

CAESES在高功率密度冷却系统技术跨代中的应用与展望

报告人：王嘉炜

中国北方车辆研究所

13810295600

jwwang@noveri.com.cn

报告提纲

一

高功率密度冷却风扇的特点

二

传统冷却风扇的设计与应用

三

基于Caeses技术的冷却风扇优化设计

四

多场耦合与智能化技术的应用与展望

五

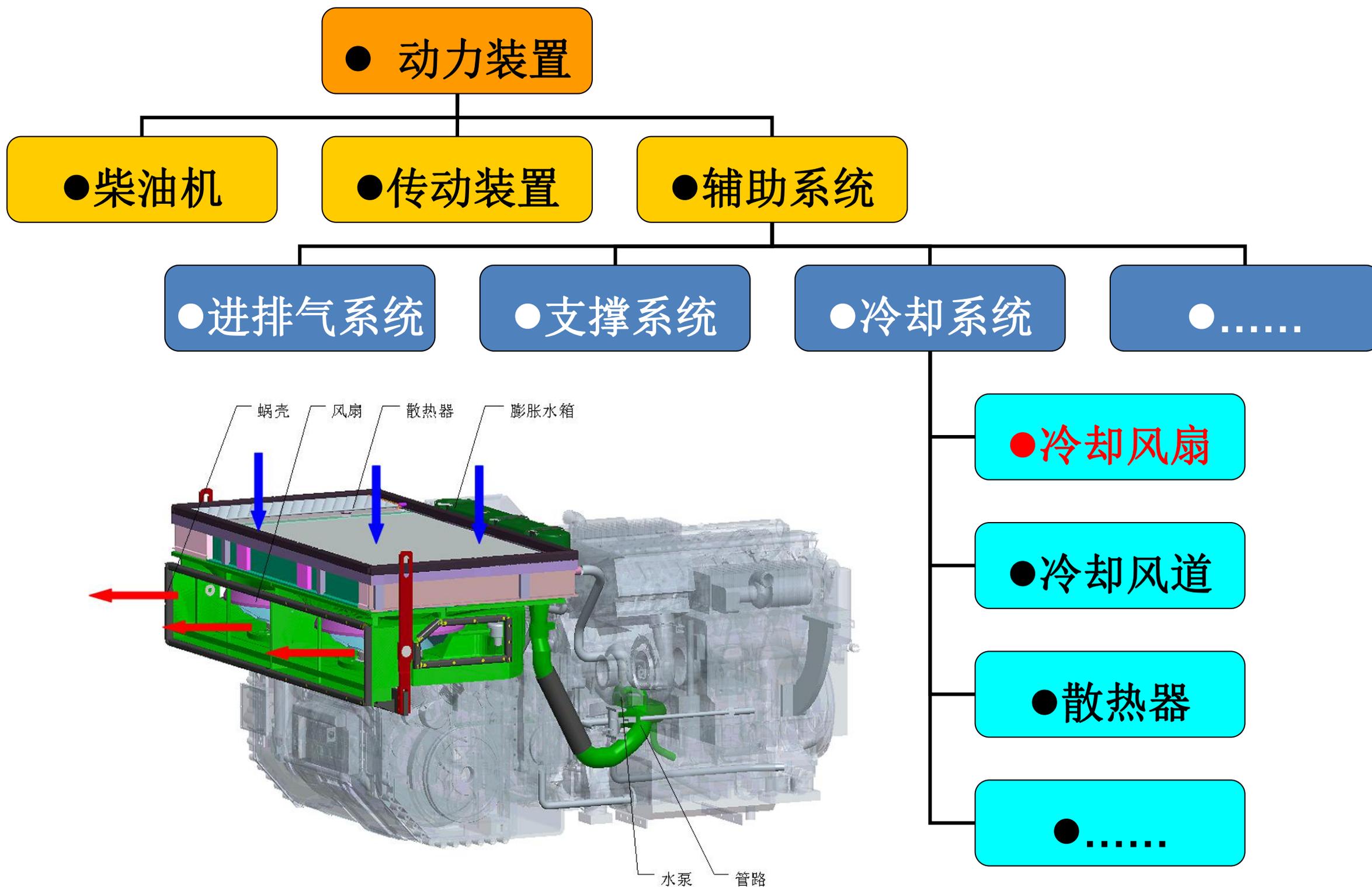
合作与交流



中国兵器
工业集团
NORINCO GROUP

中国北方车辆研究所
CHINA NORTH VEHICLE RESEARCH INSTITUTE

一. 高功率密度冷却风扇的特点



一. 高功率密度冷却风扇的特点

冷却风扇是用于高功率密度动力装置冷却系统中的一种典型的叶轮机械，主要作用是通过叶片旋转对气流做功，为冷却系统提供强制对流空气，使冷却空气具备足够的能量去克服沿程阻力，在动力舱冷却风道与大气间建立稳定的空气流动，从而使冷却空气带走足够的热量。



混流风扇



离心风扇



轴流风扇

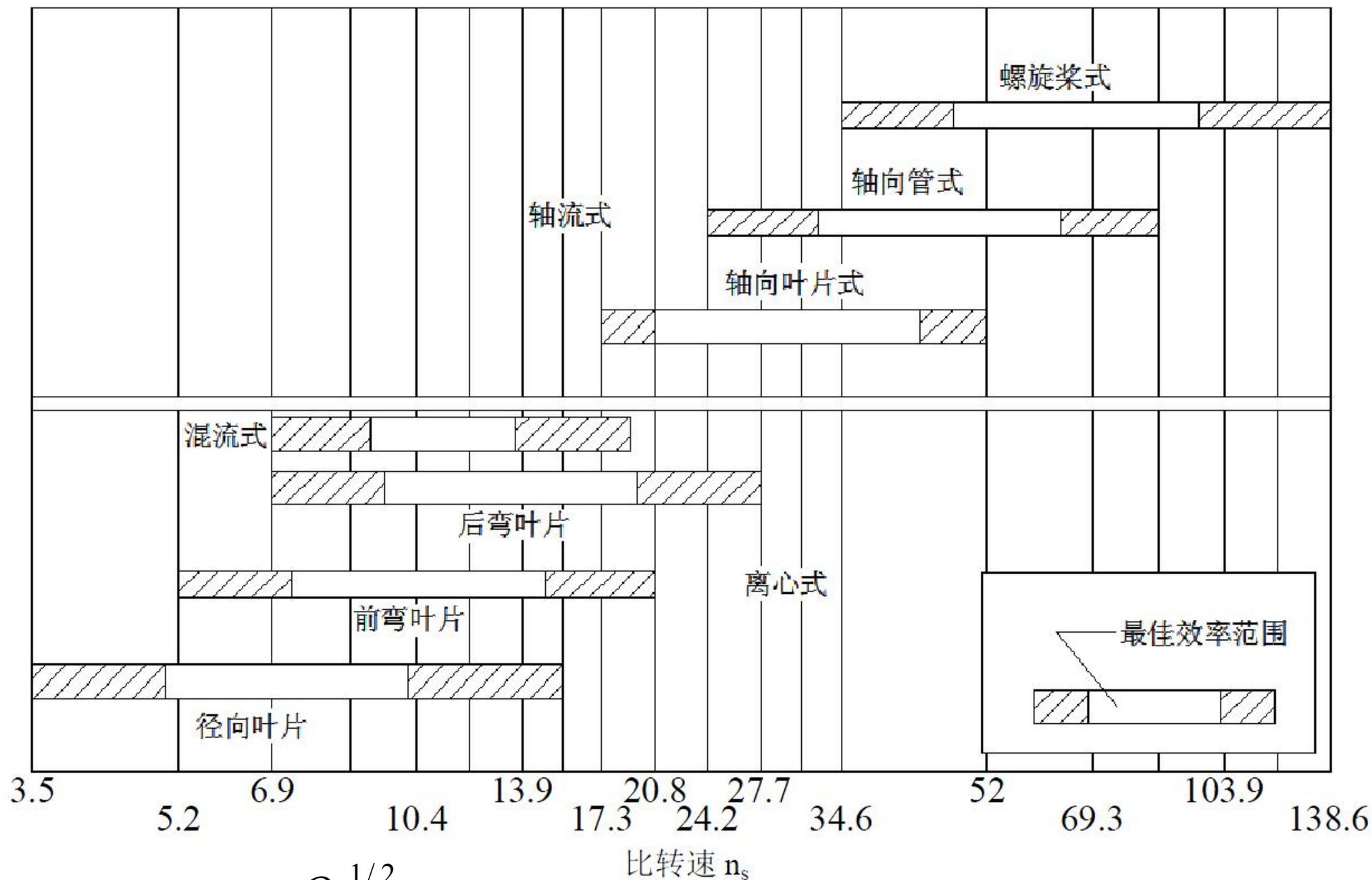
“大气是所有地面车辆冷却系统的最终散热场所。发动机及其他部件散发的热量，最终必定传至大气中（除在水下工作外）。当车辆以低速行驶或滑行时，迎风的空气流量是不足以达到冷却目的的。对于车辆来说，即使车辆是在最高速度下行驶，迎风的空气流量对于冷却来说仍然是太低了。为了向车辆冷却系统及车辆部件的强制对流，提供必要的冷却空气，必须要有风扇。”

——《车辆冷却系统设计手册》美国陆军器材局1975年版

车用冷却风扇的几个显著特点：

1. 风量大、压头高、耗电大
2. 安装空间限制严格
3. 工作转速高
4. 上下游流动条件复杂
5. 工作环境复杂，可靠性要求高

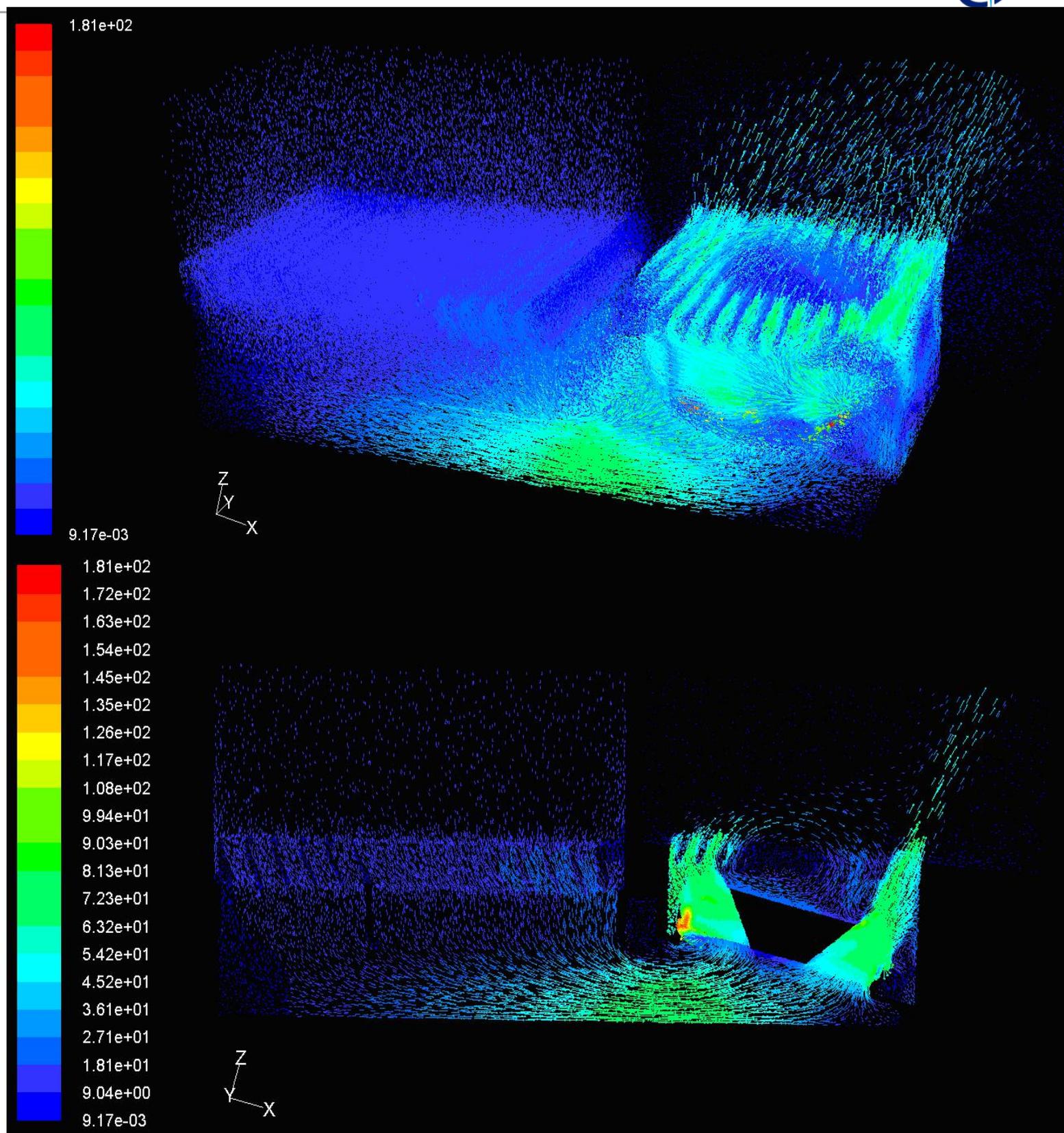
一. 高功率密度冷却风扇的特点



$$n_s = n \frac{Q_v^{1/2}}{p^{3/4}}$$

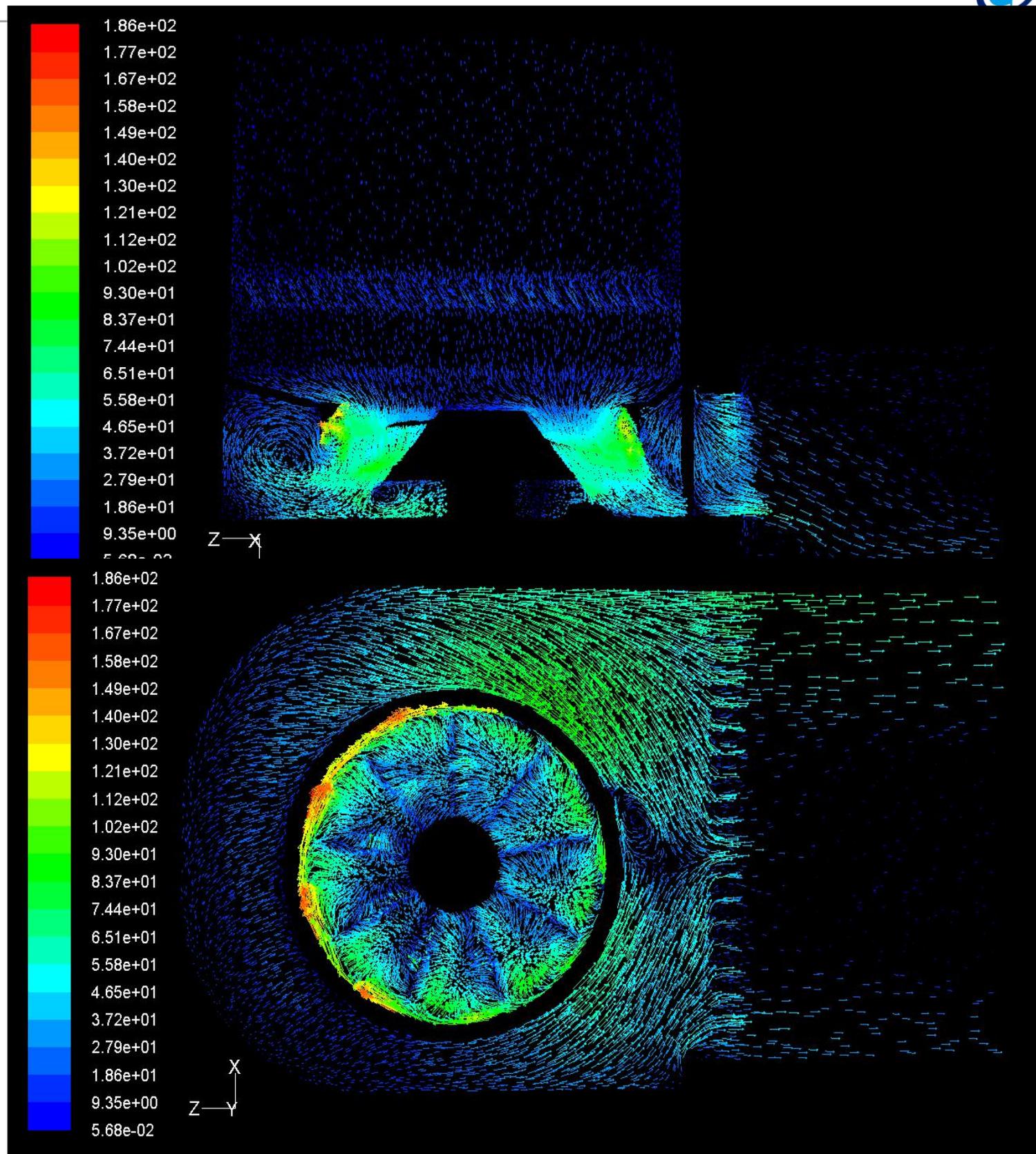
不同类型风扇的比转速范围

一. 高功率密度冷却风扇的特点



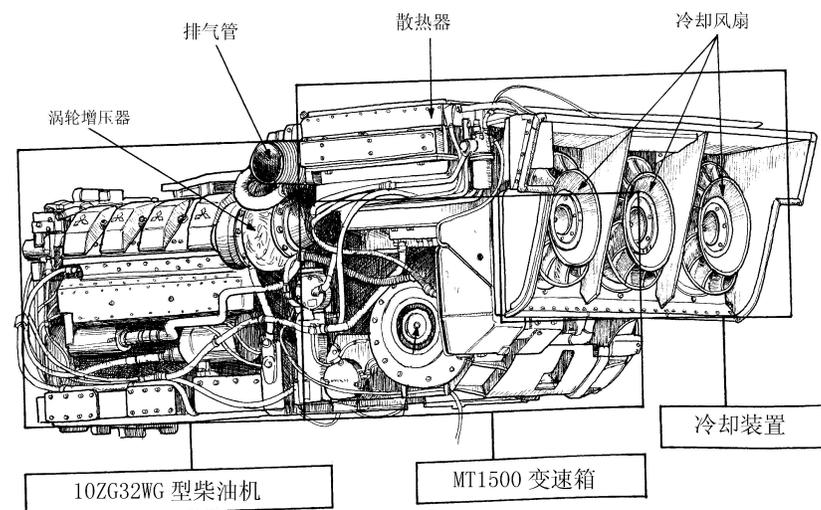
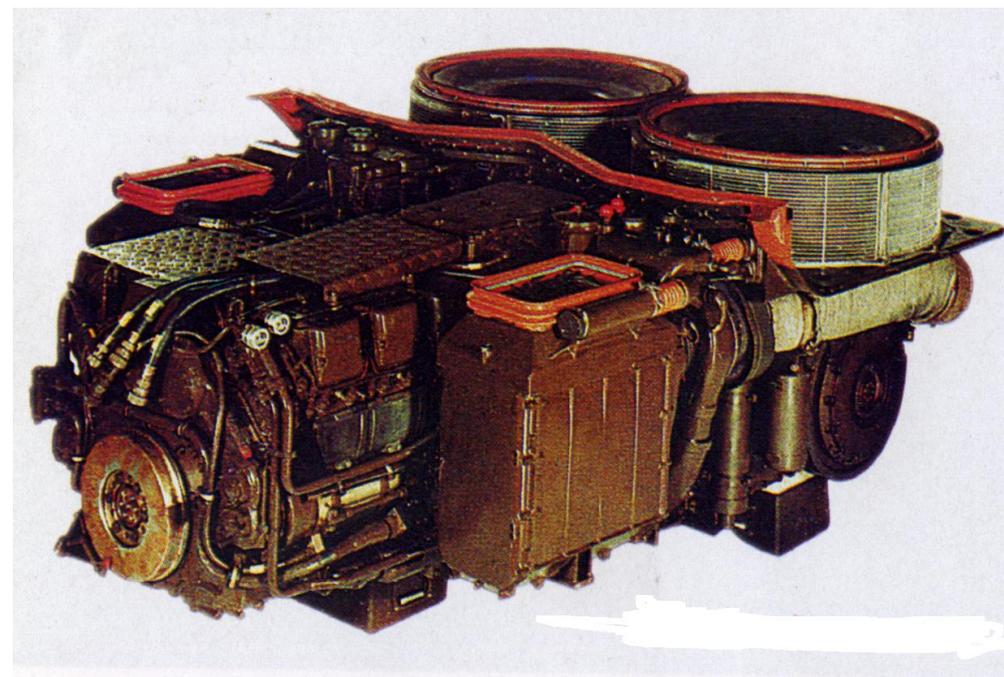
一种典型冷却系统的空气流动图谱

