

# 调压式抽油机节能控制器的研究

黄永平, 郭 凯, 金玉善

(吉林大学计算机科学与技术学院, 吉林长春 130012)

**摘 要:** 本文针对游梁式抽油机在轻载和重载两种不同工况下, 电机实际功率变化明显等问题, 提出了功率因子、控制角和滞留角之间的约束关系模型, 并提出基于数据点的自动滑动调节控制方法. 设计了基于自学习算法调压式抽油机节能控制器. 该设计采用双向晶闸管控制的三相交流调压技术, 检测采集到的电机电压与电流之间的随动相位差信号, 通过分析和自学习算法处理采集的信号之后, 调节晶闸管控制角变化方向和大小, 以改变电机的有效工作电压, 从而达到节能增效的目的. 测试结果表明, 安装该节能控制器的电机平均有功损耗降低 14.95%, 平均无功损耗降低 30.42%.

**关键词:** 算法; 节能; 控制器; 变频调速; 电机

**中图分类号:** TP399      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013) 04-0828-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.04.034

## Research on Voltage Regulating Energy Saving Controller of Pumping Unit

HUANG Yong-ping, GUO Kai, JIN Yu-shan

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract:** To solve the pumping units motor energy consumption problem, a constraint relational mode of power factor, control angle and delay angle, and automatic control method are proposed. Controller of pumping unit is designed based on self-learning algorithm. The design adopts current voltage adjusting technology, samples the signal of phase angle between voltage and current, analyzes the signal with self-learning algorithm, adjusts the direction and the size of thyristor control angle to change working voltage of motor, so as to save energy efficiently. Testing results show that motor average effective power loss decreases by 14.95%, average none effective power loss decreases by 30.42%.

**Key words:** algorithm; energy saving; controller; frequency control; motor

## 1 引言

在我国, 用抽油泵法开采的石油井数在生产井总数中占 90% 以上<sup>[1]</sup>. 在石油开采过程中, 国内外应用最为广泛的抽油设备是游梁式抽油机. 游梁式抽油机具有结构简单、可靠性高、适应工况条件好等优点, 但其使用过程中存在功率因数低、效率不高、用电成本高、负载率普遍偏低的弱点. 据统计, 在油田生产总成本中约有 1/3 为电能消耗, 而游梁式抽油机消耗的电能约占总电能消耗的 80%<sup>[2]</sup>. 目前, 我国抽油机的保有量在 10 万台以上, 电动机装机总容量在 3500MW, 每年耗电量逾百亿 kWh. 因此, 对抽油机实现节能控制显得尤为重要<sup>[3]</sup>.

现有对游梁式抽油机采用的节能技术一部分是采用变频调速节能控制器, 其可在流量、载荷等传感器的配合下, 实现抽油机动态适应油井负载的变化, 但其价

格比较昂贵, 因此无法在油田作业上得到广泛的应用<sup>[4,5]</sup>. 另一部分采用断续供电节能装置, 当游梁式抽油机上冲程的时候, 控制器发出控制信号, 接通电源进行供电; 当游梁式抽油机下冲程的时候, 控制器发出切断电源的信号. 这种节能装置在一定程度上节约了电能, 但这种断续给电机供电的方法, 可能会在供电、断电的瞬间产生冲击电压, 对电机、电路产生损害<sup>[6,7]</sup>.

本文以游梁式抽油机电机为节能控制的对象, 利用调压式节能控制器对电机进行有效的补偿控制和负载率调整, 使节电过程贯穿抽油机抽油的整个过程, 从而提高抽油机的系统效率, 达到节能增效的效果.

本文首次提出功率因子  $\Phi$ 、控制角  $\alpha$  和滞留角  $\varphi$  之间的约束关系模型, 对模型进行了分析; 并提出基于数据点自动滑动调节的控制方法, 并设计了基于自学习调控算法.

## 2 节能工作原理分析

游梁式抽油机会产生周期性变化的负载,并且不同的油井其负载曲线不同,同时其负载变化也会受到油井的深度等因素的影响.引起游梁式抽油机电机负载率低的原因主要有以下几个方面<sup>[5,8,9]</sup>:

(1)抽油机的电机是带负载启动,启动时所需的启动电流很大,因此造成功率因数较低.

