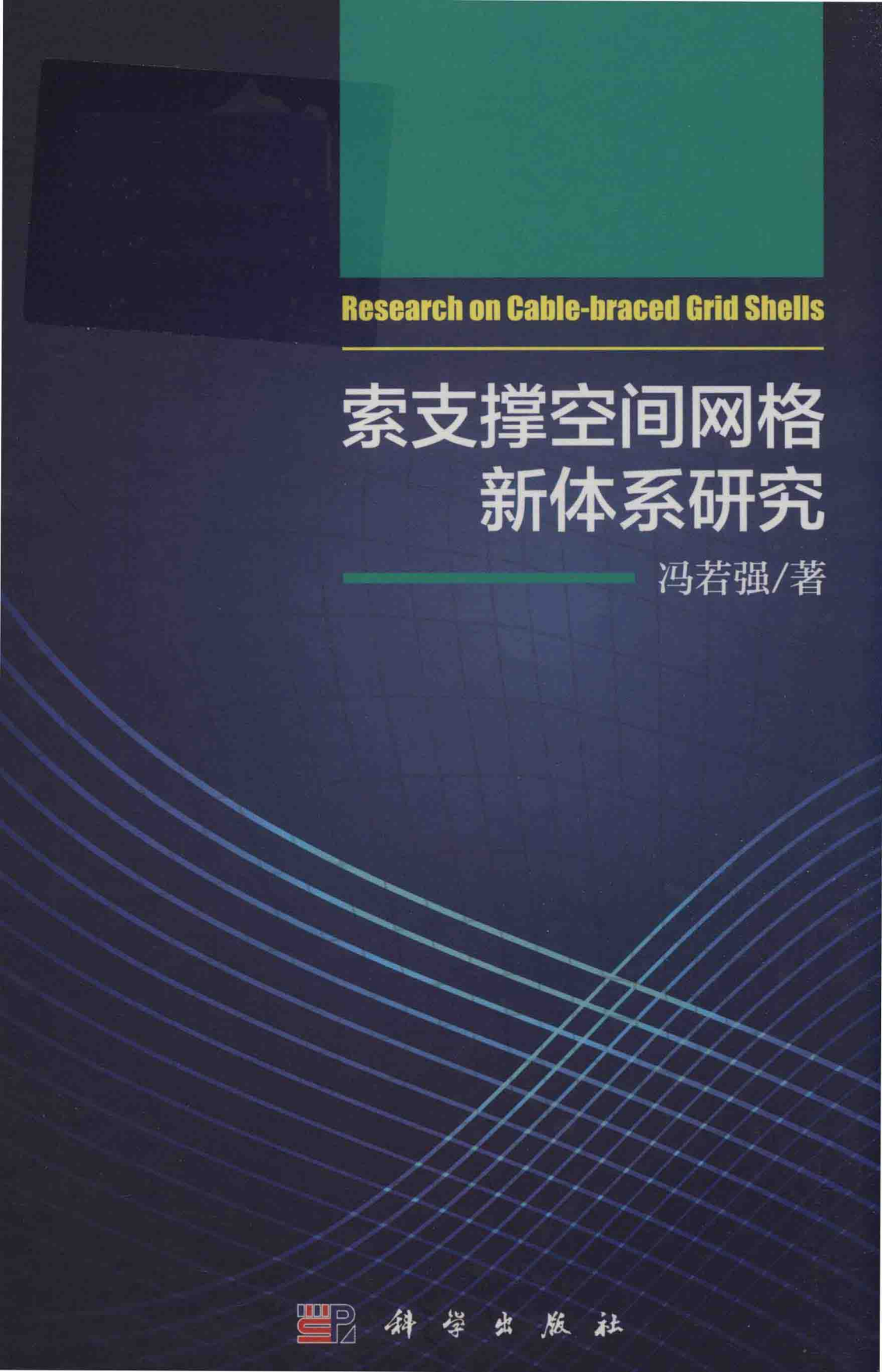




Research on Cable-braced Grid Shells

# 索支撑空间网格 新体系研究

冯若强/著



科学出版社

# 索支撑空间网格新体系研究

Research on Cable-braced Grid Shells

冯若强 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

索支撑空间网格结构是一种适合于玻璃采光顶结构的新型单层网壳结构形式,其网格单元为平面四边形,通透性高且玻璃加工方便。本书针对索支撑空间网格结构的形态优化、装配式节点力学性能及结构整体稳定三个关键问题进行研究,提出了基于准线和母线的多目标形态优化方法,通过试验和有限元数值模拟研究了装配式节点的力学性能,揭示了装配式索支撑空间网格结构的失稳机理,满足不同结构整体稳定性能要求的装配式节点力学性能要求,推导了具有初始缺陷的解析曲面索支撑空间网格结构稳定承载力计算公式。

本书可作为从事空间结构研究、设计、制作和施工的专业技术人员参考书,也可供高等院校土木工程类专业师生参考,或作为钢结构行业职业技术教育培训教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

