T/CECS ××××-202×

中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会 标 准

建筑工程振震双控技术标准

Technical standard for dual control of engineering vibration and seismic vibration of building engineering

（征求意见稿）

中国×××出版社

中国工程建设标准化协会标准

建筑工程振震双控技术标准

Technical standard for dual control of engineering vibration and seismic vibration of building engineering

T/CECS ×××-20××

主编单位：中国机械工业集团有限公司
广　　州　　大　　学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：20××年×月×日

中国×××出版社

20××　北　京

前　言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2018年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2018〕030号）及《关于同意〈建筑工程振震双控设计标准〉变更主编单位的复函》（2021年1月5日）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结我国建筑工程振震双控技术及实践经验，参考国内外有关标准，并在广泛征求意见的基础上，制订本标准。

本标准共分为8章，主要内容包括：总则，术语和符号，基本规定，振震双控作用分析与响应验算，振震双控设计方法，振震双控辅助措施，振震双控噪声控制，施工、验收、维护与监测等。

本标准所涉及专利的具体技术问题，使用者可直接与专利持有人协商处理，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会归口管理，由中国机械工业集团有限公司、广州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，请反馈给中国机械工业集团有限公司（地址：北京市海淀区丹棱街3号，邮编：100080）。

主 编 单 位：　中国机械工业集团有限公司
　　广州大学

参 编 单 位：

主 要 起 草 人：

主 要 审 查 人：

目　次

1 总　则 1

2 术语和符号 2

2.1 术　语 2

2.2 符　号 5

3 基本规定 6

3.1 设计原则 6

3.2 设计方案 6

3.3 控制标准 7

4 振震双控作用分析与响应验算 9

4.1 一般规定 9

4.2 地震作用 10

4.3 振动作用 10

5 振震双控设计方法 12

5.1 一般规定 12

5.2 以水平地震控制为主要目标的振震双控 12

5.3 以竖向振动控制为主要目标的振震双控 17

5.4 多维振震双控 18

6 振震双控辅助措施 28

6.1 交通与装备振源减振 28

6.2 振动传播路径隔振 30
6.3 振动控制对象隔振 31
7 振震双控噪声控制..... 32
7.1 振动引起二次辐射噪声的室内限值标准.....32
7.2 减振降噪设计.....32
7.3 减振措施降噪量的分析 33
7.4 抗震设计的降噪利用 33
8 施工、验收、维护与监测..... 34
8.1 一般规定.....34
8.2 施　工.....34
8.3 验　收.....37
8.4 维护与监测.....38
用词说明..... 44
引用标准名录 45
附：条文说明 47

Contents

1 General provisions 1
2 Terms and symbols 2
2.1 Terms..... 2
2.2 Symbols..... 5
3 Basic requirements 6
3.1 Design principles..... 6
3.2 Design scheme..... 6
3.3 Control criteria..... 7
4 Effect analysis and response check for dual control of engineering vibration and seismic vibration 9
4.1 General requirements..... 9
4.2 Seismic effect..... 10
4.3 Vibration effect..... 10
5 Design methods for dual control of engineering vibration and seismic vibration 12
5.1 General requirements..... 12
5.2 Taking horizontal seismic control as the main objective of dual control of engineering vibration and seismic vibration..... 12
5.3 Taking vertical vibration control as the main objective of dual control of engineering vibration and seismic vibration..... 17
5.4 Multi-dimension dual control of engineering vibration and seismic vibration..... 20
6 Auxiliary measures of dual control of engineering vibration and seismic vibration 28
6.1 Vibration source reduction for traffic and equipment..... 28
6.2 Vibration isolation on propagation path..... 30
6.3 Vibration isolation for the controlled object..... 31
7 Noise control of dual control of engineering vibration and seismic vibration 32
7.1 Indoor allowable standards for secondary radiated noise caused by engineering vibration..... 32
7.2 Design for vibration and noise reduction..... 32
7.3 Noise reduction analysis of vibration reduction measures 33
7.4 Noise reduction utilization in seismic design..... 33
8 Construction, check before acceptance, maintenance and monitoring..... 34
8.1 General requirements..... 34
8.2 Construction 34

8.3 Check before acceptance.....37
8.4 Maintenance and monitoring.....38
Explanation of wording in this standard 44
List of quoted standards..... 45
Addition: Explanation of provisions 47

1 总　则

1.0.1 为在承受振动与地震双重作用的建筑工程或装备设计中，贯彻执行国家有关防震减灾法律法规及技术经济政策，实行以预防为主的方针，减轻地震对建筑工程或装备造成的破坏，避免人员伤亡，减少经济损失，并确保建筑工程或装备满足安全、正常生产、人员健康及环境要求，做到技术先进、安全可靠、有效合理、经济适用，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于抗震设防烈度为 6 度及以上地区的新建建筑工程或装备进行振动与地震双重控制的工程设计；改建和扩建工程可参照本标准执行。

1.0.3 建筑工程或装备进行振动与地震双重控制时，振震双控设计除应符合本标准外，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 振震双控　dual control of engineering vibration and seismic vibration

为降低工程振动和地震作用对建筑工程或装备影响的综合控制技术。

2.1.2多维振震双控　multi-dimensional dual control of engineering vibration and seismic vibration

当地震和振动控制同等重要时，采用以三向地震及竖向振动控制为目标的多维振震双控设计方法。

2.1.3 以水平地震控制为主要目标的振震双控　taking horizontal seismic control as the main objective of dual control of engineering vibration and seismic vibration

以水平地震控制为主要目标、竖向振动控制为次要目标的振震双控设计方法。

2.1.4 以竖向振动控制为主要目标的振震双控　taking vertical vibration control as the main objective of dual control of engineering vibration and seismic vibration

以竖向振动控制为主要目标、水平地震控制为次要目标的振震双控设计方法。

2.1.5控制层　control layer

用于布置振震双控装置及辅助构件的专门层，可设置在建筑结

构的底部或层间。装备振震双控，可设置在装备底部、局部区域或装备所放置建筑结构中的特定区域。

2.1.6 上部结构 superstructure

振震双控建筑位于控制层以上的结构。

2.1.7 下部结构 substructure

振震双控建筑位于控制层以下的结构。

2.1.8 振震双控支座 dual control support of engineering vibration and seismic vibration

控制层中用于承载上部结构并使结构满足降低振动和地震作用功能的支座，主要有隔振支座、隔震支座等。

2.1.9隔振支座 vibration isolation support

控制层的重要部分，用于承载上部结构并具有隔离振动传递功能的装置。

2.1.10 隔震支座 seismic isolation support

控制层的重要部分，用于承载上部结构并具有隔离地震作用功能的装置。

2.1.11阻尼装置 damping device

控制层的重要部分，通过吸收及能量耗散方式，减少地震、冲击或振动等输入能量而降低结构动力响应的装置。

2.1.12 抗拉装置 anti-tension device

控制层的重要部分，避免因上部结构倾覆而引起振震双控支座竖向拉应力超限的装置。

2.1.13 限位装置 displacement restrainer

控制层的重要部分，限制振震双控支座产生超过容许水平变形的装置。

2.1.14 隔振效率 vibration isolation efficiency

结构体系采用隔振措施后振动响应幅值的减小量与隔振前的振动响应幅值之比。

2.1.15 振源减振措施 suppression measures of vibration source

通过减小振源干扰力或改变系统传递特性，使振动在源头上衰减的措施。

2.1.16 路径隔振措施 isolation measures on vibration path

在振动传递路径上，采用弹性元件（常配有阻尼元件）或屏障以减小振动传递的措施。

2.1.17 二次辐射噪声 secondary noise

被激励产生振动的建筑构件，其固体表面振动向周围空气介质辐射的声压波，亦称固体噪声。

2.1.18 振动敏感装备 vibration sensitive equipment

对环境振动控制要求较高的大型装备或精密装备。

2.1.19 振动与噪声敏感建筑 sensitive buildings of vibration and noise

指医院、学校、机关、科研单位、住宅等具有较高振动与声环境保护要求的建筑，简称敏感建筑。

2.1.20 第一形状系数 first shape factor

支座中单层橡胶层的有效承压面积与其自由侧面表面积之比。

2.1.21 第二形状系数 second shape factor

对于圆形支座，为内部橡胶层直径与内部橡胶总厚度之比；对于矩形或方形支座，为内部橡胶层有效宽度与内部橡胶总厚度之比。

2.2 符　号

VL_Z——Z 振级

VL_{Zmax}——分频最大 Z 振级

$VL_{Z,\ eq}$——等效连续 Z 振级

LA_{eq}——等效连续 A 声级

VAL——振动计权加速度级

VDV_Z——竖向四次方振动剂量值

3 基本规定

3.1 设计原则

3.1.1 当建筑工程同时具有抗震设防和振动控制要求并采用振震双控设计时，应符合下列规定：

1 在振动作用下，建筑及装备应满足正常使用的舒适性、适用性和耐久性要求；

2 在地震作用下，建筑及装备应满足在设计使用年限内的可靠性要求。

3.1.2 建筑工程抗震设防类别和抗震设防标准应按现行国家标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002、《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223 的规定确定。

3.1.3 建筑工程振震双控设计宜经多种方案比选、优化后确定。

3.1.4 建筑结构振震双控设计时，控制层以上结构的高宽比不宜大于 4.0，高宽比不满足时应论证方案的可行性。

3.1.5 振动与噪声敏感建筑、振动敏感装备进行振震双控设计时，宜根据实际情况，考虑振源减振、传播路径隔振以及振动控制对象隔振等。

3.2 设计方案

3.2.1 建筑工程或装备的振震双控设计，可采用隔振或隔震、抗振或抗震、消能减振或消能减震措施中一种或多种技术组合方案。

3.2.2 建筑或装备振震双控设计方案的选取，应符合下列规定：

1 一般情况下，宜采用多维振震双控设计方案；

2 当抗震设防烈度相对较高或对抗震有特殊要求、竖向环境振动作用相对较小或竖向容许振动要求相对较低时，可采用以水平地震控制为主要目标、竖向振动控制为次要目标的振震双控设计方案；

3 当抗震设防烈度相对较低、竖向环境振动作用相对较大、竖向容许振动要求相对较高时，可采用以竖向振动控制为主要目标、水平地震控制为次要目标的振震双控设计方案。

3.2.3 根据建筑工程不同区域的功能要求，可采用整体控制、局部控制、整体与局部联合控制的振震双控设计方案。

3.2.4 当采用新型振震双控设计方案或装置时，工程使用前应经专门研究和论证。

3.3 控制标准

3.3.1 建筑工程振震双控设计时，建筑或装备在振动作用下的容许标准应符合下列规定：

1 建筑的容许振动标准可按现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868、《建筑环境通用规范》GB 55016、《城市区域环境振动标准》GB 10070、《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355、《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170 等综合确定；装备的容许振动标准一般由生产厂家给出，无明确规定时，可按现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 等综合确定；

2 声环境控制可按现行国家标准《民用建筑隔声设计规范》GB

50118、《建筑环境通用规范》GB 55016、《声环境质量标准》GB 3096、《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355、行业标准《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170 等综合确定。

3.3.2 建筑工程振震双控设计时，建筑或装备在地震作用下的控制标准应符合现行国家标准《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的有关规定。

4 振震双控作用分析与响应验算

4.1 一般规定

4.1.1 建筑结构振震双控设计时，应分别计算振动和地震作用。

4.1.2 建筑结构振震双控振动作用的计算，应符合下列规定：

1 振动分析宜采用时程分析法；

2 结构的振动作用计算宜计入轨道交通、动力设备或人致振动等环境激励引起的振动响应。

4.1.3 建筑结构振震双控地震作用的计算，应符合下列规定：

1 一般应至少在建筑结构的两个主轴方向分别计算水平地震作用，各方向的水平地震作用应由该方向的抗侧力构件承担；

2 对于有斜交抗侧力构件的结构，当相交角度大于 15°时，应分别计算各抗侧力构件的水平地震作用；

3 对于平面不规则的建筑结构，应计入扭转效应；

4 设置控制层后，应计算竖向地震作用。

4.1.4 建筑结构振震双控的计算模型应符合下列规定：

1 地震作用分析时，计算模型应能准确反映结构构件的实际受力情况，可选取多质点系、空间杆系、空间杆—墙板元或壳元、连续体及其他组合有限元等计算模型；

2 振动作用分析时，计算模型应能准确反映振源与结构的相对位置、激励类型以及振动在结构和土体中的传播和边界反射情况；材料本构模型与阻尼设置应合理；

3 当振动激励位于结构下方或周边土体时，应建立土—结构整

体计算模型，并应根据场地工程地质勘察报告进行土层划分及参数选取；已完成结构基底振动实测的建筑工程，当采用实测数据作为振动输入时，计算模型可不计入土体的影响；

4 建筑结构振震双控采用隔振或隔震设计时，控制层中的隔振支座、隔震支座及阻尼器的计算模型应能准确反映装置的三向刚度、阻尼及荷载—位移关系特性。

4.2 地震作用

4.2.1 当建筑工程振震双控采用非隔震设计时，其地震作用、地震影响系数、构件截面与抗震变形验算，应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定；当采用隔震设计时，应符合现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的规定。

4.2.2 计算地震作用时，阻尼比的取值应按下列规定采用：

1 钢筋混凝土结构的阻尼比，宜取 0.05；

2 钢结构的阻尼比，可按下列规定取值：

1）多遇地震作用计算，结构高度不大于 50m 时，阻尼比宜取 0.04；结构高度大于 50m 且小于 200m 时，阻尼比宜取 0.03；结构高度不小于 200m 时，阻尼比宜取 0.02；

