

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.020

并网逆变器的相序自适应控制研究*

贾宇虹, 贺超, 陈国柱*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为解决传统变流器装置接入电网前需要检测电网三相相序的繁琐问题,将相序自适应控制方法应用到变流器的控制中。考虑到准确获得三相交流电的相位信息是逆变器安全可靠工作的前提条件,若装置接入电网时相序不正确,将会影响其正常工作;分析了三相数字锁相环的基本原理,在总结正序和负序情况下同步旋转变换结果的基础上,得到了相序和同步旋转变换的关系;提出了相序检测方法,并设计了相序自适应的控制算法,利用DSP TMS320F2812编程,实现了逆变器的相序自适应并网控制策略;Matlab/Simulink仿真结果证明,三相相序正确,系统运行稳定;将其应用于小型风力发电背靠背变流器装置中,得到的实验结果与仿真结果基本一致。研究及应用结果表明,所提方法简单可行、经济方便,具有较大的工程应用价值。

关键词: 并网逆变器; 相序自适应; 锁相环; 同步旋转变换

中图分类号: TM464 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1531-05

Phase sequence adaptive control research of grid-connected inverter

JIA Yu-hong, HE Chao, CHEN Guo-zhu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the troublesome problem that traditional converter devices need to inspect the three-phase sequence of the electricity grid before they connect to it, the phase sequence adaptive control method was applied to the control of the converter. If phase sequence is not correct when a device is connected to the electricity grid, the normal work of it will be influenced, considering the prerequisite of safe and reliable work of inverters is accurately acquiring the phase information. After the analysis of the fundamental principle of three-phase digital phase-locked loop, the relationship between phase sequence and synchronous rotation transformation was obtained, on the basis of summarizing the results of synchronous rotation transformation when the phase sequence was positive and negative respectively. Then the detection method of three-phase sequence was put forward, and the phase sequence adaptive control algorithm was designed. By making use of DSP TMS320F2812 program, the phase sequence adaptive control strategy of the inverter was obtained. Simulation results of Matlab/Simulink prove that the phase sequence is correct and the system runs stably. The strategy was applied to a small wind power back-to-back converter. The experimental results are accordant with that of simulation. They show that the proposed method is simple and feasible, economic and convenient, which has great value in engineering application.

Key words: grid-connected inverter; adaptive three-phase sequence; phase-locked loop; synchronous rotation transformation

0 引 言

并网逆变器作为可再生能源与电网的接口设备,将可再生能源转化的电能高效可靠地输送至电网,应

具有优良的性能。一般安装调试时工作人员首先要检测电网侧三相相序,以准确获取三相交流电的相位信息。相序是三相交流电相位信息的重要组成。通常逆变器的控制是在电网电压为正序的前提下设计的,若网侧接线错误或电网相序发生变化,控制系统

收稿日期: 2013-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177147);浙江省重点科技创新团队资助项目(2010R50021)

作者简介: 贾宇虹(1988-),女,河北正定人,主要从事电力电子技术方面的研究。E-mail: yuhong0418@163.com

通信联系人: 陈国柱,男,博士,教授,博士生导师。E-mail: gzchen@zju.edu.cn

将得不到正确的相位信息,控制环节发生错误,装置不能正常工作。常规的做法是利用相序检测仪测量相序,验证相序为正序后,再令其投入工作。这不仅增加了经济成本,而且过程繁琐,容易出错^[1]。

针对以上问题,研究人员对相序自适应进行了探讨。通常采用三相电压过零检测方法,利用单片机实现电源相序检测,其电路简单,但抗干扰能力有待证实^[2-3]。实际工程中可能存在畸变的电压和电流,通过设计基波提取电路可以消除谐波干扰,得到稳定的方波信号,但电路较复杂^[4]。受单片机本身数据处理能力的限制,研究人员采用ARM嵌入式系统实现三相交流电的相序检测,可连续监控相电输入状态,但无法获得精确的相位信息^[5]。如采用滞环方法,需要检测任意一相电压过零点时的变化趋势和其他两相的正负,过程复杂,抗干扰能力有待考验,而且不利于控制器的统一化设计^[6]。

