

绪 论

第一节 国内外水电厂计算机监控系统发展概况

水电厂最根本的任务是实现安全经济运行。随着国民经济的持续发展，兴建的水电厂越来越多，其容量也越来越大，如正在建设的三峡水电厂，总装机容量高达 18200MW。为了实现安全发供电，需要经常监测的量成千上万，需要实现的控制功能也越来越复杂。特别是抽水蓄能电厂的出现，机组的工况不仅有发电、调相，而且还有抽水，各种工况之间的相互转换，使控制功能进一步复杂。为了实现水电厂的经济运行，需要进行大量复杂的计算。随着水电厂梯级的形成，协调这些电厂的运行以期达到整体的经济运行，需要进行的计算更为复杂。以上一切使原先在水电厂上广泛使用的布线逻辑型自动装置越来越难以胜任这些复杂的工作，需要采用更为先进的技术。

与此同时，计算机技术这些年来有着迅猛的发展，其性能日趋完善，而价格日益下降，这为取代常规的布线逻辑型自动装置提供了良好的物质基础。

早在 70 年代，计算机已开始应用于水电厂，起先用于各项离线计算和工况的监测，后来逐渐进入到控制领域。它经历了一段从低级到高级 从顺序控制到闭环调节控制 从局部控制到全厂控制 从电能生产领域扩展到水情测报、水工建筑物的监控、航运管理控制等各个方面 从监控到实现经济运行 从个别电厂监控到整个梯级和流域监控的发展过程。出现了一批用微机构成的调速器、励磁调节器、同步并列装置、继电保护装置。多媒体技术应用使电厂中控室的设计发生了巨大的变化。巨大的模拟显示屏正在逐渐被计算机显示器所代替 常规操作盘基本上已被计算机监控系统的值班员控制台所取代 运行人员的操作已从过去的扭把手、按开关转为计算机键盘和鼠标操作。运行人员的工作性质也发生了质的变化 从过去的日常监盘和频繁操作转变为巡视 经常的监测和调节控制都由计算机系统去完成。运行人员的劳动强度大大减轻，人数也大大减少，甚至出现了无人值班或“无人值班”（少人值守）的电厂。采用计算机监控已成了水电厂自动化的主流。

一、国外发展概况

从 70 年代起，计算机监控在国外一些水电厂上取得了实质性的进展，出现了用计算机控制的水电厂。最初，由于计算机比较贵，全厂只用一台计算机实现对主要工况的监视和操作，通常不实现闭环调节控制。后来，随着计算机性能改善和价格下降，出现了采用

多台小型计算机实现闭环调节控制的水电厂，其代表是美国总装机容量达 6150MW 的大古力水电厂。随着高性能微机的出现，微机在水电厂监控系统中得到普遍的应用。现在，新投入的水电厂大都采用由多台计算机构成的计算机监控系统。世界各国的发展是不平衡的，目前还缺乏关于水电厂实现计算机监控的完整统计资料。就国家来说，美国、法国、日本和加拿大等国在这方面是比较领先的。

（一）法国

法国的水电资源开发比较好，大部分资源已得到利用。法国的电厂基本上是由法国电力公司（EDF）管辖。根据 80 年代初期的资料，它拥有水电厂 470 座，总装机容量为 22900MW。现在，只有 14 个场所还保留值班人员，其中 3 个在水电厂，其他在控制中心。大约有 360 台可编程控制器和 100 台左右计算机用于水电厂的机组控制和电厂监控。水电厂基本上实现了无经常值班人员，较大的水电厂采用在家值班的方式。很多河流上的梯级水电厂实现了集中监控。法国水电厂的特点是，装机容量不太大，很多是径流式电厂，需要实现的控制功能比较简单，一般只需在电厂设自动控制装置或一台计算机即可实现监控。只是在梯级控制中心、一些容量较大的水电厂和抽水蓄能电厂才设置较为复杂的计算机监控系统。法国梯级水电厂的联合调度搞得比较好，一些主要河流，如上、下罗纳河和杜朗斯河上的各梯级水电厂均用计算机实现了联合调度，取得了显著的经济效益。还有一个特点是，普遍采用国产计算机。

（二）日本

日本在水电厂计算机监控方面也搞得比较好。日本的水电厂大都是无人值班的。以东京电力公司为例，90 年代初它的总装机容量为 49000MW 其中水电厂为 7340MW，有水电厂 156 座，机组 280 台，其中 25MW 以下水电厂有 100 座。到 1990 年，无人化已达 98% 以上。日本水电厂的特点是，除抽水蓄能电厂外，容量都比较小，而且有不少电厂只装一台机组。这是因为日本没有什么大的河流，而水电资源的开发又搞得比较好。除抽水蓄能电厂外，电厂一般不设带处理功能的计算机系统，而仅设一些用微机构成的自动控制装置。电厂的监控操作都是在远离电厂的地区控制所内实现的，地区控制所内设有规模较大的计算机系统。它通过远动装置与电厂的远方终端连接，从而实现监控。抽水蓄能电厂均设置复杂的计算机监控系统。

（三）美国

美国地域辽阔，有许多大河，水电资源开发也较好，已建成许多大小不等的水电厂和大型抽水蓄能电厂，如装机容量高达 6150MW 的大古力水电厂，2100MW 的巴斯康提抽水蓄能电厂，哥伦比亚河上兴建了一批容量超过 1000MW 的水电厂。这些大型水电厂均采用庞大的功能复杂的计算机监控系统，采用的技术在上世界上是领先的。早在 70 年代末，大古力水电厂就装设了由几十台小型机构成的计算机监控系统，采用了分层分布系统。经常监视的开关量有 11000 个、模拟量有 3500 个，各种控制和指示用的控制输出量有 2000 个；实现了自动发电控制和自动电压控制；记录各项事件（包括事故）装置的分辨率为 1ms，用多台 CRT 屏幕显示器取代了常规的返回屏；监控系统的可利用率超过 99.8%。这些性能和指标在当时是最先进的，对后来水电厂计算机监控系统产生了深远的影响。 80