2）当偏心支撑框架部分承担的地震倾覆力矩大于结构总地震倾覆力矩的 50%时，阻尼比可相应增加 0.005。

3 罕遇地震作用下的弹塑性计算分析，阻尼比宜取 0.05。

4.3 振动作用

4.3.1 建筑结构的振动作用宜选取建筑工程基坑底部实测振动激励作为输入；无条件开展坑底测试时，可取相似场地与工况条件下的实测振动进行等效激励模拟。

4.3.2 结构的振动计算应符合下列规定：

1 混凝土和土体可采用动弹性模量；

2 采用有限元法进行振动作用计算时，计算模型的网格划分应在满足计算精度的前提下兼顾计算效率；

3 振动响应计算结果的提取位置，应能准确评价建筑结构的振动影响。

4.3.3 计算振动作用时，钢筋混凝土结构的阻尼比宜取 0.02~0.05，钢结构的阻尼比宜取 0.005~0.02。

5 振震双控设计方法

5.1 一般规定

5.1.1 振震双控设计应根据建筑抗震设防类别、抗震设防烈度、振动强度、容许振动标准、结构类型、场地条件以及工程造价和施工条件等因素综合确定。

5.1.2 振震双控设计一般情况下宜采用多维振震双控设计方案，也可采用控制主要目标、优化次要目标，使结构体系满足振震双控的要求，并满足下列规定：

1 当水平地震和竖向振动控制同等重要时，宜采用多维振震双控设计方法，使建筑或装备满足抗震设防需求和工程振动控制要求；

2 以水平地震控制为主要目标、竖向振动控制为次要目标的振震双控设计方法，应首先计算结构体系在水平地震作用下的抗震、隔震或减震效果，对于满足抗震性能要求的结构体系，再进行振动作用分析和控制措施优化；

3 以竖向振动控制为主要目标、水平地震控制为次要目标的振震双控设计方法，应首先计算结构体系在竖向振动作用下的隔振效果，对于满足振动控制要求的隔振体系，再进行地震作用验算和控制措施优化。

5.2 以水平地震控制为主要目标的振震双控

5.2.1 以水平地震控制为主要目标的振震双控建筑结构采用隔震设计时，结构的抗震性能目标应符合现行国家标准《建筑隔震设计标

准》GB/T 51408 的规定，并应开展设防、罕遇、极罕遇地震作用下结构及控制层验算。

5.2.2 对于满足抗震设防要求的隔震结构，应进行正常使用极限状态下的振动作用验算，建筑工程的容许振动值除应满足工艺设计要求和现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的规定外，尚应符合下列规定：

1 对于城市轨道交通上盖或毗邻建筑，应满足现行行业标准《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170 的规定；

2 对人体舒适度有要求时，应符合现行国家标准《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 1 部分：一般要求》GB/T 13441.1 和《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355 的规定；

3 装备的振动控制，应符合生产厂家和国家现行标准的要求。

5.2.3 建筑结构振震双控时，控制层应符合下列规定：

1 控制层宜布置在建筑物的底部或层间，也可在上部结构特定设备、仪器或局部区域设置隔振措施，实现振震双控功能；

2 控制层的隔震支座应与结构竖向构件位置对应，不能对应时应采取可靠的结构转换措施；

3 控制层中隔震支座的规格、数量和分布应根据竖向承载力、竖向刚度、水平刚度和阻尼要求由计算确定；当支座的底面标高不同时，应采取有效措施保证隔震装置共同工作；

4 同一控制层中选用不同类型或规格的隔震支座时，应充分发挥各支座承载力和水平变形能力；

5 同一控制层中隔震装置的竖向变形宜保持一致，并应计入隔振措施在施工阶段及长期服役过程中的压缩变形影响；

6 控制层水平向和竖向各自的刚度中心与质量中心宜重合，设防烈度地震作用下的偏心率不宜大于 3%；

7 同一部位采用多个隔震支座时，各支座间的净距应能满足施工所需的空间要求。

5.2.4 控制层中的振震双控支座应符合下列规定：

1 可通过对隔震支座增设隔振支座实现，但应严格限制隔振支座在地震作用下的水平变形，必要时可设置阻尼装置、抗拉装置或限位装置；对金属弹簧隔振支座和叠层厚橡胶隔振支座，应设置限制地震时水平变形的刚性限位装置；

2 组成振震双控支座的隔震支座和隔振支座可与阻尼装置、抗拉装置或限位装置组合使用，可组合设置，也可单独设置；

3 隔震支座采用摩擦摆式支座时，应计入支座竖向位移的影响；

4 隔震支座与阻尼装置组合使用时，罕遇地震作用下控制层水平最大位移对应的恢复力，不宜小于控制层屈服力与摩阻力之和的 1.2 倍。

5.2.5 控制层中隔震支座的设计使用年限不应低于建筑结构的设计使用年限；当控制层中其他装置的设计使用年限低于建筑结构设计使用年限时，设计中应注明更换期限与措施。

5.2.6 隔震支座与隔振支座的压应力应符合下列规定：

1 隔震支座与隔振支座的压应力不应超过表 5.2.6 的规定；

2 对于橡胶隔震支座，第二形状系数不宜小于 5.0；第二形状系数小于 5.0 且不小于 4.0 时，平均压应力限值降低 20%；第二形状系数小于 4.0 且不小于 3.0 时，平均压应力限值降低 40%，并对支座稳定性进行专门研究；

3 对于弹性滑板支座，橡胶支座部分有效承载面积范围内压应力限值及滑移材料压应力限值，应满足表 5.2.6 的规定；

4 对于摩擦摆隔震支座，摩擦材料的压应力限值应满足表 5.2.6 的规定。

表 5.2.6 隔震支座与隔振支座的压应力限值（MPa）

建筑类别	特殊设防类建筑	重点设防类建筑	标准设防类建筑
叠层厚橡胶隔振支座	6（16）	8（20）	8（20）
橡胶隔震支座	10（20）	12（25）	15（30）
弹性滑板支座	12（25）	15（30）	20（40）
摩擦摆隔震支座	20（40）	25（50）	30（60）

注：1 表中括号外数值为隔震支座与隔振支座在重力荷载代表值作用下的压应力设计值限值，括号内数值为隔震支座与隔振支座在罕遇地震作用下的最大竖向压应力限值；

2 标准设防类建筑隔震支座或隔振支座外径或外轮廓尺寸不得小于 400mm。

5.2.7 在罕遇地震作用下，隔震支座的拉应力应符合下列规定：

1 橡胶隔震支座宜保持受压状态，对于特殊设防类建筑的支座不应出现拉应力，对于重点设防和标准设防类建筑的支座拉应力限

值不应大于 1.0MPa；当不满足上述规定时，可增设抗拉装置使竖向受力满足要求；

2 在同一地震加速度时程中，出现拉应力的隔震支座数量不宜超过控制层支座总数量的 30%；

3 验算隔震支座的最大压应力和最小压应力时，应计入水平及竖向地震同时作用产生的最不利影响。

5.2.8 建筑设计工作年限内，隔震支座和隔振支座的刚度、阻尼特性变化不应超过±20%，橡胶支座的徐变量不应超过橡胶总厚度的5%。

5.2.9 建筑结构振震双控整体抗倾覆验算应符合下列规定：

1 振震双控建筑结构应进行整体抗倾覆验算和隔震支座竖向承载力验算；

2 整体抗倾覆验算时，应按罕遇地震作用计算倾覆力矩，并应按上部结构重力荷载代表值计算抗倾覆力矩，抗倾覆力矩与倾覆力矩之比不应小于 1.4；

3 控制层在罕遇地震作用下应保持稳定，不宜出现不可恢复的变形；隔震支座在罕遇水平和竖向地震共同作用下，最大压应力应符合表 5.2.6 的规定；

4 计算分析模型应能合理反映增设竖向隔振措施和抗拉装置的影响；

5 当增设抗拉装置时，在罕遇地震作用下抗拉装置及其连接件应处于弹性状态；对于特殊设防类建筑，在极罕遇地震作用下抗拉

装置及其连接件应处于弹性状态。

5.2.10 建筑结构振震双控设计时的抗震措施、构造措施和支座连接应符合现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的规定；跨越变形缝的盖板或活动连廊宜在主体结构连接处设置降低竖向振动影响的柔性垫层。

5.2.11 控制层的水平刚度、阻尼及水平向承载力，宜符合现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的规定。

5.2.12 隔震支座的力学模型应以产品的型式检验和出厂检验为依据，支座型式检验和出厂检验要求应高于现行国家标准《橡胶支座 第 3 部分：建筑隔震橡胶支座》GB 20688.3、《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的规定，检验应以集成的整体产品进行试验。

5.3 以竖向振动控制为主要目标的振震双控

5.3.1 以竖向振动控制为主要目标的振震双控建筑结构采用隔振设计时，应按现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 的规定进行隔振专项设计。

5.3.2 隔振支座可采用螺旋弹簧隔振器、碟形弹簧隔振器等，并应附加限位装置，严格控制地震作用下的水平变形；当隔振支座采用限位装置而未设隔震支座时，上部结构应满足抗震设计要求。

5.3.3 隔振设计应符合下列规定：

1 隔振系统的竖向固有频率应根据环境振动特性和隔振目标确定；

2 各支承点处隔振支座的刚度和承载力，应根据隔振系统的固

有频率和各支承点的荷载确定；

3 阻尼参数应根据隔振系统设计阻尼比确定。

5.3.4 控制层的设计应符合下列规定：

1 控制层宜设置在结构底部，当设在其他位置时应论证方案的可行性；

2 控制层中的隔振器高度应可调节、可更换；

3 隔振器连接处宜采用自粘防滑材料；

4 穿过控制层的设备配管、配线应采用柔性连接或可控制变形的其他有效措施。

5.3.5 抗震验算及层间位移角限值应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定。

5.3.6 消能减震装置的布置应符合下列规定：

1 消能减震装置应沿结构两主轴方向布置，并应避免对结构扭转和竖向隔振产生不利影响；

2 消能减震装置宜设置在变形较大的部位。

5.3.7 构造要求应符合下列规定：

1 隔振缝应同时满足抗震缝、伸缩缝和沉降缝的要求，当设置隔震支座时，尚应满足隔震支座的变形要求；

2 当控制层不设水平限位装置时，隔振器与结构之间的连接件应能满足罕遇地震作用下最大水平剪力的要求；

3 隔振支座四周应预留后期安装、维护、替换的空间。

5.4 多维振震双控

I 一般规定

5.4.1 建筑结构多维振震双控设计时，可采用下列方法：

1 叠层橡胶隔震支座与钢弹簧支座组合；

2 摩擦摆支座与钢弹簧支座组合；

3 消能装置与钢弹簧组合；

4 各向异性结构或材料多维振动控制。

5.4.2 装备多维振震双控设计时，宜采用下列方法：

1 多维减振机架振动控制；

2 气浮式多维振动控制。

II 叠层橡胶支座与钢弹簧支座组合

5.4.3 叠层橡胶支座与钢弹簧支座组合设计，应符合下列规定：

1 叠层橡胶支座与钢弹簧支座组合可采用串联或并联方式；

2 叠层橡胶支座与钢弹簧支座组合设计时，应对控制层进行水平向隔震设计和竖向振动控制设计；

3 叠层橡胶支座与钢弹簧支座组合设计应进行罕遇地震作用下的抗倾覆验算，抗倾覆安全系数不应小于 1.4；

4 振震双控装置的竖向隔振部分，应设置较大抗侧刚度的运动解耦装置，运动解耦装置可采用轴承式、导轨式等；

5 在地震作用下，叠层橡胶支座拉应力应符合现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的规定，钢弹簧支座的拉力不应超过钢弹簧支座受拉设计承载力；

6 叠层橡胶支座与钢弹簧支座串联组合时，钢弹簧支座设计承

载力不应小于叠层橡胶支座设计承载力；钢弹簧支座的变形设计值应根据承载后性能设计或时程分析后的变形需求确定；

7 叠层橡胶支座与碟形弹簧组合时，振震双控装置在地震作用下不应出现拉应力；当可能出现拉应力时，应设置抗拉装置；

8 叠层橡胶支座与钢弹簧支座串联组合时，碟形弹簧并联数量应根据橡胶支座的设计承载力确定，单个碟形弹簧的设计承载力宜取变形不大于 0.75 倍碟形弹簧内锥高时的承载力；碟形弹簧并联数量应根据隔振性能设计或时程分析时的竖向变形需求确定。

5.4.4 叠层厚橡胶支座与钢弹簧支座组合设计，应符合下列规定：

1 叠层厚橡胶支座可采用普通橡胶支座增加各层橡胶厚度制成，支座的第一形状系数可取 4～16；

2 叠层厚橡胶支座的隔震设计与计算分析，可按现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 中普通橡胶支座的规定执行；

3 支座性能参数应通过试验确定，性能试验应符合现行国家标准《橡胶支座 第 1 部分：隔震橡胶支座试验方法》GB/T 20688.1 的规定；

4 支座的竖向极限拉应力不应小于 2.0MPa；

5 设计压应力下叠层厚橡胶支座的极限水平变位不应小于其 0.55 倍有效直径和 3 倍支座内部橡胶总厚度中的较大值；

6 经设计基准期耐久性试验后，叠层厚橡胶支座刚度、阻尼特性变化不应超过初期值的 20%，徐变量不应超过支座内部橡胶总厚度的 5%；

7 应进行支座稳定性和整体抗倾覆验算，水平和竖向地震作用效应组合的抗倾覆安全系数不应小于 1.4。

III 摩擦摆支座与钢弹簧支座组合

5.4.5 摩擦摆支座与钢弹簧支座组合设计时，摩擦摆支座应符合现行国家标准《建筑摩擦摆隔震支座》GB/T 37358 的规定。

5.4.6 摩擦摆支座与钢弹簧支座组合设计，应符合下列规定：

1 摩擦摆支座与钢弹簧支座宜采用串联方式；

2 应先进行上部结构的抗震设计，确定水平隔震性能，再进行正常使用状态下的结构竖向隔振设计，确定竖向隔振性能，并应同时计入振震双控装置对结构水平和竖向性能的影响；

3 当仅需控制结构局部区域的竖向振动时，摩擦摆支座和钢弹簧支座可分别布置在结构的不同位置，摩擦摆支座应布置在控制层，钢弹簧支座可布置在需要进行竖向隔振区域的下方；

