

有锥度圆截面高耸结构的横风向响应简化计算*

邹良浩, 梁枢果, 刘亚琦

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北武汉 430072)

摘要:针对目前国外有锥度圆截面高耸结构横风向响应计算的复杂性和国内在此方面研究的不足,根据随机振动理论以及 B. J. Vickery 提出的横风向力谱,推导了计算有锥度圆截面高耸结构最大横风向响应的简化公式。在应用于工程计算方面,简化方法和基于随机振动理论的标准方法有着很好的一致性,而 B. J. Vickery 近似方法的预测值偏小。

关键词:高耸结构;横风向响应;简化公式

中图分类号:TU352.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)06-0033-06

Simplified Calculation on Across - Wind Response of Tapered High - rise Structures with Circular Section

ZHOU Liang - hao, LIANG Shu - guo, LIU Ya - qi

(Civil Engineering College, Wuhan University, Hubei Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: Now it is complex to calculate across - wind response of tapered high - rise structures with circular section abroad and its research at home is inadequate. Based on random vibration theory and across - wind force spectrum proposed by B. J. Vickery, a simplified formula on maximum across - wind response of tapered high - rise structures with circular section is achieved in this paper. With respect to engineering calculation, the results obtained by simplified method corresponds with those obtained by standard method based on the theory of random vibration well, but the prediction values by approximate method proposed by B. J. Vickery are smaller.

Keywords: high - rise structures; across - wind response; simplified formula

锥度是影响圆截面高耸结构横风向响应的一个重要参数,它使横风向力谱和气动阻尼值发生变化,锥度分散了沿结构高度旋涡脱落激振力的频率,这种分散使得横风向力谱扁平,并减小了涡激力的动力效应。对于有锥度圆截面高耸结构的横风向响应计算,B. J. Vickery 提出的方法目前在国外一直应用得较为广泛^[1],但这种方法的计算过程较为复杂,不便于工程上的使用。而在我国《高耸结构设计规范》(GBJ135-90)中,对于横风向共振验算只考虑等截面圆柱结构,非等截面圆柱结构当斜率在2%以下时取高度外径为准而化为等截面圆柱结构处理,没有考虑锥度较大一类圆截面结构工程上应如何对待。

目前,广泛应用于结构风振位移和加速度响应的方法有时域法^[2]和频域法^[3]。结构风振的速度响应主要是为了验算结构的舒适度^[4],由于圆锥面高耸烟囱没有人居住,文中只分析了其风振位移响应。

1 锥度的定义

对于一个有锥度的结构,如何将它归类于是属于小锥度结构还是大锥度结构,这个问题在目前的各种计算方法中存在着不同的说法。线性变化的锥度圆截面结构,一般来说它的锥度依赖于 $D(H)/D(0)$ 的大小($D(H)$ 、 $D(0)$ 分别为结构顶部和底部的直径),大锥度应满足的条件有以下形式:

* 收稿日期:2005-05-20

作者简介:邹良浩(1979-),男,湖北仙桃人,博士生,主要从事结构抗风研究。

$$\text{ACI 307(美国规范): } D(H)/D(0) < 0.5 \quad (1)$$

$$\text{NBCC/Pinfold(加拿大规范): } D(H)/D(0) < 0.76 \quad (2)$$

$$\text{IS 4998(印度规范): } D(H)/D(0) < 1 - \frac{H/D(0)}{25} \quad (3)$$

锥度的定义中不应该仅仅包含 $D(H)/D(0)$, 还应包含结构的“高宽比” $H/D(0)$, 在 IS 4998 的锥度定义中是唯一将此考虑进去的。在本文中采用锥度定义:

$$t = -\frac{d}{dz}(D(z)) = \frac{D(0) - D(H)}{H} \quad (4)$$

$$\text{即有} \quad D(z) = D(0) - tz \quad (5)$$

2 标准方法及 B. J. Vickery 的近似方法

无限自由度高耸结构在横风向脉动风荷载作用下的运动方程(风向为 X 轴方向)可以表示为^[5]

$$m(z) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c(z) \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(EI(z) \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right) = p(z, t) \quad (6)$$

式中: $m(z)$ 、 $c(z)$ 、 $I(z)$ 、 $p(z, t)$ 分别为沿高度 z 处单位高度上的质量、阻尼系数、截面惯性矩和横向风力。采用振型分解法求解, 由(6)式推得

$$\ddot{q}_j(t) + 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j(t) + \omega_j^2 q_j(t) = F_j(t) = \frac{\int_0^H p(z, t) \varphi_j(z) dz}{\int_0^H m(z) \varphi_j^2(z) dz} \quad (7)$$

