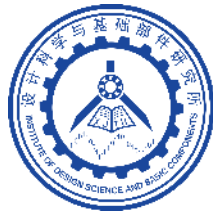




西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



设计科学与基础部件研究所
INSTITUTE OF DESIGN SCIENCE AND BASIC COMPONENTS

面向轴承预紧力调控的负泊松比隔套设计及力学特性研究

导 师： 朱永生 教授

答辩人： 蔡依青

日 期： 2020.05



目录

1

绪论

2

不同负泊松比单胞结构的设计与研究

3

三维负泊松比隔套的设计与研究

4

基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

5

针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

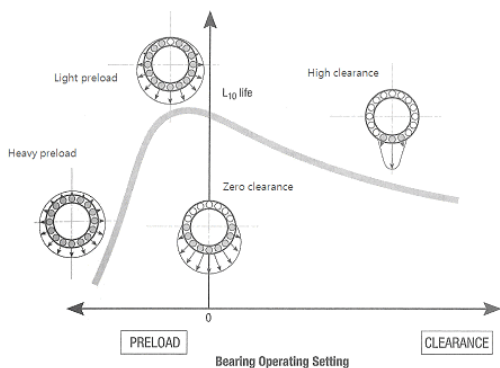
6

工作总结



1.1 研究背景

- 高速精密主轴是高档机床的最核心部件
- **预紧力调控**是保障高速精密主轴全速段最佳工作性能的核心技术



低速段，预紧力偏小

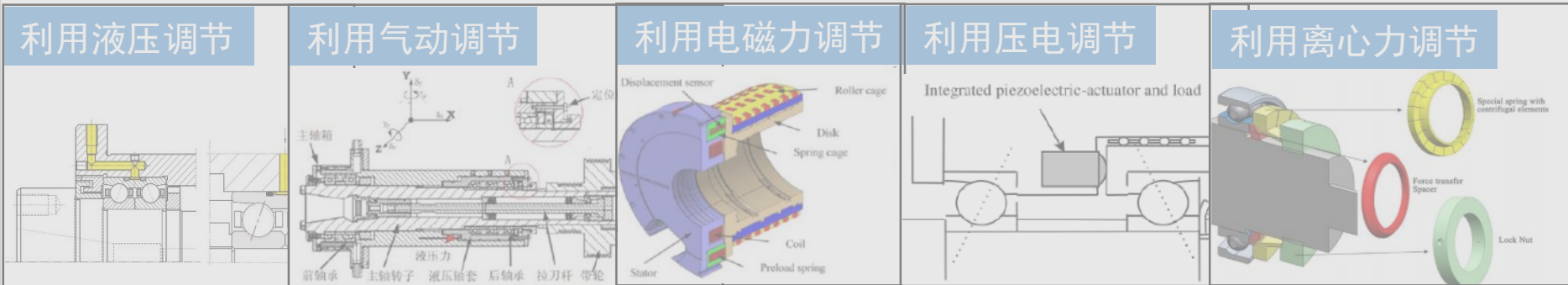
系统抵抗受迫振动与自激振动能力较弱，使得加工工件表面残留较大振纹

高速段，预紧力偏大

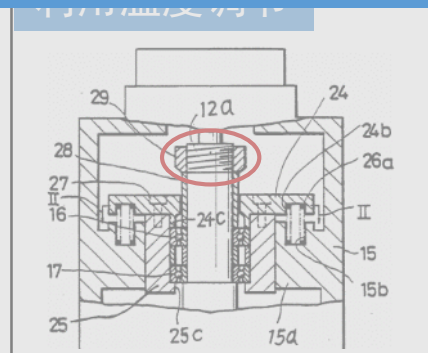
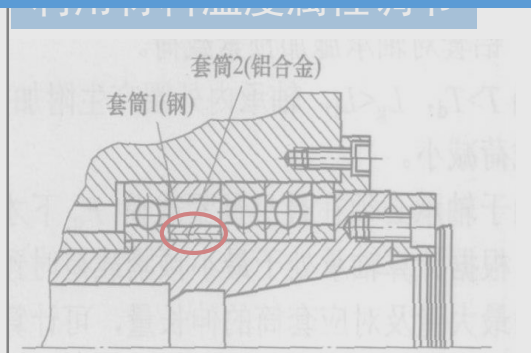
轴承温升偏高，制约主轴高速化，缩短轴承使用寿命，降低主轴回转精度

➤ 传统的恒定预紧力已不能满足高速主轴**宽工况、变预紧力**的要求

1.2 研究现状



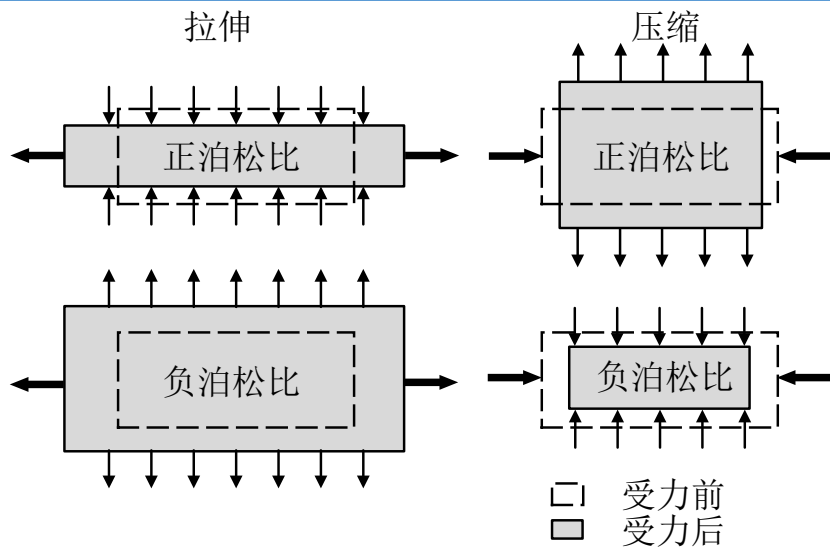
针对以上问题，在国家自然科学基金（编号：51675410）项目支持下，提出一种**基于负泊松比隔套的预紧力自适应调节方法。**



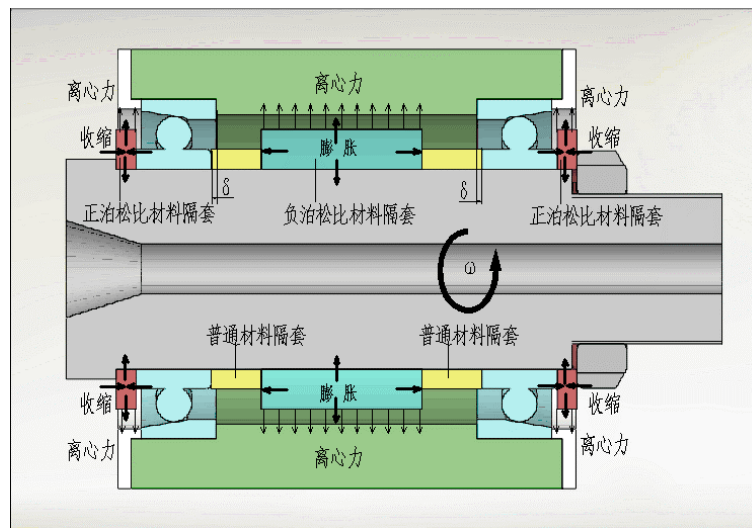
以上调节装置依赖于材料的温度属性，**精度难于控制**

1.3 研究意义

一种结合离心力及泊松比可控结构拉胀效应的全新的主轴预紧力自适应调节方法



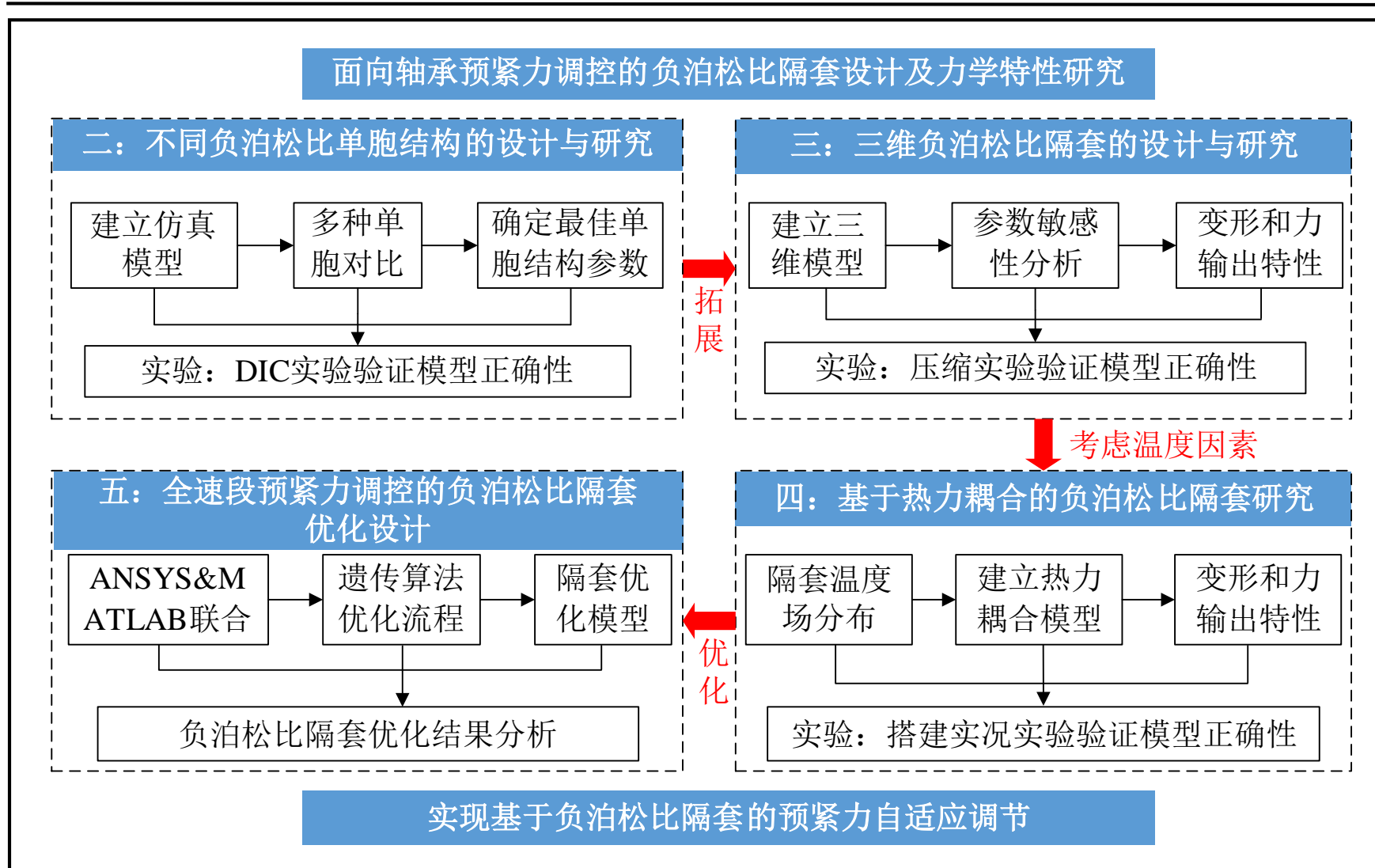
负泊松比的“拉胀压缩”效应



基于负泊松比效应的调节原理

- ◆ 隔套所受离心力能够对转速变化**实时响应**；
- ◆ 基于材料的调节方法的**简单可靠**；
- ◆ 考虑转速与温度的影响，能够对负泊松比结构**优化设计**；

