

**T/CECS XXX-202X**

中国工程建设标准化协会标准

锻锤基础设计标准

**Design standard for forging hammer foundation**

(初稿)

**中国建筑工业出版社**

中国工程建设标准化协会标准

# 锻锤基础设计标准

**Design standard for forging hammer foundation**

**T/CECSXXX-202X**

主编单位：\*\*\*\*\*\*\*

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年XX月XX日

**中国建筑工业出版社**

202X 北　　京

## 前　　言

本标准是根据中国工程建设标准化协会建标协字〔2024〕28号关于印发《2024年第二批协会标准制订、修订计划》通知的要求，由中国汽车工业工程有限公司会同有关设计、科研、生产和教学单位共同编制而成。

在本标准编制过程中，编制组开展了专题研究，并进行了广泛的调查分析，总结了我国在锻锤基础设计方法方面的实践经验，同时与相关标准进行了协调、与国际先进标准进行了比较和借鉴。在此基础上，开展广泛征求意见，深入分析讨论，最终形成了标准的征求意见稿。

本标准共分11章2个附录，主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、地基动力特征参数、振动测试、荷载与荷载组合、静力设计、刚性基础动力分析、隔振基础设计、基础构造措施、监测与运维等。

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，由中国汽车工业工程有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请反馈至中国汽车工业工程有限公司（地址：天津市南开区长江道591号，邮编：300113）。

主编单位**：**中国汽车工业工程有限公司

机械工业第四设计研究院有限公司

参编单位：

主要起草人**：**

主要审查人**：**

目录

[锻锤基础设计标准 2](#_Toc206578557)

[前　　言 3](#_Toc206578558)

[1 总则 47](#_Toc206578559)

[2术语和符号 48](#_Toc206578560)

[2.1 术语 48](#_Toc206578561)

[2.2 符号 49](#_Toc206578562)

[3 基本规定 52](#_Toc206578563)

[3.1一般要求 52](#_Toc206578564)

[3.2 地基与基础设计原则 53](#_Toc206578565)

[3.3 基础材料 54](#_Toc206578566)

[3.4 基础方案 54](#_Toc206578567)

[3.5 容许振动标准 55](#_Toc206578568)

[4 地基动力特征参数 57](#_Toc206578569)

[4.1一般规定 57](#_Toc206578570)

[4.2 地基土分类 57](#_Toc206578571)

[4.3　地基动力特性参数 58](#_Toc206578572)

[5 振动测试 63](#_Toc206578573)

[5.1 测试方法 63](#_Toc206578574)

[5.2 数据处理 64](#_Toc206578575)

[5.3 振动评估 65](#_Toc206578576)

[6 荷载分类与荷载组合 66](#_Toc206578577)

[6.1 一般规定 66](#_Toc206578578)

[6.2 静力荷载 66](#_Toc206578579)

[6.3 振动荷载 67](#_Toc206578580)

[6.4 地震作用 67](#_Toc206578581)

[6.5 荷载效应组合 68](#_Toc206578582)

[7 静力设计 71](#_Toc206578583)

[7.1 一般规定 71](#_Toc206578584)

[7.2 地基承载力验算 71](#_Toc206578585)

[7.3 基础承载力验算 72](#_Toc206578586)

[8 刚性基础动力分析 74](#_Toc206578587)

[8.1 一般规定 74](#_Toc206578588)

[8.2 振动计算 74](#_Toc206578589)

[8.3 数值分析 75](#_Toc206578590)

[9 隔振基础设计 78](#_Toc206578591)

[9.1 一般规定 78](#_Toc206578592)

[9.2 技术方案 78](#_Toc206578593)

[9.3 经验公式 79](#_Toc206578594)

[9.4 振动理论分析 80](#_Toc206578595)

[9.5 数值仿真 82](#_Toc206578596)

[9.6 隔振器与阻尼器选用 82](#_Toc206578597)

[10、基础构造措施 85](#_Toc206578598)

[10.1 一般规定 85](#_Toc206578599)

[10.2 基础材料 86](#_Toc206578600)

[10.3 构造尺寸 87](#_Toc206578601)

[10.4 地基处理 91](#_Toc206578602)

[10.5 施工与验收 91](#_Toc206578603)

[11、监测与运维 93](#_Toc206578604)

[11.1 一般规定 93](#_Toc206578605)

[11.2 振动监测 93](#_Toc206578606)

[11.3 数据处理与分析 93](#_Toc206578607)

[11.4 运维管理 94](#_Toc206578608)

[附录A、振动传播评估 95](#_Toc206578609)

[A.1 一般规定 95](#_Toc206578610)

[A.2 振动传播分析 95](#_Toc206578611)

[A.3　报告编制 98](#_Toc206578612)

[附录B 冲击式机器基础有阻尼动力系数](#_Toc206578613)*[η](#_Toc206578613)*[max](#_Toc206578613)[值的计算 100](#_Toc206578613)

## 1 总则

#### 1.0.1　为规范锻锤基础设计的技术要求，贯彻国家技术经济政策，确保结构安全可靠、功能适用、经济合理，满足正常生产要求及环境保护需求，制定本标准。

#### 1.0.2　本标准适用于下列锻锤设备隔振基础与非隔振基础的设计。

#### 1.0.3　锻锤基础设计除应符合本标准规定外，尚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的规定。

## 2术语和符号

### 2.1 术语

2.1.1 基组 machine-foundation system

锻锤基础和基础上的机器、附属设备、填土的总称。

2.1.2 锻锤 forging hammer

利用工作部分所积蓄的动能在下或上行程时对锻件进行打击使锻件获得塑性变形的锻压机器总称。

2.1.3 落下部分质量 falling mass

锻锤在打击过程中，参与动能传递的运动部件的总质量，包括锤头、锤杆、活塞及其他与锤头刚性连接的组件，单位为千克（kg）或吨（t）。

2.1.4 空气锤 pneumatic hammer

电动机通过减速机构带动曲拐轴旋转，驱动压缩活塞作上下往复运动，使被压缩的空气经旋阀进入工作缸的上腔或下腔，驱动落下部分做向下运动进行打击或回程的锻锤。

2.1.5 自由锻锤 free forging hammer

利用气压或液压等传动机构驱动锤头上、下运动进行打击,并适应自由锻工艺需要的锻锤。

2.1.6 模锻锤 die forging hammer

利用气压或液压等传动机构驱动锤头上、下运动进行打击,并适应模锻工艺过程需要的锻锤。

2.1.7 单作用锤 drop hammer

锤头只靠自重落下进行打击的锻锤。

2.1.8 对击锤 counter-blow hammer

用活动的下锤头代替砧座，当上锤头下降时，下锤头同时上升，产生对击使锻件变形，也称无砧座锤。

2.1.9 脉冲函数 pulse function

以时间为自变量的振动作用分布函数，用来判断振动作用状态。

2.1.10 后峰齿形脉冲 final peak saw tooth shock pulse

时间历程曲线为三角形的，即运动量由零线性地增加到最大值然后在一瞬间降落到零的理想冲击脉冲。

2.1.11 对称三角形脉冲 symmetrical triangular shock pulse

时间历程曲线为等腰三角形的理想冲击脉冲。

2.1.12 矩形脉冲 rectangular pulse

时间历程曲线上部为矩形的理想冲击脉冲。

2.1.13 正弦半波脉冲 sine half wave shock pulse

时间历程曲线为正弦半波形状的理想冲击脉冲。

2.1.14 正矢脉冲 versine shock pulse

时间历程曲线为自零开始的正矢（正弦平方）曲线的理想冲击脉冲。

2.1.15 打击能量 blow energy

当锤头进行打击时，落下部分所具有的动能。

2.1.6 刚性基础 rigid foundation

刚性基础是一种直接与锻锤设备刚性连接的基础结构，依靠自身的质量、刚度和埋深来吸收和分散锻锤工作时产生的巨大冲击力，同时将振动通过地基传递到周围土体。其设计目标是满足承载力、沉降和振动幅值的规范限值。

### 2.2 符号

#### 2.2.1　　作用和响应

——模型基础底面静压力；

——设计基础底面静压力；

——打击力峰值；

——打击作用时间；

——打击能量；

——基组的固有圆频率；

——基础竖向振动位移；

——锻锤通过基组重心的竖向扰力峰值；

——基组竖向固有周期；

#### **2.2.2**　计算指标

——地基承载力特征值；

——修正后的地基承载力特征值；

——基础底面积与基础底面静压力的换算系数；

*β*v——地基土的动沉陷影响系数

——地基承载力的动力折减系数；

——锻锤设备质量，不含落下部分质量；

——锻锤锤头质量，即落下部分质量；

——地基刚度；

——基组质量。

——冲击作用有阻尼动力系数，可按本标准附录B的规定确定；

——天然地基抗压刚度，当为桩基时采用；

——天然地基上基组的质量，当为桩基时采用；

——动力系数，可按本标准附录A的规定确定；

#### 2.2.3　几何参数

——模型基础底面积；

——设计基础底面积；

——基础顶面距离沿*x*轴水平扰力的高度；

——基组质心至基础顶面的距离；

——基组质心至基础底面的距离。

## 3 基本规定

### 3.1一般要求

**3.1.1** 锻锤的地基基础设计应满足下列结构性能要求：

**1**在静力荷载作用下，应验算地基承载力、变形及不均匀沉降，确保满足现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的要求；抗滑移安全系数不应小于1.3，抗浮稳定性安全系数不应小于1.05。

**2**在锻锤冲击振动荷载作用下，地基动承载力应按下式验算：

（3.1.1-1）

式中，为动力折减系数，按本标准第7.2.3条取值。

3基础顶面振动位移及加速度应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB50868容许振动限值的要求。

**4**在地震荷载作用下，应按《现行国家标准建筑抗震设计规范》GB 50011验算地基抗震承载力：

（3.1.1-2）

5　当周边建筑、区域环境或精密仪器设备对振动有要求时，除满足工程自身振动控制标准外，尚应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB50868的规定。

**3.1.2**锻锤基础设计时，宜取得下列资料：

1 设备参数需要有：机器的规格型号、下落部分公称质量及实际质量、额定打击能量、最大允许打击能量、设计打击频次；设备制造商提供的容许振动限值及特殊要求。

2 设备安装条件需要有：机器轮廓尺寸图、设备底座外廓图及地脚螺栓布置图；灌浆层厚度、地脚螺栓和预埋件的规格、定位精度及预紧力要求；辅助设备、管道接口位置及坑、沟、孔洞的尺寸与荷载要求。

3 设备质量与荷载需要有：机器总质量、质心位置，包括附属设备、管道及最大工件质量；动荷载时程曲线或冲击力传递路径等资料。

4 相关专业接口资料应包括：工艺专业：锻锤工艺流程图、最大工件尺寸及生产节拍；操作机、取料机布置图；建筑与结构专业：车间厂房基础图、邻近设备基础图及结构抗震等级；公用专业：地下管线分布图、隔振沟或减振措施预留条件；机电专业：动力管线荷载、振动敏感设备位置及容许振动值。

5 地勘报告的内容应包括：建设场地岩土工程勘察报告；地基动力特性试验报告；当涉及改造项目时，需要有场地环境振动本底值及历史振动监测数据。

6 环境振动敏感对象的资料应包括：邻近建筑物的结构形式、基础类型及距离；周边振动敏感目标应包括实验室、医院、住宅等的分布及容许振动标准；区域环境保护或职业健康对振动的特殊限制要求。

**3.1.3**锻锤基础方案选型应根据锻锤的设备类型和参数规格、工程地质条件和容许振动等要求综合确定。

**3.1.4**当基础遇到冻土层、液化土层、湿陷黄土、腐蚀污染土层、采空区、岩溶地区等特殊地基时，必须采用地基处理技术加固地基。

**3.1.5**当锻锤基础的振动不满足人员生活环境要求，不符合仪器设备正常工作容许振动标准，以及可能危及建筑物安全或使用寿命时，应当对锻锤采取隔振措施。

**3.1.6**锻锤设备的打击作用宜按落下部分质量的大小分类，见下表所示。

表3.1.6 锻锤分类

|  |  |
| --- | --- |
| 锻锤分类 | 落下部分质量，t |
| 小型 |  |
| 中型 |  |
| 大型 |  |
| 特大型 |  |

### 3.2 地基与基础设计原则

**3.2.1**锻锤基础设计应根据锻锤分类和地基复杂程度分为三个设计等级。设计时应根据具体情况，按表3.2.1确定。

表3.2.1　锻锤基础设计等级

|  |  |
| --- | --- |
| 设计等级 | 地基与基础类型 |
| 甲级 | 特大型锻锤基础；  影响既有建筑安全的锻锤基础；  场地和地基条件复杂的大型及以上锻锤基础；  开挖深度大于15m的锻锤基础；  周边环境条件复杂、环境保护要求高的锻锤基础 |
| 乙级 | 除甲级、丙级以外的锻锤基础 |
| 丙级 | 场地和地基条件简单，小型锻锤基础；  非软土地区且场地地质条件简单、周边环境条件简单、无环境保护要求且开挖深度小于5.0m的锻锤基础 |

**3.2.2**锻锤基础设计除应满足地基承载力要求外，尚应符合下列规定：

**1**设计等级为甲级、乙级的基础，均应进行变形验算；

**2**设计等级为丙级的锻锤基础遇下列情况之一时，应作变形验算：

**1）**地基承载力特征值小于130kPa的锻锤基础；

**2）**在基础上及其附近地面有堆载或相邻基础荷载差异较大，存在引起地基产生不均匀沉降因素时；

**3）**锻锤基础与相邻建筑距离近，可能发生倾斜时；

**4）**地基内有厚度较大或厚薄不均匀的填土，自重固结未完成时。

**3**建造在斜坡上或边坡附近的锻锤基础，尚应进行稳定性验算；

**4**坑式锻锤基础，应进行抗浮稳定性验算。

**3.2.3** 锻锤基础设计尚应符合现行国家标准《建筑地基基础设计标准》GB 50007、《动力机器基础设计标准》GB 50040的规定。

### 3.3 基础材料

#### **3.3.1**　锻锤基础采用的钢筋混凝土材料应符合现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB 50010的相关规定。

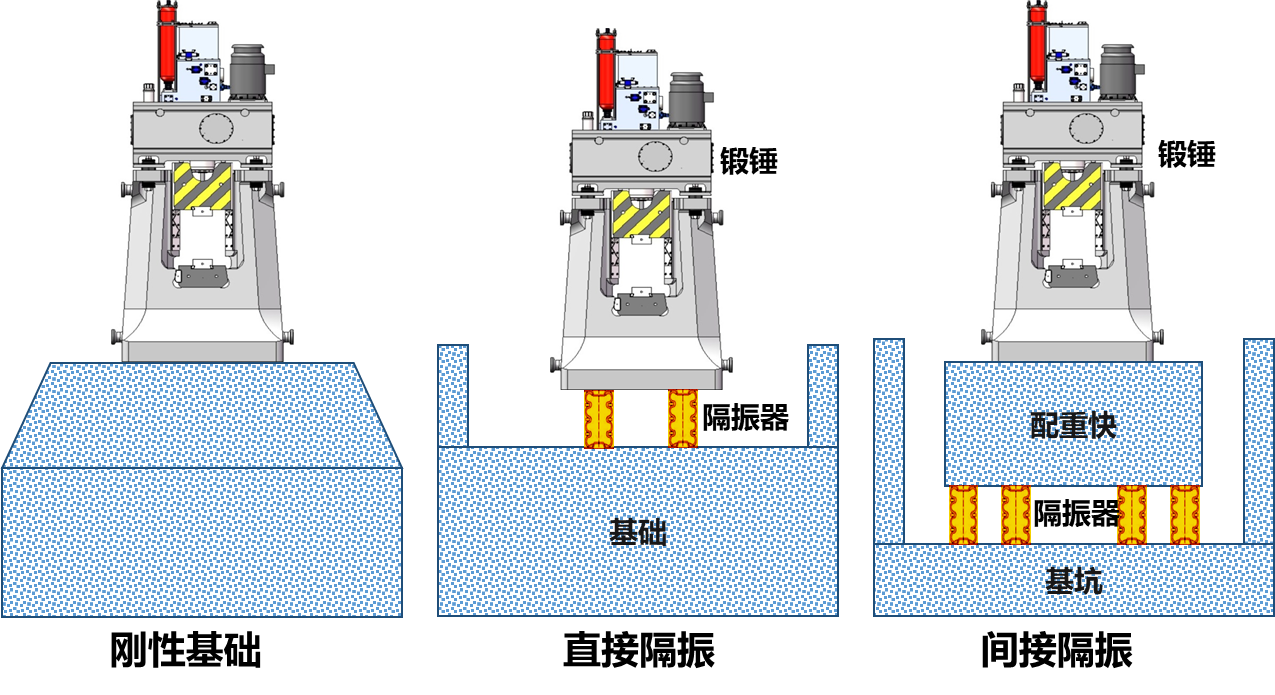
#### **3.3.2** 当锻锤基础位于地下水位较高或潮湿环境时，应采用防水混凝土，其设计抗渗等级应符合现行国家标准《建筑与市政工程防水通用规范》GB 55030的规定。

#### **3.3.3** 锻锤基础中的预埋件、支承结构等钢结构材料应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017的规定。

### 3.4 基础方案

#### **3.4.1**　锻锤基础设计应根据防振要求选择对应的技术方案，以满足振动控制的要求。

#### **3.4.2** 锻锤基础包括刚性基础和隔振基础两类；其中隔振基础可分为直接隔振间基础和接隔振基础两种，如图3.4.2所示。



（a）刚性基础 （b）直接隔振 （c）间接隔振

图3.4.2 锻锤基础方案

#### **3.4.3**锻锤隔振基础方案应根据防振要求的选择，锻锤基础设计方案宜按下表的规定选取。

表3.4.3 锻锤基础方案

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 隔振类型 | 基础方案 | 结构形式 | 示意图 | 防振要求 |
| 非隔振 | 刚性基础 | 大块式混凝土 | 图3.4.2（a） | 低 |
| 隔振 | 直接隔振 | 锻锤+隔振器+基础 | 图3.4.2（b） | 中 |
| 隔振 | 间接隔振 | 锻锤+配重块+隔振器+基坑 | 图3.4.2（c） | 高 |

### 3.5 容许振动标准

**3.5.1** **建筑工程的振动控制应符合下式规定：**

**（3.5.1）**

**式中：——建筑工程计算分析或试验测试的振动控制点的振动响应；**

**——建筑工程振动控制点的容许振动标准。**

3.5.2 建筑工程振动控制时，精密仪器设备和动力机器基础的容许振动标准宜由设备制造厂提供或通过试验确定；当设备制造厂不能提供且无法通过试验确定时，应符合本标准的规定。

3.5.3 锻锤基础容许振动应按下列规定确定：

（1）不隔振刚性基础的容许振动标准宜符合下表规定：

表3.5.3-1 不隔振刚性基础容许振动峰值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 锻锤类型 | u(mm) | a(m/s2) |
| 模锻 | 1.0 | 12 |
| 自由锻 | 0.8 | 10 |

（2）隔振基础下部基坑的容许振动标准宜符合下表规定：

表3.5.3-2 隔振基础下部基坑的容许振动峰值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 锻锤类型 | u(mm) | a(m/s2) |
| 模锻 | 0.2 | 5 |
| 自由锻 | 0.15 | 4 |

（3）隔振基础隔振器上部的容许振动标准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。

**3.5.****3 容许振动标准应保证振动控制对象在设计工况下的正常工作，振动控制点应准确反映振动控制对象的振动响应特征。**

3.5.2 锻锤基础设计时，锻锤设备振动荷载取值应符合现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228的有关规定。

**3.5.5** 本标准中昼间和夜间的时间划分应符合当地人民政府的有关规定。当无规定时，昼间宜取6时至22时，夜间宜取22时至次日6时。

**3.5.6** 锻锤基础设计尚应符合现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228、《动力机器基础设计标准》GB 50040的规定。

## 4 地基动力特征参数

### 4.1一般规定

**4.1.1**　地基动力特征参数应包括下列内容：地基动力特征参数应包括地基刚度、地基阻尼比、基组的地基参振质量和测试模型的固有频率等。

**4.1.2**　地基动力特征参数应优先通过原位动力试验确定，试验方法选择应符合下列原则：

1 冲击型设备基础宜采用自由振动试验；

2 复杂地层条件应进行波速测试以确定土体动力本构参数。

3 模型基础动力特性试验应按《地基动力特性测试规范》GB/T 50269执行，试验模型几何相似比不宜小于1:10。

**4.1.3**当地基动力特征参数无法由现场测试得到时，除天然地基抗压刚度系数和桩基刚度系数外，其他地基动力特征参数应按现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040的有关规定确定。

### 4.2 地基土分类

**4.2.1** 天然地基的地基基础承载力计算和振动响应评价时，应根据地基土类别对应的系数和指标，分别进行修正和评价。

**4.2.2**　天然地基的地基土类别宜按表4.2.2确定。

表4.2.2　地基土类别

| 土的名称 | 地基承载力特征值（kPa） | 地基土类别 |
| --- | --- | --- |
| 碎石土 |  | 一类土 |
| 黏性土 |  |
| 碎石土 |  | 二类土 |
| 粉土、砂土 |  |
| 黏性土 |  |
| 碎石土 |  | 三类土 |
| 粉土、砂土 |  |
| 黏性土 |  |
| 粉土、砂土 |  | 四类土 |
| 黏性土 |  |

### 4.3　地基动力特性参数

### I 天然地基

**4.3.1**　天然地基的动力特性参数宜由现场测试确定，测试方法应符合现行国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T 50269的有关规定；当无测试条件时，宜按本标准第4.3.2～4.3.9条的规定确定。

**4.3.2** 天然地基的抗压刚度系数，可按下列规定确定：

**1**　当基础底面积不小于20m2时，可按表4.3.2采用。

表4.3.2　天然地基的抗压刚度系数Cz值（kN/m3）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 地基承载力特征值（kPa） | 土的名称 | | |
| 黏性土 | 粉土 | 砂土 |
| 300 | 66000 | 59000 | 52000 |
| 250 | 55000 | 49000 | 44000 |
| 200 | 45000 | 40000 | 36000 |
| 150 | 35000 | 31000 | 28000 |
| 100 | 25000 | 22000 | 18000 |
| 注：中间数值可按线性插值计算。 | | | |

**2**　当基础底面积小于20m2时，抗压刚度系数可采用表4.3.2中的数值乘以底面积修正系数，底面积修正系数可按下式计算：

（4.3.1）

式中：*β*r——基础底面积修正系数；

*A*——基础底面积（m2）。

**4.3.3** 当基础底部的地基土由不同土层组成时，其影响深度应按下列规定确定：

**1** 方形基础，宜按下式计算：

＝2*b* (4.3.3-1)

式中：——影响深度(m)；

*b——*方形基础的边长(m)。

**2** 其他形状的基础，宜按下式计算：

(4.3-2)

4.3.4当基础对地基土影响深度范围内包含不同土层时（图3.4.4），其抗压刚度系数宜按下式计算：

 (4.3.4)

式中：*C*z——地基土抗压刚度系数(kN/m3)；

*C*z*i*——第*i*层土的抗压刚度系数(kN/m3)，可按本标准4.3.2条的规定确定；

*hi*——从基础底至*i*层土底面的深度(m)；

*hi*-1——从基础底至*i*-1层土底面的深度(m)。



1-基础；2-地基

图4.3.4 分层土地基

4.3.5 天然地基的抗压，应按下列公式计算：

(4.3.5)

式中：——天然地基沿z轴的抗压刚度（kN/m）；

A——基础底面积（）；

4.3.6　埋置基础的地基承载力特征值小于350kPa，且基础四周回填土与地基土的密度比不小于0.85时，其抗压刚度宜乘以提高系数，提高系数宜按下列公式计算：

αz＝(1+0.4*δ*d)2 (4.3.6-1)

(4.3.6-2)

式中：αz ——基础埋深作用对地基抗压刚度的提高系数；

*δ*d——基础埋深比，当*δ*d大于0.6时，取0.6；

——基础埋置深度(m)。

4.3.7 天然地基的阻尼比，应按下列规定计算：

1 竖向阻尼比，宜按下列公式计算：

（1） 对于黏性土：

ζz = (3.4.7-1)

= (3.4.7-2)

（2） 对于砂土、粉土：

ζz = (3.4.7-3)

式中：ζz ——天然地基竖向阻尼比；

——基组质量比；

*m*——基组的质量(t)；

*ρ*——地基土的密度(t/m3)。

4.3.8 埋置基础的天然地基阻尼比，宜取明置基础的阻尼比乘以基础埋深作用对阻尼比的提高系数，阻尼比提高系数宜按下列公式计算：

*β*z＝1＋*δ*d  (3.4.8-1)

式中：*β*z——基础埋深作用对竖向阻尼比的提高系数；

### II 桩基

4.3.9 桩基的动力参数取值，应符合下列规定：

**1** 预制桩或沉管灌注桩的动力参数宜由现场测试确定；当无测试条件时，宜按本标准第 3.4.10～3.4.15条的规定确定。

**2** 钻孔灌注桩或其它桩型的动力参数宜由现场测试确定。

**3** 桩基动力参数的测试方法应按现行国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T50269的规定确定。

4.3.10 桩基的抗压刚度，应按下列公式计算：

(4.3.10-1)

 (4.3.10-2)

式中：*K*pz——桩基抗压刚度(kN/m)；

*k*pz——单桩的抗压刚度(kN/m)；

*n*p——桩数；

*C*pτ*i*——桩周第*i*层土的当量抗剪刚度系数(kN/m3)；

*A*pτ*i*——第*i*层土的桩周表面积(m2)；

*C*pz——桩端土的当量抗压刚度系数(kN/m3)；

*A*p——桩的截面积(m2)。

4.3.11当桩的间距为桩的直径或截面边长的4倍～5倍时，桩周各土层的当量抗剪刚度系数Cpτ，宜按表4.3.11采用。

表4.3.11 桩周土的当量抗剪刚度系数Cpτ值(kN/m3)

| 土的名称 | 土的状态 | 当量抗剪刚度系数*C*pτ |
| --- | --- | --- |
| 淤泥 | 饱和 | 6000~7000 |
| 淤泥质土 | 天然含水量45%~50% | 8000 |
| 黏性土 | 软塑 | 7000~10000 |
| 可塑 | 10000~15000 |
| 硬塑 | 15000~25000 |
| 粉土、粉砂、细砂 | 稍密~中密 | 10000~15000 |
| 中砂、粗砂、砾砂 | 稍密~中密 | 20000~25000 |
| 圆砾、卵石 | 稍密 | 15000~20000 |
| 中密 | 20000~30000 |

4.3.12计算桩基的固有频率和振动位移时，其竖向和水平回转向总质量及基组的总转动惯量，应按下列公式计算：

 (4.3.12-1)

 (4.3.12-2)

式中：—桩基上基础沿z轴竖向振动质量（t）；

——天然地基基组的质量（t）；

——竖向振动时桩和桩间土参加振动的当量质量（t）；

——桩的折算长度（m）；

——基础底面的宽度（m）；

——基础底面的长度（m）；

——桩和桩间土的混合密度（t/m3）；

4.3.13桩的折算长度，宜按表4.3.14采用。

表4.3.13 桩的折算长度*l*t

|  |  |
| --- | --- |
| 桩的入土深度（m） | 桩的折算长度（m） |
| ≤10 | 1.8 |
| ≥15 | 2.4 |

注：当桩的入土深度为10m～15m 之间时，可采用插入法计算桩的折算长度。

4.3.14桩基竖向阻尼比，宜按下列公式计算：

1）桩基承台底为黏性土时：

(4.3.14-1)

