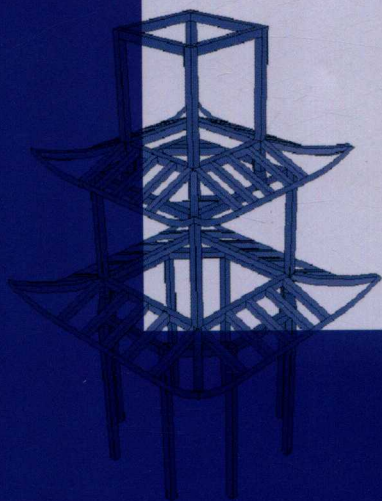
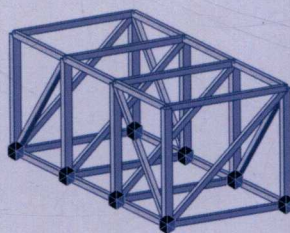




结构模型设计 制作与分析

JIEGOU MOXING
SHEJI ZHIZUO
YU FENXI

李俊华 林 云 编著



中国建筑工业出版社

结构模型设计制作与分析

李俊华 林 云 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

结构模型设计制作与分析/李俊华, 林云编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 3
ISBN 978-7-112-21576-8

I. ①结… II. ①李… ②林… III. ①建筑结构-结构设计-模型 (建筑)-高等学校-教学参考资料 IV. ①TU318
②TU205

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 292949 号

责任编辑: 王砾瑶
责任设计: 李志立
责任校对: 王 烨

结构模型设计制作与分析

李俊华 林 云 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12½ 字数: 301 千字
2018 年 2 月第一版 2018 年 2 月第一次印刷
定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-21576-8
(31236)

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

土木工程是一个实践性很强的专业，为提高学生的创新设计与工程实践能力，全国高等学校土木工程专业指导委员会和中国土木工程学会自 2007 年以来，每年主办全国大学生结构设计竞赛，到 2017 年已成功举办了十一届。该项赛事现已成为教育部确定的全国九大大学生学科竞赛之一，每年吸引大量土木工程及其他相关专业的学生参与。在全国大学生结构设计竞赛的引领和带动下，各省、市、地区以及高校内部的结构设计竞赛也在不断开展。当然，也有个别省、市的竞赛活动开展时间早于全国赛事，如浙江省，其省内一年一度的大学生结构设计竞赛至今已成功举办了十六届。

从近些年国家和省、市的结构设计竞赛题目来看，其主要关注工程结构实际面临的问题，如抗震、抗风、抗撞击等，设计对象既包括房屋建筑、道路桥梁等传统结构，也包括海洋平台、高架水塔、立体停车场等特种结构，设计题目兼具实用性和灵活性的特点，采用的材料丰富多彩，包括纸片、塑料、竹材等。通过设计、制作结构模型并进行加载测试，使学生全面了解结构与施工的全过程，培养学生的创新思维，锻炼学生的实践动手能力。

目前，各省、市及全国大学生结构设计竞赛都有参赛队伍名额限制，为选拔合适的学生队伍参加浙江省及全国大学生结构设计竞赛，本书作者所在的宁波大学每年都举行校级结构设计竞赛。为了给学生提供良好的竞赛训练条件，学校于 2006 年成立了大学生结构设计实践教学基地，2007 年该基地升级为浙江省省级实践教学基地，本书第一作者从 2007 年起担任该基地的负责人，负责学校结构设计竞赛活动的组织与参赛学生的指导工作，至今已有十余年。近两年，受学校“大学生结构设计协会”邀请，又担任了该社团的辅导老师。“大学生结构设计协会”的一项重要任务是组织新生进行结构设计竞赛，吸引对竞赛活动感兴趣的大一学生参与。刚入校的大一新生参加结构设计竞赛面临的最大困难是结构概念尚不清晰、分析问题的能力尚有欠缺、模型制作经验尚不足。为了改善这一状况，协会的负责人希望能有一本专门指导学生进行结构模型设计、制作与分析的书，为参赛学生提供帮助，这就是本书出版的初衷。

全书共 11 章，围绕学生参与的历届国家和浙江省大学生结构设计竞赛模型设计、制作、分析展开，对参与此项工作的学生深表感谢！宁波大学林云老师、布占宇老师、章子华老师、丁勇老师、吴善幸老师、魏春梅老师、王天宏老师等长期以来对参加结构设计竞赛的学生进行了悉心指导，本书第一作者的研究生对书中部分计算分析过程做出了贡献，作者在此谨向他（她）们致以诚挚的谢意！书中部分插图和内容引自全国和浙江省大学生结构设计竞赛赛题，特此感谢！