1.4 技术路线



目录

1

绪论

2

不同负泊松比单胞结构的设计与研究

3

三维负泊松比隔套的设计与研究

4

基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

5

针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

6

工作总结

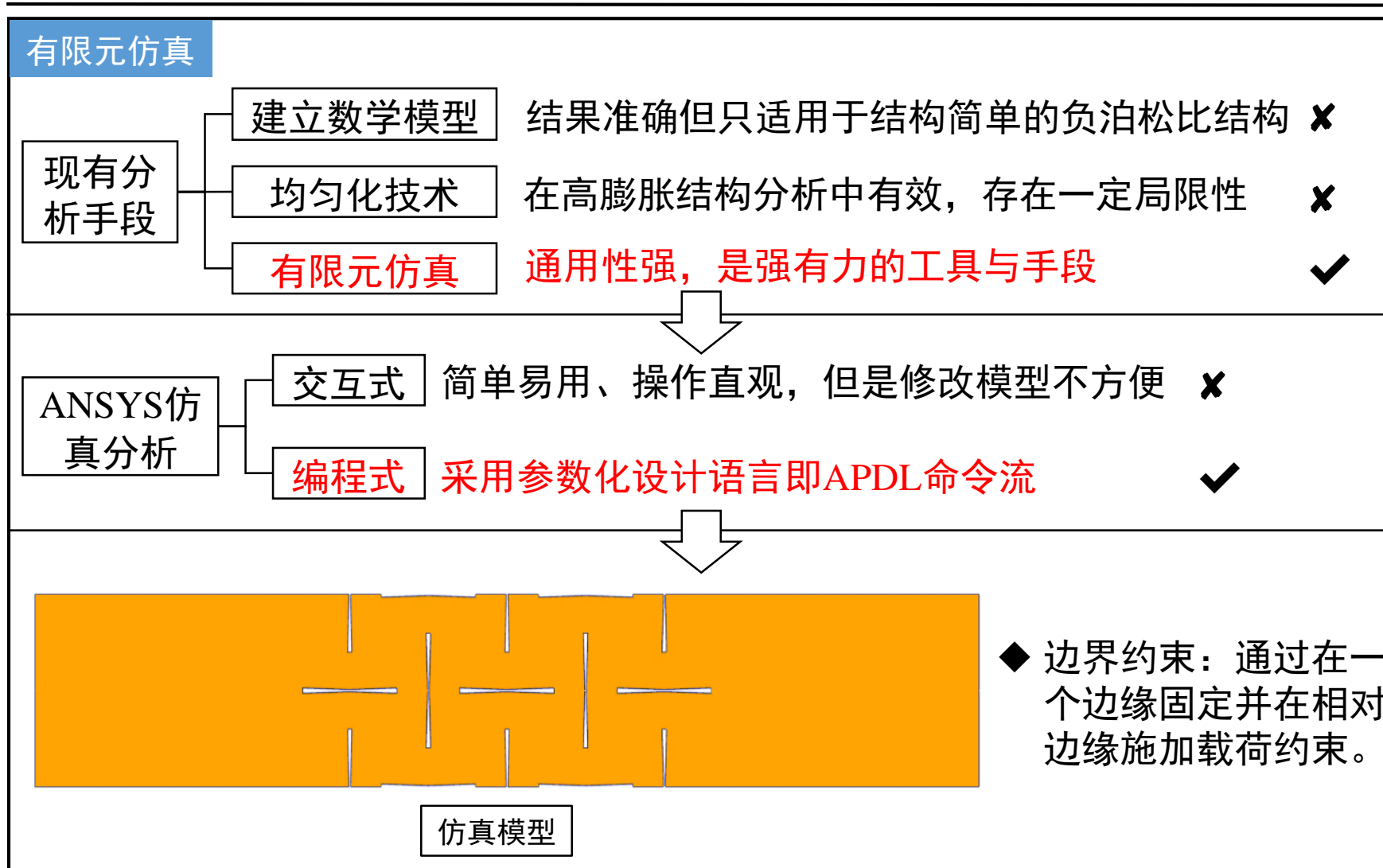
2 不同负泊松比单胞结构的设计与研究

2.1 负泊松比单胞结构的分类

内凹结构	星形结构	内凹六角形	双箭头结构	内十二面体	内十四面体	V字结构	效应明显； 可设计性强			
	手性结构	三杆圆节点	四杆圆节点	四杆方节点	三杆圆节点反手性	六杆圆节点反手性		承载能力差 易扭曲		
		旋转结构	正方形旋转	矩形旋转	三角形旋转				泊松比值不 可变	
二维结构变形			三维结构变形			可设计性差 加工难度大				

2 不同负泊松比单胞结构的设计与研究

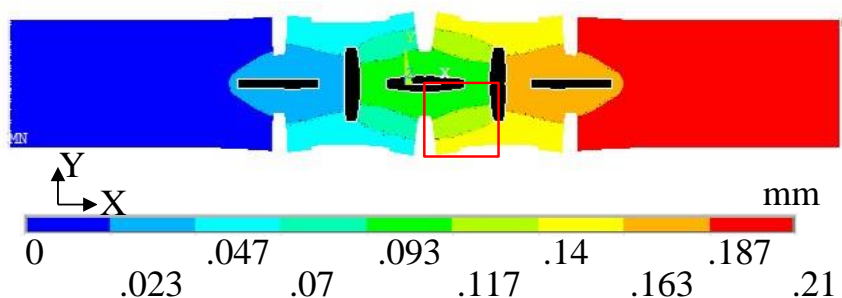
2.2 负泊松比单胞结构仿真模型的建立



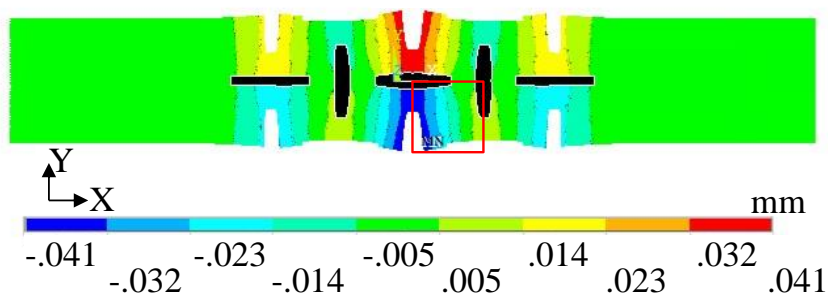
2 不同负泊松比单胞结构的设计与研究

2.2 负泊松比单胞结构仿真模型的建立

仿真结果



(a) X方向位移云图



(b) Y方向位移云图

位移结果云图

计算过程

选取红色方框内单元进行计算

上边边界节点的纵向位移平均值为 $\langle U_y \rangle^U$

下边边界节点的纵向位移平均值为 $\langle U_y \rangle^D$

左边边界节点的横向位移平均值为 $\langle U_x \rangle^L$

右边边界节点的横向位移平均值为 $\langle U_x \rangle^R$

$$\langle \varepsilon_{xx} \rangle = \frac{\langle U_x \rangle^R - \langle U_x \rangle^L}{L_0} = 0.093$$

$$\langle \varepsilon_{yy} \rangle = \frac{\langle U_y \rangle^U - \langle U_y \rangle^D}{L_0} = 0.041$$

$$\mu = -\frac{\langle \varepsilon_{yy} \rangle}{\langle \varepsilon_{xx} \rangle} = -\frac{0.041}{0.093} = -0.44$$

2 不同负泊松比单胞结构的设计与研究

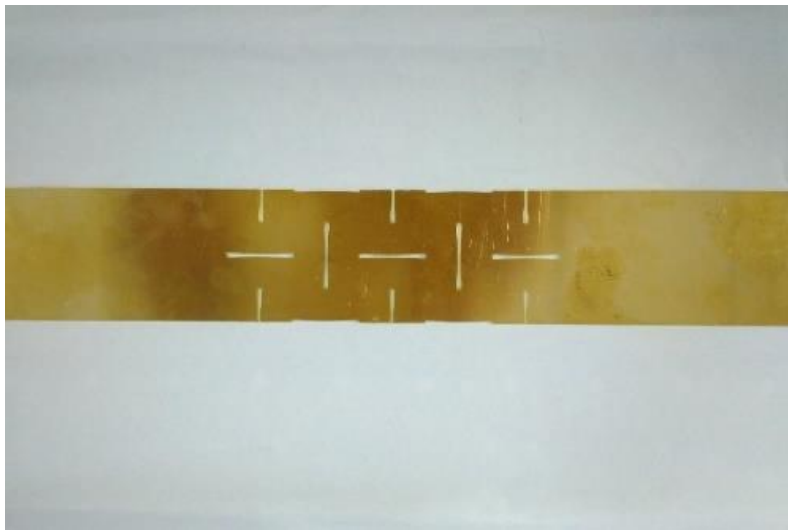
2.3 基于数字图像相关法的拉伸实验

实验目的与原理

- ◆ 实验目的：验证上述仿真模型的准确性，对比研究后续不同负泊松比单胞结构
- ◆ 实验原理：通过拉伸实验获得试件的变形量，最终计算出该样件的泊松比值

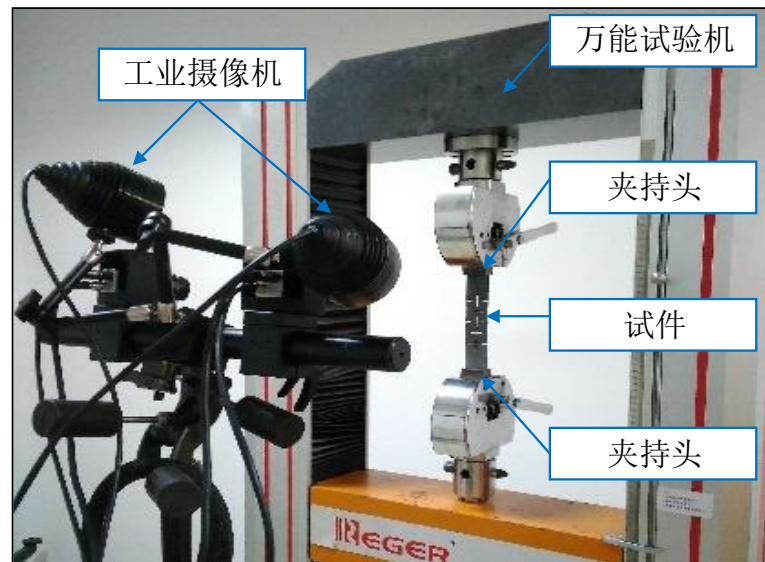
试件制备

- ◆ 为了方便加工和节约成本，采用黄铜材料，激光切割技术



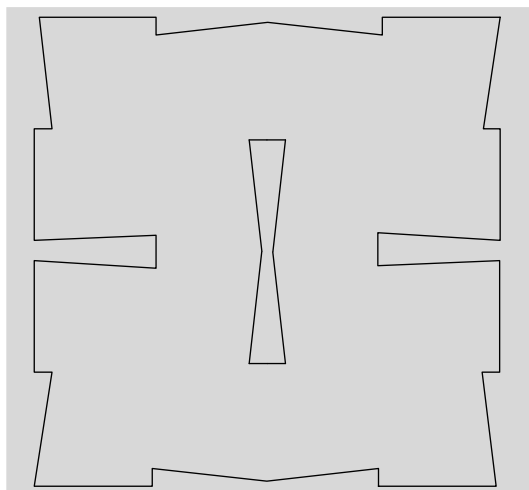
实验装置

- ◆ 基于数字图像相关法（DIC）的非接触测量系统



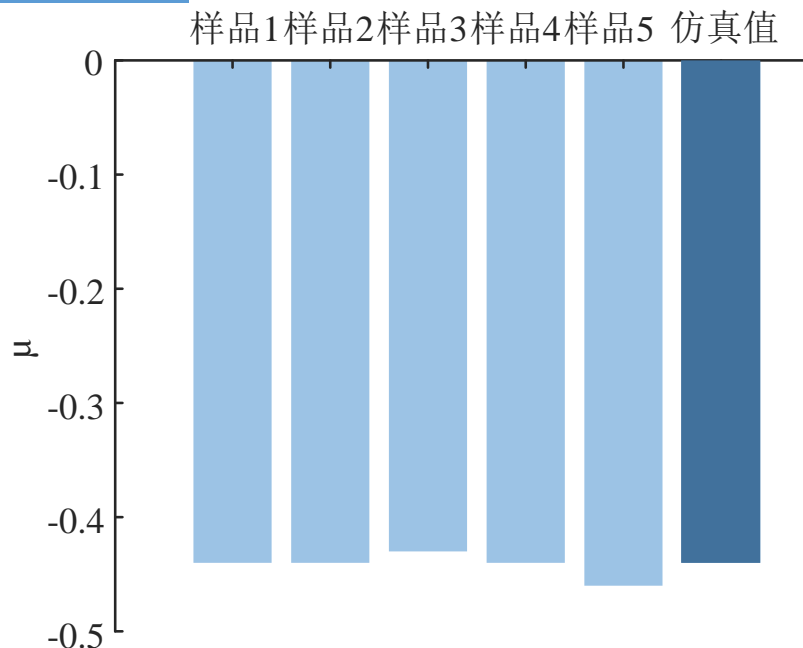
2.3 基于数字图像相关法的拉伸实验

数据处理



- ◆ 选取两个工业摄像机共同聚焦的单元区域进行分析。
- ◆ 上下24个点的y值之差为该分析区域的y向位移变形
- ◆ 左右24个点的x值之差为该分析区域的x向位移变形。