索支撑空间网格新体系研究/冯若强著. —北京:科学出版社, 2017.12  
ISBN 978-7-03-056197-8

I. ①索… II. ①冯… III. ①网格结构—研究 IV. ①TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 322971 号

责任编辑:刘信力/责任校对:邹慧卿  
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

**科学出版社 出版**

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**北京虎彩文化传播有限公司 印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 17 1/2 插页: 1

字数: 346 000

**定价: 128.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

近四十年来,空间网格结构因其受力合理,用料经济,造型美观多样,覆盖空间大,抗震性能良好等特点,在世界范围内得到迅猛发展。索支撑空间网格结构是一种新型的单层网壳形式,这种结构曲面形式自由、造型优美,结构形式简洁、通透,主要应用于玻璃采光顶结构中,具有良好的发展前景。目前这种结构体系在国外已经得到较为广泛的应用,而我国对这种结构体系的研究和应用相对较少。

改革开放三十多年来,中国的发展日新月异,尤其是土木工程建筑和基础设施建设正在飞速发展,随着国家的经济实力和人民物质生活水平的提高,人们对公共建筑的要求不再是满足功能要求和经济性,忽视建筑造型和美观,而是功能、经济性和建筑造型的辩证统一要求,需要建筑和结构的类型多样化。因此对各种新颖空间结构形式的需求会越来越多。索支撑空间网格玻璃采光顶结构是空间结构发展的新趋势之一,其不但具有丰富的建筑表现力和强烈的视觉冲击效果,而且由于采用了透明建筑材料玻璃,可以实现室外自然环境和室内空间完美融合,是一种生态类建筑。目前这种结构体系在国外已经得到较为广泛的应用,而我国对这种结构体系的研究和应用相对较少。

本书内容主要来源于近年来课题组的研究成果,从索支撑空间网格结构形态优化、装配式节点力学性能及结构整体稳定三个方面进行了详细介绍,为该类结构的工程设计提供参考,反映了索支撑空间网格结构在国内的研究水平,具有较高的学术参考和工程应用价值,希望推动索支撑空间网格结构这种新结构体系在国内的应用和发展。本书包括索支撑空间网格结构简介、表面平移法、自由曲面形态优化方法、装配式节点力学性能、装配式单层网格结构整体稳定性能及解析曲面结构整体稳定承载力公式推导共六个章节,各章节有一定联系,也可作为独立的部分阅读。

第1章索支撑空间网格玻璃采光顶结构,是全书的铺垫。介绍了索支撑空间网格结构体系组成、特点、发展历程以及工程项目,在此基础上提出了索支撑空间网格结构亟待解决的关键问题。

第2章索支撑空间网格结构表面平移法。介绍了索支撑空间曲面形成的方法——表面平移法,包括滑动平移法和缩放平移法,并介绍了一些由表面平移法生成曲面的工程案例。

第3章基于准线和母线的自由曲面单层索支撑空间网格结构的形态优化。基于索支撑空间网格结构曲面形成的方法,提出了一种适用于索支撑空间网格结构

的多目标形态优化方法。

第4章索支撑空间网格结构装配式节点。通过试验和数值模拟探讨了适用于索支撑空间网格结构装配式节点的力学性能,研究发现索支撑空间网格结构装配式节点不能作为刚接节点来考虑,其刚度及承载力较刚接节点均有削弱,属半刚性节点。

第5章装配式索支撑空间网格结构静力稳定性能。在装配式节点足尺试验的基础上,探讨了装配式节点力学性能对索支撑空间网格结构的影响,揭示了装配式索支撑空间网格结构的失稳机理,提出了基于不同结构整体稳定性能目标的索支撑空间网格结构装配式节点力学性能要求,并给出装配式索支撑空间网格结构稳定承载力估算公式。

第6章解析曲面刚接索支撑空间网格结构稳定承载力。基于平衡方程、几何方程和物理方程,推导了具有初始缺陷、考虑几何非线性和物理非线性影响的椭圆抛物面和联方柱面索支撑空间网格结构稳定承载力计算公式。