4 竖向隔振单元由多个钢弹簧支座组成时，应确保所有钢弹簧支座在竖向荷载作用下变形协调，且钢弹簧支座组的竖向刚度中心宜与形心重合；

5 振震双控装置的竖向隔振部分应避免偏心受压或承受较大横向荷载，且应设置较大抗侧刚度的运动解耦装置，运动解耦装置可采用轴承式、导轨式等；

6 任意水平位移下，摩擦摆的支座板应避免受弯。

5.4.7 摩擦摆支座与钢弹簧支座组合的振震双控装置，应符合下列规定：

1 应同时实现水平隔震和竖向隔振功能，并宜集中布置在结构的控制层；

2 采用单主滑动摩擦面型摩擦摆和双主滑动摩擦面型摩擦摆时，支座的水平剪切性能和水平极限变形能力应符合现行国家标准《建筑摩擦摆隔震支座》GB/T 37358 的规定；

3 采用螺旋弹簧、碟形弹簧和其他具有轴向线弹性性能的弹簧时，钢弹簧支座在结构承载力极限状态和罕遇地震下均应保持弹性，钢弹簧支座的力学性能、疲劳性能、外观和耐久性应符合现行国家标准的有关规定；

4 在设计水平位移变化范围内，应保证装置竖向隔振性能不发生显著变化；在设计竖向压力变化范围内，应保证装置水平隔震性能不发生显著变化。

IV 消能装置与钢弹簧组合

5.4.8 当装备振震双控采用消能装置与钢弹簧组合设计时，消能装置应符合现行行业标准《建筑消能减震技术规程》JGJ 297 的规定。

5.4.9 消能装置与钢弹簧组合设计，应符合下列规定：

1 消能装置与钢弹簧宜采用并联方式；

2 宜根据支座面积尺寸和协同作业限制要求进行一体化设计；

3 应根据建筑结构承载确定钢弹簧竖向稳定变形值；

4 设防地震、罕遇地震作用下，组合装置的侧向变形不应大于控制层整体变形限值；

5 采用软钢类材料时，宜适当增大其弯剪模量。

5.4.10 消能装置的活动耗能部件与端头固定套筒之间的结构间隙不应大于 3mm。

V 各向异性结构或材料多维振震双控

5.4.11 多振源作用下建筑结构的振震双控设计，可采用具有各向异性的振动控制装置或材料。

5.4.12 多维振动控制采用各向异性结构或材料设计时，应符合下列规定：

1 当水平向和竖向振源卓越频带不同且幅值量级相近时，可采用同类装置并通过各向调频进行组合设计；

2 当水平向和竖向振源卓越频带不同且幅值量级差异较大时，可采用不同类型装置或材料，同时进行调频与耗能组合设计。

5.4.13 各向异性的叠层阻尼薄板结构设计，应符合下列规定：

1 应计入各层纤维铺设角度、纵横向剪切模量等各向异性参数对薄板损耗因子的影响；

2 验算时可不计入结构的平面与横向剪切和纵向拉伸作用；

3 阻尼层的胀缩变形耗能优化提升时，宜增加各向异性叠层阻尼薄板结构的剪切刚度。

5.4.14 剪切模量较大的各向异性约束阻尼梁或板设计时，应计入约束层剪切模量。

5.4.15 控制层节点采用各向异性结构或材料时，应符合下列规定：

1 节点竖向变形处应设置限位器，以确保控制层的整体性，避免局部严重受弯和受拉；

2 应计入材料的动力特性随温度等环境变化对性能的影响，避免在性能易退化的环境中使用。

VI 多维减振机架振震双控

5.4.16 建筑工程中的装备可采用多维减振机架进行振震双控。

5.4.17 多维减振机架的振动控制性能应符合现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 的规定，并应符合下列规定：

1 减振机架弹簧隔振支座应满足竖向承载力、三向刚度、水平变形能力、阻尼比等性能要求；

2 多维减振机架隔振系统的竖向刚度计算时，应根据上部质量、设备以及管道的振动频率等参数进行计算；

3 大型设备减振机架宜设置水平向阻尼器；

4 减振机架钢框架采用的钢材不应低于 Q355-B。

5.4.18 多维减振机架的抗震性能应符合现行国家标准《建筑机电工程抗震设计规范》GB 50981 的规定。

5.4.19 钢弹簧隔振器钢框架的变形不应大于弹簧压缩量的 0.1 倍，当不能满足要求时，应计入钢框架与隔振系统的耦合作用。

5.4.20 多维减振机架的构造措施，应符合下列规定：

1 减振机架应与上部设备和主体结构连接可靠，当管道穿越建筑结构沉降缝时，应计入不均匀沉降的影响；

2 减振机架应具有水平调节和保证水平基准的功能；

3 减振支架的构件应采用成品构件，连接紧固件的构造应便于安装；

4 当水平管道通过竖向管道与地面设备连接时，管道与设备之间应采用柔性连接，水平管道距竖向管道 0.6m 范围内应设置侧向支撑，竖向管道底部距地面大于 0.15m 处应设置抗震支撑；

5 当机架安装于屋面时，减振机架与屋面连接不应破坏屋面的防水。

VII 气浮式多维振震双控

5.4.21 建筑工程中的装备可采用气浮式多维振震双控方法。

5.4.22 气浮式多维振震双控的振动控制性能应符合现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 的规定，并应符合下列规定：

1 当隔振体系质量较小且支撑面受质心变化呈不灵敏特征时，可采用无源式空气弹簧；

2 当隔振体系质量较大且支撑面受质心变化呈灵敏特征时，可采用有源式空气弹簧。

5.4.23 气浮式多维振震双控的抗震性能应符合现行国家标准《建筑机电工程抗震设计规范》GB 50981 的规定。

5.4.24 有源气浮式振动控制系统设计，应符合下列规定：

1 承载力设计时，应根据气浮单元的额定工作承载力与上部隔振体系的质量进行对比，不应超出气浮单元极限承载力的 80%；

2 气浮单元的布置应根据重力荷载作用下支反力相对一致原则，气浮单元受压时承载力最大单元与最小单元相差不应大于 15%；

3 气浮系统进行模态参数设计时，应保持前三阶平动振型质量累计参与系数大于 95%；

4 气浮系统的阻尼比不宜小于 0.15，当承载力较大时，除通过设置内部气室阻尼孔调节气流形成阻尼外，尚应增设粘滞阻尼器；

5 当气浮系统水平向存在较大振动荷载时，应设置侧向粘滞阻尼器和限位器。

5.4.25 有源气浮式振动控制系统气路分组设计时，气浮单元的配置除应按三点平衡原则进行分组设置自动跟踪调平阀外，尚应符合下列规定：

1 当气浮单元数量为 3 时，每个气浮单元可各自成组、单独配置；

2 当气浮单元数量大于 3 时，应按照支反力对称性原则分 3 组配置；

3 当气浮单元数量大于 30 时，除满足上述设计分组要求外，尚应计入各组气路长度的均匀性影响；

4 当气浮单元分布具有异形特征时，除满足上述设计分组要求外，异形基础的固有频率与气浮系统主频错频率不应小于 40%。

5.4.26 带伺服装置的气浮控制系统设计，应符合下列规定：

1 当系统中被动部分气浮单元主要用于承载时，可按上部重量的 80%进行设计；

2 当系统中作动部分气浮单元主要用于控制时，可按上部重量的 20%进行设计。

5.4.27 气浮单元的辅助设计，应符合下列规定：

1 气浮单元的气源应采用清洁气体；

2 气浮单元的囊或膜应做好防护并避免侵蚀老化；

3 空气弹簧的使用应按现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 的规定执行。

6 振震双控辅助措施

6.1 交通与装备振源减振

6.1.1 交通与装备的振源减振应保证建设工程全生命周期的安全性、有效性和可维修性。

6.1.2 交通与装备振源减振，应符合现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 的规定。

6.1.3 交通与装备振源减振设计时环境振动、结构噪声、古建筑振动、振动敏感设备振动的评价指标及要求应符合国家现行相关标准要求。

6.1.4 受轨道交通与装备振源影响的敏感建筑物振动控制，应符合下列规定：

1 应优先进行功能与建筑布局调整，宜选择对减小振动响应有利的结构型式；

2 敏感建筑物基础宜与轨道交通、装备振源结构基础分离，不应采用刚性连接；

3 采取振动控制措施后的室内环境振动和噪声控制效果应经过预测、评价。

6.1.5 轨道交通与装备宜按使用功能对具有较高环境振动与噪声要求的楼层及房间进行振动响应预测，当采用类比测量进行振动预测时，类比对象和拟建工程的类比条件应符合下列规定：

1 源强类比条件至少应包括线路敷设方式、线形、轨道结构类型、车辆类型、运行条件等，可按现行行业标准《环境影响评价技

术导则 城市轨道交通》HJ 453 的规定执行；

2 建筑物环境振动的类比条件除应满足源强类比条件外，尚应包括线路与建筑物的水平及竖向距离、地质条件、建筑物基础及结构类型等；

3 建筑物室内结构噪声的类比条件除应满足环境振动类比条件外，尚应包括建筑建造形式（装配式、非装配式)、建筑构造形式（混凝土、钢结构、混凝土钢结构混合等等)、房间尺寸、门窗材质、室内装饰条件等；

4 类比对象与预测对象在源强条件、线路、建筑物距离等因素存在差异时，可通过类比试验或经验公式对存在差异的影响因素进行修正。

6.1.6 当采用数值仿真进行城市轨道交通环境振动及二次辐射噪声预测分析时，建立的数值仿真模型应能真实反映实际的源强特性、场地振动传播规律及建筑物结构特征，并应符合下列规定:

1 计算结果应满足城市轨道交通环境振动及结构噪声频率评价的范围要求，环境振动预测时的频率范围应为 1Hz～80Hz，二次辐射噪声预测时的频率计算范围应为 16Hz～200Hz;

2 对已运营的城市轨道交通线路，应进行实际轨道交通振源测试，为数值仿真预测提供激励；对未运营的城市轨道交通线路，可采用类比条件相同的振动源测试数据作为数值仿真预测的激励；

3 数值仿真模型的激励源应能反映城市轨道交通线路和车辆处于正常保养状态时运行的最大振动影响；

4 数值仿真模型应包含完整的敏感建筑物预测目标（含地上、地下的连续结构），并沿预测目标四周适当外延。

6.1.7 当城市轨道交通线路周边敏感建筑物未建成时，宜根据实际情况进行轨道减振设计；当城市轨道交通线路周边敏感建筑物已建成时，宜根据实际情况对轨道进行振动控制改造。

6.1.8 振动控制产品及材料应避免对环境产生二次污染，其力学稳定性、化学稳定性、耐热稳定性、耐化学腐蚀及耐候性等应符合现行国家相关标准的规定。

6.2 振动传播路径隔振

6.2.1 振动传播路径隔振可采用屏障隔振，屏障隔振设计应符合现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 的规定；采取的隔振措施不应对建筑抗震产生不利影响。

6.2.2 当振源主要干扰频率大于 10Hz 时，宜采用排桩式屏障隔振；振源主要干扰频率大于 20Hz 时，可采用沟式屏障隔振。

6.2.3 下列情况下，宜采用波阻板屏障隔振：

1 对于振动频率小于 100Hz 的地面人工振源，可在地面振源下方设置水平波阻板进行隔振；

2 当需减少环境振动对隔振对象的影响时，可在隔振对象下的土面或砂垫层表面设置波阻板进行隔振；

3 当采用波阻板无法满足隔振要求时，可采用波阻板与其他隔振方式并联的措施。

6.3 振动控制对象隔振

6.3.1 建筑结构和工业装备的振动控制对象隔振可采用高承载力、高阻尼的聚合物减振垫；当采用厚度不大于 50mm 的支承式聚氨酯减振垫时，应符合下列规定：

1 减振垫应设置在基础的底部和四周，当基础四周设有隔振沟时，可不进行减振垫的侧铺；

2 基底减振垫的设计应符合建筑结构承载力的要求；

3 底部减振垫铺设可采用点铺、条铺、满铺等方式；

4 应进行抗震验算，验算时建筑结构底部约束可按摩擦滑移考虑，摩擦系数应根据现场试验确定；

5 采用减振垫整体隔振时，设计的整体竖向频率和减振效率应通过静压试验对计算分析数据进行修正和校准，试验的有效短边尺寸不应小于 3m。

6.3.2 振动控制对象的隔振可采取被动隔振或房中房等措施。

6.3.3 根据振动控制需求，动力设备及动力管道宜采取减小振动及建筑结构二次辐射噪声传递的振动控制措施。

6.3.4 精密仪器和设备的隔振措施、隔振方案、隔振体系及隔振参数选取应符合现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 的规定。

6.3.5 建筑结构的振动响应分析结果可作为微振设计、工艺布局及优化布置的依据。

7 振震双控噪声控制

7.1 振动引起二次辐射噪声的室内限值标准

7.1.1 环境及设备振动引起的建筑物室内二次辐射噪声限值应符合现行国家标准《建筑环境通用规范》GB 55016 中建筑外部噪声源或建筑内部设备传播至主要功能房间室内的噪声限值要求。

7.1.2 城市轨道交通振动引起的建筑物室内二次辐射噪声限值，除应符合 7.1.1 条规定外，尚应符合现行行业标准《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170 的规定。

