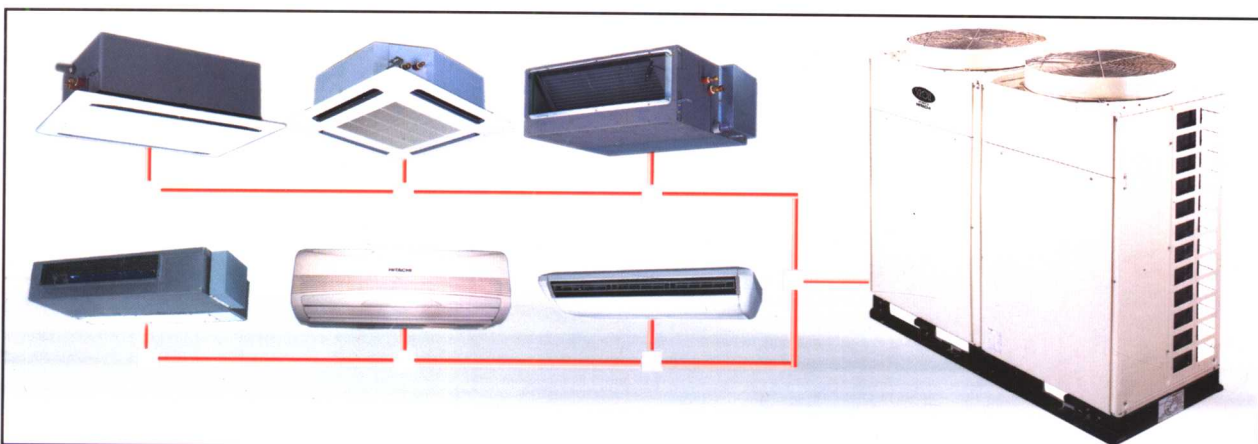




变频控制 多联式空调系统

王志刚 徐秋生 俞炳丰 编著



化学工业出版社

变频控制多联式空调系统

王志刚 徐秋生 俞炳丰 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

变频多联机具有使用节能、环境舒适、控制灵活等特点,以其自由的组合布置、优良的部分负荷效率及灵活的使用方法,适应了市场的需求,满足了不同规模建筑物的要求。本书以典型的变频多联机产品为例,系统地叙述了变频多联机的原理、技术及应用。分别介绍了制冷原理、空调原理、变频多联机的原理、变频多联机空调系统设计、变频多联机的控制系统和计费系统、变频多联机工程设计中常见问题及分析、家用中央空调设计和变频多联机的安装与调试。不仅阐明了变频多联机空调系统的原理及技术,还提供了一些设计与安装的实例。

从事变频多联机空调系统工作的研发人员、设计人员可通过学习本书掌握变频多联机空调系统的技术并能在此基础上结合本职工作加以创造性地应用。本书的全部内容或部分内容可用于变频多联机空调业的技术人员、维修人员、管理人员和销售人员的培训。本书还可作为制冷、空调专业及相关专业研究生、本科生的教学参考用书和专题讲座教材。

图书在版编目(CIP)数据

变频控制多联式空调系统/王志刚,徐秋生,俞炳丰
编著. —北京:化学工业出版社,2006.7
ISBN 7-5025-9138-9

I. 变… II. ①王… ②徐… ③俞… III. 空气调
节系统-变频调速-控制系统 IV. TU831.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 085417 号

变频控制多联式空调系统

王志刚 徐秋生 俞炳丰 编著

责任编辑:戴燕红 郑宇印

责任校对:周梦华

封面设计:胡艳玮

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 454 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-9138-9

定 价:48.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

多联式空调(热泵)机组,简称多联机,20世纪80年代诞生于日本,是我国近年来才发展起来的一种具有集中式空调系统特点的新型空调系统,它集变频、变容等技术于一身,具有使用节能、环境舒适、控制灵活等特点。变频多联机以其自由的组合布置、优良的部分负荷效率及灵活的使用方法,适应了市场的需求,满足了不同规模建筑物的要求,尤其在中小型建筑物中保持了强大的竞争能力。许多从事变频多联机空调系统的设计、制造、安装、运行、维修的专业技术人员和管理、销售人员迫切需要了解 and 掌握变频多联机空调系统的设计与使用方面的相关知识,本书便是为适应这一要求而编写的。

本书以典型的变频多联机产品为例,系统地叙述了变频多联机的原理、技术及应用。全书共分8章,分别介绍了制冷原理、空调原理、变频多联机的原理、变频多联机空调系统设计、变频多联机的控制系统和计费系统、变频多联机工程设计中常见问题及分析、家用中央空调设计和变频多联机的安装与调试。本书不仅阐明了变频多联机空调系统的原理及技术,还提供了一些设计与安装的实例。

本书主要由青岛海信日立空调系统有限公司的工程技术人员编写。他们的分工如下:第3章由王志刚博士、孟建军高级工程师完成,第4章由徐秋生高级工程师、周仲行工程师、谢雄兵工程师完成,第5章由王志刚博士、董志强工程师完成,第6章及第7章由徐秋生高级工程师完成,第8章由奚祥富高级工程师完成。第1章及第2章由西安交通大学俞炳丰教授编写。全书由俞炳丰教授、王志刚博士审改定稿。

本书编写工作的立项和完成得到了青岛海信日立空调系统有限公司费立成总经理、朴营国副总经理、范大鹏副总经理、富冈正郎副总经理、吉田康孝技术部长、李明华副部长及蔡昌星副部长的支持和关心。西安交通大学博士生陈志不仅参与了初稿的审改工作,而且在文字、插图的录入和处理方面花费了大量的时间。青岛海信日立空调系统有限公司的杨萍、李希志、李亚军、陈启、许爱民、刘莉莉、李海平、肖伟等也参与了本书编写的一些具体工作。对于上述所有人士对本书编写作出的贡献和支持在此深表谢意。

本书是一本实用性很强的专业技术用书,可供从事变频多联机空调技术各层次专业人员阅读与使用。变频多联机空调系统的研发人员、设计人员可通过学习本书掌握变频多联机空调系统的技术并能在此基础上结合本职工作加以创造性地应用。本书的全部内容或部分内容可用于变频多联机空调系统技术人员、维修人员、管理人员和销售人员的培训。本书还可作为制冷、空调专业及相关专业研究生、本科生的教学参考用书和专题讲座教材。

