

# 核级管道非标支架的力学分析与优化设计

王骥骁, 弓振邦, 刘贺同, 高齐乐

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘要:** **目的** 基于核级管道支架的力学分析, 针对性地提出非标支架优化设计方案。**方法** 核电站中管道支架为确保管道系统的安全运行发挥着至关重要的作用。针对工况复杂、要求严苛、承载恶劣的管道支架, 为满足其支撑与抗震功能, 通常采用非标设计。深入研究非标支架的力学计算和评定方法。通过有限元计算评定结果, 发现支架设计中不满足规范要求项, 提出非标支架优化设计方案。**结果** 首先针对支架整体结构刚度和稳定性不足, 采取增加斜支撑与增强约束等结构性修改措施, 进而确定增强支撑钢梁强度的优化方案, 解决应力超过规范许用限值问题, 最后对于问题集中的管道连接区域, 提出局部支撑构件重新设计方案。**结论** 该优化方案可为核级管道非标支架设计提供借鉴和指导, 以满足核电标准规范和设计要求。

**关键词:** 管道支架; 非标; 力学分析; 有限元计算; 优化设计

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.008

**中图分类号:** O342      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)12-0050-06

## Mechanical Analysis and Optimization Design of Non-standard Supports for Nuclear Pipes

WANG Ji-xiao, GONG Zhen-bang, LIU He-tong, GAO Qi-le  
(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100840, China)

**ABSTRACT: Objective** To propose optimized design ideas and solutions of support based on mechanical analysis of pipe support. **Methods** Pipe supports play a crucial role in ensuring the safe operation of the pipeline system. In order to meet its supporting and anti-seismic functions, non-standard designs are usually adopted for nuclear pipeline supports with complex working conditions and strict requirements. In this paper, the mechanical calculation and evaluation methods of non-standard supports for nuclear pipes were studied in depth, to find out the items that didn't meet the requirements on specification for pipe design and propose a non-standard stent optimization design scheme based on the evaluation results of finite element calculations. **Results** First of all, for the lack of the overall structural rigidity and stability of the supports, structural modification measures, such as increasing the oblique support and strengthening constraints were taken; furthermore, the optimization plan for strengthening the strength of the supporting steel beam was determined to solve the problem that the stress exceeded the specification allowable limit value; finally, for the pipeline connection area where the problems were concentrated, the redesign scheme of the local support component was proposed. **Conclusion** The optimization scheme proposed in this paper can provide reference and guidance for the design of non-standard pipeline supports, and meet the nuclear power standard specifications and design requirements.

**KEY WORDS:** pipe support; non-standard; mechanical analysis; finite element calculation; optimization design

核电站中支架是确保管道系统和设备安全运行至关重要的结构，支架对管道系统和设备起固定限制和支撑作用。支架的设计和改进行是核电站设计中的重要环节<sup>[2]</sup>。通常情况下，支架及其所支撑管道及设备，需要承受自重、压力、热膨胀、地震等多种复杂载荷。支架的刚度、强度、稳定性及抗震性能，直接关系到管道及设备的安全运行<sup>[3]</sup>。文中针对核电站中非标管道支架的力学分析及优化设计改进的关键技术问题开展相关研究，进而为后续核电厂非标支架的设计提供经验参考与技术支持。

## 1 分析方法及优化设计研究方案

### 1.1 非标支架概述及应力评定准则

管道系统的非标支架通常由型钢、板材、管件等钢材构件组合而成<sup>[4]</sup>，在核电厂中结构形式繁多、功能复杂多样、数量庞大、且应用广泛<sup>[5]</sup>。按 RCC-M 规范在 H1310 节的规定<sup>[6]</sup>，1 级设备的支撑件为 S1 级，2 级和 3 级设备的支撑件为 S2 级。文中深入研究的 S2 级支撑件，应遵守 RCC-M 规范 H3300 节的设计规则。板式或壳式支撑件在不同设计准则的应力限值见表 1。

表 1 支架应力评定限值

工况	准则	许用极限
设计工况	0/A/B 级	$\sigma_m \leq 1.0S$
正常工况		$\sigma_m + \sigma_b \leq 1.5S$
异常工况		
事故工况	D 级	$\sigma_m \leq \min\{S_y, 0.5S_u\}$ $\sigma_m + \sigma_b \leq \min\{1.5S_y, 0.8S_u\}$

