

流体网络理论在火电机组 热力系统分析中的应用

宋东辉 著



科学出版社

流体网络理论在火电机组 热力系统分析中的应用

宋东辉 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者从事火电机组热力系统分析方法研究的成果总结。区别于循环函数法、等效焓降法等传统方法,书中将流体网络理论引入热力系统分析,将热力系统分析分解为流体网络分析和基于流体网络计算结果的焓值分布分析两个层面。该方法可用于热力系统变工况计算,适用于热力系统的设计、分析和技术改造。

本书可供工程热物理、热能工程等相关专业的科技人员、工程设计人员阅读,也可作为高等院校相关专业研究生教材、本科生选修教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体网络理论在火电机组热力系统分析中的应用 / 宋东辉著. —北京:科学出版社, 2018

ISBN 978-7-03-057664-4

I. ①流… II. ①宋… III. ①流体系统(自动化)-应用-火电厂-热力系统-系统分析 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第117687号

责任编辑:吴凡洁 王楠楠 / 责任校对:彭 涛

责任印制:师艳茹 / 封面设计:铭轩堂

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>

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张:9

字数:169 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

目前,火力发电仍占我国电源结构的大部分,地位举足轻重。提高火电机组能源利用效率,对于加速国民经济发展的意义重大。

火电机组运行的经济性取决于很多方面,为了提高热能的利用率,降低冷源损失,火电机组普遍采用再热循环和回热加热系统,来提高蒸汽循环的热效率。本书的研究目标就是分析或评价再热循环和回热加热系统对机组循环热效率的影响,包括在各种变工况条件下,再热循环和回热加热系统运行状态的分析。

工质循环流动的通道结构复杂,构成了一个复杂的热力系统,各分支之间互相影响,要研究回热系统或再热系统,不能将它们孤立出来,必须将它们放入大的热力系统中进行研究。因此,本书以某真实火电机组的热力系统为对象,研究热力系统的分析方法及回热系统和再热系统对工质循环热效率的影响。

热力系统的计算和分析方法较多,本书根据自身的研究目的,将热力系统的分析计算方法简化,分解为热力系统流体网络分析和基于流体网络计算结果的焓值分布分析。将流体网络理论思想引入热力系统流体网络计算,通过合理假设,将热力系统流体网络的工质流动简化为不考虑工质换热对工质物性参数影响的一维、稳态流动问题,从而建立热力系统流体网络的等值电路模型,将复杂流体网络的质量流量和压力分布求解,转化为直流电路的电流、电压分布求解,再应用基尔霍夫定律建立等值电路的数学模型,通过求解该模型获得热力系统流体网络的质量流量和压力分布。再根据机组设计参数,建立热力系统焓值分布模型,在热力系统流体网络计算结果的基础上,得到热力系统焓值分布,进而得到机组循环热效率模型。

通过研究,本书应用流体网络理论思想建立热力系统流体网络计算模型,并建立热力系统焓值分布模型,通过将 100%THA、75%THA、50%THA、40%THA 和 30%THA 五个工况的流体网络计算结果及焓值分布计算结果与该机组汽轮机热力特性数据进行比对,验证模型的准确性。在此基础上,本书给出应用该模型求解机组运行中典型问题的方法,包括热力系统流体网络支路流阻变化、给水泵或凝结水泵扬程变化、凝汽器压力变化、加热器水侧管路泄漏等。

在分析再热蒸汽系统和回热加热系统对蒸汽循环热效率的影响时,本书给出再热蒸汽系统和回热加热系统有效度的定义。该定义可以反映再热蒸汽系统和回热加热系统对蒸汽循环热效率的影响方向,以及影响程度的相对大小。

