

Fundamentals
of Vapor - Compression Refrigeration
and Air - Conditioning
System Modeling



制冷空调系统 仿真原理与技术

张春路 编著



化学工业出版社

Contents 目录

第 1 章 概 论 1

1.1 制冷系统仿真技术研究的意义	1
1.2 制冷系统仿真模拟技术的研究现状评述	2
1.2.1 面向制冷系统匹配设计的稳态仿真技术	3
1.2.2 面向制冷系统控制设计的动态仿真技术	4
1.2.3 面向大系统设计与控制的综合仿真技术	5
1.2.4 从仿真模拟到现代产品设计方法学	6
1.3 本书的内容安排	6

第 2 章 计算方法基础 8

2.1 单变量非线性方程求解方法	8
2.1.1 两分法	9
2.1.2 牛顿法	10
2.1.3 割线法	11
2.1.4 试值法	12
2.1.5 反向二次插值法	12
2.1.6 Brent 法	13
2.1.7 单变量方程算法小结	16
2.2 多变量非线性方程组求解方法	16
2.2.1 牛顿法	16
2.2.2 Broyden 法	18
2.3 插值与拟合	18
2.3.1 线性插值	19
2.3.2 双线性插值	20
2.3.3 曲线拟合的线性最小二乘法	21

第 3 章

制冷剂 and 载冷剂的热物性计算

23

3.1 制冷剂热物性简化计算	23
3.1.1 系统仿真对制冷剂热物性计算的要求	23
3.1.2 Cleland 拟合模型	25
3.1.3 隐式三次多项式拟合模型	30
3.1.4 表格插值法	34
3.2 湿空气热物性计算	35
3.2.1 湿空气的组成	35
3.2.2 湿空气的热力性质	35
3.2.3 湿空气的焓湿图	39
3.3 载冷剂热物性计算	41
3.3.1 纯质液体的热物性计算	42
3.3.2 溶液的热物性计算	42

第 4 章

压缩机模型

44

4.1 系统仿真对压缩机模型的要求	44
4.2 压缩机效率模型	45
4.3 压缩机 AHRI 10 系数模型	48
4.4 变容量压缩机模型	51
4.4.1 变频压缩机模型	51
4.4.2 数码涡旋压缩机模型	52
4.4.3 滑阀调节容量的螺杆压缩机模型	53
4.5 带经济器的压缩机模型	53
4.6 离心压缩机模型	54
4.6.1 单级离心压缩机性能的半经验模型	55
4.6.2 离心压缩机的经验模型	56

第 5 章

节流元件模型

57

5.1 节流元件	57
5.1.1 节流元件类型	57
5.1.2 系统仿真对节流元件模型的要求	58
5.2 毛细管和短管模型	58
5.2.1 制冷剂在毛细管和短管内的流动特性	58
5.2.2 均相流分布参数模型	59

5.2.3	经验关联式模型	64
5.2.4	毛细管近似积分模型	69
5.3	孔板模型	71
5.4	热力膨胀阀 MOP 模型	71
5.5	电子膨胀阀模型	73
5.5.1	图表模型	73
5.5.2	经验关联式模型	75

第 6 章 冷凝器模型

77

6.1	冷凝器四区模型	78
6.1.1	四区模型的定义	78
6.1.2	微元模型	79
6.1.3	算法	80
6.2	考虑制冷剂管路排布的翅片管换热器分布参数模型	86
6.2.1	建模策略	86
6.2.2	翅片管换热器模型与算法	87
6.3	管壳式冷凝器模型	88
6.3.1	建模策略	89
6.3.2	微元模型	89
6.3.3	管壳式冷凝器模型与算法	90
6.4	冷凝器模型常用实验关联式	91
6.4.1	水平管内单相流动换热与压降	91
6.4.2	水平管内两相凝结换热与压降	92
6.4.3	水平管束外两相凝结换热	94
6.4.4	翅片管换热器空气侧换热与压降	94

第 7 章 蒸发器模型

96

7.1	蒸发器三区模型	96
7.1.1	三区模型的定义	96
7.1.2	微元模型	96
7.1.3	算法	98
7.2	翅片管蒸发器分布参数模型	103
7.3	满液式蒸发器模型	104
7.3.1	建模策略	104
7.3.2	微元模型	104
7.3.3	满液式蒸发器模型与算法	105