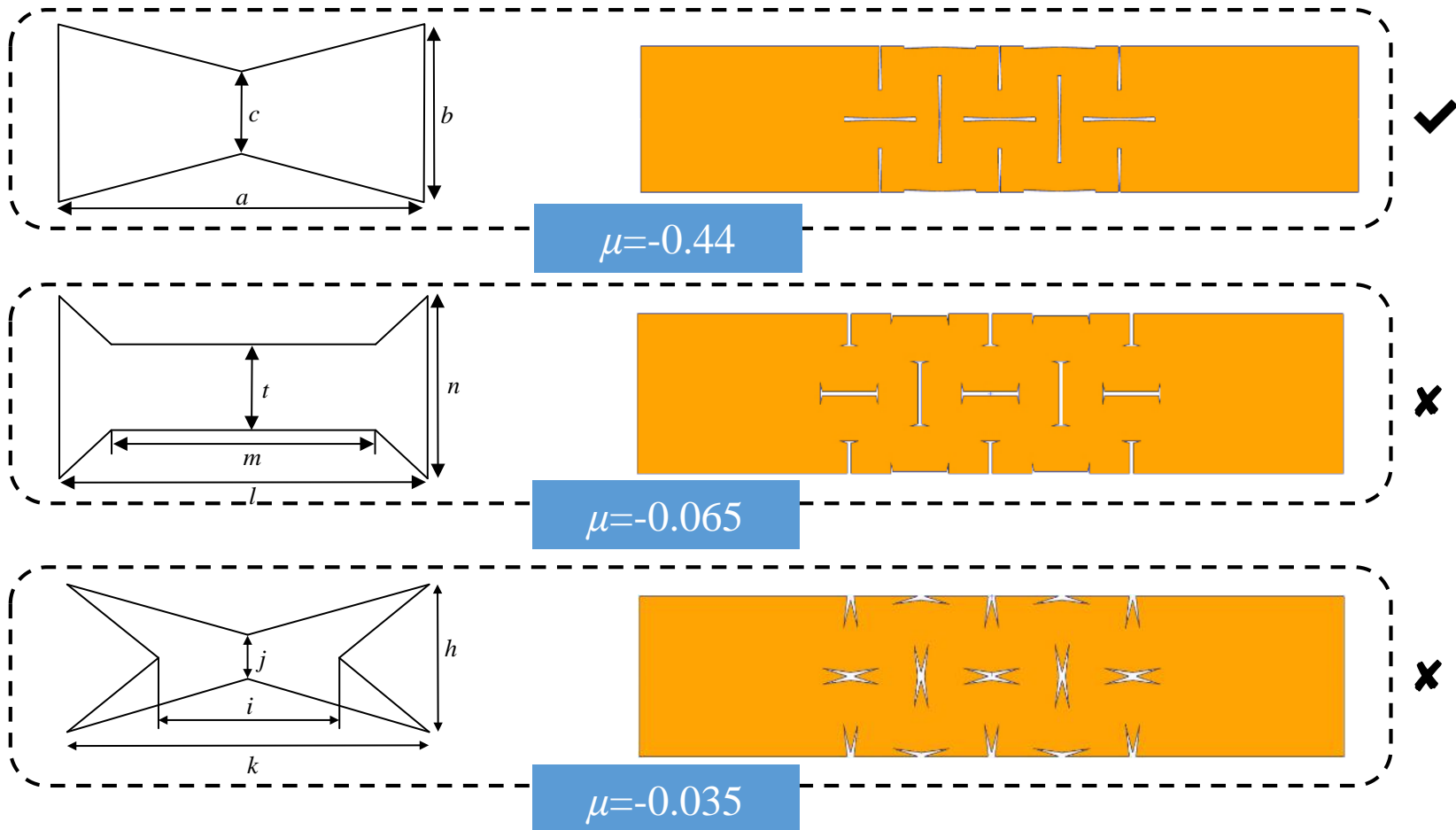
实验结果



- ◆ 五组实验结果的相对标准偏差值为2.3%，说明五组**实验重复性**很好。
- ◆ 实验与仿真值相差4.5%，得到了良好的一致性，说明**仿真方法的准确性**。

2.4 不同负泊松比单胞结构的对比

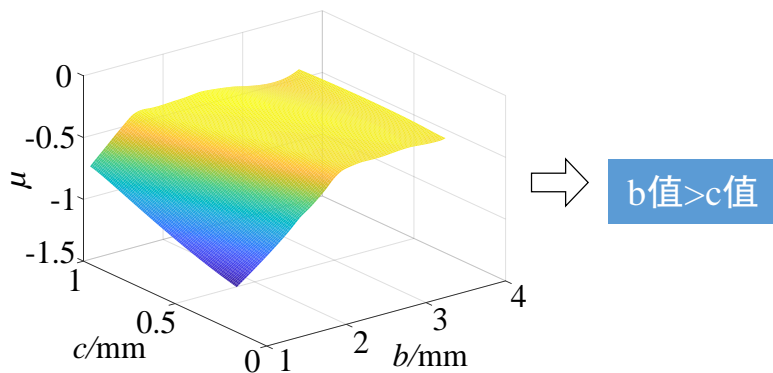
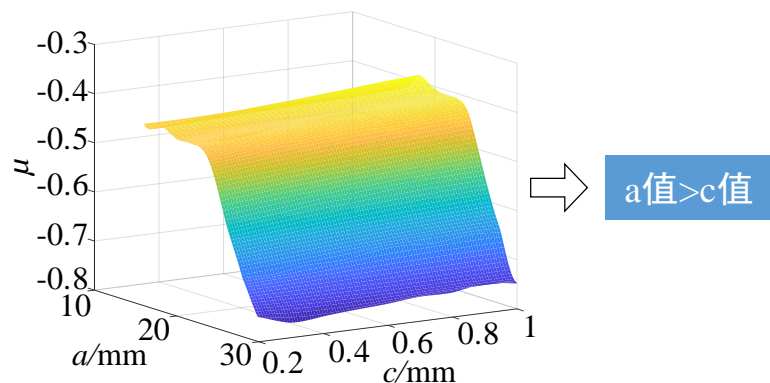
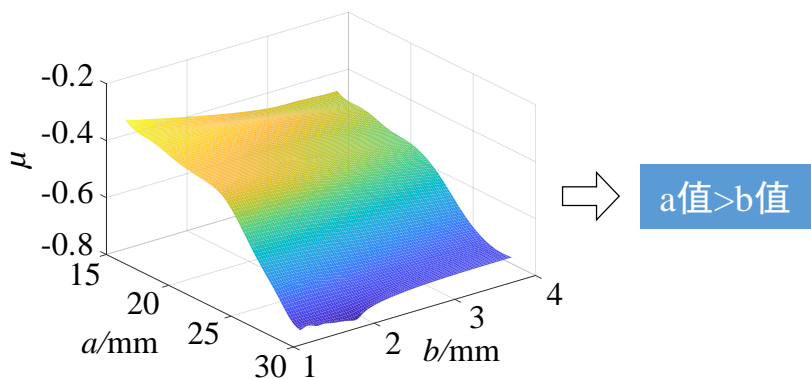
◆ 考虑可设计性以及拓展为三维结构的可能性，控制孔隙率均为8%，设计对比了三种内凹型低孔隙率单胞结构。



2 不同负泊松比单胞结构的设计与研究

2.5 负泊松比单胞结构参数影响分析

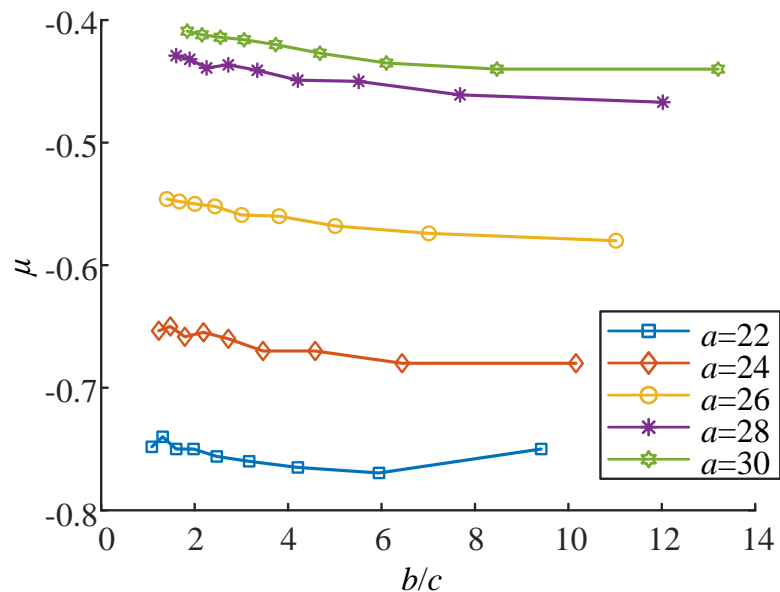
◆ 在同一孔隙率(5%)下, 分别分析参数a和b、a和c、b和c对泊松比值的影响



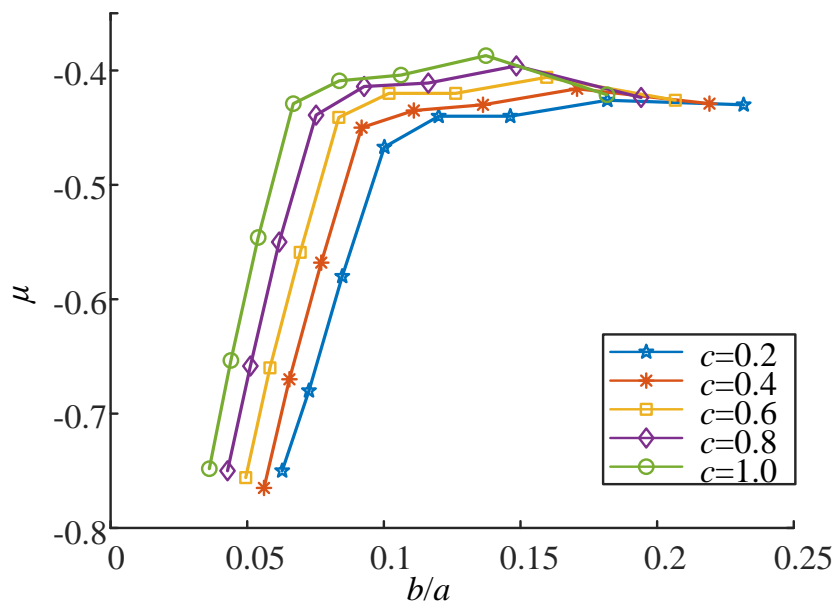
➤ 对负泊松比值影响程度的顺序为: a值>b值>c值

2.5 负泊松比单胞结构参数影响分析

◆ a值不变时，b与c比值对泊松比值的影响



◆ c值不变时，b与a比值对泊松比值的影响



Study on negative Poisson's ratio structure with low porosity[C]. The 2019 3rd International Conference on Smart Materials and Structural Engineering (ICSMSE 2019).

(第一作者, EI. 已录用)

目 录

1

绪论

2

不同负泊松比单胞结构的设计与研究

3

三维负泊松比隔套的设计与研究

4

基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

5

针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

6

工作总结

3 三维负泊松比隔套的设计与研究

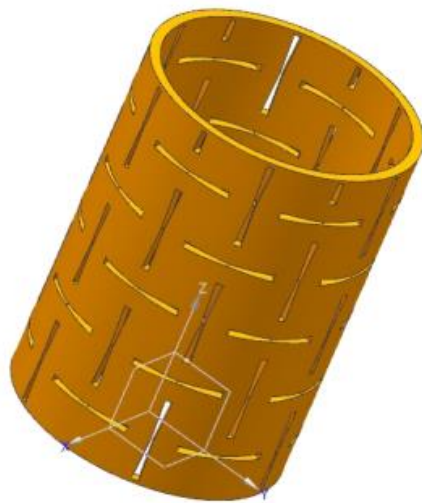
3.1 三维负泊松比结构模型的建立

实体模型

依据全速段最佳预紧力调节要求，设计制作具有负泊松比的轴承内圈隔套



基于上述内凹六边形的单胞结构，采用两单胞垂直交替分布的周期性结构，形成三维负泊松比结构的模型



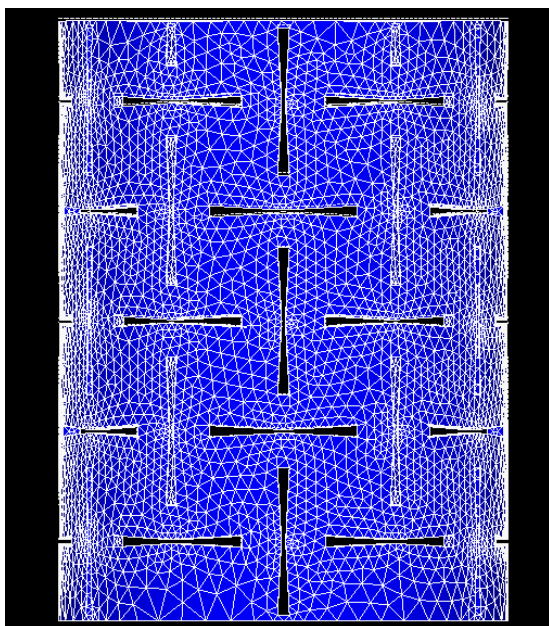
以7014角接触球轴承为对象
隔套内径：70mm
隔套外径：76mm
轴向长度：100mm

