

燃煤机组实时仿真模型

阿城电站设备自动化设计研究所

PDG

目 录

本书涉及到的图与表清单	(2)
摘 要	(4)
第一章 绪论	(4)
第二章 过去的仿真模型简介	(6)
发电机组和机组元件的模型	(6)
物理模型	(7)
汽包锅炉	(7)
直流锅炉	(9)
经验模型	(10)
子系统模型	(10)
实时仿真器	(10)
第三章 模型方程	(13)
锅炉给水泵/给水阀	(16)
下降管/水冷壁	(17)
汽包蒸汽	(18)
一级过热器(蒸汽侧)	(18)
喷水减温器	(19)
二级过热器(蒸汽侧)	(19)
调节阀和冲动式叶片	(20)
高压缸和低压缸(没有再热器,不抽汽)	(21)
炉膛/水冷壁	(21)
二级过热器炉膛	(22)
一级过热器炉膛	(23)
汽包水位控制器	(23)
第四章 模型在计算机上的实现	(23)
积木式	(24)
通用性	(24)
计算方法	(24)
实时与机器时间运行	(25)
研究支持子程序	(26)
实时支持程序	(27)

公用/分时的支持程序	(29)
第五章 模型确认	(31)
稳态工况	(31)
暂态响应实验	(33)
第六章 结果和分析	(42)
节流阀位置对机组响应的影响	(42)
对节流阀流通面积阶跃变化的响应	(44)
对燃料流量阶跃变化的响应	(49)
对空气流量阶跃变化的响应	(49)
对过热器减温喷水流量增加的响应	(56)
对予热空气温度变化的响应	(56)
对燃料热值降低的响应	(56)
模型参数的极限值	(67)
第七章 建议和展望	(68)
第八章 总结与结论	(69)
附录	(71)
A. 状态方程计算	(71)
B. 汽包模型方程	(74)
C. 汽包水位控制器	(78)
D. 燃烧效率	(80)
E. 传热方程	(81)
F. 计算机硬件和操作系统	(86)
G. 仿真程序	(90)
参考资料	

本书涉及到的图与表清单

一、图:

1. 燃化石燃料发电机组过程流程图	(13)
2. 状态变量流程图	(15)
3. 汽包设计 1	(17)
4. 汽包设计 2	(17)
5. 研究系统的信息流程图	(26)
6. 实时系统的信息流程图	(27)
7. DISPLAY 程序的抽样输出	(28)
8. OUTPUT 程序的抽样输出	(29)
9. PLOPEN 程序的抽样输出	(30)
10. 对节流阀流通面积阶跃减小的闭环响应	(34)

11. 对喷射流量阶跃增加的闭环响应.....	(35)
12. 对节流阀流通面积阶跃增加的开环响应.....	(36)
13. 对喷射流量阶跃增加的开环响应.....	(39)
14. 对给水流量阶跃增加的开环响应.....	(40)
15. 对音速和亚音速节流面积减小流速的响应.....	(42)
16. 对音速和亚音速节流流量流通面积减小温度的响应.....	(44)
17. 对音速和亚音速节流流量流通面积减小压力响应.....	(44)
18. 节流阀流通面积增加的模型响应.....	(45)
19. 节流阀流通面积减小的模型响应.....	(47)
20. 燃料流量增加的模型响应.....	(50)
21. 燃料流量减小的模型响应.....	(52)
22. 空气流量增加的模型响应.....	(54)
23. 空气流量减小的模型响应.....	(57)
24. 减温喷水增加的模型响应.....	(59)
25. 空气予热温度增加的模型响应.....	(61)
26. 空气予热温度降低的模型响应.....	(63)
27. 燃料热值减小的模型的响应.....	(65)
28. 汽包水位参数.....	(77)
29. 汽包水位控制器参数.....	(78)
30. 燃烧效率与冲淡系数的关系.....	(80)
31. 布置因子的确定.....	(85)
32. 软件清单.....	(93)

二、表

1. 仿真模型用的术语.....	(15)
2. 模型与机组稳态工况的比较.....	(32)
3. 音速和亚音速节流情况下的稳态工况比较.....	(43)
4. 模型变量的极限值.....	(67)
5. 汽包变量标记符.....	(74)
6. 弗吉尼亚州的Bituminous煤的分析.....	(81)
7. 烟汽热交换术语.....	(82)
8. 烟汽热交换术语.....	(83)

- 1) 全部元件模型都是基于热力学第一定律和物理平衡分析的基础上。
- 2) 仿真程序包能实时运行,或以较实时快8倍的速度运行。
- 3) 虽然涉及的范围比较小,但模型提供了有关机组因果关系的必要数据,因而使其在工程师或机组运行人员培训方面具有重要使用价值。
- 4) 该仿真程序包是具有交互性,因而能使用户实时在线操作控制变量或根据需要插入误操作。
- 5) 仿真程序包是通用性的,故可用于任何汽包型发电机组,稍加改动也可用于直流炉发电机组。

为验证模型,将其对控制变量变化的开环和闭环响应与发电机组现场实验响应进行了比较。该仿真程序包的整体响应与现场实验结果极为相似,因而表明在大多数情况下模型能够真实地预示机组的响应。

本书概述的仿真系统尽量设计得通用和灵活。本仿真系统可用于研究机组的运行行为或对所提出系统设计进行初步分析。本仿真程序包适用于任何机组,并专门改编以满足用户的特殊要求。利用它的实时仿真能力,新运行人员可在此系统上受训,使他们熟悉机组的重要参数及时间响应特性。

