



团 体 标 准

T/CSA 070-2021

多功能杆结构设计规范

Design specification of structure for multi-function pole

版本：V01.00

2021-07-06 发布

2021-07-06 实施

国家半导体照明工程研发及产业联盟
中关村半导体照明工程研发及产业联盟

发布

目 次

前 言	I
引 言	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	2
4 符号.....	3
5 基本设计规定.....	4
5.1 设计原则	4
5.2 荷载和地震作用	7
5.3 材料选用	9
6 结构计算.....	15
6.1 一般规定	15
6.2 实腹式结构	15
6.3 格构式结构	15
7 构件及节点连接.....	15
7.1 一般规定	15
7.2 构件设计	16
7.3 连接设计	18
7.4 法兰盘的连接计算	18
8 构造与工艺技术要求.....	24
8.1 一般规定	24
8.2 节点连接	26
8.3 制作与安装	27
8.4 工艺技术要求	28
9 地基与基础.....	28
9.1 一般规定	28
9.2 地基计算	29
9.3 基础设计	31
附录 A（资料性）法兰盘内力计算	33

前 言

本文件由国家半导体照明工程研发及产业联盟标准化委员会（CSAS）制定发布，版权归 CSA 所有，未经 CSA 许可不得随意复制；其他机构采用本文件的技术内容制定标准需经 CSA 允许；任何单位或个人引用本文件的内容需指明本文件的标准号。

到本文件正式发布为止，CSAS 未收到任何有关本文件涉及专利的报告。CSAS 不负责确认本文件的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本文件主要起草单位：华信咨询设计研究院有限公司、宁波摩尔克斯灯杆技术有限公司、杭州华普永明光电股份有限公司、深圳爱克莱特科技股份有限公司、良业科技集团股份有限公司、深圳市洲明科技股份有限公司、北京新时空科技股份有限公司、上海三思电子工程有限公司、英飞特电子(杭州)股份有限公司、湖州明朔光电科技有限公司、常州市武进区半导体照明应用技术研究院、北京智创华科半导体研究院有限公司、中关村半导体照明联合创新重点实验室。

本文件主要起草人：竹影、池远东、姚云龙、尹炳承、叶增辉、夏誉、张锋斌、周勇、秦海波、李澄、姜玉稀、江步亨、熊敬康、高伟、余湛。

中兴通讯股份有限公司、浙江德宝通讯科技股份有限公司、浙江八方电信有限公司为本标准的撰写提供了支持，在此一并表示感谢。

引 言

多功能杆是一种集照明、交通、安防、通信、监控、LED屏等多种功能于一体的新型的基础设施，随着智慧城市建设的推进，基于LED照明在节能、控制和联网等方面的技术进展，基础网络运营商、设计、硬件、软件企业及系统集成商纷纷开始探索将搭载各种功能模块的多功能杆作为建设智慧城市的重要切入口。各种功能模块的挂载给多功能杆带来了结构安全和载荷能力的挑战，规范的结构设计是多功能杆物理安全的基础，因此需要更多的关注到杆身的结构设计，确保不同使用环境下杆体的使用安全。

为规范多功能杆结构设计的术语符号，明确杆体结构、连接、附属构件、基础的设计原则、材料选择、计算方法、制作与安装技术要求等，促进面向智慧城市建设的多功能杆结构件和接口模块化、标准化发展，形成产品的通用性、互换性，维修的便利性，市场的规范化，生产的规模化以及成本的降低等目标，国家半导体照明工程研发及产业联盟（CSA）组织制定多功能杆结构设计规范。为在多功能杆结构设计中贯彻执行国家的技术经济政策，做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量，特制定本规范。

在多功能杆结构设计文件中，应注明结构的设计使用年限、使用条件、钢材牌号、连接材料的型号（或钢号）和对钢材所要求的力学性能、化学成分及其它的附加保证项目。此外，还应注明所要求的焊缝形式、焊缝质量等级、端部刨平顶紧部位及对施工的要求。

未经技术鉴定或设计许可，不得改变多功能杆结构的用途和使用环境。

在建设多功能杆结构时应按国家有关规定共同建设，实现资源共享。

在执行本文件与国家标准规范有矛盾时，应以现行国家标准规范为准。

在进行多功能杆结构设计时，凡本文件未作出规定的，尚应符合现行国家标准和相关行业标准的有关规定。

多功能杆结构设计规范

1 范围

本文件规定了多功能杆结构设计的术语和定义、符号、基本设计规定、结构计算、构件及节点连接、构造与工艺技术要求、地基与基础设计。

本文件适用于多功能杆结构，路灯杆结构设计可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 699 优质碳素结构钢技术条件
- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 3077 合金结构钢
- GB/T 3190 变形铝及铝合金化学成分
- GB/T 3191 铝及铝合金挤压棒材
- GB/T 5117 非合金钢及细晶粒钢焊条
- GB/T 5118 热强钢焊条
- GB/T 5293 埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂
- GB/T 5780 六角头螺栓 C 级
- GB/T 5782 六角头螺栓
- GB/T 12470 埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂
- GB/T 14957 熔化焊用钢丝
- GB/T 25745 铸造铝合金热处理
- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- GB 50009 建筑结构荷载规范
- GB 50011 建筑抗震设计规范
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50025 湿陷性黄土地区建筑标准
- GB 50057 建筑物防雷设计规范
- GB 50112 膨胀土地区建筑规范
- GB 50135 高耸结构设计标准
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收规范

- GB 50429 铝合金结构设计规范
- GB 50689 通信局站防雷与接地工程设计规范
- CJJ 45 城市道路照明设计标准
- DLT 5219 架空输电线路基础设计技术规程
- JGJ 94 建筑桩基技术规范
- JGJ 118 冻土地区建筑地基基础设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

多功能杆 multi-function pole

用于搭载照明、交通指示管理、监控设备、移动通信设备、监测设备、信息发布设备等的综合性杆体，又称综合杆、智慧杆。

3.2

主杆 primary member

垂直于地面，与基础可靠连接、用于支撑横臂、副杆和其他功能性部件、设备的载体结构件。

3.3

副杆 secondary member

安装于多功能杆主杆上部，用于搭载设备的载体。

3.4

横臂 transverse arm

安装于多功能杆侧面，水平横向挑出用于搭载设备的载体。

3.5

分仓 compartment

多功能杆体内部用于各类设备分隔安装或各种线缆单独布放的空间。

3.6

滑槽 sliding chute

用于安装指示牌、摄像头、天线、灯具及其他设备装置的固定结构装置，安装于主杆、副杆或横臂上，一般为 C 形或其他截面形式。

3.7

连接件 fastening

将指示牌、摄像头、天线、灯具及其他设备固定于滑槽上的构件。

3.8

杆高 height of pole

主杆底板底面至副杆顶部或主杆顶部（无副杆时）的垂直距离。

3.9

横臂长 length of crossing bar

横臂与主杆或副杆连接处至横臂悬挑处端部的长度。

4 符号

下列符号适用于本文件。

4.1 计算指标符号

- f_y ——材料的屈服强度；
- f ——材料的抗弯、抗压、抗拉强度设计值；
- f_v ——材料的抗剪强度设计值；
- f_a ——修正后的地基承载力特征值；
- f_{aE} ——调整后的地基抗震承载力；
- N_t^b ——每个螺栓的受拉承载力设计值；
- S ——地基变形的规定限值；
- δ ——结构或构件的变形限值。

4.2 几何参数符号

- A ——截面面积、毛截面面积、基础底面积；
- B ——底板宽度；
- C ——主角钢边至底板边的距离；
- D ——地脚螺栓对应的计算宽度；
- H ——多功能杆结构的总高度；
- W ——截面抗弯模量；
- W_x 、 W_y ——对 x、y 轴的截面抗弯模量；
- Y_{max} ——地脚螺栓中心至主角钢的最大距离；
- y_i ——第 i 个螺栓中心到旋转轴的距离；
- a ——底板计算区段的自由边长度、合力作用点至基础底面最大压力边缘的距离；
- a_x ——合力作用点至 e_x 一侧基础边缘的距离；
- a_y ——合力作用点至 e_y 一侧基础边缘的距离；
- b ——计算高度处的覆冰厚度、平行于 x 轴的基础边长、多边形杆体单边宽度；
- b_{min} ——杆脚底板各区段中的最小宽度；
- d ——圆截面构件的直径；
- e_x ——x 方向的偏心距；
- e_y ——y 方向的偏心距；
- h_{cr} ——土重法计算的临界深度；
- h_t ——基础上拔深度；
- l ——平行于 y 轴的基础底面边长；

- t ——连接件的厚度；
- s ——螺栓的间距；
- θ ——两螺栓之间的圆心角；
- α_0 ——土体计算的抗拔角。

4.3 计算系数及其它符号

- ψ_C ——可变荷载的组合值系数
- ψ_q ——可变荷载的准永久值系数；
- ψ_W ——抗震设计时的风荷载组合值系数；
- γ ——覆冰重度；
- γ_0 ——结构重要性系数；
- γ_1 ——土体重的抗拔稳定系数；
- γ_2 ——基础重的抗拔稳定系数；
- γ_G ——永久荷载的分项系数；
- γ_Q ——可变荷载的分项系数；
- γ_{Eh} 、 γ_{Ev} ——分别为水平、竖向地震作用分项系数；
- γ_W ——风荷载分项系数；
- γ_{RE} ——承载力抗震调整系数；
- α_1 ——与构件直径有关的覆冰厚度修正系数；
- α_2 ——覆冰厚度的高度变化系数；
- ϕ ——轴心受压构件稳定系数；
- μ_s ——风荷载的体形系数；
- Re ——雷诺数。

5 基本设计规定

5.1 设计原则

- 5.1.1 多功能杆结构设计，宜采用以概率论为基础的极限状态设计方法，以可靠指标度量结构构件的可靠度，以分项系数设计表达式进行计算。
- 5.1.2 多功能杆结构的设计基准期为 50 年。
- 5.1.3 多功能杆的设计使用年限一般为 50 年。有特殊使用要求的多功能杆，可根据使用要求及现行相关国家标准另行确定。
- 5.1.4 多功能杆结构的安全等级一般为二级。有特殊使用要求的多功能杆，可根据使用要求及现行相关国家标准另行确定。
- 5.1.5 多功能杆结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计：
 - a) 承载能力极限状态：这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力，或达到不适于继续承载的变形；

b) 正常使用极限状态：这种极限状态对应于结构或结构构件达到变形或耐久性能的有关规定限值。

5.1.6 多功能杆结构构件承载能力极限状态设计应采用荷载效应的基本组合，并按下列极限状态设计表达式中的最不利值确定：

a) 由可变荷载效应控制的组合：

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q_1} \gamma_{L_1} S_{Q_1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} \psi_{C_i} S_{Q_{ik}}) \leq R \dots\dots\dots (1)$$

b) 由永久荷载效应控制的组合：

$$\gamma_0(\gamma_G S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} \psi_{C_i} S_{Q_{ik}}) \leq R \dots\dots\dots (2)$$

