



高强度柴油机曲轴平衡率对润滑及振动特性的影响

汇报人：赵俊生（教授）
单 位：中北大学

2020年11月6日



主要内容

一、研究背景及意义

二、曲轴平衡性分析

三、平衡率对主轴承润滑与特性分析

四、平衡率对曲轴振动特性分析

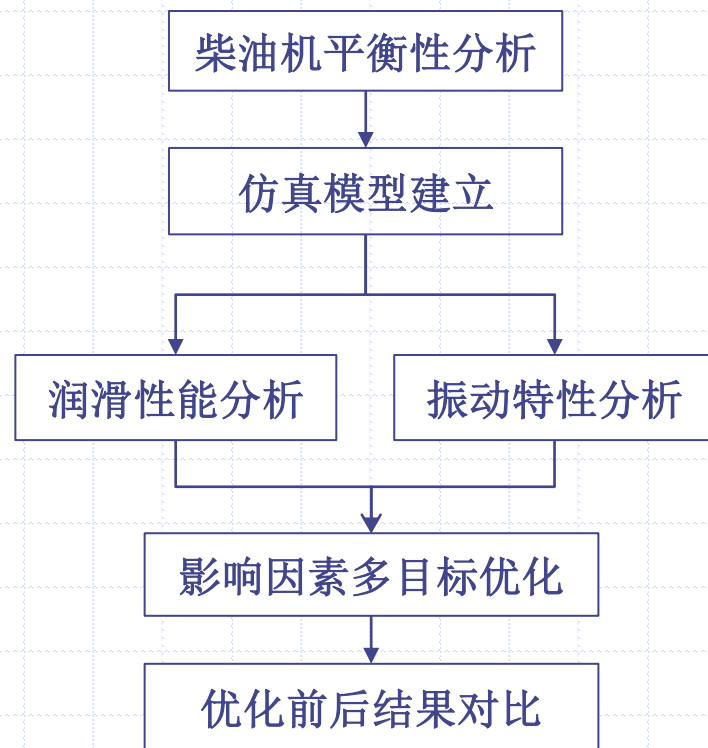
五、神经网络遗传算法的多目标优化



一、研究背景及意义

基于“十三五”预研项目，柴油机在强化过程中，**转速提高、爆压增大**，气缸爆发压力和惯性力等冲击载荷进一步加剧，**曲轴不平衡**将引起轴颈弯曲或倾斜，进而导致曲轴轴承润滑和振动特性的恶化。

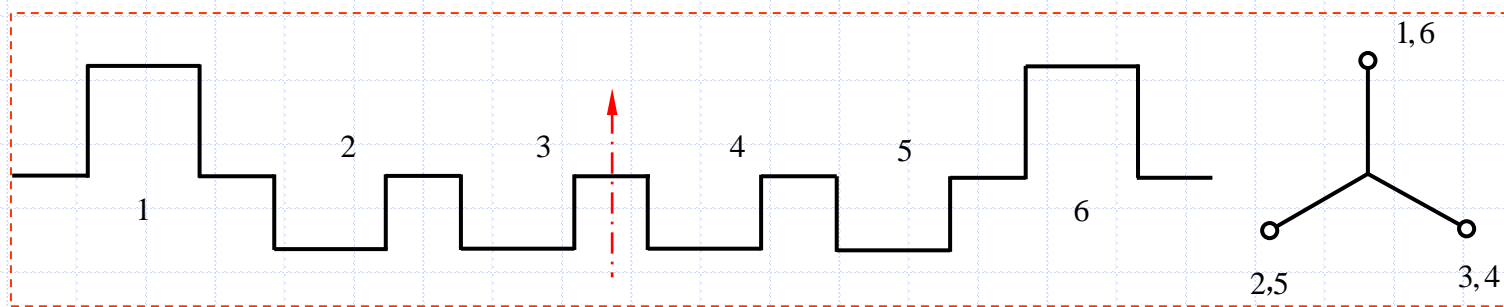
因此选取**曲轴平衡重**为研究对象，综合考虑柴油机曲轴轴承系统运动学、动力学和摩擦学的影响，建立仿真模型对曲轴的平衡性进行分析。



技术路线图

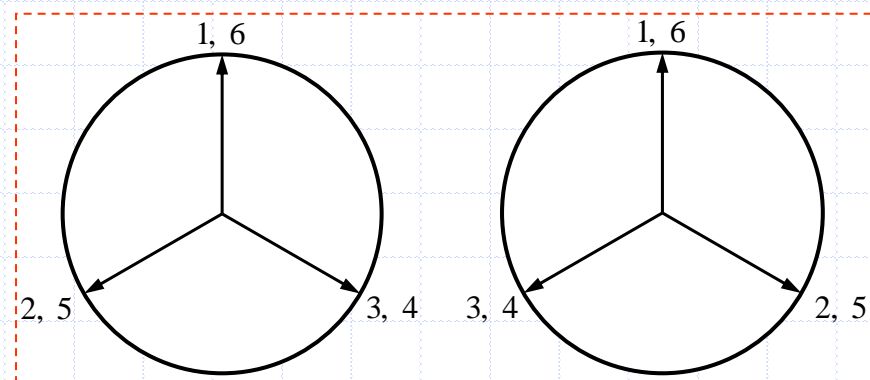
二、曲轴平衡性分析

2.1 外平衡分析



12V150柴油机曲轴示意图

- 12V150柴油机的旋转惯性力、往复惯性力及其力矩已达到完全的外平衡。
- 气缸压力和惯性力引起曲轴的内弯矩会产生周期性的弯曲变形，因此需要对曲轴进行内平衡分析。

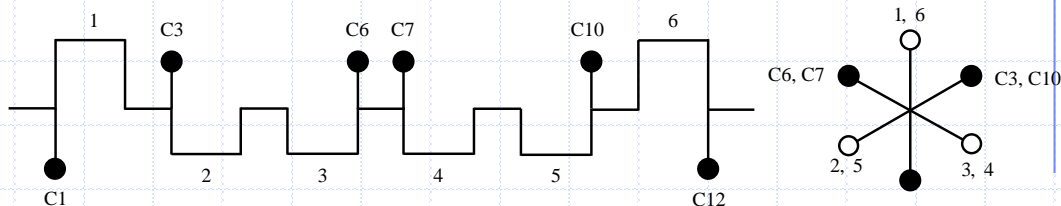


曲轴轴向一阶和二阶矢量图

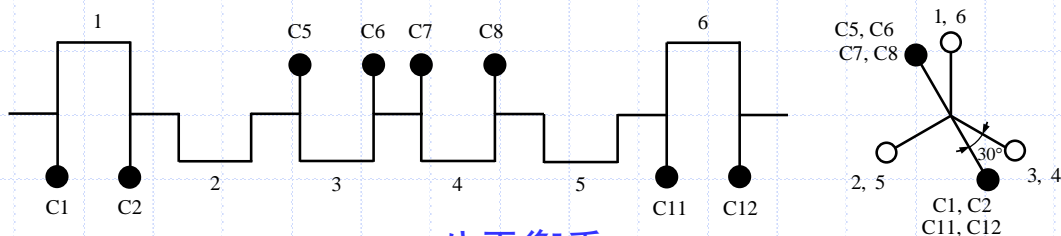
二、曲轴平衡性分析

2.2 内平衡分析

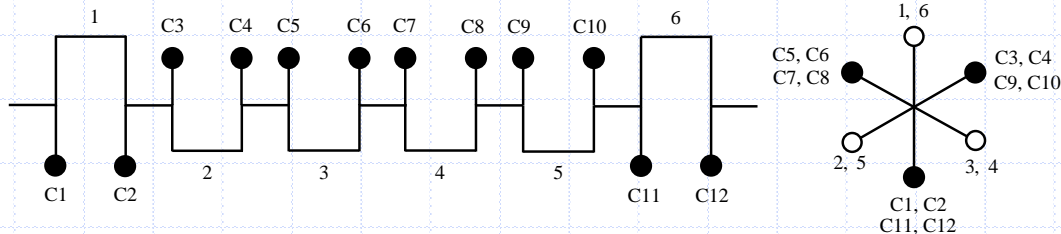
- 内部平衡措施是考虑旋转惯性力所产生的内力矩，是在曲轴上设置平衡重加以平衡。
- 在欠平衡、临界平衡、50%过平衡和100%过平衡四种平衡率下，分析三种布置方案的曲轴主轴承载荷，确定合适曲轴平衡重配置方案。