2）桩基承台底为砂土、粉土时：

(4.3.14-2)

3）采用端承桩时：

(4.3.14-3)

4）当桩基承台底与地基土脱空时，其竖向阻尼比可取端 承桩的竖向阻尼比。

4.3.15 计算桩基阻尼比时，宜计入桩基承台埋深对阻尼比的提高作用，桩基竖向、水平回转向以及扭转向阻尼比提高系数，宜按下列规定计算：

**1**  对于摩擦桩：

(4.3.15-1)

**2**  对于端承桩：

(4.3.15-2)

式中：——桩基承台埋深对竖向阻尼比的提高系数；

## 5 振动测试

### 5.1 测试方法

**5.1.1**锻锤基础建造完成后，应按现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868的有关规定进行振动测试，并应满足容许振动标准的要求。

**5.1.2**锻锤基础振动测试仪器，应具备冲击振动测试的能力，性能技术指标应满足锻锤基础的振动特性，应符合有关振动测量的现行国家标准的规定。

**5.1.3**锻锤基础的振动测试系统应根据振动测量方面的现行国家标准规定，由国家认定的计量部门进行校准。振动测试时，测试系统应在校准有效期内。

**5.1.4**锻锤基础振动传感器的选择宜符合下列规定：

1. 振动加速度测试可选用压电式或压阻式加速度传感器。对于高幅值冲击加速度测量，优先选用压阻式加速度传感器；对于宽频带或高频振动测试宜优先选用压电式加速度传感器。传感器量程、频响范围应覆盖锻锤工作参数。

【编制说明】在进行振动加速度测试，压电式或压阻式加速度传感器。对于具有高幅值冲击加速度测量，其瞬态冲击、峰值加速度超过1000g，采用压阻式加速度传感器，抗过载能力强，低频响应好；对于宽频带或高频振动测试，特别是振动频率大于5kHz时，宜优先选用压电式加速度传感器，传感器量程、频响范围需覆盖锻锤工作参数包括，频率0.1Hz~1kHz，加速度0.1g~2000g。

2. 振动速度测试：可选用磁电式速度传感器或压电式速度传感器；小幅值低频振动宜选用磁电式速度传感器；大幅值或宽频带振动宜选用压电式速度传感器。

3. 振动位移测试，可选用非接触式激光位移传感器；激光传感器需注意采样率与量程，避免动态误差。大位移低频振动可选用电涡流位移传感器。

**5.1.5**锻锤基础的振动测试宜采用加速度传感器，对于大型热模锻锻锤基础振动，可采用速度传感器。

**5.1.6**锻锤基础振动测量采用的加速度传感器，除应符合国家现行相关标准的有关规定外，尚应满足下列条件；

**1**　工作频率范围内灵敏度频率响应幅值误差不大于±10%；

**2**　当锻锤打击力脉冲持续时间为时，冲击加速度传感器的固有频率应大于（Hz）；

**3**冲击加速度传感器的灵敏度幅值线性度不大于±10%；

**4**最大横向灵敏度比小于5%；

**5**压电式加速度传感器的绝缘电阻大于1011Ω。

**5.1.7**锻锤基础振动测试的速度传感器除应符合国家现行相关标准的有关规定外，测量精度尚应满足下列条件：

**1**　磁电式速度传感器的频率响应范围不小于1Hz～100Hz；

**2**　压电式速度传感器的频率响应范围不小于2Hz～6000Hz；

**3**　最大横向灵敏度比小于5%。

**5.1.8**　锻锤基础振动测点的布置应按照以下原则设置：

1 基础本体振动控制点应选在基础顶面与基坑顶面的角点和边中点，不少于4个测点。

2 当需要验证隔振装置的隔振效果时，应在隔振装置的上下接触面附近布置测点，上下对称设置，测点不少2个。

3 地面振动传播测点设置，应以锻锤基础中点为中心，以基础边为起点，沿放射线方向布置测点。

4 在基础顶部宜设置1个参考测点。

5 测点布置尚应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868的规定。

**5.1.9** 锻锤基础振动测试的位移传感器应满足现行国家标准《振动位移传感器检定规程》（JJG 644）中关于线性度、频率响应、灵敏度等计量性能的要求。振动测试系统须经国家法定计量机构检定/校准合格，并在其证书有效期内使用。测试前应核查传感器及配套仪器的校准状态，确保其量值溯源至国家振动计量基准。

### 5.2 数据处理

**5.2.1**振动信号应进行数据预处理，数据预处理应符合下列规定：

**1**数据标度变换时，应确保物理单位相互对应；

**2**应消除数据中存在的因零点漂移、低频性能不稳定、环境干扰等因素引起的信号趋势项；

**3**当振动测试信号存在噪声或高频干扰时，应进行数字滤波。

**5.2.2**采用时域方法分析冲击振动数据时，宜包括下列内容：

1　通过时域波形分析获取冲击峰值、脉冲宽度、脉冲类型等参数特征；

**2**通过计算获取等效加速度、等效作用时间、相关函数、概率密度函数等。

**5.2.3**采用频域方法分析冲击振动数据时，宜包括下列内容：

**1**冲击响应谱分析；

**2**幅相频特性分析；

**3**能量谱、功率谱分析。

### 5.3 振动评估

**5.3.1**　锻锤基础振动测试结果应取控制点时域瞬态响应最大值。

**5.3.2**　振动测试结果应按基础控制点的记录数据为准。每个测点记录有效数据不得少于3次。测试结果与算术平均值的相对误差在±５%以内时宜取平均值。

**5.3.3**　锻锤基础控制点的振动测试结果应符合下式规定：

（5.3.3）

式中：——试验测试得到的结构或结构构件控制点的振动响应，对于参数见3.5条；

——结构或结构构件控制点的容许振动标准，按本标准关于各种振动控制指标的规定采用，对应参数见3.5条。

## 6 荷载分类与荷载组合

### 6.1 一般规定

6.1.1　锻锤基础设计应考虑静力荷载、振动荷载与地震作用及效应组合。

6.1.2　对于抗震设防烈度7度及以上地区的大型锻锤基础，宜按现行国家标准《建筑抗震设计标准》 GB /T50011的有关规定进行抗震验算。

6.1.3　荷载组合应满足结构在不同荷载组合下的承载力极限状态和正常使用极限状态的要求。

6.1.4　计算荷载效应组合时，不同荷载的分项系数和组合值系数应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009、《工程结构通用规范》GB 55001的有关规定采用。

### 6.2 静力荷载

**6.2.1**　锻锤基础设计的静力荷载应包括基础及以上的永久荷载、可变荷载和等效静力荷载。荷载取值应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009的有关规定。

**6.2.2**　锻锤基础静力分析采用的永久荷载应包括：基础重量、基础上部填土重量、固定设备、土压力、水压力、其他结构重量等。

**6.2.3**　锻锤基础静力分析采用的可变荷载应包括：锻锤及其辅助设备的重量、移动工作台、其他运输工具的满载重量、操作人员和一般工具等活荷载。

**6.2.4**　锻锤所在厂房设计时，应考虑锻锤冲击作用的动力效应。由设备与分析构件的重量乘以动力系数计算得到。锻锤所在建筑物内，不同控制位置对应的动力系数应按表6.2.4取值。

**表6.2.4　锻锤动力系数**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 控制部位 | 符号 | 非隔振基础 | 直接隔振 | 间接隔振 |
| 锻锤底座处 |  | 1.5~2.0 | 1.5~2.0 | 1.5~2.0 |
| 基础下地基 |  | 1.3~1.5 | 1.10 | 1.0 |
| 锻锤上方屋盖结构 |  | 1.2~1.3 | 1.05 | 1.0 |

注1：落锤质量1t及以下锻锤动力系数取小值，16t及以上锻锤取大值，其他落锤质量可按线性插入取值。

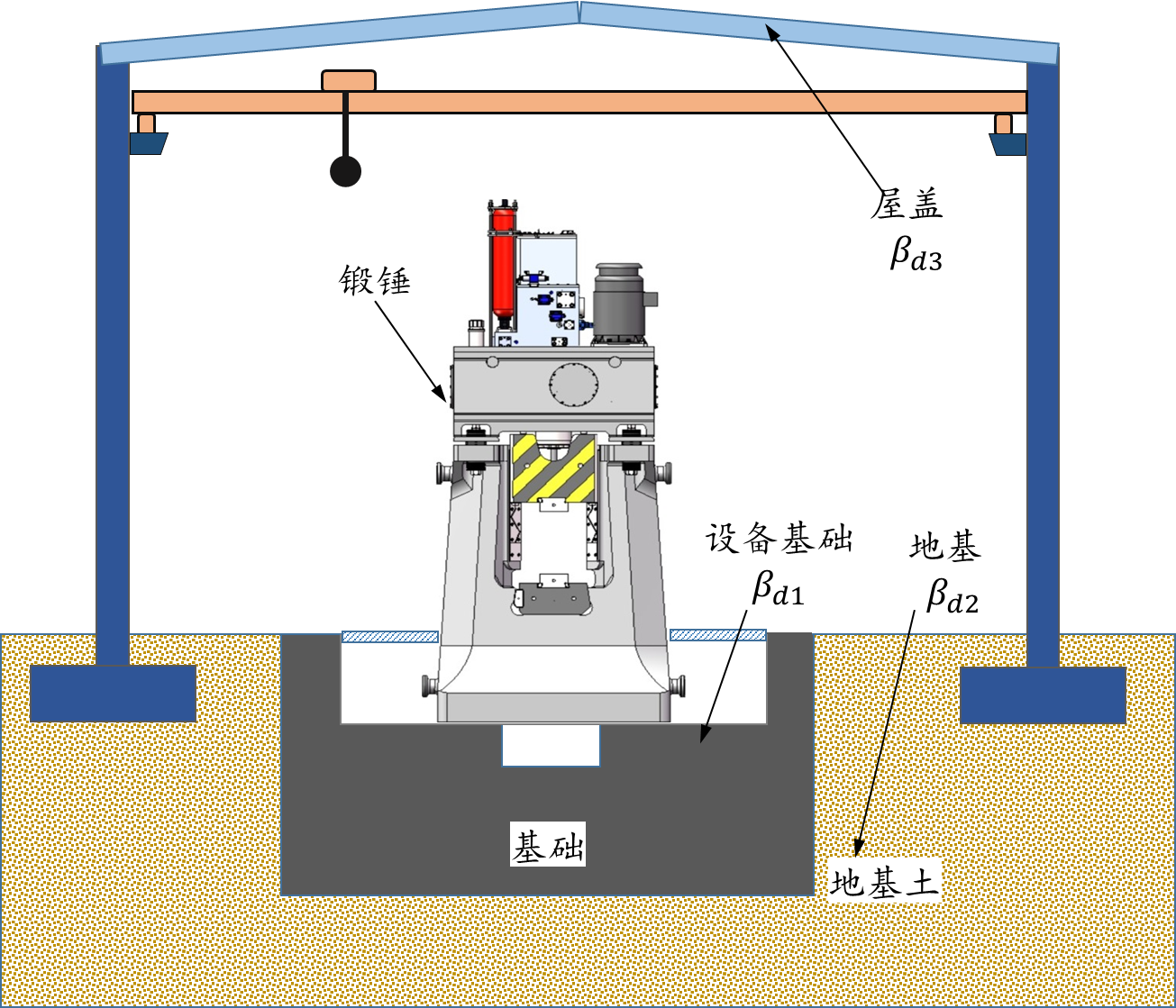


图6.2.4 厂房动力系数位置

### 6.3 振动荷载

6.3.1　锻锤基础振动计算所采用的振动荷载，应由设备厂家提供或通过试验确定。当设备厂家不能提供且无法进行试验确定时，应按现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228的有关规定采用。

6.3.2　锻锤具有冲击荷载作用，振动荷载宜采用后峰齿形、对称三角形、矩形脉冲、正弦半波和正矢脉冲五种脉冲函数表示。

6.3.3 脉冲函数的基本参数应包括：冲击类型、脉冲峰值和持续时间等。

6.3.4　锻锤设备厂家提供的振动荷载资料应包括：锤头质量、打击能量、振动频率范围，打击力，打击时间，作用位置、方向和大小，设备的动力特性等参数。

6.3.5　当设备厂家无法提供振动荷载资料时，宜根据设备厂家提供的有关技术参数，按现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228的有关规定取值。

### 6.4 地震作用

**6.4.1**　抗震设防烈度和设计基本地震加速度取值，应按现行国家标准《建筑抗震设计标准》 GB /T50011-2010第3.2条地震影响章节的规定选取。

**6.4.2**　锻锤基础抗震验算应按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB 50010的规定进行地震作用计算，并满足《建筑抗震设计标准》 GB /T50011的要求，地震作用可按设计反应谱计算。

**6.4.3**　天然地基基础抗震验算时，应采用地震作用效应标准组合。地基抗震承载力应按下式计算：

（6.4.3）

式中， ——调整后的地基抗震承载力；

——地基抗震承载力调整系数。根据地基土的性状，按现行国家标准《建筑抗震设计标准》 GB /T50011的有关规定取值；

——深宽修正后的地基承载力特征值。

**6.4.4**　抗震设防烈度不低于7度的锻锤基础工程，当地面以下20m范围内存在饱和沙土、粉土、沙砾土等易液化土层时，应进行液化判别；若存在液化土层，应根据工程的抗震设防类别、地基的液化等级采取相应的抗液化措施。

**6.4.5**　液化土和震陷软土中桩的配筋范围，应取桩顶至液化土层或震陷软土层底面埋深以下不小于1.0m的范围，纵向钢筋应与桩顶位置处的钢筋一致，箍筋应进行加强。

### 6.5 荷载效应组合

**6.5.1**　静力荷载的效应组合应符合下列规定：

**1**　对于承载能力极限状态，应按荷载基本组合或偶然组合计算荷载效应组合的设计值，并应符合下式规定：

（6.5.1-1）

式中： ——结构重要性系数，对安全等级为二级、三级的结构构件不应小于1.0，对安全等级为一级的结构构件和大型锻锤基础不应小于1.1；

——静力荷载效应组合的设计值；

——结构构件抗力的设计值。

**2**　对于正常使用极限状态，应按荷载的标准组合，并应符合下式规定：

（6.5.1-2）

式中： ——静力荷载效应组合的标准值；

*C* ——结构或结构构件达到正常使用要求的规定限值。

**6.5.2**　振动荷载的效应组合应符合现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228的有关规定，按照正常使用极限状态设计时，应按荷载标准组合，并应符合下式规定：

（6.5.2）

式中： ——振动荷载效应的组合值；

*D* ——结构或结构构件达到容许振动标准限值。

**6.5.3**　锻锤地基基础振动对环境的影响应符合下式规定：

（6.5.3）

式中： ——环境振动荷载效应的标准值；

*E* ——环境振动标准容许值。

**6.5.4**　采用时域分析振动荷载效应组合时，应在时域进行组合计算；采用频域分析振动荷载效应组合时，可采用统计平均的方法。

**6.5.5**　振动荷载组合方法宜符合下列规定：

**1**　当多个周期性振动荷载或稳态随机振动荷载组合时，振动荷载均方根效应组合值，宜按下式计算：

（6.5.5-1）

式中： ——*n*个振动荷载均方根效应的组合值；

——第*i*个振动荷载效应的均方根值；

*n* ——振动荷载的总数量。

**2**　当两个周期性振动荷载作用时，振动荷载效应组合的最大值，宜按下式计算：

（6.5.5-2）

式中： ——两个振动荷载效应组合的最大值；

——第1个振动荷载效应的最大值；

——第2个振动荷载效应的最大值。

**3**　当冲击荷载起控制作用时，振动荷载效应组合，宜按下式计算：

（6.5.5-3）

式中： ——当冲击荷载控制时，在时域范围上效应的组合值；

——冲击荷载效应在时域上的最大值；

——冲击作用下的组合系数，可按表6.5.5取值。

**表6.5.5　冲击作用下的组合系数**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 振动荷载数 | 1 | 2 | ≥3 |
| 组合系数 | 1 | 0.95 | 0.9 |

## 7 静力设计

### 7.1 一般规定

**7.1.1**　锻锤基础宜采用钢筋混凝土结构。基础结构形式应根据工艺要求选用地坑式或大块式基础。

**7.1.2**　根据国家标准《动力机器基础设计标准》GB50040-2020第3.3.5条中地基土类别的规定，当轻型及以上的锻锤基础采用天然地基时，不宜直接设置在四类土层上。受条件限制，锻锤基础落于四类土层上时，应采用人工地基。

**7.1.3**　特殊地质条件下当建筑物基础应进行地基稳定性计算时，锻锤基础应满足地基稳定性的要求。

**7.1.4**　锻锤基础设计时，宜满足下列要求。

1 对于自由锻基础，质量比宜满足下式要求：

（7.1.4-1）

2 对于模锻基础，质量比宜满足下式要求：

（7.1.4-2）

式中，为锻锤基础的质量（t）;

为锤头质量（t）。

3 软弱地基质量比应取大值。

4 在基础自重相同的条件下，宜增大基础的底面积、减小埋置深度。

**7.1.5**　锻锤基础开挖应根据土层地质条件确保施工安全、避免影响周围环境。

**7.1.6** 当置于天然地基的锻锤基础与毗邻建筑物基础的埋深不在同一标高时，基底标高差异部分应回填夯实。

**7.1.7**　地基基础设计尚应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的有关规定。

### 7.2 地基承载力验算

7.2.1 动力机器基础底面的地基平均静压力设计值，应符合下式要求：

(7.2.1)

式中：——基础底面的地基平均静压力标准组合值(kPa)；

——地基承载力的动力折减系数；

——修正后的地基承载力特征值(kPa)。

7.2.2 基础底面静压力的计算，应包括下列荷载：

1 基础自重和基础上回填土重。

2 机器自重和传至基础上的其它荷载。

7.2.3 锻锤基础地基承载力的动力折减系数，可按下列公式计算：

1 锻锤非隔振基础，应按下式计算：

(7.2.3)

式中：——基础的竖向振动加速度(m/s2)；

——地基土的动沉陷影响系数，按第7.2.4条的规定确定。

——重力加速度，可取。

2 锻锤隔振基础地基承载力的动力折减系数可取0.9。

7.2.4 地基土的动沉陷影响系数值，可按下列规定确定：

当为天然地基时，可按表7.2.4的规定确定：

表7.2.4 地基土动沉陷影响系数值

|  |  |
| --- | --- |
| 地基土类别 |  |
| 一类土 | 1.0 |
| 二类土 | 1.3 |
| 三类土 | 2.0 |
| 四类土 | 3.0 |

2 对桩基础，宜按桩端持力层地基土类别选用。

3 地基土类别按现行《动力机器基础设计标准》的规定确定。

### 7.3 基础承载力验算

**7.3.1**　锻锤基础的钢筋混凝土强度验算，应符合承载力极限状态的规定；对于变形、振动和裂缝宽度验算，应符合正常使用极限状态的规定。

**7.3.2**　基础底板应根据结构《混凝土结构设计规范》GB50010-2010的规定计算板的内力。结构配筋应按受弯构件正截面承载力计算确定，并满足配筋率的要求。

**7.3.3**　对于坑式基础，侧壁内力计算应包含侧边土压力、水压力、地面堆载等荷载条件。地面堆载应根据工艺或设计要求确定，且不应小于10kPa。结构配筋计算应按下列两个阶段分别计算取大值，且应满足最小配筋率的要求。

**1**　施工阶段配筋按受弯构件正截面承载力计算；

**2**　使用阶段配筋按偏心受压构件正截面承载力计算。

**7.3.4**　对于坑式基础的底板可按钢筋混凝土板构件计算。基础底板应以侧壁为支承，宜按四边支承的板计算，并应符合下列规定：

**1**　当长边与短边长度之比不大于2.0时，应按双向板计算；

**2**　当长边与短边长度之比大于2.0但小于3.0时，宜按双向板计算；

**3**　当长边与短边长度之比不小于3.0时，宜按沿短边方向受力的单向板计算，沿长边方向布置构造钢筋。

**7.3.5**　锻锤基础在设备安装部位和地脚螺栓连接处，应进行局部受压承载力验算。

## 8 刚性基础动力分析

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 对于轻型及以上的锻锤，在基础设计时，应根据本章的要求进行基组动力计算。

**8.1.2**　基础振动控制点的响应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB50868的规定。

**8.1.3**　锻锤基础动力分析时，基组竖向振动作用宜按图8.1.3简化建模。

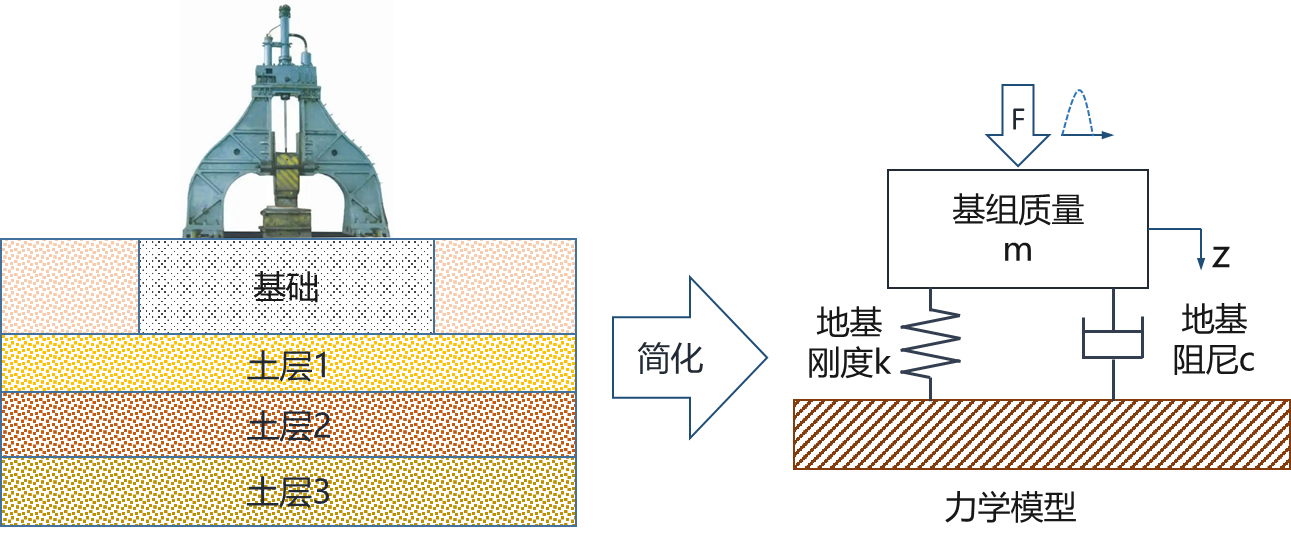


图8.1.3 锻锤基组模型

### 8.2 振动计算

8.2.1锻锤基础顶面竖向振动位移、固有圆频率和振动加速度，可按下列公式计算：

(8.2.1-1)

(8.2.1-2)

(8.2.1-3)

式中：——锻锤基础的竖向振动位移(m)；

——锻锤基础的竖向振动加速度(m/s2)；

——振动位移调整系数；

——频率调整系数；

——天然地基抗压刚度，当为桩基时采用；

——基础、砧座、锤架及基础上回填土的总质量(t)；当为桩基时，应包括桩和桩间土参加振动的当量重量，其值可按本标准第4.3节的规定进行换算；

——锤头落下部分的实际质量(t)；

——落下部分的最大速度(m/s)；

e——回弹系数。

8.2.2根据锻锤类型和工件材料特性，回弹系数e宜按下式取值。

（8.2.2）

8.2.3 根据不同的锻锤类型，锤头打击瞬间的初速度，也就是锻锤落下部分的最大速度，可按下列公式进行计算：

1对于单作用的自由下落锤，可按下式计算：

（8.2.3-1）

2对于双作用锤，可按下式计算：

（8.2.3-2）

3当给出锻锤最大打击能量时，可按下式计算：

（8.2.3-3）

式中：——落下部分最大行程(m)；

——汽缸最大进气压力(kPa)；

——锤头重量（kN），；

——汽缸活塞面积(m2)；

——锤头最大打击能量(kJ)。

### 8.3 数值分析

8.3.1 锻锤基础的数值分析宜采用有限元方法，模型应包含基础和地基土，并考虑材料非线性、接触非线性及动力相互作用。

8.3.2 数值分析的内容应包括：

1验证简化计算结果的合理性；

2优化基础结构尺寸及配筋；

3评估复杂地质条件下的动力响应；

4基础振动控制点的振动响应。

8.3.3 分析软件应具备瞬态动力学分析能力，并支持显式或隐式积分算法。

8.3.4 模型的建立应满足以下要求

1基础应按实际尺寸创建实体单元模型，砧座、锤架等设备质量应按活荷载和质量元形式施加；锻锤打击力应按冲击荷载，以时程函数形式施加。

2地基土可按照粘弹性土弹簧支座，作为钢筋混凝土基础的边界条件。

3混凝土采用弹塑性模型，弹性模量按现行国家标准《混凝土结构设计标准》GB 50010取值，阻尼比取0.05。

4地基土宜按现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB50040计算地基土动态特征参数的抗压刚度系数，并由此计算出地基土的动态参数，刚度和阻尼比。

