

ICS 27.120.20  
F 65  
备案号: 57403—2017

**NB**

**中 华 人 民 共 和 国 能 源 行 业 标 准**

NB/T 20403—2017RK

---

# **压水堆核电厂隔间压力与温度瞬态分析**

**Subcompartment pressure and temperature transient analysis  
in pressurized water reactors**

2017 - 02 - 10 发布

2017 - 07 - 01 实施

**国家能源局      发 布**  
**国家核安全局    认 可**



## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 确定质量和能量释放源项的准则 .....	2
5 压力和温度瞬态分析的准则 .....	6
6 非对称压力分析准则 .....	11
7 淹没水位评价准则 .....	12
附录 A (资料性附录) 短期质量和能量释放 .....	14
附录 B (资料性附录) 压力和温度瞬态分析的建议 .....	16
附录 C (资料性附录) 排气道阻力系数计算 .....	22
附录 D (资料性附录) 动态排气道建模 .....	24
附录 E (资料性附录) 隔间压差计算 .....	27
参考文献 .....	29

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。  
本标准由能源行业核电标准化技术委员会提出。  
本标准由核工业标准化研究所归口。  
本标准起草单位：上海核工程研究设计院。  
本标准主要起草人：杨萍、王国栋、韦胜杰。  
本标准2016年5月19日，经国家核安全局审查认可。

# 压水堆核电厂隔间压力与温度瞬态分析

## 1 范围

本标准规定了压水堆核电厂安全壳内和安全壳外由高能或中能管道破裂或其他事件引起的短期和长期的隔间内压力与温度瞬态与淹没影响分析所必需的方法与准则。

本标准适用于压水堆核电厂安全壳内和安全壳外隔间及设备支承的设计审查,并可为确定设备鉴定环境条件提供参考。

本标准不考虑由于管道破裂引起的喷射力及有关作用,也不包括管道支架设计及破口位置确定。

## 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,仅所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。

NB/T 20402—2017RK 压水堆安全重要流体系统单一故障准则

EJ/T 335 轻水堆核电厂假想管道破损事故防护设计准则

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**能动故障 active failure**

除了非能动故障外,一经要求便依靠机械动作来完成其预期核安全功能的设备的失效。

示例:动力驱动阀或止回阀不能动作至其正确位置,或泵、风机、柴油发电机不能启动。

注:除非采取特殊设计措施或动作限制措施(例如“闭锁”电动阀的断路器)以防止误动作,否则应将由于其驱动或控制系统发生故障而引起的能动设备误动作看作是能动故障,无意地使动力驱动阀通电以致打开或关闭是误动作的例子。

### 3.2

**临界(次临界)流 critical (subcritical) flow**

流体速度等于(小于)局部流体状态条件下流体中声速的一种流体流动状态。

### 3.3

**均匀平衡模型 homogeneous equilibrium model**

基于混合物各相流速相等、均匀混合(相和组分)、各相和组分处于热平衡及等熵流动假设的一种临界流计算公式模型。

### 3.4

**惯性效应 inertial effect**

在隔间压力和温度瞬态分析中,由动量方程中的流体加速项引起的压力瞬态特性。

### 3.5

**长期 long term**

为确定建立设备暴露环境的压力和温度时间历程而需考虑的时间。

### 3.6

**节点容积 node volume**

在压力和温度计算分析中假设的几何分区容积。

### 3.7

**非能动故障 passive failure**

工艺流道堵塞或保持其结构完整性或稳定性的设备故障，以致其不能按要求提供预期的核安全功能。

### 3.8

**短期 short term**

为被研究参数达到其峰值再达到准稳态所需要的时间。

注：在大多数隔间分析中，此时间范围可从几毫秒到几十秒，通常用于为隔间结构设计所进行的支持性分析中。

### 3.9

**破前漏 leak-before-break, LBB**

管道裂纹在正常运行、预计瞬态和安全停堆工况载荷的作用下发展到导致失效的尺寸之前已产生可探测到的泄漏。

注：对于满足LBB评价准则的管道，其突然灾难性失效是不可能的。

## 4 确定质量和能量释放源项的准则

### 4.1 概述

假设管道破裂后，隔间中产生的压力和温度瞬态在很大程度上取决于管道破口质量和能量的释放率，随着释放率的增加，随后的环境状况变得越来越严重。除了淹没分析外，应采用会产生最大能量释放率的电厂运行方式。对于淹没分析，应采用会导致最大质量释放的运行方式。本章提出了用于确定喷放速率的方法。

质量和能量释放计算可归纳为两类：短期和长期。短期：与作用在构筑物和设备上压差引起的推力有关。推力在管子破裂不久就达到量大值，典型的是在1 s之内，然后随着压力逐渐与环境压力趋于一致而减少。长期：与通常经过较长时间才会达到最大值的淹没、环境压力、温度和湿度情况有关。本标准不规定安全壳内分析用的长期质量和能量释放计算方法。

### 4.2 通用准则

应按照NB/T 20402—2017RK考虑单一故障准则在安全重要流体系统中的应用。如在第5章、第6章、第7章的响应计算中假设了更严重的单一能动故障，则不需考虑关系到释放率的单一能动故障。

管道破口特性应按照EJ/T 335通过其位置、类型、面积和开裂时间来确定。涉及到LBB准则应用的内容，管道破裂动力效应、隔间升压瞬态效应和水淹效应等，应按照国家核安全局具体监管要求执行。

### 4.3 短期释放

#### 4.3.1 系统审查

作为进行分析的第一步，分析人员应熟悉所考虑的流体系统，由此决定分析中系统的取舍。应考虑设备，如节流装置、阀门、泵和热交换器的位置、功能和特性对流率的影响。在开发获得保守释放率的模型中应考虑与功率水平相关的系统运行方式和流体条件。

#### 4.3.2 手算

假设系统初始条件保持恒定的手算是可接受的。尽管如此，应包括破裂后导致较高释放的流体条件，例如存在流体压力和密度变化导致较大喷放速率的情况。质量和能量释放计算应反映这一点。

在假定的破口几何尺寸与流体状态的条件下，应采用临界流关系式预计的上限流量计算破口质量流量。对两相和饱和蒸汽工况可采用莫迪（Moody）关系式；对单相蒸汽工况可采用均匀平衡模型；在过冷或饱和液体工况下可采用亨利-福斯克（Henry-Fauske）关系式。其他能给出等于或大于上述单位面积质量流量的关系式是可以接受的。

从喷放系数、破口面积和单位面积临界质量流量的乘积可获得喷放流率。单位面积临界质量流量是通过临界流量关系式计算而得的单位面积流率。除非通过试验数据认为更小的喷放系数是合理的。否则应采用喷放系数值为1。试验条件（流体状态和流动几何形状）应适用于所假设的破口条件。还应考虑尺度比例效应。不得使用小于0.6的喷放系数。

应用公式（1）确定破口流率：

$$W = C_D A G_c \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$W$ ——质量流量；

$C_D$ ——喷放系数；

$A$ ——破口面积；

$G_c$ ——单位面积临界质量流量。

能量释放考虑中破口液体焓值应等于破裂管道中流体的滞止焓值。

当为取得喷放速率选择流体状态时，应考虑电厂正常运行方式的范围。

#### 4.3.3 计算机分析

用计算机程序来确定质量和能量释放时对系统应进行详细的分析，以免忽略重要的影响。

##### 4.3.3.1 系统模型的范围

应确定模型所包括的系统，需要考虑哪些系统应基于该系统的流体装量对整个系统流体装量的影响程度。对于有大管径管道和大容积设备的系统，可以忽略系统中一些小管径支路管线，但若假想破口管道是小管径时，则应考虑该管道。其他小管径管道是否需要考虑，需要根据其相对容积和与破口位置的接近程度来定。

对有容器的系统，通常须建立从流体容器到破口位置之间的管道的详细模型，该容器可以是提供流体源的容器、系统或设备。可以建立考虑了所有装量的粗略模型，且当某容器的装量足够大时，可以忽略接到该容器的其他管路系统的装量。

