



清华大学
Tsinghua University

叶片泵的若干研究进展 及优化设计

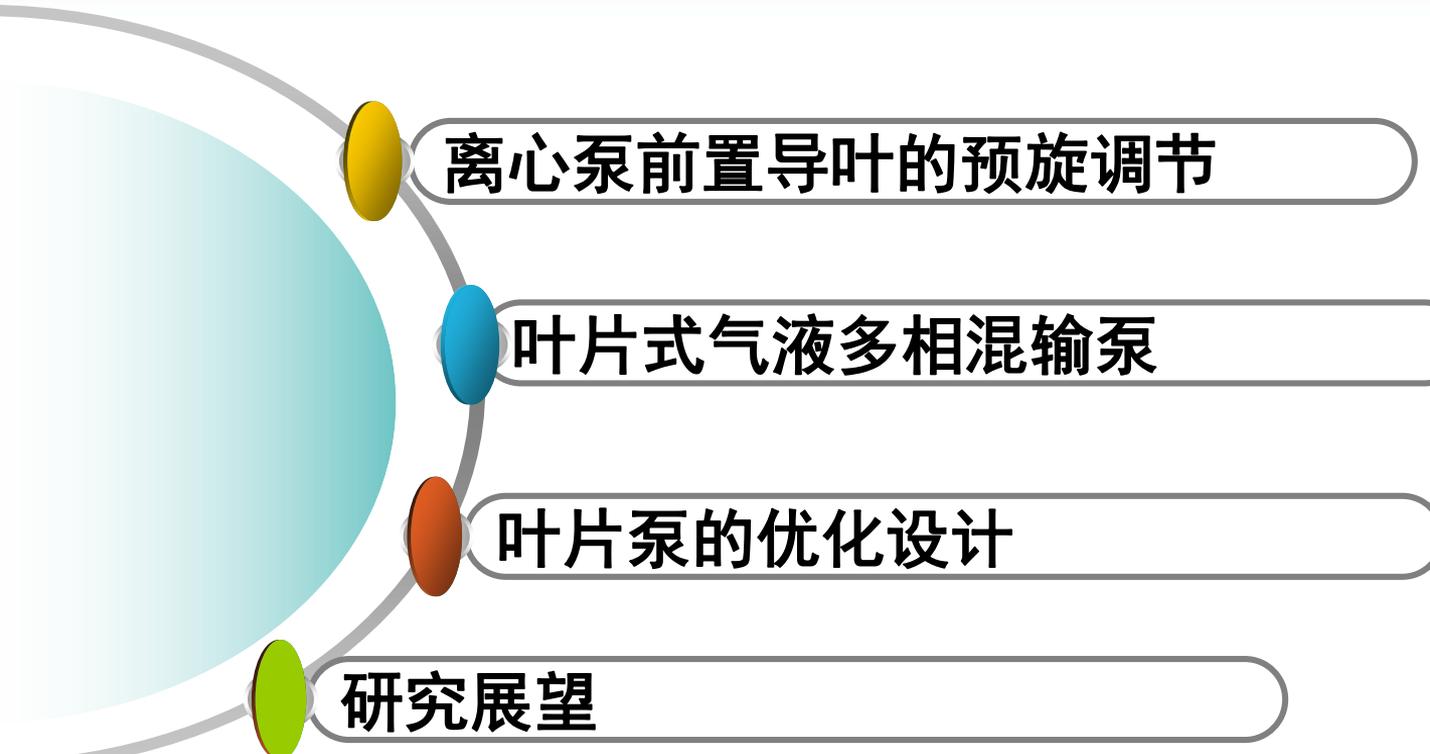
曹树良

(caoshi@mail.tsinghua.edu.cn)

清华大学 热能工程系

流体机械及流体工程研究所

主要内容

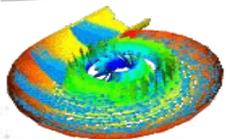


离心泵前置导叶的预旋调节

叶片式气液多相混输泵

叶片泵和优化设计

研究展望



一、离心泵前置导叶的预旋调节

❖ 背景:

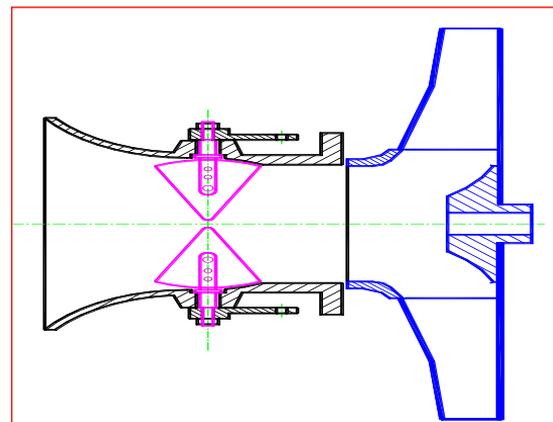
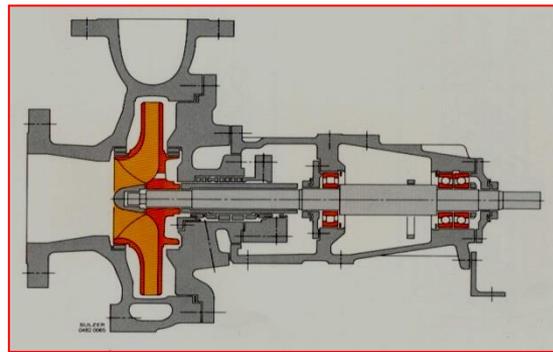
- 实际工程运行中的节能问题越来越受到重视
- 离心泵应用广泛，但由于选型不当或调节方法不正确导致实际运行效率较低

❖ 目的及意义:

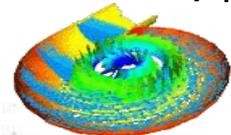
- 提出了一种新的离心泵工况调节方法
- 为离心泵节能给出了一条新的途径

❖ 调节原理:

- 离心泵的实际运行工况点是由管网特性和泵特性所共同决定
- 叶轮进口的来流条件是影响泵性能的一个关键因素

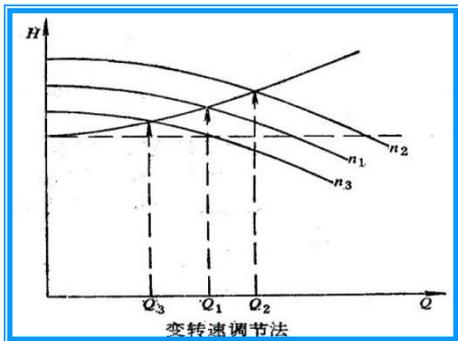


$$H_{Euler} = \frac{\omega}{g} (c_{u2}r_2 - c_{u1}r_1) = \frac{\omega}{2\pi g} (\Gamma_2 - \Gamma_1)$$

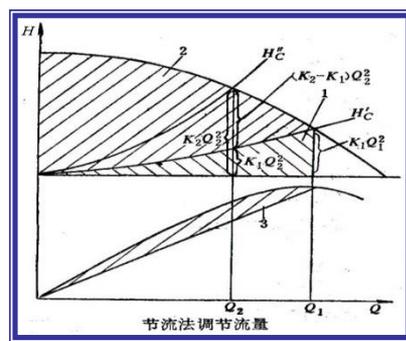
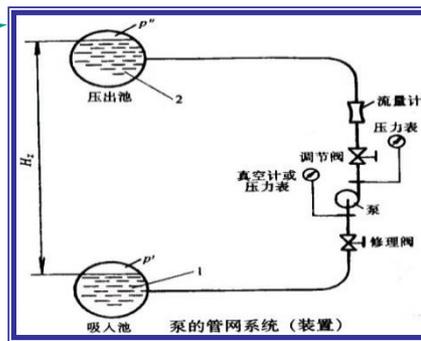


一、离心泵前置导叶的预旋调节

变速调节



节流调节

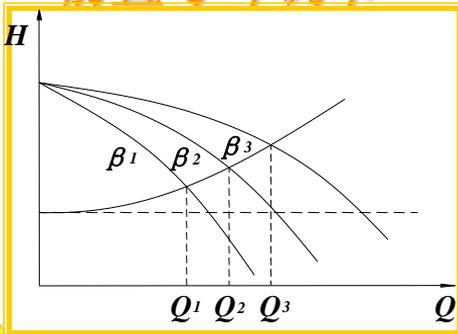


节流调节

变速调节

前导预旋调节

前置导叶调节

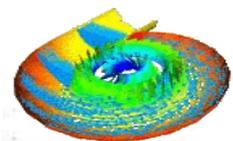
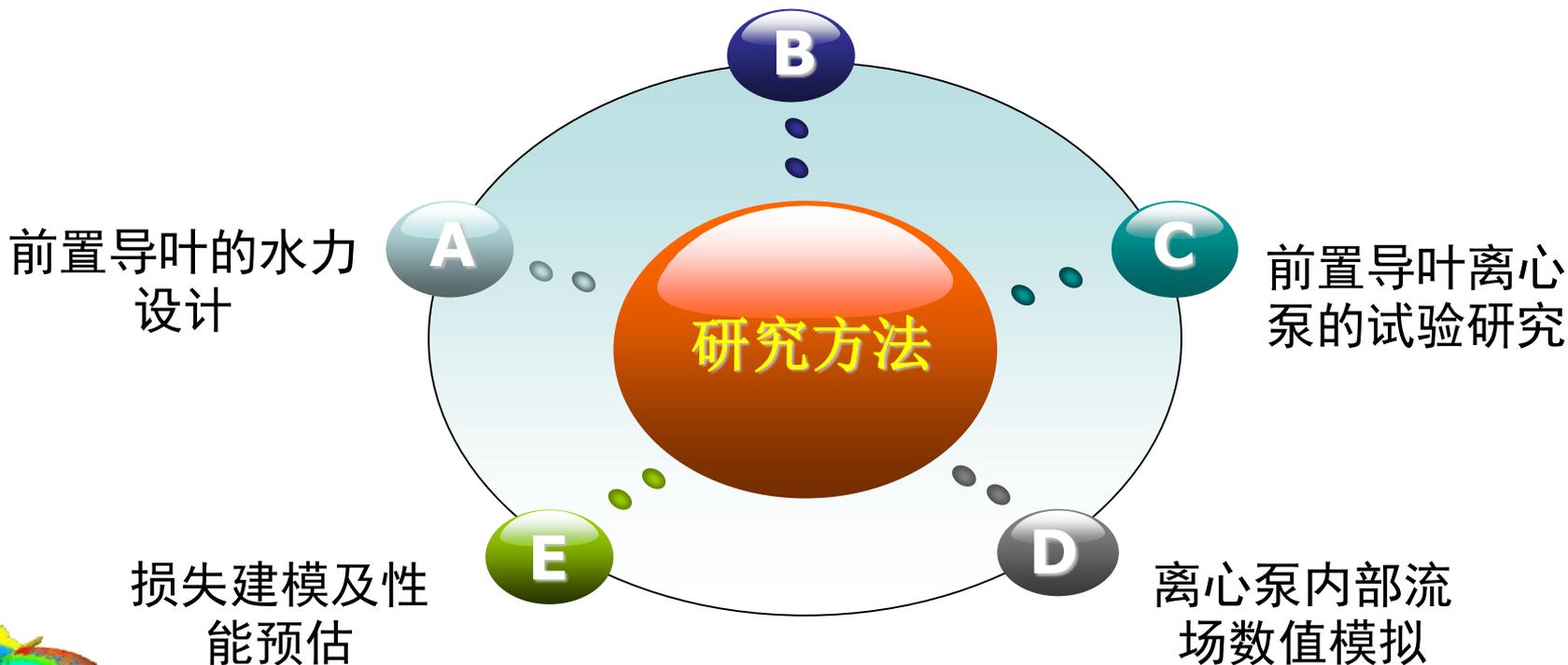


