

河北省艺术中心工程风洞试验研究

王建东 王军 吕一心

(河北省建筑设计研究院, 石家庄 050011)

何龙德 董志成 赵桂林 许可法

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 河北省艺术中心工程体型复杂, 如何确定建筑物顶部壳体的风荷载成为设计过程中的一个关键。本文详细介绍了该工程 1:150 建筑测压模型的风洞试验情况, 包括测点布置、吹风角度、试验方法及试验数据等内容, 为本工程的结构设计提供了重要依据。

关键词 风洞试验, 体型系数, 测点布置

1 工程概况

河北省艺术中心工程是河北省九五重点工程, 位于省会石家庄市中心, 建筑物密集地段。该建筑由主馆和音乐厅两部分组成, 东西长 136.4 米, 南北宽 92.47 米, 顶点高度 57.5 米; 其中主馆包括舞台和观众厅, 舞台顶部为一类似贝壳形的球壳, 观众厅顶部为一柱面形筒壳, 见图 1。该工程体量大, 体型复杂, 球壳局部悬挑长度达 6 米, 为确保整体结构和局部构件风荷载的正确选取, 通过风洞试验确定风荷载参数是很有必要的^[1]。

2 试验设备、模型、测点布置及吹风工况角

中国科学院力学研究所环境风洞全长 40 米, 风洞试验段的截面尺寸为宽 1.8 米, 高在 1.2~1.4 米之间可调, 试验段长为 14 米, 最大风速为 27 米/秒。该风洞具有两个试验段, 其中第二试验段为大气边界层风洞试验段, 可获得不同下垫面时相应风速和湍流度剖面, 最大湍流度可达 20%以上。本试验使用的热线风速仪是从丹麦引进的 56C17CTA 热线风速仪, 测压仪器是从美国引进的 SDIUMK5 型机械扫描阀和两个高精度的压力传感器。数据采集系统最高采样频率可达 100KHz, 试验时传感器把被测量部位上的压力信号转换成电信号, 经放大后输入 A/D 板 (LH-SC10) 转换为数字信号, 然后用计算机进行数据采集、实时显示、计算存储及结果输出等, 并能通过软件系统控制机械扫描阀压力测量点的自动转换^[2], 见图 2。

本试验测压模型的缩尺比为 1:150, 模型长 909.3 毫米、宽 616.5 毫米、高 383.3 毫米。模型是用烘干的红松木料制成, 主要由以下几部分组成: 球壳、筒壳、女儿墙、平顶及四周主墙壁。模型表面上测压孔布置的数量为: 球壳上 86 个, 筒壳上 58 个, 女儿墙的外壁和内壁上分别布置 40 个和 33 个, 四周主墙壁上除女儿墙外壁外再布置 46 个, 平顶上除女儿墙内壁上再布置 17 个, 整个建筑物模型上共布置 280 个测压孔。

进行风载试验时, 将测压模型固定在环境风洞第二试验段的转盘处, 通过转动转盘来改变相对于模型的风向, 即改变方位角 β 。本试验在 $\beta=0\sim 360^\circ$ 范围内, 共取 15 个方位角, 从 0° 起, 每隔 30° 取一个风向, 有 12 个方位角, 在 $\beta=90^\circ\sim 180^\circ$ 范围内增加了 3 个方位角, $\beta=105^\circ, 135^\circ, 165^\circ$ 。规定 $\beta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, 分别对应南风、西风、北风和东风。本试验测压模型在风洞中的堵塞比约为 8%。

3 试验方法及数据处理

王建东, 男, 1965.11 出生, 工学硕士, 高级工程师
河北省自然科学基金和河北省建委资助

为了研究风对建筑物及结构的影响,对风洞中模拟自然风的基本要求是:①模型与建筑物应几何相似,模型的边界几何形状不因缩尺而变形,同时地形特征与建筑物形状都不变;②来流运动应相似,即平均速度分布及湍流特性应基本相似;③动力相似,即流动的雷诺数应相等。

