

ICS 27.120

F 29

备案号: 26343-2009

# DL

## 中华人民共和国电力行业标准

DL / T 1103 — 2009

---

### 核电站管道振动测试与评估

Testing and evaluation of vibration in nuclear power plant piping system



2009-07-22 发布

2009-12-01 实施

---

中华人民共和国国家能源局 发布

## 目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 定义	1
4 管道振动分类及等级	2
5 振动测试方法	3
6 管道振动等级评定	4
附录 A (资料性附录) 测试设备指南	7
附录 B (规范性附录) 测试设备要求	9
附录 C (规范性附录) 峰值速度判据	11
附录 D (规范性附录) 交变应力强度判据	13
附录 E (资料性附录) 计算分析: 稳态和瞬态振动的精确验证方法	15

## 前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于下达 2004 年行业标准计划的通知》（发改办工业[2004] 872 号）的要求安排制定的。

本标准规定了核电站管道振动的分类、检查与测量要求，计算分析和评定。本标准参照 ASME OM-S/G 2000 Part3：核电站管道系统试运行及启动过程中的振动测试要求，并等效引用其主要内容。

本标准的附录 A、附录 E 为资料性附录，附录 B、附录 C 和附录 D 为规范性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业核电标准化技术委员会归口并解释。

本标准起草单位：苏州热工研究院有限公司、大亚湾核电运营管理有限责任公司。

本标准主要起草人：林磊、陈志林、薛飞、逄文新、王俊、汪小龙、陆念文、杜建英。

本标准为首次制定。

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中心（北京市白广路二条一号，100761）。

# 核电站管道振动测试与评估

## 1 范围

本标准规定了核电站管道系统的振动测试方法、评估方法及验收准则。

本标准适用于核电站役前、初始启动试验、运行阶段各种工况下进行的管道系统稳态振动和可预期的瞬态振动的测试与评估。

本标准不适用于役前、初始启动试验、运行阶段的各种工况下的随机偶发管道瞬态振动的测试与评估。管道系统中的设备（如泵、阀等）不属于本标准范围。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

ASME OM-S/G-2000 Part3 核电站管道系统试运行及启动过程中的振动测试要求

ASME 锅炉及压力容器规范，第III卷

ASME B31 系列管道规范

## 3 定义

下列定义适用于本标准。

### 3.1

**管道系统 piping system**

指由管道组件和部件组成，其边界和功能在设计规范中明确给出。

### 3.2

**测试工况 test conditions**

指在进行测试时管道系统所处的工况。

### 3.3

**正常运行工况 normal operating conditions**

指管道系统处于预期功能的运行工况。

### 3.4

**运行测试 operational testing**

指正常运行工况下进行的测试活动。

### 3.5

**调试测试 preoperational testing**

指在冷态、热态调试阶段进行的测试活动。

### 3.6

**稳态振动 steady-state vibration**

在正常运行中时间相对较长的周期性振动。

### 3.7

**瞬态振动 transient vibration**

指在相对较短时间间隔内发生的振动，其应力循环次数小于  $1 \times 10^6$ ，如泵启动和切换，阀门的快速开、关及安全释放阀动作等。

### 3.8

#### 管壁振动 **shell-wall vibration**

指管壁的径向振动，其特征是周向呈叶状振型。

### 3.9

#### 原型 **prototype**

指根据原始设计建造的系统，该系统没有任何可用的历史测试记录。

### 3.10

#### 振动测试系统 **vibration testing system**

包括用于测试和记录振动数据的所有仪表或测试设备。在测量位置所要测量的变量（如位移、速度、加速度等）作为系统的输入信号，则振动测试系统的输出信号为被测量的数字/模拟量，且转换为相应的物理量。

### 3.11

#### 振动等级 **vibration class**

根据管道系统的特点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别为 W1、W2、W3，瞬态振动的管道系统其振动等级分别为 S1、S2、S3。

