

# 基于有限元法的直驱混凝土蜗壳海水循环泵临界转速分析

郑海霞

(上海阿波罗机械股份有限公司 上海 201499)

**摘要:** 混凝土蜗壳海水循环泵是核电站重要的非核级设备,其安全可靠运行对核电站至关重要。通过 ANSYS 方法进行直驱混凝土蜗壳海水循环泵的临界转速分析和现场带载试验,验证直驱混凝土蜗壳海水循环泵在正常运行过程中,转子不会发生共振,轴系安全可靠,能够确保直驱混凝土蜗壳海水循环泵安全可靠稳定运行。

**关键词:** 蜗壳海水循环泵; 转子; 临界转速

## 0 引言

直驱混凝土蜗壳海水循环泵(以下简称“循环水泵”)是电机和水泵主要部件通过刚性联轴器连接的一种循环水泵。此海水循环泵不设齿轮箱减速,电机设计为 24 级,满足设计所需低转速要求。循环水泵是核电站重要的非核级设备,为常规岛关键设备。

主泵为整个核电站的“心脏”,海水循环泵是三回路系统(循环水系统 CRF)的“心脏”<sup>[1]</sup>,因此循环水泵的安全、可靠、稳定运行对核电站至关重要。

自循环水泵国产化以来,对其研究的主要方向为设计理论、设计方法、结构研究、数值模拟、空化性能、模型试验等<sup>[2]</sup>。本文通过 ANSYS 方法进行直驱循环水泵的临界转速分析,以验证循环水泵在正常运行过程中,泵转子不会发生共振,轴系安全可靠,能够确保循环水泵安全可靠运行。

## 1 设计参数

直驱循环水泵机组主要技术指标:额定流量为 15.63m<sup>3</sup>/s,额定扬程为 18.27m,功率为 4100kW,运行环境温度最大可至 50℃,额定输入电压为 10kV,输入频率为 50Hz。

## 2 直驱混凝土蜗壳海水循环泵结构

循环水泵由电机直接驱动,采用立式、单级、底部入口的混凝土蜗壳式混流泵,其主要功能是向汽轮机厂房凝汽器及汽轮机的开式冷却水系统提供所需冷却水,海水在循环水泵的带动下转化成动能,带走系统热量,排入海水中。

循环水泵吸入口、吐出口布置在不同标高的平面上,海水从水泵底部吸入,侧面排出,即下进水侧出水的结构形式。循环水泵由混凝土蜗壳泵(包括进水流道、蜗壳流道、转子部件等)、电机、高压油泵润滑系统、辅助设备管道及阀门仪表等组成,其示意图见图 1。

循环水泵设计时采用“可抽芯结构”的设计理念,即电机从泵组基础拆离后,转子部件可整体从泵组内抽出,进行大修。同时可允许仅对水泵的轴承、填料密封、气囊密封等部件分别进行检查和更换。

循环水泵是国内首台套采用混凝土蜗壳式结构、由电机直接驱动的循环水泵。其优点是:

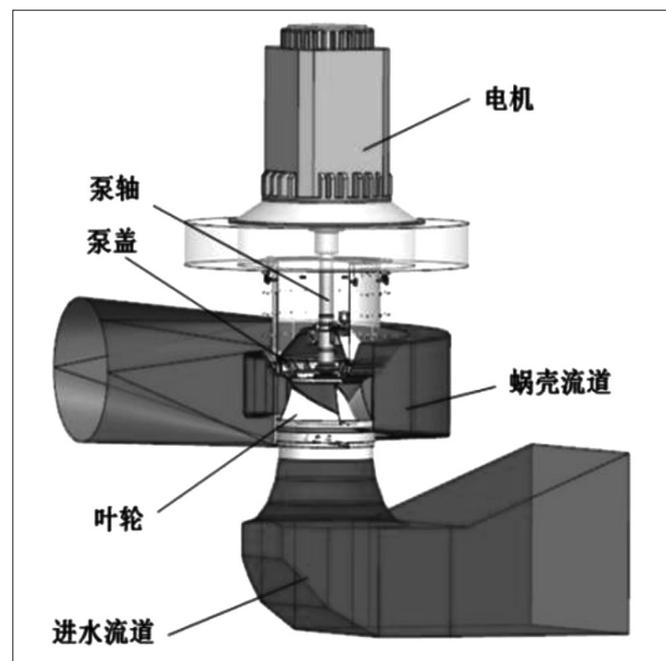


图 1 循环水泵示意图

(1) 取消了传统的降速齿轮箱、润滑油系统、系统仪表等, 简化了系统流程, 使得系统故障点减低, 增加了系统可靠性;

(2) 齿轮箱和润滑油系统的取消, 减少了现场运行人员对主冷却水泵的监测点, 为后续主冷却水泵无人值守、在线运维打下基础;

(3) 便于运行维护, 减少了运行维护成本, 缩短了大修周期。

### 3 计算目的

转动件转子在运转中都会发生振动, 转子的振幅随转速的增大而增大, 到某一转速时, 振幅达到最大(即共振), 超过这一转速后, 振幅随着转速的增大而减小, 且稳定于某一范围内, 这一转子振幅最大时的转速被称为转子的临界转速。

转子在临界转速时, 会出现激烈的振动, 而且轴的弯曲度明显增大, 长时间运行还会造成轴的严重弯曲变形, 甚至折断, 所以有必要在设计阶段使转子的临界转速避开循环水泵工作转速区间, 以免发生共振。

临界转速计算的目的是证明循环水泵在运行期间, 转子的的工作转速是否远离共振区, 即是否满足:

$$n_{cr1} > 1.5n$$

式中:  $n$  — 转子的正常工作转速 (248r/min);

$n_{cr1}$  — 转子的一阶临界转速。

## 4 物理模型建模和有限元模型

### 4.1 物理模型建模

循环水泵的转子部件包括轴、叶轮、联轴器和径向轴承等。通过 UG10.0 进行转子部件物理模型建模, 物理模型与实物比例为 1:1, 轴承做简化处理, 只建立受约束的导瓦, 物理模型见图 2。

### 4.2 有限元模型

将物理模型导入到 ANSYS 软件, 使用 ANSYS 的网格划分工具对物理模型进行网格划分, 生成实体单元, 得到可供分析的有限元模型。

进行临界转速计算时, 网格的精度对计算结果影响较大, 网格太稀疏会导致计算结果误差过大, 网格太密, 所需计算周期较长。综合考虑计算精度和

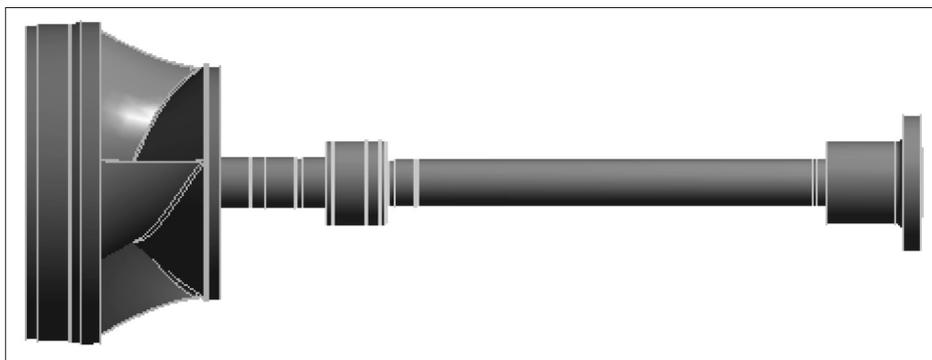


图2 混凝土蜗壳海水循环泵主要部件物理模型示意图

计算时间, 网格质量控制控制在 0.85 以内<sup>[3]</sup>, 计算时进行网格无关性验证。

依据经验划分网格, 进行计算, 得到计算结果后, 对网格数目进行加密, 通过 4 种不同网格数, 进行网格无关性验证, 网格数及计算结果见表 1。

表1 网格敏感度分析

网格划分方案	网格数	1 阶临界转速 / (r/min)
方案一	446038	482.076
方案二	523541	483.257
方案三	603841	484.182
方案四	686525	485.034