7.4 蒸发器模型常用实验关联式	106
7.4.1 水平管内单相流动换热与压降	106
7.4.2 水平管内两相沸腾换热与压降	106
7.4.3 水平管束外两相沸腾换热	107
7.4.4 翅片管换热器空气侧换热与压降	107

第 8 章 辅助设备模型

108

8.1 连接管模型	108
8.1.1 连接管对系统性能的影响	108
8.1.2 连接管模型	109
8.2 四通换向阀模型	110
8.2.1 四通换向阀对系统性能的影响	110
8.2.2 四通换向阀模型	110
8.3 储液器和气液分离器模型	111
8.3.1 储液器对系统性能的影响	111
8.3.2 储液器模型	112
8.3.3 气液分离器对系统性能的影响	112
8.3.4 气液分离器模型	113
8.4 泵与风机模型	113
8.4.1 泵对系统性能的影响	113
8.4.2 泵模型	113
8.4.3 风机对系统性能的影响	114
8.4.4 风机模型	114
8.4.5 风机定律	115

第 9 章 制冷系统仿真

116

9.1 系统循环分析	116
9.1.1 简单制冷/热泵循环	116
9.1.2 带经济器的制冷/热泵循环	116
9.1.3 跨临界制冷/热泵循环	118
9.2 简单制冷/热泵系统的模型与算法	119
9.2.1 系统模型	119
9.2.2 系统充注量模型	119
9.2.3 系统算法	120
9.3 模型标定	122
9.3.1 仿真误差与模型标定	122

9.3.2	部件模型标定	122
9.3.3	系统模型标定	123
9.4	热泵型分体式空调器系统仿真与分析	124
9.4.1	仿真对象	124
9.4.2	实验验证	124
9.4.3	系统特性的仿真分析	125
9.5	螺杆冷水机组系统仿真与分析	130
9.5.1	仿真对象	130
9.5.2	实验验证	132
9.5.3	系统特性的仿真分析	134

第 10 章 建筑空调系统仿真

136

10.1	建筑空调系统模型	136
10.1.1	制冷剂回路模型	136
10.1.2	冷冻水与冷却水回路模型	136
10.1.3	空气处理过程与负荷模型	137
10.1.4	机组与系统能效的定义	137
10.2	建筑空调系统的仿真案例分析	138
10.2.1	空调箱独立新风系统案例	138
10.2.2	冷却水回路优化案例	143

主要符号表

146

参考文献

148

1.1 制冷系统仿真技术研究的意义

制冷系统广泛应用于食品冷冻冷藏、家用和商用建筑的空气调节、车辆空调、工业冷冻等诸多领域，系统构成从简单到复杂，种类繁多，如图 1 所示。

制冷系统的能耗占据国家总能耗的比例不断提高，是节能减排的重点领域之一。中国目前已是世界上制冷空调设备产能最高的国家，是否拥有先进的产品设计和更新换代的核心科技已成为中国从制冷大国进步到制冷强国的一个主要衡量指标。因此，对制冷系统及其部件特性的研究一直是相关领域的研究重点。

对制冷系统及其部件特性的研究，一般有实验和仿真模拟两类研究方法。通过实验，可以直接获得制冷系统及部件的主要特性，是使用最为广泛的一类方法。在实验研究基础上，人们还总结了很多经验方法。但是，制冷系统参数多、耦合性强，使得实验研究面临耗时长、成本高、很多参数难以准确测量的问题。因此，随着计算机技术的发展，基于模型的制冷系统计算机仿真模拟技术在过去 30 年获得了快速发展^[1~4]。通过建立部件和系统模型进行仿真模拟计算，可以快速地预测制冷系统的性能，减少样机试制数量和实验费用。而且，仿真模拟可以预测很多实验难以测量的参数，基于仿真模拟还可以进一步优化制冷系统及部件。制冷系统越是复杂，仿真模拟相对于实验研究的优势就越是显著。但是，由于制冷系统及部件在结构和流动传热机理上的复杂性，相应的模型都是建立在一定假设和实验关联式（如换热系数关联式、摩擦系数关联式、压缩机容积效率关联式等）的基础之上，所以模型都存在一定的偏差。在通过必要的实验验证之前，仿真模拟的结果经常会受人质疑。所以，目前的研究方法更多地偏向于仿真与实验研究相结合，以达到扬长避短的效果。现阶段仿真模拟技术的发展，也是以减少实验而不是取代实验为基本目标。