本书是作者在火电机组热力系统分析方面所做的开创性工作的总结，希望对丰富和发展这一领域的研究起到推进作用。由于作者水平有限，书中难免存在不足，恳请读者批评指正。

作 者

2018年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 火电机组热力系统分析	1
1.2 热力系统的分析方法	2
1.3 流体网络的研究背景	5
1.4 基于流体网络理论的热力系统分析方法	7
第 2 章 基于流体网络理论的热力系统流体网络模型的建立	8
2.1 流体网络的基本理论	8
2.1.1 流体网络理论的概念	8
2.1.2 流体网络理论的发展	8
2.1.3 流体网络的特点和研究方法	9
2.1.4 流体网络理论存在的问题	9
2.2 热力系统流体网络的等值电路模型	10
2.2.1 热力系统热平衡图	10
2.2.2 热力系统等值电路模型所做的假设	12
2.2.3 热力系统的流体网络等值电路建模	12
2.3 基于等值电路模型的热力系统流体网络的数学模型	15
2.3.1 基尔霍夫定律	15
2.3.2 热力系统流体网络的数学模型	16
2.3.3 数学模型结果验证	18
2.4 变工况条件下热力系统流体网络模型的建立	26
2.4.1 流阻变化	27
2.4.2 压力变化	30
2.4.3 支路变化	38
2.5 本章小结	41
第 3 章 基于流体网络理论的热力系统焓值分布模型的建立	43
3.1 再热、回热加热系统的热力学分析	43
3.2 热力系统热效率分析模型的建立	44
3.2.1 汽轮机各级段热效率模型	44
3.2.2 给水泵流量-焓增模型	49

3.2.3	给水泵流量-扬程模型	49
3.2.4	热力系统焓值分布模型	50
3.2.5	模型验证	51
3.3	有效度计算及分析	55
3.4	本章小结	59
第4章	变工况条件下焓值分布和循环有效度的计算	60
4.1	流阻变化	60
4.2	压力变化	62
4.2.1	水泵扬程变化	62
4.2.2	节点压力变化	68
4.3	支路变化	69
4.4	本章小结	71
第5章	热力系统增加0号高加的算例	72
5.1	增加0号高加的热力系统模型	72
5.1.1	等值电路模型	72
5.1.2	数学模型	72
5.1.3	焓值分布模型	75
5.2	计算结果及分析	76
5.2.1	100%THA 工况计算结果	76
5.2.2	75%THA 工况计算结果	80
5.2.3	50%THA 工况计算结果	83
5.2.4	40%THA 工况计算结果	87
5.2.5	30%THA 工况计算结果	90
5.2.6	计算结果分析	94
5.3	本章小结	96
参考文献		97
附录		103

第1章 绪 论

1.1 火电机组热力系统分析

火电机组的运行经济性取决于很多方面，如地理位置因素、设备的技术水平因素、机组的系统设计因素、机组的运行水平因素、机组的管理水平因素等。提高机组的运行经济性是一个复杂的问题，它可以分解为很多研究方向，其中重点之一就是如何提高电能生产过程中能量利用的效率。

电能的生产过程实质是能量的转化过程，因为目前无法从自然界中直接获取电能，所以需要从其他能量形式转化。火电机组通过燃烧的方式将燃料中的化学能转化为热能，再通过水蒸气对汽轮机叶片做功，完成热能到机械能的转化，最后，在发电机内，通过电磁感应实现机械能到电能的转化。

电能转化过程中，各个环节的转化效率不尽相同。目前，电站锅炉的热效率一般在 93% 左右，机械能的传递效率和机械能到电能的转化效率，一般在 95% 以上，而热能到机械能转化的这个环节，由于存在较大的冷源损失，热能最终转化为机械能的比例在 40% 左右，是降低能源利用率最多的环节。为了提高热能的利用率，降低冷源损失，火电机组普遍采用再热循环和回热加热系统来提高蒸汽循环的热效率。

再热循环和回热加热系统对热力系统循环热效率的影响均分为两个方面。再热循环一方面可以降低汽轮机低压缸排汽的湿度，同时增大蒸汽的功率，另一方面增加了汽轮机排汽的熵值，增加了热损失。回热加热系统利用汽轮机内的抽汽来加热给水的系统，它一方面提高了给水温度，降低了锅炉燃料的消耗量，另一方面减少了汽轮机内的做功蒸汽总量，从而减少了汽轮机的功率输出。两方面的作用，效果相反，从理论上讲，存在一个最佳设计工况，使再热循环和回热加热系统达到最高的能量利用率。

那么，究竟回热加热系统运行在什么状态？如何比较或者衡量回热加热系统各段抽汽对循环热效率的影响？再热循环和回热加热系统究竟多大程度上提高了循环热效率？探索这些问题答案的过程，其实就是研究回热系统和再热系统运行规律的过程，得到这些问题的答案，有利于找到提高回热系统和再热系统效率的方法，使回热系统运行在最佳运行状态，使提高再热循环效率成为可能。这也是本书研究的目的和意义。