从表 1 可知, 当网格数大于 44.6 万时, 计算结果趋于稳定, 考虑计算精度和计算时间, 选择了方案一进行临界转速分析计算。方案一网格划分见图 3。

## 5 临界转速计算

### 5.1 约束方式

循环水泵转子部件的约束方式见图 4, A 处为径向轴承, 承受径向力的作用, 约束其径向位移; B 处为刚性联轴器, 约束其径向位移、轴向位移和轴向转动。

### 5.2 计算结果

按图 4 对模型进行约束, 且把叶轮内含的介质以附加质量的形式加在叶轮上。各阶模态振型见图 5 ~ 图 10。

计算获得各阶临界转速, 计算结果见表 2。

通过对循环水泵转子临界转速的分析, 得出其临界转速为  $n_{cr1}=482.076\text{r/min}$ , 而泵正常工作时的转速  $n=248\text{r/min}$ 。

满足临界转速校核关系式:  $n_{cr1} > 1.5n=372\text{r/min}$ , 即一阶临界转速大于 1.5 倍的工作转速, 循环水泵

正常运行时远离共振区，可有效避免共振现象。

## 6 试验验证

为验证循环水泵正常运行时远离共振区，确保其运行时，系统振动满足技术要求，即负载时，水泵轴承及电机推力和径向组合轴承处的振动值（峰-峰值）小于  $65\mu\text{m}$ ，泵组除进行临界转速分析外，亦采取如下措施：

(1) 主要部件含转子部件在交付现场前，在预装坑内进行预装后，确保整个转子部件符合技术要求。

(2) 电机联轴器和泵轴联轴器在同一机床进行加工，确保联轴器精度的一致性。

(3) 电机联轴器和泵轴联轴器为刚性连接，通过超级螺栓连接，连接方式如图 11 所示。

(4) 为避免安装电机联轴器 - 泵轴联轴器时水平度和垂直度超差，可先将泵轴联轴器安装在泵轴端，并测量泵轴联轴器端水平度和垂直度，水平度应  $\leq 0.05\text{mm/m}$ ，垂直度应  $\leq 0.05\text{mm/m}$ 。

(5) 电机在出厂前进行电机轴输出端跳动检查，控制在  $0.10\text{mm}$  以内。电机交付现场后，安装与泵轴联轴器连接的电机联轴器。通过电动盘车装置对电机进行盘车，检查电机联轴器的径向