式中: ζ_j 、 ω_j 、 $\varphi_j(z)$ 、 q_j 分别为第 j 振型的阻尼比、频率、振型和广义坐标。

根据随机振动理论^[3], 在横向风力作用下结构横风向位移响应的谱密度可以写成

$$S_y(z, \omega) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_j(z) \varphi_k(z) H_j(-i\omega) H_k(i\omega) S_{FF_k}(\omega) \quad (8)$$

对自立式高耸结构, 可忽略振型间的相关性, 则结构横风向位移响应谱密度可表示为:

$$S_y(z, \omega) \cong \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j^2(z) |H_j(i\omega)|^2 S_{FF}(\omega) \quad (9)$$

其中 $H_j(-i\omega)$ 、 $H_k(i\omega)$ 分别为第 j 、第 k 阶振型的频响函数。

Vickery 提出的形如高斯分布的横风向力谱表达式如下^[6]:

$$\frac{\omega S_p(z, \omega)}{\sigma_p^2} = \frac{1}{B \sqrt{\pi}} \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right) \exp \left[- \left(\frac{1 - \omega/\omega_s}{B} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中: 旋涡脱落频率 $\omega_s = 2\pi S\bar{U}(z)/D(z)$, S 为斯脱罗哈数, \bar{U} 为平均风速, D 为结构物的宽度, B 为带宽参数, $\sigma_p = \tilde{C}_L \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(z) D(z)$, \tilde{C}_L 为升力系数均方根值。于是得到第 j 振型横风向广义力谱密度为

$$S_{FF_j}(\omega) = \frac{1}{(M_j^*)^2} \int_0^H \int_0^H \left\{ \tilde{C}_L \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(z) D(z) \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \omega/\omega_s}{B} \right)^2 \right] \right\}_{z=z_1} \frac{1}{B \sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\omega_{s1} \omega_{s2}}} \left\{ \tilde{C}_L \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(z) D(z) \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \omega/\omega_s}{B} \right)^2 \right] \right\}_{z=z_2} R(z_1, z_2, \omega) \varphi_j(z_1) \varphi_j(z_2) dz_1 dz_2 \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} R(z_1, z_2, \omega) = \cos(2r/3) \exp \{ - (r/3)^2 \} \\ r = 2 |z_1 - z_2| / [D(z_1) + D(z_2)] \\ \omega_{s1} = 2\pi S\bar{U}(z_1)/D(z_1), \omega_{s2} = 2\pi S\bar{U}(z_2)/D(z_2) \end{cases} \quad (12)$$

$$M_j^* = \int_0^H m(z) \varphi_j^2(z) dz \quad (13)$$

对于这种高层高耸结构,由于高阶振型的贡献很小,一般不超过10%^[7],对于工程上来说,一般只考虑第一振型的贡献,位移响应均方根 $\sigma_y(z)$ 由随机振动理论可写成

$$\sigma_y(z) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} S_y(z, \omega) d\omega \right]^{1/2} \cong \varphi_1(z) \left[\int_{-\infty}^{\infty} |H_1(i\omega)|^2 S_{FF}(\omega) d\omega \right]^{1/2} \quad (14)$$

以上即为用标准方法计算的有锥度圆截面高耸结构的横风向位移响应,而B. J. Vickery近似处理后得到^[6]:

$$\sigma_y(z) \cong \varphi_1(z) \sqrt{\frac{\pi L}{2\beta\zeta_1} \frac{\bar{C}_L \rho D^4(z_0) \varphi_1(z_0)}{8\pi^2 S^2 M_1^*}} \quad (15)$$

其中 z_0 为临界高度,在 $z=z_0$ 处有 $\omega_s = \omega_1$, ω_1 为结构第一固有频率。 $L = \int_0^{\infty} R(r) dr$, $\beta = \alpha D(z_0)/z_0 + t$, α 为地面粗糙度系数。

3 简化公式的推导

将(10)式的横风向力谱表达式写成如下形式

$$\frac{S_p(z, \omega)}{\sigma_p^2} = \frac{1}{\sqrt{\pi B \omega_s}} \exp \left[- \left(\frac{1 - \omega/\omega_s}{B} \right)^2 \right] = S_f(\omega) \quad (16)$$