3 三维负泊松比隔套的设计与研究

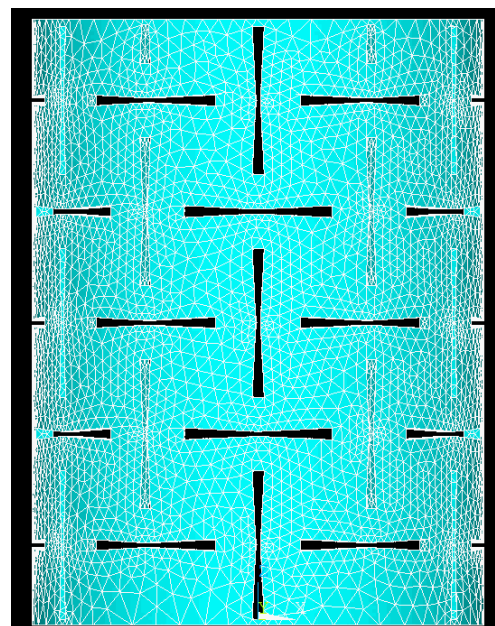
3.1 三维负泊松比结构模型的建立

仿真模型

- ◆ 坐标系设置：根据模型的需要，选取圆柱坐标系
- ◆ 网格划分：选择四面体网格划分（考虑孔洞）
- ◆ 载荷约束：一端周向和轴向约束，另一端自由；施加角速度



压缩效应



拉胀效应

3 三维负泊松比隔套的设计与研究

3.2 三维负泊松比隔套参数影响分析

采用**正交试验法**对隔套结构进行参数影响分析

明确试验目的，确定评价指标

挑选因素，确定水平

选正交表，进行表头设计

明确试验方案，列出实验结果

对试验结果进行分析，包括极差和方差分析

确定最优或较优因素水平组合

(1) 本试验选用 $L_9(3^4)$ 型正交表

水平	因素			
	A a值/mm	B b值/mm	C c值/mm	D 孔隙率P
1	15	1.6	0.8	6%
2	20	2.0	1.0	8%
3	25	2.4	1.2	10%

(2) 实验参数和实验结果

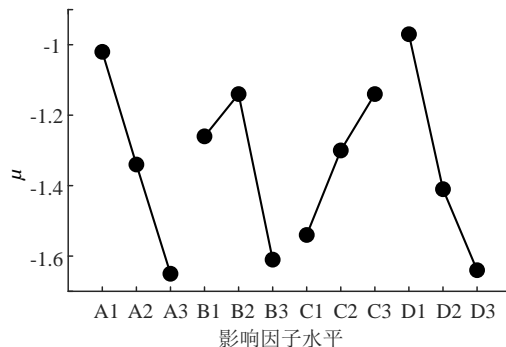
编号	A	B	C	D	实验结果	
					泊松比	轴向伸长量/mm
I	1	1	1	1	-0.77	0.001214
II	1	2	2	2	-0.89	0.001595
III	1	3	3	3	-1.40	0.001776
IV	2	1	2	3	-1.56	0.012876
V	2	2	3	1	-0.58	0.000885
VI	2	3	1	2	-1.89	0.002798
VII	3	1	3	2	-1.44	0.010583
VIII	3	2	1	3	-1.95	0.026545
IX	3	3	2	1	-1.56	0.001520

3 三维负泊松比隔套的设计与研究

3.2 三维负泊松比隔套参数影响分析

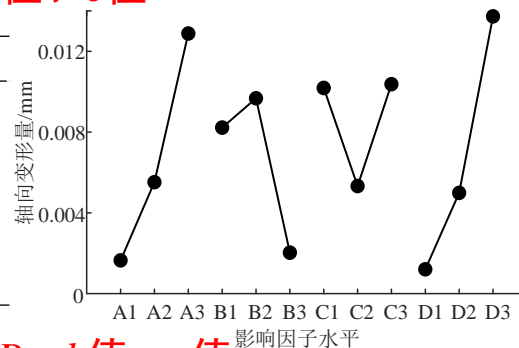
(3) 为了评价各个因素对泊松比值和轴向变形量的影响程度，对试验数据进行极差分析。

指标	水平	a值	b值	c值	孔隙率P
泊松比值	1	-1.02	-1.26	-1.54	-0.97
	2	-1.34	-1.14	-1.30	-1.41
	3	-1.65	-1.61	-1.14	-1.64
	极差	0.63	0.47	0.4	0.67
	权重	2	3	4	1



◆ 对泊松比值影响程度由大到小依次为**孔隙率P**、**a值**、**b值**、**c值**

指标	水平	a值	b值	c值	孔隙率P
轴向变形量/mm	1	0.001647	0.008224	0.010186	0.001206
	2	0.005520	0.009675	0.005330	0.004992
	3	0.012883	0.002031	0.010373	0.013732
	极差	0.011236	0.007644	0.005043	0.008740
	权重	1	3	4	2



◆ 对轴向变形量的影响程度由大到小依次为**a值**、**孔隙率P**、**b值**、**c值**

结论： a值和孔隙率P对泊松比值和轴线变形量影响较大，a值和孔隙率越大，泊松比效应越明显，轴向变形量越大；b值和c值的影响较小

3 三维负泊松比隔套的设计与研究

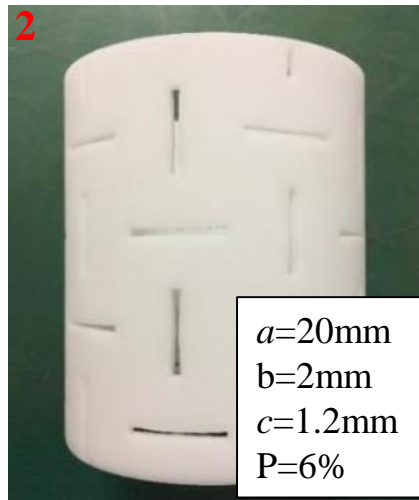
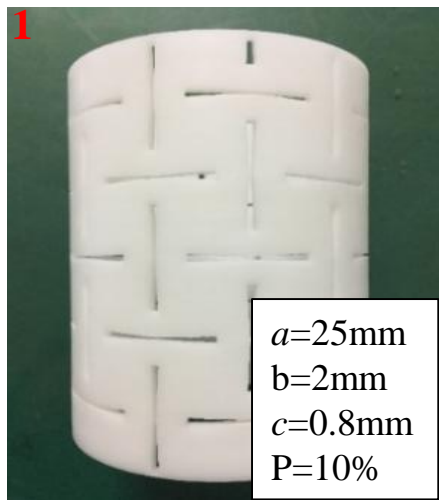
3.3 三维负泊松比隔套压缩实验验证

实验目的与原理

- ◆ 实验目的：快速验证三维隔套的仿真模型和各参数的影响规律
- ◆ 实验原理：通过轴向受压实验，获得试件的径向变形量，最终计算出该样件的泊松比值

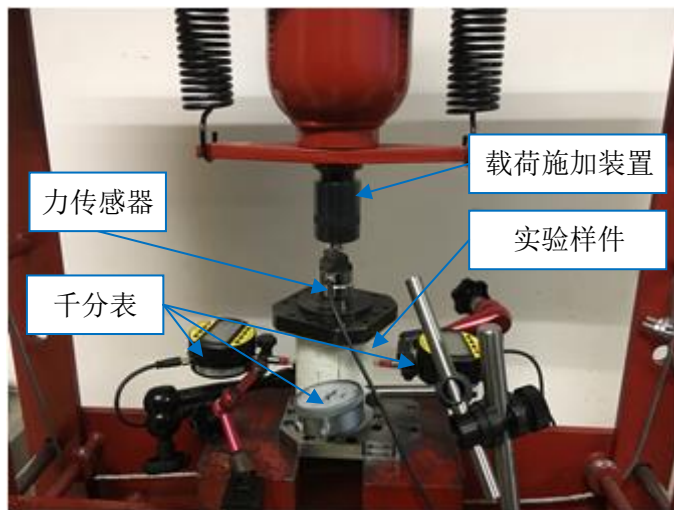
试件制备

- ◆ 为了方便加工，采用3D打印技术



实验装置

- ◆ 在机械式丝杠压力加载装置试验台上进行受压实验

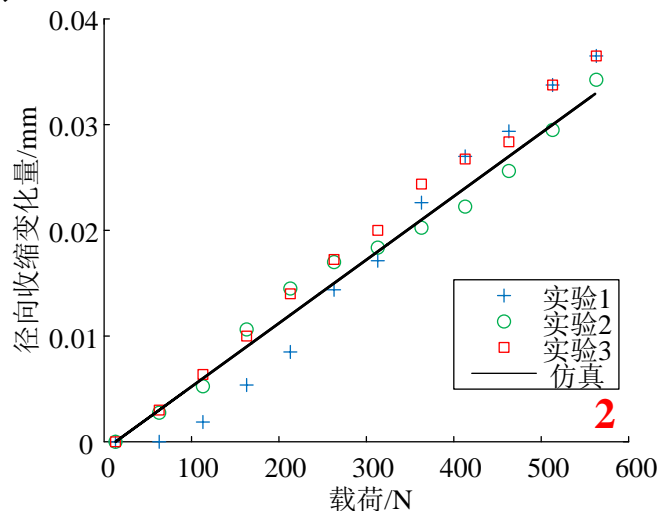
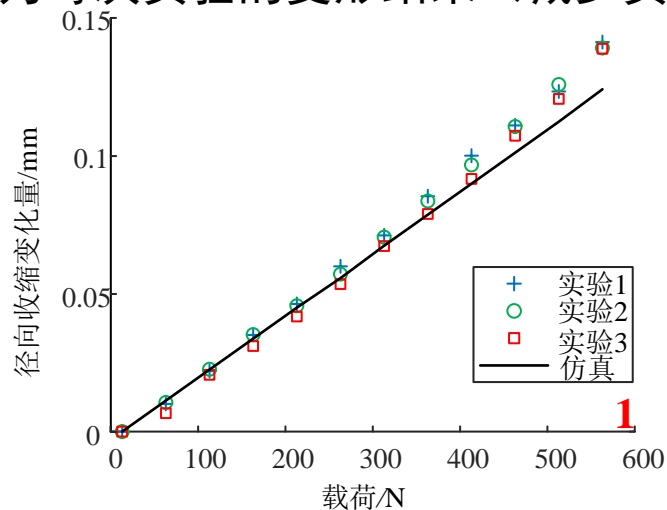


3 三维负泊松比隔套的设计与研究

3.3 三维负泊松比隔套压缩实验验证

数据处理

- ◆ 两个样件各三组重复实验，压力从0-600 N，记录4个千分表数据，以其平均值作为每次实验的变形结果（减少实验误差）



实验结论

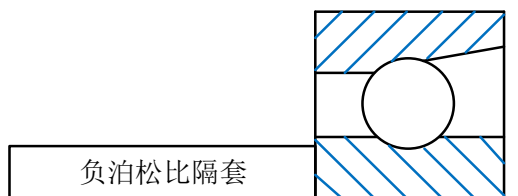
- ◆ 实验中结构呈现压缩效应，表明所设计**负泊松比隔套的合理性**；
- ◆ 两个试件实验和仿真最大误差量分别为12%、9.6%，证明**仿真方法的准确性**；
- ◆ 样品1的负泊松比效应远远优于样品2，说明了**各参数影响规律的正确性**。