5冲击荷载可按第6.3节中脉冲函数的要求输入，持续时间宜根据锻件类型（热锻/冷锻）选取。

8.3.5 分析应按以下步骤进行：

1静力分析：计算基础在自重及设备静载下的初始应力场；

2模态分析：提取基组固有频率及振型，验证与简化公式（8.2.1）的一致性；

3瞬态动力分析：时间步长，（为脉冲持续时间），总时长覆盖振动衰减至5%峰值的时间；

4 输出控制点的位移、加速度时程曲线及应力云图。

8.3.6 结果验证与评价应符合以下要求：

1. 数值结果应与简化计算结果对比，差异超过15%时需复核模型参数或简化假设。

2. 振动位移与加速度应符合本标准第3.5节容许振动标准，否则需调整基础尺寸或隔振设计。

3. 混凝土应力峰值应满足《混凝土结构设计标准》GB 50010的承载力要求，局部高应力区应加强配筋。

8.3.7 数值分析中尚需计入下列计算条件

1复杂地层：分层土需逐层定义动力参数，软弱夹层应单独建模并考虑其减震效应。

2多锤联动：采用多荷载步模拟连续打击，叠加效应按第6.5.5条组合。

3地震耦合：按《建筑抗震设计标准》 GB /T50011进行多遇地震下的时程分析。

8.3.8 计算书应包含以下内容

数值分析计算书应包括：模型简图、材料参数、荷载条件、结果曲线（位移/加速度/应力）、与规范的符合性结论及优化建议。

## 9 隔振基础设计

### 9.1 一般规定

9.1.1 本章适用于采用隔振技术的锻锤基础设计。隔振设计可采用直接隔振或间接隔振方式：

1 自由锻锤宜采用间接隔振基础；

2 模锻锤基础可采用直接隔振基础。

3 隔振设计应满足锻锤工艺要求，并符合环境振动控制标准。

9.1.2 隔振基础设计需遵循下列原则：

1隔振系统应能有效降低振动传递率，确保锻锤打击效率不受显著影响。

2隔振器选型应综合考虑刚度、阻尼、疲劳寿命及环境适应性。

3隔振基础的结构设计应满足静力承载力、动力稳定性及长期耐久性要求。

4 隔振系统固有频率宜避开锻锤工作频率，避免冲击共振。当隔振系统阻尼比大于0.15时，可不考虑冲击共振的影响。

5隔振基础宜设置限位装置，防止冲击荷载下的过大位移。

6 隔振锻锤基础的地基允许承载力可按不折减的数值取用。

### 9.2 技术方案

9.2.1 锻锤基础隔振可选如下用两种隔振方案：

1隔振器安装在设备底座与基础之间的直接隔振方案（见图9.2.1-1）；

2隔振器设置在基础配重块与基坑之间的间接隔振方案（见图9.2.1-2）。

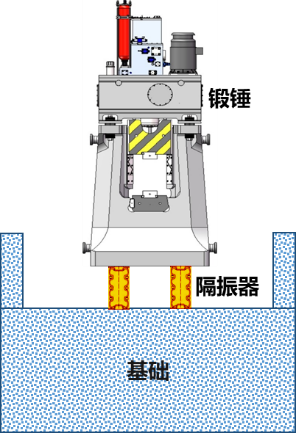
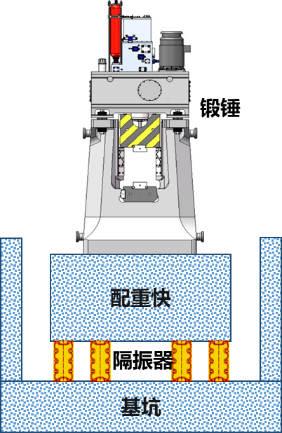
 

图9.2.1-1 直接隔振 图9.2.1-2 间接隔振

9.2.2 锻锤隔振宜按如下要求选择隔振方案：

1 对于中小型及以下的，且无特殊防振要求时，可采用直接隔振方案。

2 对于锤头质量大于5t的大型锻锤和高振动敏感环境要求的场合，应采用间接隔振方案。

9.2.3 锻锤隔振系统组成应包含如下内容：

1 弹性元件：钢弹簧、橡胶隔振器或空气弹簧等。

2 阻尼元件：黏滞阻尼器、摩擦阻尼器等。

3 辅助结构：限位块、水平稳定装置、防松螺栓等。

9.2.4 锻锤隔振基础设计过程应包含如下内容：

1 确定隔振目标，容许振动值）。

2选择隔振方式及元件。

3 计算隔振系统动力参数（刚度、阻尼比）。

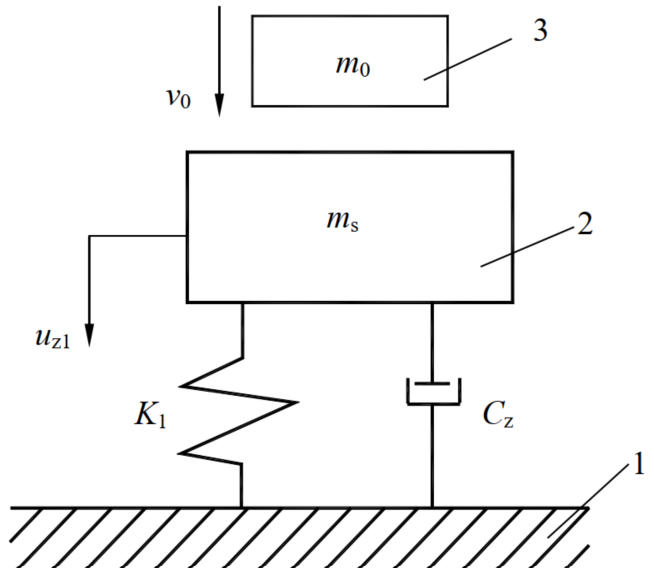
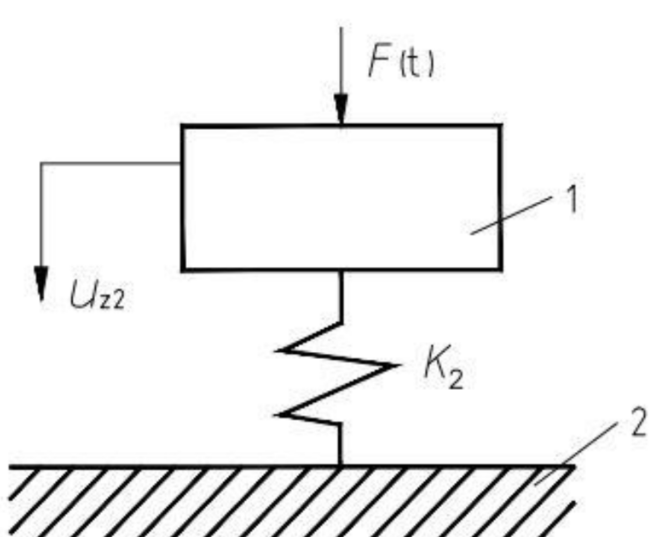
4 验算隔振效果及结构安全性。

### 9.3 经验公式

9.3.1 锻锤基础隔振后的振动分析模型， 应符合下列规定：

1 砧座振动计算时，可假定基础为不动体，宜采用有阻尼单自由度振动模型（图 9.3.1-1）。

2 基础振动计算时，振动荷载可取隔振器作用于基础的扰力，宜采用无阻尼单自由度振动模型（图9.3.1-2）。

1—基础；2—砧座；3—锤头 1—基础；2—地基

图9.3.1-1有阻尼单自由度模型 图9.3.1-2 无阻尼单自由度模型

9.3.2分析隔振基础的竖向振动位移时，可假定基础块为刚性体，宜采用单自由度振动模型；

分析地基振动位移时，扰力可取隔振器底部作用于下部结构的振动荷载，宜采用无阻尼单自由度振动模型。

9.3.3 隔振器支撑的基础块最大竖向振动位移可按下列公式计算：

（9.3.3-1）

（9.3.3-2）

（9.3.3-3）

式中 Az1— 砧座的最大竖向振动位移(m)；

m0— 锻锤落下部分重量(kg)；

ms— 隔振器上部支撑总重量(kg)；

V0— 落下部分的最大冲击速度(m/s)；

e1— 回弹系数，模锻锤取0.5，自由锻锤取0.25，锻打有色金属时取0；

K1— 隔振器的竖向支撑总刚度(N/m)；

z— 隔振系统的阻尼比；

Cz— 隔振器的竖向阻尼系数(N•s/m)；

9.3.4 隔振基础地基的最大竖向振动位移可按下列公式计算：

（9.3.4-1）

式中 Az2— 地基的最大竖向振动位移(m)；

K2— 地基的折算刚度(N/m)；

Kz— 地基土的抗压刚度(N/m)，应符合现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB50040的有关规定；

### 9.4 振动理论分析

9.4.1 锻锤基础的隔振设计应符合下列规定：

1 基础和砧座的最大竖向振动位移不应大于容许振动值；

2 锻锤在下一次打击前，砧座应停止振动；

3 锻锤打击后,隔振器上部质量不应与隔振器分离。

9.4.2 锻锤隔振系统的动力学分析可简化为两自由度模型（见图9.4.2）:

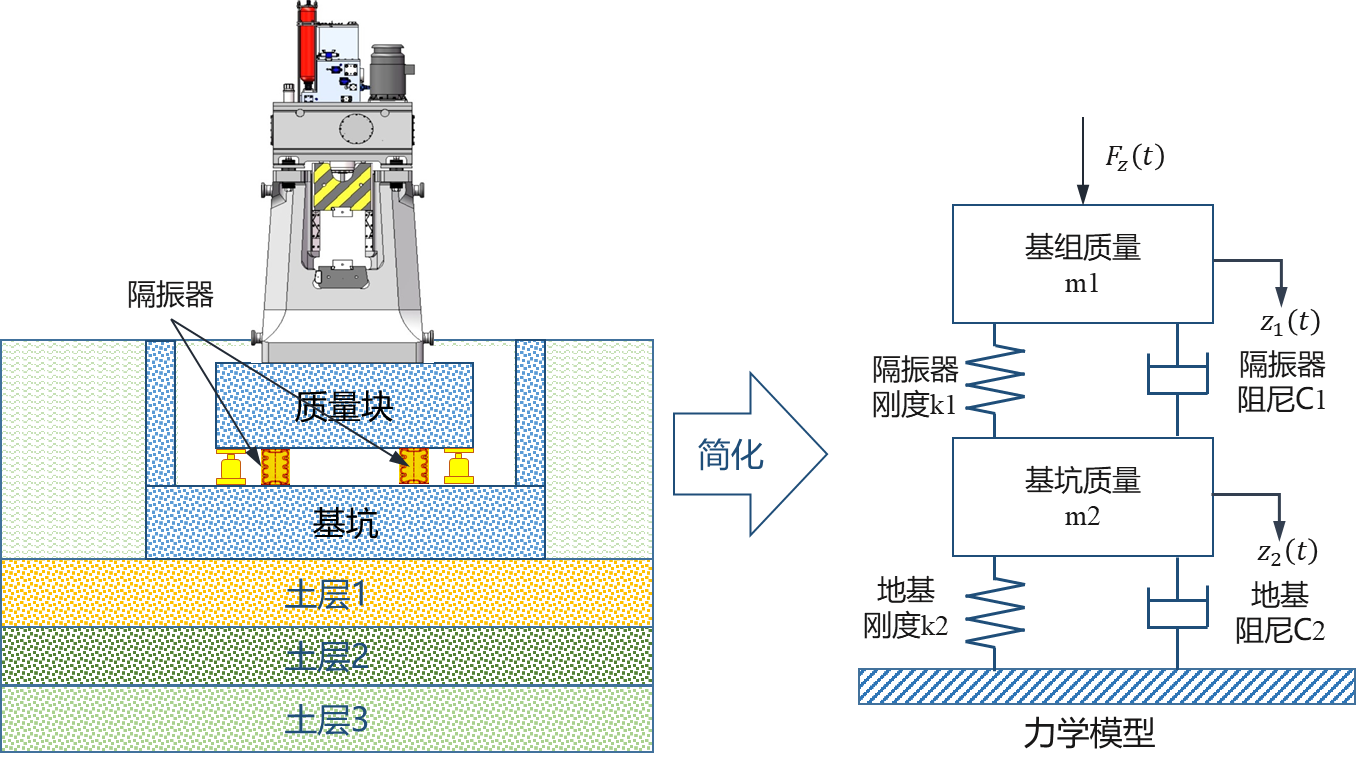


图9.4.2 锻锤隔振基础模型

模型参数定义如下：

图中，——锻锤打击力，按瞬时冲击荷载考虑（kN）；

——基组质量（t），包括锻锤底座、砧座及配重块；若采用直接隔振，则为设备重量；

——隔振器的总刚度（kN/m）和阻尼系数（kN·s/m）；

——基坑质量（t），含基础底板、侧壁及土参振质量；

——基坑下土层的等效刚度（kN/m）和等效阻尼系数（kN·s/m）。

9.4.3 锻锤隔振基础运动微分方程为：

(9.4.3)

式中：为锻锤打击力（kN）；

为基坑振动位移（m）；

为隔振基础振动位移（m）；

为隔振器刚度（kN/m）；

为地基刚度（kN/m）；

为地基阻尼系数（kN\*s/m）；

为隔振器阻尼系数（kN\*s/m）；

为基坑质量（t）；

为隔振器以上的设备和配重块总质量（t）。

9.4.4计算锻锤隔振基础振动响应，可采用振型分解法或线性加速度积分法。

### 9.5 数值仿真

9.5.1 建模方法可包括如下：

1采用有限元软件建立锻锤-隔振器-基础-地基耦合模型。

2隔振器采用弹簧-阻尼单元模拟，地基采用等效边界或无限元模型。

9.5.2 分析内容应包括：

1模态分析：验证隔振系统固有频率是否避开锻锤工作频段。

2瞬态分析：模拟冲击荷载下的振动衰减过程，评估隔振效果。

3谐响应分析：分析频域振动传递特性。

9.5.3 参数优化应包括：

1调整隔振器刚度、阻尼比，优化振动控制效果。

2评估不同隔振布置方案对结构受力的影响。

9.5.4 大型锻锤隔振基础需要进行测试验证，仿真结果应与理论计算及现场测试数据对比，误差控制在±10%以内。

### 9.6 隔振器与阻尼器选用

9.6.1 隔振器的选用应根据的工作特性、振动频率范围、荷载大小及环境要求等因素综合确定。

9.6.2 隔振器的设计应满足以下要求：

1. 有效降低振动传递率，确保基础及周边环境的振动控制在容许范围内；

2. 具备足够的承载能力和稳定性，适应静荷载和动荷载的共同作用；

3. 耐久性好，能长期承受工作产生的冲击和疲劳荷载；

4. 便于安装、维护和更换。

9.6.3 隔振器的布置应保证基组的整体平衡，避免因隔振器刚度不均导致设备倾斜或振动模态异常。

9.6.4 钢弹簧的设计与选用应符合下列条件：

1 材料技术条件：钢弹簧应采用优质合金钢，其力学性能应符合现行国家标准《弹簧钢》GB/T 1222的规定。

2 弹簧的弹性模量、屈服强度和疲劳极限等力学性能需符合相关标准，确保在工作过程中不会发生塑性变形。

3 弹簧表面应进行防腐处理，如镀锌、喷塑或涂覆耐油涂层。表面光洁度应符合标准，以减少磨损和提高疲劳寿命。

4 弹簧的尺寸（直径、长度、线径等）应根据锻锤的工作参数和振动特性进行设计。弹簧的形状（如圆形、矩形等）需符合设计标准。

9.6.5 隔振器动态参数选取应符合下列条件：

1 隔振器应具有三向承载能力，三向刚度和阻尼、大变形等性能。

2 隔振器的额定承载力应符合设计规定，其值不宜小于设计工作荷载的1.25倍，并满足疲劳性能要求；

3 隔振器刚度应性能稳定，静刚度与刚度理论值偏差小于15%，动静刚度偏差宜小于10%；

9.6.6 阻尼材料的设计与选用应符合下列条件：

1 阻尼材料宜采用橡胶、聚氨酯等高分子材料，其性能应符合《工程橡胶制品通用规范》HG/T 2196的要求。

2 材料应具备耐油、耐老化特性，适应工业环境。

3 锻锤隔振阻尼参数选取应根据振动控制目标确定，宜为0.08~0.30；

4 阻尼器阻尼系数应通过试验取得，宜取10Hz频率下的阻尼系数值；

5 阻尼器的阻尼材料随温度变化应性能稳定不挥发；

6 阻尼特性曲线应包含阻尼材料的动态刚度-频率曲线和损耗因子-温度曲线。

7 阻尼选用应根据振动频率范围选择阻尼材料的类型；结合钢弹簧或其他隔振元件，形成复合隔振系统。

9.6.7 阻尼弹簧隔振器应满足以下技术指标：

1 静态性能：额定荷载下的变形量应符合设计要求，偏差不超过±10%；

长期使用后刚度变化率应小于5%。

2 动态性能： 在工作频率范围内，振动传递率不应大于20%；

阻尼比应稳定在0.1~0.3之间。

3 环境适应性：工作温度范围为-20℃~+60℃；

4 耐腐蚀性能应满足工业环境要求。

9.6.8 阻尼弹簧隔振器的安装应符合下列规定：

1 安装前应检查隔振器的型号、规格及荷载匹配性；

2 隔振器与基础和设备的连接应牢固，避免松动或偏移；

3 安装后应进行振动测试，确保隔振效果达到设计要求。

9.6.9 隔振器的维护与更换：

1 定期检查隔振器的变形、锈蚀及老化情况；

2 发现异常时应及时更换，避免影响隔振效果和设备安全。

## 10、基础构造措施

### 10.1 一般规定

10.1.1 锻锤基础构造设计应满足以下要求：

1强度要求：应能承受最大冲击荷载作用下的压应力和拉应力，确保不发生结构破坏；

2刚度要求：控制基础的振动幅值，避免影响设备精度和周边建筑安全；

3耐久性要求：应具备抗渗、抗冻、抗腐蚀等性能，确保长期使用可靠性；

4抗疲劳性要求：应能承受长期交变冲击荷载，防止疲劳开裂；

5抗冲击韧性要求：材料应具有良好韧性，避免脆性破坏。

10.1.2 锻锤基础下地基持力层范围内，遇到特殊地质条件时应进行专项地基处理，包括地基处理或采用桩基。当采用桩基时，应按照抗拔桩设计，并满足《建筑桩基技术规范》JGJ 94的有关要求。

10.1.3 构造设计应符合工艺要求，并满足：

1设备安装要求：合理设置预埋件、地脚螺栓孔，保证安装精度；

2维护检修要求：预留检修通道、观测孔，便于后期维护；

3工艺适应性：基础结构不应妨碍锻锤正常操作及工艺调整。

10.1.4 基础形式选择应符合以下原则：

1大块式基础：适用于中小型锻锤，地质条件较好且环境振动要求不高的场合；

2地坑式基础：适用于大型锻锤、软弱地基或对振动控制要求严格的场合；

3在砧座凹坑顶部钢筋网范围内宜采用细石混凝土浇筑，施工时应确保砧座凹坑下的钢筋位置正确。

4砧座凹坑底的混凝土顶面，应严格保证其水平度，并在基础砼初凝后、终凝前找平，不得在混凝土凝固后另用砂浆找平；

5锻锤基础在砧座垫层下1.5m高度范围内，不得留设施工缝；

10.1.5 隔振基础设计应符合下列规定：

1隔振方式可采用橡胶隔振器、弹簧隔振系统或复合隔振装置；

2 隔振系统固有频率宜避开锻锤工作频率，避免冲击共振。当隔振系统阻尼比大于0.15是，可不考虑冲击共振的影响。

3隔振效率应满足环境振动限值要求，必要时设置隔振沟；

4隔振元件应便于检查、更换，并具有足够的耐久性。

### 10.2 基础材料

10.2.1锻锤基础混凝土的选用应符合下列规定：

1锻锤基础宜采用整体式混凝土结构，直接承受冲击荷载的部分应采用强度等级不低于C35的混凝土；非直接受冲击部分（如基坑侧壁）可采用C30。并满足现行国家标准规范《混凝土结构设计标准》GB/T 50010、《建筑与市政工程防水通用规范》GB 55030等的要求；基础垫层混凝土强度等级不应低于C15，地下水有腐蚀性时，应满足防腐蚀规范的有关要求。

2当锻锤基础位于地下水位较高或潮湿环境时，应采用防水混凝土，抗渗等级：一般不应低于P6，对于高地下水压或腐蚀性环境特殊情况下，不宜低于P8。

3混凝土骨料宜采用坚硬、级配良好的粗骨料，以提高混凝土的抗冲击能力。

10.2.2 钢筋的选用应符合下列规定：

1受力钢筋应采用HRB400、HRB500钢筋，其它部位可采用HRBF400、HRBF500钢筋，钢筋的连接不宜采用焊接接头。

2构造钢筋可采用HRBF400、HRBF500级，最小配筋率应符合《混凝土结构设计标准》GB 50010的要求。

10.2.3 锻锤基础中的预埋件、支承结构等钢结构材料，宜采用Q235B或Q355B等低合金高强度结构钢，以保证良好的焊接性和抗冲击性。

10.2.4 设备底座与基础连接处的二次灌浆层应采用C40及以上微膨胀细石混凝土或专用高强灌浆料。

**10.2.5** 砧座垫层的材料，应符合下列规定：

**1** 由方木或胶合方木组成的木垫，宜选用材质均匀、耐腐性较强的一等材，并应经干燥及防腐处理，其树种以及力学性能参数应按现行国家标准《木结构设计标准》GB50005的规定采用。

**2** 木垫的材质，应符合下列规定：

1）横放木垫可采用TB20、TB17，对于不大于1t的锻锤，亦可采用TB15、TC17、TC15。

2）竖放木垫可采用TB15、TC17、TC15。

3）竖放木垫下的横放木垫可采用TB20、TB17。

4）对于木材表层绝对含水率，当采用方木时不宜大于25%，

当采用胶合方木时不宜大于15%。

**3** 对于不大于5t 的锻锤可采用橡胶垫，橡胶垫可由普通型运输胶带或普通橡胶板组成，含胶量不宜低于40%，肖氏硬度宜为65Hs；胶种和材质的选择，应符合下列规定：

1）胶种宜采用氯丁胶、天然胶或顺丁胶。

2） 当锻锤使用时间每天超过16h时，宜选用耐热橡胶带（板）。

3）运输胶带的力学性能应符合现行行业标准《耐热输送带》

HG2297的有关规定，普通橡胶板的力学性能宜符合现行国家标准《工业用橡胶板》GB/T5574的有关规定。

### 10.3 构造尺寸

10.3.1锻锤基础与厂房基础的净距不宜小于500mm；当同一厂房内有多台10t及以上的锻锤时，各锻锤基础中心线的距离不宜小于30m或采用隔振基础。

10.3.2 单臂锻锤基础的锤击中心、基础底面形心和基组重心宜位于同一铅垂线上；当不在同一铅垂线上时，锤击中心与基础底面形心应对准，且锤击中心与基组重心的偏心距不应大于基础偏心方向边长的5%；锻锤基础边缘的竖向振动位移，可按下式计算：

(10.3.2)

式中：*u*ez——锤击中心、基础底面形心与基组重心不在同一铅垂线上时，锻锤基础边缘的竖向振动位移(m)；

*e*h——锤击中心对基组重心的偏心距(m)；

*b*h——锻锤基础偏心方向的边长(m)。

**10.3.3** 砧座下垫层的总厚度不应小于表10.3.3的规定值，总厚度可按下式计算：

(10.3.3)

式中： *f*c——垫层承压强度设计值(kN/m2)；

*E*——垫层的弹性模量(kN/m2)。

表10.3.3 垫层最小总厚度

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 落下部分公称质量(t) | 木垫(mm) | 输送胶带(mm) |
| 0.25 | 150 | 20 |
| 0.40 | 200 | 20 |
| 0.50 | 250 | 20 |
| 0.75 | 300 | 30 |
| 1.00 | 400 | 30 |
| 2.00 | 500 | 40 |
| 3.00 | 600 | 60 |
| 5.00 | 700 | 80 |
| 10.00 | 1000 | － |
| 16.00 | 1200 | － |
| 20.00 | 1400 | — |
| 25.00 | 1600 | — |

**10.3.4** 砧座下垫层的铺设方式，应符合下列规定：

**1** 木垫横放并由多层组成时，上下各层应交迭成十字形；最上层沿砧座底面的短边铺设，每层木垫厚度不宜小于150mm，并应每隔0.5m～1.0m用螺栓将方木拧紧，螺栓直径可按表10.3.4采用。

表10.3.4 横放木垫连接螺栓直径

|  |  |
| --- | --- |
| 每层木垫厚度(mm) | 螺栓直径(mm) |
| 150 | 20 |
| 200 | 24 |
| 250 | 30 |
| 300 | 35 |

**2** 木垫竖放时，宜在砧座凹坑底面先横放一层厚100mm～150mm的木垫，然后再沿凹坑用方木立砌，并将顶面刨平；对小于0.5t锻锤可不放横向垫木。

**3** 橡胶垫由一层或数层运输胶带或橡胶板组成，上下各层应顺条通缝迭放，并应在砧座凹坑内满铺。

**10.3.5** 砧座垫层下基础部分的最小厚度，应符合表10.3.5的规定。

表10.3.5 砧座垫层下基础部分的最小厚度

|  |  |
| --- | --- |
| 落下部分公称质量(t) | 最小厚度(mm) |
| ≤0.75 | 800 |
| 1 | 1000 |
| 2 | 1200 |
| 3 | 1750 |
| 5 | 2000 |
| 10 | 2750 |
| 16 | 3500 |
| 20 | 4000 |
| 25 | 4500 |

**10.3.6** 基础的配筋，应符合下列规定：

**1** 砧座垫层下基础上部应配置水平钢筋网，钢筋直径宜为12mm～20mm，钢筋间距宜为100mm～150mm；伸过凹坑内壁的长度，不宜小于50倍钢筋直径；钢筋网宜伸至基础外缘，钢筋网的层数可按表10.3.6采用，各层钢筋网的竖向间距宜为100mm～200mm，并宜按上密下疏的原则布置；最上层钢筋网的混凝土保护层厚度，宜为30 mm～50mm。

表10.3.6 钢筋网层数

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 落下部分公称质量(t) | ≤1 | 2～3 | 5～10 | 16 | 20~25 |
| 钢筋网层数 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

**2** 砧座凹坑的四周，应配置竖向钢筋网，钢筋间距宜采用100mm～250mm；当锻锤小于5t时，钢筋直径宜采用12mm～20mm；当锻锤不小于5t时，钢筋直径宜采用20mm～25mm；竖向钢筋宜伸至基础底面。

**3** 基础的底面应配置水平钢筋网，钢筋间距宜为100mm～250mm；当锻锤小于5t时，钢筋直径宜采用12mm～20mm；当锻锤不小于5t 时，钢筋直径宜采用18mm～25mm。

**4** 基础及基础台阶顶面，砧座凹坑外侧面及不小于2t的锻锤基础侧面，应配置钢筋网，钢筋直径宜应采用12 mm～20mm、间距宜为150 mm～250mm。

**5** 不小于5t 锻锤砧座垫层下的基础，应沿竖向配置水平钢筋网，钢筋直径宜采用12mm～20mm、水平间距不宜大于400mm，竖向间距不宜大于800mm。

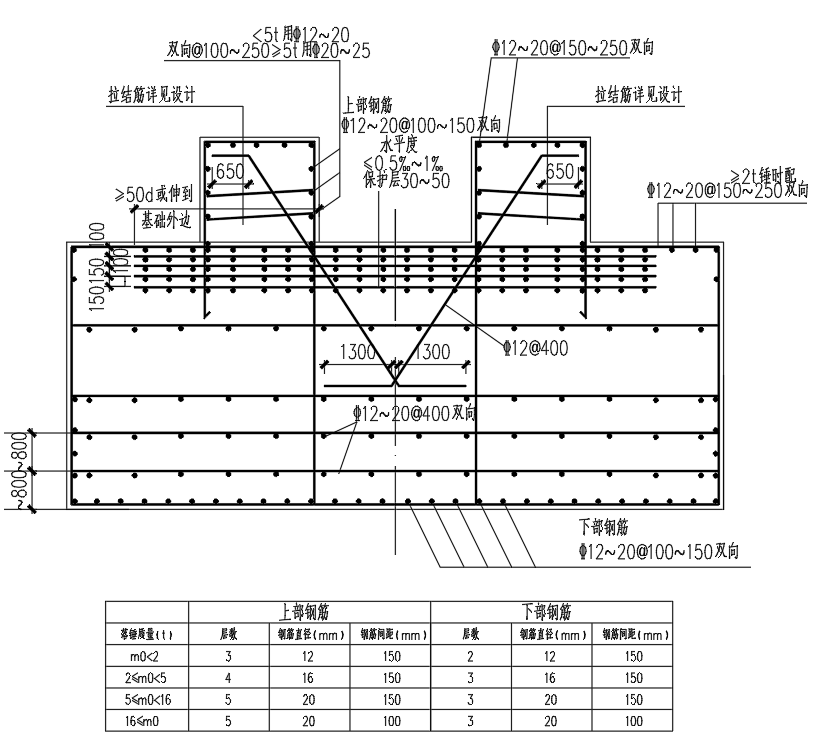


图10.3.6 大块式基础配筋示意图

6 转角处及孔洞周边应增设斜向加强筋，防止应力集中。

**10.3.7** 砧座凹坑与砧座、垫层的四周间隙中，应采用沥青麻丝填实，并应在间隙顶面50mm～100mm范围内用沥青浇灌。

**10.3.8** 锻锤基础地脚螺栓的设置，应符合下列规定：

1 I型和II型地脚螺栓的锚固长度不应小于25倍螺栓直径，III型地脚螺栓的锚固长度不应小于20倍螺栓直径。并应符合《混凝土结构设计标准》GB 50010关于钢筋锚固长度的规定。

2 地脚螺栓轴线距基础边缘的距离不应小于5倍螺栓直径，且不应小于150mm，预留孔边缘距基础边缘的距离不应小于100mm，当不满足要求时，应采取加强措施。

3 预埋地脚螺栓底面下混凝土的厚度不应小于50mm，当设置预留孔时，孔底面下混凝土的厚度不应小于100mm。

3 预埋件位置偏差应控制在±5mm以内，确保设备安装精度。

10.3.9 基础和预埋件的尺寸与精度尚应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205、《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202、《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《动力机器基础设计标准》GB 50040的要求。