7.2 减振降噪设计

7.2.1 在空间规划与布局上应使连续的建筑结构整体远离振源或断开连续结构，宜使振动与噪声敏感建筑远离振源。

7.2.2 为有效降低二次辐射噪声，可采取隔振沟、减振排桩、减振垫、减振弹簧等措施，防止结构振动向敏感建筑传递。

7.2.3 敏感建筑的房间不宜采用石膏板、水泥压力板、金属板等声辐射效率高的轻质材料，不宜采用整体大面积的非分散型墙体及天花构造。

7.2.4 敏感建筑房间内宜结合装修采取吸声处理措施，吸声材料的降噪系数不宜低于 0.40。

7.2.5 当敏感建筑房间受二次辐射噪声影响严重时，可采用房中房措施。

7.3 减振措施降噪量的分析

7.3.1 减振措施降噪量的评价宜采用建筑物减振前后二次辐射噪声的 A 声级差值，并宜分频给出减振降噪量。

7.3.2 减振降噪量的计算应包括源强类比实测、实验室隔振测试及二次辐射噪声降噪量预测计算。

7.4 抗震设计的降噪利用

7.4.1 地铁上盖建筑结构采用弹簧或橡胶支座时，在满足抗震要求的条件下，宜根据二次辐射噪声的频率范围进行隔振设计。

7.4.2 宜采用结构缝隔离连续结构的振动传递。

8 施工、验收、维护与监测

8.1 一般规定

8.1.1 本章适用于与建筑工程振震双控直接关联的控制层、建筑结构交接面的结构施工、双控装置安装、验收、系统监测与运行维护等。

8.1.2 建筑工程振震双控工程的施工、验收、监测与维护，除应符合本章的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

8.2 施　工

8.2.1 振震双控装置的支墩和预埋件应符合下列规定:

1 支墩和上部结构的连接面，应预留预埋件的位置;

2 支墩和预埋件安装前应对其轴线、标高和水平度进行复核、验收，连接螺栓孔应预拧封闭，防止混凝土灌入孔内;

3 预埋件的安装允许偏差应符合表 8.2.1 的规定;

表 8.2.1 预埋件安装允许偏差

验收项目	允许偏差
预埋板平面位置（mm）	±5.0
预埋件标高（mm）	±5.0
预埋件平整度（mm/m）	±2.0
连接套筒位置（mm）	±0.5

4 支墩混凝土浇筑应减少对预埋件的影响，可采用二次浇筑、加设排气通道等措施。

8.2.2 振震双控装置的安装应在上道工序交接检验合格后进行，安

装工程经质量验收合格后方可进行后续施工，装置安装应符合下列规定：

1 振震双控装置的安装允许偏差应符合表 8.2.2 的规定；

表 8.2.2 振震双控装置安装允许偏差

验收项目	允许偏差
振震双控装置平面位置（mm）	±5.0
振震双控装置标高（mm）	±5.0

2 当支墩混凝土强度达到设计强度的 80%以上时，方可进行振震双控支座的安装。

8.2.3 振震双控装置采用钢弹簧支座进行竖向隔振时，应采用先预紧后释放工艺，支座安装应符合下列规定：

1 支座吊装就位时，应计入混凝土的收缩变形，并复测支撑面标高及平面位置，待验收通过后，拧紧下预埋板连接螺栓；

2 支座与上预埋件的连接螺栓丝扣部位应涂抹润滑剂，便于释放时拆卸，连接螺栓待释放完毕后应再完全拧紧；

3 支座预紧安装就位后，应采取保护措施，防止后续施工污染、损伤。

8.2.4 振震双控装置上部结构施工时，应符合下列规定：

1 装置就位或固定后、上部结构浇筑前，应对装置采取一定保护措施；

2 混凝土浇筑过程中，应对各节点装置竖向压力和变形值进行观测。

8.2.5 控制层的阻尼器应符合下列规定：

1 阻尼器进场应具备产品合格证书和方案要求的各项标定报告；

2 阻尼器连接件与预埋件应确保连接可靠，阻尼器预埋件的平面位置安装允许偏差不应大于 5mm；

3 阻尼器的安装应在上部结构全部施工完毕后进行；

4 建筑结构施工时，应预留阻尼器耳板焊接位置，避免阻尼器出现无法焊接的情况；

5 安装应由经专门培训人员实施，并在监理人员监督下方可施工。

8.2.6 当采用叠层橡胶支座与钢弹簧支座组合设计时，施工安装应符合下列规定：

1 钢弹簧支座上、下连接板设置的滑移面预埋板的施工应保障水平滑移限值大于叠层橡胶支座侧向最大变形值；

2 钢弹簧支座与叠层橡胶连接板应满足支座侧向最大变形值小于竖向受力失稳极限偏移值；

3 叠层橡胶支座与结构构件连接处应设预埋板，预埋板搭接钢筋长度不应小于 600mm。

8.2.7 当采用摩擦摆支座与钢弹簧支座串联组合设计时，施工安装应符合下列规定：

1 安装应采用下支座板、钢弹簧支座滑块、上支座板的顺序；

2 摩擦摆宜设限位器，其钢弹簧支座滑块最大侧向滑移值不应大于受压侧向失稳位移限值；

3 摩擦摆组合装置安装后，所有装置预计调平标高偏离不应大

于 3mm。

8.2.8 当采用消能装置与钢弹簧组合设计时，施工安装应符合下列规定：

1 组合控制装置应设置在结构竖向受力体系的结构或构件上；

2 当组合控制为集成型、一体化装置时，安装后静态稳定高差偏离不应大于 3mm。

8.3 验　收

8.3.1 振震双控工程施工应在自检合格基础上进行验收。

8.3.2 振震双控支座安装工程验收时，应包括下列内容：

1 企业相关资质；

2 控制层专项施工方案；

3 控制层预埋件及振控双控装置进场验收报告；

4 具有相关资质的振控双控装置第三方检测报告；

5 振控双控装置的合格证、质量证明等；

6 隐蔽工程验收记录；

7 振控双控装置安装验收检验申报；

8 完整有效的安全、技术控制资料。

8.3.3 振震双控工程验收时，应对隔振（震）缝及柔性连接部位进行系统验收。

8.3.4 振震双控工程验收时，应对振震双控支座进行全数检查，支座型号、数量、安装位置应符合设计要求，且各支座应与上下预埋件紧密贴合，不应有缝隙。

8.3.5 控制层中的隔振支座、隔震支座、阻尼器等出厂前应经检验，并取得合格证书。

8.3.6 屏障隔振施工后，应对正常工作条件下的振动进行测试，检验屏障隔振的效果是否满足设计要求，振动测试应符合现行国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T 50269 的规定。

8.4 维护与监测

8.4.1 振震双控工程的维护检查可分为常规检查、定期检查和应急检查。

8.4.2 常规检查应每年进行一次。

8.4.3 定期检查应为竣工后第 1 年、3 年、5 年、10 年，10 年后可每 5 年检查一次。

8.4.4 当发生可能对控制层相关构件、装置造成破坏的地震、火灾、爆炸等偶然事件后，应进行重点部位的应急检查。

8.4.5 新建振震双控工程宜设置振震双控监测点，并制定详细的监测方案；监测数据的评价量及数据处理，应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

8.4.6 建筑物室内设置强震和振动观测模拟台站，监测点布置应符合下列规定：

1 强震观测监测点宜选择在典型楼层典型房间室内地板中央，并在远离建筑一定距离的自由地表设置自由场台站监测点；

2 需要观测建筑物扭转特性时，应在典型楼层端部布置多个监测台站。

8.4.7 建筑物强震观测的数据处理及台网运行维护，应符合现行行业标准《强震动观测技术规程》DB/T 64 的规定。

本标准用词说明

1 为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：

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：

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：

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的写法为：“应符合……的规定”、“应按……执行”。

引用标准名录

《城市区域环境振动标准》GB 10070

《城市区域环境振动测量方法》GB 10071

《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 1 部分：一般要求》GB/T 13441.1

《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 2 部分：建筑物内的振动（1Hz~80Hz)》GB/T 13441.2

《橡胶支座 第 1 部分：隔震橡胶支座试验方法》GB/T 20688.1

《机械振动与冲击装有敏感设备建筑物内的振动与冲击第 2 部分：分级》GB/T 23717.2

《建筑抗震设计规范》GB 50011

《建筑工程地震设防分类标准》GB 50223

《地基动力特性测试规范》GB/T 50269

《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355

《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452

《工程隔振设计标准》GB 50463

《建筑工程容许振动标准》GB 50868

《建筑机电工程抗震设计规范》GB 50981

《建筑振动荷载标准》GB/T 51228

《建筑隔震设计标准》GB/T 51408

《建筑摩擦摆隔震支座》GB/T 37358

《强震动观测技术规程》DB/T 64

《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》HJ 453

《环境振动监测技术规范》HJ 918

《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170

《建筑消能减震技术规程》JGJ 297

《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002

《建筑环境通用规范》GB 55016

《民用建筑隔声设计规范》GB 50118

《声环境质量标准》GB 3096

《橡胶支座 第 3 部分：建筑隔震橡胶支座》GB 20688.3

《工程振动术语和符号标准》GB/T 51306

《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083

《工程结构设计通用符号标准》GB/T 50132

《地铁设计规范》GB 50157

《工业企业厂界环境噪声排放标准》GB 12348-2008

《地铁噪声与振动控制规范》DB 11/T 838

《地铁车辆段、停车场区域建设敏感建筑物项目环境噪声与振动控制规范》DB11/T 1178

中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会 标 准

建筑工程振震双控技术标准

Technical standard for dual control of engineering vibration and seismic vibration of building engineering

T/CECS ×××-20××

条文说明

中国×××出版社

20×× 北 京

制订说明

《建筑工程振震双控技术标准》T/CECS XXX-202X，经中国工程建设标准化协会于202X年X月X日以第XX号公告批准发布。

本标准制订过程中，编制组进行了大量的调查研究和科学试验工作，总结了近年来我国在建筑工程振震双控技术领域的实践经验，参照了国外先进技术法规和技术标准。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能够准确理解和执行条文规定，《建筑工程振震双控技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目　次

1 总　则 51

2 术语和符号 52

2.1 术　语 52

2.2 符　号 52

3 基本规定 63

3.1 设计原则 63

3.2 设计方案 63

3.3 控制标准 54

4 振震双控作用分析与响应验算 55

4.1 一般规定 55

4.2 地震作用 56

4.3 振动作用 56

5 振震双控设计方法 59

5.1 一般规定 59

5.2 以水平地震控制为主要目标的振震双控 59

5.3 以竖向振动控制为主要目标的振震双控 63

5.4 多维振震双控 64

6 振震双控辅助措施 28

6.1 交通与装备振源减振 28

6.2 振动传播路径隔振 80

6.3 振动控制对象隔振 83

7 振震双控噪声控制.....85

7.1 振动引起二次辐射噪声的室内限值标准.....85

7.2 减振降噪设计.....85

7.3 抗震设计的降噪利用 33

7.4 减振措施降噪量的分析 86

8 施工、验收、维护与监测.....87

8.1 一般规定.....87

8.2 施　工.....87

8.3 验　收.....88

8.4 维护与监测.....88

1 总　则

1.0.1 近年来，随着我国城市轨道交通的快速发展，轨道交通上盖或毗邻建筑工程的需求越来越多，如何解决好建筑工程的振动控制及抗震设防需求，具有重要意义。此外，对于建筑工程内部的精密仪器和设备、大型动力装备等，对振动及抗震安全性的需求也较多。我国在轨道交通减振与隔振、建筑工程整体或局部隔振、室内减振降噪等方面已开展了大量的研究，在面向振动、地震双重作用的振震双控设计理论、工程应用方面积累了较为丰富的经验，为推动振震双控标准化打下了坚实基础。本标准旨在对工程振动及抗震同时有控制需求的建筑结构或装备振震双控设计进行规定。本标准振震双控中的隔振设计，主要针对轨道交通产生的振动、动力装备产生的振动以及人致振动等，本标准振震双控中的抗震、隔震设计，针对地震产生的振动。

1.0.3 本标准振震双控中的隔振设计，应与现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 等相协调；本标准振震双控中的抗震或隔震设计，应与现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 等相协调。

2 术语和符号

2.1 术　语

2.1.1~2.1.21 本节所列术语是按现行国家标准《工程振动术语和符号标准》GB/T 51306、《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083 的规定，并结合本标准用词进行编写。

2.2 符　号

2.2.1~2.2.2 本节所列符号是按现行国家标准《工程振动术语和符号标准》GB/T 51306、《工程结构设计通用符号标准》GB/T 50132 的规定，并结合标准的特点编写。

3 基本规定

3.1 设计原则

3.1.1 轨道交通、动力装备等引起的振动会对建筑的办公和生活环境造成影响，造成振动舒适性问题。如果建筑物内设有精密仪器和设备，较大的振动会影响加工和测量精度，造成建筑结构的适用性问题。对建筑结构采取振动控制措施，就是为了确保在工程振动作用下的舒适性和适用性功能。对于长期承受周期性振动荷载的建筑结构，还应考虑耐久性，如大型风洞试验室等。

在抗震设防烈度较高的地区，采用隔震或减震建筑是一种减少地震危害、确保结构可靠性的有效措施，隔震建筑需要遵循“中震不坏、大震可修、巨震不倒”的原则。

3.1.3 开展振震双控时，从控制层设置形式上，可以考虑整体隔振（震）或局部隔振（震）；从控制方案选择上，可以考虑钢弹簧与粘滞阻尼器的组合、钢弹簧与橡胶隔震器的组合、摩擦摆与钢弹簧的组合等；从结构设计上，既要考虑上部结构的抗震性能与工艺需求，又要考虑下部结构的加强设计等，故在开展振震双控设计时，应经多种方案比选、优化后确定。

