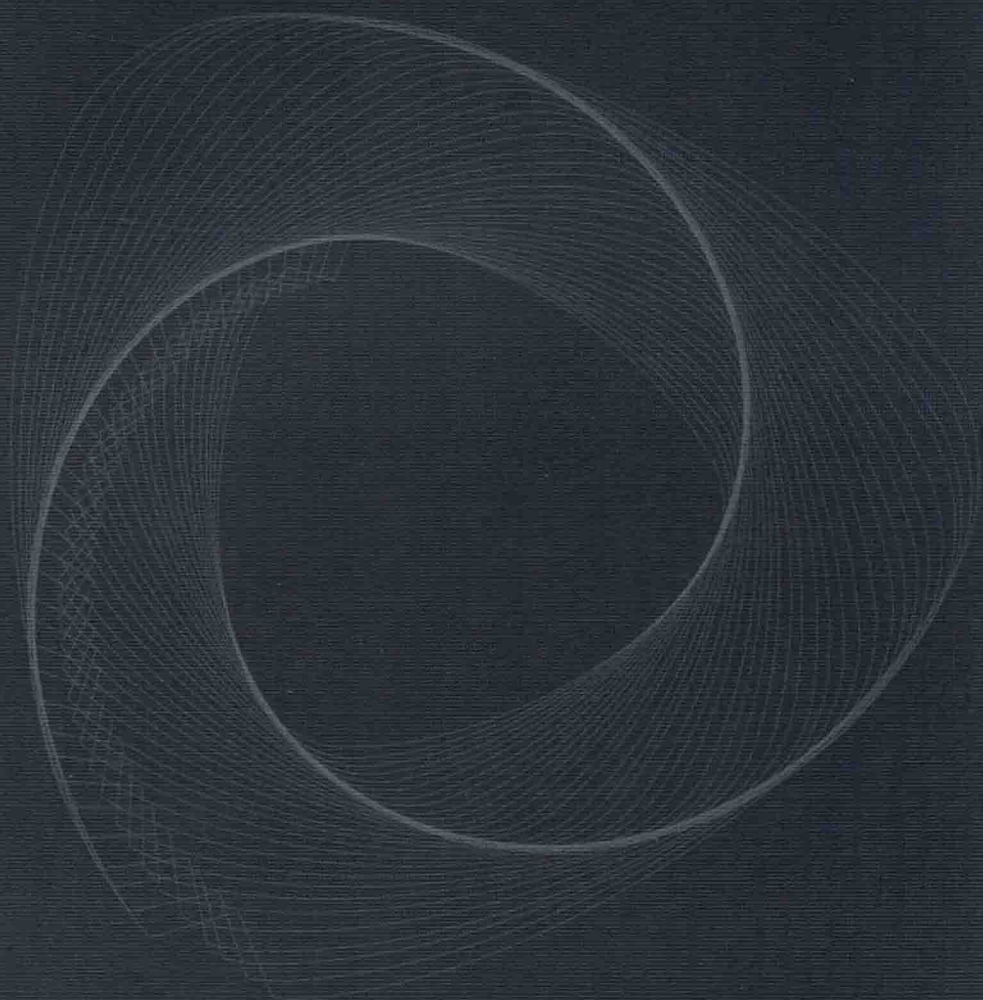


SHANGHAI TOWER **CURTAIN WALL STRUCTURE**

上海中心大厦悬挂式幕墙结构设计

丁洁民 何志军 著



中国建筑工业出版社

SHANGHAI TOWER **CURTAIN WALL STRUCTURE**

上海中心大厦悬挂式幕墙结构设计

丁洁民 何志军 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

上海中心大厦悬挂式幕墙结构设计 / 丁洁民等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015.3
ISBN 978-7-112-17853-7

I. ①上… II. ①丁… III. ①幕墙—建筑结构—结构设计—上海市 IV. ①TU227

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第040716号

责任编辑: 刘瑞霞 辛海丽
责任校对: 张 颖 姜小莲

上海中心大厦悬挂式幕墙结构设计

丁洁民 何志军 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
北京锋尚制版有限公司制版
北京顺诚彩色印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 13 1/2 字数: 420千字
2015年4月第一版 2015年4月第一次印刷
定价: 88.00元

