



南京航空航天大学

2019民航学院硕士学位答辩

# 装配应力对飞机管路密封性能的影响分析 及其检测方法研究

 答辩人：於为刚

 指导老师：陈 果



# 目录

01

研究背景与现状

02

论文基本框架

03

具体内容阐述

04

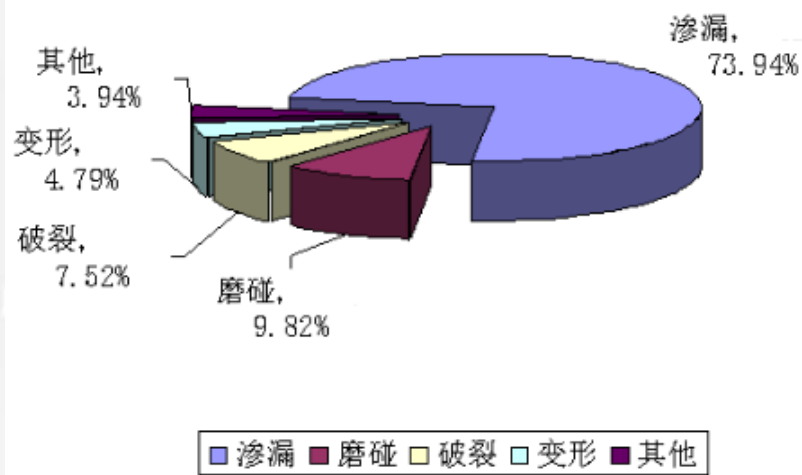
总结与展望



# 01. 研究背景与现状



- **液压管路系统**：作为飞机动力传输的主要通道，可以实现能量的转换、传递、分配和控制



- **导管类故障**：在设计制造类故障中占到71%，其中，导管渗漏故障占到总体的73.9%，成为主要故障问题

## 导管故障原因

材料

材料性能较差

成形工艺

成形工艺不符合标准

振动环境

液压附件舱、发动机舱振动环境复杂

安装应力

管接头装配应力过大、支架定位不准、装配质量差

已有深入研究

研究较少



因此，针对飞机管路连接件，深入分析装配偏差下管路连接件的装配应力，研究由于装配应力引发的管路泄漏机理；同时，研究管路安装应力的智能检测方法，控制管路连接件的装配质量，这对于有效地控制管路系统的故障、提高管路系统的可靠性具有重要的意义和价值。

## 现状总结：

- (1) 针对管道初始安装应力研究主要集中在有限元仿真，缺少有效的**安装应力试验模拟方法**；
- (2) 针对管路连接件的研究主要是建立**二维轴对称模型**，无法准确模拟装配偏差的影响；
- (3) 目前结构损伤识别技术多是由于**建筑结构领域**，管道损伤识别应用较少；

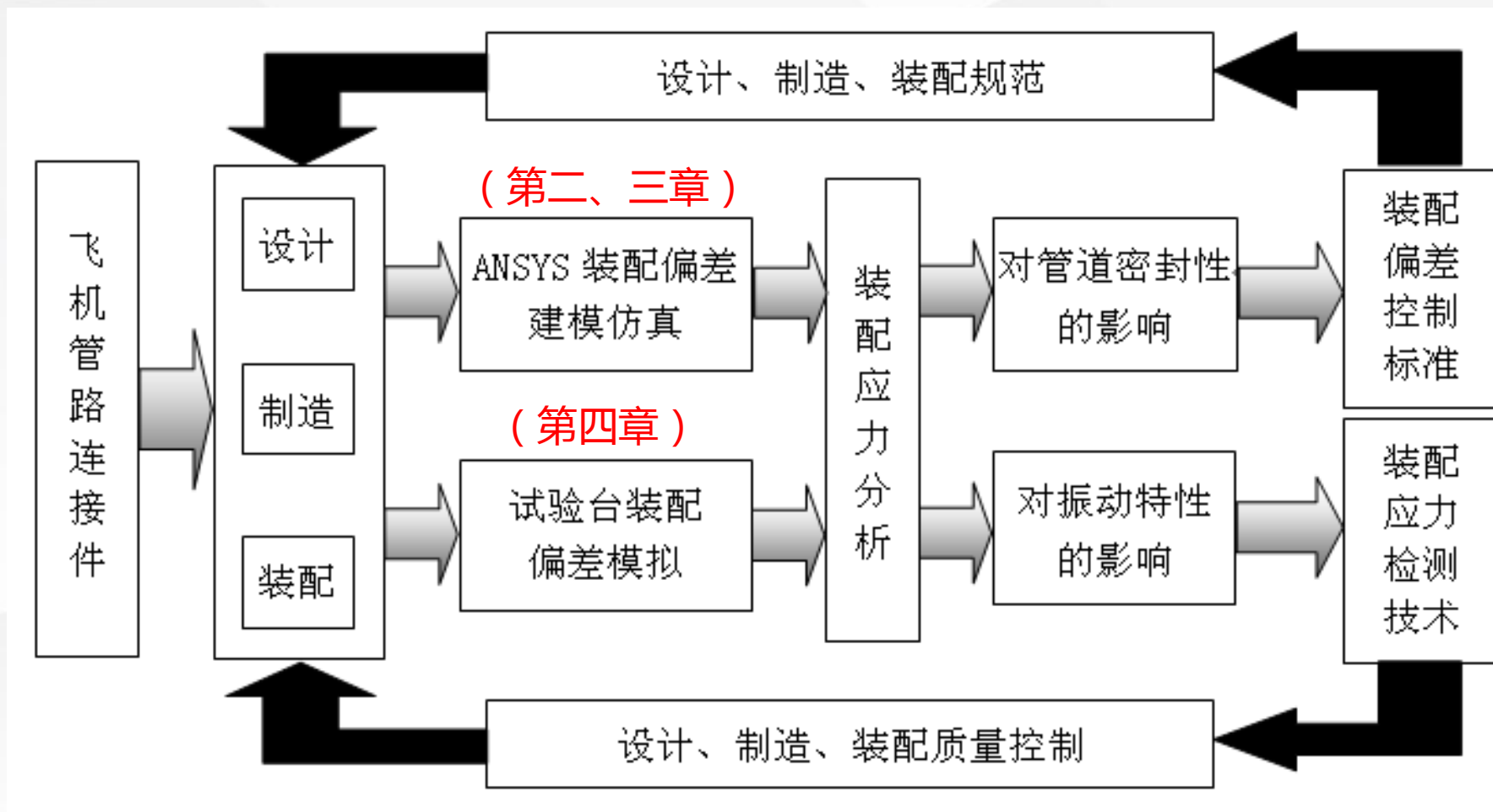


因此，本文通过建立管路连接件**三维有限元模型**，研究了装配应力对管路密封性能的影响规律；同时构建了管路安装应力试验台，**模拟了初始安装应力**，并基于结构损伤识别技术开发了**管路安装应力智能检测方法**。



## 02. 论文基本框架

### 装配应力对飞机管路密封性能的影响分析及其检测方法研究







## 03. 具体内容阐述

1

管路连接件多  
体接触有限元  
建模

2

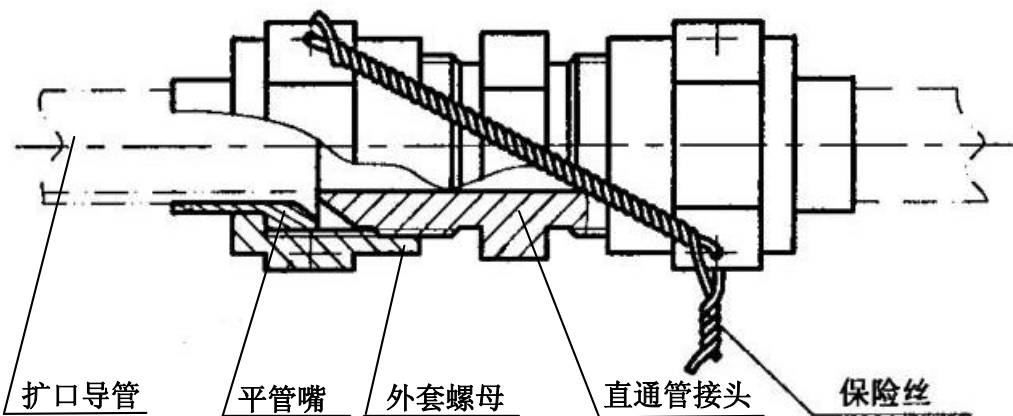
装配应力对管  
道密封性能影  
响分析

3

管道安装应力  
智能检测技术  
研究

## 管路连接件多体接触 有限元建模

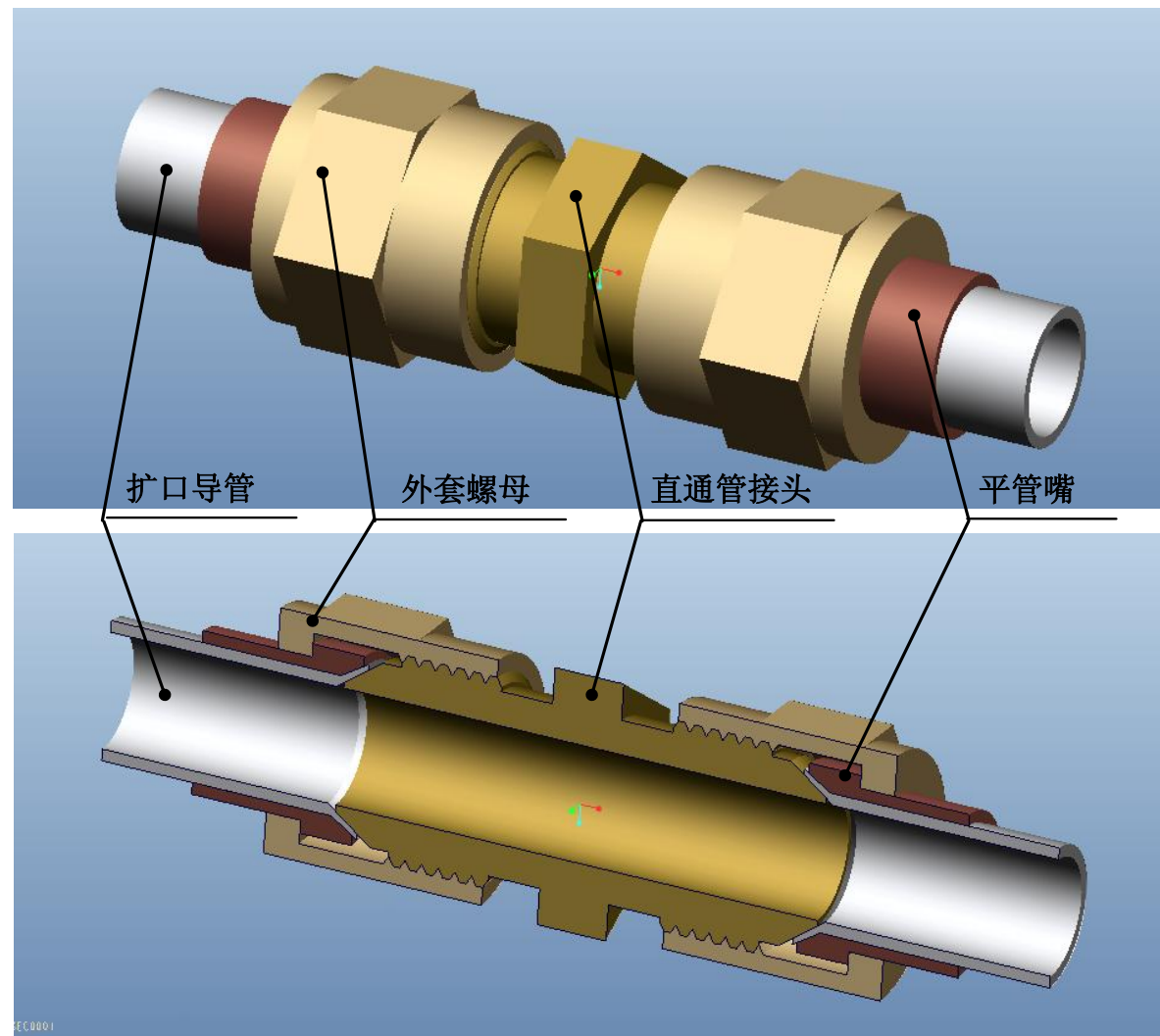
航空工业标准HB 4-1-2002



《扩口管路连接件通用规范》

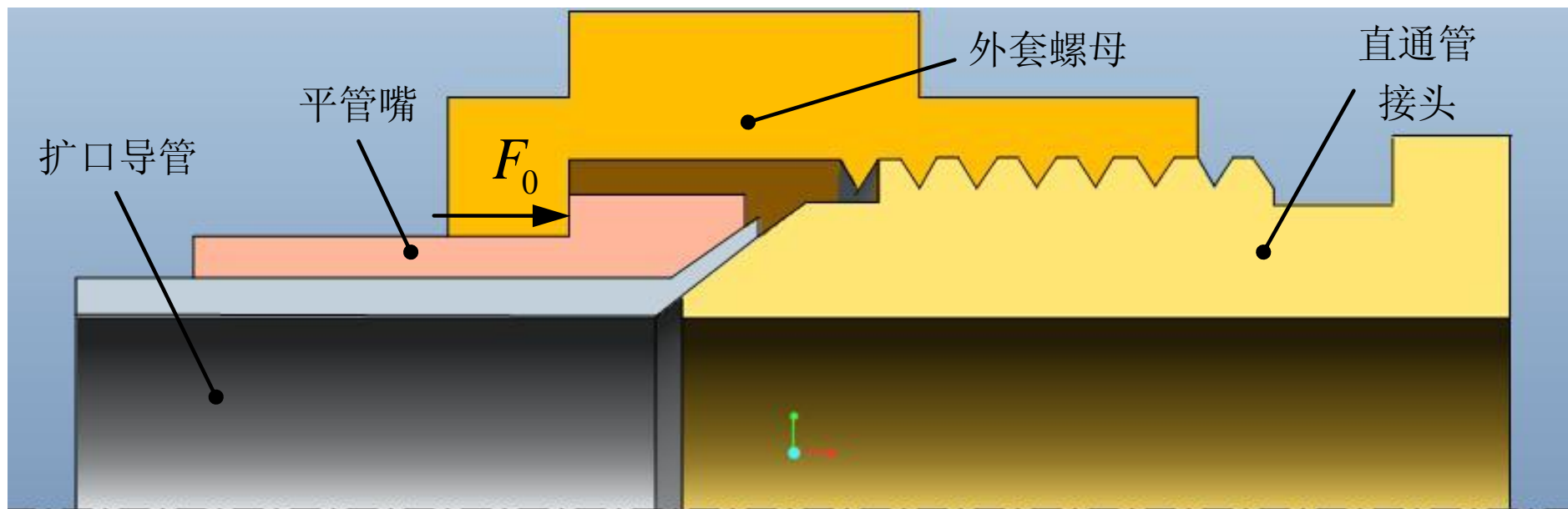


## PROE三维模型



# 管路连接件多体接触有限元建模

## 扩口式管路连接件基本密封原理



## 管路连接件多体接触 有限元建模

式中，

$d_2$  —— 螺旋副的螺纹中径

$\psi$  —— 螺旋副的螺纹升角

$\varphi_v$  —— 螺旋副的当量摩擦角

$u_f$  —— 摩擦系数

预紧载荷施加方案：预紧力矩 ——> 预紧力

管路连接副预紧力矩  $T =$

螺旋副间的摩擦力矩  $T_1$  + 平管嘴和外套螺母间的摩擦力矩  $T_2$

$T_1$  与轴向预紧力  $F_0$  的关系为：

$$T_1 = \frac{1}{2} F_0 d_2 \tan(\psi + \varphi_v)$$

$T_2$  与轴向预紧力  $F_0$  的关系为：

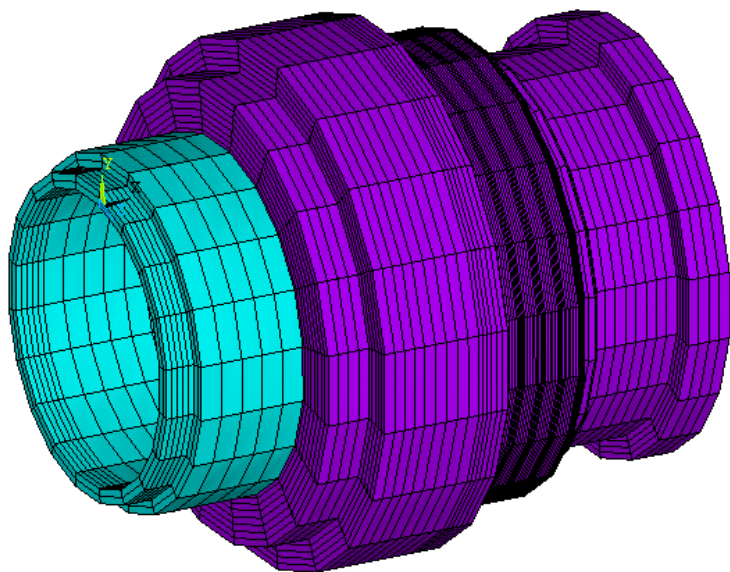
$$T_2 = \frac{1}{2} F_0 u_f d$$

因此，得到轴向预紧力  $F_0$  与预紧力矩  $T$  的转换公式为：

$$F_0 = T \left[ \frac{d_2 \tan(\psi + \varphi_v)}{2} + \frac{1}{2} u_f d \right]^{-1}$$

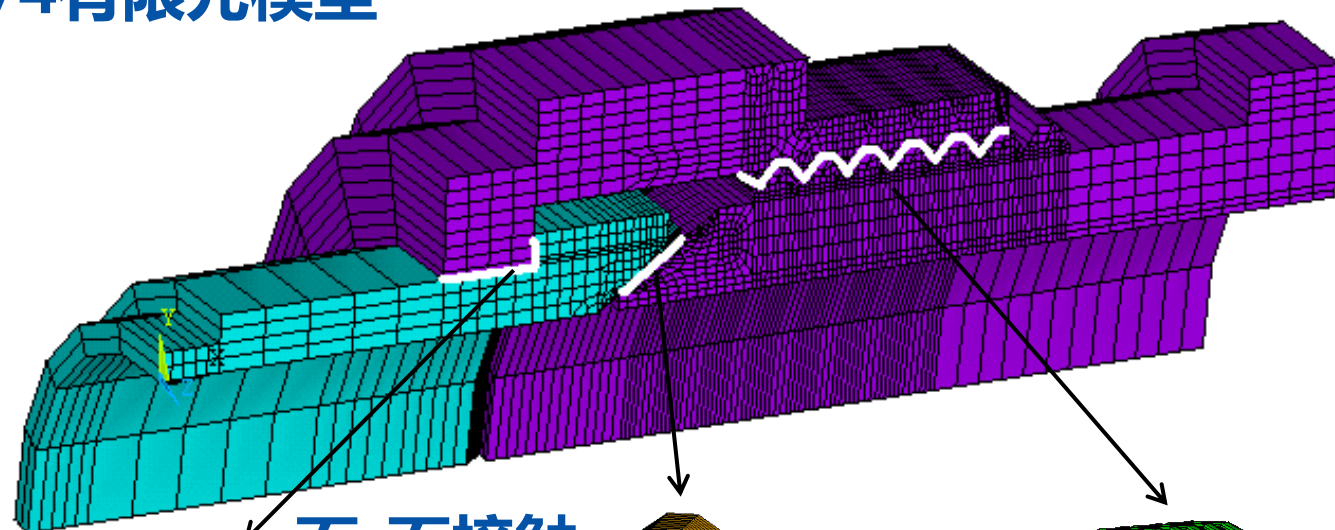
### 管路连接件多体接触 有限元建模

#### 基于ANSYS有限元建模

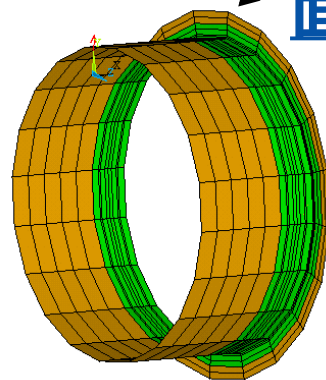


**SOLID185**单元，单元数  
41220，节点数41260

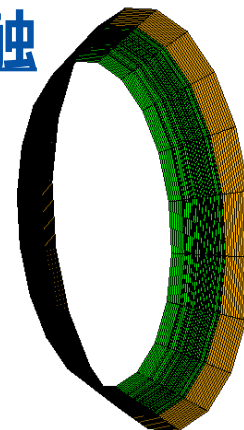
#### 1/4有限元模型



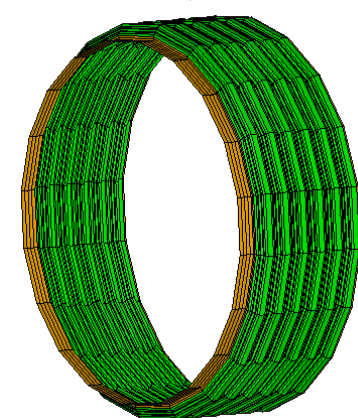
面-面接触



平管嘴——螺母



★★导管——管接头



螺母——管接头

## 管路连接件多体接触 有限元建模

### 面-面接触分析的关键参数

#### (1) 接触单元的选择

二维接触对：CONTA173接触单元和TARGE170目标单元

#### (2) 初始接触状态的建立

设置KEYOPT ( 9 ) = 4：忽略建模时初始渗透或间隙的影响

#### (3) 接触类型和接触算法选择

设置KEYOPT ( 12 ) = 0：设置法向可分离、切向可滑动的标准接触

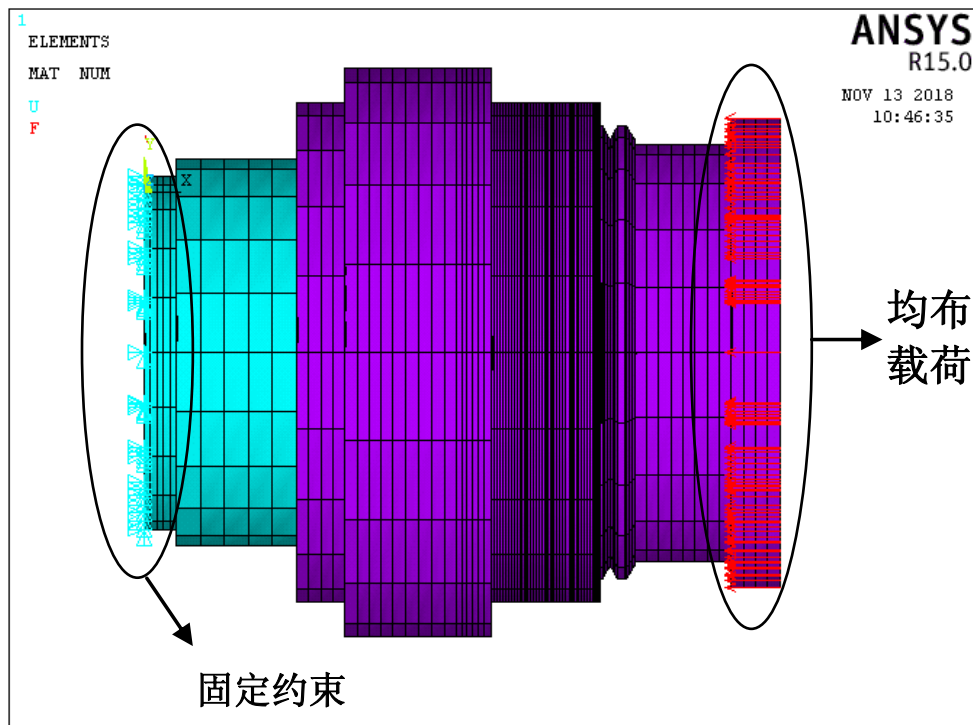
设置KEYOPT ( 2 ) = 0：增进的拉格朗日算法

#### (4) 摩擦类型的选择

对于标准接触，通过给定摩擦系数MU来模拟摩擦行为

# 管路连接件多体接触有限元建模

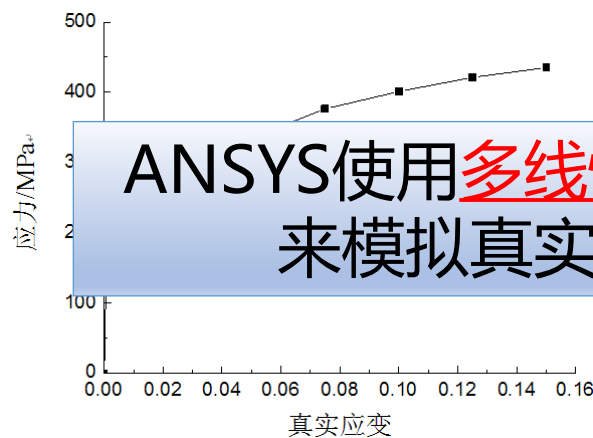
## 边界条件和载荷



## 材料本构模型

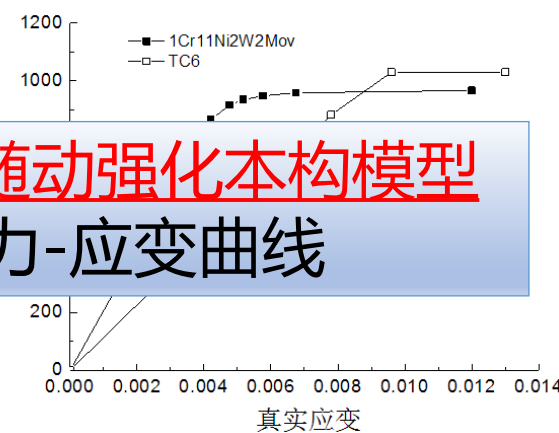
### 管路连接件基本材料属性

	扩口导管	平管嘴	螺母和管接头
材料	1Cr18Ni9Ti	1Cr11Ni2W2Mov	TC6
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7850	7850	4500
弹性模量 (GPa)	206	206	113
泊松比	0.3	0.3	0.3
屈服极限 (MPa)	205	860	883
强度极限 (MPa)	550	967	1030