对没有容器的系统，存在不易识别流体容器的情况，如由于阀门隔离形成的小容积设备、有较多分支管线的管道等，在这些情况下没有必要开发可以详细模拟所有管道的模型，此时可以只针对破裂管道的某一长度建立详细模型，而对其余部分可集中处理为单一的或等效的节点。

##### 4.3.3.2 模型开发要求的信息

程序输入模型的建立应考虑下列信息（其他功能也可能是重要的，应在需要时予以考虑）：

- a) 管道长度;
- b) 管道内径;
- c) 摩擦因子;
- d) 管道形状阻力系数, 见附录 C;
- e) 设备内部流体容积;
- f) 设备内部流道长度和面积;
- g) 设备形状阻力系数;
- h) 泵特性;
- i) 与功率水平有函数关系的流体热力工况;
- j) 孔板面积;
- k) 文丘里管面积;
- l) 阀门位置和类型;
- m) 作为时间函数的阀位(全开、部分开或关闭)。

#### 4.3.3.3 流体系统模型

##### 4.3.3.3.1 计算机程序

可以用获得许可的数字计算机程序来获取质量和能量释放率。这些程序用来计算例如管道破裂事件后流体系统中的热工-水力响应。流体系统划分成控制体(或节点)以及连接控制体的接管(流动通道)。在这种方法中,在节点上求解质量和能量守恒方程,在流动通道上求解一维动量方程,并由此得出系统工况的时间历程。

##### 4.3.3.3.2 节点划分

在建立流体系统模型时,要作的重要决定是怎样将系统划分成离散的控制体。模型对质量和能量释放率影响很大。除非表明对相似问题的建模经验是可用的,否则应进行节点划分敏感性研究。

首先通过选择初始节点划分方案来进行这个研究。在由所使用的程序规定的限制条件下,控制容积的尺寸在整个系统中可以是不同的。尽管如此,在管径不变的一段管道中,应使用统一尺寸的控制容积。模型选定后,按计算机程序规定准备输入参数,执行这个计算,并记录释放率。

建议采用的第二个建模方案是新的控制容积要比第一个模型的更小。新容积尺寸可选为先前的一半。将从第二个模型里得到的质量和能量释放与先前的进行比较。如果两种情况的结果是吻合的,则表明第一个模型选择的节点是合适的。

从两个模型所得的结果如果不能吻合,应用第三个有更精细节点划分的模型来进行评价。同前一样,需对两个释放率进行比较,查看第二和第三个节点划分方案的结果是否吻合。这个过程应继续到从两个模型得出的释放率收敛到一个可以接受的程度为止。

释放率对破口和远距离流体容器之间的管道节点划分是最敏感的。在进行敏感性研究时远距离容器的详细模拟并不重要,故不需要改变节点划分。尽管如此,如果容器靠近破口,尤其当容器是含有稍微弯曲的流体流动通道的复杂设备或系统时,节点划分研究还应考虑容器模型。

##### 4.3.3.3.3 时间步长

计算机程序用户手册应提供时间步长选择的指导。可能设有自动时间步长选择,但这种选择要满足可接受的数学求解准则。

在程序输入数据规定了时间步长的情况下,应用下列步骤来确定可接受的时间增量。对每个节点模型,计算机逐一取较短的时间步长运行以找出能求出给定节点模型收敛解的步长。随着节点尺寸的减小,

要求更短的时间步长。对4.3.3.3.2所讨论的节点划分研究，每个节点模型可能要求对时间步长进行敏感性研究。

#### 4.3.3.4 初始条件

应对正常运行限值之内的初始条件进行审查，以确定哪一组条件将导致最大的释放率。破口流量取决于流体压力和焓值。应选择会产生最大释放的初始条件。在给定运行工况下，流体压力可在某允许范围内变化。在分析中应采用最高压力。

应考虑所有正常运行系统的排布情况，例如，因为其他管道可以排布为提供流体装量和能量的附加来源，所以阀门可全开或全关或部分开启。

#### 4.3.3.5 临界流模型

选择的临界流模型应保守地预计所在系统现在流体工况下的质量释放率。单位面积临界质量流量取决于流动几何条件和流体状态。对两相和饱和蒸汽工况可采用莫迪模型，单相蒸汽工况可采用均匀平衡模型，过冷或饱和液体工况可采用亨利-福斯克模型。应采用临界流喷放系数等于1。除非试验数据表明有理由取更低的值。试验条件（流体状态和流动几何形状）应适用于破口条件。还应考虑尺度比例效应。不得采用小于0.6的喷放系数。

#### 4.3.3.6 喷放分析的持续时间

应在超过能量释放率达到峰值时刻的这段时间内确定瞬态质量和能量释放。分析应考虑由于流体含汽量某些重要转变或受流体装量影响会导致滞后发生峰值释放率的可能性。

#### 4.3.3.7 结果

应以表格形式记录产生的数据。表格应包括时间、破口单位面积质量流量、破口流体比焓和破口能量释放率。破口节点流体压力和密度是可选的。压力和密度在计算管道破裂推力时是有用的。表格数据应有足够的时间点，以便在快变化期间能准确地反映出参数的状态。应表示出最大和最小质量和能量的释放率及其持续时间。在准稳态情况下，采用较少的时间点是可接受的。

#### 4.3.4 短期能量和质量释放的示例

需进行质量和能量释放分析的例子见附录A。

### 4.4 长期释放

#### 4.4.1 系统审查

应熟悉要分析的系统，包括：管道、阀门、泵和热交换器等；与功率水平有函数关系的热工-水力条件；运行方式或与功率水平有函数关系的系统排布情况；热源；可用的流体装量和保护动作信号以及系统隔离或开始运行的延迟时间。可从系统描述、电厂模型和图纸来得到这些信息。

#### 4.4.2 手算

计算长期释放可使用手算，并可用4.3.2给出的临界流关系式和喷放系数。

如果流体初始时处在饱和状态，那么为确定喷放流率必须维持初始压力和焓值。应假设这些条件，直到丧失足够的流体装量以致不再存在饱和条件为止。如果破口上游（如容器）的流体状态与破口处的饱和状态不同，则初始流体装量排空后喷放流率取决于初始上游流体状态。除了传热会导致更严重的条

件以外,应通过破口发生前的压力和焓值来确定临界流率和焓值。在这种情况下,应考虑传热以确定一个能得到更大能量释放率的修正的流体工况。

在流体过冷的情况下,可假设在破口产生后,流体立即会达到饱和液体状态。可用相应于初始流体温度的饱和压力计算流率。应用公式(1)来确定破口质量流率。

长期释放流率取决于系统上游的几何形状以及流体状态。为避免过高估计喷放阶段后期的释放,可取的方法是对上游系统的几何形状进行审查,查出可能存在的处于小于破口流率的流率值时可能达到临界的约束点。在约束点上的临界流率取决于约束点上游流体的状态。这个降低的流率可用作初始喷放后的释放率。

当可表明能通过破口的流体装量已排空时,质量和能量的释放应终止。终止可由保护动作信号和阀门关闭引起的系统隔离实现。

#### 4.4.3 计算机分析

利用计算机分析提供了确定系统降压和相关的较低破口质量流率的手段。也可以进行设备中压力或水位的跟踪。设备异常压力或水位能触发保护动作信号以隔离系统或缓解喷放影响。

##### 4.4.3.1 能量源

用计算机确定长期质量和能量释放信息取决于能量源项。分析应包括破口和隔离阀之间管道中的装量及对此有作用的任何容器装量。在确定能量源项时,应考虑容器与破口可能的隔离。还应包括会增加对隔间能量释放的在阀门、容器、管道等中所含的能量。

##### 4.4.3.2 初始条件

应按照4.3.3.4确定初始条件。

##### 4.4.3.3 系统响应

在确定长期质量和能量释放中,应考虑系统对管道破裂的响应。除了终止瞬态所要求的操纵员动作外,还应包括自动的系统响应。系统响应延迟应包括下列内容:

- a) 阀门关闭时间;
- b) 电气线路延迟;
- c) 信号延迟;
- d) 操纵员动作的延迟。

##### 4.4.3.4 系统模型

应按照4.3.3进行系统建模。

### 5 压力和温度瞬态分析的准则

#### 5.1 概述

对于核电厂隔间压力与温度瞬态分析,应考虑三类评价:

- a) 隔间升压分析;
- b) 环境压力和温度响应分析;
- c) 非对称压力载荷分析。

这三类评价中的每一个都是分开确定的，以重点突出分析的最终用途。进行隔间升压分析是为了确定构筑物上的压力载荷。进行环境压力和温度响应分析是为了确定机械与电气设备鉴定的压力和温度条件。进行非对称压力载荷分析是为了确定在特定设备或构筑物上压力载荷的分布（在第6章中阐述）。除了其最终用途通常与设备、支承和构筑物设计有关外，它与隔间升压分析是相似的。

从建模观点出发，a) 和c) 两项分开进行以强调后面分析的准确性。5.4.1描述了对三种评价同样适用的范围。仅适用于一或两种评价的范围，在特别提及这些分析的章条里讨论。

应用分析方法来研究机组对高能和中能管道破裂的环境压力和温度响应。通常，在某些分析阶段中，分析方法使用计算机程序。需要时，在适当的条款中指出对特定使用认为不可采纳的方法。

在这些分析中也应考虑单一故障。

## 5.2 电厂配置

在进行分析中，应对电厂配置进行审查，以熟悉所考虑的区域。这应包括确定在假想管道破裂后电厂系统功能事件的顺序和电厂几何配置。应对相应的电厂文件和总体布置图进行审查，以取得进行如5.3.1和5.4.4所描述的隔间节点划分所依据的电厂几何条件的全貌。可用的确定电厂配置的导则和资料参见附录B。

几何配置的审查应包括识别所有影响分析的如下电厂部件：

- a) 采暖通风和空调系统；
- b) 爆破膜、堵塞物、格栅和门。

应非常仔细地考虑由于压力引起的流道堵塞和流道几何形状变化。

## 5.3 隔间升压分析

准确地确定作用到机组构筑物两侧压差的分析定义为隔间升压分析。这个分析通常需要使用计算机程序。

### 5.3.1 节点划分

选择隔间节点划分方案不应使节点内有明显的压力梯度，即应当通过敏感性研究证实节点划分的方案，敏感性研究包括增加节点的数目直至计算的峰值压力收敛到小量的改变为止。同时需要包括对压力的空间变化的考虑，如隔间内周向、轴向、和径向的压力变化，用以计算作用于部件上的瞬态力和力矩。

应通过在每个对由于破口产生的流型和压力有重要影响的几何不连续点上定义节点边界来实现节点划分。节点划分应考虑由于长流道流体惯性或摩擦损失而产生的压力梯度。还应对节点划分进行校核，以确保在输送期间流速不超过声速。应根据预期的流动方向来划分节点。这些准则会导致在隔间里要求进行多节点分析。

### 5.3.2 惯量

用于这类分析的多数计算机程序中需要的几何惯量需从几何中心到邻近容积的几何中心来计算。惯量  $I$  定义如下：

$$I = \int^L \frac{dl}{A} \approx \sum_i \left( \frac{\Delta L}{A} \right) \dots \dots \dots (2)$$

式中：

$L$ ——邻近节点或容积中心间的距离；

$A$ ——垂直于流动方向的容积横截面积。

对面积有重大变化的流道应分段得出累加的惯量增量。

### 5.3.3 初始条件

隔间升压分析,应从所有正常运行工况中选取可以保守地确定隔间中产生压差的一组条件作为初始大气条件。一个可接受的模型要假设空气处在最大允许温度、最小绝对压力和相对湿度为零。如果假设的初始气体条件与此不同,则应当证明所选的值是合理的。

### 5.3.4 排气道的阻力系数

阻力系数输入值的计算应包括所有类型损失的影响,包括摩擦损失、转向、收缩或膨胀和障碍物周围的流动损失。对其损失由几种损失(例如转向加膨胀)组合而成的排气道,除非已有组合阻力系数的特定方程或经验关系式可用,可将每种类型的损失相加构成总的损失。当用这种方法组合阻力系数时,所用的面积基准应与流道面积一致。计算阻力系数的附加导则参见附录C。

### 5.3.5 非能动和能动部件及系统

在分析中应考虑所有非能动和能动部件及系统的影响,包括特定系统和动态排气道建模的影响。附录B提供了具体系统影响的指导,附录D提供了动态排气道建模的指导。

### 5.3.6 临界流动(阻塞流)关系式

选用的临界流动关系式对可用的试验数据应是保守的。建议使用的临界流动关系式是均匀平衡模型。

### 5.3.7 传热影响

对隔间升压分析通常可忽略传热影响。

### 5.3.8 时间步长长短

时间步长长短在很大程度上取决于质量和能量释放率、几何条件、节点划分方案和其他因素。有关时间步长长短的导则见附录B。

### 5.3.9 终止时间准则

在分析中,确定的分析终止时间应超过所研究的每个主要构筑物边界上出现最大压差的时间。这通常发生在喷放开始和在输入喷放能量释放率峰值后某一时刻之间,但特殊情况除外。

### 5.3.10 夹带

在分成节点的隔间模型中通过所有流道的排气流性能应基于热平衡下的均匀混合物,除非通过试验数据证明其他假设是合理的,否则应假设100%水被夹带进入相邻隔间。

### 5.3.11 敏感性研究

应按要求对节点划分、时间步长和其他参数进行敏感性研究以确保其分析结果的有效性。进行敏感性研究的考虑在附录B中提供。

### 5.3.12 质量和能量释放率

应按照第4章规定计算质量和能量释放率。

### 5.3.13 压差评价

对于新建核电厂，在建造许可证审批阶段，构筑物和部件设计中所用的压差值，应当是安全壳系统可接受的隔间、构筑物和封闭部件的计算压差值的1.4倍。在运行执照审批阶段，计算的压差峰值不应超过设计压力，并期望计算的压差峰值和建造许可证审批阶段计算的压差值没有太大差别。但是，分析模型的改善或竣工隔间的改变可能影响有效的裕度。

#### 5.3.14 压差的确定

应按整个事件期间，构筑物正反两侧上产生的平均压力的最大差值计算所研究的构筑物两侧的压差载荷。计算最大压差的方法应与结构设计几何条件的要求和数据的预计用途相一致。在本标准里，对更详细压力载荷分布的计算作为非对称压力载荷来考虑，并在6.3中讨论。

### 5.4 环境压力和温度响应

#### 5.4.1 通用准则

为确定环境瞬态对安全重要的系统、部件和构筑物的影响，应进行由于管道破裂或采暖通风和空调系统丧失可能引起的假想建筑物加热瞬态造成的压力和温度响应的计算。使用的分析方法与在隔间升压分析中所用的方法相似。最终，应通过分析保守地得出压力与温度值。

应使用工艺系统与仪表图、系统描述和其他必需的文件对影响机组环境的所有的电厂系统得出一个始发瞬变后各事件的顺序，应确定所有系统的保护动作整定值和动作时间。

#### 5.4.2 模型接合

当超出计算机程序接口或节点（容积）限制时，为描述一个完整的建筑物，可能需要几个相互重叠的计算机模型。在这种情况下，至少有一个模型包括从能量源到建筑物排出口或结构边界，并且包括所有大节点（容积）区。接合的模型应始终有重叠区域以保证接合的充分性，并且提供更准确的局部注入条件。输入到模型的初始压力分布还应在实际可能情况下平衡，以考虑隔间之间的标高差，避免瞬态中可能的不准确度或早期不稳定性。

