

900 MW核电机组主泵振动问题的根本原因分析

Root Cause Analysis on 900 MW Nuclear Power Unit Primary Coolant Pump Vibration Problem

孙健

(岭东核电有限公司, 广东深圳, 518124)

摘要: 怎样解释大亚湾与岭澳核电站配备的100型主泵在运行中表现出的特殊振动现象, 长期以来一直困扰着管理与专业人员。本文在分析了几种理论解释后, 通过对立式转子进行动力学分析, 全面解释了主泵振动问题的产生、发展过程, 并相应提出了预防思路。

关键词: 主泵 动平衡 动力学

Abstract: How to explain the vibration phenomenon of primary coolant pump in 900 MW nuclear power plant has long been puzzling the management and technical experts. This paper analyzes the specific vibration phenomenon of the pumps, and looks into several theoretical explanations towards the problem, and studies the dynamic behavior of pump's vertical shaft, then it comprehensively explains the causes and evolution process of vibration problem, and provide the idea of prevention accordingly.

Key words: Primary pump Dynamic balance Dynamics

1 反应堆主泵的类型与结构

反应堆主泵是压水堆核电站一回路主要的旋转设备, 承担着补偿一回路冷却剂压力降、推动冷却剂循环等重要功能。大亚湾核电运营公司负责营运的大亚湾与岭澳核电站共装备12台由法国JEUMONT-INDUSTRIES制造的100型主泵(每单元机组配备3台)。每台主泵均为空气冷却、三相感应式电动机驱动的单级轴密封机组。整机是一台立式组件, 如图1所示, 从顶部到底部由电动机、密封组件和泵的水力部件组成, 串联布置的三级轴封控制由泵轴的泄漏。由化容控制系统供应的密封水注入到泵轴承和密封件之间, 以防止反应堆冷却剂向上流动, 同时冷却轴封和泵轴承。电动泵组装有三个径向轴承和一个止推轴承, 其中两个径向轴承和一个止推轴承用来支撑电动机转子, 另一个径向轴承形成泵轴承, 它是水润滑轴承, 由斯太立合金堆焊的不锈钢轴颈和石墨环构成的套筒组成。

综 述
核 电 设 计
工 程 管 理
工 程 建 造
运 行 维 护
核 安 全
核 电 前 期
核 电 论 坛
核 电 经 济
核 电 国 产 化
核 电 质 量 保 证
核 电 信 息

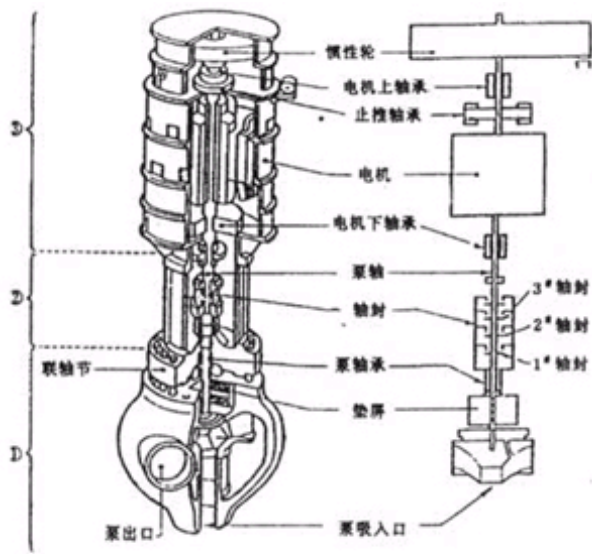


图1 100型主泵的结构型式

2 反应堆主泵特殊的振动问题

两电站投入商运以来，100型主泵陆续出现的特殊振动问题长期困扰着专业技术人员，这些特殊的振动问题主要表现出如下特征。

2.1 主泵的振动水平明显地受到轴封水流量的影响

2003年4月8日，岭澳1号机由于投运RCV上充泵下泄孔板，致使3号主泵轴封流量由2.0 m³/h降低到1.7 m³/h（系统设计要求轴封流量控制在1.8 m³/h），该泵轴振动也由200 μm下降到150 μm，其后调高轴封流量到2.0 m³/h，振动水平又回升到190 μm。值得注意的是，不同主泵的振动状态对轴封水流量改变的响应是完全不同的，如2000年2月22日对D1RCP001/002/003P0进行轴封水调整的试验（数据见下表）：

轴封流量	D1RCP001P0	D1RCP002P0	D1RCP003P0
2.2 m ³ /h	160 μm	90 μm	200 μm
2.5 m ³ /h	155 μm	140 μm	180 μm
3.0 m ³ /h	155 μm	190 μm	160 μm

