

多维空化诊断监测和其他简单技术比较

Branko Bajic 布兰克·贝基 Korto 空化诊断监测服务公司 www.korto.com china@korto.com

空蚀的影响最好在大修时直接进行评估。但是，为了找到造成空蚀的运行工况点，同时明确水轮机各个部件在空化中的不同作用，我们必须采取空化振动噪声检测或者监测手段。基于美国大古力水坝大型混流式水轮机组的案例，本文将介绍用于气蚀诊断和监测的多维空化振动噪声分析技术，并和其他简单技术进行对比。

1. 简介

因为水轮机几何形状细节会对其空化情况有巨大影响，即使型号完全一样，甚至在相同的工况下运行，不同的水轮机还是会在空化特性上表现出显著的差别。模型试验并不能预测这种差别，所以必需进行真机气蚀试验。大修时可以直接检查累积空蚀量，从而评估空化造成的最终影响。与此同时，原型机的在线测试也很必要，它可以发现恶化效应的来源，也可解答一些我们关心的问题，诸如哪个工况点造成的空化最严重，水轮机的哪个部件造成了空化。这需要长期在线监测，它对于跟踪机组老化以及发现事故造成的变化有至关重要的作用。

在原型水轮机上的空化很难发现。因此，唯一实用的方法就是进行真机空化测试。监测需要使用适合的空化振动噪声传感器，传感器安装在水轮机上恰当的位置，这样可以监听空化噪声，评估其后果，诸如水轮机部件的振动。根据传感器的数量和它们分析处理信号所使用的不同方法，一般把水轮机空化诊断监测技术分为以下两种：多维和简单技术。



图 1 – 位于华盛顿州哥伦比亚河上的大古力水坝，美国：装机容量 6809 MW。第三电站：3x605 MW 和 3x805 MW

本文介绍了 Korto 的多维技术¹，并将此技术和其他两种由美国公司提供的简单技术进行比较。两种技术对比基于在第三电站里的大型混流式水轮机上的测试²展开，该电站位于美国农垦局所有的大古力水坝（图 1）。

2. 多维技术

为了避免空化造成恶性后果，有时把大吨位船体后部的高负载螺旋桨设计为在全空化流中工作。水轮机中是不能这么施行的。在水轮机上要尽量避免空化，或者控制在非常微弱的范围，这样可以使挖掘工作不那么昂贵。所以一台典型的水轮机经常会在接近空化阈值的工况运行。因此，固定导叶和活动导叶后的水流变化会引发转轮叶片的空化。图 2 就显示了这种影响。

¹ 简述: International Water Power & Dam Construction Journal, May 2001, Feb. 2003, Nov. 2004

理论介绍: Journal of Fluids Engineering of the American Society of Mechanical Engineers, Dec. 2002

物理背景: Journal of Hydraulic Research of the International Association of Hydraulic Engineering and Research, Jan. 2003

更多参见: www.korto.com/Letter.pdf and

www.korto.com/downloads/white_papers/Korto_Cavitation_diagnostics_and_monitoring.pdf

² Grand Coulee G-20, Multidimensional Cavitation Test, Comparison of Three Cavitation Monitoring Techniques,

Korto Cavitation Services, Report GC082103, Vol. 1 and 2, May 2008

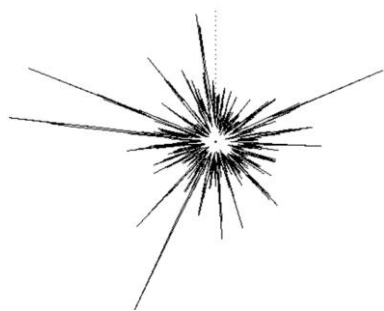


图 2 – 典型的短时平均空化强度（径向坐标）和转轮瞬时角位置（角度坐标）的相关性

就气蚀来说，一台水轮机上不可能找到两片完全一样的导叶，也不存在两个完全一样的转轮叶片。所以我们不能简单以水轮机作为整体来考察气蚀情况，而是要考虑可能有 $V \times B$ 独立的空化过程在作用，这里， V 和 B 分别是导叶和转轮叶片的数量。我们能够在如图 2 所示的曲线中查到这些空化过程的数据，不同的峰值描述了不同导叶和不同转轮叶片的相互作用。

