

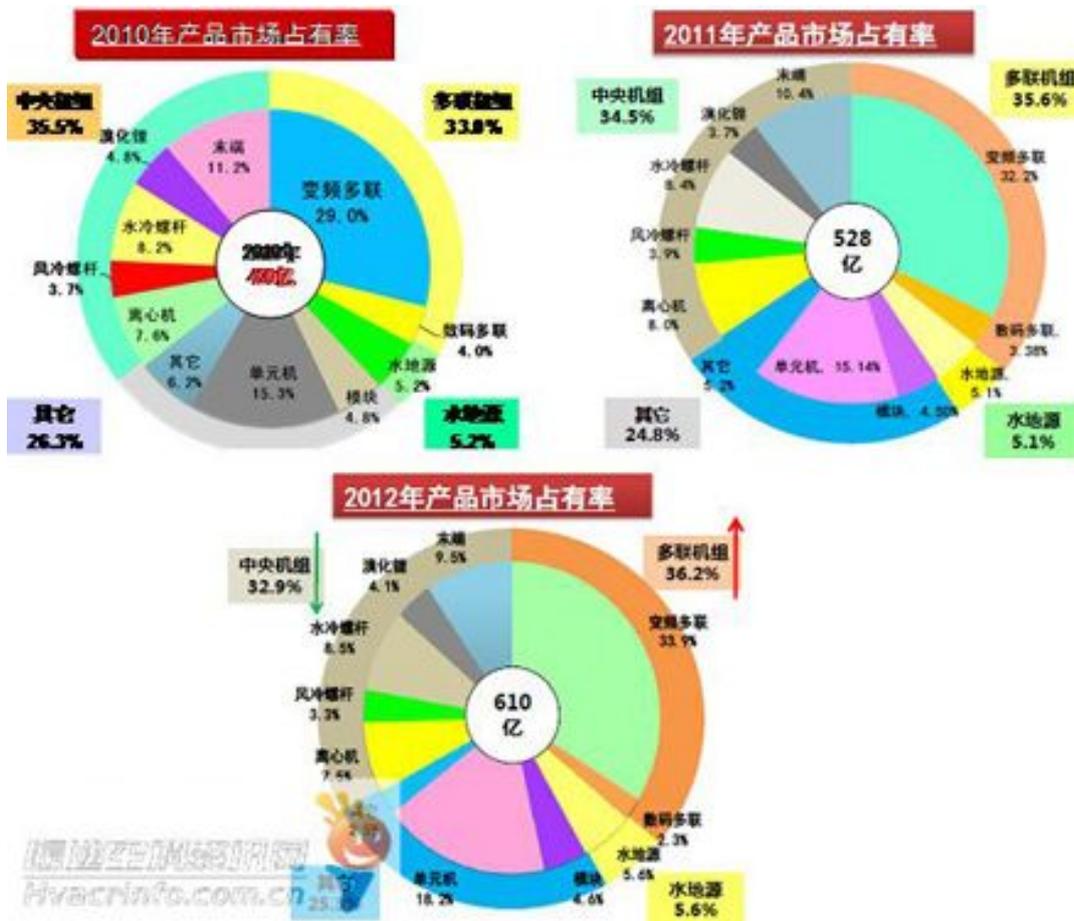
石文星：中国的多联机技术与标准发展

【暖通空调在线】石文星教授多年来致力于热泵技术的研发工作，也因对多联机在中国应用领域的技术性研究，参与了多项多联机国家标准的起草和修订工作。最近，行业内有关多联机技术标准修订及APF性能评价体系的引入成为一个热点话题，因此石文星教授为大家系统细致地介绍了有关多联机技术发展、标准修订及APF带来的影响等相关技术内容。

一、由于目前我国多联机产品的应用情况以及近些年的发展，尤其是在产品技术方面的进步体现在哪些方面，请问，此项技术未来发展的趋势如何？

多联机可以认为是一种多室内机的房间空调器。从原理上看，它属于直接蒸发式空调系统，无需配系统，通过变容调节，它具有优异的部分负荷性能和变工况性能；从使用上看，它室内机独立控制、使用灵活，自带控制系统，无需专门的运行管理人员，且易于实现行为节能；从投资上看，它采用制冷剂直接输配冷热量故占用安装空间小，有时也可不设室外机专用机房，且可分期建设、分期投资。如果多联机系统设计、应用合理，则是一种很好的节能型空调系统形式。因此，近年来多联机系统得到迅猛的发展，目前已成为非常活跃的中央空调系统形式之一。

