

ICS 27.100  
F 23  
备案号：33086-2011



# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 292 — 2011

## 火力发电厂汽水管道振动控制导则

The steam/water piping vibration evaluation  
and control guide for power plant

2011-07-28发布

2011-11-01实施

国家能源局 发布

## 目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般规定	2
5 管道振动分类及等级	2
6 振动测试与评估	3
7 管道振动治理及验收方法	4
附录 A (资料性附录) 仪器和测量指南	6
附录 B (规范性附录) 峰值速度判据	8
附录 C (资料性附录) 允许峰值速度 ( $V_{allow}^{peak}$ ) 计算及振动评估	10
附录 D (规范性附录) 交变应力强度判据	12
附录 E (资料性附录) 稳态和瞬态振动的精确评估方法	14
附录 F (资料性附录) 管道振动的激励机制、响应和整改措施	16

## 前　　言

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电站金属材料标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：西安热工研究院有限公司。

本标准参加起草单位：山东电力研究院、东北电力科学研究院有限公司、天津市电力科学研究院。

本标准主要起草人：康豫军、杨百勋、王军民、张都清、张超群、董雷、安付立、马崇、王必宁、卫大为、吴晓俊。

本标准是首次发布。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

## 引　　言

本标准在编制过程中参考了 ASME OM-S/G-2007 Part3:Requirements for Preoperation and Initial Start-up vibration testing of Nuclear Power Plant Piping Systems (核电站管道系统试运行和初始启动中的振动测试要求) 的部分内容。其中引用了该标准的附录 A (Instrumentation and Measurement Guideline) 作为本标准的附录 A (资料性附录) 仪器和测量指南; 引用了该标准的附录 D (Velocity Criterion) 作为本标准的附录 B (规范性附录) 峰值速度判据; 引用该标准的 3.2.1 节作为附录 D (规范性附录) 交变应力强度判据; 引用该标准附录 E (Excitation Mechanisms, Responses, and Corrective Actions) 作为本标准的附录 F (资料性附录) 管道振动的激励机制、响应和整改措施。

同时, 本标准是在总结和分析了大量管道振动测试数据和技术的基础上制定的。

# 火力发电厂汽水管道振动控制导则

## 1 范围

本标准规定了发电厂汽水管道振动测试、评估与振动治理方法。

本标准适用于火力发电厂和核电站常规岛汽水管道系统稳态振动和可预期的瞬态振动的测试、评估和振动治理。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

DL/T 5366 火力发电厂汽水管道应力计算技术规程

ASME OM-S/G-2007 Part3 核电站管道系统试运行和初始启动中的振动测试要求

ASME BPV Code, Section III 锅炉及压力容器规范，第III卷

ASME B31 系列管道规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1 管壁振动 pipe-wall vibration

管壁径向振动，频率较高，具有轴向和周向叶状模态形状的振动特征。

### 3.2 稳态振动 steady-state vibration

在电站正常运行中发生的持续时间较长的重复性管道振动。

### 3.3 瞬态振动 transient vibration

短时间内发生的振动，其总的应力循环次数小于  $1 \times 10^6$ 。如泵的启动和切换、阀门的快速开启和关闭、安全释放阀的动作等。

### 3.4 模态 mode

系统固有特性的统称，包括模态频率、模态阻尼和模态振型。

### 3.5 振型 mode shape

系统固有的振动形状或特征矢量，振型具有正交性，弹性系统的振动遵从叠加原理。

### 3.6 振动等级 vibration class

根据管道系统的特性和振动水平对其进行等级划分，稳态振动的管道系统其振动等级分为 WZD1、WZD2、WZD3，瞬态振动的管道系统其振动等级分为 SZD1、SZD2、SZD3。

### 3.7 振幅 vibration amplitude

管道振动位移幅值，为振动位移峰—峰值的二分之一。

#### 4 一般规定

- 4.1 当管道发生明显的振动、水锤和汽锤现象时，应及时对其发生的位置、时间、工况和管道振动状况进行记录，并对管道系统和支吊架进行检查。
- 4.2 管道的振动不应导致管道系统及相关附件（焊缝、弯头、阀门、管座及热工元件等）产生裂纹、损坏及功能失效，不应损坏管道的保温。
- 4.3 管道的振动不应导致支吊架各部件的损坏和功能的失效，如支吊架管部、根部、连接件和功能件不应变形或开裂。
- 4.4 发现管道振动，应评估振动对管道及设备的危害程度，如果对安全运行构成威胁，则应查明原因并进行振动治理。
- 4.5 在管道上增加约束装置或改变支吊架的位置、类型和荷载时，应依据 DL/T 5366 或 ASME B31.1 进行管系应力分析，并保证管系应力合格、管道对设备的推力和力矩在允许范围内。
- 4.6 对经受地震影响的管道和设备基础，应对管道系统标高、位置进行测量，确认管道冷、热态疏水坡度是否正确，测量记录管道系统端点位移变化量。必要时，对管道系统进行地震响应谱及应力分析，并提出处理措施。

