

ACP1000 余排系统管道的强度分析与评定

兰麒, 宁庆坤, 唐雨建

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: **目的** 深入研究 PIPESTRESS 程序计算原理和方法, 总结软件的特点, 并对如何更好地使用有限元软件完成核级管道计算工作提出自己的观点, 为后续的管道计算工作提供指导。 **方法** 采用 PIPESTRESS 软件对 ACP1000 余排系统管道进行应力计算, 结合 RCC-M 规范和管道分析的基本原理, 从管道模型建立、载荷定义与工况组合、管道抗震分析和应力评定几个方面对 PIPESTRESS 软件的基本原理和具体应用进行深入分析与研究, 并采用 SYSPIPE 软件对 PIPESTRESS 的计算结果进行设计验证, 对产生误差的原因进行深入研究。 **结果** 虽然存在一些影响验证结果的因素, 但两种软件的计算结果十分接近。 **结论** PIPESTRESS 程序能够很好地胜任对 ACP1000 核级管道的建模、力学分析和应力评定工作, 具有良好的计算精度, 该研究成果可以为 ACP1000 管道计算提供依据, 对未来 PIPESTRESS 程序在新堆型中的应用也具有很大的参考价值。

关键词: ACP1000 管道; 应力分析; PIPESTRESS; SYSPIPE; 设计验证

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.010

中图分类号: O342 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0047-07

Strength Analysis and Evaluation of ACP1000 Residual Heat Removal System Piping

LAN Qi, NING Qing-kun, TANG Yu-jian

(China Nuclear Power Engineering Co, Ltd, Beijing 100840, China)

ABSTRACT: Objective To study in depth the calculation principle and method of PIPESTRESS program, summarize the characteristics of the software, and propose viewpoints on how to better use finite element software to complete nuclear pipeline calculation to guide the subsequent pipeline calculation work. **Methods** PIPESTRESS software was used to calculate the stress of ACP1000 Residual Heat Removal System piping. Combined with RCC-M specification and the basic principle of piping analysis, the basic principle and specific application of PIPESTRESS were discussed and studied in depth from the aspects of piping model establishment, load definition and working condition combination, seismic analysis and stress evaluation of the calculation results. Then the design verification for PIPESTRESS was carried out with the SYSPIPE software. The causes of errors were studied in depth. **Results** Although there were some factors affecting the results of verification, the results of the two kinds of software were very close. **Conclusion** PIPESTRESS program can be well qualified for the modeling, mechanical analysis and stress assessment of ACP1000 piping, and has good calculation accuracy. The research results can provide basis for the calculation of ACP1000 piping, and also have great reference value for the future application of PIPESTRESS program in new reactor.

KEY WORDS: ACP1000 piping; stress analysis; PIPESTRESS; SYSPIPE; design verification

ACP1000 是中核集团在 CP1000 核反应堆基础上, 消化吸收 AP1000 核电技术, 吸取国际核电站事故经验教训后, 自主研发的一种第三代压水堆核电站。其余热排出系统 (RHR) 采用全压设计, 温度高压大, 工况参数复杂, 计算难度大。

DST 公司的 PIPESTRESS 软件是国际上广泛使用的有限元管道计算软件^[1], 适用于多种堆型, 内置了完整的国际通用的核级管道设计规范 (如 RCC-M 规范、ASME 规范等), 功能非常强大。PIPESTRESS 程序对使用者要求很高, 如果不对管道计算原理和程序操作方法进行深入研究, 很容易得出不符合实际的结果。