式中：

γ_0 ——结构重要性系数，不应小于 1.0；

γ_G ——永久荷载的分项系数，一般情况下应取 1.3，永久荷载效应对结构有利时取 ≤ 1.0 ；

γ_{Q_i} ——第 i 个可变荷载的分项系数，其中 γ_{Q_1} 为可变荷载 Q_1 的分项系数，一般情况下应取 1.5，可变荷载效应对结构有利时取 0；

γ_{L_i} ——第 i 个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数，其中 γ_{L_1} 为主导可变荷载 Q_1 考虑设计使用年限的调整系数，对雪荷载和风荷载，不考虑此调整系数，应取重现期为设计使用年限选取相应的荷载值，对其他可变荷载取值按 GB 50009 的规定采用；

S_{Gk} ——永久荷载标准值的效应；

$S_{Q_{ik}}$ ——第 i 项可变荷载标准值的效应，其中 S_{Q_1k} 为第一个可变荷载标准值的效应，其荷载效应在诸可变荷载效应中起控制作用；

ψ_{C_i} ——可变荷载 Q_i 的组合值系数，应根据不同的荷载组合按第 5.1.7 条的规定采用；

n ——参与组合的可变荷载数；

R ——结构或构件抗力的设计值。

5.1.7 多功能杆结构构件承载能力极限状态设计应考虑如下两种不同荷载基本组合，其可变荷载组合值系数应分别按表 1 采用。

表 1 荷载基本组合及可变荷载组合值系数

荷载组合		可变荷载组合值系数	
		ψ_{cw}	ψ_{ci}
I	G+W	1.0	—
II	G+W+I	0.25~0.7	1.0

注 1：表中 G 代表永久荷载，W 代表风荷载，I 代表覆冰荷载；

注 2：组合 II 中一般取 0.25，但 $0.25\omega_0$ 不小于 0.15 kN/m^2 ；对覆冰后冬季风很大的区域，应根据实地情况调查选用相应的值；

注 3：需要考虑雪荷载时，雪荷载的组合系数均取 0.7。

5.1.8 结构或构件承载力的抗震验算，应按下式进行计算：

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} + \psi_W \gamma_W S_{Wk} \leq R/\gamma_{RE} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

γ_G ——重力荷载分项系数，一般情况下应取 1.3；

S_{GE} ——重力荷载代表值效应，重力荷载代表值应取结构自重和各竖向可变荷载的组合值之和,规定如下：

- a) 对结构自重(结构构配件自重、固定设备重等)取 1.0；
- b) 对雪荷载取 0.5。

γ_{Eh} 、 γ_{Ev} ——分别为水平、竖向地震作用分项系数，按表 2 采用；

S_{Ehk} ——水平地震作用标准值效应；

S_{Evk} ——竖向地震作用标准值效应；

γ_W ——风荷载分项系数，应采用 1.5；

S_{Wk} ——风荷载标准值效应；

ψ_W ——抗震基本组合中的风荷载组合值系数，可采用 0.2；

γ_{RE} ——承载力抗震调整系数，按有关规范取值（强度计算取 0.75，稳定计算取 0.80）。

表 2 地震作用分项系数

地震作用	γ_{Eh}	γ_{Ev}
仅按水平地震作用计算	1.3	0.0
仅按竖向地震作用计算	0.0	1.3
同时按水平地震和竖向地震作用计算（水平地震为主）	1.3	0.5
同时按水平地震和竖向地震作用计算（竖向地震为主）	0.5	1.3

5.1.9 正常使用极限状态应分别按荷载效应的标准组合、准永久组合进行计算，并应满足本规范要求的限值。

a) 标准组合应用于计算结构或构件的变形，按下式进行计算：

$$S_{Gk} + S_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Q_{ik}} \leq \delta \dots\dots\dots (4)$$

b) 准永久组合应用于地基变形和基础裂缝宽度的计算，按下式进行计算：

$$S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Q_{ik}} \leq S \dots\dots\dots (5)$$

式中：

δ ——结构或构件的变形限值；

S ——地基变形或基础裂缝的规定限值；

ψ_{qi} ——准永久效应组合时，任何第 i 个可变荷载的准永久值系数，按表 3 取用。

表 3 可变荷载准永久值系数

荷载类别	风荷载	活荷载	雪荷载		
			地区 I	地区 II	地区 III
准永久值系数 ψ_{qi}	0(0.4)	0.4	0.5	0.2	0

注 1：在风玫瑰图呈严重偏心的地区，风荷载的准永久值系数采用 0.4（频遇值）；

注 2：雪荷载的分区按 GB 50009 执行。

5.1.10 多功能杆结构正常使用极限状态的控制条件应符合下列规定：

- a) 在以风荷载为主的荷载标准组合作用下，多功能杆结构的主杆和副杆任意点的水平位移不得大于表 4 的规定；

表 4 多功能杆结构的水平位移限值

以风或多遇地震作用为主的荷载标准组合作用下	水平位移限值	
	按线性分析	u/H_i
按非线性分析	u/H_i	1/33

注 1：表中 u ——任意点水平位移（与 H_i 高度对应）；

H_i ——任意点高度；

注 2：多功能杆任意点水平位移 u 应考虑基础变形。

- b) 在以风荷载或地震作用为主的荷载标准组合作用下，多功能杆横臂任意点的水平位移不得大于表 5 的规定；

表 5 多功能杆结构的水平位移限值

以风或多遇地震作用为主的荷载标准组合作用下	水平位移限值	
	按线性分析	u/H_i
按非线性分析	u/H_i	1/50

- c) 多功能杆的主杆和副杆在横臂自重及横臂上搭载的设备自重为主的荷载标准组合作用下，横臂自身任意点的竖向位移不宜大于 1/50；不应大于 1/20；立柱任意点的水平位移不得大于 1/75。

多功能杆结构的各构件位移，可结合所挂载的设备对振动敏感度的要求进行控制或适当放宽要求。

5.2 荷载和地震作用

5.2.1 多功能杆结构上的荷载与作用一般可分为下列两类：

- 永久荷载与作用：结构自重、搭载设备重量、土重、土压力、地基变形作用等；
- 可变荷载与作用：风荷载、覆冰荷载、地震作用、雪荷载、活荷载（包括平台安装检修荷载）、温度作用等。

5.2.2 风荷载应按如下规定计算：

- 多功能杆结构所承受的风荷载计算应按 GB 50009 中规定的重现期 R 为 50 年执行，但基本风压不得小于 0.35 kN/m^2 ；
- 计算风振系数时，实腹式结构的阻尼比可取为 0.01，格构式结构的阻尼比可取为 0.02；
- 多功能杆结构的风荷载体型系数 μ_s 如在 GB 50009 列出时，可按该规定采用；其他可按如下规定采用：

- 1) 多功能杆的主杆和副杆及横臂体型系数 μ_s 可按表 6 的规定确定；

表 6 多功能杆主杆和副杆及横臂体型系数 μ_s

截面形式	体型系数 μ_s
圆形	0.6
十六边形及以上	0.8
十二边形	1.0
六边形及八边形	1.2
四边形	1.3
不规则截面	1.3

注：带 U 型滑槽的截面按照不规则截面取值。

2) 设备设施的体型系数 μ_s 可按表 7 的规定确定。

表 7 各类设备设施的体型系数 μ_s

设施设施形状	体型系数 μ_s
圆柱体	0.9
其它形状	1.3

5.2.3 雪荷载的计算应按 GB 50009 的规定执行，基本雪压按 50 年一遇采用。

5.2.4 覆冰荷载的计算应遵循如下原则：

- a) 设计多功能杆结构时，应考虑结构构件、设备等表面覆冰后所引起的重力荷载及挡风面积增大的影响；
- b) 基本覆冰厚度应根据当地离地 10 m 高、重现期 50 年的观测资料分析确定。当无观测资料时，应通过实地调查确定，或按下列经验数值分析采用：
 - 1) 重覆冰区：基本覆冰厚度可取 20 mm~50 mm；
 - 2) 中覆冰区：基本覆冰厚度可取 15 mm~20 mm；
 - 3) 轻覆冰区：基本覆冰厚度可取 5 mm~10 mm。
- c) 管线及结构构件上的覆冰荷载的计算应符合下列规定：
 - 1) 圆截面构件每单位长度上的覆冰荷载可按下式计算：

$$q_l = \pi b \alpha_1 \alpha_2 (d + b \alpha_1 \alpha_2) \gamma \cdot 10^{-6} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

q_l ——单位长度上的覆冰荷载(kN/m)；

b ——基本覆冰厚度(mm)，按本条款的规定采用；

d ——圆截面构件的直径(mm)；

α_1 ——与构件直径有关的覆冰厚度修正系数，按表 8 采用；

α_2 ——覆冰厚度的高度变化系数，按表 9 采用；

γ ——覆冰重度，一般取 9 kN/m³。

表 8 与构件直径有关的覆冰厚度修正系数 α_1

直径(mm)	5	10	20	30	40	50	60	70
α_1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.75	0.7	0.63	0.6

表 9 覆冰厚度的高度变化系数 α_2

离地面高度(m)	10	50	100	150	200	250	300	≥ 350
α_2	1.0	1.6	2.0	2.2	2.4	2.6	2.7	2.8

2) 非圆截面构件上每单位表面面积上的覆冰荷载可按下式计算:

$$q_a = 0.6b\alpha_2\gamma \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

q_a ——单位面积上的覆冰荷载(kN/m²)。

5.2.5 地震作用可按如下规定确定:

- a) 多功能杆的抗震设防类别一般为标准设防类(丙类),有特殊使用要求的多功能杆结构按现行相关国家标准另行确定。抗震设防烈度应按其所在地的抗震设防基本烈度采用;
- b) 多功能杆结构地震作用计算宜采用振型分解反应谱法,计算方法按 GB 50011 的规定执行;
- c) 抗震设防烈度为 9 度时多功能杆结构应同时考虑竖向地震与水平地震作用的不利组合。