年代末，大古力水电厂又更新了它的计算机监控系统，采用了广泛使用微机的监控系统。美国的大型水电厂由于控制功能复杂，在电力系统中的地位比较重要，都保留了少量的值班人员。

（四）加拿大

加拿大水电资源丰富，开发得比较好，水电装机容量在世界上处于前列。它的特点是，水电厂装机容量一般都比较大大，气候环境条件恶劣，人口密度低，技术人员相对来说比较缺乏，因此，要求水电厂有较高的自动化水平。水电厂，特别是新建的水电厂，多设置了计算机监控系统。著名的有邱吉尔瀑布水电厂（5225MW）拉格朗梯级水电厂（8个电厂，总装机15263MW）等。

近年来，一些发展中国家，如巴西、委内瑞拉、阿根廷等，兴建了一批装机容量很大的水电厂，如巴西与巴拉圭合建的伊泰普水电厂（12600MW）、委内瑞拉的古里水电厂（10000MW）、阿根廷的 Yacyreta 水电厂（2700MW）。它们都采用了复杂的计算机监控系统。

特别需要指出，抽水蓄能电厂几乎全都采用了计算机监控系统。

国外研制水电厂计算机监控系统有许多公司，其中比较著名的有，加拿大的 CAE 公司、瑞士和德国的 ABB 公司、德国的西门子公司、法国的 ALSTOM 公司（原 CEGELEC 公司）、日本的日立公司和东芝公司、美国和加拿大的贝利公司、奥地利的依林（ELIN）公司等。它们都推出自己的系列产品，在世界各地得到了广泛的应用。我国也引进了它们的部分产品。

二、国内发展概况

我国水电厂计算机监控系统的研制工作起步不晚。早在 70 年代末，原水电部就组织了南京自动化研究所（现改为电力自动化研究院）、长江流域规划办公室（现改为长江水利委员会）和华中工学院（现改为华中科技大学）研究葛洲坝水电厂采用计算机监控系统问题。随后，中国水利水电科学研究院（简称水科院）自动化研究所开始了富春江水电厂计算机监控系统的研制工作。天津电气传动设计研究所（简称天传所）也开始了永定河梯级水电厂计算机监控系统的研制工作。这些监控系统于 80 年代中先后投入运行。

与此同时，也引进了一些国外研制的监控系统。采用 GAE 公司产品的有葛洲坝大江电厂、隔河岩水电厂和龚嘴梯调；采用西门子公司产品的有鲁布格水电厂、广州抽水蓄能电厂 C 二期、龚嘴水电厂；采用 ABB 公司产品的有潘家口、天生桥二级、溪口、宝兴河梯级和二滩等水电厂；采用贝利公司产品的有十三陵抽水蓄能电厂和天荒坪抽水蓄能电厂；采用法国 CEGELEC 公司产品的有广州抽水蓄能电厂（一期）、高坝洲水电厂；采用依林公司产品的有小浪底水电厂。要指出，有些引进是与国外贷款紧密联系的。

十多年来，国内的研制单位也取得了很大的成就。已投运的几十个计算机监控系统中绝大多数是由国内单位研制的。技术水平也有了很大的提高，达到了国外 90 年代的水平。许多新技术，如分层分布处理、分布式数据库、开放式系统、网络结构、多媒体、专家系统等，都得到了相应的应用。电力自动化研究院和水科院自动化研究所还推出了自己的系

列产品，不仅在国内水电厂得到广泛应用，甚至还出口到国外。

据不完全统计，目前已有约 40 座大型水电厂实现了计算机监控，详见表 1-1。根据 DL/T5065—1996 《水力发电厂计算机监控系统设计规定》，今后设计的“总装机容量为 250MW 及以上的大型水电厂应采用计算机监控系统，有条件按集中控制设计的梯级水电厂或水电厂群宜采用计算机监控系统。”

根据近年来的实践，新建中的中型水电厂已基本上采用计算机监控系统，不采用的已是少数。

表 1-1 我国大型水电厂（250MW 以上）计算机监控系统投运情况表

序号	电厂名称	装机容量 (MW)	供货单位	投运年份
1	二滩水电厂	$6 \times 550 = 3300$	ABB 公司	1998
2	李家峡水电厂	$5 \times 400 = 2000$	电力自动化研究院	1996
3	天荒坪抽水蓄能电厂	$6 \times 300 = 1800$	Baily (贝利) 公司	已投运
4	葛洲坝大江水电厂 一期	$14 \times 125 = 1750$	CAE 公司	1992
	二期		电力自动化研究院	1998
5	白山水电厂	$5 \times 300 = 1500$	中国水利水电科学研究院	1997
6	水口水电厂	$7 \times 200 = 1400$	SI 公司、电力自动化研究院	1997
7	天生桥二级水电厂	$6 \times 220 = 1320$	ABB (SC) 公司	已投运
8	龙羊峡水电厂 一期	$4 \times 320 = 1280$	中国水利水电科学研究院	1992
	二期			1996
9	五强溪水电厂	$5 \times 250 = 1250$	Landis&Gyr 公司	1994
10	漫湾水电厂	$5 \times 250 = 1250$	电力自动化研究院	1993
11	刘家峡水电厂	$3 \times 225 + 1 \times 300 + 1 \times 250 = 1225$	哈尔滨电力自动化所	已投运
12	隔河岩水电厂	$4 \times 300 = 1200$	CAE 公司	1994
13	天生桥一级水电厂	$4 \times 300 = 1200$	电力自动化研究院	1997
14	岩滩水电厂	$4 \times 300 = 1200$	电力自动化研究院	1997
15	广州抽水蓄能电厂 (一期)	$4 \times 300 = 1200$	CEGELEC 公司	1995
16	万家寨水电厂	$6 \times 180 = 1080$	电力自动化研究院	1998
17	葛洲坝二江电厂 一期	$2 \times 170 + 5 \times 125 = 965$	电力自动化研究院	1989
	二期			1994
18	丹江口水电厂	$6 \times 150 = 900$	电力自动化研究院	1990
19	丰满水电厂	约 800 (10 台)	东北勘测设计研究院	1995
20	安康水电厂 (二期)	$4 \times 200 = 800$	中国水利水电科学研究院	1999
21	新安江水电厂	约 800	华东电力试验研究院	1992
22	十三陵抽水蓄能电厂	$4 \times 200 = 800$	Baily (贝利) 公司	1997
23	乌江渡水电厂	$3 \times 210 = 630$	电力自动化研究院	1993
24	鲁布革水电厂 一期	$4 \times 150 = 600$	西门子公司	1990
	二期		电力自动化研究院	1998
25	铜街子水电厂 一期	$4 \times 150 = 600$	电力自动化研究院	1992
	二期			1997
26	莲花水电厂	$4 \times 130 = 520$	电力自动化研究院	1996

