

叶轮技术研究所 科研介绍 ——气体动压悬浮涡轮冷却器

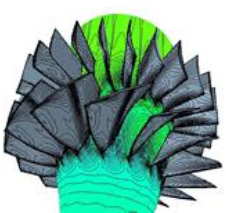
北京石油化工学院
【机械工程学院——过程流体机械方向】

<http://www.bipt.edu.cn/pub/jxgc/>

汇报人：肖云峰

13911539129

xiaoyunfeng@bipt.edu.cn



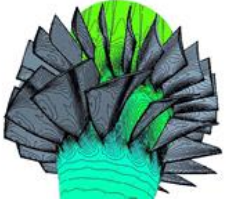
汇报大纲

一、叶轮技术研究所情况简介

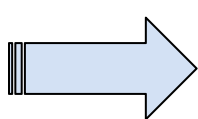
二、已成功完成的课题（**52项**）

三、气体动压悬浮涡轮冷却器整机技术

- ◆ 3.1 涡轮冷却器整机技术
- ◆ 3.2 研究工具
- ◆ 3.3 初步一维气动设计
- ◆ 3.4 轴系布局与优化
- ◆ 3.5 关键零部件的动静强度
- ◆ 3.6 整机气动仿真与结构优化



一、“叶轮技术研究所”简介



2006年，“特种透平机械研究所”成立；
2014年正式命名为“叶轮技术研究所”！

http://meche.bipt.edu.cn/singlePage.aspx?gid=50000&sid=50400&id=50403

化工学院 特种透平机械研...

 **机械工程学院**
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

学笃通变 敦正求实

首页 | 学院概况 | 师资队伍 | 人才培养 | 学科科研 | 实验室建设 | 学生工作 | 招生招聘 | 党群工作 | 快速导航

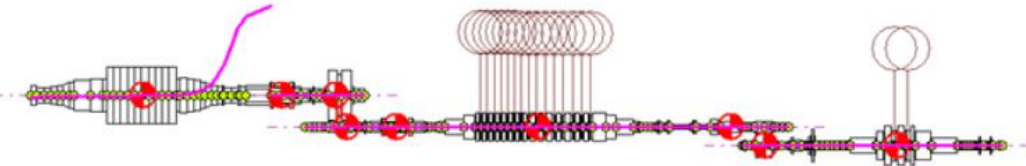
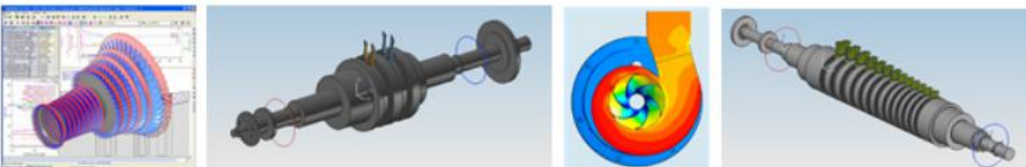
学科科研

- ▶ 学科概况
- ▶ 研究选题方向
- ▶ 项目与成果
- ▶ 科研机构
 - 能源工程先进连接技术北..
 - 光机电装备技术北京市重..
 - 特种透平机械研究所
 - 多相流高效分离技术与设..
 - 机器人应用技术研究
 - 化工设备设计研究所

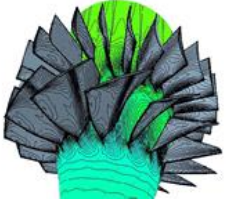
特种透平机械研究所

您现在的位置：学科科研>科研机构

北京石油化工学院特种透平机械研究所
(Research Institute of Special Turbine Machinery in BIPT, RIT)



2006年
成立



定型

2016

• 高速动压气浮风机、涡轮整机研制

2015

• 多机组动力学耦合数值方案开发

2014

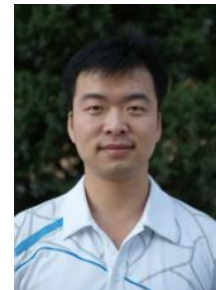
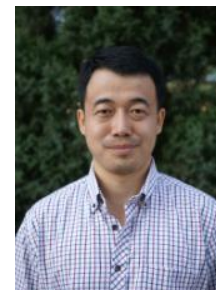
• 涡轮与风机的叶型及整机开发

2013

• 轴系转子动力学分析

2012

• 叶片及转子疲劳断裂分析



发展

2011

• 叶轮部件焊接应力应变数值计算

2010

• 转子动力学分析

2009

• 透平系统工艺热力学计算

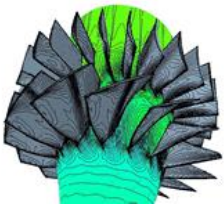


成立 2006

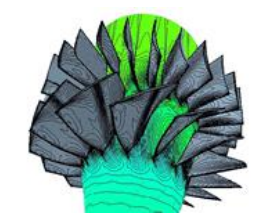
• 叶轮动静强度分析

• 透平的气动性能计算、优化



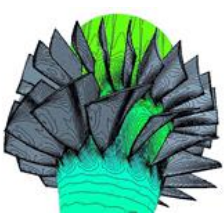


	吕涛	李爱琴	张璟	张志莲	刘洋	杜文海	肖云峰
年龄	58	44	40	42	42	36	44
学位 职称	博士 副教授	博士 讲师	博士 讲师	博士 副教授	博士 讲师	博士 副教授	硕士 副教授
毕业 院校	西安交通 大学	北京理工 大学	中科院	北京化工 大学	北京理工 大学	比利时烈日 大学	北京化工 大学
主要 研究	疲劳断裂、 制造成型	气动噪声	系统热力学	优化算法、 叶型开发	燃烧	气动程序开 发、仿真	轴系转子动 力学、整机

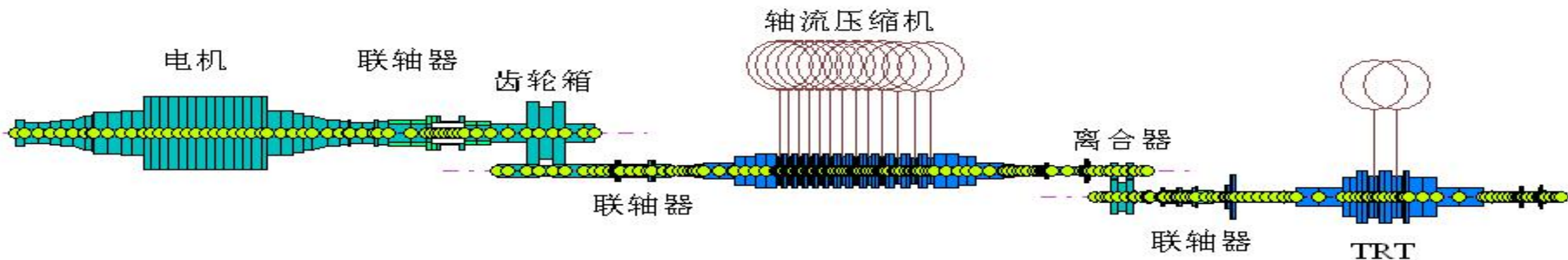
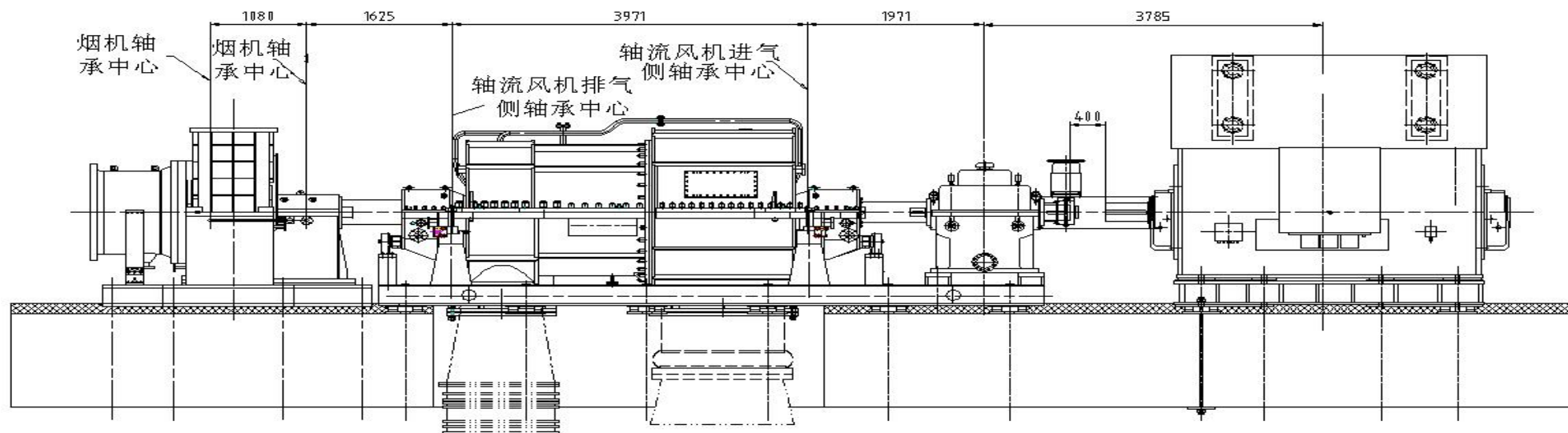


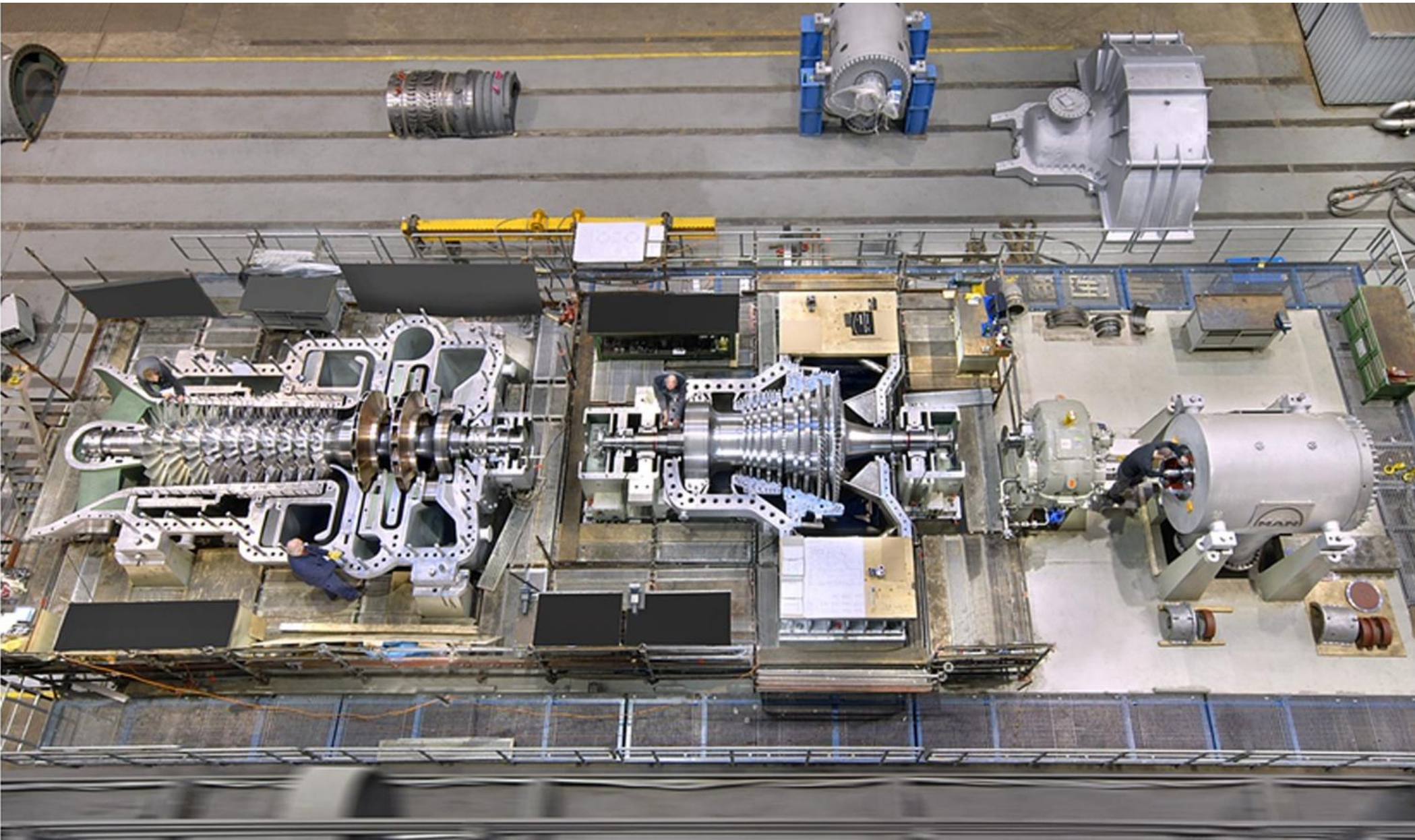
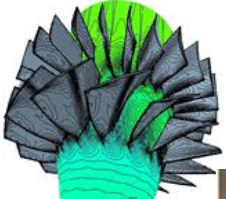
二、已成功完成的科研课题（52项）

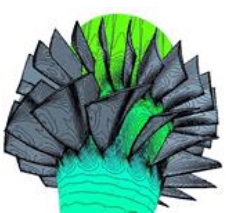
合同编号	合同名称	负责人	签订日期	甲方名称
H2020-111	燃烧喷嘴操作参数对燃烧特性影响的数值模拟研究	李爱琴	2020/10/10	中国科学院工程热物理研究所
H2020-085	高压氮透平膨胀机叶型与流道开发	张志莲	2020/10/5	杭州杭氧膨胀机有限公司
H2020-084	新型天然气透平膨胀机研发	张志莲	2020/9/30	杭州杭氧膨胀机有限公司
H2020-033	超临界CO ₂ 压缩机通流结构工程设计	杜文海	2020/6/9	中国科学院工程热物理研究所
H2020-017	LQ-19涡轮冷却器优化改进设计	肖云峰	2020/5/12	贵州永红航空机械有限责任公司
H2020-016	基于空气动压轴承的三轮式涡轮冷却器开发	肖云峰	2020/5/12	贵州永红航空机械有限责任公司
H2019-064	焦化分馏塔（C202）整体吊装结构强度分析研究	吕涛	2019/9/3	北京燕化正邦设备检修有限公司
H2019-054	首台QD280燃气轮机发电机组轴系振动特性计算与评估	张志莲	2019/6/26	中国航发动力股份有限公司
H2019-031	新型氮透平膨胀机叶型与流道开发	肖云峰	2019/4/25	中国科学院理化技术研究所
H2019-002	小流量高压比离心压气机气动设计及数值模拟	杜文海	2019/1/15	中国科学院工程热物理研究所
H2018-109	增压级多型面耦合流动机理及优化设计方法研究	杜文海	2018/10/22	中国科学院工程热物理研究所
H17-120	气浮动压涡轮冷却器研制	肖云峰	2017/12/5	新乡航空工业（集团）有限公司
H17-024	轴系振动特性计算与评估	张志莲	2017/4/26	中航动力股份有限公司
H16-112	新型动压气浮增压涡轮开发	肖云峰	2016/11/14	贵州永红航空机械有限责任公司



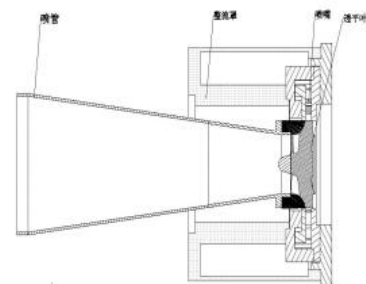
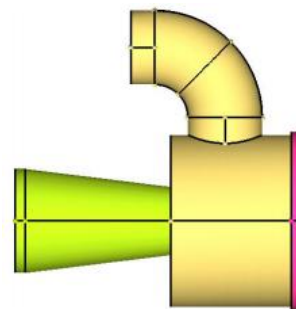
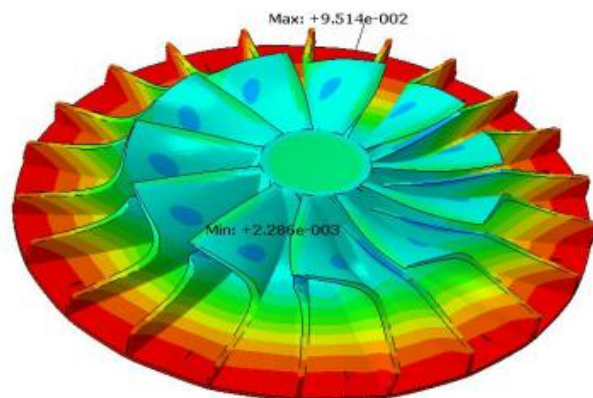
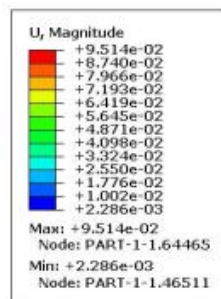
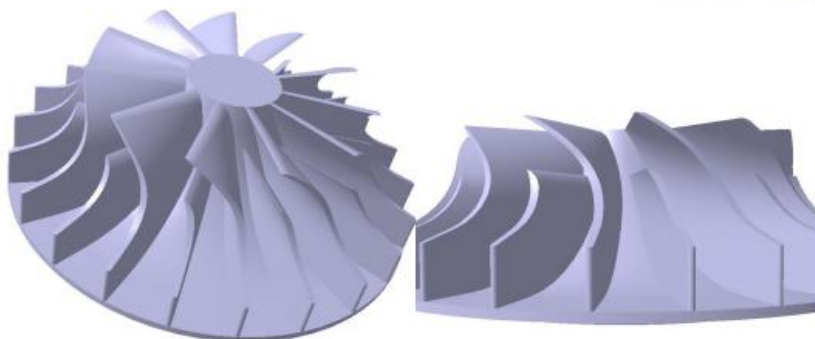
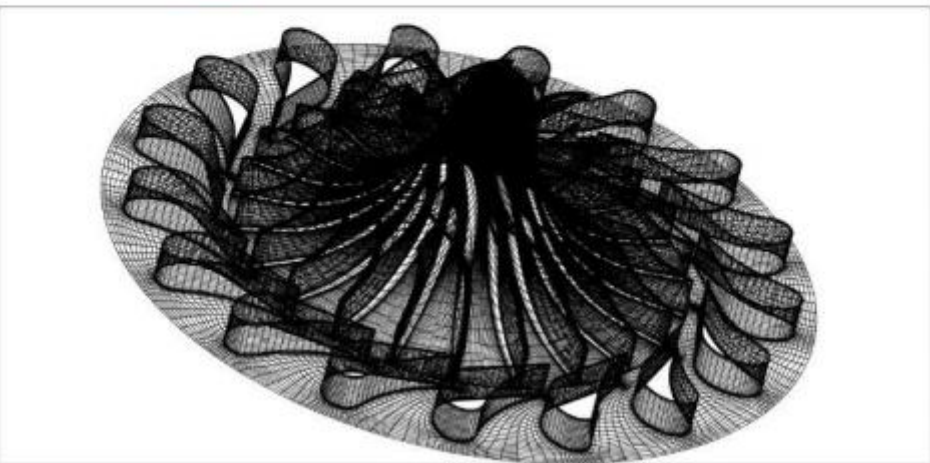
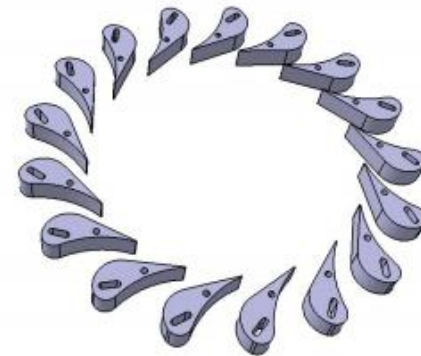
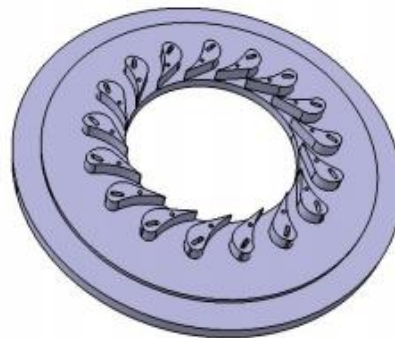
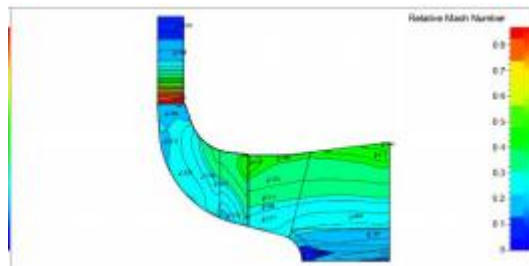
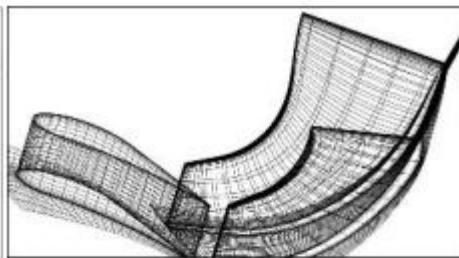
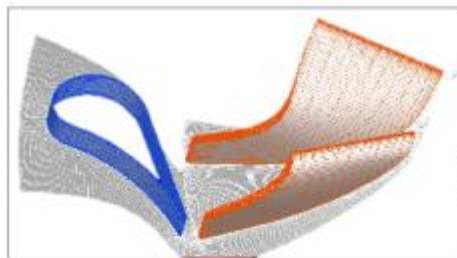
典型工作1：涡轮风机及电机多机组轴系转子动力学计算评估模型

