

AP1000 核岛厂房模块化布置特点分析

刘佩, 刘昱, 曹小伟

(中广核工程设计有限公司, 上海 200030)

摘要: 核岛厂房是整个核电厂最关键的建筑物, 合理的厂房布置设计对提高核电厂的安全性、经济性有着至关重要的影响。本文介绍了第三代压水堆核电机组 AP1000 核岛厂房的布置情况, 并结合 AP1000 核岛厂房模块化布置特点与目前二代加改进型核电机组 CPR1000 核岛布置进行了比较分析, 为当前 AP1000 机组核岛厂房布置模块化设计优化提供了参考。

关键词: AP1000; 核岛厂房; 模块化

Analysis on the feature of nuclear island modularization arrangement of AP1000

LIU Pei, LIU Yu, CAO Xiaowei

(China Nuclear Power Design Company, Shanghai 200030)

Abstract: Nuclear island building is one of the most important structures of the whole nuclear power plant, thus reasonable arrangement design has significant influence on safety and economics of the plant. Arrangement of 3rd generation reactor AP1000 is introduced. According to the feature of modularization of AP1000, arrangement is also compared to the traditional arrangement of CPR1000, to provide reference for design improvement of AP1000 modular.

Key words: AP1000; nuclear island building; modularization

引言

核电工程的模块化建造技术是核电厂缩短建造工期、降低造价、提高经济性的重要手段, 也是第三代核电机组 AP1000 先进性的重要标志之一。模块化是一种先进的设计理念, 它的最大优点是可以通过减少在现场的施工量而缩短核电的建设工期^[1-5], 同时, 采用模块化后, 大量的施工工作在制造厂完成, 可以更好地保证施工质量。随着世界首台 AP1000 核电机组落户中国三门, 模块化技术开始在压水堆核电厂中第一次大规模应用^[6-8], 如何正确掌握核岛模块化布置技术, 已成为消化、吸收 AP1000 核电技术的重点工作之一。本文对 AP1000 核岛厂房布置情况进行了介绍, 并结合 AP1000 核岛厂房模块化布置特点与目前二代加改进型核电机组 CPR1000 核岛布置进行了比较分析。

1 AP1000 核岛厂房布置

AP1000 机组主要厂房分为五部分: 核岛 (反应堆厂房和核辅助厂房)、汽轮机厂房、附属厂房、放射性废物厂房和柴油发电机厂房。反应堆厂房又由安全壳厂房和屏蔽厂房组成, 如图 1 所示。

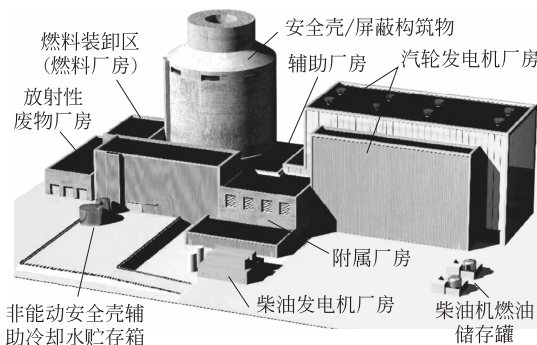


图 1 AP1000 机组主要厂房布置

安全壳厂房、屏蔽厂房及核辅助厂房三部分组成了核岛厂房，这三部分厂房共同布置在同一个底板基础上，在总平面布置中属于安全相关构筑物^[9-10]。

1.1 安全壳厂房

安全壳厂房为抗震Ⅰ类建筑，是一个具有独立支撑并带有上下椭圆形封头的圆柱体钢壳。安全壳厂房包括了钢制安全壳容器和包含在钢制安全壳内的结构物。安全壳厂房是一个容纳了所有安全壳内系统的整体结构，其功能是为容纳假想设计基准事故后产生的放射性物质的释放以及在正常运行状态下为堆芯和反应堆冷却剂系统提供屏障。它包容了一回路带有放射性物质的所有设备，以防止放射性物质向外扩散。

