

Design of Thermal Performance Calculation Software for Thermal Power Plant



A Thesis Submitted to Chongqing University
in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering

By
Song Jian

Supervised by Prof. ZHANG Xinming
Major: Power Engineering and
Engineering Thermophysics

College of power Engineering of Chongqing University ,
Chongqing, China

May, 2011

摘 要

随着火电机组单机容量的不断增大,热力系统结构也变得越来越复杂。采用手工计算和基于传统编程方法编制的软件往往只针对某一具体的特定机组,当热力系统配置或内部联结方式发生变化时,往往需要修改代码,限制了计算的速度和方便程度。随着软件工程和高级编程语言的出现,为开发火电机组热力性能计算软件创造了条件。

本文以电站热力设备及系统为研究对象,建立了热力设备及系统的热力性能计算模型,同时根据软件的需要对水和水蒸汽热力性质的计算模型进行了深入研究,对热力性能计算软件的结构和主要算法进行了设计。本文主要做了以下几个方面的工作:

①对热力性能计算软件的国内外研究概况、课题意义进行了阐述。结合火电机组热力性能计算软件的开发和应用,应用软件工程方法学对软件进行了需求分析和功能设计。

②回热系统的计算是热力性能计算的核心,在对不同容量、不同类型机组的热力系统结构进行分析的基础上,对热力系统进行了模块划分。本文设计的热力性能计算软件具有组态功能,为此,本文在加热器物理模型中引入了疏水开关,提出了一个包含有通断系数 K 的回热系统通用数学模型。

③根据热力性能计算的需要,研究了水和蒸汽热力性质公式 IAPWS-IF97,编制了水和蒸汽热力性质求解程序。为了保证计算的效率及准确性,应用热力学原理对 IAPWS-IF97 的区域划分算法进行了较深入的研究,并体现于算法中。根据各区公式指数的排列规律对各自的计算模型进行了优化处理。

④对热力性能计算软件的组态功能的实现进行了分析和设计,编制了火电热力性能计算软件的核心代码,计算了某 N300-16.65/537/537 机组的热经济性指标。

关键词: 火电机组, 热力系统, IAPWS-IF97, 组态, 软件工程

ABSTRACT

With the continuous improvement of capacity for thermal power plant, thermal system structure is becoming ever more complicated. Hand calculation methods and software using traditional programming often stuck to a specific plant. While thermal system configuration or method of internal connection is changed, the software is needed to modify the code, which limits the speed of calculating and levels of comfort. With the appearance of software engineering and high level language, the development of thermal performance calculation software for thermal power plant is available.

The thermal equipment and system was taken as main object of study in this paper, and the computational model was established. For the requirements of the software, the thermodynamic properties of water and steam was researched. At last, the architecture of thermal performance calculation software for thermal power plant was designed. The main contents and achievements of the paper were as follows:

①The current situation and significance of thermal performance calculation software were introduced. Based on the development and application of thermal performance calculation software for thermal power plant, the software requirements analysis was done to apply software engineering.

②The calculation of regenerative system is the key of the thermal calculation. Through the research on different thermal system construction, the module of thermal system was devided. The thermal performance calculation software in this paper had a function of configuration. Therefore, drain switch was introduced in physical model of heater. And general mathematical model of regenerative system which contained switching coefficient was proposed.

③According to the need of thermal performance calculation software, the thermodynamic properties equation of water and steam IAPWS-IF97 was researched and the procedures of thermodynamic properties of water and steam was programmed. For the purpose of computational efficiency and accuracy, the partitioning algorithm was deeply researched to apply thermodynamic principles which was embodied in algorithm. Each computation module was processed to apply optimization method according to arrangement rule of index in each region.

④The method of system's configuration in thermal performance calculation software was researched. The thermal economical index a N300-16.65/537/537 thermal

power plant was calculated in this paper.

Key words: Thermal Power Plant, Thermal System, IAPWS-IF97, Configuration, Software Engineering

目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
符号表.....	VI
1 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 电站运行优化软件研究现状	2
1.2.2 热力系统分析方法研究现状	4
1.3 本文主要的研究内容	6
2 热力性能计算软件需求分析	7
2.1 软件工程的概 念	7
2.2 软件的需求分析	7
2.2.1 软件总体介绍	7
2.2.2 软件的功能需求	8
2.2.3 软件的数据流图	8
2.3 本章小结	9
3 电站热力系统计算模型的建立	10
3.1 热力系统模块的划分	10
3.2 加热器数学模型的建立	11
3.2.1 加热器的分类	11
3.2.2 加热器边界的划分	12
3.2.3 加热器通用矩阵模型	13
3.2.4 加热器模型设计	16
3.3 辅助设备及系统的数学模型	17
3.3.1 门杆汽封系统的数学模型	17
3.3.2 轴封系统的数学模型	18
3.3.3 给水泵和小汽轮机的数学模型	19
3.4 汽轮机排汽焓的计算	19
3.4.1 汽轮机排汽焓的计算模型	19
3.4.2 排汽焓计算结果验证	21
3.5 机组及全厂热经济指标	22

3.5.1 汽轮机组的热经济指标	22
3.5.2 全厂的热经济指标	23
3.6 本章小结	24
4 水与水蒸汽热力学性质的计算模型	25
4.1 IAPWS-IF97 的适用范围及区域划分	26
4.2 IF97 状态方程与特性函数	27
4.3 IAPWS-IF97 计算程序	27
4.3.1 第 1 类问题的求解	28
4.3.2 第 2 类问题的求解	31
4.3.3 计算结果验证	32
4.4 本章小结	34
5 火电机组热力性能计算软件的开发	35
5.1 软件结构图	35
5.1.1 组态模块	35
5.1.2 数据采集模块	38
5.1.3 热力计算模块	39
5.1.4 结果显示模块	42
5.2 软件的计算流程图	42
5.3 实例验证	42
5.4 本章小结	45
6 结论及展望	46
6.1 结论	46
6.2 展望	46
致 谢	47
参考文献	48
附 录	52
作者在攻读学位期间发表的论文	52

符号表

D	汽水流量, kg/h
f	自由能, kJ/kg
g	吉布斯自由焓, kJ/kg
h	焓, kJ/kg
p	压力, MPa
Q	加热器外部热量, kJ/kg
s	熵, kJ/(kg K)
T	温度, K
u	热力学能, kJ/kg
v	体积, m ³ /kg
α	抽汽系数
δ	相对密度
ϕ	无量纲自由能
γ	无量纲自由焓
η	效率
π	相对压力
ρ	密度, kg/m ³
τ	相对温度

下标

f	辅助汽水
s	疏水
w	给水

1 绪 论

1.1 研究背景

能源是人类社会经济增长和可持续发展的动力。改革开放以来,我国能源工业迅速发展,为保障国民经济持续快速发展作出了重要贡献。2009 年我国一次能源生产总量和消费总量已居世界第二位,但是由于我国人口众多,人均能源拥有量在世界上还处于较低水平,人均能源消费量也只有世界平均水平的 62%。同时,我国的能源开发和利用率低下,人们在享受能源带来的经济发展和科技进步等利益的同时,也付出了巨大的资源和环境代价。因此要实现能源的可持续发展,必须节约能源,提高能源利用效率。

节约能源是我国可持续发展的一项长远发展战略,是我国的基本国策。节能可以减少能源消耗,降低污染物排放,优化能源结构,因此越来越受到人们的高度重视。自 1973 年发生第一次全球性的能源危机以来,世界各国纷纷采取措施节约能源,提高能源利用效率,从而保障本国能源和经济安全。我国在“十二五”规划建议中提出,加快建设资源节约型、环境友好型社会,合理控制能源消费总量,提高能源利用效率,调整能源消费结构,大力发展循环经济,同时加强资源节约和管理,加大环境保护力度^[1]。

电力工业是我国能源工业的重要组成部分。近年来,我国电力生产大幅度增长。截至 2009 年底,全国发电装机容量 8.74 亿千瓦,其中火电装机占总装机的 74.49%,而在火电机组中,燃煤机组容量占 91.98%^[2]。可以看出,在相当长一段时期内,我国以燃煤为主的发电生产结构不会改变。而我国的火电机组由于受到材料和制造工艺、设计安装水平和运行方式等因素的影响,特别是受到燃料多变因素的制约,机组运行的安全性和经济性指标与国外先进水平有一定的差距。根据最新统计资料表明,我国火力发电厂平均供电煤耗率为 341g/(kW h),到 2015 年力争降到 330 g/(kW h),这表明我国火电机组还有相当大的节能潜力^[2]。因此,在电力行业中开展节能降耗工作能有效地缓解我国的能源紧张问题,对实现国民经济的可持续发展具有十分重要的现实意义。

同时,随着电力体制改革的不断深入,以及电力市场的建立、形成和发展,我国电力供应紧张形势趋于缓解,在发电设备利用小时数普遍下降、煤价居高不下等因素的影响下,发电成本控制越来越受到重视。在确保机组安全运行的前提下,挖掘自身潜力,通过优化生产最大限度地降低煤耗,是发电企业增强市场竞争力、提高经济效益的重要手段。

国内外的实践表明,通过信息资源的集成、加工和利用,运行人员可以了解

和掌握机组主辅设备的运行状态和性能，对于预防事故的发生、改善机组运行和检修方式具有积极的作用，并能够产生巨大的经济效益。国外的研究以美国电力研究院（EPRI）的研究和应用最具有典型性和代表性，其研究表明，机组运行时的实际热耗率比可能达到的最佳热耗率高出近 100 kJ/(kW h)，其中大约有 50%是可以通过各种途径得到控制的，其中电站优化控制系统的应用就是节能增效中很关键的一部分^[3,4]。

目前，随着计算机技术的迅速发展和电力信息系统在电厂中的应用，可以实时获取机组主要的运行参数，为开发电站性能优化系统提供了充分的数据支持，使过去无法解决的问题得到了解决。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 电站运行优化软件研究现状

在国外，有代表性的电站热力性能优化系统开发单位主要有：美国的 EPRI、GE Energy 公司、西屋电气公司、通用物理公司、Pegasus 公司，瑞士的 ABB 公司，德国的 Siemens 公司，英国的 GEGB（General Electricity Generating Borad）公司，芬兰的 NE（Nokia Electronics），日本的三菱、日立、东芝公司等。这其中比较典型的系统主要有：

①GE Energy 公司的电站优化解决方案 Enter。该方案由 CycleExpress，EfficiencyMap，GateCycle，Optimizer，Optifire 和 Plant Payback 等功能模块组成，可以在线监控电站设备的运行，通过对电站的热平衡进行仿真来预测设备性能的降低程度，从而提高电站设备性能与运行特性，使电站利润最大化^[6]。

②瑞士 ABB 公司的电站运行优化软件包 Optimax。该软件由过程信息管理、性能计算、基于模型的诊断专家系统、电站负荷优化调度等功能模块组成，以电站发电成本作为核心，利用 DCS 实时数据进行热经济性计算，使运行人员和管理人员能够根据计算结果调整运行参数，从而使机组或整个电站处于最佳运行状态，最大限度地提高机组的潜力^[7]。

③西屋电气公司的电站过程优化与高级控制软件包 SmartProcess。该软件包含 Optimizers 和 Advisors 等功能模块。Optimizers 模块运用基于知识的方法对电站设备进行建模和优化，并将优化结果直接发送给 DCS；Advisors 模块通过对机组当前运行条件下的设备性能进行分析，针对电站运行过程中存在的问题提出建议，通过调整运行参数尽可能降低不必要的发电成本损失^[8]。

④美国通用物理公司的性能监测和优化系统 EtaPRO。该系统包含建模分析、性能监测、趋势分析、状态诊断、报表生成等功能模块，能够对锅炉侧和汽轮机侧进行全范围的优化。软件的模块化设计能够满足不同客户的需求，同时也为客

户提供了二次开发环境^[9]。

⑤德国 Siemens 公司的 Sienergy。该系统由运行优化 OPTIPRO、机组控制优化 PROFI、效率分析优化 SR4 和生产管理 BFS++ 等功能模块组成，从燃料价格、设备运行费用、机组效率和主要部件损耗等角度对电站进行优化，涵盖了机组实时优化控制、系统优化管理、设备维护管理、项目管理和文件管理等多方面的内容，各功能模块之间相互独立，用户可以根据电站实际情况灵活搭配^[9]。

⑥美国 Pegasus 公司的 NeuSight 和 Power Perfecter。这两种系统基于神经网络技术和预测控制技术建立多目标动态优化控制器，通过动态调整 DCS 设定参数与偏置参数，实现机组运行优化控制，从而提高电站运行经济性，降低污染物排放^[10]。

国内的一些高等院校、科研企业和电力研究院等都在电站热力系统性能监测系统方面开展了一系列深入的研究，并取得了一定的成果。其中比较著名的系统主要有：

①清华大学的锅炉变工况运行优化监测系统。该系统运用径向基函数（RBF）神经网络和模式识别技术，在线提供不同运行工况下的燃烧优化方法，不仅可以自动完成锅炉负荷变动下的正常调节功能，同时还能够在一定程度上实现工况变动下的运行优化^[11]。

②东南大学的机组运行优化系统。该系统包含测点监测、性能计算和分析、目标优化、偏差分析、循泵优化、吹灰优化、统计报表和热力试验等功能模块，通过对热力设备进行在线监测、对机组的煤耗分布进行分析优化，将结果实时发送给运行人员，通过机组运行人员调整运行参数，从而达到提高机组运行水平的目的^[12]。

③浙江大学的机组在线能耗分析系统。该系统读取 DCS 中的数据并进行预处理后，通过计算机组的热经济性指标和在线能耗，实时监测机组运行的经济性和设备运行情况。该系统同时可以给出各指标的能耗分析结果，并给机组运行人员提供指导，从而提高火电机组运行的经济性，降低机组发电成本^[13]。

④华北电力大学的机组在线优化运行管理系统。该系统可以在线监测机组的运行状态，进行能耗分析；通过指导运行人员操作，提高机组运行的经济性；通过对运行过程进行监督，规范运行人员的操作；通过对设备的健康状况进行诊断，提高机组运行的可靠性^[14]。

⑤西安热工研究院的机组动态经济运行分析系统。该系统基于 DCS 中的数据进行机组性能全面优化调整试验，对机组性能进行在线分析，将系统提供的各种优化曲线提交给运行人员，指导运行人员对机组运行进行优化，以提高机组运行的经济性、降低发电成本^[15]。

⑥山东电力试验研究院的机组运行分析与专家支持系统。该系统通过实时计

算电站机组的热经济性指标并监测设备的性能数据，动态确定当前工况下可能达到的最佳运行水平和相应的参数指标，依据趋势分析和相关性分析结果对运行中发生的重要事件、主要参数和特征量的异常变化进行提示与报警，根据各过程参数相互之间的内在关系和发展变化规律检查实际数据的可靠性，从而对机组进行优化，提高机组的运行水平^[16]。

⑦北京埃普瑞电力科技公司引进的 SOAP 锅炉性能优化系统。该系统包括设备关键参数监测软件和性能优化软件两部分，以专家系统和试验设计为核心，利用统计回归分析、模糊数学和智能神经网络等知识建立多输入变量与多目标之间的非线性多维数学模型，并以此数学模型计算电站锅炉的性能指标，从而对锅炉性能进行全面分析优化^[17]。