3.1.4 当建筑结构高宽比大于 4 时，建筑结构开展振震双控的难度较大，控制效果不明显，扭转等不利效应显著，若确需对其开展振震双控设计，方案应经充分论证、研讨及专项审查。

3.1.5 振动与噪声敏感建筑包括医疗或疗养区、高端办公区以及对声学环境有严格要求的声学实验室、音乐厅等。振动敏感装备包括：

高精度加工设备、精密测量仪器、大科学精密装置等。

3.2 设计方案

3.2.1 隔振装置主要指钢弹簧、碟簧、聚氨酯减振垫等，隔震装置主要指叠层橡胶、摩擦摆等，消能减振（震）装置主要指粘滞阻尼器等。多种技术组合一般是指通过叠层橡胶、摩擦摆等与钢弹簧、碟簧、聚氨酯减振垫进行串、并联，并通过辅助措施限制隔振（震）层变形、同时耗散地震能量，达到振震双控设计的目的。

一般情况下，隔振装置、隔震装置仅有竖向隔振效果或水平向隔震效果，要想达到理想的振震双控效果，需基于隔振装置及隔震装置进行组合设计，如将二者进行串联、并联以及基于机械机构的内部组合设计等，以此实现振震双控的功能。

3.2.2 当抗震设防烈度相对较高、竖向振动要求较低时，可采用以水平地震控制为主要目标的振震双控技术；当抗震设防烈度相对较低、竖向振动要求较高时，可采用以竖向振动控制为主要目标的振震双控技术。

一般情况下，宜采用多维振震双控设计方案，保证在地震、振动作用下，振震双控体系具有多项组合、各向异性等功能，减少水平地震作用和竖向环境振动作用的影响。此外，当抗震设防烈度较高、竖向容许振动要求也相对较高时，如北京地区，当临近地铁建设剧院、实验室等对振动要求较高的建筑结构，以及地铁咽喉区地铁上盖建筑，地铁引起的振动较大，同时由于上盖建筑的边梢效应影响，地震安全性不容忽视，可考虑采用多维振震双控设计方案。

3.2.3 当轨道交通等振源斜跨或部分穿过建筑工程时，可以考虑局部控制，其控制难度及性价比都较高，实际工程中，开展振震双控时，应尽可能简化结构体系、通过结构设缝等方式优化结构高宽比，使建筑工程振震双控作用和效果发挥更加理想。

3.2.4 新型多维振震双控设计方案或装置，一般是指目前尚未在工程中应用，仍处在设计或者试验阶段的方案或装置。

3.3 控制标准

3.3.1 建筑工程振震双控设计时，振动评价时，既要符合容许振动标准的要求，又要符合振动引起的建筑结构二次辐射噪声以及其他声环境要求。

此外，振动对建筑物内人体舒适性和疲劳—工效降低的影响评价应采用单一参数振动加速度级评价方法；建筑物内的容许振动计权加速度级，应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 关于建筑物内人体舒适性的规定。

根据现行国家标准《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 1 部分：一般要求》GB/T 13441.1 中规定的基本评价方法，计算测试时间内计权均方根振动加速度，振动计权加速度级应按下式计算：

$$VAL = 20\lg\frac{a_w}{a_0} \tag{1}$$

式中：VAL——计权加速度级(dB)；

a_w——计权均方根加速度值（m/s^2）；

a_0——基准加速度，取 10^{-6}（m/s^2）。

该评价方法适用于频率范围在 0.1Hz~400Hz 的周期振动、随机振动或具有分布频谱的非周期振动，也适用于振动能量集中于该频带范围内的连续冲击型振动。该评价方法的准确度可根据现行国家标准《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 1 部分：一般要求》GB/T 13441.1 中关于基本评价方法适用性进行检验。对于波峰因数大于 9，或者间歇性特别明显的振动，该方法可能低估振动对不舒适性影响的严重程度。

对于交通引起的振动对建筑物内人体舒适性影响的评价，可附加采用竖向四次方振动剂量值评价方法，评价位置应取建筑物室内地面中央或室内地面振动敏感处。结构竖向四次方振动剂量值的计算过程和容许振动值应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的有关规定。交通振动在车辆通过时振动较大，无车辆通过时振动较小，以间歇式振动为主，四次方振动剂量值评价方法对峰值更加敏感，因此，除基本评价方法外，可提供四次方振动剂量值的结果进行补充评价。

4 振震双控作用分析与响应验算

4.1 一般规定

4.1.1 实际工程中，通常是对已按抗震要求设计的建筑结构进行振动作用分析复核。若需采取隔振措施，则对采取了隔振措施的建筑结构再进行抗震验算，最终迭代出符合要求的建筑结构振震双控设计。

4.1.2 轨道交通振动属于建筑结构外部输入振动，一般的激励输入形式为加速度；动力设备主要包括建筑结构内部的水泵、空调、压缩机等，动力设备、人致振动的激励输入形式一般为力；在采用时程分析法时，要综合各类振动荷载，确定合理的时间步长。车致振动分析的积分步长与模拟得到的响应频谱范围有关，为更真实地模拟车致振动影响，积分步长应尽量小，且应兼顾计算效率，建议采用 0.005s。

4.1.3 本条结合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 中关于地震作用计算，做出规定。

4.1.4 当开展地铁或地上轻轨、高铁等轨道交通振动作用下的建筑结构振震双控计算时，一般应建立“土体-隧道或高架-轨道-建筑结构”大型有限元模型，并对土体边界按粘弹性边界或无限元方法进行约束处理；更加精细的有限元模型，还应对轨道扣件等进行建模。控制层中的隔振支座、隔震支座以及粘滞阻尼器等一般可以根据有限元软件中的相关单元设置进行使用，也可根据实际需求对节点或

支座进行精细化建模。

对单栋建筑结构的振震双控分析，可采用实测数据中振动最大的测点振动时程作为基底激励，进行一致输入分析；考虑实测振动一般为加速度形式，采用最大振动作为激励进行一致输入，既可以保证分析结果体现振动作用的影响，又可以简化输入，提高时程分析效率。

4.2 地震作用

4.2.1 建筑工程振震双控非隔震设计时，其地震影响系数、层间位移角等应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定进行验算；采用隔震设计时，应按现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的规定进行验算，并应分别对控制层上、下部结构进行验算。

4.3 振动作用

4.3.1 基坑底部测试时，应注意测试条件、测点放置位置等是否满足要求，确保测试的准确性；测试的数据将作为建筑结构振震双控的主要输入，如果因测试原因导致的数据不准确，将对建筑结构振动评价以及后续的振震双控措施造成影响。

若考虑人致振动、设备振动等对建筑结构内部精密设备等的影响，因激励作用在楼盖上，可以采用楼盖振动激励作为振动输入；此外，实际工程中，也可采用模拟与实测相结合的方式确定振动输入。

进行等效激励模拟获得的振动输入数据，应根据实际情况，进行

适当修正。

4.3.2 通常情况下，网格尺寸越小，数值模拟的计算精度会越高，但计算时间成本也显著增加，实际工程中，考虑计算精度并兼顾计算效率，重点区域的网格尺寸不宜超过振动最小波长的1/10，非重点区域的网格尺寸不宜超过振动最小波长的 1/6。重点区域指直接受振动影响或人员活动频繁的区域；非重点区域指距离振源较远或者对振动结果不敏感的区域。

振动作用计算结果拾取点应能反映具有相似振源的振动作用分析结果的一般规律，应能准确评价建筑结构的振动影响，结果应包括但不限于峰值加速度、加速度分布、位移分布、加速度时程、位移时程、加速度频谱等。

4.3.3 计算振动作用时的钢结构、钢筋混凝土阻尼比，依据《建筑楼盖振动舒适度技术标准》JGJ/T 441、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3、《AISC Design Guide 11 - Floor Vibrations Due To Human Activity》、德国人行桥设计指南《Footbridge Guidelines EN03》、国际标准ISO 10137《Bases for design of structures-Serviceability of buildings and walkways against vibrations》进行综合取值。

对于钢结构的阻尼比，取值区间相对较大，对于行走激励为主的钢结构连廊、室内天桥，《建筑楼盖振动舒适度技术标准》JGJ/T 441 阻尼比取 0.005；德国人行桥设计指南《Footbridge Guidelines EN03》给出的钢结构阻尼比最小值为 0.002，平均值

0.004，但考虑大幅值振动荷载造成的较大阻尼比，其阻尼比建议为 0.04；国际标准ISO 10137《Bases for design of structures-Serviceability of buildings and walkways against vibrations》规定的风致振动钢结构阻尼比一般取 0.01；我国标准《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ 99 建议的阻尼比区间为 0.01~0.02；《AISC Design Guide 11 - Floor Vibrations Due To Human Activity》给出的较有代表性的阻尼比取值为 0.01~0.02；ISO 10137《Bases for design of structures-Serviceability of buildings and walkways against vibrations》规定：结构高度 h=40m 的钢结构阻尼比取 0.018，h＞80m 取 0.01；综上，钢结构振动作用计算时的阻尼比可取 0.005~0.02。

5 振震双控设计方法

5.1 一般规定

5.1.2 多维振震双控设计方法，宜具有多项组合、各向异性等功能，使建筑或装备满足抗震设防需求和工程振动控制要求。

5.2 以水平地震控制为主要目标的振震双控

5.2.1 设防地震作用下，应进行结构及控制层的承载力与变形验算；在罕遇地震作用下，应进行结构及控制层的变形验算，并应对控制层的承载力进行验算；在极罕遇地震作用下，特殊设防类建筑应进行结构及控制层的变形验算。

根据现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的规定，应对建筑物水平抗震性能进行“中震设计”，满足“中震不坏、大震可修、巨震不倒”：在设防地震用下进行截面设计和配筋验算，结构采用线弹性模型；罕遇地震作用下，允许结构进入损伤程度轻微到中度的弹塑性状态，采用弹塑性模型进行分析，验算结构和支座的变形，应同时进行支座的承载力验算。对于大多数隔震建筑，一般情况下只需增加特殊设防类建筑在极罕遇地震作用下的支座变形验算。对于特殊设防类和房屋高度超过 24m 的重点设防类建筑或有较高要求的建筑，应对结构进行极罕遇地震作用下的变形验算。在结构满足上述抗震性能水准的前提下，应对其正常使用极限状态下受环境振动作用的响应进行验算，结构采用可合理计及竖向振型的线弹性模型。

5.2.2 以水平地震控制为主要目标的振震双控建筑结构，在满足现

行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 规定的地震设防性能目标基础上，可根据建筑物内附属设备、精密仪器和振动敏感设备的类型，由制造部门提供或由试验确定容许振动值，当无法提供或不具备试验条件时，应按现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 采用；对于具有人体舒适性需求的建筑，可由实际需求或试验确定，当无法提供或不具备试验条件时，按《机械振动与冲击：人体暴露于全身振动的评价》GB/T 13441 和现行国家标准《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355 采用。近年来，随着地铁上盖建筑日益增多，这类建筑的容许振动限值，除应满足上述标准外，尚应符合现行《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170 等标准关于噪声的规定。

5.2.3 同一控制层中所有隔震装置的竖向变形应保持一致，具有重要意义。隔震装置安装时，应严格控制竖向变形的一致性和协调性，对于因施工或安装偏差导致的变形不一致，应及时采用垫片等方式进行调整，避免因变形不一致导致的竖向受力发生变化、隔震支座性能无法正常发挥，实际工程中应足够重视。

振震双控控制层各支座，由于具有竖向弹性变形功能，因此，竖向必须控制偏心率，避免竖向偏心运动对振震双控支座和上部结构的不利作用。

一般情况下，摩擦摆等钢支座的竖向刚度特性不同于橡胶类支座，考虑变形协调性，这两类支座在同一控制层中不宜混用。此外，

一般摩擦摆隔震支座水平滑动时会产生竖向位移，形成对所支承结构的顶升作用，以及对所串联的竖向隔振器的压缩作用，因此，考虑结构变形协调性，同一控制层中不应将这类摩擦摆隔震支座与橡胶类隔震支座混用，应严格考虑支座滑动时控制层和结构的整体协调性。对于竖向隔振装置，其竖向变形随上部结构施工过程逐步累积，该变形必须在结构施工与运营阶段予以考虑，避免对施工质量、结构变形和构造造成不利影响。控制层的摩阻力，指控制层中各摩擦摆隔震支座，或弹性滑板支座，或摩擦型阻尼装置等滑动时受到的水平动摩擦力的总和。

5.2.4 对于第一形状系数不大于 6 的叠层厚橡胶支座，应设置限制地震时水平变形的刚性限位装置。

5.2.5 控制层在长期使用过程中，其耐久性要求应符合现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 的有关规定，此外，由于竖向隔振装置的竖向刚度比传统支座低得多，当使用过程中部分支座竖向变形过大时，会造成控制层不均匀沉降，必须予以重视，预留对支座进行顶升调整或托换的措施。

5.2.7 罕遇地震作用下，隔震支座将会在重力荷载代表值产生的竖向压应力基础上叠加较大的竖向拉、压应力，而且，竖向隔振措施的增设可能会进一步增加倾覆效应，进而增加竖向压应力。因此，需要分别设定竖向压应力限值及竖向拉应力限值。隔振垫层、摩擦摆支座和弹性滑板支座没有竖向受拉能力，都不允许出现拉应力，而叠层厚橡胶支座的抗拉性能较弱，对于特殊设防类建筑的支座不

应出现拉应力，对于重点设防和标准设防类建筑的支座拉应力限值不应大于 0.5MPa。最大压应力和最小压应力的计算参照以下公式:

最大压应力=1.0×恒载+0.5×活载+1.0×罕遇水平地震作用产生的最大轴力+0.4×竖向地震作用产生的轴力。

最小压应力=1.0×恒载-1.0×罕遇水平地震作用产生的最大轴力-0.5×竖向地震作用产生的轴力。

多层尤其是高层建筑隔震设计，特别是增加了竖向隔振功能的控制层，应重点关注支座受拉问题。罕遇地震作用下，支座的最大拉应力应满足本标准规定的数值，且出现拉应力的支座数量不宜过多，不超过支座总数的 30%。

