



数据加载失败，请稍后重试！

855

TB657
D58

制冷空调装置仿真与优化

丁国良 张春路 著



A0951800

科学出版社

2001

内 容 简 介

制冷空调装置的计算机仿真与优化技术,是节省装置的设计时间与改进性能、实现制冷空调系统设计方法现代化的关键。本书内容主要为作者十余年来从事制冷空调装置仿真与优化研究的成果,并注意将作者为国内外企业开发的制冷空调装置专用设计软件中的最新方法包含进去。本书的内容包括仿真与优化的基本概念,制冷空调装置中压缩机、毛细管、冷凝器、蒸发器等部件的模型建立,装置围护结构的模型建立,仿真用制冷剂物性及空泡系数选取,以及如何在部件模型基础上实现整个装置的仿真与优化。本书最后指出了仿真与优化研究进一步发展的方向,初步介绍了智能化仿真的思路。

本书可作为制冷空调专业的大学生、研究生课程教材,也可供相关科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

制冷空调装置仿真与优化/丁国良等著. -北京:科学出版社,2001
ISBN 7-03-009398-4

I. 制… I. 丁… III. ①制冷-空气调节器-计算机仿真②制冷-空气调节器-设计-最佳化 N. TB657.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 22644 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年6月第 一 版 开本:787 × 1092 1/16
2001年6月第一次印刷 印张:11 1/2
印数:1—2 000 字数:252 000

定价: 25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(杨中))

前 言

制冷空调系统是世界上消耗能量最多的一种耗能系统,我国的制冷空调产业发展迅速,主要制冷空调产品产量均为世界第一。但是在制冷空调产品设计中,仍大量地依赖样机的反复制作与调试,使得产品的设计周期延长,并影响性能优化。用计算机仿真代替样机试验,在计算机上面实现产品的优化设计,是制冷空调产品设计方法现代化的发展方向。

作者在国内十余年的研究工作经历中,一直从事制冷空调装置的计算机仿真与优化工作。近年来,作者在上海交通大学给本科生开设了制冷空调装置仿真与优化课,为硕士生、博士生开设了制冷系统智能化仿真课。本书是在给本科生开设的课程教学讲义基础上进一步整理而成。本书可以作为制冷专业高年级学生、研究生教材,也可以作为制冷企业技术人员或作者开发的软件使用者学习和了解软件核心方法之用。高等院校作为本科生教材使用时,如果学生还未学过数值方法,建议在教学时将附录部分放在第二章之前讲授。

本书介绍的所有方法已用于作者开发的软件中,并在企业中得到应用与检验。本书有相应的软件可供读者索取与购买。对于在学习本书基础上需要进一步深入研究的读者,今后可以进一步学习《制冷系统智能化仿真》。

作者在制冷空调的仿真与优化研究过程中,长期得到上海交通大学制冷与低温工程研究所老师们的关心与指导,不少工作是由协助作者工作的博士生、硕士生完成的。研究工作得到了国内外基金与企业资金的支持,书中的一些实验数据是由软件应用企业提供的。作者的研究最近又得到了国家“973”计划的支持,首席科学家过增元院士关心并支持本书的整理出版,在百忙当中抽时间审阅全书,并为本书作序。作者在此一并致谢!

丁国良

2001年2月

于上海交通大学

第一章 概 论

1-1 仿真的概念与步骤

仿真就是用一个能代表所研究对象的模型去完成的某种实验，以前常称为模拟。

在进行实际系统的分析、综合与设计的过程中，人们除了对系统进行理论上的分析计算以外，常常需要对系统的特性进行实验研究。这种实验研究一般有两种：一种是在实际系统上进行，另一种则是在模型上进行。在许多情况下，如果直接用真实系统进行实验，往往不经济或不安全，有时甚至做不到或者没有意义。因此在实践中出现了用模型代替真实系统做实验的方法，发展了仿真技术。

仿真是在模型上进行的，按照模型的性质不同，可以将仿真分为物理仿真与计算机仿真。

所谓物理仿真是用一个与实际系统物理本质相同的模型去完成实验。例如利用船模去完成船舶阻力的试验，船模的水下部分与实船有相同的几何比例，船模拖曳时与实船有相似的水动力学性质。飞机模型、汽车模型等在风洞中吹风试验也是物理仿真。进行物理仿真必须遵守一些相似准则，如几何相似、雷诺数相似等。

所谓计算机仿真，是用数学形式表达实际系统的运动规律，数学形式通常是一组微分方程或差分方程，然后用计算机来解这些方程。在这里，描述实际系统运动规律的数学形式称为数学模型，用来解数学方程的计算机可以是模拟计算机，也可以是数字计算机。

物理仿真在实际应用中仍受较大的限制。对于一个比较复杂的系统来说，影响因素很多，很难用一个物理模型来进行仿真。这是因为对一个复杂系统设计制造一个模型常常要花费巨大的代价，周期相当长，同时实验的准备工作也十分可观。而另一方面，计算机软硬件都得到了迅速发展，用计算机对实际系统进行仿真就日益显示出其优越性。采用计算机仿真的好处是明显的：用一套仿真设备可以对物理性质截然不同的许多控制系统进行仿真研究，相对于复杂系统的物理模型的制作、调整、测试等工作，为了进行计算机仿真而准备模拟计算机的排版板或数字计算机的程序的工作量要小得多，周期也要短得多，所花的费用也要少得多。随着计算机的飞速发展，计算机仿真越来越多地代替了纯物理的仿真，因此现在通常所说的仿真，指的都是计算机仿真。

