



T/CECS XXX-202X

中国工程建设标准化协会标准

建筑索结构工程施工标准

Construction standard for cable structures of buildings

(征求意见稿)

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

建筑索结构工程施工标准

Standard for construction of cable structure in buildings

T/CECS XXX-202X

主编单位：东南大学

北京工业大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年XX月XX日

中国计划出版社

202X年 北京

前 言

根据工程建设标准化协会《关于印发〈2019年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2019〕22号）的要求，标准编制组经过深入调查研究、认真总结实践经验，参考国外先进技术资料，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分为12章和3个附录。主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、施工阶段设计、拉索制作与包装运输、索节点制作与安装、索结构安装、预应力建立及调整、施工机具设备与计算机控制液压系统、施工监测与验收、拉索材料与成品保护及施工安全防护与环保、使用阶段维护及相关附录等。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会轻型钢结构专业委员会归口管理，由东南大学负责具体技术内容的解释。本标准在使用中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：江苏省南京市江宁区东南大学；邮编：211189），以供修订时参考。

主编单位：东南大学
北京工业大学

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

前 言	I
目 次	II
Contents	IV
1 总则	1
2 术语与符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	4
3 基本规定	6
4 施工阶段设计	8
4.1 一般规定	8
4.2 零应力状态设计	10
4.3 施工过程分析	12
4.4 牵引和张拉工装系统设计	14
5 拉索制作和包装运输	16
5.1 一般规定	16
5.2 拉索制作	16
5.3 包装运输	18
6 索节点制作与安装	20
6.1 一般规定	20
6.2 螺杆连接节点	20
6.3 销轴耳板节点	21
6.4 索夹节点	22
6.5 可滑动节点	25
7 索结构安装	26
7.1 一般规定	26
7.2 刚性子结构安装	27
7.3 拉索铺展	31
7.4 拉索安装	32
7.5 拉索存放和成品保护	35
8 预应力建立及调整	37
8.1 一般规定	37
8.2 预应力建立	38
8.3 预应力调整	41
9 施工机具设备与计算机控制液压系统	42
9.1 一般规定	42
9.2 安装和张拉机具设备	42
9.3 计算机控制液压牵引张拉系统	44
10 施工监测与验收	46
10.1 一般规定	46
10.2 施工监测	46
10.3 施工验收	46
11 安全防护及环保	48
11.1 一般规定	48
11.2 施工安全防护	48

11.3 施工环保	49
12 使用维护	50
附录 A 刚性索结构拉索初应变计算方法	51
附录 B 拉索单元的无应力长度计算方法	1
附录 C 拉索锚具常用类型	3
本标准用词说明	6
引用标准名录	7

Contents

Contents	IV
1 General Provisions	1
2 Terms and Symbols	2
2.1 Terms	2
2.2 Symbols	4
3 Basic Requirements	6
4 Construction Stage Design	8
4.1 General Requirements	8
4.2 Zero-Stress State Design	10
4.3 Construction Process Analysis	12
4.4 Traction and Tensioning System Design	14
5 Fabrication, Packaging and Transportation of Cable	16
5.1 General Requirement	16
5.2 Cable Frabrication	16
5.3 Packaging and Transportation	18
6 Fabrication and Installation of Cable Joint	20
6.1 General Requirement	20
6.2 Threaded Rod Connection Joint	20
6.3 Ear Plate Joint with Pin Connection	21
6.4 Cable Clamp Joint	22
6.5 Slidable Joint	25
7 Installation of Cable Structure	26
7.1 General Requirement	26
7.2 Installation of Rigid Substructure	27
7.3 Cable Spread	31
7.4 Cable Installation	32
7.5 Cable Storage and Finished Product Protection	35
8 Establishment and Adjustment of Prestress	37
8.1 General Requirement	37
8.2 Presstress Establishment	38
8.3 Prestress Adjustment	41
9 Construction Machinery and Equipment and Hydraulic System Controlled by Computer	42
9.1 General Requirement	42
9.2 Machinery and Equipment for Installation and Tensioning	42
9.3 Hydraulic Traction and Tensioning System Controlled by Computer	44
10 Construction Monitoring and Acceptance	46
10.1 General Requirement	46
10.2 Construction Monitoring	46
10.3 Acceptance	46
11 Safety and Environmental Protection	48
11.1 General Requirement	48
11.2 Construction Safety Protection	48
11.3 Construction Environmental Protection	49
12 Use and Maintenance	50
Appendix A Calculation Method of Cable Initial Strain in Rigid Cable Structure	51
Appendix B Calculation Method of Unstressed Length of Cable Element	1
Appendix C Common Types of Cable Member Anchorage	3
Explanation of Wording in This Code	6
List of Quoted Standards	7

1 总则

1.0.1 为在建筑索结构施工过程中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于建筑索结构工程中拉索、索节点及相关构件的制作、结构的施工和使用维护。

1.0.3 建筑索结构施工除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 建筑索结构 cable structure in buildings

包含拉索作为主要受力构件的建筑结构，包括刚性索结构和柔性索结构。

2.1.2 刚性索结构 rigid cable structure

由索杆系与梁、拱、桁架、网壳等刚性子结构组成的建筑索结构形式。

条文说明：刚性索结构分析符合小变形假定，如张弦结构、弦支穹顶结构、斜拉网格结构、索拱结构等。

2.1.3 柔性索结构 flexible cable structure

由索杆系与环梁/桁架、边梁/桁架、立柱、地锚等周边支承结构和边缘构件组成的建筑索结构形式，

条文说明：柔性索结构分析必须考虑几何非线性效应，且预应力是结构形成的必要条件，如悬索结构、索网结构、索桁架结构、索穹顶结构等。

2.1.4 拉索 cable member

由高强钢丝或实心圆形钢棒制成的索体及其锚具组成的受拉构件。

2.1.5 索体 cable body

拉索受力的主要部分，建筑索结构中多采用半平行钢丝束、钢绞线、钢棒。

2.1.6 半平行钢丝束拉索 semi-parallel wire cable

采用若干根同直径的高强钢丝平行集束、扭绞及外挤高密度聚乙烯护套制成的拉索。

2.1.7 钢绞线拉索 spiral strand cable

采用若干根钢丝相邻层反向螺旋捻制在一根中心钢丝上制成的拉索。全部采用圆形钢丝可制成圆丝钢绞线拉索，外部一层或多层采用 Z 形钢丝可制成密封钢绞线拉索。

条文说明：根据钢绞线拉索的索体弹性模量值不同，可分为低弹模钢绞线索、中弹模钢绞线拉索和高弹模钢绞线拉索。低弹模钢绞线的弹性模量为 (110~140) GPa，如《不锈钢拉索》YB/T 4294 规定的不锈钢钢绞线。中弹模钢绞线的弹性模量为 (160±10) GPa，如《建筑工程用锌-5%铝-混合稀土合金镀层拉索》YB/T 4543 和《建筑结构用密封索》GB/T *****规定

的钢绞线。高弹模钢绞线的弹性模量为 (195 ± 10) GPa, 如《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 规定的钢绞线。

由预应力混凝土用钢绞线构成的拉索在建筑索结构工程中也有所应用, 该钢绞线可以成束布置在钢管中, 端头配防松夹片锚具; 也可以单根或多根成索, 两端配挤压锚具及耳板式或螺杆式连接件等。

2.1.8 钢拉杆 steel tie rod

由钢质杆体和连接件等组件组装的受拉构件。

2.1.9 锚具 anchorage

索体端头与外部边界节点连接的部件集合, 索体的拉力通过其传递给外界, 一般包括索体固接件、调节装置和外连件等。

2.1.10 冷铸式锚具 cold-casting anchorage

采用环氧树脂与钢丸(铁砂)等材料用冷铸技术固结索体端头的锚具。

2.1.11 热铸式锚具 hot-casting anchorage

采用低熔点合金用热铸技术固结索体端头的锚具。

2.1.12 压接式锚具 swaged socket

采用压接技术固结索体端头的锚具。

2.1.13 预张拉 pre-stretching

制作钢绞线拉索时, 在规定值范围内对拉索进行加载和卸载, 使其伸长读数保持不变的状态。

2.1.14 超张拉 over stretching

制作拉索时, 对拉索施加超过设计力值的张拉, 使其处于稳定可靠状态。

2.1.15 索夹节点 cable clamp joint

通过紧固高强度螺栓使索夹的主体和压板夹持住索体, 防止与索体相对滑动而形成的拉索与相邻构件的连接节点。

2.1.16 索夹抗滑移承载力 anti-sliding capacity of cable clamp

通过索夹和索体之间的摩擦力抵抗索夹节点两侧索力差的能力。

2.1.17 零应力状态 zero-stress state

建筑索结构在未建立预应力且无荷载作用效应时的无应力状态, 是非预应力构件在无应力条件下加工放样和安装的基准状态。

2.1.18 初始预应力状态 initial-prestressed state

建筑索结构在设计单位指定的预应力作用和永久作用组合下的平衡状态。

2.1.19 成形状态

建筑索结构在预应力作用和结构自重作用组合下的平衡状态。

2.1.20 预应力 prestress

在无外部作用时，建筑索结构中通过张拉拉索引入拉索初应变而产生的自平衡内力。

2.1.21 一步成形分析 one-step forming analysis

不考虑施工过程，采用一步求解进行的结构成形分析，一般用于设计阶段。

2.1.22 多步成形分析 multi-step forming analysis

按照施工过程，采用多步连续求解进行的结构成形分析，一般用于施工阶段。

2.1.23 分阶段张拉 stretching in stages

对拉索分多批或分多级施加张拉力的施工方式。每一批次或每一级次称为一个张拉阶段。

2.1.24 主动张拉索 actively-stretched cable

利用张拉设备直接进行张拉的拉索。

2.1.25 被动张拉索 passively-stretched cable

不直接进行张拉，而是通过相邻构件的平衡和协调条件来建立预应力的拉索。

2.2 符号

2.2.1 材料性能

E —— 索体的弹性模量；

F —— 拉索的抗拉力设计值；

F_0^p —— 拉索的初张力；

σ_0^p —— 拉索的初应力；

ε_0^p —— 拉索的初应变；

ΔT_0^p —— 拉索的等效温差；

α —— 拉索的温度线膨胀系数。

t_k —— 设计初始预应力态下第 k 根拉索的拉力；

t_k^p —— 设计初始预应力态下荷载在第 k 根拉索中产生的轴力。

ε_k^0 —— 第 k ($k=1,2,\dots,n$) 根拉索的初应变，其中 n 为具有初应变的拉索数目；

\tilde{t}_{ik} —— 第 k 根拉索初应变的单位增量在第 i 根拉索中产生的轴力。

2.2.2 几何参数

L_c —— 拉索的系统长度；

A —— 索体的有效截面积；

s_0 —— 拉索的无应力长度；

H —— 拉索拉力的水平分量；

q —— 拉索单位长度的线荷载（含自重）；

L —— 拉索两端节点的水平距离；

C —— 拉索两端节点的竖向距离；

t_i —— 拉索较高节点的拉力；

t_j —— 拉索较低节点的拉力。

3 基本规定

3.1.1 索结构工程实施前，应编制经施工单位技术负责人审批的施工组织设计及其配套的专项施工方案等技术文件，并按有关规定报送总包工程师、监理工程师或业主代表；对于新型、大型、复杂、特殊或重要的索结构工程的施工技术方案的和安全应急预案应通过专家评审；审批通过后的技术文件在施工过程中应严格执行。

条文说明：拉索在施工前，应根据结构特点、结构总体施工组织、拉索安装施工仿真分析结果、拉索专项施工工艺流程等编制详细的施工组织设计文件；施工组织应符合国家现行相关施工质量验收规范及施工图的要求，在施工过程中应严格按照施工组织文件的要求执行。应按照《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》（住建部[2018] 37 号令），施工之前做好专项施工方案、安全应急预案，必要时组织专家评审，确保施工安全。

3.1.2 索结构工程施工的技术文件和承包合同技术文件，对施工质量的要求应不低于本标准和国家现行标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定。

3.1.3 索结构施工前，应根据结构特点、现场实际情况及设计要求，结合施工仿真分析结果选择合理的总体施工方案与拉索专项施工方案，确保结构施工过程安全及施工成形状态符合设计要求。所选用的施工总体方案应便于拉索的安装与张拉。

3.1.4 刚性子结构、周边支承结构和边缘构件的深化设计、加工制作、安装方案、施工组织设计应与拉索施工综合协调考虑。当需要专家论证时，刚性索结构中的刚性子结构施工应与拉索施工一并进行，柔性索结构的周边支承结构和边缘构件施工宜与拉索施工一并进行。

3.1.5 条文说明：拉索与相关结构和构件的施工应统一协调，并且应明确设计在结构中施加预应力的目的，保证张拉成形状态达到设计要求。索结构工程施工及质量验收时，应使用经计量检定合格且在有效期内的计量器具，并按有关规定操作和正确使用。各专业施工单位和监理单位应统一计量标准。

3.1.6 索结构施工用的专用机具和工具，应满足施工要求，并检验合格且在有效期内。

3.1.7 索结构应在周边支承结构和边缘构件联合检查验收合格后进行施工。

3.1.8 索结构施工宜制定监测方案，对索结构、支承结构的关键部位的应力或位形进行监测；当出现异常情况时，应立即停止施工，分析原因并采取有效措施后方可继续施工，形成的文件资料应存档。

3.1.9 索结构在运输、堆放和施工过程中应采取有效防护措施，防止拉索及相关结构和构件损坏。

3.1.10 索结构工程施工应符合安全文明、劳动保护和环境保护等有关国家现行法律法规和标准的规定。

3.1.11 对于本规范未涉及的新技术、新工艺、新材料和新结构，施工前应进行试验，并根据试验结果确定所必须补充的标准，且通过专家论证。

4 施工阶段设计

4.1 一般规定

4.1.1 建筑索结构应根据本标准和国家现行标准《钢结构工程施工规范》GB50755 的要求进行零应力状态设计、施工阶段结构分析和验算、施工详图设计、牵引和张拉工装系统设计。选用的设计指标应符合设计文件、国家现行标准《钢结构通用规范》GB55006、《钢结构设计标准》GB50017 和其他现行有关标准的规定。

条文说明：建筑索结构主要为钢结构，其施工阶段设计和分析应符合国家现行标准《钢结构工程施工规范》GB50755 中关于钢结构工程施工阶段设计的相关要求。混凝土的周边支承结构和边缘构件应符合相关混凝土结构的规范标准。

4.1.2 施工过程分析应根据施工方案进行全过程分析，建立相应的计算模型，并设定步骤和作用等分析参数和条件。

条文说明：建筑索结构应根据国家现行标准《钢结构工程施工规范》GB50755 等相关规范的要求进行施工阶段分析，以保证结构和构件满足强度、稳定性和变形的要求。

由于预应力施工过程中结构受力状况变化复杂且施工成形状态与过程密切相关，施工分析中应该根据施工方案合理地确定计算模型、步骤和作用。

4.1.3 施工分析计算模型中材料的弹性模量、温度线膨胀系数、密度等物理性能参数应符合实际。拉索索体的弹性模量宜由试验确定，当缺乏试验资料时可按表 5.2.4-1 取值。当拉索长度较短时，拉索的计算弹性模量宜综合考虑索端节点和锚具刚域的影响。

条文说明：一般情况下，分析模型中的索单元连接在节点中心之间，因此实际拉索的索体长度小于分析模型的索单元长度。鉴于索端节点和锚具刚域的影响，实际拉索的轴向刚度高于分析模型的索单元。当拉索长度越短，该影响越明显。为精细化分析，对短索的计算弹性模量建议考虑该影响。