只考虑第一振型,于是有

$$S_{FF}(\omega) = \frac{1}{(M_1^*)^2} \int_0^H \int_0^H \bar{C}_L^2 \frac{1}{4} \rho^2 \bar{U}^2(z_1) D(z_1) \bar{U}^2(z_2) D(z_2) S_f(\omega) R(z_1, z_2, \omega) \varphi_1(z_1) \varphi_1(z_2) dz_1 dz_2 \quad (17)$$

采用随高度线性变化的第一阶振型,即 $\varphi_1(z) = z/H$,并假定相干函数等于1,平均风速沿高度变化的规律用指数规律描述,于是得到

$$S_{FF}(\omega) = \frac{S_f(\omega)}{(M_1^*)^2} \left(\bar{C}_L \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(H) H \right)^2 \left(\frac{D(0)}{2\alpha + 2} - \frac{tH}{2\alpha + 3} \right)^2 \quad (18)$$

因此,位移响应均方根 $\sigma_y(z)$ 可写成

$$\begin{aligned} \sigma_y(z) &\cong \gamma \varphi_1(z) \left[\int_{-\infty}^{\infty} |H_1(i\omega)|^2 S_{FF}(\omega) d\omega \right]^{1/2} \\ &= \gamma \varphi_1(z) \left[\frac{1}{(M_1^*)^2} \left(\bar{C}_L \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(H) H \right)^2 \left(\frac{D(0)}{2\alpha + 2} - \frac{tH}{2\alpha + 3} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} |H_1(i\omega)|^2 S_f(\omega) d\omega \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (19)$$

式中 γ 为简化计算后的修正系数。由于采用了荷载沿高完全相干和基阶振型沿高线性变化两个偏于保守的假定, γ 为小于1的系数。上式中的积分计算采用分段处理方法,所以得到

$$\sigma_y(z) \cong \frac{\gamma \varphi_1(z)}{M_1^* \omega_1^2} \left(\bar{C}_L \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2(H) H \right) \left(\frac{D(0)}{2\alpha + 2} - \frac{tH}{2\alpha + 3} \right) \left[1 + \frac{S_f(\omega_1) \pi \omega_1}{4\zeta_1} \right]^{1/2} \quad (20)$$

其中采用结构质量沿高度的变化接近于 $D^2(z)$ 的规律,所以广义质量 M_1^* 取为

$$M_1^* = \int_0^H m(0) \left(1 - \frac{tz}{D(0)} \right)^2 \frac{z^2}{H^2} dz = m(0) \left(\frac{H}{3} - \frac{tH^2}{2D(0)} + \frac{t^2 H^3}{5D^2(0)} \right) \quad (21)$$

式中 $m(0)$ 为结构底部的质量常数, $S_f(\omega_1)$ 的表达式如下

$$S_f(\omega_1) = \frac{1}{\sqrt{\pi B \omega_s}} \exp \left[- \left(\frac{1 - \omega_1/\omega_s}{B} \right)^2 \right] \quad (22)$$

$$\omega_s = 2\pi S \cdot \bar{U}(z_s)/D(z_s) \quad (23)$$

取 $\omega_1 = \omega_s$,将(22)式代入(20),得到最大横风向响应计算公式

$$\sigma_y(z) = \frac{\gamma \varphi_1(z)}{M_1^* \omega_1^2} \left(\bar{C}_L \frac{1}{2} \rho \bar{U}_s^2(H) H \right) \left(\frac{D(0)}{2\alpha + 2} - \frac{tH}{2\alpha + 3} \right) \left[1 + \frac{\sqrt{\pi}}{4\zeta_1 B} \right]^{1/2} \quad (24)$$

式中的 $\bar{U}_s(H)$ 由 $\omega_1 = \omega_s$ 来确定。

4 简化公式的进一步探讨

4.1 简化公式的适用范围

经过大量的计算分析,此简化公式适用于高宽比在 $8 \leq H/D(0) \leq 12$ 的有锥度圆截面高耸结构的最大横风向响应计算。公式中的修正系数 γ 、旋涡脱落频率 ω_s 表达式中的 z_s 与结构的高宽比和锥度大小有关,现将它们的值分别列于以下各表中。

表1 高宽比等于12的修正系数值

高宽比 $H/D(0)$	t	z_s	γ	
			钢结构 (阻尼为0.01)	钢筋混凝土结构 (阻尼为0.05)
12	4%	0.53H	0.28	0.26
	6%	0.38H	0.17	0.16
	8%	0.29H	0.16	0.15