续表 1-1

序号	电厂名称	装机容量 (MW)	供货单位	投运年份
27	柘溪水电厂	447.5	华中理工大学	1988
28	潘家口水电厂	$1 \times 150 + 3 \times 90 = 420$	ABB 公司、电力自动化研究院	1998
29	凤滩水电厂	$4 \times 100 = 400$	中国水利水电科学研究院	1994
30	大东江水电厂	$4 \times 100 = 400$	中国水利水电科学研究院	1997
31	三门峡水电厂	$2 \times 75 + 5 \times 50 = 400$	电力自动化研究院	1995
32	万安水电厂	$4 \times 100 = 400$	电力自动化研究院	1997
33	大峡水电厂	$4 \times 75 + 24 = 324$	电力自动化研究院	1996
34	新丰江水电厂	$2 \times 85 + 2 \times 75 = 320$	电力自动化研究院	1994
35	沙溪口水电厂	$4 \times 75 = 300$	电力自动化研究院	1992
36	江垭水电厂	$3 \times 100 = 300$	电力自动化研究院	1998
37	宝珠寺水电厂	$4 \times 75 = 300$	中国水利水电科学研究院	1996
38	富春江水电厂	一期	中国水利水电科学研究院	1984
		二期	中国水利水电科学研究院	1990
		三期	电力自动化研究院	1998
39	紧水滩水电厂	$6 \times 50 = 300$	中国水利水电科学研究院	1997
40	太平驿水电厂	$4 \times 65 = 260$	电力自动化研究院	1997

第二节 水电厂计算机监控方式的演变

由于计算机监控设备在水电厂的推广应用，水电厂监控系统的监控方式也发生了变化。随着计算机技术的发展，计算机系统在水电厂监控系统中的作用及其与常规设备的关系也发生了变化，其演变过程大致如下。

一、以常规控制装置为主、计算机为辅的监控方式 (Computer-Aided Supervisory Control, 简称 CASC)

早期由于计算机价格比较贵，而且人们对它的可靠性不信任，因此，水电厂的直接控制功能仍由常规控制装置来完成，计算机只起监视、记录打印、经济运行计算、运行指导等作用。采用此方式时，对计算机可靠性的要求不是很高，即使计算机部分发生故障，水电厂的正常运行仍能维持，只是性能方面有所降低。采用这种控制方式的典型例子是伊泰普水电厂运行的初期（80年代上半期）。当时采用这种控制方式的理由是，根据巴西和巴拉圭的国情，认为采用计算机监控系统的经验还不够成熟，缺乏相应的技术力量，故而先采用能实现数据采集和监视记录等功能的计算机系统，而水电厂的控制仍由常规设备来完成。这样，可以为将来采用实现控制功能的系统作准备，同时可以减少前期的投资。后来，依泰普水电厂还是将它更新为具有复杂控制功能的、比较完善的计算机监控系统。

国内采用这种控制方式的典型例子是富春江水电厂综合自动化的一期工程（80年代上半期）。一期工程是一个实时监测系统，实现数据的采集和处理、提供机组经济运行指导和全厂运行状态的监视记录，计算机不直接作用于生产过程的控制。这在当时是合适的，后来已更新为能实现控制功能的比较完善的计算机监控系统。

这种控制方式的缺点是，功能和性能都比较低，并对整个水电厂自动化水平的提高有一定的限制，新建水电厂目前已很少采用。

对已运行的水电厂，在常规监控系统的基础上，加一点专用功能的全厂自动化装置，如自动巡回检测和数据采集装置，按水流或负荷调节经济运行装置等，也可取得很好的技术经济实效，投资也不大，不要求很高的运行管理水平，这种 CASC 方式还是可以采用的。国外有不少这样的实例。

二、计算机与常规控制装置双重监控方式 (Computer-Conventional Supervisory Control, 简称 CCSC)

随着计算机系统可靠性的提高和价格的下降以及人们对计算机实现监控的信任度的提高，让计算机直接参加控制已容易被人们所接受，但对它还是不够放心，所以出现了计算机与常规控制装置双重监控的方式。此时，水电厂要设置两套完整的控制系统，一套是以常规控制装置构成的系统，一套是以计算机构成的系统，相互之间基本上是独立的。两套控制系统之间可以切换，互为备用，可靠性是有保证的。采用这种方式的原因是：

(1) 有些用户，特别是大型水电厂，对计算机系统的可靠性仍有较大的顾虑，总觉得计算机系统没有常规系统可靠，心理上有障碍，要设一套常规系统作后备。

(2) 原来的水电厂运行值班人员习惯于常规设备的操作，不熟悉计算机系统的操作，要有一段适应过程。

(3) 计算机系统检修时，常规系统可以投入运行，不影响电厂的正常运行。

(4) 如果水电厂已有常规系统，加设计算机监控系统可以减少干扰，不影响电厂的正常运行。这一点对已运行水电厂的改造是有现实意义的。

国外采用这种方式的典型例子是美国邦纳维尔第二电厂（558MW）和巴斯康提抽水蓄能电厂（2100MW）。国内采用这种控制方式的典型例子是葛洲坝大江电厂（1750MW）和龙羊峡水电厂（1280MW）。

采用这种方式的缺点是：由于需要设置两套完整的控制系统，投资比较大；由于两套系统并存，相互之间要切换，二次接线复杂，可靠性反而有所降低。目前新建水电厂已很少采用这种控制方式。

