

# 光伏发电在电动阀门中的应用

曹太强<sup>1</sup>, 许建平<sup>1</sup>, 徐顺刚<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院 成都 610031; 2. 重庆师范大学物理学与信息技术学院 重庆 沙坪坝区 400047)

**【摘要】**为了克服电动阀门在沙漠和其他地区供电难的问题,提出了用光伏电池为蓄电池充电,用蓄电池的电能为电动阀门控制系统供电,并用DSP实现全数字软件锁相环(DSPPLL)控制直流电机可逆调速的脉冲宽度调节(PWM)。试验证明光伏电池能满足电动阀门的开、关所需要的电能,该方法不仅能实现整个系统的功能,而且其性能稳定可靠,减少系统的谐波和纹波成分,使整个控制系统能实时地遥控、数据采集和传输、液晶显示电机转矩,使直流电机稳速高精度控制阀门的流量。

**关键词** 全数字软件锁相环; DC-DC变换器; 数字压控振荡器; 电脉冲宽度调节; 太阳能发电  
**中图分类号** TM914 **文献标识码** A

## Photovoltaic Generation and Its Applications in Electrical Valve

CAO Tai-qiang<sup>1</sup>, XU Jian-ping<sup>1</sup>, and XU Shun-gang<sup>1,2</sup>

(1. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031;

2. College of Physics and Information Technology, Chongqing Normal University Shapingba Chongqing 400047)

**Abstract** In order to address the issue of power supply for electrical valve in the deserts and other circumstances, a novel method of electrical valve power supply by accumulator is presented, which is charged by photovoltaic cell. The controlling circuits of digital software phase-locked loop (DSPPLL) using digital signal process (DSP) is constructed, which is driven by the pulse-width modulation (PWM) controlled by DC motor. The experiments prove that the photovoltaic cell can provide enough energy to turn on or shut down the electrical valve. The control method not only realizes the functions of the whole system, but also runs more precisely and reliable. In addition, this method greatly decreases the harmonics and ripples of power supply systems, making the entire system realize online remote control, data acquisition and transmission, and display the torque of electrical machine on LCD precisely. At the same time, the DC motor is able to control the flow magnitude of electrical valve more precisely and steadily.

**Key words** all digital software phase-locked loop; DC/DC inverter; digital voltage-control oscillator; pulse width modulation; solar energy generation

电动阀门是一种不需要连续供电,但在工作时需要非常高的转动控制精度的执行机构,近年来在石油、化工、水处理等领域得到了广泛应用。为了克服电动阀门在沙漠等野外地区供电难的问题,针对电动阀门的工作环境和特点,本文研究了利用光伏电池对蓄电池进行充电,由DSP处理器对电动阀门控制,从而精确控制电动阀门的开度,以达到控制管道中气体或液体流量的目的。由于电动阀门是非连续工作的执行机构,其驱动和控制系统功率一般在几百瓦左右。因此,在设计时可以采用小功率的光伏电池向蓄电池充电,在电动阀门工作时由蓄电池提供电机和控制系统所需的能量。为此,

本文设计了一套智能非侵入式外部遥感设定控制型电动阀门执行机构。

由于对电动阀门的功能、性能、稳定性和可靠性要求相当高,目前国内用的电动阀门大部分都是依靠进口,并且价格相当昂贵,因此对电动阀门进行研究具有重要的实际意义。本文将重点研究直流电机执行机构控制系统的设计和实现。

### 1 直流电机PLL控制系统原理

传统的模拟式电机速度控制系统一般采用测速发电机作为速度传感器,测速发电机输出斜率受环境条件的影响很大。为了提高控制系统的速度稳定

性和精确性, 本文采用光电编码器输出的数字信号作为电机的角速度, 并与设定角速度比较得到光电编码器输出的数字信号的相位差。本文还提出了基于DSP的数字软件锁相环控制方案<sup>[1-2]</sup>, 以软件实现锁相环的功能, 实时调节输出PWM开关脉冲的占空比, 精确、快速地调节电机转速。

