

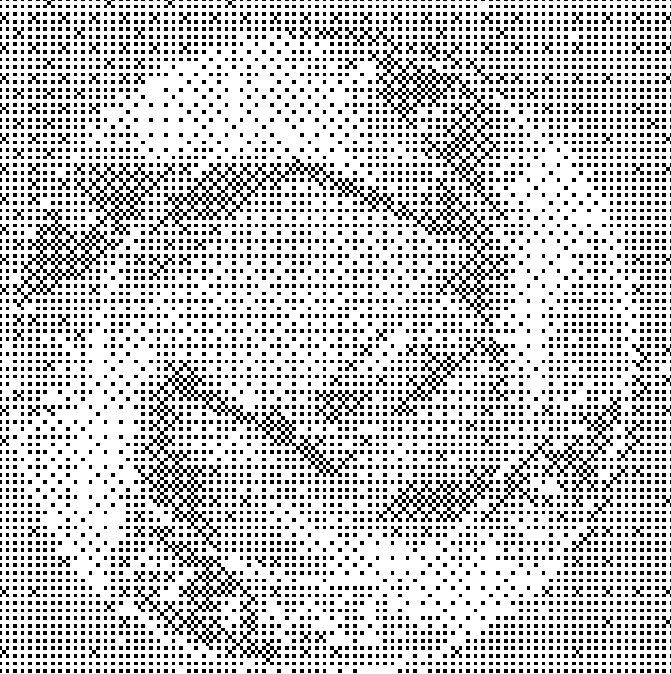
CECS 212 : 2006

中国工程建设标准化协会标准

预应力钢结构技术规程

Technical specification for prestressed
steel structures

中国计划出版社



中国工程建设标准化协会标准

预应力钢结构技术规程

Technical specification for prestressed
steel structures

CECS 212 : 2006

主编单位：北 京 工 业 大 学

中国钢结构协会专家委员会

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2 0 0 6 年 1 2 月 1 日

中 国 计 划 出 版 社

2006 北 京

中国工程建设标准化协会标准
预应力钢结构技术规程

CECS 212 : 2006

☆

北京工业大学 主编
中国钢结构协会专家委员会

中国计划出版社出版

(地址:北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 4 层)

(邮政编码:100038 电话:63906433 63906381)

新华书店北京发行所发行

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

850×1168 毫米 1/32 3.5 印张 90 千字

2006 年 12 月第一版 2006 年 12 月第一次印刷

印数 1—5100 册

☆

统一书号:1580058·827

定价:25.00 元

前 言

根据中国工程建设标准化协会(2004)建标协字第 05 号文《关于印发中国工程建设标准化协会 2004 年第一批标准制、修订项目计划的通知》的要求,制定本规程。

预应力钢结构是一种新兴的工程技术。在钢结构的承重结构体系中引入预应力,可以改善结构的承重特性和稳定性,增加结构刚度,减轻结构自重,降低钢耗量、降低成本,也可以创造新的结构体系和建筑造型。我国现已建成了数十项大型的预应力钢结构建筑工程。

本规程是在总结我国实践经验和参考国外资料的基础上编制的。本规程的主要内容包括结构设计基本规定、材料和锚具、结构体系及其分析、节点和连接构造、施工及验收、防护和监测等方面。

根据国家计委计标[1986]1649 号文《关于请中国工程建设标准化委员会负责组织推荐性工程建设标准试点工作的通知》的要求,现批准发布协会标准《预应力钢结构技术规程》,编号为 CECS 212:2006,推荐给工程建设设计、制造、施工和使用单位采用。

本规程由中国工程建设标准化协会冶金分会 CECS/TC 37 归口管理,由北京工业大学建工学院(北京市朝阳区平乐园 100 号,邮编:100022,电话与传真:010-67391815)负责解释。在使用中如发现需要修改或补充之处,请将意见和资料径寄解释单位。

主 编 单 位: 北京工业大学

中国钢结构协会专家委员会

参 编 单 位: 天津大学

东南大学

清华大学

贵州大学

北京交通大学

中国航空工业规划设计研究院

中国巨力集团

深圳建升和钢结构建筑安装公司

深圳三鑫玻璃幕墙工程公司

北京中天久业膜建筑技术有限公司

主要起草人：陆赐麟 张爱林 刘锡良 陈志华 王国周
石永久 柴昶 舒赣平 杨建国 李中立
葛家琪 马克俭 姚裕昌 鲍广鉴 徐国彬

中国工程建设标准化协会

2006年10月22日

目 次

1	总 则	(1)
2	术语、符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(4)
3	设计基本规定	(7)
3.1	设计原则	(7)
3.2	设计表达式	(7)
3.3	结构构件	(8)
3.4	预应力损失	(9)
4	材料和锚具	(13)
4.1	一般规定	(13)
4.2	索材	(13)
4.3	锚具	(15)
4.4	设计指标	(18)
4.5	拉索性能和试验要求	(19)
5	结构体系和分析	(21)
5.1	结构体系和计算规定	(21)
5.2	预应力拉杆	(22)
5.3	预应力压杆	(23)
5.4	预应力实腹梁	(24)
5.5	预应力桁架	(25)
5.6	预应力拱架	(30)
5.7	预应力框架	(30)
5.8	预应力吊挂结构	(32)

5.9	预应力立体桁架	(33)
5.10	预应力网架	(35)
5.11	预应力网壳	(37)
5.12	预应力玻璃幕墙结构	(41)
5.13	预应力索膜结构	(43)
6	节点和连接构造	(47)
6.1	一般规定	(47)
6.2	张拉节点	(48)
6.3	锚固节点	(50)
6.4	转折节点	(54)
6.5	索杆连接节点	(56)
6.6	拉索交叉节点	(58)
6.7	玻璃幕墙节点	(60)
6.8	索膜结构节点	(62)
7	施工及验收	(64)
7.1	一般规定	(64)
7.2	安装	(64)
7.3	张拉工艺	(65)
7.4	工程验收	(66)
8	防护和监测	(67)
8.1	防腐	(67)
8.2	防火	(68)
8.3	维护和保养	(69)
8.4	监测	(70)
附录 A	素材选用表	(71)
附录 B	锚具材料选用表	(72)
	本规程用词说明	(73)
附:	条文说明	(75)

1 总 则

1.0.1 为了使预应力钢结构的设计和施工做到安全可靠、经济合理、技术先进、确保质量,制定本规程。

1.0.2 本规程适用于工业与民用建筑和构筑物中预应力平面和空间钢结构等承重体系的设计、施工及维护。对于预应力玻璃幕墙和索膜结构以及其他预应力钢结构(桥梁结构、塔桅结构、冷弯薄壁型钢结构等)等,本规程应与有关专业标准配套使用。

1.0.3 预应力钢结构设计应根据建筑功能、材料供应及制造、施工条件等确定先进合理的预应力钢结构体系和施工方案,满足施工和使用过程中各种工况下结构的强度、刚度和稳定性要求,并符合防火和防腐的有关规定。施工前应编制施工组织设计,应由具有合格资质的专业队伍进行施工,并严格执行质量检查及验收制度。

1.0.4 在预应力钢结构设计文件中,应注明结构的使用年限,施工张拉程序,钢材、索材和锚具材料的牌号和等级,连接材料的型号和材料性能、化学成分,附加保证项目,还应注明所要求的焊缝形式、焊缝等级、端面刨平顶紧部位和对施工的要求。预应力钢结构的施工制作单位应根据已批准的技术设计文件绘制施工详图,并经原设计单位同意。如需修改设计,应经原设计单位同意并签署文件后方可实施。

1.0.5 预应力钢结构的设计及施工,除遵守本规程外,尚应遵守现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068、《建筑结构荷载规范》GB 50009、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《钢结构设计规范》GB 50017 和《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 等以及有关行业标准、协会标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.1 预应力钢结构 prestressed steel structure

在设计、制造、安装、施工和使用过程中,采用人为方法引入预应力以提高结构强度、刚度、稳定性的各类钢结构。

2.1.2 单次预应力 single-stepped prestressing

对结构只进行一次施加预应力的卸载方法。

2.1.3 多次预应力 multi-stepped prestressing

在制造、安装过程中,对结构两阶次以上施加预应力的卸载方法。

2.1.4 先张法 pre-tensioning method

单次施加预应力时,首先对结构张拉的卸载方法。

2.1.5 中张法 mid-tensioning method

单次施加预应力时,对结构部分加载后再张拉的卸载方法。

2.1.6 多张法 multi-tensioning method

多次施加预应力时,数次张拉与加载相间进行的卸载方法。

2.1.7 拉索法 cable method

用张拉钢索使结构产生卸载效应的方法。

2.1.8 位移法 displacement method

用强迫支座或其他部位移位使结构产生卸载效应的方法。

2.1.9 变形法 deformation method

将不同弹性变形的肢件组拼成整体构件,利用各肢件的不同恢复力提高构件承载力的制造方法。

2.1.10 布索方案 lay-out of cables

使预应力拉索在结构体系中有效卸载的布置方案。

- 2.1.11 廓外布索 cable system outside contour
在结构轮廓线外布置索系以取得较大卸载效应的方法。
- 2.1.12 廓内布索 cable system inside contour
在结构轮廓线内(或紧贴轮廓线)布置索系以节省建筑空间的方法。
- 2.1.13 预应力(张拉)阶次 steps of prestressing (tension)
对结构进行多次张拉的次数。一般取 2~4 次。
- 2.1.14 卸载杆 load-decreasing member
在结构中产生与荷载应力符号相反的预应力的杆件。
- 2.1.15 增载杆 load-increasing member
在结构中产生与荷载应力符号相同的预应力的杆件。
- 2.1.16 中性杆 neutral member
预应力不产生荷载效应的结构杆件。
- 2.1.17 设计杆 designed member
设计时具有最大内力值而控制截面选择的一组杆件。
- 2.1.18 内力峰值 peak value of force
在荷载作用下,构件截面内产生的最大内力值。
- 2.1.19 先张肢 former tensioned branch
由数肢组成的张拉构件中或数根施加预应力的拉索中,排序在前列进行张拉者。
- 2.1.20 后张肢 later tensioned branch
由数肢组成的张拉构件中或数根施加预应力的拉索中,排序在后列进行张拉者。
- 2.1.21 应力松弛(损失) stress release(loss)
在预应力张拉过程中后张肢导致先张肢的内应力下降,或因锚固构造压缩变形等而导致的应力损失。
- 2.1.22 锚固节点 anchor joint
拉索或张拉杆件锚固于结构上的着力节点。
- 2.1.23 转折节点 turning joint

在拉索改变走向的折点处与结构相连接的节点。

2.1.24 张拉节点 tensioning joint

用设备、器具等对拉索进行张拉以施加预应力的着力节点。

2.1.25 强度幅值 strength amplitude

材料弹性抗拉或抗压强度的单向值。

2.1.26 张弦结构 beam string structure

上弦为压弯杆件,下弦为张力索,中间连以撑杆的结构体系。

2.1.27 吊挂结构 cable-supported structure

以吊索承托横向构件的结构体系。

2.1.28 索膜结构 cable-membrane structure

以立柱、压杆、预应力拉索为主要承重构件,上表面覆以紧绷膜材的结构体系。索膜结构是塑膜结构的一种类型。

2.1.29 索-玻璃幕墙结构 cable-glass curtain structure

由双层或交叉的预应力索与压杆组成的点支玻璃幕墙承重结构。

2.1.30 弦支穹顶 suspendome

用连续的拉索(或拉杆)和撑杆(悬杆)加强单层穹顶网壳而形成的预应力网壳结构。

2.1.31 张拉系数 tension coefficient

考虑预应力效应对结构的影响和力度的准确性而对张拉力进行调整的系数。

2.2 符 号

2.2.1 作用和作用效应:

F ——集中荷载;

P ——节点荷载;

H ——水平力;

M ——弯矩;

N ——轴心力;

Q ——重力荷载；
 R ——支座反力；
 V ——剪切力；
 T ——拉索张力；
 S ——荷载标准值的效应；
 σ ——法向应力；
 τ ——剪切应力；
 σ_0 ——法向预应力；
 τ_0 ——剪切预应力；
 v ——荷载作用下结构的挠度；
 v_0 ——预应力产生的结构反向挠度；
[v]——结构挠度的容许值。

2.2.2 材料性能：

E ——钢材的弹性模量；
 E_{ca} ——拉索或拉杆的弹性模量；
 G ——钢材的剪切模量；
 f ——钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；
 f_{ca} ——钢索或拉杆的抗拉强度设计值；
 f_v ——钢材的抗剪强度设计值；
 f_y ——钢材的屈服点。

2.2.3 几何参数：

A ——毛截面面积；
 A_n ——净截面面积；
 A_{ca} ——拉索或拉杆的毛截面面积；
 I ——毛截面惯性矩；
 I_n ——净截面惯性矩；
 S ——毛截面面积矩；
 W ——毛截面模量；
 W_n ——净截面模量；

L ——跨度,全长;
 D ——跨度,直径;
 l ——长度;
 b ——宽度;
 t ——厚度;
 h ——高度;
 d ——间距,孔径;
 e ——偏心距;
 λ ——长细比;
 α, β ——夹角。

2.2.4 计算系数:

γ_T ——预应力索的张拉系数;
 φ ——轴心压杆的稳定系数;
 n ——预应力阶次,拉索根数;
 i ——杆件序号。

3 设计基本规定

3.1 设计原则

3.1.1 预应力钢结构应采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,采用分项系数设计表达式进行计算。

3.1.2 施加预应力的技术方案及选择预应力的阶次和力度,应遵循结构卸载效应大于结构增载消耗,并保证结构整体效应增长的原则。

3.1.3 预应力钢结构的设计应包括预应力施工(单次或多次预应力方案)阶段和使用阶段的各种工况。应进行结构和构件的强度、刚度和稳定性计算,必要时尚应考虑结构抗震和非线性影响。对于使用阶段需要换索的工况,在计算和构造上应预先考虑。

3.1.4 对构件强度、稳定性以及连接强度的计算,应采用荷载效应的基本组合值,对变形的计算,应采用荷载效应的标准组合值。预应力效应属永久荷载效应。结构计算中的各项系数(重要性系数、分项系数、组合系数、动力系数等),应按国家现行有关标准的规定采用。

3.1.5 预应力索膜结构的设计应包括初始形态分析、荷载效应分析及裁剪分析三个相互制约的过程,必要时还应进行施工过程分析。

3.2 设计表达式

3.2.1 预应力钢结构按承载能力极限状态进行基本组合计算时,应采用下列设计表达式:

$$\gamma_0(\gamma_G S_{GK} + \sum_{i=1}^m \gamma_{pi} \gamma_T S_{pi} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik}) \leq R(\gamma_R, f_K, a_K \dots) \quad (3.2.1)$$

式中 γ_{pi} ——预拉力分项系数,对结构有利时取 $\gamma_{pi} = 1.0$,不利时

取 $\gamma_{pi} = 1.2$;

γ_T ——张拉系数;

S_{pi} ——预拉力标准值的效应。

其余符号的说明与现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 相同。

注:公式(3.2.1)仅适用于荷载与荷载效应为线性关系的情况。

3.2.2 预应力荷载对结构构件的张拉系数 γ_T 应分别按下列情况取值:

1 当杆件的荷载应力与预应力符号相同,或符号相反但杆件的预应力值大于荷载应力值时, $\gamma_T = 1.1$;

2 当杆件荷载应力值大于预应力值且符号相反时, $\gamma_T = 0.9$;

3 当以有效手段(如采用测力计或其他仪表)直接监测预应力张力值时,对所有杆件 $\gamma_T = 1.0$ 。

在多次预应力结构中,当杆件的预应力效应随阶次而变号时,也应按上述规定分别取值。

3.3 结构构件

3.3.1 预应力钢结构中的拉索,除应保证索材在弹性状态下工作外,在各种工况下均应保证索力大于零($T > 0$)。钢索强度的设计值不应大于索材极限抗拉强度的 40%~55%,重要索取低值,次要索取高值。

3.3.2 预应力受弯构件在活荷载作用下的垂直变形(挠度)值应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定。预应力作用下构件的反向变形值应以两支座间连线为基线,取构件弯曲轴线对基线的最大垂直偏离值。此值不得超过对该结构规定的容许值。

3.3.3 预应力钢结构考虑地震作用时,结构构件的地震效应与其他荷载效应的组合,应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定进行计算,并进行截面抗震验算。

3.3.4 预应力钢结构的连接计算除满足本规程的要求外,尚应符合

合国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 第 7 章的各项有关规定。

3.3.5 严寒地区暴露在室外的预应力拉索应考虑裹冰荷载的作用,还应做外保护层,防止腐蚀。

3.3.6 玻璃幕墙和采光顶支撑结构的正常使用极限状态验算,应包括结构变形不超过规定值和卸载索预应力不退零两种情况。

3.3.7 玻璃幕墙和采光顶的支撑结构中,索的预拉力应按最低预应力度原则确定。其最低预应力度应能保证索结构在正常使用的不利荷载工况下,卸载索不致松弛而退出工作,即:

$$S_{Gk} + S_{pk} + S_{wk} + 0.5S_{Ek} \geq 0 \quad (3.3.7)$$

式中 $S_{Gk} + S_{pk} + S_{wk} + S_{Ek}$ 分别为恒荷载、预应力、风荷载、水平地震作用标准值作用下的内力值。其中,0.5 为现行行业标准《玻璃幕墙工程技术规范》JGJ 102 规定的组合系数。

3.4 预应力损失

3.4.1 索张拉过程中因压实锚具而产生的锚固损失,宜按下式计算:

$$x_m = \Delta_a \frac{A_{ca} E_{ca}}{l} \quad (3.4.1)$$

式中 A_{ca} ——拉索的截面面积;

E_{ca} ——拉索材料的弹性模量;

l ——拉索长度;

Δ_a ——锚具压实总量,采用精制螺母锚具或塞环式锚头时取 1mm;采用夹片锚具时取 2mm。

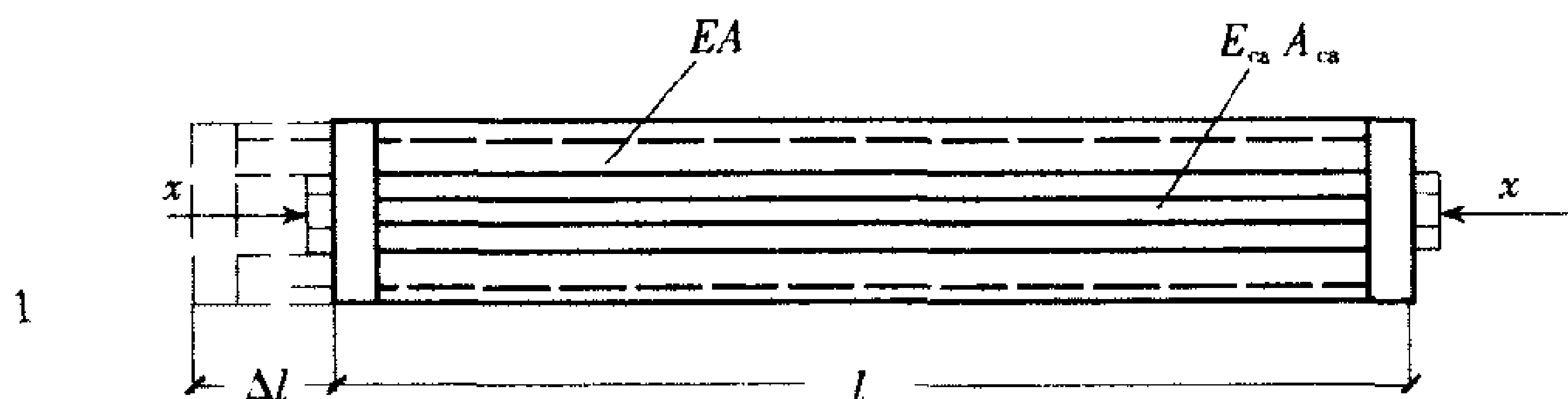


图 3.4.1 拉索张拉构件的变形

3.4.2 在索张拉锚固后,因素长继续增加而导致的松弛损失 x_s ,宜按下式计算:

1 预应力钢丝(束)、钢绞线。

1) 普通松弛级:

$$x_s = 0.4\psi(x/f_{ptk} - 0.5)x \quad (3.4.2-1)$$

式中 ψ ——系数,一次张拉时 $\psi=1.0$,超张拉时 $\psi=0.9$;

x ——预应力拉索的控制张拉内力;

f_{ptk} ——拉索材料的抗拉强度标准值。

2) 低松弛级:

当 $x \leq 0.7f_{ptk}$ 时:

$$x_s = 0.125(x/f_{ptk} - 0.5)x \quad (3.4.2-2)$$

当 $0.7f_{ptk} < x \leq 0.8f_{ptk}$ 时:

$$x_s = 0.20(x/f_{ptk} - 0.575)x \quad (3.4.2-3)$$

2 高强度钢筋:

1) 一次张拉: $x_s = 0.05x \quad (3.4.2-4)$

2) 超张拉: $x_s = 0.035x \quad (3.4.2-5)$

3.4.3 在多束索排序张拉时,后序索张拉对前序索已有内力产生的序次损失,应采取加大前序索张拉力的方法予以补偿。当长度相同、截面相等的多束索顺序张拉时,应对各序次的索采用下列不同的张拉力 x_i :

1 当拉索群位于预应力杆件截面重心时(图 3.4.3-1):

$$x_1 = x_2 \left(1 + \frac{1}{1+\beta}\right) \quad (3.4.3-1)$$

.....

$$x_i = x_{i+1} \left(1 + \frac{1}{i+\beta}\right) \quad (3.4.3-2)$$

.....

$$x_n = \frac{x}{n} \quad (3.4.3-3)$$

$$\beta = \frac{EA}{E_{ca}A_{ca}} \quad (3.4.3-4)$$

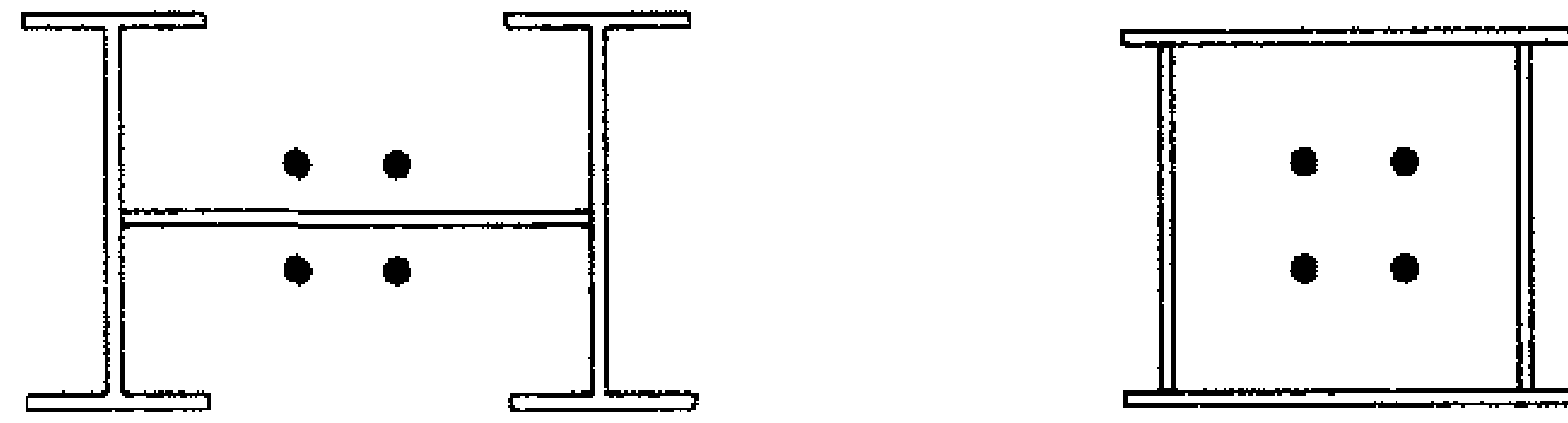


图 3.4.3-1 中心拉索群位置示意

2 当直线拉索群不位于预应力杆件截面重心时(图 3.4.3-2)

$$x_1 = x_2(\alpha_2 + 1) \quad (3.4.3-5)$$

.....

$$x_i = x_{i+1}(\alpha_{i+1} + 1) \quad (3.4.3-6)$$

.....

$$x_n = \frac{x}{n} \quad (3.4.3-7)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{\frac{\beta n}{\left(\frac{c}{i_x}\right)^2 + 1} + i - 1} \quad (3.4.3-8)$$

- 式中 A ——预应力杆件的截面面积；
 E ——预应力杆件的弹性模量；
 A_{ca} ——单束拉索的截面面积；
 E_{ca} ——单束拉索的弹性模量；
 c ——梁截面重心至拉索中心的间距；
 i_x ——梁的截面回转半径。

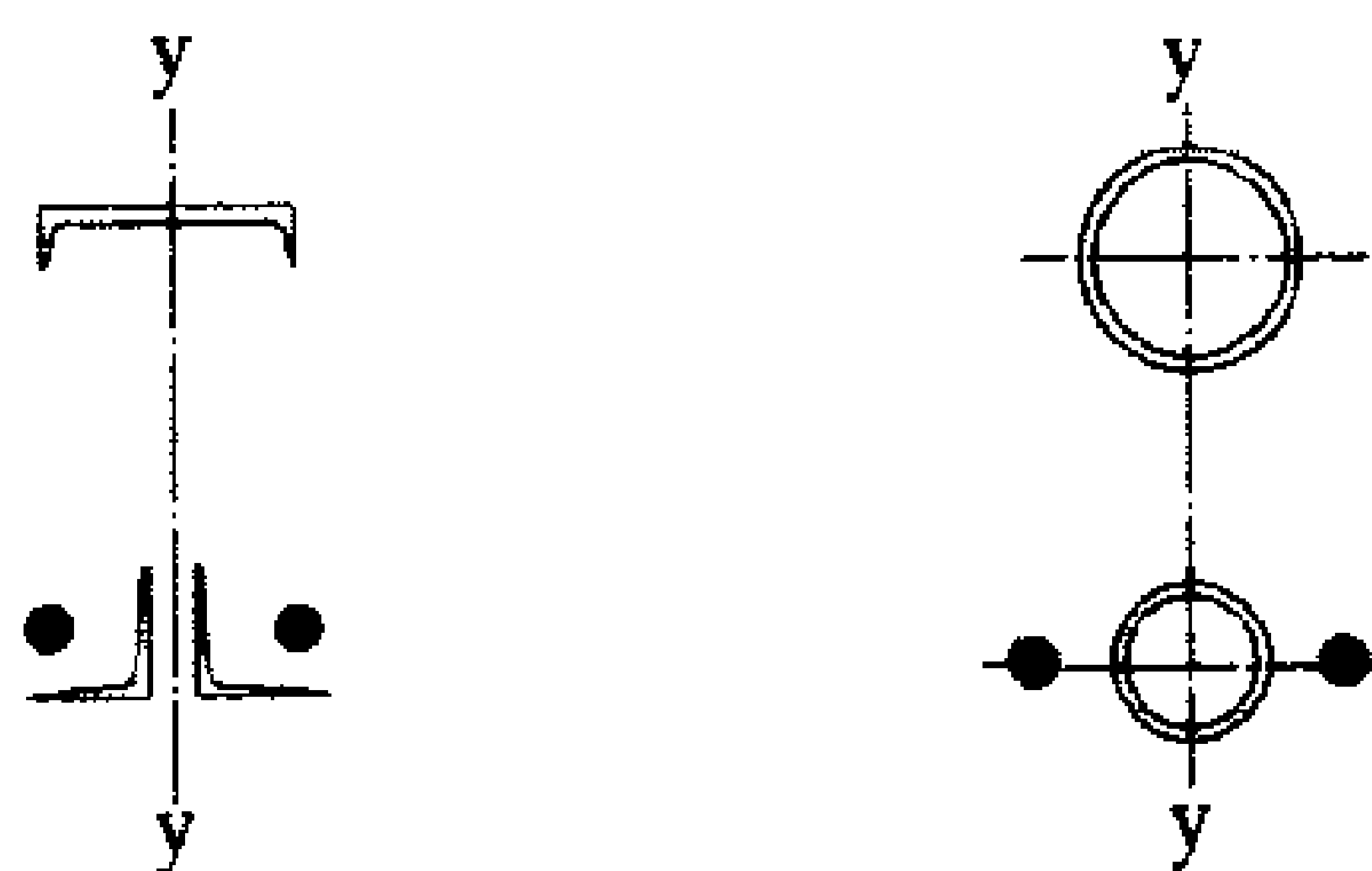


图 3.4.3-2 偏心拉索群位置示意

3.4.4 在折线形或曲线形拉索的端点、折点等处,张拉时因接触面摩阻力而产生的摩擦损失,可参照现行协会标准《建筑工程预应力施工规程》CECS 180 进行计算。

3.4.5 拉索预应力的锚固损失、松弛损失、序次损失和摩擦损失均应在张拉过程中予以补偿。

3.4.6 直接采用索力测定仪测定索力的预应力拉索,除松弛损失外,其他损失可不进行计算,由仪表进行控制。

4 材料和锚具

4.1 一般规定

4.1.1 预应力钢结构工程应按性能匹配、强度协调、造价合理并便于施工等要求合理选材。各类材料的材质、性能应符合相关国家标准的规定。

4.1.2 预应力钢结构中的材料可分为刚性构件钢材、索材和锚具材料等。刚性构件的钢材应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 关于材料选用的规定,索体材料和锚具材料可分别参照附录 A 和附录 B 选用。并应符合本章的相关规定。

4.2 索 材

4.2.1 索体分为钢丝绳索体、钢绞线索体、钢丝束体和钢拉杆索体,其分类标准应符合附录 A 的规定。

4.2.2 钢丝绳索体所用钢丝绳的质量、性能应符合现行国家标准《钢丝绳》GB/T 8918 的有关规定。钢丝绳的极限抗拉强度可分为 1570、1670、1770、1870 和 1960MPa 等级别。钢丝绳的基本组成元件为绳芯、绳股和钢丝(见图 4.2.2)。钢丝绳的绳芯可采用纤维芯、金属芯、有机芯和石棉芯。金属芯可分为独立的钢丝绳芯和钢丝股芯。钢丝绳宜采用无油镀锌钢芯钢丝绳。



图 4.2.2 钢丝绳结构示意图

4.2.3 构成绳芯、绳股和钢丝绳的最基本元件钢丝,可采用光面钢丝或镀锌钢丝。钢丝形状宜采用圆形钢丝,有特殊要求(如密封

钢丝绳)时,可采用异形钢丝。

4.2.4 钢绞线材料的选用应符合下列要求:

1 钢绞线可采用的类型有镀锌钢绞线、高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线、铝包钢绞线、涂塑钢绞线、无粘结钢绞线和 PE 钢绞线等。

2 钢绞线索体所用钢绞线的质量、性能应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224、现行行业标准《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》YB/T 152 的规定。钢绞线内的钢丝应符合现行行业标准《镀锌钢绞线》YB/T 5004 的有关规定。钢丝的捻距不得大于其直径的 14 倍。

3 玻璃幕墙用不锈钢索应符合国家现行标准的相关规定,所用不锈钢丝应符合现行国家标准《不锈钢丝》GB/T 4240 的规定。

4 钢绞线的截面可按 1×3 、 1×7 、 1×19 和 1×37 等规格选用,其强度等级按极限抗拉强度可分为 1270、1370、1470、1570、1670、1770、1870、1960MPa 等级别。

4.2.5 钢丝束材料的选用应符合下列要求:

1 钢丝束索体可分为平行钢丝束和半平行钢丝束两种。其护套可分单层护套或双层护套,其断面结构见图 4.2.5。钢丝束所用钢丝的直径为 5mm 和 7mm,宜选用高强度、低松弛、耐腐蚀的钢丝。钢丝的质量和性能应符合现行国家标准《桥梁缆索用热镀锌钢丝》GB/T 17101 的规定。

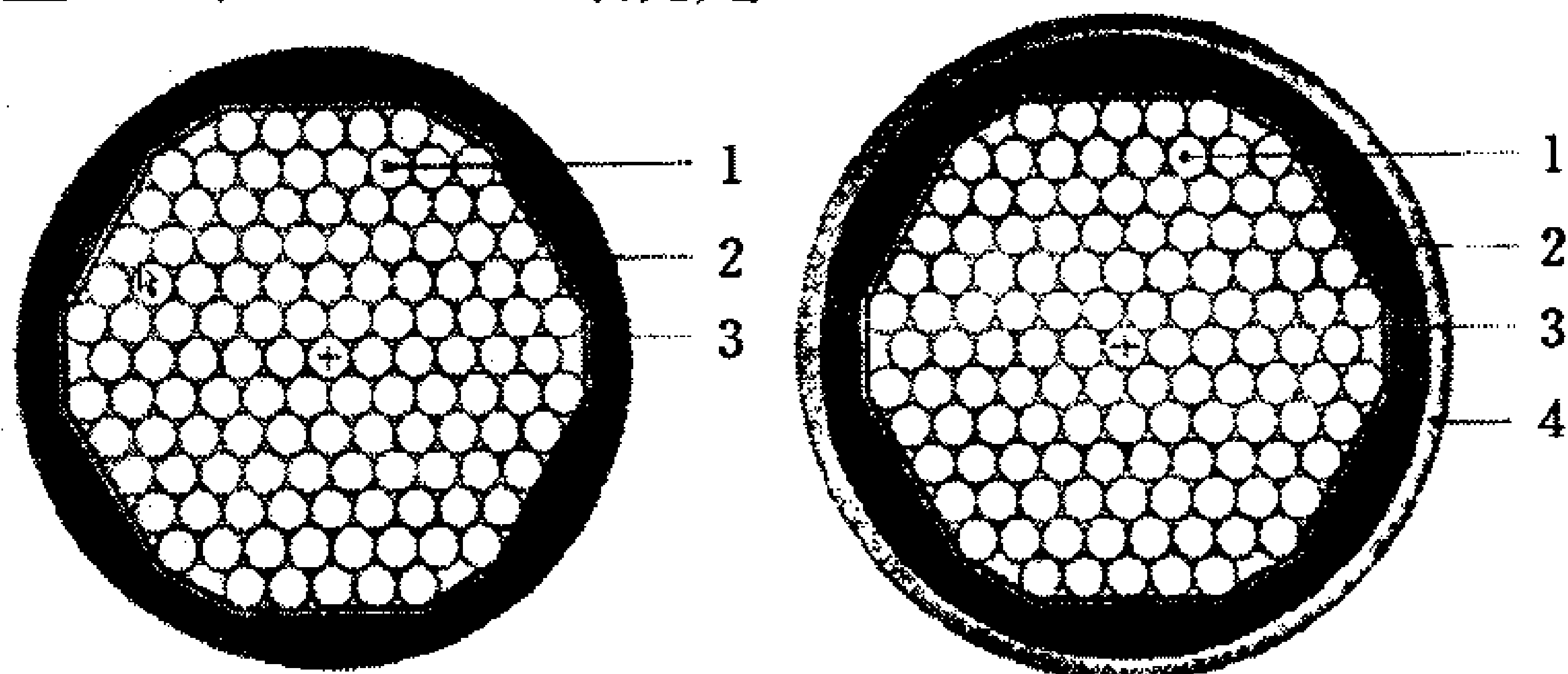


图 4.2.5 带挤包护层钢丝束的断面结构

1—高强钢丝;2—缠绕细钢丝或纤维增强聚酯带;3—黑色聚乙烯护套;
4—彩色聚乙烯护套

2 钢丝束外应绕包高强度复合包带,单层重叠宽度不应小于带度的 1/3。绕包层应齐整致密,无破损。钢丝束复合包带外应有热挤高密度聚乙烯防护层。防护层可采用黑色或彩色高密度聚乙烯塑料,其技术性能应符合现行行业标准《建筑缆索用高密度聚乙烯塑料》CJ/T 3078。在高温、高腐蚀环境下宜选用带双层护层的钢丝束。护层应紧密包覆,在生产、运输、吊装过程中不得松脱。防护层外观应光滑平整,无破损,防护层厚度偏差值不应超过 +2mm、-1mm。

4.2.6 钢拉杆材料应符合下列要求:

1 钢拉杆材料应符合国家现行相关标准的规定。钢拉杆应由圆柱形杆件、调节套筒、锁母和两端耳环接头等部件组成,可采用的主要结构形式有单耳环式[图 4.2.6(a)]、双耳环式[图 4.2.6(b)]和不对称式[图 4.2.6(c)]。钢拉杆杆体的强度级别(屈服强度)可采用 345、460、550、650MPa 等级。玻璃幕墙用钢拉杆应符合现行国家标准《不锈钢冷加工钢棒》GB/T 4226 的有关规定。

高强度钢拉杆材料的屈服强度不应低于 460MPa,并具有重量轻、耐疲劳等特性。

4.3 锚 具

4.3.1 锚具材料应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的要求,并符合现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的规定。

热铸锚的铸体材料应采用锌铜合金,锌、铜原材料应符合现行国家标准《阴极铜》GB/T 467、《锌锭》GB/T 470 的要求。冷铸锚的铸体填料主要应采用环氧树脂和钢丸,铸体试件强度不应小于 147MPa。

压接锚、夹片锚、挤压锚、螺母锚和镦头锚的锚具组件宜采用低合金结构钢或合金结构钢,其技术性能应符合现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 或《合金结构钢》GB/T 3077 的规

定。

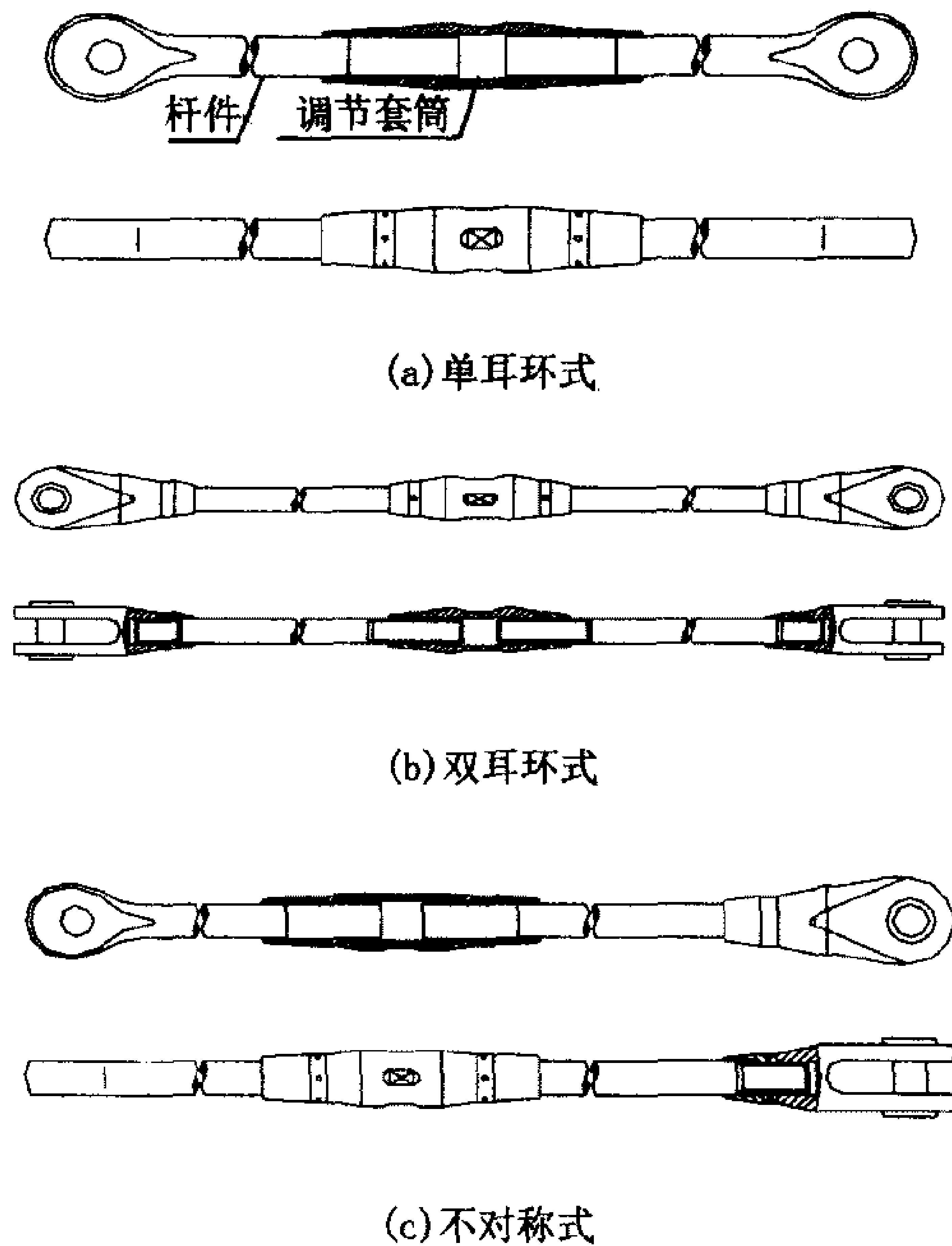


图 4.2.6 钢拉杆的结构

锚具应根据预应力构件的品种、锚固要求和张拉工艺等选用。

对预应力钢绞线宜采用夹片锚具，也可采用挤压锚具和压接锚具；对预应力钢丝束宜采用镦头锚具，也可采用冷铸锚具和热铸锚具；对钢拉杆宜采用螺母锚具；承受低应力或动荷载的夹片锚具应有防松装置。

4.3.2 锚具组件的材料应符合下列要求：

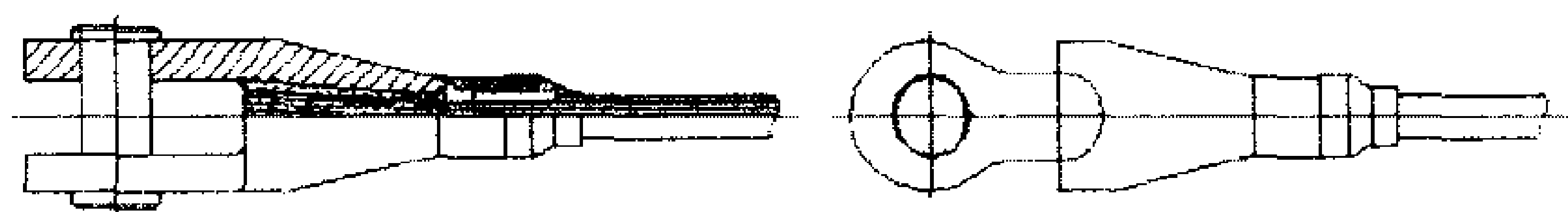
1 冷铸锚锚杯坯件宜采用锻件，热铸锚锚杯坯件可采用锻件或铸件。锻件材料应采用优质碳素结构钢或合金结构钢，其技术性能应分别符合现行国家标准《优质碳素结构钢》GB/T 699 和《合金结构钢》GB/T 3077 的规定。采用铸件时，其技术性能应符

合现行国家标准《一般工程用铸造碳钢件》GB/T 11352 的规定，其分类应符合附录 B 的规定。

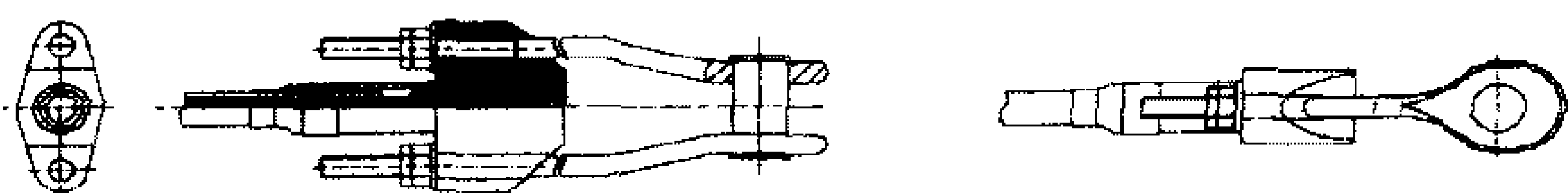
2 锚具组件的毛坯锻件应符合现行行业标准《冶金设备制造通用技术条件 锻件》YB/T 036.7 的有关规定，锻件须进行超声波探伤和磁粉探伤，并符合现行国家标准《锻轧钢棒超声波检验方法》GB/T 4162 中 A 级或 B 级和现行行业标准《承压设备无损检测 第 4 部分：磁粉检测》JB/T 4730.4 中的 II 级要求。所用铸钢锚具，其组件经超声波探伤应符合现行国家标准《铸钢件超声探伤及质量评级方法》GB/T 7233 中三级的有关规定。

3 销轴和螺杆的坯件应为锻件，其材料应选用优质碳素结构钢或合金结构钢。其性能应分别符合现行国家标准《优质碳素结构钢》GB/T 699、《合金结构钢》GB/T 3077 的有关规定。当采用优质碳素结构钢时宜采用 45 号钢。

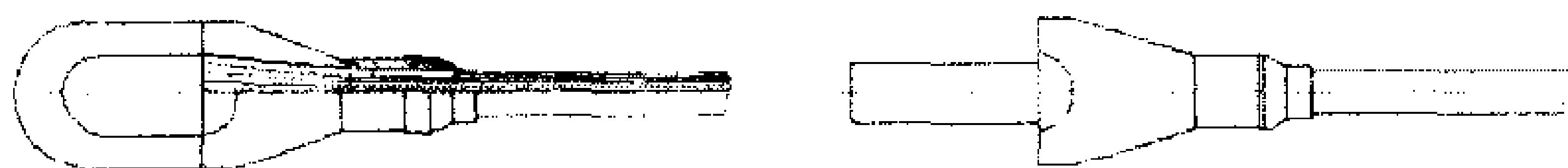
4.3.3 玻璃幕墙用的不锈钢索锚具应符合国家现行相关标准的规定。热铸锚锚具可采用图 4.3.3(a)~(f) 的各种形式；冷铸锚锚具可采用冷铸墩头锚具[图 4.3.3(g)]。



(a) 叉耳式



(b) 双螺杆式



(c) 耳环式



(d) 双耳内旋式

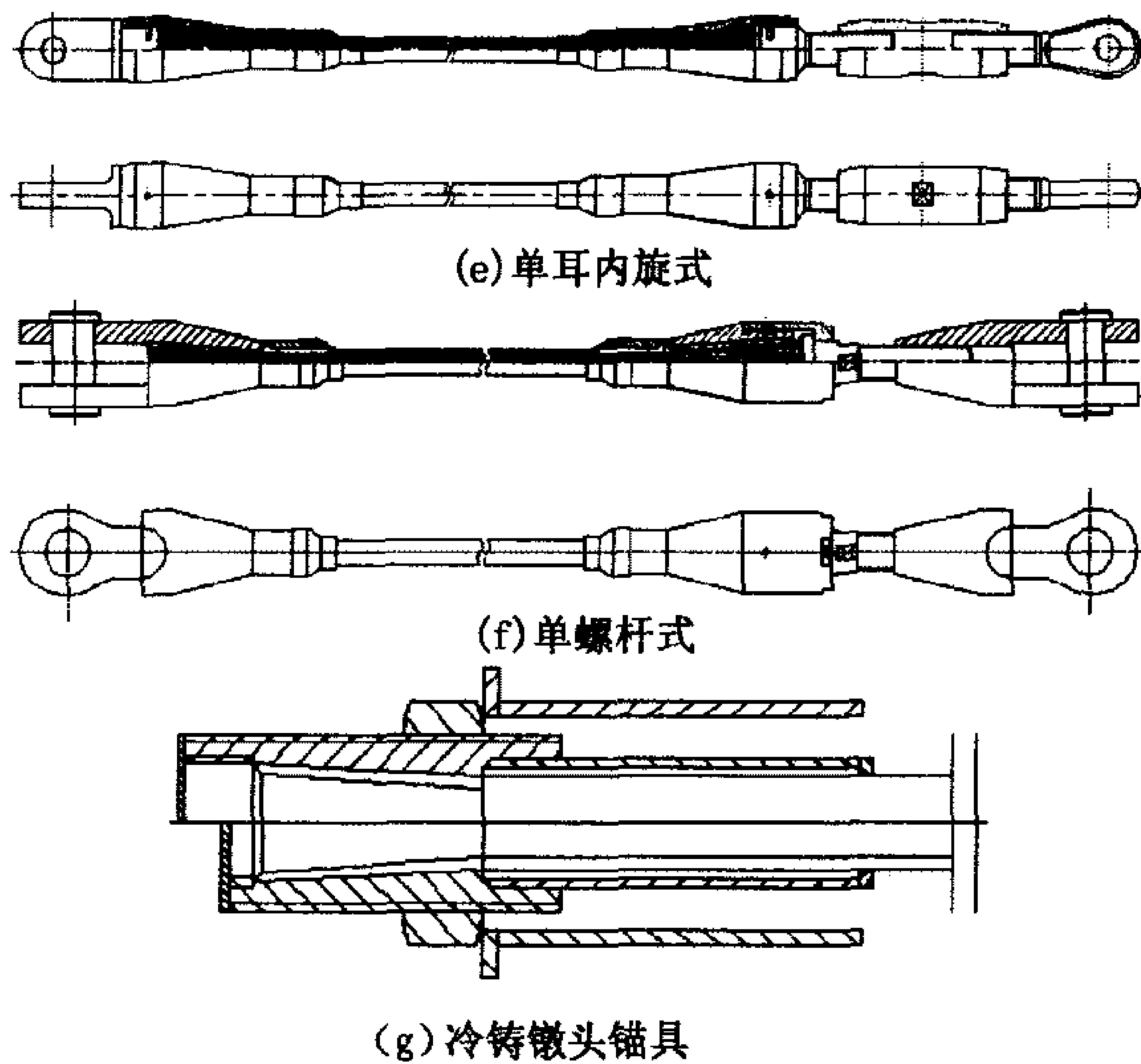


图 4.3.3 热、冷铸锚锚具的结构形式

4.4 设计指标

4.4.1 钢丝抗拉强度的标准值和设计值应按表 4.4.1 采用。

表 4.4.1 钢丝的抗拉强度

抗拉强度标准值(MPa)	抗拉强度设计值(MPa)
1470	820
1570	870
1670	930
1770	980
1870	1040

注：当钢丝抗拉强度标准值不符合本规定时，其设计值可通过换算求得。

4.4.2 索体材料的弹性模量宜由试验方法确定。在不进行试验的情况下，索体材料施加预应力后的弹性模量可参照表 4.4.2 取值。

表 4.4.2 索体材料的弹性模量

索 材 种 类	弹性模量(N/mm ²)
钢丝束索	2.00×10^5
钢绞线索	1.95×10^5
钢丝绳索	1.40×10^5
钢拉杆索	2.06×10^5

4.4.3 索体材料的线膨胀系数宜由试验方法确定。在不进行试验的情况下,索体材料的线膨胀系数可参照表 4.4.3 取值。

表 4.4.3 索体材料的膨胀系数

索 材 种 类	线膨胀系数(/°C)
钢丝束索	1.84×10^5
钢绞线索	1.32×10^5
钢丝绳索	1.59×10^5
钢拉杆索	1.20×10^5

4.5 拉索性能和试验要求

4.5.1 在制索前钢丝绳索应进行初张拉。初张拉力值应采用材料极限抗拉强度的 40%~55%。初张拉不应少于 2 次,每次持载时间不应少于 50min。

4.5.2 拉索制作完毕后应进行超张拉试验。其试验力宜采用设计荷载的 1.2~1.4 倍,且宜调整到最接近 50kN 的整数倍。试验时可分为 5 级加载。成品拉索在卧式张拉设备上超张拉后,锚具的回缩量不应大于 6mm。

4.5.3 当成品拉索的长度不大于 100m 时,其偏差不应大于 20mm;当成品拉索的长度大于 100m 时,其偏差不应大于长度的 1/5000。

4.5.4 钢丝束拉索的静载破断力不应小于索体标称破断力的

95%；钢丝绳拉索的最小破断力不应低于相应产品标准和设计文件规定的最小破断力。

4.5.5 索体的静破断力,包括锚具的抗拉承载力、铸体的锚固力,不应小于标称破断力的95%。锚具的抗拉承载力不应小于索体的抗拉力,锚具与索体间的锚固力不应小于索体抗拉力的95%。

4.5.6 当拉索需要进行疲劳试验时,其试验方法应符合下列要求:

1 采用 2.0×10^6 次循环脉冲加载。

2 钢丝束拉索的上限加载应力取 0.40~0.55 极限抗拉应力,对一级耐疲劳拉索,应力幅采用 200MPa;对二级耐疲劳拉索,应力幅采用 250MPa。

3 钢丝绳拉索的上限加载应力取 0.55 极限抗拉应力,应力幅采用 80MPa。

4 钢丝被拉断数不应大于索中钢丝总数的 5%。护层不应有明显损伤,锚具无明显损坏。锚杯与螺母旋合正常。

经疲劳试验后静载破断力不应小于索体标称抗拉力的 95%,拉断时延伸率不应小于 2%。

4.5.7 拉索的盘绕直径不应小于 30 倍索的直径。拉索在盘绕弯曲后,截面外形不应有明显变化。

5 结构体系和分析

5.1 结构体系和计算规定

5.1.1 预应力钢结构可分为预应力基本构件、预应力平面结构和预应力空间结构。预应力基本构件包括预应力拉杆、预应力压杆和预应力实腹梁。预应力平面结构包括预应力桁架、预应力拱架、预应力框架和预应力吊挂结构。预应力空间结构包括预应力立体桁架、预应力网架、预应力网壳、预应力玻璃幕墙钢结构和预应力索膜结构。