由于编者水平有限,书中错误及疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

王志刚 徐秋生 俞炳丰
2006年7月

目 录

1 制冷原理	1
1.1 制冷剂及其替代	2
1.1.1 制冷剂的种类和符号	2
1.1.2 选择制冷剂的原则	3
1.1.3 ODP 和 GWP	3
1.1.4 制冷剂替代	6
1.2 单级压缩蒸气制冷循环	11
1.2.1 单级压缩蒸气制冷的理论循环	11
1.2.2 单级压缩蒸气制冷的实际循环	21
2 空调原理	25
2.1 湿空气的性质与焓湿图	25
2.1.1 湿空气的组成及基本状态参数	25
2.1.2 湿空气的焓湿图及其应用	28
2.2 空调房间热、湿负荷与送风量的确定	35
2.2.1 室内外空气计算参数的确定	35
2.2.2 空调房间热、湿负荷的计算	37
2.2.3 空调房间送风状态和送风量的确定	41
2.2.4 空调系统新风量的确定	42
2.3 室内空气品质	42
2.3.1 影响室内空气品质的因素	43
2.3.2 生物污染的侵入及传播途径	43
2.3.3 生物污染的防治措施	43
3 变频多联机的原理	50
3.1 变频多联机的发展背景	50
3.1.1 多联机的含义	50
3.1.2 多联机的产生背景	50
3.2 变频多联机的技术特点	51
3.2.1 多个独立循环一拖多	51
3.2.2 传统固定配置的一拖多	51
3.2.3 多联机的基本原理和技术特点	52
3.2.4 热泵型多联机的基本构成	55
3.3 变频多联机的使用范围	70
3.3.1 适用于建筑物功能多变、空调运行时间极不统一的空调系统	71
3.3.2 系统的作用域	71
3.3.3 制热运行时对室外温度的要求	77
3.3.4 变频多联机用作舒适性空调	78

4 变频多联机空调系统设计	80
4.1 基本原则	80
4.2 设计步骤	84
4.2.1 确定空调方案	85
4.2.2 确定新风方案	89
4.2.3 负荷计算（注意新风负荷的承担方式）	97
4.2.4 划分多联机系统，确定室外机的大体位置	98
4.2.5 室内机选择计算	98
4.2.6 室外机选择计算	99
4.2.7 校核各室内机的实际供冷量、供热量	102
4.2.8 检查各系统的室内外机配比	102
4.2.9 新风设备选型计算	102
4.2.10 布置室内机	102
4.2.11 布置新风系统	132
4.2.12 布置室外机	132
4.2.13 连接管路，标注配管管径和分歧管型号规格	136
4.3 变频多联机设计应注意的问题	145
4.3.1 避免按传统水系统空调设计方式设计变频多联机系统	145
4.3.2 负荷计算时计算负荷宜适当放大	145
4.3.3 室外机振动和噪声对周边环境的影响	146
4.3.4 周边环境应满足室外机的要求	146
4.3.5 宜按内外区设置系统	146
4.3.6 避免强季节风直吹室外机换热器	146
4.3.7 设计时应注意室内机噪声处理	146
4.3.8 应考虑室内机容量和处理能力有限	147
4.3.9 新风机处理新风能力、规格有限	147
4.3.10 多联机系统仅适合舒适性空调领域	147
4.3.11 家用变频多联机系统设计应注意的问题	149
4.4 多联机空调系统在实际应用中常见的问题	149
4.5 多联机设计步骤举例	152
5 变频多联机的控制系统和计费系统	165
5.1 变频多联机机组的控制策略	165
5.1.1 变频多联机机组的控制要求	165
5.1.2 变频多联机机组的控制策略	166
5.2 现场总线技术及 H-LINK 通讯配线系统	168
5.3 变频多联机运行控制系统原理及构成	171
5.3.1 个别控制	171
5.3.2 集中控制	172
5.3.3 网络控制	178
5.4 空调电费计量和分配系统	185
5.4.1 电费计量和分摊的原理和系统构成	185

5.4.2	空调电费计量和分配系统连接方式	185
5.4.3	电费计量和分摊的常用方式	186
5.4.4	待机耗电部分的处理	189
5.4.5	按制冷剂流量比例分摊电费(方式1)的计算方法	189
5.4.6	按温控器开启时间分摊电费(方式2)的计算方法	191
6	变频多联机工程设计中常见问题及分析	193
6.1	室内外机连接管长和高差	193
6.2	室内外机的布置	196
6.2.1	室内机的布置	196
6.2.2	室外机的布置	207
6.3	室内外机的容量选择及配比	214
6.4	空调系统分区	216
6.5	制热量的衰减	216
6.6	新风问题	218
6.6.1	全热交换器处理新风的问题	218
6.6.2	应用制冷剂直接蒸发式新风机处理新风易出现的问题	219
6.6.3	风管机,四面出风、两面出风嵌入式,落地式柜机引入部分新风易出现的问题	220
6.6.4	新风冬季加热处理、夏季直接送入室内易出现的问题	220
6.6.5	室外新风由风机直接送入室内易出现的问题	220
6.6.6	机械排风结合自然进风	221
6.6.7	自然通风	221
6.7	室内机的气流组织和高层建筑使用的热压问题	222
6.7.1	室内机的气流组织	222
6.7.2	高层建筑物使用的室外机的热压问题	223
6.8	管道布置问题	229
7	家用中央空调设计	236
7.1	设计注意事项	236
7.2	设备布置	236
7.3	新风供给方式	239
8	变频多联机的安装与调试	241
8.1	多联机安装质量的重要性	241
8.2	安装操作流程图	241
8.3	施工前的准备	241
8.3.1	与施工各专业之间的配合、协调	241
8.3.2	施工图纸的审核	243
8.4	编写施工组织设计	244
8.5	必备工具	245
8.6	空调设备的安装	245
8.6.1	室内机的安装	245
8.6.2	室外机的安装	250
8.6.3	有线遥控器的安装	254

