



T/CECS G XXXX: 20XX

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路桥梁涡激共振控制技术规程

Technical specification for control of
vortex-induced vibration of highway bridges

(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction
Standardization

中国工程建设标准化协会标准

公路桥梁涡激共振控制技术规程

Technical specification for control of vortex-induced vibration of
highway bridges

T/CECS G: XX-XX-XX

主编单位：哈尔滨工业大学
中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限
公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：XX年XX月XX日

人民交通出版社股份有限公司

北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会关于印发<2024 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2024〕116 号）的要求，由哈尔滨工业大学、中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司承担《公路桥梁涡激共振控制技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

编写组在总结桥梁涡激共振二十余年来工程经验和相关科研成果的基础上，以完善和提升桥梁涡激共振防控技术为核心，完成了本规程的编写工作。

本标准分为 8 章、1 篇附录，主要内容包括：1 总则、2 术语、3 基本规定、4 服役桥梁涡激共振判别、5 服役桥梁涡激共振控制触发条件、6 服役桥梁涡激共振气动控制措施、7 服役桥梁涡激共振阻尼控制措施、8 服役桥梁涡激共振控制监测与效果评估。

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

本标准基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由哈尔滨工业大学或中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或赖马树金（地址：哈尔滨市黄河路 73 号哈工大二校土木学院 419 室；邮编：150090；传真：0451-86282068；电子邮箱：laimashujin@hit.edu.cn），以便修订时研用。

主 编 单 位：哈尔滨工业大学

中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司

参 编 单 位：

主 编：

主要参编人员：

主 审：

参与审查人员：

目 次

1 总则	错误! 未定义书签。
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	5
3 基本规定	9
4 服役桥梁涡激共振判别	10
5 服役桥梁涡激共振控制触发条件	13
5.1 一般规定	13
5.2 振幅控制条件	13
5.3 加速度控制条件	14
5.4 视觉安全控制条件	14
5.5 疲劳损伤控制条件	15
5.6 结构病害与附属设施控制条件	16
6 服役桥梁涡激共振气动控制措施	17
6.1 一般规定	17
6.2 气动控制措施的选型与设计	17
6.3 风洞试验验证要求	20
6.4 检验	20
6.5 安装与验收	21
7 桥梁涡激共振阻尼控制措施	23
7.1 一般规定	23
7.2 阻尼控制措施的选型与设计	23
7.3 检验	34
7.4 安装与验收	35
8 桥梁涡激共振控制监测与效果评估	37
8.1 一般规定	37
8.2 监测系统设置与数据采集要求	37

8.3 减振效果评估方法与标准	38
8.4 控制装置巡检与长期维护	39

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为规范公路桥梁涡激共振控制技术，保障桥梁全寿命期的运营安全与适用性，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于服役期公路桥梁涡激共振判别与控制。其他用途桥梁可参照执行。

1.0.3 公路桥梁涡激共振控制技术的实施，除应符合本标准外，尚应符合国家及行业现行有关标准的规定。

征求意见稿

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 桥梁涡激共振 vortex-induced vibration (VIV) of bridges

桥梁结构在特定的风速范围内,由于流体绕经主梁、拉(吊)索等结构产生规则的交替脱落旋涡,当旋涡脱落频率与结构某阶固有频率接近时,诱发结构的限幅共振现象(本规程中简称涡振)。

2.1.2 涡振判别 VIV identification

基于桥梁现场实测的自由风场数据与结构动力响应(位移、加速度)信号,提取时域、频域及概率密度统计等特征,将风致涡激共振与随机抖振、车辆激振及其他环境微振动进行定性与定量区分的综合判定过程。

2.1.3 涡振控制触发条件 activation criteria for VIV mitigation

桥梁结构实际发生的涡激共振响应(如位移幅值、加速度幅值等)或发生频次,达到或超过了规范规定的允许限值,对结构受力安全、构件疲劳寿命、行车安全或桥上人员舒适度产生不利影响,从而必须启动或采取气动抑振措施、阻尼减振措施或交通管控措施的判定阈值(界限条件)。

2.1.4 视觉安全控制条件 visual safety control criteria

桥梁发生涡激共振时,为避免桥面产生明显的波浪起伏或附属构件(如路灯、声屏障等)产生大幅摇晃,从而导致驾驶员产生视觉恐慌、异常急刹等危及交通安全的行为,而针对结构动态变形幅值设定的容许界限。

2.1.5 疲劳损伤控制条件 fatigue damage control criteria

为主梁及其局部关键受力细节、拉索锚固区等,在涡激共振交变应力作用下免于产生累积疲劳破坏,基于等效动力应力幅和常幅疲劳极限设定的强制干预条件。

2.1.6 涡振控制 bridge VIV control

为主梁、斜拉索及吊索等桥梁构件的涡振响应超出规定限值时,采取增设气动抑振设施或机械阻尼装置等干预手段,以减小振动幅值的技术动作。

2.1.7 气动控制 aerodynamic control

通过在桥梁局部加装导流板、扰流板/栅格、涡流发生器，或采用被动吸吹流动控制等装置，以改善断面气动外形、破坏旋涡有规则脱落，从而抑制涡振的措施。

2.1.8 风嘴 fairing

附加于钝体桥梁主梁两侧边缘，用于改善截面气动流线型、减弱气流分离并抑制旋涡脱落的轻质附加构件。

2.1.9 导流板/扰流板 guide vane / spoiler

设置于主梁表面、边缘或下方的板状构件，通过强制改变局部气流流向或破坏附面层，来削弱旋涡脱落相干性及强度的气动干预构件。

2.1.10 涡流发生器 vortex generator

布置在局部流场中诱发小尺度流向涡的小型突起物（如齿状或翼型阵列），旨在促进边界层内能量交换，延缓气流大面积分离。

2.1.11 被动吸吹气控制 passive suction and blowing control

利用桥梁结构断面表面的自然风压差（高风压区进气、低风压区排气），通过内部预设孔道引导气流，以破坏旋涡周期性脱落的免动力气动控制技术。

2.1.12 阻尼控制 damping control

通过在桥梁特定受控位置附加机械耗能装置或附属质量子结构，提高结构全系统的模态阻尼比，耗散涡振能量的治理措施。

2.1.13 调谐质量阻尼器 tuned mass damper (TMD)

由质量块、弹簧元件和耗能阻尼元件组成的附加振子系统。将其自振频率调谐至主结构特定涡振频率附近，通过动力吸振原理耗散主结构振动能量的装置。

2.1.14 调谐液体质量阻尼器 tuned liquid mass damper (TLMD)

将弹簧质量振子浸没于液体中，利用液体浮力降低弹簧静伸长，同时利用流固耦合效应提供附加质量与流体阻尼的一种低频减振装置。

2.1.15 惯容调谐质量阻尼器 inerter-based tuned mass damper (TMDI)

在常规 TMD 基础上串接或并接惯容器的减振装置。利用机械转换产生“表观惯性质量”，在极小物理质量增加的前提下，大幅提升装置等效质量和低频控制效能。

2.1.16 多重调谐质量阻尼器 multiple tuned mass dampers (MTMD)

由多个具备不同调谐频率的子阻尼器组合而成的减振系统。通过合理的频率间距分布形成较宽的减振频带，以提高对环境引起的结构频率漂移的鲁棒性。

2.1.17 冲击质量阻尼器 impact mass damper (IMD)

依靠内部活动质量块与外部腔体之间的非线性能量动量交换及高频碰撞(结合缓冲层材质耗能)，从而宽频带耗散结构高频振动能量的装置，常用于控制柔性索的涡振。

2.1.18 桥梁涡振控制监测 monitoring for vortex-induced vibration mitigation of bridges

为检验减振/抑振措施有效性，利用传感与数据采集设备，对桥址区特定风场参数、桥梁结构特定频段的动力响应特征，以及减振装置运行状态进行的数据采集、识别、分析与评估的专业技术活动。