从上表可以看出：在轴封水流量由2.2 m³/h增大到3.0 m³/h后，1号泵振动水平基本不变，2号泵轴振动显著增大，而3号泵则明显减小。

2.2 主泵的振动高点是不断变化的

如：1999年3月8日，在105大修后一回路升温、升压过程，记录到D1RCP002P0振动矢量的变化情况，在冷态启动时工频分量为160 μm/8°，升温、升压到热停堆时这个振动矢量变化到154 μm/104°，也就是说振动方向变化了96°。

2.3 需要反复进行现场动平衡降低振动水平

每当主泵轴振动急剧增大时，变化的主要频率成分都是工频（占通频振动的80%-90%），一般的处理方式是在热停堆工况进行现场动平衡降低振动水平。但奇怪的是，经过平衡的主泵再经过一次简单的起停过程，又会表现出明显的不平衡特征（即工频振动再度升高），而不得不再次进行平衡。如：2000年3月5日，D1RCP003P0在106大修启动后轴振动水平在热停堆工况达到230 μm，现场进行动平衡试验将轴振动降低到140 μm，随后进行惰走试验，该泵经过一次简单起停过程，再次启动时原来经过平衡的良好振动状态又出现反复，被迫进行第二次平衡。

2.4 主泵启动次序的变化也会造成主泵振动状态的剧烈变化

如：2003年4月17日109大修后期，机组回到热停堆状态，D1RCP002P0轴振动良好，进行惰走试验同时停运三台主泵，随后按照1、3、2的顺序依次启动主泵，002P0原本振动在90 μm，再启动后急剧上升到200 μm，随后进行第二次惰走试验，三台主泵同时停运后按照1、2、3的顺序再次启动，002P0轴振动水平又恢复到100 μm的良好水平。而期间除了改变启动次序以外没有任何其他操作。

3.1 质量不平衡

质量不平衡是旋转机械产生振动问题的主要原因之一。根据一般的振动分析理论，转子存在质量不平衡时主要的频谱特征是工频分量占到振动总水平的80%以上。这一点应该与我们采集的频谱表现一致。加之每次解决主泵振动问题都是通过现场动平衡的方式，因此有人便认为主泵转子上一定存在质量平衡问题需要不断矫正。

事实上转子质量不平衡还有一个基本特征，那就是相位基本稳定，这一点明显与主泵振动矢量存在变化的事实不符，同时对转子质量不平衡进行处理后，在较短的时间里一般不会出现需要频繁矫正的情况。很明显，反应堆主泵的振动问题不是完全由于质量不平衡造成的。

3.2 固体硼结晶在轴承内表面造成的缺陷

针对主泵存在的振动问题，我们向法国电力公司（EDF）发文，希望对方可以利用其雄厚的技术实力与丰富的运行经验给我们帮助。EDF在回文中承认他们的电站也存在同样问题，同样也是通过动平衡来解决，但遗憾的是对于根本原因对方也莫衷一是，只是笼统地提到固体硼结晶在轴承内表面造成的缺陷可能是造成振动的原因，等等。

对于这个解释我们并不认同。首先，轴承存在缺陷的设备振动问题不可能通过平衡解决；其次，轴承存在缺陷导致设备振动较高也不可能通过调整轴封水流量来得到缓解。可以说，EDF提供的这个解释完全不能说明我们面对的振动现象，因而是不能令人信服的。

3.3 主泵轴系的热变量

一段时间以来，主泵轴系的热变量被认为是造成主泵振动问题的主要原因。这个解释认为主泵大轴各向、各个部件的温度差异导致主泵转子存在一个热变量，正是由于这个热变量的存在和不断变化才造成主泵轴振动表现出特殊性。而每次进行现场动平衡试验就是对这个热变量进行平衡。

应该说，热变量的理论基本可以解释前面列举的问题，如：转子存在随工况而变化的热变量会造成转子振动矢量的变化，热变量在一定程度上也确实可以通过现场动平衡来矫正，等等。但热变量的解释却不能完全说明轴封水流量的改变到底是如何明显影响到转子轴振动的。同时两次简单的起停过程就会引起轴振动剧烈变化用该理论也无法完美地作出解释。据此，可以说热变量应该是导致主泵振动的因素之一，但却不是根本原因。

4 转子在滑动轴承中的动力学特性是主泵振动问题的根本原因

卧式动压滑动轴承的动力学理论认为，当卧式转子稳定工作时，转子旋转形成的动压液膜对转子有一个承载力，这个力与转子自重会在某一位置取得平衡，使得转子轴心与轴承的中心形成一个稳定的角度。在转子质量偏心形成的离心力扰动下，转子中心会在这个固定位置做小范围的弓型涡动，其频率与转子工频同步。