## 4 管道振动分类及等级

### 4.1 稳态振动

#### 4.1.1 振动等级 1 (W1)

满足下述条件之一的管道系统为 W1 级：

- a) 可以获得其在原型或相似系统上的测试数据，且可观测到最小不可接受振动的管道系统。
- b) 根据经验反馈，不会出现显著振动响应的管道系统。

此等级管道系统的振动状况采用 5.1.1 给出的方法进行检查，采用 6.2.1 提供的准则进行评价。

#### 4.1.2 振动等级 2 (W2)

满足下述条件之一的管道系统为 W2 级：

- a) 根据经验反馈，可能出现显著振动响应的管道系统。
- b) 不适宜用 W1 级管道系统的评价方法进行评定的管道系统。

此等级管道系统的振动状况采用 5.1.2 给出的方法进行检查，采用 6.2.2 提供的准则进行评价。

#### 4.1.3 振动等级 3 (W3)

满足下述条件之一的管道系统为 W3 级：

- a) 响应特性不是简单管道模态的管道系统（如出现管壁振动）。
- b) 不适宜用 W2 和 W1 类管道评价方法进行评定的管道系统。

此等级管道系统的振动状况采用 5.1.3 提供的方法进行检查，采用 6.2.3 提供的准则进行评价。

### 4.2 瞬态振动

#### 4.2.1 振动等级 1 (S1)

满足下述要求的管道系统为 S1 级：系统在运行寿期内经历瞬态振动（例如，系统经受泵的启动、阀门的开启和关闭），并且根据经验反馈，不会出现显著振动响应的管道系统。

此等级管道系统的振动状况采用 5.2.1 提供的方法进行检查，采用 6.3.1 提供的准则进行评价。

#### 4.2.2 振动等级 2 (S2)

满足下述要求的管道系统为 S2 级：用预期动载荷进行设计和分析，并根据所施加的预期动载荷能保守地预测瞬态力函数及相应结构响应的管道系统。

此等级管道系统的振动状况采用 5.2.2 提供的方法进行检查, 采用 6.3.2 提供的准则进行评价。

#### 4.2.3 振动等级 3 (S3)

满足下述要求的管道系统为 S3 级: 根据经验反馈, 由于部件设计的固有特性、系统运行或管系设计特性而经受明显瞬态情况, 且并未进行瞬态分析的管系。

此等级管道系统的振动状况采用 5.2.3 提供的方法进行检查, 采用 6.3.3 提供的准则进行评价。

### 5 振动测试方法

#### 5.1 稳态振动测试方法

##### 5.1.1 目视检查方法

目视检查方法参见附录 A.1。

##### 5.1.2 振动速度测试

###### 5.1.2.1 测试设备

参见附录 A 选用适当的测试仪器, 在管道系统上进行振动速度测量, 所用测试仪器应满足附录 B 的要求。

###### 5.1.2.2 测试位置及方法

初始测量应在管道上目视最大位移点处进行。在管线上不同点对振动速度进行连续测量, 确定出最大峰值振动速度所在位置。在每一测点上, 沿管道圆周进行测量以找出最大振动速度的方向, 测量应该在该点垂直于管道轴线的方向上进行, 位置确定后进行最大峰值振动速度 ( $v_{\max}^{\text{peak}}$ ) 的最终测量。

最大峰值振动速度从实际速度时域信号中得到, 应确保有足够长时间的信号, 以保证统计精度, 确保测量结果的可靠性。

所使用仪器的测量频率范围应符合附录 B 中 B.2.1 的要求。

##### 5.1.3 振动应变测试

###### 5.1.3.1 测试设备

参见附录 A 选用适当的测试仪器, 在管道系统上进行振动应变测量, 所用测试仪器应满足附录 B 的要求。

###### 5.1.3.2 测试位置及方法

- a) 进行管道系统的应变测量时, 在直管段上靠近可能发生最大应力部位 (如焊缝、支管连接处等) 应布置足够多的应变片, 记录管道系统的动态应变。
- b) 测定管道的名义弯矩, 应变片应布置于非应力集中部位。

#### 5.2 瞬态振动测试方法

##### 5.2.1 目视检查方法

在要求进行瞬态振动检查的各瞬态工况下对管道系统进行目视检查。若需要, 试验可重复以获取不同点的目视检查结果。

其他要求见 5.1.1。

##### 5.2.2 振动速度测试

###### 5.2.2.1 测试设备

对于瞬态振动速度的测量, 需选择合适的传感器, 传感器应具有足够的量程和频率响应, 以测量冲击载荷下的管道响应。

###### 5.2.2.2 测试位置及方法

按照 5.1.2.2 中的相关要求执行。

##### 5.2.3 振动应变测试

按照 5.1.3 中的相关要求执行。

### 5.3 记录报告

振动测试记录报告中应包括:

- a) 测试对象;
- b) 测试时间;
- c) 测试方法;
- d) 测试位置;
- e) 测试环境;
- f) 测试仪器;
- g) 测试工况;
- h) 测试结果。

## 6 管道振动等级评定

### 6.1 前提条件

本节的管道振动等级评定是在下述前提条件基础上建立的:

