

前 言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2013 年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》（建标〔2013〕6 号）要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准主要技术内容是：1 总则；2 术语和符号；3 基本规定；4 风荷载；5 黏滞和黏弹性阻尼器的风振控制；6 调谐阻尼器的风振控制；7 主被动混合调谐质量阻尼器的风振控制；8 风振控制系统抗震设计。

本标准由住房和城乡建设部负责管理，由哈尔滨工业大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送哈尔滨工业大学（地址：哈尔滨南岗区黄河路 73 号哈尔滨工业大学土木工程学院 309 室，邮编：150090）。

本标准主编单位：哈尔滨工业大学

本标准参编单位：大连理工大学

同济大学

哈尔滨工业大学（深圳）

广州大学

香港城市大学

北京工业大学

北京市建筑设计研究院有限公司

中国建筑科学研究院有限公司

中国电子工程设计院有限公司

中国建筑西南设计研究院有限公司

悉地国际设计顾问有限公司

本标准主要起草人员：欧进萍 李 惠 张东昱 金新阳

陈文礼	顾 明	肖仪清	娄 宇
郭安薪	冯 远	谭 平	滕 军
杨蔚彪	吴 斌	傅学怡	李秋胜
闫维明	关新春	李芦钰	赖马树金
本标准主要审查人员：徐 建	郁银泉	梁枢果	谢壮宁
李盛勇	张令心	徐赵东	李寿英
段元锋			

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	6
3.1	一般规定	6
3.2	结构风振控制响应计算	7
3.3	风振控制系统设计要求	10
3.4	风振控制系统检验	11
4	风荷载	12
4.1	一般规定	12
4.2	顺风向风振的等效风荷载	13
4.3	横风向和扭转风振的等效风荷载	16
4.4	顺风向脉动风荷载	19
5	黏滞和黏弹性阻尼器的风振控制	21
5.1	一般规定	21
5.2	阻尼力模型	21
5.3	设计要点	23
5.4	检验	25
5.5	连接与安装	27
6	调谐阻尼器的风振控制	28
6.1	一般规定	28
6.2	调谐阻尼器力学参数	28
6.3	设计要点	31
6.4	检验	34

6.5 连接与安装	34
7 主被动混合调谐质量阻尼器的风振控制	36
7.1 一般规定	36
7.2 设计规定	36
7.3 检验	43
7.4 安装与验收要求	44
8 风振控制系统抗震设计	45
本标准用词说明	46
引用标准名录	47

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	4
3	Basic Requirements	6
3.1	General Requirements	6
3.2	Calculation of Controlled Structural Responses Subject to Wind Load	7
3.3	Design Requirements of Wind-induced Structural Vibration Control System	10
3.4	Testing of Wind-induced Structural Vibration Control System	11
4	Wind Load	12
4.1	General Requirements	12
4.2	Equivalent Wind Load for Structural Along-wind Direction Vibration	13
4.3	Equivalent Wind Load for Structural Cross-wind Direction and Torsional Vibration	16
4.4	Fluctuating Wind Load of Along-wind Direction	19
5	Wind-induced Structural Vibration Control Based on Viscous and Visco-elastic Damper	21
5.1	General Requirements	21
5.2	Damping Force Model	21
5.3	Design Specification	23
5.4	Testing	25

5.5	Connection and Installation	27
6	Wind-induced Structural Vibration Control Based on Tuned Mass/Liquid Damper	28
6.1	General Requirements	28
6.2	Mechanical Parameters of Tuned Mass/Liquid Damper	28
6.3	Design Specification	31
6.4	Testing	34
6.5	Connection and Installation	34
7	Wind-induced Structural Vibration Control Based on Active-passive Hybrid Tuned Mass Damper	36
7.1	General Requirements	36
7.2	Design Specification	36
7.3	Testing	43
7.4	Installation and Acceptance Requirements	44
8	Seismic Resistance Design Requirements for Wind Vibration Control System	45
	Explanation of Wording in This Standard	46
	List of Quoted Standards	47

1 总 则

1.0.1 为减小建筑结构风致振动，提高结构安全性、适用性和舒适性，正确利用振动控制技术，做到技术先进、经济合理、安全适用、保证质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建和既有建筑结构风振控制系统的设计、检验和安装；不适用于大跨屋盖结构。

1.0.3 结构风振控制系统可兼用于结构抗震控制；当兼用于结构抗震控制时应同时满足结构抗风和抗震设计要求。

1.0.4 建筑结构风振控制系统的设计、检验和安装，除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 被控结构 controlled structure

安装了风振控制系统的建筑结构。

2.1.2 风振控制系统 wind-induced structural vibration control system

安装在被控结构上为结构提供控制力、增大结构阻尼或改变结构刚度从而减小结构风振响应的元件和装置。

2.1.3 结构风振控制体系 combined system of controlled building structures and wind-induced vibration control system

被控结构与风振控制系统构成的体系。

2.1.4 设计风荷载 designed wind load

被控结构在进行风振控制设计和风振响应验算时所使用的风荷载，包括等效风荷载和风荷载时程。

2.1.5 附加阻尼比 addition damping ratio

将风振控制系统减振作用等效为增加被控结构阻尼比时，计算得到的风振控制系统提供给被控结构的阻尼比。

2.1.6 等效风荷载 equivalent wind load

计入风振控制系统给被控结构提供附加阻尼比影响的等效风荷载标准值。

2.1.7 黏滞阻尼器 viscous damper

通过阻尼器内部黏滞液体运动产生阻尼、消耗结构振动能量的一种速度相关型阻尼器。

2.1.8 黏弹性阻尼器 visco-elastic damper

通过黏弹性材料的剪切变形产生阻尼、消耗结构振动能量的一种速度相关型阻尼器。

2.1.9 调谐阻尼器 tuned mass/liquid damper

指通过与结构形成共振从而吸收和耗散结构振动能量，减小结构风振响应的控制系统，包括调谐质量阻尼器和调谐液体阻尼器。

2.1.10 调谐阻尼器有效质量 effective mass of tuned mass/liquid damper

调谐阻尼器质量中参与振动从而吸收和耗散被控结构振动能量的那一部分质量。

2.1.11 主被动混合调谐质量阻尼器 active-passive hybrid tuned mass damper

由被动调谐质量阻尼器和主动驱动控制装置共同组成的风振控制系统。

2.1.12 主动控制算法 active control algorithm

以结构响应信息或荷载实时信息为输入，在线实时确定结构主动控制力的算法。

2.1.13 风振控制系统位移设计值 designed displacement of wind-induced structural vibration control system

根据设计风荷载计算并考虑安全系数放大得到的风振控制系统最大位移。

2.1.14 风振控制系统速度设计值 designed velocity of wind-induced structural vibration control system

根据设计风荷载计算并考虑安全系数放大得到的风振控制系统最大速度。

2.1.15 风振控制系统控制力设计值 designed control force of wind-induced structural vibration control system

根据设计风荷载计算并考虑安全系数放大得到的风振控制系统最大控制力。

2.1.16 风振控制系统位移允许值 allowable displacement of wind-induced structural vibration control system

风振控制系统能够允许承受的最大位移。

2.1.17 风振控制系统速度允许值 allowable velocity of wind-induced structural vibration control system

风振控制系统能够允许承受的最大速度。

2.1.18 风振控制系统控制力允许值 allowable control force of wind-induced structural vibration control system

风振控制系统能够允许承受的最大控制力。

2.2 符 号

2.2.1 风荷载与风振参数

R ——被控结构顺风向风振共振因子；

R_L ——被控结构横风向风振共振因子；

R_T ——被控结构扭转风振共振因子；

τ_{wk} ——被控结构顺风向等效风荷载标准值；

τ_{wLk} ——被控结构横风向等效风荷载标准值；

τ_{wTk} ——被控结构扭转风振的等效风荷载标准值；

β_z ——被控结构顺风向风振系数；

ω_{D1} ——被控结构第一阶顺风向振动圆频率；

ω_{L1} ——被控结构第一阶横风向振动圆频率；

ω_{T1} ——被控结构第一阶扭转振型圆频率。

2.2.2 结构参数

C ——被控结构的阻尼阵矩阵；

M ——被控结构的质量阵矩阵；

ω ——被控结构自振圆频率；

ξ ——被控结构阻尼比；

ξ_{eq} ——包括风振系统提供阻尼的被控结构顺风向第一阶振型等效总阻尼比。

2.2.3 风振控制系统参数

c_T ——调谐阻尼器阻尼系数；

c_v ——黏滞和黏弹性阻尼器给被控结构附加的等效线性阻尼系数；

- F_d ——风振控制系统控制力；
- F_{dm} ——风振控制系统控制力设计值；
- k_T ——调谐阻尼器刚度；
- k_v ——黏滯和黏弹性阻尼器给被控结构附加的等效线性刚度；
- m_T ——调谐阻尼器的质量；
- μ_T ——调谐阻尼器有效质量与被控结构预期控制振型广义质量的比值；
- ω_T ——调谐阻尼器自振圆频率；
- ξ_T ——调谐阻尼器阻尼比；
- ξ_c ——风振控制系统为被控结构提供的附加阻尼比。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 风振控制技术宜按下列规定选用：

1 黏滞和黏弹性阻尼器宜用于层间相对位移和相对速度较大的被控结构；

2 黏弹性阻尼器宜用于阻尼器使用温度变化范围较小的被控结构；

3 调谐阻尼器宜用于阻尼比较小的被控结构；

4 主被动混合调谐质量阻尼器宜用于对结构风振减振效率要求较高的被控结构。

3.1.2 风振控制系统宜根据减振要求沿结构两个主轴方向分别设置，平面布置不宜使结构产生扭转响应。

3.1.3 风振控制系统竖向布置位置，宜根据被控结构振动特征和所采用的振动控制技术特点优化确定。

3.1.4 风振控制系统安装位置应便于检查、维修和更换。

3.1.5 风振控制系统应符合下列规定：

1 在风荷载标准值作用下风振控制系统应正常工作，其部件不应发生强度破坏；

2 在被控结构服役期内风振控制系统部件不应发生疲劳破坏；风振控制系统在风荷载标准值作用下，应能连续工作 4h 不发生疲劳破坏；当风振控制系统不能满足疲劳强度要求时，应能更换；