8.7 制冷管道的安装	255
8.7.1 制冷剂配管材料	255
8.7.2 铜管管道内壁的清洗	255
8.7.3 制冷剂配管施工通用要求	256
8.8 电气系统的安装	267
8.8.1 强电电源系统的安装	267
8.8.2 通讯系统的安装	269
8.9 系统调试	274
8.9.1 调试前的检查与准备	274
8.9.2 调试工具和仪表	275
8.9.3 试运转前的确认事项	275
8.9.4 单系统的调试及参数确认	275
8.9.5 多系统联合试运转及调试	276
8.9.6 竣工验收	277
8.10 试运行及故障查找	278
8.10.1 查找方法	278
8.10.2 一般故障分析	280
参考文献	283

1 制 冷 原 理

从低于环境温度的空间或物体中吸取热量，并将其转移给环境介质的过程称为制冷。制冷技术是为适应人们对低于环境温度条件的需求而产生和发展起来的。

实现制冷所需的机器和设备，称为制冷机。例如，机械压缩式制冷机包括压缩机、蒸发器、冷凝器和节流机构；吸收式制冷机包括发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和节流机构等。在制冷机中，除压缩机、泵和风机等机器外，其余是换热器及各种辅助设备，统称为制冷设备。而将制冷机同消耗冷量的设备结合在一起的装置称为制冷装置，例如冰箱、冷库、空调机等。

在常用的液体蒸发式制冷中，制冷机都依靠内部循环流动的工作介质来实现制冷过程。它不断地与外界产生能量交换，即不断地从被冷却对象中吸取热量，向环境介质排放热量。所谓环境介质是指大自然中的空气和水。制冷机使用的工作介质称为制冷剂，制冷剂在制冷系统中所经历的一系列热力过程总称为制冷循环。为了实现制冷循环，必须消耗能量，该能量可以是电能、热能、机械能、太阳能及其他形式的能量。

制冷、制热与空调技术是相互独立而又密切相关的学科。为使某一物体或空间达到或维持一定的低温，就要有一温度更低的冷源来吸收该物体或空间的热量，并把这一热量转移到外界环境中去。冷源的制取有两种方法：一种是利用天然冷源，如天然冰或地下水（冬灌夏用的深井水）；另一种是人工制冷，利用热力学中的制冷循环方法制取冷源。制热的意义是使某一物体或空间的温度高于环境介质的温度，这就要有一温度更高的热源向该物体或空间放出热量，以使该物体或空间达到或维持一定的高温。热源的产生也有两种方法：常见的是将燃料燃烧产生的高温火焰或烟气等直接用作热源，或通过锅炉产生蒸汽、热水等作为间接的热源；另一种方法是利用热泵将废热热源或自然界的低温热源转变为高温热源。空调是空气调节的简称，就是把经过处理的空气，以一定的方式送至某一空间，使该空间内空气的温度、湿度、气流速度、洁净度和噪声等控制在需要的范围内。为此，空气必须经过加热、加湿、冷却、减湿等处理过程。换言之，空调技术以制冷、制热技术作为基础，产生冷、热源的设备是空调系统的重要组成部分。

几乎每一个提供冷却作用的空调系统都依赖于一套制冷系统来提供冷的液体，如水或盐水，或者直接从空气流中移去显热和潜热。向空调系统也提供热量的制冷系统常被称为热泵。由于制冷系统的性能对空调系统的控制和性能有重要影响，因此那些涉足于空调系统的人们需要有一些基本的制冷知识。对于制冷知识的领会有助于空调工程师理智地选择制冷设备并将设备适当地匹配到整个系统。

当前，制冷空调工程中用得最广泛的是蒸汽压缩式制冷循环和吸收式制冷循环。前者利用制冷剂产生的潜热，通过压缩、冷凝、节流、蒸发 4 个过程组成的封闭循环实现制冷，是现在应用最广泛的一种制冷循环；后者由吸收剂和制冷剂组成工质对溶液，利用热能驱动，实现发生、冷凝、节流、蒸发、吸收几个过程组成的封闭循环。目前最普遍的是水-溴化锂吸收式制冷机，大量应用于空调工程中。本章将主要介绍采用替代制冷剂的动向、蒸汽压缩式制冷的原理与系统。

1.1 制冷剂及其替代

制冷剂是制冷装置中的工作流体，它在制冷系统中循环流动，通过自身热力状态的循环变化不断与外界发生能量交换，达到制冷的目的。习惯上又称制冷剂为制冷工质或简称工质。

制冷剂是随着制冷技术的发展而发展的。1834 年，美国人珀金斯发明了世界上第一台制冷机，采用的制冷剂为乙醚 (CH_3OCH_3)。1866 年，二氧化碳 (CO_2) 被用作制冷剂。1872 年，玻义耳发明以氨 (NH_3) 为制冷剂的压缩机。1876 年，使用二氧化硫 (SO_2) 为制冷剂。氯甲烷 (CH_3Cl) 在 1878 年开始使用。到 20 世纪 30 年代，一系列的卤代烃（美国杜邦公司称其为氟里昂的）制冷剂相继问世。这些热力性能优良、无毒、不燃、能适用不同温度区域的工作流体，显著地改善了制冷机的性能，大大促进了制冷与空调行业的发展。随后于 20 世纪 50 年代，开始使用共沸制冷剂。20 世纪 60 年代开始使用非共沸制冷剂，此时，卤代烃制冷剂几乎达到了相当完善的地步。

20 世纪 80 年代，科学家们指出，一些氟里昂制冷剂 (CFCs、HCFCs) 对臭氧层有损耗作用，进而对人类健康和人类所依赖的生态环境造成巨大有害影响。随之而来的制冷剂替代技术的发展，使制冷剂的选择进入一个主要以节省能源和保护环境为宗旨的新时代。

1.1.1 制冷剂的种类和符号

常用制冷剂按化学成分区分，主要有无机物、氟里昂和碳氢化合物三类，按组成区分，有单一制冷剂和混合物制冷剂。

根据 ISO817 制冷剂编号规定，制冷剂符号由字母“R”和跟随其后的一组数字与字母组成。“R”表示制冷剂，后面的数字与字母是根据制冷剂的化学组成按一定规则编写的。下面简述各类制冷剂符号的编写规则。

