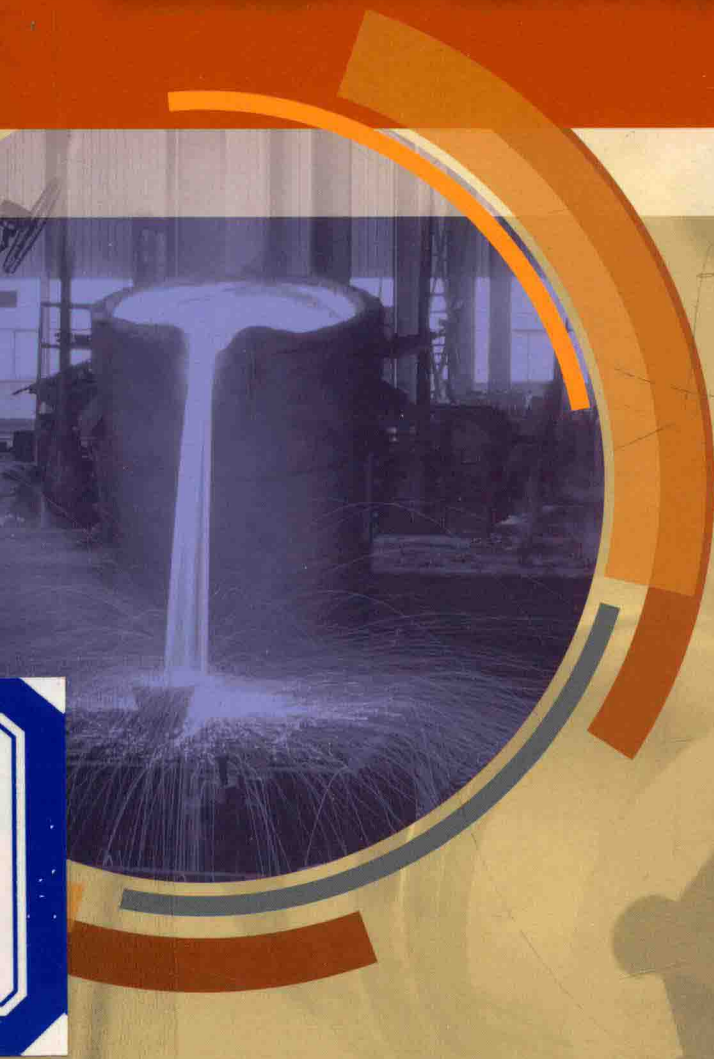




机械类 国家级实验教学示范中心系列规划教材

# 热能工程实验与实践教程

宋泾舸 主编



科学出版社

机械类国家级实验教学示范中心系列规划教材

# 热能工程实验与实践教程

宋泾舸 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是一本以介绍虚拟实验为主的大学实验教材。在工程热力学、传热学、工程流体力学等热能工程相关的理论与实验的基础上,以系统仿真技术为平台,通过虚拟实验,实现大规模热能工程系统的构建、结构与参数的调整、分析,探索创新型热能工程实验的基本原则和实施途径。全书共10章,主要内容包括:热能工程实验概述、锅炉原理实验、汽轮机原理实验、热力系统及优化实验、单元机组集控运行实验、水泵性能实验、热工控制系统实验、制冷与空调实验、换热器与强化换热技术实验、热能动力系统综合实践。实验后附有思考题。

本书可作为能源与动力工程类大学本科及专科实验教材,也可作为相关专业师生和工程技术人员的参考书。为高等工程教育中的创新型实验的建设提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

热能工程实验与实践教程/宋泾舸主编. —北京:科学出版社,2016.1  
机械类国家级实验教学示范中心系列规划教材  
ISBN 978-7-03-047215-1

I. ①热… II. ①宋… III. ①热能—实验—教材 IV. ①TK11-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第008680号

责任编辑:毛莹 张丽花 / 责任校对:蒋萍

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年1月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:300 000

定价:42.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

实践教学在高等工程教育教学中具有十分重要的作用。传统的实验模式以验证理论课的教学内容为目标。受硬件条件的限制,实验无法在设备类型、系统结构、实验工况等方面有较大的变化,难以给学生提供自主构建新系统的机会。由于实验缺乏灵活性,难以为学生提供丰富、灵活的创新型实践条件。

创新型实践教学是高等工程教育的重要环节和发展方向。与传统实验的验证型目标不同,创新型实验的目标是通过创新的实验过程提升学生的学习兴趣,要有贴近工程与生活的实例。通过改变原始实验系统多方面的特征,从而创新地认识、理解、掌握和运用理论知识。系统特征的变更过程与效果是创新认知的重要来源。近年来,随着仿真技术的不断发展,基于计算机仿真的虚拟实验日益受到国际工程教育界的重视。虚拟实验在以复杂工程系统为对象的工科高校理论与实践创新型教学中具有节约能源、节省占地、可模拟多种复杂工况等优势。虚拟实验为创新型工程教育实践提供了灵活、强大、无风险的实践环境。探索基于过程仿真软件的创新型实践教学,对于改进面向复杂工程系统的工科专业课教学具有重要的意义。

热能工程实验是能源与动力工程专业教学实践的重要组成部分,是仿真实验的重要应用领域之一。然而,目前基于系统仿真技术为主的热能工程实验指导书还比较少见。作者根据多年教学实践编写了这本以实物实验与虚拟仿真实验相结合的面向创新型实践能力培养的热能工程实验教学指导书。实验体系以物理实验为基础,帮助学生认识和理解热能工程涉及的燃烧、传热等过程若干机理,以系统仿真技术为主要实验手段,以复杂热能系统为对象,建立旨在提升热能工程学生创新型实践能力的系列实验。