5.3 材料选用

5.3.1 多功能杆结构采用的材料应符合相应质量标准,碳素结构钢应符合 GB/T 700、低合金高强度结构钢应符合 GB/T 1591、铝合金应符合 GB/T 3191、GB/T 3190、GB/T 25745 等规定。

焊接结构应具有碳含量的合格保证,焊接结构以及重要的非焊接承重结构采用的钢材还应具有冷弯试验的合格保证。

5.3.2 多功能杆结构的钢材,宜采用 Q235、Q355、Q390、Q420、Q460 等钢材强度等级的结构钢;滑槽及其他附属构件的钢材,宜采用 Q235、Q355 等结构钢;多功能杆结构、滑槽及其他附属构件的铝合金,宜采用牌号 6061、6063、6063A、5083、3003、3004 等材料强度等级的铝合金。

需要焊接的构件不得采用 Q235 普通碳素结构钢 A 级;主要受力构件在冬季工作温度等于或低于-20℃时,不宜采用 Q235 沸腾钢。

5.3.3 连接材料应符合下列要求:

- a) 多功能杆结构的焊接宜采用手工电弧焊,选用的焊条应符合现行国家标准 GB/T 5117 或 GB/T 5118 的规定,焊条型号应与构件钢材的强度相适应,可按下列原则选用:
 - 1) 对于 Q235 钢,宜选用 E43××型焊条;
 - 2) 对于 Q355 钢,宜选用 E50××型焊条;

- 3) 对于 Q390 钢、Q420 钢、Q460 钢，宜选用 E55××型或 E60××型焊条；
- 4) 对于不同强度钢材的连接焊缝，可采用与低强度钢材相适应的焊条。
- b) 采用自动焊接或半自动焊接时，焊丝和相应的焊剂应与主体金属强度相适应，不同强度的钢材相焊接时，可按强度较低钢材选用焊接材料。焊丝和焊剂应符合 GB/T 14957 的规定；
- c) 采用螺栓连接时可选用普通螺栓，并应分别符合 GB/T 5782、GB/T 5780 的规定；
- d) 采用法兰连接时宜选用高强螺栓，符合 GB/T 1231 的规定；
- e) 地脚锚栓宜采用 Q235 钢、Q355 钢或 Q390 钢制作，也可采用 35 号、45 号优质碳素钢或 40Cr 合金结构钢制作，但不得焊接；
- f) 多功能杆结构采用铝合金焊接连接时，必须考虑热影响区材料强度降低带来的不利影响。热影响区范围及折减系数参照 GB 50429 确定。
- 5.3.4 多功能杆结构常用材料设计指标应满足下列规定：
- a) 钢材的强度设计值，应根据钢材厚度或直径按表 10 采用；
- b) 钢材的螺栓和锚栓连接的强度设计值按表 11 采用；
- c) 焊缝的强度设计值按表 12 采用；
- d) 铝合金的强度设计值，按表 13 采用；
- e) 铝合金结构焊缝强度设计值，按表 14 采用；
- f) 铝合金结构普通螺栓连接的强度设计值，按表 15 采用；
- g) 铝合金结构铆钉连接的强度设计值，按表 16 采用。

表 10 钢材的强度设计值 (N/mm²)

钢材 牌号		钢材厚度或直径 mm	抗拉、抗压和抗弯 f	抗剪 f_v	端面承压 (刨平顶紧) f_{ce}
碳素结 构钢	Q235 钢	≤16	215	125	320
		>16, ≤40	205	120	
低合金 高强度 结构钢	Q355 钢	≤16	305	175	400
		>16, ≤40	295	170	
	Q390 钢	≤16	345	200	415
		>16, ≤40	330	190	
	Q420 钢	≤16	375	215	440
		>16, ≤40	355	205	
	Q460 钢	≤16	410	235	470
		>16, ≤40	390	225	

注 1：表中直径指实芯棒材直径，厚度系指计算点的钢材或钢管壁厚，对轴心受拉和轴心受压构件系指截面中较厚板件的厚度；

注 2：20 号优质碳素钢（无缝钢管）的强度设计值同 Q235 钢。

表 11 螺栓和锚栓连接的强度设计值(N/mm²)

螺栓的性能等级、锚栓 和构件钢材的牌号		普通螺栓						锚 栓	承压型连接		
		C 级螺栓			A 级、B 级螺栓				高强度螺栓		
		抗 拉 f_t^b	抗 剪 f_v^b	承 压 f_c^b	抗 拉 f_t^b	抗 剪 f_v^b	承 压 f_c^b	抗 拉 f_t^a	抗 拉 f_t^b	抗 剪 f_v^b	承 压 f_c^b
普通螺栓	4.6 级、4.8 级	170	140	—	—	—	—	—	—	—	—
	6.8 级	300	240	—	—	—	—	—	—	—	—
	8.8 级	400	300	—	400	320	—	—	—	—	—
地脚锚栓	Q235	—	—	—	—	—	—	140	—	—	—
	Q355	—	—	—	—	—	—	180	—	—	—
	Q390	—	—	—	—	—	—	185	—	—	—
	35 号钢	—	—	—	—	—	—	190	—	—	—
	45 号钢	—	—	—	—	—	—	215	—	—	—
	40Cr 合金结构钢	—	—	—	—	—	—	260	—	—	—
承压型连接 高强度螺栓	8.8 级	—	—	—	—	—	—	—	400	250	—
	10.9 级	—	—	—	—	—	—	—	500	310	—
构件钢材牌 号	Q235	—	—	305	—	—	405	—	—	—	470
	Q355	—	—	385	—	—	510	—	—	—	590
	Q390	—	—	400	—	—	530	—	—	—	615
	Q420	—	—	425	—	—	560	—	—	—	655
	Q460	—	—	450	—	—	595	—	—	—	695

注 1: A 级螺栓用于 $d \leq 24 \text{ mm}$ 和 $L \leq 10 d$ 或 $L \leq 150 \text{ mm}$ (按较小值)的螺栓; B 级螺栓用于 $d > 24 \text{ mm}$ 和 $L > 10 d$ 或 $L > 150 \text{ mm}$ (按较小值)的螺栓。d 为公称直径, L 为螺栓公称长度;

注 2: A、B 级螺栓孔的精度和孔壁表面粗糙度, C 级螺栓孔的允许偏差和孔壁表面粗糙度, 均应符合相应的要求;

注 3: 若有实验依据时, 螺栓强度设计值可适当提高, 但须按行业规程统一实行;

注 4: 35 号钢、45 号钢锚栓材质应符合 GB/T 699 的要求, 35 号钢一般不宜焊接, 45 号钢一般不应焊接;

注 5: 40Cr 合金结构钢抗拉强度为热处理后的强度, 热处理后的材料机械性能应满足 GB/T 3077 的要求;

注 6: 摩擦型高强螺栓连接的强度设计值参照 GB 50017。

表 12 焊缝的强度设计值(N/mm²)

焊接方法和 焊条型号	构件钢材		对接焊缝			角焊缝 抗拉、抗 压和抗剪 f_t^w	
	牌号	厚度或直径 mm	抗压 f_c^w	焊缝质量为下列等级时, 抗拉 f_t^w			抗剪 f_v^w
				一级、二级	三级		
自动焊、半自动焊 和 E43 型焊条的手 工焊	Q235 钢	≤16	215	215	185	125	160
		>16, ≤40	205	205	175	120	
自动焊、半自动焊 和 E50、E55 型焊 条的手工焊	Q355 钢	≤16	305	305	260	175	200
		>16, ≤40	295	295	250	170	
自动焊、半自动焊 和 E50、E55 型焊 条的手工焊	Q390 钢	≤16	345	345	295	200	200 (E50)
		>16, ≤40	330	330	280	190	220 (E55)
自动焊、半自动焊 和 E55、E60 型焊 条的手工焊	Q420 钢	≤16	375	375	320	215	220
		>16, ≤40	355	355	300	205	(E55)
	Q460 钢	≤16	375	375	320	215	240
		>16, ≤40	355	355	300	205	(E60)

注 1: 自动焊和半自动焊所采用的焊丝和焊剂, 应保证其熔敷金属的力学性能不低于 GB/T 5293 和 GB/T 12470 中相关的规定;

注 2: 焊缝质量等级应符合 GB 50205 的规定。其中厚度小于 8 mm 钢材的对接焊缝, 不应采用超声波探伤确定焊缝质量等级;

注 3: 对接焊缝在受压区的抗弯强度设计值取 f_c^w , 在受拉区的抗弯强度设计值取 f_t^w ;

注 4: 表中厚度系指计算点的钢材厚度, 对轴心受拉和轴心受压构件系指截面中较厚板件的厚度;

注 5: 构件为 20 号优质碳素钢的焊缝强度设计值同 Q235 钢。

表 13 铝合金材料强度设计值(N/mm²)

铝合金材料			用于构件计算		用于焊接连接计算	
牌号	状态	厚度 mm	抗拉、抗压和 抗弯 f	抗剪 f_v	焊件热影响区抗拉、 抗压和抗弯 $f_{u,haz}$	焊件热影 响区抗剪 $f_{v,haz}$
6061	T4	所有	90	55	140	80
	T6	所有	200	115	100	60
6063	T5	所有	90	55	60	35
	T6	所有	150	85	80	45

表 13 铝合金材料强度设计值(N/mm²) (续)

铝合金材料			用于构件计算		用于焊接连接计算	
牌号	状态	厚度 mm	抗拉、抗压和 抗弯 f	抗剪 f_v	焊件热影响区抗拉、 抗压和抗弯 $f_{t,haz}$	焊件热影 响区 ^a 抗剪 $f_{v,haz}$
6063A	T5	≤10	135	75	75	45
		>10	125	70	70	40
	T6	≤10	160	90	90	50
		>10	150	85	85	50
5083	O/F	所有	90	55	210	120
	H112	所有	90	55	170	95
3003	H24	≤4	100	60	20	10
3004	H34	≤4	145	85	35	20
	H36	≤3	160	95	40	20

注：热影响区范围按 GB 50429 的规定采用。

表 14 铝合金结构焊缝强度设计值(N/mm²)

