

DB33

浙 江 省 地 方 标 准

DB 33/T 856—2012

特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南

Guidelines for long span steel box girder suspension bridge

2012 - 03 - 09 发布

2012 - 04 - 09 实施

浙江省质量技术监督局 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、符号	2
3.1 术语	2
3.2 符号	3
4 材料	6
4.1 混凝土	6
4.2 普通钢筋及预应力筋	6
4.3 高强度钢丝及钢丝绳	6
4.4 结构用钢材	7
4.5 其他	7
5 作用	7
5.1 一般规定	7
5.2 各类作用	7
5.3 作用效应组合	8
6 总体设计及计算	8
6.1 一般规定	9
6.2 抗风设计	9
6.3 抗震设计	10
6.4 总体计算	11
7 桥塔	12
7.1 一般规定	12
7.2 结构型式	12
7.3 结构计算	12
7.4 构造要求	12
7.5 附属设施	13
8 锚碇	13
8.1 一般规定	13
8.2 结构型式	13
8.3 结构计算	13
8.4 构造要求	14
8.5 附属设施	14
9 缆索系统	14

- 9.1 主缆..... 15
- 9.2 吊索..... 17
- 9.3 索夹..... 18
- 9.4 索鞍..... 23
- 10 钢箱梁..... 30
 - 10.1 结构型式..... 31
 - 10.2 结构计算..... 31
 - 10.3 构造要求..... 31
 - 10.4 附属设施..... 32
 - 10.5 其他..... 32
- 11 约束系统及伸缩装置..... 32
 - 11.1 结构约束体系..... 32
 - 11.2 支座的设计与选型（竖向、横向支座）..... 33
 - 11.3 伸缩装置的设计与选型..... 33
- 附录 A（规范性附录） 抗风设计 34

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009 《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写规则》给出的规则进行起草。

本标准由浙江省交通运输厅提出并归口。

本标准起草单位：浙江省舟山连岛工程建设指挥部、中交公路规划设计院有限公司、中国铁道科学研究院。

本标准主要起草人：宋晖、许宏亮、王武刚、张克、徐军、刘波、唐茂林、王晓冬、常志军、曾宇、刘晓光、张玉玲、田越、陶晓燕。

特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南

1 范围

本标准规定了跨径1 500 m~2 000 m之间的双塔钢箱梁悬索桥材料、作用、总体设计及计算、桥塔、锚碇、缆索系统、钢箱梁和约束系统及伸缩装置等方面的内容。

本标准适用于跨径1 500 m~2 000 m的双塔钢箱梁悬索桥设计，跨径1 000 m~1 500 m的双塔钢箱梁悬索桥设计可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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 467 阴极铜
- GB/T 470 锌锭
- GB/T 699 优质碳素结构钢
- GB 700 碳素结构钢
- GB 711 优质碳素结构钢热轧厚钢板和宽钢带
- GB/T 714 桥梁用结构钢
- GB/T 1228 钢结构用高强度大六角头螺栓
- GB/T 1229 钢结构用高强度大六角螺母
- GB/T 1230 钢结构用高强度垫圈
- 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 3274 碳素结构钢和低合金钢热轧厚钢板和钢带
- GB/T 5313 厚度方向性能钢板
- GB 7659 焊接结构用碳素钢铸件
- GB/T 9919 钢丝绳
- GB 9945 造船用球扁钢
- GB 11352 一般工程用铸造碳钢件
- GB/T 17101 桥梁缆索用热镀锌钢丝
- JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则
- JTG D60-2004 公路桥涵设计通用规范
- JTG/T D60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范
- JTG D62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG D63-2007 公路桥涵地基与基础设计规范
- JTJ025-86 公路桥涵钢结构及木结构设计规范
- JT/T 395 悬索桥预制主缆丝股技术条件

JT/T 449 公路悬索桥吊索

YB/T 036.3 铸钢件

3 术语、符号

3.1 术语

3.1.1

悬索桥 suspension bridge

利用主缆及吊索作为加劲梁的悬挂体系，将荷载作用传递到桥塔、锚碇的桥梁

3.1.2

桥塔 pylon

用以支承主缆并将荷载通过基础传递给地基的结构

3.1.3

锚碇 anchorage

锚固主缆索股，传递主缆拉力，支承或嵌固于地基的结构

3.1.4

锚固系统 anchorage system

将主缆的索股与锚碇连接的结构构造

3.1.5

前锚面 front anchor facet

锚固系统的前锚面中邻近索股的锚固面

3.1.6

加劲梁 stiffening girder

提供桥面、直接承受汽车荷载的梁体结构

3.1.7

分体式钢箱梁 individual steel box girder connected by crossbeams

两个及以上单独的钢箱通过横梁连接而成的一种加劲梁断面型式

3.1.8

主缆 main cable

以桥塔及支墩为支承、两端锚固于锚碇，并通过吊索悬挂加劲梁的缆索结构

3.1.9

主缆锚跨 anchor span of main cable

位于散索鞍和前锚面之间的主缆结构部分

3.1.10

预制平行丝股 prefabricated parallel wire strand

由工厂化预制高强镀锌钢丝组成的平行丝股

3.1.11

吊索 hanger

连接主缆与加劲梁的构件

3.1.12

缆扣 cable buckle

主缆与加劲梁之间的一种约束连接构造

3.1.13

锚头 socket

用于主缆预制索股两端与锚固系统连接的构件或用于吊索两端与加劲梁及主缆索夹联结的构件

3.1.14

索夹 cable clamp (cable band)

箍紧主缆的构件，当设置吊索时，将吊索与主缆相连接

3.1.15

索鞍 saddle

为主缆提供支承并使主缆平顺地改变方向的构件

3.1.16

预制平行钢丝索股法 prefabricated parallel wire strand erection methods (PPWS法)

将工厂化预制的平行高强钢丝组成的索股运至工地安装的施工方法

3.2 符号

3.2.1 几何特征

3.2.1.1 长度

l_{sae} —— 钢丝在锚杯内的锚固长度

l_{sc}	—— 锚杯内铸体材料的有效长度
l_c	—— 索夹长度
l_k	—— 索夹螺杆握距
l_{sa}	—— 鞍槽拉杆中心处鞍槽侧壁的弧长
l_e	—— 散索鞍摆轴、滚轴的有效接触长度
s_{cb}	—— 索夹螺杆轴向间距
H	—— 鞍槽内中央列索股总高度
h	—— 骑跨式索夹承索槽槽深
h_{ss}	—— 鞍座槽路中索股高度
t_c	—— 索夹壁厚
t_{sm}	—— 铸体材料有效长度内的锚杯平均壁厚
b	—— 鞍座槽路宽度
δ	—— 骑跨式索夹承索槽槽壁根部厚度
Δ_{tc}	—— 骑跨式索夹承索槽下的壁厚增厚
Δ_{wt}	—— 主缆钢丝直径的允许正偏差

3.2.1.2 直径 半径

d_w	—— 主缆钢丝直径
d_d	—— 主缆的设计直径
d_c	—— 主缆在索夹处的设计直径、索夹内孔的设计直径
d_h	—— 钢丝绳吊索公称直径
d_{cb}	—— 索夹螺杆的有效直径
d_{sr}	—— 滚轴式散索鞍的滚轴直径
r_{hb}	—— 钢丝绳吊索在索夹上的弯曲半径
r_e	—— 销接式索夹吊耳板与索夹壁间的过渡圆弧半径
r_v	—— 鞍座承索槽底部立面圆弧半径
r_h	—— 散索鞍承索槽侧壁的平面圆弧半径
r_{sb}	—— 摆轴式散索鞍的摆轴断面圆弧半径
r_c	—— 骑跨式索夹承索槽内圆弧半径

3.2.1.3 角度

θ_{tm}	—— 设计恒载的中跨缆力对应的主缆中跨切线角
θ_{ts}	—— 设计恒载的边跨缆力对应的主缆边跨切线角
θ_{sa}	—— 散索鞍处计算缆力对应的主缆锚跨切线角
θ_{ss}	—— 散索鞍处计算缆力对应的主缆边跨切线角
θ	—— 钢桁架梁腹杆与弦杆的夹角
α_s	—— 主缆在鞍槽上的包角
α_c	—— 骑跨式索夹承索槽在索夹上的包角
β_c	—— 骑跨式索夹承索槽张开角
β_s	—— 索股锚头的锚杯内锥面母线与轴线的夹角
φ	—— 索夹在主缆上的安装倾角

φ_{sc} —— 锚杯内铸体上压力线与锚杯内锥面母线的夹角

3.2.2 应力

σ —— 材料计算应力

σ_b —— 主缆钢丝公称抗拉强度

σ_{ycb} —— 索夹螺杆材料的屈服强度

σ_{yc} —— 索夹材料的屈服强度

σ_j —— 散索鞍摆轴、滚轴的接触应力

σ_t —— 索股锚头锚杯的环向应力

$[\sigma_j]$ —— 材料容许接触应力

E —— 钢材材料的弹性模量

3.2.3 力

F_c —— 单根主缆的拉力

F_{ct} —— 主缆紧边拉力

F_{cl} —— 主缆松边拉力

F_{cm} —— 设计恒载的中跨缆力

F_{cs} —— 设计恒载的边跨缆力

F_{fc} —— 索夹抗滑摩阻力

F_{sp} —— 加劲梁架设期间主索鞍的顶推力

F_t —— 锚杯的环向拉力

$f_h(h)$ —— 鞍槽内最高索股顶至计算高度处(h)的侧向压力

f_H —— 主索鞍鞍槽内高度H范围中主缆索股的总侧向力

f_{Hs} —— 散索鞍鞍槽内高度H范围中主缆索股的总侧向力

f_{sr} —— 主缆各列索股的向心压力

f_v —— 鞍槽内中央列索股单位体积竖向力

G_s —— 索鞍重力

M_{rH} —— 由侧压力 f_H 产生的总弯矩

N_c —— 主缆上索夹的下滑力

N_h —— 吊索拉力

N_s —— 索股拉力

N_{sb} —— 鞍槽拉杆单根拉力

n_{tra} —— 鞍槽拉杆拉力

P_{tot} —— 索夹上螺杆总的设计夹紧力

P_b —— 索夹上单根螺杆的安装夹紧力

P_b^c —— 索夹上单根螺杆的设计夹紧力

R —— 散索鞍摆轴、滚轴上的总荷载

v —— 单根钢丝与合金在单位面积上的附着力

3.2.4 计算系数

- K —— 安全系数
 K_a —— 锚碇抗滑稳定安全系数
 K_c^c —— 主缆应力验算安全系数
 K_{fc} —— 索夹的抗滑安全系数
 k —— 索夹紧固压力分布不均匀系数
 μ —— 摩擦系数
 V —— 主缆的设计空隙率
 V_c —— 主缆在索夹内的设计空隙率
 V_s —— 主缆在鞍槽内的设计空隙率