本书涉及的实验是在工程热力学、传热学、工程流体力学等热能工程相关的理论与实验的基础上,结合热能工程实际开设的拓展性实验。本书的特点是以物理实验为基础,以系统仿真实验为主,通过大规模热能工程系统的构建、结构与参数的调整和分析,探索创新型热能工程实验的基本原则和实施办法。主要内容包括:热能工程实验概述、锅炉原理实验、汽轮机原理实验、热力系统及优化实验、单元机组集控运行实验、水泵性能实验、热工控制系统实验、制冷与空调实验、换热器与强化换热技术实验、热能动力系统综合实践。为高等工程教育中的创新型实验的建设提供参考。

本书共 10 章。第 1、4、6、8、10 章由宋泾舸编写,第 2 章由陈琪编写,第 3、7 章由李学政编写,第 5 章由杨飞编写,第 9 章由张竹茜编写。全书由宋泾舸统稿,并由何伯述教授主审。本书在编写过程中参阅了以往其他兄弟院校的同类教材、资料及文献,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在不足之处。恳请广大读者提出宝贵意见,以求进一步改进。

作 者

2015 年 6 月 10 日

# 目 录

## 前言

第 1 章	热能工程实验概述	1
1.1	热能工程实验的目的和意义	1
1.2	热力系统稳态仿真实验平台基本操作	3
1.3	火电厂仿真机介绍	9
第 2 章	锅炉原理实验	13
2.1	实验 1: 煤的发热量测定	13
2.2	实验 2: 锅炉热平衡综合实验	17
2.3	实验 3: 锅炉燃烧系统动态分析实验	20
第 3 章	汽轮机原理实验	26
3.1	实验 1: 汽轮机级内热力性能分析	26
3.2	实验 2: 凝汽器真空系统仿真分析	30
3.3	实验 3: 汽机轴系振动的监测仿真	33
3.4	实验 4: 数字电液调节系统仿真	38
第 4 章	热力系统及优化实验	46
4.1	热力系统仿真实验平台功能详解	46
4.2	实验 1: 发电厂热力系统结构与循环过程认识实验	79
4.3	实验 2: 发电厂热力系统过程分析实验	83
4.4	实验 3: 热力系统参数调整与能效分析实验	87
第 5 章	单元机组集控运行实验	91
5.1	实验 1: 单元机组启停	91
5.2	实验 2: 单元机组正常运行	94
5.3	实验 3: 单元机组事故处理	97
第 6 章	水泵性能实验	99
6.1	实验 1: 水泵性能测定	99
6.2	实验 2: 水泵串并联性能	102
第 7 章	热工控制系统实验	105
7.1	实验 1: 上水箱动态特性测试	105
7.2	实验 2: 锅炉燃料控制系统	108
第 8 章	制冷与空调实验	111
8.1	实验 1: 制冷系统结构及过程认识	111

---

8.2	实验 2: 吸收式制冷系统热力过程仿真	114
8.3	实验 3: 制冷系统热力特性分析	117
<b>第 9 章</b>	<b>换热器与强化换热技术实验</b>	<b>121</b>
9.1	实验 1: 对数平均换热温差测定实验	121
9.2	实验 2: 翅片管换热器换热性能测定实验	124
<b>第 10 章</b>	<b>热能动力系统综合实践</b>	<b>130</b>
10.1	大型火电机组 DCS 操作员站使用方法	130
10.2	大型火电机组锅炉设备规范	142
10.3	大型火电机组汽轮机设备规范	156
10.4	大型火电机组主要启动与正常运行操作	167
10.5	大型火电机组设备运行曲线	180
10.6	热力系统创新设计举例	188
<b>参考文献</b>		<b>196</b>

# 第1章 热能工程实验概述

## 1.1 热能工程实验的目的和意义

### 1.1.1 实验的目的和意义

实践教学在高等工程教育教学中具有十分重要的作用。传统的实验模式，以验证理论课的教学内容为目标。受硬件条件的限制，实验无法在设备类型、系统结构、实验工况等方面有较大的变化。这种实验缺乏灵活性，难以给学生提供自主构建新系统的机会，难以调动学生实践的主观能动性。

创新型实践教学是高等工程教育的重要环节和发展方向。近年来，随着仿真技术的不断发展，基于计算机仿真的虚拟实验日益受到国际工程教育界的重视。虚拟实验在以复杂工程系统为对象的工科高校理论与实践创新型教学中具有节约资源、节省占地、可模拟多种复杂工况等优势。虚拟实验为创新型工程教育实践提供了灵活、强大、无风险的实践环境。过程仿真软件是一类用来仿真过程系统稳态和动态过程中参数变化的系统仿真软件，广泛应用于工业系统运行过程的分析，如热力系统、化工系统、机械系统等。探索基于过程仿真软件的创新型实践教学，对于改进面向复杂工程系统的工科专业课教学具有重要的意义。

### 1.1.2 创新型实验的特征

传统实验以验证理论为目标，实验过程比较固定，实验结果也大同小易。与传统实验的验证型目标不同，创新型实验的目标是通过创新的实验过程提升学生的学习兴趣，要有贴近工程与生活的实例。通过改变原始实验系统多方面的特征，从而创新地认识、理解、掌握和运用理论知识。系统特征的变更过程与效果是创新认知的重要来源。参数变换、元件变换、结构变换是热力系统典型的特征变更方式。