3 三维负泊松比隔套的设计与研究

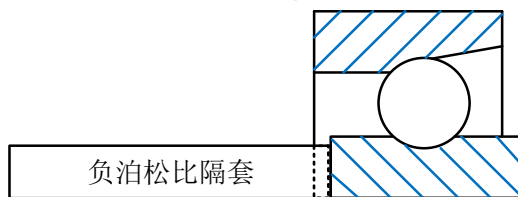
3.4 三维负泊松比隔套力学特性研究

力学模型建立的原理

负泊松比隔套与轴承始终处于位移与轴向力协调状态



(a) 初始状态下



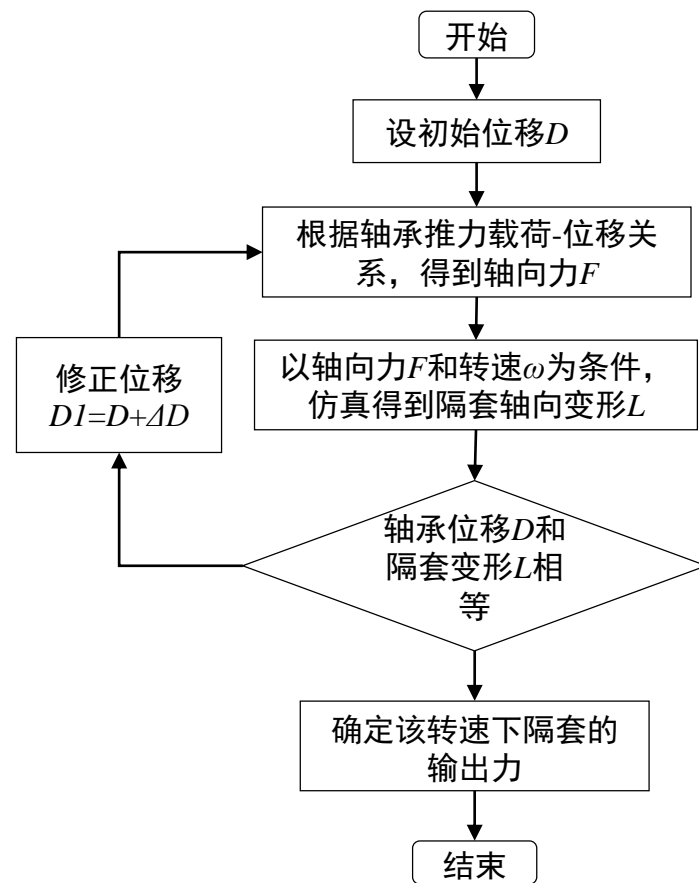
(b) 一定转速下

隔套的伸长位移量等于轴承的压缩位移量



轴承的轴向力大小等于负泊松比隔套所受轴向力

力学模型建立流程图

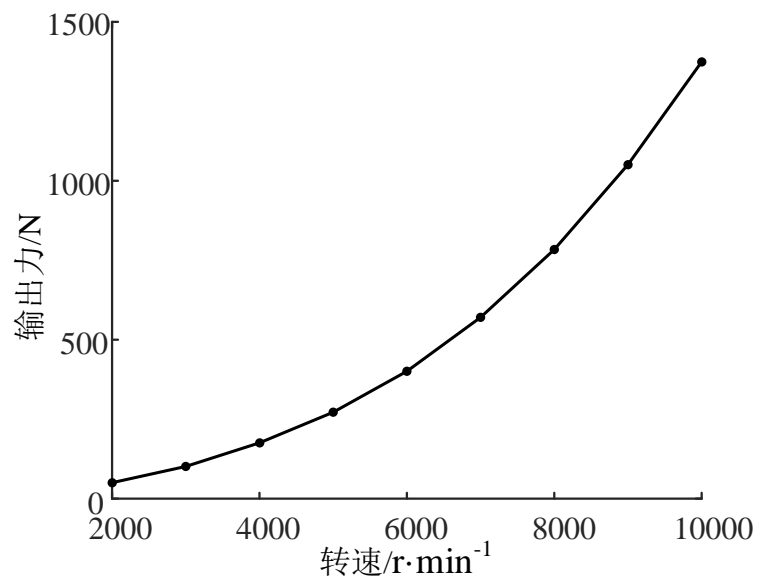
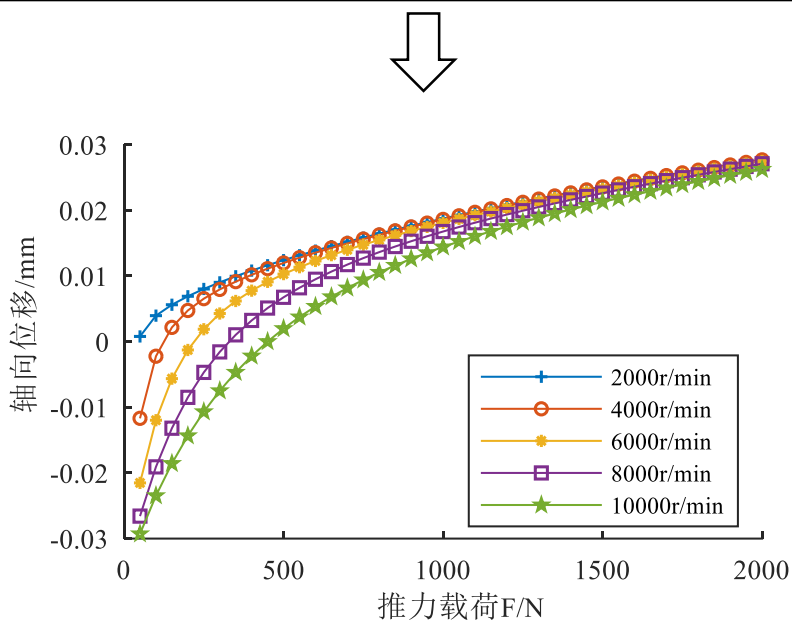


3 三维负泊松比隔套的设计与研究

3.4 三维负泊松比隔套力学特性研究

◆ 边界条件:

利用拟静力学模型得到的不同转速条件下7014轴承的推力-位移曲线

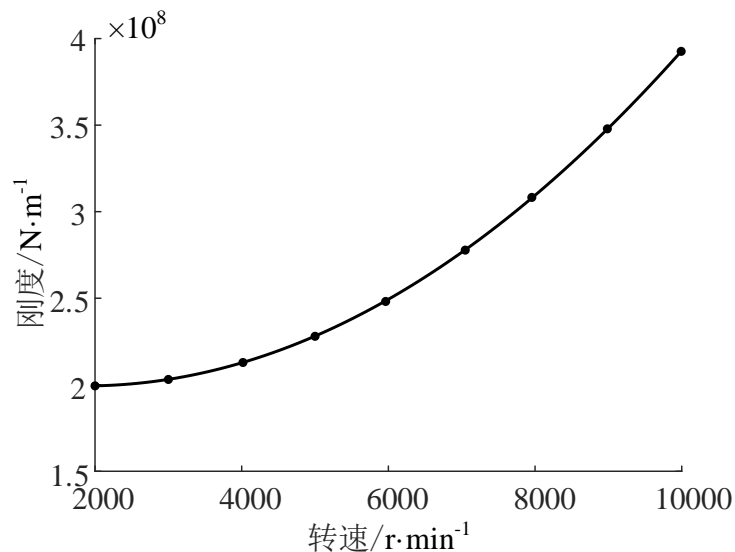


7014轴承要求的预紧力范围在145-1470 N之间，因此本文设计的隔套输出力调节范围满足设计需求。

3 三维负泊松比隔套的设计与研究

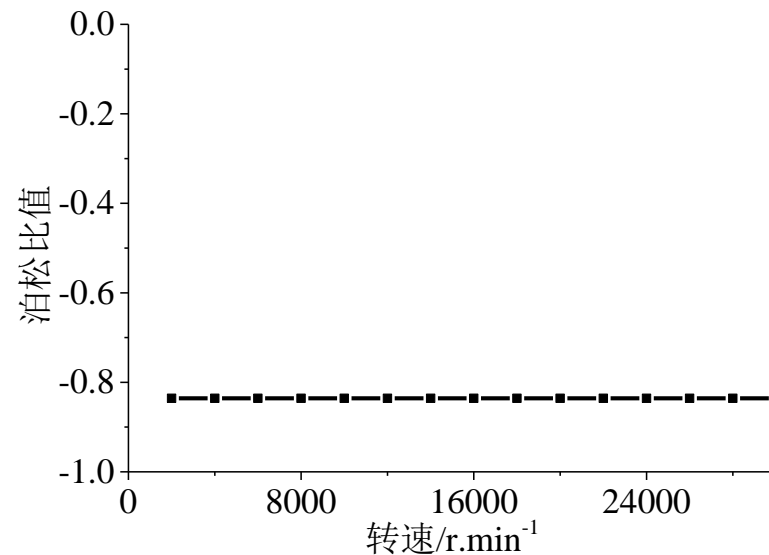
3.4 三维负泊松比隔套力学特性研究

负泊松比隔套刚度值



◆ 负泊松比隔套刚度值与轴承刚度同在一个数量级上，说明此隔套具有很好的承

自由状态下泊松比值



◆ 此隔套在只受离心力的作用下，泊松比值为-0.836。

蔡依青，朱永生，闫柯等. 面向轴承预紧力调控的负泊松比隔套设计[J]. 西安交通大学学报. (第一作者，EI. 在审)