如上所述,过去的大多数运行人员培训工作都是在熟练运行人员指导下,学员学习他们应掌握的技能 and 经验。培训计划中的许多做法是把工作中培训与发电机组运行理论教程结合起来进行。然而,采用这种培训方式,受训者可能没有观察到一次故障或误操作,因而可能不会处理这样故障工况。仿真器能使用户在不危及设备和其他方面安全性的情况下进行大量的操作练习,从而在比较短的时间内获得用其他方法很难得到,或不可能得到的广泛经验。

在机组日常运行中,运行人员必须处理大量的数据。在故障或异常工况下,信息处理问题变得更加复杂了。因为运行人员必须在较短的时间内正确地做出判断和反应。虽然预先进行的课堂教育能使运行人员具备这种反应能力,但关键参数相互作用方面的经验提高了做出正确反应的可能性。为了在因其它不重要参数引起混乱的条件下提供这种运行经验,此仿真程序包仅包括主要元件的模型。这使运行人员和培训学员有机会了解那些是重要参数,因而使他们能在异常情况下对这些重要参数做出反应,而不被对机组整体响应影响小的其他参数分散注意力。虽然模型的范围有限,但包括了主要参数,因此采用该仿真程序包可达到有效培训目的。

本书的其它部分对本仿真程序包作了补充说明,并指出了它的适用范围。第二章介绍了过去燃化石燃料发电机组模型,建模方面的研究成果,其中包括汽包炉及直流炉机组蒸汽系统、物理和经验建模方法有关的研究工作综述。这一章还简单地介绍了出售及电力公司拥有的模拟器。

第三章介绍了机组元件的建模方法和建模采用的方程。利用第三章前面给出的术语和符号,详细地分析了每个机组元件并建立了模型。本系统包括11个机组元件,其范围从锅炉给水泵到一级过热器炉膛。机组这些部分的每一部分都采用一个程序模块仿真,并将其与其它模块相互连接。第四章介绍程序调度、结果输出、数据存贮和实时操作所需的软件程序。模型程序与支持程序组合一起成为单独的仿真程序包,该程序包产生所需的数据输出和用户应用所需的时间标度。

把所有子程序按适当顺序连接起来汇编成仿真程序包后,必须验证机组模型。第五章介

绍了利用比较机组现场试验数据和计算机模型响应的办法得出的验证结果。利用该精确的验证后的模型,为给出机组对输入或控制参数变化的响应,在系统上做了附加实验。这些实验结果的介绍构成了第六章的一部分。分析这些实验数据,使我们深刻地了解了机组各部分元件的相互作用情况及其中的那些相互作用在确定机组响应中起主要作用的部分。

由于该仿真模型刚研制时比较简单,故有许多元件可以加到此程序包中。第七章介绍了改变模型及有关新模块的建议。还介绍了扩充系统的可能方法和在新结构形式情况下可能进行的进一步分析。

本课题研制的仿真程序包,为把理论和现实所涉及到的问题融洽地结合起来提供了唯一机会。它能灵活地应用于不同一次热源和不同锅炉的机组。并可用于教育、培训及科学研究。

第二章 过去的仿真模型简介

发电机组和机组元件的模型

建立发电机组模型,是电力公司解决大型汽轮发电机组问题的主要手段。电力公司不仅面临减少环境污染的要求,而且还要求提高发电机组效率,但经济方面的考虑迫使一些超过正常使用寿命的旧机组继续运行。为满足这些方面的要求,对于机组控制新方法的设计,正在进行各方面的研究工作,以开发新的机组控制方法,分析并降低对环境的污染和改进操作方法和操作技术。研究这些问题的重要技术手段是被研究系统的数字模型。这些模型可以达到如下目的:减少强迫停机率提高机组效率和响应特性,延长机组寿命,因预防性提前维护而缩短修理时间,因加深操作人员对机组响应特性的了解而改进操作方法,并且能为改进产品提供反馈信息。

型模的复杂程度基本上取决于其预定使用目的。用于分析控制系统或电力系统稳定性的模型,大部分通常属于经验模型,并基于对被研究系统传递函数的分析得出。如果模型用于研究机组的相互作用或运行人员的最终培训和考核,那么对其要求比较广。因为模型必须在所有可能的运行方式下充分真实,所以增加要求将提高其复杂性。

尽管大多数雄心勃勃常规发电机组动态特性研究工作都致力于计算管路、水冷壁、过热器、再热器后汽机的暂态应力,仍然必须把通常的发电机组动态特性分析范围局限在提供近似数字模型的水平,该数字模型确切地和明显地描述被研究项目的必要相互作用。对于工业问题仿真成功地应用极其重要的部分是具有如下三个必要特点的有效数字模型:

- (1) 数字模型必须适当精确地复现被研究的响应过程。
- (2) 数字模型必须比较简单。
- (3) 它必须精确地与实际过程相似,即容易把实际参数与模型参数联系起来。

大型复杂锅炉—汽轮机系统可利用理论或者经验建模方法进行仿真。理论建模方法涉及对汽轮发电机组中实际过程的深刻了解。这种了解包括从过程表面现象的描述到沿过程流程发生物理和化学变化的全过程。一经了解了热力学和物理原则,就能用一组偏微分方程归纳出发电机组的数字模型。完成这些后,最终归纳出模型的方法取决于模型的最终应用后研

