

# 凝结水泵变频运行振动超标治理

孙 伟，施 缤

（江苏省投资管理有限责任公司，江苏 南京 210005）

**摘 要：**凝结水泵因在变频运行过程中存在振动问题，被迫在较高转速下运行，增加了凝结水泵耗电量。通过跟踪观察振动特点，分析振动原因是共振所致，采用动平衡方法，精确控制转子的不平衡力，降低设备在临界转速区工作时的振动，使振动值达到优秀水平，振动治理后节电效益显著。

**关键词：**凝结水泵；变频；振动；治理

## 0 引言

某发电有限责任公司共有两台 660MW 超超临界燃煤发电机组（厂内编号五号、六号）。两台机组分别于 2011 年 8 月和 2013 年 8 月投产。每台机组配置凝结水泵 2 台，其中 1 台运行，1 台备用，凝结水泵采用高压变频装置调速。凝结水泵为长沙水泵厂生产，配套湘潭电机厂电机。

凝结水泵在采用变频调速运行时，经常有振动超标现象，被迫维持在较高转速下运行，在机组部分负荷运行时，凝结水泵出力偏大，使用调节阀进行节流，这种运行方式使凝泵耗电量明显增加，极不经济。

## 1 凝结水泵技术参数

凝结水泵技术参数见表 1、2。

表 1 水泵技术数据

型号	C720III-4
扬程/m	386.5
效率/%	80
必须汽蚀余量/m	4.10
转速/(r/min)	1480
出水压力/MPa	3.984
旋转方向	电机向泵看逆时针

表 2 电机技术数据

型号	YSPKSL630-4
额定功率/kW	2300
额定电压/kV	6
同步转速/(r/min)	1480
频率/Hz	50
冷却方式	空-水冷却

对配套电机的技术要求：电动机使用变频电机，变频电动机应能适应变频调速的运行方式。专

用变频电动机的频率范围 0-50Hz，电动机空载状态下能够在各频率下平稳运行。电动机带负载状态下正常运行频率范围为 25-50Hz。

## 2 凝结水泵运行中的振动情况

表 3 不同转速转动机械的简易振动标准

额定转速/(r/min)	振动标准/ $\mu\text{m}$
3000	50
1500	85
1000	100
750	120

不同转速转动机械的简易振动标准见表 3。凝结水泵正常工作转速范围约在 750~1500r/min 之间，因此其运行振动标准应按不大于 120~85 $\mu\text{m}$  进行控制。

经跟踪观察机组建设及投产以来凝结水泵运行中的振动特点如下（以 5A 凝结水泵为例）：

1）新建机组凝结水系统调试时，测得凝结水泵组工频运行时电机顶部振动在 3 丝以内达到优良水平。

2）机组投产后，在凝结水泵定期测量振动中发现其有时振动合格、有时振动超标（凝结水泵组未配置在线振动测量仪表）。

为此在机组停运时，用手持测振仪测量凝结水泵电机顶部从转速 1480r/min 降至 750r/min 过程的振动情况，发现随着凝结水泵从额定转速 1480r/min 开始下降，当转速降至约 1380r/min 时振动开始明显上升，在转速降至 1000r/min 左右振动达到顶峰，振动数值达 300 $\mu\text{m}$ ，远超标准，之后振动随转速下降而下降，到 850r/min 左右时振动基本降至与额定转速时振动值相同，在 80 $\mu\text{m}$  以下合格。

为节能运行需要，同时又防止运行中振动过大损坏设备，综合考虑后将变频器输出下限定在 85%，对应凝结水泵转速下限 1258r/min，在该转速下限工作时振动约为 120 $\mu$ m（仍有少许超标）。因凝结水泵长时间在较高振动下运行，危害逐步显现，随着运行时间加长，凝结水泵振动数值逐渐升高，设备健康水平变差，在机组检修时曾发现电机轴承座内孔磨损严重。