3 风振控制系统不应承受结构自重；

4 在风荷载标准值作用下，风振控制系统部件不应与结构构件发生碰撞，并宜采取防碰撞措施。

3.1.6 被控结构风振响应验算应符合下列规定：

1 采用等效风荷载法计算应考虑风振控制系统附加阻尼比的影响；

2 风振控制系统与被控结构连接构件的设计应考虑风振控制系统传递的控制力；

3 在风荷载标准值作用下，被控结构最大顶点侧向位移和最大层间位移角应符合现行行业标准《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3 和《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 的规定；

4 在 10 年一遇风荷载标准值作用下，被控结构顶点最大加速度应符合现行行业标准《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3 和《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 的规定。

3.1.7 对有抗震设防要求的被控结构，应考虑风振控制系统对结构地震响应的影响。当风振控制系统也用于被控结构抗震控制时，应按本标准第 8 章和现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的相关规定，进行风振控制系统设计。

3.1.8 设计文件应注明风振控制系统性能参数，并按本标准的要求对风振控制系统或部件进行检测。

3.2 结构风振控制响应计算

3.2.1 当被控结构以顺风向风振为主时，可仅进行结构顺风向风振控制设计和验算；对横风向风振和扭转风振明显的结构，尚应同时进行结构横风向风振控制和扭转风振控制的设计和验算。

3.2.2 被控结构风振响应分析宜采用下列方法：

1 当被控结构顺风向风振以第一振型为主时，宜按本标准第 3.2.4 条计算被控结构顺风向风振响应；

2 立面规则且平面为圆形或矩形的建筑结构，宜采用本标准第 4.3 节规定的结构横风向等效风荷载，按本标准第 3.2.5 条计算被控结构横风向风振响应；

3 对平面为矩形的建筑结构，当其扭转风振以第一振型为主时，宜采用本标准第 4.3 节规定的结构扭转风振等效风荷载，

按本标准第 3.2.6 条计算被控结构扭转风振响应；

4 当被控结构风振中高阶振型响应影响显著或者结构平面复杂时，宜按本标准第 3.2.7 条规定，采用时程分析法计算被控结构风振响应。

3.2.3 采用等效风荷载法计算被控结构风振响应时，应符合下列规定：

1 风振控制系统阻尼器模型宜采用等效线性模型；

2 被控结构自振频率和振型的计算应计入风振控制系统提供的质量和等效线性刚度；被控结构总阻尼比应取被控结构阻尼比与风振控制系统附加阻尼比之和；

3 被控结构顺风向风振、横风向风振和扭转风振的等效风荷载标准值应考虑风振控制系统附加阻尼比的影响，并应符合本标准第 4 章的相关规定。

3.2.4 采用等效风荷载法计算被控结构顺风向风振响应时，应符合下列规定：

1 被控结构顺风向最大位移响应宜采用本标准第 4.2.1 条规定的等效风荷载标准值，按静力方法计算确定。

2 被控结构顺风向设计最大动位移响应宜按下式计算：

$$x_{Dm}(z) = x_{Sm}(z)(\beta_z - 1) \quad (3.2.4-1)$$

式中： $x_{Dm}(z)$ ——脉动风作用下被控结构在高度 z 处顺风向风振的最大动位移 (m)；

$x_{Sm}(z)$ ——等效风荷载作用下被控结构高度 z 处顺风向风振的最大位移 (m)，按本条第 1 款规定确定；

β_z ——被控结构风振系数，按本标准第 4.2.2 条规定计算。

3 被控结构顺风向最大速度响应宜按下式计算：

$$\dot{x}_{Dm}(z) = \omega_{D1} x_{Dm}(z) \quad (3.2.4-2)$$

式中： $\dot{x}_{Dm}(z)$ ——脉动风作用下被控结构在高度 z 处顺风向风振的最大速度 (m/s)；

ω_{D1} ——被控结构第一阶顺风向振动圆频率 (rad/s)。

4 被控结构顺风向最大加速度响应宜按本标准第 4.2.4 条规定计算。

3.2.5 采用等效风荷载法计算被控结构横风向最大风振响应时，应符合下列规定：

1 被控结构横风向风振最大位移响应宜采用本标准第 4.3.1 条或第 4.3.3 条规定的横风向第 1 阶振型等效风荷载标准值，按静力方法计算确定。

2 被控结构横风向风振最大速度响应宜采用下式计算：

$$\dot{x}_{1m}(z) = \omega_{11} x_{1m}(z) \quad (3.2.5)$$

式中： $x_{1m}(z)$ ——被控结构在高度 z 处横风向风振的最大位移 (m)，根据本条第 1 款确定；

$\dot{x}_{1m}(z)$ ——被控结构在高度 z 处横风向风振的最大速度 (m/s)；

ω_{11} ——被控结构第一阶横风向振动圆频率 (rad/s)。

3 被控结构横风向风振最大加速度响应宜按本标准第 4.3.7 条规定计算。

3.2.6 采用等效风荷载法计算矩形平面被控结构扭转风振响应时，应符合下列规定：

1 被控结构扭转风振最大转角宜采用本标准第 4.3.5 条规定的等效风荷载标准值，按静力方法计算确定；

2 被控结构扭转风振最大转角速度宜按下式确定：

$$\dot{\theta}_{1m}(z) = \omega_{T1} \theta_{1m}(z) \quad (3.2.6)$$

式中： $\theta_{1m}(z)$ ——被控结构在高度 z 处扭转风振的最大转角 (rad)，按本条第 1 款确定；

$\dot{\theta}_{1m}(z)$ ——被控结构在高度 z 处扭转风振的最大角速度 (rad/s)；

ω_{T1} ——被控结构第一阶扭转振型圆频率 (rad/s)。

3.2.7 采用时程分析法计算被控结构风振响应时，应符合下列规定：

1 被控结构风振响应计算应采用包括被控结构模型和风振控制系统阻尼器模型在内的结构风振控制体系力学模型；

2 结构风振控制体系力学模型应包括被控结构、风振控制系统以及支撑等连接构件，应能正确反映风振控制体系的受力与工作状态。

3.2.8 风振控制系统位移和速度设计值的计算应符合下列规定：

1 采用等效风荷载法计算被控结构风振响应时，风振控制系统位移和速度设计值应取为按本标准第 3.2.4～3.2.6 条规定计算得到的风振控制系统最大位移和最大速度的 1.4 倍；

2 采用时程分析法计算被控结构风振响应时，风振控制系统位移和速度设计值应取为采用多条风荷载时程计算得到的风振控制系统最大位移和最大速度包络值的 1.4 倍。

3.3 风振控制系统设计要求

3.3.1 风振控制系统的控制力允许值应大于其控制力设计值的 1.2 倍；风振控制系统的位移和速度允许值应分别大于其设计值的 1.2 倍。

3.3.2 为安装风振控制系统而设置的支撑、墙、梁或梁柱节点等结构构件，应能承受风振控制系统控制力允许值作用而不发生破坏，并应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 和《混凝土结构设计规范》GB 50010 中关于钢构件连接或钢与钢筋混凝土构件连接的构造措施要求。

3.3.3 风振控制系统与被控结构之间的直接连接部件在风振控制系统控制力允许值作用下应处于弹性工作状态。

3.3.4 风振控制系统与被控结构之间宜采用螺栓连接或销栓连接，也可采用焊接连接；当采用销栓连接时，连接销轴之间应配合紧密；当采用焊接时，焊接工艺和质量应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661 的规定。

3.3.5 风振控制系统不宜安装在太阳直射、雨淋、温度过高和过低的部位；不能满足环境条件时，应采取措施避免控制系统材

料和部件的老化、锈蚀和黏滞阻尼器黏滞液体因温胀而发生的泄漏。

3.3.6 施工过程中应采取措施避免破坏防腐漆，安装完毕后应对防腐情况进行检查。

3.4 风振控制系统检验

3.4.1 不同类型风振控制系统安装前，应按本标准相应章节规定对系统或部件进行检验。

3.4.2 黏滞和黏弹性阻尼器检验应符合本标准 5.4 节的规定。

3.4.3 调谐阻尼器和主被动混合调谐质量阻尼器的检验应符合下列规定：

1 调谐质量阻尼器的刚度元件和阻尼元件组装前应按本标准第 6.4 节规定进行检验；

2 当调谐质量阻尼器或者主被动混合调谐质量阻尼器的质量块较大，无法在安装前对风振控制系统整体性能进行检验时，应按本标准第 7.3 节规定进行控制系统零部件检验，并应在现场安装后对控制系统进行整体调试；

3 主被动混合调谐质量阻尼器应按本条第 2 款检验外，安装前尚应按本标准第 7.4 节规定对作动器进行检验和调试。

3.4.4 当被控结构遭遇大于现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 规定的风荷载作用后，应对风振控制系统及其连接部件进行检查。发现风振控制系统部件损坏或系统工作异常时，应进行维修、加固或更换。

4 风 荷 载

4.1 一 般 规 定

4.1.1 当被控结构顺风向风振以第一阶振型振动为主时，可按本标准第 4.2 节相关规定计算顺风向等效风荷载。

4.1.2 当被控结构立面规则且平面为圆形和矩形时，可按本标准第 4.3 节相关规定计算横风向和扭转风振等效风荷载。

4.1.3 当被控结构立面复杂或高阶振型对结构风振影响显著时，宜采用时程分析法进行被控结构风振响应分析，所采用的风荷载时程宜按下列规定选取：

1 当被控结构高宽比大于 6 或须考虑扭转风振响应时，宜进行刚性模型风洞试验，采用风洞试验测量的三维风荷载时程；

2 当被控结构高宽比小于 6，且扭转风振响应可忽略时，宜采用结构所在地相似地貌条件下实测的风速时程计算风荷载，但应根据当地设计风荷载的要求对实测风速幅值进行调整，调整后 10m 高度处实测风速时程的 10min 平均风速应与当地设计风速一致；