(1) 单一制冷剂

① 氟里昂和烷烃类 烷烃化合物的分子通式为 $\text{C}_m\text{H}_{2m+2}$ ，氟里昂的分子通式为 $\text{C}_m\text{H}_n\text{F}_x\text{Cl}_y\text{Br}_z$ ($n+x+y+z=2m+2$)。它们的符号为 $\text{R}(m-1)(n+1)(x)\text{B}(z)$ ，如二氟二氯甲烷 (CCl_2F_2) 为 R12，五氟乙烷 (CF_3CHF_2) 为 R125，丙烷 ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$) 为 R290。600 系列被指定用于一些有机制冷剂，如丁烷为 R600，异丁烷为 R600a。

对于环状衍生物，在制冷剂符号的数字前加字母“C”，如八氟环丁烷 (C_4F_8) 的符号为 RC318。链烯烃及链烯烃的卤代物，在“R”后面先写 1，其后的数字编写方式与氟里昂及烷烃类符号表示中的数字编写方式相同，例如，丙烯 (C_3H_6) 符号为 R1270。当乙烷系列有异构体时，每一种异构体都有相同的编号，最对称的只用编号表示。当异构体变得越来越不对称时，附加连续的小写字母（例如 a, b, c）。当丙烷系列有异构体时，每一种异构体都有相同的编号，异构体由两个附加的小写字母来区分。

如上所述，在单一氟里昂和烷烃类制冷剂所规定的编号前一般加字母“R”。但近年来由于涉及臭氧层的损耗情况，为了能从符号上显示制冷剂元素的组成，从而了解是否含有氯或溴等消耗臭氧的元素，也可以在规定的符号中不用“R”而用组成元素符号：用字母“C”表示碳，如存在溴、氯、氟，则分别用字母“B”、“C”、“F”表示；含有氢的制冷剂，字母“H”放在更前面。这样分子中含氯、氟、碳的完全卤代烃写作“CFC”，如 CFC-12；分子中含有氢、氟、氯、碳的不完全卤代烃写作“HCFC”，如 HCFC-22；分子中含有氢、氟、碳的无氯卤代烃写作“HFC”，如 HFC-134a；碳氢化合物则写作“HC”，如 HC-170。

② 无机物 无机物的符号中编号首位为 7，7 后面的数字是该无机物的相对分子质量（取整数部分），例如，R717 表示 NH_3 ，R718 表示 H_2O ，R744 表示 CO_2 ，R764 表示 SO_2 。注意，因为 N_2O 和 CO_2 的相对分子质量的整数部分相同，为区别起见，用 R744a 表示 N_2O 。

(2) 混合物制冷剂 混合物制冷剂是由两种或多种化合物组成的，按其特性分为共沸混合物制冷剂和共沸混合物制冷剂。

共沸混合物制冷剂呈现单一制冷剂的特性，起单一制冷剂的作用。共沸混合物制冷剂用“5”开始的 3 位数字编号，如 R500、R502。

混合物制冷剂还保持组分物质某些特性的称为非共沸混合物制冷剂。例如，不像单一制冷剂和共沸混合物制冷剂那样在某一个温度下沸腾，各组分物质的沸点决定了非共沸混合物制冷剂在一个温度区间内沸腾。非共沸混合物制冷剂的编号由数字“4”开始的三位数表示，并以一个字母结尾，以区分相同组分物质的不同质量分数，如 R410A、R407C。

混合物制冷剂由它们各自的制冷剂编号和质量分数作标识。制冷剂根据其组分的标准沸点由低到高排列。例如，R501 用 R22/12 (75/25) 表示，R407C 则标识为 R32/125/134a (23/25/52)。

1.1.2 选择制冷剂的原则

通常在选用制冷剂时应考虑下面一些重要性质：a. 热力学性质（高汽化潜热、低凝结温度、相对高的临界温度、正的蒸发压力、相对低的冷凝压力）；b. 物理性质和化学性质（高蒸气介电强度、良好的传热性能、令人满意的溶油性、低溶水性、惰性和稳定性）；c. 安全性（不易燃、无毒性、无刺激性）；d. 对环境的作用（臭氧损耗潜能低、全球变暖潜能小）。另外，制冷剂应有较低的成本，发生泄漏时易被探测。

原则上，制冷剂的选择必须考虑制冷剂对当地环境可能产生的作用，更应考虑对全球环境的潜在影响，还要考虑制冷剂对特定制冷系统的适用性。

(1) 具有环境可接受性 所选制冷剂的 ODP 值与 GWP 值必须是零或尽可能小。如果有必要采用 ODP 值或 GWP 值大于零的制冷剂，则必须尽量减少其充灌量，并使系统的设计和安装能防止泄漏。所选制冷剂不危害水，不形成雾，能重新使用或易于处置。

(2) 热力学性质满足指定的要求，能量效率高 制冷剂在给定的工况下进行制冷循环时有令人满意的循环特性，包括单位容积制冷量和单位质量制冷量较大、压力和压力比适中、排气温度不过高、等熵压缩的比功小、制冷系数较大、制冷机的传热性能和流动性能好。需要强调的是，如果制冷剂对环境的影响仅仅是全球变暖效应，在能量效率与低充灌量不能同时满足的情况下，必须优先考虑能量效率。

(3) 制冷系统的运行安全可靠 制冷剂的化学稳定性（高温高压时）和热稳定性好，对钢或其他金属不腐蚀，与润滑油相容，无毒、无刺激性气味，不燃、不爆或燃爆性很小，使用安全。

(4) 价格适当，可在市场上购买。

事实上，很难找到完全符合上述要求的制冷剂。所选的制冷剂是否合适，应根据使用要求、使用条件、系统容量和装置种类来进行综合评价。然而，为了保护和改善人类生存环境，对于任何所选制冷剂，其 ODP 值和 GWP 值等于零或接近零的条件是无论如何必须满足的。

1.1.3 ODP 和 GWP

(1) 臭氧损耗潜能 (ODP) 臭氧层是地球的保护伞，它对波长为 280~315nm 的太阳

辐射 B 种紫外线 (UV-B) 有很强的吸收能力, 起到过滤的作用。若臭氧层浓度的减少使到达地表的 UV-B 增加, 则会对我们产生下列不利影响: a. 免疫系统受到破坏及皮肤癌罹患率增加; b. 白内障罹患率增加; c. 海洋食物网会受到严重干扰; d. 干扰陆地生态系统; e. 加剧空气污染; f. 加速户外塑胶材料的老化。