表2 高宽比等于10的修正系数值

高宽比 $H/D(0)$	t	z_s	γ	
			钢结构 (阻尼为0.01)	钢筋混凝土结构 (阻尼为0.05)
10	4%	0.59H	0.38	0.36
	6%	0.45H	0.23	0.22
	8%	0.34H	0.17	0.16

介于上述表中值的中间值,可按线性插值取用。

所以计算有锥度圆截面高耸结构的最大横风向响应步骤如下:

- 1) 根据结构特性查表得到相应的和值。
- 2) 由关系式可以得到相应的顶部风速值。
- 3) 将代入(24)式即可得到结构位移响应的均方根值。

现将部分用简化公式计算的结果与积分计算结果的比较列于表4。

表3 高宽比等于8的修正系数值

高宽比 $H/D(0)$	t	z_s	γ	
			钢结构 (阻尼为0.01)	钢筋混凝土结构 (阻尼为0.05)
8	4%	0.61H	0.50	0.46
	6%	0.53H	0.35	0.33
	8%	0.41H	0.23	0.22
	10%	0.34H	0.19	0.18
	12%	0.29H	0.19	0.18

表4 简化计算与积分计算结果比较表

结构高度 /m	底部直径 /m	锥度	阻尼	位移均方根/m		结构高度 /m	底部直径 /m	锥度	阻尼	位移均方根/m	
				积分计算	简化公式					积分计算	简化公式
100	8.33	0.04	0.05	0.013 8	0.013 6	120	12	0.06	0.05	0.027 0	0.026 6
100	8.33	0.06	0.05	0.012 2	0.012 8	120	12	0.08	0.05	0.028 3	0.027 2
100	8.33	0.08	0.05	0.016 4	0.015 8	120	15	0.06	0.05	0.067 5	0.069 3
100	10	0.04	0.01	0.030 4	0.031 0	120	15	0.08	0.05	0.058 6	0.059 6
100	10	0.06	0.01	0.023 5	0.024 6	120	15	0.10	0.05	0.062 0	0.061 7
100	10	0.08	0.01	0.024 6	0.022 6	200	16.67	0.04	0.01	0.027 7	0.028 8
100	12.5	0.04	0.05	0.078 1	0.078 7	200	16.67	0.06	0.01	0.024 4	0.024 6
100	12.5	0.06	0.05	0.058 6	0.059 4	200	16.67	0.08	0.01	0.032 8	0.032 5
100	12.5	0.08	0.05	0.050 9	0.050 3	200	20	0.04	0.05	0.060 3	0.062 6
100	12.5	0.10	0.05	0.053 9	0.054 3	200	20	0.06	0.05	0.046 9	0.048 4
120	10	0.04	0.01	0.016 0	0.016 3	200	20	0.08	0.05	0.049 1	0.049 3
120	10	0.06	0.01	0.014 1	0.014 3	200	25	0.06	0.05	0.011 7	0.012 1
120	10	0.08	0.01	0.019 0	0.019 8	200	25	0.08	0.05	0.102	0.103
120	12	0.04	0.05	0.034 9	0.035 6	200	25	0.10	0.05	0.107	0.106

4.2 简化方法与其他方法的比较

在此将把简化方法与标准方法以及 Vickery 方法做一实例上的比较,现考察两个高耸烟囱:

烟囱1:钢结构烟囱,高 $H = 160$ m,底部外径 $D(0) = 16$ m,锥度 $t = 0.06$,基本风压 $w_0 = 0.6$ kN/m², $T_1 = 2.75$ s,阻尼 $\zeta_1 = 0.1$,B类地貌,振型采用均布荷载下的挠曲线近似表示,即 $\varphi_1(z) = 2z^2/H^2 - 4z^3/(3H^3) + z^4/(3H^4)$ 。

采用标准方法,编制电算程序可以得到结构顶部位移均方根值随结构顶部风速的变化情况和采用 Vickery 方法,编制电算程序可以得到结构顶部位移均方根值随结构临界高度的变化情况见图1。

从图1中可以看出,由标准方法计算得到的结构的最大均方根位移响应发生在顶部风速 $\bar{U}(160) = 24$ m/s 的时候。而由 Vickery 方法计算得到的结构的最大均方根位移响应发生在临界高度等于 83 m