六平衡重



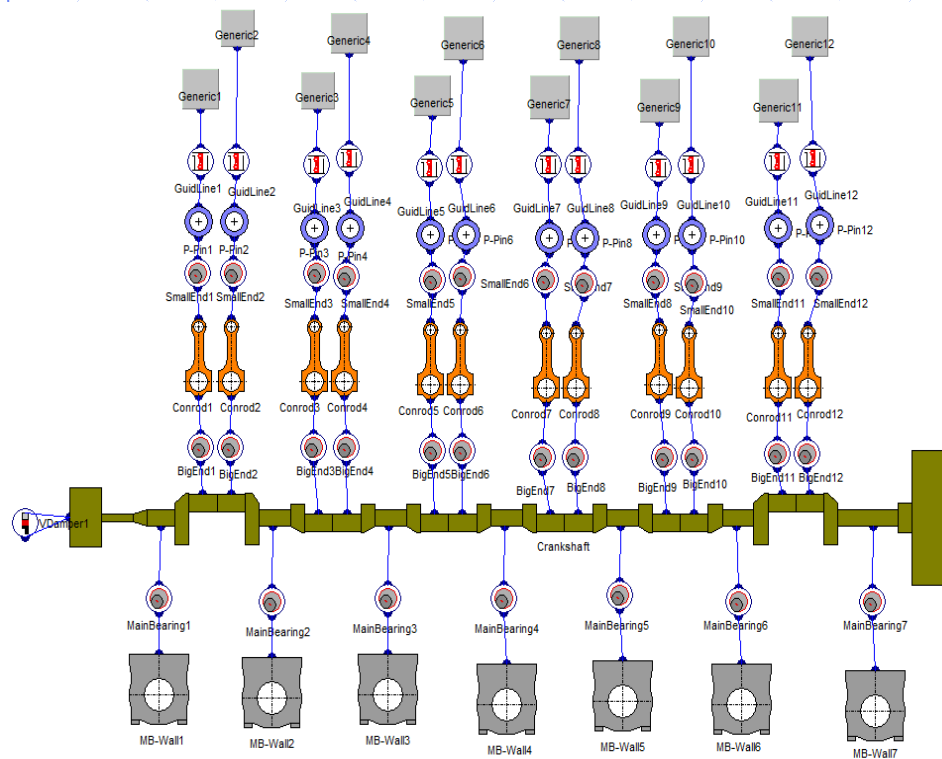
八平衡重



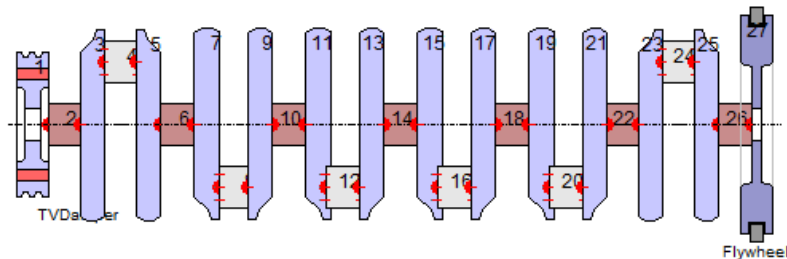
十二平衡重

二、曲轴平衡性分析

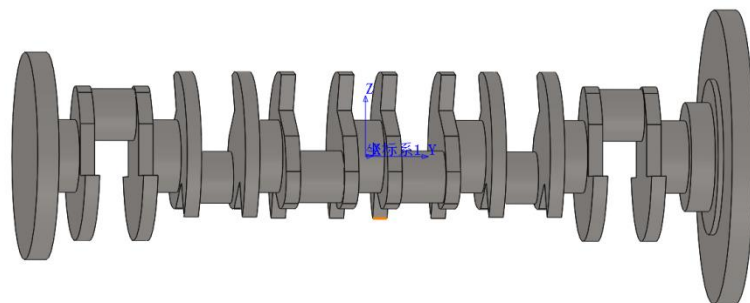
2.3 仿真模型建立



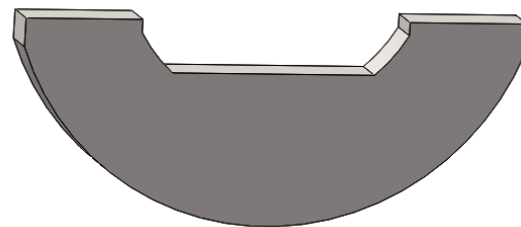
Excite Designer 仿真模型



12平衡重曲轴当量模型



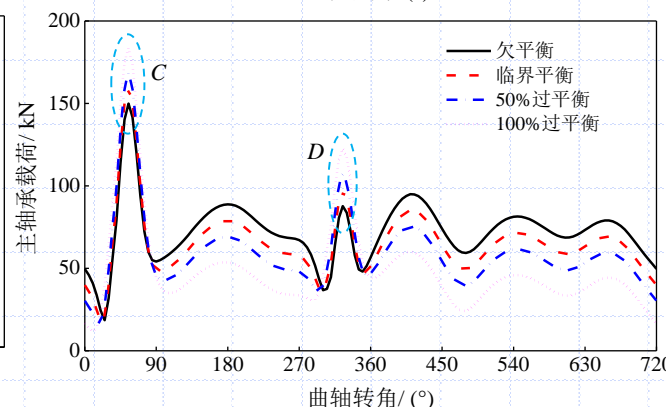
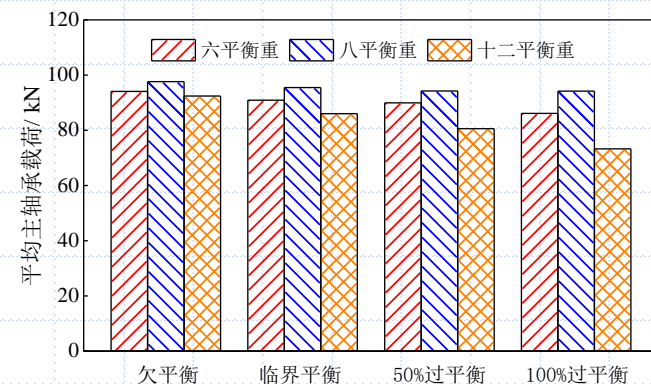
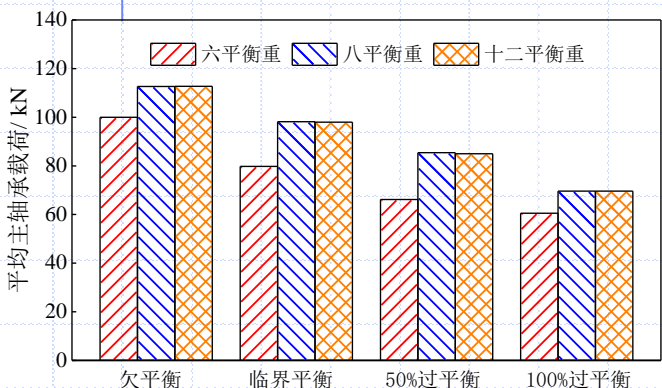
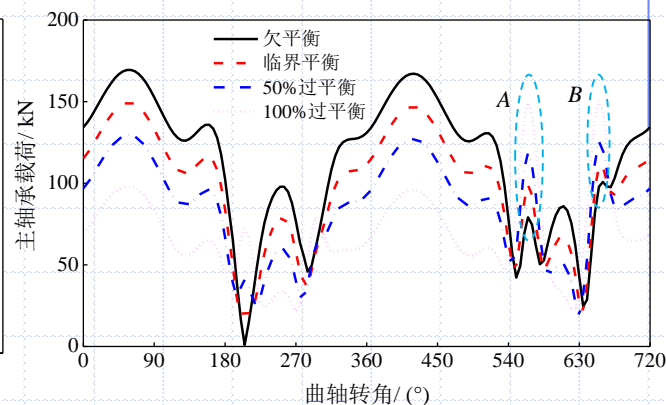
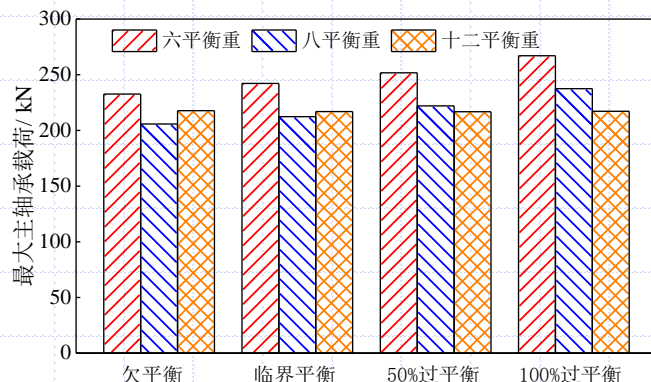
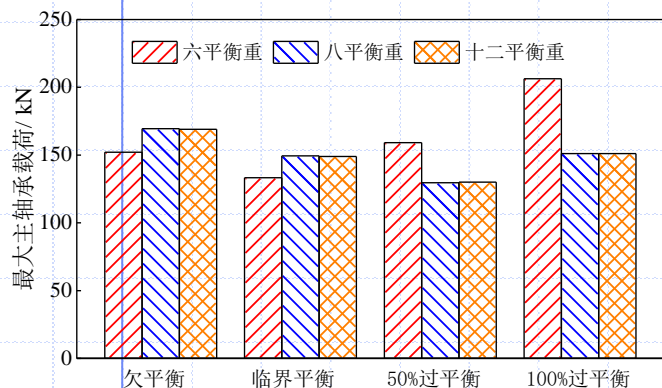
12平衡重曲轴