(2)抽油机的输出功率是周期性变化的,因而其驱动电机的电流也是周期性变化的,在选择电动机时,电机的额定功率需要取电机运行过程中的最大值.因而,抽油机和电机一般选型偏大,造成电机功率利用率降低.

(3)要准确地选取一台抽油机的驱动电机的容量,需要测量大量的数据,而对于大型的抽油机设备很难做到准确地测量,而如何计算抽油机电机容量尚没有一个统一的、准确的计算公式.因此在大多数情况下都是采用估算的方法来选择配套电机的功率,一般留有较大的余量.

(4)抽油机的使用周期很长,在其使用周期内由于油井工况的变化,对于电机的功率需求可能有很大的差异,比较合理的做法是根据不同时期的功率需求进行匹配,以提高电机的运行效率和功率因数,但在实际生产中很难做到,一般是在使用期内不再更换电机.因此,在选择电机时都是按照抽油机可能遇到的最大功率进行选择.

上述原因都会造成抽油系统处于“大马拉小车”的状态,如果能够克服抽油机系统这些问题,将抽油机电机的运行效率仅提高 1%,年节电就可达到 35MW,可见其节能潜力十分巨大<sup>[10]</sup>.

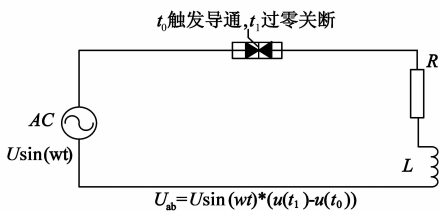


图1 等效电路图

### 2.1 晶闸管单相调压

$R-L$  负载是交流调压器最一般化的负载.把两个反并联连接的晶闸管或使用一个双向晶闸管接在交流输入电源与负载之间,形成单相调压电路,等效电路如图 1.晶闸管的控制方式为相位控制,从图 2 可看出,对不同的晶闸管控制角  $\alpha$  可得到不同的负载电压波形, $\alpha$  角越大,晶闸管每周期的导通角  $\theta$  就越小,加载在负载上的电压有效值就越小;反之, $\alpha$  角越小,加载在负载上

的电压有效值就越大,从而起到了调压作用.单相或三相交流调压电路中的负载是纯感性负载,而实际上调压电路中的负载为感性负载时,电流滞后电压一个  $\varphi$  角,我们称之为滞留角<sup>[4]</sup>.滞留角  $\varphi$  可以通过电压、电流过零测试电路来检测.由基尔霍夫定律,得到:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = U \sin(\omega t) * (u(t_1) - u(t_0))$$

其中  $U$  为交流电压的峰值, $u(t)$  为阶跃函数.解该方程得:

$$i(t) = C_1 e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{U * ((u(t_1) - u(t_0)) * (\omega L \cos(\omega t) - R \sin(\omega t)))}{(\omega L)^2 + R^2} \quad (1)$$

其中: $\alpha = \omega t_0$ ,  $\alpha + \theta = \pi + \varphi = \omega t_1$ ,  $C_1$  为待定常数.

由  $t_0 = \alpha / \omega$ ,  $t_1 = (\pi + \varphi) / \omega$ , 带入式(1)

$$i(t_0) = C_1 e^{-\frac{R}{L}t_0} - \frac{U * ((u(t_1) - u(t_0)) * (\omega L \cos(\omega t_0) - R \sin(\omega t_0)))}{(\omega L)^2 + R^2} \quad (2)$$

$$i(t_1) = C_1 e^{-\frac{R}{L}t_1} - \frac{U * ((u(t_1) - u(t_0)) * (\omega L \cos(\omega t_1) - R \sin(\omega t_1)))}{(\omega L)^2 + R^2} \quad (3)$$

又因电流  $t_0$  触发导通,  $t_1$  过零关断, 所以有:

$$i(t_0) = 0, \quad (4)$$

$$i(t_1) = 0. \quad (5)$$

根据式(2), (3), (4), (5) 消去  $C_1, t_0, t_1$  后, 得到:

$$e^{-\frac{R}{L}(\frac{\pi + \varphi - \alpha}{\omega})} = \frac{-\omega L \cos(\varphi) + R \sin(\varphi)}{\omega L \cos(\alpha) - R \sin(\alpha)} \quad (6)$$