#### 5.4.3 破口谱的减小

在有许多假想管道破裂且破口远离被研究设备或区域的大区域中，仅对最坏工况的破口详细地进行计算机分析是合适的。对这样的破口谱减小必须进行足够的分析，以确定或证明根据被研究区域压力或温度条件选择的最坏工况破口是合理的。

如果包络方法的准确性不能通过检查得以保证，应进行计算机敏感性分析以确保其准确性。

#### 5.4.4 节点划分

节点划分和几何条件计算的导则与在5.3.1中描述的隔间升压分析相似。通常可采用比隔间分析更粗糙的模型。

#### 5.4.5 排气道导则

排气道分析可应用在隔间分析中使用的习惯建模方法，但需加上一些附加考虑。应考虑所有过道、格栅、采暖通风和空调管道、管道沟和楼梯。阻力系数可从有关手册中查得。常用阻力系数参见附录C。

#### 5.4.6 采暖通风和空调模型

采暖通风和空调系统有可能以与正常流道例如门道和楼梯井无关的方式重新分布整个建筑物内的大气，尤其是在瞬态的后面阶段是如此。必须通过合适的节点（或容积）和所计算（或调整）的输入值

来表示大的管道网络，以确保得到准确的范宁型（Fanning-type）摩擦损失。通常入口和出口损失较大，必须包括在模型中。

尽管在采暖通风和空调系统中的初始流量较小且容易倒流，但在模型中应考虑长的采暖通风和空调管道对流体流动的影响。建模中应包括风机、隔板和过滤器。

应包括假想事件中起作用并且影响分析结果的任何温度、流量或压力驱动的密闭阀。

#### 5.4.7 质量和能量释放率

应按照第4章确定质量和能量释放源项的准则计算质量和能量释放率。

#### 5.4.8 时间步长长短

时间步长长短的确定，应同时满足稳定准则和对结果所要求的保守性。通常为使成本最小化，要求大的时间步长，并且要求进行敏感性研究以证明所选时间步长的可接受性。确定时间步长的进一步指导见B.7。

#### 5.4.9 敏感性分析

需要时应对节点划分、时间步长和任何其他参数进行敏感性研究，以保证分析结果的有效性。

#### 5.4.10 初始条件

用于设备鉴定时，应将初始大气条件选在高温、低压和高相对湿度的正常运行值。

#### 5.4.11 传热影响

为减弱压力或温度响应，可考虑向构筑物 and 设备的传热。如果来自高温设备的传热对环境温度或压力有明显的影 响，则应考虑并包括之。

分析还应包括最高和最低外部环境条件的影响。

#### 5.4.12 非能动和能动部件及系统

如5.3.5中讨论的，在分析中应考虑对压力和温度响应有影响的所有非能动和能动部件及系统。

#### 5.4.13 临界流动关系式

在分成节点的隔间模型中，通过所有流道的流动性能应基于热平衡下的均匀混合物，并假设100%水夹带得出。

#### 5.4.14 瞬态考虑

##### 5.4.14.1 操纵人员响应

应确定操纵人员为缓解瞬态后果或隔离管道破口的动作以便限定瞬态的终止时刻。对于某一给定的管道破裂和参加人员的情况，所取操纵人员响应时间应是完全合理的。

##### 5.4.14.2 建筑物隔离

对环境条件变化敏感的建筑物的区域可通过使用闭合门、温度驱动的防火密闭阀或其他设备以与管道破口的影响相隔离。对于每个管道破裂事件，应证明用于规定环境探测和设备驱动的所有假设是合理的。

### 5.4.14.3 压力和温度衰变的瞬态效应

在完成缜密的瞬态分析后，应确定瞬态效应的衰变速率。如果在瞬态分析中考虑了传热影响，则衰变速率应考虑构筑物的热载荷。

## 6 非对称压力分析准则

### 6.1 概述

本标准中将管道破裂引起的非对称压力载荷定义为由于压力在构筑物、部件或设备表面上的瞬态分布引起的在构筑物、部件和设备上的载荷。非对称压力分析确定了差压随空间与时间的分布，以估算作用在被研究部件上的力和加力时间。

分析的目的在于确定构筑物、部件和部件支承的设计要求。本章阐述了非对称压力载荷对外表面的影响。非对称压力载荷显得重要的时间过程很短，通常为几分之一秒。

在此分析中，应考虑单一故障。

### 6.2 升压分析模型

#### 6.2.1 力的分布

在建立隔间模型前，应确定受载荷影响的部件、设备表面和构筑物的受力分布。这个分布提供了隔间节点模型的范围和细节的基准。

#### 6.2.2 通用的隔间模型

在 5.3 中规定的计算机模型研制准则和导则可应用到非对称升压分析。应建立模型以确定作用在所研究设备或构筑物上的力和动量。因此，通常需要多节点模型。

#### 6.2.3 质量和能量释放率

应按照第4章确定质量和能量释放率。

### 6.3 载荷研究

#### 6.3.1 非对称压力载荷

应采用在所研究设备、构筑物或部件区域中的压力数据或流动速率来求出非对称压力载荷。对于可以从计算机模型求得压力分布的大设备和构筑物，应使用垂直于设备表面上的压力来计算三个正交方向上的净非对称压力载荷和动量。其计算公式如下：

$$\bar{F}(t) = -\sum_i P_i \bar{n}_i S_i \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{M}(t) = -\sum_i P_i \bar{n}_i l_i S_i \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$F(t)$  ——随时间变化的净力；

$M(t)$  ——随时间变化的动量；

$P_i$  ——在容积*i*中随时间变化的静压；

$\bar{n}_i$  ——设备节点*E* 表面的单位垂直向外向量；

$l_i$  ——动量臂：节点表面中心到原点的距离；

$S_i$ ——与节点*i*接触的设备表面面积。

### 6.3.2 流场考虑

设备或构筑物处于流场内部时，应使用基于当地流速的拖曳压降或摩擦压降关系式来确定载荷。这种情况通常与部件，例如延伸到或穿过流体流场的格栅、支承或管道有关（详见B.5）。通常这些部件的模型建立在一个节点的边界上，选择使用什么方法（压力或阻力）应依据可用的关系式而定：当在计算机程序的限制范围内可准确地反映压力分布时，应使用压力关系式，在可以很好确定和始终一贯地应用阻力关系式时，对设备应使用阻力关系式。如果不能准确地确定压力分布并且不能始终一贯地应用阻力关系式，则应考虑重新划分节点或终止使用，以确保所研究设备的设计是保守的。当绕物体的流动仅取决于雷诺数时，认为阻力关系式得到很好的确定。在可使用均匀的外部自由流速率及已很好确定状态特性的地方，通常可使用这种关系式，见B.4。

### 6.4 终止时间准则

分析终止时间应超过以最大应力、位移、加速度、动量和支承载荷表示的部件、构筑物或设备的峰值结构响应的时间。峰值非对称压力产生的力和动量发生在峰值结构响应时间之前。使用简化的结构模型，可估算终止时间以作为压力分析的输入。

### 6.5 敏感性研究

需要时应对节点划分、时间步长长短和其他参数进行敏感性研究，以确保分析结果的有效性。

另外，进行非对称升压分析时，节点划分敏感性研究应考虑用于计算作用在设备上的瞬态力和动量的空间变量（例如在隔间中周向、轴向和径向升压）。对任何参数确定其敏感性的最直接的过程是对6.3中由压力算得的力和动量载荷进行比较。

## 7 淹没水位评价准则

### 7.1 概述

高能或中能流体系统管道破裂会导致水释放到破口区域和邻近区域。为保证淹没不妨碍安全重要系统和设备的预期功能，应估算作为时间函数的水位高度以评价对安全重要系统和设备产生的影响。水位高度是破口的排放率、管道储存的流体容量、流体工况、房间几何条件和排水特性的函数。在本标准中不考虑非管道破口源引起的淹没。