3 当被控结构高宽比小于 6，且扭转风振响应可忽略时，无风洞试验结果和当地实测数据时，可按本标准第 4.4 节相关规定计算顺风向脉动风荷载。

4.1.4 被控结构风振控制设计和验算使用的风荷载时程应符合下列规定：

1 基本风压和场地粗糙类别应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

2 风速时程的持续时间不宜小于 10min，采样周期不宜大于 0.1s；

3 脉动风速时程的功率谱、相干函数和湍流度应按现行国

家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定。

4.2 顺风向风振的等效风荷载

4.2.1 被控结构顺风向等效风荷载作用面积，应取垂直于风向的最大投影面积；垂直于建筑物表面的单位面积等效风荷载标准值，可按下式计算：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (4.2.1)$$

式中： w_k ——结构顺风向等效风荷载标准值 (kN/m^2)；

w_0 ——基本风压 (kN/m^2)，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

μ_s ——风荷载体型系数，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

μ_z ——风压高度变化系数，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

β_z ——被控结构高度 z 处的风振系数，当计算顺风向平均风压时取 1。

4.2.2 对一般竖向悬臂型结构，可仅考虑结构第一阶振型的影响，被控结构高度 z 处的风振系数可按下列公式计算：

$$\beta_z = 1 + 2g_P I_{10} B_z \sqrt{1 + R^2} \quad (4.2.2)$$

式中： g_P ——峰值因子，可取 2.5；

I_{10} ——高度 10m 处名义湍流强度，对应 A、B、C 和 D 类地面粗糙度，可分别取 0.12、0.14、0.23 和 0.39；

R ——脉动风荷载的共振分量因子；

B_z ——脉动风荷载的背景分量因子，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定。

4.2.3 当计入风振控制系统给被控结构提供的附加阻尼比时，脉动风荷载的共振分量因子可按下列公式计算：

$$R = \eta_R \sqrt{\frac{\pi}{6\xi_{\text{eq}}} \frac{x_1^2}{(1+x_1^2)^{4/3}}} \quad (4.2.3-1)$$

$$x_1 = \frac{30f_1}{\sqrt{k_w w_0}}, x_1 > 5 \quad (4.2.3-2)$$

式中： f_1 ——被控结构顺风向风振的第一阶自振频率（Hz）；

k_w ——地面粗糙度修正系数，对 A、B、C 和 D 类地面分别取 1.28、1.0、0.54、0.26；

ξ_{eq} ——被控结构顺风向第一阶振型的等效总阻尼比，取为被控结构第一振型阻尼比 ξ_1 与风振控制系统提供的被控结构第一振型附加阻尼比 ξ_{c1} 之和；

η_R ——脉动风荷载共振分量因子折算系数，可按表 4.2.3 确定。

表 4.2.3 脉动风荷载共振分量因子的折算系数 η_R

x_1	ξ_{eq}									
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20
5	0.989	0.978	0.966	0.954	0.942	0.901	0.872	0.841	0.790	0.690
6	0.990	0.979	0.968	0.957	0.945	0.906	0.879	0.849	0.800	0.704
7	0.990	0.980	0.969	0.958	0.947	0.910	0.883	0.854	0.806	0.714
8	0.990	0.981	0.970	0.959	0.948	0.912	0.886	0.858	0.811	0.720
9	0.991	0.981	0.971	0.960	0.950	0.914	0.888	0.861	0.815	0.726
10	0.991	0.981	0.971	0.961	0.950	0.916	0.890	0.863	0.818	0.730
20	0.992	0.983	0.974	0.964	0.954	0.922	0.898	0.872	0.830	0.747
30	0.992	0.983	0.974	0.965	0.955	0.924	0.900	0.875	0.833	0.752
40	0.992	0.983	0.975	0.965	0.956	0.924	0.901	0.876	0.835	0.754
50	0.992	0.984	0.975	0.966	0.956	0.925	0.902	0.877	0.836	0.755
60	0.992	0.984	0.975	0.966	0.956	0.925	0.902	0.877	0.836	0.756
70	0.992	0.984	0.975	0.966	0.956	0.925	0.902	0.878	0.837	0.756
80	0.992	0.984	0.975	0.966	0.956	0.925	0.903	0.878	0.837	0.757
90	0.992	0.984	0.975	0.966	0.956	0.926	0.903	0.878	0.837	0.757
100	0.992	0.984	0.975	0.966	0.956	0.926	0.903	0.878	0.837	0.757
120	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.878	0.838	0.758

续表 4.2.3

x_1	ξ_{eq}									
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20
140	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.878	0.838	0.758
160	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.879	0.838	0.758
180	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.879	0.838	0.758
200	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.879	0.838	0.758
220	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.879	0.838	0.758
240	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.879	0.838	0.758
260	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.879	0.838	0.758
280	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.879	0.838	0.758
300	0.992	0.984	0.975	0.966	0.957	0.926	0.903	0.879	0.838	0.758

注：对于中间数值，可采用线性插值确定。

4.2.4 体形和质量沿高度均匀分布的高层建筑，顺风向风振加速度可按下式计算：

$$a_{D,z} = \frac{2g_p I_{10} w_R \mu_s \mu_z B_z \eta_a B}{m} \quad (4.2.4)$$

式中： $a_{D,z}$ ——高层建筑高度 z 处顺风向风振加速度 (m/s^2)；

w_R ——重现期为 R 年的风压 (kN/m^2)，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

B ——迎风面宽度 (m)；

m ——结构单位高度的质量 (10^3kg/m)；

η_a ——顺风向风振加速度的脉动系数，可按表 4.2.4 确定。

表 4.2.4 顺风向风振加速度脉动系数 η_a

x_1	ξ_{eq}									
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20
5	4.140	2.939	2.410	2.095	1.881	1.504	1.355	1.246	1.125	0.990
6	3.926	2.787	2.285	1.986	1.783	1.425	1.284	1.180	1.066	0.937

续表 4.2.4

x_1	ξ_{eq}									
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20
7	3.747	2.660	2.180	1.895	1.702	1.360	1.225	1.125	1.016	0.894
8	3.595	2.552	2.092	1.818	1.632	1.304	1.175	1.079	0.975	0.857
9	3.464	2.459	2.015	1.752	1.573	1.256	1.131	1.040	0.939	0.825
10	3.349	2.378	1.949	1.694	1.520	1.215	1.094	1.005	0.908	0.798
20	2.672	1.896	1.554	1.351	1.212	0.969	0.872	0.801	0.723	0.636
30	2.336	1.658	1.359	1.181	1.060	0.847	0.762	0.701	0.632	0.556
40	2.123	1.507	1.235	1.073	0.963	0.770	0.693	0.637	0.575	0.505
50	1.971	1.399	1.147	0.997	0.895	0.715	0.643	0.591	0.534	0.469
60	1.855	1.317	1.079	0.938	0.842	0.672	0.605	0.556	0.502	0.441
70	1.762	1.251	1.025	0.891	0.800	0.639	0.575	0.528	0.477	0.419
80	1.686	1.196	0.980	0.852	0.765	0.611	0.550	0.505	0.456	0.401
90	1.621	1.150	0.943	0.819	0.735	0.587	0.529	0.486	0.439	0.386
100	1.565	1.111	0.910	0.791	0.710	0.567	0.511	0.469	0.424	0.372
120	1.473	1.045	0.857	0.744	0.668	0.534	0.481	0.442	0.399	0.350
140	1.399	0.993	0.814	0.707	0.635	0.507	0.457	0.419	0.379	0.333
160	1.338	0.950	0.778	0.676	0.607	0.485	0.437	0.401	0.362	0.318
180	1.286	0.913	0.748	0.650	0.584	0.466	0.420	0.386	0.348	0.306
200	1.242	0.882	0.722	0.628	0.564	0.450	0.405	0.372	0.336	0.295
220	1.203	0.854	0.700	0.608	0.546	0.436	0.393	0.361	0.326	0.286
240	1.169	0.830	0.68	0.591	0.530	0.424	0.381	0.350	0.316	0.278
260	1.138	0.808	0.662	0.575	0.516	0.413	0.371	0.341	0.308	0.271
280	1.110	0.788	0.646	0.561	0.504	0.402	0.362	0.333	0.301	0.264
300	1.085	0.770	0.631	0.549	0.492	0.393	0.354	0.325	0.294	0.258

注：对于中间数值，可采用线性插值确定。

4.3 横风向和扭转风振的等效风荷载

4.3.1 当计入风振控制系统给被控结构提供的附加阻尼比时，跨临界强风共振在圆形平面高层建筑高度 z 处引起的横风向第 j

阶振型等效风荷载标准值，可按下式计算：

$$\omega_{1k,j} = \frac{|\lambda_j| v_{cr}^2 \phi_{Lj}(z)}{12800(\xi_j + \xi_{cj})} \quad (4.3.1)$$

式中： $\omega_{1k,j}$ ——横风向第 j 阶振型等效风荷载标准值 (kN/m^2)；

λ_j ——计算系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

v_{cr} ——临界风速，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

$\phi_{Lj}(z)$ ——被控结构横风向第 j 阶振型系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；

ξ_j ——被控结构横风向第 j 阶振型的阻尼比；

ξ_{cj} ——风振控制系统提供的被控结构横风向风振第 j 阶振型附加阻尼比。

4.3.2 矩形平面高层建筑当满足下列条件时，可按本标准第

4.3.3 条规定确定其横风向风振等效风荷载：

1 建筑的平面形状和自重在整个高度范围内基本相同；

2 高宽比 $H/\sqrt{BD}$ 为 4.0~8.0，深宽比 D/B 为 0.5~2.0，其中 H 为被控结构总高度， B 为被控结构的迎风面宽度， D 为被控结构平面顺风向进深；