对于特殊设防类建筑，应满足极罕遇地震作用下抗拉装置及其连接件均处于弹性状态。

5.2.8 应重视振震双控装置在长期荷载作用下的竖向徐变，并应在产品设计和检测阶段予以考虑。

5.2.9 由于设置竖向隔振装置，振震双控控制层的竖向刚度相比传统控制层要低得多，使建筑结构的整体倾覆运动更趋不利，因此，将抗倾覆力矩与倾覆力矩之比提升至 1.4，以确保结构抗倾覆能力。在计算抗倾覆力矩时，可计入抗拉装置等抗倾覆措施的抗力作用。

5.2.12 对于以水平地震控制为主要目标的振震双控支座，可采用竖向和水平向解耦的力学模型。验算地震作用响应时，在水平方向上采用与现行国家标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408 规定相符的力学模型，竖向采用线弹性模型或考虑拉压刚度不等的弹性模型；

验算振动响应时，在水平向和竖向均采用线弹性模型。但上述力学模型均应经支座产品的型式检验和出厂检验验证，当竖向性能和水平性能耦合作用明显时，应采用能够描述耦合作用的力学模型。

5.3 以竖向振动控制为主要目标的振震双控

5.3.1 以竖向振动控制为主要目标的振震双控，进行隔振专项设计时，应具备的资料包括：建筑结构图纸和有限元模型，环境振动资料，抗震验算所需的相关资料等。

5.3.3 建筑结构开展振震双控设计，在隔振设计时，隔振支座的承载力应根据每个支座的反力进行计算，并根据支座反力的大小、竖向固有频率、竖向设计变形量，计算隔振支座的刚度，每个支座的隔振器数量应布置合理、形式上尽可能对称。建筑结构竖向荷载一般应根据结构重力荷载代表值确定。

5.3.5 以竖向振动控制为主要目标的振震双控，应按《建筑抗震设计规范》GB 50011 的要求进行抗震验算，控制层上部结构的层间位移角限值等抗震要求应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定。

当隔振支座变形超过其容许值时，可采用消能减震装置、限位装置或隔震装置控制其变形；采用消能减震装置以及隔振支座的振震双控组合支座系统的结构进行分析时，组合支座的竖向刚度和阻尼、水平刚度和阻尼、各方向位移最大容许值或位移限值等计算参数应准确。

5.3.6 消能减震装置应沿结构的两个主轴方向布置，宜设置在变形

较大的位置以及可有效传递水平力的构件附近，并避免对地震的扭转响应产生不利影响；消能减震装置的参数应优化设计，宜保证建筑结构在多遇、设防及罕遇地震作用下的性能充分发挥，出力滞回曲线宜饱满。

5.3.7 设防或罕遇地震作用下，建筑结构与隔振器之间可能发生较大的压缩变形导致压并，也有可能发生较大的受拉变形导致建筑结构与隔振器脱开，此时应保证有抗拉要求的隔振器与上部结构有效连接，一般可沿建筑结构四周设置一定数量的抗拉支座，具体可通过大震作用下的隔振支座变形计算进行确定。

5.4 多维振震双控

5.4.1 其他多维振震双控设计，经有效性论证后，也可采用。

5.4.3 叠层橡胶支座与钢弹簧（或碟簧）支座串并联组合通过运动解耦达到多维振震双控的效果。叠层橡胶支座的选用与布置应主要考虑地震作用，叠层橡胶支座与钢弹簧/碟簧支座振震双控装置水平向设计时应考虑装置的整体水平力学特性，设计方法可参考现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定。

钢弹簧/碟簧支座串并联部分的选型和配置应主要考虑竖向环境振动，对竖向部分进行性能设计时，应考虑振震双控装置的整体竖向力学特性。装置的水平和竖向力学性能应根据试验得到，试验测试方法可参考测试叠层橡胶支座水平和竖向力学性能的相关标准。为实现对环境振动进行控制而增加钢弹簧/碟簧支座串并联组合部分，不应对结构的抗震整体安全性造成削弱。采用叠层橡胶支座与钢弹

簧/碟簧支座串并联组合进行性能化设计时，通常需采用时程分析方法，使设计后的支座承载力和变形能力同时满足地震作用和环境振动要求。

由于对竖向振动进行隔振会导致隔振结构的竖向整体刚度减小，因此，对采用叠层橡胶支座与钢弹簧/碟簧支座串并联组合的隔振结构的倾覆验算将更为重要。

叠层橡胶支座与碟簧串并联组合时，碟簧并联数量应根据橡胶支座的设计承载力确定，单碟簧的设计承载力宜取变形小于等于0.75 倍碟簧内锥高时的承载力，并联后碟簧组合设计承载力不应小于叠层橡胶支座设计承载力；碟簧串联数量应根据隔振性能设计或时程分析时的变形需求确定。

叠层橡胶支座与碟簧串并联组合时，在地震作用下，振震双控装置不应出现拉应力；当可能出现拉应力时，应在碟簧串并联组合部分的角部设置抗拉装置。

5.4.4 叠层厚橡胶支座可由普通橡胶支座增加各层橡胶厚度制成，即通过减小支座第一形状系数而减小竖向刚度，普通橡胶支座的第一形状系数均大于 20。日本采用了第一形状系数为 5~13 的叠层厚橡胶支座进行核电厂竖向隔震和轨道竖向隔振设计，由于叠层厚橡胶支座竖向设计面压随第一形状系数的减小而减小，因此，为平衡竖向设计面压和第一形状系数，并考虑到竖向隔振（震）效果，给出 4~16 的第一形状系数区间，供设计选择。目前，基于现有的叠层厚橡胶支座试验研究，结果表明现有规范对叠层厚橡胶支座力学

性能指标计算误差较大，因此，叠层厚橡胶支座的设计应基于试验性能参数。同时，在支座设计时，应通过试验获取支座极限压应力和拉应力，供设计参考，并获悉其稳定性，防止支座应用过程中失稳；在振震双控设计时，应控制正常使用状态和极限状态的支座竖向压应力，并进行整体抗倾覆验算。

5.4.10 消能装置的核心部件主要是由端头固定套筒结构和活动性耗能部件构成，无地震作用下，耗能部件与套筒接触但不受力，地震作用后才相互约束，并使耗能部件产生侧向弯剪变形。故在无地震作用的正常工作状态下，固定端套筒和活动耗能部件之间应保持一定间隙，一般不应高于 3mm。

5.4.13 当采用叠层阻尼薄板构成的具有竖向大负载、水平向多层滑移面多维振动控制结构，其具有一定程度上的各向异性特征，该类结构主要针对中高烈度区的构筑物设施，如低温蒸馏、余热利用、石化设施、水利渡槽等，进行振震双控设计。

5.4.14 剪切模量较大的各向异性约束阻尼梁（板）设计时，应考虑约束层剪切模量变化对结构最大损耗因子的影响；可不考虑约束层剪切模量增加对阻尼层厚度方向胀缩变形耗能变化的影响。约束层剪切模量的增加、阻尼层的剪切耗能增加，结构的最大损耗因子提高，最大损耗因子处的频率向高频方向移动。

5.4.17 大型设备减振机架应设置水平向阻尼器或水平抗震支撑，可有效防止隔振弹簧水平变形过大，导致设备倾覆。

5.4.18 多维减振机架与基础或建筑结构的连接应满足水平地震抗剪

要求；减振机架的地震水平变形应满足要求；减振机架与上部装备之间应满足地震抗滑移要求；对于支撑重要装备的减振机架，尚应安装地震作用下的可靠保护措施。

5.4.19 当计入钢框架与隔振系统的耦合作用时，应开展钢框架、隔振系统以及上部支撑装备的整体建模分析。

5.4.20 管道与设备之间采用的柔性连接，主要包括橡胶单球型软连接、橡胶双球型软连接、弹簧隔振器连接、弹簧吊架连接等。

当减振机架安装屋面时，不应破坏屋面防水，一般应将减振机架放置在屋面反梁或者另设混凝土基墩上，并将减振机架与下部连接牢固，减振机架不宜浮放。

5.4.21 气浮式多维振动控制主要用于建筑工程中同时有振动控制、抗震需求的装备振震双控，在动力机器基础振动控制中也有应用。

5.4.22 无源式空气弹簧指不需要外界供给气源，有源式空气弹簧指振动控制系统工作时，需要外界不间断地供给洁净气源。

5.4.24 有源气浮式振动控制系统工作时，各气浮单元之间的压力主要通过气路优化配置以及节流阀等进行调节，当振动控制系统发生明显倾斜或者有持续性地充、放气过程时，应及时检查气路连接和系统其他零部件是否正常工作。

当气浮系统水平向存在较大振动荷载作用时，配合侧向粘滞阻尼器使用，既可以对水平变位进行有效限制，也可以增加体系的附加阻尼比，增加耗能；限位器主要通过较大变位下的卡死或碰撞等，防止振动控制体系因水平向较柔发生大变位后甩出，造成振动控制

体系及上部装备的损失。

5.4.25 有源气浮式振动控制系统的气路分组优化设计对于控制系统性能有效、稳定发挥，实际工程中，应结合分组数量、气路长度以及气浮单元布置等进行综合考虑。

6 振震双控辅助措施

6.1 交通与装备振源减振

6.1.2 轨道交通振源减振设计应符合现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463、《地铁设计规范》GB 50157 等的有关规定。为减小轨道交通引起的地传振动和地传噪声，应考虑三个问题：振源、振动通过介质的传播、介质与接受者（建筑物）的相互作用。也就是说，轨道交通引起的地传振动和地传噪声的控制措施可以从空间上分为三大类：振源控制、振动传播路径控制和建筑物振动控制。因此，需要综合考虑技术性和经济性。振源控制是最有效的减振方法。但是，所有振源控制措施均涉及轨道交通的设计和运营，减振设计必须保证轨道交通的可靠性、可利用性、可维修性、安全性及经济性。

振源控制措施主要有：线位（水平向和竖向）、轨道设计、钢轨品质和维修、列车/车辆设计和维修、列车速度、支承结构设计（例如路基、高架结构或隧道）。

1 线位

将新建轨道交通的线位远离建筑物，可有效减小其影响。线位的移动程度有限，需要综合考虑旅客乘坐舒适性、最小曲线半径、最大曲率变化率和坡度。

2 轨道设计

采用重型钢轨，可提高钢轨的垂向抗弯刚度，其减振性能对软土路基更为有效。采用减振接头夹板或无缝钢轨，可减小或消除有

缝钢轨冲击带来的振动和噪声。采用可动心辙叉，可减小固定式辙叉的有害空间，减小振动和噪声。在小曲线半径处，安装钢轨润滑装置或车载润滑装置，可减小轮轨侧磨引起的高频振动和噪声。另外，采用重型隧道结构等措施也可明显减小振动。

图 1 给出有砟轨道和无砟轨道的各种减振措施的主要特征和主要弹性元件（用粗黑线表示）的位置，弹性元件的位置主要分为三类：轨下、枕下和道床下。有砟轨道和无砟轨道的各种减振措施的减振效果和造价均为从上到下递增。

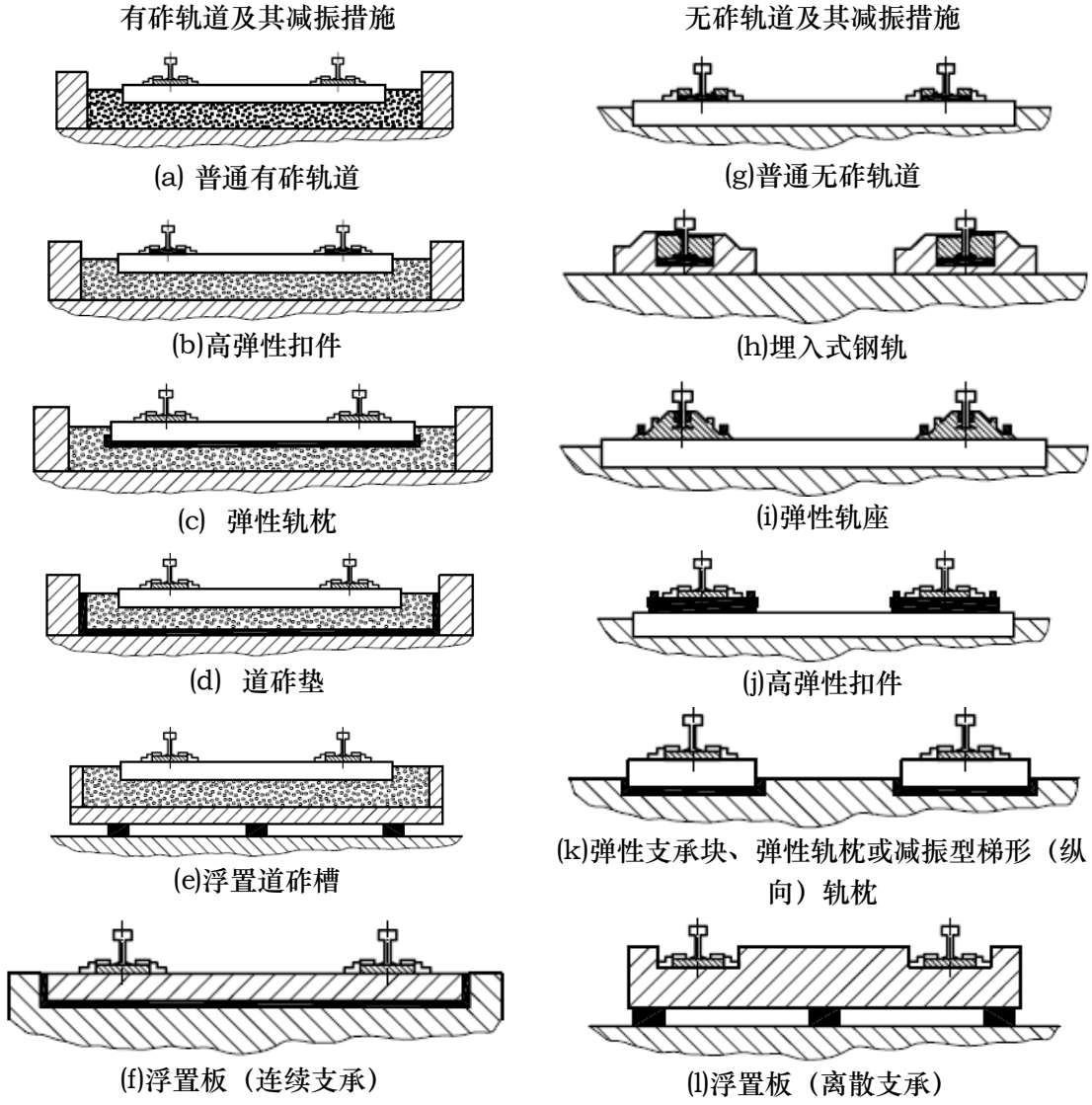

图 1 各种减振轨道的示意图

图 1 中的所有减振轨道中，浮置道砟槽和浮置板的减振效果最好，固有频率和有效频率最低，弹性元件（通常为橡胶、钢弹簧、聚氨酯等）支承的重量最重。

除上述基于隔振原理的减振措施外，还有两种措施是基于阻尼耗能原理：阻尼钢轨或钢轨调谐质量阻尼器（动力吸振器），这两种措施可以增大钢轨阻尼，提高振动衰减，耗散钢轨振动能量。