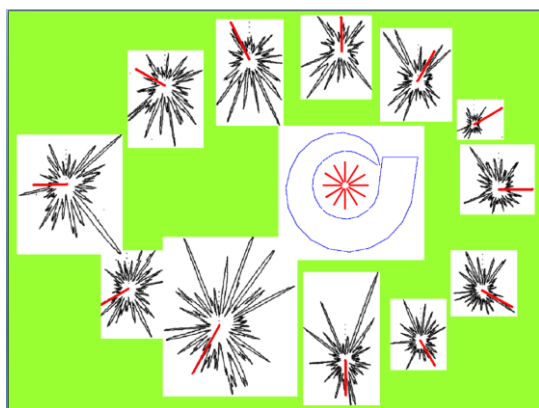


图 3 – 如图 2 所示的曲线，来自轴流式水轮机上的 12 个不同的周向分布位置。平均空化强度以及曲线图案都有很显著的不同。

检查一台水轮机上不同位置的数据相关性，我们能够发现很大的差别（图 3），这些差别是由导叶叶片的形状和设定不同以及蜗壳形状不同引起的。即使这些不同不会影响机组效率，它们也可能对空化性能有很大的作用。显然，仅仅依赖某一个位置的空化振动噪声传感器只能得到关于平均空化强度和整个空化过程很随机的结果。多维技术使用相当大数量的传感器。图 4 展示了一个典型的诊断测试配置，如果是长期在线监测的话，传感器的数量则会少一些。

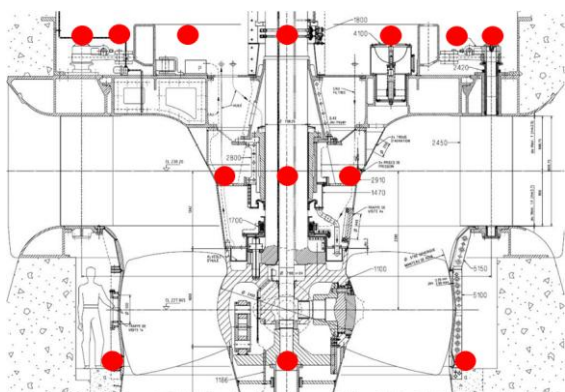


图 4 – 一个多维空化诊断测试中的传感器分布示例

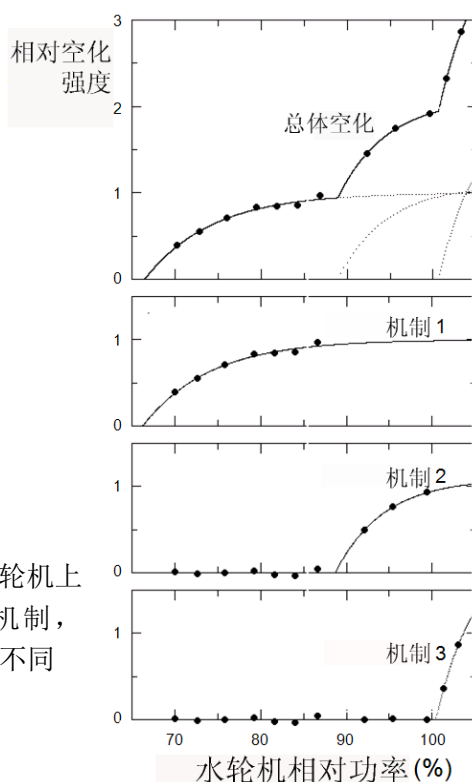


图 5 – 来自一台水轮机上三种不同的空化机制，区别在于空化阈值不同

多数情况下，在相同或不同条件下运行的水轮机上会出现几种不同的空化类型，如图 5 所示。同一种类型的空化也可能出现在水轮机的不同位置。这些不一样的空化机制产生在不同的流段，是相互独立的，因此应当区别处理。而且每种机制在每个导叶/转轮叶片对的细节上也不尽相同。用 M 来表示所研究的水轮机上出现的空化机制种类数，我们就得到了 $M \times V \times B$ 个不同的评估过程；对一个典型的混流式水轮机来说，这个数量可以达到 1000 个。使用多维技术，可以通过各种信号和数据分析工具来确定不同的空化机制，图 6 表示了其中一种。这里，空化强度由不同颜色代表，三段黑线指向了在该水轮机上发现的三种空化机制。