ISBN 978-7-112-17853-7

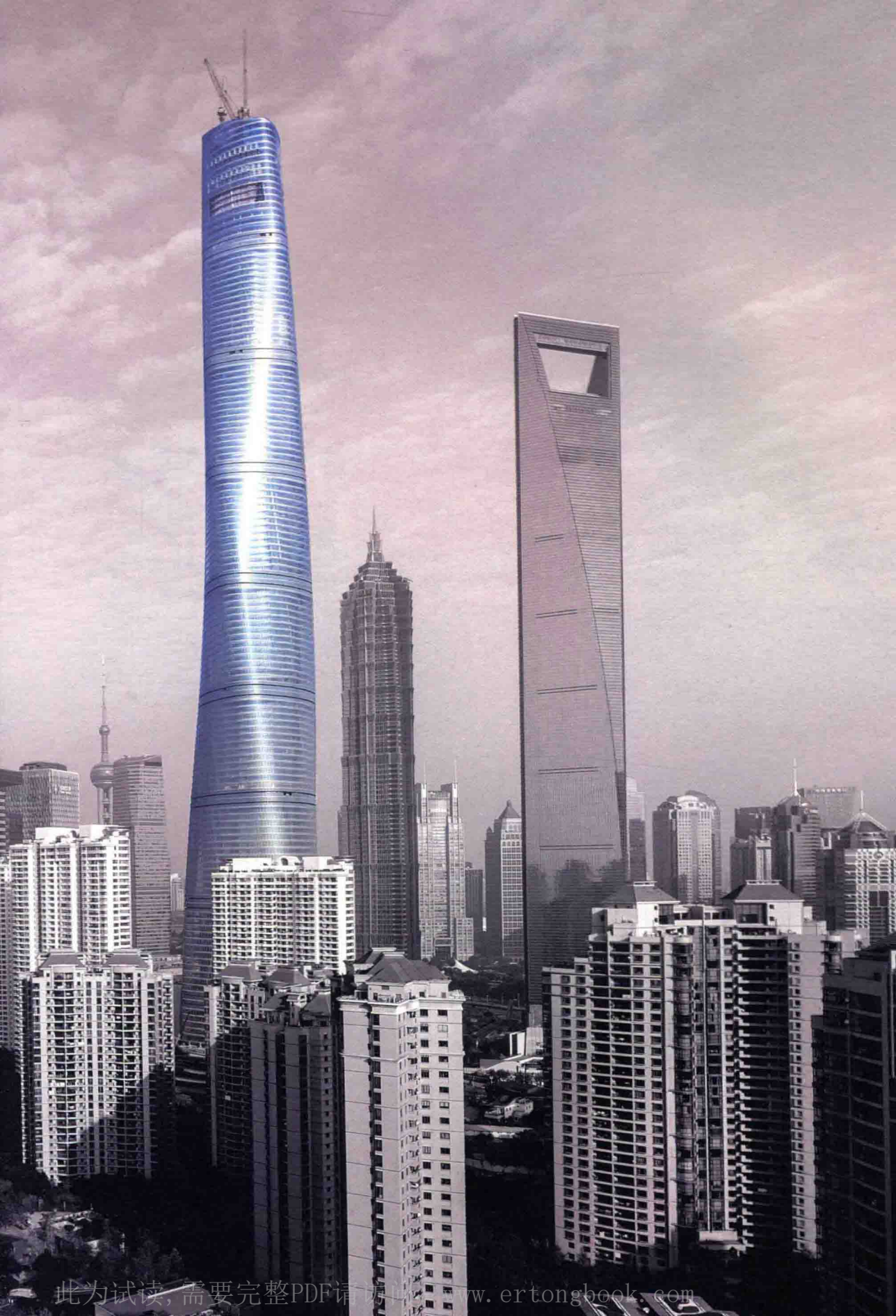
(27054)

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)







上海中心大厦位于上海浦东陆家嘴金融区核心区小陆家嘴，与金茂大厦和上海环球金融中心毗邻，是我国设计建造的第一幢 600m 以上的超高层建筑，总建筑面积 58 万 m^2 ，主体结构高度 583.4m，塔冠结构最高点 632m，建成后三座建筑成品字布局，共同成为上海的新地标。该项目首次在超高层建筑中大规模使用了双层独立玻璃幕墙系统，其中与主体结构分离且扭曲收缩的外幕墙系统是整栋建筑区别于其他高层建筑的显著特点之一。

