

《科技情报》调研报告

控—12

\*\*\*\*\*  
\*  
\*  
\* 国外在线计算机在反应堆中应用概况 \*  
\*  
\*  
\*\*\*\*\*

第二研究设计院

一九七二年十一月

## 毛 主 席 语 录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

### 内 容

- 一、引言
- 二、在线计算机在反应堆运行控制中的应用
- 三、计算机系统的可靠性和反应堆的安全性
- 四、反应堆中使用的计算机系统的主要性能
- 五、结束语

## 一、引言

在早期的反应堆中，为保证其安全运转，一般均采用常规的仪表和控制技术。随着各种功能的反应堆特别是核动力堆的发展，需要监测的参量多达几千个以上，控制的功能也相当复杂，为保证其安全有效地运行，在线计算机的应用更为迫切了。

反应堆中所以要广泛采用在线计算机，主要是出于提高运行的经济性和安全性的考虑。

由于在线计算机具有快速而强大的计算功能，使最经济地利用反应堆的活性区成为可能，同时这种功能也被扩大到蒸汽发生器、透平、冷凝器等辅助设备方面。当然有些活性区的最佳化计算可以从仪表上收集到的数据在离线的计算机上进行，但是由于时间的延误，不能及时调整设备的运行工况而大为逊色了。其定量的经济得益未见报导，但这个无形的优点远远超过由于采用计算机系统所带来的投资的增加。对于研究和试验堆来讲，由于在线计算机有效的数据收集和快速分析成为可能，因而可以从及早地利用更多的试验结果中得到好处，据报导，英国原子能管理局（UKAEA）的VERA和VIPER试验堆上，用了在线计算机，每年可节省20个工作日，即相当于得益20000英镑。

对于大型的核电站有大量的参数需要监督，处理和控制在，例如英国的伍尔法（Wylfa）气冷堆电站，需测的量在9000个左右（包括二个反应堆的模拟和数字输入量），假如不在集中的中央控制间利用计算机对其进行监督和控制，就不可能安全运转。另外，用可靠的计算机来替代操作人员进行反应堆的自启动，装卸料车的复杂的程序控制，对于提高其安全性来讲是很有意义的。

除此以外，利用计算机还可以给操纵人员提供特殊的显示方式，改变使用要求时灵活方便以及节省人力等方面的优点，而采用常规技术，

这些优点是无法获得的。

美国于1954年开始在航空核动力(GE ANP)中就采用IBM 650计算机处理来自1200个左右的测点数据了,其后在汉福特、SNAP、希平港的反应堆上采用了计算机。英国和法国也于60年代初期于勃兰德威尔(Bradwell)、贝克莱(Berkely),和EDF-1等动力堆上使用了计算机。从1968年9月在挪威Sanderford召开的由欧洲核能机构组织的“在线计算机在核反应堆中的应用”会议上发表的文章来看,60年代后期设计或建设的反应堆和核电站基本上都采用了在线计算机控制了。而且随着运行经验的积累,控制技术的发展以及所能提供的计算机功能的扩大和可靠性的提高,计算机的使用范围也在不断扩大。附表中分别列举了60年代运行设计的一些动力堆和研究、试验堆中使用计算机的情况。

国外一般电子计算机在反应堆中的应用分成三个阶段,即(1)数据处理阶段,(2)监督控制阶段,(3)直接数字控制阶段。由于前两阶段较难区分,也可简单分为(1)数据处理和(2)直接数字控制二个阶段。从附表看来,目前基本上处于数据处理阶段,即计算机进行数据的收集,记录和各種处理,为操纵人员提供良好的运行信息而不直接参与控制。但也有一些反应堆已较好地建立了计算机直接数字控制系统。对于这个问题,目前各国看法不一,因而采用的步骤有快有慢,使用的范围也不一样,留待下节叙述。

## 二、在线计算机在反应堆运行控制中的应用

使用在线计算机的任务是提供更为良好的运行信息和实现完善的控制功能。随着反应堆运行经验的积累和计算机技术的发展,近年来在这两方面有着很大的改进和发展。主要是:

### 1. 测量值和报警信息的显示

## 2. 报警分析和报警探测

## 3. 数据记录

## 4. 计算

## 5. 反应堆自启动

## 6. 程序控制

## 7. 直接数字控制

### 1. 测量值和报警信息的显示

早期运行的反应堆中，测值和报警的显示的设备是打印机、字码管和刻有报警内容的光字牌。由于打印机的可靠性差、噪音大、速度慢，字码管和光字牌布置困难（数量大），运行不方便，以及显示方式的局限性，不能满足运行的需要。在线计算机的使用，使具有良好显示功能的阴极射线管（CRT）显示成为可能了。目前国外反应堆上用的较普遍。如美国的F、F T F、H T L T R试验堆，英国的奥特勃兰（Oldbury）、伍尔法（Wylfa）、丹季尼斯‘B’（Dungeness‘B’）、亨克利‘B’（Hinkley‘B’）等动力堆和VERA、VIPER试验堆，加拿大的NRU研究堆，Gentilly 动力堆、瑞典的Marviken 动力堆，西德的Obrigheim 动力堆，丹麦的DR2，挪威的HBWR，日本的TTR等研究试验堆都已分别采用。

阴极射线管的对角线尺寸有53cm、43cm、36cm、22cm……等多种规格。体积小，可以直接装于操纵台上，按操纵员的需要或发生报警时自动地在萤光屏上显示各种参数，文字或图形，非常方便地给操纵员提供各种信息。同时使控制间布置紧凑，利于集中控制。

阴极射线管显示由一系列的字码所组成，按照指令来确定所需字码

的位置，字码本身按照输入信息在字码发生器中产生，形成的字码光束在萤光屏上显示出来，通常产生一个字码为 $12\mu s$ 左右，也可产生各种图形，显示图象的重复频率为每秒 $12\sim 16$ 次。

阴极射线管在反应堆中的主要显示功能为

(1)显示参数值。一般为表格形式，为一组组的帧幅，按需要来选择，见图1。

(2)显示报警内容。报警出现时，按次在专门的阴极射线管上以文字形式显示出来。

(3)显示各种图形。

a、以座标形式显示参数—时间的关系，见图2。

b、以分布图形式显示，见图3、4。

c、以线段长度形式显示，见图5。

除了上述的阴极射线管外，美国在H T L T R堆上用了一种 $17''$ 的三色显示管。目前在国外还在研究一种固态显示装置。

## 2.报警分析和报警探测

大型动力堆的报警信号，数量大，情况复杂，单靠在阴极射线管上显示所有报警，操纵员不易及时准确判断产生报警的真正原因，以致所采取的措施不是错误就是延滞，甚至导致不必要的停堆，对于有效地运行和设备的安全都是极为不利的。1965年英国在奥特勃兰核电站上首先进行了报警分析的研究试验工作，取得运行经验后，在其后设计建造的伍尔法，亨克利‘B’、丹季尼斯‘B’都采用了。

报警分析就是在总结以往核电站运行经验的基础上，总结出一套分析和处理故障的规律作为标准（文献中叫做报警树或报警模型），存贮于计算机中，和实际出现的报警情况进行逻辑比较，然后给操纵员显示

出产生故障的原因以及应采取的措施，而那些不必要的有关报警，就不再显示出来，这样给操纵员的报警信息大为简化了。

以一个轴承润滑系统的报警分析为例，简单说明如下。

当供电电源故障时，引起一系列报警：电源电压下降，马达停车，压力下降，流量下降，最后是轴承温度升高。报警分析的结果把产生的原因和应采取的措施显示为：报警内容：A盘电压下降，操作建议：A盘切换到各用电源

其余报警可以不显示出来。若操纵员还须知道，可经人为操作令其显示出来。

这样的系统也能产生一个推论出来的报警。如在本例中，假如只有流量下降和轴承温度升高的报警，可以推论出故障原因是过滤器堵塞，而这个报警是无法直接测得的，同时向操纵员推荐相应的操作。

这样，可极大地减轻操纵员分析处理故障的工作和减少那些不必要的报警对操纵员的干扰。报警分析的最终目标是能实现自动的事故处理，目前还只能做到找出报警的主要原因和推荐相应的操作，仍须通过操纵

