万钧(1980—), 男, 博士研究生, 硕士生导师, 主要从事建筑照明、绿色建筑研究。

通信作者: 贾铁, 男, 硕士, 主要从事建筑照明、绿色建筑研究, (E-mail)609336634@qq.com。

the relationship between these influencing factors. Through model fitting, adjustment and analysis verification, the underlying relationship between core elements are further interpreted. Finally, the core evaluation elements are elaborated and analyzed from a quantitative perspective. The outcome is an objective and reasonable visual evaluation system for the night lighting of ancient tower buildings, which provides data and reference standards for the design, planning and construction of night lighting projects in ancient tower buildings.

**Keywords:** night scene lighting; structural equation model; pavilion-like ancient tower; AMOS; evaluation

楼阁式古塔经过数千年的交流和演化,作为一座独具东方建筑特色的古塔形式,其所矗立区域多成为城市的核心,如图1和图2所示。同时,随着城市核心区夜景需求的快速发展<sup>[1-2]</sup>,楼阁式古塔照明效果不良的现状引起高度重视,贾铁等<sup>[3]</sup>和侯万钧等<sup>[4]</sup>就楼阁式古塔夜景照明现状、亮度比例、色温、视觉舒适度等进行了系统的调研、实验和分析,其他文献均以项目分析为主。文中应用结构方程模型(structural equation model, SEM)对楼阁式古塔的建筑特点、夜景照明需求、美学需求等进行研究,构建出可供实际应用且客观合理的楼阁式古塔夜景照明视觉评价体系,以改变古塔类建筑照明美感表现不良的情况,使所在区域的总体照明环境得到有效改观,并为古塔类建筑夜景照明设计和工程项目规划建设提供数据和评价标准。

评价体系是由影响因子构成的,以往研究影响因子,通常是依靠问卷的形式进行主观定性评估来确定<sup>[5]</sup>,为保证评价体系的准确性和有效性,文中选择专家访谈与SEM相结合的方式确定评价要素,建立整体评价模型,应用AMOS进行定量拟合,根据影响要素(评价指标)之间的相关性,对其进行测试和确定。SEM因其模型构建及运行的优越性,得到广泛应用,例如,在某事件的满意度指标评价体系的构建、某事件的绩效指标评价等。



图1 典型楼阁式塔夜景照明现状

Fig. 1 Current situation of night lighting



图2 典型楼阁式塔区域夜景照明环境

Fig. 2 Night lighting environment

## 1 SEM与夜景照明视觉评价

### 1.1 结构方程模型

SEM是一种统计学范畴的数据分析方法,主要利用变量(影响因素)的协方差矩阵来对变量(影响因素)间关系进行分析<sup>[3,6-7]</sup>,可以最小化理论预测与数据样本的协方差之间的差距。在模型构建中,变量主要分为“潜在变量”和“观测变量”。包含在分析中,但不作为解释变量且会影响变量间关系的叫“潜在变量”;“观测变量”作为解释变量,是可以通过直接观察或测量得到的变量<sup>[3,8-9]</sup>。其数据可以反映潜在变量,必须有多个变量与潜在变量具有系数关系,观察到的每个变量都对应于一个以 $e$ 为表示的误差项。各变量又可以细化分为外生变量(exogenous variables)与内生变量(endogenous variables)<sup>[5]</sup>,如图3所示。

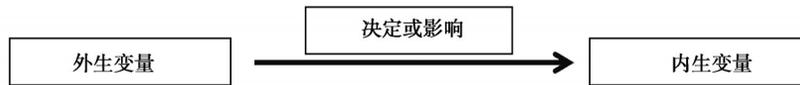


图 3 外生变量与内生变量的关系

Fig. 3 Relationship between exogenous variables and endogenous variables

## 1.2 结构方程模型与夜景照明视觉评价的结合优势

此次楼阁式古塔夜景照明视觉评价体系的构建和拟合与 SEM 的几大优势和特点契合度较高,能够有效保证整个评价体系的可信度和科学性,切实提高整个评价体系的实际应用效果。

1) 结构方程模型具有理论先验性<sup>[3,10]</sup>。模型的每一步都必须基于清晰且严谨的逻辑论证,对于夜景照明视觉评价这类具有一定理论基础,主观评价影响较多的研究体系,从因子筛选和逻辑建构 2 个层面同时对评价体系的科学性和逻辑性进行了限定。