2013年商用空调市场规模的统计数据尚没有公布，但从2010年至2012年的统计数据可以看出：目前，冷水机组和多联机的市场份额均大于30%，其中多联机的市场占有率逐年增加，其产值每年的增长率都约20%，说明多联机这类系统已得到市场的充分认同。



自 1982 年日本大金公司推出多联机系统方案之后，日本各大空调企业都迅速推出了相应的产品，极大地推动了多联机的技术进步。目前多联机技术主要集中在日本、韩国和中国三个国家。我国的多联机产业起步较晚，是从 1998 年左右才开始自主研发，虽然才 15 年左右的历史，但我国的主要企业，如美的、格力、海尔等投入的研发成本，培养和引进了大量的优秀人才，使我国多联机的总体技术水平达到国际同行水平，并同在国际市场上竞争。近年来随着国内企业逐渐掌握了多联机的核心技术，并拥有了大量自主知识产权技术，其发展速度更为迅猛，很多企业的多联机市场份额逐年攀升，正在逐步追赶雄踞前两位的大金和日立公司。

多联机从产品研发、工程应用到运行管理各个环节都有其关键技术问题。

(1) 产品研发：多联机产品的研发涉及到制冷系统技术、模拟仿真技术和电子技术三大技术领域，这些技术包括制冷、空调、计算机、自动控制、网络、通讯、电机、电子、机械等领域，是一个综合难度很高的技术，是一项艰巨复杂但又非常有意义的系统工程，被认为是制冷空调技术的制高点。在产品研发阶段的关键技术除了压缩机的驱动和制冷剂分配控制外，更为重要的技术问题在于制冷系统的优化设计与优化控制问题。欲研发出高效、可靠的多联机产品，则必须探明复杂制冷系统的稳态特性和动态特性，明确制冷剂的动态迁移特性，故必须对多联机系统进行模拟仿真和实验研究。

(2) 工程应用：工程应用主要是指针对具体建筑的多联机系统的设计和安装过程。多联机系统的设计不仅仅是将多联机布置在建筑中即可，而需要根据建筑的负荷特征和多联机的运行特性，对建筑进行合理分区，以保证每套多联机系统能够尽可能高效地运行；更为重要的是，多联机是依靠制冷剂作为能量的输配介质，且制冷剂中含有一定的润滑油，故保证制冷剂的合理分配和润滑油安全返回是极为重要的问题。因此，多联机系统的设计和安装至关重要，不仅关系到系统的能效高低，而且关系到系统的安全运行。多联式系统的设计与安装是多联机产品应用过程中的两个重要环节，系统设计是产品设计的延伸，系统安装是产品制造的扩展。为规范多联机系统的设计与安装，必须开展系统特性模拟，总结实际设计经验，形成工程设计和安装规范，以保证系统的可靠、高效运行。

(3) 运行管理：在运行管理阶段，需通过实际运行效果来检验多联机产品的可靠性和系统设计的合理性，并检验产品和系统的运行性能。

到目前为止，各多联机厂家已在上述三个环节开展了大量的研发工作，大力推进了多联机行业的发展。今后尚需在新系统设计、系统仿真、故障诊断和现场性能测试方面开展工作，以推动多联机系统整体技术的提升。

二、目前多联机的相关标准有哪些？国际上对于多联机标准的主要不同点体现在哪些方面？我国的 GB/T18837-2002 施行多年来，遇到哪些问题？

据我们了解的，构建多联机标准体系是保证多联机产业健康发展的必要条件。我国的多联机产业虽然起步比日本晚，但从标准体系建设方面来看，我国是多联机标准体系建立最为完善的国家。

我国的多联机标准主要分为三类：产品标准、产品的能效标准和产品应用标准。

(1) 产品标准：包括 GB/T 18837-2002《多联式空调（热泵）机组》、GB/T 22069-2008《燃气发动机驱动空调（热泵）机组》和 GB/T 25857-2010《低环境温度空气源多联式热泵（空调）机组》。GB/T 18837-2002 适用于常规风冷式多联机产品，GB/T 25857-2010 适用于北方地区使用的空气源热泵多联机产品，GB/T 22069-2008 适用于由燃气发动机驱动的风冷式多联机产品。三部标准基本覆盖了现行产品，目前正在针对多联机的一些衍生产品，如利用冷凝热回收制备生活热水和冬季采用地板辐射采暖的多联