究人员的理论基础。

物理模型

汽包锅炉 许多研究人员研究了汽包炉发电机组的建模问题。1958年, Chien 等人首次全面分析了汽包炉发电机组, 该发电机组是燃油、单炉膛、自然循环船用锅炉, 得出一组偏微分方程组后, 为得出描述锅炉动态行为的线性常微分方程组, 作了一些简化假设。在该简化中采用的主要方法是采用扰动理论和差分方程技术。这样, 就得出了描述某一稳态运行工况下的锅炉行为, 但对其他不同的稳态工况必须调整变量的系数。蒸汽流量是主要的扰动量, 燃料流量和给水流量是控制输入量。该蒸汽发生器模型用于表示电力锅炉显得太简单了, 但可用作简化模型, 它可以通过减少假设而扩充。

1961年, Daniels 等人发表了他们致力于研究适用电站数字模型而得到的结果。他们研究的系统是Philadelphia电力公司Cromby2^{*}机组。这是一台燃煤粉双炉膛的强制循环再热式锅炉, 对于这种汽包炉系统, 节流阀位置是主要扰动量, 而控制输入是燃料流量、给水阀位置、过热器和再热器减温喷水流量、过热器和再热器燃烧器倾斜位置及空气流量。由物理过程导出了方程并利用扰动理论和差分方程技术进行了线性化, 为减少模型中的方程个数, 把每个实际部件划分为均质的几段, 并用集中参数表示。每个部件所需的段数要取决于模型的精度和频率响应要求。一个环节内的部件条件是仅取决于时间的独立状态, 为实验模型的实用性, 在Cromby 2号机组上进行了广泛的开环实验。这是首次把大型汽包炉公布的现场数据与模型所预示的数据相比较。虽然该模型没有为控制系统设计提供充分精确的响应, 但它仍然适用于描述子系统间的相互作用。

1967年Thompson提出了Daniels模型的改进型式。他主要使模型增加了许多单元容积(Elemental volumes), 以达到更好描述实际分布参数过程的目的。推导了象汽包这样一些对于给定容积可假设具有一致性的元件的常规方程。

对于性质随轴向距离显著变化的其他元件, 集中参数方法不能保证适当的精度。因此, Thompson利用单元容积技术得出精确的稳态情况和实用的偏导数系数。确定了单元容积后, 推导了状态变量的系数矩阵, 并采用状态空间分析方法确定系统的动态行为。该模型与Cromby 现场测试数据的比较结果验证了绝大多数假设, 尤其证实了因采用分布参数方法后而对模型响应特性的改善。然而, 由于采用了大量的单元容积而导致了大维数状态空间, 因而使模型用于实时分析时显得过份复杂。

在1963~1967年间Nicholson扩充了Chien等人的燃油汽包炉, 使其包括了汽轮发电系统。假设锅炉模型由集中能量存储单元组成, 并利用与静态有关的流量—功率关系和汽机模型组合到一起。汽机模型包括进汽阀室和汽轮机再热器的蒸汽存贮效应。交流发电机利用同步发电机的线性化Park方程仿真, 其扰动输入为电网的负荷要求。建立模型后, 采用具有状态变量的离散矩阵表达式分析机组的动态特性。

1969年, Kwan和Anderson两人也扩充了Daniels等人提出的模型, 他们减少了原模型数字归纳中采用的假设数目, 并把汽机抽汽包括在模型中。对于这一汽包炉系统, 忽略掉了给水加热器和制粉系统, 因为该模型用于评定机组的时间特性。为提高该模型表达式的精度, 假定给水的密度随温度变化, 考虑了管路的存贮效应, 并将汽机分为三部分: 高压、中压及低压部分。不管是该模型还是Nicholson提出的模型与现场实验数据的比较情况都没有披露。因此, 仅能用对照物理论证所给出的响应检查模型预示响应的办法验证模型的精度。

1969年, Gaseau和Godin提出用于仿真问题的一般方法。他们提出的方法适合于各类机组, 既适合于汽包炉, 也适用于直流炉, 而且也适用于它们连接相应其他模型组成的系统。为易于建模, 可将发电机组化分为如下三类元件:

(1) 长元件(如管路和热交换器), 这类元件中, 热传导现象起重要作用。

(2) 短元件(汽包和冷凝器), 在这种元件中质量和能量存贮占主导地位。

(3) 复杂的短元件(如汽机和炉膛), 对于这类元件, 忽视了存贮效应, 因此假定稳定工况。

这些类中的每一种都借助由该种元件特有假设所限制的物理方程分别处理。由于线性化和集中参数分析方法不能仿真延时和传播速度起主导作用的复杂相互作用过程, 故模型设计采用分布参数和随时间变化的基准状态。求解采用转移矩阵和状态空间方法。该模型的优点是比较通用, 这个优点是因为减少了简化假设的数目和其非线性特点使得能在不同负荷和负荷变化情况下仿真而获得的。然而, 由于许多通用机组变量(如给水流量、蒸汽流量), 不是显式出现在最终模型, 因而, 这种方法不适用于实时仿真。

前面介绍的模型, 除Gaseau和Godin的模型外都采用线性方法。然而, 为适当地表征发电机组在超过其额定负荷50%范围的全工况下的运行特性, 要求采用非线性模型。1971年, McDorald等人利用物理定律和再次基于Cromby机组开发了汽包炉机组非线性数字模型。该模型的控制变量是磨煤机给煤器行程、节流阀位置、给水阀位置、空气流量、过热器及再热器喷水流量和过热器及再热器燃烧器的倾斜位置。在设计模型时, 利用了两个基本假设:

(1) 可以忽略空气和高温烟气的动态特性, 因其涉及的时间常数极短。

(2) 可以忽略省煤器及给水加热器的动态特性的影响, 因其提高了模型的复杂程度, 而又不提高模型的精度。

这个模型与过去所采用模型的主要区别在于建立汽机、炉膛及汽包模型时所作的假设不同。就汽机而言, 采用了第一级由多个调节阀和冲击式汽轮机构成的表示形式, 而不利用其他模型所采用的单节流阀近似表示方法。这一特殊的表示方法使汽机临界蒸汽温度及机组耗热率计算较为精确。在过去的分析中, 忽略了燃烧器倾斜状态或假定它线性变化。McDonald的模型利用考虑炉膛有效热交换表面积变化的方法, 计及燃烧器倾斜状态的影响。为考虑所采用燃烧器及其在炉膛中位置的变化, 也采用类似的补偿办法。汽包的一般建模方法类似于Daniels和Enns等人的方法, 但与Chien等人的建模方法明显不同。代替写出液态和蒸汽态各自的方程并试图模拟液-汽界面的建模方法, McDonald, Kwatny和Spare假设汽包内的全部工质是饱和的并写出整个汽包的质量和能量守恒方程, 然后, 显式确定汽包的水体积, 但为计算水位必须增加假设条件。该方法的优点是因这些假设产生的误差不通过模型的其他段传播。

即使模型比较简单, 它也能以适当的精度再现机组的响应, 正象仿真结果和现场试验数据的比较结果所证实的那样。这些比较比过去的任何比较都广泛得多, 并证明提出的这个模型比文献中介绍的其他模型精确得多。虽然该模型是利用特定机组的数据设计的, 但它也适用于类似型式的任何其他机组。为使该模型用于各种不同的机组, 只需修正易于从机组设计数据中得出的物理参数。

McDonald和Kwatny的Cromby2*机模型看来已被电力工业部门和机组仿真器生产厂用

作为进一步建模研究工作的标准。从那时以后的大多数课题都采用这个模型,并为满足课题要求改变设计条件。1974年, Berkowitz, Jones 和 Markunas 在彻底研究 Cromby 机组模型的基础上开始建立 Boston Edison 电力公司的 Mystic 4[#] 机模型。以 Cromby 机组的模型为基础, 利用物理原理设计了 Mystic 4 号机组的模型。这两个模型的两个主要差别是描述炉膛热交换与过热器质量存贮效应的方法不同。在 Cromby 模型中, 燃烧器配置与倾斜角度的校正对于所要求的精度来说是适当的。而对于 Mystic 4 号机模型, 要求采用考虑辐射面面积随燃烧率变化的附加校正系数。这使模型的有效范围从满负荷的百分之九达到了百分之百。但是, 难于确定这些校正系数的数字表达式。目前 MITRE 公司正在从事的研究课题将更好地描述炉膛辐射热交换, 这种描述方法在宽负荷范围内是精确的, 并适用于具有已知尺寸、几何形状、燃烧器配置情况和燃料类型的任何炉膛。

由于假设蒸汽密度为常数, 所以 Mystic 4 号机组的模型阶数低于 Cromby 机组模型。这一假设基于质量存贮时间常数小 (0.2—0.5 秒) 的基础上, 这意味着蒸汽流量基本上是不可压缩的。在不必沿过热器长度对蒸汽密度积分情况下, 该模块的时间步长可选得较长。在采用较长时间步长的情况下, 所需要的计算量较少, 并易于使模型稳定。利用机组静态运行数据, 在满负荷的 38%~95% 范围内的几点验证了 Mystic 4 号机模型。看来 Berkowitz, Jones 和 Markunas 已经证实, 集中详细分析 Cromby 模型及其所采用的技术, 利用比较少的时间就能建立精确描述任何具体机组的数字模型。虽然需要作某些补充, 特别是质量存贮方面, 但 McDonald 建立的 Cromby 机组模型为任何特定机组的建模打下良好的基础。

直流锅炉 在过去的 20 年, 各电力公司把他们的大部分资金投放到了建造直流炉系统方面。这种机组随其循环效率提高运行压力较高, 直流炉机组的负荷响应速度也比汽包炉机组快。然而, 由于它所遵循的物理原理还是同样的而且只有少数几个部件不同, 因此, 可利用同样的技术、假设条件, 甚至同一个基本模型分析这些系统。1965 年, Adams 等人利用物理建模方法建立了一个适于利用模拟计算机求解的直流炉系统模型。该模型基本上类似于 Chien 等人的模型, 只是去掉了汽包部分而增加了简单的汽轮发电机模型。在除汽轮机一发电机动特性模型外的所有子系统中, 均采用集中参数、有限差分 and 扰动技术。利用假定汽轮发电机组动态响应速度明显快于锅炉响应的条件, 导出了简单和线性的汽轮机——发电机组稳态方程。Adams 等人也证实了物理建模方法对于直流炉机组的实用性, 但导出的模型只适用于控制系统的基础分析, 而不适用于分析这种机组中出现的复杂相互作用现象。

