

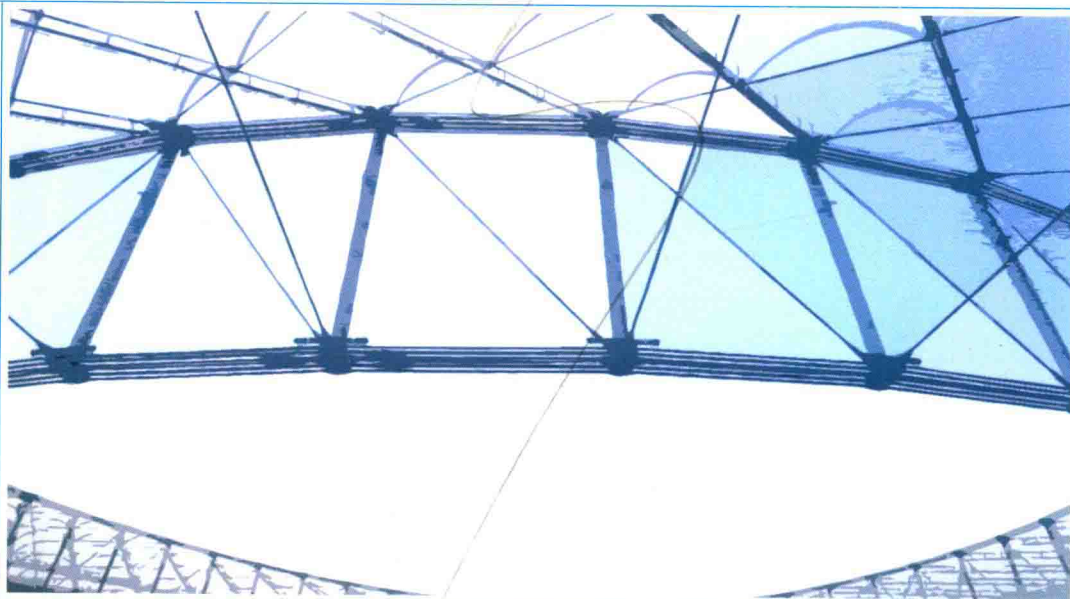
空间结构系列图书

JIANZHU SUO JIEGOU JIEDIAN SHEJI
JISHU ZHINAN

建筑索结构节点设计 技术指南

主 编 张毅刚

副主编 陈志华 刘 枫



中国建筑工业出版社

空间结构系列图书

建筑索结构节点设计 技术指南

主 编 张毅刚

副主编 陈志华 刘 枫

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑索结构节点设计技术指南/张毅刚主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 4
(空间结构系列图书)
ISBN 978-7-112-23467-7

I. ①建… II. ①张… III. ①悬索结构-节点-结构设计-指南
IV. ①TU351-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 047408 号

本指南系统阐述了建筑索结构节点的设计方法, 包括 8 章内容。第 1 章介绍了建筑索结构类型和拉索节点的基本概况; 第 2 章介绍了建筑索节点类型; 第 3 章给出了建筑索结构节点材料的选用原则与要求; 第 4 章给出了索节点设计的一般原则、数值分析原则以及防腐、防火设计; 第 5、6、7、8 章分别给出了螺杆连接节点、索夹节点、耳板式节点和可滑动节点的承载力验算方法、构造要求、制作和施工要求; 附录列出了常用索体性能参数和常用锚具型号及其尺寸参数。

本书可供土木工程相关专业的设计和研究人员、大学教师、研究生、高年级本科生参考使用。

责任编辑: 刘瑞霞 武晓涛

责任校对: 芦欣甜

空间结构系列图书 建筑索结构节点设计技术指南

主 编 张毅刚

副主编 陈志华 刘 枫

*

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

北京科地亚盟排版公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 6 $\frac{3}{4}$ 字数: 167 千字

2019 年 4 月第一版 2019 年 4 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-23467-7
(33767)

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)

编审委员会

- 顾 问：蓝天 董石麟 沈世钊 马克俭 刘锡良 严 慧 曹 资
姚念亮 刘善维 张毅刚
- 主 任：薛素铎
- 副主任：李亚明 周观根 陈国栋 高继领 王小瑞 黄达达 陈志华
吴金志
- 委 员：白宝萍 蔡小平 陈文明 高博青 耿笑冰 韩庆华 郝成新
李存良 李 凯 李明荣 李中立 罗兴隆 唐泽靖子 王 丰
王海明 王 杰 王 平 王双军 王秀丽 王元清 向 阳
薛海滨 张其林 赵伯友 支旭东 钟宪华 朱忠义 冯 远
罗尧治 武 岳 刘 枫 罗 斌 宁艳池 任俊超 王泽强
许立准 李雄彦 孙国军 胡 洁