与卧式转子在滑动轴承中的动力学特点不同，立式转子在滑动轴承中缺少转子重力这个负载（如图2）。由图可见，轴承中心为 O ，轴颈中心 O' 因不平衡而偏离 O 时，轴颈和轴承间隙沿周向是不均匀的。润滑油被轴颈带动，顺着转动方向从较宽的间隙流进较窄的间隙而形成液楔对轴颈有挤压力作用。设轴承的全部液膜对转子轴颈的总压力 F 位于挤压的一侧并朝向轴颈中心 O' ，将力 F 分解为 O' 的径向力 F_e 和周向力 F_t 。分力 F_e 起支持轴颈的作用，相当于转轴的弹性力，分力 F_t 垂直于 O' 的半径并顺着转动方向，使 O' 的速度增大，就是使转子涡动的力。从直观上来看就好象液膜“推”轴在轴承内作环绕运动。对转子稳定性较好的设计，这个涡动会约束在较小的范围，但对于缺少重力负载的立式轴系而言，稳定性差，这个涡动一旦出现会比较容易呈现发散运动。

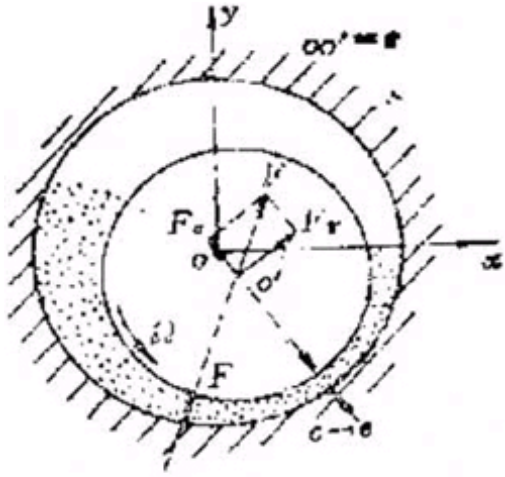


图2 立式转子在滑动轴承中的受力分析

这个由于立式转子稳定性差造成的较大范围的涡动在现场采集的轴振动的轴心轨迹图和时域波形上可以清晰地找到。

正常稳定的转子由于必然存在的离心力的作用，轴心轨迹会表现出近似一个椭圆，且约束在较小的范围，如岭澳2号机3号主泵在第一燃料循环周期内轴振动水平在50 μm 左右（如图3）。岭澳1号机3号主泵在第一燃料循环的大部分时间轴振动都维持在200 μm 的较高水平，其轴心轨迹明显发散且表现出明显的“8”字型特征（如图4），说明振动信号除主频率以外还有一个较大的扰动存在。再观察时域波形的图形（如图5），主泵电机工作频率（25 Hz）非常清晰，但每一个由于离心力而产生的正弦波上都负载了一个与工作频率同频率的分量，将这两个峰值的幅值相加基本上与频谱上的工频分量相吻合。由此可以看出，主泵频谱上的工频分量实际上是由几个同频率的分量构成（主要包括质量偏心、转子涡动等），要大幅度地降低工频振动仅仅平衡质量偏心是不够的，帮助转子稳定下来，消除这个同频扰动后轴振动才会下降到理想的水平。

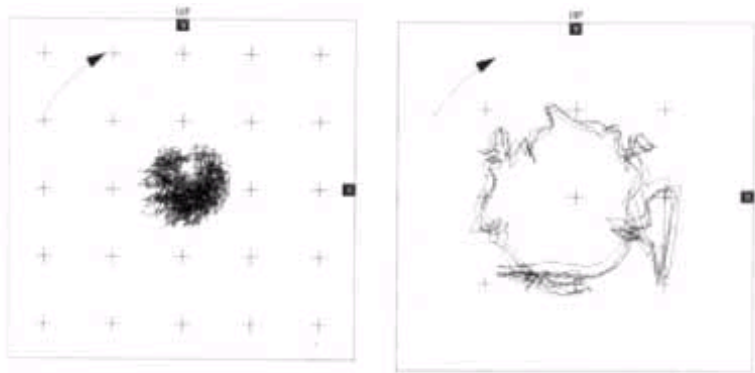


图3 岭澳2号机3号主泵轴心轨迹图 图4 岭澳1号机3号主泵轴心轨迹图

可以进一步认为，这个由于立式转子不稳定而产生的涡动最初会由于滑动轴承液膜的刚度而限制在小范围，但运行时间加长，无疑会增大离心力，而离心力又增大涡动力，需要不断增加刚度来约束大范围的涡动，轴承液膜会越来越薄，最终振动幅值超过轴承间隙，使得动静摩擦，破坏设备。事实上大亚湾1号机3号主泵在第九个燃料循环中轴振动水平最大到220 μm ，在轴心轨迹图上出现了碰磨的迹象，大修检查该泵的水导轴承发现已经出现磨损的坑槽。