如何为脱离主体结构且扭曲上升的外幕墙提供坚实的支撑，保证整个外幕墙系统的安全受力和正常使用，是整个幕墙系统设计乃至整个项目结构设计的难点。为此，该项目首次在超高层建筑上采用了一种新型的分区悬挂的“巨型柔性悬挂式幕墙支撑结构体系”，用于实现外幕墙扭曲的外立面几何形态。该体系独立于主体结构、几何造型扭曲、分区悬挂重量大、悬挂高度高、竖向支承刚度柔且不均匀，整个幕墙结构体系构成及传力较为特殊导致其与主体结构协同工作复杂，给结构与施工带来巨大的技术挑战。

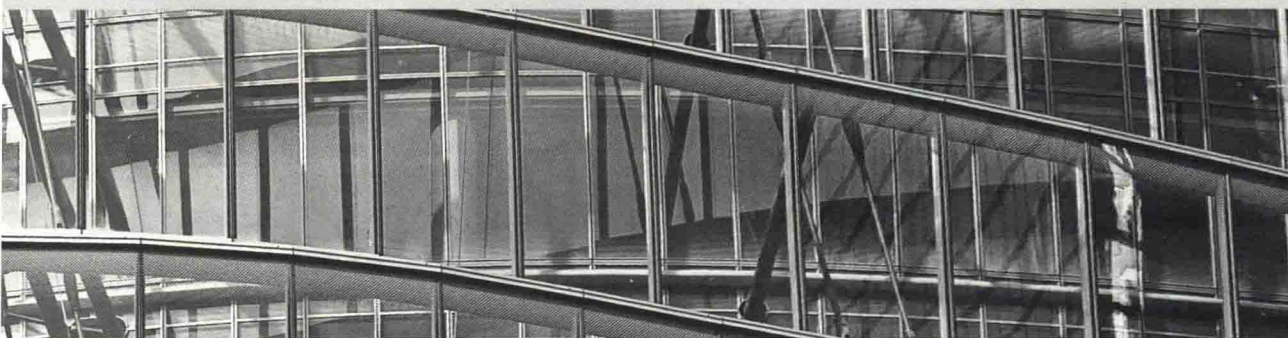
由于该体系在国内外超高层建筑工程中尚无应用先例，且在很多方面都超越了现行技术标准，同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司抽调技术骨干组成科研攻关团队对其进行技术攻关。无论是结构体系还是节点构造均经历了多轮的反复论证分析与优化，进行了大量的创新性工作，相关优化措施不仅提高了整个系统的可建造性，而且节省了结构造价，取得了显著的经济效益。同时科研团队还对对结构安全至关重要的，水平和竖向荷载下幕墙

支撑结构与主体结构协同工作性能、竖向地震反应以及施工过程中幕墙支撑结构的受力特性等一系列非常规问题进行了深入的专项分析和研究，确保了工程建设的顺利进行，幕墙系统的建造完成也验证了该结构分析、设计研究的可靠性。另外，在深化设计阶段，科研团队配合上海市机械施工集团有限公司对支撑结构的竖向伸缩节点、短支撑节点、扭转限位约束节点等一系列特殊节点构造进行了深入的深化设计研究，确保了相关特殊节点设计的可实施性。

上海中心幕墙支撑结构设计经历了艰辛的设计历程，其成功的设计经验和研究成果是对现有高层建筑幕墙结构设计理念和方法的丰富和完善，同时也对其他类似的复杂工程项目具有一定的参考价值。

本书共有 9 章。第 1 章为项目工程的基本概况，主要介绍工程背景情况，幕墙建筑设计理念，结构设计的特点及难点。第 2 章为主体结构设计概况，简要介绍主体结构的体系及设计情况，使读者对幕墙依附的主体结构有所了解。第 3 章主要介绍幕墙的体系及其与主体结构的连接关系，使读者对上海中心幕墙系统构成特点有宏观的了解。第 4 章为荷载与作用，介绍幕墙系统所承受的荷载的特点。第 5 章介绍幕墙结构的基本力学特性及基本设计情况。第 6~8 章详细介绍了幕墙与主体结构协同工作特性，包括静力协同特性、地震反应、施工过程影响等。第 9 章对幕墙支撑结构一些关键节点设计、试验情况进行说明。