2) 结构方程模型可以将分析和测量同步进行<sup>[6,11-12]</sup>。SEM 不仅可以处理各视觉评价要素间的关系,还可以将数据测量中出现的绝大部分误差包含于评价体系的分析和拟合过程中,把测量信度及效度的概念整合到统计推断中,通过利用对观测变量的模型化和逻辑化分析加以估计,将体系中涉及主观评价较多且包含诸多潜在变量的不利影响降到最低,这样可以准确评估影响因素测量过程中的误差,也有利于提高整个体系的信度和有效度。

3) 结构方程模型综合了多种统计方法,测量模式比传统的统计方法更有弹性<sup>[2,13-15]</sup>。

4) 结构方程模型中存在误差不影响体系的构建结果<sup>[5-12]</sup>。本次评价体系通过专家访谈获取所需数据,访谈对象的专业素质较高,对访谈数据做了周密的预处理,最终数据的合理性可以在一定程度上得到保证,但误差的存在是不会被完全消除的。利用 SEM 中存在误差且不影响体系的构建结果的优势,最大程度削弱误差对模型结果的影响。

5) 结构方程模型中的每个潜在变量一般都由 2 个或 2 个以上观测变量所组成,可以对各影响因素的信度和效度进行估计<sup>[5,8,10]</sup>。文中体系建立 24 个观测变量,每个潜在变量在其下辖都会有 2 个或 2 个以上的观测变量,此体系的构成方式与 SEM 的搭建形式高度吻合,可以充分利用 SEM 模型估计多个指标的信度和效度方面的优势,增加构建评价体系的合理化程度。

6) 根据科研经验和专业知识,研究者可假设各潜在变量之间存在的相关关系并据此构建初步的逻辑模型,再导入数据完成拟合度检验。通过对备选模型进行数据拟合,在保证能够进行理论解释的基础上选择最优模型,进而对所构建模型的拟合程度进行估计。

SEM 与本次体系构建的流程和目的完全符合,能够保证此次体系构建的合理有效。

## 2 评价体系模型构建及应用

### 2.1 楼阁式古塔建筑

楼阁式古塔建筑的整体结构一般由地宫、塔基(或称须弥座)、塔刹、塔身共 4 部分构成,但在夜景照明方面,只需考虑塔基、塔刹和塔身。古塔外部分层设置窗和门,两层间均设置有腰檐,部分古塔还设有栏杆和平座<sup>[3,11,16]</sup>,各层檐下均设有极具中国古建特征的梁、枋、柱。古塔从最初的宗教性建筑发展成现今的标志性和纪念性建筑历经千年,长期承担礼佛的作用,有些古塔还兼顾军事作用,古塔作为佛教文化和中式古建传统的融合载体也渐渐成为了一座城市或地区的重要标志<sup>[11,16-17]</sup>。

### 2.2 变量设定及路径假设

文中评价体系的主体为楼阁式古塔建筑,通过对所选变量的调查,再利用访谈问卷进行评价,都是基于人的肉眼视觉感知对古塔夜间的照明效果的真实评价。在体系构建之前,笔者已经发表过多篇关于楼阁式古塔建筑夜景照明的相关文章,对其建筑形制、历史发展、文化传承、建筑定位等建筑特性进行了全面的研究<sup>[3-4,11]</sup>,对国内外现存的多座楼阁式古塔建筑及其照明效果进行了实地观测,其中,有兴福寺五重塔、正定凌霄塔等;同时,参考相关工程设计经验,梳理了此类建筑现存的各种照明表现方式和其合理性程度,最终归纳

了5大潜在变量,主要为色温、亮度、建筑特性3个表现层面;此外,还对照明实现和建筑保护2大层面进行了综合考虑,接下来归纳筛选了影响5大潜在变量的相关因素,选定为观测变量<sup>[3,5,18]</sup>,具体关系如表1所示。