直流炉发电机组模型经历了汽包炉模型所经历的同样不断完善过程。1966 年 Littman 等人利用 Thompson 的分布参数方法对 Bull 的超临界直流炉机组作了仿真实验。在此研究中, 采用了模拟计算机和数字计算机, 但注意到了模拟计算机的某些局限性。由于任何一个模型都必须具有大量的方程, 因而发现模拟计算机最适用于要求频繁改变参数和反复运算的控制系统研究方面。数字计算机则最适用于模型分析、暂态响应和系统的相互作用现象研究方面。Bull Run 模型采用物理建模方法, 并利用龙格—库塔法和积分—暂态分析方程。利用早些时候在类似机组上进行的现场实验结果验证了该数字方法和模型的响应。验证主要是核对模型响应曲线和现场数据曲线之间大致形状的相符程度。

因为对于汽包炉和直流炉系统来说, 产生蒸汽的热循环基本上是相同的, 故替换经过验证模型内的部件后仍能产生精确的响应。这似乎体现了这些机组采用物理建模方法的一般趋势。Kwatny 和 Spare 从 McDonald 的 Cromby 模型着手, 为获得适用于其研究工作需要的模

型作了一些必要的假设和元件替换。

经验模型

物理过程也能用较普通的方法，即利用简单的（通常是一阶的）滞后和延迟函数近似表示响应的方法建模。为此，可把一个复杂的物理现象用简单的方式表示，而这种表示在所研究的运行范围内是近似正确的。这种方法有时也称为“黑盒”法，因为这种方法在很大程度上忽略了过程中的细节，而仅保留了输入和输出部分。这种模型的优点是简单，但具有难于把模型参数与实际机组参数联系起来的缺点。如果低阶模型设计的很巧妙，则可通过现场实验确定模型参数。但如果不能计算或不能从实验中得出参数，那么就不易于验证这种模型。

已经设计了各种不同系统的许多低阶模型。这些模型中的大多数在形式上类似于profos在1955年提出的模型。Profos把锅炉分为三个部分：燃烧系统，热惯性部分及存贮与压降部分。对于这些部分中的每一部分，均采用传递函数法，并在必要时包括延时。然后，必须把时间常数和从被研究实际机组得出的物理参数连系起来。

有许多能用于控制及系统稳定性仿真研究的低阶锅炉模型（Asfrom和Eklund 1972；……）。在这些模型中，确定各种规模及类型锅炉的时间常数是必须重视的重要问题。直到得出规范化模型之前，经验模型只适用于运行中的发电机组。采用经验模型趋于使被仿真物理过程难于理解，因而使这种模型不适用于研究或实时仿真。经验模型主要用于子系统控制研究及电网频率稳定性分析。

子系统模型

许多论文介绍了可并入较大系统模型的子系统模型。这些部件模型中的某些模型可能比McDonald、Kwatny和Spare采用的模型完全或精确，经过一些参数调整后这些模型可合并入到Cromby模型中去。元件的模型基于物理或经验方法制定。但只有基于物理原理的模型才能纳入Cromby模型。某些代入的可能性包括：

- (1) 确定绝热火焰温度与放热过程的燃烧模型 (Powell 1957)；
- (2) 包括有系统惯性和阀门操作时间影响的汽轮机模型 (Greenwood和Payne 1966)；
- (3) 包括有功功率和无功功率损耗的发电机模型 (Anderson 1969)；
- (4) 包括弯头及阀门对流体传输时间影响管路模型 (English 1970)。

代入这些元件模型中的任何模型，都能在不明显增加运算时间和存贮要求的条件下提高整个模型的精度。

实时仿真器

燃化石燃料机组的运行，继续对电力公司提出了大量的人力要求，这就需要进行大量的运行人员培训工作。电力系统的可靠性在很大程度上取决于发电机组和开关站运行人员能力。

在正常运行过程中，操作项目都是例行操作，操作者的大多数操作动作对系统的稳定性影响很小。但在某些情况下，操作者是否训练有素通常决定机组是否能不停电而保持继续运行。培训的重点已放在操作者处理事故状态的能力。工业界已发现，提供这种培训，而又不危及设备、系统稳定性或运行人员本身的唯一办法就是利用仿真器。

系统仿真技术早已用于军事、民航及其他工业，作为要求严格无错误情况下工作的运行人员的一种有效培训方法。由于电力工业在这方面的要求相同，看来在机组仿真器上定期的

训练操作人员是满足这种培训要求的唯一办法。仿真器的最著名应用大概就是领航员训练。领航员训练计划与发电机组操作人员培训有许多共同之处。在这两种培训中,被培训人员学习日趋昂贵和复杂的设备操作方法,而且把安全作为一个主要考虑因素。

由于对核发电机组运行人员的培训要求日趋严格,故核电部门在应用仿真器培训操作人员方面处于领先地位。这些仿真器是用于仿真每台机组整个系统的大范围仿真器。它为被培训者提供了基本上与实际机组控制室设备相同的设备。所有在实际机组上可能的运行人员操作都可在这些大范围仿真器上进行;每个操作产生的响应都和真实机组条件下的响应相同。

通常,由于范围培训仿真器投资及运行费用高昂,几家电力公司必须公用一台仿真器进行人员培训。直到最近,这些公用设备才由核反应堆销售厂商提供。由于运行机组台数不断增加,某些电力公司(例如,Duke Power)发现购买自用仿真器从经济角度看是合适的。这样作的目的是提高运行人员培训效果,降低总的培训费用,并能够在不影响供方安装进行的情况下再次考核操作人员资格(Thomas 1975)。现在不装于发电设备供方培训中心内的仅有几台仿真器,是美国电力公司的燃化石燃料发电机组仿真器和Consolidated Edison的India Point I 核发电机组仿真器。