机产品制定行业标准。

(2) 能效标准：GB 21454-2008《多联式空调（热泵）机组能效限定值及能源效率等级》是针对 GB/T 18837-2002 所述风冷式多联机产品的能效标准，是我国终端用电产品能效标准之一。

(3) 应用标准：我国多联机产品的应用标准有一部行业标准 JGJ 174-2010《多联机空调系统工程技术规程》和一部国家标准 GB/T 27941-2011《多联式空调（热泵）机组应用设计与安装要求》，这两部行业标准为我国多联机产品的应用提供了重要依据。此外，在 GB50189《公共建筑节能设计标准》等建筑设计标准中也有对机组性能要求方面的条款。

下面我主要谈一谈多联机的产品标准问题。

我国多联机的产品标准 GB/T 18837-2002 是世界上的第一部国家标准，且第一次采用季节性能指标 IPLV 来评价多联机产品的性能，甚至比日本行业标准 JRA 4055《多联机季节耗电量计算基准》还早一年。此后，2006 年日本和韩国分别制定了相应的国家标准 JIS B 8616-2006《パッケージエアコンディショナ（单元式空气调节机）》和 KS B ISO 15042:2006《多联式空调机和空气源热泵的测试及能效评价方法》；国际标准化组织 ISO 在 2009 年推出一部多联机标准 ISO 15042《Multiple split system air conditioners and air to air heat pumps — Testing and rating for performance（多联式空调和热泵的性能测试和评价）》；此后 2010 年美国 and 欧洲均发布了多联机的性能测试标准 ANSI/AHRI1230-2010《Performance Rating of Variable Refrigerant Flow (VRF) Multi-Split Air-Conditioning and Heat Pump Equipment（变制冷剂流量多联式空调和热泵设备性能标准）》、PrEN 14825-2010《Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling— Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance（空间加热和冷却用带电动压缩机的空调、液体冷却装置和热泵一部分负荷工况试验、评价和季节性能计算）》。

目前，评价多联机的季节运行性能的指标主要有 IPLV(C)/IPLV(H)（GB/T 18837-2002，韩国标准 KS B ISO 15042:2006 等效采用了 GB/T 18837-2002 的评价方法），CSPF/HSPF（或 SEER/HSPF）（JIS B 8616-2006、ISO 15042），IEER（ANSI/AHRI1230-2010），SEERon/SCOPon（PrEN 14825-2010）等，分别被应用于不同国家（组织）的标准体系中。这些指标的本质思想都是一致的，都是希望通过几个典型工况的测定性能值、不同外温条件下多联机的运行时间以及多联机应用建筑的负荷特性来评价多联机全年运行的能效状态，以此来评价多联机性能的好坏。但由于多联机的应用地域不同、应用建筑不同、使用习惯不同以及人们对多联机特性的认识程度不同，故各国多联机的标准也出现了一定的差异。

我国多联机标准 GB/T 18837-2002 已应用了 10 余年，在实际应用过程中也发现了一些问题和不足，主要归结为以下几点：

(1) 多联机在起步阶段，其产品主要是风冷式多联机，但随着技术和产业的发展，多联机的类型逐渐丰富，除风冷式（空气源热泵型）多联机外，水冷式（水源热泵型）、热回收型（可同时制冷、制热）多联机等产品在市场上的比例也逐渐增大，故原有标准 GB/T 18837-2002 的适用范围需要扩大。

(2) GB/T 18837-2002 标准中采用了 IPLV 指标，决定其指标数值大小的部分负荷曲线（人们常称为“S 线”）采用了美国标准 ARI 340/360 的 S 线，其中的建筑冷热负荷模型和多联机运行温频模型未反映我国国情；而且其部分负荷性能测试工况仅考虑了室内机组运行数量的变化，但未反映其变工况（即性能参数随外温条件的变化）特性，其制冷性能测试仅在夏季供冷室外平均温度（27℃）、制热性能测试仅在机组设计室外工况（干湿球温度=7/6℃）条件下进行，从而使得多联机 IPLV 指标的数值普遍偏