表 1 中  $\sigma_m$  为总体薄膜应力（包括不连续效应，不包括应力集中）； $\sigma_b$  为一次弯曲应力（不包括应力集中和不连续效应）； $S$  为材料的基本许用应力； $S_y$  为支架材料屈服强度； $S_u$  为支架材料抗拉强度。

### 1.2 支架力学分析及优化设计流程

基于有限元计算，对核电站中管道支架进行力学计算评定，依照与其对应的规范要求，对支架的刚度、强度、稳定性及抗震性能等诸多技术要求，基于上述结果提出设计优化方案。研究流程及思路如图 1 所示。

1) 支架的力学计算和分析评定：需要根据非标支架的具体形式和功能，完成规范及设计要求的相关评定。包括应力应变、刚度、强度、稳定性等规范要求，同时也包括涉及连接处的焊缝、螺栓、预埋板的校核评定，以及涉及特殊构件及区域的其他评定。

2) 支架的修改及优化设计方案的探究：基于力学计算结果进行分析，对评定项中不满足规范要求或未达到设计预期的技术参数指标和功能需求的部分，有针对性地提出修改建议及优化设计方案。在其研究过程中，需要完成多个优化改进方案的力学计算，对其评定结果进行分析比较。综合考虑多方面的条件，进而确定最终优化设计方案。

### 1.3 优化改进设计技术路线及方案

针对支架设计的优化改进，研究方案分为三个技术思路。

1) 整体结构优化：针对力学参数和技术指标不满足设计要求的支架，探索尝试支架整体结构形式的修改及再设计，以满足强度、刚度、稳定性等基础技

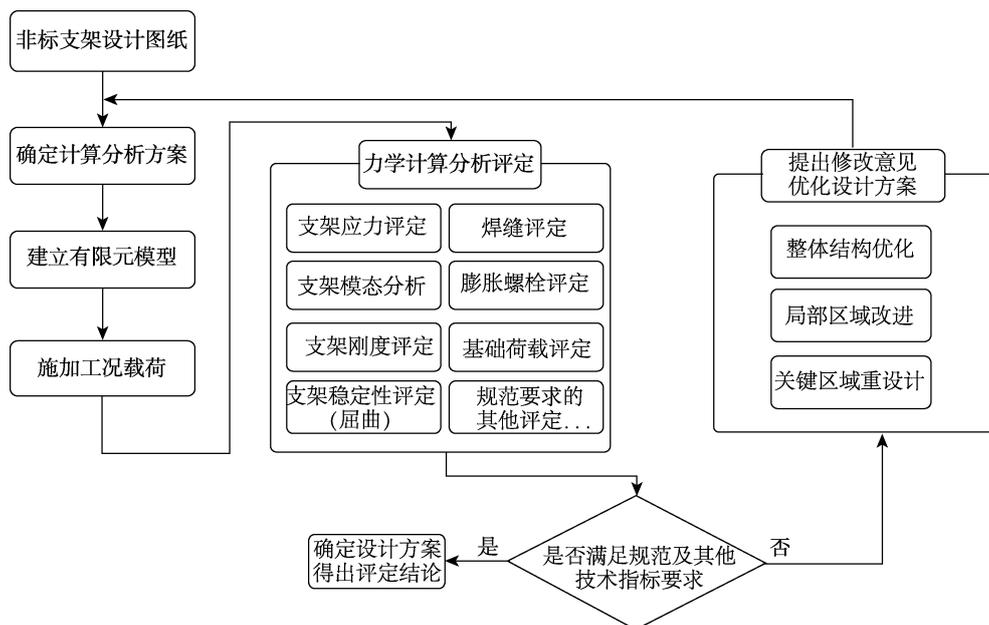


图 1 核级管道非标支架计算与优化设计流程

术指标的要求。

2) 局部区域改进：对于局部区域强度不足、应力过大的构件，考虑局部改进、结构补强、辅助结构支撑等改进方案。

3) 关键区域重新设计：通常非标支架承载情况较为恶劣，其中管支撑连接区域、螺栓等关键位置容易出现应力不合理现象，考虑对于上述区域进行设计修改等措施。

以表 2 为例，对工程实践中支架常见设计问题，进行不满足项剖析的示例分析。最终通过分析多种优化方案的计算结果，比较评估并总结规律，探究优化改进方法对于支架各项力学性能及参数指标的影响，为后续支架设计提供指导。