又根据功率三角形:

$$\tan \Phi = \frac{\omega L}{R} \quad (7)$$

其中,功率因子为  $\Phi$ , 得到  $\Phi, \alpha$  和  $\varphi$  之间的约束关系:

$$\frac{\tan(\Phi) * \cos(\varphi) - \sin(\varphi)}{\tan(\Phi) * \cos(\alpha) - \sin(\alpha)} + e^{\frac{\alpha - \pi - \varphi}{\tan \Phi}} = 0 \quad (8)$$

由上述关系式(8), 我们利用 Matlab 软件得到图 3. 从图像上我们可以看出  $\Phi$  随  $\alpha, \varphi$  变化的情况. 我们控制可变参数  $\alpha$ , 对应地可得到观测量  $\varphi$ , 最终由二者的值可确定  $\Phi$  的大小.

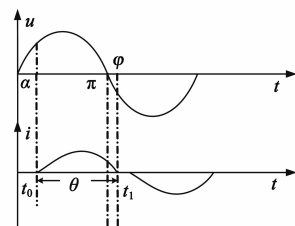
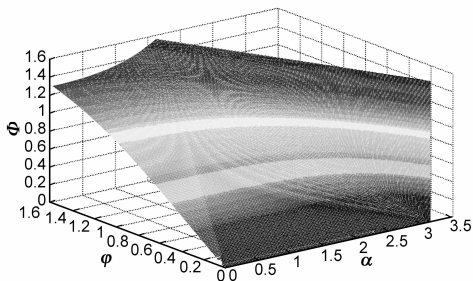


图2 晶闸管调压波形

图3  $\Phi$ 、 $\alpha$ 和 $\varphi$ 三者约束3D曲线

## 2.2 晶闸管三相交流调压

抽油机大多采用三相交流感应电动机,在调压技术中采用三相调压电路.本文抽油机节能控制器采用的是由双向晶闸管组成的三相半波相位控制的 $\Delta$ 型调压电路.其工作的原理及每组负载上的电压波形与单相交流调压情况相同.因为异步电机等效电路中的总阻抗是随转差率 $s$ 的不同而变化,所以 $\Phi$ 是个因变量<sup>[11]</sup>.三相晶闸管调压电路带电阻感性负载时,总的趋势也是控制角 $\alpha$ 越大,调压电路输出电压越低.当 $\alpha > \Phi$ 时,输出电压随 $\alpha$ 增大而减小;当 $\alpha = \Phi$ 时由式(8)

可知,调压器失去调压作用;当 $\alpha < \Phi$ 时,一定要采用宽脉冲或脉冲列触发,此时,调压控制器失去调压作用<sup>[12]</sup>.

## 3 基于自学习调控算法的分析与设计

由于电路的有功功率 $P = UI\cos\Phi$ ,为了使有功功率达到最优值,这就要使功率因子达到最小值.在式(8)中, $\tan(\Phi)$ 既无法用 $\alpha$ 、 $\varphi$ 表示出来,也无法对 $\Phi$ 求关于 $\alpha$ 、 $\varphi$ 的偏导数,因此,使用传统的数学方法我们无法得到 $\Phi$ 取到极值的情况.为了突破这种限制,针对工业控制的特点,本文提出了基于图像分析并保存数据点的工业控制方式,也就是通过分析图3中的图像,通过Matlab计算并保存图像上数据点(如表1),在控制过程中,通过查表来自动滑动调节.我们不断调节晶闸管的控制角 $\alpha$ ,并观测滞留角 $\varphi$ ,使图像变化方向朝靠近下方曲线的方向变化,既自动滑动调节控制方法.可以发现,将图3沿着 $\Phi$ 轴向 $\alpha$ 与 $\varphi$ 所确定的平面投影即可得到在不同 $\Phi$ 值下的 $\alpha$ 和 $\varphi$ 的二维约束曲线,如图4所示.