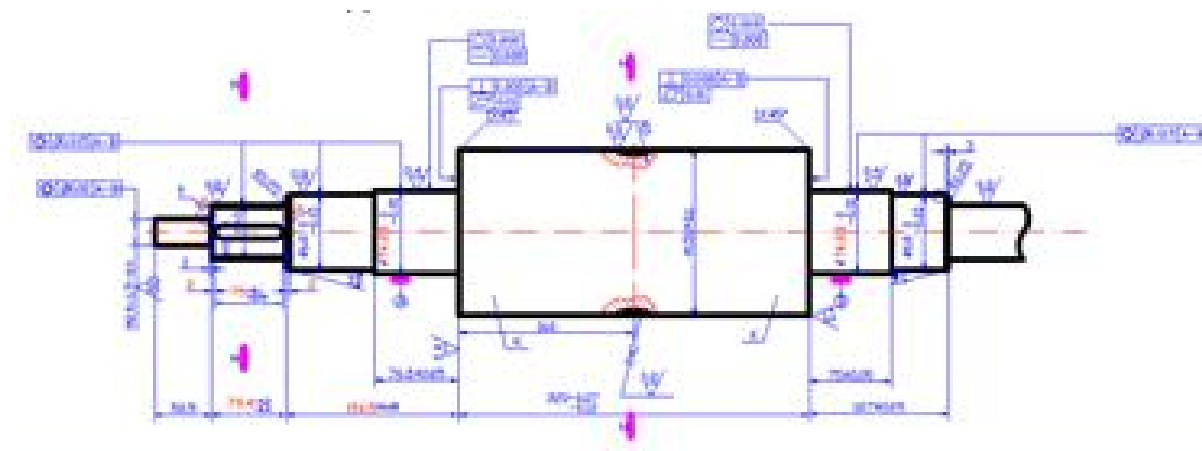
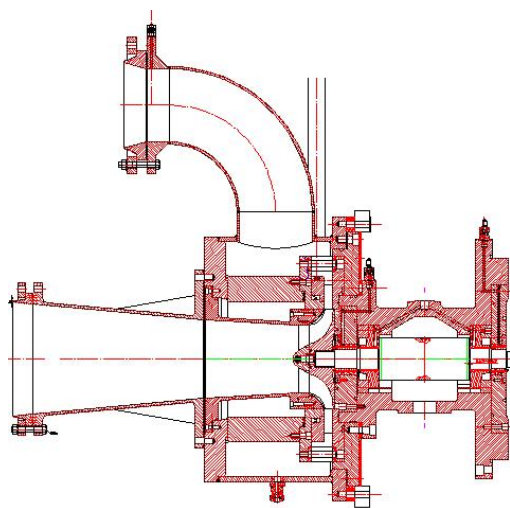
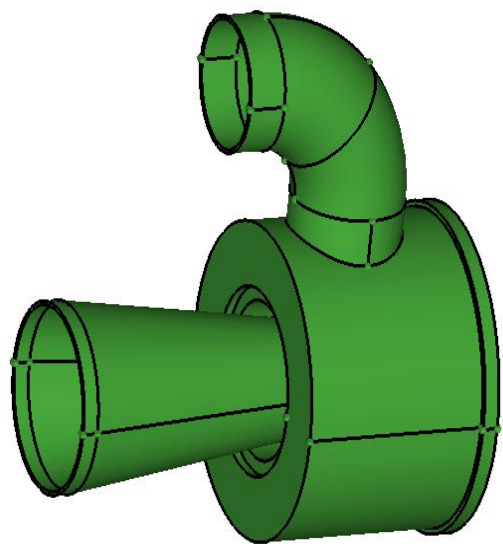
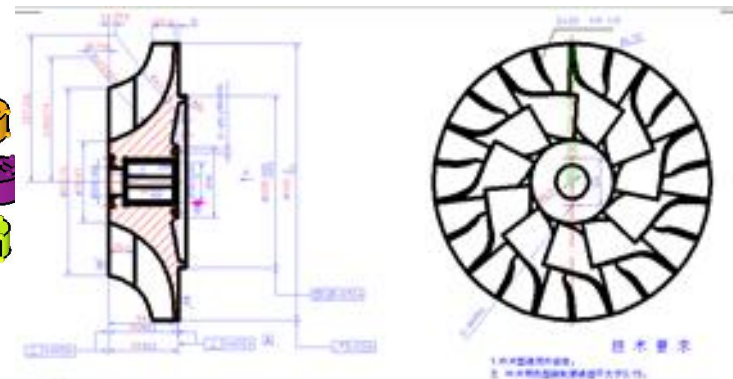
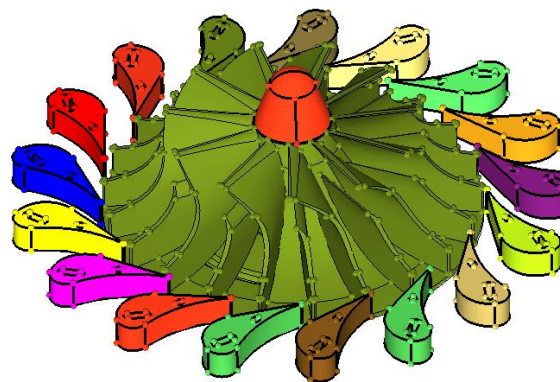
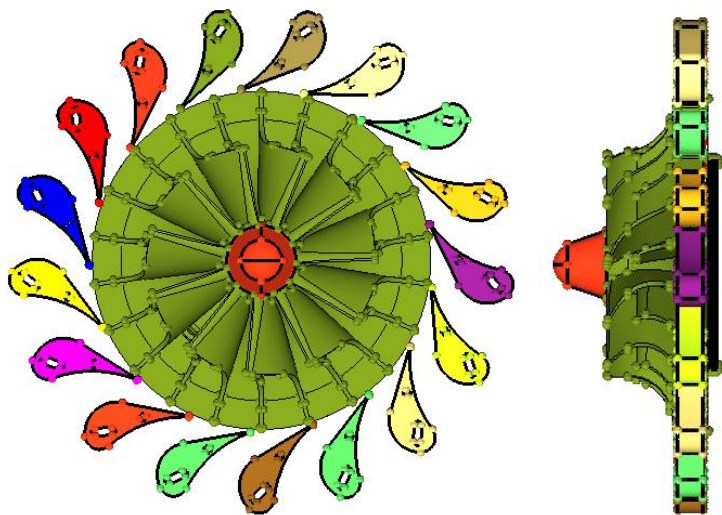
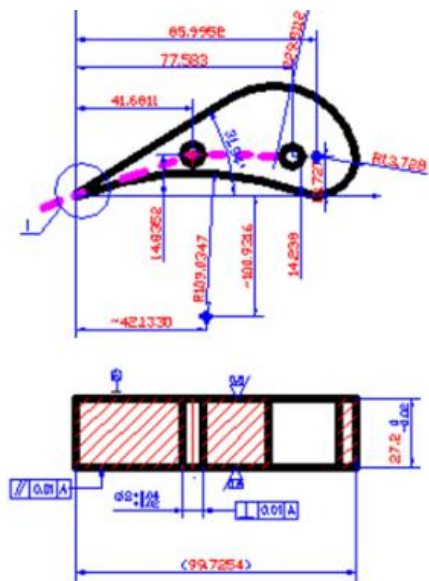
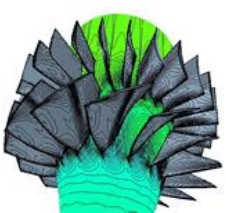


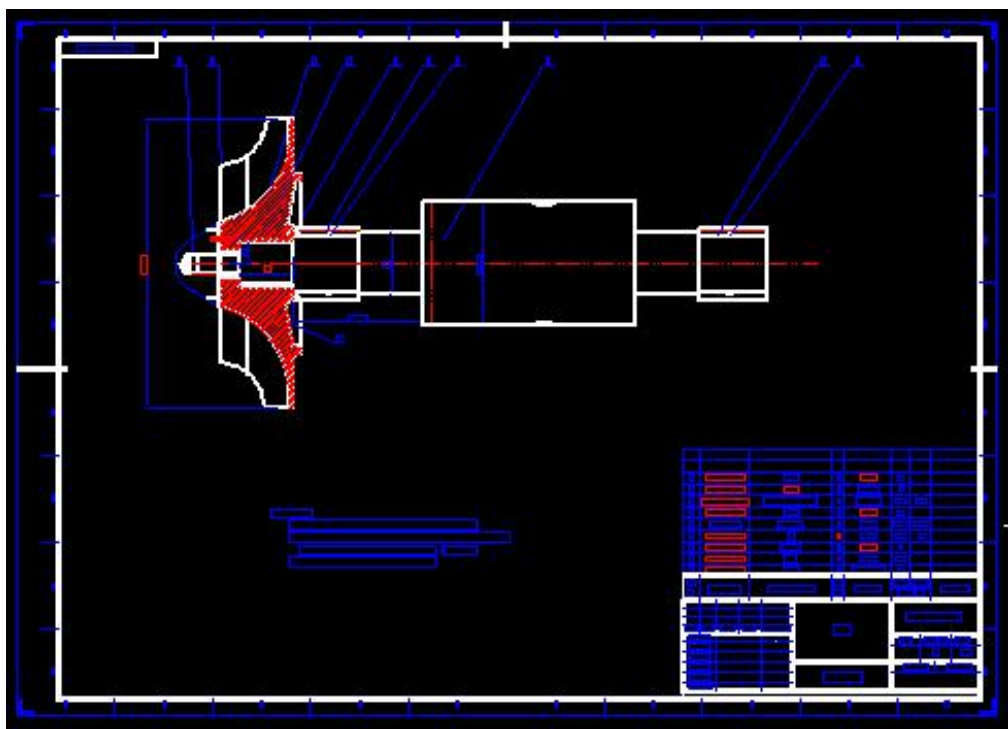
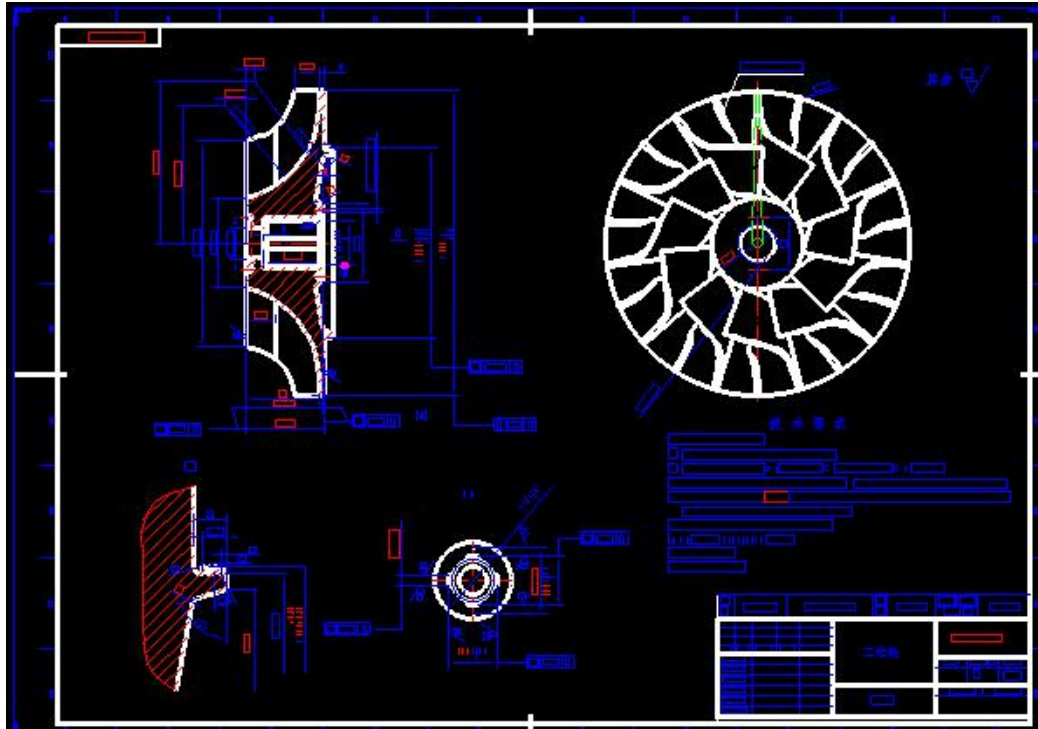
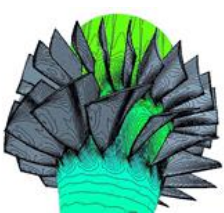




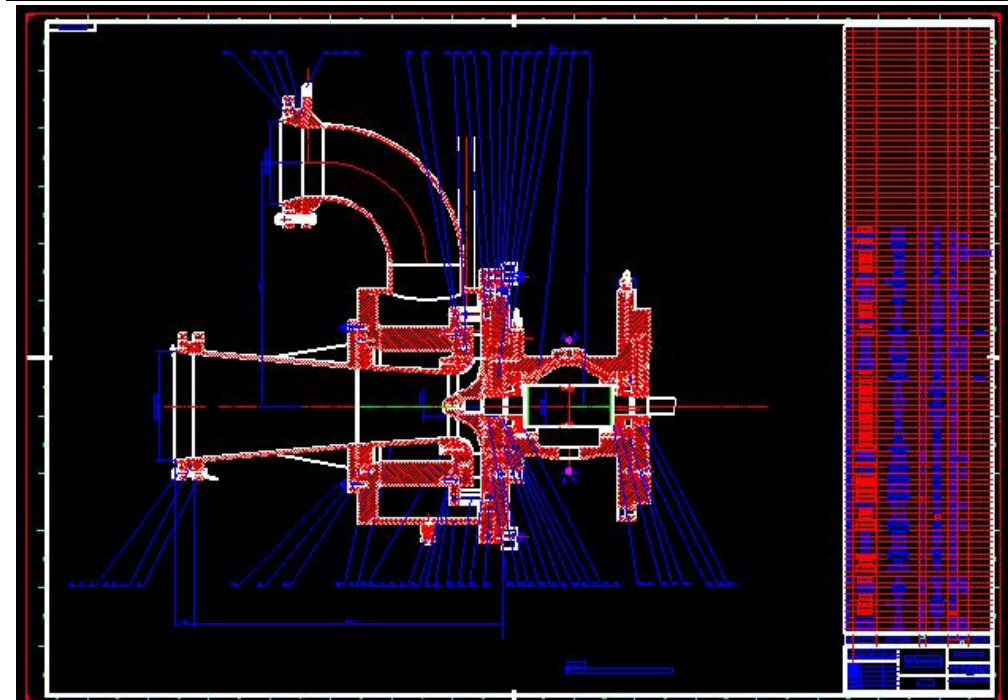
典型工作2：某向心涡轮的整机开发与气动仿真计算

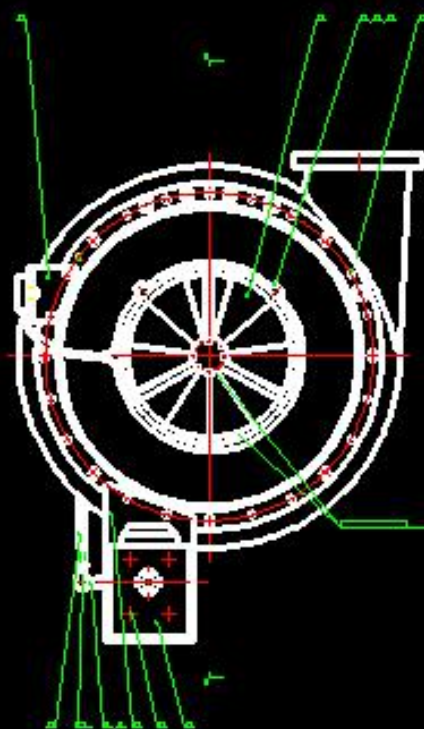
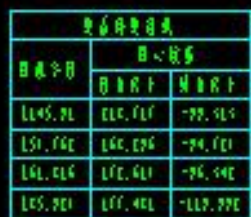






