

变频控制在空调中的应用现状与发展趋势(二)

Variable Frequency Control Technology in the Application Status and Development Trend of Air Conditioning (2)

李善根

Li Shangen

三花控制器研发中心

Research and Development Center of Sanhua Controller

摘要: 介绍了空调系统中的压缩机与风机的多种变频调速方式及历史演变过程, 实现变频空调较高季节能效比, 较低噪音、振动以及较高舒适度等控制方法; 通过使用条件的分析, 对空调的变频控制技术发展进行了展望。

关键词: 季节能效比 SPWM 矢量变频控制 高舒适度

Abstract: Introduces the compressor and Fan in the air conditioning system with a variety of frequency control of motor speed and the historical evolution process, realize the high frequency conversion air conditioning season eer (ratio of the energy efficiency), low noise, vibration and high comfort control method. Through the analysis of conditions of use, frequency conversion control of air conditioning technology development trend is prospected.

Keywords: Season EER, SPWM, The vector frequency conversion control, High comfort

[中图分类号] T B657.2 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 05-0056-05

(上接 4 月刊 P53)

3 变频空调及其控制技术的发展趋势

变频空调与控制技术的发展趋势, 总的说来, 是朝着高舒适度、高效能、更智能、更方便安装、网络控制、与建筑装修更和谐等。因此, 作为变频控制器也必须逐步去满足上述要求。

3.1 实现高舒适度的控制技术趋势

早期用继电器或温控器简单控制的定频空调, 一会儿开、一会儿停, 仅提供一个不太热或不太冷的环境温度。而房间温度的较大波动不仅会造成人体不舒服, 而且其噪音时有时无也往往让人无法入睡; 包括室外机的噪音, 更是夏日和冬日的一大环境噪音污染源。

因此, 高舒适度空调的控制技术趋势, 有以下几个方面。

(1) 不让房间内温度波动的控制技术

当房间温度接近设定温度, 或室外环境温度与设定温度相差不是很大时, 空调器只需很小的制冷(热)功率就能满足设定温度和维持恒温环境。为此, 变频控制器必须能够精确采集房间温度、计算房间温度的变化率及温度变化趋势, 并不断给出和调整压缩机的运行目标频率。同时, 要求控制

器的变频调速范围大, 特别是能控制压缩机的低转速运行, 这是确保能平稳补给所需制冷(热)量维持房间温度不波动的关键。有的空调厂商打出“1Hz 变频”口号, 尽管有点夸张, 但确实是实现房间温度不波动的关键技术基础。

由图 6 所示的压缩机的转矩特性可知, 不同转角的转矩相差很大和低转速时机械惯量过小情况下, 控制器应以 180° 正弦波直流矢量变频技术为基础, 再通过合理的角转矩补偿, 使压缩机每一转角所需转矩都能得到恰如其分的补偿, 就可以让压缩机在很低转速下都能平稳地运转。通过空调上的温度传感器感知房间温度与设定温度差值、房间温度的变化率等数据, MCU 或 DSP 进行处理和实现房间的恒温控制, 从而实现房间温度几乎不变的高舒适度要求。

应该指出, 不同类型的压缩机, 有不同的电磁参数和转矩特性, 这种 180° 正弦波直流矢量控制器都是针对某一种压缩机型号量身定制的, 且转矩特性会随工况的变化而变化, 需要根据工况的变化作出不同的补偿量。因此, 不同控制技术的差异性是会直接决定变频空调性能优劣的。

(2) 房间与周围环境的低噪音控制技术

当人昏昏欲睡时，如果原本开着且均匀发出噪音的风机突然停止，就可能一下子被惊醒；当风机停止时的寂静维持了一段时间，又将进入梦乡时风机突然开启，这时又被惊醒；如此一整夜都可能睡不好觉。因此，空调噪音是生活中比较烦恼的事情，特别是晚上睡眠期间，对房间内的噪音大小和变化、房间外的噪音和变化都是十分敏感的。要实现高舒适度，就必须对空调的噪音问题进行治理。