一. 高功率密度冷却风扇的特点



一种典型冷却系统的空气流动图谱

一. 高功率密度冷却风扇的特点



几种典型冷却系统气动布局

一. 高功率密度冷却风扇的特点

高功率密度
动力冷却系
置特殊需求

兼具大风量高压头
的气动特点

复杂限域空间下
抗流动畸变能力

紧凑结构下与风道
通流部件的适应性匹配

与多种传动装置的
一体化集成

在复杂环境下长期
高速可靠的工作能力

技术要点

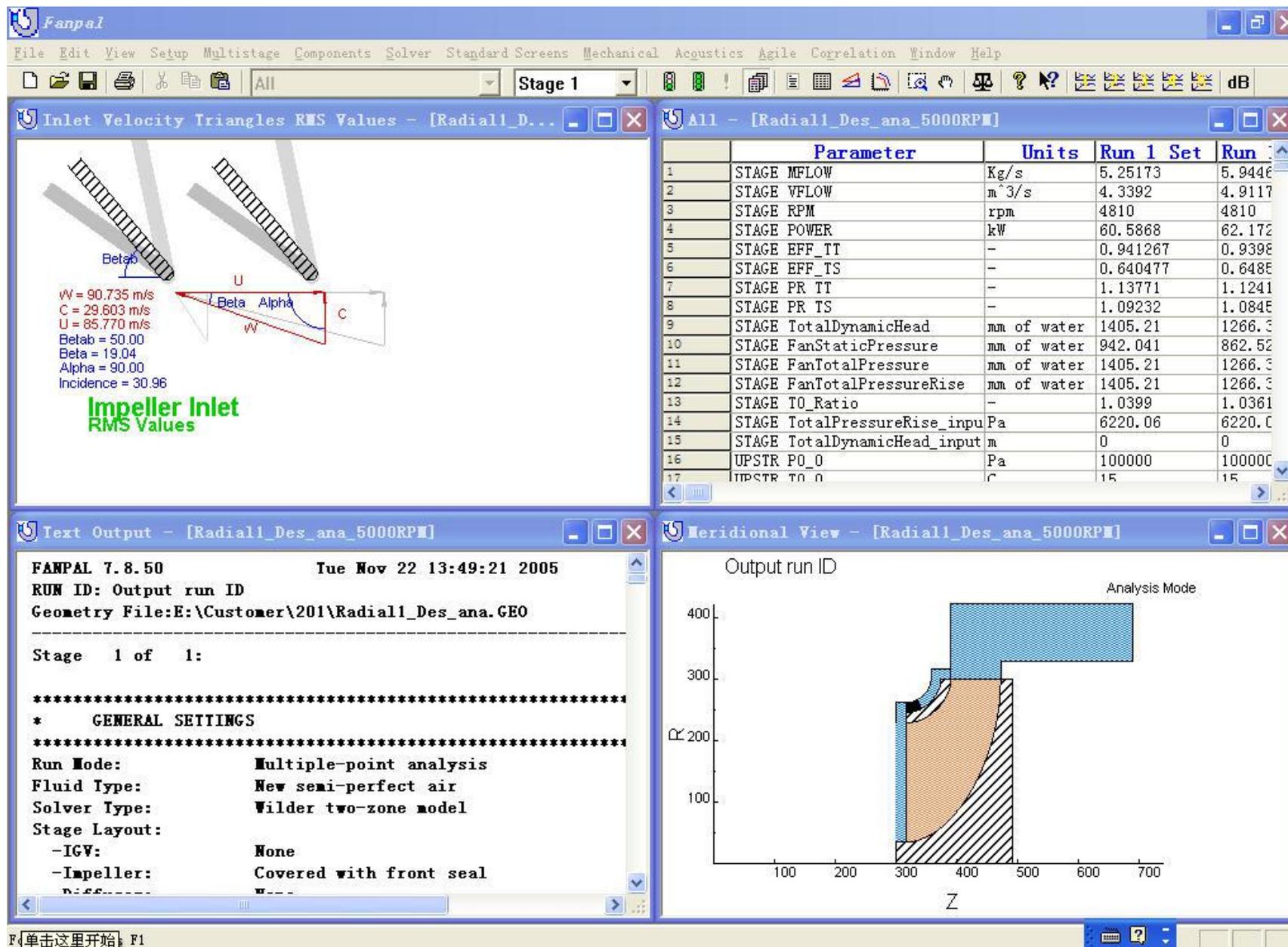
多物理场多目标、
耦合、参数化冷却
风扇的优化设计方
案

二. 传统冷却风扇的设计与应用

- 基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计
- 离心风扇在实车状态下的应用与分析

基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计

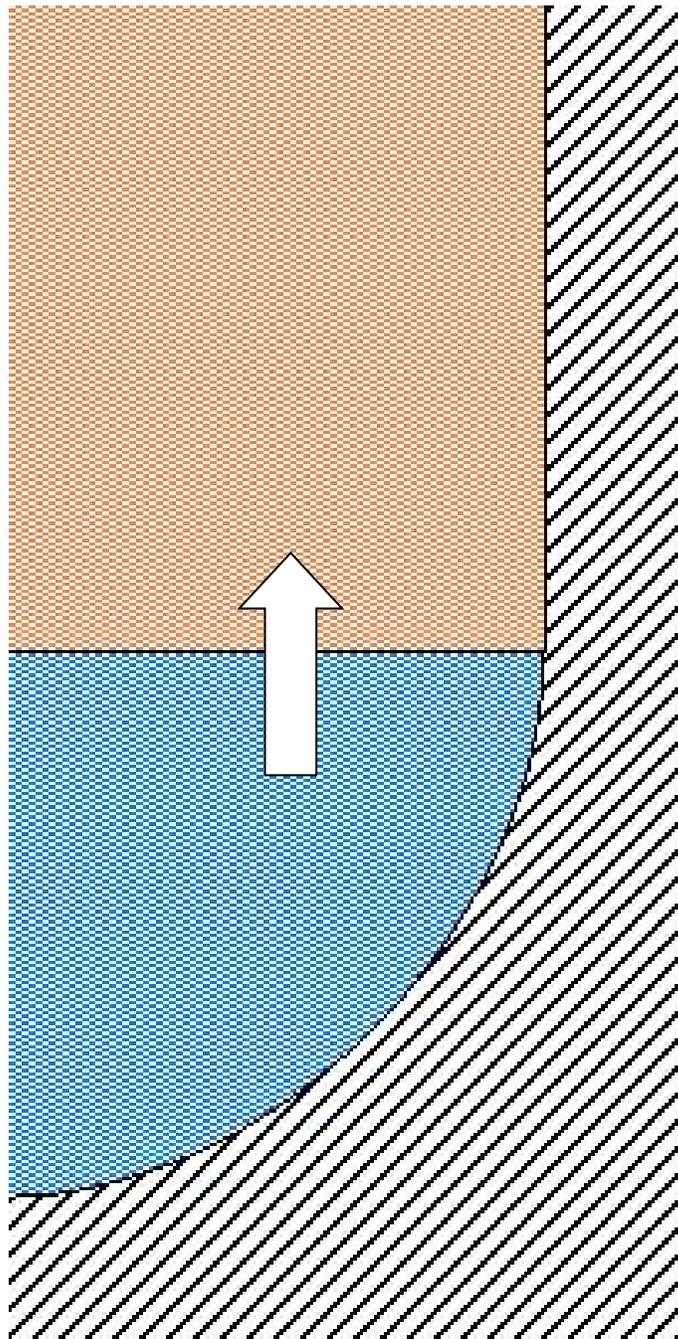
1. 离心风扇的一元流动分析



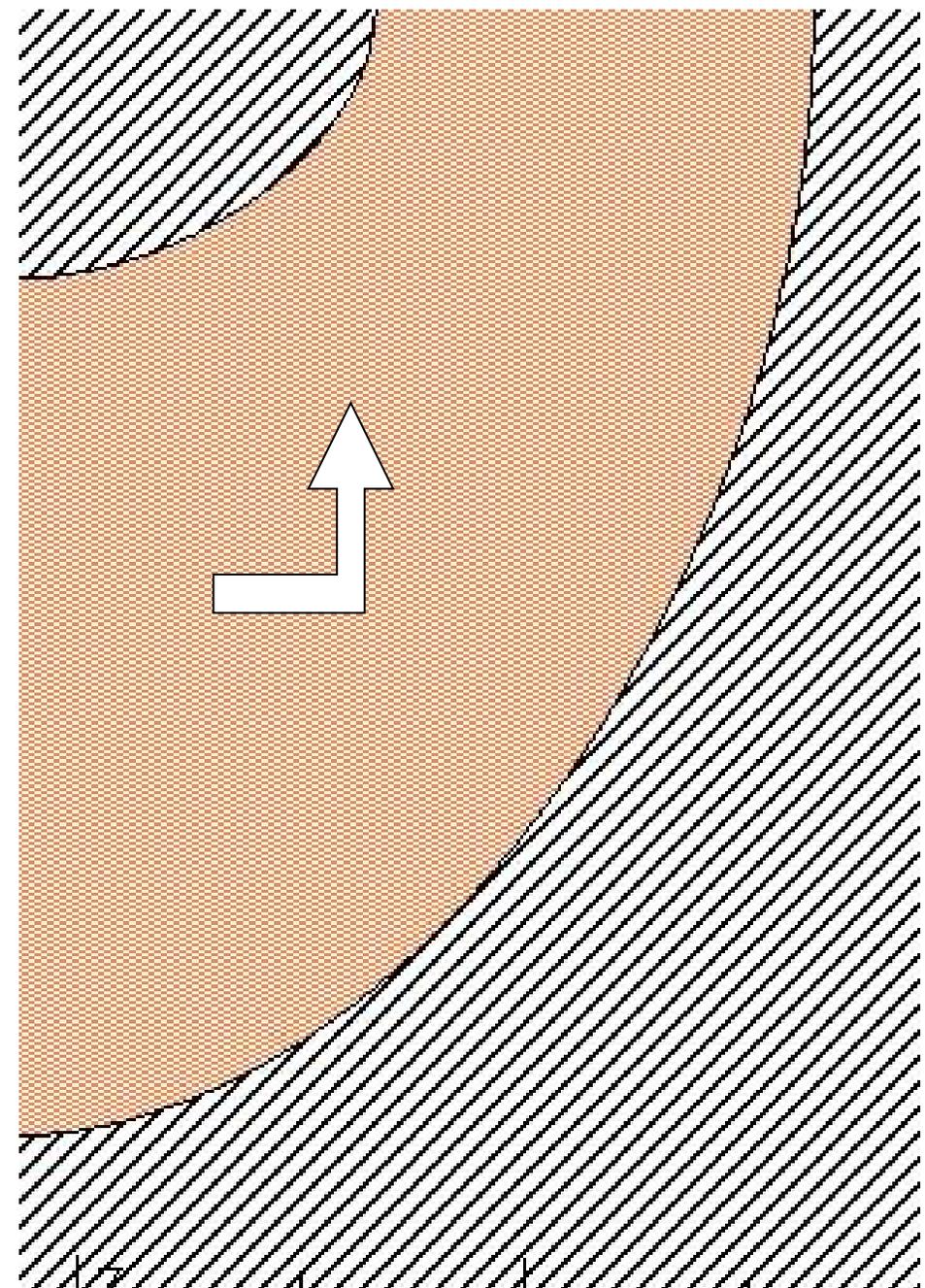
基于FANPAL模块的风扇一维流动分析

基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计

1. 离心风扇的一元流动分析



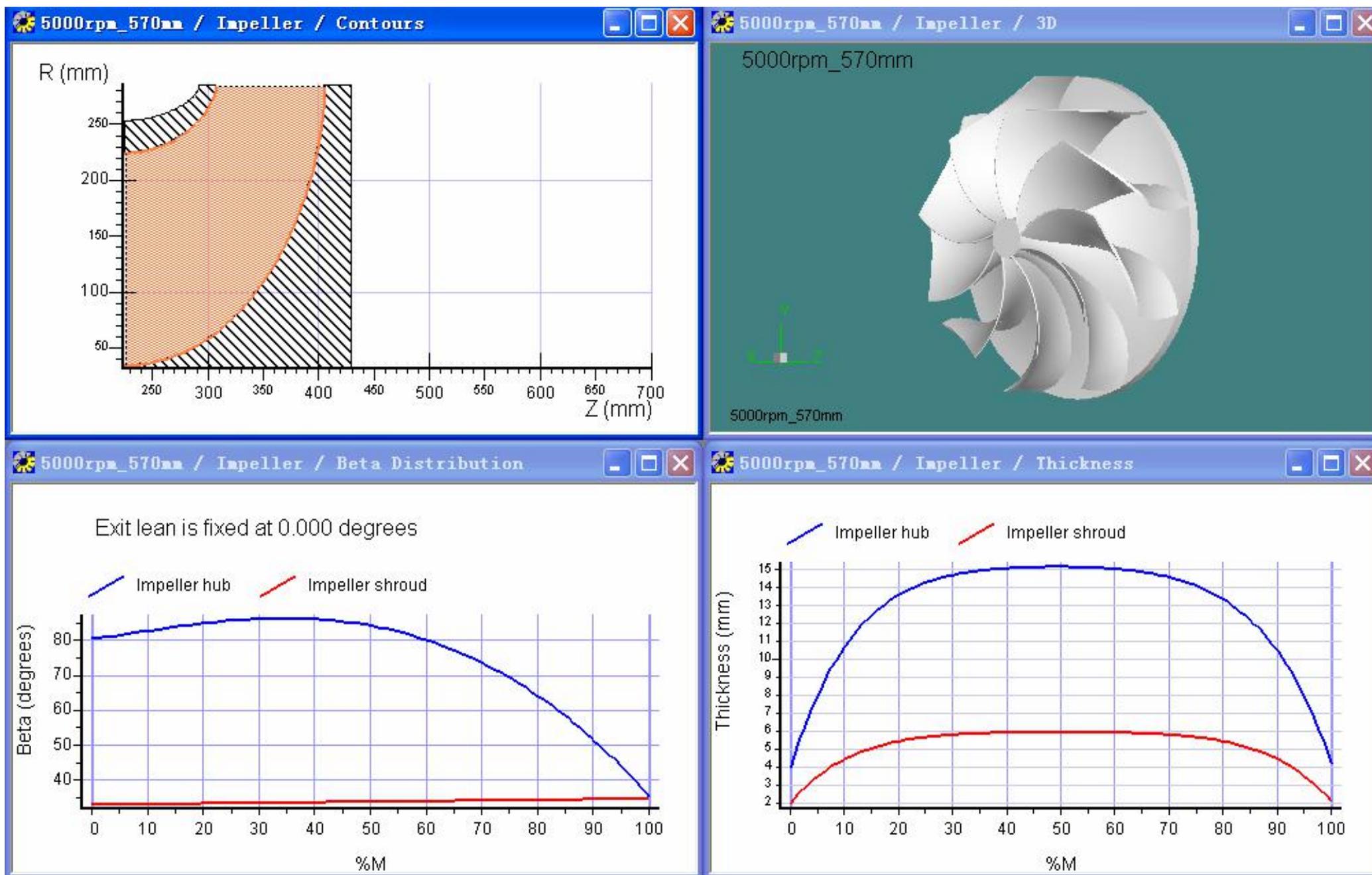
径向进气



轴向进气

基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计

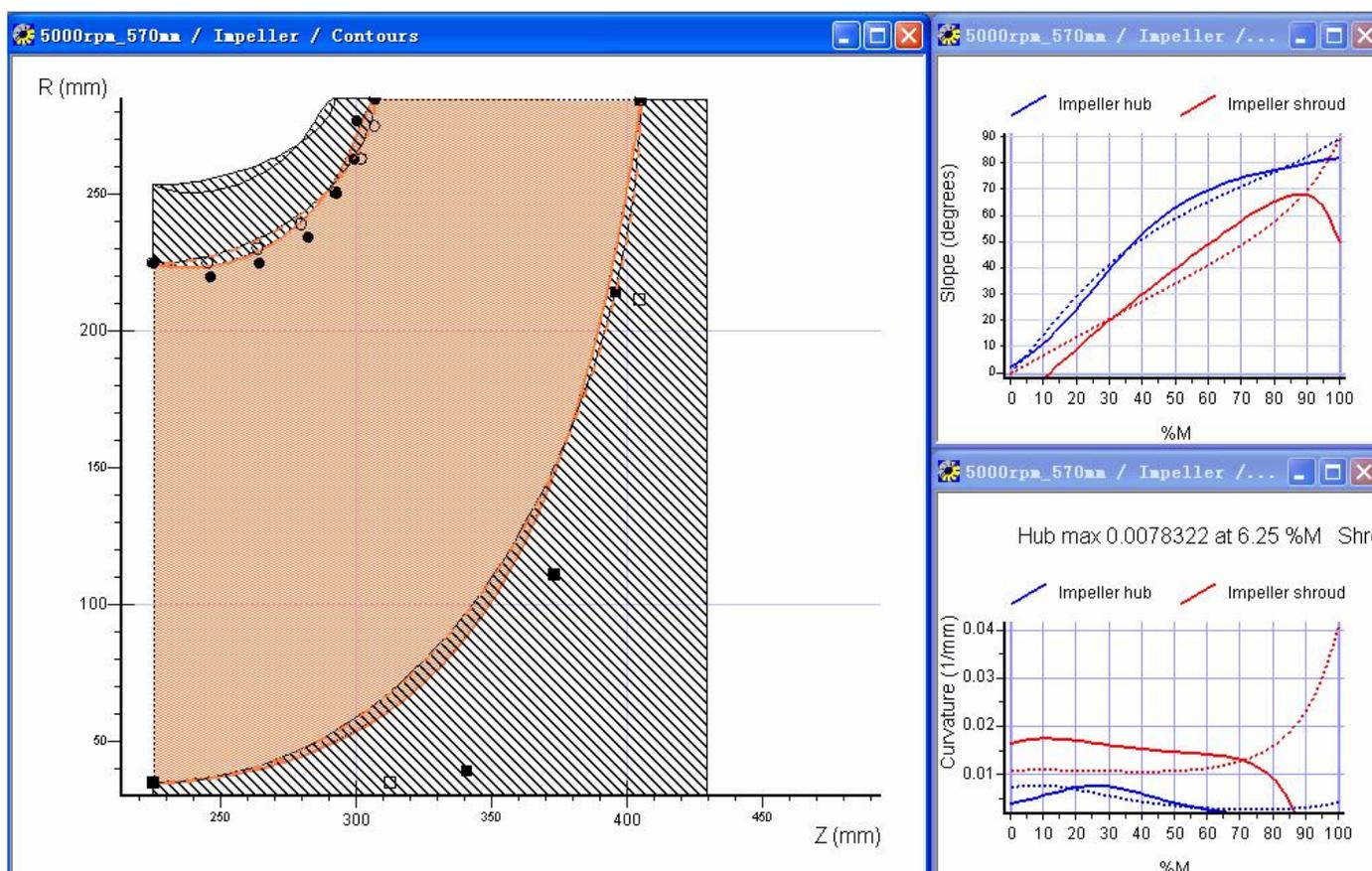
2. 子午流道优化及三维建模



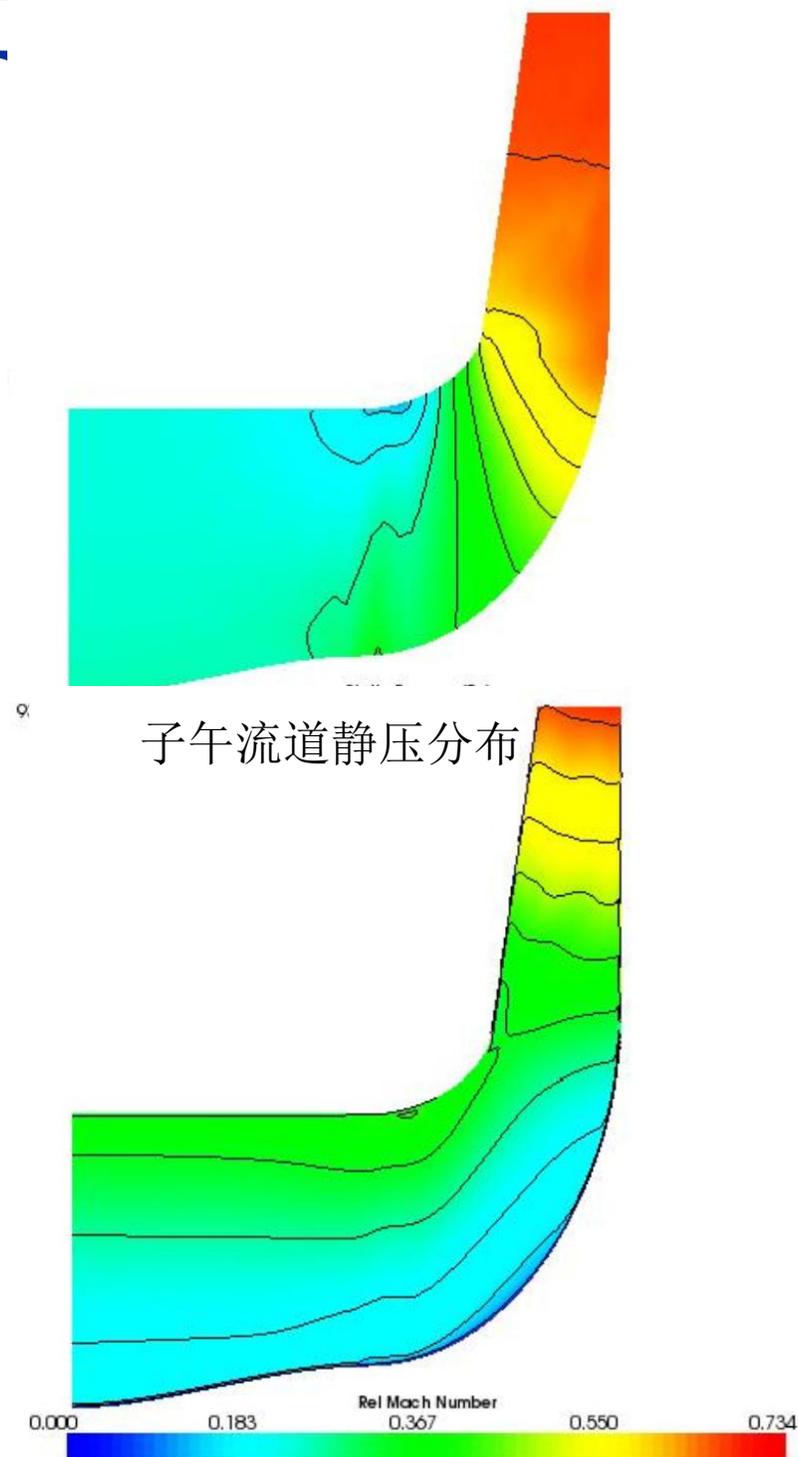
基于AxCent模块的风扇子午流道优化及三维建模

基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计