5.1.2 预应力平面结构中的预应力张拉杆件(拉索)应布置在承重结构的主平面或与之平行的对称平面内。预应力空间结构中的预应力张拉杆件应布置在预应力效应较高的三维空间内,应能使结构产生有利的卸载作用,增大结构的承载力和刚度。

5.1.3 预应力钢结构中拉索的布置可采用廓内布索和廓外布索两种方式。

5.1.4 预应力基本构件和预应力平面结构应在二维平面内进行受力分析,预应力空间结构应在三维空间内进行受力分析。

5.1.5 预应力钢结构中的张拉杆件,计算时应假定为理想柔性体。杆件必须始终处于线弹性受力阶段;拉杆和索系应在整个工作阶段处于受拉状态,不承受压力。

5.1.6 索在结构上的锚固节点应是铰接节点。对单折索和多折索,当在转折点处采用滑轮节点时,索的摩擦阻力可忽略不计。索的应力松弛和内力损失应按相关规定考虑。

5.1.7 预应力钢结构的总刚度矩阵可由刚性构件的单元刚度矩阵与柔性索的单元刚度矩阵经坐标变换后组装而成。

5.1.8 预应力钢结构设计时,应考虑结构在制造、安装、施加预应

力、承受各类荷载过程中,可能发生的各种不利的单独工况和组合工况下的强度、刚度和稳定性要求。必要时,尚应考虑断索支座沉降以及维修状态下的特殊工况。

5.2 预应力拉杆

5.2.1 预应力拉杆主要由刚性主杆和张拉杆两部分组成(图 5.2.1)。刚性主杆的承载力取决于张拉杆的材料强度和张拉力值。

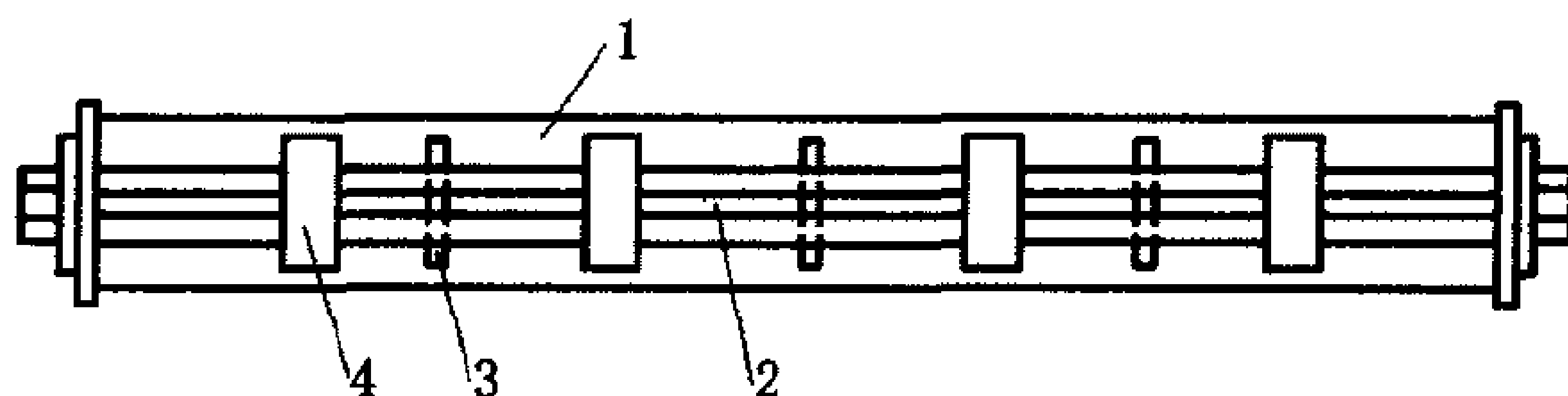


图 5.2.1 预应力拉杆示意

1—刚性主杆;2—张拉杆;3—隔板;4—缀板

5.2.2 应设置连接刚性杆与张拉杆间的隔板以增大张拉力值,提高预应力钢拉杆的整体承载力。整体承载力设计应以两杆材料同时达到各自强度设计值为原则。

5.2.3 预应力钢拉杆的强度验算,应符合下列公式的要求:

1 先张法时:

$$1) \text{ 刚性杆: } \sigma_1 = \frac{FE_1}{E_1A_1 + E_2A_2} - \sigma_{01}\gamma_{T2} \leq f_1 \quad (5.2.3-1)$$

$$2) \text{ 张拉杆: } \sigma_1 = \frac{FE_2}{E_1A_1 + E_2A_2} + \sigma_{02}\gamma_{T1} \leq f_2 \quad (5.2.3-2)$$

2 中张法时:

$$1) \text{ 首批荷载作用下的刚性杆 } \sigma_1 = \frac{F_1}{A_1} \leq f_1 \quad (5.2.3-3)$$

$$2) \text{ 施加预应力阶段的张拉杆 } \sigma_{02} = \frac{F_1 + \sigma_{01}A_1}{A_2} \leq f_2 \quad (5.2.3-4)$$

3) 第二批荷载作用下:

$$\text{刚性杆: } \sigma_1 = \frac{F_2 E_1}{E_1 A_1 + E_2 A_2} - \sigma_{01} \gamma_{T2} \leq f_1 \quad (5.2.3-5)$$

$$\text{张拉杆: } \sigma_1 = \frac{F_2 E_2}{E_1 A_1 + E_2 A_2} + \sigma_{02} \gamma_{T1} \leq f_2 \quad (5.2.3-6)$$

式中 σ_1, σ_2 ——刚性杆和张拉杆中的应力;

σ_{01}, σ_{02} ——刚性杆和张拉杆中的预应力;

F ——全部荷载;

F_1, F_2 ——第一批及第二批荷载;

A_1, A_2 ——刚性杆和张拉杆的截面面积;

E_1, E_2 ——刚性杆和张拉杆的材料弹性模量。

5.3 预应力压杆

5.3.1 预应力压杆可采用撑杆式压杆的各种形式(图 5.3.1), 可由中心杆、拉索系和连接二者的撑杆组成。

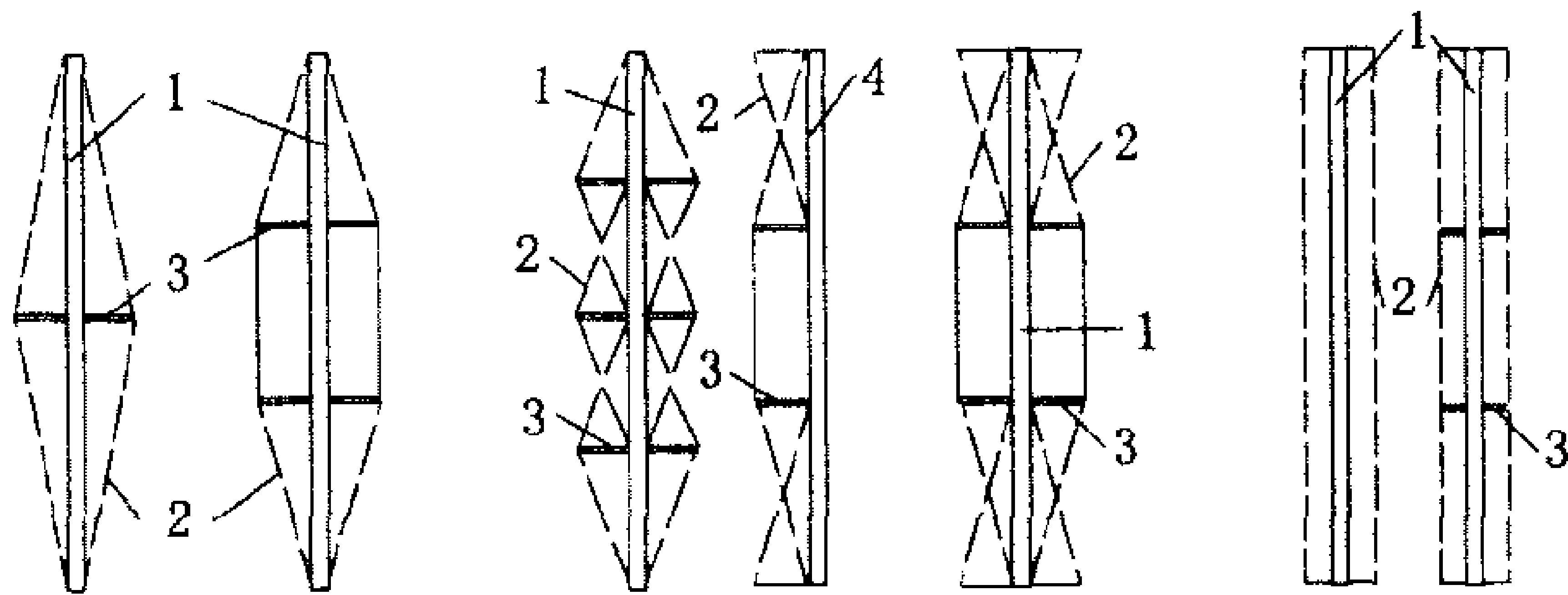


图 5.3.1 撑杆式压杆示意

1—中心杆; 2—拉索; 3—撑杆; 4—边杆。

5.3.2 拉索体系可沿杆身全长或局部布置, 宜采用廊外布索方式, 也可采用廊内布索。

5.3.3 撑杆可沿中心杆周围分布, 宜与索系相应均匀布置为四支或三支(图 5.3.3), 并与中心柱和索系相连。

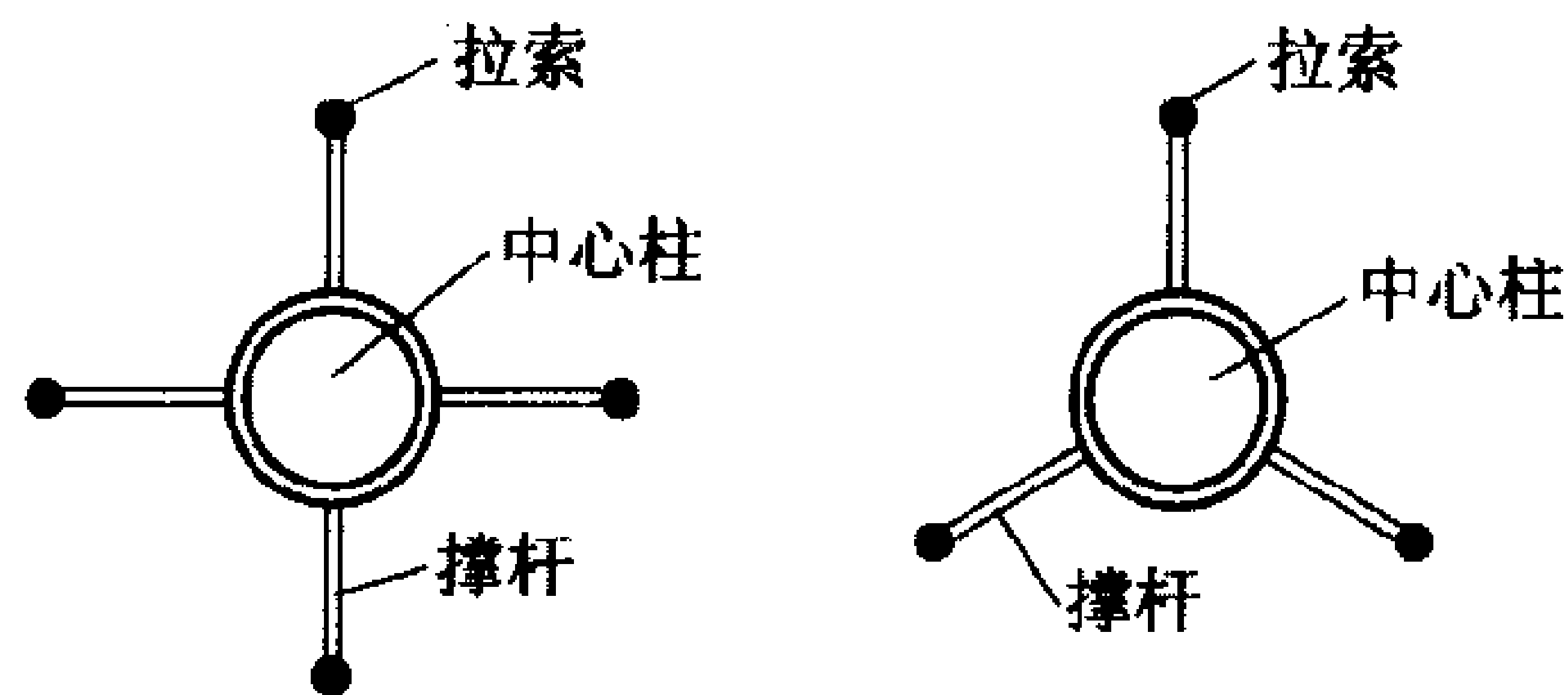


图 5.3.3 撑杆式压杆的截面

5.3.4 撑杆式压杆的节间数宜采用 2~4。

5.3.5 所采用的预应力力度应保证索在受力的各阶段始终受拉力,且力度不应过大,以免削弱杆件的承载力。

5.4 预应力实腹梁

5.4.1 预应力实腹梁按工艺可分为三类:拉索预应力梁、支座位移梁和弹性变形梁。前者又可分为力度张拉及电热张拉两种。

5.4.2 拉索预应力实腹梁的布索方案可分为廓内[图 5.4.2(a)、(c)、(f)]与廓外[图 5.4.2(g)、(h)]两种。

1 廓内布索又可分为断续[图 5.4.2(d)、(e)]和连续[图 5.4.2(a)、(c)、(f)]两种方案。拉索可布置成直线、曲线和折线形。断续索(局部式)和连续索(整体式)均应布置在弯矩峰值处以调整应力。亦可只在弯矩峰值处局部布索[5.4.2(b)、(e)]。

2 当建筑净空允许时可采用廓外布索,以增大卸载效应[图 5.4.2(g)~(j)]。预应力索布置在受拉翼缘外侧并以撑杆相连(又称下撑式梁)。索至梁截面重心的距离视卸载力度而定。

3 预应力梁的高跨比应小于同等荷载和支承条件下非预应力梁的高跨比。

4 在拉索锚头和转折点处必须保证拉力均匀传递。拉索内力必须计入构造和材料的应力损耗。

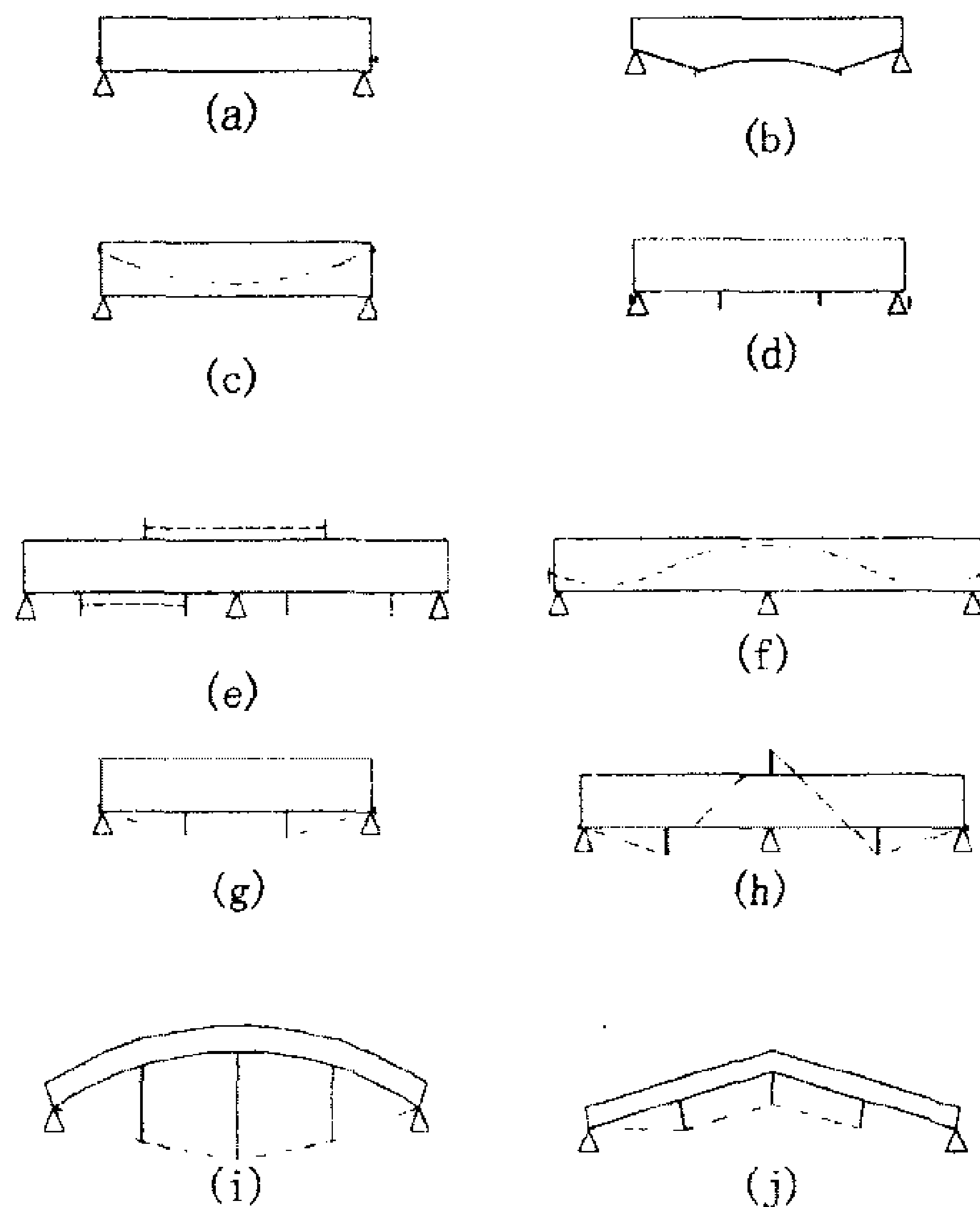


图 5.4.2 预应力实腹梁示意

5.4.3 支座位移法只适用于超静定的连续梁结构。可利用支座的强迫升降位移调整梁中的正负弯矩峰值。此类结构的支座设计标高应予充分保证,以实现卸载力度。

5.4.4 电热法预应力梁适用于在空中安装的简支梁。预应力拉条宜采用高强钢筋和钢棒。在施工操作过程中应保证电路良好绝缘。受外力或电火花损伤而带有疤痕的拉条,不得继续采用。

5.5 预应力桁架

5.5.1 拉索预应力桁架可分为局部布索和整体布索两类。前者直线布索于内力较大的拉杆杆身[图 5.5.1(a)、(c)、(d)、(j)],以提高杆件强度承载力;后者以折线或曲线形式连续布索于较大内力杆群处[图 5.5.1(b)、(l)、(m)],使弦杆、腹杆同时引入预应力。整体布索合理性的判断依据应是卸载杆的经济效益应大于增载杆

的附加消耗。拉索不仅可布置于桁架廓内[图 5.5.1(b)、(i)、(l)],亦可布索于廓外[图 5.5.1(e)、(f)、(g)],后者卸载效果更好。廓外布索时可采用撑杆使桁架与拉索相连[图 5.5.1(f)、(g)、(n)、(p)],以改善受力条件减少变形。对大跨度的重载桁架可采用双重布索方案[图 5.5.1(o)],以加大卸载力度。

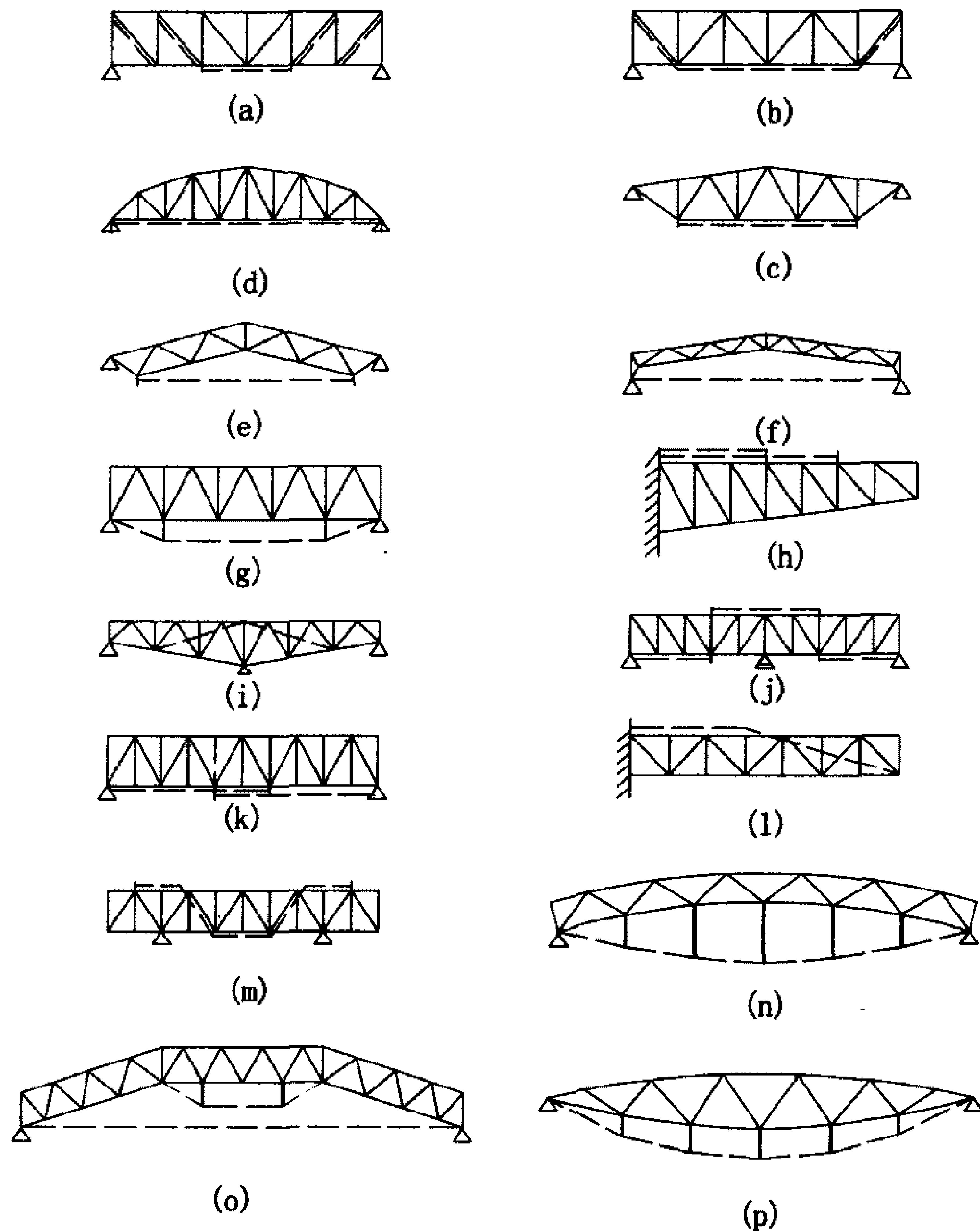


图 5.5.1 预应力钢桁架结构的形式

5.5.2 对桁架单独杆件施加预应力时,拉索应位于杆件截面一主惯性轴平面内并对称于截面重心(图 5.5.2-1)。对桁架整体施加预应力时,拉索应位于桁架垂直平面内[图 5.5.2-2(a)、(b)],或

对称置于垂直平面的两侧[图 5.5.2-2(c)]。

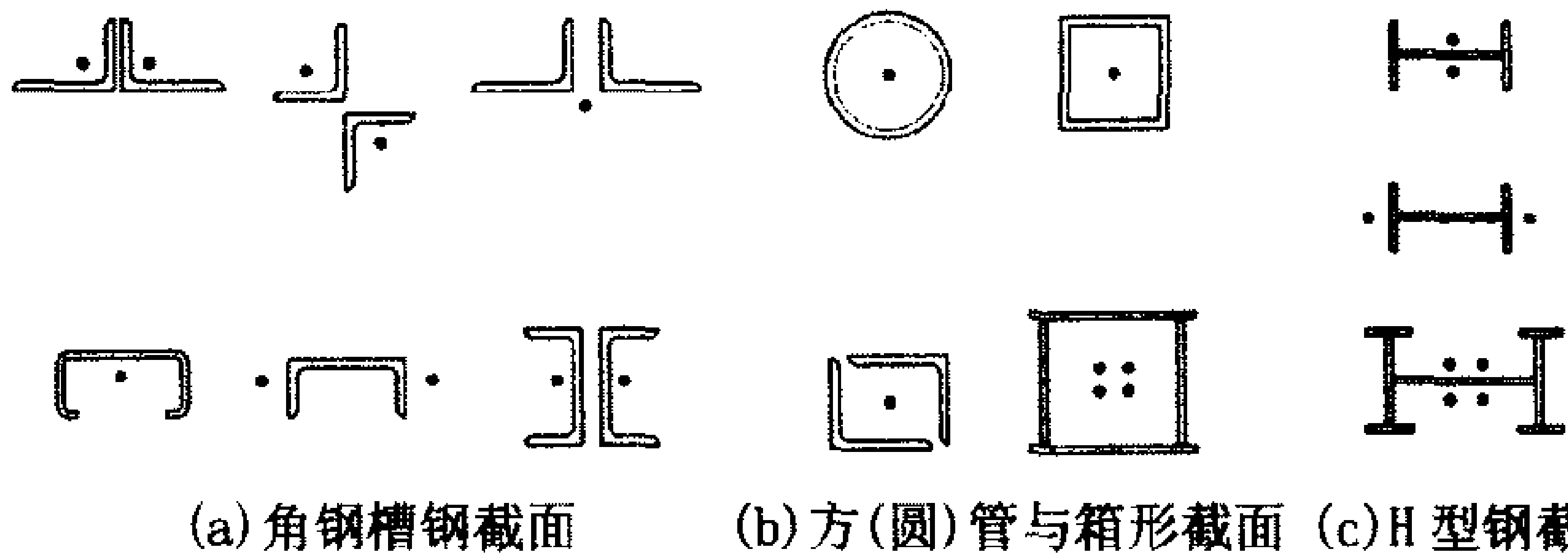


图 5.5.2-1 杆件截面形式

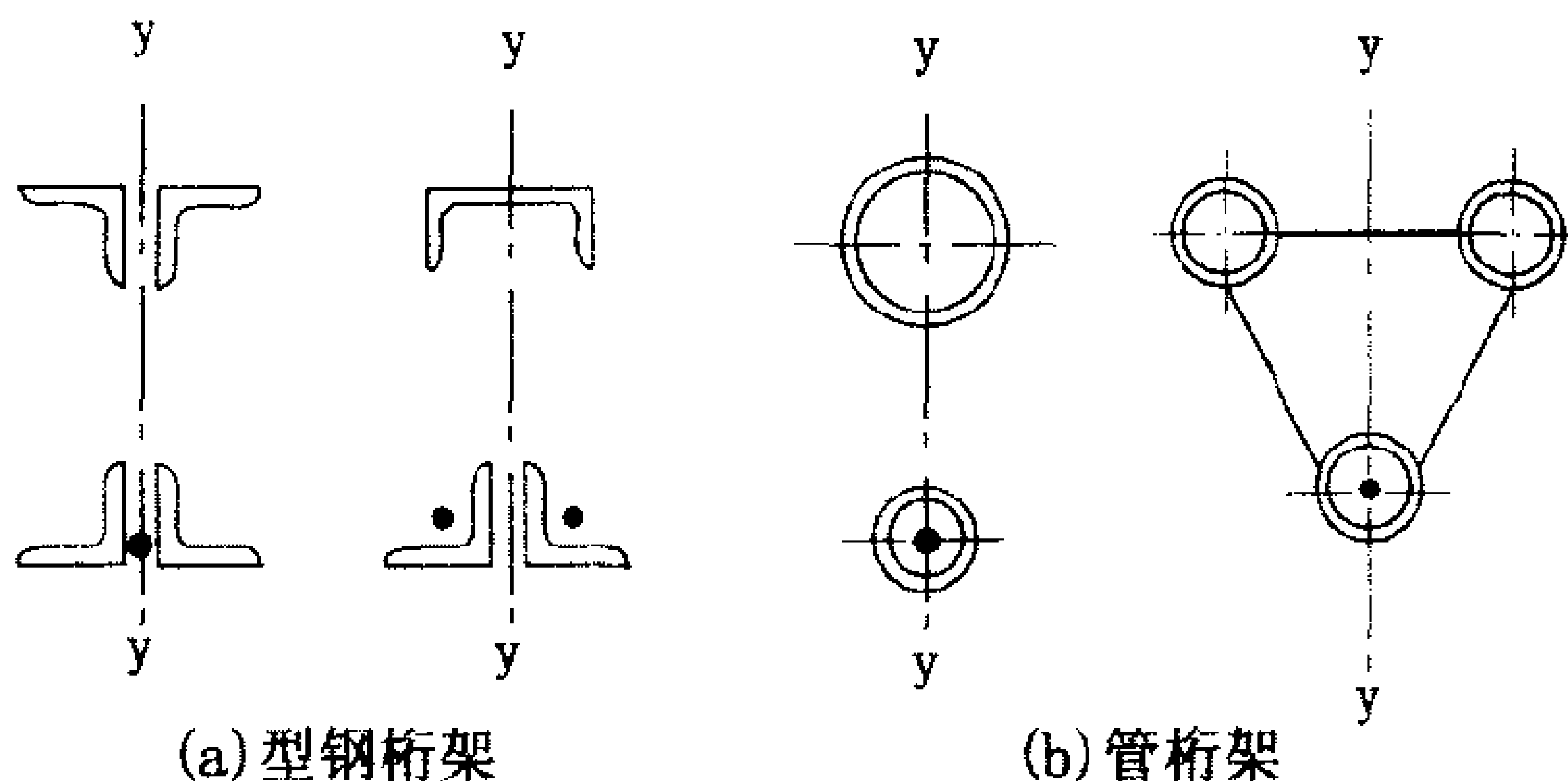


图 5.5.2-2 桁架截面布索位置示意

5.5.3 在弦杆内力较大的区段可增加局部布索[图 5.5.1(h)]或重叠布索[图 5.5.1(k)],以节约索材。

5.5.4 为了保证施加预应力时杆件的稳定性,拉索应以隔板或管段与杆身相连并保证在索板间纵向自由移动,连接点间距可按计算确定。

5.5.5 拉索的锚固点和转折点应位于支座节点或中间节点处,并通过加劲肋板将拉索张力传至节点中心。

5.5.6 单次预应力桁架的高跨比不应大于同比非预应力桁架的高跨比。多次预应力桁架的高跨比更应明显小于同比非预应力桁架的高跨比,以减轻自重,提高预应力效应。

5.5.7 当廓外布索或索与桁架不可能中间相连时,可将桁架组对成空间块体或设计成三边立体桁架,以保证预应力施工阶段桁架的整体稳定性。

5.5.8 拉索预应力桁架计算时,应根据不同布索情况和不同张拉工艺进行分析。对单独杆件局部布索的计算如同预应力拉杆,其预应力效应不影响桁架的其他杆件。对整体布索的预应力桁架,在外荷载作用下如同超静定结构体系。整体布索桁架所受的索系影响可分为两类:一是对桁架杆件的卸载;二是参与桁架共同承担外载。

1 对桁架杆件产生卸载影响的范围和力度,应视布索方案及张拉工艺而定。先张索仅对桁架杆件产生预应力,后张索不仅对先张索参与的结构体系产生预应力,而且对先张索的力度产生影响,必须计入内力分析。

2 整体布索索系先后张拉完毕并形成下列新的预应力桁架结构后,索与桁架共同承担荷载,其内力分析可按下列情况进行:

1)当 k 次超静定桁架布置 n 根拉索时,结构可视为 $k+n$ 次超静定体系。桁架中可取索中拉力 x 及冗杆内力 z 为未知力,列出 $k+n$ 个方程式组求解 $x_1 \cdots x_n$ 和 $z_1 \cdots z_k$ 。

2)在静定桁架中布置 n 根拉索时,结构可视为 n 次超静定体系。取索内力 x 为未知力,列出 n 个方程式可求解 $x_1 \cdots x_n$ 。

3)静定桁架中只布置一根拉索时,可按一次超静定结构求解索力 x_1 。在外荷载作用下,计入拉索的变形, x_1 可用力法按下式求出:

$$x_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{N_{oi} N_i l_i}{E_i A_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{N_{oi}^2 l_i}{E_i A_i} + \frac{l_{ca}}{E_{ca} A_{ca}}} \quad (5.5.8-1)$$

式中 N_{oi} 、 N_i ——分别为拉索单位张拉力、单位荷载作用下桁架第 i 杆中的内力;

E_i 、 A_i ——分别为桁架第 i 杆的材料弹性模量、截面面积;

l_i 、 l_{ca} ——分别为桁架第 i 杆、拉索的长度;

E_{ca} 、 A_{ca} ——分别为拉索材料的弹性模量、截面面积。

3 当沿静定桁架下弦长向布置等截面拉索时,荷载作用下的索力可按下式求出:

$$x_1 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i l_i}{l_a \left(1 + \frac{E_i A_i}{E_{ca} A_{ca}}\right)} \quad (5.5.8-2)$$

当结构体系、布索方案、张拉工艺较复杂时,可采用预应力拉索张拉全过程分析法对索系和结构内力进行计算。

5.5.9 对预应力桁架杆件承载力的验算,在最不利工况下,应符合下列公式的要求:

1 荷载内力与预应力符号不同的桁架杆件:

1) 荷载作用下的受压杆件:

当荷载内力大于预应力时:

$$N_{pi} - (\gamma_2 x + x_1) N_{1i} \leq \varphi_i f A_i \quad (5.5.9-1)$$

当荷载内力小于预应力时:

$$N_{pi} - (\gamma_1 x + x_1) N_{1i} \leq f A_{ni} \quad (5.5.9-2)$$

2) 荷载作用下的受拉杆件:

当荷载内力大于预应力时:

$$N_{pi} - (\gamma_2 x + x_1) N_{1i} \leq f A_{ni} \quad (5.5.9-3)$$

当荷载内力小于预应力时:

$$N_{pi} - (\gamma_1 x + x_1) N_{1i} \leq \varphi_i f A_i \quad (5.5.9-4)$$

2 荷载内力与预应力符号相同的桁架杆件:

1) 荷载作用下的受压杆件:

$$N_{pi} - (\gamma_1 x + x_1) N_{1i} \leq \varphi_i f A_i \quad (5.5.9-5)$$

2) 荷载作用下的受拉杆件:

$$N_{pi} - (\gamma_1 x + x_1) N_{1i} \leq f A_{ni} \quad (5.5.9-6)$$

3 拉索:

$$\gamma_1 x + x_1 \leq f_{ca} A_{ca} \quad (5.5.9-7)$$

式中 N_{pi} ——全部荷载作用下第 i 杆的内力;

- N_{1i} ——单位拉索张力在第 i 杆中产生的内力；
 γ_1 ——张拉系数，采用 1.1；
 γ_2 ——张拉系数，采用 0.9；
 φ_i ——第 i 杆的受压稳定系数；
 A_i, A_{ni} ——分别为第 i 杆的毛截面面积、净截面面积；
 A_{ca}, f_{ca} ——分别为拉索的截面面积、强度设计值。

5.6 预应力拱架

5.6.1 预应力拱架结构可分为拉索式和位移式两类。亦可采用两者混合式。

5.6.2 拉索式预应力拱架的布索方案可有多种(图 5.6.2)，其经济效益与拱的几何轴线、荷载特性、索系类型、预应力力度、拱体截面形式和构造等因素有关。拉索的功能是承担拱架的侧推力和调整拱架截面应力峰值。

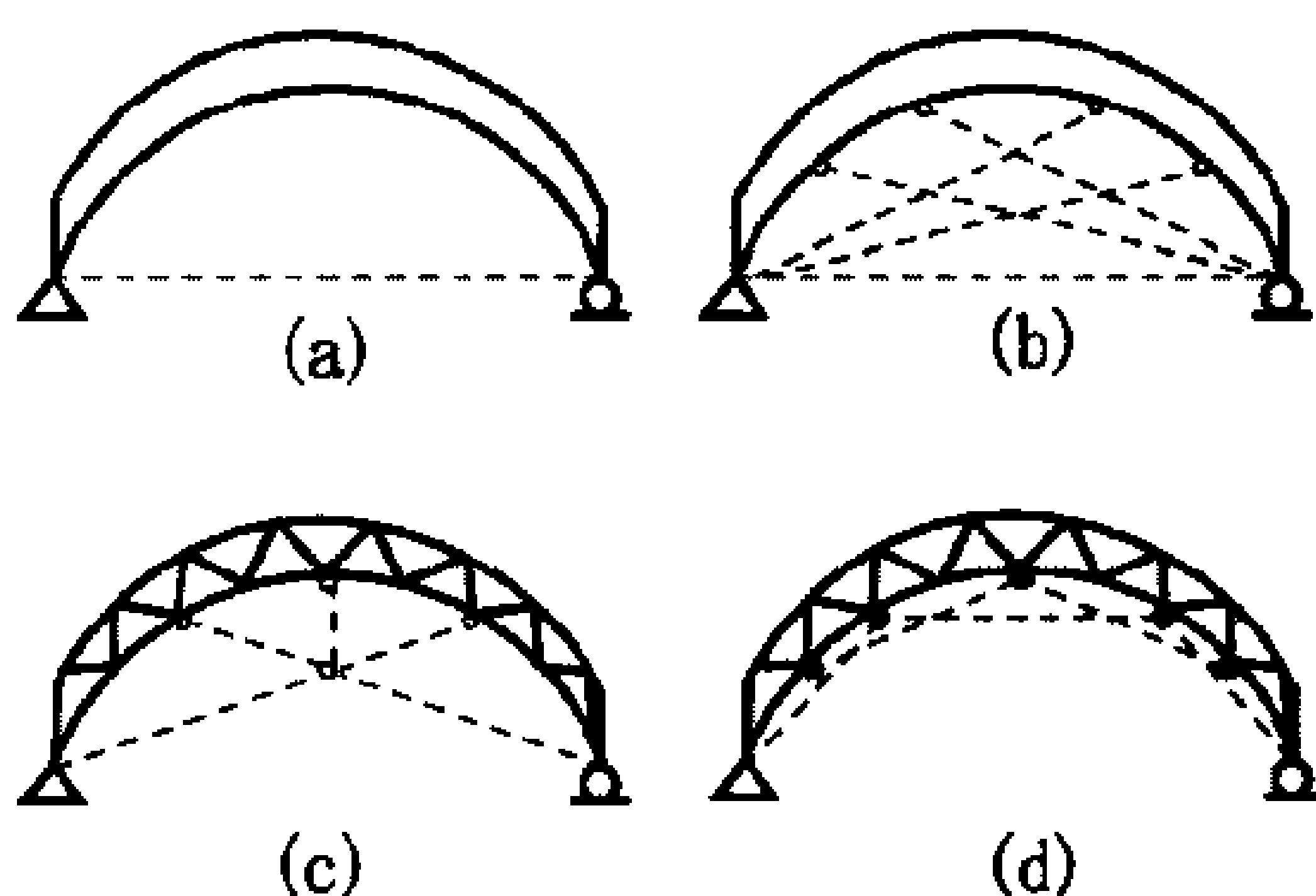


图 5.6.2 拱架结构布索示意

5.6.3 位移式预应力拱架可不设拉索，仅借助支座铰点的水平位移，调整拱截面内的荷载应力。其工艺简单，但对场地地质条件要求较高，以保证支座的设计位置。

5.7 预应力框架

5.7.1 拉索预应力框架结构的布索方案可有下列 3 种：

1 横向布索。

拉索可水平布置于两柱脚之间[图 5.7.1(a)]或两柱头之间

[图 5.7.1(b)]。为提高卸载效应,也可在拉索与横梁间设置二次张拉的撑杆[图 5.7.1(d)],借助于增长撑杆的支顶作用再次调节内力,改善刚度。梁柱铰接的框架也可只对横梁单独布索[图 5.7.1(c)]。

2 竖向布索。

可自柱头竖向布索。索端可锚固于独立基础上[图 5.7.1(e)],亦可锚固于柱基础上[图 5.7.1(f)]。

3 连续布索。

沿梁柱长度在受正弯矩一侧连续布索[图 5.7.1(g)、(h)]。拉索的锚固和张拉均可在地面操作。

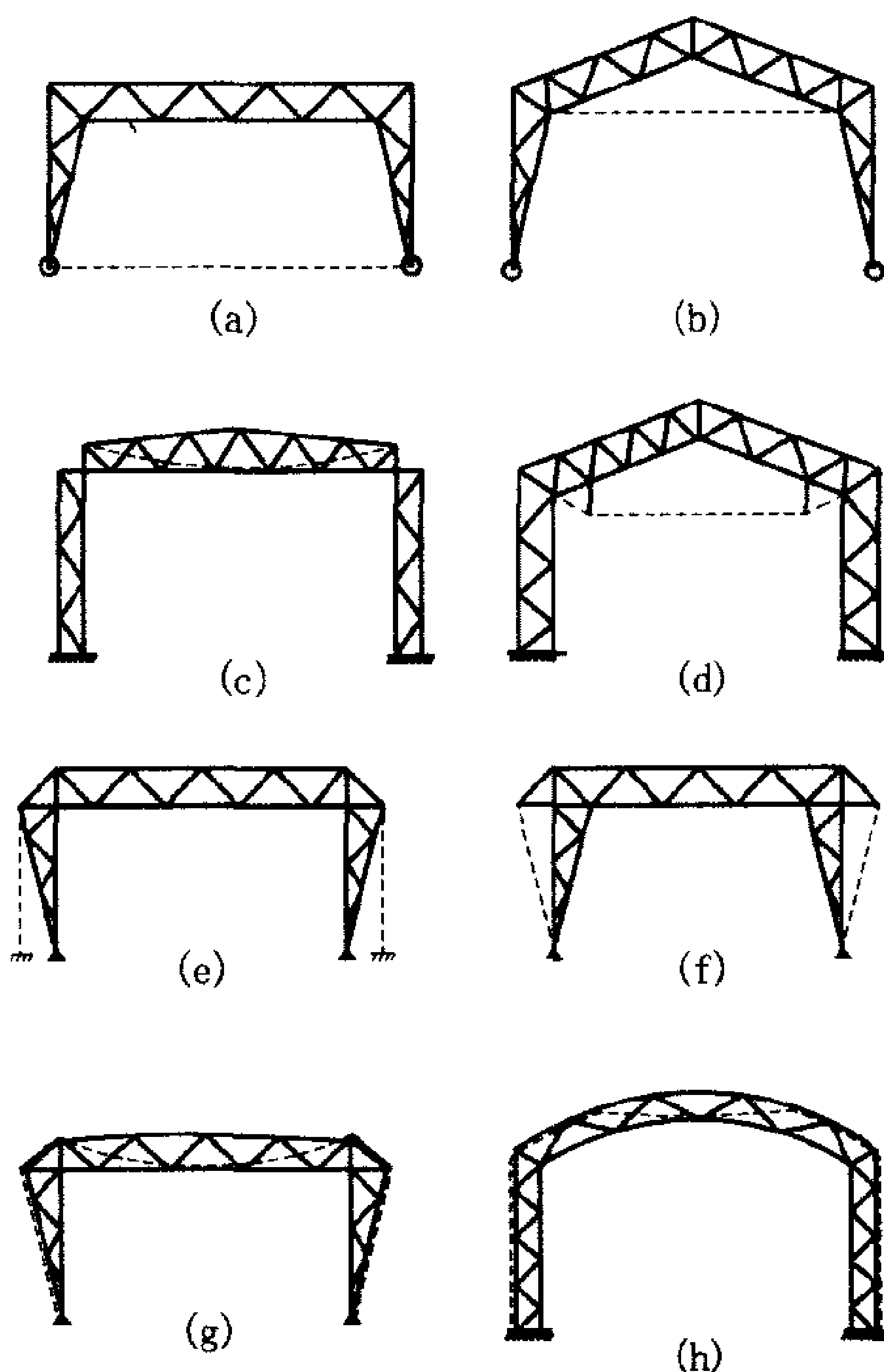


图 5.7.1 框架结构布索示意

5.7.2 支座位移法适用于超静定框架体系,可利用部分支座节点

的水平或垂直位移调整横梁和柱中的弯矩峰值(图 5.7.2)。由于位移量设计值大小直接影响预应力力度。因此,应保证支座的设计标高和位置。

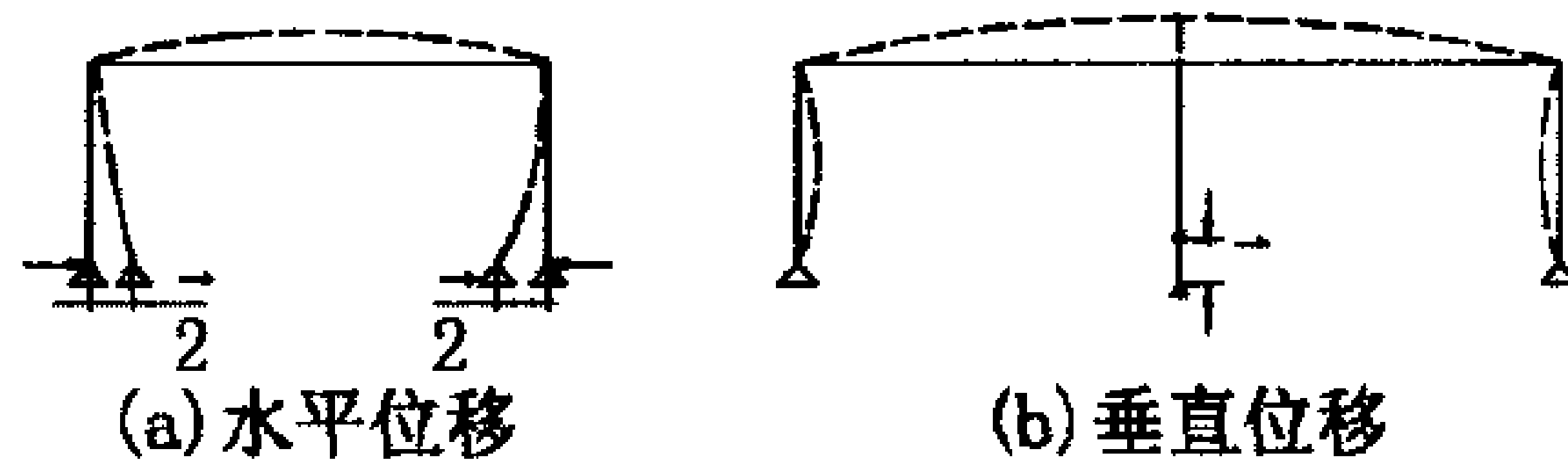


图 5.7.2 支座位移法预应力框架方案示意

5.8 预应力吊挂结构

5.8.1 预应力吊挂结构的结构体系可分为平面吊挂结构和空间吊挂结构两类。按吊索的几何形状可分为斜向吊挂结构[5.8.1(a)]和竖向吊挂结构[5.8.1(b)]两种。

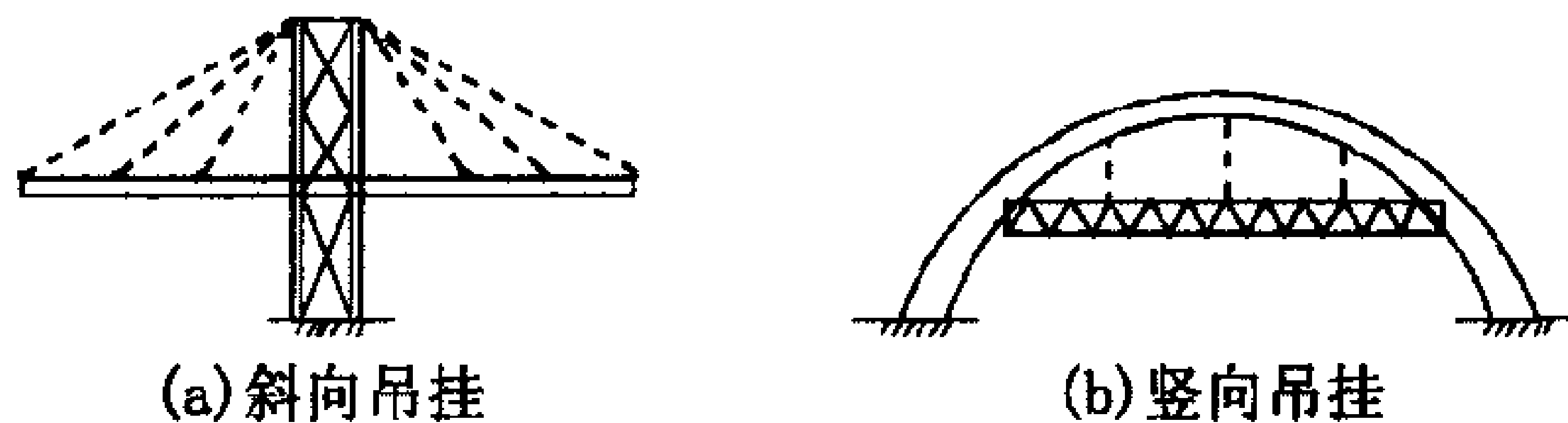


图 5.8.1 预应力平面吊挂结构示意

5.8.2 吊挂结构可由三部分组成:支承结构、屋盖结构和吊索。支承结构主要有立柱、刚架、拱架和悬索等。屋盖结构宜采用经济合理的轻型结构。布索方案应遵循对称、均衡的原则,形成均匀的屋盖吊点,降低内力峰值,增大结构刚度。吊索与屋盖平面的夹角可取 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

5.8.3 吊索的形式可分为放射式[5.8.3(a)],竖琴式[5.8.3(b)],扇式[5.8.3(c)]和星式[5.8.1(d)]数种。吊索与屋面的夹角不宜小于 25° 。被吊挂的横向结构可采用实腹梁、蜂窝梁、桁架、立体桁架和拱等几种类型。

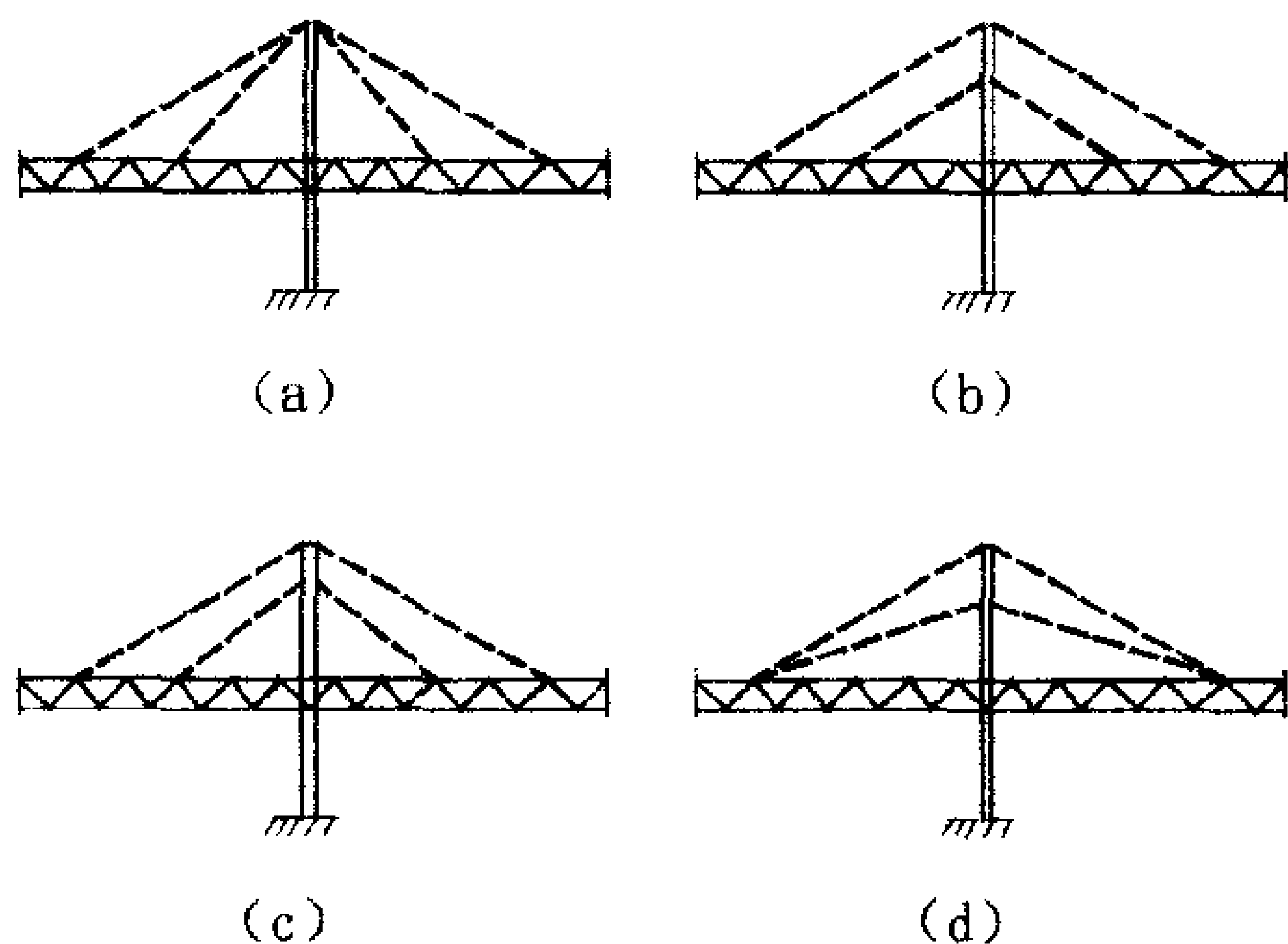


图 5.8.3 预应力斜拉结构的布索方案示意

5.8.4 空间吊挂结构宜采用整体式,亦可由单元式组拼成整体结构。吊挂的空间结构可采用网架、网壳、空间桁架等形式。

5.8.5 必须保证平面吊挂结构间和空间单元结构间的体系纵向刚度。可采用交错布索方案,亦可采用相邻平面(单元)立柱间设置拉索支撑的方案加强结构的整体刚度。

5.8.6 在相邻空间结构单元交界处应进行竖向连接,以增强屋盖结构的整体性,但在构造上应保证吊挂单元可横向自由胀缩。

5.8.7 吊索穿越屋面处的密封构造和防漏措施应有效可靠,并应允许索孔间有相对位移。当屋面可能出现吸力作用时,还应增设抗风索系。

5.9 预应力立体桁架

5.9.1 根据桁架的横截面形式,预应力立体桁架可分为三角形和四边形两种(图 5.9.1)。其中三角形又可分为倒三角形和正三角形。拉索可布于弦杆体外,亦可布于弦杆体内。