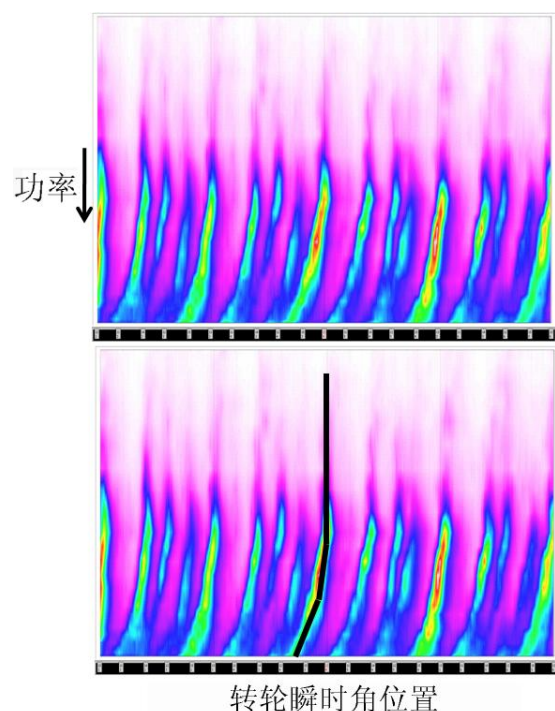


图 6 – 不同的色块显示了不同的导叶/转轮叶片对之间的相互作用。

在用于水轮机空化诊断和监测的多维技术中，大量的高频数据（每个传感器高达 1 或 2MHz，来源于至少 100 转数据）都是通过遍布水轮机各处足够多数目的传感器获取的，这些数据将会经过相当复杂的信号数据处理，总共 $M \times V \times B$ 个空化过程都会被求解，最后这些数据会整合在一起成为最终结果。长期监测的话，分析得出的数据将简化成类似振动监测使用的标量和矢量形式。这些空化数据被送到电站监测系统进行记录，趋势以及进一步的分析。这里一个很重要的具体问题是记录累积空化强度，它可以用来评估空蚀发展的情况以及安排状态检修。传感器的数量和位置，甚至监测算法细节通常是由现场的初步空化诊断测试决定的。因为每台水轮机的空化都有其自身的特点，我们不推荐所谓标准化的监测系统。

3. 结果

多维数据处理的第二步是一个按步进行的合成，最后会基于水轮机运行参数（两个水位，导水机构，对于轴流式机组来说是转轮开度，流量，功率等）得出如下多种空化状况的描述：

- $M \times V \times B$ 个导叶/转轮叶片对的特性描述了每种空化机制（共 M 种）在 B 个转轮叶片上的空化强度分量，这个量受到每片导叶（ V 个）的影响，也受到蜗壳后部位置的影响；
- $M \times B$ 个转轮叶片的特性描述了每个叶片周向平均的空化强度，这样可以在所有导叶和所有蜗壳后部位置上得到平均的结果；
- $M \times V$ 个导叶的空化特性；这些数据总的来说并不描述导叶上的任何空化情况，但是表现了每个导叶在转轮叶片空化上的平均化作用；
- M 以及一个总体的空化特性描述了水轮机的平均空化强度。