为了满足上述要求,在模型前的风洞试验段底板上,放置模拟大气边界层装置,该装置由不同形状和不同大小的粗糙元组成,目的是要达到来流的运动相似。本试验使用的模拟装置有大尖塔、小尖塔和小方块等三种粗糙元,其中大尖塔和小尖塔的高度分别为 1.2 米和 0.9 米,小方块的尺寸为 60mmx60mmx35mm。

风速沿高度的变化规律通常用幂指数的形式来表示:

$$\frac{U_z}{U_{z_0}} = \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中 Z 为离开风洞底板的高度, Z_0 为某一参考高度,这一参考高度可在边界层厚度范围内按需任意选取, U_z 和 U_{z_0} 分别为 Z 和 Z_0 相应高度的风速。幂指数 α 为速度分布指数,地面越粗糙, α 值越大。对于建筑物相对密集的大城市中心区一般 $\alpha=0.28\sim 0.44$ ^[1]。

试验时,风洞中的风和自然风的密度、粘性系数可以认为一致,而本试验中测压模型和实际建筑物的特征长度之比为 1:150,所以如果要求雷诺数相等,则就要求试验风速为自然风速的 150 倍,这是不可能的。由于本试验中建筑物模型为有尖锐棱角的物体,其流动分离的位置基本固定,对一定范围的雷诺数不敏感,故可以认为相似参数雷诺数业已自模。在此条件下,模型试验可以不必考虑雷诺数相等的条件。此时,风速大小对压力系数基本上没有影响。正因为雷诺数不必相等,即模型缩小多少倍,风速可以不必扩大多少倍,风速的大小只取决于测量仪器的精度,这就使风洞试验大为简化。

对于通过压力测量系统测得的试验数据,可用以下公式计算出被测点的压力系数:

$$C_{P_i} = (P_i - P_\infty) / (P_0 - P_\infty) \quad (2)$$

式中 P_i 为模型上某点 i 处的压力, P_∞ 、 P_0 分别为参考点处的气流静压和总压。本试验中参考点的高度与模型顶部同高 383.3 毫米(全尺寸 57.5 米),其轴向安装位置为后转盘中心上游 3 米处。根据风荷载体型系数的定义,压力系数 C_{P_i} 可视为模型表面某点 i 处的体型系数,即:

$$\mu_s = C_{P_i} \quad (3)$$

高层建筑的风荷载常用以下公式计算^[1]:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (4)$$

其中 w_k 为风荷载标准值, w_0 为离地面 10 米标高处 30 年一遇的基本风压, β_z 为风振系数, μ_s 为风荷载体型系数, μ_z 为风压高度变化系数。

利用本试验的结果,计算风荷载的公式应为:

$$w_k = \beta_z \mu_s w_t \quad (5)$$

其中 w_t 为河北省艺术中心建筑物顶部高度 57.5 米处的风压,它是该建筑物 57.5 米高度处的风压高度变化系数 $\mu_z(57.5)$ 与基本风压 w_0 的乘积,即 $w_t = \mu_z(57.5) \cdot w_0$, 当 $\alpha=0.3$, 相应的梯度风高度取 $Z_g=450$ 米时, $\mu_z(57.5)=0.318(57.5/10)^{0.60}=0.91$ 。 μ_s 为本试验给出的当地

压力系数 C_{pi} 。由于本风载试验是在模拟大气边界层的状态下进行的,所以式(5)中的 μ_z 实际上包含了风速随高度的增加而增加,湍流度随高度的增加而减小等自然风所具有的因素。式(4)和式(5)中的 β_z 则完全相同。

4 试验结果讨论

现对试验结果简要讨论如下:

球壳 $\beta=0^\circ$ (南风), 30° , 330° 时,球壳弧面为背风面,表面压力分布全是负值, C_{pi} 变化范围分别为 $C_{pi} = -0.5921 \sim -1.0799$, $C_{pi} = -0.5928 \sim -1.5715$, $C_{pi} = -0.6256 \sim -2.1707$ 。在其它方位角,球壳弧面大部分区域的压力仍为负压,即使在 $\beta=180^\circ$ (北风)时,除球壳弧面上个别点为很小的正压外,其余部分由于三维弧面对气流的加速作用仍出现较强的负压。此时球壳弧面承受向外的张力。对于向前伸出的球壳屋檐,屋檐的上下面压力系数之差的最大值达到 $0.6962 \sim 2.7875$,这表明在球壳的屋檐构件上出现了很强的风荷载。球壳的垂直墙面在 $\beta=0^\circ$ (南风)时为迎风面,墙壁受到较大的正压力,其平均压力系数为 $C_{pi} = 0.56$ 。

筒壳 在不同风向时,筒壳屋檐的上下面压力系数之差最大值达到 $0.6343 \sim 1.4594$,这表明在筒壳的屋檐构件上仍出现了较大的风荷载分布。在 $\beta=0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内,筒壳上弧面表面压力分布几乎全是负压,只在某些方位角时由于受球壳垂直壁面的迎面作用,才在个别点出现很小的正压。因此,筒壳的上弧面受到了向上的吸力。筒壳南墙壁(弧形柱面壁)南风时为迎风面,但此时由于其壁面形状的卸载作用,壁面压力系数较小 $C_{pi} = -0.33 \sim -0.27$ 。西风或东风时,气流沿该弧形柱面壁是加速的,因而在壁面上出现较大的负压 $C_p = -0.6$;此时在筒壳左右侧壁上的压力均为负压,即使在迎风时也是如此。这是由于受左右两侧女儿墙背风面的作用和筒壳上弧面对气流的加速作用所致。

女儿墙 女儿墙受到了较大的内外压力差。当风绕过女儿墙边界时,由于物面变化产生突跃,气流发生了分离并产生了旋涡,从而出现了较大的负压,此时边角处的墙壁仍受到较大的内外壁压力差。

四周墙壁 一般情况下风荷载对该建筑物墙壁不会产生危险,但当 $\beta=0^\circ$ (南风), 30° 时,东墙下前方的空腔壁分别承受内外壁压力差为 1.4574 、 1.1821 ,应引起注意。南墙弧形柱面壁的绕流特性与筒壳南墙壁的类似,南风时, $C_p = 0.18 \sim 0.51$,西风或东风时,也出现了较大的负压 $C_p = -0.5$ 。

平顶 由于受女儿墙背风面的影响,平顶表面压力分布几乎全是负压,因而平顶表面受到垂直向上的拉力。

5 结论

对河北省艺术中心工程测压模型进行的风洞试验模拟了自然风绕该建筑模型的不同状态下的流动特性。风洞试验获得了大量的试验数据,试验数据量值合理,规律性好,数据的可信度高,为本工程的结构设计提供了重要依据。

参 考 文 献

- 1 建筑结构荷载规范 GBJ9-87.北京:中国计划出版社,1989(将出修订本)
- 2 中国科学院力学研究所.河北艺术中心建筑测压模型风洞模拟试验.1998
- 3 张相庭.工程抗风设计计算手册.北京:中国建筑工业出版社,1998