由于作者学识水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请并感谢读者给予批评指正！

2017 年 11 月

目录

第1章 吊脚楼模型设计制作与分析 1

1.1 模型设计制作背景 1

1.2 模型设计与制作过程 1

1.2.1 关键问题分析 1

1.2.2 上部承载结构选型 2

1.2.3 下部抗冲击结构选型 3

1.2.4 结构整体刚柔性分析 5

1.2.5 其他构件与连接设计 6

1.3 构件详图和整体效果图 9

1.3.1 构件详图 9

1.3.2 模型尺寸与整体效果图 10

1.4 分析与计算 11

1.4.1 计算说明 11

1.4.2 恒载分析与计算 11

1.4.3 撞击荷载分析与计算 12

1.5 结构内力计算 16

1.5.1 恒载内力计算结果 16

1.5.2 第一级加载内力计算结果 17

1.5.3 第二级加载内力计算结果 19

1.5.4 第三级加载内力计算结果 21

1.5.5 构件应力验算 23

1.6 极限承载力估算 23

第2章 高跷模型设计制作与分析 28

2.1 模型设计制作背景 28

2.2 设计方案选择 29

2.2.1 关键问题分析 29

2.2.2 总体思路 30

2.2.3 结构选型 30

2.2.4 方案比较 30

2.2.5 定型方案特色 32

2.3 模型制作过程 32

2.3.1 主要构件截面形式 32

2.3.2 节点处理方式 32

2.3.3	模型尺寸与整体效果图	33
2.3.4	部分构件详图	34
2.3.5	模型加工图与材料表	35
2.4	结构受力分析	36
2.4.1	计算模型	36
2.4.2	荷载分析	37
2.4.3	计算结果与分析	37
第3章	古建筑模型设计制作与分析	43
3.1	模型设计制作背景	43
3.2	设计方案选择	44
3.2.1	关键问题分析	44
3.2.2	总体思路	45
3.2.3	方案比较	45
3.3	模型制作	47
3.3.1	模型尺寸与整体效果图	47
3.3.2	杆件截面与构造详图	48
3.3.3	构件编号与加工图	50
3.4	结构受力分析	52
3.4.1	材料性能与构件试验	52
3.4.2	内力分析	53
第4章	山地桥梁模型设计制作与分析	61
4.1	模型设计制作背景	61
4.2	模型设计制作要求	61
4.3	设计方案选择	62
4.3.1	关键问题分析	62
4.3.2	总体思路	63
4.3.3	方案比较	63
4.4	模型制作	66
4.4.1	整体效果图	66
4.4.2	模型三视图	66
4.4.3	构件详图	68
4.5	结构受力分析	70
4.5.1	材料性能	70
4.5.2	计算基本假设	71
4.5.3	有限元模型	71
4.5.4	加载遥控小车荷载	72
4.5.5	计算结果与分析	72

第 5 章 大跨度屋盖结构模型设计制作与分析	87
5.1 模型设计制作背景	87
5.2 模型设计与制作过程	88
5.2.1 关键问题分析	88
5.2.2 整体方案比较	89
5.2.3 构件截面选型	91
5.2.4 模型效果图与构件详图	92
5.2.5 结构三视图	93
5.2.6 节点处理	94
5.3 受力计算与分析	95
5.3.1 材料规格与性能	95
5.3.2 计算假设与有限元模型	95
5.3.3 荷载分析	96
5.3.4 内力计算	97
5.3.5 挠度计算	99
5.3.6 承载力验算	99
第 6 章 海洋平台模型设计制作与分析	105
6.1 模型设计制作背景	105
6.2 加载程序与评分规则	106
6.2.1 加载程序	106
6.2.2 加载评分规则	106
6.3 模型设计与制作过程	106
6.3.1 总体设计思路	106
6.3.2 主要构件设计与结构图	107
6.3.3 其他构件设计	109
6.4 受力计算与分析	110
6.4.1 材料规格与性能	110
6.4.2 荷载计算	110
6.4.3 有限元分析	110
6.4.4 位移估算	113
第 7 章 广告牌模型设计制作与分析	116
7.1 模型设计制作背景	116
7.2 加载程序与评分规则	116
7.2.1 加载程序	116
7.2.2 加载评分规则	117
7.3 模型设计与制作过程	117

7.3.1	总体设计思路	117
7.3.2	结构选型	117
7.3.3	主要构件设计	118
7.4	受力计算与分析	119
7.4.1	材料规格与性能	119
7.4.2	风荷载计算	119
7.4.3	有限元分析	119
第8章	高架水塔模型设计制作与分析	124
8.1	模型设计制作背景	124
8.2	加载程序与评分规则	125
8.2.1	加载程序	125
8.2.2	加载评分规则	125
8.3	模型设计与制作过程	125
8.3.1	总体设计思路	125
8.3.2	方案比较	126
8.3.3	定型方案详情	126
8.3.4	制作尺寸图	129
8.4	受力计算与分析	129
8.4.1	材料规格与性能	129
8.4.2	加载工况	130
8.4.3	有限元分析	130
第9章	碰撞冲击下梁式结构模型设计制作与分析	135
9.1	模型设计制作背景	135
9.2	加载程序与评分规则	137
9.2.1	加载程序	137
9.2.2	加载评分规则	138
9.3	模型设计与制作过程	139
9.3.1	总体设计思路	139
9.3.2	方案比较	139
9.3.3	杆件规格与型号	141
9.3.4	杆件与节点加强处理方式	141
9.3.5	模型尺寸与效果图	141
9.3.6	杆件制作与构造	142
9.4	受力计算与分析	144
9.4.1	材料规格与性能	144
9.4.2	荷载计算	145
9.4.3	静力分析	146

9.4.4	动力分析	152
9.4.5	有限元分析	156
第 10 章	塔式停车楼模型设计制作与分析	160
10.1	模型设计制作背景	160
10.2	加载程序与评分规则	161
10.2.1	加载程序	161
10.2.2	加载评分规则	162
10.3	模型设计与制作过程	162
10.3.1	总体设计思路	162
10.3.2	方案比较	163
10.3.3	定型方案概况	164
10.3.4	主要杆件规格	164
10.3.5	节点处理	166
10.3.6	模型三视图与整体效果图	166
10.4	受力计算与分析	168
10.4.1	材料规格与性能	168
10.4.2	模态分析	168
10.4.3	动力反应分析	169
第 11 章	不等跨两跨桥梁模型设计制作与分析	172
11.1	模型设计制作背景	172
11.2	加载程序与评分规则	173
11.2.1	加载程序	173
11.2.2	加载评分规则	174
11.3	模型设计与制作过程	174
11.3.1	总体设计思路	174
11.3.2	结构选型	175
11.3.3	方案比选	178
11.3.4	模型三视图	183
11.4	受力计算与分析	183
11.4.1	材料规格与性能	183
11.4.2	有限元分析	184
参考文献		190