铝合金母材牌号及状态	焊丝型号	对接焊缝			角焊缝
		抗拉 f_t^w	抗压 f_c^w	抗剪 f_v^w	抗拉、抗压 和抗剪 f_t^w
6061-T4	SAIMG-3(Eur 5356)	145	145	85	85
6061-T6	SAIMG-1(Eur 4043)	135	135	80	80
6063-T5 6063-T6	SAIMG-3(Eur 5356)	115	115	65	65
6063A-T5 6063A-T6	SAIMG-1(Eur 4043)	115	115	65	65
5083-O/F/H112	SAIMG-3(Eur 5356)	185	185	105	105

注：对于两种不同合金的焊接，焊缝的强度设计值应采用较小值

表 15 铝合金结构普通螺栓连接的强度设计值 (N/mm²)

螺栓的材料、 性能等级和 构件铝合金牌号			普通螺栓								
			铝合金			不锈钢			钢		
			抗拉 f_t^b	抗剪 f_v^b	承压 f_c^b	抗拉 f_t^b	抗剪 f_v^b	承压 f_c^b	抗拉 f_t^b	抗剪 f_v^b	承压 f_c^b
普通 螺栓	铝合 金	2B11	170	160	—	—	—	—	—	—	—
		2A90	150	145	—	—	—	—	—	—	—
	不锈 钢	A2-50、 A4-50	—	—	—	200	190	—	—	—	—
		A2-70、 A4-70	—	—	—	280	265	—	—	—	—
钢	4.6/4.8 级	—	—	—	—	—	—	170	140	—	
构 件	6061-T4		—	—	210	—	—	210	—	—	210
	6061-T6		—	—	305	—	—	305	—	—	305
	6063-T5		—	—	185	—	—	185	—	—	185
	6063-T6		—	—	240	—	—	240	—	—	240
构 件	6063A-T5		—	—	220	—	—	220	—	—	220
	6063A-T6		—	—	255	—	—	255	—	—	255
	5083-O/F/H112		—	—	315	—	—	315	—	—	315

表 16 铝合金结构铆钉连接的强度设计值 (N/mm²)

铝合金铆钉牌号及构件铝合金牌号		铝合金铆钉	
		抗剪 f_v^r	承压 f_c^r
铆钉	5B05-HX8	90	—
	2A01-T4	110	—
	2A10-T4	135	—
构件	6061-T4	—	210
	6061-T6	—	305
	6063-T5	—	185
	6063-T6	—	240
	6063A-T5	—	220
	6063A-T6	—	255
	5083-O/F/H112	—	315

6 结构计算

6.1 一般规定

- 6.1.1 多功能杆结构应进行强度、稳定性和变形验算。
- 6.1.2 多功能杆结构的选型应综合考虑使用要求、周围环境与景观、结构的承受能力以及工程造价等因素。
- 6.1.3 多功能杆结构应按本文件 5.1 节的规定进行承载能力极限状态计算，并依次以风荷载及覆冰荷载作为第一个可变荷载进行组合计算，必要时还应进行抗震验算。
- 6.1.4 多功能杆结构应按本文件第 5.1 节的规定进行正常使用极限状态验算，并应满足相应的变形规定。
- 6.1.5 多功能杆结构包括实腹式结构、格构式结构等型式。
- 6.1.6 多功能杆结构在风荷载作用下，应考虑最不利影响作用方向。

6.2 实腹式结构

- 6.2.1 实腹式结构的内力及变形可按变截面梁单元或平均等截面梁单元有限元法进行分析。变截面梁单元按坡度改变来划分单元，计算中应考虑竖向荷载因杆身变形产生的二次效应影响。
- 6.2.2 实腹式结构的水平风荷载可分段计算，以分段中央高度的风荷载作为该段的平均风荷载，每段长度不大于 5 m。
- 6.2.3 实腹式结构可按悬臂压弯杆件计算。
- 6.2.4 锥形实腹式结构的外壁坡度不大于 2% 时，应根据雷诺数 Re 按 GB 50135 进行横风向风振的验算。
- 6.2.5 实腹式结构挑臂长度不宜超过 15 m，超过 15 m 时宜采用适当的控制技术以减小结构变形。

6.3 格构式结构

- 6.3.1 格构式结构的横截面可配合场地条件或装饰效果，采用矩形、三角形等截面。
- 6.3.2 格构式结构计算时，宜将结构作为整体，按整体空间刚架法或整体空间桁架法，采用三维空间程序进行受力分析，主材与腹杆之间、腹杆与腹杆之间的连接，可按实际情况，视为刚接或铰接。
- 6.3.3 结构辅助杆件的承载能力应不低于所支撑主材内力的 2%、斜杆内力的 5%；结构横隔杆的承载能力应不低于所支撑横杆内力的 2%。

7 构件及节点连接

7.1 一般规定

- 7.1.1 多功能杆结构的构件和节点连接设计除了应满足使用阶段的受力要求外，尚应考虑施工阶段的受力要求。

7.1.2 结构构件和节点连接设计，应按承载能力极限状态的要求，采用荷载基本组合和强度的设计值进行计算。

7.2 构件设计

7.2.1 结构构件的设计，应根据受力状态分别进行受弯、轴向拉压等的强度计算以及整体稳定和局部稳定验算，具体计算应按 GB 50017、GB 50429 的有关规定进行，但塑性发展系数 γ_x 、 γ_y 应取为 1.0。

7.2.2 构件的长细比 λ 不应超过下列规定值：

- a) 主材： $\lambda \leq 150$ ；
- b) 横杆、斜杆： $\lambda \leq 180$ ，当内力小于杆件承载力的 50% 时， $\lambda \leq 200$ ；
- c) 辅助杆、横隔杆： $\lambda \leq 200$ ；
- d) 受拉杆： $\lambda \leq 350$ ；

施加预应力的拉杆，长细比不受限制。

7.2.3 多功能杆应考虑管壁局部稳定的影响：

多功能杆杆筒径厚比不宜大于 250，除按 GB 50017 中压弯构件的有关公式进行强度和稳定验算外，尚应按下列公式进行局部稳定验算：

a) 多功能杆杆筒为圆形截面时，应按下列公式进行验算：

$$\frac{N}{A \cdot f_c} + \frac{M}{W \cdot f_b} \leq 1 \dots\dots\dots (8)$$

式中：

f_c ——圆形杆筒受压局部稳定强度设计值 (N/mm²)；

f_b ——圆形杆筒受弯局部稳定强度设计值 (N/mm²)。

N ——所计算截面的轴心压力设计值 (N)；

M ——所计算截面的弯矩设计值 (N·mm)；

W ——截面抗弯模量 (mm³)；

A ——圆形杆筒截面面积 (mm²)。

受压和受弯局部稳定强度设计值可根据 D/t 的范围按下列条件计算度确定。

受压局部稳定强度设计值 f_c

$$\text{当 } \frac{D}{t} \leq \frac{24100}{f} \text{ 时, } f_c = f$$

$$\text{当 } \frac{24100}{f} \leq \frac{D}{t} \leq \frac{76130}{f} \text{ 时, } f_c = 0.75f + \frac{6025}{D/t} \dots\dots\dots (9)$$

受弯局部稳定强度设计值 f_b

$$\text{当 } \frac{D}{t} \leq \frac{38060}{f} \text{ 时, } f_b = f$$

$$\text{当 } \frac{38060}{f} \leq \frac{D}{t} \leq \frac{76130}{f} \text{ 时, } f_b = 0.70f + \frac{11410}{D/t} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

f ——钢材的设计强度 (MPa)；

D ——圆形杆筒外径 (mm);

t ——圆形杆筒壁厚 (mm)。

b) 多功能杆筒为多边形截面时, 应按下列公式进行验算:

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq \mu_d f \dots\dots\dots (11)$$

1) 八边形:

$$\mu_d = \begin{cases} 1.0 & \sqrt{f_y} \frac{b}{t} \leq 683 \\ 1.42(1.0 - 0.000434\sqrt{f_y} \frac{b}{t}) & 683 \leq \sqrt{f_y} \frac{b}{t} \leq 958 \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

2) 十二边形:

$$\mu_d = \begin{cases} 1.0 & \sqrt{f_y} \frac{b}{t} \leq 630 \\ 1.45(1.0 - 0.000491\sqrt{f_y} \frac{b}{t}) & 630 \leq \sqrt{f_y} \frac{b}{t} \leq 958 \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

3) 十六边形:

$$\mu_d = \begin{cases} 1.0 & \sqrt{f_y} \frac{b}{t} \leq 565 \\ 1.42(1.0 - 0.000522\sqrt{f_y} \frac{b}{t}) & 565 \leq \sqrt{f_y} \frac{b}{t} \leq 958 \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

b ——多边形杆简单边宽度 (mm);

t ——多边形杆筒壁厚 (mm);

μ_d ——设计强度修正系数;

f_y ——钢材的屈服强度 (MPa)。

7.2.4 多边形或圆形构件的复合受力强度计算:

$$\left(\frac{N}{A} + \frac{M_x \cdot C_y}{I_x} + \frac{M_y \cdot C_x}{I_y}\right)^2 + 3\left(V \cdot \frac{Q}{I_t} + T \cdot \frac{C}{J}\right)^2 \leq (\mu_d f)^2 \quad (\text{多边形}) \text{ 或 } f_b^2 (\text{圆形}) \dots\dots\dots (15)$$

式中:

M_x ——绕 x 轴截面弯矩设计值 (N · mm);

M_y ——绕 y 轴截面弯矩设计值 (N · mm);

C_x ——计算点在 x 轴投影长度 (mm);

C_y ——计算点在 y 轴投影长度 (mm);

I_x ——绕 x 轴截面惯性矩 (mm⁴);

I_y ——绕 y 轴截面惯性矩 (mm⁴);

V ——剪力设计值 (N);

T ——扭矩设计值 (N · mm);

C ——从中和轴至计算点的距离 (mm);

$\frac{Q}{I_t}$ ——确定最大弯曲剪应力参数 (1/mm²);

$$\text{圆形: } \text{Max}Q/I_t = \frac{0.637}{(D-t)t}$$

$$\text{八边形: } MaxQ/I_t = \frac{0.618}{(D-t)t}$$

$$\text{十二边形: } MaxQ/I_t = \frac{0.631}{(D-t)t}$$

$$\text{十六边形: } MaxQ/I_t = \frac{0.634}{(D-t)t}$$

$\frac{c}{J}$ ——确定最大扭转剪应力参数 ($1/\text{mm}^3$);