为此，室内风机至少采用 PG 相控调速技术，如能采用 BLDC 风机会更好，关键是能实现超低速 / 静音运行。同时，也应该实现室外风机的宽调速运行技术，因为室外风机噪音同样会影响环境的舒适度。室外风机功率较大，应优选 BLDC 电机和无位置传感器的 180° 正弦波驱动控制技术。BLDC 风机的本身噪音较小，容易实现风机的低噪音，同时，BLDC 在低转速时的功耗极小。

此外，为防止直流调速时的载波频率产生电磁噪音，要求室外风机的 SPWM 载波频率高于 10kHz，室内 BLDC 风机的 PWM 调速载波频率高于 16kHz。

(3) 合适的房间湿度控制技术

当空调工作久了，房间内的相对湿度是否会大幅下降？如相对湿度过低，人们就会感到唇干舌燥，且不经意间常会被静电“电击”，同样会有一种不舒适感。对于定频空调来说，这是毫无办法的事，因为定频空调的蒸发器温度基本上是一定的，只要低于凝露温度，蒸发器上就不可避免地产生凝露水，即把房间内空气中水气毫不留情的给吸走了。

为此，必须采用变频控制技术，在对压缩机、室内外风机进行变速控制的同时，还要根据室内蒸发器温度，来适时控制与调节电子膨胀阀开度，以维持蒸发器内的蒸汽压力适中和控制露点。一般蒸汽压力较高，蒸发温度也较高，就能避免过多结露和控制房间相对湿度过低的问题。

湿度控制过程：当房间温度接近设定温度时，压缩机转速必须能够降低，室内外风机转速也能调至很低，通过控制电子膨胀阀的开度，维持蒸发器有较高温度和减少凝露，这样，房间内空气中的水汽就不会被蒸发器所吸走，不仅提高了空

调的能效，而且还保持了房间内舒适的相对湿度，从而提高了人体的舒适度。

(4) 减少人体受风的控制技术

空调房间，人们比较讨厌的是冷风直接吹在身上。夏日环境温度较高，人体感觉较热，希望能吹到一些凉风倒是舒适的；但是在室内舒适温度下，由制冷空调吹出的风往往较冷，如在睡眠时直接吹到人体感到不适，晚上睡觉时很容易感冒，冬天就更不用说了。为此，热泵型空调具有“防冷风”功能。

因此，如何不让人体感受到空调风不适，也是高舒适度空调控制技术方案所必需考虑的。

之前，高端空调系统多选用全风管式空调，其静压式送冷（热）风不仅无噪音，也没有人体感受空调风的不适。

对于全制冷剂的变频空调，目前开始流行仿风管机，使出风口紧贴天花板缓缓散落冷（热）空气外，在控制技术上就是要设计多个步进电机驱动技术，以及分别控制风门、风向。

还有，在挂壁机上，采用人体感应定位技术或许也是一种选择。通过红外线人体感应定位和控制步进电机，使空调的风门、风向不直接对准人体，这是解决人体不受风或少受风的一种方案。

当然，如上所述室内低转速送风，不仅是降噪不降湿的关键，也是提高人体少受风的最常见和实用有效的技术方案。

3.2 进一步追求高能效的控制方略

空调的能效通常由 COP 或 EER 来表示。对于变频空调，是按不同季节、不同时段进行加权后定义的季节能效比（SEER）进行恒量的。

先从空调的节能原理来介绍变频控制技术为何能实现高能效问题。表 1 是反映变频空调制冷量和能效的实验数据。

表 1 的数据表明：能效比与压缩机转速、室外环境温度密切相关。环境温度越低，压缩机转速越低，能效比就越高。图 12 的数据说明：空调的能效比（COP 或 EER）与空调的冷凝器温度和蒸发器温度密切相关，冷凝器温度越低、蒸发器温度越高，则同样压缩机转速下的制冷功率越高、能效比也越高。