第 1 章 吊脚楼模型设计制作与分析

1.1 模型设计制作背景

吊脚楼是我国传统山地民居中的典型形式。这种建筑依山就势，因地制宜，在三峡库区等南方旧式民居中比比皆是，在今天仍然具有极强的适应性和顽强的生命力，是中华民族久远历史文化遗产的象征，也是我们的先辈们巧夺天工的聪明智慧和经验技能的充分体现。近年来的工程实践和科学研究表明，这类建筑易于遭受到地震、大雨诱发的泥石流、滑坡等地质灾害而发生破坏，自然灾害是这种建筑的天敌。因此，如何提高吊脚楼抵抗这些地质灾害的能力，是工程师们应该想方设法去解决的问题。

第六届全国大学生结构设计竞赛以吊脚楼抵抗泥石流、滑坡等地质灾害为题目,以质量球模拟泥石流或山体滑坡,撞击一个四层吊脚楼框架结构模型的一层楼面,如图 1-1 所示。模型材料为竹片,模型结构构件之间的连接采用 502 胶水。模型各层楼面系统承受的竖向荷载由附加配重钢板或配重铅块实现。主办方提供器材将模型与加载装置连接固定,并提供统一的测量工具对模型的性能进行测试。

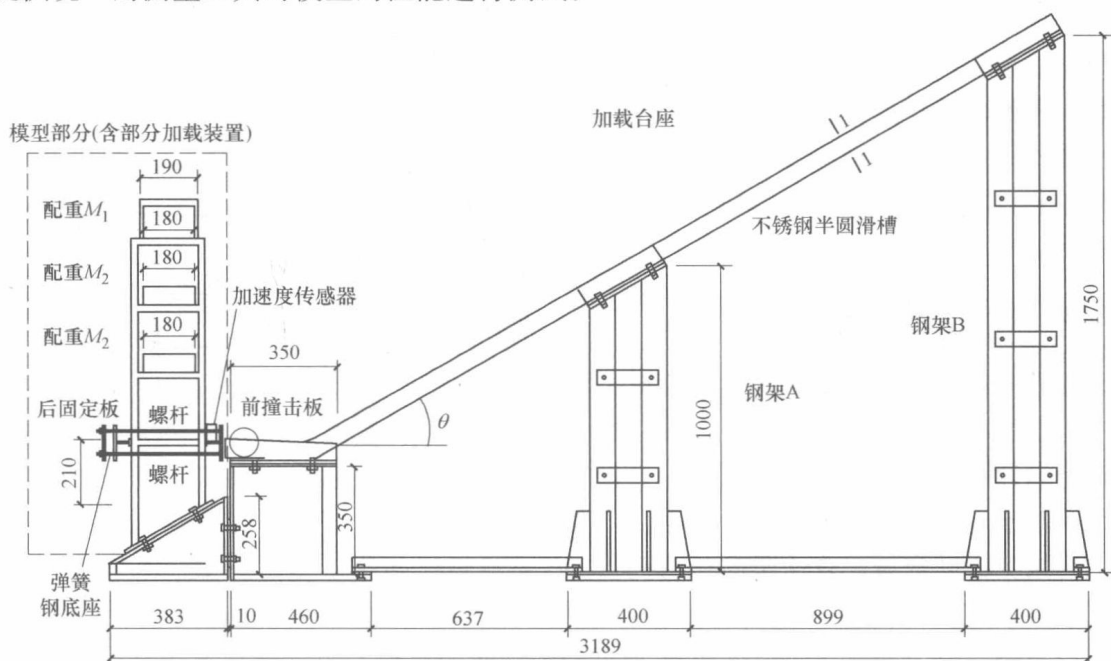


图 1-1 模型及加载装置简图

1.2 模型设计与制作过程

1.2.1 关键问题分析

本次竞赛的主要形式为质量球撞击承受荷载的结构楼面，撞击前承受既定的竖向荷载

(配重)，其中屋面配重为可变配重，二、三层楼面配重为恒定配重，一楼配重为安装于一层楼面的加载装置质量。撞击加载共分三级，每级加载取质量球不同的下落高度。模型性能通过加载试验评定，加载评分标准为：

(1) 计算模型承受的总质量 M (g)

$$M=M_1+M_2+M_3+m \tag{1-1}$$

式中 m ——结构自重 (g)；
 M_1 、 M_2 ——配重质量 (g)；
 M_3 ——一层楼面处安装于模型上的加载装置质量 (g)。

(2) 计算模型性能得分

$$C=\frac{Ma}{500m} \tag{1-2}$$

式中 m ——结构自重 (g)；
 M ——模型承受的总质量 (g)；
 a ——传感器实测加速度值 (km/s^2)。

$$S=75\frac{C}{C^*} \tag{1-3}$$

式中 C^* ——各队模型性能参数的最大值；
 C ——本队模型的性能参数；
 S ——本队模型性能得分。

从加载评分标准可以看出，模型设计的目标有三个：一是模型自身的质量足够轻；二是模型能承受的竖向荷载（配重）足够大；三是模型承受质量球冲击时的瞬间水平加速度尽量大。因此设计的关键在于：首先要选择合适的结构体系以便在自重较小的情况下尽可能承受更大的竖向荷载，其次设计合适的抗冲击单元以有利于消耗冲击能量并获得较大的瞬间水平加速度。

