

STATUE

大型复杂雕像结构 分析设计及施工

Analysis design and construction of miscellaneous statue structures

马 军 赵才其 著



中国建筑工业出版社

大型复杂雕像结构 分析及施工

马 军 赵才其 著



NLIC2970888244

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大型复杂雕像结构分析设计及施工/马军等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 1
ISBN 978-7-112-14925-4

I. ①大… II. ①马… III. ①雕塑像-建筑设计②雕塑像-工程施工 IV. ①TU767

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 281495 号

本书为国内第一本系统介绍大型复杂雕像结构的分析、设计和施工过程的专著。全书共 8 章, 其中第 1 章简要介绍了大型雕像结构的选型; 第 2、3、4 章分别介绍该类特种结构的静力、动力及疲劳分析方法; 第 5、6 章分别简要介绍雕像结构的连接构造方式及雕像基座的建筑、结构设计原则; 第 7 章通过工程实例, 较详细地描述了大型雕像结构的制作安装工艺及其现场施工的全过程; 第 8 章介绍了 17 座国内外规模较大的大型雕像工程实例。

书中部分内容反映了东南大学空间结构及形态研究所多年来在大型复杂雕像结构的设计和研究方面取得的科研成果, 以及南京航天晨光股份有限公司 20 多年长期积累的制作安装经验。

本书可供从事相关工程的设计、监理及施工技术人员参考, 也可作为高校结构工程专业师生的参考用书。

* * *

责任编辑: 刘瑞霞 王 梅

责任设计: 张 虹

责任校对: 张 颖 赵 颖

大型复杂雕像结构分析设计及施工

马 军 赵才其 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京画中画印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8 $\frac{1}{4}$ 字数: 205 千字

2013 年 2 月第一版 2013 年 2 月第一次印刷

定价: 68.00 元

ISBN 978-7-112-14925-4

(22999)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前言

自 1993 年起,东南大学空间结构及形态研究所,充分利用在大跨空间结构及特种结构方面的技术优势,与专门从事艺术制像及工程设计、建造的大型企业,也是目前唯一拥有建设部颁发的大型铜像安装资质的企业——航天晨光股份有限公司艺术制像分公司长期合作,先后共同设计、建造了 30 余座国内外规模最大的雕像工程,积累了丰富的特种结构分析、设计和施工经验。

由于大型雕像结构的外形异常不规则和超大高宽比,导致其内部的结构组成及传力体系、风载取值等均不同于一般的高层建筑,受力情况要复杂得多。其金属外壳通常由铜、不锈钢等材料锻造或铸造而成,对结构在风、地震及温度作用下的强度、刚度要求高,而且我国目前还没有专门针对该类结构的设计规程可供参考。为此,本书结合作者多年从事雕像类特种结构的分析、设计经验,系统阐述了该类结构的设计原则、方法以及构造措施,并力争通过具体工程实例的分析、设计过程介绍,让读者了解并掌握该类结构的设计及施工过程。书中详细介绍了“长沙千手观音像”等多座目前国内外规模最大的著名雕像工程的设计、建造过程。

本书共 8 章,在介绍结构分析、设计理论的同时,强调工程对象的实用性,为相关工程的设计、监理和施工技术人员今后遇到类似工程提供重要的参考依据,也可供广大结构工程专业的高校师生参考。

本书第 1~5 章和第 8 章由东南大学的赵才其、马军编写;第 6 章由夏建明、王检编写;第 7 章由航天晨光股份有限公司艺术制像分公司的糜朝华、田益民、陈志刚、夏翠英编写。全书由赵才其、马军负责统稿。

在本书的编写过程中,东南大学的研究生王薇、赖俊明、陈立奇、代帅、独魏等同学,以及校友潘宇、黄会平、靳磊、张志龙等参与了大量的现场拍照和插图绘制工作,谢娜提供了相关章节的部分素材,在此一并表示感谢!