平衡重

二、曲轴平衡性分析

2.4 主轴承载荷分析



MB4最大和平均主轴承载荷

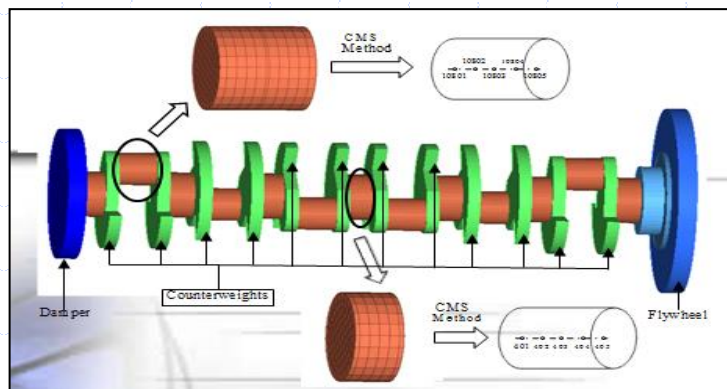
MB6最大和平均主轴承载荷

MB4和MB7载荷随曲轴转角变化

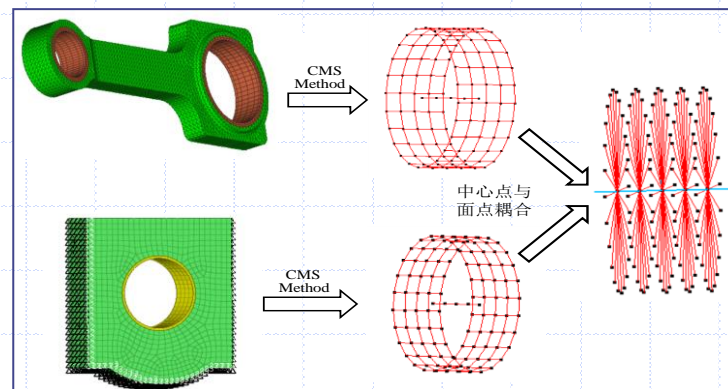
➤ 综合比较不同平衡重布置的七个主轴承最大和平均主轴承载荷，**十二平衡重布置的曲轴优于六平衡重和八平衡重。**

三、平衡率对主轴承润滑特性分析

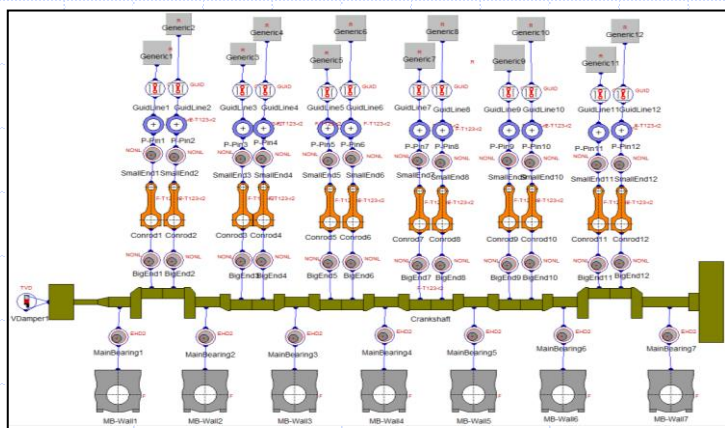
3.1 模型的建立与求解



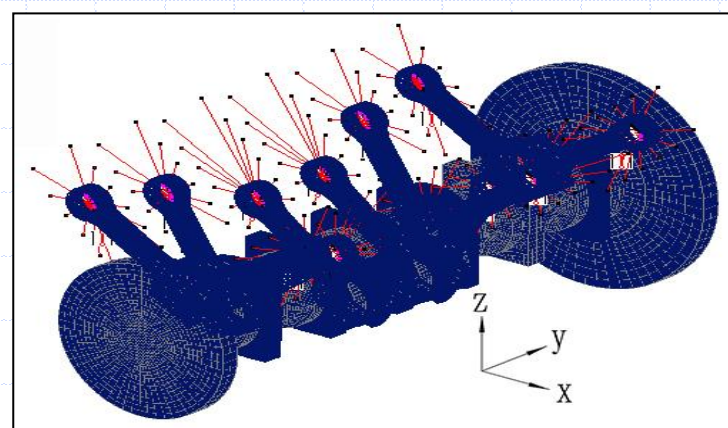
曲轴有限元模型



连杆和轴承座有限元模型



多体动力学仿真二维模型



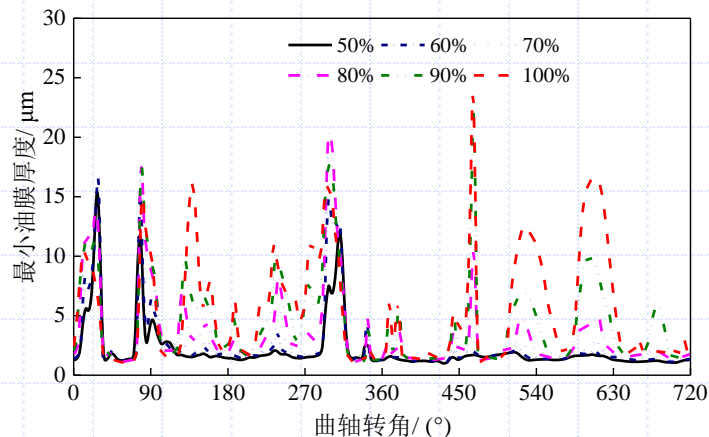
多体动力学仿真三维模型

三、平衡率对主轴承润滑特性分析

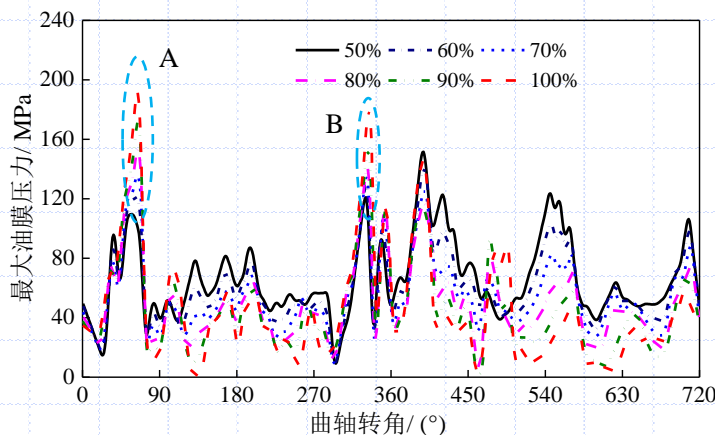
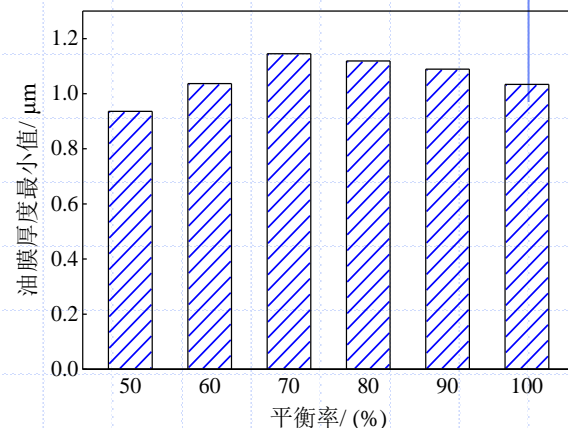
3.2 润滑特性分析

➤ 随平衡率的增加，主轴承最小油膜厚度在大部分时间内均有所增加，而最大油膜压力和摩擦损失功在大部分时间内均有所减小。

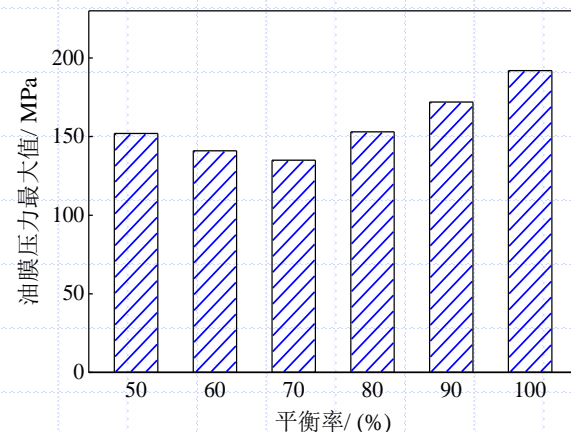
➤ 平衡率在70%~90%之间主轴承润滑特性相对较好。



不同平衡率下最小油膜厚度的时变曲线和最大值



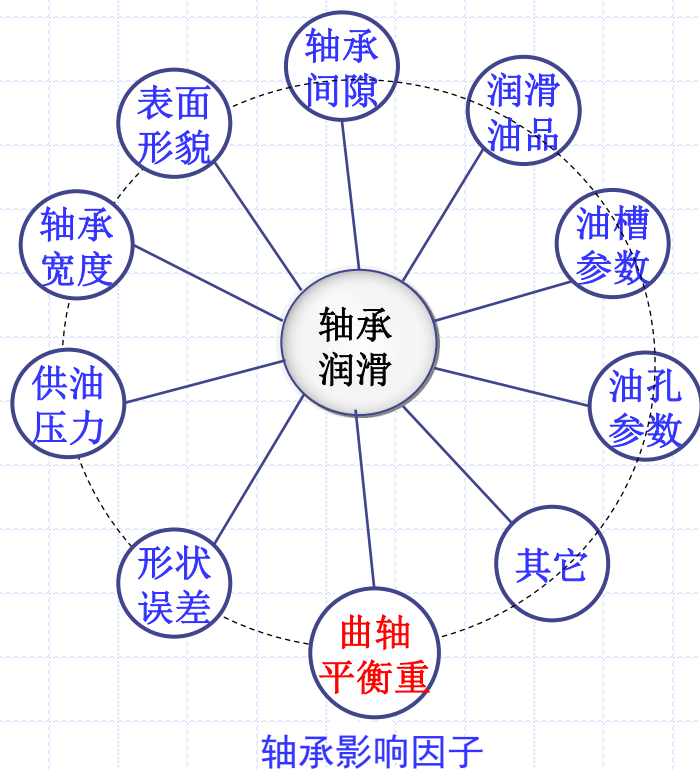
不同平衡率下最大油膜压力的时变曲线和最大值



三、平衡率对主轴承润滑特性分析

3.3 析因试验设计

为了筛选重要影响因素，减少试验次数，选取分辨度为IV的 2^{10-5} 的试验设计，对十个因素进行分析。



因子与水平

因子	缩写	单位	-1水平	+1水平
平衡率	BAR	%	50	90
轴承宽度	BEW	mm	44	48
轴承间隙	RAC	μm	40	80
轴瓦修型	BEC	μm	0	5
机油粘度	VIS	mPa s	7	12
供油压力	OSP	MPa	4	10
油孔直径	BOD	mm	3	7
油槽宽度	OGW	mm	3	7
轴颈粗糙度	ROJ	μm	0.4	0.8
轴瓦粗糙度	ROB	μm	0.4	0.8