3 $v_H T_{L1}/\sqrt{BD} \leq 10$ ， T_{L1} 为被控结构横风向第一阶自振周期， v_H 为被控结构顶部速度。

4.3.3 当计入风振控制系统给被控结构提供的附加阻尼比时，矩形平面高层建筑横风向风振等效风荷载标准值可按下列公式计算：

$$\omega_{1k} = g_P \omega_0 m_z C_L \sqrt{1 + R_L^2} \quad (4.3.3-1)$$

$$R_L = K_L \sqrt{\frac{\pi S_{FL} C_{sm} / \gamma_{CM}^2}{4(\xi_{hl} + \xi_{al} + \xi_{cl})}} \quad (4.3.3-2)$$

式中： ω_{1k} ——横风向第 1 振型风振等效风荷载标准值 (kN/m^2)；

C_L ——横风向风力系数,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定;

R_L ——横风向共振因子;

S_{FL} ——无量纲横风向广义风力功率谱,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定;

K_L ——振型修正系数,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定;

C_{sm} ——横风向风力功率谱的角沿修正系数,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定;

ξ_{hl} ——被控结构横风向风振第一阶振型阻尼比;

ξ_{al} ——被控结构横风向风振第一阶振型气动阻尼比,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定;

ξ_{cLl} ——风振控制系统提供的被控结构横风向风振第一阶振型附加阻尼比;

γ_{CM} ——地面粗糙度修正系数,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定。

4.3.4 矩形平面高层建筑当满足下列条件时,可按本标准第

4.3.5 条规定确定其扭转风振等效风荷载:

1 建筑的平面形状在整个高度范围内基本相同;

2 刚度及质量的偏心率(偏心距/回转半径)小于 0.2;

3 高宽比 $H/\sqrt{BD} \leq 6$,深宽比 D/B 为 1.5~5.0, $\nu_H T_{T1}/\sqrt{BD} \leq 10$, T_{T1} 为被控结构第一阶扭转振型自振周期。

4.3.5 当计入风振控制系统给被控结构提供的附加阻尼比时,矩形平面高层建筑扭转风振等效风荷载标准值可按下列公式计算:

$$w_{Tk} = 1.8 g_P w_0 \mu_H C_T \left(\frac{z}{H} \right)^{0.9} \sqrt{1 + R_T^2} \quad (4.3.5-1)$$

$$R_T = K_T \sqrt{\frac{\pi F_T}{4(\xi_{T1} + \xi_{cT1})}} \quad (4.3.5-2)$$

式中： w_{Tk} ——扭转风振等效风荷载标准值（ kN/m^2 ）；
 μ_H ——被控结构顶部风压高度变化系数；
 C_T ——风致扭矩系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；
 R_T ——扭转共振因子；
 F_T ——扭矩谱能量因子，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；
 K_T ——扭转振型修正系数，按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定；
 ξ_{T1} ——被控结构扭转第一阶振型阻尼比；
 ξ_{cT1} ——风振控制系统提供的被控结构第一阶扭转振型附加阻尼比。

4.3.6 顺风向风振、横风向风振和扭转风振等效风荷载宜按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 考虑风荷载组合工况。

4.3.7 当计入风振控制系统给被控结构提供的附加阻尼比时，体形和质量沿高度均匀分布的矩形平面高层建筑，横风向风振加速度可按下式计算：

$$a_{L,z} = \frac{2.8g_D w_R \mu_H B}{m} \phi_{L1}(z) \sqrt{\frac{\pi S_{FL} C_{sm}}{4(\xi_{h1} + \xi_{a1} + \xi_{cL1})}} \quad (4.3.7)$$

式中： $a_{L,z}$ ——高层建筑高度 z 处横风向风振加速度（ m/s^2 ）；
 $\phi_{L1}(z)$ ——被控结构横风向第一阶振型系数。

4.4 顺风向脉动风荷载

4.4.1 人工模拟脉动风速时程应考虑空间相关性，且不应少于 3 组；

4.4.2 脉动风速时程功率谱应与目标谱保持一致，在（0 ~ 5）Hz 频率范围内功率谱整体误差应符合下式规定：

$$\frac{\int_0^5 \sqrt{[S_t(f) - S_i(f)]^2} df}{\int_0^5 S_t(f) df} < 5\% \quad (4.4.2)$$

式中: $S_t(f)$ ——目标功率谱值;

$S_f(f)$ ——脉动风速功率谱值;

f ——脉动风频率 (Hz)。

4.4.3 被控结构顺风向沿高度变化的脉动风荷载可按下列公式的计算:

$$w_{kf}(z, t) = \mu_z \rho v_{zf}(t) v_z \quad (4.4.3-1)$$

$$v_z = v_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha_T} \quad (4.4.3-2)$$

式中: $w_{kf}(z, t)$ ——被控结构高度 z 处顺风向脉动风荷载时程 (N/m^2);

ρ ——空气密度, 标准大气压下, 取 $1.225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$;

$v_{zf}(t)$ ——被控结构高度 z 处顺风向脉动风速 (m/s);

v_z ——被控结构高度 z 处顺风向平均风速 (m/s);

α_T ——地面粗糙度指数, 按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 确定;

v_{10} ——高度 10m 处的基本风速 (m/s)。

5 黏滯和黏彈性阻尼器的風振控制

5.1 一般規定

5.1.1 用于風振控制的黏滯阻尼器和黏彈性阻尼器性能应符合下列規定：

1 在设计环境温度范围内，黏滯阻尼器和黏彈性阻尼器的主要力学性能指标变化量不应大于 15%；

2 黏彈性材料与连接钢板应具有良好的黏結性能，当阻尼器控制力达到其允许值时，阻尼器不应发生界面粘結破坏；

3 黏滯阻尼器和黏彈性阻尼器应具有良好的疲劳性能，应符合本标准第 3.1.5 条关于風振控制系统疲劳性能的规定；

4 在正常使用环境下，黏滯阻尼器设计使用年限不宜小于 30 年；黏彈阻尼器设计使用年限不宜小于 50 年。

5.1.2 黏滯阻尼器和黏彈性阻尼器用于被控结构風振控制设计时，应符合下列規定：

1 阻尼器的安装数量和位置宜通过方案优化确定；

2 阻尼器宜布置在结构变形和速度较大的位置，且平面布置宜避免偏心；

3 阻尼器宜沿被控结构高度均匀布置；

4 被控结构風振响应分析应计入黏滯阻尼器给被控结构提供的附加阻尼；

5 被控结构風振响应分析应计入黏彈性阻尼器给被控结构提供的附加刚度和附加阻尼。

5.2 阻尼力模型

5.2.1 采用等效线性模型时，黏滯和黏彈阻尼器控制力应按下式计算：

$$F_d = k_v x + c_v \dot{x} \quad (5.2.1)$$

式中: F_d ——阻尼器控制力 (N);

$\dot{x}$ ——阻尼器两端相对速度 (m/s);

x ——阻尼器两端相对位移 (m);

k_v ——阻尼器等效线性刚度 (N/m): 黏滞阻尼器 k_v 取 k_{vs} , 宜按本标准第 5.2.3 条计算; 黏弹性阻尼器 k_v 取 k_{ve} , 宜按本标准第 5.2.4 条计算;

c_v ——阻尼器等效线性阻尼系数 (N·s/m): 黏滞阻尼器 c_v 取 c_{vs} , 宜按本标准第 5.2.3 条计算; 黏弹性阻尼器 c_v 取 c_{ve} , 宜按本标准第 5.2.4 条计算。

5.2.2 采用非线性模型时, 黏滞阻尼器控制力宜采用下列公式计算:

$$F_d = c_d |\dot{x}|^\alpha \text{sgn}(\dot{x}) \quad (5.2.2-1)$$

$$\text{sgn}(\dot{x}) = \begin{cases} 1 & \dot{x} \geq 0 \\ -1 & \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (5.2.2-2)$$

式中: F_d ——黏滞阻尼器的控制力 (N);

c_d ——黏滞阻尼器的阻尼系数 $[N/(m/s)^{-\alpha}]$;

$\dot{x}$ ——黏滞阻尼器两端相对速度 (m/s);

α ——黏滞阻尼器中液体的流动指数, 通过试验确定;

$\text{sgn}(\bullet)$ ——符号函数。

5.2.3 黏滞阻尼器等效线性刚度和阻尼系数宜按下列公式计算:

$$k_{vs} = 0 \quad (5.2.3-1)$$

$$c_{vs}(\omega_1) = \frac{\lambda}{\pi} c_d \omega_1^{\alpha-1} y_{Dm}^{\alpha-1} \quad (5.2.3-2)$$

$$\lambda = \frac{2^{2+\alpha} \Gamma^2(1+\alpha/2)}{\Gamma(2+\alpha)} \quad (5.2.3-3)$$

式中: k_{vs} ——黏滞阻尼器等效线性刚度 (N/m);

c_{vs} ——黏滞阻尼器阻尼系数 (N·s/m);