由于编者的水平有限、时间仓促,书中的错误和不足之处恳请广大读者批评指正。

编 者

2012 年 9 月于东南大学

目 录

第 1 章 大型雕像结构的选型	1
1.1 大型雕像的常见类别	1
1.2 大型雕像的内部构造	2
1.3 雕像主刚架的结构形式	3
第 2 章 大型雕像结构的静力分析	5
2.1 建模特点和结构布置原则	5
2.2 设计荷载的取值	7
2.2.1 风洞试验要点	7
2.2.2 荷载工况	16
2.3 结构的强度和刚度分析	16
2.4 特种型钢混凝土构件设计	36
2.4.1 型钢混凝土梁	36
2.4.2 型钢混凝土柱	39
2.4.3 型钢混凝土剪力墙	40
第 3 章 大型雕像结构的动力分析	42
3.1 雕像结构的动力特性分析	42
3.1.1 地震作用基本理论	42
3.1.1.1 振型分解反应谱法	42
3.1.1.2 合理振型数的确定原则	44
3.1.1.3 时程分析方法及地震波的选取	44
3.1.2 工程实例分析	45
3.1.2.1 模型概况	45
3.1.2.2 基本荷载	46
3.1.2.3 模态分析	46
3.2 多遇地震下的弹性分析	49
3.2.1 反应谱分析	49
3.2.2 时程分析	50
3.3 罕遇地震下的弹塑性分析	56
3.3.1 FNA 方法简介	56
3.3.2 参数设置	56
3.3.3 分析结果	56

3.3.4 分析结论	59
第4章 大型雕像结构的疲劳分析	61
4.1 风载下的疲劳问题	61
4.2 疲劳分析基本理论	62
4.2.1 疲劳相关概念	62
4.2.2 线性疲劳累积损伤理论	63
4.2.3 名义应力法 (S-N 法)	64
4.2.4 考虑平均应力对疲劳寿命的影响	65
4.2.5 疲劳载荷谱	66
4.3 疲劳分析软件简介	66
4.3.1 前后处理器 (MSC. PATRAN)	66
4.3.2 有限元结构分析软件 (MSC. NASTRAN)	67
4.3.3 有限元疲劳分析软件 (MSC. FATIGUE)	67
4.4 雕像工程实例分析	68
4.4.1 分析对象简介	68
4.4.2 基本假定	69
4.4.3 计算与分析	69
4.4.4 参数分析及结论	72
4.5 雕像工程案例分折	74
4.5.1 分析对象简介	74
4.5.2 计算分析	74
4.5.3 结论	79
第5章 大型雕像结构的构造设计	80
5.1 雕像结构的常见截面形式	80
5.2 连接节点的构造设计	80
5.2.1 支座节点设计	80
5.2.2 中部节点设计	82
5.2.3 边缘节点设计	83
第6章 大型雕像结构的基座设计	84
6.1 大型雕像基座的类别	84
6.2 雕像基座的建筑设计	84
6.2.1 平面功能设计	84
6.2.2 剖面立面设计	84
6.2.3 环境景观设计	85
6.3 基座的结构设计	86
6.3.1 结构选型	86

6.3.2 构造设计	87
6.3.3 基础设计	89
第7章 大型雕像结构的制作安装	92
7.1 主刚架的定位、放样及安装方法	92
7.2 金属外壳的材料及其成型技术	93
7.3 金属外壳的下料、放样及安装工艺	96
7.4 金属外壳的表面处理技术	97
7.5 香港观音像制作安装过程示例	99
7.6 金属外壳的防雷构造设计	107
7.7 主刚架与金属外壳的“犯界”	108
第8章 大型雕像工程实例简介	109

第 1 章 大型雕像结构的选型

1.1 大型雕像的常见类别

这里我们所述的大型雕像，一般指高度在 20m 以上、50m 以下的雕像，而 50m 以上则称为超大型雕像。总体而言，大型雕像通常有：①历史人物像，如郑和像、关公像、老子像、郑成功像等（图 1.1）；②佛教类雕像，如各种观音像、弥勒像等（图 1.2）。