本书由丁洁民负责组织和定稿，丁洁民、何志



军、李久鹏编写，胡殷为本书的编写也做了大量工作。

上海中心幕墙支撑结构的设计过程，得到了建设单位上海中心建设发展有限公司全方位的大力支持，总经理顾建平先生、副总经理葛清先生在项目最艰难的攻关阶段给予了充分的信任是项目设计得以顺利完成的重要保障，在此表示衷心的感谢。

美国 GENSLE 建筑师事务所，完成了幕墙系统的方案及初步设计，在项目的前期做了大量协调工作，在此表示衷心的感谢。

美国 Thornton Tomasetti 工程顾问公司执行总裁 Dennis Poon 先生，副总裁朱毅先生在项目前期做了大量探索性的工作，为后续设计工作提供了建设性的建议，在此表示衷心的感谢。

上海建工集团副总裁房庆强先生在项目设计、施工过程中做了大量协调工作，上海机械施工集团有限公司总工程师吴欣之先生针对有关特殊节点的深化设计，提出了大量创造性的解决方案，在此一并表示衷心感谢。

宝钢钢构有限公司、沈阳远大铝业工程有限公司，在钢结构深化设计及加工、幕墙深化及制作安装过程中做了大量卓有成效的工作，圆满地实现了设计的意图，在此表示衷心的感谢。

最后，由衷感谢同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司“上海中心设计团队”的各位同仁在幕墙支撑结构设计和建造过程中给予的全方位的大力支持和配合。特别感谢集团总建筑师任力之先生、副总建筑师兼上海中心项目经理陈继良先生，在技术上所给予的支持以及在项目设计和施工过程中所做的大量协调工作。