J ——极惯性矩 (mm^4);

t ——厚度 (mm)。

7.3 连接设计

7.3.1 多功能杆各构件之间的连接,宜采用螺栓连接,并采取现场拼装。局部部位如:杆脚板、法兰盘、钢管之间及钢管与节点板之间的连接,可采用焊接,但不得在现场施焊。

7.3.2 构件连接当采用螺栓连接时应验算螺栓的受剪、受拉及承压承载力;采用焊接时应验算焊缝的抗剪、抗拉和抗压承载力。连接的计算,应按 GB 50017、GB 50429 的有关规定进行。

7.3.3 多功能杆杆结构构件焊接时,与母材等强设计的对接焊缝质量等级应不低于二级,其他对接焊缝和角焊缝的质量等级应不低于三级。

7.3.4 多功能杆结构中的法兰连接应与结构整体计算模型相匹配,与施工条件相适应,与受力性质相对应,根据法兰位置在杆筒内、外分为内法兰和外法兰,法兰连接宜采用高强度等级普通螺栓,并加双螺母防松。

7.3.5 多功能杆钢管段间连接可采用套接或对接法兰盘连接。

7.3.6 多功能杆钢管段间连接采用套接连接时,钢管套接连接的设计长度,应考虑加工与安装偏差,不宜小于套接段外管最大内径 D 的 1.5 倍,套接段外管长度及其上部 200 mm 范围内的纵向焊缝应采用一级焊缝,端部应加引弧板。

7.3.7 多功能杆钢管段间连接采用对接法兰盘连接时,法兰的高强度等级普通螺栓连接应确保均匀、对称。在全部构件就位后应按表 17 的预拉力设计值拧紧,并加双螺母防松。

表 17 高强度等级普通螺栓连接副施工预拉力设计值 (kN)

螺栓的性能等级	螺栓公称直径 mm					
	M16	M20	M22	M24	M27	M30
8.8s	24	37.5	45	52.5	69	84
10.9s	30	46.5	57	67.5	87	106.5

7.4 法兰盘的连接计算

7.4.1 有加劲肋法兰盘螺栓的拉力如图 1 所示,应按下列规定计算:

a) 当法兰盘仅承受弯矩 M 时,普通螺栓所受最大拉力按下式计算:

$$N_{tmax} = \frac{M \cdot y_n}{\sum (y_i)^2} \leq N_t^b \dots\dots\dots (16)$$

式中:

N_{tmax} ——距螺栓群转动中心轴② y_n 处的螺栓拉力(N);

y_i ——螺栓群转动中心轴②到第 i 个螺栓的距离;

y_n ——离螺栓群转动中心轴②最远螺栓的距离;

N_t^b ——每个螺栓的受拉承载力设计值。

b) 当法兰盘承受轴向拉力 N 和弯矩 M 时, 普通螺栓拉力分两种情况计算:

- 1) 螺栓全部受拉时, 绕通过螺栓群形心的转动中心轴①转动, 螺栓所受最大拉力按下式计算:

$$N_{tmax} = \frac{M \cdot y'_n}{\sum (y'_i)^2} + \frac{N}{n_0} \leq N_t^b \dots\dots\dots (17)$$

式中:

N_{tmax} ——距螺栓群转动中心轴① y'_n 处的螺栓拉力(N);

y'_i ——螺栓群转动中心轴①到第 i 个螺栓的距离;

y'_n ——离螺栓群转动中心轴①最远螺栓的距离;

n_0 ——该法兰盘上螺栓总数。

- 2) 当按式 17 计算任一螺栓拉力出现负值时, 螺栓群并非全部受拉, 此时绕螺栓群转动中心轴②转动, 螺栓所受最大拉力按下式计算:

$$N_{tmax} = \frac{(M+Ne)y_n}{\sum (y_i)^2} \leq N_t^b \dots\dots\dots (18)$$

式中:

N_{tmax} ——距螺栓群转动中心轴② y_n 处的螺栓拉力(N);

e ——螺栓群形心轴与螺栓群转动中心轴②之间的距离 (mm)。

- 3) 当法兰盘承受轴向压力 N' 和弯矩 M 时, 此时绕螺栓群转动中心轴②转动, 普通螺栓所受最大拉力按下式计算:

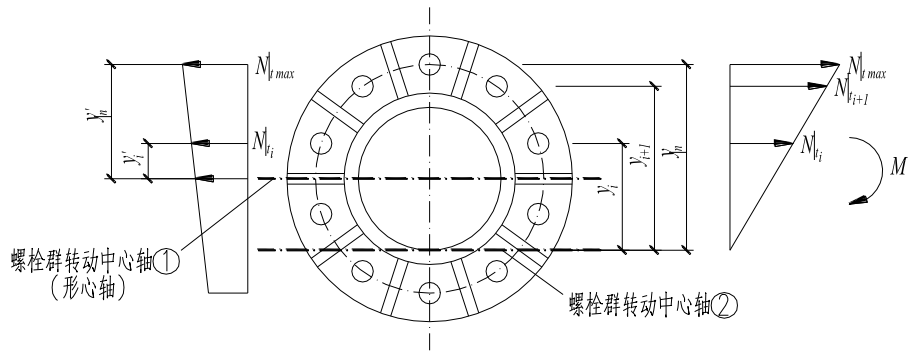
$$N_{tmax} = \frac{(M-N'e)y_n}{\sum (y_i)^2} \leq N_t^b \dots\dots\dots (19)$$

式中:

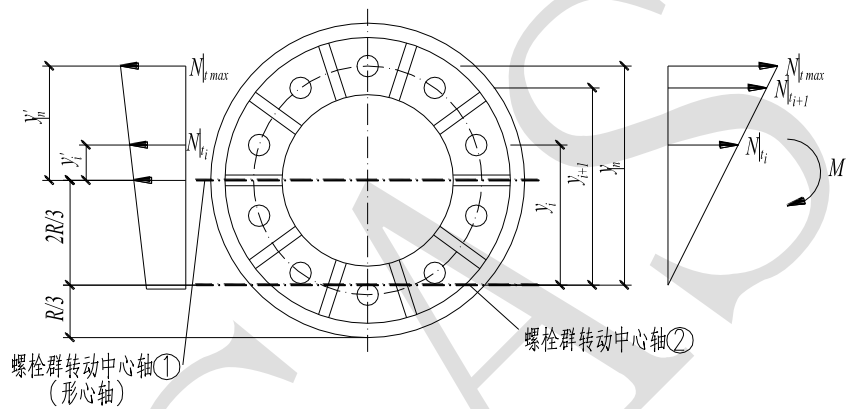
N_{tmax} ——距螺栓群转动中心轴② y_n 处的螺栓拉力(N), 出现负值则表示法兰螺栓不受拉。

对圆形有加劲肋法兰, 转动中心轴如图 1 所示。

对矩形有加劲肋法兰, 转动中心轴如图 2 所示。



(a) 外法兰



(b) 内法兰

图 1 圆形法兰螺栓群转动中心轴

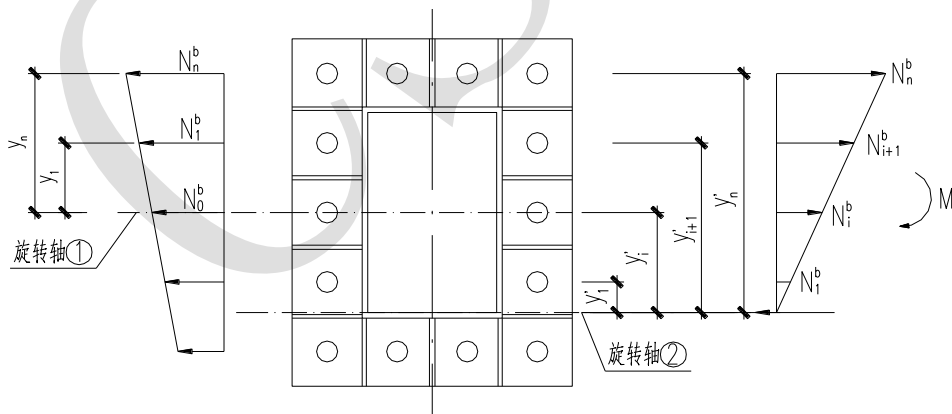


图 2 矩形法兰螺栓群转动中心轴

7.4.2 有加劲肋的法兰盘底板厚度应按下式计算:

$$t \geq \sqrt{\frac{5M_{max}}{f}} \dots \dots \dots (20)$$

式中:

t ——法兰盘底板厚度 (mm);

M_{max} ——按单个螺栓最大拉力均布到法兰板对应区域时计算得到的法兰板单位板宽最大弯矩。法兰板按两边固结（沿加劲板边）一边铰接（沿管壁）弹性薄板近似计算弯矩，详见附录 A 的规定；

f ——钢材抗拉强度设计值。

7.4.3 有加劲肋法兰的加劲肋板强度、加劲肋板与法兰板的焊缝、加劲肋板与筒壁焊缝如图 3 所示，应按下列要求验算。

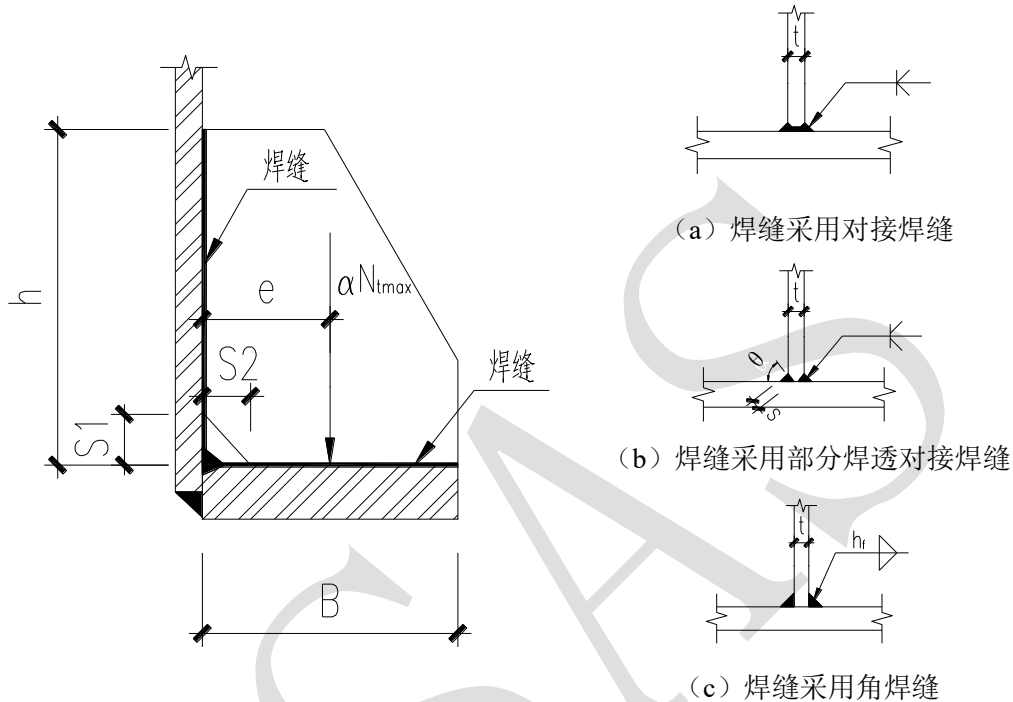


图 3 内、外法兰加劲肋板计算示意图

a) 法兰加劲肋板强度应按下列公式计算：

$$\text{剪应力验算: } \tau = \frac{\alpha N_{tmax}}{(h-S_1) \cdot t} \leq f_v \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{正应力验算: } \sigma = \frac{6\alpha N_{tmax} \cdot e}{(h-S_1)^2 \cdot t} \leq f \dots\dots\dots (22)$$

