

# 水轮发电机组状态监测分析系统 在十三陵抽水蓄能电厂的应用

朱莹<sup>1</sup>, 吴玉林<sup>1</sup>, 樊玉林<sup>2</sup>, 郑松远<sup>3</sup>

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 十三陵抽水蓄能电厂, 北京 102200;  
3. 北京华科同安监控技术有限公司, 北京 100037)

[摘要] 本文介绍了应用于十三陵抽水蓄能电厂 3#机的机组状态监测分析系统, 包括其系统组成、测点分布以及各监测子系统的特点, 该系统记录了 2005 年 5 月十三陵抽水蓄能电厂 3#机组大修前后的振动摆度数据, 检验了大修的成果, 对大修有着一定的指导意义, 在大修之后又在 3#机组上安装了局部放电和油色谱监测子系统, 整套系统为机组的状态检修提供了基础。

[关键词] 机组状态监测系统; 振动摆度; 压力脉动; 局部放电; 油色谱

[中图分类号] TK730.8 [文献标识码] B [文章编号] 1000-3983 (2007) 01-0044-05

## The Application of Hydrogenerator Units Monitoring and Analysis System in Beijing SSL Pumped Storage Plant

ZHU Ying<sup>1</sup>, WU Yu-lin<sup>1</sup>, FAN Yu-lin<sup>2</sup>, ZHENG Song-yuan<sup>3</sup>

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. Beijing Shisanling Pumped Storage Plant, Beijing 102200, China;  
3. Beijing Tongan Monitoring Technology Co. Ltd., Beijing 100037, China)

**Abstract:** the units monitoring and analysis system which was used in Beijing SSL pumped storage plant including the components of the system, the measuring points and the characteristic of the system were introduced in this paper. This system recorded the data of the vibration and run-out before and after the repair, in order to check up the effect of the repair and provide the information to repair. After the repair, the PDA and oil chromatogram systems were installed on unit 3, all of these systems provide the information to decide whether the unit need repair.

**Key words:** units monitoring and analysis system; run-out; vibration; PD; oil chromatogram

## 1 前言

十三陵抽水蓄能电厂装机容量  $4 \times 200$  MW, 混流可逆式水泵水轮机, 年发电量 12.46 亿 kW·h, 年抽水用电量 16.69 亿 kW·h, 电站循环效率达 74.64%, 其中 3#机组参数如表 1。

十三陵抽水蓄能电厂主要运行方式为调峰发电、抽水填谷, 同时还兼顾了电网的动态运行要求, 如电网紧急事故备用和快速爬坡等, 因此电厂的安全运行就尤为重要。该电站水电机组原来的大修和小修大多采用周期性检修方式, 这种“到时必修”的方式确实存在着许多弊端, 这不仅减少了机组的有效发电时间, 还造成大量的人力、物力、财力浪费。为了掌握设备的实时状态信息, 以实施“状态检修”,

电厂于 2005 年 5 月投运了一套由北京华科同安监控技术有限公司开发的 TN8000 水轮发电机组状态监测分析系统。

## 2 系统组成与测点分布

### (1) 系统组成

北京十三陵抽水蓄能电厂 3#机组状态监测系统硬件系统由机组稳定性监测子系统(包括振动摆度监测分析子系统, 压力脉动监测子系统等)、发电机局部放电监测子系统、变压器油色谱在线监测系统、上位机系统和相关网络设备组成。机组稳定性监测子系统、发电机局部放电监测子系统、变压器油色谱监测子系统硬件设备集中安装在发电机层的机柜内, 上位机系统放置在主控室<sup>[1]</sup>。具体系统网络如图 1 所示。