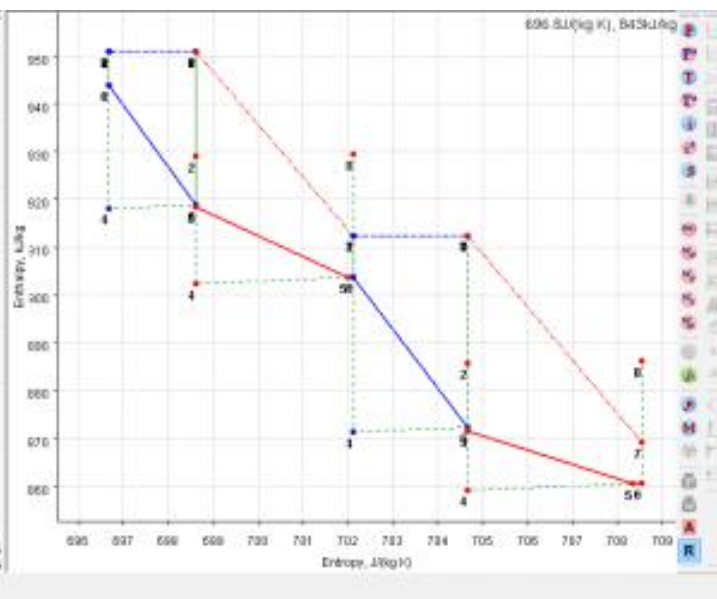
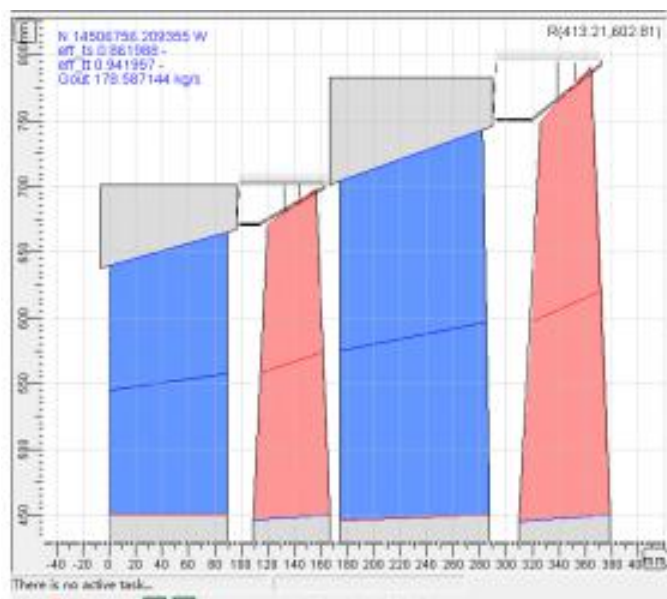
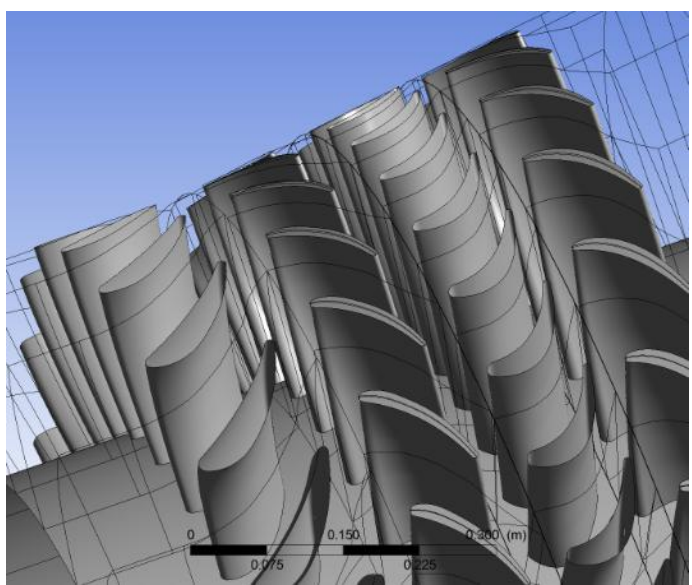
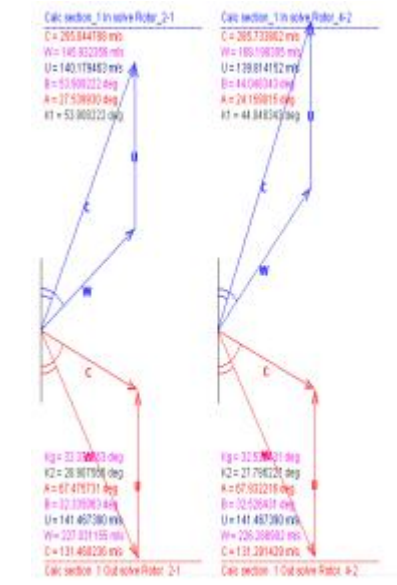
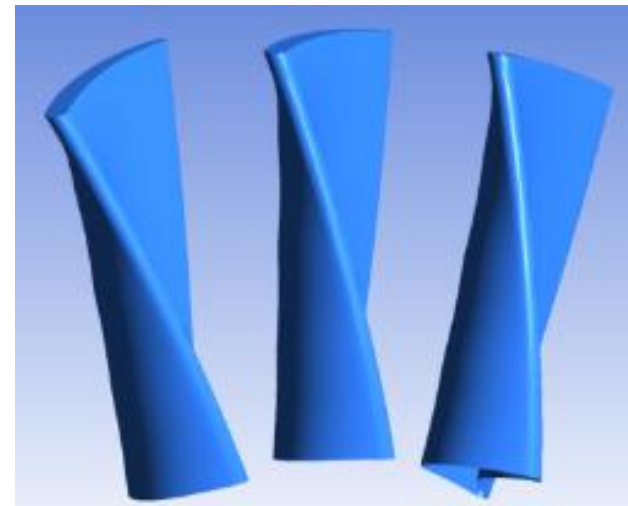
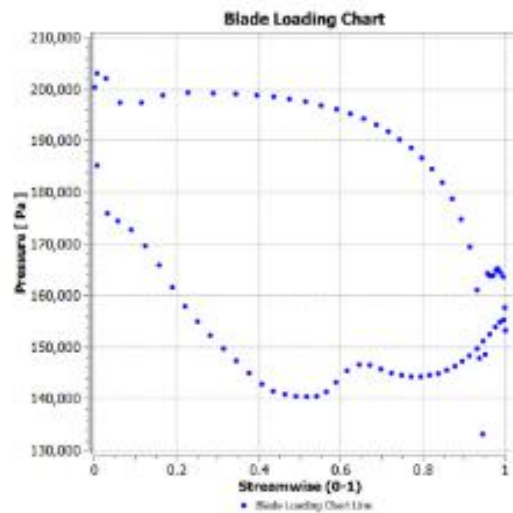
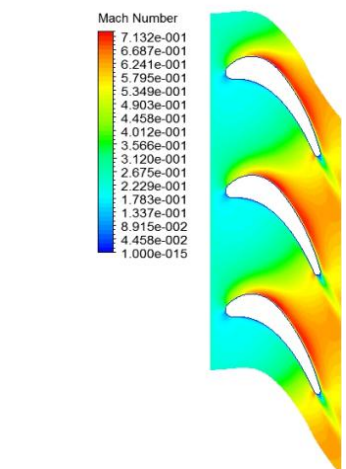
序号	名称	符号	单位	估取值	备注
1	喷嘴中气流的速度系数	φ	\	0.96	一般在 0.92~0.98
2	工作轮中气流速度系数	ψ	\	0.84	取值 0.75~0.9
3	工作轮叶高轮径比	l_1/D_1	\	0.04	一般在 0.03~0.1 之间取值
4	工作轮相对轴向间隙	δ/l_m	\	0.017	以 0.05 为界损失计算经验公式不同
5	喷嘴出口减窄系数	τ_N	\	0.98	考虑叶片厚度的减窄系数
6	工作轮进口减窄系数	τ_1	\	0.965	在 0.92~0.96 之间
7	工作轮出口减窄系数	τ_2	\	0.775	在 0.75~0.85 之间
8	喷嘴出口安装角	α_1	°	16	在 12°~16°
9	工作轮进口叶片角	β_1	°	90	一般满足进气时无冲击要求
10	工作轮出口叶片角	β_2	°	33	在 20°~45°
11	轮径比	μ	\	0.504	是一个比较重要的影响因素，必须经过方案比较确定

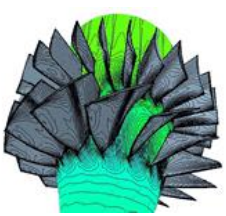






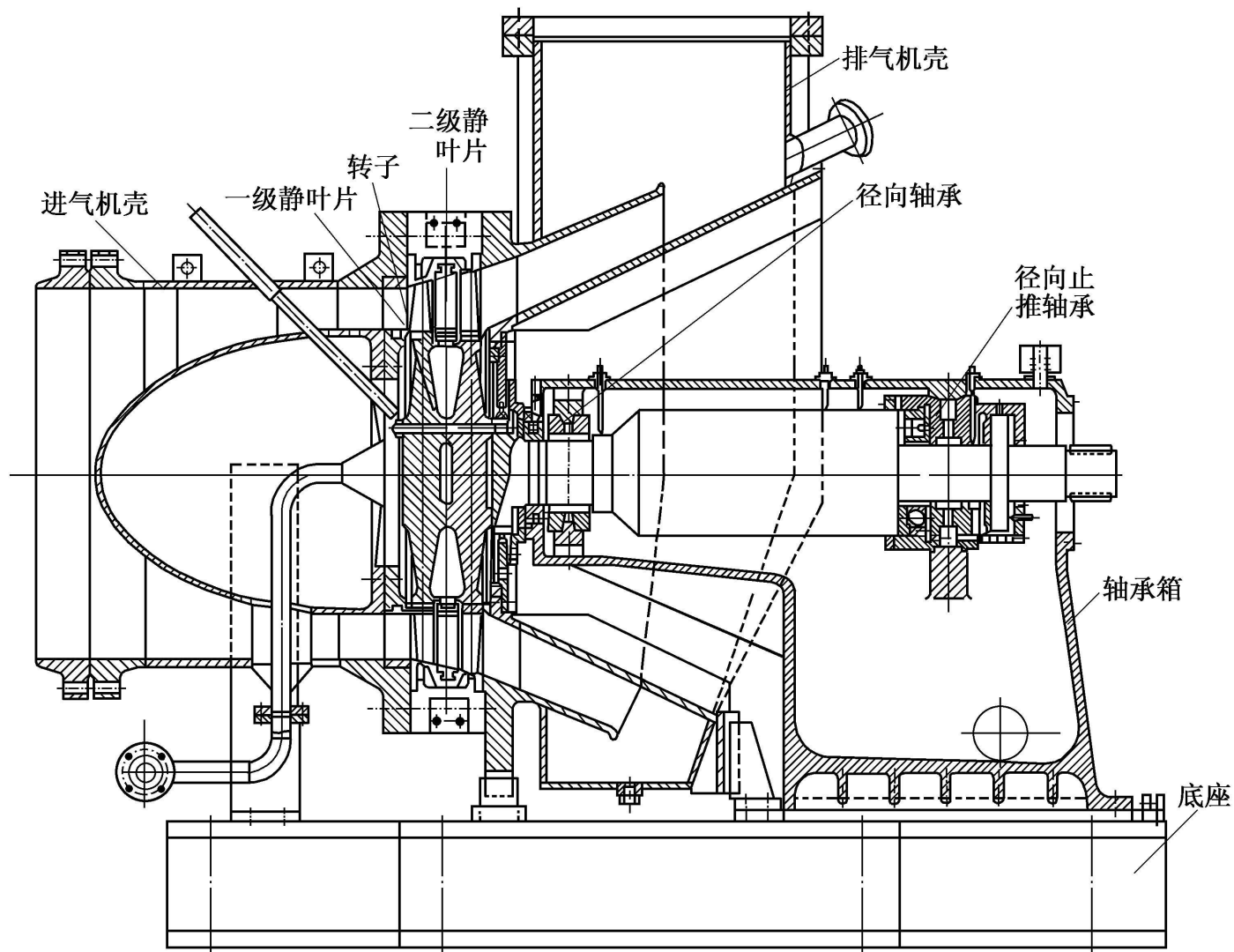
典型工作4：某轴流涡轮（烟机）的新叶型开发与气动优化

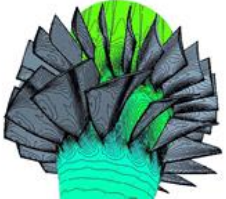




典型工作5：石化炼油厂烟气轮机整机研制

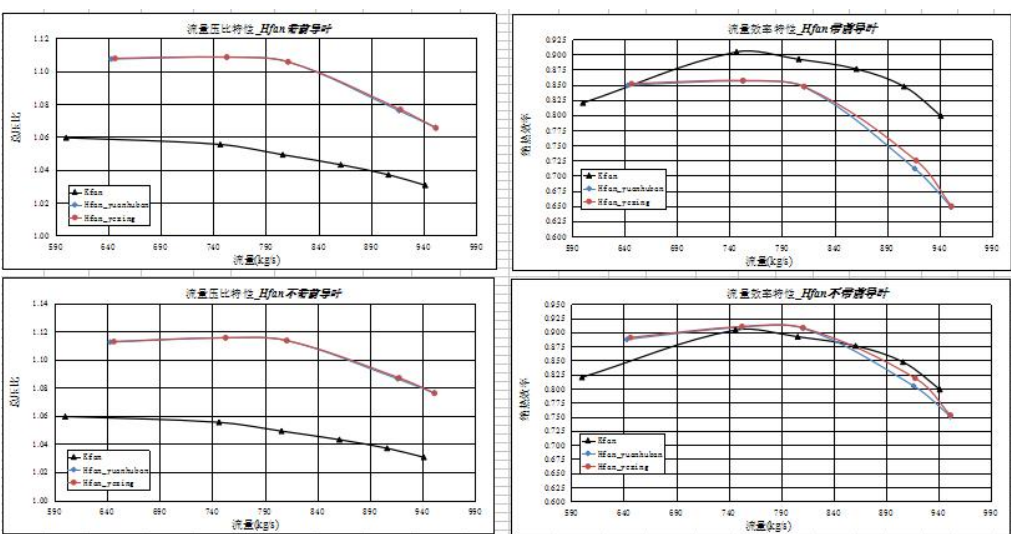
输出功率从**3MW** 到**3.3MW**。适用于**30万吨** 到**300万吨** 的催化裂化装置。



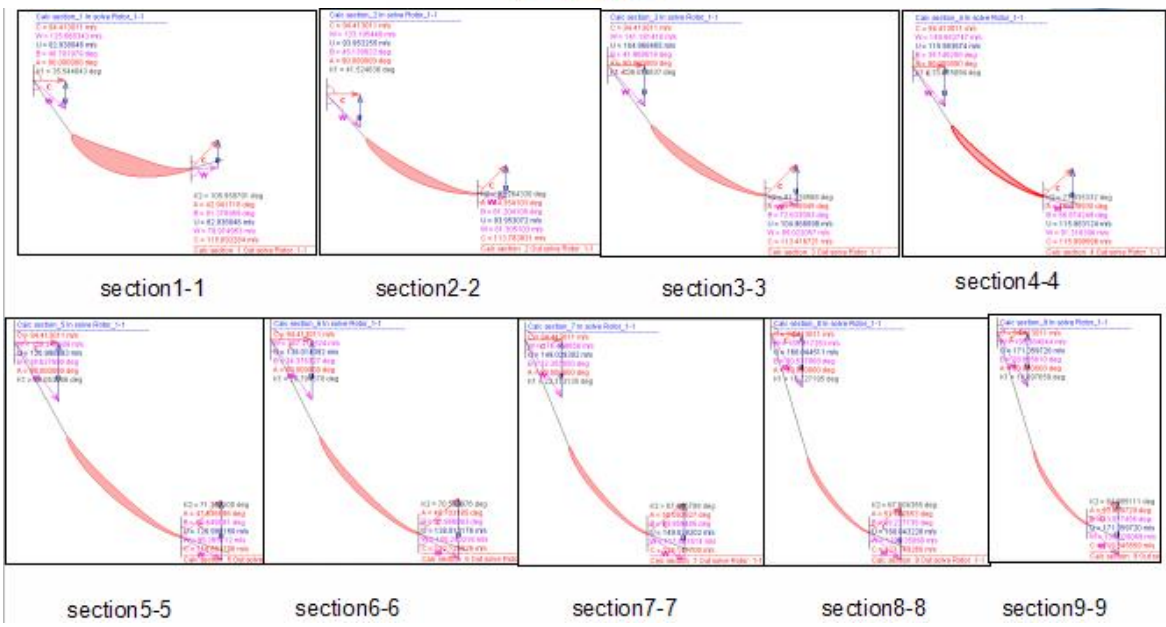
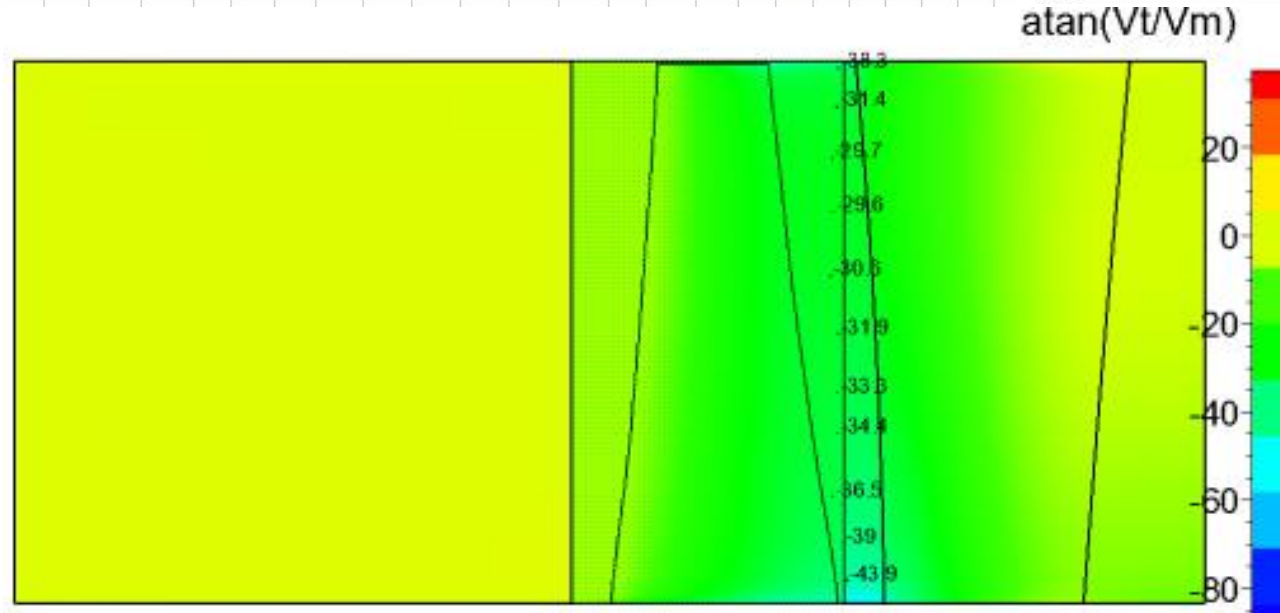
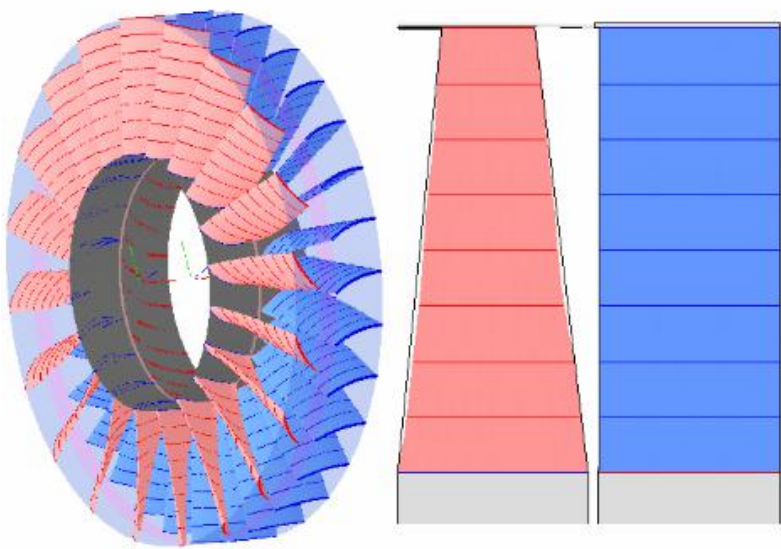