3.2.5 数量

- n —— 各列索股股数
 n_s —— 单根主缆中索股总股数
 n_{sc} —— 鞍槽内中央列索股股数
 n_{sb} —— 鞍槽拉杆根数
 n_{ws} —— 每根索股的钢丝根数
 n_{wt} —— 鞍座槽路内单排钢丝数量
 n_{cb} —— 索夹上安装的螺杆总根数
 n_{sr} —— 滚轴式散索鞍的滚轴根数
 n_{tot} —— 单根主缆中钢丝总根数

4 材料

4.1 混凝土

- 4.1.1 用于悬索桥各部分构件的混凝土，其强度等级、标准值、设计值、弹性模量、剪切模量应按 JTG D62-2004 的规定取用。
- 4.1.2 混凝土桥塔塔身的混凝土强度等级不应低于 C50。
- 4.1.3 锚体混凝土强度等级不应低于 C30(60 天龄期)，局部高应力区域混凝土强度等级不应低于 C40。

4.2 普通钢筋及预应力筋

钢筋混凝土及预应力混凝土构件所采用的普通钢筋和预应力筋，其钢筋类别、抗拉强度和弹性模量应按 JTG D62-2004 的规定取用。

4.3 高强度钢丝及钢丝绳

- 4.3.1 主缆索股、吊索所用高强度钢丝及钢丝绳应采用热镀锌线材。
- 4.3.2 镀锌高强度钢丝的技术指标应符合 GB/T 17101 的规定。

4.3.3 镀锌钢丝绳的技术指标宜符合 GB/T 9919 的规定。

4.4 结构用钢材

4.4.1 钢桥塔、钢箱梁的钢材可采用 GB/T 714、GB 700、GB/T 1591 规定的或其他适用于桥梁结构的碳素结构钢和低合金结构钢。当焊接结构要求钢板厚度方向性能时，其材质应符合 GB/T 5313 的规定。

4.4.2 索鞍、索套、索夹本体材料采用铸钢时，其技术条件宜符合 GB 11352、GB 7659、YB/T 036.3 的规定。

4.4.3 索鞍、索夹、预应力锚固系统的拉杆宜采用合金结构钢，其技术条件宜符合 GB/T 3077 的规定。

4.4.4 高强度螺栓连接副的技术条件宜符合 GB/T 1228、GB/T 1229、GB/T 1230、GB/T 1231 的规定。

4.4.5 锚头锚杯、盖板、销接式锚头耳板及销轴等应选用优质钢材制造，其技术条件宜符合 GB 11352、GB/T 699、GB/T 3077 的规定。

4.4.6 铸焊构件采用的结构用钢板技术条件宜符合 GB 711、GB 3274 的规定。

4.4.7 球扁钢的技术条件宜符合 GB 9945 的规定。

4.5 其他

4.5.1 焊接材料应保证焊缝与主体钢材技术条件相适应，并应通过焊接工艺评定确定。

4.5.2 热铸锚头铸体材料应选用低熔点锌铜合金，技术条件宜符合 GB/T 470、GB/T 467 的规定。

5 作用

5.1 一般规定

5.1.1 作用的计算

公路悬索桥设计中作用的计算，除本节有明确规定外，应符合现行 JTG D60-2004 的要求。

5.1.2 混凝土构件

5.1.2.1 公路悬索桥设计中作用的分类与组合，应符合现行 JTG D60-2004 的要求。

5.1.2.2 结构重要性系数的确定，应符合现行 JTG D60-2004 的要求，并根据结构计算状态确定作用效应分项系数和频遇值、准永久值系数。

5.1.2.3 基础稳定性验算时，各分项系数为 1.0。

5.1.3 钢构件

作用的分类与组合应符合容许应力法相关规定。

5.2 各类作用

5.2.1 总则

5.2.1.1 永久作用计算应按现行 JTG D60-2004 的规定执行。其中基础变位作用包括桥塔竖向变位、锚碇水平及竖向变位。结构重力计算时，当钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土含筋率（含普通钢筋和预应力钢筋）大于 1%（体积比）时，其重度可按单位体积中扣除钢筋体积的混凝土的自重加所含钢筋的自重之和计算。

5.2.1.2 汽车荷载、汽车冲击力和制动力、人群荷载均应按现行 JTG D60-2004 的规定采用。

5.2.2 风荷载

作用在悬索桥上的风荷载应通过专题研究确定，需考虑顺桥向（X）、横桥向（Y）和竖桥向（Z）三个分量，各构件的风荷载宜按本标准相应部分及其它有关规范的规定计算，并考虑以下两种不同的情况分别计算风荷载：

- a) 当桥面高度静阵风风速 ≥ 30 m/s 时，按照桥面静阵风风速 30 m/s（有活载）计算风荷载；当桥面高度静阵风风速 < 30 m/s 时，按照桥面静阵风风速计算风荷载；
- b) 按照百年一遇设计风速计算成桥状态风荷载，按照 20 年一遇设计风速计算施工状态风荷载。

5.2.3 温度作用

考虑温度作用时，应根据当地的具体情况，结构物使用的材料和施工条件等因素计算由温度引起的结构效应。温度作用应按现行 JTG D60-2004 的规定执行。

混凝土桥塔两侧的日照温差值及内外温差值可取 5°C 。

5.2.4 悬索桥支座摩阻力

悬索桥支座摩阻力应按现行 JTG D60-2004 的规定计算。

5.2.5 地震作用

地震作用宜通过专题研究确定。

5.2.6 撞击作用

需要考虑船舶撞击作用时，撞击作用通过专题研究确定。

5.2.7 施工荷载

进行施工计算时，应计入施工中可能出现的施工荷载，包括架设机具和材料、施工人群、桥面堆载、临时配重以及风荷载等，以考虑设计结构的施工安全性。

5.3 作用效应组合

5.3.1 在进行作用效应组合时，主缆计算拉力应将体系温度作用作为永久作用计入，其余应符合 JTG D60-2004 中有关作用效应组合的规定。

5.3.2 在进行抗震验算时，宜将桥面上 0.2 倍的汽车设计荷载作为水平向附加质量计入结构质量中。

6 总体设计及计算

6.1 一般规定

6.1.1 悬索桥总体设计应根据桥址处的地形、地质、气象、水文、通航、防洪等建设条件，结合结构受力合理性以及景观要求，对跨径布置、桥塔及锚碇设置、结构体系、主缆及吊索布置、加劲梁型式、桥面布置等进行综合考虑，合理设计。

6.1.2 悬索桥总体设计应考虑抗风、抗震的要求，并进行抗风、抗震专题研究。

6.1.3 悬索桥加劲梁的结构体系可根据具体情况选择纵飘体系、半飘体系、纵向约束体系、简支体系及纵向、竖向约束体系等。

6.1.4 悬索桥边中跨比一般为 0.3~0.45。

6.1.5 悬索桥全桥结构刚度主要由主缆垂跨比、边中跨比、桥塔刚度等参数决定，应通过技术经济综合比选确定。主缆垂跨比一般宜在 1/9~1/12 的范围内选择。

6.1.6 短吊索的长度应考虑加劲梁架设备的要求。跨中短吊索自主缆中心到加劲梁侧锚点对应处的桥面高度不宜小于 3.5 m；边跨短吊索长度则应按照满足索夹受力及构造要求、并尽量减小位移量的原则确定。

6.1.7 悬索桥吊索间距应综合考虑加劲梁运输架设条件以及吊索的受力情况确定。

6.1.8 为提高结构的抗风稳定性、减小吊索弯折疲劳及梁端位移，可采用柔性缆扣。

6.1.9 悬索桥加劲梁的宽度除应满足技术标准外，还应考虑吊索锚固构造及检修道设置；加劲梁的高度除满足受力、刚度要求外，还应满足抗风稳定性的要求。加劲梁外形应通过气动选形并满足抗风要求。

6.1.10 悬索桥的整体竖向刚度的控制标准应考虑如下要求：

- a) 在各种工况下，结构各部分不得侵入通航净空；
- b) 应避免下垂的视觉效果；
- c) 变形不致导致桥面排水不畅；
- d) 当不计冲击力的汽车荷载引起的加劲梁最大竖向挠度值大于跨径的 1/250 时，应满足舒适性评价指标（ISO 2631 或 Sperling 方法）。

6.1.11 悬索桥加劲梁在强风（桥面无车）作用下，最大横向位移不宜大于跨径的 1/150。

6.1.12 桥面变形后的倾斜率在基本组合作用时不宜大于 6%、偶然组合作用下不宜大于 10%。

6.1.13 避雷系统、航空障碍系统、导航、助航设施应根据相关要求进行专项设计。

6.2 抗风设计

6.2.1 一般原则

6.2.1.1 悬索桥抗风设计除了满足本标准的设计规定外，尚应符合 JTG/T D60-01-2004 和国家其它有关强制性标准的设计规定。

6.2.1.2 悬索桥抗风设计应包括静力抗风设计和动力抗风检验两部分。静力抗风设计是指：静力风荷载作用下的结构强度、刚度和稳定性的设计计算；动力抗风检验是指：动力风荷载作用下的结构强度、刚度和稳定性的试验和计算检验，有限振幅的舒适度及疲劳检验。抗风设计应遵照本标准附录 A 执行。

6.2.1.3 悬索桥抗风设计应遵循原则：

- a) 按桥梁设计风荷载的重现期，在桥位所在区域可能出现的最大风速下，须保证桥梁不会发生毁灭性的自激发散振动；
- b) 在计入风力的各种组合情况下，须保证桥梁满足强度及刚度要求，且不会发生静力失稳；
- c) 桥梁可能出现的非破坏性风致振动的振幅，应限制在满足使用舒适度、行车安全和抗疲劳要求的范围内；