的时候,这时结构顶部风速 22.25 m/s 等于。并且由 Vickery 方法计算计算的结果偏小。

对于烟囱 1,采用简化方法,先查表得到相应的 z_s 和 γ 值分别为 $0.45H$ 和 0.23 ,然后代入公式在结构顶部高度处,标准方法、简化方法及 Vickery 方法计算得到的位移响应均方根分别为 0.0560 m 、 0.0570 m 和 0.0528 m ,简化方法和标准方法有着很好的一致性,而 Vickery 方法的预测值偏小。

即可得到结构的最大位移响应,简化方法与标准方法以及 Vickery 方法的比较结果见图 2。

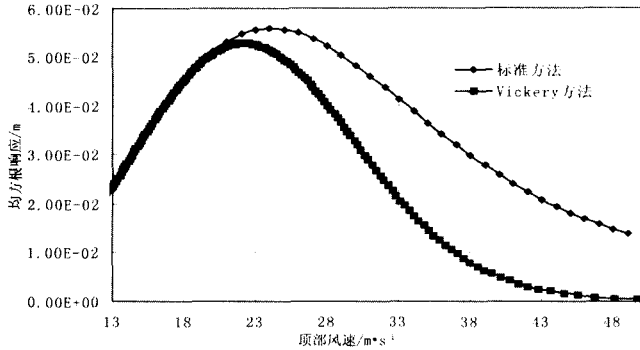


图 1 由标准方法和 Vickery 方法计算的顶部位移响应均方根比较(烟囱 1)

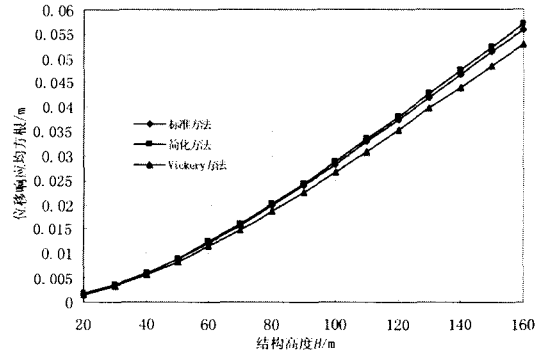


图 2 三种方法的比较结果(烟囱 1)

烟囱 2: 钢混结构烟囱, 高为 $H = 180\text{ m}$, 底部外径为 $D(0) = 18\text{ m}$, 锥度 $t = 0.08$, 基本风压 $w_0 = 0.6\text{ kN/m}^2$, $T_1 = 2.7\text{ s}$, 阻尼 $\zeta_1 = 0.05$, B 类地貌, 振型采用均布荷载下的挠曲线近似表示, 即 $\varphi_1(z) = 2z^2/H^2 - 4z^3/(3H^3) + z^4/(3H^4)$ 。

采用标准方法, 编制电算程序可以得到结构顶部位移均方根值随结构顶部风速的变化情况和采用 Vickery 方法, 编制电算程序可以得到结构顶部位移均方根值随结构临界高度的变化情况见图 3。

从图中可看出由标准方法计算得到的结构的最大均方根位移响应发生在顶部风速 $\bar{U}(160) = 28\text{ m/s}$ 的时候。而由 Vickery 方法计算得到的结构的最大均方根位移响应发生在临界高度等于 73 m 的时候, 这时结构顶部风速等于 25.6 m/s 。并且由 Vickery 方法计算计算的结果偏小。

对于烟囱 2,采用简化方法,先查表得到相应的 z_s 和 γ 值分别为 $0.34H$ 和 0.16 ,然后代入公式即可得到结构的最大位移响应,简化方法与标准方法以及 Vickery 方法的比较结果见图 4。

在结构顶部高度处,标准方法、简化方法以及 Vickery 方法计算得到的位移响应均方根分别为 0.0358 m 、 0.0560 m 和 0.0340 m ,简化方法和标准方法有着很好的一致性,而 Vickery 方法的预测值偏小。