创新型实验应突出通过新过程的构建来巩固理论知识、将理论知识用于新的环境，在灵活多变的条件下加深学生对基本理论的理解和运用，达到活学活用的目的。近年来，国内外对创新型实践教学都十分重视，并开展了比较广泛的研究。创新型实验应该在传统实验实施的多个环节上表现出更加灵活的实施过程。只有提供更大的发挥空间，才能激发学生自主创新的意识和促进创新能力的提高。因此，创新型实验应该在如下几个方面提供更加灵活的选择。

#### 1. 能够自主地搭建实验系统

自主地搭建实验系统已经在许多领域的创新型实验中得到应用。例如，机器人、电子系统等。但在涉及大型过程系统的专业课教学中，搭建物理系统是不现实的。采用基于模块的过程仿真系统能够在认识和理解设备仿真模块的基本行为和特性的基础上，为学生提供自主



搭建简单和复杂工程系统的机会。通过自主地搭建系统,学生能够对设备的连接要求、接口参数的选择、管路特性、工质质量和能量的传递过程等有更直观的体验和理解。

## 2. 能够自主地选取实验条件

传统的实验,实验条件相对单一或只有预先设计的几种情况。如果学生任意改变实验条件,可能得不到理想的实验结果,甚至造成实验设备的损坏。创新型实验,应该能够给学生提供更大的选取实验条件的空间,包括可能出现问题和故障的条件。这样,学生在进行创新思维和实践时,才能有效地修正自己的实验方案,向着可行的方向发展,而不是随意设想。这点在高等工程教学中非常重要。

## 3. 能够自主地调整实验过程

自主地调整实验过程既包括调整质量流、能量流、信息流的流动方向,又包括为了调整这些流动而通过添加设备和管路进行系统结构的改变。例如,在热力循环过程中,对原则性热力系统的设备特性的改变或对局部参数的调整都会对热力循环中系统各部件的运行状态产生一定程度的影响,使系统的整体特性发生改变。通过对系统特性变化多样性的认识,创新性地理解和掌握相关理论知识。

基于这些特征,利用以计算机仿真技术为支撑的实验手段是创新型实验的一个重要发展方向。

### 1.1.3 虚拟实验与实物实验融合的必要性

能源科技是我国“十二五”七大新兴产业发展战略之一。随着能源系统向大型化、复杂化方向发展,研究领域与化工、环境等不同学科融合与交叉,例如,总能系统的热力学分析理论、不确定性模型集成建模、混杂系统建模方法、热力系统优化控制、热力系统的状态监测和故障诊断等。这些研究都需要多工程领域集成建模与仿真分析软件平台的有效支持。

由于热力系统相关设备结构复杂、体积庞大、资源消耗大,采用纯实物实验的方法存在一些主要缺点:①投资大;②占用场地大;③资源消耗大;④实验周期长;⑤过程重复有一定难度;⑥故障难以模拟;⑦单次实验的学生人数严重受限;⑧无法对系统结构进行较大改动;⑨设备维护成本高。因此,采用计算机仿真分析几乎是唯一可行的实践锻炼的解决方案。

图形化热力系统仿真分析软件包是能源与动力工程专业用来进行热能工程领域系统构建、仿真、分析、优化的面向创新能力培养的实践性教学软件包。为了提高能源与动力工程专业热能工程领域的创新性、实践性教学水平,增进学生对热力系统工作过程的深入理解和相关操作的掌握能力,非常有必要采用这样的系统软件。

对于热能工程实验,这样的软件系统应该主要考虑如下技术特征。

#### 1. 面向对象的图形化建模环境

通过图形组件的拖放与连接实现直观建模,可视化编辑组件属性调整系统参数,通过菜单选项实现系统性能分析,通过曲线(热力循环、参数趋势)显示分析结果。

#### 2. 对热能工程的专业支撑能力

软件应具有多种热力系统涉及的组件库,能够支持多种热力系统对象的实践分析,包括火电站、供热系统、制冷与空调系统,如锅炉、汽机、换热器、泵与风机、阀门、管道等,同时支持多种热工介质的性能分析,如水和水蒸气、氨、R143a等介质。



### 3. 系统具有可扩展性

软件应能够在现有功能基础上进行部件、算法的扩展。虽然虚拟实验在创新型实践教学发挥着重要的作用，但实物实验在一些系统相关的实践教学中仍然是必不可少的。从小型的实物系统实验结果向大型仿真系统的平滑过渡与集成，能够为学生提供多层面、多尺度的学习环境。以此作为实践框架，探索构建热力系统仿真分析实践平台的功能和创新型实践内容，将形成一种多尺度的创新型实践教学模式。

## 1.2 热力系统稳态仿真实验平台基本操作

“热力系统稳态仿真实验平台”是用于进行简单和复杂热力系统的过程认知、系统构建、稳态特性分析的虚拟实验平台。在“汽轮机原理实验”、“热力系统及优化实验”、“制冷与空调实验”、“热能动力综合实践”的实验与实践环节中能够提供丰富的虚拟实验条件。下面介绍该平台的基本使用方法，详细的功能请参考本书4.1节。

### 1.2.1 仿真实验平台的启动

在桌面上双击稳态仿真系统快捷图标启动，打开一个窗口，如图1-1所示，可以根据需要设定工具栏的排列形式，因此外观可能略有不同。在第4章中将介绍构成屏幕各部分的内容。