#### 5 管道振动分类及等级

##### 5.1 稳态振动

###### 5.1.1 振动等级 1 (WZD1)

符合下述条件之一的为 WZD1 级：

- a) 目视观察存在振动且振动不剧烈的管道系统；
- b) 根据以往对相似系统的检查和运行经验，管道系统预期不会出现显著振动响应。

该等级管道系统的振动测试与评估采用 6.1 的方法进行。

###### 5.1.2 振动等级 2 (WZD2)

符合下述条件之一的为 WZD2 级：

- a) 根据以往对相似系统的检查和运行经验，可能出现显著振动响应的管道系统；
- b) 存在明显振动且不适用 WZD1 级管道评估方法进行评估的管道系统。

该等级管道系统的振动测试与评估采用 6.2 的方法进行。

###### 5.1.3 振动等级 3 (WZD3)

符合以下条件之一的为 WZD3 级：

- a) 不能通过简单管道模态来反映系统响应的管道（如管壁振动等）；
- b) 振动速度评估超标且需要精确评估的管道系统。

该等级管道系统的振动测试与评估应采用 6.3 的方法进行。

##### 5.2 瞬态振动

###### 5.2.1 振动等级 1 (SZD1)

符合以下条件的为 SZD1 级：

管道系统在运行过程中存在瞬态振动（例如系统遇到泵启动的瞬间、阀门的打开或关闭），根据以往相似系统的运行经验，管道系统不应出现明显的振动响应。

该等级管道系统的振动测试与评估应采用 6.1 的方法进行。

###### 5.2.2 振动等级 2 (SZD2)

符合以下条件的为 SZD2 级：

管道系统在运行过程中存在瞬态振动（例如系统遇到泵启动的瞬间、阀门的打开或关闭），并出现明显的振动响应。

该等级管道系统的振动测试与评估应采用 6.2 的方法进行。

### 5.2.3 振动等级 3 (SZD3)

符合以下条件的为 SZD3 级：

根据以往系统运行经验，由系统设计固有特性、系统运行或系统设计特性决定的，已知存在剧烈瞬态振动响应（例如系统遇到泵启动的瞬间、阀门的打开或关闭及水锤等），且未进行瞬态分析的管道系统。

该等级管道系统的振动测试与评估应采用 6.3 的方法进行。

## 6 振动测试与评估

### 6.1 振动等级 1 级管道检查与评估

#### 6.1.1 目视检查

振动等级 1 级管道系统，宜采用目视检查方法。振幅可以用简单的测量器具估测（如尺子、弹簧吊架刻度、管道或保温擦碰痕迹及目视观察等），频率可目视估测（如用秒表等记录振动次数），参见附录 A。

#### 6.1.2 振动评估

6.1.2.1 振动等级 1 级管道系统评估结果应分为可接受和不可接受两类。估算最大峰值振动速度的公式为： $V_{\max}^{\text{peak}} = 2\pi f A$ ， $A$  为最大振幅，mm； $f$  为振动频率，1/s。

6.1.2.2 对于碳钢及低合金钢管道，当最大峰值振动速度  $V_{\max}^{\text{peak}}$  不大于 12.4mm/s 时，振动是可接受的。

6.1.2.3 对于不锈钢管道，当最大峰值振动速度  $V_{\max}^{\text{peak}}$  不大于 21.3mm/s 时，振动是可接受的。

6.1.2.4 碳钢及低合金钢和不锈钢以外的其他材料管道，应根据其疲劳曲线（S-N）并按照 B.2 计算允许峰值速度判据，当最大峰值振动速度  $V_{\max}^{\text{peak}}$  不大于  $V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$  时，振动是可接受的。

6.1.2.5 管道振动评估时还应考虑下列因素：

- a) 管道最大振幅，管道振动频率；
- b) 管道系统中敏感设备所处的位置及功能；
- c) 主管道上引出小管的振动特性；
- d) 支吊架类型，如刚性支吊架、弹性支吊架等。

6.1.2.6 当综合评估管道系统振动是可接受时，可不作进一步的测量和评估。当振动是不可接受时，应进行振动治理；当无法判断振动是否可接受，应采用 6.2 的方法进行评估。

### 6.2 振动等级 2 级管道测试与评估

#### 6.2.1 振动速度测试

应在管道的最大振幅点上进行测量，测量方向应与管道轴线垂直，信号应充分、连续，参见附录 A。

#### 6.2.2 振动评估

振动等级 2 级管道系统应按表 1～表 4 进行评估，按照 B.2 精确计算允许峰值速度  $V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$ 。振动评估分为优秀、合格和不合格三类。对系统及附件无特殊安全要求时，振动评估可参见附录 C。碳钢和不锈钢以外的其他材料管道，应根据其疲劳曲线（S-N）并按照 B.2 计算允许峰值速度判据。

表 1 WZD2 级管道系统的评估（碳钢及低合金钢）

最大峰值振动速度测量值 $V_{\max}^{\text{peak}}$ mm/s	振动评估	处理措施
$V_{\max}^{\text{peak}} \leq 12.4$	优秀	无
$12.4 < V_{\max}^{\text{peak}} \leq V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	合格	应根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$V_{\max}^{\text{peak}} > V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	不合格	应进行振动治理或按 6.3 评估

表 2 SZD2 级管道系统的评估（碳钢及低合金钢）

最大峰值振动速度测量值 $V_{\max}^{\text{peak}}$ mm/s	振动评估	处理措施
$V_{\max}^{\text{peak}} \leq 20.0$	优秀	无
$20.0 < V_{\max}^{\text{peak}} \leq V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	合格	应根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$V_{\max}^{\text{peak}} > V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	不合格	应进行振动治理或按 6.3 评估

表 3 WZD2 级管道系统的评估（不锈钢）

最大峰值振动速度测量值 $V_{\max}^{\text{peak}}$ mm/s	振动评估	处理措施
$V_{\max}^{\text{peak}} \leq 21.3$	优秀	无
$21.3 < V_{\max}^{\text{peak}} \leq V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	合格	应根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$V_{\max}^{\text{peak}} > V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	不合格	应进行振动治理或按 6.3 评估