本书为江苏高校优势学科建设工程资助项目。在本书的编写过程中,硕士生王希、姚斌、葛金明、李海建和王鑫协助做了较多工作,在此表示感谢。

# 目 录

## 前言

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第 1 章 索支撑空间网格玻璃采光顶结构 .....            | 1  |
| 参考文献 .....                            | 6  |
| 第 2 章 索支撑空间网格结构表面平移法 .....            | 9  |
| 2.1 表面平移法基本原理 .....                   | 10 |
| 2.2 滑动平移法 .....                       | 12 |
| 2.3 缩放平移法 .....                       | 12 |
| 2.4 工程案例 .....                        | 14 |
| 参考文献 .....                            | 17 |
| 第 3 章 基于表面平移法的自由曲面索支撑空间网格结构形态优化 ..... | 18 |
| 3.1 自由曲面索支撑空间网格结构形态优化方法 .....         | 18 |
| 3.1.1 优化算法 .....                      | 18 |
| 3.1.2 目标函数 .....                      | 23 |
| 3.1.3 优化变量和状态变量 .....                 | 27 |
| 3.1.4 以应变能为目标函数的共轭梯度法的实现 .....        | 27 |
| 3.1.5 基于表面平移法的形态优化 .....              | 29 |
| 3.1.6 优化方法验证 .....                    | 33 |
| 3.2 基于表面平移法的自由曲面索支撑空间网格结构形态优化 .....   | 37 |
| 3.2.1 滑动平移法自由曲面索支撑空间网格结构算例分析 .....    | 37 |
| 3.2.2 缩放平移法自由曲面索支撑空间网格结构算例分析 .....    | 40 |
| 3.3 B 样条曲线自由曲面索支撑空间网格结构形态优化 .....     | 43 |
| 3.3.1 光顺的定义 .....                     | 44 |
| 3.3.2 B 样条曲线 .....                    | 45 |
| 3.3.3 B 样条曲线自由曲面索支撑空间网格结构优化方法 .....   | 47 |
| 3.3.4 算例分析 .....                      | 49 |
| 3.3.5 自由曲面索支撑空间网格结构光顺评价 .....         | 51 |
| 3.4 索支撑空间网格结构优化过程及优化目标比较 .....        | 53 |
| 3.4.1 自由曲面索支撑空间网格结构优化过程力学性能分析 .....   | 53 |
| 3.4.2 自由曲面索支撑空间网格结构单目标形态优化 .....      | 58 |
| 3.5 自由曲面索支撑空间网格结构的多目标形态优化 .....       | 64 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 3.5.1 目标函数分类与组合 | 64 |
| 3.5.2 多目标形态优化理论 | 65 |
| 3.5.3 算例分析      | 68 |

|      |    |
|------|----|
| 参考文献 | 73 |
|------|----|

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第4章 索支撑空间网格结构装配式节点 | 76 |
|--------------------|----|

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 4.1 装配式节点介绍             | 76  |
| 4.2 索支撑空间网格结构装配式节点设计及构造 | 78  |
| 4.2.1 节点设计依据            | 78  |
| 4.2.2 索支撑空间网格结构装配式节点构造  | 81  |
| 4.3 装配式节点足尺静力试验         | 83  |
| 4.3.1 试验方案              | 83  |
| 4.3.2 节点破坏模式            | 89  |
| 4.4 SSB 节点试验结果及数值模拟     | 93  |
| 4.4.1 节点数值模型简化          | 93  |
| 4.4.2 SSB 节点试验结果及数值模拟   | 95  |
| 4.4.3 节点参数影响            | 141 |
| 4.5 SSB 节点静力性能          | 145 |
| 4.5.1 节点平面外刚度           | 145 |
| 4.5.2 节点平面内刚度           | 157 |
| 4.5.3 垫片对节点性能的影响        | 168 |
| 4.5.4 SSB 节点构造要求        | 172 |

|      |     |
|------|-----|
| 参考文献 | 175 |
|------|-----|

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第5章 装配式索支撑空间网格结构静力稳定性能 | 176 |
|------------------------|-----|

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 5.1 装配式索支撑空间网格结构整体模型            | 176 |
| 5.1.1 装配式节点有限元模型                | 176 |
| 5.1.2 装配式节点弹簧刚度                 | 177 |
| 5.1.3 装配式节点有限元模型验证              | 181 |
| 5.2 SSB 节点索支撑空间网格结构静力性能研究       | 187 |
| 5.2.1 结构形式及构件尺寸                 | 187 |
| 5.2.2 设计荷载作用下的静力分析              | 189 |
| 5.2.3 稳定分析                      | 196 |
| 5.3 垫片对装配式索支撑空间网格结构静力稳定性的影响     | 207 |
| 5.3.1 模型参数                      | 207 |
| 5.3.2 垫片对索支撑空间网格结构静力稳定性的影响      | 208 |
| 5.4 索支撑空间网格结构整体稳定性能对装配式节点力学性能要求 | 216 |

|                                   |                              |            |
|-----------------------------------|------------------------------|------------|
| 5.4.1                             | 模型参数                         | 216        |
| 5.4.2                             | 节点转动刚度                       | 216        |
| 5.4.3                             | 节点面外极限弯矩                     | 225        |
| 5.4.4                             | 节点塑性极限位移                     | 230        |
| 5.4.5                             | 装配式索支撑空间网格结构稳定承载力估算          | 232        |
| 参考文献                              |                              | 234        |
| <b>第 6 章 解析曲面索支撑空间网格结构稳定承载力公式</b> |                              | <b>235</b> |
| 6.1                               | 具有初始缺陷椭圆抛物面索支撑空间网格结构静力稳定性能   | 235        |
| 6.1.1                             | 具有初始缺陷椭圆抛物面索支撑空间网格结构稳定基本方程   | 235        |
| 6.1.2                             | 具有初始缺陷椭圆抛物面索支撑空间网格结构稳定基本方程求解 | 242        |
| 6.1.3                             | 索支撑网格等代刚度                    | 247        |
| 6.1.4                             | 算例验证                         | 249        |
| 6.1.5                             | 误差分析                         | 250        |
| 6.2                               | 具有初始缺陷联方柱面索支撑空间网格结构静力稳定性能    | 253        |
| 6.2.1                             | 具有初始缺陷联方柱面索支撑空间网格结构稳定基本方程    | 253        |
| 6.2.2                             | 具有初始缺陷联方柱面索支撑空间网格结构稳定基本方程求解  | 256        |
| 6.2.3                             | 联方索支撑网格等代刚度                  | 261        |
| 6.2.4                             | 算例验证                         | 264        |
| 6.2.5                             | 误差分析                         | 265        |
| 参考文献                              |                              | 269        |
| <b>彩图</b>                         |                              |            |