(a) 太仓郑和像



(b) 陕西老子像



(c) 山西关公像

图 1.1 历史人物像



(a) 长沙千手观音像



(b) 浙江奉化弥勒佛

图 1.2 佛教类雕像

1.2 大型雕像的内部构造

大型雕像一般由以下四部分组成（图 1.3）：

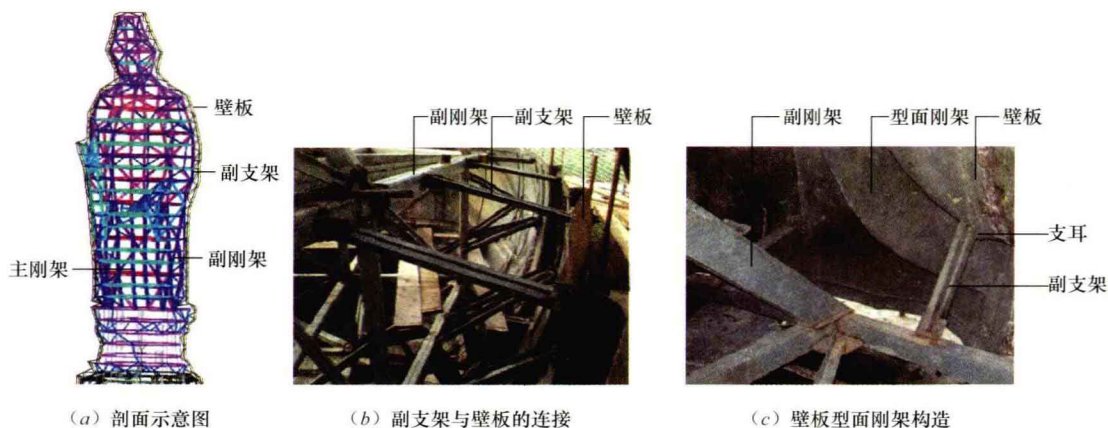


图 1.3 大型雕像的内部构造

(1) 主刚架

主刚架又称主骨架，主要功能是抵抗作用于整座雕像的自重、风、地震等荷载。它是决定整个像体安全与否的最重要的结构部分，必须具有足够的承载力、刚度及整体稳定性，也是本书重点讨论的内容。

(2) 副刚架

副刚架位于主刚架与副支架之间，由于主刚架的几何外形很难严格沿着雕像的外轮廓布置，副刚架的设置可弥补主刚架与副支架之间较大的空间，起到桥梁纽带作用。

(3) 副支架

副支架的功能是直接将外轮廓壁板通过专用装置（支耳和链杆）连接到副刚架上。为使副支架能将壁板的荷载有效地传递到主刚架上，应对每一块壁板上支耳的数量、位置和副支架的方位及数量进行合理设计，以确保每一块壁板的后面有足够数量的副支架，并形成一個独立的几何不变体系，否则有可能使壁板的荷载沿竖向平面往下逐层传递，导致下部几层壁板承受不了上面多层壁板传下来的累计荷载，而产生较大的变形甚至破坏。

(4) 壁板

大型雕像的壁板通常采用黄铜、紫铜或不锈钢材料制作。不锈钢壁板一般采用锻造工艺加工，而铜壁板除锻造外，还有铸造工艺制作。锻造壁板的厚度通常为 1~2mm，铸造壁板的厚度为 8~12mm，这主要取决于雕像的规模和单块壁板的大小。为使单块壁板在风载作用下具有足够的承载力和刚度，需在壁板的背面设置纵横向加劲肋（又称型面刚架），在这些加劲肋上布置支耳或夹片，以便与副支架的一端连接。

1.3 雕像主刚架的结构形式

针对不同造型、规模的大型雕像，通常可采用以下几种主刚架结构形式，作为其主要的承重结构。

(1) 钢筋混凝土框架结构 (图 1.4)

雕像的钢筋混凝土框架结构类似于一般的建筑工程，它主要由钢筋混凝土梁、柱现浇而成。其优点是，结构整体刚度较大，工程造价低；缺点是，相对于钢结构自重大、施工周期长、与副支架的连接不方便。

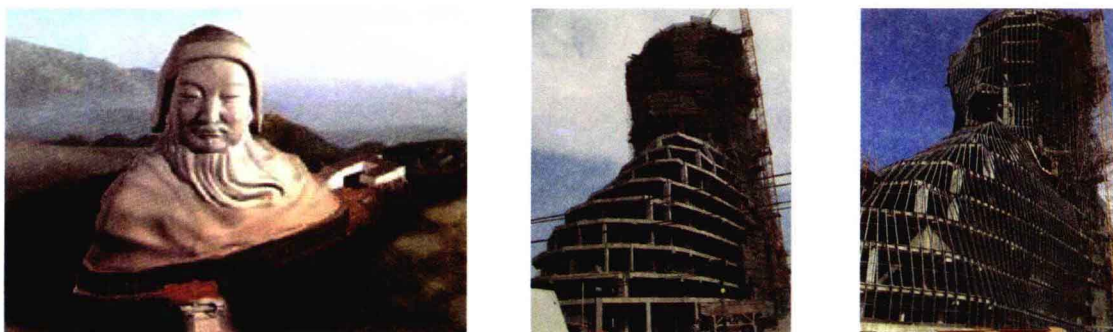


图 1.4 乌海成吉思汗胸像 (钢筋混凝土框架)

