

嵌入式电子节能控制器的设计与实现

钟 斌

(浙江工业大学 容大后勤集团, 杭州 310014)

摘要: 节能控制能够有效降低能耗, 对保护环境等方面具有重要影响; 但目前大多数电子节能控制器都是通过采用单片机技术和双向晶闸管过零触发交流调压电路对电子节能控制器进行设计; 通过介绍电子的负荷特点和节能原理, 分析电子节能控制器的硬件组成电路, 并对电子节能控制器的主要软件程序的流程图进行设计, 完成电子节能控制器设计; 但这种方法节能控制效果较低, 难以保证电子节能控制器性能, 为此, 提出一种基于模糊 PID 控制的嵌入式电子节能控制器设计与实现方法; 首先通过对嵌入式电子节能控制器的处理器、电源电路、复位电路、系统时钟电路、JTAG 接口电路、D/A 转换电路、功放电路、双极性电源电路以及嵌入式电子节能控制器硬件 PCB 板器件布局等的设计, 完成嵌入式电子节能控制器硬件设计; 在此基础上, 选用模糊 PID 控制方法对嵌入式电子节能控制器进行设计; 通过分析模糊 PID 控制原理, 介绍加入自调节因子的模糊 PID 控制的算法设计, 以此确定输入输出隶属度函数, 再利用模糊推理和模糊规则, 得到电子节能控制器的模糊控制过程, 从而完成嵌入式电子节能控制器的设计; 实验证明, 所提方法能够有效提高嵌入式电子节能控制器的节能控制效果, 具有良好的使用价值。

关键词: 嵌入式; 电子节能控制器; 设计与实现

Design and Implementation of Embedded Electronic Energy Saving Controller

Zhong Bin

(Rongda Service Group, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Energy saving control can effectively reduce energy consumption, and has an important impact on the protection of the environment. But most electronic energy saving controllers is designed by adopting the single chip microcomputer technology and the bidirectional thyristor zero crossing triggering AC voltage regulating circuit. Through the introduction of load characteristics and the energy-saving principle of electronic circuit analysis, electronic energy-saving controller hardware and software flowchart of the main program of controller is designed. However, the energy-saving control effect is low and it is difficult to guarantee the performance of electronic energy saving controller. Therefore, a design and implementation method of embedded electronic energy saving controller based on fuzzy PID control is proposed. Based on the embedded electronic energy-saving controller processor, power circuit, reset circuit, system clock circuit, JTAG interface circuit, D/A conversion circuit, amplifier circuit, bipolar power supply circuit and embedded electronic energy-saving controller hardware board PCB devices layout design, complete the embedded electronic energy-saving controller hardware design. On this basis, the fuzzy PID control method is used to design the embedded electronic energy saving controller. Through the analysis of the fuzzy PID control principle, introduced to the self regulating factor fuzzy PID control algorithm is designed to determine the input and output membership function, then using fuzzy reasoning and fuzzy rules, fuzzy controller of electronic energy saving control process, thus completing the design of energy saving controller embedded electronic. Experimental results show that the proposed method can effectively improve the energy saving control effect of embedded electronic energy saving controller, and has good use value.

Keywords: embedded; electronic energy saving controller; design and implementation

0 引言

随着经济发展, 各项建设取得巨大成就的同时也付出了资源和环境被破坏的代价^[1-2], 所以提高资源利用率迫在眉睫^[3], 电子节能控制器的设计为电子能源发展带来积极作用^[4], 是减低电子产品能耗的重要手段^[5]。但目前大多数电子节能控制器设计方法通过将电子节能控制器的处理器、电源等部分作为一个动态系统, 通过系统论的观念挖掘电子节能控制器的节能潜力, 通过将微电子技术与现代模糊控制技术相结合对电子节能控制器软件进行设计, 在此基础上, 完成电子节能

控制器设计^[6]。该方法是进行电子节能控制器设计的重要方法, 引起相关专家学者的关注^[7], 该课题也成为业内人士关注的重点, 随着研究内容的深入, 得到许多研究成果^[8]。