目录

1

绪论

2

不同负泊松比单胞结构的设计与研究

3

三维负泊松比隔套的设计与研究

4

基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

5

针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

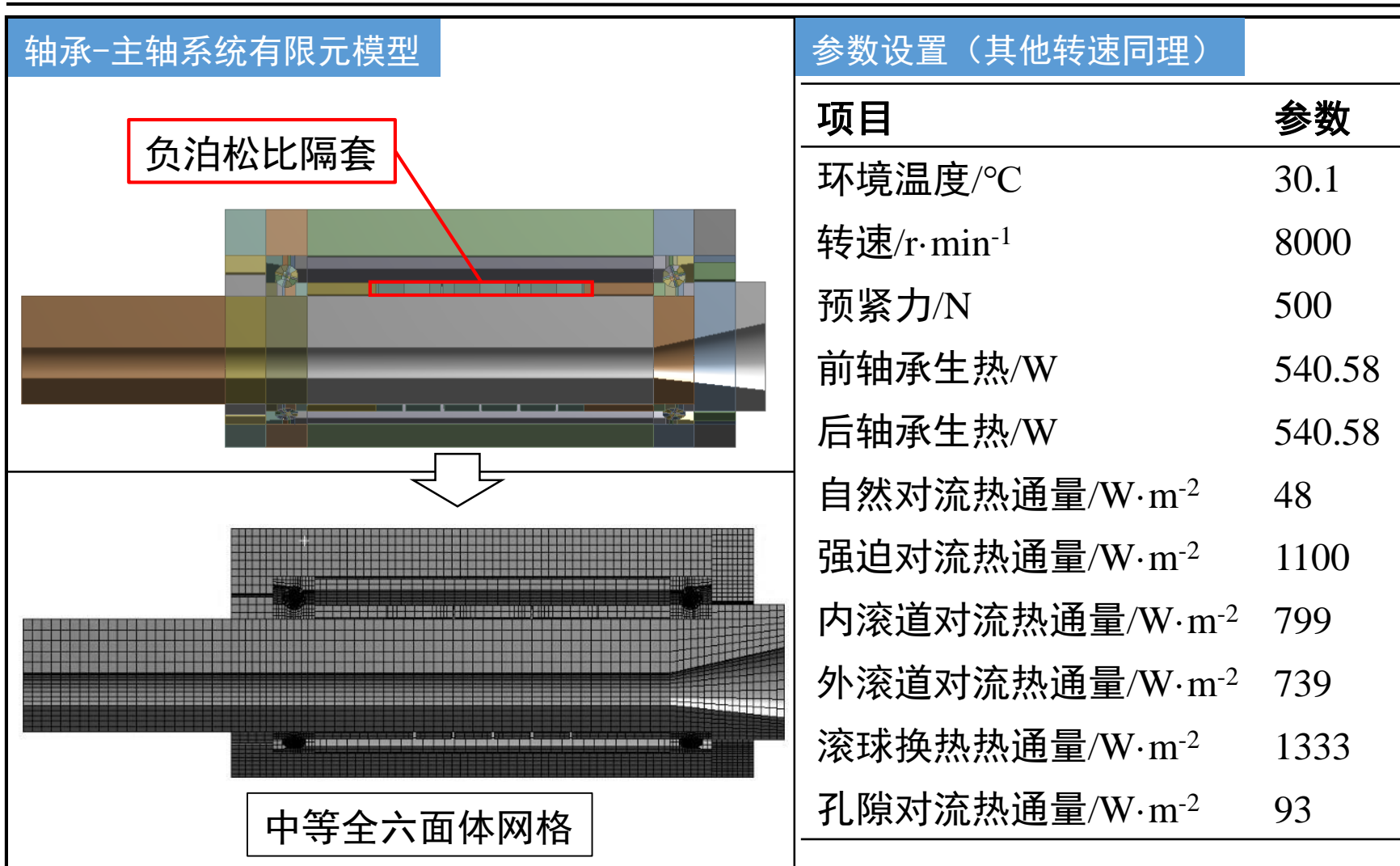
6

工作总结



4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

4.1 轴承-主轴系统温度场仿真分析

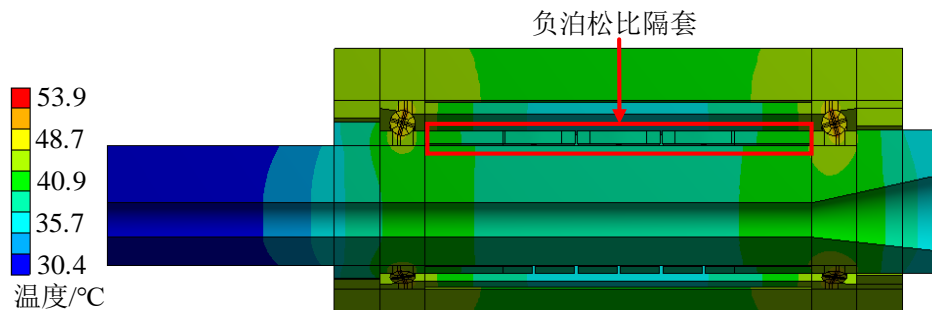


4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

4.1 轴承-主轴系统温度场仿真分析

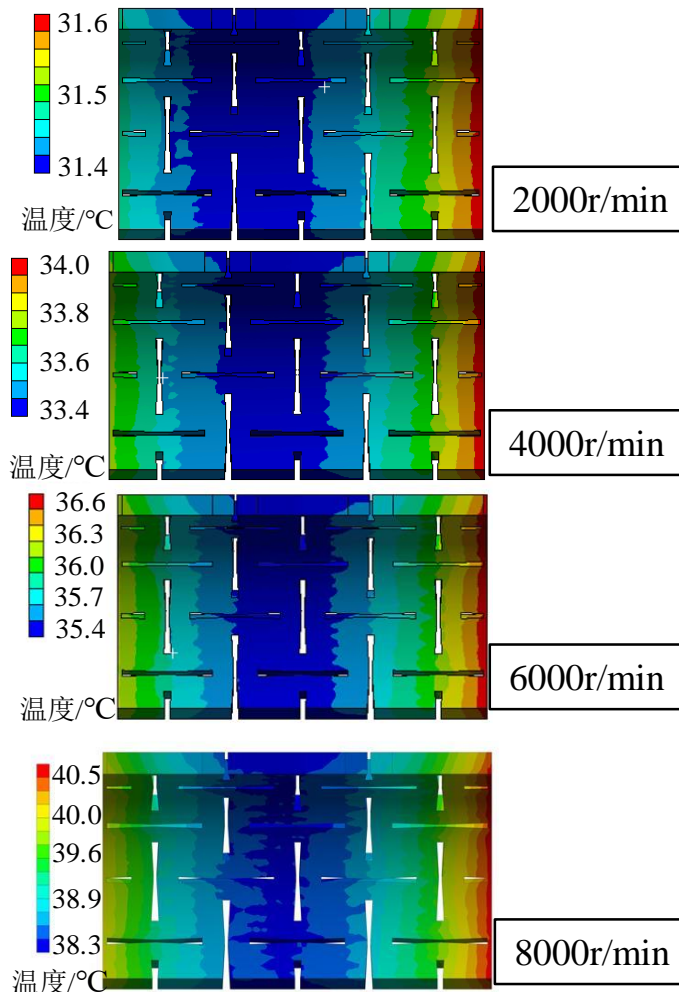
轴承-主轴系统温度场结果

以8000r/min为例，计算热平衡时主轴-轴承系统温度场，提取负泊松比隔套的温度分布



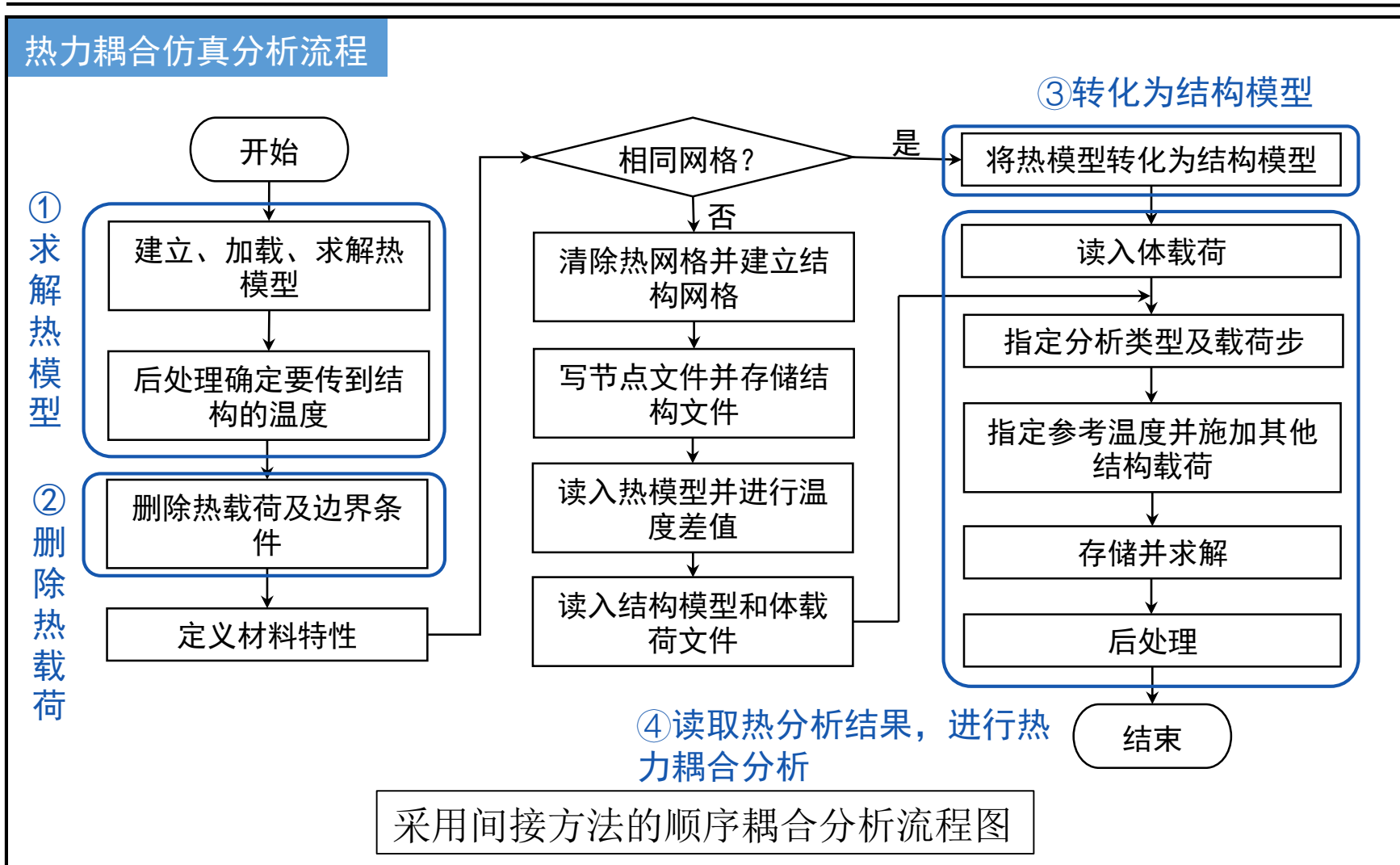
结论：

- ◆ 隔套两端温度高，中间温度最低；从一端到中间温度接近于线性分布；
- ◆ 隔套前端温度稍稍低于后端温度，原因是主轴的前端伸出较长致使散热较好，则前端的轴承温度也略低于后端轴承温度



4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

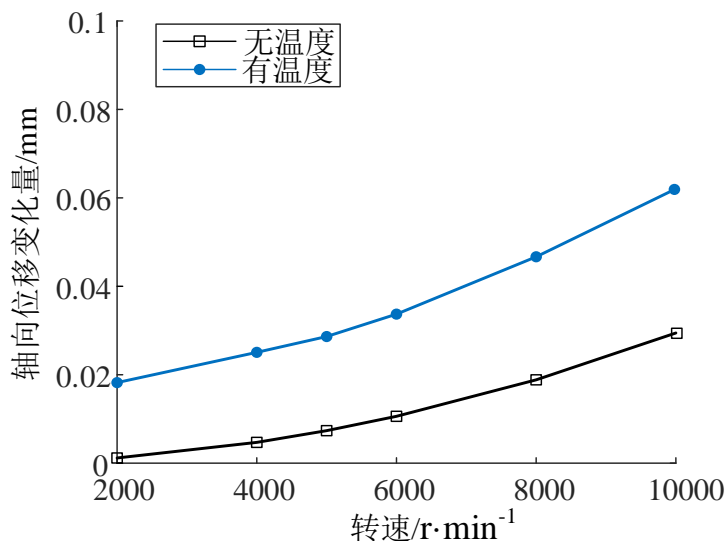
4.2 基于热力耦合仿真模型的建立



4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

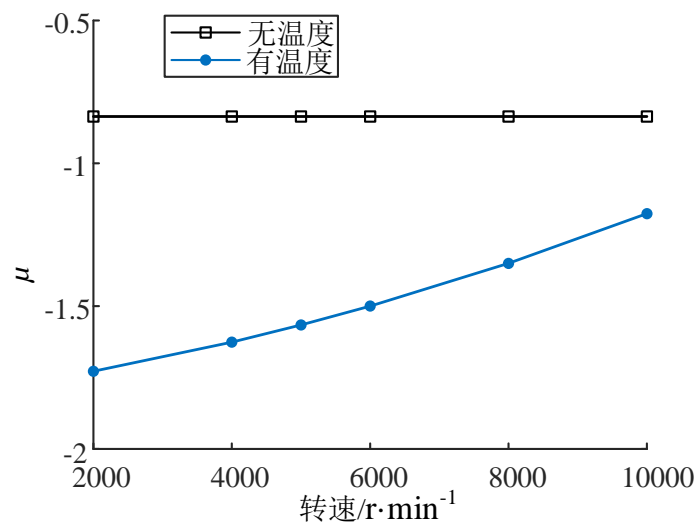
4.3 基于热力耦合的负泊松比隔套变形和力输出特性

负泊松比隔套变形量



- ◆ 对比有无温度因素，可以看出热力耦合模型下**轴向伸长量更大**。
- ◆ 相同转速变化区间内热力耦合模型下的隔套伸长变化量0.044mm比未考虑温度时隔套伸长量变化量0.028mm明显增加。

自由状态下泊松比值

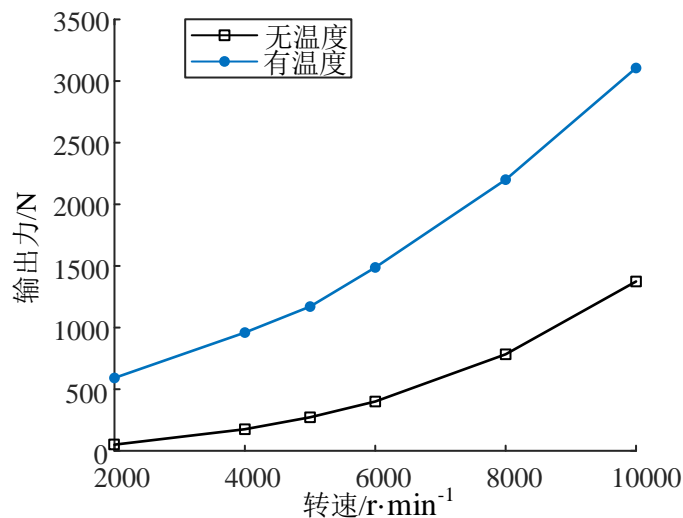


- ◆ 对比有无温度因素，说明**温度影响隔套的泊松比值**，且转速越大，负泊松比效应越小。

4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

4.3 基于热力耦合的负泊松比隔套变形和力输出特性

- ◆ 通过施加不同转速下的隔套温度边界条件得到不同转速对应的温度场结果与力学模型耦合，最终计算出不同转速下隔套的输出力值



结论：

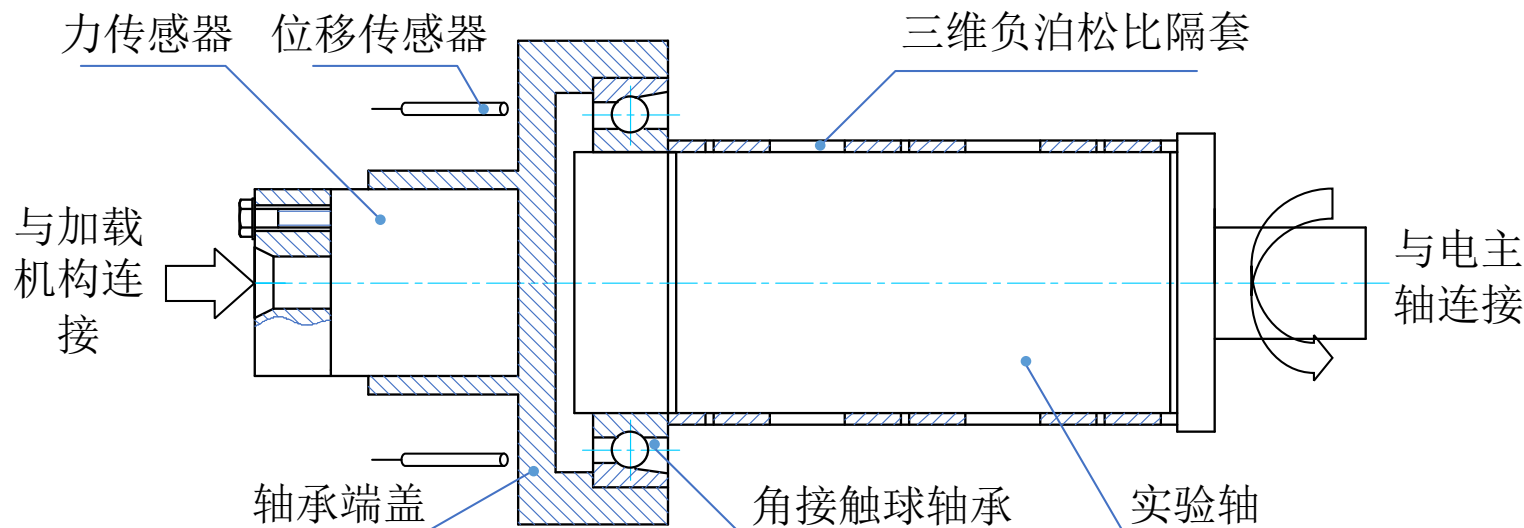
- ◆ 对比有无温度因素，热力耦合模型下的**力输出更大**。
- ◆ 相同转速变化区间内热力耦合模型下的隔套输出力变化量比未考虑温度时隔套输出力**变化量明显增加**。