- d) 可通过施加改善桥梁空气动力特性的措施、设置合适的阻尼装置或增加结构刚度、质量等，使桥梁满足抗风设计要求。

6.2.1.4 大跨度悬索桥加劲梁断面气动选型的数值方法宜采用计算流体动力学和二维颤振分析相结合的方法，以颤振稳定性能为主要评价标准。

6.2.1.5 桥塔断面气动选型宜采用计算流体动力学方法，以涡振性能和静风荷载为评价标准。

6.2.1.6 钢箱梁断面应通过风洞试验确定，并经全桥风洞模型试验验证。当颤振检验风速较高时，钢箱梁可采用分体式钢箱梁。

6.2.1.7 提高颤振性能的措施应通过气弹模型风洞试验确定。可采用增设中央稳定板等措施提高结构的颤振临界风速。

6.2.1.8 钢箱梁应进行大尺度节段模型涡振风洞试验。抑制钢箱梁涡振可采用导流板、格栅、质量阻尼器等气动措施。

6.2.1.9 钢箱梁悬索桥应进行静风稳定性能分析与评价。

6.2.2 静力抗风设计包括主要构件的静力风荷载及其响应的计算和验算

6.2.2.1 悬索桥桥塔、主缆、吊索设计的静力风荷载应分别考虑横桥向和顺桥向分量的两个作用工况，并与其它荷载组合后验算结构强度和刚度。

6.2.2.2 悬索桥钢箱梁设计的静力风荷载应分别考虑横桥向+竖桥向、顺桥向+竖桥向两个工况，并与其它荷载组合后验算结构强度和刚度。

6.2.3 动力抗风检验包括主要构件在动力风荷载作用下的振动响应的试验和计算检验

6.2.3.1 悬索桥桥塔动力抗风检验应分别考虑自立状态的驰振失稳和涡振刚度以及成桥状态的抖振强度，其中抖振强度检验时应与其它荷载作用进行组合。

6.2.3.2 悬索桥主缆动力抗风检验应分别考虑施工阶段和成桥状态的抖振强度，并与其它荷载作用进行组合。

6.2.3.3 悬索桥吊索动力抗风检验应分别考虑尾流驰振失稳、涡振刚度和抖振强度，其中抖振强度检验时应与其它荷载作用进行组合。

6.2.3.4 悬索桥加劲梁动力抗风检验应分别考虑施工阶段和成桥状态的颤振稳定性、涡振刚度和抖振强度，其中抖振强度检验时应与其它荷载作用进行组合。

6.2.4 风致行车安全评价

当桥面最大设计静阵风风速大于25m/s且不关闭交通时，应开展风致行车安全评价。应在对大桥在路网中的重要程度及桥位处风环境深入研究的基础上，进行综合技术经济比选，确定是否设置风障以保障行车安全。风障的断面型式、布置方式应通过专题研究（包括数值分析、风洞试验、现场效果测试等）确定，并应关注风障对颤振、涡振及静风荷载的影响。

6.3 抗震设计

6.3.1 一般原则

6.3.1.1 桥梁选址应选择设防烈度较低和对抗震有利的地段通过，尽量避开不良地质条件地区。对非岩石地基，尤其砂土液化地区，应对基础采取加强措施。

6.3.1.2 桥梁抗震设计应结合地形、地质条件、构造特点、地震强度、工程规模、震害经验及景观要求等因素，确定合理的桥塔及基础型式等。

6.3.1.3 高设防烈度区宜采用对称的结构形式、结构体系。9度或9度以上设防烈度地区，悬索桥塔与梁间宜采用塔梁弹性约束或阻尼约束体系。

6.3.1.4 应保持结构抗震在经济与抗震安全之间的合理平衡。

6.3.2 抗震结构设计

6.3.2.1 在进行悬索桥减震设计时，重点考虑在加劲梁与桥塔间、加劲梁与锚碇间设置减震装置。

6.3.2.2 基于抗震设防水准下的结构抗震性能研究，确定减震装置类型及参数。

6.3.2.3 常用的减震装置包括：粘滞阻尼器、液压缓冲装置、金属阻尼器等。

6.3.2.4 减震装置的使用寿命不应少于20年，并考虑可检、可修及可更换性。

6.3.2.5 应通过试验对减震装置的变形、阻尼比、刚度等参数进行验证。试验值与设计值的差别应在10%以内。

6.3.3 抗震设防水准及性能要求

本标准推荐按照两个概率设防水准进行结构抗震设计，结构性能要求及抗震设计中地震效应的计算方法见表1。

表1

抗震设防水准	性能要求	验算方法	推荐重现期
E1 地震作用	地震后能够保持其正常使用功能， 结构处于弹性工作阶段。	多振型线性 反应谱方法	475 年 (50 年超越 概率 10%)
E2 地震作用	地震主要受力结构不破坏或轻微损伤， 不修复或短期内能恢复其正常使用功能， 结构局部进入弹塑性工作阶段。	多振型线性 反应谱方法 弹塑性时程 反应分析方法	2475 年 (50 年超越 概率 2%)

在大桥的初步设计阶段之前应该完成针对性的地震安全性评价。可根据大桥重要性适当提高设防水准E1。

6.4 总体计算

6.4.1 总体计算应采用有限位移理论。总体计算模式宜按空间结构体系进行。

6.4.2 在结构总体受力分析中，主体结构不计汽车荷载冲击力的影响，但支座及局部构件应计入汽车荷载冲击力。

6.4.3 计算各种作用效应组合下的结构内力及位移，提出结构设计所需要的主缆及吊索的控制拉力、加劲梁及桥塔（墩）身各截面的内力和控制截面的竖向挠度及水平变位、支座反力、梁端转角（面内、面外）及纵向位移。

6.4.4 根据设计成桥线形、恒载状况推算空缆线形，计算索股无应力长度、鞍座预偏量、索股初始张力、索夹位置及吊索无应力长度。

7 桥塔

7.1 一般规定

7.1.1 悬索桥桥塔为压弯构件，受力以压力为主，可根据水文、地质条件的不同选用桩基础或沉井等，并根据结构的受力要求选择适宜的持力土层。

7.1.2 悬索桥桥塔一般设计为柔性结构，根据不同需要采用混凝土桥塔或钢桥塔型式。

7.1.3 塔柱与加劲梁间应留有适当的宽度以满足加劲梁横向温度变形的需要。

7.2 结构型式

7.2.1 混凝土桥塔一般采用塔柱及横梁组成的门式框架结构；塔柱及横梁一般采用空心箱形截面；可根据受力要求及景观要求确定横梁的数量和位置。

7.2.2 钢桥塔塔柱截面一般宜选择带有切角的箱形，具体形状应通过风洞试验确定；可根据受力要求及景观要求确定横梁的数量、位置和造型。

7.3 结构计算

7.3.1 桥塔计算可结合总体计算进行。桥塔宜采用空间图式进行整体分析计算，并计入结构非线性效应。

7.3.2 混凝土桥塔应进行截面承载力验算和裂缝宽度验算；钢桥塔应进行截面应力验算和构件局部稳定验算；桥塔应验算整体稳定性。

7.4 构造要求

7.4.1 混凝土桥塔

7.4.1.1 塔柱顶段应有足够厚度的实体段，塔顶设置钢格栅时，其尺寸应与主索鞍匹配，塔柱底部应设置实体段或塔座。

7.4.1.2 塔柱与横梁连接处的塔壁应局部加厚。

7.4.1.3 塔柱和横梁应设置通风孔，间距宜为 10 m~15 m。

7.4.1.4 塔柱受力钢筋和普通箍筋应符合下列规定：

- a) 竖向受力钢筋直径应不小于 25 mm；
- b) 受力钢筋的截面面积不宜小于混凝土截面面积的 1%；
- c) 箍筋直径应不小于 12 mm，间距不大于 200 mm。

7.4.2 钢桥塔

7.4.2.1 钢混结合一般采用螺栓锚固方式、埋入式或螺栓锚固与埋入结合式。承台处结合段连接方式宜采用螺栓锚固式或螺栓锚固与埋入结合式，塔柱结合段连接方式宜采用埋入式。

7.4.2.2 塔柱节段高度划分应充分考虑加工设备的加工能力和吊装设备的吊装能力。

- 7.4.2.3 钢桥塔外壁板和竖向隔板的厚度根据受力确定，但外壁板及主要受力隔板不宜小于 20 mm。
- 7.4.2.4 箱室内应设置水平横隔板，间距不宜大于 3 000 mm。
- 7.4.2.5 塔柱节段连接宜采用金属接触与高强度螺栓结合的方式。
- 7.4.2.6 桥塔制振措施除通过风洞试验优化结构外形外，还可考虑安装质量调谐阻尼器或晃动调谐阻尼器达到减震目的。

7.5 附属设施

- 7.5.1 桥塔塔柱内应设置爬梯、升降机或电梯，并配备完善的照明系统。
- 7.5.2 塔内通道及横梁顶面两侧应设安全栏杆。
- 7.5.3 塔顶应设置避雷装置，塔顶及塔身必要时应设置航空障碍标志。塔柱（加劲梁）必要时应设置助航设施。
- 7.5.4 塔柱顶应设置鞍罩或鞍室，应设置可靠的防水构造，宜设置除湿系统。
- 7.5.5 桥塔塔柱及横梁内外应设置有效的防、排水系统。

8 锚碇

8.1 一般规定

- 8.1.1 锚碇基础设计时应结合 JTG D63-2007 有关规定，进行工程地质勘察，查明岩土的物理力学性质、地下水埋藏及不良地质等详细情况。
- 8.1.2 锚体设计的钢筋混凝土部分除符合本章规定外，应符合 JTG D62-2004 有关规定。
- 8.1.3 对非岩石地基或全风化岩基上的锚碇变位应进行建设及运营期监控。锚碇水平变位宜 $\leq 0.0001L$ （主跨跨径）、竖向变位宜 $\leq 0.0002L$ （主跨跨径）。

8.2 结构型式

- 8.2.1 锚碇在结构上主要分为重力式锚碇、隧道式锚碇和岩锚。
- 8.2.2 重力式锚碇由锚块、散索鞍支墩、锚室和基础组成；隧道式锚碇由锚塞体、散索鞍支墩、锚室组成；岩锚由埋于岩体中的锚固拉杆组成。
- 8.2.3 重力式及隧道式锚碇的锚固系统中的型钢锚固系统由锚梁、锚杆组成；预应力锚固系统由预应力体系、索股锚固连接器组成。

8.3 结构计算

8.3.1 一般要求

- 8.3.1.1 重力式锚碇结构整体稳定及基底应力验算应符合 JTG D63-2007 的规定外，尚应满足下列要求：
 - a) 锚碇整体抗滑动稳定安全系数：基本组合下 ≥ 2.0 ，地震组合下 ≥ 1.1 ；
 - b) 锚碇基础应分别进行施工阶段、运营阶段的基底应力验算，并应保证锚碇基底前后端（包括岩石地基的情况）不出现应力重分布；
 - c) 锚固系统中锚固主缆的拉杆或型钢锚杆安全系数 ≥ 2.0 。
- 8.3.1.2 隧道式锚碇位置宜选择岩体完整稳定的区域。对隧道锚应进行岩土力学数值模型分析，验算围岩稳定及锚塞体抗拔。锚塞体抗拔安全系数 ≥ 2.0 。