与节流调节的主要区别：通过改变泵本身的特性曲线来调节水泵运行工况点，从而有效的减少了阀门调节的节流损失！

离心泵工况的调节方法

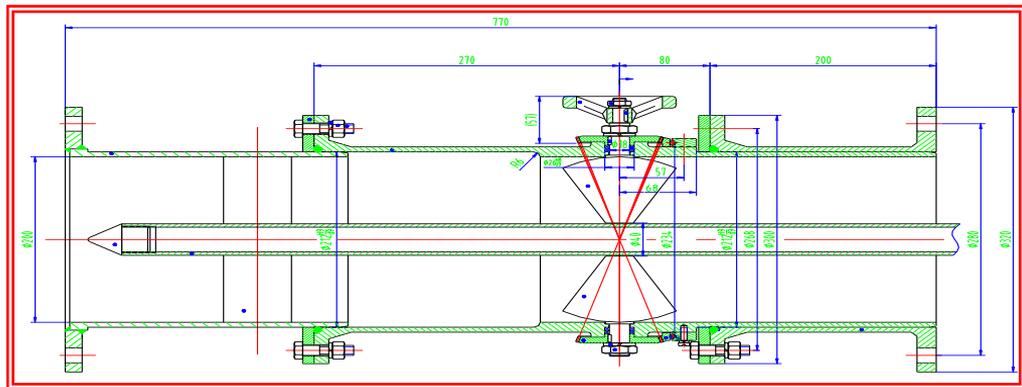
一、离心泵前置导叶的预旋调节

前置导叶装置的结构设计



一、离心泵前置导叶的预旋调节

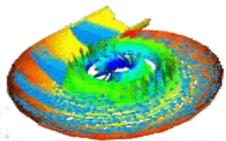
- ❖ 三维空间前置导叶试验装置
- 前置导叶装置的结构设计（导叶数：6）



(a) 前置导叶结构设计图

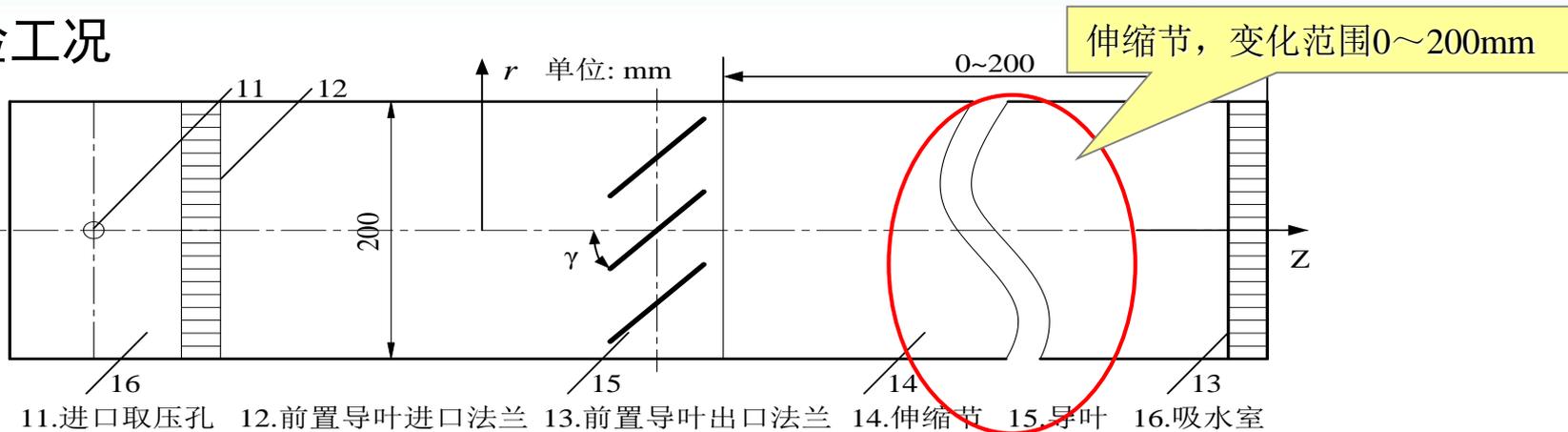


(b) 前置导叶实体图



一、离心泵前置导叶的预旋调节

❖ 试验工况

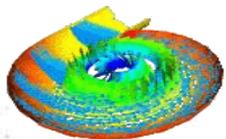


■ 试验离心泵型号为：XA150/32

转轮外径	转轮进口直径	吸水管进口直径	叶片数	试验转速
329mm	185mm	200mm	6	1450rpm

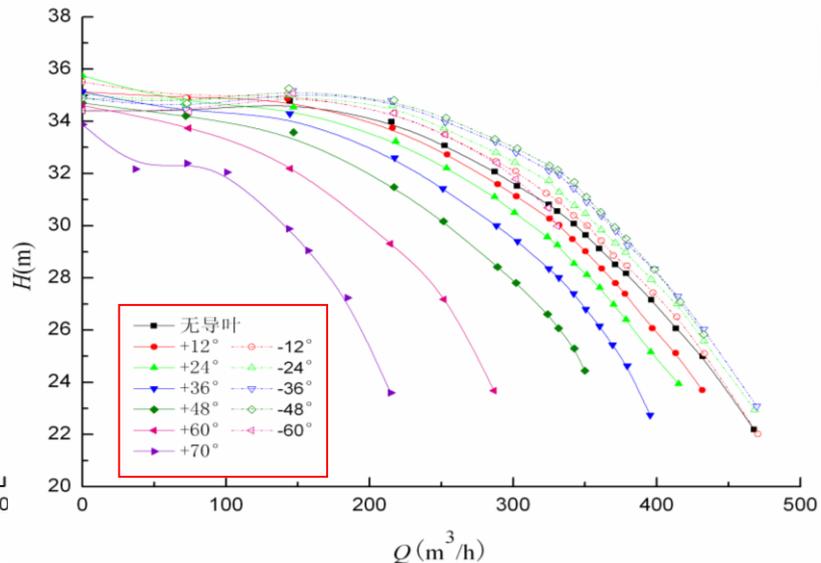
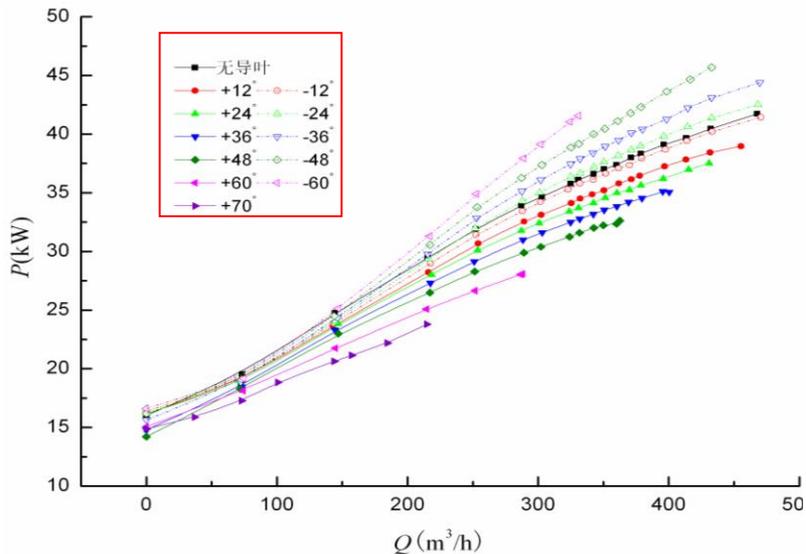
■ 试验方案

- ⊕ 三个轴向位置：伸缩节长度分别为 $L=0, 100, 180$ mm
- ⊕ 12个导叶开度下能量特性试验，前置导叶安放角分别为：
 $0^\circ, \pm 12^\circ, \pm 24^\circ, \pm 36^\circ, \pm 48^\circ, \pm 60^\circ, +70^\circ$

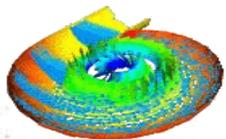


一、离心泵前置导叶的预旋调节

■ 前置导叶(L=100mm)

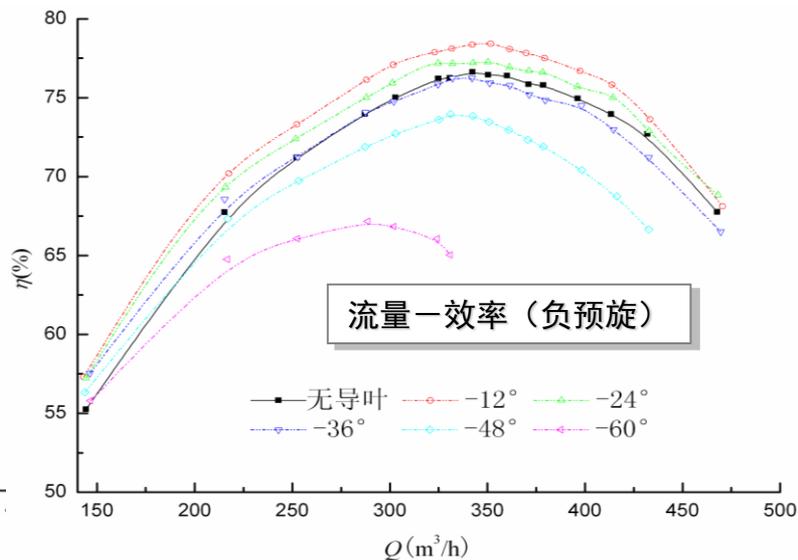
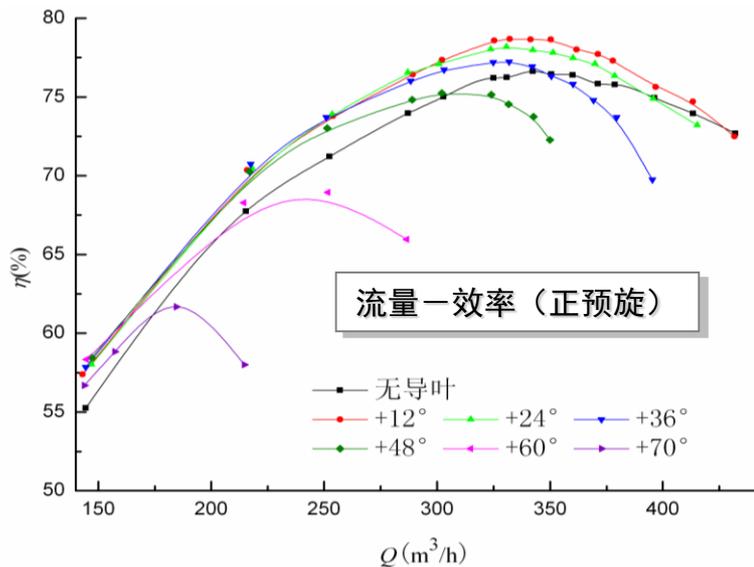