ANSYS使用多线性随动强化本构模型来模拟真实应力-应变曲线

1Cr18Ni9Ti真实应力-应变曲线



1Cr11Ni2W2Mov和TC6真实应力-应变曲线



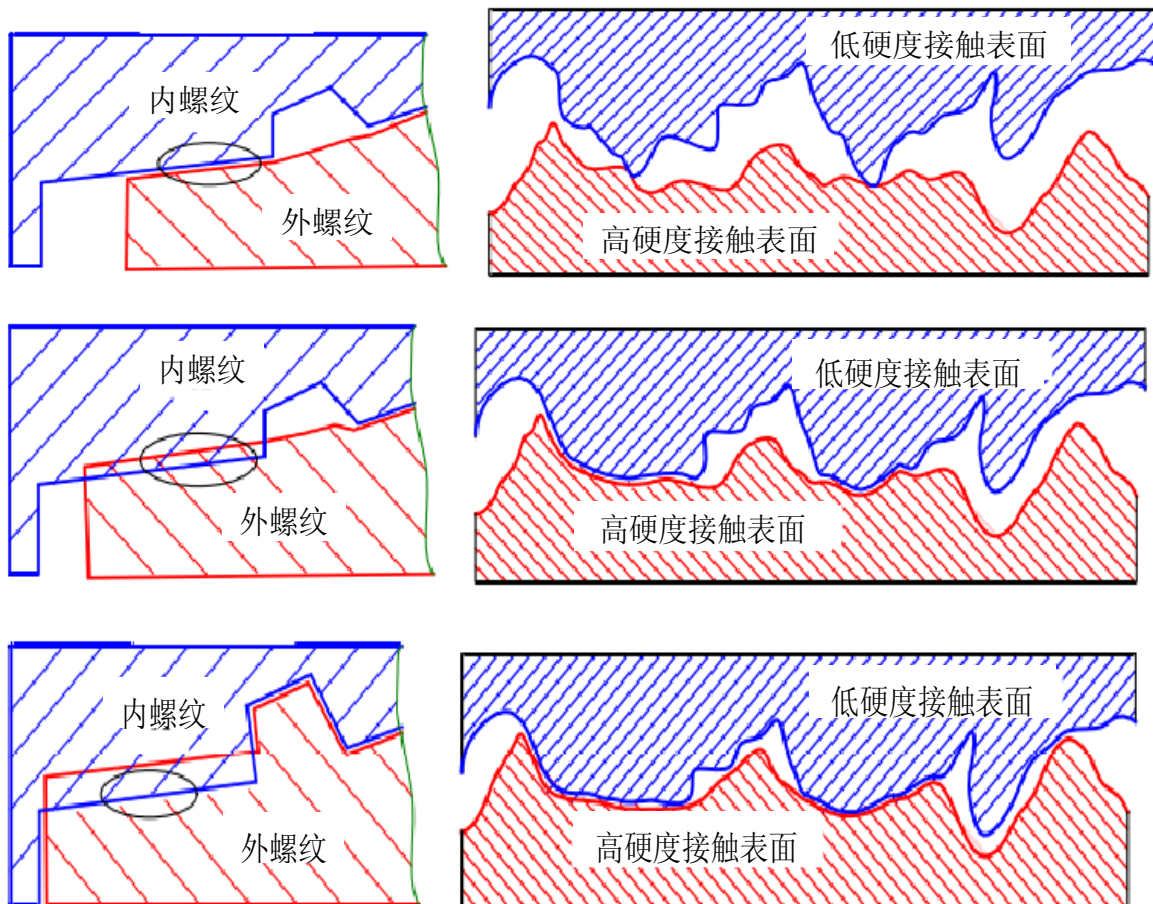
## 管路连接件多体接触 有限元建模

### 小结：

首先介绍了飞机管路连接件的基本组成结构，分析了在工作状态中的基本密封原理；接着根据航空工业标准建立了M18X1.5扩口式管接头三维模型，分析了预紧力矩与轴向预紧力的转换方案，施加了边界条件和载荷，基于ANSYS接触有限元技术完成了管路连接件建模。

## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 金属密封机理分析（金属密封的微观过程）



**初始接触阶段：**两表面开始接触，微凸体基本未产生挤压变形，表面间隙较大

**过盈配合阶段：**部分表面开始贴合，微凸体产生挤压变形，接触压力增大，间隙减小

**完全接触阶段：**大部分微凸体互相侵入，产生大量挤压变形，表面间隙降低至减小值

## 装配应力对管道密封性能影响分析

Mayer推导出了边界摩擦条件下，在密封面宽度、表面粗糙度、接触压应力、粘度等因素影响后的**泄漏率**：

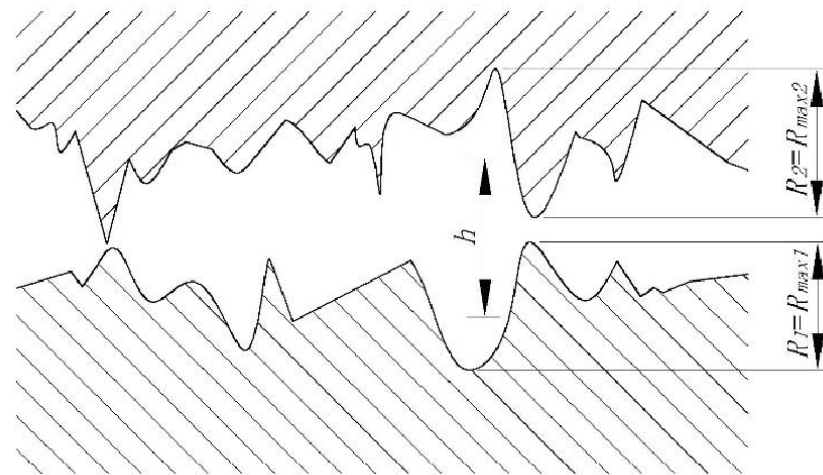
$$Q = \frac{\pi d_2 h^2 \Delta p S}{P_g^2}$$

式中： $d_2$ 为密封流体的进入直径， $\Delta P$ 为密封流体内外的压力差， $S$ 为间隙系数，与密封面宽度成反比， $P_g$ 为密封面上的接触应力；

密封性能（泄露率）的**影响因素**：

密封面平均泄漏间隙（粗糙度）、密封面上的接触压应力、密封面宽度

## 金属粗糙表面密封理论模型



金属密封的**平均泄漏间隙**：

$$h = \frac{\frac{R_{max1}^2}{R_{a1}} + \frac{R_{max2}^2}{R_{a2}}}{2}$$

式中： $h$ 为粗糙深度构成的缝隙高度， $R_{max1}$ 、 $R_{max2}$ 为上、下密封面粗糙度的最大深度， $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$ 为上、下密封面粗糙度的平均值；

## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 管路连接件的密封条件

密封面的表面质量和粗糙度、  
密封面宽、密封比压



管路连接件的密封性能

不同材料、尺寸、表面质量、  
实际工况



实际密封条件难以定量描述



针对特定型号进行密封试验和仿真



确定密封条件

## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 管路连接件的密封条件

丁建春：通过仿真和试验研究了某型管接头不同拧紧力矩下的**密封带宽度**：口径在12mm以下，密封带宽度取1mm左右较为合理；口径在14mm到32mm，密封带宽度取0.5mm左右较为合理。

熊影辉：指出密封副实现有效密封条件：使密封面的**接触压应力**保持在较软材料屈服强度的1~3倍，同时最大接触压应力小于较硬材料的屈服强度。

王小刚：通过管路锥形密封结构原理试验得到其密封条件为：宏观接触面范围内形成一圈封闭的密封环，**密封比压**大于700MPa，且满足密封比压的**密封面宽**大于0.5mm。

冉光斌：研究了双锥形管接头的密封条件为：**密封面宽**的最小值大于1.6~2.4mm；密封面上的**接触压应力**大于较软材料两倍的屈服强度。



**密封条件**：（1）连接副在宏观接触范围形成一圈封闭的密封环，密封环宽度和面积达到一定条件；  
（2）密封面上的接触压应力大于组成连接副的较软材料的屈服强度使其发生塑性变形。

# 装配应力对管道密封性能影响分析

## 密封区域接触参量的提取方法

管路连接件  
ANSYS仿真结果



提取出接触面中与目标面距离为零的二维单元

实际接触单元



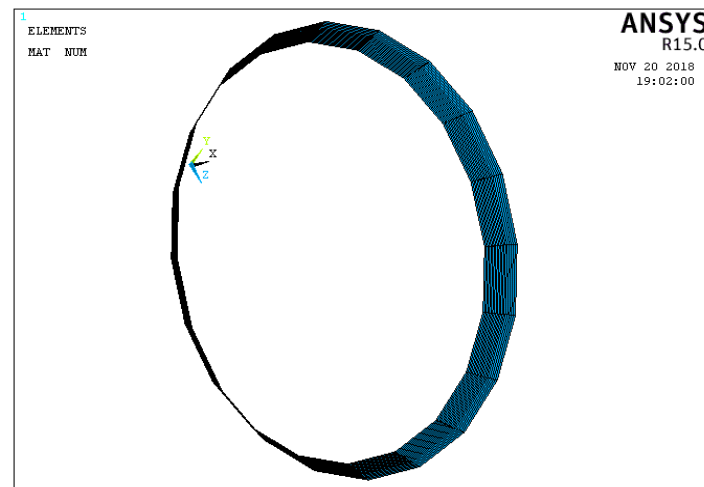
提取出接触应力大于屈服强度的部分单元

有效接触单元 (有效密封环)

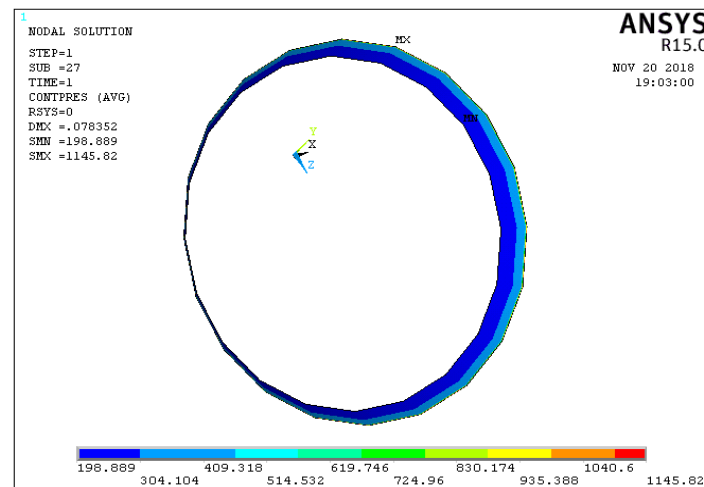


面积积分、宽度测量、应力平均

密封面宽、密封面积  
密封面平均接触压应力



有效密封环



接触压应力云图

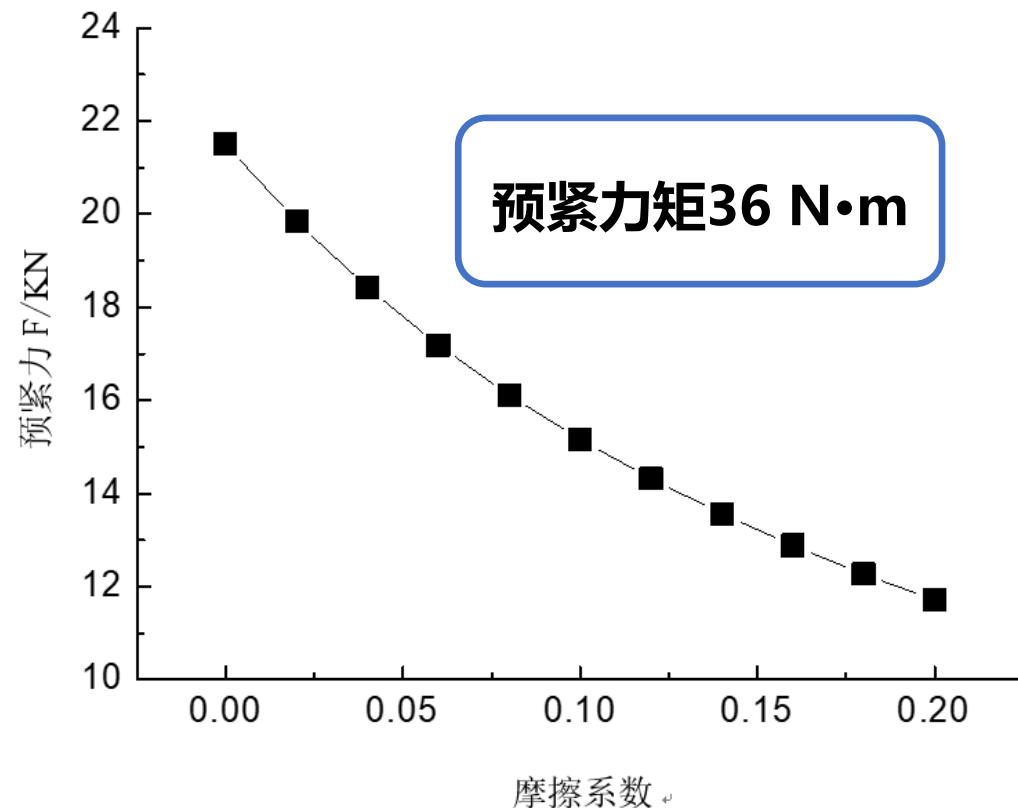
## 装配应力对管道密封性能影响分析

### 摩擦系数对轴向预紧力的影响分析

- ① 金属的**表面质量和粗糙度**影响密封性能；
- ② ANSYS仿真引入**摩擦系数**来考虑表面形貌特征的影响；
- ③ **轴向预紧力 $F_0$ 与预紧力矩 $T$ 的转换公式为：**

$$F_0 = T \left[ \frac{d_2 \tan(\psi + \varphi_v)}{2} + \frac{1}{2} u_f d \right]^{-1}$$

其中， $u_f$ 的取值范围一般为：0~0.2

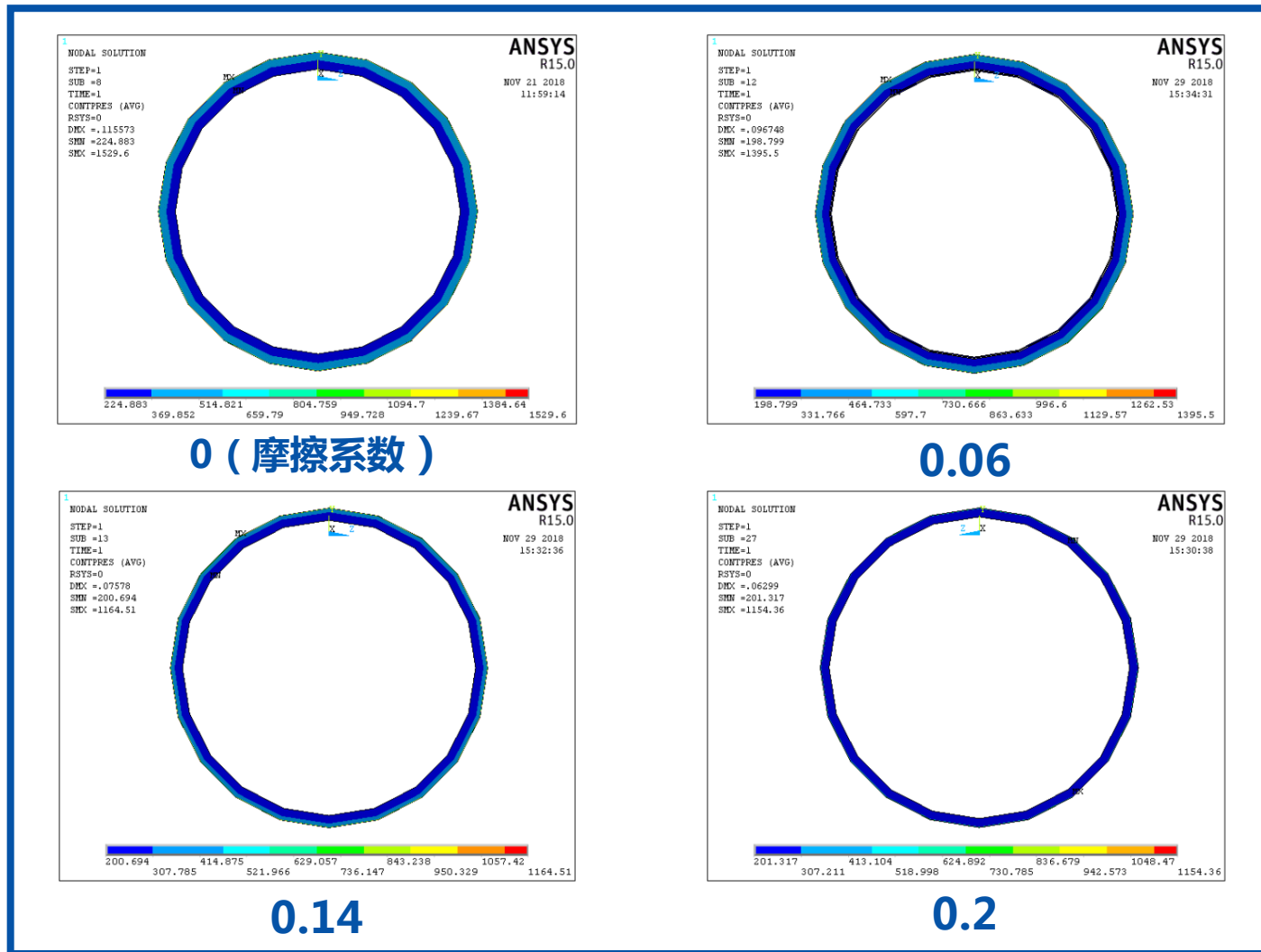
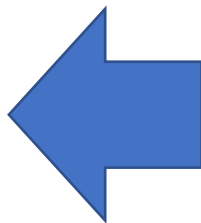