2. 子午流道优化及三维建模

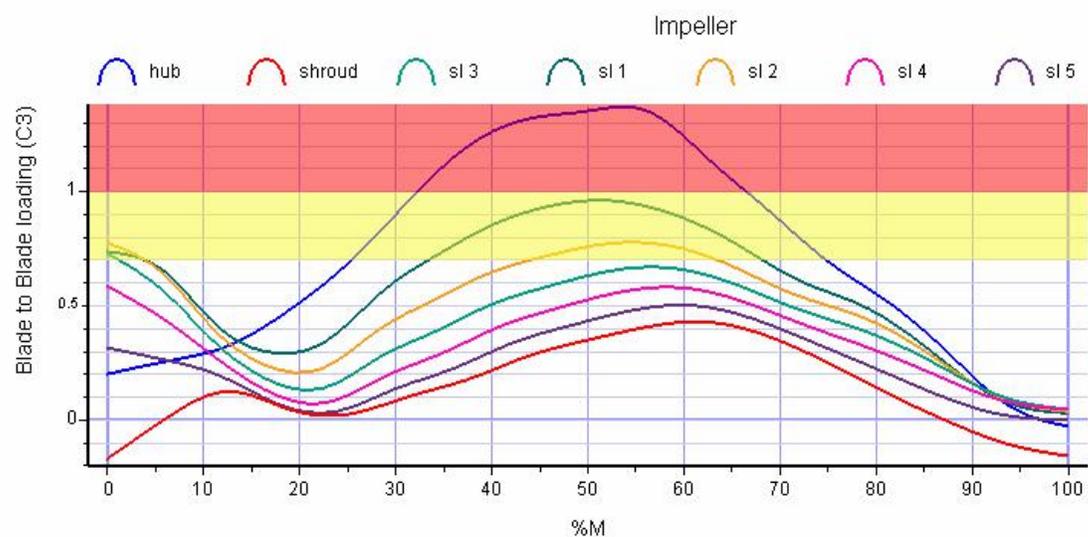


子午流道优化

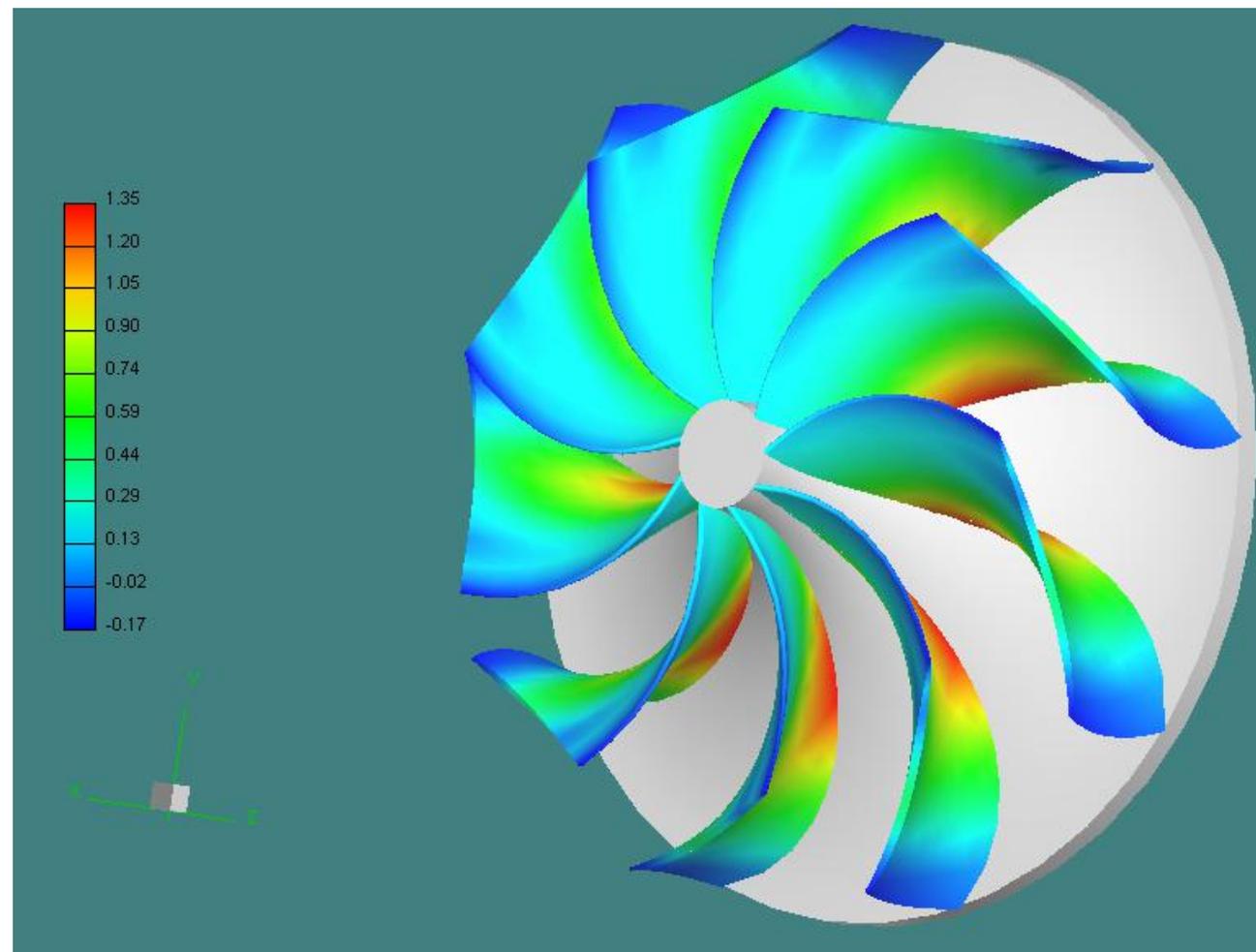


基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计

2. 子午流道优化及三维建模



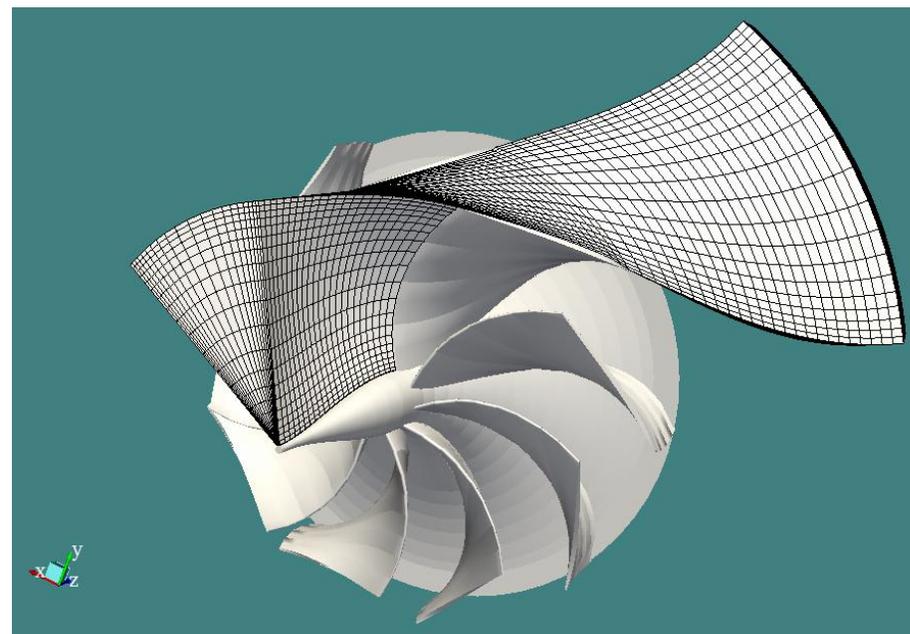
流线曲率法得出不同截面载荷分布情况



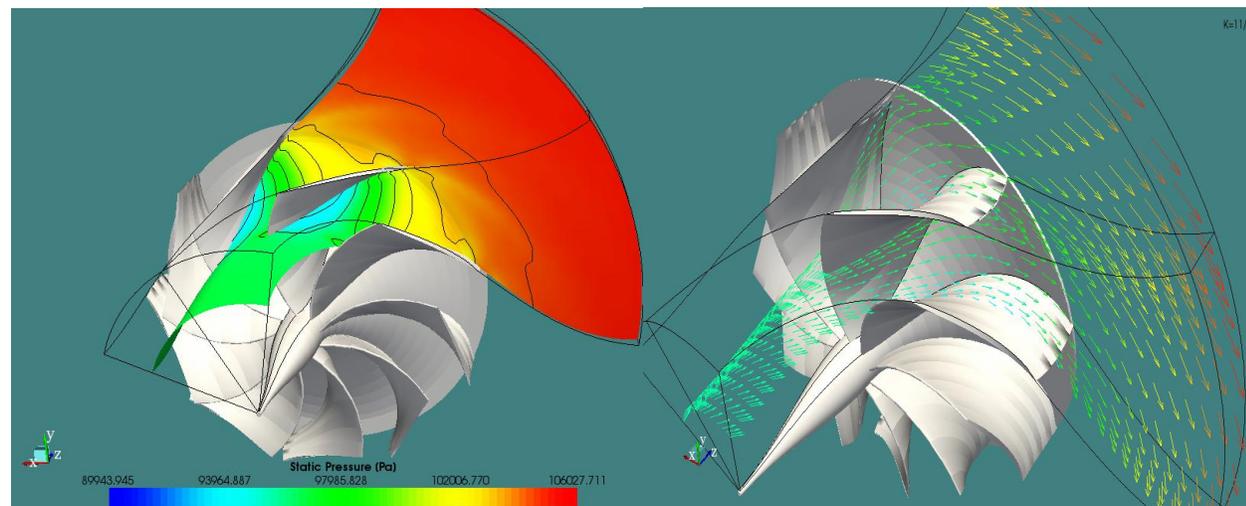
流线曲率法三维效果

基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计

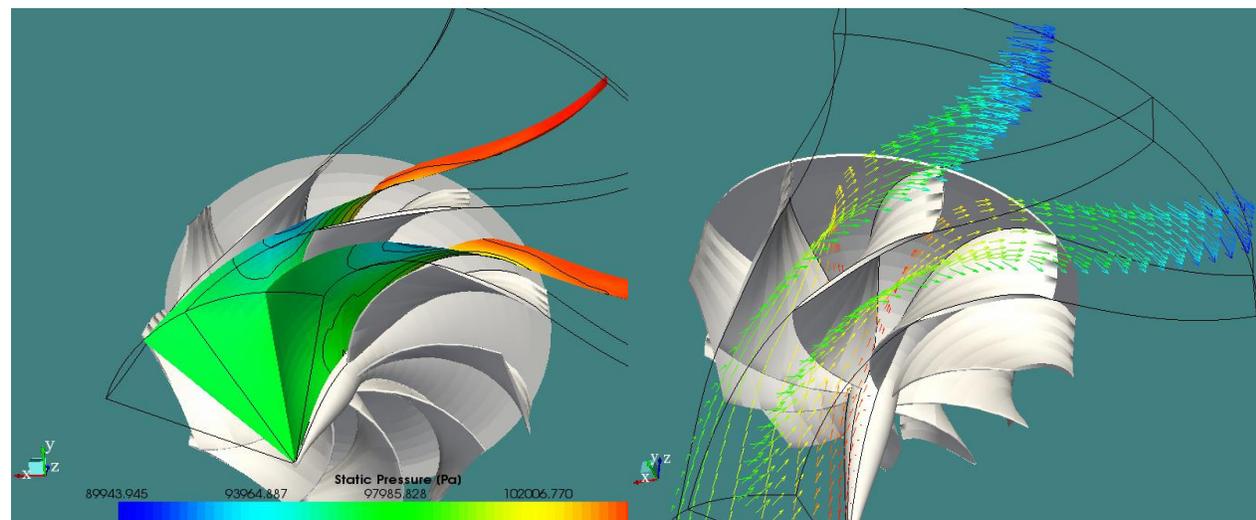
3. PushButton三维CFD仿真



H型计算网格



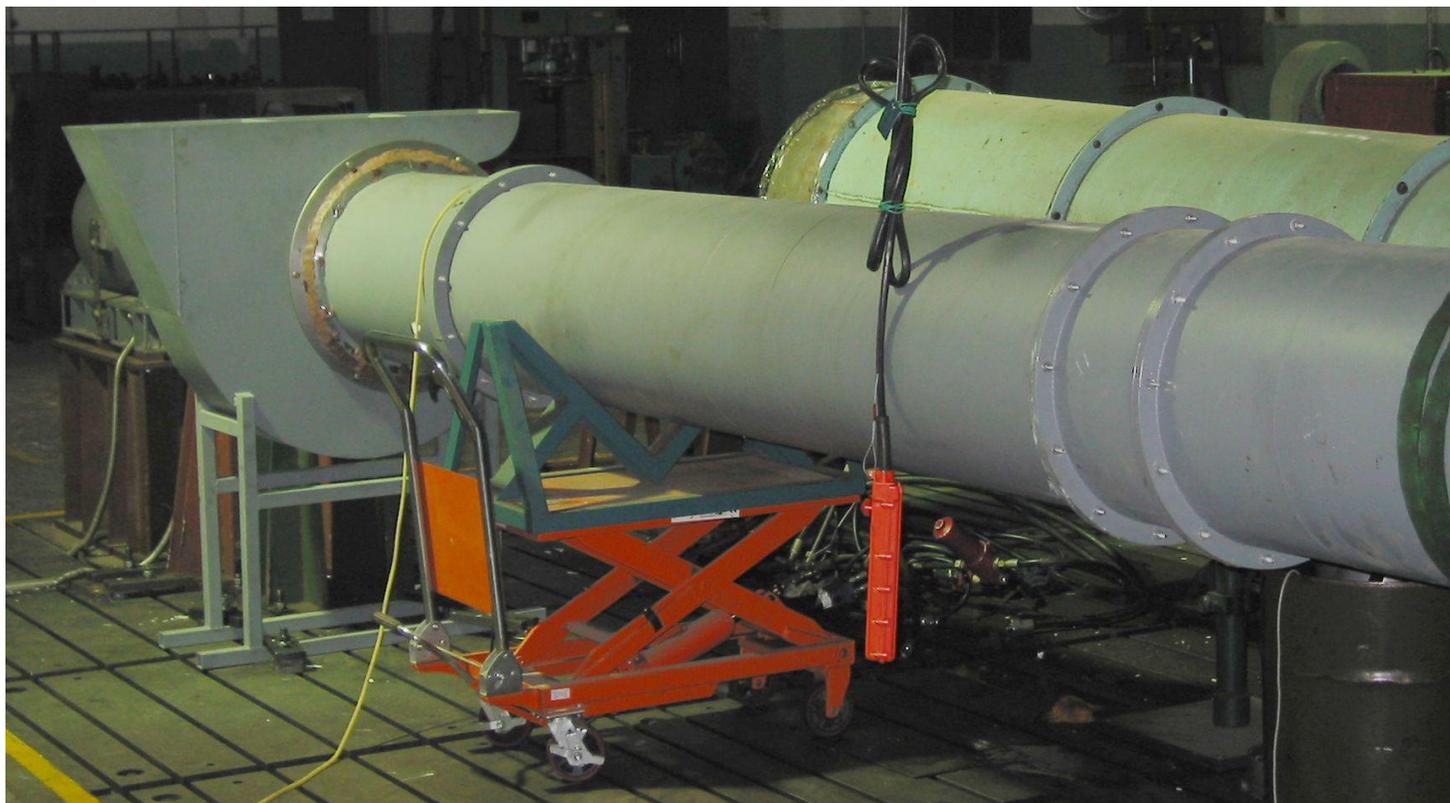
S_1 流面静压分布及速度矢量



S_2 流面静压分布及速度矢量

基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计

3. 实物样机及台架试验



离心风扇气动性能试验



离心风扇样机实物

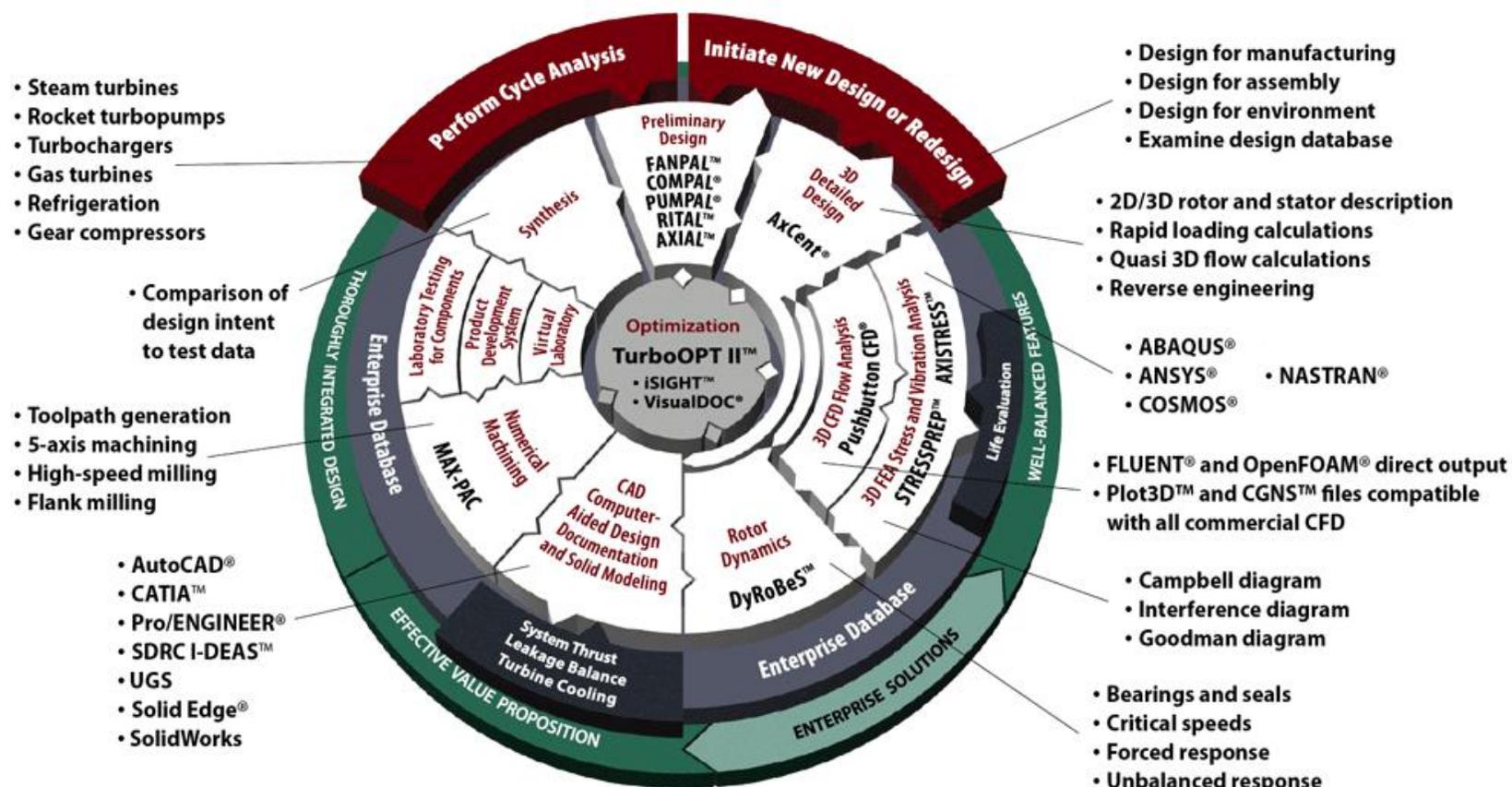
基于Concepts NREC软件进行的冷却风扇设计

优点

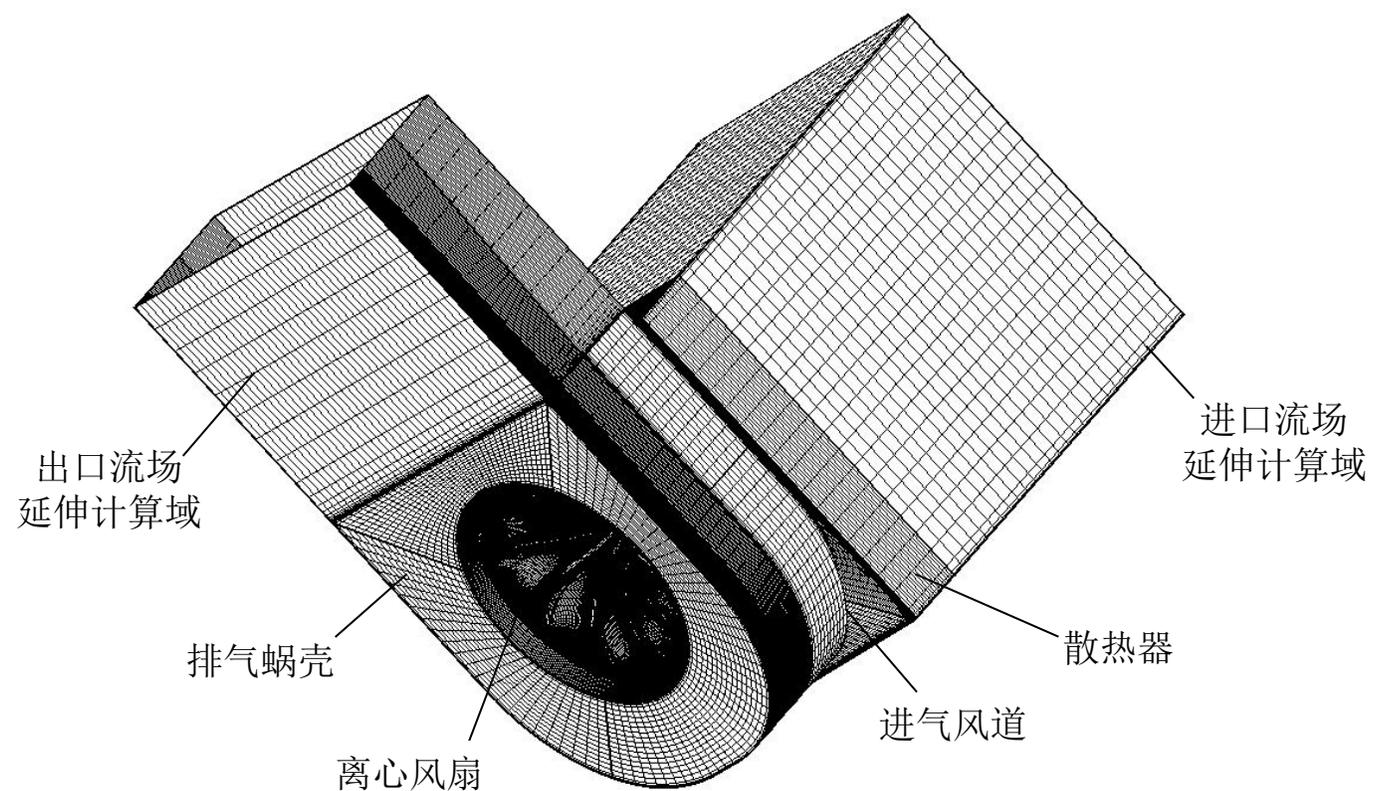
- 方便、快捷
- 专业化程度高
- 体系完整
- 应用面广

缺点

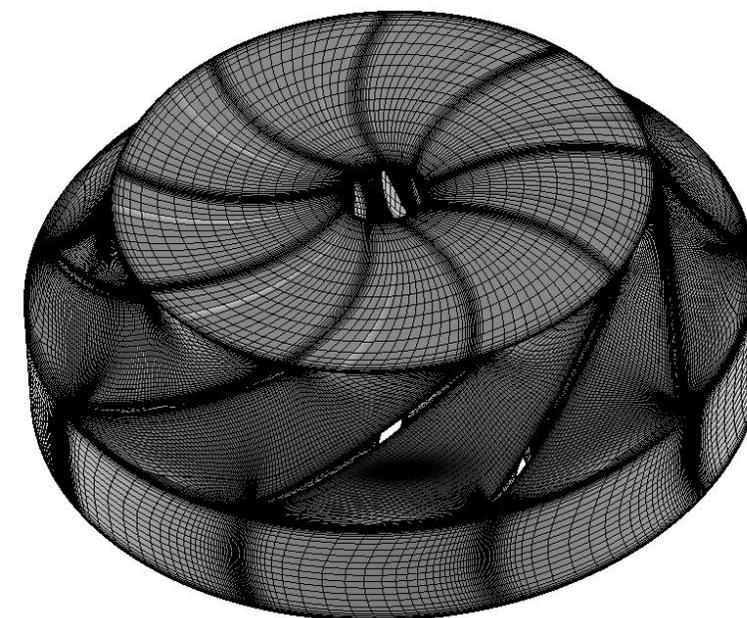
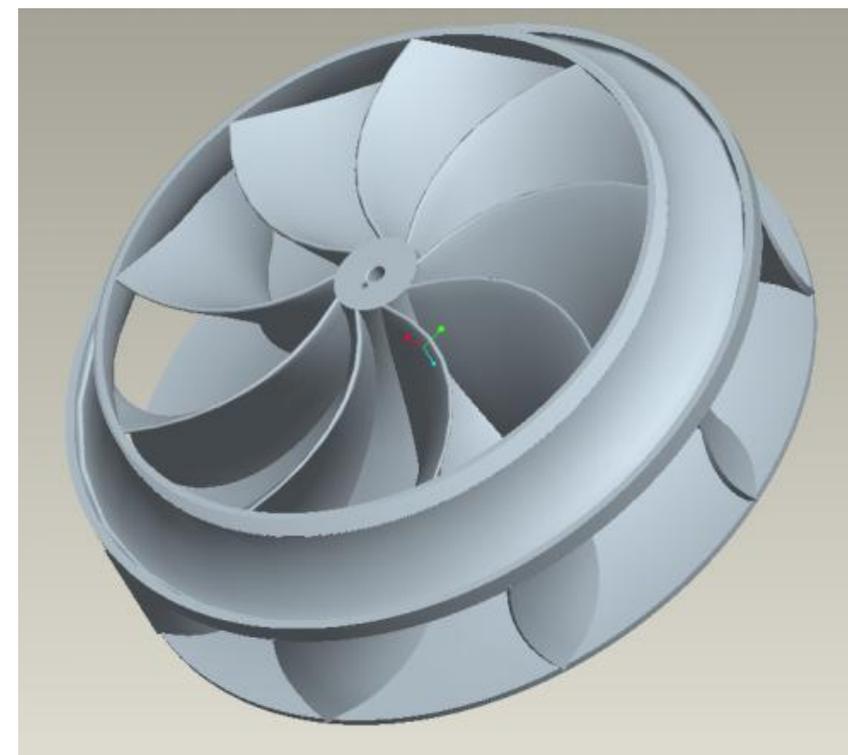
- 内置流动损失模型
- 对设计人员要求较高
- 依赖于设计经验
- 基于理想设计工况