直流电机调速双闭环控制框图如图1所示。图1中可以看出, 光伏电池对蓄电池进行充电, 蓄电池为电动执行机构提供工作时需要的电源。数字软件锁相环实现输出信号实时跟踪输入信号相位的闭环控制系统<sup>[3]</sup>, 数字软件锁相环应用范围十分广泛(从最初的无线通讯到现在的电力电子与电力传动控制系统<sup>[4]</sup>)。本文将数字软件锁相环控制思想引入到电机的速度控制系统中, 实现瞬态的快速响应, 以及稳态的高精度转速控制。

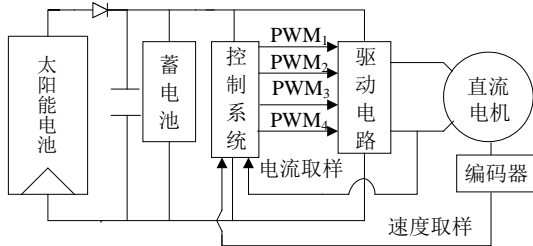


图1 直流电机调速双闭环控制框图

模拟锁相环(PLL)是一个相位误差反馈闭环控制系统, 用鉴相器(PD)检测并运算和处理输入信号 $\theta_1(t)$ 和压控振荡器(VCO)的反馈信号 $\theta_2(t)$ 之间的相位差, 得到误差信号 $U_d(t)$ , 如图2所示。

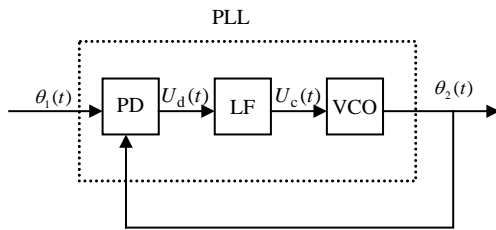


图2 锁相环原理

数字锁相环除具有数字电路的优点外, 还可用于解决模拟锁相环存在的直流零点漂移、部件饱和等问题, 以及进行初始校准。数字锁相环的误差控制信号是离散的数字信号而不是模拟信号, 因此数字锁相环中受控信号输出相位的改变是离散的而不是连续的。

用DSP控制的光伏发电电动阀门由太阳能电池及其蓄电池充电系统、直流电机和光电编码器组成的数字压控振荡器(DCO)、双极性PWM直流可逆驱动电路、DSP处理器4部分组成, 其内部结构如图3

所示。图中, DSP实现锁相环的数字鉴相、滤波、PI控制等。

### 1.1 数字压控振荡器原理及数学模型

以DSP处理器为核心的直流电机锁相速度控制系统如图3所示, 直流电机的速度检测传感器采用数字式光电编码器, 在激励电压 $U_c$ 的作用下, 光电编码器输出的数字脉冲序列正比于电机的角速度:

$$\omega(t) = k_m U_c \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_m}\right) \right] \quad (1)$$

式中  $K_m$ 为比例增益;  $T_m$ 为电机机械常数。

将式(1)进行Laplace变换, 可得:

$$\Omega(s) = U_c(s) \frac{K_m}{1 + sT_m} \quad (2)$$

电机转轴的相位 $\theta_2(s)$ 是角速度的时间积分, 若光电编码器的码盘有 $K_2$ 个齿, 则光电耦合器产生信号的相位为 $\Omega$ 的 $K_2$ 倍, 即:

$$\theta_2(s) = U_c(s) \frac{K_m K_2}{s(1 + sT_m)} \quad (3)$$

因此电机和光电编码器组合的传递函数为:

$$H_m(s) = \frac{\theta_2(s)}{U_c(s)} = \frac{K_m K_2}{s(1 + sT_m)} \quad (4)$$

以上分析说明电机转速的角位移是电机激励电压的函数, 电机和光电编码器组合后成为一个二阶系统, 如果考虑锁相环的DLF(数字环路滤波器), 则整个控制成为一个三阶系统。为了保证系统的稳定, DLF必须具有零点(即相位超前校正功能), 否则在较高频率时, 闭环传递函数的相位可能超过 $180^\circ$ , 导致系统不稳定<sup>[5]</sup>。