(2) 测点分布

十三陵蓄能电站 3#机组状态监测系统主要测点包括机组的振动、摆度、压力脉动、局部放电、油色谱及相关过程量参数。测点清单见表 2。

表 1 3#机组基本参数

水泵 / 水轮机	型式	HLN115-LJ-366		
	转轮标称直径	3.66 m		
	转轮叶片数	7		
	导叶数	16		
	最大吸出高程	- 67 m		
	水轮工况	额定出力	204 MW	
		额定水头	430 m	
		额定流量	53.8 m <sup>3</sup> /s	
		最高效率	93.3 %	
	水泵工况	最大出力	218MW	
最大扬程		481 m		
最小流量		34.5 m <sup>3</sup> /s		
最高效率		92.38 %		
发电 / 电动机	型式	SSV482/12-300		
	发电工况额定容量	222 MVA, cosφ=0.9		
	电动工况额定容量	218MVA,cosφ=1		
	定子额定电压/电流	13.8 kV/9288 A		
	转子额定电压/电流	139 V/2098 A		
	转子磁极数	12		
	发电工况效率	98.20 %		
	电动工况效率	98.56 %		
主变 / 压器	额定容量	240 MVA		
	效率	99.7 %		

表 2 测点清单

序号	测点名称	数量
1	键相信号	1
2	上导轴承 X/Y 向摆度	2
3	下导轴承 X/Y 向摆度	2
4	水导轴承 X/Y 向摆度	2
5	上架架 X/Y 向水平振动	2
6	上架架 Z 向垂直振动	1
7	定子铁心 X/Y 向水平振动	2
8	定子铁心 Z 向垂直振动	1
9	下机架 X/Y 向水平振动	2
10	下机架 Z 向垂直振动	1
11	顶盖 X/Y 向水平振动	2
12	顶盖 Z 向垂直振动	1
13	抬机量	1
14	钢管压力脉动	1
15	蜗壳进口压力脉动	1
16	尾水管进口压力脉动	1
17	尾水管扩散段压力脉动	1
18	活动导叶后压力脉动	1
19	迷宫密封内外压力脉动	2
20	发电机局部放电	6
21	主变油色谱分析	1

3 系统各子系统功能及数据分析

(1) 振动摆度监测分析子系统

TN8000 数据采集箱对机组的振动、摆度以及相关的过程量参数进行实时、并行、整周期采样，并进行相应的处理、计算和特征提取，在数据采集站液晶显示器、工程师站显示器以及网络所联的有关工作终端上以结构示意图、棒图、数据表格、曲线等形式实时动态显示所监测的数据和状态。系统在监测过程中，提供了多种报警功能，在各监测界面上实时提示报警状态。

2005 年 5 月十三陵抽水蓄能电厂 3#机组进行了大修，为了检验大修效果并对大修提供参考建议，在大修前后均利用 TN8000 状态监测分析系统采集了机组在各个工况下的振动和摆度数据(如图 2)。

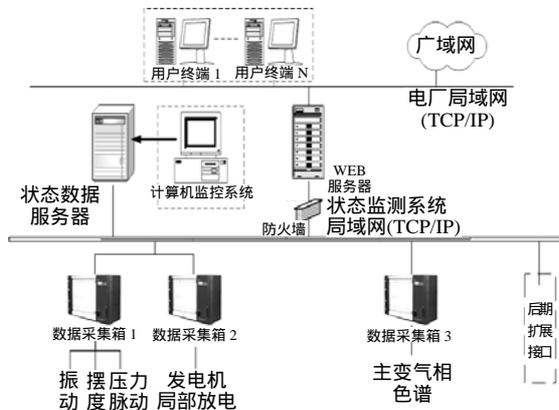
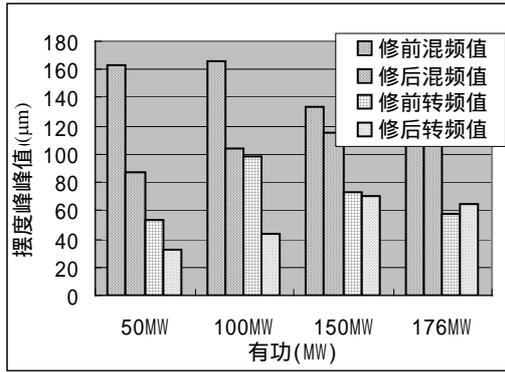
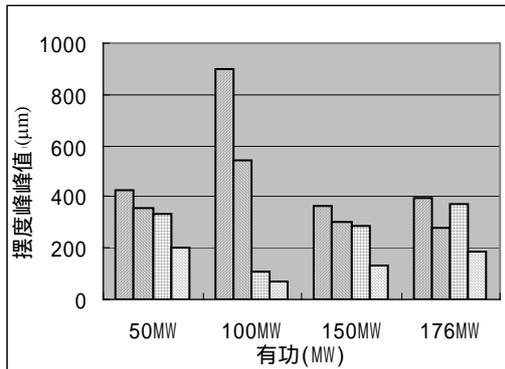