表 4 SZD2 级管道系统的评估（不锈钢）

最大峰值振动速度测量值 $V_{\max}^{\text{peak}}$ mm/s	振动评估	处理措施
$V_{\max}^{\text{peak}} \leq 36.4$	优秀	无
$36.4 < V_{\max}^{\text{peak}} \leq V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	合格	应根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$V_{\max}^{\text{peak}} > V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	不合格	应进行振动治理或按 6.3 评估

### 6.3 振动等级 3 级管道测试与评估

振动等级 3 级管道系统应按照附录 D 中允许交变应力强度判据进行评估，评估应分为合格与不合格两类，评估方法见表 5。管道振动应力测试和分析方法参见附录 A 及附录 E。

表 5 振动等级 3 级管道系统的评估

最大交变应力强度 $S_{\text{alt}}$ MPa	振动评估	处理措施
$S_{\text{alt}} \leq S_{\text{el}}/\alpha$	合格	应根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$S_{\text{alt}} > S_{\text{el}}/\alpha$	不合格	应进行振动治理或系统整改

## 7 管道振动治理及验收方法

7.1 评估管道振动不可接受或不合格，应按 7.2 或 7.3 的要求进行管道振动治理。可能的管道振动治理及相关内容如下：

- a) 找出激振源并降低或消除激振力。
- b) 改变管道系统的约束或更改管系布置结构，降低管道振动响应。
- c) 优化泵或阀门的运行方式以降低管系振动。

- d) 对振动治理后的管道系统按 6.1.2 进行评估，必要时按 6.2 进行振动测试与评估。振动治理应同时核算管道应力及对设备的推力和力矩。
  - e) 振动激励、管道系统的响应和可能额外的测试、分析和整改参见附录 F。
- 7.2 对于振型较为明显、振动较规律的管道，如果判断应进行振动治理，至少应进行下列工作：
- a) 观察管道振动形态，掌握管道主振型；
  - b) 采用 6.1.1 目视测量管道最大振幅、主振动频率，估算最大振动速度；
  - c) 减振方案应综合考虑管道主振型、管道热位移及厂房结构等因素而制定，可按 DL/T 5366 或 ASME B31.1 进行管系应力分析；
  - d) 可能使用的减振装置如阻尼器、限位装置、固定支架、滑动支架、弹簧减振器等；
  - e) 减振方案实施后应观察减振效果，应按 6.1.2 对管道减振效果进行评估验收。
- 7.3 对于振动形态较为复杂或振动剧烈的管道，进行振动治理时，至少应进行下列工作：
- a) 分析引起管道振动原因，如果是由于泵及阀门运行方式等原因引起的管道振动，如阀门内漏、阀门两侧压差过大或两台泵在某流量下管道振动响应明显增大等，应优先考虑对其进行改进或运行优化，以降低或避开振动；
  - b) 观察管道振动形态，掌握管道主振型；
  - c) 采用 6.2 方法进行振动测试和评估，必要时进行管道模态计算，掌握管道振动特征；
  - d) 减振方案应综合考虑管道主振型、管道热位移及厂房结构等因素而制定，可按 DL/T 5366 或 ASME B31.1 进行管系应力分析；
  - e) 可能使用的减振装置如阻尼器、限位装置、固定支架、滑动支架、弹簧减振器等；
  - f) 减振方案实施后应观察记录或测试减振效果，应按 6.1.2 对管道减振效果进行评估验收，必要时按 6.2.2 进行评估验收。
- 7.4 管道振动治理应了解和注意如下情况：
- a) 排汽管和疏水管有一个或两个作为集中质量的隔离阀，应注意是否支撑牢固；
  - b) 主管线较小的振动可能会引起支管远端的大幅振动，这些支管应和主管道一起评估；
  - c) 多泵并行运行工况，泵的组合运行在某流量下会引起管道显著的振动，应对这种振动进行评估或整改；
  - d) 对泵、阀门和换热器等敏感设备，振动可能影响其功能、操控性和结构性能，应仔细评估；
  - e) 对于常发生振动的管道系统，应特别注意焊缝区域，应考虑振动引起的焊缝局部应力。

**附录 A**  
**(资料性附录)**  
**仪器和测量指南**

### A.1 目视方法

目视检查方法允许采用感官(如视觉、触摸)来确定振动的可接受性。例如,依据丰富的经验,目测低频振动(频率为1Hz~10Hz)的振动幅值,低频振动振幅可用标尺来估测。

对于不要求精确评估结果的管道,6.1节的简单方法可以用来对振动等级1级管道位移振幅进行估测,但应注意在某些情况下使用该简单方法得到的估测值可能误差过大。如高频低幅振动( $f>20\text{Hz}$ , $A<0.76\text{mm}$ )很难用标尺度量。

视觉方法是用来识别那些明显可接受的振动。如果目视检查后不能确定振动的可接受性,应采用A.2的方法。A.2适用于振动等级2级、3级管道测试。

### A.2 电测法

#### A.2.1 传感器

##### A.2.1.1 加速度传感器

压电加速度传感器是振动测量传感器中的一种,耐高温、耐久性好,可靠性高,标定容易及性能稳定,固有的低噪声、动态范围宽且线性好、质量轻、测量简易。伺服加速度传感器具有良好低频响应特性,优点是输出信号高和低的频率响应(低至直流)。对管道测量的加速度传感器应特别注意的事项如下:

- a) 振动传感器输出与温度的关系:如果从室温到运行温度的输出信号变化超过10%时,应该根据制造商手册中的数据进行温度修正。
- b) 振动传感器输出与频率的关系:这种变化取决于加速度传感器的类型、采用的安装技术及其输出信号是传入电荷放大器或是电压放大器等因素有关。输出频率可能在每个频段有0.3%的变化。如果变化超过测量频段10%,应使用制造商提供的数据进行修正。
- c) 使用的最高温度:任何情况下不能超过制造商所规定的最高使用温度。如有必要,可绝热安装以降低加速度传感器的温度。
- d) 加速度传感器的特性,比如频率响应和相关的电路应与需要测量目的相匹配。应使用合适的量程和带通滤波器帮助分析者获取所需要的数据。
- e) 在电站管道测量应用中,加速度传感器两个固有的测试缺点可能产生的困难是:低电平、高阻抗输出和低频较差的信噪比(S/N),特别是需要获得位移时的两次积分。

##### A.2.1.2 速度传感器

速度传感器是直接测量速度的传感器,通常由移动的线圈或移动的磁铁组成,输出电压与动圈移动切割磁力线的速度成正比,因此得到速度。这种电动式传感器的主要优点是具有高电平和低输出阻抗,因此信号不受电磁噪声的干扰;主要缺点是体积大和线性带宽范围窄。在得出位移指标时,低频背景噪声干扰限制了其用途,因为积分会放大低频噪声。

##### A.2.1.3 位移传感器

适用于直接测量管道振动的位移传感器,如电涡流探头、线性可变差动探头(LVDT)、手持式振动测量仪等,主要优点是所测的绝对位移都是基于一个固定基准,因此在零频率(dc)下具有一致的频率响应和信噪比(S/N)曲线。此外,还具有输出信号高、可抗噪声干扰的优点,主要缺点是位移传感器必须牢固安装在稳固的结构上,而在实际运行中安装固定有一定的难度。

#### A.2.1.4 专用传感器

对于特殊振动量的测量，可采用专用测试仪器，如激光测振仪等。

#### A.2.1.5 应变计

对于需要进行应力评定的管道系统，可采用应变计进行测量。管道应力测量可使用焊接型或粘贴型应变计。管道温度较高或环境有辐射性时，可使用焊接型应变计。

使用应变计测量时，尤其是静态应变测量，应注意常会遇到的问题，如温度补偿、粘贴稳定性、仪器稳定性以及湿度、辐射和高温环境等，应使用新的技术以解决这些潜在的问题。

#### A.2.2 电缆

因为电缆噪声会干扰传感器的振动信号，所以在传感器和信号调理器之间应使用低噪声电缆，这种电缆应能适合预期的环境温度特性。

如果使用电缆接头，应该采取措施避免潮湿露水浸入这些接头，因为一般来说，传感器和信号调理器之间的长电缆(>30m)在工作中可能会产生高噪声或信号衰减，远程前置放大器(或远程电荷转换)应避免这些问题。应仔细了解传感器和电缆生产厂家提供的文件数据。

#### A.2.3 信号调理器

##### A.2.3.1 一般要求

信号调理器对所选择的传感器应该有合适的电特性。对于加速度传感器的信号调理器，应包含由加速度信号通过积分电路得到速度和位移的功能。增益归一化对加速度计输出比例系数的直接结合是其一个重要特征，因为这样可设计出可显示绝对速度和位移的组件。

##### A.2.3.2 频率范围

0~300Hz的频率范围可覆盖管道所有的振动频率，管道振动的主要成分通常在0.5Hz~30Hz。

##### A.2.3.3 振动量程范围

振动测量系统应该能测量0.254mm/s~2540mm/s范围内的速度，以及0.002 54mm~254mm范围内的位移。

##### A.2.3.4 滤波

应具有低通滤波、高通和带通滤波功能，以消除超低频和高频噪声信号。

附录 B  
(规范性附录)  
峰值速度判据

### B.1 一般要求

为了确定最大振动速度的位置，应在管道系统上进行多点速度连续测量。确定最大振动速度位置后，在该点测量最大峰值速度  $V_{\max}^{\text{peak}}$ ，并与允许峰值速度  $V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$  进行比较，可接受性标准为

$$V_{\max}^{\text{peak}} \leq V_{\text{allow}}^{\text{peak}} \quad (\text{B.1})$$

### B.2 允许峰值速度

允许峰值速度计算式为

$$V_{\text{allow}}^{\text{peak}} = \frac{C_1 C_4}{C_3 C_5} \frac{\beta S_{\text{el}}}{\alpha C_2 K_2} \quad (\text{B.2})$$

$$C_3 = \left( 1.0 + \frac{W_F}{W} + \frac{W_{\text{INS}}}{W} \right)^{1/2}$$

式中：

$V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$  —— 允许峰值速度，mm/s。

$\beta$  —— 转换系数取 13.4, mm/s/MPa。

$C_1$  —— 管道特征跨距间补偿集中质量影响的修正系数，根据图 B.1 取值。

$C_4$  —— 端部条件修正系数。两端固定的直管段取 1.00；悬臂梁及简支梁取 1.33；等臂 Z 形弯结构取 0.74；等臂 U 形弯结构取 0.83；筛选时取保守值 0.7。