1.2.2 上部承载结构选型

首先考虑采用如图 1-2 所示的传统梁板结构，这种结构荷载分布均匀，稳定性较好，但构件数量多，传力尚不直接，自重相对大，基于竞赛目的考虑，选择放弃。

为减少构件数量，并使竖向荷载的传递路线尽可能直接，设计了如图 1-3 所示的十字交叉梁结构，较传统方式，梁传递给柱的荷载更加直接，传力路线变短，用材减少，效率提高。

上述十字交叉梁采用方形空心截面，荷载传递的过程中梁承担较大的弯矩和剪力作用，但方形空心截面抗弯效果不佳，因此图 1-3 所示的十字交叉梁截面尚有改进的空间。考虑到竹材抗拉性能好，设想改变梁截面形式，并进行了拉片提重物试验，如图 1-4 所示。

试验结果表明，采用拉片形式足以承担既定的楼面竖向荷载。为使拉片荷载有效传

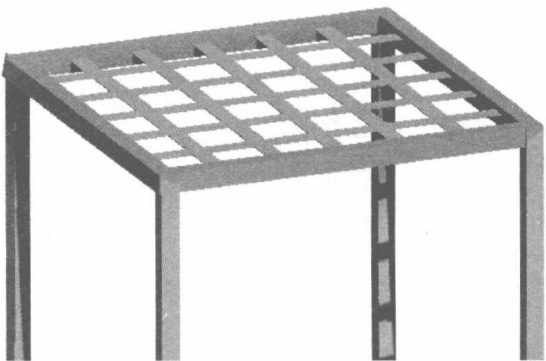


图 1-2 传统梁板结构

递，同时避免应力集中，在拉片端部加设一圆柱形过渡构件，使拉片与柱形成一个小于 90° 的夹角，如图 1-5 所示。

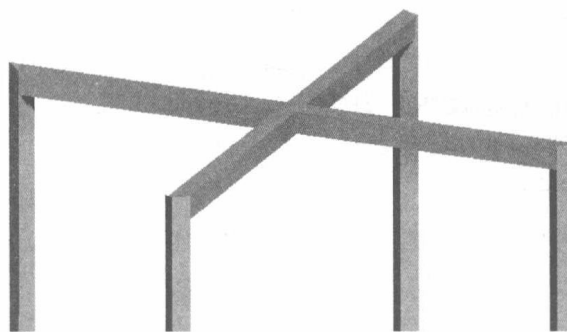


图 1-3 十字交叉梁结构



图 1-4 拉片提重物试验

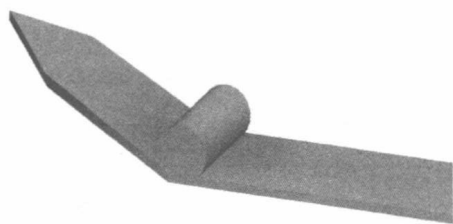


图 1-5 应力过渡构件

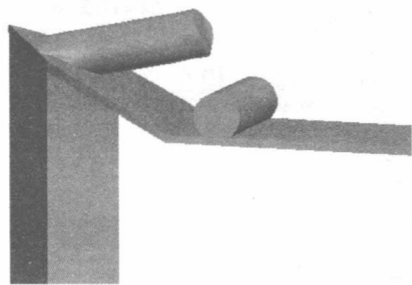


图 1-6 上部支撑构件

为保证拉片与竖向主杆的可靠连接，将主杆的端头切成一个斜坡，角度与拉片倾斜的角度相同，这样就能使拉片与主杆以最大面积接触，防止二者脱落。但构件的连接仅仅依靠 502 胶水，其可靠度尚难以保障。联想到焊接钢构件时，融化焊条使二者结合，于是将竹材“融化”，即将竹片磨成竹粉涂在拉片与主杆连接的周围，再用 502 胶水粘合，极大地提高了连接的可靠度。同时在柱顶设置支撑构件（见图 1-6），受荷时支撑构件与圆柱形过渡构件接触，一方面防止连接处竹片向上撕裂，另一方面起到卸载作用，提高构件的承载能力。上部结构的最终方案如图 1-7 所示。

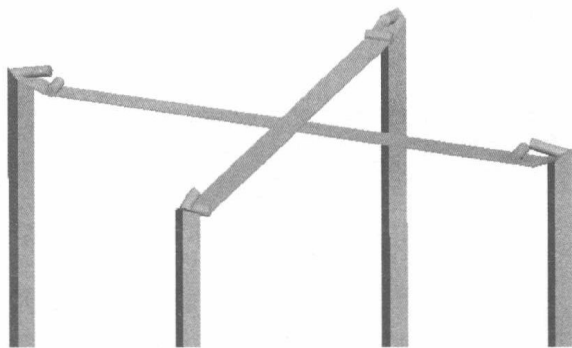


图 1-7 上部结构示意图

1.2.3 下部抗冲击结构选型

模型下部一层楼面要承受冲击动力荷载。初步考虑两种不同的杆件布置形式，一种是用水平杆加斜向杆件直接抵抗冲击荷载（见图 1-8）；一种是利用水平杆加反向拉片间接抵抗冲击荷载。根据赛题规则，无论哪种形式，构件都要固定在地板上，质量球冲击位置

(图 1-8 中 F_1 作用位置) 恒定。由于角度的原因, 前者的水平冲击力 (图 1-8 中的 F_1) 由水平杆和斜向杆件共同分担, 而试验加载所测的加速度是水平加速度, 能量在斜向杆件中

消耗后, 必然导致水平加速度测量值减小, 对竞赛得分不利; 同时, 斜向杆件的荷载 (图 1-8 中 F_2) 向上传递, 在节点柱中产生向上的冲击效应 (图 1-8 中的 F_3), 而上部主杆的长度较长, 长细比较大, 杆件容易发生失稳破坏, 为防止失稳破坏的发生, 必须增加杆件强度, 这将导致模型质量大大增加。