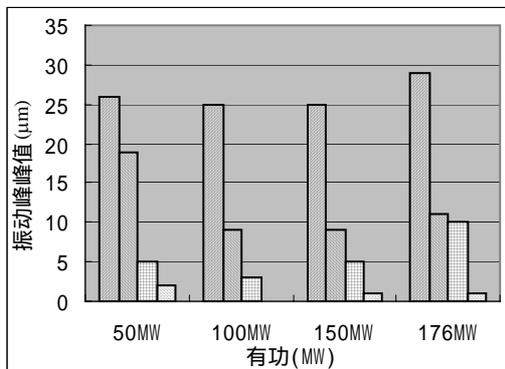
图 1 十三陵 3#机组监测系统网络



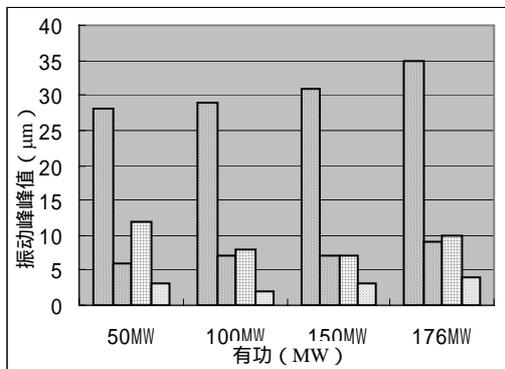
(a) 大修前后上导摆度x峰峰值对比



(b) 大修前后水导摆度x峰峰值对比



(c) 大修前后上机架垂直振动峰峰值对比



(d) 大修前后下机架垂直振动峰峰值对比

图2 大修前后各导轴承摆度及机架振动峰峰值对比

由图 2 可以看出：

大修之前：水轮机导轴承摆度值普遍较大，在发电 100 MW 时水导 X 向摆度达到了 898 μm；水轮机导轴承处的振幅变化比发电机上导轴承处的振幅变化敏感，并且在调相工况下，水导摆度较发电时降低幅度较大，最大值从 672 μm 降低至 430 μm。

大修之后：机组在各个运行工况下，水轮机导轴承运行水平明显得到了改善。在发电 100 MW 工况下水导摆度值从 898 μm 降为 546 μm，其他工况下水导摆度值也明显降低；机架各部件振动在各个工况下不同程度降低，机架垂直振动降低尤为明显；上导摆度和下导摆度大修后基本维持了大修前的良好水平；水导振幅变化比发电机导轴承变化敏感的现象，经过大修也有所改善。

(2) 压力脉动监测子系统

TN8000 系统可监测过流部件的压力脉动，实时显示压力脉动的波形和频谱；分析压力脉动的频率成分以及压力脉动随工况的变化情况；分析各点压力脉动及其频域特性与导叶开度的关系。对水轮机各过流段的压力脉动进行监测分析，可以全面掌握机组的水力特性，监视水力激振因素，了解水力激振对机组稳定性的影响。针对十三陵机组特点，选取的压力脉动测点如图 3 所示。