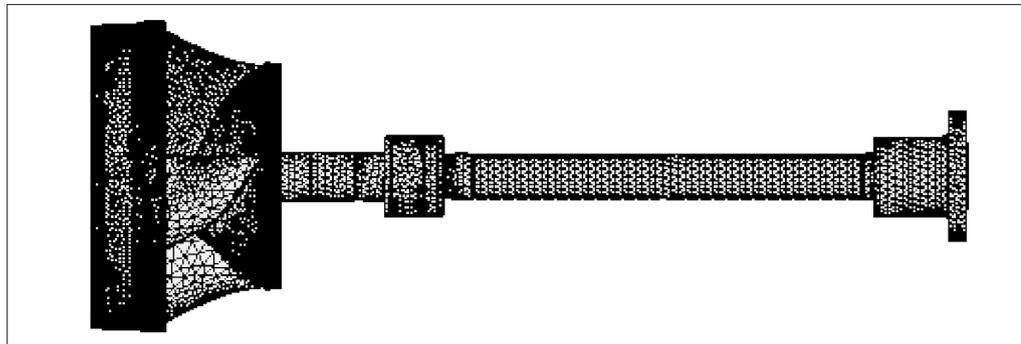


图 3 方案一网格划分示意图

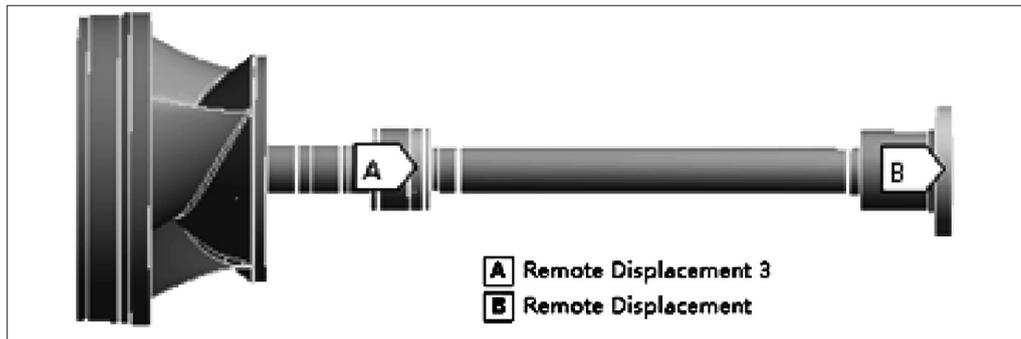


图 4 循环水泵转子部件的约束方式示意图

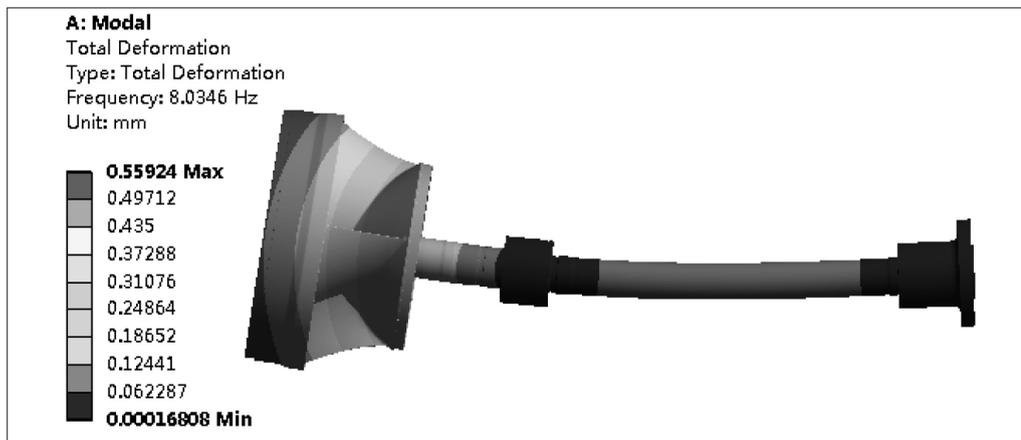


图 5 一阶模态振型图

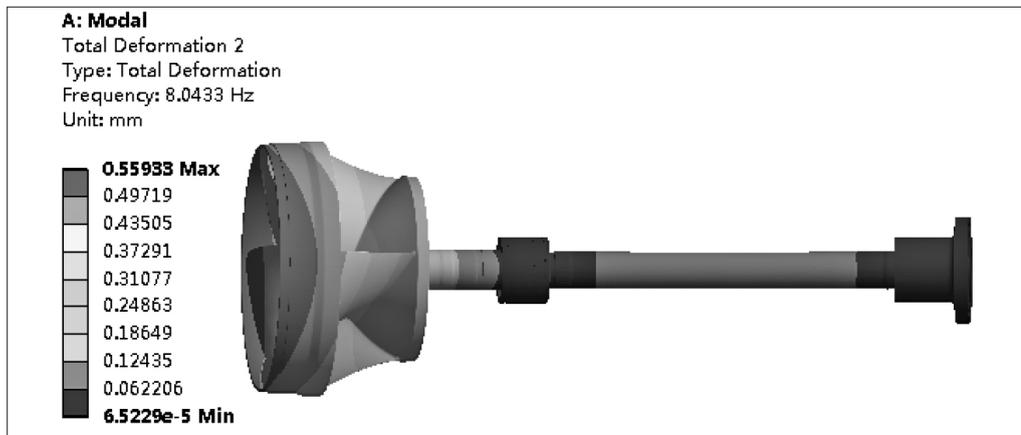


图 6 二阶模态振型图

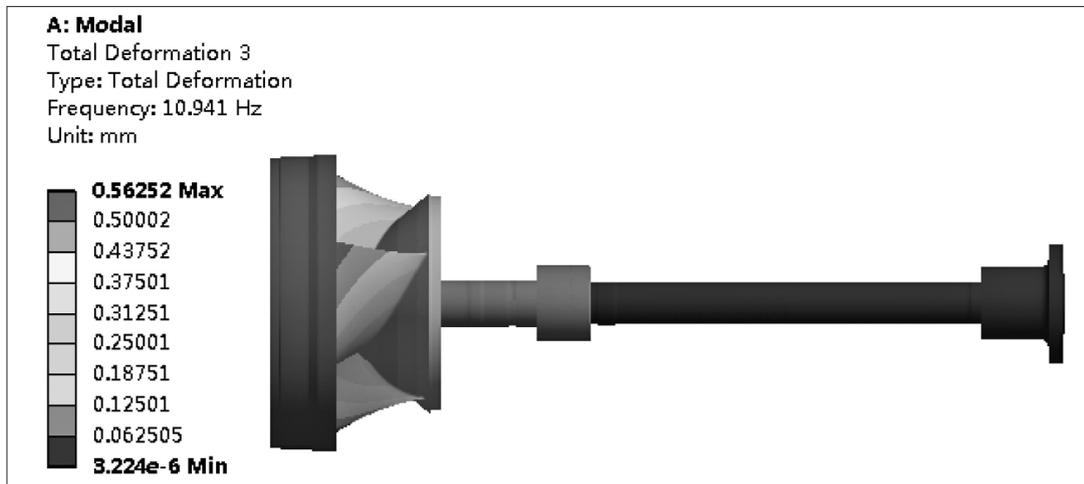


图7 三阶模态振型图

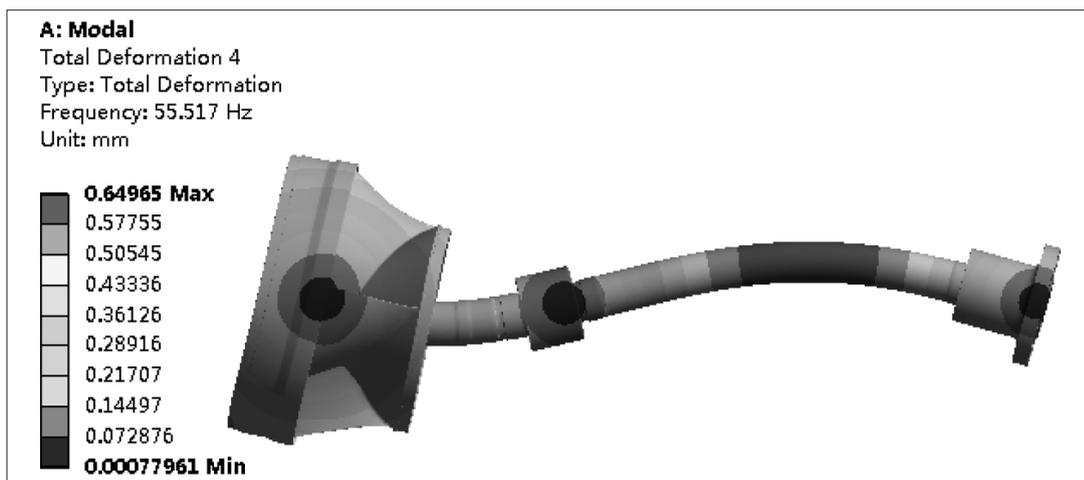


图8 四阶模态振型图