离心风扇在实车状态下的应用与分析

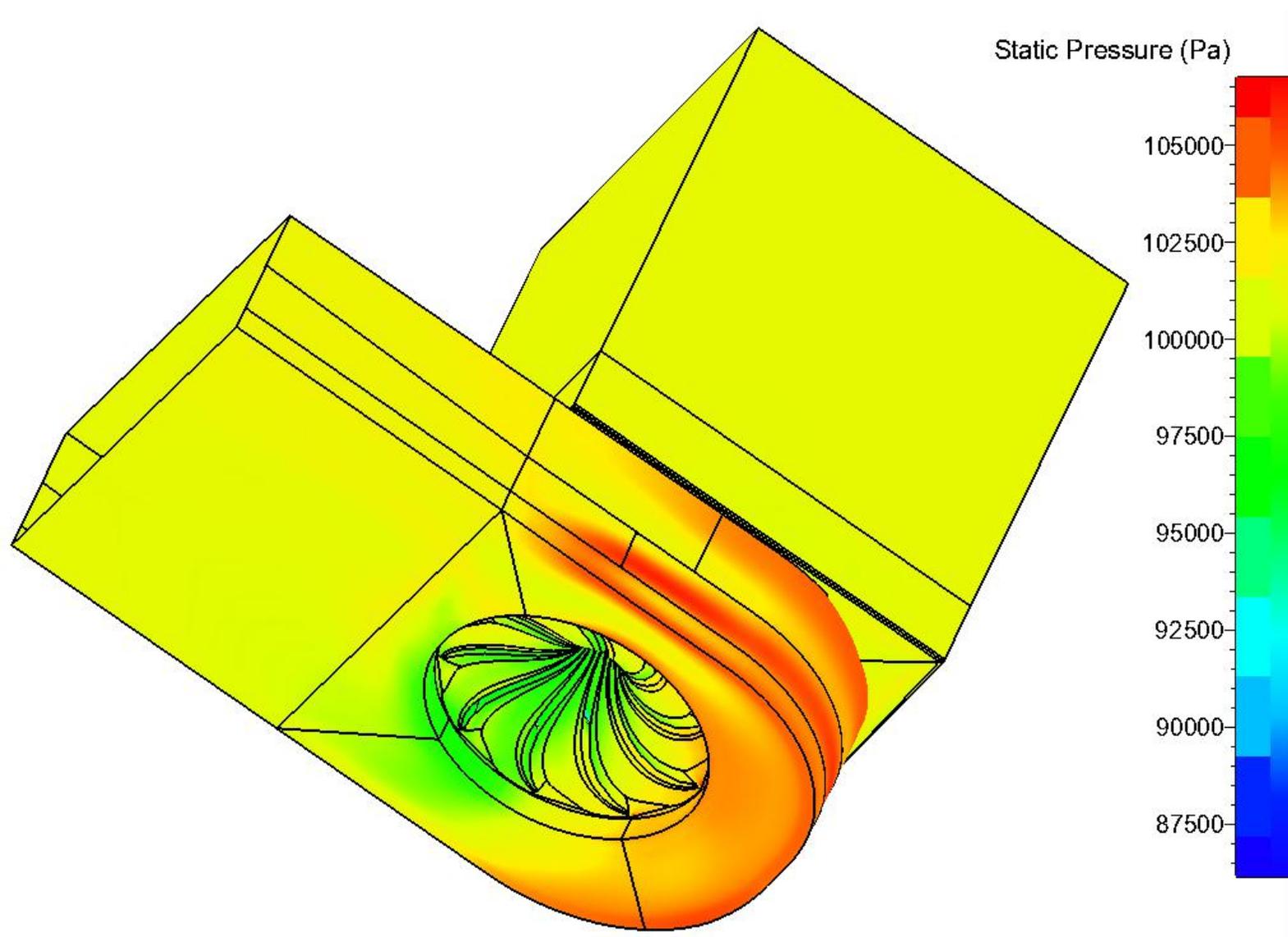


采用Numeca进行的系统级仿真分析网格



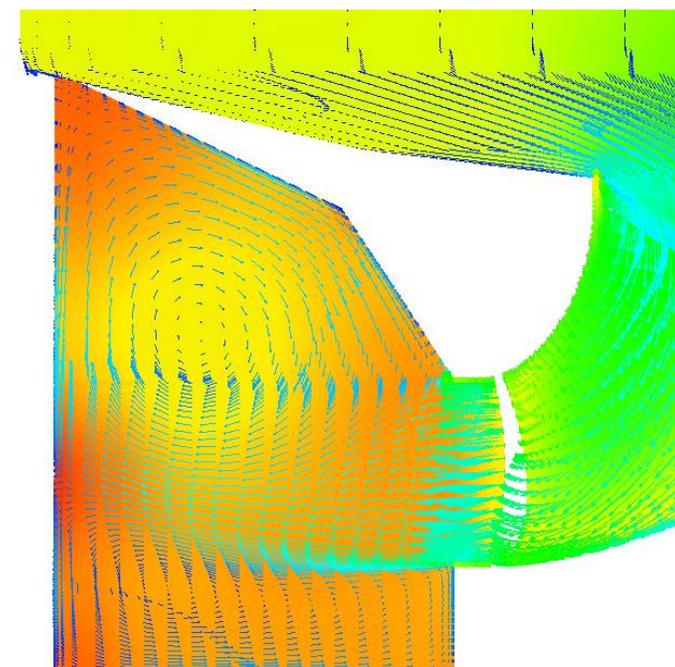
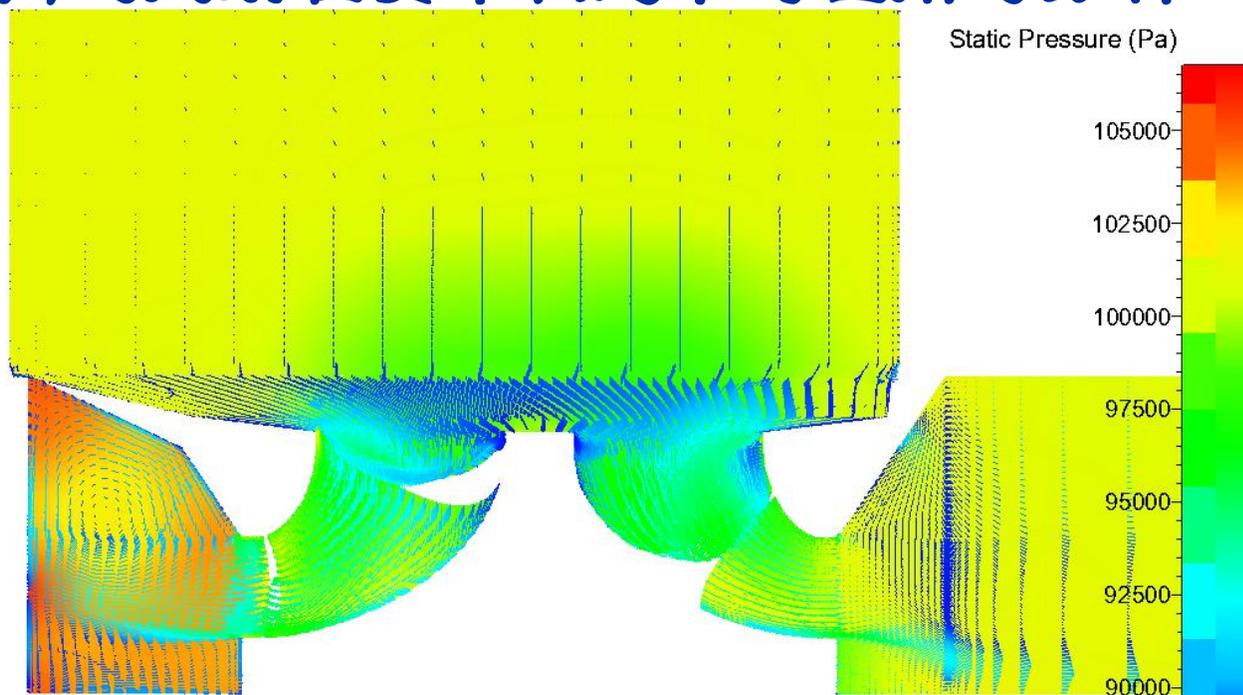
离心风扇及其叶片通道的网格

离心风扇在实车状态下的应用与分析

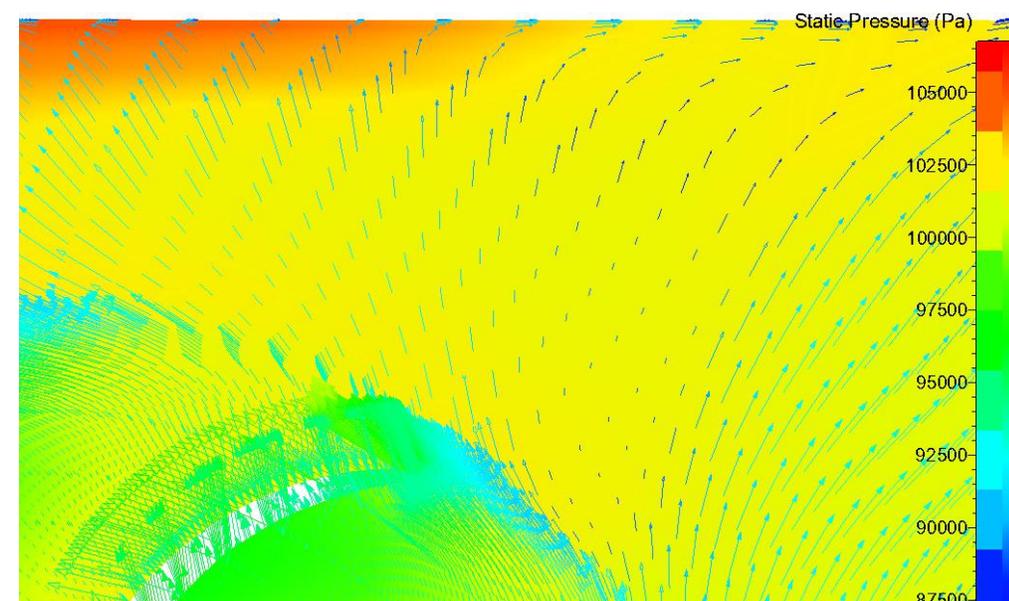
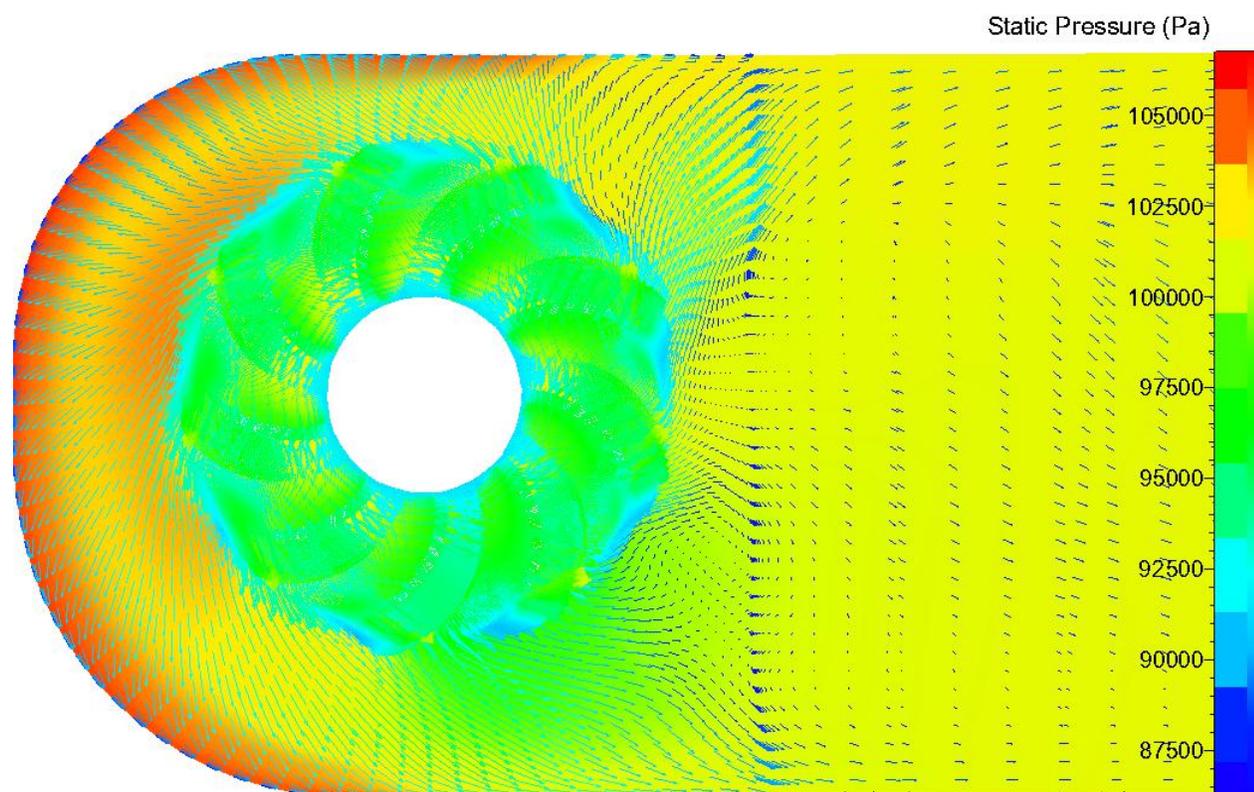