由于上述相序检测方法存在弊端,结合并网逆变器装置的应用需要,本研究提出一种并网逆变器的相序自适应控制方法,在装置主功率单元投入运行之前,数字控制器利用基于同步旋转变换的数字锁相环快速、可靠地检测三相交流电相序,自动调整锁相和控制算法与相序相对应,避免因三相接线错误而导致装置无法正常运行。相序自适应控制仅依靠软件实现,无需增加任何硬件,经济方便。

1 相序检测

基于同步旋转坐标变换的锁相环由软件实现,基本原理图如图1所示。采用锁相环的相位输出 $\hat{\theta}$,把由采样调理电路得到的三相电压 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 经过同步旋转坐标变换得到 dq 坐标系下的无功分量 u_d 、有功分量 u_q , u_d 与给定值0相减后的误差信号作为比例积分(PI)调节器的输入,输出 ω 作为锁定角频率的误差信号,与频率参考值 ω_0 相加后得到 $\hat{\omega}$,经过积分器作用生成相位信号 $\hat{\theta}$ ^[7-8]。

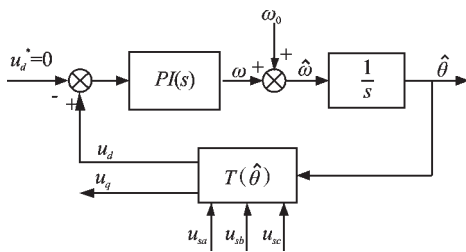


图1 三相锁相环的基本原理图

三相交流电有正、负序两种连接方式,在 abc 坐标系下,表示为:

$$u_{sabc} = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0) \\ \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0 \mp 2\pi/3) \\ \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0 \pm 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: V_m —电网相电压有效值, ω_0 —基波角频率, θ_0 —初始相位角。

为了简化控制系统的设计,通常进行同步旋转坐标变换,将三相静止坐标系中的正弦变量转化成两相同步旋转坐标系中的直流变量^[9]。

经过Clarke变换,在 $\alpha\beta$ 坐标系下正负序相量分别表示如下:

$$u_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0) \\ -\cos(\omega_0 \cdot t + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$u'_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} u'_{\alpha} \\ u'_{\beta} \end{bmatrix} = T'_{\alpha\beta} \cdot \begin{bmatrix} u'_{sa} \\ u'_{sb} \\ u'_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0) \\ \cos(\omega_0 \cdot t + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $T_{\alpha\beta}$ —Clarke变换矩阵。

$$\text{且: } T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}。$$

设 dq 旋转坐标系与 A 相电网电压同步,即 $\hat{\theta} = \omega_0 \cdot t + \theta_0$,将 $\alpha\beta$ 坐标系下的正、负序矢量分别进行正序同步旋转坐标变换,得到:

$$u_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = T(\hat{\theta}) \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0 - \hat{\theta}) \\ -\cos(\omega_0 \cdot t + \theta_0 - \hat{\theta}) \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$u'_{dq} = \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} = T'(\hat{\theta}) \cdot \begin{bmatrix} u'_{\alpha} \\ u'_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0 + \hat{\theta}) \\ \cos(\omega_0 \cdot t + \theta_0 + \hat{\theta}) \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(2\omega_0 \cdot t) \\ \cos(2\omega_0 \cdot t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $T(\hat{\theta})$ —正序Park变换矩阵。

$$\text{且: } T(\hat{\theta}) = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ -\sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix}。$$