第一个大型原子能发电机组全范围仿真器是由通用电气公司设计的。它安装在位于伊利诺州Morris的通用电气公司沸水反应堆培训中心,在Dresden I BWR 仿真器上的运行人员培训始于1958年6月。当发电机组完全投入运行时,可对仿真器性能进行现场实验验证。在Dresden I * 机组起动之前,仿真器用于进行机组以后运行的操作实验。已证明仿真的特性几乎与预料的机组特性精确一致后,已将仿真器调到与机组特性更加精确匹配。由于达到了这样精确的仿真精度,原子能委员会(现在的核管理委员会)已经对该仿真器作了最新批准。

Babcock 和 Wilcox 公司已和Singer公司的Link培训组织签定了合同,提供第一台全范围压水反应堆仿真器。1969年12月投入运行的该仿真器安装在位于Virginia的Lynchburg的Babcock 和 Wilcox原子能培训中心。该仿真器控制室的设计几乎是运行于加利福尼亚的803 Rancho Seco机组控制室的复制品。

西屋公司的培训仿真器是110万千瓦压水反应堆发电机组的仿制品。它是由西屋公司的计算机与仪表部建造的,此仿真器提供给位于伊利诺州的齐恩西屋训练中心,并1972年的2月开始用于培训。

90万千瓦Calvert Cliffs压水反应堆发电机组全范围仿真器建成于1972年12月,它是燃烧工程公司与Singer—Link公司,为位于Connecticut的Windsor的燃烧工程公司核培训设施而签定的合同。此仿真器具有其他大范围仿真器的大多数能力:

- (1) 把仿真过程固定在任何一点。
- (2) 从前面任何一点重现仿真过程。
- (3) 快速/慢速运行,以表明具体系统的相互作用与影响。
- (4) 可在仿真过程中插入该操作式故障状态。

这些功能使了解机组和元件过程的培训增加了学习怎样处理故障工况的机会。

第一个电力公司拥有的核发电机组仿真器开始运行于1973年12月,是在Consolidated Edison公司的Indian Point I 号核发电机组上实现的。和大多数仿真器一样,该Indian 仿真器是由Singer公司的Link 部建造的。在该设备上的人员培训分成两组到八组进行。瑞典和

西德的电力公司已经和Consolidated Edison 公司签订了培训合同，到目前为止，已有美国各电力公司的大约110人在该仿真器培训中获得了运行经验。

Electronics Associates公司已经为美国电力服务公司的燃化石燃料130万千瓦Amos 3号机组制造了全范围仿真器。该仿真器是安装在西佛吉尼亚靠近查尔斯顿城的发电机组培训中心。此仿真器有个独特之处，即它是第一个全范围超临界锅炉系统仿真器；它也是第一个电力公司拥有和运行的仿真器。由于燃化石燃料机组培训要求不如核电机组那样严格，故各电力公司预定了很少几台燃化石燃料机组的仿真器。但是，由于越来越重视系统稳定性及高效率运行等刺激因素，电力公司对训练异常和故障处理能力的小范围廉价化石燃料机组仿真器更加感兴趣了。

1964年，第一批小范围仿真器之一由Electronics Associates公司耗资20000美元建成。该训练设备精确地模拟实际机组的燃烧系统和给水系统。它不是采用计算机模型进行仿真，而是采用带气源系统的气动控制器产生温度、压力、流量指示信号。它的控制设备配置严格按着现有控制盘形式，以便于操作人员能迅速地把从培训中得到的知识用于工作中去。

1972年，Christenson等人发表了学院研究用沸水反应堆仿真器的设计研究报告。该系统采用混合计算机实时求解沸水反应堆模型方程。此仿真器以机组的核系统运行行为重点，而只把给水和汽机部分作为次要部分。然而，这个仿真器却充分显示了小范围仿真器在使学员及被训人员熟悉系统间相互作用和机组运行方面的价值。

仿真器的另一个优点是在控制台设计方面。操作者误操作的根源及相应的系统故障时间都可以归因于如下原因中的一个原因。

- (1) 培训不当。
- (2) 方法不当。
- (3) 环境差。

过去，充分注意了前面两个原因，但对良好响应环境的重要性认识不够。历来，控制盘设计是由电力公司设计部门或由设计师/工程师提出的，他们互相之间以及它们和运行部门很少协商。仿真器能够使运行人员参与设计，并在不涉及附加停机要求的条件下实验改变设计方案的效果。

仿真器已经被证明在教育和培训工程师及运行人员方面是非常有益的。利用McDonald的Cromby模型，经过适当的替换和更改，能够研制出小范围实时仿真器，它将成为有利的研究和教育工具。

第三章 模型方程

为使实时仿真器能够完善地复现系统的相互作用，并保持其经济上的可行性，必须认真选择被仿真系统及效应。了解机组元件间相互作用行为是仿真培训的主要目的。为使运行人员/被培训人员不被错综复杂的阀门操作或旁路回路所述惑，本程序包描述较普通系统级的反馈效应。从而有助于被培训人员理解这些效应和相关事件的发生顺序。尽管这不包括整个机组响应，但在这些系统级也能得到有效的培训。

在给定整个机组框图的条件下，可以根据确定的机组重要设备设计仿真模型。设备的重要性是取决于仿真器的预定用途及其未来的可能应用。在本仿真程序包中，把表示机组各元件的模块加到简化的机组模型中，直到该软件包的响应特性和实际机组精确相应时为止。然后就考虑用这些模块代表该仿真的重要的机组设备。作为以后能够扩充的基本系统，本仿真包括如下机组元件的模型：