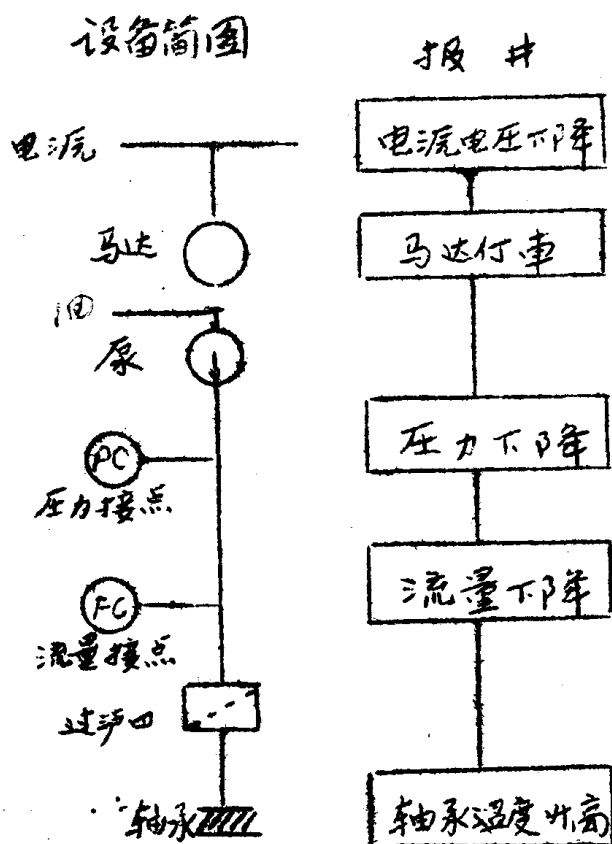


图6 报警分析例各

人员判断后采取处理措施。

燃料元件的包壳破损探测，对于反应堆的安全运行极为重要。具有几万块燃料元件的反应堆中任何一块元件的包壳破损都是不容许的，必须及时准确地判断和处理。目前在气冷堆上用得较多的是气体法，主要是测量各孔道中元件包壳在破损时洩漏出的放射性气体多少来确定。探测的主要困难在于正常情况下的‘本底’放射性是反应堆功率、温度、运行时间的函数，而元件包壳破损后洩漏出来的裂变气体量与破损类型（如快破损、慢破损）探测时间有关，加之放射性计数率又是按统计涨落规律出现的。为此，法国早于1961年在EDF-1动力堆上采用了RW300型电子计算机，按次检测各孔道的放射性值，进行校正运算后，确定燃料元件包壳破损的大小和位置。其后在EDF-2、EDF-3、Bugey1等反应堆上都有相似的系统。差不多同时，英国在贝克莱反应堆采用了数字计算机，用检测到的各孔道放射性值同本管道以往的各种测值进行不同方式的比较，从而确定元件包壳破损的大小和位置。在其后的十、八个动力堆中，也都用计算机来进行探测。

### 3. 数据记录：

作为长期保存和分析用的记录装置是各类打印机（如条式打印机、制表机等）和穿孔机。按不同用途，有以下几种：

(1) 例行记录：按照对不同参数的要求，每小时，每天或每月打印制表一次。

(2) 报警记录：出现报警时，将有关数据立即自动打印出来。

(3) 趋势记录：对所选定的若干个参数，将其某一时间间隔内（如30秒、60秒、5分钟或几小时）的数值全部打印出来。

(4) 按命令记录：按操纵员的命令，记录下所需要的值。

(5) 穿孔输出：主要是供进一步离线运算分析之用。

除上述几种记录功能外，对于反应堆的事故分析具有特别重要意义的是“事故后记录”（post-incident record）。所谓“事故后记录”是一旦反应堆或其他主要设备事故停车时，计算机能将事故前、后若干时间内某些状态参数全部打印出来供进一步分析之用。在英国反应堆中以下二种记录方式是有代表性的：

△打印出事故前35分钟到事故后5分钟内所贮存的3000个读数。

△打印出事故前2分钟到事故后1分钟内所贮存的1000个读数。

基于打印机有可动的机械部分，它是整个计算机系统最薄弱环节，目前正在研究用照相、干式印刷等方式来替代。

### 4. 计算：

在线计算机用于反应堆能获得经济效果的主要方面是对运行中的反应堆和其他主要设备的性能不断计算，操纵员根据计算结果不断调整运行状态使之在最佳情况下运行。合理地确定燃料更换计划，也是一个重要方面。美国的Big Rock Point 沸水堆由于利用计算机的计算结

果来调整运行，提高燃耗达10%。

从1963年5月美国在第一个Big Rock Point沸水堆上使用在线计算机以来，其后意大利的Garigliano沸水堆，西德的KRB KWW 沸水堆，直到美国1970年投入运行的Dresden第二、三号单元所用的在线计算机的计算功能大致相同，主要有：