在计算机仿真研究的过程中，一般要经过这样四个步骤：

1) 写出实际系统的数学模型。对于不同的要求可以采用不同的模型，对于热力系统的动态仿真，较多采用偏微分方程。

2) 将它转变成能在计算机上进行运转的数学模型。比如要在数字计算机上进行仿真，应当将描述实际连续过程的方程，变成一组离散方程。

3) 编出仿真程序。

4) 对仿真模型进行修改、校验。

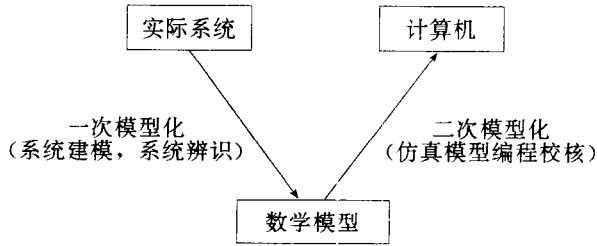


图 1-1 仿真模型建立过程

这里涉及到三个具体的部分：一是实际系统，二是数学模型，三是计算机；并且共有两次模型化：第一次是将实际系统变成数学模型，第二次是将数学模型变成计算机能够用的仿真模型。这可以用图 1-1 表示。

通常我们将一次模型化的技术称为系统建模及系统辨识技术，而将二次模型化、仿真模型编程、校核的技术称为系统仿真技术。

仿真系统按照有无实物介入来区分，可分为实时仿真系统和非实时仿真系统。

1-2 仿真用计算机

仿真按照计算机的类型不同来区分，可分为：用模拟计算机组成的仿真系统，用数字计算机组成的数字仿真系统及用混合模拟机组成的或用数字-模拟混合计算机组成的混合仿真系统，以及用微型机阵列组成的全数字式仿真系统等。

首先出现的用于仿真的计算机是模拟计算机，大约在 20 世纪 40 年代。模拟计算机由一些不同功能的模拟运算部件组成。使用时，先用导线把这些部件按照题目要求连接起来，就可进行仿真运算。

现代模拟计算机的运算部件基本上由高增益集成直流放大器和一些无源运算网络组成，可以实现不同的运算功能。常见的运算功能有加法、反相、积分、乘系数、乘法、函数的发生（包括常见的解析函数和任意函数）、某些非线性运算等。使用模拟计算机时，首先要按被仿真对象的数学模型画成排题图，然后按排题图把各运算部件用专用的导线连起来。为了实际解题的需要，模拟计算机还可设置变量的初值。在模拟计算机进行仿真运行中，还可以把某些变量的动态历程用适当的形式显示，以便观察或记录。

在计算机仿真中，有时需要把一些实物与计算机连接，构成一个仿真系统。例如由计算机仿真控制对象，而与实际的控制器相连，构成自动控制系统。这种情况下计算机的运算速度必须跟上这些实物的响应速度，否则就会发生仿真的严重失真。有时仿真系统中要有人介入，例如轮机员的仿真训练器，则计算机的仿真计算速度应与实际轮机系统的响应速度一致，否则人就感到不像是实际的轮机在运行，这类情况下就要求实时仿真。有时要求仿真计算速度比实际对象的响应速度更高，因此实际对象的动态过程在计算机仿真时只要用短得多的时间去完成，这样就可以在较短时间内完成很多次的仿真运行，以便能很快地比较仿真对象各种不同方案的动态特性，从而实现优化。这种情况称为超实时仿真。对于响应速度较快的对象，计算机的运算速度必须相当快才能实现实时仿真与超实时仿真。模拟计算机各运算部件是并行工作的，与串行运算的普通数字计算机相比，运算速度要高很多，因此用于实时与超实时仿真就十分有利。

模拟计算机上进行的运算是“连续”的，因而更接近实际的连续系统，模拟机仿真较为直观。

模拟机是依靠模拟电路工作的,它的运算精度不可能太高,一般为千分之几;模拟机的逻辑判断能力弱,又无记忆功能,对一些特殊环节如纯迟延,或较为复杂的非线性环节及当系统中有比较多的逻辑判断环节时,用模拟机来进行仿真比较困难,仿真的自动化程度较低。

数字仿真是随着数字计算机的发展和推广使用而发展起来的。20世纪60年代后数字仿真得到了长足的发展。数字计算机对于模拟机来讲,一个突出的优点是精度较高。对于现在使用的普通微机,运算精度也可达到6位有效数字以上,精度上远高于模拟机。另外,对于一些模拟机较难实现的特殊环节,用数字机来仿真则很容易,至于仿真具有逻辑判断环节的系统则更是数字计算机的独特功能;另外用数字计算机来对控制系统进行仿真,整个“被仿真系统”都包含在一组程序之中,所以使用起来十分方便,修改参数也很容易,仿真的自动化程度相当高。

当然,数字机的精度也是有限制的。首先实际数字计算机数据的有效位数不可能是无限的,因此总存在舍入误差。另外在仿真中采用的很多算法是近似算法,总带有一定误差。

由于键盘和CRT使仿真的操作人员和计算机间建立起联系,因此数字计算机有利于提高仿真的交互性,操作者不仅可在键盘输入题目的数据,并在CRT上看到解答,还可以根据早期的仿真结果修改模型和对仿真运行的要求,以在新的仿真运行中实验新的设想。