大，不能更为准确地反映机组的实际运行性能。

(3) 正因为 GB/T 18837-2002 标准中的 IPLV 指标存在上述两方面的不足，故其数值与冷水机组的 IPLV 指标、单元式空调机等产品的 SEER、HSPF 等指标不具有可比性，从而导致暖通空调设计师在方案选择时难以与其他产品进行等价比较，进而回归到利用多联机产品的名义工况性能进行性能分析，不得不丢掉了多联机产品变工况性能的信息（其 IPLV 指标仅作为参考使用了）。

正因为如此，2010 年全国冷冻空调设备标准化技术委员会组织了全国多联机企业、科研机构对多联机标准体系进行研究，并向国标委立项修订现行标准，2010 年得到国标委的批复（修订计划编号：20101873-T-604）。经过近 4 年的研究、实验、研讨，针对多联机的性能评价体系、标准的适用范围、性能测试方法以及反映多联机长管路安装对性能的影响等问题进行了重点研究，并形成了标准送审稿，于 2013 年 11 月 19 日在“全国冷冻空调设备标准化技术委员会三届四次工作会议暨标准审查会”上，批准了 GB/T 18837《多联式空调（热泵）机组》新标准的送审稿。

三、请您介绍一下此次修订的过程，以及此修订标准与现行的 GB/T 18837-2002 标准的主要区别。

这次标准的修订是在充分研究现行标准在执行过程的优势和不足前提下进行的。由于多联机产业巨大，标准起草对行业的发展至关重要，故起草组非常慎重，并进行了深入细致的研究、起草工作。

1、关于标准起草工作，可以从以下几个方面可以看出本次修订工作的严谨性。

(1) 组建了包含全国近 30 家的多联机主要研究机构和国内外生产研发企业在内的标准起草组。

(2) 成立了“多联式空调（热泵）机组性能评价体系研究”项目工作组，其成员基本覆盖了起草组的主要研究机构和国内外生产研发企业，开展了近 3 年的实验研究、数据调研和模拟仿真等工作，形成了多联机性能评价体系和产品分类体系的研究报告；

(3) 邀请美国、日本、中国的多联机标准起草专家，召开了“多联式空调（热泵）机组性能评价国际研讨会”，对多联机性能评价方法进行了深入的研讨；

(4) 召开了 5 次标准起草研讨会，对标准研发过程的关键问题和行业反馈意见进行讨论，以推进标准起草工作的顺利进行；

(5) 由起草单位进行了 30 余台套多联机的全工况（制冷与自热）实验、除霜实验、待机能耗实验；

(6) 通过杂志和网上发布标准《征求意见稿》，获得了 70 余条意见和建议，起草组一一核实处理；

(7) 2013 年 11 月召开了标准审查会，最终于 2013 年 12 月形成了标准报批稿。一般的标准起草流程，除了标准《草稿》、《讨论稿》外，都是“三稿定案”（《征求意见稿》、《送审稿》、《报批稿》），而这部标准是“五稿定案”（《征求意见稿》、《征求意见修改稿》、《送审讨论稿》、《送审稿》、《报批稿》）。可见，GB/T 18837-2002 标准的修订付出了起草组的多少艰苦和努力。

2、关于新标准与现行标准 GB/T 18837-2002 的主要区别在于以下几个方面：

(1) 标准的适用范围有变化。现行标准 GB/T 18837-2002 仅适用于 T1 气候类型的风冷式机组，而新标准扩大至 T1 气候类型的风冷式机组、水冷式机组以及同时制冷与制热的热回收型机组，且 T2、T3

气候类型的机组也可参考执行。

(2) 多联机的性能评价体系有变化。为保证标准体系的延续性，并与国际标准接轨，本次标准修订最大的特点是对各类多联机的评价体系进行了调整和完善，以消除现行标准中 IPLV 指标中存在的不足。新标准规定，风冷式机组采用全年性能系数 APF（针对热泵型）或制冷季节能效比 SEER（针对单冷型）取代现行标准的综合部分负荷性能系数 IPLV 对产品性能进行评价。对于水冷式多联机组，由于水源的不同，机组的评价工况也不同，但由于水源极为复杂，故本次修订时仅对制冷季节给出了 IPLV (C) 的评价指标，其制热性能仅采用名义工况性能指标进行评价。今后可根据对水冷式机组的发展和研究的深入进行补充和完善。