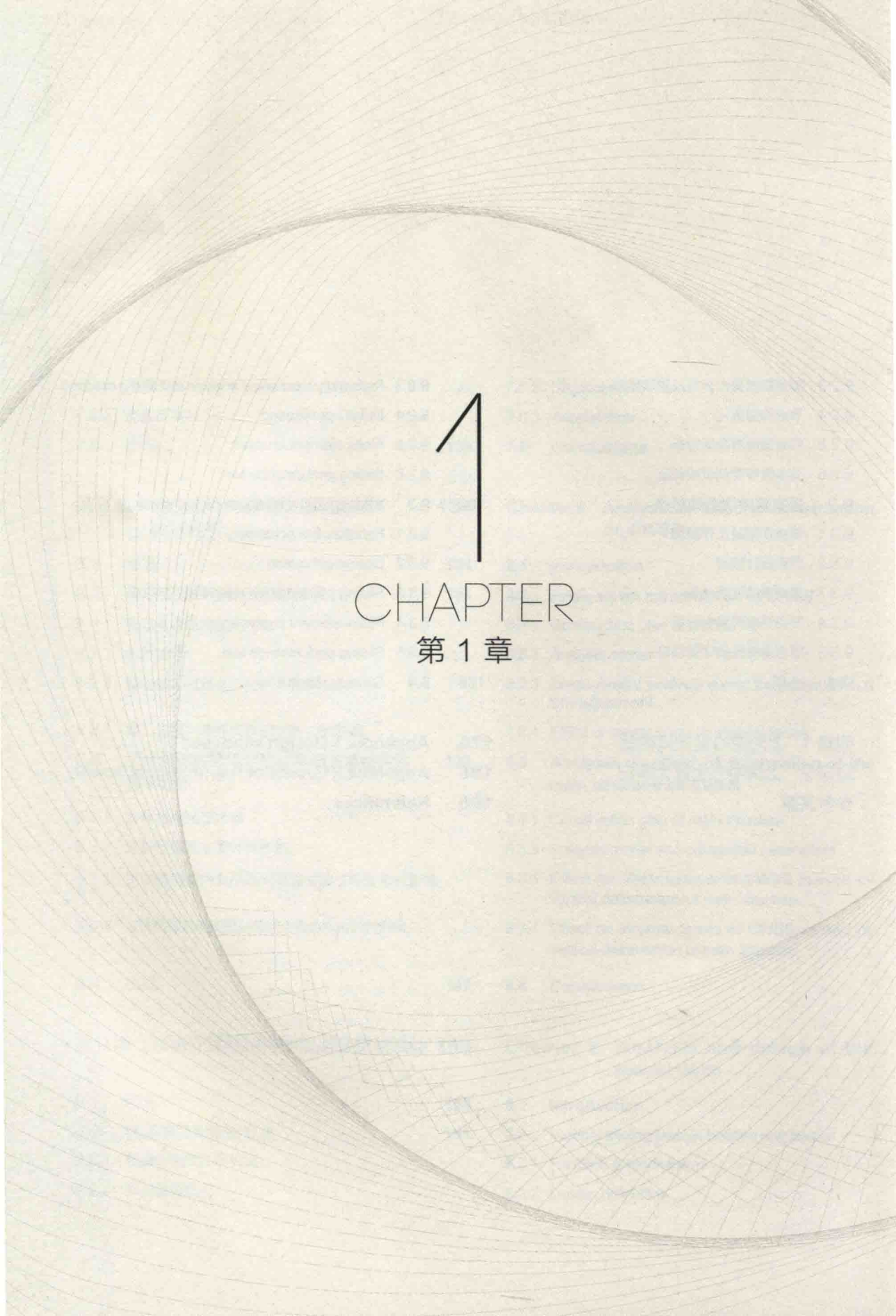
谨以此书献给所有为此项目付出艰辛工作的单位和个人。

本书介绍的内容引用了美国 GENSLE 建筑师事务所、美国 Thornton Tomasetti 结构事务所、沈阳远大铝业工程有限公司，在幕墙建筑设计、幕墙结构初步设计、幕墙深化设计中所做的杰出工作，以及加拿大 RWDI 顾问公司的风洞试验的研究成果，在此一并表示感谢。同时，本书的编写过程中也参考了很多国内外同行的相关资料、图片及论著，并尽其所能在参考文献中予以列出，但如有疏漏之处，敬请谅解。

由于作者水平有限，且成书时间较紧，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

丁洁民

2014 年 12 月于上海

The background of the page is a light beige or cream color. It features a series of thin, concentric circles that are slightly offset from each other, creating a sense of depth and movement. In the lower right quadrant, there is a faint, light blue grid pattern that overlaps with the circular lines. The overall aesthetic is minimalist and modern.

1

CHAPTER

第 1 章

第1章 项目基本情况

1.1 工程背景

1.2 建筑设计概况

1.3 幕墙设计概况

1.3.1 幕墙系统设计理念

1.3.2 外幕墙几何形态及优化

1.3.3 复杂曲面幕墙的拟合

1.3.4 幕墙单元板块构造

1.4 外幕墙结构设计挑战

1.5 外幕墙支撑结构选型

1.6 悬挂式幕墙支撑结构设计的特点及难点

第2章 主体结构设计概况

2.1 结构体系与布置

2.1.1 抗侧力体系

2.1.2 重力体系

2.1.3 塔冠结构

2.2 结构设计标准

2.3 荷载与作用

2.3.1 重力荷载

2.3.2 风荷载

2.3.3 地震作用

2.3.4 荷载组合

2.4 整体分析主要结果

2.4.1 弹性分析主要结果

1 Chapter 1 Project basic information

2 1.1 Project background

2 1.2 Architectural design overview

8 1.3 Curtain wall design overview

1.3.1 Ideas of curtain wall system design

1.3.2 Exterior curtain wall geometry & optimization

1.3.3 Complicated curtain wall surface fitting

1.3.4 Details of unit plate of curtain wall

15 1.4 Structural design challenge of curtain wall

15 1.5 Structure selection of exterior curtain wall support system

16 1.6 Structural feature and difficulties of suspended curtain wall support structure design