本书从热力系统的流体网络计算入手,应用流体网络理论思想,建立热力系统流体网络的等值直流电路模型,通过对复杂直流电路模型的求解,得到流体网络各节点的压力、流量参数,再建立流体网络的热平衡方程,对热力系统进行变工况下的经济性稳态分析,从而形成基于流体网络理论的热力系统循环热效率分析方法。

1.2 热力系统的分析方法

火电机组的热力系统,是指火电厂实现热功转换热力部分的工艺系统,它通过热力管道及阀门将各主、辅热力设备有机地联系起来,连续地将燃料的能量转换成机械能,最终转变为电能^[1]。它是采用热力学分析火电机组经济性的根本对象。

目前,热力学分析方法大多建立在热力学第一定律和热力学第二定律基础上,主要包括常规热平衡法、等效热降法、循环函数法、矩阵分析法、偏微分分析法、符号“烟”分析法等。

1. 常规热平衡法

常规热平衡法是发电厂设计、热力系统分析、汽轮机设计最基本的方法^[2]。它以单台加热器为研究对象,逐段列写加热器的汽水质量平衡和能量平衡方程,以得到各段加热器抽汽系数,并利用功率方程和吸热方程求解系统的热经济指标^[3-5]。

这种方法计算准确,但过程烦琐,通用性差,因此,一般只作为其他方法的校验基准^[6-12]。

2. 等效热降法

20世纪60年代,苏联专家库兹涅佐夫提出了等效热降法,并在70年代逐步完善,80年代在我国得到广泛应用。等效热降法基于热功转换原理,考虑到设备质量、热力系统结构和参数的特点,以等效热降和抽汽效率的变化来分析热力系统的热经济性^[13-19]。

等效热降法分为整体等效热降法和局部等效热降法。局部等效热降法属于能量转化中的平衡法,它用局部运算代替整个系统的繁杂运算,在分析非再热机组时,是一种方便有效的方法^[20-22]。但在分析再热机组时,因为要考虑再热蒸汽流量的变化,计算变得烦琐,为了减少计算量,往往需要进行一些近似处理,用牺牲准确性,换取计算的简便。

3. 循环函数法

美国的 Salibury 在 20 世纪 50 年代提出了“加热单元”概念,其后,我国原电力工业部电力建设研究所马芳礼高级工程师,结合工程设计和教学经验创立了循环函数法。循环函数法根据热力系统的参数,列出反映热经济性的基本和综合特性系数的函数方程式,用以分析热力系统工况或系统结构发生变化而引起的经济性变化^[23,24]。

在生产实际中,循环函数推导烦琐,因此不如等效热降法应用广泛。在 20 世纪 90 年代,将矩阵思想引入循环函数法的计算中,成为一个新的研究热点^[25,26]。

循环函数法在推导不可逆损失时,忽略了末级加热器疏水进入凝汽器所带来的冷源损失,因此,有一定的近似性。并且,该方法在系统结构发生变化时,只限定在局部循环的变化对系统的影响,在分析端差等设备缺陷的影响时,计算不方便^[27-30]。

4. 矩阵分析法

矩阵分析法通过矩阵的形式表达热力系统的汽水分布,通过对矩阵求解,并结合功率方程、能量方程的求解,分析热力系统。矩阵分析法的优点是,热力系统的结构和矩阵表达式对应,当热力系统结构或参数发生变化时,只要调整矩阵的结构和矩阵元素数值即可,这增强了矩阵分析法的实用性^[31-36]。但要将计算热经济指标的其他方程融入矩阵,还有很多研究工作要做^[37-41]。

5. 偏微分分析法

偏微分理论最初用于推导等效焓降和抽汽效率这两个概念^[42-43],后来,在实际应用中,用于对热力系统参数的变化进行线性化处理,使发电厂热力系统的概念更加清晰,易于接受^[44-49]。通过偏微分理论推导出的辅助汽水流量对发电标准煤耗率影响的强度矩阵,可视为热力系统的固有属性,大大方便了辅助汽水扰动的耗差分析^[50,51]。