4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

4.4 实际工况下实验验证

实验目的与原理

- ◆ 实验目的：验证负泊松比隔套在实际工况下的变形和力输出特性
- ◆ 设计原因：考虑到将负泊松比隔套直接放进主轴系统中进行实验，**装配不便、测量不便、条件控制不便**等
- ◆ 实验原理：负泊松比隔套在各个转速下产生**轴向伸长量推动轴承内圈**，进而通过轴承外圈与轴承端盖可以测量隔套的轴向伸长量和输出力

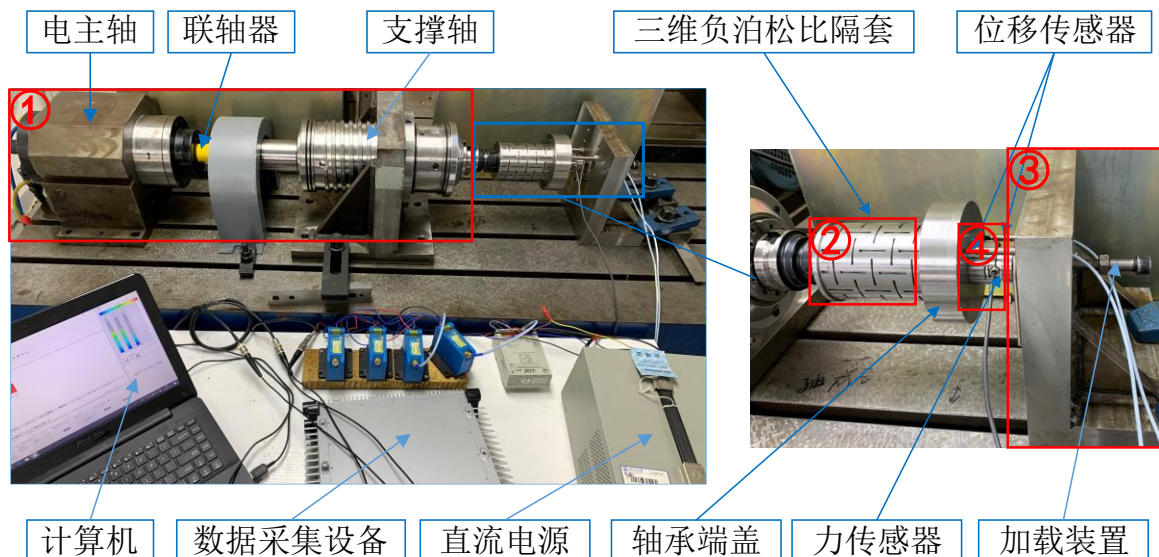





4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

4.4 实际工况下实验验证

实验台搭建

- ① 驱动部分
- ② 试件部分
- ③ 加载部分
- ④ 测量部分



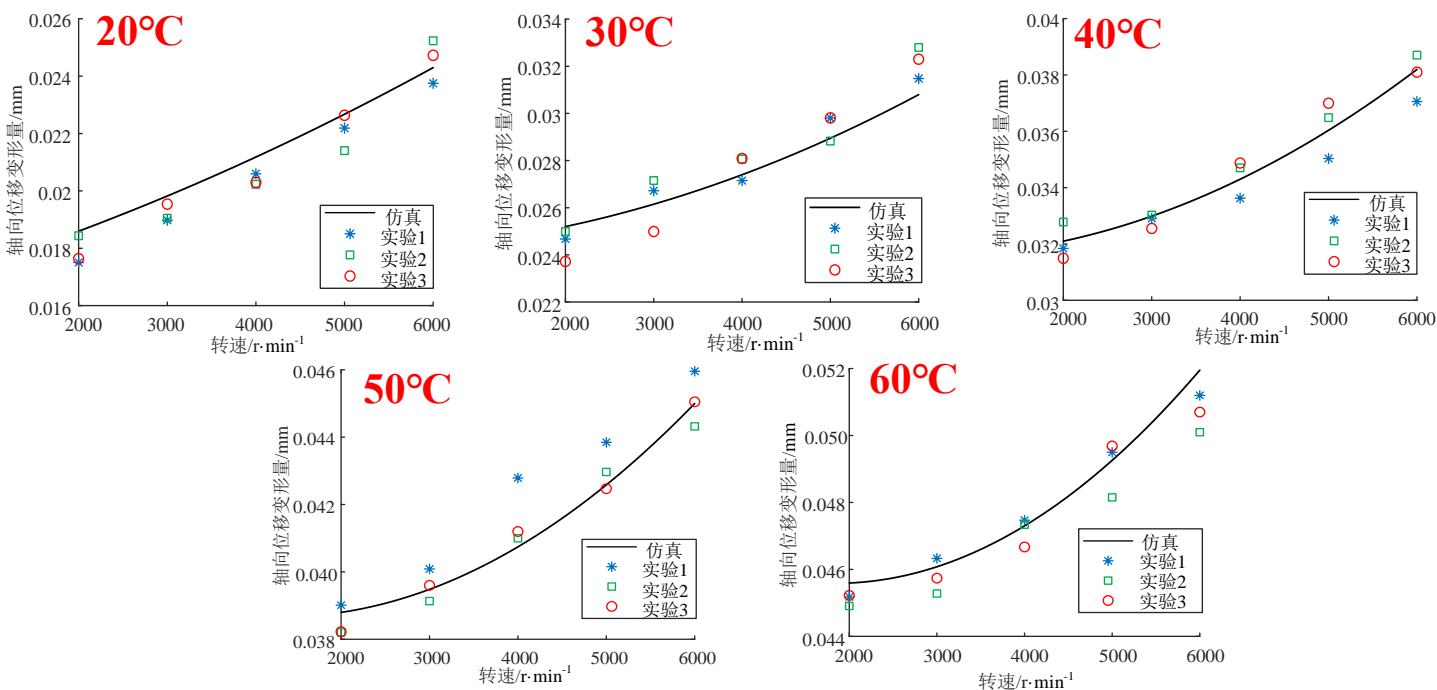
力传感器	位移传感器	温度传感器	传感器	型号	量程	测量精度
			力传感器	HBM-U3	-5kN~5kN	0.5N
			电涡流位移传感器	KF2306-5SUM	500μm	0.1μm
			温度传感器	Fluke-561	-40°C~550°C	0.1°C

4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

4.4 实际工况下实验验证

实验结果

在搭建实验台上，每一组实验分别记录20°C、30°C、40°C、50°C、60°C各个温度下不同转速的负泊松比隔套轴向变形量值（取两个位移传感器的平均值），共进行三组重复实验



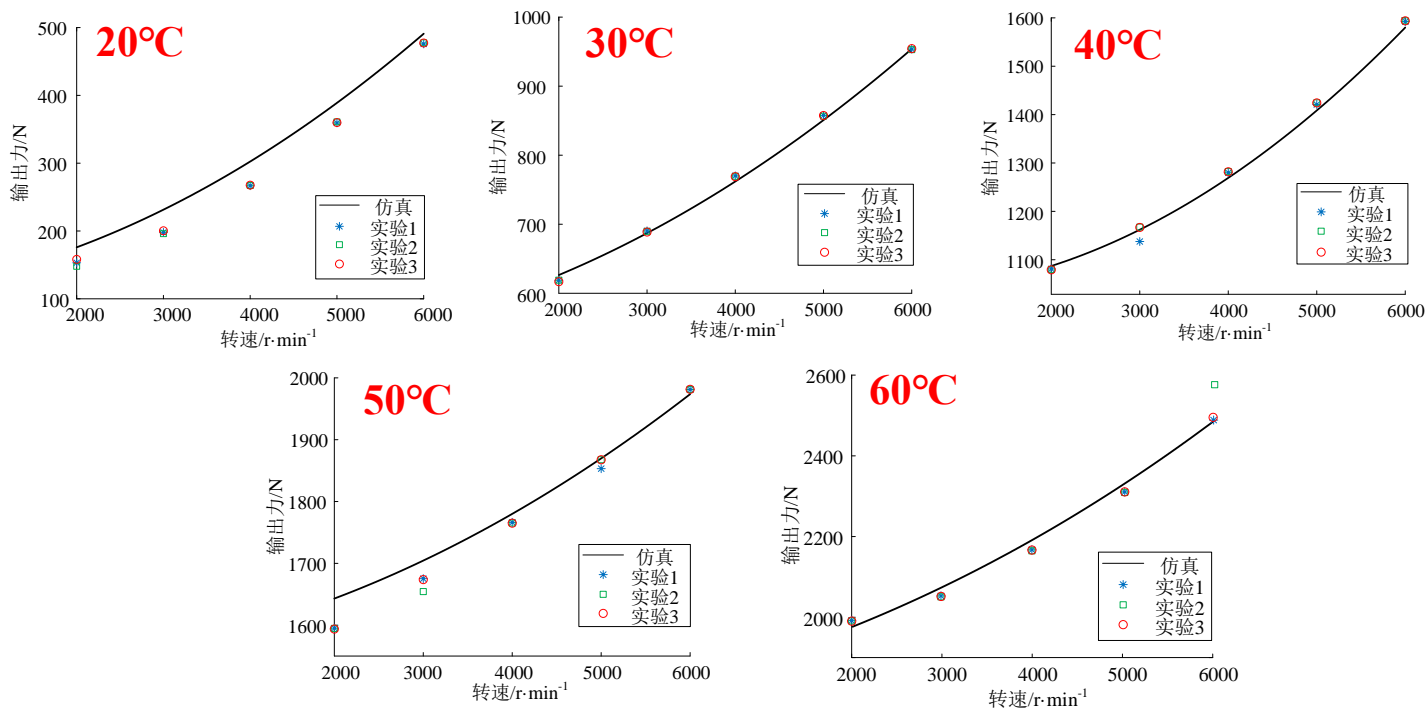
- ◆ 三组重复性试验相对标准偏差为6.6%，证明实验重复性好，**隔套性能稳定**；
- ◆ 对比实验和仿真最大误差为5.9%，证明三维负泊松比隔套的**力学模型准确性**。
- ◆ 在温度较低时轴向变形量随转速变化更线性；随着温度升高，轴向变形量随转速变化的**非线性更明显**。

4 基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

4.4 实际工况下实验验证

实验结果

在搭建实验台上，每一组实验分别记录20°C、30°C、40°C、50°C、60°C各个温度下不同转速的负泊松比隔套输出力值，共进行三组重复实验



- ◆ 三组重复性试验相对标准偏差为3.9%，证明实验重复性好，隔套性能稳定；
- ◆ 对比实验和仿真最大误差为4.2%，证明三维负泊松比隔套的力学模型准确性；
- ◆ 不同温度的各转速下隔套输出力曲线可以看出，隔套输出力随转速变化都接近于线性。

目录

1

绪论

2

不同负泊松比单胞结构的设计与研究

3

三维负泊松比隔套的设计与研究

4

基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

5

针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

6

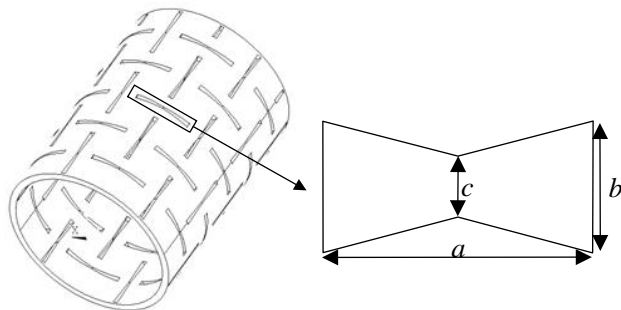
工作总结

5 针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

5.1 负泊松比隔套优化模型

优化参数

优化参数为4个，分别是横向宽度 a 、侧杆长 b 、中间空隙 c 以及孔隙率 P



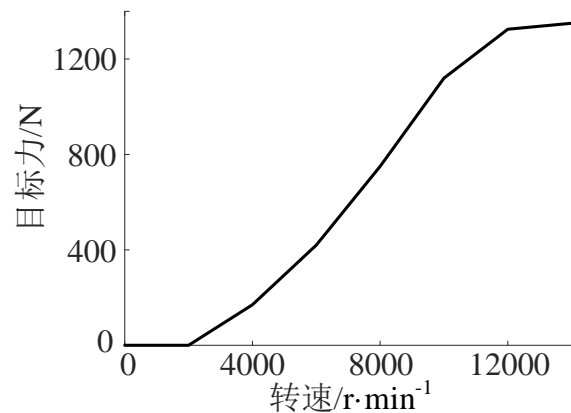
约束条件

内凹六边形结构的形状约束，孔隙率 P 范围约束以及负泊松比隔套的刚度值 K 保证与轴承刚度同在 10^8 数量级。

$$\begin{cases} c \leq b \leq a \\ 2\% \leq P \leq 10\% \\ K - 1 \times 10^8 \geq 0 \end{cases}$$