19 Chapter 2 Introduction of the main structure design

20 2.1 Structure system & arrangement

2.1.1 Lateral system

2.1.2 Gravity system

2.1.3 Crown structure

25 2.2 Structural design standards

27 2.3 Loads

2.3.1 Gravity load

2.3.2 Wind load

2.3.3 Earthquake action

2.3.4 Load Combinations

29 2.4 Principal analysis results

2.4.1 Elastic analysis results

目录

CONTENTS

2.4.2	弹塑性分析主要结果		2.4.2	Elastic-plastic analysis results	
2.5	主要构件及节点设计	38	2.5	Design of principal members and joints	
2.5.1	巨型柱设计		2.5.1	Mega column design	
2.5.2	核心筒设计		2.5.2	Core tube design	
2.5.3	伸臂、环带、径向桁架设计		2.5.3	Outriggers , belts truss and radial truss design	
2.5.4	楼面结构设计		2.5.4	Floor design	
2.5.5	节点设计		2.5.5	Joints design	
第3章	幕墙支撑结构体系	49	Chapter 3	Curtain wall support structure (CWSS) system	
3.1	2~8区典型幕墙结构体系	50	3.1	Typical CWSS system of Zone2~8	
3.2	大堂区幕墙结构体系	53	3.2	CWSS system of the lobby	
3.3	塔冠区幕墙结构体系	56	3.3	CWSS system of the crown	
3.4	典型幕墙结构体系优选	57	3.4	Selection & optimization of the typical CWSS	
3.4.1	环梁优化设计		3.4.1	Ring beam optimized design	
3.4.2	抗扭体系选型		3.4.2	Anti-torsion system selection	
3.4.3	底环梁竖向伸缩节点优化设计		3.4.3	Optimized design of vertical sliding joint in bottom ring beam	
3.5	幕墙支撑结构主要设计标准	60	3.5	Structural design standards of the CWSS	
第4章	荷载与作用	63	Chapter 4	Loads	
4.1	引言	64	4.1	Introduction	
4.2	重力荷载	64	4.2	Gravity load	
4.2.1	幕墙自重		4.2.1	Curtain weight	
4.2.2	设备层荷载		4.2.2	Loads of the MEP floor	
4.3	风荷载	64	4.3	Wind load	
4.3.1	塔楼风荷载		4.3.1	Wind load of the main structure	
4.3.2	幕墙风荷载		4.3.2	Wind load of the curtain wall	

4.4	温度作用
4.4.1	中庭温度场模拟
4.4.2	幕墙支撑结构设计温差的确定
4.5	地震作用
4.6	幕墙支撑结构设计荷载组合

第5章 幕墙支撑结构的基本分析与设计

5.1	引言
5.2	分析模型
5.3	结构基本受力特性分析
5.3.1	环梁受力分析
5.3.2	径向支撑受力分析
5.3.3	交叉支撑及限位支座受力分析
5.3.4	吊杆受力分析
5.4	构件设计
5.4.1	环梁设计
5.4.2	径向支撑设计
5.4.3	吊杆设计
5.4.4	幕墙支撑结构用钢量统计
5.5	常规节点设计
5.5.1	顶部吊挂节点
5.5.2	径向支撑与楼面结构连接节点
5.5.3	底环梁与休闲层楼面连接构造
5.5.4	径向支撑与环梁、吊杆汇交节点
5.5.5	限位约束节点
5.5.6	底环梁伸缩节点

66	4.4 Temperature effect
	4.4.1 Atrium temperature field simulation
	4.4.2 Determination of the temperature difference
71	4.5 Earthquake action
73	4.6 Design load combinations of the CWSS

75 Chapter 5 Basic analysis and design of the CWSS

76	5.1 Introduction
76	5.2 Analysis model
77	5.3 Basic mechanical behavior analysis
	5.3.1 Ring beam
	5.3.2 Radial strut
	5.3.3 Cross brace & limit constraint
	5.3.4 Sag rod
81	5.4 Member design
	5.4.1 Ring beam
	5.4.2 Radial strut
	5.4.3 Sag rod
	5.4.4 Steel consumption
85	5.5 General joint design
	5.5.1 Suspension Joint
	5.5.2 Joint of radial strut to floor structure
	5.5.3 Joint of bottom ring beam to amenity floor structure
	5.5.4 Joint of radial strut, ring beam and sag rods
	5.5.5 Anti-torsion constraint
	5.5.6 Sliding joints in bottom ring beam