表 2 非标支架常见设计问题及不满足项剖析 ( 示例 )

规范与设计常见不满足项	可能原因分析
结构刚度不足	刚度作为基本结构参数指标，考虑存在整体结构设计缺陷，对于不同方向的刚度差异考虑针对性结构设计改进
应力值超过限制	针对本支架载荷情况，考虑存在承载钢梁强度不足以及局部应力载荷集中情况
管道支撑连接构件问题严重	管道支撑处作为管道载荷与支架集中传递连接构件，其承载条件恶劣，结构强度不足，出现较大变形

## 2 实例分析及优化设计

### 2.1 管道支架概述与基本参数

本节分析讨论的管道非标支架为某系统共架形式支架，实现支架功能的是两个 PF 固定支架。该型支架承担着管道支撑和抗震功能，同时也作为两条管段的力学计算边界，因此确保该支架的刚度、强度、稳定性及抗震性能就显得尤为重要。

### 2.2 非标支架有限计算与力学分析

针对初始设计方案的管道非标支架，利用有限元软件 ANSYS 进行力学计算和分析评定工作。考虑支架主体大部分钢制板材类构件，选用板壳单元 ( Shell181 ) 建模。根据如图 2 所示的管道支架设计

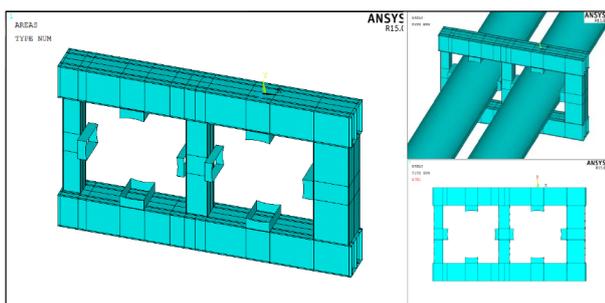


图 2 支架有限元模型

图进行有限元建模。

1) 工况组合。计算的支架为共架双 PF 支架，约束自由度为 12 个。在计算中，要评估对支架可能出现的最恶劣工况载荷组合形式，因此需要考虑的组合工况数为  $2^{12}$  次。利用支架的对称性和弯扭组合情况，对 4096 组工况进行压缩整理后，通过命令流编写程序化加载工况模块。其中根据管道与支架的实际连接情况，利用 MPC 技术，将加载点和支架连接部件的焊接区域绑定，实现施加载荷的合理化。

2) 刚度评定。支架刚度计算采用单位载荷法，按照管道实际连接情况，在支架承受载荷的作用点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向各施加 10 kN 载荷，计算得到管道支架的最大位移。根据胡克定律： $F=KX$ ，可计算得到支架的刚度，见表 3。由于所支撑管道的管径为 660.4 mm，设计要求的最小刚度为 250 000 kN/m，以该数值作为刚度校核限值。通过计算表明，支架刚度三个方向的刚度均不满足设计要求，其中尤其是  $z$  方向刚度与设计存在量级上的差距，并且  $x$  方向刚度也不足设计要求的 40%。基于刚度的计算结果，该支架结构设计上存在较大缺陷。需要整体结构设计上的改进。

表 3 支架刚度计算

方向	框架结构 位移/ $(\times 10^{-5} \text{ m})$	支架整体 位移/ $(\times 10^{-4} \text{ m})$	刚度 $/( \text{kN} \cdot \text{m}^{-1} )$
$x$	6.87	1.07	93 458
$y$	1.24	0.45	222 222
$z$	53.6	5.36	18 657

3) 应力评定。根据上述工况组合得到支架最不利工况的薄膜和薄膜加弯曲应力结果。支架采用 Q235-C 的许用值来进行评定，管道非标支架在 0/A/B 和 D 级工况的最不利应力结果及应力云图如图 3 所示。其中灰色色块区域为超过设计许用值的区域。