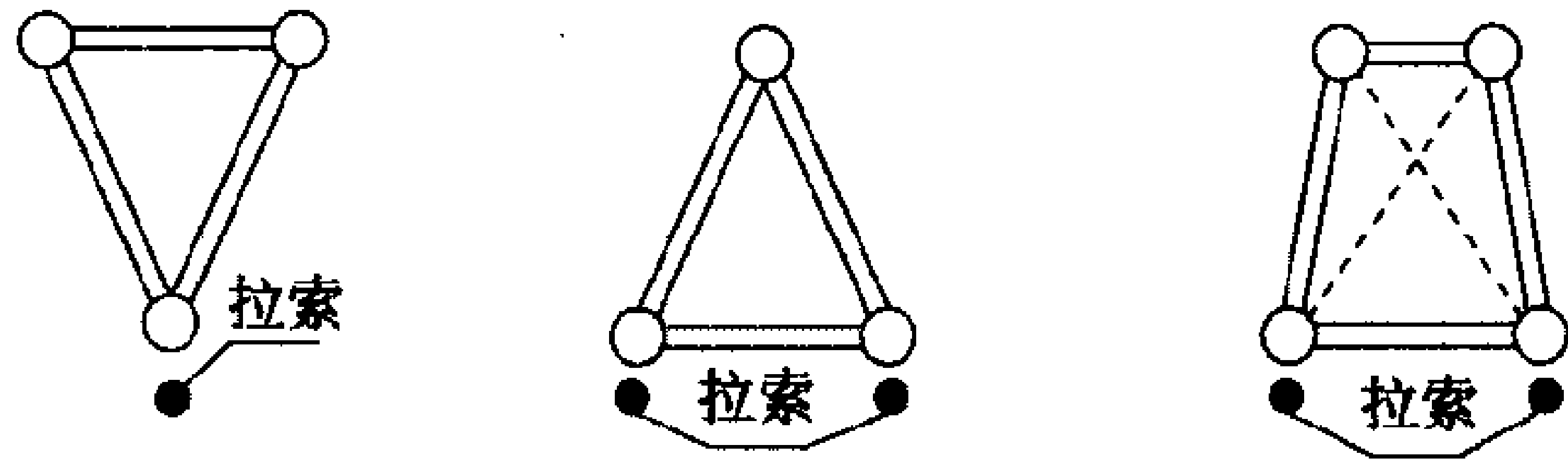


图 5.9.1 预应力立体桁架的截面形式示意

5.9.2 预应力立体桁架应进行下列计算：

1 单独杆件局部施加预应力的桁架，其计算要求与普通钢桁架相同。其中预应力杆件按单独预应力拉杆设计。

2 整体张拉预应力可分为先张法、中张法和多张法。单次预应力时，宜采用中张法。中张法预应力桁架可采用下列步骤计算：

- 1) 计算结构在自重和部分永久荷载作用下产生的前期荷载内力(拉索暂不参与受力)；
- 2) 计算钢索张拉力使结构产生的预应力，并对前期荷载内力峰值进行卸载；
- 3) 计算在其余永久荷载和各种可变荷载作用下，结构承受的荷载内力(拉索参与共同受力)；
- 4) 验算在前期荷载、预应力、其余永久荷载和全部可变荷载作用下结构的内力，使结构及杆件满足强度、刚度及稳定性要求。

5.9.3 当预应力立体桁架按拟梁计算时，应考虑索与普通钢材弹性模量的差异，计算抗弯刚度时折算惯性矩可取：

1 当撑杆较长，中性轴位于立体桁架之外时：

$$I_{eq} = \frac{A_s \times 0.928A_{ca}}{A_s + 0.928A_{ca}} h_0^2 \quad (5.9.3-1)$$

2 当撑杆较短，中性轴位于立体桁架上下弦之间时：

$$I_{eq} = \frac{A_{s1} \times (A_{s2} + 0.928A_{ca})}{A_{s1} + (A_{s2} + 0.928A_{ca})} h_0^2 \quad (5.9.3-2)$$

式中 I_{eq} ——预应力立体桁架按拟梁计算时的折算惯性矩；
 h_0 ——某截面处桁架的计算高度；
 A_s ——桁架钢管的截面面积；
 A_{s1} ——桁架上弦钢管的截面面积；
 A_{s2} ——桁架下弦钢管的截面面积；
 A_{ca} ——拉索的截面面积。

5.9.4 设计预应力立体桁架时,应考虑由于空间桁架中加入钢索单元所引起的组成、构造、受力特点和性质的变化。此时,除应符合本节的规定外,尚应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的相关规定。

5.10 预应力网架

5.10.1 预应力网架设计应包括下列内容:结构选型和优化,布索方案比较和选择,张拉阶次和力度设计,结构静力分析,结构杆件和节点设计,结构施工工艺设计等。

5.10.2 当预应力网架采用有限元方法分析时,宜采用下列基本假定:所有的荷载均作用于节点;网架的节点均视为理想的空间铰节点;杆件只承受轴向力;索与其通过的中间节点紧密接触;结构处于弹性工作阶段;在荷载作用下变形很小。

5.10.3 预应力网架的预应力宜采用下列两种施加方式:(1)支座位移法,通过强行调整网架支座的高差建立预加内力;(2)拉索法,在网架的下弦平面内(或杆截面内布索)或下弦平面下方加撑杆布置预应力索,通过张拉预应力索使结构产生与外荷载反向的挠度和内力。

5.10.4 预应力网架宜采用多次预应力的卸载技术。

5.10.5 预应力网架中拉索的布置方式可采用在网架高度范围内布置下弦水平索或折线索[图 5.10.5(a)、(b)、(c)],也可在下弦设置一个或多个支撑点布索[图 5.10.5(d)]。

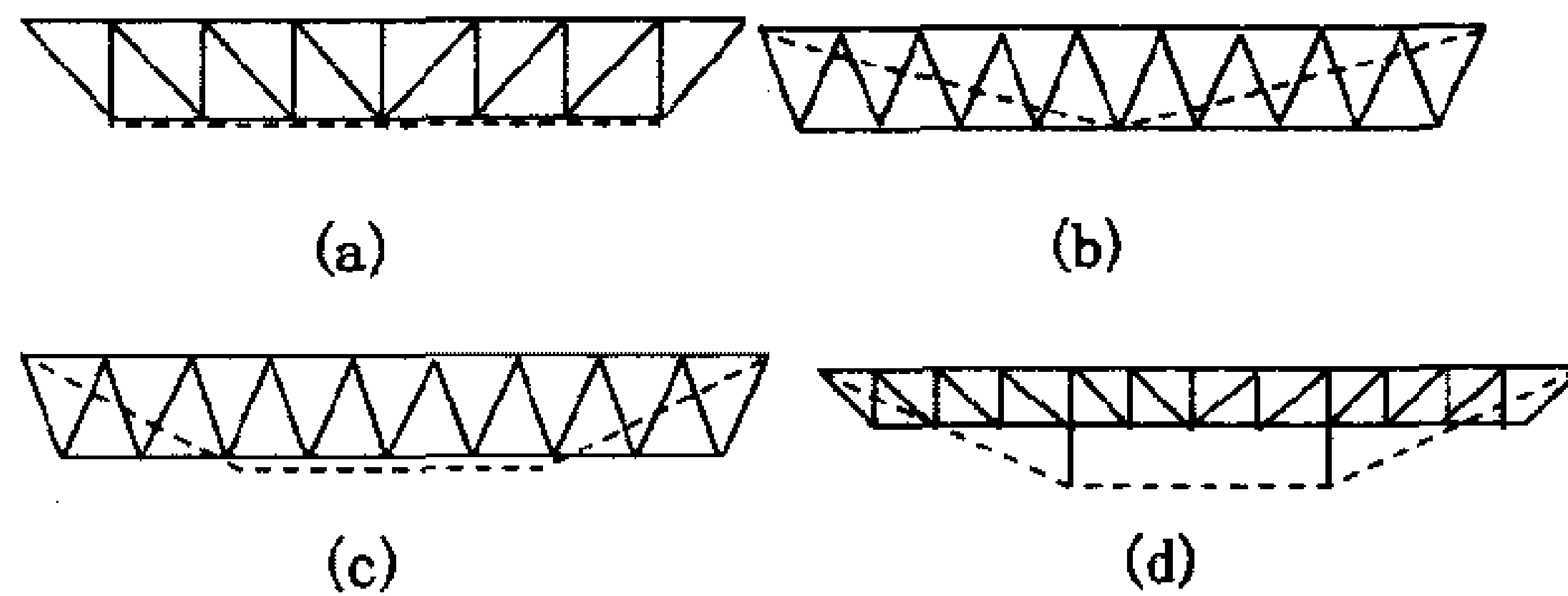


图 5.10.5 预应力网架的布索方式

5.10.6 预应力网架中,预应力索的平面布置可采用对角线布索[图 5.10.6(a)]、平行边布索[图 5.10.6(b)]、井字式布索[图 5.10.6(c)]、多重井字布索[图 5.10.6(d)]和四角放射布索[图 5.10.6(e)]等方案。

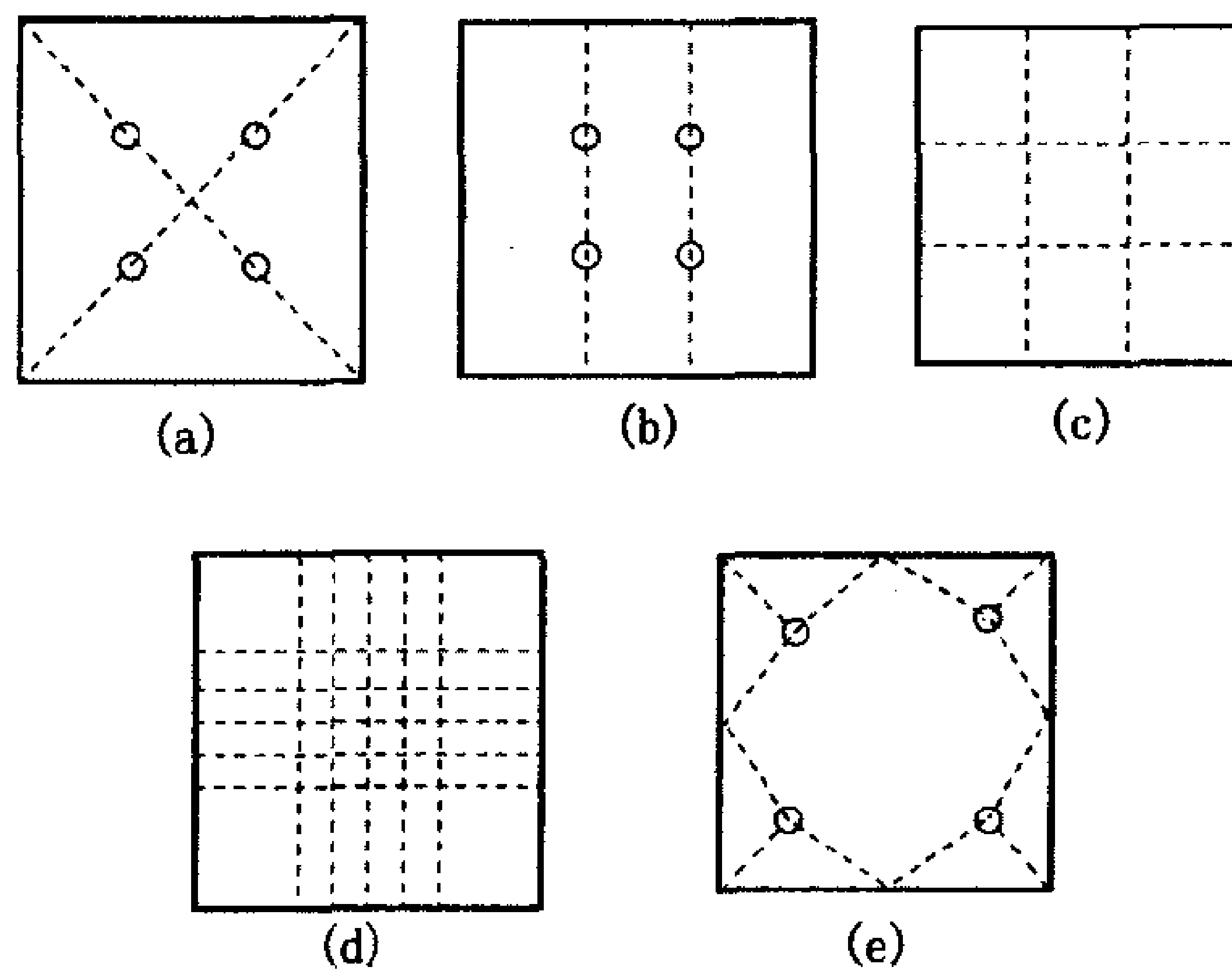


图 5.10.6 预应力网架中索的平面布置

5.10.7 在施加预应力和加载阶段,网架的支座宜采用可侧移(克服摩擦力后可侧移)的构造措施。施工完成后,应根据设计要求将支座与下部结构连接固定。

5.10.8 对网架施加预应力过程中内力变号的杆件,应专门验算其强度和稳定性。

5.10.9 在方案估算和初步设计阶段,可采用拟板法对预应力网架进行近似的静力分析和动力计算。

5.11 预应力网壳

5.11.1 预应力网壳的设计内容等同第 5.10.1 条的规定。必要时,尚应进行网壳稳定性计算。

5.11.2 预应力网壳可采用下列结构形式:支座拉索预应力网壳、交叉梁系预应力网壳和弦支穹顶等。

5.11.3 支座拉索预应力网壳的设计应符合下列规定:

1 支座拉索预应力网壳可采用下列结构形式:预应力球面网壳、预应力柱面网壳、预应力双曲扁网壳和预应力扭网壳。

2 支座拉索预应力网壳中拉索的布置应满足建筑造型、使用功能等建筑要求,并改善结构刚度和结构内力分布,使卸载杆多、增载杆少,降低结构用钢量。

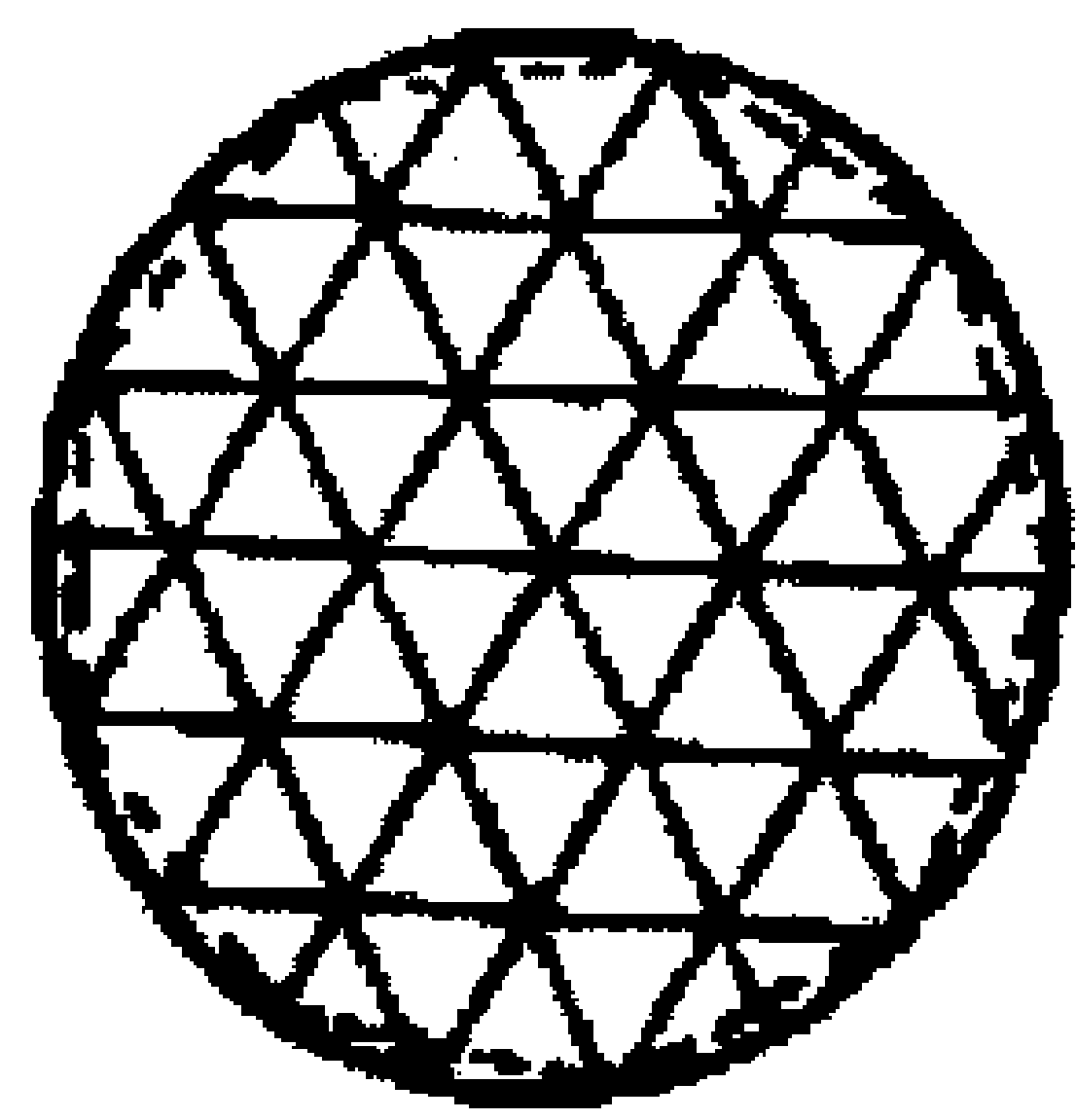
3 预应力球面网壳宜沿周边支座分段布索,或沿支座对角线布索,或间隔几个支座布索[图 5.11.3(a)]。

4 预应力柱面网壳宜在两端和中部横膈式桁架的下弦,沿投影平面短向布索[图 5.11.3(b)]。

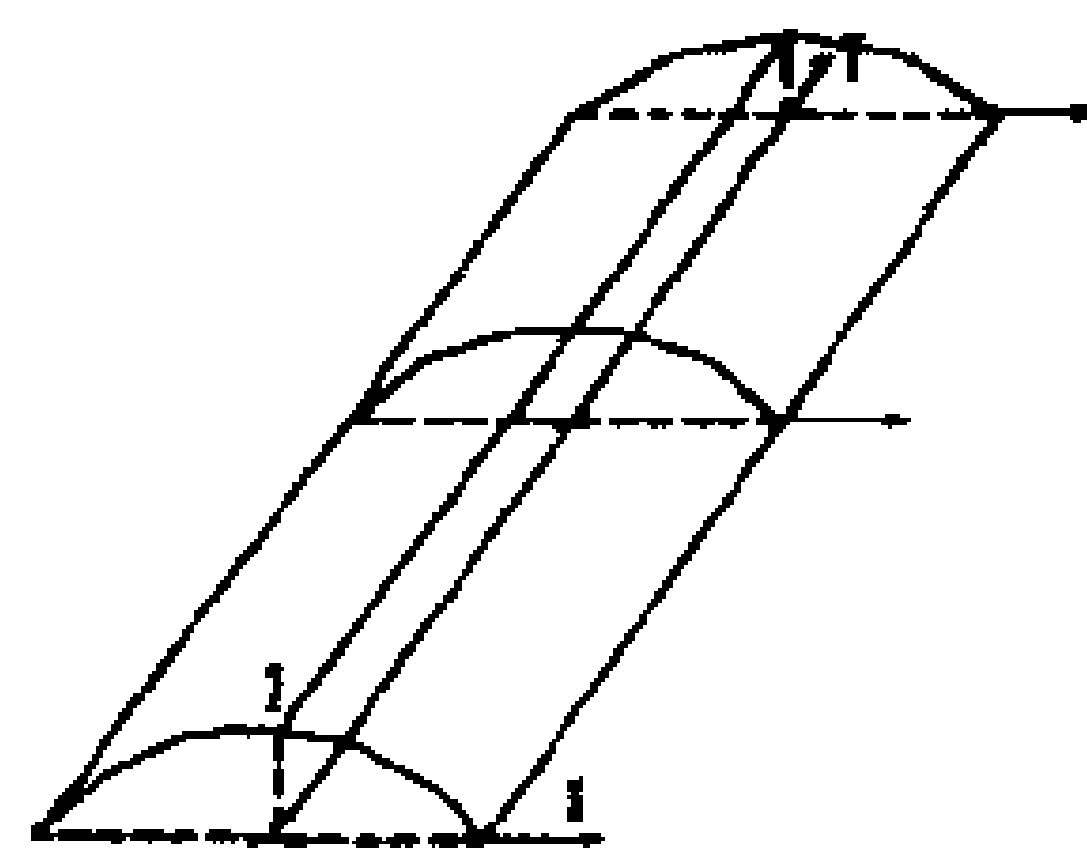
5 预应力双曲扁网壳宜沿网壳边缘桁架系杆布索[图 5.11.3(c)]。

6 预应力扭网壳宜在网壳需要设置系杆的部位布索[图 5.11.3(d)]。

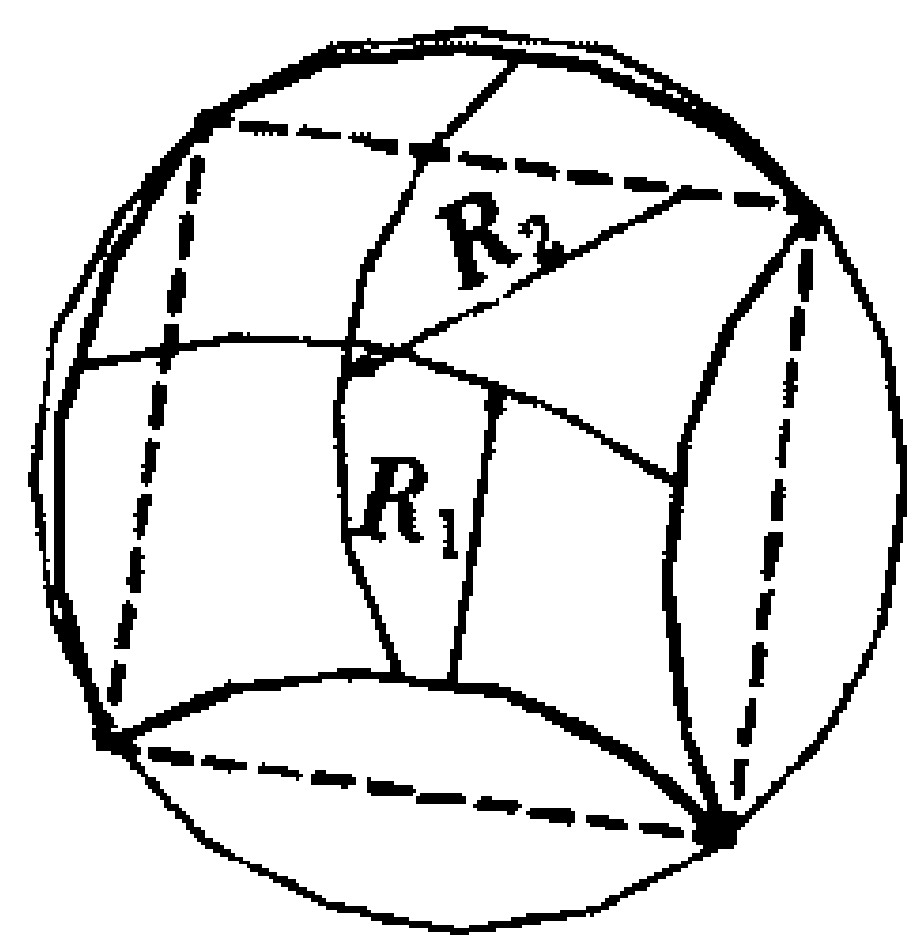
7 当采用拟壳法对支座拉索预应力网壳进行近似静力分析和动力计算时,预应力索的初始预应力可作为外力考虑。在使用状态下,索作为系杆考虑,可忽略索与普通钢管材料弹性模量差异的影响。



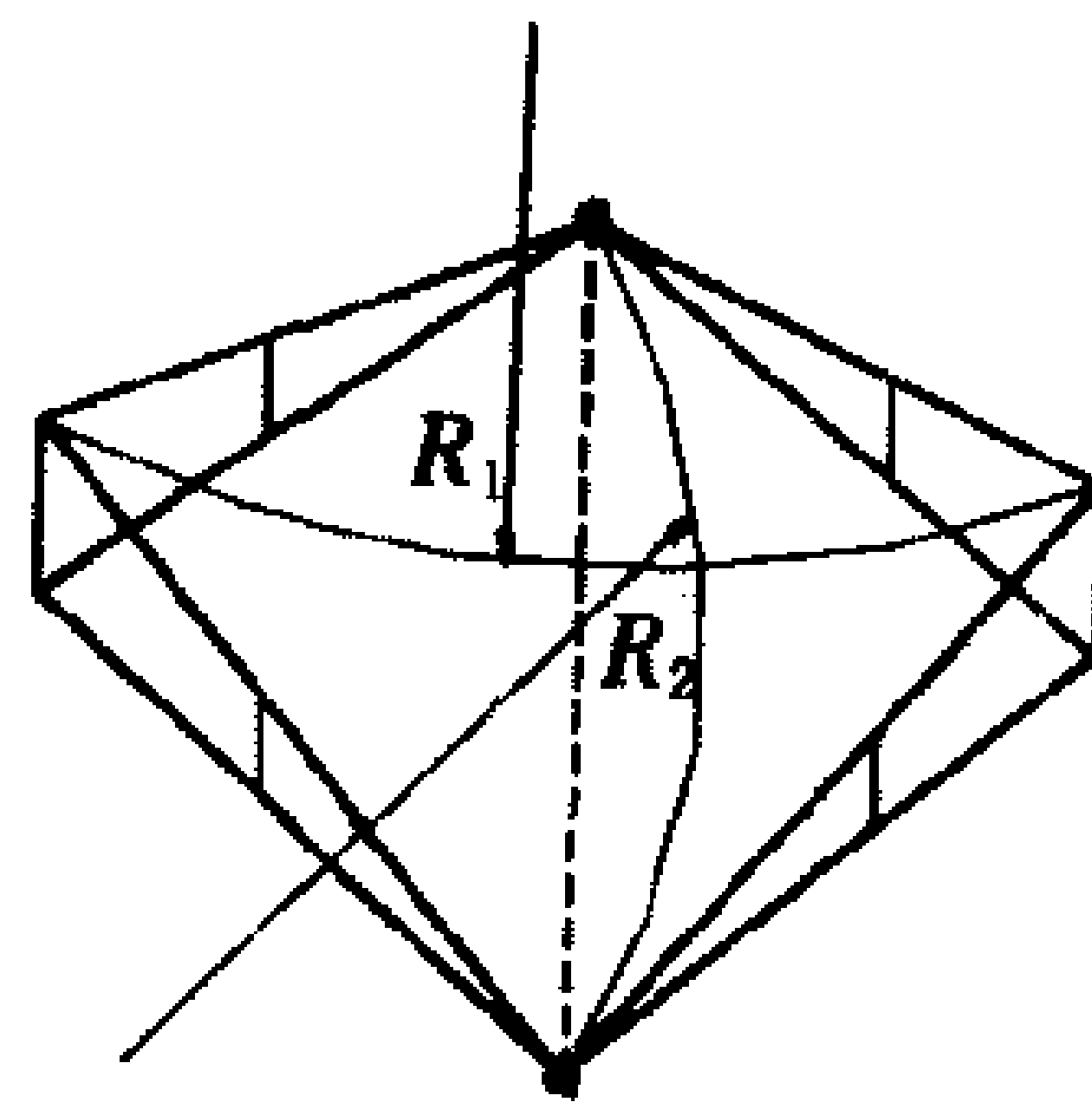
(a) 预应力球面网壳



(b) 预应力柱面网壳



(c) 预应力双曲扁网壳



(d) 预应力扭网壳

图 5.11.3 支座拉索预应力网壳的布索方案

5.11.4 交叉梁系(张弦梁系)预应力网壳的设计应符合下列规定:

1 交叉梁系预应力网壳可采用下列结构形式:双向、多向和肋环式交叉梁系预应力网壳。

2 双向式交叉梁系预应力网壳适用于矩形、圆形和椭圆形平面[图 5.11.4(a)]。

3 多向式交叉梁系预应力网壳适于多边形平面[图 5.11.4(b)]。

4 肋环式交叉梁系预应力网壳可按中心辐射式放置拱,拱下设置撑杆,撑杆与环向索或斜索连接[图 5.11.4(c)]。

5 交叉梁系预应力网壳可采用花篮螺丝调节法、张拉钢索法和支承卸除法施加预拉力。

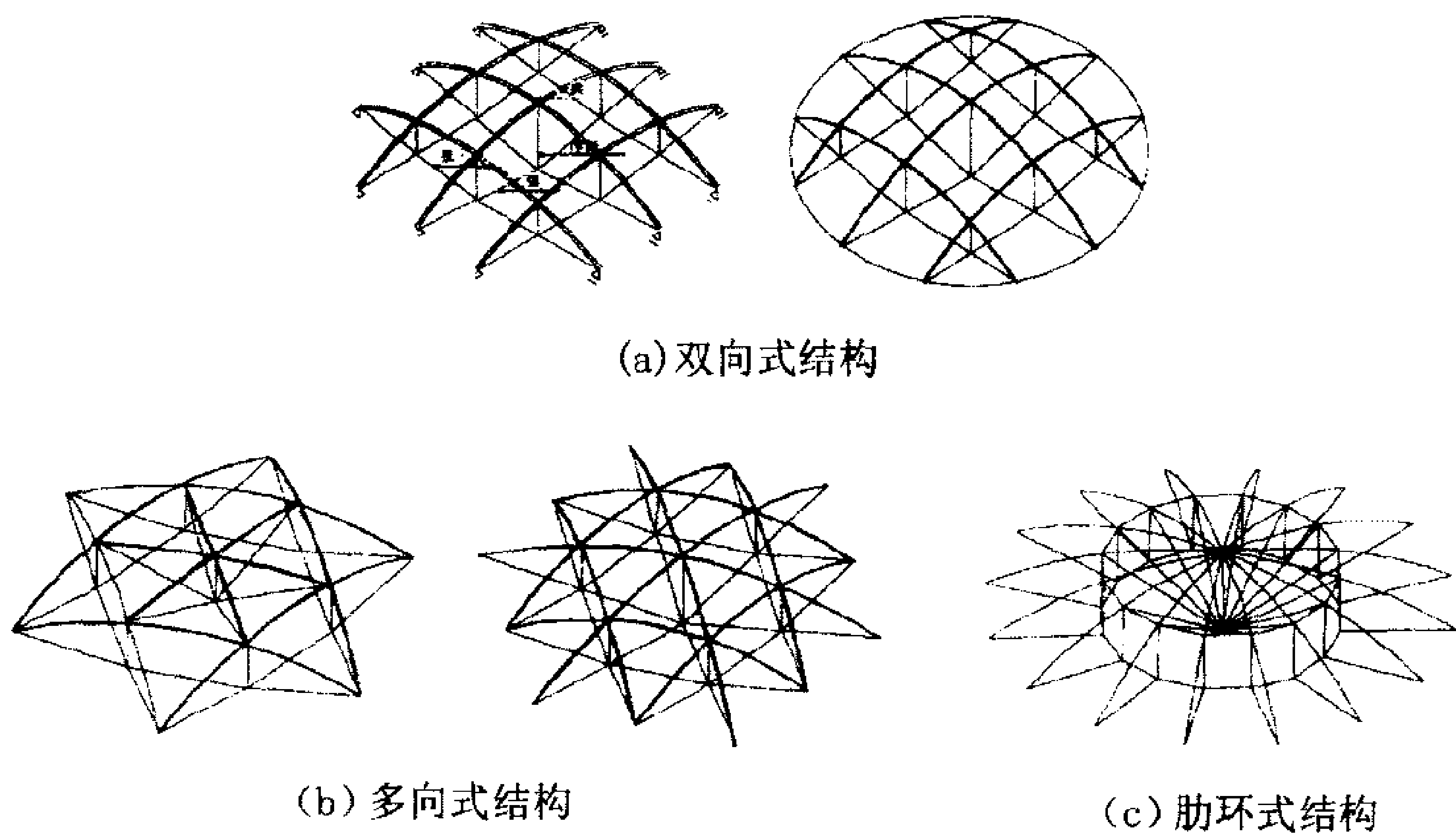


图 5.11.4 交叉梁系预应力网壳的结构形式

5.11.5 弦支穹顶的设计应符合下列规定：

1 弦支穹顶应由单层网壳、撑杆和索形成结构体系（图 5.11.5-1）。

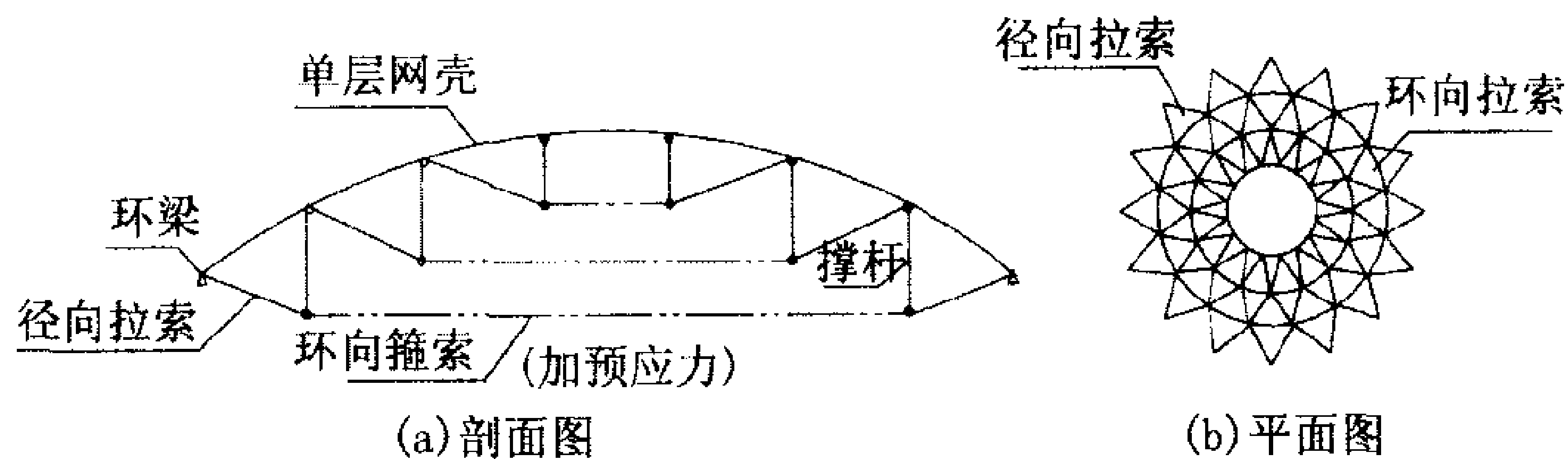


图 5.11.5-1 弦支穹顶结构体系

2 按上层单层网壳的形式，弦支穹顶可分为下列形式：肋环型弦支穹顶[图 5.11.5-2(a)]、施威德勒型弦支穹顶、联方型弦支穹顶、凯威特型弦支穹顶和凯威特-联方型弦支穹顶 [5.11.5-2(b)]等。

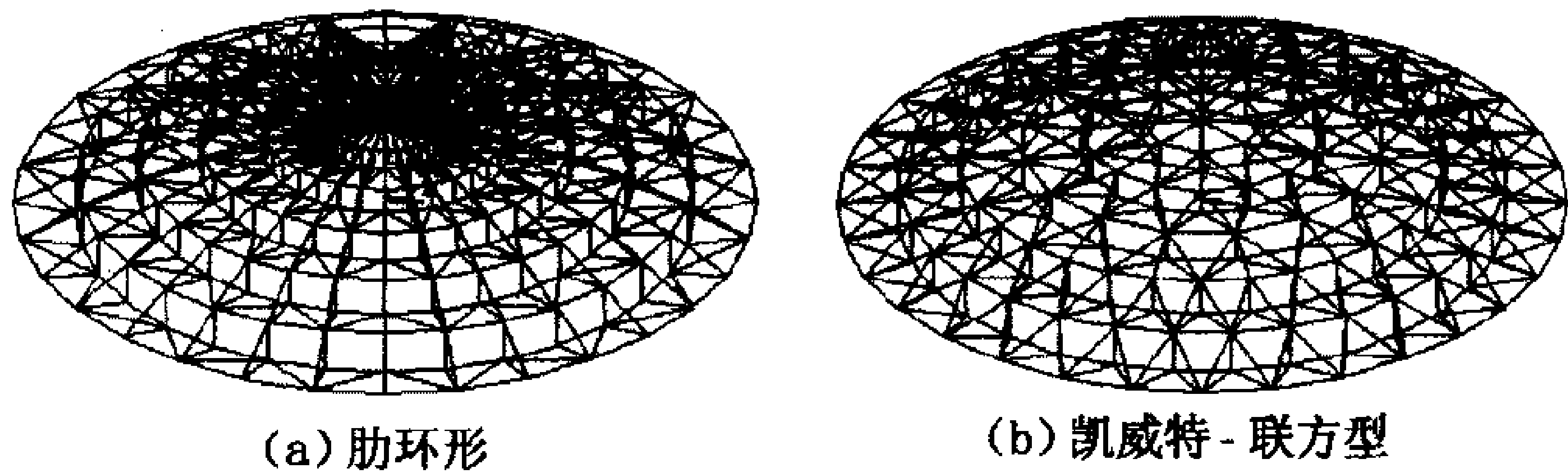


图 5.11.5-2 弦支穹顶的结构形式

3 确定弦支穹顶拉索中施加的预应力值,应以抵抗单层网壳的等效节点荷载和减少最外环杆件对支承结构的水平推力为原则。计算模型可按图 5.11.5-3 选取。

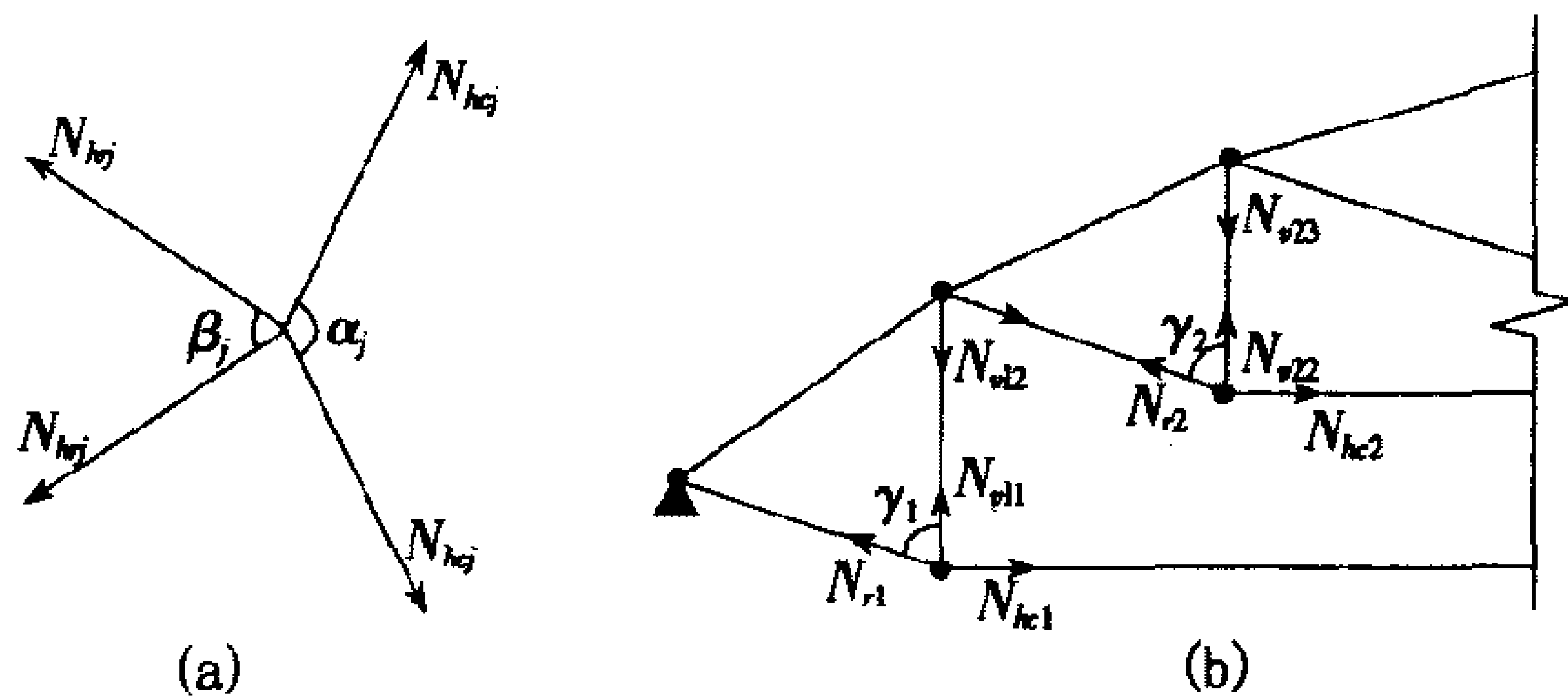


图 5.11.5-3 设定弦支穹顶预应力比值的计算模型

各环索施加的预应力比值为 $N_{hc1} : N_{hc2} : \dots : N_{hcj} : \dots : N_{hcn}$, 其中 N_{hcj} 可按式取值:

$$N_{hcj} = \begin{cases} (F_j + K_{j+1} N_{hc(j+1)}) / K_j & j = n-1, n-2, \dots, 1 \\ F_n / K_n & j = n \end{cases} \quad (5.11.5)$$

式中 $K_j = 2 \cot \gamma_j \frac{\cos(\alpha_j/2)}{\cos(\beta_j/2)}$;

F_j ——弦支穹顶第 j 道环索上方单层网壳的等效节点荷载;

N_{hcj} ——第 j 道环向索的轴力;

N_{vji} ——第 i 道环索预应力引起的第 j 道环索处撑杆的轴力;

α_j ——第 j 道环索相邻索段的夹角；

β_j ——第 j 道环索位置上相邻径向索在水平面 XOY 上投影的夹角；

γ_j ——第 j 道环索位置上径向索与竖向撑杆的夹角。

4 弦支穹顶的单层网壳部分可采用刚接节点或铰接节点；撑杆与单层网壳、撑杆与拉索的连接采用铰接节点。

5 弦支穹顶中施加拉索预应力可采用下列两种方法：

1) 撑杆伸长法，通过调整撑杆的长度使环向索和径向索产生预应力；

2) 拉索缩短法，优先采用缩短环向索的方法施加预应力，也可采用缩短径向索的方法。

6 设计时，应明确区分结构在预应力施加前后的状态。

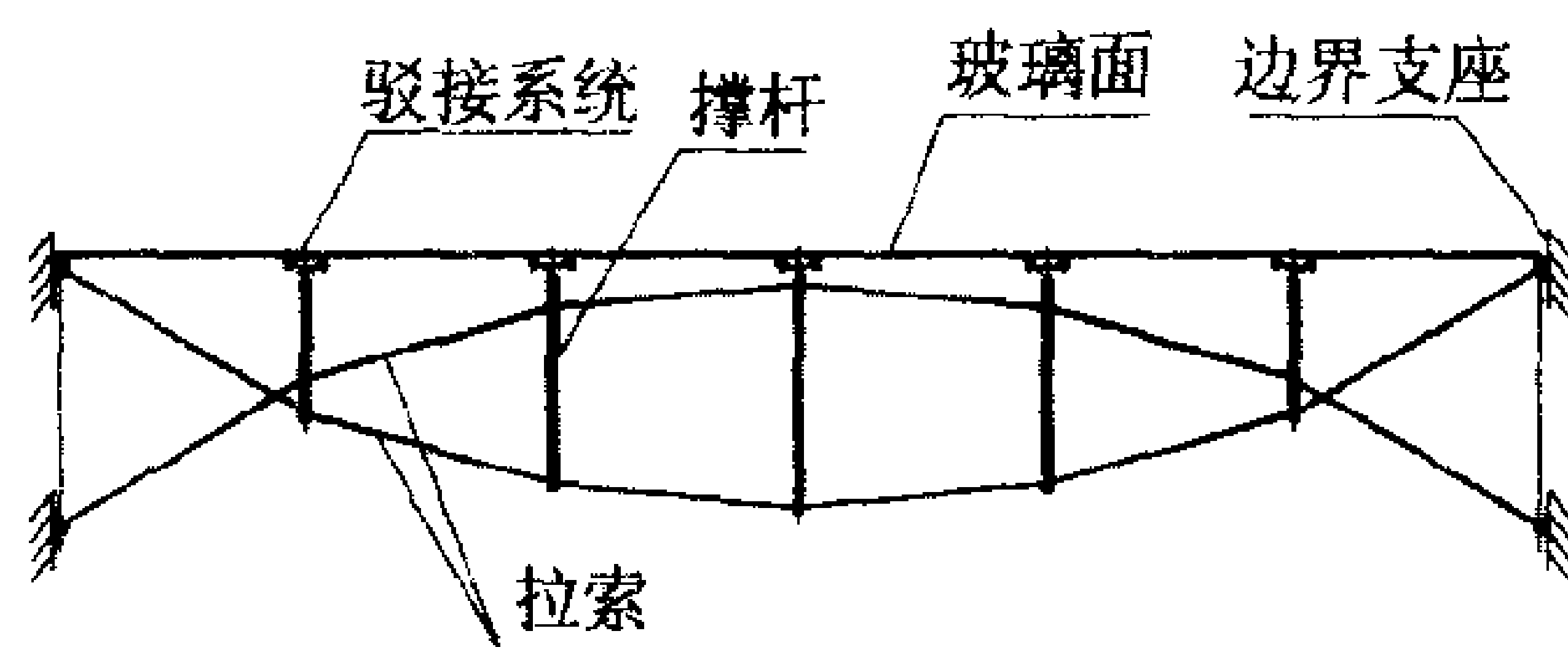
1) 零态，结构无自重、无预应力的状态；

2) 预应力平衡态，结构在自重和预应力作用下的自平衡状态；

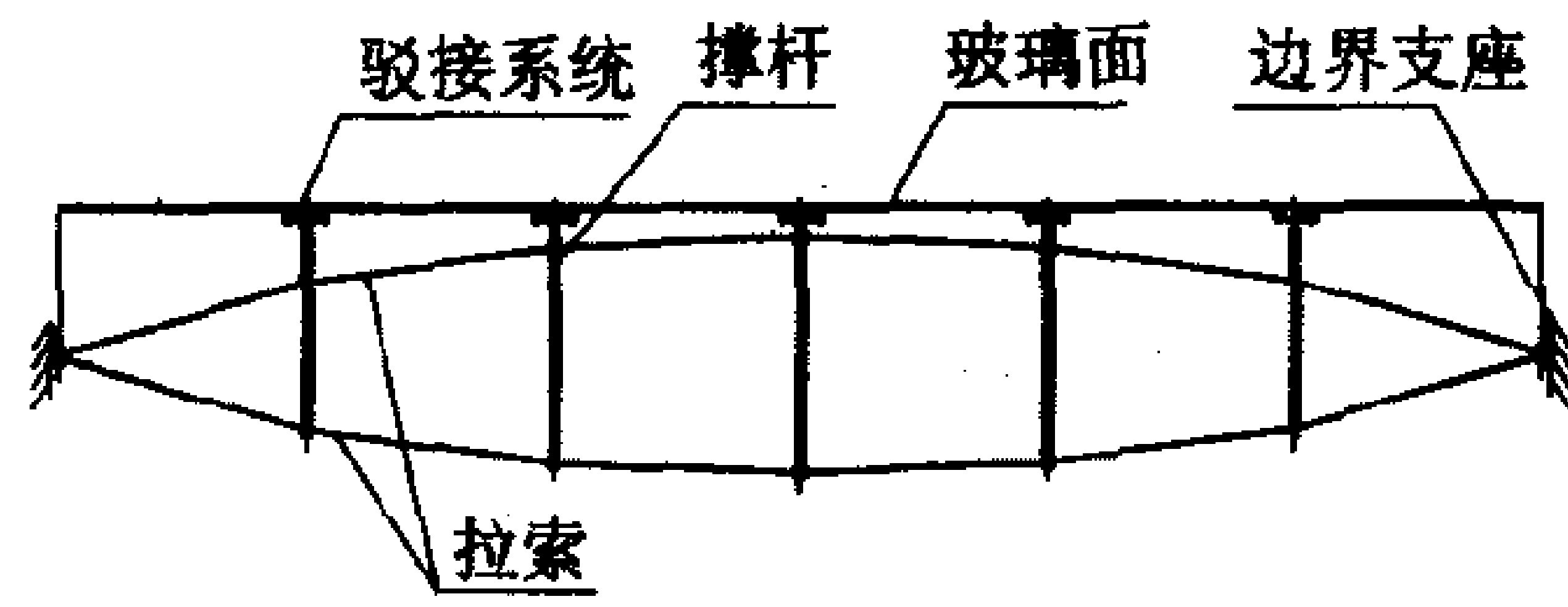
3) 荷载态，在预应力平衡态的基础上承受外荷载作用的状态。

5.12 预应力玻璃幕墙结构

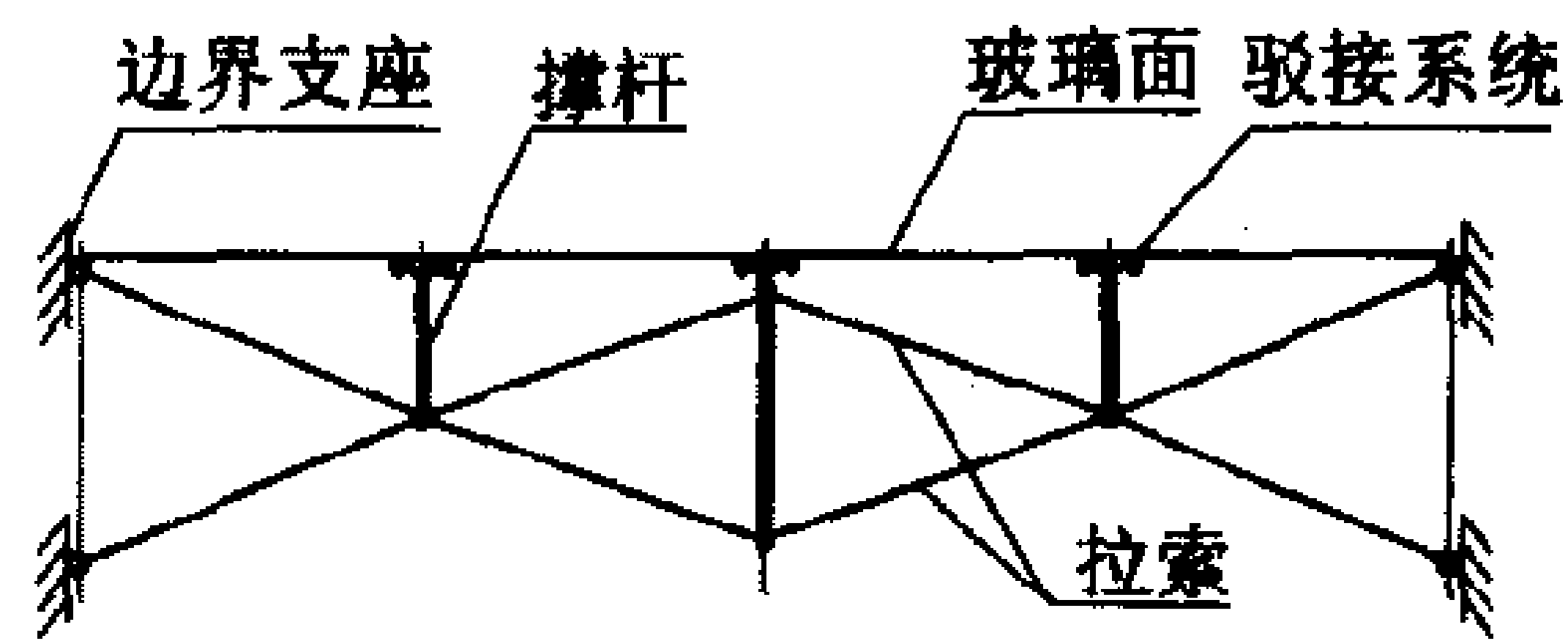
5.12.1 玻璃幕墙采用的预应力承重结构可包括索杆体系(图 5.12.1-1)和索梁体系(图 5.12.1-2)两种。索杆体系由拉索弦杆和刚性撑杆组成，索梁体系由拉索弦杆、刚性撑杆和中心压杆组成。