表1 不同的 $\alpha$ 、 $\varphi$ 情况下 $\tan(\Phi)$ 的值

$\varphi \backslash \alpha$	$1/24\pi$	$2/24\pi$	$3/24\pi$	$4/24\pi$	$5/24\pi$	$6/24\pi$	$7/24\pi$	$8/24\pi$	$9/24\pi$	$10/24\pi$	$11/24\pi$
$1/24\pi$											
$2/24\pi$	0.13165										
$3/24\pi$	0.13165	0.26795									
$4/24\pi$	0.13165	0.26796	0.41432								
$5/24\pi$	0.13165	0.26796	0.41451	0.57830							
$6/24\pi$	0.13165	0.26798	0.41481	0.57938	0.77144						
$7/24\pi$	0.13165	0.26801	0.41528	0.58185	0.77726	1.01279					
$8/24\pi$	0.13165	0.26814	0.41602	0.58489	0.78534	1.03032	1.33735				
$9/24\pi$	0.13165	0.26816	0.41713	0.58919	0.79649	1.05426	1.38407	1.81909			
$10/24\pi$	0.13165	0.26833	0.41878	0.59525	0.81180	1.08711	1.44880	1.94239	2.64926		
$11/24\pi$	0.13165	0.26861	0.42124	0.60378	0.83310	1.13278	1.54055	2.12352	3.01538	4.52779	
$12/24\pi$	0.13165	0.26909	0.42486	0.61586	0.86297	1.19779	1.67554	2.40565	3.64292	6.15133	13.75050
$13/24\pi$	0.13166	0.26989	0.43024	0.63316	0.90589	1.20698	1.88617	2.88946	4.92303	11.08257	无解
$14/24\pi$	0.13167	0.27122	0.43827	0.65852	0.96624	1.44448	2.24809	3.87704	8.81146	无解	无解
$15/24\pi$	0.13170	0.27345	0.45053	0.69701	1.07112	1.70427	2.98813	6.87873	无解	无解	无解
$16/24\pi$	0.13178	0.27720	0.46982	0.75880	1.24694	2.23723	5.24042	无解	无解	无解	无解
$17/24\pi$	0.13197	0.28367	0.50179	0.86760	1.60977	3.86313	无解	无解	无解	无解	无解
$18/24\pi$	0.13245	0.29528	0.55966	1.09458	2.72131	无解	无解	无解	无解	无解	无解
$19/24\pi$	0.13368	0.31783	0.68310	1.79540	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解
$20/24\pi$	0.13688	0.36879	1.07058	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解
$21/24\pi$	0.14618	0.53581	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解
$22/24\pi$	0.18314	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解
$23/24\pi$	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解
$24/24\pi$	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解	无解

由于节能控制器的工作特性需要 $\alpha > \Phi$ <sup>[5]</sup>,并且有

$\alpha < \pi$ ,我们以 $1/24\pi$ 为 $\alpha$ 、 $\varphi$ 的取样间隔,根据方程式

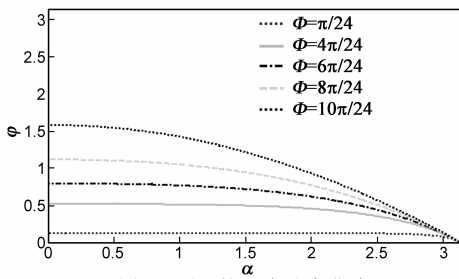


图4  $\alpha$ 和 $\varphi$ 的二维约束曲线

(8)计算各个时刻  $\tan(\Phi)$  的值.表 1 为在不同的  $\alpha$ 、 $\varphi$  情况下  $\tan(\Phi)$  的值.其中,无解指在  $[0, \pi]$  范围内  $\Phi$  无解.

节能控制器调控算法流程如图 5 所示.在  $t_0$  时刻触发晶闸管的门级使晶闸管导通,根据角速度计算出  $\alpha_0$  观测并记录滞留角  $\varphi_0$ ,这样求出  $\tan\Phi_0$ .改变  $\alpha$  的大小、变化方向,记录随之变化的  $\varphi$ ,并根据它们的值通过查表得到  $\tan\Phi$ .如果  $\tan\Phi$  变大,则  $\alpha$  应当向当前变化方向的相反方向变化,否则, $\alpha$  应当向当前变化的方向变化<sup>[13,14]</sup>.