舍伍德·罗兰 (S. Rowland) 和马里奥·莫利纳 (M. Molina) 于 1974 年提出, 包括常用的 CFCs 制冷剂在内的许多人工合成的含氯物质可以与臭氧反应, 使之变成氧分子 (O_2), 导致臭氧层浓度降低, 即臭氧层损耗。臭氧层损耗使过多的 UV-B 穿过大气层到达地球表面。

一些制冷剂非常稳定, 在对流层中不易分解, 它们通过大气环流最终扩散到平流层。在平流层里, 强烈的太阳紫外线促使这些制冷剂化学分子破裂, 释放出氯原子。这些氯原子与臭氧发生化学反应, 生成氧分子。在化学反应中氯原子只起催化剂的作用, 本身并没有消耗。因此, 一个氯原子可以通过成千上万次的上述化学反应把臭氧转变成氧分子。

臭氧损耗潜能 (ODP) 是用来评价化合物破坏臭氧层能力的指标。对于某一给定的化合物, 其 ODP 值是 1kg 该化合物释放到大气中损耗臭氧的程度。但该值是在相对的基础上计算得到的, 即将 CFC-11 的 ODP 值定为 1, 所有其他化合物就定出相对于 CFC-11 的 ODP 值。表 1-1 给出了一些典型制冷剂的 ODP 值及其大气寿命。

表 1-1 制冷剂有关数据汇总

分类	制冷剂 编号	分子式或组成	相对分 子质量	标准 沸点 ^① /℃	临界点		(TLV ^② - TWA) /ppm ^⑥	LFL ^③ /%	HOC ^④ /(MJ/kg)	安全 类别 ^⑤	大气 中寿 命/年	ODP	GWP (按 100 年计)	
					T _c /℃	P _c /MPa								
HCFC	R22	CHClF ₂	86.47	-40.8	96.2	4.99	1000	无	2.2	A1	11.9	0.004	1700	
	R123	CHCl ₂ CF ₃	152.93	27.8	183.8	3.66	50	无	2.1	B1	1.4	0.012	120	
	R141b	CH ₃ CCl ₂ F	116.95	32.0	204.2	4.25	500	5.8	8.6	—	9.3	0.086	700	
	R411A	R1270/22/152a (1.5/87.5/11.0)	82.36	-39.7	99.1	4.95	1000	无	—	A1/A2	—	0.30	1500	
	R411B	(3.0/94.0/3.0)	83.07	-41.6	96.0	4.95	1000	无	6.5	A1/A2	—	0.32	1600	
	R411C	(3.0/95.5/1.5)	83.44	-41.8	95.5	4.95		无	—	A1	—	0.032	1600	
HFC	R134a	CH ₂ FCF ₃	102.03	-26.1	101.1	4.06	1000	无	4.2	A1	13.8	0	1300	
	R404A	R125/143a/134a (44.0/52.0./4.0)	97.6	-46.6	72.1	3.74	无	无	-6.6	A1/A1	—	0	3800	
	R407C	R32/125/134a (23.0/ 25.0./52.0)	86.2	-43.8	87.3	4.63	无	无	-4.9	A1/A1	—	0	1700	
	R410A	R32/125 (50.0/50.0)	72.58	-60.9	72.5	4.95	无	无	-4.4	A1/A1	—	0	2000	
	R507A	R125/143a (50.0/50.0)	98.86	-47.1	70.9	3.79	无	无	-5.5	A1	—	0	3900	
天然 制冷剂	HC	R290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	44.10	-42.2	96.7	4.25	2500	2.1	50.3	A3	—	0	3
		R600	C ₄ H ₁₀	58.12	-0.5	152.0	3.80	800	1.5	49.5	A3	—	0	3
		R600a	CH(CH ₃) ₃	58.12	-11.7	134.7	3.64	800	1.7	49.4	A3	—	0	3
		R4(11)0	CH ₂ (CH ₂) ₃ CH ₂	73.14	49.3	—	—	—	1.4	—	A3	—	0	11
		R717	NH ₃	17.03	-33.3	132.3	11.3	25	15.0	22.5	B2	—	0	<1

① 标准沸点中混合物则存在温度滑移;
② TLV-TWA 为最高允许浓度时间加权平均值;
③ LFL 为燃烧最小浓度值;
④ HOC 为燃烧热量;
⑤ 安全类别为根据 GB/T 7778—2001 和 ASHRAE 34—1997 的分类;
⑥ 1ppm=1μg/g, 下同。

(2) 全球变暖潜能 (GWP) 天然温室气体二氧化碳和水蒸气存在于地球周围的大气中。二氧化碳和水蒸气能让太阳短波光不受阻碍地通过,使地球加热。而长波热辐射被地球反射,地球得以冷却。二氧化碳和水蒸气拦截反射的长波热辐射,使地表气温达到入射到地球上的太阳能和被地球向空间辐射回去的能量处于平衡的温度,大气的这种保温作用被称为温室效应。适当的温室效应对地球来说是必需的。如果没有温室效应,地球表面平均气温仅为 -18°C ,而实际地表平均气温为 15°C 。即地球大气的温室效应可使地球表面的气温增加 33°C 。温室气体还包括甲烷、近地面的臭氧、氧化二氮 (N_2O)、制冷剂等。

近百年来,由于大量燃烧矿物燃料和砍伐树木等人类活动,地球大气中的二氧化碳等温室气体过度增长,例如大气中的二氧化碳浓度已增加了 25%。尽管大气成分的变化对全球气候的影响目前还难做出精确预测,然而可以认定人为的温室效应会给人类的生存空间带来负面影响:全球气温升高,两极的冰溶化,海平面上升,中纬度地区气候干旱化等一系列问题。科学家估计,如果大气中二氧化碳浓度增加的趋势保持下去,那么接下来的 100 年内,地球气温会提高 $1.5\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ 。因此,1992 年 6 月在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上,有 160 多个国家元首、政府首脑签署了《气候变化框架公约》,最终目的是将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上。