轴承响应

响应	单位	缩写
最小油膜厚度	μm	MOFT
最大油膜压力	MPa	MOFP
峰值粗糙接触压力	MPa	PACP
摩擦损失总功	W	AFPL



三、平衡率对主轴承润滑特性分析

3.3 析因试验设计

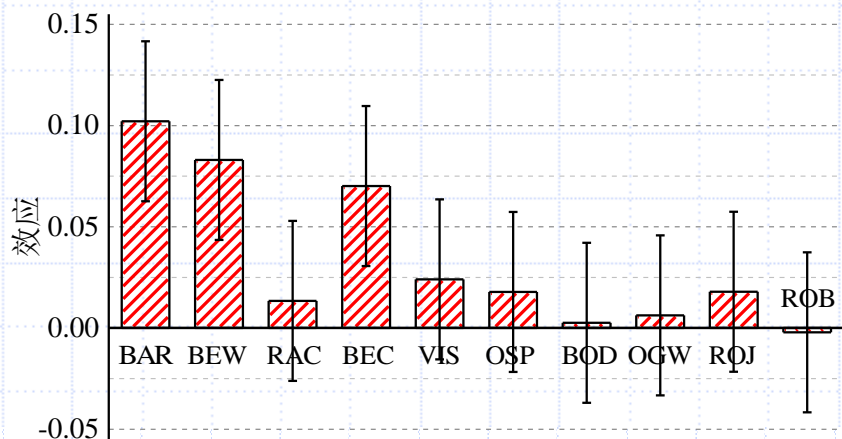
运行结果

Run	Variable										Response			
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	MOFT/ μm	MOFP/ MP	PACP/ MPa	AFPL/ W
1	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	1.361	211	60	3555
2	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	1.002	194	128	5465
3	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	1.048	188	117	4288
4	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	0.831	170	179	5516
5	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	0.775	197	200	5751
6	-	+	-	+	+	+	+	-	+	-	1.11	154	102	7092
7	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	0.76	236	205	4315
8	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	1.044	154	117	5740
9	+	-	-	+	-	+	-	+	+	-	1.067	203	112	4087
10	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	0.865	225	168	4659
11	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	1.358	157	60	5131
12	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	0.817	274	184	6192
13	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	0.782	247	197	5226
14	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	0.963	230	138	4243
15	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	0.953	192	141	4526
16	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	0.944	237	144	4494
17	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	0.836	223	178	5585
18	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	1.006	193	127	4080
19	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	0.921	170	150	5677
20	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	1.318	195	65	3882
21	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	0.815	254	185	6979
22	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	0.998	148	129	5524
23	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	1	237	129	5649
24	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	1.163	234	92	3219
25	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	0.895	243	158	3232
26	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1.467	187	47	4418
27	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	0.877	170	164	7402
28	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	0.983	199	133	4054
29	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	1.009	194	126	4070
30	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	0.845	245	174	7693
31	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1.042	150	118	5125
32	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	0.878	256	163	3706

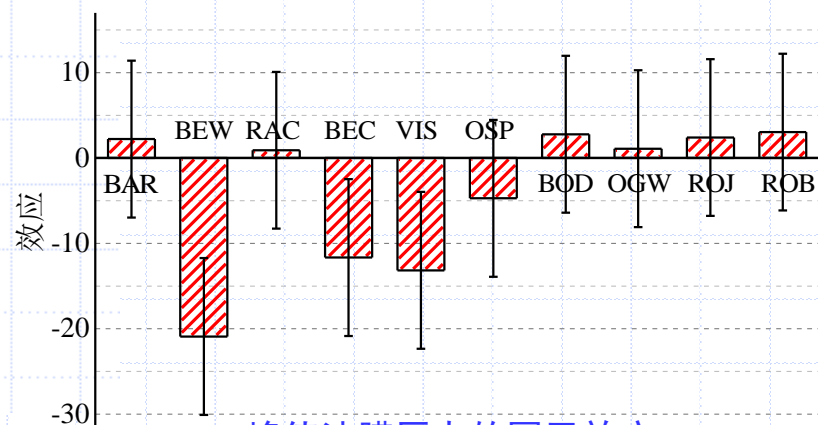
三、平衡率对主轴承润滑特性分析

3.4 因子筛选

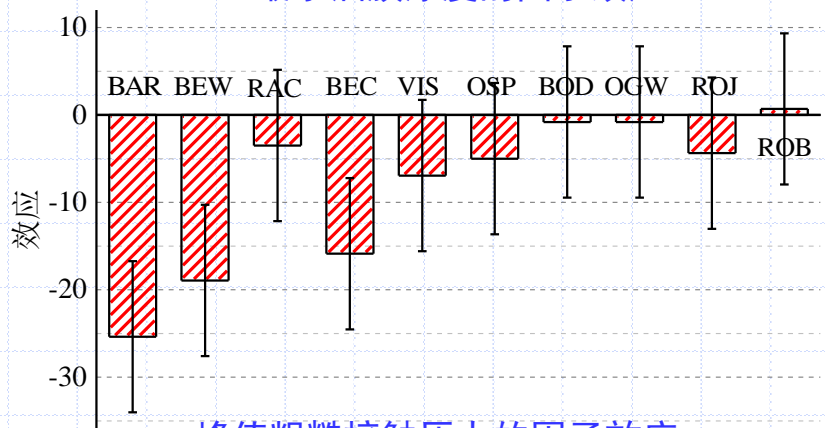
为了确定影响轴承润滑的主要因素，计算所有响应在95%置信区间的因子效应。



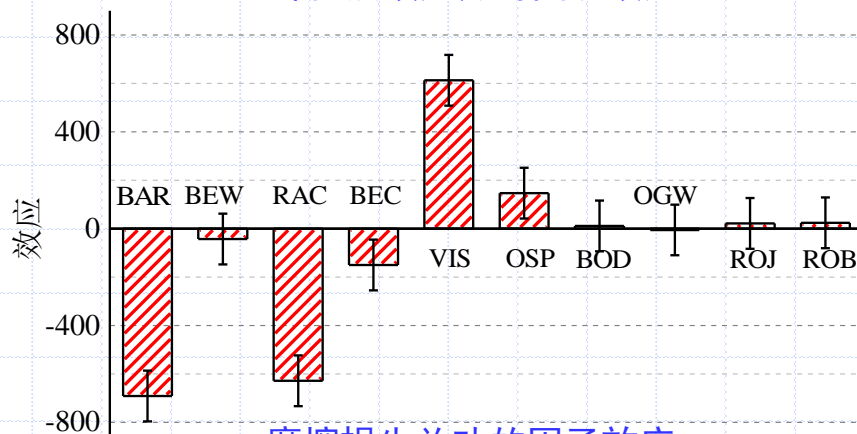
最小油膜厚度的因子效应



峰值油膜压力的因子效应



峰值粗糙接触压力的因子效应



摩擦损失总功的因子效应

推断出对所有响应影响显著的因子：

平衡率、轴承宽度、轴承间隙、轴瓦修型、机油粘度

三、平衡率对主轴承润滑特性分析

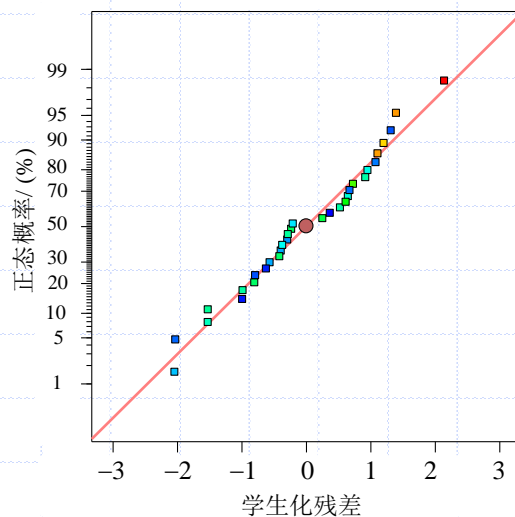
3.4 因子筛选

为了验证五个显著影响因子的有效性，建立五个因子的缩减回归模型并进行统计学分析。

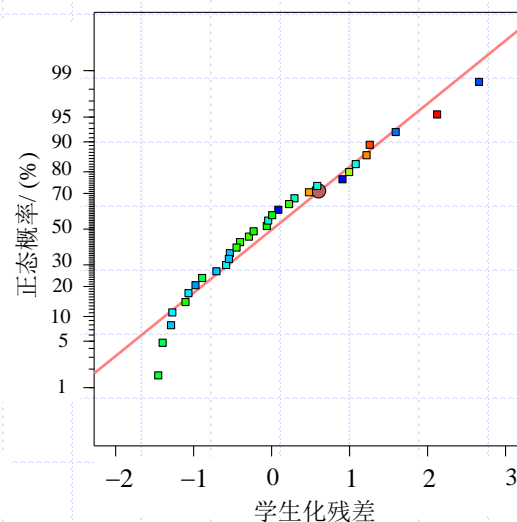
两个模型统计量对比

	全模型				缩减模型			
	MOFT	MOFP	PACP	AFPL	MOFT	MOFP	PACP	AFPL
R^2_{Adj}	0.758	0.661	0.789	0.961	0.735	0.623	0.763	0.944
R^2_{Adj}	0.642	0.499	0.689	0.942	0.685	0.550	0.717	0.933
R^2_{Pre}	0.437	0.213	0.510	0.908	0.600	0.429	0.640	0.915