1.2 屏蔽厂房

屏蔽厂房是环绕安全壳容器的构筑物，为抗震Ⅰ类钢筋混凝土结构，分为屋顶结构和圆柱结构，屋顶为圆锥形钢筋混凝土结构，圆柱结构分为上环区、中环区和下环区三个部分，圆柱外直径约为 44m，壁厚约为 0.9m。电站正常运行时，屏蔽厂房为安全壳容器及位于安全壳厂房内的放射性系统和部件提供屏蔽，同时保护安全壳容器避免受到外部事件的伤害。

1.3 核辅助厂房

核辅助厂房为抗震Ⅰ类钢筋混凝土结构，同屏蔽厂房 70% 的圆柱外面相连，核辅助厂房室内楼板和结构墙与屏蔽厂房的圆柱在结构上相连接，厂房共分为 7 层，大部分核辅助系统布置在这里，同时厂房内设置了吊装孔、各类吊车、人员通道等以方便设备运输、维修和燃料转运与处置的操作设施。

2 AP1000 模块分类

在西屋公司 AP1000 的设计中，按照电厂模块化设计原则将模块分为结构模块和设备模块，此外钢制安全壳（CV）的制造与施工工艺也采用了模块化技术。

AP1000 模块化原始设计中初步划分了 178 个模块，分布在反应堆厂房、核辅助厂房、附属厂房以及汽轮机厂房^[7,9,11]，如表 1 所示。

2.1 结构模块

结构模块用在一些储水箱、基坑衬板、屏蔽墙及其他建筑结构上，这些模块可以在厂外工厂里预制成为子模块，然后运输到现场进行组装，在模块安装之前，装配上管道、导线、梯子等附

件。在 AP1000 核电厂中，根据功能不同，建筑结构模块又可分为以下几类：CA 模块、CB 模块、CH 模块和 CS 模块。

表 1 AP1000 模块的数量与分布

序号	厂房名称	机械模块	结构模块	合计	备注
1	反应堆厂房	15	55	70	
2	核辅助厂房	48	43	91	
3	附属厂房		10	10	单堆计
4	汽轮机厂房	7		7	
5	合计	70	108	178	

CA 模块是钢板模块表面浇筑混凝土，或者安装好之后在模块里面浇筑混凝土。这种模块的强度主要利用钢构件与混凝土的组合效应，它取代传统的钢筋与模板。

CB 模块类似于土建灌浆时所用的模板，但灌浆之后不需要拆除，这种模块用于取代电厂密集区域的建造模板，同时可以为支撑及设备提供锚固点。这些模块大多被用于分割房间和周围的墙体，当墙体钢筋编制完成后，只要将这种 CB 模块吊装就位，就能把墙体与房间分隔开，此时墙体一侧就可以进行灌浆，而不会影响房间另一侧的安装或调试工作。

CH 模块是钢结构组合，模块用的结构钢与非模块工程用钢基本一致。在进行 CH 模块预装配时，尽可能的装配上金属甲板、插入件、加强件等。CH 模块如同一副搭好的钢结构骨架，在场外预制好后整体吊装就位。

CS 模块则一般为公用楼梯模块。可根据安装人员的要求进行分段预制和安装，方便现场施工。

2.2 机械模块

机械模块包括一些设备，例如泵、热交换器、鼓风机、空气处理机组及过滤器等，装在同一个支撑构架上面，并附有连接的管道、阀门、仪表、导线及支撑结构。模块内的这些部件要按便于预装配的要求，作为一个单元进行布置安装。

机械模块分为设备类和管道阀门类模块，根据模块所在区域不同，设备模块分别以 KQ、KB、KU、KT 作为模块种类的代号，K 系列模块中，Q 代表反应堆厂房、B 代表核辅助厂房、T 代表汽轮机厂房、U 则代表通用的设备模块；而管道阀门模块内部不含泵、罐、过滤器等各类设备，但可以包括阀门等小设备，分别以 Q、

R、W 作为模块种类的代号，管道阀门类模块中 Q 代表反应堆厂房、R 代表核辅助厂房、W 代表汽轮机厂房。

2.3 钢制安全壳模块

钢制安全壳模块是 AP1000 电厂中一个特殊模块^[6]。安全壳是核电站反应堆厂房的外部密封结构，它包容一回路系统带放射性物质的所有设备，以防止放射性物质向外扩散，是核电站最关键的安全屏障之一，目前核电站核岛安全壳一般采用的都是混凝土筒体墙结构。与常规压水堆的预应力混凝土安全壳不同，为了满足非能动设计要求，AP1000 反应堆厂房屏蔽结构设计为钢制圆柱形安全壳，在安全壳外为钢筋混凝土屏蔽构筑物（屏蔽厂房），如前所述二者均按抗震 I 类设计。