### 10.4 地基处理

10.4.1 对于特殊地质条件应符合下列规定：

1遇软弱土、液化土或湿陷性黄土时，应采用桩基、换填或注浆加固，桩基间距宜为桩径的4~5倍。

2地基承载力不足时，应采取人工地基、打桩、扩大基础底面积或采用筏板基础等措施。

10.4.2 防振措施应符合下列要求：

1隔振基础周边应设置防振沟，沟宽不小于300mm。

2基础底部可铺设砂石垫层，厚度不小于300mm。

10.4.3 基础周边回填土应分层夯实，压实系数不应小于0.94，避免不均匀沉降。

### 10.5 施工与验收

**10.5.1** 锻锤基础，在砧座垫层下1.5m高度范围内，不得设置施工缝；砧座垫层下的基础上表面应一次抹平，不得做找平层；木垫下基础的水平向倾斜度不应大于1‰，橡胶垫下的水平向倾斜度不应大于0.5‰。

10.5.2锻锤基础施工应符合下列要求：

1混凝土浇筑应连续进行，避免冷缝；振捣必须密实，尤其注意钢筋密集区域。混凝土养护时间不少于14天。

2隔振系统安装时，隔振器（如橡胶隔振器、弹簧隔振系统）安装前需校准水平度，偏差不超过1/1000。隔振元件应固定牢固，安装后需进行初始压缩量检查。

3预埋件与地脚螺栓的埋置：预埋件位置偏差控制在±5mm以内，地脚螺栓预埋深度不小于螺栓直径的25倍。螺栓外露长度、垂直度应符合设计要求，安装后需临时固定防止移位。

4钢筋工程：钢筋规格、间距、搭接长度应符合设计要求，双层双向钢筋网间距不大于200mm。转角及孔洞周边应增设斜向加强筋，防止应力集中。

5地基处理：软弱地基需按设计要求进行换填、打桩或注浆加固，桩基间距宜为桩径的4~5倍。基础底部砂石垫层厚度不小于300mm，分层夯实。

6回填土施工：基础周边回填土应分层夯实，每层厚度不超过300mm，压实系数不小于0.94。

10.5.3 基础施工验收应符合下列要求：

1外观与尺寸检查：基础尺寸允许偏差：轴线±10mm，顶面标高±5mm。基础表面无裂缝、蜂窝、孔洞等缺陷，局部缺陷面积不超过总面积的0.5%。

2允许偏差：轴线偏差：±10mm；顶面标高偏差：±5mm；预埋件位置偏差：±5mm。

3材料与强度检测：混凝土试块抗压强度需达到设计强度等级，并符合《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107。防水混凝土抗渗等级不低于P6（特殊环境不低于P8）。

4振动测试：振动幅值、频率应符合《建筑工程容许振动标准》GB 50868的规定。隔振系统效率需满足设计要求，测试数据存档备查。

5预埋件与锚固检查：地脚螺栓紧固扭矩符合设计要求，无松动现象。预埋件焊缝质量按《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205进行检测。

6资料验收：提供完整的施工记录（含混凝土浇筑、养护、隔振器安装等）、材料合格证及检测报告。地基处理专项验收记录（如桩基检测报告、压实度测试等）。

7其他要求：施工过程中发现地质异常或设计变更，需及时联系设计单位调整方案。验收合格后，需在基础表面标注沉降观测点，定期监测使用阶段的沉降与振动情况。

8依据规范：《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《建筑工程容许振动标准》GB 50868、《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205、《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202、《混凝土结构设计规范》GB 50010、 《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《动力机器基础设计标准》GB 50040。

## 11、监测与运维

### 11.1 一般规定

11.1.1 本章适用于锻锤基础在施工及使用阶段的振动监测与运维管理，确保基础长期安全稳定运行。

11.1.2 检测内容应包括振动响应、结构变形、隔振器性能及周边环境影响等。

11.1.3 运维管理应结合监测数据，制定定期检查、维护和应急处理措施。

### 11.2 振动监测

11.2.1 检测项目

1振动控制点设置应选取：基础顶面、隔振器上下端、周边敏感区域等位置。

2检测参数应包括振动控制点的振动速度或加速度，对于隔振基础尚应测试位移响应。

3检测尚需包含：基础沉降、倾斜及裂缝发展等内容。

4 检测隔振器状态时，应包含：刚度变化、阻尼性能及位移限位等内容。

11.2.2 传感器布置

1基础顶面布置不少于4个测点，隔振器位置布置双向传感器。

2周边敏感区域（如建筑物）每20m布置1个测点。

11.2.3 监测频率

1安装调试阶段：每月2次；

2运行初期（1年内）：每月1次；

3稳定运行期：每季度1次；

4异常情况下：实时连续监测。

### 11.3 数据处理与分析

11.3.1 数据采集应符合《工业建筑振动检测与评价技术规程》T/CECS 1124-2022的规定。

11.3.2 分析内容应包括：

1. 时域分析：峰值振动、脉冲持续时间；

2. 频域分析：主导频率与隔振系统固有频率的匹配性；

3. 趋势分析：振动幅值随时间的变化规律。

11.3.3 报警阈值设定：

1振动速度超过GB 50868限值的80%时触发预警；

2隔振器位移超过设计值的10%时需检修。

### 11.4 运维管理

11.4.1 锻锤基础应进行定期监测包括人工巡视监测，一年内宜每月监测1次，两年及以后半年监测1次。若无异常情况，可调整为每年1~2次，但遇强振、地质变化或设备改造时应加密监测。

11.4.2 监测项目包括设备振动监测，螺栓紧固、基础沉降、裂缝、基础渗漏水检查等；采用隔振基础时尚应对隔振器进行检查。

11.4.3 监测点宜布置在基础顶面或锻锤底脚、厂房基础地面或墙面上，且易于观测的位置。

11.4.4 隔振系统宜每年进行固有频率、阻尼比等动态参数复测。

11.4.5 应急处理

1 振动超标时，立即停机并排查设备故障或地基异常；

2 隔振器失效时，临时加固并更换受损部件。

## 附录A、振动传播评估

### A.1 一般规定

A.1.1 本章适用于锻锤基础振动对所在厂房结构、周边环境及建筑物影响的评估，包括振动传播范围、衰减规律及控制措施的设计。

A.1.2 振动传播评估应结合现场实测与预测数据，确保结果符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868的要求。

A.1.3 评估范围应包括锻锤基础周边50m内的敏感区域（如办公区、住宅区、精密仪器车间等），必要时可扩大至500m。

A.1.4　振动传播评估应包含振源特性分析、场地振动传播与衰减特性分析、评估对象振动响应分析以及评估结论与建议。

A.1.5　振动传播评估时，应取得锻锤振源参数与概况、评估对象信息、传播路径场地特性与空间位置关系。

A.1.6　在设计阶段，当锻锤基础振动作为场地的主要振源时，应对振动沿地基传播振动进行分析与评估，提出厂区内的振动区划条件。当场地内的防振对象不满足容许振动要求时，需对改进厂区规划布置，调整锻锤与振敏对象的防振距离，或改进基础隔振方案使之满足容许振动标准的要求。

A.1.7　关于振动对周边场地影响的评估，应根据工程建设阶段的不同，采用相应的分析方法，包括现场实测法、经验公式法、数值分析法和数据表格法等。这些方法使用场景应符合下表的要求。

表A1.7 锻锤基础地面振动传播评估

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 适用阶段 | 前期规划 | 工程设计 | 后期工程 | 说明 |
| 经验公式 | ○ | √ | ○ |  |
| 数值分析 | ○ | √ | ○ |  |
| 数据表格 | √ | ○ | × |  |
| 现场实测 | × | × | √ | 见第5章 |
| 注 | 表中：√表示适用，○表示可使用，×表示不适用。 | | | |

### A.2 振动传播分析

A.2.1 振动在土体中的传播宜采用弹性半空间理论或分层土模型，考虑土体阻尼和波速的影响。振动传播分析宜根据不同工程建设阶段，对照表A.1.7提供的适用性条件，分别采用现场实测法、经验公式法、数值分析法或数据表格法。

A.2.2 当缺乏详细地质资料时，宜按经验公式法分析锻锤基础振动传播。计算步骤如下：

1锻锤基础竖向或水平向振动传播衰减计算可按下式进行：

（A.2.2-1）

式中：——距离基础边缘处的地面振动速度；

——基础边缘的振动速度；

——基础边缘至计算点的距离；

——基础等效半径；

——与振源半径相关的几何衰减系数，对于一般性黏土，可取；

——土的能量吸收系数，一般坚硬粘性土、中密碎石、卵石类地基土，可取；对于软土场地或饱和淤泥软土场地，对于软土可乘以1.5~2的系数，对于坚硬土应乘以0.5~0.6的系数。

——地基基础的振动频率。

2锻锤基础等效半径可按下式计算：

（A.2.2-2）

（A.2.2-3）

式中：——矩形基础动力影响系数；

——基础底面积。

3 不同类型土的能量吸收系数按《动力机器基础设计标准》GB50040-2020附录C确定。

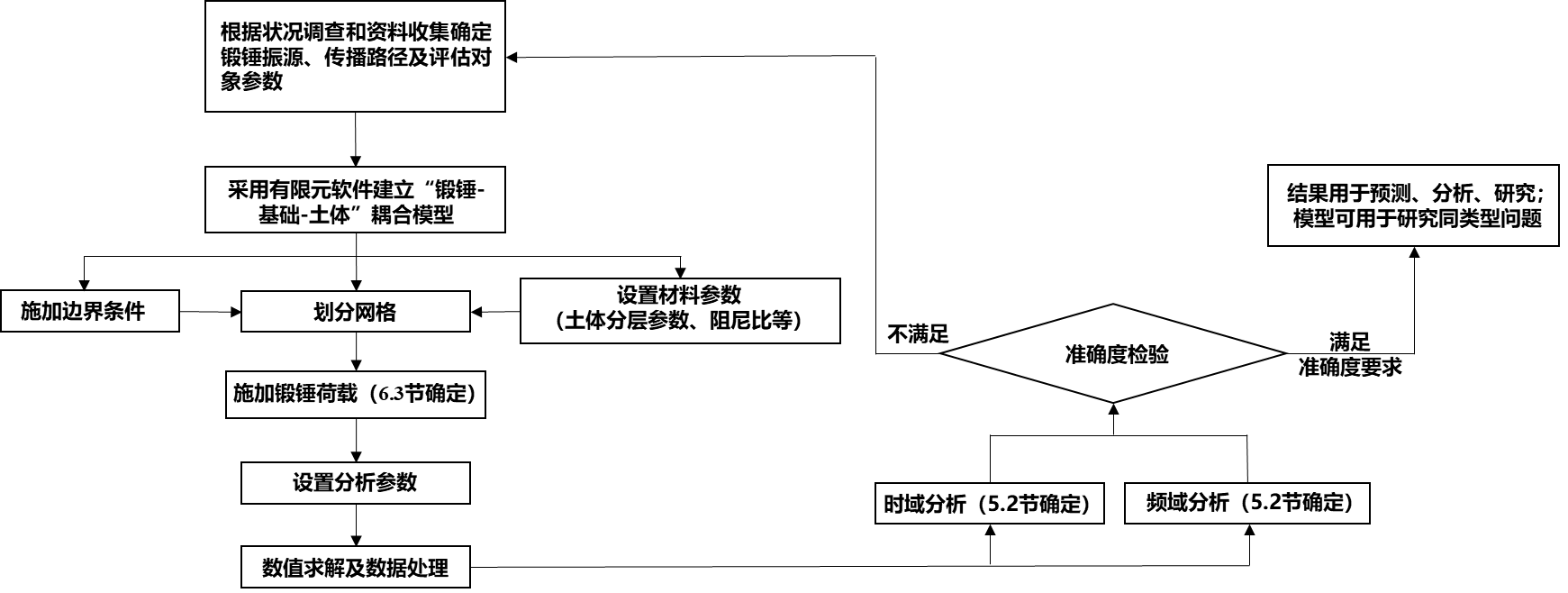
A.2.3 数值分析法宜按下步骤分析：

1 采用有限元软件建立“锻锤-基础-土体”耦合模型，分析振动传播路径及衰减规律。

2 模型应包含土体分层参数、阻尼比及边界条件（如无限元或粘弹性边界）。

3 锻锤荷载类型可依据6.3节内容确定。

4 数值分析法预测宜采用有限元法，预测可按图A.2.3所示流程进行。应对数值分析法计算结果的有效性和准确性进行验证。



图A.2.3　数值分析法流程图

A.2.4 现场测试法宜按下列步骤进行测试：

1锻锤基础周边布置测点，记录振动速度或加速度时程曲线。

2测点间距宜为5m～10m，重点区域（如建筑物基础）应加密布置。

3测试方法应符合本标准第5章的规定。

A.2.5 数据表格法宜按下列步骤进行振动响应评估：

1为了确定锻锤非隔振刚性基础振动对附近区域的振动影响，在工程规划设计阶段可以根据类型，按照下表的数值确定合理的防振距离。

表A.2.5-1 锻锤非隔振振动速度沿场地分布（单位：mm/s）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 压机  类型 | 距离,m | | | | | | | | | | | |
| 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 |
| 轻型 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 小型 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 中型 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 大型 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 特大型 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

注：中间数值可按线性插值方法计算。

2按照表A.2.5-1查到的振动速度应根据地基土类别的不同，按照下式进行修正。

（A.2.5）

式中，—修正后地面振动速度；

—土类别修正系数，按照表A.2.5-2选取。

表A.2.5-2 土类别修正系数

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土类别 | 淤泥质土 | 黏土 | 坚硬土 | 岩石 | 桩基 |
|  | 1.5~2.0 | 0.9~1.1 | 0.6~0.8 | 0.3~0.6 | 07~0.9 |

### A.3　报告编制

**A.3.1**对锻锤振动对所在车间、周边环境、以及附近建筑物内的人体舒适性、精密仪器与设备、建筑结构等可能产生的振动影响评估时，应按照下列要求编写评估报告。

**A.3.2**评估报告应包括下列内容：

**1**评估目的及工作内容；

**2**按本标准第A.1条要求开展状况调查和资料收集，叙述锻锤振源、传播路径以及评估对象的基本情况；

**3**场地土类别和场地土动力特性参数情况；

**4**评估指标和容许振动值的确定及依据；

**5**评估所采用的方法、测点以及计算过程；

**6**使用的仪器及仪器校验或计算模型校验；

**7**数据处理的方法和结果；

**8**将测试或预测结果与容许振动值进行分析、对比，做出锻锤振源对评估对象是否造成有害影响的结论；

**9**测试或预测结果超过容许振动值时，应提出可行的振动控制措施。

**A.3.3**振动测试报告宜按下表的要求编写：

表A.3.3　振动传播测试记录表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试日期 |  | | | 测试地点 | |  | | | |
| 天气情况 |  | | | 记录人员 | |  | | | |
| 锻锤类型及参数 |  | | | 评估目的 | |  | | | |
| 测试仪器 |  | | | | | | | | |
| 评价标准及评估指标、容许振动值 |  | | | | | | | | |
| 测点布置图 |  | | | | | | | | |
| 测点编号 | 1 | 2 | | | 3 | | … | | N |
| 传感器编号 |  |  | | |  | |  | |  |
| 数采通道编号 |  |  | | |  | |  | |  |
| 测试记录 | | | | | | | | | |
| 序号（工况号） | 时间 | | 评估指标值 | | | | | 备注 | |
| 1 |  | |  | | | | |  | |
| 2 |  | |  | | | | |  | |
| 3 |  | |  | | | | |  | |
| … |  | |  | | | | |  | |
| N |  | |  | | | | |  | |

## 附录B 冲击式机器基础有阻尼动力系数*η*max值的计算

**B.0.1**锻锤等冲击式机器的振动荷载，在动力分析时可采用脉冲函数来描述冲击作用。脉冲函数可采用后峰齿形、对称三角形、矩形脉冲、正弦半波、正矢脉冲等。振动能量较小时，可采用后峰齿形脉冲；振动能量较大时，可采用矩形脉冲。冲击机器冲击作用所对应的脉冲函数形式可按照现行国家标准《建筑振动荷载标准》采用。五种脉冲作用下的动力系数值，可按本附录第D.0.2条的规定采用。

**B.0.2** 当扰力为后峰锯齿冲击脉冲或对称三角形冲击脉冲时，基组的有阻尼动力系数，可按下列规定确定：

1对于竖向有阻尼动力系数，阻尼比和固有周期*T*n可取基组的竖向阻尼比、固有周期*T*nz。

2对于水平回转耦合振动第一、第二振型有阻尼动力系数、确定时，阻尼比和固有周期*T*n可分别取基组的水平回转耦合振动第一、第二振型阻尼比、、、、第一、第二振型固有周期*T*n1、*T*n2。

3基组竖向、水平向和回转向扰力或扰力矩脉冲时间*t*o宜取相同值。

表B.0.2-1 后峰齿形脉冲的*η*max值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ζ  *t*o/*T*n | 0.00 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| 0.05 | 0.1568 | 0.1452 | 0.1352 | 0.1263 | 0.1184 | 0.1115 | 0.1052 | 0.0996 | 0.0944 | 0.0898 | 0.0856 |
| 0.10 | 0.3107 | 0.2881 | 0.2681 | 0.2505 | 0.2350 | 0.2212 | 0.2087 | 0.1975 | 0.1874 | 0.1783 | 0.1698 |
| 0.15 | 0.4598 | 0.4261 | 0.3966 | 0.3708 | 0.3477 | 0.3273 | 0.3090 | 0.2924 | 0.2774 | 0.2639 | 0.2514 |
| 0.20 | 0.6012 | 0.5574 | 0.5189 | 0.4851 | 0.4551 | 0.4283 | 0.4045 | 0.3829 | 0.3633 | 0.3455 | 0.3294 |
| 0.25 | 0.7331 | 0.6796 | 0.6329 | 0.5919 | 0.5555 | 0.5229 | 0.4938 | 0.4676 | 0.4438 | 0.4223 | 0.4027 |
| 0.30 | 0.8530 | 0.7913 | 0.7373 | 0.6896 | 0.6474 | 0.6099 | 0.5761 | 0.5457 | 0.5183 | 0.4933 | 0.4705 |
| 0.35 | 0.9595 | 0.8907 | 0.8303 | 0.7771 | 0.7301 | 0.6881 | 0.6504 | 0.6165 | 0.5859 | 0.5580 | 0.5325 |
| 0.40 | 1.0512 | 0.9765 | 0.9111 | 0.8535 | 0.8024 | 0.7570 | 0.7162 | 0.6794 | 0.6461 | 0.6158 | 0.5882 |
| 0.45 | 1.1267 | 1.0477 | 0.9787 | 0.9180 | 0.8641 | 0.8160 | 0.7729 | 0.7341 | 0.6989 | 0.6669 | 0.6377 |
| 0.50 | 1.1854 | 1.1040 | 1.0328 | 0.9702 | 0.9146 | 0.8651 | 0.8206 | 0.7804 | 0.7441 | 0.7110 | 0.6807 |
| 0.55 | 1.2271 | 1.1450 | 1.0734 | 1.0103 | 0.9543 | 0.9043 | 0.8594 | 0.8189 | 0.7820 | 0.7485 | 0.7177 |
| 0.60 | 1.2516 | 1.1709 | 1.1005 | 1.0385 | 0.9834 | 0.9341 | 0.8898 | 0.8496 | 0.8131 | 0.7797 | 0.7490 |
| 0.65 | 1.2596 | 1.1825 | 1.1151 | 1.0556 | 1.0026 | 0.9552 | 0.9123 | 0.8734 | 0.8378 | 0.8052 | 0.7751 |
| 0.70 | 1.2521 | 1.1805 | 1.1179 | 1.0625 | 1.0129 | 0.9683 | 0.9279 | 0.8909 | 0.8569 | 0.8256 | 0.7965 |
| 0.75 | 1.2306 | 1.1667 | 1.1105 | 1.0605 | 1.0156 | 0.9748 | 0.9374 | 0.9030 | 0.8712 | 0.8415 | 0.8139 |
| 0.80 | 1.1971 | 1.1428 | 1.0946 | 1.0514 | 1.0120 | 0.9757 | 0.9421 | 0.9108 | 0.8814 | 0.8539 | 0.8279 |
| 0.85 | 1.1541 | 1.1111 | 1.0724 | 1.0368 | 1.0036 | 0.9725 | 0.9430 | 0.9150 | 0.8885 | 0.8632 | 0.8391 |
| 0.90 | 1.1045 | 1.0744 | 1.0460 | 1.0187 | 0.9923 | 0.9664 | 0.9413 | 0.9168 | 0.8931 | 0.8702 | 0.8481 |
| 0.95 | 1.0518 | 1.0355 | 1.0179 | 0.9991 | 0.9793 | 0.9589 | 0.9380 | 0.9170 | 0.8961 | 0.8755 | 0.8553 |
| 1.00 | 1.0000 | 0.9966 | 0.9878 | 0.9751 | 0.9597 | 0.9426 | 0.9243 | 0.9055 | 0.8864 | 0.8673 | 0.8484 |

表B.0.2-2对称三角形脉冲的*η*max值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ζ  to/Tn | 0.00 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| 0.05 | 0.1568 | 0.1453 | 0.1352 | 0.1264 | 0.1185 | 0.1115 | 0.1053 | 0.0996 | 0.0945 | 0.0899 | 0.0856 |
| 0.10 | 0.3116 | 0.2887 | 0.2688 | 0.2512 | 0.2356 | 0.2217 | 0.2092 | 0.1980 | 0.1879 | 0.1786 | 0.1702 |
| 0.15 | 0.4626 | 0.4287 | 0.3990 | 0.3729 | 0.3498 | 0.3291 | 0.3106 | 0.2940 | 0.2789 | 0.2652 | 0.2527 |
| 0.20 | 0.6079 | 0.5634 | 0.5244 | 0.4901 | 0.4597 | 0.4326 | 0.4083 | 0.3864 | 0.3666 | 0.3486 | 0.3321 |
| 0.25 | 0.7458 | 0.6912 | 0.6434 | 0.6013 | 0.5640 | 0.5307 | 0.5009 | 0.4741 | 0.4498 | 0.4277 | 0.4076 |
| 0.30 | 0.8747 | 0.8106 | 0.7546 | 0.7052 | 0.6615 | 0.6225 | 0.5876 | 0.5561 | 0.5276 | 0.5017 | 0.4781 |
| 0.35 | 0.9931 | 0.9203 | 0.8567 | 0.8007 | 0.7511 | 0.7068 | 0.6672 | 0.6315 | 0.5992 | 0.5699 | 0.5431 |
| 0.40 | 1.0997 | 1.0191 | 0.9487 | 0.8867 | 0.8318 | 0.7829 | 0.7390 | 0.6995 | 0.6638 | 0.6314 | 0.6019 |
| 0.45 | 1.1934 | 1.1059 | 1.0295 | 0.9623 | 0.9028 | 0.8498 | 0.8023 | 0.7596 | 0.7209 | 0.6858 | 0.6539 |
| 0.50 | 1.2732 | 1.1800 | 1.0985 | 1.0269 | 0.9635 | 0.9071 | 0.8567 | 0.8113 | 0.7703 | 0.7331 | 0.6992 |
| 0.55 | 1.3390 | 1.2411 | 1.1558 | 1.0808 | 1.0146 | 0.9556 | 0.9029 | 0.8555 | 0.8127 | 0.7739 | 0.7386 |
| 0.60 | 1.3919 | 1.2908 | 1.2027 | 1.1254 | 1.0570 | 0.9963 | 0.9420 | 0.8931 | 0.8491 | 0.8091 | 0.7727 |
| 0.65 | 1.4337 | 1.3305 | 1.2406 | 1.1617 | 1.0921 | 1.0301 | 0.9748 | 0.9251 | 0.8802 | 0.8395 | 0.8024 |
| 0.70 | 1.4657 | 1.3614 | 1.2706 | 1.1909 | 1.1206 | 1.0581 | 1.0022 | 0.9520 | 0.9067 | 0.8656 | 0.8281 |
| 0.75 | 1.4891 | 1.3845 | 1.2936 | 1.2138 | 1.1434 | 1.0808 | 1.0249 | 0.9746 | 0.9292 | 0.8880 | 0.8504 |
| 0.80 | 1.5049 | 1.4009 | 1.3105 | 1.2312 | 1.1612 | 1.0990 | 1.0434 | 0.9933 | 0.9481 | 0.9071 | 0.8696 |
| 0.85 | 1.5140 | 1.4113 | 1.3220 | 1.2437 | 1.1746 | 1.1131 | 1.0582 | 1.0087 | 0.9640 | 0.9233 | 0.8862 |
| 0.90 | 1.5171 | 1.4164 | 1.3288 | 1.2520 | 1.1841 | 1.1238 | 1.0698 | 1.0212 | 0.9771 | 0.9371 | 0.9005 |
| 0.95 | 1.5151 | 1.4168 | 1.3313 | 1.2564 | 1.1903 | 1.1314 | 1.0786 | 1.0310 | 0.9879 | 0.9486 | 0.9127 |
| 1.00 | 1.5085 | 1.4131 | 1.3302 | 1.2576 | 1.1934 | 1.1362 | 1.0849 | 1.0386 | 0.9966 | 0.9583 | 0.9231 |