4.1.4 施工分析计算模型中的预应力作用可采用在拉索上施加初张力、初应力、初应变、等效温差等方式进行模拟，模拟方式转换可按式（4.1.4-1）计算。

$$F_0^P = \sigma_0^P A = \varepsilon_0^P EA = -\alpha \Delta T_0^P EA \quad (4.1.4-1)$$

式中： F_0^P ——拉索的初张力；
 σ_0^P ——拉索的初应力；
 ε_0^P ——拉索的初应变；
 ΔT_0^P ——拉索的等效温差；
 E ——拉索的弹性模量；
 A ——拉索的有效截面积；
 α ——拉索的温度线膨胀系数。

条文说明：索结构分析计算时，在计算模型中常通过对拉索施加初张力、初应力、初应变或等效温差等方式来模拟预应力作用，其本质上是在拉索上引入无应力长度收缩量。在该预应力作用及其他作用下，结构变形协调后达到平衡状态，拉索上呈现平衡后的索力。

4.1.5 施工分析计算模型中拉索初应变的分布模式和数值，应根据结构设计初始预应力态并结合施工方案，通过分析来确定。对于刚性索结构，拉索初应变可根据设计初始预应力态的拉索内力采用附录 A 的方法进行计算。

条文说明：分析计算模型中拉索初应变的分布模式有沿拉索全长均匀分布、仅在拉索张拉端单元上分布、仅在主动索上分布、在主动索和被动索上都分布等，不同分布模式下得到的拉索初应变是不同的，且对初始预应力态的结构位形和构件姿态有影响，因此须根据结构设计初始预应力态并结合施工方案，通过分析来确定。

4.1.6 施工阶段的承载能力极限状态验算应根据国家现行标准《工程结构通用规范》GB55001 的要求按短暂设计状况进行，并根据需要进行正常使用极限状态验算。

条文说明：索结构施工阶段计算必须依据国家现行标准《工程结构通用规范》GB55001 规定的短暂设计状况进行承载能力极限状态验算。如果对施工阶段的结构变形有要求，则可根据需要进行正常使用极限状态的验算。

4.1.7 施工阶段验算时，结构重要性系数不应小于 0.9，重要的临时支撑结构其重要性系数不应小于 1.0。

4.1.8 施工阶段验算应按国家现行标准《工程结构通用规范》GB55001、《钢结构工程施工规范》GB50755 和《建筑结构荷载规范》GB50009 的要求进行荷载取值和组合，同时应考虑结构各施工阶段的实际荷载情况，并结合工程所处的地理位置及环境，综合考虑温度、风、

雪等荷载的影响，可不考虑地震和偶然荷载的作用。

条文说明：施工阶段验算时，应考虑施工荷载的实际布置情况；当不能确定时，应考虑其不利布置影响。施工荷载包括施工人员、堆载、架设机具及材料、临时配重等。由于工程所处地理位置不同，其环境条件差异很大，应结合实际情况确定风荷载的影响；对于冬季可能下雪的地带，应考虑雪荷载、裹冰荷载等影响。

4.1.9 施工阶段设计应分析验算主体结构、周边支承结构、边缘构件、临时措施、牵引张拉工装系统等的强度、稳定性和刚度，验算结果应满足设计要求及国家现行相关标准的规定。

条文说明：与结构施工相关的支撑、缆风绳、作业平台等临时措施及牵引张拉工装的验算也属于施工阶段设计的内容。

与结构成形状态的索力相比，一般牵引提升阶段的索力较小，但位形和受力特性等差异大，这可能引起周边支承构件局部出现大弯矩，索夹两侧索力差大等，导致结构局部和索夹抗滑移的承载力不足。因此，应根据仿真分析结果对结构构件、节点连接等进行复核，确保牵引提升过程中的安全。

建筑索结构中预应力的建立可以采用一次张拉拉索的施工方式，但也常采用分阶段张拉（分批张拉拉索或将拉索张拉力分多级进行张拉）的施工方式。分阶段张拉的优点可以避免结构中应力增幅过大、共用张拉设备以节省施工费用等，但也存在张拉过程中结构内力变化复杂的缺点，因此必须对每一个张拉阶段进行结构分析和验算，并保证结构的强度、稳定性和刚度要求。

4.1.10 施工单位应进行拉索制作详图设计，内容包含索体的类型和规格、锚具形式和尺寸、调节装置位置和调节量、拉索的长度和根数、索夹标记位置、允许偏差及对应索长的张拉力值和温度值等。拉索制作应在制作详图经设计单位认可后进行。

条文说明：拉索生产厂家应向施工单位提供索体和锚具的形式和尺寸，并对其受力性能负责。

4.2 零应力状态设计

4.2.1 当设计文件未明确结构零应力状态的位形时，应通过分析确定结构零应力状态。

条文说明：张拉拉索在结构中建立预应力是建筑索结构施工的重要特点。索结构的刚性子结构、周边支承结构和边缘构件需按照零应力状态进行深化设计、加工制作和拼装，当设计文件中未明确结构零应力状态的位形时，应进行结构零应力状态设计。

4.2.2 确定零应力状态应以设计初始预应力态为目标，并考虑实际施工步骤的影响。设计初始预应力态的结构位形、构件内力、作用条件和约束条件等应在设计文件中明确。当结构位形和拉索内力在设计文件中不能完整表达时，设计单位应提供初始预应力态的结构计算模型。

条文说明：索结构零应力状态分析的目的在于计算构件的加工几何（长度）和结构的安装几何，以从零应力状态经施工过程达到设计初始预应力态为目标。

4.2.3 零应力状态确定宜采用正装法进行分析。当采用倒拆法计算时，应明确在每个分析步骤中下步拆除的非预应力构件接近零应力。

条文说明：正装法是对结构施工过程进行正序分析，即跟踪模拟施工过程分析结构的内力和变形。基于设计初始预应力态采用正装法计算零应力状态是个迭代过程，其基本思路为：先将设计初始预应力态位形作为初始零应力状态位形，按照实际施工顺序对结构进行全过程正序跟踪分析，得到结构施工成形时的位形，将其与设计位形的差值反号叠加到初始零应力状态位形上得到新的零应力状态位形，反复迭代至施工成形位形与设计位形的差值满足收敛标准。

倒拆法是对施工过程的逆序分析，其计算零应力状态位形的基本思路为：基于设计初始预应力态，按照施工过程逆序逐步拆除构件，分析各步剩余结构状态，该状态也就是所拆构件在正序中安装前的结构状态。倒拆法计算简单，无需迭代，但只有在每个逆序分析步骤中下步拆除的非预应力构件接近零应力，才能保证计算的准确性。所谓非预应力构件是指在分析计算模型中未直接施加预应力作用的构件。

4.2.4 构件的详图设计、放样加工及结构拼装应依据零应力状态分析结果进行。

条文说明：为便于构件的加工制作，可基于零应力状态分析结果，以拉索节点、支座节点等

为控制点，采用曲线拟合的方式确定加工制作构件的形状。各段拟合曲线的连接部位应平顺过渡。

4.2.5 构件加工制作、结构拼装及预变形的实施应进行专项工艺设计。

4.3 施工过程分析

4.3.1 各阶段施工分析应充分考虑施工过程的影响，必要时进行施工过程多工况的连续求解。

条文说明：施工过程分析可根据施工过程实际情况分阶段展开，这样每一阶段的分析模型相对简单，但要注意不同阶段分析结果的衔接；也可从开始就建立包含各个阶段临时措施及整个结构的整体计算模型进行全过程的多工况连续求解，此时，分析模型相对复杂，但过程连续。不论采取哪种方法，施工过程分析都要能真实反映施工过程的变化，确保分析结果的可靠性。

4.3.2 施工过程分析时，计算模型中的结构构件、工装构件、边界条件、荷载条件和预应力作用等应与实际情况一致，必要时建立包含整体结构和施工措施的完整模型。牵引提升过程分析时，尚应考虑施工设备、工装等附加荷载的影响。

条文说明：计算模型应包含已安装的结构构件和必要的支撑、缆风绳等施工措施构件，构件的几何、力学等参数与实际一致，拉索预应力、构件连接、支座约束条件等应与实际施工相符。

对于柔性索结构，其牵引提升阶段的结构刚度小，荷载对结构位形影响大，因此分析时应计入牵引工装、千斤顶等临时施工措施重量的影响。

4.3.3 柔性索结构的施工分析和刚性索结构的多步成形分析应考虑几何非线性效应。

条文说明：柔性索结构的施工状态具有较大的位形变化，应进行几何非线性分析。刚性索结构的多步骤连续过程分析，应通过几何非线性分析来考虑前序结构位形变化对后序施工的影响。

柔性索结构的牵引提升过程中，结构位形变化大，分析难度大，位形变化最不利点的捕

捉较为关键。在施工过程分析时，应针对关键阶段及关键点应进行精细化分析，精准跟踪牵引提升过程结构的最不利位置；而对于结构变化平稳阶段则可增加分析步长，减少分析工作量。

4.3.4 柔性索结构牵引提升过程应保证索杆系位形的稳定性。

条文说明：柔性索结构中的索杆系在初始阶段，因位形变化大，杆件可能受压而处于不稳定状态；在牵引提升过程中，部分拉索可能存在着索力由大到小再逐步增加的过程，从而造成索杆系从稳定到不稳定再到稳定状态的过渡。因此，应通过仿真分析，找到索杆系牵引提升过程中的最不稳定状态，判别该状态下结构的稳定性，并根据分析结果采取相应的措施。

4.3.5 主动张拉索的选择应控制结构施工成型态的预应力偏差，并考虑施工便利性。结构预应力偏差分析宜考虑索端锚固节点安装偏差、被动张拉索长度误差和主动张拉力误差的影响。

条文说明：研究表明，拉索锚固节点安装偏差和拉索长度加工误差对结构预应力造成的偏差不可忽略。理论上，只有对所有拉索进行主动张拉并控制其张拉力时，才能够完全消除预应力偏差；否则，则应该分析以上两类因素对结构预应力造成的偏差。研究还表明，当选择不同的主动张拉索时，由相同的锚固节点安装偏差和索长加工误差所引起的结构预张力偏差并不相同，往往还差异显著。这也说明，有必要合理选择主动张拉索以将结构预应力偏差控制在较低的水平。

4.3.6 应合理确定拉索张拉批次和级数。当拉索分批张拉时，前批次拉索的张拉力应计入后续批次拉索张拉的影响。

条文说明：当采用分阶段张拉时，每一个张拉阶段结构的拉索数量、边界约束、荷载条件通常发生变化，因此应合理确定各阶段的结构分析计算模型、荷载作用及其组合方式。当拉索分批张拉时，后批次拉索的张拉会影响前批次拉索内力，一般情况下可采用倒拆法分析各批次的拉索张拉力，也可根据“拉索无应力长度不变”原则采用正装法进行分析。

4.3.7 施工全过程应满足结构安全性要求，且主要构件处于弹性应力状态。考虑过程分析得到的施工成形状态应与设计成形状态进行对比，两者偏差应得到设计单位的认可。

条文说明：设计成形状态是使用阶段结构分析和验算的基础，该成形状态一般为一步成形分析的结果。依据施工方案，按照施工过程多步连续求解得到的施工成形状态，与设计成形状态之间可能存在一定的偏差，若偏差过大，则会影响结构使用阶段的安全性。

4.4 牵引和张拉工装系统设计

4.4.1 牵引和张拉用工装系统应安全可靠和便于装拆、操作和检修，应根据施工过程分析结果，综合考虑下列因素进行专项设计：

- 1 施工方案；
- 2 牵引与张拉的力值、距离和角度方向；
- 3 设备、工装索、锚具和节点的形式和尺寸以及操作空间尺寸。

条文说明：牵引和张拉用工装系统包括机具设备、反力架、工装索、工装锚固节点及零配件等。牵引和张拉工装系统是索结构施工的关键临时措施之一，涉及到施工过程的安全性，应进行专门设计。牵引和张拉工装系统设计应保证牵引提升、预应力施加的可操作性、安全性和高效性。张拉工装系统应满足拉索锚具调节和永久锚固的作业空间要求。

4.4.2 拉索牵引和张拉工装系统应满足各阶段的施工要求，当采用整体或累积牵引提升施工柔性索结构时应统一为一套系统。

条文说明：柔性索结构牵引和张拉工装系统的统一，有利于减少工装设备投入量，降低工装锚固点构造复杂性，实现牵引和张拉连续作业。

4.4.3 设备、反力架、工装索、锚固节点及零配件应配套设计，应有明确传力路径并适应作业过程中的位移和转动，将设备作用力有效传至拉索上。

条文说明：拉索牵引和张拉过程中结构形态变化大，工装系统在满足安装张拉操作和承载力要求的同时，尚应适应过程中的位形变化。

4.4.4 张拉设备应采用穿心式液压千斤顶，牵引设备宜采用穿心式液压千斤顶。

4.4.5 工装索宜选用 1×7 结构高弹模钢绞线（束），牵引张拉距离较短时可选用钢棒、螺杆或精轧螺纹钢筋。高弹模钢绞线（束）、精轧螺纹钢筋和钢拉杆的技术条件应分别符合国家现行标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224、《预应力混凝土用螺纹钢筋》GB/T 20065 和《钢

拉杆》GB/T 20934 的规定。

条文说明：钢绞线（束）牵引长度不受限制，一般用于长距离牵引；钢拉杆和精轧螺纹钢筋安装方便，但因杆体具有抗弯刚度，变形适应能力差，一般用于短行程张拉。

4.4.6 工装索应沿拉索轴线对称布置，使拉索仅承受轴向拉力，其锚固方式应满足液压千斤顶倒缸时临时锚固的需要。

4.4.7 工装索锚固点可设在基础、结构构件、结构耳板等位置，可采用在结构上预设埋件、焊接耳板、节点耳板开孔、抱箍等方式。

4.4.8 牵引和张拉工装系统应进行承载力验算，验算内容包括反力架抗弯和抗剪强度验算、整体及局部稳定性验算、工装锚固节点验算和工装索抗拉强度验算等。工装索的承载力设计值应按照国家现行标准《索结构技术规程》JGJ 257 中规定取值。

4.4.9 牵引和张拉工装系统的设计承载力和穿心式液压千斤顶的额定工作能力应符合以下规定：

- 1 牵引用工装系统设计承载力和穿心式液压千斤顶额定工作能力应不低于 2.0 倍牵引力；
- 2 当索长可调时，张拉用的工装系统设计承载力和穿心式液压千斤顶额定工作能力应不低于 1.3 倍张拉力；当索长不可调时，应不低于 1.5 倍张拉力；
- 3 穿心式液压千斤顶额定工作能力不宜大于 5.0 倍张拉力。

条文说明：尽管牵引阶段的设备作用力远小于张拉阶段的，但鉴于牵引阶段的同步性要求低于张拉阶段，因此牵引阶段的工装系统设计承载力和设备额定工作能力应具有更高的安全系数。

尽管在仿真分析、材料加工制作和现场安装等方面，定长索施工比可调索施工的精度控制要求更严，但就现场实施张拉锚固而言定长索张拉力难以调整，因此定长索张拉时工装系统设计承载力和设备额定工作能力应具有更多的储备。

4.4.10 焊接固定在结构上的拉索牵引用和张拉用的工装锚点宜统一设计。

5 拉索制作和包装运输

5.1 一般规定

5.1.1 半平行钢丝束拉索的质量、性能应符合国家现行标准《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》GB/T 18365 的规定。

5.1.2 圆丝锌铝镀层钢绞线拉索的质量、性能应符合国家现行标准《建筑工程用锌-5%铝-混合稀土合金镀层拉索》YB/T 4543 的规定，圆丝不锈钢钢绞线拉索的质量、性能应符合国家现行标准《不锈钢拉索》YB/T 4294 的规定，密封钢绞线拉索的质量、性能应符合国家现行标准《建筑结构用密封索》GB/T *****的规定。