冷却系统全计算域静压分布云图

离心风扇在实车状态下的应用与分析

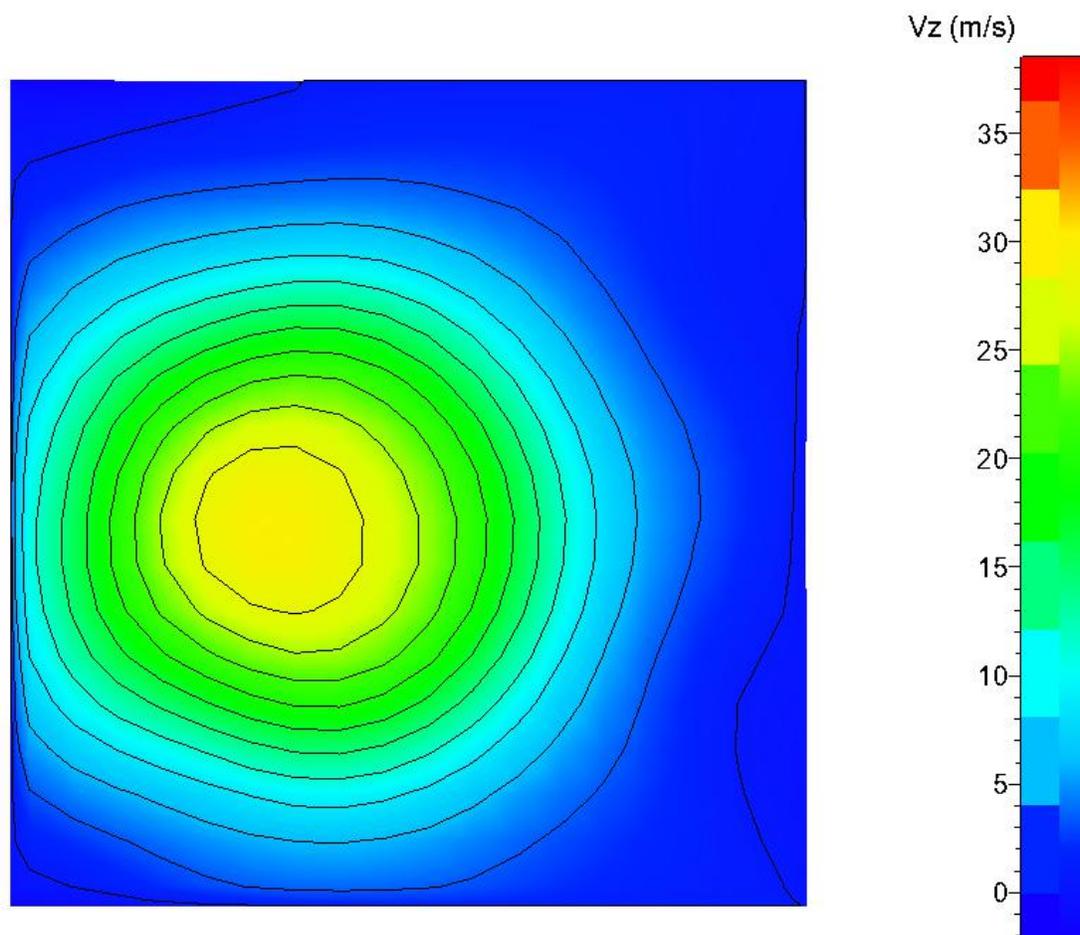


过旋转轴切面静压分布与速度矢量分布

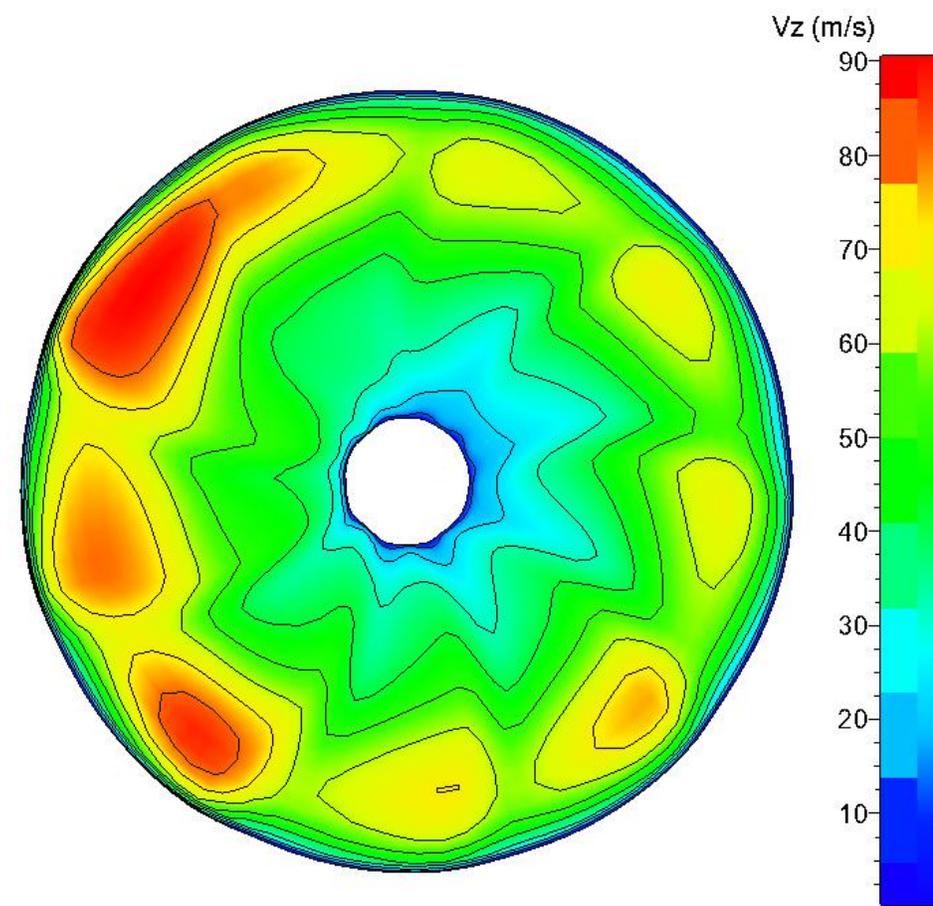


垂直于旋转轴切面静压分布与速度矢量分布

离心风扇在实车状态下的应用与分析

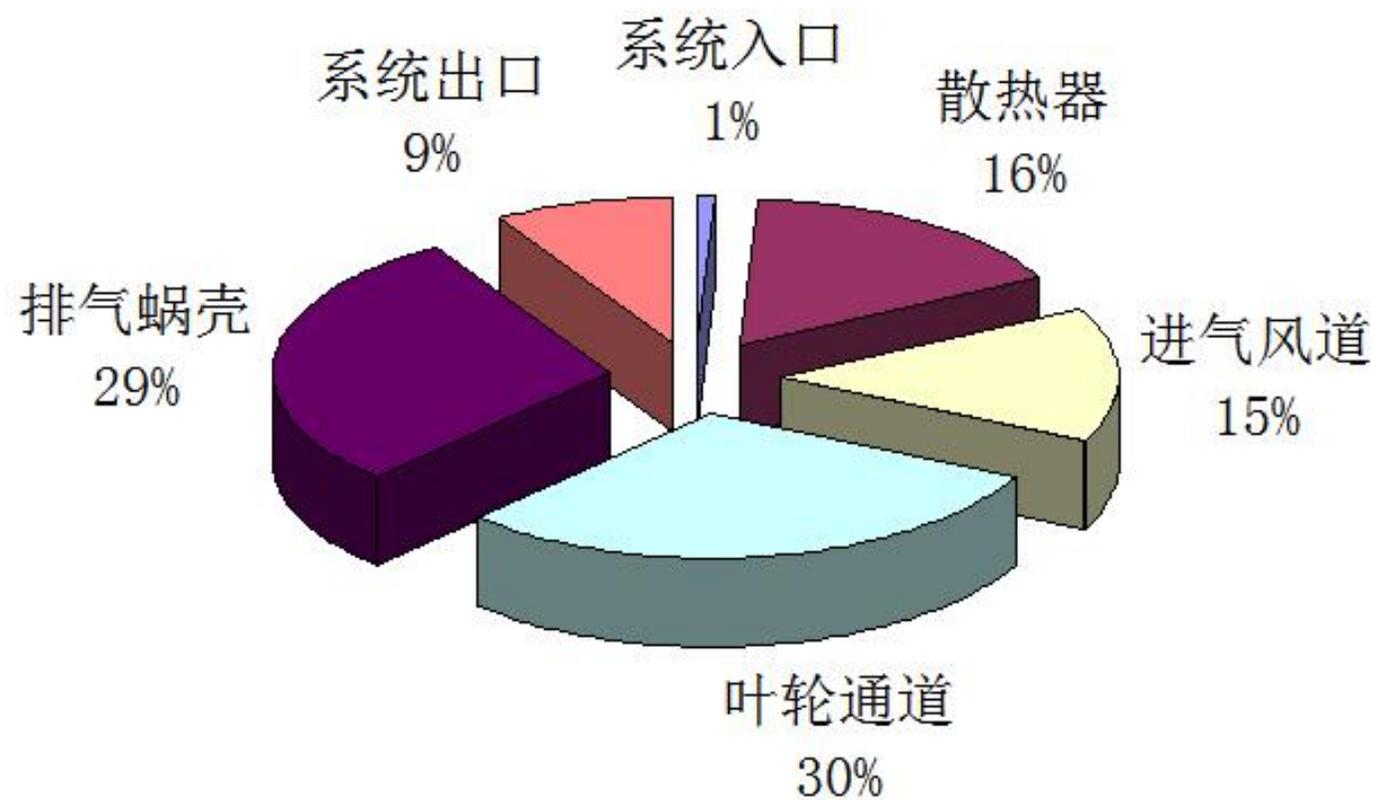


散热器出口轴向速度分布图



风扇进口轴向速度分布图

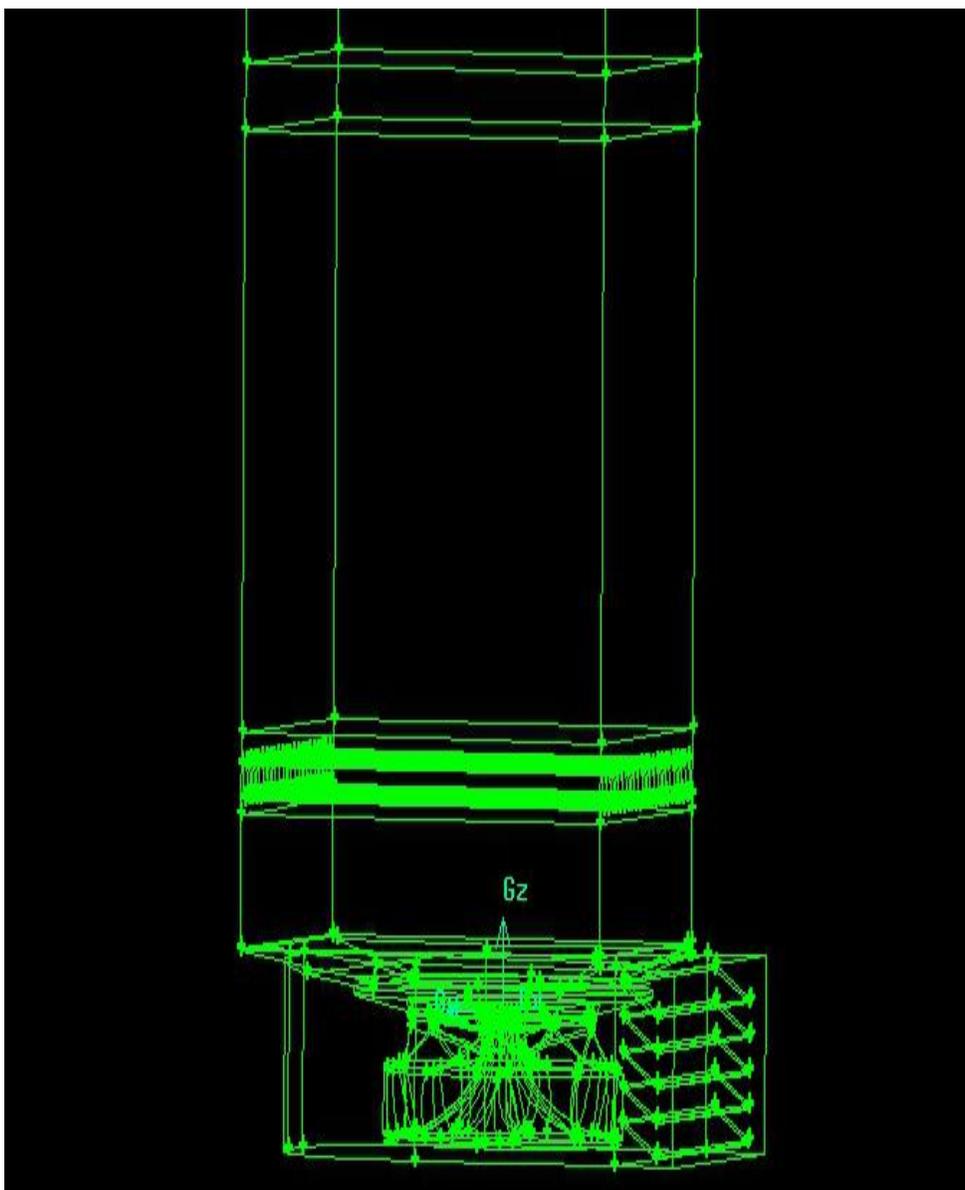
离心风扇在实车状态下的应用与分析



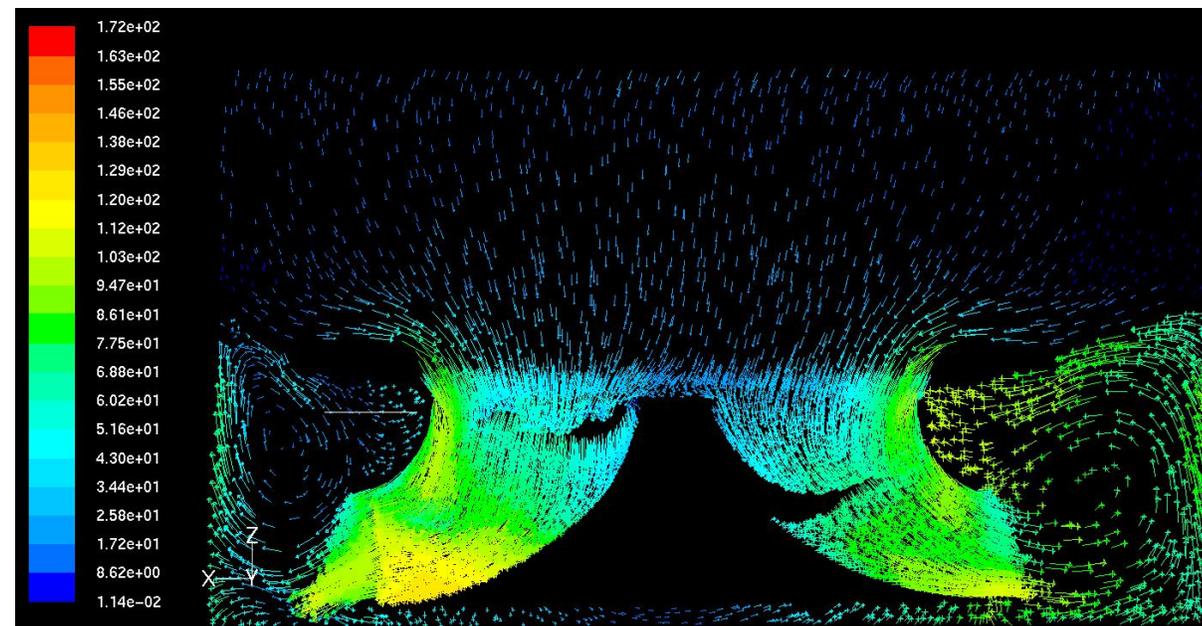
冷却系统各流通部件耗功比

- 叶轮通道内的耗功是风扇内流动损失产生的
- 排气蜗壳的耗功比例最大，散热器、进气风道次之，说明除散热器外的流通部件内的流动损失过大
- 应当增大散热器有效功耗所占的比例，减少其他流通部件无用功的流动损耗

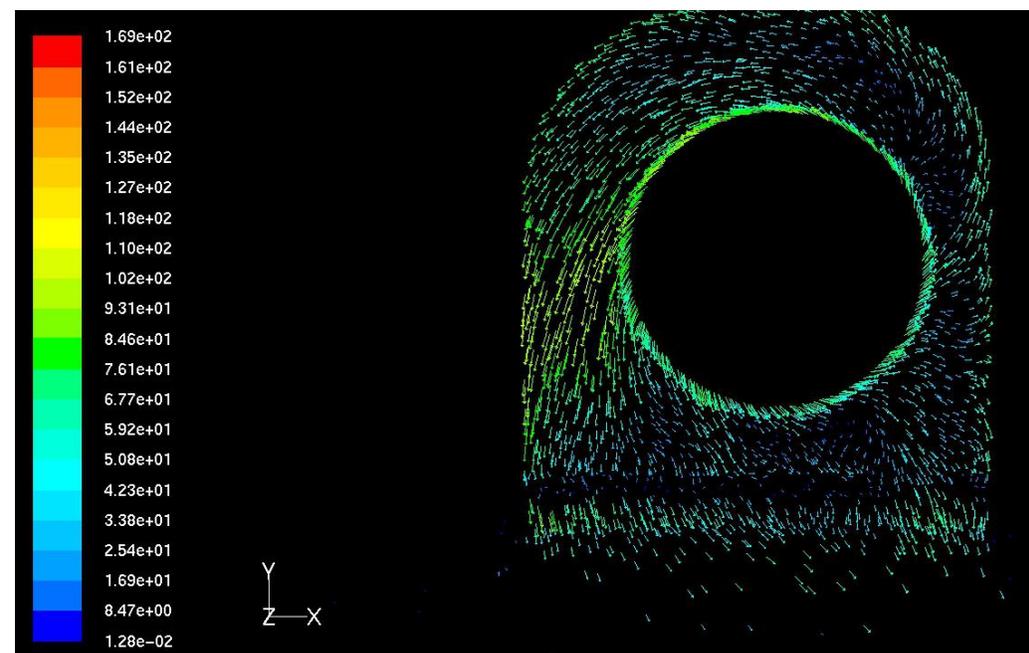
离心风扇在实车状态下的应用与分析



基于实车状态的冷却系统三维模型

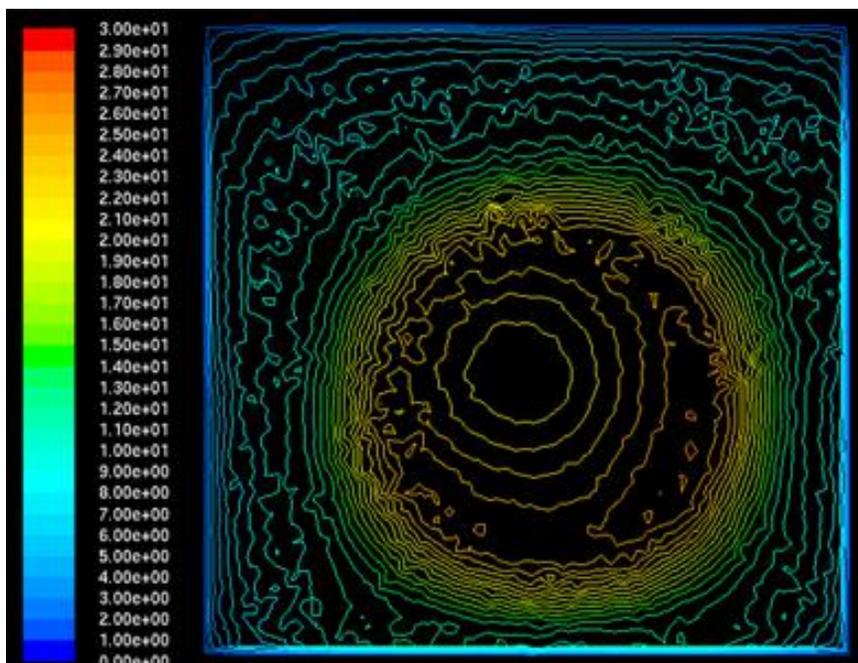


子午面内的速度分布分布

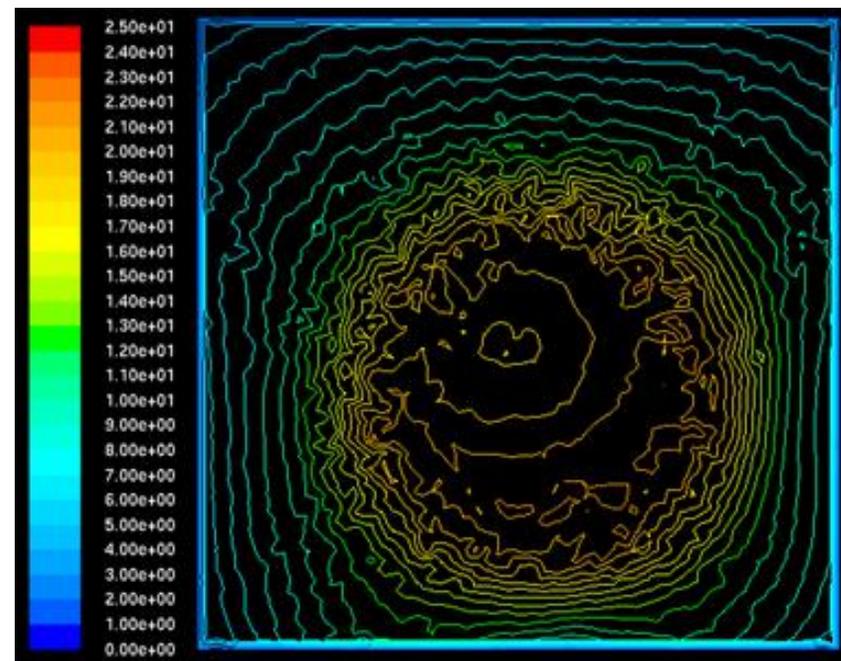


叶轮流道中相对速度场

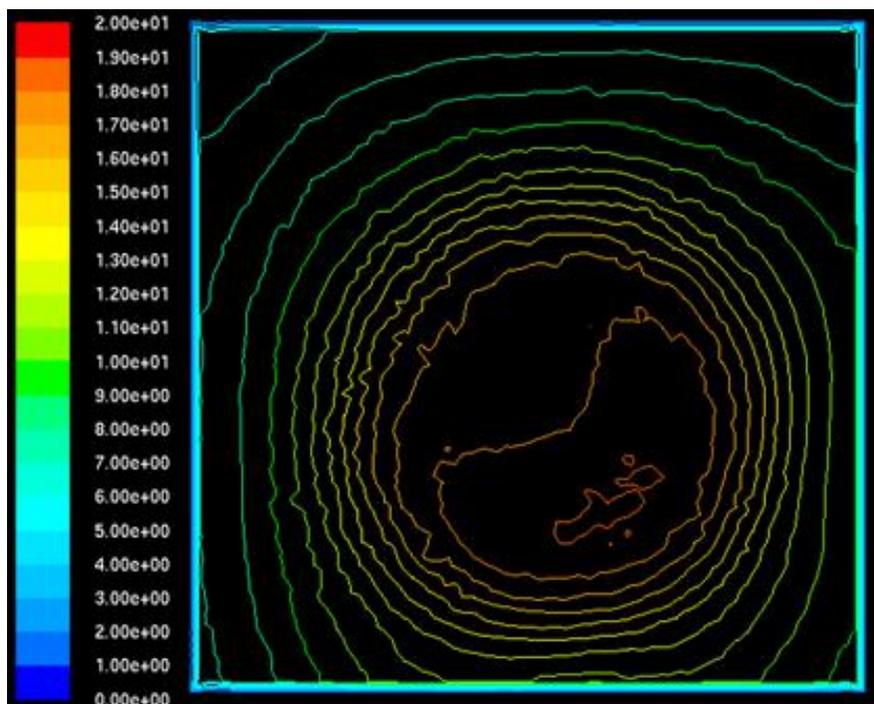
离心风扇在实车状态下的应用与分析



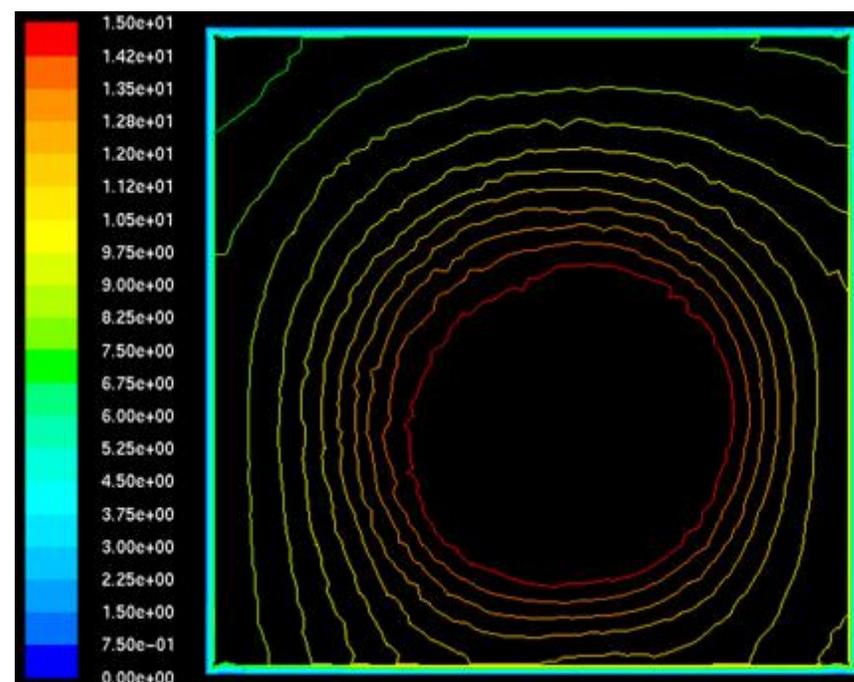
换热器出口速度等值线 (6mm)



换热器出口速度等值线 (25mm)

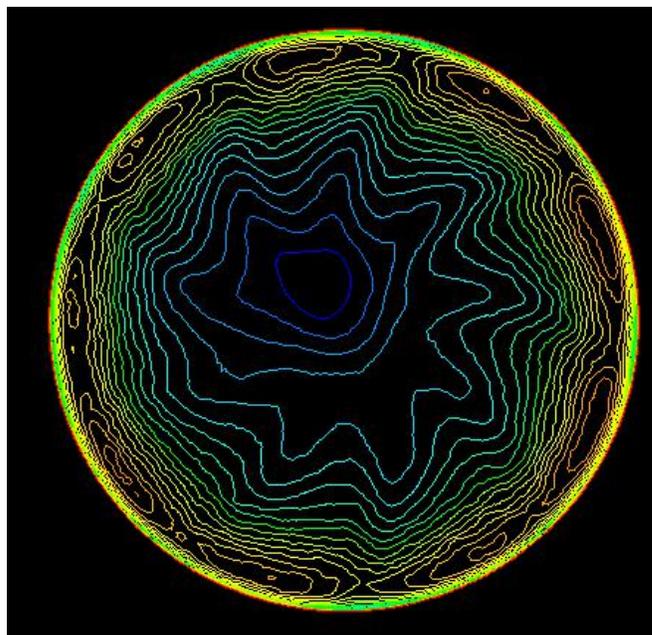


换热器出口速度等值线 (50mm)

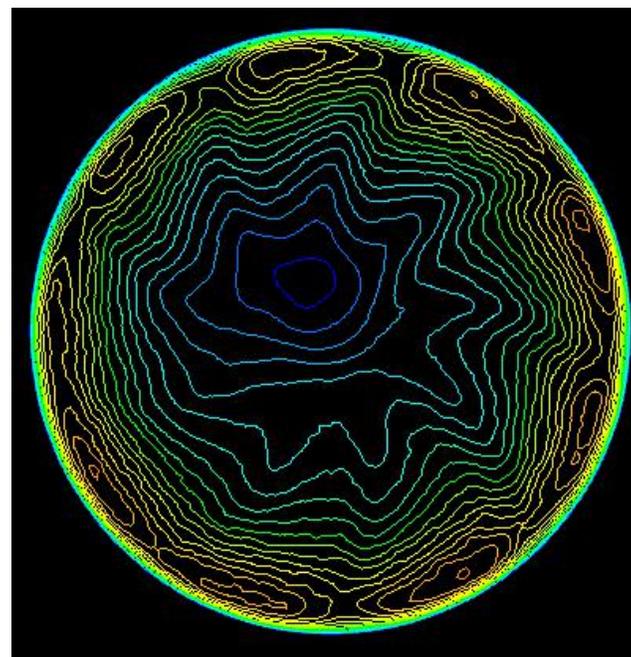


换热器出口速度等值线 (75mm)