(2) 钢筋混凝土筒体结构 (图 1.5)

雕像的钢筋混凝土筒体结构类似于高层建筑中的筒体结构，可设计成圆筒、方筒或椭圆筒。其优点是，结构整体刚度大，抗风、抗震性能好，便于与电梯井的使用功能相结合；缺点是，仅适用于竖向形体较规则的站立式雕像 (通常简称“站像”)，一般必须通过设置副刚架结构，才能与副支架和壁板连接。



图 1.5 海南观音像 (筒体结构)

(3) 钢桁架结构 (图 1.6)

雕像的钢桁架结构是由方钢管、圆钢管或角钢等型钢杆件，通过节点板连接而成的铰接结构。其优点是，杆件之间的连接要求不高，可采用螺栓连接或焊接，施工难度低，结构自重轻，通过设置空间任意方向的杆件，较易满足雕像的外轮廓要求，一般不需再设副

刚架结构，便可直接与副支架相连；缺点是，结构的整体刚度不够大，必须设置大量的斜向支撑杆，才能形成具有几何三角形的桁架结构，内部杆件零乱繁杂。



图 1.6 浙江奉化弥勒佛（钢桁架结构）

（4）钢框架结构（图 1.7）

雕像的钢框架结构一般是由 H 型钢或槽钢、大截面方钢管等杆件刚性连接而成的刚架结构。其优点是，除具备钢桁架结构的优点外，可少设甚至不设斜向支撑杆件，内部空间显得较为简洁，施工速度快；缺点是，杆件之间的连接要求高。

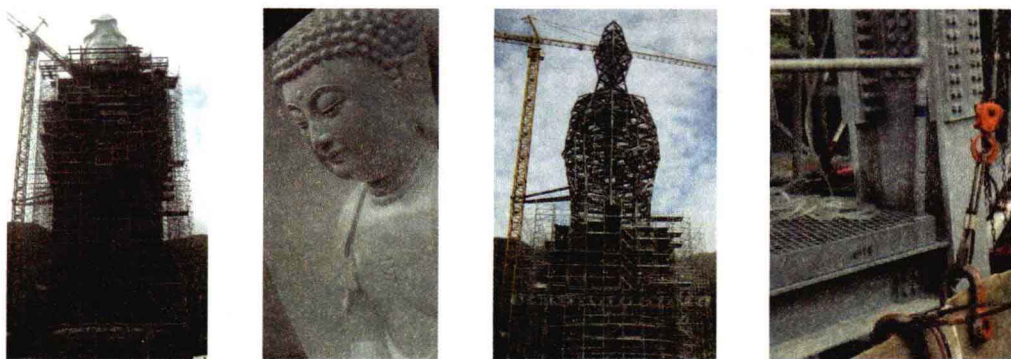


图 1.7 香港新界观音像（钢框架结构）

（5）钢网架结构（图 1.8）

雕像的钢网架结构是将钢管通过高强度螺栓或直接焊接到加工好的钢球上，形成的螺栓球或焊接球空间网架结构。其优点是，杆件及节点的加工可在专用设备上进行，其生产效率和加工精度高，现场装配速度快；缺点是，不太适合形状不规则的雕像结构，否则由于大量的杆件之间的夹角无规律、节点种类太多，安装困难且综合成本高。



图 1.8 福建泉州郑成功骑像（钢网架结构）

第2章 大型雕像结构的静力分析

2.1 建模特点和结构布置原则

由于雕像结构的外形无论在平面还是立面方向都特别复杂,因此其内部结构的有限元建模工作要比一般的规则结构困难得多。其基本原则是:建模必须充分考虑外轮廓壁板的二次安装,即杆件和节点的布置,在预留一定的安装空间后,必须满足外形要求。具体布置方法是,依据像体外形的电子扫描曲线(通常沿高度方向每隔0.2~0.5m截取一根曲线),在每隔2m左右的一层曲线范围内布置杆件和节点,每个节点离外轮廓曲线的最近距离,一般应控制在350~1200mm,否则不能满足二次安装壁板的空间要求。节点之间布置的杆件,应尽量形成三角形的几何不变体系。特别需要指出的是,在进行结构平面布置时,对于沿曲线方向的外圈边梁,由于直接承受二次外挂壁板传来的扭矩,其截面形式宜采用具有良好抗扭性能的封闭型截面,如方钢管、圆钢管等,不宜采用角钢或H型钢等开口截面。如图2.1所示为辽宁朝阳观音像的三层结构平面布置图。