# 第1章 索支撑空间网格玻璃采光顶结构

玻璃结构是指采用玻璃作为主要围护构件的一类新型结构体系,它具有以下三方面特点:①以现代玻璃加工工艺和节点制作技术为基础;其采用的玻璃主要是具有较高强度和安全性的钢化玻璃和夹胶玻璃(采光顶结构)。而在节点制作方面更多采用了机械铸造技术,使其在安全性和美观性方面较之传统节点有了较大提升。②在结构设计方面更多考虑了通透性对构件截面和布置方式的要求,并由此演化出一批明显区别于传统结构概念的新型结构形式,如应用于玻璃幕墙支承结构中的索桁架结构和单层平面索网结构。③大多用于一些对视觉效果要求较高的大型公共建筑中,此外还在一定程度上降低了建筑能耗,属于绿色建筑的范畴。综上所述,虽然玻璃结构并非真正以玻璃作为结构构件(也有些采用,仅适用于小跨度),但由于其在设计中更多地考虑了玻璃材料的特殊性,因而在结构设计、节点连接和安装工艺方面具有更多区别于传统结构的特点,可以划归为新型结构体系的范畴<sup>[1-6]</sup>。

玻璃结构主要包括玻璃幕墙结构和玻璃采光顶结构,在国外已得到较为广泛的应用,像德国的 Kempinsky 酒店单层索网玻璃幕墙、Neckarsulm 穹顶、柏林动物园河马馆采光顶、Lehrter 铁路站台及 DG 银行采光顶等都是极具代表性的新型玻璃结构作品<sup>[6-11]</sup>。但玻璃结构在我国的应用只有十几年的历史,而且大多集中于玻璃幕墙领域。经过十几年的发展,我国的玻璃幕墙结构发展已经比较成熟,基本实现了从框支式玻璃幕墙向点支式玻璃幕墙的跨越,结构形式多种多样,发展出了多种体现玻璃材料自身通透、美观特点的结构形式,如玻璃幕墙结构中的索桁架结构和单层平面索网结构,而且工程实践数量较多,应用较为普遍。但相比之下,在玻璃采光顶结构领域发展速度较慢,尤其是对具有玻璃自身材料特点的新型结构形式较少涉猎,大多沿用传统的屋盖结构形式,并没有像玻璃幕墙结构那样形式多样,同时对具备本领域特色的基础性理论问题还缺乏系统深入的研究。而随着建筑多样化大趋势的发展,国内目前对结构形式新颖、体现玻璃材料特点的玻璃采光顶结构的需求也会不断增长。这种新型结构形式的缺乏和工程设计理论研究的滞后性势必会影响到玻璃采光顶结构向规模更大、形式更新、技术要求更高的方向发展。因此,从源头做起,深入开展玻璃采光顶结构的体系创新并建立完备的工程设计理论体系,就成为当前迫切需要解决的问题<sup>[12-15]</sup>。

目前单层网壳结构是玻璃采光顶结构较为常用的结构形式,具有结构造型简

洁、结构刚度好,杆件截面小等优点。但普通单层网壳结构主要以三角形为基本网格单元,而对于玻璃采光顶结构,人们往往希望通过减少支承杆件的数量以增加室内空间的通透性,且结构几何造型应更为美观。若能省去三角形网格中的斜杆,以平面四边形网格代替三角形网格,则势必给室内空间带来更好的视觉效果。这是因为,与三角网格较为自由的拓扑连接关系不同,平面四边网格的连接更为规则,并且根据实际的需要大都沿着主曲率方向分布,所以相比三角网格更能反映网格所表示几何形体的形状变化,符合人们对形状的自然感知。四边网格由于其规则的结构以及符合人们对三维形状的感知与审美,可以比三角网格更为直接地应用在几何造型、细分曲面、建筑设计等方面<sup>[16]</sup>。并且同三角形玻璃比,平面四边形玻璃更便于加工,玻璃的受力性能更好。与曲面四边形玻璃相比,平面四边形玻璃不仅便于加工,且造价更低。同时,曲面四边形中杆件多为曲线,加工难度和成本远大于平面四边形中的直杆。

以此为原则,一种适合于玻璃采光顶结构的新型单层网壳结构形式——索支撑空间网格结构就应运而生了,如图 1-1 和图 1-2 所示,曲面形式自由、造型优美,结构形式简洁、通透。出于通透性考虑和玻璃加工方便,其网格单元为平面四边形,由于四边形网格的平面内刚度较弱,所以每个四边形网格的对角由交叉的斜索相连(图 1-3),形成了一种由刚性的杆件和柔性的索共同组成的混合结构,通过斜索将不稳定的四边形网格转换成稳定的三角形网格。为保证网壳网格为平面四边形,“表面平移法”被用来建立网壳曲面和划分网格,如图 1-4 所示。其基本思想是沿结构的长轴和短轴方向分别构造两条正交的准线和母线,将准线沿母线平移滑动,就可以构造出一系列较为均匀的四边形网格。该方法可以保证网格为平面四边形,同时各个网格杆件的长度相等,只是角度不同,方便杆件的加工和安装。按照平行向量的不同形成方式,可将表面平移法分为滑动平移法和缩放平移法两种<sup>[17]</sup>。