- 正预旋时，扬程曲线向左下方偏移；负预旋向右上方偏移，但幅度不是很大。
- 正预旋有利于降低轴功率消耗

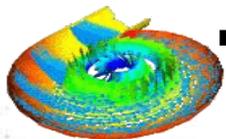


一、离心泵前置导叶的预旋调节

■ 前置导叶(L=100mm)



- 随着正预旋角度的增加，最优效率点的位置逐渐向小流量偏移
- 负预旋角度较小时，最优工况点稍往大流量区移动，而且能够提高离心泵的运行效率，但当角度过大时最优点则迅速向小流量区移动



一、离心泵前置导叶的预旋调节

■ 前置导叶(L=100mm)

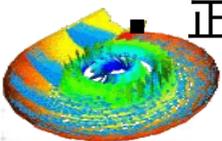
①

外特性	前置导叶预旋角度 / °						
	无导叶	0	12	24	36	48	60
Q	342.43	343.2	332.1	330.8	324.8	302.1	251.8
H	31.0	30.01	30.02	29.96	28.01	27.81	27.18
η	76.63	78.76	78.68	78.10	77.23	75.25	69.93

- 正预旋较宽角度范围内最优效率比无导叶时要高，改善了小流量工况的水力性能

②

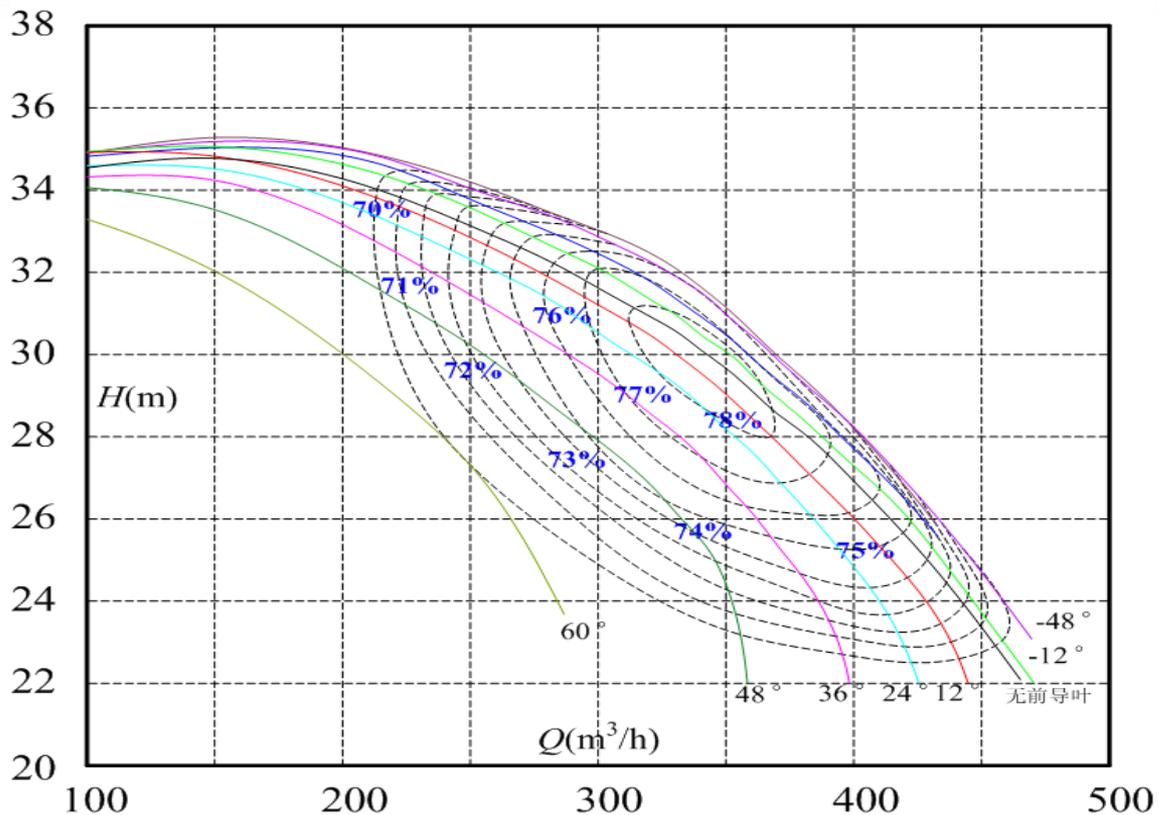
外特性	最优流量 / $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$				
	343.2	332.1	330.8	324.8	302.1
无导叶	76.63	76.25	76.23	76.21	75.02
有导叶	78.76	78.68	78.10	77.23	75.25



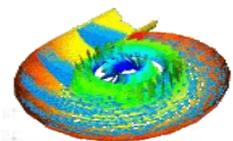
■ 正预旋时，不同角度下的最优效率均高于相同流量条件下无导叶时泵的效率

■ 安装导叶后，效率最大可以提高2.13%

一、离心泵前置导叶的预旋调节



配有前置导叶离心泵的综合特性曲线(L=100 mm)



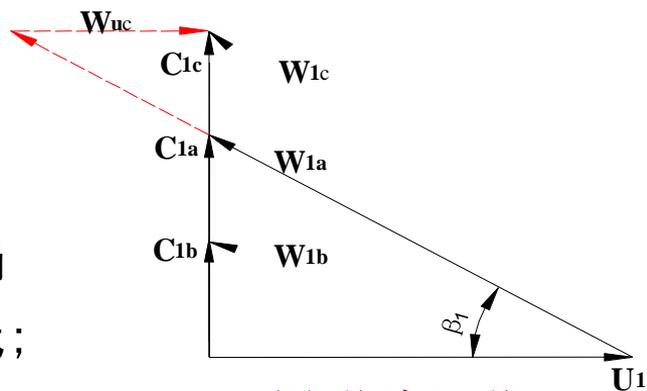
一、离心泵前置导叶的预旋调节

❖ 导叶安放角对水泵效率的影响

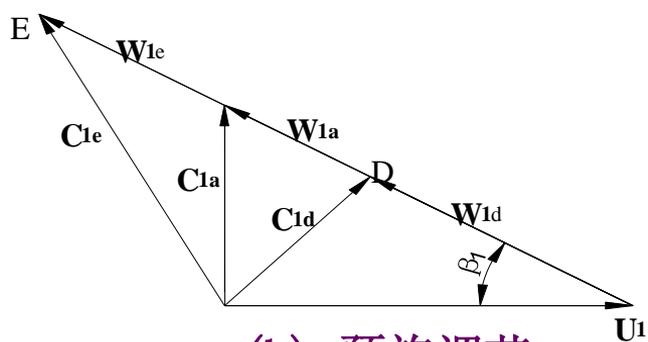
- ◆ 正预旋调节能够改善离心泵在小流量工况下的水力性能；
- ◆ 负预旋时, 则最优点的位置为稍往大流量区偏移, 且最高效率值在大的负预旋角下迅速降低；

原因:

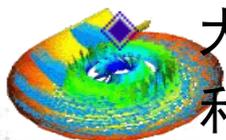
- ◆ 三维前置导叶能够为叶轮进口提供较为均匀的到来条件；
- ◆ 在小流量工况下, 三维前置导叶有效的抑制了叶轮进口的回流；
- ◆ 大流量工况下, 由于叶轮流道内部的漩涡损失和表面摩擦损失加大, 从而导致效率下降



(a) 节流调节



(b) 预旋调节



一、离心泵前置导叶的预旋调节

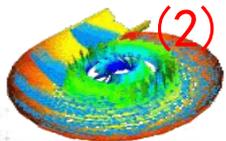
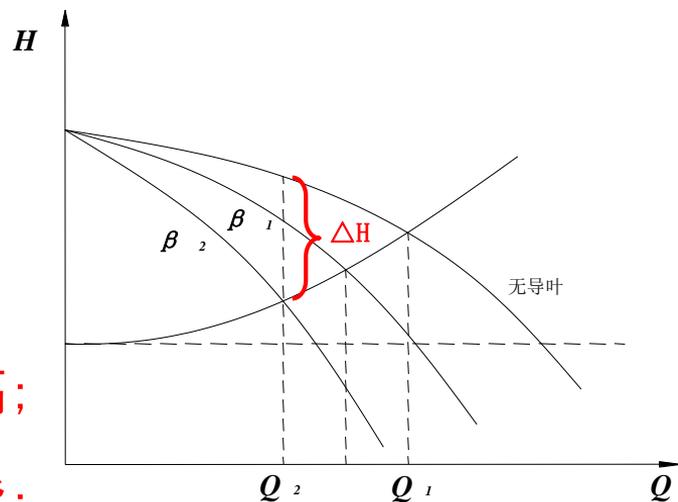
实验结论：