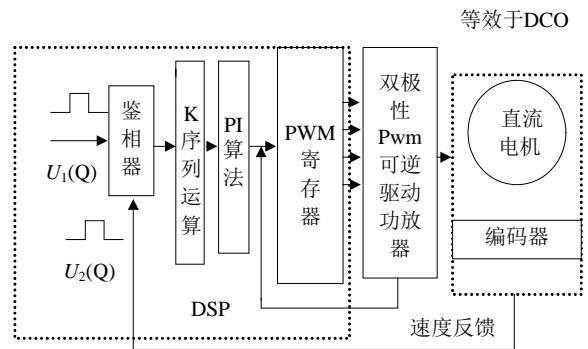


图3 DSP软件锁相环直流电机控制系统

### 1.2 DSPLL实现PWM比例积分控制原理

在DSP处理器中, 全数字软件锁相环由数字鉴相(DPD)、数字序列滤波算法和PI运算三个主要部分构成, 如图4所示。

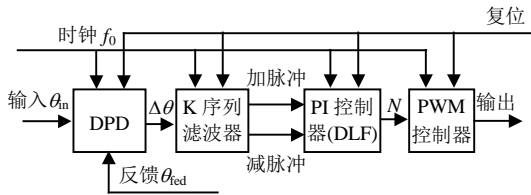


图4 PWM比例积分控制全数字锁相环原理

数字鉴相的种类很多,很多文献采用同步JK鉴相方法。该方法结构简单、逻辑功能强,能够满足一般的工程要求,但是其逻辑功能只有在控制信号为“1”期间保持输入信号和反馈信号均不发生变化时才正确。假如输入信号在时间 $\Delta t$ 之内有一个干扰正脉冲,触发器所处的状态就不能反映输入信息,这是因为输入信号为“0”、反馈信号为“1”时鉴相应处于“0”状态。

维持阻塞D鉴相能保证时钟信号为“1”的持续期内鉴相状态不变,因此具有较强的抗干扰能力。在DSP处理器中,DPD对给定信号和编码器的速度反馈信号的相位进行比较,输出高低电平脉冲序列,DPD依据输入信号 $\theta_m$ 和反馈信号 $\theta_{fed}$ 的上升沿进行判断,产生两个相位误差up和down。

鉴相时输出的是高低脉冲,需要采用数字序列滤波平滑其中的起伏,并消除噪声和干扰脉冲的影响。一般的数字序列滤波器(数字环路滤波器)有4种,本文采用“N先于M”序列滤波器<sup>[6-7]</sup>。“N先于M”滤波的工作原理是鉴相输出的超前、滞后脉冲分别储存在两个寄存器“N”中,它们的和储存在寄存器“M”中。当3个寄存器都清“0”时,随着二元的序列脉冲不断输入,寄存器不断地记数,直到满足以下情况为止:

(1) 其中一个“N寄存器”在“M寄存器”存满以前或存满的同时就存满数了,输出一个加脉冲或减脉冲,3个寄存器都清“0”;

(2) 如果“M寄存器”先于任何一个“N寄存器”存满,3个寄存器都清“0”,不输出脉冲。

PI控制作为锁相环的DLF,与模拟环中的环路滤波器一样,都对噪声和低频分量起抑制作用,控制环路相位校正的速度和精度,对锁相环的动、静态性能起决定性作用。PI控制器取代了传统锁相环中的环路滤波,它由DPD鉴相的相位误差乘上一定的比例系数得到一个比例参数 $K_p$ ;同时对相位误差的大小进行积分,并通过积分系数的调节得到一个积分控制参数 $K_i$ ;将 $K_p$ 和 $K_i$ 相加得到的PWM的控制参数 $N$ (即PI控制器在反馈信号的上升沿在对一个相位误差脉冲内由K计数器产生的加减脉冲)进行计

数、综合并进行比例积分调节、计算值输出、寄存器清零等动作,并开始新的一个控制周期,将产生的计算结果送给PWM寄存器产生PWM信号控制开关管的触发信号。在控制过程中,采样周期与反馈脉冲周期是同步的<sup>[8-9]</sup>。