第 6 章 幕墙支撑结构与主体结构协同工作性能研究 99		Chapter 6 Study on properties of cooperative work of curtain wall support structure with main structure	
6.1	引言	100	6.1 Introduction
6.2	分析模型	101	6.2 Analysis model
6.3	竖向荷载作用下幕墙支撑结构与主体结构协同工作分析	102	6.3 Cooperative work analysis under vertical loads
6.3.1	吊挂支承刚度不均匀性及控制措施		6.3.1 Effects and control measures of non-uniform support stiffness
6.3.2	吊挂刚度不均匀对幕墙支撑结构的影响		6.3.2 Effect of non-uniform support stiffness on CWSS
6.3.3	休闲层楼面变形对支撑结构的影响		6.3.3 Effect of deformation of the amenity floor on CWSS
6.4	水平荷载作用下幕墙支撑结构与主体结构协同工作分析	112	6.4 Cooperative work analysis under lateral loads
6.4.1	水平荷载作用下支撑结构的竖向变形特性		6.4.1 Deformation analysis of CWSS under lateral loads
6.4.2	水平荷载作用下支撑结构的受力特性		6.4.2 Mechanical analysis of CWSS under lateral loads
6.5	小结	116	6.5 Conclusions
第 7 章 幕墙支撑结构地震作用反应分析 119		Chapter 7 Analysis on seismic action on CWSS	
7.1	引言	120	7.1 Introduction
7.2	分析模型	120	7.2 Analysis model
7.3	模态特性分析	121	7.3 Modal analysis
7.4	竖向地震作用下幕墙支撑结构反应分析	124	7.4 Vertical seismic response of CWSS
7.4.1	地震作用反应		7.4.1 Internal force
7.4.2	位移反应		7.4.2 Displacement
7.4.3	加速度反应		7.4.3 Acceleration
7.5	水平向地震作用下幕墙支撑结构反应分析	128	7.5 Horizontal seismic response of CWSS
7.5.1	地震作用反应		7.5.1 Internal force

7.5.2	位移反应		7.5.2	Displacement
7.5.3	加速度反应		7.5.3	Acceleration
7.6	小结	130	7.6	Conclusions

第 8 章 施工过程对幕墙支撑结构的影响分析

8.1	引言	134
8.2	幕墙支撑结构施工过程分析	134
8.2.1	幕墙支撑结构施工方案	
8.2.2	分析模型	
8.2.3	幕墙施工过程变形分析及预调值的确定	
8.2.4	施工过程对幕墙支撑结构内力的影响	
8.3	主体结构的竖向变形对幕墙支撑结构的影响分析	139
8.3.1	主体结构施工方案	
8.3.2	分析模型及主要计算参数	
8.3.3	主体结构竖向变形及对幕墙支撑结构变形的影响	
8.3.4	主体结构竖向变形对幕墙支撑结构内力的影响	
8.4	小结	147

第 9 章 幕墙支撑结构特殊节点分析与设计 149

9.1	引言	150
9.2	底环梁竖向伸缩节点	151
9.2.1	节点作用及工作机理	
9.2.2	节点设计难点	

Chapter 8 Analysis on effect of construction on CWSS

8.1	Introduction
8.2	Analysis on construction of CWSS
8.2.1	Construction plan of CWSS
8.2.2	Analysis model
8.2.3	Displacement analysis during the construction & Pre-adjustment
8.2.4	Effect of construction on internal forces
8.3	Analysis on effect of deformation of the main structure on CWSS
8.3.1	Construction plan of main structure
8.3.2	Analysis model and calculation parameters
8.3.3	Effect on deformations of CWSS caused by vertical deformation of main structure
8.3.4	Effect on internal forces of CWSS caused by vertical deformation of main structure
8.4	Conclusions