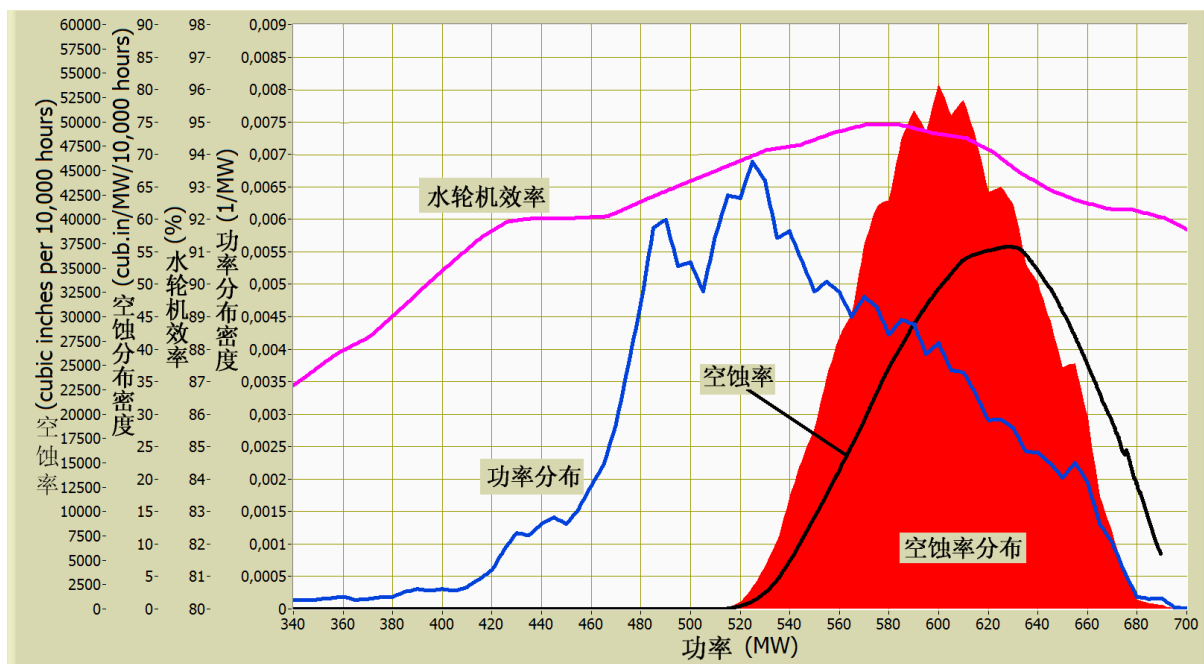


图 7 – 大古力混流式机组 G-20 的空蚀率评估曲线(多维技术实现)和效率曲线

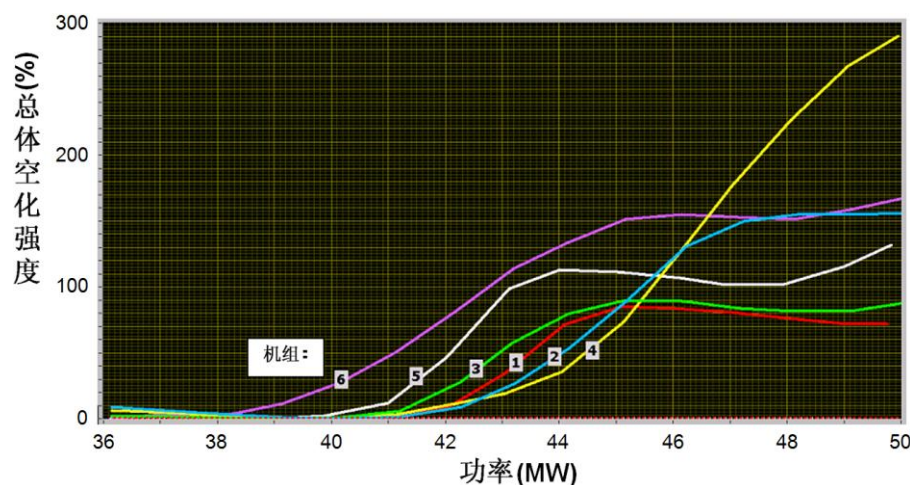


图 8 – 冰岛 Landsvirkjun 的 Burfell 水电站里 6 台型号参数一致的常规混流式水轮机的比较，揭示了在空化阈值高度以及空化发展强度上的不同。

图 7 和图 8 显示了总体空化特性，图 9 则显示了导叶特性。这些数据在水轮机运行优化（图 7-避免高空化强度运行工况）和电站运行优化（图 8 和图 9-在空化严重的机组上少分配负载，同时保证总输出功率）中会用到。

各种具体描述水轮机空化特性的数据形式都是有用的，比如，检查其他水轮机参数诸如混流式机组上的协联工况点（图 10），或者直接显示蜗壳影响的参数（图 11）。后者显示在水轮机测试中，多数空化都出现在蜗壳内一个相当狭窄的角度范围里，同时也说明了在两个最高功率之间会出现一个空化强度陡增，表明一个新的空化机制出现。如图 10 和图 11 所示的空化特性揭示了水轮机是可以得到改进的。