假设图 1-8 中角 α 为 40° , 通过分析可以得到, 当施加水平荷载 F_1 时, 斜向杆件受到的冲击力 F_2 大约为 F_1 的 1.5 倍, 上部柱需要承受的冲击力 F_3 大约为 F_1 的 1.1 倍, 可见采用第一种杆件布置形式时, 各主要杆件的受力都较大。

加速度是否会因为能量的向上传递而减小呢? 图 1-9 为按此思路制作的模型在三次冲击荷载作用下的加速度图像。

模型自重 m 为 390g, 承受的总质量 M 为 58000g (自重+满载配重)。

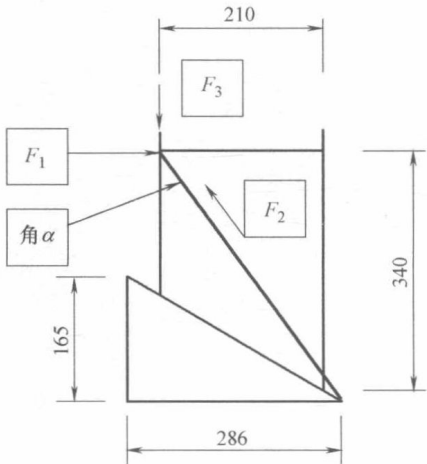


图 1-8 底部支撑结构计算简图

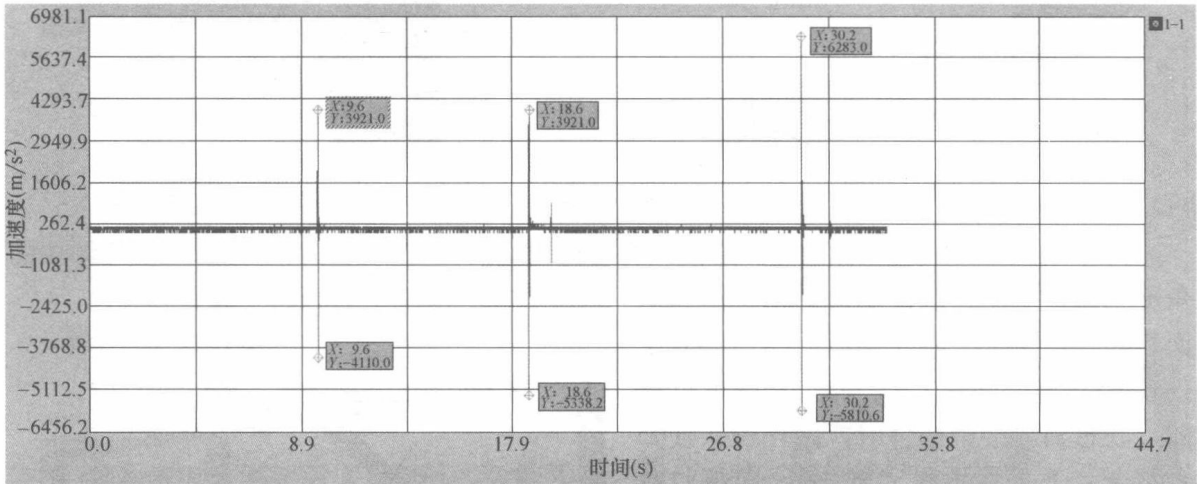


图 1-9 底部支撑结构加速度测量图

从图 1-9 可以看出, 模型最大加速度为 6283.0m/s^2 , 最小加速度为 -5810.6m/s^2 , 取绝对值最大值 6.283 km/s^2 , 则模型性能参数为:

$$C_1 = \frac{Ma}{500m} = \frac{58000 \times 6.283}{500 \times 390} = 1.869$$

倘若在图 1-8 的撞击点处引申一条下拉片替代图中的斜向杆件, 形成水平杆加反向拉片的另一种抗冲击结构形式 (见图 1-10)。经过分析, 当其中水平杆件与拉片的夹角大约为 30° 时, 拉片受到的冲击荷载 F_2 只有不到 F_1 的 1.2 倍; 与拉片相交的柱受到的荷载 F_4 只有 F_1 的 0.6 倍, 因此第二种抗冲击结构形式更为合理。

进一步对比分析: 斜拉片间接抵抗冲击荷载的方式与前者相比受力的角度更小, 效率更高; 同时在这种受荷方式下, 冲击能量有很大一部分被拉片吸收, 对吊脚层的柱起到良