作与施工建造等方面的最新成果。本系列图书拟包括空间结构相关的专著、技术指南、技术手册、规程解读、优秀工程设计与施工实例以及软件应用等方面的成果。希望通过该系列图书的出版，为从事空间结构行业的人员提供借鉴和参考，并为推广空间结构技术、推动空间结构行业发展做出贡献。

中国钢结构协会空间结构分会 理事长
空间结构系列图书编审委员会 主任

薛素铎

2018年12月30日

本书编委会

主 编：张毅刚

副主编：陈志华 刘 枫

编 委：(姓氏拼音为序)

曹正罡 邓 华 黄 颖 李海旺 梁存之 刘 健

刘 伟 刘红波 罗 斌 罗永峰 宁艳池 任俊超

孙国军 王泽强 吴金志 张国军 赵 波 周 健

周黎光 朱万旭

前 言

建筑索结构以其轻盈的体态、合理的受力与优美的造型，吸引了建筑师和结构工程师们的共同关注。近二十年来，我国建筑索结构工程需求与实际工程数量实现了跳跃式增长，张弦结构、弦支穹顶、索穹顶、单索结构及横向加劲索系、索网结构、双层索系、斜拉结构等结构体系相继在我国大型实际工程中推广应用。在这样的背景下，中国钢结构协会空间结构分会 2010 年在东莞成立了索结构专业组，当时张毅刚教授担任主任委员，本人和其他几位专家担任副主任委员，每年都组织全国索结构技术交流会或者典型索结构工程现场观摩会等活动，积极研讨索结构的分析理论、建造技术以及索具制作等科学技术内容，推动建筑索结构的快速健康发展。

随着建筑索结构的广泛应用，工程技术人员越来越认识到索节点设计是索结构工程设计的一个关键环节，不仅直接影响建筑美观和结构合理性，更密切关系到工程的成本造价、施工周期及安全等各方面。虽然《索结构技术规程》JGJ 257 及《预应力钢结构技术规程》CECS 212 都涉及索节点的内容，但只给出了一些索节点的基本构造做法，也没有统一标准，更缺少详细的设计分析计算方法，远不能解决工程实践的问题。

为了使广大工程技术人员更好地掌握索节点设计技术，并响应空间结构分会编制“空间结构系列图书”计划号召，中国钢结构协会空间结构分会索结构专业组在二届二次会议上，研究决定启动《索结构节点构造详图》标准图集的编制立项工作；在二届三次会议上，对已初步形成的标准图集编制立项报告初稿进行了深入的讨论；由于立项问题以及编制内容的细化变更，在二届四次会议上，暂停了标准图集的编制工作，同时启动了《建筑索结构节点设计技术指南》（以下简称指南）的编制工作，成立了指南编委会：邀请第一届索结构专业组主任委员张毅刚担任主编，副主任刘枫和我担任副主编，索结构专业组部分委员及相关单位的技术负责人参与编写，经过编委会集体讨论确定了指南的编写大纲。

指南全书包括建筑索结构简介、节点类型与选型、节点材料、节点设计原则、螺杆连接节点、索夹节点、耳板式节点、可滑动节点八章内容。邓华、王泽强、曹正罡、周黎光、朱万旭等编写第 1 章，介绍了建筑索结构类型、索体、锚具、拉索的工厂张拉及检验、索结构施工；刘红波、陈志华、周黎光、王泽强、周健、黄颖、宁艳池、赵波、罗永峰等编写第 2 章，按照索与索的连接、索与刚性构件的连接、索与支承构件的连接、索与围护结构的连接分类，介绍了建筑索节点类型；李海旺、张国军、曹正罡、孙国军等编写第 3 章，在热轧钢材、铸钢材料、高强螺栓连接材料、焊接连接材料、索夹材料、涂装材料等方面，给出了各自的选用原则与要求；吴金志、曹正罡、梁存之、孙国军等编写第 4 章，给出了索节点设计的一般原则、数值分析原则以及防腐与防火设计；梁存之、罗斌、任俊超等编写第 5 章；罗斌、刘健、朱万旭、刘红波、黄颖等编写第 6 章；罗斌、周健、

