



简单管节点强度计算技术规程

中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司

目录

1.定义	1
1.1 参数定义	1
1.2 节点分类	1
1.3 简单管节点要求	4
2.简单管节点强度计算	5
2.1 简单管节点强度系数 Q_u 计算	5
2.2 简单管节点强度系数 Q_f 计算	6
2.3 简单管节点强度计算及强度修正	7
2.4 简单管节点强度校核	11
2.5 节点构造要求	12

1.定义

1.1 参数定义

依据 APIRP2A-LRFD-2019 中图 14.1-1，简单管节点的各参数定义如下：

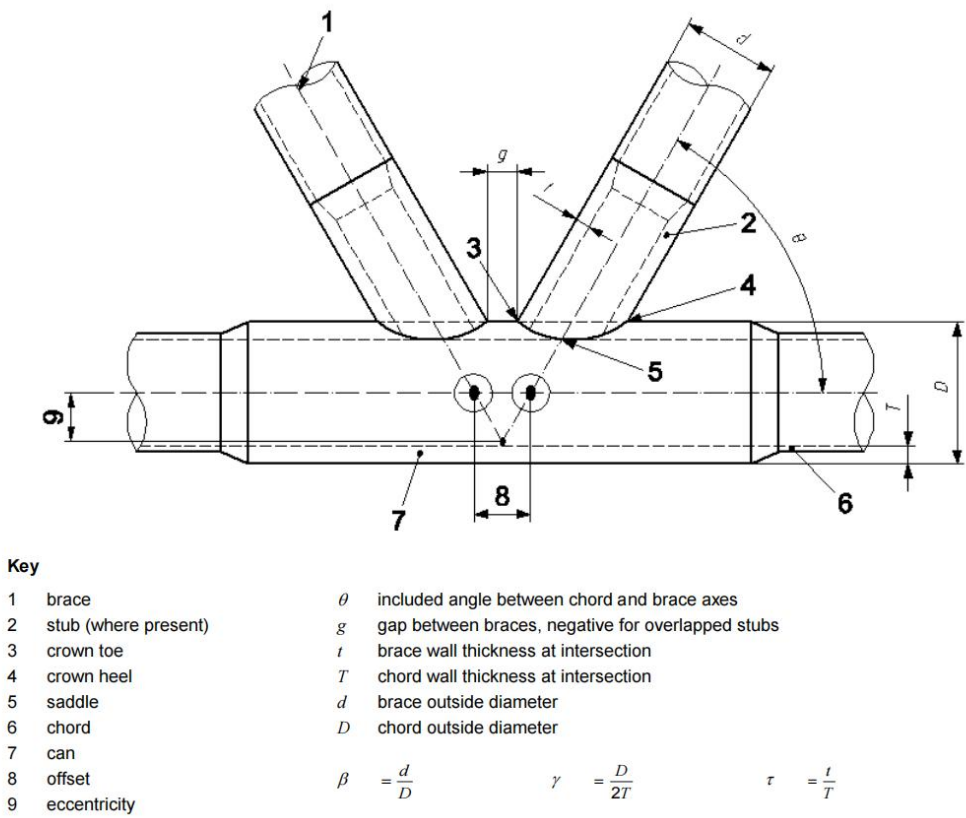


Figure 14.1-1—Terminology and Geometrical Parameters for Simple Tubular Joints

1.2 节点分类

依据 APIRP2A-LRFD-2019 中 14.2.5 节，导管架结构可分为 Y、K 和 X 接头（也称为交叉接头）三种接头，如下。

Y 型：垂直于弦的支撑轴向力的分量由弦中的梁剪切平衡，则支撑和弦构成 y 形接头。平行于弦的支撑件轴向力由弦中的轴向力来平衡。

K 型：垂直于弦的支撑轴向力分量相互平衡在 10 % 以内，则同一平面和弦同一侧的一对支撑构成 k 管节点。平行于弦的轴向支撑力的分量由弦中的轴向力来平衡。

X 型：在弦的同一平面或结合弦两侧的其他结构组件，如果轴向力通过弦传递到另一边，则构成 X 形接头：在弦中没有整体反应。

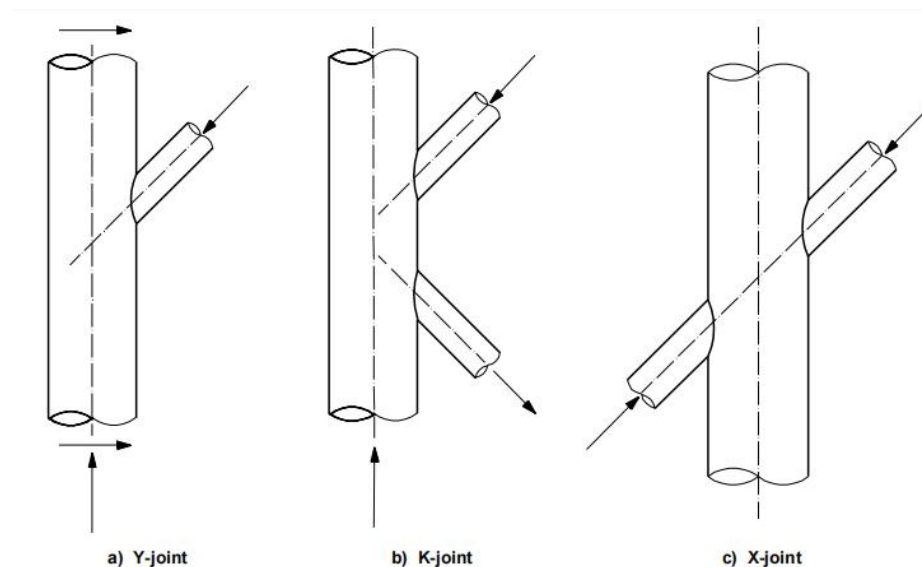


图 5.10.1 基本节点类型

海上固定钢结构通常是在一个平面或多个平面（多平面接头）中混合上述接头类型的空间框架。为了分类， $\pm 15^\circ$ 内平面内的所有杆件可视为在一个平面内。管节点分类仅基于考虑撑杆中的轴向力。

上述管节点类型的变体是 T 形接头，即 Y 形管节点，其中支撑和弦杆之间的夹角约为 90° 和双 T 形管节点，它们看起来像 X 形管节点，角度约为 90° ，但表现为两个 T 形管节点，因为支撑轴向力传递到弦杆而不是相反的支撑。

分类应适用于带弦（Y 接头）的单独撑杆的组合或带弦（K 或 X 接头）的一对撑杆的组合，而不是根据每个载荷情况下的轴向力模式确定的整个接头。因此，例如，单个支撑可以构成 K 接头的一部分和 Y 接头的一部分，并应相应地分类为每个相关类型的比例，例如 50%K 接头和 50%Y 接头。这种分类与疲劳和强度的考虑有关。应根据评估接头首先为 K 型接头，其次为 y 型接头或 x 型接头进行分类。图 5.10-2 显示了支撑节点分类方案的一些简单示例。