2.2 符号

2.2.1 作用、响应参数与几何参数

U ——桥址处自由来流 10 分钟平均风速；

V ——流体（风）的局部运动速度；

$a(t)$ ——桥梁结构（或主梁）加速度时程；

S_p ——结构振动响应功率谱中的最大幅值；

S_{p-1} ——结构振动响应功率谱中的次最大幅值；

U_r ——折减风速(Reduced Velocity)；

θ ——桥址处实测风偏角；

f_s ——桥梁受控模态的自振频率；

f_v ——实测的主梁竖弯涡振频率；

f_t ——实测的主梁扭转涡振频率；

f_{p1} ——结构振动响应功率谱中最大幅值对应频率；

$S(f_{p1})$ ——结构振动响应功率谱中最大幅值；

R ——能量集中因子；

a_{rms} ——实测加速度 10 分钟时距均方根值；

h_{rms} ——主梁竖向涡振实测位移最大 10 分钟时距均方根值；

θ_{rms} ——主梁扭转涡振实测扭转角最大 10 分钟时距均方根值；

h_{max} ——实测的主梁竖向涡振最大振幅；

θ_{max} ——实测的主梁扭转涡振最大扭转角；

P_{med} ——加速度瞬时响应中值概率密度；

L_w ——实测涡激共振主导模态的半波长；

Δ_{top} ——桥梁发生扭转涡振时引起的立柱顶端相对动态位移；

$\Delta\sigma_{eq}$ ——实测涡振时程下的等效动力应力幅；

B ——主梁全宽；

H ——主梁特征高度；

D ——拉索、吊索或吊杆的外径；

L_c ——拉索或吊索的计算长度(自由长度)；

T ——拉索的轴向索力；

m ——拉索的单位长度线质量。

2.2.2 控制阈值与容许限值参数

$[h_v]$ ——现行规范规定的竖向涡振振幅允许值；

$[\theta_t]$ ——现行规范规定的扭转涡振振幅允许值；

$[a_{rms}]$ ——现行规范或设定的加速度舒适度允许限值；

$[R_{vw}]$ ——视觉安全长高比容许限值(或桥面动态变坡率限值)；

$[\Delta_{top}]$ ——视觉可容忍的最大附属构件端部摆幅限值；

$[\Delta\sigma_L]$ ——现行规范规定的对应构造细节常幅疲劳极限(截止限)；

T_{rem} ——剩余疲劳评估寿命；

T_d ——桥梁剩余设计使用年限。

2.2.3 气动控制参数

H ——主梁特征高度；

L ——主梁或附属气动构件的展向长度；

F_r ——桥梁振动响应功率谱峰值折减频率；

A_{up} ——主梁上表面设置的吸吹气孔面积

A_{down} ——主梁下表面设置的吸吹气孔面积；

n ——特定范围内的气孔数量；

ρ ——流体(液体或气体)的密度。

S_t ——结构无量纲旋涡脱落频率(斯特劳哈尔数)；

L_d ——导流板与桥梁结构面之间的设计间距；

δ_b ——结构面局部流场的速度边界层厚度；

ν ——流体的运动粘滞系数；

V ——流体(风)的局部运动速度；

x ——沿流体方向距壁面前缘的距离；

\bar{C}_μ ——无量纲动量吸吹气系数。

2.2.4 阻尼及其力学参数

f_s ——桥梁受控模态自振频率；

m_s ——桥梁受控模态的广义质量(或等效质量)；

$\phi(x_d)$ ——阻尼器安装位置处桥梁目标模态的振型值；

m ——附加阻尼器(TMD或TLMD)的活动质量；

μ ——阻尼器的广义质量比；

k ——阻尼器的物理刚度；

c ——阻尼器的物理阻尼系数；

f_d ——阻尼器的自振频率；

ξ_d ——阻尼器的阻尼比；

f_{opt} ——调谐质量阻尼器的最优频率比；

ξ_{opt} ——调谐质量阻尼器的最优阻尼比；

αm ——调谐液体质量阻尼器(TLMD)中液体的附加质量；

V_m ——阻尼器活动质量块的体积；

C_m ——活动质量块的附加质量系数；

λ ——调谐液体质量阻尼器的附加质量比；

δ ——阻尼器弹簧静力伸长量；

γ_{opt} ——阻尼系统的最优调谐频率比；

ζ_{opt} ——阻尼系统的最优设计阻尼比；

b ——惯容器的表观惯性质量；

λ ——惯容器表观惯性质量与活动质量比值；

J ——惯容器飞轮的转动惯量；

p_s ——滚珠丝杆惯容器的导程；

n ——MTMD 系统中的子阻尼器总数；

B ——MTMD 系统的无量纲频带宽度；

f_T ——MTMD 系统的目标中心调谐频率；

ξ_{max} ——阻尼器可为拉索某阶模态提供的最大对数/模态阻尼比；

x_c ——外置索端阻尼器安装位置距锚固点的距离；

d_{opt} ——IMD 内置活动质量块与腔室缓冲层之间的最优单侧净碰撞间隙；

Y_{max} ——吊索在无控制状态下，目标受控频率对应的最大容许振幅；

α ——间隙优化系数。

3 基本规定

3.0.1 服役桥梁涡激共振（以下简称“涡振”）管控应贯彻“主动预防、及时响应、科学决策、综合治理”的原则，确保桥梁结构疲劳寿命安全，保障运营期车辆行人的安全与舒适。

3.0.2 服役桥梁的涡振管控工作，应根据桥梁的结构特点、服役环境、历史振动记录及安全管控目标，采取长期监测、状态识别、安全评估、交通管控、工程治理及长期闭环验效等综合措施。

3.0.3 服役桥梁采取的任何涡振控制工程措施，均不得降低主梁、缆索等关键构件的安全储备，且不应降低桥梁结构在服役期内的颤振临界风速及静力发散风速。

3.0.4 用于涡振控制的各类气动构件、阻尼装置及辅助构件，应满足全寿命周期内的耐疲劳、防腐蚀、抗老化要求，并应具备便于日常巡检、维护、维修和更换的构造设计。

4 服役桥梁涡激共振判别

4.0.1 桥梁涡激共振（简称涡振）控制应首先进行涡振判别，判别数据源应根据桥梁监测系统的配置情况按下列规定确定：

1 当桥梁设有监测系统时，宜根据系统连续采集的桥址风速、风向及结构振动响应数据进行在线自动判别。

2 当桥梁未设监测系统或系统局部失效时，可按下列替代方式进行判别：

1) 通过管养人员现场巡视，依据肉眼观测到的结构持续、规律性明显振动现象进行定性初步判别；

2) 调用桥梁既有安防或交管监控摄像头画面，采用视频图像识别技术提取结构振动特征进行辅助判别；

3) 就近获取桥址周边国家气象观测站或交通气象监测节点的同期风速风向资料，作为风况条件的佐证依据。

3 用于涡振判别的结构振动响应数据，应为加速度数据或位移数据。

条文说明：

4.0.2 桥梁主梁单模态涡振判别方法应符合下列规定：

1 判别指标宜同时采用 10 分钟振动响应均方根值 σ_y 、能量集中因子 R 、折减风速 U_r 和风偏角 θ 作为涡激共振判定指标，也可补充其他指标参数。 σ_y 、 R 和 \bar{f} 按公（4.0.2-1）、（4.0.2-2）和（4.0.2-3）计算：

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ddot{y}_i^2} \quad (4.0.2-1)$$

式中：

σ_y ——主梁振动加速度/位移均方根值；

\ddot{y} ——主梁振动加速度；

N ——10分钟加速度采样点数。

$$R = \frac{P_1}{P_2} \quad (4.0.2-2)$$

式中：

p_1 ——结构振动响应功率谱中最大幅值；

p_2 ——结构振动响应功率谱中次最大幅值。

折减风速 U_r 可由下式计算：

$$U_r = \frac{U}{f_{p_1} H} \quad (4.0.2-3)$$

式中：

H ——主梁特征高度；

f_{p_1} ——结构振动响应功率谱中最大幅值对应频率；

U ——桥梁自由来流 10 分钟平均风速。

2 判别方法可采用多指标阈值逐层判断法，阈值设定应符合下列规定：

1) 加速度均方根值阈值宜设置为 3cm/s^2 ；

2) 能量集中因子阈值宜设置为 10；

3) 折减风速上、下限阈值宜设置为 $\frac{1}{St} + 2$ 和 $\frac{1}{St} - 2$ ， St 为主梁无量纲旋涡脱落频率；

4) 风偏角值上、下限阈值宜设置为 20° 和 -20° ；

5) 其他指标阈值宜根据试验或现场实测确定。

条文说明：

3 判别方法也可采用基于多维指标的高维空间无监督聚类或有监督分类的机器学习算法。

条文说明：

传统的单一限值判定法易受交通车辆激振、阵风抖振或传感器噪声的干扰，容易产生误报。多维度指标联合判别可以提高涡振识别鲁棒性和准确率。然而对于多维度指标判别，阈值判断方法难以对振动类型进行全面、准确划分。机器学习算法（如无监督的 K-Means 聚类、有监督的支持向量机 SVM 或随机森林等）能够通过学习多维度涡振指标在高维空间的簇类特征，从而准确对涡振与其他振动进行聚类或者分类。

4.0.3 桥梁吊索/吊杆、斜拉索涡振判别方法应符合下列规定：

1 判别指标宜同时采用 10 分钟振动响应均方根值 σ_y 、加速度瞬时响应中值概率密度 P_{med} 和振动响应功率谱峰值折减频率 \bar{f} ，也可补充其他指标参数。

P_{med} 采用核密度估计计算，按公式（5-4）计算。

$$P(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_h(x - x_i) \quad (4.0.3-1)$$