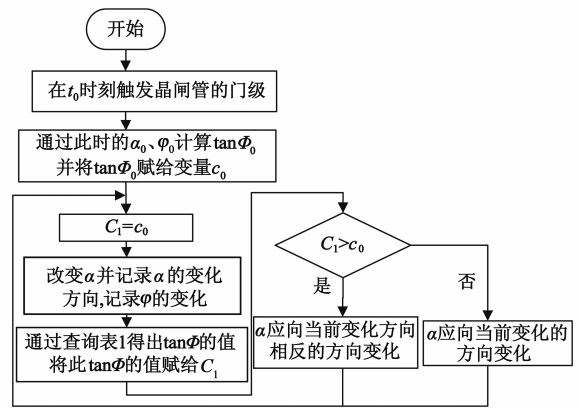


图5 节能控制器调控算法流程图

表 2 安装节能控制器前后相关参数测试结果对比

抽油机型号	状态	平均有功功率/kw	平均无功功率/kw	电流变化范围/A	平均电流/A	电压变化范围/V	平均电压/V
CYJ3 - 1.5 - 9	安装前	4.57	12.73	24.07 - 41.95	30.98	348 - 366	357
	安装后	3.55	9.35	13.88 - 62.17	28.90	321 - 361	332
HB	下降率	22.31%	24.19%		6.71%		7.00%
CYJ8 - 2.5	安装前	8.06	12.73	25.07 - 33.95	28.51	349 - 395	381
	安装后	6.92	10.05	13.08 - 48.29	26.10	251 - 358	331.5
- 26HB	下降率	14.14%	21.05%		8.45%		13.00%
CYJY1 - 2 - 4.8	安装前	8.57	19.73	25.07 - 51.95	33.46	403 - 415	411
	安装后	7.85	10.65	11.68 - 50.17	28.80	329 - 369	339
- 73HF	下降率	8.40%	46.01%		13.92%		17.52%

### 4 节能控制器的节能实验

根据不同型号的游梁式抽油机,进行了节能控制器的节能实验,安装节能控制器前后相关参数的测试结果如表 2 所示.

### 5 结束语

本文分析了晶闸管调压式电路的节能原理,提出功率因子  $\Phi$ 、控制角  $\alpha$  和滞留角  $\varphi$  之间的约束关系模型,并对模型进行了分析;基于数据点自动滑动调节的控制方法,并设计实现了该控制方法的算法.

经过实验测试证明,在不同的抽油机型号下均能够达到较好的节能效果,可满足抽油机井上的节能需求,具有广阔的应用前景<sup>[15,16]</sup>.

#### 参考文献

[1] 黄秀华,韩志昌,丁建国,等.游梁式抽油机[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.18 - 19.  
Huang Xiuhua, Han Zhichang, Ding Jianguo, et al. Beam Pumping Units Electric Motor[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2001. 18 - 19. (in Chinese)

[2] 李敏,崔爱玉,宁刚,等.抽油机节能技术的探讨[J].油气田地面工程,2002,21(4):116 - 117.  
Li Min, Cui Aiyu, Ning Gang, et al. Discussion on energy saving technique of pumping unit[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2002, 21(4): 116 - 117. (in Chinese)

[3] 杜永军,刘安生,朱君,等.PSEC 型抽油机节能控制器节能原理[J].大庆石油学院学报,1999,23(3):99 - 101.  
Du Yong-jun, Liu An-sheng, Zhu Jun, et al. Research of energy saving mechanism of PSEC pumping unit energy saving controller [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(3): 99 - 101. (in Chinese)

[4] 杜永军,赵启成,等.对调压式抽油机节能控制器的新认识[J].节能,2000,(1):6 - 8.  
Du Yong-jun, Zhao Qi-cheng et al. The new recognize for voltage-adjusting pump unit energy-saving controller [J]. Energy Conservation, 2000, (1): 6 - 8. (in Chinese)

[5] 陈丽.调压式抽油机节能控制器软硬件开发及节能机理研究[D].黑龙江:大庆石油学院,2007.  
Chen-li. Hardware and software development and energy-saving mechanism study of voltage regulating style energy saving controller of pumping unit[D]. Heilongjiang: Daqing Petroleum Institute, 2007. (in Chinese)

[6] Zong Ming, Geng Dayong. An intelligent controller for oil-pumping unit[A]. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems[C]. Shenyang: IEEE, 2011. 1254 - 1257.