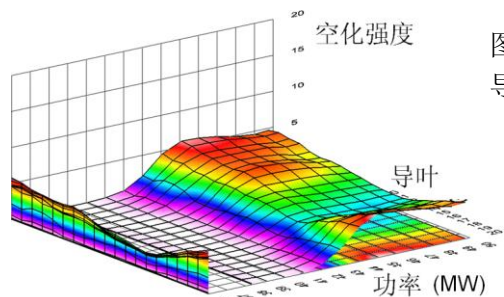


图 9 – Burfell 六台水轮机的
导叶空化特性

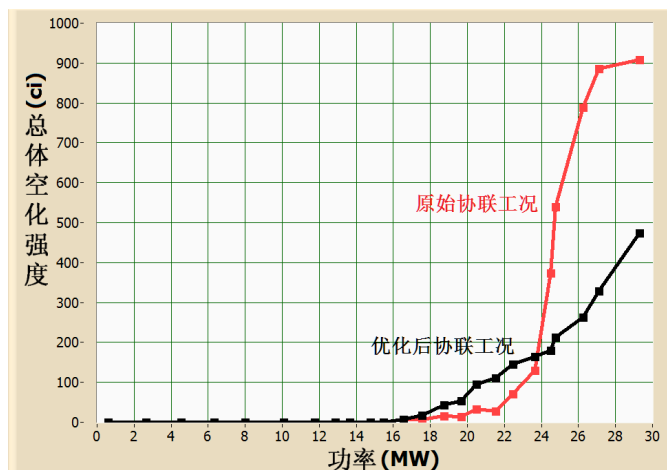
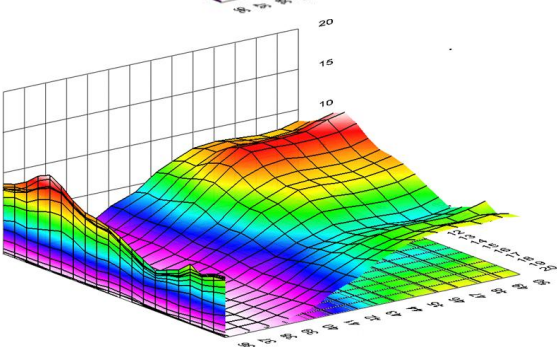
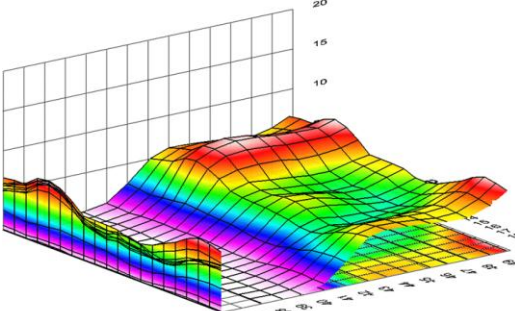
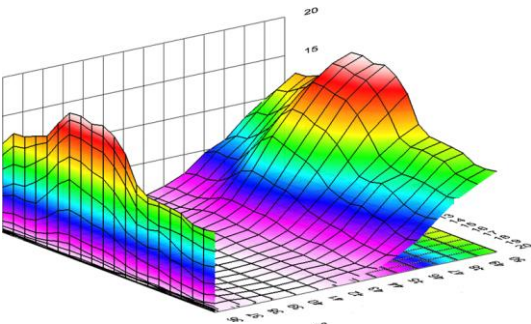
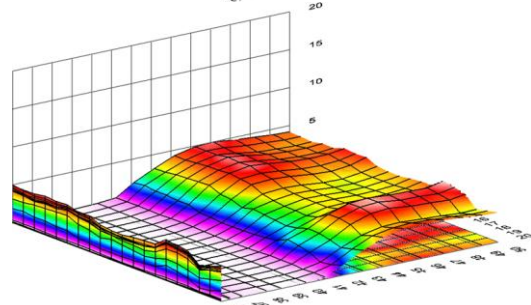
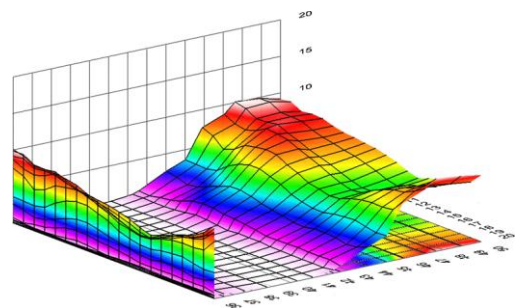


图 10 – 法国 EDF 的 Kembs 水电站轴流式水轮
1 号机组的空化情况，两种协联工况：通过模
型试验设计的原始协联工况和在原型机上试验
得到的优化后协联工况；我们推荐在指标测试
中包含空化这一项。

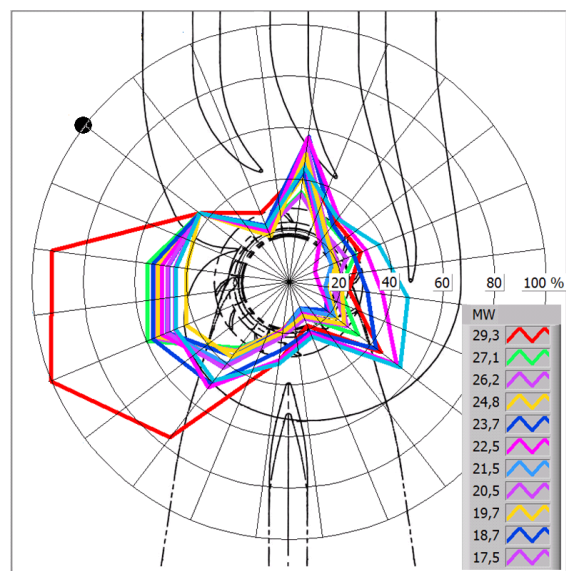


图 11 – Kembs 1 号机组上蜗壳后部空化强度
的空间分布；空化强度值在用黑点线做出
的方向上归一化了。

4. 和简单气蚀监测技术的对比

简单的气蚀监测技术遵循绝大多数水电机组参数测量逻辑，很直接：使用和测量参量匹配的传感器，然后估计平均值或者是其他适合的数值。对于空化来说，这样的逻辑并不好，有如下两个原因：

- 这样的空化监测得到的结果太过依赖于传感器的位置选择（对比图 3 中不同曲线间的幅度差别）。即使测得的平均值间的差值有标定来补偿，不同水轮机部件间的相互作用造成的差异，体现在不同的尖峰曲线，显示对于一个特定的传感器位置，部分空化分量也许没有捕捉到或者被高估了。这样，单一传感器的监测读数也许不具有代表性，会造成较大误差；
- 简单的信号处理算法忽略了一些信息，诸如图 3 中数据图形所含的信息。所以这种监测技术不能获得反映空化细节的数据。如果使用仅有的数据图形，获得的信息还有可能是错误的。