堆芯功率分布

堆芯流量分布

极限功率密度

临界热流比

计算氙的量以预测反应性的变化

达到临界时控制棒位置的预测

燃料的辐照

辐照燃料同位素的成分

堆芯仪表装置的检修计划

其它计算（如电站效率、冷凝器性能、给水加热器性能等）

必须指出，核性能计算的关键在于从局部的堆芯通量探测器的测值、控制棒位置、循环水流量和堆功率输出这些输入量来精确地决定堆芯功率分布，对于各堆芯探测器之间的区域用扩展技术来计算。一旦确定功率分布后，其它堆芯参数较容易地推导。如燃料辐照和燃料同位素成分对于燃料循环分析是极为重要的，燃料辐照可由堆芯产生的总热功率和堆芯功率分布进行计算，燃料中的同位素成分从同位素—辐照曲线推导得来。如意大利的Garigliano沸水堆，为了计算目的将活性区理想地分为2048个节点来计算，每隔一小时修正一次。

由于精确地了解了功率峰值因子，从而提高堆芯功率密度成为可能。在压水堆、气冷堆上，计算功能虽不如沸水堆突出，但也是极为重要的。

目前由于计算机能力和检测技术的改进，在计算的物理模型、数学方法更好地精确描述方面也在不断改进。

#### 5. 反应堆的自启动

反应堆的启动是安全运行中极为重要的一环，对于起停频繁的试验堆或某些动力堆，缩短启动时间也有着重要的意义。利用计算机在启动前检查各设备是否处于堆启动所必备的条件，在提棒的启动过程中不断监督堆的功率水平和周期，以最快的速度安全达到功率运行区，这样可以避免由于操纵人员的疏忽可能造成的事故或者过于谨慎导致不必要的启动过程的延长。

日本的TTR、JRR-1、HTR等试验堆，于60年左右都已先后用在线计算机实现自启动，英、法、加拿大等目前正在建设的一些反应堆中，也考虑了由计算机来实现自启动。

目前在反应堆启动方面用的更多的是用计算机计算，预测出反应性（如计算氙的重），并算出达到临界时控制棒应有的位置。操纵人员以这些预测值为参考，进行启动，获得良好效果。

#### 6. 程序控制：

在反应堆中还有一些专门的设备或系统，如装卸料机，通量扫描测量系统，燃料元件包壳破损探测的控制等，其工作环境恶劣（高温、强放射性下工作），操作程序复杂，目前也有用计算机进行远距离控制的。

法国的M L4和Bugey1反应堆，都分别设置了专门的计算机控制装卸料机，加拿大的Pickering、Gentilly反应堆的计算机也具有这个功能。

英国伍尔法动力堆的燃料元件破损探测系统中，用计算机控制：组系统积分器量程、单管采样扫描、破损定位扫描、跟踪系统和温度测量等。

丹季尼斯<sup>6</sup> B<sup>7</sup> 动力堆中，为了测量反应堆的轴向通量分布，从测量用的滚珠放入堆芯辐照、自堆芯取出、环形游标室和放大器的校零检验、辐照前后放射性的测量和修正，直到滚珠的存放入专门存贮器的操作，也都由计算机来进行控制。

## 2. 直接数字控制

反应堆的主要控制回路是功率控制和堆芯功率分布控制（防止空间振荡和展平通量）。对于核电站来讲，功率控制中包括冷却剂质量流量、冷却剂温度和蒸汽温度、蒸汽压力、蒸汽发生器冷却水流量等控制回路。目前一般都采用模拟控制器。加拿大、日本等在这方面进行了直接数字控制的工作，取得了一定的经验。

加拿大于1963年在NRU研究堆上安装了两台（PDP-5，PDP-4）计算机，其任务之一是连续调查中子通量模拟控制器的整定值以保持堆的出口温度恒定，这是向直接数字控制接近的一步。其后于1966年在道格拉斯点（Douglas Point）重水动力堆上（PWR型，电功率200MW）安装的CDC-636计算机，则进而根据堆芯温度发送器的信号直接进行功率分布的控制，而快速的功率调节仍由模拟控制器控制慢化剂的液位来实现。（功率定值由计算机调整）。此外，计算机还与反应堆的安全系统相连，只有当同一管道中常规仪表测出的低流量和计算机送出的高出口温度同时发生时才发出停堆信号以改善电站的利用率，但假如计算机不起作用，低流量报警仍能自动地停堆。（见图7）