三、以计算机为基础的监控方式 (Computer-Based Supervisory Control, 简称 CBSC)

随着计算机系统的可靠性进一步提高和价格的进一步下降，出现了以计算机为基础的监控系统。采用此方式时，常规控制部分可以大大简化，平时都采用计算机控制。因此，对计算机系统的可靠性要求就比较高，这可以采用冗余技术来解决，要保证系统某一单元

或某局部环节发生故障时，整个系统和电厂运行还能继续进行。

采用此种方式时，中控室仅设置计算机监控系统的值班员控制台，模拟屏已成为辅助监控手段，可以简化甚至取消。

国外采用这种方式的典型例子是美国的大古力水电厂、委内瑞拉的古里水电厂、法国的孟德齐克抽水蓄能电厂（920MW）等。国内采用这种方式的典型例子是漫湾水电厂（1250MW）。

这种控制方式是目前国内外水电厂采用的主要计算机控制方式。

四、取消常规设备的全计算机控制方式

随着计算机技术的进一步发展和水电厂计算机监控系统运行经验的累积，出现了以计算机为唯一监控设备的全计算机控制方式，实际上它是 CBSC 方式的延伸。此时，取消了中控室常规的集中控制设备，机旁也取消了自动操作盘。中控室还保留模拟显示屏，但其信息取自计算机系统，不考虑在机组控制单元（计算机型的）发生故障时进行机旁的自动操作。此时，对计算机系统的可靠性提出更高的要求，冗余度进一步要求提高。

采用这种方式的典型例子是我国隔河岩水电厂（1200MW），采用 CAE 公司的产品。这种方式投资比较大，但它有良好的应用前景。

第三节 水电厂计算机监控系统的功能

水电厂计算机监控系统需要实现的功能与水电厂的装机容量、机组台数、在电力系统中的重要性及承担任务的复杂性（如发电、航运、防洪、灌溉等）等因素有关。以下介绍它可能实现的功能，具体需要的功能要根据上述因素来确定，不能一概而定。

1. 数据的采集和处理

水电厂各运行设备的参数需要经常进行巡回检测，校核它们是否异常（越限），还要对数据库进行更新。这些参数有电量和非电量之分。电量包括 SDJ9—87 《电测量仪表装置设计技术规程》中规定的应在中控室监视的参数；非电量包括机组各轴承的油温及部分瓦温，机组的部分定子绕组和铁芯温度，机组冷却器的部分冷风和热风温度，机组的流量、振动、摆度，主变压器油温，上、下游水位和需监视启闭过程或位置的闸门开度等。

2. 开关量监视记录和事件顺序记录（Sequence Of Events, SOE）

监控系统需要监视记录的开关量有机组运行工况（停机、发电、调相、抽水等）、各断路器和隔离开关的位置信号、主要设备的事故和故障信号、监控系统的故障信号。事故、故障信号及重要位置状态信号一般采用带中断的输入，一旦这些信号发生变化，立即进行采集处理，并对断路器的位置信号、继电保护和安全自动装置的动作进行顺序记录，以便事后对事故进行分析。

3. 事故追忆和故障录波

发生事故时，对一些与事故有关的参数的历史值和事故期间的采样值进行显示和打

印，主要有重要线路的电压、电流、频率和机组的电压、电流等。

4. 正常的控制和操作

对全厂主要机电设备和风、水、油、厂用电等辅助系统的各种设备进行控制和操作。它们是机组工况的转换（如开机、停机、发电转调相、调相转发电、发电转抽水、抽水转发电等）、机组的同步并列、断路器和隔离开关的分合、机组辅助设备的操作、机组有功功率和无功功率的调整、变压器分接头有载调节等。

5. 紧急控制和恢复控制

机组发生事故和故障时应能自动跳闸和紧急停机。电力系统发生故障或失去大量负荷时（如频率过低或过高），能迅速采取校正措施和提高稳定措施，如增加机组出力，投入备用机组，将机组转入调相运行，切除机组等，使电力系统及时回到安全状态。当系统稳定后，进行恢复控制，使电厂恢复到事故前的运行工况。

6 自动发电控制（Automatic Generation Control，简称 AGC）

水电厂自动发电控制的任务是，在满足各项限制条件的前提下，以迅速、经济的方式控制整个水电厂的有功功率来满足电力系统的需要。控制整个水电厂的有功功率应包括机组的合理启停，它包含了实现水电厂的经济运行。其主要内容如下：

(1) 根据给定的水电厂需发功率，考虑调频和备用容量的需要，计算当前水头下水电厂的最佳运行机组数和组合；

(2) 根据水电厂供电的可靠性、设备（特别是机组）的实际安全和经济状况确定应运行机组的台号；

(3) 在应运行机组间实现负荷的经济分配；

(4) 校核各项限制条件，如机组空蚀振动区、下游最小流量、下游水位变化等，不满足时进行各种修正。

7. 自动电压控制（Automatic Voltage Control，简称 AVC）

自动电压控制是在满足水电厂和机组各种安全约束条件下，比较高压母线电压实测值和设定值，根据不同运行工况对全厂的机组作出实时决策（改变励磁），或改变联络变压器分接头有载调节位置，以维持高压母线电压的设定值，并合理分配厂内各机组的无功功率，尽量减少水电厂的功率消耗。

8. 人机接口

人机接口是运行人员对全厂生产过程进行安全监控，维修人员对监控系统进行管理、维修、开发的必需手段。它包括以下内容：

- (1) 系统控制权的设置和切换；
- (2) 机组及重要设备的状态设置；
- (3) 测点和设备的投运；
- (4) 参数整定值和限值的修改；
- (5) 电厂运行方式的设置和切换；
- (6) 调各种画面；
- (7) 各类打印和报表；

- (8) 操作票显示和在线修改；
- (9) 机组启停和工况转换操作；
- (10) 断路器及隔离开关的开断、关合操作；
- (11) 机组有功功率和无功功率的调整；
- (12) AGC 和 AVC 功能设置和参数设定；
- (13) 故障和事件报警处理。