近几年，国内电站运行优化技术得到了迅速发展，但与国外公司相比，国内开发单位往往受到资金、技术储备等因素的制约，在开发效率和产品性能等方面都处于劣势。随着电站自动化水平的不断提高和信息化技术的飞速发展，机组运行优化技术获得了更广阔的发展空间，同时也成为国内外科研机构的研究热点。目前电力行业呈现出快速发展的态势，对电站机组运行优化技术市场需求巨大，已投运的电站运行优化系统已经创造了显著的经济效益，为国民经济和电力行业的可持续发展发挥了重要作用。

1.2.2 热力系统分析方法研究现状

电站热力系统热经济性分析是电站热力系统性能监测的基础，其分析和研究具有十分重要的意义。电站热力系统性能热经济性分析方法可以分为两大类，即基于热力学第一定律的热量法和基于热力学第二定律的焓方法，两者分别从热力系统“量”和“质”的两个不同角度来建模。焓分析方法可以评价能量中焓的转换、传递、利用和损失情况，确定出该系统或装置的焓利用效率^[18]。

基于热力学第一定律的分析方法主要有：

①常规热平衡法

常规热平衡法是最基本的热力系统计算方法，是汽轮机设计、电站设计、热力系统分析的最常用的方法，也是求解热力系统的基础，至今仍在广泛使用。它基于单个加热器的能量平衡和物质平衡，计算各级加热器的抽汽系数，并利用系统的功率方程和吸热量方程最终求得系统的热经济性指标。近年来，对火电机组热力系统分析计算方法的计算精度要求越来越高，使用该方法结合矩阵思想逐渐成为新的研究热点^[18]。

②等效焓降法

等效焓降法基于热变功的基本原理，考虑到设备质量、热力系统参数和结构的特点，通过严密的理论推导，得到热力分析参量 H_j 及 η_j 等，用以分析热功转换

及能量利用的程度。在系统和参数确定后,各种实际热力系统的这些参量也就随之确定,并通过一定公式计算,成为一次性参数给出。对热力设备和系统进行经济性诊断分析时,可直接用这些参数进行定量诊断、分析和计算。该方法最大的特点是在系统的参数或者结构变化时,只需对局部进行定量,而不需要像常规法那样需要重新计算整个系统,因而方便了热力系统的节能分析和改造。但是等效焓降法的基本前提是各加热器的汽水参数维持设计值,如果这一前提不能保证,则使用该方法计算会引起一定误差^[19]。

③矩阵法

随着计算机技术的发展,矩阵法成为当前热力系统热经济性分析计算方法的研究热点。矩阵法根据加热器的能量平衡方程和质量平衡方程构造矩阵模型,矩阵结构与热力系统结构一一对应。当热力系统结构或机组运行工况变化时,只需改变矩阵的元素就可以实现重新计算。该方法突出的优点通过“数”与“形”的结合,简化了数学模型,且容易通过计算机编程实现^[19]。

④循环函数法

循环函数法本质上是一种反平衡计算方法。该方法通过将整个回路划分为若干加热单元,进而求取单元进水系数。循环函数法的特点是将整个循环分为主循环和辅助循环两部分,主循环定义为主凝结水及向其加热的各抽汽、疏水组成的工质循环,辅助循环定义为由辅助水、汽及向其加热的各抽汽、疏水组成的工质循环。当热力系统结构发生变动时,只需要重新计算辅助循环即可。该方法适用于局部定量分析,但在计算端差等设备缺陷对系统的影响时还不是很方便^[20]。

⑤偏微分法

偏微分法最先用来对等效焓降和抽汽系数进行定义和推导,随后在这种理论和矩阵法的基础上,发展了热(汽)耗变换系数法,通过导出的热耗变换系数 ξ_j 和汽耗变换系数 k_j 来对电厂热力系统的分析,并可以进行局部定量计算^[21]。

基于热力学第二定律的分析方法主要有:

⑥熵分析法

熵分析法通过对整个系统的熵平衡计算,求得系统的熵产大小及其分布,分析产生熵产的因素,确定熵产与不可逆损失之间的关系,用以评价过程的不完善性,并作为改进过程的依据^[22]。但是熵的概念比较抽象,无法满足把能量的使用价值与经济价值融合在一起的需求。

⑦焓分析法

焓分析法不仅考虑热功转换过程中量的方面,而且也考虑质的方面,着重能量转化过程中的不可逆损失即能量在质的方面的差别,可进一步评价热力系统能量转化和利用的完善程度。近年来,将焓分析法引入到电厂性能分析和故障诊断

中，用来评价热力系统及整个发电厂的焓性能指标^[23]。

总之，随着电站热力系统分析方法的不断完善和计算机技术的飞速发展，其在指导电站经济运行方面的计算分析作用也越来越重要。目前，我国电站热力系统的分析主要基于热力学第一定律。因此，本文建立热力系统的数学模型时，主要采用基于矩阵思想的常规热平衡法。

1.3 本文主要的研究内容

本文的主要目的是，希望在借鉴国内外相关研究成果的基础上，通过对热力系统的数学模型进行分析研究，以通用性、智能化和精确度为目标，利用面向对象的设计思想，编制电站热力性能计算软件，能够准确地对机组热经济性进行分析计算。

本文主要做了以下几个方面的工作：

①结合火电机组热力性能计算软件的开发和应用，应用软件工程方法学对软件进行了需求分析。

②根据热力系统中的基本设备进行了模块划分，建立回热加热器的数学模型；对汽轮机排汽焓的计算方法进行了研究。

③根据软件需要编制了水和蒸汽计算子程序，并对程序实现过程中的一些关键问题进行了研究。

④对系统的组态实现方法进行了研究，根据各模块的数学模型编制了计算程序，结合水和蒸汽计算子程序，计算某机组的热经济性。

2 热力性能计算软件需求分析

火电厂热力性能计算软件的开发是一项工作量大、复杂的工作，为了保证开发过程有计划、有步骤的进行，本文基于软件工程的设计思想来指导和解决软件开发中的各种问题，并对软件进行分析和设计。

2.1 软件工程的概述

目前对软件工程比较认可的一种定义认为，软件工程是研究和应用如何以系统性的、规范化的、可量化的过程化方法去开发和维护软件，以及如何把经过时间考验而证明正确的管理技术和当前能够得到的最好的技术方法结合起来。

软件工程的主要思想就是采用工程的技术和方法来开发和维护软件，把当前最好的技术方法和管理技术结合起来，从而经济地开发出可靠的、可维护的、可重用的能满足用户需求的软件产品。

为了使开发出的软件产品达到开发的目标，在开发过程中必须遵循下列的软件工程基本原则^[25]：

(1) 选取适宜的开发风范，保证软件开发的可持续性，并使最终的软件产品满足用户的要求。

(2) 为达到软件工程的目标，采用合适的设计方法，使开发出的软件产品能够解决和实现例如模块化、局部化、一致性、构造性、信息隐藏等问题。

(3) 为保证按期交付高质量的软件产品，在开发过程中需要提供必要的工程支持。

(4) 在软件开发过程中实施有效的软件工程管理。

2.2 软件的需求分析

软件需求分析是指软件开发人员通过研究用户的需求，完全理解用户对软件功能的需求，建立一个可确认的、可验证的基本依据。需求分析虽然是软件开发过程的开始阶段，但也是整个软件过程的关键点，对保证软件质量至关重要。需求分析的主要任务就是准确说明软件必须完成哪些工作，提出具体、完整、准确的目标要求。

2.2.1 软件总体介绍

国外的热力性能计算软件虽然提供了比较完整的功能，但价格普遍很高；而国内的热力性能计算软件的研究虽然取得了一定成果，但真正投入使用的不多。

本软件的主要目的是研究开发出一种具有组态功能的、能够适用于电力研究

院（中试所）和电厂的热力性能计算软件，从而能够计算出机组的缸效率、热耗率等热经济指标。本软件可用于以下情况：

①对于大修、技改前后的机组，需要对热力性能测试的结果进行计算分析，以检测大修、技改的结果；

②对于新投产的机组，需要通过热力性能测试的结果来检验机组的热力性能是否达到了保证值；

③通过本软件的计算分析结果来预测设备部件的运行情况，为机组的安全经济运行提供依据。

2.2.2 软件的功能需求

电站热力系统结构复杂，不同容量机组的热力系统结构不同，即使是相同容量机组的热力系统结构也不尽相同，因此要实现软件的通用性难度极大。传统的性能计算软件，只能针对某一具体的特定机组，对不同的机组都要重新设计程序或者修改代码，并且对工程技术人员的专业水平要求较高，一定程度上限制了软件的推广应用。

为了使系统具有良好的通用性和扩充性，在系统设计时应注意突出系统的模块化和可视化的特点。模块化的特点是建立各个子系统和设备部件的模型，通过将模型进行不同的组合以构造出实际需要的系统。可视化的特点是用图形可视化的方式将抽象的设备部件及其工作原理表示出来，这样不仅方便了用户理解系统的结构，而且可以保证系统组态结果的正确性。

通过分析，将软件的功能概括为以下几个方面：

①建立模块图形资源库。模块图形资源是进行组态的基础。软件首先建立各个设备的模块图形，并添加到模块图形资源库中保存，用户可以根据需要创建、删除、修改模块及模块的属性；

②实现组态功能。用户通过从模块图形资源库中调出模块图标按照原则性热力系统图中的连接方式，像搭积木一样将模块图标组合起来。软件能自动对用户的组态结果进行识别并以适当的数据结构储存；

③计算热经济性指标。编制软件的最终目的是进行热力计算。软件能够根据组态的结果，通过识别自动生成热力系统的计算矩阵，以完成热力性能的计算。目前大多数发电厂已应用 DCS/MIS 系统，计算所需的采样数据可以从 DCS/MIS 的实时数据库中获得；

④输出计算结果。软件能够显示计算的各项热经济性指标，并能够查询存储的各项历史性能指标，并能够显示设备的各项性能。

2.2.3 软件的数据流图

数据流图是结构化分析方法的核心。它从数据传递和加工角度，以图形方式

来表达系统的逻辑功能、数据在系统内部的逻辑流向和逻辑变换过程。电厂热力系统中的数据具有如下特点：

①数据量大。热力系统求解就是将可测得的一次参数（如温度、压力、流量等）转化为二次参数（如焓、熵等），然后根据质量平衡和能量平衡计算出系统各处的流量，进而求得所需结果。要完成计算，所需的测点繁多，进行计算的前提是从众多的测试数据中选取有效的数据。同时，为便于以后查询和比较，要求将测试数据进行保存。

②数据实时性高。热力系统在线计算时要求从 DCS/MIS 系统中取得实时数据，动态显示机组的热经济性。通过与热力测试的结果进行比较，得出影响机组经济性的因素，调整运行状态以提高经济性。

③数据真实、全面、可靠。热力计算的结果不仅关系到机组的经济性，更关系到热力系统运行的安全性。

通过对软件的需求分析和电厂热力系统数据特点的分析，可得出如图 2.1 所示的软件数据流图。

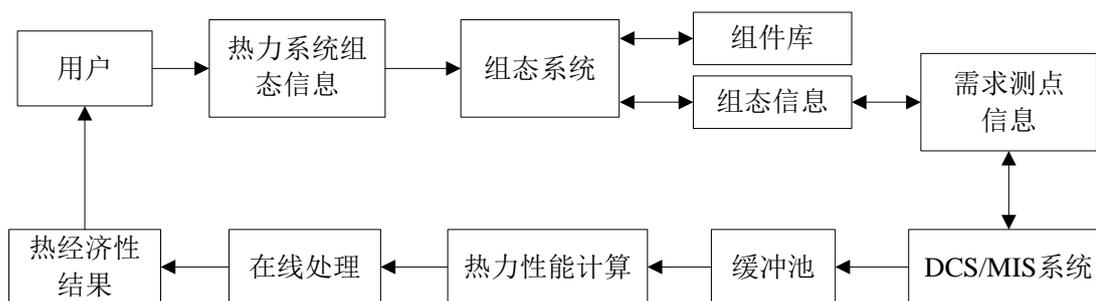


图 2.1 软件数据流图

Fig 2.1 Data flow diagram of the software

2.3 本章小结

按照软件工程的原理对火电机组热力性能计算软件进行了需求分析，总结了软件的主要功能，设计了软件的数据流图。

3 电站热力系统计算模型的建立

火电厂热经济性计算既是热力系统设计、技术改造的理论基础，又是保证热力设备经济运行的实用技术。通过对热力系统进行热经济性计算和分析，可以指导运行人员及时调整运行参数，最大限度地发挥机组的节能潜力，对电厂来说具有十分重要的经济意义。其中，建立热力系统的计算模型是进行计算分析的基础。随着计算机技术的发展，应用计算机对热力系统进行建模并完成复杂的计算成为解决电站热力系统性能分析及优化的重要手段。

传统的软件实现方法只是针对某一具体机组建立其数学模型，如果热力系统的结构形式发生了变化，就必须重新建立系统的数学模型，重新编制程序，导致代码利用率很低，不利于实现软件的通用性。近年来，随着机组单机容量的不断增大，热力系统的结构变得越来越复杂、庞大。如果继续采用传统的编程方法来编制软件，不仅需要极大的工作量，而且软件的继承性和通用性也较差，无法实现软件的组态功能。

因此，为了提高代码利用率，实现软件的通用化计算，将自动控制领域中“组态”的思想引入火电机组热力性能计算软件的设计。热力系统组态的基本思想就是将热力设备或者子系统抽象为算法模块，利用模块之间的连接来反映实际系统中设备的连接关系，最后实现热力性能的计算。

3.1 热力系统模块的划分

热力系统模块的划分就是确定组成热力系统的基本单元，模块划分的形式决定了模块之间的连接组合方式。合理的模块划分，应保证连接组合模块的过程比较容易进行，同时任意插入和删除一个模块不会给其它模块带来影响。按照面向对象的设计要求，只有独立的物理设备才可以作为模块，在划分时应该有合适的尺度。如果模块划分过细，不仅会增加模块的数量，而且容易造成计算形式的多元化，即不同模块尽管计算代码不同，但计算结果一致；若模块划分过粗，虽然可以减少模块数量，但却会使组态过程缺乏灵活性。一般地，模块划分的标准有两个^[28]：1) 从程序设计角度，模块应具有完整的物理概念和较强的数学独立性，编制的程序能被独立编写、易于调试和扩充修改；2) 模块的开发和连接方法简单，易于程序开发自动化。

美国电力研究所 (EPRI) 开发的可用于火电站和核电站的图形建模软件 MMS 以火电厂基本设备为单元来划分模块，模块的接口就是工质进出模块的出、入口，这样的划分形式是基于模块而不是基于流体网络特性。采用 MMS 划分的模块独立

性强，模块连接简单，降低了开发的难度。

本文在考虑了热力系统的结构和用户习惯的基础上，基于电厂基本设备为单元进行模块划分。电站热力系统是由锅炉、汽轮机、凝汽器、加热器等基本热力设备及连接这些基本设备的汽水管道组合而成的复杂系统，各种热力过程在这些设备和管道中发生。尽管热力系统庞大、复杂，设备的类型、容量繁多，但仍有许多相同或相似的基本设备，它们的基本工作原理相同、工作过程一样，只是物理结构尺寸、运行参数不同。这些设备的类型是有限的，因此可以做成通用的、数量有限的设备模型库。根据实际情况将设备参数分为输入参数、输出参数、系数等三类。其中输入参数与输出参数用来与外部进行信息交换，系数用来定义设备的类型等。

通过对电站热力系统的分析，将热力系统划分为子系统和设备：**a、主蒸汽及再热蒸汽系统**：汽轮机；**b、抽汽回热系统**：加热器；**c、给水及凝结水系统**：凝汽器类和泵；**d、辅助蒸汽和水系统**：门杆类和汽封。在此基础上，可将热力系统进一步划分为具体的对象体系。图 3.1 是汽轮机系统各子系统的划分图。从图 3.1 可以看出，热力系统的分类主要分为两层，各个子系统都是由特定的部件对象构成的，从而与各级子系统构成完整的热力系统。