轴向预紧力——摩擦系数

# 装配应力对管道密封性能影响分析

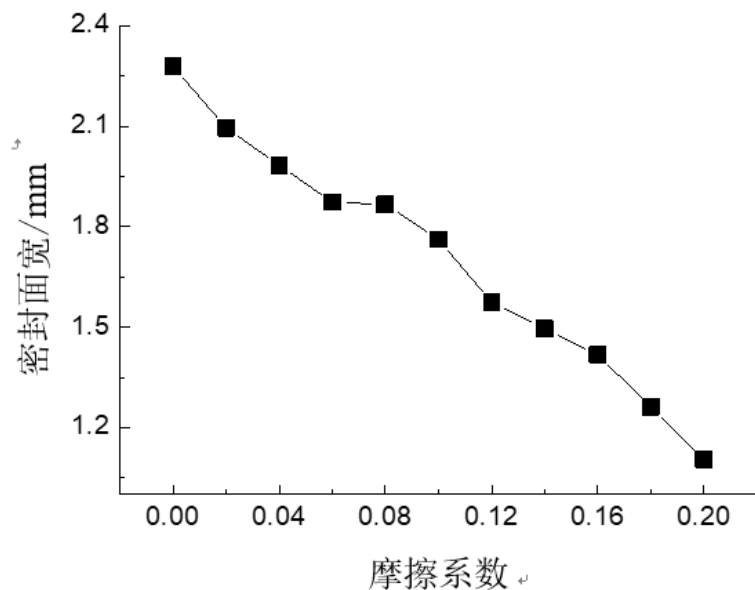
## 摩擦系数对密封环区域的影响分析

不同摩擦系数下的密封环区域：**随着摩擦系数增大，密封环区域宽度减小**



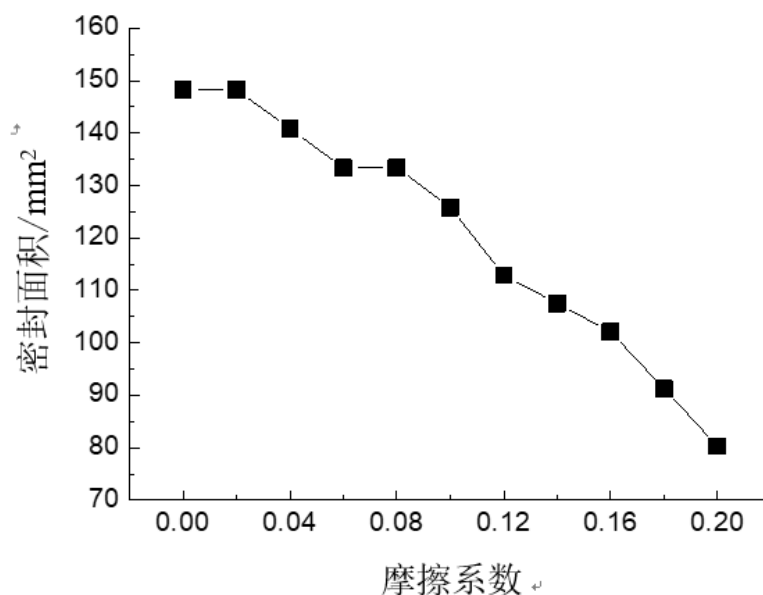


## 装配应力对管道密封性能影响分析

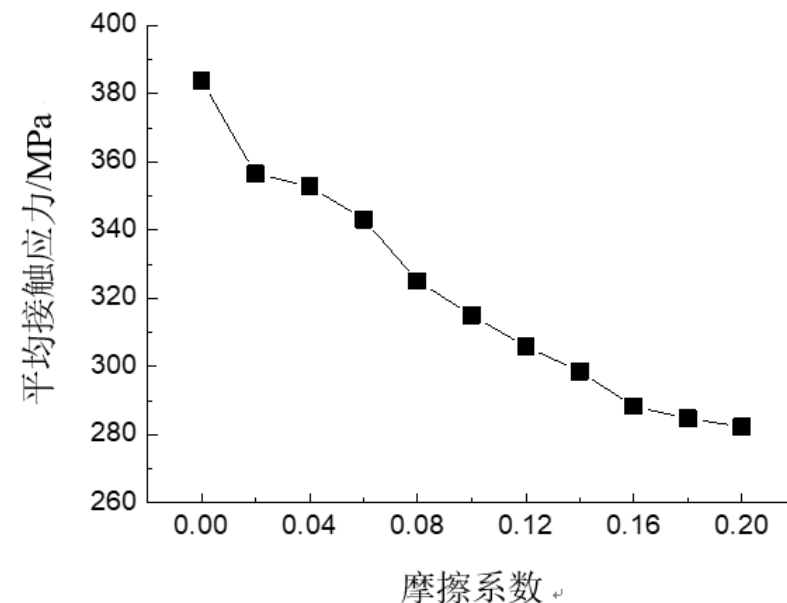


密封面宽——摩擦系数

## 摩擦系数对密封区域接触参量的影响分析



密封面积——摩擦系数



密封面平均接触压应力——摩擦系数

因此，可以得出密封面的表面质量和粗糙度影响着摩擦系数，在同一拧紧力矩下，摩擦系数增大，轴向拧紧力反而减小，密封面宽、密封面积以及密封面平均接触压应力都逐步减小，密封性能降低。

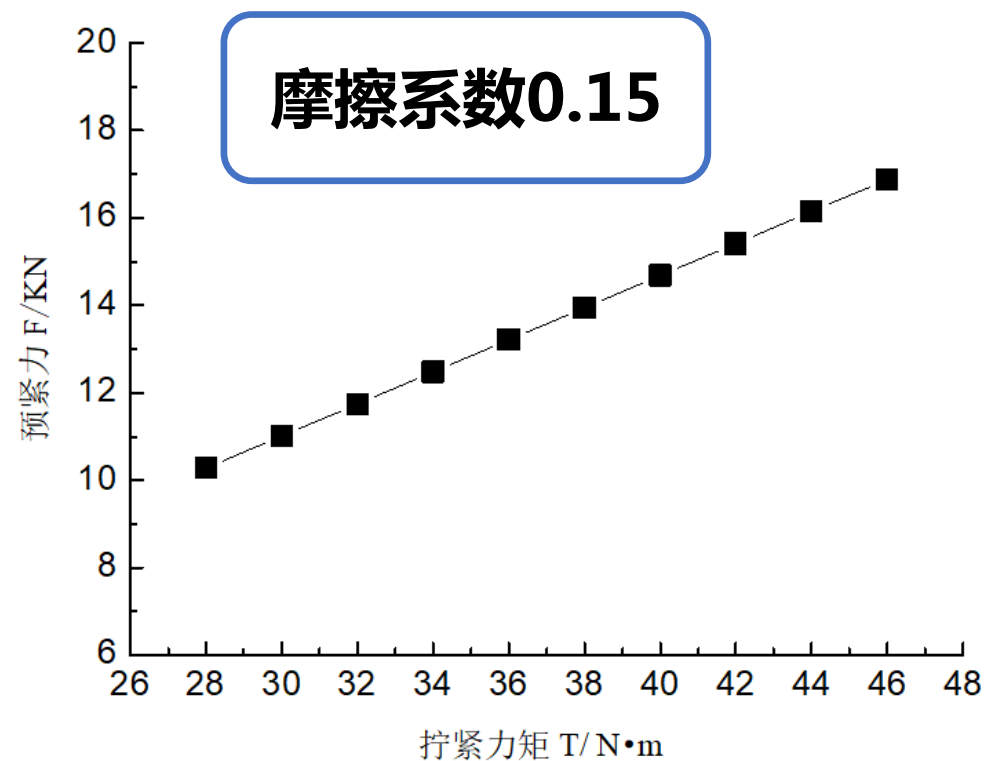
## 装配应力对管道密封性能影响分析

### 拧紧力矩对轴向预紧力的影响分析

#### HB 4-1-2002 扩口管路连接件通用规范

##### 导管装配试验件的拧紧力矩要求

导管内径 d/mm	导管、接头和外套螺母中 任何一种是铝制品		导管和连接件全部为钢件	
	最小拧紧力矩 N·m	最大拧紧力矩 N·m	最小拧紧力矩 N·m	最大拧紧力矩 N·m
8	16.70	29.40	26.50	35.30
10	20.60	35.30	32.35	41.15
12	25.50	41.15	38.20	48.00

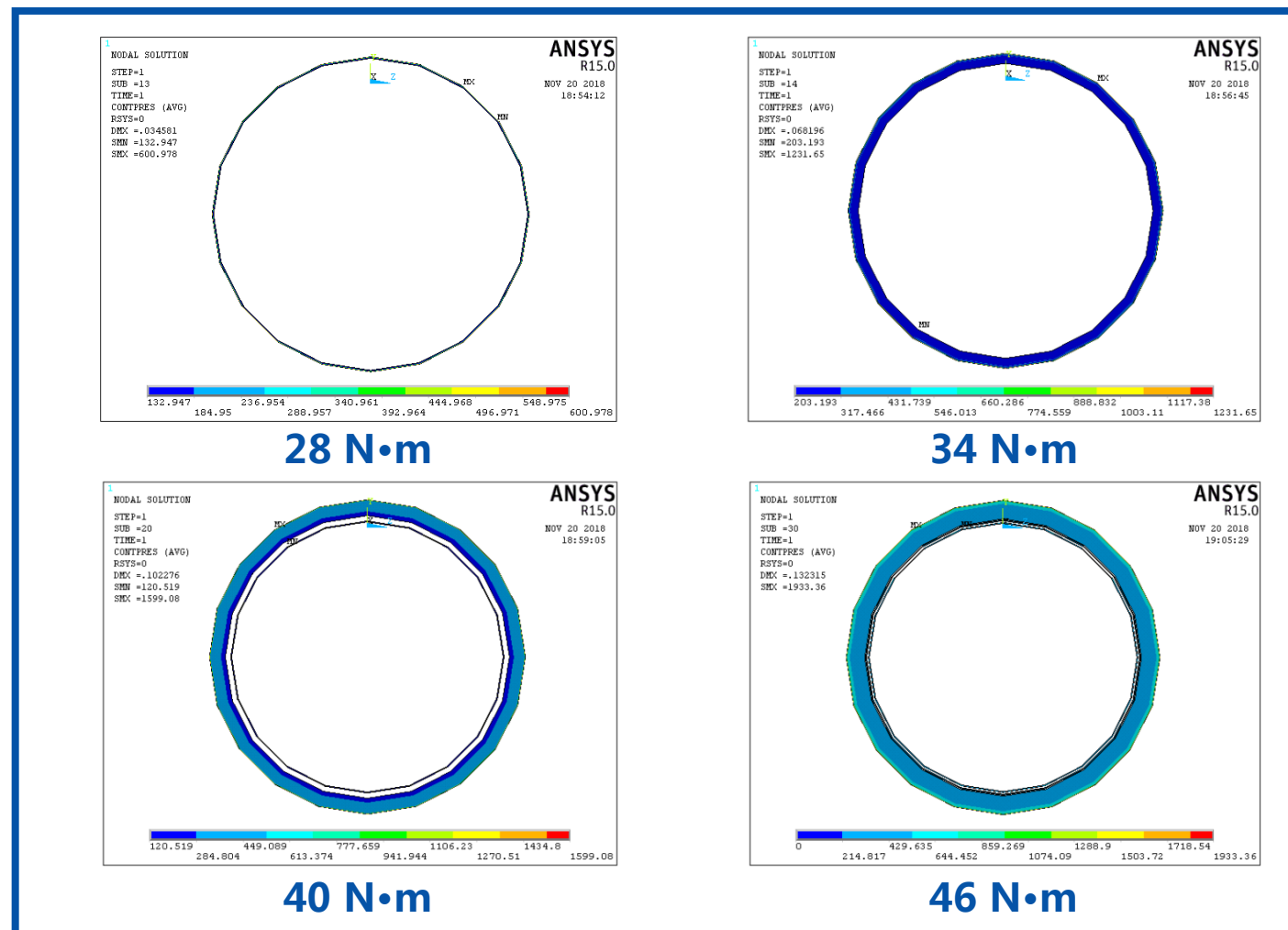


轴向预紧力——拧紧力矩

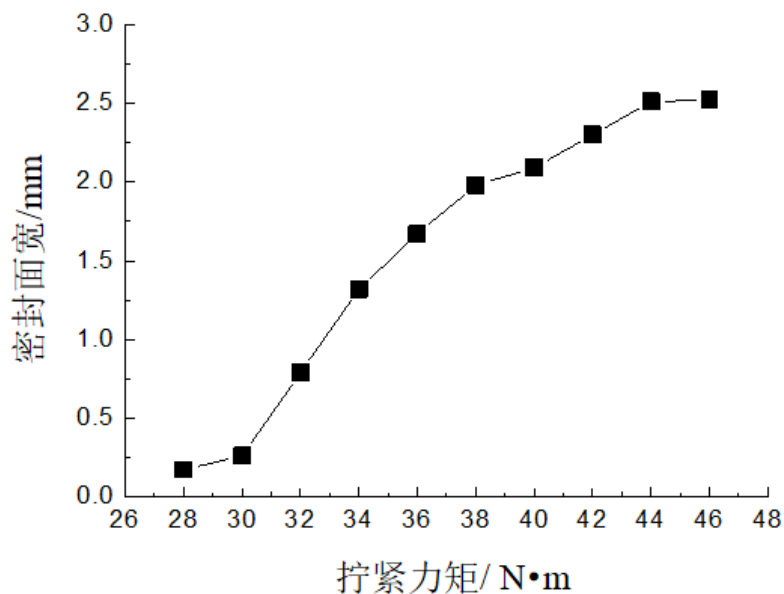
## 装配应力对管道密封性能影响分析

不同拧紧力矩下的密封环区域：**随着拧紧力矩增加，密封环宽度明显增加**

## 拧紧力矩对密封环区域的影响分析

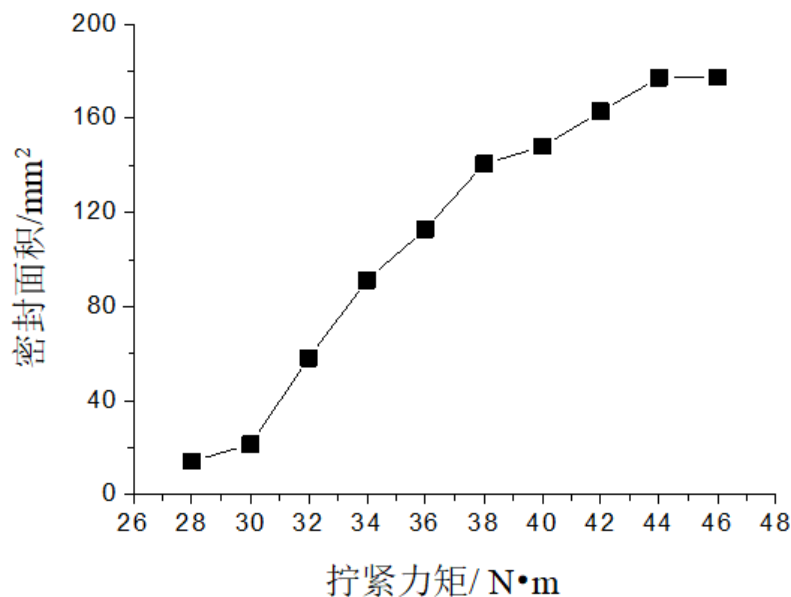


## 装配应力对管道密封性能影响分析

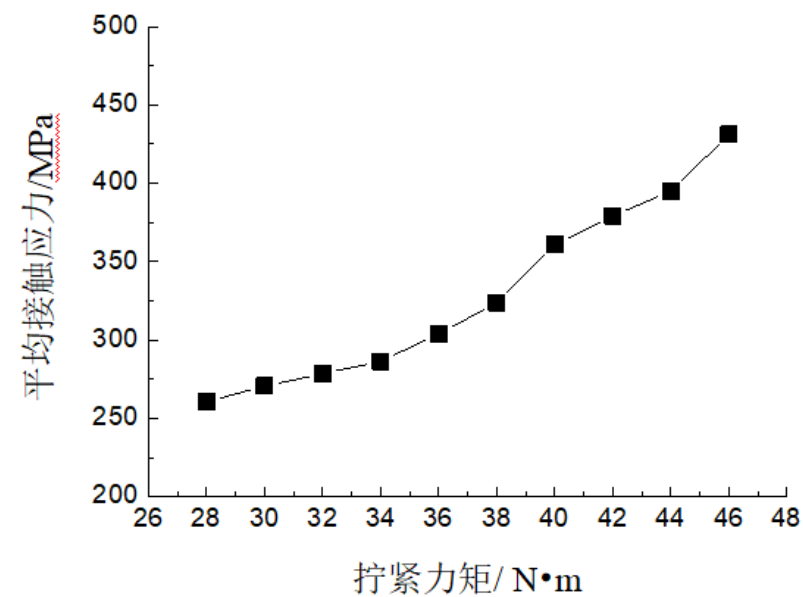


密封面宽——拧紧力矩

## 拧紧力矩对密封区域接触参量的影响分析



密封面积——拧紧力矩



密封面平均接触压应力——拧紧力矩

- (1) 拧紧力矩增大，密封面宽、密封面积以及密封面平均接触压应力都逐步增大，密封性能增强；
- (2) 拧紧力矩大于38N·m，密封性能增速减缓并接近最大值，可能超过承载极限，产生结构破坏。

## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 管路连接件整体强度校核

### 管路连接件材料本构模型：

扩口导管 ( 1Cr18Ni9Ti )

平管嘴 ( 1Cr11Ni2W2Mov )

直通管接头和外套螺母 ( TC6 )

### 塑性材料：

主要以屈服形式失效

### 第三和第四强度理论进行校核

### 第四强度理论（畸变能密度理论）：

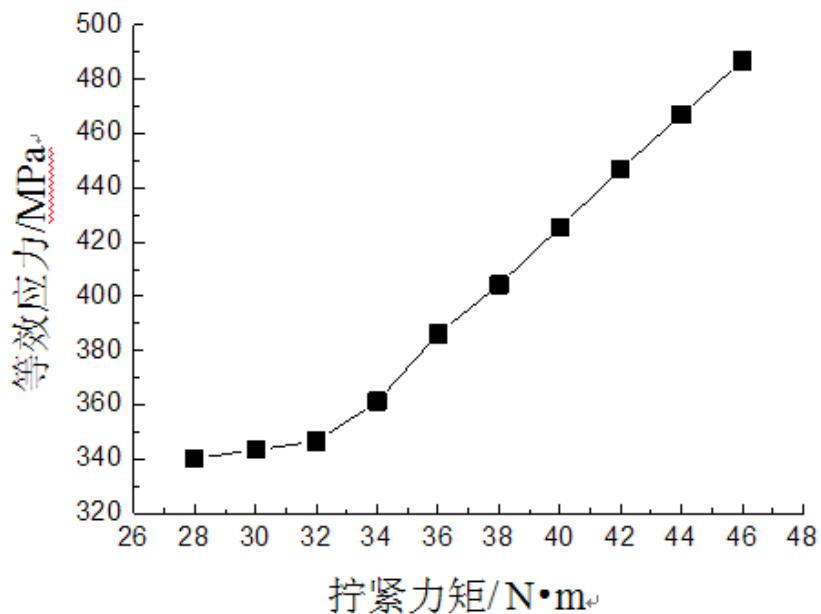
认为材料发生屈服主要是畸变能密度引起的，即认为构件处于任意应力状态下，只要其内部一点畸变能密度达到材料性能有关的某一极限值，该点处的材料就发生塑性屈服。

第四强度理论又称**Von Mises理论**，在ANSYS中可以提取管路连接件各个组件的**等效应力（V.Mises应力）**，通过对比材料的强度极限来进行强度校核。

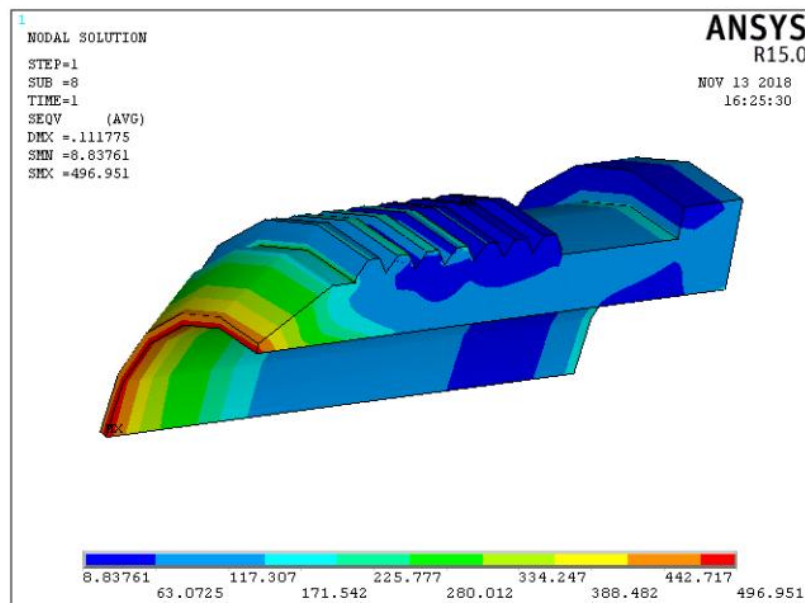
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 管路连接件整体强度校核

### 直通管接头强度校核



最大等效应力——拧紧力矩



46 N·m拧紧力矩等效应力分布

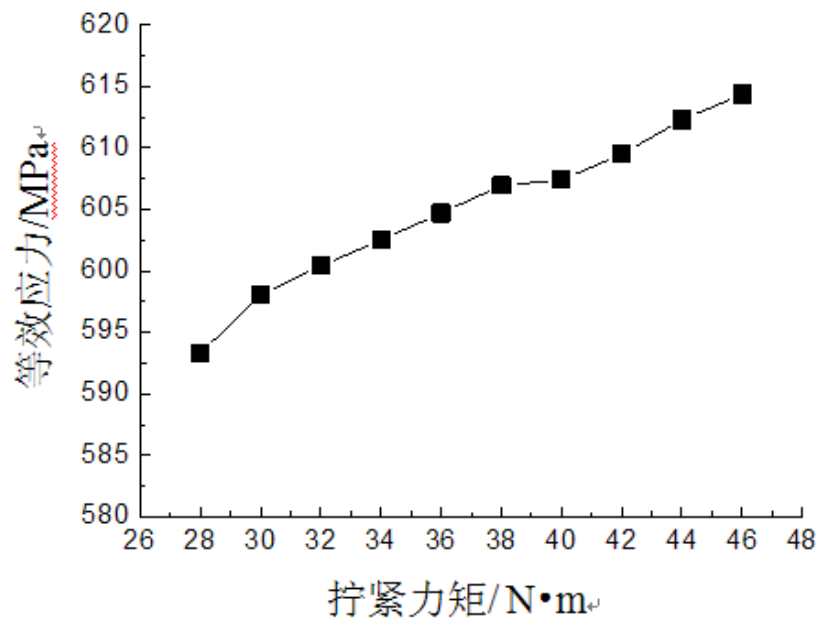
结论：

直通管接头（TC6）的强度极限为**1030MPa**，仿真的最大等效应力主要集中在管接头的锥面区域，大概为**500MPa**左右满足第四强度理论要求。

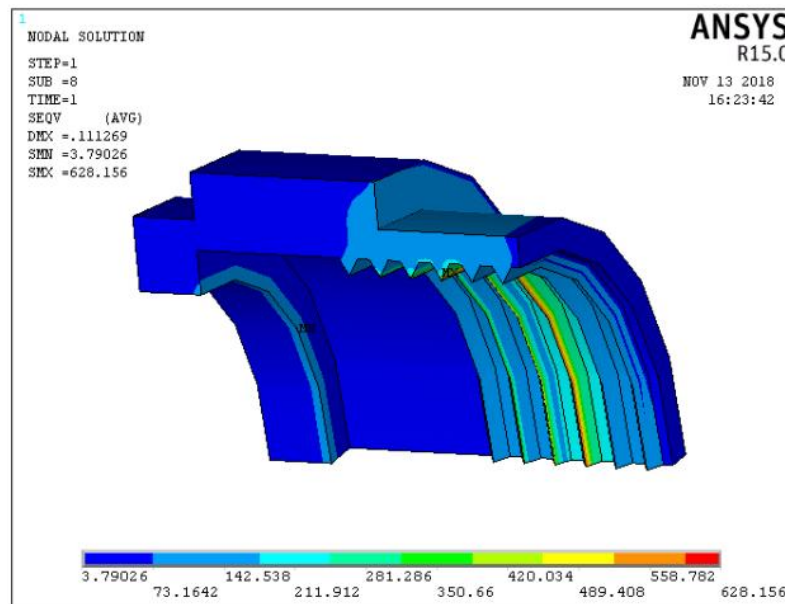
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 管路连接件整体强度校核