9. 通信

监控系统应能与网调、梯调、水情测报系统、溢洪闸门控制系统、大坝安全监测系统、航运管理系统、厂内技术管理系统等实现通信。

监控系统内部通信，包括水电厂级与现地控制单元级之间及现地控制单元与调速器、励磁调节器、同步并列装置之间的通信。

10. 自诊断

应具备完善的自诊断能力，及时发现自身故障，并指出故障部位。还应具备自恢复功能，即当监控系统出现程序死锁或失控时，能自动恢复到原来正常运行状态。

11. 仿真培训

正常情况下，水电厂均由计算机监控系统进行监控，运行人员根本不进行什么操作，久而久之，他们对操作变得生疏，一旦需要，如监控系统发生故障，往往会不知所措，因此需要定期进行仿真培训，新来人员更是需要。

仿真培训功能是在不涉及水电厂生产设备的情况下，对水电厂运行和检修人员进行基本知识技能、模拟操作和事故处理等方面的培训，以提高水电厂人员的素质，保证水电厂安全运行。利用计算机仿真技术作为培训手段在水电厂日益获得重视，在不少水电厂上得到应用，如委内瑞拉的古里水电厂、我国的葛洲坝水电厂等。

12. 自动处理水电厂事故

这是一项难度极大、目前尚处于研究探讨阶段、但潜在意义极大的功能。

水电厂发生事故后往往需要在极短时间（几秒或几十秒）内对事故情况作出正确判断，及时采取有效措施，防止事故扩大，并转入安全工况运行。目前，这些均由运行人员进行人工处理。人的反应能力有一定的局限性，不可能在这么短的时间内掌握并处理大量信息，并对事故情况作出正确的判断，更谈不上采取及时有效的处理对策了。而事故处理的好坏在很大程度上又取决于运行人员的经验和临场处置的能力。特别在发生重大事故时，运行人员处于高度紧张的状态下，很容易发生失态现象，结果导致事故的进一步扩大，造成极其严重的后果。许多事例说明了这一问题的严重性。即使不发生失态，运行人员采取各项措施不一定都是最合适的。因此，需要建立一套科学的自动处理事故的手段，它是以科学规则和准则为基础的，自动寻找最佳的处置策略，以期达到最佳的效果。这样的手段无疑是水电厂广大人员极其欢迎的。

计算机的人工智能专家系统正是解决这类问题的良好帮手。它可以迅速地对收集到的每一个报警信息，根据其对事故的重要性和紧急程度进行相关处理和排除，把一些无关重要的信息屏蔽掉，再对剩下的信息进行综合分析。根据存在计算机内的操作规程、事故处

理规程、过去处理事故的经验和实例以及一些准则，推出相应的事故处理对策。

水电厂事故是千变万化的，有关的信息量是很大的，时间又那么紧迫，因此，进行自动处理事故工作的难度也是很大的。可以分几步走，先易后难，逐渐取得经验，进一步加以完善。先可以对一些较常出现的事故，事先拟定一些处理对策，存在计算机内。当出现这类事故时，自动推出对策，揭示给运行人员，由他们采取相应的行动，实现所谓的开环指导。我国葛洲坝二江电厂已经开始实现这种部分事故的开环指导处理，这项工作有待今后进一步深入研究和实践。

第四节 实现计算机监控可取得的效益

水电厂实现计算机监控后可取得以下几个主要的效益。

一、提高安全运行水平

安全运行是水电厂最重要的任务。为保证水电厂的安全运行，必须对水电厂的运行工况和设备进行经常的严密监测。

水电厂需要经常监测的信息量与水电厂容量和机组台数有关，大型水电厂的信息量可以多达数千甚至数万。如葛洲坝水电厂约有 2027 个模拟量、3132 个开关量和 134 个脉冲量；美国大古力水电厂 70 年代采用的计算机监控系统需监测的有 3500 个模拟量和 11000 个开关量。因人的反应能力有限，靠人工监视不能及时发现视问题，结果导致事故的发生。

计算机能迅速采集和处理大量信息，弥补了人的能力局限性，因而能迅速发现异常，以便及时采取措施，防止事故的发生，大大提高了水电厂安全运行的水平。这些是难以用量化的数据来表达的。

二、实现经济运行

水电厂实现自动发电控制以后，可以使水电厂经常处于优化工况下运行，达到多发、少耗水的目的。梯级水电厂实现全梯级优化运行后，可以进一步节约宝贵的水电资源，提高经济效益。苏联学者曾对可获得的经济效益进行了计算，结果表明可提高水能利用率约 4%。我国的一些计算表明，平均效益约为 1%。具体效益的大小随水电厂的类型而异，具有调节性能强的水库和负荷曲线变化大的水电厂的经济效益尤为显著。梯级水电厂实现经济运行后的效益更大，可达百分之几。

三、减少运行值班人员

水电厂采用计算机监控以后，监测和操作大多由计算机系统进行，运行值班人员只是在旁进行监视以及进行少量的键盘和鼠标操作，工作量大大减少，劳动强度大大减弱。因此，可以大大减少运行值班人员，有的水电厂甚至可以实现无人值班。主厂房一般可不设人值班，中控室只留一、两人值班。大型水电厂完全没有人值班在现阶段还是不合适的。

法国罗纳河由 12 个水电厂组成的梯级，总容量 2200MV·A，原有运行维修人员 700

人，实现计算机监控后，减为 150 人。美国石河段水电厂，总容量 1300MW 实现计算机控制后，每次值班只需 1 人。我国沙田水电厂，总容量 54MW，原来职工总数为 300 人，实现计算机控制后，减为 40 人，其中运行人员不到 20 人。广州抽水蓄能电厂（一期）中控室值班值仅 1 人，全厂定员 88 人。