- (1) 振动引起的最大应力在弹性范围内, 因此不发生塑性循环失效;
- (2) 在振动事故中如存在热瞬态效应, 则其影响已在管道系统评估中得以考虑;
- (3) 由压力波动引起的薄膜应力与由振动弯矩引起的应力相比可不予考虑;
- (4) 振动事故的疲劳累积使用系数对其他预先确定瞬态振动的累积使用系数没有显著影响。

### 6.2 稳态振动

#### 6.2.1 W1 级管道系统的评定

W1 级管道系统根据目视检查人员的经验或简易仪器测量结果进行评定。

W1 级管道系统的测试结果分为可接受和不可接受, 评定方法如下:

- a) 目视检查人员应根据以下因素对管道振动量级进行评价:
  - 1) 振幅和位置;
  - 2) 与敏感设备的接近程度;
  - 3) 连接分支特性;
  - 4) 临近部件支撑的能力;
  - 5) 运行的一些独有特性。

振动量级可接受的管道系统, 可不进行进一步的测量或评估。

- b) 振动量级不可接受的管道系统, 或无法判断所观察到的变形是否可接受的管道系统, 应根据 6.2.2 或 6.2.3 进行评估。

#### 6.2.2 W2 级管道系统的评定

W2 级管道系统按附录 C 的峰值速度判据进行评定。

W2 级管道系统的测试结果按照表 1 (碳钢管道) 和表 2 (不锈钢管道) 的评定要求进行评定, 分为四个振动品质:

- 1) 优秀;
- 2) 合格;
- 3) 应评估;
- 4) 不可接受。

表 1、表 2 中的  $v_{allow}^{peak}$  按附录 C 计算得到, 除碳钢和不锈钢以外的其他材料管道, 根据 S-N 曲线计算相应的  $v_{allow}^{peak}$  值, 并进行等级评定。

表 1 W2 级碳钢管道系统的评定

最大峰值振动速度测量值 $v_{\max}^{\text{peak}}$ mm/s	振动品质	评 定 要 求
$0 \leq v_{\max}^{\text{peak}} \leq 12.4$	优秀	无
$12.4 < v_{\max}^{\text{peak}} \leq v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	合格	跟踪
$v_{\max}^{\text{peak}} > v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	应评估	进行应力评价, 见 6.2.3
$v_{\max}^{\text{peak}} > 2v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	不可接受	建议处理

表 2 W2 级不锈钢管道系统的评定

最大峰值振动速度测量值 $v_{\max}^{\text{peak}}$ mm/s	振动品质	评 定 要 求
$0 \leq v_{\max}^{\text{peak}} \leq 21.3$	优秀	无
$21.3 < v_{\max}^{\text{peak}} \leq v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	合格	跟踪
$v_{\max}^{\text{peak}} > v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	应评估	进行应力评价, 见 6.2.3
$v_{\max}^{\text{peak}} > 2v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	不可接受	建议处理

6.2.3 W3 级管道系统的评定

W3 级管道系统的评定按附录 D.1 的允许交变应力强度判据进行评定。用于获得管道振动应力的方法参见附录 E。对于 W3 级管道系统, 按照表 3 的要求进行评定, 分为两个振动品质:

- 1) 合格;
- 2) 不合格。

表 3 依据应力给出的振动品质

最大交变应力强度测量值 $S_{\text{alt}}$	振动品质	评 定 要 求
$S_{\text{alt}} \leq S_a$	合格	跟踪
$S_{\text{alt}} > S_a$	不合格	应处理

表 3 中  $S_{\text{alt}}$  和  $S_a$  的定义见附录 D。

6.3 瞬态振动

6.3.1 S1 级管道系统的评定

S1 级管道系统根据目视检查人员的经验或简易仪器测量结果进行评定。

S1 级管道系统的测试结果分为可接受和不可接受。

- a) 目视检查人员应根据以下因素对管道系统振动量级进行评价:
  - 1) 振幅和位置;
  - 2) 与敏感设备的接近程度;
  - 3) 连接分支特性;
  - 4) 临近部件支撑的能力;
  - 5) 运行的一些独有特性。



振动量级可接受的管道系统，可不进行进一步的测量或评估。

b) 振动量级不可接受的管道系统，或无法判断所观察到的变形是否可接受的管道系统，应根据 6.3.2 或 6.3.3 进行评估。

6.3.2 S2 级管道系统的评定

S2 级管道系统按附录 C 的峰值速度判据进行评定。

S2 级管道系统的测试结果按照表 4（碳钢管道）和表 5（不锈钢管道）的评定要求进行评定，分为三个振动品质：

- 1) 优秀；
- 2) 合格；
- 3) 应评估。

表 4 和表 5 中的  $v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$  按附录 C 计算得到，除碳钢和不锈钢以外的其他材料管道，根据  $S-N$  曲线计算相应的  $v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$  值，并进行等级评定。