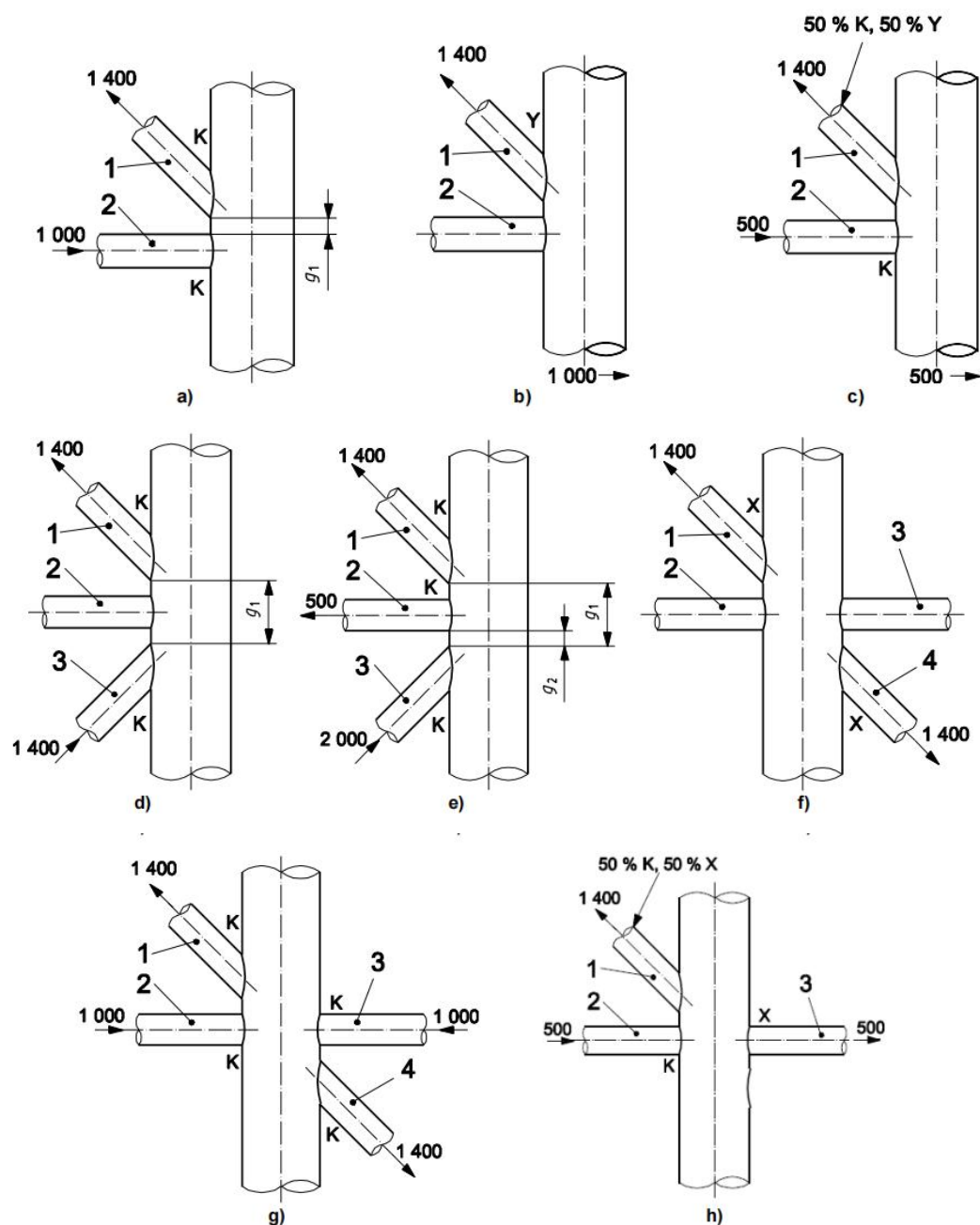


图 5.10.2 节点分类示例

图 5.10-2 h)是轴向力流和分类层次的良好例子,应采用于管节点中撑杆的分类。弦左侧的支撑 1 和 2 作为 K 管节点, 占对角支撑轴向力的 50 %。支撑 1 中其他 50 %的轴向力与支撑 3 形成一个 x 形接头。不允许用张力和压缩力的组合来替换支撑件的轴向力, 以产生相同的净力。如图 5.10-2 h 所示, 不能用 1000 的压缩力和 500 的张力代替支撑 2 中的轴向力, 因为这将导致不适当的水平支撑的 X 管节点分类和支撑 1 的完整 K 管节点分类。

应仔细考虑确定 K 管节点之间的正确间隙。在图 5.10-2 a), 适当的间隙位于相邻的撑杆之间。但是, 如果存在中间支撑, 如图 5.10-2 d), 则作为 K 型接头的外部支撑之间存在适当的间隙。在这种情况下, 由于间隙通常很大, k 型管节点的强度可以恢复到 y 型管节点的强度。图 5.10-2 e) 具有指导意义, 因为撑杆 2 的适当间隙是 g_2 , 而撑杆 1 的适当间隙是 g_1 。尽管支撑 3 完全分类为 K 管节点 (和弦为 500 的支撑 2, 支撑 3 的其余部分为支撑 1), 通过加权 g_1 和 g_2 的轴向力平衡从支撑 1 和 2 的间隙的比例来确定强度。

节点分类汇总:

1. 看垂直于弦的轴力是否能被平衡在百分之 10 之内, 如果能平衡, 就是 K 节点, 如果不能平衡, 就是 Y 节点。如果只能平衡百分之 50, 那就是百分之 50 的 K 和百分之 50 的 Y。

2. X 节点是撑杆本身的力完全由撑杆平衡掉, 完全不需要弦杆进行平衡。

3. 多撑杆结构, 优先判断受力较小的杆件、优先确定 K 节点, 然后才是 Y 和 X 型节点。

1.3 简单管节点要求

依据 API RP2A-LRFD-2019 中第 14.3.1 节, 简单管节点的要求如下:

14.3.1 General

Simple tubular joints are joints having no gussets, diaphragms, grout, or stiffeners. Simple Y- and X-joints have no overlap of principal braces, but simple K-joints may have overlaps up to $0.6 D$.

The validity ranges for the parameters that are used in the formulae given in the remainder of 14.3 are as follows:

- $0.2 \leq \beta \leq 1.0$;
- $10 \leq \gamma \leq 50$;
- $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$;