运行值班人员减少后，相应的生活建筑和社会文化设施也可减少，从而大大节约投资。此外，减少值班人员不仅具有经济效益，而且有一定的社会效益。

我国目前正在大力推行“无人值班”（少人值守）的方式。

第五节 少人值班和“无人值班”（少人值守）问题

一、客观上需要水电厂实现少人值班或“无人值班”（少人值守）

随着国民经济的蓬勃发展，水电厂得到了大量兴建，我国西南和西北地区兴建了许多水电厂，今后还将建设更多的水电厂。这些水电厂大都位于深山峡谷，地理位置偏僻，远离城市，交通不便，文化设施较差，生活单调。水电厂不得不办起自己的医院、学校、幼儿园和电影院，几乎办成了一个小社会，相应的人员急剧增加。随着人民生活水平的提高，人们对生活质量的要求也提高了。他们不再满足于一般的物质要求，而有更高的要求，特别是精神文化方面的要求。出现了一系列尖锐的社会问题，如生病找不到好医院，看病难；年青人找对象难；孩子找不到好学校，读书升大学难。这导致职工不安心在水电厂工作，要求调到城市工作，工程技术人员尤其如此。结果大批工程技术人员流失，新毕业的大学生又不愿去，水电厂的生产出现了危机。这迫切要求提高水电厂自动化水平，实现计算机监控，大大减少水电厂生产人员和后勤人员，从而减轻这方面的压力。这就需电厂实现少人值班或“无人值班”（少人值守）。

二、无人值班和“无人值班”（少人值守）的含义

无人值班是指水电厂内没有经常值班人员，即不是全天 24h 内都有运行值班人员。一般又有两种方式：在家值班和远方集中值班；运行值班人员定期前往厂内巡视或有事应召前往厂内处理问题。

“无人值班”（少人值守）值班方式引入了“值班”和“值守”两个不同的概念。“值班”是指对水电厂运行的监视、操作调整等有关的运行值班工作。主要包括运行参数及状态的监视，机组的开、停、调相、抽水等工况转换操作，机组有功功率、无功功率的调整及必要时的电气接线操作切换等工作。“值守”则指一般的日常维护、巡视检查、检修管理、现场紧急事故处理及上级调度临时交办的其他有关工作。

“无人值班”（少人值守）的值班方式是指，水电厂内不需要经常 24h 都有人值班（一般在中控室）。其运行值班工作改由厂外的其他值班人员（一般是上级调度部门）负责，但在厂内仍保留少数 24h 在值守的人员，负责上述“值守”范围的工作。这是一种介于少人值班和无人值班之间的特殊值班方式。

三、国内外水电厂实现少人值班和无人值班的情况

前面已经介绍了一些工业发达国家水电厂实现少人值班和无人值班的概况。

瑞典国家电力公司下属 70 个水电厂，总容量 8970MW，水电厂从业人员 650 人，每兆瓦为 0.07 人。而我国水电厂人员较多，就以广东省电力公司下属 7 座常规水电厂为例，总容量 835.5MW，总人数为 2198 人，每兆瓦为 2.63 人。扣除服务人员外，每兆瓦为 2.03 人，远远大于工业发达国家的人数。

我们着重介绍法国是如何实现水电厂少人值班和无人值班的。法国绝大部分水电厂是无人值班的。470 座水电厂由 14 个控制中心（或水电厂）集中进行监控。监控方式分三种：

(1) 第一类是大型水电厂、梯级水电厂群或抽水蓄能电厂。这类水电厂装机容量和调节能力在电网中是举足轻重的，因此控制中心不仅要密切监视来自它们的信息，还要随时修正发给它们的给定值（需发功率）。

(2) 第二类是中型水电厂。控制中心向它们发送日负荷运行计划，由水电厂的监控设备在机组间分配负荷。

(3) 第三类是容量和调节能力均较小的水电厂。控制中心只对它们进行监视，不进行控制，由它们的监控设备自治运行。

无人值班水电厂在厂房内不设值班人员，但设有“强制在家值班”人员，负责一个或几个水电厂的紧急情况处理。值班人员必须留在离水电厂不太远的城镇的家中。水电厂发生事故时，水电厂监控设备通过电话系统接通在家值班人员的电话，用语音通报事故的性质和地点。如果需要的话，值班人员应赶到水电厂处理事故。发生事故时，第一类水电厂要求在家值班人员在 8min 内赶到现场，第二类水电厂为 20min，第三类水电厂则为 1h。

这几年来，我国已开始重视水电厂实现少人值班和“无人值班”（少人值守）的工作。上面提到的沙田水电厂就是一个例子。葛洲坝二江电厂实现“无人值班”（少人值守）后，职工总数（包括维护人员）已减为 167 人，每兆瓦为 0.17 人，并实现了集中检修。此外，还指定了一批“无人值班”（少人值守）的试点水电厂，它们是下苇甸、广州抽水蓄能、太平湾一长甸、龚嘴、映秀湾、万安、隔河岩、柘溪、鲁布革、白山和紧水滩等水电厂。

四、实现“无人值班”（少人值守）的条件和方式

实现“无人值班”（少人值守）的条件主要有：

(1) 电厂主辅设备安全可靠，能长期稳定运行。

(2) 电厂的基础自动化系统完善可靠。

(3) 已建立全厂自动化系统，通常是计算机监控系统，能实现监控、记录、调整控制等功能。

(4) 有一支素质良好的运行人员队伍，熟悉水电厂生产，勇于负责，能正确处理各种可能出现的事故。

(5) 要有一套完整的科学管理制度。

实现“无人值班”（少人值守）的主要方式有：

(1) 由梯级调度所（或集中控制中心）实现对梯级水电厂或水电厂群的集中监控，各被控电厂可以实现“无人值班”（少人值守），如梯级调度所（或集中控制中心）就设在其中一个水电厂，则该厂为少人值班水电厂。

(2) 由上级调度所（如网调、省调、地调）直接监控的水电厂，也可以实现“无人值班”（少人值守）。

(3) 有些较小的水电厂可以按水流（水位）或日负荷曲线自动运行，不需要水电厂值班人员，也不需上级调度值班人员的直接干预。因此，这些水电厂也可实现“无人值班”（少人值守）。

水电厂实现“无人值班”（少人值守）对水电厂的设计有较大影响。既然厂房，甚至中控室已经没有人，原先布置的那么多目测型表计是否还有必要？控制台和模拟显示屏是否还要？中控室面积是否还要那么大？一系列的问题有待进一步解决。