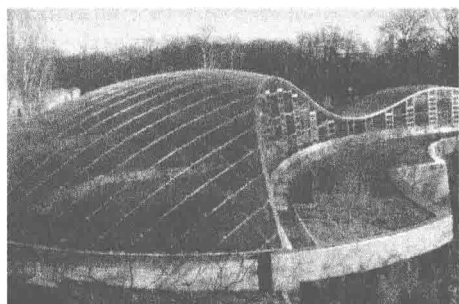


图 1-1 德国柏林动物园河马馆



图 1-2 莱比锡工业展览馆庭院

索支撑空间网格结构的另一个特点是其节点连接,包括两种节点连接,一种是

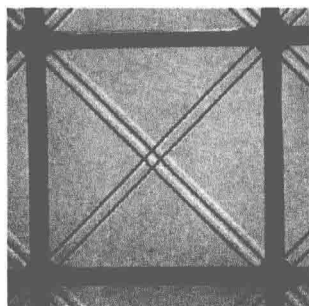


图 1-3 交叉斜索加强网格

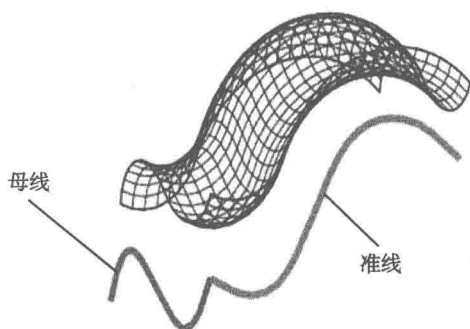


图 1-4 表面平移法

常规的刚性节点，为焊接连接，由于安装不方便，采用不多，如图 1-5 所示。另一种采用较多的装配式节点连接，如图 1-6 和图 1-7 所示，主要连接为在节点中心处上下两块节点板，采用一个主螺栓连接。由于只有一个螺栓连接，两块节点板在网格平面内可以做一定的转动，因此节点在网格平面内为铰接。每块节点板和杆件端部采用螺栓连接，为实现节点板和杆件连接美观，将杆件端部进行削弱，其节点刚度介于刚接和部分刚接之间，因此节点在网格平面外方向可以看成是半刚接。这种新型装配式节点是专门针对索支撑空间网格结构曲面形式和受力特点设计和开发的，因此从节点形式、受力性能到构造要求都与传统空间结构节点截然不同 [18-21]。

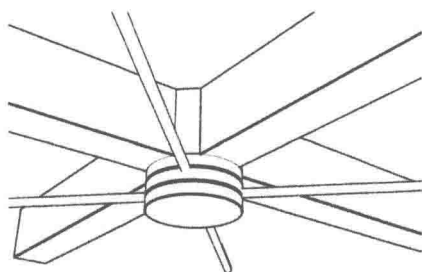
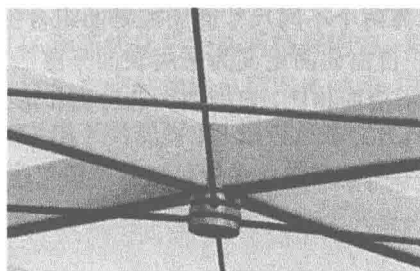


图 1-5 索支撑空间网格玻璃采光顶结构焊接式节点

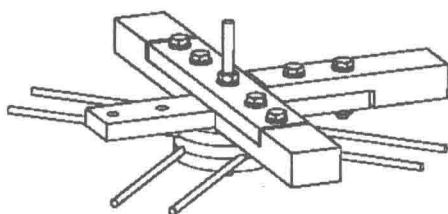
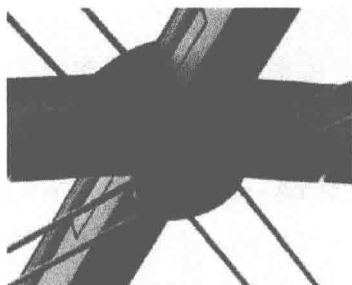


图 1-6 索支撑空间网格玻璃采光顶结构装配式 SBP 节点

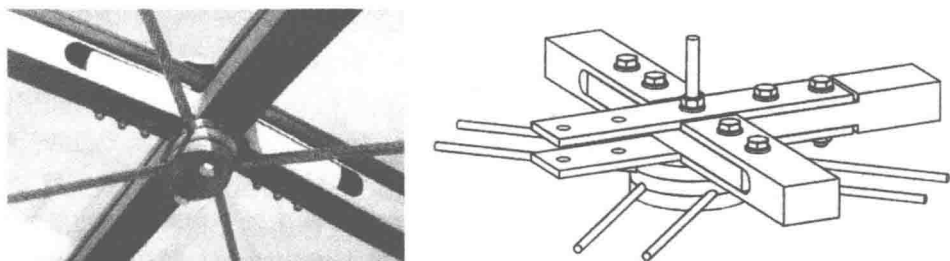
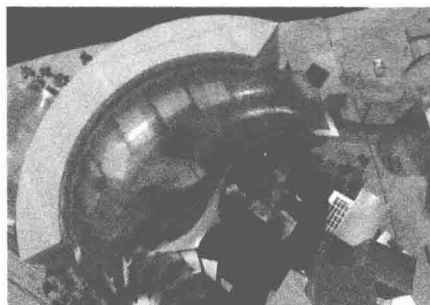