文中深入研究了如何运用 PIPESTRESS 程序对 ACP1000 余热排出系统管道进行强度分析与评定, 为后续的管道计算工作提供指导。

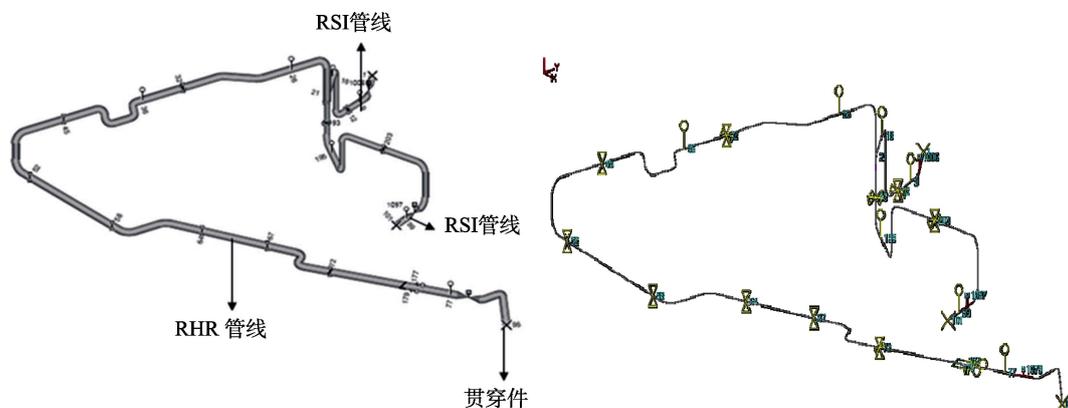


图 1 PIPESTRESS 管道模型

1.2 弯头柔性系数

由于管道模型同时包含一、二级管道, 因此必须要注意弯头的柔性问题。对接焊弯头在由直管段推压制造的过程中, 弯头的柔性会增为直管的 k 倍, k 即为弯头的柔性系数^[2]。

RCC-M 规范^[3]中对于弯头柔性系数有明确的规定, 对于二级管道, 根据 C3680 中的规定, k 是一个只与弯曲半径和管道尺寸有关的参数:

$$k = \frac{1.65}{h}$$

式中: $h = tR/r^2$ 。 R 为弯曲半径; r 为横截面的平均半径; t 为弯头的名义壁厚。

对于一级管道, 根据 RCC-M 规范 B3684.1 中的规定, 在满足一定条件的前提下:

$$k = \frac{1.65}{h} \left(\frac{1}{1 + \frac{Pr}{tE} X_k} \right)$$

式中: P 为管道内压; $X_k = 6(r/t)^{4/3} (R/r)^{1/3}$; E 为管道弹性模量。

从以上规范规定可以看出, 一级管道弯头的柔性

1 管道模型的建立

1.1 RHR 管道建模

文中需要分析的管线由余热排出系统 (RHR) 管道和安全注入系统 (RSI) 管道组成, 其中 RHR 系统管道为二级管道, 设计温度为 180°C , 设计压力 17.13 MPa 。RSI 系统管道为一级管道, 设计温度为 343°C , 设计压力为 17.13 MPa 。管线材料均为 Z2CN1810, 抗震类别均为 1F 类。管线模型中采用了直管、弯头、阀门、大小头、三通等几乎全部单元类型, 支撑类型也囊括了弹性支撑、刚性支撑和阻尼器三种支撑。采用 PIPESTRESS 对管道进行建模, 并对支撑点施加约束, 得到的模型如图 1 所示:

系数除了与弯曲半径和管道尺寸有关外, 还和内压有关的。采用 PIPESTRESS 建立一个外径 273 mm , 壁厚 6.35 mm 的 90° 弯头模型, 将弯头一端固定, 并取压力为 10 MPa , 分别按照一级和二级管道进行计算, 结果见表 1。

表 1 弯头频率和柔性系数

管道等级	一阶频率/Hz	柔性系数
一级	190.48	7.93
二级	155.77	12.12

由此可见, 弯头当作为一级管道考虑时, 由于压力的存在, 导致柔性系数变小, 从而弯头刚度变大。这种影响是不容忽略的, 当计算同时含有一、二级管道的模型时, 这个问题是非常需要注意的。

2 载荷定义与工况组合

2.1 主要载荷

由于含有贯穿件, 文中分析的管线承受的载荷除了通常的内压、自重、热胀、地震 (SL1 和 SL2) 外, 还增加了不同厂房之间的锚固点位移等工况。表 2

表 2 载荷列表

自重+内压	压力、自重	工况号	备注
		1	持续载荷
地震	SL1 地震	2	偶然载荷 (动态)
	SL2 地震	9	偶然载荷 (动态)
热胀	正常工况下热胀	20	一般只有一个
	异常工况下热胀	21-26	可包括多个工况
	事故工况下热胀	37	可包括多个工况
	最高温度 (夏天) 影响	12	与 20、21—26 工况进行组合
	最低温度 (冬天) 影响	13	与 20、21—26 工况进行组合
锚固点位移	预应力和蠕变产生的锚固点位移	14	
	建筑物沉降产生的锚固点位移	16	
	设计基准事故产生的锚固点位移	48	只在事故工况下考虑
	SL1 地震的锚固点位移	3、4、5	按静载荷考虑, 需要与 SL1 地震工况组合
	SL2 地震的锚固点位移	41、42、43	按静载荷考虑, 需要与 SL2 地震工况组合