5.1.3 高弹模钢绞线的质量、性能应符合国家现行标准《预应力混凝土用钢绞线》YB/T 5224 的规定。当其配置挤压式锚具时，锚具的质量、性能应符合国家现行标准《建筑幕墙用钢索压管接头》JG/T 201 的规定；当其配置夹片式锚具时，应设置防夹片松脱装置，且锚具的质量、性能应符合国家现行标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的规定。

5.1.4 密封钢绞线的外部 Z 形钢丝应采用锌铝镀层，内部圆钢丝宜采用锌铝镀层。当内部圆钢丝采用热镀锌时，应在圆钢丝间填充不包含任何溶剂的含锌防腐材料。

5.1.5 钢拉杆的质量、性能应符合国家现行标准《钢拉杆》GB/T 20934 的规定。

5.2 拉索制作

5.2.1 成品索在出厂前应按照拉索制作详图进行检验并做记录，检验记录应包含理论值、实测值及误差值。在检验结果符合允许误差要求后方可运输去施工现场，且检验记录应及时提交给施工单位。对重大项目或应项目要求时，监理单位应旁站监查。

5.2.2 成品索长度误差应符合设计要求，且不大于表 5.2.2-1 中的允许值。

表 5.2.2-1 成品索长度误差允许值

拉索类型	系统长度 $L(m)$	长度误差 $\Delta L(mm)$
半平行钢丝束、碳钢钢绞线	≤ 50	± 15
	$50 < L \leq 100$	± 20
	> 100	$\pm L/5000$
不锈钢钢绞线	≤ 5	± 6
	$5 < L \leq 10$	± 10
	$10 < L \leq 50$	± 15

	$50 < L \leq 100$	± 20
	> 100	$\pm L/5000$
钢拉杆	≤ 5	± 5
	$5 < L \leq 10$	± 10
	> 10	± 15

条文说明：对于不锈钢钢绞线拉索，当 $L \leq 20\text{m}$ 时，长度误差允许值依据国家现行标准《不锈钢拉索》YB/T 4294 的规定；当 $L > 20\text{m}$ 时，长度误差允许值依据国家现行标准《建筑工程用锌-5%铝-混合稀土合金镀层拉索》YB/T 4543 的规定。

5.2.3 成品索的索体直径误差应不大于以下允许偏差。当设计单位提出更严格要求时，尚应符合设计要求。

- 1 半平行钢丝束索体护套的外径允许偏差为：[-1, +2]mm；
- 2 圆丝钢绞线和密封钢绞线的外径允许偏差为：[0, +3%]mm；
- 3 不锈钢钢绞线的外径允许偏差为：当公称直径 $\leq 10\text{mm}$ ，[-2%, +6%]；当公称直径 $> 10\text{mm}$ ，[-2%, +5%]；
- 4 钢拉杆杆体的直径允许偏差和弯曲度应符合国家现行标准《热轧钢棒尺寸、外形、重量及允许偏差》GB/T 702 的规定。

5.2.4 拉索索体的弹性模量应符合表 5.2.4-1 的规定。

表 5.2.4-1 拉索索体弹性模量 (GPa)

索体类型	碳素钢			合金钢	不锈钢		
	半平行钢丝束	圆丝钢绞线		密封钢绞线	钢拉杆	圆丝钢绞线	密封钢绞线
		中弹模	高弹模				
弹性模量	≥ 190	160 ± 10	195 ± 10	160 ± 10	206 ± 10	≥ 110	130 ± 10

条文说明：钢丝束和钢绞线的弹性模量主要与金属材质和捻距有关。碳素钢索体的弹性模量高于不锈钢索体，大捻距索体的弹性模量高于小捻距索体。不锈钢圆丝钢绞线索体的弹性模量应符合国家现行标准《不锈钢拉索》YB/T 4294 的规定。不锈钢密封钢绞线索体的弹性模量参考国外厂家提供的资料。

《建筑工程用锌-5%铝-混合稀土合金镀层拉索》YB/T 4543 规定的钢绞线采用 1×7、1×19、1×37 及以上的结构，公称直径可达到 100mm 以上，捻距为钢绞线公称直径的 8 倍~13 倍，弹性模量为 (160 ± 10) GPa，属于中弹模钢绞线。《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 规定的钢绞线采用 1×2、1×3、1×7 和 1×19 结构，目前最大公称直径为 28.6mm；1×2、1×3 和 1×7

结构钢绞线的捻距为钢绞线公称直径的 12 倍~16 倍，模拔钢绞线的捻距应为钢绞线公称直径的 14 倍~18 倍，1×19 结构钢绞线的捻距为钢绞线公称直径的 12 倍~18 倍；弹性模量达到(195±10) GPa，属于高弹模钢绞线。

本标准中除特别说明不锈钢之外，钢绞线均指碳素钢钢绞线。

5.2.5 钢绞线索体定长切断前，应进行预张拉。预张拉方法为：在钢绞线公称破断力的 40%~60%间反复张拉 5 次后持续 10min，或按照公称破断力的 50%~55%持续张拉 100min。

条文说明：钢绞线索体的公称破断力为相应产品标准中规定的最小破断力。

5.2.6 半平行钢丝束拉索和钢绞线拉索制作完成后，应逐根进行超张拉检测。超张拉力值取设计索力的 1.2~1.4 倍或索体公称破断力值的 45%~55%。

条文说明：半平行钢丝束索体的公称破断力为钢丝的标准抗拉强度与钢丝束公称截面积的乘积。

5.2.7 钢拉杆制作完成后应进行整体成品拉力试验，试验载荷为 0.85 倍杆体屈服载荷。

条文说明：钢拉杆杆体的屈服载荷为杆体的标准屈服强度与其公称截面积的乘积，公称破断力为杆体的标准抗拉强度与其公称截面积的乘积。

5.2.8 出厂前锚具表面的防腐处理应符合设计要求，且不低于相应国家现行标准的有关规定。

条文说明：一般情况下，锚杯、螺母、调节螺杆、销轴表面可采用电镀锌、渗锌处理，镀锌厚度为 10μm~30μm，渗锌厚度不小于 45μm；叉耳接头、单耳接头、浇铸接头、其他密封组件表面可采用涂漆、热喷锌/铝、热镀锌、渗锌处理，渗锌厚度不小于 45μm，其余涂装厚度不小于 70μm。

5.3 包装运输

5.3.1 拉索应采用不损伤其表面质量的材料进行包装。

5.3.2 半平行钢丝束和钢绞线拉索应能自由盘绕，盘绕内径应不小于表 5.3.2-1 的规定。盘绕后索体不应有鼓丝、散丝及明显变形，盘绕后最大外径应能满足交通运输的要求。

表 5.3.2-1 拉索最小盘绕内径

拉索种类	半平行钢丝束拉索	密封钢绞线拉索	圆钢绞线拉索
最小盘绕内径	20D	30D	20D

5.3.3 钢拉杆应采用直条包装，当长度超过运输工具尺寸时，可将锚具与索体拆开分别运输。

6 索节点制作与安装

6.1 一般规定

6.1.1 索节点可采用铸造、锻造、焊接等方法加工成毛坯，并应经车削、铣削、刨削、钻孔、镗孔等机械加工而成。铸钢件的加工应符合国家现行标准《铸钢结构技术规程》JGJ/T 395 的规定。

条文说明：索节点毛坯加工工艺有三种方式：1) 铸造工艺，包括模型制作、检验、浇注、清理、热处理、打磨、修补、机械加工、检验等工序；2) 锻造工艺，包括下料、加热、锻压、机械加工、检验等工序；3) 焊接工艺，包括下料、组装、焊接、机械加工、检验等工序。

6.1.2 索节点各零件及钢部件的加工质量应符合国家现行标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的有关规定。

6.1.3 对于焊接在支承结构或边缘构件上的索节点连接件，可在支承结构或边缘构件施工完成后，根据实测坐标进行焊接。

条文说明：工程实践中，索节点的支座或支承结构的连接件可能有较大偏差，在没有检查并确认满足要求的情况下直接进行索节点安装，可能导致索结构整体位形偏差过大，甚至造成安全事故。为避免这种情况发生，特要求索节点安装前对其连接部位的空间位置进行复测校核。对于直接焊接在支承结构或边缘构件上的索节点连接件，在支承结构或边缘构件施工完成后根据实测连接部位的坐标焊接索节点连接件，可以更好地保证索节点的安装精度。

6.1.4 索节点及永久保留工装锚点的涂装应符合国家现行标准《钢结构工程施工规范》GB 50755 的有关规定。永久保留的工装锚点涂装要求应不低于所在主体结构构件。在运输、存放以及安装过程中应做好成品保护。

6.2 螺杆连接节点

6.2.1 螺杆连接节点中的普通螺纹应符合国家现行标准《普通螺纹 基本牙型》GB/T 192、《普通螺纹 直径与螺距系列》GB/T 193、《普通螺纹 基本尺寸》GB/T 196 和《普通螺纹 公差》GB/T 197 的规定。

6.2.2 梯形螺纹应符合国家现行标准《梯形螺纹 第1部分：牙型》GB/T 5796.1、《梯形螺纹 第2部分：直径与螺距系列》GB/T 5796.2、《梯形螺纹 第3部分：基本尺寸》GB/T 5796.3 和《梯形螺纹 第4部分：公差》GB/T 5796.2 的规定。

6.2.3 螺母安装应紧固牢靠，外露丝扣不应少于两扣；索与索用螺杆套筒连接时应确保螺杆拧入套筒内的螺纹长度不小于螺杆公称直径的 1.0 倍。

条文说明：在索-索螺杆套筒连接中，螺杆拧入套筒的长度不可见，是检查的重点，并确保拧入套筒的螺纹长度不小于 1.0 倍的螺杆公称直径。

6.2.4 通过螺母承压传力的拉索节点的局部承压面钢板表面应平整、清洁，不应有飞边、毛刺、焊接飞溅物、焊疤污垢等。

6.2.5 预埋式螺杆连接节点安装过程中，螺杆的位置及尺寸允许偏差应符合国家现行标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 地脚螺栓的规定。

6.2.6 结构张拉完成后，应做好螺杆连接节点的防腐、防火等防护措施。对于旋入锚具内的螺牙，可通过抹防锈油等方式对螺牙进行防锈处理，张拉完成后应对间隙处密封；对于外露螺牙、螺杆等，应与结构整体一起做后续的防腐、防火处理。

条文说明：螺杆连接的螺纹是连接的重要和敏感部位，应做好防护措施，防止螺纹损伤。

6.2.7 螺杆连接节点的张拉工装方向应与螺杆连接节点方向一致，不应偏心受力。

6.3 销轴耳板节点

6.3.1 耳板的销孔应采用机加工钻孔，且主板和贴板应整体钻孔。

6.3.2 当销轴和销孔的表面要求机加工时，其质量要求应符合相应的机械零件加工标准的规定。当销轴直径大于 120mm 时，宜采用锻造加工工艺制作。

6.3.3 耳板表面的涂装应不低于主体结构构件表面涂装的要求。

6.3.4 销轴应进行无损探伤，超声波探伤应达到国家现行标准《锻轧钢棒超声波检验方法》GB/T 4162 的 B 级合格；磁粉探伤应达到国家现行标准《重型机械通用技术条件 第 15 部分：锻钢件无损探伤》GB/T 37400.15 的 2 级合格。

6.3.5 耳板和销轴制作允许偏差应符合表 6.3.5-1 规定。

表 6.3.5-1 耳板和销轴制作允许偏差

构件	项目	允许偏差
耳板	耳板的宽度和长度	±1.0mm
	加工边直线度	l/3000，且不大于 2.0mm

	相邻两加工边夹角	30'
	平面平行度	0.5mm
	加工面垂直度	0.025t, 且不大于 0.5mm
	加工面表面粗糙度 Ra	50 μ m
	销孔直径	0.0mm ~ 1.0mm
	销孔圆度	2.0mm
	销孔垂直度	0.03t, 且不大于 2.0mm
	销轴孔壁表面粗糙度 Ra	25 μ m
销轴	销轴直径	-0.25mm ~ 0.00mm

注：表中 l 为板边长度， t 为板厚度。

6.3.6 耳板式节点安装精度应符合以下规定：

- 1 耳板销孔中心至结构节点中心的连线与拉索轴线的角度偏差小于 0.5° ，且销孔中心与拉索轴线的垂直距离偏差小于 10mm；
- 2 当拉索长度可调时，耳板销孔中心与结构节点中心的距离偏差小于 5mm，拉索两端耳板中心的直线距离偏差小于 30mm；
- 3 采用双耳板时，双耳板的同轴度偏差应小于 0.5mm。

条文说明：当拉索长度不可调时，应根据拉索长度允许偏差，在保证索力达到允许偏差的前提下，采用误差影响分析来确定合理的耳板销孔中心位置允许偏差，必要时可提高拉索长度的精度要求，或采取措施调节耳板连接件长度。

6.4 索夹节点

6.4.1 索夹孔道接触面应涂覆锌层，严禁油漆涂装和油污。当索夹与索体表面钢丝直接接触时，锌层厚度宜不宜小于 0.5mm，且不宜大于 1.0mm。

条文说明：锌层硬度较钢材低，有利于防止索夹损伤索体表面钢丝的镀层，且防止电化学腐蚀。油漆涂装和油污等会严重降低索体和索夹之间的摩擦系数，进而降低索夹抗滑移承载力。

涂覆锌层可采用热喷锌和冷喷锌。当采用冷喷锌时，宜进行刷涂。鉴于冷喷锌近年开始应用于索夹孔道，工程经验尚少，工程实施前应制定刷涂工艺标准，且进行索夹抗滑移承载力试验。

6.4.2 索夹孔道允许偏差宜符合表 6.4.2-1 的规定。

表 6.4.2-1 索夹孔道允许偏差

项 目	允许偏差
孔直径	0mm~2mm
孔中心与索夹节点中心间距	±1mm
孔道中心圆弧两端切线夹角	±15'
索孔道表面粗糙度	≤50μm
索夹孔道倒圆角	≥10mm

6.4.3 索夹在安装前应完成涂装，预紧高强度螺栓后可对局部进行补充涂装。

6.4.4 索夹出厂后，在运输、存放和安装过程中应做好成品保护。

6.4.5 在索体展开且无扭转的情况下，应按照索体表面标记安装索夹，且应将配对制孔的索夹主体和压板进行配对组装。索夹安装位置允许偏差不大于±5mm；当索夹夹持并联的2根及以上索体时，同一索夹在各索体上安装位置相对偏差尚应不大于±3mm。

条文说明：当索夹夹持多根并联的索体时，同一索夹在各并联索上安装位置的相对偏差对并联索的应力均匀性会产生明显的不利影响，因此对该相对偏差提出更高的要求。

6.4.6 索夹高强度螺栓的预紧力应符合设计要求或根据索夹抗滑移试验确定。

6.4.7 高强度螺栓可采用扭力扳手或千斤顶施加预紧力，应对扭力扳手或千斤顶进行标定。当采用扭力扳手对高强度螺栓施加预紧力时，应通过试验测定高强度螺栓的扭力系数。扭力系数试验的高强度螺栓与索夹应配套，且高强度螺栓、螺母和螺孔的材质、规格、工艺、涂装、螺牙旋合长度应与工程件一致。

条文说明：索夹的高强度螺栓与同于常规钢结构连接的高强度螺栓存在较大的差异，因此不能将两者的扭力系数等同看待。对扭力系数大的大直径高强度螺栓宜采用千斤顶施加预紧力，且应对千斤顶进行标定，此时无需测定扭力系数。