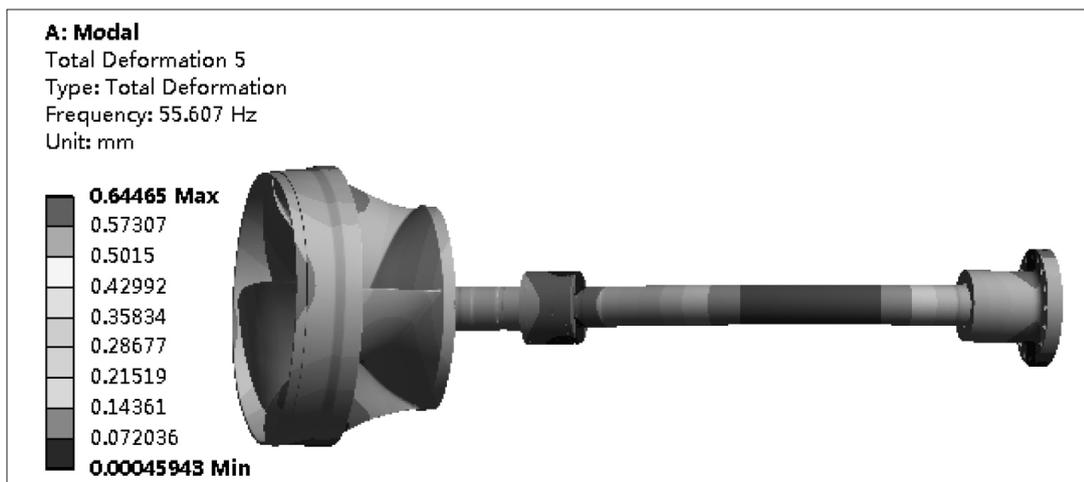


图9 五阶模态振型图

跳动及端面跳动，径向跳动要求 $\leq 0.05\text{mm}$ ，端面跳动要求 $\leq 0.05\text{mm}$ 。

循环水泵安装、调试后进行带载试验。电机启

动后，设计工况下，系统运行0.5h，视为稳定运行，此时进行水泵轴承及电机推力和径向组合轴承振动测量，测量结果：

(1) 水泵轴承最大振动为0.005mm；

(2) 电机推力和径向组合轴承处最大振动为0.009mm；

(3) 水泵平稳运行，运行过程中转子未发生共振，轴系安全可靠，系统运行无异音。

## 7 结语

(1) 通过循环水泵临界转速分析， $n_{cr1} > 1.5n$ ，满足临界转速计算分析要求。