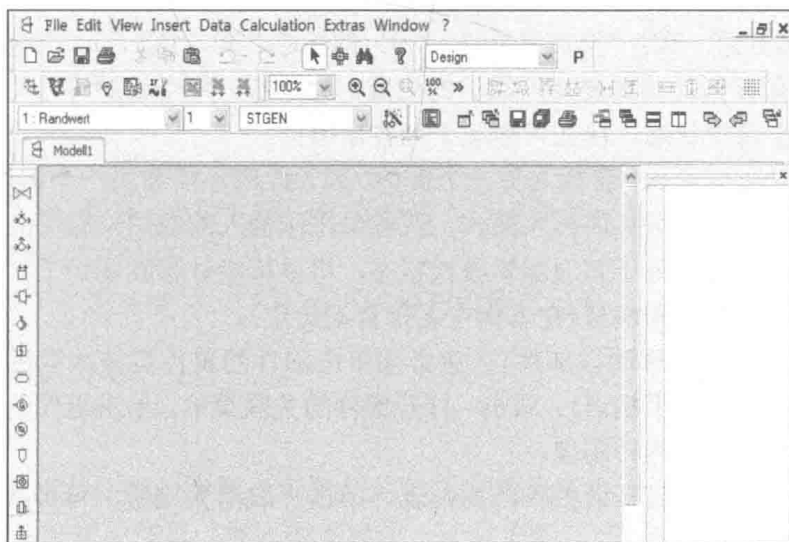


图 1-1 稳态仿真环境主窗口

本节通过使用几个部件来介绍如何构建一个简单热力循环，从而了解如何使用该稳态仿真环境。本示例将介绍：

- (1) 如何加入部件及管道；
- (2) 如何使用错误分析功能来完善循环；
- (3) 如何显示结果；
- (4) 学习稳态仿真环境中“设计工况”与“非设计工况”两种模式的区别。

## 1.2.2 创建循环

下面介绍绘制一个简单的汽水循环(图 1-2)。

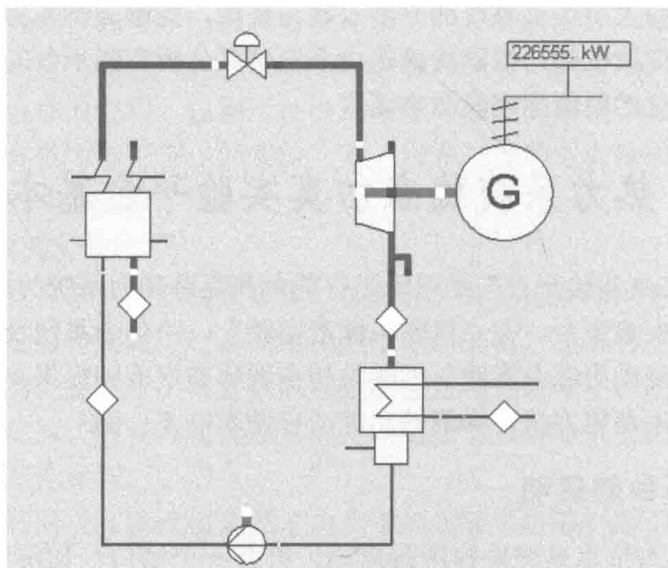


图 1-2 简单的汽水循环

### 1. 插入锅炉

从蒸汽发生器开始，单击“蒸汽发生器”符号(部件栏中第二个条目)，并选择“蒸汽发生器”→“类型 1”。将鼠标指针移到要插入锅炉的位置，并单击，一个锅炉符号将被插入图中。刚插入的锅炉仍处于选中状态，现在可继续下列各项操作。

如果单击锅炉外面区域，会插入另一个锅炉。因为此时不需要另一个锅炉，插入后按“删除”键，即可删除。右击可关闭插入模式，或者单击刚插入的锅炉，即可关闭插入模式。

上面操作之后，现在处于普通编辑模式状态，将鼠标指针移到锅炉上，随之出现的工具提示窗口，显示部件名称和编号(在本例中名称自动给定)。

单击锅炉，现在可以移动该部件(注意必须单击部件的黄色实体才能进行该项操作，而不是单击所连接的线路或手柄点)，右击，打开部件的关联菜单。单击组件的 8 个小手柄点之一，可以缩放图像大小或旋转图像。

双击“锅炉”符号，打开此部件的属性表。单击“取消”按钮，可再次关闭属性表。

### 2. 插入控制阀

下一个将要插入的部件是控制阀。因为在设计模式中，蒸汽发生器确定流出的蒸汽压力，而汽轮机确定汽机入口压力，所以，需要一个压力分离器，即需要一个控制阀。若插入该部件，单击部件栏上的节流阀，并选择“控制阀类型 1”。为进一步的工作，放大图形可能会更方便。使用工具栏上的“缩放”组合框(键入数值或选择一个数值)，或者单击组合框右侧的“100%”按钮，即可放大。

如果单击的是“100%”按钮，图形的大小将不断调整，以适合窗口。如果想放大图，使用“>>”按钮，可放大可见区。若欲放大图形区域的一部分，用鼠标右键选择绘制选择框(持续按住鼠标右键，直到出现的矩形覆盖要放大的部分为止)。

### 3. 插入蒸汽管道

绘制锅炉和控制阀之间的连接，具体实现如下。

双击蒸汽发生器(锅炉)的流出蒸汽出口(左上角红色手柄中的黑色区域——出口接点永远为黑色)，将鼠标拖到控制阀入口(入口接点永远为白色)，然后单击。软件将自动绘制接管并将接管标准化(显示为矩形)。如果管道未标准化显示，单击激活菜单栏中“视图”→“标准化管道”复选框。红线表示蒸汽管线。通过“部件属性”窗口可以查看部件接点的含义，双击部件可以打开窗口，在此窗口中，将鼠标指针指向右侧图片中的部件接点，系统会提示该接点的属性。