6.4.8 索夹高强度螺栓群的施拧顺序应按照从内向外、对称、分级循环的原则。初次拧紧的遍数宜不少于4遍，二次拧紧的遍数宜不少于2遍。

条文说明：一般情况下，索夹的高强度螺栓是逐个施拧的，先后顺序对螺栓预紧力影响很大，因此应分级循环多遍进行施拧。

6.4.9 高强度螺栓预紧完成后，索夹主体和压板之间应留有间隙，保证主体和压板之间无接触。

条文说明：要求高强度螺栓预紧后主体和压板之间无接触，是为了保证高强度螺栓的紧固力全部有效地作用在索体上。

6.4.10 索夹节点在高强度螺栓拧紧后应做除油处理，并进行防腐涂装。

5.3.6 索夹抗滑移承载力试验应符合下列规定：

- 1 索夹和索体材料、索孔道和索体表面处理、索夹制作加工和关键构造尺寸，应与实际工程一致；
- 2 同类型、同规格的索夹孔道，试验数量不应少于 3 个；
- 3 当多个索夹在同一根索体上进行抗滑移试验时，各索夹夹持段的净距不宜小于 3 倍索体直径；
- 4 安装索夹和预紧高强度螺栓、张拉拉索、顶推加载的试验流程，应与实际工程一致；
- 5 在加载顶推索夹之前应对拉索进行持载，待高强度螺栓紧固力衰减稳定后加载顶推索夹；
- 6 试验过程中宜跟踪监测高强度螺栓的紧固力，加载顶推索夹时应同步监测顶推力和索夹相对索体的滑移量；
- 7 顶推索夹的加载位置应符合结构中索夹实际受力情况；
- 8 索夹抗滑移极限承载力应通过顶推过程的荷载-位移曲线确定。当索夹的主体和压板的滑移量都迅速增加，且顶推力难以继续增加时，对应的顶推力可确定为索夹抗滑移极限承载力；
- 9 在正常试验条件下，索夹抗滑移承载力试验代表值宜取同批次的索孔道抗滑移极限承载力最小值；
- 10 索夹抗滑移承载力试验代表值不应低于索夹两侧拉索内力差值的 1.5 倍。

条文说明：在预紧高强度螺栓后张拉拉索会引起索体直径变小，这是导致高强度螺栓紧固力衰减的主要因素之一。实际工程中，既有可能先预紧索夹的高强度螺栓再张拉拉索（此时试验中的拉索预张力为 0），然后张拉达到使用工况下的设计索力；也有可能是在拉索张拉后预紧索夹的高强度螺栓（此时试验中的拉索预张力为施工方案中的拉索张拉力），再次张拉至设计索力。所以本条强调安装索夹和预紧高强度螺栓、张拉拉索、顶推加载的试验流程，应与实际工程一致。

钢丝绳体受横向挤压后会发生蠕变，这也是引起高强度螺栓紧固力衰减的主要因素之一。根据以往试验结果，蠕变持续时间较长，在早期发展速度快，后逐渐减缓。因此，张拉拉索后应进行持载，以充分可考虑蠕变的时间效应，待高强度螺栓紧固力衰减稳定后加载顶推索

夹。

加载顶推索夹应缓慢分级，直至沿索体明显滑动。图 6.4.10-1 为典型的索夹顶推荷载-位移曲线，可见当顶推力直接作用在索夹主体上时，主体先发生较小的滑动；当压板随主体一起滑动时位移迅速增加，此时对应的顶推力为该索夹的抗滑移极限承载力。

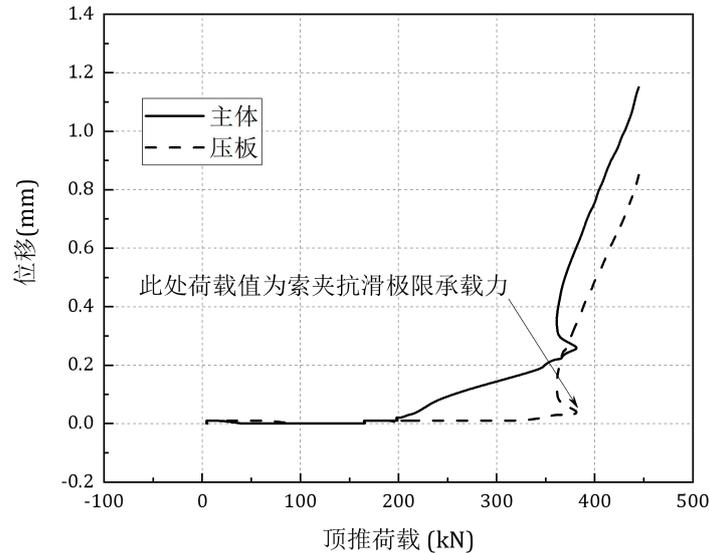


图 6.4.10-1 典型的索夹顶推荷载-位移曲线

6.5 可滑动节点

6.5.1 可滑动节点在安装前应完成涂装，并保持索槽清洁；对钢丝外露的裸索，应在索槽与索体接触面涂覆锌层。锌层厚度不宜小于 0.5 mm，且不宜大于 1.0mm；索槽与索体接触面表面严禁油漆涂装和油污。

6.5.2 可滑动节点在施工过程中，应保证拉索与节点摩擦阻力满足设计要求。

条文说明：拉索与节点摩擦阻力满足设计要求，不应有较大的预应力损失。对于仅施工过程中要求可滑动的节点，待施工张拉成形后应通过索夹对拉索进行固定。当拉索需要通过节点改变方向以便锚固时，可采用带有符合拉索弯曲形状的索鞍式可滑动节点，并应采取构造措施控制拉索与索鞍式可滑动节点中索槽的滑动与固定。

7 索结构安装

7.1 一般规定

7.1.1 刚性子结构、周边支承结构和边缘构件的制作和安装应按照结构零应力状态的位形放样加工和安装。

条文说明：索结构工程项目中结构状态分为零应力状态、初始预应力态和荷载态，刚性子结构、周边支承结构和边缘构件的加工和安装应按零应力状态进行，才能保证结构施加完成后的初始预应力态与设计一致。

7.1.2 刚性子结构制作和安装精度除了应符合国家现行规范标准的要求之外，重要节点的制作和安装精度应满足拉索施工精度控制要求。

7.1.3 刚性子结构安装前，应根据定位轴线和标高基准点对支承结构或边缘构件的支座、预埋锚栓等连接件的平面位置和标高进行复核和验收。连接件的施工偏差应符合国家现行标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 的规定。

7.1.4 拉索安装前，应对刚性子结构、支承结构或边缘构件上用于拉索锚固的锚板、锚栓、孔道、销孔的空间坐标、几何尺寸及空间倾角等进行检查并留存检查资料，检查合格后方可进行拉索安装。

条文说明：建筑索结构最终施工完成后的精度与拉索锚固端点的定位精度关系大，尤其是对定长索；因此，在施工之前应对与拉索连接的节点进行检查，符合现行相关规范标准及设计要求后方可进入下一步拉索施工工序。

7.1.5 索结构和支撑胎架的安装方法和顺序及节点连接条件和边界约束条件应严格与施工方案和施工过程分析相一致。

条文说明：索结构的安装过程中支撑胎架形式、位置、构件安装顺序、拉索张拉顺序及相应的节点连接条件和边界约束条件不能随意调整，否则可能造成仿真计算的理论值与实际值偏差较大。

7.1.6 索结构安装前，施工用的临时支撑胎架、操作平台、临时锚固点等的施工质量按照相应国家现行标准和既定施工方案进行检查，检查合格后方可进行下一步施工。

条文说明：施工临时措施对保证施工质量、施工过程安全至关重要，在索施工前对关键施工措施应按照施工方案进行检查，确保实际施工与施工方案一致，保证施工过程安全。

7.1.7 索结构施工时，缆风绳和临时下拉索的锚固应安全可靠。采用地锚时，应符合国家现行标准《建筑施工起重吊装安全技术规范》JGJ 276 的规定。

条文说明：索结构施工中，斜拉结构桅杆的临时固定、较高的临时支撑胎架等均用到缆风，缆风的锚固至关重要。锚固点宜尽量选择在结构基础上，以避免对地面的专门处理。应对锚固点的节点连接、地基基础等进行验算，确保锚固安全。

7.1.8 施工操作平台验算的均布荷载应不小于 2.0kN/m^2 ，同时兼作临时设备、结构构件安装放置平台时的荷载应按照实际承载重量取值。

条文说明：施工操作平台宜仅供施工操作人员安装张拉索时使用。有时为方便索的安装施工，操作平台上同时作为施工张拉千斤顶、锚具、铸钢件等的安装搁置平台，此时，荷载应按照所承载物体的实际重量取值。

7.1.9 施工操作平台与主体结构的连接应安全可靠且便于安装、拆卸。

条文说明：拉索施工平台的设计应便于施工人员安装操作使用。操作平台虽然为拉索施工辅助临时结构，但一般位于高空，其安全性至关重要；应根据主体结构形式、安装施工操作的便捷性等进行专门设计，并应便于安装及拆除。

7.1.10 当刚性屋面系统安装会使柔性索结构发生影响屋面正常安装和使用的大变形时，应在结构张拉完成后采取措施控制屋面系统安装过程中的结构变形量。

条文说明：实际工程中柔性索结构有不少采用刚性重型屋面（如刚性金属屋面和采光顶），屋面系统构造难以适应屋面安装过程中的结构大变形，导致较大的附加应力，存在拼缝开裂隐患，因此需在结构张拉成形后采取措施控制屋面安装过程中的位形变化量，如预先吊挂配重或下拉工装索，在屋面安装过程中逐步卸载的方法。

7.2 刚性子结构安装

7.2.1 刚性子结构安装除应符合本标准规定之外，尚应符合国家现行标准《钢结构工程施工规

范》GB 50755 和《空间网格结构技术规程》JGJ 7 的规定。

7.2.2 重要结构或部位的刚性子结构在正式安装前，宜进行整体或相邻单元间的预拼装。

条文说明：预拼装可采用实体预拼装和数字化预拼装方法。当结构较简单或确有把握时可不进行试拼装。

7.2.3 刚性子结构安装所需的临时支撑胎架、缆风绳等临时措施及吊机作业等应与拉索存放、运输、铺展、提升和张拉施工协调空间位置，避免阻碍和触碰拉索。临时支撑胎架、缆风绳等构件的空间位置与施工中拉索及其节点的周侧净距离应满足拉索施工作业的空间要求，拉索铺展和牵引提升过程中净距离宜不小于 0.5m，拉索张拉过程中净距离宜不小于 0.3m。

条文说明：一般情况下，拉索施工在刚性子结构及其临时胎架和缆风绳流水安装过程中或之后进行，空间位置的复杂性给拉索安装带来一定难度。因此，从施工流程、临时胎架和缆风绳的形式和位置等方面应为拉索施工预留空间位置和通道。为预留拉索低空铺展和空中提升的通道，临时支撑胎架可采用型钢柱加牛腿、开洞脚手架或双胎架抬撑的方法。

7.2.4 刚性子结构和拉索施工过程中，临时支撑胎架和缆风绳等措施的安装、卸载和拆除的时机、方法和流程等应符合施工方案。当在施工过程中需要进行调整时，应保证调整过程中结构的稳定性和安全性，必要时采取附加措施。

条文说明：实际工程中，常因前期考虑不周而导致在安装过程中不得不变动临时支撑胎架的情况，此时应根据现场实际情况先对临时支撑胎架现状、拆改过程等进行详细过程受力分析，必要时采取加强措施后再进行变动，确保施工过程安全。

7.2.5 用于刚性子结构安装的临时支撑胎架尚应符合以下规定：

- 1 应进行强度、构件稳定性和整体稳定性的验算。高宽比值较大时，尚应进行抗倾覆验算，必要时增设缆风绳、斜撑等稳定措施；
- 2 当设置在地面上时，地面应夯实并铺设钢板、型钢、路基箱或浇筑混凝土；
- 3 当设置在下部结构上时，应对下部结构进行验算，必要时可在临时支撑胎架下增设分配梁将载荷传递至下部结构的大承载力构件上，或下部结构进行加固；
- 4 顶部应考虑调整标高的措施，及与刚性子结构连接和脱离的措施。对于预应力张拉作用不足以使刚性子结构与胎架脱离的情况，尚应考虑拉索张拉后胎架卸载的措施；
- 5 主传力构件之间的连接应紧密，传力面应平整贴合，尽量减少载荷作用下的非弹性变形；

6 对于重荷载、地基条件复杂或缺乏经验时，可对临时支撑架进行试压，以检验胎架的承载力、刚度、压缩量及其地基的承载力和沉降位移等，并根据实测值对胎架顶标高予以调整。

条文说明：胎架顶标高受到顶压荷载、架体压缩、底部分配梁下挠及下部支承结构变形或地基沉降的综合影响，其中包含了胎架系统中构配件连接的非弹性变形。工程中，周转使用的胎架多采用标准节通过法兰盘连接，构配件连接的非弹性变形应予以关注。

7.2.6 采用高空散装法安装刚性子结构，应在整体或局部稳定单元拼装完成后张拉拉索。

条文说明：高空散装法适用于刚性索结构体系，搭设临时支撑，吊装单元直接在设计零应力状态位置拼装。刚性子结构之间的交叉稳定索，通常也采用散装法。

7.2.7 采用整榀吊装法安装刚性子结构应符合以下规定：

- 1 索杆系宜随刚性子结构一并吊装；
- 2 整榀刚性索结构在吊装前应进行拉索张拉，且根据吊装就位目标确定低空张拉的主控对象及张拉力值；
- 3 当整体结构安装就位后结构预应力形态与设计成形状态存在明显差异时，应后续进行二次张拉；
- 4 整榀吊装前应合理布置吊点，吊点宜布置在拉索端部或支座端点附近；
- 5 低空张拉工况、空中吊装工况、高空就位工况和二次张拉工况应进行结构承载力和变形验算，空中吊装工况下的拉索宜不松弛；
- 6 应保证张拉、吊装和就位阶段的刚性子结构平面外稳定。

条文说明：整榀吊装法适用于廊内预应力钢桁架、张弦梁/桁架等单向传力的刚性索结构，整榀刚性子结构在临时胎架上拼装后进行拉索安装和张拉，然后整榀结构吊装就位，必要时后续进行拉索二次张拉。一般情况下，吊装前低空张拉控制原则为吊装松钩后、结构就位时结构跨向位移接近零，保证支座对中。整榀吊装法施工若需进行二次张拉，此时就位的结构应不少于2榀且结构体系稳定，或待整体结构就位后进行。

单榀结构在吊装工况和就位工况的平面外稳定性是关注的重点，必要时应采取加固、增设扁担梁、拉设缆风绳等稳定措施，或将两榀结构形成稳定单元进行整体吊装。

7.2.8 采用滑移法安装刚性子结构应符合国家现行标准《钢结构滑移施工技术标准》T/CSCS 009 的规定，且应符合以下规定：

- 1 索杆系宜随刚性子结构一并滑移。刚性子结构单元在临时支撑上完成拼装且形成稳定单元后，应进行拉索的安装和张拉，然后进行正式滑移；
- 2 在临时支撑上张拉拉索的控制，应保证在支座轨道上正式滑移时结构跨向位移接近零，保证支座对中；
- 3 当整体结构滑移就位后结构预应力形态与设计成形状态存在明显差异时，应后续进行二次张拉；
- 4 张拉工况和滑移工况应进行结构承载力和变形验算；
- 5 双向刚性索结构可采用滑架法施工，滑移前应先在胎架上拼装不少于两榀刚性子结构单元及跨向拉索，刚性子结构整体安装完成后分批、对称张拉拉索。

条文说明：滑移法施工利用牵引或顶推装置施加作用力，将刚性索结构整体或局部稳定单元沿预设轨道滑移到设计位置。滑移法施工可分为分区块滑移、累积滑移或滑架法，适用于能设置平行滑轨的刚性索结构，尤其适用于必须跨越施工或场地狭窄、起重运输不便等情况下的以单向传力为主的刚性索结构。跨越施工是指施工场地的地面上有阻碍，不允许直接搭设支撑胎架或行走起重机。