与此不同的是，多维技术使用来自多个位置传感器的信号，并用更复杂合理的方式处理数据。这样结果更有代表性，估得的空化强度平均值更接近于真实的平均总空化强度值，关于空化过程细节的评估结论也更准确。

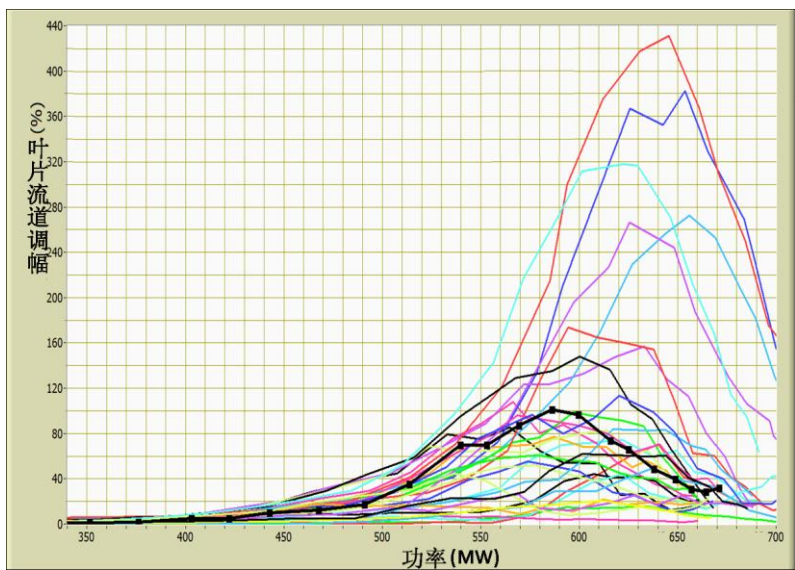


图 12 – 32 个导叶（不同颜色代表不同导叶）上获得的叶片流道调节水平的读数。简单空化监测得到的结果用黑色实点连线表明。

图 13 – 由简单空化监测做出的空化预测，使用了一个安装在尾水管壁的传感器，对比多维监测的结果（红色—空化运行，绿色—无空化运行，黄色—过渡范围）。

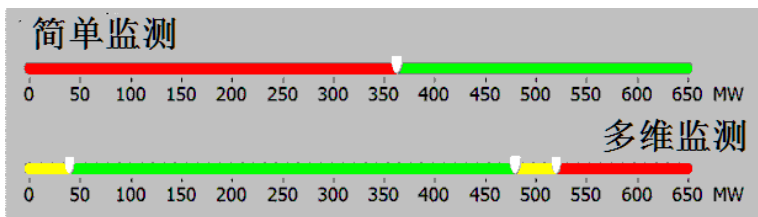


图 12 和 13 对比了多维技术和其它两种简单监测技术，它们安装在大古力水坝²，一个监测系统有一个安装在导叶臂上的传感器，将调幅作为输出（图 12），另一个监测系统使用尾水管壁上安装的一个传感器，有效值作为输出（图 13）。图 12 可以看出只采用单一传感器的时候，所获得的信号质量很差，不具有可预测性。根据传感器的位置不同，评估的空化强度达到最大时的功率能够相差 50MW 或者 100MW，这就是使用单一传感器的监测系统的情况。第二种监测系统还有一个问题：传感器安装在非空蚀，无漩涡空化占主导的地方，两年来错误的³数据³得到了一个很奇怪的结果（图 13）。

³Wolff, P.J., Jones, R.K., and March, P., “Evaluation of Results from Acoustic Emissions-Based Cavitation Monitor, Grand Coulee Unit G-24, Cavitation Monitoring System Comparison Tests, Grand Coulee Project, Final Report”, October 2005, www.wolffwareltd.com/downloads/Grand%20Coulee%20Cavitation%20Report.pdf

这是两种空化监测技术的对比：

	简单	多维
可靠诊断测试需要的传感器数量	1	每片导叶 1 个
长期监测需要的传感器数量	1	一般来说 6 个
信号和数据处理算法	简单	复杂
是否评估平均空蚀率	是	是
是否评估累积空蚀	是	是
是否代表水轮机上所有位置	否	是
是否区别各种空化种类	可忽略	是
是否包括诊断细节（转轮叶片质量等）	否	是
诊断运行恶化情况的相对灵敏度	~1	~80
结果的总体准确度和可靠性	低	高