$\Gamma(\bullet)$ ——伽马函数;

y_{Dm} ——阻尼器两端相对位移设计值, 按本标准第 3.2.8

条规定确定 (m)；

ω_1 ——阻尼器激振圆频率 (rad/s)，可取为结构顺风向、横风向或扭转的第一阶自振圆频率。

5.2.4 黏弹性阻尼器等效线性刚度和阻尼系数可按下列公式计算：

$$k_{ve}(\omega_1) = n \frac{G_1(\omega_1, T_0)A}{d} \quad (5.2.4-1)$$

$$c_{ve}(\omega_1) = n \frac{G_2(\omega_1, T_0)A}{\omega_1 d} \quad (5.2.4-2)$$

式中： $k_{ve}(\omega_1)$ ——黏弹阻尼器等效线性刚度 (N/m)；

$c_{ve}(\omega_1)$ ——黏弹阻尼器阻尼系数 (N·s/m)；

n ——阻尼器黏弹性材料并联的层数；

$G_1(\omega_1, T_0)$ ——黏弹性材料的剪切存储模量 (MPa)；

$G_2(\omega_1, T_0)$ ——黏弹性材料的剪切损失模量 (MPa)；

A ——单层黏弹性材料的剪切面积 (m²)；

T_0 ——黏弹性阻尼器工作温度 (℃)；

d ——单层黏弹性材料厚度 (m)。

5.2.5 黏弹性阻尼器的阻尼力模型选择应反映阻尼器实际受力状态，模型参数应通过试验确定。

5.3 设计要点

5.3.1 采用等效风荷载法计算被控结构风振响应时，应采用阻尼器等效线性模型。

5.3.2 采用时程分析法计算被控结构风振响应时，应采用包括被控结构力学模型和阻尼器力学模型的结构风振控制体系总力学模型。

5.3.3 采用等效风荷载法计算被控结构风振响应时，阻尼器给被控结构提供的附加阻尼比可按式确定：

$$\xi_{cj} = \frac{T_j}{4\pi M_j} \phi_j^T C \phi_j \quad (5.3.3)$$

式中: ξ_{ej} ——阻尼器提供的第 j 阶振型附加阻尼比;

M_j ——被控结构的第 j 阶模态质量 (kg);

ϕ_j ——被控结构的第 j 阶振型;

T_j ——被控结构的第 j 阶自振周期 (s);

C ——阻尼器提供的附加阻尼矩阵, 可采用本标准第 5.2.3 条和第 5.2.4 条规定的黏滞阻尼器和黏弹性阻尼器的等效线性阻尼计算。

5.3.4 当阻尼器与斜撑、填充墙或者梁等连接构件串联使用时, 连接构件刚度应符合下式规定:

$$k_b \geq c_v(6\pi/T_1) \quad (5.3.4)$$

式中: k_b ——阻尼器与被控结构连接构件的刚度 (N/m);

T_1 ——被控结构的基本自振周期 (s);

c_v ——阻尼器等效线性阻尼系数 (N·s/m)。

5.3.5 黏滞阻尼器控制力设计值计算应符合下列规定:

1 采用等效风荷载法计算被控结构风振响应时, 黏滞阻尼器控制力设计值宜采用下式计算:

$$F_{dm} = c_d |\dot{y}_{Dm}|^a \quad (5.3.5)$$

式中: F_{dm} ——黏滞阻尼器设计最大控制力 (N);

$\dot{y}_{Dm}$ ——黏滞阻尼器两端速度设计值 (m/s), 可按本标准第 3.2.8 条规定确定;

2 采用时程分析法分析被控结构风振响应时, 黏滞阻尼器控制力设计值应取为采用多条风荷载时程计算得到的阻尼器最大控制力包络值的 1.4 倍。

5.3.6 黏弹性阻尼器控制力设计值计算应符合下列规定:

1 采用等效风荷载法计算被控结构风振响应时, 在顺风向风荷载作用下黏弹性阻尼器控制力设计值宜按下式计算:

$$F_{Dm} = F_j + y_{Dm} \sqrt{k_{ve}^2 + \omega_{Dl}^2 c_{ve}^2} \quad (5.3.6-1)$$

式中: F_{Dm} ——在顺风向风荷载作用下黏弹性阻尼器控制力设计值 (N);

F_j ——在顺风向平均风荷载标准值作用下黏弹性阻尼器控制力 (N);

ω_{D1} ——被控结构顺风向风振的第一阶圆频率 (rad/s);

y_{Dm} ——在顺风向脉动风荷载作用下黏弹性阻尼器两端相对位移设计值 (m), 可按本标准第 3.2.8 条规定确定。

2 采用等效风荷载计算被控结构风振响应时, 在横风向风荷载作用下黏弹性阻尼器设计最大控制力宜按下式计算:

$$F_{1m} = y_{1m} \sqrt{k_{ve}^2 + \omega_{1L}^2 c_{ve}^2} \quad (5.3.6-2)$$

式中: F_{1m} ——在横风向风荷载作用下黏弹性阻尼器控制力设计值 (N);

ω_{1L} ——被控结构横风向风振的第一阶自振圆频率 (rad/s);

y_{1m} ——在横风向风荷载作用下黏弹性阻尼器两端设计最大相对位移 (m), 可按本标准第 3.2.8 条规定确定。

3 采用时程分析法计算被控结构风振响应时, 黏弹性阻尼器控制力设计值应取为采用多条风荷载时程计算得到的阻尼器最大控制力包络值的 1.4 倍。

5.3.7 当阻尼器沿结构高度方向分布不均匀时, 由等效风荷载法计算得到的被控结构风振响应还应采用时程分析法进行验算, 并应取两种方法计算的结构风振响应的较大值进行结构风振控制设计。

5.4 检 验

5.4.1 黏滞阻尼器和黏弹性阻尼器检验除应符合本标准规定外, 尚应符合现行行业标准《建筑消能阻尼器》JG/T 209 的规定。

5.4.2 黏滞阻尼器和黏弹性阻尼器应经检验合格后方可用于被控结构风振控制。

5.4.3 黏滞阻尼器检验应符合下列规定:

1 抽样检验应由第三方进行, 检验数量不应少于 20% 且不

应少于 2 个，检测合格率应为 100%。

2 黏滞阻尼器检测频率应根据被控结构风振主要频率确定。对结构风振以第一振型为主的结构，宜选取结构第一振型频率的 0.75 倍、1.00 倍和 1.25 倍作为检测频率。

3 阻尼器阻尼系数的检验宜采用正弦激励法。加载振幅宜选为 0.3 倍、0.6 倍、0.9 倍和 1.2 倍阻尼器位移设计值。实测阻尼系数与设计阻尼系数之差应小于 15%。

4 阻尼器阻尼力的检验宜采用正弦激励法。加载速度峰值应取为阻尼器速度设计值，往复加载圈数不少于 6 圈，测量的阻尼力与设计阻尼力之差应小于 15%，且阻尼器不应发生破坏。

5 根据被控结构风振响应的被控结构基本周期 T 确定加载频率，阻尼器在风荷载标准值作用下进行往复循环加载试验 $4 \times 3600/T$ 次，阻尼器的主要设计指标误差和衰减量应小于 15%，且黏滞阻尼器液体不应发生泄漏。

6 黏滞阻尼器应进行超载耐压试验，在 1.2 倍控制力设计值作用下，保持 3min 不应发生泄漏。

5.4.4 黏弹性阻尼器的检验应符合下列规定：

1 抽样检验应由第三方进行，检验数量不应少于 3%，且不应少于 2 个，检验合格率应为 100%。

2 黏弹性阻尼器的检测频率应根据被控结构风振主要频率确定。对结构风振以第一振型为主的结构，宜选取被控结构第一振型频率的 0.75 倍、1.00 倍和 1.25 倍作为检测频率。

3 阻尼器的刚度和阻尼系数检验宜采用正弦激励法。加载振幅宜选 0.3 倍，0.6 倍，1.0 倍和 1.2 倍阻尼器位移设计值。实测阻尼器参数与设计值之差应小于 15%。

4 阻尼器控制力的检验宜采用正弦激励法。加载幅值宜取为阻尼器位移设计值，进行往复加载试验不少于 6 圈，测量得到的控制力与设计控制力之差应小于 15%，且阻尼器不应发生破坏。

5 根据被控结构风振响应的被控结构基本周期 T 确定加载

频率，以阻尼器在平均风荷载作用下的位移为平衡位置，以阻尼器在脉动风荷载标准值作用下最大位移为幅值，进行往复循环加载试验 $4 \times 3600/T$ 次，阻尼器的主要设计指标误差和衰减量应小于 15%。

5.5 连接与安装

5.5.1 黏滞阻尼器宜采用两端铰接连接，使连接部件仅承受轴向变形。

5.5.2 黏滞阻尼器的液体应无毒、无腐、不燃和不爆。

5.5.3 安装过程中应对黏弹性阻尼器进行保护，使阻尼器仅承受剪切变形，且不应出现平面外变形导致阻尼器撕裂破坏。

5.5.4 当黏弹性阻尼器与结构连接采用焊接时，应采取措施防止焊接对黏弹性材料及黏结材料产生不利影响。

6 调谐阻尼器的风振控制

6.1 一般规定

6.1.1 调谐阻尼器宜布置在被控结构的顶层或所控制振型的峰值处；当控制被控结构扭转风振时，宜在被控结构的顶层或所控制振型峰值处远离质心布置两个调谐阻尼器，或偏心布置一个调谐阻尼器。

6.1.2 采用调谐质量阻尼器的被控结构风振控制设计可采用等效风荷载法或时程分析法；采用调谐液体阻尼器的风振控制设计宜采用等效风荷载法。

6.1.3 风振控制设计中，可仅考虑作用在被控结构上的风荷载，不考虑作用在调谐阻尼器上的风荷载。

6.1.4 直接承受调谐阻尼器作用的结构构件应进行在风振控制系统控制力设计值作用下的强度验算。

6.1.5 直接承受调谐阻尼器作用的结构构件应进行正常使用极限状态的变形验算，受弯构件的挠度应满足被控结构正常使用和调谐质量阻尼器正常工作的要求。

6.1.6 调谐质量阻尼器的阻尼元件宜采用电涡流阻尼器，也可采用黏滞阻尼器。

6.2 调谐阻尼器力学参数

6.2.1 设计文件应注明下列参数：

1 调谐质量阻尼器应注明：惯性质量块质量、连接弹簧刚度、阻尼器元件阻尼系数、自振频率、阻尼比、行程允许值、速度允许值和控制力允许值等参数。

2 调谐液体阻尼器应注明：水箱形状、尺寸和水深、水箱中液体质量、质量参与系数、自振频率和阻尼比等参数。

6.2.2 矩形水箱调谐液体阻尼器的自振圆频率、阻尼比和质量参与系数，可按下列公式计算：

$$\omega_T = \sqrt{\frac{g\pi}{a} \tanh\left(\frac{h\pi}{a}\right)} \quad (6.2.2-1)$$

$$\xi_T = \gamma \left(3.60 - \frac{\omega_T}{2\pi} \right) D^{0.4} \quad (6.2.2-2)$$

$$\tau_T = \frac{8a}{\pi^3 h} \tanh\left(\frac{\pi h}{a}\right) \quad (6.2.2-3)$$