表B.0.2-3 矩形脉冲的ηmax值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ζ  to/Tn | 0.00 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| 0.05 | 0.3129 | 0.2900 | 0.2699 | 0.2522 | 0.2366 | 0.2226 | 0.2101 | 0.1988 | 0.1886 | 0.1794 | 0.1710 |
| 0.10 | 0.6181 | 0.5727 | 0.5332 | 0.4982 | 0.4673 | 0.4398 | 0.4151 | 0.3928 | 0.3726 | 0.3544 | 0.3376 |
| 0.15 | 0.9080 | 0.8414 | 0.7833 | 0.7320 | 0.6866 | 0.6461 | 0.6098 | 0.5772 | 0.5476 | 0.5207 | 0.4962 |
| 0.20 | 1.1755 | 1.0895 | 1.0141 | 0.9478 | 0.8890 | 0.8367 | 0.7898 | 0.7475 | 0.7092 | 0.6745 | 0.6428 |
| 0.25 | 1.4142 | 1.3106 | 1.2200 | 1.1403 | 1.0697 | 1.0068 | 0.9505 | 0.8998 | 0.8540 | 0.8123 | 0.7743 |
| 0.30 | 1.6181 | 1.4995 | 1.3960 | 1.3051 | 1.2245 | 1.1528 | 1.0886 | 1.0309 | 0.9787 | 0.9314 | 0.8882 |
| 0.35 | 1.7820 | 1.6516 | 1.5378 | 1.4379 | 1.3497 | 1.2712 | 1.2010 | 1.1380 | 1.0812 | 1.0296 | 0.9827 |
| 0.40 | 1.9021 | 1.7630 | 1.6420 | 1.5360 | 1.4426 | 1.3597 | 1.2858 | 1.2196 | 1.1599 | 1.1059 | 1.0569 |
| 0.45 | 1.9754 | 1.8312 | 1.7063 | 1.5973 | 1.5016 | 1.4170 | 1.3419 | 1.2747 | 1.2144 | 1.1600 | 1.1106 |
| 0.50 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6206 | 1.5259 | 1.4427 | 1.3692 | 1.3037 | 1.2452 | 1.1925 | 1.1447 |
| 0.55 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2050 | 1.1609 |
| 0.60 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |
| 0.65 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |
| 0.70 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |
| 0.75 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |
| 0.80 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |
| 0.85 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |
| 0.90 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |
| 0.95 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |
| 1.00 | 2.0000 | 1.8545 | 1.7292 | 1.6209 | 1.5266 | 1.4443 | 1.3723 | 1.3092 | 1.2538 | 1.2053 | 1.1630 |

表B.0.2-4正弦半波脉冲的*η*max值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ζ  to/Tn | 0.00 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| 0.05 | 0.1995 | 0.1849 | 0.1721 | 0.1609 | 0.1509 | 0.1420 | 0.1340 | 0.1268 | 0.1203 | 0.1144 | 0.1090 |
| 0.10 | 0.3963 | 0.3672 | 0.3418 | 0.3195 | 0.2996 | 0.2820 | 0.2661 | 0.2518 | 0.2389 | 0.2272 | 0.2165 |
| 0.15 | 0.5875 | 0.5444 | 0.5068 | 0.4736 | 0.4442 | 0.4180 | 0.3945 | 0.3734 | 0.3542 | 0.3368 | 0.3210 |
| 0.20 | 0.7705 | 0.7140 | 0.6646 | 0.6211 | 0.5826 | 0.5483 | 0.5175 | 0.4897 | 0.4646 | 0.4418 | 0.4210 |
| 0.25 | 0.9428 | 0.8737 | 0.8133 | 0.7601 | 0.7129 | 0.6709 | 0.6332 | 0.5993 | 0.5686 | 0.5407 | 0.5153 |
| 0.30 | 1.1021 | 1.0213 | 0.9507 | 0.8885 | 0.8335 | 0.7844 | 0.7404 | 0.7008 | 0.6649 | 0.6324 | 0.6027 |
| 0.35 | 1.2462 | 1.1549 | 1.0751 | 1.0048 | 0.9426 | 0.8872 | 0.8375 | 0.7928 | 0.7523 | 0.7156 | 0.6821 |
| 0.40 | 1.3734 | 1.2728 | 1.1849 | 1.1075 | 1.0390 | 0.9780 | 0.9234 | 0.8743 | 0.8298 | 0.7895 | 0.7527 |
| 0.45 | 1.4820 | 1.3734 | 1.2787 | 1.1953 | 1.1216 | 1.0560 | 0.9972 | 0.9444 | 0.8967 | 0.8534 | 0.8140 |
| 0.50 | 1.5708 | 1.4558 | 1.3555 | 1.2674 | 1.1895 | 1.1203 | 1.0584 | 1.0028 | 0.9526 | 0.9071 | 0.8657 |
| 0.55 | 1.6395 | 1.5198 | 1.4156 | 1.3242 | 1.2435 | 1.1718 | 1.1078 | 1.0504 | 0.9986 | 0.9516 | 0.9089 |
| 0.60 | 1.6904 | 1.5678 | 1.4612 | 1.3679 | 1.2855 | 1.2124 | 1.1472 | 1.0888 | 1.0360 | 0.9883 | 0.9449 |
| 0.65 | 1.7264 | 1.6024 | 1.4947 | 1.4004 | 1.3174 | 1.2438 | 1.1781 | 1.1193 | 1.0663 | 1.0183 | 0.9746 |
| 0.70 | 1.7500 | 1.6257 | 1.5179 | 1.4237 | 1.3408 | 1.2673 | 1.2018 | 1.1432 | 1.0903 | 1.0425 | 0.9990 |
| 0.75 | 1.7634 | 1.6398 | 1.5327 | 1.4392 | 1.3570 | 1.2842 | 1.2194 | 1.1614 | 1.1091 | 1.0619 | 1.0189 |
| 0.80 | 1.7683 | 1.6462 | 1.5405 | 1.4483 | 1.3673 | 1.2957 | 1.2319 | 1.1749 | 1.1236 | 1.0771 | 1.0349 |
| 0.85 | 1.7665 | 1.6464 | 1.5425 | 1.4520 | 1.3726 | 1.3025 | 1.2402 | 1.1844 | 1.1343 | 1.0889 | 1.0477 |
| 0.90 | 1.7591 | 1.6414 | 1.5398 | 1.4514 | 1.3739 | 1.3056 | 1.2449 | 1.1906 | 1.1418 | 1.0977 | 1.0576 |
| 0.95 | 1.7473 | 1.6324 | 1.5333 | 1.4472 | 1.3719 | 1.3055 | 1.2466 | 1.1940 | 1.1468 | 1.1041 | 1.0652 |
| 1.00 | 1.7320 | 1.6201 | 1.5237 | 1.4401 | 1.3671 | 1.3028 | 1.2459 | 1.1951 | 1.1495 | 1.1083 | 1.0709 |

表B.0.2-5正矢脉冲的*η*max值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ζ  to/Tn | 0.00 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| 0.05 | 0.1568 | 0.1453 | 0.1353 | 0.1264 | 0.1186 | 0.1116 | 0.1053 | 0.0997 | 0.0946 | 0.0899 | 0.0857 |
| 0.10 | 0.3121 | 0.2893 | 0.2692 | 0.2516 | 0.2360 | 0.2221 | 0.2096 | 0.1984 | 0.1882 | 0.1790 | 0.1705 |
| 0.15 | 0.4644 | 0.4304 | 0.4006 | 0.3744 | 0.3512 | 0.3305 | 0.3119 | 0.2952 | 0.2800 | 0.2663 | 0.2537 |
| 0.20 | 0.6123 | 0.5674 | 0.5282 | 0.4936 | 0.4630 | 0.4357 | 0.4112 | 0.3891 | 0.3692 | 0.3510 | 0.3345 |
| 0.25 | 0.7542 | 0.6990 | 0.6506 | 0.6080 | 0.5703 | 0.5367 | 0.5065 | 0.4794 | 0.4548 | 0.4325 | 0.4121 |
| 0.30 | 0.8890 | 0.8239 | 0.7669 | 0.7167 | 0.6723 | 0.6326 | 0.5971 | 0.5651 | 0.5361 | 0.5098 | 0.4858 |
| 0.35 | 1.0154 | 0.9410 | 0.8759 | 0.8186 | 0.7679 | 0.7226 | 0.6820 | 0.6455 | 0.6125 | 0.5824 | 0.5551 |
| 0.40 | 1.1322 | 1.0492 | 0.9767 | 0.9128 | 0.8563 | 0.8058 | 0.7606 | 0.7199 | 0.6831 | 0.6497 | 0.6192 |
| 0.45 | 1.2385 | 1.1477 | 1.0684 | 0.9986 | 0.9367 | 0.8816 | 0.8322 | 0.7878 | 0.7476 | 0.7111 | 0.6778 |
| 0.50 | 1.3333 | 1.2356 | 1.1503 | 1.0752 | 1.0086 | 0.9494 | 0.8963 | 0.8486 | 0.8054 | 0.7662 | 0.7305 |
| 0.55 | 1.4161 | 1.3124 | 1.2218 | 1.1422 | 1.0717 | 1.0090 | 0.9528 | 0.9023 | 0.8567 | 0.8153 | 0.7776 |
| 0.60 | 1.4866 | 1.3780 | 1.2832 | 1.1999 | 1.1262 | 1.0607 | 1.0020 | 0.9493 | 0.9017 | 0.8585 | 0.8192 |
| 0.65 | 1.5454 | 1.4329 | 1.3348 | 1.2487 | 1.1726 | 1.1049 | 1.0444 | 0.9900 | 0.9409 | 0.8964 | 0.8559 |
| 0.70 | 1.5932 | 1.4780 | 1.3776 | 1.2894 | 1.2116 | 1.1424 | 1.0806 | 1.0250 | 0.9749 | 0.9294 | 0.8881 |
| 0.75 | 1.6311 | 1.5141 | 1.4122 | 1.3228 | 1.2439 | 1.1738 | 1.1111 | 1.0548 | 1.0041 | 0.9580 | 0.9161 |
| 0.80 | 1.6601 | 1.5421 | 1.4395 | 1.3495 | 1.2701 | 1.1996 | 1.1366 | 1.0800 | 1.0289 | 0.9826 | 0.9405 |
| 0.85 | 1.6810 | 1.5630 | 1.4603 | 1.3703 | 1.2910 | 1.2205 | 1.1576 | 1.1010 | 1.0500 | 1.0037 | 0.9616 |
| 0.90 | 1.6949 | 1.5775 | 1.4754 | 1.3860 | 1.3071 | 1.2371 | 1.1745 | 1.1184 | 1.0677 | 1.0217 | 0.9798 |
| 0.95 | 1.7027 | 1.5864 | 1.4854 | 1.3970 | 1.3190 | 1.2498 | 1.1880 | 1.1325 | 1.0823 | 1.0368 | 0.9953 |
| 1.00 | 1.7051 | 1.5906 | 1.4911 | 1.4041 | 1.3273 | 1.2592 | 1.1984 | 1.1437 | 1.0943 | 1.0495 | 1.0086 |

### 用词说明

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”；

1. 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”；

1. 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”；

1. 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”

### 引用标准名录

本标准引用下列标准。其中，注日期的，仅该日期对应的版本适用本标准；不注日期的，其最新版适用于本标准。

《建筑地基基础设计规范》GB 50007

《建筑结构荷载规范》GB 50009

《混凝土结构设计标准》GB 50010

《建筑抗震设计标准》GB 50011

《钢结构设计标准》GB 50017

《动力机器基础设计标准》GB 50040

《地基动力特性测试规范》GB/T 50269

《建筑工程容许振动标准》GB 50868

《建筑振动荷载标准》GB/T 51228

《建筑与市政工程防水通用规范》GB 55030

《振动位移传感器检定规程》JJG 644

《振动位移传感器检定规程》JJG882

**中国工程建设标准化协会标准**

**锻锤基础设计标准**

**T/CECS XXX-202X**

# 条文说明

**制定说明**

本标准在编制过程中，编制组开展了专题研究，进行了广泛的调查分析，总结了我国在锻锤基础设计方法方面的实践经验，与相关标准进行了协调、与国际先进标准进行了比较和借鉴。

为便于广大技术和管理人员在使用本标准时能正确理解和执行条款规定，《锻锤基础设计标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。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条款规定的参考。

目录

[条文说明 47](#_Toc207010474)

[1 总则 50](#_Toc207010475)

[2术语和符号 52](#_Toc207010476)

[2.1 术语 52](#_Toc207010477)

[2.2　符号 52](#_Toc207010478)

[3 基本规定 53](#_Toc207010479)

[3.1一般要求 53](#_Toc207010480)

[3.2 地基与基础设计原则 56](#_Toc207010481)

[3.3 基础材料 57](#_Toc207010482)

[3.4 基础方案 57](#_Toc207010483)

[3.5 容许振动标准 58](#_Toc207010484)

## 1 总则

1.0.1本条阐明了制定本标准的核心目的和基本原则。

1. 目的性：制定本标准的首要目的是“规范锻锤基础设计的技术要求”，为这一特定领域的设计活动提供统一、权威的技术依据，结束以往可能存在的做法不一、依据混乱的局面。

2. 政策性：标准编制需“贯彻国家技术经济政策”，意味着在技术要求中需体现节约资源、保护环境、技术先进、经济合理等国家宏观政策导向。

3. 核心目标： 标准追求的最终目标是多方面的：

安全可靠： 确保锻锤基础本身及其影响范围内的建筑、设备、人员的安全，是设计的首要前提。

功能适用： 基础设计必须满足锻锤设备正常、高效运行所需的精度、稳定性等工艺要求。

经济合理： 在满足安全和功能的前提下，设计方案应进行技术经济比较，优化投资，避免不必要的浪费。

生产与环保需求： 设计需保障生产的连续性和稳定性，同时必须控制振动和噪声对周边环境的影响，满足日益严格的环保要求。

1.0.2 本条明确了本标准的适用范围。

1. 适用对象： 本标准适用于各类锻锤设备的基础设计，明确涵盖了“隔振基础”与“非隔振基础”两种主要技术路线。这体现了标准对不同减振需求场景的全面覆盖。

2. 技术体系区分： 编制说明进一步解释了两种基础类型对应的动力体系：

隔振基础（柔性体系）： 通过设置隔振装置，主动降低传递到基础和地基的动荷载，主要用于对振动控制要求高的场合。

非隔振基础（刚性体系）： 依靠基础自身的质量、刚度和阻尼来承受和耗散动荷载，结构相对简单。

3. 设备类型涵盖： 标准适用的锻锤设备范围广泛，包括传统的有砧座锤，如空气锤、模锻锤、自由锻锤等，对击式锤，如无砧座锤以及其他特殊类型的锻锤。指出不同设备的“打击作用会有差异，需要区别对待”，为后续章节中针对不同类型设备提出差异化设计要求做了铺垫。

1.0.3 本条规定了本标准与其他标准规范的关系。

1. 优先性： 锻锤基础设计“应符合本标准规定”，表明本标准是直接针对锻锤基础设计的专用标准，在设计时应首先遵循。

2. 协调性与完整性： 设计工作“尚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的规定”。这表明：

本标准是专业技术标准体系中的一部分，不能孤立使用。

锻锤基础设计必然涉及地基基础、混凝土结构、荷载、抗震、材料、施工验收等多个通用领域，必须同时满足这些领域的共性要求，如《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《混凝土结构设计标准》GB 50010、《建筑抗震设计标准》GB 50011、《建筑结构荷载规范》GB 50009等。

本条确保了标准应用的系统性和法律合规性，避免因执行本标准而与其他强制性标准条款产生冲突。

## 2术语和符号

### 2.1 术语

**2.1.1~2.1.12**　本节所列的术语均按照现行国家标准《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和《动力机器基础设计标准》GB 50040等的有关规定，并结合压力机基础设计中的专用名词编写。

其中，2.1.3条中，锻锤落下部分质量也称“锤头质量”，本标准中统一采用符号，下落部分质量的计算范围包括：

（1）对于自由落锤（单作用锤），锤头质量仅含锤头自重；

（2）对于双作用锤（如气动锤、液压锤），应包括锤头、锤杆及驱动活塞的联动质量。

锤头质量应由设备制造商提供实测值；无实测数据时，考虑制造公差及附件重量，可按公称质量乘以1.05~1.10的系数修正。

### 2.2　符号

**2.2.1~2.2.3**　本节中采用的符号是按照现行国家标准《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、《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083和《动力机器基础设计标准》GB 50040等的有关规定，并结合压力机基础设计中所用的物理量进行编写。

## 3 基本规定

### 3.1一般要求

**3.1.1** 本条文规定了锻锤地基基础设计应满足的五项结构性能要求，涵盖静力荷载、振动荷载、地震作用及环境振动控制等方面，确保基础在设计使用年限内安全、适用、耐久。

1　静力荷载验算

锻锤基础在静力荷载（如基础自重、设备重量、回填土重等）作用下，必须保证地基承载力、变形及不均匀沉降满足《建筑地基基础设计规范》GB 50007的要求。

抗滑移安全系数≥1.3：防止基础在水平荷载作用下发生滑动。

抗浮稳定性安全系数≥1.05：防止地下水浮力导致基础上浮，尤其对坑式基础更为关键。

2　振动荷载下的动承载力验算

锻锤冲击荷载具有瞬时、高能量特性，易引起地基土动力响应。采用动力折减系数 对静承载力特征值进行折减，以反映动力荷载对地基承载力的削弱效应。的取值依据第7.2.3条，综合考虑地基土类别、振动加速度等因素。

3　振动控制标准

基础顶面的振动位移和加速度必须控制在《建筑工程容许振动标准》GB 50868规定的限值内，以确保设备正常运行、人员舒适及结构安全。

4　地震作用验算

在地震区，需按《建筑抗震设计规范》GB 50011验算地基抗震承载力，采用调整系数对静承载力进行提高，反映地震作用下土体的动力特性。

5　环境振动控制

当周边存在振动敏感目标（如精密仪器、医院、住宅等）时，除满足自身振动控制外，还需符合GB 50868中对环境振动的限制要求，必要时需采取隔振或减振措施。

**3.1.2**本条文规定了锻锤基础设计前期需收集的关键资料清单，是确保基础设计安全、经济、合理的前提和基础。编制理由和依据如下：

1 全面性与系统性要求：锻锤基础设计是一个涉及机械、结构、岩土、工艺、环境等多专业的复杂系统工程。条文所列6大类资料，包括设备参数、安装条件、质量荷载、专业接口、地质勘察、环境敏感对象等，系统性地涵盖了影响基础设计的全部关键输入条件，避免因资料遗漏导致设计缺陷或后期变更。

2 锻锤基础设计具体要求应包括以下内容：

（1） 设备参数：落下部分质量（m₀）、打击能量（E₀）是计算冲击荷载和进行动力分析的核心参数。公称质量与实测质量的区分，以及制造商提供的振动限值，是确保计算模型准确性和满足设备运行要求的关键。

（2） 安装条件：详细的安装图纸和要求是确定基础尺寸、预埋件定位、局部荷载分布的直接依据，关系到设备安装的精度和基础局部承压的安全性。

（3） 质量与荷载：机器总质量、质心位置是进行静力分析（地基承载力、沉降）和动力分析（质量矩阵）的基础。动荷载时程曲线或冲击力传递路径是进行精确动力仿真分析（如有限元分析）的理想输入数据。

（4） 专业接口：强调了基础设计并非孤立进行，必须与工艺布局、厂房结构、地下管网、周边设备及电气系统相协调，避免冲突，并提前为可能的隔振减振措施预留条件。

（5） 地勘报告：岩土工程勘察报告提供地基土静力参数（承载力、压缩模量等），而地基动力特性试验报告（如地基刚度系数、阻尼比等）是进行动力机器基础设计的必要前提，对于无法现场测试的参数，可按现行国家标准《建筑工程容许振动标准》 GB 50040等标准分析。改造项目还需了解场地振动本底值。

（6） 环境敏感对象：体现了标准对环境保护和职业健康的重视。基础设计不仅要保证自身安全，还需控制振动传播对周边建筑、精密仪器和人员的影响，满足国家标准《建筑工程容许振动标准》 GB 50868等标准的要求。这是决定是否需要采用隔振基础以及隔振效率目标的重要依据。

3 风险控制与经济性：提前获取全面准确的资料，有助于选择最经济合理的基础方案（如刚性基础或隔振基础）、避免因资料不全导致的保守设计或后期加固产生的巨大费用，并从源头控制振动对环境的影响风险。

3.1.3 本条规定了锻锤基础方案选型的基本原则。锻锤基础设计需综合考虑设备特性（如锻锤类型、落下部分质量、打击能量、工作频率等）、工程地质条件（如地基土类别、承载力、动力特性参数等）以及环境振动控制要求（如周边建筑、精密仪器的容许振动标准）。方案选型应在技术可行、经济合理的前提下，确保基础安全、稳定，并满足振动控制目标。设计时宜进行多方案比选，优先选用隔振基础方案以降低振动影响。

3.1.4 本条规定了在特殊地基条件下必须采取地基处理措施。冻土层、液化土层、湿陷性黄土、腐蚀性土层、采空区、岩溶地区等不良地质条件会显著降低地基承载力、增大沉降风险或引发地基失效，严重影响锻锤基础的安全性和稳定性。因此，必须根据具体地质情况，采用换填、桩基、注浆、压实等地基处理技术进行加固，确保地基满足静力和动力承载力要求。

3.1.5 本条规定了应采取隔振措施的情形。锻锤运行产生的强烈振动若超出人员舒适度、仪器设备正常工作或建筑结构安全的容许限值，则必须采取隔振措施。隔振系统可有效降低振动传递率，保护周边环境和设备，延长基础使用寿命。设计时应根据振动控制目标选择合适的隔振方案（直接隔振或间接隔振），并进行隔振效率验算。

3.1.6 本条规定了锻锤分类依据。对于锻锤设备可以按锻锤打击能量和落下部分质量（或锤头质量）来分类。由于现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB50868、《动力机器基础设计标准》GB50040和《建筑振动荷载标准》GB/T51228等均以锻锤下落部分质量来分析。为了与相应的现行国家标准协调一致，本标准依旧采用落下部分质量来分类。

锻锤按落下部分质量分为小型、中型、大型和特大型，主要依据国内外锻锤设备常用规格及动力基础设计经验。分类的目的是为了区分不同规模锻锤对地基基础的动力影响程度，便于设计人员根据锻锤类型采取相应的设计措施。

锤打击能越大，振动影响也越大。为了避免锻锤振动对环境的影响，周边结构安全，需要合理控制锻锤基础振动响应。因此，有必要将锻锤按打击能量来分级。自由锻的级方法分析方法宜按下表规定。

表3.1.3-1 锻锤分级

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 锻锤分级 | 锤头质量 | 打击能量 | 适用工件 | 示例应用 |
| kg | kJ |
| 轻型锻锤 | <0.1 | <10 | 小型或精细工件 | 小型零件加工、模具锻造 |
| 小型锻锤 | 0.1~1.0 | 10~200 | 中型工件 | 轴类、齿轮、机壳等 |
| 中型锻锤 | 1.0~5.0 | 100~300 | 大型工件 | 大型结构件、重型机械部件 |
| 大型锻锤 | 5.0~16.0 | 300~500 | 特大型工件 | 航空航天、重型工程制造 |
| 特大型 | >16.0 | >500 | - | - |

自由锻：依赖操作者或简单机械（如空气锤、蒸汽锤）的局部打击，打击力分散且多次成形。

典型打击力范围：小型自由锻锤（如50 kg空气锤）打击力约 几十至几百千牛（kN）；大型液压自由锻机可达 几千至数万千牛（如万吨级水压机）。

模锻：通过模具封闭型腔一次性成形，需在极短时间内填充复杂型腔，要求瞬时超高打击力。

典型打击力范围：小型模锻锤：几百至上千kN（如1吨模锻锤打击力约800~1500 kN）。大型模锻压力机：几万至数十万千牛（如5万吨模锻压机最大力达500 MN）。

在相同工件尺寸条件下，模锻工艺所需的打击力通常是自由锻的5~20倍。这一显著差异主要源于两种锻造方式的受力特性不同：自由锻加工时，锻锤直接打击高温锻件，由于热金属具有优异的塑性变形能力，金属流动时产生的变形抗力相对较小，同时高温工件会通过塑性变形吸收大量冲击能量，从而显著减小对设备的反作用力；而模锻工艺由于采用封闭式锻模，在打击瞬间，高温坯料会迅速与常温模具表面接触，产生剧烈的"冷击"效应（thermal shock），这不仅会增大金属流动的摩擦阻力，还会因模具约束导致应力集中，最终形成极高的峰值打击力。此外，模锻过程中金属材料需要完全填充型腔的强制流动特性，也是造成其打击力显著增大的重要原因。例如：锻造一个中型齿轮坯，自由锻可能需多次累计打击力1000 kN，而模锻可能需单次瞬时打击力10,000 kN。

### 3.2 地基与基础设计原则

3.2.1 设计等级划分

锻锤基础的设计等级划分综合考虑了锻锤的规模、地基条件、周边环境复杂性及施工难度等因素，旨在区分不同工程的设计深度和控制要求。

甲级：适用于特大型锻锤、复杂地质条件、深基坑、邻近重要建筑物或对环境振动控制要求极高的项目，需进行全面的静力与动力分析、变形验算及专项论证。

乙级：适用于大多数中型至大型锻锤基础，需进行常规的静力与动力验算。

丙级：适用于小型锻锤、地质条件简单、无特殊环境要求的项目，可适当简化计算，但仍需满足基本安全与使用功能要求。

设计等级的划分有助于合理分配设计资源，确保工程安全与经济性的平衡。

3.2.2 变形验算与稳定性要求

甲级和乙级基础必须进行变形验算，以确保在使用过程中不会因不均匀沉降影响设备正常运行或结构安全。

丙级基础在特定情况下（如地基承载力较低、存在堆载或填土等）也需进行变形验算，防止潜在风险。

斜坡或边坡附近的基础需进行稳定性验算，防止滑坡或倾覆；坑式基础需验算抗浮稳定性，防止地下水浮力导致基础上浮。

3.2.3 本条内容与《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《动力机器基础设计标准》GB 50040 等现行国家标准保持协调，确保设计原则的一致性和互补性。

### 3.3 基础材料

3.3.1 锻锤基础宜采用整体式混凝土结构。对于砧座下方等直接承受冲击荷载的部位，应提高混凝土强度等级，规定不应低于 C35；对于基坑侧壁等非直接受冲击部分，可按《混凝土结构设计标准》GB/T 50010 的一般要求，采用 C30 即可。