同理,将 $\alpha\beta$ 坐标系下的正、负序矢量分别进行负序同步旋转坐标变换,得到:

$$u_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = T'(\hat{\theta}) \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0 + \hat{\theta}) \\ -\cos(\omega_0 \cdot t + \theta_0 + \hat{\theta}) \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(2\omega_0 \cdot t) \\ -\cos(2\omega_0 \cdot t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$u_{dq}' = \begin{bmatrix} u_d' \\ u_q' \end{bmatrix} = T'(\hat{\theta}) \cdot \begin{bmatrix} u_{\alpha'} \\ u_{\beta'} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 \cdot t + \theta_0 - \hat{\theta}) \\ \cos(\omega_0 \cdot t + \theta_0 - \hat{\theta}) \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $T'(\hat{\theta})$ —负序 Park 变换矩阵。

$$\text{且: } T'(\hat{\theta}) = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & -\sin \hat{\theta} \\ \sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix}.$$

由式(4~7)的变换结果可得,只有当三相交流电正负序与同步旋转变换正负序一致时,才能得到恒定的 dq 轴分量,其中 d 轴分量恒为0。若三相交流电相序与同步旋转变换顺序不一致, dq 轴分量是二倍电网频率的交流量,不是恒定值。

因此,总结得出三相相序的检测方法:当采用正序同步旋转变换时,稳定时,若得到的有功 q 轴分量恒为负值,则判定三相相序为正序;当采用负序同步旋转变换时,稳定时,若得到的有功 q 轴分量恒为正值,则判定三相相序为负序。相序发生错误时, dq 轴分量是二倍电网频率的交流量,因此,锁相环与电网同步时,理论上检测延时不超过半个工频周期,快速实现相序检测。

同时得到实现三相相序自适应的锁相环,首先假定三相交流电为正序,采用正序同步旋转变换,检测有功 q 轴分量,若为正值,则判定三相交流电为负序,采用负序同步旋转变换,检测有功 q 轴分量,若为负值,则判定三相交流电为正序,采用正序变换。

2 控制策略

并网逆变器的控制通常采用电流内环和电压外环相结合的方式,电压环通过电流环起作用,进而达到稳定直流侧电压的目的^[10]。电压环和电流环之间如何衔接取决于基波有功电流进行同步旋转变换之后的物理意义。本研究分别对正、负序下基波有功电流进行相应的同步旋转变换,得到结果如下:

$$i_{dq0} = T_{abcldq0} \cdot i_{abc} = \sqrt{2}I_m \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$i'_{dq0} = T'_{abcldq0} \cdot i'_{abc} = \sqrt{2}I_m \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $T_{abcldq0}$, $T'_{abcldq0}$ — abc 坐标系到 $dq0$ 坐标系的正序、负序变换式; i_{abc} , i'_{abc} —正序电流、负序电流; I_m —电流有效值。

故 Q 轴对应有功轴,相序为正序时, Q 轴为负代表输出有功功率;相序为负序时, Q 轴为正代表输出

有功功率。锁相环完成相序检测后,根据判断的相序,调整有功功率的控制。

实现逆变器相序自适应运行的控制框图如图2所示。直流侧电压给定值 U_{dref} 与电压传感器测得的 U_{dc} 相减得到的误差送入电压环PI控制器,输出乘以相序标志 SIGN 作为有功电流给定值 I_{qref} 。当相序为正序时, SIGN=1;相序为负序时, SIGN=-1。电流给定值与由电流传感器测得的三相电网电流经坐标变换后得到的 I_d 、 I_q 相减得到的误差送入电流环PI控制器,输出得到调制信号电压 U_d 、 U_q 。

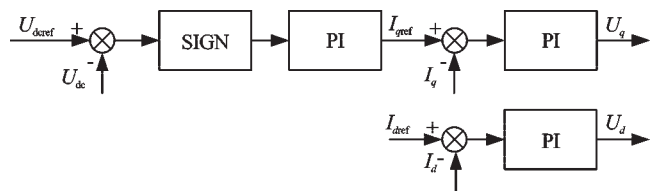


图2 并网逆变器的相序自适应控制框图

3 仿真及实验验证

以三相 LCL 滤波并网逆变器为例,逆变器采用三相全桥结构,经 LCL 滤波连接至公用电网。本研究在装置中进行锁相环测试实验,控制器采用 DSP TMS320F2812,编程实现锁相环的相序检测与调整,流程图如图3所示。