6. 符号“烟”分析法

符号“烟”分析法,其思想建立在热力学第二定律基础上,由西班牙学者 Valero 等提出^[52-54],Valero 等认为热力学第二定律所提供的信息并不够分析热力系统,因此提出附加方程 2F-2P-2R 基本准则,由此建立了事件矩阵,通过矩阵运算得到热力系统相应“烟”的单位“烟”成本。如果计入设备折旧、维修及劳务工资等非能量费用,可以进一步得到热经济学成本^[55-62]。

目前,符号“烟”分析法还处在发展阶段,很多文献尝试使用这一方法对热

力系统的热经济性进行分析,并取得了一些成果^[63-67]。

7. 特性试验法

特性试验法指通过对实际运行的机组进行热力特性试验,以确定各运行参数的变化对机组热经济性的影响^[68-74]。理论上讲,用特性试验法来确定运行参数或设备参数变化对机组热经济性的影响是可靠的,但实际上,机组运行过程中,性能是在变化的,特性试验法只能在一定时间内有效^[75-77]。

8. 特性曲线法

特性曲线法根据汽轮机制造厂家所提供的主蒸汽压力、再热蒸汽温度、主蒸汽温度、排汽压力等参数变化时,汽轮机内功率及循环吸热量修正曲线,来分析当机组初、终参数偏离基准值时,机组经济指标的相对变化^[78-83]。

特性曲线法的缺点是当机组投运时间长了后,其性能与特性曲线会存在偏差,使耗差分析的结果产生一定误差。

9. 简化偏导原理算法

简化偏导原理算法从汽轮机功率方程出发,对相应变量求全微分,并进行一些必要的简化,从而得到参数偏离目标值时,热经济指标的相对变化^[84-88]。

这种方法有利于分析大扰动参数变化对有关参数的定量影响,但实际计算起来却很麻烦,有些量的变化需要进行详细的变工况计算才能获得,因此,实际应用较少。

10. 热力学法

热力学法根据工质的热力循环进行推导,得到大扰动参数的改变对机组发电标准煤耗率的影响。这种方法的计算误差较大,并且大扰动下汽轮机相对内效率的变化还需要通过变工况计算来确定^[89-94]。

11. 变工况分析及热平衡计算法

这一方法主要通过热力系统的变工况计算,得到机组参数变化对机组运行的影响,再利用热平衡方法分析机组的热经济指标^[95-99]。汽轮机变工况计算非常复杂,需要很多原始数据或模拟试验数据,工作量大,不适于在线计算。

12. 回归计算方法

回归计算方法中,目前应用较多的有线性回归、神经网络回归、支持向量机回归等。

机组的热经济参数与机组运行参数间存在非线性关系,因此,采用线性回归虽然简便,但存在一定误差^[100]。

神经网络回归的优点是支持非线性拟合,并有一定容错性;缺点是容易陷入局部极值,在缺少样本时,网络的泛化能力不强^[101]。

支持向量机是目前应用较多的一种研究方法,在处理非线性问题时,能够有效克服维数灾难及局部极小,并具有较好的泛化能力^[102-104]。

13. 流图理论方法

流图理论方法利用信号流图反映热力系统的拓扑结构,流图上的节点标志系统变量,支路标志节点之间的连接关系和信号的流动方向,通过求解流图,即可对热力系统进行热经济性分析^[105-108]。

以上热力学分析方法,存在计算误差较大,或者计算过程复杂,或者编程计算困难等缺点,没有一种方法比较完善且计算简便,可以成为工程计算中普遍采用的方法。本书基于自身的研究目的,寻找简化的热力系统分析方法,改变传统串联算法的单元制计算方法,将热力系统分析分解为流体网络分析和基于流体网络计算结果的焓值分布分析两个部分,并引入矩阵运算,使流体网络计算和焓值分布计算在各自的算法中“并联”求解。

1.3 流体网络的研究背景

在热力系统的研究过程中,可以发现,要分析热力系统在变工况下的热经济性,首先要计算出工质在各条管道内(包括汽轮机内)流量和压力的变化,而工质流动的管道系统具有复杂的网络拓扑结构,在工程应用中,并不需要知道流体在复杂管道内流动的机理,而只需要知道在管路节点处,流体的压力和流量,因此,可以把复杂的管道系统抽象成一个流体网络,把流体的传输和瞬变问题转化成流体网络节点的压力与支路内的流量问题。流体网络的分析方法多集中于动态分析,主要包括节点压力法、图形建模法、网络法、键合图法等方法。