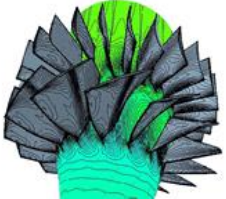


典型工作6：某动叶可调的轴流鼓风机叶型及流道开发与气动优化



名称	代号	公式	根径	中径	顶径
半径	r	已知	800	1225	1650
轴向速度	C_z	从best result fan中计算可得或查公式计算	103.64803	107.531624	116.331961
后导叶入口圆周速度	C_{2a}	从best result fan中计算可得或查公式计算	89.6040043	70.924185	64.713254
后导叶出口计算参数	n2	(0°~0.25)	0.125	0.125	0.125
后导叶出口圆周速度	C_{2a}	$C_{2a} = C_{2a} * n2$	11.2005005	8.865523125	8.08915675
进口气流角	α_2	$\arccot(C_{2a}/C_z)$	49.9748687	56.87877645	61.05343641
出口气流角	α_3	$\arccot(C_{3a}/C_z)$	83.832444	85.28688168	86.02233993
气流转折角	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha = \alpha_3 - \alpha_2$	33.8575753	28.40810523	24.96890352
叶栅稠度	τ_z	查表2-28	1.5	1.5	1.5
叶片数	Z		31	31	31
弦长	b	$b = 2\pi r / Z$	243.220072	372.4307356	501.641399
栅距	t	$t = b / \tau_z$	162.146715	248.2871571	334.4275994
翼型弯角	θ	$\theta = (\alpha_3 - \alpha_2 - i) / (1 - m \tau_z)$	45.1446496	37.38059674	32.38121454
	m	$m = 0.41 - 0.002 * \delta$	0.387599	0.392268954	0.393821687
攻角	i	(-5°~5) 或 (0°~3)	3	3	3
翼型进口几何角	$\alpha_{2,A}$	$\alpha_{2,A} = \alpha_2 + i$	52.9748687	59.87877645	64.05343641
落后角	δ	$\delta = m \theta \sqrt{t/b}$	14.2870743	11.97249151	10.41231102
翼型出口几何角	$\alpha_{3,A}$	$\alpha_{3,A} = \alpha_3 + \delta$	98.1195183	97.25937319	96.43465095
绝对平均气流速度与源线的夹角	δ_{av}	$\delta_{av} = \cot^{-1}((c_{2a} + c_{3a})/2c_z)$	64.067143	69.64485509	72.62467909





典型工作：某透平膨胀机整机气动仿真与结构优化

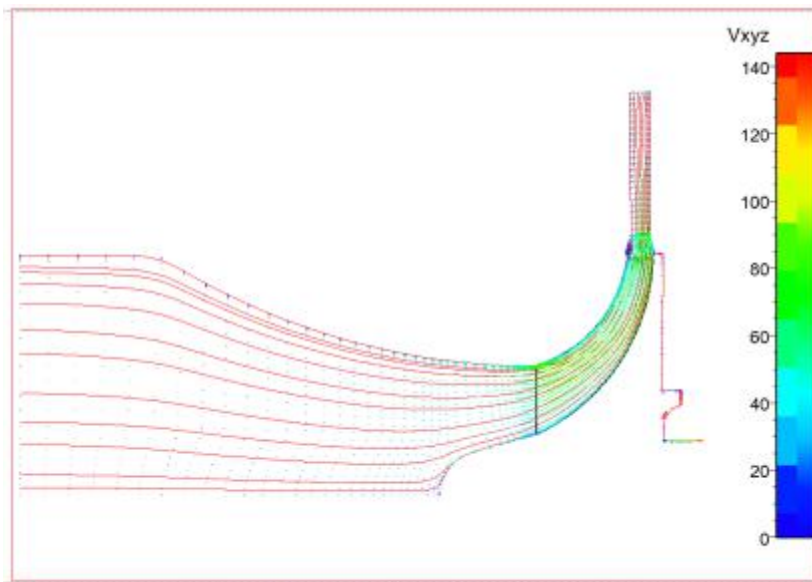
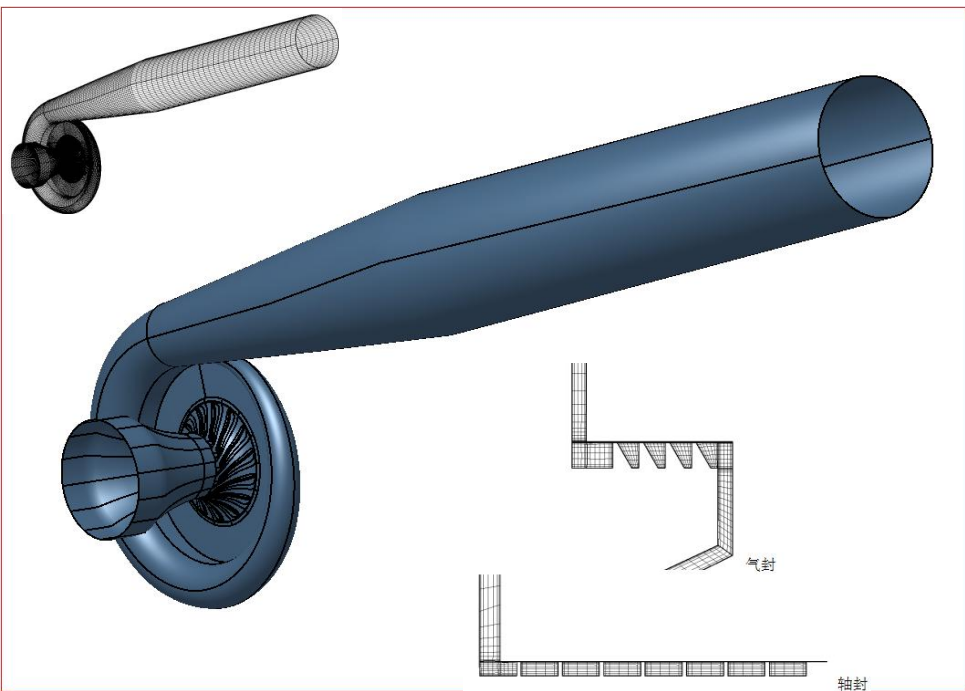
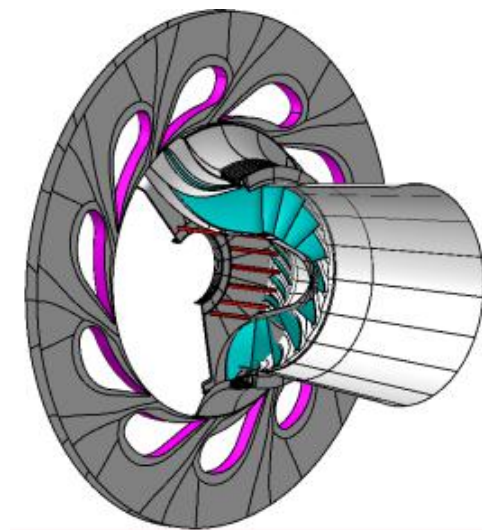
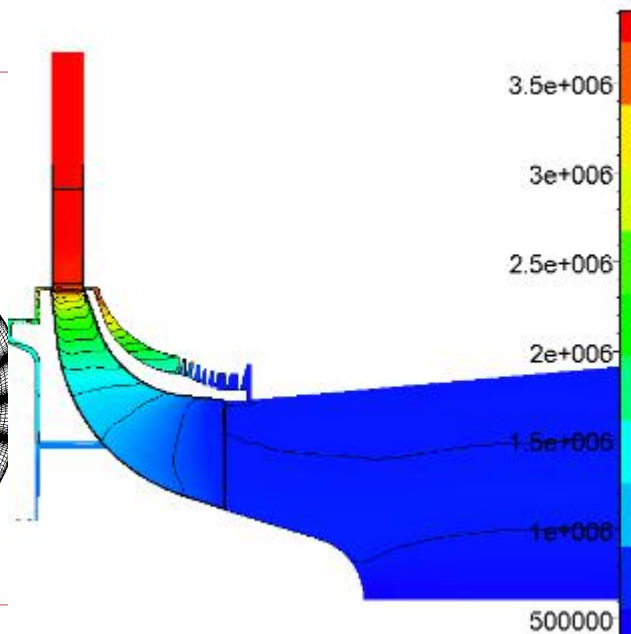
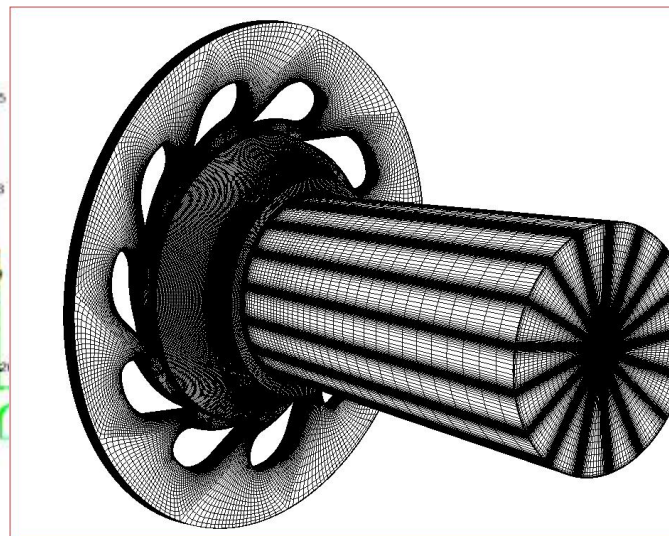
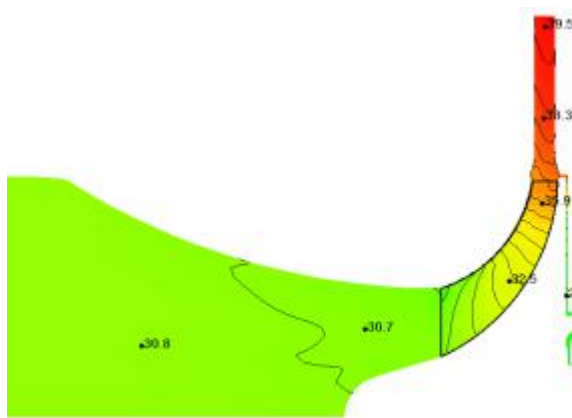
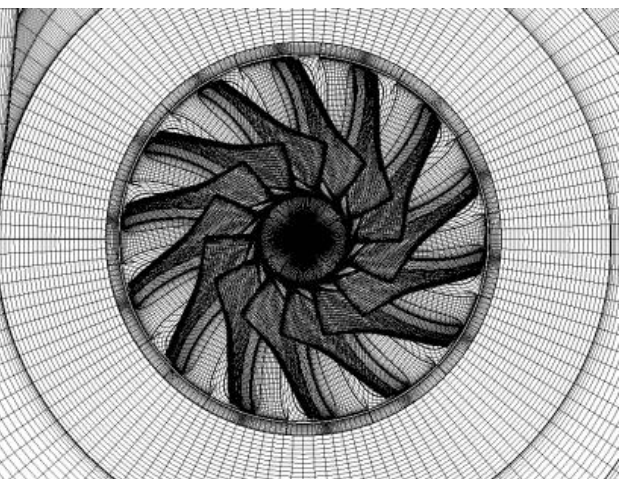


图 1-67 周向平均速度分布

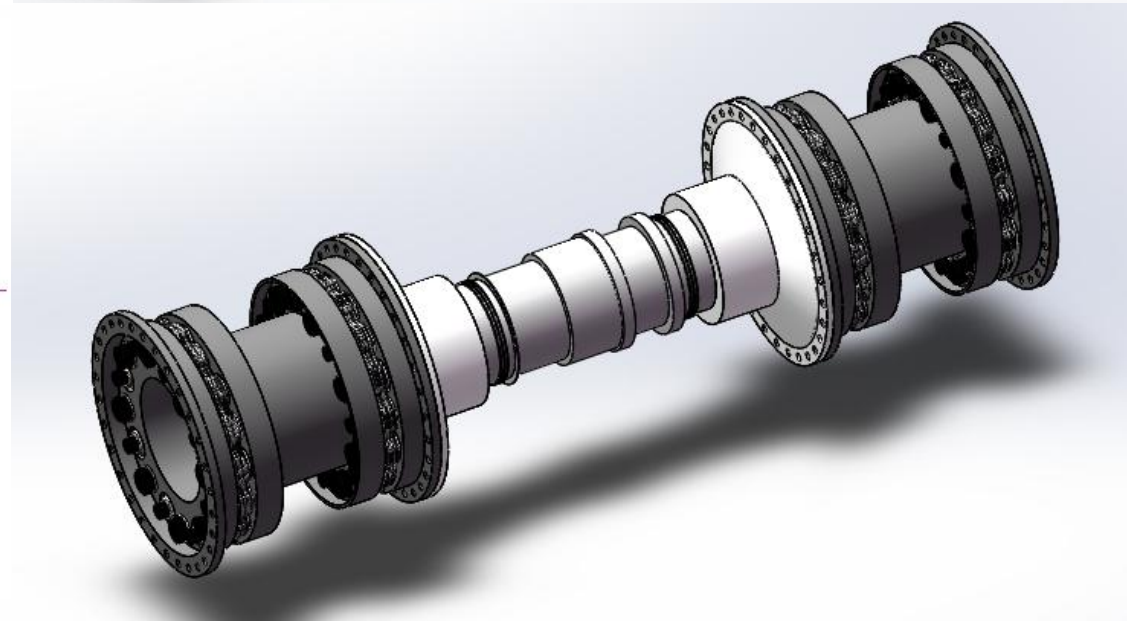
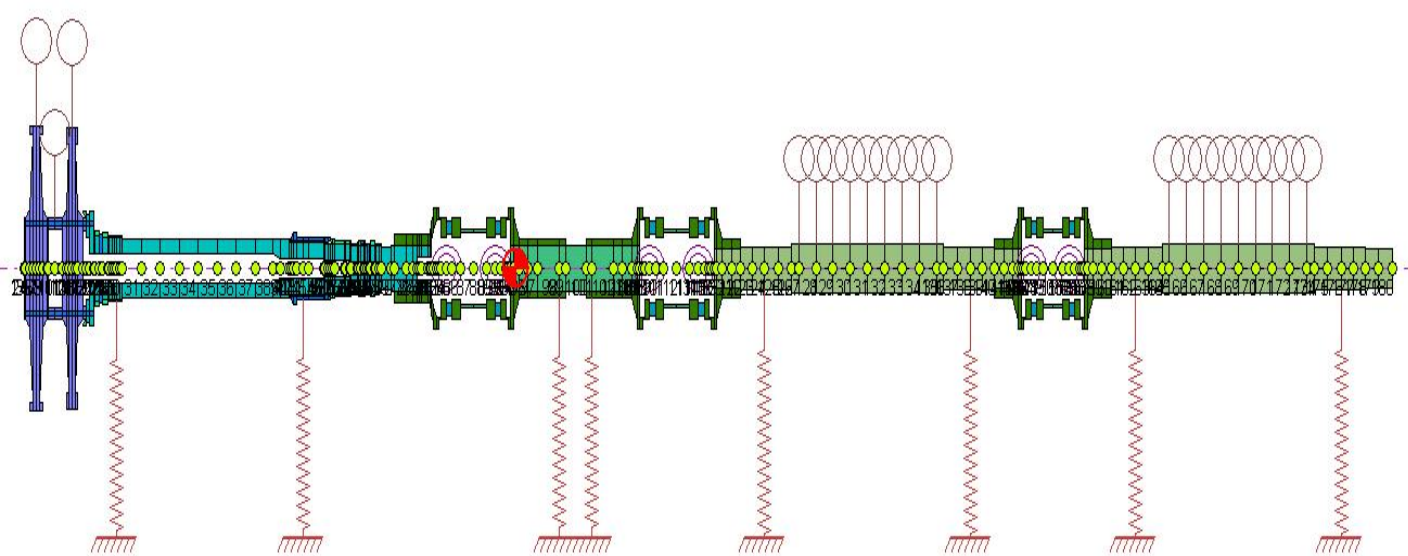
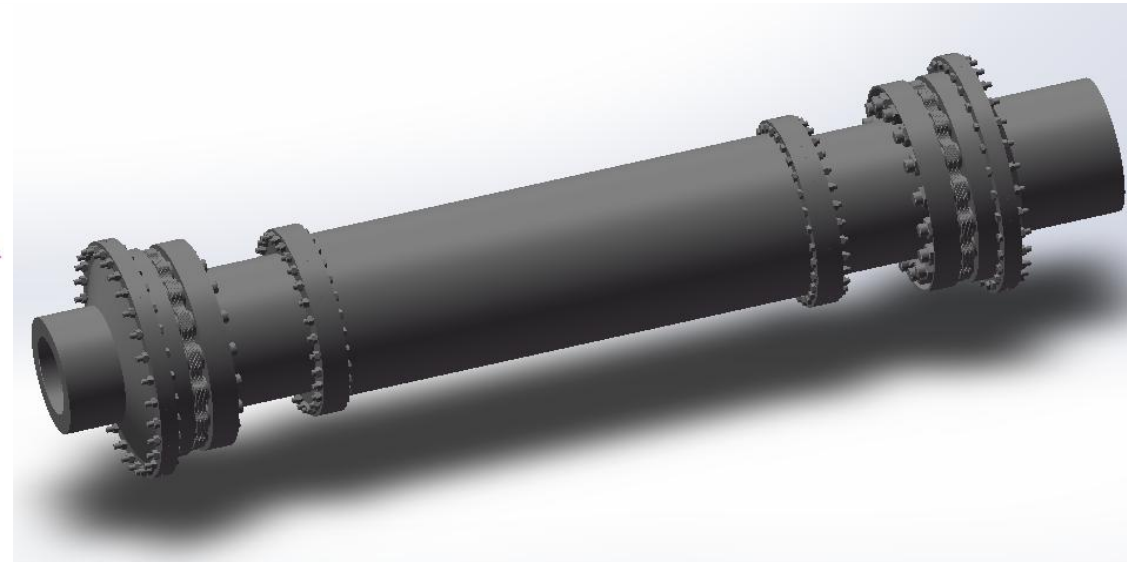
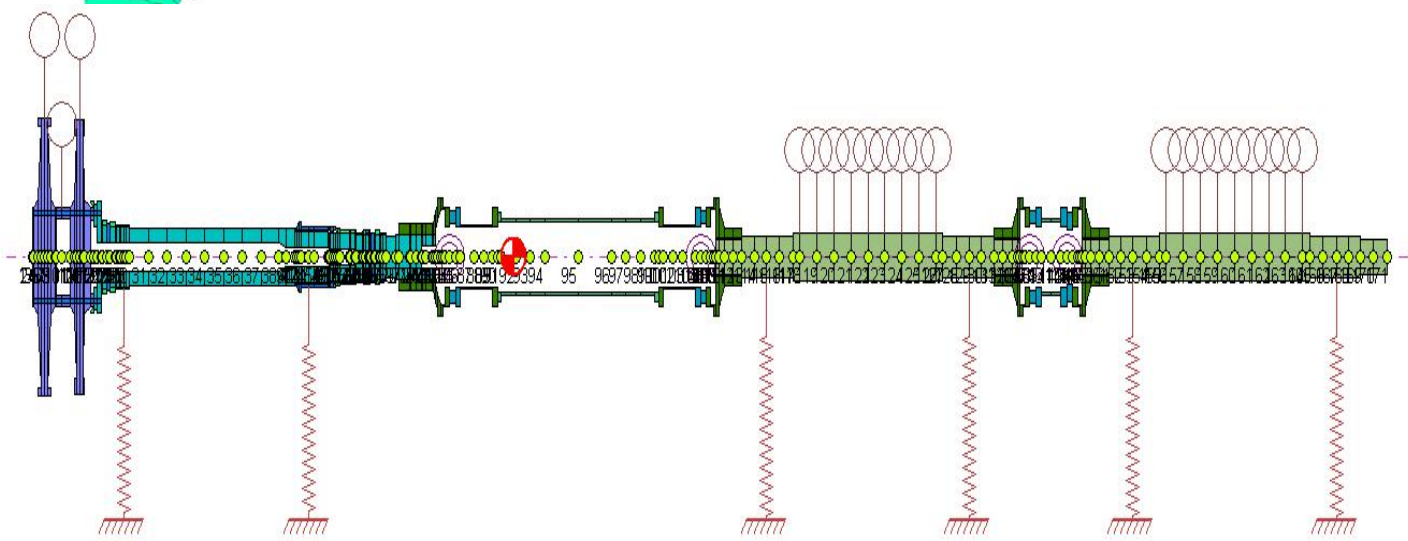


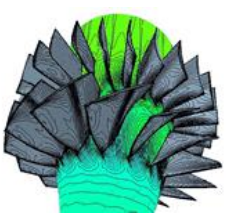
Absolute Total Pressure





典型工作：某燃气轮机整机实验台轴系转子动力学改造





四川空分（集团）有限公司



成都发动机(集团)有限公司
CHENGDU ENGINE(GROUP)CO.,LTD.