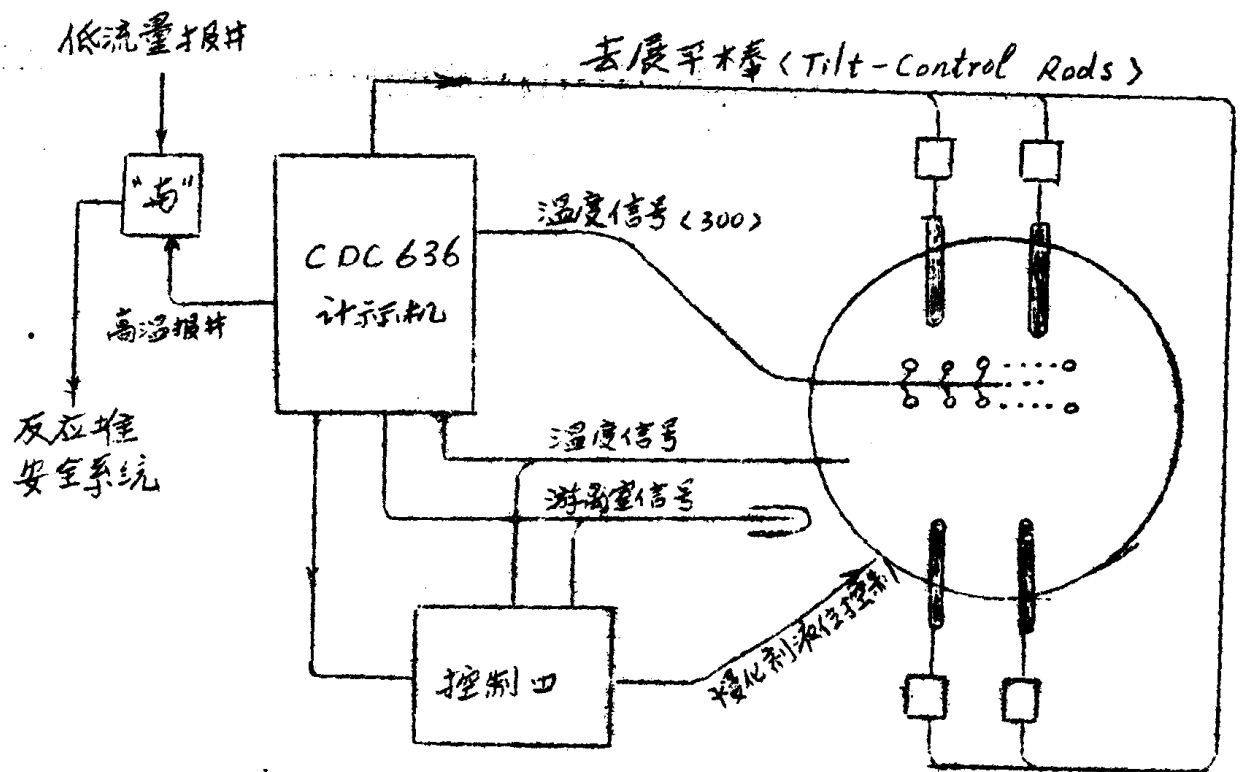


图 7. 道格拉斯点计算机系统

新建的 Pickering 核电站 (有四个堆, 功率为  $4 \times 500\text{MW}(\text{e})$  重水慢化重水冷却, PWR 型, 天然铀) 和 Gentilly 核电站 ( $250\text{MW}(\text{e})$  重水慢化, 轻水冷却, BWR 型) 则几乎所有与反应堆相连的主要控制回路都通过数字计算机构成闭环控制了。

以 Gentilly 电站为例: (见图 8)