此外，还需指出，实现“无人值班”（少人值守）虽然有巨大的意义，但毕竟要增加许多投资，一定要实事求是，谨慎行事。千万不要赶时髦，造成前方减人，后方增人，只是将前方生产人员变成后方坐机关人员，水电厂总人数并没有显著减少，不但白白浪费了国家大量宝贵的资金，而且削弱了水电厂的安全生产。

参考文献

Special Report: Power Plant Automation, Power, 1995, No. 2

水电厂计算机 监控系统的结构和性能指标

第一节 水电厂计算机监控系统结构的演变

自 20 世纪 70 年代水电厂采用计算机监控系统以来，它的系统结构经历了以下演变过程。

一、集中式监控系统

早期，计算机比较贵，一般只能设一台计算机对全厂进行集中监控，称作集中式监控系统。这种系统的基本特点是不分层（不设采用计算机的现地控制级设备）。此时，由于只有一台计算机，一切计算处理都要在此进行，所有信息都要送到这里，所有操作、控制命令都要从此处发出，因而只要计算机一出故障，整个控制系统就瘫痪，只能改为手动控制运行，性能大大降低，这是集中监控系统的致命弱点。其次，由于所有信息都要送到这台计算机，现场需要敷设很多电缆，机组台数越多，电缆也越多，这不但增加了投资，而且降低了系统的可靠性，电缆及其接头容易发生故障，通信也是薄弱环节。

为了克服过分依赖一台计算机的缺点，可以增设第二台计算机作为备用，以提高整个系统的可靠性。这样，就出现了下面三种备用方式。

（一）冷备用方式 Cold Standby

此时，一台计算机为工作计算机，或称主计算机，另一台为备用计算机。平时备用计算机不参加生产过程的控制，只担任一些离线计算和程序开发等任务。一旦主计算机发生故障，备用计算机就启动或切换，进而取代出故障的主计算机对生产过程进行控制。但由于取代有一段过程，可能丢失一部分信息，在这一段过渡时间内，控制系统实际上处于停滞状态，这对实时控制是不利的。但它的优点是，备用计算机可以做一些别的工作，从资源合理利用角度来看，可能是合适的。

（二）温备用方式 Warm Standby

此时，备用计算机是经常运转的，在正常情况下只承担一些离线任务。它的存储器周期性地被来自主计算机的实时数据所更新，这可以通过周期性联接数据库、事件表和档案库来实现。

由于备用计算机不需启动，切换取代时间比较短，丢失数据的范围就比较小，但还不

能完全避免。此外，还存在下列危险，即可能接收切换前主计算机处理的错误数据。

(三) 热备用方式 (Hot Standby)

此时，两台计算机是并列运行的，执行同样的程序。来自生产过程的数据由两台计算机独立地进行处理。它们之间的差别是，只有主计算机的输出是真正接至生产过程的。如果主计算机发生故障，备用计算机可立即取而代之。这样就解决了丢失信息和接收错误信息的问题。但为此付出了一定代价，即备用计算机不再能承担离线任务。这种方式用在系统可靠性要求比较高的场合。随着计算机价格的下降，这种热备用方式用得比较普遍。如果不特别说明的话，主备用运行方式就是指的这种热备用运行方式。

采用集中式监控系统的典型例子是 20 世纪 70 年代研制的美国石河段水电厂计算机监控系统。石河段水电厂是一座水库库容较小，带峰荷的低水头径流式水电厂。总装机容量为 1300MW，有 11 台机组，其中 7 台为转桨式水轮发电机组，4 台为定桨式水轮发电机组。它采用一台 PDP-11/35 型小型计算机控制整个水电厂，机组本身的控制采用常规自动装置。计算机监控系统实现的功能有：

(1) 数据采集和处理。它包括测量、监视、报警、电能积算、事件记录和制表打印等。数据采集每 4s 执行一次，全部存入数据库。带中断的开关量可随时响应。

(2) 机组启停控制。这里指的是确定应运行的机组台数和台号，至于机组启停顺序控制是由机组本身的常规自动装置执行的。启停的原则是保持各台机组运行于最高效率附近 1% 的范围内。如果不在此范围内，就增开或停下一台机组。程序每隔 30s 执行一次。

(3) 机组有功功率的控制。每 3min 读一次上、下游水位值，根据这些水位值算出每台机最高效率对应的功率整定值。如果可能的话，使机组整定功率与此最高效率下的功率整定值相同。然后，将此整定值与机组实际功率进行比较，如差值超过规定死区，就调整机组功率直至差值在误差允许范围内。此程序每 4s 执行一次。

(4) 电压和无功功率的控制。此程序分两部分。首先调整各台机组的无功功率以减少母线电压与要求电压之间的偏差，每 8s 执行一次。第二步算出所需总无功功率（等于各台机组无功功率之和），将它按比例在机组间进行分配，每 15s 执行一次。这两部分任务交替反复执行，直至电压偏差和无功功率平衡均能得到满足时为止。

(5) 上游水位控制，即自动溢流。每 3min 采集一次上游水位和溢洪闸开度，计算是否需要泄放，溢洪闸门要开多少个，每个闸门开启多少，以维持水库有足够高的水位。误差信号是现有库水位减去最大允许库水位，如此误差为负，则不需开闸门，如果为正，则算出与此误差成正比的泄流量，根据此泄流量算出应开启闸门数和开度。

石河段水电厂集中式监控系统需要的投资少，为 50 万美元，而获得的经济效益十分显著。据报导，每年增加发电量 0.8%~6%，这与水头有关，平均为 3%。运行值班人员由 2 人降为 1 人。计算机监控系统的全部投资在 3 年内收回。