5 运用新的理论来解释主泵的振动现象

了解了立式转子的动力学特征就可以比较全面地解释主泵出现的这些“奇特”的振动现象了。

5.1 变化的轴封水流量改变了支撑刚度进而影响到转子振动

研究主泵的具体结构不难发现，保持一回路密封的1、2、3道液体密封与主泵的水导轴承统一构成了主泵转子系统的径向支撑体系。油膜（液膜）的厚度是影响滑动轴承刚度的因素之一，油膜越厚刚度越弱，反之则越强。当轴封水流量变化时实际上就是改变了立式转子的支撑刚度，轴振动状态的变化也就不难理解了。另一方面，正常工作期间，立式转子处于脆弱的平衡状态，在刚度改变这一显著的扰动下，原先的稳定状态被破坏，一旦“不幸”不能重新找到新的平衡位置，涡动放大，振动状态也就不能回复到原先的水平了。

5.2 工作环境的改变影响了转子在轴承中的工作位置

事实上，在大修后一回路升温、升压过程中，主泵转子轴系就在不断适应转子的工作环境，“寻找”自己最佳的工作位置，到热停堆状态一回路温度、压力稳定后，转子轴颈在滑动轴承中最终的工作位置才会确定下来。这个过程反映在振动相位上就表现为振动高点的不断变化上。

5.3 现场动平衡是对转子体系综合因素的平衡

通过对主泵轴心轨迹和时域波形的分析，我们可以发现，当主泵振动大时虽然都表现为工频振动占绝大部分，但实际上这个频率的振动幅值是由两个部分构成的：其一，转子系统真实存在的质量不平衡，这个分量绝对存在，只是大小的差别；其二，与转速频率同频的涡动频率，这个涡动是由于立式转子稳定性差而造成的，并随着离心力而不断加大。现场动平衡实际上是对转子热变量、水力不平衡、质量不平衡以及转子系统特定的工作条件（包括刚度、阻尼）等综合条件而进行的附加配重。这个配重一定要使得转子在滑动轴承中达到相对稳定的状态才算成功，否则这次平衡之后还会需要再次进行。同时运行当中主泵轴系工作状态（刚度、阻尼）的明显改变也会使得平衡的努力归于失败。

6 提高立式转子稳定性的方法

6.1 实际中可以操作的手段

立式转子稳定性问题是在机械设计时就确定了，但这并不意味着运营单位一定无所作为。支撑系统的刚度、滑动轴承的间隙、质量平衡的精度等诸多因素都可以影响到转子的稳定性。在实践中如果主泵振动较大，在检修过程中可以重点检查：

（1）轴承、密封等支撑系统螺栓的紧力。在转子扰动力一定的情况下，刚度越大振动的响应就越小。支撑系统处于设计的理想状态有利于提高转子的稳定性。

（2）转子与滑动轴承的间隙。间隙过大的滑动轴承可以让小的不平衡、不对中引起大的振动。

（3）尽量提高转子的平衡精度。根据振动理论，不平衡扰动力在任何转子上都会存在。提高平衡精度有利于减小对稳定性脆弱的转子的扰动。当然对涡动占据主要成分的情况，进一步提高平衡精度非常困难，此时还是应该在帮助转子稳定方面多下功夫。

6.2 最终解决主泵振动问题的理论探讨

为了解决立式转子稳定性差的问题，国外有的技术文献提出建议，要求在安装立式转子的靠背轮时预置一个偏心，用转子偏心的挠性力来提高转子的稳定性，当然这个偏心量应该是经过严格计算的数值，它既能够提高转子的稳定性又保证轴系不会由于太大的偏心而造成设备损坏。可以要求主泵的厂家进行这项工作。

参考文献

- [1]陆颂元. 汽轮发电机组振动. 北京：中国电力出版社，2000.
- [2]袁宏义，牛明忠. 设备振动诊断技术基础. 北京：国防工业出版社，1991.
- [3]佟德纯，李华彪. 振动监测与诊断. 上海：上海科技文献出版社，1997.
- [4]陈济东主编. 大亚湾核电站系统及运行. 北京：原子能出版社，1994.