表 4 S2 级碳钢管道的评定

最大峰值振动速度测量值 $v_{\text{max}}^{\text{peak}}$ mm/s	振动品质	评 定 要 求
$0 \leq v_{\text{max}}^{\text{peak}} \leq 12.4$	优秀	无
$12.4 < v_{\text{max}}^{\text{peak}} \leq v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	合格	跟踪
$v_{\text{max}}^{\text{peak}} > v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	应评估	进行应力评价，见 6.3.3

表 5 S2 级不锈钢管道的评定

最大峰值振动速度测量值 $v_{\text{max}}^{\text{peak}}$ mm/s	振动品质分类	评 定 要 求
$0 \leq v_{\text{max}}^{\text{peak}} \leq 21.3$	优秀	无
$21.3 < v_{\text{max}}^{\text{peak}} \leq v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	合格	跟踪
$v_{\text{max}}^{\text{peak}} > v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$	应评估	进行应力评价，见 6.3.3

6.3.3 S3 级管道系统的评定

S3 级管道系统的评定按附录 D.2 的允许交变应力强度判据进行评定。用于获得管道振动应力的方法参见附录 E。按照表 6 的评定要求进行评定，分为两个振动品质：

- 1) 合格；
- 2) 不合格。

表 6 依据应力给出的振动品质

最大振动应力测量值 $\sigma_{\text{max}}$	振动品质	评 定 要 求
$S_{\text{alt}} \leq S_a$	合格	跟踪
$S_{\text{alt}} > S_a$	不合格	修复

**附录 A**  
**(资料性附录)**  
**测试设备指南**

### **A.1 目视方法**

目视检查方法适用于 W1 (S1) 级管道系统的测试。目视检查方法允许利用感官 (如触摸) 来确定振动量级是否可接受。例如, 凭借经验通过触摸可以相当准确地感觉到频率为 2Hz~30Hz 的管道振动, 低频振动的幅值可以用千分尺来估计。

对于 W1 (S1) 级管道系统中不要求精确结果的管道, 可用 5.1.1 所推荐的简单方法评估振动量级。

目视方法的目的是确认振动是可接受的。如果不能确定振动量级可接受, 那么在目视检查之后, 需要用附录 C 或附录 D 所述的方法进行评估。

### **A.2 电测法**

**A.2.1** 本方法的硬件选择及方法适用于 W2 (S2) 及 W3 (S3) 级管道系统的振动测试。

#### **A.2.2 传感器**

##### **A.2.2.1 加速度计**

管道振动测量常用低频压电式传感器, 对于有超低频信号测试要求 (低于 0.5Hz) 的管道系统, 也可以采用电容加速度计。

对管道测量特别重要的加速度计特性如下:

- a) 传感器输出随温度的变化误差超过 10%, 需要根据温度修正曲线进行修正。
- b) 使用的最高温度: 任何情况下加速度计都不应超过制造商规定的最高工作温度。

##### **A.2.2.2 速度传感器**

速度传感器是用于直接测量速度而设计的传感器。它通常由一个可动的线圈或磁块组成, 输出电压正比于磁力线被可动部件切割的速率, 也就是速度值。

##### **A.2.2.3 位移传感器**

管道测量中用于直接检测位移的传感器有涡流探头 (或接近探头)、线性变量微分变送器 (LVDT)、拉线式电位计等, 都用于检测相对于固定点的绝对位移。

##### **A.2.2.4 专用传感器**

对特定振动量的测量, 可采用专用测试仪器 (如激光振动测量仪等)。

##### **A.2.2.5 应变片**

对于需进行应力评定的管道系统, 可采用应变片进行测量。用在管道上的应变片通常有可焊型和粘贴型, 电厂环境的温度及放射性量级特征可能会限制粘贴型应变片的使用, 因此可以使用可焊型应变片, 它可用在核电站所有温度及放射性量级的环境。

在测量过程中应避免可能遇到的问题, 尤其是静应力测量。这些问题与温度补偿、黏结剂稳定性、仪器稳定性及温度、放射性、高温环境等有关, 使用者应利用不断发展的新技术来避免这些潜在问题的发生。