- 对缩减模型的检验，验证了五个因子对所有响应影响显著。
- 确定显著影响因子：平衡率、轴承宽度、轴承间隙、轴瓦修型、机油粘度



最小油膜厚度残差图



摩擦损耗功的残差图



三、平衡率对主轴承润滑特性分析

3.5 影响权重分析

为进一步明确曲轴平衡率在五个显著因子的影响权重关系，以主轴承MB7为对象，以最小油膜厚度、最大油膜压力、峰值粗糙接触压力和平均摩擦损失功为评价指标，进行正交仿真试验。

仿真结果

试验	因子					响应			
	A	B	C	D	E	MOFT/ μm	MOFP/ MPa	PACP/ MPa	AFPL /W
1	1	1	1	3	2	1.131	170	98	4372
2	1	2	4	1	5	1.143	168	96	4728
3	1	3	5	2	1	1.396	153	55	4329
4	1	4	3	5	4	1.017	217	124	4641
5	1	5	2	4	3	1.001	197	128	3451
6	2	1	5	1	3	1.163	174	92	3916
7	2	2	1	4	4	1.223	144	81	5475
8	2	3	3	3	5	1.245	147	77	3971
9	2	4	2	2	2	0.966	161	138	4177
10	2	5	4	5	1	0.971	222	136	6124
11	3	1	2	5	5	0.835	194	178	4640
12	3	2	3	2	3	1.057	193	115	4257
13	3	3	4	4	2	0.907	172	155	6261
14	3	4	1	1	1	0.865	189	168	6244
15	3	5	5	3	4	1.054	162	115	5779
16	4	1	3	4	1	1.028	185	122	3952
17	4	2	5	5	2	1.098	212	105	3957
18	4	3	2	1	4	1.091	170	107	4096
19	4	4	4	3	3	1.033	212	120	3964
20	4	5	1	2	5	1.041	203	118	3800
21	5	1	4	2	4	1.037	179	119	6374
22	5	2	2	3	1	1.123	153	100	4648
23	5	3	1	5	3	1.019	164	124	4789
24	5	4	5	4	5	1.064	171	113	4594
25	5	5	3	1	2	1.008	175	126	4622

因子-水平表

影响因子	水平1	水平2	水平3	水平4	水平5
A 平衡率/(%)	80	70	50	90	60
B 轴承宽度/mm	46	48	47	44	45
C 轴承间隙/μm	50	80	70	40	60
D 轴瓦修型/μm	2	5	4	3	0
E 机油粘度	0W40	20W30	5W20	5W40	20W10



三、平衡率对主轴承润滑特性分析

3.5 影响权重分析

最小油膜厚度:

平衡率、轴承间隙、轴承宽度、轴瓦修型、机油粘度;

最大油膜压力:

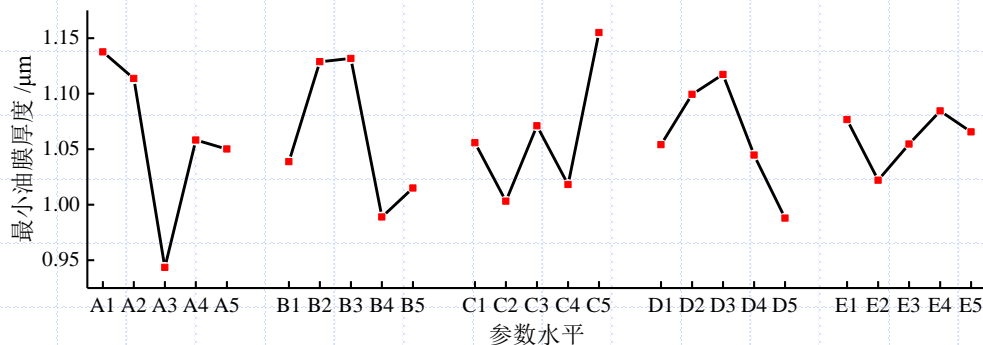
轴瓦修型、轴承宽度、平衡率、轴承间隙、机油粘度;

峰值粗糙接触压力:

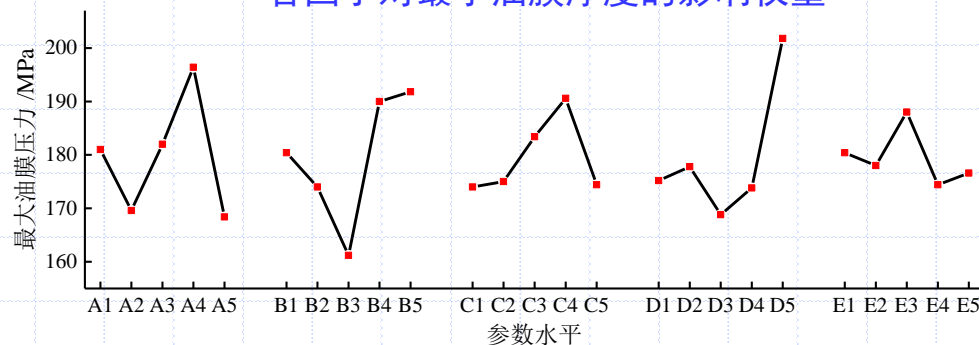
平衡率、轴承间隙、轴承宽度、轴瓦修型、机油粘度;

平均摩擦损失功:

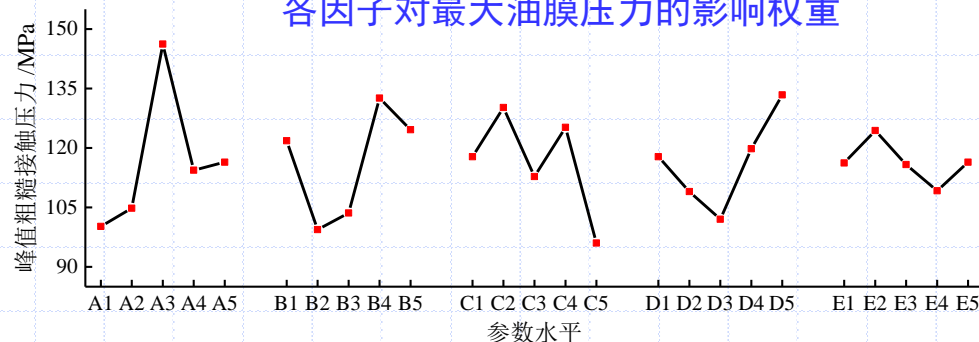
平衡率、轴承间隙、机油粘度、轴瓦修型、轴承宽度。



各因子对最小油膜厚度的影响权重



各因子对最大油膜压力的影响权重

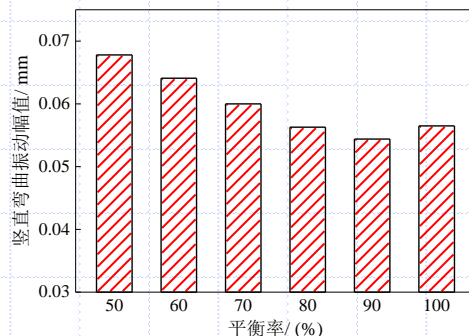
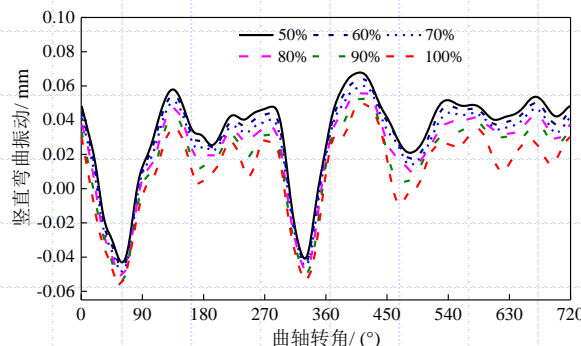




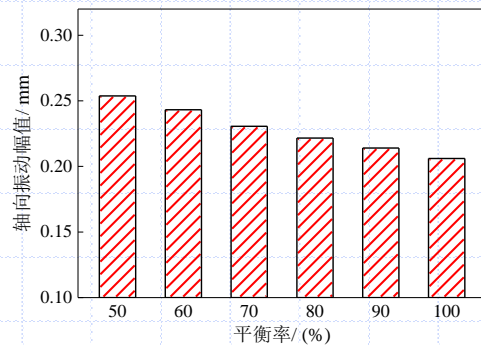
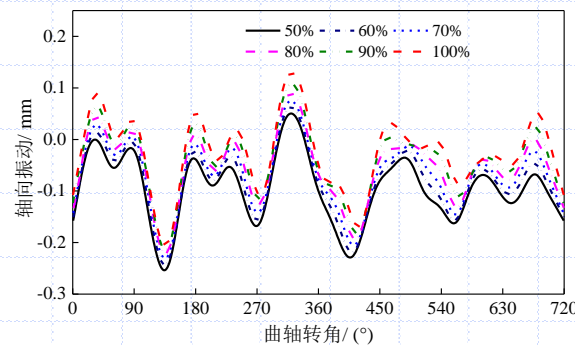
四、平衡率对曲轴振动特性分析