钢制安全壳共有约 260 块，由平均尺寸约 $38\text{m} \times 10\text{m}$ 厚度约 44mm 的弧形钢板焊接而成，总高度约为 66m，直径约为 40m，顶部和底部为椭圆形封头，中间筒体高约 43m，安全壳的四周侧壁上还有一些贯穿件孔、支架、门洞及其他附件等，总重量约为 3360t，如图 2 所示。

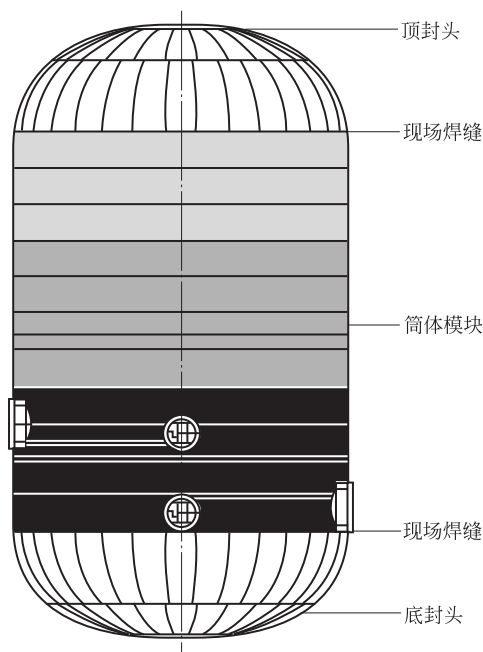


图 2 AP1000 钢制安全壳轮廓

3 AP1000 核岛厂房模块化布置

根据 AP1000 核电厂的模块分布情况可见，

AP1000 核岛厂房模块一般反应堆厂房以结构模块为主，核辅助厂房以设备模块为主，如图 3 所示。

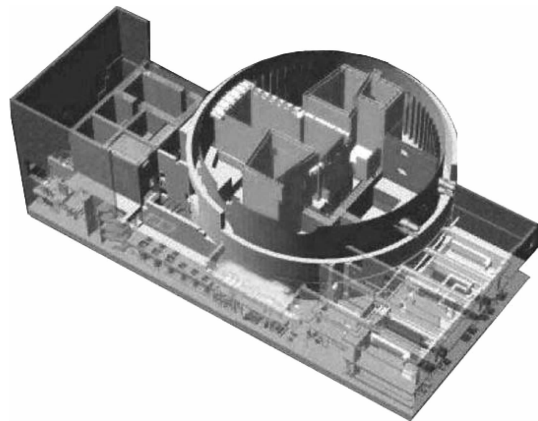


图 3 AP1000 核岛厂房布置情况

3.1 反应堆厂房

反应堆厂房内几乎所有的墙与楼板都采用了模块化设计，共有 55 个结构模块，其中 CA 类 15 个，CB 类 26 个，CH 类 10 个，CS 类 4 个。而反应堆厂房内机械模块数量不多，主要布置在钢制安全壳底部，其中大部分机械模块为三废系统与化容系统的泵、疏水箱等模块。

反应堆厂房结构模块涵盖了厂房内的主体结构，包括 CA01 “蒸汽发生器隔间和燃料运输通道模块”、CA02 “稳压器隔间和安全壳内置换料水箱东北墙模块”、CA03 “安全壳内置换料水箱钢覆面模块”和 CA04 “一次屏蔽墙模块”等大小模块。

反应堆厂房内共设置有 6 个设备模块，包括 KQ10、KQ11、KQ22、KQ23、KU20CVA 和 KU20CVB。这些设备模块主要将与安全相关的重要阀门、泵等设备以及相连的管道集成在一起。