### 4. 插入汽轮机

单击部件栏中的“汽轮机”图标，并选择“汽轮机”→“类型1”。连接控制阀的出口与汽轮机的入口。因为本稳态仿真环境不允许类型错误的接点相连，所以需要找到汽轮机上正确的连接点。

### 5. 插入发电机

选择“编辑”→“插入部件”→“电动机/发电机”→“发电机”，即可插入发电机。将机械轴(粗绿线)接到汽轮机轴输出端上。另外，双击电气出口，绘制一条短线(双击完成画线)。短线的绘制是为了以后可以通过连接值字段从而显示发电机的功率。

### 6. 加入汽轮机凝汽器

在热交换器部分(部件栏中的第7个条目)，可以找到汽轮机凝汽器。将凝汽器插入汽轮机下方，并将汽轮机的蒸汽出口之一接到凝汽器的蒸汽入口上。为了说明和显示冷却水状态的需要，在冷却水入口和出口(最右侧接点)上绘制一条短水管(蓝色管)。

### 7. 加入泵

在部件栏中的第6个条目是泵。将凝汽器出水口(底部)连接到泵入口上，将泵出水口连接到锅炉的进水口上。最后，必须在锅炉的再热器入口下绘制一条短线(锅炉右下角的蒸汽连接)，以定义再热器的入口状况。

现在图形建模工作准备完毕，下面可以试着开始仿真运算。

## 1.2.3 计算和错误分析

### 1. 仿真

现在如果想让该循环投入运行，可以从菜单栏中选择条目“计算”→“仿真”，或单击“仿真”按钮，将得到错误信息“输入数据错误，计算失败”，这是正常的，因为尚未设定任何模型数据。实际上，当中许多数据已经给定。插入部件时，本稳态仿真环境会自动从标准库插入该部件的一套标准规格数据或默认值。这些数据可在属性表中查看(双击部件，或用鼠标右键打开关联菜单，并选择“属性”)。

### 2. 错误分析

通过错误分析，可以得知还缺少哪些数据。单击“计算”→“错误分析”。注意，除含有错误的线路或部件以外，图其余部分变为灰色。错误部件通过颜色突出显示出来。详细情况在错误窗口中显示(图1-3)。

字段“Error-Type”(错误类型)指出出现的错误类型，而字段“Component”(部件)给

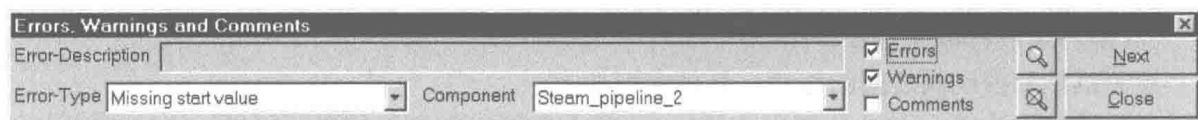


图 1-3 错误窗口

出含有该错误的部件或线路的名称。注意，与部件一样，线路也具有相应命名。这里，错误“Missing start value”（缺少初值）指的是汽轮机和冷凝器之间的管子缺少冷凝水压力。

### 3. 插入初值

若欲定义该值，从部件栏选取“插入初始值”图标，选择“边界输入值”组件，并将其置于红线上（注意，进行错误分析的同时也可编辑模型）。“边界输入值”组件在置于管路上时会自动变为菱形，不在管线上时为沙漏形。在插入后，双击插入的初始值并键入输入字段中的压力  $P$  的所需值，如 0.07bar（若欲使用其他单位，可以通过单位组合框进行切换）。

选择下一个错误类型“Missing mass flow”（缺乏质量流量）。在右边的部件列表中，会看到该项下面包括了许多线路。当浏览该列表时，线路将逐一上色。可以使用“放大镜”查找上色的线路。

将输入值置于泵和蒸汽发生器之间的水管上，并定义质量流量  $M$ ，如 200kg/s。可以用 Ctrl+C/Ctrl+V 复制/粘贴现有值，而不需插入新“输入值”。若欲删除入口压力，选定它并使用删除键删除。

### 4. 其他仿真分析

关闭错误分析窗口，并再次进行仿真。通过错误分析，得知仍然缺少一个质量流量，即锅炉的入口蒸汽流量。在同一线路上还缺少压力和焓。在一个“输入值”组件中指定所有 3 个值，可以用指定温度来代替指定焓，例如，指定  $P = 30\text{bar}$ 、 $T = 300^\circ\text{C}$  和  $M = 0\text{kg/s}$ 。注意，指定值为“0”和空白之间有重大差异。如果字段留空白，则暗示未定义相应数值。如果插入 0，则指定 0 值。当再次计算时，会发现缺少冷却水的压力和焓。例如，指定  $P = 2\text{bar}$  和  $T = 300^\circ\text{C}$ 。

虽然仍然有警告，但是现在计算能够成功进行。警告是因为泵的实际值超出规定的特性范围。此警告可以暂时忽略。

打开该文件，单击文档中的“窗口”→“平铺”，显示两个窗口。比较部件和线路的布置以及属性表中的规格值。当将鼠标指针置于发电机的电气出口上时，显示相应的电功率。也可在此设置数值显示域。