中电建成都电力机械厂



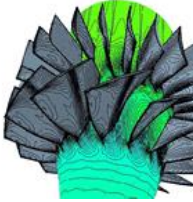
西安航空动力股份有限公司



武汉航达科技有限公司



东方电气东方汽轮机有限公司



证书号第3720390号



发明专利证书

发明名称：一种带储气功能的自冷却型空气悬浮压机

发明人：肖云峰;聂帅;刘强;孟波;吕涛;张志莲;陈磊;康宇轩;冷雪

专利号：ZL 2018 1 0503548.6

专利申请日：2018年05月23日

专利权人：北京石油化工学院

地址：102600 北京市大兴区黄村清源北路19号

授权公告日：2020年03月17日 授权公告号：CN 108775289 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



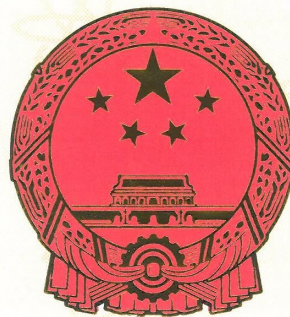
局长
申长雨

申长雨



第1页(共2页)

其他事项参见续页



四川省科学技术进步奖 证书

为表彰四川省科学技术进步奖获得者，特颁发
此证书。

奖励类别：科技进步类

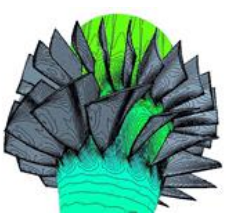
项目名称：工业余能高效回收利用多机联轴透平机组
研制与应用

奖励等级：二 等

获奖者：北京石油化工学院

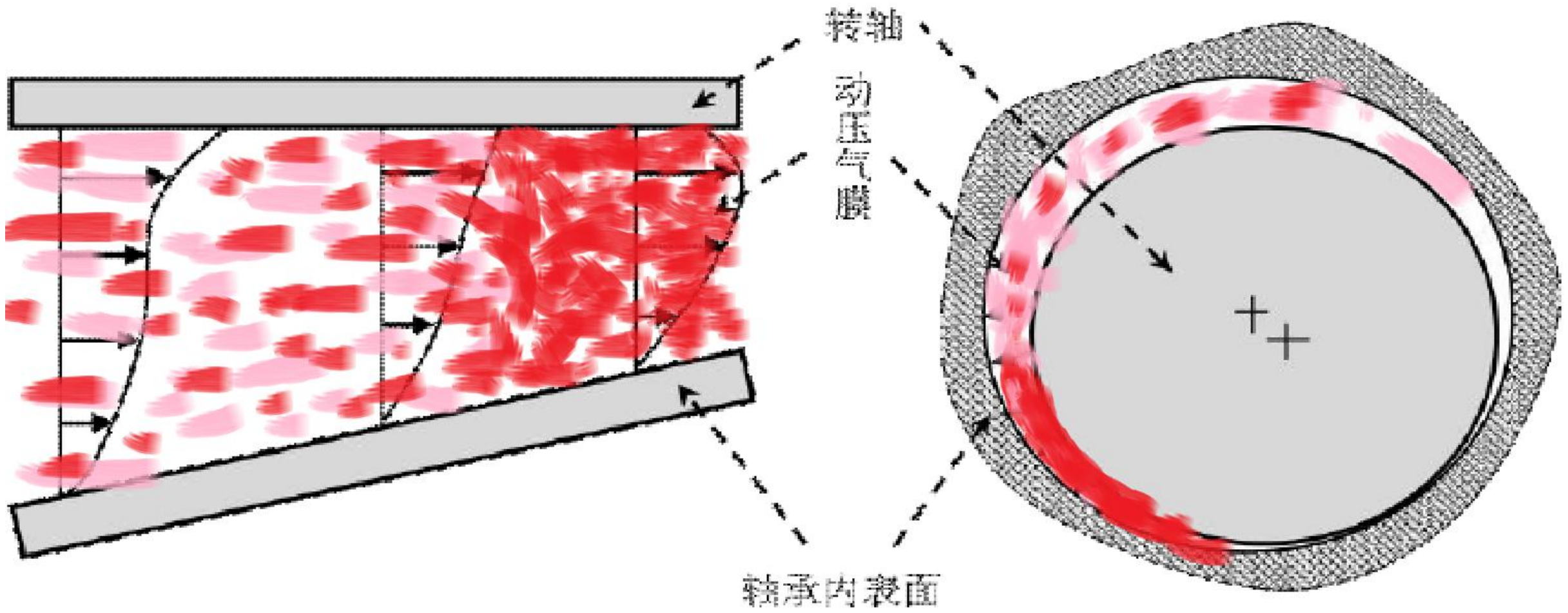


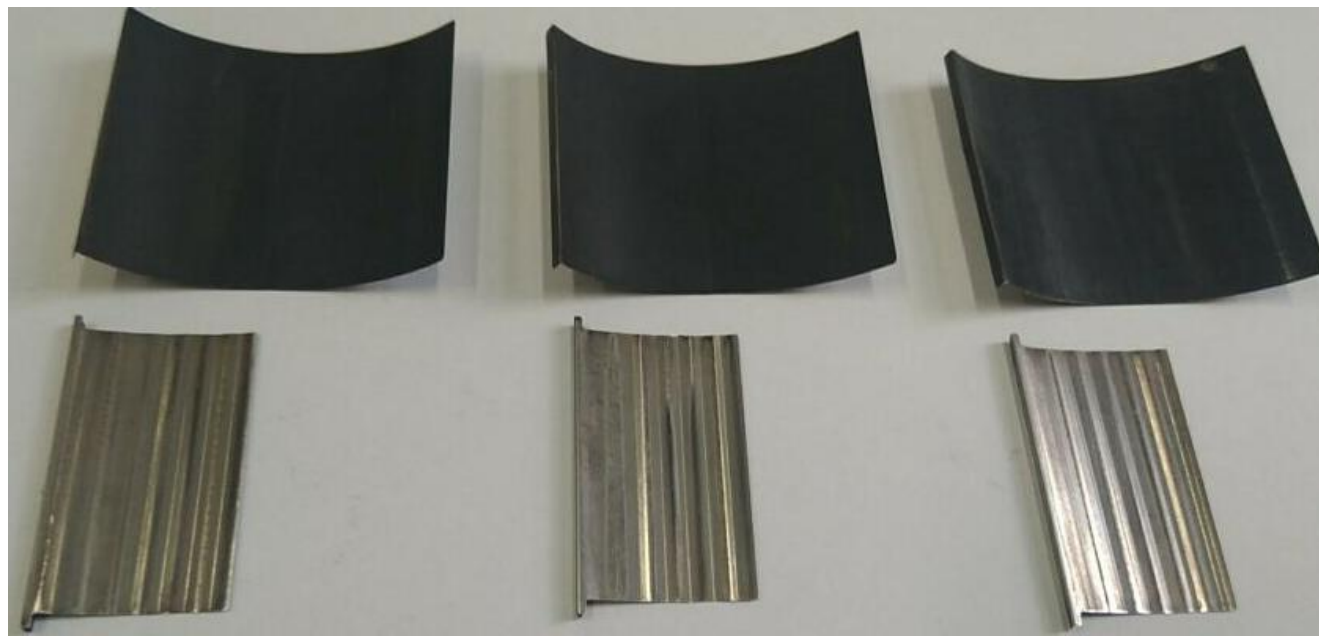
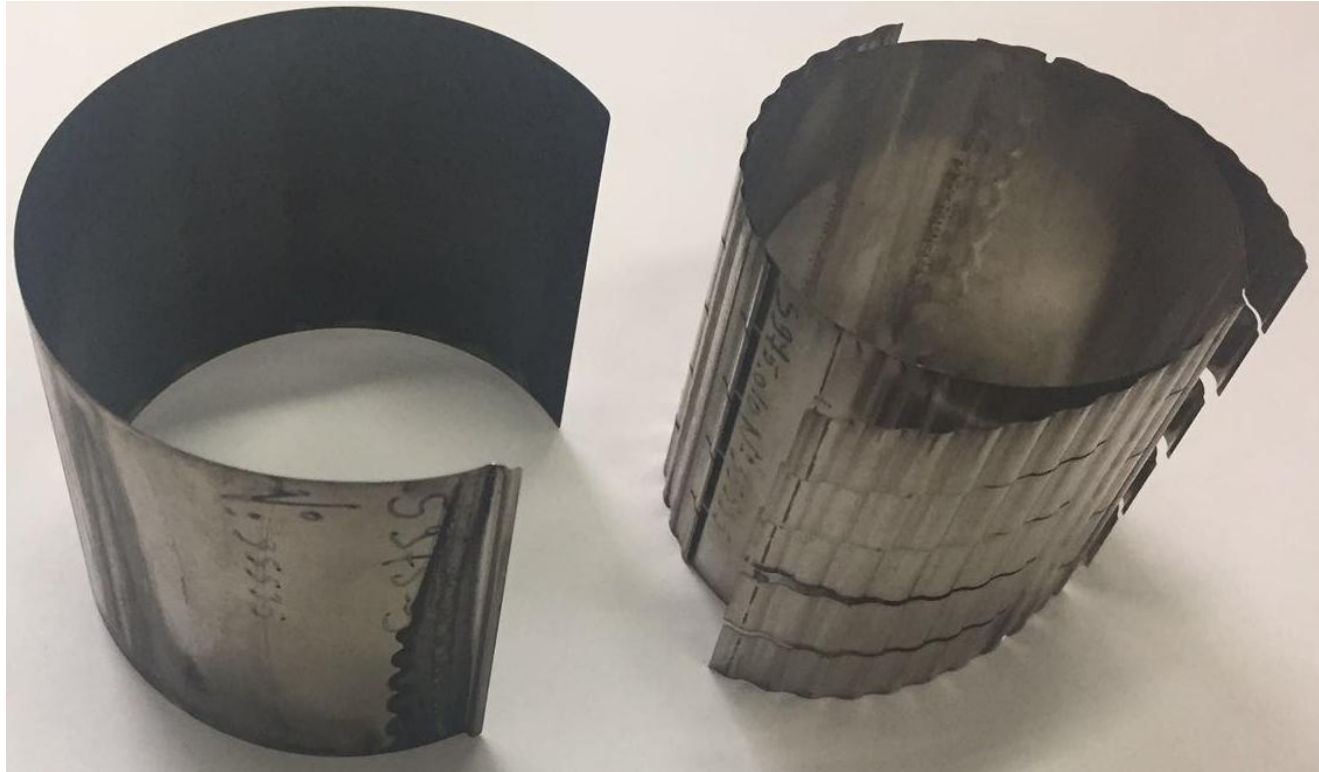
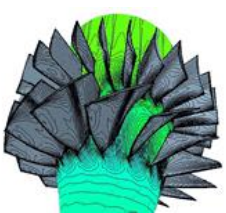
证书号：2017-J-2-01-D03



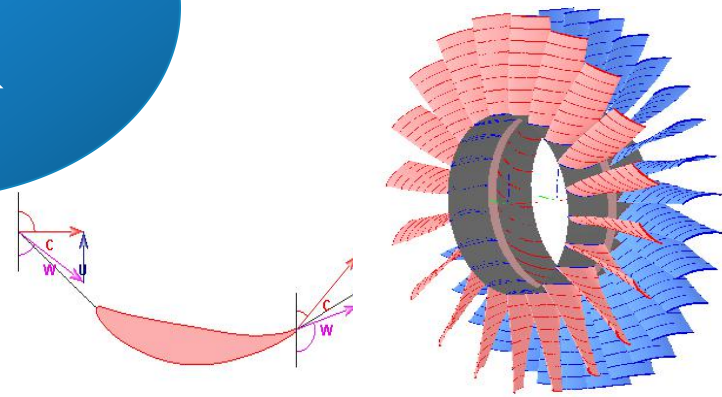
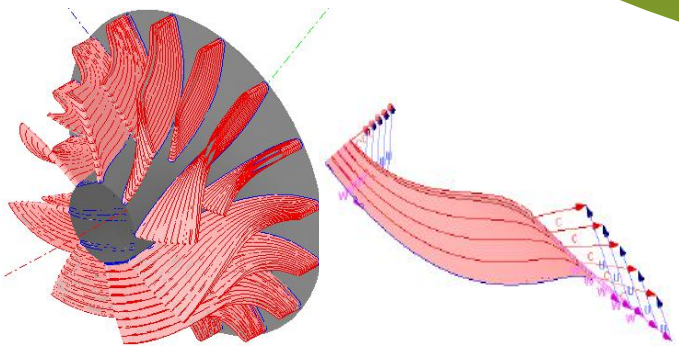
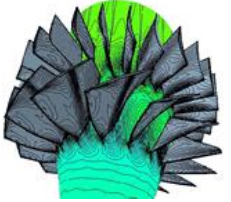
三、气体动压悬浮涡轮冷却器整机技术

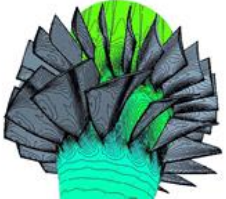
- ◆ 3.1 涡轮冷却器整机技术
- ◆ 3.2 研究工具
- ◆ 3.3 初步一维气动设计
- ◆ 3.4 轴系布局与优化
- ◆ 3.5 关键零部件的动静强度
- ◆ 3.6 整机气动仿真与结构优化



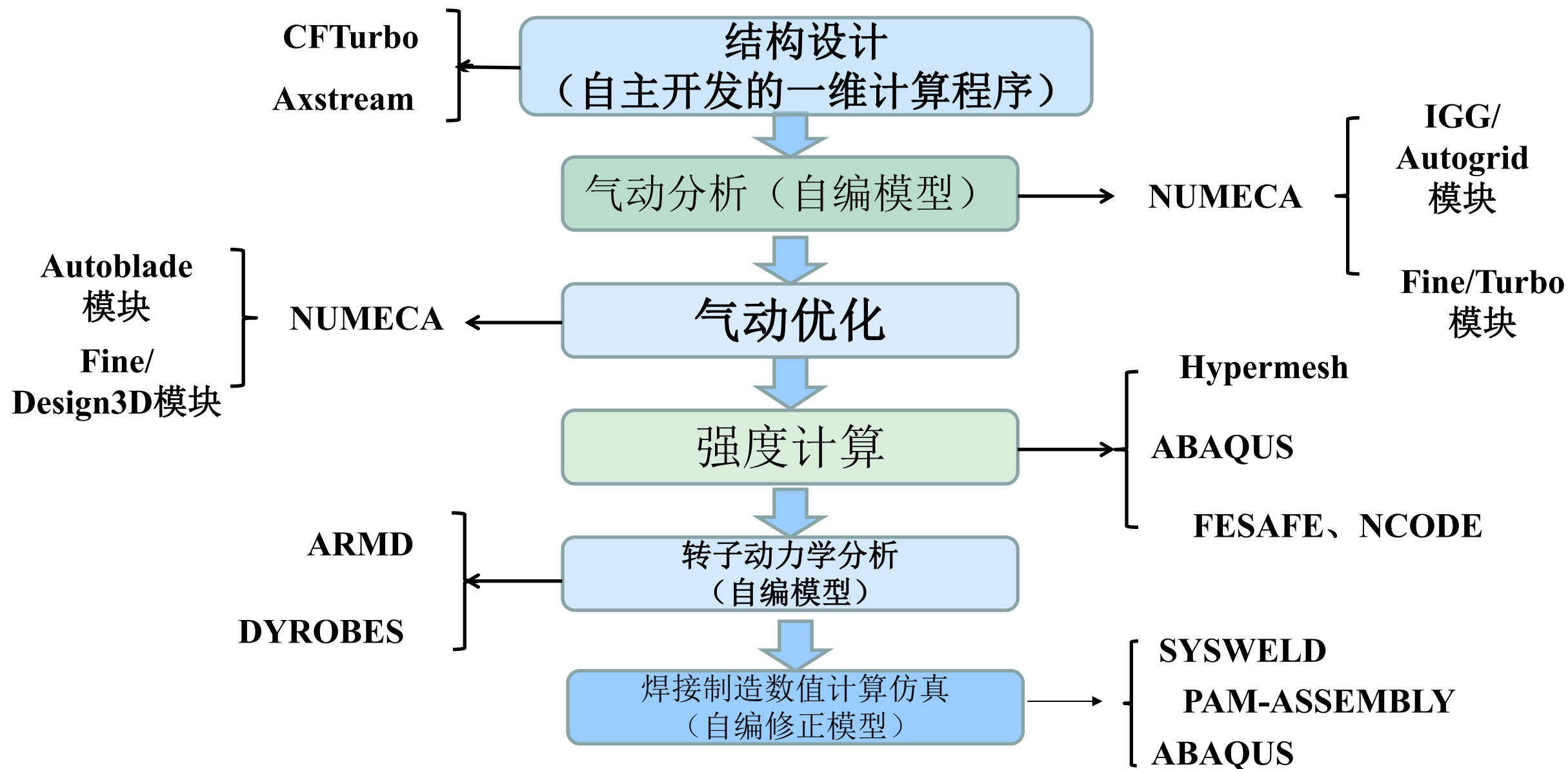


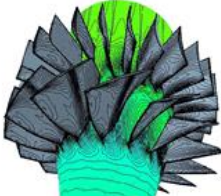
3.1、涡轮冷却器整机技术





3.2、研究工具





3.3、初步一维气动设计

1) Slip coefficient by GÜLICH/WIESNER

$$\gamma = f_1 \left(1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_{2B}}}{z^{0.7}} \right) k_w$$

$$f_1 = \begin{cases} 0.98 & \text{for radial impellers} \\ 1.02 + 1.2 \cdot 10^{-3} (n_q - 50) & \text{for mixed-flow impellers} \end{cases}$$

$$k_w = \begin{cases} 1 & \text{for } d_{im}/d_2 \leq e_{Lim} \\ 1 - \left(\frac{d_{im}/d_2 - e_{Lim}}{1 - e_{Lim}} \right)^3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$d_{im} = \sqrt{0.5 \cdot (d_{1,Shroud}^2 + d_{1,Hub}^2)}$$

$$e_{Lim} = \exp \left(- \frac{8.16 \sin \beta_{2B}}{z} \right)$$

2) Slip coefficient by AUNGIER/WIESNER

$$r_{cor} = r \left(1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{Lim}}{1 - \varepsilon_{Lim}} \right)^{\sqrt{\beta_{2B}/\beta_{00}}} \right)$$

$$\varepsilon_{lim} = \frac{\gamma - \sin(19^\circ + 0.2 \beta_{2B})}{1 - \sin(19^\circ + 0.2 \beta_{2B})}$$