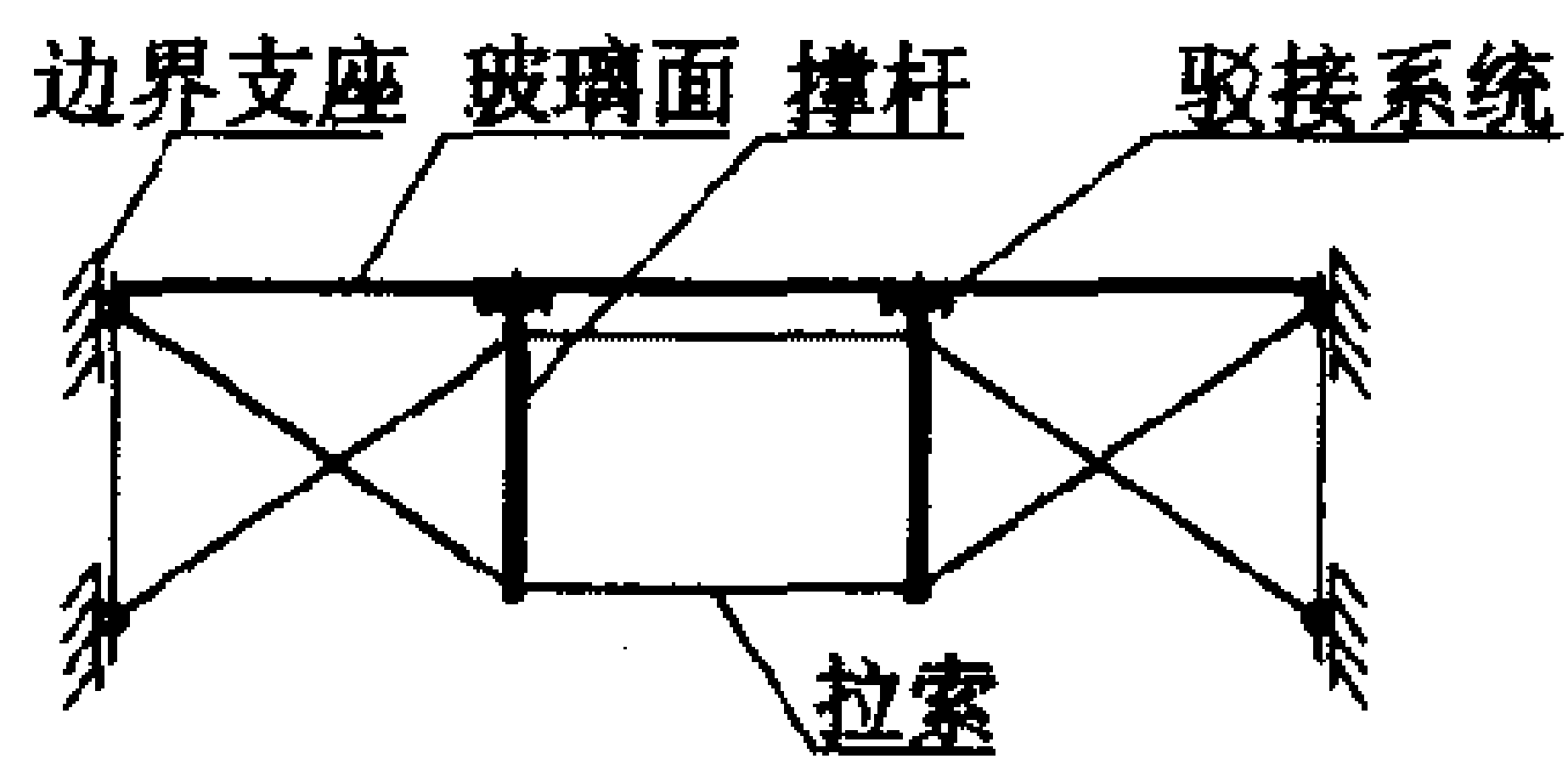
(a) 鱼腹形(1)



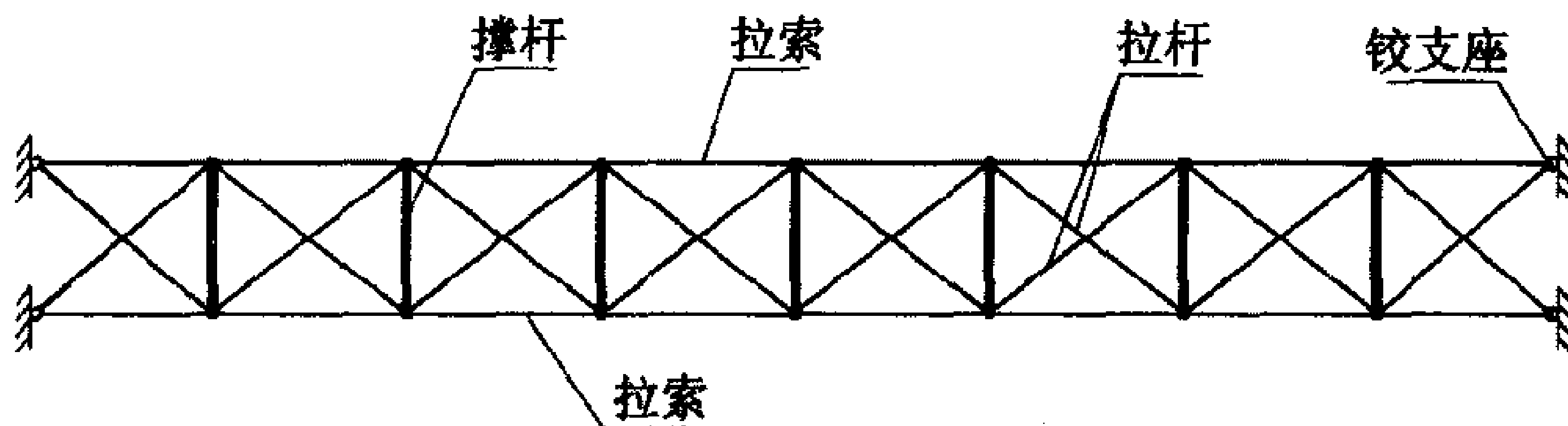
(b) 鱼腹形 (2)



(c) 交叉杆式 (1)



(d) 交叉杆式 (2)



(e) 长方形

图 5.12.1-1 预应力索杆体系

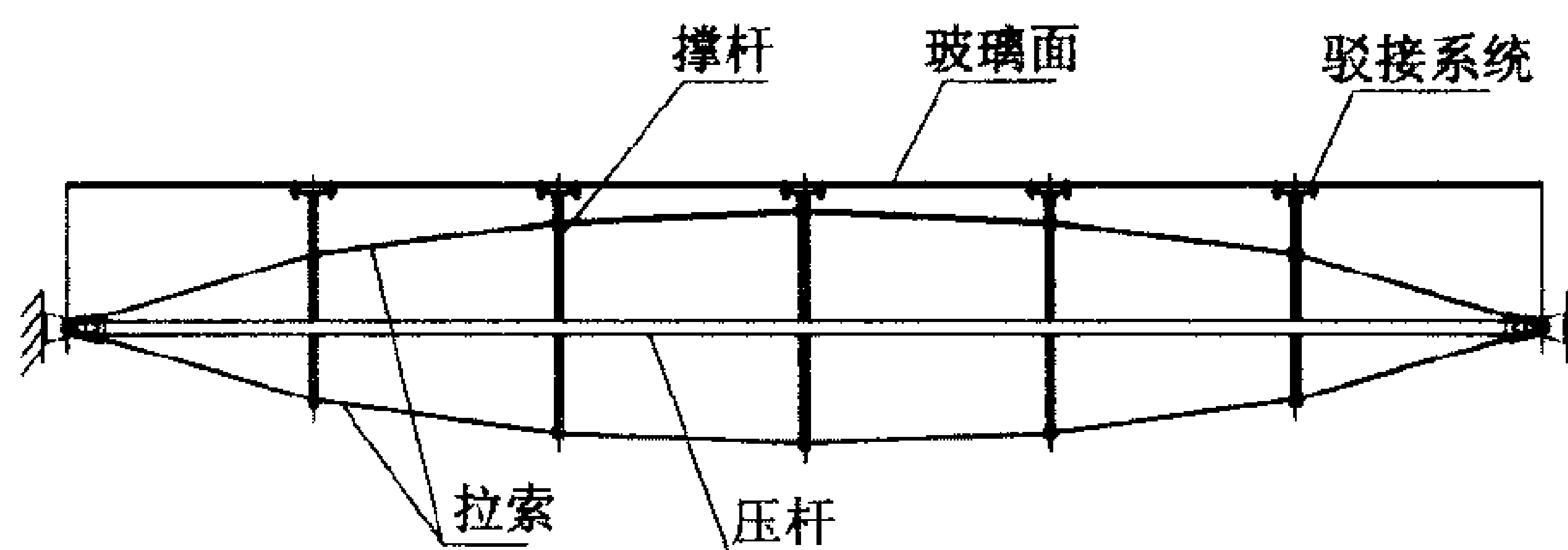


图 5.12.1-2 预应力索梁体系

5.12.2 玻璃幕墙的抗风预应力索杆体系宜采用垂直或水平向布置,由对称双索组成平面索桁架(图 5.12.1-1)。该结构体系必须从体系外部提供预应力的支承,以平衡体系中的预应力。

5.12.3 玻璃幕墙的索梁体系,亦宜采用垂直或水平向布置,多用于传递垂直荷载。由对称的双索和中心受压杆组成,预应力索与中心压杆形成自平衡体系。中心压杆和索的受力可按索梁体系分析,压杆应按偏心受压构件设计。

5.12.4 预应力索杆体系、索梁体系的计算分析应采用考虑几何非线性的弹性分析方法。

5.12.5 玻璃幕墙支承结构的计算应考虑预应力、恒荷载、活荷载、风荷载、温度作用和地震作用的组合。计算支承结构的内力和变形时,不应考虑玻璃面板参与工作,其相对挠度不应大于 $1/250$ 。

5.13 预应力索膜结构

5.13.1 索膜结构可分为张拉式索膜结构(图 5.13.1-1)和索系支撑式膜结构(图 5.13.1-2),或由二者组合成的结构体系。

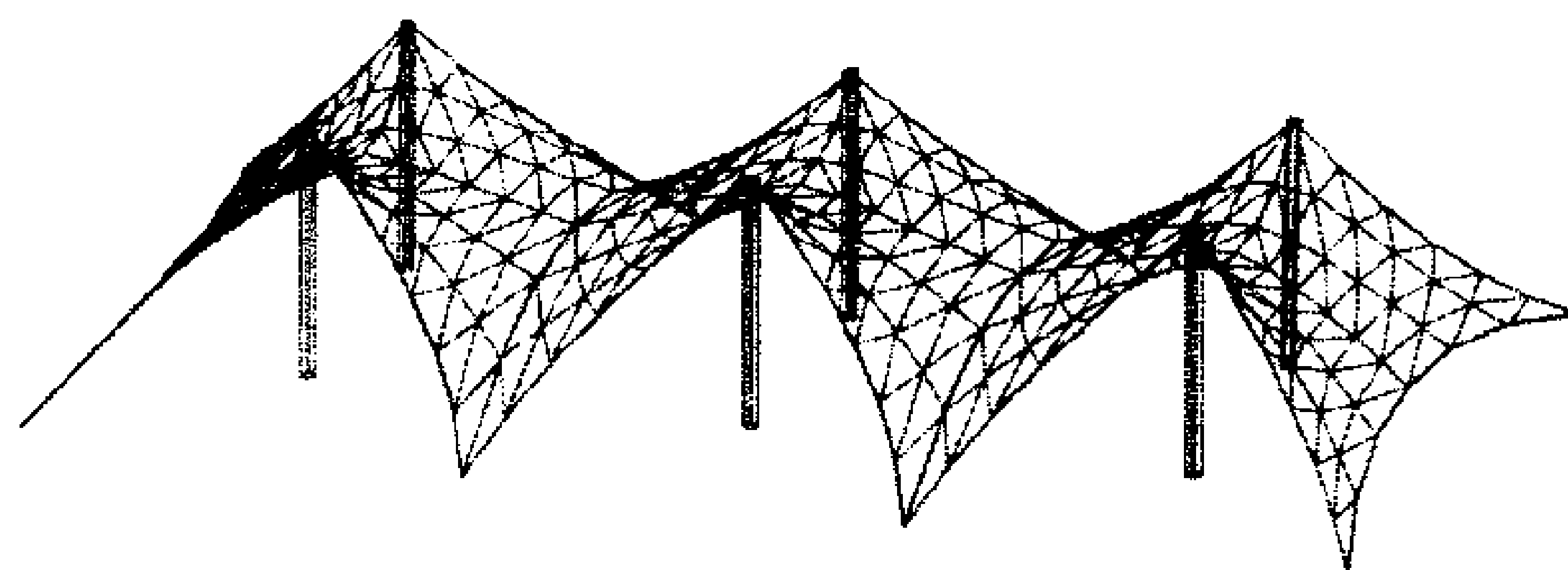


图 5.13.1-1 张拉式索膜结构

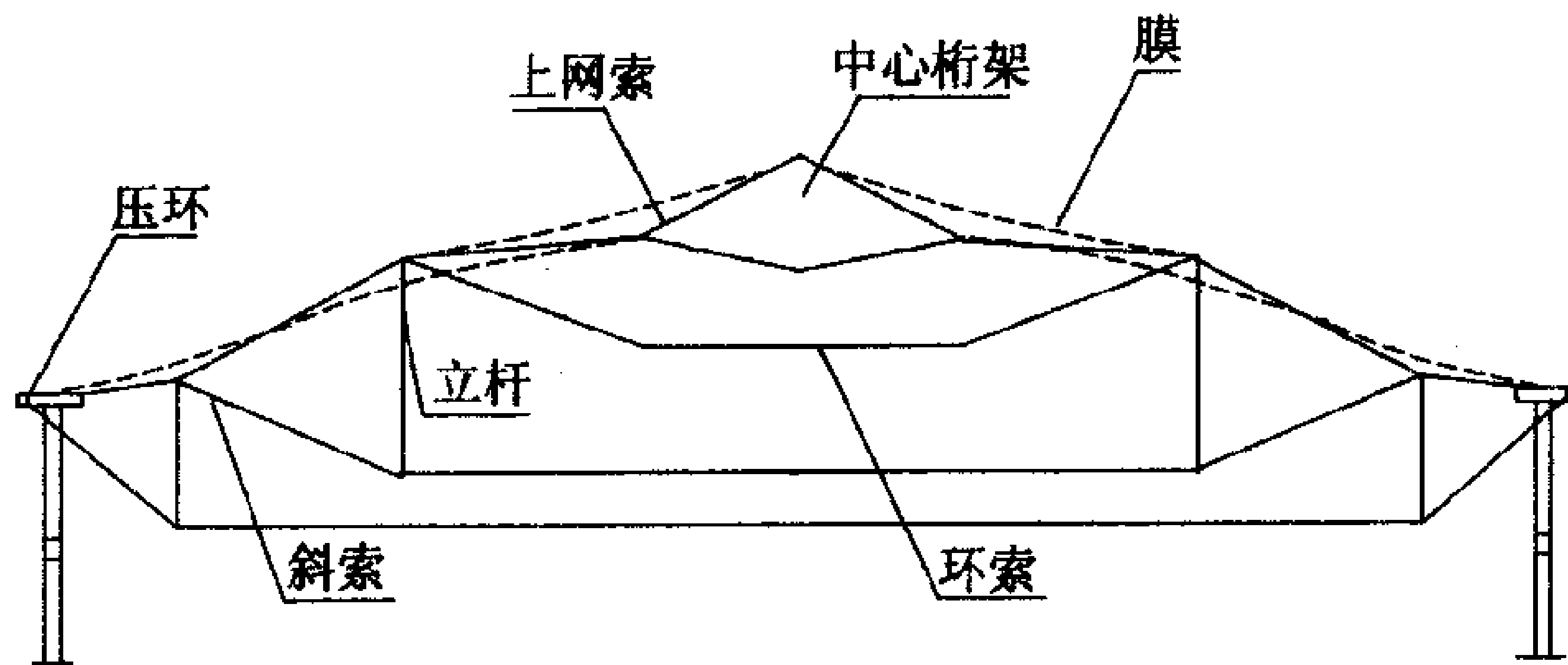


图 5.13.1-2 索系支撑式膜结构

5.13.2 膜结构设计时应进行初始形态分析、荷载分析及裁剪分析；必要时还应进行施工过程分析。

5.13.3 膜结构计算时应考虑结构的几何非线性、膜材料的各向异性，可不考虑材料的非线性。

5.13.4 膜结构的初始形态分析可采用非线性有限元法、动力松弛法、力密度法；荷载分析可采用非线性有限元法和动力松弛法；裁剪分析可采用几何展开法和平面热应力有限元法等。

5.13.5 膜结构中施加预应力的方法可采用：柱底顶升法（图 5.13.5-1）、柱顶顶升法（图 5.13.5-2）、飞柱顶升法（图 5.13.5-3）、张紧斜拉索法（图 5.13.5-4）和张紧谷索法（图 5.13.5-5）等。

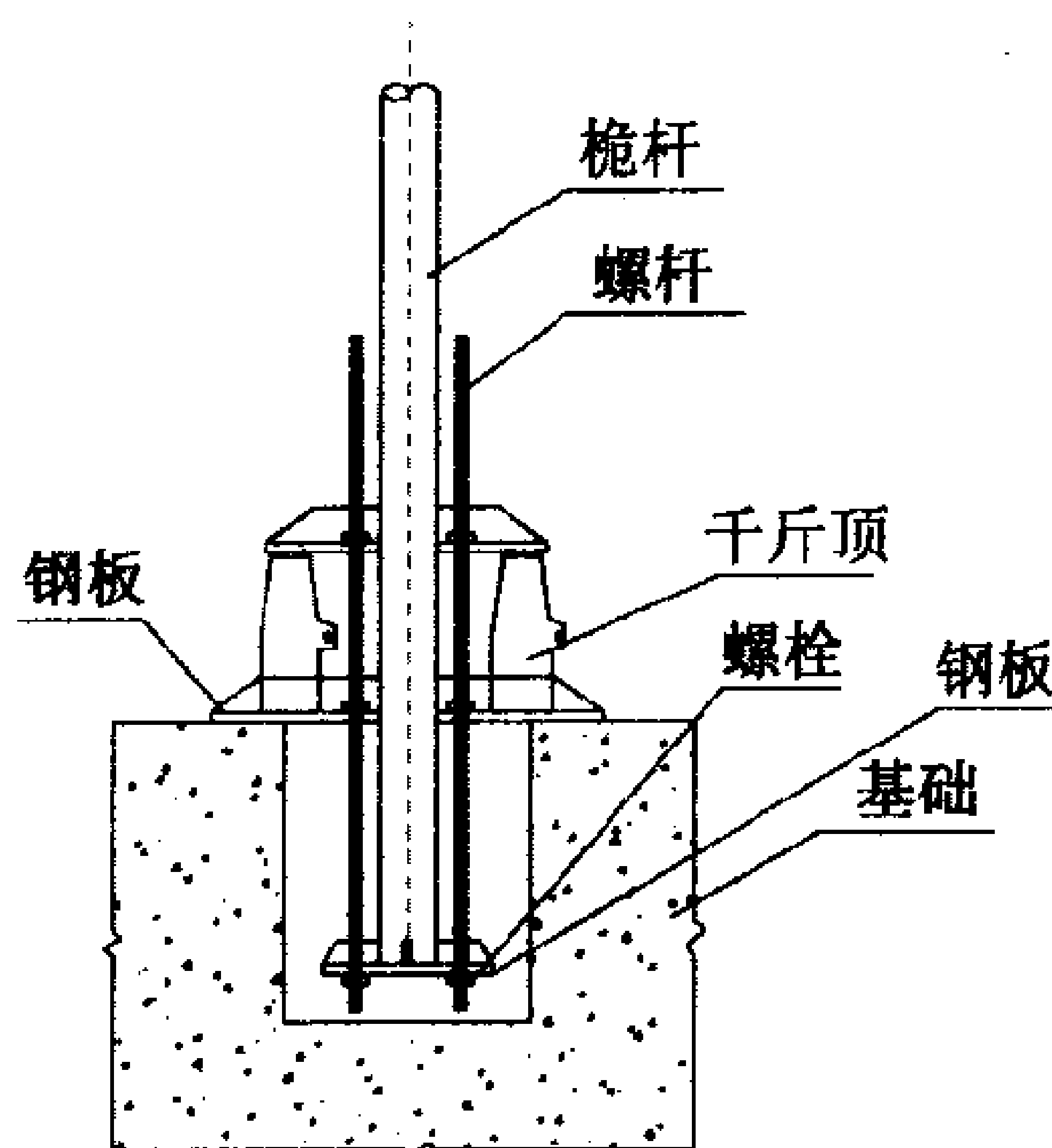


图 5.13.5-1 柱底顶升法

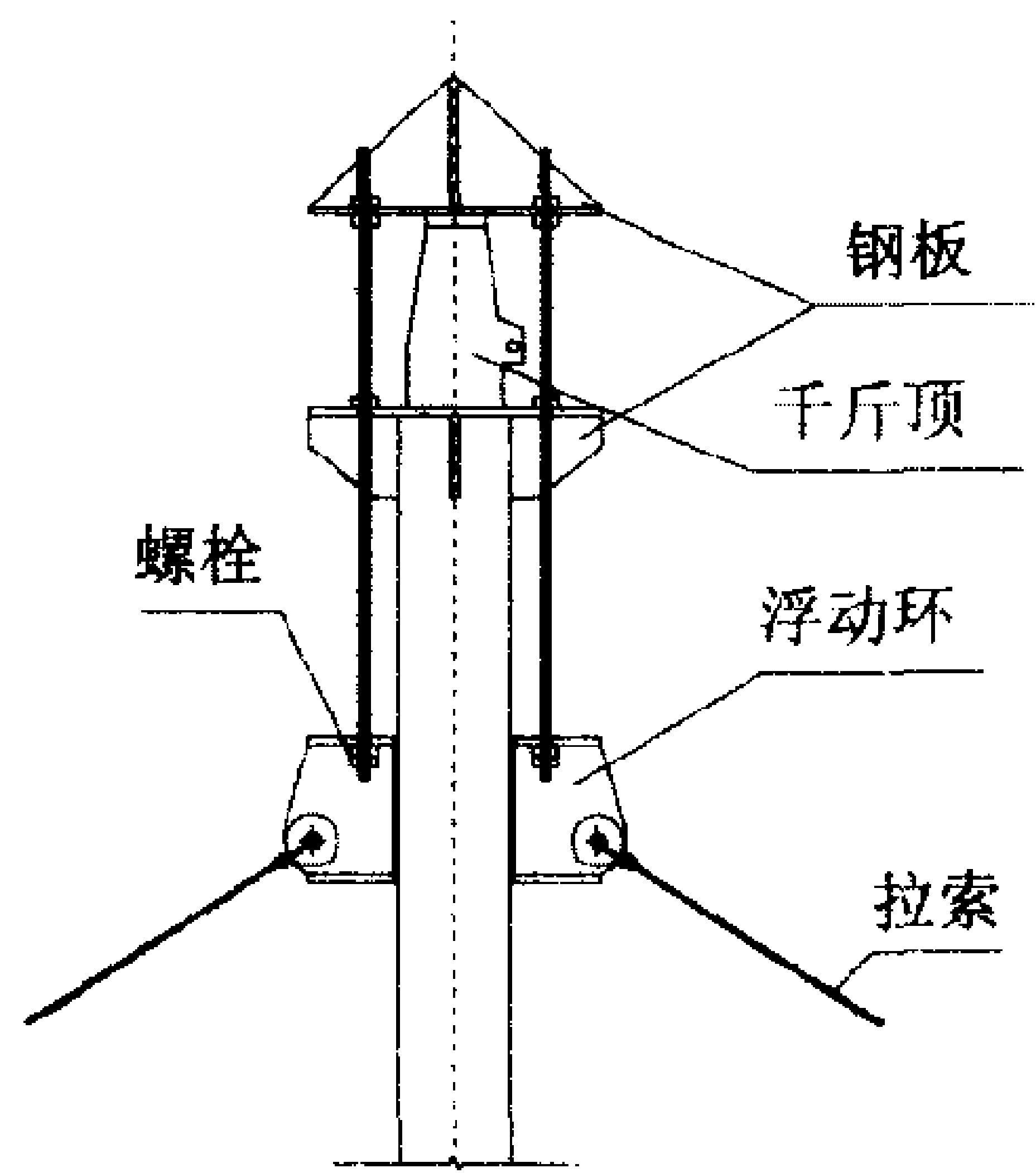


图 5.13.5-2 柱顶顶升法

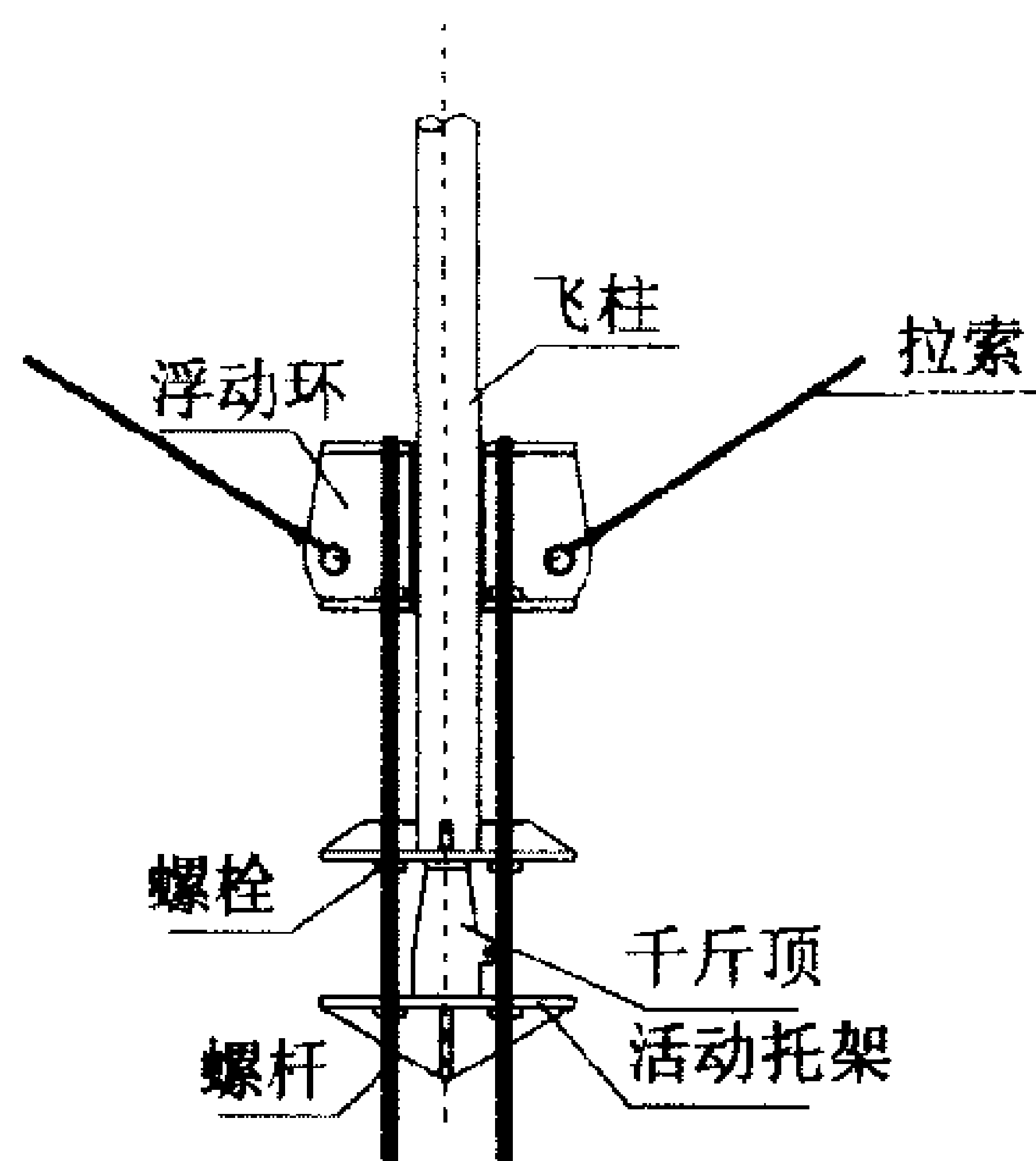


图 5.13.5-3 飞柱顶升法

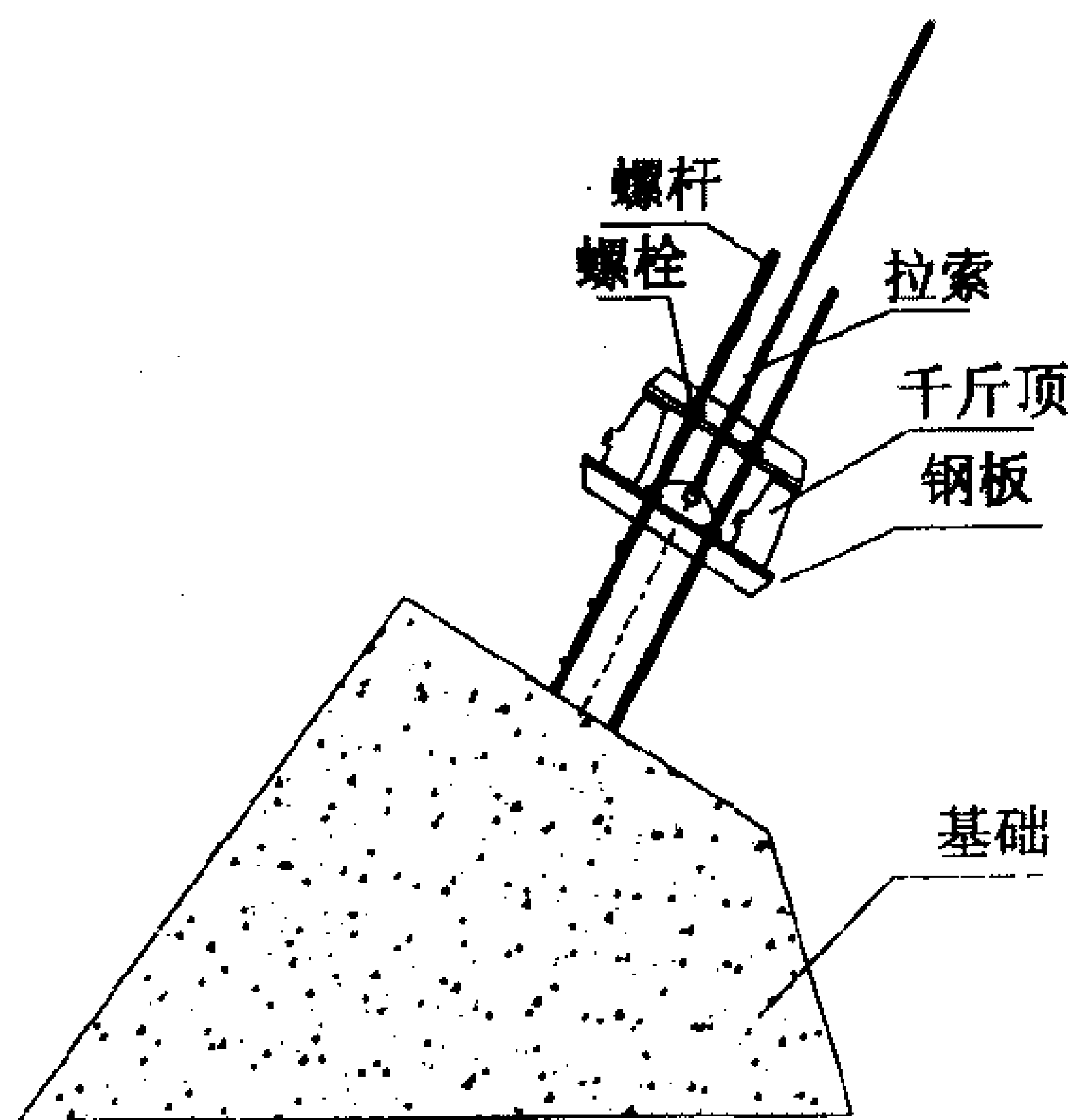


图 5.13.5-4 张紧斜拉索法

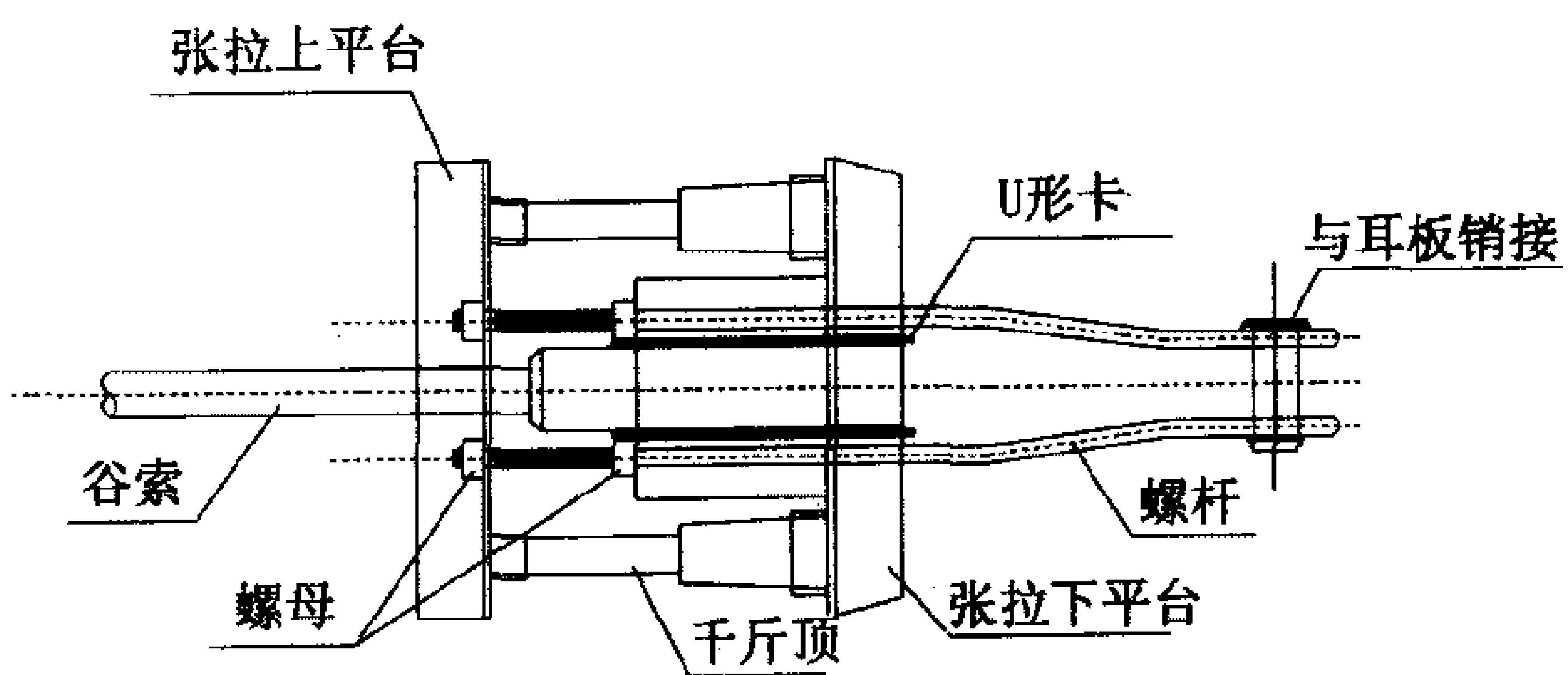


图 5.13.5-5 张紧谷索法

6 节点和连接构造

6.1 一般规定

6.1.1 根据预应力钢结构的特点和拉索节点的连接功能,节点可分为张拉节点、锚固节点、转折节点、索杆连接节点、交叉节点和玻璃幕墙节点等主要类型。

6.1.2 预应力钢结构的连接构造应保证结构受力明确,尽量减少应力集中和次应力,减小焊接残余应力,避免材料多向受拉,防止出现脆性破坏,同时便于制作、安装和维护。

6.1.3 构件拼接或节点连接通常采用焊缝连接、螺栓(销栓)连接或栓焊混合连接。各种连接的计算及其构造要求应按现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定执行。

6.1.4 在张拉节点、锚固节点和转折节点的局部承压区,应验算其局部承压强度并采取可靠的加强措施满足设计要求。对构造、受力复杂的节点可采用铸钢节点。

6.1.5 预应力拉索全长及其节点应采取可靠的防腐措施,且便于施工和修复。如采用外包材料防腐,外包材料应连续、封闭和防水;除了拉索和锚具本身应采用耐锈蚀材料外包外,节点锚固区可采用外包膨胀混凝土、低收缩水泥砂浆、环氧砂浆密封或具有可靠防腐和耐火性能的外层保护套结合防腐油脂等材料将锚具密封。

6.1.6 当拉索受力较大、节点形状复杂或采用新型节点时,应对节点进行平面或空间有限元分析,全面掌握节点的应力大小和应力分布状况。

6.1.7 对重要、复杂的节点,根据设计需要,宜进行足尺或缩尺模型的承载力试验,且节点模型试验的荷载工况应尽量与节点的实

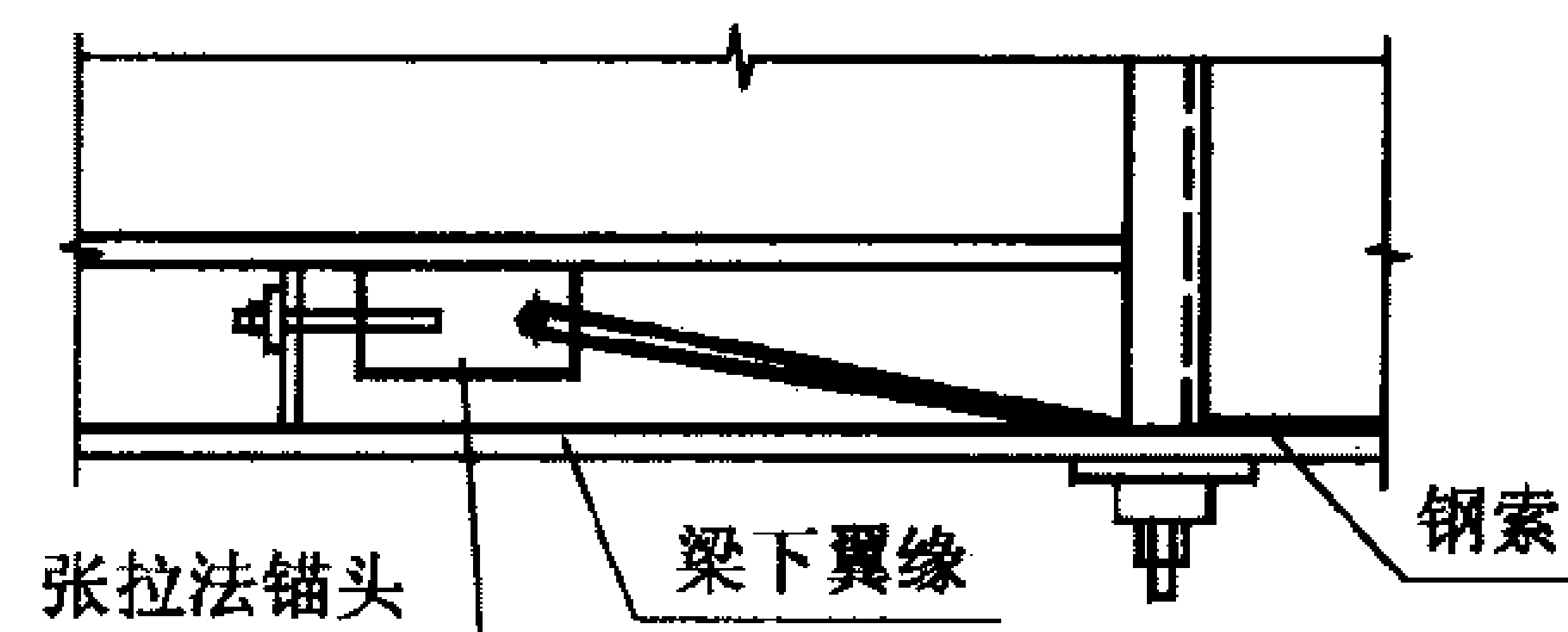
际受力状态一致。

6.1.8 根据节点的重要性、受力大小和复杂程度,节点的承载力设计值应为构件承载力设计值的 1.2~1.5 倍。

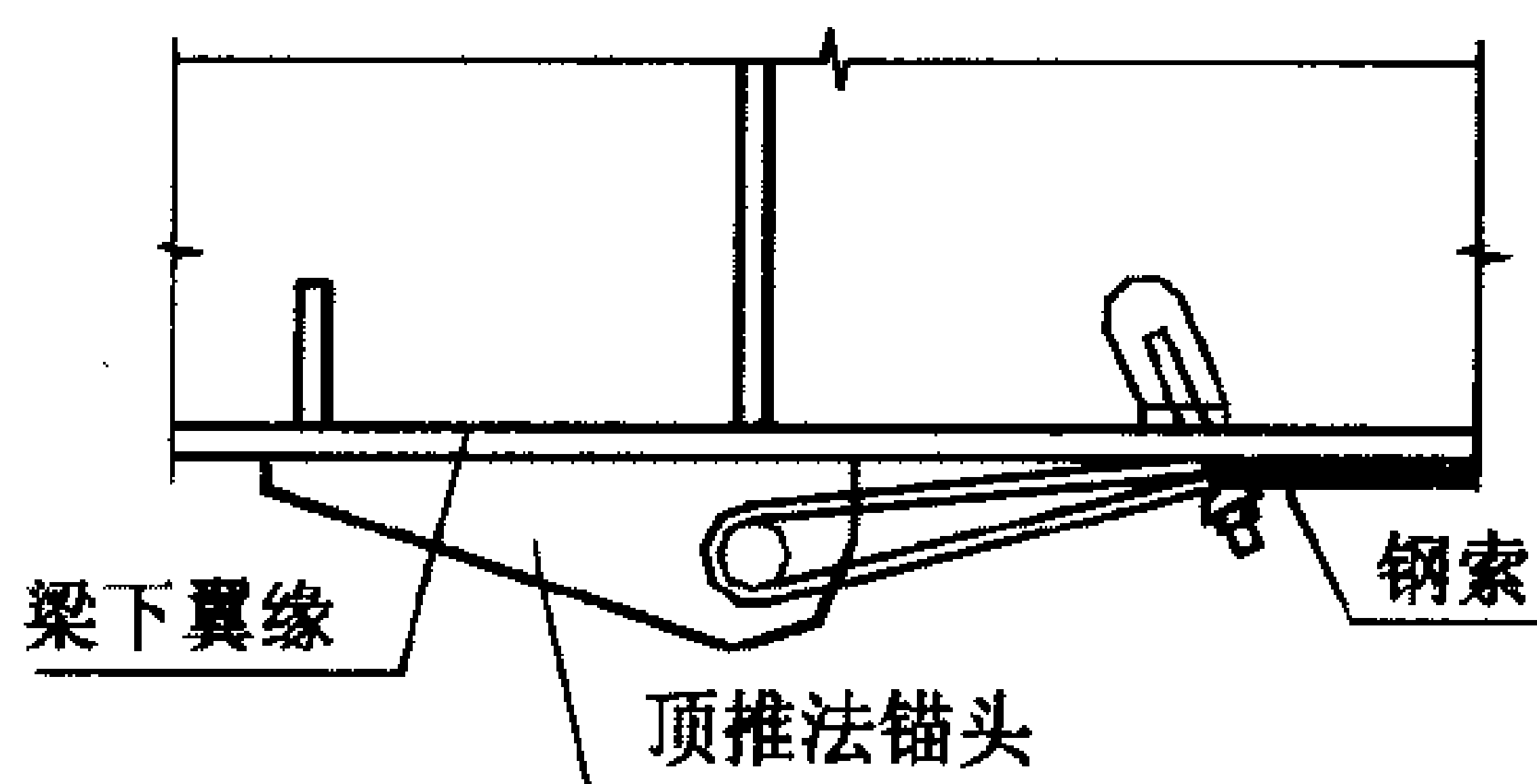
6.2 张拉节点

6.2.1 高强拉索的张拉节点应保证节点张拉区有足够的施工空间,便于施工操作,且锚固可靠。对于张拉力较大的拉索,可采用液压张拉千斤顶或其他专用张拉设备进行张拉;对于张拉力较小的拉索,可采用花篮调节螺栓或直接拧紧螺帽等方法施加预应力。

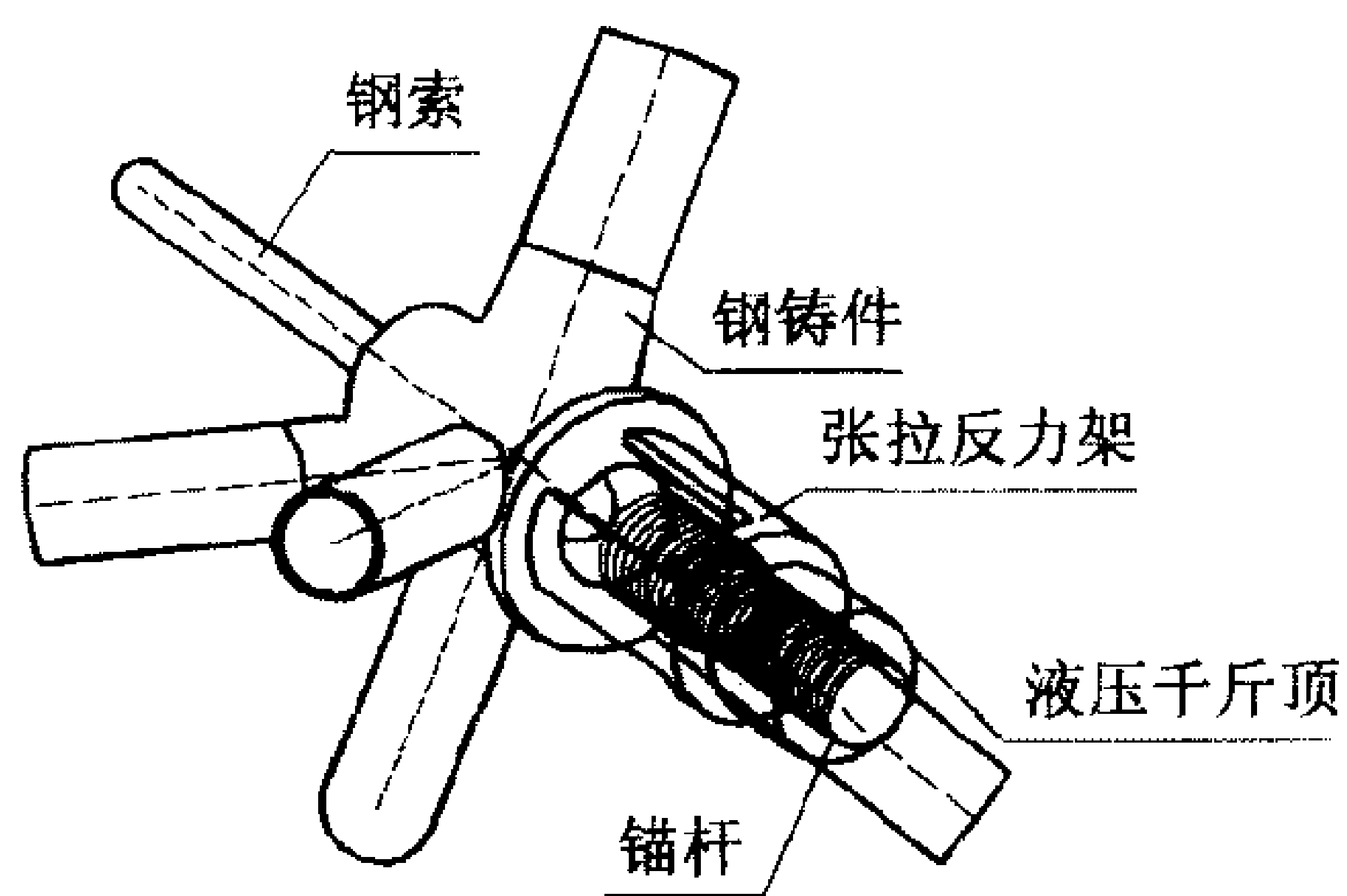
6.2.2 张拉节点与主体结构的连接应考虑超张拉和使用荷载阶段拉索的实际受力大小,确保连接安全(图 6.2.2)。