## 2 双极性PWM直流可逆调速电路

最基本的调速系统由全桥式变换电路、直流电动机、PWM驱动电路组成,如图5所示。当电机正转时,开关管 $T_1$ 与 $T_3$ 导通;反转时,开关管 $T_2$ 和 $T_4$ 导通,其电流方向如图中虚线所示。由于电机是感性负载,因此,当 $T$ 开关管关断时,电机电流将继续沿原来的方向流过,此时电流流向为 $D_3 \rightarrow \text{MOTOR} \rightarrow D_1$ 或 $D_4 \rightarrow \text{MOTOR} \rightarrow D_2$ 。

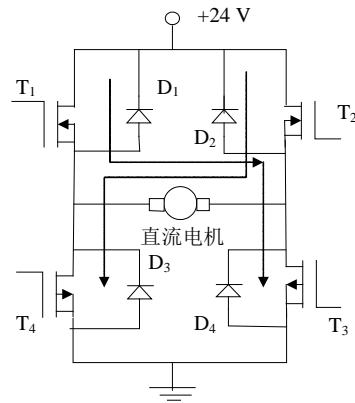


图5 直流电机的可逆调速电路

为了准确控制开关管的导通, $T_1$ 为P-MOSFET,当栅极电压为负脉冲时, $T_1$ 导通; $T_3$ 为N-MOSFET,当栅极电压为正脉冲时, $T_3$ 导通,此时电机正向运转,同时 $T_2$ 和 $T_4$ 锁定为关断状态。同理可得电机反转时 $T_2$ 、 $T_3$ 及 $T_1$ 、 $T_4$ 的工作原理。

## 3 试验和数据

在试验系统中,采用DSP控制器。从图1中可看出,双闭环控制是通过软件实现的。电流的PI调节使用霍尔电流传感器检测电流变化,并通过AD采样电路输入给DSP,再经A/D转换产生电流反馈信号。由于是双极性可逆PWM系统,在电流PI调节编程时一定要注意PWM的占空比除了决定电机的转速外,还决定电机的转向。

在可逆调速驱动电路中,PWM是通过DSP的PWM输出引脚 $\text{PWM}_1 \sim \text{PWM}_4$ 输出控制信号,从图5中可看出, $\text{PWM}_1$ 和 $\text{PWM}_3$ 的控制规律一样, $\text{PWM}_2$ 和 $\text{PWM}_4$ 的控制规律一样,因此比较方式控制寄存器ACTRA的设置应为0 096 H。

可逆调速采用IPM模块, 该模块有高速光耦, 以及过压、过流保护, 与单独采用MOSFET和IGBT管相比, 可靠性更高、稳定性更强。由DSP运算产生的PWM信号直接与模块连接, 用200 W的直流电机试验。太阳能板型号为24 V、5 W的SUN-5, 两只12V、17 AH蓄电池串联后与太阳能板组合成供电电源<sup>[10]</sup>。测试的经验公式为:

$$f = 0.347\{a_s / [T_e^2(t_r + t_f)]\}^{1/3} \quad (8)$$

式中  $t_r$ 为上升时间; $t_f$ 为电压从90%下降到10%所需时间; $T_e$ 为电动机磁回路的电磁时间常数; $a_s = I_s/I_N$ ,  $I_s$ 为电机启动电流,  $I_N$ 为电机额定电流。

本系统选择20~40 kHz的开关频率。遥控设定电动阀门的电机测试波形如图6所示。通道1为电机电流波形;通道2为电机电压波形。从测试波形图可看出,图6a中,当 $f=5$  kHz时,触发脉冲上升沿有滞后现象,不能实时触发开关管的导通;图6d中,当 $f=80$  kHz时,改变PWM的占空比(尤其当占空比在60%~90%之间变化时)对改变电机的转速并不明显。当开关频率在20~40 kHz范围内变化,电机的占空比介于20%~95%之间时,能精确控制电机的转速。电机主轴带动电动阀门的减速机构执行球阀的开度,但是编码器并不是安装在电机主轴上,而是安装在减速机构上,因此编码器的脉冲信号不会丢失,使得编码器脉冲信号能准确无误地反馈给DSP进行实时处理<sup>[11]</sup>。

给定转速范围0.5~1 500 rpm,当系统启动及受到突加、突卸100%额定负载时,研究电机的动态过渡过程性能。测试表明,当速度锁相时间很小,超调量小于1%,电机转速为0.5 rmp时,系统的低速调节仍然能够保证系统稳定运行。