表1 模型要素间关系及情况说明表

Table 1 Relationship of the model elements

潜在变量 (一级变量)	观测变量(二级变量)	变量说明
A:建筑特性表现	A1:建筑形体表现	建筑体量、外轮廓得到真实反映,比例均衡,以免造成比例失真,同时对建筑整体进行全面展现,不孤立的展现建筑的某一部分,或遗漏某一部分,比如遗漏须弥座、塔身、塔刹或者其他建筑部位或构件等 <sup>[3,16]</sup> 。
	A2:建筑文化表现	古塔建筑作为重要的宗教符号以及中外建筑交流融合的主要体现,同时作为中国古建筑中的集大成者,要着重考虑其本身建筑文化的展现,将其本身所蕴含的佛教文化以及中国古建筑文化通过灯光这一载体在夜晚被释放出来,使其充满生命力 <sup>[3]</sup> 。
	A3:建筑结构表现	楼阁式古塔建筑结构复杂,从塔基、须弥座、塔刹、塔身等大结构到梁、枋、柱、斗拱等小结构均各有特点且非常精美,故需对古塔建筑各结构进行全面的展现,同时还要考虑各结构在夜景照明语境下的照明层次关系 <sup>[3]</sup> 。
	A4:建筑材质表现	古塔建筑多为木制或砖木混合材质,也有金属或琉璃材质,对于不同的古塔材质要采用不同的照明方式进行展现,尽量将其本身材质还原出来 <sup>[3]</sup> 。
	A5:建筑外部装饰表现	建筑外部除去结构、构件、材质外还会有雕花、浮雕、彩绘、风铃等精美的建筑装饰元素,要对其所展现的内容、尺寸等进行合理的展现和强调 <sup>[3]</sup> 。
	A6:建筑风格表现	根据其不同的建筑风格及作用进行照明设计。
	A7:建筑节日表现	在不同的节日背景下进行不同的照明动态转变,用以展现建筑特性。
B:亮度表现	B1:结构间亮度比例	根据其结构重要程度及自身特征进行亮度比例划分,体现其照明层次关系,凸显古塔建筑结构,提升其空间感 <sup>[3,16]</sup> 。
	B2:与环境亮度协调性	保证古塔建筑本身亮度与周围环境亮度协调,建筑既要突出于环境又要融入于环境。
	B3:建筑整体凸显比例	楼阁式古塔建筑从其建筑地位、建筑尺度、建筑文化内涵等方面都注定会成为一个地区或一个场所的核心,同时在区域性照明设计上要做到结构层次的划分,所以在夜景照明设计中,要保证建筑整体的凸显 <sup>[3]</sup> 。
	B4:同平面亮度均匀度	同一平面内,保证其亮度均匀度。
	B5:亮度时间变化	根据夜色及周围环境的亮度变化进行亮度调节 <sup>[16]</sup> 。
C:色温表现	C1:与环境色温协调性	保证其与整个环境的色温协调性,保证其色温表现与大环境无较大反差,同时又保证建筑凸显。
	C2:建筑色彩还原度	保证建筑表面色彩(彩绘、材质等)还原度,降低色阈值影响
	C3:建筑性格及氛围营造	不同的色温会烘托出不同氛围,会对观察者产生不同的心理感受,会影响建筑在人们心理的印象,影响建筑本身性格的展现,所以要做到建筑本身建筑性格的还原,保证建筑整体氛围的色温营造及烘托。
	C4:色温与亮度结合合理性	色温与亮度合理结合,因相同色温效果下,不同亮度水平在人眼视觉感受下会有一定的差别,所以在特定的建筑主体上要对色温和亮度进行合理的结合 <sup>[16]</sup> 。
	C5:各结构间色温合理性	保证建筑各结构间的色温设计合理性变化需求。
	C6:色温时间变化	根据节日或周围环境的色温变化合理性。
D:照明效果表现	D1:智能控制	对所有灯具都应尽量做到实时控制,方便对照明效果进行实时调节,以适应不同需求及变化。
	D2:灯具选型	在灯具的选型上要在保证效果的同时,选用安装简单、破坏小、体型小、易于建筑融为一体、能耗少且寿命长的灯具类型。
	D3:灯具隐藏	为了保证建筑夜间照明效果,同时避免灯具对建筑欣赏过程中产生视线干扰,都会做到对照明灯具进行隐藏,做到见光不见灯。
	D4:节能环保	在照明设计保证效果的同时也要兼顾节能环保,节省能源,降低光污染。

续表 1

潜在变量 (一级变量)	观测变量(二级变量)	变量说明
H:建筑保护	H1:安装损害	灯具常见的安装方式有抱箍、打孔、胶黏等,都会对建筑本身产生一定得破坏。
	H2:灯光损害	光线本身对建筑会产生一定损伤,对建筑本身表面彩绘和颜色产生褪色影响,同时灯具会产生热量,对建筑尤其是木质建筑产生胀缩影响。

建筑保护和照明实现这2个层面会受到其他3个层面的影响,将外生潜在变量定为色温、亮度、建筑特性3大表现;将内生潜在变量定为建筑保护和照明实现,合理假设了10条路径关系,具体关系如表2所示。