数字机同模拟机的主要差距在于运算速度要慢一些,在一些要求反应较快的系统中,不如模拟机效果好。

由于模拟计算机与数字计算机在系统仿真中各有优缺点,所以就产生了将两种机器结合起来进行仿真的混合仿真系统。它的基本结构有两种,一种是在模拟机的基础上增加一些数字逻辑功能,称为混合模拟机;另一种是由模拟机、数字机及混合界面三者联合起来构成一个模拟-混合计算系统。在混合仿真机中,模拟机完成高速运算,而数字机则可实现对模拟机的自动管理、监督和控制,并完成一些高精度的运算。这样混合仿真机既具有模拟机的高速度,又具有数字机的高精度、存储能力大和逻辑功能强的优点。

从发展趋势看,数字仿真大有后来居上之势。现代计算机中,数字计算机占了主要成分,在没有专门说明的情况下,通常所说的计算机指的都是数字计算机。近年来,数字计算机的软硬件飞速发展,运算速度已不再成为主要问题,全数字实时仿真已成为现实。预料今后系统仿真技术将向着全数字方向发展,特别是将来随着智能机的问世,数字仿真也必将发展到一个相应的新阶段。在没有特别说明的情况下,现在通常所说的仿真指的是计算机数字仿真。本书的仿真研究,也是在这个范围中进行的。

1-3 仿真在制冷空调中的应用

(1) 仿真用于制冷空调装置的设计

对于制冷空调装置的仿真研究,主要是为产品开发服务。通过仿真实现装置的最优设计具有很多优点,为了对此有较多的了解,可以将其与常规的设计方法进行比较。

在常规的设计中,是先定下产品的性能目标,然后推断其工作状况,最后确定产品的结构。而对于仿真而言,是先定下产品的结构,然后看其具体的工作过程是如何的,在算出

其工作过程的基础上,得到最后的性能。从这个过程可以看出,常规的设计方法,目标很明确,更有可操作性,所以容易被广大工程技术人员理解。而仿真到底有什么优点,为什么要大力推广,如何应用该项技术,则还未被普遍了解。

常规的设计方法中没有一套完整描述整个系统特性的模型,它所包含的仅是部分经过高度简化,能反映系统部分特性的模型。由于其先天的不足,使得它的发展受到较大的限制。以常规冰箱设计方法为例,总是先定下产品的性能要求,如耗电量、储藏温度,再推断运行参数,如制冷剂的蒸发压力、冷凝压力等,最后得到作为设计目标的结构参数,如压缩机容量、蒸发器面积、毛细管长度与直径等。如果仅仅按照这样一套设计过程进行工作的话,即便设计方法绝对准确,仍然有许多不尽人意的地方。比如说按某一环境参数进行设计,至多能保证在这一条件下的产品性能达到要求。如果需要同时满足几个环境参数下的要求,而分别按照不同的环境条件去设计,会得到不同的设计结果,最后只能在其中进行折中,但是最后的性能会怎样呢,却不能直接得出。从这样一个简单的例子可以看出,仅有从性能定结构这样一个步骤是不够的。在实践中,人们已经认识到这个问题,所以在设计时,都有一个校核过程,即在产品结构定了以后,再计算一下各种性能,这个过程其实已经是仿真的过程了。也就是说,人们已经认识到常规设计方法的不足之处,体会到仿真的重要性了。要真正对系统进行正确仿真,需要建立准确的模型,而现在所常用的简单模型难以反映复杂的实际过程,因此这方面的研究仍然是相当欠缺的。

由于计算机仿真的落后,所以现在在制冷产品设计中,往往要制作大量的样机进行实验,即通过在这种最接近批量生产的实际产品的模型上进行物理仿真,以弥补设计的不足。不断制作样机并做实验的过程是相当费时费力的,所以发展制冷装置的计算机数字仿真已成为很急迫的任务。

仿真是确定结构参数后检测性能的过程。通过仿真,可以知道多项性能,从而对所确定的结构参数是否合理作出较好的评价。为了寻求一组合理的结构参数,需要作不断的调整,不断的仿真,这是优化过程,它可以通过配置优化程序完成,或者直接根据经验与要求,由操作者来完成。为了能较快地寻到一组较好的结果,希望初始的结构参数尽量要好,用常规设计的方法确定初始参数是一种比较好的方法。所以应该把常规设计的方法和计算机仿真的方法相结合,以使工作更有效。

(2) 仿真用于制冷空调装置的控制

为了保证制冷空调装置的正常运行,必须要有一定的控制手段。在一些先进的装置中,还采用了较为复杂的控制手段。先进的控制手段能否取得良好的控制效果,还取决于被控制对象的特性。通过仿真,可了解被控对象采用控制手段后的性能,为选择与修正控制方案提供依据。

以最常见的家用冰箱采用双位控制为例。在冰箱中,是通过压缩机的开与停来实现对于箱内温度的控制的,但是如何选择好控制参数,直接关系到控制效果。如果开停机的差动范围很大,则冰箱箱内空气温度变化就会过大;但是如果这个差动范围过小,则可能使压缩机过于频繁地启停,从而使耗电量增加。如果能建立有效的仿真模型,对于各种控制参数下装置工作过程进行仿真,就可以确定合适的控制参数。

现在一些新的控制手段,所能达到的控制效果可以更好,但需要的被控对象的信息也会要求更多。在这种情况下,更需要建立一个较好的系统仿真模型。

1-4 优化的含义

优化就是根据人们期望的目标,使装置的性能达到最佳。制冷空调装置的优化首先要使装置设计最佳,其次要保证系统能够工作在最优的工作状态下,因此制冷空调装置的优化包括最优设计与最优控制。