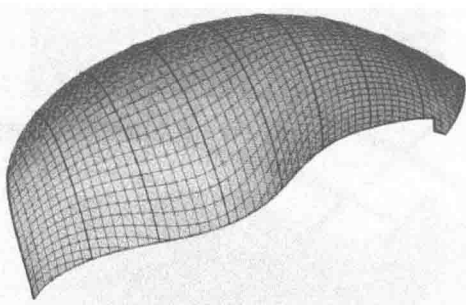
图 1-7 索支撑空间网格玻璃采光顶结构装配式 SBP2 节点

索支撑空间网格采光顶结构的兴起源于 20 世纪 80 年代末的欧洲,最早提出索支撑空间网格采光顶结构形式的是德国著名学者 Schlaich 教授,在我国工程应用中尚处于空白。

采用表面平移法生成的索支撑空间网格结构曲面形式包括两种:解析曲面和自由曲面。所谓自由曲面(图 1-8),从几何角度讲就是指那些无法用解析函数表达的曲面<sup>[22]</sup>。而自由曲面与传统的解析曲面相比,具有外形更加灵活、美观和多样的特点,更加符合建筑师要求。目前索支撑空间网格结构在国外工程应用中主要限于传统的解析曲面,如椭圆抛物面(德国 Neckarsulm 穹顶,如图 1-9 所示)、柱面(德国世贸中心市场,如图 1-10 所示)、球面(德国巴特诺伊施塔特 Rhönklinikum 穹顶)、马鞍面(德国莱比锡工业展览馆庭院采光顶,如图 1-2 所示)以及这些曲面结构的分割与组合(德国柏林动物园河马馆为两个不同尺寸椭圆抛物面组合生成,如图 1-1 所示)。对于索支撑空间网格结构,自由曲面定义为采用表面平移法生成的不具有解析函数表达式的曲面。与传统解析曲面相比,自由曲面的种类和形式更加丰富,其为建筑师提供了更大的创作空间。



(a) 建筑模型



(b) 平面四边形网格划分

图 1-8 耶路撒冷宽恕博物馆

但是对于空间结构而言,仅仅强调形式上的自由是不够的,还应同时保证这种曲面形式在结构受力上的合理性。因为众所周知,大跨空间结构是凭借其合理形状

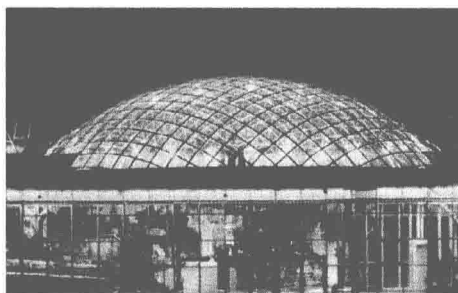


图 1-9 德国 Neckarsulm 穹顶外景

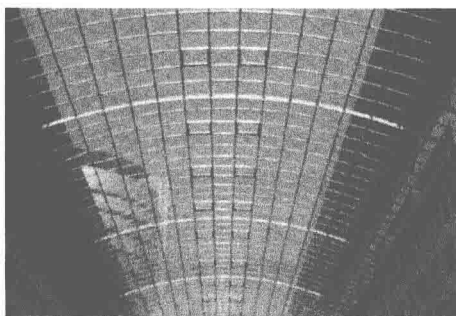


图 1-10 德国德雷斯頓世貿中心

来实现结构的高效率的,也就是说空间结构的几何外形与其力学性能之间是密切相关的。因此,空间结构的自由曲面应定义为那些明显区别于传统建筑造型的、外形美观、结构合理的曲面形式。为了在给定建筑条件下寻求具有最佳受力性能的结构形状,需要对结构进行形态优化<sup>[22-27]</sup>。由于自由曲面索支撑空间网格结构在曲面形式(表面平移法生成)、网格形状(平面四边形网格)、网格形式(钢杆件+交叉斜索)、节点类型(装配式节点)以及力学性能等方面具有特殊性<sup>[28-30]</sup>,在对此类结构进行形态优化时需要解决如下关键问题:

- (1) 为离散网格结构,不能直接应用现有的连续壳体结构优化方法;
- (2) 在结构形态优化过程中,网格应始终保持为平面四边形;
- (3) 形态优化后结构网格要均匀,避免网格大小不一;
- (4) 为有索结构的单层网壳结构,需要考虑几何非线性和结构整体稳定;
- (5) 出于美观要求,通过形态优化产生的自由曲面应光滑。