◆ 前置导叶预旋调节能够有效的扩大离心泵运行工况点的调节范围，拓宽离心泵的高效运行区，改善离心泵在非设计工况下的水力性能，从而给离心泵节能给出了一条新的途径。

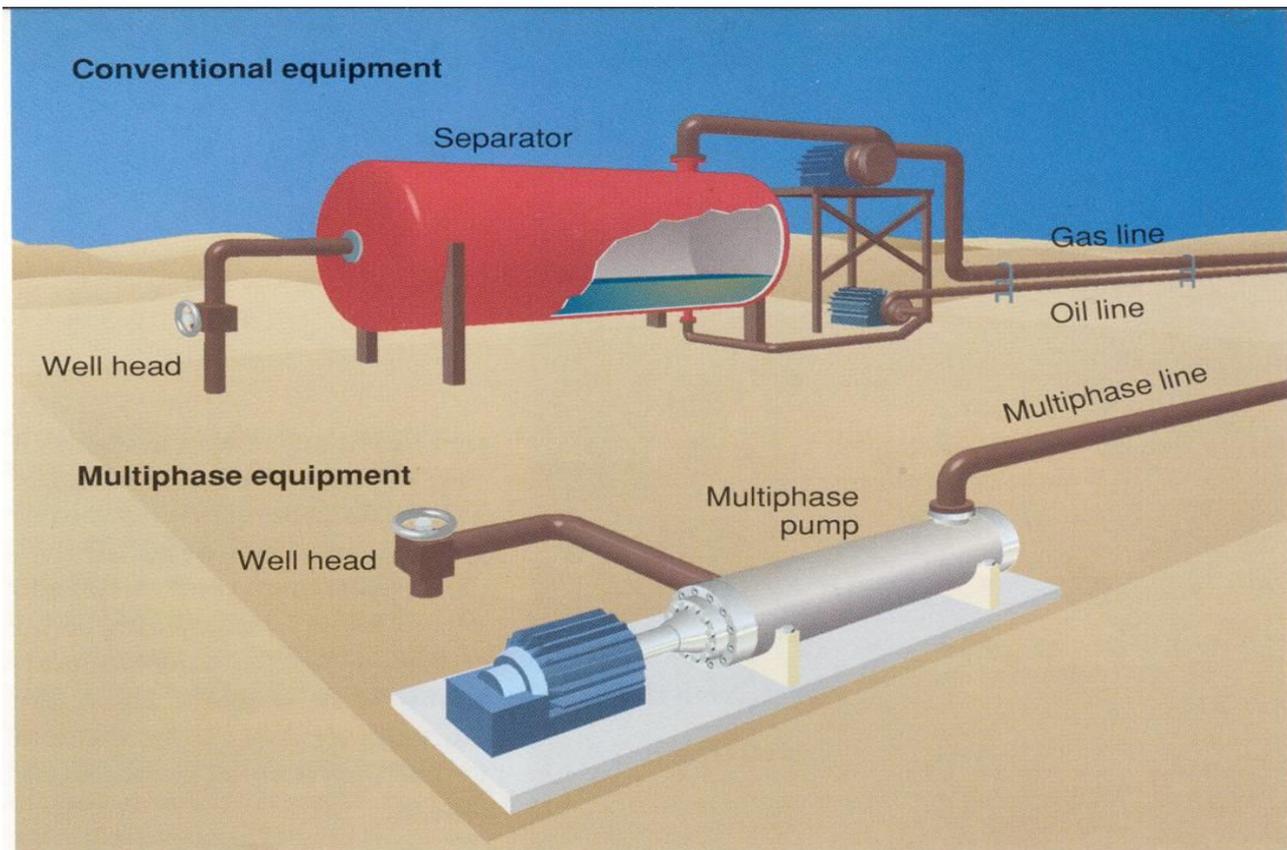
◆ 前置导叶预旋调节的离心泵节能主要来之于两个方面：

(1) 泵自身的节能——实际运行效率的提高；

(2) 前置导叶代替阀门调节所带来的节能；

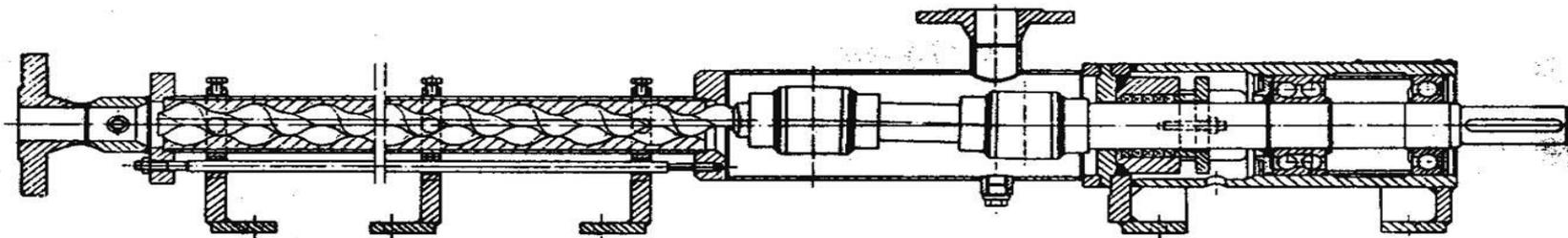


二、叶片式气液多相混输泵

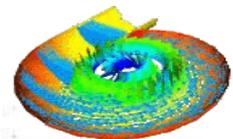
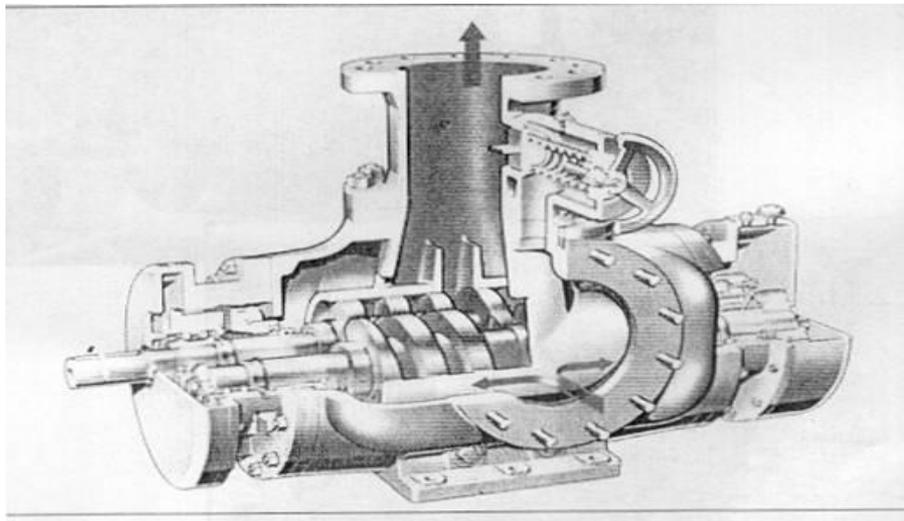


集输方式的
比较

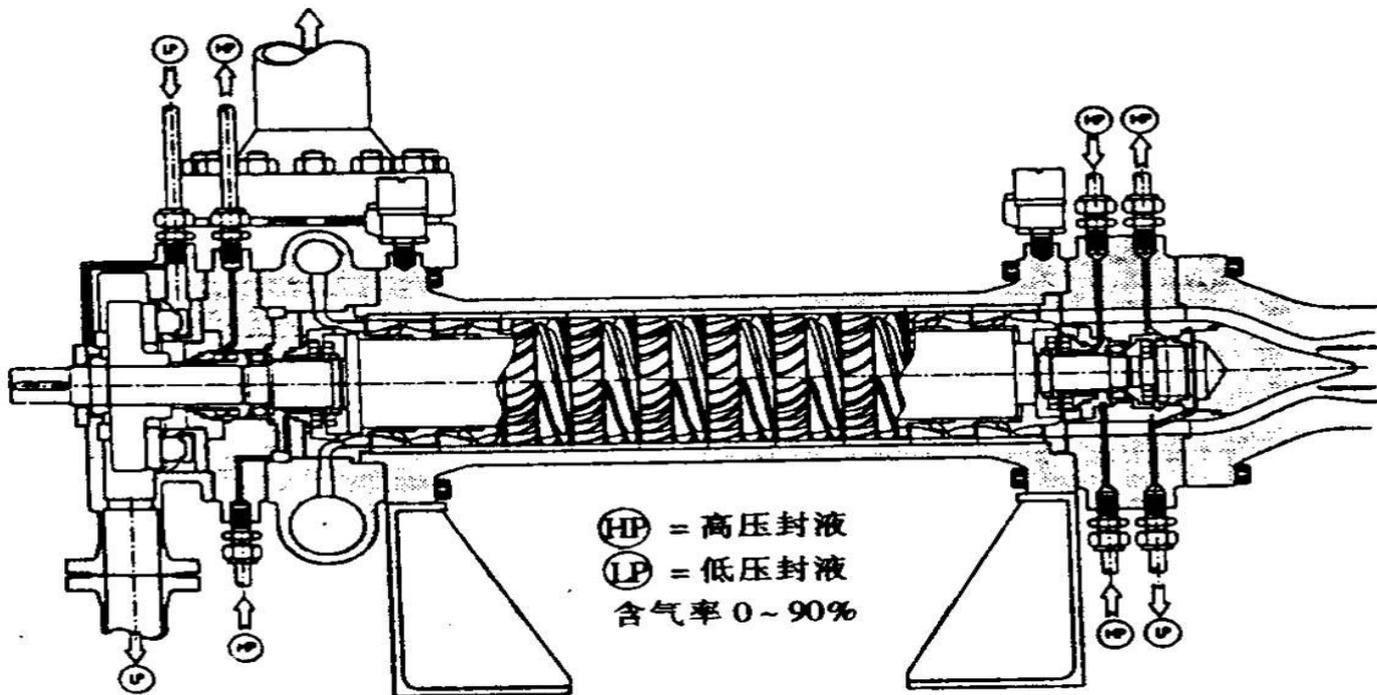
二、叶片式气液多相混输泵



Bornemann
Multiphase Pumps

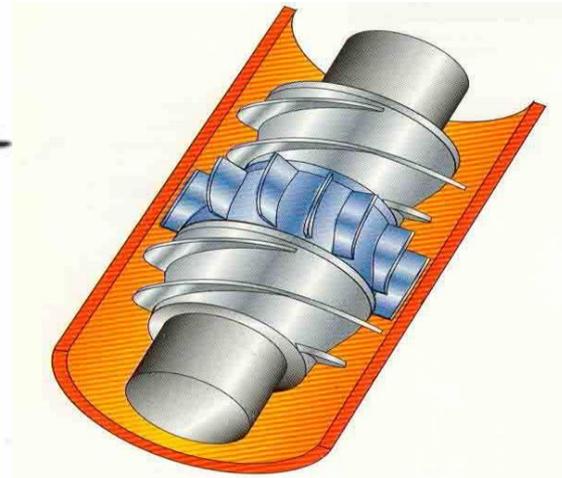
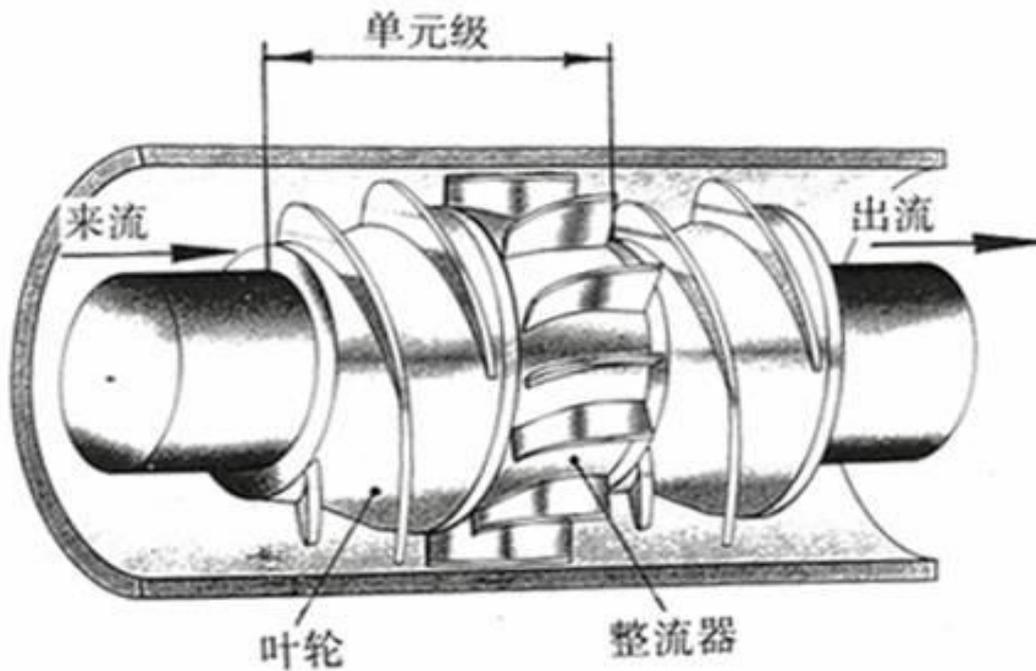