表2 假设路径关系表

Table 2 Hypothetical path relationship

序号	假设路径关系
Z1	“建筑特性表现”和“亮度表现”之间有相关性;
Z2	“建筑特性表现”对“色温表现”之间有相关性;
Z3	“亮度表现”对“色温表现”之间有相关性;
Z4	“建筑特性表现”对“照明效果实现”有直接正向影响;
Z5	“建筑特性表现”对“建筑保护”有直接正向影响;
Z6	“亮度表现”对“照明效果实现”有直接正向影响;
Z7	“亮度表现”对“建筑保护”有直接正向影响;
Z8	“色温表现”对“照明效果实现”有直接正向影响;
Z9	“色温表现”对“建筑保护”有直接正向影响;
Z10	“建筑保护”对“照明效果实现”有直接正向影响。

A、B 2项中一项有变化使得另一项发生相应变化,就说2个变量间互相影响,具体表示为“有相关性”,A项出现变化会使B项随之变化,而B项出现变化不会导致A项出现变化,就说A对B有“直接正向影响”<sup>[3]</sup>。

### 2.3 主观评价实验

由于该模型中包含很多晦涩难懂的变量,需要具备相关专业知识才能理解,并获得权威性的数据。此次模型构建的数据收集方式采用专家访谈式问卷进行,将建筑系教授、研究生导师及在读博士生设定为访谈对象。运用SD法(语义差别量表法)进行前期数据评价和收集,采用5级量表,其评价数值分别对应为:5—非常重要,4—比较重要,3—一般,2—不重要,1—非常不重要。为确保问卷评价的切实性,使问卷参与者在访谈开始前,更客观、准确地了解问卷目的,将问卷中的一些的信息对问卷访谈的参与者进行讲解,包括目的、流程、意义等不对评价结果产生影响且利于参与者准确评价的重要信息,同时,将前期调研的相关资料和数据发至参与者手中,让他们能够充分理解问卷,对评价等级的相应程度有一定的心理预期<sup>[3]</sup>。本次实验共收到235份访谈问卷,将评价时间不足平均评价时间60%的问卷进行筛选剔除,再采用四分位数法批量去除异常值,最终回收有效问卷共213份,问卷有效率高达90.6%。

### 2.4 数据可信度分析

实验采用SPSS(数据分析及整理软件)的Cronbacha信度对系数进行数据的可靠性分析,系数值大于0且小于1。当Cronbacha信度系数值 $\geq 0.8$ 时,问卷数据评价为有着非常好的内部一致性;当Cronbacha信度系数值大于等于0.7且小于0.8时为良好,大于等于0.6且小于0.7时为可接受的范围。运行SPSS对问卷中24个观察变量进行信度分析,得出总体结果,Cronbacha信度系数值为0.919,再分别对各变量的潜在数据进行信度分析。结果表明,除照明效果实现外( $\alpha$ 系数为0.5~0.6),其他潜在变量数据的可靠性均达到了可接受的水平,系数 $> 0.6$ ,如表3所示,表明访谈问卷获得的数据高度可靠,属于有效实验<sup>[3,15,18]</sup>。

表3 问卷整体及各潜在变量数据可信度值表

Table 3 Credibility values of the questionnaire as a whole and each potential variable

潜在变量名称	观测变量数	克隆巴赫 Alpha 系数值
问卷整体数据	24	0.919
建筑特性表现	7	0.811
亮度表现	5	0.710
色温表现	6	0.792
照明效果实现	4	0.507
建筑保护	2	0.609

## 2.5 模型的搭建及拟合评价

此次模型是根据10条假设路径关系及变量间关系进行构建的,在Amos软件上构建系统后,导入数据,对模型进行拟合和修正,最终得到科学实用的评价体系整体模型。

SEM的数据拟合原则是研究结构方程的假设模型与实际数据之间的一致性。假设模型中隐含的协方差矩阵 $\Sigma$ 越接近样本数据的协方差矩阵 $S$ ,模型拟合越好。在SEM中,有许多关于模型拟合程度的评价指标,Yi和Bagozzi详细区分了它们,分别是3类适配度拟合指标:基本模型、整体模型和模型内部结构<sup>[3,15,19]</sup>。对模型的整体适配程度指标进行了细化:绝对、增值、简约3类整体适配程度指标。最常用的适配程度指标是 $\chi^2$ (卡方检验),卡方值可以借用拟合函数值直接推导出来,为了充分评估模型的适配程度,又开发了增值拟合程度指标和绝对拟合程度指标<sup>[15-18]</sup>。结合问卷数据,综合选择了CMIN/DF(卡方自由度比)、RMSEA(近似误差平方根)、IFI、TLI、CFI和PGFI(残差矩阵拟合指标)来检验模型的拟合适配程度水平<sup>[3]</sup>。评价标准如表4所示。

表4 拟合程度合理限制指标

Table 4 Reasonable fitting degree constraint indicator

指标	CMIN/DF	RMSEA	IFI	TLI	CFI	PGFI
数值	<2	<0.08 适配情况合理 <0.05 适配情况良好	>0.9	>0.9	>0.9	>0.5