式中： ω_T ——矩形水箱调谐液体阻尼器的自振圆频率（rad/s）；

ξ_T ——矩形水箱调谐液体阻尼器的阻尼比；

τ_T ——矩形水箱调谐液体阻尼器的质量参与系数；

a ——矩形水箱液体振动方向长度（m）；

h ——水箱水深（m）；

D ——矩形水箱位移幅值；

γ ——水箱中加滤网影响系数（水箱中加滤网时取 1，不加滤网时取 0.5）。

6.2.3 圆柱形水箱调谐液体阻尼器的自振圆频率、阻尼比和质量参与系数，可按下列公式计算：

$$\omega_T = \sqrt{\frac{1.84g}{r} \tanh\left(\frac{1.84h}{r}\right)} \quad (6.2.3-1)$$

$$\xi_T = \frac{0.45}{2\sqrt{R_1}} \left[\frac{1.3}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{r}\right)} \left(\frac{1 - \frac{h}{r}}{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{r}\right)} + 1 \right) + 4.09 \right] \quad (6.2.3-2)$$

$$\tau_T = \frac{r}{4.39h} \tanh\left(\frac{1.84h}{r}\right) \quad (6.2.3-3)$$

$$R_1 = \omega_1 r^2 / \nu \quad (6.2.3-4)$$

式中： ω_T ——圆柱形水箱调谐液体阻尼器的自振圆频率 (rad/s)；
 ξ_T ——圆柱形水箱调谐液体阻尼器的阻尼比；当 $h/r > 1$ 时， ξ_T 取为 $0.92/\sqrt{R_1}$ ；
 τ_T ——圆柱形水箱调谐液体阻尼器的质量参与系数；
 r ——圆柱形水箱圆截面半径 (m)；
 h ——水箱水深 (m)；
 R_1 ——第一振型雷诺数；
 ν ——流体黏滞系数；

6.2.4 U 形水箱调谐液体阻尼器的自振圆频率、阻尼比和质量参与系数，可按下列公式计算：

$$\omega_T = \sqrt{2g/L} \quad (6.2.4-1)$$

$$\xi_T = \sqrt{\frac{1}{2gL}} \xi_0 \left| \frac{2}{3} v_{\max} \right| \quad (6.2.4-2)$$

$$\tau_T = B/L \quad (6.2.4-3)$$

式中： ω_T ——U 形水箱调谐液体阻尼器的自振圆频率 (rad/s)；
 ξ_T ——U 形水箱调谐液体阻尼器的阻尼比；
 τ_T ——U 形水箱调谐液体阻尼器的质量参与系数；
 B ——U 形水箱水平管长度 (m)；
 L ——U 形水箱中液体总长 (m)；
 $v_{\max}$ ——U 形水箱中液体的最大速度 (m/s)；
 ξ_0 ——U 形水箱隔板或闸板阻尼系数，由表 6.2.4-1 和表 6.2.4-2 确定。

表 6.2.4-1 U 形水箱隔板阻尼系数

A_0/A	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
ξ_0	1650	625	302	156	86	44.1	29.6	18.1	10.5	6.9	4.28	2.55	1.52

注： A_0 是隔板开洞面积， A 是 U 形水箱横截面积。

表 6.2.4-2 U 形水箱闸板阻尼系数

h_0/h	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
ξ_0	∞	193	44.5	8.12	2.80	0.39	0.09

注： h_0 是闸板空隙高度， h 是水箱管段高度。

6.2.5 按本标准第 6.2.2 条～6.2.4 条计算得到的调谐液体阻尼器阻尼比，尚应通过阻尼器试验进行检验。

6.2.6 矩形水箱的水深(h)与振动方向水箱平面尺寸(a)比值应大于 1/8；圆柱形水箱的水深(h)与水箱半径(r)比值应大于 1/8。

6.3 设计要点

6.3.1 调谐阻尼器作用于被控结构的控制力宜由下列公式确定：

$$F_d = m_T[\ddot{x}_i + \tau_T \ddot{y}] \quad (6.3.1-1)$$

$$\ddot{y} + 2\omega_T \xi_T \dot{y} + \omega_T^2 y = -\ddot{x}_i \quad (6.3.1-2)$$

式中： F_d ——调谐阻尼器施加给被控结构的控制力(N)；

m_T ——等效调谐质量(kg)：对调谐质量阻尼器取质量块质量，对调谐液体阻尼器取水箱中液体质量；

$\ddot{x}_i$ ——调谐阻尼器安装位置被控结构的绝对加速度(m/s^2)；

y ——对调谐质量阻尼器，是质量块相对于其安装结构位置的位移响应(m)；对调谐液体阻尼器，是阻尼器中液体振动的广义位移响应(m)；

ω_T 、 ξ_T ——调谐阻尼器的自振圆频率和阻尼比；

τ_T ——调谐阻尼器质量参与系数：调谐质量阻尼器取为 1；调谐液体阻尼器按本标准第 6.2.3～6.2.5 条规定取值。

6.3.2 调谐阻尼器设计参数取值宜符合下列规定：

1 调谐阻尼器有效质量与结构预期控制振型广义质量比值宜取 0.5%～5.0%，且宜取较大值：

$$\mu_T = \frac{\tau_T m_T}{\phi_1^T M \phi_1} \quad (6.3.2-1)$$

式中： μ_T ——调谐阻尼器有效质量与被控结构预期控制振型广义质量比值；

M ——被控结构质量矩阵(kg)；

ϕ_1 ——被控结构风振的第一阶振型：振型向量在调谐阻尼器安装位置取为 1。

2 调谐阻尼器的最优自振圆频率和最优阻尼比宜按下列公式确定：

$$\omega_{\text{opt}} = \omega_1 \frac{\sqrt{1-\mu_T/2}}{1+\mu_T} \quad (6.3.2-2)$$

$$\xi_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\mu_T(1-\mu_T/4)}{4(1+\mu_T)(1-\mu_T/2)}} \quad (6.3.2-3)$$

式中： ω_{opt} ——调谐阻尼器的最优自振圆频率(rad/s)；

ξ_{opt} ——调谐阻尼器的最优阻尼比；

ω_1 ——被控结构风振的第一阶自振圆频率(rad/s)。

6.3.3 调谐质量阻尼器的刚度和阻尼系数宜按下列公式确定：

$$k_T = m_T \omega_{\text{opt}}^2 \quad (6.3.3-1)$$

$$c_T = 2m_T \xi_{\text{opt}} \omega_{\text{opt}} \quad (6.3.3-2)$$

式中： k_T ——调谐质量阻尼器的刚度(N/m)；

c_T ——调谐质量阻尼器的阻尼系数(N·s/m)。

6.3.4 当调谐阻尼器设置在结构顶端时，调谐阻尼器提供的第一振型等效附加阻尼比宜按下列公式计算：

$$\xi_c = \sqrt{\tau_T} \frac{\xi_T \alpha_T \mu_T}{1 + [4\xi_T^2(1+\mu_T) - (\mu_T+2)]\alpha_T^2 + (1+\mu_T)^2\alpha_T^4} \quad (6.3.4-1)$$

$$\alpha_T = \frac{\sqrt{1-\mu_T/2}}{1+\mu_T} \quad (6.3.4-2)$$

式中： α_T ——调谐阻尼器最优自振频率与被控结构风振第一阶自振频率比值；

τ_T ——调谐阻尼器质量参与系数，按本标准第 6.3.1 条规定选取。

6.3.5 阻尼器惯性质量行程应符合下列规定：

1 当调谐质量阻尼器的刚度和阻尼系数采用本标准第 6.3.3 条规定的最优值时，阻尼器惯性质量行程设计值宜按下式计算：

$$y_{Dm} = \phi \gamma x_{Dm} \quad (6.3.5)$$

式中： y_{Dm} ——调谐质量阻尼器惯性质量行程设计值(m)；

x_{Dm} ——调谐质量阻尼器安装位置处被控结构最大动位移(m)，按本标准第 3.2.3～3.2.6 条规定确定；

ϕ ——安全系数，取 1.4；

γ ——调谐质量阻尼器行程与安装位置处结构最大位移的比值，可由表 6.3.5 查得。

2 调谐质量阻尼器惯性质量的行程允许值应大于其设计值的 1.2 倍。

表 6.3.5 调谐质量阻尼器最大行程与安装位置处被
控结构最大动位移比值 γ

结构阻尼比	模态质量比 μ_T					
	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
0.01	8.935	6.374	4.519	3.689	3.195	2.858
0.02	8.304	6.018	4.320	3.549	3.085	2.767
0.03	7.765	5.702	4.139	3.418	2.982	2.682
0.04	7.298	5.420	3.972	3.297	2.886	2.602
0.05	6.890	5.165	3.819	3.184	2.796	2.526