二、叶片式气液多相混输泵

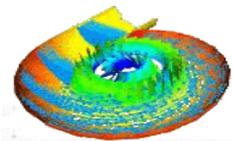


Poseidon Multiphase Pump

二、叶片式气液多相混输泵



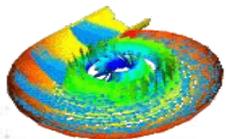
叶片式气液多相混输泵的结构和原理



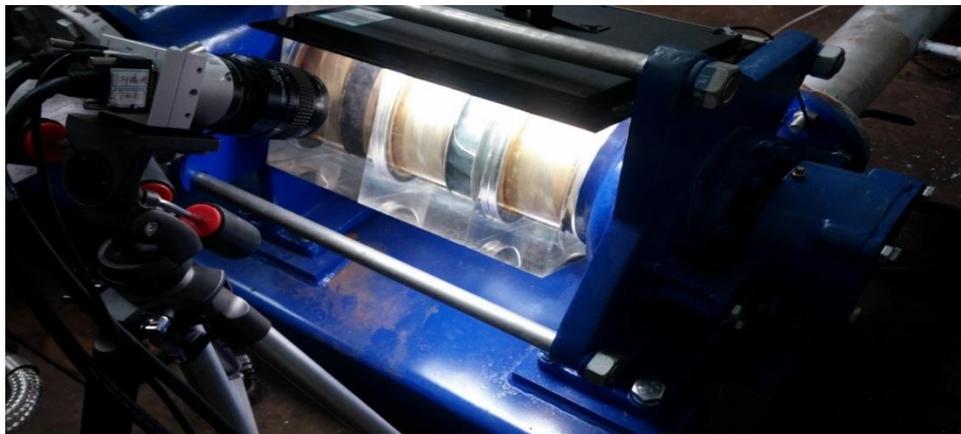
二、叶片式气液多相混输泵



研制的供试叶片式气液多相混输泵

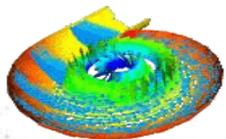
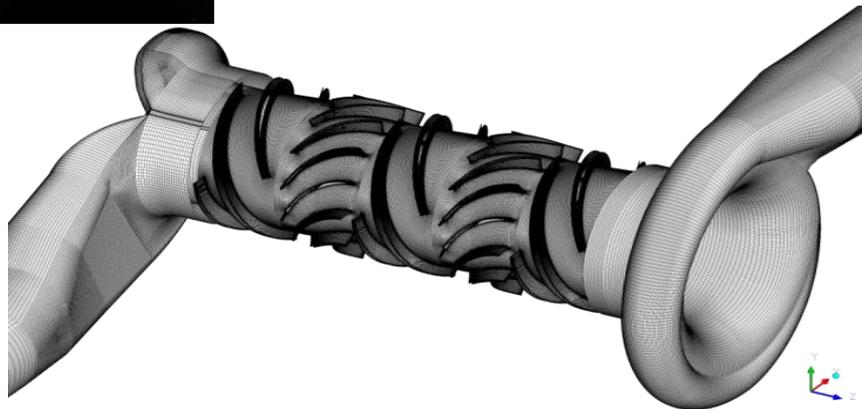