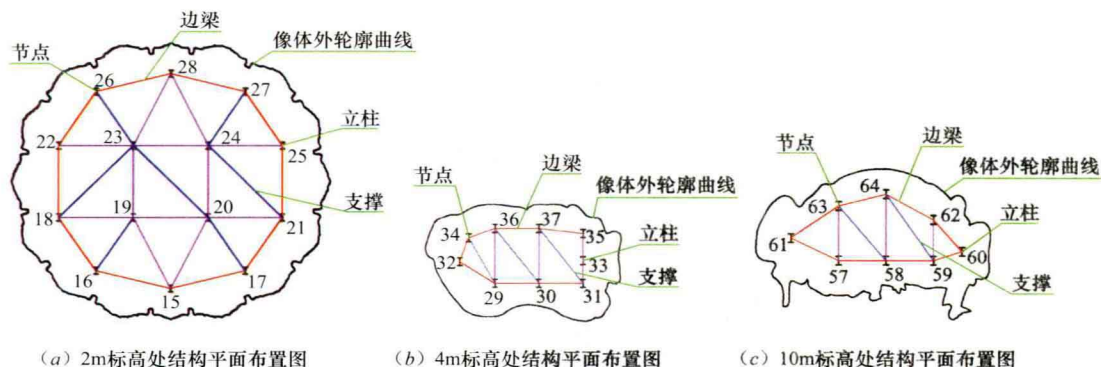


图2.1 水平方向结构平面布置图(辽宁朝阳观音像)

在各层平面的结构布置完成后,再进行竖向结构的布置,即沿像体高度方向连接各层平面上的节点。基本沿竖向的构件按柱截面设置,一般采用H型钢或箱形截面,并注意其主轴的放置方向。斜向的构件按纵向支撑设置,通常采用等边或不等边的双角钢截面,也可采用圆钢管、方钢管或H型钢截面。如图2.2、图2.3分别为吉林敦化像的主刚架剖面图及三维立体模型。

这里需要注意的是:①在连接像体外围的竖向构件时,由于某两层曲线之间像体的实际外轮廓可能存在内凹部分,此时该处的某些构件可能会与二次安装的壁板位置相冲突,即所谓的“犯界”(详见7.7节);②在雕像的身体与头、颈部轮廓突变处,应将杆件的网

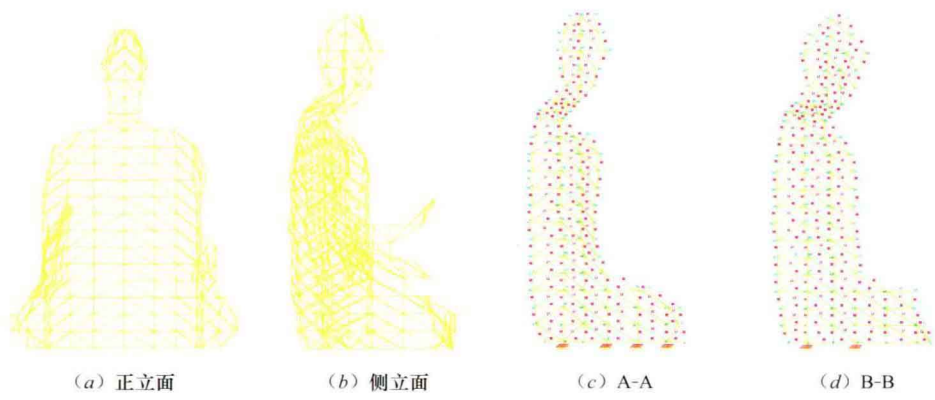


图 2.2 吉林敦化像主刚架立面、剖面图

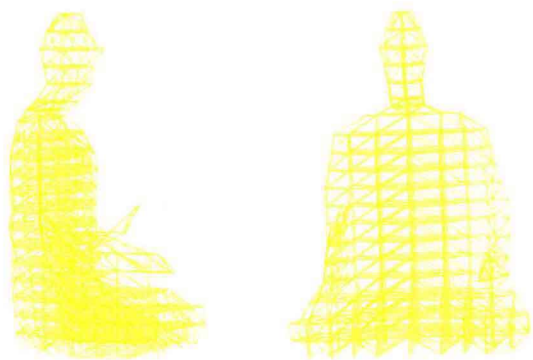


图 2.3 吉林敦化像的三维立体模型

格适度细化和再分，以便合理过渡；③对于手臂、飘带等细长部件，宜采用单肢多折杆件；④当头部有背光、照壁等部件时，可采用由 H 型钢或方钢管构成的单层网格结构。如图 2.4 所示为朝阳观音像头部背光结构图。