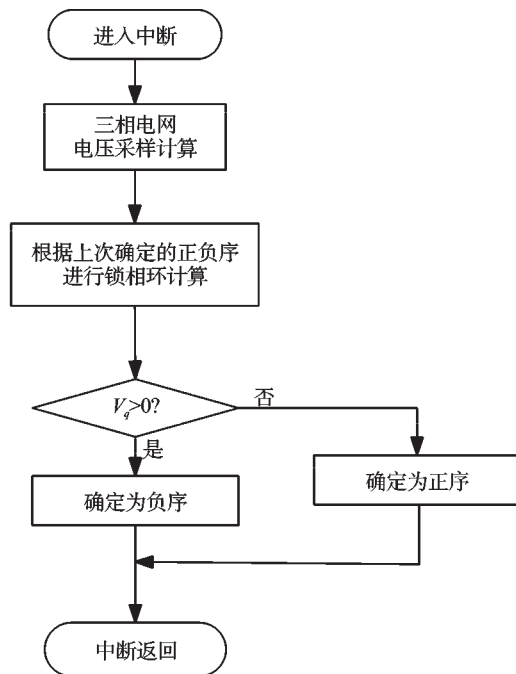


图3 软件流程图

正序交流电突变为负序交流电的波形如图4(a)所示,负序交流电突变为正序交流电的波形如图4(b)所示。图4中相序为正序时,锁相相位与 A 相交流电

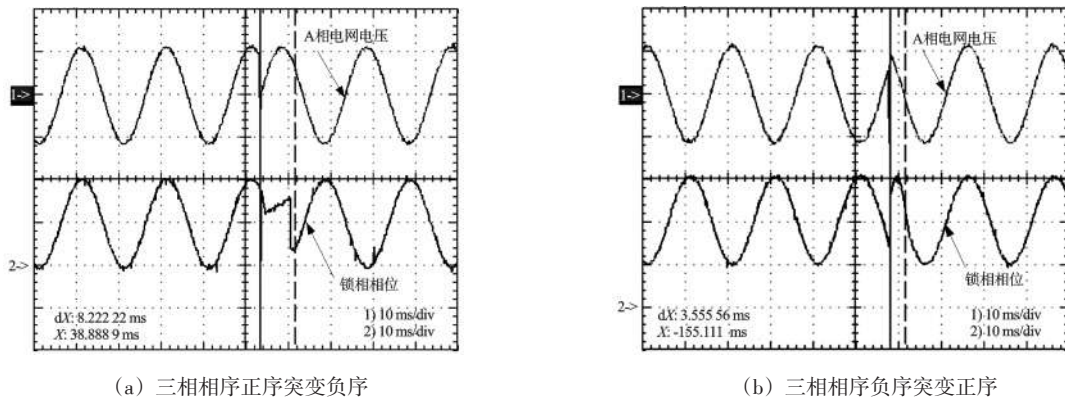


图4 相序突变波形

一致,负序时相反,即相差180°。dx表示相位调整时间,分别在8ms和3ms左右完成相序调整,均在半个工频周期内。

利用Matlab/Simulink搭建背靠背变流器系统仿真模型进行电网电压分别为正序和负序时的验证。主要参数为:电网电压690V,频率50Hz,滤波电感 $L_1=300\mu\text{H}$, $L_2=180\mu\text{H}$,滤波电容 $C=190\mu\text{F}$,阻尼电阻 0.1Ω ,直流侧电压给定值1100V。

正序和负序时的三相电网电流仿真波形如图5(a)、5(b)所示,可看出电网正、负序时电流对称,相序正确,逆变器稳定运行。电网正序和负序时的直流侧电压波形如图5(c)所示,可看出直流侧电压稳定在1100V。