在本分析中应考虑单一故障。

### 7.2 评价导则

#### 7.2.1 水装量

应假设在隔离破口前可释放的总的水装量全部释出。对一给定的管道破裂和操纵人员的情况，应证明所考虑的限制水释放的任何操纵人员或自动动作及响应时间是完全合理的。

#### 7.2.2 运行工况

应使用所有正常运行工况作为确定选择导致最严重淹没工况的依据。选择破口系统的初始工况应依据最小比容的流体状态。

#### 7.2.3 排水面积

在淹没水位的评价中应考虑某一区域排水的流通面积。在邻近区域淹没水位的评价中,应考虑从电厂的一个区域到邻近区域的流动。应依据流动区域的流动情况和几何条件来选择区域间的排放系数,以便获得在所研究区域中淹没水位的上限保守值。

### 7.3 分析技术

#### 7.3.1 淹没区域的确定

应考虑所有在正常工况下含有流体的管道都可能在一个区域里产生不可接受的淹没水位。应将电厂分成几个研究的隔离区域。这些区域的划分应依据电厂布置和结构配置,并且应选择可提供进入该区域的流体(淹没水)同离开该区域的流体(排出水)的简单比较。

应确定进入和离开某一区域或在某一区域中的淹没途径(例如各标高之间)。这些淹没途径可包括门道、楼梯井、管道井和沟、墙和地板口及其他开孔。当证明合理时,可考虑地坑泵和其它排水能力的作用。

#### 7.3.2 流体释放评价

对于假设的管道破裂,流体将从破口释放,直到破口隔离或流体容器排空为止。应通过建立流体装量的边界来确定流体可能释放到一个区域或几个区域的总量。

在所确定的边界范围内,对流体装量的贡献应包括管道储存的流体容量、设备(例如箱)所储存的流体容量和从水泵来的流体的总量。流体容量应包括冷凝至液体状态的流体的总质量。应按照第4章的准则计算破口的质量释放率。

#### 7.3.3 流体释放分布

只要释放率大于某一区域的排放率,释放到这一区域的流体将在该区域中积聚。某一区域的排放率应依据有效流通面积来计算。这应通过考虑水位高度和流通面积标高之间的关系以及如在7.2.3中所描述的排放系数来完成。每个区域所建立的水位高度应通过对释放到该区域的流体容量与区域的表面积进行比较来计算。考虑了低于水位高度的管道、构筑物或其他设备的容积水位高度将会增加。应对每个会受淹没源影响的区域重复进行水位高度的计算。

附 录 A  
(资料性附录)  
短期质量和能量释放

### A.1 质量和能量释放的典型流体系统

下列系统是可能需要进行质量和能量释放分析的例子：

- a) 主蒸汽系统；
- b) 主给水系统；
- c) 辅助给水/启动给水系统；
- d) 蒸汽发生器排污系统；
- e) 反应堆上充（补给）系统；
- f) 反应堆下泄系统；
- g) 反应堆冷却剂系统；
- h) 辅助蒸汽系统。

### A.2 系统模型

在流体系统模型的研制中，可能不需要连接到供给破口流体的大容器的管道系统的详细模型。例如在安全壳外下泄管道破裂情况下，反应堆冷却剂系统不需要用一个非常详细的模型来表达。在水力模型中，不需要像余热排出系统或稳压器喷淋系统那样的连接到反应堆冷却剂系统的管道。

另一个例子是主蒸汽管道破裂。如果蒸汽发生器二次侧容积较大，则应当包括主蒸汽管道和蒸汽发生器，但可以忽略给水管道的。如果蒸汽发生器二次侧容积不大，粗略地表示蒸汽发生器和主给水泵出口之间的给水管道的可以接受的。这个粗略表达式可能只是一个控制容积。

反应堆冷却剂系统主冷却剂管道中假想破口的模型依据确定破裂管道和主设备（反应堆压力容器、蒸汽发生器和反应堆冷却剂泵）的合适节点划分的研究而定。在反应堆压力容器中，要考虑的是下降段、下腔室、堆芯和出口腔室区。用合适的节点划分来计算蒸汽发生器入口腔室、传热段和出口腔室。可采用独立节点来表示各设备之间的管道。

### A.3 初始工况

本标准4.3.3.4讨论了计算释放率的初始流体力工况的选择原则。这里给出几个例子。

因为热备用（零功率）时初始流体压力大于较高功率水平的压力，所以此时蒸汽管道破口的喷放速率是最大的。

由于初始温度较高使管道破裂后所达到的饱和压力最高，所以在最大功率时，给水管道的破口喷放速率是最大的。

### A.4 质量和能量源项确定

一经使用上面提供的导则检验了流体系统并且确定了模型后,应作出有关确定质量和能量源项方法的决定。如果系统简单,可以使用手算,则应遵守4.3.2中的规定。在流体系统需要计算机辅助才能确定其质量和能量项的情况下,应遵守4.3.3的规定。

附 录 B  
(资料性附录)  
压力和温度瞬态分析的建议

## B.1 概述

为设计或执照审批进行的压力和温度瞬态分析的主要目的是为了核电厂构筑物的鉴定或安全有关设备的鉴定。可单独或组合使用多种不同的方法,以保守地计算压力和温度。存在着对短期与长期响应分析的方法和假设与设计人员或分析人员的要求不同的情况。因此,本分析的目的是在本标准的正文中规定可接受方法的最低要求。这里对满足执照审批和设计要求,以及保守地计算压力和温度的方法提出了建议。

通常,结构设计对瞬态压差比对瞬态环境温度影响更敏感。因此通过对构筑物上隔间升压分析(见5.3)或对设备上非对称压力载荷的分析(见第6章)来进行压力瞬态分析。这两者均考虑短期影响。在计算安全有关设备鉴定用的温度包络线时,要求进行环境温度瞬态分析。在对有较大热膨胀影响的一些构筑物(如安全壳内衬)设计的鉴定中,环境温度分析也是重要的。这些通常是长期效应,在本标准中既作短期也作长期效应的分析。

在下列几章中,列出了分析的步骤。

## B.2 一般模型开发

确定分析模型中的第一步应是确定电厂的配置。本任务的两个主要部分是确定假想管道破裂后电厂系统功能事件的顺序和确定几何条件及有关流体边界条件。这些需要使用下列信息,但应考虑将它们包括到分析模型中的必要性。

### B.2.1 一般电厂信息

开发压力和温度分析所用模型要求的一般信息应包括表B.1中提出的那些内容。在开始确定问题的范围和分析程序之前,应集中某些必要的信息。这些数据包括要进行调研的问题的物理描述和环境条件。

必需集中图纸以完整地描述所进行研究的区域。应找出具体的图纸,其中包括建筑物的总平面布置和总体布置图、标明假想破口位置的管路图和描述采暖通风和空调管道布置的图。描述混凝土墙(钢筋和块体)和较大的构筑物的结构图及标明设备位置的电气图是分析所必要的。还需要敏感设备的细节和大设备的外形图。

应对重要或敏感的设备、部件和结构墙的可用数据进行审查,其中包括任何可用的温度限值和压力限值。

为完成输入描述,需要另外的信息和假设。应规定所有建筑物的初始条件。应取得和审查任何对结果有影响的控制系统运行的信息。还应取得和审查由于环境温度或管道破裂能触发其动作的如采暖通风和空调密闭阀和门锁等物项或其他动作的信息。审查应包括电厂非能动部件的确定。这些非能动部件包括在管道破裂后以动力学方式作出响应的设备,如非能动的采暖通风和空调系统、爆破膜、堵塞物和门。格栅细节能用于描述楼板之间的旁通流量泄漏。有价值的假设包括反应堆操纵人员可能的干预和减轻事故以及事故结束的标志。两者均假定熟练的电厂人员采取合适的动作。在进行分析规程和解决潜在问题前需要这些信息。

### B.2.2 载荷顺序

必要时应当用工艺系统和仪表图、控制系统描述和其他必需的文件来确定会影响机组环境的所有电厂能动系统在始发事件后的事件顺序（如果在机组安全分析报告中还没有进行的话）。事件顺序将确定压力和温度分析的功能并作为其输入值。应确定系统的驱动时间或保护动作信号整定值，或两者的组合。