### 外套螺母强度校核



最大等效应力——拧紧力矩



46  $N \cdot m$ 拧紧力矩等效应力分布

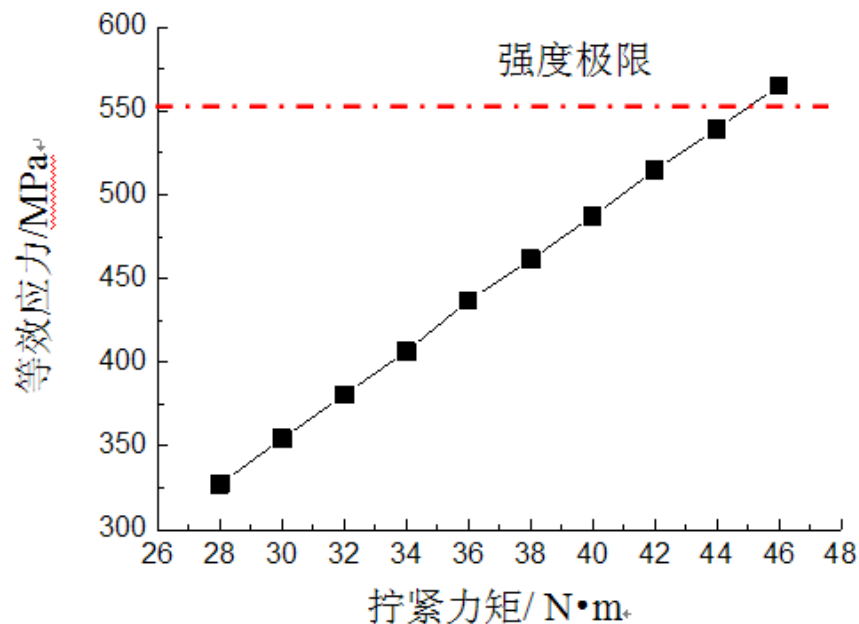
结论：

外套螺母 (TC6) 的强度极限为**1030MPa**，仿真的最大等效应力集中在螺纹齿根区域，基本稳定在**590~615MPa**左右，满足第四强度理论要求。

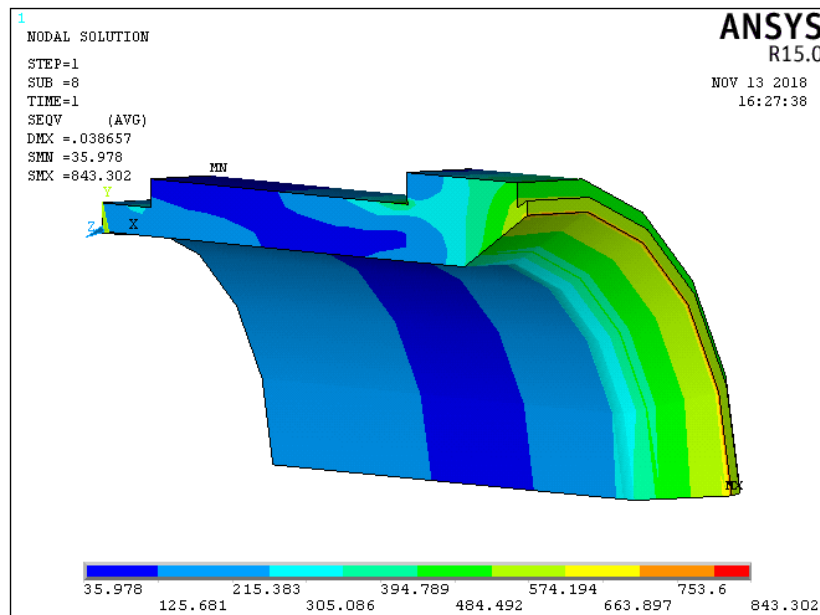
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 管路连接件整体强度校核

### 扩口导管强度校核



最大等效应力——拧紧力矩



46 N·m拧紧力矩等效应力分布

结论：

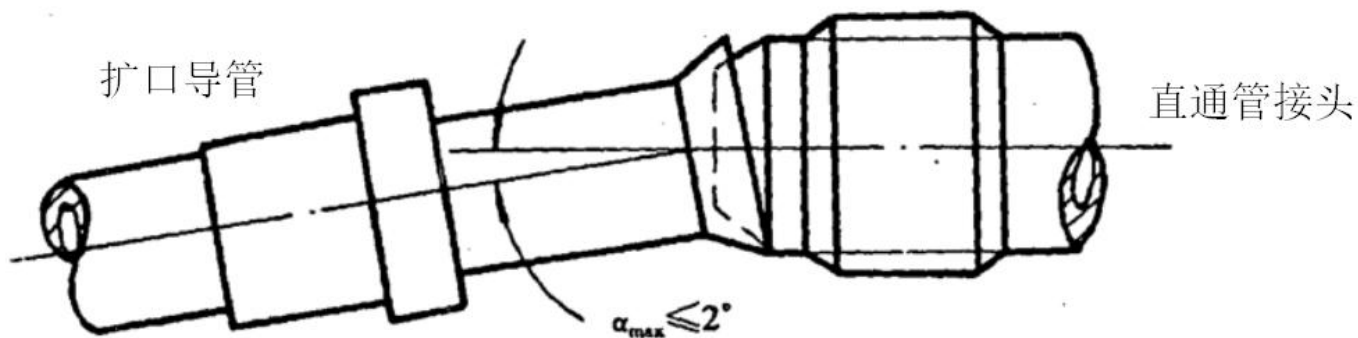
扩口导管（1Cr18Ni9Ti）的强度极限为**550MPa**，当拧紧力矩**46N·m**，最大等效应力**574.19MPa**  $>$  **550MPa**，导管可能发生破坏；因此，最大拧紧力矩可取为**44N·m**，与航标提出的**41.15N·m**十分接近，说明仿真具有一定的准确性



## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

### 角度偏差对密封性能的影响分析



GJB3054-97 《飞机液压管路系统设计、安装要求》

——导管端部的角度偏差

角度偏差一般指两根相连导管中心轴线的相对偏角，**标准规定**“导管自由端须与接头或附件管嘴平行，允许的偏差不超过**2°**”。

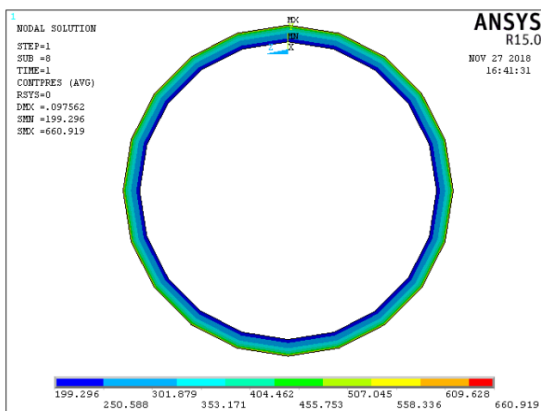
**仿真条件**：摩擦系数0.15，拧紧力矩36N·m，角度偏差**0°~3°**；

**密封环区域**：密封面宽、密封面积、密封面平均接触压应力；

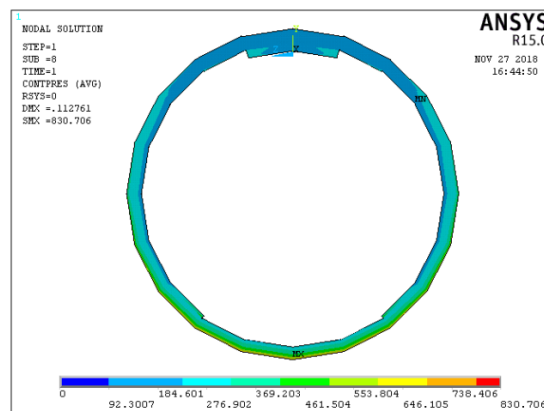
## 装配应力对管道密封性能影响分析

### 角度偏差对密封性能的影响分析

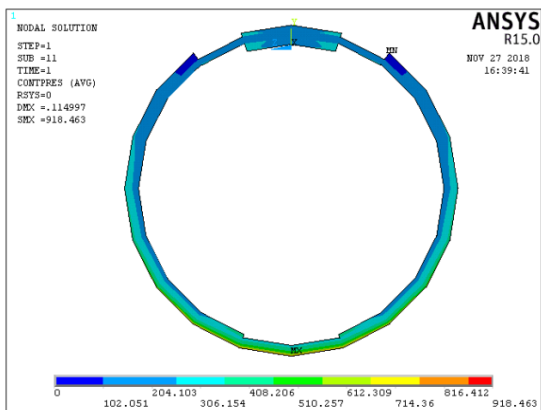
## 装配偏差对密封性能的影响分析



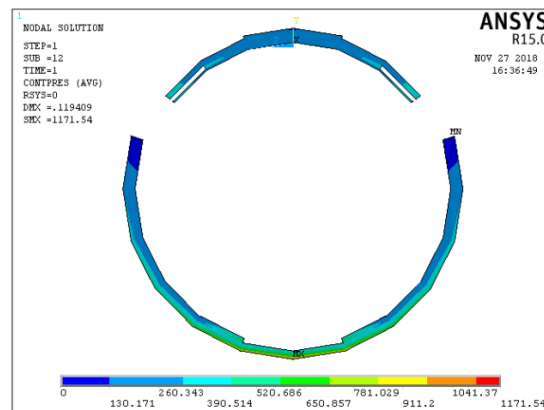
0°



1.2°



2.1°



3°

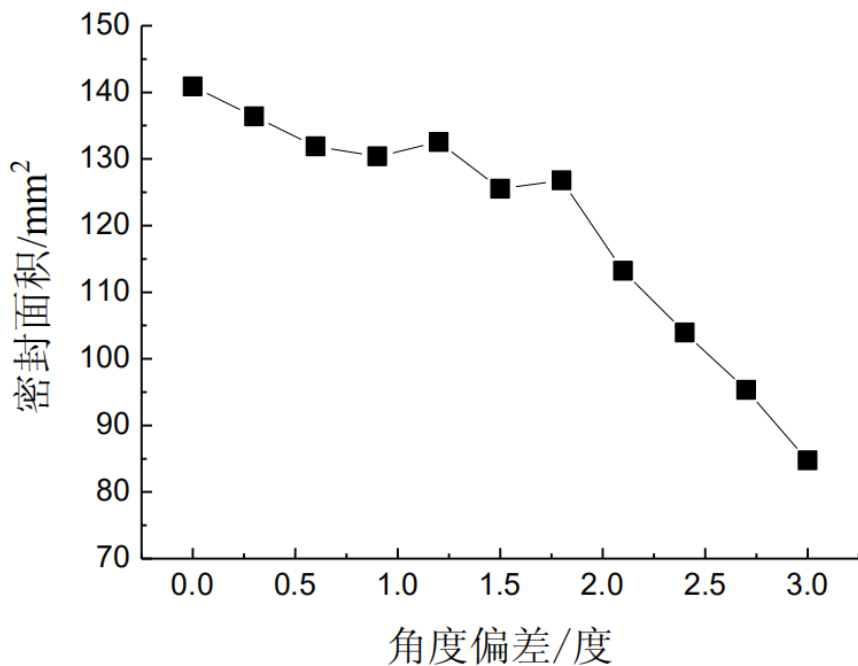
结论：

角度偏差为0°时，密封环区域为完整的圆锥面，密封性能最高；随着角度偏差增大，密封环部分区域变窄，密封面积减小，接触压应力降低，密封性能也随之降低；当角度偏差达到3°，密封环出现明显“缺失”，该区域极可能出现泄露。

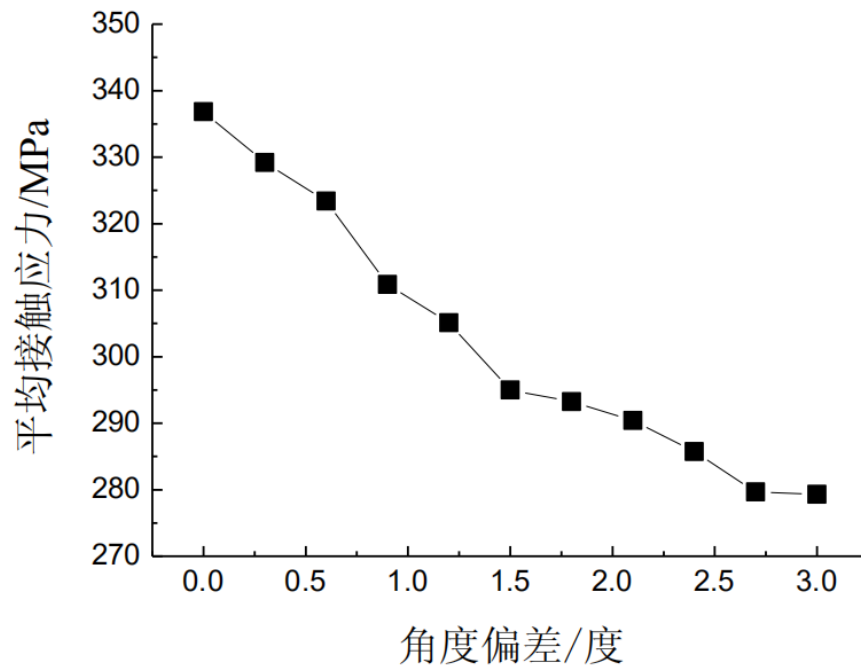
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

### 角度偏差对密封性能的影响分析



密封面积——角度偏差



平均接触压应力——角度偏差

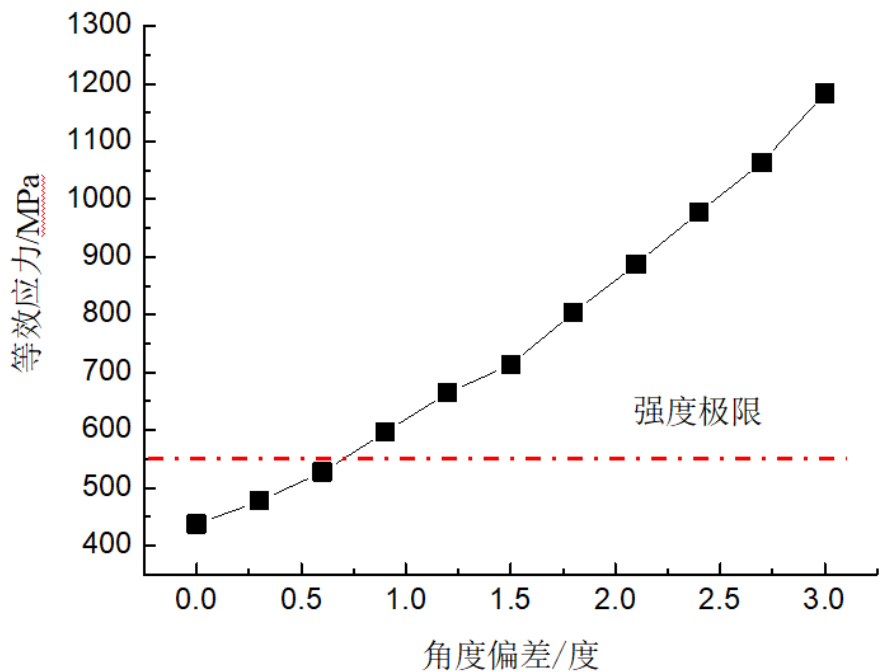
### 结论：

随着角度偏差**增大**，密封面积存在一些波动，但基本呈**下降**趋势，密封面平均接触压应力也**逐渐减小**，密封性能也随之**降低**。

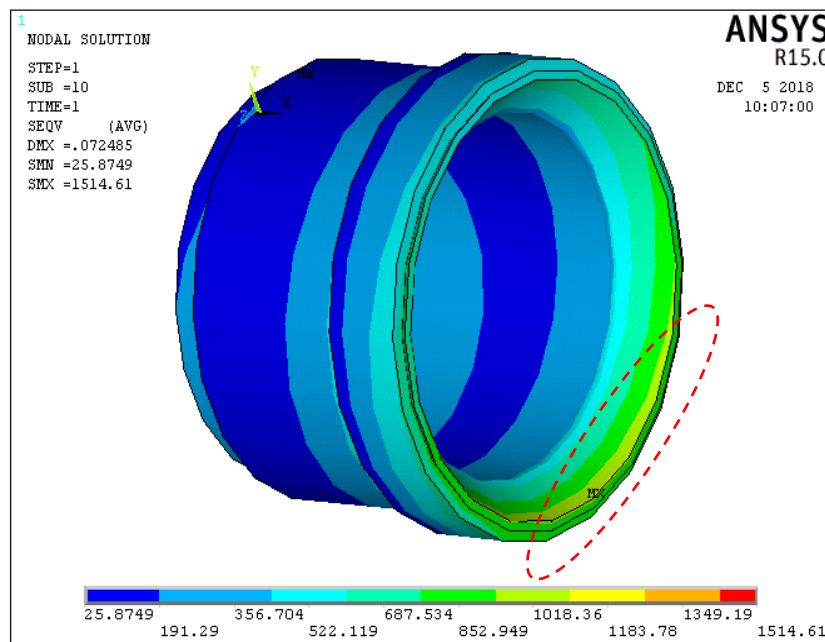
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

### 角度偏差时扩口导管强度校核



最大等效应力——角度偏差



角度偏差3°时等效应力分布

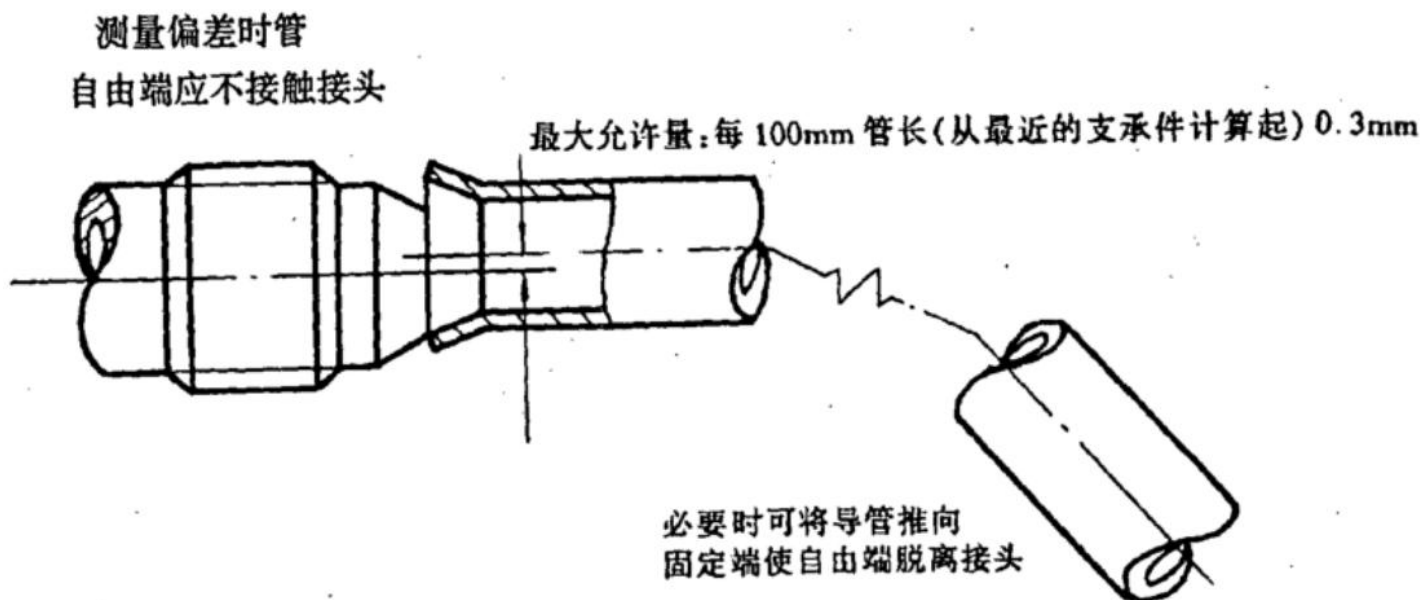
结论：

随着角度偏差**增大**，导管锥面部分区域的等效应力**明显增大**，角度偏差达到一定程度时，扩口导管将超过其承载极限，出现破坏，密封性能随之**降低**。

## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

### 径向偏差对密封性能的影响分析



GJB3054-97 《飞机液压管路系统设计、安装要求》

——导管端部的径向偏差

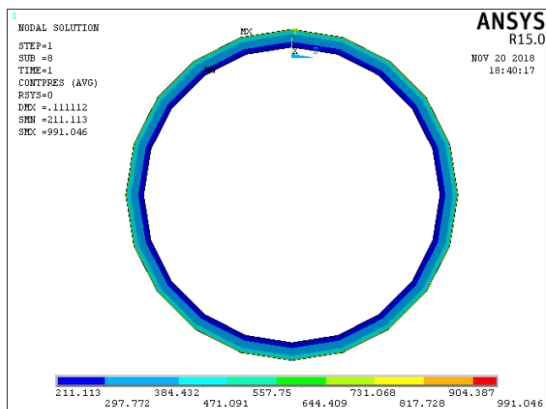
径向偏差一般指两根相连导管中心轴线的径向距离，**标准规定**：“导管自由端须与接头或附件管嘴在同一直线上，其偏差按导管每100mm长（从最近的支承件算起）不超过0.3mm”。

**仿真条件**：摩擦系数0.15，拧紧力矩36N·m，径向偏差**0~0.5mm**；

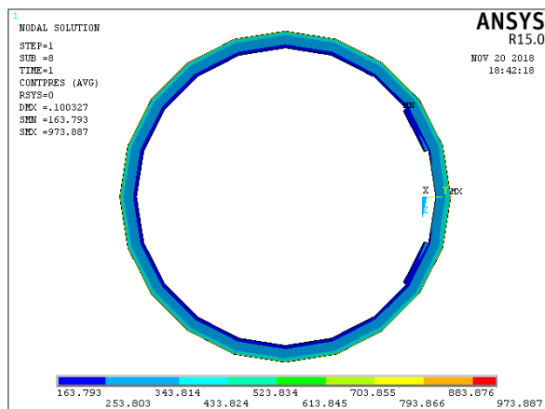
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