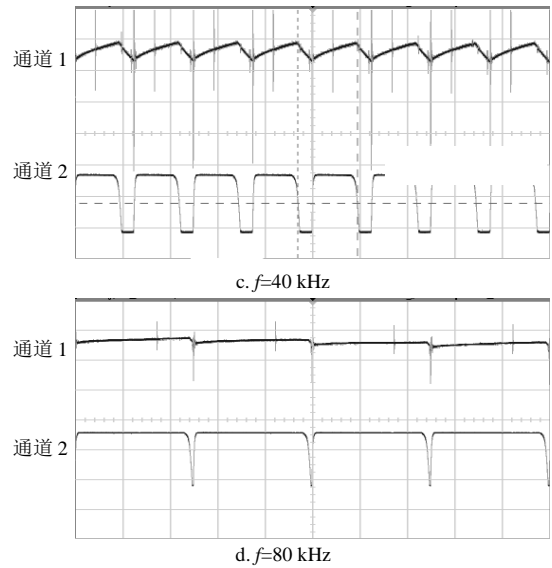
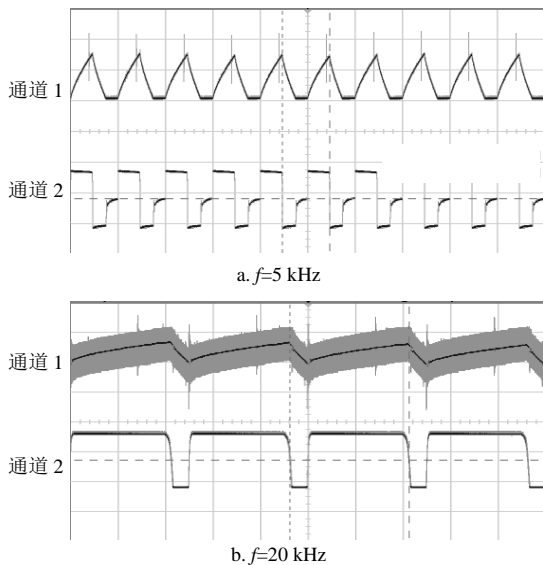


图6 不同频率时直流电机电压、电流波形

## 4 结 论

用光伏发电为电动阀门提供电能,能够解决长期以来困扰部分地方供电难的问题。本文采用基于DSP软件锁相环技术设计PWM直流电机控制器,实现了电机速度控制的实时性、可靠性及稳定性等,这是模拟控制器难以实现的。试验表明:系统能快速锁相,无静差和较小超调,尤其是获得了良好的低速调速性能。基于DSP实现了电动阀门执行控制系统的红外遥控、远程控制、手动控制、参数整定、以及故障显示与报警等功能。本文研究的方法具有实际的工程应用价值,已用于智能非侵入式外部遥感设定控制电动阀门执行机构中,也适用于交流电机、步进电机及阻性负载中。

### 参 考 文 献

- [1] RAGOT P, MARKOVIC M, PERRIARD Y. Optimization of electric motor for a solar airplane application[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2006, 42(4): 1053-1063.
- [2] CHUNG C C, LEE C Y. An all-digital phase-locked loop for high-speed clock generation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003, 38(2): 347-351.
- [3] SHAYANY R, LE-NGOC T. All digital phase-locked loop: Concepts, design and applications[J]. IEE Proceedings, 1989, 136(1): 53-56.
- [4] CHEN Mu-ping, CHEN Jan-ku, MURATA K, et al. Surge analysis of induction heating power supply with PLL[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(5): 702-709.
- [5] 王福昌, 鲁昆生. 锁相技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996.  
WANG Fu-chang, Lu Kun-sheng. The phase-locking technology[M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 1996.
- [6] WILLIAM C L, CHAK Ming-chie. A survey of digital