虽然减振轨道是减小地传振动和地传噪声的有效方法，但这并不是其最主要的功能。轨道最基本的功能是支承和引导车辆，使得轨道交通正常运营，安全、舒适、性价比高。鉴于此，轨道设计应考虑可靠性、可利用性、可维修性和安全性原则，还有造价以及能适应多种车辆。某些情况下，这些因素会限制减振轨道的性能。限制减振轨道的关键因素为：1)安全性；2)建设成本，包括轨道形式的复杂性，特殊设计的部件，安装所需的时间和人工；3)全寿命成本（包括维修）：部件寿命；4)旅客乘坐舒适性；5)可靠性；6)轨道交通的可利用性（即大量的轨道维修而影响正常运营）；7)钢轨粗糙度和波浪形磨耗的发展特性。

3 列车/车辆设计

列车/车辆设计中对地传振动或地传噪声产生重要影响的关键参数为：1)车辆的一系和二系悬挂：降低刚度，采用无摩擦式阻尼器，其中，一系悬挂更重要，可明显减小车体浮沉模态产生的振动；2)簧下质量：减小簧下质量（车轮、轮轴和轴箱），可明显减小车轮跳动模态产生的振动；3)车辆轴重：越小越好；4)车辆轴距的布置；5)

车轮踏面粗糙度；6)弹性车轮；7)阻尼车轮。

与轨道设计一样，上述所有参数对于轨道交通的可靠性、可利用性、可维修性、安全性及经济性都很重要。因此，减振只能作为列车集成化设计的一部分，减振需要与轨道交通的运营要求进行折衷。从地传振动和地传噪声控制角度看，列车设计和轨道设计的集成化是必要的。

4 列车速度

降低列车速度通常不是控制地传振动或地传噪声的有效方法，不应视作常规方法。一方面，地传振动和地传噪声水平与列车速度呈非线性关系，列车速度的降低有时可能使地传振动和地传噪声增大，这取决于车轮通过频率与轮轨共振频率的接近程度，但是在列车常见速度范围内，总体上，列车速度的提高会引起更大的振动。另一方面，列车速度对于轨道交通的商业运营和运输效率来说是最基本因素之一，在局部位置减小地传振动或地传噪声需要与列车延误而对旅客带来的干扰进行权衡。

5 既有轨道交通

减小已运营的轨道交通产生地传振动或地传噪声的办法通常是有限的。这是因为，线位是固定的，诸如更换弹性更高的轨道结构、增加路基刚度和质量（例如，在轨道下增设混凝土板或石灰桩以控制低频振动）的减振措施需要长时间停止列车运营来完成改造工作，这对乘客和商业运营会产生重大影响。因此，能应用于广泛运营线路的地传振动或地传噪声控制的措施局限于可通过维修实施的，特

别是保证光滑的轮轨踏面的维修。主要措施如下：1)钢轨打磨：在运营速度下，减小与地传振动或地传噪声有关波长的钢轨粗糙度；2)消除钢轨接头：安装减振接头夹板或焊接钢轨接头；3)道岔和交叉维修；4)车轮镟修和打磨；5)轨道几何形位调整；6)临时限速。

对于冲击式、旋转式等装备振源，应采用主动隔振措施减小对周围环境的影响。

6.1.3 交通与装备振源减振设计除应满足环境振动、室内二次结构噪声、建筑工程、振动敏感设备等国家现行相关容许振动标准要求外，尚应符合下列规定：

1 环境振动评价指标宜为 Z 振级 VL_Z（1Hz～80Hz)，环境振动应符合现行国家标准《城市区域环境振动标准》GB 10070 和《城市区域环境振动测量方法》GB 10071 的规定；

2 结构噪声评价指标应为等效连续 A 声级 LAeq（16Hz～200Hz)，结构噪声应符合现行行业标准《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170 中分类限值的规定；

3 古建筑振动评价指标应取时域范围内最高承重结构处的振动速度峰值（1Hz~100Hz)，对文物保护单位内的保护目标振动影响的分析应符合现行国家标准《古建筑防工业振动技术规范》GB/T 50452 的规定，对其它敏感建筑的振动影响分析应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的规定；

4 振动敏感设备振动评价指标除应满足设备的使用要求外，尚

应符合现行国家标准《机械振动与冲击装有敏感设备建筑物内的振动与冲击 第 2 部分：分级》GB/T 23717.2 和《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的规定。

6.1.4 根据城市轨道交通振动污染来源、传播途径以及防治技术手段，针对城市轨道交通振动污染，可从四个方面着力解决，即"合理规划"、"源头措施"、"传播途径消减"和"敏感目标防护"。合理规划是从城市轨道交通宏观层面提出相应技术要求，从总体上控制或减少产生噪声与振动的线路或路段，具体包括线网规划、线路走向、土地利用性质等方面的内容；全面考虑经济效益、社会效益、环境效益，厉行节约和可持续发展，优先从功能布局、建筑布局等设计工作入手，并应优选利于抑振的建筑结构型式，以降低地铁环境振动和结构噪声影响。

轨道交通振源基础与敏感建筑物基础分离，轨道交通、设备运行产生的振动波经轨道结构基础传至土体，由土体传至建筑物。如果振源与建筑结构进行刚性整体性连接，其特点为振动波未经过土体、无障碍传导至建筑物上部结构，引发建筑物上部结构直接振动，其传播路径为振源—建筑物，诱发的振动响应规律有明显不同，且与分离式合建建筑相比，合并式合建建筑势必对建筑物安全及楼层内部人们日常生活造成程度更高的不利影响。

轨道交通引起的振动和结构噪声的预测较为复杂，分析中存在许多未知因素和不确定因素。地传振动或地传噪声预测模型的开发应考虑基本分量：源、传播路径和接受者（建筑物）。地传振动或地

传噪声及其所有分量应按照频率的函数进行计算。

6.1.6 采用数值仿真法进行环境振动及结构噪声预测分析时，建立的数值仿真模型应能真实反映实际的源强特性、场地振动传播规律及建筑物结构特征，应考虑的具体参数有:

1 振源特性参数：地铁线路及轨道结构参数、隧道埋深与几何参数、车辆特征参数及列车速度等;

2 场地振动传播规律影响参数：地铁线路与建筑物位置关系、土层条件及岩土物理力学参数等;

3 建筑结构特征参数：建筑基础类型、结构类型、建筑平（立）面布置、结构构件几何参数及材料物理力学参数等。

数值方法主要包括有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、有限差分法(FDM)等，数值模拟中，应确定时间步长和单元尺寸的影响。

1 有限元法(FEM)

在 FEM 中，系统表示为单元网格，迭代求解跨越单元边界的连续性函数。可采用专业 FEM 软件，但是需要注意两个问题的模拟: 1)隧道—土体和土体—基础之间的分界面处的单元；2)轮轨接触面处的输入函数，特别是其随时间和空间变化的方式。尤为重要的是，模型中需包含合适的边界单元，以避免结果因边界反射而失真。

与 BEM 相比，FEM 在实际应用中更具通用性，很容易地模拟各种几何不规则（包括埋在地下的结构和多土层)。但是，FEM 的缺点是土体（其本质上是半无限的）只能用有限尺寸的单元模拟。因此，无法精确模拟辐射阻尼，即波传播到无穷远引起的能量损失，需要

确定边界反射带来的误差。

2 边界元法(BEM)

BEM 模拟是一种适合于格林函数基本解已知的方法。BEM 可替代 FEM，只需要在模型的边界处（表面）划分单元。对于地传振动，BEM 计算量小，且特别适合于模拟大地的半无限特性，在边界处无波反射，不需要确定边界反射带来的误差，不需要像 FEM 一样仔细定义边界条件。

在过去的四十年间，波的传播问题研究一般采用 BEM，可通过采用合适的基本解精确考虑辐射阻尼。但是，很难处理实际中碰到的结构和其下土体的几何不规则和材料的不均匀。当然，一些新版 BEM 也已经具有处理几何不规则的能力。然而，这需要采用更复杂的格林函数或对所研究的内域进行更精细地细分。

3 有限差分法(FDM)

FDM 可得出高等代数解，即涉及波方程的数值解。FDM 模拟涉及对动力系统的离散化，采用有限时间间隔的微分方程在时域上进行每个单元状态的逐步计算。FDM 方法最大的缺点是对不规则区域的适应性差。与 FEM 一样，FDM 需要确定边界反射带来的误差。

4 混合模型

为克服该缺点，常需其他辅助方法来模拟无限区域，也就是所谓的混合方法。用这种方法，土—结构系统的域可分为两个子域，即近场和远场。近场包括振源、结构、所关心的土体区域，通常用 FEM 或 FDM 模拟。在 FEM 分析中，在分界面的节点处建立远场的

阻抗矩阵，从而把节点力与节点位移联系起来。远场不包括近场的半无限域，即振源附近的土体区域至接受者（建筑物）之间的土体。用有限数量的单元模拟远场的无限属性的方法有许多种，包括传统的 BEM、相容边界、透射边界、粘性边界、叠加边界、旁轴边界、双渐进边界、外推边界、多方向边界、无限元、一致无限小有限元细胞法（也称为比例边界 FEM），每种方法有各自的优缺点。由于其灵活性，混合方法常用来处理涉及波障措施、建筑物、路堤、分层土、钢轨和轨道问题。

6.2 振动传播路径隔离

6.2.1 针对动力机器基础、地基强夯施工、桩基施工、岩土爆破、地面交通等地表振源，沟式屏障、排桩式屏障、波阻板屏障均可有效降低振动对临近建（构）筑物的影响。排桩或波阻板屏障分别在地基中设置了竖向或横向增强体，增加地基整体刚度，对临近建（构）筑物抗震性能有一定提升作用。

实际工程中，需根据具体工程情况，搜集振源、基础、地基相关参数，初步设计屏障参数，再通过建立"振源—地基—屏障"相互作用计算模型，仿真计算隔振区域动力响应及隔振效果。通过调整屏障技术参数，多次试算，结合经济控制因素，最终达到设计要求。现行国家标准《工程隔振设计标准》GB 50463 对空沟、排桩和波阻板屏障隔振的深度、尺寸、范围等设计参数均有详细规定。

地震作用下，隔振沟更易发生边坡失稳现象，对临近建（构）筑物的安全有影响。因此，对于振震双控的屏障隔振设计而言，如

果使用沟式屏障，应确保空沟临空面的稳定性，不应对建筑抗震产生不利影响。

6.2.2 沟式屏障隔振的效果主要和深度有关，沟深大于 1 倍瑞利波波长时，隔振效果可达 60%~80%。但是，对于干扰频率较低、波长较长的情况，受隔振沟开挖深度的限制，不适宜用沟式屏障进行隔振。排桩屏障隔振效果虽然不及空沟屏障，但桩长易于控制，适用较低频率的振动波。

6.2.3 波阻板置于地面振源下方进行隔振的主要机理：基岩上单一土层的振动存在截止频率，当表面作用的简谐线荷载的频率低于该截止频率时，土层中没有波的传播，即辐射阻尼接近于零；仅当激振频率大于截止频率时，土层中才会出现波的传播现象；当激振频率接近截止频率时，土层发生共振。