3) Slip coefficient by VON BACKSTROEM

$$\gamma = 1 - \frac{1}{F_0 \cdot \sin(\beta_{2B})}$$

$$sol = \frac{1 - \varepsilon \cdot z}{2\pi \cdot \sin(\beta_{2B})}$$

$$F_0 = 5$$

4) Slip coefficient by PFLEIDERER

$$\gamma = 1 - \frac{c_{u2} - c_{u2}}{u_2}$$

$$c_{u2} = \frac{c_{u2}}{k_i} - \frac{r_1^2}{r_2} \left(\frac{1}{k_i} - 1 \right) 2\pi n (1 - \delta_r)$$

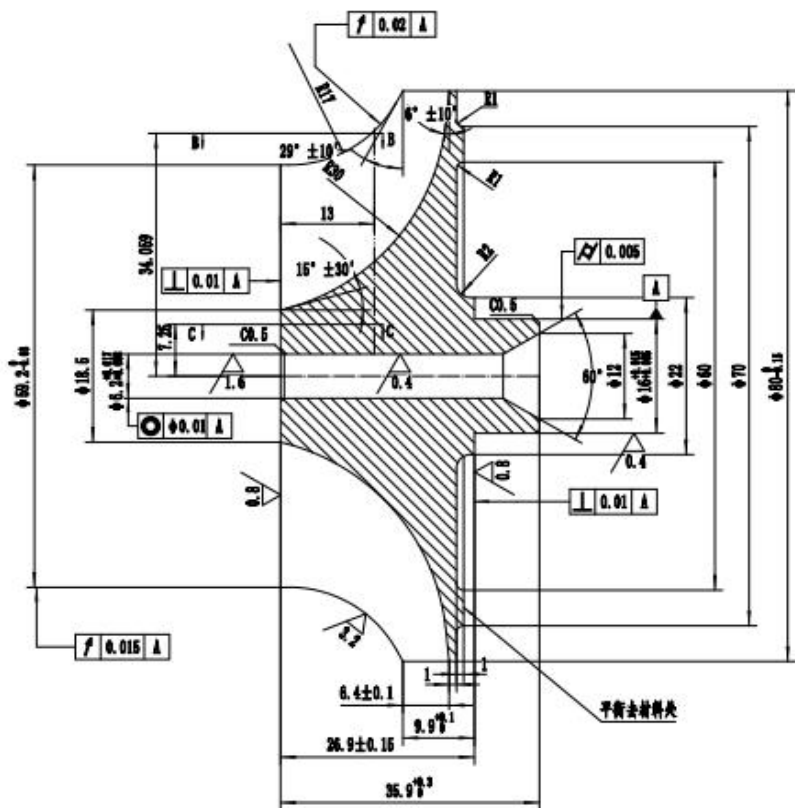
$$k_i = \frac{1}{1 + P} = \frac{\tilde{Y}}{\tilde{Y}_\infty} = \frac{\Delta(rc_s)}{\Delta(rc_\infty)}$$

涡轮一维气动计算程序

膨胀机进口压力	P0	1.22	BAR	
进口温度	T0	341.55	K	
出口压力	P2	0.685	BAR	
流量	Q	116.0946133	Nm ³ /h	
效率	η	81.5%		
气体常数	R	287.0959945		1.4
密度		1.292049612		
	qm	0.041666667	kg/s	150
喷嘴中气流速度系数	Φ	0.975		
工作轮中气流速度系数	ψ	0.87		
喷嘴出口叶片角	α _i '	16		0.279253
多变指数	n	1.372885511		
估取扩压比	P3	0.6650	BAR	估取扩压比
进口比焓	I0	70.237	KJ/kg	
膨胀机出口理想比焓	I2s	18.096	KJ/kg	
工作轮出口理想比焓	I2s'	15.645	KJ/kg	
膨胀机总的理想比焓降	hs	52.141	KJ/kg	
通流部分理想比焓降	hs'	54.592	KJ/kg	
进口压缩性系数	Z0	0.999667539		
进口状态密度	ρ0	1.24458		
等焓理想速度	Cs	330.4300228	m/s	
估算叶轮出口容积流量	Q2	192.476	m ³ /h	
估算转速	n	73748.14455		
估取特性比	u1	0.642		
估算直径	D	54.93698332		
取定工作轮直径	D	69.9		
取定转速	n	58000		ns=
叶轮线速度	u1	212.2774156		
特性比	u1	0.642427748		
喷嘴出口喉部截面速度	C*	328.3725826	m/s	
喉部气体密度	ρ*	0.786880256	kg/m ³	
喷嘴喉部宽度	bn	4.829454545	mm	
喷嘴叶片数	Zn	12		
喷嘴叶片高度	ln	2.782491796	mm	5.000

压气机一维气动计算程序

一、设计参数						
介 质			空气			
气 量	Q	Nm ³ /H	116.0946	=	0.041667	Kg/s
进口压力	P0	Bar A	0.595	=	6067.095	KgF/m ²
进口温度	T0	K	330.05	=	56.9	℃
出口压力	P2		0.93			
转 速	n	RPM	58000	=	6073.746	rad/s
效 率			0.8			
二、基本参数						
摩尔质量	M	Kg/Kmol	28.96			
标态密度	ρ0	Kg/Nm ³	1.29205			
绝热指数	k		1.4			
气体常数	R	J/Kgk	287.0925	=	29.27529	Kgf.m/Kgk
设计压比	ε		1.563	要求压比	1.563025	
进口压缩性系数	Z0		0.9999			
进口密度	ρ1	Kg/m ³	0.627999			
进口状态动力粘度	ν1	N.s/m ²	1.91E-05			
进口状态运动粘度	η1	m ² /s	3.05E-05			
出口温度	T2	K	350.6	=	77.44	℃
出口压缩性系数	Z2		1			
出口密度	ρ2	Kg/m ³	0.8			
出口状态动力粘度	ν2	N.s/m ²	2.10E-05			
出口状态运动粘度	η2	m ² /s	2.51E-05			
粘度的温度指数	ω		-0.698			
三、直径估算						
绝热能量头	h _{ad}	J/Kg	45136.75			
进口容积流量	Q1	m ³ /s	0.066348			
比转速	Ns		0.427358			
叶片出口安装角	β _{2A}	°	-45			
能量头系数	ψ		0.6			
压机轮半径	R ₂	m	0.050488			100.9759
叶片部分宽度	B	m	0.023123	≈	0.0524	
进口平均轴向流速	C _{1m}	m/s	69.2			
进口面积	A1	m ²	0.00137			
轮径比	D _{1m} /D ₂		0.52			
进口平均半径	R _{1m}	m	0.026254			
进口叶顶半径	R _u	m	0.030121			30.12065
进口叶根半径	R _a	m	0.021709			21.70862



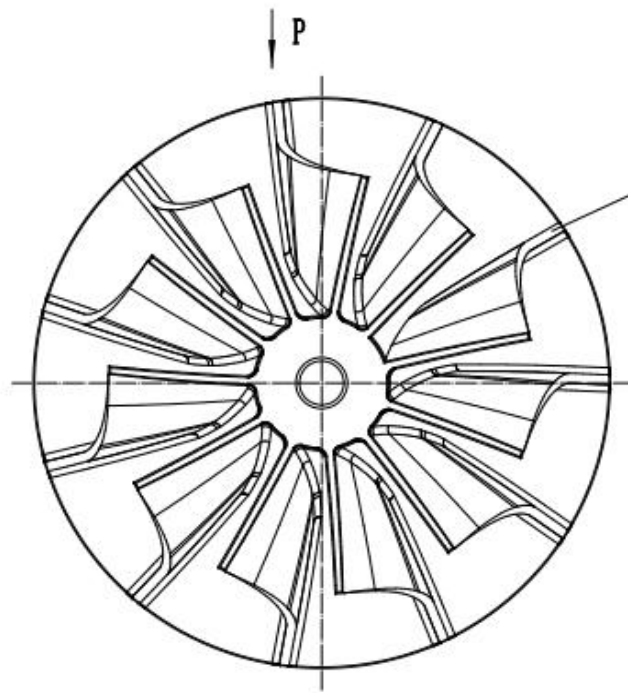
B-B

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
工作面	0	0.282	0.794	1.466	2.237	3.122	4.100	5.162	6.302	7.514	8.795	10.141	11.549	13.016
背面	-1.4	-1.118	-0.606	0.066	0.837	1.723	2.700	3.762	4.902	6.114	7.395	8.741	10.149	11.616

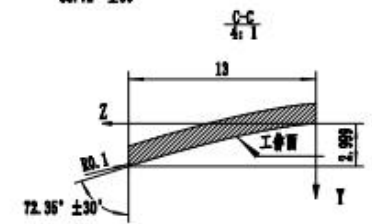
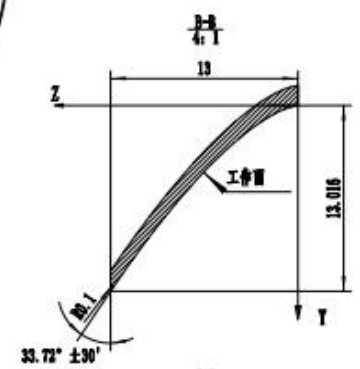
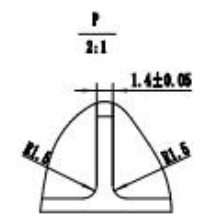
C-C

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
工作面	0	0.088	0.227	0.398	0.591	0.804	1.033	1.278	1.536	1.807	2.089	2.383	2.686	2.999
背面	-1.4	-1.313	-1.173	-1.002	-0.809	-0.596	-0.367	-0.122	0.136	0.407	0.689	0.983	1.286	1.599

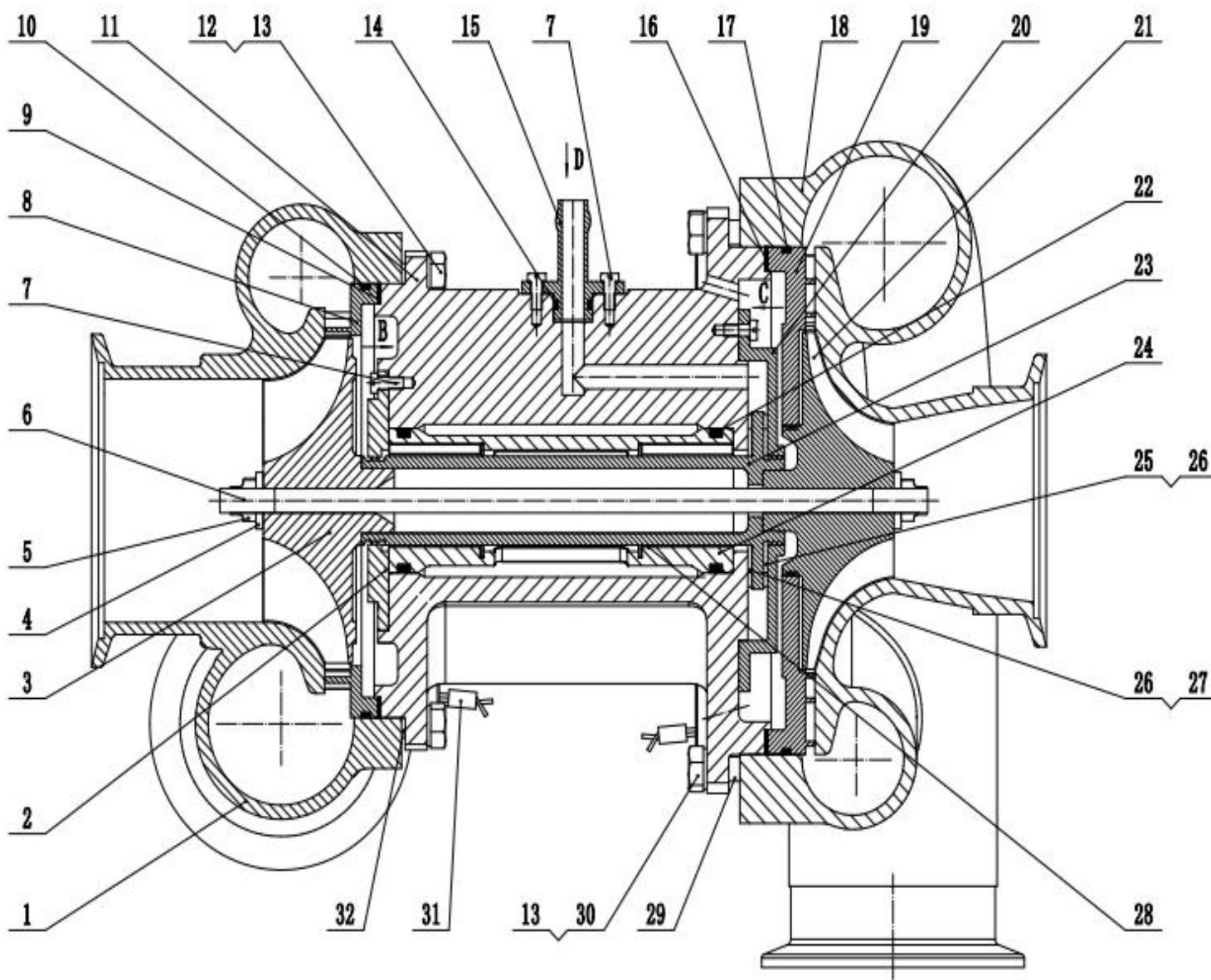
- 1、叶轮加工采用数控加工，加工后用X光荧光检查无裂纹、孔穴及机械损伤。
 - 2、B-B、C-C线面光滑连接，表面粗糙度为平均轮廓面轮廓点的连接。
 - 3、棱角倒钝，未注倒角C0.5。
 - 4、叶轮流道底部允许保留刀痕，刀痕高度不得超过0.2mm；走刀步长1.00mm。
 - 5、其余 $Ra 0.02$ 。
 - 6、铸件加工前进行热处理：(-60~70)℃，保温2h。
 - 7、平衡去材料处，去材料处厚度不得大于0.8。
- 注：允许采用直径 $\phi 90$ 以上的2A12-T4材料加工。



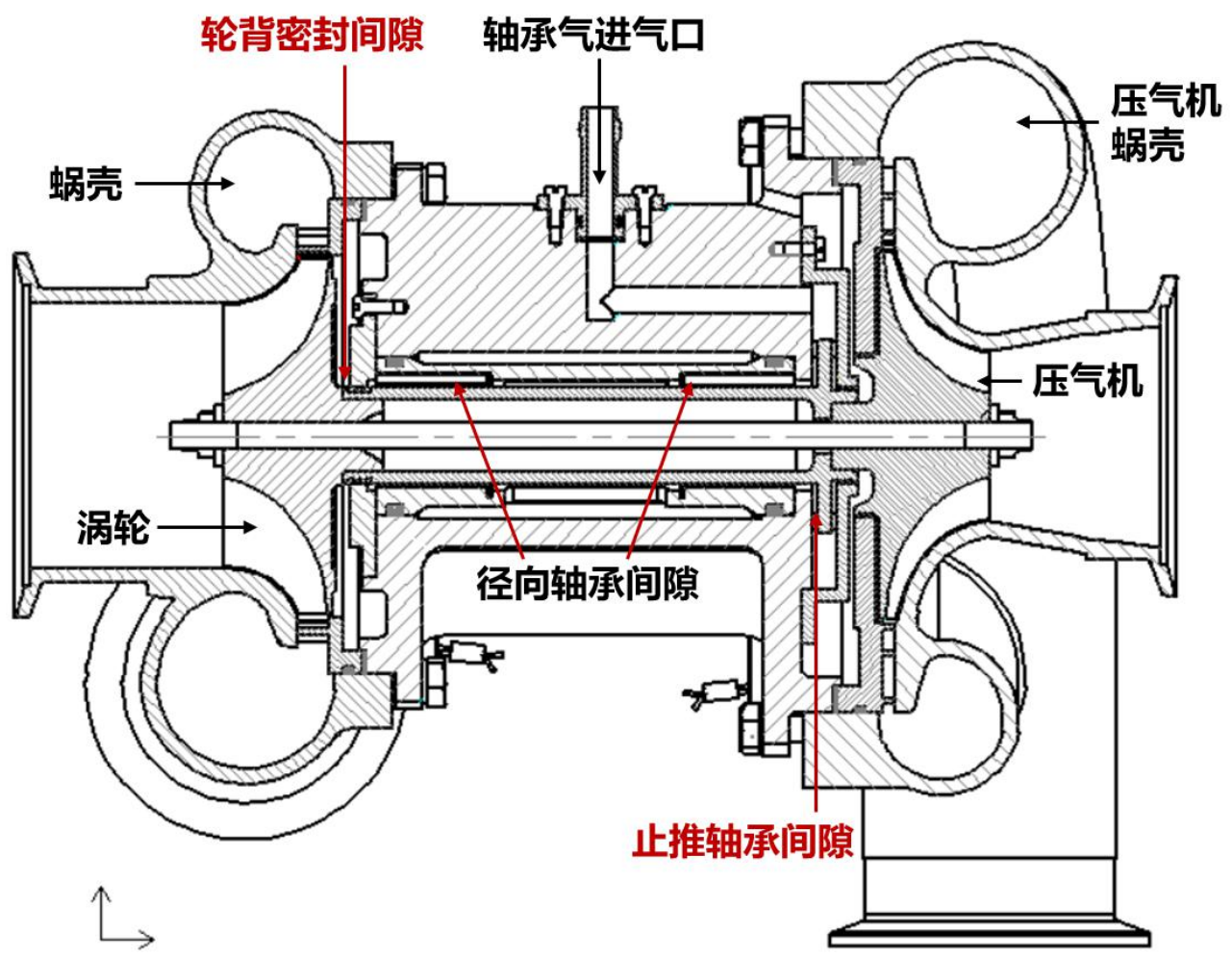
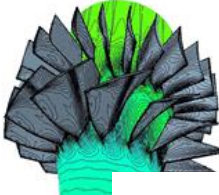
11个叶片均布