8.3.1.3 对散索鞍支墩及锚固系统前、后锚面宜按空间结构分析其应力状况，并与常规计算对比分析后进行配筋设计。

8.3.2 型钢锚固系统

8.3.2.1 锚杆的强度验算应计入索股方向与锚杆轴线的偏差及双束锚杆两侧拉力差的影响。

8.3.2.2 对锚梁翼缘面直接承压的混凝土应进行局部承压应力验算。

8.3.3 预应力锚固系统

8.3.3.1 预应力筋施加的有效预拉力不应低于索股拉力 N_s 的 1.2 倍。

8.3.3.2 索股锚固连接器应进行承压和抗剪验算。

8.3.3.3 拉杆设计计算时，应计入拉杆与索股拉力方向安装偏角产生的附加弯曲应力及拉杆间的拉力误差。

8.3.3.4 拉杆的设计内力应计入 10% 的偏差系数。

8.4 构造要求

8.4.1 锚室内锚面处应设置平台及便于上下的台阶。锚面上锚固点间距应考虑千斤顶布置及操作空间的需要。

8.4.2 锚体周围应布置有效的排水系统，锚室可借鉴隧道防水经验进行有效的防水设计，并设置可靠的防水构造。

8.4.3 设计重力式锚体时应合理考虑混凝土分层分块浇筑及埋设冷却水管等防裂措施，混凝土表面宜设置防裂钢筋网。

8.4.4 隧道锚洞壁应设计成阶梯式或底口大、上口小的形状。

8.4.5 锚塞体的截面尺寸应根据锚固系统类型和索股锚固面的布置确定。

8.4.6 锚塞体封顶混凝土可用微膨胀混凝土。

8.4.7 型钢锚固系统应符合以下要求：

- a) 锚梁、锚杆、支架采用型钢或由钢板焊接、栓接而成。锚梁可分段制造，用工地螺栓连接。锚梁与锚杆宜采用螺栓连接。
- b) 锚杆表面应进行无粘接处理。

8.4.8 预应力锚固系统应符合以下要求：

- a) 预应力筋宜采用高强度钢绞线。
- b) 索股锚固连接器应满足锚固预应力筋和连接拉杆的构造需要。

8.5 附属设施

8.5.1 锚室内应设置照明系统，检修通道及栏杆。

8.5.2 锚室内宜安装除湿系统或采取其他的防护措施。

9 缆索系统

9.1 主缆

9.1.1 一般规定

9.1.1.1 主缆材料及截面尺寸等设计参数应根据结构总体布置、计算缆力等确定。

9.1.1.2 主缆材料应采用镀锌高强度钢丝。

9.1.1.3 主缆用镀锌高强度钢丝直径 d_w 宜在 5.0 mm~5.5 mm 范围内选用, 钢丝公称抗拉强度 σ_b 不宜小于 1 670 MPa, 应符合 GB/T 17101 的规定。

9.1.1.4 主缆设计空隙率为: 一般截面空隙率 $V=18\sim20\%$, 索夹内截面空隙率 $V_c=16\sim18\%$ 。

9.1.2 结构型式

9.1.2.1 主缆常见的截面类型为由高强平行钢丝组成的圆形截面(图1)。为便于紧缆后将主缆压成圆形, 在架设索股时通常按照正六边形排列。

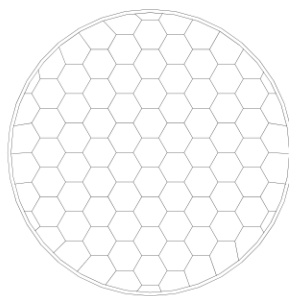


图1 主缆截面

9.1.2.2 主缆索股两端应设置锚头。锚头通过锚固系统与锚碇连接实现主缆锚固。

9.1.3 结构计算

9.1.3.1 构件强度验算时除本节有明确规定外, 应符合 JTJ 025-86 的规定。

9.1.3.2 设计计算中, 主缆的弹性模量取值宜不大于 2.0×10^5 MPa。

9.1.3.3 在永久作用+汽车(人群)荷载+体系温度作用组合下, 主缆应力安全系数不宜小于 2.3。

9.1.3.4 主缆线形及长度按照以下方法进行计算:

- 主缆线形和长度宜采用分段悬链线方程计算。
- 主缆预制索股制作长度应综合考虑实测钢丝弹性模量值、实验索股弹性模量值进行计算, 并计入索鞍处的曲线修正及锚跨段索股空间角度修正。
- 主缆预制索股制作长度应计入由制作误差、架设误差及地球曲率影响等引起的长度预留量。

9.1.3.5 锚头验算:

- 锚头锚杯内钢丝锚固长度应满足锚固强度的要求, 热铸锚可按式(1)计算:

$$l_{sae} \geq \frac{K\sigma_b}{4\nu} d_w \dots\dots\dots (1)$$

式中:

d_w —— 主缆钢丝直径, mm;

l_{sae} —— 主缆钢丝在锚杯内的锚固长度, mm, 见图 2;

σ_b —— 主缆钢丝公称抗拉强度, MPa;

K —— 钢丝锚固安全系数, 取 $K=2.5$;

ν —— 单根钢丝与合金在单位面积上的附着力, 无试验资料时:
铸体材料为热铸料, 可取 $\nu=25\text{MPa}$;
铸体材料为冷铸料, 可取 $\nu=19\text{MPa}$ 。

b) 锚头验算应包括支承面压应力、铸体材料有效长度内的平均壁厚 t_{sm} 及锚杯的环向应力 σ_t 。

锚杯与铸体材料相互作用示意图 2。

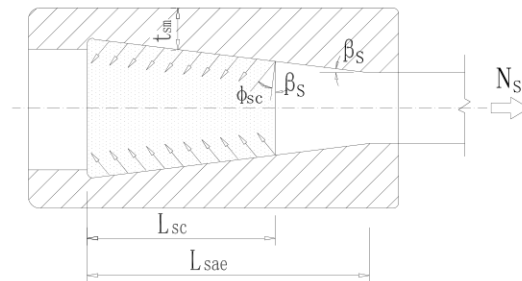


图2 锚杯与铸体材料相互作用示意

锚杯的环向应力可按式 (2) 计算:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{l_{sc} t_{sm}} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

σ_t —— 锚杯的环向应力, MPa;

l_{sc} —— 铸体材料的有效长度, $l_{sc} = \frac{2}{3} l_{sae}$, mm;

t_{sm} —— 铸体材料有效长度内锚杯的平均壁厚, mm;

F_t —— 锚杯环向拉力, N。可按式 (3) 计算:

$$F_t = \frac{N_s}{2\pi \cdot \tan(\varphi_{sc} + \beta_s)} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

N_s —— 索股拉力, N;

β_s ——锚杯内锥面母线与轴线的夹角， $\beta_s=7^\circ \sim 9.5^\circ$ ；

铸体材料为热铸料时，斜度宜取高值；

铸体材料为冷铸料时，斜度宜取低值；

φ_{sc} ——锚杯内铸体上压力线与锚杯内锥面母线的夹角；

铸体材料为热铸料时，可取 $\tan \varphi_{sc}=0.2$ ；

铸体材料为冷铸料时，可取 $\tan \varphi_{sc}=0.45$ 。

9.1.4 构造要求

9.1.4.1 采用 PPWS 法施工的预制平行索股构造应符合 JT/T 395 的规定。

9.1.4.2 与锚固系统连接的构件长度应考虑索股长度调整量和千斤顶张拉空间的需要。

9.1.4.3 主缆应设置有效的防护构造，防护构造型式有圆形丝加膩子的传统防护方法、异型钢丝加干燥空气除湿的防护方法，应在综合技术经济比选的基础上选择。缠丝材料应选择镀锌低碳钢丝。缠绕力应保证在成桥之后仍有一定的永存张力。

9.1.5 附属设施

9.1.5.1 主缆顶面宜设置检修道。检修道由固定于索夹的栏杆立柱及扶手钢丝绳组成。

9.1.5.2 主缆出入塔顶鞍罩及锚体前墙处应设置缆套及密封装置。

9.2 吊索

9.2.1 一般规定

9.2.1.1 吊索材料可采用镀锌钢丝绳、镀锌高强平行钢丝。吊索技术指标应符合 JT/T 449 的规定。

9.2.1.2 吊索设计长度应根据施工中主缆的实际空缆线形、主缆弹模、加劲梁等实际恒载重量及吊索实测弹性模量进行修正。

9.2.2 结构型式

9.2.2.1 吊索顺桥向布置宜采用竖直布置型式。

9.2.2.2 吊索与主缆的连接可采用骑跨型式（见图 3（a））或销接型式（见图 3（b））。

9.2.2.3 吊索与加劲梁的连接型式应传力直接可靠、检修方便和不易积水锈蚀。常用的型式可采用承压式或销接式。

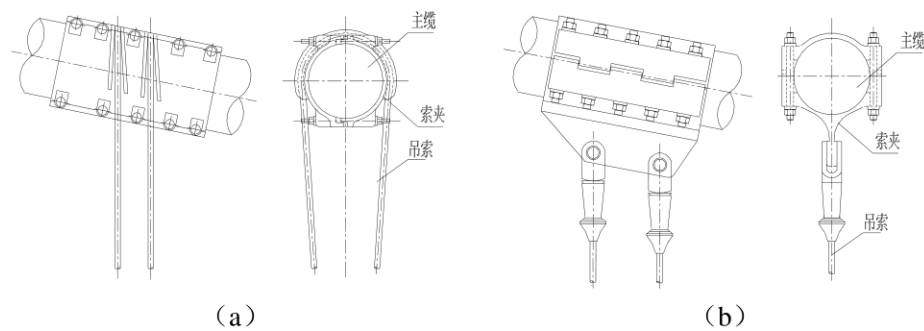


图3 吊索与主缆连接

9.2.3 结构计算

- 9.2.3.1 构件强度验算除本节有明确规定外，应符合 JTJ 025-86 的规定。
- 9.2.3.2 平行钢丝索股吊索弹性模量设计取值不宜小于 1.9×10^5 MPa，镀锌钢丝绳吊索弹性模量设计取值不宜小于 1.1×10^5 MPa。
- 9.2.3.3 *强度验算中，骑跨式吊索的安全系数不宜小于 4.0，销接式吊索的安全系数不应小于 3.0。应验算断索工况时相邻吊索的安全系数，骑跨式吊索不应小于 2.5，销接式吊索不应小于 1.8。
- 9.2.3.4 吊索锚头验算应参照本标准 9.1.3.5 条。