对于大跨度的刚性索结构，滑移施工宜设置平行的 2 条主滑轨和若干条次滑轨。主滑轨沿结构两端支座通长设置，次滑轨在跨内根据跨度大小设置若干条，其长度应满足拉索张拉前的滑移长度。滑移施工时宜在临时支撑上拼装完成不少于 2 榀刚性子结构单元且连接可靠，然后在张拉拉索后滑移出跨内次轨道，此后在主滑轨上滑移至设计位置。

当刚性索结构为双向或多向传力时，可采用滑架法施工。采用滑架法施工时，应先在胎架上拼不少于两榀刚性子结构单元及跨向拉索，滑移向拉索安装一端锚具，上部刚性子结构和跨向拉索随着胎架滑移，滑移向拉索展开并安装，反复进行上述操作，完成刚性子结构安装。

滑移法施工应考虑位移不同步作用。位移不同步的限值应根据结构跨度、刚度等综合考

考虑确定，计算分析时不宜小于 20mm；多条滑道时，应考虑不同滑道间的不同步作用组合。

7.2.9 采用提升法安装刚性子结构应符合国家现行标准《重型结构和设备整体提升技术规范》GB 51162 的规定，且应符合以下规定：

- 1 提升设备宜选用行程和提升力可控的穿心式液压千斤顶；
- 2 索杆系宜随刚性子结构一起提升，在提升前宜进行拉索张拉，其索力控制宜保证提升到位时与周边连接点的水平位移和竖向位移接近零；
- 3 当提升就位与周边连接后结构预应力形态与设计成形状态存在明显差异时，应后续进行二次张拉；
- 4 低空张拉工况、空中提升工况和高空就位工况应进行结构和提升措施的承载力和变形验算；
- 5 提升前应合理布置提升点，提升点宜布置在拉索端部或与周边连接点附近。

7.3 拉索铺展

7.3.1 拉索宜根据工程进度需要，在现场具备放索条件时分批或整批进场。

7.3.2 拉索可采用吊装、牵引或两者综合的方式进行铺展，应根据铺展场地、上方空间、拉索重量和长度等条件选择铺展方式。

条文说明：对于长拉索，当难以采用吊装的方式进行铺展时，可通过卷扬机或千斤顶等进行牵引铺展，并应做好牵引端的锚固工作。

7.3.3 在地面或看台上铺展拉索时，拉索的铺展位置宜根据施工过程分析结果确定，并根据场地状况对铺展位置进行调整，铺展路径应避开结构、临时支撑架、缆风绳等障碍物。

条文说明：近年来大型索结构在工程中应用的越来越多，如弦支穹顶、轮辐式结构、索穹顶等在施工中一般采用索体地面或低空铺展及高空胎架铺展两种方法。这些结构中索一般由径向索及环向索构成，索的体量较大，尤其是环索自重大、长度长，采用地面铺展组装再牵引提升的施工方式优势更为明显。地面或低空铺展牵引提升施工过程中，因结构形态变化很大，为减少初始牵引阶段索的水平运动对索体防护及支承胎架的影响，索的初始摆放位置应按照理论分析结果确定。对于大型体育场馆等，受场地内看台影响，存在着局部位置高差大的情况，此时常通过搭设临时平台的方式对索摆放高度进行调整。此外，场地内布置有上部结构

支撑时，确定牵引路径时要防止与结构支撑相碰。

7.3.4 拉索在高空支架上铺展前应确定合理的吊装和铺展路径，应结合下部结构、吊装空间、牵引路径等对拉索铺展胎架进行专项设计。

条文说明：拉索在高空支架上铺展时，因铺展位置与成形状态接近，具有安装牵引距离短，便于牵引安装等优势，但因拉索位于高空，且存在着已有结构的支撑架，具有空间位置关系复杂，一般不能上大型吊装设备，对索的吊装、牵引铺展等要求高等缺点。因此，拉索在高空支架上铺展时应对索的吊装路径、临时支撑架等进行专门设计。因结构支撑架与索支架可能存在着相互影响，应注意结构支撑架的安全性。

7.3.5 对于成圈盘绕的拉索，铺展时拉索应放置在索盘架上。开盘时应采取制动措施，防止崩盘。

条文说明：拉索较长时，一般通过直接圈成圈或通过绞盘圈成圈运输。因索盘绕产生的弯曲应变能和牵引产生的偏心力，索开盘时产生加速，导致弹开、散盘，可能造成崩盘或索体伤人等事故。开盘时可通过刹车制动装置等使开盘器缓慢转动，索体逐渐展开。

7.3.6 当采用牵引的方式在地面、看台或支架上铺展长拉索时，应沿牵引路径设置必要的带滚轴的吊点或支点。

7.4 拉索安装

7.4.1 拉索安装前应对索体、锚具及零配件的出厂报告、产品质量保证书、检验报告及品种、规格、色泽、数量进行验收。

7.4.2 应根据索结构形式和力学特性、索体和锚具形式、节点构造、牵引张拉机具、场地条件，并结合刚性子结构、支承结构和边缘构件的施工方案等综合确定拉索安装方法。拉索安装可采用吊装法、牵引提升法和溜索法等，在确保质量、安全和进度的前提下，应选择经济合理的安装方法。

条文说明：拉索安装方法对施工过程安全、施工质量、施工进度及经济性影响大，实际施工时根据具体情况而选用。

7.4.3 柔性索结构采用牵引提升法施工可分为提升阶段和张拉阶段。索杆系低空组装后通过外

端牵引被整体提升或累积提升至高空，最后通过张拉将拉索锚具与结构节点锚接就位。提升阶段应符合以下规定：

- 1 在牵引提升前，应进行空中牵引提升工况和高空张拉工况的仿真分析，确定各工况的结构形态、牵引力和张拉力，并验算支承结构的承载力和变形；
- 2 牵引提升施工前应对牵引路径、周边支承连接、机具设备等进行检查；
- 3 提升阶段先试提升至一定高度后悬停 12h 以上，检查确认无异常后正式提升至高空；
- 4 牵引提升过程应根据仿真分析结果进行控制，确保整体位形稳定，防止压杆出现难以逆转的翻转，必要时采取拉设工装索等临时措施，或调整牵引提升方案。

条文说明：柔性索结构常采用地面或低空组装，然后整体或累积牵引提升至高空张拉成形的施工方法。提升法优选整体或整榀索杆系提升，也可牵引提升单根拉索或将索系分区片单元提升后高空对接。从低空到高空的提升过程中，可采用累积提升。

柔性索结构在预应力作用下才具有刚度。牵引提升阶段索杆系处于低应力状态，且位形与设计成形状态差异大，压杆顶端的拉索可能处于悬垂松弛状态，约束压杆的能力大大降低。随后续牵引提升和张拉，压杆会逐渐达到设计成形状态，但压杆也有可能可能会出现难以逆转的翻转，此时应采取临时措施增强索杆系位形的稳定性，或调整牵引提升方案。

相比张拉阶段，柔性索结构提升阶段对同步性要求可适当放宽。

7.4.4 拉索采用溜索法安装，应符合以下规定：

- 1 临时溜索可选用钢丝绳或钢绞线，应保证溜索与结构连接可靠；
- 2 溜索法施工的牵引设备可选用电动葫芦、卷扬机或液压千斤顶；
- 3 溜索法施工前应进行溜索施工过程分析，包括：牵引力、溜索的拉力计算及其承载力验算。牵引力和溜索拉力的计算应考虑溜索、拉索、索夹和卡具的重量及溜索的线形等，溜索承载力的安全系数应不低于 2.0；
- 4 根据拉索的重量，拉索与溜索可选择 U 形卡具直接连接或带有滚轴的卡具连接。

条文说明：溜索法在拉索设计位置附近安装临时溜索，拉索的索头和索体挂在溜索上，通过前端牵引使拉索沿溜索在高空铺展和安装，适用于难以在场地内低空铺展拉索的情况。

7.4.5 对于长度可调的被动张拉索，应在安装前根据仿真分析结果、索长制作误差和索端连接节点坐标误差等对索长进行调整。

条文说明：因工程施工中总存在施工误差，为减小误差对结构的影响，常在索端设置可调节量，通过调整索长以减少误差影响。对于以张拉力控制为主的主动索，则可直接安装，在张拉时调节索长。对于被动索，在安装前应根据索端节点坐标测量结果、拉索制作长度误差等预先调整索长。

7.4.6 对于一端张拉的拉索，安装拉索时宜先将其固定端与相应结构节点锚接就位。

条文说明：在拉索固定端与相应结构节点锚接就位后，以固定端为基点，依序将索夹、撑杆等与拉索连接，直至张拉端。

7.4.7 当马鞍形正交索网结构的承重索和稳定索分开安装时，宜先安装承重索，后安装稳定索。

7.4.8 在安装桅杆支承的斜拉索前，应对桅杆采取设置支撑或缆风绳、约束桅杆底部转动等临时措施，确保拉索安装过程中桅杆的稳定性。

条文说明：由于一般桅杆斜拉结构中的桅杆与底座铰接，应采取有效措施，确保索安装过程中桅杆处于稳定状态。

7.4.9 钢拉杆吊装前应对杆体进行吊装验算，选择合适的吊点或设置吊装扁担梁进行吊装。钢拉杆安装时应防止压弯，避免产生永久性变形。

条文说明：因钢拉杆具有抗弯刚度，且其运输方式与拉索不同，一般为散件运输，因此在吊装前应进行验算。对刚度较大的钢拉杆可直接吊装，但应选取合适的吊点；对直径较小长度较大的钢拉杆，因其抗弯刚度小，不宜直接吊装，宜采取辅助措施进行吊装。

安装阶段因拉杆轴向拉力尚未建立，在外力作用下很容易产生塑性变形，安装时应特别注意，防止承受压力或平面外作用，避免产生永久性变形。

7.4.10 可使用液压千斤顶、卷扬机、倒链等对拉索进行牵引及临时固定。当牵引力较大时，可采取在拉索中部设置临时吊点等措施减少牵引力。

条文说明：工程中当索体长度长、重量大，尤其较接近水平布置时，索的牵引力往往较大。为减小牵引力，可在索体中间增加临时提升点。

7.4.11 通过螺母承压传力的拉索在安装时应对螺母位置进行限位，使螺母形心与承压构件形心对正。

条文说明：锚具采用螺杆通过螺母承压连接时，为施工安装方便，锚固点锚具孔道与螺杆之间一般有较大间隙，安装时如不加限位可能导致拉索作用形心与理论作用点有较大的偏差。

7.4.12 将拉索锚具与结构节点临时连接，完成拉索安装时，锚具调节装置的螺牙旋合长度不宜小于 1.0 倍螺杆直径。

条文说明：对于可调节索，往往将拉索锚具调长后与结构节点临时连接。为确保临时连接可靠，对调节装置的螺牙旋合长度提出了具体要求。

7.5 拉索存放和成品保护

7.5.1 索结构施工前应根据现场施工环境和材料特征，规划分类存放的仓库和场地。

7.5.2 拉索存放时应防火、防雨和防浸泡。现场存放点宜设在放索点附近，避免二次倒运对拉索造成损伤。

7.5.3 盘圈索应水平堆放，重叠堆放时应逐层加设垫木，并应预防锚具压伤拉索护层和涂层。

7.5.4 拉索场内运输应注意运输路线，防止拉索与周边物体磕碰。

7.5.5 盘圈拉索在场内吊装时应采用编织吊带并采用平放三点式进行吊装，带绞盘运输的拉索应用编织吊带固定绞盘轴进行吊装，散放运输拉索应用编织吊带固定锚具后吊装，严禁直接用钢丝绳捆绑索体表面，展开后的索体吊点不宜少于两点。

条文说明：盘圈拉索展开后，多吊点可避免索弯曲角度过大而导致的跳丝、散股等不利情况；如采用单吊点时应使用专门的吊装夹具。

7.5.6 吊装过程中应轻吊轻放，避免锚具压损拉索护层和涂层。

7.5.7 拉索铺展前，应根据现场实际情况设置合理的拉索保护措施与成品保护措施。拉索在地面铺展时，铺展场地应平整、压实且无积水，沿铺展场地应布置临时防护装置。拉索展开时应防止索体扭绞，并做好索体、锚具防护工作。拉索在成品结构上铺展时应做好成品结构的防护。

条文说明：索体展开时，应防止索体扭绞，且应同时沿索体展开方向在地面或看台上铺展木方，设置滚轮、支架等，防止索体直接在硬地面或看台上拖行而造成索体损伤。

7.5.8 拉索安装过程中，应注意保护已做好防锈、防火涂层的构件，避免涂层损坏。若构件涂层和拉索护层被损坏，必须及时修补或采取措施保护。

7.5.9 拉索安装过程中，应防止雨水进入锚具内；带 PE 护套拉索还应防止雨水进入索体内。

条文说明：应特别注意保护拉索护套与锚具连接部位的密封性，防止雨水、潮气等的进入。

7.5.10 钢结构焊接时，严禁在拉索上进行引弧。

条文说明：焊条在索体上引弧会对钢丝造成损伤，严重情况会造成断丝。

7.5.11 钢构焊接、切割等施工作业应避免在拉索的周边和上方进行，作业点应与拉索保持一定距离，或采取挂接火斗、盖石棉或防火布等措施防止落物、动火等可能对拉索造成损伤的风险。

7.5.12 锚具和裸索索体表面的镀层和涂层、半平行钢丝束索的 PE 护套等出现局部划伤时应及时修复。

条文说明：拉索施工过程中锚具、裸索索体表面镀层等出现索体局部划伤时可将划伤表面清理干净后，再喷涂 CRC 冷镀锌漆或喷涂环氧富锌油漆等。

8 预应力建立及调整

8.1 一般规定

8.1.1 刚性索结构的拉索张拉应在相应的刚性子结构施工验收合格后进行，柔性索结构的张拉应在周边支承结构和边缘构件施工验收合格后进行。

条文说明：单向传力的刚性索结构工程实践中，为节省工期，普遍存在流水进行刚性子结构安装、拉索安装和张拉，待刚性子结构整体施工验收后进行拉索张拉显然不现实，因此应根据刚性子结构安装与拉索张拉的流水施工步骤，对刚性子结构进行分单元验收。

一般情况下，柔性索结构的周边支承结构和边缘构件在拉索牵引提升前整体施工完成。

鉴于柔性索结构对支承结构的作用力，在牵引提升阶段小，在张拉阶段显著增大，因此允许拉索牵引提升在支承结构验收前进行，但拉索张拉必须在支承结构施工验收后进行。

须注意的是，无论刚性索结构，还是柔性索结构，拉索安装前应符合 7.1.4 条的规定。

8.1.2 预应力张拉前应做好充分的准备和检查，并应符合以下规定：

1 根据结构安装整体方案和拉索施工专项方案，应进行施工过程分析，掌握施工过程的结构特性和状态，为拉索施工提供张拉力等参数，为监测提供理论参考值，确保施工安全；

2 构件的几何关系及连接条件、支座约束条件、施工措施、作用等应与计算分析一致；

3 已拼装完成刚性子结构中的焊缝探伤和高强度螺栓检验报告资料应齐全，质量应达到设计要求；

4 在保证结构安全的前提下，应将阻碍张拉变形的非结构构件与结构脱离，释放非结构性约束；

5 拉索张拉人员应进行岗前培训和技术交底；

6 张拉工装设备应进行检验、校核并调试，并根据标定记录和张拉力，计算出相应的操作值；

7 应严格检查临时通道、作业平台以及安全维护设施是否到位；

8 应清理场地，禁止无关人员进入；

9 在一切准备工作做完之后，且经过系统的、全面的检查无误后，应由现场总指挥检

查并发令后，才能正式进行预应力索张拉作业。

条文说明：拉索张拉时结构和临时支撑胎架的连接条件及支座约束条件应符合张拉过程仿真分析的力学模型条件。一般情况下，在胎架上拼装刚性子结构后拉索张拉会使刚性子结构上挠而脱离临时支撑胎架，因此拉索张拉时临时支撑胎架与刚性子结构的连接方式应不阻碍结构张拉变形。