式中：

$P(x)$ ——加速度概率密度函数；

K_h ——窗口长度为 h 的核函数。

2 判别方法可采用多指标阈值逐层判断法，阈值设定应符合下列规定：

- 1) 加速度均方根值阈值宜设置为 50cm/s^2 ；
- 2) 中值概率密度阈值宜设置为 0.02；
- 3) 折减风速上、下限阈值宜设置为 $\frac{1}{St} + 3$ 和 $\frac{1}{St} - 3$ ， St 为拉索无量纲旋涡脱落频率；
- 4) 其他指标阈值宜根据试验或现场实测确定。

3 判别方法也可采用基于多维指标的高维空间无监督聚类或有监督分类的机器学习算法。

5 服役桥梁涡激共振控制触发条件

5.1 一般规定

5.1.1 服役桥梁应基于实测涡振响应特征，结合原桥抗风设计指标及现行规范，综合判定是否满足涡激共振控制条件。

5.1.2 涡激共振控制条件应包含振幅超限条件、加速度舒适度条件、视觉安全控制条件、疲劳损伤条件及结构病害条件五个维度。满足其中任一维度的控制触发条件时，必须采取相应的管控或工程治理措施。

5.1.3 控制条件的研判数据应来源于连续不少于 6 个月的结构健康监测数据、现场专项测试报告或定期检查报告。

5.2 振幅控制条件

5.2.1 主梁竖向涡振实测位移最大 10 分钟时距均方根值 \tilde{h}_{\max} 满足下式时，触发竖弯涡振控制条件：

$$\tilde{h}_{\max} > [h_v] / \sqrt{2} = \frac{0.04}{\sqrt{2}f_v} \quad (5.2.1-1)$$

式中： $[h_v]$ 为现行《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01）规定的竖向涡振振幅允许值（m）； f_v 为实测的主梁竖弯涡振频率（Hz）。

5.2.2 主梁扭转涡振实测扭转角最大 10 分钟时距均方根值 $\tilde{\theta}_{\max}$ 满足下式时，触发竖弯涡振控制条件：

$$\tilde{\theta}_{\max} > [\theta_t] / \sqrt{2} = \frac{4.56}{\sqrt{2}Bf_t} \quad (5.2.2-1)$$

式中： $[\theta_t]$ 为现行《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01）规定的扭转涡振振幅允许值（°）；B 为主梁全宽（m）； f_t 为实测的主梁扭转涡振频率（Hz）。

5.2.3 当主梁、斜拉索或吊索的实测涡振幅值引起相邻构件发生空间碰撞，或导致桥面限位装置失效时，直接触发振幅控制条件。

5.3 加速度控制条件

5.3.1 当桥面实测竖向加速度均方根值 \tilde{a}_{\max} 满足下列条件之一，且引发过往司乘人员明显不适或社会投诉时，触发主梁加速度控制条件：

1 对于一般公路桥梁，主梁在 1 年内累计发生 5 次 $\tilde{a}_{\max} > 50\text{cm/s}^2$ 事件或发生 1 次 $\tilde{a}_{\max} > 80\text{cm/s}^2$ 事件；

2 城市桥梁或设有较宽人行道的大跨桥梁，行人舒适度竖向加速度：

$$a_{\max} > 0.25\sqrt{f_v} \quad (5.3.1-1)$$

5.3.2 当实测扭转加速度引起桥面高侧面积车辆（如集装箱卡车、双层客车）发生明显的横向偏移，危及行车轨迹保持能力时，触发主梁加速度控制条件。

5.3.3 桥梁吊索、吊杆或斜拉索在 1 年内累计发生 20 次及以上 $\tilde{a}_{\max} > 300\text{cm/s}^2$ 涡振事件，或发生 5 次及以上 $\tilde{a}_{\max} > 500\text{cm/s}^2$ 涡振事件时，应启动拉（吊）索涡振专项处治。

5.4 视觉安全控制条件

5.4.1 当涡激共振导致的桥面空间波浪起伏或附属构件（路灯、声屏障等）摆动，对行车视距、驾驶员心理产生严重影响，足以诱发急刹车、异常减速等影响交通安全的行为时，直接触发视觉安全控制条件。

5.4.2 主梁竖向涡激共振不仅受限于绝对振幅，还应受限于涡振模态的空间波形陡度（动变坡率）。当实测最大振幅 h_{\max} 满足下式时，触发视觉波浪恐慌控制条件：

$$h_{\max} > \frac{L_w}{[R_{v\omega}]} \quad (5.4.2-1)$$

式中： L_w ——实测涡激共振主导模态的半波长，即相邻两个振型过零点之间的空间距离。

$[R_{vw}]$ ——视觉安全长高比容许限值，无特定研究时取 $[R_{vw}] = 400 \sim 500$ （即桥面动态变坡率超过 0.4%~0.5%）。

5.4.3 当主梁发生扭转涡振或弯扭耦合涡振时，桥面附属立柱构件（如高杆路灯、监控主杆等）的顶端水平摇晃可视度极大。当实测主梁扭转角度 θ_{max} 引起的立柱顶端相对动态位移 Δ_{top} 满足下式时，触发视觉安全控制条件：

$$\Delta_{top} = H_{pole} \times \tan(\theta_{max}) > [\Delta_{top}] \quad (5.4.3-1)$$

式中： H_{pole} ——桥面附属立柱构件的高度（m）；

$[\Delta_{top}]$ ——视觉可容忍的最大端部摆幅限值，宜取 0.3m~ 0.5m。

5.4.4 除上述理论验算外，当结构健康监测系统或桥面视频监控系统捕获到以下现象之一时，应直接判定触发视觉安全控制条件：

- 1 涡振发生期间，桥面车流平均车速非拥堵性骤降幅度超过正常车速的 30%；
- 2 涡振发生期间，桥面监控记录到连续多起由于驾驶员视觉恐慌导致的异常急刹车或压线偏航行为；
- 3 引发了广泛的新闻媒体关注及社会公众恐慌投诉。

5.5 疲劳损伤控制条件

5.5.1 服役桥梁应建立包含关键受力细节（如钢梁纵横肋交接处、主梁与索锚固区等）的有限元模型，计算实测涡振时程下的等效动力应力幅 $\Delta\sigma_{eq}$ 。

5.5.2 当实测涡振引起的等效动力应力幅满足下式时，触发疲劳预警控制条件：

$$\Delta\sigma_{eq} > [\Delta\sigma_L] \quad (5.5.2-1)$$

式中： $[\Delta\sigma_L]$ 为现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）规定的对应构细节常幅疲劳极限（疲劳截止限）。

5.5.3 基于实测涡振频次及振幅，采用 Miner 线性累积损伤准则评估剩余疲劳寿命 T_{rem} 。当满足下式时，触发强制性疲劳控制条件：

$$T_{rem} < T_d \quad (5.5.3-1)$$

式中： T_d 为桥梁剩余设计使用年限。

5.6 结构病害与附属设施控制条件

5.6.1 服役桥梁定期检查或专项检查中，发现由涡激共振直接导致的下列病害时，触发附属设施控制条件：

1. 支座出现异常位移、脱空或剧烈磨损；
2. 桥面伸缩缝锚固区出现混凝土开裂、钢构件断裂；
3. 原桥安装的粘滞阻尼器、电涡流阻尼器出现漏油、过热或低频疲劳失效；
4. 检修道、声屏障、照明灯柱等附属结构发生螺栓松动或疲劳断裂。

6 服役桥梁涡激共振气动控制措施

6.1 一般规定

6.1.1 服役桥梁主梁涡激共振（涡振）可采用气动干预措施进行控制。气动控制措施主要包括：增设风嘴、导流板、扰流板/格栅、涡流发生器以及被动吸吹气流动控制装置等。

6.1.2 实施任何主梁气动控制改造前，应开展节段模型或全桥气动弹性模型风洞试验。试验除验证该气动减振方案的涡振抑制效率外，应严格复核并证明增设此类气动构件后，主梁的颤振、驰振及静风发散临界风速不得低于现行《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01）的要求。