制冷装置优化设计,首先要建立研究对象的目标函数 $f(x)$,使它在一组设计变量 (x_1, x_2, \dots, x_n) 时达到最大值 $\max f(x)$,比如制冷装置的效率;或达到最小值 $\min f(x)$,比如制冷装置的能耗。由于对于函数最大值的求解可以转化为对于函数最小值的求解,如 $\max f(x)$ 即相当于 $\min [-f(x)]$,因此优化中一般统一归结为函数最小值的求解。

目标函数 $f(x)$ 中的设计变量 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是不能任意选取的,它们必须满足一定的关系和要求,描述这些关系和要求的方程称为约束方程。这些方程可以为等式,也可以为不等式。采用小于号的不等式,通过两边加上负号,可以转化为采用大于号的不等式,因此不等式约束统一为采用大于号的不等式。

上面讨论的数学问题总是可以采用如下的数学形式来描述:

目标函数 $\min f(x)$

约束条件 $h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$

$g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$

上方程是通过数学模型的建立而得到的,按照要求不同,可以采用简易程度不同、形式相差很大的方程。如对于制冷装置动态过程性能进行综合优化,就需要建立系统仿真模型,这时 $f(x)$ 实际上是一组很复杂的微分方程。约束条件有时也不能用简单的代数方程写出。这些需在具体的对象研究中确定。

优化过程就是在上面这些方程确定后,通过合适的优化算法,求得目标函数最小值,以及此时的设计变量值。

1-5 制冷装置计算机辅助设计入门

1. 计算机辅助设计的基本概念

计算机辅助设计(Computer Aided Design)——CAD 技术是近年来得到迅速发展的科技新领域。从广义讲,计算机辅助设计的概念包含了计算机在工程设计、产品设计等所有领域中的应用。设计包含有分析、计算、绘图等。实际上计算机问世后不久即在设计中用于计算和分析,而计算机绘图则经历了一段较长的探索过程,计算机辅助设计——CAD 的概念是伴随着计算机绘图技术的发展才产生,并广为传播。1962 年美国麻省理工学院首先实现了把屏幕显示和光笔技术应用用于计算机图形输入/输出和命令指点,为实现人机协同工作打下基础。1963 年春,在美国计算机大会上,他们发表了有关计算机辅助设计的五篇论文,首先提出了计算机辅助设计——CAD 的概念,震动了工程技术界。这些研究现在看来,似乎很粗糙,但在当时却是划时代的。现在的 CAD 技术是计算机在工程

设计方面的综合应用技术,它充分体现了计算机硬件和软件的最新成就,特别是计算机图形技术、数据库技术、智能模拟技术等重大成果,把工程设计所需要的设计理论、方法、数据和设计者的经验、智慧与计算机的强大功能有机地结合起来,从而成为强有力的工程设计工具。进入20世纪80年代,国外许多咨询公司和工程公司都开始普遍采用CAD技术。CAD技术已经成为衡量一个咨询公司或工程公司技术水平的重要标志和竞争投标的强有力手段。

一个CAD系统一般应该包括有专业计算、分析、优化程序、数据库系统,以及自动化绘图系统。计算机辅助绘图(Computer Aided Drawing)是CAD系统的一个很重要的组成部分,也是影响最大的部分,它可以是一个独立的应用系统,直接为工程设计服务,而且也常常被称为CAD系统。包括我国目前进口的许多CAD系统实际上仅是计算机绘图系统,从高一级的应用水平来看,这只是计算机辅助设计系统的一部分。在开发和应用CAD技术的初期,往往首先从解决计算机辅助绘图问题开始,即用计算机代替传统的手工画法绘制工程设计图纸,但这仅是计算机辅助设计的第一阶段,在这基础上应再实现专业计算与专业绘图的连接,向设计全过程发展。

2. 计算机辅助设计系统的组成及基本功能

一个完整的计算机辅助设计系统是由一系列硬件系统和软件系统组成的,硬件系统是由计算机及外围设备构成,软件系统是针对不同的硬件系统而设置的操作、支撑和应用系统。

1)硬件环境。应该有带有高分辨率显示器的计算机主机、宽行打印机、数字化仪或图形扫描仪、绘图仪等。

2)软件环境。计算机辅助设计系统,不仅需要完善的硬件设备,还要选配与硬件设备相适应的软件环境,主要包括:所选机型的系统软件,如操作系统,各种高级语言的编译程序以及其他有关系统软件;图形支撑软件,这实际上是计算机辅助设计中所需要的绘图系统。目前国内最常见的计算机辅助绘图软件为AutoCAD。

作为一个计算机辅助设计系统应包括以下几个功能:

1)计算功能。这是任何计算机系统中最基本的功能。对于工程设计中的计算机辅助设计实际上包含有设计、计算、绘图三个方面,其中任何一个内容均有大量的计算,因此对所选择的硬件设备,其主机应有足够的运算速度。

2)存储功能。

3)输入功能。除了一般利用键盘输入数据外,对于图形数据尚需配备有图形输入设备,如数字化仪、图形扫描仪等。

4)输出功能。计算机辅助设计系统,应能在显示屏幕上显示出设计过程的当前状态,并能反应出图形编辑过程(如增加、删除、修改等)的结果,如果已得出满意的设计并要求输出时,可以通过绘图仪、打印机等设备实现硬拷贝输出,以便长期保存。