- $\tau \leq 1.0$;
- $f_y \leq 500 \text{ MPa}$.

2. 简单管节点强度计算

2.1 简单管节点强度系数 Q_u 计算

在 APIRP2A-LRFD-2019 的 14.3.3 节中规定, In general, the strength factor, Q_u , varies with joint classification and type of brace force, as given in Table 14.3-1. For IPB and OPB, Q_u is independent of joint classification.

一般而言, 强度因子 Q_u 随管节点分类和支撑力类型而不同, 如下表所示。

对于撑杆 IPB (平面内弯曲) 和 OPB (平面外弯曲), Q_u 不随节点分类的改变而改变。

表 5.10.2 Q_u 计算公式 (摘自 API-LRAF-2019 中表 14.3.1)

Joint Classification	Brace Force			
	Axial Tension	Axial Compression	In-plane Bending	Out-of-plane Bending
K		$(16 + 1.2\gamma)\beta^{1.2}Q_g$ but $\leq 40\beta^{1.2}Q_g$	$(5 + 0.7\gamma)\beta^{1.2}$	$2.5 + (4.5 + 0.2\gamma)\beta^{2.6}$
T/Y	30β	$2.8 + (20 + 0.8\gamma)\beta^{1.6}$ but $\leq 2.8 + 36\beta^{1.6}$		
X	$6.4\gamma^{0.6}\beta^2$	$[2.8 + (12 + 0.1\gamma)\beta]Q_\beta$		

式中的 Q_β 可通过下列公式进行计算:

$$Q_\beta = \frac{0.3}{\beta(1-0.833\beta)} \quad (\text{for } \beta > 0.6) \quad (14.3-5)$$

$$Q_\beta = 1.0 \quad (\text{for } \beta \leq 0.6) \quad (14.3-6)$$

式中的 Q_g 可通过下列公式进行计算:

$$Q_g = 1 + 0.2[1 - 2.8g/D]^3 \text{ but } \geq 1.0 \quad \text{for } g/D \geq 0.05 \quad (14.3-7)$$

$$Q_g = 0.13 + 0.65\phi\gamma^{+0.5} \quad \text{for } g/D \leq -0.05 \quad (14.3-8)$$

式中各参数的定义如图 5.10.4。

Q_g 计算中, 参数 ϕ 可通过下式进行计算:

$$\phi = t * f_{y,b} / (T * f_y)$$

其中:

$f_{y,b}$ 一支撑件在与弦杆相交处的代表性屈服强度 (撑杆的屈服强度), MPa;

T —与弦杆相交处的支撑壁厚度, mm。

Q_u 计算时应注意:

当 $\beta > 0.9$ 的X接头计算轴向拉力时， Q_u 项适用于同轴支撑（即 $e/D \leq 0.2$ ，其中 e 为两个支撑的偏心率）；如果撑杆不是同轴的（ $e/D > 0.2$ ），则应在表中应取为 23β 。偏心率 e 的定义为上图中“8”表示部分。

注：X型节点偏心 e/D 应 ≤ 0.2 。

2.2 简单管节点强度系数 Q_f 计算

依据API RP2A-LRFD-2019中14.3.4节规定，弦力因子 Q_f 是考虑在弦中分解的载荷/动作产生的力的因子，其计算公式如下：

$$Q_f = \left[1 + C_1 \left(\frac{P_c}{P_y} \right) - C_2 \left(\frac{M_{ipb}}{M_p} \right) - C_3 A^2 \right]$$

式中 A 可通过下式计算：

$$A = \left[\left(\frac{P_c}{P_y} \right)^2 + \left(\frac{M_c}{M_p} \right)^2 \right]^{0.5}$$

其中：

P_c —计算撑杆处弦杆的轴向力（弦杆自身和撑杆合力产生），N；

M_c —计算撑杆处弦杆的弦杆内由分项弯矩产生的和弯矩（弦杆自身和撑杆合力产生），N·mm

$$M_c = (M_{ipb}^2 + M_{opb}^2)^{0.5}$$

P_y —具有代表性的轴向强度，由于弦的屈服可以忽略屈曲，以力为单位，N；

$$P_y = A_c f_y$$

f_y —弦杆的代表性屈服强度，以应力为单位；

A_c —弦杆或弦的横截面积；

M_p —chord can 的代表性塑性矩； $M_p = 1/6 \times (D^3 - (D-2t)^3) \times f_y$

$\gamma_{R,q}$ —屈服强度的系数； $\gamma_{R,q} = 1.05$

M_{ipb} —平面内弯曲

M_{opb} —平面外弯曲

C_1 、 C_2 、 C_3 的系数见下表。

表 5.10.3 Q_f 计算中 C_1 、 C_2 、 C_3 系数表（摘自API-LRAF-2019中表14.3.2）

Joint Type	C_1	C_2	C_3
K-joints under brace axial loading	0.2	0.2	0.3
T/Y-joints under brace axial loading	0.3	0	0.8
X-joints under brace axial tension ^a			
$\beta \leq 0.9$	0.2	0	0.5
$\beta = 1.0$	0.2	0	0.2
X-joints under brace axial compression ^a			
$\beta \leq 0.9$	0.2	0	0.5
$\beta = 1.0$	-0.2	0	0.2
All joints subject to brace bending moments	0.2	0	0.4
^a Linearly interpolated values between $\beta = 0.9$ and $\beta = 1.0$ for X-joints under brace axial loading.			

使用上式在计算 Q_f 时，应使用支撑交叉点两侧的弦力和弯矩的平均值。弦轴向力在拉力为正；当在支撑足迹处产生压缩时，弦合成弯曲力矩。

2.3 简单管节点强度计算及强度修正

1. 强度计算

依据 APIRP2A-LRFD-2019 中 14.3.2 规定，接头的强度不仅随其材料特性和几何形状而变化，而且随每个撑杆上的力模式而变化。因此，强度的值可以在不同的载荷情况下发生变化。

应计算每个支撑拉力、压缩、平面内弯曲（IPB）和面外弯曲（OPB）的各个力分量的简单管状接头的强度。

依据 APIRP2A-LRFD-2019 中 14.3.2，简单管状节点的代表性强度可根据下式计算：

$$P_{uj} = \frac{f_y T^2}{\sin \theta} Q_u Q_f$$

$$M_{uj} = \frac{f_y T^2 d}{\sin \theta} Q_u Q_f$$

其中：

P_{uj} （承载力）—代表的管节点轴向强度，以力为单位，N；

M_{uj} （承载力）—代表节点弯矩强度，以力矩为单位，N·mm；

f_y —弦杆的代表性屈服强度（SMYS（规定的最小屈服强度）或抗拉强度的 0.8 的较小者），以应力为单位，MPa；

T—与支撑件相交处的弦壁厚度，mm；

d—撑杆的外径，mm；

θ —支撑和和弦之间的夹角；

Q_u —强度系数；

Q_f —弦杆内力影响因子。

对于混合分类的节点， P_{uj} 和 M_{uj} 应通过将 Y、K 和 X 管节点行为的贡献加权除以该行为在管节点中的比例来计算。这意味着对于所考虑的每个荷载工况， P_{uj} 和 M_{uj} 可能不同。