刘红波、宁艳池等编写第7章；任俊超、宁艳池、刘伟等编写第8章，分别给出了螺杆连接节点、索夹节点、耳板式节点、可滑动节点的承载力验算方法、构造要求、制作和施工要求；朱万旭、黄颖、宁艳池、刘伟、任俊超等完成附录的编写，列出了常用索体性能参数和常用锚具型号及其尺寸参数。以上各章节编写小组的第一名即是各章的负责人。指南编写过程中，进行了多次专题编写工作会议，集中讨论确定编写思路和关键技术内容。针对各章节的稿件，张毅刚教授和刘枫研究员等分别进行了完善和全面系统的梳理。指南的编写得到了空间结构分会理事长暨系列图书主编薛素铎教授的支持，空间结构分会秘书长吴金志和索结构专业组秘书孙国军为本指南的编写做了大量工作。我国空间结构相关企业特别是以下索结构的骨干单位为本指南的编写和出版给予了大力支持：巨力索具股份有限公司、广东坚朗五金制品有限公司、北京市建筑工程研究院有限责任公司、南京东大现代预应力工程有限责任公司和柳州欧维姆机械股份有限公司等。

希望本指南的出版能够进一步推动建筑索结构技术的蓬勃发展。

由于编撰时间相对仓促，疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

索结构专业组主任委员 **陈志华**

2019年1月

目 录

第 1 章 建筑索结构简介	1
1.1 建筑索结构的形式、特点和基本要求	1
1.2 单索结构及横向加劲索系	3
1.3 索网结构	4
1.4 双层索系	4
1.5 斜拉结构	7
1.6 张弦结构	8
1.7 弦支穹顶	10
1.8 索穹顶	12
1.9 其他索结构形式	13
1.10 索体	15
1.11 锚具	18
1.12 拉索的工厂张拉及检验	20
1.13 索结构施工	22
参考文献	24
第 2 章 节点类型与选型	26
2.1 一般规定	26
2.2 索与索的连接节点	26
2.3 索与刚性构件的连接节点	28
2.4 索与支承构件的连接节点	33
2.5 索与围护结构的连接节点	34
参考文献	35
第 3 章 节点材料	37
3.1 节点材料选用基本原则	37
3.2 热轧钢材的选用方法与要求	38
3.3 铸钢材料的选用方法与要求	38
3.4 高强螺栓连接材料的选用方法与要求	39
3.5 焊接连接材料的选用方法与要求	39
3.6 索夹材料的选用方法与要求	39
3.7 其他连接构件的材料选用方法与要求	40
3.8 涂装材料的选用原则	41

3.9 附表	41
参考文献	45
第4章 节点设计原则	46
4.1 一般原则	46
4.2 数值分析原则	46
4.3 防腐与防火	47
参考文献	48
第5章 螺杆连接节点	49
5.1 一般原则	49
5.2 承载力验算	52
5.3 构造与施工要求	54
参考文献	55
第6章 索夹节点	57
6.1 一般原则	57
6.2 强度承载力验算	58
6.3 抗滑承载力验算与试验	59
6.4 构造和制作要求	60
6.5 施工要求	61
参考文献	61
第7章 耳板式节点	62
7.1 一般原则	62
7.2 耳板承载力验算	63
7.3 销轴承载力验算	65
7.4 构造要求	66
7.5 制作和施工要求	67
参考文献	68
第8章 可滑动节点	69
8.1 一般原则	69
8.2 承载力验算	70
8.3 构造要求	71
参考文献	72
附录A 常用索体性能参数	73
附录B 常用锚具型号及其尺寸参数	84

1.1 建筑索结构的形式、特点和基本要求

1.1.1 索结构是用索作为主要受力构件而形成的结构体系。

1.1.2 用于建筑物的索结构形式丰富并不断发展，常用形式包括悬索结构（单层索系（单索结构、索网结构）、双层索系、横向加劲索系）、斜拉结构、张弦结构（弦支穹顶）、索穹顶等。