监测灵敏度的巨大差异是使用初始恶化效应的空化振动噪声特征数据和来自多维算法空间求解单元的特征数据以及简单监测系统所提供的总空化特征数据作对比而得出的。

5. 模型试验和原型/真机试验

- 在一个典型的模型空化试验中得到的对原型机实际运行有帮助的数据，要比通过在实际电站进行多维空化振动噪声监测或测试得到的数据少得多（图 14）。
- 在一些情况中，并不是所有空化机制都可以在模型试验中观察到，但是所有机制都能在现场的多维空化振动噪声测试中监测到并且进行评估。
- 在初生空化模型中比尺效应有强烈的影响。这样，必须在原型机上检查空化情况。
- 因为在空蚀检修中没有完全对转轮叶型采取保护，并且运行中有各种恶化效应出现，水轮机的空化性能会随时间变化。这使得对原型机连续监测很有必要。

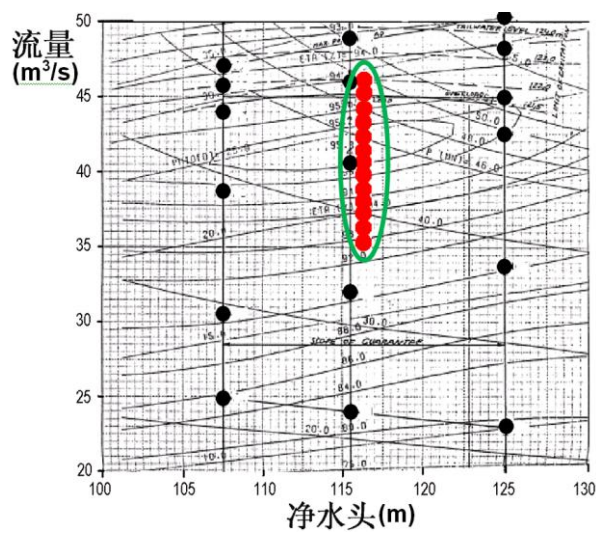


图 14 – 模型试验得到的典型的和空化相关的结果—黑点线；原型机试验得到结果—红点线；运行范围—绿线。在 17 个模型数据点中，只有两个描述了运行中真实情况，在原型机试验中才能得到更细化的描述。