式中：

α ——加劲肋板承担反力的比例，按附录 A 表 A.1 取值；

N_{tmax} ——单个螺栓最大拉力设计值 (N)；

t ——加劲肋板的厚度 (mm)；

h ——加劲肋板的高度 (mm)；

e —— N_{tmax} 偏心距，取螺栓中心到钢管外壁的距离 (mm)；

S_1 ——加劲肋板下端切角高度 (mm)；

f_v ——加劲肋板钢材的抗剪强度设计值 (N/mm²)；

f ——加劲肋板钢材的抗拉强度设计值 (N/mm²)；

b) 法兰加劲肋板焊缝应按下列公式验算：

1) 焊缝采用对接焊缝，如图 3 (a) 所示。

竖向焊缝验算：

$$\tau_f = \frac{\alpha N_{tmax}}{t(h-s_1-2t)} \leq f_v^w \dots\dots\dots (23)$$

$$\sigma_f = \frac{6\alpha N_{tmax}e}{t(h-s_1-2t)^2} \leq f_t^w \dots\dots\dots (24)$$

$$\sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau_f^2} \leq 1.1f_t^w \dots\dots\dots (25)$$

水平焊缝验算：

$$\sigma_f = \frac{\alpha N_{tmax}}{t(B-s_2-2t)} \leq f_t^w \dots\dots\dots (26)$$

2) 焊缝采用部分焊透对接焊缝、角焊缝，如图 3 (b) (c) 所示。

竖向焊缝验算：

$$\tau_f = \frac{\alpha N_{tmax}}{2h_e(h-s_1-2h_f)} \leq f_f^w \dots\dots\dots (27)$$

$$\sigma_f = \frac{3\alpha N_{tmax}e}{h_e(h-s_1-2h_f)^2} \leq \beta_f f_f^w \dots\dots\dots (28)$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2} \leq f_f^w \dots\dots\dots (29)$$

水平焊缝验算：

$$\sigma_f = \frac{\alpha N_{tmax}}{2h_e(B-s_2-2h_f)} \leq \beta_f f_f^w \dots\dots\dots (30)$$

式中：

σ_f ——垂直于焊缝长度方向的拉应力 (N/mm²)；

τ_f ——平行焊缝长度方向的剪应力 (N/mm²)；

B ——加劲肋板宽度 (mm)；

S_2 ——加劲肋板横向切角尺寸 (mm)；

f_t^w 、 f_v^w ——对接焊缝抗拉、抗剪强度设计值 (N/mm²)；

f_f^w ——角焊缝的强度设计值 (N/mm²)，部分焊透对接焊缝同角焊缝取值；

h_f ——为角焊缝焊脚尺寸 (mm)；对部分焊透对接焊缝 $h_f = S$ ；

h_e ——角焊缝的计算厚度 (mm)，直角角焊缝等于 $0.7h_f$ ， h_f 为焊接尺寸；对部分焊透对接焊缝，当 $\theta = 45^\circ \pm 5^\circ$ ， $h_e = S - 3$ ；

β_f ——正面角焊缝的强度设计值增大系数：对承受静力荷载和间接承受动力荷载的结构，

$\beta_f = 1.22$ ；

f 、 f_v ——加劲肋板钢材的抗弯、抗剪强度设计值 (N/mm²)。

7.4.4 无加劲肋的法兰盘螺栓，如图 4 所示，应按下列公式计算：

a) 当杆件只受轴心拉力作用时：

一个螺栓所对应的管壁段中的拉力：

$$N_b = N/n \dots\dots\dots (31)$$

一个螺栓所承受的最大拉力:

$$N_{tmax} = mN_b \frac{a+b}{a} \leq N_t^b \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中:

m ——法兰盘螺栓工作条件系数, 取 0.65;

n ——法兰盘上螺栓数目;

N ——杆件的轴向拉力 (N)。

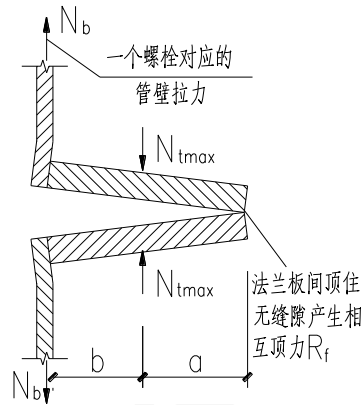


图 4 无加劲肋法兰螺栓受力

b) 当杆件受轴向拉(压)力及弯矩共同作用时:

一个螺栓所对应的管壁段中的拉力:

$$N_b = \frac{1}{n} \left(\frac{M}{0.5R} + N \right) \quad \dots\dots\dots (33)$$

式中:

M ——法兰盘所受弯矩($N \cdot mm$);

N ——法兰盘所受轴向力 (N), 压力时取负值;

R ——钢管的外半径 (mm)。

一个螺栓所承受的最大拉力可按式 32 计算。

7.4.5 无加劲肋的法兰板, 如图 5 所示, 应按下列公式计算:

$$\text{顶力: } R_f = N_b \cdot \frac{b}{a} \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$\text{法兰板剪应力: } \tau = 1.5 \cdot \frac{R_f}{t \cdot s} \leq f_v \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$\text{法兰板正应力: } \sigma = \frac{5R_f \cdot e_0}{s \cdot t^2} \leq f \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$s = (R + b) \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (37)$$

式中:

s ——螺栓的间距(mm);

R_f ——法兰板之间的顶力(N);

θ ——两螺栓之间的圆心角 (rad);

t ——法兰板的厚度 (mm)。

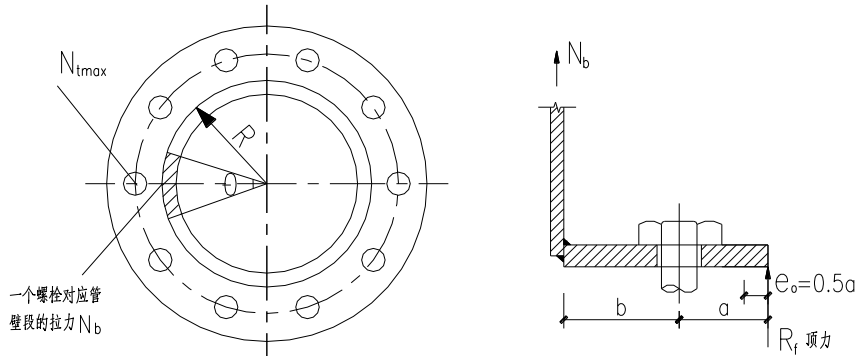


图 5 无加劲肋法兰板受力示意

8 构造与工艺技术要求

8.1 一般规定

8.1.1 多功能杆结构的构造应力求简单，结构传力明确，减少次应力影响；节点处各受力杆件的形心线（或螺栓准线）宜交汇于一点，减少偏心；节点构造应简单紧凑，力求减少结构的受风面积。

8.1.2 角钢构件的螺栓准线应靠近形心线，减少传力的偏心。

8.1.3 多功能杆结构应采取防锈措施；对管形和其他封闭形截面的构件，当采取喷涂防锈时端部应密封，当采用热镀锌防锈时端部不得密封；在锌液易滞留的部位应设溢流孔。

8.1.4 多功能杆结构的最小规格要求：

- a) 主要受力的角钢截面不应小于 L45×4；
- b) 主要受力的圆管壁厚不应小于 4 mm；
- c) 主要受力构件的钢板厚度不宜小于 4 mm，锚栓垫板厚度不应小于 12 mm。