1.1.3 建筑索结构根据受力特点可分为刚性和柔性索结构：

(1) 刚性索结构在荷载作用下满足小变形假定，如斜拉结构、张弦结构（弦支穹顶）等；

(2) 柔性索结构的计算分析必须考虑几何非线性效应，各项荷载效应之间不再满足线性叠加原则，如悬索结构（单层索系、双层索系、横向加劲索系）、索穹顶等。

1.1.4 预应力是指非荷载效应的结构自平衡内力状态，是形成索结构初始应力的主要方式。预应力是对结构中所有构件内力（包括边界约束反力）的总体描述，而不是特指某个或某些构件的内力。索结构分析时，预应力作为一种独立效应与恒荷载、活荷载等各类荷载效应进行组合。

1.1.5 初始几何态、初始预应力态和荷载态是索结构设计和施工分析面临的三个基本状态。初始几何态指结构的加工放样状态。初始预应力态指在预应力施加完毕后结构的自平衡状态，是进行结构荷载效应分析的基础。荷载态是结构在外部荷载作用下的平衡状态。

1.1.6 索结构的初始预应力态应通过“找形”确定，即确保结构形状和预应力满足平衡关系的状态。根据平衡关系确定的初始预应力态应满足所有索单元受拉的条件，同时预应力提供的几何刚度能够确保结构形态的稳定性。

1.1.7 设计时，索结构的初始预应力态应综合考虑建筑造型、使用功能和受力合理的要求，通过反复试算确定。过于扁平的形态易在屋面形成积水或积雪，导致局部刚度减弱，“找形”时应避免形成此种形态。

1.1.8 索结构的预应力水平应根据结构受力特点和控制目标合理确定，预应力过高或过低都会对结构受力性能和经济性产生不利影响。

1.1.9 索必须存在初始拉应力才能参与结构工作。初始拉应力可以通过张拉形成，也可以由外荷载产生。初始拉应力的建立一般有以下方法：

(1) 对索进行张拉；

(2) 调节双层索系的连杆（索）长度；

(3) 在单索上采用钢筋混凝土屋面板等重屋面，也可在屋面板上超载加荷并浇筑板缝，然后卸载，使索与钢筋混凝土板构成壳体屋面；

(4) 在横向加劲索系中,对横向加劲构件的支座下压使其强迫就位,从而对纵向索建立预应力。

1.1.10 对边缘构件及支承结构进行合理布置,才能保证索结构预应力的可靠维持。索结构预应力的平衡方式有:

- (1) 结构预应力自平衡;
- (2) 利用斜拉索或斜拉杆通过地锚传至基础;
- (3) 通过边梁及其支承结构(如柱、框架、落地拱)传至基础。

1.1.11 索结构计算时,应考虑与支承结构的相互影响,宜采用包含支承结构的整体模型进行结构分析。

1.1.12 在永久荷载控制的荷载组合作用下,索结构中的索不得松弛;在可变荷载控制的荷载组合作用下,索结构不得因个别索的松弛而导致结构失效。

1.1.13 索结构通常对风荷载敏感。室外长拉索(长度大于 50m)一般应考虑风振和雨振的影响,并根据需要设置适当的阻尼减振装置。

1.1.14 索结构最大挠度限值宜满足表 1.1.14 的要求。根据正常使用极限状态的验算要求,任何屋盖结构都必须具备相当的刚度以保证在外荷载作用下不发生较大的变形。这也表明,柔性索结构分析时虽然必须考虑几何非线性效应,但不能认为结构在荷载作用下允许出现过大的变形。

索结构最大挠度限值 **表 1.1.14**

结构类型	最大挠度限值
单索屋盖	$l/200$ (自初始几何态算起)
索网、双层索系、横向加劲索系屋盖; 斜拉结构、张弦结构(弦支穹顶)、索穹顶屋盖	$l/250$ (自初始预应力态算起)
曲面索网、双层索系玻璃幕墙及采光顶; 张弦结构(弦支穹顶)玻璃采光顶	$l/200$ (自初始预应力态算起)
单层平面索网玻璃幕墙	$l/45$

注: l ——承重索跨度。

1.1.15 索构件通常有拉索和钢拉杆两种类型,其截面的验算应满足:

(1) 索的抗拉力设计值应按下式计算:

$$F = \frac{F_{tk}}{\gamma_R} \quad (1.1.15-1)$$

式中: F ——索的抗拉力设计值(kN);

F_{tk} ——索的极限抗拉力标准值(kN);

γ_R ——抗力分项系数,拉索取 2.0;钢拉杆取 1.7。

(2) 索的承载力应按下式验算:

$$\gamma_0 N_d \leq F \quad (1.1.15-2)$$

式中: N_d ——索承受的最大轴向拉力设计值(kN);