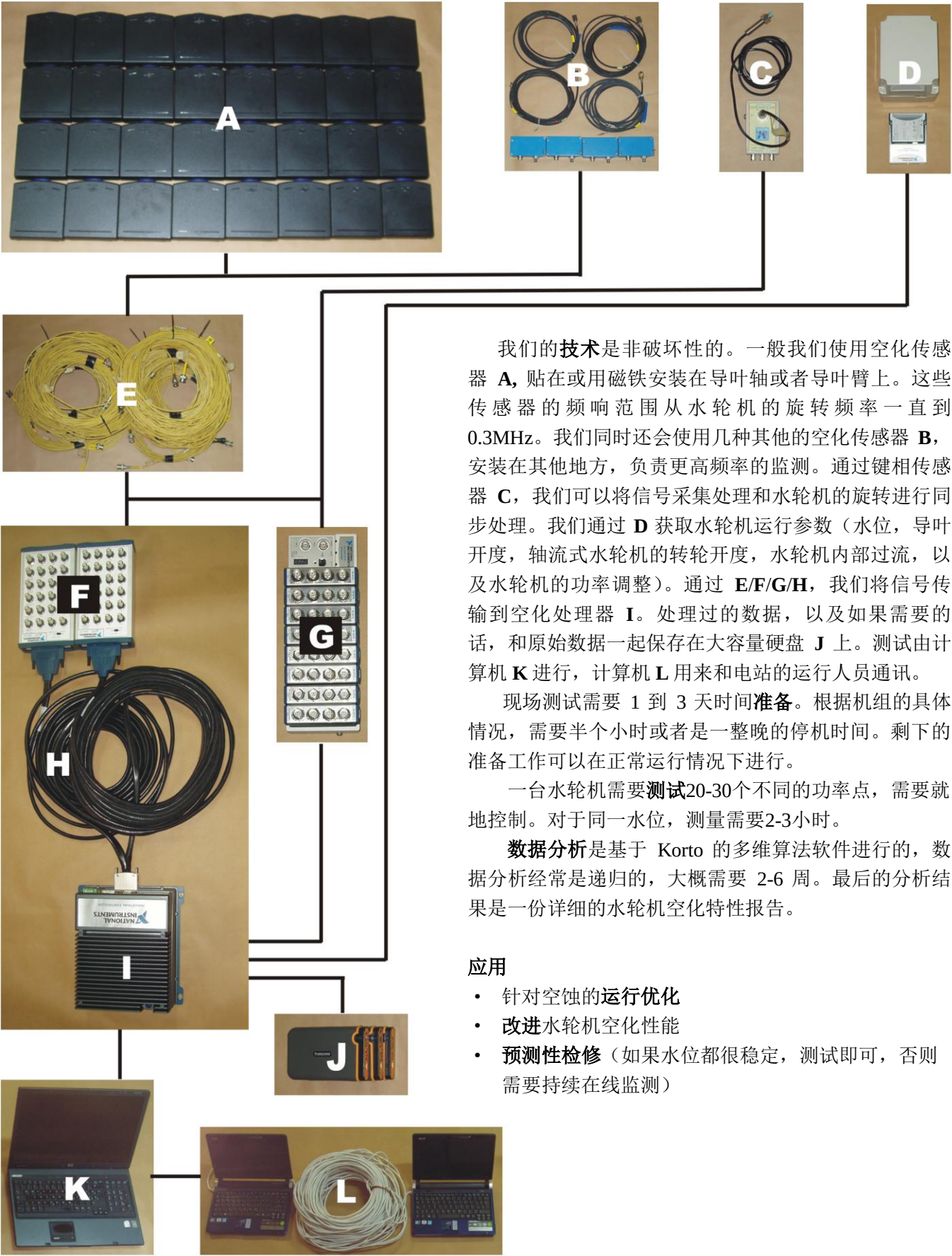
6. 回顾和结论

空化诊断测试和监测的多维技术使用遍布于水轮机各处的传感器，进行复杂的信号数据处理，从而得到关于空化强度的可靠结果，并提供空化情况的诊断细节。这能够用来优化水轮机或者水电站运行以得到最小空蚀，基于空化情况安排检修，并确定水轮机可以改善的部件。

简单空化监测技术基于单一传感器和简单的信号处理过程，其得到的空化强度评估结果可能有很大误差。它们忽略了多数空化振动噪声信号中包含的空化信息，无法提供空化的细节情况。

还有，模型试验不能代替原型机上的空化测试。

附录 1 – 水轮机组上的多维空化诊断-我们如何实现？



我们的**技术**是非破坏性的。一般我们使用空化传感器 **A**，贴在或用磁铁安装在导叶轴或者导叶臂上。这些传感器的频响范围从水轮机的旋转频率一直到 0.3MHz。我们同时还会使用几种其他的空化传感器 **B**，安装在其他地方，负责更高频率的监测。通过键相传感器 **C**，我们可以将信号采集处理和水轮机的旋转进行同步处理。我们通过 **D** 获取水轮机运行参数（水位，导叶开度，轴流式水轮机的转轮开度，水轮机内部过流，以及水轮机的功率调整）。通过 **E/F/G/H**，我们将信号传输到空化处理器 **I**。处理过的数据，以及如果需要的话，和原始数据一起保存在大容量硬盘 **J** 上。测试由计算机 **K** 进行，计算机 **L** 用来和电站的运行人员通讯。

现场测试需要 1 到 3 天时间**准备**。根据机组的具体情况，需要半个小时或者是一整晚的停机时间。剩下的准备工作可以在正常运行情况下进行。

一台水轮机需要**测试**20-30个不同的功率点，需要就地控制。对于同一水位，测量需要2-3小时。

数据分析是基于 Korto 的多维算法软件进行的，数据分析经常是递归的，大概需要 2-6 周。最后的分析结果是一份详细的水轮机空化特性报告。

应用

- 针对空蚀的**运行优化**
- **改进**水轮机空化性能
- **预测性检修**（如果水位都很稳定，测试即可，否则需要持续在线监测）

附录 2 – 典型的多维监测系统的安装



空化传感器安装在导叶轴或者导叶臂上，置于坚固的保护箱中。



信号来自：

- （一般情况）6 个空化传感器
- 键相传感器
- 工况数据（水位，导叶开度，轴流式水轮机的转轮开度，水轮机流量，功率）。



这些随机空化信号样本，在时间和空间上具有代表性，输送到空化数据处理器上，进行多维监测算法，这样将大量高频数据压缩成关键性的空化特征数据。通常，总体空化强度作为模拟量输出，这些数据以及关于空化细节的数据会在局域网内发布。

该系统可以集成到机组状态监测系统中，也可以独立运行，每个电站只需配备一台空化计算机系统。



Korto的多维空化监测算法是利用FPGA/RT（现场可编程门阵列/实时）技术实现的。左图是Korto多维空化诊断检测处理器（型号7391P）的内部视图。

Contact:



Korto Cavitation Services
Bd de la Pétrusse 102
2320 Luxembourg
Luxembourg

电话 +55 21 3010 4083
手机 +38 59 1580 6433
传真 +35 22 0880 663
Skype korto.cavitation

www.korto.com

中文资料请联系：china@korto.com