6.1.3 改造后的主梁恒载增量，以及由气动构件引起的静阵风阻力增量，不应导致原桥主梁、拉索（吊索）及下部结构的受力超出原设计容许范围

6.2 气动控制措施的选型与设计

6.2.1 对于因钝体特征诱发旋涡脱落的箱梁，宜在主梁两侧边缘增设或改造风嘴。服役桥梁加装风嘴宜采用薄壁钢结构或玻璃钢(FRP)等轻质高强材料。

6.2.2 对于截面空间受限或流线型化改造困难的桥梁，宜采用扰流板、导流板、扰流栅格等措施，通过破坏桥面附面层、引导气流下洗或分离，抑制旋涡的相干生成。

6.2.3 当主梁原截面气动性能较好，但因桥面附属设施（护栏、声屏障、检修道等）改变了气动外形而诱发涡振时，应优先考虑通过改造附属构件进行治理。包括但不限于：

1. 封闭或开启防撞护栏的透风间隙；
2. 改变声屏障或防抛网的高度与透风率；
3. 将靠近主梁边缘的实体检修道铺板更换为透风钢格栅。

6.2.4 主梁涡振导流板控制措施的设计与实施应满足下列规定：

- 1 导流板宜应用于断面形状复杂、存在明显气流钝体分离特性且易诱发严重尾流脱落的桥梁主梁；
- 2 导流板的安装位置宜布置于主梁斜腹板与底板交界处，或检修车轨道外侧；
- 3 导流板的具体布置方案（包括桥面板上下表面、主梁边缘等）应根据桥梁断面的原始气动特性及风洞试验优化结果确定；
- 4 导流板的几何尺寸（宽度、倾角等）应建立参数化模型，通过计算流体动力学模拟与风洞试验进行比选优化，以最大程度削弱旋涡脱落的相干性；
- 5 导流板与桥梁结构面之间的设计间距 L_d 宜大于此处流场的速度边界层厚度 δ_b 。边界层厚度 δ_b 可按公式（6.2.4-1）进行理论估算：

$$L_d \geq \delta = 5.0 \sqrt{\frac{\nu x}{V}} \quad (6.2.4-1)$$

其中， ν 是流体的运动粘滞系数， x 是沿流体方向距壁面前缘的距离， V 是流体(风)的局部运动速度。

6.2.5 主梁涡振扰流板及扰流格栅控制措施应满足下列规定：

- 1 抑流板的安装位置宜选择在旋涡脱落强烈区域，如主梁侧面或桥面板下缘；
- 2 扰流结构的设计应平衡气动耗能效果与构造复杂度，避免板体迎风面积过大或自重过大；
- 3 扰流板可向流场引入局部气动阻尼，其布置间距与尺寸应结合桥梁的敏感模态特性与涡振频段进行优化；
- 4 对于分离式双箱梁截面，宜在两箱梁的中央开槽间隙处（上下缘）均设置扰流格栅，以打碎空隙内的强烈旋涡脱落，抑制涡激共振的发生。

6.2.6 主梁涡振涡流发生器控制措施应满足下列规定：

- 1 涡流发生器适用于由尾流涡交替脱落引发主梁发生涡振的流场工况；
- 2 涡流发生器的展向布置间距宜为主梁高度的 1.0 倍 ~ 3.0 倍；
- 3 涡流发生器的自身高度宜为主梁高度的 0.10 倍 ~ 0.25 倍；
- 4 流发生器宜错列或成排布置在主梁断面的尾部或气流易分离区。

6.2.7 主梁涡振被动吸吹气控制措施应满足下列规定：

- 1 吸气孔应设置于主梁断面表面的高风压区，吹气孔应设置于低风压区；
- 2 吸气孔与吹气孔之间应通过内部通气孔道相贯通，且通气孔道的横截面面积应与吸、吹气孔的净面积相匹配；
- 3 开孔面积应通过无量纲动量吸吹气系数（ \bar{C}_μ ）进行标定。无量纲吸吹气系数 \bar{C}_μ 按公式（6.2.7-1）计算

$$\bar{C}_\mu = \frac{n(A_{up} + A_{down})U_k^2}{HLU_\infty^2} \quad (6.2.7-1)$$

其中， A_{up} 是主梁上表面设置的吸吹气孔面积； A_{down} 是主梁下表面设置的吸吹气孔面积； H, L 分别是主梁的高度和展向长度， n 是 L 范围内的吹气孔数量； U_k 为吸吹气孔的射流速度、 U_∞ 为迎风来流速度。对于控制单箱梁涡激振动， \bar{C}_μ 宜大于0.02，相邻气孔的中心距宜小于1.4H；对于其他复杂截面箱梁，各项参数必须通过风洞试验或数值模拟专门确定。

6.2.8 桥梁吊索、吊杆及斜拉索的涡振吸吹气控制措施宜符合下列规定：

- 1 被动吸吹气套环的净厚度不宜小于0.05倍的拉索外径（0.05D）；
- 2 被动吸吹气套环沿索长方向宜采用紧密无间隙布置方式；
- 3 被动吸吹气套环的单开孔高度不应小于0.07倍的单个套环总高度；
- 4 被动吸吹气套环应重点包覆布置在斜拉索或吊索的上半部分高风速区域。

套环包覆的总长度宜大于0.4倍的自由索长（ $0.4L_c$ ），且严禁小于0.3倍的自由索长（ $0.3L_c$ ）。

6.2.9 气动构件及其与原桥主梁的连接节点，应按现行《公路桥梁抗风设计规范》进行局部抗风压设计。设计风速应取桥址处百年一遇极值风速，并计入局部体型放大系数。

6.2.10 考虑到桥面行车引起的宽频振动及长期风致微振作用，金属类气动构件及连接螺栓必须进行疲劳验算与防松动设计。

6.2.11 气动构件的布置不得阻碍原桥主梁的桥面排水系统，且不得干涉原桥面检查车的运行轨迹和检修人员的作业空间。

6.3 风洞试验验证要求

6.3.1 服役桥梁实施气动改造前，必须进行专项节段模型风洞试验。

6.3.2 风洞试验模型应精确模拟原桥改造后的桥面栏杆、声屏障、路灯、检修车轨道等突出附属构件（几何缩尺比不宜小于 1:50）。

6.3.3 试验应至少包含以下工况验证：

- 1 均匀流场下的涡振响应测试；
- 2 攻角变化范围（ $-5^{\circ} \sim +5^{\circ}$ ）内的涡振敏感性测试；
- 3 改造后的结构颤振临界风速复测。

6.3.4 当改造方案在风洞试验中实测的最大涡振振幅小于第 5.2 节规定的振幅允许值的 50%，且未引发其它气动不稳定时，方可判定该气动控制方案合格。

6.4 检验

6.4.1 气动控制构件（风嘴、导流板、扰流板、涡流发生器、吸吹气套环等）进场前，应进行严格的出厂检验，并提供产品合格证、材质检测报告及几何尺寸检验记录。

6.4.2 气动构件的制造材料及重量检验应符合下列规定：

1 采用薄壁钢结构制造的构件，其钢材材质及焊缝质量应符合现行国家标准的要求，且必须具备与桥址腐蚀环境相适应的防腐涂层厚度及附着力检验报告；

2 采用玻璃钢（FRP）或高分子聚合物材料制造的构件，应提供抗紫外线老化、耐高低温交变（宽温域）及阻燃性能的类型检验报告；

3 由于气动改造对全桥恒载敏感，气动构件单品成品的实测重量与设计理论重量的偏差不应大于 +5%。

6.4.3 气动构件的几何精度检验应严格控制，并应符合下列规定：

1 气动外形对风流场极为敏感，流线型风嘴、导流板的迎风面几何线形偏差不应大于 $\pm 3\text{ mm}$ ，断面安装倾夹角偏差不得大于 $\pm 1.0^\circ$ ；

2 扰流格栅及透风附属构件（如透风栏杆、钢格栅步板），其开孔率、透气间隙尺寸的制造偏差不应超过设计值的 $\pm 5\%$ ；

3 对于主梁吸吹气装置及拉索/吊索被动吸吹气套环，必须精确查验吸吹气孔的净开口尺寸、套环壁厚及通风孔道净面积，单个气孔面积的偏差不应大于 $\pm 2\%$ 。

6.4.4 金属连接件与紧固件进场时，应重点检验螺栓、防松螺母、防退垫圈的机械性能等级、螺纹精度与防腐镀层，抽样检验结果必须符合抗风疲劳设计要求。

6.5 安装与验收

6.5.1 服役桥梁气动构件的安装施工应制定专项交通组织方案。宜采用模块化预制、现场拼装的工艺，最大程度缩短桥面作业时间。

6.5.2 气动构件安装时，严禁在原桥主受力构件（如主跨钢箱梁顶底板受拉区）随意进行电焊或钻孔。宜采用高强螺栓连接或利用原预留孔洞。

6.5.3 气动控制构件安装作业前，应对桥梁既有结构的安装基面进行预处理。若主梁边缘、斜腹板或下翼缘存在防腐层破损或锈蚀，应先进行除锈修复；拉索或吊索表面的油脂、污物应清理干净。

6.5.4 主梁表面气动构件的安装精度及空间布设应符合下列规定：

1 风嘴、导流板、导流栅格等构件沿桥梁纵向拼接时，相邻构件之间宜留有伸缩缝隙，且拼缝处应保持线形平顺。迎风面由于错台或缝隙不均引起的局部凸起不应大于 2 mm ，严防因拼缝不当引起局部高频风噪或非预期的尾流脱落；

2 涡流发生器等离散排布构件的纵向、展向布置间距及相对结构边缘的距离，应严格遵循风洞试验指导的设计方案，安装位置偏差不应大于 $\pm 20\text{ mm}$ ；