Chapter 9 Analysis and design of the special joints

9.1	Introduction
9.2	Vertical sliding joint in bottom ring beam
9.2.1	Function & mechanism
9.2.2	Design difficulties

9.2.3 节点初步受力分析及滑动验算

9.2.4 节点构造优化

9.2.5 节点强度有限元分析

9.2.6 节点滑移性能试验验证

9.3 短支撑内端滑动节点

9.3.1 节点作用及工作原理

9.3.2 节点设计难点

9.3.3 节点滑动性能分析

9.3.4 节点强度有限元分析

9.3.5 节点滑移性能试验验证

9.4 小结

附录 1 上海中心设计风荷载

附录 2 上海中心大厦大事记

参考文献

9.2.3 Preliminary mechanical analysis and sliding checking

9.2.4 Detail optimization

9.2.5 Finite element analysis

9.2.6 Sliding performance test

162 9.3 Sliding Joint in short radial strut

9.3.1 Function & mechanism

9.3.2 Design difficulties

9.3.3 Sliding performance analysis

9.3.4 Finite element analysis

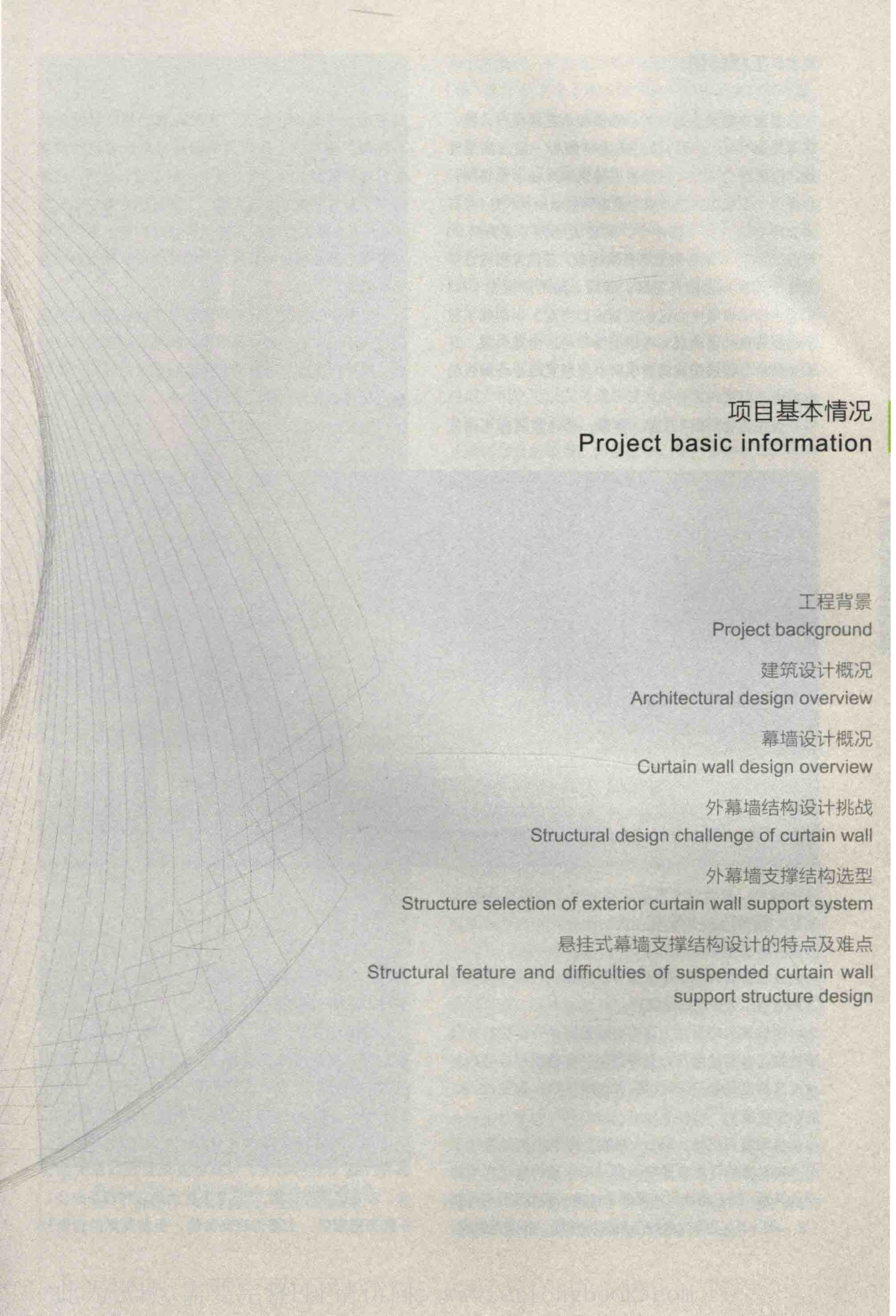
9.3.5 Sliding performance test

168 9.4 Conclusions

170 Appendix 1 Design wind load

186 Appendix 2 Events of the Shanghai Tower

196 References



项目基本情况 Project basic information

工程背景
Project background

建筑设计概况
Architectural design overview

幕墙设计概况
Curtain wall design overview

外幕墙结构设计挑战
Structural design challenge of curtain wall

外幕墙支撑结构选型
Structure selection of exterior curtain wall support system

悬挂式幕墙支撑结构设计的特点及难点
Structural feature and difficulties of suspended curtain wall support structure design