表 1 某变频空调在不同环境温度下的运行数据

室外环境温度 (℃)	Comp RPM	1 小时制冷量 (BTU)	制冷功率 (W)	室外机耗电功率 (W)	室内机耗电功率 (W)	EER1(BTU/W)	EER2(W/W)
35	4500	36524	10704.09	2270	177	14.93	4.4
35	3200	26485	7761.959	1515	114	16.26	4.8
28	4500	38126	11173.59	1907	127	18.74	5.5
28	3200	27727	8125.952	1259	88	20.58	6
31	2300	20678	6060.101	925	84	20.49	6
31	1867	16426	4813.968	741	47	20.85	6.1
28	1200	11026	3231.39	465	47	21.54	6.3
20	1200	12307	3527.684	275	47	37.38	11

注：美国的制冷量的单位一般用 BTU（英热单位），1btu=0.29307W.h

COP [W/W]

Condensing Temperature (°C)	-10	-5	0	5	10	15
Evaporating Temperature (°C)						
40	2.77	3.33	4.04	4.89	5.99	7.33
50	1.99	2.38	2.85	3.40	4.07	4.88
60	1.42	1.67	1.98	2.36	2.82	3.36

图 12 COP 值与蒸发温度、冷凝温度之间的关系

(1) 如何控制和降低冷凝器温度

在固定环境温度下，要降低冷凝器温度有以下几种方法：

一是增大换热器热交换面积；二是提高空气与散热面的对流速度和风量，尽量降低与散热面接触的空气温度；三是减少进入冷凝器的制冷剂蒸汽量。

增大换热器的热交换面积是定频高效空调的法宝，但此法必然会增加空调器的成本、体积和重量，并在早几年的高效定频空调中被大量选用。

以未来的变频控制技术来说，应主要通过以下途径降低冷凝器的温度。

① 首先是减小气相制冷剂的输入量，即在满足室内温度前提下，尽量减小运行功率。

显然，为维持房间内的温度恒定，必须不断补充所需的制冷量。但所需制冷量的补给可以是多种方式：定频机是以断续开停方式补给，开启时，压缩机定频运行，其吸入和压缩的制冷剂恒定且量较大，此方式，压缩机运行时冷凝器的温度最高，即能效最低；现在，多数变频压缩机因采用最低频率限制，也会时开时停，但其较低频率下运行的时间明显大于定频机，运行功率——制冷剂的供给量已明显小于定频机；今后的趋势是 PID 精密控制电子膨胀阀技术和“1Hz 变频”技术，做到压缩机不停且始终在很低频率下运行，此时，补给制冷剂的时间最长，但在总量不变情况下运行时的制冷补给量相对最小，这样，就能实现较低冷凝器温度的目标。

② 发展和普及无位置传感器的直流 180° 正弦波矢量变频风机调速技术，并选用变转速范围大的 BLDC 风机，通过冷凝器温度传感器检测的温度、温度变化率及趋势，用精密 PID 控制方式在很宽范围内控制风量和风速，实现空气与散热面的空气对流速度与风量最优化。根据冷凝换热器实际温度，控制 BLDC 风机的最佳风量与转速区间，就能兼管风机本身耗电量与换热器能效。

(2) 如何提高蒸发器的温度

蒸发器是实现制冷剂液相进、气相出，制冷量与进入的液相制冷剂数量成正比。提高蒸发器温度的方法与冷凝器十分相似。

在制冷时，当室内温度接近设定温度时，从舒适度考虑，室内风机会以尽量低的转速送风；此时电子膨胀阀开度较小，进入蒸发器的液态制冷剂较少，蒸发器的温度也相对较高。这也是变频空调在接近设定温度时的低转速运行，能有很高能效比的主要方法。

增大换热器面积也是提高蒸发器温度的有效手段，如选用仿风管机、落地式柜机、四面出风的天花机等作为室内机，这些室内机均有较大的空间来增大换热器，并可优选离心式风叶来增大风速、减小转速和噪音，且不会直接吹至人体上。这也是今后的一大发展趋势。

值得一提的是，对于房间制冷来说，事实上有较大一部分的冷量是被冷凝水带走的。当房间中的水蒸汽由气态变化液态时会放出较大汽化热，这部分汽化热实际上是靠吸收空调蒸发器的制冷量才实现水蒸汽变液态水的，也就是说，房间中的冷凝水吃去了不少冷量。因此，提高蒸发器结露点温度不仅减小了冷凝水实现保湿，而且非常节能。