3.3.2 当锻锤基础位于地下水位较高或潮湿环境时，应采用防水混凝土。抗渗等级一般不应低于P6；对于高地下水压或腐蚀性环境等特殊情况，不宜低于P8。

3.3.3 锻锤基础中的预埋件、支承结构等钢结构材料，宜采用Q235B或Q355B等低合金高强度结构钢，以保证良好的焊接性和抗冲击性。

### 3.4 基础方案

**3.4.1**　锻锤基础的防振要求是选择基础方案的首要依据。不同类型的锻锤（如自由锻锤、模锻锤）及其工作特性（如冲击能量、频率、工作制度）对基础的振动控制要求不同，需结合工程实际情况综合确定。

**3.4.2** 锻锤基础主要分为刚性基础和隔振基础两大类。刚性基础依靠其自身质量、刚度和埋深来吸收和传递冲击能量，适用于振动控制要求不高的场合。隔振基础则通过设置隔振器（如弹簧、橡胶垫等）来隔离振动传递，适用于对振动敏感的环境。

直接隔振：隔振器设置在设备与基础之间，结构简单，适用于中小型锻锤。

间接隔振：隔振器设置在配重块与基坑之间，隔振效果更好，适用于大型锻锤或高防振要求的场合。

图3.4.2直观展示了三种基础方案的构造形式，便于设计人员理解与选用。

**3.4.3** 本条规定了不同防振要求下推荐采用的基础方案。表格3.4.3总结了三种方案的适用条件：

非隔振刚性基础：适用于防振要求低的场合，结构简单、造价低。

直接隔振基础：适用于中等防振要求，结构较简单，隔振效果明显。

间接隔振基础：适用于高防振要求，隔振效率高，但结构复杂、造价较高。

设计时应根据锻锤类型、场地条件、环境敏感度等因素综合选择，必要时可通过振动仿真或试验验证方案可行性。

### 3.5 容许振动标准

3.5.1 本条规定了锻锤基础振动控制的基本要求，适用于锻锤设备基础在冲击荷载作用下的振动响应控制。振动控制标准依据现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868，并结合锻锤设备的工艺特点和使用环境制定。

3.5.2 本条规定了振动控制原则，锻锤基础的振动控制应综合考虑以下因素：

设备正常运行所需的振动限值；操作人员舒适性与健康保护；周边建筑物、精密仪器设备的防振要求；环境保护与职业健康相关标准。

3.5.3 容许振动值的确定：

不隔振刚性基础的容许振动值（表3.5.3-1）主要依据锻锤类型（模锻/自由锻）及其对基础的冲击特性确定。模锻锤因打击能量大、频率高，其容许振动值略高于自由锻锤。

隔振基础下部基坑的容许振动值（表3.5.3-2）考虑了隔振系统对振动能量的衰减作用，其限值较不隔振基础更为严格，以确保隔振效果。

隔振基础上部的振动控制应直接引用GB 50868中关于工业设备区域的振动限值，确保设备正常运行和人员操作安全。

3.5.4 振动控制点的选取

振动控制点应设置在能真实反映设备运行状态和振动传播特征的位置，通常包括：基础顶面中心或角点；隔振器上下端；邻近敏感建筑或设备的基础或地面。

3.5.5 时间划分说明

本条中“昼间”与“夜间”的时间划分依据地方政府规定，若无明确规定，则按6时至22时为昼间、22时至次日6时为夜间执行。此划分主要用于环境振动评估中考虑不同时段的人体敏感度差异。

3.5.6 与其他标准的协调，本条规定与《建筑振动荷载标准》GB/T 51228、《动力机器基础设计标准》GB 50040等标准相协调，确保振动荷载取值、动力分析方法和振动控制目标的一致性。

## 4 地基动力特征参数

### 4.1一般规定

**4.1.1**　本条明确了地基动力特征参数的主要内容，包括地基刚度、阻尼比、参振质量等。这些参数是进行动力响应分析的基础，其准确性直接影响到锻锤基础设计的合理性与安全性。

**4.1.2** 强调优先通过原位试验确定动力参数，尤其是对于冲击型设备基础，推荐采用自由振动试验法。对于复杂地层，波速测试是获取土体动力本构参数的有效手段。

**4.1.3** 在无法进行现场试验时，允许参照《动力机器基础设计标准》GB 50040 的相关规定取值，但需注意其适用性与局限性。

4.2 地基土分类

4.2.1~4.2.2 地基土分类是确定动力参数的基础。该分类表结合地基承载力特征值和土类名称，将地基土分为四类，便于后续刚度系数、阻尼比等参数的取值。

### 4.3　地基动力特性参数

### I 天然地基

**4.3.1**　天然地基的动力特性参数主要包括地基刚度、阻尼比、地基参振质量等，是锻锤基础动力分析与设计的关键依据。对于振动控制要求较高的工程，宜优先通过现场试验确定，试验方法须严格遵循现行国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T 50269 的相关规定，确保数据的可靠性与代表性。

当确实不具备现场测试条件时，允许采用本标准的经验方法进行估算。可按第4.3.2条至第4.3.9条提供的计算公式与参数取值表，根据地基土的类别、承载力特征值、基础底面积及埋置深度等条件，经计算确定天然地基的抗压刚度、阻尼比等动力参数。需注意的是，经验方法是在特定地质与荷载条件下总结得出，其适用性存在局限。因此，对于甲级设计等级的锻锤基础、复杂地层或动力响应要求严格的工程，仍应创造条件进行现场测试，以确保设计安全与经济合理。

**4.3.2**本条规定了天然地基抗压刚度系数的取值方法。当基础底面积不小于20m²时，值可根据地基承载力特征值和土类按表4.3.2直接查取；当基础底面积小于20m²时，需引入底面积修正系数：

由此系数对查表值进行修正。该条文体现了地基刚度随基础尺寸变化的规律，小尺寸基础因边界效应和应力集中现象，其单位面积刚度通常大于大尺寸基础。修正系数的引入确保了不同尺寸基础下地基刚度取值的合理性与一致性，为后续动力计算提供准确依据。

**4.3.3** 本条规定了基础底部地基土影响深度的计算方法。对于方形基础，影响深度取基础边长的2倍；对于其他形状的基础，则按基础底面积的平方根的2倍计算。该条文旨在合理确定地基土动力参数的计算范围，确保地基刚度、阻尼比等动力特性参数取值的准确性，为锻锤基础的动力分析与设计提供可靠依据。

**4.3.4** 当基础影响深度范围内存在不同土层时，地基抗压刚度系数应符合本条规定的计算方法，采用加权平均法，按各土层厚度比例计算综合抗压刚度系数，以反映分层土对地基刚度的实际贡献。该方法基于弹性半空间理论和实际工程经验，确保计算结果的合理性与适用性。应用时需准确获取各土层的刚度系数及厚度数据，避免因土层参数不准确导致设计偏差。本条规定适用于天然地基中常见的不均匀土层情况，为锻锤基础的动力分析提供可靠的地基刚度参数依据。

**4.3.5** 天然地基抗压刚度的计算方法，即，其中为地基抗压刚度系数，为基础底面积。该公式体现了地基刚度与基础尺寸之间的线性关系，是动力机器基础设计中地基动力特性参数计算的核心内容之一。该公式适用于均质土层或经等效处理后的分层土地基；在实际工程中，值应优先通过现场试验确定，若无试验条件则可按本标准表4.3.2查取；公式未直接考虑埋深影响，需按第4.3.6条进行埋深修正。本条的制定依据了《动力机器基础设计标准》GB 50040的相关规定，确保了与现行国家标准的一致性。

**4.3.6** 埋置基础地基抗压刚度计算时，应计入埋深对地基刚度的影响，考虑地基刚度提高系数。基础埋深对地基刚度的增强作用是通过基础埋深比进行量化。当时，应按下式计算刚度提高系数：

当时，取。

此条文适用于地基承载力特征值小于350kPa且基础四周回填土与地基土密度比不小于0.85的情况，其目的是更合理地反映实际工程中埋深对地基动力刚度的有利影响。

**4.3.7** 天然地基竖向阻尼比应符合本条规定的计算方法。阻尼比计算时，需要区分黏性土与砂土、粉土两类地基土。黏性土地基的竖向阻尼比计算公式为：

砂土和粉土地基则为

其中为基组质量比。

该公式基于大量实测数据与理论分析，反映了地基土类型对振动能量耗散特性的影响，适用于初步设计阶段无现场试验数据时的阻尼比估算，确保动力计算的合理性与安全性。

**4.3.8** 埋置基础的天然地基阻尼比计算应符合本条规定的方法，明确其可取明置基础的阻尼比乘以基础埋深作用对阻尼比的提高系数，并给出了的计算公式。该条文体现了基础埋深对地基动力特性的增强效应，通过引入埋深比，量化了埋深对阻尼比的贡献，为工程设计提供了明确的修正依据。

### II 桩基

4.3.9桩基的动力参数（如抗压刚度、阻尼比等）应优先通过现场试验确定，以确保其与实际地质条件和桩基施工质量相符。若无法进行现场试验，可依据本标准第4.3.10~4.3.15条提供的经验公式进行计算。但对于钻孔灌注桩等非标准桩型，仍建议进行现场动力测试，以保证设计参数的准确性。

4.3.10 桩基抗压刚度的计算考虑了桩身与土体的相互作用。公式中引入了桩周土的当量抗剪刚度系数和桩端土的当量抗压刚度系数，以反映不同土层对桩基刚度的贡献。该公式适用于常规间距（4~5倍桩径）的摩擦桩和端承桩。

4.3.11 基于大量试验数据和工程经验总结而来,给出的值列于表4.3.11中，适用于一般土质条件。若土层特性与表中差异较大，应通过现场试验或数值分析进行修正。

4.3.12 桩基竖向和水平回转向总质量及基组总转动惯量应按本条规定计算。公式中引入竖向振动时桩和桩间土参加振动的当量质量，旨在合理反映桩-土体系在振动过程中的协同惯性效应。

桩的折算长度，依据桩的入土深度确定，体现了桩身与周边土体的动力相互作用深度。基础底面宽度和长度的引入，则考虑了基础尺寸对参振土体范围的影响。该计算方法适用于常规间距布置的摩擦桩与端承桩体系，其物理意义明确，便于工程应用。

4.3.13 桩的折算长度应根据桩的入土深度，在表4.3.13中查装的折算长度。该这算长度反映桩-土系统在动力相互作用下参振土体有效高度的关键参数。其取值依据桩的入土深度确定，是基于大量现场试验与理论分析总结出的经验值。当桩的入土深度在10m至15m之间时，可采用线性插值法确定，以保证计算的连续性与工程适用性。该规定考虑了不同桩长对地基动力响应的影响，较短的桩其周围土体参与振动的范围较小，而较长的桩则能带动更深层土体振动，因此折算长度随入土深度增加而增大。本条文的制定旨在为桩基动力分析提供简化且合理的计算依据，确保桩基刚度及振动响应计算的准确性。

4.3.14 桩基竖向阻尼比的确定需综合考虑桩-土相互作用机制及土体能量耗散特性。本条区分了三种情况：当桩基承台底为黏性土时，土体具有较高的粘滞性，能量吸收能力强，故阻尼比取值较高；承台底为砂土或粉土时，土体颗粒间摩擦作用显著但粘滞性较弱，阻尼比适当降低；若采用端承桩或承台与地基土脱空，则振动能量主要通过桩身传递至深层土体，桩周土参与振动的程度较低，阻尼比取值最小。公式中的质量比反映了基组质量与地基土参振质量的相对关系，其值越大，阻尼比越小，符合振动能量向土体扩散的物理规律。该规定适用于一般地质条件下的桩基动力设计，若遇特殊土层（如液化土、软黏土等），应结合现场试验或数值分析进行修正。

4.3.15 桩基承台埋置深度对阻尼性能具有显著提高作用，其原因在于回填土与桩基-土体系统共同工作，增强了振动能量的耗散。本条针对摩擦桩和端承桩分别给出了阻尼比提高系数的计算方法；摩擦桩的提高系数与埋深比呈线性关系，反映了回填土对桩周土约束作用的增强；端承桩的提高系数则考虑了桩端阻力和埋深共同影响的非线性特性。设计中需注意，提高系数的适用前提是回填土压实度不低于0.85，且地基承载力特征值小于350kPa，确保土体具备足够的密实度和协同变形能力。若实际工程中埋深过大（），则应取上限值0.6，避免过高估计埋深效应。

## 5 振动测试

### 5.1 测试方法

**5.1.1**明确了振动测试的必要性与最终目标，即验证锻锤基础在运行时的振动响应是否满足国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868的限值要求。这是保障设备安全运行、人员健康及环境合规的核心环节。

**5.1.2~5.1.3** 对测试系统的性能与校准提出了强制性要求。锻锤冲击振动具有幅值高、频带宽、瞬态性强的特点，因此测试系统必须具备相应的动态响应能力，并在有效校准期内使用，以确保测量结果的计量溯源性。

**5.1.4~5.1.7** 传感器的选型原则应符合本条的规定。核心依据是锻锤振动的特性：对于可能超过1000g的高幅值冲击加速度，推荐抗过载能力强、低频响应好的压阻式传感器；对于需分析高频成分或宽频带振动的场景，则优先选用频响范围更宽的压电式传感器。速度传感器则更适用于振动能量以低频为主的大型锻锤测试。所有传感器均需满足严格的线性度、横向灵敏度比和绝缘电阻等技术指标，以减小测量误差。

**5.1.8** 锻锤基础振动测点的科学布置是准确获取结构动力响应、评估隔振性能及环境影响的基础。本条对测点布置原则作出了详细规定，其核心目的在于全面捕捉振动信息、确保数据代表性与可比性。

1 规定在基础顶面与基坑顶面的角点和边中点布置不少于4个测点。这些位置是基础结构动力响应的**控制点**，能有效反映基础在冲击荷载下的整体振动形态（如刚体平移、转动）及可能存在的扭转效应，避免因测点过少而遗漏关键振型信息。

2 针对隔振基础，要求在隔振器上下接触面附近对称布置测点。此举是为了直接测量隔振器两端的动力响应，从而精确计算隔振效率（传递率）。上下同步测试可消除时间不同步带来的误差，是评价隔振系统工作性能是否达到设计目标的关键环节。

3 规定了环境振动传播测点的布置方法。以基础中心为原点、沿放射线方向布置，是为了系统研究振动波在土体中的传播衰减规律。近场区（5m, 10m）测点密集可捕捉到复杂的波场相互作用，远场区（20m-50m递增）则用于评估对敏感目标的长期影响，为环保设计提供数据支撑。

4 要求在基础顶部设置参考测点。该点作为基准点，可用于与其它测点进行对比分析，校验测试系统的稳定性，并在多工况测试中保证数据的一致性。

5 强调了与国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868的协调性。该标准对不同功能建筑、精密仪器的振动测点布置有具体规定，尤其在评估振动对周边建筑影响时，测点应布置在受影响建筑的基础或主体结构的敏感位置上，本工程的测点布置需与之衔接，确保评估结果的适用性和权威性。

总之，振动测点的设置应能体现出从振源（基础本体）到路径（土中传播）再到受体（环境）的全过程振动测试理念，构建了一个完整、立体、科学的测点网络，为锻锤基础的设计验证、性能评价和环境准入提供坚实的数据基础。

**5.1.9**本条旨在确保振动位移测量结果的计量准确性与法定有效性。位移传感器是获取基础振动幅值、评价隔振效果的关键设备，其线性度、频率响应和灵敏度等核心指标必须符合国家计量规程《振动位移传感器检定规程》（JJG 644）的严格规定。测试前，必须核查传感器及整个测量系统的校准状态，确保其量值可溯源至国家基准，并在检定证书有效期内使用。这是防止测量偏差、保证数据公正可靠、使测试结论具有法律效力的根本技术措施。

### 5.2 数据处理

为保证锻锤基础振动测试数据的准确性与可靠性，必须对采集的原始信号进行科学、规范的预处理与分析。本条明确了振动信号数据处理的基本要求与方法。

数据预处理是确保后续分析准确的基础。首先，数据标度变换需严格按照传感器灵敏度及采集系统设置，将电压信号转换为对应的物理量（如加速度、速度、位移），确保量值溯源准确。其次，消除趋势项至关重要。由于传感器零点漂移、温度变化或低频干扰等因素，信号中常包含非振动引起的缓慢变化成分（趋势项），需采用多项式拟合或高通滤波等方法予以剔除，避免其对时域和频域分析结果造成失真。此外，当信号中存在高频噪声或特定干扰时，应进行数字滤波处理。滤波器的选择（如低通、带通）及参数设置（截止频率、阶数）须根据信号特征及分析目的合理确定，并注意防止相位失真或信号畸变。

在时域分析中，应提取冲击振动的关键特征参数，包括峰值、脉冲宽度、波形特性等，并可通过计算等效作用时间、自相关函数、互相关函数及概率密度函数等，进一步揭示振动的统计特性与规律。在频域分析中，应采用傅里叶变换获取信号的频谱结构，进行冲击响应谱分析以评估系统在不同固有频率下的最大响应，并通过功率谱密度分析确定振动能量的频率分布特征，为判断振源特性、结构共振及隔振效果提供依据。

本节规定的数据处理方法旨在统一分析流程，确保测试结果真实、客观地反映锻锤基础的振动响应，为振动评估与设计验证提供可靠的数据支撑。

**5.2.1**振数据预处理是振动信号分析的基础，旨在保证数据的准确性与可靠性。标度变换确保物理量单位一致，消除趋势项可避免低频漂移干扰，数字滤波则能有效抑制高频噪声，突出有效冲击信号特征。这些步骤共同为后续的时域与频域分析提供高质量数据基础，确保振动评估结果的科学性与准确性。

5.2.2 采用时域方法分析锻锤冲击振动数据时应包含的主要内容。冲击振动具有瞬态、高幅值、宽频带的特性，其时域波形直接反映了冲击作用的本质特征，是进行动力分析和评估的基础。

时域波形分析：通过直接观察和测量振动信号的时域曲线，可以最直观地获取冲击荷载的关键参数。冲击峰值反映了荷载的最大强度，是结构强度和隔振器选型的重要依据；脉冲宽度（即打击作用时间）决定了激励能量的频率分布，是判断系统动力响应的关键参数，脉冲越窄，高频成分越丰富；脉冲类型（如后峰齿形、矩形、三角形等）决定了动力系数的取值（参见附录B），直接影响振动位移和加速度的计算结果。

计算获取特征参数：通过对时域信号进行进一步的数学处理，可以提取更深层次的信息。

等效加速度/等效作用时间：可用于将复杂的冲击波形简化为标准脉冲，便于进行理论计算和对比分析。

相关函数：可用于分析信号在不同时间点上的相似性或周期性，判断信号中是否存在重复冲击或特定模式的振动。

概率密度函数：描述了振动信号幅值在不同强度水平上出现的概率分布，有助于了解冲击振动的统计特性，判断其是否服从某种分布（如正态分布），为随机振动分析提供基础。

综上，本条规定的要求旨在从时域角度全面、准确地表征锻锤冲击振动的动力特性，为后续的频域分析、结构设计验证和振动评估提供可靠的数据支持。

5.2.3 本条规定了在频域内对锻锤基础冲击振动信号进行分析时应包含的主要内容，旨在从频率维度揭示振动能量的分布特征、系统固有特性及振动传递规律，为振动评估和控制提供依据。

1 冲击响应谱分析：冲击响应谱用于描述冲击激励对一系列不同固有频率单自由度系统的最大响应，能有效反映冲击荷载的频率成分及其对结构的潜在破坏能力。通常计算绝对加速度响应谱。分析时需合理设置频率范围（应覆盖锻锤工作可能激发的主要频段）和阻尼比（可采用测试估算或经验值）。其结果可用于评估冲击振动对精密设备、建筑结构或人体舒适性的影响，并与容许振动标准中的频域限值进行对比。

2 幅相频特性分析：通过傅里叶变换得到振动信号的幅值谱和相位谱，用以识别振动的主导频率、谐波成分、系统共振频率以及信号在各频率分量上的相位关系。对预处理后的时域信号进行快速傅里叶变换（FFT），获取频率-幅值（幅值谱）和频率-相位（相位谱）曲线。应注意频率分辨率和泄漏效应的影响。幅值谱可直观显示振动能量集中的频带，帮助判断振源特性和传播路径中的放大频段；相位谱可用于模态分析或故障诊断。

3 能量谱、功率谱分析：能量谱密度（ESD）描述冲击信号能量在频域上的分布，适用于瞬态冲击信号；功率谱密度（PSD）描述随机或稳态信号功率在频域上的分布，适用于连续运行锻锤的稳态振动成分或随机背景振动。对于明确的冲击瞬态信号，宜采用能量谱密度分析；对于包含稳态或随机成分的信号，可采用自功率谱密度分析。分析中应注意窗函数的选择和平均方式。能量谱/功率谱分析可以量化不同频率成分的能量/功率大小，用于评估振动能量的频域分布特征，识别主要振源频率，并为隔振设计提供输入。

### 5.3 振动评估

**5.3.1**　本条规定了锻锤基础振动测试结果的取值原则。锻锤的荷载性质为瞬时冲击荷载，其振动响应具有瞬态、高幅值、短持续时间的特点。结构的最大动应力、设备连接的可靠性以及对人体的冲击感受，主要由振动响应的峰值（最大值）决定。

与稳态振动或随机振动采用有效值（RMS）作为评价指标不同，冲击型振动必须采用时域内的峰值响应进行评价，方能真实、安全地反映其动力效应。因此，本标准规定，振动测试的结果应以各控制点测得的时域瞬态响应最大值作为评价依据，并与本标准第3.5节规定的容许振动峰值标准进行对比，判断是否满足要求。

5.3.2 本条规定了振动测试数据的处理与取值原则，旨在确保测试结果的可靠性、稳定性和准确性。

以控制点数据为准：锻锤基础的振动响应具有空间分布特性。控制点（通常位于基础顶面角点、边中点或隔振器关键位置）的响应最大，最能代表基础的最不利工作状态，是评估其是否满足容许振动标准的关键。因此，必须以这些控制点的测试数据作为评价依据。

有效数据次数要求（不少于3次）：锻锤打击是瞬态冲击过程，单次打击的振动响应可能受到锻件材质、温度、操作手法等偶然因素的影响，存在一定离散性。规定不少于3次的有效记录，是为了通过多次测量来抵消偶然误差，获取更具代表性的数据，避免以单次偶然结果作为评判依据。

相对误差控制与取值（±5%，取平均值）：该款规定了数据有效性的判定标准和处理方法。

±5%的相对误差限值：是衡量多次测量数据一致性和重复性的关键指标。若各次测量的最大值（或最小值）与算术平均值之间的相对误差超过此限值，说明数据离散性较大，可能表明测试系统不稳定、测点松动、锻锤工作状态异常或每次打击工况存在显著差异。此时应查明原因并重新测试，而非简单地取平均值，否则将导致评估结果失真。

取算术平均值：当数据稳定性良好（满足±5%误差要求）时，取算术平均值作为最终测试结果，这是一种消除随机误差、逼近真值的常用数据处理方法，能使测试结果更真实地反映锻锤基础在稳定工况下的振动水平。

综上，本条规定通过确定关键测点、要求最小数据量和设定数据一致性标准，共同构成了保证锻锤基础振动测试结果科学、准确、可信的有效措施。

6 荷载分类与荷载组合

6.1 一般规定

6.1.1　荷载分类与荷载组合应符合下列原则：锻锤基础在设计过程中需同时考虑静力荷载、振动荷载及地震作用等多种荷载工况。静力荷载是基础长期承受的恒载与活载，振动荷载是锻锤工作时产生的周期性或冲击性动力作用，地震作用则是偶然性的极端荷载。本条规定明确了锻锤基础设计必须进行多工况荷载组合分析，以确保结构在各类荷载作用下的安全性与适用性。

3.1.2 位于抗震设防烈度7度及以上地区的大型锻锤基础，其地震作用效应显著，应按照现行国家标准《建筑抗震设计标准》GB/T 50011进行抗震验算。本条强调了对重要锻锤基础抗震设计的强制性要求，以防止在地震作用下发生严重破坏或功能失效。

3.1.3 锻锤基础设计应满足承载力极限状态和正常使用极限状态的要求。承载力极限状态确保结构不发生破坏或失稳，正常使用极限状态则控制振动幅值、变形和裂缝等使用性能指标。荷载组合时应根据不同极限状态选用相应的分项系数和组合值系数。

6.1.4 本条明确要求荷载分项系数和组合值系数的取值应遵循《建筑结构荷载规范》GB 50009和《工程结构通用规范》GB 55001的规定。这些系数反映了荷载的变异性、组合效应及结构可靠度要求，是保证设计安全与经济合理的重要依据。

6.2 静力荷载

**6.2.1**　锻锤基础设计时应考虑的静力荷载种类。静力荷载包括永久荷载、可变荷载以及由动力效应等效而来的静力荷载。荷载取值依据《建筑结构荷载规范》GB 50009，确保荷载标准的统一性和可靠性。设计中需特别注意锻锤设备及其辅助设施的重量，这些荷载是基础设计的主要静力来源。

6.2.2 永久荷载应包括基础自重、基础上部填土重量、固定设备重量、土压力、水压力等。这些荷载在结构使用期间其值不随时间变化，或其变化与平均值相比可以忽略不计。计算时需准确评估基础及上部结构的实际重量，尤其要注意大型锻锤设备及附属结构的重量分布。

6.2.3 可变荷载应包括锻锤及其辅助设备的重量、移动工作台重量、运输工具满载重量、操作人员及工具等活荷载。这些荷载的大小、位置可能随时间变化，设计时应根据工艺布置和最大可能荷载取值，并考虑其最不利布置。

6.2.4 锻锤工作时产生的巨大冲击荷载会对厂房结构产生动力效应。本条通过引入动力系数，将动力效应转化为等效静力荷载进行设计，简化了计算过程。表中给出的动力系数取值范围是基于大量工程实践和试验数据，并考虑了锻锤吨位（落下部分质量）和基础隔振形式的影响。

表6.2.4中明确规定了系数的取值原则。表中数值取值是，要考虑落下部分质量。落锤质量越小，动力系数取小值；落锤质量越大，动力系数取大值；中间值可采用线性插值确定。这体现了对不同规模锻锤冲击效应差异性的考虑。

图6.2.4直观地标明了不同动力系数所对应的厂房结构部位，便于设计人员正确应用。

6.3 振动荷载

6.3.1　锻锤工作的本质是巨大的冲击能量在极短时间内释放，其产生的振动荷载是基础设计的控制性动力输入。本条规定了振动荷载数据获取的优先次序。最准确的数据应来源于设备制造厂家，因其掌握设备的精确动力学参数和冲击特性。若无法从厂家获取，应通过现场实测确定（详见本标准第5章）。当上述两种途径均不可行时，方可依据现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228中的经验方法进行估算。设计人员应注意，估算值可能存在偏差，在重要工程或复杂地质条件下应谨慎采用。

6.3.2 锻锤的冲击作用时间极短，但其引起的系统振动响应却与冲击力的时间历程（波形）密切相关。为便于进行理论分析和数值计算，本条建议采用五种典型的理想脉冲函数来近似模拟实际的冲击荷载。选择哪种脉冲函数，需根据锻锤的具体类型、工艺（如热锻、冷锻）以及砧座与基础的垫层特性综合判断。例如，后峰齿形脉冲和对称三角形脉冲常用于模拟能量较小或垫层较软的冲击；而矩形脉冲和正矢脉冲则更适用于模拟能量巨大、作用时间极短的刚性冲击。

6.3.3 无论采用哪种脉冲函数，都必须明确其三个核心参数：冲击类型（选择函数形态）、脉冲峰值（，力的最大值）和持续时间（）。脉冲峰值和持续时间是计算基础振动响应的关键输入变量，其取值准确性直接关系到设计结果的安全性与经济性。这些参数应优先采用第6.3.1条规定途径获取的数据。

6.3.4 本条规定了在设计前期，需向设备厂家索取的关键技术参数清单。这些资料是进行精准动力分析和基础设计的根本依据。“打击力”和“打击时间”是脉冲函数的核心参数；“振动频率范围”有助于判断是否会发生共振；“作用位置、方向和大小”决定了荷载的施加方式（集中力、力矩等）；“设备的动力特性”如设备总质量、质心、转动惯量等，是建立准确动力学模型所必需的。