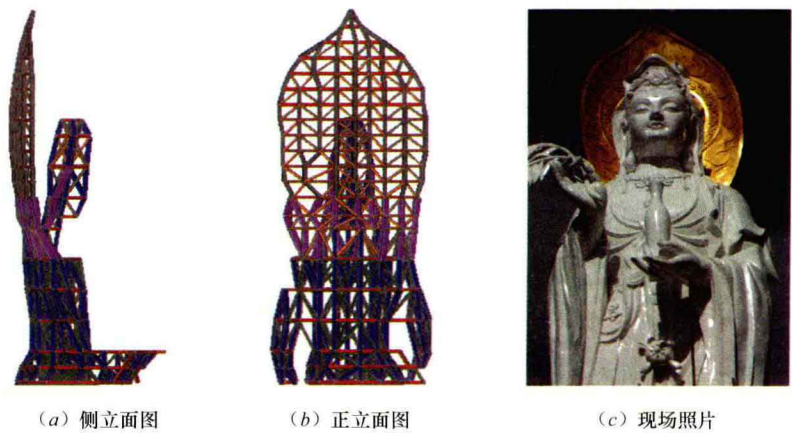


图 2.4 朝阳观音像头部背光结构

2.2 设计荷载的取值

作用在大型雕像结构上的荷载通常包括以下几种：

(1) 结构自重：指内部主骨架、次骨架及副支架等部分的结构自重，通常由软件自动计入。

(2) 悬挂荷载：指由不同材质相应的外轮廓铜板或不锈钢板的自重荷载，可近似按受荷范围换算成集中荷载和集中力偶作用于相应的节点上。

(3) 风荷载：对于大型雕像结构，风荷载往往是结构设计中主要的控制荷载之一。与一般的高层建筑不同的是，由于雕像结构的外形异常不规则，导致其风荷载作用下各部位的表面风压很不均匀，甚至没有明显的规律。为此，不能简单地套用现行《建筑结构荷载规范》GB 50009—2001（2006 版），必须制作实物结构的缩尺模型进行专门的风洞试验，以获取相应的风载体形系数（详见 2.2.1 节）。而基本风压、风振系数及风压高度变化系数仍可按规范查取。

(4) 地震作用：主要考虑水平地震作用，采用振型分解反应谱法，计算两个主轴方向的地震作用，并考虑双向地震作用下的扭转效应。

(5) 温度作用：位于温差较大地区的大型雕像结构，设计时必须充分考虑极端温差条件下的温度作用。

(6) 雪荷载及裹冰荷载：对像体外轮廓的较大迎风凹面（如背光等部位），设计时应考虑不对称的积雪荷载，及细长手臂、飘带等部位上的裹冰荷载。

2.2.1 风洞试验要点

风洞试验的目的是研究雕像模型，在不同风向角下的整体气动力变化情况，以及模型表面的压力分布情况。进而确定结构的风载换算体型系数，为结构在风载下的计算分析提供重要的依据。

这里我们以福建厦门 78m 高的郑成功石材雕像工程为例，简要介绍一下大型雕像结构的风洞试验过程。该工程的风洞试验模型经同比例缩放后，于 2012 年 7 月在南京航空航天大学空气动力学研究所的低速非定常风洞中进行。