3. 制冷装置计算机辅助设计的内容

一个完整的制冷装置计算机辅助设计系统应该包括从初步规划到最后图纸输出的这样一个功能强大的系统,大致可以分为结构规划、系统初步分析计算、仿真与优化、自动

图纸绘制这样四个部分。

1)结构规划。这是工程或产品设计的第一步,不是单纯的机械设计或制冷设计,而是以机械设计为主体,涉及到电子学、制冷、工艺学、材料学、美学等多学科的综合设计技术。如在冷库设计中,首先要考虑的是如何通过冷库整体设计的合理性来保证提高冷库的综合性能和技术指标,包括如何布置承重结构、围护结构,如何防潮,如何尽可能减少冷桥等。在家用冰箱设计中,是先根据市场的要求确定冰箱的大致规格,并初步确定结构,在这个过程中,要充分顾及到产品的美观,造价便宜,制冷系统与其他必要的配件容易布置等。

2)系统初步分析计算。对于制冷设备,专业工程师们都积累了一套基本的设计计算方法,即便对于全新的装置,也可以按照基本的传热传质关系进行初步的设计计算。把原来所用的方法编成计算机程序,并没有太多的困难,而这样做的好处是明显的:首先计算机的高速度可以大大提高工作效率,减少计算时间;第二,通过把原来各人所用的方法,编成互相之间可以很方便地共同享用的程序,有利于方法的积累、交流与完善。通过初步的设计分析计算,可以大致确定装置的基本结构尺寸。如对于冷库,通过估计冷库的负荷,可以初步确定压缩机、蒸发器、冷凝器、分油器、高压储液器等各种部件的尺寸及布置方式。对于家用冰箱来讲,通过热负荷的估算,可初定供最后选用的几种压缩机,确定可能的蒸发器的布置方式与尺寸、冷凝器的类型与尺寸等。

3)仿真与优化。把原来所用的方法用计算机来实现仅仅是计算机应用的最基本的方面,系统初步分析计算是装置设计中的一个重要环节,而不应该是最后的结果。装置的很多性能不能通过简单的计算得到,人们在制冷装置的设计中所常用的方法是静态集中参数的方法,而实际过程是一个动态分布参数的过程,用静态集中参数的方法只能在一定程度上估算实际装置的性能,但却难以减少计算的误差,因此最后不得不依靠大量的实验来检验计算的效果,进一步改进系统,而这是很浪费时间和金钱的。如何借用计算机这个有效的计算工具,开发有效的精确进行装置计算的动态仿真与优化软件,是计算机辅助设计的难点。通过系统的仿真与优化,可以检验初步设计的效果,同时可以改进系统,并最终确定设计方案。

4)自动图纸绘制。根据计算结果,通过绘图软件自动绘制图纸。由于基本绘图软件的成熟,降低了这一步工作的难度。各个专门的领域通常根据自己的需要建立专门的图库,或对基本绘图软件作一定的改进,以提高自动绘图的速度。

第二章 压缩机模型

从本章开始,将陆续介绍制冷空调装置仿真用的部件数学模型,分别有压缩机模型、毛细管、冷凝器模型、蒸发器模型、围护结构动态负荷模型和制冷剂热力性质模型。

需要指出的是,我们在这里强调“制冷空调装置仿真用的部件数学模型”,这是因为它们与专门研究部件特性所采用的数学模型是有差异的。专门用于部件特性研究的数学模型需要全面考虑部件的细节,如部件具体结构对部件性能的影响、换热器来流的不均匀性对部件性能的影响、以及部件性能的优化设计等等,研究侧重于微观结构对宏观性能的影响、以及流动换热的机理性问题;而装置仿真用的部件模型侧重于从整体上考虑部件的热力性能,不涉及或只涉及到少量的部件结构变化。因此,装置仿真用的部件数学模型的复杂程度要远低于部件特性研究专用的数学模型。从另一方面来看,由于装置仿真涉及到部件模型之间的耦合计算,因此采用过于复杂的部件模型将难以在常规概念下完成仿真和优化计算。

2-1 装置仿真用压缩机模型的要求

压缩机是压缩式制冷空调装置的“心脏”,对于压缩机特性的研究、压缩机结构的优化、压缩机与装置各部件的匹配历来是制冷空调装置研究的一个重要方面。对压缩机建立数学模型,进行计算机仿真是目前广泛采用的研究方法。从1972年开始,每两年在美国普度大学举办一次国际压缩工程学术会议,会上集各国研究之新成就、新思想,进行交流并出版论文集,对压缩机技术的发展起到了推动作用。

现在使用的压缩机种类较多,如全封闭、半封闭、开启式,活塞式、回转式、涡旋式,建模时必须按不同的种类分别处理。应根据具体的对象,收集原始资料,提出为简化模型所需的假设及其理由;确定参数与变量,并检查模型的正确性,拟定在计算机上数值计算的规划。

模型的建立还直接取决于使用模型的目的。由于各研究者建立模型时出发点不同,某一状况下先进的模型在另一种应用场合未必就是最佳模型。数学模型的形式不仅取决于实际对象的性质,还取决于待解决的问题以及求解数学模型的条件。数学模型太简单,不足以充分反映问题的物理本质,使问题不能得到很好的解决,但过分复杂的数学模型又不能用于解决实际问题。

目前对压缩机的数学模型研究,大多是把压缩机作为单独一个装置,为其结构优化服务。在这些模型中,需要准确反映压缩机中各种结构参数对于压缩机性能的影响,因此模型比较复杂。

从系统仿真优化角度研究压缩机数学模型,并不要求准确反映压缩机内部的工作过程,但需要能够准确计算对系统性能和其他部件有影响的参数,并尽可能减少计算时间。对于以装置仿真为目的的压缩机模型,侧重于反映对于系统性能有影响的参数,目的在于