根据 APIRP2A-LRFD-2019 中 A14.3.2 规定，保留了强度方程式的基本 API 格式。 Q_u 的插值以前适用于受到轴向力影响的混合分类支架，现在插值基于 P_{uj} 的加权平均值，因为 Q_f 也随轴向力分类而变化。以图 14.2-2 h) 为例，斜撑具有 50% 的 K 型和 50% 的 X 型接头分类。在这种情况下， P_{uj} 分别针对 K 关节分类和 X 关节分类进行计算。在 X 接头分类的计算中，根据 14.3.5，短罐长度的任何影响都包括在内。此后，代表性接头轴向强度可按如下方式计算：

$$P_{uj} = 0.50P_{uj, K} + 0.50P_{uj, X}$$

其中

P_{uj} —具有代表性的管节点轴向强度，以力为单位，N；

$P_{uj,K}$ —K 型管节点分类的代表性管节点轴向强度，以力为单位，N；

$P_{uj,X}$ —X 形管节点分类的代表性管节点轴向强度，以力为单位，N；

在 APIRP2A-LRFD-2019 中 14.3.2 规定，对于具有混合分类的撑杆， P_{uj} 和 M_{uj} 应该通过加权 Y-、K-和 X-管节点类型的贡献与该类型在管节点中的比例来计算。这意味着 P_{uj} 和 M_{uj} 对于每种负载情况可能是不同的。

对于带有 Chord Can 的 X 型和 Y 型接头， P_{uj} 不得超过 APIRP2A-LRFD-2019 中 14.3.5（见下节）节中规定的强度限制。简单管状接头的强度设计值如下：

$$P_d = \frac{P_{uj}}{\gamma_{R,j}}$$

$$M_d = \frac{M_{uj}}{\gamma_{R,j}}$$

其中：

P_d —管节点轴向强度的设计值，以力单位为单位，N；

M_d —为接头弯矩强度的设计值，以力矩单位为单位,N；

$\gamma_{R,j}$ —管状接头的部分阻力系数， $\gamma_{R,j} = 1.00$ 。

2.弦长度对 Y-和 X-节点强度的修正

在 APIRP2A-LRFD-2019 中 14.3.5 节规定，对于带弦加厚段（Chord Can）的简单 Y 接头和 X 接头，应使用以下公式来计算考虑弦长度下 Y-和 X-节点的强度：（K 型节点不修正）。

$$P_{uj} = [\gamma + (1 - \gamma)(T_n/T_c)^2]P_{uj,c}$$

注： L_c 值越大，折减系数越大。

其中

P_{uj} —具有代表性的节点轴向强度，以力为单位，N；

$P_{uj,c}$ —5.10.3.2 中的计算 P_{uj} 值，基于 chord can 几何和材料特性，包括根据 chord can 特性和尺寸计算出的 Q_f ；

5.10.3.2 中的计算 P_{uj} 值，基于弦能几何和材料特性，包括根据弦能特性和尺寸计算出的 Q_f ；

r ： 当 $\beta \leq 0.9$ 时， $L_c / (2.5 D)$ ； **注： $L_c / (2.5 D)$ 取值通常大于 0.4.**

当 $\beta > 0.9$ 时， $(4\beta - 3) L_c / (1.5 D)$ ；

注： $r < 1$

L_c —有效总弦长度，mm；

T_n —是 chord can 两侧标称弦杆厚度中较小的一个，mm；

T_c —chord can 的厚度，mm。

上面公式中的 L_c 可通过下图公式进行计算：

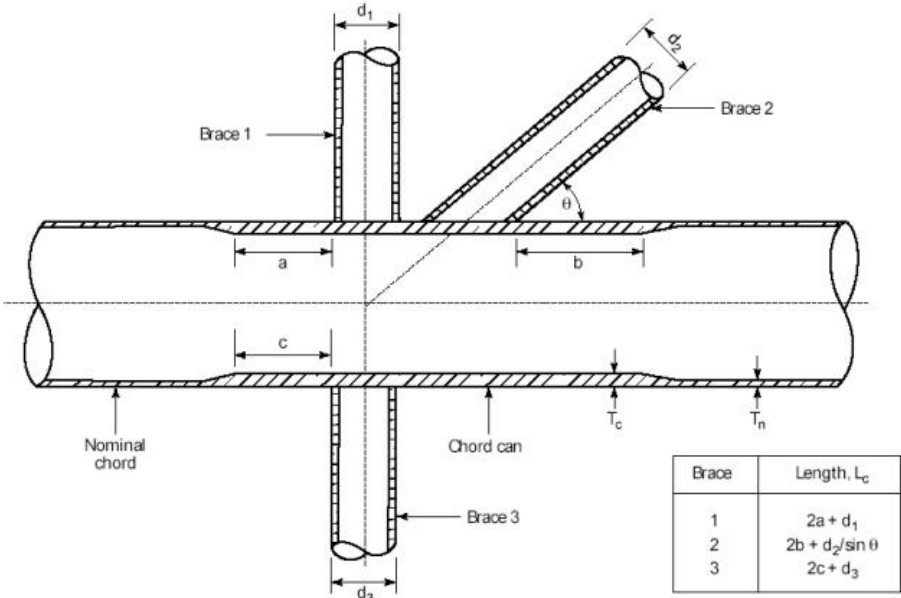
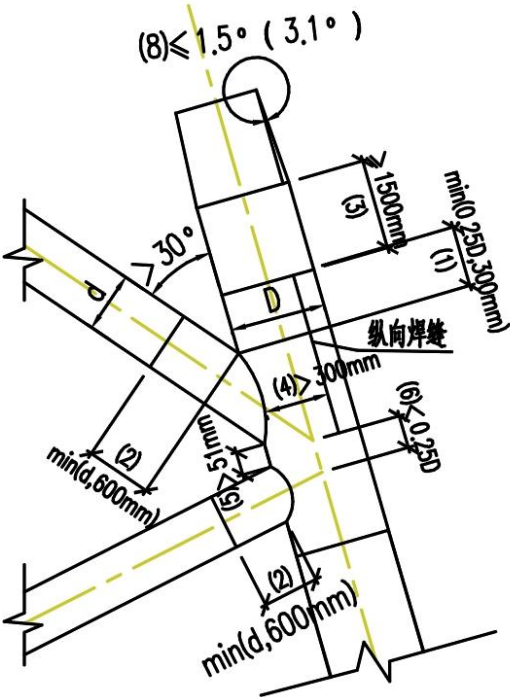