中列出了本次分析考虑的载荷以及各载荷所对应的工况号。其中的部分载荷需要与其他指定载荷进行组合。

2.2 热胀工况的组合

对于热膨胀载荷, 应先对每个热胀工况各个方向的冷态力矩进行单独计算, 然后再对同一方向上全部热胀工况的冷态力矩分量进行包络, 最后再对三个方向的包络力矩分量进行 SRSS (平方和开平方) 组合, 从而得到最终的热胀载荷合力矩。冷态力矩的折算公式为:

$$M_{cold} = \frac{E_{cold}}{E_{hot}} M_{hot}$$

式中: M_{cold} 为冷态下的力矩; M_{hot} 为热态下的力矩; E_{cold} 为冷态下的弹性模量; E_{hot} 为热态下的弹性模量。

2.3 持续和偶然载荷的组合

对于持续载荷 (如自重、内压) 和偶然载荷 (地震), 组合方法根据管道等级的不同而有所区别。

对于一级管道:

$$M = \left[\left(|M_{Ax}| + |M_{Bx}| \right)^2 + \left(|M_{Ay}| + |M_{By}| \right)^2 + \left(|M_{Az}| + |M_{Bz}| \right)^2 \right]^{1/2}$$

对于二级管道:

$$M = \left[M_{Ax}^2 + M_{Ay}^2 + M_{Az}^2 \right]^{1/2} + \left[M_{Bx}^2 + M_{By}^2 + M_{Bz}^2 \right]^{1/2}$$

对于一级管道是按照类似热胀载荷的方式组合的, 而对于二级管道则是先分别对持续和偶然载荷各自三个方向的力矩进行 SRSS 组合, 然后再进行互相组合。此外, 对于地震位移和地震响应的组合方式, PIPESTRESS 完全可以由设计者自行定义, 像平方和

开平方 (SRSS) 组合、绝对值相加组合等都是可以选择的。

2.4 工况组合命令

PIPESTRESS 程序所有工况的组合都需要设计者进行人工定义, 输入比较复杂, 定义时需要非常小心谨慎。其工况组合命令有“CCAS”和“CSTR”两种, 其中“CCAS”命令同时适用于一级和二级管道, “CSTR”命令只适用于非一级管道。下面列举了采用 CCAS 命令分别计算一、二级管道的工况组合命令流及程序内部对应的应力计算过程。可以看到, 程序内部的组合方式与本节开始时介绍的规范规定的组合方式是完全一致的。

热胀载荷: CCAS CA=151 RF=20 ME=8 EQ=1 C1=21 C2=22 C3=23

一级管道持续和偶然载荷: CCAS CA=500 RF=60 PR=0 SS=1 ME=1 EQ=2 OP=0 C1=1 C2=92 TI=/0.EQ(9)

二级管道持续和偶然载荷: CCAS CA=501 RF=60 PR=0 SS=1 ME=1 EQ=3 OP=0 C1=1 C2=92 TI=/B.EQ(10)/

3 管道抗震分析

静力法、谱分析法和时程法是工程中最常用的三种抗震分析法。对于 ACP1000 核级管道的抗震分析, 采用的是谱分析法。

3.1 反应谱的选取

本次计算采用多层谱法对 RHR 系统管道进行抗震分析, 选取的反应谱见表 3。此外, 当采用多层谱进行计算时, PIPESTRESS 不需要像 SYPIPE 程序^[6]那样对刚性和阻尼器支撑所在节点施加激励和投影, 只需要定义支架所在的谱层数即可, 因此使用起来更为方便。

表3 多层谱分析选谱

厂房	标高/m	反应谱	阻尼比
5RX (内层安全壳)	1.15	X、Y、Z SL1 SL2 谱	3% (SL1) /4% (SL2)
5RX (环墙内区域)	-0.85	X、Y、Z SL1 SL2 谱	3% (SL1) /4% (SL2)
5RX (环形区)	-0.85	X、Y、Z SL1 SL2 谱	3% (SL1) /4% (SL2)