γ_0 ——结构的重要性系数。

1.1.16 索结构一般需进行初始几何态(加工放样)分析和施工张拉全过程分析,应采取有效措施对可能的预应力偏差进行控制。

1.2 单索结构及横向加劲索系

1.2.1 单索结构一般由平行布置或辐射布置的单索构成。

(1) 平行布置的单索形成下凹的单曲率曲面(图 1.2.1-1), 适用于矩形或多边形的建筑平面。由于要满足屋面排水的要求, 单索的两端一般不等高。为平衡单索的拉力, 通常在支承单索的边柱外设斜拉索。

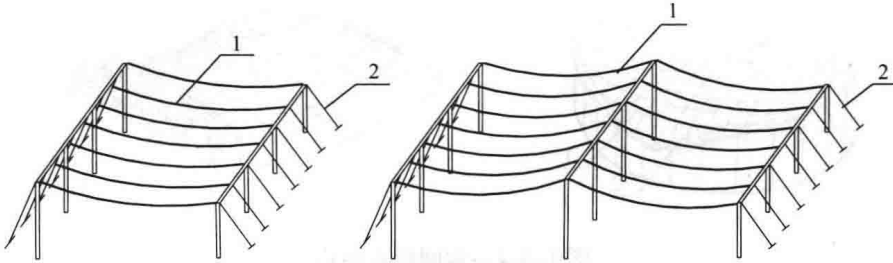


图 1.2.1-1 平行布置的单索结构

1—承重索; 2—斜拉索

(2) 辐射布置的单索适用于圆形、椭圆形建筑平面(图 1.2.1-2), 中心一般设置受拉环, 方便多根索汇交。允许设置中心立柱时, 可构成伞形曲面, 便于排水。

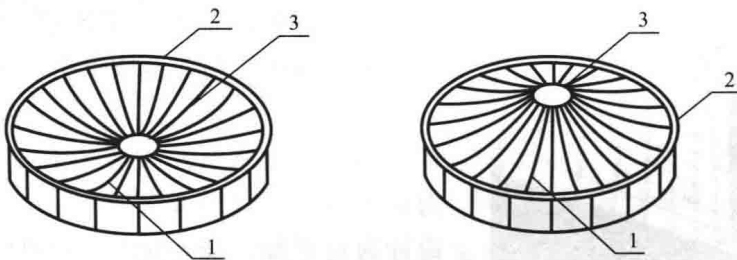


图 1.2.1-2 辐射布置的单索结构

1—承重索; 2—圈梁; 3—中心受拉环

(3) 悬索结构中, 单索的垂度一般为跨度的 $1/10 \sim 1/20$ 。

1.2.2 单索的形状由屋面荷载的分布形式决定。当索上荷载沿跨度方向均布时, 单索的形状为抛物线; 当索上荷载沿索长方向均布时, 单索的形状为悬链线。

1.2.3 单索体系必须依靠屋面重量来维持形状的稳定, 故一般采用钢筋混凝土屋面板等重屋面。

1.2.4 单索除采用钢索外, 也可以采用劲性钢构件, 如板带、型钢或桁架。

1.2.5 横向加劲索系形成空间受力体系, 适用于矩形、多边形建筑平面, 可采用轻型屋面(图 1.2.5)。横向加劲索系的垂度一般为跨度的 $1/10 \sim 1/20$, 横向加劲构件的高度一般为跨度的 $1/15 \sim 1/25$ 。

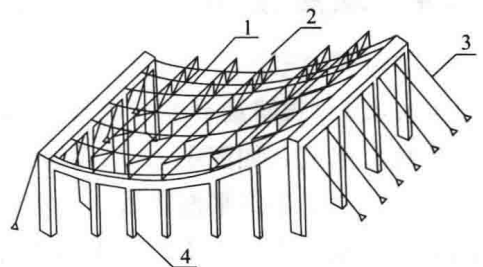


图 1.2.5 横向加劲索系

1—索; 2—横向加劲构件; 3—锚索; 4—柱

1.3 索网结构

1.3.1 索网结构(图 1.3.1)是指由相互正交、曲率相反的两组索在交点处相互连接而形成的鞍形曲面结构。下凹的承重索在下,上凸的稳定索在上,周边固定在边缘构件上。承重索的垂度一般为跨度的 $1/10\sim 1/20$,稳定索的拱度一般为跨度的 $1/15\sim 1/30$ 。