3 构件安装完毕后，应沿桥面全线进行干涉复核，确保气动构件及其连接件绝不干涉桥面径流排水路径，不影响检修车轨道的通行限界。

6.5.5 拉索/吊索被动吸吹气套环的安装应符合下列规定：

1 气动套环应从拉索设计高程的上端向下紧密顺延安装。套环总包覆长度应满足本规程第 6.2.8 条的覆盖率限值；

2 套环与拉索 PE 防护套之间宜设置缓冲橡胶垫层，抱箍紧固压力应均匀适中，确保在极限风荷载下套环不发生纵向滑移与周向扭转，且严禁局部夹裂或压伤拉索 PE 护套。

6.5.6 连接节点的紧固与防坠落验收应符合下列规定：

1 所有气动构件的受力高强螺栓必须使用扭矩扳手严格按设计指定的初拧和终拧扭矩进行紧固，并做好扭矩施加标记；

2 交变风压是导致气动构件松动的首要因素，相关连接节点应 100% 落实防松动构造（如双螺母、高强防松垫圈或螺纹锁固胶）与安全防坠措施。

6.5.7 气动构件安装结束后，应依托桥梁健康监测系统或专项临时风振观测设备进行实桥涡振性能跟踪观测。观测与验收标准如下：

1 宜捕捉并记录主导风向上，风速处于设计防涡振检验风速区间内的实桥结构动力响应数据；

2 在预期的涡振发生风速带内，实测的主梁（或拉索/吊索）各阶模态的最大振幅必须完全被抑制在相关现行规范或设计限定的安全与舒适度允许值（如本规程第 5.2 节规定的振幅允许值）以内，且未出现由气动构件引发的局部驰振或明显的气动噪声。

6.5.8 工程移交验收时，归档资料应包含：气动构件专项风洞试验报告、产品材质及出厂检验合格证、安装几何偏离度复核表、螺栓紧固扭矩验收记录表、实桥观测对比记录，并移交后期养护部门进行全寿命期跟踪巡检维护。

7 桥梁涡激共振阻尼控制措施

7.1 一般规定

7.1.1 服役桥梁涡激共振（涡振）可采用附加阻尼措施进行控制。阻尼控制装置主要包括：塔梁间竖向阻尼器、调谐质量阻尼器（TMD）、调谐液体质量阻尼器（TLMD）、惯容调谐质量阻尼器（TMDI）、多重调谐质量阻尼器（MTMD）、杠杆质量阻尼器（LMD）、摆锤式多重调谐质量阻尼器（MTMD）、冲击质量阻尼器（IMD）等。

7.1.2 桥梁各构件涡振阻尼控制的总体设计目标应满足下列要求：

- 1 主梁受控模态的等效目标阻尼比不宜低于 0.8%；
- 2 吊索（吊杆）及斜拉索等柔性索体系的中低阶模态，目标阻尼比不宜低于 0.5%（即对数衰减率不应小于 3.0%）；
- 3 针对超长斜拉索的难以控制的高阶模态（采用协同阻尼系统时），其对数衰减率底线要求可适当放宽，但不应小于 1.5%。

7.1.3 阻尼控制系统应进行全寿命周期设计，并应具备良好的耐久性、免维护性或易更换性。

7.2 阻尼控制措施的选型与设计

7.2.1 采用塔梁间竖向阻尼器控制主梁多模态涡振应符合下列规定：

- 1 竖向阻尼器的一端应可靠铰接于桥塔（墩）伸臂支架处，另一端应铰接于加劲梁的横隔板等局部刚度较大部位；
- 2 竖向阻尼器的耗能元件宜选用黏滞流体阻尼器、电涡流阻尼器等；
- 3 阻尼器极限行程及动刚度的实测值与设计值的偏差率不应超过 $\pm 5\%$ 。

7.2.2 采用调谐质量阻尼器（TMD）控制主梁涡振应符合下列规定：

- 1 TMD 宜针对桥梁识别出的特定主导涡振模态进行控制；

2 常规 TMD 宜应用于涡振频率较高的主梁，其受控涡振频率宜大于 0.4 Hz；

2 TMD 宜布置在桥梁受控模态振型的波峰（最大位移响应幅值）位置附近；

3 TMD 设计质量比不应小于 0.5%，TMD 质量比 μ_1 按公式（7.2.2-1）计算：

$$\mu_1 = \frac{m_1 \phi^2(x_d)}{m_s} \quad (7.2.2-1)$$

式中：

m_1 ——TMD 活动质量（kg）；

x_d ——TMD 在主梁上的安装位置；

$\phi(x_d)$ ——TMD 安装位置处桥梁目标模态振型值；

m_s ——桥梁受控模态广义质量（kg）。

4 当采用 TMD 对桥梁涡振进行控制时，TMD 的最优调谐频率 f_{opt} 及最优阻尼比 ζ_{opt} 可按公式（7.2.2-2）和（7.2.2-3）进行设计计算：

$$f_{opt} = f_s \cdot \frac{1}{1 + \mu_1} \quad (7.2.2-2)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu_1}{8(1 + \mu_1)}} \quad (7.2.2-3)$$

式中：

f_s ——桥梁受控模态频率（Hz）；

5 TMD 物理装置的设计刚度 k_1 和目标阻尼 c_1 ，应使其自振特性与最优参数相匹配，并按公式（7.2.2-4）和（7.2.2-5）计算确定：

$$k_1 = 4\pi^2 m_1 \cdot f_{opt}^2 \quad (7.2.2-4)$$

$$c_1 = 4\pi m_1 \cdot f_{opt} \zeta_{opt} \quad (7.2.2-5)$$

式中：

k_1 ——TMD 的弹簧物理刚度（N/m）；

c_1 ——TMD 的物理阻尼系数（N·s/m）；

6 TMD 弹簧在重力作用下的静力伸长量 δ_1 应按公式 (7.2.2-6) 验算, 其值应满足主梁内部安装可用净空的要求:

$$\delta_1 = \frac{g}{4\pi^2 f_{opt}^2} \quad (7.2.2-6)$$

条文说明:

TMD 最优频率比和最优阻尼比的设计公式 (8.2.2-2、8.2.2-3) 是基于经典的 Den Hartog 定点理论推导得到的, 其前提是假定主结构的固有阻尼比为零。由于大跨度桥梁的天然模态阻尼比一般较小(通常在 0.2%~0.5% 之间), 采用该组公式确定 TMD 的最优参数已具备足够的工程精度。但是, 当桥梁自身模态阻尼比不可忽略, 或需要追求极致的控制效率时, 需要对 TMD 设计参数通过数值仿真进行进一步优化。

7.2.3 采用调谐液体质量阻尼器 (TLMD) 控制主梁涡振应符合下列规定:

1 当主梁受控涡振频率小于 0.4 Hz 时, 可采用 TLMD 进行控制。TLMD 示意图如图 7-1 所示;

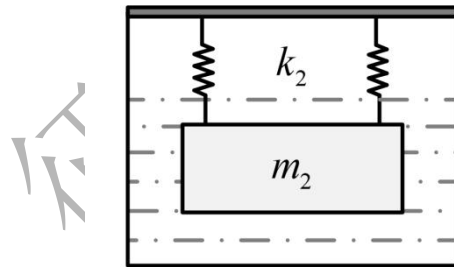


图 7-1 TLMD 示意图

2 TLMD 的参数设计必须计入活动质量块在液体中往复振动时产生的流体阻尼、附加质量及浮力等流固耦合效应。TLMD 的质量比设计值不宜小于 0.5%, 质量比 μ_2 及附加质量比 λ_1 应按公式 (7.2.3-1) 和 (7.2.3-2) 计算:

$$\mu_2 = \frac{m_2 \phi^2(x_d)}{m_s} \quad (7.2.3-1)$$

$$\lambda_1 = \frac{\Delta m}{m_2} \quad (7.2.3-2)$$

式中:

m_2 ——TLMD 活动质量块的物理质量 (kg)；

Δm ——液体的附加质量 (kg)。初步设计时，当活动质量块为长方体时，附加质量可按 $\Delta m = \rho C_m V_m$ 估算 (其中 ρ 为液体密度， C_m 为流体附加质量系数， V_m 为质量块体积)。最终确定的 Δm 需要通过流体动力学数值模拟或试验标定；

λ ——TLMD 的液体附加质量与活动质量比值。

3 TLMD 的最优调谐频率 f_{opt} 及最优阻尼比 ζ_{opt} 可按公式(7.2.3-3)和(7.2.3-4)进行设计计算：

$$f_{opt} = f_s \cdot \frac{1}{1 + \mu_2} \sqrt{\frac{1 + \lambda_1 + \mu_2 \lambda_1}{1 + \lambda_1}} \quad (7.2.3-3)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu_2}{8(1 + \lambda_1)(1 + \mu_2)}} \quad (7.2.3-4)$$