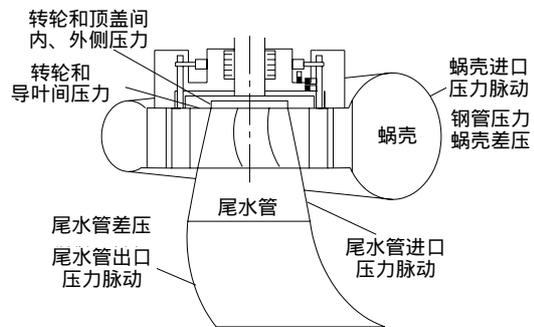


图 3 压力脉动测点

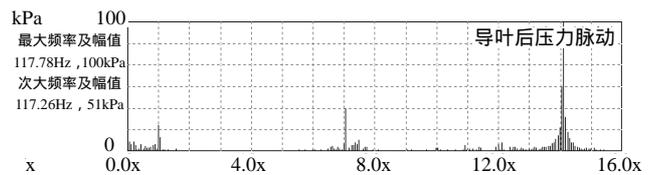


图 4 导叶后压力脉动频谱图

抽水蓄能机组在抽水工况以及发电工况时，导叶后的压力脉动都显著存在，是压力脉动监测需要重点注意的测点。通过对该点压力脉动的检测，得到以下规律：如图 4 所示（图中横坐标为转频的倍数，纵坐标为脉动幅值），该压力脉动的主要频率是两倍的叶片倍数转频，十三陵 3#机组转轮叶片数为 7，转频为 8.3 Hz，由上图可以看出导叶后的压力脉动特征频率为 14 倍转频，即 117.78 Hz。这种现象发生的原因可能是水流流过转轮和导叶时，由于动静相干产生了参数共振<sup>[2]</sup>。

当机组运行在部分负荷工况：有功功率为 90~120 MW 之间，存在较大的压力脉动，其频率为 2.60 Hz，是水轮机转频的 0.31 倍，通过观察水导轴承摆度与有功功率的三维谱图以及各导轴承摆度与有功功率相关趋势图（如图 5、图 6），可以看出在各导轴承测点信号都有明显的这种频率成分，有功功率为 90~120 MW 之间的工况是不稳定工况。产生这种现象的原因可能是机组运行在这段运行工况范围内，尾水管中形成了涡带，产生了低频压力脉动。一般处理方法是在运行过程中尽量避免在该范围运行，但是通过分析十三陵抽水蓄能电站近几个月的运行工况数据可知，很多情况下是需要运行在不稳定工况区的。因此，通过尾水管补气的措施来降低尾水涡带压力脉动造成的振动可能是更为适当的措施。

(3) 局部放电监测子系统

十三陵抽水蓄能电厂的局部放电监测子系统采用加拿大 IRIS 公司的 HYDROTRAC 系统，该系统由传感器、数据采集装置以及检测分析软件组成。传感器采用专门为检测水轮发电机定子线棒的局部放电设计的电容耦合器。监测分析软件可连续并自动监测水轮发电机在正常工作时，定子线圈绝缘状态，给出局部放电脉冲的各相放电量、放电相位、放电次数；持续监测发电机定子绕组各相的最大局部放电量，并指示当前绝缘状态；进行放电量变化率分析；提供放电的二维谱图分析手段，并能根据历史数据进行趋势分析。

描述局部放电监测情况一般采用放电量  $q$  与放电次数  $N$  的二维谱图（如图 7），如果曲线与放电量坐标轴及放电次数坐标轴所围成的面积越大，表明定子线棒状态越不好，但是仅仅凭借某一时刻的局部放电的放电量与放电次数关系图来判定发电机定子线棒的绝缘状态还不够全面，因此还需要进行一个阶段内局部放电的趋势分析，图 8 为发电机局部放电 A 相、B 相和 C 相在 5 月至 9 月有关数据变化曲线，从图中可以