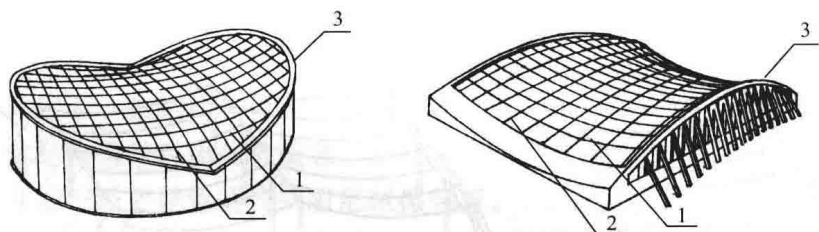


图 1.3.1 索网屋盖结构
1—承重索; 2—稳定索; 3—边缘构件

1.3.2 索网结构为空间受力体系,具有很好的形状稳定性和刚度。平面形状可为方形、矩形、多边形、菱形、圆形、椭圆形等,一般采用轻型屋面。

1.3.3 索网结构的初始预应力态通常通过“找形”分析确定,预应力水平则一般由满足跨中挠度限值要求所决定。索网结构的预应力一般通过张拉稳定索或承重索来建立。

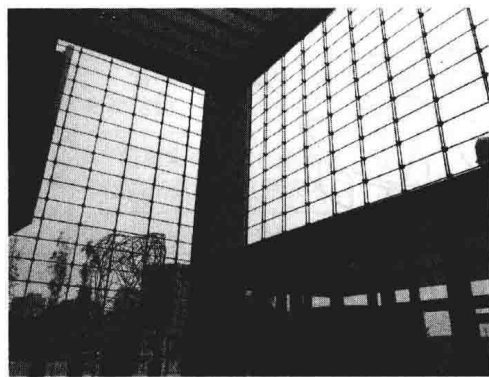


图 1.3.5 平面索网幕墙结构

1.3.4 索网结构的预应力需要外围边缘构件来平衡,因此过大的预应力对外围边缘构件的受力是不利的。圆形或椭圆形屋盖的边缘构件通常设计为自平衡。当不能自平衡时,则需要通过斜拉索等方式将预应力传递到基础。

1.3.5 平面索网结构(图 1.3.5)是一种常用的玻璃幕墙支承结构,此类索网的平面外刚度主要由预应力提供。

1.4 双层索系

1.4.1 双层索系由一系列下凹的承重索和上凸的稳定索以及它们之间的连杆(拉索或压杆)组成,如图 1.4.1-1 所示。

(1) 对于矩形平面建筑,承重索、稳定索可以平行布置或交错布置,构成索桁架形式的双层索系(图 1.4.1-2),此时承重索的垂度一般为跨度的 $1/15\sim 1/20$,稳定索的拱度一般为跨度的 $1/15\sim 1/25$ 。

(2) 用于圆形平面建筑时,承重索、稳定索一般呈辐射状布置(图 1.4.1-3),构成辐

射布置的索桁架结构。索桁架固定在受压外环梁上，内部连于受拉环。承重索的垂度一般为跨度的 $1/17 \sim 1/22$ ，稳定索的拱度一般为跨度的 $1/16 \sim 1/26$ 。