在事件顺序中受审查的要素至少应包括：

- a) 采暖通风和空调系统，其中包括建筑物隔离保护动作和被控制的密闭阀的整定值；
- b) 机组的安全和保护系统；
- c) 所假设的操纵人员响应；
- d) 建筑物隔离系统的响应，其中包括有关检测系统和系统驱动时间的假设；
- e) 破口隔离系统；
- f) 大的发热源和热阱；
- g) 可应用分析的能动故障准则。

### B.3 计算机程序考虑

高能或中能管道破口响应分析需要专门的模型和输入描述。隔间通常包含较大的容积和流通面积，每个容积有多个接管。大的高能管道破裂导致破口邻近地区的极高压差。在两个容积之间，空气、蒸汽和液相水混合物通常以声速流动这些物理和分析过程要求对模型的选择作仔细的考虑。

可进行的模型选择根据计算机程序的不同而有较大的变化。尽管它们所有的基本假设都是相同的，但对基本方程却没有采用相同的处理方法。在仔细阅读用户手册准备分析前，分析人员应熟悉所使用的程序。进而，分析人员应知道计算机程序的限制，尤其是应知道在程序中所作近似处理而固有的保守性。

大多数程序使用的基本假设是相同的，它们是：

- a) 一维流动；
- b) 所有变量径向一致；
- c) 流体状态均匀平衡；
- d) 相和组分热力平衡。

如所指出的那样，不同的程序有不同的项，最复杂的是包括基本方程输运项的程序。

表B.1 一般电厂信息

物项	压力和温度分析所用模型的一般信息
可 应 用 的 图 纸	平面和总体布置图 管路图 结构图——混凝土和大的构筑物 电气图——设备位置 采暖通风和空调平面图 设备图 热绝缘图
机 械 数 据	管道 破口位置 管道规格 设备 安全有关设备 设计压力限值 设计温度限值
另 外 的 信 息 源	控制系统描述 采暖通风和空调密闭阀 管道破裂驱动的管道流动控制装置 由管道破口引起的环境温度触发的门锁或其他动作 可应用的假设 操纵人员干预 事件终止 电厂模型 其他 建筑物初始条件 格栅细节 屏蔽堵塞物或吹气盘细则（质量、动量矩等） 从大热源来的传热

B.4 压力载荷与阻力载荷模型的考虑

为了提供在特定设备和构筑物上的载荷，需研制非对称压力载荷分析模型。如果将为计算一个构筑物或设备的保守的载荷而研制的模型用于不同的构筑物或设备，可能没有代表性。还有，为提高一个区域中计算的准确度而研制的模型通常不适用于某一相连的区域。在这些情况下，应考虑研制多个模型。有关这些问题在下面讨论。

当采用一个并非专门适用于设备的模型时，建模的困难在于需对通过使用压力分布还是阻力或摩擦关系式来计算设备上的载荷作出判断。在这种情况下，可能不能得到详细的压力分布（应用压力关系式）或均匀的自由流速率（应用阻力关系式）。另外，即使作了详细的节点划分，由于许多程序在模拟分层流动和切变流动影响的能力上的限制，计算机程序可能不能提供详细的压力分布。在这些情况下，力的历程的很大差异将导致要使用压力分布对阻力关系式。

使用方法的选取（压力或阻力）依据可用的关系式及其适用性而定。在模型或计算机程序的限制范围内（例如关于节点划分和切变流动影响）能准确地表示压力分布的地方，采用压力关系式，当绕物体的流动仅取决于雷诺数（例如可较好地确定均匀的自由流速率）的地方，使用阻力关系式。由于模型节点划分或计算机程序的限制，很少可能用一个模型去计算一个设备上的两种受力历程。对较大的设备，模型和节点划分的研究应当集中在压力分布上。在不容易进行详细压力分布计算的地方，建模的重点应当放在所研究设备局部均匀速率的计算上。预期对设备上的受力历程计算使用阻力关系式。

通过压力分布和阻力关系式两者算得的受力历程应当在幅值和时间上可比较。当办不到时，分析人员的责任是确定在计算准确的受力历程中是否可采用附加的模型。这可通过局部重新划分节点以提供一个准确的压力历程或自由场速率来实现，但不要试图同时确定两者；这些节点划分方案会是不同的。另一方面，对使用结构应用的考虑不进行重新分析便可解决差异。使用结构应用的一个例子是如果可保守地设计构筑物或设备，使用由两种方法的任一种得到的峰值载荷和最接近构筑物或设备自振频率的频率（或最接近的主要响应模式）是合适的。如果构筑物或设备不能采用这种保守假设进行设计，可考虑使用增加了局部节点的节点划分方案（如果计算机程序能对各种局部流动工况进行建模）或使用更适合于计算已很好确定的阻力关系的自由流速率的节点划分方案。

## B.5 节点划分

### B.5.1 节点划分原则

在大多数分析中，要求在一个大的隔间里进行某种节点划分，并通过确定会明显影响由于管道破裂产生的流动形式和压力的每个几何约束点的节点边界来实现。进行试验性节点划分，并通过改变节点数对它的合适性进行敏感性试验。至少应拟定两个节点划分方案。

分析可能要求多维节点划分安排。为此，应修改一些流动描述符的定义。可建立一个两维结构，并保持大多数计算机程序的均匀一维流动假设。节点划分要满足以下要求：

- a) 从结构边界开始；
- b) 尽可能保持区域在几何条件上有规则；
- c) 在可能产生临界流动时，不失去流通面积约束点；
- d) 描述与流动方向垂直的流动面积；
- e) 节点划分以便接管能表示出目前的实际流动形式（例如漏流或自然循环）；
- f) 在可能之处，避免很小容积节点直接连接到很大容积节点上。

### B.5.2 节点划分敏感性研究

为进行节点划分敏感性研究，使用在B.5.1中要求的两种节点划分算出其结果。对两种节点划分的结果进行比较，以确定它们对节点划分方案选择的敏感性。如果结果不能相比，则应进行另外的节点划分（通常有更多的节点）。并对其结果再进行比较。继续这个过程直到发现结果对节点划分的改变不敏感为止。随着分析人员进行节点划分和审查结果方面经验的积累，可将敏感性研究降低到只进行两次计算的理想数目：一次为基准计算，另一次为敏感性计算。

敏感性计算模型可比基准计算模型节点多，也可比它少。最佳步骤是容许容易地对其结果进行比较。对在有规则几何条件的区域中隔间的升压分析，节点划分应能通过简单的加法或减法对结果进行比较。如果两个模型表明了对节点划分是敏感的，则可通过对较早模型的节点进一步简单再划分来建立一个新的模型。这样，可建立一套节点划分方案，模型的计算和结果的比较是加法或除法。但对几何条件不规则的区域不能总采用如此简单的方法。

## B.6 排气道

### B.6.1 流体大量释放

连接两个互相连接的自由容积的流道或排气面积,应选取为沿流道方向的最小流通面积。以给出一个保守的释放损失(节点容积之间)和临界流。

如果采用无两个组分(空气/蒸汽)状态方程的程序,应提出另一个设计问题。应当指出,在管道破裂区域中受约束的几何条件可导致要求使用0.6的临界流乘子,以给出整个隔间较小保守性的平均压力结果。当大量流体强迫保存在靠近破口的区域中,并且排出到安全壳的时候,0.6的乘子进一步限制了流体自由分布的流动,降低了离开破口的压力。尽管如此,预期通常在初步安全分析报告阶段采用的用于计算设计压差的平均压力的1.4的乘子能弥补由于这种工况引起的任何近似或保守性的不足。然而,应在每一个工程项目中对此进行摸索,以确保设计的合适性。