8.1.3 拉索张拉应根据结构特性并结合施工方案和施工过程分析计算结果，合理选择“力”控和“形”控的内容，确定控制目标值及主控对象，并应符合以下规定：

- 1 拉索张拉控制目标值的计算分析应采用作用的标准值或平均值；
- 2 分步分级的张拉过程宜以位形控制为主，以索力控制为辅；
- 3 最后步级的拉索张拉宜以索力控制为主，以位形控制为辅；
- 4 对于受张拉力影响位形变化敏感的结构，拉索张拉应以位形控制为主，以索力控制为辅。

条文说明：拉索张拉控制内容分为“力”和“形”两部分，“力”包含索力、钢构内力、支座反力等，“形”包含跨中竖向位移、支座水平位移、构件空间姿态等。

8.1.4 索结构张拉成形后应进行结构分项验收，验收合格后方可进行屋面系统和吊挂次结构的安装。屋面系统和吊挂次结构应采用合理的节点构造和构配件，待结构张拉成形后依据实测值，按照设计目标进行调整安装。

条文说明：一般索结构设计中，屋面系统和吊挂次结构以荷载的方式作用在结构上，因此拉索张拉引起的预应力应分布在结构上，避免影响次结构。相对传统刚性结构，索结构张拉变形较大，特别是柔性索结构张拉后的位形受多种因素的影响。

8.2 预应力建立

8.2.1 索结构可通过主动张拉拉索、顶撑压杆、重型屋面持载、临时下拉配载等方式在结构中建立预应力。

条文说明：主动张拉拉索，是通过张拉设备对拉索施加拉力而在结构中建立预应力，是索结构建立预应力的主要方式。顶撑压杆，是通过顶撑使压杆两端节点撑开并对索系施加集中力，

拉索被动拉伸而建立预应力。重型屋面持载一般用于悬索结构，是在低应力状态下安装悬索后安装重型屋面，在重力作用下悬索下挠至设计位形并建立预应力。临时下拉配载，是在结构安装过程中通过工装索或配载对部分结构施加下拉力，产生预变形和预应力，待其余结构安装后释放工装索或卸除配载，预应力在整体结构中重新分配。

8.2.2 对于共节点的多根拉索可采用被动张拉方法，并应符合以下规定：

- 1 节点构造及其与该节点连接的非索构件应保证主动索系的张拉力能自由、有效地传递至被动索系；
- 2 根据节点的力平衡关系，被动索系宜具有唯一的预应力分布模态；
- 3 应控制被动索的索长和外联节点坐标偏差，以保证被动索索力和共用节点位置的准确性。

条文说明：拉索被动张拉方法，是指主动张拉部分拉索（主动索），而其他拉索（被动索）被动建立预应力，

8.2.3 拉索张拉批次和顺序应根据结构特点和结构总体施工方案合理确定，并应符合以下规定：

- 1 当拉索数量较多或结构总体施工方案需要时，可采用分批张拉。
- 2 当能满足施工过程中结构安全性和各阶段控制指标时，可采用一次张拉，即各根索仅张拉一次。
- 3 分批次张拉应考虑先后批次张拉的相互影响，通过张拉过程分析确定各批次各索的张拉力理论值，保证分批张拉完成后各索力都达到目标值。
- 4 多次张拉中，各次张拉可根据结构特点和所处施工阶段需要采用不同的主控对象及控制目标值。

条文说明：根据张拉批次，拉索张拉方法可分为整批一次张拉、整批多次张拉、分批一次张拉、分批多次张拉。当拉索数量较多，为减少张拉设备和人员投入量，可采用分批张拉。另外，有些结构总体施工过程也需要分批张拉，例如：大跨张弦桁架屋盖沿纵向累积滑移过程为拼装连接一榀桁架，张拉一榀拉索，累积滑移一个纵向柱距，其中一榀拉索为一张拉批次。

与多次循环张拉相比，一次张拉具有明显的高效率，因此现工程实践中以一次张拉为主。

但对于重型屋面的建筑索结构，拉索预应力用以平衡屋盖恒载（含结构和屋面自重），由于拉

索张拉时无屋面，一次张拉可能会引起结构过大的上挠和应力，导致结构出现安全性问题。另外，结构施工的各阶段可能存在不同的预应力控制目标，而一次张拉无法满足各阶段需求时则应采用多次张拉。

8.2.4 拉索采用一端张拉或两端张拉应根据索杆布置形式和拉索内预应力传递特点进行选择，并符合以下规定：

- 1 当整根拉索仅通过锚具与相邻构件连接时，可采用一端张拉；
- 2 当拉索的索体与相邻构件连接，若该相邻构件及其节点不影响整根拉索内各段索力的自由传递，可采用一端张拉；否则，应采用两端张拉；
- 3 对于大跨和超大跨的张弦索结构，为便于控制撑杆的空间姿态，宜采用两端张拉；
- 4 两端张拉可采用两端同步张拉，也可采用一端张拉后另一端补拉的方式；
- 5 拉索的张拉点位应考虑施工的便利性。

条文说明：根据拉索主动张拉点的数量，拉索张拉可分为一端张拉和两端张拉。如桅杆斜拉网格结构和弦支穹顶结构中的斜索，整根拉索仅通过锚具与相邻构件连接，可采用一端张拉。如张弦梁/桁架结构中的下弦索，其上的撑杆能随拉索张拉方向自由摆动，可采用一端张拉。但是对于大跨和超大跨的张弦结构，由于索端距离偏差大且拉索张拉延伸量大，端部的短撑杆垂直度不易控制，宜采用两端张拉。

8.2.5 当同批次张拉存在多个张拉点时，为保证各张拉点的同步性，应进行分级张拉，并符合以下规定：

- 1 对于重要的结构拉索且同批次张拉的索力相互影响较大时，张拉级数应不少于 5 级；
- 2 对于多次张拉中的后续次张拉，当新增索力较小时，基于分级级差不大于前次张拉的原则，可适当减小本次张拉级数；
- 3 张拉分级的级差可采用均匀分级或前级差大后级差小的方式。

条文说明：同批次进行分级张拉，是降低同批次内索力相互干扰的重要措施。对于多次张拉，一般情况下首次张拉的索力较大，而后续次张拉的新增索力较小，因此可根据首次张拉的级差来确定合理的后续次张拉的级数。

8.2.6 采用可调索或定长索应根据结构特点及拉索制作精度和现场安装精度的控制能力进行选择，并符合以下规定：

1 当索长或安装位形的误差对结构性能影响大，且施工单位对拉索制作精度或现场安装精度控制能力一般时，宜采用可调索；

2 当采用定长索时，在保证验收标准的前提下，应基于充分误差影响分析的基础上确定合理的索长、安装位形等误差控制指标，并制定专门的精度控制方案，严格落实。必要时可对索端连接节点采取调节措施。

条文说明：根据在施工现场时拉索长度是否可调，可将拉索分为定长索和可调索。相比可调索，定长索施工对相关单位的施工分析、加工制作、现场安装等提出了更高的精细化标准和误差控制要求。国内已有多个定长索应用的大型工程案例，实施效果良好，体现了较高水平。为促进建筑索结构向更高精度和更美观性方向发展，定长索是可建议的方案。

8.2.7 拉索张拉完成后，应在锚具的调节螺杆、端盖和连接筒口等部位涂防腐密封胶，锚具其余部分可与主体钢结构一致，按设计要求进行防腐处理。

8.2.8 分批张拉过程中，每批次张拉后该批次拉索索力允许偏差不宜大于计算理论值的 5%。

8.2.9 结构张拉成形后，关键控制点位的索力允许偏差不宜大于计算理论值的 10%，拱度及垂度允许偏差不宜大于跨度的 1/1000。

条文说明：拉索张拉前，施工单位应会同设计等相关单位根据结构力学性能、施工方案和监测方案合理确定索力、拱度及垂度的关键控制点位和计算理论值，并作为施工验收的依据。

对于悬挑结构，跨度取悬挑长度的 2 倍。

8.3 预应力调整

8.3.1 预应力调整时，应保证锚具与结构节点有效连接。

8.3.2 对于重要的索结构，考虑使用期间索力调整或换索的需要，焊接固定在结构上的张拉工装锚点宜永久保留。

8.3.3 局部预应力调整前，应评估相邻区域结构甚至整体结构，以及围护结构受到的影响。

8.3.4 刚性子结构或支承结构的安装偏差不应通过预应力调整来纠正。

条文说明：预应力调整纠偏会在结构中产生附加应力，导致最终成形时的结构应力状态偏离设计目标，不利于结构安全性。

8.3.5 当屋面、幕墙等围护结构安装后，不宜再调整预应力。

9 施工机具设备与计算机控制液压系统

9.1 一般规定

9.1.1 索结构施工机具和设备等使用应符合国家现行标准《钢结构工程施工规范》GB 50755 和《建筑机械使用安全技术规程》JGJ 33 的相关规定；

9.1.2 采用起重设备安装钢丝拉索时，拉索应处于松垂状态，起吊速度应平稳缓慢，单机荷载不应超过起重设备额定起重量的 80%。

条文说明：钢丝拉索没有抗弯刚度，采用起重设备安装时拉索容易对吊钩产生水平分力。若该水平分力作用在起重臂一侧，会使起重臂受到弯扭力，影响起重机的安全。为尽量减小该水平分力，吊装时拉索应处于松垂状态，且起吊速度应平稳缓慢。另规定“单机荷载不应超过起重设备额定起重量的 80%”，预留一定的安全范围。

9.1.3 卷扬机和液压千斤顶的技术条件应符合国家现行标准《建筑卷扬机》GB/T 1955 和《预应力用液压千斤顶》JG/T 321 的规定。

9.1.4 牵引、张拉用设备和仪表应满足作业要求且定期维护，正式使用前应进行校核、标定和调试。

9.1.5 计算机控制液压牵引张拉系统应由计算机控制中心实时对检测传感器采集的位移、油压信息进行显示、运算、分析，并对系统发送实时的动作指令，实现位置同步或载荷同步或位移载荷复合控制。

条文说明：计算机控制液压牵引张拉系统主要由计算机控制中心、液压泵站、液压千斤顶、工装系统和检测传感器等组成，其中检测传感器应包括位移和油压传感器，形成闭路控制系统，确保施工过程中索结构的关键响应与理论计算的一致性。

9.2 安装和张拉机具设备

9.2.1 拉索安装时与索体直接接触的吊索具应采用编织吊索，编织吊索的技术条件应符合现行标准《编织吊索 安全性》JB/T 8521 的规定。

条文说明：为保护结构索索体表面，严禁采用钢丝绳直接绑扎结构索。依据《编织吊索 安全性》JB/T 8521 的 5.13 条，吊装带的最小破断力应为 6 倍极限工作载荷。

9.2.2 当采用卷扬机牵引拉索，卷扬机应设置制动器，应单独设置锚固点并做好防止机座滑移和倾覆的措施，导向滑轮不得使用开口滑轮。钢丝绳的直径应根据卷扬机的额定功率和工作级别计算选用。

9.2.3 锚具就位时可采用两侧设置手拉葫芦校正锚具姿态。手拉葫芦的技术条件应符合国家现行标准《手拉葫芦》JB/T 7334 的相关规定。

9.2.4 手拉葫芦应根据起重能力选型，手拉葫芦的两端应可靠固定。

9.2.5 安装阶段刚性结构的动力系数宜按下列数值选用：穿心式液压千斤顶钢绞线提升取 1.2；塔式起重机、拔杆吊装取 1.3；履带式、汽车式起重机吊装取 1.4；卷扬机应根据起升速度按照国家现行标准《建筑卷扬机》GB/T 1955 选用。

条文说明：当牵引提升柔性索杆系时可不考虑动力效应。

9.2.6 工装钢绞线索应符合下列规定：

- 1 单束钢绞线中的左捻和右捻钢绞线根数应相等；
- 2 使用前应与液压千斤顶进行负载试验，并检查锚具的工作情况；
- 3 利用疏导板将工装钢绞线理顺，两端锚具间的钢绞线相互平行，不得穿插扭绞；
- 4 钢绞线穿入前锚具后，应对钢绞线进行预紧，使所有钢绞线共同参与工作，且受力均匀。

9.2.7 液压千斤顶系统应由液压千斤顶、液压泵站、油管及油压表组成，并符合以下规定：

- 1 液压千斤顶宜采用穿心式液压油缸，内置工装索承载，由主油缸及与工装索配套的前、后锚具三部分组成；
- 2 液压千斤顶与油压表应配套标定后配套使用，标定时千斤顶活塞的运动方向应与实际工作状态一致。标定有效期应小于半年，当设备出现不正常现象或检修后，应重新标定；
- 3 工作时液压千斤顶及油路管道里的液压油应无外泄漏；
- 4 当一台液压泵站同时控制多个穿心式液压油缸时，每个液压油缸宜单独有调速或关闭功能，且操作位置宜靠近液压油缸；
- 5 同一牵引张拉点的多台液压千斤顶应采用同一规格。

条文说明：液压千斤顶张拉索力时，前锚具作用、后锚具松弛。千斤顶空载回程时，后锚具作用、前锚具松弛。

9.2.8 索力需要减载的工况场合，宜采用前锚具与后锚具含液压油缸控制打开与关闭功能的液压张拉千斤顶。索力减载时，应先确保前锚具完全关闭、后锚具完全打开的状态下，操作穿心式液压油缸缩缸减载，或在穿心式液压油缸的无杆腔装外泄式平衡阀，通过调节平衡阀上的溢流阀减压实现油缸缩缸。

9.3 计算机控制液压牵引张拉系统

9.3.1 计算机控制液压牵引张拉系统的设计应符合以下规定：

- 1 液压泵站宜采用液压比例系统，可实现多点同步调压。液压泵站的配置应满足牵引张拉对速度和能力的要求；
- 2 计算机控制中心与液压泵站宜采用网络实现数据通讯与指令传送；
- 3 根据牵引张拉控制要求选择检测传感器的种类和精度。

9.3.2 计算机控制液压牵引张拉系统应符合下列安全要求：

- 1 系统应具有安全自锁、互锁功能，不应出现违背既定逻辑、既定时序的机械、液压和电气动作；
- 2 系统中的电子元器件应具有良好的抗干扰性能；
- 3 系统中应设置相应的检验算法和逻辑判断，避免误操作造成的系统非正常运行，以确保在系统误触发误操作的安全性；
- 4 计算机控制中心应实时检测并报告系统故障；
- 5 系统应具有失电、失控的保护措施；
- 6 系统的供配电应符合国家现行相关标准的规定，并采取合理可靠的防雷接地保护措施，确保系统的供电安全。

9.3.3 计算机控制液压系统在运输入场过程中，应做好相应的保护措施，在运输到位后对设备和元器件进行检查。

9.3.4 液压泵站的布置应符合下列规定：

- 1 液压泵站应在检验合格后入场布置；
- 2 液压泵站布置时应用吊机平稳起吊，避免损伤元器件；
- 3 液压泵站应有防雨、散热措施，对设置在高空的液压泵站应有临时的安全保护设施。