$C_3$  —— 考虑管道介质和保温层的修正系数。

$W$  —— 管道单位长度的质量，kg/m。

$W_F$  —— 管道单位长度介质的质量，kg/m。

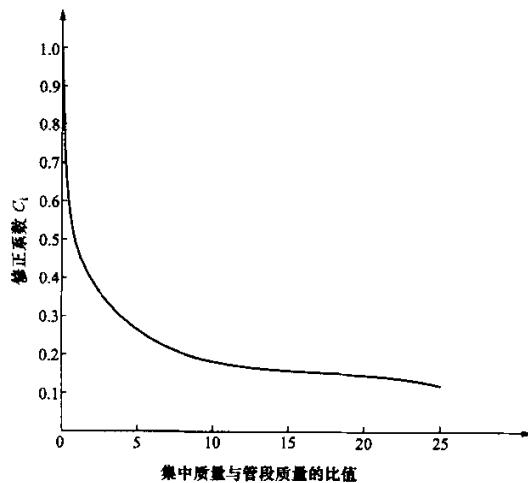


图 B.1 管道特征跨距间补偿集中质量影响的修正系数  $C_1$

$W_{\text{INS}}$ ——管道单位长度保温层的质量, kg/m。当管道无保温层且管内无介质或为蒸汽时,  $C_3$  等于 1.0; 当介质加保温质量等于管道质量,  $C_3$  等于 1.414; 在大多数情况下, 该值小于 1.5。

$C_5$ ——测量频率与管道梁的第一阶固有频率不同时的修正系数, 为非共振强迫振动的修正因子, 它等于管道管跨的第一阶固有频率和测量频率的比值, 该比值在 1.0 和 2.0 之间; 比值小于 1.0 的, 修正因子  $C_5$  等于 1.0; 比值大于 2.0 时, 本标准中无定义。

$C_2K_2$ ——对大多数管道系统, ASME 规范确定的应力指数  $C_2K_2$  不大于 4。

$S_{\text{el}}$ —— $0.8S_A$ ,  $S_A$  为 ASME BPV Code, Section III 图 1-9.1 中  $1 \times 10^6$  次循环下的交变应力, 或者 ASME BPV Code, Section III 图 1-9.2.2 中  $1 \times 10^{11}$  次循环下的交变应力, 分析时应考虑温度对弹性模量的影响, MPa。

$\alpha$ ——许用应力减弱系数, ASME BPV Code, Section III 图 1-9.1 中所涉及的材料取 1.3; ASME BPV Code, Section III 之图 1-9.2.1 或图 1-9.2.2 中所涉及的材料取 1.0。

### B.3 允许峰值速度计算

以下各修正系数均为保守值, 其振动速度筛选值适用于大多数管道系统。振动速度小于该值的管道可不作进一步分析, 大于该值的振动不一定超标, 振动是否可接受应对  $V_{\text{allow}}^{\text{peak}}$  进行更准确计算, 但极复杂的管道系统该振动速度筛选值可能不保守。

- a)  $C_1=0.15$ ;
- b)  $C_2K_2=4.0$ ;
- c)  $C_3=1.50$ ;
- d)  $C_4=0.70$ ;
- e)  $C_5=1.0$ ;
- f)  $S_{\text{el}}/\alpha=53 \text{ MPa}$  (碳钢及低合金钢管道, 不锈钢管道为 91MPa)。

碳钢及低合金钢管道  $V_{\text{allow}}^{\text{peak}} = \frac{13.4 \times 0.15 \times 0.70 \times 53}{1.50 \times 1.0 \times 4.0} = 12.4 \text{ mm/s}$

不锈钢管道  $V_{\text{allow}}^{\text{peak}} = \frac{13.4 \times 0.15 \times 0.70 \times 91}{1.50 \times 1.0 \times 4.0} = 21.3 \text{ mm/s}$

**附录 C**  
**(资料性附录)**  
**允许峰值速度 ( $V_{allow}^{peak}$ ) 计算及振动评估**

**C.1 修正系数及峰值速度判据计算**

管道振动可接受性标准为  $V_{max}^{peak} \leq V_{allow}^{peak}$ ，表 C.1 为遵照本标准附录 B 选取适当系数计算出的振动允许峰值速度，参考实测管道振动峰值速度统计值，选取表 C.1 最右侧一列作为第二级  $V_{allow}^{peak}$ ，由此得到表 C.2~表 C.5 碳钢/低合金钢及不锈钢管道稳态/瞬态振动评估表。碳钢和不锈钢以外的其他材料管道，应根据其疲劳曲线 (S-N) 并遵照附录 B 计算允许峰值速度判据。

**表 C.1 碳钢/低合金钢及不锈钢管道振动峰值速度允许值  $V_{allow}^{peak}$  计算**

修正系数及峰值速度允许值	ASME	蒸汽管道 (跨距间无阀门)	蒸汽管道 (跨距间有阀门)	给水管道 (跨距间无阀门)	给水管道 (跨距间有阀门)
集中质量影响的修正系数 $C_1$	0.15	1	0.25	1	0.25
介质和保温层的修正系数 $C_3$	1.5	1.2	1.2	1.25	1.25
端弯件、修正系数 $C_4$	0.7	0.74	0.74	0.74	0.74
固有频率和测量频率的比值 $C_5$	1	1.3	1.3	1.3	1.3
应力指数 $C_2K_2$	4	4	4	4	4
碳钢稳态振动峰值速度允许值 mm/s	12.43	84.22	21.06	80.85	20.21
碳钢瞬态振动峰值速度允许值 mm/s	19.93	135.07	33.77	129.67	32.42
不锈钢稳态振动峰值速度允许值 mm/s	21.34	144.61	36.15	138.82	34.71
不锈钢瞬态振动峰值速度允许值 mm/s	36.35	246.31	61.58	236.46	59.12