9.2.4 构造要求

- 9.2.4.1 吊索构造除本节有明确规定外，宜符合 JT/T 449 的规定。
- 9.2.4.2 设计时应采取构造措施改善吊索锚头锚口的应力状况。
- 9.2.4.3 吊索应采取抑制风致振动的措施。
- 9.2.4.4 骑跨式吊索的夹具内侧与钢丝绳接触的金属垫块宜采用硬度较小的材料并制成弧面（见图 4）。

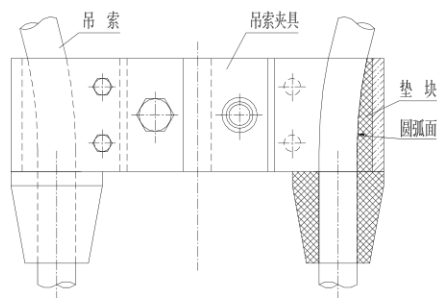


图4 吊索夹具垫块弧面示意

9.3 索夹

9.3.1 结构型式

- 9.3.1.1 索夹结构可采用安装吊索的索夹、不安装吊索的索夹及紧邻索鞍的锥形封闭索夹等型式。

9.3.1.2 索夹对合型式可采用左右对合型（见图5）或上下对合型（见图6）。

9.3.1.3 索夹长度及螺杆数宜根据主缆与垂线的夹角变化进行分类设计。

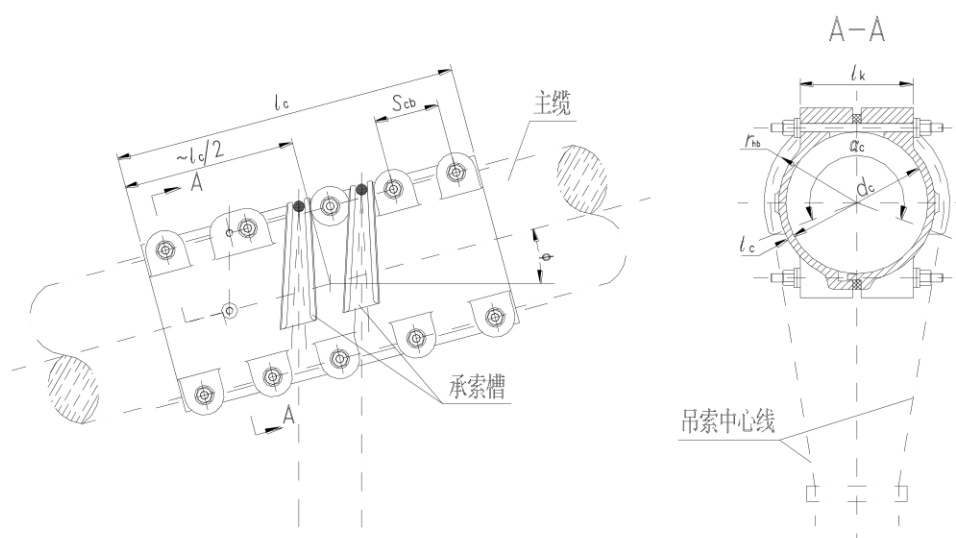


图5 左右对合型索夹结构

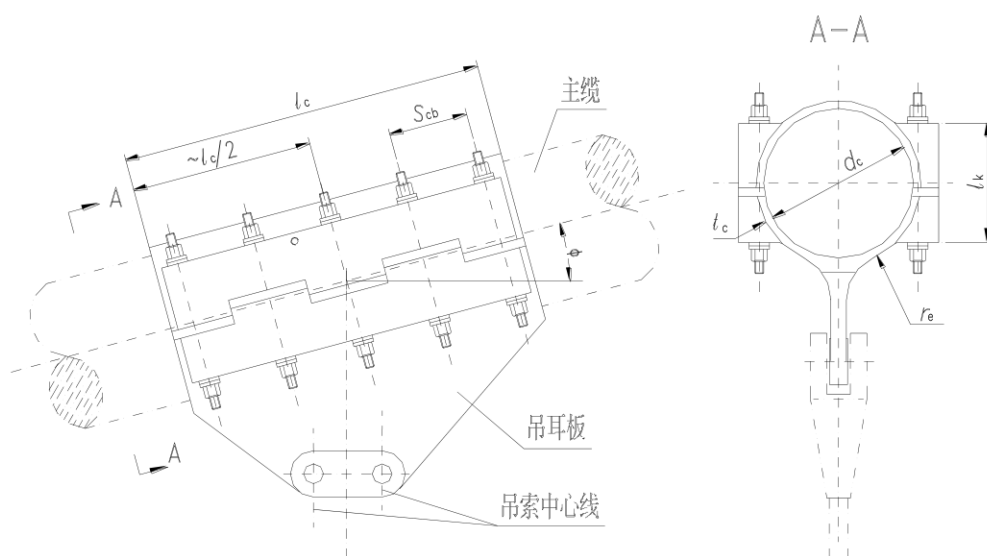


图6 上、下对合型索夹结构

9.3.2 结构计算

9.3.2.1 索夹内孔设计直径 d_c 应按式（4）确定：

$$d_c = \sqrt{\frac{d_w^2 \cdot n_{tot}}{1 - V_c}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

d_c ——索夹内孔设计直径，mm；

d_w ——主缆的钢丝直径，mm；

n_{tot} ——单根主缆中钢丝总根数；

V_c ——主缆在索夹内的设计空隙率（设计取值见本标准9.1.1.4条）。

9.3.2.2 索夹紧固验算：

- a) 有吊索索夹的抗滑安全系数应满足式（5）的要求

$$K_{fc} = \frac{F_{fc}}{N_c} \geq 3 \dots\dots\dots (5)$$

式中：

N_c ——主缆上索夹的下滑力， $N_c = N_h \sin \varphi$ ，N；

N_h ——吊索拉力，N；

φ ——索夹在主缆上的安装倾角（见图5、图6），按同类索夹中的最大值计算；

F_{fc} ——索夹抗滑摩阻力， $F_{fc} = k\mu P_{tot}$ ，N；

k ——紧固压力分布不均匀系数，取2.8；

μ ——摩擦系数，设计时取0.15；

P_{tot} ——索夹上螺杆总的设计夹紧力，N；

$$P_{tot} = n_{cb} P_b^c \quad \text{N}$$

P_b^c ——索夹上单根螺杆设计夹紧力，N；

n_{cb} ——索夹上安装的螺杆总根数。

- b) 有吊索索夹在首次安装时，索夹上单根螺杆安装夹紧力 P_b 应按式（6）计算。

$$P_b = \frac{P_b^c}{0.7} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

P_b ——单根螺杆安装夹紧力，N；

- c) 螺杆的有效直径 d_{cb} 应满足式（7）的要求。

$$d_{cb} \geq \sqrt{\frac{4KP_b^c}{\pi\sigma_{ycb}}} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

d_{cb} ——螺杆的有效直径, mm;

σ_{ycb} ——螺杆材料的屈服强度, MPa;

K ——螺杆的设计安全系数, 取 2。

- d) 索夹螺杆螺纹副应根据单根螺杆的安装夹紧力及相关的标准确定螺纹的螺距, 校核螺纹副旋合长度, 验算螺纹的抗弯、抗剪强度。
- e) 无吊索索夹上的单根螺杆设计夹紧力宜采用有吊索索夹上的单根螺杆设计夹紧力 P_b^c 。

9.3.2.3 索夹壁厚 t_c 不宜小于 35 mm, 其强度应满足式 (8) 的要求。

$$\frac{\sigma_{yc}}{\sigma} = K \geq 3 \dots\dots\dots (8)$$

式中:

σ ——索夹材料计算应力, MPa, 按式 (9) 计算:

$$\sigma = \frac{P_{tot}}{2t_c\ell_c} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

ℓ_c ——索夹长度, mm;

σ_{yc} ——索夹材料的屈服强度, MPa;

K ——索夹壁厚设计安全系数。

9.3.3 构造要求

9.3.3.1 索夹螺杆宜设计成缩腰形螺杆, 其握距 ℓ_k (见图 5, 图 6) 应满足 $\ell_k \geq 0.7d_c$ 的要求。

9.3.3.2 索夹螺杆沿索夹的轴向间距 S_{cb} (见图 5, 图 6) 应满足张拉千斤顶安装空间要求。

9.3.3.3 索夹内孔的两端、锥形封闭索夹的小端, 应设计用于嵌入主缆防护用缠绕钢丝的环向凹槽。

9.3.3.4 在索夹的对合面上应设计用于轴向定位的嵌合构造, 嵌合构造的嵌合量及间隙应能满足索夹内主缆设计空隙率 V_c 在 $\pm 2\%$ 范围内的变化要求。

9.3.3.5 索夹上应设置主缆检修道立柱安装的相应构造。

9.3.3.6 骑跨式吊索索夹:

a) 承索槽在索夹上的包角 α_c (见图 5) 应大于吊索在索夹上的实际包角。

b) 钢丝绳吊索在索夹上的弯曲半径 r_{hb} (见图 6) 应按式 (10) 计算确定

$$r_{hb} = \frac{d_c}{2} + t_c + \Delta_{tc} \geq 7.5d_h \dots\dots\dots (10)$$

式中:

r_{hb} ——钢丝绳吊索在索夹上的弯曲半径, mm;