1. 节点压力法

我国电站流体网络的动态研究源于电站仿真培训系统的开发需求。清华大学于1983年开始从事流体网络系统建模与算法研究工作^[109],当时研究的目的是用于电站仿真培训系统的开发。1985年,清华大学首次提出流体网络系统的实时仿真算法——节点压力法,并成功应用于我国第一套200MW火电机组全仿真模拟培训系统的研制工作中,1988年,经过改进与提高,提出了新的节点压力法,并应用于火电机组仿真培训系统的研制工作中^[110]。

节点压力法建立节点压力和设备各自独立的计算模块,各模块间变量相互关联并往复迭代,这种方法建模简单,但存在收敛速度慢、封闭岛计算产生多解等问题。

2. 图形建模法

图形建模法,严格来说,不是一种独立的流体网络求解方法,它主要解决的是以固定图形搭建的任意流体网络的拓扑结构的自动识别问题,从而解决流体网络的图形化建模问题。20 世纪 90 年代初期,国外的仿真研究机构相继推出了图形化建模开发环境^[111-113],大大提高了仿真建模的效率,国内的一些单位也在进行积极研制^[114-116],1999 年,文献[117]中提出了流体网络拓扑结构在图形建模中的定义和识别方法,解决了流体网络用图形方法建模的问题。

3. 网络法

网络法是结合矩阵运算的一种计算方法,它与节点压力法不同的是,节点压力法通过迭代,实现压力从源点或入口到出口的传递,而网络法,将所有节点的压力方程、流量方程列出后,用矩阵进行统一求解,这样避免了节点压力法在求解可压缩流体网络时出现的流量不守恒问题,同时提高了收敛速度^[118-120]。网络法广泛采用的迭代算法为节点残量修正算法,尤其是在航空发动机和润滑油系统的设计及性能分析中^[121-126]。网络法还有一些改进方法,如在非稳态流体网络求解时引入压力修正方法和微积分方法,将非线性方程组转化为线性方程组进行求解,从而提高计算的稳定性^[127]。

4. 键合图法

键合图理论是 20 世纪 60 年代初美国的 Paynter 所提出的^[128]。键合图理论以能量守恒定律为依据,把不同能量领域的多种物理量统一归纳为势、流、位移和动量四种变量,通过广义功率流把系统中的能量参数与元件参数统一起来,利用图示模型的形式揭示系统各变量之间的因果关系。键合图建模方法是一种图形建模方法,通过键合图元间具有明确物理意义和严格因果关系的组合,可以形象地描述系统中各元件、各参数间的信息联系,从而方便地建立系统的状态方程并进行求解。键合图理论在一般机械、车辆系统、工程机械、热力学、生物学、化学、流体传动、社会经济、声学、农业等许多领域得到应用,国外对于键合图理论的研究和应用较多^[129-132],国内相对研究较少^[133],但已有文献开始将键合图理论应用于热工流体网络的建模研究^[134]。

目前,流体网络的研究方法多集中于暂态分析,力求获得参数扰动后,工质流动随时间变化的细节,计算量大。即使是稳态计算,采用的计算方法也很复杂。本书的研究,恰恰不需要知道两个稳态过程中间的过渡过程,而只需研究稳态下

的工质质量流量分布和压力分布,因此,本书采用基于流体网络理论的方法,对热力系统流体网络进行求解。

1.4 基于流体网络理论的热力系统分析方法

本书根据自身的研究目的,将热力系统的分析分解为热力系统流体网络分析和基于流体网络计算结果的焓值分布分析。将流体网络理论思想引入热力系统流体网络计算,从而建立热力系统流体网络的等值电路模型,将复杂流体网络的质量流量和压力分布求解,转化为电路的电流、电压分布求解,并应用基尔霍夫定律建立等值电路的数学模型,通过求解该模型获得热力系统流体网络的质量流量和压力分布。再根据机组设计数据,建立热力系统焓值分布模型,在热力系统流体网络计算结果的基础上,计算得到热力系统焓值分布。在此基础上,通过变工况计算,可以得到不同工况下的热力系统焓值分布和循环热效率,以此进行不同条件下的热力系统分析。该方法具体研究思路如下。