- [7] K X Qian, P zeng, H Y Yuan. Measurement of rotary pump flow and pressure by computation of driving motor power and speed [J]. Journal of system Medical Engineering Technology, 2000, 24(6): 273 - 276.
- [8] William F Powers, Paul R Nicastri. Automotive vehicle control challenges in 21st century [J]. Control Engineering Practices, 2000, 8(6): 605 - 618.
- [9] John M Miller, Allan R Gale, V Anand Sankaran. Electric drive subsystem for a low-storage requirement hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(6): 56 - 58.
- [10] Lu Q F, Fan C Z, Ye Y Y, Zhu Z Q. A high torque density permanent magnet motor for oil pumping unit [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(7): 1 - 3.
- [11] Juan Li, Hong Zhi Yang, Mei Han. Study on single crank flexible pumping unit in oil field artificial lift [J]. Journal Applied Mechanics and Materials, 2011, 66 - 68: 471 - 476.
- [12] 董世民, 王胜杰, 卢东风, 等. 定向井有杆抽油系统抽汲参数的优化设计和仿真模型 [J]. 石油学报, 2008, 29(1): 120 - 123.  
Dong Shi-min, Wang Sheng-jie, Lu Dong-feng, et al. Simulation models for optimization design of suction parameters for rod pumping system in directional wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 120 - 123. (in Chinese)
- [13] 涂象初, 张子明, 李维良, 等. 人工智能控制及其在控温中的应用 [J]. 电子学报, 1986, 14(2): 1 - 5.  
Tu Xiang-chu, Zhang Zi-ming, Li Wei-liang, et al. AI control and its application in temperature-controlling system [J]. Acta Electronica Sinica, 1986, 14(2): 1 - 5. (in Chinese)
- [14] 冯宏娟, 王守觉. 直观修改控制规则的自调整模糊控制器 [J]. 电子学报, 1992, 20(2): 10 - 15.  
Feng Jue-juan, Wang Shou-jue. On self-organizing fuzzy control algorithm with regulating the control rules directly [J]. Acta Electronica Sinica, 1992, 20(2): 10 - 15. (in Chinese)
- [15] Bingyi Zhang, Shuai Wang, You Zhang, et al. Study of sliding mode variable structure control system for a novel gearless

windlass balance oil pumping unit driven by low-speed and high-torque PMSM [A]. International Conference on Electrical Machines and Systems [C]. Shenyang: IEEE, 2009. 1 - 5.

- [16] Feng Yongjian, Hong Ming, Xiaowei Huo. The electric-hydraulic servo equipment for the real force and motion simulation of pumping unit [J]. Advanced Materials Research, 2011, 346: 889 - 895.

### 作者简介



**黄永平** 男, 1964 年 9 月出生, 辽宁沈阳人, 1986 年于南开大学物理系获得学士学位. 1989 年于南开大学物理系获得硕士学位. 2002 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位. 现为吉林大学副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为嵌入式软件、嵌入式软件架构, QP 量子通信平台, 基于 6LowPAN 和 IPv6 的传感器网络, 信息物理融合系统 CPS.

E-mail: hyp@jlu.edu.cn



**郭凯** 男, 1990 年 3 月出生, 黑龙江绥化人. 2012 年于吉林大学获得学士学位. 现于吉林大学攻读硕士学位. 从事嵌入式系统、嵌入式软件架构有关研究.



**金玉善(通讯作者)** 女, 1963 年出生, 吉林长春人. 1986 年于天津大学电子系获得学士学位. 现为吉林大学副教授、硕士生导师. 主要研究方向为智能控制与嵌入式系统、工业控制系统.

E-mail: jinys@jlu.edu.cn