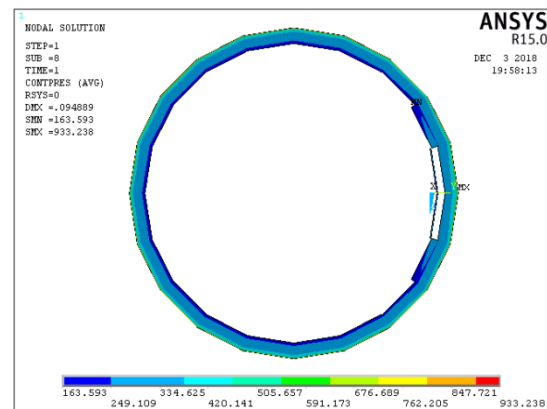
### 径向偏差对密封性能的影响分析



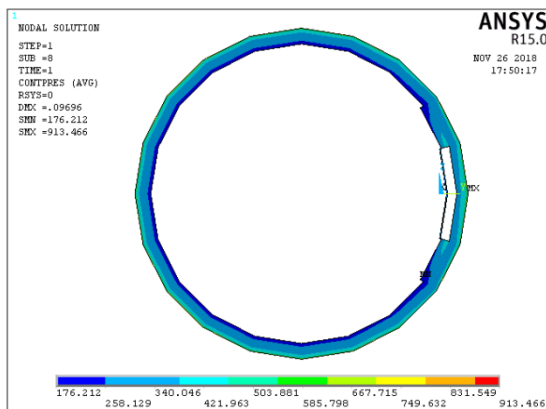
0mm



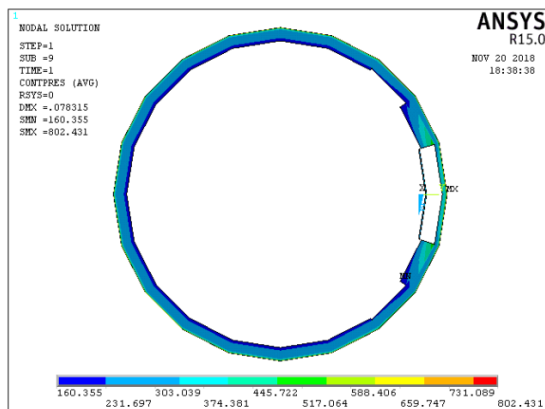
0.1mm



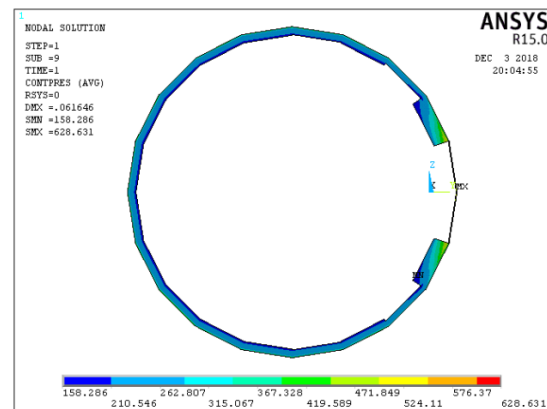
0.2mm



0.3mm



0.4mm



0.5mm

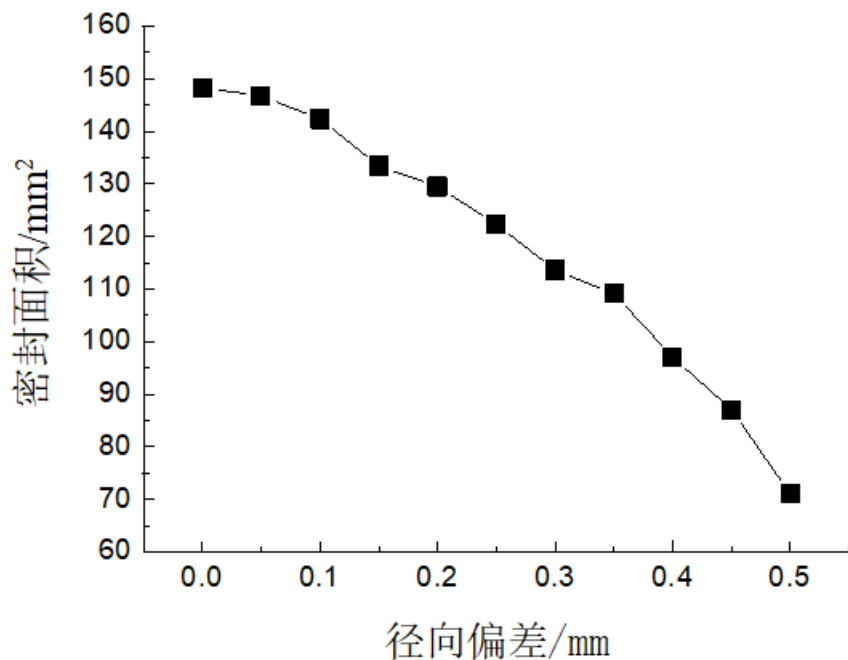
结论：

随着径向偏差**增大**，密封环部分区域**变窄**，密封面积**减小**，接触压应力**降低**，并且密封环部分区域出现**“漏洞”**，该区域极可能出现泄露，管路连接件密封性能**下降明显**；

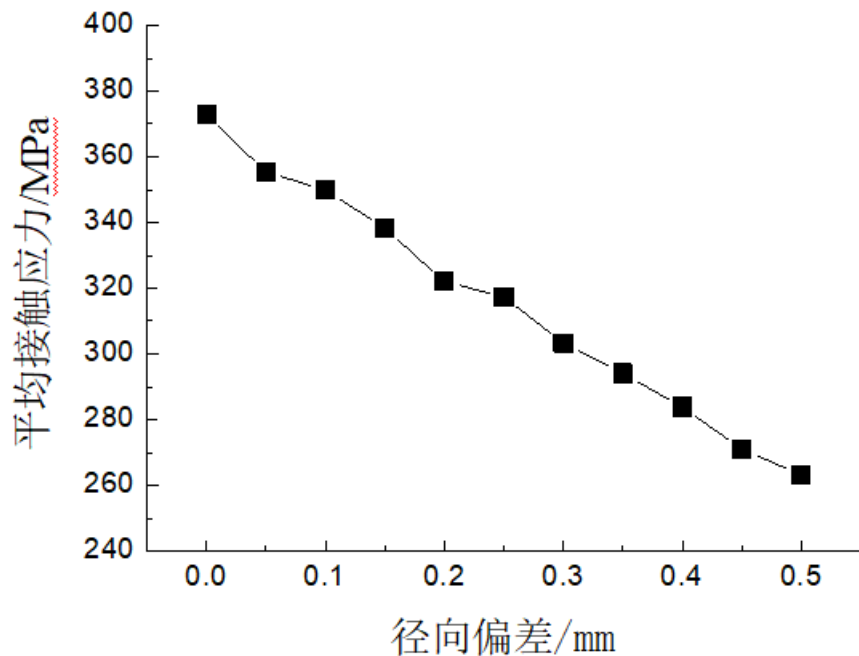
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

### 径向偏差对密封性能的影响分析



密封面积——径向偏差



平均接触压应力——径向偏差

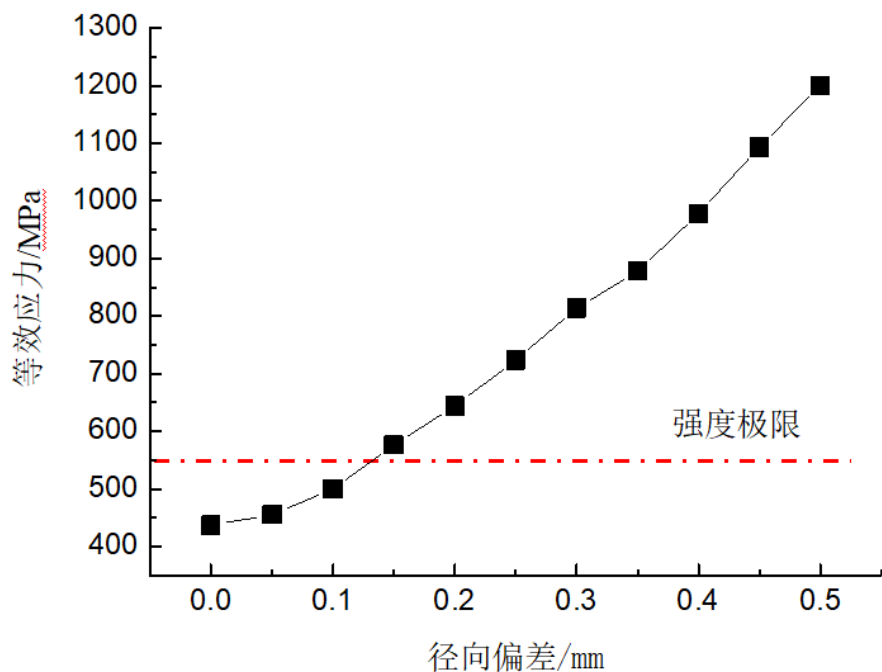
### 结论：

随着径向偏差**增大**，密封面积基本呈**下降**趋势，密封面平均接触压应力也逐渐**减小**，密封性能也随之**降低**。

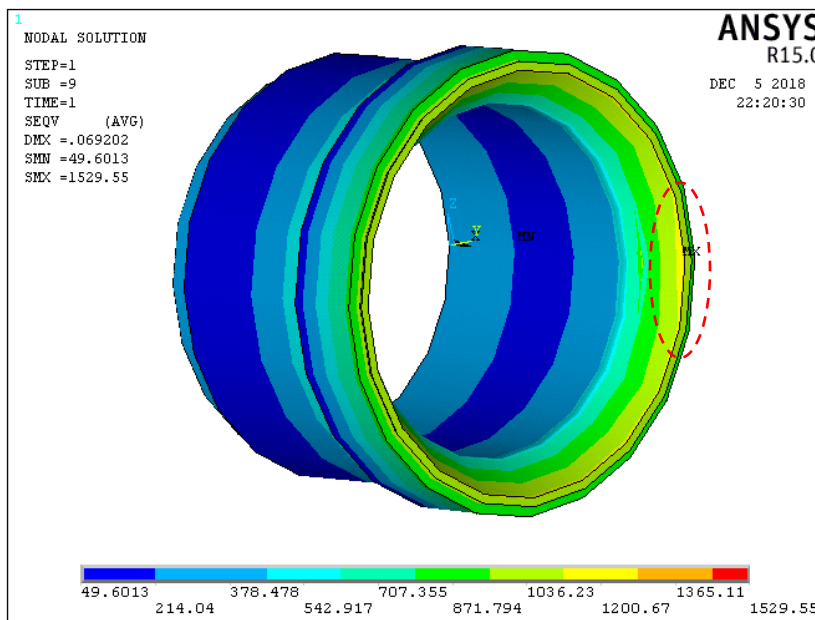
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

### 径向偏差时扩口导管强度校核



最大等效应力——径向偏差



径向偏差0.5mm时等效应力分布

结论：

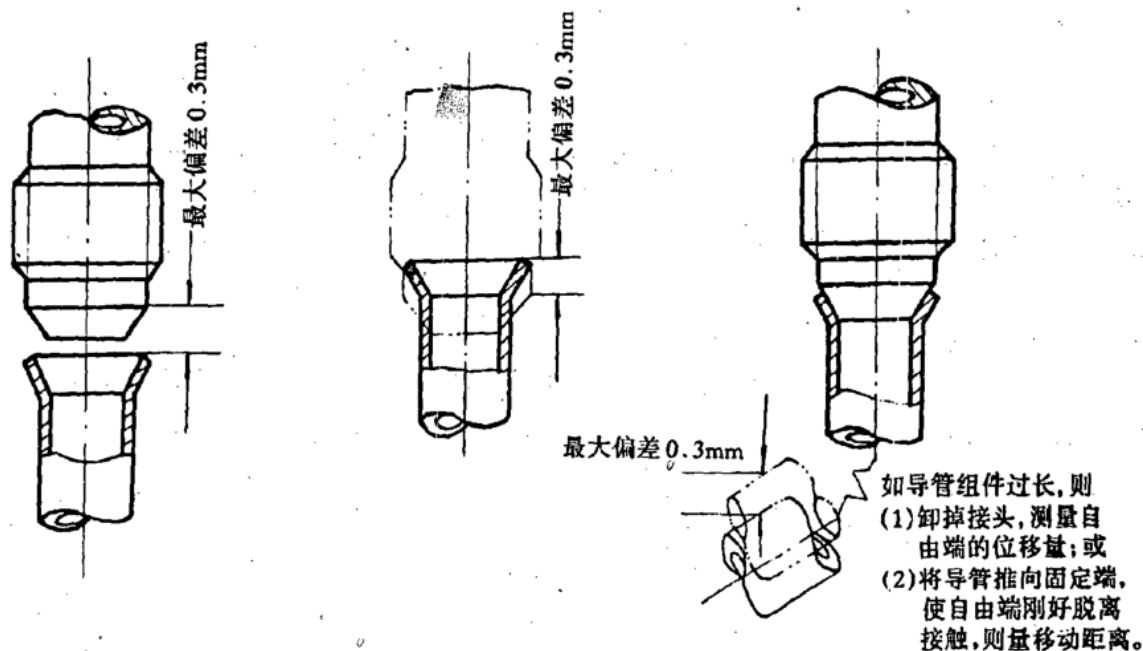
随着径向偏差**增大**，导管锥面部分区域的等效应力**明显增大**，径向偏差达到一定程度时，扩口导管将超过其承载极限，出现破坏，密封性能随之**降低**。



## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

### 长度偏差对密封性能的影响分析



GJB3054-97 《飞机液压管路系统设计、安装要求》

——导管长度方向偏差

长度方向偏差一般指两根相连导管对接端面上的相对长度，**标准规定**：“导管每100mm长其偏差不超过0.3mm，对每根导管的总长偏差应控制在0.8mm以内”。

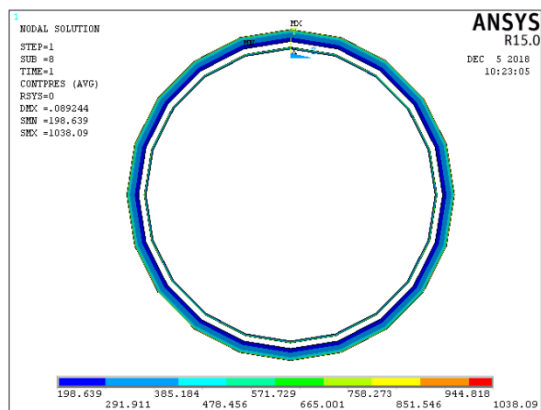


**仿真条件**：将正常装配导管与管接头接触位置规定为“0”，导管远离管接头方向为“+”，相反为“-”；摩擦系数0.15，拧紧力矩36N·m，长度偏差-0.5~+0.5mm；

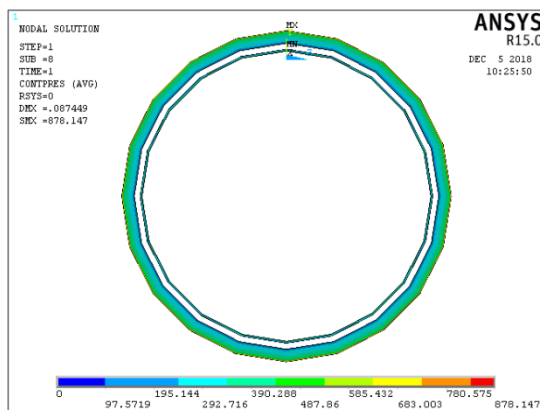
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

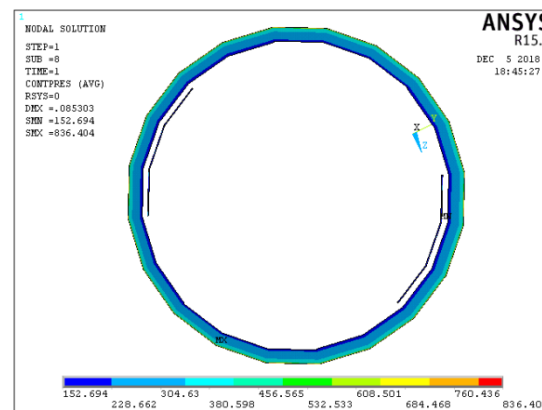
### 长度偏差对密封性能的影响分析



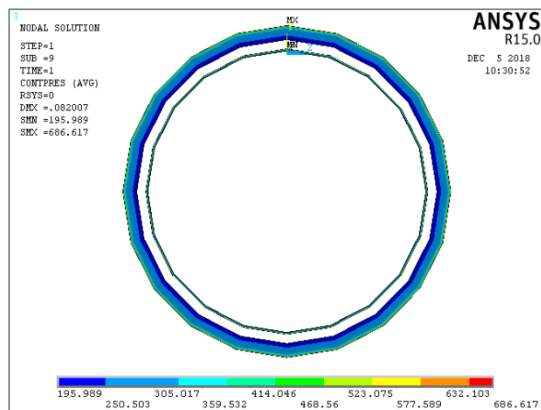
+0.5mm



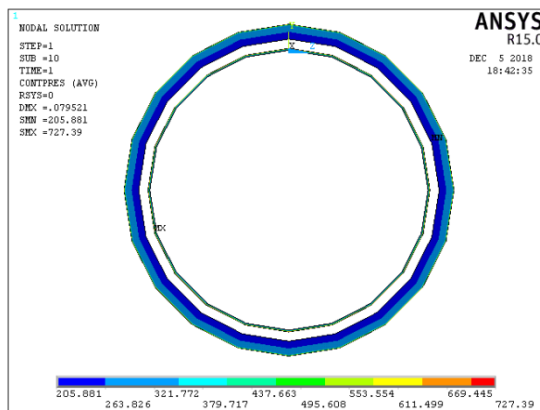
+0.3mm



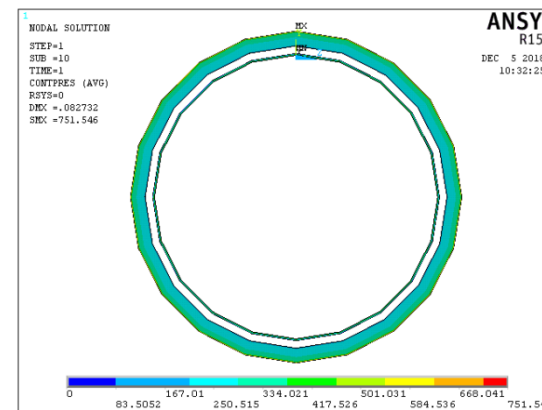
+0.1mm



0mm



-0.3mm



-0.5mm

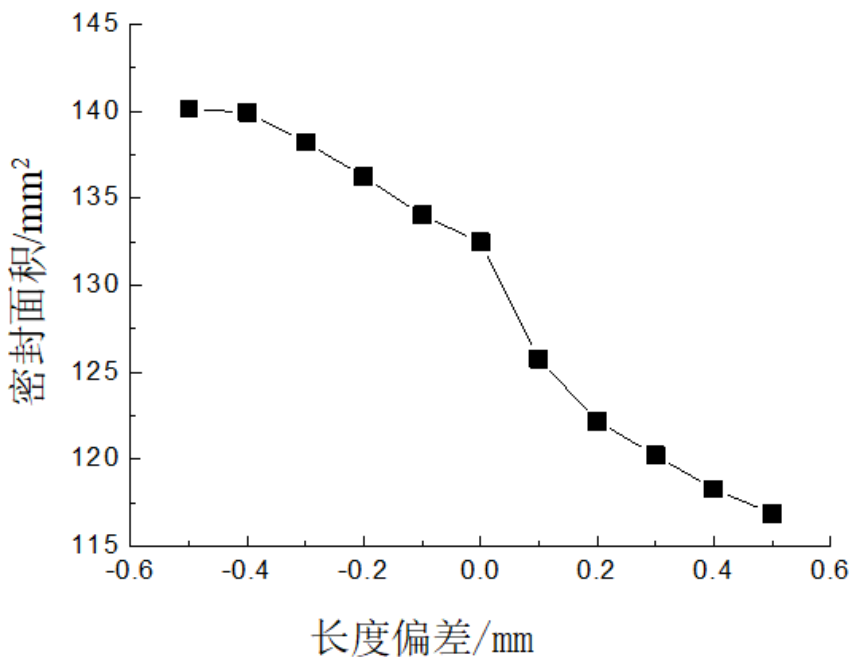
结论：

长度偏差基本**不会改变**密封环形状；当长度偏差为“+”即导管远离管接头方向时，长度偏差**增大**，密封环宽度和面积**减小**；当长度偏差为“-”即导管靠近管接头方向时，长度偏差**增大**，密封环宽度和面积**增大**。

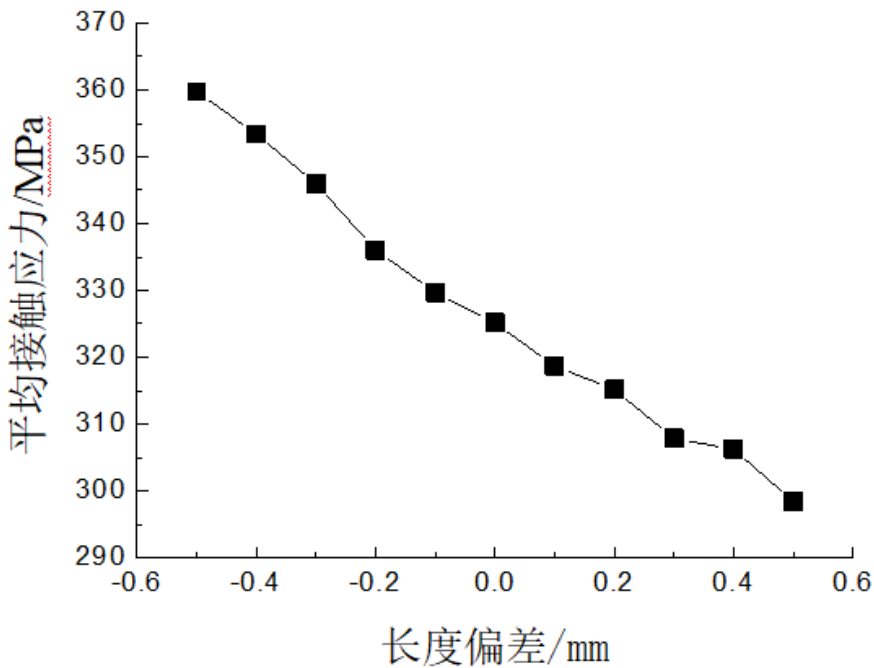
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