3.2 低阶频率的模态组合

对于管道截断频率以前的模态，可以采用 GROUP 法、10%法和 CQC 法等方法对模态进行组合。GROUP 法是核电厂抗震设计规范^[7]中规定的一种密集频率法，该方法按密集频率系数对频率进行分组，先将每组内的各个响应取绝对值相加进行组合，然后再将组与组之间的响应进行 SRSS 组合。10%法也是一种密集频率法，这种方法是 M310 电站工程中最常用的方法，具有较大的保守性，只适用于 SYSPipe 软件，PIPESTRESS 中不能选择此方法。CQC 法是一种完全平方组合法，若采用 10%法的抗震计算结果不理想，可以尝试采用 CQC 法从而降低计算结果的保守性。

本次计算采用 GROUP 法进行模态组合，得到的前五阶频率见表4。管道模型的第一阶和第二阶模态阵型如图2所示。

表4 前五阶频率

阶数	固有频率/Hz
1	2.5256
2	3.7937
3	5.4937
4	6.2372
5	8.1186

中的 left-out-force 选项来控制静力修正的，而无需求 SYSPipe 那样定义每个方向的“单位施加加速度载荷”（通常工况号定义为 6、7、8）来进行静力修正，因此更为方便。

4 应力评定

4.1 一级管道评定

ACP1000 电站一级管道各载荷工况要满足的 RCC-M 准则和相应的许用应力极限见表5。经过 PIPESTRESS 程序计算，得到的一级管道应力评定如下：

表5 ACP1000 电站一级管道应力评定限制

载荷工况	工况号	准则级别	方程	RCC-M B 3650 极限
设计工况	1, 2	O 级	9	<1.5S _m
	2, 20 T 26	A 级	10	<3S _m
正常工况	20 T 26	A 级	12	<3S _m
	1b,2	A 级	13	<3S _m
事故工况	1, 9	D 级	9	<3S _m
	9	D 级	9'	<2.5S _m
	1	D 级	9''	<2.0S _m

注：S_m 为设计温度下材料的许用应力强度，当方程 10 未满足时，方程 12、13 要同时满足

表6 一级管道最大应力评定

准则级别	方程	节点	计算值/MPa	许用极限/MPa	应力比
O	9	101	90.46	141.00	0.64
	10	101	413.53	282.00	1.47
A	12	101	195.53	282.00	0.69
	13	101	167.90	282.00	0.60
D	9	101	139.78	282.00	0.50
	9''	1	92.12	229.4	0.40

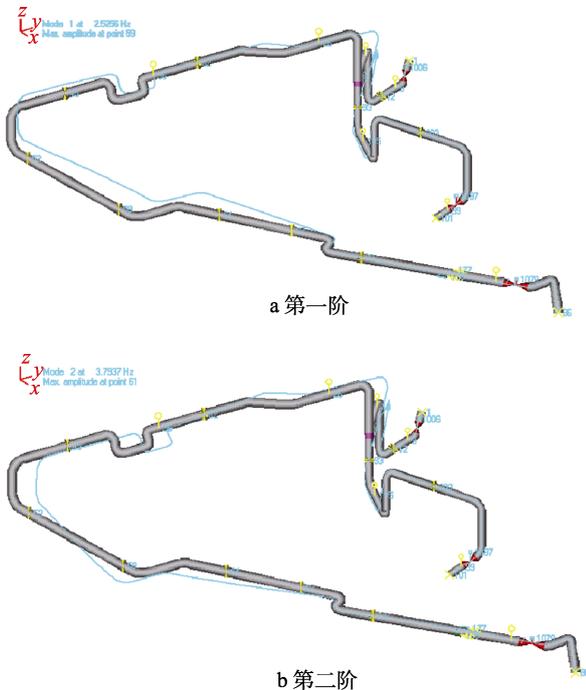


图2 RHR 系统管道第一、二阶模态振型

3.3 静力修正

对于截断频率以后的高阶模态响应（刚性段），需要与低阶频率响应进行组合，即静力修正。PIPESTRESS 是通过反应谱工况定义命令“RCAS”

4.2 二级管道评定

ACP1000 电站二级管道各载荷工况要满足的 RCC-M 准则和相应的许用应力极限见表 7。经过 PIPESTRESS 程序计算，得到的二级管道应力评定见表 8。