(1) 热力系统流体网络的建模研究。首先,根据流体网络理论的思想、特点和研究方法以及热力系统对象的特点与研究目的,做出相应假设,将所研究问题简化,应用流体网络理论思想建立热力系统流体网络的等值电路模型,根据基尔霍夫定律,对等值电路模型求解,得到热力系统流体网络的数学模型,应用该数学模型对不同工况进行计算,将计算结果与设计数据比较,验证模型的准确性和可靠性。

(2) 热力系统流体网络的变工况研究。在热力系统流体网络模型建立的基础上,研究热力系统流体网络在变工况条件下的求解方法,包括热力系统流体网络中的个别支路流阻变化、重要节点的压力变化、加热器泄漏造成的流体网络支路变化。这些热力系统流体网络的变工况研究,为后续分析变工况条件下的热力系统分析打下了基础。

(3) 热力系统热效率模型的建模研究。在热力系统流体网络模型建立的基础上,将汽轮机所有级根据抽汽点划分为几个级段,再根据汽轮机热力特性数据,建立汽轮机各级段的流量-效率模型,从而获得热力系统焓值分布模型,应用该数学模型对不同负荷工况进行计算,将计算结果与设计数据比较,验证模型的准确性和可靠性。

(4) 热力系统热效率的变工况分析。在热力系统流体网络的变工况研究及热力系统热效率模型的建模研究的基础上,可对流阻变化、压力变化和支路变化等变工况情况进行热效率计算。

(5) 有效度分析。应用本书所提出的建模方法和有效度概念,可对热力系统改造方案进行计算研究,同时可对回热系统和再热系统的运行特点进行分析。

第2章 基于流体网络理论的热力系统

流体网络模型的建立

2.1 流体网络的基本理论

2.1.1 流体网络理论的概念

这里所指的“流体网络理论”，不是第1章中提到的“流体网络”这一概念相关理论的总称，而是使用电气网络和传输线理论来分析流体网络的一种理论。流体网络理论是由研究管内流体传输与瞬变而发展起来的一门应用科学。它可以用来分析发生在工业动力装置、控制测量装置和生物医学工程等各种流体管路系统中的功率与信息的传输过程，以及扰动引起的各种流体瞬变现象。它主要涉及两个学科的内容，一是流体力学，二是电气网络和传输线理论^[135]。

2.1.2 流体网络理论的发展

管内流体传输与瞬变的研究工作，最早是从研究波在管路中的传播过程开始的。1808年英国物理学家 Young 从研究血液流动出发，提出了充满理想流体的弹性管内波传播速度公式。1850年 Navier 和 Stokes 两人发展了流体力学基本方程，提出了有名的 Navier-Stokes 方程，对可压缩流体的研究起了重大的推动作用。1927年 Quick 最早从理论上对水击现象进行概括，水击现象的基本原理已被当时的人们所掌握。而研究以上问题所涉及的流体管路数学模型，只停留在理想流体无损管路一维波动方程的初级模型基础上。直到 1950 年 Iberall 利用水击理论和不可压缩流体力学等方面的研究成果，才得出了管路中包含黏性摩擦和热传导两个因素的流体管路的第一个完整模型^[136]。但由于该模型结构十分繁杂，不便于在实际工程问题中应用。1957年，Rohman 和 Grogan 对 Iberall 所提出模型的解直接与电传输线的结构相比拟，由于采用线性化的分析方法，压力被模拟为电压，体积流量被模拟成电流，并引入相应于电阻、电感和电容的等值流体参数，从而使解答具有更加简洁的形式。1958年以后，用电气等值回路方法分析流体系统的动态过程逐渐增多，在射流体网络信号分析、人体动脉管系脉搏波传播的瞬态特性等方面都取得了很大进展。

2.1.3 流体网络的特点和研究方法

(1) 流体网络是由研究管内流体传输与瞬变而发展起来的一门应用科学。在它研究的范围内, 流体管路的轴向长度远大于其横向长度, 其轴向流动速度远大于其横向流动速度。因此可以略去横向流动速度分量, 认为所有流动参数是沿管路横截面求平均值的。