氯氟烃 (CFC)、氢氯氟烃 (HCFC) 和氢氟烃 (HFC) 制冷剂都被京都协议书规定为温室气体,它们如被排放到大气中,将增强地球温室效应,并对全球变暖产生作用。值得指出的是,如果一定量的温室气体释放到大气中,存留在大气中的量会随着时间持续减少。因此,一种温室气体对全球变暖的累积影响将持续增加,直至该气体从大气中消失。

对于一种给定的化合物,可用“全球变暖潜能”(GWP)来反应该化合物对全球变暖作用的能力。和 ODP 值一样,GWP 值也是在一个相对的基础上计算出来的。二氧化碳的 GWP 值为 1,且不必考虑累积时间水平 (ITH)。所有其他温室气体都有一个相对二氧化碳的值。对于同一种化合物,所用的 ITH 不同,GWP 值会发生变化。一些典型制冷剂的 GWP 值列于表 1-1 中。

制冷和空调系统运行时需要能量,在大部分情况下,能量来自于电力或矿物燃烧的直接消耗。煤、石油和天然气燃料生产电力时都产生二氧化碳并将它排放到大气中。制冷和空调系统运行时这种消耗能量的形式也对全球变暖起作用。

总当量变暖效应 (TEWI) 概念被用来对制冷空调应用造成温室效应的总量值进行评估。它考虑了对全球变暖起作用的两种方式,即制冷剂排放的直接效应和能源利用的间接效应。直接效应由泄漏损失效应和回收损失效应组成,它取决于制冷剂的 GWP 值、气体泄漏量和考虑的时间长度,间接效应取决于制冷和空调系统运行的效率。TEWI 的计算公式为

$$TEWI = GWP \times L \times n + GWP \times m \times (1 - \alpha) + n \times E \times \beta \quad (1-1)$$

式中 GWP——全球变暖潜能值,按 100 年水平计;

L ——制冷剂泄漏量,kg/年;

n ——有效使用期,年;

m ——制冷剂充灌量,kg;

α ——制冷剂回收系数,其值为 $0\sim 1$;

E ——能量消耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{年}$;

β ——二氧化碳排放量, $\text{kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

制冷剂泄漏量不仅包括系统运行过程和维护过程的泄漏量,而且还包括停机期间的泄漏

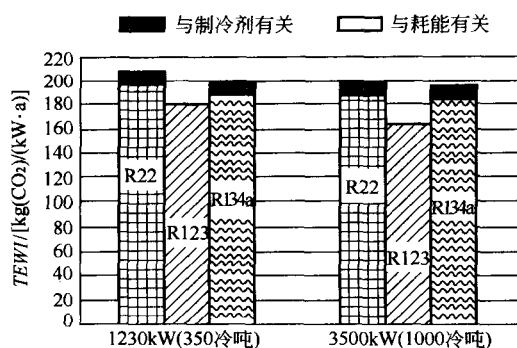


图 1-1 总当量变暖效应 TEWI 的比较

剂本身有关的直接效应相比，间接效应（与能量有关的部分）对全球变暖造成的影响要大得多，如图 1-1 所示。

寿命期气候性能 LCCP (Life Cycle Climate Performance) 是在 TEWI 基础上补充了制冷机和制冷剂生产过程中的能耗引起的温室效应。若用 LCCP 衡量和分析，其直接温室效应均很小，间接温室效应占主要部分。

1.1.4 制冷剂替代

(1) 背景介绍 保护臭氧层的全球合作始于 1985 年保护臭氧层维也纳公约的协商与缔结。在联合国环境规划署 (UNEP) 的倡议下，1987 年 9 月签署了关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书，该议定书于 1989 年 1 月 1 日起生效。之后还实施了伦敦修正案 (1990 年)、哥本哈根修正案 (1992 年)、维也纳修正案 (1995 年) 和北京修正案 (1999 年)。为防止全球气候变暖，联合国环境规划署 1988 年设立了 IPCC (国际间有关气候变化政府协商组织)，1992 年联合国通过了“气候变化框架条约”，1995 年在德国柏林召开了第一届气候变化框架条约缔约国会议，1997 年 12 月在日本召开第三届缔约国京都会议，形成了削减温室气体的决议案。表 1-2 为各议案的汇总表。

表 1-2 国际条约对 CFCs、HCFCs 及 HFCs 的规定

国际规定	CFCs	HCFCs	HFCs
	蒙特利尔议定书	蒙特利尔议定书	京都议定书 ^①
发达国家 ^②	1996 年 1 月 1 日禁止生产和消费	2004 年削减 35%；2010 年削减 65%；2015 年削减 90%；2020 年禁止。2030 年前作为补充用，可生产基准年的 0.5% 以下	2008～2012 年平均减少排放 5.2%
发展中国家	2010 年 1 月 1 日禁止生产和消费	2016 年 1 月 1 日消费冻结在 2015 年水平上，2040 年 1 月 1 日禁止消费	
美国	1996 年 1 月 1 日禁止生产和消费	2003 年 1 月 1 日禁止 R141b 用于发泡；2010 年 1 月 1 日冻结 R22 和 R142b 生产、禁止生产 R22 新设备；2015 年 1 月 1 日冻结 R123 和 R124 生产；2020 年 1 月 1 日禁用 R22 和 R141b、禁止生产 R123 和 R124 新设备；2030 年 1 月 1 日禁用 R123 和 R124	
欧共体	1996 年 1 月 1 日禁止生产和消费	2000 年 1 月 1 日削减 50%；2004 年 1 月 1 日削减 75%；2007 年 1 月 1 日削减 90%；2015 年 1 月 1 日削减 100%	

① 京都议定书应在 2000 年开始实施，温室气体为 CO₂、CH₄、N₂O、HFC、PFC、SF₆ 等 6 类；

② 发达国家在京都议定书中指 38 个工业化国家，基准以本国 1989 年 HCFCs 消费量+1989 年 CFCs 消费量的 3.1%，其中 3.1% CFCs 消费量，1995 年修订为 2.8%。