6.3.5 此条是第6.3.1条的补充和延伸。当确实无法从厂家获得详细荷载资料，但厂家能提供一些基本技术参数（如公称吨位、落下部分质量、最大打击能量、行程等）时，可按《建筑振动荷载标准》GB/T 51228中提供的基于大量工程经验总结出的经验公式和方法来推算振动荷载。这是一种在缺乏直接数据情况下的实用化设计手段。

### 6.4 地震作用

**6.4.1**　本条明确了锻锤基础地震作用计算的基本输入参数来源。抗震设防烈度、设计基本地震加速度、设计地震分组等参数是确定地震影响系数曲线的基础，必须根据项目所在地的区划图文件及《建筑抗震设计标准》GB 50011的最新版本确定，以确保与国家抗震设防总体要求一致。设计时严禁直接采用历史项目数据或经验值，必须进行核实。

6.4.2 锻锤基础不仅承受巨大的冲击振动荷载，在地震区还需抵抗地震作用。本条强调抗震验算需遵循《建筑抗震设计标准》GB 50011和《混凝土结构设计标准》GB 50010的原则。地震作用通常采用振型分解反应谱法计算，该方法能较好地考虑结构动力特性与地震动特性的关系。对于特别不规则或重要的甲类锻锤基础，必要时可采用时程分析法进行补充计算。验算需包括结构强度、变形及地基抗震承载力等内容。

6.4.3 地震作用下，地基土的动承载力会有所提高。本条给出了地基抗震承载力的简化计算方法，采用地震作用效应标准组合，并通过地基抗震承载力调整系数对静力承载力特征值进行提高。系数的取值直接引用GB 50011，其依据是大量震害调查和试验研究，反映了岩土体在地震动力作用下的实际性能。需要注意的是，此条适用于进行深度和宽度修正后的地基承载力特征值。

6.4.4 饱和砂土、粉土等在地震作用下易发生液化，导致地基承载力骤降甚至失效，对锻锤基础这种对沉降和稳定性要求极高的结构危害极大。本条为强制性要求，强调在抗震设防烈度7度及以上地区必须进行液化判别。判别方法应按照GB 50011的有关规定执行。一旦判定存在液化土层，应根据地基的液化等级和锻锤基础的设计等级（见本标准第3.2.1条），采取相应的抗液化措施，如换填、加密（振冲、挤密桩等）、桩基穿越液化层或采用箱基、筏基加深基础等。

6.4.5 当采用桩基础处理液化或震陷软土地基时，桩身不仅承受竖向荷载，还可能承受因土体侧移或下沉产生的负摩阻力、水平力及弯矩。本条对桩身的配筋提出了加强要求，旨在提高桩基在复杂地震作用下的抗弯和抗剪能力，避免脆性破坏。规定的配筋范围（液化层底面下不少于1.0m）确保了塑性铰区域得到充分加强，保证桩基具有足够的延性和耗能能力。

6.5 荷载效应组合

**6.5.1**　本条规定了锻锤基础在承载能力极限状态和正常使用极限状态下静力荷载效应的组合原则。静力荷载包括基础自重、设备重量、土压力、水压力等永久荷载和可变荷载。设计时应根据《建筑结构荷载规范》GB 50009和《工程结构通用规范》GB 55001的规定，采用相应的分项系数和组合值系数。结构重要性系数的取值依据结构安全等级确定，对大型锻锤或安全等级为一级的基础应提高要求，以确保足够的安全储备。

6.5.2 锻锤基础的振动荷载效应组合需按正常使用极限状态进行验算，重点控制振动响应不超过容许限值。振动荷载的组合值应依据《建筑振动荷载标准》GB/T 51228确定。本条款强调振动控制的重要性，确保锻锤运行时不影响设备自身精度及周边环境。

6.5.3 锻锤基础产生的振动可能对周边环境（如建筑物、精密仪器、人员舒适度）造成影响。本条要求对环境振动效应进行验算，其标准值应不大于现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868规定的限值。设计时需结合振动传播评估（见附录A）进行综合分析。

6.5.4 振动荷载效应组合可采用时域或频域分析方法。时域分析直接叠加各荷载时间历程，适用于冲击荷载；频域分析则采用统计平均方法，适用于稳态或随机振动。设计人员应根据荷载特性和分析目的选择合适的分析方法。

6.5.5 本条提供了多种振动荷载组合的具体计算方法：

1 多周期或稳态随机振动：采用均方根（RMS）组合方法，基于能量叠加原理，适用于振动频率成分复杂且无显著主频的场合。

2 两个周期性振动：采用峰值直接叠加法，偏于安全地考虑最不利瞬时响应。

3 冲击荷载控制：采用时域峰值与均方根组合值加权叠加的方法，引入冲击组合系数以反映多个冲击荷载同时作用的概率折减。取值基于荷载数量和经验总结，荷载越多，组合系数越小，越符合实际统计规律。

本节内容系统规定了锻锤基础在不同类型荷载（静力、振动、环境振动）作用下的效应组合原则和方法，涵盖了承载力、正常使用和环境影响三个方面的验算要求。设计人员应结合工程实际情况，合理选择荷载组合模型和分析方法，确保基础设计安全、经济、合规。

## 7 静力设计

### 7.1 一般规定

**7.1.1**　锻锤基础承受巨大的冲击荷载，因此宜采用整体性、刚性好的钢筋混凝土结构。地坑式基础能将振动更好地限制在坑内，减少对周边环境的影响，并便于安装隔振系统，适用于对振动控制要求高或地质条件较差的情况。大块式基础结构简单、施工方便、经济性好，适用于振动控制要求不高、地质条件良好的中小型锻锤。基础形式的选择应综合考虑锻锤吨位、工艺要求、地质条件和环境限制等因素。

7.1.2 四类土（如软弱黏性土、松散粉土砂土）承载力低、压缩性高、动力性能差，直接在其上建造锻锤基础易产生过大沉降和振动，影响设备精度和安全。因此，本标准规定不宜直接将锻锤基础设置在四类土层上。若因条件限制无法避开，必须采用人工地基进行加固处理，如换填垫层、强夯、桩基础等方法，以提高地基承载力、减小变形、改善动力特性，确保基础稳定可靠。

7.1.3 在斜坡、边坡、采空区、岩溶等特殊地质区域建造锻锤基础时，除满足承载力与变形要求外，还必须进行整体稳定性验算，防止基础及其周边土体发生滑移、塌陷等灾害。本条款强调此类情况下地基稳定性计算的必要性，设计时应根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007等相关标准进行专项分析和处理。

7.1.4 本条款规定了锻锤基础设计中的经验性控制指标。

1 质量比（）：基础质量与锤头质量的比值是控制基础振动响应的关键参数。比值越大，基础振动位移越小。自由锻锤工艺允许的振动稍大，故比值取30~40；模锻锤要求更高的精度和稳定性，故比值取40~50。软弱地基上应取较大值以补偿地基刚度的不足。

2 尺寸原则：在总质量不变的条件下，增大底面积可降低基底静压力和提高地基刚度，有利于减少沉降和振动；减小埋深则可降低施工难度和成本，并避免深部不良土层的影响。设计时应寻求经济合理的平衡。

7.1.5 锻锤基础基坑通常较深，开挖时必须根据岩土工程勘察报告采取适当的支护和降水措施，确保基坑边坡稳定和施工安全。同时，应评估开挖对邻近建筑物、地下管线的影响，采取必要的监测和保护措施，防止对周围环境造成不利影响。

7.1.6 当锻锤基础与毗邻的厂房柱基等基础埋深不同时，若高差处理不当，可能因土体应力重叠或施工扰动导致不均匀沉降。对此，应将基底标高差异部分的土体回填并分层夯实，必要时可采用灰土、级配砂石等材料，以保证接触带土体的密实度和稳定性，协调两侧基础的变形。

7.1.7 锻锤基础首先是建筑物的地基基础，其静力设计（如地基承载力计算、变形控制、抗浮、抗滑移等）必须遵守《建筑地基基础设计规范》GB 50007的通用规定。本条款强调了锻锤基础设计除满足本标准特有的动力要求外，尚应全面符合国家现行基础设计通用标准的基本原则。

### 7.2 地基承载力验算

7.2.1 本条规定了锻锤基础底面地基平均静压力设计值的验算要求。公式（7.2.1）中的动力折减系数用于考虑锻锤冲击荷载对地基承载力的不利影响。该系数根据地基土类别和基础振动加速度确定，体现了动力荷载下地基土强度的折减特性。

7.2.2 基础底面静压力的计算应包括基础自重、回填土重、机器自重及传至基础上的其他荷载。这些荷载共同构成基础的静力作用，是验算地基承载力的基本依据。设计时应准确计算各荷载值，确保静压力取值的合理性。

7.2.3 本条给出了锻锤非隔振基础和隔振基础的地基承载力动力折减系数的计算方法。

对于非隔振基础，按公式（7.2.3）计算，其中地基土的动沉陷影响系数按第7.2.4条确定，反映了不同土类在动力荷载下的响应差异。

对于隔振基础，由于隔振系统有效减少了传递至地基的振动能量，故可取0.9，简化了设计流程。

7.2.4 表7.2.4中的值是根据不同地基土类别在动力荷载下的变形特性确定的。一类土至四类土的值依次增大，反映了土体刚度越低、动力敏感性越高的特性。

对于桩基础，值应按桩端持力层土类别选用，以确保桩基动力设计的准确性。

7.3 基础承载力验算

**7.3.1**　本条规定了锻锤基础钢筋混凝土结构应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010进行承载力极限状态和正常使用极限状态的验算。锻锤基础在冲击荷载作用下，除应满足强度要求外，尚需控制振动位移、加速度及裂缝宽度，确保结构在长期动力荷载作用下的耐久性和适用性。

7.3.2 基础底板在锻锤冲击荷载作用下承受较大弯矩和剪力，其内力计算应依据板壳理论或有限元方法进行。配筋应满足最小配筋率要求，并考虑动力荷载的疲劳效应。钢筋布置宜采用双层双向配筋，并在应力集中区域加强配筋。

7.3.3 坑式基础侧壁承受土压力、水压力及可能的堆载作用，内力计算应分施工阶段和使用阶段分别进行。施工阶段按受弯构件计算，使用阶段按偏心受压构件计算，并取两者包络值进行配筋设计。地面堆载不小于10kPa是考虑常见车间环境下的最小荷载要求。

7.3.4 坑式基础底板支承于侧壁，其受力模式与支承条件密切相关。根据板的长宽比确定其计算模型（双向板或单向板），并在长边方向布置构造钢筋以控制温度及收缩裂缝。

7.3.5 锻锤设备地脚螺栓连接处及安装部位存在较大的局部压力，易导致混凝土压溃或开裂。应依据《混凝土结构设计规范》GB 50010进行局部受压验算，必要时设置钢筋网片或型钢加强。

8 刚性基础动力分析

8.1 一般规定

**8.1.1** 本条明确了需要进行动力计算的锻锤设备范围。“轻型及以上”的锻锤通常指落下部分质量不小于1t的锻锤（参见本标准第3.1.6条）。这类锻锤的冲击能量较大，引起的基础振动较为显著，仅进行静力设计不足以确保其安全性、适用性和对周边环境的影响可控。动力计算的目的是验算基础在冲击荷载作用下的振动位移、加速度和频率是否满足本标准第3.5节的容许振动标准，并为结构设计提供动力荷载依据。

8.1.2 本条是锻锤基础设计的核心目标之一。基础的振动响应直接关系到：

1 设备自身正常运行：过大的振动会影响锻锤的加工精度、降低工艺质量，并可能导致设备本身或其连接部件发生疲劳破坏。

2 操作人员舒适性与安全：基础及相连操作平台的振动应在人体可接受范围内。

3 周边环境与建筑安全：振动通过地基土传播，可能影响邻近的精密设备、仪器和建筑结构的安全与正常使用。  
因此，动力分析的结果必须符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868的规定，该标准对不同保护对象提出了详细的振动限值要求。

8.1.3 本条提供了进行锻锤基础动力分析时建议采用的简化力学模型。锻锤基础的振动主要表现为竖向振动，将“基组”（基础、砧座、锤架及基础上回填土的总质量）视为一个集中质量，将地基的支承作用简化为一个弹簧（刚度为或），形成一个单自由度体系，是工程中广泛采用且经验证有效的简化分析方法。该模型概念清晰，计算简便，适用于初步设计和大多数中、小型锻锤的基础动力分析。本章第8.2节的公式即基于此模型推导而来。对于体型复杂、受力特殊或对分析精度要求极高的大型、特大型锻锤基础，可按第8.3节要求采用更精细的数值模型进行分析。

8.2 振动计算

8.2.1本条给出了锻锤刚性基础顶面竖向振动位移、加速度及基组固有圆频率的简化计算公式。该方法是基于有阻尼单自由度体系在冲击荷载作用下的理论解，并引入了经工程实践验证的调整系数（），以考虑实际基础与理想模型的差异。

1 公式物理意义：公式（8.2.1-1）本质上反映了动量守恒原理和能量法思想。锻锤打击的初始动能被地基的弹性变形所吸收并转化为振动能。公式中的项代表了基组与地基组成的系统的特征阻抗，是决定振动响应大小的关键参数。

2 调整系数：位移调整系数）和（频率调整系数）用于修正理论公式与实际工程之间的偏差。其取值综合了地基的非完全弹性、基础的非绝对刚性、动力参振质量的不确定性等因素。设计中应根据地基土类别、基础尺寸和埋深等条件，参照相关手册或试验数据合理选取，通常取值范围在0.6~1.0之间。当无可靠数据时，可暂取1.0进行初步估算。

3 适用范围：本公式适用于初步设计和中小型锻锤基础的振动估算。对于大型、特大型锻锤或地质条件复杂的基础，宜按本标准第8.3节的规定，采用数值分析法进行更精确的校核。

8.2.2 锻锤回弹系数也称为恢复系数，表示锤击系统在锻击后相对速度与锻击前相对速度的比值，此处可将其体现为锻件的弹塑性指标。e值随锻件温度的增高而减少，其值在0~1之间。

《锻压手册》中有：回弹系数e值取决于锻件的锻造温度。温度越高，e值越小，打击效率就越高，反之，锻造温度过低甚至打冷铁，对锻锤的能量利用不利。自由锻工艺的锻件一般能在较高的锻造温度下变形，故自由锻锤的e值可取为0.3，而模锻件在终锻模膛内终锻成形时，已接近终锻温度，所以，模锻锤的e值应取为0.5。

《动力机器基础设计手册》引入了冲击回弹影响系数。冲击回弹影响系数。对模锻锤：当模锻钢制品时，取；模锻有色金属制品时，取；对自由锻锤，取。将上述参数汇总与下表中。

表8.2.2 锻锤回弹系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 名称 | 模锻钢制品 | 模锻有色金属 | 自由锻 |
| 《动力机器基础设计手册》 | 0.58 | 0.11 | 0.26 |
| 《锻压手册》 | 0.50 | -- | 0.30 |

对与模锻，需要考虑合模时的作用，结合上表给出的数值，从安全角度出发，选取回弹系数：对于模锻，；对于自由锻，。

8.2.3 准确确定锤头打击瞬时的最大速度是计算振动响应的前提。本条提供了三种情况下的计算方法。

单作用自由下落锤（公式8.2.3-1）：其动力仅来源于落下部分的势能。公式中的0.9是考虑空气阻力、摩擦损失等因素的效率系数。

双作用锤（公式8.2.3-2）：其下落过程除重力外，还受到气缸压力的加速作用。公式反映了蒸汽或压缩空气动力与重力共同作用下的能量平衡关系。0.65是综合了气体膨胀做功效率、摩擦损失等的经验系数。

已知打击能量E₀（公式8.2.3-3）：这是最直接和推荐的方法。公式由动能公式推导而来，其中的2.2是考虑实际打击效率（并非全部动能都转化为使锻件变形的有效功，有一部分能量消耗于基础振动、设备变形等）而对理论公式的修正系数。设计中应优先采用设备制造商提供的额定最大打击能量进行计算。

### 8.3 数值分析

8.3.1 锻锤基础动力响应复杂，尤其是对于大型、特大型锻锤或地质条件复杂的情况，简化计算方法可能无法准确反映基础-地基系统的真实受力状态。本条规定推荐采用有限元法等数值分析方法，旨在更精确地模拟冲击荷载作用下基础与地基土的相互作用、材料非线性行为以及波动在土体中的传播，为设计提供更可靠依据。数值分析是对第8.2节简化计算方法的重要补充和验证。

8.3.2 本条明确了数值分析应解决的四大类工程问题：

验证简化结果：通过与8.2节经验公式结果对比，校核数值模型的正确性，若差异显著（如超过15%），需排查模型参数、边界条件或本构关系的合理性。

优化设计：通过参数化分析，寻找基础尺寸、配筋、埋深等的最优解，在安全与经济之间取得平衡。

评估复杂工况：针对软弱土层、液化土、分层不均地基等特殊条件，数值方法能有效评估其对抗震、抗冲击性能的不利影响。

预测振动响应：精确计算基础及周边场地的振动水平，是评估是否满足环境振动标准（如GB 50868）的关键手段。

8.3.3 锻锤冲击荷载具有瞬时、高幅值、短历时的特点，属于典型的瞬态动力学问题。分析软件必须具备高效的瞬态动力学求解器。显式积分算法（适用于求解高速冲击、大变形问题；隐式积分算法则适用于振动衰减过程的模拟。软件选择需根据具体问题特点和设计人员熟悉程度确定。

8.3.4 本条对数值模型的建立提出了具体技术要求：

1 基础模型：应采用实体单元精确模拟基础几何形状，设备质量以质量点或分布质量形式施加在相应位置，确保质量、质心、转动惯量与实际一致。

2 地基模型：推荐采用“质量-弹簧-阻尼器”等效边界（如GB 50040附录方法）或更精确的有限元-边界元耦合模型。对于远场振动传播分析，应采用无限元或粘弹性边界以模拟地基辐射阻尼，避免波反射失真。

3 材料本构：混凝土应采用考虑开裂、压碎的非线性模型（如混凝土塑性损伤模型）；地基土可采用等效线性或非线性模型（如Drucker-Prager模型），其动力参数（动剪切模量、阻尼比）应与应变水平相适应。

4 荷载输入：锻锤打击力应按第6.3节规定，选取合适的脉冲函数（如矩形脉冲、正矢脉冲）并以力-时程曲线形式精确施加于砧座底部对应位置。

8.3.5 推荐采用以下标准化分析流程以确保结果可靠性：

静力分析：用于计算初始地应力场和自重引起的变形，为后续动力分析提供初始状态，对于考虑土体非线性的分析尤为必要。

模态分析：用于获取基组的固有频率和振型，可与8.2.1条公式计算结果相互验证，是判断模型动力特性是否合理的重要步骤。

瞬态动力分析：是核心计算环节。时间步长必须足够小以满足精度和稳定性要求，通常需满足（为脉冲主周期）或（这里为系统最小周期）。总分析时长应持续至振动响应充分衰减。

结果输出：应提取关键控制点（如基础顶面角点、砧座底部、邻近敏感点）的位移、加速度、速度时程曲线以及基础内部的应力云图，作为设计和验算的依据。

**8.3.6** 数值分析结果必须接受严格校验和评价：

1 与简化法对比：若与8.2节简化公式结果差异超过15%，应优先怀疑数值模型在参数取值、边界条件或荷载简化方面的误差，并进行复核。

2 振动合规性：计算得到的振动位移与加速度峰值必须满足本标准第3.5节的容许振动标准。否则，需调整基础设计方案（如增大质量、尺寸）或采用隔振措施。

3 强度安全性：混凝土最大主应力应满足《混凝土结构设计标准》GB 50010的承载力要求。对应力集中区域（如砧座凹坑角部、地脚螺栓附近）应在配筋时予以加强。

8.3.7 本条指出了三种需特别关注的复杂工况及其模拟方法：

1 复杂地层：分层土应逐层定义动力参数。软弱夹层对振动有隔离和放大效应，应单独建模并考虑其非线性。

2 多锤联动：对于连续打击，应采用多个荷载步模拟，其动力响应叠加效应应按第6.5.5条（荷载效应组合）的规定进行组合，以评估最不利状态。

3 地震耦合：对于高烈度区的大型锻锤基础，需按《建筑抗震设计标准》GB 50011 要求，进行多遇地震作用下的时程分析，考虑冲击荷载与地震作用的可能组合。

8.3.8 数值分析计算书是设计文件的重要组成部分，应全面、清晰地记录分析过程与结论，供审查、校核和存档之用。其内容应具备可重现性，包括模型信息、参数取值、荷载条件、详细结果以及明确的是否满足规范要求的结论和优化建议。

9 隔振基础设计

9.1 一般规定

9.1.1 本条明确了锻锤基础采用隔振技术设计方法的适用范围与隔振方案选择。锻锤基础隔振方案应根据锻锤的工艺类型和振动控制要求，来决定选取直接隔振或间接隔振。这两种隔振方案是锻锤隔振的两种基本形式。

自由锻锤的工艺特点是打击能量大、工作频率较低且冲击作用显著，其振动能量主要通过基础向四周传播。间接隔振（即在基础配重块与基坑之间设置隔振器）能更有效地隔离振动向地基的传递，显著降低对周边环境和厂房结构的影响，因此作为推荐方案。

模锻锤的工艺相对连续，打击频率较高，但其振动控制目标通常更侧重于保证设备自身的精度和稳定性。直接隔振（即在锻锤设备与基础之间设置隔振器）结构相对简单，能有效控制传至设备的振动，在满足环境振动要求的前提下可优先采用。

隔振设计必须在满足锻锤工艺要求（如打击效率、设备稳定性）的前提下进行，并最终确保振动指标符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868的规定。

9.1.2 本条规定了锻锤隔振基础设计应应遵循的总体原则：确保隔振系统安全、有效、耐久的基本要求。

1 隔振效率与功能保障：隔振系统的首要目标是降低振动传递率，但必须以保证锻锤的正常工艺功能为前提，不能因隔振元件的变形或阻尼过大而显著影响打击能量的有效传递和设备回程。

2 隔振器选型：隔振器的性能参数（刚度、阻尼、疲劳寿命）需根据锻锤的冲击荷载特性、工作频率和环境条件（如温度、湿度、油污）进行综合比选，确保其长期工作的可靠性和稳定性。

3 结构设计要求：隔振基础除满足隔振要求外，其自身结构（如配重块、基坑）必须具有足够的强度、刚度和稳定性，以承受静荷载和巨大的冲击动力荷载，并保证长期的耐久性。

4 避开共振要求：隔振系统的固有频率应远离锻锤的主要工作频率（通常为1-3Hz的砧座振动频率和更高的设备频率），避免发生共振放大效应。当系统具有足够的阻尼（ζ> 0.15）时，可有效抑制共振峰，放宽对频率避让的严格要求。

5 安全限位设置：为防止在极端冲击或意外荷载（如偏击）下隔振器发生过大的位移或变形，必须设置可靠的限位装置，保护隔振器并维持系统的整体稳定性。

6 地基承载力折减：由于隔振系统有效地隔离了冲击荷载向地基的直接传递，地基承受的动力作用显著减小。因此，在进行地基承载力验算时，可考虑对动力折减系数进行优化，或参照本条说明，取较高的折减系数（如0.9），更充分地利用地基承载力，体现隔振带来的经济效益。

### 9.2 技术方案

9.2.1 本条规定了锻锤隔振基础的两种基本形式：直接隔振和间接隔振。直接隔振是将隔振器直接设置在设备底座与基础之间，结构简单，适用于中小型锻锤及振动控制要求不高的场合；间接隔振则是将隔振器设置在配重块与基坑之间，通过增加配重块质量来进一步提高隔振效果，适用于大型锻锤或对振动敏感的环境。设计时应根据锻锤类型、工艺要求及环境振动限值综合选用。

9.2.2 隔振方案的选择应综合考虑锻锤的规格、使用频率、场地条件及环境保护要求。中小型锻锤在无特殊防振要求时可选用直接隔振方案，结构简单、经济性好；对于锤头质量大于5t的大型锻锤或周边存在振动敏感设备、建筑时，应采用间接隔振方案，以确保振动传递率控制在允许范围内。

9.2.3 隔振系统应由弹性元件、阻尼元件和辅助结构三部分组成。弹性元件（如钢弹簧、橡胶隔振器等）提供必要的柔度，降低系统固有频率；阻尼元件（如黏滞阻尼器）抑制共振响应和冲击位移；辅助结构（如限位装置、防松螺栓等）则保障系统在异常荷载下的安全性和稳定性。各元件应协调设计，确保系统整体性能满足隔振要求。

9.2.4隔振基础设计是一个系统过程，隔振基础设计流程应包括以下内容：需明确隔振目标、选择合适隔振元件、进行动力参数计算，并最终验算隔振效果和结构安全性。设计时应与工艺、结构、地质等专业密切配合，确保隔振系统既满足锻锤工艺要求，又符合环境振动控制标准。

### 9.3 经验公式

9.3.1 锻锤隔振基础振动分析的基本力学模型。将复杂的隔振系统简化为单自由度模型是基于工程实践的常用方法，其计算结果能满足大部分工程设计的精度要求。

本小节采用的分析模型和计算公式是按照国家标准《工程隔振设计标准》GB50463-2019中，第4.3节第I锻锤部分的规定采用。具体规定如下：

1 在计算砧座振动时，由于隔振器的存在，下部基础传递上来的振动已被大幅衰减，因此可将基础视为相对不动的支承点，采用有阻尼单自由度模型（图9.3.1-1）计算砧座的振动响应是合理且偏于安全的。

2 在计算基础（或基坑）振动时，其振动能量主要来源于隔振器传递下来的力。该力相对于锻锤原始打击力已大大减小，且频率成分以隔振系统的固有频率为主。此时，将地基视为刚性基础，采用无阻尼单自由度模型（图9.3.1-2）计算基础的振动，重点评估其绝对位移响应，方法简便且概念清晰。

9.3.2 本条对分析模型的假定进行了明确。将隔振器上部的基础块（或配重块）假定为刚性体，是基于其尺寸和质量远大于隔振器自身，其弹性变形对系统整体振动模态影响很小的考虑。此假定简化了计算，是一种工程近似方法。分析地基振动时，将隔振器底部对下部结构的反力作为“等效扰力”进行处理，是将上下部系统解耦分析的关键步骤，便于工程应用。

9.3.3 公式（9.3.3-1）至（9.3.3-3）是计算隔振器上部砧座振动位移的关键经验公式。

公式（9.3.3-1）物理意义明确：分子代表了锻锤冲击产生的总动量（考虑回弹系数）；分母代表了系统总质量与固有圆频率的乘积，反映了系统的惯性。指数衰减项则体现了阻尼对峰值响应的抑制作用。

回弹系数的取值直接影响了计算结果。根据第8.2.2条的编制说明，模锻取0.5，自由锻取0.25，锻打有色金属时能量吸收完全，取0，是基于大量工程实践和文献数据确定的经验值。