### 长度偏差对密封性能的影响分析



密封面积——长度偏差



平均接触压应力——长度偏差

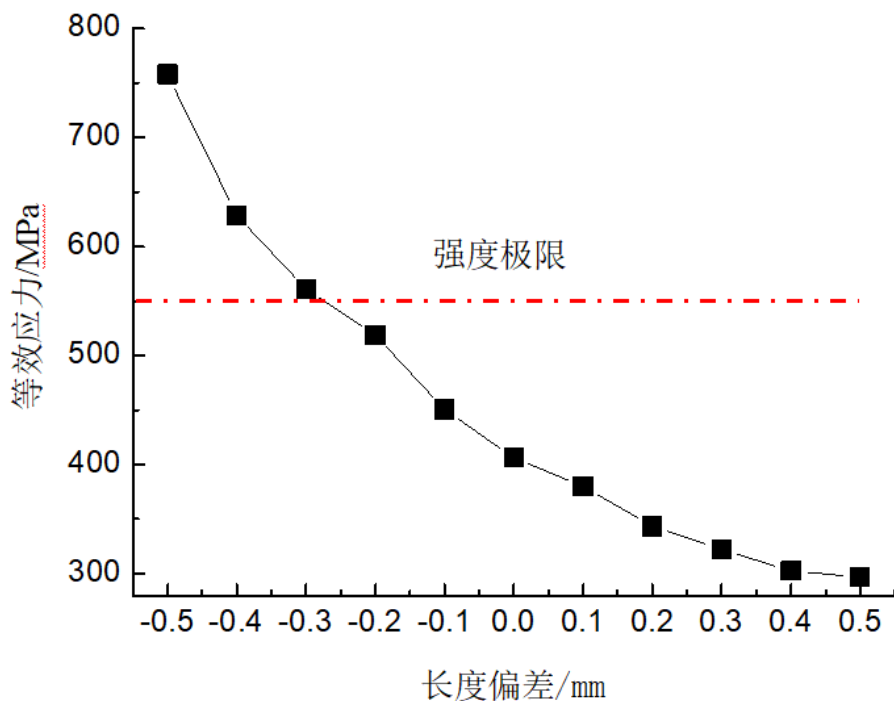
结论：

当长度偏差为“+”即导管远离管接头方向时，长度偏差**增大**，密封环面积和平均接触压应力**减小**；当长度偏差为“-”即导管靠近管接头方向时，长度偏差**增大**，密封环面积和平均接触压应力**增大**。

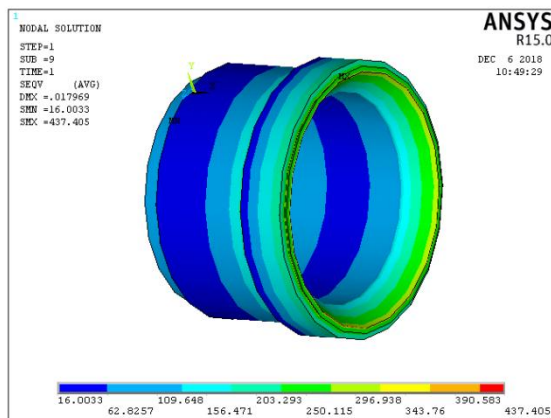
## 装配应力对管道密封性能影响分析

## 装配偏差对密封性能的影响分析

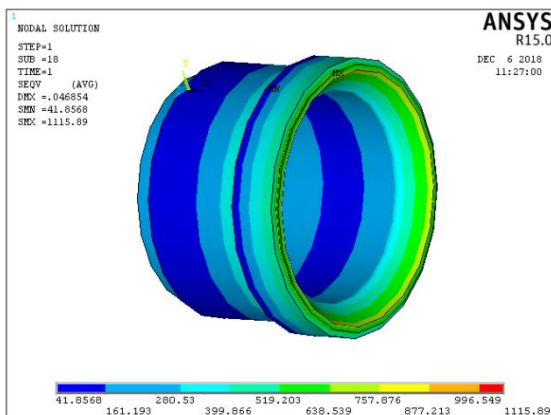
### 长度偏差时扩口导管强度校核



最大等效应力——长度偏差



### 长度偏差+0.5mm时等效应力分布



### 长度偏差-0.5mm时等效应力分布

结论：

当长度偏差为“+”即导管远离管接头方向时，长度偏差**增大**，导管等效应力**减小**；  
当长度偏差为“-”即导管靠近管接头方向时，长度偏差**增大**到一定程度时，扩口导管将超过其承载极限，出现破坏，密封性能随之**降低**。

## 装配应力对管道密封性能影响分析

### 小结：

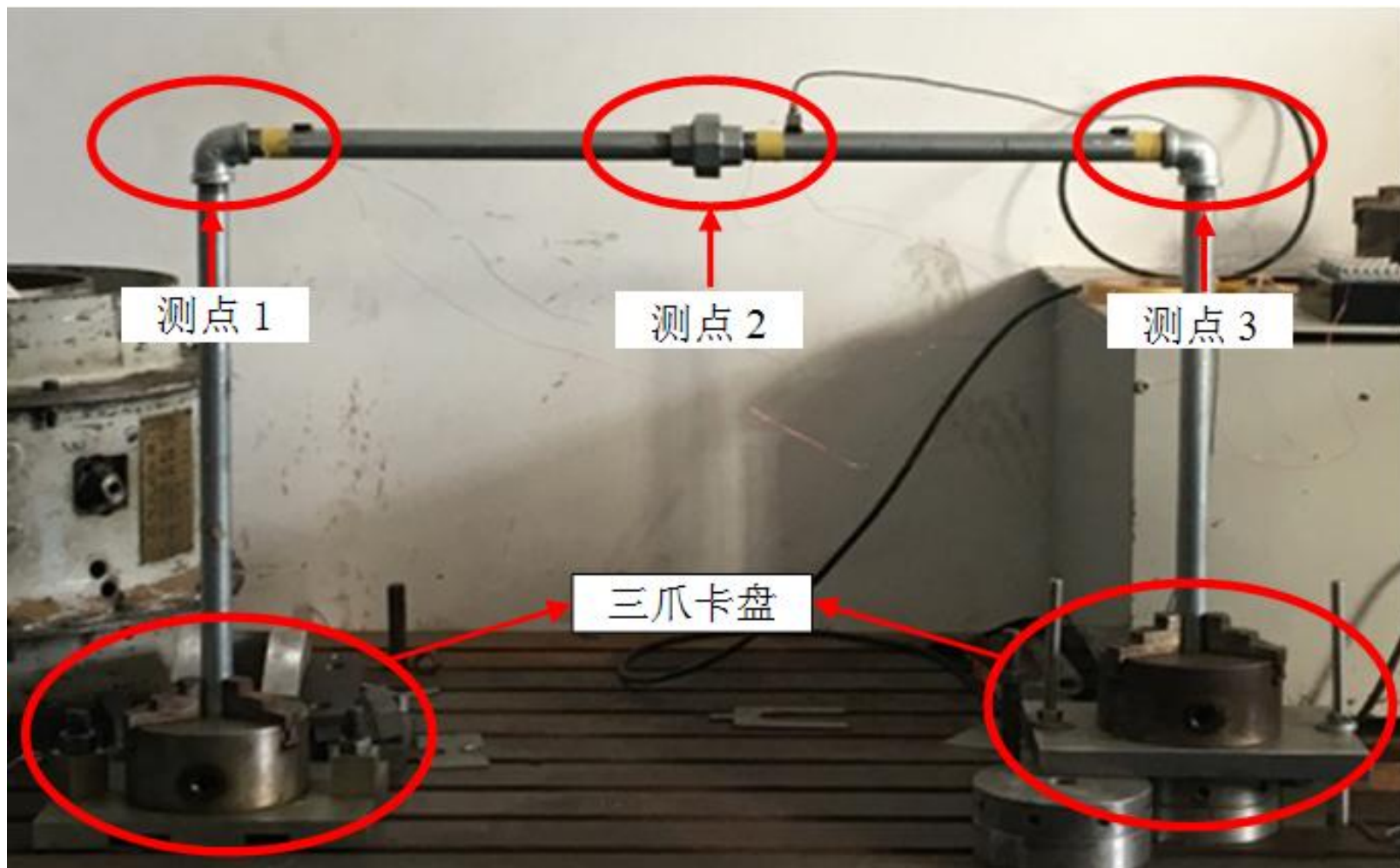
(1) 研究了摩擦系数对密封性能的影响规律：同一拧紧力矩下，随着摩擦系数增大，轴向预紧力反而减小，密封性能随之降低。

(2) 研究了拧紧力矩对密封性能的影响规律：在一定范围内，随着拧紧力矩的增大，管路连接件的密封性能也将增强；但拧紧力矩超过某一极限值，扩口导管可能发生破坏。

(3) 研究了装配时出现的几种典型偏差对密封性能的影响：角度偏差、径向偏差都会使管路连接件密封性能降低，并且会使扩口导管的部分区域产生较大的装配应力，使管路结构产生破坏而出现泄漏或其他故障；长度偏差为“+”时密封性能降低，为“-”时密封性能增强，但超过一定程度会使管路结构产生破坏。

## 管路安装应力智能检测技术研究

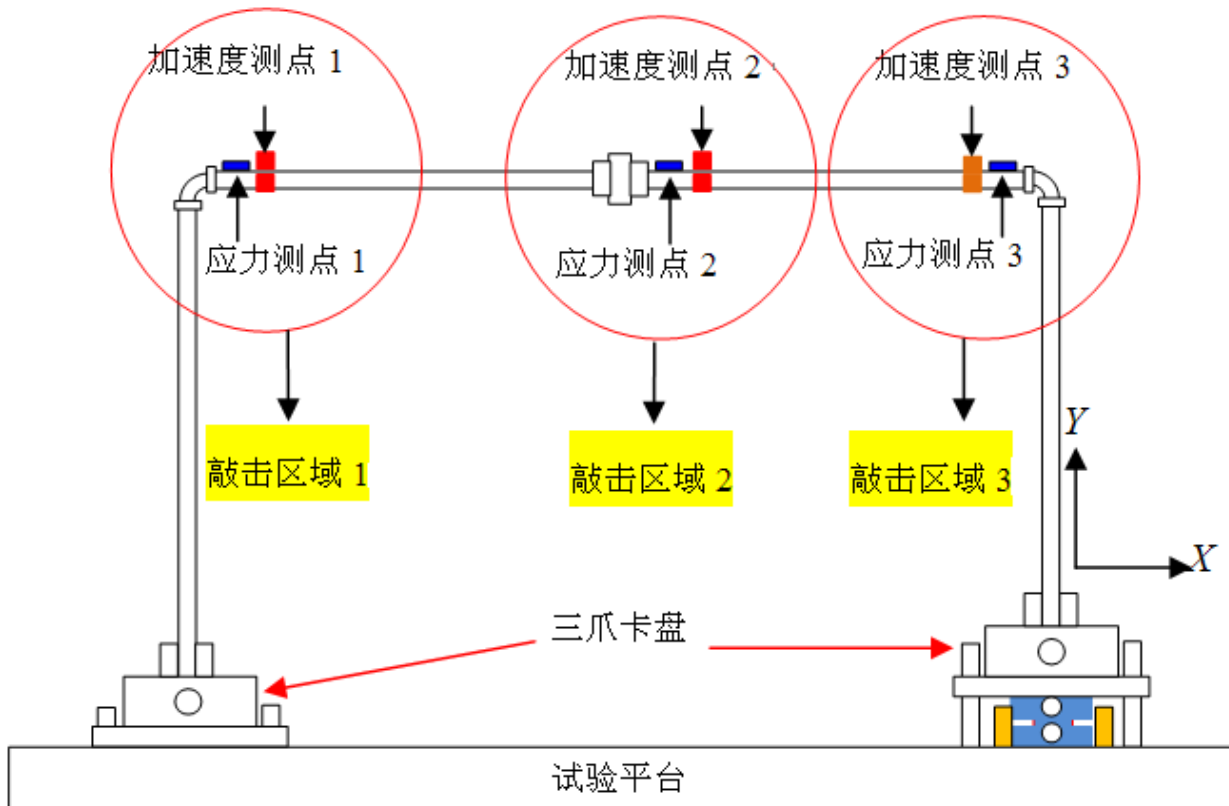
试验台主要由导管、管接头、三爪卡盘、试验平台等组成；通过使左侧的三爪卡盘沿着试验平台产生**横向位移**来模拟管道的初始安装应力。