### 3 振动问题对节能运行的影响

根据水泵的相似原理，当转速变化时，流量与转速成正比，扬程与转速的平方成正比，轴功率与转速的立方成正比，因此，同一台水泵转速发生变化时，水泵的主要性能参数将按上述比例定律而变化，并且，在变化过程中可保持效率基本不变。

利用水泵相似原理绘制出水泵转速与功率关系图（图 1），因 5A 凝泵存在振动超标问题，只能运行在 1258r/min 以上正常节能区域。如能将凝泵振动问题解决，凝泵根据机组负荷需要可以随意调节，则转速最低可以下潜 750r/min 运行，功耗进一步降低，如图深度节能区域即变频器可以进一步发挥节能潜力的区域。

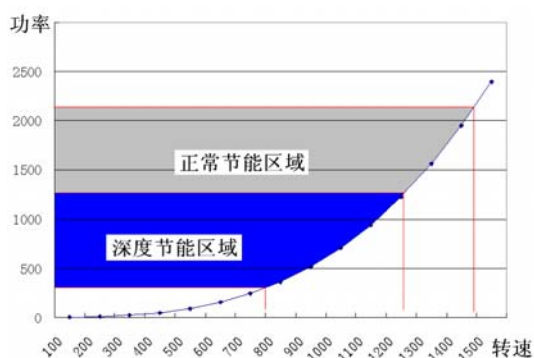


图 1 水泵转速与功率关系图

### 4 振动原因分析

凝结水泵为地坑立式外筒形多级离心式水泵，电机位于最顶端，通过螺栓与凝结水泵外筒体相连，电机轴与泵轴通过弹性柱销联轴器联接。电机采用滚动轴承来承担转子径向力和轴向力，水泵主要由滑动轴承来承担转子径向力、滚动轴承来承担转子轴向力。泵组振动大小受多种因素影响，可能引起振动的主要原因有：

1) 泵与电机中心不正；

- 2) 不同工况下的水力扰动；
- 3) 基础不均匀沉降，台板水平度不好；
- 4) 轴承间隙偏大或偏小；
- 5) 设备零部件加工偏差；
- 6) 电磁干扰；
- 7) 工作转速位于临界转速区。

从上述振动特征可以判断，凝结水泵组在正常工作转速区域存在临界转速区，凝结水泵在临界转速区运行时发生共振，导致振动超标。

### 5 技术攻关方向选定

为降低振动，常用的处理方法有：

1) 提高设备结构刚度如加强支撑、焊接加强筋等。提高刚度一方面可以改变临界转速，另一方面可以降低振动幅度。但是如何将系统临界转速提高到额定转速以上，具有很大的不确定性和难度，而由于共振时振动幅度较大，提高刚度后，虽然能降低振动超标程度，但很难做到使振动不超标，因此该方法不能使振动问题得到根本解决。

2) 减小叶轮出力如车削叶轮、去除一级叶轮，使正常工作点上移，避开临界转速区。采用这种处理方法后，由于叶轮出力减小，运行在 1220~1480r/min 转速范围时，在同等转速下，水泵耗功相比原运行方式进一步下降，具有一定的效果。但是，为了保证高负荷和夏季工况时凝结水泵的出力，叶轮出力降低幅度有限，该处理方法仍不能使变频器的节能效果得到充分发挥。

经过一段时期对凝结水泵振动的观察分析，及对其他电厂采用加强支撑和改变叶轮出力处理效果的调研，为彻底解决凝结水泵振动问题，使凝结水泵在全工作转速区域能自由升降调节，尽最大可能发挥变频器的节能效果，决定与科研单位合作，采用动平衡方法，精确控制转子的不平衡力，降低设备在临界转速区工作时的振动，使振动值在合格范围内。

对于由质量、弹簧和阻尼所组成的单自由度振动系统而言，系统响应可以表示为：

$$A = \frac{mr}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega^2} - \frac{1}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega\omega_n}\right)^2}} = \alpha \cdot mr$$