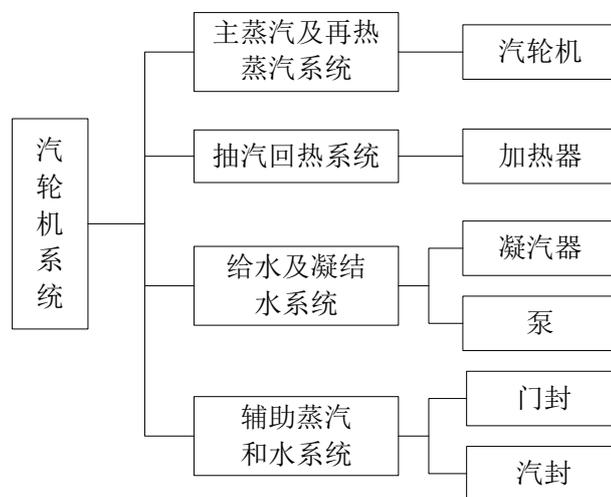


图 3.1 汽轮机系统各子系统划分图

Fig 3.1 Diagram of subsystem of turbine system

3.2 加热器数学模型的建立

3.2.1 加热器的分类

根据加热器抽汽、疏水和给水流动组合的不同情况，可将加热器分为疏水放流式（图 3.2(a)）和汇集式两种。在疏水放流式加热器中，抽汽和疏水进入加热器

后都以疏水形式流向下一级加热器；在汇集式加热器中，抽汽和疏水进入加热器后汇入给水一起流出。其中，汇集式加热器包含混合式加热器（图 3.2(b)）和带疏水泵的面式加热器（图 3.2(c)）两种。

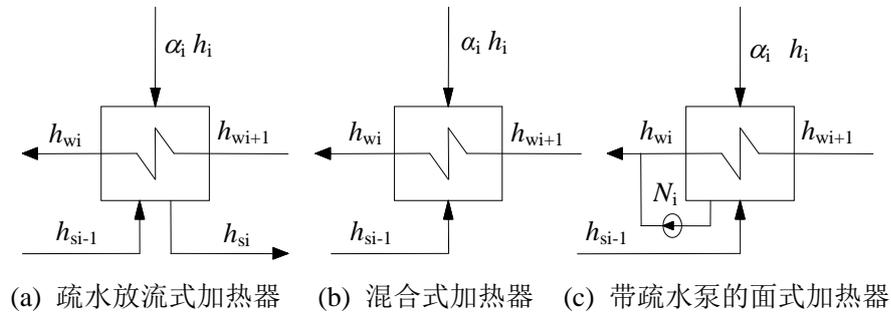


图 3.2 加热器的三种基本形式

Fig3.2 Three basic types of heaters

图中： α_i ——第 i 级加热器的抽汽系数；

h_i ——第 i 级加热器的抽汽焓值，kJ/kg；

h_{wi+1} 、 h_{wi} ——第 i 级加热器的进、出口给水焓值，kJ/kg；

h_{si-1} 、 h_{si} ——第 i 级加热器的进、出口疏水焓值，kJ/kg

为了方便计算和统一，将加热器的抽汽放热量、给水焓升和疏水放热量分别用 q_i 、 γ_i 、 τ_i 来表示。

对疏水放流式加热器：

$$\left. \begin{aligned} q_i &= h_i - h_{si} && \text{kJ/kg} \\ \tau_i &= h_{wi} - h_{wi+1} && \text{kJ/kg} \\ \gamma_i &= h_{si-1} - h_{si} && \text{kJ/kg} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

对汇集式加热器：

$$\left. \begin{aligned} q_i &= h_i - h_{wi+1} && \text{kJ/kg} \\ \tau_i &= h_{wi} - h_{wi+1} && \text{kJ/kg} \\ \gamma_i &= h_{si-1} - h_{wi+1} && \text{kJ/kg} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

3.2.2 加热器边界的划分

热力系统性能计算是以热力学基本定律为基础的，其最小元素为单个加热器，因此对加热器的边界的划分是极其重要的。图 3.3 是某 N100-8.83/535 型凝汽机组热力系统中加热器边界划分示意图。

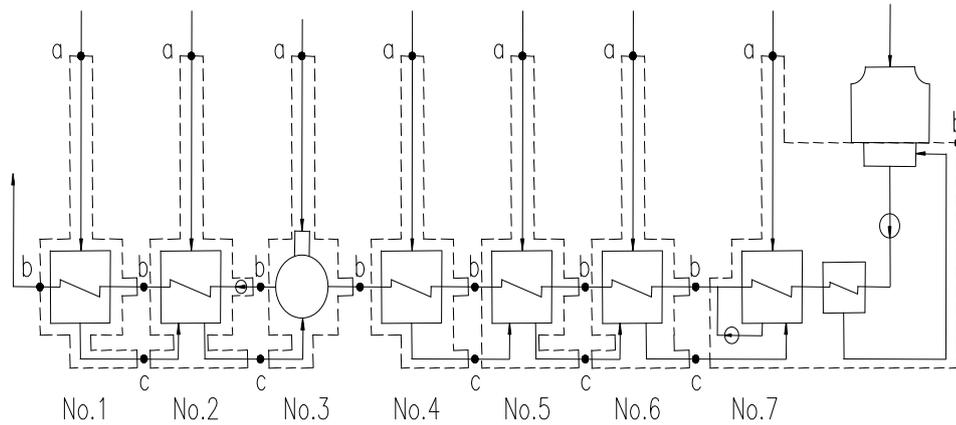


图 3.3 加热器边界划分示意图

Fig 3.3 Example for the division of heater boundary

划分的原则如下^[30]:

- ①加热器抽汽的边界点取汽轮机抽汽的出口点(图 3.3 中 a 点);
- ②加热器主给水管道上(或主凝结水的)边界点(图 3.3 中 b 点)取自相邻低一级加热器的给水出口位置,对于带疏水泵的汇集式加热器其边界点取在汇集点之后(水流方向)。与凝汽器相连的加热器的主给水(或主凝结水)边界点为凝汽器热水井入口点;
- ③两级加热器之间有疏水管路时,则应在两级加热器的疏水管路上适当取一点(图 3.3 中 c 点);
- ④将轴封加热器与其相邻的回热加热器规定为一个计算单元(图 3.3 中 No.7)。

3.2.3 加热器通用矩阵模型

本文分析了各种加热器的特点,将加热器抽象为一个物理模型,如图 3.4 所示。图中的符号说明如下:

Q_i 为 i 级加热器利用的外部热量;

α_i 为 i 级加热器的抽汽系数;

h_i 为 i 级加热器的抽汽焓;

α_{si} 为 i 级加热器的疏水系数;

h_{si} 为 i 级加热器的疏水焓;

α_{fi} 为 i 级加热器的辅助汽水系数;

h_{fi} 为 i 级加热器的辅助汽水焓;

α_{wi} , α_{wi+1} 为 i , $i+1$ 级加热器的给水系数;

h_{wi} , h_{wi+1} 为 i , $i+1$ 级加热器的出口水焓;

K_i 为 i 级加热器的通断系数,当 $K_i=1$ 时,疏水管路关闭,表示该加热器是汇集式;当 $K_i=0$ 时,疏水管路联通,表示该加热器是疏水放流式。

$$+ \begin{bmatrix} -K_1 h_{s1} \\ K_1 h_{s1} & -K_2 h_{s2} \\ & \dots \\ & & K_{n-1} h_{s_{n-1}} & -K_n h_{sn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{s1} \\ \alpha_{s2} \\ \dots \\ \alpha_{sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Q_1 - \alpha_{f1} h_{f1} \\ -Q_2 - \alpha_{f2} h_{f2} \\ \dots \\ -Q_n - \alpha_{fn} h_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

如果计算过程中需要考虑各级加热器的效率 η_i , 可将式(3.9)中抽汽焓 h_i 替换为修正后的抽汽焓 h'_i , 但在排汽焓的计算中, 不能使用修正后的抽汽焓, 应使用修正前的抽汽焓 h_i 。

$$h'_i = h_i \eta_i + h_{si}(1 - \eta_i) \quad (3.10)$$

②水侧质量平衡方程

图 3.4 所示的通用加热器的水侧质量平衡方程式

$$\alpha_{wi} = \alpha_{wi+1} + K_i(\alpha_i + \alpha_{fi} + K_{i-1}\alpha_{si-1}) \quad (3.11)$$

将式(3.11)整理为

$$K_i \alpha_i + (-\alpha_{wi} + \alpha_{wi+1}) + K_i K_{i-1} \alpha_{si-1} = -K_i \alpha_{fi} \quad (3.12)$$

将第 1 级加热器的水侧质量平衡方程单独列出:

$$K_1 \alpha_1 + (-\alpha_{w1} + \alpha_{w2}) = -K_1 \alpha_{f1} \quad (3.13)$$

水侧质量平衡方程组的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} K_1 & & & \\ & K_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & K_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 1 & & 0 \\ & -1 & 1 & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{w1} \\ \alpha_{w2} \\ \dots \\ \alpha_{wn+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ K_2 K_1 & 0 & \\ & \dots & \\ 0 & \dots & K_n K_{n-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{s1} \\ \alpha_{s2} \\ \dots \\ \alpha_{sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_1 \alpha_{f1} \\ -K_2 \alpha_{f2} \\ \dots \\ -K_n \alpha_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

③汽侧质量平衡

在建立加热器的汽侧质量平衡方程时引入了一个变量 L_i , L_i 在计算时不必单独给出, 通过与 K_i 的关系进行定义:

$$\begin{cases} L_i + K_i = 1 \\ L_i K_i = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

图 3.4 所示的通用加热器的汽侧质量平衡方程式

$$\alpha_{si} = L_i(\alpha_i + \alpha_{fi} + K_{i-1}\alpha_{si-1}) \quad (3.16)$$

将式(3.16)整理为

$$L_i \alpha_i + (L_i K_{i-1} \alpha_{si-1} - \alpha_{si}) = -L_i \alpha_{fi} \quad (3.17)$$

将第 1 级加热器的汽侧质量平衡方程单独列出:

$$L_1 \alpha_1 + (-\alpha_{s1}) = -L_1 \alpha_{f1} \quad (3.18)$$

汽侧质量平衡方程组的矩阵形式为

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} L_1 & & & \\ & L_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & \dots & 0 & \\ L_2 K_1 & -1 & & \\ & & \dots & \\ 0 & \dots & L_n K_{n-1} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{s1} \\ \alpha_{s2} \\ \dots \\ \alpha_{sn} \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} -K_1 \alpha_{f1} \\ -K_2 \alpha_{f2} \\ \dots \\ -K_n \alpha_{fn} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

记：

$$\begin{aligned}
X_1 &= \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_n \end{bmatrix} & X_2 &= \begin{bmatrix} \alpha_{w1} \\ \alpha_{w2} \\ \dots \\ \alpha_{wn+1} \end{bmatrix} & X_3 &= \begin{bmatrix} \alpha_{s1} \\ \alpha_{s2} \\ \dots \\ \alpha_{sn} \end{bmatrix} \\
C_1 &= \begin{bmatrix} -Q_1 - \alpha_{f1} h_{f1} \\ -Q_2 - \alpha_{f2} h_{f2} \\ \dots \\ -Q_n - \alpha_{fn} h_{fn} \end{bmatrix} & C_2 &= \begin{bmatrix} -K_1 \alpha_{f1} \\ -K_2 \alpha_{f2} \\ \dots \\ -K_n \alpha_{fn} \end{bmatrix} & C_3 &= \begin{bmatrix} -K_1 \alpha_{f1} \\ -K_2 \alpha_{f2} \\ \dots \\ -K_n \alpha_{fn} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

将式(3.9)、式(3.14)、式(3.19)联立方程组得

$$\left. \begin{aligned}
A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 &= C_1 \\
A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + A_{23}X_3 &= C_2 \\
A_{31}X_1 + 0 \cdot X_2 + A_{33}X_3 &= C_3
\end{aligned} \right\} \tag{3.20}$$

将式(3.20)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

解式(3.21)可得 $X^T = (X_1, X_2, X_3)$ ，即可求得所有的抽汽系数、给水系数和疏水系数。

采用矩阵模型后，回热系统的计算统一为矩阵的运算。矩阵中引入了通断系数 K_i ，通过软件的组态模块对 K_i 进行赋值，可将通用模型转化为任何一种实际的加热器模型。在进行在线监测软件的计算时可根据现场采样值，将系数填入一个规范的组态格式，即可方便的建立回热系统结构，求得抽汽系数。

3.2.4 加热器模型设计

加热器的数学模型建立后，以模块的形式进行封装，热力系统建立时只需调用加热器模块即可。图 3.5 给出了加热器的模型。

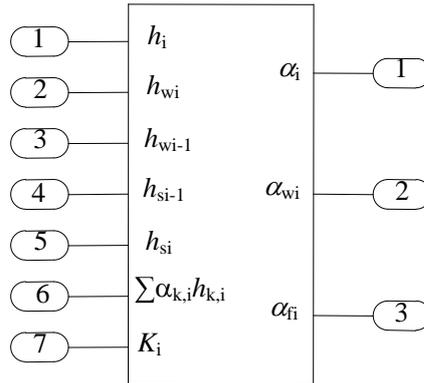


图 3.5 加热器模型

Fig 3.5 Structural drawing of heater modelling

输入参数:

- 1——抽汽焓 h_i
- 2——加热器出口水焓 h_{wi}
- 3——加热器进口水焓 h_{wi-1}
- 4——进入加热器的上一级疏水焓 h_{si-1}
- 5——加热器出口疏水焓 h_{si}
- 6——进入加热器的辅助汽水热量 $\sum \alpha_{k,i} h_{k,i}$
- 7——加热器的通断系数 k_i

输出参数:

- 1——加热器的抽汽系数 α_i
- 2——加热器的给水系数 α_{wi}
- 3——加热器的疏水系数 α_{si}

3.3 辅助设备及系统的数学模型

3.3.1 门杆汽封系统的数学模型

汽轮机的门杆汽封漏汽量应当根据机组运行的实际参数进行计算。如果计算资料不全，也可以设计值代替。

门杆汽封漏汽量可按下式计算:

$$G_v = 75.2\sigma F \sqrt{P_1 / v_1} \quad (3.22)$$

式中: F ——汽封的环形缝隙面积, cm^2 ;

p_1, p_2 ——汽封段前和段后的蒸汽压力, kgf/cm^2 ;

σ ——与 p_2/p_1 及流动情况相关的系数, 可由相应的曲线查得;

v_1 ——汽封段前的蒸汽比体积, m^3/kg ;

3.3.2 轴封系统的数学模型

汽轮机级内的漏汽主要存在于隔板和主轴的间隙处，以及动叶顶部和汽缸的间隙处。此外，在主轴穿出汽轮机的高压端或高中压缸的两端处，也存在着漏汽，这些都将使得汽轮机的效率降低，增大了汽水损失。同时，因汽轮机低压缸内的压力低于大气压力，在主轴穿出低压缸的两端处，会有空气露入汽缸，使机组的真空恶化，增大了抽汽器的负荷。

目前，在汽轮机中广泛采用齿形轴封阻止各处的漏汽，以此来提高汽轮机的效率。在汽轮机的高压端或高中压缸的两端处常采用曲径轴封；在低压端或低压缸的两端处常采用光轴轴封。