4.3 附加方程评定

根据 ACP1000 PSAR 文件 3.2.3 节规定，抗震 I 类部件分为 1I, 1F 和 1A 三类，抗震 1I 类部件要

求其在 SL-2 地震载荷作用能够保持其完整性，抗震 1F 类部件要求其在 SL-2 地震载荷作用下能够保证其功能性，抗震 1A 类部件要求其在 SL-2 地震载荷作用下能够保证其可运行性。

根据 RCC-P 规范中的规定，对于抗震 1F 类部件应按照 C 级准则进行评定，对于抗震 1A 类部件应按照 B 级准则进行评定。抗震 1F 类部件和抗震 1A 类部件校核的方程和许用值见表 5-3 和表 5-4。

表 7 ACP1000 电站 2 级管道应力评定限制

载 荷	工况号	准则级别	方程	RCCM C 3650 极限
内压+自重	1	O 级	6	$<1.0S_h$
热膨胀	12、13、20、21 T 26	A 级	7	$<1.0S_a$
	1、12、13、20、21 T 26		8	$<1.0(S_h + S_a)$
固定端位移	14、16	A 级	9	$<3.0S_c$
异常工况	1、2、3、4、5	B 级	10	$<1.2S_h$
	1、9、41、42、43、48		10	$<2.4S_h$
事故工况	9、41、42、43	D 级	10'	$<1.9S_h$
	1		10''	$<2.0S_h$

注：当方程 7 未满足时，需要满足方程 8

表 8 二级管道最大应力评定

准则级别	方程	节点	计算值/ MPa	许用极限/ MPa	应力比
0	6	77	44.49	102.60	0.43
A	7	18	109.58	160.65	0.68
	9	86	13.28	324.00	0.04
B	10	86	79.16	123.12	0.64
D	10	86	132.03	246.24	0.54

由于本次计算的管线抗震类别均为 1F 类，且不含有抗震 1A 类的阀门，因此只需进行管道功能性校核评定。经过计算，得到的结果见表 11。通过计算结果可以看出，该管线各项应力均满足要求。

表 9 抗震 1F 类部件评定准则

管道级别	应力	评定方程	许用极限
一级	一次应力	9	$1.9S_m$
	二次应力	12	$5.0S_m$
二级	一次应力	10	$1.8S_h$
	二次应力	7	$3.0S_c$

注： S_c 为室温（冷态）下材料的许用应力

表 10 抗震 1A 类部件评定准则

管道级别	应力	评定方程	许用极限
一级	一次应力	9	$1.5S_m$
	二次应力	12	$3.0S_m$
二级	一次应力	10	$1.2S_h$
	二次应力	7	$1.0S_a$

表 11 管道功能性校核评定

管道等级	应力	方程	节 点	计算值/MPa	许用极限/MPa	应力比
一级	一次应力	9	101	161.30	178.60	0.90
	二次应力	12	101	192.78	470.00	0.41
二级	一次应力	10	86	129.22	184.68	0.70
	二次应力	7	18	109.58	324.00	0.34

5 设计验证

虽然计算结果能够满足规范要求，但是由于

PIPESTRESS 是首次在工程中应用，大量的参数设定都需要人工完成，一个错误的参数就可能导致计算结果与真实值大相径庭。因此为了防止误用程序，确保设计安全，有必要采用 SYSPipe 程序对计算结果进

行设计验证。

5.1 影响验证结果的因素

在设计验证前,先研究三个可能会对验证结果产生影响的问题。

1) 三通的刚度处理问题。三通作为核电管道系统中一个非常重要组成部件,其连接区域的刚度问题一直容易被人忽略。为了研究这个问题,建立三个三通模型。第一个三通用 PIPESTRESS 建模,第二个用 SYSPIPE 三通单元建模,第三个用 SYSPIPE 直管单元建模并在连接区域建立刚性单元。三个模型均取主管外径 273 mm,壁厚 6.35 mm,支管外径 88.9 mm,壁厚 3.05 mm,材料均为 Z2CN1810,并在三通支管端部设固定点。分别计算其第一阶频率。得到的结果如图 3 所示。