如图4所示,5个潜在变量具体表现为椭圆形(例如, $A$ ),24个观测变量具体表现为长方形(例如, $A1$ ),每个变量的测量误差具体表现为圆形(例如, $e1$ ),变量间存在相关性关系(例如, $A$ 和 $B$ )就以两端箭头的圆弧作为连接,带单端箭头的直线代表两变量间的正向影响关系,比如,单端箭头由 $A$ 指向 $B$ ,表示 $A$ 直接正向影响着 $B$ ,运算所得相关路径系数在各条圆弧和直线上显示,此外,还代表相应潜在变量在每个观测变量的载荷<sup>[3,15,19]</sup>。

将前期间卷数据依次导入初始构建模型中,并对模型进行拟合分析,通过观察表5所得数据发现CMIN/DF、RMSEA、IFI、TLI、CFI的拟合数据值均在合理指标水平以下,需要对初始构建模型进行整体修正。

## 2.6 模型修正

修正初始构建模型的第一步是分析假设的初始路径关系和初始构建模型现状运行要求,在模型的各项拟合调整标准的基础上,考虑模型修正指标和标准化载荷量中的各项推荐修正指标来逐步修正<sup>[5,19]</sup>。

整个修正过程需对初始假定的10条路径关系进行参数分析,如表6所示,初始的10条假定路径关系中的“Z9”路径参数为-0.38,低于标准参数值,说明这条路径关系属于错误假设,也就表示“建筑保护”层面不受“色温表现”层面变化的决定性作用,故将假设路径“Z9”进行了删除。

通过模型所得载荷系数如表7所示,不符合载荷标准系数值0.2的有 $e4$ 、 $e5$ 、 $e11$ 、 $e12$ 、 $e23$ 和 $e24$ ,说明其显著性不强,拟合不佳,故将以上6项删除。再次进行模型计算,结果如表8所示。

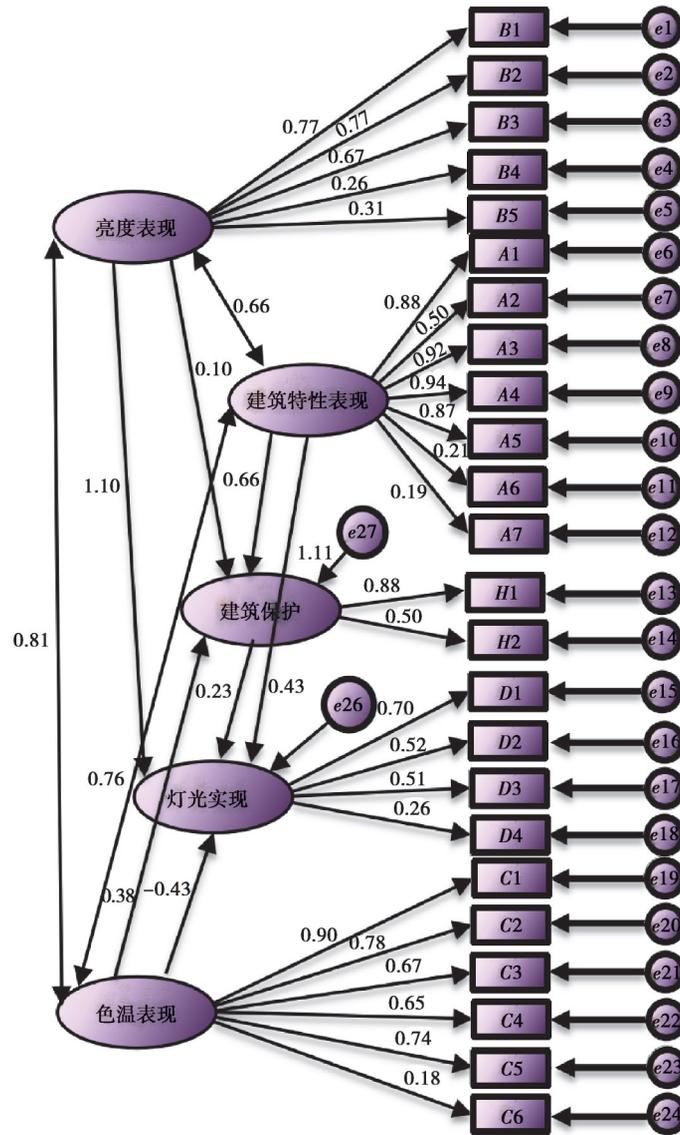


图 4 初始模型搭建结构图

Fig. 4 Initial model building structure diagram

表 5 初始搭建模型重要指标数据统计表

Table 5 Statistics of important indicators of initial model

指标	CMIN/DF	RMSEA	IFI	TLI	CFI	PGFI
数值	7.923	0.181	0.597	0.537	0.594	0.521

表 6 假设路径关系系数值统计表

Table 6 Statistics of assumed path relationship coefficient values

假设路径关系	路径系数	假设路径关系	路径系数
Z1	0.66	Z6	1.10
Z2	0.76	Z7	0.10
Z3	0.81	Z8	0.43
Z4	0.43	Z9	-0.38
Z5	0.66	Z10	0.23