从表 1-2 可以看出，发达国家从 2004 年就要开始消减 R22 的生产和消费量，我国将在 2016 年消费冻结在 2015 年水平上。所以，我国在 2015 年以前不但可以继续消费 HCFCs（包括 R22、R123、R141b 等），而且还可以扩大 HCFCs 的生产与消费。这里应该弄清楚发达国家与发展中国家淘汰和限制 R22、R123 等 HCFCs 制冷剂的时间表是不同的。

值得注意的是，一些欧洲国家在环保组织鼓动下，将淘汰 HCFCs 的时间表大大提前，例如瑞士、意大利 2000 年 1 月 1 日禁用 HCFCs，德国 2000 年 1 月 1 日禁用 R22，瑞典、加拿大 2010 年 1 月 1 日禁用 HCFCs。同时也要求发展中国家调整和加速淘汰 HCFCs 的时间表，但遭到包括中国在内的一些发展中国家的强烈反对。另一方面，在蒙特利尔议定书中最有发展前途且 ODP 为零的 HFCs——R134a、R404A、R407C、R410A 等物质，其全球变暖潜能值（GWP）往往较大（见表 1-1），已成为温室气体。因此，在欧洲一些国家，例如挪威、丹麦等对使用 HFCs 苛以重税。这表明人们对制冷剂替代有一个逐步走向理性的过程，即寻找全面评估制冷剂对大气气候和人类生态环境产生影响的科学方法，过早淘汰 R22、R123 等 HCFCs 和限制使用 HFCs 都是错误的。

20 世纪 30 年代以后，卤代烃（俗称氟里昂）类制冷剂逐步替代了氨、 SO_2 、 CO_2 等制冷剂，它们属于甲烷系（R11、R12、R22 等）和乙烷系（R114、R115 等）卤代烃。丙烷系以上卤代烃由于价格高和工艺复杂而不为人们所采用。由于氯氟烃的淘汰以及毒性和燃烧性等缘故，在甲烷系和乙烷系卤代烃类物质中（图 1-2），能用作制冷剂尤其是性能优良的物质更是难觅。由图 1-2 可看出，甲烷系仅有 R23（HFC），而乙烷系只剩 R134 和 R125（HFC），除了 R134 的同分异构体 R134a 外，R23 和 R125 都缺少作为制冷剂的优良性能。因此，人们将具有一定燃烧性，但在某方面有优良性能的物质混在一起，使其形成在一定工作范围内具有优良性能的制冷剂。因而甲烷系选择了 R32，乙烷系选择了 R152a、R143a 和 R125 等。根据要求，采用不同物质和混合比就形成了庞大的混合制冷剂（包括共沸和非共沸）类物质。目前这类物质还在扩大。

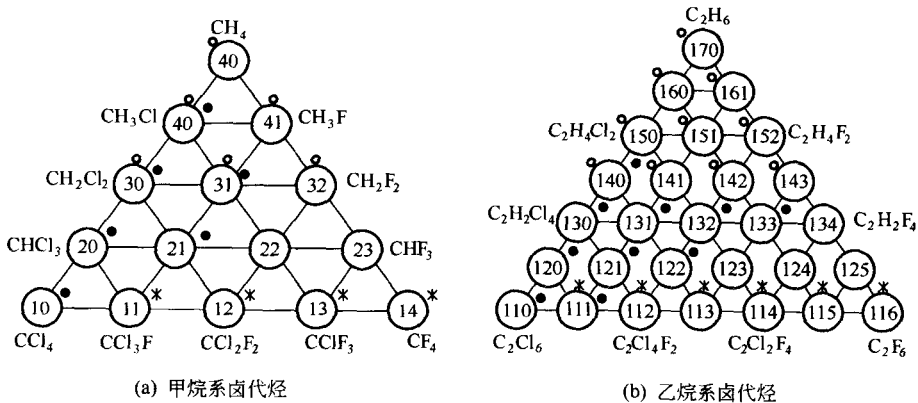


图 1-2 甲烷系和乙烷系卤代烃

○—可燃性；●—毒性；*—大气中寿命长

但混合物一般适用于某一范围，例如空调领域为 R404A（RAC）、R407C（PAC、HVAC），低温为 R404A 和 R507A。另外，该类物质最大缺点是，系统一旦产生泄漏，则原来组分发生变化，影响机组性能，补充制冷剂时需将剩余成分抽出后，再完全补充新的制冷剂，显然成本增高，工序复杂。

另外，图 1-2 中的卤代烃（三角形左侧腰上的物质除外）均可称为“氟里昂”，它们是一个大家族（还有丙烷系、丁烷系等），目前暖通空调与制冷设备中采用 R22、R134a、R407C、R410A 等是它们中的一种或数种之混合物。

有人认为，未来 30 年的制冷剂将属于 ODP 和 GWP 都是零的天然制冷剂。然而，除了环境参数，我们也应当考虑制冷剂的热力学和安全特性。这些特性对产品开发 and 运行尤其重要。

丁烷、异丁烷和丙烷的可燃性较高，氨的可燃性和毒性处于中等。以后的建筑物规范修正本可能会不允许在建筑物内安装使用易燃制冷剂的冷水机组。近几年来，CO₂ 也吸引了很多注意，但和大型空调设备中所使用的其他制冷剂相比，它的压力非常高。高压容器不仅增加制造成本，也增加了运行中的安全隐患。CO₂ 作为制冷剂的最根本缺点是效率很低，其相应的间接效应对环境造成的负面影响大。所以，CO₂ 仅限在小型系统中使用，通常不适用于空调系统中采用的离心式冷水机组在内的大型制冷场合。

无论从哪个角度来说水都是一种安全的天然制冷剂，它的效率和热交换性能都很合理，一些机构已经在实验室中建立并测试了水作为制冷剂的样机。水用作制冷剂的一个巨大挑战是如何处理低压及高容积流量的问题，压缩机和机组的体积都比现有机组大很多，因此，安装时的占地面积和机组材料成本都很高。第二个缺点是水不能制取 0℃ 以下低温。

(2) 冷水机组中的替代制冷剂

① 环境影响评估 目前，我国使用的单一类制冷剂对大气环境的影响可以从表 1-3 中得出结论。CFCs 类物质的 ODP 和 GWP 值普遍较高，HCFCs 类物质的 ODP 与 GWP 值一般低得多，HFC 类物质的 ODP 值等于零，但 GWP 值相对较高，虽然 HC 类物质的 ODP