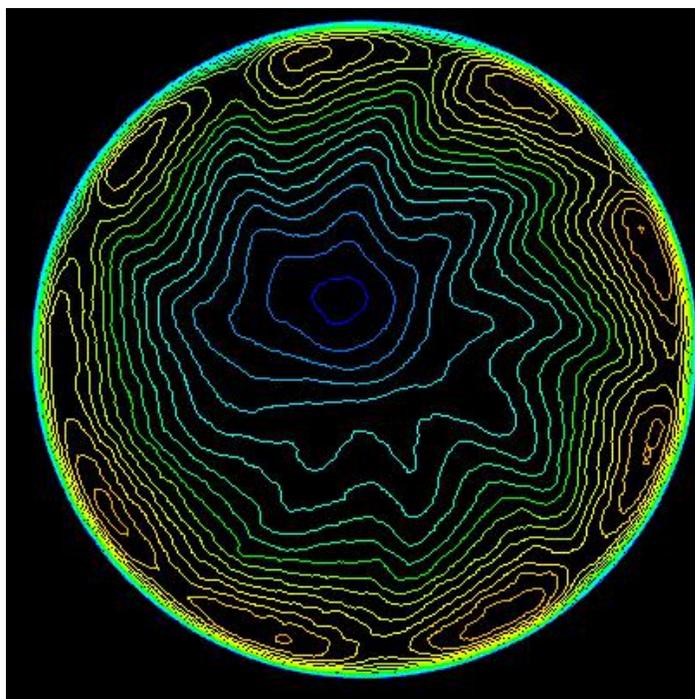
离心风扇在实车状态下的应用与分析



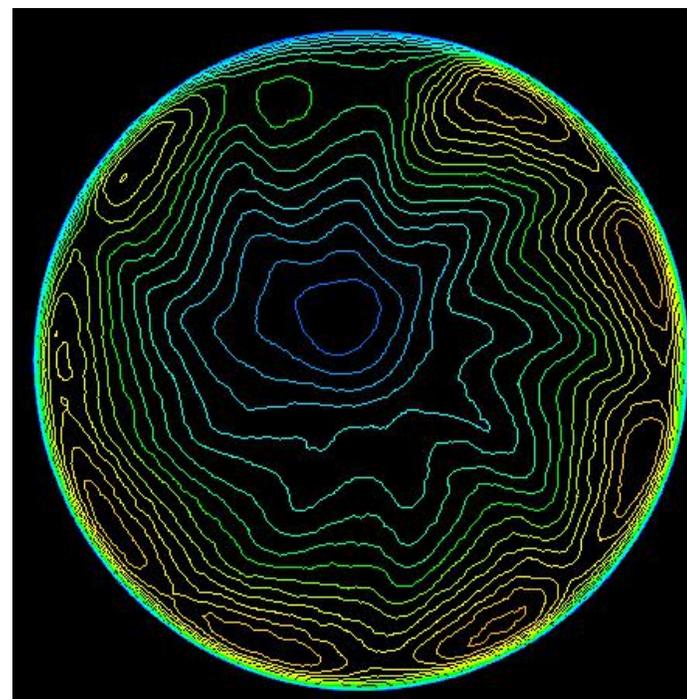
叶轮进口速度等值线（6mm）



叶轮进口速度等值线（25mm）



叶轮进口速度等值线（50mm）

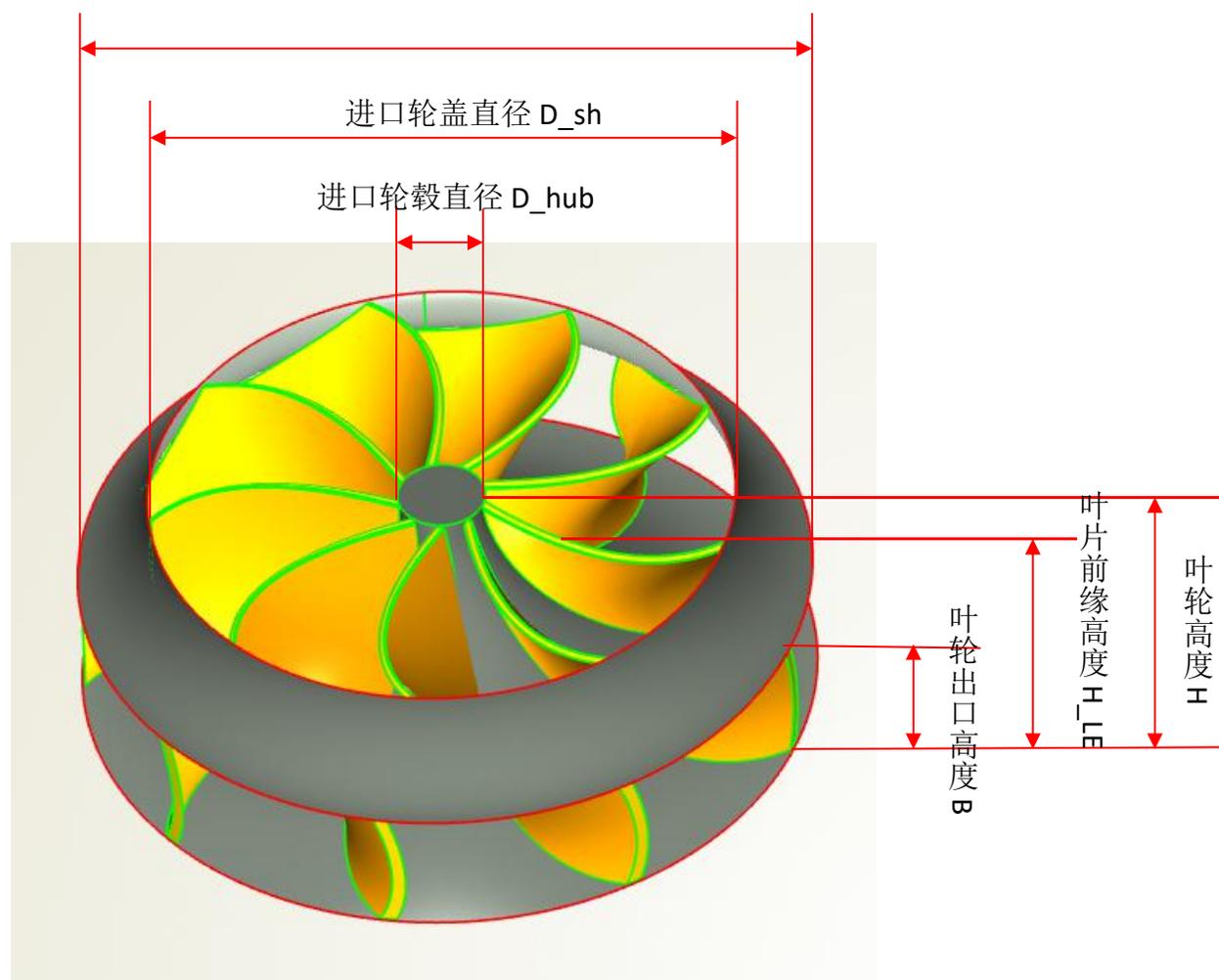
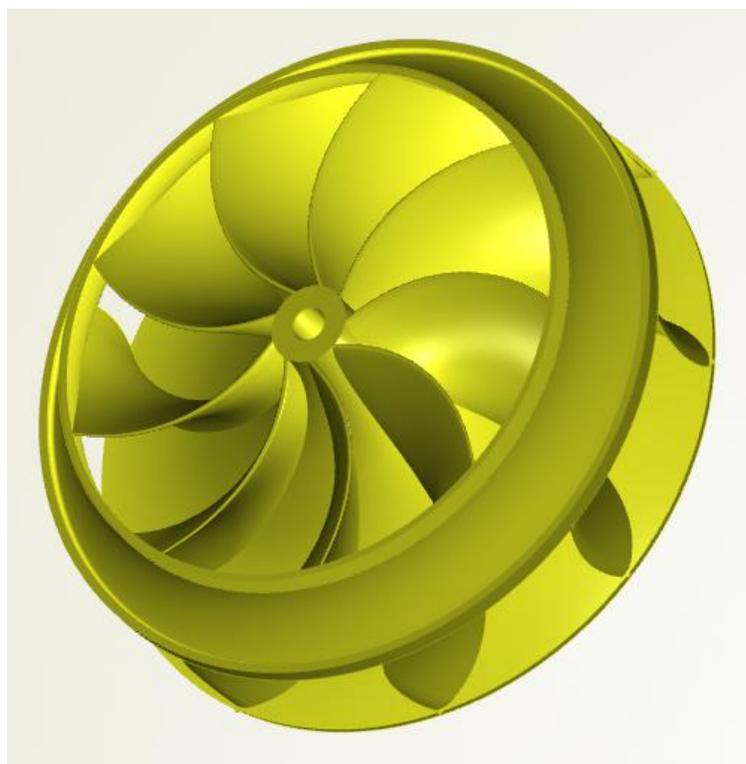


叶轮进口速度等值线（75mm）

离心风扇在实车状态下的应用与分析

- 受到紧凑空间的压制，离心风扇上下游流场产生了剧烈的流动畸变
- 风扇的有用功多用于克服散热器以外通流部件的流动阻力
- 散热器出口与风扇进口之间的距离是影响流动的关键性因素
- 风扇与冷却风道的通流匹配是需要持续改进的方向

- 风扇叶轮参数化建模
- 理想风道风扇仿真优化
- 实际风道风扇仿真优化
- 优化结果对比



在专业的三维参数化建模工具
CAESES软件中对风扇叶轮模
型进行重构，在建模过程中设
定叶轮主要几何参数

- 根据实际模型空间的限制，考虑与现有蜗壳、风道等结构的匹配，在模型优化过程中中保持整个叶轮的直径不变；为了更好的考核参数变化对风扇性能影响的规律，此处尽量采用相对数值参数，最终定义如下参数：
 - 叶片出口切向角度 β_{2_delta} =叶片尾缘位置的切向角度
 - 叶片出口位置包角 End_theta_delta =叶片尾缘所在位置的包角
 - 前缘位置 LE_position =叶轮高度 H -前缘位置高度 H_{LE}
 - 进口轮毂相对直径 $\text{ratio01} = \frac{\text{进口轮毂直径 } D_{hub}}{\text{叶轮直径 } D}$
 - 进口轮盖相对直径 $\text{ratio02} = \frac{\text{进口轮盖直径 } D_{sh}}{\text{叶轮直径 } D}$

- 最终定义的主要参数变化如下:

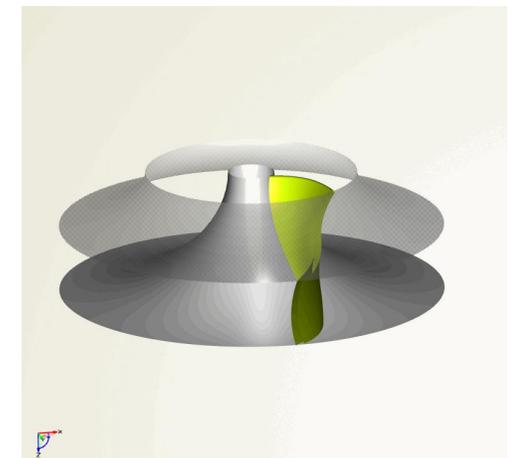
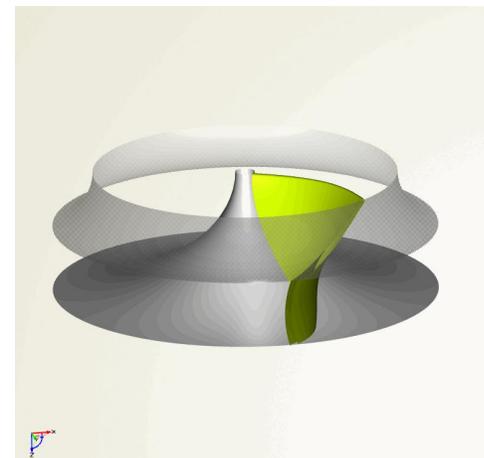
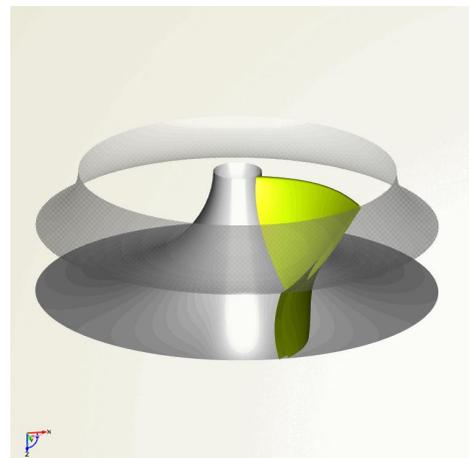
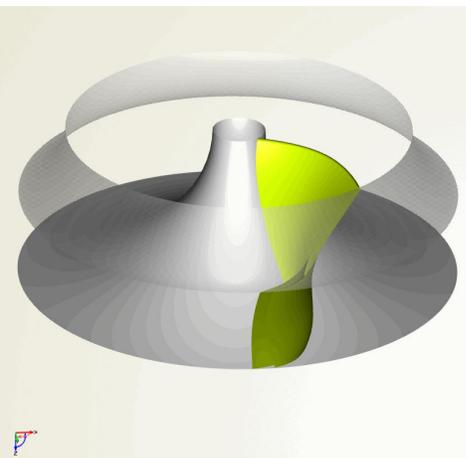
叶片出口切
向角度
beta2_delta

叶片出口位
置包角
End_theta_d
elta

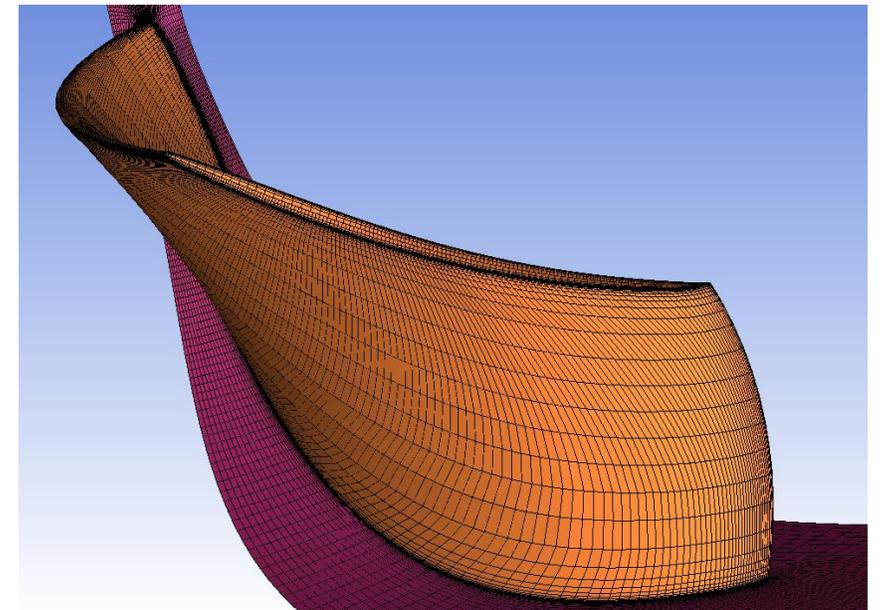
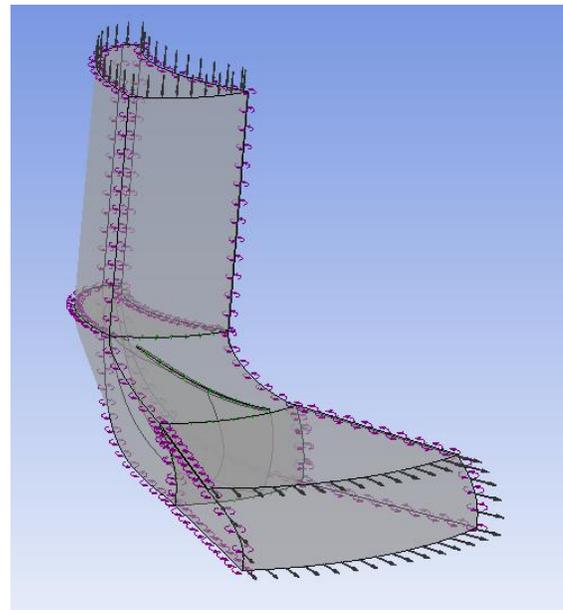
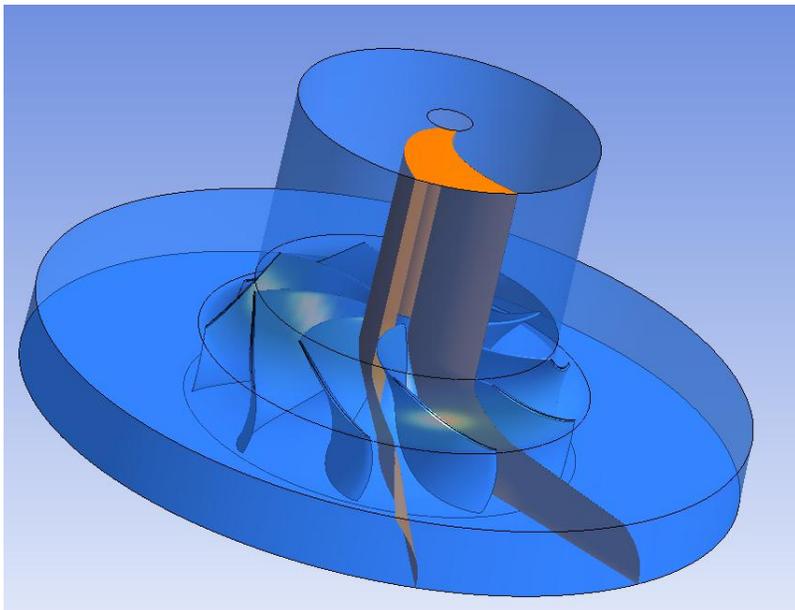
前缘位置
LE_position

进口轮毂相
对直径
ratio01

进口轮盖
相对直径
ratio02



- 首先将风扇叶轮在理想风道内进行仿真计算，叶轮进口直接连接直筒圆管，出口直接沿径向向外延长；
- 为了节省计算时间，在整体叶轮模型中截取单个叶片的流体通道（如下图所示）进行计算，单通道两个侧面给定周期性边界条件。



理想风道风扇仿真优化

- 根据实际模型空间的限制，考虑与现有蜗壳、风道等结构的匹配，最终选定beta2_delta（叶片出口切向角度）、End_theta_delta（叶片出口位置包角）、LE_position（前缘位置）、ratio01（进口轮毂相对直径）、ratio02（进口轮盖相对直径）五个参数作为设计变量（参数变化示意图见上文描述）；
- 以固定入口流量下计算得到的静压升和静压效率作为优化目标；
- 采用优化算法进行了30个模型的优化计算。

Design Variables					
	Design Variable	Lower	Value	Upper	Active
1	beta2_delta	-15	0	15	<input checked="" type="checkbox"/>
2	End_theta_delta	-15	0	15	<input checked="" type="checkbox"/>
3	LE_position	0	2.5	25	<input checked="" type="checkbox"/>
4	ratio01	0.08	0.12	0.16	<input checked="" type="checkbox"/>
5	ratio02	0.767	0.8	0.833	<input checked="" type="checkbox"/>
6					<input type="checkbox"/>

Evaluations		
	Evaluation	Objective
1	effil	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
2	eval_DPs	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
3	eval_DPt	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
4	eval_Power	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
5	eval_Vflow	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>

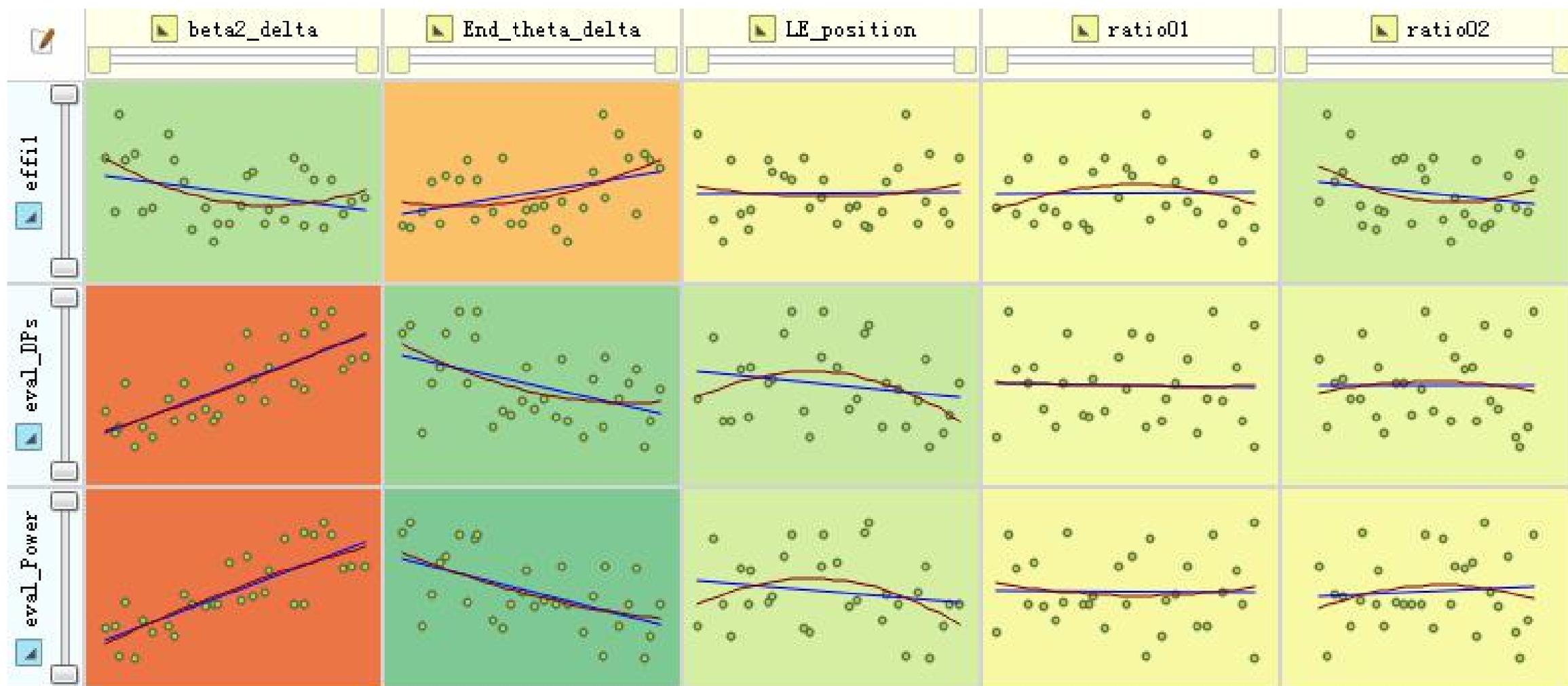
三. 基于Caeses技术的冷却风扇优化设计

3.4396446	21.437534	0.13716682	0.76784447	0.62618906	6617.1993	68688.168
8.3183537	11.725887	0.11689968	0.80799492	0.62826141	6645.2955	68752.281
-11.092075	17.741753	0.13373382	0.77209409	0.63893182	6266.5688	63751.219
-8.0353524	11.789705	0.14500625	0.83098191	0.64032053	7293.0728	74033.166
-5.949512	8.869248	0.084369765	0.79906178	0.64034433	7292.5823	74025.436
-9.4436027	8.2940899	0.12102188	0.82369204	0.64379397	6971.4989	70387.001
6.8326864	7.1839974	0.10939897	0.7743637	0.64587298	6311.4138	63517.404
14.363707	18.787685	0.1193835	0.79774816	0.64901747	6188.9245	61982.914
-7.1600807	6.6933909	0.10051588	0.79051271	0.65433693	6266.7748	62252.365
13.170914	3.2135752	0.12962532	0.81410207	0.65499881	5709.3275	56657.531
10.737202	24.515609	0.090024773	0.79281789	0.65587599	6262.891	62067.795
-3.1937652	10.015415	0.11244731	0.80155295	0.65612939	5848.5759	57939.379
12.59677	21.766161	0.15709626	0.82713623	0.65845165	5342.158	52735.86
9.6768737	0.17224015	0.14330117	0.77705047	0.6718809	6033.5298	58370.354