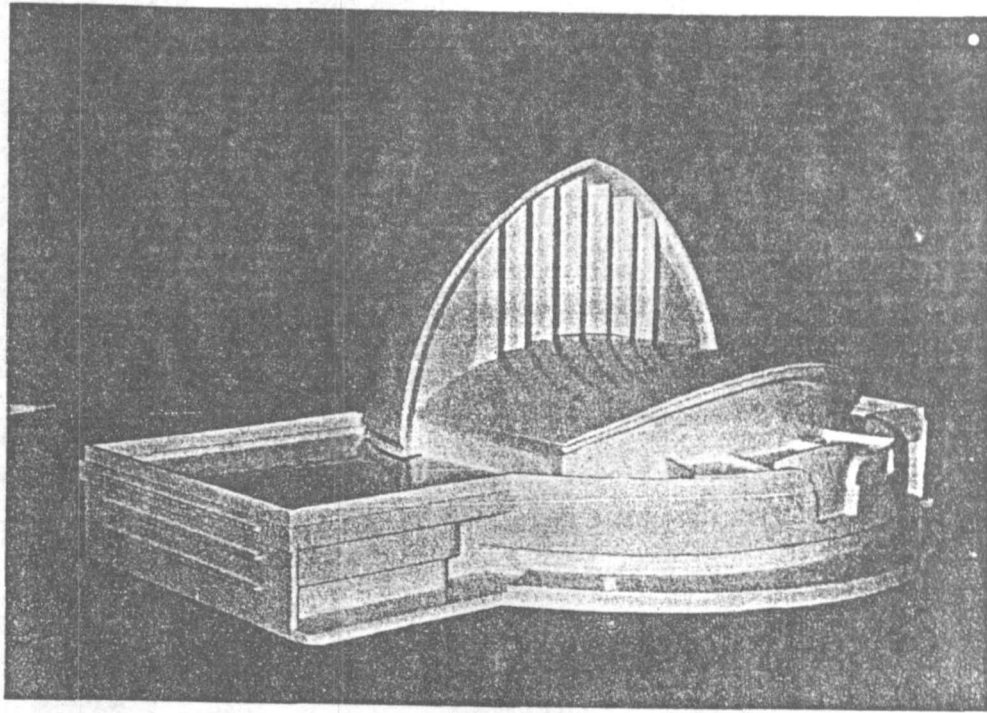


图1 1:150 建筑物模型

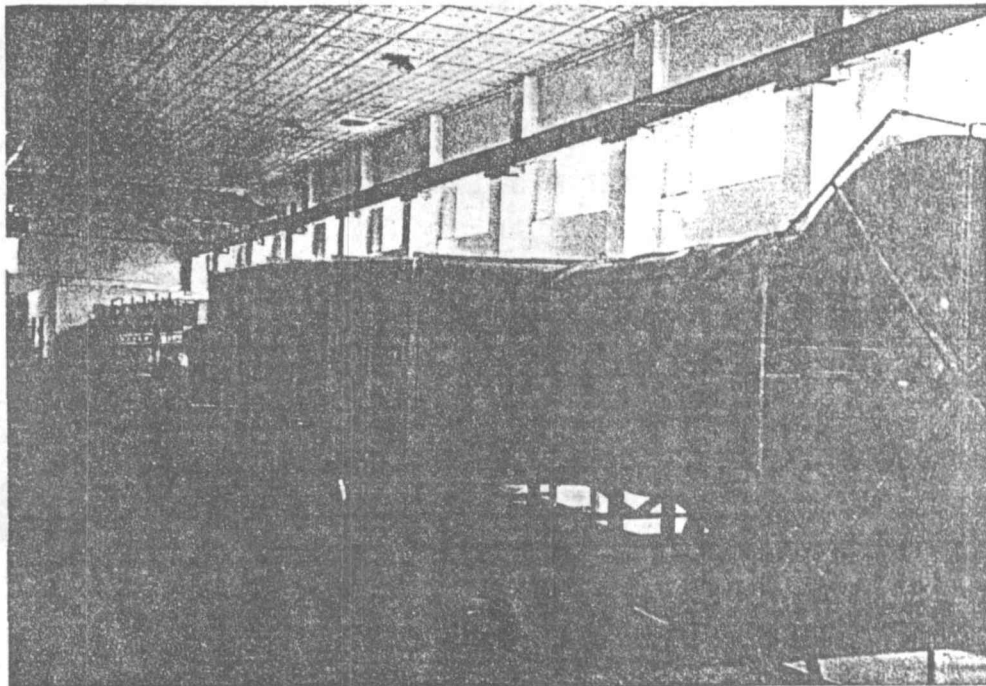


图2 风洞全貌