- phase-locked loops[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(4): 410-431.
- [7] STEPHEN M W, TROUDET T. Digital phase-locked loop with jitter bounded[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1989, 36(7): 980-986.
- [8] CHING Che-chung, CHEN Yi-le. An all-digital phase-locked loop for high-speed clock generation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003, 38(2): 347-351.
- [9] 李亚斌, 彭咏龙, 李和明. 自采样比例积分控制全数字锁相环的性能分析和实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 64-69.
- LI Ya-bin; PENG Yong-long; LI He-ming. The implementation and analysis of a self-sampling pi control all digital phase-locked loop[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(18): 64-69.
- [10] 曹太强, 许建平, 吴昊, 等. 基于DSP的直流电机数字调速系统的设计[J]. 电力电子技术, 2008, 42(2): 73-77.
- [11] CAO Tai-qiang; XU Jian-pin; WU hao. Designing DSP based digital control DC motor system[J]. Power Electronics, 2008, 42(2): 73-77.

编辑 熊思亮

#### (上接第42页)

从图中可知, 采用时域和IDFT变换域联合降噪信道估计的OFDM-TDCS在低信噪比时有很好的性能。由于对噪声抑制能力相同, 时间平均降噪和时间滑动平均降噪具有相同的性能, 比理想信道估计的性能大约差2 dB, 但是时间滑动平均具有相同时延。由于时间遗忘在收敛后比时间平均具有更好的噪声抑制作用, 因此在低信噪比时性能较后者更好。但正如前面分析, 时间遗忘降噪在开始一段时间信道估计不准确, 因此当信噪比较高时导致存在错误平台。时间平均与时间遗忘结合降噪性能很好, 与理想信道估计相比, 时间平均与时间遗忘结合方法1性能大约差1.5 dB, 时间平均与时间遗忘结合方法2性能大约差1 dB, 但是方法(2)在整个时间段都有时延, 最大时延为7个导频符号, 而方法(1)只在开始21个导频符号有时延。

## 4 结束语

本文利用IEEE 802.22环境下信道系数变化缓慢的特点, 针对基于OFDM的TDCS系统, 提出了采用时域和IDFT变换域级联降噪的信道估计技术。仿真结果表明, 本文提出的级联降噪算法具有很好的性能, 时间平均与时间遗忘结合的两种方法不但提高了信道估计的准确性, 还减小了时延。

### 参 考 文 献

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [3] 王军, 李少谦. 认知无线电: 原理、技术与发展趋势[J]. 中兴通讯技术, 2007, 13(3): 1-4.
- WANG Jun, LI Shao-qian. Cognitive radio: principle, technology and tendency[J]. ZTE Communications, 2007, 13(3): 1-4.
- [4] CHAKRAVARTHY V D, SHAW A K, TEMPLE M A, et al. Cognitive radio-an adaptive waveform with spectrum sharing capability[C]//IEEE Wireless Communications & Networking Conference, New Orleans, LA USA: IEEE Press, 2005.
- [5] HAN C, WANG J, GONG S P, et al. Detection and performance of the OFDM-based transform domain communication system[C]//International Conference on Communications, Circuits and Systems. Guilin, China: IEEE Press, 2006.
- [6] HAN C, WANG J, YANG Y, et al. Addressing the control channel design problem: OFDM-based transform domain communication system in cognitive radio[J]. Computer Networks, 2008, 52(4): 795-815.
- [7] DILLARD G M, REUTER M, ZEIDDLER J, et al. Cyclic code shift keying: a low probability of intercept communication technique[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 786-798.
- [8] SOFER E, CHOUINARD G. WRAN channel modelling [DB/OL]. [2006-10-09]. [http://www.ieee802.org/22/meeting\\_documents/005\\_aug\\_teleconferences/22-05-0055-03-0000\\_WRAN\\_channel\\_modeling.doc](http://www.ieee802.org/22/meeting_documents/005_aug_teleconferences/22-05-0055-03-0000_WRAN_channel_modeling.doc).
- [9] LEE Y. Noise reduction for channel estimation based on pilot-block averaging in DVB-T receivers[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2006, 52(1): 51-58.
- [10] ZHAO Y P, HUANG A P. A novel channel estimation method for OFDM mobile communication systems based on pilot signals and transform-domain processing [C]//IEEE 47th Vehicular Technology Conference, Arizona, USA: IEEE Press, 1997.

编辑 熊思亮