3.3 变频多联机与控制技术

多联机俗称“一拖多”，更广义地说，也可以是“二拖多”、“三拖多”等。目前，在我国城乡，墙壁上的空调挂壁机随处可见，这非常有碍景观。如何掩盖这些空调室外机，已成为诸多房产开发商的一大课题。多联机或许是最好的选择。

多联机技术上有多种实现方案，一般按传递冷媒可分为：全风管机、冷水机、全制冷剂；按结构分为：简易一拖多、模块机；模块机又可分主从控制、集中控制等类型。

多联机应具有以下的主要技术要求和控制要点。

① 压缩机需要宽范围变频，特别是能够超低频运行，这样才能满足多个房间空调的任意开启与运行。

② 多联机的室外风机也要求是宽变频，以便跟随压缩机一起升降频；直流变频的室外风机在控制上须满足逆风启动和带堵转保护。

③ 多联机的室内风机可以多种多样，以满足不同多联机。从发展趋势看，推荐 BLDC 变速离心式风叶的风管机、仿风管机（全制冷剂多联机）、四面出风的天花机与立式柜机，前面已述。

④ 多联机中制冷剂分配调节的电子膨胀阀及其控制；电子膨胀阀控制技术是高效全制冷剂多联机的核心技术之一。

⑤ 各房间温度的采集、通信传输与处理；并由此来决定室外机运行频率的控制。

⑥ 多联机的供电技术，一般为单机各自供电；要考虑多联机之间的电源隔离。

⑦ 多联机的集中控制与显示技术，能与户内的所有室外机、室内机通信和获取各种数据，并能任意设置、显示各种设定与运行数据，最好用点阵屏 / 中英文显示。

⑧ 多联机通过互联网、手机网的监控技术；如多联机的集中控制器通过 WiFi、电脑上位机等接入智能家居系统中。

3.4 超低温制热与制冷

随着空调热泵技术的不断发展，空调的制热应用也越来越普及，其高节能和高舒适度更有利于向北方普及。

(1) 超低温制热

在冬天,当室外环境温度低至 -5°C 至 -15°C 时,室内温度仍要求达到 20°C 以上。此时,空调能否有效制热,对于变频控制技术又是一个新的挑战。

一般好的变频压缩机最高转速可达1200RPM(俗称120Hz),上述超低温下要有较好的制热效果,可通过提高变频压缩机的转速来实现。这就需要变频控制器也能够实现120Hz高频运行。对于BLDC压缩机的驱动,此时会遇到这样一个问题:转速很高时,反电势也随频率提高,而DC母线电压却受到输入电源电压的限制。

如何解决这个矛盾,目前可以有以下的解决途径。

① 通过DC电机的弱磁控制,即虽然DC母线电压有限,但为了减小高转速下的DC电机反电势,可通过软件控制,相当于将DC电机的磁通量 Φ 减小,就能降低DC电机反电势,从而实现有限DC母线电压下的高转速运行。

② 采用PAM技术,通过Boost硬件升压电路,当压缩机进入高转速运行时,DC电机的反电势电压升高,此时,通过Boost硬件电路也同步增大输出DC母线电压,即可冲抵高转速下的高反电势问题,实现BLDC压缩机的高转速运行。

③ 采用二级压缩技术,详见下节介绍。

(2) 超低温制冷

在北方地区,冬天不取暖是无法生活的。因此,如壁炉等燃气、燃煤取暖是很普及的,但这些原始的取暖方法,最大不足是房间内的温度波动较大,控温效果很不理想。

为了追求高舒适度,在北美、欧洲、俄罗斯等北方的一些高端住宅,通过空调与壁炉相结合的恒温取暖方法应运而生。也就是说,房间内由壁炉等取暖器提供一个大致粗放的供热源,这种供热源的温度波动大、不易控制;房间内再配备一个可精确调节温度的空调器。