汽轮机的轴封漏汽量应当按照实际的结构尺寸和蒸汽参数进行计算，这样更接近于真实的情况。曲径式轴封漏汽计算法是最常用的方法。

① 当沿漏汽方向的最后一级轴封后的汽压高于临界压力时，即 $\frac{P_2}{P_1} > \frac{P_{cr}}{P_1} = \frac{0.85}{\sqrt{z+1.5}}$ ，高低齿形轴封漏汽量按下式计算：

$$G_g = 3.6 \times 10^{-2} F \mu_g \sqrt{\frac{g}{z} * \frac{P_1^2 - P_2^2}{P_1 v_1}} \quad (3.23)$$

式中： F ——轴封间隙的环形面积， cm^2 ； $F = \pi D \delta$ ；

D ——轴封间隙处的轴颈， cm ；

δ ——轴封的径向间隙， cm ；

g ——重力加速度， m/s^2 ；

P_1 ——轴封间隙前的蒸汽压力， kgf/cm^2 ；

v_1 ——轴封间隙前的蒸汽比体积， m^3/kg ；

P_2 ——轴封片后的蒸汽压力， kgf/cm^2 ；

μ_g ——高低齿形轴封漏汽的流量系数；

z ——轴封齿数。

② 当最后一级轴封后的汽压达到或者低于临界压力时，即 $\frac{P_2}{P_1} > \frac{P_{cr}}{P_1} = \frac{0.85}{\sqrt{z+1.5}}$ ，

高低齿形轴封漏汽量计算公式为：

$$G_g = 3.6 \times 10^{-2} F \mu_g \sqrt{\frac{g}{z+1.5} * \frac{P_1}{v_1}} \quad (3.24)$$

③ 若轴封为平齿结构时，这时汽流流经轴封片后不会发生转向，还存在着一定的动能，在蒸汽流经下一道轴封片时，仍存在着一定的速度，致使漏汽量增大。计算时应对式 (3.23) 和式 (3.24) 的结果乘以修正系数 K_g 。 K_g 的数值根据轴封的尺寸，由 K_g 与 δ/S 的关系曲线查得。

计算高低齿形轴封漏汽量时，也可采用单一的表达式计算，即：

$$G_g = 3.6 \times 2.09 \times 10^{-2} \mu_g \beta_g F \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \quad (3.25)$$

式中： β_g ——轴封漏汽量与同一参数下的临界漏汽量之比；

3.3.3 给水泵和小汽轮机的数学模型

小汽轮机的汽源一般可分为三种：新蒸汽、热再热蒸汽和冷再热蒸汽。从全厂热经济性来看，正常工况时的汽源采用新蒸汽最差，而采用冷再热蒸汽最好。采用新蒸汽可以避免低负荷和启动前的汽源切换，但经济性较差，一般只作为小汽轮机的备用汽源或低负荷时的切换汽源。

小汽轮机的用汽量可按式计算：

$$D_{st} = \frac{\Delta h_p D_{fw}}{\eta_{st} \Delta h_s^i} \quad (3.26)$$

式中： D_{st} ——小汽轮机用汽量，t/h；

Δh_p ——给水泵的焓升，kJ/kg；

D_{fw} ——给水流量，t/h；

h_{st} ——蒸汽的理想焓降，kJ/kg

Δh_s^i ——给水泵的理想焓升，kJ/kg

3.4 汽轮机排汽焓的计算

3.4.1 汽轮机排汽焓的计算模型

在电站热力性能计算中，汽轮机排汽焓是一个很重要的参数。但由于低压缸排汽处于湿蒸汽区，其温度、压力互相不独立，而目前无法利用测量仪表直接得到焓值。实际应用中需要由其它已知数据并利用一定的方法求得。目前，在线数据通常采用压力、温度、电功率、流量测量仪表来获得。其中，压力、温度、电功率测量仪表较准确，一般能将误差控制在1%之内，而流量测量仪表由于长期使用，可能会因受到流体冲刷而引起变形或结垢，从而增加了测量误差。因此，为提高计算精度，有必要寻求一种不依赖于流量测量仪表的计算方法。另外，排汽焓的计算一般需要多次迭代，这不仅要求计算周期要小于数据采集的周期，而且需要在不延长数据采集周期的前提下，尽力减少迭代次数。

目前，理论上计算汽轮机排汽焓主要有以下几种方法^[36,37,38]：

①能量平衡法

将汽轮机回热系统看作一封闭的热力单元，忽略系统内工质储存能的变化，利用热平衡方程和物质平衡方程计算各级加热器抽汽、各辅助汽水、再热蒸汽和排汽流量系数，然后由汽轮机功率方程计算汽轮机排汽焓。该方法能够精确计算出汽轮机排汽焓，但前提是其他抽汽点的焓值已知。

②曲线外推法

根据汽轮机在过热蒸汽区入口状态点和抽汽状态点，作出压力-焓曲线，然后将此曲线平滑外推到湿蒸汽区，由此估算处于湿蒸汽区的抽汽和排汽焓。该方法优点是简单、易于计算机编程计算，但缺点是曲线拟合点较少，精度较差。

③神经网络法

该方法利用汽轮机结构数据和汽轮机实际检测数据估算排汽焓值。优点是计算精度高，但该方法需要对电厂的大量数据进行挖掘、学习，因此该方法不具有通用性。

求解排汽焓的方法多种多样，其特点可归纳如下：

①如果末级抽汽在湿蒸汽区，此时末级抽汽焓和排汽焓两个参数未知，只能增加一个限定条件找到一个合适的解。不同文献中提出的限定条件不同，本文假定低压缸入口焓、末级抽汽焓和膨胀终点焓在一条直线上。

②在迭代求解时，假设末级抽汽焓比假设排汽焓要好。因为即使假设的末级抽汽焓有较大误差，求出的排汽焓与真实值也是比较接近的。

对于汽轮机排汽焓的计算来说，不但要求计算方法简单、计算工作量小、速度快，而且要求有较高的计算精度。基于以上考虑，本文采用曲线外推法和能量平衡法结合的方法，即末级抽汽焓由前几级抽汽点采用曲线外推法确定，然后根据汽轮机功率方程由能量平衡法确定汽轮机的排汽焓。汽轮机排汽焓的具体计算步骤如下：

①通过曲线拟合，确定湿蒸汽区的蒸汽焓初值 h_{c1}

根据前几级抽汽的状态点拟合出压力-焓曲线，然后由湿蒸汽区各未知点的压力推出各未知抽汽点的焓和排汽焓。当第一次计算排汽焓精度不够时，需要进行下一次的曲线拟合，这时需要将上次计算得到的排汽焓值作为一个已知点参与到曲线拟合中。

②根据能量平衡法计算排汽焓 h_{c2}

根据加热器模型求得机组各级抽汽量以后，通过对整个回热系统作热平衡计算得出汽轮机排汽焓 h_{c2} 。能量平衡计算方程为：

$$W = \frac{N}{\eta_m \eta_e} \quad (3.27)$$

$$W = D_0 h_0 + D_{zr}(h_{zr} - h_{gp}) - \sum_{j=1}^n D_j h_j - D_c h_c - \sum D_{zf} h_{zf} - \sum D_{mg} h_{mg} \quad (3.28)$$

式中： W 为汽轮机内功； N 为发电机功率； η_m 为机械效率； η_e 为发电效率； D_{zq} ， h_{zq} 为主蒸汽流量，焓值； D_{zr} ， h_{zr} 为再热蒸汽流量，焓值； D_j ， h_j 为各级抽汽量，焓值； D_c ， h_c 为汽轮机排汽量，焓值。

③求得最终排汽焓 h_c

将曲线拟合法得到的排汽焓 h_{c1} 和能量平衡法得到的排汽焓 h_{c2} 作比较，多次重复拟合压力-焓曲线，直到满足计算要求。

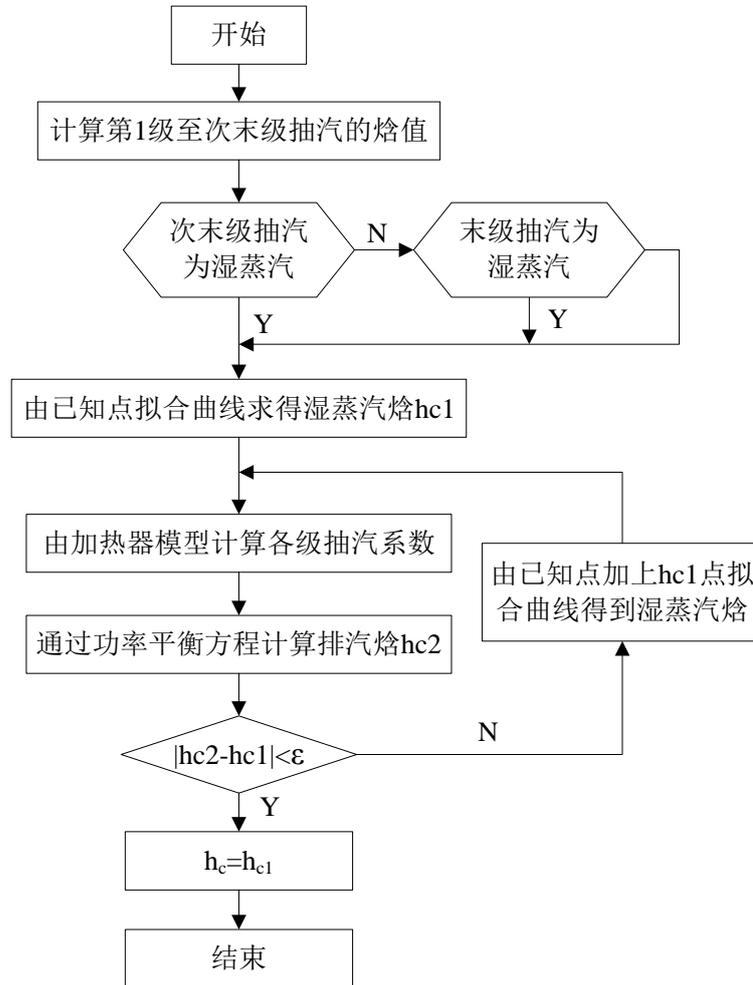


图 3.6 排汽焓程序算法流程图

Fig3.6 The flow chart of exhaust enthalpy programmed algorithm

3.4.2 排汽焓计算结果验证

利用上述方法某 N100-8.83/535 型机组进行了计算，将本节模型计算值与设计值计算进行了比较，见表 3.1。

表 3.1 排汽焓的设计值与计算值的对比

Fig 3.1 Comparing of exhaust enthalpy between designed data and calculated data

参数	额定工况	100% 负荷	80% 负荷	70% 负荷
排汽焓设计值/(kJ/kg)	2280.6	2337.1	2344.4	2342.3
排汽焓计算值/(kJ/kg)	2279.3	2334.6	2342.8	2343.8

3.5 机组及全厂热经济指标

热力系统经济性指标的计算是进行经济性分析和诊断的基础，对电厂的节能具有重要的意义。目前常采用热量法定量评价电厂的热经济性。

3.5.1 汽轮机组的热经济指标

①汽耗量 D_0 和汽耗率 d_0

汽耗量是指在电功率 P_e 时汽轮发电机组所需的进汽量，汽耗率是指汽轮发电机组每发 1kW h 电能所需的进汽量，其计算公式为：

$$D_0 = \frac{3600P_e}{W_i \eta_m \eta_g} \quad (3.29)$$

$$d_0 = \frac{D_0}{P_e} = \frac{3600}{W_i \eta_m \eta_g} \quad (3.30)$$

式中： W_i ——1kg 进汽在汽轮机中的内功，kJ/h；

η_m ——机械效率；

η_g ——发电机效率。

②汽轮机的热耗量 Q_0 和热耗率 q_0

汽轮机的热耗量 Q_0 是指所发功率 P_e 时消耗的热量，热耗率 q_0 是指汽轮发电机组每发 1kW h 电能所消耗的热量。计算公式分别为：

$$Q_0 = D_0(h_0 - h_{fw}) + D_{rh}(h_{rh}'' - h_{rh}') \quad (3.31)$$

$$q_0 = \frac{Q_0}{D_0} = (h_0 - h_{fw}) + \alpha_{rh}(h_{rh}'' - h_{rh}') \quad (3.32)$$

式中： D_0 ——主蒸汽流量，kg/h；

h_0 ——主蒸汽焓值，kJ/kg；

h_{fw} ——锅炉给水焓，kJ/kg；

h_0 ——主蒸汽焓值，kJ/kg；

D_{rh} ——进出再热器的蒸汽流量，kg/h；

h_{rh}'' ——再热蒸汽焓值，kJ/kg；

h_{rh}' ——高压缸排汽焓值，kJ/kg；

α_{rh} ——1kg 进汽时再热蒸汽的份额， $\alpha_{rh}=D_{rh}/D_0$

③汽轮机绝对内效率 η_i

汽轮机绝对内效率 η_i 是指汽轮机的内功率 W_i 与汽轮机热耗量 Q_0 的比值，计算公式为：

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_0} \quad (3.33)$$

④汽轮发电机组的绝对电效率 η_e

汽轮发电机组的绝对电效率 η_e 是指汽轮发电机组的电功率 P_e 与汽轮机热耗量 Q_0

的比值，计算公式为：

$$\eta_e = \frac{3600P_e}{Q_0} = \eta_m \eta_g \eta_i \quad (3.34)$$

⑤汽轮机各缸的相对内效率

汽轮机各缸的相对内效率是指工质在相应汽缸内的实际焓降与理想焓降的比值，其计算公式为：

$$\eta_{\text{gang}} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{out,t}} \quad (3.35)$$

式中： h_m ——缸进口的蒸汽焓值，kJ/kg；

h_{out} ——缸出口的蒸汽实际焓值，kJ/kg；

$h_{out,t}$ ——缸出口的蒸汽理想焓值，kJ/kg；

3.5.2 全厂的热经济指标

①锅炉输出热量 q_b

锅炉输出热量 q_b 是指 1kg 工质在锅炉中的吸热量，其计算公式为：

$$q_b = \alpha_b(h_b - h_{fw}) + \alpha_{rh}h_{rh} + \alpha_{b1}(h_{b1} - h_{fw}) \quad (3.36)$$

式中： α_b ——1kg 进汽时过热蒸汽的份额；

h_b ——过热蒸汽比焓，kJ/kg；

α_{b1} ——1kg 进汽时排污水量的份额；

h_{b1} ——锅炉排污水比焓，kJ/kg

②管道效率 η_p

管道效率是指汽轮机从锅炉吸收的热量与锅炉输出的热量的比值，其计算公式为：

$$\eta_p = \frac{q_0}{q_b} \quad (3.37)$$

η_p 不仅包括主蒸汽管道和再热管道的热损失，还包括排污水热量等。

③全厂热效率 η_{cp}

全厂热效率 η_{cp} 是指汽轮发电机组中的锅炉、汽轮机、发电机及其系统在发电过程中热能的利用率，即

$$\eta_{cp} = \frac{3600P_e}{Bq_L} = \eta_b \eta_p \eta_e \quad (3.38)$$

式中： B ——锅炉燃煤量，kg/h；

q_L ——锅炉输入热量，kJ/kg；

η_b ——锅炉效率， $\eta_b = q_b/q_1$

④全厂热耗率 q_{cp}

$$q_{cp} = \frac{Bq_L}{P_e} = \frac{3600}{\eta_{cp}} \quad (3.39)$$

⑤发电标准煤耗 b^s

发电标准煤耗 b^s 是指汽轮机组每发 1kW h 的电量所消耗的标准煤量，计算公式为：

$$b^s = \frac{3600}{q_s \eta_{cp}} \approx \frac{0.123}{\eta_{cp}} \quad (3.40)$$