4 TLMD 物理装置的设计刚度 k_2 和目标阻尼 c_2 ，应使其自振特性与最优参数相匹配，并按公式 (7.2.3-5) 和 (7.2.3-6) 计算确定：

$$k_1 = 4\pi^2 (m_2 + \Delta m) \cdot f_{opt}^2 \quad (7.2.3-5)$$

$$c_2 = 4\pi (m_2 + \Delta m) \cdot f_{opt} \zeta_{opt} \quad (7.2.3-6)$$

TLMD 实际物理阻尼 c_2 的耗能需求，应通过调节活动质量块与容器侧壁间的流体缝隙宽度、或在流场中增设阻尼网/孔板来实现。

5 TLMD 在流体浮力作用下的弹簧静力伸长量 δ_2 ，应按公式 (7.2.3-7) 和 (7.2.3-8) 验算验证其内部安装空间：

$$\delta_2 = \frac{g(1 - \rho / \rho_2)}{4\pi^2 f_{opt}^2 (1 + \lambda_1)} \quad (7.2.3-7)$$

$$\rho_2 = \frac{m_2}{V_m} \quad (7.2.3-8)$$

式中：

g ——重力加速度；

ρ_2 ——TLMD 活动质量的等效密度 (kg/m^3)；

V_m ——TLMD 活动质量体积 (m^3)。

条文说明：

常规 TMD 的弹簧静力伸长量与控制频率的平方成反比，当桥梁涡振频率小于 0.4Hz 时，常规 TMD 的弹簧静力伸长量将超过 1.55m，在考虑安装框架尺寸、弹簧压并高度、活动质量块尺寸、TMD 行程等因素之后，常规 TMD 难以在主梁内部实施。TLMD 将弹簧质量振子浸没在液体中，液体的浮力以及附加质量能够有效降低弹簧静力伸长量，同时利用流固耦合作用产生阻尼耗能，TLMD 能够在梁内有限空间下实现主梁低频涡振控制。

物体在液体中振动时会带动周围部分液体一起振动，这部分液体的质量称为附加质量，往往与振动物体质量在一个量级，会对弹簧质量振子的振动频率、阻尼比产生显著影响。由于附加质量产生机理及计算理论十分复杂，TLMD 的实际附加质量需要通过试验进行确定。

7.2.4 采用惯容调谐质量阻尼器 (TMDI) 控制主梁涡振应符合下列规定：

1 当主梁受控涡振频率小于 0.4 Hz 时，可采用 TMDI 进行控制，其原理示意图如图 7-2 所示。

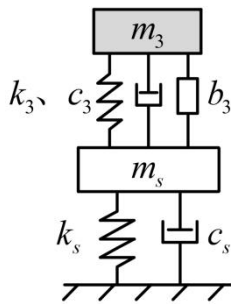


图 7-2 TMDI 示意图

2 TMDI 的参数设计应综合考虑活动质量与惯容器表观惯性质量的协同效应。TMDI 的质量比 μ_3 及表观惯量比 λ_2 应按公式 (7.2.4-1) 和 (7.2.4-2) 计算：

$$\mu_3 = \frac{m_3 \phi^2(x_d)}{m_s} \quad (7.2.4-1)$$

$$\lambda_2 = \frac{b}{m_3} \quad (7.2.4-2)$$

式中：

m_3 ——TMDI 活动质量块的物理质量 (kg)；

b ——惯容器的表观惯性质量 (kg)；

λ_2 ——TMDI 的惯容器表观惯性质量与活动质量比值。

3 TMDI 的最优调谐频率 f_{opt} 及最优阻尼比 ζ_{opt} 可按公式(7.2.4-3)和(7.2.4-4)进行设计计算：

$$f_{opt} = f_s \cdot \frac{1}{1 + \mu_3} \sqrt{\frac{1 + \lambda_2 + \mu_3 \lambda_2}{1 + \lambda_2}} \quad (7.2.4-3)$$

$$\zeta_3 = \sqrt{\frac{3\mu_3}{8(1 + \lambda_2)(1 + \mu_3)}} \quad (7.2.4-4)$$

4 TMDI 物理装置的设计刚度 k_3 和目标阻尼 c_3 ，应使其自振特性与最优参数相匹配，并按公式 (7.2.4-5) 和 (7.2.4-6) 计算确定：

：

$$k_3 = 4\pi^2 (m_3 + b_3) \cdot f_{opt}^2 \quad (7.2.4-5)$$

$$c_3 = 4\pi (m_3 + b_3) f_{opt} \zeta_{opt} \quad (7.2.4-6)$$

式中：

k_3 ——TMDI 的弹簧刚度 (N/m)；

c_3 ——TMDI 的物理阻尼系数 (N·s/m)；

5 TMDI 弹簧在重力作用下的静力伸长量 δ_3 可按以公式 (7.2.4-7) 计算，并应验证其内部安装空间：

$$\delta_3 = \frac{g}{4\pi^2 f_{opt}^2 (1 + \lambda_2)} \quad (7.2.4-7)$$

6 在满足主梁内部安装空间要求的前提下，TMDI 的惯性质量在设计时宜尽

量取较小值。

条文说明：

TMDI 是采用惯容器将常规 TMD 的活动质量与主结构相连得到。常用的惯容器有齿轮齿条惯容器、滚珠丝杆惯容器等。惯容器出力与两端加速度成正比，具有动态负刚度效应，可以实现对 TMD 的降频。TMDI 具有高静刚度-低动刚度特征，在控制低频振动时，TMDI 的弹簧静力伸长量明显低于常规 TMD，安装空间需求显著降低。

惯容器是通过将线性运动转换为飞轮的高速转动来实现的。图 8-3 为齿轮齿条惯容器示意图，图 8-4 为滚珠丝杆惯容器示意图。对于齿轮齿条惯容器，其惯性质量可按下式计算：

$$b_3 = \left[(J_1 + J_2) + (J_3 + J_4) \cdot \left(\frac{r_2}{r_3} \right)^2 \right] \frac{1}{r_1^2} \quad (7.2.4-8)$$

式中：

r_1 、 r_2 、 r_3 ——齿轮 1、齿轮 2、齿轮 3 的分度圆半径 (m)；

J_1 、 J_2 、 J_3 ——齿轮 1、齿轮 2、齿轮 3 的转动惯量 (kg·m²)；

J_4 ——飞轮的转动惯量 (kg·m²)。

对于滚珠丝杆惯容器，其惯性质量可按下式计算：

$$b_3 = \left(\frac{2\pi}{p_s} \right)^2 \cdot (J_{bs} + J_4) \quad (7.2.4-9)$$

式中：

p_s ——丝杆导程 (m)；

J_{bs} ——丝杆的转动惯量 (kg·m²)。

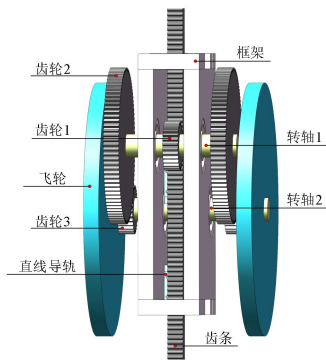


图 7-3 齿轮齿条惯容器

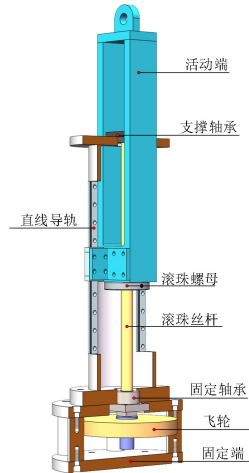


图 7-4 滚珠丝杆惯容器

TMDI 的控制性能与惯容器两端连接位置有关，对于大跨桥梁主梁振动控制场景，惯容器一般连接在与 TMDI 中常规 TMD 连接点相同位置。此时，惯容器的作用为降低 TMDI 弹簧经理伸长量，而惯性质量的增加会降低 TMDI 的控制性能。因此，在满足安装空间要求的前提下，应尽量取小值以充分发挥 TMDI 的控制效果。

7.2.5 采用多重调谐质量阻尼器（MTMD）控制主梁涡振应符合下列规定：

1 MTMD 宜应用于全风速域下主梁可能发生多阶模态涡振，或因环境温度变化及结构刚度退化导致桥梁自振频率波动较大的控制场景；

2 MTMD 系统应进行全局协同设计，统筹确定子阻尼器的总数量、空间布置方式，以及各子阻尼器的单体质量比、频率比及阻尼比；

3 当采用 MTMD 应对主梁频率波动或宽频激振时，应根据设定控制目标确定有效控制频带宽度，并优化各子阻尼器在该频带内的频率间距与阻尼分布规律。

4 空间布置时，应将具有不同调谐频率的子阻尼器，分别布置在其对应阶次目标控制模态振型的波峰（最大位移响应幅值）位置附近。

条文说明：

多重调谐质量阻尼器(MTMD)通过将多个不同频率的子阻尼器并联，形成较宽的有效减振频带，其对结构频率波动和多阶模态激振具有极强的鲁棒性。在工程设计阶段，当 MTMD 采用频率均匀分布策略时，其各子阻尼器的频率设置克