图 5.10.5 弦长 L_c 计算示意

特别注意：K 形节点的强度不因弦长的影响而降低。

管节点的构造要求如下所示，a, b 的最小值为 0.25D 和 300mm 中的较小值。



2.4 简单管节点强度校核

依据 APIRP2A-LRFD-2019 中 14.3.6 节规定，当节点承受轴向力、弯矩、弯矩和轴向力共同作用时，节点的每个支撑应满足下述条件：

$$U_j = \left| \frac{P_B}{P_d} \right| + \left(\frac{M_B}{M_d} \right)_{ipb}^2 + \left| \frac{M_B}{M_d} \right|_{opb} \leq 1.0$$

其中

U_j —节点利用率

P_B —由分解载荷/作用产生的支撑件中的轴向力，N；

M_B —分解载荷/作用下支撑件的弯矩，N·mm；

P_d —节点轴向强度的设计值（对应弦杆），由 5.10.3.2 节中计算得到，N；

M_d —接头弯矩强度的设计值（对应弦杆），由 5.10.3.2 节中计算得到，N·mm；

ipb —表示平面内弯曲；

opb —表示平面外弯曲。

根据 APIRP2A-LRFD-2019 第 A.14.2.3 条，Chord Can 除了满足设计载荷/作用所需的强度外，还应具有至少为每种设计情况（原位、加载、吊装、安装、意外等）的每个方向支撑有效强度的最小轴向承载力的 50%。对于地震荷载/作用，Chord Can 承载力应至少为现场设计情况的支撑有效强度的 100 %。

注：海上风电极端工况下（ULS）荷载要远大于地震荷载工况，所以起控制作用的为 ULS 工况，故静力计算时节点强度需要撑杆轴向强度的 50%的承载力验算，不考虑地震时的 100%要求。

14.2.3 Minimum Joint Strength

Chord cans, in addition to developing the strength required by design loads/actions, shall have a minimum axial capacity of at least 50 % of the effective strength of each incoming brace for each design situation (in-place, loadout, lifting, launch, accidental, etc.).

For earthquake loads/actions, the chord can capacity shall be at least 100 % of the brace effective strength of each incoming brace for the in-place design situation.

The effective strength of the brace is defined as the representative yield strength for braces where the axial component is tensile, Equation (13.2-1), or the compression buckling strength where the axial component is compressive, Equation (13.2-5) or Equation (13.2-6). The effective strength calculations shall be based on the nominal material and geometrical properties of the brace, not those of the brace stub (should one exist).

For the purposes of this requirement, the chord can capacity shall be determined using the representative strength given in Equation (14.3-1). The strength factor (Q_u) and the chord force factor (Q_t) shall be consistent with the design situation being considered.

3.1.3 API Joint Strength 50% Check

3.1.3.1 Method 1: Original API

A check is performed for each tubular connection to determine the capability of the connection to carry 50% of the effective member strength of any connecting brace. The effective strength is taken as the buckling load for members loaded in tension or compression and as yield for members loaded primarily in tension. This method is applied for API RP2A WSD 21st Ed and before, and API LRFD.

For simple joints, the following equation should be satisfied:

$$\frac{F_{yb} \gamma \tau \sin \theta}{F_{yc}(11 + 1.5/\beta)} \leq 1.0$$

where:

F_{yb} = the yield strength of the brace member

F_{yc} = lesser of yield strength of chord or 2/3 of tensile strength

2.5 节点构造要求

根据 API RP2A-LRFD-2019 第 14.2.6 节：接头细节设计是接头设计的一个基本要素。对于未加固的接头，推荐的详细命名法和尺寸如图 14.2-3 和 14.2-4 所示。弦杆加厚段长度向撑杆的外边缘延伸至少超过弦直径的四分之一，或 300mm。Y 接头和 x 接头的强度是接头长度的函数（见 14.3.5），短接头长度会导致接头强度的降低。应该考虑增加罐头长度超过这里给出的最小值，以避免降低强度的需要。