表7 标准化载荷系数统计表

Table 7 Statistics of standardized load factor

变量名称	载荷系数	变量名称	载荷系数
结构间亮度比例 $e_1$	0.591	灯光损害 $e_{13}$	0.250
与环境亮度协调性 $e_2$	0.595	安装损害 $e_{14}$	0.769
建筑整体凸显比例 $e_3$	0.454	灯具隐藏 $e_{15}$	0.256
同平面亮度均匀度 $e_4$	0.069	灯具选型 $e_{16}$	0.266
亮度时间变化 $e_5$	0.095	智能控制 $e_{17}$	0.491
建筑形体表现 $e_6$	0.768	与环境色温协调性 $e_{18}$	0.816
建筑文化表现 $e_7$	0.248	建筑色彩还原度 $e_{19}$	0.603
建筑结构表现 $e_8$	0.849	建筑性格及氛围营造 $e_{20}$	0.451
建筑材质表现 $e_9$	0.878	色温与亮度结合合理性 $e_{21}$	0.425
建筑外部装饰表现 $e_{10}$	0.755	各结构间色温合理性 $e_{22}$	0.550
建筑风格表现 $e_{11}$	0.042	色温时间变化 $e_{23}$	0.033
建筑节日表现 $e_{12}$	0.038	节能环保 $e_{24}$	0.065

表8 模型初次修正后拟合程度数值统计表

Table 8 Numerical statistics of fitting degree after the initial correction of the model

指标	CMIN/DF	RMSEA	IFI	TLI	CFI	PGFI
数值	2.920	0.095	0.909	0.888	0.908	0.748

可以看出,模型评价的多项重要指标均有所改善,但是CMIN/DF、TLI仍然无法完全满足评价标准,所以一次修正后的模型还需要继续进行修正和优化。

通过观察构建模型的计算量表里修正指数<sup>[5,14,17]</sup>中的协方差项,发现 $e_6\sim e_8$ 、 $e_7\sim e_{14}$ 、 $e_7\sim e_{15}$ 、 $e_{13}\sim e_{19}$ 、 $e_{14}\sim e_{15}$ 两两之间的误差是互相关联的,故对此完成修正,根据相关性在模型中增加了5条路径关系,表9为模型运行结果,显示修正后的拟合模型中所有拟合评价指标数值均在合格指标之上,最终得到楼阁式古塔夜景照明视觉评价体系的SEM模型建构图,如图5所示。

表9 模型二次修正后所得拟合程度数值统计表

Table 9 Numerical statistics of fitting degree obtained after secondary correction of the model

指标	CMIN/DF	RMSEA	IFI	TLI	CFI	PGFI
数值	1.936	0.066	0.957	0.946	0.957	0.757

## 2.6 实例应用

依托所构建并达到合理拟合标准的楼阁式古塔夜景照明视觉评价体系,对正定县凌霄塔(如图6所示)进行实际应用,共收回52份有效问卷,所得总体满意度为46%,选取满意度最低同时满意度低于30%的5项评价变量进行模拟优化,再次进行视觉评价,所得凌霄塔夜景照明优化前后满意度,如表10所示。

观察优化结果发现,虽然只优化了5项变量,但古塔建筑夜景照明整体满意度提升明显,说明此评价体系实际应用良好,为古塔类建筑的照明设计方法和数据基础上提供实践经验和理论参考。