反应堆厂房内共设置有 9 个管道阀门模块。如，Q223 模块为压力容器直接注入 A 阀门模块，Q305 模块包含了化容系统、放射性废液处理系统、非能动堆芯冷却系统的隔离阀，Q601 为反应堆冷却剂系统 1、2、3 级自动卸压阀模块。

3.2 核辅助厂房

按整个核电厂模块化设计原则，核辅助厂房内的布置大致分割成 17 个 R 模块，6 个 KU 模块，25 个 KB 模块，8 个 CA 模块，1 个 CB 模

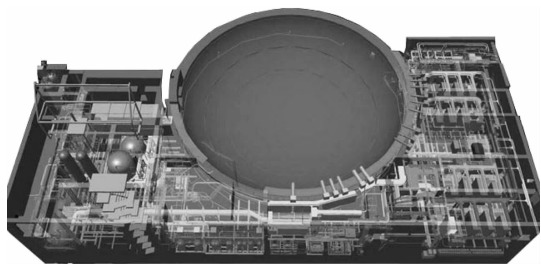


图4 AP1000 核辅助厂房布置情况

块, 23 个 CH 模块, 11 个 CS 模块, 以及 21 个左右的管道组件。每个模块均为一个可以在工厂加工、制造和运输的独立单元, 在现场将模块吊装就位后, 只需实施各模块间的相互连接, 即可完成厂房安装施工。

核辅助厂房结构模块以 CH 类及 CS 类为主, CA 及 CB 模块相对较少。CA20 模块是核辅助厂房最重要的 CA 模块, 位于核辅助厂房 5&6 区。CA20 模块是最早安装的大型结构模块, 模块内部划分为许多隔间, 如 12563、12463、12365 等房间。

辅助厂房房间数量较多, 机械模块多布置在这里。在辅助厂房模块划分时, 一般在模块划分边界上, 将不同的系统的划分为不同的设备模块。对于辅助厂房内布置的一些需外罩包容的容器并带有高放射性的设备, 则一般将放射性设备、屏蔽包容容器及其连接管道组成一个模块, 此类模块较多, 如包容放射性过滤器的 KU21SFA/B、KU21WL6/7 等。

另外, 核辅助厂房内的管道类模块多布置在靠墙侧或两侧墙之间, 一般包括电缆桥架、暖通管道、仪表管道以及一些小管。此类模块很多, 包括 R261、R219、R451 等。这种模块的钢结构框架不仅为运输、现场整体安装提供了方便, 同时钢结构框架本身可作为桥架、管道等设备的永久性支架。

4 核岛厂房模块化布置特点分析

模块化建造技术是一项通用技术, 是一项传统思维方式、管理模式转变的产物, 并首次在压水堆核电机组中第一次大规模应用。以下就 AP1000 核岛厂房模块化布置与施工技术特点, 并结合常规二代加改进型核电机组 CPR1000 进行比较分析。

① 相比于 CPR1000 核岛厂房布置情况, AP1000 反应堆系统只有两条环路, 同时采用了

屏蔽泵、非能动技术之后, 主系统及核辅助系统的工艺管线都得到了简化^[12], 反应堆厂房内的建筑结构也随之简化, 核岛厂房内的房间减少, 这都有利于核岛内大规模应用模块化设计与施工技术。

② AP1000 核岛厂房内主要的建筑结构均进行了模块化设计, 此类建筑结构模块现场施工一般都处在核岛厂房施工的关键路径上, 比较典型的有钢制安全壳 CV 模块、CA01、CA03、CA05、CA20 等结构模块。相比而言, CPR1000 机组的原型建筑结构设计上并没有考虑采用模块化建造技术, 核岛厂房房间繁多, 一般单个核岛系统管线布置较长, 布置涉及的房间也较多, 不利于机械类模块的大量应用。

③ AP1000 核岛厂房模块化布置中结构模块取代了传统施工中的模板, 多个结构模块可直接形成房间。如反应堆厂房 11206 房间整体就是由 8 个 CB 模块 (CB12、CB41~CB47) 和 2 个 CA 模块 (CA01 和 CA37) 构成, 模块应用相对集中。此外, 核岛厂房的 11207、11208、11209、11305 等房间也是如此, 集中应用了多个结构模块来分割房间。