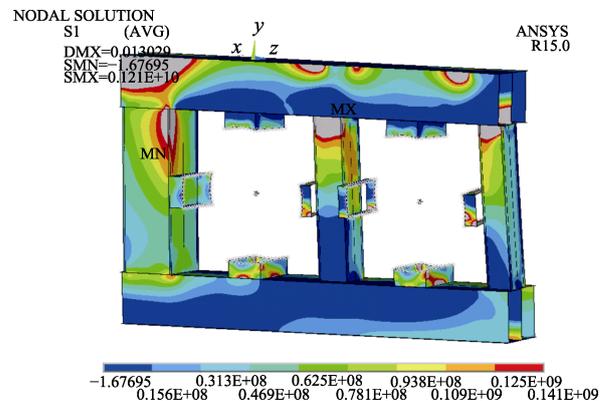


图 3 支架 0/A/B 工况下薄膜加弯曲应力云图

通过对非标支架在各工况下的力学计算和应力分析，发现支架最大应力严重超过许用值。与此同时，

在焊缝评定、基础载荷状态、螺栓等数项评定中，应力结果超出许用值数倍，存在大范围结构不满足规范要求的情况。基于上述评定结果，该支架需要针对整体结构进行设计改进。

### 2.3 优化改进方案研究

本管道支架的优化设计参考 2.2 节的有限元分析及评定结果，针对计算结果中不满足规范要求 and 设计

指标的问题进行分析总结。针对本支架存在的不同类型问题，通过多次探索与尝试方案的试算结果分析，提出如图 4 所示的设计改进思路。

在探索各改进方案过程中发现，针对支架结构的改进、补强、调整、优化对于支架的刚度、强度与稳定性等性能有着较为复杂的影响，各个参数指标、规范限制、设计要求之间并不是独立的。为满足上述要求，拟定的探索改进设计方案见表 4。

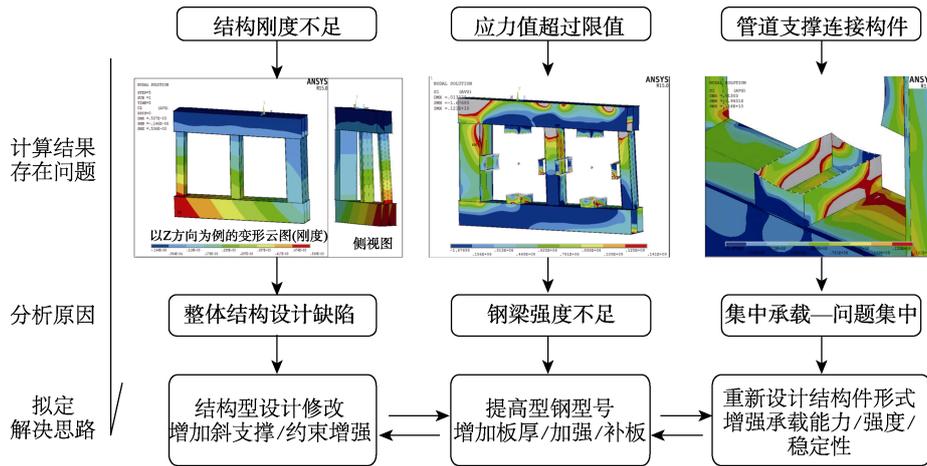


图 4 针对管道支架存在问题及拟定的研究思路

表 4 管道支架改进设计方案

拟定优化方案	中部支撑构件		补充斜支撑设计		备注
	左竖梁 H 型钢	中竖梁 H 型钢	前后支撑	下部支撑	
PLAN-1	125	150	×	×	
PLAN-2	150	150	×	×	
PLAN-3	150	200	×	×	
PLAN-4	150	200	✓	×	
PLAN-5	150	200	✓	✓	
PLAN-6	150	200	✓	✓	支撑连接件重新设计

由于左侧与中部竖钢梁的实际型钢标号受管墙

间隙和管间间隙限制，中间还包含管道护板，支撑构件等结构，左侧竖梁最大设计为 HW150×150，中部竖梁最大设计为 HW200×200。同时考虑到  $x$  方向与  $z$  方向刚度较差，尝试通过补充斜支撑结构设计提高刚度。