由于反应堆的反应性有正的空穴系数, 直接用计算机控制 16 根附加棒来粗略调节反应性。六个主管的冷却剂流量阀也作为一个功率的函数来控制。

堆功率的连续调节用七根吸收棒来调整, 用的是数字步进马达来驱动。信号来源是游离子和热工信号的组合。

为了空间控制的目的, 由 40 个燃料孔道测得的蒸汽含量 (从而测知孔道功率) 来分别调节七个区域中的控制棒来达到。

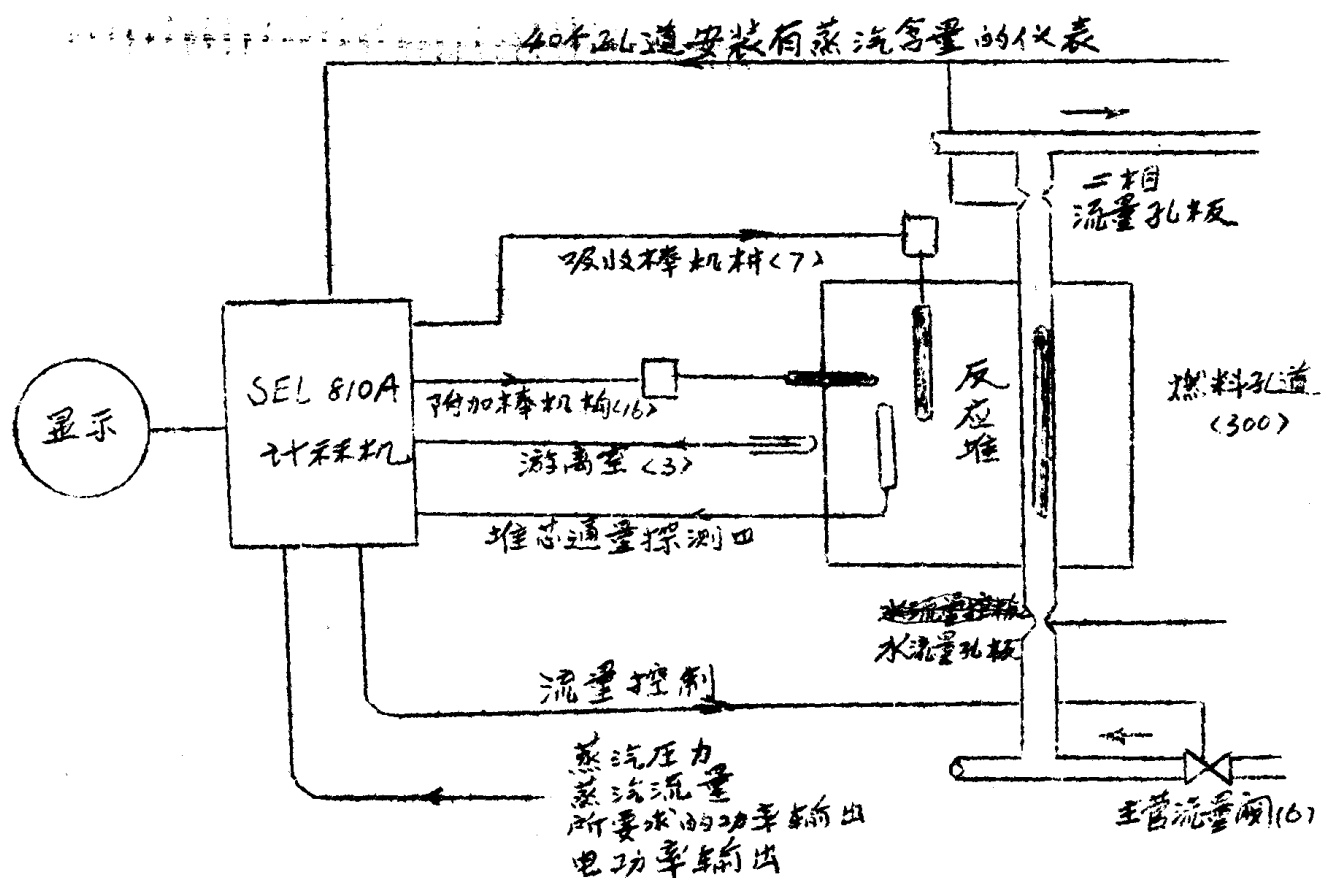


图 8. Gentilly 的计算机系统.

综上所述，功能 1~4 是给操纵人员提供良好的运行信息，而功能 5~7 则实现完善的控制功能。在反应堆上使用在线计算机是开环运行（提供运行信息而不直接参与控制）还是闭环运行（直接参与控制）国外有不同看法。

如英国认为，尽管模拟控制系统能满足反应堆运行的要求，但回路本身有相当的电子设备，为保证其可靠性，一般都安装有备用控制回路，对于已经使用了可靠的在计算机的反应堆来讲，扩大成直接数字控制以替代常规设备，在经济上是有很大吸引力的。