8.1.5 多功能杆结构的受力构件采用钢管时，应采用热轧无缝钢管或直缝埋弧焊接钢管，不宜采用高频点焊钢管和螺旋卷制钢管。

8.1.6 多功能杆结构开设检修孔等孔洞时，杆身计算应考虑开孔的影响，进行开孔补强设计，并采取相应的补强措施。当符合下列情形时，杆身采取相应的构造补强措施即可。

- a) 当开孔率 $\Delta \leq 7\%$ 时，可采用贴板补强，如图 6 所示，贴板的宽度和厚度应满足下列公式要求；

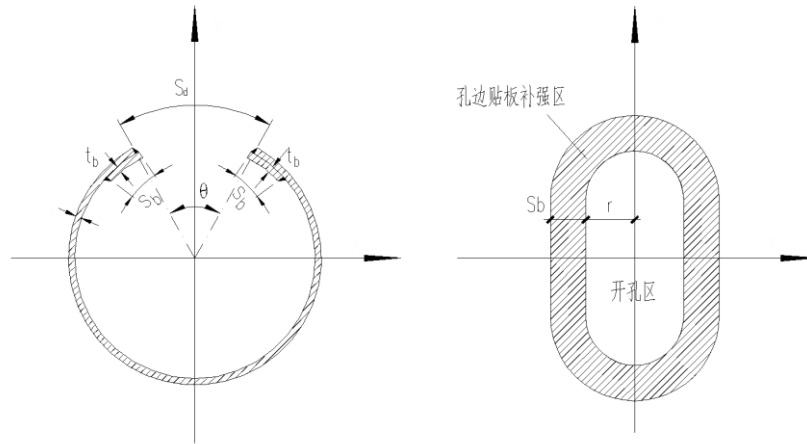


图6 贴板补强杆筒孔洞

$$\Delta = \theta/2\pi \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$\phi = 2s_b/s_d \geq 1.0 \quad \dots\dots\dots (39)$$

$$\psi = t_b/t \geq 1.0 \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中：

Δ ——开孔率；

θ ——孔洞中心所在的杆身横截面开孔区域所对应的圆心角弧度（rad）；

ϕ ——贴板相对宽度比；

ψ ——贴板相对厚度比；

s_b ——贴板沿管壁周向的弧长（mm）；

s_d ——孔洞对应管壁周向弧长（mm）；

t_b ——贴板厚度（mm）；

t ——管壁厚度（mm）。

b) 当开孔率 $7\% < \Delta < 10\%$ 时，采用加强圈补强，如图7所示，加强圈的高度和厚度应满足下列公式要求；

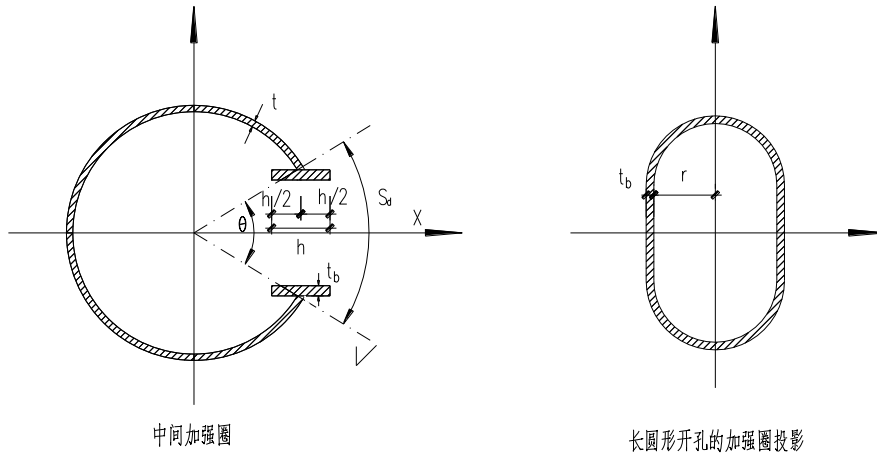


图 7 加强圈补强杆筒孔洞

$$\lambda_h = 2h/s_d \geq 0.6 \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$\gamma_t = t_b/t \geq 1.5 \quad \dots\dots\dots (42)$$

式中：

λ_h ——加强圈的相对高度比；

γ_t ——加强圈的相对厚度比；

h ——加强圈高度（mm）；

s_d ——孔洞对应管壁周向弧长（mm）；

t_b ——加强圈厚度（mm）；

t ——管壁厚度（mm）。

- c) 当开孔率 $10\% \leq \Delta < 15\%$ 且相应位置的杆身应力比不大于 0.8 时，或开孔率 $15\% \leq \Delta < 18\%$ 且相应位置的杆身应力比不大于 0.60 时，采用加强圈补强，加强圈的高度和厚度应满足公式（41）和（42）要求。
- d) 当开孔率 $18\% \leq \Delta < 35\%$ 时，采用加强圈补强，加强圈的高度和厚度应满足公式（41）和（42）要求，或采用其它有效的补强措施，必要时对补强后的杆身进行有限元分析，避免补强部位及相关区域应力集中过大。

8.2 节点连接

8.2.1 多功能杆结构构件采用螺栓连接时，用于连接受力杆件的螺栓，其直径不应小于 12 mm，每一杆件在接头一端的螺栓数不宜少于 2 个。

8.2.2 多功能杆结构中受剪螺栓的螺纹不应进入剪切面。

8.2.3 多功能杆结构中受拉普通螺栓应用双螺母防松；主杆等主要受力构件之间的连接螺栓，应采用双螺母或扣紧螺母等能防止螺母松动的有效措施。

8.2.4 连接节点构造：

- a) 角钢杆的主材连接节点，应采用内、外包钢或节点板通过螺栓连接，主材的厚度差大于 2 mm 时，应增加厚度等于主材厚度差的垫板；

b) 节点板形状不宜狭长，节点板边缘与杆件轴线所夹角 α 不宜小于 15° ，如图 8 所示；

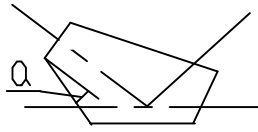


图 8 节点板

c) 节点板较大时，宜将节点板卷边（或增设加劲板）增大刚度，而不宜将节点板加至太厚。

8.2.5 螺栓的排列和距离应符合表 18 的规定。

表 18 螺栓的排列和允许距离

名称	位置和方向		最大允许距离（取两者的较小值）	最小允许距离	
中心 距离	外排(垂直内力方向或顺内力方向)		$8d_0$ 或 $12t$	$3d_0$	
	中 间 排	垂直内力方向	$16d_0$ 或 $24t$		
		顺内力方向	构件受压力		$12d_0$ 或 $18t$
			构件受拉力		$16d_0$ 或 $24t$
中心至 构件边 缘距离	顺内力方向		$4d_0$ 或 $8t$	$2d_0$	
	垂直内力 方向	切割边		$1.5d_0$	
		轧制边		$1.2d_0$	

注 1： d_0 为螺栓的孔径， t 为外层较薄板件的厚度。

注 2：钢板边缘与刚性构件（如角钢、槽钢等）相连时，螺栓最大间距可按中间排的数值采用。

8.2.6 焊缝布置应避免立体交叉和集中在一处，角焊缝连接时构件端部的焊缝宜采用围焊，所有围焊的转角处必须连续施焊。

8.2.7 法兰盘连接构造：

a) 有加劲肋法兰盘：底板厚不小于 16 mm；管径小于 120 mm 时螺栓不宜少于 4 个；管径大于或等于 120 mm 时，螺栓不宜少于 6 个；加劲板的厚度不宜小于板长的 1/15，并不宜小于 5 mm。加劲肋与法兰板及钢管交汇处应切除直角边长不小于 15 mm 的三角，应避免三向焊缝交叉；

b) 无加劲肋法兰盘：底板厚不小于 20 mm，强度及变形应满足计算要求；

c) 钢管与法兰盘的连接：钢管应进入法兰板，双面坡口环缝焊接。

8.3 制作与安装

8.3.1 多功能杆结构的制作与安装，除应符合设计要求外，还应满足本节要求。

8.3.2 采用进口钢材和代用材料时，应提供该材料的机械性能和化学成分，并经技术评估合格后方可采用。

8.3.3 主材拼接节点处，和主材连接的外包角钢应铲根，内包角钢应铲背，变坡时制弯角度应一致，保证主材、外包和内包角钢三者连接相吻合。

8.3.4 构件制孔要求如下：

- a) C 级六角头螺栓的螺栓孔直径比螺栓杆公称直径大 1.0 mm~1.5 mm；
- b) B 级六角头螺栓的螺栓孔的直径应与螺栓杆公称直径相等。

8.3.5 除埋入基础的地脚螺栓外，多功能杆结构的所有构件材料均需进行防锈处理，一般宜采用热浸镀锌法，构件的镀锌层厚度应达到如下要求：

- a) 构件厚度大于或等于 5 mm 的构件，镀锌层厚须不小于 86 μm ；
- b) 构件厚度小于 5 mm 的构件，镀锌层厚须不小于 65 μm 。

8.3.6 多功能杆结构连接螺栓拧紧后外露丝扣长度不少于 2 扣。

8.3.7 露出基础顶面的螺栓在多功能杆结构安装前，应采取防锈措施，并妥善保管，防止螺栓锈蚀与损伤。

8.3.8 多功能杆结构组立后，杆脚底板应与基础面接触良好，当底板（法兰）与基础间有预留为调整法兰、底板水平高差而预留的空隙时，在多功能杆安装调正完成后 7 天内应用高一级的微膨胀细石混凝土浇筑密实。

8.3.9 多功能杆结构安装调正完毕后，需用混凝土进行封闭，底板（法兰）、加劲板及地脚锚栓应位于混凝土保护层内，外包混凝土厚度，对 H 型截面不宜小于 160 mm，对矩形管或圆管不宜小于 180 mm，同时不宜小于杆体截面高度的 30%；强度等级不宜低于 C20。

8.4 工艺技术要求

8.4.1 多功能杆杆体内宜设置分仓结构，进行强弱电分离。

8.4.2 多功能杆结构上宜设置设备连接构件，连接构件宜模块化、标准化。

8.4.3 多功能杆杆体 2.5 m 以下部分宜进行防粘贴处理。

8.4.4 多功能杆结构的防雷与接地应按 GB 50057、CJJ 45、GB 50689 的要求设置防雷与接地设施。

9 地基与基础

9.1 一般规定

9.1.1 多功能杆结构地基基础设计前应进行岩土工程勘察。

9.1.2 多功能杆结构基础型式的选用应结合多功能杆结构形式、建设场地地质条件和周围环境条件，通过技术经济比较综合分析确定。

9.1.3 多功能杆结构采用扩展基础时，在正常使用极限状态标准组合作用下，基础底面允许部分脱离基土，但脱开的面积应不大于底面全面积的 1/4。

9.1.4 地基基础设计时，所采用的荷载效应最不利组合与相应的抗力限值应符合下列规定：

- a) 按地基承载力确定基础底面积及埋深或按单桩承载力确定桩数时，传至基础或承台底面上的荷载应按正常使用极限状态下荷载效应标准组合，相应的抗力应采用地基承载力特征值或单桩承载力特征值；

- b) 计算地基变形时，传至基础底面上的作用效应应按正常使用极限状态下作用的准永久组合，相应的限值应为地基变形允许值；
- c) 多功能杆基础的抗拔计算采用安全系数法，荷载效应应按承载能力极限状态下荷载效应的基本组合，但分项系数为 1.0；
- d) 在确定基础或桩基承台高度，计算基础内力，确定配筋和验算材料强度时，上部结构传来的荷载效应组合和相应的基底反力，应按承载能力极限状态下荷载效应的基本组合，采用相应的分项系数；
- e) 当需要验算基础裂缝宽度时，应按正常使用极限状态下作用的准永久组合。
- 9.1.5 当地基土质为湿陷性黄土、膨胀土和季节性冻土时，多功能杆结构的基础尚应满足 GB 50025、GB 50112、JGJ 118 的规定。
- 9.1.6 当多功能杆结构基础处于地下水位以下时，应考虑地下水对基础及覆土的浮力作用。
- 9.1.7 当多功能杆结构的基础和地锚处于侵蚀性环境时，应按相关规范的规定采取防护措施。
- 9.1.8 多功能杆结构基础采用窄基浅基础、窄基深基础、宽基基础时应满足 DLT 5219 的规定。