### **A.2.3 电缆**

由于电缆噪声会污染由传感器获得的振动信号, 在传感器与数采器之间应使用低噪声电缆, 且电缆应适合预期环境的温度。

如果使用电缆接头, 应注意避免在这些部位出现温度传导。

### **A.2.4 信号调理器**

**A.2.4.1 一般要求**

信号调理器对所选的传感器应有合适的电特性。对加速度计，由信号调理器的积分电路或采集分析仪中的软件积分来获得速度和位移输出。积分电路可以包括在信号调理器中。增益的归一化是一个和加速度计输出比例系数（工程单位）联系在一起的重要特征，从而可以直接以速度及位移的单位读取数据。

**A.2.4.2 频率范围**

0~300Hz 的频率范围可以覆盖所有实际管道振动情况。

**A.2.4.3 振动等级范围**

包括传感器在内的测量系统应能测量 0.254mm/s~2540mm/s 的速度范围或 0.00254mm~25.4mm 的位移范围。

**A.2.4.4 滤波**

应具有低通、高通和带通滤波功能，以滤除超低频信号以及不需要的高频噪声等。

## 附 录 B

### (规范性附录)

### 测 试 设 备 要 求

#### B.1 典型的振动测试系统

本节提供满足 W1、W2、W3 及 S1、S2、S3 管道系统最低测试要求的测试设备与记录设备规范指南。由于数据采集技术不断发展, 本节不提供方法或技术, 但不管采用何种方法采集数据, 都应确保采集到的数据的准确性、可重复性, 并且数据采集设备应满足测试规范要求。附录 A 给出了典型振动测试系统的指南和注意事项。在试验过程中, 可以用附录 A 作为测试系统规范的基本内容。

#### B.2 一般要求

##### B.2.1 系统规范

振动测试系统技术要求应写成书面文件, 它可包括在测试说明书中, 也可作为测试要求的参考。振动测试系统技术要求应包含如下内容:

- a) 功能描述;
- b) 设备清单 (生产商, 型号, 产品系列号);
- c) 设备标定记录;
- d) 设备说明书;
- e) 安装说明书。

对振动测试系统来说, 构成振动测试系统的每个设备, 以下信息和最低要求应包含在设备规范里面:

- a) 每个输入和输出设备: 使用的单位和满量程范围。
- b) 精度: 规定为物理量的满量程的百分数。  
振动测试系统最低要求: 精度应高于所测变量验收值的 10%。
- c) 最小可测量值:  
振动测试系统最低要求: 最小可测量值应小于所测变量验收值的 80%, 以确保所有振动量级大于验收值的管道系统均能被筛选出来。
- d) 范围: 在指定精度内的满刻度范围。  
振动测试系统最低要求: 测量范围应大于所测变量验收值的 20%。
- e) 频率响应: 在指定精度内的最低和最高频率。  
振动测试系统的最低要求: 频率响应范围须扩大至高于最大或低于最小所测变量重要频率范围的 1/2 倍频程。
- f) 标定数据: 具体要求见 B.3。
- g) 其他规定: 对测量系统特殊的或对变量精确测量至关重要的其他规定 (例如, 温度补偿、安装要求等)。

表 B.1 给出了一个振动测试系统设备规范最低要求的例子。

**表 B.1 振动测试系统设备规范最低要求举例**

验收值 mm	精度 mm	最小可测量值 mm	满量程 mm	频响范围 Hz	其他: 最大管线温度 ℃
0.254	±0.0254	<0.203	0.304	0.5~60	120
2.54	±0.254	<2.03	3.04	0.5~20	150

### B.3 标定

振动测试系统中所有设备应有最新标定文件，这些文件必须附在振动测试系统说明书的后面。振动测试系统应进行现场测试并记录，以确保安装好的振动测试系统能完成系统技术要求指定的功能。

### B.4 重复性

应证明振动测试系统具备前后一致性测量的能力，这可在预调装置和检验台对几个平稳的变量的连续测量来实现，连续测量的结果应符合振动测试系统规定的最小精度要求。

### B.5 峰值和均方根值测量

振动测试系统必须能得到真实的零—峰值测量结果，如果使用的仪器易于进行均方根值测量，那么必须使用保守的方法将均方根值转换成零—峰值。

附 录 C  
(规范性附录)  
峰 值 速 度 判 据

### C.1 一般要求

该方法要求在管道系统上的不同点对振动速度进行连续测量,以确定最大振动速度所在的位置。确定该点后,在该点上进行最大峰值速度 ( $v_{\max}^{\text{peak}}$ ) 的测量并与最大允许峰值速度 ( $v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$ ) 进行比较。验收准则为  $v_{\max}^{\text{peak}} \leq v_{\text{allow}}^{\text{peak}}$ 。