5 结论

基于随机振动理论和结构动力学知识以及 B. J. Vickery 提出的横风向力谱,推导了计算有锥度圆

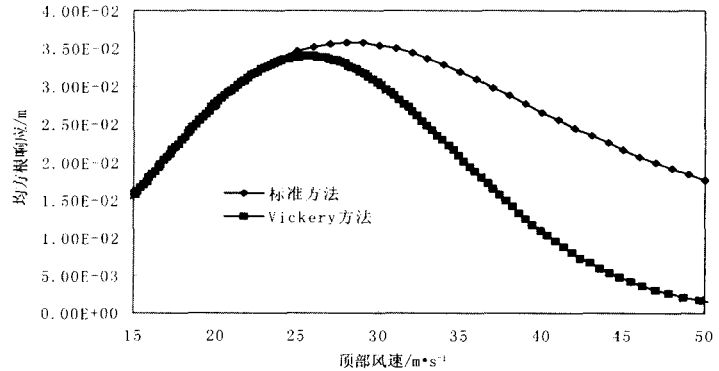


图 3 由标准方法和 Vickery 方法计算的顶部位移响应均方根比较(烟囱 2)

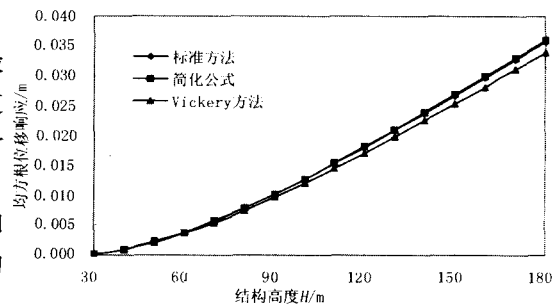


图 4 三种方法的比较结果(烟囱 2)

截面高耸结构最大横风向响应的简化公式。通过将简化公式与标准方法和 Vickery 方法比较,得出以下几点结论:

1) 简化公式计算的结果和标准方法计算的结果具有很好的一致性,利用此简化公式可以准确评估结构的响应大小,为结构设计提供参考;

2) Vickery 方法计算得到的结果要比简化公式和标准方法计算的结果小。

参考文献:

- [1] B. J. Vickery. Wind loads and design criteria for chimneys[M]. Wind Effects on Buildings and Structures, 1998.
- [2] 王元清,谭成冬,张勇. 拱形波纹钢屋盖结构风振响应的时域分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(2): 56-60.
- [3] 欧进萍,王光远. 结构随机振动[M]. 北京:高等教育出版社, 1998.
- [4] 徐贵章,瞿伟廉. 变截面高耸结构满足人舒适要求的抗风计算[J]. 重庆建筑大学学报, 1995, 17(3): 80-84.
- [5] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海:同济大学出版社, 1990.
- [6] B. J. Vickery, A. W. Clark. Lift or across-wind response of tapered stacks[J]. J. Struct. Div. ASCE, 1972, 98: 1-20.
- [7] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海:同济大学出版社, 1985.

(上接第 15 页)

与艺术逻辑或者被认为是相对立的,或者被机械地相互套用;但科学哲学给了二者一个同构体系。在以科学哲学考查建筑形式中的传统问题时,我们至少可以运用上述章节所提的几个原理与思维方式。

“有文化的建筑才是真正有生命力的建筑”。第 20 届世界建筑师大会以“21 世纪的建筑学”为主题,其 6 个分题之一便是“建筑文化”。“建筑文化”包含了传统因素的自然流露。以此视点而观,中国现有建筑形式的传统如何回归已是迫切至极的问题。在处理这一问题时,我们既要避免纯使命式或纯商业式的功利行为,也要脱开复古式的肤浅抄袭。其实无论舶来样式与传统风格如何冲突,复古主义与叛逆主义如何攻讦,传统因子在个体的思维中是很难被完全抹杀的。我们要以科学哲学的眼光来审定建筑传统,将限定于某一特定时期的狭隘的死的传统变成随社会整体发展而变化的活的传统;我们也要以科学哲学的眼光来审视自身行为,将局限性行为变成开放的更具未来价值的行为。更进一步而言,我们最好避开那种对旧传统符号的肤浅抄袭,而去把握传统在每个建筑形式设计者心中的驻留的内核。我们处在永恒的变化中是一项共识,传统内核的永生与嬗变也应是一项共识^[5]。

参考文献:

- [1] 泽熙. 波普尔与现代科学理念[EB/OL]. <http://www.oursci.org/ency/phil/061.htm>, 2004-06-10.
- [2] (英)Flew, Antony. 新哲学词典[M]. 上海:上海译文出版社, 1992.
- [3] 萧默. 多元建筑论与现代建筑论的分歧[A]. 萧默建筑艺术论集[C]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [4] 范景中,曹意强,严善徽. 我们艺术中的悲观主义[J]. 美术研究, 1997, (1): 19-21.
- [5] 陈蔚,胡斌. 当代城市历史遗产的保护[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(5): 30-33.