计算结果列表

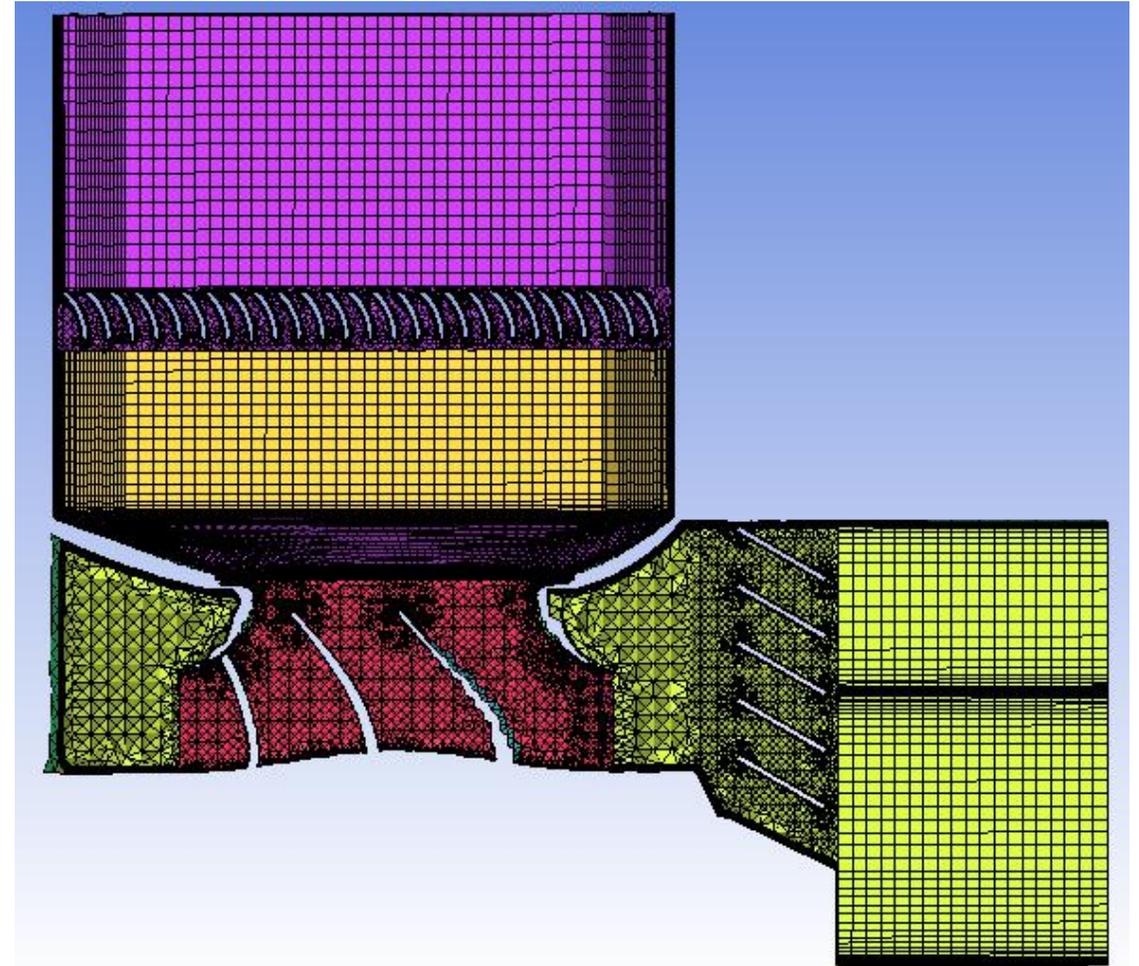
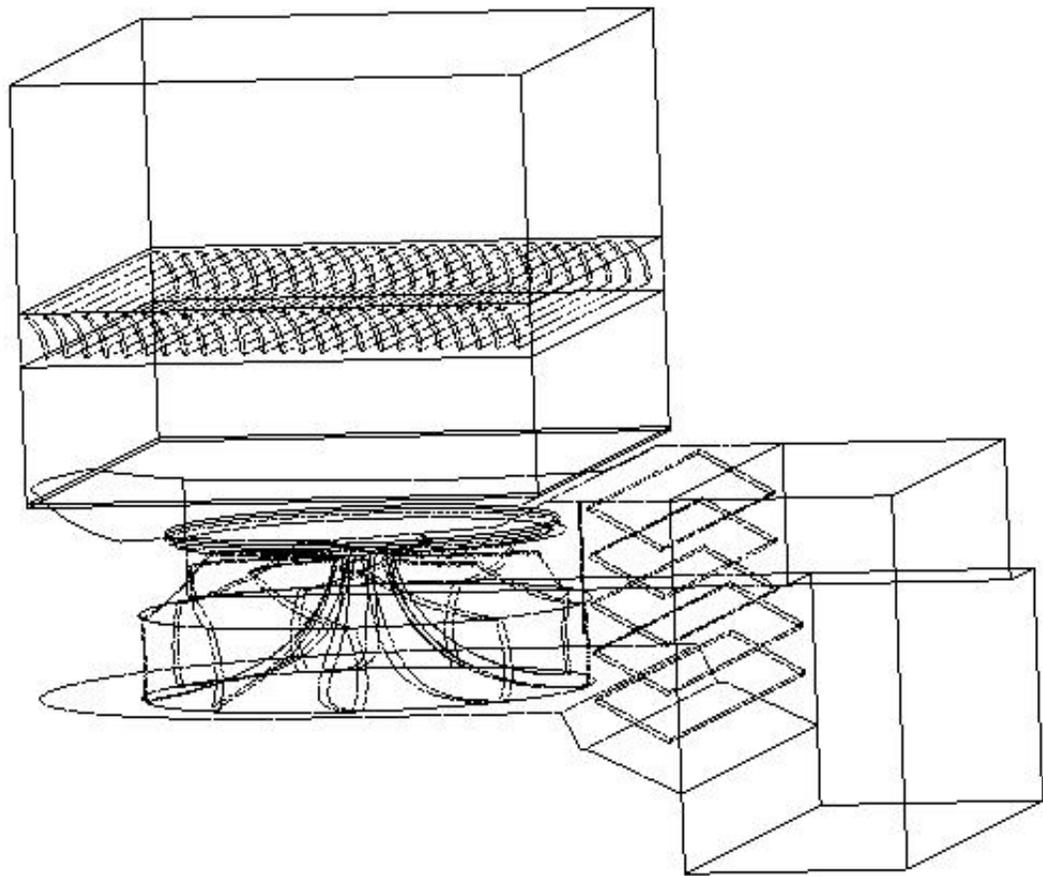
- 其中最优结果与原始模型结果对比，静压效率提升**4.53%**；
- 优化后模型的功耗有明显下降，静压升与原模型基本保持一致。

三. 基于Caeses技术的冷却风扇优化设计



- 根据批量的优化计算结果，我们可以拟合各个参数对静压升、功率、效率的影响趋势；
- 可以看出，在当前参数范围内，叶片出口切向角度、叶片出口位置包角两个参数的影响趋势最为明显；
- 随着尾缘切向角度的增大，风扇叶轮静压升增大，功率增大，效率降低；随着尾缘包角的增大，静压升下降，功率下降，效率提升。

三. 基于Caeses技术的冷却风扇优化设计



实际风道风扇仿真优化

三. 基于Caeses技术的冷却风扇优化设计

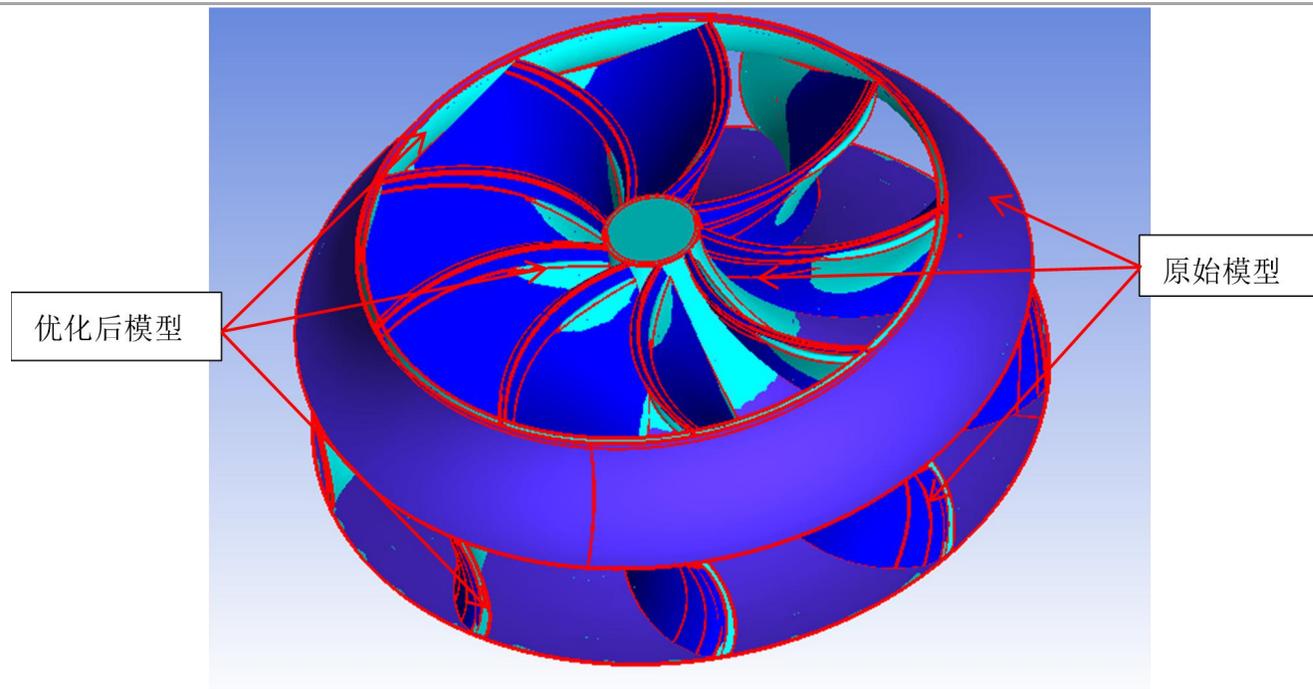
7.9940146	19.515891	0.12514179	0.76974876	6.5891	53661.5
-12.190187	22.916696	0.13997234	0.78702115	6.6895	59612.5
-3.1937652	10.015415	0.11244731	0.80155295	6.7093	60431.6
13.170914	3.2135752	0.12962532	0.81410207	6.7227	60165.4
-4.3575247	17.394533	0.097892026	0.82970864	6.7831	60944.5
9.6768737	0.17224015	0.14330117	0.77705047	6.8237	60195.5
5.7296891	10.58399	0.080689917	0.82577131	6.8267	60964.7
-11.092075	17.741753	0.13373382	0.77209409	6.8357	65091.1
-7.1600807	6.6933909	0.10051588	0.79051271	6.8512	62734.5
-2.2825464	23.524697	0.10643536	0.79515913	6.8889	63315.7
0.36402959	14.144766	0.094820061	0.82057356	6.8972	63360.1
10.737202	24.515609	0.090024773	0.79281789	6.9305	63968.9

实际风道风扇仿真优化计算结果列表

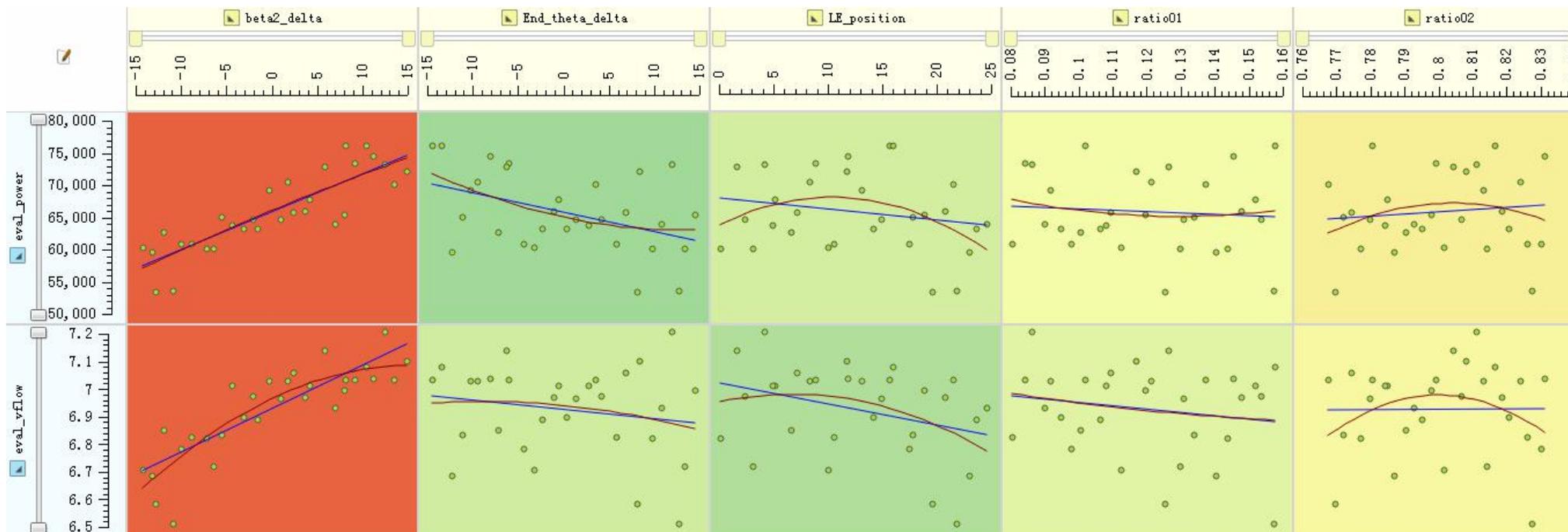
目标参数	风量(m ³ /s)	风量变化比例	功耗 (kW)	功耗变化比例
原始模型	4.37		40.37	
理想风道优化模型	4.42	1.22%	39.74	-1.55%
实际风道优化模型	4.62	5.64%	41.69	3.27%