考虑到管支撑连接部分问题较为严重，连接构件原设计为方钢。根据有限元计算分析结果，强度、刚度及稳定性都存在较大问题。为增强其结构强度，改善承载情况，每个方钢重新设计为两个含加强板的 H 型钢，并且靠墙附近的支撑构件均直接约束在墙上，以增强稳定性。

1) 改进优化方案对于支架刚度的影响。参考 2.2.2 节刚度评估的相关方法，采用单位载荷法对于改进方案的支架整体刚度进行评定比较，见表 5。

表 5 各改进方案支架刚度计算

方案编号	方向	框架位移/( $\times 10^{-5}$ m)	刚度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	方案编号	方向	框架位移/( $\times 10^{-5}$ m)	刚度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )
PLAN-1	$x$	6.87	93 458	PLAN-4	$x$	4.07	118 203
	$y$	1.24	222 222		$y$	0.696	232 558
	$z$	53.6	18 657		$z$	4.39	209 205
PLAN-2	$x$	6.52	95 238	PLAN-5	$x$	1.11	176 367
	$y$	1.08	230 947		$y$	0.644	233 645
	$z$	42.1	23 753		$z$	3.64	221 729
PLAN-3	$x$	4.98	104 712	PLAN-6	$x$	0.319	3 134 796
	$y$	0.826	231 481		$y$	0.0488	20 491 803
	$z$	29.8	33 557		$z$	1.11	900 901

注：根据规范要求  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的刚度均不能小于 250 000  $\text{kN/m}$

通过数据分析比较,发现 PLAN-4 前后斜支撑的设计,使 z 方向刚度提升 6 倍以上, PLAN-5 下部斜支撑提升了 x 方向 50%的刚度,如图 5 和图 6 所示。因此,斜支撑设计对于支架刚度有着明显的加强。由于 PLAN-6 管件支撑构件多处于预埋板直接焊接,直接承载了大量载荷,使各个方向的刚度增强了数十倍,使支架刚度均满足了规范要求。

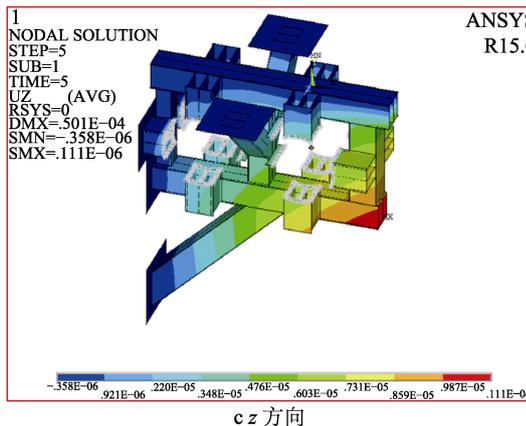
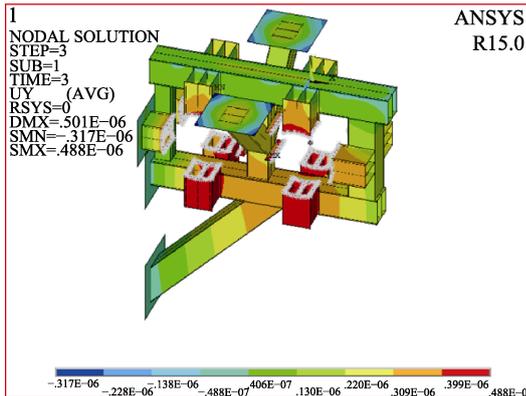
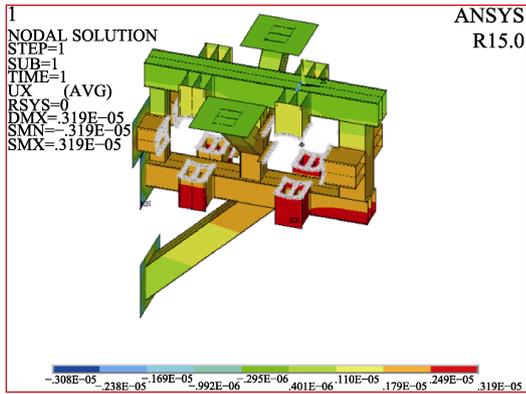