在 X 形接头中，直径较大的构件应继续穿过接头，另一个应框架在穿过构件上。当等直径的构件在 x 形接头处相遇时，使具有更大的力的通过构件更有效。

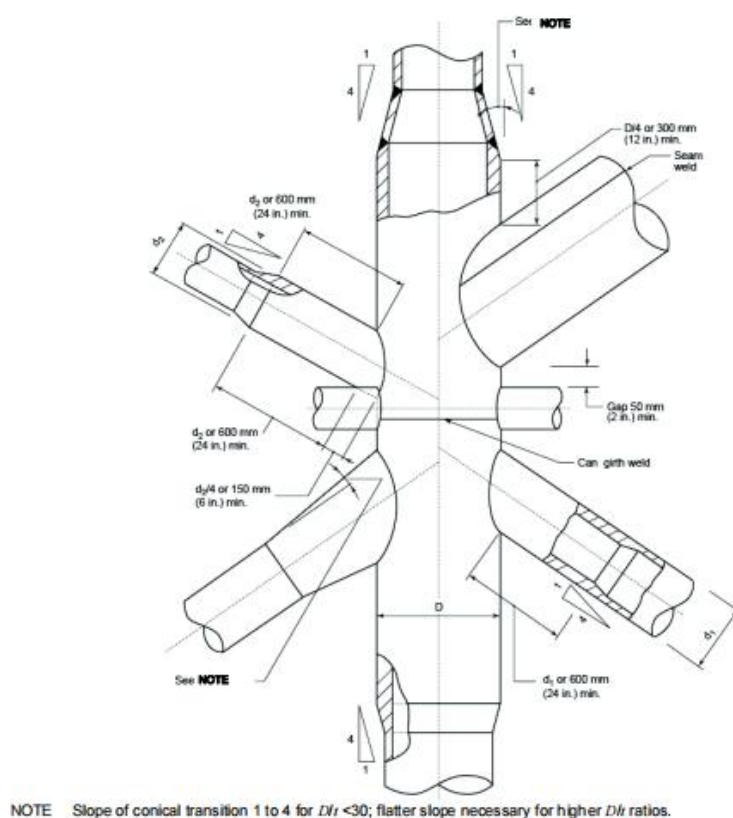
当两个或多个支架在接头处相交时，每个构件框架进入接头的顺序应由壁厚和/或直径确定。壁面最厚的构件应为连续构件或贯穿构件，其余构件的框架顺序应基于壁厚减小的顺序。如果两个或两个以上的构件具有相同的壁厚，则直径较大的构件应为连续构件或贯穿构件。贯通撑杆可以设置加厚段，以确保其厚度至少等于重叠支架的厚度。

如果两个或两个以上的成员具有相同的直径和壁厚，则任何一个成员都可以贯通。由其他支撑连接覆盖的支撑焊缝，应进行无损检测（NDT）检查。

当撑杆需要增加壁厚、更高的屈服强度和/或更严格的韧性时，所需的改变材料应从其与弦杆的连接处延伸，或超出其与任何重叠支架的连接处，延伸支架直径或 600 毫米中的较大者。

以上给出的弦和支撑杆最小尺寸均不包括任何厚度锥度出现的长度；Chord Can 和弦杆之间或支撑杆和支撑构件之间的厚度差异应以 1: 4 或更低的速度呈锥形（见图 14.2-3）。对于重要考虑疲劳因素的接头，内部锥细会对裂纹起源产生不良影响，并难以发现裂纹；对于此类接头，锥细应在外部（即匹配内径）。纵向焊缝和环形焊缝的定位，应尽量减少或消除其对接头性能的影响。支撑件的纵向接缝应位于接头冠跟附近（参见图14.2-3）。弦杆的纵向焊缝应与撑杆距离至少300毫米（见图14.2-4）。当弦需要圆周焊缝以达到所需的可长度时，焊缝应放置在鞍座和顶部位置之间的轻载支架交叉处（参见图14.2-3）。