### C.2 允许峰值速度

允许峰值速度的表达式为

$$v_{\text{allow}}^{\text{peak}} = \frac{13.4 C_1 C_4}{C_3 C_5} \frac{S_{\text{el}}}{\alpha C_2 K_2} \quad (\text{C.1})$$

$$C_3 = \sqrt{1.0 + \frac{W_{\text{F}}}{W} + \frac{W_{\text{INS}}}{W}} \quad (\text{C.2})$$

式中:

13.4 —— 转换系数, mm/s/MPa;

$C_1$  —— 补偿特征管段上集中质量影响的修正系数, 根据图 C.1 取值;

$C_4$  —— 端部条件修正系数;

$S_{\text{el}}$  ——  $0.8S_{\text{A}}$ ,  $S_{\text{A}}$  为 ASME BPV 规范 Section III Division1 图 I-9.1 中  $10^6$  次循环下的交变应力或 ASME BPV 规范 Section III Division1 图 I-9.2.2 中  $10^{11}$  次循环下的交变应力, 分析计算时应考虑温度对弹性模量的影响, MPa;

$C_3$  —— 管道内介质和管道保温层的修正系数, 管道没有保温层且空载或者介质为蒸汽时, 可取  $C_3 = 1.0$ ;

$W$  —— 单位长度管道的质量, kg/m;

$W_{\text{F}}$  —— 单位长度管道内介质的质量, kg/m;

$W_{\text{INS}}$  —— 单位长度管道保温层的质量, kg/m;

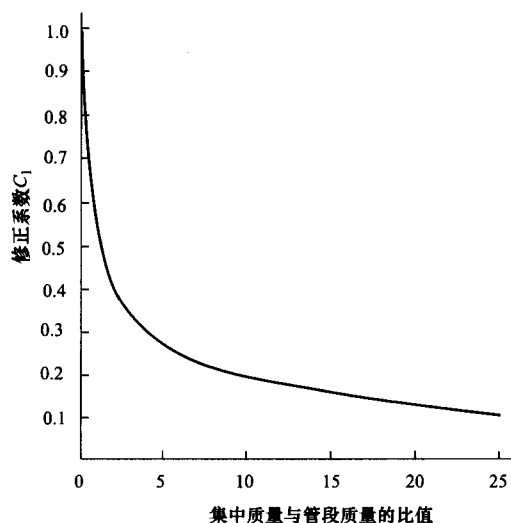


图 C.1 集中质量影响修正系数

$C_5$ ——考虑强迫振动偏离共振的修正系数，等于管跨第一阶固有频率与测得的频率之比；

$C_2$ ——二次应力指数，其定义及取值见 ASME BPV 规范 Section III NB-3680；

$K_2$ ——局部应力指数，其定义及取值见 ASME BPV 规范 Section III NB-3680；

$\alpha$ ——许用应力减弱系数。

当端部非固定约束以及形状非直管段时进行修正，两端固定的直管段取  $C_4$  为 1.00，该值对直管段的任何实际端部边界条件都是保守的；简支和悬臂管段取  $C_4$  为 1.33；等边 Z 型弯头取  $C_4$  为 0.74；等边 U 型弯头取  $C_4$  为 0.83。当频率比小于 1.0 时，可取  $C_5$  值为 1.0；当频率比值介于 1.0~2.0 之间时， $C_5$  等于该比值；当频率比值大于 2.0 时，本标准中无定义。对 ASME BPV 规范 Section III Division1 图 I-9.1 中的材料  $\alpha$  取 1.3；对 ASME BPV 规范 Section III Division1 图 I-9.2.1 或图 I-9.2.2 中的材料  $\alpha$  取 1。

### C.3 速度筛选准则

如果全部系数均采用保守值，就可以得到任何管道形式的可接受振动速度筛选值。利用该筛选值可检查管道系统的振动量级，对于振动速度小于该筛选值的管道可不进行进一步分析，而振动速度大于该筛选值的管道，其应力量级不一定超标，但需要进一步的论证来确定管道振动量级是否可接受。

下面的修正系数对绝大部分管道系统是保守的，对于极复杂的管道系统可能不保守。

$$1) \quad C_1 = 0.15$$

$$2) \quad C_2 K_2 = 4.0$$

$$3) \quad C_3 = 1.50$$

$$4) \quad C_4 = 0.70$$

$$5) \quad C_5 = 1.0$$

$$6) \quad S_{el} / \alpha = 52.92 \text{ MPa (碳钢管道, 不锈钢管道为 } 91.2 \text{ MPa)}$$

$$v_{\text{allow}}^{\text{peak}} = \frac{13.4 \times 0.15 \times 0.70}{1.5 \times 1.0} \times \frac{52.92}{4} = 12.4 \quad (\text{mm/s}) \quad (\text{C.3})$$