二、叶片式气液多相混输泵

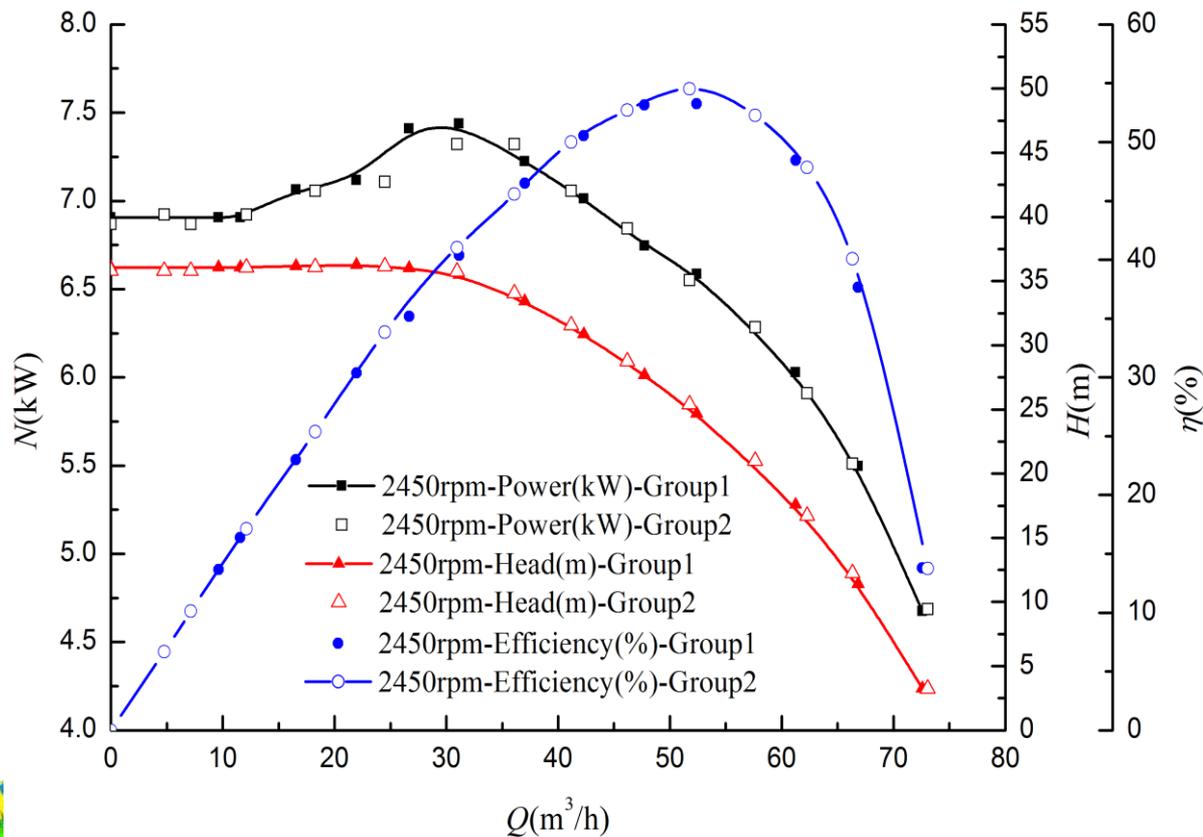


实验研究

数值计算

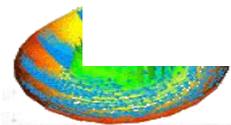


二、叶片式气液多相混输泵

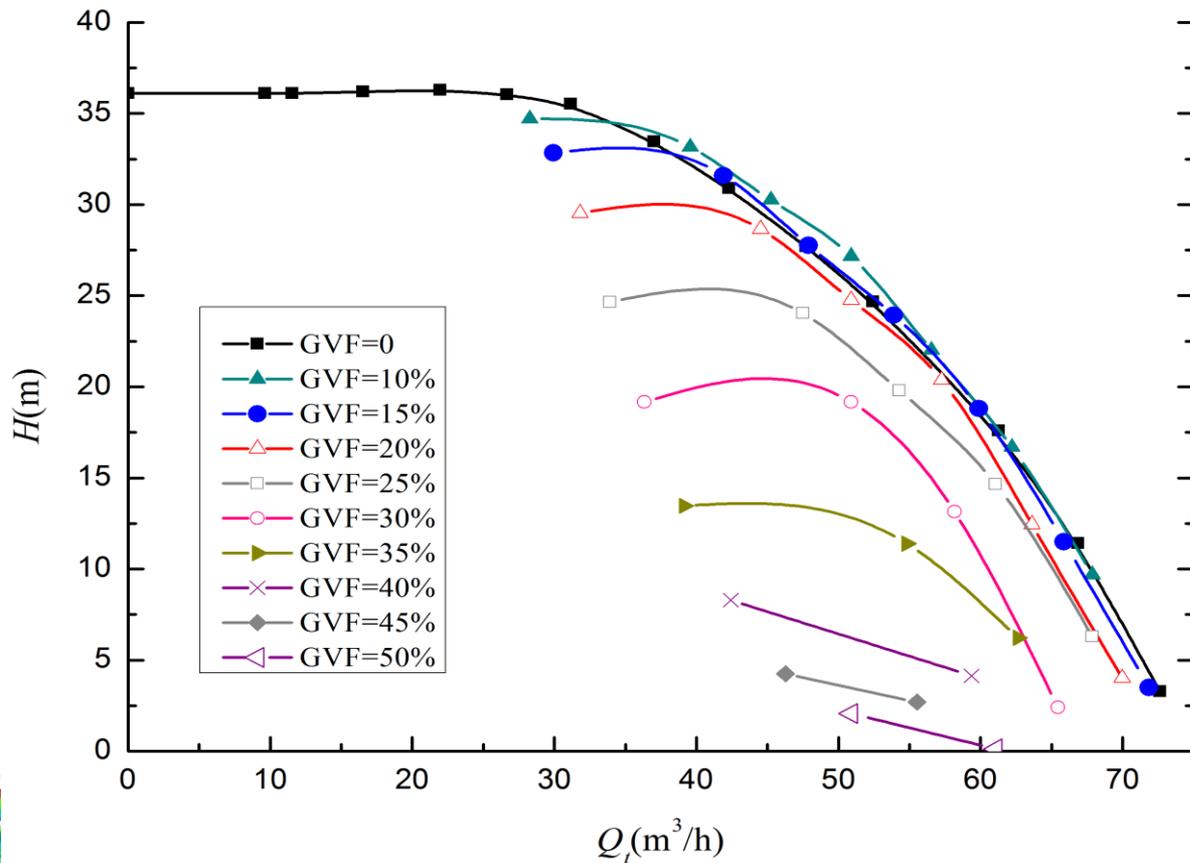


最优效率点： 50m³/h,
25.5m, 55%

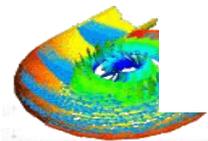
纯水工况的实
验结果



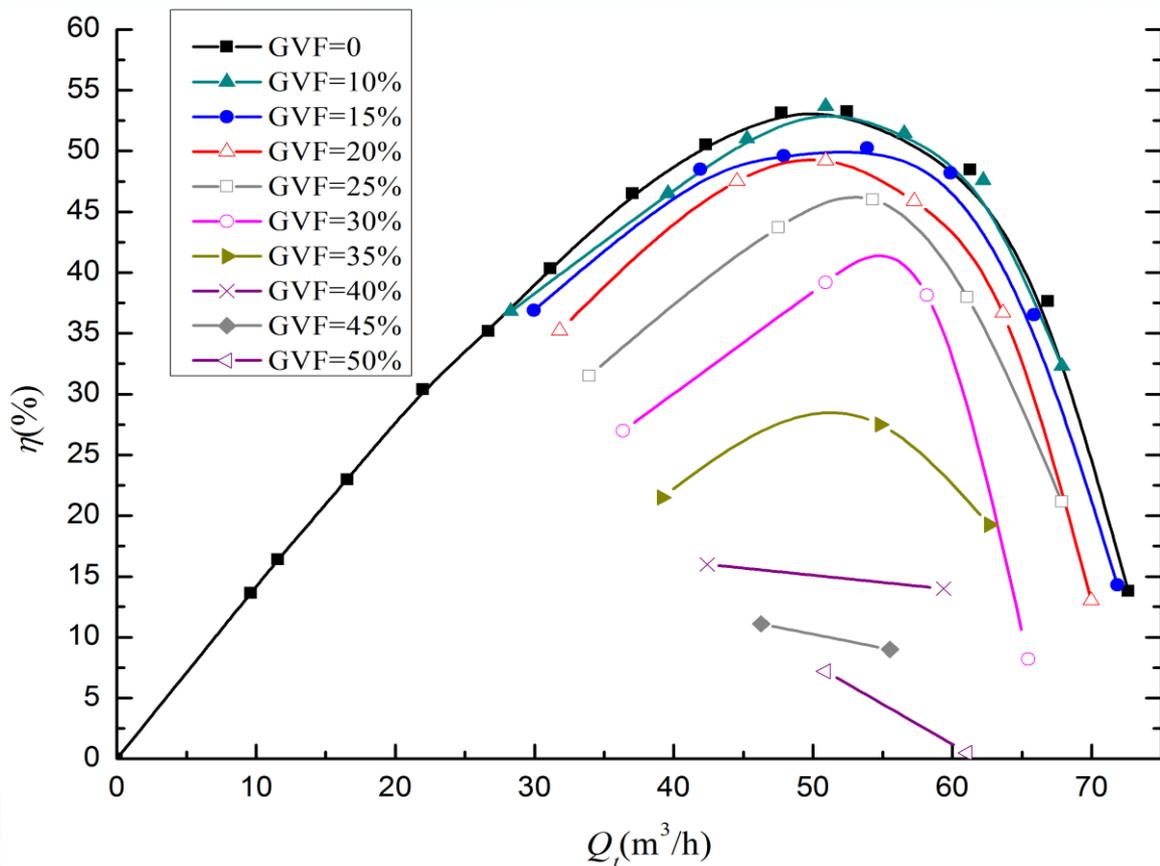
二、叶片式气液多相混输泵



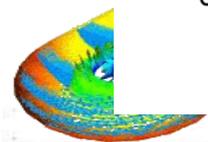
不同含气量时扬程随流量的变化



二、叶片式气液多相混输泵



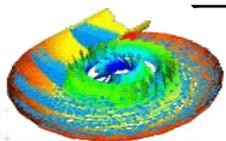
不同含气量时效率随流量的变化



二、叶片式气液多相混输泵

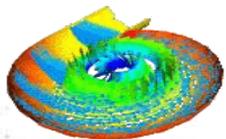
实验研究结论：

1. 研发的叶片式气液多相混输泵气体体积含量最高达到了50%以上，能在短时间内输送100%的气体而不发生气堵现象，纯水工况效率较国外有关报导高15%。
2. 泵的最高效率随含气量的不同而不同，目前的实验表明，当 $GVF \leq 10\%$ 时泵效与纯水工况相近，而当 $GVF \geq 35\%$ 时，最高效率开始明显下降。
3. 该泵的水力设计可以满足一定含气量的气液多相混输要求。但如何进一步提高含气量，提高水力效率仍然是今后进一步深入研究的关键。



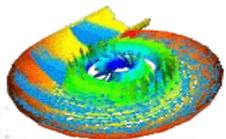
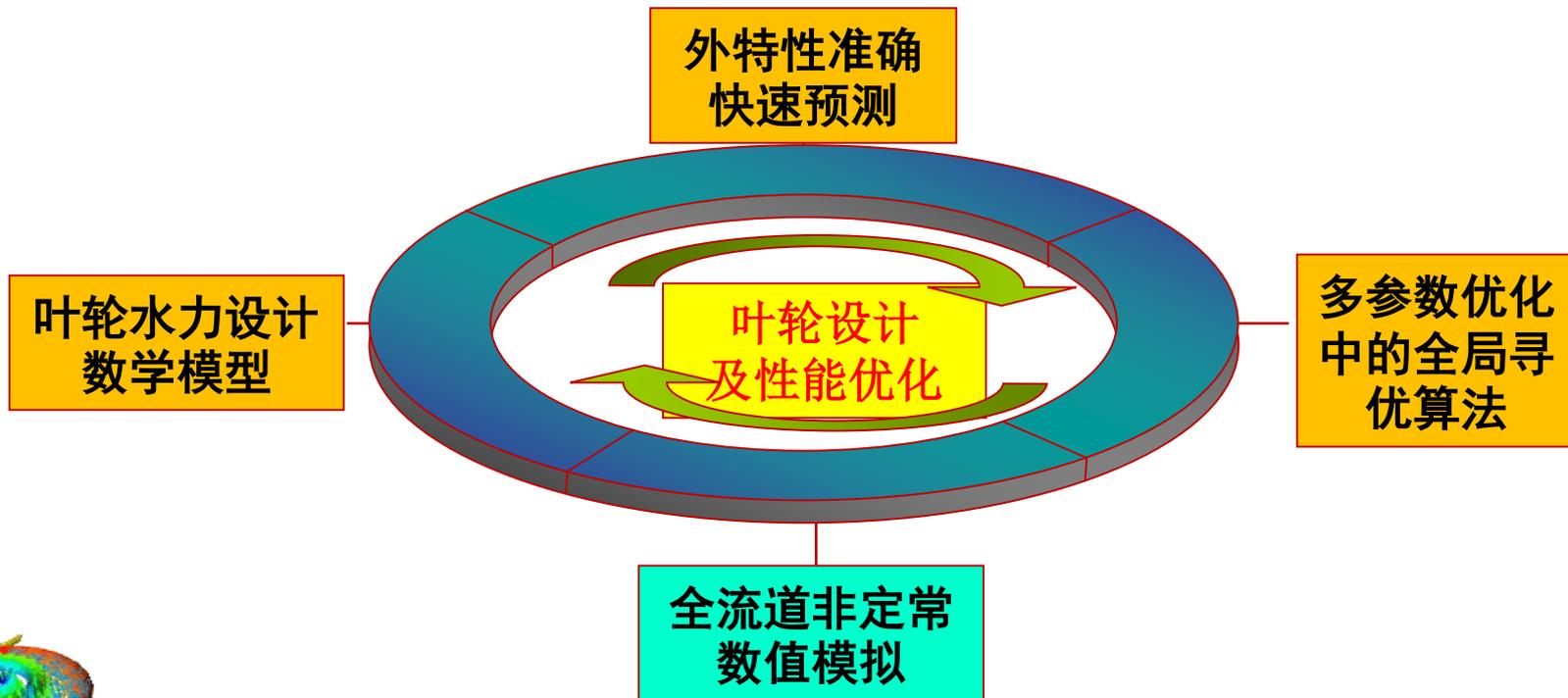
三、叶片泵和优化设计

- 优化设计通常包含以下三个平台的建设：
 - 初设平台
 - 性能预估平台
 - 优化设计平台



三、叶片泵和优化设计

■ 优化设计的关键问题



三、叶片泵和优化设计

1、初设平台——传统设计方法与正反问题迭代法

一元理论

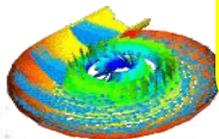
- 叶片为无穷多、叶片厚度为无限薄
- 轴对称流动
- 轴面速度沿同一过水断面均匀分布
- 轴面速度仅满足连续方程
- 离心泵的主要设计方法

二元理论

- 叶片为无穷多、叶片厚度为无限薄
- 轴对称流动
- 轴面速度按给定的规律分布 $\begin{cases} \Omega_u = 0 \\ \Omega_u \neq 0 \end{cases}$
- 轴面速度仅满足连续方程
- 混流泵的主要设计方法