4.1 振动特性分析

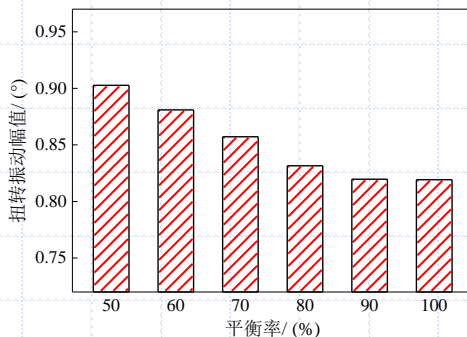
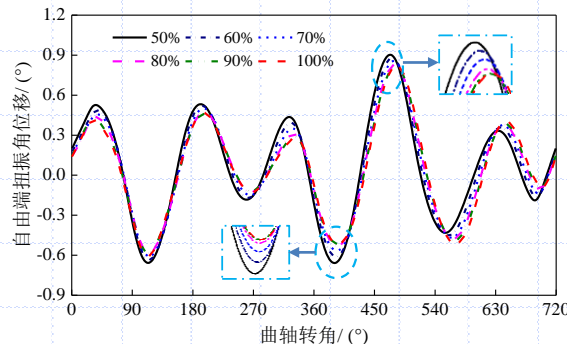
- 以主轴颈MB7中间节点和曲轴自由端节点为研究对象，进一步分析不同的平衡率对曲轴水平和竖直弯曲振动、轴向振动和自由端扭转振动的影响。
- 分析看出曲轴配置合适的平衡重能有效抑制曲轴的三维振动。



不同平衡率下竖直弯曲振动时变曲线和幅值



不同平衡率下轴向时变曲线和幅值



不同平衡率下自由端扭转时变曲线和幅值



四、平衡率对曲轴振动特性分析

仿真结果

4.2 影响权重分析

为进一步分析曲轴平衡率对振动特性的影响权重，以第3章筛选的五个因子作为影响因素进行正交试验。以水平和竖直弯曲振动、轴向振动和自由端扭转振动为评价指标，进行正交仿真试验。

因子-水平表

影响因子	水平1	水平2	水平3	水平4	水平5
A 平衡率 / (%)	60	90	50	70	80
B 轴承宽度 /mm	45	44	47	48	46
C 轴承间隙 / μm	60	40	70	80	50
D 轴瓦修型 / μm	0	3	4	5	2
E 机油粘度	20W10	5W40	5W20	20W30	0W40

试验	因子					响应			
	A	B	C	D	E	水平弯振/mm	竖直弯振/mm	轴向振动/mm	扭转振动/($^{\circ}$)
1	1	1	4	5	2	0.0589	0.1104	0.3167	0.917
2	1	2	5	4	1	0.0490	0.0825	0.3315	0.914
3	1	3	1	3	5	0.0515	0.0915	0.3244	0.9097
4	1	4	2	2	4	0.0559	0.0708	0.3108	0.9111
5	1	5	3	1	3	0.0547	0.1011	0.3240	0.9167
6	2	1	1	4	3	0.0559	0.0782	0.2715	0.922
7	2	2	2	3	2	0.0518	0.0575	0.2632	0.8846
8	2	3	3	2	1	0.0597	0.0857	0.2626	0.9266
9	2	4	4	1	5	0.0630	0.0916	0.2524	0.9285
10	2	5	5	5	4	0.0521	0.0672	0.2695	0.898
11	3	1	2	1	1	0.0581	0.0726	0.3248	0.9389
12	3	2	3	5	5	0.0568	0.1035	0.3405	0.9325
13	3	3	4	4	4	0.0608	0.1156	0.3286	0.9296
14	3	4	5	3	3	0.0501	0.0851	0.3332	0.931
15	3	5	1	2	2	0.0531	0.0932	0.3351	0.9279
16	4	1	3	3	4	0.0538	0.0961	0.3089	0.9155
17	4	2	4	2	3	0.0581	0.1060	0.3016	0.929
18	4	3	5	1	2	0.0490	0.0750	0.3022	0.895
19	4	4	1	5	1	0.0504	0.0862	0.3076	0.904
20	4	5	2	4	5	0.0540	0.0672	0.2979	0.895
21	5	1	5	2	5	0.0502	0.0717	0.2919	0.894
22	5	2	1	1	4	0.0516	0.0805	0.2945	0.906
23	5	3	2	5	3	0.0522	0.0623	0.2778	0.882
24	5	4	3	4	2	0.0549	0.0901	0.2839	0.914
25	5	5	4	3	1	0.0609	0.0992	0.2731	0.933



四、平衡率对曲轴振动特性分析

4.2 影响权重分析

水平弯曲振动:

轴承间隙、平衡率、机油粘度、轴承宽度、轴瓦修型;

竖直弯曲振动:

轴承间隙、平衡率、轴瓦修型、机油粘度、轴承宽度;

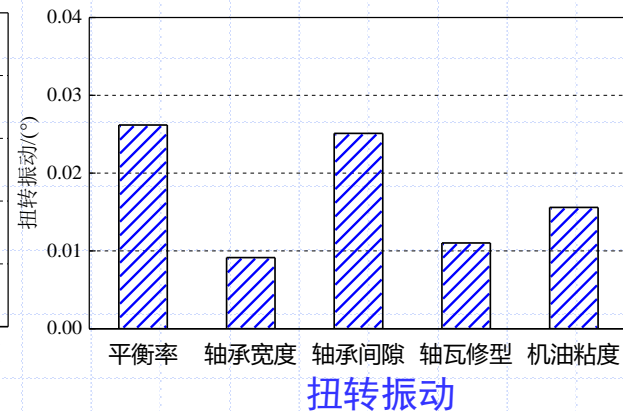
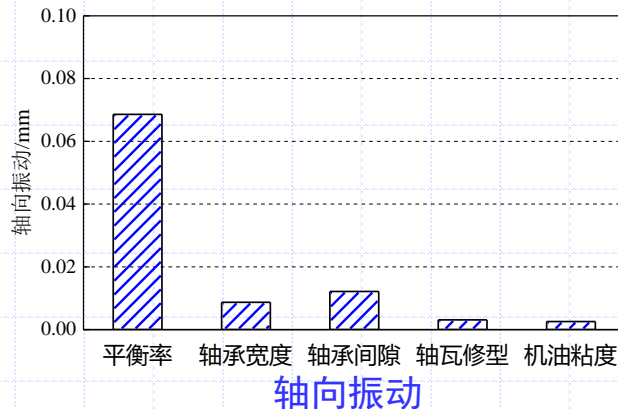
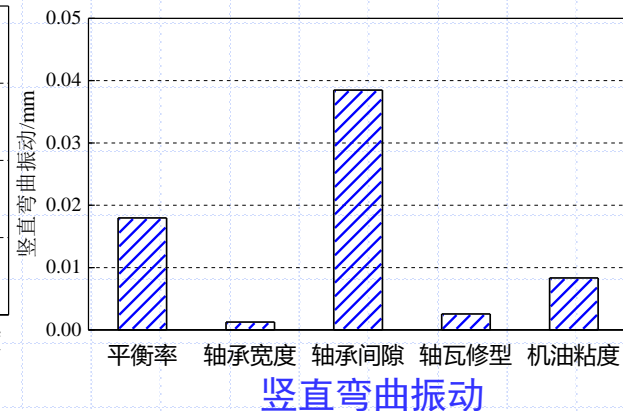
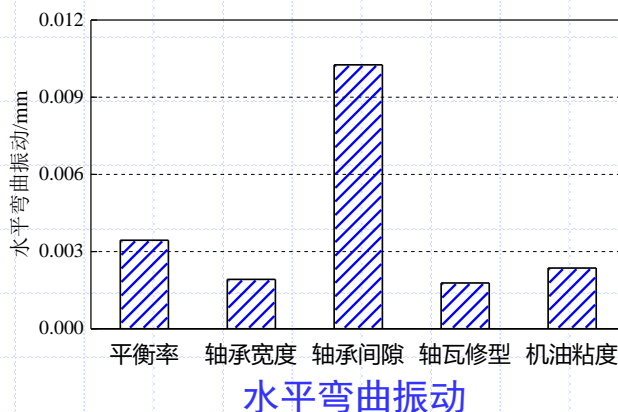
轴向振动:

平衡率、轴承间隙、轴承宽度、轴瓦修型、机油粘度;

扭转振动:

平衡率、轴承间隙、机油粘度、轴瓦修型、轴承宽度。

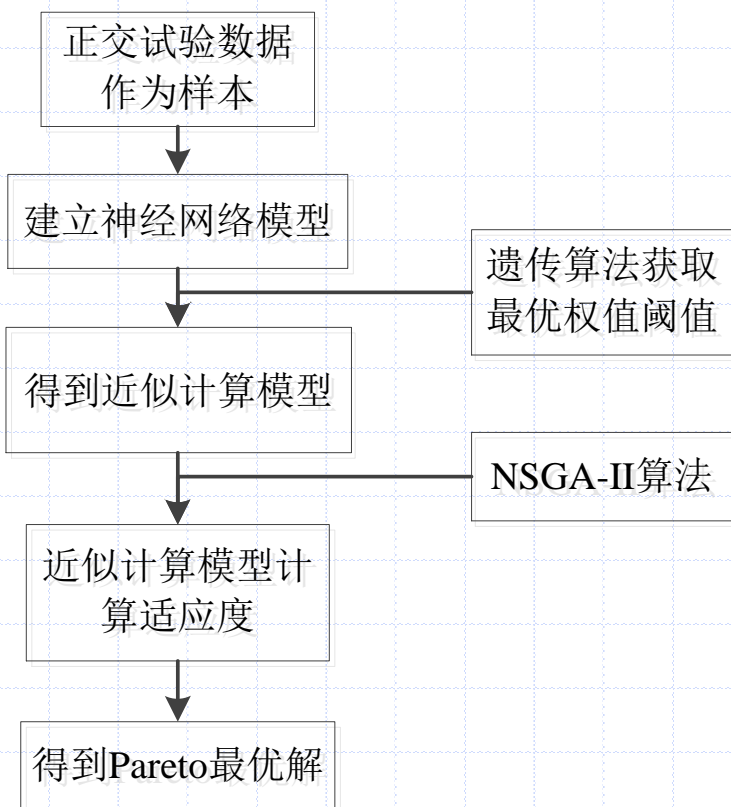
结论: 曲轴平衡率对润滑和振动特性影响较大





五、神经网络遗传算法的多目标优化

5.1 优化模型设计



优化模型设计

设计变量

设计变量	初始值	取值范围
平衡率/ (%)	70	[50, 90]
轴承宽度/ mm	44	[44, 48]
轴承间隙/ μm	56	[40, 80]
轴瓦修型/ μm	0	[0, 5]
机油粘度/ mPa.s	9.011	[7.310, 11.685]

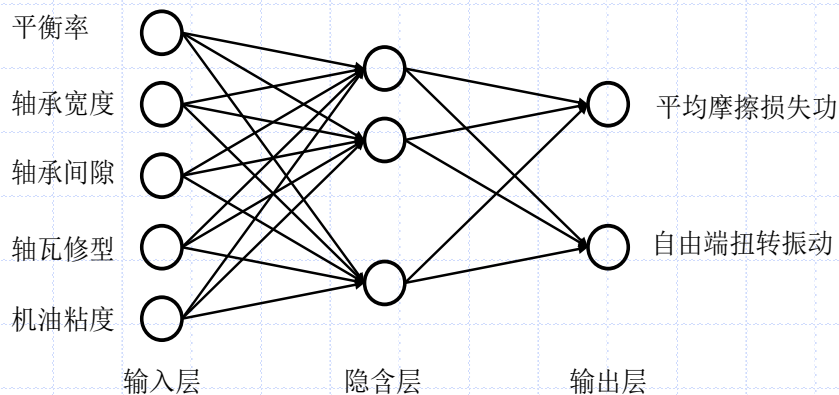
样本点与结果

样本点	设计变量					目标	
	平衡率/ (%)	轴承宽度 / mm	轴承间隙 / μm	轴瓦修型 / μm	机油粘度 / mPa.s	平均摩擦 损失功/ W	自由端扭 转角度/ ($^\circ$)
1	80	46	50	4	9.375	4372	0.894
2	80	48	40	2	8.39	4728	0.88
3	80	47	60	5	10.47	4329	0.905
4	80	44	70	0	11.685	4641	0.916
5	80	45	80	3	7.31	3451	0.936
6	70	46	60	2	7.31	3916	0.908
7	70	48	50	3	11.685	5475	0.895
8	70	47	70	4	8.39	3971	0.914
.....							
47	80	44	60	0	9.375	4346	0.906
48	80	47	40	2	7.31	4362	0.882
49	80	48	70	5	11.685	4458	0.914
50	80	46	80	4	8.39	3639	0.933

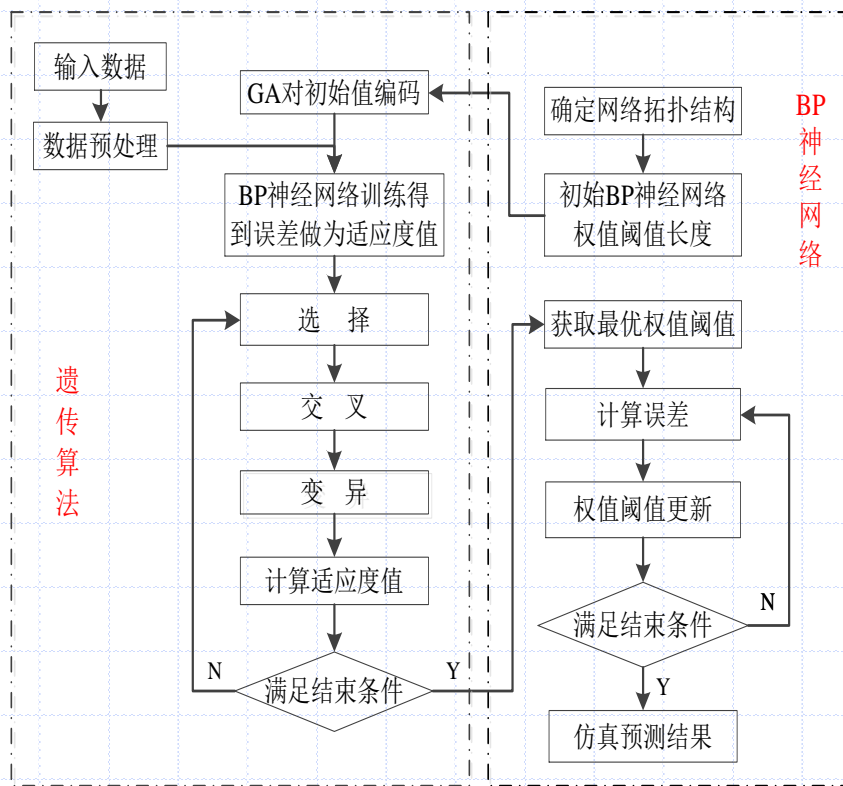
五、神经网络遗传算法的多目标优化

5.2 神经网络模型建立

- 前40组作为训练数据来构建网络，以后10组作为测试数据，神经网络的结构设置为5-9-2，即输入层有5个节点，输出层有2个节点，隐含层节点经过多次调试取为9。
- 遗传算法的种群规模为20次，迭代次数为50，交叉概率为0.9，变异概率为0.2。



BP神经网络模型

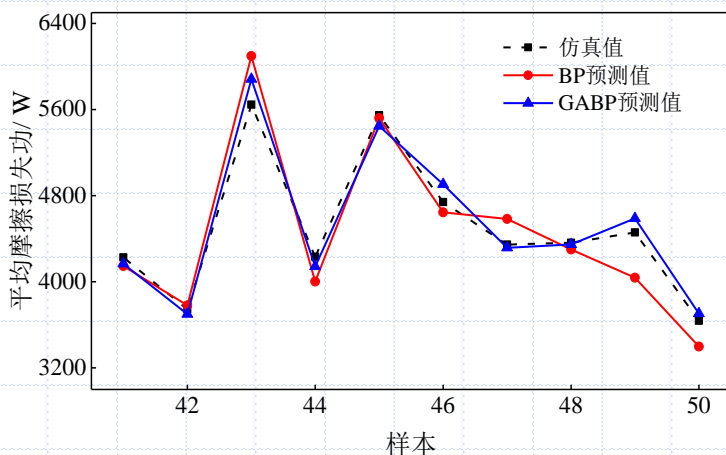


遗传算法优化BP神经网络流程图

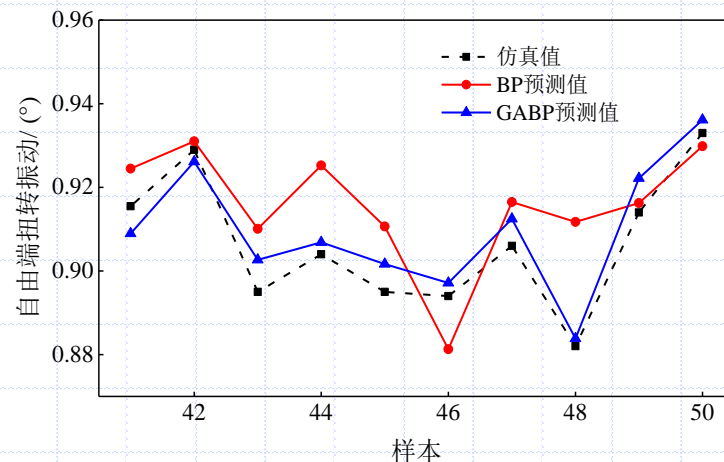
五、神经网络遗传算法的多目标优化

5.2 神经网络模型建立

- BP对平均摩擦损失功的预测的最大相对误差为10.2%，对自由端扭转振动预测的最大相对误差为3.3%。
- GABP对平均摩擦损失功的预测的最大相对误差为4.2%，对自由端扭转振动预测的最大相对误差为2.0%。
- **GABP**对平均摩擦损失功和自由端扭转振动的预测误差均小于5%。
- **GABP**模型比BP模型对样本的整体预测能力有明显提高，因此建立的遗传算法优化神经网络模型能满足多目标优化模型的需要。