## 1.2.4 设计和非设计模式

本稳态仿真环境下有两个全局计算模式：

- (1) 设计 (Design) 模式 (“满负荷”)；
- (2) 非设计 (Off-Design) 模式 (“部分负荷”)。

### 1. 设计模式

设计模式适用于创建新循环。该模式下可定义所有部件的适当参数数据，例如，根据制造商所提供的特性数据。设计模式下得出的计算结果将被自动保存为非设计计算模式的基准

值。例如，一个汽轮机部件，双击该部件，可以打开该部件的规格值。值 P2N(公称出口压力)为基准值。在设计模式下，该值不用于计算。

当插入新汽轮机时，可以得到默认的 0.01bar 虚设值。经过设计模式计算后，蒸汽出口压力的计算值将被用来自动替代虚设值并保存入该字段。改变汽轮机和冷凝器之间的“输入值”部件中的  $P$  值，可计算测试该项功能。

## 2. 非设计模式

非设计模式借助出口压力转换定律计算汽轮机参数(在本例中为“斯托多拉”定律)。非设计模式建立在已经完成计算的设计工况的基础上，对不同非标准工况进行变工况计算(采用不同的输入数据)。

## 3. 模式文件

模式文件以树形结构方式组织了多个针对该系统的仿真计算模式。若欲创建新模式，单击模式栏中的“P”按钮，随之打开“模式”对话框，其中显示了现有的模式结构。若欲添加模式，单击“新子模式”。缓慢单击新模式在树形结构中的名称两次，即可改变新模式的名称。在树形结构中选择新模式，单击“激活”。在模式栏组合框中，会显示现有模式的名称。可以使用该组合框在不同模式之间切换。

注意，子模式从其母模式继承所有属性(例如，所有部件的规格值和特性)。若欲在现有模式中切换到非设计模式，从工具栏中“其他功能”当中单击“模型选项”，在模式文件窗口中切换到非设计模式。切换完成之后的运算为变工况计算。在修改特性数据的时候，会发现从母模式继承的值呈灰色，修改的值以黑色显示。

## 1.2.5 结果显示

本稳态仿真环境提供各种不同的结果显示方式。

### 1. 工具提示窗口

最容易的方法是将鼠标指针置于部件或管道上。几秒后，在随之出现的工具提示窗口中会显示与该部件/管道相关的主要热动力参数值。

### 2. 属性窗口

双击管道或部件，可打开属性表。另外，可以从菜单栏选择条目“编辑”→“属性”或右击部件/管道，在显示的关联菜单中选择“属性”。属性中有一个“结果”选项卡，显示相应线路或部件的计算结果值。

### 3. 数值十字标

若欲永久显示结果值，可以使用数值十字标。单击部件栏中的数值十字标符号(倒数第二个条目)，将鼠标指针移到想添加的线路或部件上，按下鼠标左键并移动鼠标，数值十字标此时自动改变大小。如果大小合适，松开鼠标左键即可插入数值十字标。

右击(如果不想继续插入另一个十字标)，停止插入。然后再次选中该十字标，即可在十字标内单击，移动十字标，或者单击它的手柄以改变大小。

双击十字标，可打开相应属性表(图 1-4)。

在此，可以设置哪些数值类型显示在数值十字标中。底部列表显示了所有适用于选定线路或部件的数值类型。使用上/下箭头键，可以在数值十字标左列或右列中插入数值，或将这

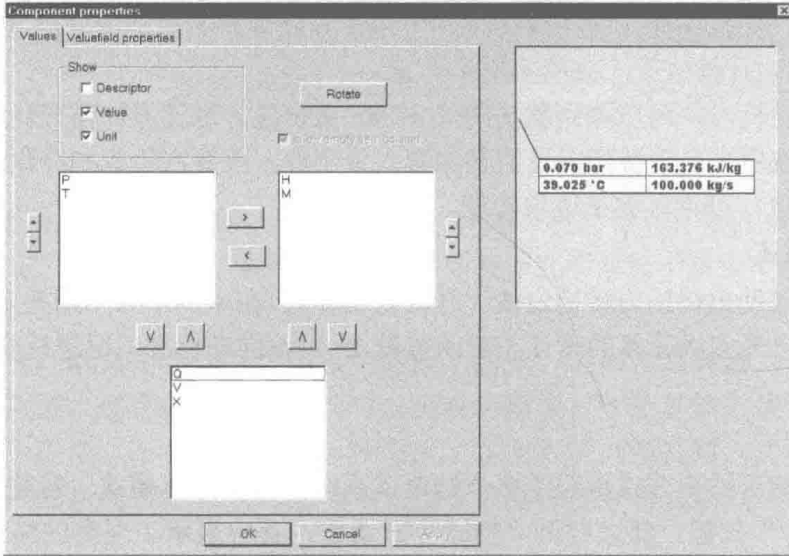


图 1-4 属性表

些数值从这些列中删除。使用最左和最右的微调按钮，可以改变数值排列顺序；使用“<”和“>”按钮，可在左列和右列之间移动条目。

在基本属性中，可以定义是否显示说明和单位，可以旋转字段。当第二列空白时，可以决定是否显示空列。属性表的第二个选项卡（“数值域属性”）用于对线型、字体和接至底层对象的线条进行上色和修改，以改善显示效果。如果想在循环画面中放置几个相同大小和相同设置的数值十字标，可以用 Ctrl+C 键和 Ctrl+V 键复制和粘贴数值十字标，并将接点移到有需要的线路或部件上。