式中，A 为响应幅值，mr 为偏心质量和偏心距的乘积，k 为支撑刚度， $\omega$ 、 $\omega_n$  为工作频率和固有频

率,  $\xi$  为阻尼系数。 $\alpha$  为灵敏度系数, 阻尼、刚度和固有频率一定时,  $\alpha$  是旋转频率的函数。

从式  $k$  可以看出, 在整个变频转速范围内, 运行转速确定后, 振动响应  $A$  是不平衡量  $mr$  的线性函数。 $\omega \approx \omega_n$  时, 系统处于共振区,  $\alpha$  很大, 系统振动响应对不平衡力敏感, 导致振动很大。

当整个系统设计、加工、安装好后, 系统固有频率  $\omega_n$  也就确定了, 此时可以通过动平衡方法, 降低转子上的不平衡力, 进而降低整个变频工作范围内的振动。

## 6 5A 凝结水泵振动处理及分析

两台机组共有两台变频凝结水泵, 编号分别为 5A、6A, 先对 5A 凝结水泵进行了处理。

在凝泵电机上端垂直和平行管道方向安装了振动速度传感器, 如图 2, 平行于进水管方向为 X 向振动、垂直于进水管方向为 Y 向振动, 与轴上的键相光标配合, 用于测量机组转速和振动相位。上述振动信号及键相信号接入振动数据采集分析系统进行振动数据的记录、存储、分析和处理。

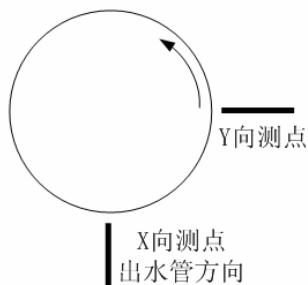


图 2 垂直和平行管道方向安装振动速度传感器

### 6.1 原始振动情况

凝泵启动, 测试了原始状态下凝泵振动随转速变化情况。测试时, 电机和泵通过对轮连接在一起。

1) 1480r/min 定速附近运行时, 电机顶端 X 向和 Y 向振动较大, 分别达到 116 $\mu$ m 和 108 $\mu$ m, 振动超标。

2) 变频运行时, 振动进一步增大。X 向振动在 983r/min 达到最大, 幅值为 596 $\mu$ m。Y 向振动在 1049r/min 达到最大, 幅值为 640 $\mu$ m;

3) 定速和变频运行时, 振动信号中的主频率为工频, 其余频率分量较少。

注: 983r/min 和 1049r/min 转速下振动过大, 超出传感器和仪表测量范围, 波形上出现了削波,

因此 X 向和 Y 向实际振动还要大于 596 $\mu$ m 和 640 $\mu$ m;

从原始振动测试情况下, 5A 凝结水泵振动较以前又有明显升高, 在额定转速下都不能保证振动在合格范围内, 设备健康状况很差, 给机组安全运行带来隐患。

### 6.2 电机上部转子动平衡处理

电机上部转子动平衡共进行了 5 次, 泵电联接振动测试 3 次, 电机空机振动测试 3 次。试验期间因电机轴承有异音和温度异常升高, 更换了电机上轴承及端盖 (相当于电机上轴承座), 更换后重做动平衡, 因此动平衡次数较多。

处理后振动情况: 定速下 Y 向和 X 向最大振动分别为 78 $\mu$ m 和 71 $\mu$ m; 变频运行区间内, Y 向和 X 向最大振动 340 $\mu$ m 和 220 $\mu$ m。

相比较处理前振动情况, 在定速下已由振动超标降至振动合格, 变频运行时最大振幅减半, 明显好转, 但仍超标较多。

### 6.3 泵电对轮动平衡处理

由于变频运行时最大振动仍超标较多, 对此进行了分析, 认为可能原因有:

1) 水泵基础不均匀沉降, 造成水泵支座不水平, 水泵转子运行时产生涡动。

2) 水泵长时间振动超标运行, 水泵导轴承间隙增大, 导致水泵临界转速降低。

根据分析决定在泵电对轮上加平衡块进行减振处理, 经过 2 次动平衡加重和 2 次泵电联接振动测试, 振动处理符合要求, 结果如下:

1) 1480r/min 定速工作时, X 向和 Y 向总体振动小于 30 $\mu$ m, 750~1480r/min 整个变频区间内最大振动小于 60 $\mu$ m, 振动达到优秀水平。

2) 在 571r/min 和 672r/min 附近有一个振动峰值点, 垂直和水平方向上最大振动分别达到 150 $\mu$ m 和 130 $\mu$ m。这两个区域远离正常工作区域, 未作处理。凝泵启动时, 在 500~750r/min 区域内不要停留即可。

## 7 6A 凝结水泵振动处理及分析

### 7.1 原始振动情况

凝泵启动, 测试了原始状态下凝泵振动随转速变化情况。测试时, 电机和泵通过对轮连接在一起。

(1) 1480r/min 定速附近运行时, 电机顶端 X

向和 Y 向振动分别为 66 $\mu\text{m}$  和 59 $\mu\text{m}$ ，振动合格。

(2) 变频运行时，振动进一步增大。X 向振动在 1039r/min 达到最大，幅值为 400 $\mu\text{m}$ 。Y 向振动在 1117r/min 达到最大，幅值为 240 $\mu\text{m}$ ；

## 7.2 动平衡处理

由于六号机组投产较迟，6A 凝结水泵运行时间较短，且运行时变频器输出下限定在 85%，较 5A 凝结水泵提高 5%，对凝结水泵起到了较好的保护作用，因此经测试发现，6A 凝结水泵处理前的原始振动较 5A 明显要好很多。

在泵电联接的情况下，直接在泵电对轮上第 1 次试加重，测试振动有明显减小趋势，经计算，进行了第 2 次加重精调，处理后测试振动符合要求，结果如下：

1) 1480r/min 附近定速工作时，X 向和 Y 向总体振动小于 20 $\mu\text{m}$ ，750rpm~1480rpm 整个变频区间内最大振动小于 55 $\mu\text{m}$ ，振动达到优秀水平。

2) 在 360r/min 附近有一个振动峰值点，虽然该转速附近振动峰值特征明显，但是因其振动幅度小于 40 $\mu\text{m}$ ，而且转速较低，对机组安全运行的影响较小，可以不考虑其影响。

## 8 振动处理前后效果对比

表 4 处理前后振动情况汇总表

凝结水泵	处理前最大振动/ $\mu\text{m}$	处理后最大振动/ $\mu\text{m}$
5A 工频运行	116 (超标)	30 (合格)
5A 变频运行	640 (超标)	60 (合格)
6A 工频运行	66 (合格)	20 (合格)
6A 变频运行	400 (超标)	55 (合格)

处理前后振动情况汇总见表 4。简化条件测算处理后节电效益如下：

1) 处理前凝结水泵全年平均工作转速：按 85% 额定转速计算（即为防止振动超标，运行时设定的变频调节转速下限值）；

2) 处理后凝结水泵全年平均工作转速：根据机组当前年负荷率估计，由于凝结水泵运行转速不再受振动限制，全年平均转速应在 71% 额定转速左右；

3) 年运行时间按 300 天计。

根据以上计算条件，用水泵相似原理计算两台机组每年共节电  $2300 \times 0.885 \times 24 \times 300 \times (0.85^3 - 0.71^3) \times 2 \approx 750$  万千瓦时。

## 9 结束语

凝结水泵变频工作转速区域与设备自身的临界转速区域重叠，使得凝结水泵变频器的节能作用不能得到充分发挥。通过振动治理，采用合理的转子动平衡方法，可以将凝结水泵发生共振时的振动控制在合格范围内，从而使得凝结水泵能够在临界转速区域内根据机组负荷需要降至尽可能低的转速运行，实施凝结水泵的深度节能运行，设备健康水平也得到明显提升。

### 作者简介：

孙 伟（1979-），男，江苏盐城人，工程师，从事火力发电厂技术管理工作；

施 缤（1973-），男，江苏盐城人，高级工程师，从事火力发电厂汽机专业技术管理工作。