值得注意的是，无论是 APF（包括 SEER）体系，还是 IPLV 体系，其核心思想相同，均是希望用相同的基准来衡量不同产品的季节运行性能，是反映不同机组在对应典型气象条件、对应典型建筑负荷和对应运行作息时间条件下的运行性能优劣。当这些条件均相同时，APF 和 IPLV 体系应具有-致性。由于不同类型机组规定的上述条件和构成环节（如：是否包括能量输配系统）存在差异，故尽管采用了相同的指标体系，但其指标的数值大小也不具有可比性；对于同一台产品采用不同标准来评价时，尽管其标准体系相同，但其数值大小也有一定的差别，例如采用 GB/T 18837 报批稿规定方法获得的 APF（或 SEER）数值与日本标准 JIS B 8616- 2006、ISO 标准 ISO 15042 以及欧洲标准 SEERon/SCOPon 的数值也不一定相同，故在说明或标注产品性能指标时应给出其对应的评价标准。

(3) 增加了一种多联机的连接方式。总结多联机在实际应用中的系统连接形式，补充了一种性能测试时室内、外机的连接方式，使得测试工况更为接近实际使用情况。

(4) 增加了多联机性能测试时对室内机的组合方式和开机状态的要求和规定。在现行标准中未明确性能测试时的室内机的开启状态，而在制定多联机能效标准 GB 21454-2008 时给出了明确的开启状态，但在采用 APF（包括 SEER）体系性能指标时，其开启状态和组合方式对数值大小有直接的影响，故给出了明确的规定和要求。

(5) 增加了风冷多联式空调（热泵）机组稳态和非稳态制热性能的测试要求。风冷式机组在制热运行时往往会出现结霜、除霜运行，是一个典型的非稳态过程，为此，规定其性能测试方法是保证数据-致性的重要条件，故新标准对此进行了详细的规定。

(6) 增加了多联式空调（热泵）机组待机功率的测试要求。新标准将待机功率作为性能指标提出了要求，但只给出了提出明示值的要求，尚未给定具体的指标要求，随着技术的发展，未来有可能将待机功率限定值作为其性能评价指标之一。

(7) 增加了室内外机连接管长度对多联机性能参数影响程度的测试方法的资料性附录，为了向暖通空调工程师提供系统设计的依据，提供室内外机连接管长度对多联机性能参数影响程度的修正系数公式或表格是必要的，故新标准对管道长度修正系数的测试方法给出了具体规定。当然新标准的更新内容不仅仅包含上述内容，还有一些细节有所变化，请相关人员认真研读此后正式发布的产品标准。

四、您认为采用 APF 性能评价体系后，对我国多联机技术的发展可能存在哪些重大影响？

我认为，采用 APF 性能评价体系后，在以下几个方面将可能产生积极的影响：

(1) 高效的部件技术。进一步提高压缩机、换热器、风扇性能，提高电机的变容驱动技术性能应该是多联机技术继续努力的方向。

(2) 全面提升多联机的全工况设计与控制技术。现行标准 GB/T 18837-2002 虽然也规定了多联机制热季节 IPLV (H) 的评价方法, 但由于只需要考核制冷季节 IPLV (C), 故企业对提升 IPLV (C) 更为关注。采用 APF 性能评价体系后, 由于需要测试不同外温时的能效指标, 故企业将会把重点转移到提升全工况性能方面来, 包括系统的设计与控制两个方面。

(3) 重点研发除霜技术。由于除霜运行时的能耗将计入多联机的能耗中, 故高效的除霜技术以及无霜空调技术的研发可能进入一个重要的研究方向。

(4) 改善制冷循环, 降低多联机的非工作能耗。产品的非工作能耗主要是指待机能耗、除霜能耗、保证系统安全的必要能耗, 为了进一步降低非工作能耗, 应在控制技术和系统循环设计等方面提升技术水平。

五、请您简单介绍一下多联机的适用性问题。

这些年来我确实多联机共性问题的研究方面投入了较多的精力, 通过与行业协会和多联机企业的合作, 通过仿真和实验研究, 加深了对多联机特性的认识, 为多联机的优化设计、优化控制、性能评价和工程应用提供了一定的帮助。

我认为, 多联机首先是一种变容控制的直接蒸发式空调机, 故它是一种单元式空调机, 因此它具有单元式空调机的变工况特性; 同时多联机又是一种特殊的单元式空调机, 其不同点在于它是一种大容量、多末端、长管路的单元式空调机, 故具有特殊的运行特性。关于多联机的认识, 我认为比较明确的结论有以下几点:

(1) 多联机室内外机组之间的连接管不能过长、高差不能太大。这就是我们常说的具有“作用域”的概念, 由于多联机系统的设计与工程安装是多联机产品设计与制造的延续, 我们必须关注其作用域问题, 基于此, 我们鼓励在多联机系统设计时, 应合理布置室内外机, 使布置、安装后的系统能够尽可能减少系统性能的衰减。实际上, 多联机由于是直接蒸发式空调系统, 故不需要风冷式冷(热)水机组加风机盘管等系统那样需要水泵等输配能耗, 但压缩机的吸气管或排气管的延长, 必然带来一定的阻力损失, 为获得建筑物需要的制冷量或制热量, 故压缩机的转速一定增加, 转速增加将带来压缩机的能耗增加。可以这样认为, 当压缩机增加的电耗远小于水泵消耗的电耗时, 多联机系统相对于风冷式冷(热)水机组加风机盘管机组更为节能, 当室内外机连接管长度较短时, 其性能更为优越。

(2) 多联机具有“性能域”, 这是源于多联机具有多个末端设备所致。多联机具有与单元式空调不同的部分负荷特性, 即当外温一定时, 系统在某一负荷率时的能效比不是一个常数, 而是一个与各室内机使用状态、负荷率等因素有关的一个区域。这个结论对于产品的性能检测、多联机系统设计和合理使用具有一定的指导意义。由于多联机存在性能域特征, 故在系统设计时, 应该考虑对建筑进行合理分区, 合理布置多联机系统, 以发挥多联机优良的部分负荷特性, 减少空调用电。

(3) 单个多联机系统的容量不宜做得过大。多联机的“多联”不仅表现在多个室内机上, 由于其模块化设计, 还表现在室外机的多联上, 换言之, 一套多联机可以将多个室外机模块并联起来作为一套多联机的室外机组。多个室外机模块构建的多联机容量必然增大, 一方面, 容量增大有可能导致多联机室内外机组之间的连接管增长, 连接管过长必然导致性能衰减更大, 因此需遵循多联机的“作用域”限制; 另一方面, 多联机的室外机组采用变容量模块和定容量模块组合的较多(目前全部采用变容量模块的组合逐渐增多), 但室外机组采用逐级增减模块运行数量的方式来调节系统容量的方式较多, 故使得多联机特有的上抛物线 COP 性能带的优势削弱, 极限情况下(采用一台变容机组和多台定容机组组合), 对

导致多联机在中、高负荷率区域的能效比更接近定速机组的特性。此外，过大的系统，还会导致系统的非工作能耗增加，例如，仅开一台室内机时，必要的除霜、回油循环都会消耗更多的能量。

(4) 多联机系统的现场性能测试技术亟待发展。众多工程测试结果表明，多联机系统与在同类建筑中的其他类型的集中空调系统相比其消耗的电能都很少，系统节能原因到底是哪些环节起到了主要作用？是系统能效比高？还是多联机的分散集中控制便于实现行为节能的结果所致？目前的系统设计是否存在不足？如何改善机组和系统设计？目前，虽然世界上已有一些研究者在开展相关工作，但均未找到一种简便、快捷的第三方独立检测的方法。因此，亟待研发多联机系统的现场性能测试技术也是我们得出的结论之一。

多联机自从诞生以来仅有 30 余年的历史，但仍然是空调系统的新成员。由于多联机具有诸多的特殊优越性，故在行业中得到快速发展，并在中小型空调系统中占据了重要位置。为客观评价、正确使用多联机空调（热泵）系统，必须探明多联机的适应性问题。2006 年，受中国制冷空调工业协会的委托，我们课题组和华中科技大学陈焕新教授课题组一起经过近一年的工作，在大量的文献调研、模拟仿真和实地测量基础上，对多联机的适应性问题进行研究，撰写了《多联机空调系统适应性研究报告》（该报告已于 2007 年由中国制冷空调工业协会印刷出版），较为全面地阐述了多联机的主要特点和适用性问题，希望为多联机的合理使用和性能评价等提供参考。这个研究工作为后来的 GB/T 27941-2011《多联式空调（热泵）机组应用设计与安装要求》标准的制定和本次 GB/T 18837《多联式空调（热泵）机组》标准的修订提供了一定的基础准备。

关于多联机的适用性问题可以参见这份报告。随着多联机技术的进步和人们对多联机研究的深入，当时得出的一些定量数据可能在现在有一些变化，但是其定性的结论在现在还是具有一定的指导意义和参考价值的。