看出，局放数据均在正常范围内，并且基本维持不变，说明发电机局部放电比较稳定，状态没有发生变化。

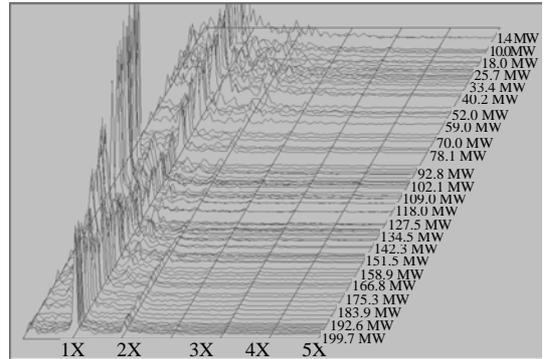


图 5 水导轴承摆度与有功的三维谱图

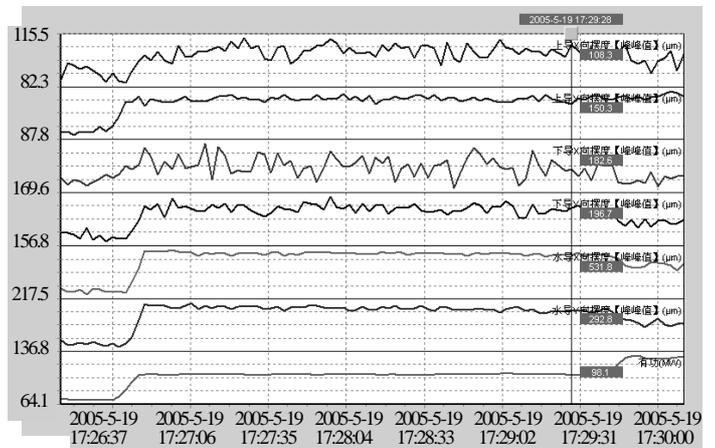


图 6 各导轴承摆度与有功的相关趋势图

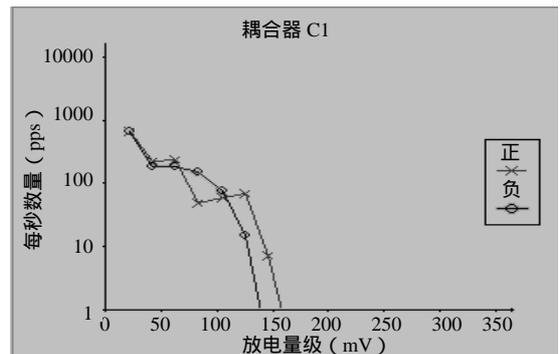
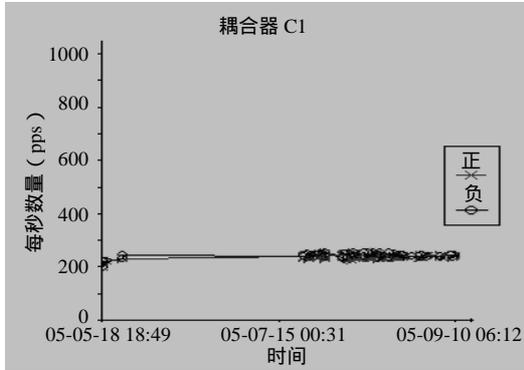


图 7 局部放电  $q-N$  图

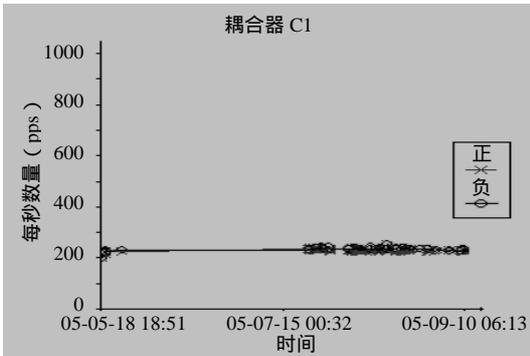
(4) 油色谱监测子系统

变压器油中溶解气体分析是诊断充油电气设备最有效的方法之一，能够及早发现潜伏的故障。主变油色谱分析仪可以定期地并可靠地监测预报变压器故障的八种故障气体（包括氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、氧气、一氧化碳和二氧化碳），仪器定期从变压器

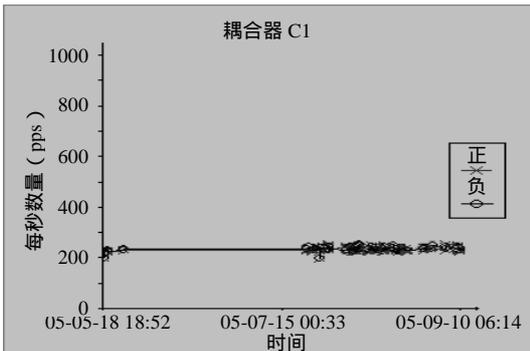
循环油中脱气,用其内部的气相色谱确定气体的浓度。软件可以给出变压器中多种气体的浓度;诊断变压器中局部放电、局部过热、绝缘纸过热等故障;区分放电类型与过热类型。