该公式适用于估算隔振系统在一次冲击下的最大瞬态响应，是评估锻锤自身工作稳定性和隔振器上部结构安全的重要依据。

### 9.4 振动理论分析

9.4.1 本节提供的理论分析方法是隔振基础设计的核心计算手段，其目的是在设计和优化阶段，通过简化模型预测系统的动力响应，确保隔振方案在理论上满足第9.4.1条规定的三项基本要求，为后续的详细数值仿真和实验验证提供依据和方向。锻锤隔振基础设计必须满足的三项核心性能指标。

1 振动控制：是隔振设计的首要目标，需同时保证隔振器上部（设备）和下部的振动均在容许限值内。

2 振动衰减要求：规定砧座在下一次打击前应停止振动，是为了避免多次打击产生的振动叠加，确保锻锤的打击精度和工艺稳定性。若振动未衰减完全，将影响工件的成型质量。

3 隔振器工作状态：要求隔振器上部质量不与隔振器分离，是保证隔振系统正常工作、避免出现冲击碰撞的基本条件。一旦发生分离，将产生极大的冲击荷载，可能损坏设备和隔振器。

9.4.2 将复杂的锻锤-隔振器-基础-地基系统简化为图9.4.2所示的两自由度模型，是进行理论分析的基础。

配重质量：代表隔振器上部的设备、砧座及配重块的总质量，是承受锻锤冲击的直接质量。

基坑质量：代表隔振器下部的基坑及其内部填土的总质量，是振动向地基传播的源质量。

弹簧与阻尼：代表隔振器系统的总刚度和阻尼。

弹簧与阻尼：代表基坑下地基土的等效刚度和阻尼。

该模型能清晰地反映冲击能量在“设备-隔振器-基础-地基”路径中的传递与衰减过程，适用于初步设计和方案对比。

9.4.3 该方程组是基于达朗贝尔原理建立的两自由度系统受迫振动方程。

第一个方程描述了质量（上部设备）在锻锤打击力和来自隔振器（）及地基（）的反力共同作用下的运动。

第二个方程描述了质量（下部基坑）在受到来自上部质量通过隔振器传递的力作用下的运动。该方程是进行隔振系统动力响应解析计算或数值求解的基础。

9.4.4 根据上述运动微分方程，锻锤隔振基础动力分析宜采用下列两种方法求解：

1 振型分解法：适用于线性系统。通过求解系统的无阻尼固有频率和振型，将耦合的方程组解耦为两个独立的单自由度方程，分别求解后再叠加，从而得到系统的总响应。该方法概念清晰，计算效率较高。

2 线性加速度积分法（如Newmark-β法）：是一种直接积分法，特别适用于求解瞬态冲击响应。该方法逐步积分计算系统的位移、速度和加速度时程，对非线性和时变系统也有较好的适应性，是数值仿真中常用的方法。

### 9.5 数值仿真

9.5.1 在锻锤隔振基础设计中，采用数值仿真方法应符合下列原则、内容和要求。对于大型、复杂或对振动控制要求极高的锻锤基础，仅依靠经验公式或简化理论分析可能难以准确预测其动力响应和隔振效果。数值仿真作为一种重要的辅助设计手段，可以更精确地模拟锻锤-隔振器-基础-地基整个系统的耦合动力行为，为优化设计提供依据。

数值仿真模型的基本构成。建立“锻锤-隔振器-基础-地基”系统的整体耦合模型是准确分析振动传递和衰减的关键。隔振器宜采用能同时定义刚度与阻尼的弹簧-阻尼单元模拟。地基模型的合理性对计算结果影响显著，采用等效粘弹性边界或无限元可以有效地模拟振动波在土体中的辐射阻尼效应，避免波在人工边界处的虚假反射，从而提高远场振动预测的准确性。

9.5.2 本款规定了数值仿真应包含的基本分析类型。

1 模态分析用于确定隔振系统的固有频率和振型，是避免系统与锻锤冲击主频发生共振的前提，确保隔振系统工作在合理的频率范围。

2 瞬态动力分析是核心内容，用于直接模拟锻锤打击这一冲击荷载作用下的时间历程响应。它可以精确计算出基础和各楼层的最大振动位移、加速度以及隔振器的动应力，是评价隔振效果和结构安全性的直接依据。

3 谐响应分析用于分析系统在不同频率简谐荷载作用下的稳态响应，有助于理解振动传递率随频率的变化规律，综合评价隔振系统在频域内的性能。

9.5.3 本款指出了数值仿真的最终目的不仅是分析，更是为了优化设计。通过改变模型中隔振器的布置、刚度（K）、阻尼（C）等参数，可以反复计算并对比不同方案的振动控制效果和结构受力状态。从而在满足振动限值的前提下，寻求经济、合理、安全的最优设计方案，实现性能与成本的平衡。

9.5.4 本款强调了数值仿真结果必须通过实践进行验证。对于大型重要工程，仿真中采用的模型、参数和本构关系必须通过现场原型测试或模型试验数据进行校核与修正。将仿真结果与理论计算及测试结果对比，并将误差控制在可接受的范围内，是确保数值仿真结果可靠性、从而正确指导工程设计的必要环节。未经验证的仿真结果不宜直接作为最终设计依据。

### 9.6 隔振器与阻尼器选用

9.6.1 锻锤隔振基础中核心元件，隔振器与阻尼器应符合如下选用原则、技术要求和性能指标。隔振系统的有效性、可靠性和耐久性直接取决于这些元件的正确选择和设计。

隔振器选用的总体原则。锻锤冲击荷载具有峰值高、历时短、频带宽的特点，因此隔振器必须具备高承载能力、抗冲击疲劳性能及良好的动态稳定性。选择时需进行综合技术经济比较，并非单一追求高性能指标，而应选择最匹配锻锤工作特性和环境要求的产品。

9.6.2隔振器设计需满足下列四项基本功能要求。

1 降低振动传递率是隔振的核心目标，需通过合理的刚度和阻尼匹配来实现。

2 足够的承载能力和稳定性是保证设备安全运行和隔振器自身不被压溃或失稳的前提。

3 锻锤每天成千上万次的冲击对隔振器构成严峻的疲劳考验，其材料和结构必须具有优异的抗冲击和抗疲劳性能。

4 便于安装、维护和更换是工程实用性的体现，设计时应预留必要的操作空间和更换条件。

9.6.3 隔振器的布置直接影响基组的振动模态和设备运行平稳性。刚度不均会导致基础倾斜，引起设备安装精度超差，甚至诱发扭转振动等复杂模态，严重影响隔振效果和设备寿命。因此，应保证各隔振器刚度、标高一致，布置对称均匀。

9.6.4 钢弹簧是锻锤隔振中最常用的隔振元件之一，因其承载力高、刚度稳定、耐久性好。本条对其材料、力学性能、防腐处理和几何尺寸提出了具体要求。

强调采用优质合金钢并符合《弹簧钢》GB/T 1222，是为了确保弹簧在冲击荷载下具有足够的强度和韧性。要求表面防腐处理，是为了适应工业厂房可能存在的潮湿、油污等腐蚀环境。尺寸和形状需根据荷载和空间限制专门设计，避免使用未经计算的通用件。

9.6.5 本条对隔振器的关键动态性能参数做出了定量规定。

1 锻锤冲击荷载具有多维特性，因此隔振器应具备三向（竖向、水平向）的隔振能力和约束性能。

2 额定承载力留有1.25倍的安全裕度，是为了应对不可预见的过载情况，并满足疲劳寿命要求。

3 对刚度的稳定性提出了包括静刚度偏差<15%，动静刚度偏差<10%等的要求，是因为刚度是计算隔振系统固有频率和隔振效果的关键参数，其稳定性直接决定了理论设计与实际效果的一致性。

9.6.6 阻尼器主要用于消耗冲击能量，抑制共振振幅。本条对阻尼材料的选用和性能提出了要求。

推荐橡胶、聚氨酯等高分子材料，是因为其具有高损耗因子，能有效耗能。

要求耐油、耐老化，是为了保证其在工业环境下的长期性能稳定性。

阻尼比ζ范围0.08~0.30是一个经验范围。阻尼过小则冲击后振动衰减慢，可能影响锻锤作业节奏；阻尼过大则会降低高频区域的隔振效果，且传递到基础的动荷载会增加。具体取值需根据隔振目标和锻锤类型权衡确定。

阻尼系数通常与频率相关，规定以10Hz下的值为参考值是为了统一测试和比较标准。

要求温度稳定性，是为避免环境温度变化导致阻尼性能剧烈变化，影响系统稳定性。

第7款说明阻尼器通常不单独使用，而是与钢弹簧组合形成“弹簧-阻尼”系统，兼顾隔振（弹簧）和耗能（阻尼）功能。

9.6.7 本条对集成了弹簧与阻尼的复合隔振器的综合性能提出了具体的量化指标。这些指标是检验产品是否合格、能否满足工程应用的重要依据，包括静态压缩量、耐久性、振动传递率、阻尼比、工作温度范围和耐腐蚀性等。

9.6.8 隔振器如果安装不当也无法达到预期效果。要求安装前的检查、连接的牢固性以及安装后的测试验证，确保隔振器安装位置正确、受力均匀、无初始缺陷。

9.6.9 隔振系统并非永久性部件，需要定期维护以确保其长期性能。本条规定了日常检查的内容和发现异常后的处理措施，建立预防性维护制度，避免因隔振器失效而导致设备损坏或振动超标。

## 10、基础构造措施

### 10.1 一般规定

10.1.1 锻锤基础在冲击荷载作用下承受极大的动力响应，其构造设计需综合考虑强度、刚度、耐久性、抗疲劳性和抗冲击韧性。本条明确了基础设计的五项基本性能要求，确保基础在长期冲击作用下仍能保持结构完整性和使用功能。

1 强度要求：指基础在锻锤最大冲击荷载的瞬时作用下，混凝土和钢筋应力不应超过材料强度极限，防止结构性破坏。

2 刚度要求：控制基础的整体和局部变形，过大的振动幅值会影响锻锤的打击精度和工艺质量，并可能通过地基传播，影响邻近设备和建筑的安全。

3 耐久性要求：锻锤基础常位于车间地下，可能处于潮湿或地下水环境中，因此需具备抗渗、抗冻、抗腐蚀等性能，确保其在设计使用年限内的可靠性。

4 抗疲劳性要求：锻锤工作时的荷载是每分钟数次至数十次的重复冲击荷载，基础结构（特别是砧座下方和应力集中区域）必须具备良好的抗疲劳性能，防止裂缝的萌生和扩展。

5 抗冲击韧性要求：在冲击荷载下，材料应能吸收较多能量并发生一定塑性变形而非突然断裂，因此对混凝土的骨料、强度等级以及钢筋的延性提出了更高要求。

10.1.2 特殊地质条件（如软弱土、液化土、湿陷性黄土等）会显著影响基础的稳定性和振动特性。本条强调在地基持力层不良时应进行专项处理，必要时采用桩基，并按抗拔桩设计，以增强基础的抗振能力和整体稳定性。

锻锤基础的振动性能与地基土的特性密切相关，锻锤基础的地基处理应符合如下规定：当天然地基软弱、存在液化土或湿陷性黄土时，必须进行人工处理（如换填、强夯、注浆等）或采用桩基，将荷载传递到更深、更稳定的土层。桩基应按抗拔桩设计，是因为在冲击荷载引起的振动过程中，基础对桩基会产生反复的上拔作用。

10.1.3 锻锤基础的构造设计应兼顾设备安装、维护检修和工艺操作的便利性。预埋件、地脚螺栓孔的设置应准确，避免后期调整困难；检修通道和观测孔的预留有助于长期运维。

10.1.4 基础形式的选择应结合锻锤规格、地质条件及环境振动要求。大块式基础适用于振动控制要求不高的场合；地坑式基础适用于大型锻锤或软弱地基。砧座凹坑区域的施工质量对基础性能影响显著，应严格控制混凝土浇筑质量和钢筋布置。基础形式的选择和关键部位的施工应符合下列规定。

大块式基础：依靠其巨大质量和刚度来抵抗振动，适用于振动控制要求不高的场合。

地坑式基础：整体性强，对限制振动传播更为有效，尤其适用于大型锻锤或环境敏感区域。

砧座下施工要求：砧座是直接承受冲击的关键部位，其下的混凝土必须连续浇筑、充分振捣、严格找平，以确保冲击力能均匀扩散至基础整体。规定1.5m范围内不得设施工缝，是为了避免该高应力区形成薄弱环节。

10.1.5 隔振基础的设计应综合考虑隔振元件的选型、系统频率匹配、隔振效率及可维护性。隔振系统的固有频率应避开锻锤工作频率，避免共振；阻尼比的合理取值可有效抑制冲击响应。

本条为隔振基础的设计提供了基本原则。隔振系统的设计核心是频率匹配（避开共振区）和位移控制。较高的阻尼（>0.15）可以有效抑制冲击引起的瞬态共振响应。同时，必须设置机械限位装置，防止在极端冲击或意外情况下隔振器发生过大的变形或失效，确保系统安全。

### 10.2 基础材料

10.2.1 锻锤基础混凝土的选用宜符合下列要求：

1 锻锤基础宜采用整体式混凝土结构，以提高整体刚度和抗冲击性能。

2 直接承受冲击荷载的部位，如砧座下方，应采用强度等级不低于C35的混凝土，以确保足够的抗压和抗拉强度。

3 非直接受冲击部位，如基坑侧壁等，主要承受土压力和侧向约束作用，其强度要求可适当降低，采用C30混凝土可满足要求并兼顾经济性。垫层混凝土强度等级不低于C15是出于施工找平和基础保护的基本需求。且应符合《混凝土结构设计标准》GB/T 50010的一般要求。

4 当地下水位较高或处于潮湿环境时，应采用防水混凝土，抗渗等级一般不低于P6，特殊情况下不低于P8，以满足耐久性要求。当地下水具有腐蚀性时，应依据现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046等相关规范，选用耐腐蚀的水泥品种并控制水胶比，或采取其他防腐措施。

5 混凝土骨料应选用坚硬、级配良好的粗骨料，以提高抗冲击能力和抗疲劳性能。

10.2.2 锻锤基础在冲击荷载作用下，内部会产生复杂的动应力，对钢筋的强度、延性和疲劳性能要求较高。HRB400、HRB500级热轧带肋钢筋具有强度高、延性好、性能稳定的优点，是受力钢筋的首选。规定钢筋连接不宜采用焊接接头，是因为焊接热影响区可能形成材质脆化点，在长期冲击振动荷载下易成为疲劳裂纹源，采用机械连接（如直螺纹套筒连接）可有效避免此问题，保证钢筋连接段的整体性能和抗震、抗疲劳能力。构造钢筋的性能要求可适当放宽，采用细晶粒热轧钢筋（HRBF）即可满足。

10.2.3 锻锤设备的地脚螺栓、预埋件、支承结构等钢结构部件，不仅需要承受静力荷载，更需承受设备运行时的动力和冲击荷载。Q235B和Q355B钢属于低合金高强度结构钢，具有良好的综合力学性能、可焊性和冲击韧性，能够满足上述受力要求。其质量等级应符合《碳素结构钢》GB/T 700和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591的规定。

10.2.4 设备底座与混凝土基础之间的二次灌浆层起着传递设备荷载、固定地脚螺栓的关键作用。采用C40及以上强度的微膨胀细石混凝土或专用高强灌浆料，可以确保灌浆层具有高强、早强、无收缩的特性，从而与基础混凝土和底座底面紧密接触，保证荷载的有效传递，防止底座松动。专用灌浆料的流动度、竖向膨胀率等指标应符合《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448的规定。

10.2.5 砧座垫层是介于锻锤砧座与混凝土基础之间的弹性缓冲层，其作用是吸收和分散锤头的冲击能量，减小传递到基础混凝土上的冲击应力峰值，保护基础不被击碎。

1 木垫：传统且常用的垫层材料。要求使用经干燥防腐处理的一等材，是为了保证其强度均匀、耐久性好，防止因腐朽或虫蛀而失效。对树种和强度等级的规定是保证木垫具有足够的抗压、抗冲击能力。控制含水率是为了防止使用过程中过度干缩导致垫层松动、变形或承载力下降。

2 橡胶垫：适用于中小型锻锤。规定含胶量和肖氏硬度是为了确保橡胶垫具有合适的弹性模量和阻尼特性，既能有效缓冲，又不会因过软而导致砧座位移过大。推荐氯丁胶、天然胶等是因为其综合力学性能和耐久性较好。对于长时间连续工作的热锻工况，耐热型橡胶能防止老化过快，延长使用寿命。相关产品应符合其行业和国家标准以保证质量。

### 10.3 构造尺寸

10.3.1 规定锻锤基础与厂房基础之间的最小净距（≥500mm），是为了避免振动相互传递影响厂房结构安全。同时，也是为了防止多台锻锤同时工作时，振动通过地基相互传递产生叠加效应，从而放大振动响应，影响设备正常运行和基础安全。对于大型锻锤（10t及以上），其振动能量大，影响范围广，因此要求更大的间距或采用隔振基础以切断振动传播路径。进一步要求基础中心间距不小于30m或采用隔振基础，以控制振动叠加效应。

10.3.2 锻锤基础在冲击荷载作用下主要产生竖向振动。若锤击中心、基础底面形心与基组重心三心不重合，将产生附加的力矩，引发基础的不利回转振动，导致基础边缘的振动位移显著增大。由公式：

可以定量地描述了偏心距对边缘振动位移的放大效应，要求偏心距控制在基础边长的5%以内，是为了将这种不利影响限制在工程可接受的范围内。

10.3.3 锻锤设备下垫层是指设备坑下铺设的木垫或橡胶垫，是锻锤设备与混凝土基础之间的关键缓冲层。其首要功能是吸收和分散巨大的冲击能量，避免混凝土因冲击应力过大而破坏。垫层厚度需根据锤头冲击能量（体现为）和垫层材料的承压强度*f*c与弹性模量*E*经计算确定，同时其最小厚度必须满足表10.3.3的规定，以确保有足够的变形空间来耗能，并为长期使用后可能发生的压缩预留余量。

10.3.4 垫层铺设方式应符合下列规定：

1 横放木垫：要求上下层交叉成十字形并用螺栓拧紧，是为了将冲击荷载有效地扩散到更大面积，防止垫层局部失稳或发生水平滑移，确保其整体工作性能。

2 竖放木垫：先铺一层横垫木可提供一个平整的基面，使立砌的方木受力均匀，提高垫层的整体稳定性。

3 橡胶垫：要求满铺且各层通缝迭放，是为了保证垫层刚度均匀，避免因布置不当导致砧座受力不均而发生倾斜。

10.3.5 砧座下基础最小厚度应符合下列要求：

砧座垫层下方的混凝土基础部分直接承受由垫层传递来的扩散后的冲击应力。该部分必须有足够的厚度，以确保冲击应力在传递到基础下部及地基之前已充分衰减至混凝土的抗压强度以下。表中规定的不同吨位锻锤对应的最小厚度，是防止基础混凝土发生冲切或压碎破坏的基本构造要求。

砧座垫层下基础最小厚度的规定是为了保证基础具有足够的刚度和强度，避免冲击荷载导致基础开裂或破坏。厚度随锻锤吨位增加而增大，体现分级控制原则。

10.3.6 配筋规定旨在提高基础的抗冲击和抗疲劳性能。上部水平钢筋网用于抵抗冲击拉应力，竖向钢筋网用于约束砧座凹坑周边混凝土，底面钢筋网增强整体抗弯能力。钢筋直径、间距和层数根据锻锤吨位分级设置，体现差异化设计。锻锤基础配筋设计遵循“抗御冲击，控制裂缝”的原则。

1 上部水平钢筋网：位于砧座凹坑底部，直接承受冲击引起的弯曲拉应力。多层布置且上密下疏，是为了重点加强高应力区。钢筋伸过内壁长度要求（≥50d）是为了保证钢筋的有效锚固，防止从混凝土中被拔出。

2 凹坑四周竖向钢筋网：用于抵抗侧向土压力及冲击引起的水平力，并约束混凝土，控制裂缝发展。

3 基础底面水平钢筋网：抵抗基础整体弯曲产生的拉应力。

4 侧面钢筋网：防止表面收缩裂缝和温度裂缝，并增强基础的整体性。

5 竖向水平钢筋网（≥5t锻锤）：在大吨位锻锤基础中，砧座下区域处于复杂的三向应力状态，配置此类钢筋旨在增强该区域的抗剪和抗冲击能力。

6 加强筋：在应力集中的转角、孔洞等部位增设斜向钢筋，是防止裂缝萌生和扩展的重要构造措施。

10.3.7 砧座与凹坑内壁之间的间隙用于安装调整和适应热胀冷缩。采用沥青麻丝填实并表层灌沥青。砧座周边间隙填充沥青麻丝并浇灌沥青，既可允许微小位移，又能防止水分、杂物进入，延长垫层使用寿命。

10.3.8 地脚螺栓承受设备工作时的巨大动荷载。足够的锚固长度（25d~20d）是保证其不被拔出的根本。规定的边缘距离是为了防止混凝土在螺栓拉力下发生劈裂破坏。若距离不足，需配置钢筋网加强。预埋件的高精度要求（±5mm）是保证锻锤设备准确安装就位的前提。

10.3.9 规定了基础及预埋件施工应符合有关国家现行标准的要求，确保设计、施工、验收全过程质量控制。

### 10.4 地基处理

10.4.1 特殊地质条件处理应符合下列规定：

1 软弱土、液化土、湿陷性黄土等不良地质条件下，地基承载力不足、易发生沉降或液化，严重影响锻锤基础的稳定性和使用安全。因此，必须采取桩基、换填或注浆加固等措施。桩基间距取桩径的4~5倍，是基于群桩效应和承载力扩散的工程经验，确保桩基协同工作，避免应力重叠。

2 地基承载力不足时，可采用人工地基、扩大基础底面积、筏板基础等方法，以提高整体刚度和均匀性，减少不均匀沉降。

10.4.2 防振措施宜符合下列规定：

1 防振沟的设置可有效阻断振动波传播，减少对周边结构和环境的影响。沟宽不小于300mm 是基于振动波衰减和施工可行性的综合考虑。

2 砂石垫层具有良好的能量吸收和分布能力，厚度不小于300mm 可有效减小冲击荷载对地基的直接作用，提高基础的抗振性能。

10.4.3 回填土施工应符合下列规定：回填土应分层夯实，每层厚度不超过300mm，压实系数不小于0.94，以确保回填土的密实度和均匀性，避免因回填不实导致的基础不均匀沉降或侧向位移。

10.5 施工与验收

**10.5.1** 施工缝设置与表面平整度控制宜符合下列规定：

1 砧座垫层下1.5m范围内严禁设置施工缝，是为了避免该区域在冲击荷载下出现薄弱面，导致裂缝扩展。

2 表面一次抹平：防止二次找平层与基层粘结不牢，在振动下剥离，影响砧座安装精度和设备稳定性。

3 倾斜度控制：木垫与橡胶垫对基础平整度要求不同，橡胶垫更敏感，故允许偏差更小（0.5‰），以保证隔振效果。

10.5.2 施工质量控制要点为：

1 混凝土浇筑与养护：连续浇筑、充分振捣：避免冷缝和内部空洞，确保混凝土密实性和整体性。养护时间为14天，应保证混凝土强度发展和耐久性，尤其对于大体积基础防止早期开裂。

3 隔振系统安装：水平度校准：确保各隔振元件受力均匀，避免偏载导致早期失效。初始压缩量检查：验证隔振器安装是否到位，是否符合设计预压要求。

4 预埋件与地脚螺栓：位置偏差≤±5mm：保证设备安装精度，避免安装应力。埋深≥25d：确保锚固可靠性，防止振动松动。

5 钢筋工程：加强筋设置：在转角和孔洞处增设斜筋，防止应力集中导致的裂缝。双层钢筋网间距≤200mm：提高抗冲击和抗裂性能。

6 地基处理与回填：桩基间距4~5倍桩径：避免群桩效应，提高承载力。回填土压实系数≥0.94：防止不均匀沉降，保证基础整体稳定性。

10.5.3 验收标准与检测要求

1 外观与尺寸偏差：严格控制在规范允许范围内，确保结构安全与使用功能。

2 材料强度与抗渗性：必须符合设计及国家标准，尤其防水混凝土在潮湿环境下应不低于P6。

3 振动测试：需实测振动响应，确保符合《建筑工程容许振动标准》GB 50868，隔振效率达标。

4 资料完整性：施工记录、检测报告、验收文件等应齐全，便于后续运维与追溯。

## 11、监测与运维

### 11.1 一般规定

11.1.1 本条明确了第11章的适用范围，强调锻锤基础在施工阶段和使用阶段均需进行系统性的振动监测与运维管理。目的是通过科学监测和有效管理，确保基础在长期冲击荷载作用下的安全性和稳定性，防止因振动累积导致的结构损伤或功能失效。

11.1.2 规定了振动监测应涵盖的主要内容，包括振动响应：反映基础动态性能；结构变形：评估基础整体刚度与稳定性；隔振器性能：确保隔振系统有效工作；周边环境影响：防止振动对相邻结构或设备造成不利影响。这些内容的综合监测有助于全面掌握基础运行状态，为运维决策提供依据。

11.1.3 强调运维管理应以监测数据为基础，制定以下措施：按周期进行外观、传感器、连接件等定期检查；根据数据趋势提前进行预防性维护；制定振动超标、隔振器失效等突发情况的应急预案。通过数据驱动的运维策略，可显著提升基础的可靠性和使用寿命。

### 11.2 振动监测

11.2.1 规定了振动监测的基本项目和测点布置原则。振动控制点的设置应考虑锻锤基础的动力响应特性及其对周边环境的影响。测点布置在基础顶面、隔振器位置及敏感区域，可全面反映振动传播路径和衰减情况。

11.2.2 传感器布置要求确保数据的代表性和可靠性。基础顶面不少于4个测点可避免局部异常干扰；隔振器位置布置双向传感器可同时获取竖向和水平向振动响应。

11.2.3 监测频率的设置依据设备运行阶段动态变化特征。安装调试阶段振动响应不稳定，需加密监测；运行稳定后逐步降低频率，但仍需定期检查以预防潜在问题。

11.3 数据处理与分析

11.3.1 数据采集应符合现行行业标准《工业建筑振动检测与评价技术规程》T/CECS 1124-2022，确保数据质量和可比性。

11.3.2 分析内容涵盖时域、频域和趋势分析，旨在识别振动主导频率、脉冲特性及其与隔振系统固有频率的匹配性，避免共振风险。

11.3.3 报警阈值设定基于《建筑工程容许振动标准》GB 50868，预留20%安全裕度，确保在接近限值前及时

### 11.4 运维管理

11.4.1 定期监测频率根据设备运行年限和稳定性动态调整，兼顾经济性与安全性。强振、地质变化或设备改造时应加密监测，确保基础持续安全运行。

11.4.2 监测项目涵盖振动、结构、渗漏等多方面，综合评估基础状态。隔振系统需专项检查，确保其动态性能符合设计要求。

11.4.3 测点布置应考虑可操作性和代表性，便于长期观测和数据对比。

11.4.4 隔振系统动态参数年检可及时发现刚度衰减、阻尼变化等问题，保障隔振效果。

11.4.5 应急处理措施强调快速响应与临时加固，避免故障扩大，确保人员与设备安全。