表 1-3 制冷剂的大气环境影响特性

类别	编号	分子式	大气中寿命 /年	ODP	GWP (按 100 年计)	(TLV-TWA) /ppm	LFL /%	安全性 类别
CFCs	R11	CCl ₃ F	45	1.0	4600	1000	无	A1
	R12	CClF ₂	100	0.82	10600	1000	无	A1
	R113	CCl ₂ FCClF ₂	85	0.90	6000	1000	无	A1
	R114	CClF ₂ CClF ₂	300	0.85	9800	1000	无	A1
	R115	CClF ₂ CF ₃	1700	0.40	7200	1000	无	A1
HCFCs	R22	CHClF ₂	11.9	0.034	1700	1000	无	A1
	R123	CHCl ₂ CF ₃	1.4	0.012	120	50	无	B1
	R124	CHClFCF ₃	6.1	0.026	620	1000	无	A1
	R141b	CH ₃ CCl ₂ F	9.3	0.086	700	500	5.8	A2
	R142b	CH ₃ CClF ₂	19	0.043	2400	1000	6.0	A2
HFCs	R23	CHF ₃	260	0	12000	1000	无	A1
	R32	CH ₃ F ₂	5.0	0	550	1000	12.7	A2
	R125	CHF ₂ CF ₃	29	0	3400	1000	无	A1
	R134a	CH ₂ FCF ₃	13.8	0	1300	1000	无	A1
	R143a	CH ₃ CF ₃	52	0	4300	1000	7.0	A2
	R152a	CH ₃ CHF ₂	1.4	0	120	1000	3.7	A2
	R227ea	CH ₃ CHF ₂ CF ₃	33	0	3500	1000	无	—
	R236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	220	0	9400	1000	无	A1
	R245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7.2	0	950	300	无	B1
HCs	R170	CH ₃ CH ₃	—	0	3	1000	2.9	A3
	R290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	—	0	3	2500	2.1	A3
	R600	C ₄ H ₁₀	—	0	3	800	1.5	A3
	R600a	CH(CH ₃) ₃	—	0	3	800	1.2	A3
	R1270	C ₃ H ₆	—	0	3	660	2.0	A3
	R4(11)0	CH ₂ (CH ₂) ₃ CH ₂	—	0	11	—	1.4	A3

和 GWP 值接近零，但它们是易燃易爆物质。作为冷水机组使用 HCFC 类物质的 R22 和 R123 有着综合环保优点。尤其是 R123 的环保性能较为突出。

另外，当采用总当量变暖效应 (TEWI) 值和较为严格的全球变暖影响评价指标，即寿命期气候性能 (LCCP) 值对上述制冷剂评估时，在 RAC、PAC 和冷水机组中 R22 有着综合优势，仅在与混合物 R407C、R410A 比较中处于相当的地位或者稍稍劣势。R123 在大型离心式冷水机组中 (350~1000 冷吨) 比较 R134a 则 TEWI 将低 14%~20%，即 CO₂ 排放量将减少，而且 R123 目前看来是其他任何单一制冷剂所无法替代的。

② 安全性评估 制冷剂安全性主要反映在毒性和燃烧性两个方面。在 GB/T 7778 和 ASHRAE34 中，毒性分为低毒性 (A 类) 和高毒性 (B 类)。燃烧性分为三级，即 1 类不可燃、2 类具有燃烧性、3 类易燃易爆。由 A 或 B 和 1、2、3 中的一个数字组成综合等级用于反映制冷剂的毒性和燃烧性。

由表 1-3 可知，CFCs 均为 A1 类，HCFCs 的 R123 属于 B1 类，HFCs 的组成混合物组分的 R32、R143a、R152a 属于 A2 类，HCs 全部为 A3 类。

表 1-4 为 PAFT (替代物氟碳烃毒性试验计划) 公布的主要单一制冷剂的毒性试验数据。从表 1-4 可知，PAFT 机构暂定 R123 制冷剂 8h 工作时间加权平均暴露浓度限值为 10~30ppm，J. M. Calm 与 G. C. Hourahan 指出，R123 的 TLV-TWA 为 50ppm (Refrigerant Data Summary. Engineered System, 2001. 11)。欧洲标准 PrEN378—1999 规定，R123 占用人员暴露浓度极限 (OEL) 为 100g/m³，美国 ASHRAE15—1994 规定，R123 的立即危及生命或健康浓度 (IDLE) 为 6.3g/m³。虽然 R123 具有优良的热工性能，但终究具有一定的毒性，故在大型离心式冷水机组中一方面要有优异的排气设备 (年泄漏量小于 1%)，使机房保持 R123 浓度低于 10~30ppm，同时根据 GB 9237—2001 《制冷和供热用机械制冷系统安全要求》中 5.8.3 的规定，机房应装设制冷剂浓度检测仪，其报警浓度应设在 10ppm，并设置排风机。

另外，在“特灵”1993 年 9 月第四期的《如何面对 CFC 问题》文章中刊登了美国杜邦公司发表的关于部分 CFCs、HCFCs 和 HFCs 的毒性试验结果，如表 1-5 所示。

表 1-4 PAFT 公布的主要单一制冷剂的毒性试验数据

项 目	HCFCs				HFCs				
	R22	R123	R124	R142b	R134a	R125	R32	R143a	R152a
急性毒性/ppm									
吸入白鼠 LC50(4h)		>350000	300000		>500000	>800000			
白鼠 ALC(4h)	220000			128000			>760000	>540000	>383000
经口白鼠 LD ₅₀		9000mg/kg							
狗诱发心脏病/ppm	50000	25000	25000		75000	350000	300000	300000	150000
遗传毒性									
Ames 试验		阴性	阴性		阴性				
染色体异常		阴性	阴性		阴性				
小核试验		阴性	阴性	2%, 15 周 阴性	阴性				
优性致死试验				2%, 15 周 阴性	阴性				
恶性毒性(吸入)/ppm									
白鼠 28 日 NOEL								10000	2 周 100000
白鼠 90 日 NOEL					50000		50000	40000	
白鼠 90 日 NOAEL			50000			50000			