参考以下经验公式进行初步分配：

对于包含 n 个子阻尼器的 MTMD 系统，设其目标中心频率为 f_T ，设定频带宽度为 B ，则第 j 个子阻尼器的调谐频率 f_j 可按公式 (1) 和 (2) 估算：

$$f_j - f_T \left[1 - \frac{B}{2} + \frac{(j-1)B}{n-1} \right] \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (7.2.5-1)$$

$$B = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_T} \quad (7.2.5-2)$$

式中：

f_j ——第 j 个子阻尼器的自振频率 (Hz)；..

f_T ——MTMD 系统的目标中心调谐频率 (Hz)，通常取主梁目标受控模态的自振频率；

B ——无量纲频带宽度；

n ——子阻尼器的总个数；

f_{\max}, f_{\min} ——MTMD 系统覆盖的最高和最低调谐频率 (Hz)。

对于确定的总质量比 μ ，为达到最优控制效果，其最优频带宽度 B_{opt} 理论上与 $\sqrt{\mu}$ 近似成正比，实际工程中，单体子阻尼器的阻尼比通常选取在 2%~5% 之间。

7.2.6 斜拉索多模态涡振的协同阻尼控制应符合下列规定：

1 对于索长大于或等于 300 m 的斜拉索，其涡振控制设计必须涵盖多阶模态的振动响应；

2 宜在索端采用外置式阻尼器（如杠杆质量阻尼器 LMD 等）控制斜拉索的中、低阶模态振动；外置式阻尼器的安装位置距锚固点的距离与拉索计算长度之比，不应小于 2%；

3 宜采用附加摆锤式多重调谐质量阻尼器控制斜拉索的高阶模态振动；该附加阻尼器的有效控制频带应能完全覆盖外置式阻尼器因安装位置受限而产生的控制“模态盲区”（振型节点区）；

4 斜拉索协同阻尼控制系统的设计控制频率范围应覆盖 15 Hz 以内的所有

易激振模态；安装该系统后，斜拉索在设计控制频率范围内的各阶模态对数衰减率（ δ ）均不应小于 1.5 %。

条文说明：

斜拉索外置式阻尼器（如黏滞阻尼器、LMD 等）的控制效果受其安装位置的严格限制，当阻尼器安装在索端一定距离 x_c 处时，基于弦振动理论的渐近解（Pacheco 等提出的通用曲线或 Krenk 公式），斜拉索在第 i 阶模态下能提供的最大附加阻尼比 $\zeta_{i,\max}$ ，以及达到该最大阻尼比所需的最优物理阻尼系数 $C_{opt,i}$ ，可按公式（7.2.6-1）和（7.2.6-2）进行初步估算：

$$\zeta_{i,\max} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{x_c}{L_c} \quad (7.2.6-1)$$

$$C_{opt,i} \approx \frac{\sqrt{T \cdot m}}{i \cdot \pi \cdot (x_c / L_c)} \quad (7.2.6-2)$$

式中：

$\zeta_{i,\max}$ —— 阻尼器可为拉索第 i 阶模态提供的最大对数阻尼比；

x_c —— 阻尼器安装位置距索端锚固点的距离（m）；

L_c —— 拉索的计算长度（m）；

T —— 拉索的轴向索力（m）；

m —— 拉索的单位长度线质量（kg/m）；

i —— 斜拉索受控模态的阶次。

从公式（7.2.6-2）可以看出，外置阻尼器提供的阻尼水平直接取决于安装距高比 (x_c / L_c) ，当索长 L_c 较大或需控制高阶模态（模态驻点多）时，宜引入多重调谐阻尼器等技术手段进行协同控制。

摆锤式调谐阻尼器是一种利用质量块作为质量元件，利用钢绞线作为刚度及阻尼元件的阻尼装置。通过频率调谐，将斜拉索振动传递至质量块处，经由阻尼元件耗散振动能量。图 7-5 为摆锤式调谐阻尼器结构示意图。

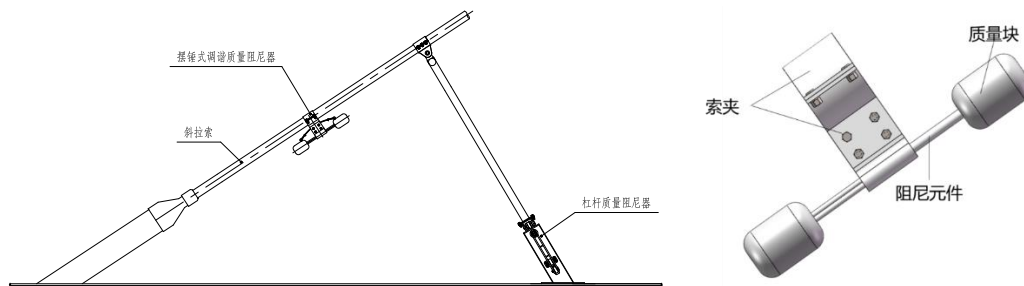


图 7-5 摆锤式调谐阻尼器构造示意图

7.2.7 吊索（吊杆）的涡振阻尼控制应符合下列规定：

- 1 宜采用摆锤式多重调谐质量阻尼器（MTMD）、冲击质量阻尼器（IMD）单独或组合配置的形式控制吊索涡振响应；
- 2 附加阻尼器的总体选型与参数设计，应结合吊索的自由长度、结构线密度以及预估的易激振频率范围综合确定；
- 3 目标控制频率的选取，应优先依据现场实测的吊索动力响应频谱特征进行提取与确定；
- 4 采用吊索 MTMD 时，其有效适用范围宜为控制目标频率在 3 Hz ~ 25 Hz 范围内的中、高频模态涡振；
- 5 采用吊索 IMD 时，可通过调节内置质量块的碰撞间隙以及柔性耗能元件的材料与构造特征，实现对不同主导频段下吊索涡振的宽频带控制；
- 6 空间布置时，各类附加单体阻尼器的实际安装位置应严格避开受控阶次模态的振型节点（位移驻点）。

条文说明：

IMD 依靠内部活动质量块与腔体的非线性碰撞及动量交换来耗散能量。其减振效率对质量块的“碰撞间隙”高度敏感。

在初步设计时，最优单侧碰撞间隙 d_{opt} 可结合吊索目标控制位置的最大预期振幅进行估算：

$$d_{opt} = \alpha \cdot Y_{\max} \quad (7.2.7-1)$$

式中：

d_{opt} ——IMD 内置活动质量块与耗能缓冲层之间的最优单侧净间隙（m）；

Y_{\max} ——吊索在无控制状态下，目标受控频率对应的最大容许振幅（m）；

α ——间隙优化系数，根据经验及碰撞恢复系数不同，通常取 0.8~1.5。

由于 IMD 具有强非线性特征，公式 (7.2.7-1) 仅供初步定型参考，最终的间隙取值与柔性耗能元件配置应通过足尺落锤或台架力学试验进行验证。

7.3 检验

7.3.1 桥梁涡振阻尼控制装置进场前，应进行型式检验和出厂检验。进场时应核查产品合格证、出厂检验报告及安装调试说明书。

7.3.2 调谐质量类阻尼器（TMD、MTMD、摆锤式 MTMD、LMD 等）的检验应符合下列规定：

- 1 活动质量块的实测质量与设计值的偏差不应大于 $\pm 1\%$ ；
- 2 各阻尼器单体的实测自振频率与设计调谐频率的偏差不应大于 $\pm 2\%$ ；
- 3 阻尼元件的等效线性阻尼系数或物理阻尼比与设计值的偏差不应大于 $\pm 5\%$ ；
- 4 对于控制微幅高频涡振的阻尼器（如吊索 MTMD），应进行微幅激振下的死锁特性与启动摩擦力检验，确保其在微小位移下能正常激活并稳定耗能。

7.3.3 调谐液体质量阻尼器（TLMD）与惯容调谐质量阻尼器（TMDI）的检验应符合下列规定：

- 1 TLMD 应重点检验容器的密封性能、防腐涂层质量，以及工作液体的密度、黏度等物理参数，其流体附加质量与阻尼特性应通过台架试验标定；
- 2 TMDI 应检验惯容器的表观惯性质量（实测值偏差不应大于 $\pm 5\%$ ）及其内部机械传动部件的运动顺畅性，传动机构的静摩擦阻力不应超过设计允许限值。

7.3.4 冲击质量阻尼器（IMD）的检验应符合下列规定：

- 1 应精确检验内置活动质量块与耗能缓冲层之间的单侧碰撞间隙，其制造允许偏差不应大于 $\pm 0.5\text{ mm}$ ；
- 2 柔性耗能缓冲元件的材质硬度、碰撞恢复系数等力学性能应符合设计要求。