**表 C.2 WZD2 级管道系统的评估 (碳钢及低合金钢)**

最大峰值振动速度测量值 $V_{max}^{peak}$ mm/s	振动评估	处理措施
$V_{max}^{peak} \leq 12.4$	优秀	无
$12.4 < V_{max}^{peak} \leq 20.2$	合格	可根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$V_{max}^{peak} > 20.2$	不合格	应进行振动治理或按 6.3 评估

**表 C.3 SZD2 级管道系统的评估 (碳钢及低合金钢)**

最大峰值振动速度测量值 $V_{max}^{peak}$ mm/s	振动评估	处理措施
$V_{max}^{peak} \leq 20.0$	优秀	无
$20.0 < V_{max}^{peak} \leq 32.4$	合格	可根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$V_{max}^{peak} > 32.4$	不合格	应进行振动治理或按 6.3 评估

表 C.4 WZD2 级管道系统的评估（不锈钢）

最大峰值振动速度测量值 $V_{\max}^{\text{peak}}$ mm/s	振动评估	处理措施
$V_{\max}^{\text{peak}} \leq 21.3$	优秀	无
$21.3 < V_{\max}^{\text{peak}} \leq 34.7$	合格	可根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$V_{\max}^{\text{peak}} > 34.7$	不合格	应进行振动治理或按 6.3 评估

表 C.5 SZD2 级管道系统的评估（不锈钢）

最大峰值振动速度测量值 $V_{\max}^{\text{peak}}$ mm/s	振动评估	处理措施
$V_{\max}^{\text{peak}} \leq 36.6$	优秀	无
$36.6 < V_{\max}^{\text{peak}} \leq 59.1$	合格	可根据疏水管、阀门及相关设备敏感性确定是否需要进行振动治理
$V_{\max}^{\text{peak}} > 59.1$	不合格	应进行振动治理或按 6.3 评估

## C.2 说明

- a) 碳钢稳态振动  $S_{\text{el}}/\alpha$ , ASME BPV Code, Section III 表 I -9.1 中  $1 \times 10^6$  循环下的  $S_A$  为  $86.19 \text{ MPa}$  ( $\alpha=1.3$ ),  $S_{\text{el}}/\alpha = 0.8 \times S_A/\alpha = 0.8 \times 86.19/1.3 = 53 \text{ MPa}$ ;
- b) 碳钢瞬态振动  $S_{\text{el}}/\alpha$ , ASME BPV Code, Section III 表 I -9.1 中  $1 \times 10^5$  循环下的  $S_A$  为  $138.00 \text{ MPa}$  ( $\alpha=1.3$ ),  $S_{\text{el}}/\alpha = 0.8 \times S_A/\alpha = 0.8 \times 138.00/1.3 = 85 \text{ MPa}$ ;
- c) 不锈钢稳态振动  $S_{\text{el}}/\alpha$ , ASME BPV Code, Section III 表 I -9.2.2 中  $1 \times 10^{11}$  循环下的  $S_A$  为  $113.76 \text{ MPa}$  ( $\alpha=1.0$ ),  $S_{\text{el}}/\alpha = 0.8 \times S_A/\alpha = 0.8 \times 113.76/1.0 = 91 \text{ MPa}$ ;
- d) 不锈钢瞬态振动  $S_{\text{el}}/\alpha$ , ASME BPV Code, Section III 表 I -9.2.2 中  $1 \times 10^6$  循环下的  $S_A$  为  $194.43 \text{ MPa}$  ( $\alpha=1.0$ ),  $S_{\text{el}}/\alpha = 0.8 \times S_A/\alpha = 0.8 \times 194.43/1.0 = 156 \text{ MPa}$ .

**附录 D**  
**(规范性附录)**  
**交变应力强度判据**

**D.1 稳态振动**

对于稳态振动，最大的计算交变应力强度  $S_{alt}$  应满足以下条件：

a) 对于 ASME 1 类管道系统

$$S_{alt} = \frac{C_2 K_2}{Z} M \leq \frac{S_{el}}{\alpha} \quad (D.1)$$

式中：

$C_2$ ——二次应力指数，定义和取值见附录 B；

$K_2$ ——ASME BPV Code, Section III 定义的局部应力指数；

$Z$ ——管道的截面模量；

$M$ ——由振动产生的最大零—峰值动态弯矩，或振动载荷与其他载荷共同引起的最大零—峰值动态弯矩；

$S_{el}$ ——定义和取值见附录 B；

$\alpha$ ——许用应力减弱系数，定义和取值见附录 B。

b) 对于 ASME 2 类、3 类管道和 ASME B31 管道系统

$$S_{alt} = \frac{C_2 K_2}{Z} M \leq \frac{S_{el}}{\alpha} \quad (D.2)$$

$$C_2 K_2 = 2i$$

式中：

$i$ ——应力增大系数，取值见 ASME BPV Code, Section III 的 NC 和 ND 部分，或者见 ASME B31。

如果在试验过程中发现有振动量级较高的管系，而在预先的管系分析中未考虑到，则应采取相应的措施，并对设计规范进行修正。

**D.2 瞬态振动**

对于瞬态振动，最大交变应力强度应该被限制在以下定义的限值之内。在确定允许的最大交变应力强度之前，应该首先估计最大预期的等效振动载荷循环次数 ( $n$ )。

a) 对于 ASME 1 类管道系统，最大交变应力强度应小于设计基础要求的限值。如果这种瞬态振动没有预先在设计基础中被考虑进去，则应对瞬态振动进行评估。剩余使用系数 ( $U_v$ ) 由式 (D.3) 确定，即