注：中间数字可采用线性插值确定。

6.3.6 调谐质量阻尼器控制力设计值宜按下式计算：

$$F_d = k_T y_{Dm} \quad (6.3.6)$$

式中： F_d ——调谐质量阻尼器控制力设计值 (N)；

y_{Dm} ——调谐质量阻尼器行程 (m)；

k_T ——调谐质量阻尼器刚度 (N/m)。

6.3.7 当结构风振响应包含多振型成分时，调谐质量阻尼器结

构风振控制设计宜采用时程分析法。

6.4 检 验

6.4.1 调谐阻尼器安装前，应按本节相关规定进行检测，检验合格后方可使用。

6.4.2 小型调谐阻尼器的频率和阻尼比应由第三方按下列规定进行检测，检测合格率应为 100%：

1 抽样检验数量不应少于阻尼器数量的 20%，且不应少于 2 个；当只有 1 个时，取 1 个；

2 调谐阻尼器的实测频率与设计值的相对误差应小于 1%；

3 调谐阻尼器的实测阻尼比与设计值的相对误差应小于 10%；

4 调谐质量阻尼器的刚度和阻尼元件疲劳性能应符合本标准第 3.1.5 条规定；

5 调谐质量阻尼器惯性质量应采用行程限位等安全保护措施，并应通过非破坏性试验验证上述安全保护措施的有效性和可靠性。

6.4.3 大型调谐阻尼器安装前，应对其元件进行检验；安装后应对阻尼器整体性能进行现场测试，并应符合下列规定：

1 调谐阻尼器的实测频率与设计值的相对误差应小于 1%；

2 调谐阻尼器的实测阻尼比与设计值的相对误差应小于 10%。

6.5 连接与安装

6.5.1 直接与调谐阻尼器连接的结构构件在阻尼器控制力设计值作用下应处于弹性状态。

6.5.2 调谐质量阻尼器的安装应符合下列规定：

1 采用轨道支撑惯性质量的调谐质量阻尼器，轨道的直线度和平行度应满足阻尼器正常工作要求。

2 调谐质量阻尼器安装层楼板或部位应采用结构构造加强

措施，并应进行强度和挠度验算。在阻尼器控制力设计值作用下，连接结构构件应保证调谐质量阻尼器正常工作。

3 调谐质量阻尼器周围应预留阻尼器正常工作及检修空间。

4 悬吊式调谐质量阻尼器应有防止其失效下落的措施。

5 当采用水箱作为调谐阻尼器质量时，水箱与被控结构间的水管和线缆应采用柔性连接或其他有效措施，保证水箱发生水平位移时正常工作。

6 调谐质量阻尼器各部件应进行防腐防锈处理。

7 当采用电涡流阻尼作为阻尼元件时，应检测阻尼元件磁钢的表面涂层质量，磁钢表面应进行专门的防腐防锈处理。

6.5.3 调谐液体阻尼器的水箱应与结构紧密连接，保证水箱与结构共同运动，不发生相对滑移；调谐液体阻尼器的水箱在工作时不应发生倾覆。

6.5.4 调谐液体阻尼器系统安装完毕后，应注水检测水箱的密闭性。

7 主被动混合调谐质量阻尼器的风振控制

7.1 一般规定

7.1.1 主被动混合调谐质量阻尼器风振控制系统设计，除应符合本章规定外，尚应符合第6章中关于调谐质量阻尼器的相关规定。

7.1.2 控制装置安装数量宜根据被控结构风振控制目标及主被动混合调谐质量阻尼器控制驱动装置性能确定。

7.1.3 主被动混合调谐质量阻尼器宜安装于所控被控结构振型的峰值处。

7.1.4 主被动混合调谐质量阻尼器设计寿命不应低于被控结构设计使用年限；可通过更换混合调谐质量阻尼器零部件来满足设计工作寿命要求。

7.1.5 对惯性质量较小的主被动混合调谐质量阻尼器，安装前后应按本标准第7.4节的规定进行性能检测；对惯性质量较大、不便于试验测试的混合调谐质量阻尼器，安装后应按本标准第7.4节的规定进行现场性能测试。

7.2 设计规定

7.2.1 设计文件中应注明主被动混合调谐质量阻尼器的惯性质量、刚度系数、阻尼系数、自振频率、阻尼比、主动控制力的计算方法和阻尼器行程、速度、控制力的设计值及允许值等性能参数。

7.2.2 主被动混合调谐质量阻尼器的惯性质量、刚度系数和阻尼系数的设计宜符合下列规定：

1 阻尼器惯性质量与结构预期控制振型模态质量的比值 μ_T 宜取 0.5%~5.0%，且宜取较大值。

2 主被动混合调谐质量阻尼器的刚度系数和阻尼系数宜根据本标准公式 (6.3.3-2) 和式 (6.3.3-3) 确定。

7.2.3 主被动混合调谐质量阻尼器主动控制力可按下列公式确定：

1 采用加速度反馈计算的主动控制力可按下列式计算：

$$u(t) = -m_1 g_a \ddot{q}_1 - g_v \dot{y} - g_d y \quad (7.2.3-1)$$

$$g_d = m_T (\alpha_A \omega_1)^2 - k_T \quad (7.2.3-2)$$

$$g_v = 2m_T (\alpha_A \omega_1) \xi_A - c_T \quad (7.2.3-3)$$

式中： $u(t)$ ——主动控制力（N）；

$\ddot{q}_1$ ——被控结构所控振型广义加速度响应（ m/s^2 ）；

g_a ——主被动混合调谐质量阻尼器的加速度反馈增益，可按本条第2款规定确定；

g_d ——主被动混合调谐质量阻尼器的行程反馈增益；

g_v ——主被动混合调谐质量阻尼器的相对速度反馈增益。

2 结构加速度反馈控制增益 g_a 取值可根据驱动器能力、控制目标、附加阻尼比及惯性质量行程允许值确定；也可采用其他算法确定状态反馈增益。

3 主被动混合调谐质量阻尼器的行程反馈增益和相对速度反馈增益可按下列公式计算：

$$\alpha_A = \frac{1}{1 + \mu_T} \sqrt{\frac{2 + \mu_T - \mu_T g_a}{2}} \quad (7.2.3-4)$$

$$\xi_A = \sqrt{\frac{(4 + 3\mu_T - g_a)(\mu_T + g_a)}{8(1 + \mu_T)(2 + \mu_T - g_a)}} \quad (7.2.3-5)$$

式中： α_A ——主动调谐质量阻尼器的名义最优调频比；

ξ_A ——主动调谐质量阻尼器的名义最优阻尼比。

7.2.4 主被动混合调谐质量阻尼器控制算法应符合下列规定：

1 阻尼器的主动/被动模式切换规则应明确合理；

2 主动调谐质量阻尼器控制算法应进行鲁棒性和稳定性分析；

3 控制算法宜计入主动控制力时滞的影响；

4 控制算法应具有对反馈信号和作动器失效的诊断能力；当诊断出系统存在严重问题而无法正常工作时，应能采取软、硬

件有效措施保证系统安全；

5 控制算法应可更换或更新。

7.2.5 采用等效风荷载法的主被动混合调谐质量阻尼器结构风振控制设计应考虑阻尼器对结构附加等效阻尼比的作用。

7.2.6 当采用本标准第 7.2.3 条规定确定主被动混合调谐质量阻尼器主动控制力时，可根据被控结构的自身阻尼比、阻尼器惯性质量和结构模态质量比值 μ_T ，按表 7.2.6-1～表 7.2.6-5 计算主被动混合调谐质量阻尼器给被控结构提供的附加阻尼比 ζ_c 。

表 7.2.6-1 主被动混合调谐质量阻尼器提供的等效附加阻尼比 ζ_c (原结构阻尼比 0.01)

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
0.005	0.016	0.017	0.019	0.023	0.026	0.028	0.031
0.01	0.023	0.025	0.028	0.033	0.037	0.041	0.045
0.02	0.033	0.036	0.041	0.048	0.054	0.059	0.064
0.03	0.041	0.045	0.051	0.059	0.067	0.073	0.080
0.04	0.048	0.053	0.059	0.069	0.078	0.085	0.093
0.05	0.054	0.059	0.067	0.078	0.087	0.096	0.104

表 7.2.6-2 主被动混合调谐质量阻尼器提供的等效附加阻尼比 ζ_c (原结构阻尼比 0.02)

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
0.005	0.014	0.015	0.018	0.021	0.024	0.026	0.029
0.01	0.021	0.023	0.026	0.031	0.035	0.039	0.042
0.02	0.031	0.034	0.039	0.046	0.052	0.057	0.062
0.03	0.039	0.043	0.049	0.057	0.064	0.071	0.077
0.04	0.046	0.050	0.057	0.067	0.075	0.083	0.090
0.05	0.052	0.057	0.064	0.075	0.085	0.094	0.102

**表 7.2.6-3 主被动混合调谐质量阻尼器提供的
等效附加阻尼比 ζ_e (原结构阻尼比 0.03)**

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
0.005	0.012	0.014	0.016	0.019	0.022	0.025	0.027
0.01	0.019	0.022	0.025	0.029	0.033	0.037	0.041
0.02	0.029	0.033	0.037	0.044	0.050	0.050	0.060
0.03	0.037	0.041	0.047	0.055	0.062	0.069	0.075
0.04	0.044	0.049	0.055	0.065	0.073	0.081	0.088
0.05	0.050	0.055	0.062	0.073	0.083	0.092	0.100

**表 7.2.6-4 主被动混合调谐质量阻尼器提供的
等效附加阻尼比 ζ_e (原结构阻尼比 0.04)**

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
0.005	0.011	0.013	0.015	0.018	0.021	0.023	0.026
0.01	0.018	0.020	0.023	0.028	0.032	0.035	0.039
0.02	0.028	0.031	0.035	0.042	0.048	0.053	0.058
0.03	0.035	0.039	0.045	0.053	0.060	0.067	0.073
0.04	0.042	0.047	0.053	0.063	0.071	0.079	0.086
0.05	0.048	0.053	0.060	0.071	0.081	0.090	0.098

**表 7.2.6-5 主被动混合调谐质量阻尼器提供的
等效附加阻尼比 ζ_e (结构阻尼比 0.05)**

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
0.005	0.010	0.012	0.014	0.017	0.019	0.022	0.024
0.01	0.017	0.019	0.022	0.026	0.030	0.034	0.037
0.02	0.026	0.029	0.034	0.040	0.046	0.051	0.056
0.03	0.034	0.038	0.043	0.051	0.058	0.065	0.071
0.04	0.040	0.045	0.051	0.061	0.069	0.077	0.084
0.05	0.046	0.051	0.058	0.069	0.079	0.087	0.096