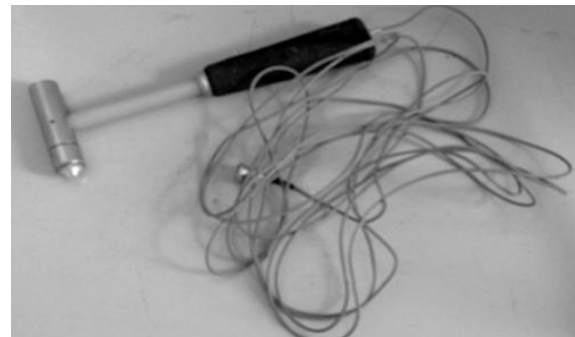
管道安装应力检测试验台

# 管路安装应力智能检测技术研究

## 试验台传感器布置



## 模态敲击

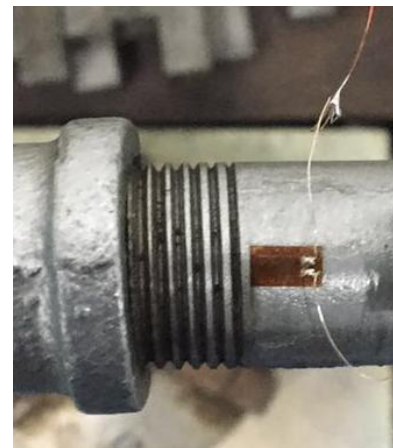


30927型力锤

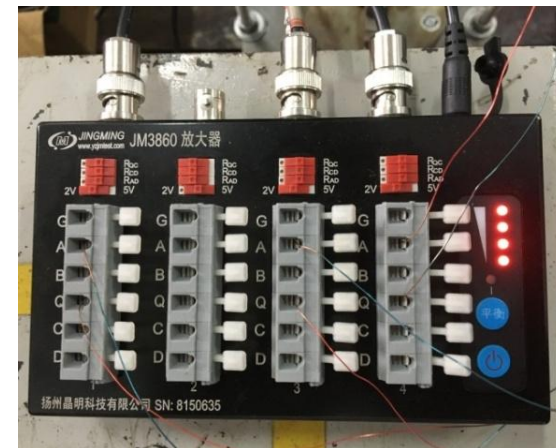


B&K4508加速度传感器

## 应力测试



BX120-3AA箔式电阻应变片

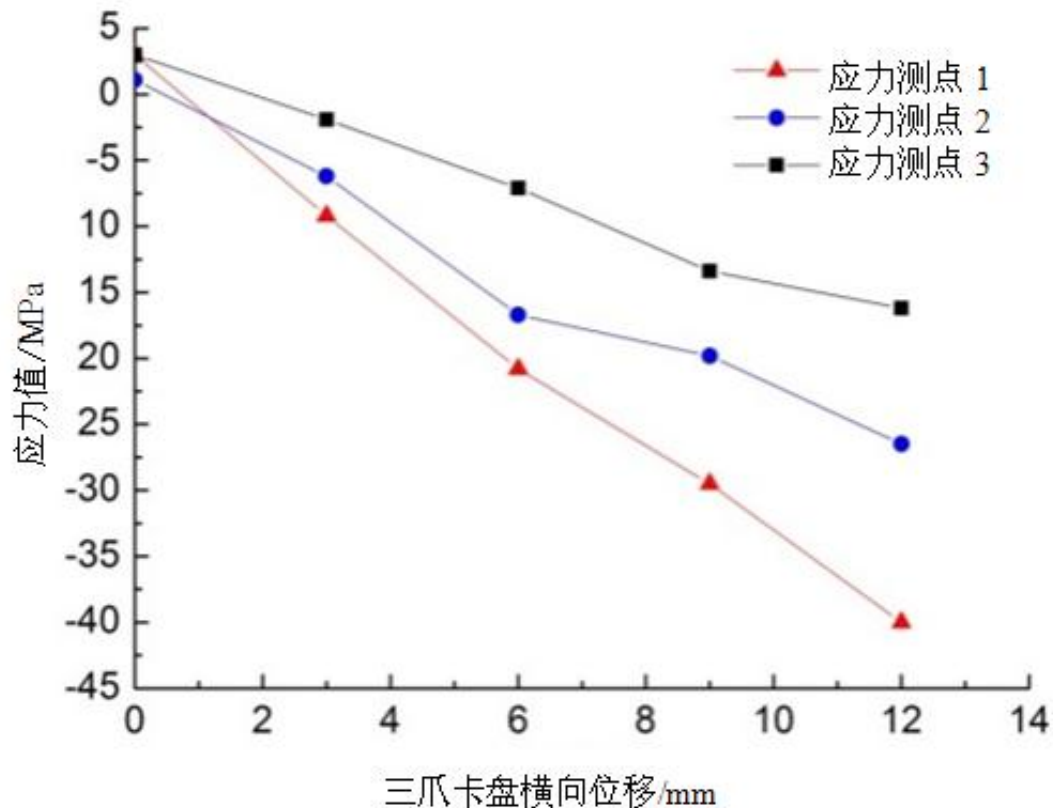


JM3860应变放大器

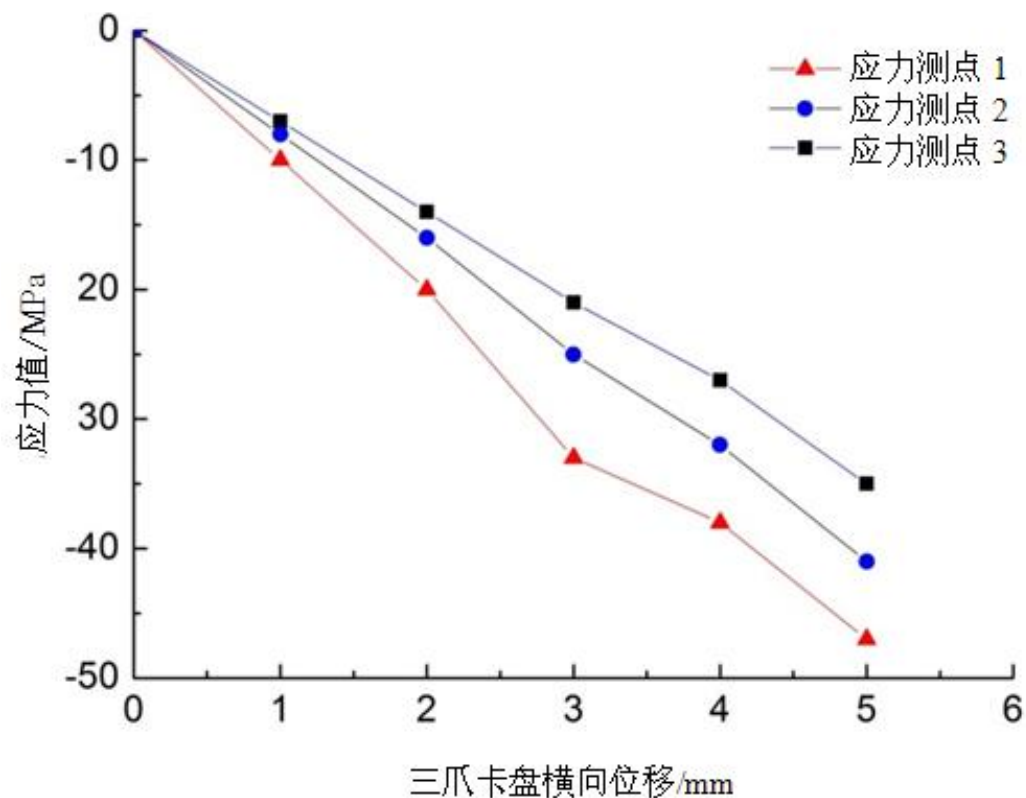
## 管路安装应力智能检测技术研究

可以发现**仿真与试验的应力变化趋势**基本一致，说明了安装应力模拟的正确性

### 试验台应力测试结果



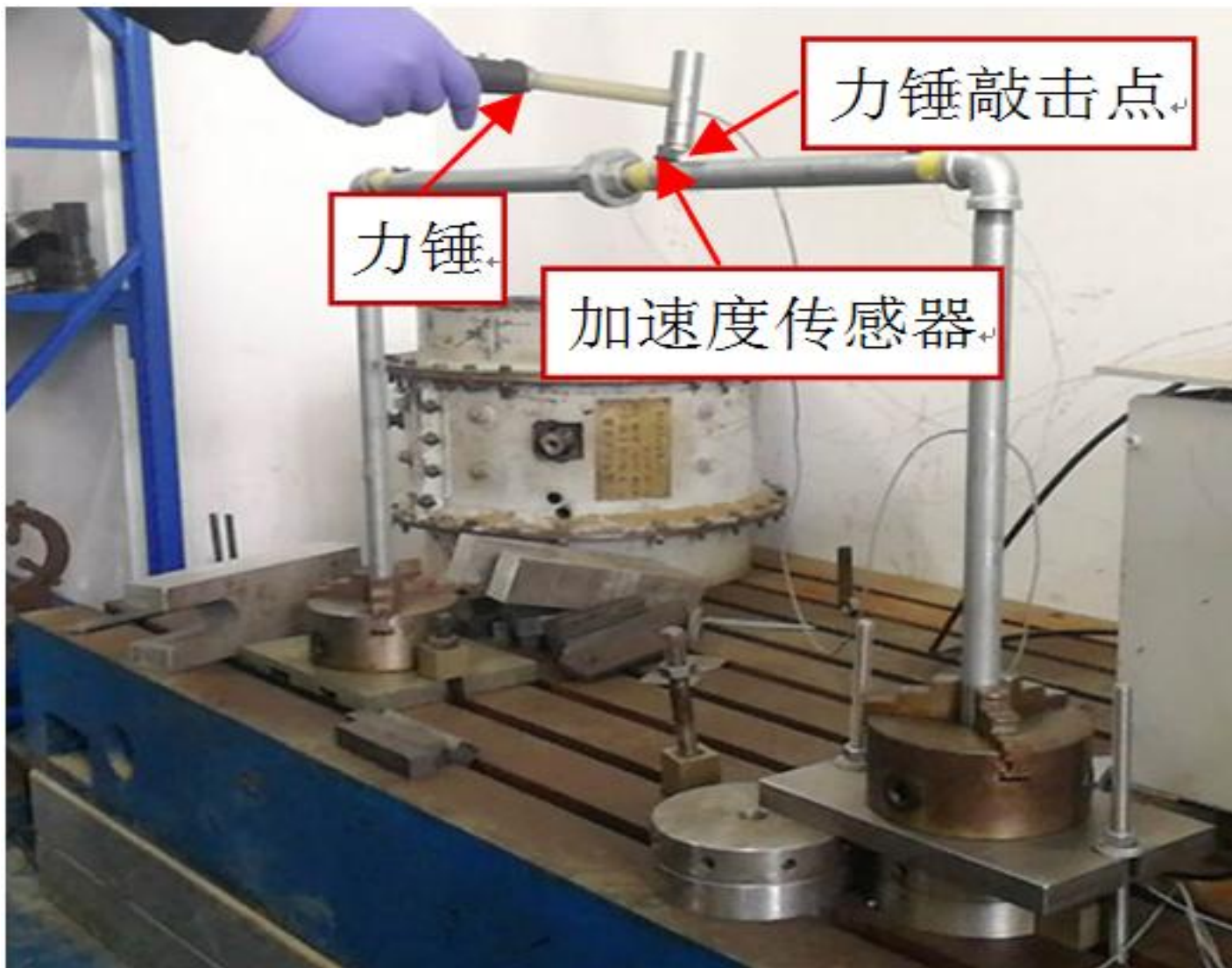
### ANSYS应力仿真结果





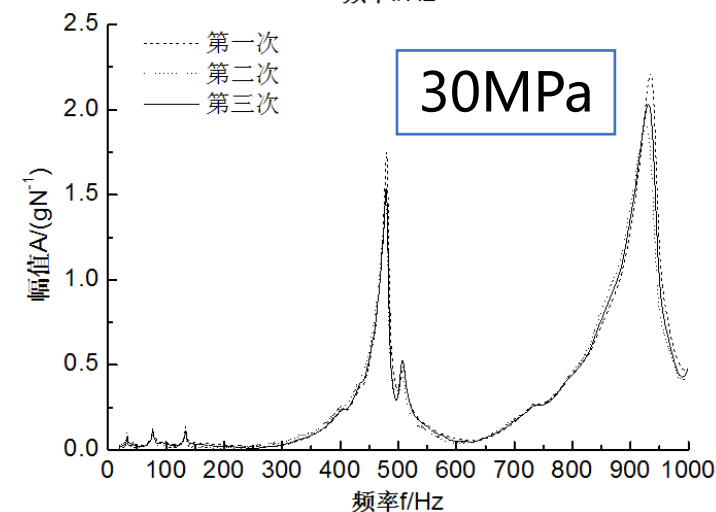
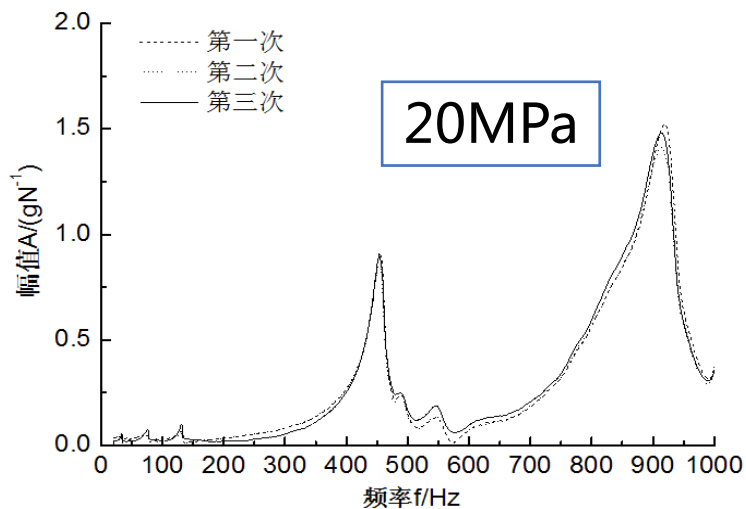
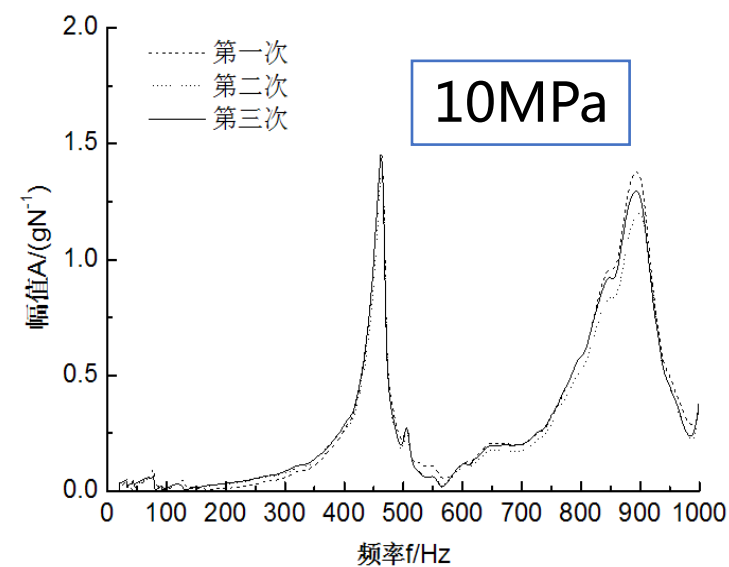
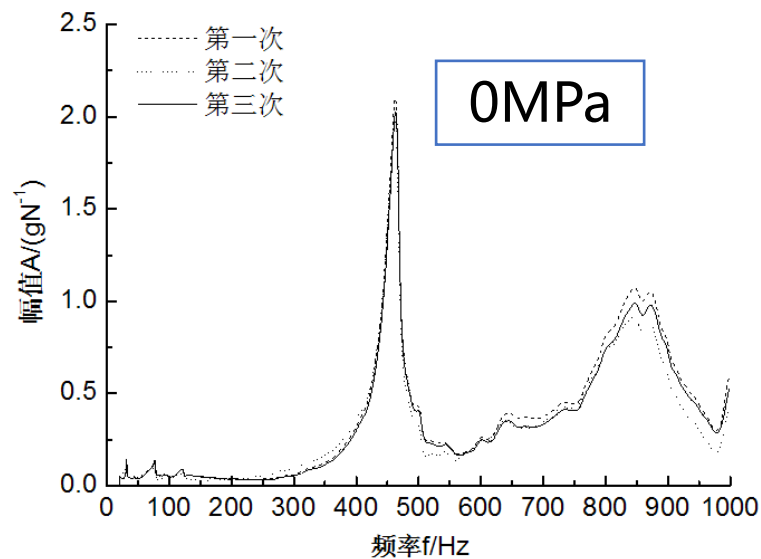
## 管路安装应力智能检测技术研究

基于锤击法的导管模态试验，通过力锤敲击导管测试点来获取导管各点的原点频响函数



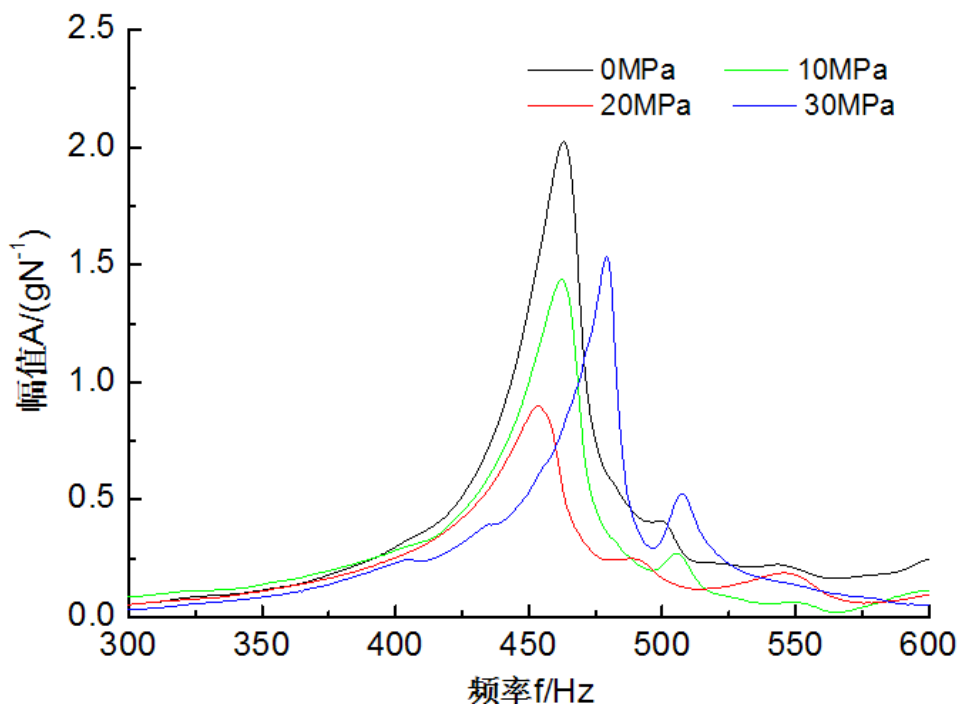
## 管路安装应力智能检测技术研究

通过对比测点1不同应力下的三次敲击结果可以发现：三次敲击的频响函数基本一致，证明了敲击结果的有效性

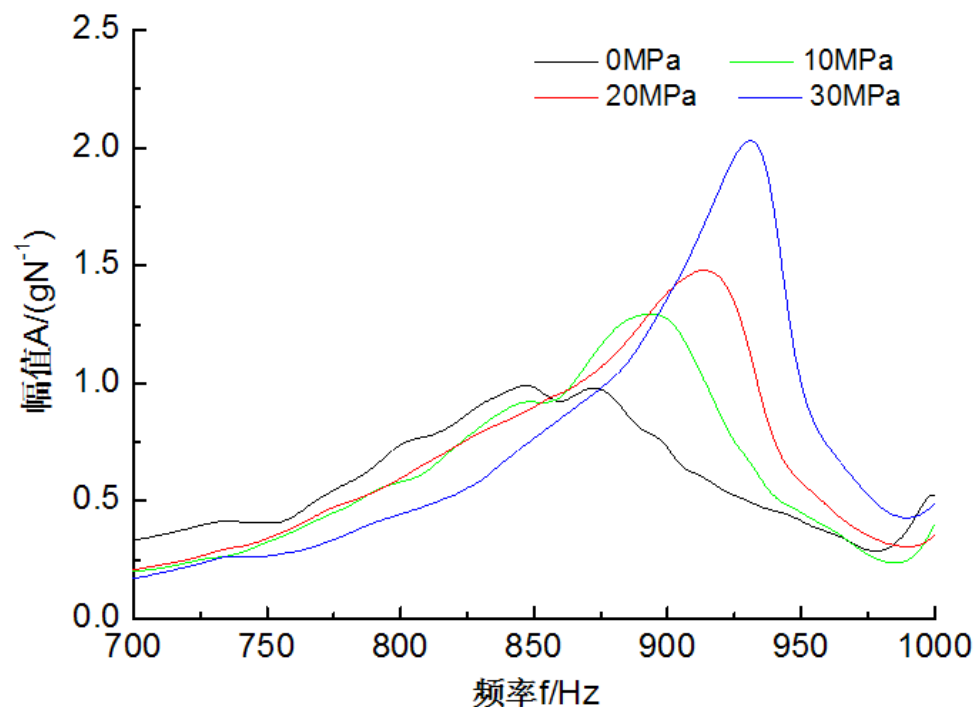


管路安装应力智能  
检测技术研究

## 测点1不同装配应力频响函数的不同频段比较



300Hz - 600Hz

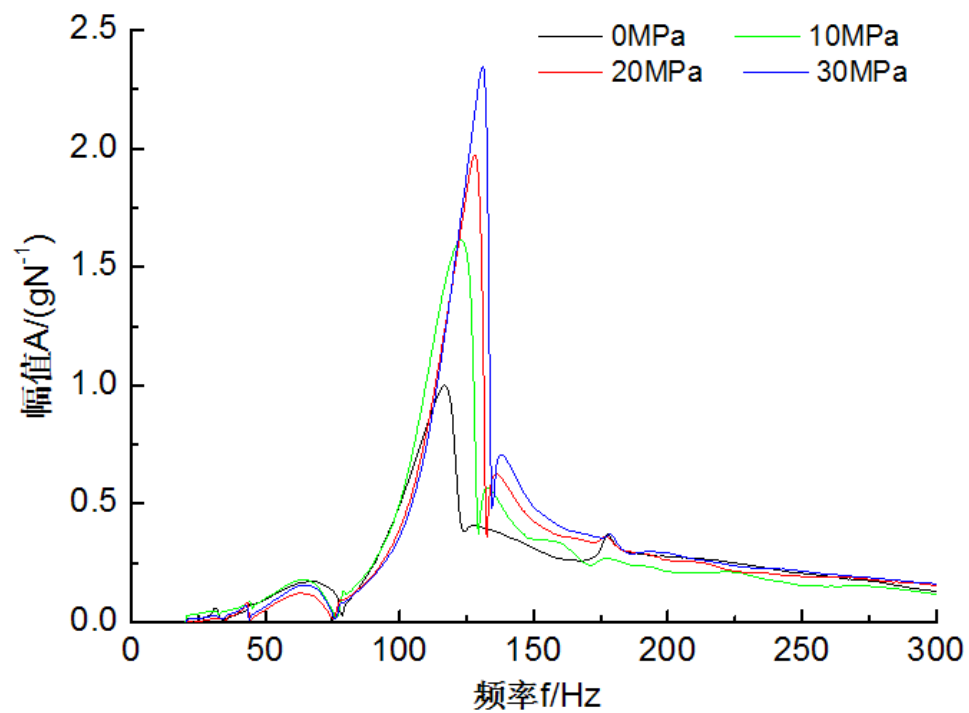


700Hz - 1000Hz

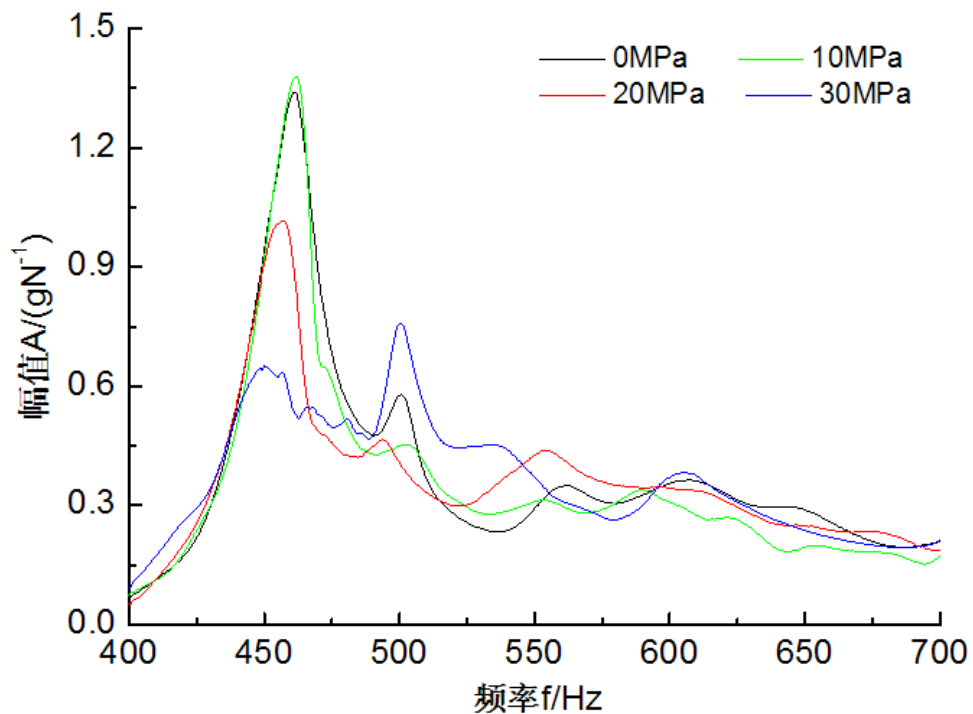
不同装配应力将导致频响函数的差异

管路安装应力智能  
检测技术研究

## 测点2不同装配应力频响函数的不同频段比较



0Hz - 300Hz

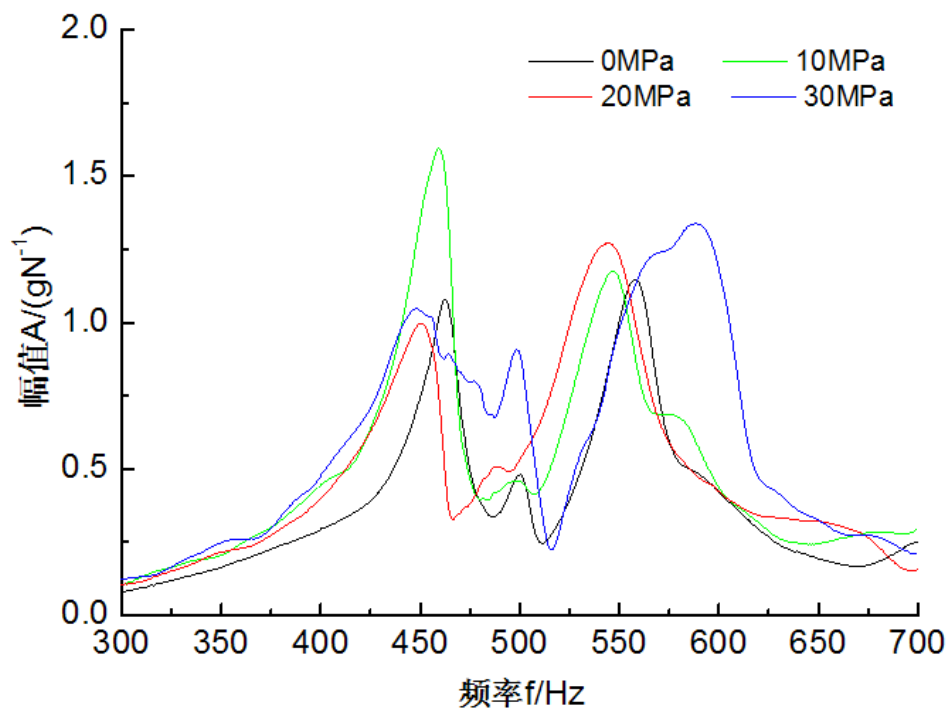


400Hz - 700Hz

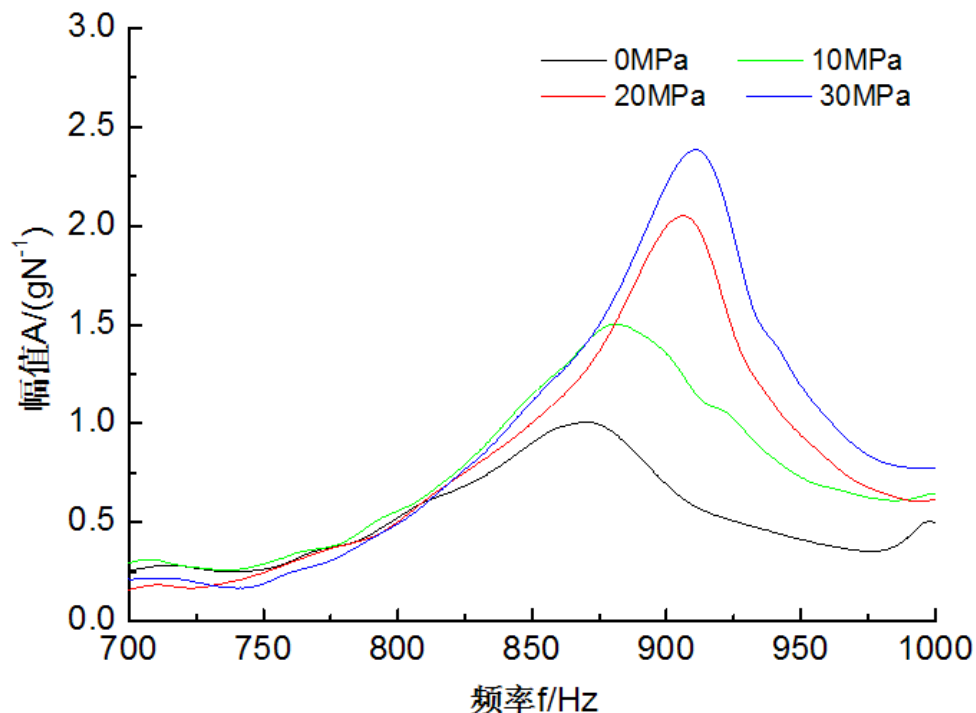
不同装配应力将导致频响函数的差异

管路安装应力智能  
检测技术研究

## 测点3不同装配应力频响函数的不同频段比较



300Hz - 700Hz



700Hz - 1000Hz

不同装配应力将导致频响函数的差异

# 管路安装应力智能检测技术研究

如何**识别**不同装配应力下的**频响函数**

**判断**装配应力的**大小**与**装配质量**的好坏

## 管道安装应力检测系统开发

**管路型号**      **数据采集**

管道编号	是否已检测	评估结果
试验台_测点1	已检测	优
试验台_测点2	未检测	差
试验台_测点3	未检测	差
飞机1-管道169-P1	未检测	差
飞机1-管道169-P2	未检测	差
飞机2-管道169-P1	未检测	差
飞机2-管道169-P2	未检测	差
飞机3-管道169-P1	未检测	差
飞机3-管道169-P2	未检测	差
飞机1-管道170-P1	未检测	良
飞机2-管道170-P1	未检测	良
飞机3-管道170-P1	未检测	良
169-P1	未检测	良
169-P2	未检测	良

当前设备: NewEquipment1; 当前管道: 试验台\_测点3      2018年11月18日 21:09:19

# 管路安装应力智能检测技术研究

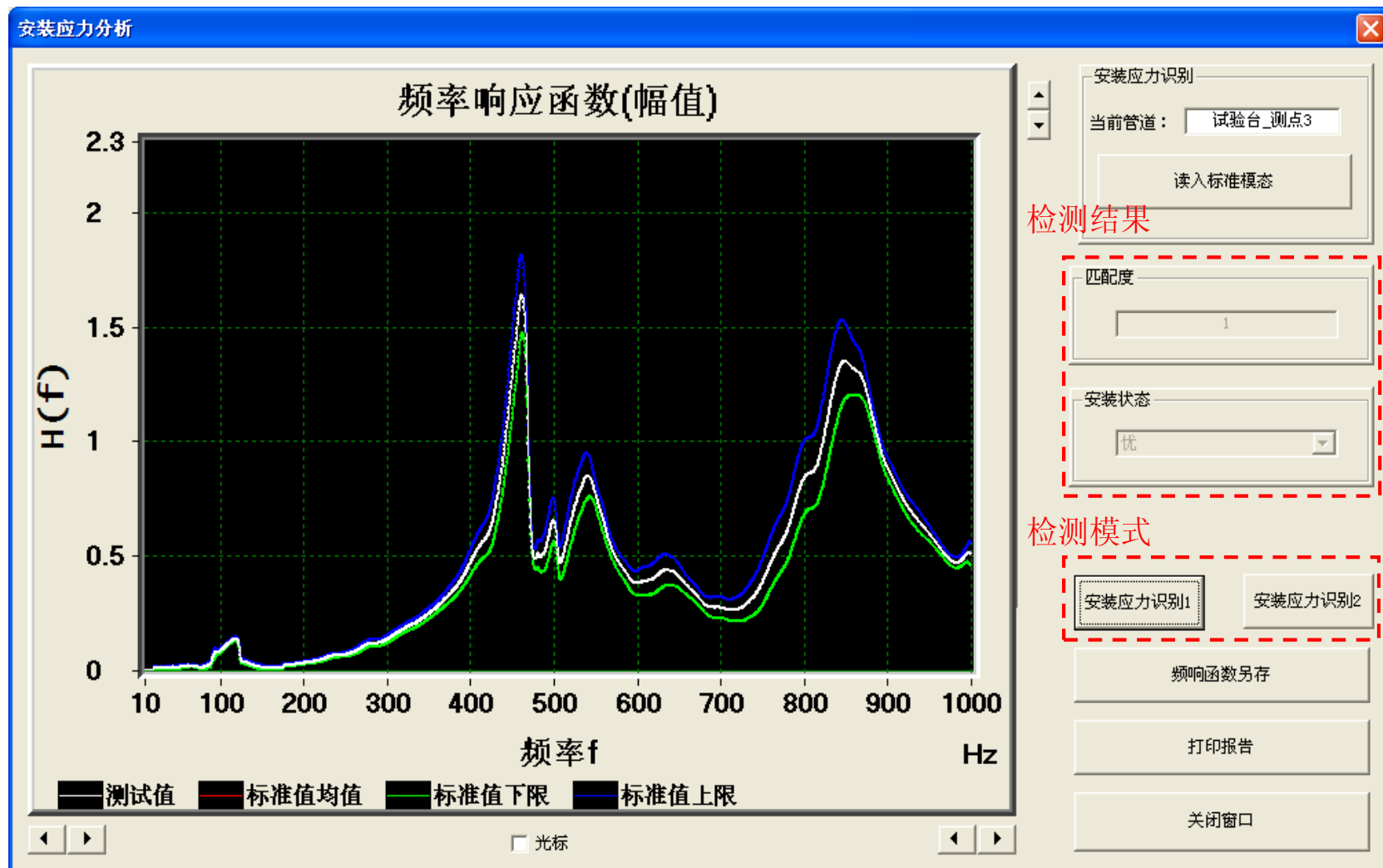
## 安装应力检测模式：

### 识别1：

基于一类支持向量机法

### 识别2：

基于频响函数相似度法



## 管路安装应力智能检测技术研究

### 基于一类支持向量机的装配应力异常检测

**一类分类法**属于单值分类，在对管道装配应力进行状态评估时，仅仅利用了正常状态的数据样本进行学习，再对未知状态的样本进行分类。在实际的工程应用中，虽然异常装配的原因很多，难于统计，但是正常装配下的频响函数数据容易获得，**通过正常数据来检测未知样本数据可以判别管道装配是否正常**，识别出管道装配异常就可以有效预防管道故障的发生，对于在飞机管道装配期间有效地控制管道故障具有重要的工程应用价值。