注：Chord Can 中不应有环向焊缝。



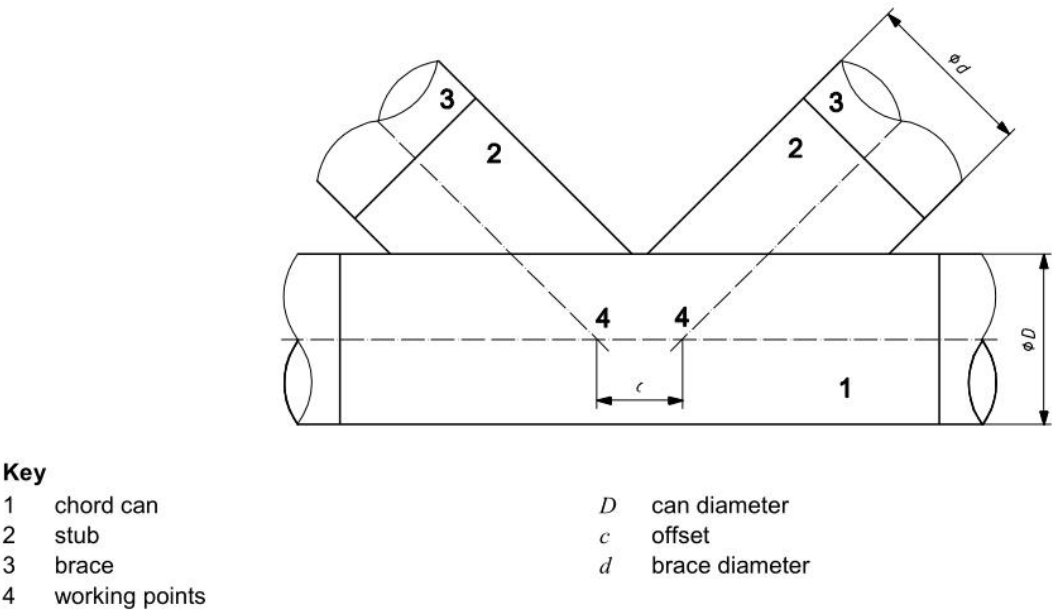


图 2.4-3 偏移的定义

根据 API-LFRD-2019 第 12.3.3.1 节，上图 c (offset) 值应小于 $0.25D$ 。

根据 NB/T 10105-2018 第 9.3.2 节，节点构造需满足下式要求。

$$\frac{F_{yb} (\gamma r \sin \theta)}{F_y (11 + 1.5/\beta)} \leq 1.0$$

其中：

F_{yb} 为节点处撑杆构件的屈服强度 (MPa)

γ 为弦杆半径与弦杆厚度之比；

r 为撑杆厚度与弦杆厚度之比；

θ 为自弦杆量起的撑杆角度 ($^{\circ}$)

F_y 为弦杆构件在节点处屈服强度或 $2/3$ 的抗拉强度 (MPa)，取二者的较小值；

β 为撑杆直径与弦杆直径之比。

根据 NB/T 10105-2018 第 9.3.2 节规定上式中 r 和 F_{yb} 应取自正常的撑杆构件，而不是端部加厚段。

注：上述公式内撑杆均指撑杆的非加厚段。

参数允许范围（构造要求）：

The validity ranges for the parameters that are used in the formulae given in the remainder of 14.3 are as follows:

- $0.2 \leq \beta \leq 1.0$;
- $10 \leq \gamma \leq 50$;
- $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$;
- $\tau \leq 1.0$;
- $f_y \leq 500 \text{ MPa}$.

对于 K 型接头，以下有效范围也适用： $0.6 < g/D$ 。附件 A 讨论了对于超出上述范围的接头可以采用的方法。

疲劳计算时，应满足的构造要求，DNV-C203 附录 B.1 规范中

The validity range for the equations in Table B-1 to Table B-5 is as follows:

$$\begin{array}{rcl}
 0.2 & \leq & \beta \leq 1.0 \\
 0.2 & \leq & \tau \leq 1.0 \\
 8 & \leq & \gamma \leq 32 \\
 4 & \leq & \alpha \leq 40 \\
 20^\circ & \leq & \theta \leq 90^\circ \\
 \frac{-0.6\beta}{\sin\theta} & \leq & \zeta \leq 1.0
 \end{array}$$

根据两本规范，构造要求汇总如下：

$$0.2 \leq \beta \leq 1.0$$

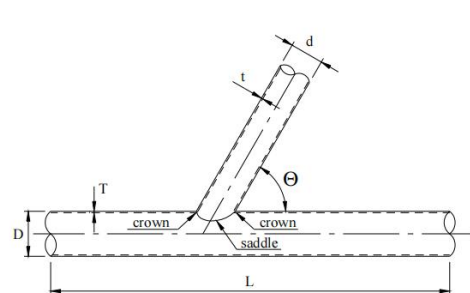
$$0.2 \leq \tau \leq 1.0$$

$$10 \leq \gamma \leq 32$$

$$4 \leq \alpha \leq 40$$

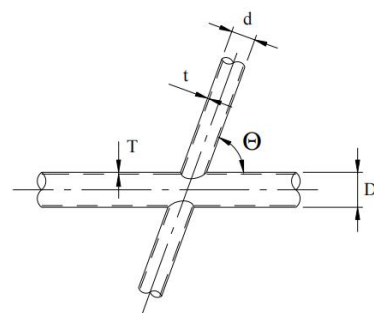
$$30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

$$\frac{-0.6\beta}{\sin\theta} \leq \zeta \leq 1.0$$



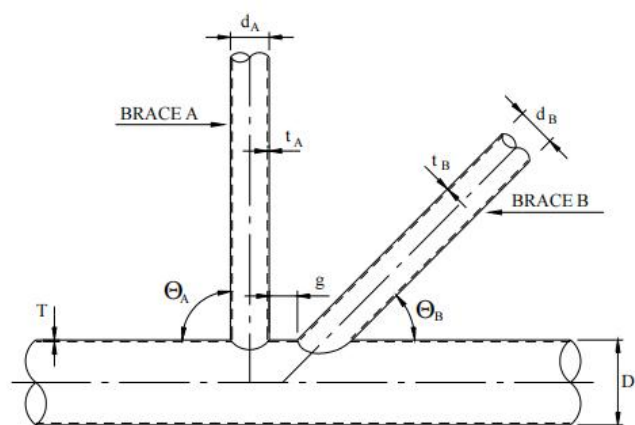
$$\beta = \frac{d}{D}$$

$$\alpha = \frac{2L}{D}$$



$$\gamma = \frac{D}{2T}$$

$$\tau = \frac{t}{T}$$



$$\beta_A = \frac{d_A}{D} \quad \beta_B = \frac{d_B}{D}$$

$$\tau_A = \frac{t_A}{T} \quad \tau_B = \frac{t_B}{T}$$

$$\gamma = \frac{D}{2T} \quad \zeta = \frac{g}{D}$$

图 2.4-4 管节点各参数的定义