文献 [8] 提出电子节能控制器设计与实现方法, 通过对功率因素校正电路、逆变电路、保护电路、复位电路等的设计, 在电路中使用的 APFC 芯片是 L6561。在完成电子节能控制器硬件设计基础的基础上, 通过对 ZigBee 无线通信模块等电子节能控制器模块设计, 完成电子节能控制器设计。但这种方法存在由于设计出的电子节能控制器体积较大, 导致其使用范围受到限制。文献 [9] 提出的电子节能控制器设计方法, 从国内外研究现状和应用范围出发, 设计电子节能控制器。通过将改进的变结构单神经元自适应 PID 控制算法应用到电子节能控制器信号匹配过程中, 通过对电子节能控制器的控制策略进行研究, 改善信号匹配过程中的不协调问题, 根据实际需要, 控制电子节能控制器的输出, 将嵌入式系统应用于电子节

收稿日期: 2017-05-17; 修回日期: 2017-06-08。

基金项目: 浙江省教育厅 2016 年课题(Y201635800)。

作者简介: 钟 斌(1976-), 男, 浙江诸暨人, 硕士, 工程师, 主要从事高校水电及节能管理、后勤信息化方向的研究。

能控制器中, 通过对节能控制器处理器的选择, 完成嵌入式电子节能控制器设计。但这种方法在实际操作过程中, 计算复杂, 所以节能控制难度较大。文献 [10] 提出的电子节能控制器设计方法, 从目前节能控制器普遍存在的问题出发, 分析节能控制的局限性, 在借鉴国外先进控制理论的基础上, 综合考虑转速控制和压力控制的优点, 提出电子节能控制器设计的新方法。通过继电自整定 PID 的电源电路控制方法与基于参数自适应模糊 PID 的处理器控制方法相结合, 完成电子节能控制器的设计构想, 在此基础上, 完成对电子节能控制器复位电路、JTAG 接口电路、时钟电路等的设计。完成电子节能控制器设计。但这种方法由于设计成本较高, 一般设备难以承受其价格, 导致其难以推广使用。

根据上述问题, 提出一种基于模糊 PID 控制的嵌入式电子节能控制器的设计与实现方法, 在对嵌入式电子节能控制器硬件设计过程中, 对嵌入式电子节能控制器的处理器、电源电路、复位电路、系统时钟电路、JTAG 接口电路、D/A 转换电路、功放电路、双极性电源电路以及嵌入式电子节能控制器硬件 PCB 板器件布局等硬件进行设计。在此基础上, 通过模糊 PID 控制方法对嵌入式电子节能控制器的软件进行设计。通过对模糊 PID 控制原理进行分析, 并设计了加入自调节因子的模糊 PID 控制方法, 通过确定输入输出的隶属度函数, 根据模糊推理和模糊规则, 得到电子节能控制器的模糊控制过程, 从而完成嵌入式电子节能控制器的软件设计, 从而完成嵌入式电子节能控制器的设计。实验证明, 本文所提方法能够有效提高节能控制效果, 具有良好的使用价值。

1 节能控制器的系统结构

节能控制器就是根据检测的电压与电流的相位差, 得到功率因数, 根据功率因数调节工作电压。使电压大小跟随负载变化而变化, 从而降低有功功率、无功功率损耗, 达到节能控制的目的。

节能控制器主要包括电流采集电路、电压采集电路、电流电压信号调节电路、光隔离电路等, 采用 SP708S 芯片和 JTAG 电路接口。节能控制器结构如图 1 所示。

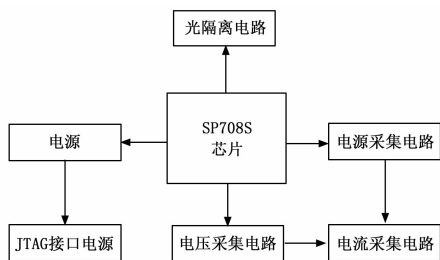


图 1 节能控制器结构

在忽略谐波影响、磁饱和、铁损及定子电阻时, 功率因数可表示为:

$$\cos\varphi = \frac{pL_m^2 R'_2 \Delta\omega}{L_1 \sqrt{(\sigma^2 L_2^2 \Delta\omega^2 + R_2^2)(L_2^2 \Delta\omega^2 + R_2^2)}} \quad (1)$$

式中, $\Delta\omega$ 表示转差角频率; σ 表示漏感系数, $\sigma = 1 - \frac{L_m}{L_1 L_2}$; p 表示极对数。

对于节能控制器, 其功率因数与转差角频率密切相关, 而

转差角频率又与节能控制器的负载转矩、供电电压和频率存在关系。因此, 在不同负载下, 可以通过调节端电压调节节能控制器的功率因素。当负载下降时, 通过降低节能控制器的电源电压来减少铁损, 同时电流随之下降也减少了铜损, 从而起到节能控制作用。