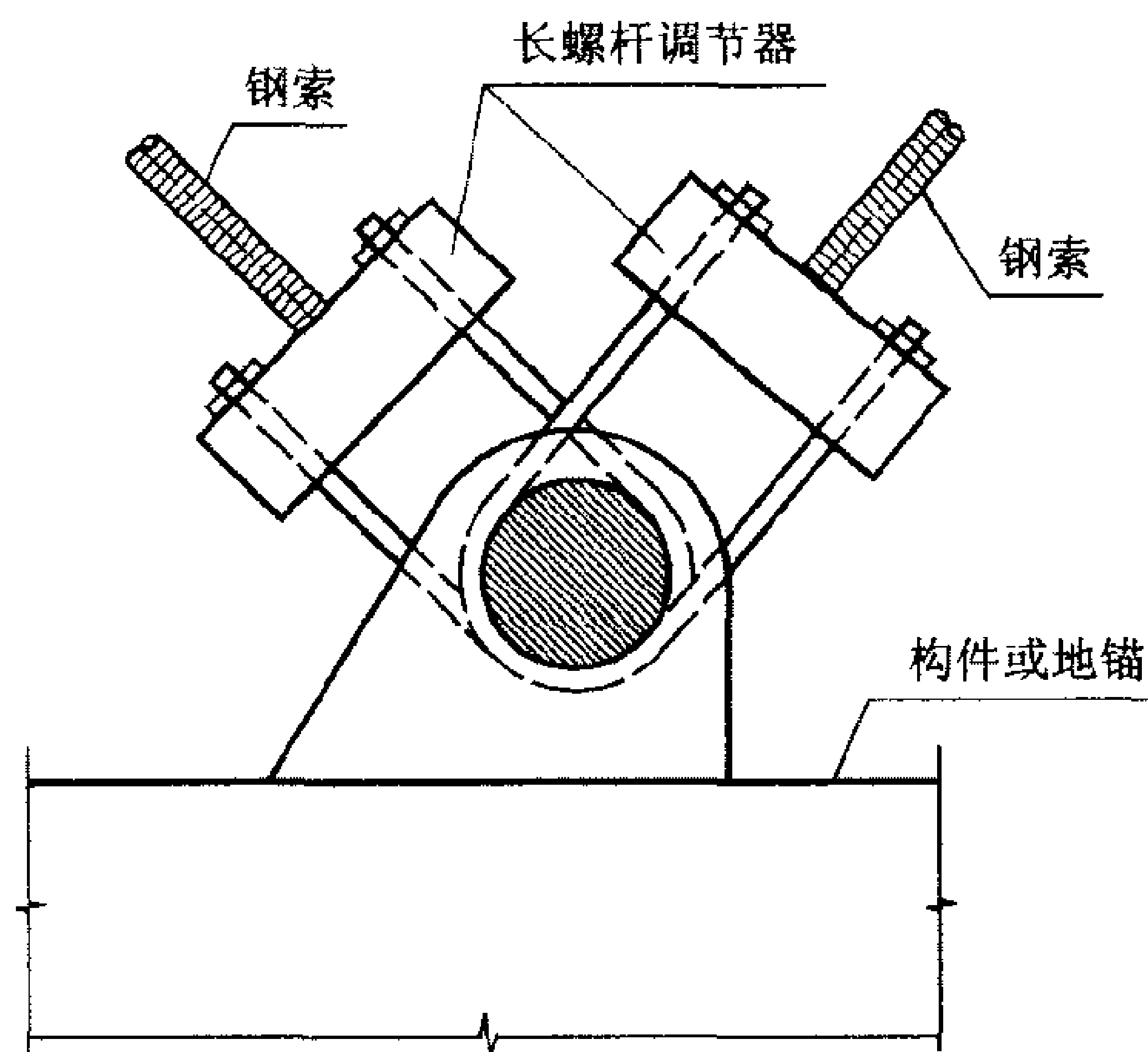
(a) 张拉法锚头式节点



(b) 顶推法锚头式节点



(c) 千斤顶式节点



(d) 螺杆调节式节点

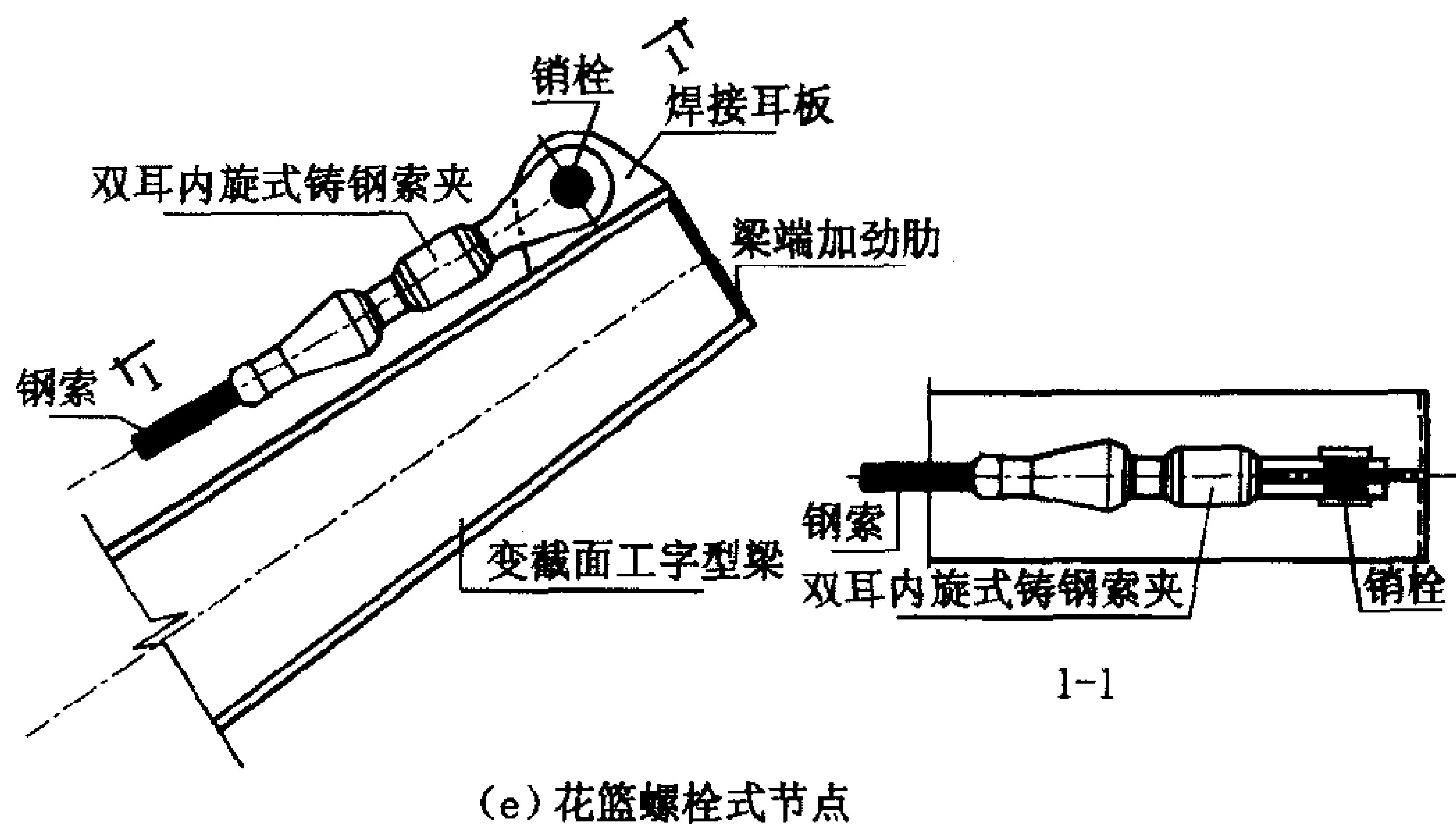


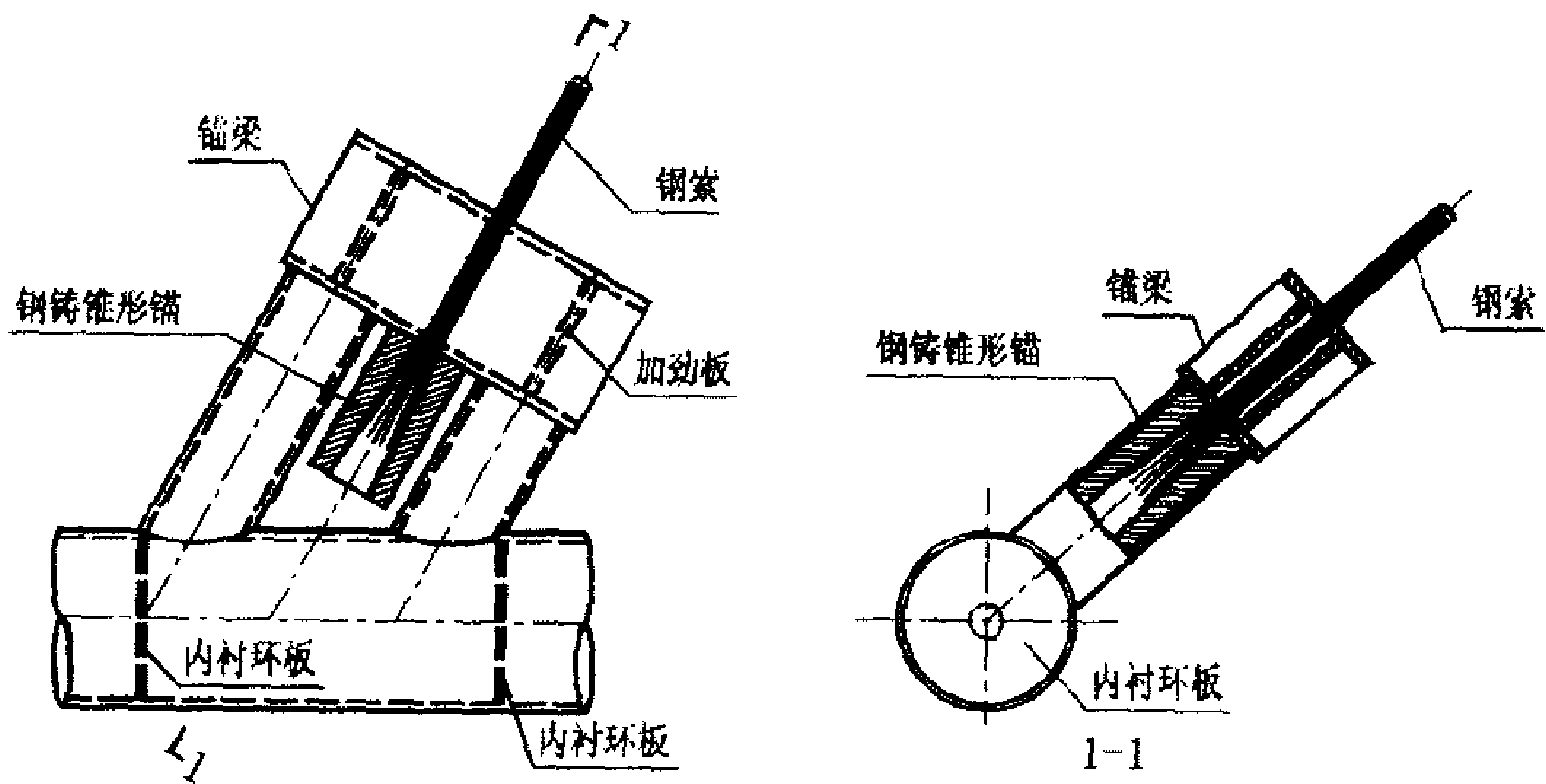
图 6.2.2 张拉节点的构造示意

6.2.3 通过张拉节点施加拉索预应力时,应根据设计需要和节点强度,采用专门的拉索测力装置监控实际张拉力值,确保节点和结构安全。

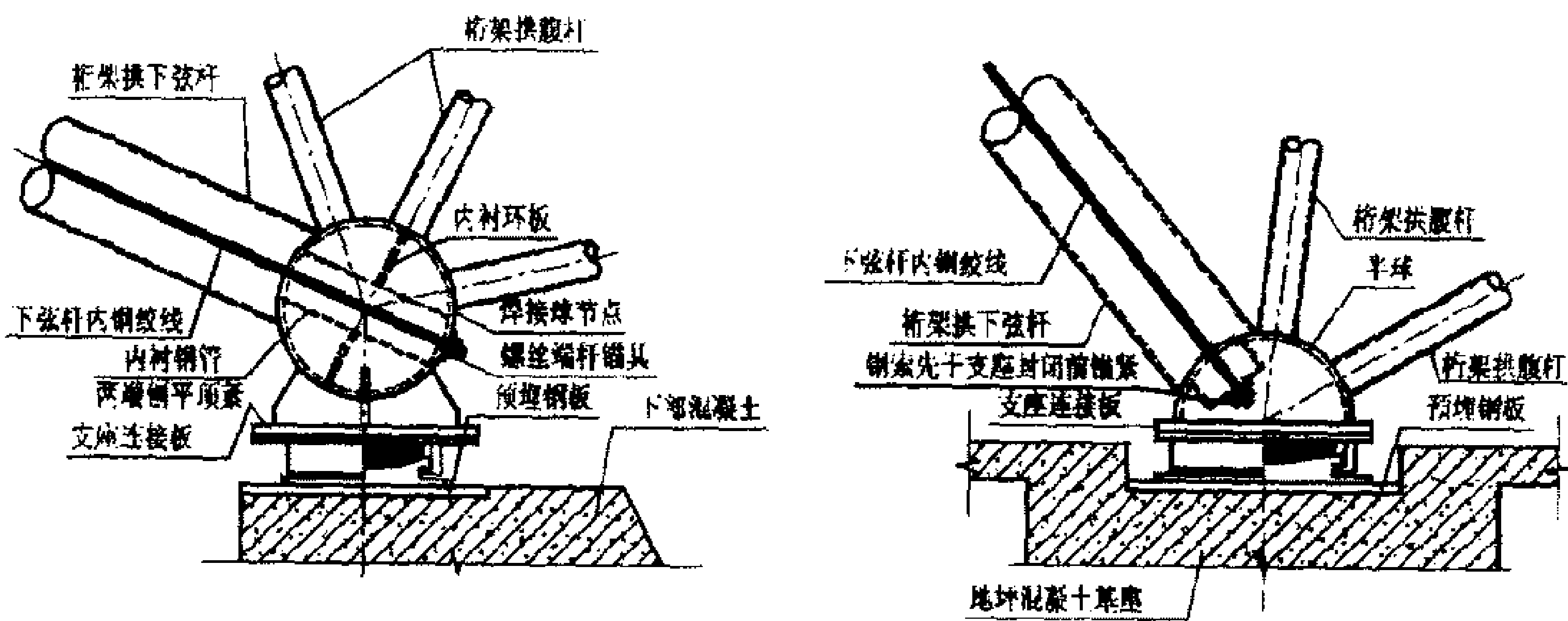
6.3 锚固节点

6.3.1 锚固节点应采用传力可靠、预应力损失低且施工便利的锚具,尤其应保证锚固区的局部承压强度和刚度,应设置必要的加劲肋、加劲环或加劲构件等加强措施。

6.3.2 对锚固节点区域的主要受力杆件、板域应进行应力分析和连接计算,并采取可靠、有效的构造措施(图 6.3.2)。节点区应避免出现焊缝重叠、开孔等易导致严重残余应力和应力集中的情况。

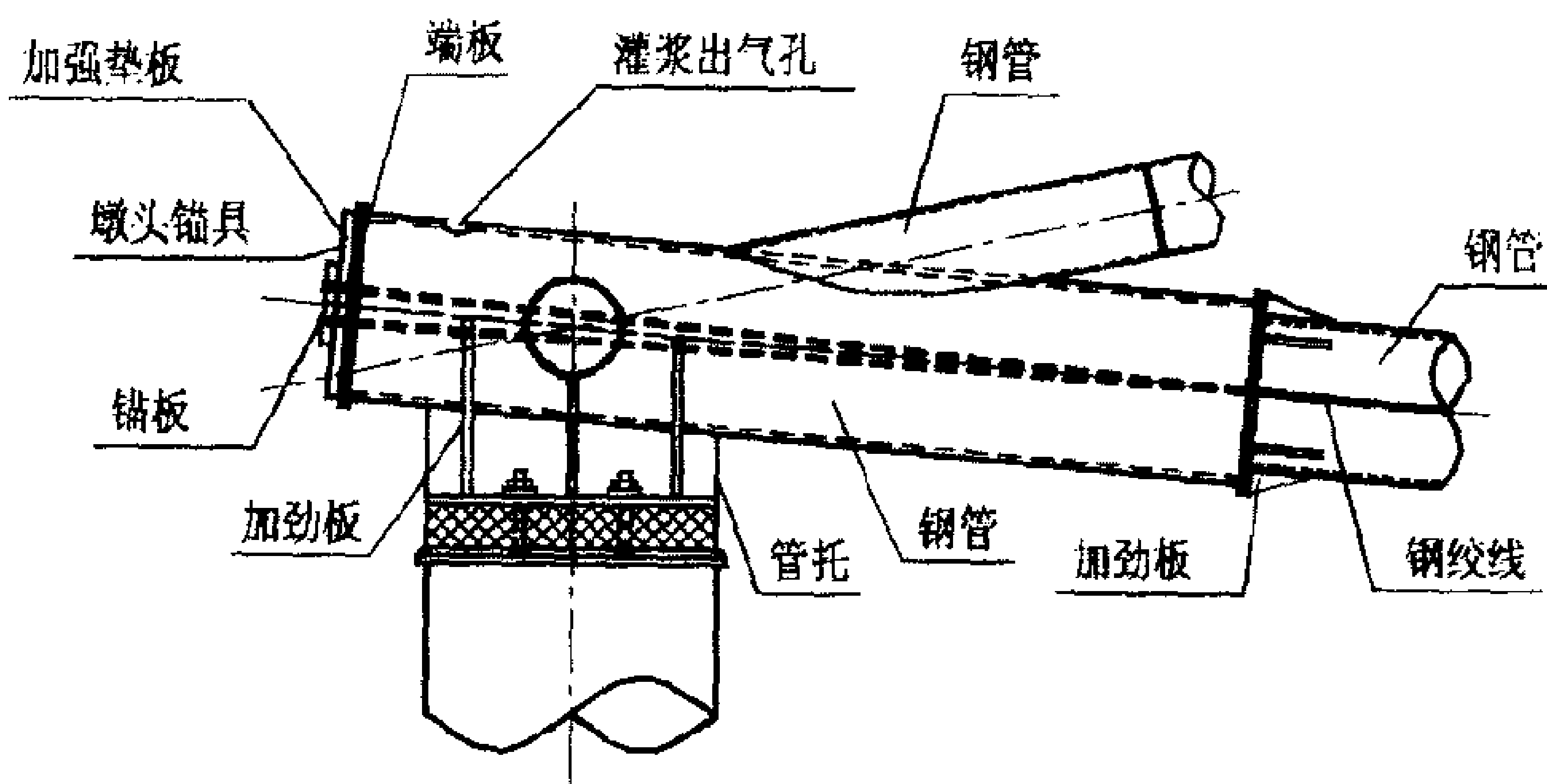


(a) 锚梁式节点

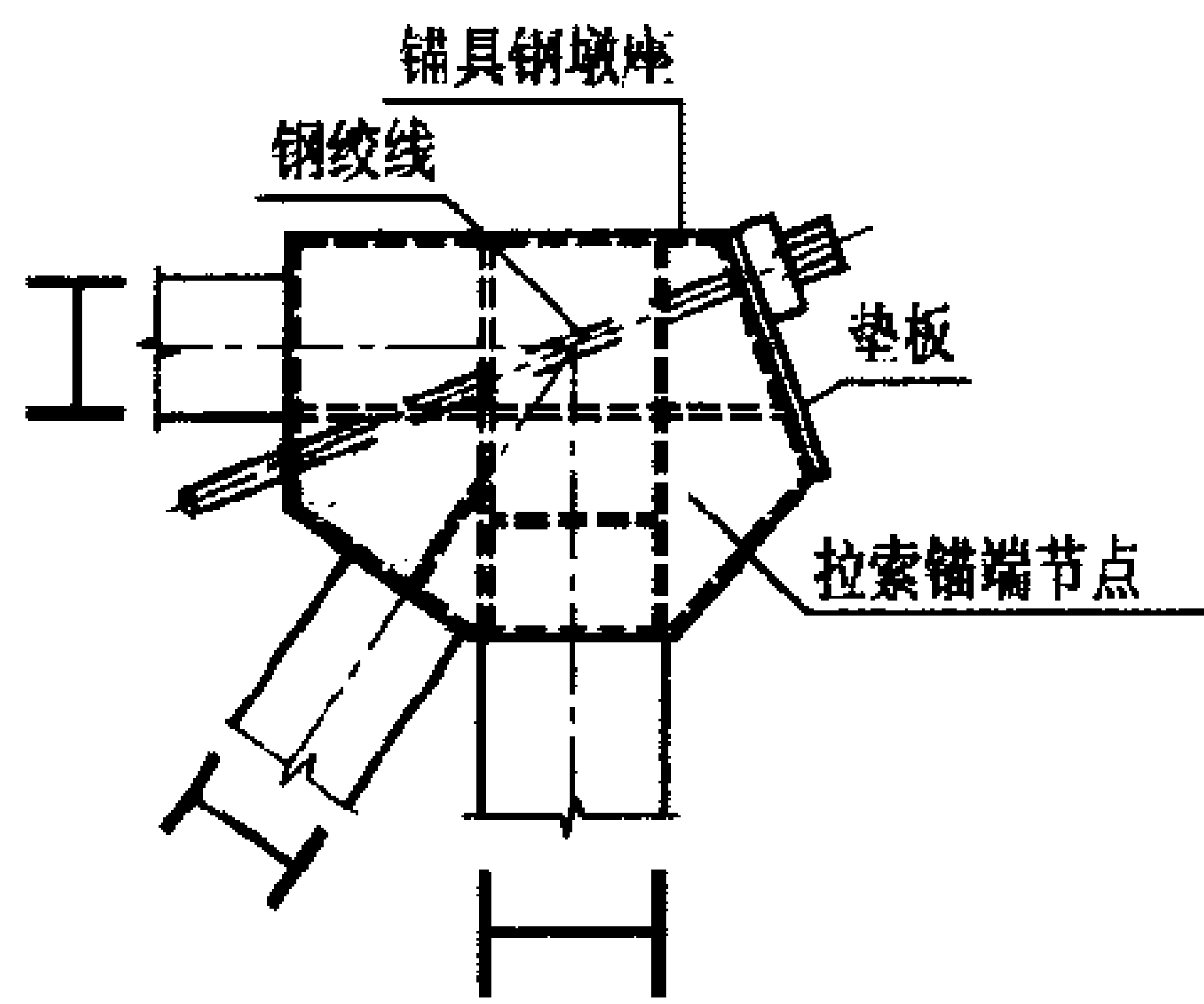


(b) 外锚固式支座球节点

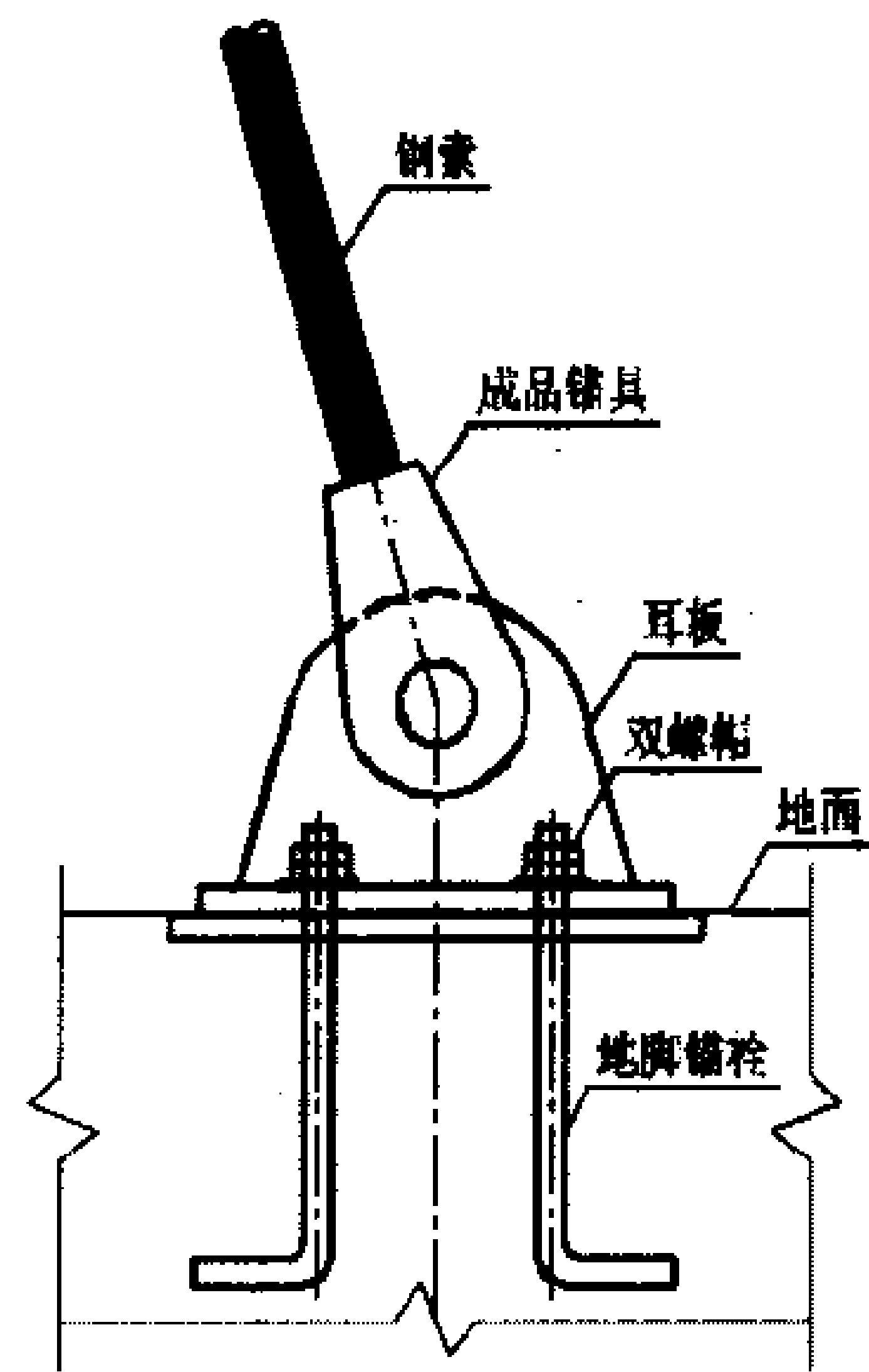
(c) 内锚固式支座半球节点



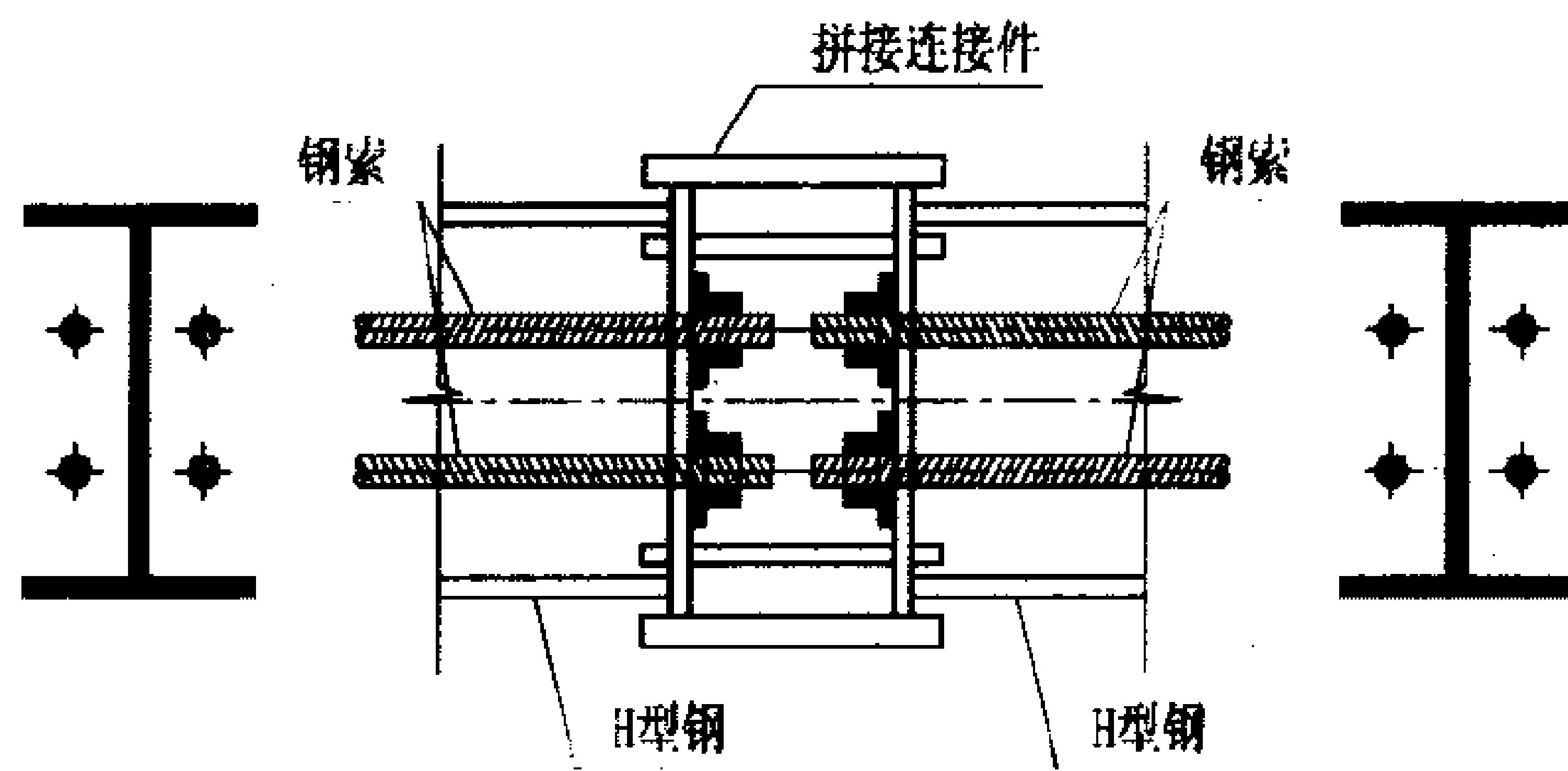
(d) 圆管桁架端部节点



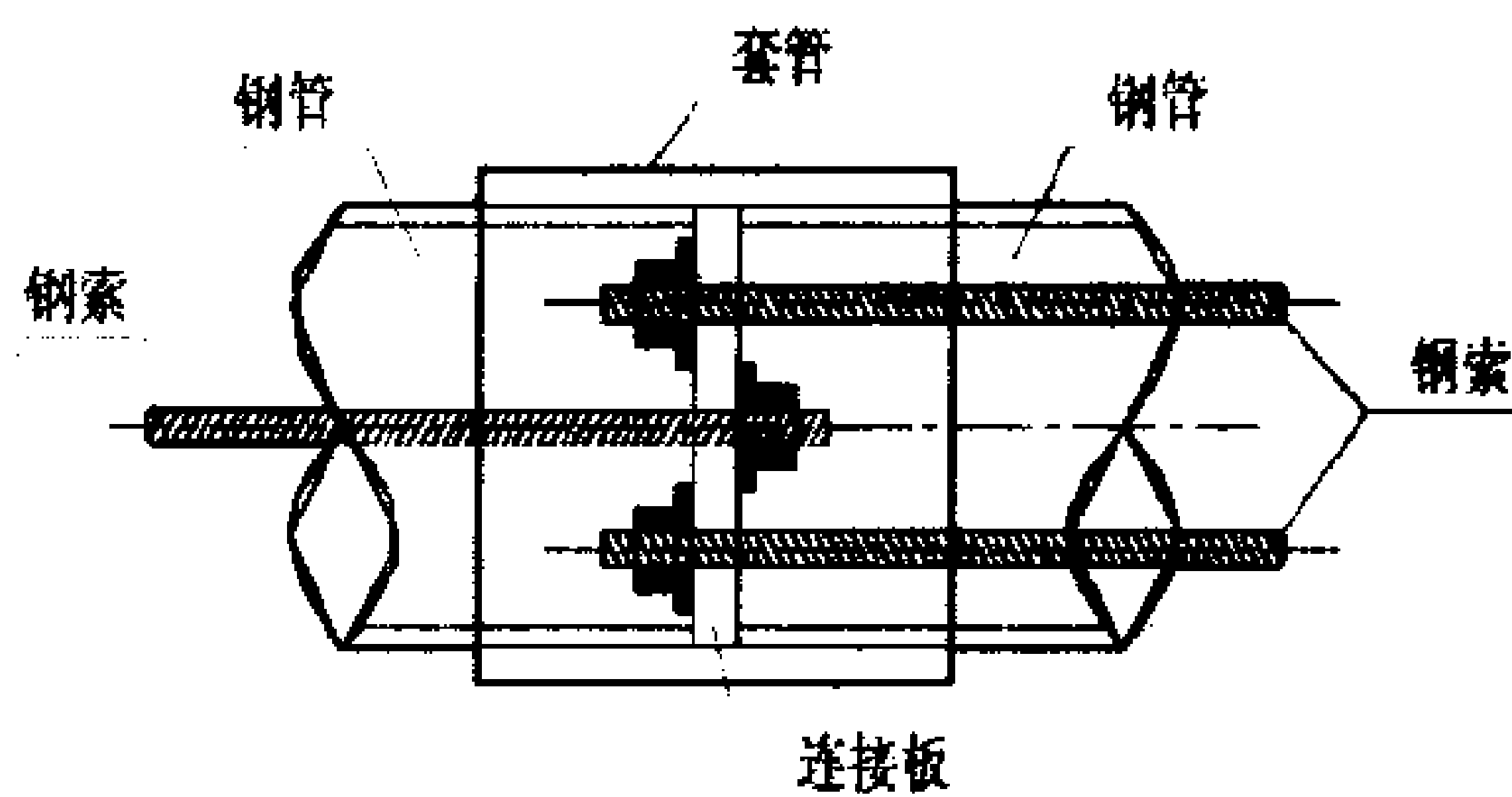
(e) H型钢桁架结构端部节点



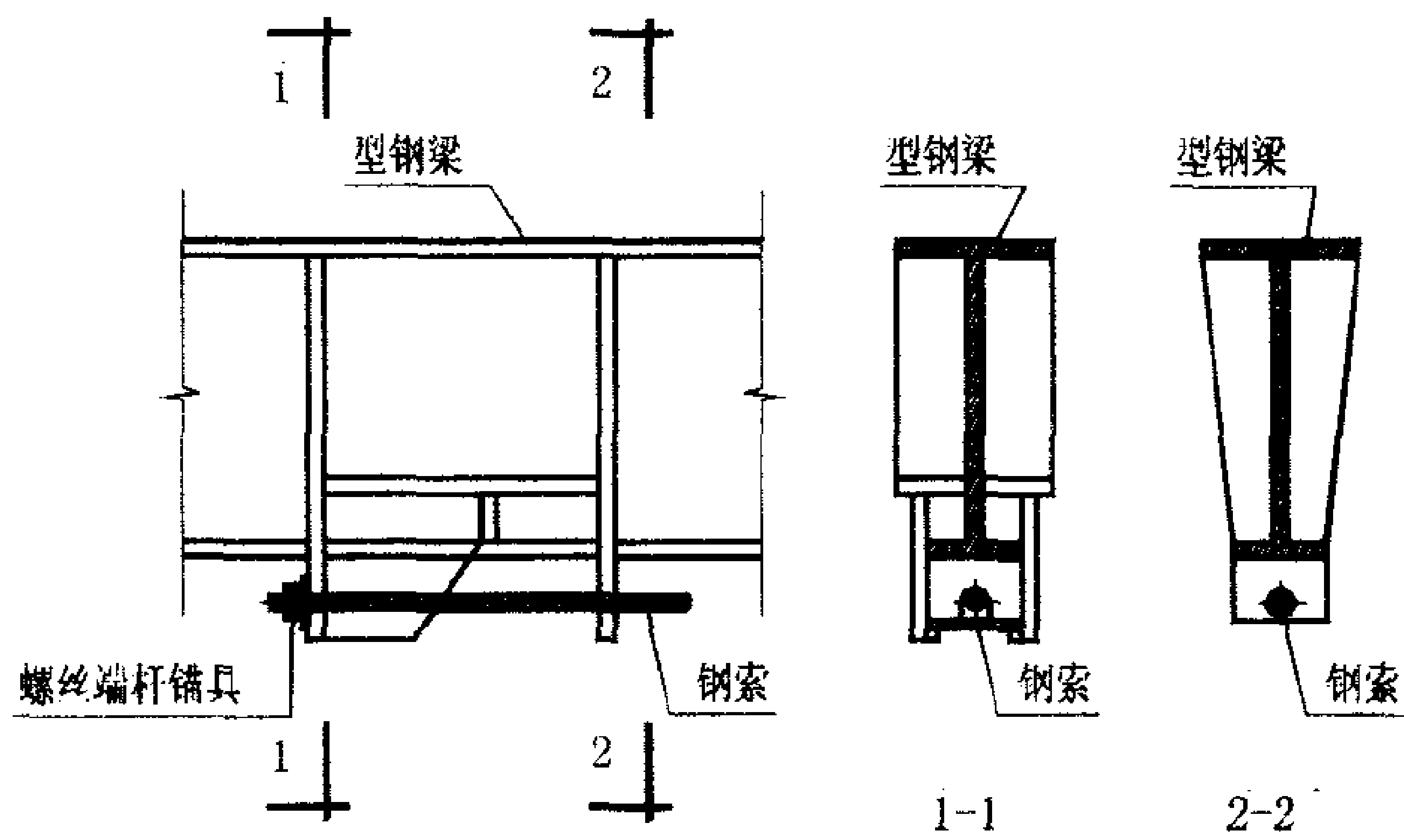
(f) 地节点



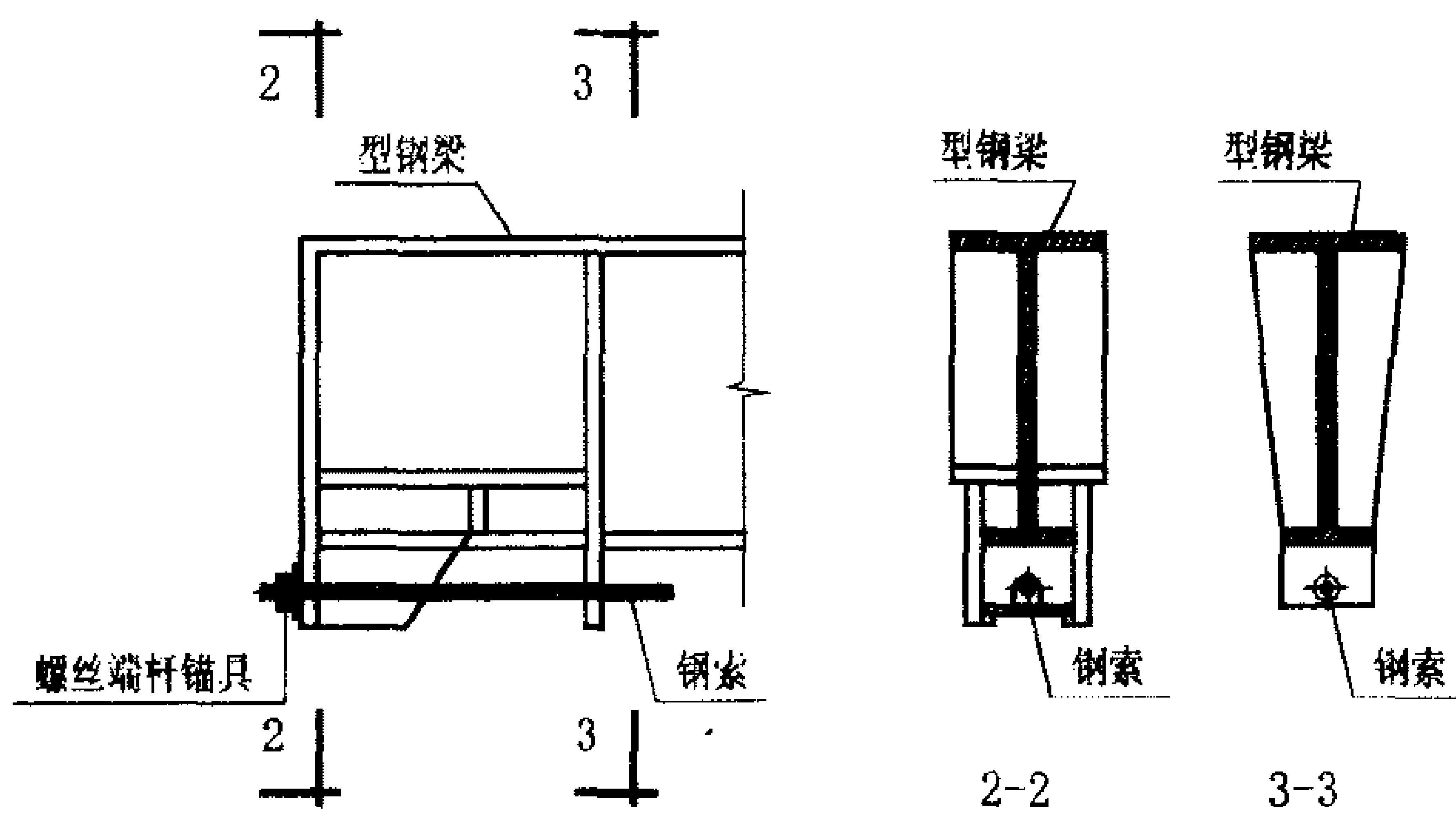
(g) H型钢梁拼接节点



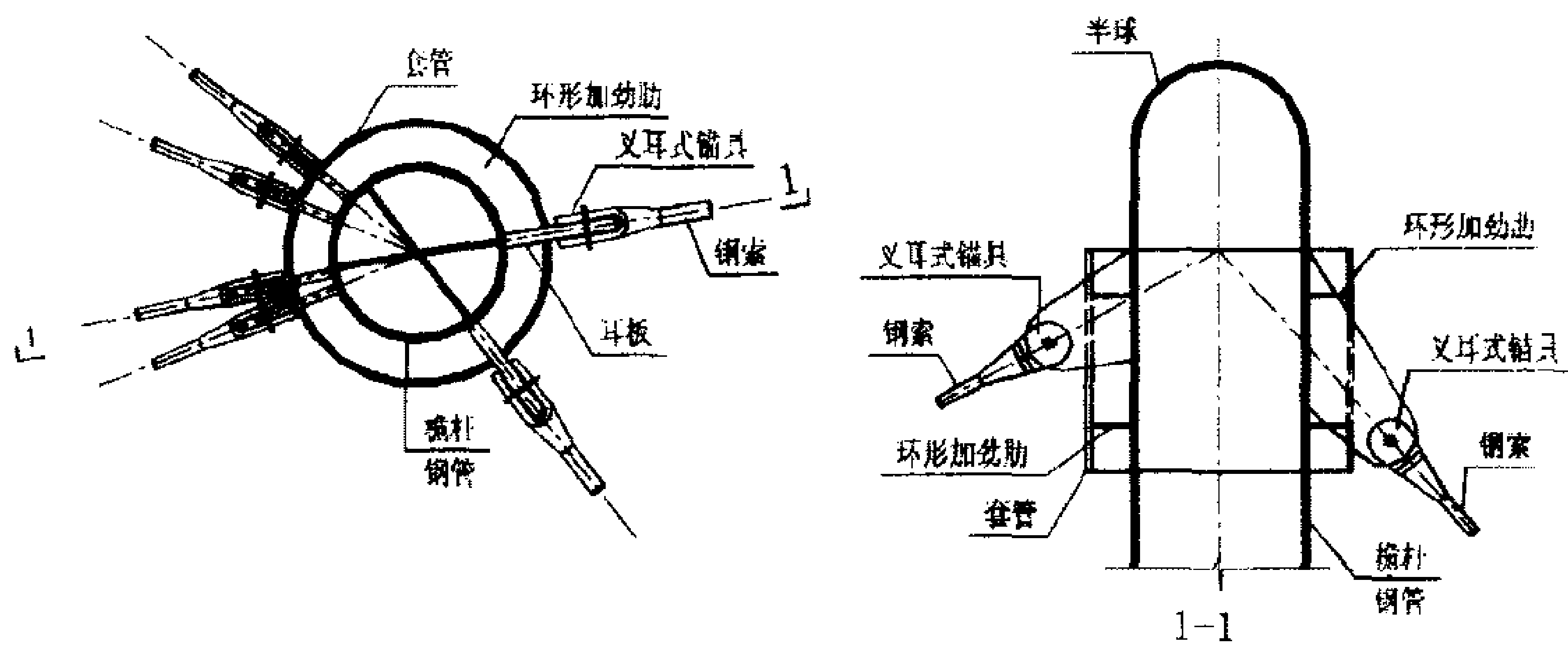
(h) 钢管拼接节点



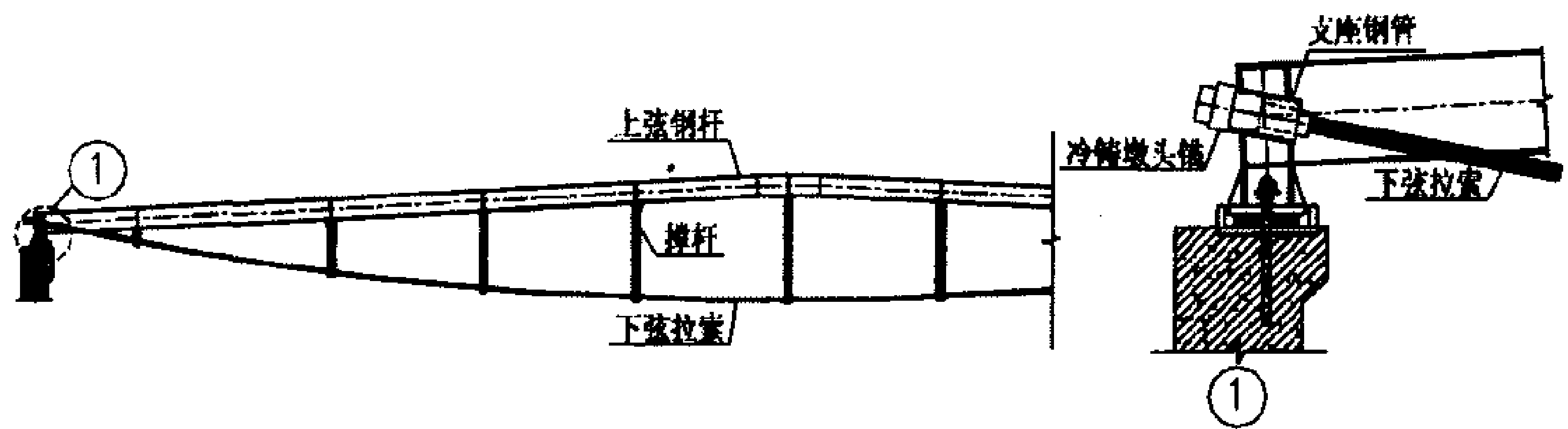
(i) H型钢梁中间节点



(j) H型钢梁端部节点



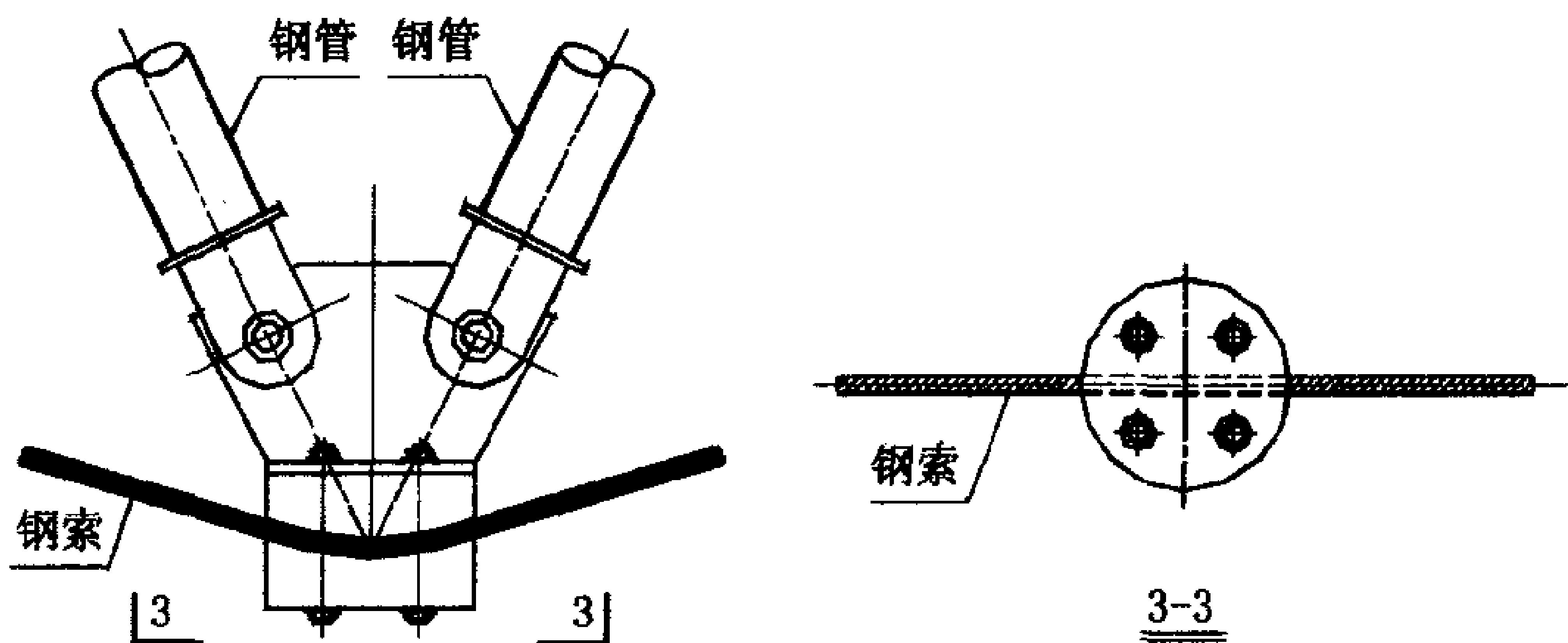
(k) 桅杆结构节点



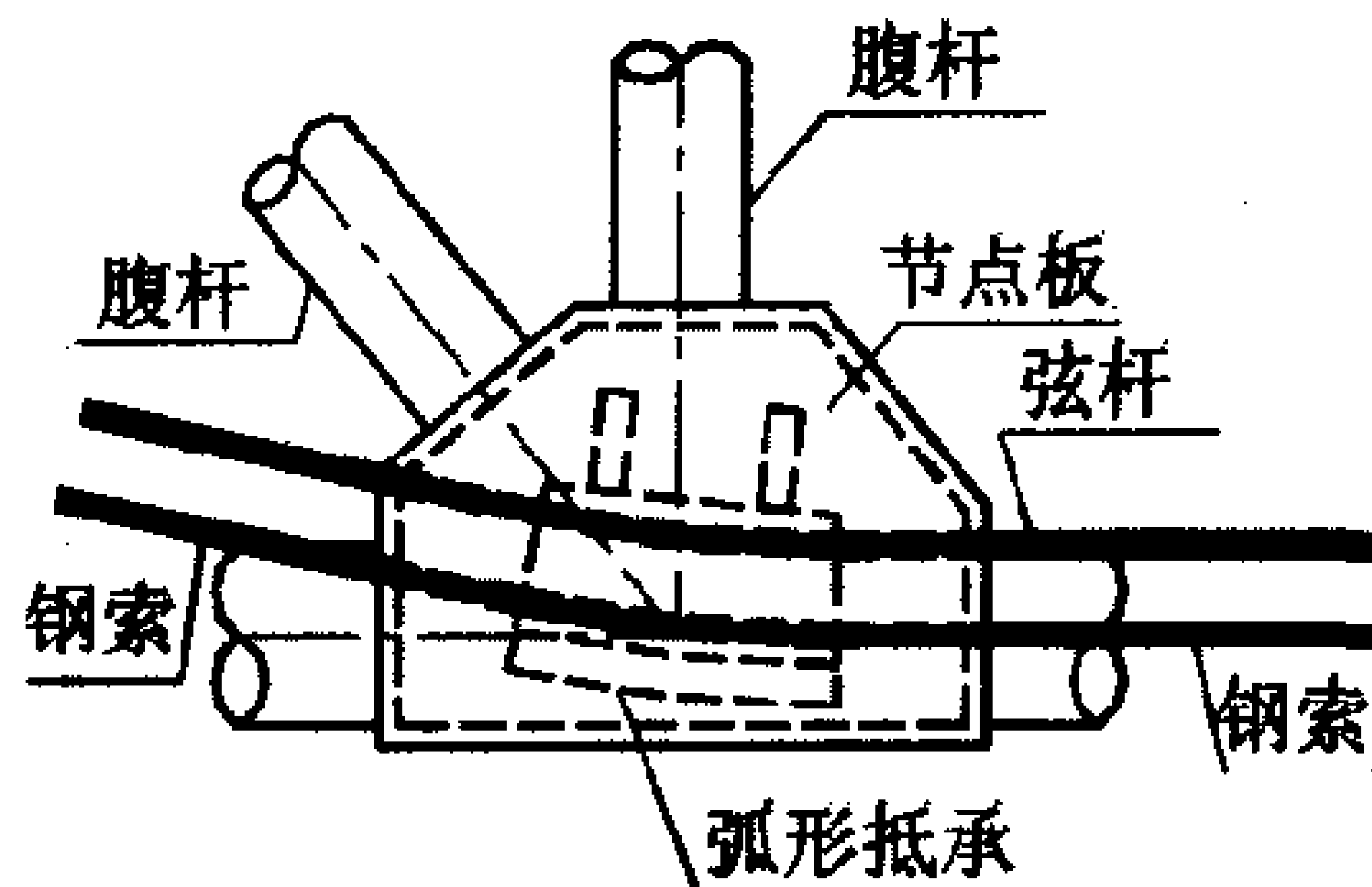
(1) 张弦桁架节点
图 6.3.2 锚固节点构造示意

6.4 转折节点

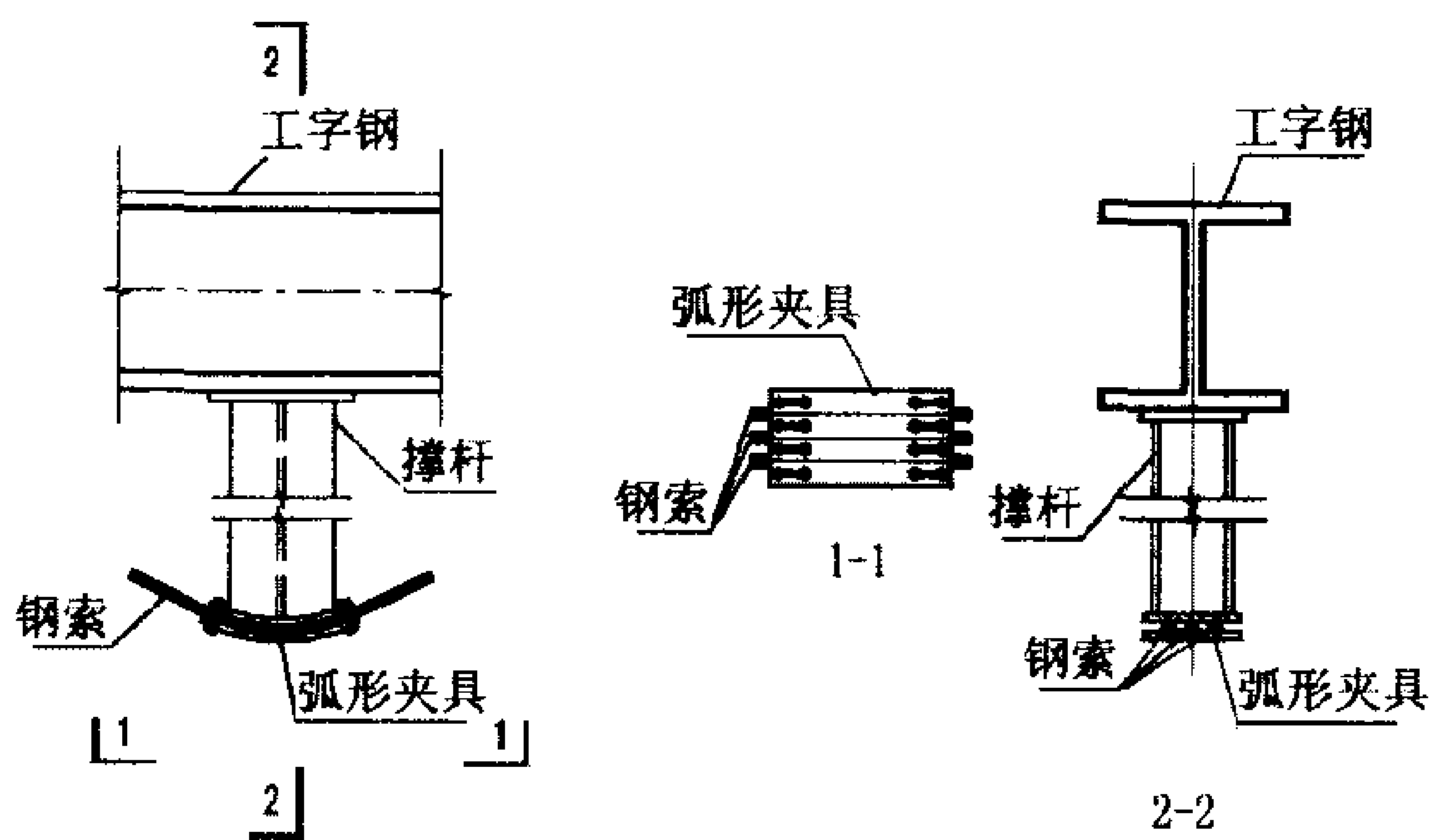
6.4.1 转折节点宜与主体结构连接(图 6.4.1)。转折节点应设置滑槽或孔道供应索准确定位和改变角度。滑槽或孔道内可采用润滑剂或衬垫等摩擦系数低的材料;转折节点沿拉索夹角平分线方向对主体结构施加集中力,应验算该处的局部承压强度和该集中力对主体结构的影响,并采取加强措施。拉索转折节点处于多向应力状态,其强度降低值应在设计中予以考虑。