西德美国等有些人认为，在动力水堆上，计算机目前应按“在线开环”使用，主要出于安全性，设备利用率和价格三方面的考虑。目前的计算机系统利用率在99%以上，故障间平均时间（亦称平均无故障时间，即MTBF）为几千小时，但仍不能替代目前的标准安全系统，即使采用双机系统，能否保证安全运行也还有怀疑；其次是由于闭环所带来的设备利用率的增加是不大的，因为由在线计算机提供给操纵员的信息和直接数字控制相比，其时间延带所带来的经济损失对于核电站来讲是微不足道的；第三计算机的价格尚较常规仪表为贵，以英国的AGR型动力堆为例，常规仪表控制系统的投资为652200英镑，而采用计算机系统（包括DDC）的投资为750000英镑。

如何提供良好的运行信息，由于堆型不同各国也不尽相同。在英国的气冷堆上，为确保安全运行，用计算机进行报警探测、报警分析、信息显示方式等做了大量的研究工作，而美国、西德、意大利等的水堆上，着重于堆的核性能的在线计算，为操纵员提供最佳运行的指导以获得良好的经济效果。

### 三、计算机系统的可靠性和反应堆的安全性

#### 1. 计算机系统的可靠性

由于大量的数据处理及控制功能集中在一个计算机系统里，重要部件的故障意味着大量的甚至全部功能的损失。在各类试验堆上，计算机系统的停车将导致实验计划的延迟，有些按“在线开环”原则运行的动力堆，计算机系统故障后虽然仍能保持运转，但将导致出力减少，效率降低；至于那些计算机系统与反应堆系统组成一个整体的堆来讲，前者的故障若在短期内（如半小时）不能修复，必须立即停堆，其经济损失更为严重，按英国的计算，每停堆一小时将损失1000英镑。

据英国报导，典型的故障间平均时间为1000~5000小时（除打印机外）利用率为99.6%以上。加拿大NRU堆上的计算机运行了40000小时，故障间平均时间为2300小时。英国的伍尔法核电站利用率可望达到99.9%（据报导，中央处理单元等安装完毕后，进行了2000小时的可靠性检验运行，利用率达99.98%）。丹季尼斯“B”的故障间平均时间可望达到14000小时，利用率为99.8%。鉴于可靠性的重要性，国外近年来进行了大量研究试验工作，目前主要从两个途径来解决，一是提高计算机本身的可靠性，二是用备份和分集（diversity）的方法。前者属于计算机制造问题这里不作详述。

对于那些由于故障会使整个系统损失功能的部分如中央处理单元（或叫计算机），外存贮器，主电源发电机组等，都备有备份。就中央处理单元而言，目前采用的有双计算机系统和多计算机系统。双机系统是反应堆正常运转时，全部输入输出设备通过公共通道系统由一台计算机承担全部工作，并有例行试验程序检查其是否正常工作，一旦发生故障，自动切换器切向备用计算机。对于具有二个反应堆的核电站来讲，有采用三机系统的正常运行时，每个反应堆对应有一台计算机，两个系统独立的工作，第三台计算机为备用，假如两台计算机中的一台故障，

备用机自动投入工作。例如英国的伍尔法用的是双机系统,丹季尼斯“B”是三机系统。

在那些提供100%备份不经济的地方,则采用分集的方法。例如将输入信号分为若干小组(如每个扫描器为500个输入)输入信号是这样分配的,当某一扫描器故障,所丢失的信息不至严重到需要反应堆停止工作的程度。这个原则也用于打印机或阴极射线管显示系统。

尽管采用备份和分集的方法以提高故障间平均时间和缩小故障范围,但更有希望的是发展一种“多元”计算机(“Polymorphic”Computer)当发生故障时仅使“故障缓和”(Fail Soft)或者“优度减退”(graceful degradation)而不是突然停机,这种系统目前正在研究中。

## 2. 反应堆的安全性

确保反应堆的安全是头等<sup>重</sup>要的事。正因为如此,到目前为止所看到的反应堆系统都安装有从发送器到动作电路的安全独立的安全保护系统而不被计算机系统所代替。在有些情况下,能从计算机获得更为有效的保护信号送入安全保护系统时,两者间的隔离必须妥善考虑。

此外,在反应堆系统中仍保留一定数量的常规仪表和控制设备,以备在完全失去计算机功能的事故情况下能完成下述职能:

- (1)在负载不变的情况下短期运行
- (2)安全停堆
- (3)维持反应堆在停堆状态中。