### B.6.2 长期释放

作一些额外的考虑后,B.6.1中描述的那些习惯建模方法适用于此。应考虑所有附加的厅过道、格栅、采暖通风和空调管道、管道沟和楼梯。在一些程序中,总是按范宁损失来计算容积 $f(L/D)$ 的流动损失,并且应仔细地加以观察,以维持准确的流动摩擦。为此,可能需要取消容积摩擦选择或调整容积的等效直径。

对锐边入口和出口及斜的弯通道,常需要考虑接管摩擦。

如果已按照B.5.1使用一维流道作了节点划分,接管惯量大多易于计算。

## B.7 时间步长

时间步长长短的选择是一个不确定的因素。通常在瞬态开始时,特别是在大量高温、闪蒸流体注入到小容积中的地方需要最短时间步长。

### B.7.1 时间步长长短

时间步长长短在很大程度上取决于喷放范围、几何条件、节点划分和保护动作时间。通过经验、试验运行和敏感性研究可得到一个时间步长表。通过查阅程序用户手册和审查例题可获得一个可接受的初始试验性时间步长。另一有用资料是类似问题的以前计算情况。下面是计算时间步长表的通用规则。

a) 依据库朗特(Courant)准则选择一个试验性时间步长。

$$\Delta t = L/a \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$L$ ——节点或接管长度;

$a$ ——声速,近似等于488 m/s。

b) 由于热力学特性变化很快,在喷放早期应减短试验性时间步长。时间步长减短到十分之一是合理的。对于在每一时间间隔内对最长和最短时间步长作了规定的程序,最大和最小值之比为5~10。

c) 在问题趋于稳定状态的整个瞬态期间。时间步长增加到2~5倍。

d) 用敏感性研究来最后确定一组适合求解问题的稳定的、不敏感的和经济的时间步长值。

### B.7.2 时间步长敏感性

对时间步长进行敏感性分析，以保证计算结果对所选时间步长长短不敏感，并找出最长的实际可行的时间步长。通过将所选的输出参数与使用更长或更短时间步长而得到的结果进行比较，校验这组最佳时间步长值的敏感性。这最好通过将这组最佳（或稳定的）时间步长值中的每一个时间步长加倍或减半的方法来达到。使用最长时间步长可降低成本，而时间步长敏感性研究则提供了这种选择适用性的证明。

在整个初始瞬态期间都应当进行时间步长敏感性研究。使用长的时间步长或在应经常用于比较的参数是温度的地方的其他主要参数变化时，分析的后阶段也可能要求敏感性研究。

附 录 C  
(资料性附录)  
排气道阻力系数计算

### C.1 计算说明

当流动没有阻塞时,两个隔间容积之间的压力损失依据两个主要分量而定:几何形状损失和表面剪切摩擦损失。突然或逐渐膨胀和收缩、流经物体或流动转向引起的形状损失是容积之间压差的主要部分。这些可直接输入到程序中。与混凝土墙和设备接触引起的压力损失不太重要,这些损失不能直接输入到一些程序中,并且仅认为是等效的范宁型(管道流动)损失。因为这些损失可能影响到这个分析的最终压力,故不能忽略它们。对这些损失可进行敏感性研究以确定它们相对于形状损失的重要程度。

### C.2 形状损失

由于面积突然变化和转向引起的形状阻力系数(排气损失)应独立地进行计算,然后进行组合。下述方法用来计算流道的形状损失。

面积突然增大引起的形状阻力系数 $K_1$ ( $A_1$ 到 $A_2$ ,  $A_2 > A_1$ )由下式表示:

$$K_1 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \dots\dots\dots (C.1)$$

当 $A_2 \gg A_1$ 时,  $K_1$ 趋向于1。

面积突然收缩引起的形状阻力系数 $K_1$ ( $A_2$ 到 $A_1$ ,  $A_2 > A_1$ )由下式表示:

$$K_1 = 0.5 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \dots\dots\dots (C.2)$$

当 $A_2 \gg A_1$ 时,  $K_1$ 趋向于0.5。

当流道从一个节点(容积)到另一个节点包括多个局部损失时,可使用任何标准公式来决定局部阻力系数,然后按下列所描述的方法进行综合:

a) 对串联局部损失,总阻力系数用(C.3)式通过对串联局部阻力系数加权相加确定:

$$K = \sum_i K_i \left(\frac{A_i}{A_i}\right)^2 \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

$A_i$ ——接管面积;

$A_i$ ——接管中与局部阻力系数 $K_i$ 对应的流道面积。

b) 对并联局部损失,总的阻力系数确定如下:

$$A_t = \sum_i A_i \dots\dots\dots (C.4)$$

$$K = \left[ \sum_i \left( \frac{A_i}{A_t} \cdot \frac{1}{\sqrt{K_i}} \right) \right]^{-2} \dots\dots\dots (C.5)$$

### C.3 壁面摩擦损失

容积中的摩擦压力损失通常按在每一半容积中的范宁型（管道）摩擦损失进行计算：

$$\Delta P_f = 4f \frac{l}{2D_h} \rho \frac{V|V|}{2} \Phi_{2P} \dots\dots\dots (C.6)$$

式中：

$f$ ——范宁摩擦压力损失因子（如果使用达西-韦斯帕奇（Darcy-Weisbach）摩擦因子，则 $f_d = 4f$ ，本章中所有方程式都需以它替换）；

$\Phi_{2P}$ ——两相摩擦乘子。

依据卡门-尼古拉茨方程（Karman-Nikuradse），在光滑管道中湍流的范宁摩擦因子是：

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.4 + 4 \lg(Re \sqrt{f}) \dots\dots\dots (C.7)$$

式中： $0.0002 \leq f \leq f_t$ ，其中 $f_t$ 是：

$f_t$ ——是层流和湍流流动之间转换的范宁值。

对于层流：

$$f = \frac{16}{Re} \dots\dots\dots (C.8)$$

在某些程序中，两相摩擦乘子 $\Phi_{2P}$ 可根据修正的巴罗西（Baroczy）关系式求得，并用于增加两相流体流动的壁面摩擦损失。

有两维节点划分的隔间流动（一个容积有两个以上的接管）不对应于管道流动方程。因此，为了确保输入剪切摩擦损失的准确度，应使用管道型损失的等效直径来放大或缩小摩擦阻力系数。

## 附录 D (资料性附录) 动态排气道建模

### D.1 概述

在排气道建模中考虑问题之一是在瞬态期间,由于一些可动的机械或结构部件堵塞流道,使某些排气道流动面积改变。这里的部件指会影响排气道的爆破膜、门、堵塞物和闸门等。如果部件对运动的惯性阻力很小,则其模型可处理为当压差达到整定值时(此整定值通过对部件的强度或重量或两者的考虑,或通过某些其他方法确定)它们瞬时打开。尽管如此,一些部件如重的门、重的爆破膜和中子屏蔽塞在压差达到部件触发整定值时并不能瞬时打开。在这种情况下,排气面积瞬时全开的假设是不保守的,因此,应建立一个称作动态或时间相关的排气道模型。

动态排气道在很大程度上取决于设备的质量、设备两侧压差的增加速率和它打开的方式,并且应当在建模过程中加以仔细考虑。本附录讨论了在动态排气道建模中可用的方法。应当指出本附录限于分析考虑。应该用试验验证。

### D.2 动态排气道建模

在动态排气道建模中,应当做的第一步是确定部件的配置。应当集中考虑部件以及任何铰链和锁的几何条件和材料特性。动态排气道分析所需要的数据清单包含在表B.1中。

第二步是确定部件的移动方式。用堵塞物(在垂直位移型堵塞物的情况下)、静摩擦(在水平堵塞物的情况下)或锁、铰链和膜材料(对锁住的门或爆破膜)的最低强度来确定触发部件打开所要求的压差阈值。这压差阈值称为触发整定值。

随着部件移动接近其全开位置,在隔间里流体的压力和流量受到部件移动速率的影响。相反地,部件移动速率也在很大程度上取决于隔间里的压力和流动行为。因此,其响应是相互关联的。如果用于隔间压力和温度分析选择的计算机程序没有能力模拟动态排气道(但有能力模拟排气道面积随时间变化),则设备的动态特性应在外面计算,并通过以下讨论的迭代程序耦合到流体动力学行为上:

- a) 依据设备位移(例如依据高度或角度)的行为计算与时间相关的排气面积开度曲线。应当对局部几何条件进行审查,以得出在部件达全部位移前会限制流动的局部面积约束点(如果存在,这受约束的面积可作为在流动受阻塞时的全开面积);
- b) 将这释放面积开度曲线输入到热工-水力模型中,并得出一组压力和流率数据;
- c) 用从 b) 中得到的压力和流率及考虑了设备惯量和面积相关性的动力学方程计算设备的动力学特性(如在 D.3 中所示)。并由此产生另外一条(下一步迭代)与时间相关的排气面积开度曲线;
- d) 如果在 c) 中计算得到的面积开度数据与 a) 中假定的值不同(5%是合适的收敛准则),则重复 a) ~ c) 步骤,直到收敛到一个可接受的结果为止。

### D.3 垂直位移型部件的动力学方程

部件的重量一经被流经部分开启的排气面积的流体作用在部件上的向上压力和动量力所克服,垂直位移型部件,如设备闸门,就发生位移,可忽略摩擦力的作用。这种配置的动力学方程可写成:

$$M \frac{d^2 h}{dt^2} = A_0 (P_{in} - P_{out} - P_m + \frac{W^2}{\rho A_0^2}) \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

$M$ ——堵塞物质量;  
 $A_0$ ——全开的排气面积;  
 $P_{in}$ ——部件下面区域中流体的静压;  
 $P_{out}$ ——堵塞物上面区域中流体的静压;  
 $P_m$ ——部件单位面积上的重量;  
 $h$ ——部件的垂直位移;  
 $t$ ——时间;  
 $W$ ——质量流量;  
 $\rho$ ——流体质量密度。

假定平均压力和流率值在一个时间步长上是均匀的, 可直接对 (D.1) 式积分求解得:

$$h = h_0 + \bar{V}_\tau + 1/2 \bar{a} \tau^2 \dots\dots\dots (D.2)$$

$$\bar{V} = V_0 + \bar{a} \tau \dots\dots\dots (D.3)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{m} (\bar{P}_{in} - \bar{P}_{out} - P_m + \frac{\bar{W}^2}{\rho A_0^2}) \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

$h$ ——时间步长结束时堵塞物的位移;  
 $h_0$ ——时间步长开始时堵塞物的位移;  
 $V_0$ ——时间步长开始时堵塞物的速度;  
 $m$ ——堵塞物单位释放面积上的质量,  $M/A_0$ ;  
 $\tau$ ——时间步长  $\Delta t$ ;

$\bar{W}$ ——在整个时间步长期间平均流率 (假设总与流动方向垂直):

$$\bar{W} = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} W(t) dt \dots\dots\dots (D.5)$$

每个压力均为在整个时间步长期间的平均压力:

$$\bar{P} = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} P(t) dt \dots\dots\dots (D.6)$$

#### D.4 角位移型部件的动力学方程

角位移型的方程和计算步骤与 D.3 中所讨论的相似。这种部件的动力学方程可写成:

$$\frac{I}{L} \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} = A_0 (P_{in} - P_{out}) + \frac{(W \cos \theta)^2}{\rho A_0^2} - Mg \cos \alpha \dots\dots\dots (D.7)$$

使用 D.3 章中所述的假定和平均方法, 对 (D.7) 式积分可得出:

$$\theta = \theta_0 + \omega\tau + \frac{\bar{T}\tau^2}{2I} \dots\dots\dots (D.8)$$

$$\omega = \omega_0 + \frac{\bar{T}\tau}{I} \dots\dots\dots (D.9)$$

并且

$$\bar{T} = I \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} \dots\dots\dots (D.10)$$

$$\bar{T} = L \left[ A_0 (\bar{P}_{in} - \bar{P}_{out}) + \frac{(W \cos \theta)^2}{\rho A_0} - Mg \cos \alpha \right] \dots\dots\dots (D.11)$$

式中：

$\theta$  ——从初始位置测得的角度；

$\alpha$  ——跟踪重力向量的角度；

$I$  ——质量惯性矩；

$L$  ——面积动量臂；

$g$  ——重力加速度；

$\bar{T}$  ——使部件转动的平均转矩；

$\omega$  ——角速度（其中假设部件在初始位置的一个表面与流道是垂直的）。

通过计算 $T$ 然后适时修正 $\omega$ 和 $\theta$ ，按堵塞物的开度逐步求解方程。应使用足够的时间步长确保在整个时间步长里（通常大于10步），压力和流量不致改变太多。

在每一次对 $\theta$ 重新计算结束时，用部件流动面积与 $\theta$ 的曲线（在第一步中计算）确定相应时间的流通面积。这过程将继续到部件流通面积全开为止。

附 录 E  
(资料性附录)  
隔间压差计算

用于隔间分析的计算机程序的正常输出以每个节点的压力-温度历程形式给出。隔间结构分析所研究的参数是边界两侧的压差。如在本标准5.3.1中所讨论的,所研究的隔间或区域可能需要许多节点以充分地描述在其边界内的压力行为。因此,应制定确定边界两侧预期压差的方法。不管采用程序或手算方法,下列步骤是较合适的一种:

- a) 在流动回路中每个容积的平均压力 $\bar{P}_v$ 可用(E.1)式进行计算:

$$\bar{P}_v = \sum_{i=n}^m (P_i V_i) / \sum_{i=n}^m V_i \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

$P_i$ ——节点*i*上的压力;

$V_i$ ——节点*i*上的容积。

流动网络中容积的某些邻近容积按流体力学意义连接(没有流道,但通过墙进行分隔)。当确定压差时应考虑这些容积,并且赋以等于或低于其环境压力的平均压力值。

对均匀区域和节点划分,例如通常的反应堆腔的情况,可使用平均容积不致有大的误差。

- b) 压差可通过将邻近容积的平均压力减去所研究容积的平均压力而获得:

$$\Delta P_v = \bar{P}_v - \bar{P}_{av} \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

$\bar{P}_{av}$ ——a中所确定的邻近容积中的压力。

- c) 通常每个表面都有一个 $P_v$ 值,如果分析的目的是确定一个设计值,应进行下列工作:

$$\Delta \bar{P}_v = \sum_{i=1}^n \Delta P_{vi} / n \dots\dots\dots (E.3)$$

式中:

$n$ ——隔间里的表面数目。

$$\Delta \bar{P}_{vD} = F \Delta \bar{P}_v \dots\dots\dots (E.4)$$

式中:

$F$ ——确定设计值 $\Delta \bar{P}_{vD}$ 时所用的合适的相乘因子。

如果压力历程数据表明,穿过容积有明显的压力梯度,应当进行下列校核:

$$\Delta \bar{P}_{vD} \geq \Delta \bar{P}_{vi, \max} \dots\dots\dots (E.5)$$

$$\overline{\Delta P_v} F \geq \overline{\Delta P_{vj,max}} \dots\dots\dots (E.6)$$

- d) 如果分析的目的是确定设计裕度，则应重复 a 到 c，并包括应用公式 (E.4) 和 (E.6)，以确保设计裕度率至少为 1。

### 参 考 文 献

- [1] NUREG-0800 SRP (2007) 6.2.1 CONTAINMENT FUNCTIONAL DESIGN
  - [2] EJ/T 924—1995 《轻水堆隔间压力与温度瞬态分析》
-





中 华 人 民 共 和 国  
核 行 业 标 准  
压水堆核电厂隔间压力与温度瞬态分析  
NB/T 20403—2017RK

\*

核工业标准化研究所出版发行

北京海淀区骚子营 1 号院

邮政编码: 100091

电 话: 010-62863505

原子能出版社印刷

版权专有 不得翻印

\*

2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—50

定价 44.00 元