选用合适的压缩机,并使之与装置的其他部件匹配好。因此建模时,如果对压缩机内部各种部件的结构参数的影响也进行较详细描述的话,虽然可能使压缩机模型较为全面,精度也有可能略有提高,但总体上带来的问题是,模型过分复杂,计算时间变长,程序可靠性降低。注意精度与速度的平衡、注意可靠性的保证是仿真时需要非常注意的地方。

由于压缩机对于制冷空调装置的作用是通过制冷剂的迁移来实现的,因此对于通过压缩机的制冷剂流量的计算是压缩机模型的最主要的参数计算,流经压缩机的制冷剂状态关系对于反映压缩机与蒸发器及冷凝器之间的作用也是很重要的。由于系统的能耗是装置优化的主要目标,而压缩机是装置耗能的主要部件,因此对于压缩机功率的计算也应当是模型的重要功能。

因此,对于装置仿真用压缩机模型,主要是要建立压缩机的流量与功率、蒸发器和冷凝器的关系,以及计算出其他影响装置性能的参数,如排气温度的。

在目前的中小型制冷装置中,全封闭的活塞式压缩机和滚动转子式压缩机得到了广泛应用,而涡旋式压缩机等新型压缩机因其优越的性能亦逐渐受到青睐。本节主要介绍活塞式压缩机和滚动转子式压缩机的建模,而其他类型压缩机的建模可以在结合其自身特点的基础上按相似的步骤进行。

2-2 小型全封闭活塞式压缩机数学模型

2-2-1 小型全封闭活塞式压缩机建模特点

小型全封闭活塞式压缩机被广泛用于小型制冷装置,全封闭压缩机在结构上可认为由开启式压缩机加上电机、机壳和润滑油组成,如图 2-1 所示。制冷剂在压缩机中的流动可分为吸气升温过程、气缸中压缩过程和排气时降温过程。

对于定转速的小型全封闭压缩机,电机的转速大约在 2800r/min 左右。在每一转中,气缸存在吸气和排气过程,而且活塞的位移速度不仅取决于电机转速,还同其在气缸中的

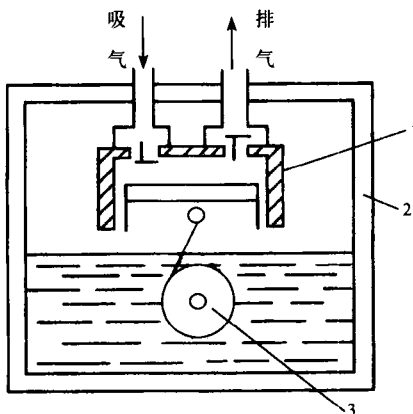


图 2-1 全封闭往复式压缩机示意图

1. 气缸; 2. 机壳; 3. 电动机

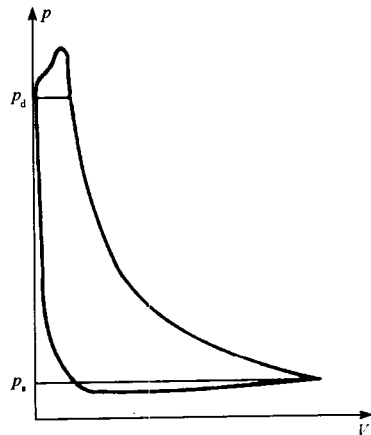


图 2-2 开式压缩 p - V 图

位置有关,这就决定了在每一转中的吸气与排气流量都是不相等的。如果要对于压缩机进行深入分析,优化其内部结构的话,必须要能准确反映各种结构参数对于这些动态性能的影响。

但从装置的性能角度出发,所关心的主要还是制冷量所产生的用冷效果。相对于制冷系统需要数分钟才能基本建立压程,空气侧需要数十分钟才能接近达到所需要的温度效果,压缩机每转所需要的约 0.02s 的时间实在是太短了。因此压缩机每转中存在的流量非连续性这种脉动对于装置整体制冷性能的影响可以忽略,只要计算压缩机每一转的平均流量即可。

2-2-2 制冷剂流量计算

根据上面的分析,对于系统仿真用的压缩机模型,只需要计算出每转的平均流量即可,因此对于流量的计算可以借鉴已有的压缩机流量计算模型,用下式计算:

$$m_{\text{com}} = \lambda \frac{V_{\text{th}}}{v_{\text{suc}}} \quad (2-1)$$

式中, V_{th} 为压缩机的理论容积输气量, v_{suc} 为开式压缩机环节吸气口的制冷剂气体比容, λ 为输气系数。

对于活塞式压缩机,有

$$V_{\text{th}} = i \frac{\pi D^2}{4} S \cdot n \quad (2-2)$$

式中, D 为缸径, S 为活塞行程, n 为转速; i 为气缸数,对于小型全封闭压缩机,一般有 $i=1$ 。

输气系数可以用如下公式计算:

$$\lambda = \lambda_v \cdot \lambda_p \cdot \lambda_T \cdot \lambda_D \quad (2-3)$$

λ_v 、 λ_p 、 λ_T 、 λ_D 分别为容积系数、压力系数、温度系数、泄漏系数。

$$\lambda_v = 1 - c \left[\left(\frac{p_c + \Delta p_c}{p_e} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] \quad (2-4)$$

$$\lambda_p = 1 - \frac{1 + c}{\lambda_v} \frac{\Delta p_c}{p_e} \quad (2-5)$$

$$\lambda_T = \frac{T_{\text{suc}}}{aT_c + b\theta} \quad (2-6)$$

$$\lambda_D = 0.98 - 5.62\epsilon \left(\frac{\delta}{L} \right) \quad (2-7)$$

式(2-4)~式(2-7)中, p_c 、 p_e 分别为冷凝压力与蒸发压力, Δp_c 、 Δp_e 为排气和吸气压力损失, θ 为过热度, δ 为活塞与气缸的径向间隙, L 为活塞有效密封长度, ϵ 为压缩比, m 为多变指数。