$$U_v = 1 - U \quad (D.3)$$

式中：

$U$ ——ASME 1 类管道分析中的累积使用系数，不包括振动载荷。

最大允许等效振动载荷循环数 ( $N_v$ ) 由式 (D.4) 计算，即

$$N_v = \frac{n}{U_v} \quad (D.4)$$

应用  $N_v$  时，最大交变应力强度  $S_{alt}$  应不大于  $S_a$ ， $S_a$  为允许交变应力峰值，见 ASME BPV Code, Section III, 图 1-9.1, 图 1-9.2.1 或者图 1-9.2.2。

对于未预先分析的瞬态振动，或不适合单独进行载荷评估的，则需要根据 ASME BPV Code, Section III 的要求进行疲劳分析。

- b) 对于 ASME 2 类和 3 类及 ASME B31 管道系统，应按 D.1 b) 的方法进行应力评估，另一种方法是用 ASME 规范进行瞬态振动应力评估。

**附录 E**  
**(资料性附录)**  
**稳态和瞬态振动的精确评估方法**

**E.1 概述**

在对振动等级 3 级或振动等级 2 级管道系统进行评估的评估方法不适用，或过于保守时，可使用本部分给出的评估方法。本评估方法的主要目的是用测得的管道振动形态精确评估管道系统的振动应力。

**E.2 模态响应技术****E.2.1 一般性要求**

用试验数据识别出系统的模态位移和固有频率。

对系统进行模态分析，获得与模态振型矢量相对应的固有频率、模态振型和模态应力矢量（或弯矩）。管道系统分析和测试的固有频率和模态形状应具有相关性，根据测量模态位移，分析应力向量可用来确定管道中的实际应力状态。

**E.2.2 测试要求**

管道系统应布置足够的测点来识别固有频率和模态位移，不要求测点一定在最大振动位置上。测点位置应该尽量和系统分析模型中的点一致。

系统应按测试规范的要求进行试验。应记录足够多的数据以便按 E.2.3 节所述方法对数据进行恰当的处理。

**E.2.3 数据处理**

对稳态振动数据进行简化处理，以获取系统每一个显著振动模态的零—峰值位移。有多种确定模态位移的方法，E.3 中讨论了其中的两种方法。在使用 E.3 所述的任何一种方法时，要特别注意分离识别出系统中可能存在的密集模态。

**E.2.4 测试和分析的相关性**

对所有主要贡献的模态，管道系统测量的模态频率和模态位移应与理论分析得到的模态频率和模态形状一致，至少测试和理论分析的模态形状在主模态的方向上应该一致；各模态下的相对大小并不需要严格一致。此外，对应的测试和理论分析的模态频率应合理吻合。

**E.2.5 测试响应的评估**

测得的管道模态位移和相关分析结果，可用于管系振动应力（或力矩）的精确评估。用测量管道位移和系统模态分析信息得到振动应力的方法见 ASME OM-S/G Part3 的附录 C，所得到的振动应力按本标准附录 D 进行评估。

**E.3 应力测量技术****E.3.1 一般性要求**

应在管道系统直管上预计发生最大应力处安装足够数量的应变片。当用于确定名义弯矩时，应变计应该位于远离应力集中的点。

**E.3.2 测试响应的评估**

由管道系统测试点获得的应变换算为三个方向的力矩分量，并按本标准附录 D 进行评估。

**E.4 傅里叶变换分析**

本部分给出了通过测量位移时间历程来获取管道系统模态位移的方法，建议结合 E.2 使用。

记录的加速度、速度或位移的时间历程都可以通过使用傅里叶变换转化为谱密度函数。由谱密度在

频域的计算结果包含预期的系统主要响应。应有足够数量的频谱平均值以保证涵盖密度函数。在离散频带上的主模态响应区对密度函数进行积分以获得均方根（RMS）模态响应，通过考虑响应的统计特性，很容易将其转化为峰—峰值响应。

除了模态响应以外，谱密度函数可揭示出由旋转设备之轴和叶片所激发的特定频率的管道系统响应。应确定这些频率下的管道位移。

**附录 F**  
**(资料性附录)**  
**管道振动的激励机制、响应和整改措施**

### F.1 激励机制

管道振动的激励机制是在管内传输的流体或汽体的压力脉动，或是由接触的或相邻的设备所传递的机械振动。

控制阀的振动、高流速引发紊流、激流或气穴等，可能造成管道低频振动，可通过阀门控制系统的修正得以减轻，其他如增加管道阻尼、改变管道路径或管道尺寸以减少紊流，采用截流孔或防气穴阀门以减少闪振或气穴等。

泵或压缩机引起的压力脉动、在气或蒸汽系统中由控制阀引起的振动、水系统中涡流流出管口等就是高频振动来源的例子。采用消声器、振动阻尼器、容器罐、降噪阀门或增加多级孔等都是消减振源的例子。

压力扰动或脉动在流体中的传播方式与声音在空气中的传播方式相同。如果脉动频率与管道的音频相同或接近时，压力脉动会增大，这种共振增加了管道振动的危害性。音频是声音在流体或气体中传播速度的函数，与管道长度成反比。