Δ_{tc} ——承索槽下的壁厚增厚 (见图 9.3.3.6), mm; 可在 $0 \sim t_c$ 范围内取值;

d_h ——钢丝绳吊索公称直径, mm。

c) 承索槽宜设置在索夹中部, 其张开角 β_c (见图 7) 应满足建设及运营过程中的吊索位移要求,

全桥有吊索索夹的 β_c 应尽量减少种类。

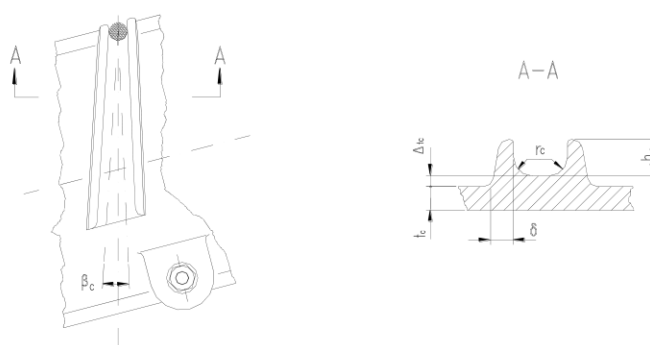


图7 承索槽构造

d) 承索槽断面（见图 7）设计要求：

- 1) 槽深 h 不应小于吊索钢丝绳公称直径 d_h ；
- 2) 槽壁根部厚度 δ 宜与索夹壁厚 t_c 相等；
- 3) 槽内圆弧半径 r_c 宜为吊索钢丝绳公称半径的 1~1.05 倍；
- 4) 槽外壁应按铸造要求设计相应的拔模斜度。

9.3.3.7 销接式吊索索夹：

- a) 吊耳板的中心平面应与索夹轴向竖直中心平面相重合，吊索合力中心线宜通过索夹中部。
- b) 吊耳板的厚度应为索夹壁厚 t_c 的 2 倍，吊耳板与索夹壁间的过渡圆弧半径 r_e （见图 6）应大于索夹壁厚 t_c 的 6 倍。

9.3.3.8 锥形封闭索夹距桥塔中心线的水平距离不宜小于索夹内孔设计直径 d_c 的 10 倍。

9.4 索鞍

9.4.1 结构型式

9.4.1.1 悬索桥索鞍型式有主索鞍、散索鞍或散索套及转索鞍。

9.4.1.2 根据采用材料及成型方法的不同，索鞍设计为全铸式（见图 8 a）、b）、铸焊组合式（见图 8 b）、c）、图 9）及全焊式。

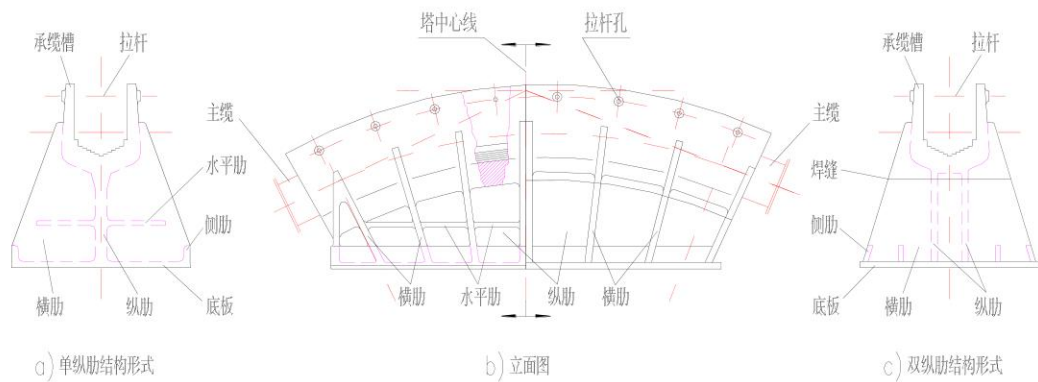


图8 肋传力结构的索鞍

根据传力方式的不同，索鞍可设计为肋传力结构（见图8）或外壳传力结构（见图9）。

9.4.1.3 索鞍一般设计为分体式（见图8，图9），应根据吊装能力进行块件划分。其鞍体与底座间可采用滚轴动式或滑动式等不同的移动摩擦副。

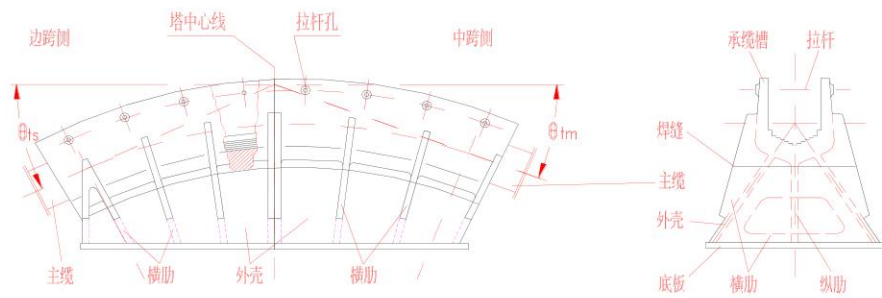


图9 外壳传力结构的索鞍

散索鞍可采用摆轴式（见图10）或滚轴式（见图11）等不同的移动副。

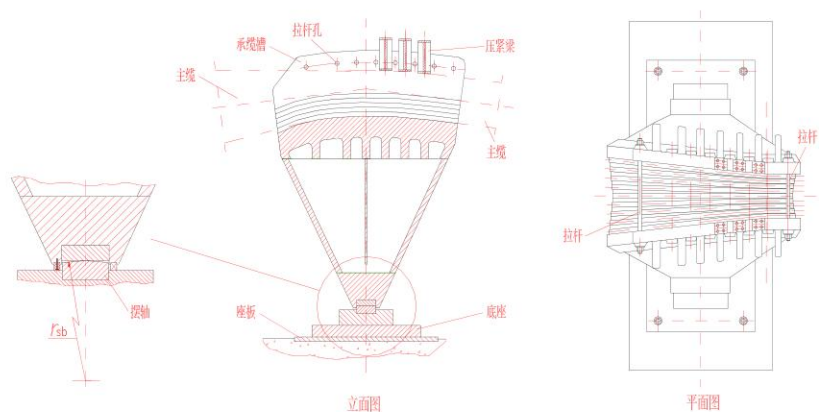


图10 摆轴式散索鞍

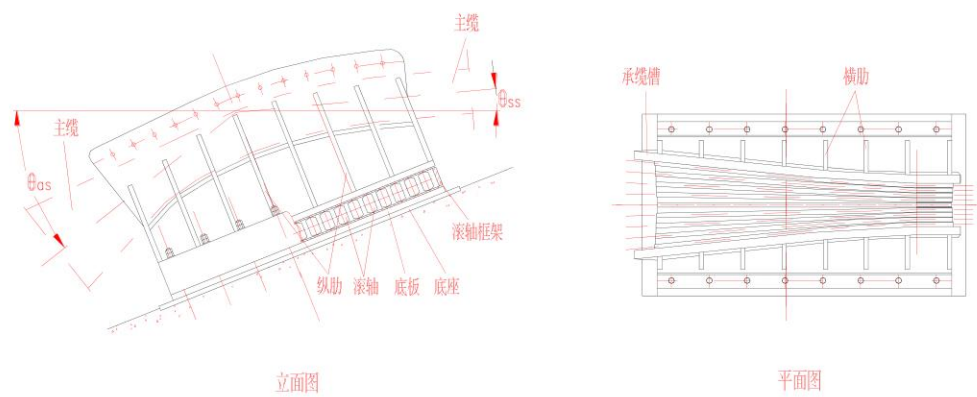


图11 滚轴式散索鞍

9.4.2 结构计算

9.4.2.1 索鞍设计应符合以下要求：

- a) 承缆槽立面及平面的线形应与结构自重作用条件下的主缆线形相吻合。
- b) 承缆槽底部立面圆弧半径 r_v 不宜小于一般截面主缆设计直径 dd 的(8~12)倍。
- c) *散索鞍承缆槽侧壁的平面圆弧半径 r_h 不宜小于 $1.15r_v$ ，且各索股的平弯圆弧段应完全包容在该索股的竖弯圆弧段内。
- d) 无论在施工状态、成桥状态还是在最大缆力的状态，主缆钢丝（索股）均应与鞍座的承缆槽有效相切。

9.4.2.2 槽路尺寸按式（11）计算（见图 12）：

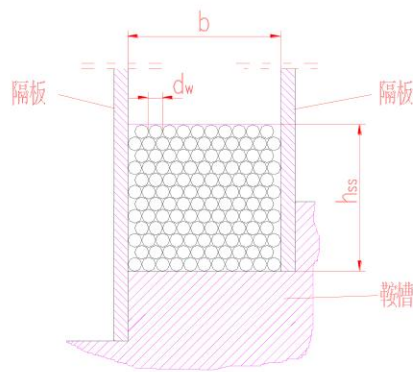


图12 鞍槽槽路尺寸

a) 槽路宽度按式（11）计算

$$b = n_{wt} \cdot (d_w + \Delta_{wr}) \dots \dots \dots (11)$$

式中：

b ——槽路宽度，mm，0.5mm 取整；

n_{wt} ——单排钢丝数量；

Δ_{wr} ——主缆钢丝直径的允许正偏差，mm。

b) 槽路中索股高度按式 (12) 计算：

$$h_{ss} = \frac{\pi \cdot d_w^2 n_{ws}}{4b(1-V_s)} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

h_{ss} ——槽路宽度，mm，0.5mm 取整；

n_{ws} ——每根索股的钢丝根数；

V_s —— $V_s = (1.02 \sim 1.10)V$ ， V 为一般截面主缆的设计空隙率。

9.4.2.3 鞍槽中主缆抗滑验算（见图 13）：

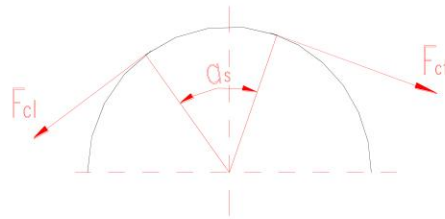


图13 主缆抗滑验算图式

鞍槽内主缆抗滑安全系数应满足式 (13) 的要求

$$K = \frac{\mu_m \alpha_s}{\ln(F_{ct} / F_{cl})} \geq 2 \dots\dots\dots (13)$$

式中：

μ_m ——主缆与槽底和侧壁间的名义摩擦系数，一般取 $\mu_m=0.2$ ；

α_s ——主缆在鞍槽上的包角，弧度；

F_{ct} ——主缆紧边拉力，N；

F_{cl} ——主缆松边拉力，N。

9.4.2.4 鞍体应力验算及强度校核：

- a) 鞍体验算时需考虑横肋的加劲作用；初步尺寸拟定可按本条中提供的荷载计算方法进行，最终以空间分析进行结构强度验算。
- b) 缆力对鞍体作用力的模型转化为图 14 所示，纵向按单位长度计。