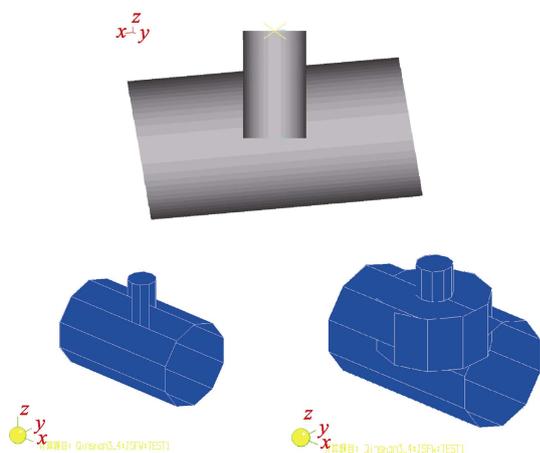


图 3 不同处理方法的三通模型

表 12 三种模型的一阶固有频率 Hz

SYSPIPE (三通单元)	SYSPIPE (采用刚性单元)	PIPESTRESS
115.09	155.75	155.79

由此可见,SYSPIPE 程序三通单元的一阶频率偏低,而当 SYSPIPE 程序采用直管加刚性单元的建模方法时,得到的一阶频率与 PIPESTRESS 程序非常近似。这是因为 SYSPIPE 程序的三通单元由 4 个节点 3 个直管单元构成,其支管起始点与主管中心点为同一节点,这样主管和支管连接区域的刚度就等于支管的刚度。这明显是不合理的,会导致三通附近的应力、支架载荷等的计算结果和真实值有所偏差。PIPESTRESS 程序的三通单元由五个节点构成,其支管起始点在主管外径边缘位置,与主管中心点之间采用刚性连接,这就使其刚度更符合真实刚度,因此计算结果更为精确,如图 4 所示。

2) 工况组合方式问题。SYSPIPE 程序几乎全部的载荷工况组合和方程评定都是在软件内部自动进行的,其在附加方程评定时采用的工况组合方法与规

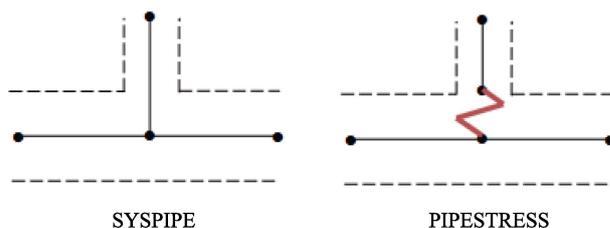


图 4 三通有限元模型

范规定有所不同。对于一次应力(持续和偶然载荷),1、2 级管道均按照 1 级管道方法进行组合;对于二次应力(热胀载荷),则是先对每个热胀工况三个方向进行组合,然后再进行工况间组合。这样得到的结果比 PIPESTRESS 完全按照规范要求组合后的结果略小。

3) 对中误差取值问题。实际工程中,管道与管道在焊接过程中会存在相对中心线的偏差,这种偏差叫做对中误差。PIPESTRESS 默认 RCC-M 和 ASME 规范取的对中误差为 2.4 mm,其他规范取 0.79 mm;SYSPIPE 程序则统一默认取 0.48 mm。对中误差主要会对对接焊缝和过渡段的应力增强系数产生影响,从而会使两种程序对同一个模型的计算结果有所差别。

了解了可能影响验证结果的这三个问题后,采用 SYSPIPE 程序对该段管线进行建模分析计算,下面将给出具体计算结果的对比。

5.2 模态分析验证

表 13 和图 5 给出了两种软件前五阶频率以及第一阶模态阵型图的对比。可以看到,无论是各阶固有频率值还是阵型图,两种程序的计算结果都非常接近,最大误差为 1.173%。

表 13 前五阶频率对比

阶数	固有频率/Hz		误差/%
	SYSPIPE	PIPESTRESS	
1	2.5169	2.5256	0.346
2	3.7813	3.7937	0.328
3	5.4748	5.4937	0.345
4	6.2251	6.2372	0.194
5	8.0245	8.1186	1.173

5.3 计算应力验证

两种程序的各项应力计算结果对比见表 14—16。可以看出,两种软件的各项最大应力的计算结果非常接近,最大误差为 3.507%,是在可接受范围内的。

通过以上对比不难发现,虽然存在一些影响验证结果的因素,但两种软件的计算结果还是十分接近的,这也间接验证了两种软件计算精度的可靠性。目前核安全局对两种管道强度分析软件的计算结果都是认可的。