(2) 通过主要部件厂内预装、配对联轴器机加工精度保证、电机输出端跳动检查等措施，保证了轴系的可靠性，预防振动指标超标。

(3) 通过循环水泵带载试验，可知：循环水泵可以安全、可靠、稳定运行。且运行时无共振现象发生。

## 参考文献：

[1] 郑海霞，张必文，王永博. 应用ANSYS方法对海水循环泵

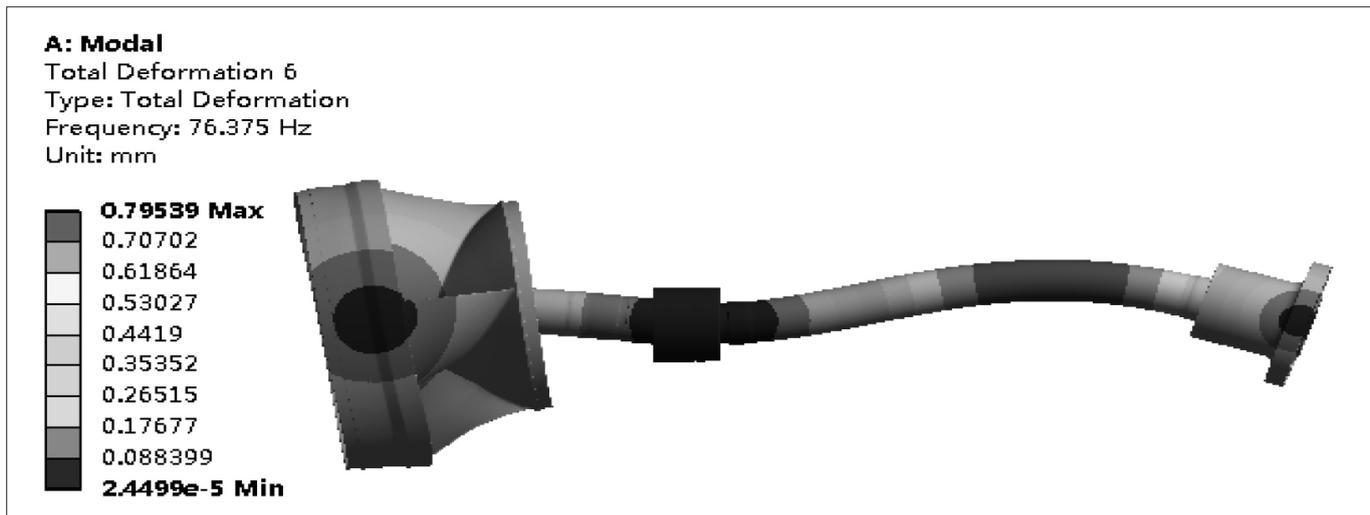


图 10 六阶模态振型图

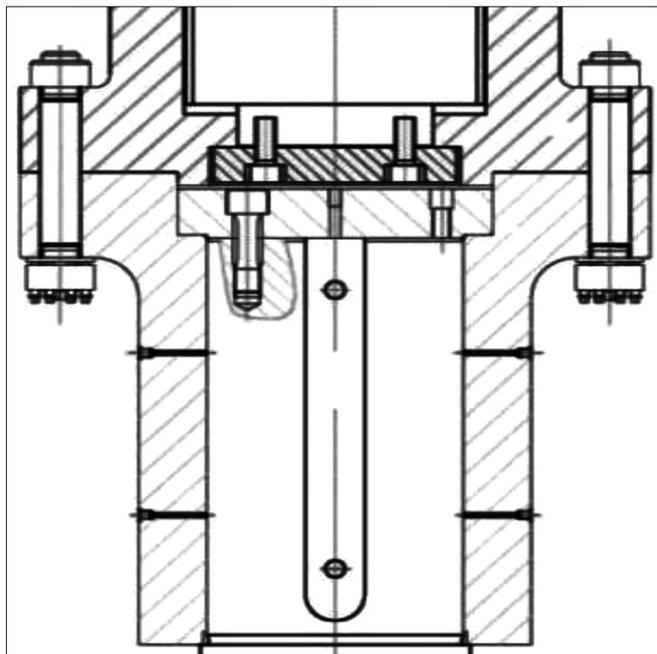


图 11 电机联轴器和泵联轴器连接图

表 2 临界转速计算结果

模态	临界转速 / (r/min)	频率 / Hz
1	482.076	8.0346
2	482.598	8.0433
3	656.46	10.941
4	3331.02	55.517
5	3336.42	55.607
6	4582.5	76.375

内部流场的研究 [J]. 工程技术, 2018(10):205-207.

[2] 郑海霞. 人机工程学在国产化循环水泵应用的探讨 [J]. 工程技术, 2019(07):226-228.

[3] 王春林, 郑海霞, 张浩, 等. 可调叶片高比转速混流泵内部流场数值模拟 [J]. 排灌机械, 2009, 27(01):30-34.

作者简介: 郑海霞 (1982.10-), 女, 汉族, 河北唐山人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 循环水泵、重要厂用水泵、贝类捕集器、高温气冷堆运输贮存容器、乏燃料贮存格架等。