波阻板置于土面进行隔振的主要机理：将矩形波阻板视为圆柱体的一段，当在柱体表面作用与柱轴平行的 SH 波偏振，与柱轴垂直的远场散射波场$U_{\mathrm{s}}(r，\theta，t)$按下列公式计算：

$$U_{\mathrm{s}}\left(r，\theta，t\right)=U_0\sqrt{\frac{2}{\pi\gamma r}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t-\gamma_{\mathrm{r}})\psi_{\mathrm{s}}(\theta)} \tag{2}$$

$$\psi_{\mathrm{s}}(\theta)=-\mathrm{i}\sin\gamma_0\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(r-\frac{\pi}{4})}+2\sum_{n=1}^{+\infty}(-\mathrm{i})^{\mathrm{n}+1}\sin\gamma_{\mathrm{n}}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\gamma_{\mathrm{n}}-\frac{2n+1}{4}\pi)}\cos n\theta \tag{3}$$

$$\gamma=\frac{2\pi}{\lambda} \tag{4}$$

式中：r——极坐标横轴；

θ——波入射角，极坐标切向角（°）；

t——时间（s）；

γ——波数；

λ——波长（m）；

ω——圆频率（rad/m）。

当γ = a，（a 为柱体半径）且γ_a=1，即波长很长时，只有很小一部分入射波被散射，总波场与入射波场十分相似。随频率增加，即波长变短时，a ≫ λ_s（γ_a=5，λ_s为剪切波长），按角度的分布变得愈来愈复杂，向前产生很大的散射，这时散射场与入射波干扰形成"影子区"。波长非常短时，即γ_a≫1，散射波的一半集中到正前方，而另一半或多或少均匀地散布在其余方向，这时在圆柱体的后面，可得到相对未扰动区，即隔振区。

波阻板与其它隔振方式并联主要包括两种情形：一种是在振动控制对象（如精密仪器）基础下方一定深度处放置水平有限尺寸波阻板，并配合其它隔振器（如阻尼弹簧）并联隔振；另一种是波阻板置于土面，自身作为基础板或厚地坪工作，同时在波阻板周边布置排桩并联隔振。波阻板屏障隔振传递率，根据容许振动值与隔振前环境振动测试数据确定。通过传递率可判断单一波阻板能否达到设计要求，是否需要并联隔振。

6.3 振动控制对象隔振

6.3.1 处于低烈度区的建筑工程和工业装备，当受到多源振动作用，如地铁、高铁、汽车、施工等振动影响时，当建筑物的抗震设防等级较低，一般以振动控制为主，如果是高层建筑，不适合采用底部或层间减隔振方式，可根据计算结果，采用基底铺设聚氨酯类减振

垫，其厚度一般不超过 50mm，侧面如果填土侧埋不设隔振沟，侧墙也需要进行铺设，铺设后对建筑结构形成一种半包围式底部约束。抗震验算时，建筑结构底部宜采用滑移摩擦来模拟约束边界条件，具体取值需根据现场测试结果确定。

考虑用于建筑结构基底隔振的减振垫，一般不可维修和更换，故在使用前，应针对减振垫的耐久性、耐腐蚀性、服役寿命等进行充分研究，并经论证后采用。

6.3.3 动力设备及动力管道是建筑结构内部的主要振源，对于结构内部有明确防微振需求的精密设备、实验室及声学环境等，应对动力设备及动力管道采取隔振、减振措施，最大程度降低振动向外传递及沿建筑结构的二次辐射噪声影响。

6.3.4 在振震双控的前提下，根据不同振动控制对象的不同隔振要求，采用相应的隔振措施，主要包括：

1 柔性隔振方案：隔振系统的固有频率低于环境振动的峰值主频，频率比应为 2.5~5.0。该方案适用于精密仪器设备的防微振控制；当环境振动频率大于 20Hz 时，可采用橡胶隔振垫；当环境振动频率为 5Hz~20Hz 时，宜采用钢弹簧隔振器；当环境振动频率为 1Hz~5Hz 时，可采用空气弹簧隔振器；

2 阻尼减振方案：当隔振频率无法避开环境振动的频率区间，或者环境振动含有大量冲击振动时，需要在隔振装置中设置阻尼元件；特别地，当有小型冲床上楼或者人员走动的振动影响时，需要采取阻尼减振措施；

3 浮筑楼板方案：采用局部区域楼面下设置隔振装置，减少建筑振动对楼面的影响；

4 刚性隔振方案：在建筑结构中，局部区域采用增大梁、板、柱的截面，以提高结构刚度，达到减小振动的目的；

5 动力吸振器：适用于局部楼面振动较大，且为单峰值窄频带振动的情形。

6.3.5 可根据建筑结构振震双控设计模型，开展有限元数值计算，根据振动响应云图，为各层拟布置的振动控制对象，进行优化布置。此外，提取的建筑结构楼盖响应，可作为振动控制对象的隔振输入。

7 振震双控噪声控制

7.1 振动引起二次辐射噪声的室内限值标准

7.1.1 当环境振源来自外部，如工业设备、施工设备、建筑外设备等，其振动引起的建筑物室内二次辐射噪声限值应符合《建筑环境通用规范》GB 55016 中建筑外部声源传播至主要功能房间室内的噪声限值要求。该限值与建筑所在声环境功能区有关，如 1 类声环境功能区夜晚有睡眠要求的房间限值为等效声级不大于 30dB(A)，2-4 类声环境功能区可放宽 5dB，即 35 dB(A)。当振源来自建筑内部设备，如电梯、水泵、风机、压缩机、变压器等，其振动引起的建筑物室内二次辐射噪声限值也应满足《建筑环境通用规范》GB55016 的限值规定，此时，限值与建筑功能区无关，如有睡眠要求的房间限值为等效声级不大于 33 dB(A)。

7.1.2 在行业标准 《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170 中，对轨道交通振动引起的噪声干扰给出了详细测量方法，也给出了噪声限值。城市轨道振动引起的二次辐射噪声，应同时满足本条和 7.1.1 条的限值要求。

7.2 减振降噪设计

7.2.2 连续结构，如与敏感建筑相连的地下车库、连廊或建筑的过渡结构等，可传递二次辐射噪声，为降低或防止振动在连续结构中的传播，可采取隔振沟、减振排桩、减振弹簧等措施。

7.2.3 与质量重、厚度大的材料相比，轻质薄板类构件容易受到振动激励形成二次辐射噪声。与砌块或条板类分散型构造相比，大面

积整体构造具有较单一的振动频率，容易形成更强的二次辐射噪声。

7.2.4 降噪系数（NRC）是指对某种材料在 250Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz测得的吸声系数平均值，算到小数点后两位，末尾取 0 或 5。工程中常见的降噪系数 NRC≥0.4 的材料有砂岩吸声板、矿棉吸声板、玻纤吸声板等。

7.2.5 一般地，采取隔振措施后，降噪量在几分贝（dB）至 15dB 左右；若降噪效果要求超过 15dB，可考虑采用房中房。

7.3 减振措施降噪量的分析

7.3.1 减振措施的降噪量是用于评价减振措施为人员所在的建筑物带来的噪声降低量，故采用 A 声级作为评价量。

7.3.2 减振措施降噪量的计算包含现场测试、实验室测试、计算三部分内容。现场测试、实验室测试应符合相应的国家标准要求。类比源强的振源、与振源的距离、土壤成分组成、建筑结构形式等与拟采用减振措施的建筑物越接近，则减振措施降噪量的计算越准确。

实验室隔振测试主要针对减振设备，其结果反映的是减振设备的物理特性，各频带二次辐射噪声降噪量不随减振设备的使用工况而改变。二次辐射噪声降噪量是各频带能量叠加的结果，同样的减振措施对不同的建筑物会得到不同的结果。

源强类比实测是指，与拟采用减振措施的建筑物在振源、与振源的距离、土壤成分组成、建筑结构形式等类似的无减振措施的建筑物内进行二次辐射噪声实测。

实验室隔振测试是指，在声学实验室内对拟采用的减振措施进

行 31.5Hz~ 500Hz 范围内各频带二次辐射噪声降噪量实测。二次辐射噪声降噪量预测计算是指，以源强类比实测结果为二次辐射噪声类比源强，叠加在声学实验室内对拟采用的减振措施进行的各频带二次辐射噪声降噪量实测值，计算得到采取减振措施后的二次辐射噪声预测值，该数值与源强类比实测值之差即为减振措施二次辐射噪声降噪量。

7.4 抗震设计的降噪利用

7.4.1~7.4.2 减振降噪措施宜结合结构抗震设计充分考虑，在满足抗震要求的条件下，达到振震双控的目的，如将抗震缝、隔振缝要求进行综合考虑设计。地铁上盖建筑结构采用弹簧或橡胶支座进行抗震设计时，在满足抗震要求的条件下，宜将隔振频率扩展到二次辐射噪声的范围，可为 31.5Hz~500Hz。

8 施工、验收、维护与监测

8.1 一般规定

8.1.1 建筑工程振震双控控制层中的隔振装置、隔震装置、限位装置以及阻尼装置等的安装、施工质量以及后期运行状态监测是振震双控工程质量保证及正常工作的关键，应在施工、验收、维护与监测各个阶段对关键装置、主要节点、交接面等进行重点关注。

8.2 施工

8.2.1 支墩和上部结构的连接面预留预埋件位置时，应注意预埋板平面位置、预埋件标高、预埋件平整度以及连接套筒位置的安装偏差，支墩和预埋件安装前应对其轴线、标高和水平度进行复核、验收，避免因安装偏差过大导致控制层承载及受力与设计偏差较大，无法正常发挥振震双控性能，甚至造成受力分布发生变化等危害。

混凝土一次浇筑完毕后，应对预埋件的平面位置和标高进行复测，如有偏移应及时进行校正；二次浇筑的混凝土宜采用高流动性收缩小的混凝土、微膨胀或无收缩高强灌浆料，其强度等级宜比原设计强度提高一级；浇筑过程中应注重排气工艺，确保混凝土不应有局部空鼓。

8.2.2 为防止振震双控装置安装标高与设计存在一定误差，振震双控装置安装时高度应可调。

8.2.3 隔振支座预紧安装就位后，应采取有效措施对支座进行保护，避免因吊装等施工过程中的失误，对支座产生撞击等损伤；一旦发生污染、损伤事件，应及时开展检查并做好关键部位的检查记录，

并向相关单位及时报告，对确需更换的应及时更换。

8.2.4 装置就位或固定后、上部结构浇筑前，应对装置采取一定保护措施（例如，在装置上覆盖一层塑料薄膜并扎紧），防止浇筑混凝土以及碎石等卡入装置中。在上部混凝土浇筑过程中，应对各节点装置竖向压力和变形值进行观测，保持结构受力和变形一致。

8.2.5 控制层的阻尼器在设防和罕遇地震作用下，将承受较大的地震作用力，故阻尼器连接耳板预留焊接位置时，应确保预埋件牢固、可靠，并应开展必要的拉、剪承载力验算，确保阻尼器正常、安全、可靠工作。

8.3 验收

8.3.2 振震双控工程验收时，应根据实际需要，开展振动控制效果测试与评价，满足要求后，方可组织验收。

8.3.6 本条给出屏障隔振的验收要求，每一个屏障隔振设计均需要进行专门的振动测试，通过对隔振措施实施前后振动量的对比，评估隔振效果，具体可结合《地基动力特性测试规范》GB/T 50269 的相关规定执行。

8.4 维护与监测

8.4.1 检查项目包括振震双控支座变形、阻尼器的连接和位移状况、控制层管道柔性连接等，水平变形和竖向压缩变形应使用专业仪器进行检查，其它项目可采用目检。

8.4.5 开展振震双控工程监测，实时监测工程的振震双控效果，可为后续其他振震双控设计及科学研究提供数据库，监测点位置应符

合下列规定：

1 现行国家标准《城市区域环境振动标准》GB 10070：测点为各类区域建筑物室外 0.5m 以内的振动敏感处，必要时测点可置于建筑物室内地面中央；

2 现行行业标准《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170：测点为建筑物一楼的室内，也可布置在建筑的基础距外墙 0.5m 范围内；

3 现行国家标准《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355：测点为人员主要活动区域地面振动敏感位置，小于 20m2 房间至少 1 个测点，大于 20m2 房间至少 3 个测点；

4 现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868：测点为室内地面中央或室内地面振动敏感处。

振震双控工程监测方案包括：监测所依据的标准及有关的技术资料，监测点分布情况，监测所采用的仪器设备情况，监测评定标准，监测数据处理方法，监测结果展示方法以及监测仪器设备的维护方法等。

监测数据评价量及数据处理方式，应符合下列规定：

1 现行国家标准《城市区域环境振动标准》GB 10070 和《城市区域环境振动测量方法》GB 10071：评价量可取 Z 振级最大值 VL_{Zmax}，并按照声功能区域划分五类标准分别对标；对于轨道交通要求连续测量 20 次列车获取的 20 次读数的算术平均值得到最终的 VL_{Zmax}；

2 现行国家标准《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》GB/T 50355：评价量可取 VL_{Zmax}和 1/3 倍频程铅垂向振动加速度级最大值 $VL_{Zmax,f}$，并按照品质要求划分两类标准分别对标。要求至少测量 5 次振动事件后取平均值获取 VL_{Zmax}，多个测点时应取各测点的最大值；

3 现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868：评价量可取振动计算加速度级即竖向四次方振动剂量值 VDV_Z，要求测量昼间/夜间时段所有振动事件；

4 现行国家标准《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》JGJ/T 170：评价量取为 4~200Hz 分频最大振级 VL_{Zmax}；对于轨道交通要求测试按照该区段设计的最高速度或实际运营速度通过不少于上下行各 5 列车，各次结果的算术平均值获取 VL_{Zmax}，多个测点时应取各测点的平均值；

5 现行国家标准《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 1 部分：一般要求》GB/T 13441.1 和《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第 2 部分：建筑物内的振动（1Hz~80Hz)》GB/T 13441.2：评价量为计权均方根与附加评价方法；

6 现行行业标准《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》HJ 453、《地铁噪声与振动控制规范》DB 11/T 838 和《地铁车辆段、停车场区域建设敏感建筑物项目环境噪声与振动控制规范》DB11/T 1178：评价量可取 VL_{Zmax}；

7 现行行业标准《环境振动监测技术规范》HJ 918：评价量可

取等效连续 Z 振级 $VL_{Z,\ eq}$。

8.4.6 从建筑安全要求出发，为指导抗震设计和抗震加固，宜在建筑典型楼层位置设置强震观测台站，监测地震动加速度后，获取加速度峰值和不同阻尼比下的地震动反应谱。