本研究在一组风电背靠背变流器平台上进行实验验证,主要参数与仿真相同。正序和负序时的三相电网电流波形如图6(a)、6(b)所示,和仿真波形基本一致,说明逆变器实现了三相相序自适应控制,系统运行正常。

4 结束语

针对并网逆变器装置由于接入电网时相序错误导致其不能正常工作的问题,本研究提出了相序检测方法和相序自适应控制算法,仅需要通过DSP TMS320F2812编程,即可实现并网逆变器的相序自适

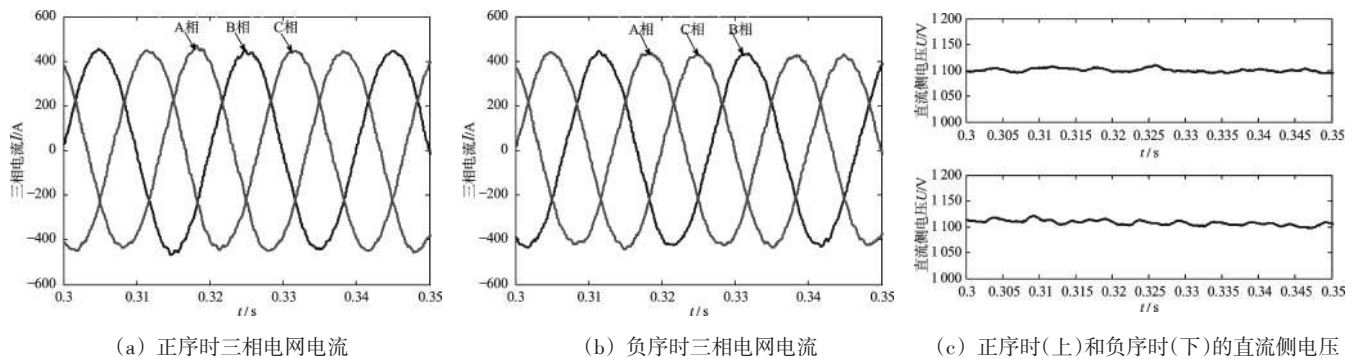


图5 仿真波形

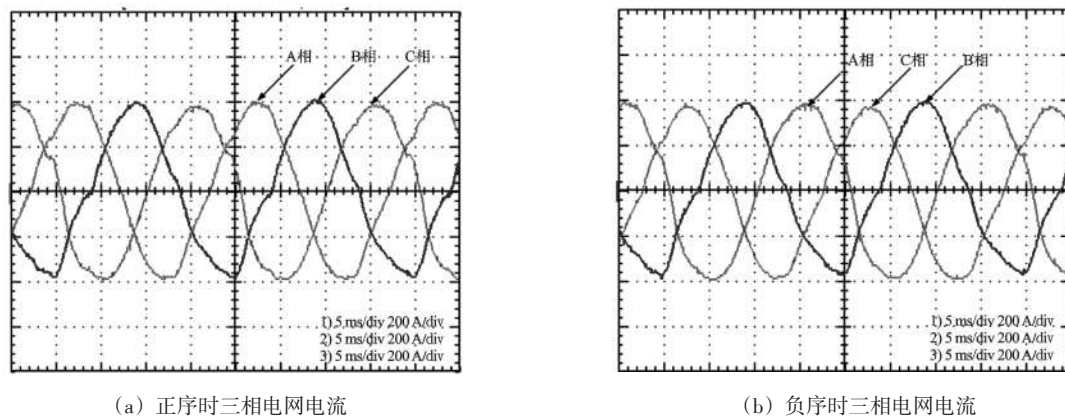


图6 实验波形

应控制。笔者将该控制策略应用于小型风力发电背靠背变流器装置,实验结果和系统仿真结果一致,表明相序可得到快速、准确地检测,简单可靠,并网系统运行稳定,实现了三相相序自适应控制。控制方案中无需增加任何硬件,经济方便,抗干扰能力强。