## 1.2.6 使用宏

通常，如果不想用单个部件，而是使用预定义的宏 (Macros) 来协助构造一个循环，有几个宏库可提供使用。另外，用户也可创立自己的个人宏库。

### 1. 创建宏

“宏”是由一组单个部件形成的“封装部件”（或“子系统”）。若欲创建宏，只需选择编辑区系统中的部分模型（通过使用鼠标左键和 Shift 键单击单个部件或用鼠标左键绘制截取框），然后单击菜单栏中的“宏”→“保存”。指定宏的名称和说明，并单击“确定”按钮。宏将添加到宏库中，宏的名称可以显示在部件向导栏中的宏组合框中。

### 2. 插入宏

若欲使用宏，选择该组合框下的一个宏部件（或单击菜单“宏”→“插入”），并将鼠标指针移到将插入宏之处。注意宏只是方便部分模型的多次重复使用。如果只是将编辑区的一部分复制到另一个编辑区上，只需使用复制和粘贴即可。

### 3. 用宏建立循环

选择“文件”→“新建”打开新循环，插入如下宏：

- (1) 锅炉与汽轮机高压缸；
- (2) 汽轮机中压缸；



- (3) 汽轮机低压缸;
- (4) 汽轮机低压缸与发电机;
- (5) 冷凝器;
- (6) 低压预热器;
- (7) 高压预热器。

适当排列和连接宏, 然后进行计算(如果有警告信息, 可以忽略)。现在仍旧缺少的是循环效率的计算。循环效率的计算必须对泵的功率求和, 然后从发电机电功率减去泵的总功率。结果必须与“效率表”部件以及“蒸汽发生器”部件的输入能量相连。因为开始时已把这些线路设为不可见, 可使用“视图”→“全部显示”查看这些线路。

## 1.3 火电厂仿真机介绍

火电厂仿真机是用于进行火电厂热能动力系统全过程学习和系统特性分析的虚拟实验平台。在“锅炉原理实验”、“汽轮机原理实验”、“热工控制系统实验”、“单元机组集控运行实验”、“热能动力综合实践”的实验与实践环节中能够提供丰富的虚拟实验条件。下面对火电厂仿真机进行简要介绍, 关于本书采用的火电厂仿真机的详细功能与使用方法请参考本书的 10.1 和 10.2 节。

### 1.3.1 火电厂仿真机概述

仿真机是利用计算机仿真技术进行工程对象分析和技术人员培训的设备。发电设备数学模型计算机提供实时数据, 配合部分或全部真实控制台屏或表示监控台屏的屏幕显示(CRT)画面, 演示与真实情况相同的电力设备各种运行方式的状态, 包括启动、正常运行、停机和事故情况下的状态, 可以满足各种目的的培训要求。目前, 仿真机已广泛应用于培训操作人员、工程技术人员及管理人员, 提高他们的监控能力和运行技术水平。仿真机是以计算机技术和仿真技术为基础并应用电网、自动控制、仪表和电厂的锅炉、汽轮机、发电机以及运行专业的理论和实践知识而研制的一种实用装置。

#### 1. 仿真机的特点

(1) 可实现对电厂的生产全过程进行仿真, 额定参数的正常启动、停机, 滑参数的启动、运行、停机, 机组带基本负荷的运行特性, 机组带调峰负荷的运行特性, 冷态、温态及热态、极热态启动运行, 故障跳闸和各种操作以及其他扰动下的暂态特性。

(2) 模型符合物理学、数学和电力科学的基本定律, 而不是用预定的关系曲线来代替, 任何近似的假设和计算方法, 都不应该降低对模型逼真度的要求。

(3) 设备或系统的模型都能良好地反映其动态过程, 能够实现对仿真对象的连续、实时的仿真, 仿真效果与实际机组运行工况一致, 仿真环境应使受训人员在感觉上和视觉上与被仿真机组实际环境一致。

(4) 具备完善的运行人员培训功能, 提供向受训人员展现正常和故障情况的实际现场运行状态, 有效地提高运行人员的专业知识、操作技能、应变能力和熟练程度, 使运行人员经培训后能熟练地掌握机组启停过程和维持正常运行的全部操作, 学会处理异常、紧急事故的技能, 提高实际操作能力和分析判断能力, 训练应急处理能力, 确保机组安全、经济运行。



(5) 具备在不同工况条件下分析和改进机组运行操作方案、方式, 并加以优化的能力和手段。

(6) 具备对岗位运行人员、热控检修岗位和技术管理人员进行定期轮训的能力, 可作为上岗、晋升前的考核手段, 客观地反映被培训人员的实际操作能力和分析判断能力, 提供相应手段。

(7) 具备对机组的控制系统进行仿真研究以选择最佳的控制方案和动态整定参数的能力和手段。

(8) 具备对机组的故障原因和结果进行分析, 以便改进运行操作和制定反事故对策的能力和手段。

## 2. 仿真机的分类

从仿真机的培训目的和功能来分类, 可以划分为基本原理型和全仿真型。基本原理型所配置的控制台屏不是以某一实际电站为目标, 而是从基本原理出发模拟某类型、某容量机组的主要设备和系统, 并配置简化的供学员学习和掌握基本原理的台屏, 可以进行操作和显示操作结果参数的 CRT 画面, 或兼有台屏和 CRT 画面。用以培训新的操作员或在校学生, 使其从直观上学习和掌握电厂设备和系统特性、物理过程、介质流程及故障的原因和结果。为全仿真型培训仿真机或实际电厂操作打基础。