(2) 通常, 流体网络理论研究的对象的流动参数是轴向距离和时间的函数, 即一元不定常流动。

(3) 流源压力的波形可以是正弦波、矩形波, 也可以是按一定函数规律变化的规则和不规则波形。

(4) 流体传输与瞬变不仅在简单的单管路中进行, 在许多情况下往往是在以网络形式出现的管系中进行的。这个管系既包含许多分布参数的主管路和支路, 又包括许多集中参数的流体元件。

除了上述特点, 管内流动还受许多因素, 如流体惯性、黏性、压缩性、热传导、管路几何形状和大小及管路端部阻抗等的影响而变得十分复杂。即使对于最简单的单管路传输问题, 其流体力学运动方程也是非线性的, 求解十分困难。对于常见的带有若干分叉管路和不同流体部件的流体管系, 因其内部流动现象的许多机理还不十分清楚, 要完整地建立起描述其运动过程的流体力学方程式更不容易。工程实际应用中, 比较关心的是管系中各个管路连接点处压力和流量的瞬态特性, 以及它们如何受到流源幅值和频率、管长、管径以及终端、始端阻抗等的影响, 而对于管路内部流动机理的详细过程一般并不要求了解。这就使我们有可能把一个流体管系考虑为一个流体网络, 把流体管系的传输和瞬变问题化成一个只是求流体网络各个节点瞬态压力和流量的问题, 即可以从网络分析的观点研究流体管系的传输和瞬变过程, 从而避开单纯从流体力学方法解决时所遇到的一些困难。在流体网络理论发展过程中, 大量的理论和实验研究表明, 在线性化的假设条件下, 从流体力学基本方程出发所推导出的流体传输方程和等效电路与电气网络中相应的传输方程和等效电路, 其形式是完全相同的。这就说明完全可以利用电气网络理论中的许多概念和方法解决流体网络中的传输与瞬变问题。这就是流体网络理论的基本思想。

2.1.4 流体网络理论存在的问题

流体和电子是两种不同的介质, 它们之间存在本质的差异, 流体网络中有一

些特殊的问题,使它分析起来比电气网络更加困难,具体如下。

(1) 流体密度的变化会影响到网络的特性,因此流体要分成不可压缩和可压缩两种不同情况加以研究。

(2) 作用在流体元件上的黏性力与流动的类型有关。相同几何形状的元件在层流和紊流时有不同的特性。

(3) 流体力学中运动方程为非线性的,其管路阻抗一般也是非线性的,因此要得到普遍适用的流体网络理论是十分困难的。

(4) 流体网络的特征量比对应的电学量更难于测量,使流体网络理论的发展受到来自流体测量技术方面的阻碍。

由于上述困难,流体网络理论不能像电气网络理论那样有一整套比较系统和成熟的理论。目前,流体网络理论把问题局限在“小扰动”情况下,使方程线性化。这时电气网络中的线性系统理论才能成为有力的分析工具。

流体网络理论基本遵循从流体力学方程出发,导出流体网络中每个元件和管路 with 电气网络相对应的等值数学模型,从而建立起网络的等值线路和等值方程,最后用网络分析方法得到各个节点上的压力和流量的瞬态特性。

2.2 热力系统流体网络的等值电路模型

2.2.1 热力系统热平衡图

本书以某电厂一台 350MW 超临界火电机組为示范研究对象,建立其流体网络的等值电路模型。该机组回热加热系统由 3 台高压加热器、4 台低压加热器和 1 台除氧器构成,加热器疏水方式为逐级自流,不设疏水泵;第一段抽汽位于高压缸,第二段抽汽位于高压缸排汽,第三、第四、第五段抽汽位于中压缸,第六、第七、第八段抽汽位于低压缸。给水系统配备 2 台汽动给水泵、1 台电动给水泵,汽动给水泵的汽源来自第四段抽汽,排汽进入凝汽器。汽轮机为双缸双排汽,高中压缸合缸、对头布置,1 台低压缸,1 次中间再热。图 2-1 为该机组汽轮机热耗率保证(THA)工况的热力系统图。图 2-1 中, P 为工质压力,单位为 MPa; T 为工质温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; H 为工质焓,单位 kJ/kg ; G 为工质流量,单位为 t/h 。

该工况设计单位给出的功率为 350MW,汽耗为 $2.841\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,热耗为 $7647.3\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。