目标函数

目标力曲线即轴承初始预紧力（即转速为0时对应的最佳预紧力）与轴承最佳预紧力曲线上各转速对应预紧力值的差值。



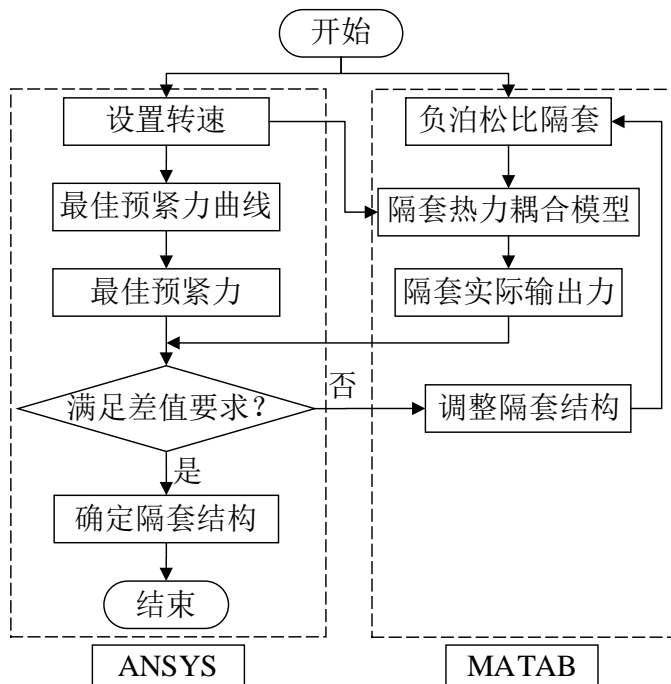
$$f = \min \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_{af} - F_a)^2} \right)$$

式中： N 表示转速的个数；
 F_{af} 表示负泊松比隔套输出力值；
 F_a 表示目标力值；

5 针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

5.2 ANSYS和MATLAB联合优化

联合优化的原理



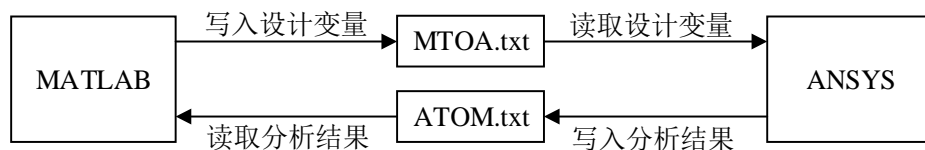
联合优化的关键技术

① MATLAB自动调用ANSYS部分

```
SYSTEM("E:\ansys\ANSYS  
Inc\v150\ansys\bin  
\winx64\ANSYS150.exe"%ANSYS绝对路径  
-b %BATCH方式运行ANSYS  
-p ane3fl %ANSYS分析模块  
-i "E:\apdl.txt" %输入文件  
-o out"E:\result.out")%输出结果文件
```

② ANSYS和MATLAB数据的传输

数据传输通过txt文件实现



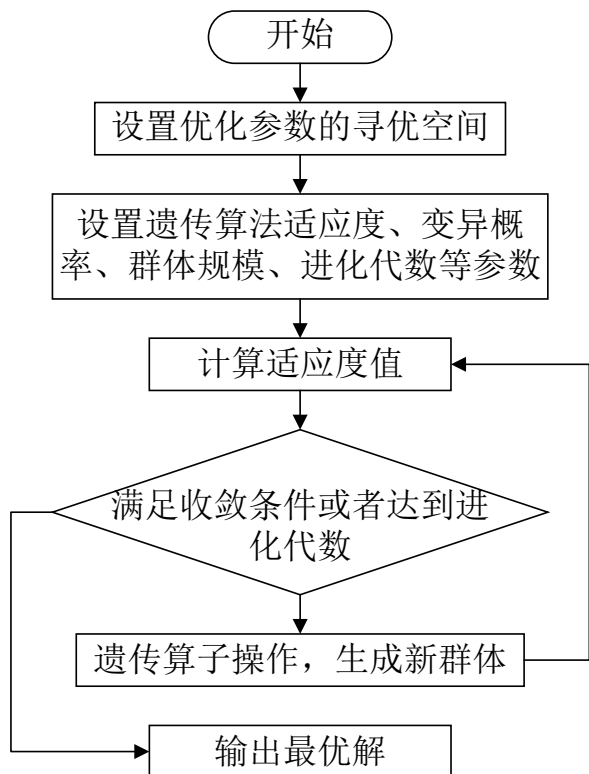
方法优点:

- ◆ 结合MATLAB&ANSYS两者优势;
- ◆ 可以**提高运算效率**;
- ◆ 实现优化设计运算迭代的**自动化**。

5 针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

5.3 负泊松比隔套优化结果分析

遗传算法优化过程



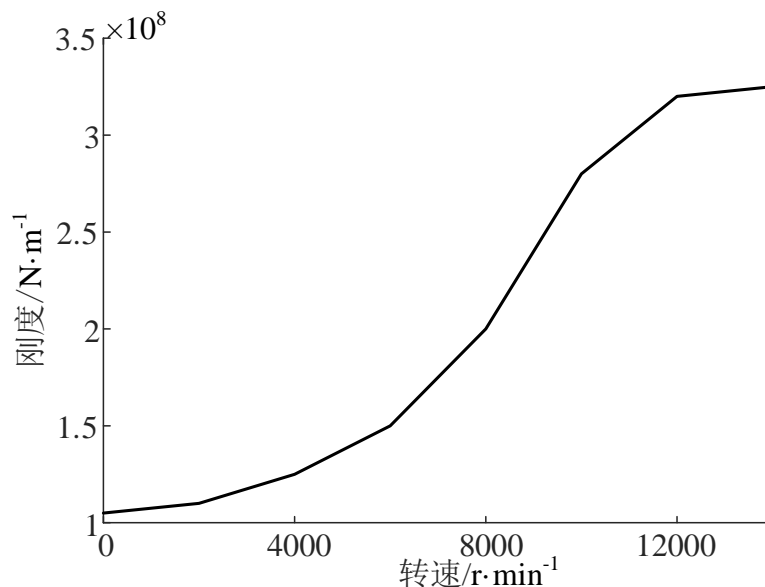
- ◆ 首先要确定负泊松比隔套**优化设计的目标函数、变量以及约束条件**，然后设置遗传算法中的相关参数。
- ◆ 设置完成后，对设计变量进行编码并随机产生初始化种群，根据设置的目标函数对每一个个体**计算适应度值**。
- ◆ 然后**判断是否满足收敛条件**，若满足则停止计算，输出最优参数；若不满足，则执行选择操作，选择出来的个体经过交叉和差异等操作产生新一代种群，并开始新一代的遗传继续迭代优化。

5 针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

5.3 负泊松比隔套优化结果分析

优化结果

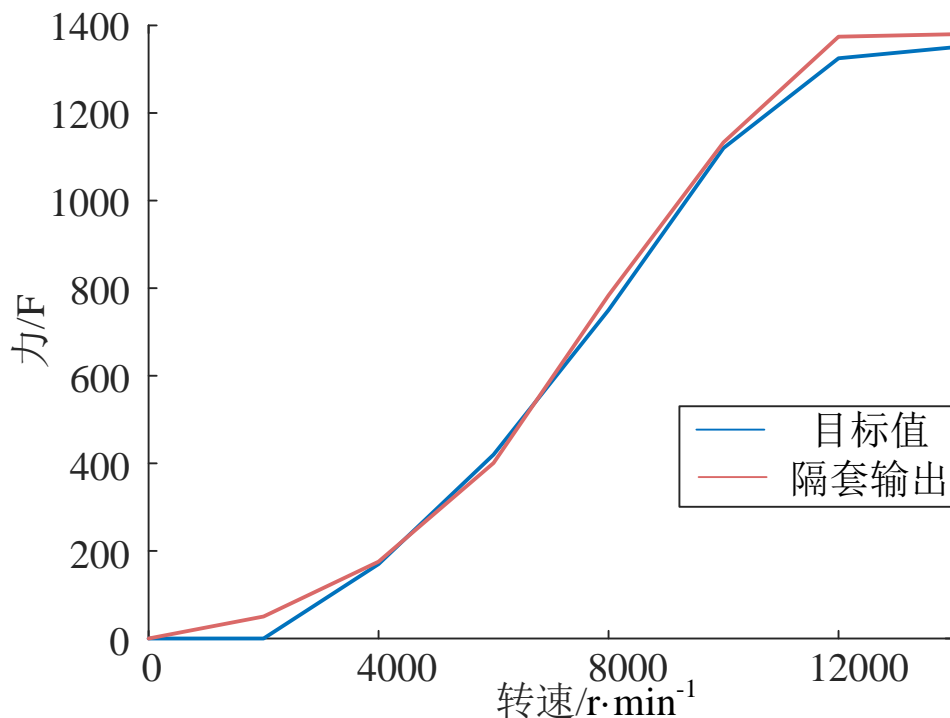
- ◆ 经过多代循环计算出最终各优化参数最佳组合，即 a 为20mm、 b 为1.6mm、 c 为1mm、孔隙率 P 为10%
- ◆ 建立最优参数下的三维负泊松比隔套实体模型，基于第四章建立的热力耦合模型，计算出负泊松比隔套在不同转速下刚度值



5 针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

5.3 负泊松比隔套优化结果分析

各转速下负泊松比隔套的输出力值与目标值曲线对比



◆ 结论：隔套实际输出的力与目标值最大误差为3.7%（49.4N），达到了优化的效果，进而说明了所设计的隔套可以自适应的调整轴承预紧力。

目 录

1

绪论

2

不同负泊松比单胞结构的设计与研究

3

三维负泊松比隔套的设计与研究

4

基于热力耦合的负泊松比隔套力学特性研究

5

针对全速段预紧力需求的负泊松比隔套优化设计

6

工作总结

6.1 结论



针对主轴隔套承载大的需求，通过建立仿真模型对比分析三种低孔隙率结构，确定采用**内凹六边形负泊松比单胞结构**。并进行**基于数字图像相关法的拉伸实验**，验证了仿真模型的正确性。



设计了一种全新的**三维负泊松比隔套**结构，在考虑轴承受力边界的前提下**建立三维负泊松比隔套力学分析模型**，获得不同转速下三维负泊松比隔套的**变形规律和力输出规律**。



采用**间接方法的顺序耦合方法**，构建了隔套的**热力耦合分析模型**；研究了不同转速条件下主轴温度场对隔套伸长量及输出力的影响规律，搭建实验台并实验验证了结果的正确性；



以**满足轴承预紧力在全转速范围内需求**为目标，构建负泊松比隔套参数优化模型，并基于遗传算法完成整个优化算法的实现。隔套实际输出的预紧力与目标值相差**3.7%**，证明所优化的负泊松比隔套可以更好调节轴承预紧力。

6.2 展望



由于实验测试条件的限制，本文的负泊松比隔套仅在实验室搭建的高速主轴实验台上验证了隔套的有效性与准确性，对于将负泊松比隔套装置在主轴系统内部中的实验验证有待进一步的开展。



由于时间限制，本文所设计的负泊松比隔套为一种满足系统刚度需求的低孔隙率的周期性有序结构。在后续的研究中，可以开发设计更复杂拓扑方式或多种单胞组合的无序低孔隙率负泊松比结构。



本文所设计的隔套结构特性研究是通过有限元仿真结合实验验证，在之后的研究中可以进一步建立理论数学模型来表达隔套变形与隔套尺寸参数的函数关系，并利用连续优化算法使得隔套结构设计更精确。

6.3 研究成果

◆ 论文

- ◆ Cai YQ, Zhu YS, Yan K, Yuan QQ, Hong J. Study on negative Poisson's ratio structure with low porosity[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019, 358(5): 052007.
- ◆ 蔡依青, 朱永生, 闫柯, 袁倩倩, 洪军. 面向轴承预紧力调控的负泊松比隔套设[J]. 西安交通大学学报, 2020. (在审)

◆ 专利

- ◆ 朱永生, 蔡依青, 闫柯, 洪军, 袁倩倩, 陈凯达. 一种基于负泊松比结构的主轴预紧力自适应调节方法: 中国, CN109163018A[P]. 2019-01-18. (已授权)
- ◆ 朱永生, 蔡依青, 闫柯, 陈凯达, 袁倩倩, 洪军. 一种泊松比可控结构隔套的优化设计方法: 中国, CN110245418A[P]. 2019-09-17.
- ◆ 闫柯, 尹婷婷, 朱永生, 蔡依青, 洪军. 一种具有负泊松比效应的多孔含油保持架的调控方法: 中国, CN110206824A[P]. 2019-06-13.

◆ 荣誉

- ◆ 2019-2020学年 获得西安交通大学优秀研究生
- ◆ 2019-2020学年 获得第二届“SKF-陕西博灵”企业奖学金





西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



设计科学与基础部件研究所
INSTITUTE OF DESIGN SCIENCE AND BASIC COMPONENTS

感谢各位老师！
敬请批评指正！

导师：朱永生 教授

答辩人：蔡依青

日期：2020.05.23