通常激励机理是在流动不连续时产生涡旋脱落，涡旋脱落一定的频率范围内造成压力脉动。如果压力脉动频率与管道固有频率接近，就会发生共振并且振动将被放大。改善流动不连续性，如打开分支管道，会降低涡旋脱落并改变脱落频率，由此避免共振的发生。如果依然无效，就需要改变管道的固有频率。固有频率改变包括改变管道长度以提高或降低其固有频率，也可使用消声器、减振器、抽吸稳定器装置（即容器罐）等。

### F.2 气穴

气穴通常是引起管道振动的原因，同样也会产生噪声、压力波动、冲蚀破坏以及流量降低，本节讨论它是如何发生、发展与管道部件的相关性。同时也提供了工程实例说明在非正常操作条件下有害的气穴是如何发生的。

当流体压力低于它的饱和蒸汽压力时，就会发生气穴，通常发生在减压口和流体控制阀处。当气穴遇到压力高于其饱和压力时，气穴将会破裂，该情况在气穴移动到下游管口或阀门时发生。气穴破裂会导致振动并引起管道振动、表面侵蚀并会加速腐蚀。

气穴噪声取决于它发生的严重程度，可以从爆裂声到类似于沙砾在管道中传输的声音。特别严重时可损伤听力。

当气穴破裂发生在管道或部件表面时，就会发生侵蚀和腐蚀。气穴会侵蚀管道表面，并加剧腐蚀的发生。管道失效和泄漏促使人们研究上述问题的监测和补救措施。

管道系统中引起压降导致气穴的部件有阀门、孔、大小头、泵和弯管。下列情况下会减少破坏，比如持续保持低的气穴水平；从气穴区域移除分界面；处理分界表面使它可以抵挡破坏；在流体流动过程中减少流体的能量；喷射气体到隔离的区域。对于气穴引发的管道振动，最重要的是要减少或消除其产生来源。

### F.3 管口发生气穴的工程实例

压水堆电站化学容积控制系统(CVCS)中，有一个单级降压的孔板，这个孔板口径为6.35mm，长为609.60mm，经过孔板的压降大约是13.97MPa（从上游反应器冷却系统的压力15.53MPa，到下游压

力大约为 1.73MPa)，需要 1.38MPa 或更大的反压来防止在排放端发生的气穴。

在一个核设备中，当测量的压力超过了标准值，在排放端的压力会降到大约 690MPa，在这种条件下操作 9 个月后被发现并重新建立系统的设计条件。然而，如此长时间超出设计压力运行情况足以在出口端口造成气穴和严重的冲蚀。腐蚀反过来在出口端影响流体特性，产生持续的气穴，甚至在设计压力条件下也会持续恶化。

气穴会激励管道系统，振动水平足够高时，在接管焊接处会造成泄漏。连接处可用相同的设计规范修复，但持续的气穴致使管口持续侵蚀，导致接管处更频繁失效。

查看电厂记录显示，发现以前的运行并不在设计的反压要求的范围之内，工程评估表明，管口处存在潜在的气穴并可能冲蚀。当更换管口后，气穴和失效的管接口焊接失效才会停止。

#### F.4 管道响应

管道梁振动是最普遍遇到的响应，这种由管道结构模态激励起的振动与简单梁振动相似。虽然梁的振动频率可能高达 100Hz 甚至更高，但是典型的占主导地位的振动频率低于 20Hz。消除或减少激振源是最有效的修正措施，低频梁振动可通过适当增加支撑约束降低振动。

最有效的抑制振动方法是在弯管、较重集中质量或管道不连续处增加约束。接管口、疏水管、旁路和工艺性部件的振动可以通过对主管道重物（阀门、法兰盘等）增加支撑消除相关振动。

采用能承受持续振动荷载支撑和结构制止管道振动，这种振动会使非抗振动设计管道组件和支撑系统产生过度磨损和疲劳。安装的组件必须有抵挡这些振动的能力，并且应该对这些管件进行定期的检查并更换。

高频管道振动位移振幅较小，只有几毫米或更小，通常大部分管道系统都普遍存在振动。因此，附加支撑难以有效控制高频振动。例如，存在间隙的支吊架不能控制高频振动。

管道壳壁振动是典型的高频振动，比如，对于  $\phi 588\text{mm}$  的管道，壳壁振动模态最低振动频率是 190Hz。管壳壁的振动频率与管壁的厚度成正比，与管道直径成反比。对于壳壁振动最有效的修正措施是消除振源。如果振源不能有效消除，那么管壁振动频率就必须离开共振区，即改变管道直径，比如采用厚壁管道，也可用环向加强增加管壁频率，可增加约束层阻尼来减小动力学响应及其应力。

#### F.5 附加的测试和分析

振动根源的研究需要更详细的分析和/或测试，下列步骤可用来帮助确定振动发生的根源，或降低确定振动应力方法的保守性。比如，当使用 ASME OM-S/G Part3 第 5 节简化评估技术振动值超过限值，那么使用更细致的技术时振动值可能不超标。ASME OM-S/G Part3 第 5 节简化评估技术对大多数管道的评估是有效方法，但是，保守的假设得到的是简化的标准，因此，对较大振动位移需要用更详细的分析和测试进行判断振动是否可接受。详细的测试也包括使用应变仪精确确定管道的峰值应力水平。应变仪结合相关测试和分析，可以降低其保守性。在电站运行期间，持续监测数据获取系统也可以用于确定系统振动响应。