2-2-3 功率计算

压缩机的理论功率为

$$N_{\text{th}} = V_i \cdot \lambda \cdot \frac{p_e \cdot m}{m-1} \left[\left(\frac{p_c}{p_e} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] \quad (2-8)$$

指示效率可取

$$\eta_i = \lambda_T + 0.0025(T_e - 273.15) \quad (2-9)$$

有效功率为

$$N_{ef} = \frac{N_{th}}{\eta_i} + N_m \quad (2-10)$$

式中, N_m 为摩擦功率。

最终的输入功率为

$$N_{in} = \frac{N_{ef}}{\eta_{mo}} \quad (2-11)$$

式中, η_{mo} 为电机效率。

2-2-4 温度计算

压缩机流量计算时,吸气状态是以开式压缩机气缸吸入口的状态所计算的,直接计算得到的排气温度也是离开气缸时的排气温度。对于装置来讲,其实并不要求精确知道压缩机内部的状态,但要确定全封闭压缩机进出口状态之间的关系,因为这些参数才直接与蒸发器与冷凝器这几个部件发生关系。

为了确定开式压缩机的吸气状态,需要计算压缩机内部与外界传热的关系,为了简化起见,将全封闭压缩机的传热部分划成两大部分:第一部分为气缸,第二部分为除气缸外的压缩机其他部件。

气缸所用的材料有较大的导热系数,而气缸与气体间的换热系数则较小,因此可以认为气缸的温度是均匀的。

$$(c\rho V)_{CLN} \frac{dT_{CLN}}{dt} = N_m + Q_1 - Q_2 \quad (2-12)$$

电机浸在油中将热量传给外壳,而油因为受到搅拌,传热迅速,因此近似认为电机、机壳、润滑油以及壳腔中的制冷剂气体都达到同样的温度。将这些部分作为一个整体,来计算其温度的动态变化。

$$\sum c\rho V \frac{dT_s}{dt} = Q_2 - Q_3 + Q_{mo} + Q_d - Q_s \quad (2-13)$$

在式(2-12)、(2-13)中, N_m 是活塞所作的摩擦功率, Q_1 为气缸内气体传给气缸壁的热量, Q_2 为气缸壁传给压缩机壳腔内制冷剂的热量; $(c\rho V)_{CLN}$ 为压缩机气缸的热容, T_{CLN} 为气缸壁的温度; $\sum c\rho V$ 为全封闭压缩机除气缸以外其余部分热容之和, T_s 为压缩机外壳的温度, Q_3 为压缩机向周围环境的散热量, Q_{mo} 为压缩机电机产生的热量, Q_d 为排气管向壳腔中的散热,而 Q_s 则是进气在壳体中温升所吸收的热量。

2-3 小型全封闭滚动转子式压缩机数学模型

2-3-1 小型全封闭滚动转子式压缩机的特点

滚动转子式压缩机,是回转式压缩机的一种。滚动转子式制冷压缩机有多种结构型式,但是它们的工作原理都相同。图 2-3 为滚动转子式压缩机的结构示意图。它由一个圆

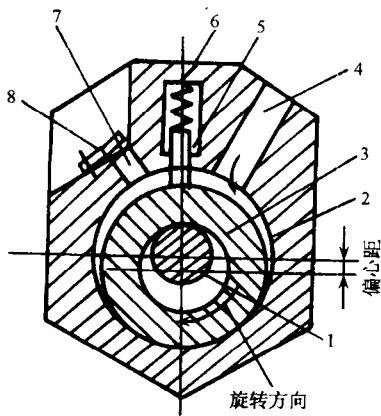


图 2-3 滚动转子式压缩机结构示意图

1. 主轴; 2. 气缸; 3. 转子; 4. 吸气口;
5. 刮片; 6. 弹簧; 7. 排气口; 8. 排气阀

柱形的气缸 2 和一个圆柱形的转子(也称旋转活塞)3 所组成。转子的转动中心和气缸 2 的轴线在同一条线上,但圆柱形转子的外表面和转动中心不是对称的,而是有一定的偏心距,转子 3 离转动轴心最远的表面与气缸 2 的内表面接触;在气缸 2 的上部中间,安装有一块能上下滑动的刮片 5,因此这种压缩机又称为刮片式压缩机。靠弹簧 6 的作用,刮片 5 的下部始终和转子 3 表面相接触。因此,刮片 5 与气缸 2 的内壁、转子的外表面及两侧的端盖组成了一个封闭的基元容积,容积的大小则随转子的旋转而发生周期性的变化。刮片 5 和转子 3 使气缸上的吸气口 4 与排气口 7 隔开。吸气口 4 上没有阀门,排气口 7 上安装了排气阀 8。为了减小余隙容积,排气口的位置应尽量与刮片 5 靠近。