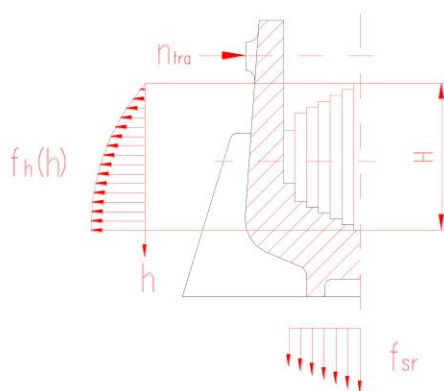


图14 鞍槽受力图式

1) 各列索股的向心压力 f_{sr} 按式 (14) 计算:

$$f_{sr} = \frac{F_c \cdot n}{n_s \cdot r_v} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

f_{sr} ——索股的向心压力, N/mm;

F_c ——单根主缆的拉力, 取边跨缆力和中跨缆力中的较大值, N;

n ——该列索股根数;

n_s ——单根主缆中索股总股数。

2) 最高索股顶至计算高度 h 处的侧向压力 $f_h(h)$ 可按式 (15) 计算:

$$f_h(h) = \frac{f_v \cdot b \cdot (1 - e^{-(2\mu h)/(3b)})}{2\mu} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$f_h(h)$ ——最高索股顶至计算高度 h 处的侧向压力, N/mm²;

μ ——钢丝间摩擦系数, 一般取 0.15;

f_v ——中央列索股单位体积竖向力, N/mm³, 可按式 (16) 计算;

$$f_v = \frac{F_c \cdot n_{sc}}{r_v \cdot n_s \cdot b \cdot H} \dots\dots\dots (16)$$

式中:

n_{sc} ——中央列索股股数;

H ——中央列索股总高度, mm。

3) 高度 H 范围内的总侧向力 f_H , N/mm, 可按式 (17) 计算:

$$f_H = \frac{f_v \cdot b \cdot H}{2\mu} - \frac{3f_v \cdot b^2 \cdot (1 - e^{-(2\mu H)/(3b)})}{4\mu^2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

计算散索鞍鞍槽的总侧向力 f_{HS} 应计入主缆索股平弯产生的附加侧向力, N/mm。按式 (18) 计算:

$$f_{HS} = f_H + \frac{F_c \cdot (1 - \frac{n_{sc}}{n_s})}{2r_h} \quad \dots\dots\dots (18)$$

4) 由侧压力 f_H 或 f_{HS} 产生的总弯矩 M_{fH} 可按式 (19) 计算:

$$M_{fH} = S \cdot \frac{f_v \cdot b \cdot H}{2\mu} + \frac{9f_v \cdot b^3 \cdot (1 - e^{-(2\mu H)/(3b)})}{8\mu^3} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

M_{fH} ——由侧压力 f_H 或 f_{HS} 产生的总弯矩, N·mm/mm;

$$S = \frac{H}{2} - \frac{3b}{2\mu} \quad \text{mm}$$

5) 沿单位弧长的鞍槽拉杆拉力 n_{tra} 可按式 (20) 计算

$$n_{tra} = \frac{N_{sb} \cdot n_{sb}}{l_{sa}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

n_{tra} ——沿单位弧长的鞍槽拉杆拉力, N/mm;

N_{sb} ——单根拉杆力, N;

n_{sb} ——拉杆根数;

l_{sa} ——拉杆中心处鞍槽侧壁的弧长, mm。

c) 强度验算时的荷载工况:

1) 单根主缆拉力 F_c 为空缆缆力时, 鞍槽侧壁未施加拉杆力 ($n_{tra}=0$) 的情况;

2) 单根主缆拉力 F_c 为最大缆力时的情况。

9.4.2.5 加劲梁架设期间主索鞍的顶推力:

- a) 主索鞍顶推力
- F_{sp}
- 可按式 (21) 计算:

$$F_{sp} = (F_{cm} \sin \theta_{tm} + F_{cs} \sin \theta_{ts} + G_s) \mu \dots \dots \dots (21)$$

式中:

 F_{sp} ——主索鞍顶推力, N; G_s ——主索鞍重力, N; μ ——主索鞍位移滑动副的摩擦系数; F_{cm} ——结构自重作用下的中跨缆力, N; θ_{tm} ——结构自重作用下的中跨缆力对应的主缆中跨切线角 (见图 9); F_{cs} ——结构自重作用下的边跨缆力, N; θ_{ts} ——结构自重作用下的边跨缆力对应的主缆边跨切线角 (见图 9)。

- b) 顶推力作用下强度验算包括: 滑动面的抗压强度、与滑动面相联的结构及零件的抗剪强度、鞍体上承受顶推力处的局部抗压抗弯及抗剪强度、顶推量控制装置的强度。

9.4.2.6 散索鞍摆轴、滚轴承压验算:

- a) 摆轴的接触应力
- σ_j
- 应满足式 (22) 的要求:

$$\sigma_j = 0.418 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot E}{l_e \cdot r_{sb}}} \leq [\sigma_j] \dots \dots \dots (22)$$

式中:

 σ_j ——摆轴的接触应力, MPa; r_{sb} ——摆轴断面圆弧半径 (见图 10), mm; l_e ——摆轴上、下承面的有效接触长度, mm;E——材料弹性模量, 对于钢材, 可取 $E=2.10 \times 10^5$ MPa; $[\sigma_j]$ ——材料容许接触应力, 按所选用材料硬度及相应的标准、规范取用, MPa;

R ——摆轴上的总荷载, N, 可按式 (23) 计算:

$$R = 2F_c \cdot \sin\left(\frac{\theta_{sa} - \theta_{ss}}{2}\right) + G_s \cdot \cos\left(\frac{\theta_{sa} + \theta_{ss}}{2}\right) \dots \dots \dots (23)$$

式中:

G_s ——散索鞍重力, N;

F_c ——单根主缆拉力, 取锚跨缆力和边跨缆力中的较大值, N;

θ_{sa} ——计算缆力对应的主缆锚跨切线角 (见图 11);

θ_{ss} ——计算缆力对应的主缆边跨切线角 (见图 11)。

b) 滚轴的接触应力 σ_j 可按式 (24) 计算并应满足:

$$\sigma_j = 0.591 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot E}{l_e \cdot d_{sr}}} \leq [\sigma_j] \dots \dots \dots (24)$$

式中:

σ_j ——滚轴的接触应力, MPa;

d_{sr} ——滚轴直径, mm;

R ——单根滚轴上的荷载, N, 可按式 (25) 计算

$$R = \frac{3}{2n_{sr}} \cdot [2F_c \cdot \sin(\frac{\theta_{sa} - \theta_{ss}}{2}) + G_s \cdot \cos(\frac{\theta_{sa} + \theta_{ss}}{2})] \dots \dots \dots (25)$$

式中:

n_{sr} ——滚轴根数。

9.4.2.7 摆轴式散索鞍稳定验算:

结构自重作用状态下, 主缆各个索股对散索鞍的总压力线和鞍体自身重力的合力线宜通过摆轴接触点。

9.4.3 构造要求

9.4.3.1 索鞍的承缆槽应按主缆索股的排列方式及数量设置隔板 (见图 12), 隔板宜沿高度方向分层, 可沿长度方向分块。

9.4.3.2 当桥塔为混凝土结构时, 主索鞍宜采用肋传力的结构型式 (见图 8), 纵肋、横肋的间距及数量、肋的厚度应根据第 9.4.2.4 条规定确定。传力纵肋可按单肋设计, 当承缆槽宽度大于 700mm 时, 宜按双肋设计。

9.4.3.3 当桥塔为钢结构时, 主索鞍宜采用外壳传力的结构型式 (见图 9)。

9.4.3.4 承缆槽上部应设置夹紧拉杆, 各槽路应用锌填块填至顶面与中央列索股平齐。

9.4.3.5 当散索鞍鞍槽中主缆的竖弯转角小于 25° 时, 承缆槽顶部应设置压紧梁 (见图 10)。

9.4.3.6 塔顶鞍座应设置限位装置。

10 钢箱梁

10.1 结构型式

- 10.1.1 特大跨径悬索桥的钢箱梁断面结构型式可采用整体式或带有横向连接构件的分体式等结构型式。
- 10.1.2 钢箱梁桥面板宜采用正交异性板结构型式，纵向加劲肋宜采用 U 形闭口加劲肋。
- 10.1.3 钢箱梁梁段连接型式可采用全焊连接或焊接与高强度螺栓组合连接。
- 10.1.4 钢箱梁应设置横隔板，横隔板可采用板式或桁架与板组合型式。吊点及支座处应采用板式横隔板。

10.2 结构计算

- 10.2.1 除本节规定外，结构强度验算应符合 JTJ 025-86 的规定。
- 10.2.2 钢箱梁钢桥面验算应考虑下列不同体系应力：
 - a) 全桥体系中由弯矩、剪力和扭矩产生的应力；
 - b) 桥面体系车轮荷载产生的应力；
 - c) 全桥体系应力和桥面体系应力的迭加，验算时容许应力值可提高 25%。
- 10.2.3 钢箱梁强度应验算下列荷载工况：
 - a) 梁段存放时临时支承的状态；
 - b) 梁段吊装状态；
 - c) 运营期间更换吊索或吊索破坏时的受力状态。
- 10.2.4 桥面体系应力计算时的车轮荷载应计入桥面铺装对车轮荷载的扩散效应。
- 10.2.5 正交异性钢桥面板的桥面体系汽车荷载应力计算应计入冲击系数。桥面板和纵肋的冲击系数可取 0.4；在轮载作用下，桥面板的变形曲率半径应 ≥ 20 m，纵肋间面板的挠度应 ≤ 0.4 mm。
- 10.2.6 横隔板计算冲击系数的有效跨度可采用吊索锚固点的横向间距。
- 10.2.7 对于板式横隔板，应分析在车轮荷载作用下的压屈稳定和应力分布结果确定横隔板的加劲方式。
- 10.2.8 在充分考虑分体式钢箱梁的整体抗扭刚度、横向抗弯刚度和横向连接刚度的基础上，对横向连接构件进行分析计算，确定横向连接构件的构造设计。
- 10.2.9 凡承受反复应力的构件及构造细节均应进行疲劳计算分析。
- 10.2.10 施工阶段梁段间临时连接件应进行抖振强度检验，抖振内力应与其它荷载作用进行组合。

10.3 构造要求

- 10.3.1 钢箱梁节段的划分应考虑便于制造、运输和架设。
- 10.3.2 梁节段间应设置工地临时连接构造，临时连接构造应满足梁段架设过程中的结构受力、变形要求及抗风稳定性要求。
- 10.3.3 钢箱梁构造应便于更换吊索或支座。
- 10.3.4 钢箱梁结构应满足钢结构防护要求。无法进入内部进行防护作业的闭口截面构件应封闭。钢箱梁内部设置除湿系统时，应保证箱梁内部的气密性。
- 10.3.5 钢箱梁构造应充分考虑施焊和无损检验的操作空间，尽量减小焊接残余应力、降低局部应力集中。对于活荷载应力幅及残余应力均较大的焊接构件，应提出相应的制作工艺及检验要求。