好的保护作用，有利于节约材料。更重要的是，拉片与水平冲击点不直接接触，可使结构获得更大的瞬间水平加速度，提高竞赛成绩。

图 1-11 为按此思路制作的模型在三次冲击荷载作用下的加速度图像。模型自重 m 为 270g，承受的总质量 M 为满载 58000g（自重 + 满载配重）。

从图 1-11 可以看出，模型最大加速度为 8739.6m/s^2 ，即 8.7396km/s^2 ，模型性能参数为：

$$C_2 = \frac{Ma}{500m} = \frac{58000 \times 8.7396}{500 \times 270} = 3.755$$

可见模型性能参数有明显改进，因此选择了水平杆加拉片的间接抵抗冲击作用的结构形式，最终选择的下部结构形式如图 1-12 所示。

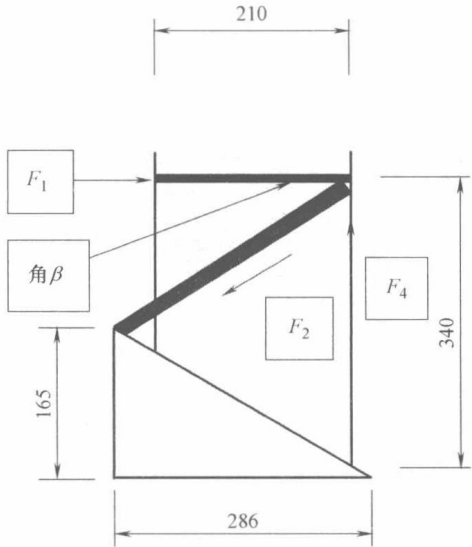


图 1-10 底部斜拉结构计算简图

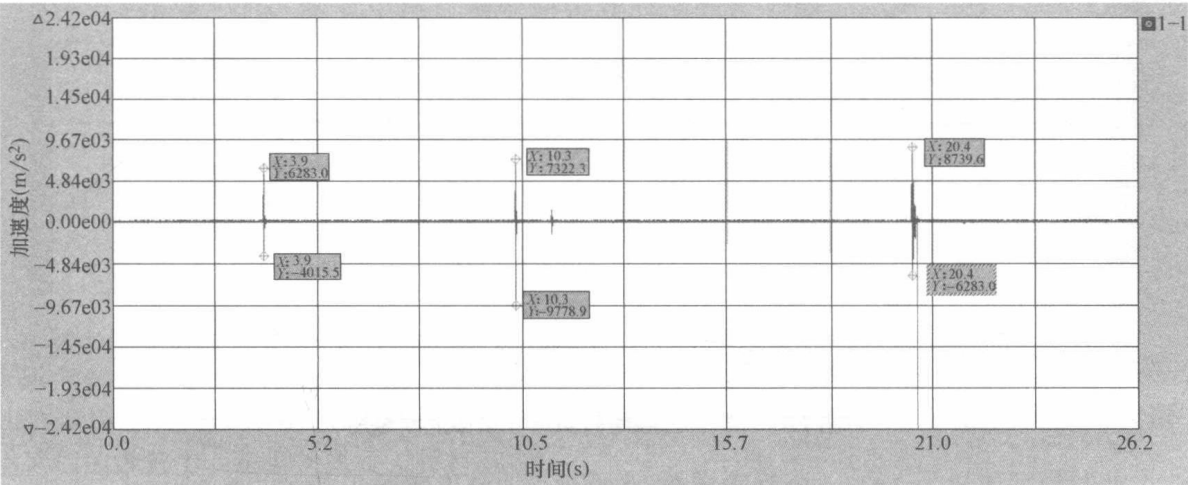


图 1-11 底部斜拉结构加速度测量图

1.2.4 结构整体刚柔性分析

关于整体结构刚柔性的选择，主要考虑两个因素，一是对结构加速度的影响，二是对模型质量的影响。模型制作初期，采用较柔结构形式（见图 1-13）。其特点是二、三、四层采用同样的平面布局，模型上下在水平面的投影尺寸没有变化。同时，在二、三层间设置了交叉斜拉杆，保证结构在抵抗冲击作用时具有良好的整体性。这种结构形式下，测得的加速度图像如图 1-14 所示。经计算，模型性能参数为 3.755。

完成上述模型的撞击试验后，考虑调整模型杆件布局，将上面两层即第三、四层的杆件尺寸调小（内径为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ），第二层的杆件调为上小下大结构（顺着撞击方向的两个侧面均采用直角梯形，如图 1-15 所示），底部楼层的杆件外径变为 $240\text{mm} \times 240\text{mm}$ 。此时的结构刚度大，撞击时的整体位移较小，由此得到的加速度图像如图 1-16