式中： q_s ——标准煤的低位发热量， $q_s = 29300 \text{kJ/kg}$

⑥供电标准煤耗率 b_n^s

供电标准煤耗率 b_n^s 是指扣除厂用电后的标准煤耗，计算公式为：

$$b_n^s = \frac{b^s}{1 - \varepsilon} \quad (3.41)$$

式中： ε ——厂用电率。

3.6 本章小结

本章对电站热力系统进行了模块划分，根据质量平衡和能量平衡建立了通用的加热器数学模型，在此基础上，讨论了汽轮机排汽焓的计算方法。本章为电站热力系统组态计算软件的实现提供了理论基础。

4 水与水蒸汽热力学性质的计算模型

水与水蒸汽作为典型的常规工质，广泛应用于包括动力工程及相关学科的许多领域中。在电站性能计算中，需要随时确定水和蒸汽的压力、温度、焓、熵、比体积等热力学参数。传统的水蒸汽性质图或表已无法满足要求，准确计算水和蒸汽的热力性质成为电站性能计算的一个重要基础。随着计算机技术的飞跃发展及计算机的日益普及，不仅可以把复杂的水蒸汽热力性质计算公式程序化，由计算机完成复杂的计算，并且可以达到非常高的精度。

目前，水和水蒸汽热力性质计算公式主要有：

①IFC-67 公式。1967 年由国际公式化委员会（IFC）在第六届国际水蒸汽性质会议上提出。此后的几十年，该公式广泛应用于工业领域的水和蒸汽热力性质计算中，使用范围为压力从理想气体的极限值 0MPa 到 100MPa，温度从 0.01℃ 到 800℃。但该公式形式复杂，常系数多，且数值计算中需要有效位数较长，计算工作量大^[40]；尤其不能满足对超临界机组的高参数或超高参数下的工况进行计算的要求。

②IAPWS-IF97 公式。为满足科学计算的需要和工业领域的需求，国际水与水蒸汽协会（IAPWS）于 1997 年 9 月在 IAPWS-IF95 的基础上通过了“IAPWS 水与蒸汽热力性质 1997 工业用公式”，简称 IAPWS-IF97。与 IFC-67 相比，IAPWS-IF97 公式的计算精度与速度有了明显提高，且分区简化，满足了区域边界一致性的要求^[41]。自 IAPWS-IF97 公布以来，在国际上迅速得到了推广和应用。2007 年 8 月，IAPWS 在瑞士卢森堡发布了 IAPWS-IF97 的最新修订版本，将 5 区的压力从原来的 10MPa 扩展到 50MPa。

③BTI 公式。BTI 公式为前苏联热工研究所提出的计算模型，相对于 IFC 公式，形式简单，常系数少，而且在大多数热功计算的使用范围内，具有足够的实用计算精度。BTI 公式的适用范围为温度至 600℃、压力至 26MPa^[42]。

目前，由于超临界和超超临界机组已在我国得到迅速发展，对水和水蒸汽的热力参数的计算提出了迫切需求。通常认为，超超临界机组的蒸汽温度不低于 593℃ 或蒸汽压力不低于 31 MPa，这时 BTI 公式已不再适用。同时，由于 IAPWS-IF97 公式无论在精度、计算速度和区域边界的一致性等方面都优于 IFC-67，所以随着 IAPWS-IF97 公式的发布，工业领域一般都采用 IAPWS-IF97 来计算水和水蒸汽的热力参数。

4.1 IAPWS-IF97 的适用范围及区域划分

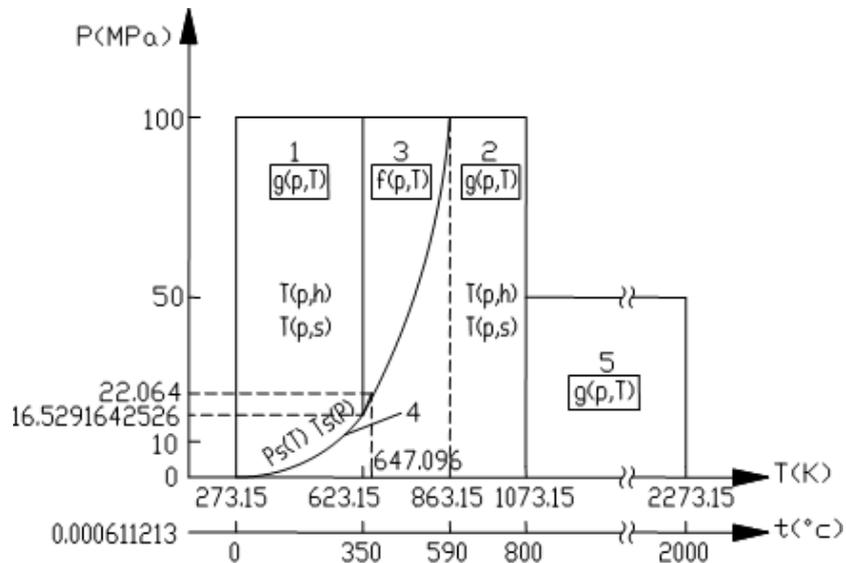


图 4.1 IAPWS-IF97 的区域和方程

Fig 4.1 Regions and equations of IAPWS-IF97

IAPWS-IF97 的有效范围为

$$273.15K \leq T \leq 1073.15K, \quad 611.212677Pa \leq P \leq 100MPa$$

$$1073.15K \leq T \leq 2273.15K, \quad 611.212677Pa \leq P \leq 50MPa$$

IAPWS-IF97 将整个计算区域划分为五个区域，如图 4.1 所示。1 区为未饱和和水区，2 区为过热蒸汽区（细分为三个子区域），3 区为临界水和蒸汽区，4 区为饱和蒸汽区，5 区为超高温蒸汽区。其中，2 区和 3 区的边界线由 B23 方程描述，2 区的子区域边界线分别为等压线 $p=4MPa$ 和等熵线 $s=5.85kJ/(kg \cdot K)$ 。

下表为各区域的范围。

表 4.1 IAPWS-IF97 各区域的范围

Table 4.1 Available range of each region in IAPWS-IF97

区域	适用范围
1 区	$273.15K \leq T \leq 623.15K, \quad p_s(T) \leq p \leq 100MPa$
2 区	$273.15K \leq T \leq 1073.15K, \quad 0 \leq p \leq 100MPa$
3 区	$623.15K \leq T \leq T_{23}(p), \quad p_{23}(T) \leq p \leq 100MPa$
4 区	$273.15K \leq T \leq 647.096K$
5 区	$1073.15K \leq T \leq 2273.15K, \quad 0 \leq p \leq 50MPa$

4.2 IF97 状态方程与特性函数

热力学中共有 8 个状态参数（状态函数）：压力 p ，温度 T ，比体积 v ，热力学能 u ，熵 s ，焓 h ，亥姆霍兹自由能 f ，吉布斯自由焓 g 。其中前 5 个参数为基本参数（前 3 个为可测的基本参数），后 3 个为导出参数。8 个状态参数可组合得到 $8 \times C_7^2 = 168$ 个热力学函数。

根据热力学特性函数的性质，若已知某个特性函数，则可通过求其偏导，得到全部热力学参数^[45]。

根据基本热力学关系

$$du = Tds - pdv \quad (4.1)$$

经推导可知 $u(s,v)$, $h(s,p)$, $f(T,v)$, $g(T,p)$ 等热力学函数是特性函数。

例如，根据热力学定义

$$h = u + pv \quad (4.2)$$

$$f = u - Ts \quad (4.3)$$

$$g = h - Ts \quad (4.4)$$

可将基本热力学关系式(4.1)改写为

$$dg = -sdT + vdp \quad (4.5)$$

由式(4.5)和式(4.1)~(4.4)可得

$$s = -(\partial g / \partial T)_p \quad (4.6)$$

$$v = (\partial g / \partial p)_T \quad (4.7)$$

$$u = g - T(\partial g / \partial T)_p - p(\partial g / \partial p)_T \quad (4.8)$$

$$h = g - T(\partial g / \partial T)_p \quad (4.9)$$

$$f = g - p(\partial g / \partial p)_T \quad (4.10)$$

可见若函数 $g(T,p)$ 已知，则其余全部热力学函数均可确定，因此 $g(T,p)$ 是特性函数。

本文在研制水和水蒸汽性质求解程序的过程中，研究了 IAPWS-IF97 提供的水和水蒸汽状态方程，发现其 1、2、5 区的基本方程实际上是特性函数 $g(p,T)$ 方程，3 区的基本方程则是特性函数 $f(T,v)$ 方程（但用 $f(T,\rho)$ 形式表示）。因此，在程序设计中，充分理解和运用了热力学特性函数的性质，并体现在算法上。

4.3 IAPWS-IF97 计算程序

水和水蒸汽的性质十分复杂，其状态方程在 IAPWA-IF97 中分 5 个区，表达为 5 个基本方程、5 个反推方程，包括约 1200 个系数和指数。

经分析，水和水蒸汽热力性质的求解问题可以分为以下 2 种类型：

① 自变量组合为两个基本参数。如在 1、2 区已知 (p,t) ， (p,h) 和 (p,s) ，在 3 区已

知 (ρ, t) ，在 5 区已知 (p, t) ，这类问题可以结合 IAPWS-IF97 的基本方程、反推方程和热力学关系式直接求解。

②自变量组合为一个基本参数和一个非基本参数或自变量组合为两个非基本参数。如有一个基本参数的情况：在 1、2、5 区已知温度 T （或压力 p ）与焓 h 、熵 s 、比体积 v 中的任意一个或在 3 区已知已知温度 T （或密度 ρ ）与焓 h 、熵 s 、压力 p 中的任意一个组合求解其他热力参数；或者如两个参数都是非基本参数的情况：已知焓 h 、熵 s 、比体积 v 中的任意两个组合求解其他热力参数，这些情况都归为第 2 类问题。

各求解程序（函数）在命名时采用了热力参数的缩写字母来说明输入、输出之间的关系。第一个字母是输出参数，后面两个字母是输入参数，如表 4.2 所示。

表 4.2 水和水蒸气热力性质计算软件各函数的说明

Table4.2 Explanation of function of IAPWS-IF97 software

函数名称	说明
float h_pt(float p, float t)	由已知的压力 p (MPa)和温度 t ($^{\circ}\text{C}$)计算对应的比焓 h (kJ/kg)
float h_ps(float p, float s)	由已知的压力 p (MPa)和比熵 s (kJ/(kg k))计算对应的比焓 h (kJ/kg)
float t_ph(float p, float h)	由已知的压力 p (MPa)和焓 h (kJ/kg)计算对应的温度 t ($^{\circ}\text{C}$)
float h_pv(float p, float v)	由已知的压力 p (MPa)和比体积 v (m^3)计算对应的比焓 h (kJ/kg)
float p_hs(float h, float s)	由已知的焓 h (kJ/kg)和熵 s (kJ/(kg k))计算对应的压力 p (MPa)
float h_px(float p, float x)	由已知的压力 p (MPa)和干度 x 计算对应的焓 h (kJ/kg)
float h_tx(float t, float x)	由已知的温度 t ($^{\circ}\text{C}$)和干度 x 计算对应的焓 h (kJ/kg)
.....

4.3.1 第 1 类问题的求解

第 1 类问题都有对应的基本方程和反推方程，因此可以认为是显式问题。但是每个区的基本方程和反推方程各不相同，因此在计算时首先需要由已知的压力 p 和温度 T 及区域边界方程、饱和线判断所处区域，然后调用对应区域的方程进行热力性质的计算。

① 区域判断算法

进行区域判断时，有两种方法。第一种方法是将温度 T 分别代入 B23 方程和饱和线方程分别求出 p_1 和 p_s ，然后再与已知压力进行比较。第二方法是将压力 p 分别代入 B23 方程和饱和线方程分别求出 t_1 和 t_s ，然后再与已知温度进行比较。两种方法的基本原理相同，差别是所用的边界方程和饱和线方程不同。本文在计算时采用的是第一种方法。

由 B23 方程和克劳修斯-克拉贝隆方程, 可得出 B23 边界线和饱和线在区域内具有单调性 (单增)。

进行区域判断的方法为:

- 1) 当 $p=p_s$ 时, 为 4 区;
- 2) 当 $273.15\text{K}\leq T\leq 623.15\text{K}$ 时, 若 $p_s\leq p\leq 100\text{MPa}$, 为 1 区; 若 $0\leq p\leq p_1$, 则为 2 区;
- 3) 当 $623.15\text{K}\leq T\leq 863.15\text{K}$ 时, 若 $0\leq p\leq p_1$, 为 2 区; 若 $p_1\leq p\leq 100\text{MPa}$, 则为 3 区;
- 4) 当 $863.15\text{K}\leq T\leq 1073.15\text{K}$ 时, 若 $0\leq p\leq 100\text{MPa}$, 为 2 区;
- 5) 当 $1073.15\text{K}\leq T\leq 2273.15\text{K}$ 时, 若 $0\leq p\leq 10\text{MPa}$, 为 5 区。

IAPWS-IF97 的基本方程中, 1 区、2 区和 5 区在计算时可将压力 p 、温度 T 直接代入计算。由于 IAPWS-IF97 具有很好的边界一致性, 所以饱和水的热力参数可由 1 区和临界区的方程在边界条件下求出, 饱和蒸汽的热力参数可由 2 区和临界区的方程在边界条件下求出。

在 3 区内, 基本方程是密度 ρ 和温度 T 的函数, 根据热力学特性函数的关系式, 密度和压力之间的关系式为:

$$\frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} = \delta \left(n_1 \delta^{-1} + \sum_{i=2}^{40} n_i I_i \delta^{i-1} \tau^{J_i} \right) \quad (4.11)$$

式中: p ——压力, MPa

T ——已知温度, K

ρ ——已知密度, kg/m^3

δ ——相对密度, $\delta = \rho/\rho^*$

τ ——相对温度, $\tau = T^*/T$

n_i, I_i, J_i ——多项式系数

式(4.11)是隐函数, 应采用迭代法求解密度。求根方程为:

$$f(\rho) = \frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} - \delta \left(n_1 \delta^{-1} + \sum_{i=2}^{40} n_i I_i \delta^{i-1} \tau^{J_i} \right) = 0 \quad (4.12)$$

使用改进的 Aitken 算法求 3 区的压力 p 的伪代码为:

If ($623.15\text{K}\leq T\leq 647.096\text{K}$) and ($p\leq p_s(T)$)

{ $\rho_0=100$;

$\tau=T^*/T$;

While(1)

{

$\delta=\rho_0/\rho^*$;

```

    ρ1=pρ/(RTρ0φδ);
    ρ2=(ρ0+ρ1)/2;
    ρ3=pρ/(RTρ2φδ);
    ρnew=ρ0-(ρ1-ρ0)(ρ2-ρ0)/((ρ3+ρ0)(ρ1+ρ2));
    if (|ρnew-ρ0|<ε) return ρnew;
    ρ0=ρnew; }
}

```

② IAPWS-IF97 方程的计算过程

IAPWS-IF97 提供的的基本方程和导出方程均为多项式的形式，且每一项分别是两个自变量幂的乘积。通过对公式幂指数的分析，可以得出幂指数 I_i 和 J_i 均有一定的规律。本文以 1 区的反推方程为例，说明幂指数的排列规律。表 4.3 所示为 1 区反推方程的幂指数。