1) 试验设备和模型

(1) 试验风洞

厦门郑成功像模型的风压试验在低紊流、低噪声、非定常回流式低速风洞中进行，试验段为开口，如图 2.5 所示。

非定常风洞试验段的主要技术指标为：

宽×高×长 1.5m×1.0m×1.7m；

最大风速 开口 45m/s，闭口 60m/s；

气流偏角 俯仰方向 $|\Delta\alpha| \leq 0.5^\circ$ ，偏航方向 $|\Delta\beta| \leq 0.5^\circ$ ；

紊流度 $\epsilon \leq 0.07\%$ 。

(2) 试验模型

试验模型按 1:100 的比例采用树脂制作，如图 2.6 所示。

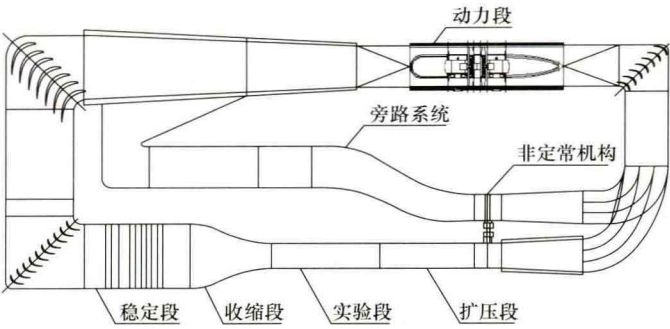


图 2.5 南航低速非定常风洞试验装置简图



图 2.6 模型照片

(3) 测力天平

试验模型的气动力由六分量盒式天平测量，天平的外形如图 2.7 所示。天平载荷能力和静校指标性能如表 2.1 所示。

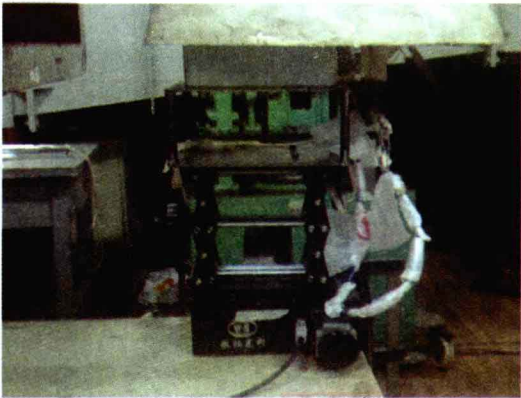


图 2.7 六分量盒式天平

天平载荷能力和静校性能指标 表 2.1

项 目	X	Y	Z	M_x	M_y	M_z
载荷 (N, N·m)	150	500	150	30	30	80
静校准度 (%)	0.26	0.22	0.16	0.42	0.36	0.36

(4) 测压系统

模型上的压力分布由压力扫描阀进行采集，如图 2.8 所示。压力扫描阀的量程为 254mmH₂O。

(5) 数据采集处理系统

试验采用的数据采集处理系统由放大器、数据采集卡和计算机组成，该系统采样速度最高可达 40000 点/s，采集精度为全量程的 0.1%。



图 2.8 压力扫描阀

2) 试验内容

(1) 模型测力试验

模型测力试验共测量了 24 个风向角下的模型六分量气动力。风向角从 0° 开始，每 15° 测量一次（定义模型正面迎风时风向角为 0° ，模型逆时针旋转风向角为正）。实验风速 $v_\infty = 25.0 \text{ m/s}$ ，大气密度 $\rho = 1.1839 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 模型测压试验

模型表面压力测量试验共测量了 24 个风向角下的模型表面各测量点的压力分布。风向角从 0° 开始，每 15° 测量一次（定义模型正面迎风时风向角为 0° ，模型逆时针旋转风向角为正）。试验风速 $v_\infty = 25.0 \text{ m/s}$ ，大气密度 $\rho = 1.1839 \text{ kg/m}^3$ 。模型上的测压点分布见图 2.9。