对不锈钢管道

$$v_{\text{allow}}^{\text{peak}} = \frac{13.4 \times 0.15 \times 0.70}{1.5 \times 1.0} \times \frac{91.2}{4} = 21.3 \quad (\text{mm/s}) \quad (\text{C.4})$$

### C.4 速度判据的使用条件

允许速度和应力之间的基本关系是基于下面的假设而推导的：管道的振型与一阶固有频率下的振型一致。用户应避免在不考虑振动速度、幅值、频率、振型的情况下使用速度判据。速度判据公式中的修正系数就是用来修正基本关系，以考虑非共振时的强迫振动情况。

如果管道的振动频率低于一阶固有频率，那么使用速度判据时就应考虑系数  $C_5$ ，因为当一阶固有频率与强迫振动频率的比值介于 1.0 和 2.0 之间时，不考虑修正系数所计算的应力是不保守的。

多跨距系统在电厂中很常见，当评价由邻近跨距的共振激励引起的应力时，一定要谨慎。在决定使用速度标准方法之前应确定单跨距的固有频率，以证明速度标准是可用的。如果一阶固有频率和测量频率之比小于或等于 2.0，那么可用速度方法。

**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, 计算的最大交变应力强度  $S_{alt}$  应在以下定义的限值以内。

(a) 对 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, 其定义及取值见附录 C;

$\alpha$  ——许用应力减弱系数, 其定义及取值见附录 C;

$K_2$  ——局部应力指数, 其定义及取值见附录 C;

$M$  ——仅由振动载荷引起的最大零—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;

$S_{el}$  ——其定义及取值见附录 C;

$Z$  ——管道截面模量。

(b) 对 ASME2 类、3 类和 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:

$i$  ——应力集中系数, 其定义及取值见 ASME BPV 规范 Section III, NC-3673 和 ND-3673 或 ASME B31 标准。

如果在试验过程中发现有振动量级高的管线, 而之前在对管系的设计分析中没有考虑到这些管线, 那么应考虑采取应对措施, 并对设计规范提出修正意见。

**D.2 瞬态振动**

对瞬态振动, 最大交变应力强度应在以下定义的限值以内。在确定允许的最大交变应力强度以前, 应对等效最大预期振动载荷循环次数 ( $n$ ) 进行评估。

(a) 对 ASME 1 类管道系统, 最大交变应力强度小于设计基准要求的限值。如果在设计基准内没有考虑瞬态振动, 则应对瞬态振动进行评估。剩余使用因子计算式为

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

式中:

$U$  ——累积使用系数, 由对 ASME 1 类管线的分析中得来, 且不考虑振动载荷。

最大允许等效振动载荷循环次数计算式为

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

最大交变应力强度  $S_{alt}$  应小于  $S_a$ ,  $S_a$  与  $N_v$  相对应。 $S_a$  为允许交变应力峰值, 参看 ASME BPV 规范 Section III, 图 I-9.1, 图 I-9.2.1 或图 I-9.2.2。



对于没有进行事先分析的瞬态振动,或对那些不适合单独进行载荷评估的,则需要根据 ASME BPV 规范 Section III 进行新的疲劳分析。

(b) 对 ASME 2 类和 3 类以及 ASME B31 管道系统,应采用与 D.1 (b) 对应的方法来进行应力评估。另一种方法是采用 ASME 规范进行瞬态振动应力评估。

## 附录 E (资料性附录)

### 计算分析：稳态和瞬态振动的精确验证方法

#### E.1 概述

当系统的部分属于 W3 (S3) 级管道系统, 或当 6.2.1、6.2.2 及 6.3.1 和 6.3.2 的方法不适用或过于保守时, 可用本节描述的方法进行评价。而当系统的动力学特性表明, 系统模态主要是由大型设备 (如泵、热交换器等) 的激励引起时, 本节方法也是适用的。本验证方法的主要目标就是通过测量管道系统的振动特性精确估计系统的振动应力。

E.2 和 E.3 分别给出了应用本节验证方法的两种可行技术和相关要求。

#### E.2 模态响应技术

##### E.2.1 一般要求

该方法要求从测试数据识别出系统的模态位移和固有频率。

该方法要求对系统进行模态分析, 获得系统固有频率, 模态振型及与振型向量相对应的模态应力向量 (或弯矩) 的解析解。实际测量和理论分析的固有频率和振型的结果应进行相关性分析。而后利用应力向量的解析值确定管道在所测量的模态位移下的真实应力状态。