为了保证玻璃加工的方便和结构美观要求,结构形态优化后,平面四边形网格的属性不能改变。此外,自由曲面索支撑空间网格结构的一个优势就在于其网格均匀、杆件长度相等。因此进行过形态优化后,这一特征也应保留。由于索支撑空间网格结构中存在拉索,在外荷载作用下,索的拉力可能增大,亦或降低甚至松弛,因此在结构形态优化过程中需要考虑几何非线性的影响。索支撑空间网格结构属于单层网壳结构,结构整体稳定属于结构设计控制因素之一,在计算结构整体稳定承载力时需要考虑物理非线性和几何非线性的影响<sup>[31-33]</sup>。出于美观要求,形态优化后自由曲面要光滑。从字面上看,“光滑”既包括数学上关于函数连续性的要求,也侧重建筑功能等方面的需要。但无论采用何种优化目标和算法,都难保证优化后的曲面一定光滑。自由曲面索支撑空间网格结构为离散网格结构,杆件一般为直杆,曲面不连续变化,因此在对此类结构进行形态优化时,曲面的光滑程度是极为重要的控制指标。而对于自由曲面混凝土连续壳体结构,曲面连续变化,对曲面光滑要求没有索支撑空间网格结构严格。

综上所述,目前在索支撑空间网格结构设计和工程应用中最为关键的问题有三个:一个是结构曲面形状选择,如何给出外形美观、曲面光滑、结构合理的曲面形状。二是装配式节点力学性能和刚性节点比有何差别,如何设计装配式节点。三是在结构整体模型分析中如何考虑装配式节点半刚性的影响,装配式索支撑空间网格结构整体稳定性能如何。

针对上述问题,本书分别进行了研究,具体内容包括:索支撑空间网格结构表面平移法;基于表面平移法的自由曲面索支撑空间网格结构形态优化;索支撑空间网格结构装配式节点;装配式索支撑空间网格结构静力稳定性能;解析曲面索支撑空间网格结构稳定承载力公式。

通过本书的研究,建立索支撑空间网格玻璃采光顶结构形态设计理论,确定索支撑空间网格结构复杂曲面的成形方法,采用形态创构理论设计结构曲面形状;掌握索支撑空间网格结构的装配式节点力学性能 and 设计方法;明确索支撑空间网格结构的整体稳定;建立完善的索支撑空间网格结构工程设计理论体系。促进这种新型结构形式更多地应用到玻璃采光顶结构中,以便更好地满足各种建筑形式和功能对于结构的要求。

### 参 考 文 献

- [1] 史蒂西,施塔伊贝,巴尔库,舒乐. 玻璃结构手册 [M]. 白宝鲲,厉敏,赵波,译. 大连:大连理工大学出版社,2004.
- [2] Jan B, Rudolf A. Glass and Steel Structure[C]. Proceedings of international symposium on theory, design and realization of shell and spatial structures, Nagoya Japan, 2001.
- [3] 沈小锋. 玻璃结构的发展和应用 [J]. 世界建筑, 2002, (1): 17-22.
- [4] 冯若强. 单层平面索网玻璃幕墙结构静动力性能研究 [D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2006.
- [5] 王元清,石永久,李少甫,徐悦,荆军. 点支式玻璃建筑结构体系及其应用技术研究 [J]. 土木工程学报, 2001, (4): 1-9.
- [6] Schlaich J, Schober H, Moschner T. Prestressed cable net facades[J]. Structural Engineering International, 2005, 15(1): 36-39.
- [7] Schlaich J, Schober H. Glass roof for the hippo house at the Berlin Zoo[J]. Structural Engineering International, 1997, 7(4): 252-254.
- [8] Schlaich J, Schober H. Design Principles of Glass Roofs[C]. Proc. Int. Conf. on Lightweight Structures in Civil Engineering, Warsaw, 2002.
- [9] Ian Ritchie. Aesthetics in glass structure[J]. Structural Engineering International, 2004, 14(2): 84-87.
- [10] Fisher-Cripps A C, Collins R E. Architectural glazing: design standard and failure models[J]. Building and Environment, 1995, 30(1): 29-40.