显然,这种空调调节器应能在室外环境温度超低情况下进行制热和制冷。如前所述,当户外环境温度很低时进行制热,其能效比往往较低;所以,更多的是进行制冷调温。即将壁炉等取暖器平均温度略为调高,其最低温度区间为人体舒适温度,当壁炉等取暖温度过高时,房间空调器也同时启动,并运行在制冷模式下,将壁炉提供过高的温度降下来,从而获得舒适的房间温度环境。这种超低温制冷,从前面的理论分析,可知其能效比是非常高的。

这种超低温制冷的空调变频控制技术,首先要考虑变频控制器的元器件、零部件的耐低温性,特别是半导体元器件,有很多耐温级别,必须选用低温特性好的器件;其次,室外温度很低时,压缩机中制冷剂容易积液、且与润滑油互溶,在压缩机启动时因吸气压力骤降和制冷剂沸腾,容易将压缩机内的润滑油带走,从而导致压缩机少油损伤。因此,对于

低温运行的压缩机,有一项很重要的技术,就是压缩机的曲轴箱加热技术,其目的就是防止制冷剂变液态并溶解于压缩机内的润滑油中。

压缩机曲轴箱加热技术,通常有2种方法:一是外包电加热带,通过控制器上继电器的吸合让加热带通电发热;二是在压缩机定子绕组中流过电流,通过定子绕组的电阻发热,因为压缩机定子绕组的直流电阻值很小(1Ω 左右),控制器需要输出很大的电流才能产生几10W的加热功率,因此,PWM恒电流控制和调节技术是定子加热关键点。

同时,要考虑到压缩机的漆包线直流电阻随温度而变化,温度越高铜电阻越大,如果简单的输出一个恒定电流,则压缩机温升会随着温度升高而加快。

3.5 太阳能变频空调控制技术

太阳能空调有几种方案,下面按供电条件分别给予叙述。

(1) 光伏逆变并网方案

该方案直接用普通空调器就可以了,其技术完全在于逆变并网环节。其优点,是目前分散式光伏逆变并网已形成了量产,且可以与电网交互供电或同时供电。

(2) 独立太阳能供电方案(1)

仍有电网供电,但距变电站很远,输电线较细而且很长的场合。如无线通信接力基站、高速公路收费站、铁路道叉、电视发射塔、地质勘探、流动牧场、渔船等距离城区较远或自带小型发电机等场合。

适用于此类场合的太阳能全直流变频空调控制器的结构框图,如图13所示。此类弱供电地区的电网或自发电,只能承受较小功率的用电器和仪器用电,但承受不了空调类大功率的电器。因此,通过光伏板和蓄电池的组合供电系统,实现太阳能变频空调的供电。即白天阳光充足时往往气温也高,此时光伏板的供电不仅能满足空调的全功率运行,还可有富余的电能供蓄电池充电。到了夜晚或阴雨天,相对气温较低但仍闷热难耐,此时就利用蓄电池供电,但为省电,空调会限功率运行。同时,弱供电系统也可以较小功率连续为蓄电池充电。

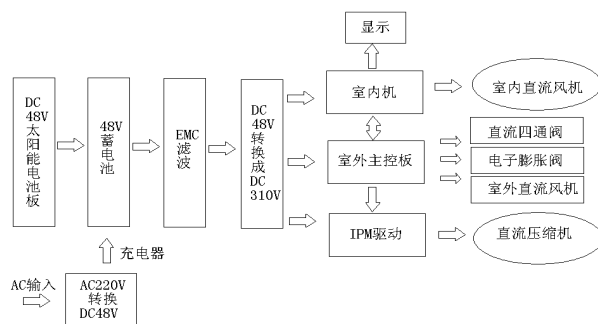


图13 弱电网地区的太阳能全直流变频空调控制器框图

最后需指出的是,太阳能全直流变频空调必须全部选用

BLDC 压缩机、BLDC 室内外风机电机、DC 四通阀和电子膨胀阀等，空调系统也应按高能效要求配置，控制器等均需按太阳能电源的特点进行设计。

(3) 独立太阳能供电方案(2)