- 锅炉给水泵/给水阀
- 下降管
- 水冷壁
- 汽包
- 一级过热器

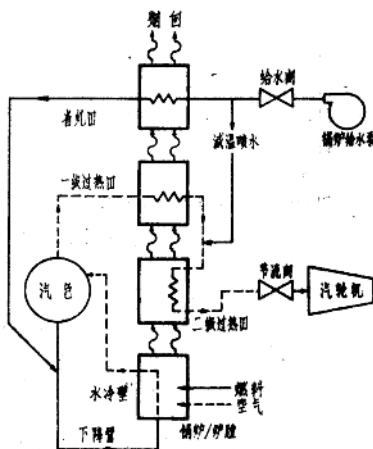


图1 燃化石燃料机组的过程流程图

- 喷水减温器
- 二级过热器
- 节流阀
- 汽机高、低压缸
- 燃烧炉膛
- 过热器炉膛

为使仿真模型易于实现，模型仅包括在确定机组响应特性方面起重要作用的那些元件。出于这个原因，模型中删掉了冷凝器及给水加热器，但当以后需要时，可以将这些部分加到模型中去。图1为被仿真机组的过程流程。

本模型基于组件式构造原理，其中的每个模块对应于机组的一个区域或元件。在模块设计中，采用了基于机组中物理因果关系的方程。逼真的模型借助于实际物理变量的显示表达式，使使用者了解各元件中存在的机理。

为建立各机组元件的模型，在实用的场合采用了质量、动量和能量守恒的三个基本方程。质量方程考虑因流入和流出元件体积而产生的质量积累过程。

$$\frac{d}{dt}(PV) = \text{FLOW}_{i,n} - \text{FLOW}_{o,n} \quad (1)$$

假设绝热条件和流体为几乎不可压缩流体，动量方程采用伯努利方程。

$$\text{FLOW}^2 = (\text{PRESSURE}_{i,n} - \text{PRESSURE}_{o,n}) \quad (2)$$

其比例常数考虑了管路长度、流通面积和摩擦的响应。

能量方程用于计算流体焓随时间的变化率：

$$\frac{d}{dt}(\text{MASS} \cdot \text{ENTHALPY}) = (\text{ENERGY}_{i,n} - \text{ENERGY}_{o,n}) + \text{ENERGY} \quad (\text{在元件容积内产生的能量}) \quad (3)$$

为简化上述任一个方程，可在每个模型中施加附加的假设条件。但是，为建立具有坚实物理根据的模型，把这些方程用于所用的机组元件，然后再借助于假设条件简化，这就保证了模型非常接近实际的物理过程，并且易于从实际参数中推导出模型参数。

模型中引入了如下两类假设：

1. 简化数学描述太复杂物理现象的假设。
2. 简化数学运算的假设，假如用差分方程代替偏微分方程。

利用适当的简化假设，把三个基本物理方程用到了每个机组部分。这些方程中规定了三个状态变量：密度、焓和质量流速。确定了每个模型中计算的其他参数后，描述了模型的输入和输出，综合所有部分的模型及其技术要求，得出图2所示信息流程图。该图显示了每个模块需要的输入及输出。为正确地组成精确的仿真程序包，模型的这种匹配是必须的。

表1列出了仿真方程所采用的术语。作为一个例子，假如建立确定作为汽包蒸汽流量，一级过热器蒸汽流量和一级过热器蒸汽容积函数的过热器蒸汽密度的方程。这些参数中的每个参数的变量各定义如下：第一个字母表示参数，第二组字母表示与该参数有关的设备，第三组字母表示材料。表示汽包蒸汽流量的变量是 FLO_{DRMS} ，其中 FLO 表示流量， DRM 表示汽包， S 表示蒸汽。表示一级过热器蒸汽体积的变量是 VOL_{PSO} 或 VOL_{PSOS} 。因而得出蒸汽密度方程如下：

$$\text{RHO}_{\text{PSOS}} = f(\text{FLO}_{\text{DRMS}}, \text{FLO}_{\text{PSOS}}, \text{VOL}_{\text{PSOS}})$$

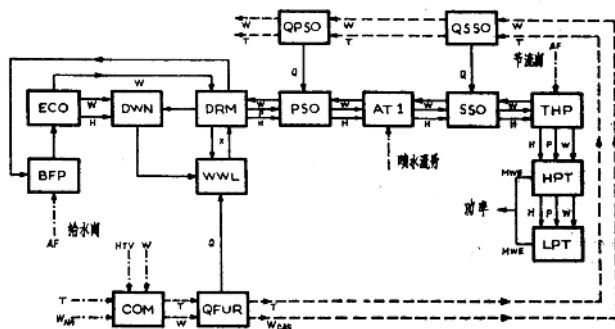


图 2 状态变量流程图

表1仿真模型用的术语

变量:

AF: 流体流通横截面积

AG: 烟气流经表面积

AS: 设备表面积

CP: 热容量, Btu/Lbm (英国热量单位/磅)

D: 表示取导数或微分

EFF: 效率

EMS: 有效质量, Lbm

ENT: 熵, Btu/Lbm Deg—R (列氏温标度)

FLO: 流量, Lbm/Sec 磅/秒

H: 焓 Btu/Lbm. 英国热量单位/磅

HTV: 发热值 Btu/Lbm 英国热量单位/磅

LEN: 长度, ft (呎)