所示。

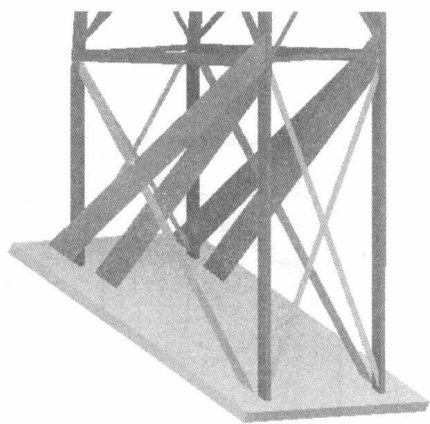


图 1-12 下部结构示意图

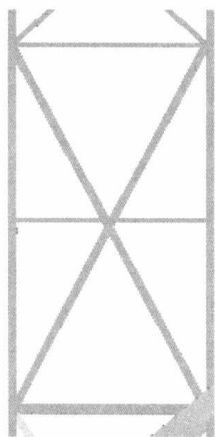


图 1-13 二、三层同截面尺寸示意图

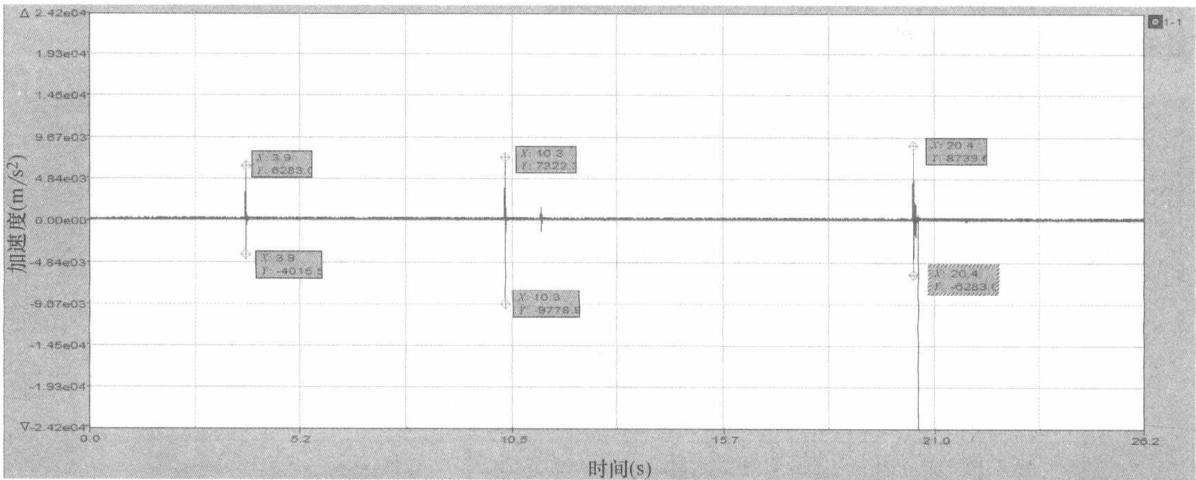


图 1-14 二、三层同截面尺寸加速度测量图

此时模型质量为 290g，荷载为满载 58000g，加速度绝对值最大值为 18093.2m/s²，即 18.0932km/s²。模型性能参数为：

$$C_3 = \frac{Ma}{500m} = \frac{58000 \times 18.0932}{500 \times 290} = 7.237$$

计算结果表明，模型性能参数较前者提高了近 1 倍。由此可见，刚性结构的测试加速度比柔性结构要明显大很多。综合模型质量和加速度测试结果，同时兼顾比赛规则，最终选定了上述刚度较大的模型形式。

1.2.5 其他构件与连接设计

(1) 二、三层承载结构设计

按照规则，二、三层要承担配重钢板，设计将几根薄片直接固定在圈梁上以满足赛题要求并最大限度地减小模型质量，如图 1-17 所示。

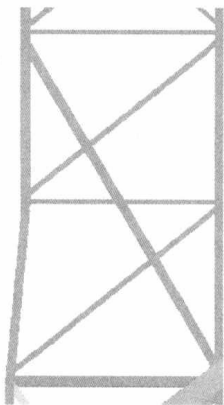


图 1-15 二、三层不同截面尺寸示意图

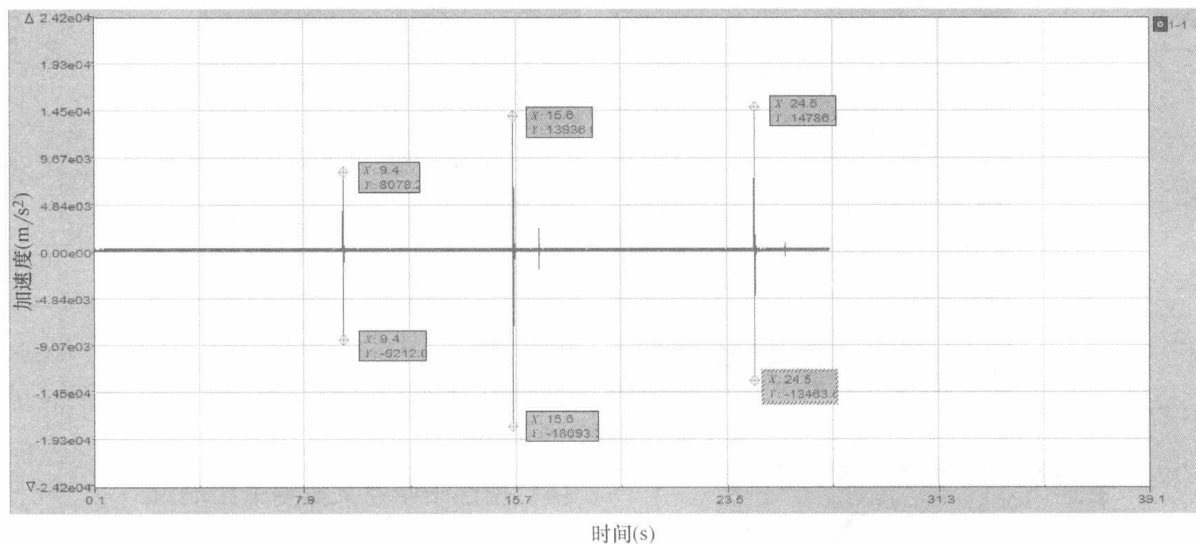


图 1-16 二、三层不同截面尺寸加速度测量图

(2) 一层抗冲击构件设计

选择三层空心杆，并对中部最易弯曲折断的部分做了加固，确保结构安全。

(3) 拉片设计

不同位置的拉片采用不同的截面尺寸，其中垂直撞击方向的前后两个面的拉片采用小截面尺寸，对于两个侧面的拉片，因为这个方向位移较大，对构件要求高，因此截面尺寸相对较大。

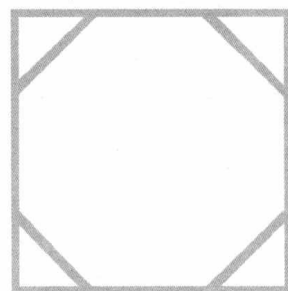


图 1-17 二、三层承载结构示意图

(4) 柱杆件抗爆裂设计

模型柱主杆采用空心杆，为防止杆件的爆裂，在外围包裹如图 1-18、图 1-19 所示的螺旋状竹片。经过试验，发现同等质量下，此设计可以大大增强主杆的承载力，很好地解决了爆杆问题。