我国也有容量很小的水电厂采用这种系统。

总的来说，集中式监控系统可靠性比较低，虽然投资较少，但已经不大采用，只用在机组台数较少、控制功能简单的中小型水电厂。

二、功能分散式监控系统

随着计算机价格的下降和水电厂对监控系统可靠性要求的提高，为了克服上述集中式监控系统的部分缺点，出现了功能分散式监控系统。此时，计算机实现的各项功能不再由一台计算机来完成，而由多台计算机分别完成。各台计算机只负责完成某一项或一项以上的任务，结果出现了一系列完成专项功能的计算机，如数据采集用计算机、调整控制用计算机、事件记录用计算机、通信用计算机等。这是一种横向的分散，功能的分散，如果某一计算机出故障，只影响某一功能，而其他功能仍然可以实施，可靠性在某种程度上有所提高。由于功能分散，每台计算机的负载可以减少，一般均可由微机来承担。这样，就出现了多微机系统，即可用多台微机来完成原先由一台高性能小型机完成的任务，经济上也是合算的。

采用功能分散式监控系统的典型例子是 20 世纪 80 年代研制的我国葛洲坝二江电厂计算机监控系统。二江电厂总装机 965MW，有 7 台机组，均为转桨式水轮发电机组，其中 2 台各 170MW，5 台各 125MW，水电厂为低水头径流式水电厂。水电厂监控系统设有三套由微机组成的专功能装置，即电量记录装置、事件顺序记录装置和功率调节装置。机组的控制仍由常规自动装置完成。原设计二江电厂的一些复杂计算任务，如自动发电控制和自动电压控制等由大江电厂的计算机监控系统来完成。后来，由于二江电厂先于大江电厂发电，为了使二江电厂监控系统早日投运，增添了一台 PDP-11/24 型小型机，由它来实现自动发电控制和自动电压控制等功能。葛洲坝二江电厂早期的计算机监控系统的系统结构如图 2-1 所示。

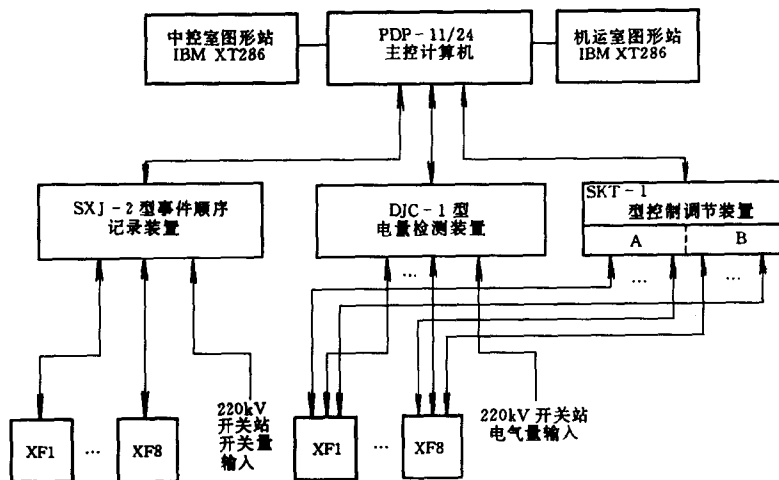


图 2-1 葛洲坝二江电厂计算机监控系统结构图

(1) 电量检测记录装置。它具有下列功能：正常电气参数的监测、打印和制表；越限或异常电气参数的监测、打印和制表；参量分析，如测量误差检出和报警；电气量历史性记录、事故追忆；图表显示；⑥电能脉冲量计算和转发；⑦与上级计算机的信

息交换。

(2) 事件顺序记录装置。它具有下列功能：及时反映生产过程中出现的事故、故障的性质、开关动作顺序和发生时间；显示事故、故障的复位信号；显示和记录正常操作的性质和时间；显示系统主接线，用彩色区别电压等级和机组运行工况；制订交接班记录等。

(3) 功率调节装置。它的主要功能是接收上位机下达的控制命令，向各台机发出开机或停机命令，调整各台机组的有功功率和无功功率。

监控系统的输入、输出信号量见表 2-1。

表 2-1 二江电厂实时计算机监控系统输入、输出容量及主要技术参数

名称	信号量	技术参数	接入方式
中断开关量	512	分辨率 1ms	有源接点、无源空接点
非中断开关量	512	分辨率 1ms	无源空接点
电气模拟量	128	采样周期 2s, 精度 0.5%	0~5V
交流量	16	采样周期 1ms	交流 100V、1A、5A
脉冲量	48	脉宽 >60ms	无源空接点
数码量	4	8 位 BCD 码	光隔
开关量输出	24	脉宽 1s	无源空接点输出
脉冲量输出	14	可变脉宽	有源接点输出

功能分散式计算机监控系统仍没有解决集中式监控系统的所有问题。如某个功能装置计算机故障，则全厂的这部分功能均将丧失，影响较大；而且仍然没有解决要将所有信息集中到一处（用电缆）所带来的问题；系统可靠性仍然不很高。因此，功能分散式监控系统目前已经很少采用。

三、分层分布式监控系统

上述信息过于集中的矛盾可以用分布处理的方式来解决。水电厂采用的处理通常是与分层控制结合在一起的，因而它实质上是一种分层分布式监控系统。

分层分布式监控系统在地域上是分散的，即按控制对象进行分散。水电厂的控制对象是水轮发电机组、开关站、公用设备、溢洪闸门等。按控制对象设置单独的控制单元，称作现地控制单元，它们是由微机或可编程控制器构成，组成了现地控制级（或称现地控制层）。电厂控制级（层）也设计计算机，它负责一些全厂性功能。电厂控制级本身也可以是一个功能分散的系统，由多台计算机组成。此时，某个机组控制单元发生故障，只影响这一台机组，而不影响整个电厂的运行。由于信息进行了分布处理，即各台机组的信息由各台机组控制单元进行处理，就不必敷设许多电缆将信息送到一处集中处理了，可以节省相应的投资。由于以上两方面的原因，整个系统的可靠性也得到显著的提高。

由于分层分布式监控系统有以上的优点，它已取代其他两种类型而成为水电厂监控系统的主要类型。这些年来新投运的水电厂监控系统几乎都采用分层分布式的。DL/T5065—1996 明确指出：“监控系统宜采用分层分布式结构，分设负责全厂集中监控任务的电厂级及完成机组、开关站和公用设备等监控任务的现地控制级。”下一节我们详细介绍水电厂的分层分布式监控系统。