##### E.2.2 测试要求

管系上应配置足够仪器来识别系统的固有频率和模态位移。不需要确保测试在振动最大的位置进行。根据附录 B 的要求, 仪器应能够测量加速度、位移或速度。仪器的安装位置应与系统理论模型中的计算点尽可能一致。

测试系统应该严格按照测试规范执行。测试中应记录足够多数据, 可以按照 E.2.3 中的方法对数据进行适当处理。

##### E.2.3 数据处理

应对稳态振动数据进行简化处理以获得系统每个主振动模态的位移零—峰值。很多确定模态位移的方法是有效的, 如试验模态分析法等。使用其中任一方法, 均应特别注意分离识别出系统中可能存在的密集的模态。

##### E.2.4 测试和分析的相关性

对所有有贡献的模态, 测量得到的管系所有主模态的频率和振型与解析方法得到的结果应该具备相关性。至少测试和分析得到的模态振型在具有主要贡献的模态方向上是相关的。而各模态下的相对幅值不需要严格一致。此外, 对应的模态频率应该合理地吻合。

##### E.2.5 测试响应的评估

利用测量所得的管道模态位移和相关解析解对管系中的振动应力 (或弯矩) 进行精确评估。利用测量的管道位移和系统模态信息获得管系振动应力的方法见 E.2.6。所得振动应力的结果应根据附录 D 的验收准则进行评价。

##### E.2.6 实验/分析校正法获得管系振动应力

###### E.2.6.1 实验/相关性分析

根据 E.2.3, 每个测量点的模态位移应制成表格并归一化为该模态下的一个适当值 (如模态质量归一化)。根据傅里叶变换计算各测点的相位得到位移的相对符号 (或正或负), 就可得到通过试验获得的归一化的振型, 可以与分析结果做比较。

###### E.2.6.2 测量响应的评估

确认实验/分析结果具有相关性后,由试验数据获得的实际模态响应即可确定管系中的分析模态力矩或模态应力。具体可以通过以下方式实现。

第  $i$  阶模态下的第  $j$  点的测量模态位移 (用  $D_{ij}^T$  表示) 除以相应的分析位移 ( $D_{ij}^A$ ), 得到如下的模态响应系数  $K_{ij}$

$$K_{ij} = \frac{D_{ij}^T}{D_{ij}^A} \quad (\text{E.1})$$

理论上, 如果试验模态振型和分析结果的相关性很完美, 每阶模态下的  $K_{ij}$  应该是相同的, 但实际上  $K_{ij}$  却有所不同。因此, 对每阶模态取最大  $K_{ij}$  作为该模态下的模态响应系数 (用  $K_i$  表示)。最大的  $K_{ij}$  应从占优势的模态运动方向的  $K_{ij}$  中去选取, 以避免不必要的保守。获得每阶模态下的模态响应系数 ( $K_i$ ) 后, 模态的试验应力向量 ( $S_j^T$ ) 可以由分析应力向量 ( $S_j^A$ ) 乘模态响应系数  $K_i$  得到, 即

$$(S_j^T)_i = K_i (S_j^A)_i \quad (\text{E.2})$$

这样获得的模态应力向量应该与适当的保守方法相结合使用以获得管道的总应力。

### E.3 应力测试技术

在稳态或瞬态振动下, 用应变片直接获得管道系统的振动应力。本节概述应变片使用的一般要求。附录 A 给出了在制定试验大纲前使用应变片的一些应考虑注意事项。

#### E.3.1 一般要求

在预计出现最大应力点附近的直管上安装足够的应变片。当用于确定名义弯矩时, 应变片应远离应力集中点。

#### E.3.2 测量响应的评估

在管道测点处测得的应变, 应转换成三个方向的主应力分量, 用 6.2.3 或 6.3.3 的评定准则进行评定。

中 华 人 民 共 和 国  
电 力 行 业 标 准  
核电站管道振动测试与评估  
DL/T 1103—2009

\*

中国电力出版社出版、发行  
(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)  
北京博图彩色印刷有限公司印刷

\*

2009年12月第一版 2009年12月北京第一次印刷  
880毫米×1230毫米 16开本 1.25印张 33千字  
印数 0001—3000册

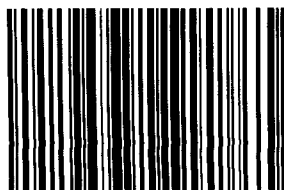
\*

统一书号 155083·2229

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



155083.2229

销售分类建议：规程规范/  
电力工程/新能源发电