表 4.3 区域 1 反推方程 I_i 、 J_i 的幂指数

Fig 4.3 Power exponent of inversion formula of 1 region

序号	I_i	J_i	序号	I_i	J_i	序号	I_i	J_i
1	0	0	8	1	1	15	2	32
2	0	1	9	1	2	16	3	10
3	0	2	10	1	3	17	3	32
4	0	6	11	1	4	18	4	32
5	0	22	12	1	10	19	5	32
6	0	32	13	1	32	20	6	32
7	1	0	14	2	10			

从表 4.3 可以看出， I_i 按递增的顺序排列，在 20 个指数中只有 7 个指数是不同的。在计算时对相同指数的幂运算提取公因式，将幂运算变成乘法运算。如 1 区的反推方程中，乘积项 $(\eta+1)^{32}=(\eta+1)^{22} \times (\eta+1)^{10}$ ，对于 $(\eta+1)^{22}$ 和 $(\eta+1)^{10}$ 的运算，也采取类似的实现方法，先对 J_i 进行排序，求出幂运算的值之后并将其保留在相应的变量中。

根据以上规则，1 区反推方程计算的算法如下：

```

double a=eta+1;
double x[21]; //存储第一个幂运算的结果
x[14]=x[15]=pi*pi; x[16]=x[17]=x[14]*pi;
x[18]=x[16]*pi; x[19]=x[18]*pi; x[20]=x[19]*pi;

```

```

double y[21]; //存储第一个幂运算的结果
y[2]=y[8]=a; y[3]=y[9]=a*a; y[10]=y[3]*a; y[11]=y[3]*y[3];
y[4]=y[3]*y[11]; y[12]=y[14]=y[16]=y[4]*y[11]; y[5]=y[12]*y[12]*y[3];
y[6]=y[13]=y[15]=y[17]=y[18]=y[19]=y[20]=y[5]*y[12];
inver_pi_eta_2=n1_2[1]+n1_2[2]*y[2]+n1_2[3]*y[3]+n1_2[4]*y[4]
                +n1_2[5]*y[5]+n1_2[6]*y[6];
inver_pi_eta_2+=pi*(n1_2[7]+n1_2[8]*y[8]+n1_2[9]*y[9]+n1_2[10]*y[10]
                +n1_2[11]*y[11]+n1_2[12]*y[12]+n1_2[13]*y[13]);
inver_pi_eta_2+=x[14]*(n1_2[14]*y[14]+n1_2[15]*y[15]);
inver_pi_eta_2+=x[16]*(n1_2[16]*y[16]+n1_2[17]*y[17]);
inver_pi_eta_2+=x[18]*(n1_2[18]*y[18]+n1_2[19]*pi*y[19]
                +n1_2[20]*x[14]*y[20])

```

4.3.2 第 2 类问题的求解

与一些文献^[41,46,47]的方法对第 2 类问题的求解方法有所不同,本文在水和水蒸汽性质求解程序的研制中采取的方法是充分利用热力学特性函数的性质与特点,体现在算法上的总思路是:

设需求任意热力学函数 $Z(X,Y)$ 的值 (X, Y 和 Z 均为状态参数), 若 (X,Y) 不是 (p,T) (对于 1、2、5 区), 则用 p, T 替换独立变量 X, Y , 即将函数 $Z(X,Y)$ 转换为函数 $Z(p,T)$, 然后根据特性函数 $g(p,T)$ 方程计算出所求 $Z(X,Y)$ 值; 同理, 若 (X,Y) 不是 (T,v) (对于 3 区), 则用 T, v 替换独立变量 X, Y , 即将函数 $Z(X,Y)$ 转换为函数 $Z(p,v)$, 再根据特性函数 $f(T,v)$ 方程计算出所求 $Z(X,Y)$ 值。

设需求任意热力学函数 $Z(X,Y)$ 的值。设 (p,T) 初值 (实际上假设了状态 (X,Y) 所在区域), 按该区基本方程或反推方程计算 $X(p,T)$ 和 $Y(p,T)$, 若在设定的误差限内计算所得 $(X(p,T), Y(p,T))$ 与给定 (X,Y) 不相等, 则表示所设 (p,T) 初值不是给定状态 (X,Y) , 需要重设 (p,T) 值继续迭代, 直至 $(X(p,T), Y(p,T))$ 与给定 (X,Y) 相等, 此时状态 (X,Y) 所在区域即被确定。

状态点所在分区确定后, 根据各区的基本方程或反推方程, 容易直接求解得 $Z(p(X,Y), T(X,Y))$ 或 $Z(T(X,Y), v(X,Y))$ 。

下面举例说明上面的算法。

如自变量组合形式为已知温度 T 和焓 h 两个参数时, 选取压力 p 初值代入函数 $h_{pt}(p,t)$ 进行迭代。通常的做法是首先根据已知温度求得饱和焓值 h_s , 如果 $h=h_s$, 说明这时的状态是饱和态, 容易求得其他的热力参数; 否则依次从 1、2、3、5 区进行迭代, 直到找到满足条件的压力值 $p(0 \leq p \leq 100\text{MPa})$ 。最后将压力 p 和温度 T 组合调用相应的函数即可求得其他的热力参数。

上述的方法需要依次搜索各区。通过分析,可以先根据温度 T 判断大致的区域,然后再进行迭代判断出具体所处的区域。具体做法如下:首先根据温度 T 与 623.15K 进行比较以判断所处的大致区域。若 $T < 623.15\text{K}$,可能处于 1 区或 2 区;若 $623.15\text{K} \leq T < 1073.15\text{K}$,可能处于 2 区或 3 区。在进行具体判断时,迭代算出压力 p 值,根据此时的 p, T 值判断是否处于该区,否则利用另一区的迭代式计算出合适的压力 p 。

如自变量组合形式为焓 h 和熵 s ,这时选取压力 p 和温度 T 代入函数 $h_pt(p,t)$ 进行迭代。这时依次从 1、2、3、4、5 区进行迭代,直到找到满足条件的压力 $p(0 \leq p \leq 100\text{MPa})$ 和温度 $T(273.15\text{K} \leq T \leq 2273.15\text{K})$ 。最后将压力 p 和温度 T 组合调用相应的函数即可求得其他的热力参数。

此外,考虑到工程上的常用 (p,T) 参数范围,在进行计算时应当选取合理的 (p,T) 迭代初值,以提高迭代效率。

4.3.3 计算结果验证

将程序的计算结果与文献 [48] 进行比较,结果如表 4.4~表 4.7 所示。

表 4.4 程序计算结果与文献[48]的比较 (已知 p 和 t)

Table 4.4 Comparing between the computing result and Ref.[48](known p and t)

给定点 (p,t)	比体积 m^3/kg			比焓 kJ/kg			比熵 $\text{kJ}/(\text{kg K})$		
	表值	计算	误差%	表值	计算	误差%	表值	计算	误差%
(3,25)	0.001002	0.001002	0	107.61	107.61	0	0.3665	0.3665	0
(80,25)	0.000971	0.000971	0	176.73	176.73	0	0.3438	0.3438	0
(3,180)	0.001126	0.001126	0	764.20	764.20	0	2.1368	2.1368	0
(16,360)	0.0111	0.0111	0	2715.63	2715.63	0	5.4616	5.4616	0
(30,520)	0.009320	0.009320	0	3167.67	3167.67	0	5.9015	5.9015	0
(0.005,35)	28.3849	28.3849	0	2564.84	2564.84	0	8.4072	8.4072	0
(22,370)	0.002029	0.002022	0.345	1842.65	1842.22	0.023	4.0333	4.0326	0
(3,240)	0.0682	0.0682	0	2824.56	2823.82	0.0261	6.2275	6.2241	0.017
(3,233.86)	0.0667	0.0667	0	2803.26	2803.27	0	6.1858	6.1858	0
	0.001217	0.001217	0	1008.37	1008.37	0	2.6456	2.6456	0

表 4.5 程序计算结果与文献[48]的比较 (已知 p 和 h)Table 4.5 Comparing between the computing result and Ref.[48] (known p and h)

给定点 (p,h)	比体积 m^3/kg			温度 $^{\circ}C$			比熵 $kJ/(kg \cdot K)$		
	表值	计算	误差%	表值	计算	误差%	表值	计算	误差%
(3,149.33)	0.001005	0.001005	0	35	35	0	0.5041	0.5043	0.0397
(80,725.52)	0.001054	0.001054	0	160	160	0	1.8607	1.8607	0
(3,421.28)	0.001042	0.001042	0	100	100	0	1.3048	1.3047	0.007
(16,1232.45)	0.001307	0.001307	0	280	280	0	3.0376	3.0375	0.003
(30,3348.94)	0.0070101	0.010701	0	570	570	0	6.1233	6.1233	0
(0.005,2669.08)	33.4927	33.4927	0	90	90	0	8.7185	8.7185	0
(22,1842.65)	0.002029	0.002061	1.577	370	371	0.27	4.0333	4.0557	0.563
(3,2824.56)	0.0682	0.0682	0	240	240	0	6.2275	6.2276	0.0016
(3,1008.37)	0.001217	0.001217	0	233.86	233.84	0.008	2.6456	2.6454	0.007
(3,2803.26)	0.0667	0.0667	0	233.86	233.86	0	6.1858	6.1858	0

表 4.6 程序计算结果与文献[48]的比较 (已知 p 和 s)Table 4.6 Comparing between the computing result and Ref.[48] (known p and s)

给定点 (p,s)	比体积 m^3/kg			比焓 kJ/kg			温度 $^{\circ}C$		
	表值	计算	误差%	表值	计算	误差%	表值	计算	误差%
(3,1.1905)	0.001035	0.001034	0.0010	379.24	379.22	0.0001	90	90	0
(80,0.7905)	0.000985	0.000985	0	317.62	317.63	0	60	60	0
(3,2.3285)	0.001155	0.001155	0	852.98	852.95	0	200	200	0
(16,6.4832)	0.0214	0.0214	0	3439.85	3439.47	0.0001	550	550	0
(30,5.4419)	0.006738	0.006743	0.0007	2820.91	2619.72	0.0713	450	450	0
(0.005,8.4072)	28.3849	28.3853	0	2564.84	2564.85	0	35	35	0
(22,4.0333)	0.002029	0.002020	0.0044	1842.65	1841.59	0.0006	370	370	0
(3,6.2275)	0.0682	0.0683	0.0015	2824.56	2825.26	0.0002	240	240	0
(16,3.7457)	0.001710	0.001710	0	1649.67	1649.69	0.0000	347.36	347.36	0
(16,5.2463)	0.0093	0.0092	0.0108	2580.80	2580.63	0.0001	347.36	347.33	0.0001

表 4.7 程序计算结果与文献[48]的比较 (已知 h 和 s)

Table 4.7 Comparing between the computing result and Ref.[48] (known h and s)

给定点 (h,s)	比体积 m^3/kg			压力 MPa			温度 T		
	表值	计算	误差%	表值	计算	误差%	表值	计算	误差%
(107.61,0.3665)	0.001002	0.001002	0	3	2.99	0.0033	25	25	0
(176.73,0.3438)	0.000971	0.000971	0	80	80	0	25	25	0
(764.2,2.1368)	0.001126	0.001126	0	3	3	0	180	180	0
(2715.63, 5.4616)	0.0111	0.01106	0.003	16	16	0	360	360	0
(3167.67, 5.9015)	0.00932	0.00932	0	30	30	0	520	520	0
(2564.84, 8.4072)	28.3849	28.3858	0	0.005	0.005	0	35	35	0
(1842.65,4.0333)	0.002029	0.002029	0	22	22	0	370	370	0
(2824.56,6.2275)	0.0682	0.06822	0	3	3	0	240	240	0
(2803.26, 6.1858)	0.0667	0.0667	0	3	3	0	233.86	233.86	0
(1008.37,2.6456)	0.001217	0.001217	0	3	3	0	233.86	233.86	0

4.4 本章小结

本章对 IAPWS-IF97 的区域划分的算法进行了深入研究。根据 3 区压力 p 和密度 ρ 的关系, 采用改进的 Aitken 算法计算密度 ρ , 从而实现了根据压力和温度计算 3 区水和蒸汽热力参数的程序。在水和水蒸气热力性质计算程序的设计中, 提出了 IAPWS-IF97 基本方程和反推方程未包括的状态方程的算法, 对各状态区域划分、迭代算法进行了较深入的研究。用本文编制的程序计算了水和蒸汽的热力性质, 并与 IAPWS-IF97 性质表中的值进行了比较, 误差很小。

5 火电机组热力性能计算软件的开发

随着 DCS/MIS 系统在电厂中的普遍应用，其数据采集系统能够自动完成运行数据的采集、显示和存储功能，使运行人员可以实时掌握机组的运行参数，并为热力系统在线计算提供数据。

本章将讨论采用组态的方式实现火电机组热力性能计算软件。组态的概念的出现是伴随着 DCS 的出现才开始被人们所熟知的，它的含义是使用软件工具对计算机及软件的各种资源进行配置，达到使计算机或软件按照预先设置自动执行特定任务和满足使用者要求的目的^[49]。在本软件中，组态就是从资源模块库中选取合适的模块，从而通过模块之间接口的连接实现系统图，由系统自动根据模型之间的拓扑关系进行矩阵的填充，最后完成对整个系统的热经济性计算。

5.1 软件结构图

图 5.1 为本软件的层次结构图。本软件首先划分为四个功能模块：组态模块、数据采集模块、热力计算模块、结果显示模块，每个功能模块下又划分了若干的子模块。

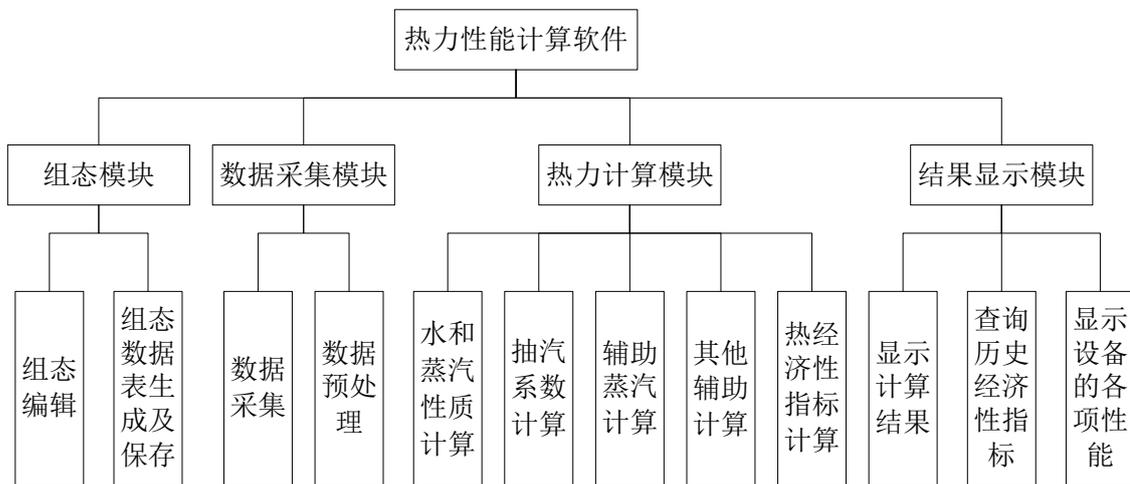


图 5.1 软件的结构设计图

Fig 5.1 Structural design drawing of the software

5.1.1 组态模块

组态模块的主要功能是通过用户定义的方式生成热力系统。在进行组态时，软件根据各个设备部件间的连接关系生成组态信息数据表，供热力计算模块调用。

因不同机组的热力系统结构各不相同，通过定义“结构参数”的方式构造各种不

同的实际热力系统。结构参数主要反映回热加热器的类型，除氧器的位置，有无疏水冷却器、加热器引入的辅助蒸汽数目等。当描述系统形式的结构参数被定义以后，机组的热力系统形式也就随之确定。对于不同类型和型号的机组，只要修改结构参数，就可以重新构造需要的热力系统。