9.3.5 计算机控制液压系统的安装应符合下列规定：

- 1 液压系统的配线除弱电系统外，均应采用额定电压不低于 500V 的铜芯多股电线或电缆；

2 电线和电缆应封装于钢管、线槽或保护罩内，避免线缆裸露于易受机械损失或有液
压油泄露的部位；

3 强电与弱电电缆应分开铺设；

4 控制系统上的配线应排列整齐，导线两端应压接相应的接线端子，并应有明显的接
线编号；

5 户外高空使用的控制箱应设置安全、牢固的防雷装置；

6 传感器在安装使用前应经过标定。

9.3.6 计算机液压控制系统在现场安装后应进行系统调试，并检查下列内容：

1 系统元器件的技术状态；

2 电动机的转动方向；

3 液压系统中电磁换向阀、比例阀、溢流阀的控制作用；

4 工装钢绞线及其锚具的工作状态。

9.3.7 系统在通过调试正常后应进行空载运行试车，并应检查下列的验收内容：

1 计算机控制中心操作方向是否正确；

2 检测传感器包括位移传感器和油压传感器反馈信号和数据是否正常；

3 系统安全保护装置是否正常；

4 顺序控制的动作是否正常；

5 偏差控制是否满足要求。

9.3.8 计算机液压控制系统完成空载运行试验后的验收应符合下列规定：

1 系统的电气接线正确，接线端应固定牢固、接触良好、标志清晰，性能指标应符合
国家现行相关标准的要求。

2 系统的电气设备和元件均应正常运行并满足工作要求。

3 系统的防误操作功能，紧急停止功能，故障检测，安全自锁和互锁功能均能正常使
用并实现系统的及时停止。

4 系统的声光信号装置显示正常，清晰可靠。

5 系统的相关技术资料应齐全。

10 施工监测与验收

10.1 一般规定

10.1.1 施工单位应在索结构施工过程中进行相应的施工监测，以确保预应力施加完成后的形态达到设计要求。

条文说明：施工监测的数据直接反映了预应力施加的效果，是评价施工质量的标准之一，因此应进行相应的监测。

10.1.2 张拉成形后应作为子分部进行验收，验收合格后方可进行后续工序的施工。

10.2 施工监测

10.2.1 施工单位应编制相应的施工监测方案，施工监测内容、监测方法和仪器、监测点位置和数量应能反应预应力施加完成的效果。

10.2.2 施工监测应包含主动张拉索的索力和关键点的位移。

条文说明：施工阶段索力监测最直接的方法是采用配套标定的液压千斤顶和油压表及张拉工装对拉索复拉。。

10.2.3 对于结构形式较复杂或跨度大于 60m 的索结构工程宜同时进行施工监测和运营期的健康监测，并应编制健康监测方案，该方案可经设计单位认可或由专家论证通过后实施。

条文说明：健康监测的索力监测方法可采用拉/压锚索计法、弓式测力仪法、动测仪法和 EM 磁通量法等。各监测仪器在使用前应进行标定，可在张拉过程中参照标定设备的读数进行标定，其中 EM 磁通量法宜在拉索生产过程中进行安装并标定。位形监测方法可采用全站仪、GPS、BDS 系统测量。

10.3 施工验收

10.3.1 建筑索结构工程应按国家现行标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 和本标准的规定，按制作加工和施工质量分项工程进行施工质量验收。

10.3.2 拉索制作加工分项验收应在制作过程中进行，可由建设单位指定的第三方或监理单位

到拉索生产单位进行各项尺寸和性能的见证验收。

10.3.3 施工质量分项验收工作应由建设单位组织，设计单位、总包单位、钢结构和索结构专业施工单位以及拉索生产单位等相关单位参加。

10.3.4 验收应具备下列文件和资料：

- 1 结构设计图、施工深化图、图纸会审记录、设计变更文件；
- 2 拉索施工方案、技术交底记录；
- 3 产品质量证明文件、产品出厂检验报告，主要包括：原材料检验、索体检验、锚具检验、超张拉记录和索夹节点检验；
- 4 千斤顶和油压表标定记录和现场安装匹配检验记录；
- 5 索夹安装自检记录，包括安装位置偏差和拧紧力矩；
- 6 张拉记录，包括张拉索力值和关键节点位移值；
- 7 不合格项目处理记录及其他相关文件。

10.3.5 拉索施工验收合格后移交给后续施工单位时，拉索专业施工单位应告知相应的注意事项。

11 安全防护及环保

11.1 一般规定

11.1.1 建筑索结构施工前，应编制施工安全与环境保护方案及安全应急预案，并建立健全的安全管理组织保证体系及安全管理制度。

11.1.2 户外作业时，应在风力不大于六级的情况下进行索结构的安装。安装过程中应注意风速和风向，并应采取安全防护措施避免拉索发生过大摆动。雷电时应停止作业。

条文说明：拉索安装时受风力影响较大，发生较大风时，应中止作业，并采取措施确保安全。

11.1.3 凡涉及临边与洞口作业、攀登与悬空作业、操作平台、交叉作业及安全网搭设，应在施工方案中制定高处作业安全技术措施，并应符合《钢结构工程施工规范》GB 50755、《建筑施工高处作业安全技术规范》JGJ 80 等国家现行有关标准的规定，严防高空坠落。

11.1.4 索结构施工前，应严格按类别对施工临时通道与安全防护设施进行检查、验收，合格后方可进行作业。当高空作业的各项安全措施经检查不合格时，严禁高空作业。

11.1.5 特殊工种作业人员必须具备相应的资格证书，持证上岗。

11.1.6 索结构施工前，应对作业人员进行安全生产教育、培训及安全技术交底。新上岗的作业人员应经过三级安全教育，并应进行操作技能及安全操作知识的培训，未经安全生产教育和培训合格的作业人员不得上岗作业。

11.1.7 索结构施工时，应为作业人员提供符合国家现行有关标准规定的合格劳动保护用品，并应培训和监督作业人员正确使用。

11.2 施工安全防护

11.2.1 索结构施工前，应搭设安全登高措施、平面安全通道及安全可靠的操作平台、挂篮等。搭设登高脚手架应符合国家现行标准《建筑施工脚手架安全技术统一标准》GB 51210 和相关标准的有关规定。当采用其它登高措施和采用型钢焊制的操作平台、挂篮时，应进行计算分析。操作平台与挂篮设置应便于拉索施工，并满铺脚手板。平面安全通道宽度不宜小于 600mm，且两侧应设置安全护栏或防护钢丝绳。

11.2.2 拉索牵引提升和张拉前，应针对牵引提升和张拉设备故障、现场突然停电、张拉过程不同步等拉索张拉风险制定应对措施。

11.2.3 拉索牵引提升和张拉前，应清理场地、拉设安全警戒线，禁止无关人员进入，保证拉

索牵引提升和张拉过程中人员安全。拉索牵引提升和张拉时，千斤顶两端严禁站人，闲杂人员不得围观，拉索施工人员应在千斤顶两侧操作，不得在端部来回穿越。

11.2.4 吊装区域应设置安全警戒线，非作业人员严禁入内。构件吊离地面 200mm~300mm 时，应进行全面检查，确认安全后再正式起吊。

11.2.5 拉索安装与张拉时，高空作业使用的小型手持工具和小型零部件应采取防止坠落措施。

11.2.6 施工现场应有专业人员和专职的电工负责安装、维护和管理拉索张拉用电设备和用电线路，施工用电应符合现行行业标准《施工现场临时用电安全技术规范》JGJ46 的有关规定。

11.2.7 索结构施工前，应有相应的消防安全管理制度，并设置安全消防设施及安全疏散设施。现场施工作业用火应经相关部门批准，气体切割和高空焊接作业时，应清除作业区的危险易燃物，并应采取防火措施。

11.3 施工环保

11.3.1 施工期间应控制噪声，减少对周边环境的影响。拉索施工宜尽量安排在白天，夜间施工应做好申报手续，并按政府相关部门批准的要求施工。夜间施工灯光应向场内照射；焊接电弧应采取防护措施。

11.3.2 拉索存放区域及安装区域应保持整洁。

11.3.3 拉索张拉时，应尽量避免油管漏油。出现漏油时，应对污染区域及时清理。

11.3.4 现场油漆涂装和防火涂料施工时，应采取防污染措施。

11.3.5 索结构安装现场剩下的废料和余料应妥善分类收集，并应统一处理和回收利用，不得随意搁置、堆放。

12 使用维护

12.1.1 建筑索结构的维护应由工程总承包单位会同设计单位、索结构施工单位共同编制维护手册，交业主在日常使用中执行。固定和连接索体的其它构件应按照国家现行有关标准的规定进行维护。

12.1.2 业主单位和使用单位应对索结构进行使用阶段的日常巡检，检查项目和检查周期应符合下列要求：

- 1 检查项目：钢构件和节点及锚具表面涂装、索体护套或表面镀层、支座位移、索夹与索体相对位置、撑杆平行度、拉索线形等。
- 2 检查方法：目视，必要时可采用专用测量仪器进行检查。
- 3 检查周期：索结构验收完成后的前三年每半年一次，以后每年一次。

12.1.3 业主单位宜委托专业单位对索结构进行使用阶段的监测或检测，定期检查索结构在使用过程中的位形和索力是否出现异常现象。检查项目和检查周期应符合下列要求：

- 1 检查项目：拉索索力、钢构件和节点及锚具表面涂装、索体护套或表面镀层、支座位移、索夹与索体相对位置、撑杆空间姿态、拉索线形、结构矢高或垂度等。
- 2 检查方法：用经纬仪、水准仪、全站仪、索力检测仪和钢尺实测。
- 3 检查周期：建议索结构验收完成后的前三年每一年一次，以后每两年一次。在特殊自然灾害发生前后，应对结构关键部位进行检查。

12.1.4 索结构使用过程中若出现位形异常或索力松弛现象，应在业主单位的组织下，由施工单位会同设计单位、业内专家一起分析原因，施工单位应编制专项修复方案，经设计单位审批后进行修复，并委托检测机构进行索结构修复后的验收。

12.1.5 索体护套出现破损现象时，应由专业人员进行修复，所用的修复材料应与索体原材料一致，修复后的性能应能满足索体正常使用。

附录 A 刚性索结构拉索初应变计算方法

初始预应力状态下所有拉索的初应变在第 k 根拉索中产生的轴力 t_k^0 按下式计算：

$$t_k^0 = t_k - t_k^p \quad (\text{A.0.1-1})$$

式中： t_k ——设计初始预应力状态下第 k 根拉索的拉力；

t_k^p ——设计初始预应力状态下荷载在第 k 根拉索中产生的轴力。

各拉索的初应变可按下式计算：

$$\begin{bmatrix} \tilde{\varepsilon}_{11} & \tilde{\varepsilon}_{12} & \cdots & \tilde{\varepsilon}_{1k} & \cdots & \tilde{\varepsilon}_{1n} \\ \tilde{\varepsilon}_{k1} & \tilde{\varepsilon}_{k2} & \cdots & \tilde{\varepsilon}_{kk} & \cdots & \tilde{\varepsilon}_{kn} \\ \tilde{\varepsilon}_{n1} & \tilde{\varepsilon}_{n2} & \cdots & \tilde{\varepsilon}_{nk} & \cdots & \tilde{\varepsilon}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \cdots \\ \varepsilon_k^0 \\ \cdots \\ \varepsilon_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1^0 \\ \cdots \\ t_k^0 \\ \cdots \\ t_n^0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.0.1-2})$$

式中： ε_k^0 ——第 k ($k=1,2,\dots,n$) 根拉索的初应变；

n ——具有初应变的拉索数量；

$\tilde{\varepsilon}_{ik}$ ——第 k 根拉索初应变的单位增量在第 i 根拉索中产生的轴力。

附录 B 拉索单元的无应力长度计算方法

建筑索结构中拉索单元的无应力长度可采用以下公式计算（参照图 B.0.1-1）：

$$s_0 = \frac{H}{q} (\sinh(\alpha) - \sinh(\beta)) - \frac{H}{4qEA} (2qL + H\sinh(2\alpha) - H\sinh(2\beta)) \quad (\text{B.0.1-1})$$

$$\alpha = \sinh^{-1}\left(\frac{qC}{2H\sinh\left(\frac{qL}{2H}\right)}\right) + \frac{qL}{2H}$$

$$\beta = \sinh^{-1}\left(\frac{qC}{2H\sinh\left(\frac{qL}{2H}\right)}\right) - \frac{qL}{2H}$$

$$H = \sqrt{\frac{t_i^2}{2} + \frac{t_j^2}{2} - \frac{s_0^2 q^2}{4} - \frac{1}{4} \left(\frac{t_i^2 - t_j^2}{s_0 q}\right)^2} \quad (\text{B.0.1-2})$$

式中： s_0 ——拉索的无应力长度（m）；

H ——拉索拉力的水平分量（N）；

q ——拉索单位长度的均布线荷载（含自重）（N/m）；

E ——拉索的弹性模量（N/m²）；

A ——拉索的截面积（m²）；

L ——拉索两端节点的水平距离（m）；

C ——拉索两端节点的竖向距离（m）；

t_i ——拉索较高节点的拉力（N）；

t_j ——拉索较低节点的拉力（N）。

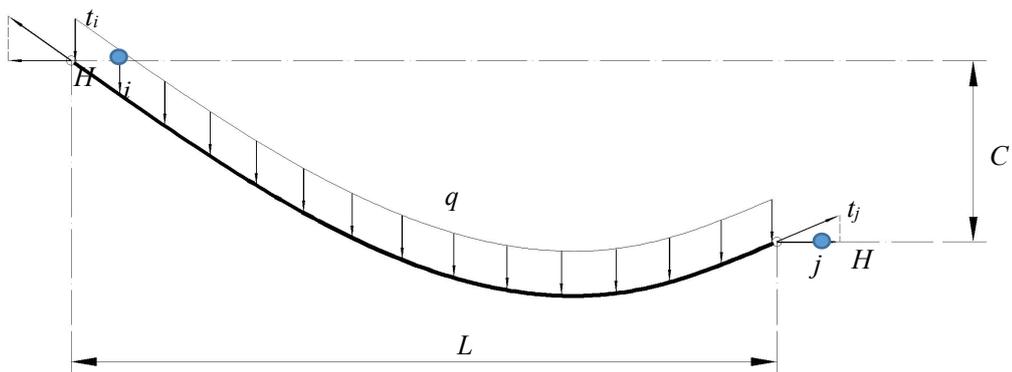


图 B.0.1-1 拉索单元

当 $F > 20Dq$ 时，可按如下简化公式计算：

$$s_0 = D - \frac{F}{EA} D \quad (\text{B.0.1-3})$$

式中： $F = \frac{t_i + t_j}{2}$ ； $D = \sqrt{L^2 + C^2}$ ，为拉索两端节点的直线距离（m）。

条文说明：式(B.0.1-1)是根据不考虑抗弯刚度的悬索单元解析理论推导得到。注意到，该式中索拉力水平分量 H 与索无应力长度 s_0 相关。通常，可先将拉索支座间的直线距离 D 先假设为 s_0 ，利用式(B.0.1-2)计算 H ，再将所得 H 代入式(B.0.1-1)计算出 s_0 ，然后再 s_0 代入式(B.0.1-2)计算 H 。一般只要经过少许几次迭代就能使求得的 s_0 趋于收敛。

《索结构技术规程》JGJ257-2012 对拉索加工长度允许偏差 Δs_0 的要求见表 B.0.1-1。考虑到建筑索结构工程中索单元（段）长度一般较短且预应力水平较高，因此可以将索单元假定为拉杆单元按式(B.0.1-3)来近似计算索长。表 B.0.1-1 给出了分别由式(B.0.1-3)和式(B.0.1-1)求得的 s_0 之间的误差为 $(0.125\sim 2)\Delta s_0$ 时，要求的最小索拉力 F 。可以看出，当 $F > 20Dq$ 时， s_0 的计算误差小于 $0.5\Delta s_0$ 。