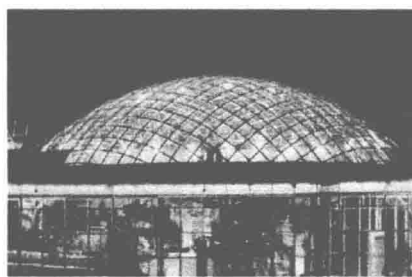
- [11] Burmeister A, Ramm E, Reitingner R. Glass Structures of German EXPO 2000 Pavilion. IASS Symposium[C]. 2001, Nagoya. Tp161.
- [12] 姚裕昌, 冯若强. 玻璃采光顶在大跨度屋盖中应用的实践与探索 [C]. 第十届空间结构学术会议论文集, 北京, 2002 年 12 月.
- [13] 冯若强, 武岳, 沈世钊. 东北农业大学玻璃采光顶结构设计分析 [J]. 建筑结构, 2006, 36(8): 25-27.
- [14] 耿翠珍, 严慧, 刘中华. 玻璃采光顶支承结构体系的理论与应用分析 [J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 106-109.
- [15] 李欣, 武岳. 索支撑网壳——一种新型的空间结构形式 [J]. 空间结构, 2007, 13(2): 17-21.
- [16] 胡事民, 来煜坤, 杨永亮. 基于曲率流的四边形主导网格的光顺方法 [J]. 计算机学报, 2008, 31(9): 1622-1628.
- [17] Glymph J, Shelden D, Ceccato C, Mussel J, Schober H. A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets[J]. Automation in Construction, 2003, 2004, 13(2): 187-202.
- [18] 李海建. 索支撑空间网格结构装配式节点研究 [D]. 东南大学硕士学位论文, 2014.
- [19] Feng R Q, Ye J, Zhu B. Behavior of bolted joints of cable-braced grid shells[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(12): 04015071.
- [20] 王希. 新型装配式索支撑空间网格结构力学性能数值模拟研究 [D]. 东南大学硕士学位论文, 2016.
- [21] Wang X, Feng R Q, Yan G R, et al. Effect of joint stiffness on the stability of cable-braced grid shells[J]. International Journal of Steel Structures, 2016, 16(4): 1123-1133.
- [22] 李娜, 陆金钰, 罗尧治. 基于能量法的自由曲面空间网格结构光顺与形态优化方法 [J]. 工程力学, 2011, (10): 243-249.
- [23] 葛金明. 自由曲面索支撑空间网格结构的形态优化 [D]. 东南大学硕士学位论文, 2013.
- [24] 冯若强, 葛金明, 叶继红. 自由曲面索支撑空间网格结构形态优化 [J]. 土木工程学报, 2013, (4): 64-70.
- [25] 冯若强, 葛金明, 胡理鹏, 等. 基于 B 样条曲线的自由曲面索支撑空间网格结构多目标形态优化 [J]. 土木工程学报, 2015, (6): 17-24.
- [26] Feng R Q, Ge J M. Shape optimization method of free-form cable-braced grid shells based on the translational surfaces technique[J]. International Journal of Steel Structures, 2013, 13(3): 435-444.
- [27] Feng R Q, Zhang L, Ge J M. Multi-objective morphology optimization of free-form cable-braced grid shells[J]. International Journal of Steel Structures, 2015, 15(3): 681-691.
- [28] 王鑫. 索支撑空间网格结构抗震性能研究 [D]. 东南大学硕士学位论文, 2014.
- [29] 冯若强, 王鑫, 叶继红. 索支撑空间网格结构强震下破坏模式研究 [J]. 土木工程学报, 2014, (s2): 113-120.

- 
- [30] Feng R Q, Zhu B, Wang X. A mode contribution ratio method for seismic analysis of large-span spatial structures[J]. International Journal of Steel Structures, 2015, 15(4): 835-852.
- [31] 姚斌. 索支撑空间网格结构静力稳定性能研究 [D]. 东南大学硕士学位论文, 2012.
- [32] Feng R Q, Ye J, Yao B. Evaluation of the buckling load of an elliptic paraboloid cable-braced grid shell using the continuum analogy[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(12): 1468-1478.
- [33] Feng R Q, Yao B, Ye J. Stability of lamella cylinder cable-braced grid shells [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88(9): 220-230.

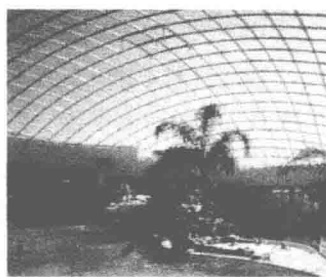


## 第2章 索支撑空间网格结构表面平移法

为了保证玻璃面板加工的方便和结构美观,结构网格划分要保证为平面四边形网格,同时网格均匀、杆件长度相等。为了得到索支撑空间网格结构的上述网格特性,可采用表面平移法生成曲面和进行网格划分。曲面可以是解析曲面,也可以是自由曲面。目前索支撑空间网格结构在国外工程应用中主要限于传统的解析曲面,如椭圆抛物面(德国 Neckarsulm 穹顶,图 2-0-1)、柱面(德国世贸中心市场,图 2-0-2)、球面(德国巴特诺伊施塔特 Rhönklinikum 穹顶)、马鞍面(德国莱比锡工业展览馆庭院采光顶,图 2-0-3)以及这些曲面结构的分割与组合(德国柏林动物园河马馆为两个不同尺寸椭圆抛物面组合生成,图 2-0-4)。对于索支撑空间网格结构,自由曲面定义为采用表面平移法生成的不具有解析函数表达式的曲面。与传统解析曲面相比,自由曲面的种类和形式更加丰富,其为建筑师提供了更大的创作空间。



(a) Neckarsulm穹顶外景



(b) Neckarsulm穹顶内景

图 2-0-1 德国 Neckarsulm 穹顶

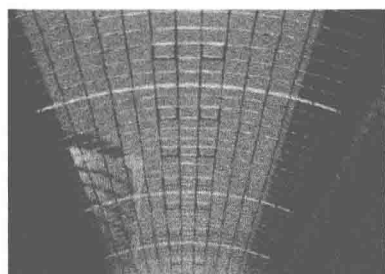


图 2-0-2 德雷斯頓(德国)世贸中心



图 2-0-3 莱比锡工业展览馆庭院