硬件系统一般包括: ①微型机或小型计算机; ②磁盘、打字机等外围设备; ③输入/输出接口和教学考核设施; ④台屏。台屏仿真有两种形式。①模拟台屏型: 模拟屏上布置有主要设备和系统流程图, 配有主要参数指示仪表; 操作台与屏一般联成一体, 台上布置有控制台硬件设备诊断、显示图像、在线数据库监视、学员成绩评价、计算机辅助练习等。②CRT 画面操作型, 通过教练员台控制屏和 CRT 画面配合实现电站各类操作功能选择。画面选择有专家方式和菜单方式。

## 3. 虚拟 DCS 仿真

虚拟 DCS (Virtual DCS) 是相对于在过程工业系统中运行的真实 DCS (Real DCS) 而言的, 虚拟 DCS 就是将真实 DCS 在非 DCS 的计算机系统中以某种形式再现。“虚拟”是现今广泛使用的一种高新技术概念, 如有实现视景模拟的“虚拟现实”、采用 CRT 交互的“虚拟仪表”、构建远程多媒体双向通信的“虚拟会议”等。当然, 虚拟技术是完全建立在当今高性能的计算机硬件、软件和网络系统之上的。虚拟 DCS 不同于其他虚拟技术的是, 其被虚拟对象也是计算机系统, 而不是一般的物理系统。虚拟 DCS 是在计算机系统上再现计算机系统, 具体地说, 就是在一种通常为开放平台计算机信息管理系统中, 尽可能真实地再现集散控制计算机系统。虚拟 DCS 正是过程工业数字化的基础之一。

在实际应用中, 为了达到设计调试、人员培训、检测诊断等系统应用目标, 需要将真实 DCS 在非 DCS 的计算机系统中再现。目前共有 3 种形式, 是分别根据 DCS 的控制设计、离线组态和构成运行系统等生命周期的不同阶段获取系统资源而实现的。

(1) 激励 DCS (Stimulation DCS)——通常是简略输入/输出板卡和外设, 采用真实 DCS 的硬件、软件和网络系统的适当或最小配置, 再现 DCS。激励 DCS 具有最高的软硬件逼真度, 但是软硬件实现成本很高, 与对象模型系统连接较难, 无法完成复杂的仿真应用功能。

(2) 虚拟 DCS (Virtual DCS)——在完成 DCS 组态之后, 采用对 DCS 网络下载文件进行

智能编译转换的方式，实现 DCS 的平台转移和再现。虚拟 DCS 应具有极高的软件功能逼真度，实现成本不高，能够完成复杂的仿真应用功能。

(3) 仿真 DCS (Simulation DCS)——只要 DCS 完成控制功能和逻辑设计，就可以根据设计图纸进行仿真。仿真 DCS 是多年来培训仿真系统通常采用的形式，虽然实现成本不高、能够完成复杂的培训仿真应用功能，但软件功能逼真度和可信度相对不够高，跟踪修改较难，几乎不能完成人员培训功能以外的高级应用功能。

虚拟 DCS 的特点，就是控制参数和算法完全来自下载文件，使用与 DCS 相同的算法、模块、时间片、位号等，可以同步修改更新，软件功能逼真度很高。可以说，虚拟 DCS 能够真正有效、经济和广泛地应用于人员培训和在线检测诊断，满足火力发电等过程工业“数字化”的需求。

### 1.3.2 1000MW 全范围仿真机

本实验采用的 1000MW 全范围火电站仿真系统是针对火电站主控室的 1:1 仿真系统。能够仿真包括锅炉、汽轮机、发电机、制粉系统等火电机组的几乎所有设备及系统工况。主要功能包括：

- (1) 冷态、稳态、热态到满负荷的机组启动操作；
- (2) 正常停机操作和紧急停机操作；
- (3) 指定工况的设备启停或升降负荷；
- (4) 任意工况的稳定运行；
- (5) 仿真模型运行、冻结；
- (6) 初始工况存、取；
- (7) 故障加入、清除；
- (8) 就地设备的运行状态监控；
- (9) 电站热力系统的图形化动态建模与仿真。

如图 1-5 所示，本实验采用的火电站仿真机是一个由多台不同功能的计算机构成的网络

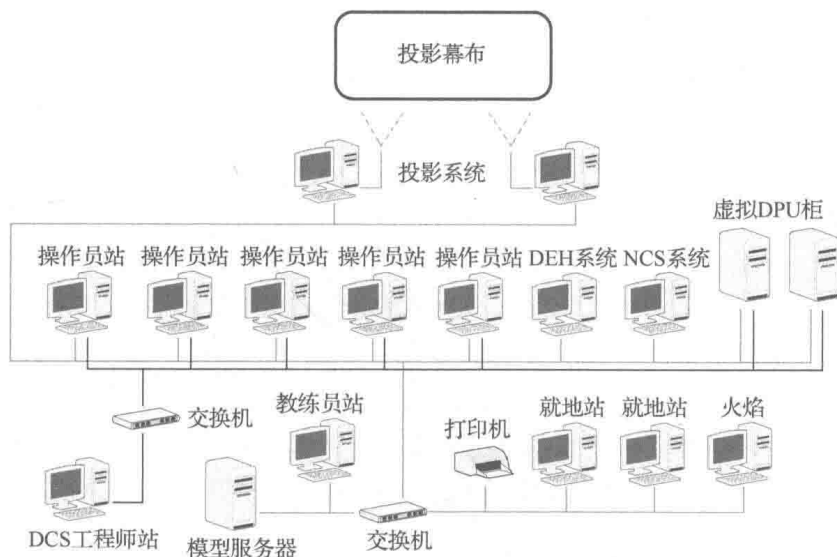


图 1-5 火电站全范围仿真机系统结构