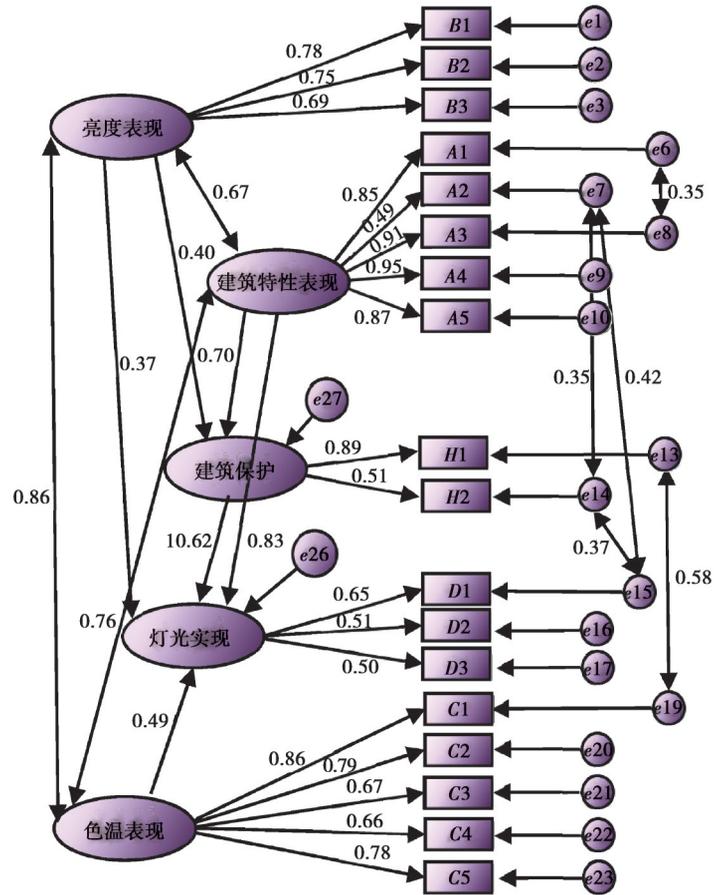


图 5 评价体系最终 SEM 逻辑建构图

Fig. 5 Final SEM logical construction diagram of the evaluation system



图 6 凌霄塔夜景照明现状

Fig. 6 Current night lighting situation of Lingxiao Tower

表10 凌霄塔夜景照明优化前后满意度表

Table 10 Satisfaction before and after the optimization of night lighting of Lingxiao Tower

满意度分类	观测变量名称	优化前满意度数值/%	优化后满意度数值/%
总体满意度	凌霄塔照明整体	46.0	77.0
	建筑结构表现	7.5	86.0
满意度最差前5名	结构间亮度比例	12.0	91.3
	与环境亮度协调性	12.8	79.6
	建筑材质表现	23.6	84.9
	建筑色彩还原度	27.3	82.6

### 3 结 论

1) 经过前期实地考察、测量, 依托 Amos 软件所构建并达到合理拟合标准的 SEM 结果, 成功建立了楼阁式古塔建筑夜景照明视觉评价体系。该体系中包含 5 个一级核心评价要素, 18 个二级评价要素。该体系的建立是基于人类视觉心理感受层面, 满足照明领域从业者及日常观赏受众从这 18 项核心评价维度对古塔类建筑的照明美感表现进行有针对性的综合评价, 改进楼阁式古塔类建筑照明美感表现欠佳的现状, 进一步改善所在区域的整体照明环境。

2) 通过前期假设和后期拟合验证, 最终在体系中的 5 个核心层面之间构建了 9 条合理实用的路径关系, 否定了 1 条路径关系。亮度、建筑特性、色温这 3 大表现层面互相间均存在相关性, 为了实现更为舒适、美观的夜间照明效果, 如果有任何一个层面发生需求变化, 其他 2 个层面也要随之进行调整; 照明最终效果实现, 呈现给大众所观赏的重要环节是在“照明效果实现”层面, 其他 4 个层面的合理研究也对其效果实现积累了重要的数据和评价基础; “建筑保护”受到“亮度表现”和“建筑特性表现”的直接影响, 亮度和建筑特性的要求发生变化, 在照明亮度和实现方式上的相应要求也会发生变化, 需要采用不同的方式和要求来对古塔类建筑进行保护; “建筑保护”不受到“色温表现”的直接影响。