表 B.0.1-1 拉索长度允许偏差 Δs_0

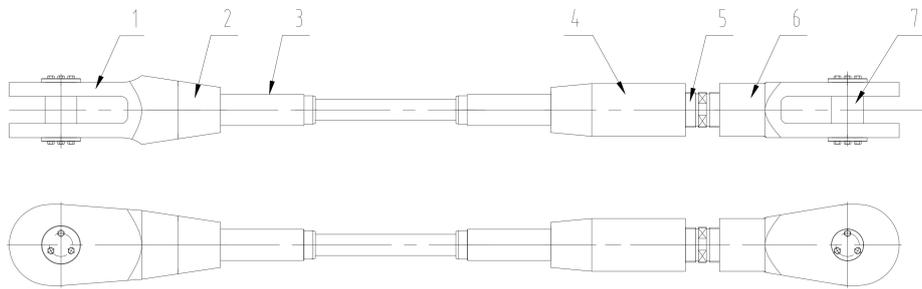
拉索长度 s_0 (m)	Δs_0 (mm)
≤ 50	± 15
$50 < s_0 \leq 100$	± 20
> 100	$\pm s_0/5000$

表 B-2 不同索长计算精度要求下能够使用简化公式(B-3)的拉力 F 最小值

索长计算精度要求	F
$0.125\Delta s_0$	$40.96 Dq$
$0.25\Delta s_0$	$28.94 Dq$
$0.5\Delta s_0$	$20.45 Dq$
$0.75\Delta s_0$	$16.70 Dq$
Δs_0	$14.46 Dq$
$2\Delta s_0$	$10.23 Dq$

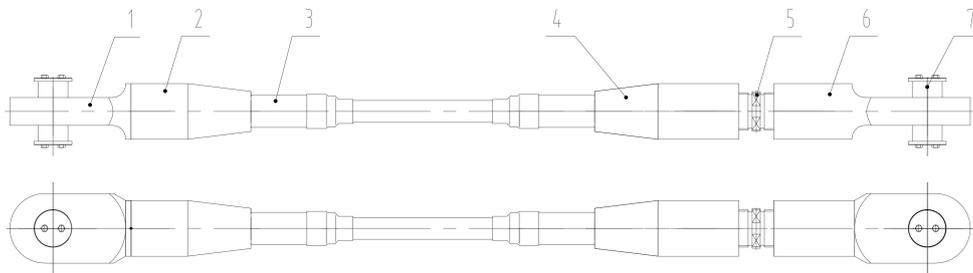
附录 C 拉索锚具常用类型

C.0.1 半平行钢丝束拉索的锚具可分为热铸锚具和冷铸锚具，锚具结构形式如图 C.0.1-1 所示。



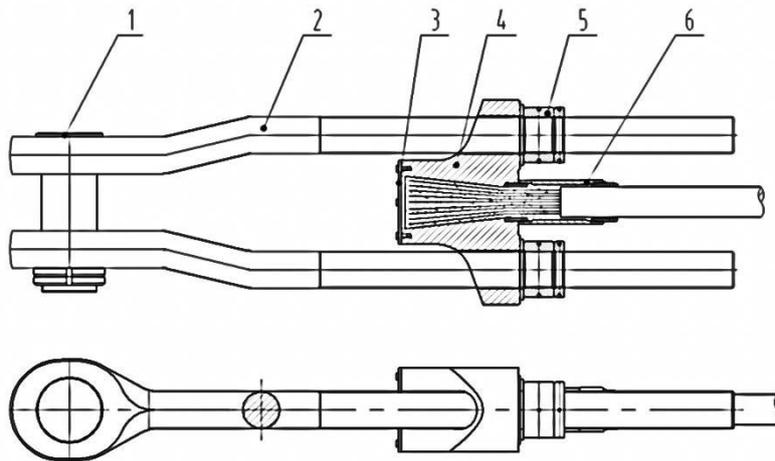
1-叉耳接头 1；2-浇铸接头；3-密封组件；4-调节锚杯；5-螺纹杆；6-叉耳接头 2；7-销轴；

(a) 叉耳螺杆式热铸锚具



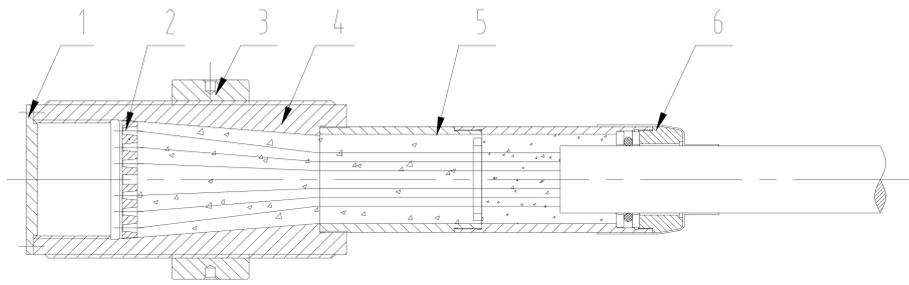
1-固定单耳接头；2-浇铸接头；3-密封组件；4-调节锚杯；5-螺纹杆；6-调节单耳接头；7-销轴；

(b) 单耳螺杆式热铸锚具



1—销轴；2—调节螺杆；3—后盖；4—浇铸接头；5—螺母；6—密封组件；

(c) 双螺杆式热铸锚具

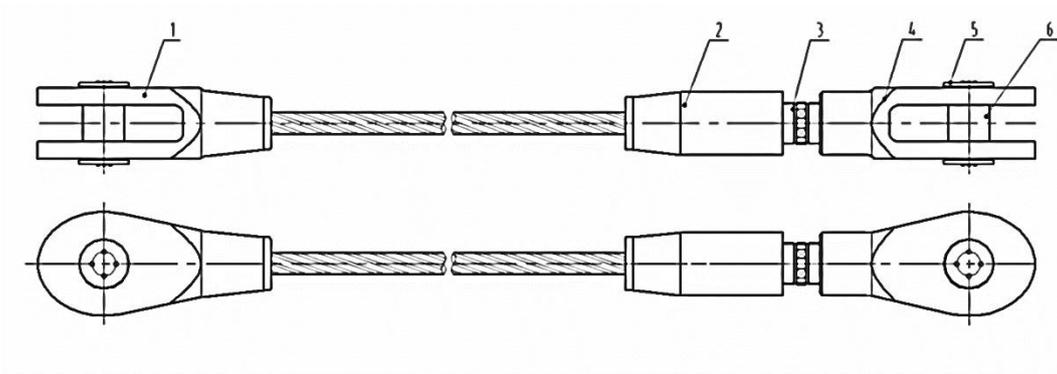


1-后盖； 2-锚板； 3-锚圈； 4-锚杯； 5-密封套筒； 6-丝堵；

(d) 镗头式冷铸锚具

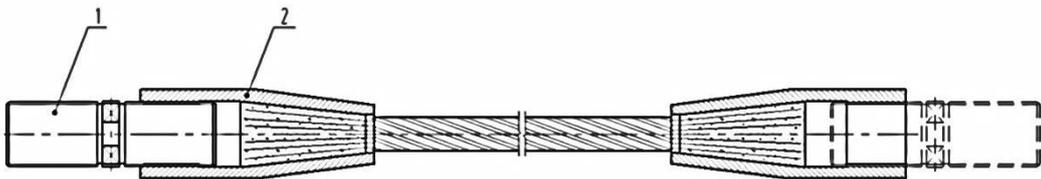
图 C.0.1-1 半平行钢丝束拉索锚具类型

C.0.2 钢绞线拉索的锚具可分为热铸锚具和压制锚具，锚具结构形式如图 C.0.2-1 所示。



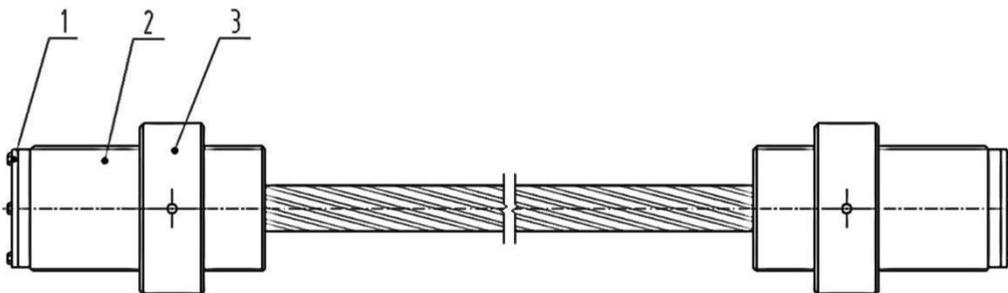
1-叉耳接头 1； 2-浇铸接头； 3-调节螺杆； 4-叉耳接头 2； 5-端盖； 6-销轴；

(a) 叉耳螺杆式热铸锚具



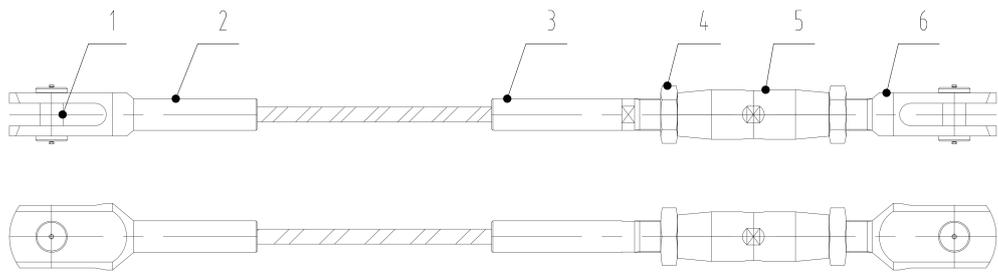
1-调节螺杆； 2-浇铸接头；

(b) 螺杆式热铸锚具



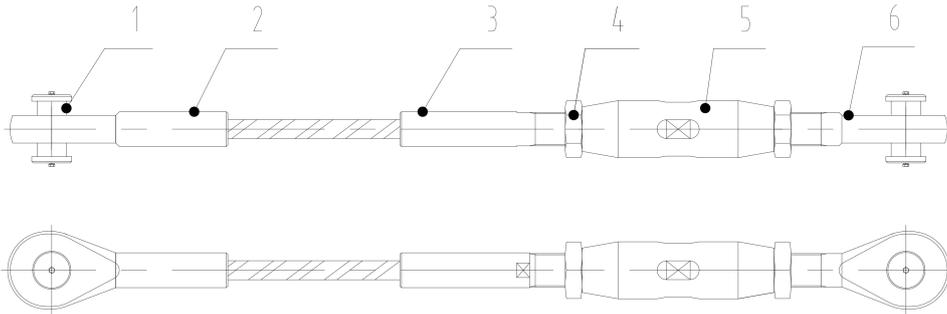
1-后盖； 2-锚杯； 3-螺母；

(c) 锚杯式热铸锚具



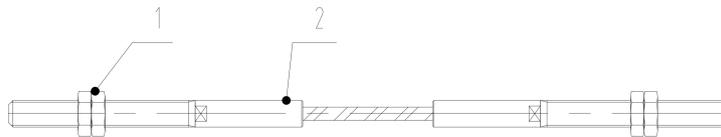
1-销轴； 2-叉耳接头 1； 3-外螺纹钢套； 4-锁紧螺母； 5-调节套筒； 6-叉耳接头；

(d) 叉耳套筒式压制锚具



1-销轴； 2-单耳接头 1； 3-外螺纹钢套； 4-锁紧螺母； 5-调节套筒； 6-单耳接头；

(e) 单耳套筒式压制锚具

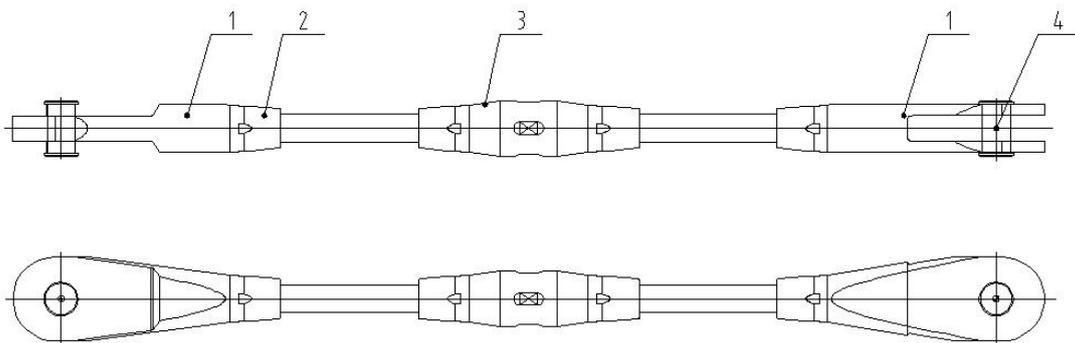


1-锁紧螺母； 2-外螺纹钢套；

(f) 螺杆式压制锚具

图 C.0.2-1 钢绞线拉索锚具类型

C.0.3 钢拉杆锚具结构形式如图 C.0.3 所示。



1—U 型（O 型）接头； 2—护套； 3—调节套筒； 4—销轴；

图 C.0.3-1 钢拉杆锚具类型

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1) 《工程结构通用规范》 GB 55001
- 2) 《钢结构通用规范》 GB55006
- 3) 《建筑结构荷载规范》 GB 50009
- 4) 《钢结构设计标准》 GB50017
- 5) 《钢结构工程施工规范》 GB 50755
- 6) 《钢结构工程施工质量验收标准》 GB 50205
- 7) 《建筑施工脚手架安全技术统一标准》 GB 51210
- 8) 《重型结构和设备整体提升技术规范》 GB 51162
- 9) 《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》 GB/T 18365
- 10) 《钢拉杆》 GB/T 20934
- 11) 《预应力混凝土用钢绞线》 GB/T 5224
- 12) 《预应力混凝土用螺纹钢筋》 GB/T 20065
- 13) 《建筑结构用密封索》 GB/T XXXX—XXXX
- 14) 《热轧钢棒尺寸、外形、重量及允许偏差》 GB/T 702
- 15) 《普通螺纹 基本牙型》 GB/T 192
- 16) 《普通螺纹 直径与螺距系列》 GB/T 193
- 17) 《普通螺纹 基本尺寸》 GB/T 196
- 18) 《普通螺纹 公差》 GB/T 197
- 19) 《梯形螺纹 第1部分：牙型》 GB/T 5796.1
- 20) 《梯形螺纹 第2部分：直径与螺距系列》 GB/T 5796.2
- 21) 《梯形螺纹 第3部分：基本尺寸》 GB/T 5796.3
- 22) 《梯形螺纹 第4部分：公差》 GB/T 5796.2
- 23) 《锻轧钢棒超声波检验方法》 GB/T 4162
- 24) 《重型机械通用技术条件 第15部分：锻钢件无损探伤》 GB/T 37400.15
- 25) 《建筑卷扬机》 GB/T 1955
- 26) 《不锈钢拉索》 YB/T 4294
- 27) 《建筑工程用锌-5%铝-混合稀土合金镀层拉索》 YB/T 4543
- 28) 《索结构技术规程》 JGJ 257
- 29) 《建筑幕墙用钢索压管接头》 JG/T 201

- 30) 《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》 JGJ 85
- 31) 《铸钢结构技术规程》 JGJ/T 395
- 32) 《建筑施工起重吊装安全技术规范》 JGJ 276
- 33) 《空间网格结构技术规程》 JGJ 7
- 34) 《建筑机械使用安全技术规程》 JGJ 33
- 35) 《预应力用液压千斤顶》 JG/T 321
- 36) 《编织吊索 安全性》 JB/T 8521
- 37) 《手拉葫芦》 JB/T 7334
- 38) 《建筑施工高处作业安全技术规范》 JGJ 80
- 39) 《施工现场临时用电安全技术规范》 JGJ 46
- 40) 《钢结构滑移施工技术标准》 T/CSCS 009