仿真模拟技术在制冷系统及其部件设计中的应用，除了模型精度问题，还存在一个如何与现代产品设计方法相结合的问题。仿真模拟技术更像是一个建立在计算机上的虚拟实验室，工程师可以通过这个虚拟实验室“测量”产品的性能。但是如何更有效地使用这种虚拟实验室设计出高质量产品，则需要将仿真模拟技术与现代产品设计方法（例如：稳健设计、可靠性设计、六西格玛设计等）结合起来，形成基于仿真模拟技术的现代产品设计

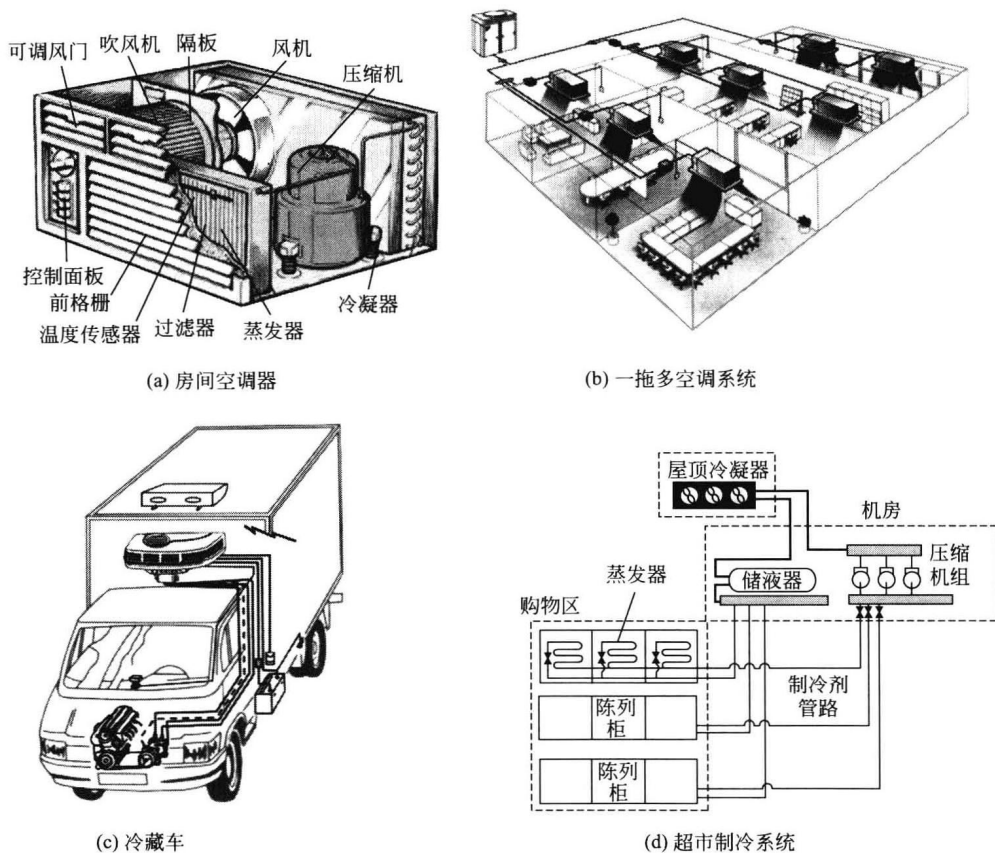


图 1 各类制冷系统

Figure 1 Refrigeration systems

方法^[5]。这方面的研究工作，近年来在电子、国防、机械、化工等很多行业都开始深入研究，但是在机械行业分支之一的制冷空调行业尚处起步阶段。这方面的探讨将另文阐述。

1.2 制冷系统仿真模拟技术的研究现状评述

制冷系统仿真模拟技术的起源可以追溯到 20 世纪 60 年代，最早由美国开利公司 (Carrier Corporation) 开展相关研究。由于当时计算机技术的落后与设备的昂贵，最初的制冷系统仿真技术研究只有大企业的研发部门才有需求和资金投入。从公开发表的文献来看，一直到 20 世纪 70 年代末、80 年代初，国际上才出现高校或研究机构（如美国的一些国家实验室）发表的相关研究成果。而国内高校开展相关研究则要更晚一些^[6]。20 世纪 80 年代以后，随着计算机软硬件技术的飞速发展，计算机仿真模拟技术在包括制冷系统仿真在内的各个领域都呈现高速发展的态势。