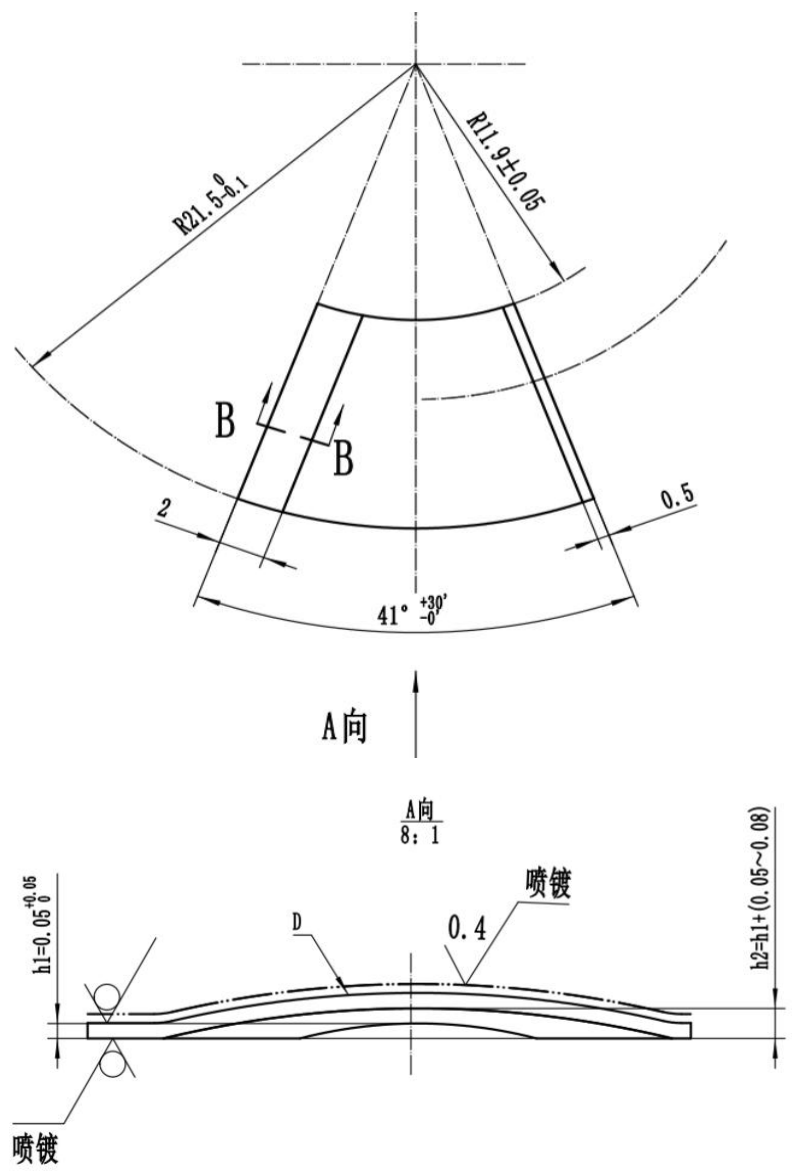
产品名称	涡轮叶片	产品型号	
图号	2A12-T4 GB/T3191	图号	
比例	1:1	比例	
材料	2A12-T4 GB/T3191	材料	
工艺		工艺	
备注		备注	



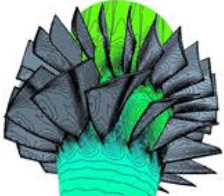
33		螺栓1Cr18Ni19Ti		接管
32	TC17-118-1~3	调压垫片		接管
31	HB4-63-1999	密封	3	
30	HB1-201P-M6×18/HD0-9-3	六角头螺钉	10	
29	TC17-119-1~3	压气机垫片		接管
28	HD1600D130	径向轴承	2	
27	HD686187-2	左推力轴承	1	
26	TC17-117-1~3	轴承调整垫片		接管
25	HD686187-1	右推力轴承	1	
24	TC17-116	轴承套	1	
23	TC17-115	轴	1	
22	HB7518-2.65×30	胶圈	2	
21	TC17-114	压气机叶轮	1	
20	TC17-113	盖板	1	
19	TC17-112	扩压器	1	
18	TC17-111	压气机铜壳	1	
17	HB7518-2.65×118	胶圈	1	
16	TC17-110-1~4	压调整垫片		接管
15	TC17-109	引气管	1	
14	HB7518-1.8×8.0	胶圈	1	
13	HB1-621PA6×10×1	垫圈	18	
12	HB1-201P-M6×16/HD0-9-3	六角头螺钉	8	
11	TC17-010	轴承支承组件	1	
10	HB7518-2.65×100	胶圈	1	
9	TC17-108-1~4	调压垫片		接管
8	TC17-107	导向环	1	
7	HB1-203P-M3×8	圆柱头螺钉	12	
6	TC17-106	拉杆	1	
5	GB/T1337-M6	自锁螺母	2	
4	TC17-104	垫圈	2	
3	TC17-103	调压叶轮	1	
2	TC17-102	调压封	1	
1	TC17-101	调压铜壳	1	
序号	代号	名称	数量	备注



动压悬浮涡轮冷却器平面图

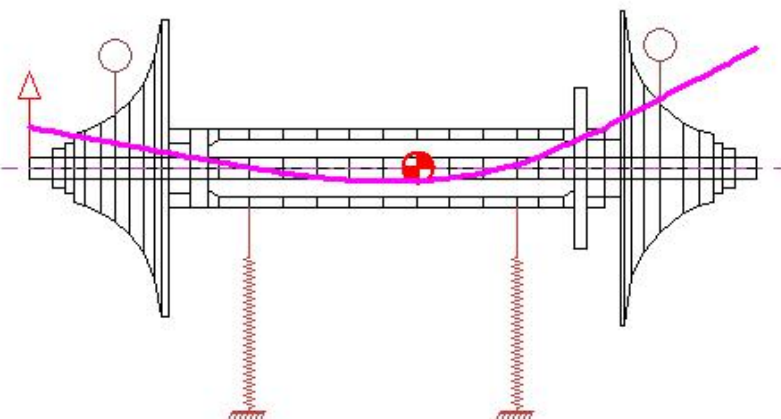


止推轴承箔片平面图



3.4、轴系布局与优化

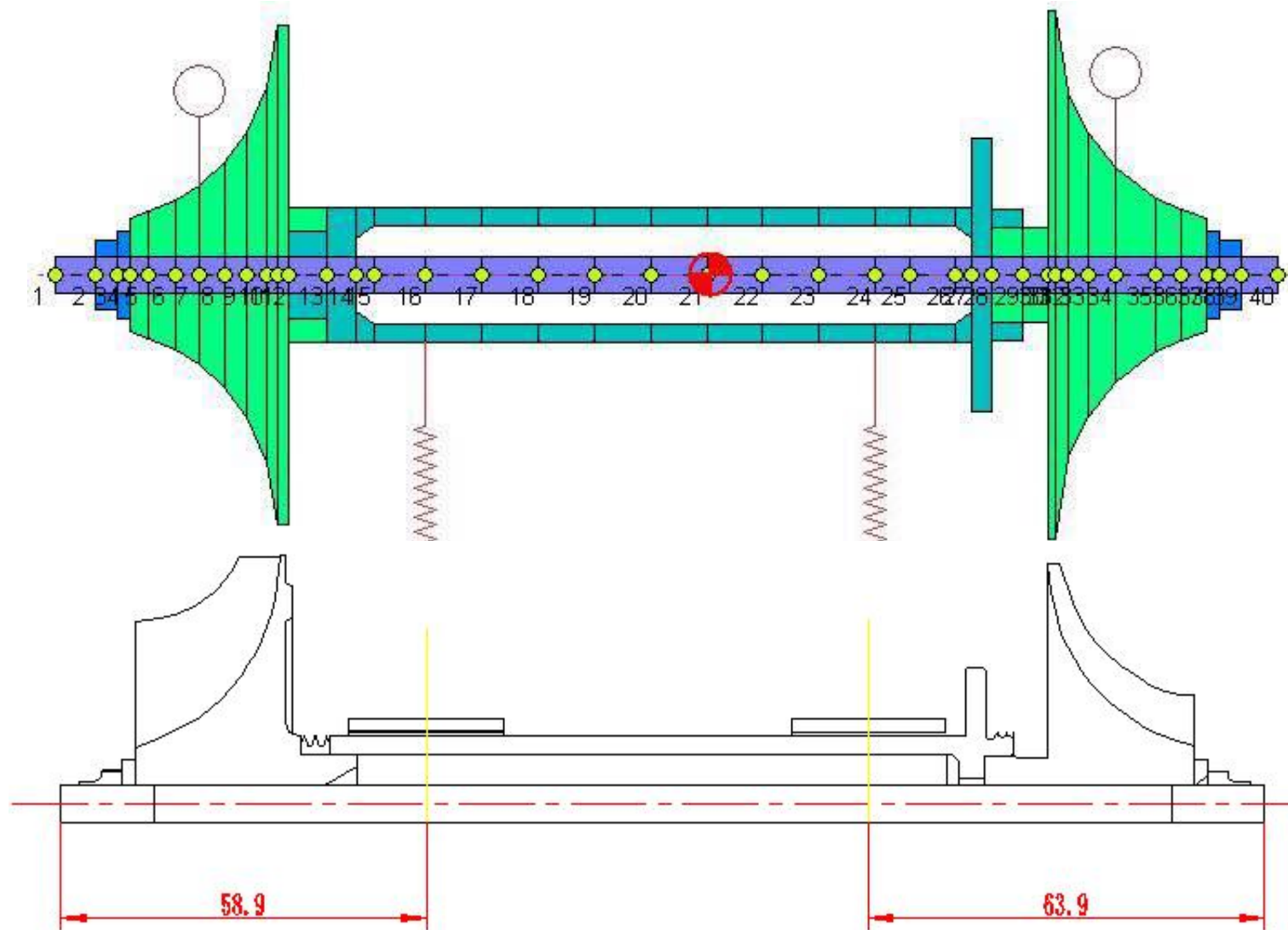
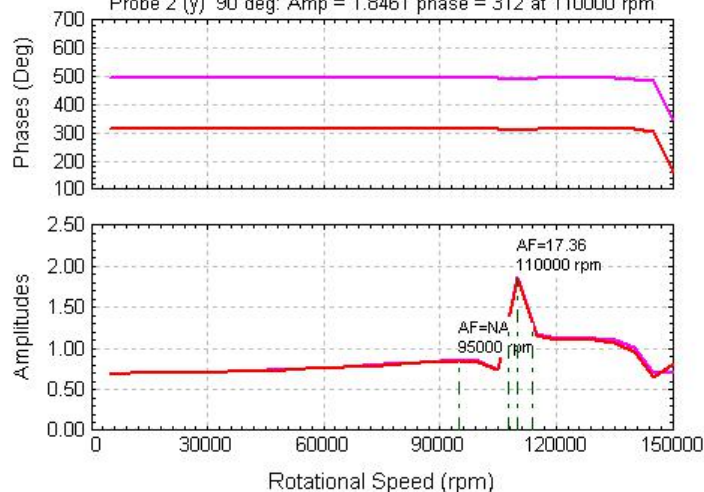
Critical Speed Mode Shape, Mode No.= 1
Spin/Whirl Ratio = 1, Stiffness: $(K_{xx}+K_{yy})/2$
Critical Speed = 134649 rpm = 2244.15 Hz

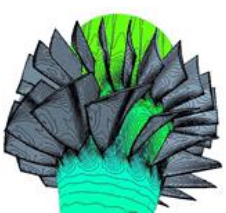


Bode Plot

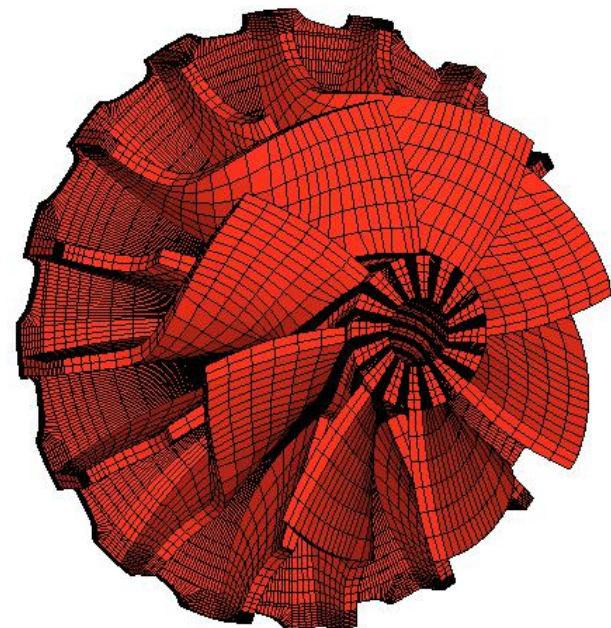
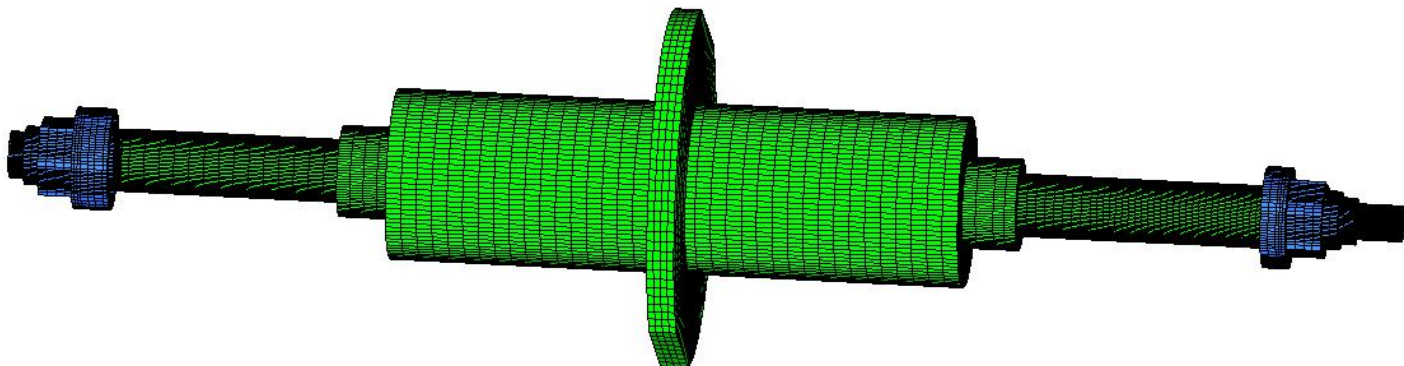
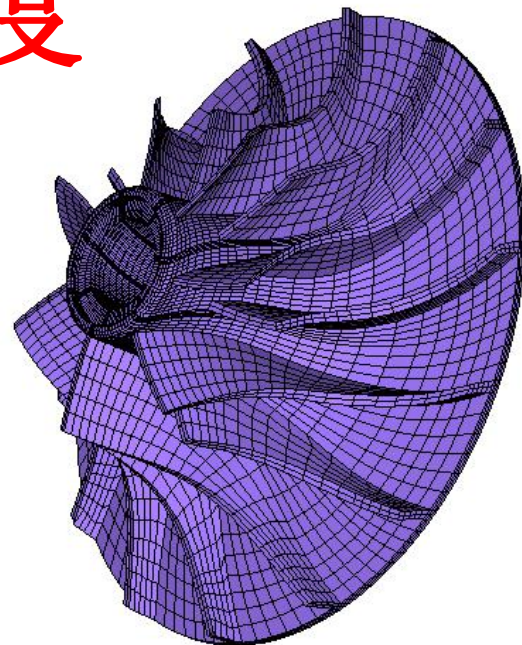
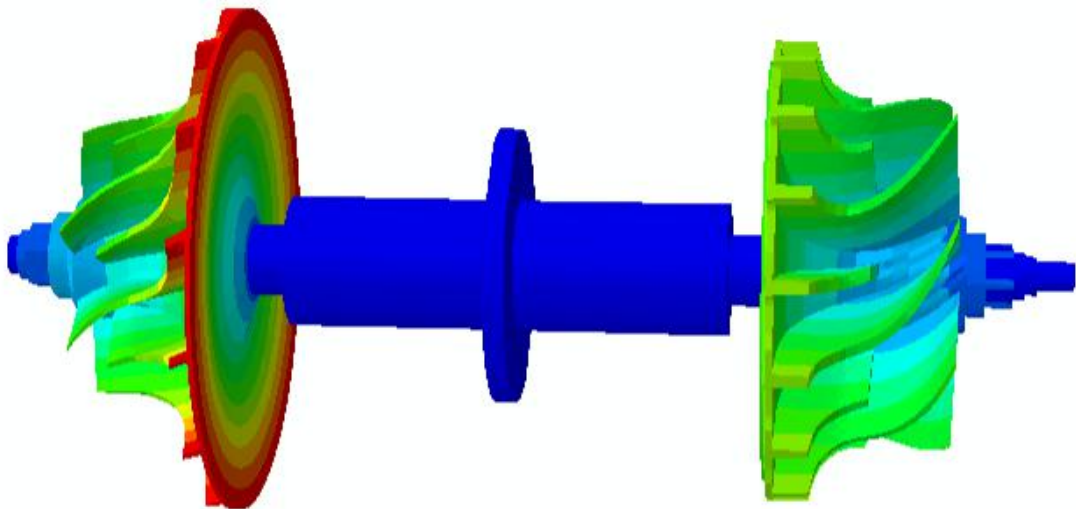
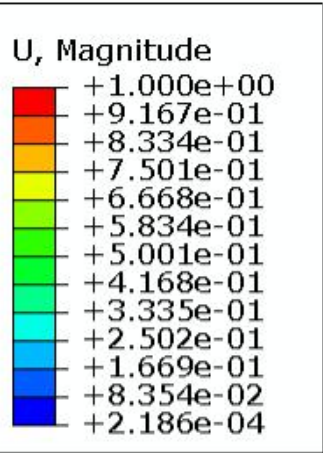
Station: 16, Sub-Station: 1

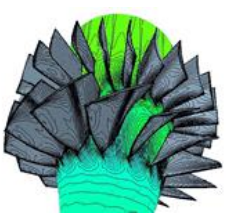
Probe 1 (x) 0 deg: Amp = 1.8633 phase = 132 at 110000 rpm
Probe 2 (y) 90 deg: Amp = 1.8461 phase = 312 at 110000 rpm