优化模型结果对比表

三. 基于Caeses技术的冷却风扇优化设计

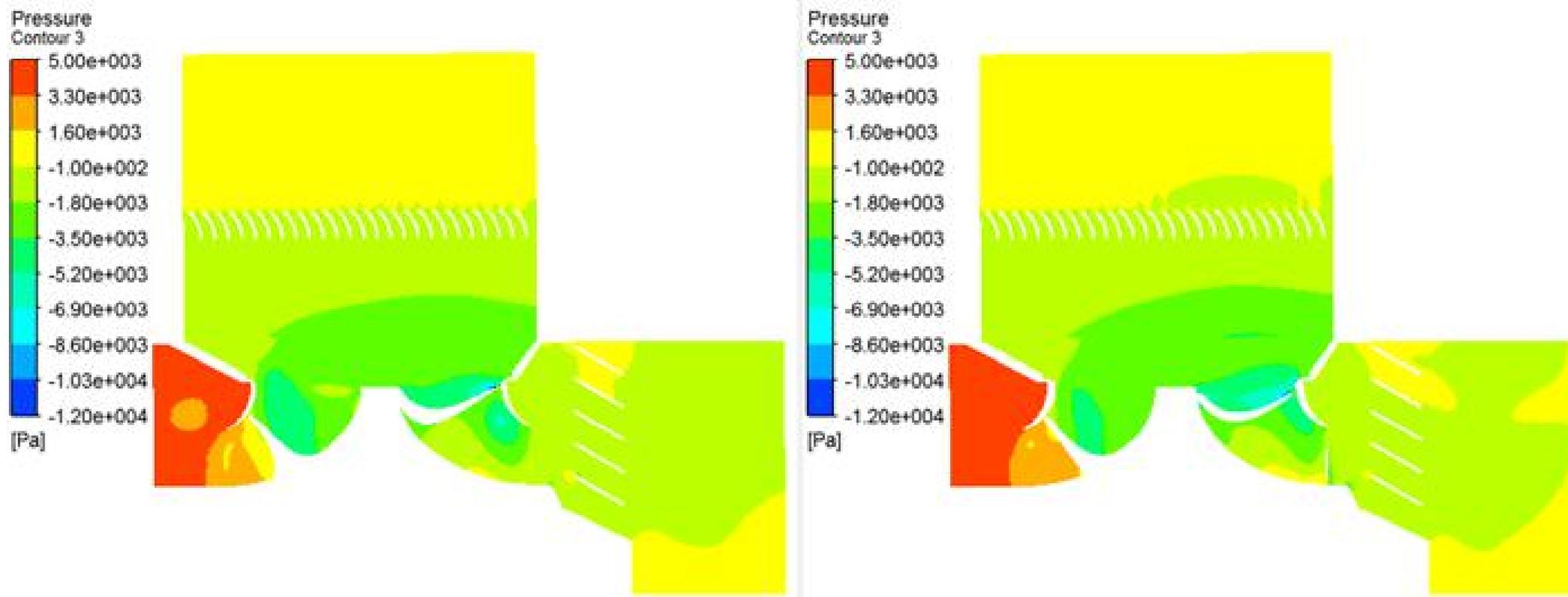


风扇模型优化前后对比图



各参数对流量功率的影响趋势曲线

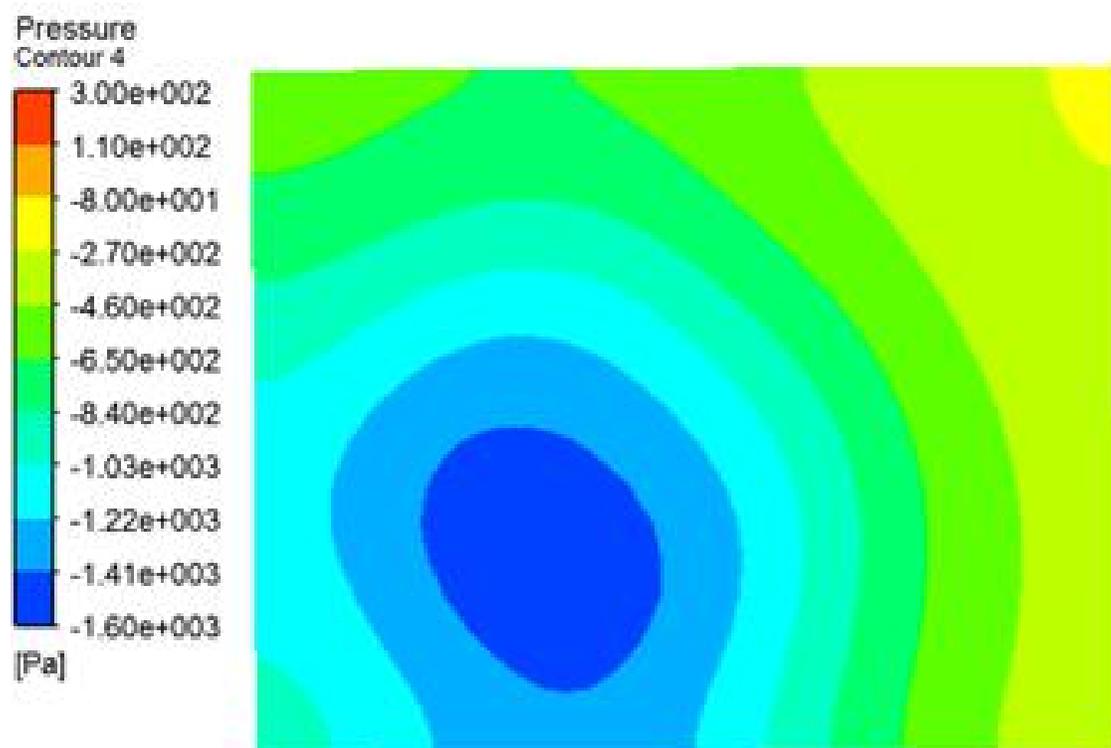
三. 基于Caeses技术的冷却风扇优化设计



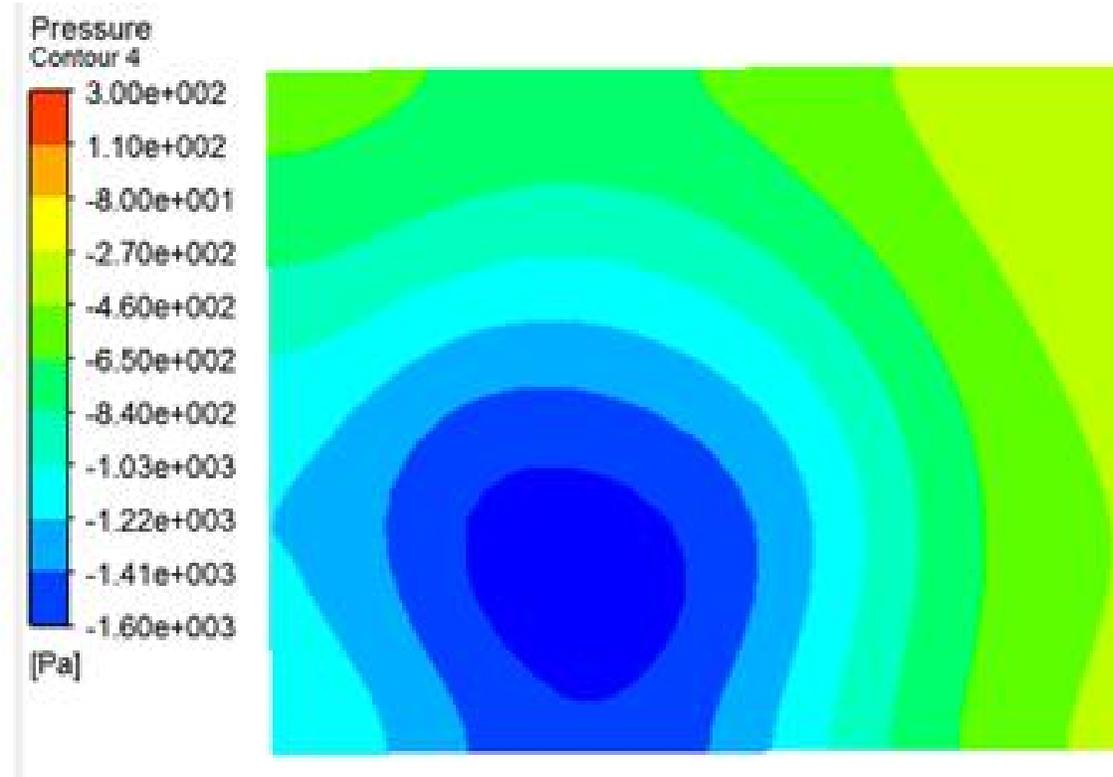
原始模型

优化模型

整体模型中心剖面压力云图

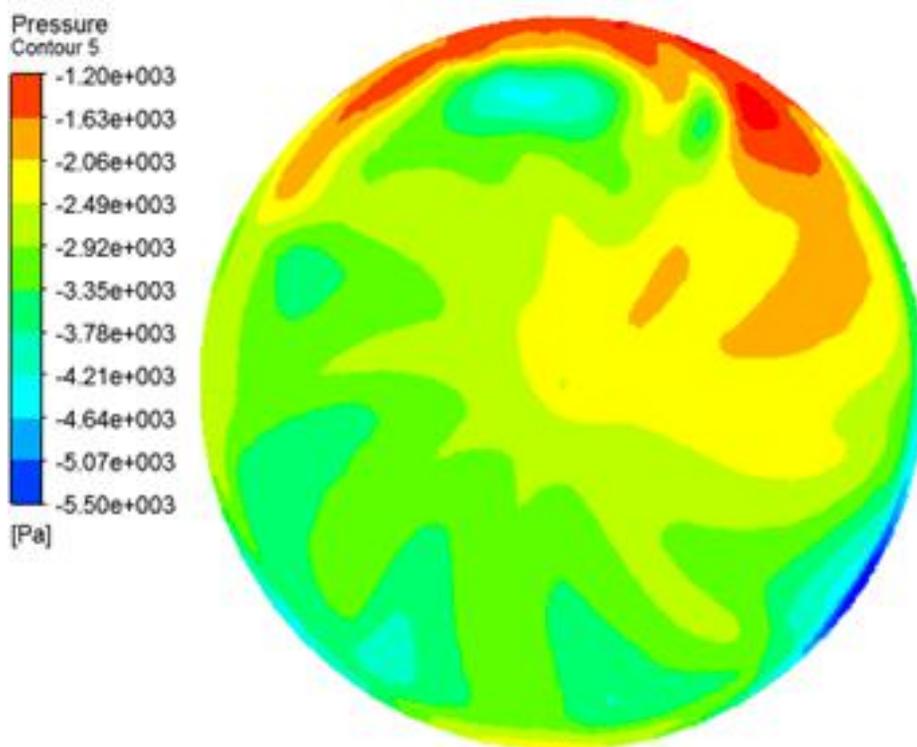


原始模型

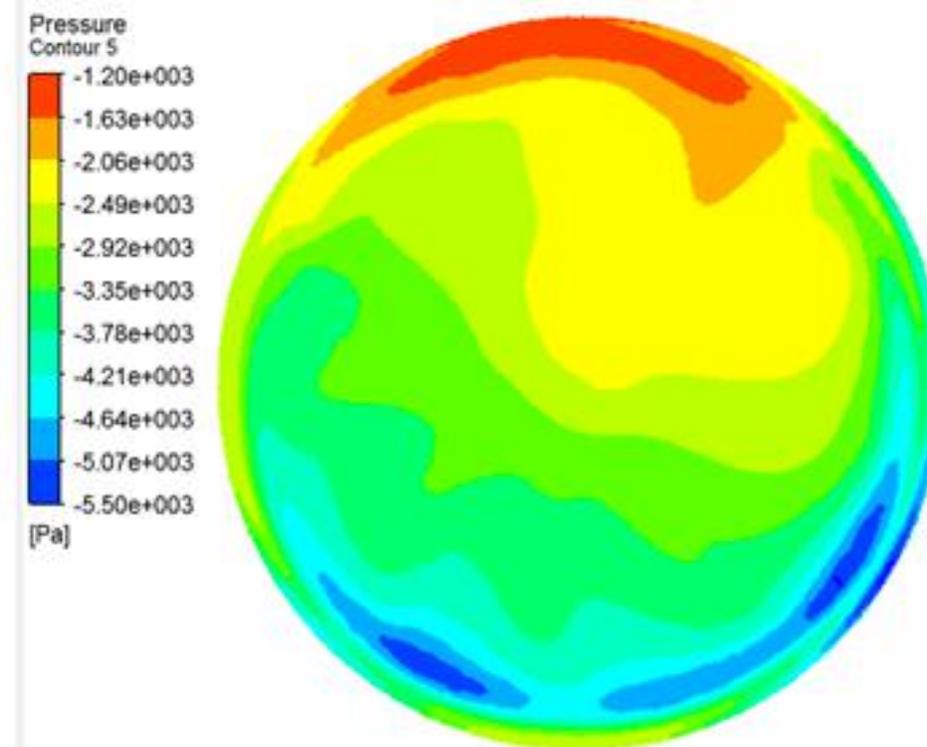


优化模型

散热器横剖面压力云图



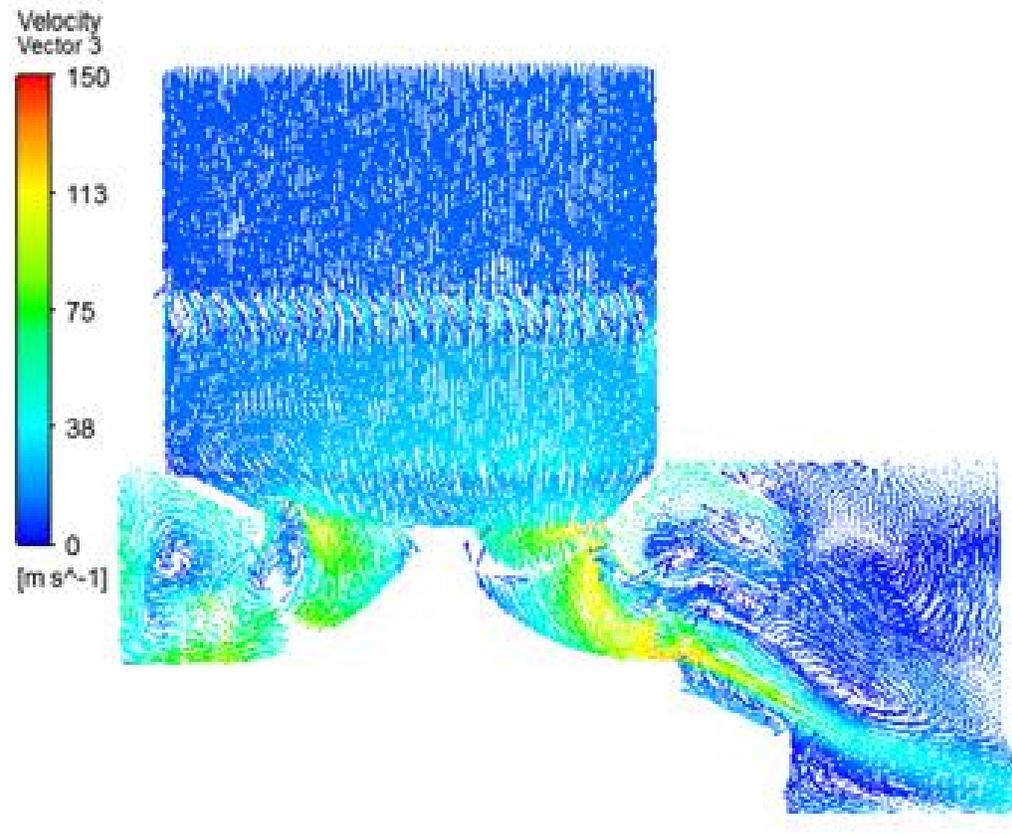
原始模型



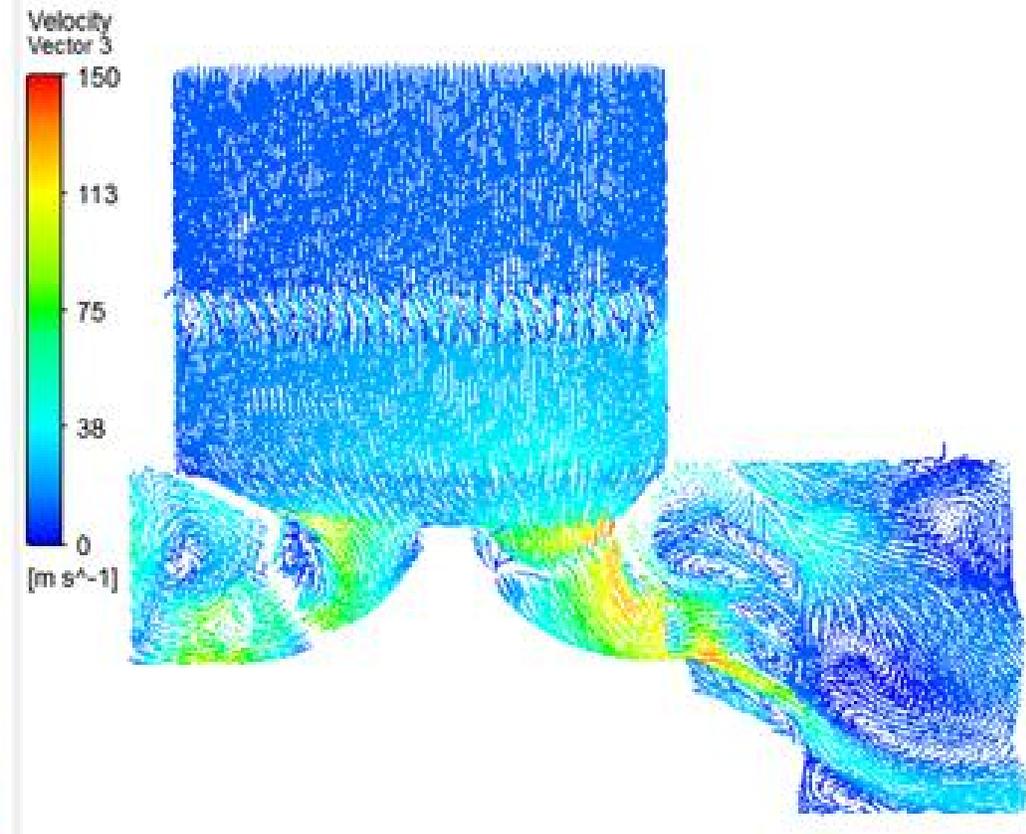
优化模型

风扇入口压力云图

三. 基于Caeses技术的冷却风扇优化设计



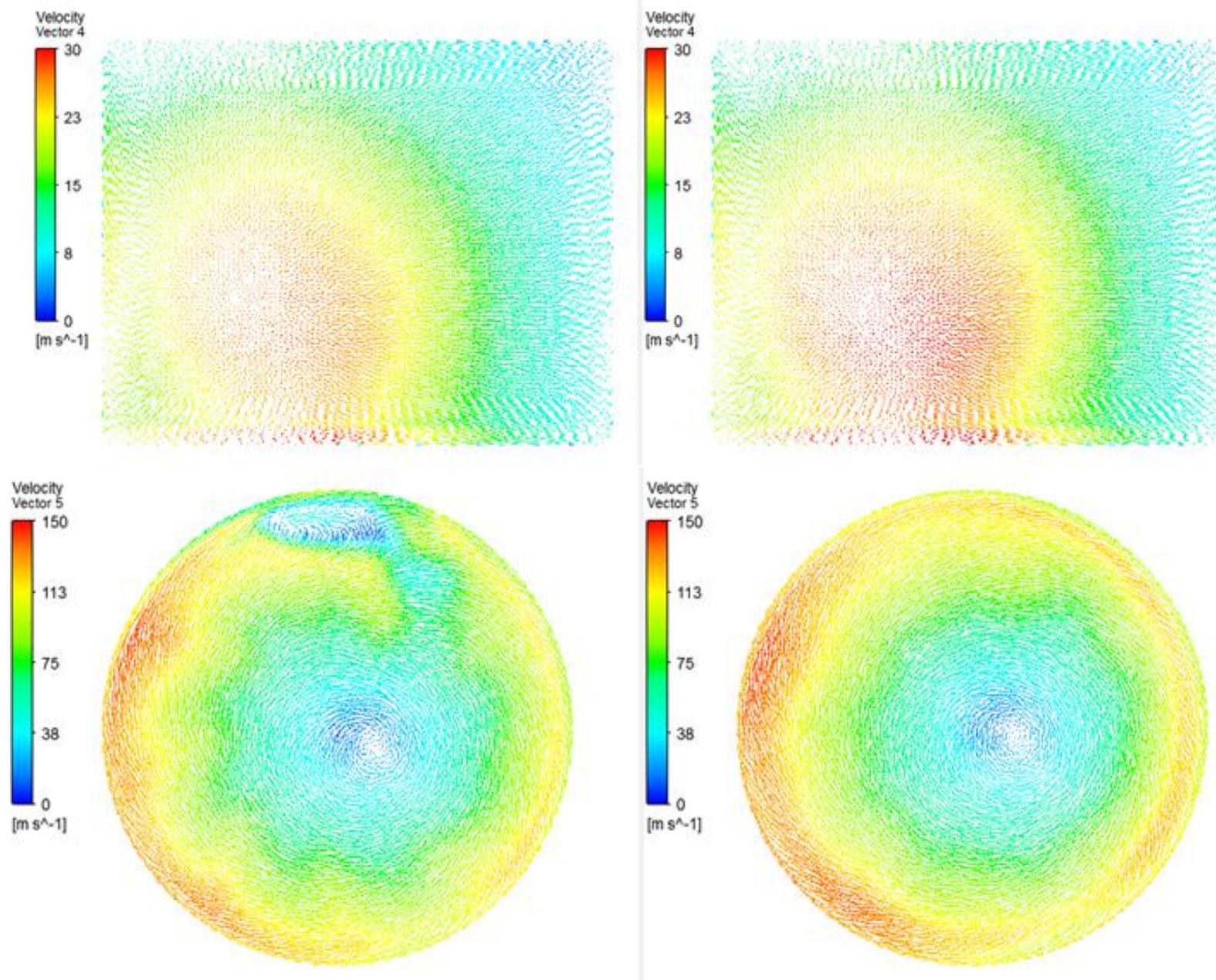
原始模型



优化模型

模型中心剖面速度矢量图

三. 基于Caeses技术的冷却风扇优化设计



原始模型

优化模型

散热器出口及风扇进口速度矢量云图

小结

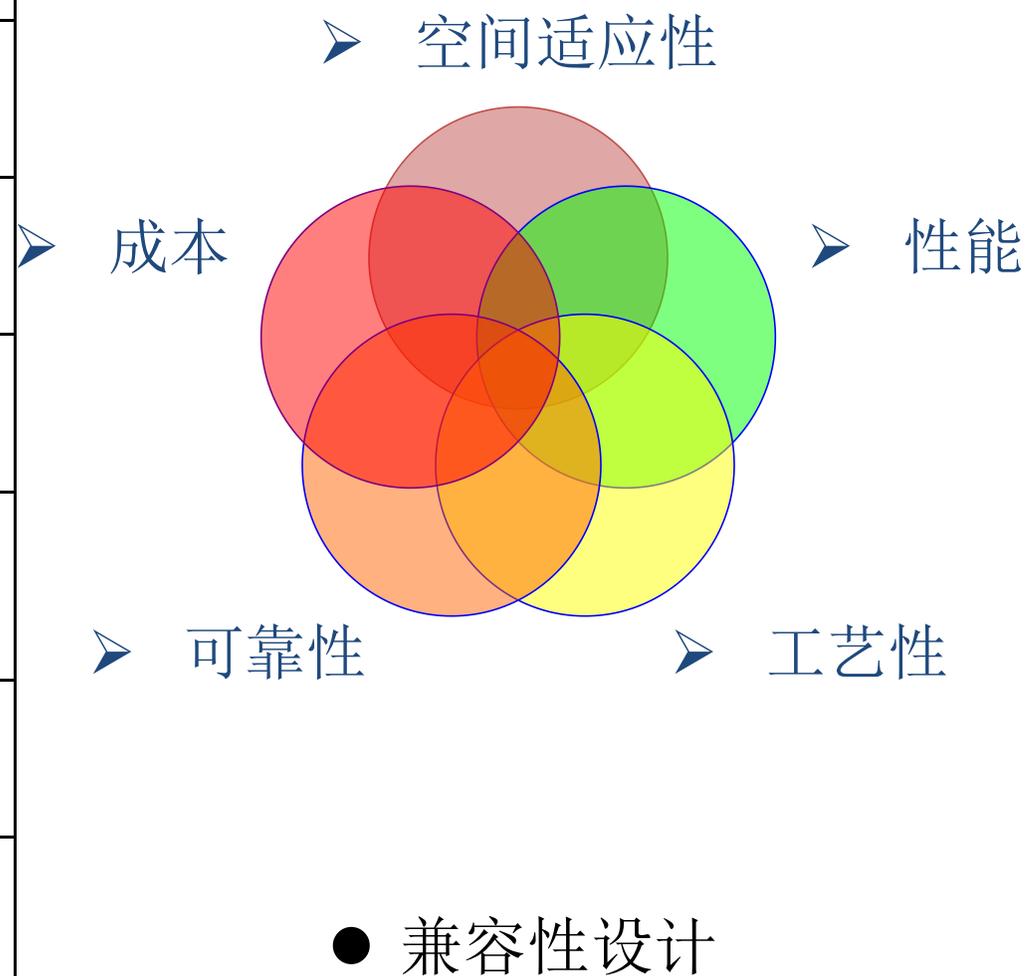
- 采用参数化建模及优化方法能够有效地提升风扇在理想风道和实际风道中的气动性能。
- 理想风道的优化结果对于实际风道环境下的性能提升有限。
- 基于实际风道下的优化能够显著改善风扇上下游的流动状态。
- 基于参数化建模及优化能得到不同参数对风扇气动的影响规律，对今后的改进设计提供**定量化**的设计依据和指导。

Caeses与传统优化设计方法的区别

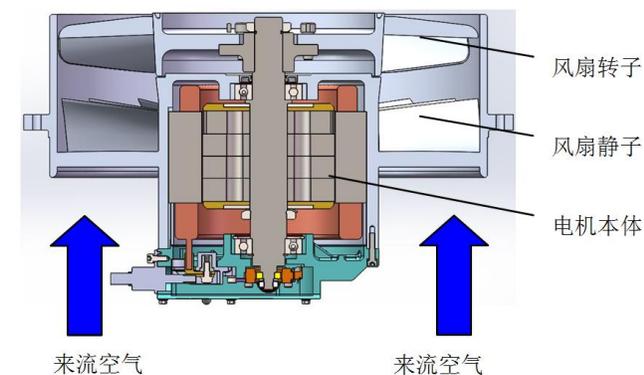
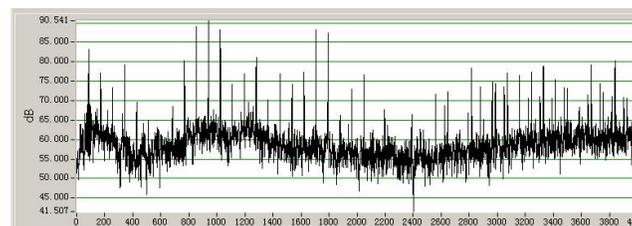
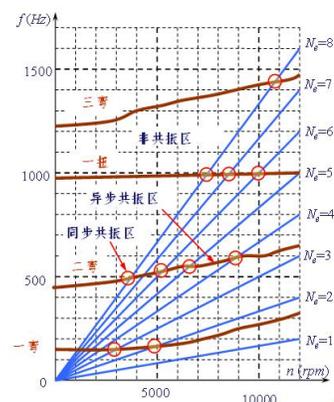
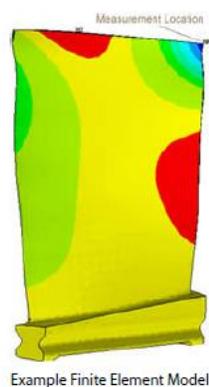
- 优化速度快，能够快速收敛得到对性能产生影响的敏感因素
- 优化结果形成数据积累，能够指导后续设计，并形成定制化的经验算法
- 多参数多目标个性化定制化搭配，全方位满足不同设计任务、不同设计策略和不同设计约束的需求
- 进一步降低了工程应用层面的技术门槛
- 突破了传统设计方法中理想流动条件的假设，使得优化结果与真实状态更为接近，具备更高的可信度

四. 多场耦合与智能化技术的应用与展望

	空间适应性	性能	工艺性	可靠性	成本
叶片数	○	●	●	○	●
叶片厚度	○	●	●	●	○
特殊造型	●	●	●	●	●
流道收缩率	●	●	○	○	○
轴向长度	●	●	○	○	○
是否等栅距	○	○	●	○	●



- 未来冷却风扇技术的发展呈现多学科融合的趋势，仅靠解决空气流动的问题已不能满足工程应用的需求
- 涉及流动、噪声、振动、传热、电磁等多个物理场
- 参数化建模可以延伸到其他学科的物理模型的构建，并最终通过多目标优化形成客户定制化的优化方案
- 大量的优化设计结果以及相关的试验结果可以利用智能化技术的发展形成新一代的设计方法，从而替代过去人工操作等大量繁复的设计流程



- ▶ **研发**：现有集多学科于一体的冷却风扇数字化研发设计平台，能够进行离心/混流/轴流各种形式冷却风扇的设计、流场仿真、强度校核、模态分析和优化设计，已构建完善的冷却风扇数字化设计体系。
- ▶ **试验**：现建有冷却空气动力系统综合试验平台，其中包含冷却风扇气动性能试验台、超转试验台、破坏试验台、传动试验台、模态测试装置，具备国内先进的冷却风扇相关的各种性能试验和可靠性试验的试验能力。
- ▶ **生产**：具备各种形式、各系列冷却风扇（离心/混流/轴流）及风扇传动装置（离合器、耦合器、液压、电驱动）的生产、装配、调试、测试试验的能力，每年最少完成500台以上的风扇生产。
- ▶ **产品参数**：风量 $2\sim 9\text{m}^3/\text{s}$ ，静压6000Pa以内。



风扇气动性能试验台

测量范围:	
被试件规格	$\leq \phi 700\text{mm}$
转速	0~12000r/min
扭矩	0~500N. m
压力	0~15kPa

依据GB/T1236进行风扇的气动性能试验，并随气动性能试验依据GB/T2888进行风扇噪声测量，并全程监测和记录风扇振动情况。



风扇超转试验台

测量范围:

被试件外径	$\leq \phi 1000\text{mm}$
被试件高度（含工装）	$\leq \phi 400\text{mm}$
最高输出转速	12000r/min

主要用于完成JB/T 6445-2005和中国北方车辆研究所的企业标准Q/AT 201.096所规定的风扇叶轮超转试验



风扇破坏试验台

名称	具体参数/详细描述	
增速主轴型号	S20D	IG6D
主轴直径	20mm	10mm
最高转速	20000r/min	60000r/min
被试件重量	≤800kg	≤50kg
被试件外径	≤φ 1000mm	≤φ 600mm
被试件高度 (含工装)	≤900mm	≤500mm

主要完成风扇叶轮破坏试验，用于检验风扇叶轮高速运转时的使用极限，并通过高速照相机捕捉风扇叶轮在破坏瞬间的结构状态。



能够对风扇进行单点或多点激励，通过振动传感器测量响应输出，利用软件的频响函数分析模块计算得到各点频响函数数据，从而进行风扇自振模态分析。

1. 自激法风扇自振频率测试
2. 共振法风扇自振频率测试
3. 结构件风扇自振频率测试

风扇自振频率测试装置



中国兵器第一研究院
NO.1 ACADEMY OF CHINA ORDNANCE

谢谢!



Thanks