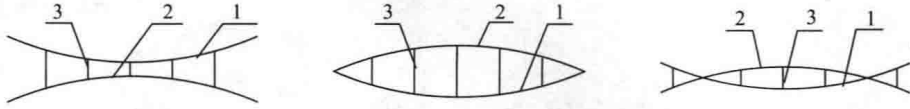


图 1.4.1-1 索桁架的一般形式

1—承重索；2—稳定索；3—连杆

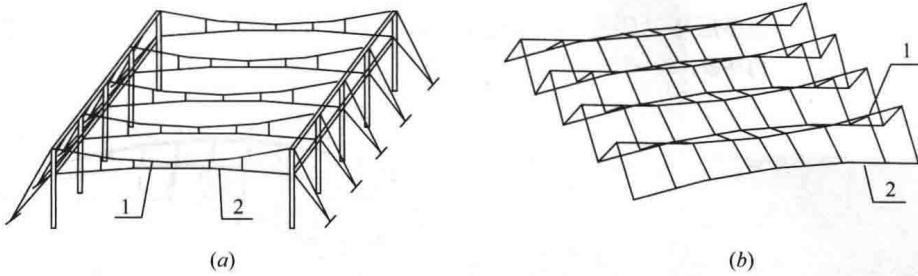


图 1.4.1-2 平行和交错布置的索桁架结构

(a) 索桁架平行布置；(b) 索桁架交错布置

1—承重索；2—稳定索

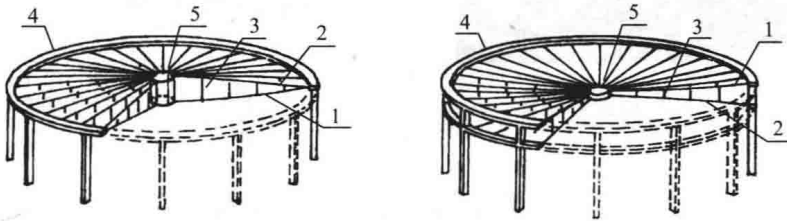


图 1.4.1-3 辐射布置的索桁架结构

1—承重索；2—稳定索；3—连杆；4—受压外环梁；5—受拉环

1.4.2 双层索系一般通过张拉稳定索或承重索建立预应力，也可调节承重索与稳定索之间的连杆长度建立预应力，但应采取有效措施控制稳定索和承重索可能的预应力偏差。与单层索系相比，双层索系的形状稳定性和刚度均大大提高。

1.4.3 将辐射布置的索桁架结构中部受拉环扩大，并替换为内环索，衍生出适用于体育场看台罩棚的环形索桁结构（图 1.4.3-1）。环形索桁结构通常适用于圆形、椭圆形的建筑平面，一般使用膜材屋面。

环形索桁结构有双层环索单层环梁（图 1.4.3-1）、单层环索双层环梁（图 1.4.3-2）两种常用形式。如果后者中的索桁架交错布置，可形成折面型环形索桁结构（图 1.4.3-3）。单层环索双层环梁环形索桁形式通常在索桁架下弦间铺设膜材屋面，以便于向周边排水。

1.4.4 双层索系也可组成图 1.4.4 所示的月牙形索桁结构。与环形索桁结构相比，其内环索和上、下外环梁均非闭合成环，而在两端的角柱处交汇，也可满足预应力的自平衡。

1.4.5 环形索桁结构和月牙形索桁结构中的预应力可以在内环索、索桁架和外环梁间平衡。但当结构跨度较大时，单榀索桁架需要施加较高的预应力才能满足结构刚度要求，这也使得内环索承受的拉力和外环梁承受的压力都很大。外环梁一般采用实腹构件，常用钢管混凝土构件。受力较大时，外环梁也会采用桁架。

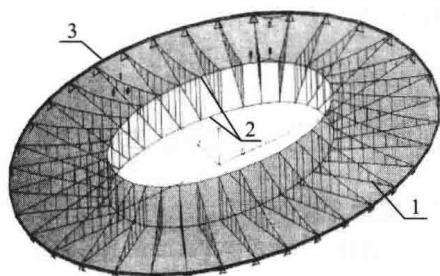


图 1.4.3-1 双层环索单层环梁环形索桁结构
1—索桁架；2—内环索；3—受压外环



图 1.4.3-2 单层环索双层环梁环形索桁结构



图 1.4.3-3 折面型环形索桁结构

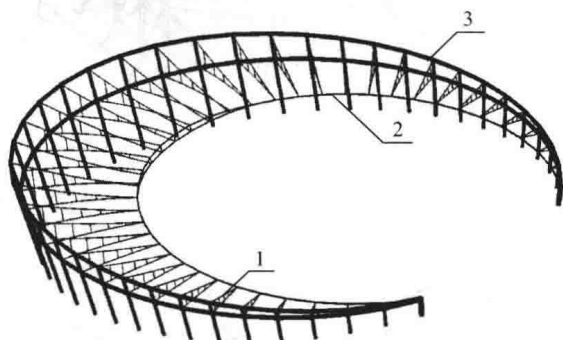


图 1.4.4 月牙形索桁结构

1—索桁架；2—内环索；3—受压外环梁

1.4.6 各类双层索系结构中，承重索、稳定索、环索一般通长，通过固定于这些索上的索夹节点与其他构件连接。由于索夹节点两边索段通常存在不平衡力，故设计时对索夹的抗滑移承载力有较高要求。

1.4.7 环形索桁结构和月牙形索桁结构一般采用地面拼装、再利用索桁架的上弦索作为牵引索进行整体提升成形（图 1.4.7）。应进行成形过程的模拟，以避免提升过程中结构大变形引起的构件和节点损伤。