(a) A相局放变化趋势

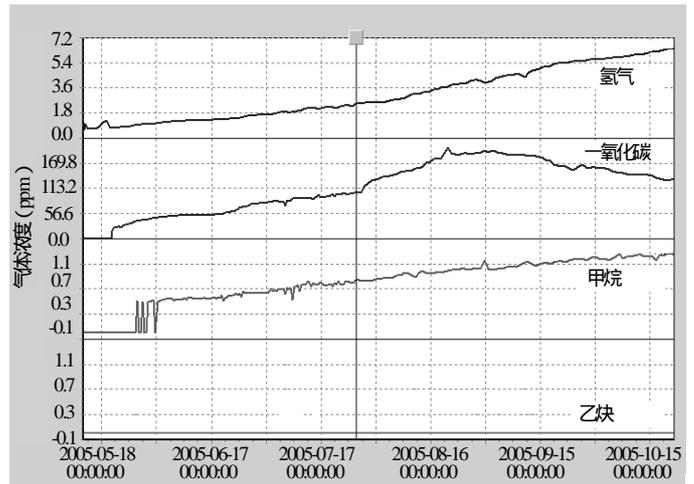


(b) B相局放变化趋势

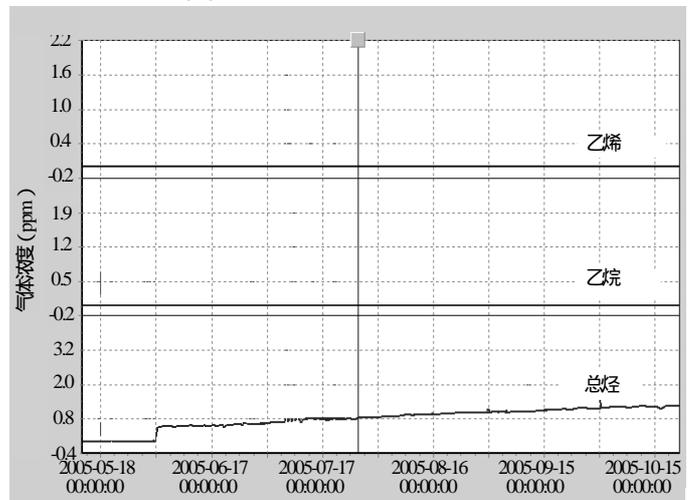


(c) C相局放变化趋势

图8 5月~9月三相局放变化趋势



(a) 氢气、一氧化碳、甲烷、乙炔含量趋势



(b) 乙烯、乙烷、总烃含量趋势

图9 6月~10月油色谱趋势

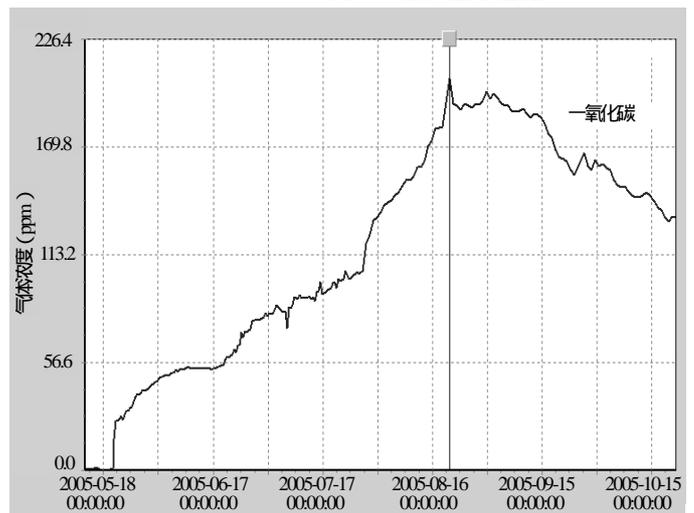


图10 CO趋势图

表3 2005年8月16日油色谱数据 ppm

氢气	一氧化碳	甲烷	乙烷	乙烯	乙炔	总烃
3.72	205.87	0.99	0	0	0	0.99

由以上图表可以看出,安装监测系统至今,其他各种气体成分保持稳定,在6月~8月期间一氧化碳含量(下转第64页)