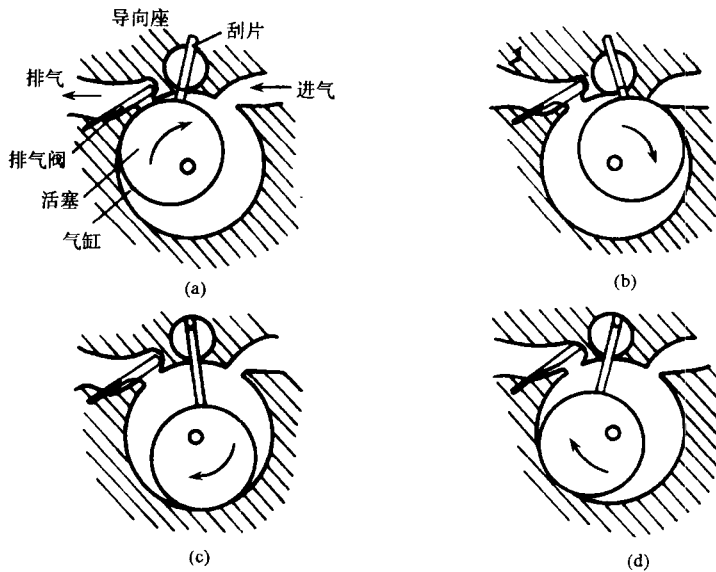


图 2-4 滚动转子式压缩机工作原理图

滚动转子式压缩机的工作原理,可以通过图 2-4 来说明。图 2-4(a)表示排气结束,吸气开始的状态。气体由吸气口进入,充满在整个气缸里。当转子转动到图 2-4(b)所示位置时,活塞与气缸壁的接触线,将吸气口和气缸容积隔开,即吸气结束,同时刮片和转子间的接触,使吸气口和排气口隔开,右上角的气缸容积开始第二次吸气。由于排气阀关闭,因此排气管内的气体不会进入气缸内。当转子由图 2-4(b)位置旋转到图 2-4(c)的过程中,刮片和转子使气缸分隔成两部分容积,左半部分气缸内的气体处于压缩阶段,右半部分气缸内的气体处于吸气过程。当压缩到排气压力时,排气阀开启,气体经排气阀排出,如图 2-4(d)所示,此时右半部分气缸仍在继续吸气。当左半部分气缸内气体完全排出时,就如图

2-4(a)所示,排气阀关闭,又开始重复进行上述的过程。这样就实现了对制冷剂蒸气的吸入、压缩和排出。

如果从系统仿真的角度考虑,小型全封闭制冷压缩机模型具有相同或相近的框架。因此,对于小型滚动转子式制冷压缩机,其建模思路与小型活塞式制冷压缩机的建模思路相仿。但两者也有较明显的区别,其中一点就是滚动转子式压缩机一般采用全封闭壳体内为压缩机排出气体的高压端方式,进气由进气管直接进入气缸。因此排气温度可取为单结点温度值,而吸气温度需另外考虑。

2-3-2 制冷剂流量计算

压缩机的排气量(质流量)同式(2-1),但不同类型的压缩机的理论输气量是不同的,对于滚动转子式压缩机,理论输气量为

$$V_h = 60n\pi R^2 L \epsilon (2 - \epsilon) \quad (2-14)$$

式中, n 为转速, R 为气缸内半径, L 为气缸轴向长度, $\epsilon = \frac{e}{R}$ 为相对偏心值, e 为偏心距。

输气系数的计算亦采用式(2-3)。其中,

1) 容积系数 λ_v 。同活塞式压缩机一样,也可按式(2-4)计算,其中相对余隙容积一般有 $c \leq 1.5\%$ 。滚动转子式压缩机中的膨胀过程是在压缩腔与吸气腔之间的月牙形通道内进行的,它是一个流动膨胀过程。我们知道对于制冷工质蒸气,当压力比大于 $1.7 \sim 1.8$ 时,它的流动膨胀就达到超音速工况;而在一般的制冷机运转中压比都是比较小的,因而膨胀过程都是在超音速工况下快速进行的,可以认为是绝热过程。故式(2-4)中采用绝热指数 k 。

2) 压力系数 λ_p 。压力系数可表示为

$$\lambda_p = 1 - \frac{1+c}{\lambda_v} \frac{\Delta p_c}{p_c} \quad (2-15)$$

它主要取决于吸气压力相对损失 $\frac{\Delta p_c}{p_c}$,而滚动转子式压缩机由于没有吸气阀,故这一值很小,大约只有 0.005 左右,因此可以认为 $\lambda_p = 1$ 。

3) 温度系数 λ_T 。全封闭滚动转子式压缩机尽管是吸气管直接接到气缸而直接吸气,但由于机体全部浸在壳体中的高温、高压气体中,因此吸入气体流经通道及气缸时仍被严重加热,故温度系数很小。由实验方法得出如下经验公式^[1]:

$$\lambda_T = AT_c + B(T_{suc} - T_c) \quad (2-16)$$

式中,系数 $A = 2.57 \times 10^{-3}$, $B = 1.06 \times 10^{-3}$; T_{suc} 是压缩机吸气温度。式(2-16)的适用范围是 $303K \leq T_c \leq 323K$ 。

4) 泄漏系数 λ_D 。泄漏系数主要是考虑由于泄漏而对输气量的影响,在滚动转子式压缩机中,泄漏是引起输气量降低的一个很重要的因素。当精心设计选用较小间隙值时, $\lambda_D = 0.98 \sim 0.92$; 当选用中等间隙时随着 t_c 从 $5^\circ C$ 降至 $-25^\circ C$, 或者 t_c 从 $30^\circ C$ 升至 $50^\circ C$, λ_D 约减小 $3\% \sim 6\%$ 。在设计时对于标准工况可近似取 $\lambda_D = \lambda_v$; 或当转速 $n = 50r/s$ 时, $\lambda_D = 0.82 \sim 0.92$; 转速 $n = 25r/s$ 时, $\lambda_D = 0.75 \sim 0.88$ 。