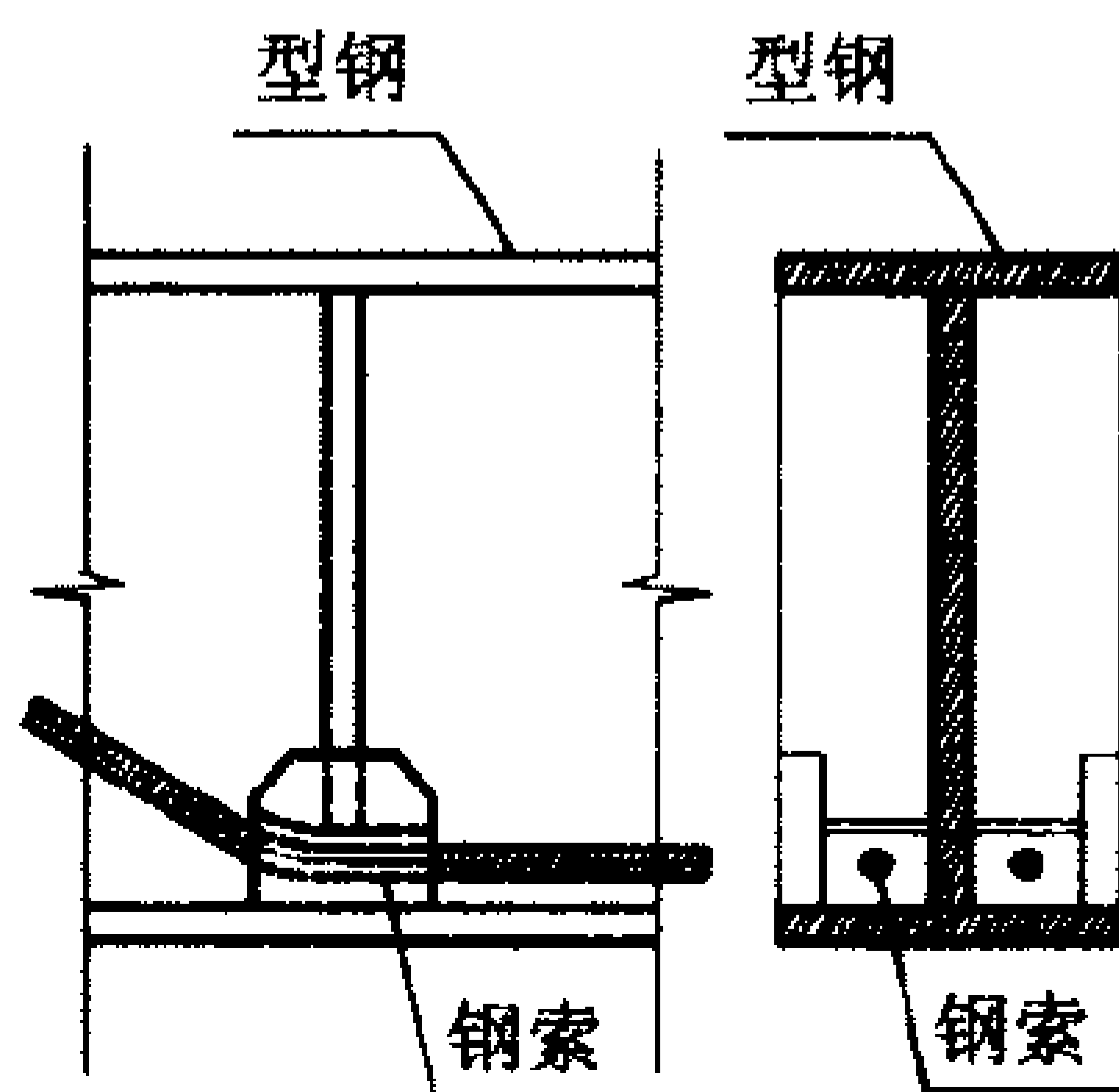
(a) 下弦拉索节点



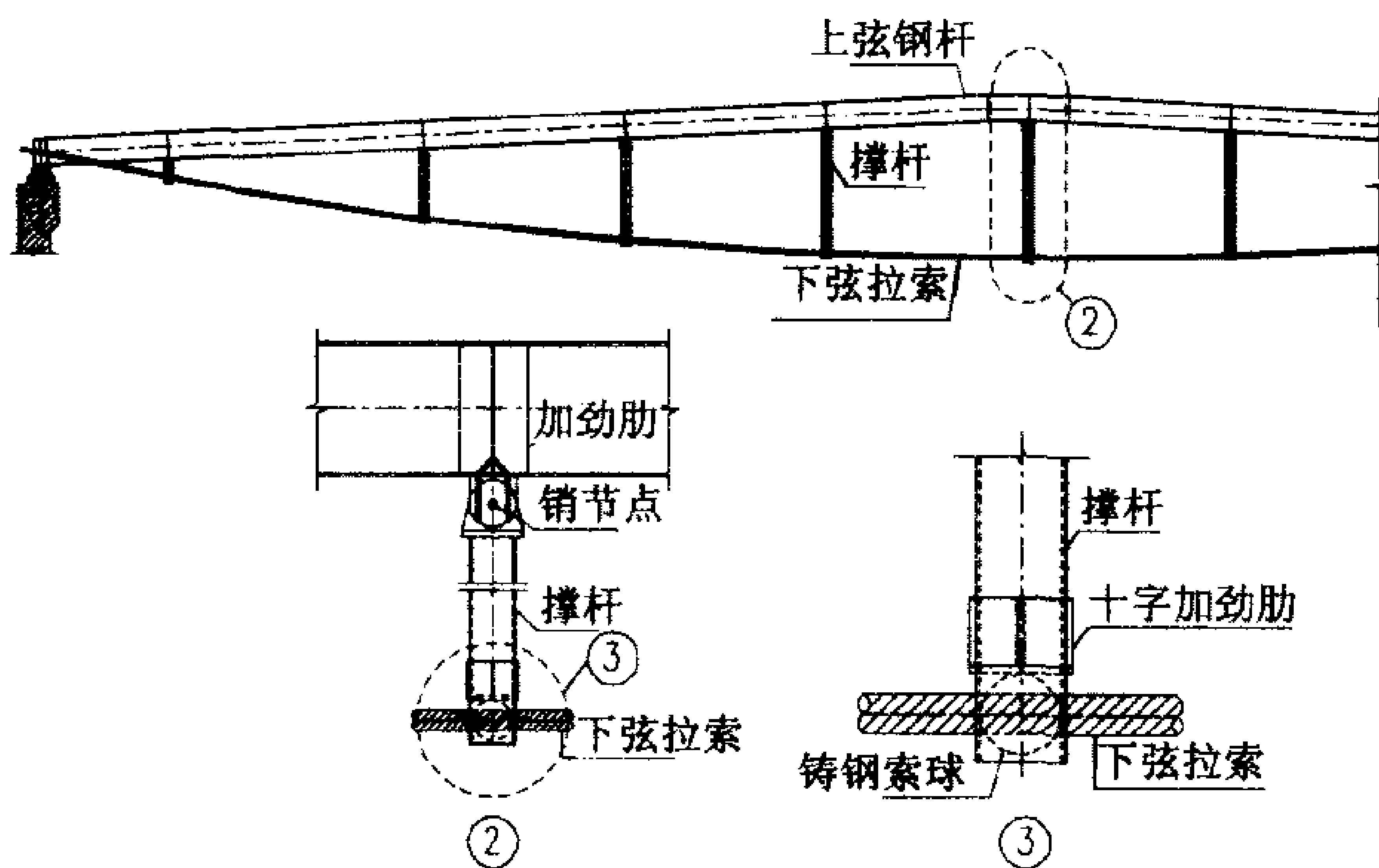
(b) 弧形连接件式节点



(c) 弧形夹具式节点



(d) 实腹梁节点

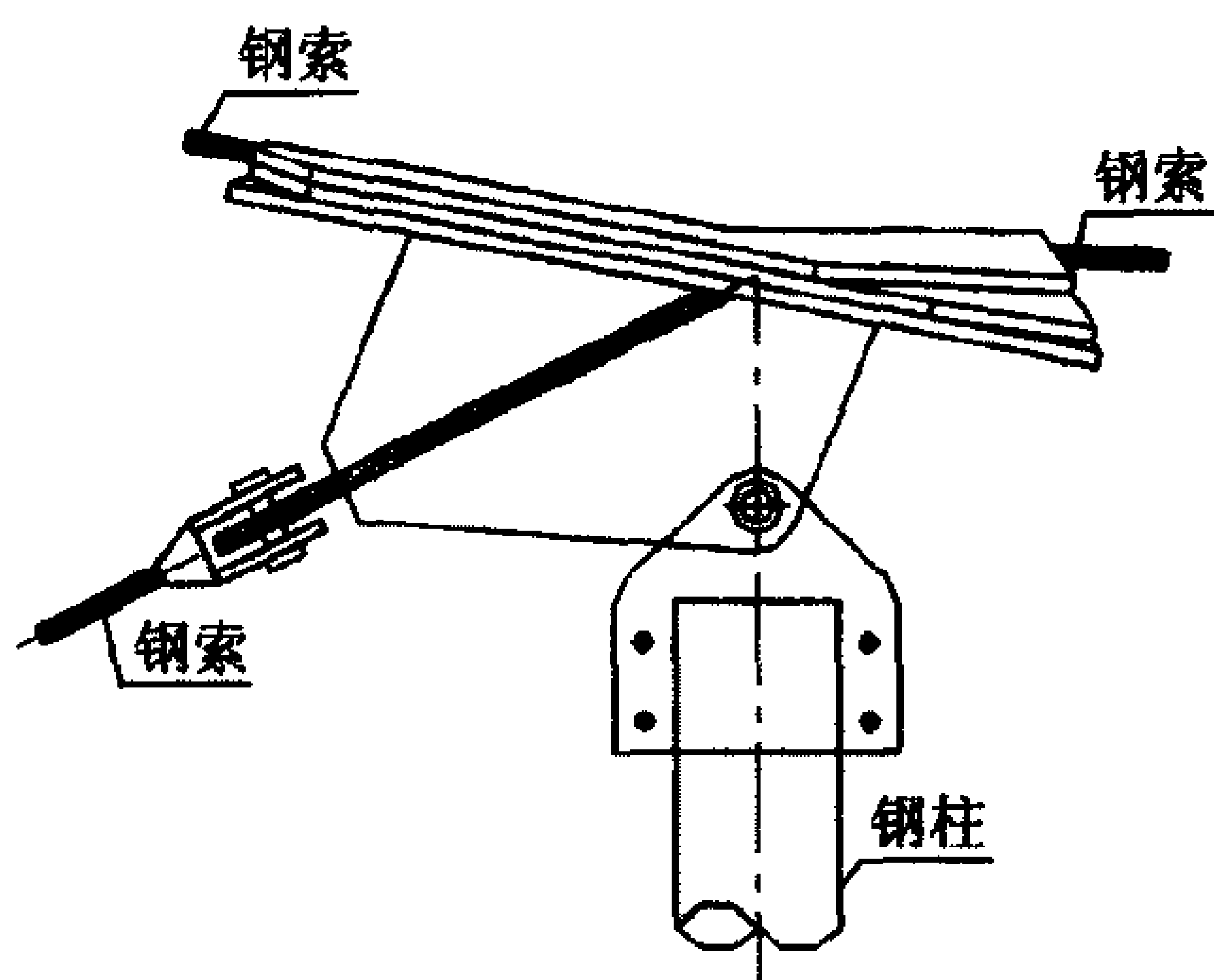
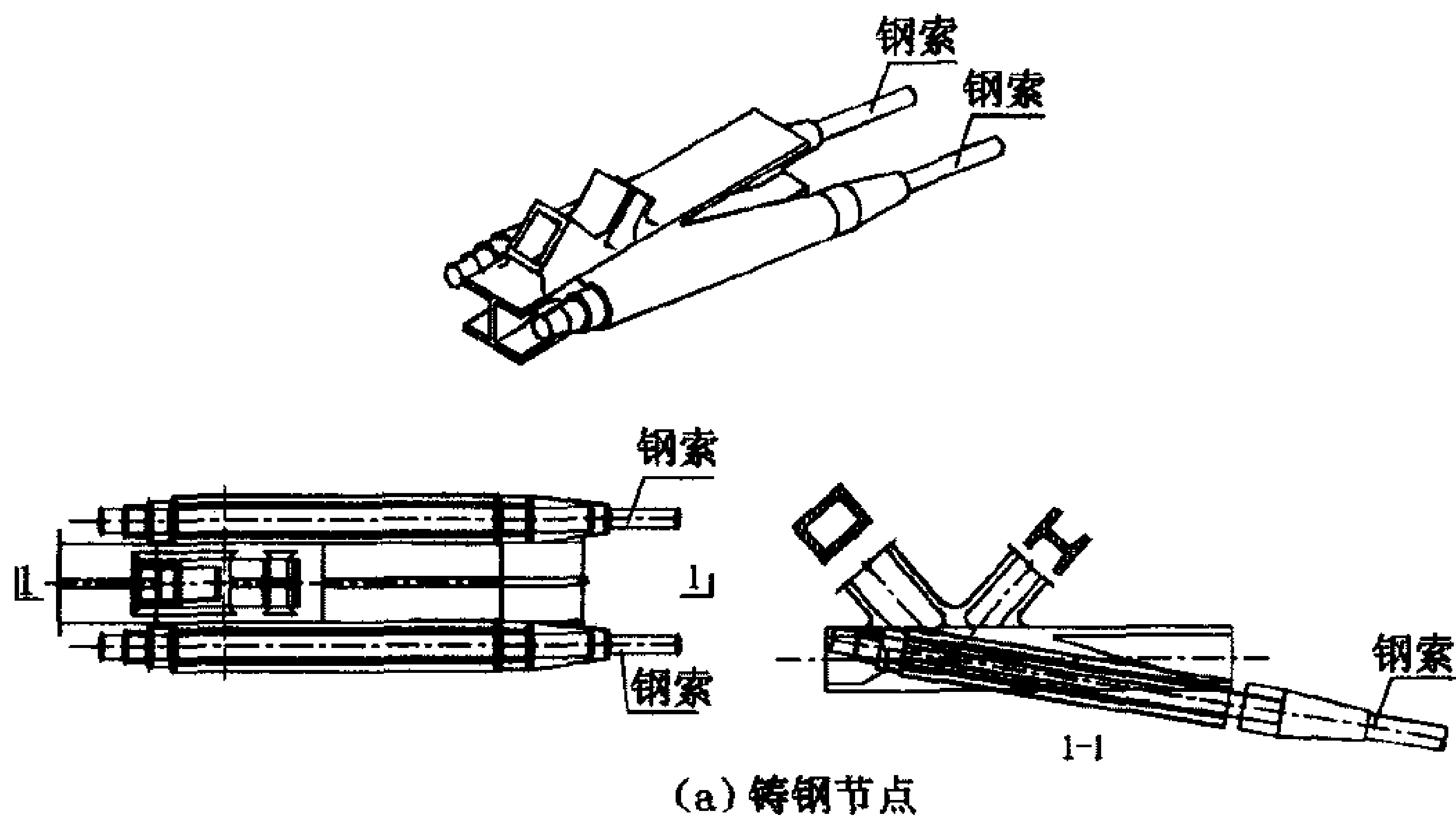


(e) 张弦桁架节点

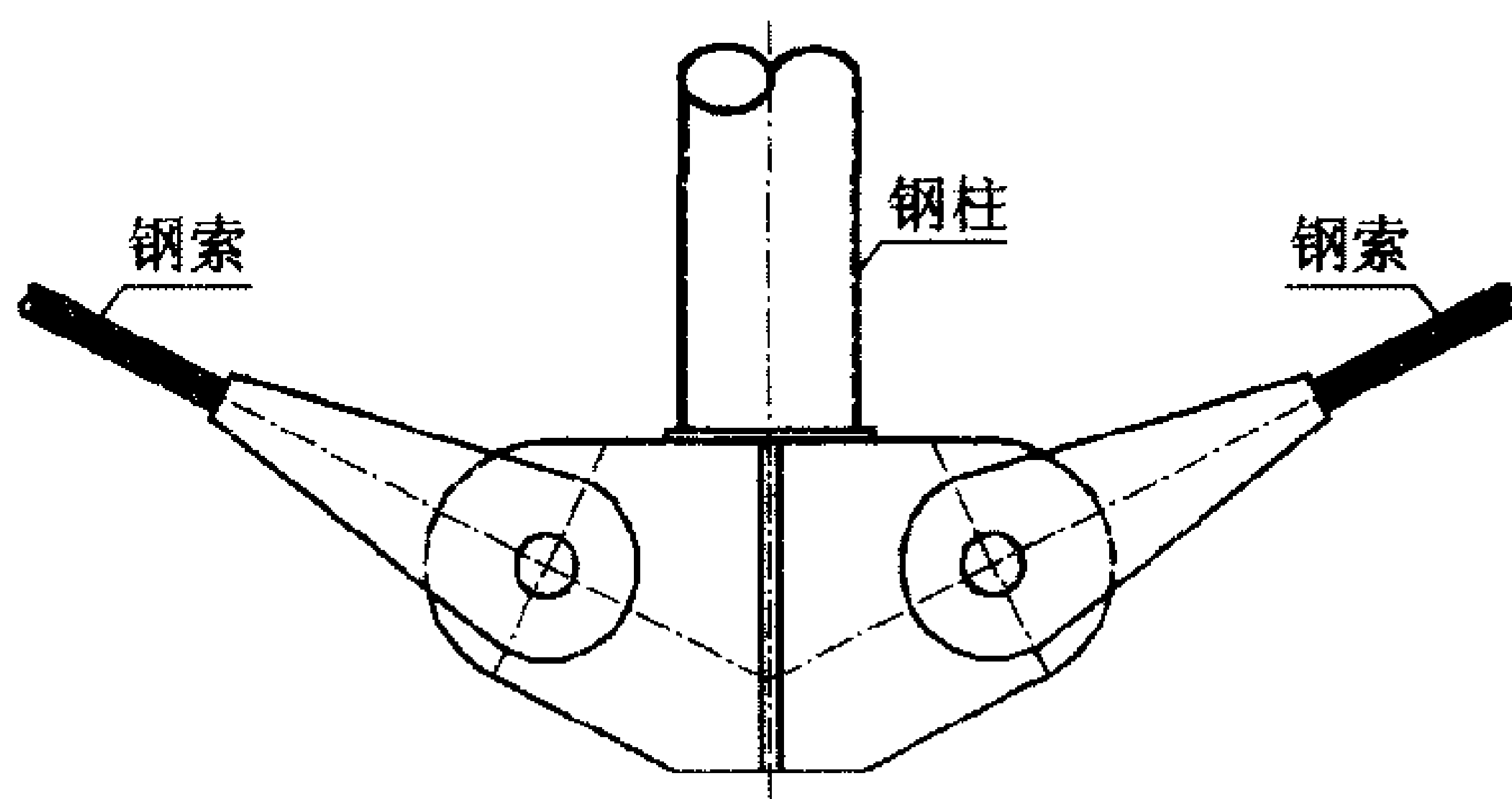
图 6.4.1 转折节点构造示意

6.5 索杆连接节点

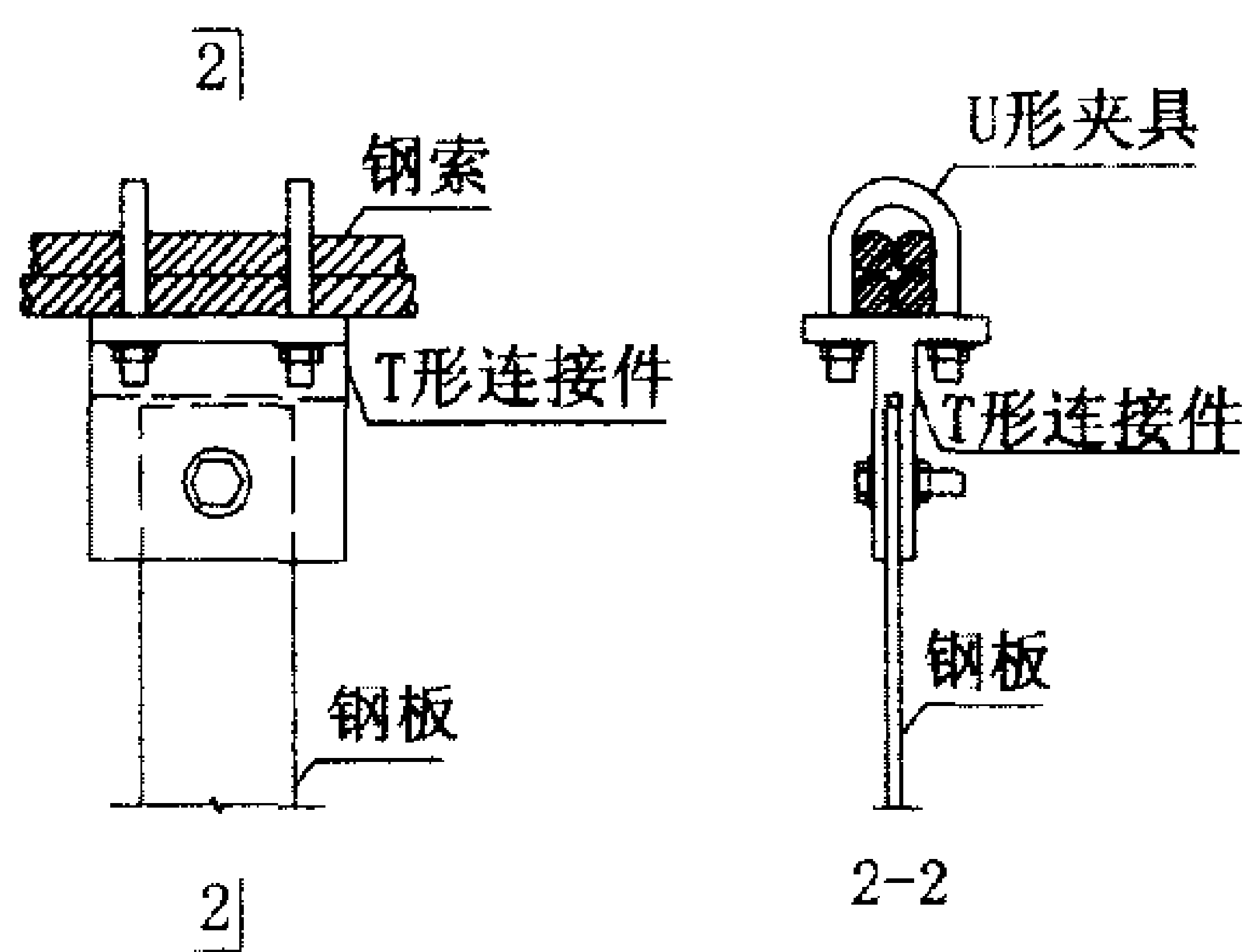
6.5.1 索杆连接节点应保证其承载力不低于杆件和拉索承载力的较小值。节点应传力可靠,连接便利,外形符合建筑造型的要求(图 6.5.1)。



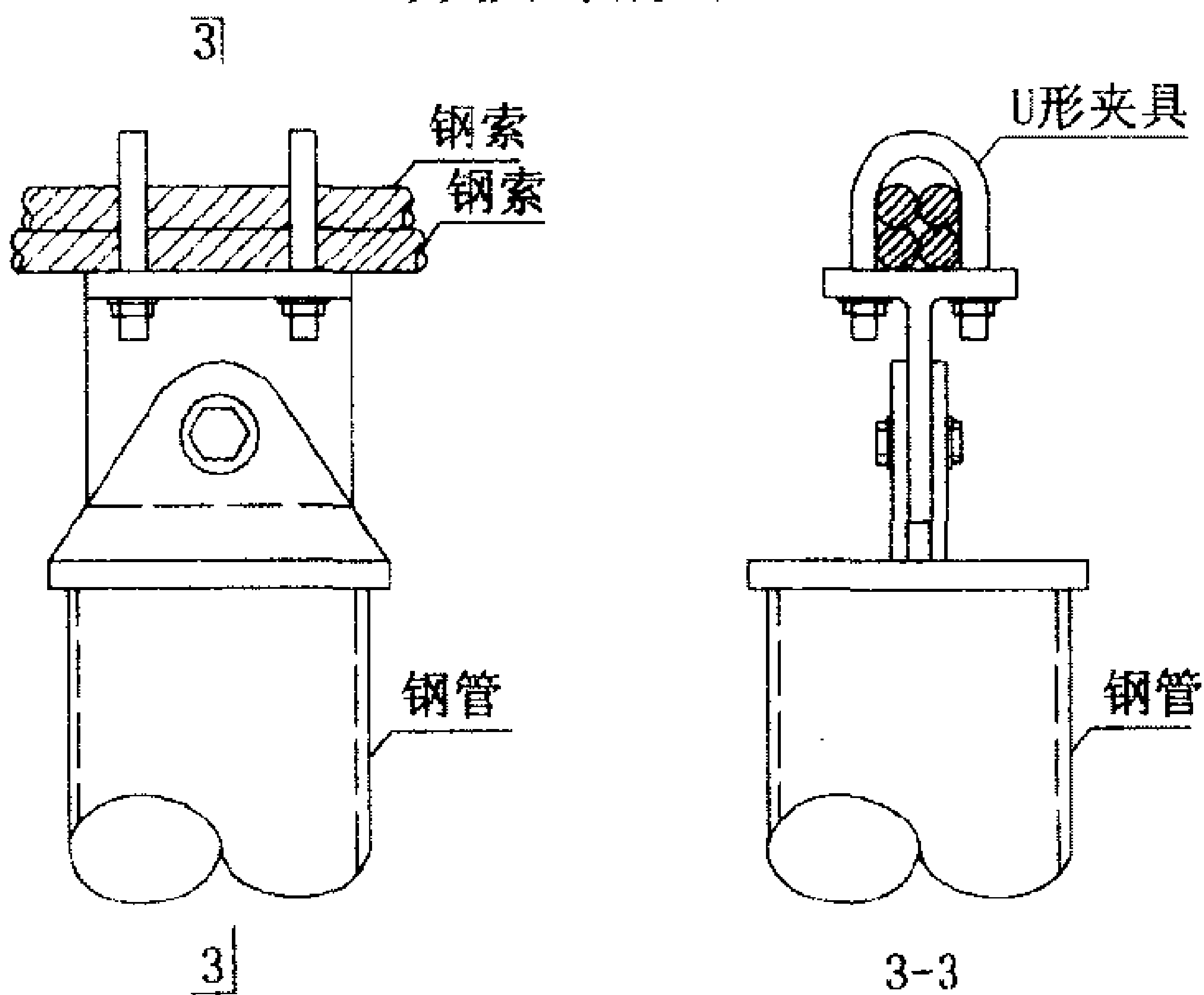
(b) 销接节点板式空间节点



(c) 销接式平面节点



d) U形夹具式钢板节点

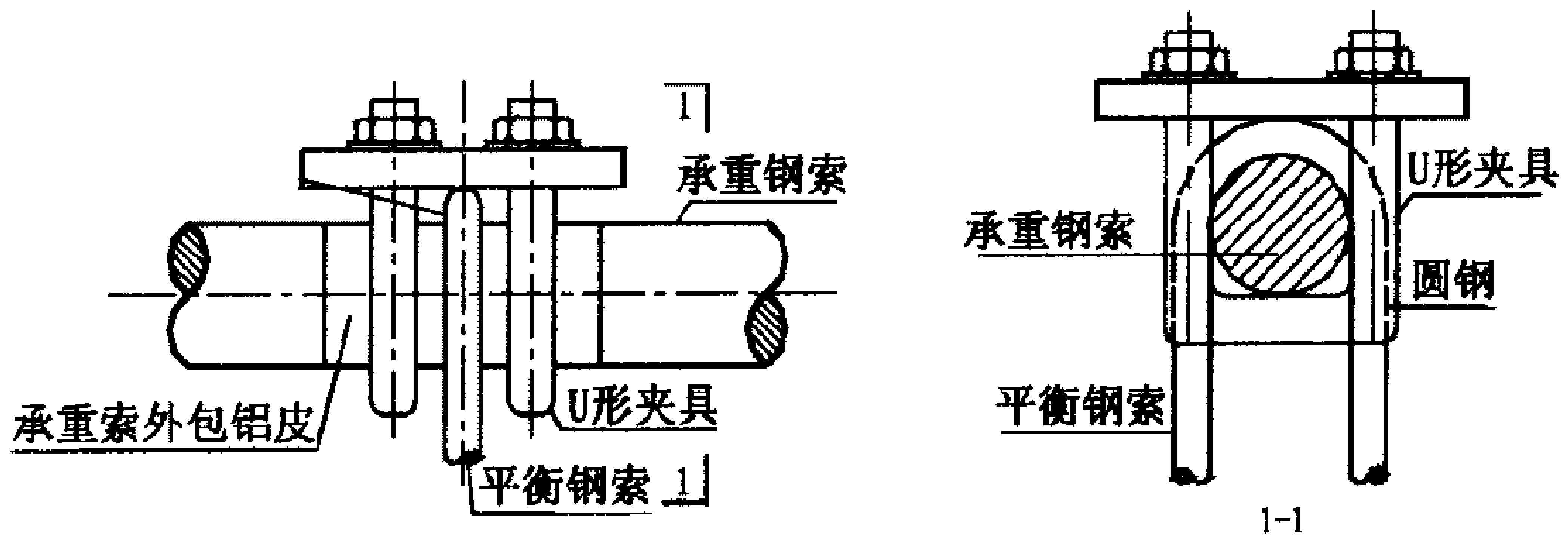


(e) U形夹具式钢管节点

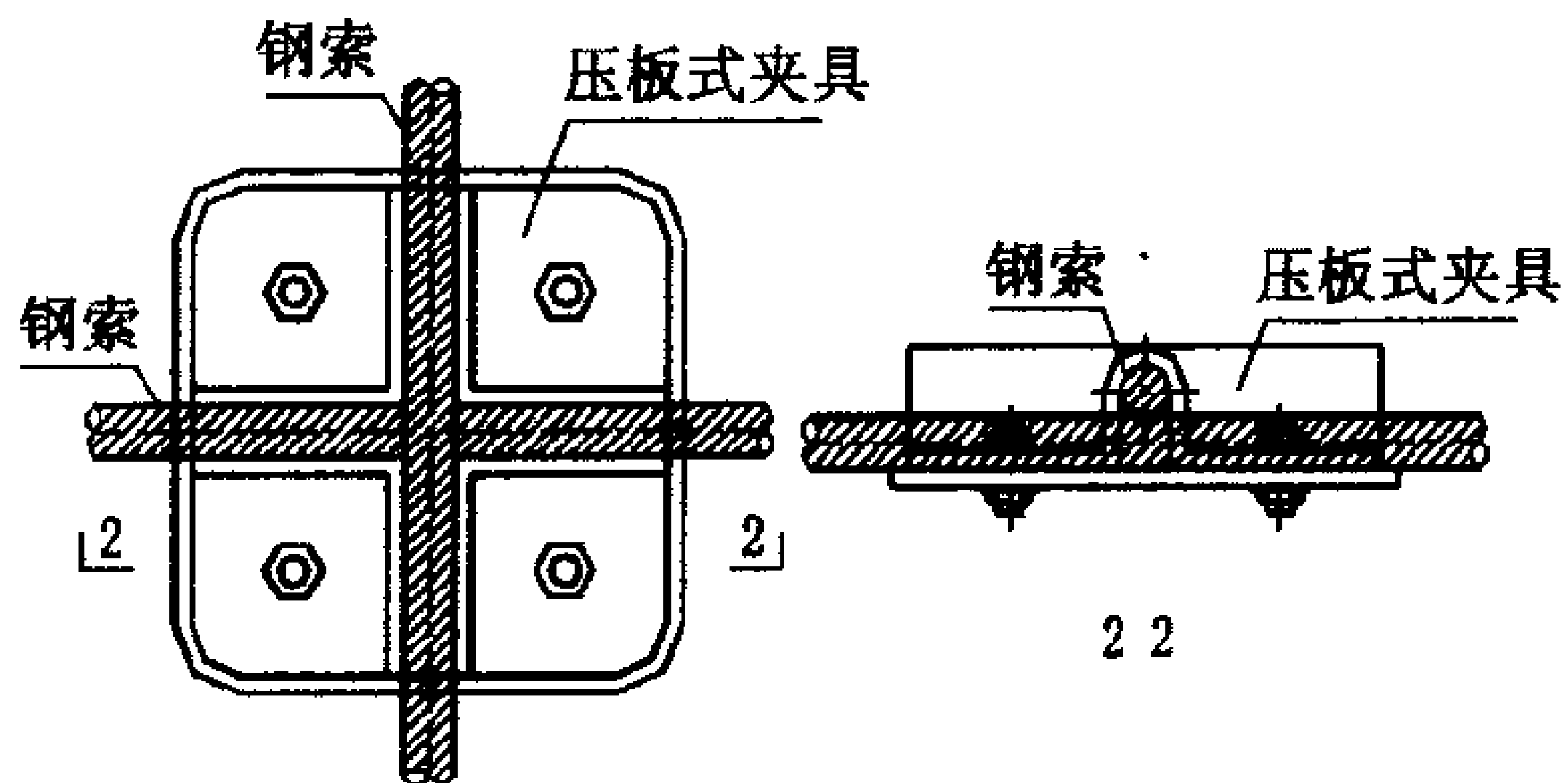
图 6.5.1 索杆连接节点构造示意

6.6 拉索交叉节点

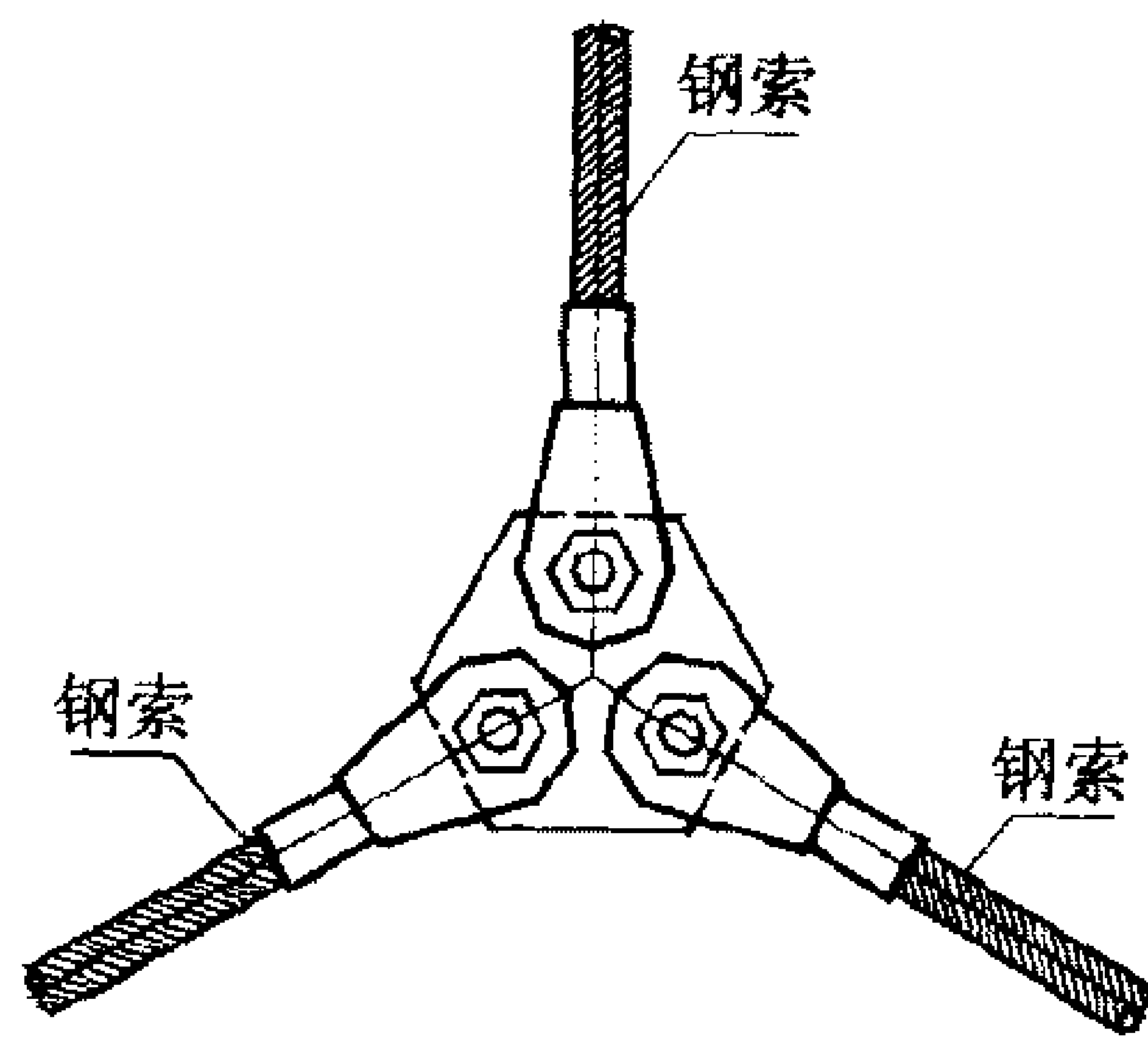
6.6.1 拉索交叉节点应根据拉索的交叉角度优化连接节点板的外形,避免因夹角过小而使拉索相碰;节点板上因开孔和造型切角等引起的应力集中区,可采取构造措施减少应力集中;必要时,应进行平面或空间的有限元分析(图 6.6.1)。



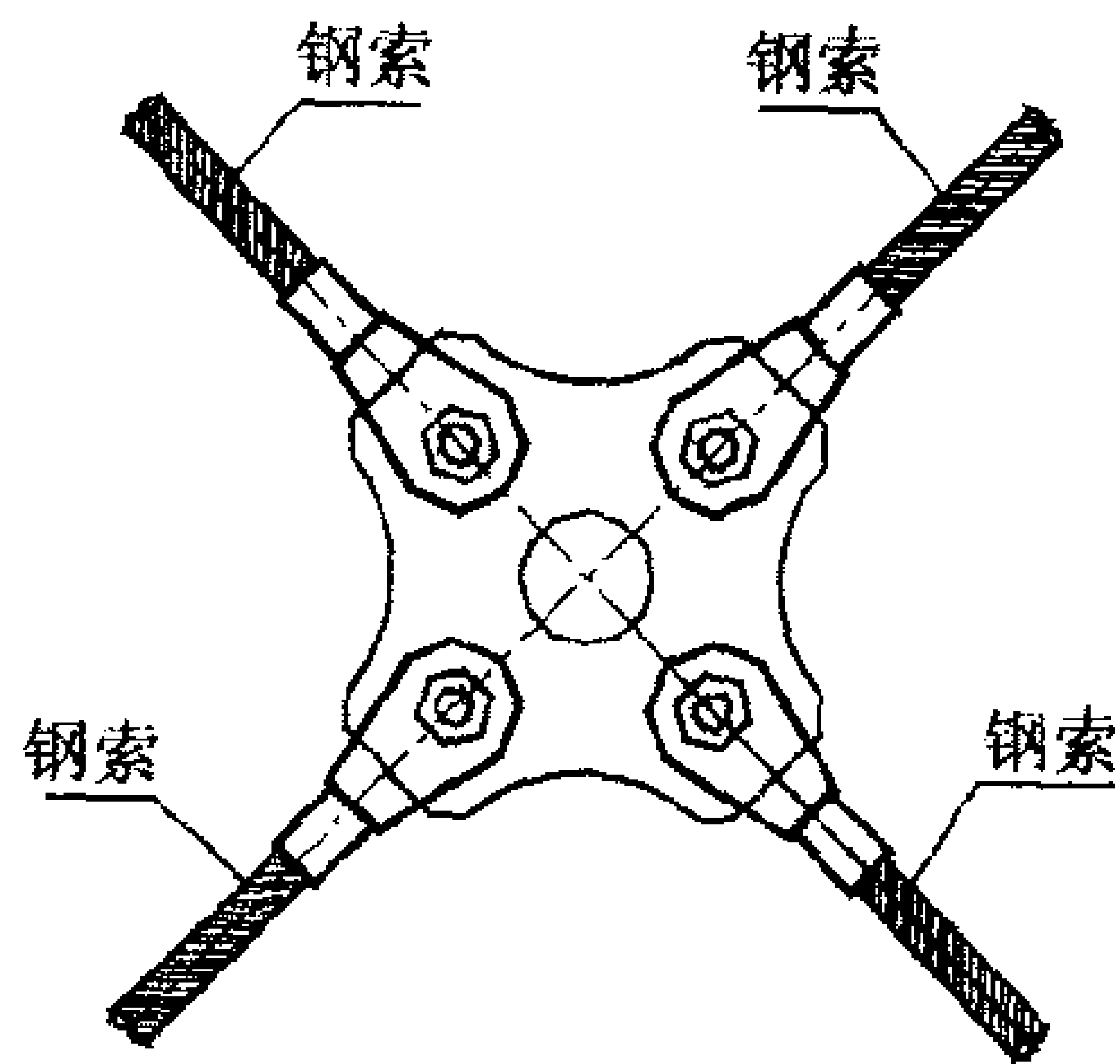
(a) U形夹具式节点



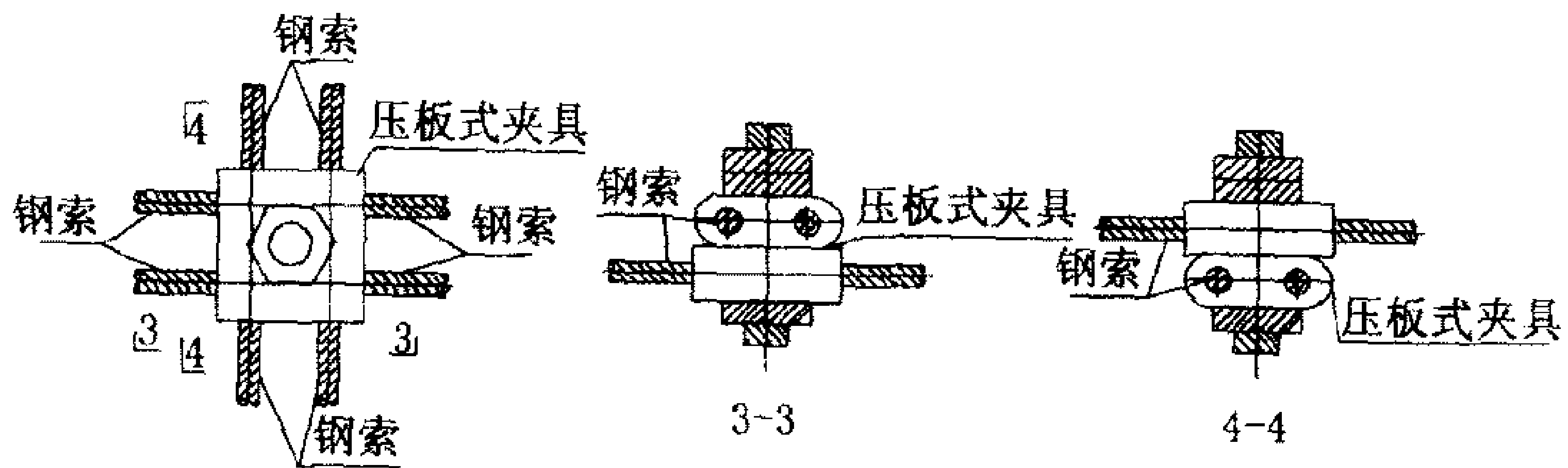
(b) 单层压板式夹具节点



(c) 销接式三向节点



(d) 销接式四向节点

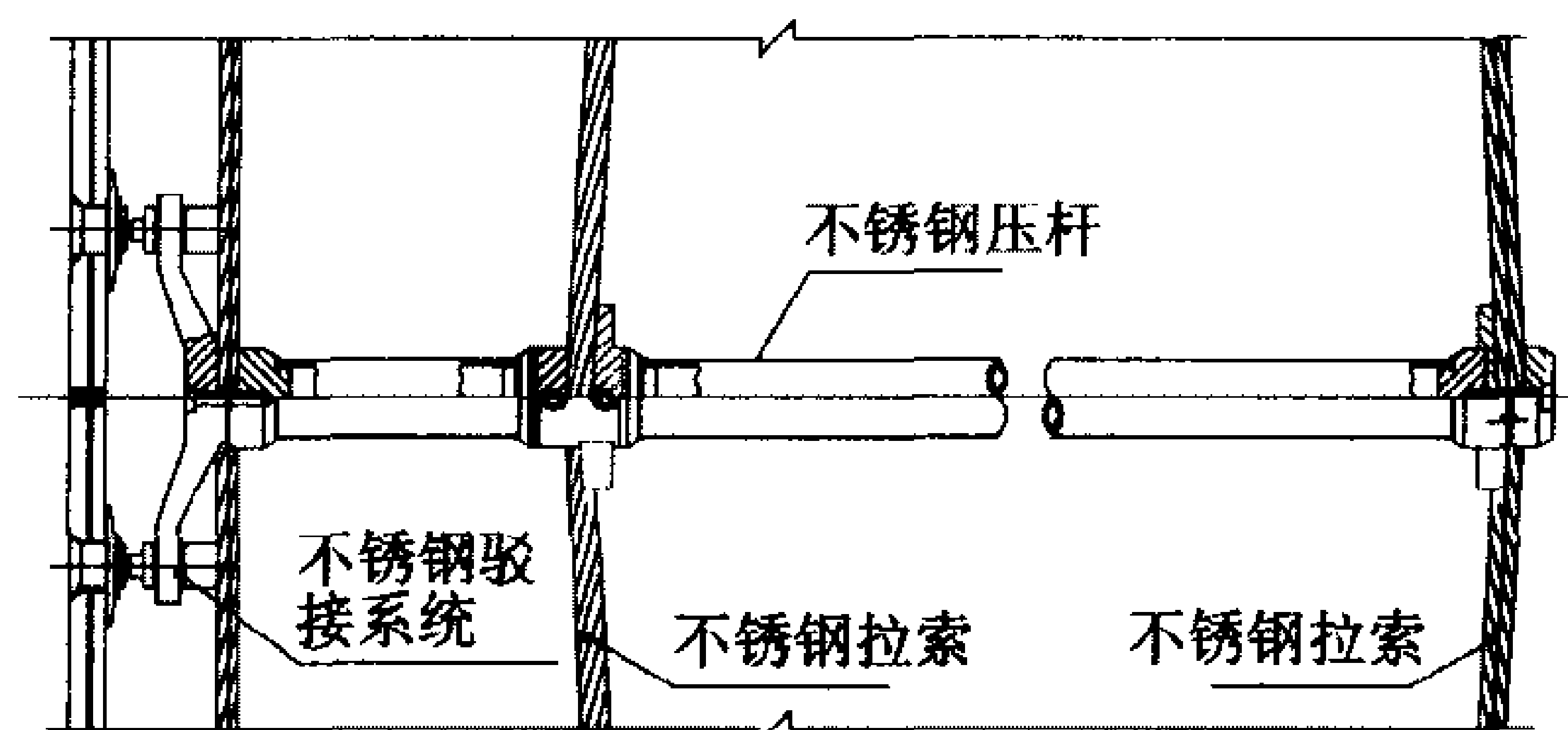


(e) 双层压板式夹具节点

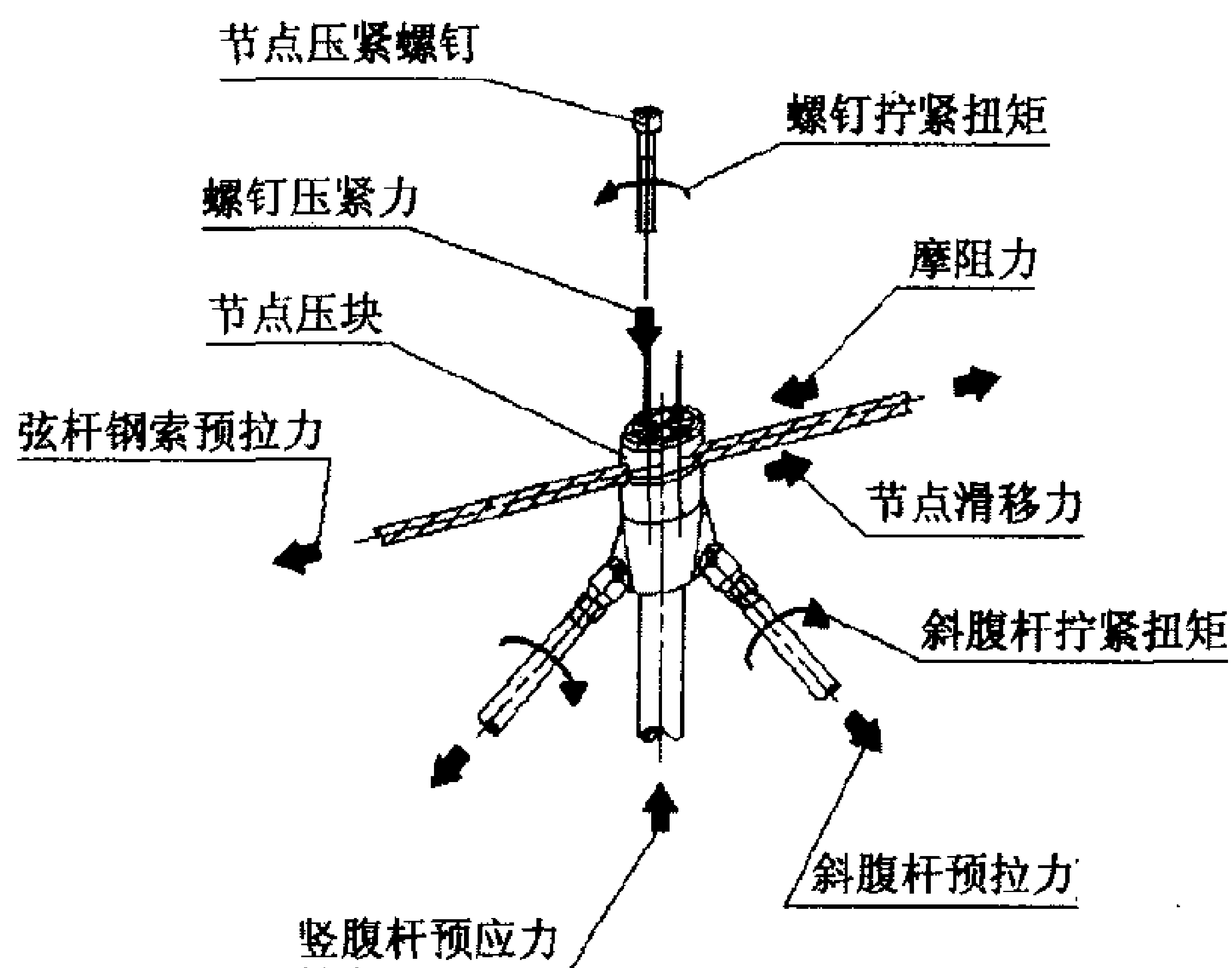
图 6.6.1 拉索交叉节点构造示意

6.7 玻璃幕墙节点

6.7.1 用于玻璃幕墙的预应力索结构的连接节点可分为索(杆)端张拉节点、固定节点、转折节点、交叉节点、索杆连接节点等(图6.7.1-1~6.7.1-3)。索的一端应设索拉力的调节装置,也便于换索。