### 参考文献

- [1] 张明宇, 王立雄, 苏晓明, 等. 城市核心区中国传统古建筑夜景照明亮度适宜性评价研究[J]. 照明工程学报, 2012, 23(5): 29-33.  
Zhang M Y, Wang L X, Su X M, et al. Adaptability analysis of nightscape lighting luminance of Chinese ancient architecture in urban core areas[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2012, 23(5): 29-33.(in Chinese)
- [2] 戴孝军. 中国古塔及其审美文化特征[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
Dai X J. China ancient pagoda and its aesthetic cultural features[D]. Jinan: Shandong University, 2014.(in Chinese)
- [3] 贾铁. 楼阁式古塔夜景照明视觉评价体系[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.  
Jia T. Visual evaluation system of night lighting of pavilion-style ancient pagodas[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020. (in Chinese)
- [4] 侯万钧, 贾铁, 王立雄, 等. 楼阁式古塔建筑夜景照明色温表现视觉适宜性评价研究[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(5): 1-8.  
Hou W J, Jia T, Wang L X, et al. Evaluation of visual suitability of illumination color temperature in night lighting of ancient tower building[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(5): 1-8.(in Chinese)
- [5] 金纹青, 曹磊, 何秋萌. 居住区儿童户外游乐空间安全影响因素的相关性分析[J]. 天津工业大学学报, 2013, 32(6): 76-80.  
Jin W Q, Cao L, He Q M. Correlative analysis of safety factors affecting children's outdoor play space in residential areas[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2013, 32(6): 76-80.(in Chinese)
- [6] 张建平. 一种新的统计方法和研究思路: 结构方程建模述评[J]. 心理学报, 1993, 25(1): 93-101.  
Zhang J P. Structural equation modelling: a new kind of statistical and research method[J]. Acta Psychologica Sinica, 1993, 25(1): 93-101.(in Chinese)
- [7] 程开明. 结构方程模型的特点及应用[J]. 统计与决策, 2006(10): 22-25.  
Cheng K M. Characteristics and application of structural equation model[J]. Statistics & Decision, 2006(10): 22-25.(in Chinese)

- [ 8 ] Moustaki I, Jöreskog K G, Mavridis D. Factor models for ordinal variables with covariate effects on the manifest and latent variables: a comparison of LISREL and IRT approaches[J]. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 2004, 11(4): 487-513.
- [ 9 ] Caporino N E, Morgan J, Beckstead J, et al. A structural equation analysis of family accommodation in pediatric obsessive-compulsive disorder.[J]. *Journal of Abnormal Child Psychology*,2012,40(1):133-143.
- [10] Nunkoo R, Ramkissoon H. Structural equation modelling and regression analysis in tourism research[J]. *Current Issues in Tourism*,2012,15(8):777-802.
- [11] Nunkoo R, Ramkissoon H, Gursoy D. Use of structural equation modeling in tourism research[J]. *Journal of Travel Research*, 2013, 52(6): 759-771.
- [12] Ingvardson J B, Nielsen O A. The relationship between norms, satisfaction and public transport use: a comparison across six European cities using structural equation modelling[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 126: 37-57.
- [13] Papantoniou P, Antoniou C, Yannis G, et al. Which factors affect accident probability at unexpected incidents? A structural equation model approach[J]. *Journal of Transportation Safety & Security*,2019,11(5) :544-561.
- [14] 杨文静, 赵建世, 赵勇, 等. 基于结构方程模型的蒸散发归因分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(3): 581-588.  
Yang W J, Zhao J S, Zhao Y, et al. Factors affecting evapotranspiration analyzed based on a structural equation model[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(3): 581-588.(in Chinese)
- [15] 侯万钧, 贾铁, 王立雄. 楼阁式古塔夜景照明亮度比例的适宜性评价[J]. *照明工程学报*, 2019, 30(3): 125-128, 144.  
Hou W J, Jia T, Wang L X. Appropriateness evaluation of luminance proportion in nightscape lighting of pavilion ancient tower [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2019, 30(3): 125-128, 144.(in Chinese)
- [16] 贺炜. 浅谈中国古塔建筑文化特点及其在当今建筑设计中的传承与发展[J]. *美术与市场*, 2014(4): 33-34.  
He W. On the cultural characteristics of China ancient pagoda and its inheritance and development in today's architectural design[J]. *Art & Market*, 2014(4): 33-34.(in Chinese)
- [17] 周德定, 徐乃婷, 高宁, 等. 应用结构方程模型分析上海市中心城区老年人跌倒的影响因素[J]. *环境与职业医学*, 2019, 36(8): 703-709.  
Zhou D D, Xu N T, Gao N, et al. Applying structural equation model to analyze the influencing factors of elderly People's falls in downtown Shanghai[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2019, 36(8): 703-709.(in Chinese)
- [18] 王永岗, 张衡, 彭志鹏, 等. 基于结构方程模型的出租车事故影响因素分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(6): 36-42.  
Wang Y G, Zhang H, Peng Z P, et al. Analysis of influencing factors of taxi accidents based on structural equation model[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2021, 40(6): 36-42.(in Chinese)
- [19] Ramkissoon H, Smith L D G, Weiler B. Testing the dimensionality of place attachment and its relationships with place satisfaction and pro-environmental behaviours: a structural equation modelling approach[J]. *Tourism Management*,2013,36 : 552-566.

(编辑 陈移峰)