序中进行计算；对机组状态信息就直接取用机组开关的位置信号。如果取自相邻系统无疑减少了本系统外部信号的引入数量，但同时受到相邻系统故障的影响就大，从提高系统运行可靠性的角度看，设计中还是应当避免采用此思路。

#### 4.2 软件容错功能

增加系统软件中的容错设计，即增加通过软件程序来判断异常情况的功能，并在发现异常后发出报警信息，维持当前运行状态。如本厂调速器程序中如果具备识别功率反馈信号异常的功能，则不会因为功率信号的异常而导致机组负荷的异常上升。

[收稿日期] 2006-07-31

\*\*\*\*\*

(上接第 48 页)

量增长速度较快，至 8 月 16 日已增长到 205.87 ppm，继而又呈下降趋势。

当机组故障涉及到固体绝缘时会引起一氧化碳和二氧化碳含量的明显增长。但根据现有统计资料，固体绝缘的正常老化过程与故障情况下劣化分解，表现在油中一氧化碳的含量上，一般情况下没有严格的界限，二氧化碳含量的规律更不明显。因此，在考察这两种气体含量时更应结合具体变压器的结构特点（如油保护方式）运行温度、负荷情况、运行历史等情况加以综合分析。

根据变压器油中溶解气体分析和判断导则<sup>[3]</sup>，在正常情况，一氧化碳含量一般在 300 ppm 以下。如总烃含量超出正常范围，而一氧化碳含量超过 300 ppm，应考虑有涉及到固体绝缘过热的可能性；如一氧化碳含量虽然超过 300 ppm，但总烃含量在正常范围，一般可认为是正常的。

图表中显示值虽然在正常范围内，但在 6 月~8 月一氧化碳含量增长比较快，现已呈下降趋势，还需给予一定的重视。

### 4 结论

(1) 利用机组状态监测手段，可以了解机组运行过程中各部件的状况，能够早发现潜在的问题，在发生事故之前采取必要的措施，避免事故发生。

(2) TN8000 水轮机组状态监测及分析系统在十三陵抽水蓄能电厂投运至今，运行稳定可靠，监测数据准确可信，为检修决策和优化运行提供了信息和数据，为实现状态检修提供了技术基础。

#### [作者简介]



李宪栋 (1977-), 2001 年毕业于东北电力学院电力系统及其自动化专业, 主要从事水电厂自动化维护工作, 工程师。



马新红 (1972-), 1995 年毕业于武汉水利电力大学水利水电动力工程专业, 主要从事水电厂机电设备的检修维护工作, 工程师。

(3) 当前我国大中型水电厂正朝着“无人值班(少人值守)”的管理模式发展, 为此各水电厂都在努力提高自身的安全经济运行管理水平和自动化程度。而机组运行的状态及其稳定性对电厂、电网的安全经济运行至关重要。及时发现机组存在的隐患和缺陷, 有针对性地对机组设备进行维护保养, 实施状态维修, 建立预测性维修体制等将有助于提高电厂、电网的安全经济运行水平, 给电厂、电网带来显著的经济效益。为此, 在现有机组运行设备的基础上, 特别是在大型水轮发电机组上安装状态监测系统, 对机组进行状态监测是迫切的、重要的。

#### [参考文献]

- [1] 郑松远. 基于系统集成的水电机组状态监测故障诊断系统, 全国大中型水电厂技术协作网, 2005.
- [2] 马震岳, 董毓新. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [3] 中华人民共和国能源部标准 SD187-86, 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].

[收稿日期] 2005-11-20

#### [作者简介]



朱莹 (1981-), 清华大学热能工程系流体机械研究所在读硕士, 主要研究方向为水轮机组状态监测与故障诊断。



吴玉林 (1944-), 清华大学热能系教授, 博士生导师。