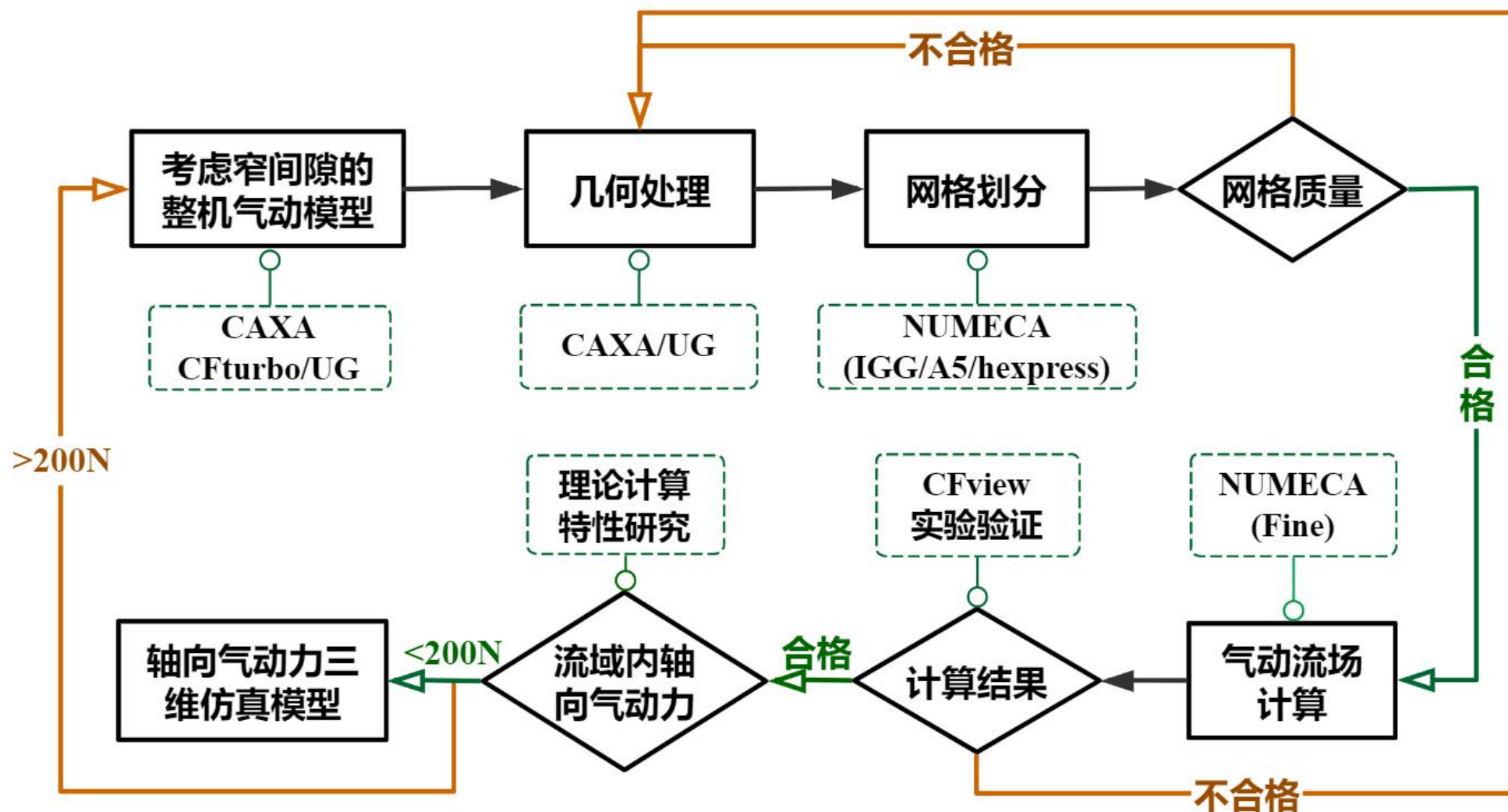


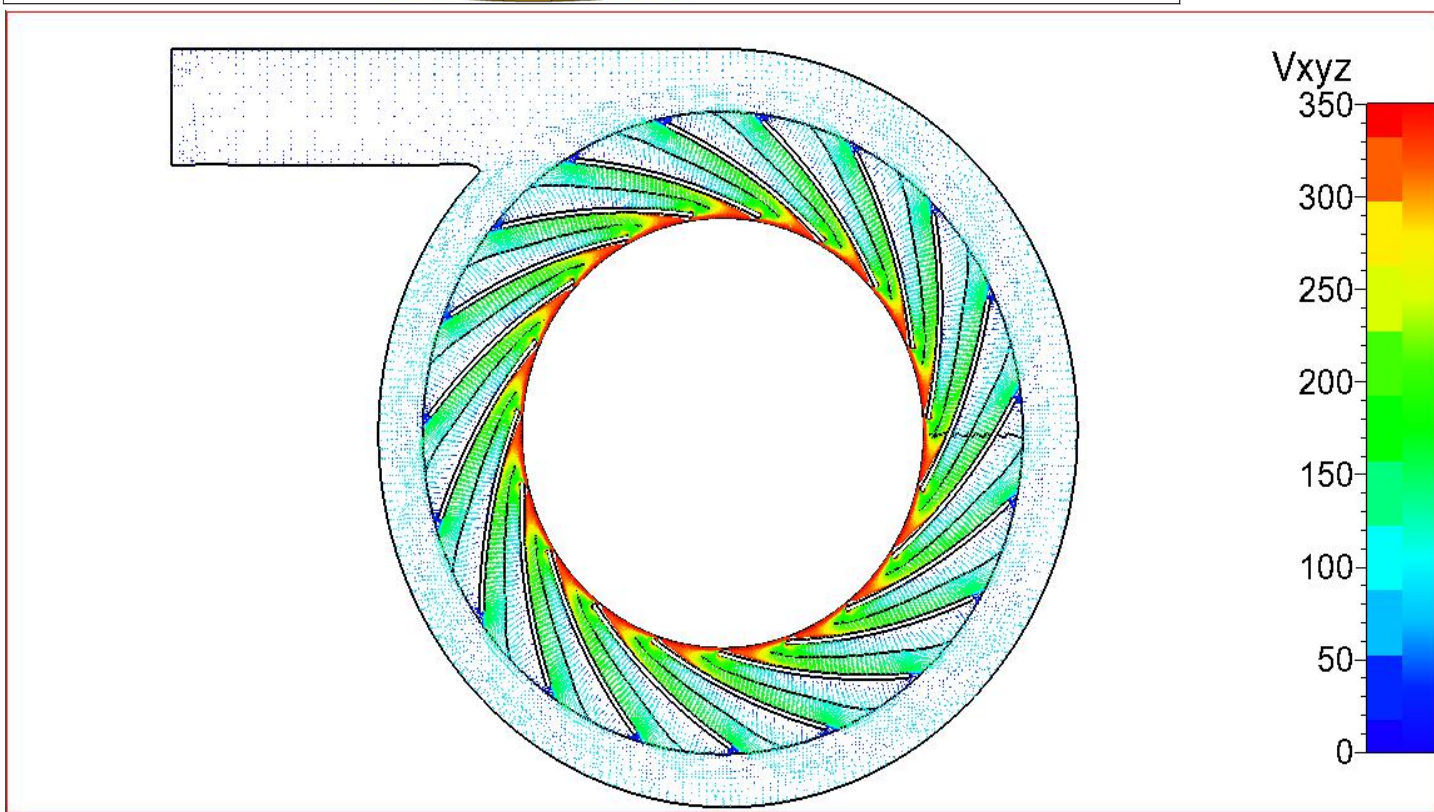
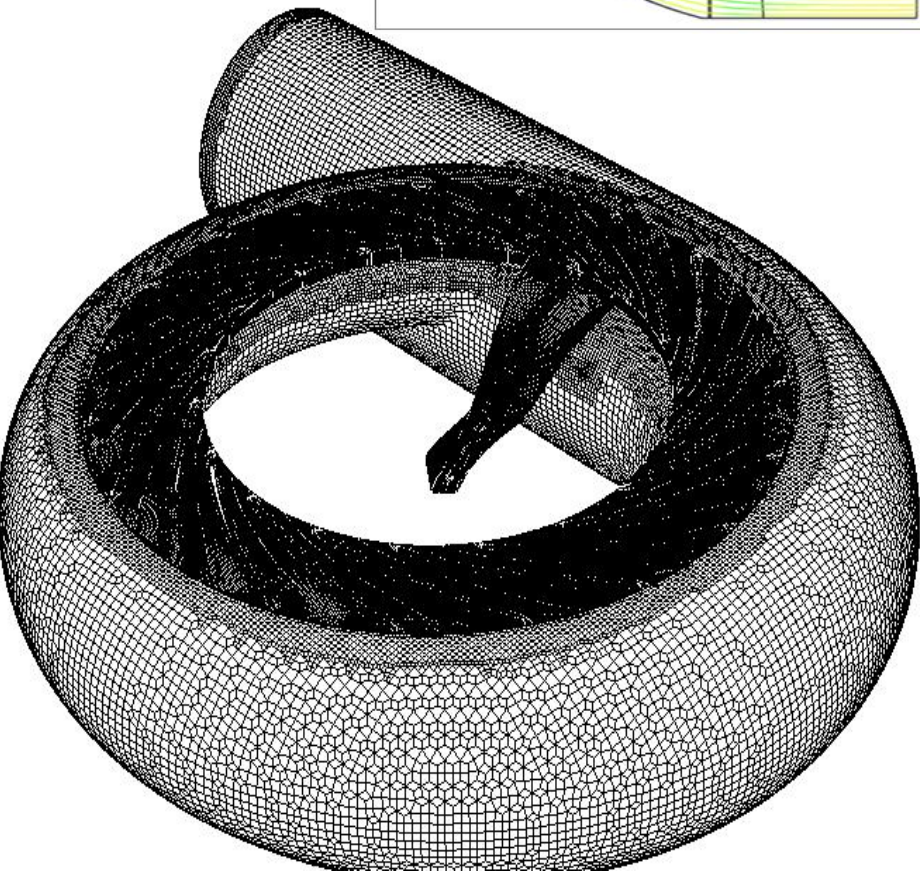
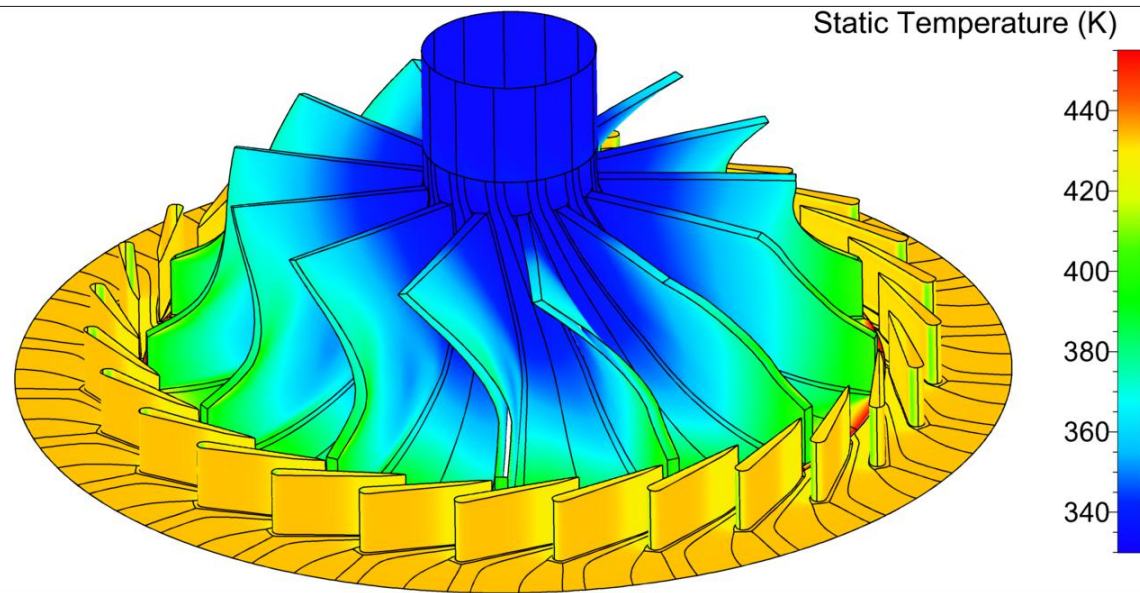
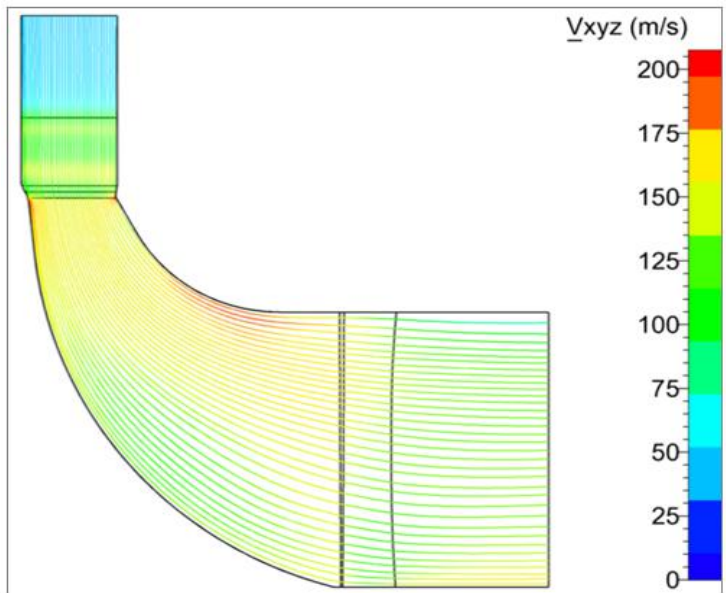
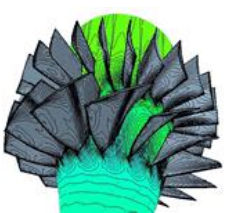
3.5: 关键零部件的动静强度

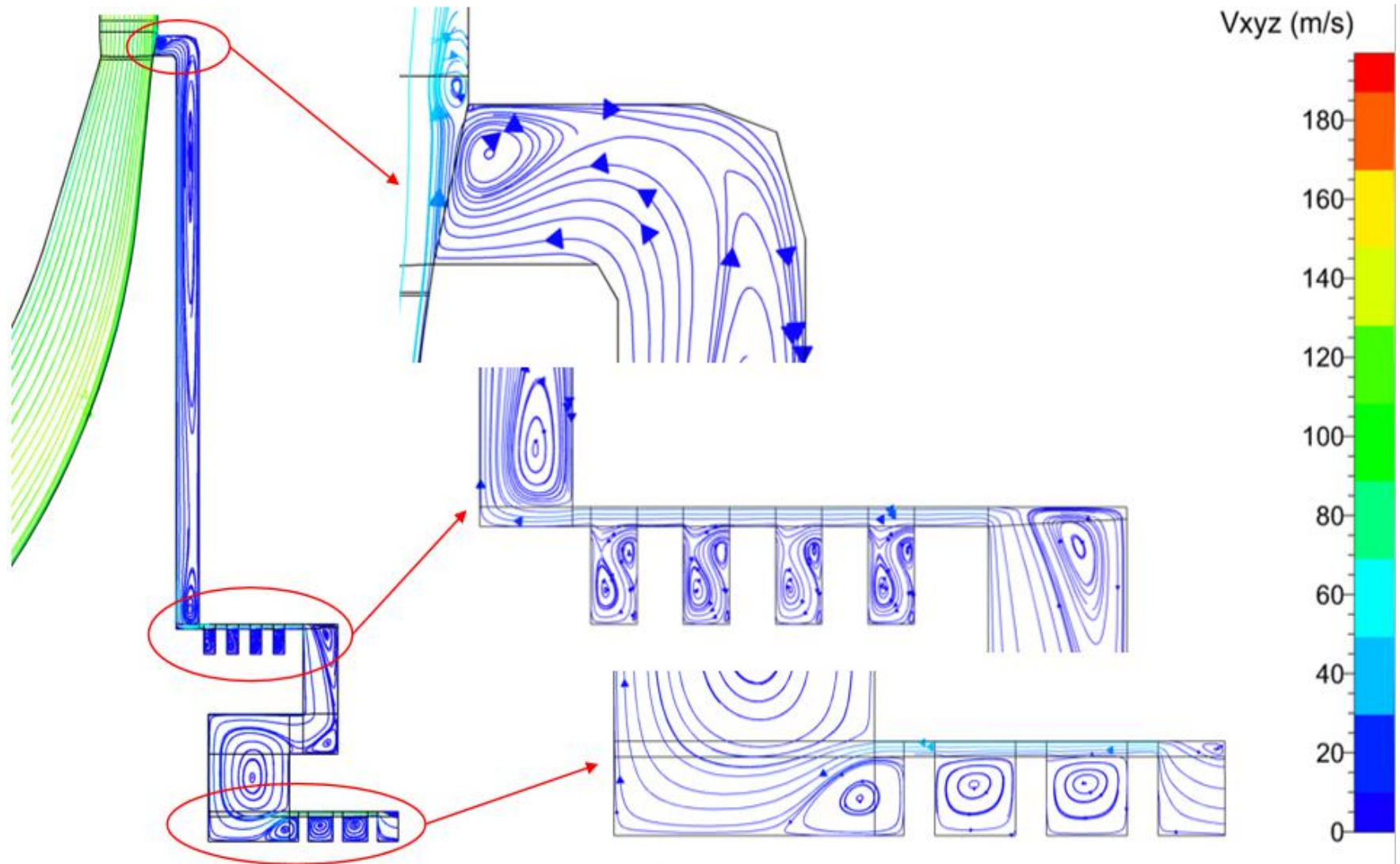
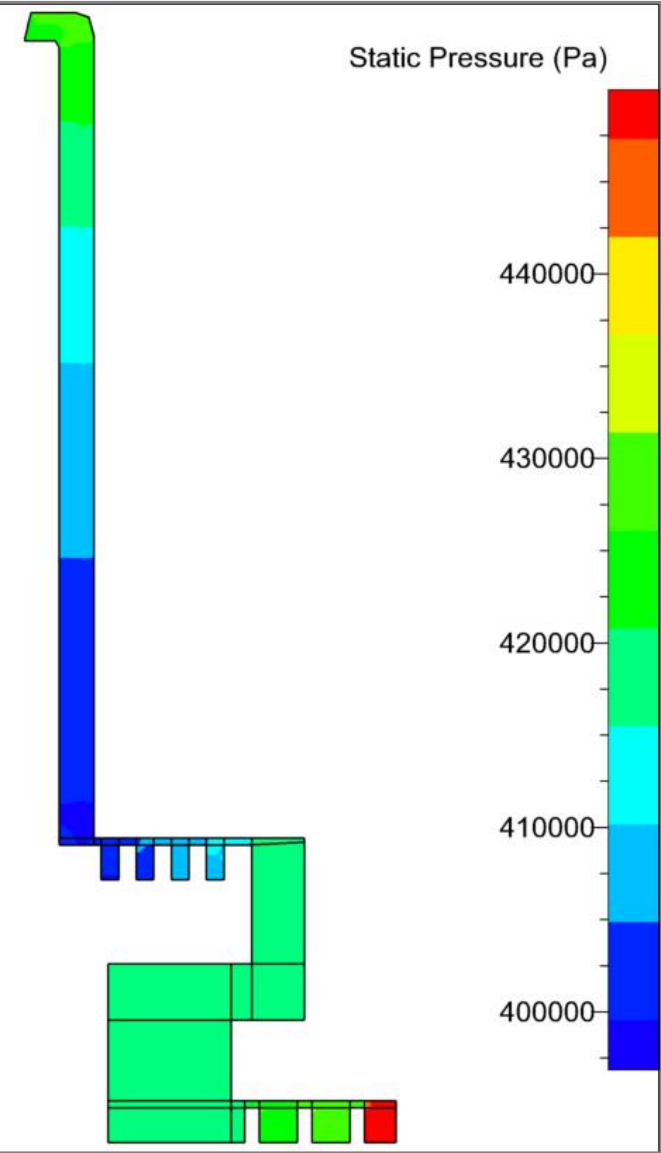
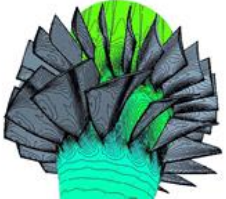




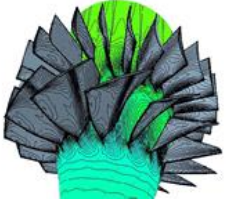
3.6: 整机气动仿真与结构优化







涡轮端轮背密封间隙流线图



总结：高科技工业应用的高精尖旋转叶轮装备研发

气浮透平膨胀机 关键技术研究

- 新型气体静压轴承
- 气体动压轴承
- 轴承气冷却与密封
- 多轮同轴转子动力学
- 叶型、轴向力平衡



微型气浮压气机 整机技术研究

- 多级压气机气动设计
- 高速无刷电机
- 气浮压气机整机技术
- 新型蜗壳流道开发



氢液化膨胀机及 燃料电池两级压气机

- 氢氦透平膨胀机研发
- 空气悬浮两级压气机