准三元理论

- 设计中能考虑叶片厚度对轴面流动的影响
- 轴面流动同时满足流体的连续方程和运动方程
- 在设计理论上更加完善
- 适用旋转机械叶轮的设计方法

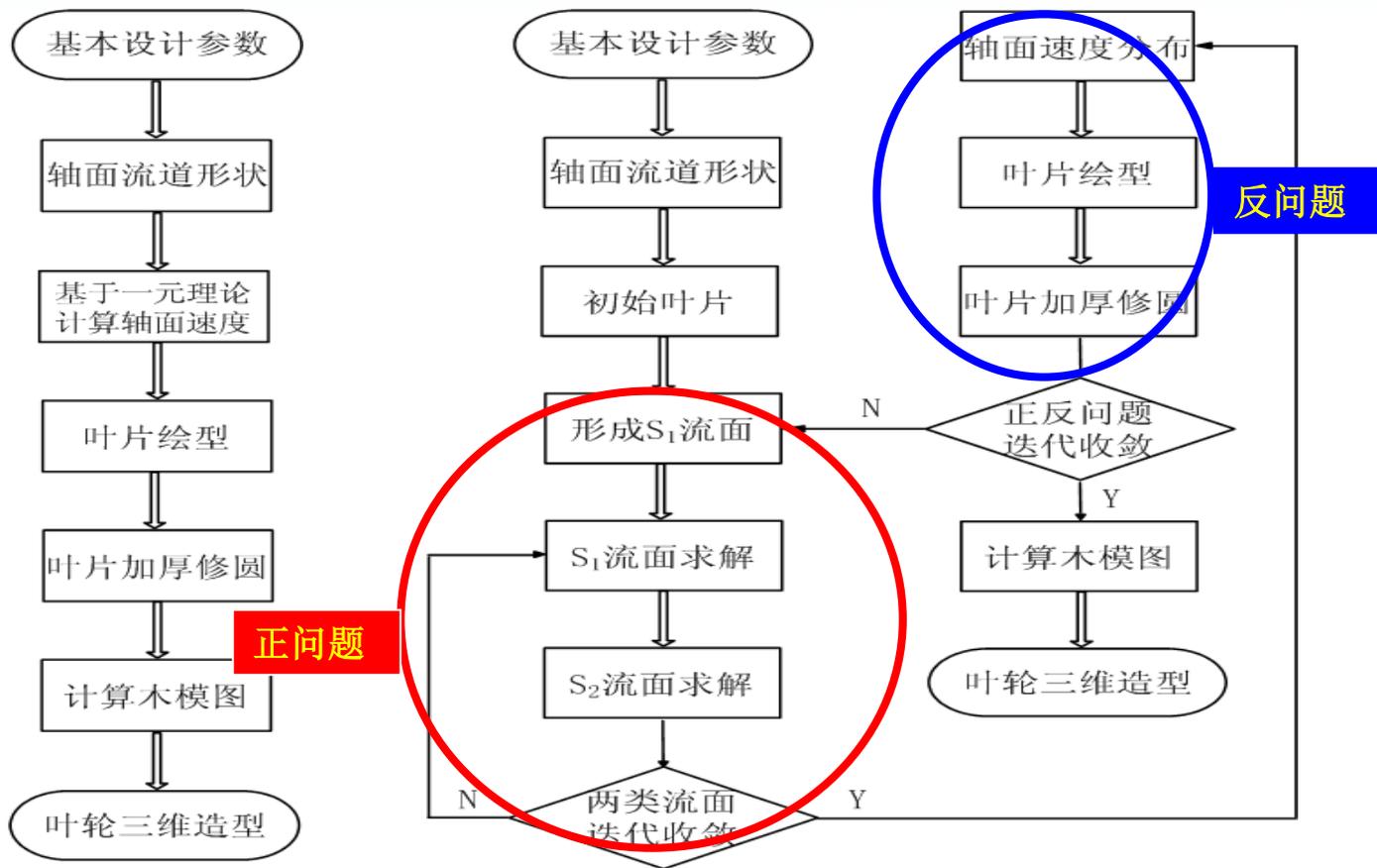


三、叶片泵和优化设计

◆传统设计方法仅需根据轴面速度的假定和流道形状计算轴面速度。

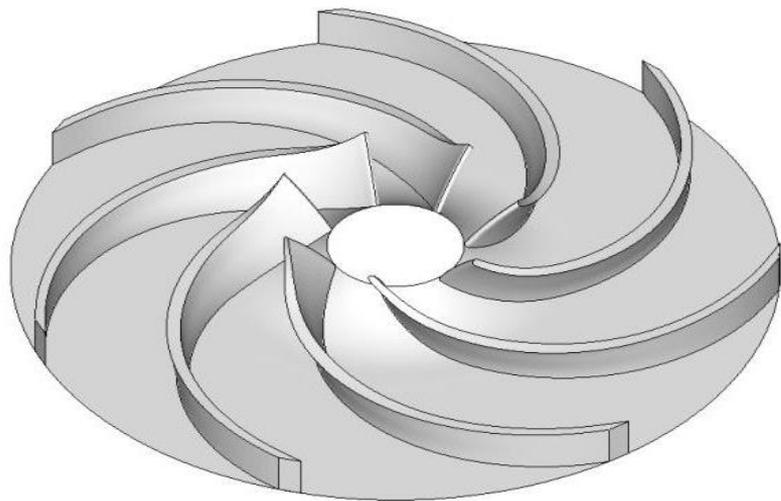
◆正反问题迭代法考虑叶片形状对轴面流动的影响，需两类流面迭代求解完成轴面速度的计算。

◆轴面流道形状计算、叶片绘型方法、叶片加厚修圆、计算木模图等模块通用。

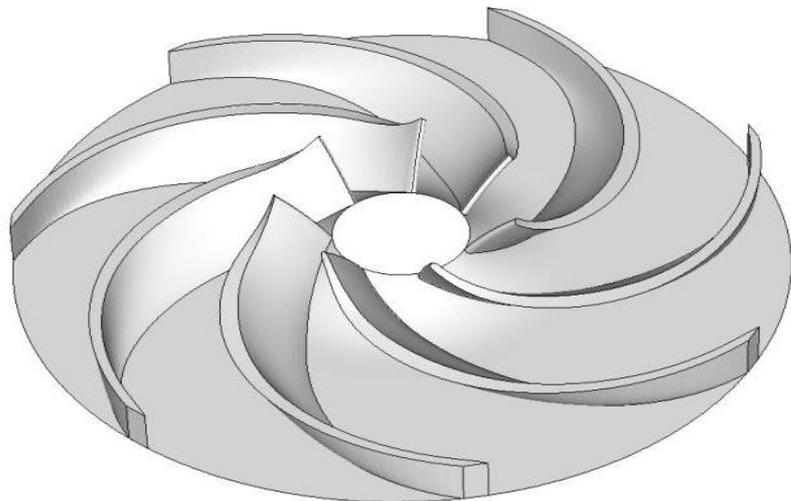


三、叶片泵和优化设计

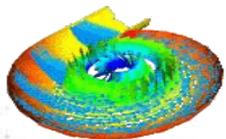
1、初设平台--传统设计方法与正反问题迭代法



传统设计方法
设计的叶轮



正反问题迭代法
设计的叶轮

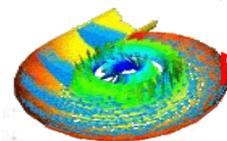


三、叶片泵和优化设计

1、初设平台--传统设计方法与正反问题迭代法

采用正反问题迭代法，在数学建模的基础上，编程建立了叶轮三元设计平台。

- 通过 S_1 、 S_2 流面迭代计算，同时求解连续方程与运动方程。
- 为控制叶片表面载荷分布，提出了可控载荷叶片绘型方法。
- 为改进传统加厚叶片方法，应用了保角变换法。
- 通过正、反问题的相互反馈，考虑了叶片形状与厚度对流动计算的影响，理论上更加完善。

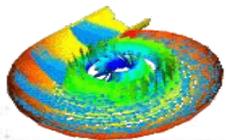


三、叶片泵的优化设计

2、性能预估平台

进行损失建模，并结合准三元流场计算方法，编程建立了叶轮**性能预估平台**。

- 依据损失产生部位和类型，并结合流道特点进行损失建模，结合准三元流场计算，建立了**性能预估平台**。
- 与试验结果的对比表明，性能预估平台可以**快速、准确**预测叶轮性能。

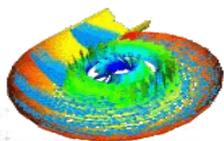


三、叶片泵和优化设计

2、性能预估平台

损失模型

符号	名称	分类
Δh_{inc}	进口冲击损失	内部损失
Δh_{sf}	摩擦损失	
Δh_{cl}	叶片间隙损失	
Δh_{sep}	流动分离损失	
Δh_{bl}	二次流损失	
Δh_{mix}	出口混合损失	
Δh_{lk}	容积泄漏损失	附加损失
Δh_{rec}	出口回流损失	

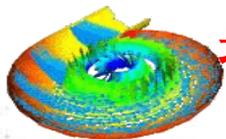


三、叶片泵的优化设计

3、优化设计平台

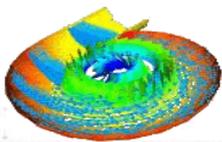
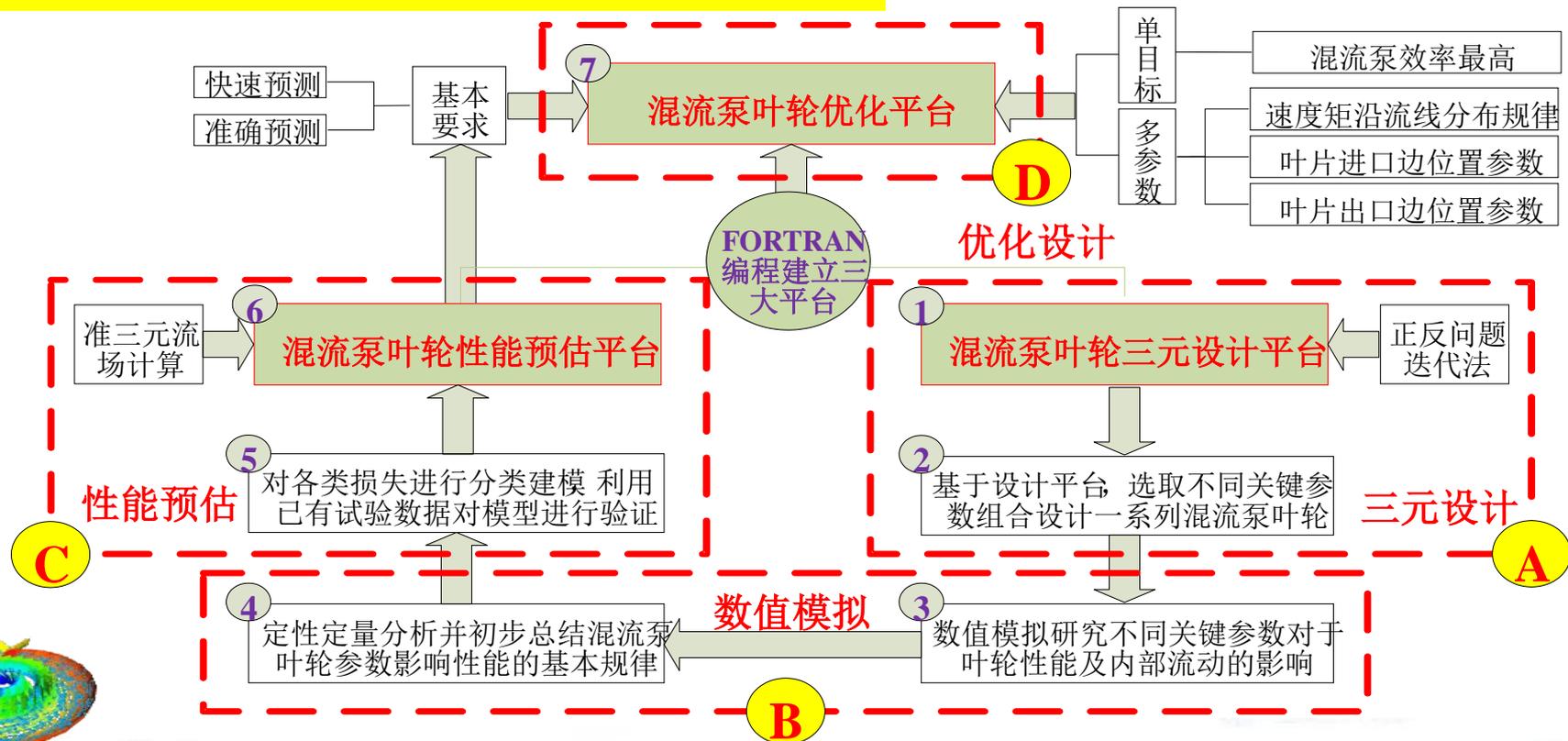
基于三元设计平台与性能预估平台，通过改进遗传算法，编程建立了混流泵叶轮优化设计平台。

- 遗传算法中引入保留最优个体策略、小生境策略等，函数测试的结果证明了算法的高效性与精准性。
- 以叶轮最高效率为优化目标，以 P 、 a_0 、 $\Delta\theta_h$ 、 $\Delta\theta_t$ 等为优化参数，通过三元设计平台确保叶轮设计符合流体真实流动，通过性能预估平台实现对叶轮效率的准确、快捷计算。
- 三维数值模拟表明，优化设计得到的叶轮内部流动稳定，压力与相对速度分布均匀，具有优越的水力特性。