10.3.6 钢箱梁顺桥向横隔板的布置应综合考虑桥面板和加劲肋的应力和变形,保证正交异性板桥面具有足够的刚度,尽量避免由于局部加劲引起的刚度突变。横隔板间距不宜大于 3.6m 并应为吊索间距的等分数。

10.3.7 横向连接构件的腹板宜与分离的封闭单箱内对应的横隔板有效连接,保证分体式钢箱梁的横向传力要求。

10.3.8 正交异性板桥面的面板厚度不宜小于 14 mm,可根据车道荷载选择不同板厚。加劲肋宜采用闭口加劲肋,板厚不应小于 8 mm,加劲肋净距与桥面板厚度之比不宜大于 25。

10.3.9 钢箱梁腹板、底板及检修道板厚度不应小于 10 mm。其上的加劲肋采用闭口加劲肋时,加劲肋板厚不应小于 6 mm,加劲肋采用球扁钢时,球扁钢厚度不应小于 10 mm。

10.3.10 钢箱梁内的横隔板应开槽口,使纵向加劲肋连续通过,横隔板的板厚不应小于 10 mm,吊索处的横隔板板厚不应小于 12 mm。

10.3.11 钢箱梁端部底板宜设置施工泄水孔,成桥后封闭。

10.4 附属设施

10.4.1 钢箱梁应设置外部检查车,条件允许时箱梁内可设置内部检查车。

10.4.2 钢箱梁应根据需要并结合路面照明设计,综合考虑通讯电缆、检修通道、消防和照明等设施的布置。

10.4.3 钢箱梁应设置有效的桥面防、排水系统,应能有效地排出桥面铺装的层间水。

10.5 其他

10.5.1 钢箱梁节段应在吊装前预拼,预拼线形应采用合龙线形,预拼时的节段不宜少于 5 段。

10.5.2 设计钢箱梁的工地接缝宽度时,应考虑焊缝收缩变形的影响。

10.5.3 设计钢箱梁应考虑横向预留拱度。

11 约束系统及伸缩装置

11.1 结构约束体系

11.1.1 总则

需根据加劲梁在桥塔处是否连续、加劲梁与桥塔间及加劲梁与主缆间不同的连接方式进行综合研究的基础上,确定悬索桥合理的结构约束体系。

11.1.2 竖向结构约束体系

加劲梁与桥塔间竖向连接方式可选择:无竖向约束、刚性连杆(吊杆)、竖向支座等。

11.1.3 纵向结构约束体系

加劲梁与桥塔间纵向连接方式可选择:纵向无约束、弹性约束、阻尼器连接、缓冲限位装置等。
加劲梁与主缆间可设柔性缆扣连接。

11.1.4 横向结构约束体系

加劲梁与桥塔或锚碇间的横向约束方式，一般设置抗风支座。

11.2 支座的设计与选型（竖向、横向支座）

11.2.1 支座的设置应根据桥梁整体计算分析确定，应满足竖向反力、水平反力的荷载转递功能和纵横向位移、转角的变形要求。

11.2.2 支座宜设置防雨水及尘埃进入的防护罩，并预留安装、维护的工作空间和设置安全防护栏杆等。

11.2.3 抗风支座可于桥塔或锚碇处设置在加劲梁两侧或梁底中间位置。

11.3 伸缩装置的设计与选型

11.3.1 伸缩装置的设置应根据桥梁整体计算分析确定，应满足梁端纵向水平位移及面内外转动的变形要求。

11.3.2 伸缩装置设计时，除应考虑温度变化、混凝土收缩徐变引起的水平位移及加劲梁挠度产生的变形外，还要考虑承受车辆荷载的制动力等。

11.3.3 一般采用模数式或其他性能可靠的伸缩装置，并应加强其防水、排水辅助设施。

附 录 A
(规范性附录)
抗风设计

A.1 风速基准

A.1.1 悬索桥抗风设计采用的基本风速和设计基准风速应按JTG/T D60-01-2004的规定确定。当桥梁跨越较窄的海峡或山谷可能出现风的收缩现象时，或者地形复杂不易确定其粗糙类型时，宜通过模拟地形的风洞试验或其他方法确定其设计基准风速。

A.1.2 施工阶段的设计基准风速，应按风速重现期进行折减。风速重现期折减系数 η 见表A.1。悬索桥施工阶段应采用不低于10年重现期的折减系数，施工周期长及重要桥梁可按表A.1所列系数适当提高。

表A.1

风速重现期（年）	10	20	30	40
η	0.84	0.88	0.92	0.95

A.1.3 悬索桥各结构构件用于计算风力的基准高度可按表A.2取用。

表A.2

结构构件	基 准 高 度 Z (m)
加劲梁	主跨桥面距设计常水位（或地表面或海平面）的平均高度
吊索、主缆	中跨加劲梁桥面平均高度到塔顶高度的平均值
桥塔（墩）	桥塔（墩）高的65%高度处

A.2 静力抗风设计

A.2.1 设计风力

A.2.1.1 设计风力应分别考虑横桥向及顺桥向水平风力。

A.2.1.2 桥塔、加劲梁、主缆和吊索单位长度上的横桥向水平设计风力可按式（A.1）计算：

$$P_D = \frac{1}{2} \rho U_d^2 \cdot g \cdot C_D \cdot A_n \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

ρ ——空气密度，取为： $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ；
 U_d ——设计基准风速，m/s；按构件基准高度确定；

g ——阵风影响系数，由风力的水平或垂直加载长度，风的脉动特性和风致结构抖振响应等决定，按JTG/T D60-01-2004的规定取值；

C_D ——构件的空气绕流阻力系数；单根主缆取0.7，吊索取1.2，并按迎风及背风侧主缆及吊索同时加载考虑。加劲梁及桥塔的阻力系数按JTG/T D60-01-2004的规定取值，或由风洞试验给出；

A_n ——结构构件沿构件轴向单位长度上垂直于水平风向的迎风侧投影面积， m^2 ；按JTG/T D60-01-2004的规定取值。

A.2.2 风力的加载方法

风力的加载方法可按JTG/T D60-01-2004的规定确定。

A.2.3 风力和其他作用的组合

- A.2.3.1.1 风力参与永久荷载和可变荷载的组合应符合JTG D60-2004的规定。
- A.2.3.1.2 风力只与永久作用组合时，应取设计风力参与组合；风力参与包含汽车荷载的组合时，取按照第5.2.2 a) 条计算的风力参与组合。

A.2.4 静力稳定性检验

- A.2.4.1 应按JTG/T D60-01-2004第6.1.3条检验悬索桥加劲梁的横向屈曲可能性。
- A.2.4.2 应按JTG/T D60-01-2004第6.1.5条检验悬索桥加劲梁静力扭转发散可能性。
- A.2.4.3 经A.2.4.1及A.2.4.2之检验不能满足静力稳定性要求时，应通过悬索桥非线性静力稳定性分析或全桥气动弹性模型风洞试验进一步检验其静力稳定性。如仍不能满足静力稳定性要求，应采取结构或空气动力学措施提高其静力抗风稳定性能。

A.3 动力抗风检验

A.3.1 加劲梁

- A.3.1.1 悬索桥加劲梁动力抗风设计的必要条件见表A.3。

表A.3

加劲梁类型		动力抗风设计的必要条件	可能发生的风振现象
桁架		$L \times U_d / B > 350$	颤振
箱梁	开口	$L \times U_d / B > 350$	颤振
		$L \times U_d / B > 330$ 且 $B / d < 5$ 且 $I_u < 0.15$ 且为钢桥	驰振
		$L \times U_d / B > 200$	涡激共振
	闭口	$L \times U_d / B > 520$	颤振
		$L \times U_d / B > 530$ 且 $B / d < 5$ 且 $I_u < 0.15$ 且为钢桥	驰振
		$L \times U_d / B > 200$	涡激共振

表中：

L —— 最大跨长, m; B —— 桥梁总宽, m; d —— 加劲梁有效高度, m;
 U_d —— 设计基准风速, m/sec; I_u —— 气流的紊流强度。

- A.3.1.2 加劲梁应按JTG/T D60-01-2004第6.3条检验其颤振稳定性, 并确定颤振临界风速。
 A.3.1.3 加劲梁应按JTG/T D60-01-2004第6.2条检验其驰振稳定性, 并确定驰振临界风速。
 A.3.1.4 加劲梁应按JTG/T D60-01-2004第7.2条检验其发生涡激共振的可能性, 并确定涡激共振发生的风速及振幅。
 A.3.1.5 加劲梁架设阶段的抗风稳定性可通过详细的计算分析或气动弹性模型风洞试验进行检验。
 A.3.1.6 在进行悬索桥风致振动分析及风洞试验时, 结构阻尼值可按表A.4取用。

表A.4

加劲梁类型	阻 尼 比 ζ	对数衰减率 δ
钢 桁 架	0.005	0.03
钢 箱 梁	0.003	0.02
钢筋混凝土箱梁	0.015	0.09

A.3.2 桥塔

- A.3.2.1 钢桥塔应按JTG/T D60-01-2004第6.2条检验裸塔的驰振稳定性, 并确定其驰振临界风速。
 A.3.2.2 桥塔的涡激共振检验:
 a) 裸塔阶段应进行涡激共振检验;
 b) 可通过裸塔气动弹性模型风洞试验, 检验裸塔涡激共振的发生风速和振幅。进行裸塔气动弹性模型风洞试验时, 应考虑施工设施的影响;
 c) 当裸塔涡激共振的发生风速低于裸塔的施工设计基准风速, 或涡激共振振幅对裸塔施工造成妨碍时, 应采用振动控制措施提高其涡激共振的发生风速或减小涡激共振振幅。
 A.3.2.3 桥塔的结构阻尼可按表A.5取用。

表A.5

桥塔材料	阻 尼 比 ζ	对数衰减率 δ
钢	0.0016	0.01
混凝土	0.01	0.06

A.4 施工设施及附属装置的抗风设计

- A.4.1 施工猫道宜通过增加横向通道或设置抗风缆提高其静力抗风稳定性。
 A.4.2 桥面设置风障或隔音墙板时, 须对加劲梁进行带风障或隔音墙板条件下的静力抗风设计与动力抗风检验。