7.3.5 塔梁间竖向阻尼器的检验应符合下列规定：

- 1 应进行低速与额定速度下的阻尼力-位移滞回曲线测试；
- 2 阻尼器的极限行程、阻尼系数及动刚度的实测值与设计值的偏差率不应超过 $\pm 5\%$ 。

7.3.6 涡振阻尼装置的疲劳性能与耐久性检验应符合下列规定：

- 1 鉴于涡振具有高频次特征，阻尼器（特别是拉索/吊索阻尼装置）应进行小幅高频疲劳试验，疲劳循环次数不应少于 2×10^6 次。试验后，核心力学参数（频率、阻尼系数等）的衰减量不应大于 10% ，且不得出现疲劳开裂或渗漏；
- 2 外露部件及紧固件应具有与桥梁所处腐蚀环境相匹配的防腐涂装或防腐材质检验报告。

7.4 安装与验收

7.4.1 阻尼控制装置安装前，宜对受控的主梁、斜拉索或吊索进行动力特性实测校验。当实测的主导涡振频率与设计理论频率偏差超过 $\pm 3\%$ 时，应根据实测结果对 TMD、MTMD 等频率敏感型阻尼器的参数进行自适应微调后方可安装。

7.4.2 阻尼装置的现场安装位置及精度应符合下列规定：

- 1 主梁 TMD、TLMD 及 TMDI 等装置宜安装于受控模态振型的波峰（最大位移响应幅值）位置附近，其平面位置及高程的安装偏差应符合设计要求；
- 2 吊索及斜拉索上的附加单体阻尼器（LMD、摆锤式 MTMD、IMD），应严格按照计算指导的纵向高程进行布置。其实际安装位置必须避开受控阶次模态的振型节点（位移驻点）；
- 3 索上阻尼器与拉索/吊索之间的抱箍连接必须牢固可靠。抱箍内侧应设置缓冲防滑垫层，紧固扭矩应符合设计要求，在确保提供足够防滑摩擦力的同时，严禁损伤拉索/吊索的 PE 防护套。

7.4.3 塔梁间竖向阻尼器的安装应确保两端铰接耳环的对中性，避免阻尼器活塞杆在服役过程中产生偏心受力；安装完毕后应根据当地环境温度与主梁线形释放残余位移。

7.4.4 阻尼系统安装完毕后，必须开展原位减振性能验收测试，测试与验收应符合下列规定：

1 宜采用环境激振法、人工敲击法或激振器法激发受控结构的动力响应。针对斜拉索/吊索的高阶模态，宜采用多点高频加速度传感器进行空间响应识别；

2 等效阻尼比验收：通过自由衰减信号识别，主梁、斜拉索及吊索加装阻尼器后的等效阻尼比（或对数衰减率）应达到本规程第 7.1.2 条规定的目标限值；

3 振幅控制验收：具备条件时，可在典型的涡振风速期间进行实桥观测，受控结构的最大涡振振幅或加速度响应必须控制在相关规范或设计允许的安全及舒适度限值以内。

7.4.5 工程移交验收时，应形成并提交完整的检验验收档案，包括产品出厂测试报告、安装位置及节点避让复核表、螺栓紧固扭矩记录、以及原位动力特性验收测试报告，相关数据应同步归入桥梁健康监测基准数据库。

8 桥梁涡激共振控制监测与效果评估

8.1 一般规定

8.1.1 服役桥梁实施涡振控制改造后，应建立长效的风速风场与结构动力响应同步监测机制，以客观评估减振（振）控制效果。

8.1.2 桥梁涡振控制效果的评估，应基于现场实测数据，重点对比控制措施实施前、后结构涡振发生的频率、最大振幅、起振风速区间及持续时间等特征参数。

8.1.3 若原桥已建有结构健康监测系统（SHM），涡振监测与评估模块应无缝接入既有系统；若原桥未设 SHM 系统，应针对受控的主梁、拉索（吊索）增设专项、独立的涡振在线监测系统。

8.1.4 阻尼控制装置与气动控制构件应纳入桥梁日常养护与定期检查范畴。当监测系统预警涡振响应超限或控制效果明显衰退时，应立即开展专项检查与维修改造。

8.2 监测系统设置与数据采集要求

8.2.2 桥梁来流自由风场监测应符合下列规定：

1 桥梁自由风场监测应在主跨跨中桥面的上下游两侧各布置 1 个测点，并在索塔顶部布置 1 个测点。对于主跨不小于 800m 的大跨度桥梁，为考虑风场沿桥向的不一致性，宜在主跨 1/4 及 3/4 位置各增设 2 个测点；

2 桥面风场监测宜采用三维超声风速仪，塔顶部宜采用机械式或二维超声风速仪。风速仪量程应大于其安装标高处设计风速的 1.2 倍；测量精度应满足：风速精度不应大于 0.3m/s，风向角精度不应大于 2°；

3 风速仪宜安装于具备足够支撑刚度与强度的测风支架上，支架与桥体需连接牢固并满足抗风要求；支架宜采用水平或垂直支架，水平支架伸出主梁边缘的水平距离宜不小于 1.5 倍梁高（或拱肋高度），垂直支架距桥面或塔顶部的高度宜不小于 1.5 倍梁高；若无条件在桥梁安装独立测风支架，风速仪可依托沿线附

属设施构件进行安装，但必须满足上述防绕流干扰要求。

8.2.3 结构振动响应监测应符合下列规定：

1 主梁的振动监测宜采用低频性能优异的力平衡式加速度计或高精度北斗/GNSS 位移基站，传感器应布置于主梁受控模态的振型波峰（最大位移处）及四分之三分点截面的两侧边缘；

2 拉索及吊索的振动监测宜采用多轴微机械（MEMS）加速度计或非接触式机器视觉位移测量系统。传感器布置应兼顾低阶与高阶模态振动特征，宜布置于距锚固端 3 米以上的高度位置。

8.2.4 数据采集策略应符合下列规定：

1 对于主梁低频涡振监测，加速度采样频率不宜低于 50 Hz；对于拉索/吊索中高频多模态涡振监测，加速度采样频率不宜低于 100 Hz；

2 超声波风速仪的采样频率不宜低于 10 Hz。

8.3 减振效果评估方法与标准

8.3.1 减振效果评估应以全自然年为基本评价周期，提取完整的季节性强风与平稳气流数据进行统计分析。

8.3.2 对于采用阻尼控制措施的受控结构，其效果评估应满足下列要求：

1 利用实测自由衰减信号或随机振动数据识别受控模态的等效阻尼比。实测阻尼比不得低于本规范第 8.1.2 条规定的目标设计限值；

2 在统计的所有发生涡振的实测风速区间内，主梁或拉索（吊索）的实测最大振幅，必须严格低于本规程第 5.2 节规定的容许振幅限值。

8.3.3 对于采用气动控制措施的主梁或拉索，其效果评估应满足下列要求：

1 基于“风速-振幅”实测散点图进行对比分析。改造后，在原发生涡振的风速与风攻角区间内，不应再出现具有明显“锁定”特征的周期性共振响应

2 在各风速段下，结构的实测振动位移及加速度均应满足规范的安全与舒适

度限值。

8.3.4 当实测振幅超出限值，或识别出的结构阻尼比相较于初验时发生显著退化（退化量超过 20%）时，评估报告应判定“涡振控制效果失效或衰减”，并触发预警。

8.4 控制装置巡检与长期维护

8.4.1 桥梁管理单位应制定涡振控制装置的专项定期巡查手册。一般气象条件下每年巡检不应少于 1 次；在经历台风、强寒潮或破坏性地震等极端荷载后，应进行特殊巡查。

8.4.2 机械类阻尼控制装置的巡检与维护应重点检查下列内容：

1 TMD、MTMD 等调谐质量阻尼器：检查导轨或悬吊弹簧有无锈蚀、卡涩现象，活动质量块有无偏移碰壁；对于采用油位黏滞阻尼元件的装置，必须重点排查有无液压油渗漏；

2 IMD 等冲击类阻尼器：重点测量并复核内部质量块与腔体侧壁的“碰撞间隙”是否因长期磨损而发生改变；检查高分子耗能缓冲垫有无老化、硬化或碎裂

3 连接抱箍及螺栓：检查安装在吊索/拉索上的阻尼器抱箍有无纵向滑移迹象，使用扭矩扳手抽检紧固螺栓的防松状态。

8.4.3 气动控制构件的巡检与维护应重点检查下列内容：

1 风嘴、导流板等附加构件的钢板焊缝有无疲劳开裂，表面防腐涂装有无起皮、脱落和锈蚀；

2 扰流板、涡流发生器的螺栓连接点有无松动，构件整体是否存在影响气动流线的严重变形；

3 对于吸吹气装置，应及时清理吸、吹气孔及内部通风管道中的灰尘、树叶及鸟巢等堵塞物，确保气动孔隙率符合设计要求。

8.4.4 当阻尼控制装置的核心耗能部件老化失效,或气动构件发生不可修复的疲劳破坏时,应及时采用原设计参数的备品备件进行替换。更换后应重新进行单体验收测试。

征求意见稿