三、叶片泵和优化设计

4、导叶式混流泵优化设计算例



三、叶片泵的优化设计

4、导叶式混流泵优化设计算例

➤ 设计参数

流量： $Q = 0.48m^3 / h$

扬程： $H = 14m$

转速： $n = 1450r / min$

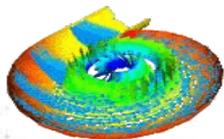
比转速： $n_s = 500$

➤ 计算确定的基本参数：

泵进、出口直径： $D_j = 350mm$

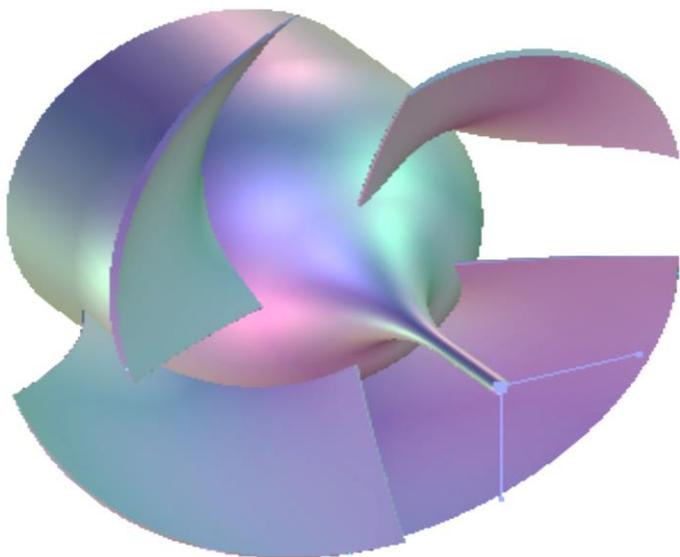
叶片转轴轮缘外径： $D_0 = 350mm$

叶片数： $Z = 4$

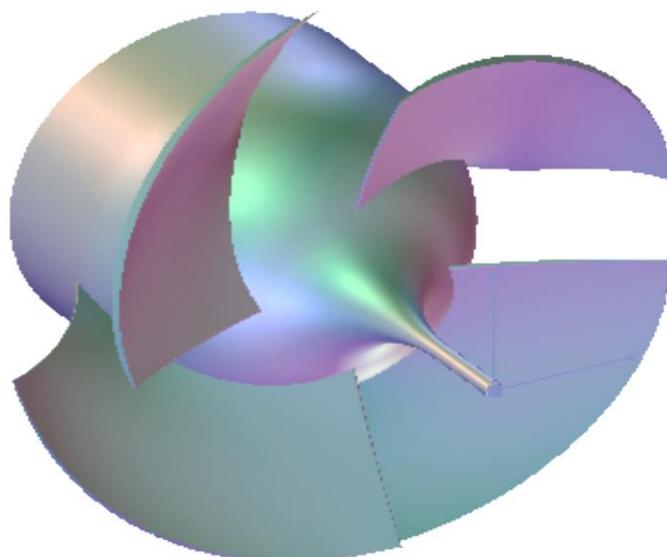


三、叶片泵和优化设计

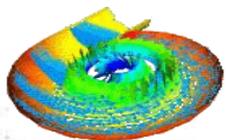
叶轮的优化设计：进化50代后获得了收敛解，计算叶轮的水力效率提高约3%。



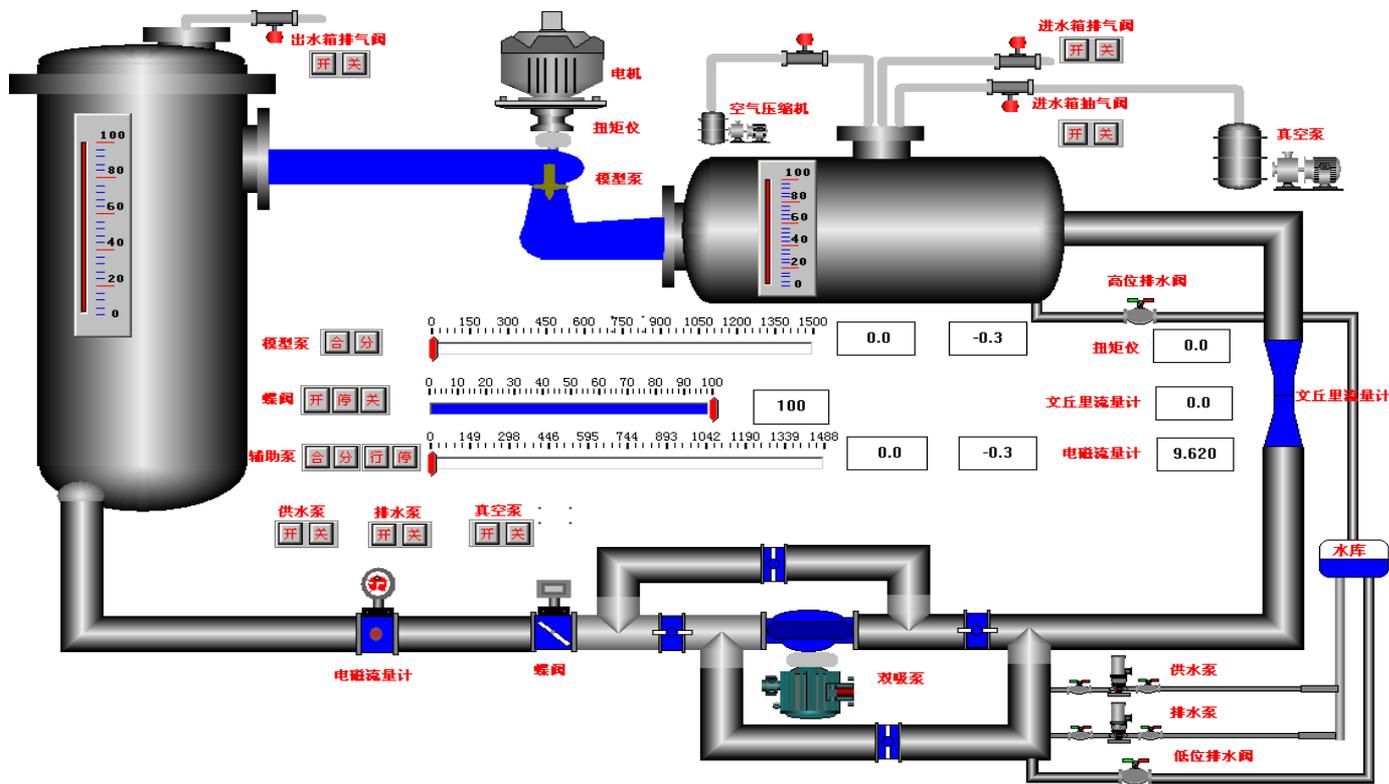
原始叶轮



优化后的叶轮



三、叶片泵和优化设计

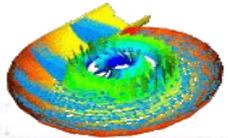


中水北方勘测设计有限责任公司试验台

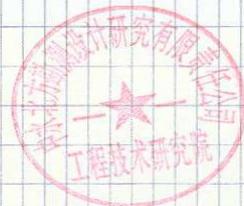
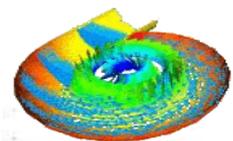
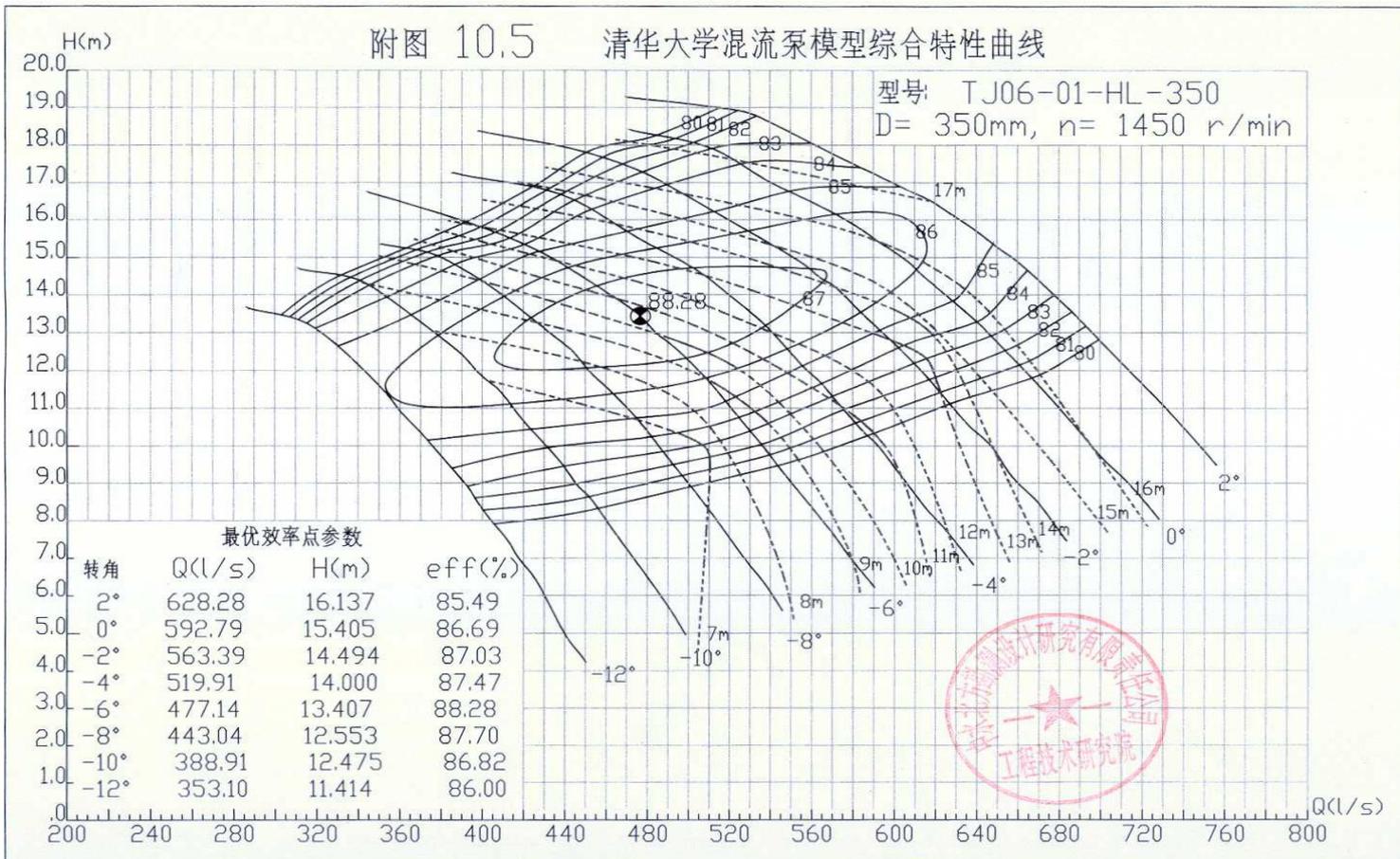
三、叶片泵和优化设计



供试模型泵



三、叶片泵和优化设计



三、叶片泵和优化设计

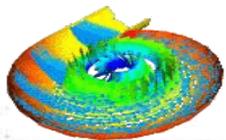
实验结果：

(1) 最高效率88.28%，对应的流量 $Q = 477.11/s$ ，扬程 $H = 13.4m$ ，比转速 $n_s = 521.8$ ，空化比转速 $C = 1020$ 。

(2) 过流能力大，高效区宽：效率大于87%的流量范围为 425 ~ 565 l/s，扬程范围为12 ~ 15m，比转速范围为 503~ 535；效率大于85%的流量范围为 360 ~ 650 l/s，扬程范围为10 ~ 17m，比转速范围为 454~ 560。

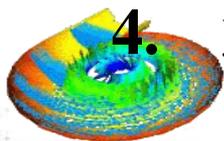
(3) 空化性能好，机组运行稳定性好：在整个实验过程中，无明显的振动和噪音。

(4) 扬程-流量曲线为单调曲线，没有不稳定运行区域



四、研究展望

1. 水力机械多目标、多工况的优化设计理论和方法，并将CAD与CFD相结合，形成完整的水力机械优化设计，虚拟实验和虚拟制造平台。
2. 多相流的理论与分析方法，包括空化与空蚀的机理与预测。
3. 水力机组过流部件的动静干涉，压力脉动；流固耦合的动力学分析；减振维稳的措施。
4. 水力机械的节能技术，优化运行等。





Thank You !