制冷系统仿真模拟技术的发展主要是受工程实践中的应用需求驱动的。应用需求的扩展和细化使得制冷系统仿真模拟技术呈现多样化的发展趋势。本节将以应用需求为主线对



制冷系统仿真模拟技术的发展和现状进行简要评述。

1.2.1 面向制冷系统匹配设计的稳态仿真技术

仿真模拟技术在制冷系统匹配设计中的应用主要有两个方面：一是在设计阶段模拟结构参数对部件性能的影响和模拟额定工况下各部件匹配在一起的系统性能；二是在匹配设计完成后模拟系统或部件在不同运行工况下的性能，提供产品性能表（rating table）给选型软件。对于大部分的制冷系统，在某一稳定的运行工况下，系统中制冷剂和载冷剂的状态也是基本稳定的，所以在制冷系统匹配设计中一般采用稳态仿真技术。稳态仿真采用稳态模型，即构成模型的方程都不含时间项。

在制冷部件仿真中，几何结构参数及其对应边界条件的复杂性是稳态仿真要解决的关键问题。一个典型的例子就是风冷机组中常用的翅片管换热器，如图2所示，管内的制冷剂被分成多股流动，以平衡换热和压降；管外空气以叉流且非均匀流动的方式与管内制冷剂进行热交换。各制冷剂流路之间通过管壁和翅片的热传导以及与空气的换热耦合在一起。要精确设计翅片管换热器，就需要在模型中准确反映这种复杂的参数耦合关系。而制冷剂管路连接的多样性和复杂性，也要求模型在管路设计方面具备通用性。NIST^[7~11]、马里兰大学^[12~14]、上海交通大学^[15~19]以及很多研究者^[20~28]都对此开展了比较深入的仿真模拟研究。在建立相关数学模型的基础上，研究者对制冷剂管路的优化给予了更多的关注^[8~11,16,17]。尽管引入了遗传算法、演化算法等现代全局优化方法，但由于无法直接使用，只得基于一定的“知识”去弥补必要的计算步骤。所以，是否能真正获得严格意义上的全局最优尚缺乏理论支撑。

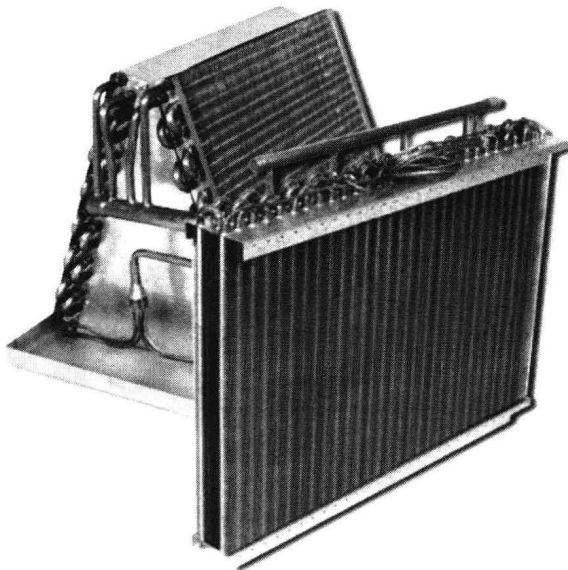


图2 翅片管换热器

Figure 2 Fin-and-tube heat exchanger

在制冷部件仿真中，由于几何结构参数的复杂性，CFD（计算流体动力学）技术也获得了越来越多的应用^[29]。同样以上文的翅片管换热器为例，空气侧的迎面风速受到空间的限制而呈现出不均匀分布，对换热器的性能产生显著影响。如果在换热器仿真时不考虑迎面风速的不均匀分布，那么计算结果的误差可能达到25%或更高^[19,30]，无法用于换热器设计和校核计算。另外，在有限的空间内通过实验测量风速分布不仅成本高，而且测量仪表会破坏真实的速度场导致测量精度不高。相比之下，通过CFD模拟可以获得整个速度场，将其输入翅片管换热器仿真软件，就可以获得更接近真实情况的仿真结果^[31]。

在制冷系统仿真中，部件模型的类型有多种选择，主要包括分布参数模型、集中参数模型、半经验模型、经验模型等^[2,3]。部件模型类型的选择，主要也是受应用需求驱动的。包含较多几何结构信息的部件模型相对比较复杂，计算速度偏慢、计算稳定性偏低，



Fundamentals
of Vapor - Compression Refrigeration
and Air - Conditioning
System Modeling

制冷空调系统仿真原理与技术

ISBN 978-7-122-15002-8



9 787122 150028 >

定价：48.00元
销售分类建议：制冷