设定结构参数时，本文做了如下约定：

- ①加热器序号从高压加热器到低压加热器依次递减；
- ②除氧器位置为除氧器所在的回热系统的位置；
- ③回热加热器类型：0 表示疏水放流式，1 表示汇集式；
- ④*i* 级加热器是否有 *j* 级加热器疏水引入 (*i*>*j*)：1 表示有，0 表示无。

设置热力系统组态的属性时，主要包括加热器的个数、加热器的类型、加热器引入的辅汽条数、是否再热、汽缸数目、各缸抽汽数目等。

例如，对于如图 5.2 所示的热力系统图，结构参数可定义为下列形式，其中大部分是以数组的形式存放的：

```

‘-----某 300MW 机组结构参数‘-----’
n=8; %回热加热器个数
h_style=[0 0 0 1 0 0 0 0]; %回热加热器类型(0: 疏水放流式; 1: 汇集式)
m=4; %除氧器编号
cooler=[1 1 1 0 0 0 0 0]; %加热器有无疏水冷却器
trad_heat=[0 0 0 2 0 0 0 1]; %回热加热器引入辅助蒸汽数目
h_drain=[0 0 0 0 0 0 0;1 0 0 0 0 0 0;1 1 0 0 0 0 0;1 1 1 0 0 0 0;
         0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 1 0 0;0 0 0 0 1 1 0;0 0 0 0 1 1 1]; %i 级回热加热器
         是否有 j 级加热器的疏水引入
if_reheat=1;%是否再热，是=1；否=0
no_cylinder=3; %汽缸数目
no_hpc=2;% 高压缸抽汽数目
no_ipc=2;% 中压缸抽汽数目
no_lpc=3;% 低压缸抽汽数目
通过上面的结构参数，可以还原机组的热力系统图。

```

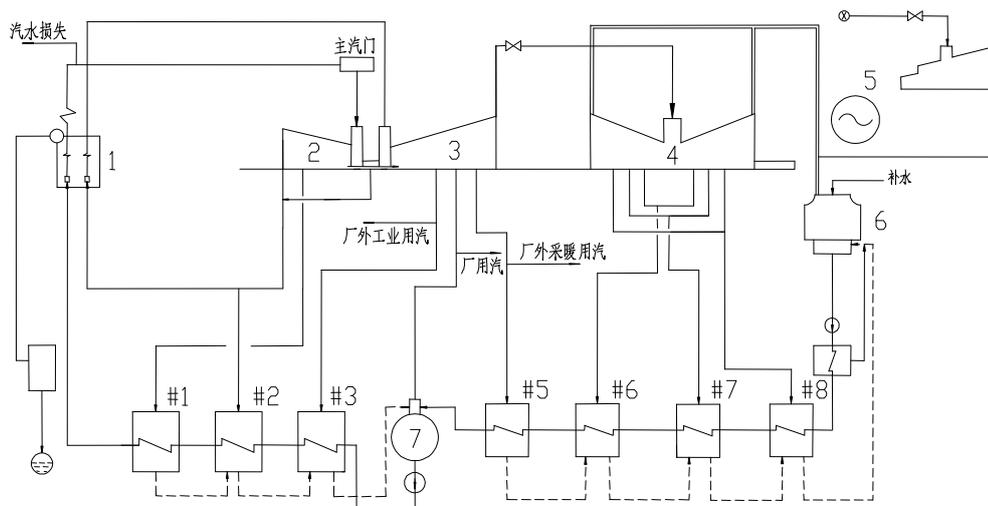


图 5.2 某 300MW 亚临界凝汽式机组热力系统图

Fig5.2 Thermodynamic system diagram of a 300MW subcritical pressure condensing turbine

①根据加热器的物理模型，将加热器定义为下列的数据结构形式。

```
struct heater
```

```
{
    int h_num[n]; /*加热器的编号*/
    int h_style[n]; /*加热器的类型*/
    int h_drain[n][n]; /*加热器有无上级疏水*/
    int h_cooler[n]; /*加热器有无疏水冷却器*/
    real h_duancha[n]; /*加热器的端差*/
    real h_fz[n]; /*加热器辅助汽水量*/
    real h_h[n]; /*加热器的纯外热量*/
    real h_tem; /*抽汽的温度*/
    real h_press; /*抽汽的压力*/
    real h_h; /*抽汽的焓值*/
};
```

②根据辅汽进出加热器的类型，将辅汽定义为下列的数据结构形式。

```
struct Fqrecord
```

```
{
    int FQnum; /*第 i 号加热器的辅汽*/
    real FQtem; /*辅汽的温度*/
    real FQpress; /*辅汽的压力*/
};
```

```

real FQh; /*辅汽的焓值*/
real FQliuliang; /*辅汽的份额*/
};

```

5.1.2 数据采集模块

数据采集模块的主要功能是进行数据采集及对采集来的数据进行预处理，去除不合理的数据。

以热力性能试验为例说明数据采集模块的功能。为了保证计算结果能全面、真实的反应机组的运行状况，同时降低测量误差，减少测量仪表的数量，在进行热力试验时主要从 DCS 读取数据，同时辅以现场仪表。

在进行加热器出口水焓的计算时，可以用加热器进汽温度下的饱和焓值来代替。从图 5.3 和图 5.4 中可以看出，水的焓值随着温度的变化差别较大，而随着压力的变化差别较小。

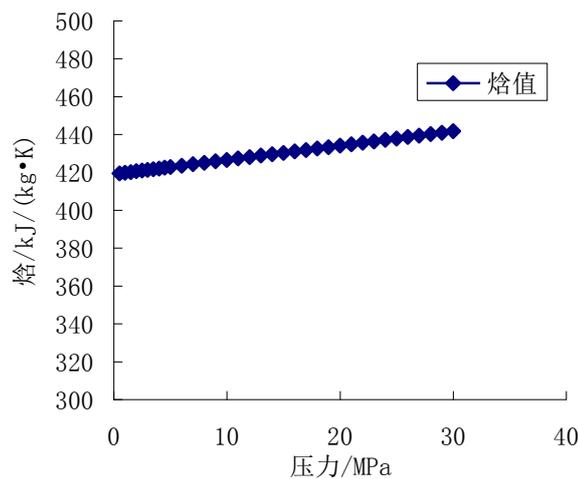


图 5.3 温度为 100°C 时焓值与压力的关系图

Fig5.3 Relational graph of Enthalpy and pressure when T=100°C

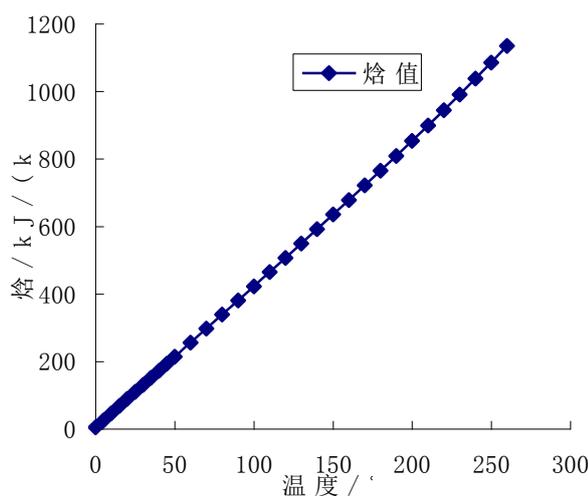


图 5.4 压力为 5MPa 时焓值与温度的关系图

Fig5.4 Relational graph of Enthalpy and temperature when p=5MPa

将热力测试所得的数据进行整理是计算的第一步，确定用作计算依据的观测值，然后求出被测参数的真实值。其主要步骤有：

①检查工况点全部原始记录的观测值，并删除确知的工况变动时间内的观测值。另外，根据工程经验判断观测值的合理性，删除不合理的部分。

②计算观测值

计算观测值时用算数平均值来计算，即

$$x = \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) / n \quad (5.1)$$

其中， X_i -观测值

n -观测值的个数

③对观测值进行修正。主要是针对压力进行大气压和标高的修正，最后计算出被测参数的真实值。

5.1.3 热力计算模块

火电厂热力性能计算软件的热力计算子系统主要是在热力系统模型的基础上，输出热耗、汽轮机效率等热经济性指标。根据软件的结构，将热力计算模块分为：水和蒸汽热力性质计算、辅助蒸汽计算、抽汽系数计算、热经济性指标计算和其他辅助计算模型等。

抽汽系数的计算是热力计算模块中最为关键的模块。它根据组态的结果识别加热器的类型、抽汽焓值和辅助蒸汽焓值等信息，建立起加热器的数学模型，求得热力试验中难以测得的抽汽系数。抽汽系数是进行热经济性指标计算的基础。

抽汽系数计算模块假定各个加热器的抽汽、给水、疏水和辅助蒸汽的焓值已

知，但是电厂中能直接测得的参数是压力、温度、比体积等，因此需要由水和蒸汽性质子程序将压力、温度、比体积转化成焓、熵。在抽汽系数的计算中还需要考虑到各种汽水损失和辅助汽水的影响，如门杆漏汽和轴封漏汽等，这些辅助汽水的计算主要其他辅助计算模型子模块完成。

在进行抽汽系数的计算时，加热器矩阵模型的填充是关键。下面简要给出了加热器矩阵模型的填充算法。

能量平衡方程的填充：

```

for (i=1;i<=n;i++)
{
    for (j=1;j<=n;j++)
    {
        if (i=j)
            { A11[i][j]=h_pt(p[i],t[i]); A13[i][j]=-K[i]*h_pt(p[i]);}
        if(i=j+1)
            { A13[i][j]=K[i]*h_pt(p[i]);}
        else
            {A11[i][j]=0;A13[i][j]=0;}
    }
}
for (i=1;i<=n;i++)
{
    for (j=1;j<=n+1;j++)
    {
        if(i=j)
            A12[i][j]=-hw[i];
        if(i=j-1)
            A12[i][j]=hw[j];
        else
            a12[i][j]=0;
    }
}

```

水侧质量平衡方程的填充：

```

for(i=1;i<=n;i++)
{

```

```

    if(i=j)
        A21[i][j]=K[i];
    if(i=j+1)
        A23[i][j]=K[j]*K[i];
    else
        {A21[i][j]=0;A23[i][j]=0;}
}
for (i=1;i<=n;i++)
{
    for (j=1;j<=n+1;j++)
    {
        if(i=j)
            A22[i][j]=-1;
        if(i=j-1)
            A22[i][j]=1;
        else
            A22[i][j]=0;
    }
}
汽侧质量平衡方程的填充:
for(i=1;i<=n;i++)
{
    if(K[i]=1) L[i]=0;
    if(K[i]=0) L[i]=1;
}
for(i=1;i<=n;i++)
{
    for(j=1;j<=n;j++)
    {
        if(i=j)
            {A31[i][j]=K[i];A33[i][j]=-1;}
        if (i=j+1)
            A33[i][j]=L[i]*K[ j];
        else

```

```

        {A31[i][j]=0;A33[i][j]=0;}
    }
}

```

5.1.4 结果显示模块

结果显示模块的主要功能是将显示计算结果、查询历史经济性指标，并能够显示设备的各项性能。

5.2 软件的计算流程图

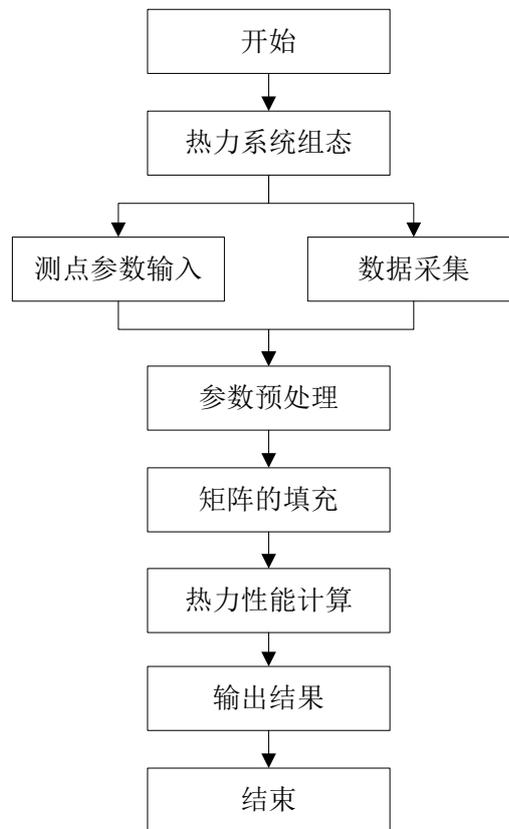


图 5.5 软件的计算流程图

Fig 5.5 The flow chart of computation of the software

5.3 实例验证

现以某火力发电厂的 300MW 凝汽式燃煤发电机组为例，计算机组的热经济性指标。图 5.2 所示为该机组的原则性热力系统图，该系统有八级不调节抽汽，其中第一、二、三级抽汽分别供三台高压加热器，第五、六、七、八级抽汽分别供四台低压加热器，第四级抽汽作为除氧器的加热汽源。除除氧器外，加热器都装设了疏水冷却器。三台高压加热器的疏水逐级自流至除氧器，第五、六、七级低压

加热器的疏水逐级自流至第八级加热器，第八级低加的疏水用疏水泵送回本级的
主凝结水出口。

①汽轮机形式和参数

汽轮机形式：亚临界、一次中间再热、两缸两排汽、凝汽式

额定功率 $p_e=300\text{MW}$

主蒸汽参数： $p_0=16.65\text{Mpa}$ ， $t_0=537^\circ\text{C}$

再热蒸汽参数：热段 $p_{rh}=3.29\text{Mpa}$ ， $t_{rh}=537^\circ\text{C}$

冷段 $p'_m=3.61\text{Mpa}$ ， $t'_{rh}=316.4^\circ\text{C}$

低压缸排汽压力： $p_c=0.00554\text{MPa}$

给水温度： $t_{fw}=262.5^\circ\text{C}$

小汽轮机排汽压力： $p_{c,xj}=6.27\text{kPa}$

表 5.1 机组抽汽参数

Table 5.1 The parameter of thermal power unit

项目	单位	回热加热器							
		#1	#2	#3	除氧器	#5	#6	#7	#8
抽汽压力	Mpa	5.954	3.61	1.63	0.803	0.341	0.134	0.0732	0.0256
抽汽温度	$^\circ\text{C}$	386.7	316.4	436.6	337.4	237.1	145	95	$x=0.916$
加热器端差	$^\circ\text{C}$	-1.67	0	0	0	2.78	2.78	2.78	2.78
抽汽压损系数	---	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