图 5 改进方案 6 单位载荷 (10 kN) 下的支架变形云图

2) 改进优化方案对于支架应力的影响。依照 RCC-M 规范中支架应力及强度评估的相关方法,以工况组合得到支架最不利工况的薄膜和薄膜加弯曲应力最大值结果,作为需要评定的数值,对支架进行

力学评定计算。各个方案的应力评定结果(见表 6)表明,中部竖梁的加强明显提高了支架整体强度。其中以事故工况膜加弯应力为例,方案 2 支架的最大应力值相对于方案 1 下降了 30%。其次,如图 7 中 PLAN-4/5 两条最大应力曲线与不含斜支撑设计的方案相比,应力值下降非常明显,斜支撑的改进设计也显著增强了支架的稳定性和承载能力。

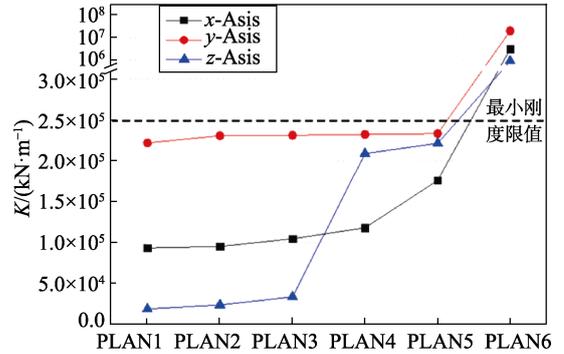


图 6 各改进方案的支架刚度分析比较

表 6 各改进方案支架应力评定 MPa

	0/A/B 级		D 级	
	薄膜	薄膜加弯曲	薄膜	薄膜加弯曲
许用限值	93.75	140.63	187.50	300.00
PLAN-1	920.44	1213.61	1617.92	2125.62
PLAN-2	727.18	845.53	1288.04	1499.51
PLAN-3	721.96	815.23	1284.92	1454.15
PLAN-4	257.03	556.59	463.11	1067.58
PLAN-5	252.19	554.97	447.88	1065.15
PLAN-6	73.91	118.96	140.08	221.25

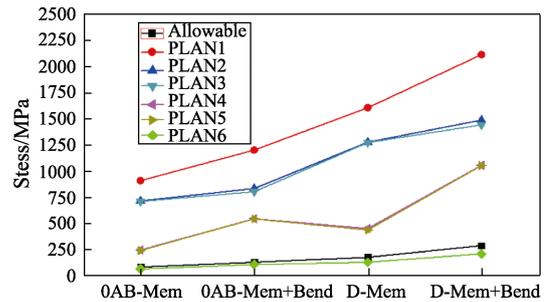


图 7 优化设计方案最大应力曲线

以许用应力值作为力学评定标准,最大应力比小于 1 即为满足规范要求。从图 8 可以看出,原设计方案计算最大应力值超过许用值 7~10 倍。通过改进方案的研究,最终 PLAN-6 达到设计要求,满足力学评定中应力值的规范要求。

3) 改进优化方案对于管道支撑件的影响。通过对各改进方案的计算结果进行分析发现,支撑件结构强度不足,应力过大。在后几个方案中最大应力出现位置,存在主体构架满足规范要求,但支撑连接件局部应力过大。其中 PLAN-6 重点对该部分做了优化改

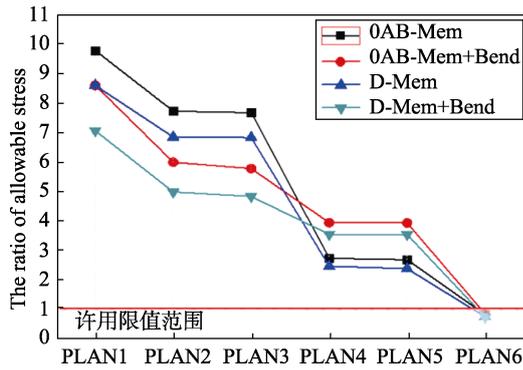


图 8 改进方案应力评价曲线(应力比)