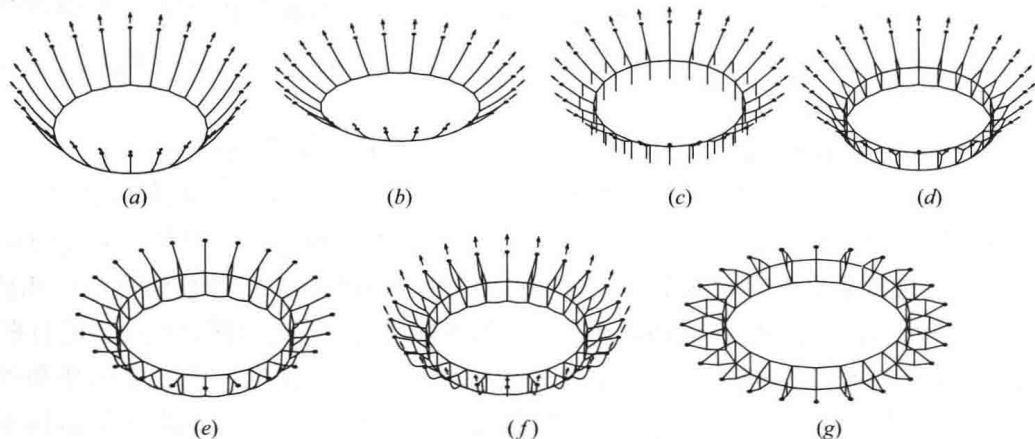


图 1.4.7 环形索桁结构的施工成形过程示意

(a) 步骤一；(b) 步骤二；(c) 步骤三；(d) 步骤四；(e) 步骤五；(f) 步骤六；(g) 步骤七

1.4.8 索桁架也常用作玻璃幕墙的支承结构，如图 1.4.8 所示。



图 1.4.8 双层索系幕墙结构

1.5 斜拉结构

1.5.1 对于跨度较大的屋盖结构，可设置塔柱（桅杆）和斜拉索为屋盖结构跨中提供吊点（图 1.5.1）。塔柱通过斜拉索可分担一部分屋盖结构上的竖向荷载，从而降低屋盖结构的内力。同时，斜拉索也相当于屋盖结构跨中的弹性支点，可有效减小屋盖的竖向变形。

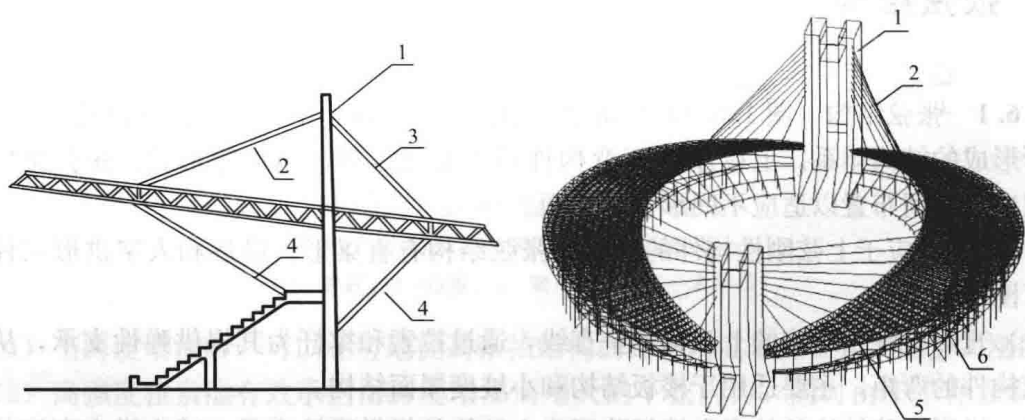


图 1.5.1 斜拉结构

1—塔柱；2—斜拉索；3—后拉索；4—下拉索；5—稳定索；6—框架

1.5.2 斜拉结构中拉索内力较大，拉索亦可锚固在与屋盖主体结构相连的中间过渡构件上，如箱梁、立体桁架等。塔柱一般独立于屋盖主体结构。

1.5.3 斜拉索一般在塔柱四周多方位布置，以发挥空间受力作用，减少塔柱弯曲内力。边柱式塔柱的柱底弯矩较大，通常在塔柱的另一侧设置平衡索或锚索（图 1.5.3）。