LVL: 液面或深度 ft (呎)

MWE: 电气功率, MW

P: 压力, Lbf/Sq.in (磅呎/平方吋)

Q: 热交换速度, Btu/Sec (英国热量单位/秒)

RHO: 密度 Lbm/Cu.ft (磅/立方呎)

RIN: 内半径, ft (呎)

ROT: 外半径, ft (呎)

S: 表示基准点或整定点

T: 温度, Deg—F (华氏度)

VOL: 体积, Cu.ft (立方呎)

X: 质量。

设备

AT1: 初级(一次)蒸汽减温器
BFP: 锅炉给水泵
CND: 冷凝器
COM: 燃烧过程
CRH: 低温级再热器管道
DRM: 汽包
DRPS: 连接汽包和一级过热器的管路
DWN: 下降管
ECO: 省煤器
FUR: 炉膛
FWV: 给水阀
GEN: 发电机
HPT: 汽机高压缸
IMP: 高压缸冲动式叶片
LPT: 汽机低压缸
NOZ: 高压缸冲动式喷嘴
PSO: 一级过热器
PSSS: 连接一级过热器与二级过热器的管路
SSO: 二级过热器
THR: 节流阀
WWL: 炉膛水冷壁

材料

AIR: 空气
FUL: 燃料
M: 金属
S: 蒸汽
SAT: 饱和蒸汽与水
W: 水

锅炉给水泵/给水阀

冷凝水通过低压给水加热器后进入锅炉给水泵(BFP)的抽水端, BFP的出口压力如水泵制造厂提供特性曲线所示, 与给水流量直接相关, 利用这些曲线及二阶多项式回归, 出口压力和给水流量的关系具有如下形式:

$$P_{BFPW} = P\phi_{BFP} + BFPA1 \cdot FLO_{BFPW} + BFPA2 \cdot FLO_{BFPW}^2 \quad (4)$$

式中 P_{BFPW} = 锅炉给水泵出口压力。

FLO_{BFPW} = 给水流量。

$P\phi_{BFP}$ = 零流量时的压差。

BFPA1、BFPA2 = 回归确定的系数。

利用下一级阀门调节来自给水泵的给水流量。假如忽略高程的变化, 流量方程为:

$$FLO_{BFPW} \cdot 2 = BFPCONV \cdot (AF_{BFPV} \cdot 2) \cdot (P_{BFPW} - P_{DRMSAT}) \quad (5)$$

在最大开度的阀门流通面积 AF_{BFPV} 规范化表示为1.0。利用机组的运行中的非线性流量方程,为考虑流通面积的规范化及另外流量的影响,可以计算出流通面积与质量流速的关系是常数关系记为 $BFPCONV$ 。

过热蒸汽减温喷水是取自通过锅炉给水泵后的给水。因此,流到省煤器的流量是给水流量 FLO_{BFPW} 与喷水流量 FLO_{ATW} 之差。

宁愿不建立省煤器的数学模型,而采用经验公式来确定给水焓的变化。此方法用于尽量使模型简单而依然包括影响模型和热循环稳定的参数。采用这个关系,并不排除以后为提高模型精度和效能而增加省煤器模块的可能性。

下降管/水冷壁

为了简化下降管/水冷壁内发生的复杂现象,模型采用了如下七个假设:

1. 回路中只存在自然循环。
2. 回路中总的循环流量为常数。
3. 沿下降管长度方向的热交换可以忽略,而且没有沸腾现象。
4. 在下降管内没有质量和能量贮存作用。
5. 蒸发和液体速度相等。
6. 质量沿水冷壁长度方向始终保持为常数(集中参数法)。
7. 水冷壁流体中贮存的能量集中于水冷壁金属质量中,并且在炉膛模型中考虑。利用这些假设,可以建立下降管/水冷壁回路的模型。

对于当前的汽包型系统,对于给水/汽包/下降管部分看起来必须采用两种设计方案。一种方案是给水直接进入下降管,而下降管其余部分流量由汽包水提供(见图3)。在另一种更广泛采用的方案中给水直接进入汽包,因此下降管的全部流体均来自汽包水(见图4)。

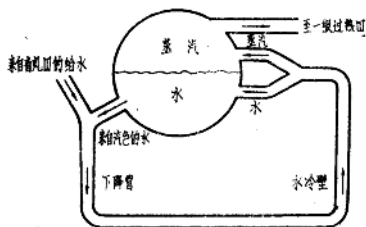


图3 汽包设计方案1

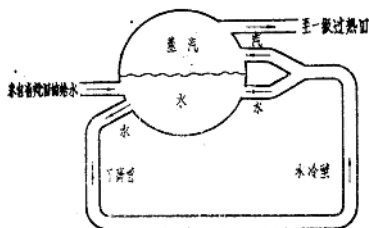


图4 汽包设计方案2

在建模过程中发现,两种设计方案的模型方程完全不同,因而需要分别单独处理。

由于这个模型基本上基于采用第一种方案的Cromby机组,故其初始设计采用了第一种方案的方程。下降管/水冷壁模块包含计算如下各项所必要的方程:下降管焓、水冷壁内的能量平衡方程,自水冷壁流出的汽水混合物的干度。

假设汽包水和给水绝热混合,如下计算下降管的焓:

$$H_{DWNW} = \frac{(FLO_{DWNW} - FLO_{ECOW}) \cdot H_{DRMW} + FLO_{ECOW} \cdot H_{ECOW}}{FLO_{DWNW}}$$