总体来说,相序自适应控制具有突出优点,其工程应用前景广阔。对于如何实现并网逆变器在线适应相序的改变且能够平稳运行,需要进一步进行研究。

参考文献(References):

- [1] 刘晓成,郁正德,邱火旺,等. PWM整流器中相序调整的新方法[J]. 电力电子技术,2010,44(11):50-51,86.
 [2] 盛占石,何婷婷,曾 丰,等. 三相电源过零检测及相序自适应新方法[J]. 现代科学仪器,2012,6(3):79-82.
 [3] 蔡茗名,刘锦高,刘中元. 三相交流电相位检测系统的设

计与研究[J]. 信息技术,2011(7):77-80.

- [4] 郭 鑫,袁海文. 独立电源系统有源滤波器相序判定的工程实现技术[J]. 低压电器,2010(12):40-44.
 [5] 杜通波,李 青,李 雄,等. 嵌入式相电检测及相序调整系统设计[J]. 中国计量学院学报,2012,23(2):110-114.
 [6] 洪小圆,吕征宇. 基于同步参考坐标系的三相数字锁相环[J]. 电工技术学报,2012,27(11):203-210.
 [7] LICCARDO F, MARINO P, RAIMONDO G. Robust and fast three-phase PLL tracking system[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2011, 58(1):221-231.
 [8] 龚锦霞,解 大,张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能[J]. 电工技术学报,2009,24(10):94-99,121.
 [9] 张 兴,张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
 [10] 赵梅花,阮 毅,杨 勇. 直驱式风力发电系统并网逆变器控制策略研究[J]. 电力电子技术,2010,44(5):4-5,19.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

贾宇虹,贺 超,陈国柱. 并网逆变器的相序自适应控制研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1531-1535.

JIA Yu-hong, HE Chao, CHEN Guo-zhu. Phase sequence adaptive control research of grid-connected inverter[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(12): 1531-1535.
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1530页)

5 结束语

毛细管平面辐射空调系统满足人们舒适的要求已经得到了理论和实验的验证,它是迄今世界最为先进的建筑节能技术,通过毛细管和重力循环系统配合低品质能源的建筑节能系统,可使室内温度场和速度场均匀、舒适,达到“安静制冷”、“绿色节能”。本研究提出的控制系统方案不仅满足舒适性、节能性和实用性的要求,而且控制灵活。

当室内或者室外环境发生变化时,该控制系统能够作出预期反应,在最短的时间内作出相应的控制,使其更加满足人们对室内环境自调节的需要。

参考文献(References):

- [1] 苏 夺,陆琼文. 辐射空调方式及其发展方向[J]. 制冷空调与电力机械,2003,22(5):26-30.
 [2] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
 [3] 陈 启,马一太. 辐射顶板空调系统的优势[J]. 节能技

术;2005,23(1):40-43.

- [4] 刘学来,薛红香,李永安,等. 毛细管平面辐射空调房间内温度研究[J]. 煤气与热力,2010,30(3):24-29.
 [5] 郑 松,宣永梅,王海亮. 辐射供冷系统结露问题的研究现状[J]. 制冷与空调(四川),2012(4):399-404.
 [6] 马玉奇,刘学来,李永安,等. 冷却顶板结露问题分析[J]. 山东建筑大学学报,2007,22(6):537-540.
 [7] LIM J H, YEO M S, KIM K W. A Study on the Application of Radiant Floor Cooling System Integrated with the Dehumidification System [C]//Eight International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands: [s.n.], 2003: 729-731.
 [8] 刘栓强,刘晓华,江 亿. 温湿度独立控制空调系统中独立新风系统的研究(1):湿负荷计算[J]. 暖通空调,2010,40(1):80-84.
 [9] RYU S R, LIM J H, YEO M S, et al. A study on the control methods for the radiant floor heating and cooling system in residential building[J]. **ASHRAE Transactions**, 2004, 47(3):106-116.
 [10] 刘晓华,江 亿. 温湿度独立控制空调系统[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.

[编辑:李 辉]