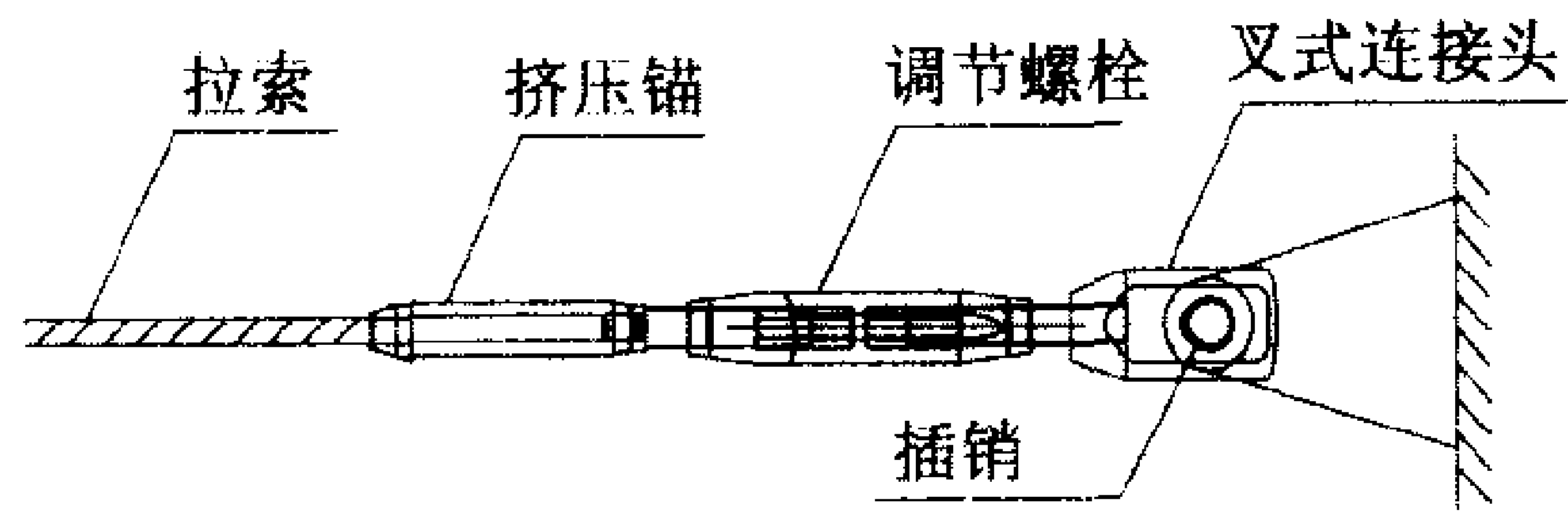


(a)

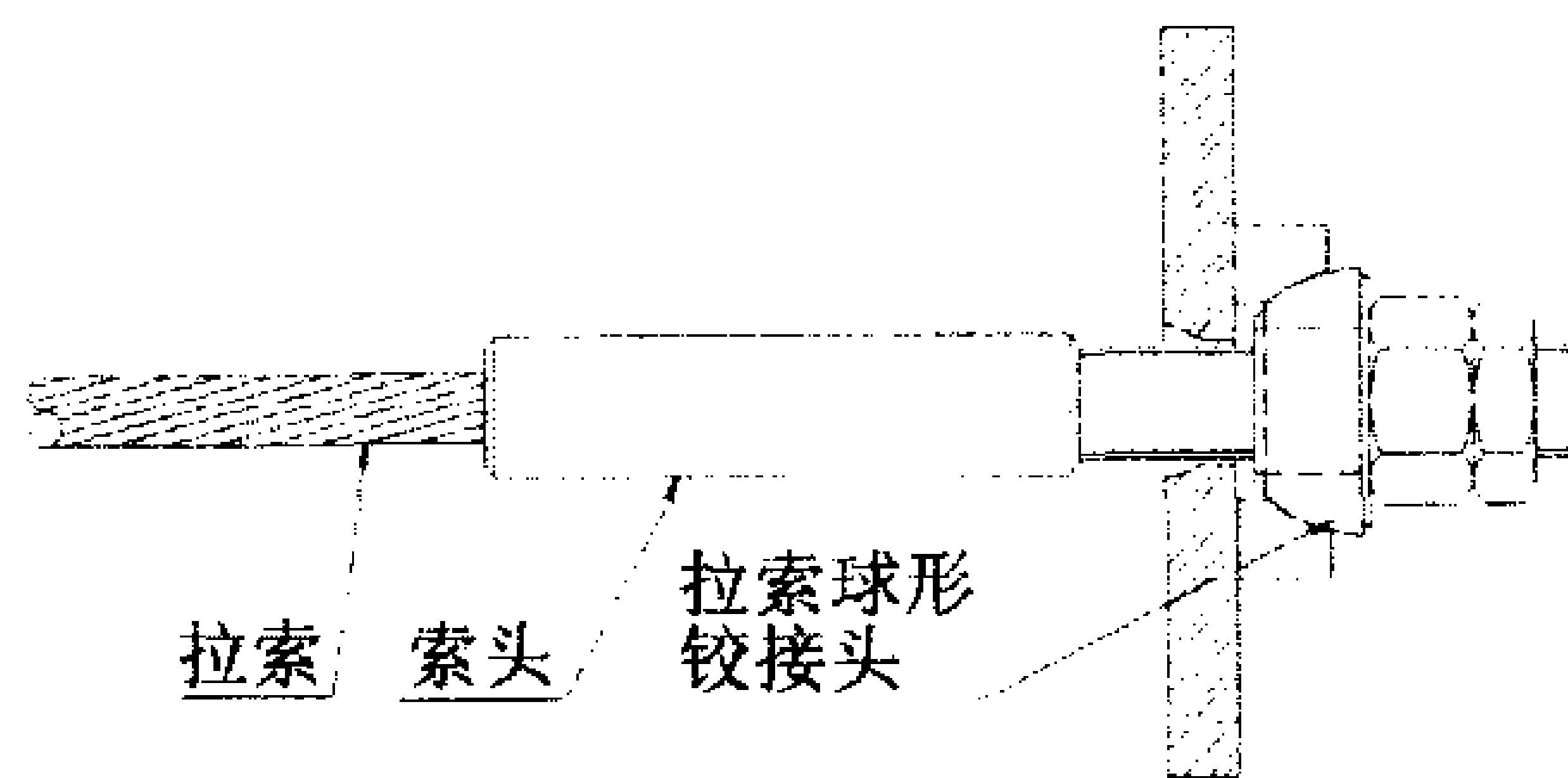


(b)

图 6.7.1-1 索杆连接节点受力示意

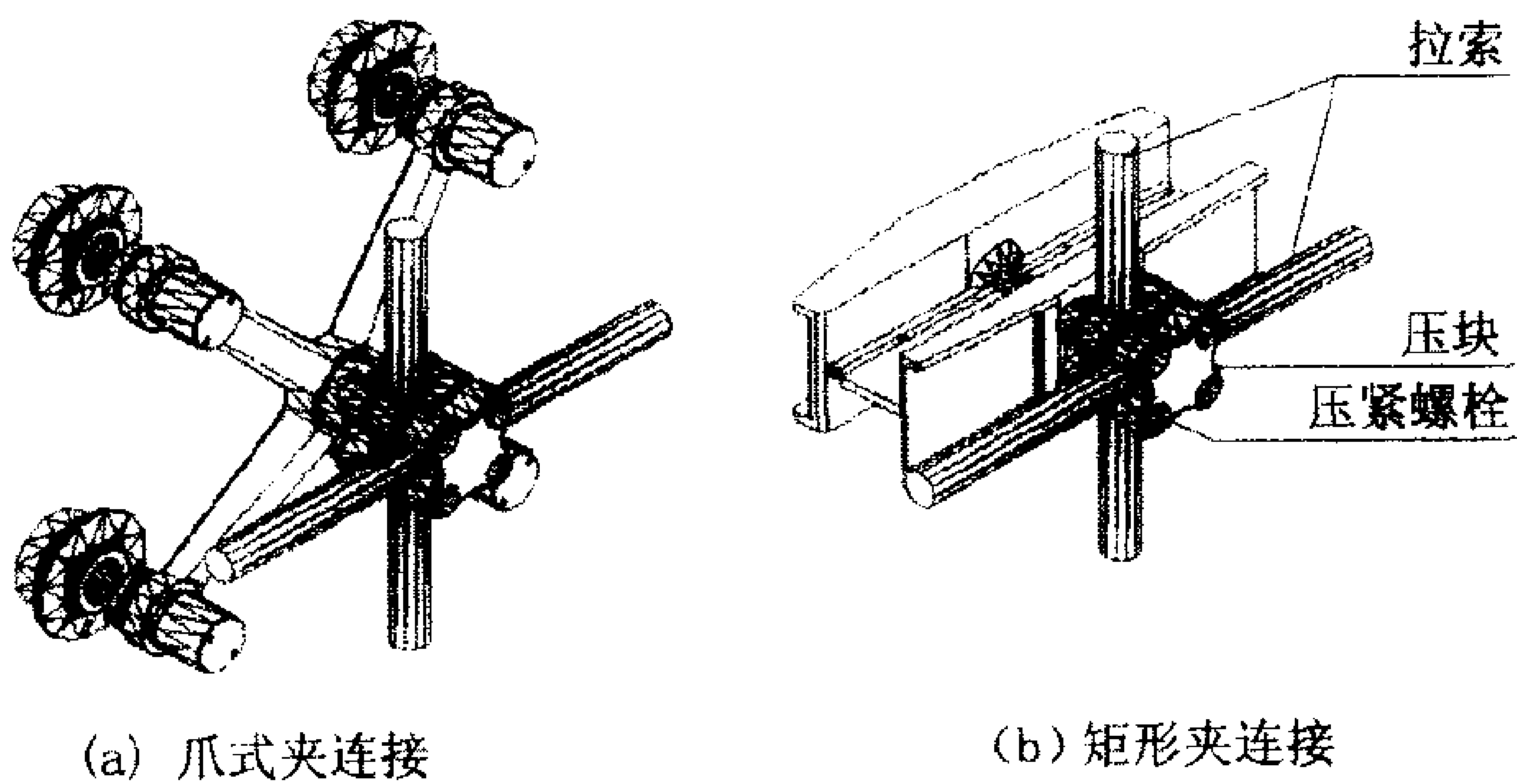


(a) 叉式连接



(b) 球铰连接

图 6.7.1-2 索端连接节点示意



(a) 爪式夹连接

(b) 矩形夹连接

图 6.7.1-3 索交叉节点示意

6.8 索膜结构节点

6.8.1 索膜结构中膜材与索的连接节点可分为脊索节点和谷索节点(图 6.8.1-1、图 6.8.1-2)。

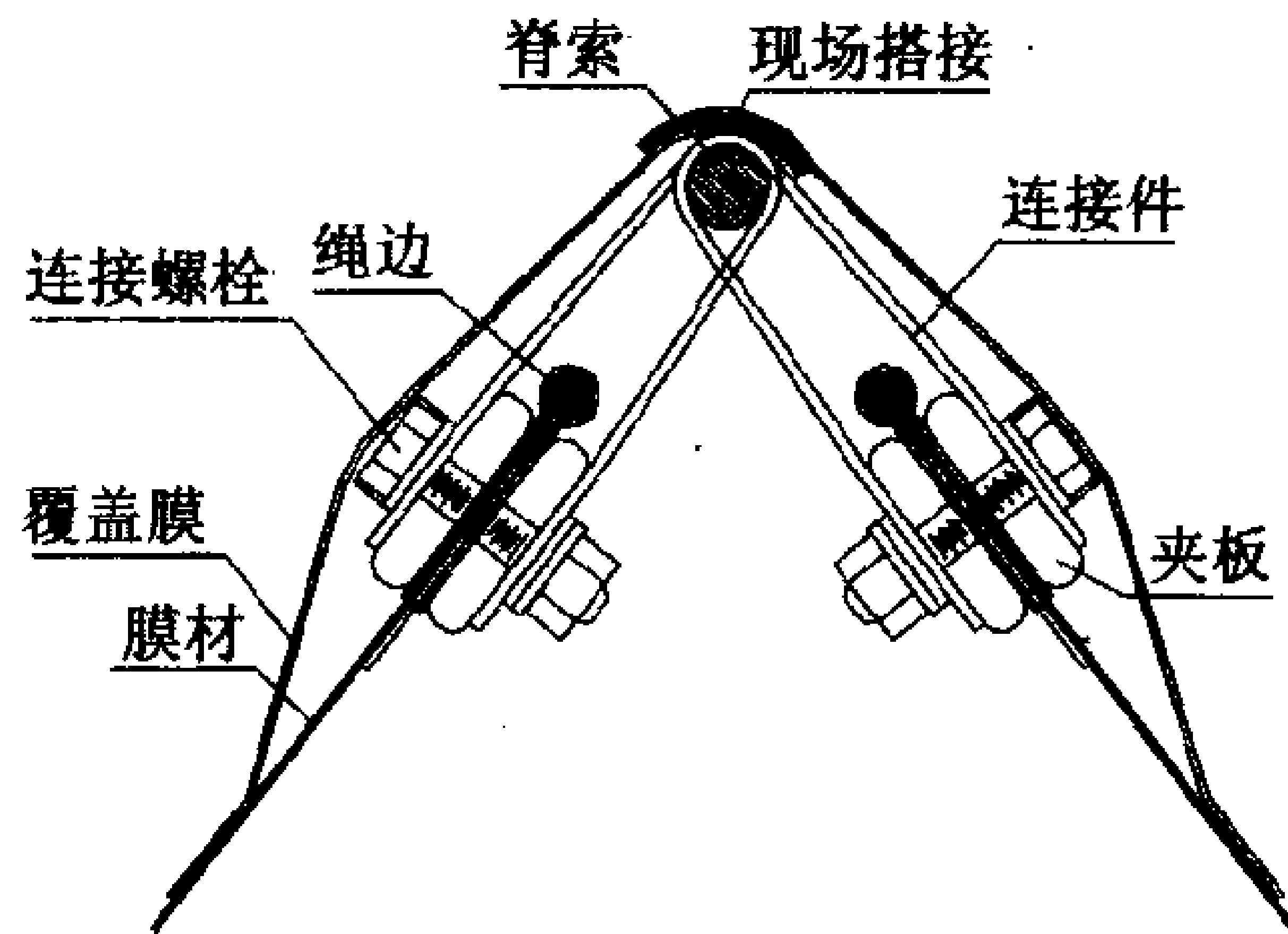


图 6.8.1-1 膜材与脊索连接示意

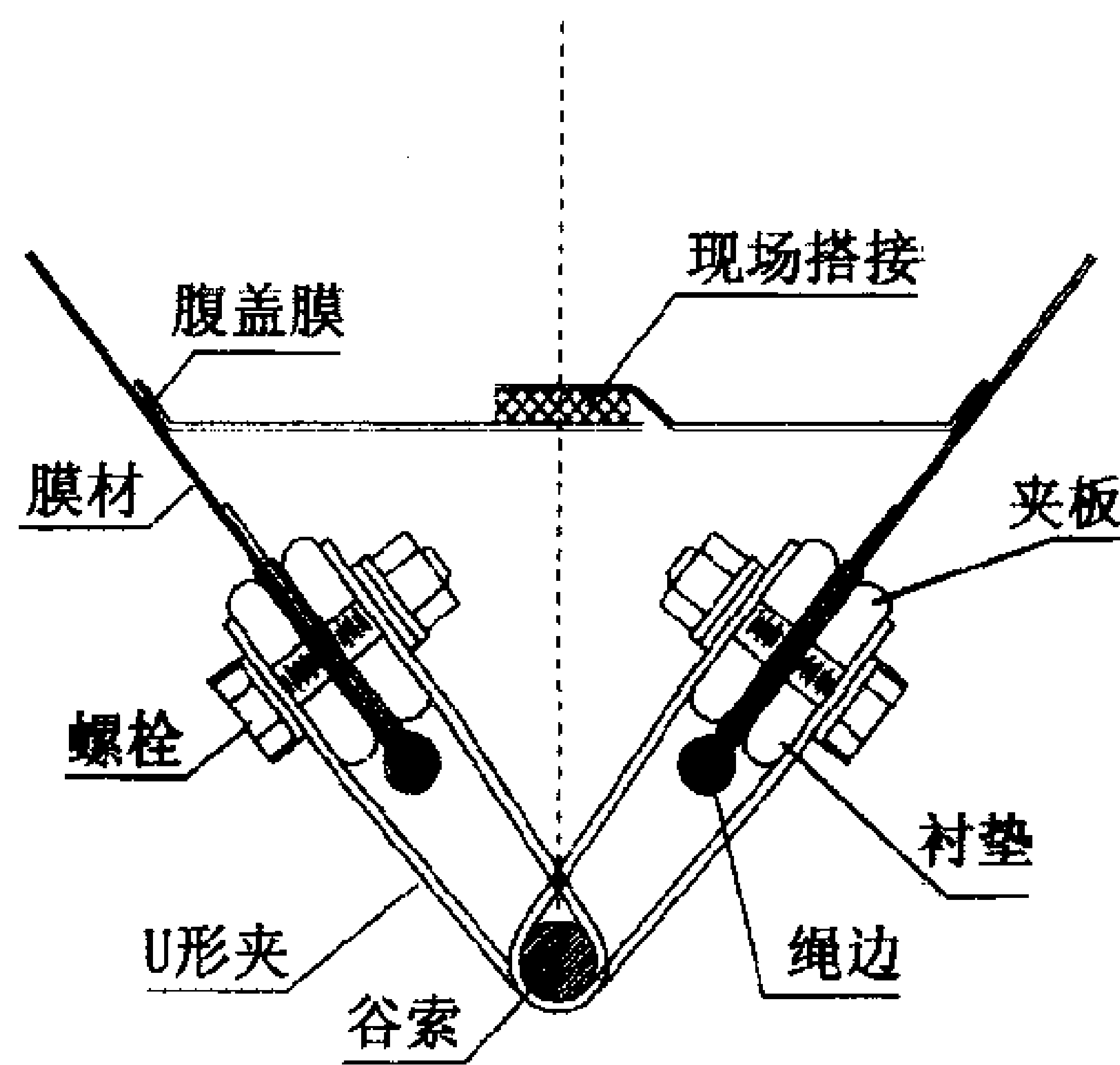


图 6.8.1-2 膜材与谷索连接示意

6.8.2 柔性膜边界索可直接穿入膜套筒内,或将膜通过连接件与索连接(图 6.8.2)。

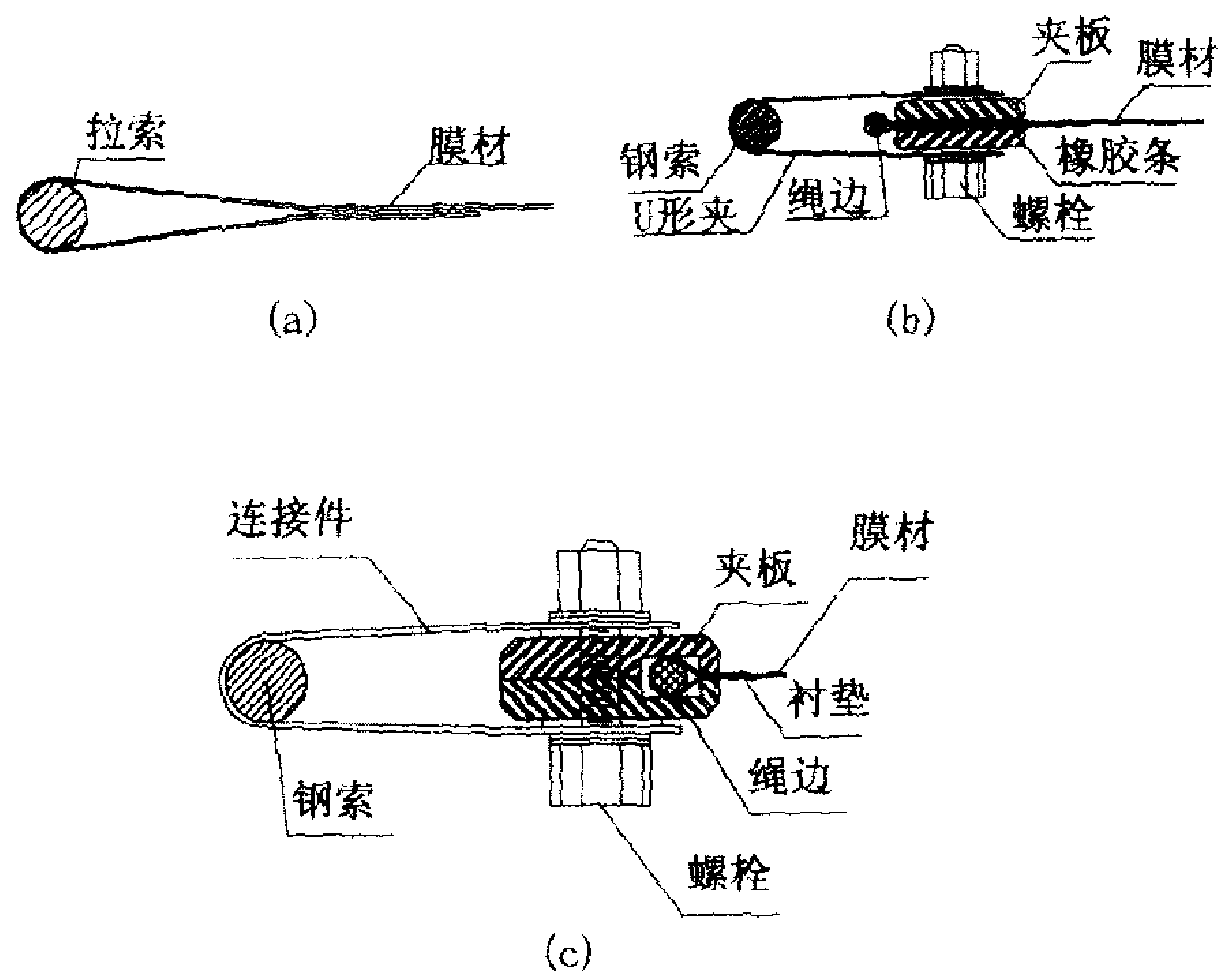


图 6.8.2 膜材边界与索连接示意

7 施工及验收

7.1 一般规定

- 7.1.1 预应力钢结构的安装工程应编制施工组织设计文件,并应符合有关结构工程施工质量验收规范和施工图的要求。
- 7.1.2 现场安装用的焊接材料、紧固件和涂料等,应具有产品质量证明书并符合相关的国家现行标准。
- 7.1.3 构件安装前应进行检验和校正,不合格的构件不得安装使用。
- 7.1.4 试验和张拉用设备和仪器应进行计量标定。施加索力和其他预应力必须采用专用设备,其负荷标定值应大于施力值的2倍。施加预应力的误差不应超过设计值的 $\pm 5\%$ 。
- 7.1.5 预应力钢结构的安装过程中应有相应的监测措施,以反馈结构的信息,调整施工质量,监控施工进度等,监测方案应经设计和监理单位认可。

7.2 安 装

- 7.2.1 拉索安装前,应根据定位轴线和标高基准点复核预埋件和连接点的空间位置和相关配合尺寸。应根据拉索受力特点、空间状态以及施工技术条件,在满足工程质量的前提下综合确定拉索的安装方法。安装方法确定后,施工单位应会同设计单位和其他相关单位,依据施工方案对拉索张拉时支撑结构的内力和位移进行验算,必要时采取加固措施。
- 7.2.2 为确保拼装精度和满足质量要求,安装台架必须具有足够的支承刚度。特别是,当预应力钢结构张拉后,结构支座反力可能有变化,支座处的台架在设计、制作和吊装时应采取有针对性的措施。

7.2.3 当风力大于三级、气温低于 4℃时,不宜进行拉索和膜单元的安装。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。

7.2.4 室外存放拉索时,应置于遮篷中且防潮、防雨。成圈的产品应水平堆放;重叠堆放时应逐层加垫木,以避免锚具压损拉索的护层。应特别注意保护拉索的护层和锚具的连接部位,防止雨水浸入。当除拉索外其他金属材料需要焊接和切削时,其施工点与拉索应保持一定距离或采取保护措施。

7.2.5 对连接用或装饰用索,可不对索力和位移进行双控,目测绷直即可。

7.3 张拉工艺

7.3.1 预应力索的张拉顺序必须严格按照设计要求进行。当设计无规定时,应考虑结构受力特点、施工方便、操作安全等因素,且以对称张拉为原则,由施工单位编制张拉方案,经设计单位同意后执行。

7.3.2 张拉前,应设置支承结构,将索就位并调整到规定的初始位置。安装锚具并初步固定,然后按设计规定的顺序进行预应力张拉。宜设置预应力调节装置。张拉预应力宜采用油压千斤顶。张拉过程中应监测索系的位置变化,并对索力、结构关键节点的位移进行监控。

7.3.3 对直线索可采用一端张拉,对折线索宜采取两端张拉。几个千斤顶同时工作时,应同步加载。索段张拉后应保持顺直状态。

7.3.4 拉索应按相关技术文件和规定分级张拉,且在张拉过程中复核张拉力。

7.3.5 玻璃幕墙中,多根预应力索的张拉工艺,应遵循分级、逐步、反复张拉到位的流程。

7.4 工程验收

7.4.1 应根据现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 和本规程的规定,进行预应力钢结构工程的施工质量验收。

7.4.2 应由建设单位组织,有关单位参加。在结构安装完成后,对索体及其连接部分,以及预应力钢结构其他部分,进行统一验收。

7.4.3 验收应具备下列文件和资料:

- 1 设计文件、安装图、竣工图、图纸会审记录,设计变更文件,使用软件名称。
- 2 制作和张拉工艺设计,施工组织设计,技术交底记录。
- 3 材料出厂质量证明文件和进场检验报告,包括:原材料检验、索材检验、锚具和连接件检验等。
- 4 施工检验记录、隐蔽工程验收记录、加工安装自检记录、张拉行程和索体张力记录、施工现场质量检查记录、不合格项目处理记录及其他相关文件。

7.4.4 竣工前,应对主要承重拉索进行索力量测,偏差值应控制在±10%以内。当超标难以调整时,必须与设计单位协商处理。拉索的表面质量和索与锚具的连接构造应满足设计要求。

8 防护和监测

8.1 防 腐

8.1.1 钢结构的防腐应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的规定。

8.1.2 钢材表面锈蚀等级不应低于 B 级。钢结构构件表面应采用喷射或抛射除锈,除锈质量等级不应低于 Sa2.5。除锈后应采取防止油污、沾水及其他损伤的措施。轻钢龙骨(冷弯薄壁型钢)结构构件应采用热浸镀锌钢板制作,镀锌量不应少于 $275\text{g}/\text{m}^2$ 。

8.1.3 室外无防火要求的钢构件,其涂层宜按五层做法(两道底漆,一道中间漆,两道面漆)涂装,底层涂装宜采用环氧富锌涂料和可靠的涂装工艺。干膜总厚度不宜小于 $150\mu\text{m}$ 。

8.1.4 钢构件的连接部位应采用不低于环氧富锌漆效果的涂装工艺进行防腐处理,并应达到与钢结构主体相同的防腐标准。

8.1.5 预应力拉索体系应根据所处环境与结构特性等条件采取相应的防腐措施和耐老化措施。其防腐措施包括索体防腐蚀、锚固自防腐蚀和传力点防腐蚀。

8.1.6 索的防腐宜采用镀锌、铝或环氧树脂喷浇,同时对钢丝绳包裹润滑材料和防护套。对特殊的腐蚀性环境,宜根据具体情况采取防腐措施。

8.1.7 对非腐蚀环境,宜根据防腐要求采取防腐措施。

8.1.8 非腐蚀环境封闭结构内的索可采用镀锌或铝做防腐处理。具体要求宜根据不同工程不同素材的具体情况在设计文件中注明。

8.1.9 建筑结构用索与其他构件的连接部位应采取可靠的密封防水处理。

8.1.10 钢结构防锈和防腐蚀采用的涂料、钢材表面的除锈等级以及防腐蚀构造要求等,应符合现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 和《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB/T 8923 的规定。在设计文件中应注明所要求的钢材除锈等级和所采用的涂料(或镀层)和涂(镀)层厚度。

除特殊需要外,设计中不宜考虑因锈蚀而加大钢材的截面厚度。

8.2 防 火

8.2.1 钢结构的防火应符合现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 和现行协会标准《建筑钢结构防火技术规范》CECS 200 等的规定。

8.2.2 受高温作用的结构,应根据不同情况采取下列防护措施:

1 当结构可能受到炽热熔化的金属的侵害时,应采用砖或耐热材料做成的隔热层加以保护;

2 当结构的表面长期受热辐射达 150°C 以上或在短时间内可能受到火焰作用时,应采取有效的防护措施(如加隔热层或水套等)。

8.2.3 室内或有特殊要求的节点的耐火极限不应低于结构本身的耐火极限。

8.2.4 索结构的防火应根据不同的建筑功能遵照有关建筑防火规范执行。当规范无明确规定时,应通过试验研究明确防火措施。

8.2.5 钢结构构件宜选用具有装饰效果的防火板材包覆保护,如耐火石膏板、硅酸钙板、加气混凝土板等,也可采用外包金属网水泥砂浆(混凝土)进行保护或喷涂防火涂料。防火涂料的性能、涂料厚度和质量要求应符合现行国家标准《钢结构防火涂料》GB 14907 和现行协会标准《钢结构防火涂料应用技术规范》CECS 24 的有关规定。

1 采用防火板材包覆时,防火板材应采取可靠方式与构件连

接。可采用轻钢龙骨、自攻钉固定于钢构件上,也可以防火板材自身作定位龙骨,用耐火胶辅以栓钉粘结固定于钢构件上。防火板材内侧面至构件外表面的距离不宜小于 20mm。

2 采用金属网抹 M5 水泥砂浆或 C20 细石混凝土包覆保护时,保护层厚度不宜小于 50mm,并应埋置金属网(钢筋网)。对于钢管混凝土柱,应按钢管混凝土结构技术规程经计算确定。

3 当采用喷涂防火涂料保护时,耐火极限不低于 1.50h 的钢构件以及高层住宅中考虑压型钢板参加工作的组合楼板宜采用厚涂型防火涂料。当钢管混凝土柱和钢梁采用有机薄涂型防火涂层时,涂层的耐火极限应按消防机构核准的数据设计。

4 其他耐火极限低于 1.50h 的钢构件可采用薄涂型防火涂料,其涂层厚度应根据构件的耐火极限要求和构件的检验测试结果确定。

8.2.6 建筑索结构的防火可优先采用钢管内布索、钢管外防火保护的方法。钢管外的防火保护可采用薄型或厚型防火涂料、防火板包裹等方法。

8.2.7 防火涂层或色覆层不得作为钢结构的防护保护层使用。

8.3 维护和保养

8.3.1 对索必须采取防护措施。索的防护可包括索的管道防护、镀锌防护、锚具防护。

8.3.2 索的管道防护是将索设置于钢或塑料管道中,防止侵蚀环境的影响。

8.3.3 镀锌防护主要是防腐蚀。钢丝的镀锌量宜采用 250~330g/m²,保护层厚度可采用 25~45μm。

8.3.4 锚具防护是对管道和锚具之间的连接部位防止水流入或汇集,尤其是暴露于室外的锚具必须进行全封闭防护,但不宜采用难以拆除的防护构造。

8.3.5 拉索的防腐蚀措施不应影响拉索的使用寿命。采用的防

护材料不得含有腐蚀钢材的成分,并应具有抗老化性能。

8.3.6 拉索及其连接部分在安装完毕后应清理干净。拉索护层不得接触任何有损护层的化学药剂,清理时应使用拉索供应商提供的专用清洁剂。

8.3.7 必须定期对索体进行清洗、去尘、脱脂和去除聚乙烯表面的静电等。

8.3.8 在使用期间需对预应力钢结构及其部件进行修补或更换时,应按照施工加载时的相反顺序,卸除荷载和预应力或卸除荷载并补加临时荷载,以考虑荷载内力与预应力的协调平衡。

8.3.9 重大工程项目的设计单位应向使用单位提供保养和维修说明书,以利在工程使用期内对重点部位进行检查和监测,并限制结构用途、使用环境的擅自变更或无序翻修。

8.4 监 测

8.4.1 应定期测量预应力钢结构中拉索的内力,并做记录。与初始值对比,如发现异常应及时报告。当量测内力与设计值相差大于 $\pm 10\%$ 时,应及时调整或补偿索力。

8.4.2 应定期检测钢丝绳索是否有断丝、磨损、腐蚀情况,及时更换缆索。

8.4.3 应定期检查索体是否有渗水等异常情况,防护涂层是否完好;对出现损伤的索和防护涂层应及时修复。

8.4.4 应定期对预应力施加装置、可调节头、螺栓螺母等进行检查,发现问题应及时处理。

8.4.5 应定期监测结构体系中的预应力状态,包括索的张紧度、膜面张紧度等。

8.4.6 在大风、暴雨、大雪等恶劣天气过程中及过程后,使用单位应及时检查预应力钢结构体系有无异常,并采取必要的措施。

附录 A 索材选用表

表 A 索材选用表

名称	类别	材料标准	说明
钢丝绳索	纤维芯	《钢丝绳》GB/T 8918	由绳芯、绳股等元件构成。金属芯又可分为钢丝绳芯和钢丝绳股芯 可采用圆形钢丝和异型钢丝。强度等级有 1570、1670、1770、1870、1960MPa
	有机芯		
	石棉芯		
	金属芯		
钢绞线索	镀锌钢绞线	《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》YB/T 152 《镀锌钢绞线》YB/T 5004 《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224	强度等级有 1270、1370、1470、1570、1670、1770、1870、1960MPa
	《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》		
	铝包钢绞线		
	涂塑钢绞线		
	无粘结钢绞线		
	PE 钢绞线		
钢丝束索	平行钢丝束	《桥梁缆索用热镀锌钢丝》GB/T 17101 《建筑缆索用高密度聚乙烯塑料》CJ/T 3078	可采用 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 7\text{mm}$ 的钢丝
	半平行钢丝束		
钢拉杆索		《船坞钢拉杆》CB/T 3957	

附录 B 锚具材料选用表

表 B 锚具材料选用表

锚具类别	组件名称	材料	材料标准
热铸锚	锚杯	锻件:优质碳素结构钢 或合金结构钢 铸件:碳钢	《优质碳素结构钢》GB/T 699 《合金结构钢》GB/T 3077 《一般工程用铸造碳钢件》GB/T 11352
	铸体	锌铜合金	《阴极铜》GB/T 467 《锌锭》GB/T 470
	销轴和螺杆的坯件	锻件:优质碳素结构钢 或合金结构钢	《优质碳素结构钢》GB/T 699 《合金结构钢》GB/T3077
冷铸锚	锚杯	锻件:优质碳素结构钢 或合金结构钢	《优质碳素结构钢》GB/T 699 《合金结构钢》GB/T 3077
	铸体	环氧树脂,钢丸	
压接锚和墩头锚	各种锚具组件	低合金结构钢 或合金结构钢	《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 《合金结构钢》GB/T 3077

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,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:

正面词采用“可”;

反面词采用“不可”。

2 本规程中指明应按其他有关标准执行时,写法为“应符合……要求(或规定)”或“应按……执行”。非必须按所指定标准执行时,写法为“可参照……执行”。

中国工程建设标准化协会标准

预应力钢结构技术规程

CECS 212 : 2006

条文说明

目 次

1	总 则	(79)
2	术语、符号	(80)
2.1	术语	(80)
2.2	符号	(80)
3	设计基本规定	(81)
3.1	设计原则	(81)
3.2	设计表达式	(81)
3.3	结构构件	(82)
3.4	预应力损失	(82)
4	材料和锚具	(84)
4.1	一般规定	(84)
4.2	索材	(84)
4.3	锚具	(90)
4.4	设计指标	(90)
4.5	拉索性能和试验要求	(91)
5	结构体系和分析	(92)
5.1	结构体系和计算规定	(92)
5.2	预应力拉杆	(92)
5.3	预应力压杆	(93)
5.4	预应力实腹梁	(93)
5.5	预应力桁架	(93)
5.6	预应力拱架	(94)
5.7	预应力框架	(95)
5.8	预应力吊挂结构	(95)

5.9	预应力立体桁架	(96)
5.10	预应力网架	(98)
5.11	预应力网壳	(99)
5.12	预应力玻璃幕墙结构	(100)
6	节点和连接构造	(102)
6.1	一般规定	(102)
6.2	张拉节点	(103)
6.3	锚固节点	(103)
6.4	转折节点	(103)
6.5	索杆连接节点	(103)
6.6	拉索交叉节点	(104)
7	施工及验收	(105)
7.1	一般规定	(105)
7.2	安装	(105)
7.3	张拉工艺	(106)
7.4	工程验收	(106)
8	防护和监测	(107)
8.1	防腐	(107)
8.3	维护和保养	(108)
8.4	监测	(108)

1 总 则

1.0.1 本条说明了制定本规程的目的。在承重钢结构中引入预应力,其目的不仅是为了改善结构的静、动力性能,降低钢耗,节约成本,而且可以改变构件的属性,提供结构刚度,创新结构体系,保证建筑造型。所以,本规程编制时兼顾了这门新兴学科的发展导向。

1.0.2 作为我国首部《预应力钢结构技术规程》,是把适用范围的重点放在已有较多工程设计与施工经验的工业与民用建筑领域上,同时遵守《钢结构设计规范》GB 50017 的规定。对于玻璃幕墙和索膜结构,以及一些特殊的预应力钢结构,如桥梁结构、塔桅结构、冷弯薄壁型钢结构等,在参照应用本规程的相关条文时,还必须遵循各自专业标准的规定。

1.0.3 可在单独杆件、部分杆件或整体结构中引入预应力。施加预应力可在工厂制造、工地安装、施加荷载甚至使用过程中进行。采用的预应力方案都应体现经济、高效、合理的原则。如果出现预应力导致的负面效应超过同等非预应力结构时,说明方案有误,应当变更设计。

1.0.4 本条提出了在设计文件(如图纸和材料订货单等)中应注明的事项。这些事项都与保证工程质量密切相关。本条还提出了施工制作单位应根据已批准的设计文件绘制施工详图,并取得原设计单位同意。把制作条件、安装技术与设计文件较好地结合起来,才能使预应力钢结构的整体和细部更加完善。

2 术语、符号

2.1 术 语

本节中列出的都是预应力钢结构常用的术语,有些在钢结构专业中还未出现过,例如,增载杆、卸载杆等。由于本学科发展时间不长,有些术语尚难以在标准中统一,但力求贴切易懂,如廓内布索、廓外布索等。属于预应力钢结构的范畴,但在本规程中未涉及或极少出现的术语未列入本节中,如悬索结构、索撑结构、空间块体结构等。

英文术语是参照已有专业名词提出的,不一定是国际上公认的标准术语,如先张肢、后张肢等。

2.2 符 号

本节给出了规程各条款中常用的符号及其含义,力求与《钢结构设计规范》GB 50017 相一致,尽量避免与已用的符号混淆,如拉索弹性模量采用 E_s 而不采用 E_c 。

3 设计基本规定

3.1 设计原则

3.1.3 预应力是人为的强迫性的外加荷载。它可以改善结构特性并与结构共生共存,属于永久荷载。但是,因其产生的方法不同,量测各异,所以其施加力度又与可变荷载相近。因此,在计算表达式中另项列出,以示区别。

3.1.5 膜结构中依赖钢骨架承受外荷载的结构形式有两种:一是骨架钢结构,以钢梁、钢桁架为承重体系,膜面紧绷于骨架上传递荷载;二是索撑钢结构,以立柱和钢索为承重体系,由预应力钢索承托膜面传递的荷载并传递到立柱和基础上。前者为非预应力钢结构体系,后者为预应力钢结构体系,本规程只包括以预应力索撑为承重体系的索膜结构。

3.2 设计表达式

3.2.1 承载能力设计表达式(3.2.1)中,左端括号内第二项是预应力产生的效应,其中 γ_{pi} 实质上是随预应力对构件的效应性质而定的杆件工作条件系数。当增载对结构不利时取 $\gamma_{pi} = 1.2$,有利时取 $\gamma_{pi} = 1.0$,区别对待。 γ_T 是体现预应力量测、手段精确度而给出的量测系数,对不同杆件亦有所不同。

3.2.2 本条文是参照前苏联《预应力钢结构设计规程》(Mockba—1963)制定的。本条设定预应力力度测量误差可能在 $\pm 10\%$ 左右,因此,对结构中增载杆件的预应力值提高 10% ,即取 $\gamma_T = 1.1$,对卸载杆预应力值减少 10% ,即取 $\gamma_T = 0.9$;而采用精度较高的仪表量测时,取 $\gamma_T = 1.0$ 。

3.3 结构构件

3.3.1 钢索强度设计值的确定,关系到结构的安全可靠,材料有效利用,成本经济合理。对各种不同的使用条件,取值不尽相同,而且各国规范、手册中的规定大相径庭。对重要的动力荷载作用下的钢索,其设计强度有的只取极限抗拉强度的20%或更少,有些工业发达国家取用33%,但国内外已建工程也有采用55%~60%的。考虑到国内工程经验不多,目前尚无大量统计数据的情况,本规程规定我国建筑工程暂时采用40%~55%的比值。结构中的重要索是指影响结构整体安危的索系,次要索是指只影响结构局部的索系。

3.3.2 预应力钢结构不仅存在荷载状态下的变形,同时存在预应力状态下的反变形,两者一般反向。反向变形的限值,采用《钢结构设计规范》GB 50017对同类非预应力钢结构的规定值。

3.3.6 玻璃幕墙和采光顶结构是指由索杆和索梁组成的预应力自平衡体系,其中不包括悬索和索网的预应力外平衡体系。

3.4 预应力损失

3.4.1 因锚具压实而产生的预应力损失将随索长度增加而影响减少,因此,只有当拉索长度较短时(如20~30m)在实际工程中考虑内力损失才有必要。当拉索较长时,1~2mm压缩量产生的内力损失只占内力损失总量的4%~5%,可以不计。

3.4.2 预应力钢结构采用高强度钢丝(束)、钢绞线作为预应力拉索,其应力松弛损失值与预应力拉索的初始应力值有关。根据应力松弛试验结果,当 $x/f_{ptk} \leq 0.5$ 时,实际的应力松弛损失很小,为简化计算可近似取 $x_s = 0$ 。所以,推荐采用低松弛的高强度预应力拉索。对于露天或长期暴露在高温环境下的预应力钢结构,应注意温度会使预应力拉索应力松弛值增加。本条主要参照《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002的相关规定,并比较了预应

力桥梁设计规范的有关规定,经过多个工程实践,证明是合理可靠的。当取超张拉的预应力松弛损失值时,张拉顺序应符合我国有关规范的要求。

4 材料和锚具

4.1 一般规定

4.1.1 预应力钢结构采用的材料主要是刚性构件的钢材、索材和锚具。钢材的选用与普通钢结构相同,按钢结构规范的规定执行。预应力钢结构中索体和锚具材料的选用,可参照本规程中的附录。

4.2 索 材

4.2.1 严格讲,钢绞线实际上是单股钢丝绳,但由于其结构组成不同于普通钢丝绳,因此,本规程把钢绞线作为一种单独的索体。

4.2.2、4.2.3 钢丝绳主要由绳芯、绳股和钢丝三个基本元件组成。

绳芯可采用纤维芯、金属芯、有机芯和石棉芯。

纤维芯可采用天然纤维(黄麻、剑麻等)和合成纤维(聚乙烯、聚丙烯等)的绳芯。带纤维芯的钢丝绳,绳体柔软、弯曲性能良好,在钢丝绳受到冲击时,纤维芯能起缓冲作用。天然纤维绳芯储油多,有利于钢丝绳保持足够的润滑,具有良好的防腐蚀性能。合成纤维绳芯除具有韧性好、不吸水、耐酸、耐碱、耐腐蚀,耐极压和耐磨损等优点外,还可使钢丝绳在动荷载下不易变形,保持绳径稳定。

金属芯分金属绳芯和金属股芯两种。金属芯钢丝绳的结构紧密稳定,具有抗挤压、抗高温、伸长少的性能,还具有整绳极限拉力大,耐疲劳性能好的特点,但是挠性较差。

有机芯钢丝绳具有较高的挠性和弹性,但不能承受横向压力,

不能承受高温辐射。

石棉芯钢丝绳具有较高的挠性和弹性,可在高温条件下工作,但不能承受横向压力。

钢丝绳的绳股由一根股芯和一层或多层钢丝组成,由钢丝围绕股芯呈螺旋状捻制而成。股芯可由钢丝构成,也可由天然纤维或合成纤维构成。绳股的形状可采用圆股和异型股。

钢丝绳有不同的分类方法:

1 按结构可分为单捻(股)钢丝绳、双捻(多股)钢丝绳、三捻钢丝绳三类。

2 按绕制方法可分为同向捻、交互捻(图 1)、混合捻三类。

3 按绳中丝与丝的接触状态可分为点接触、点线接触、线接触、面接触四类(图 2)。

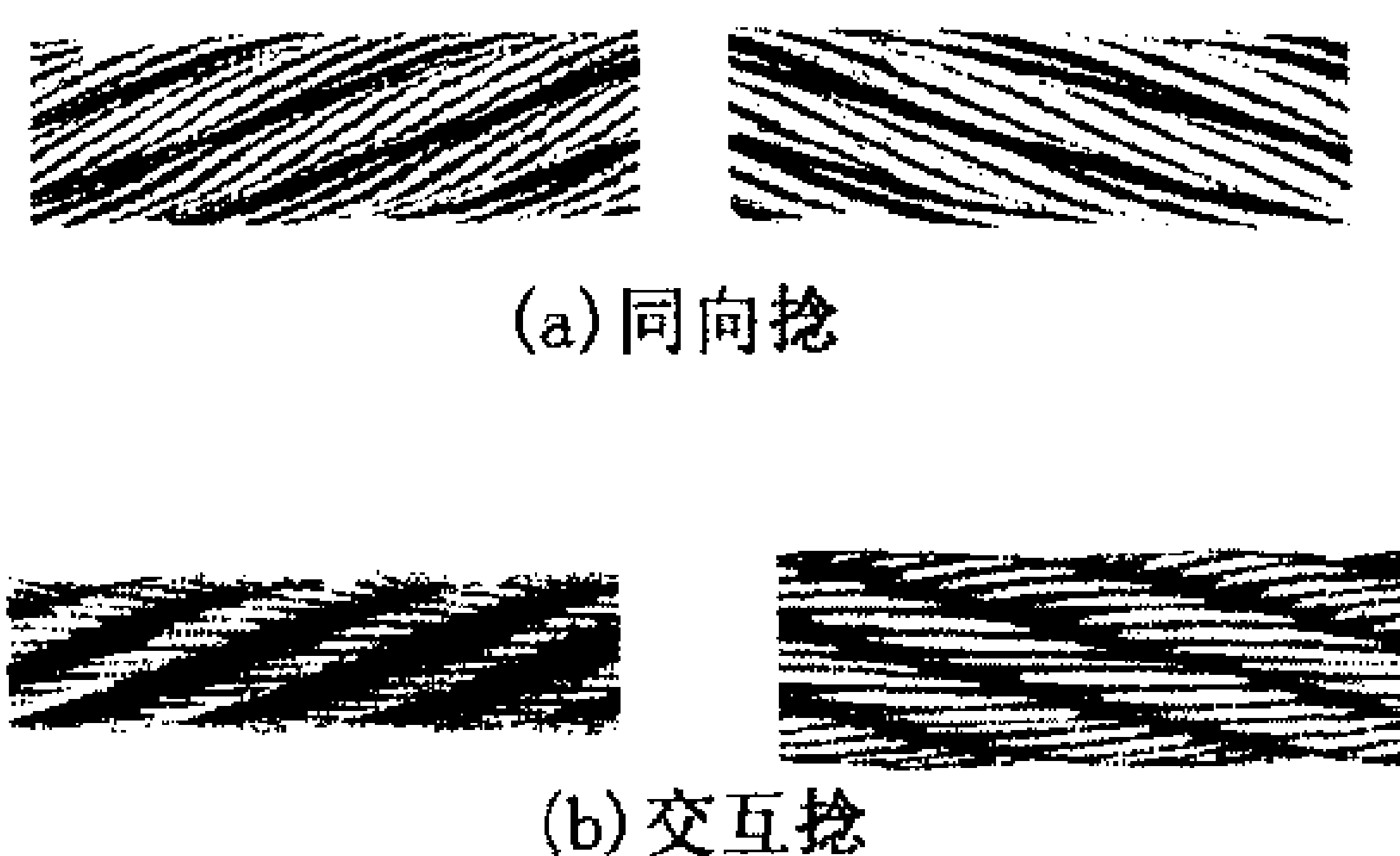


图 1 钢丝绳按绕制方法分类

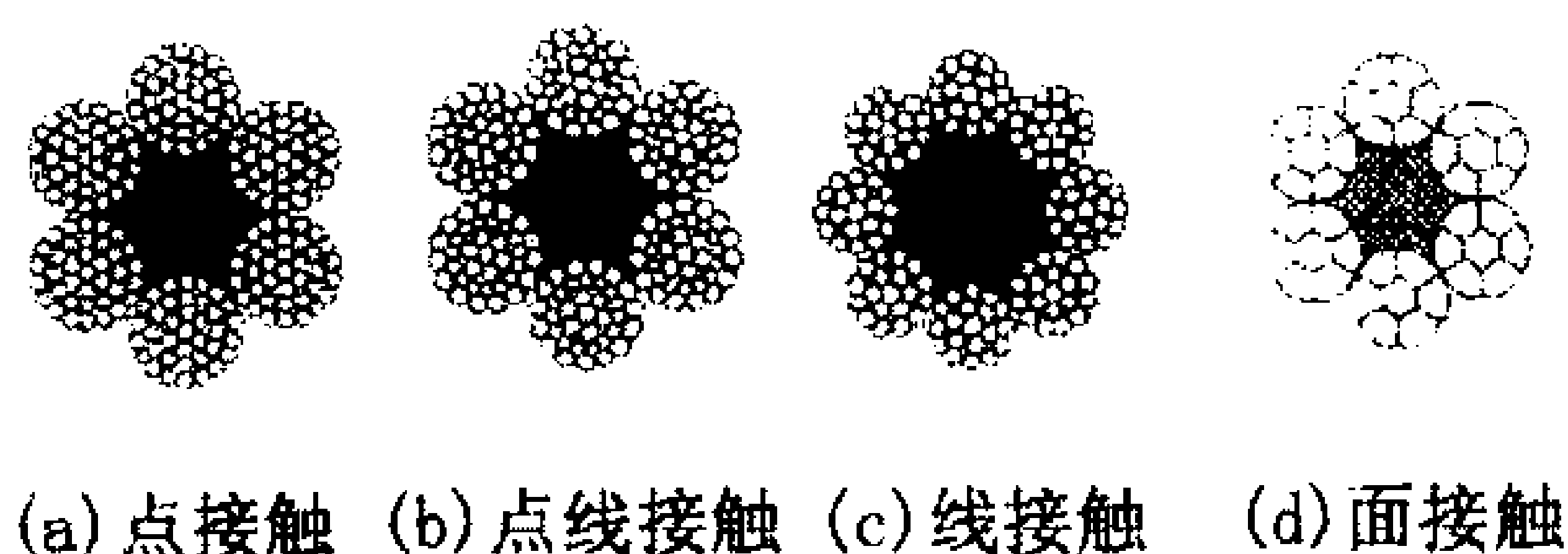


图 2 钢丝绳按接触状态分类

4 按股的断面形状可分为圆形股钢丝绳和异型股钢丝绳。异型股钢丝绳主要包括三角股钢丝绳、椭圆股钢丝绳和扇形股钢丝绳(图 3)。

5 按表面状态可分为光面钢丝绳、镀锌钢丝绳、涂塑钢丝绳。

6 不旋转钢丝绳以其捻法和结构特性而成为单独的品种(图 4)。

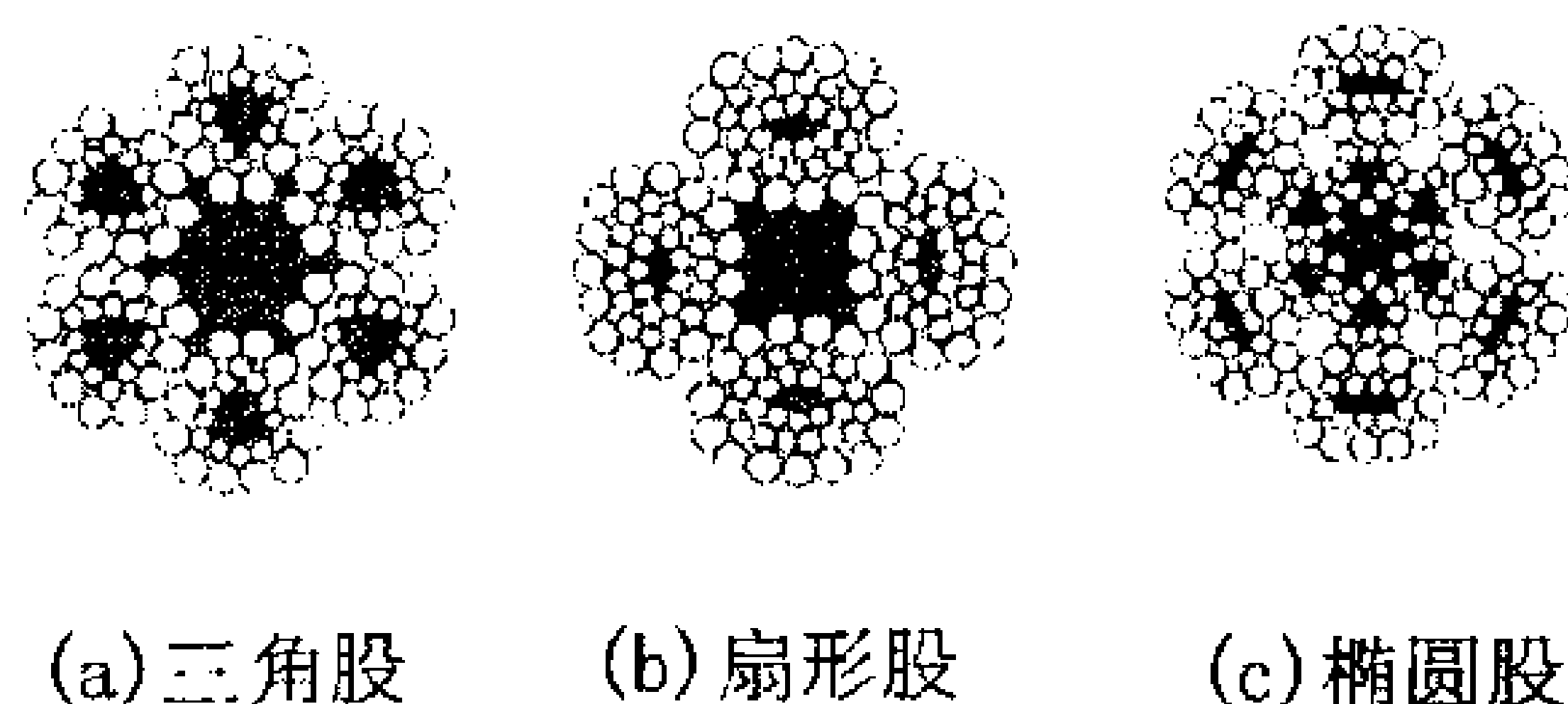


图 3 异型股钢丝绳

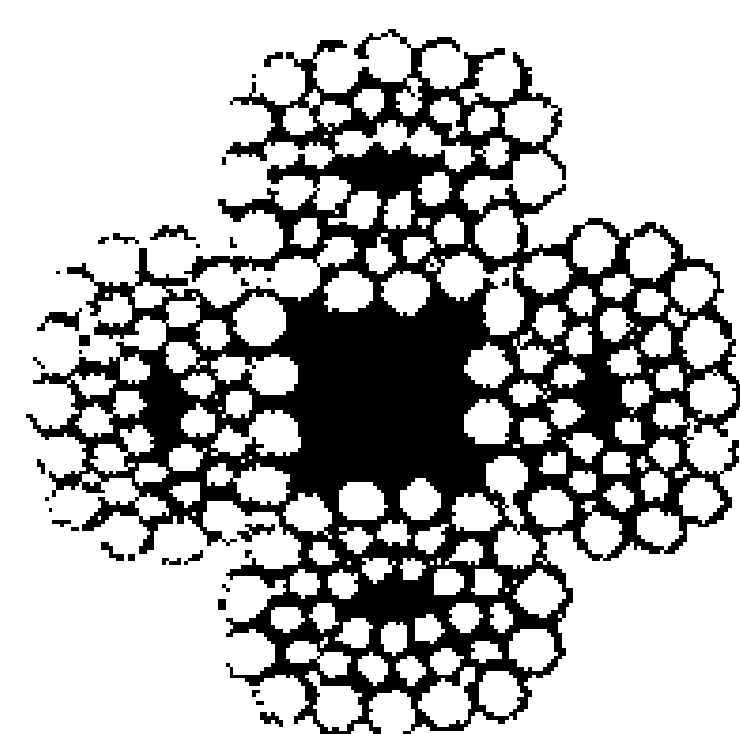


图 4 不旋转钢丝绳

密封钢丝绳是钢丝绳中比较特殊的一种,它以若干根平行钢丝束为缆心,外面逐层绞裹断面为“Z”形的钢丝,相邻两层的捻向相反,互相咬合形成保护层,包裹住内部的圆形钢丝束,最后得到粗大的钢丝绳。这种钢丝绳结构紧密,具有最大面积率,水分不易侵入,因此成为密封钢丝绳。