进, 由双槽钢结构改为两个 H 型钢独立支撑结构。以同种工况下, 支撑件的局部应力分布(如图 9 所

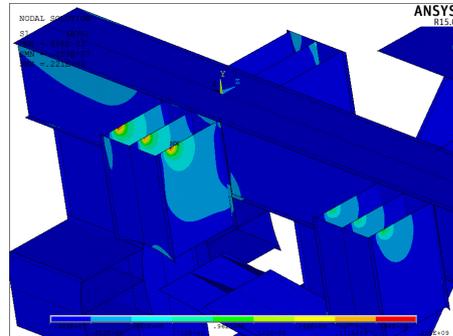
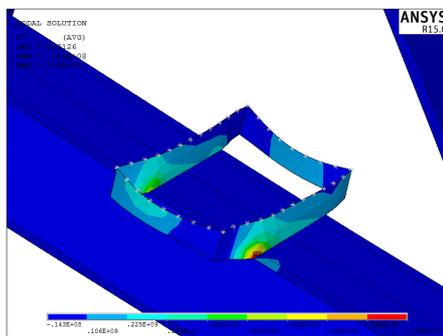


图 9 同工况下管道支撑构件局部应力分布比较

基于核工程管道非标支架实例, 应用上述优化方法, 得出以下结论。

1) 针对支架整体结构刚度和稳定性不足, 采取增加斜支撑与增强约束等结构性修改措施。

2) 明确增强支撑强度的优化方案, 解决应力超过规范许用限值问题。

3) 对于问题集中的管道连接区域, 提出局部支撑构件重新设计方案。

文中提出的优化设计方案, 可为核级管道非标支架设计提供借鉴和指导, 以满足核电标准规范和设计要求。

#### 参考文献:

- [1] TOWNLEY C H A, FINDLAY G E, GOODMAN A M, et al. Elastic-Plastic Computation as a Basis for Design Charts for Tori spherical Pressure Vessel [J]. Mech E, 1971, 185(63): 869-877.
- [2] 袁锋, 吕勇波, 艾红雷. 核辅助管道甩击及防甩支架力学分析[J]. 核动力工程, 2013, 34(6):40-42
- [3] 李成, 刘建卫, 山鹰. AP1000 结构模块墙支架连接设

计优化研究[J]. 核技术, 2013, 36(4): 273-278.

示)可以看出, PLAN-5 的最大应力值远远超过许用值, 局部改进后的 PLAN-6 应力值为 221 MPa, 降低了 80%。通过计算结果发现, 该优化设计方案显著增强了结构的强度, 达到降低支架应力, 减小变形量的效果。

### 3 结论

文中深入研究了核级管道非标支架的力学计算和评定方法。基于有限元计算评定结果, 结合工程实践, 总结提出整体结构优化、局部区域改进、关键区域重设计三套优化改进思路, 有针对性地探索了非标支架优化设计方案。

- [4] 刘天怡. 钢结构管道支架的优化设计[J]. 山西建筑, 2014, 40(3): 54-55.
- [5] 余晓菲, 张毅雄, 沈平川. 反应堆顶电缆托架及电缆桥结构力学分析[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(S): 55-59.
- [6] RCC-M 2012, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands[S].
- [7] 白旭峰, 孟昭辉, 刘洪波. 隧道内大水平推力热力管道固定支架设计研究[J]. 煤气与热力, 2015, 35(5): 4-9.
- [8] 张步岭, 张雁琴. 核电站防甩支架承受力估算实例分析[J]. 兵工自动化, 2015, 34(4): 36-38.
- [9] DEMIR H H, DRUCKER D C. An Experimental Study of Cylindrical Shells Under Ring Loading[M]. New York: Prog APPL Mech, 1963.
- [10] SCHROEDER J. Experimental Limit Couples for Branch Moment Loads on 4-in ANSI B16.9 Tees[R]. WRC Bulletin, 1985.
- [11] GERDEEN J C. A critical Evaluation of Plastic Behavior Data and a United Definition of Plastic Loads for Pressure Components[R]. WRC Bulletin, 1979.
- [12] 李永彬, 刘晓明, 周群博. 起落架舱结构优化与计算分析[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(S): 108-112.