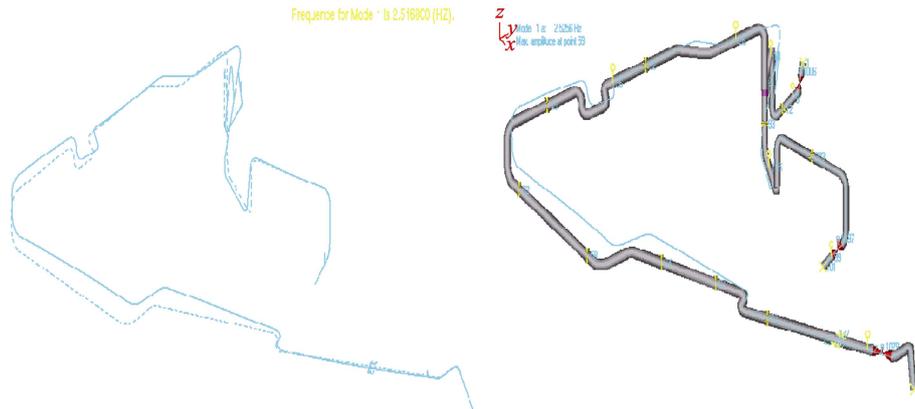


图 5 管道第一阶模态振型图对比

表 14 1 级管道应力对比

准则级别	方程	节点	计算值/MPa		误差/%
			SYSPIPE	PIPESTRESS	
0	9	101	90.42	90.46	0.044
	10	101	400.89	413.53	3.153
A	12	101	193.04	195.53	1.289
	13	101	167.85	167.90	0.030
D	9	101	139.18	139.78	0.431
	9"	1	92.12	92.12	0.000

表 15 2 级管道应力对比

准则级别	方程	节点	计算值/MPa		误差/%
			SYSPIPE	PIPESTRESS	
0	6	77	44.43	44.49	0.135
A	7	18	106.85	109.58	2.555
	9	86	12.83	13.28	3.507
B	10	86	79.15	79.16	0.013
D	10	86	131.72	132.03	0.235

表 16 管道功能性应力对比

管道等级	方程	节点	计算值/MPa		误差/%
			SYSPIPE	PIPESTRESS	
1 级	9	101	160.69	161.30	0.380
	12	101	186.68	192.78	3.268
2 级	10	86	125.56	129.22	2.915
	7	18	106.95	109.58	2.459

5.4 程序特点总结

下面对 PIPESTRESS 程序的一些特点进行总结，将其与 SYSPIPE 程序进行对比，见表 17。

6 结论

1) PIPESTRESS 程序能够很好地胜任 ACP1000 核级管道的建模、力学分析和应力评定工作。

2) PIPESTRESS 程序在使用时需要根据规范和工程实际对程序中的参数进行合理的设置，以得到正

表 17 程序特点总结

特点	PIPESTRESS	SYSPIPE
操控性	使用灵活,操作复杂	操作简单,有局限性
方程评定	人工评定	自动评定
工况组合	人工自由组合	自动组合
多层谱/静力修正	高效便利	复杂低效
三通单元刚度	真实合理	刚度偏低

确的工程结论。

3) 结合 PIPESTRESS 程序，对 ACP1000 管道应力分析方法进行了全面深入的研究，可以指导管道计算工作。

4) 深入对比和分析了 PIPESTRESS、SYSPIPE 两种程序在单元特性等方面的差异，通过对比计算结果，验证了两种程序计算精度的可靠性。

5) 该研究成果可以为 ACP1000 管道计算提供依据，对 PIPESTRESS 程序在 AP1000 等新工程中的应用具有很大的参考价值。

参考文献：

- [1] DST. PIPESTRESS Theory Manual[Z]. 1985.
- [2] DST. PIPESTRESS User Manual[Z]. 2012.
- [3] 李亚智. 有限元法基础与程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 宁庆坤, 白旭娟. 含有弯头的核级混合管道模型计算[J]. 核动力工程, 2018, 39(S1): 119-121.
- [5] RCC-M—2007, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands[S].
- [6] Framatome. SYSPIPE 234D User Manual[Z]. 2005.
- [7] GB 50267—97, 核电厂抗震设计规范[S].
- [8] 宁庆坤, 田金梅. 二代改进型核电站管道系统应力分析与评定[J]. 核技术, 2013, 36(4): 63-67.
- [9] OLEG K. Parametric Study of Flexibility Factor for Curved Pipe and Welding Elbows[C]//Transactions, SMiRT-22. San Francisco, California, 2013.
- [10] US NRC Regulatory Guide 1.61, Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants[S].