7.2.7 采用等效风荷载法计算被控结构风振控制响应时，阻尼器行程应符合下列规定：

1 阻尼器行程设计值宜按下式计算：

$$y_{Dm} = \phi \gamma x_{Dm}(z_c) \quad (7.2.7)$$

式中： y_{Dm} ——阻尼器行程设计值（m）；

$x_{Dm}(z_c)$ ——阻尼器安装位置处的被控结构最大动位移（m），按本标准第 3.2.3～3.2.6 条的规定计算；

ϕ ——安全系数，取 1.4；

γ ——阻尼器行程与安装位置处被控结构最大动位移的比值，根据被控结构的自身阻尼比和阻尼器惯性质量与结构模态质量比值 μ_T ，分别按表 7.2.7-1～表 7.2.7-5 确定。

2 阻尼器惯性质量行程允许值应大于其设计值的 1.2 倍。

表 7.2.7-1 阻尼器行程与安装位置处被控结构
最大动位移的比值 γ （结构阻尼比为 0.01）

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
0.005	8.94	9.81	10.99	12.71	14.21	15.56	16.79
0.01	6.37	6.98	7.80	8.99	10.02	10.94	11.78
0.02	4.52	4.94	5.50	6.32	7.02	7.65	8.23
0.03	3.69	4.03	4.48	5.13	5.70	6.20	6.66
0.04	3.19	3.48	3.87	4.43	4.91	5.35	5.74
0.05	2.86	3.12	3.46	3.96	4.38	4.77	5.12

表 7.2.7-2 阻尼器行程与安装位置处被控结构
最大动位移的比值 γ （结构阻尼比为 0.02）

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5
0.005	8.30	9.16	10.32	12.00	13.48	14.80	16.01
0.01	6.02	6.62	7.42	8.59	9.61	10.52	11.36
0.02	4.32	4.74	5.29	6.10	6.80	7.42	7.99
0.03	3.55	3.88	4.33	4.98	5.54	6.04	6.50
0.04	3.08	3.37	3.76	4.31	4.79	5.22	5.61
0.05	2.77	3.02	3.36	3.86	4.28	4.66	5.01

**表 7.2.7-3 阻尼器行程与安装位置处被控结构
最大动位移的比值 γ (结构阻尼比为 0.03)**

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0.0	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0.005	7.77	8.60	9.72	11.37	12.82	14.12	15.31
0.010	5.70	6.29	7.08	8.23	9.23	10.14	10.96
0.020	5.70	4.55	5.10	5.89	6.59	7.21	7.77
0.030	3.42	3.75	4.19	4.83	5.39	5.89	6.34
0.040	2.98	3.27	3.65	4.20	4.68	5.10	5.49
0.050	2.68	2.94	3.27	3.76	4.19	4.57	4.91

**表 7.2.7-4 阻尼器行程与安装位置处被控结构
最大动位移的比值 γ (结构阻尼比为 0.04)**

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0.0	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0.005	7.30	8.11	9.20	10.81	12.22	13.50	14.66
0.010	5.42	5.99	6.770	7.90	8.89	9.77	10.59
0.020	3.97	4.38	4.92	5.70	6.39	7.00	7.56
0.030	3.30	3.62	4.06	4.70	5.25	5.74	6.19
0.040	2.89	3.17	3.54	4.09	4.56	4.99	5.37
0.050	2.60	2.85	3.19	3.67	4.10	4.47	4.82

**表 7.2.7-5 阻尼器行程与安装位置处被控结构
最大动位移的比值 γ (结构阻尼比为 0.05)**

模态质量比 μ_T	加速度反馈增益 g_a						
	0.0	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0.005	6.89	7.67	8.73	10.30	11.68	12.93	14.07
0.010	5.16	5.72	6.48	7.59	8.56	9.44	10.24
0.020	3.82	4.21	4.75	5.52	6.20	6.81	7.36
0.030	3.18	3.51	3.94	4.57	5.11	5.60	6.05
0.040	2.80	3.07	3.45	3.99	4.46	4.88	5.26
0.050	2.53	2.77	3.11	3.59	4.01	4.38	4.72

7.2.8 主被动混合阻尼器的刚度和阻尼元件与被控结构连接处的控制力设计值宜分别按下列公式计算：

$$F_{kT} = k_T y_{Dm} \quad (7.2.8-1)$$

$$F_{cT} = c_T \omega_1 y_{Dm} \quad (7.2.8-2)$$

式中： F_{kT} ——阻尼器刚度元件与被控结构连接处的控制力 (N)；

F_{cT} ——阻尼器阻尼元件与被控结构连接处的控制力 (N)；

k_T ——阻尼器刚度元件的刚度 (N/m)；

c_T ——阻尼器阻尼元件的阻尼系数 (N·s/m)。

7.2.9 设置主被动混合调谐质量阻尼器后，被控结构层间变形应符合被控结构层间位移角的设计要求。

7.2.10 主动控制力设计值可按下式计算：

$$u_k = x_{Dm}(z_c) \sqrt{(m_1 g_a \omega_1^2)^2 + (g_v \omega_1 \gamma)^2 + (g_d \gamma)^2} \quad (7.2.10)$$

式中： u_k ——主动控制力设计值。

7.2.11 主动控制系统功率可按下式计算：

$$P = 0.5 \omega_1 u_k y_{Dm} / \eta \quad (7.2.11)$$

式中： P ——主动控制额定功率 (kW)；

η ——主动控制系统效率。

7.2.12 混合调谐质量阻尼器风振控制系统，除按等效风荷载法进行设计外，尚应采用时程分析法进行校核，且应符合下列规定：

1 时程分析法中被控结构与混合调谐质量阻尼器力学模型，应反映实际结构和混合调谐质量阻尼器真实的动力特性；

2 时程分析法计算的风荷载应符合本标准第 4.1.3 条和第 4.1.4 条规定，计算结果应取其包络值。

7.2.13 主被动混合调谐质量阻尼器的参数设计应符合下列规定：

1 惯性质量可根据可利用的结构附属物、减振效果要求和

行程要求等综合确定；

2 刚度元件和阻尼元件应根据减振目标和主被动混合质量阻尼器行程限制综合确定；

3 主被动混合质量阻尼器行程和速度设计值可根据驱动器性能、造价和安装空间综合确定；

4 额定驱动力与功率可根据驱动器性能、减振效果要求和造价综合确定；

5 支承系统或悬挂系统可根据安装和工作空间确定。

7.3 检 验

7.3.1 主被动混合调谐质量阻尼器零部件安装前应检验合格后方可用于阻尼器的集成。阻尼器零部件技术性能应满足设计要求，并应符合国家现行产品标准的相关规定。

7.3.2 当主被动混合调谐质量阻尼器由若干子系统和零部件组成时，应对每个子系统和零部件先进行单独测试，再进行联合测试检验。

7.3.3 驱动装置设备说明书应包括下列参数：

- 1 驱动装置额定驱动力；
- 2 驱动装置的动态频响特性；
- 3 驱动装置的控制力超调特性和时间滞后特性；
- 4 位移限位范围及制动方式；
- 5 速度设计值；
- 6 限位缓冲器的性能参数；
- 7 温度、湿度、洁净度等工作环境要求；
- 8 其他相关机械及电气参数。

7.3.4 用于控制算法设计的主被动混合调谐质量阻尼器系统动力学模型应通过试验确定。

7.3.5 混合调谐质量阻尼器安装之前应按下列规定进行性能检验：

- 1 小型混合调谐质量阻尼器安装前应进行组装试验；

2 大型混合调谐质量阻尼器安装前应进行比例模型试验，检验各种极端工况下阻尼器的控制性能、容错能力和可靠性。

7.4 安装与验收要求

7.4.1 在被控结构施工阶段，应对已安装的混合调谐质量阻尼器部件采取覆盖保护等措施，防止灰尘、油污等影响风振控制系统的使用寿命。

7.4.2 施工过程应记录控制系统支承部件的施工精度，并应在验收测试前进行系统校核。

7.4.3 主被动混合调谐质量阻尼器零部件应与结构构件保持安全净空及检修空间。

7.4.4 主被动混合调谐质量阻尼器验收前，设备供应商及施工方应提交下列说明文件：

- 1 控制系统部件供货及安装企业的资质证明；
- 2 控制系统部件出厂合格证书；
- 3 控制系统部件出厂详细检验报告；
- 4 控制系统安装及施工记录；
- 5 隐蔽工程施工及监理记录。

7.4.5 验收时设计方应提供软件操作说明书、硬件使用维护手册等资料，并应对操作使用人员进行培训。

7.4.6 混合调谐质量阻尼器验收时，应将控制系统硬件、软件共同运行进行联合调试；应进行运行测试，并提供测试验收报告。

7.4.7 混合调谐质量阻尼器安装后应进行现场调试，实测被控结构风振控制效果不应低于设计控制效果的 15%。

8 风振控制系统抗震设计

8.0.1 黏滞阻尼器和黏弹性阻尼器风振控制系统用于被控结构地震响应控制时，应符合下列规定：

1 应按本标准第 5 章规定，进行被控结构的黏滞阻尼器和黏弹性阻尼器风振控制系统设计；

2 应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关规定进行被控结构减震控制设计；

3 阻尼器安装数量和性能参数取抗风设计和抗震设计二者的较大值。

8.0.2 当调谐质量阻尼器和主被动混合调谐质量阻尼器风振控制系统用于被控结构地震响应控制时，应符合下列规定：

1 在被控结构遭遇多遇地震作用时，应采用时程分析法对阻尼器行程、速度和控制力进行验算，其最大值应小于阻尼器的设计值；

2 当被控结构遭遇设防烈度及以上烈度地震作用时，应将阻尼器进行锁定，不考虑阻尼器对结构地震响应的减震作用。

8.0.3 调谐液体阻尼器风振控制系统不宜考虑其减震作用。

本标准用词说明

1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行时的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 2 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 3 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 4 《钢结构设计标准》GB 50017
- 5 《钢结构焊接规范》GB 50661
- 6 《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3
- 7 《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99
- 8 《建筑消能阻尼器》JG/T 209