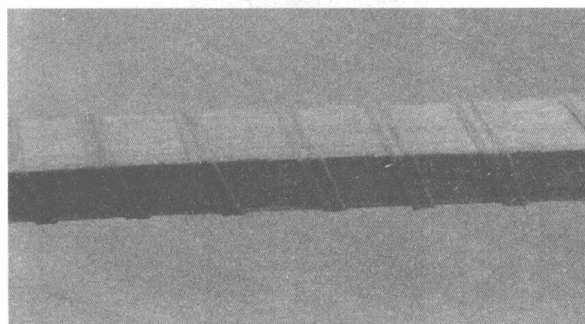


图 1-18 上部支撑柱实物图

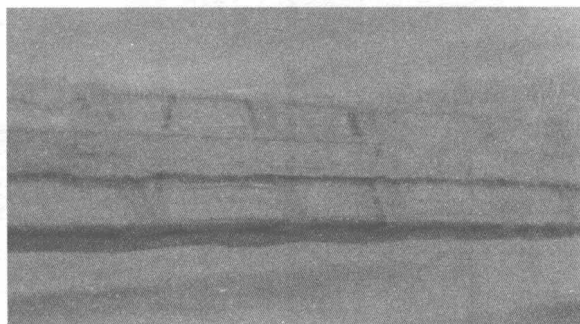


图 1-19 下部支撑柱实物图

(5) 连接点粉末的应用

对于承受巨大冲击力的结构来说，除了具有合理高强的构件外，还需要将这些构件牢固地连接起来，因此选择采用将竹片磨成竹粉应用在构件之间的连接和固定上，如图 1-20 所示。

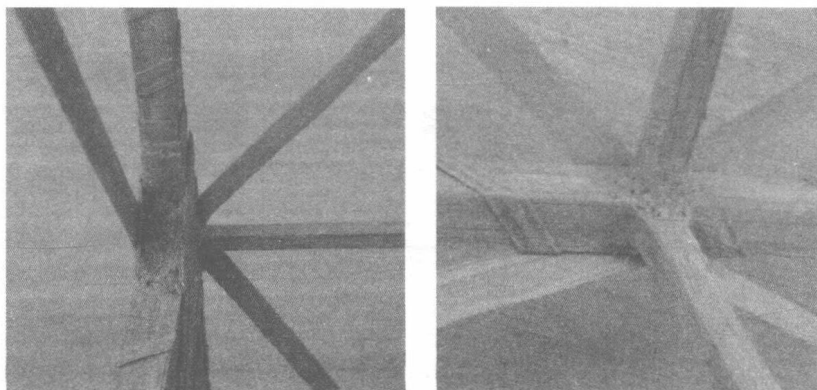


图 1-20 加粉节点实物图

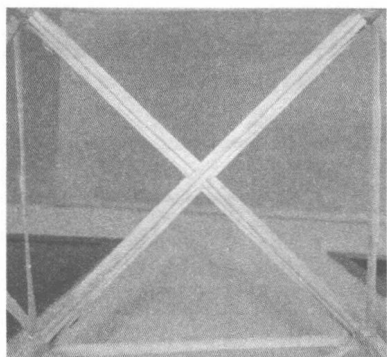


图 1-21 结构顶部实物图

(6) 顶部十字交叉梁变形控制

模型顶部采用十字交叉梁，同时根据竞赛规则，在四周设置了薄片圈梁，由于薄片圈梁所起到的支撑作用有限，为提高十字交叉梁的刚度，减小其在竖向荷载作用下的变形，十字交叉梁采用 T 形截面，既能承载，也能防止柱主杆的内缩变形，如图 1-21 所示。

经过反复试验、计算、论证，确定吊脚楼模型方案如图 1-22、图 1-23 所示。

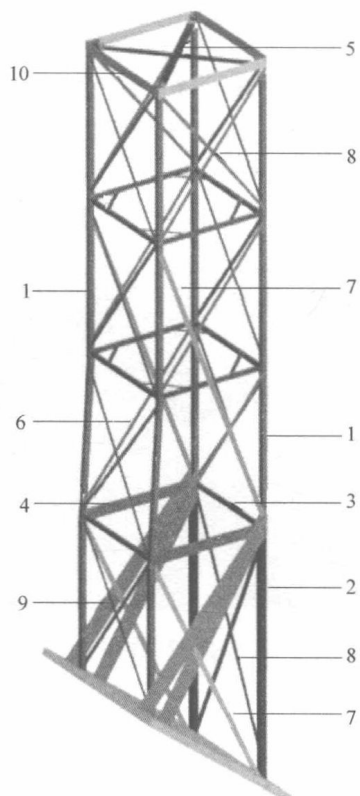


图 1-22 吊脚楼模型方案图

注：图中 1~10 代表构件编号。

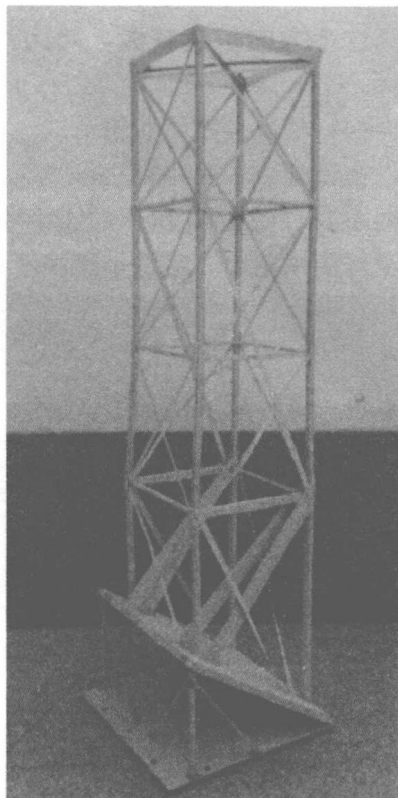


图 1-23 吊脚楼模型实物图