9.2 地基计算

9.2.1 地基承载力的计算应符合下列要求：

- a) 当承受轴心荷载时

$$p_k \leq f_a \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中：

p_k ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面处的平均压力(kN/m²)；

f_a ——修正后的地基承载力特征值(kN/m²)。

- b) 当承受偏心荷载时，除应符合公式(43)的要求外，尚应满足下式要求：

$$p_{k \max} \leq 1.2f_a \quad \dots\dots\dots (44)$$

式中：

$p_{k \max}$ ——相应于荷载效应标准组合时，基础底面边缘的最大压力(kN/m²)。

当考虑地震作用时，在公式(43)、(44)中应采用地基抗震承载力 f_{aE} 代替地基承载力特征值 f_a ，地基抗震承载力 f_{aE} 应按 GB 50011 的规定采用。

9.2.2 当基础承受轴心荷载时，基础底面压力可按下列公式计算：

$$p_k = (F_k + G_k)/A \quad \dots\dots\dots (45)$$

式中：

F_k ——相应于荷载效应标准组合时，上部结构传至基础顶面的竖向力(kN)；

G_k ——基础自重(包括基础上的土重)标准值(kN)；

A ——基础底面面积(m²)。

9.2.3 当基础承受偏心荷载时，基础底面压力可按下列公式计算：

$$p_{k \max} = \frac{(F_k + G_k)}{A} + \frac{M_k}{W} \quad \dots\dots\dots (46)$$

$$p_{k \min} = \frac{(F_k + G_k)}{A} - \frac{M_k}{W} \dots\dots\dots (47)$$

式中:

M_k ——相应于荷载效应标准组合时, 作用于基础底面的力矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);

W ——基础底面的抵抗矩(m^3);

$p_{k \min}$ ——相应于荷载效应标准组合时, 基础底面边缘的最小压力(kN/m^2)。

当 $p_{k \min} < 0$ 时, 基础底面与地基土局部脱开, 基础底面最大压力可按下列公式计算:

a) 矩形基础承受单向偏心荷载时, 如图 9 所示:

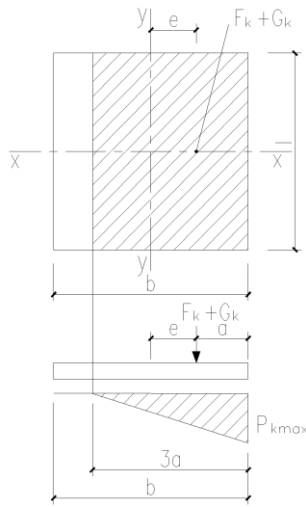


图 9 在单向偏心荷载作用下矩形基础底面部分脱开时的基底压力

$$p_{k \max} = \frac{2(G_k + F_k)}{3la} \dots\dots\dots (48)$$

$$a = \frac{b}{2} - e \dots\dots\dots (49)$$

式中:

b ——平行于 x 轴的基础底面边长(m);

l ——平行于 y 轴的基础底面边长(m);

a ——合力作用点至基础底面最大压力边缘的距离(m);

e ——偏心距(m)。

b) 矩形基础承受双向偏心荷载时, 如图 10 所示。

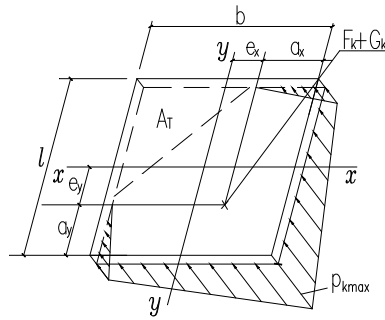


图 10 在双向偏心荷载作用下矩形基础底面部分脱开时的基底压力

$$p_{k \max} = \frac{G_k + F_k}{3a_x a_y} \dots\dots\dots(50)$$

$$a_x = \frac{b}{2} - e_x \dots\dots\dots(51)$$

$$a_y = \frac{l}{2} - e_y \dots\dots\dots(52)$$

$$e_x = \frac{M_{ky}}{G_k + F_k} \dots\dots\dots(53)$$

$$e_y = \frac{M_{kx}}{G_k + F_k} \dots\dots\dots(54)$$

式中：

M_{kx} 、 M_{ky} ——相应于荷载效应标准组合时，作用于基础底面绕 x、y 轴的力矩(kN·m)；

a_x ——合力作用点至 e_x 一侧基础边缘的距离(m)；

a_y ——合力作用点至 e_y 一侧基础边缘的距离(m)；

e_x ——x 方向的偏心距(m)；

e_y ——y 方向的偏心距(m)。

9.2.4 矩形基础基底脱开地基土面积不应大于全部面积的 1/4，应满足如下要求：

a) 承受单向偏心荷载时

$$3a \geq 0.75b \dots\dots\dots(55)$$

b) 承受双向偏心荷载时

$$a_x a_y \geq 0.125bl \dots\dots\dots(56)$$

9.2.5 多功能杆结构宜考虑地基变形。

9.3 基础设计

9.3.1 多功能杆结构基础的设计应按 GB 50007 及 JGJ 94 的规定执行。

9.3.2 多功能杆采用单桩基础和钢筋混凝土扩展基础时应满足下列要求：

a) 单桩基础的设计，可根据桩顶水平位移允许值及桩身强度按下列规定计算：

- 1) 桩顶水平位移允许值应小于 10 mm，桩身配筋率不宜少于 0.65%，必要时还应验算桩身裂缝；

- 2) 根据桩顶的水平力和力矩的大小,按 m 值法计算桩顶的变位及桩身内力,验算桩身的截面承载力时,可考虑作用于该截面上的轴压力,按压弯构件计算。
 - b) 采用钢筋混凝土扩展基础时,应根据上部结构作用效应计算基础强度和验算地基承载力并保证基底脱离基土面积不大于全部面积的 $1/4$ 。
- 9.3.3 多功能杆采用钢桩基础时应满足下列要求:
- a) 钢桩基础应根据具体条件分别进行承载能力计算和稳定性验算;
 - b) 钢桩基础应计算其水平位移及转角;
 - c) 验算上部单管杆的横向变形时,应综合考虑钢桩基础的水平位移与转角;
 - d) 钢桩基础应按相应规范要求做好防腐处理。
- 9.3.4 对存在液化土层的地基,基础设计应按 GB 50011 的要求,根据多功能杆结构的抗震设防类别及地基的液化等级采取相应的抗液化措施。
- 9.3.5 多功能杆结构基础上的地脚锚栓设计应满足如下要求:
- a) 多功能杆结构锚栓应根据上部钢杆桅结构传到杆脚的竖向力、水平力、弯矩等进行设计,考虑安装构造要求并根据基础顶后浇混凝土情况进行必要验算;
 - b) 地脚锚栓的埋设深度应按受拉钢筋锚固长度确定,当埋设深度受限制时,可在锚栓上增设锚板;
 - c) 锚栓间距不宜小于 $4d$;锚栓中心至混凝土构件边缘距离不宜小于 $4d$ 和 100mm 的较大值。上述要求不满足时,应采取在锚固长度范围内配置横向构造钢筋等措施;
 - d) 锚栓设计要考虑上部钢杆桅结构安装调节及基础预埋件埋设施工的实际误差情况,对杆柱底板锚栓孔作相应扩大,以便于安装时调整,但安装调节完毕后应加厚垫片以满足锚栓固定的要求;
 - e) 杆脚底板安装后应与下部混凝土支撑面贴合紧密,不得长期悬空。当杆脚底板下设置后浇混凝土层时,应按压弯构件验算施工期悬空段锚栓的强度与稳定。

附录 A
(资料性)
法兰盘内力计算

- A.1 法兰盘内力精确计算可根据板块的支承情况采用有限元法进行。
- A.2 法兰盘内力也可参照如下简化方法计算：
- a) 法兰盘受弯计算简图如图 A.1 所示：

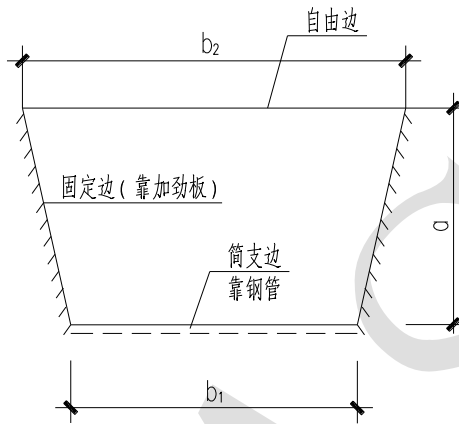


图 A.1 法兰盘受弯计算简图

- b) 板中最大弯矩：

单位板宽法兰板最大弯矩 M_{max} 应按下列公式算：

$$M_{max} = m_b q b^2 \dots\dots\dots (A.1)$$

$$q = \frac{N_{tmax}}{b \cdot a} \dots\dots\dots (A.2)$$

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

a ——固结边长度 (mm)；

b_1 ——法兰板筒支边长度 (mm)；

b_2 ——法兰板自由边长度 (mm)；

N_{tmax} ——单个螺栓最大拉力设计值 (kN)；

m_b ——弯矩计算系数，按表 A.1 的规定取值。

表 A.1 均布荷载下有加劲肋法兰弯矩计算系数 m_b 和加劲板反力比 α

a/b	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85
m_b	0.0785	0.0834	0.0874	0.0895	0.0900	0.0901	0.0900	0.0897	0.0892	0.0884	0.0872
α	0.67	0.71	0.73	0.74	0.76	0.79	0.80	0.80	0.81	0.82	0.83
a/b	0.9	0.95	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.75	2	2
m_b	0.0860	0.0848	0.0843	0.0840	0.0838	0.0836	0.0835	0.0834	0.0833	0.0833	0.0833
α	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	1.0

注：上表适用于有加劲肋板的法兰计算，假设法兰板支承条件为一边简支，两边固结，另外一边自由。

CSAS