这种钢丝绳相对一般钢丝绳而言,强度高,弹性模量大(可达到 1.6×10^5 MPa),但是价格较贵。目前,密封钢丝绳国内只有宁夏恒力一家企业按国家标准《密封钢丝绳》GB/T 352—2000 生产,主要用于客运索道。按其组成结构又可分为半密封钢丝绳、有

1~5 层 Z 形钢丝的密封钢丝绳(图 5)。

在国外这种钢丝绳应用较多,如英国“伦敦眼”中采用的密封钢丝绳,其截面如图 6 所示。

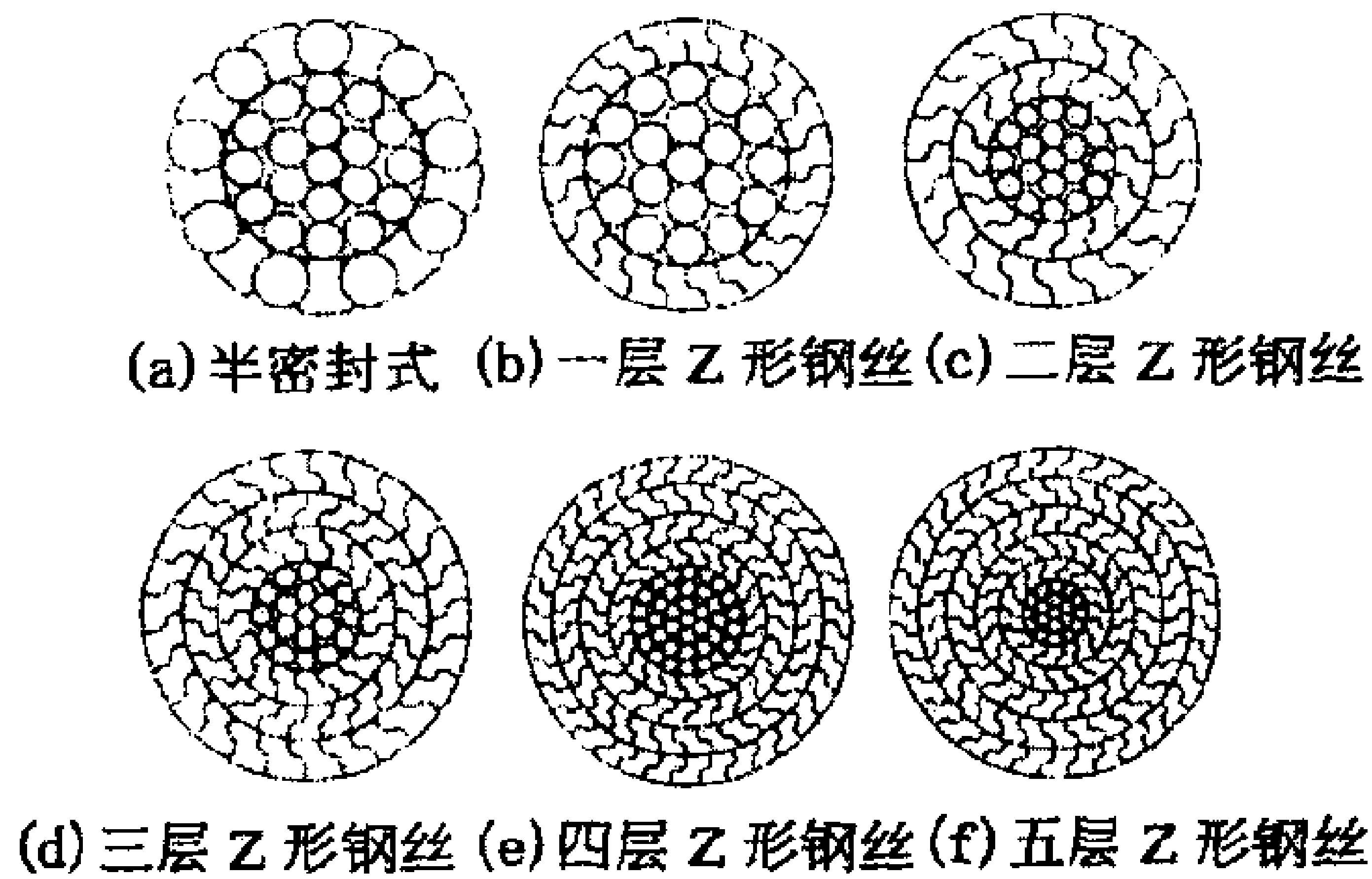


图 5 密封钢丝绳的结构种类

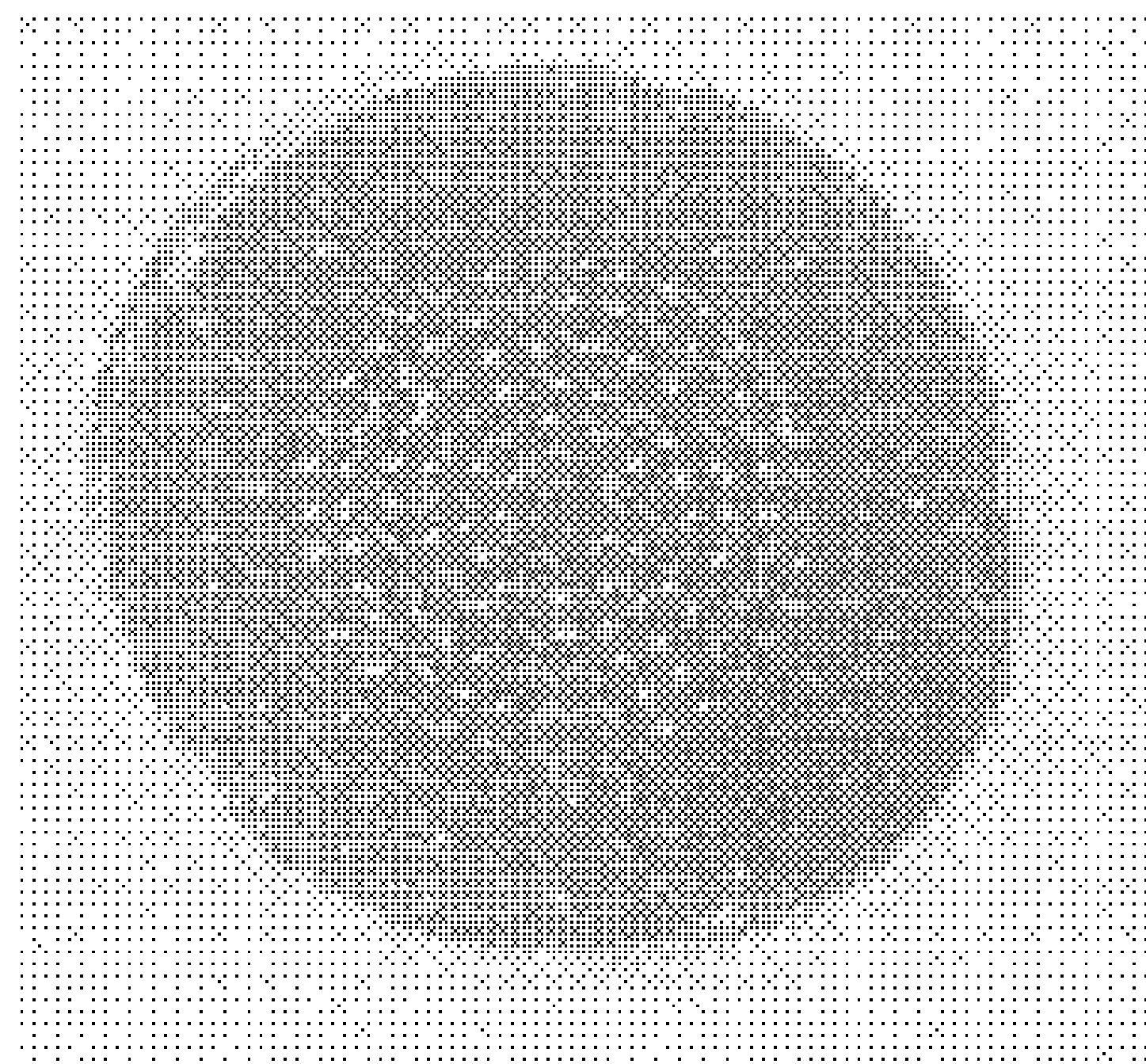


图 6 “伦敦眼”采用的密封钢丝绳

4.2.4 镀锌钢绞线适用于吊架、悬挂、通讯电缆、架空电力线以及固定物件、拴系等。钢绞线通条的直径和捻距应均匀,切断后不应松散;钢绞线内各钢丝应紧密绞合,不应有交错、断裂和折弯;钢绞线内钢丝接头用对头电焊,任意两接头间距不得小于 50m,接头处应充分镀锌。1×3 结构的钢绞线不允许有钢丝接头。

高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线适用于不与砂浆直接接触的桥梁斜拉索。

无粘结钢绞线应外包塑料,在塑料和钢绞线之间加润滑脂隔离。无粘结钢绞线主要用于后张拉法。

铝包钢绞线的金属保护层应采用 Zn-5% Al-Re 合金,具有良好的耐蚀性、明显的镀层粘附性、极佳的可塑性和可拉拔性。

涂塑钢绞线的钢基与塑料之间没有孔隙,必须用专用锚夹具与其匹配。

PE 钢绞线将塑料护套绕包在钢绞线外,护套不与钢绞线粘结,可采用双护套包塑钢绞线以增加其防腐隔离层。可在双护套中间填充润滑脂,作为无粘结钢绞线应用。

钢绞线的断面结构主要有 1×3 、 1×7 、 1×19 和 1×37 等规格。强度等级按极限抗拉强度分为 1270、1370、1470、1570、1670、1770、1870 和 1960MPa 等级别。

4.2.5 预应力钢丝束分为平行钢丝束和半平行钢丝束。一般工厂预制优先选用半平行钢丝索,现场制作可选用平行钢丝束。

半平行钢丝束应满足下列性能要求:抗拉强度大,断面密度大,弹性模量大,延伸特性明显,断面收缩率小,施工架设便利,工期短,防锈处理方便,易弯曲,价格低。扭绞束应同心左向绞合而成,钢丝排列成六角形或对称的切角六角形,捻距约 $40 \sim 60D$ 。扭出的钢丝束应排列整齐,扭绞紧密均匀,无交叉错位。

制作钢丝束应选用高强度、低松弛、耐腐蚀的钢丝。高强钢丝应采用优质碳钢盘条经索氏体化(派登脱)处理,应进行酸洗、镀铜或磷化和冷拔过程。钢丝的松弛等级应为 II 级,能承受 200 万次 $0.45R_m \sim (0.45R_m - 2\Delta F_a)$ 载荷后不断裂。钢丝可采用光面钢丝和镀锌钢丝。镀锌钢丝应采用热镀锌工艺在钢丝表面镀锌。钢丝应具有可镦性,即这种钢丝可采用冷镦工艺将端头加工成鼓槌状镦头,且镦头所能传递的荷载应能满足对钢丝的使用要求。

钢丝直径可采用 $\phi 5\text{mm}$ 和 $\phi 7\text{mm}$ 两种,采用光面钢丝或镀锌

钢丝。钢丝的力学性能应符合表 1 的规定。

表 1 钢丝的力学性能

公称直径 (mm)	抗拉强度 (MPa)	规定非比例伸长应力			伸长率 (%) $L_0 = 250\text{mm}$ 不小于	弯曲次数		松弛性能		
		无松 弛要求 (MPa)	I 级松 弛要求 (MPa)	II 级松 弛要求 (MPa)		次数 /180° 不小于	弯曲 半径 (mm)	初始应力 相当于极 限抗拉强 度的百分 数 (%)	1000h 应力 不大于(%)	
	不小于	不小于	不小于	不小于					I 级 松弛	II 级 松弛
5.00	1570	1180	1250	1330	4.0	4	15	70	8	2.5
	1670	1250	1330	1410						
	1770	1330	1410	1500						
7.00	1570	—	—	1330	4.0	5	20			
	1670	—	—	1410						

注：钢丝按公称面积确定其载荷值，公称面积应包括锌层厚度在内。

钢丝束应外加绕包带，单层重迭宽度不应小于带宽的 1/3。绕包层应齐整致密，无破损。绕包层数由生产方依具体产品确定，但重叠层数不应超过 4 层。

护层应采用黑色或彩色高密度聚乙烯塑料，其技术性能应满足现行行业标准《建筑缆索用高密度聚乙烯塑料》CJ/T 3078 的规定：

护层采用的原材料应为直径 3~4mm 的圆柱形颗粒，或单只长度为 2~4mm 或体积相当的方形颗粒。颗粒应均匀，表面光滑，无明显杂质，不允许有 3 颗及以上连粒。

经绕包的钢丝束应外挤包黑色 PE 单护层或黑色 PE+彩色 PE 双护层，彩色 PE 的颜色可按需要确定。

护层应紧密包覆，在正常生产、运输、吊装过程中不应松脱。护层外观应光滑平整，无破损。

4.2.6 高强度拉杆是由合金钢或不锈钢制成,材料屈服强度在460MPa以上,比一般的优质碳素钢高出约30%左右。具有强度高、重量轻、耐疲劳等特性,可广泛应用于空间结构、桥梁、船用吊机等。关于钢拉杆材料要求的有关标准——国家标准《钢拉杆》已编制完成,待批准发布后,可直接采用。

4.3 锚 具

4.3.1 冷铸锚具是将钢丝端部镦成球形,将铁屑与环氧树脂搅拌后浇铸入锚杯,与钢丝凝固后形成锚塞。

冷铸锚具可分为冷铸镦头锚具、镦头锚具和冷铸挤压锚具。

冷铸锚的抗疲劳性能好,但有老化问题。

热铸锚具是采用低熔点合金浇铸的锚具。其主要原料是铜铝合金,将低熔点的合金加热后充填入锚杯,达到锚固缆索的目的。

4.3.2 锚具起锚固钢索的作用,是一个重要的结构部件。钢索的张力通过锚具传到其他构件上。锚具应采用高强度合金结构钢,并经热处理以提高综合机械性能。小锚具采用锻造,大锚具采用铸造。锚具的强度应符合钢索断裂后锚具和连接件均不断裂的准则。

锚具的锚固方式有:热铸(RM)或冷铸锚固、压制锚固(YM)、夹片锚固。冷铸锚采用环氧树脂冷浇铸或 WIRELOCK 冷浇铸树脂浇铸;热浇铸采用巴氏合金热浇铸。

4.4 设计指标

4.4.1 目前设计中,钢索的抗拉能力是以容许承载力来表达的,采用单一安全系数 K 。本规程按现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 的规定采用的以概率理论为基础的极限状态设计方法,以多项系数代替了单一的安全系数。表 4.4.1 中的抗拉强度设计值系由 $f_{ptk}/1.8$ 计算并取整而得出。由于钢索是预应力结构中的重要承重构件,因此采用了比较大的安全系数。

4.4.2 本条中各种索材的弹性模量是参照《日本索结构设计指针

及说明》和现行协会标准《建筑工程预应力施工规程》CECS 180 等确定的。

4.4.3 受规程编制组委托,天津大学进行了索体材料线膨胀系数的专题研究,在理论分析的基础上进行了试验研究。试件采用直径为 3、4.2、5、5.1、6.2、7.7、9.3mm 的钢丝绳和工程中常用的 7×37 钢丝绳,以及钢绞线、钢棒和半平行钢丝束等。每种规格取 6 个试件,分别采用空气加热和水浴加热方式进行测试。根据试验结果进行统计分析后,得出了本条中规定的各种索材的线膨胀系数。

4.5 拉索性能和试验要求

4.5.1 钢丝绳拉索在工厂加工前,要用 0.40~0.55 倍拉断力进行初张拉,一是为检测质量,二是为消除变形,提高弹性模量。超张拉是为了解决非线性问题,张拉时控制变形,力作为参考。

4.5.2 根据国外的实测资料,在索结构中由于蠕变所导致的预应力损失可达到 10%~25% 左右。为消除蠕变带来的预应力损失,可在索结构施工中,根据这些数据对索实施适当的超张拉;或者在结构施工一段时间后(通常一年左右),对索(或膜)实施二次张拉。因此,在成品拉索制作完毕后进行超张拉试验。超张拉试验力一般取设计载荷的 1.2~1.4 倍,其值可调整到最接近 50kN 的整数倍上,并分为 5 级加载。成品拉索在卧式拉力试验机上超张拉以后,锚具回缩量不应大于 6mm。

5 结构体系和分析

5.1 结构体系和计算规定

5.1.1 在我国工程中已采用的预应力钢结构承重体系均已包含在本章之内。比较成熟的悬索结构在桥梁和建筑工程中应用已久并有专门的技术规程,本章内容未涉及。张弦体系分别列入各类结构中,未单独列条文。索网、索撑(索穹顶)结构,因我国工程经验很少,暂未列入本规程。

5.1.2 本条提出了预应力钢结构中预应力拉杆(拉索)在平面结构和空间结构中的布置原则和应达到的目的。

5.1.3 廓内布索是指在结构体形的外轮廓内设置拉索,廓外布索是指在结构体形的外轮廓以外设置拉索,前者布置紧凑,节省空间,后者预应力效果较好。

5.1.6 本条提出的索的应力松弛和内力损失,主要指索张拉后变形增大造成的预应力损失、锚具变形引起的预应力损失、张拉时的摩擦损失、索的松弛和徐变损失以及索温度变化引起的损失等。

5.2 预应力拉杆

5.2.1 设计预应力拉杆的目标是减小截面面积和杆件自重。为提高预应力拉杆的承载力,必须施加预压力以改变承载前的应力场。预压力越大,则抗拉承载力越高。

5.2.2 获得最大预压力的办法是提高杆件的承压稳定性。理论分析与试验研究证实,增设张拉杆与刚性杆间的隔板,可增加刚性杆间的约束从而明显增大稳定性。预应力拉杆多用于大跨度重载桥梁结构的大拉力杆或拱结构的单独拉杆。

5.2.3 选择预应力拉杆的张拉力度,除考虑刚性杆和张拉杆的强

度外,还应保证刚性杆的稳定性。

5.3 预应力压杆

5.3.1 设计预应力压杆是对压杆本身设置约束条件,以提高其抗压稳定性。一般采用设置外部中间撑杆或内部中间隔板的办法来增大中心压杆的抗压承载力。较常采用的方案如图 5.3.1 所示。

5.3.2 压杆的预应力拉索体系是为了提高杆件的整体稳定性而设置。拉索体系为中心杆件提供了弹性支承,以改善边界条件。

5.3.4 成功的设计可使压杆的稳定承载力接近或达到强度承载力。增加节间数可以明显提高稳定承载力,一般情况下节间数为 2~4 时即可满足强度要求。

5.3.5 设计压杆时预应力力度并不是越大越好,而是以保证压杆在达到强度承载力前拉索体系中不出现退零杆件为原则。过大的预应力力度是对承载力的消耗。

5.4 预应力实腹梁

5.4.1 目前三类预应力实腹梁中拉索法应用最广泛,工程实例较多,大多数采用张拉设备或器具进行张拉。电热张拉只适用于高空安装和施工作业,电热法实质上是弹性变形法的另类。位移法只适用于超静定连续梁体系。弹性变形法宜用于工厂生产条件下,工程中应用较少。

5.4.2 拉索预应力梁的方案多样,拉索张拉产生预应力是其共性。将拉索布置在受拉翼缘一侧是布索的原则,以力求有较好的卸载效应。廓外布索效应优于廓内布索,所以前者结构形式发展较多,从初期的撑杆梁到目前的张弦体系,应用普遍。廓内布索节省空间,但效益较低。

5.5 预应力桁架

5.5.1 预应力桁架是研究最早、实践最多的结构形式。1953 年

建成的布鲁塞尔飞机库大门,其主桁架采用了拉索预应力技术,至今已有 50 多年。图 5.5.1 所示桁架形式,大多数为已有工程实践者。预应力桁架型式的发展趋势已从平面桁架转向立体桁架,如上下弦杆中增添曲线杆件型,且在大跨结构中较常采用廓外布索。最近落成的深圳会展中心[图 5.5.1(n)]和成都会展中心[图 5.5.1(p)]即属新型体系。局部布索只沿单独杆件张拉,局部卸载,其效益低,附加材耗高,只宜用于大跨重载结构(如铁路桥梁)的拉杆处。整体布索可使多数杆件受益,在中、小跨桁架中皆可采用。

5.5.2 局部布索时,索的放置位置如图 5.5.2-1 所示;整体布索时部分索仍沿杆身放置,此时索和杆截面的位置仍如图 5.5.2-1 所示。整体布索时,索与桁架截面位置的关系则如图 5.5.2-2 所示。

5.5.8 本节中计算公式系按结构力学中力法经典公式 $\delta_{11}x_1 + \Delta_{1p} = 0$ 导出。 x_1 是预应力拉索的张力, δ_{11} 是 $x_1 = 1$ 时在 x_1 方向所产生的位移, Δ_{1p} 是结构由于荷载作用在 x_1 方向所产生的位移。公式(5.5.8-1)分母中第二项是拉索变形量,公式(5.5.8-2)分母中 E_iA_i 实为布索下弦杆的 EA 。两式中的 N_i 和 N_{0i} 均为单位力作用下的无量纲内力系数。

5.5.9 对预应力桁架杆件截面的强度和稳定性验算,应根据杆件受力性质和预应力效应分别采用不同的张拉系数 γ_T ($\gamma_1 = 1.1, \gamma_2 = 0.9, \gamma_3 = 1.0$)。实质上,预应力起卸载效应时,还应考虑其他因素导致的卸载不到位,即 $\gamma_T = 0.9$;预应力起增载作用时应考虑可能增载过头,即 $\gamma_T = 1.1$ 。这两种考虑对不同性质的杆件都是最不利情况。采用仪表测力法时,可不考虑计量可能的偏差,设计时可采用 $\gamma_T = 1.0$ 。所有公式中 N_i 均为无量纲值。

5.6 预应力拱架

5.6.1、5.6.2 两类拱架中,拉索式应用广泛,位移式构造简单。

当拱体采用合理轴线时,拱截面基本受压,弯矩很小,截面材料强度潜力基本用尽。因此,在拱结构中预应力的作用主要不是挖材料潜力,而是分担拱的侧推力,使支座和基础的推力卸载。对某些跨中锚有拉索的预应力拱架,则可通过变化拉索力度调整拱截面上的弯矩峰值,以减小截面高度和用钢量。

5.7 预应力框架

5.7.1 刚性框架结构的杆件基本上承受弯矩,且沿杆长弯矩变化显著,在某些杆段或截面上会出现弯矩峰值,因此采用预应力技术的主要目的是对峰值卸载。设计布索时,应将拉索布置在荷载弯矩峰值截面的拉应力一侧,或在廓外布索以使框架内产生与荷载峰值内力符号相反的预应力。为了达到施工便利和构造简单的要求,通常采用连续布索的方案,所以张拉索除对峰值弯矩卸载外,还会对某些杆件增载,加大截面。因此,拉索预应力框架布索的合理性取决于卸载杆件的预应力效益是否明显大于增载杆件的附加支出。

5.7.2 采用支座位移法时,对基础的地质条件要求较高,因为位移的大小和方向都对预应力力度产生影响。因此,必须保证支座的设计标高和位置。

5.8 预应力吊挂结构

5.8.1 吊挂结构的特点是主承重结构裸露于大气之中,突出于屋面之上,所以又称暴露结构。因其建筑造型刚劲有力,图案性好,现代感强,所以国内外工程广为采用。其结构体系的划分是以屋盖结构的类型为准,例如,立柱吊挂平面桁架屋盖就属于平面吊挂结构,立柱吊挂平板网架就划归空间吊挂结构。

5.8.2 吊挂结构的选型关系到工程的科学性及经济性。要求布索方案对称均衡,其目的是避免主承重结构承受大的偏心荷载。例如,在塔柱顶部双向对称布置吊索,柱体基本受压,而单向一侧布索就导致塔柱承受较大弯矩,将立柱转变成为悬臂梁,受力十分不利。

5.8.5 吊挂结构纵向刚度主要是指主承重结构的纵向刚度而言。在一般情况下,结构的横向刚度都是予以保证的,如图 5.8.1,(a)所示,两立柱间均以支撑相连;但纵向刚度容易忽视。尤其在平面吊挂结构中纵向刚度更显重要,除传统的排架间设置纵向支撑外,利用交叉吊索方式同样可以提供良好的刚度,形成整体。

5.9 预应力立体桁架

5.9.1 预应力立体桁架一般指拉索布置在立体桁架体外的廓外布索结构体系,其卸载效应优于廓内布索及杆内布索者。本条给出了预应力立体桁架常采用的几种截面形式。

5.9.2 三种整体张拉预应力的方法中,先张法比较简捷,多张法比较经济,中张法兼有两者的优点,所以在单次预应力钢结构设计中建议采用中张法。

5.9.3 预应力立体桁架按拟梁法计算时:

1 当撑杆较长,中性轴位于立体桁架之外时(如图 7)。

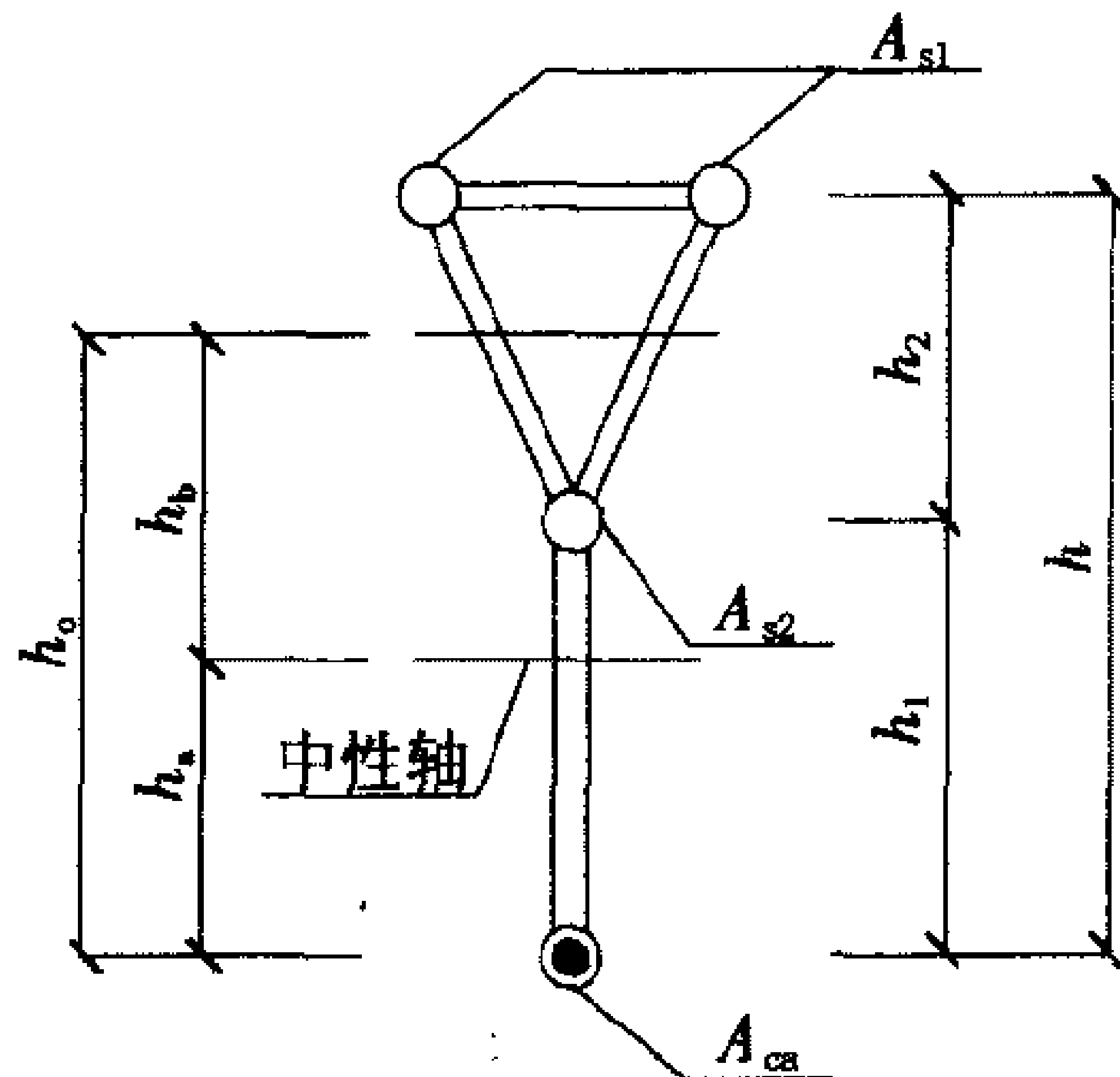


图 7 中性轴位于立体桁架之外示意

图中, A_{s1} 为桁架上弦钢管截面面积, A_{s2} 为桁架下弦钢管截面面积, A_{ca} 为拉索面积, A_s 为桁架钢管截面总面积 $A_s = A_{s1} + A_{s2}$, h_0 为某截面的有效高度。

计算抗弯刚度折算惯性矩 I_{eq} 的推导过程为:

设缆索折算换成钢材的面积为 A_{eq} , 则 $E_s A_{eq} = E_{ca} A_{ca}$

由于 $E_{ca} = 0.928E_s$

所以 $A_{eq} = 0.928A_{ca}$

对中性轴取面积矩, 有 $A_s h_a = A_{eq} h_b$

而 $h_a + h_b = h_0$

整个截面抗弯刚度的折算惯性矩为:

$$I_{eq} = A_s h_a^2 + A_{eq} h_b^2$$

联立求解上列各式, 可得:

$$I_{eq} = \frac{A_s \times 0.928A_{ca}}{A_s + 0.928A_{ca}} h_0^2$$

2 当撑杆较短, 中性轴位于立体桁架之内时(如图 8)

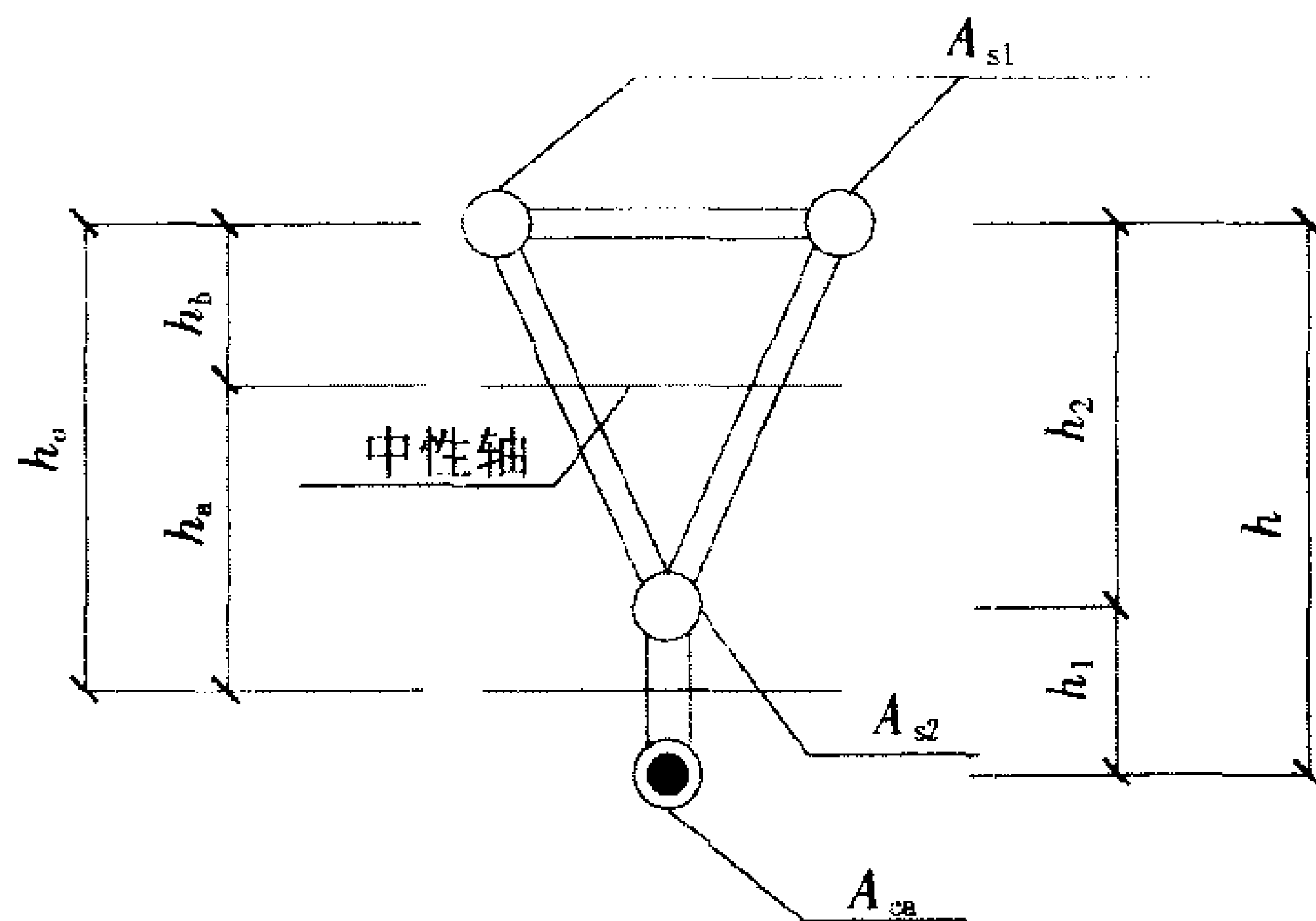


图 8 中性轴位于立体桁架之内示意

对整个截面的中性轴取面积矩, 有

$$A_{s1} h_a = (A_{s2} + A_{ca}) h_b$$

而 $h_a + h_b = h_0$

整个截面抗弯刚度的折算惯性矩为

$$I_{eq} = A_{s1} h_a^2 + (A_{s2} + A_{ca}) h_b^2$$

联立求解上列各式, 可得

$$I_{eq} = \frac{A_{s1} \times (A_{s2} + 0.928A_{ca})}{A_{s1} + A_{s2} + 0.928A_{ca}} h_0^2$$

5.9.4 预应力立体桁架结构是在国家标准《钢结构设计规范》GB 50017—2003 第 10 章钢管结构的基础上, 通过在廓外设置张拉索

而形成“预应力立体桁架结构”新体系,故“立体管桁架”的计算除应遵循本规程的规定外,尚应遵循《钢结构设计规范》GB 50017—2003 中其他有关的规定。

5.10 预应力网架

5.10.1、5.10.2 预应力网架是在平板网架的基础上,在下弦平面下方或者下弦管内或廓内布置预应力索而形成的预应力空间结构的基本形式,其整体结构特性仍属三维铰接杆系结构。

5.10.3 支座位移法是通过在支座处垫入不同厚度的金属垫块施加压力使网架产生预应力,并使挠度曲率保持定值以获得荷载下不同节间弦杆具有相同的内力值,从而杆件截面尺寸规格大为减少。这种方法施加预应力的工序只需增设钢垫块就能完成,是一种有效、简捷的卸载方法。

拉索预应力是通过对优化布置在网架结构上的高强钢索的张拉,使网架获得一组平衡力系,并在网架体系中建立一种与荷载效应符号相反的预应力,以使一部分或大部分抵消外荷载引起的杆件内力和结构变形,从而可改善内力分布,提高结构刚度,减小网架高度,提高抗震性能,节省钢材用量,降低工程造价。其特点是,在一定程度上使结构的内力和变形可调可控;施加预应力的方法简单、可靠、有效;比支座位移法节省钢材的幅度大,经济效益高;特别适合于重载、大跨的屋盖结构采用。

5.10.4 为避免一次性施加预应力时杆件内力变化幅度过大,可以采取多次施加预应力的技术。多次预应力网架多次地利用了构件的承载力和材料的强度幅值,其力学效应和经济效益必然优于单次预应力网架。

5.10.6 对角线布索是周边支承网架常用的布索形式。这种布索在靠近跨中部位多设廓外支撑柱。有资料表明,当支撑柱的总预应力达到全部静载内力的 35%~50%时,卸载效果较好。已建成的工程多采用此类布索方式。

对于矩形平面,索常平行于短边,已有方案分析表明,这种布索适用于周边支撑屋盖。井字式布索少,施工简单,可用于周边支撑的中小跨度屋盖。四角放射布索有较好的卸载效应,可用于大跨度屋盖。自由式布索可用于异形平面的周边支撑屋盖工程。

5.10.7、5.10.8 施加预应力的工程,其结构受力特性与杆件的内力密切相关,因此,支座的固定时间和杆件的内力验算是设计的重要环节。

5.11 预应力网壳

5.11.1 在本条中,根据我国的工程经验只介绍了支座拉索预应力网壳、交叉梁系预应力网壳和弦支穹顶三种预应力网壳结构形式。

5.11.2 各类预应力网壳的布索方案,可遵循布索原则综合考虑。最合理的布索位置是在各类网壳的边缘构件(结构)中主要承受拉力的系杆处,布置拉索以取代系杆。

5.11.4 交叉梁系预应力网壳是由多榀预应力张弦梁组合而成的预应力结构体系。

交叉梁系预应力网壳是用撑杆、连接杆连接压弯构件和受拉构件,通过在受拉构件上施加预应力,减轻压弯构件负担的自平衡体系。主要由下弦索、上弦杆件和竖腹杆组成,索受拉、杆为受压的二力杆,上弦杆为压弯杆件。

1 花篮螺丝调节法是通过调节两个固定点间的长度来施加预拉力,一般用于施加较小预拉力的张弦梁结构。

2 张拉钢索法是通过锚具和千斤顶直接张拉钢索以施加预拉力,一般有两端张拉和一端张拉两种方法。两端张拉可以使预应力沿索长的分布相对均匀,适用于跨度较大的结构。浦东国际机场候机楼和广州国际会展中心的张弦梁屋盖都是采用两端张拉来施加预应力。

3 支承卸除法是利用结构自重或附加在结构上的配重来施

加预拉力。在结构安装后卸除支承,由于刚性结构的变形,将部分结构自重和配重传递给撑杆,通过撑杆对索施加拉力。单独采用支承卸除法来施加预拉力时必须预先对刚性构件起拱。

5.11.5 弦支穹顶(Suspendome)是由国际薄壳及空间结构学会主席川口卫教授提出的复合结构体系,可以认为是张拉整体和单层网壳的复合,也可认为是把索穹顶的上弦索构件改换为刚性杆件后形成的结构体系。

拉索预应力的两种施加方法中,压杆的伸长是通过调整撑杆的长度使环向索和径向索中产生预应力。优点是可以使环向索的各段得到均匀的预应力,缺点是下层节点比较复杂,施工难度增加。在弦支穹顶中拉索缩短可采取缩短径向索,也可选择缩短环向索的方法。由于径向索段太多,故通常都采取缩短环向索的方法施加预应力。该方法的优点是每环只需张拉一个索段即可在整个环拉索中施加预加预应力,简便易行;缺点是由于节点摩擦的影响,使得预应力传递过程中存在很大的预应力损失,导致一环中各索段的预应力分布不均匀,所以施工时要采取措施保证拉索预应力在索段间的有效传递。

5.12 预应力玻璃幕墙结构

5.12.2 风荷载是预应力玻璃幕墙的主要荷载,且风荷载总是以正负两个方向作用到幕墙上,因此均应采用对称布索的预应力索桁架。索杆体系也称为非自平衡体系,而索梁体系称为自平衡体系。从杆件受力特点来看,都属节点铰接的桁架体系,杆件都是轴向受力,不承受弯矩和剪力。

5.12.3 预应力玻璃幕墙所受的荷载传递给主体结构,索杆体系中索的预应力也由主体结构承受。要处理好预应力在结构内部和外部的平衡问题,尽量减少对主体结构的附加荷载。

5.12.4、5.12.5 预应力索桁架的刚度小,变形大,结构内力和变形应采用考虑几何非线性的有限元软件进行分析。结构计算分析

的内容包括：(1)零荷载状态下的结构找形分析，用以确定施工张拉阶段索中预应力的分布，并检查结构的几何形状、位置等是否符合设计要求。(2)承载索的承载力分析，确保结构在各种不利荷载作用下增载索内力不超过材料的极限强度。(3)卸载索的松弛状态分析，确保结构在各种不利荷载作用下，卸载索不松弛，并保持一个合理的较小索拉力。这个较小拉力值宜控制在预拉力的1%~5%。(4)结构变形分析，确保结构在恒载、风载、预拉力标准值作用下的变形满足要求。

6 节点和连接构造

6.1 一般规定

6.1.1 预应力钢结构中拉索节点的种类较多,不同工程中具体做法也不尽相同。本条主要根据节点的连接功能进行分类。

6.1.2 拉索节点不可避免地需要开孔,外形复杂且尺寸紧凑,设计时应尽量使节点相交杆件(拉索)汇交于一点,以减小应力集中和次应力。通过板件焊接形成的节点,由于焊缝密集,在保证连接强度的前提下,宜控制焊缝尺寸,采用合理的焊接工艺,减小焊接残余应力。对于采用铸钢件的节点,其材质应满足标准要求和设计要求,避免材料因三向受拉而出现脆性破坏。节点设计时应考虑制作加工和施工安装的便利。

6.1.3 采用《钢结构设计规范》GB 50017 中未列出的高强度钢材销栓,应精加工制造,其连接强度应根据材料的强度指标,参照普通螺栓的计算公式进行计算。当销栓直径较大时,应注意材质的均匀性和延时断裂等问题。

6.1.5 当结构不同部位(如梁、柱和楼板等)的耐火极限要求不同时,节点的耐火极限应取与之相连接构件的最高耐火要求。

6.1.8 对重要、复杂节点或新型节点的试验,主要是考察节点的受力性能和结构分析方法。参照欧洲规范 Eurocode 3 和美国冷弯型钢构件设计规范(AISI)的规定及国内大量节点试验的成功经验,同类型节点的试验一组不应少于3个试件。如果任何一个试件的试验值与平均值相差都不超过 $\pm 10\%$,则取平均值;如果有一个试件的试验值偏离平均值10%以上,至少要求再做三个同类型试验,并取全部试验值中最低三个值的平均值作为试验结果。试验模型设计时,应减小尺寸效应的影响,并尽量采用符合节点实

际受力状态的平衡力系加载。

6.2 张拉节点

6.2.1 对于张拉节点,设计时应根据计算的预应力损失,确定预应力超张拉值。在张拉、锚固完毕后,应有可靠的防松措施。

6.2.3 对于分批张拉的预应力索,重点部位的预应力张拉值应考虑到后批次张拉索对先批次张拉索的影响,进行全过程监控。

6.3 锚固节点

6.3.1 对加劲肋、加强环或加劲构件,应根据其实际受力状况和支承条件,参照现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 的相应规定进行设计,重点保证其局部承压强度、刚度和局部稳定的要求。当加劲肋、加强环或加劲构件因受力或支承条件复杂而难以用简单公式进行计算时,可采用有限元方法分析,以全面了解锚固节点的实际受力状态。

6.4 转折节点

6.4.1 转折节点是使拉索改变角度并顺滑传力的一种节点,根据需要,转折节点可设计成拉索在节点处可滑动和不可滑动两种,或者拉索在预应力张拉阶段可滑动而正常使用阶段不可滑动,这将导致对节点的滑槽或孔道的构造要求不同,在预应力张拉阶段和正常使用阶段拉索的计算也有所不同,应特别注意。对于拉索可滑动的转折节点,应采取可靠措施(如润滑、增加薄铅板或聚四氟乙烯垫层等),减小拉索槽道的摩阻力。必要时,应考虑摩擦阻力的影响,根据实测或厂家提供的拉索与其槽道接触面的摩擦系数,考虑到拉索转折对节点在拉索夹角平分线方向的压力进行计算。

6.5 索杆连接节点

6.5.1 索杆连接节点是将刚性杆件与拉索串连的一种节点,其传

力沿拉索轴线方向。在索杆连接节点上,由于拉索的拉力往往较大,其连接板件的设计应特别注意平面外的稳定性,应通过计算和构造措施予以加强。

6.6 拉索交叉节点

6.6.1 拉索交叉节点是将多根平面或空间相交的拉索集中连接的一种节点,多个方向的拉力在交叉节点汇交、平衡。应尽可能将拉索设置在同一平面内相交,以减小节点区的偏心;通过紧固夹件固定拉索的交叉节点时,应防止拉索间相互滑动,以保持与计算简图的要求一致。

7 施工及验收

7.1 一般规定

本节是关于施工及验收的一般规定。主要强调两点：第一，安装及验收应符合有关标准和设计要求，并按编制的施工文件实施。第二，不合格的构件、材料和有关产品不得安装使用；不符合计量标定和误差要求的设备、仪器，不得用于施工监控作业。

7.2 安 装

本节着重阐述拉索的安装。其安装方法应根据拉索的构造特点、空间受力状态和施工技术条件，在满足工程质量要求的前提下综合确定。常用的安装(包括冲拉)方法和特点有三种：

1 整体张拉法。

整体张拉法是我国目前采用的最有效的拉索张拉方式。张拉器具可采用计算机控制的液压千斤顶群，几个、几十个千斤顶同时张拉，同步控制拉伸长度可达3mm，可最大限度地接近设计力学模型。

2 分部张拉法。

采用分部张拉法时应先对空间结构进行整体受力分析，建立模型并建立合理的计算方法，充分考虑多根索张拉的相互影响。根据分析结果，可采用分级张拉、桁架位移监控与千斤顶拉力双控的张拉工艺。施工过程的应力应变控制值可由计算机模拟有限元计算得到。

3 分散张拉法。

分散张拉即各根索单独张拉。此种张拉方法适用于一般连接用或装饰性索，无预应力要求，一般以目测绷直为准。

7.3 张拉工艺

拉索正式张拉前应进行预张拉。在确保质量和安全并符合设计要求的前提下,方可进行正式施工。索张拉一般不能一次到位,应按相关技术文件进行分级张拉,并做好分级张拉记录,同时要做好索系和基础位移的监控工作。

7.4 工程验收

预应力钢结构工程的验收应依据《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 和《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 等国家规定的规定执行。工程验收应由建设单位组织,相关单位参加,在结构施工安装完成后统一进行。

8 防护和监测

8.1 防 腐

钢结构的防腐包括表面处理、确定涂料品种和涂层厚度,以及施工与管理等四个部分。其中表面处理的质量是防腐的关键,其效果占整个涂装质量的50%~60%。目前,我国钢结构企业大多数已配备了抛丸除锈设备,因此,对钢结构的除锈等级定为Sa2.5级,要求钢材表面无可视的油脂、污垢、氧化皮、铁锈和油漆涂层等附着物,任何残留的痕迹应仅是点状或条纹状的轻微色斑。除锈等级Sa3的质量最好,但比Sa2.5的成本要增加50%以上,且只能在相对湿度不大于85%的条件下实现,因此,没有提出达到Sa3级的要求。钢结构除必须采取防锈措施外,尚应在构造上尽量避免出现难于检查、清刷和油漆之处,以及积留湿气和大量灰尘的死角和凹槽。闭口截面应沿全长和端部焊接封闭。

钢结构的防腐保护有三类方法:(1)镀层金属保护法,包括电镀、喷镀、化学镀、热镀和渗镀等;(2)化学保护法,包括氧化铝的电化学氧化(发蓝)、磷化或钝化等;(3)涂刷或喷涂的非金属保护法,包括涂料、塑料和搪瓷等的保护法。目前,应用多且可靠的方法有热镀锌的金属保护法和涂料的非金属保护法。其中,热镀锌被普遍认为是一种长效保护的措施,但造价比其他方法高。在各种涂料的非金属保护方法中,采用富锌涂料是一种行之有效的方法。

有条件时,推荐采用热镀锌方法。当采用涂料的非金属保护法而设计对涂层厚度无要求时,一般涂装4~5遍,每遍涂层的干漆膜厚度 $30\mu\text{m}$,允许偏差 $5\mu\text{m}$,涂料可采用富锌漆。其他先进可靠的涂装方法指的是锌加(ZINGA)等。

本条以下列三个标准为依据,本规程规定不详尽之处,可参见

下列标准中的相关条款：

1) 国际标准 ISO 8501-1：1998《钢材在涂装油漆和油漆有关产品前的预处理-表面清洁度的目视评定 第一部分：未涂装过的钢材和全面清除原有涂层后的钢材的锈蚀等级和预处理等级》；

2) 国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046；

3) 国家标准《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》GB/T 8923。

8.1.3 室外无防火要求的钢构件，其涂层宜按五层做法（两道底漆，一道中间漆，两道面漆）涂装，底层漆种宜采用环氧富锌漆，以便于后继保护层涂料的粘附。

8.3 维护和保养

8.3.8 由于预应力钢结构工程的特殊性，在翻修和改建时必须顾及建造时加载与施加预应力的顺序，以保证结构中内力平衡及杆内应力不超载。国内某预应力钢结构工程的屋顶面层材料因老化而需要翻修时，采用了拆除面层时同步补加临时吊重；敷设屋面材料并同步卸除临时吊重的平衡措施，使翻修工程顺利完成。

8.4 监 测

8.4.1 拉索张拉力是保证预应力钢结构体系内力平衡和结构稳定的重要因素。因此，经量测内力与初始力相差过大时，必须调整补偿。但目前由于量测手段上有困难，这项要求只能根据实际情况实施。

需本标准可按如下地址索购：

地址：北京百万庄建设部 中国工程建设标准化协会

邮政编码：**100835** 电话：**(010)88375610**

不得私自翻印。

统一书号:1580058·827

定价:25.00 元