平均摩擦损失功预测对比



自由端扭转振动预测对比

五、神经网络遗传算法的多目标优化

5.3 多目标模型建立

采用带精英策略的快速支配排序遗传算法(NSGA-II)对平均摩擦损失功和扭转振动进行多目标优化。

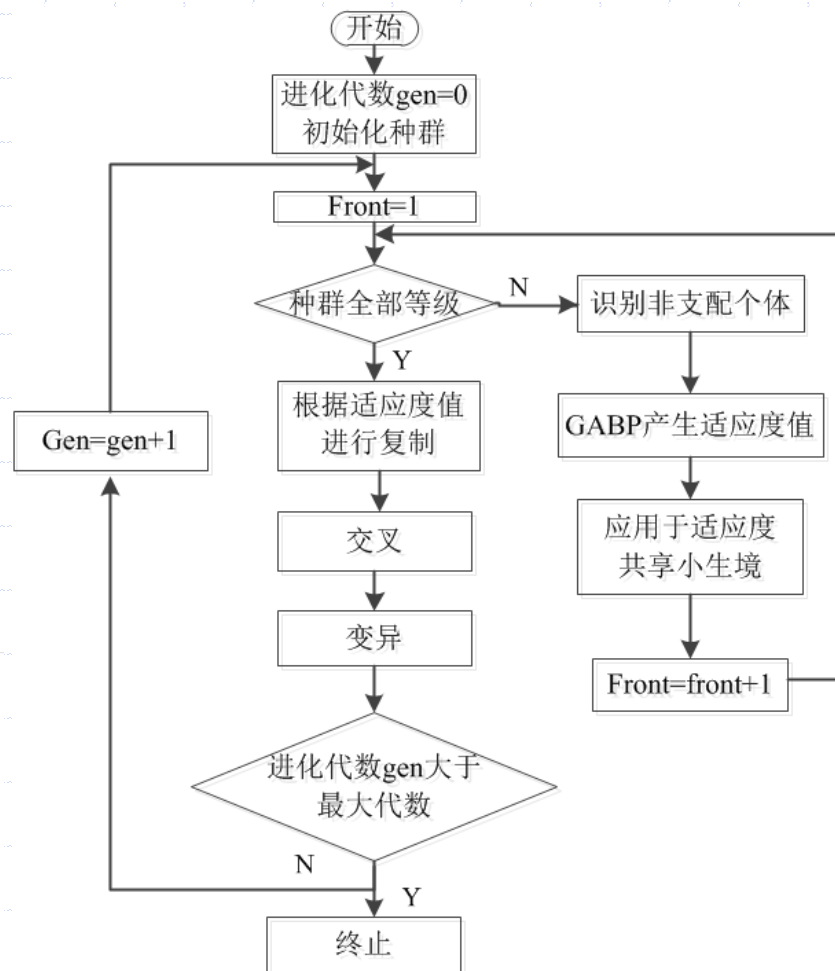
$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$$

$$\min[f_1(x), f_2(x)]$$

$$s.t. lb \leq x \leq ub$$

```

Fitnessfcn = @my_multi;
Nvars = 2;
Lb = [50, 44, 40, 0, 7.310];
Ub = [90, 48, 80, 5, 11.685];
A=[];b=[];
Aeq = []; beq = [];
Options = gaoptimset('Paretofraction', 0.3, 'Populationsize', 100, 'Generations', ...
    200, 'Stallgenlimit', 200, 'Tolfun', 1e-100, 'plotfncs', @ gaplotpareto);
[x, fval]= gamultiobj(fitnessfcn, nvars, A, b, Aeq, beq, lb, ub, options);
    
```

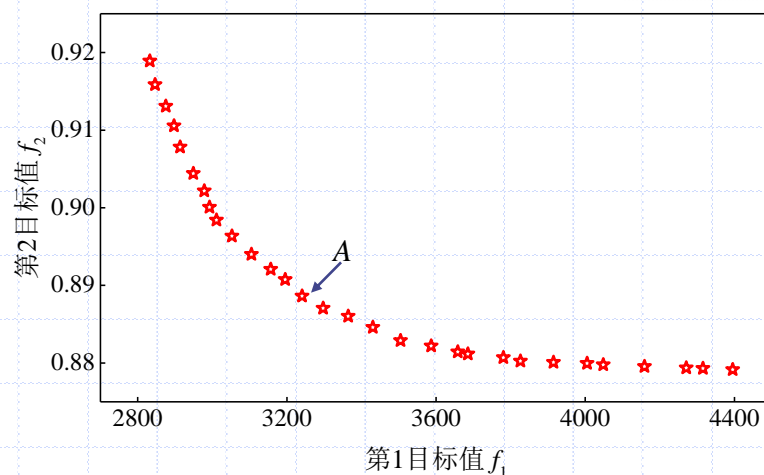


NSGA-II算法流程图

五、神经网络遗传算法的多目标优化

5.3 多目标模型建立

- 第一前端Pareto最优解分布均匀，最优解个数为30个，并且有平均摩擦损失功减小而扭转振动增大的规律。反映了同时以平均摩擦损失功和扭转振动为最小目标的矛盾性质，也验证了求解结果的有效性。



NSGA-II求解结果

- 最优参数:

平衡率/%	轴承宽度/mm	轴承间隙/ μm	轴瓦修型/ μm	机油粘度/mPa.s
85	48	58	4.2	7.8



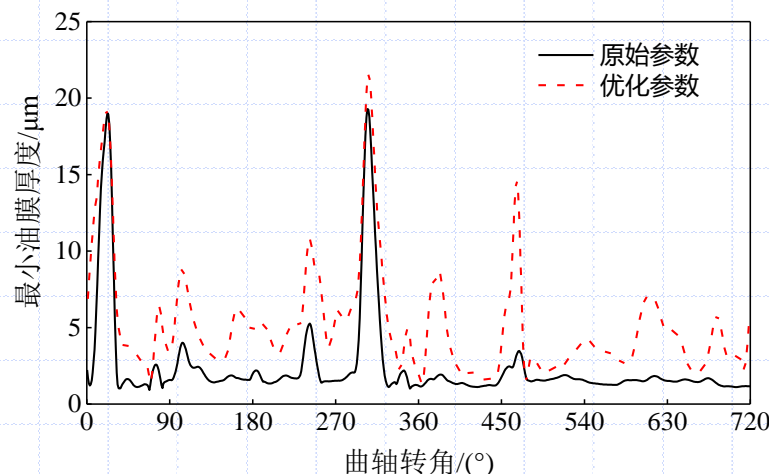
五、神经网络遗传算法的多目标优化

5.4 优化结果对比

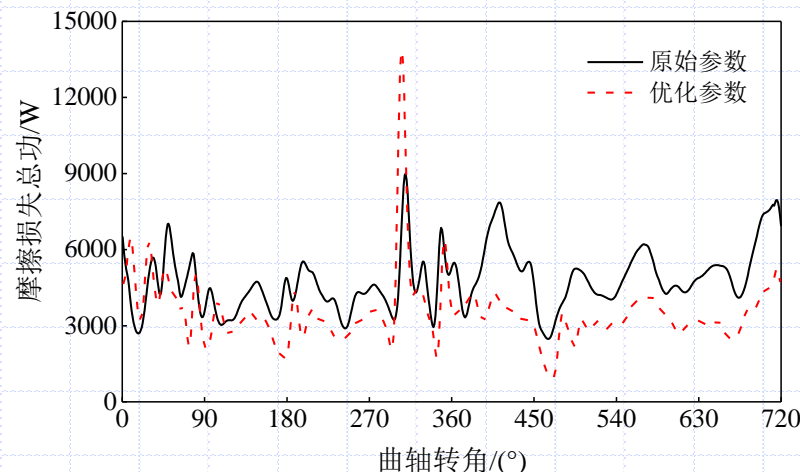
- ▶ 优化后的最小油膜厚度、峰值粗糙接触压力、摩擦损失总功、自由端扭转振动均有明显的改善；
- ▶ 自由端扭转振动减小了2%，平均摩擦损失功减小了25.7%，最小油膜厚度增加了24.4%。

优化前后结果对比

参数	原始参数	优化参数	变化率
最小油膜厚度/ μm	1.056	1.314	24.4%
最大油膜压力/MPa	217	174	19.8%
峰值粗糙接触压力/MPa	112	62	44.6%
平均摩擦损失功/W	4761	3536	25.7%
水平弯曲振动/mm	0.0492	0.0479	2.6%
竖直弯曲振动/mm	0.0813	0.707	13.0%
轴承振动/mm	0.314	0.2685	14.5%
自由端扭转振动/ $^{\circ}$	0.914	0.896	2.0%



优化前后的最小油膜厚度



优化前后的摩擦损失总功 2020/11/6



六、总结

- 在**AVL-PU**中建立曲轴轴承系统动力学和弹性流体动力润滑耦合的仿真模型，分析了曲轴平衡率对主轴承润滑性能和曲轴振动特性的影响。通过因子效应图、统计量分析、残差概率和极差等分析方法，发现了**曲轴平衡率对主轴承润滑和振动特性影响较大**；
- 利用正交试验数据作为样本，建立了五个设计变量与平均摩擦损失总功和自由端扭转振动之间的改进神经网络非线性关系，并将此非线性关系作为适应度函数，采用**NSGA-II**遗传算法对模型多目标优化。通过**优化前后的结果对比**，发现优化后的曲轴主轴承润滑和振动特性有了**明显的改善**，为大功率柴油机的强化设计提供了参考。



谢谢！

请提出宝贵意见。