②锅炉形式和参数

锅炉形式：亚临界、一次中间再热、自然循环、单汽包

额定蒸发量 $D_b=2027\text{t/h}$

过热蒸汽出口参数： $p_b=17.3\text{Mpa}$ ， $t_b=541^\circ\text{C}$

再热蒸汽参数： $p_{rh}=3.734\text{Mpa}$ ， $t_{rh}=541^\circ\text{C}$

汽包压力： $p_{b1}=18.44\text{Mpa}$

锅炉热效率： $\eta_b=0.925$

③计算中采用的其它数据

机械效率 $\eta_m=0.987$

发电机效率 $\eta_g=0.993$

回热加热器效率 $\eta_h=0.99$

扩容器效率 $\eta_f=0.99$

厂用电率 $\varepsilon=0.07$

④计算结果

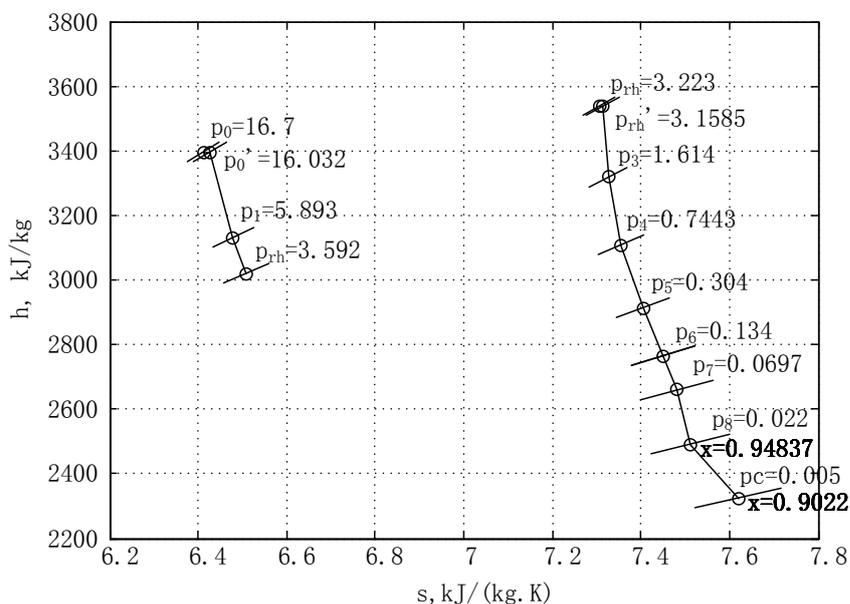


图 5.6 汽轮机蒸汽膨胀过程线

Fig 5.6 Turbine steam coefficient expansion hydrograph

表 5.2 机组抽汽系数计算

Table 5.2 Calculation of steam extraction capacity

项目	单位	回热加热器							
		#1	#2	#3	除氧器	#5	#6	#7	#8
抽汽系数	--	0.077	0.085	0.043	0.038	0.035	0.024	0.035	0.034
抽汽比焓	kJ/kg	3131	3020.19	3317.93	3108.31	2913.86	2764.41	2659.6	2491.1
疏水比焓	kJ/kg	1202.26	1050.79	861.92	698.92	555.20	447.06	371.83	257.72
加热器出口水比焓	kJ/kg	1075.04	879.42	735.45	698.92	458.07	381.96	266.73	160.76

由此，可以进行热经济性指标的计算：

汽轮机汽耗量 $D_0 = 909613 \text{ kg/h}$

热耗量 $Q_0 = 2422094843 \text{ kJ/h}$

热耗率 $q_0 = 8073 \text{ kJ/(kW h)}$

绝对电效率 $\eta_e = 0.5455$

锅炉输出热量 $Q_b = 24418965253 \text{ kJ/h}$

管道效率 $\eta_p = 0.99$

全厂热效率 $\eta_{cp}=0.4$

全厂热耗率 $q_{cp}=9036 \text{ kJ}/(\text{kW h})$

发电标准煤耗 $b^s=0.32 \text{ kg}/(\text{kW h})$

至此，基本计算出机组的原则性热经济性指标。

5.4 本章小结

本章应用软件工程对软件结构进行了设计，对系统的组态实现方法进行了研究，给出了矩阵填充的代码。在本文给出的实例中，通过定义组态文件的方式构建了热力系统，对机组的热经济性指标进行了计算。

6 结论及展望

6.1 结论

本课题以电站热力设备及系统为研究对象，建立了热力设备及系统的热力性能计算模型，同时根据软件的需要对水和蒸汽的性质公式进行了研究，对电站热力性能计算软件的结构进行了设计，为编制软件打下了基础。本文取得的主要结论如下：

①按照软件工程的方法对火电机组热力性能计算软件进行了需求分析，设计了软件的主要功能，提高了软件开发的效率，使得软件的开发具有科学性。

②通过对电厂热力系统进行分析研究，对热力系统进行了模块划分。在建立加热器模型时引入了“通断系数 K_1 ”，可以将不同类型的加热器抽象为一个类型。利用能量平衡方程和质量平衡方程，建立了矩阵形式的加热器计算模型，该模型考虑了外部热量、辅助汽水和加热器效率的影响，能够适用于不同形式的电站机组，方便了热力系统组态。

③在水和水蒸气热力性质计算程序的设计中，提出了 IAPWS-IF97 基本方程和反推方程未包括的状态方程的算法，对各状态区域划分、迭代算法进行了较深入的研究；根据各区方程指数的排列规律，优化了各区的算法。根据本文的算法编制了程序，并计算了水和蒸汽的热力参数，通过与水和水蒸汽表中的值进行比较，误差很小，可以应用于工程计算中。

④结合电站热力性能计算软件的开发和应用，应用软件工程方法学对软件结构进行了设计，对软件的功能模块进行了划分，并分析了各模块的功能。同时，对系统的组态实现方法进行了研究。在本文给出的实例中，通过定义组态文件的方式构建了热力系统，根据本文提出的加热器模型和编制的水和蒸汽性质计算程序计算了某 N300-16.65/537/537 机组的热经济性指标。结果表明，本文提出的加热器模型和 IAPWS-IF97 的计算程序是正确的。

6.2 展望

今后的研究工作主要有：

- ①完善图形组态工具，为组态功能的实现提供更好的可视化用户界面。
- ②在软件功能中添加机组效率的局部影响因素的分析功能，例如抽汽压损、加热器端差、凝汽器过冷度和真空度等的影响。

致 谢

本文是在我的导师张新铭教授的悉心指导下完成的，从论文的选题到论文中疑难点的突破，无不凝注着导师大量的心血，尤其是在论文修改定稿阶段，导师更是字字斟酌，句句推敲，提出了许多宝贵的修改意见。导师淡泊名利、为人正直、治学严谨、实事求是，他的敬业精神永远值得我学习。研究生三年的学习生活中，导师不仅给予了我学习上无微不至的关怀和帮助，在人生道路上更为我指引前进的方向，导师的谆谆教诲将令我终生难忘。在论文完成之际，谨向导师致以最诚挚的谢意。

本文的完成，还要感谢实验室的师兄陈菁、同学张晓凯，以及师妹凌娅等，他们对我研究生期间的学习和生活给予了很大的支持和帮助，让我留下了许多美好的回忆。

感谢研究生期间所有关心和帮助过我的领导、老师、同学和朋友们！

感谢我的父母和亲人，在我的人生道路上离不开他们永恒不变的关心与支持！正是他们的付出，才为我创造了良好的学习和生活环境。

特别要衷心地感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

宋 健

二〇一一年五月

参考文献

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. 第十一届全国人民代表大会第四次会议批准. 2011-3-14.
- [2] 2009 年度发电业务情况通报[EB/OL]. 国家电力监管委员会办公厅. 2010-11.
- [3] 李蔚, 盛德仁, 陈坚红, 等. 供热机组的性能监测与运行优化管理系统研究[J]. 热力发电, 2003, 33(7): 21-23.
- [4] 严俊杰, 邢秦安, 林万超, 等. 火电厂热力系统热经济性诊断理论与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [5] G.Prasad, E.Swidanbank, B.W.Hogg. A Novel Performance Monitoring Strategy for Economical Thermal Power Plant Operation[J]. IEEE Transaction On Energy Conversion, 1999, 14(3): 802-809.
- [6] Sid Sutherland. GE plant optimization solutions[EB/OL]. <http://www.ge.com>.
- [7] 许继刚, 郑慧莉. 电厂管理控制一体化信息系统的发展[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (7): 59-63.
- [8] Smartprocess Overview[EB/OL]. Westinghouse Process Control Inc.
- [9] 洪军, 司凤琪, 毕小龙, 等. 火电机组运行优化系统的现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (18): 96-103.
- [10] Pegasus Technologies Inc[EB/OL]. Value to utilities' boilers large and small.
- [11] 卢勇, 徐向东. 锅炉变工况运行优化监控系统的实现[J]. 动力工程, 2003, 23 (2): 2325-2328.
- [12] 洪军, 崔彦锋, 毕小龙, 等. 机组在线运行优化系统及实时目标工况的确定[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (6): 86-90.
- [13] 李蔚, 任浩仁, 盛德仁, 等. 300MW 火电机组在线能耗分析系统的研制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 153-155.
- [14] 杨玉婷, 刘长良. 汽轮发电机实时能损监测及分析系统[J]. 华北电力大学学报, 2000, 27(14): 49-53.
- [15] 傅德维, 俞之明, 葛严, 等. 基于分散控制系统的大型火电机组动态经济运行分析系统[J]. 中国电力, 2001, 34(5): 41-44.
- [16] 周原冰, 刘冰. 基于实时数据平台的实时监控与运行优化管理系统[J]. 现代电力, 2006, 23(2): 88-91.
- [17] 邱树德, 张世荣, 王秀林, 等. 锅炉性能优化系统 SOAP 降低氮氧化物排放应用试验[J]. 山西电力, 2004(8): 4-7.
- [18] 郑体宽, 杨晨. 热力发电厂(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

- [19] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
- [20] 马芳礼. 电厂热力系统节能分析原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [21] 郭民臣, 魏楠. 热(汽)耗变换系数法—分析电厂热力系统的新方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(4): 227-229.
- [22] M.A.Habib, S.A.M.Said, J.J.AL-Bagawi. Thermodynamic Performance Analysis of the Chazlan Power Plant [J]. Energy, 1995, 20(11): 1121-1130.
- [23] A.Valero, M.A.Lozano, J.L.Bartolome. On-Line Monitoring of Power-Plant Performance, using Exergetic Cost Techniques [J]. APPLIED THERMAL Engineering, 1996, 16(12): 933-948.
- [24] 张新铭, 王萍, 彭鹏. 基于软件工程的电厂热力系统组态软件开发[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(19): 226-229.
- [25] 张海藩. 软件工程导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [26] 贾延林. 模块化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [27] 吕崇德, 王超. 我国的电站仿真及建模技术[C]. 第五届全国仿真器学术会论文集, 2004: 24-35.
- [28] 蔡瑞忠, 王威, 吕崇德. 基于流体网络模块的模块化建模方法[J]. 清华大学学报, 1999, 39(12): 62-64.
- [29] P. S. Bartells, L. P. Smith. Modular Modeling System (MMS) , A Computer Code for Simulation of Power Plant Dynamic Performance , Proceedings : 1984 Power Plants Performance Monitoring Workshop[C], EPRI CS-4545-SR, May 1986.
- [30] 闫顺林, 张春发, 李永华, 等. 火电机组热力系统汽水分布通用矩阵方程[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 69-73, 78.
- [31] 张新铭, 谭灿燊. 基于结构特征矩阵的电厂热力系统通用矩阵模型[J]. 动力工程, 2007, 27(1): 145-148.
- [32] Xian-chang Cao, Chun-fa Zhang, An-zhong Jiang. A new method of energy degradation on-line analysis for coal-fired unit—expansion line approximating method[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22: 339-348.
- [33] Eiichi Koda, Toru Takahashi. Development of general-purpose software to analyze the steady state of power generation systems [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43: 1407-1416.
- [34] 王乃华, 高玉川, 孙奉仲, 等. 火电厂热力系统并联算法通用逻辑-矩阵模型[J]. 热能动力工程, 2004, 11(6): 610-614.
- [35] Zhang chunfa. A STEAM-WATER Distribution Matrix Equation of the Whole Thermal System [C]. S.R.Penfield 1999 International Joint Power Generation Conference, U.S.A. ASME Power, 1999: 497-503.

- [36] 任浩仁, 盛德仁, 卢学锋, 等. 汽轮机在线性能计算中排汽焓的确定[J]. 动力工程, 1998, 18 (6): 1-4.
- [37] 郭江龙, 张树芳, 陈海平. 基于 BP 神经网络的汽轮机排汽焓在线计算方法[J]. 热能动力工程, 2004, 19 (2): 179-181.
- [38] 闫顺林, 王俊有, 孙轶卿. 湿蒸汽区排汽焓动态在线计算模型的研究[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(1): 62-66.
- [39] H.R.Ren, D.R.Sheng, X.F.Lu, et al. Calculation of Turbine Exhaust Enthalpy in Online System[J]. Power Engineering, 1998, 18: 1-4.
- [40] J. V. Sengers, J. T. R. Watson. Improved International Formulations for the Viscosity and Thermal Conductivity of Water Substance[J], J. Phys. Chem. Ref. Data, 1986, 15 (4): 1291-1321.
- [41] 周艳明, 李继庚, 刘焕彬, 等. 水和水蒸汽热力性质 IAPWS-IF97 计算模型分析及算法设计[J]. 热能动力工程, 2010, 25 (2): 166-171.
- [42] 高洪涛. 工业汽轮机热力性能在线监测与故障诊断的研究[D]. 大连: 大连理工大学能源与动力学院, 1998.
- [43] H.-J. Kretzschmar, J. R. Cooper, A. Dittmann, et al. Supplementary Backward Equations for pressure as a function of enthalpy and entropy $p(h, s)$ to the formulation IAPWS-IF97 for Water and Steam [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2006, 128: 702-713.
- [44] W. Wagner, J. R. Cooper, A. Dittmann, et al. The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam [J]. J. Eng. Gas Turbines Power, 2000, 122: 150-182.
- [45] 曾丹苓, 敖越, 张新铭, 刘朝. 工程热力学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [46] Bert Rukes, R B Dooley. Supplementary release on backward equations for pressure as a function of enthalpy and entropy $p(h, s)$ to the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam[C]. Gaithersburg, Maryland, USA: The International Association for the Properties of Water and Steam, 2001, 1-13.
- [47] Koichi Watanabe, R B Dooley. Supplementary release on backward equations $p(h, s)$ for region 3, equations as a function of h and s for the region boundaries, and an equation test (h, s) for region 4 of the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam[C]. Kyoto, Japan: The International Association for the Properties of Water and Steam, 2004, 1-34.
- [48] W.瓦格纳, A.克鲁泽. 水和蒸汽的性质[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [49] 马国华. 监控组态软件及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [50] 杨亚罗, 王润孝, 库祥臣, 等. 组态概念发展的新趋势[J]. 计算机应用研究, 2006, (9):

- 13-17.
- [51] S.Cafaro, L.Napoli, A.Traverso, et al. Monitoring of the thermoeconomic performance in an actual combined cycle power plant bottoming cycle[J]. *Energy*, 2010(35): 902-910.
- [52] Gyunyong Heo, Soon Hung Chang, Soo Choi. Development of a need-oriented steam turbine cycle simulation toolbox [J]. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2004, (6): 1-10.
- [53] Albert W L Yao, Ku C H. Development a pc-based automated monitoring and control platform for electric power systems [J]. *Electric Power Systems Research*, 2003, 64(2): 129-136.
- [54] 韩伟. 热力系统性能分析组态工具研究与开发[D]. 南京: 东南大学动力工程系, 2004.
- [55] 齐志广. 汽轮机热力性能试验通用计算机软件的开发[D]. 重庆: 重庆大学动力工程学院, 2007.

附 录

作者在攻读学位期间发表的论文

- [1] 张新铭, 宋健, 张晓凯. 火电机组性能计算软件的建模及仿真研究. 电力自动化设备 (已录用).