完全没有电网但有很大蓄电池容量的场合，如汽车、船舶等时常移动的场合，邮电通信系统中基础电源为 DC27V—DC48V 等。

技术方案与图 13 同，仅去除左下的 AC220V 充电器部分，其中光伏板和蓄电池的电压一般在 DC24V-DC60。

对于完全没有电网地区，一般需要较大容量的蓄电池和电池管理系统。当白天阳光充足时给蓄电池充电，或同时启动全变频空调；当阳光不足或夜晚就用蓄电池供电。

3.6 遥测遥控与智能楼宇控制技术

随着智能楼宇与 4G 通信、互联网技术的发展，各种家电纳入智能楼宇集控系统，或通过手机等 4G 网络对空调系统进行遥测、遥控，也有越来越多的研究与应用成果出现。

变频空调系统纳入智能家居系统可考虑 2 种方式：

① 变频空调控制器中，本来就有很多通信接口，至少具有室内、室外机之间的通信。因此，只要增加一个如 485 或

232 这类标准通信接口与上位电脑或手机实现通信连接，就可以通过 4G 或互联网网络进行遥测、遥控等功能；或者与楼宇智能系统通信，成为智能家居中系统的一个终端。

② 如上面所述的多联机或单机配备集中控制器，由集中控制器联接入智能楼宇系统。

4 结论

目前，在空调上应用的变频控制技术已普遍进入到直流 180° 正弦波驱动和转矩补偿时代，特别是“1Hz 压缩机变频技术”和直流风机的大规模推广应用，更引领人们进入到变频空调的高舒适度、高能效时代。宽范围直流变频压缩技术和电子膨胀阀控制技术，也带动了多联式空调系统的飞速发展；高能效全直流变频空调，更有利于缺电或流动性场合推广太阳能空调；与智能楼宇技术的结合也将成为一种趋势。

作者简介

李善根(1949-)，男，浙江宁波人，高级工程师，杭州先途电子公司/三花控制器研发中心 首席工程师，研究方向：变频空调控制器技术。

(上接第 49 页)

传感器的常规太阳跟踪器的成本。高效 DC-DC 变换器设计，具有较大的电压增益，良好的交流功率控制质量以及最大的阳光辐照度。虽然研发的高性能 PV 发电系统属于独立(离网)应用，但它能进一步并入最大功率点跟踪(MPPT)，并改进电压型 PWM 逆变器控制为电流型的，已形成联网的发电系统。

参考文献

- [1] Rong-Jong Wai, Wen-Hung Wang and Chung-You Lin, High-Performance Stand-Alone Photovoltaic Generation System. IEEE. TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 1, 2008. 240-249
- [2] 郭忠文, 太阳能光伏发电自动跟踪系统, “太阳能” 2008, NO. 6, 36-37
- [3] 冯焱生 主编, 太阳能发电原理与应用, 北京: 人民邮电出版社, 2007
- [4] 沈辉, 曾祖勤等, 太阳能光伏发电技术, 北京: 化学工业出版社, 2005

原文作者与出处

Rong-Jong Wai, Wen-Hung Wang and Chung-You Lin. “High-performance Stand-alone Photovoltaic

Generation System”, IEEE. TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 1, 2008. 240-249

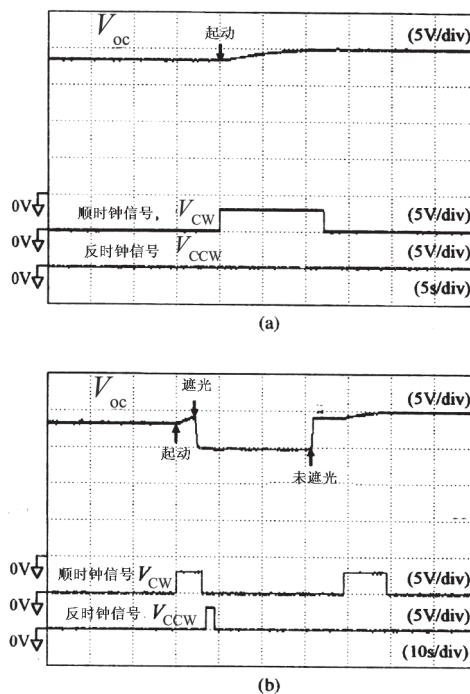


图 12 高性能独立光伏发电系统的试验结果：
(a) 正常情况下；(b) 遮光情况下