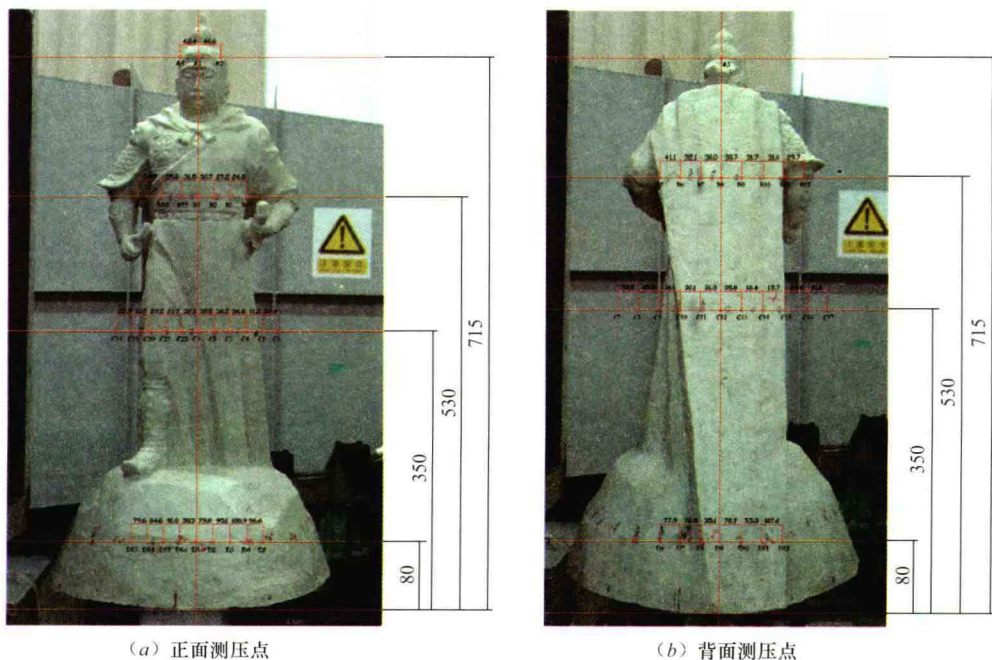


图 2.9 模型上的测压点位置

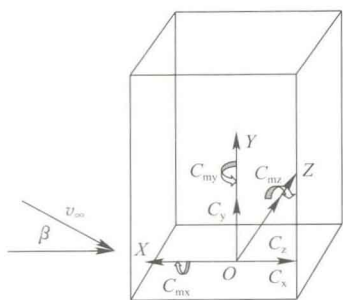


图 2.10 模型参考坐标系

郑成功像模型的测压点截面从顶部到底部分别为 A 剖面、B 剖面、C 剖面、D 剖面，测压点序号从模型正面中心位置开始，按逆时针方向排列。

3) 试验结果

(1) 测力试验结果

试验模型的参考面积取其投影面积，约为 $S=0.1495\text{m}^2$ ，参考长度取模型的高，约为 $L=0.78\text{m}$ 。模型的参考坐标如图 2.10 所示，坐标原点位于模型底部几何中心处，坐标系为风轴坐标系。

模型上的气动力系数公式为：

$$C_{x,y,z} = \frac{X,Y,Z}{\frac{1}{2}\rho v_{\infty}^2 S} \quad (2.1)$$

模型上的气动力矩系数公式为：

$$C_{mx,my,mz} = \frac{M_x,M_y,M_z}{\frac{1}{2}\rho v_{\infty}^2 SL} \quad (2.2)$$

试验模型的测力结果如表 2.2 所示。

郑成功像模型测力结果

表 2.2

$\beta (^{\circ})$	C_x	C_y	C_z	C_{mx}	C_{my}	C_{mz}
0	0.7307	0.1105	0.0778	-0.0016	-0.0224	0.2326
15	0.7754	0.0217	-0.2353	0.0304	-0.0463	0.2117
30	0.8606	-0.1004	-0.394	0.0558	-0.0615	0.1719
45	0.9626	-0.2182	-0.5682	0.0337	-0.0782	0.1045
60	1.1485	-0.3365	-0.5596	0.0082	-0.103	0.0706
75	1.2458	-0.4066	-0.2947	0.0179	-0.1239	0.0598
90	1.1670	-0.3032	0.1559	0.0714	-0.1353	0.0363
105	1.1367	-0.2603	0.4060	0.0929	-0.1651	0.0100
120	1.0695	-0.2623	0.4619	0.0297	-0.1680	0.0239
135	0.9005	-0.2144	0.3756	-0.0277	-0.1390	0.0715
150	0.7423	-0.0998	0.2831	-0.0716	-0.0966	0.1541
165	0.6294	0.0061	0.0986	-0.0374	-0.0352	0.1873
180	0.6500	0.0204	-0.0413	0.0025	0.0287	0.2143
195	0.7903	-0.0769	-0.2356	0.0312	0.0829	0.1828
210	0.8962	-0.1412	-0.3404	0.0406	0.1253	0.1269
225	0.9866	-0.0694	-0.4616	0.0184	0.1551	0.0765
240	1.0940	-0.2241	-0.1104	0.0019	0.1419	0.0454
255	1.1785	-0.2424	0.1838	0.0278	0.1365	0.0533
270	1.1864	-0.2918	0.3342	0.0391	0.1262	0.0512