④ AP1000 核岛厂房内大型储水空间结构采用了模块化设计, 如安全壳内置换料水箱 (IR-WST) 结构由 CA03、CA01 和 CA02 模块围成, CB20 模块为安全壳非能动冷却水箱的重要组成部分。

⑤ AP1000 核辅助厂房相对反应堆厂房房间较多, 同时核辅助系统大部分都布置在核辅助厂房内, 并且单个工艺系统布置位置相对集中, 有利于对核辅助厂房内的设备与管道进行模块化设计, 因此大部分机械模块也都位于核辅助厂房内部。而 CPR1000 核辅助厂房单个房间内往往布置有多个系统, 且紧凑型较差, 不利于模块化布置。

⑥ AP1000 核岛厂房内设备、阀门类机械模块布置比较紧凑, 占用空间小, 连接管道集中, 适宜进行模块化设计, 在预制厂进行制造、试验, 在现场直接进行安装, 减少模块外部的施工密度, 同时降低了设备、管道布置所占用的空间, 有利于施工质量的提高。

⑦ AP1000 采用模块施工技术, 特别是大型结构模块和钢制安全壳模块的使用, 相比 CPR1000 现场施工场地, AP1000 施工现场需要增加 CV 模块和 CA 模块的专用拼装场地, 同

时,增加了对现场大型吊车的依赖。

⑧ AP1000 采用了模块化施工技术,相对于 CPR1000 建筑结构,AP1000 建筑结构模块制造过程中对钢材的使用量将大大增加。

⑨ 为了适应大型模块施工,AP1000 采用了开口施工技术,并对施工顺序进行了调整与优化,施工顺序对模块的边界划分也带来一定影响。

⑩ 随着世界首台 AP1000 机组三门核电项目的开工,在工程实践中根据需要,又对模块的划分进行了合并或增加,以方便现场施工。可以说,在首台 AP1000 机组没有建造完成之前,模块的最终数量仍无法最终确定,模块的设计、划分和数量估计需经过 3-4 台机组的实践与经验反馈,通过标准化设计才能将电厂模块固化下来。

5 结论

相比于第二代压水堆核电机组以及常规火电机组,第三代压水堆核电机组 AP1000 大量采用了模块化技术,这也是模块化设计与施工技术第一次在压水堆核电项目中大规模应用。模块化设计与施工技术的应用可以达到减少现场施工密度、缩短电厂建设工期的目的,但 AP1000 核岛模块化技术的大量应用对核岛厂房的施工顺序、模块与模块之间接口连接、模块预制等方面提出了更高的要求,我们只有对 AP1000 核岛模块化布置特点有了充分的认识并有效应用,才能在实

际工作过程中真正发挥模块化技术的综合优势。

参考文献

- [1] 邱世平,张玉柱,李智.主厂房布置模块化设计优化.电力勘测设计.2006,1:54-59
- [2] 中国核工业第二三建设公司.用于核电站核岛的模块化建造方法:中国,CN101136259A.2008
- [3] 张志奇,王新平,张双.模块化设计在电厂设计中的应用.现代电力.2002,19(6):8-13
- [4] 王立刚.模块化配管技术研究[J].机械工程与自动化.2006,4:163-164
- [5] 英戈 D. 保罗,弗兰克.施纳贝尔.模块化电厂设计[J].国际电力.2001,2:14-18
- [6] 魏俊明、刘琼、孙坤.第三代压水堆核电机组 AP1000 的模块化施工分析[J].电力建设.2008,29(4):63-66
- [7] 李熙.浅谈 AP1000 的模块化施工. <http://www.smnpc.com.cn/shownews.aspx?id=467>.2007
- [8] 龚渊.先进压水堆核电机组 AP1000 综述. <http://www.smnpc.com.cn/shownews.aspx?id=444>.2007
- [9] Westinghouse. AP1000 Design Control Document. <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/desin-cert/ap1000.html>.2008
- [10] 林诚格等.非能动安全先进压水堆核电技术.原子能出版社,北京,2010,5:60-71,482-489
- [11] 曹小伟.简论西屋 AP1000 核电厂模块化技术.核电.2009,11:32-37
- [12] 林诚格,郁祖盛,欧阳予.非能动安全先进核电厂 AP1000.原子能出版社,北京,2008,8:5