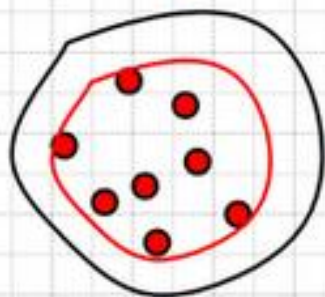


## 管路安装应力智能检测技术研究

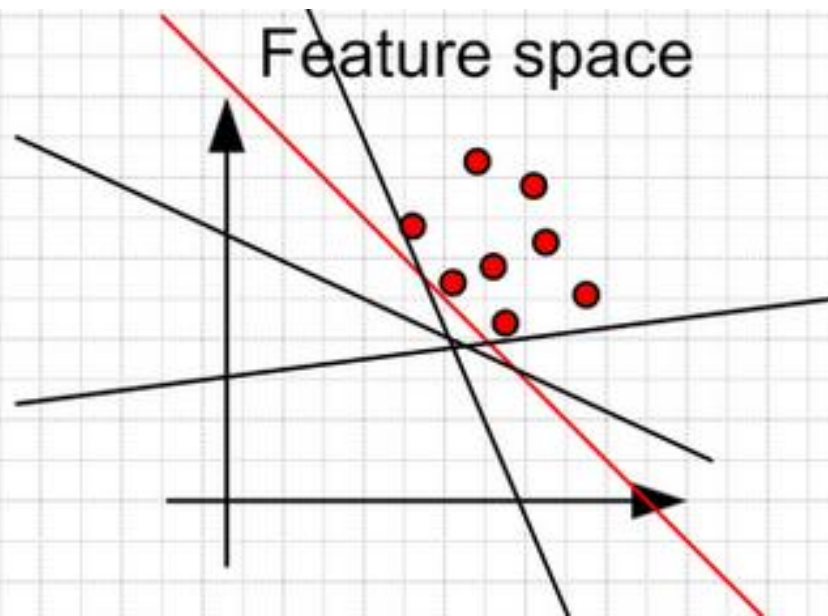
### 一类分类原理：

一类分类法，也称为单分类问题，实际上是对作为学习样本的目标样本的分布A做出正确描述，对未知样本x的分类就是检验该样本是否服从A分布，如果服从则接受该未知样本为目标样本，否则拒绝接受，即将该未知样本分类为非目标样本。

Original space



Feature space



如图所示，一类支持向量机是用超平面来描述数据，当只有正常数据样本进行机器学习时，利用正常样本对支持向量机进行训练，得到学习后的数据的边界。

## 管路安装应力智能检测技术研究

决策函数：

$$f(x) = \text{sign} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x, x_i) - \rho \right\}$$

其中， $f(x)$ 为符号函数，可对测试数据进行分类，结果为“+1”表示该数据为正常类，结果为“-1”表示为异常类



设训练数据集  $x_k \in R^n (k = 1, \dots, n)$ , Scholkopf 提出的

One-Class SVM基本算法如下：

$$\min_{\omega, b, \xi, \rho} \frac{1}{2} \omega^T \omega - \rho + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \xi_i$$

$$\begin{cases} \omega^T \varphi(x_i) \geq \rho - \xi_i \\ \xi_i \geq 0, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

(2)式可转化为求解

$$\begin{cases} \min_{\alpha} \frac{1}{2} \alpha^T Q \alpha \\ 0 \leq \alpha_i \leq \frac{1}{m}, i = 1, \dots, n \\ e^T \alpha = 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $Q_{ij} = K(x_i, x_j) = \varphi(x_k)^T \varphi(x_l)$

## 管路安装应力智能检测技术研究

根据检测函数 $g(x)$ ，以“0”为分界线，**当 $g(x)$ 为负数时**，其值越小，即绝对值越大，表明数据偏离正常类的距离越远，从而也表明了管道装配质量越偏离正常情况，装配应力越大。

$$f(x) = \text{sign} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x, x_i) - \rho \right\}$$

(定性)

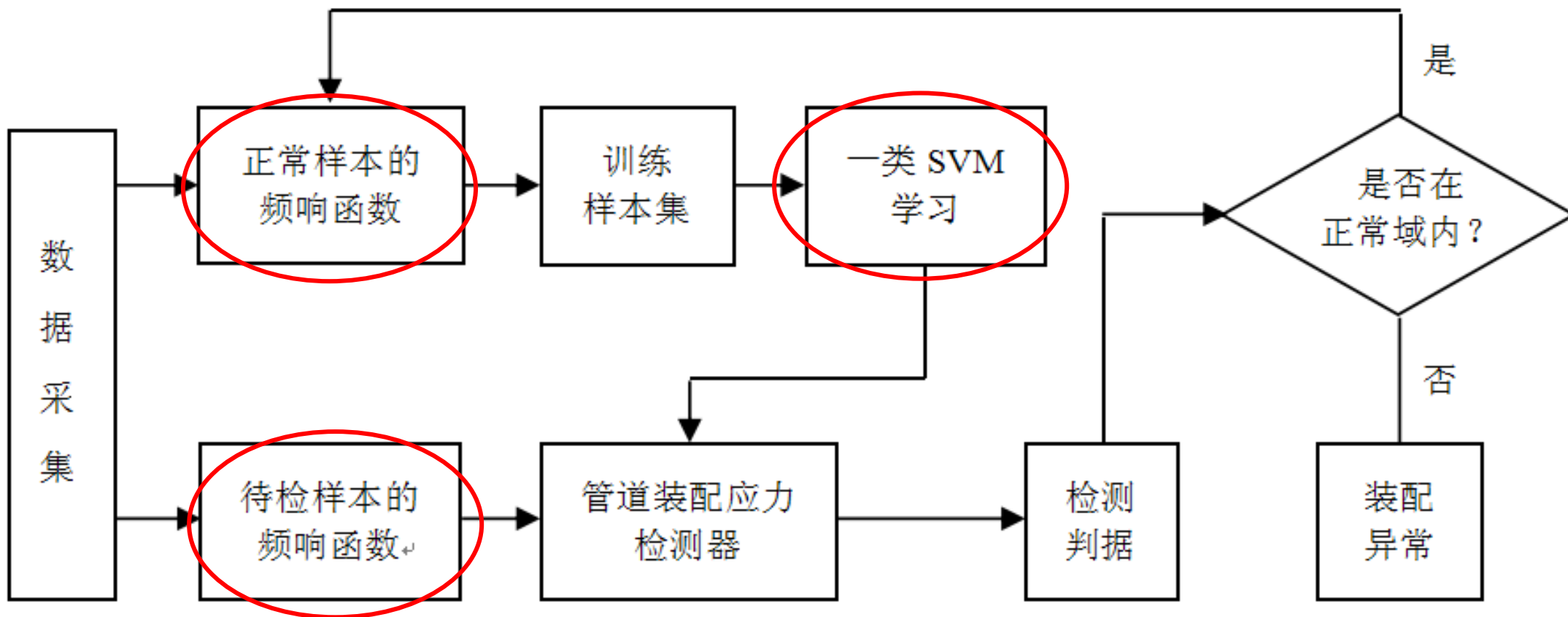
$$\text{检测函数: } g(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x, x_i) - \rho$$

(定量)



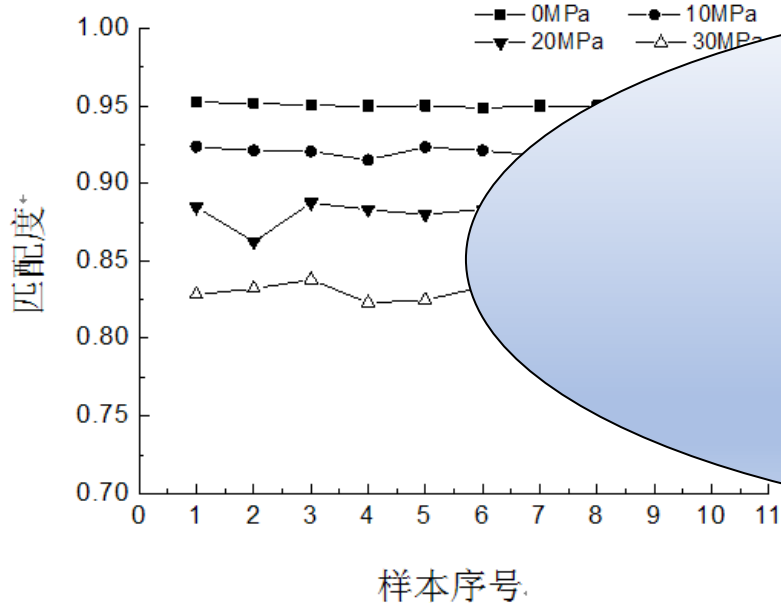
管路安装应力智能检测技术研究

基于一类SVM的管道装配应力检测流程



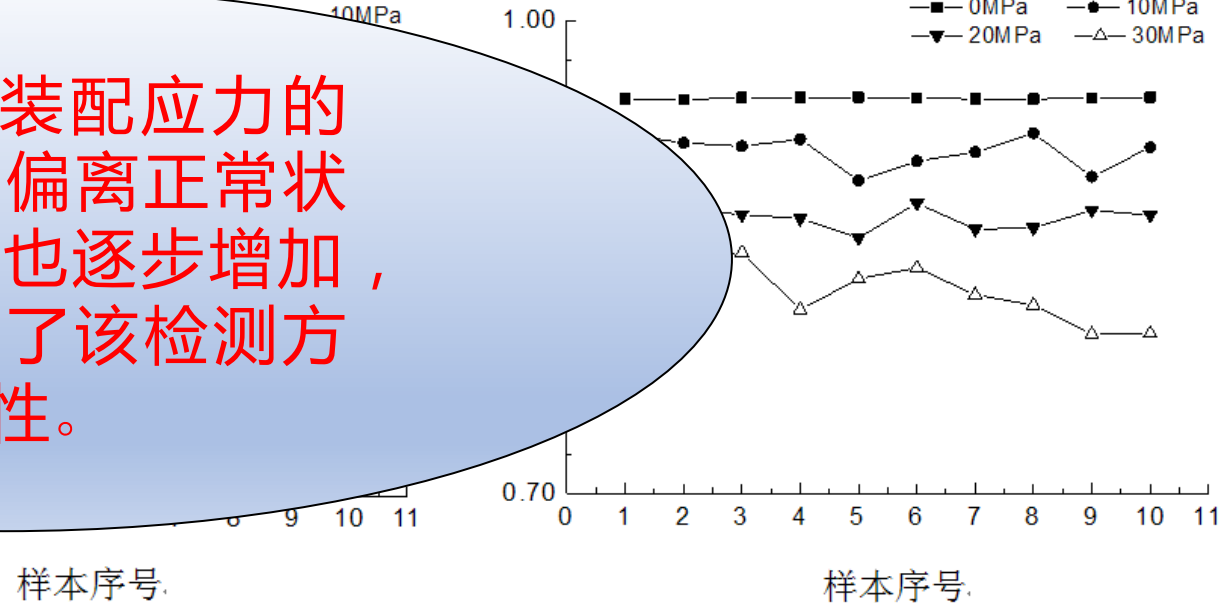
管路安装应力智能  
检测技术研究

## 1C—SVM检测结果



测点1检测结果

随着装配应力的增加，其偏离正常状态的程度也逐步增加，充分表明了该检测方法的有效性。



测点2检测结果

测点3检测结果

管路安装应力智能  
检测技术研究

## 基于频响函数相似度的装配应力异常检测

## 相似度原理：

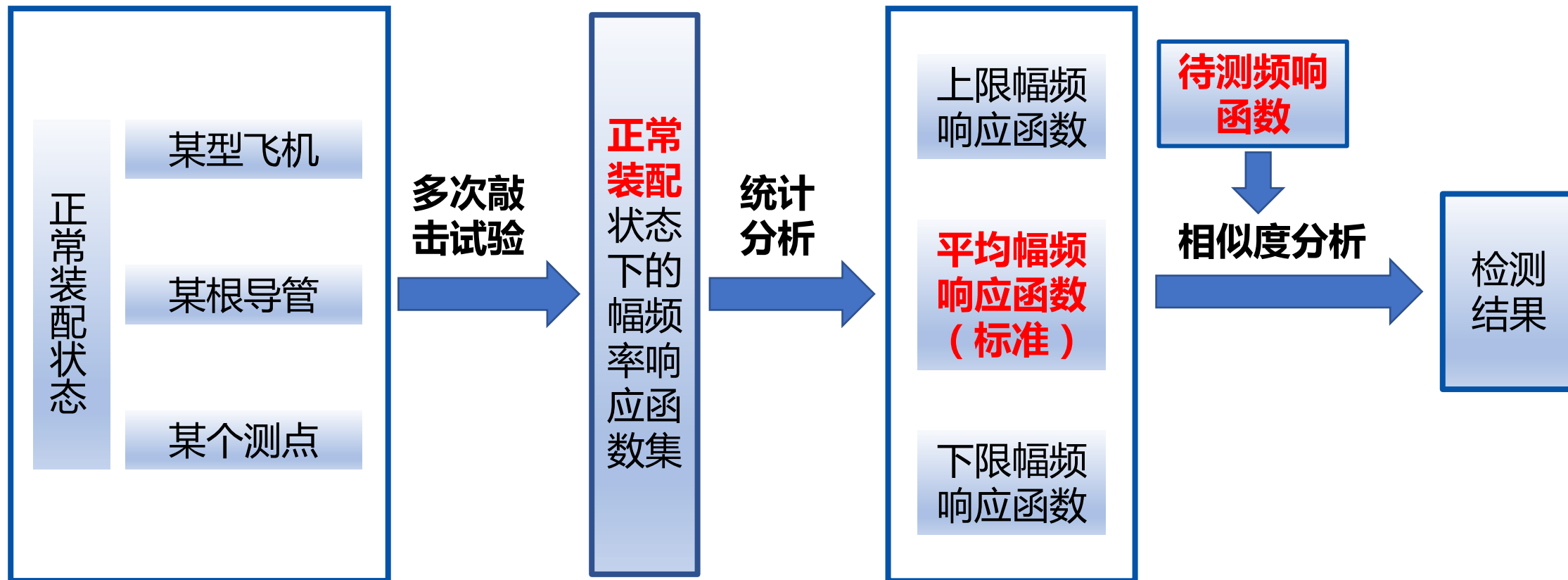
将幅频响应函数每个频率点的幅值作为一个多维向量的一个元素，则幅频响应函数可以看做一个高维向量，因此对频率响应函数的比较可以用向量的角度相似法。设标准的幅频响应函数向量为 $X$ ，待测的幅频响应函数向量为 $Z$ ，角度相似性指标（余弦度量）的定义为，

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Z_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Z_i^2}}$$

显然， $S_c$  是特征矢量  $X$  和  $Z$  之间夹角的余弦，夹角为零则取值为1，即角度相似值达到最大。该方法的优点是简单直观。

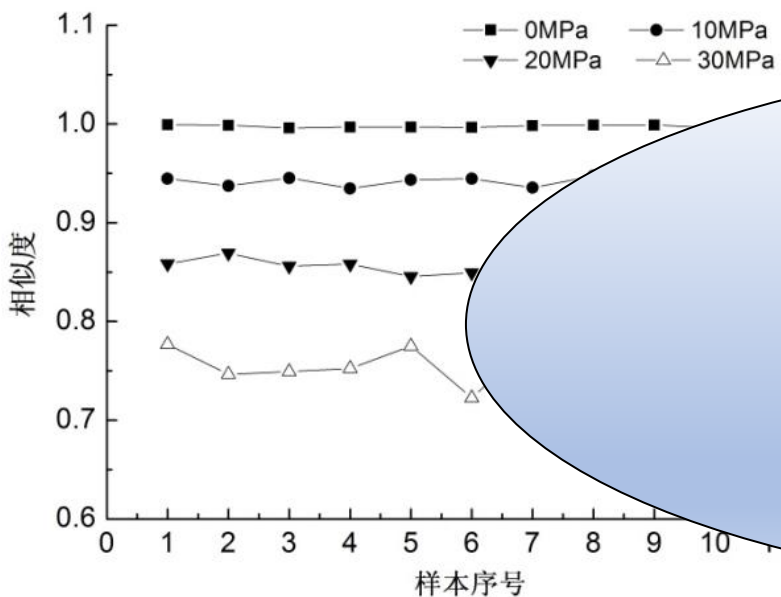
## 管路安装应力智能检测技术研究

### 基于频响函数相似度的装配应力检测流程



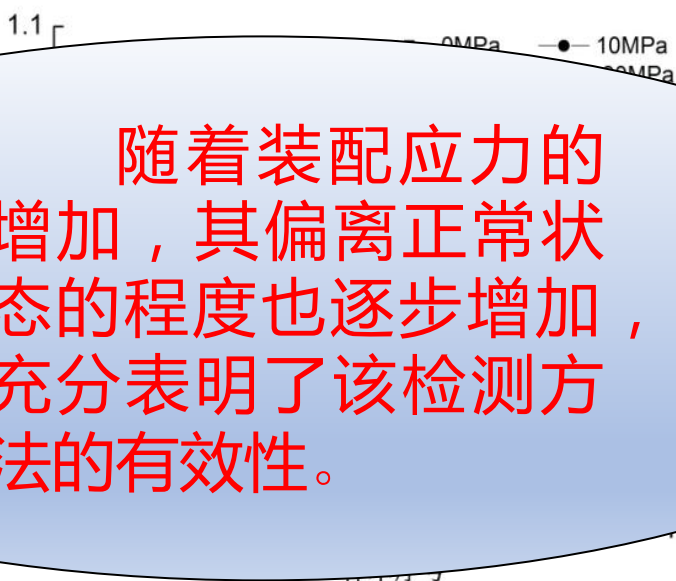
# 管路安装应力智能检测技术研究

## 相似度检测结果

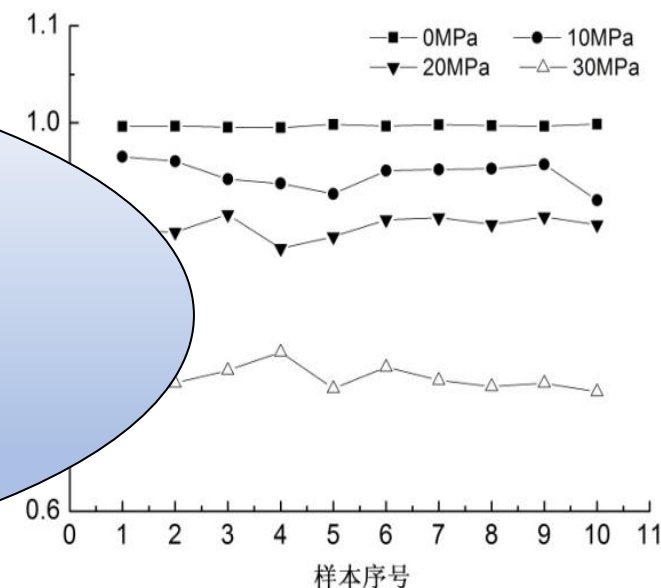


测点1检测结果

随着装配应力的增加，其偏离正常状态的程度也逐步增加，充分表明了该检测方法的有效性。



测点2检测结果



测点3检测结果



## 管路安装应力智能 检测技术研究

### 小结：

(1) 构建了管道安装应力检测试验台，进行了模态锤击试验，比较了不同安装应力下管道的原点频响函数，发现装配应力对管道固有特性具有一定的影响，主要表现在共振峰峰值大小与位置的差异；

(2) 基于装配应力对管道固有特性的影响规律开发了装配应力检测系统，研究了基于一类支持向量机法和频响函数相似度法两种检测方法，可以发现随着装配应力的增加，检测结果偏离正常状态的程度也逐步增加，充分说明这两种检测方法的有效性。



## 04. 总结与展望

## 总结：

- (1) 分析了飞机管路连接件基本组成结构，基于ANSYS软件建立了管路连接件多体接触有限元模型。
- (2) 仿真研究了摩擦系数、拧紧力矩、角度偏差、径向偏差、长度偏差等因素对管路连接件密封性能的影响规律，对相关标准进行了一定程度的验证。
- (3) 构建了管道安装应力检测试验台，通过模态锤击试验研究了装配应力对固有特性的影响规律，在此基础上开发了管道安装应力智能检测技术。

## 展望：

( 1 ) 本文基于ANSYS仿真研究了装配应力对密封性能的影响规律，在今后的工作中可以搭建密封性能测试的试验台完成相关试验，通过仿真与试验相对比的方式进一步验证装配应力对密封性能的影响规律。

( 2 ) 本文研究的两种安装应力检测方法在试验台测试时表现出良好的检测效果，然而实际飞机管路系统结构更加复杂，因此需要针对实际液压管路获取更多的测试样本，同时完成算法的优化与改进，进一步提高安装应力检测的准确性与通用性。

( 3 ) 在管路连接件装配应力和环境振动联合作用下，管路系统的疲劳寿命将受到影响，因此在今后的工作中，需要通过进一步的试验和仿真研究装配应力对管路疲劳寿命的影响规律，提出防止管路疲劳失效的装配偏差控制范围。



谢谢各位老师



南京航空航天大学

2019民航学院硕士学位答辩

# 装配应力对飞机管路密封性能的影响分析 及其检测方法研究

 答辩人：於为刚

 指导老师：陈 果