2 嵌入式电子节能控制器的设计与实现

2.1 嵌入式电子节能控制器硬件设计

选用 LPC2249 处理器作为嵌入式电子节能控制器的处理器, 其内核具有 Thumb 结构扩展、调试扩展、增强乘法器、EmbeddedICE™ 宏单元等功能, 是一种 32 位 LQFP144 脚, 基于 ARM7TDMI-S 内核的微处理器。

本文嵌入式电子节能控制器有 3.3V 作为供电电源。通过具有工作性能可靠、工作效率高、电流输出驱动能力强等优点的 KA78XX 系列开关稳压集成电路, 保障嵌入式电子节能控制器的处理器稳定可靠工作。

由于 ARM 芯片高速、低耗和低压, 给电源监控可靠性等方面带来不利影响。为降低影响, 选用专用的微处理器电源监控芯片 SP708S 作为节能控制器的复位电路。由于 nRST 和 nTRST 是通过 JTAG 仿真器控制复位实现, 因此通过 74HC125 三态缓冲门进行 JTAG 驱动。利用上拉电阻将 nRST 和 nTRST 信号上拉为高电平信号, 使节能控制器正常运行。

嵌入式电子节能控制器的处理器通过使用外部晶振或外部时钟源, 内部 PLL 电路调整节能控制器时钟, 提高嵌入式电子节能控制器的运行速度。本文选用外部 11.0592 MHz 晶振, 提高串口波特率。

本文嵌入式电子节能控制器 JTAG 接口选用标准 20 脚 JTAG 仿真调试接口, 通过 JTAG 接口上的信号 nRST 和 nTRST 与复位电路相连接, 完成共同控制系统复位的目的。

DAC702D/A 芯片是一种 16 位数模转换芯片, 具有低增益漂移、高精度等优点。由于本文嵌入式电子节能控制器选用 16 位的存储器, 所以本文选用 DAC702 芯片方便编程需要, 提高响应速度及精度。利用 nWE 信号和处理器端口 P2.25 信号经过或非门器件控制锁存器中数据向 DCA702 传送。

嵌入式电子节能控制器功放电路选用单片式高电压、大电流放大器 OPA541 功率运算放大器。

OPA541 电路内部设有有限流保护电路电阻 R_{94} , 可通过下式进行计算:

$$R_{94} = \frac{0.809V}{I_{LIM}} - 0.057 \quad (2)$$

嵌入式电子节能控制器 OPA541 功放器件与 DAC702 转换器中, 都需要双极性电源。通过 IC555 芯片实现电路振荡。

嵌入式电子节能控制器硬件 PCB 板器件布局中, 以每个功能电路的核心元件为中心进行布局, 尽量减少和缩短各元器件之间的引线 and 连接, 间距尽可能大些。

通过对嵌入式电子节能控制器的处理器、电源电路、复位电路、双极性电源电路以及嵌入式电子节能控制器硬件 PCB 板器件布局等的设计, 完成嵌入式电子节能控制器硬件设计。

2.2 基于模糊 PID 控制的嵌入式电子节能控制器软件设计

2.2.1 PID 控制理论

系统偏差的比例、积分、微分的综合控制, 简称 PID 控

制,是一种基于对“过去”、“现在”、“将来”信息估计的简单但却有效的控制算法。它有三个重要的功能:

- 1) 提供反馈控制;
- 2) 通过积分作用可以消除稳态误差;
- 3) 通过积分作用预测未来。

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一,由于其算法简单、鲁棒性好及可靠性高,被广泛应用于过程控制和运动控制中,尤其适用于可建立精确数学模型的确定性系统。PID 控制特别适用于过程动态性能良性且控制性能要求不高的情况。PID 控制也可以应用于许多具有特殊目的的控制系统中,也是分布式控制系统的重要组成部分和现场总线概念的重要组成部分,同时会随着现象总线的发展被标准化。自从有了 PID 控制,参数整定问题一直是人们研究的课题之一,在长期的工程实践中,人们已经积累了有关如何用好 PID 控制策略的丰富经验。特别是在工业过程控制中,由于控制对象的精确数学模型难以建立,系统参数又经常发生变化,运用现代控制理论进行分析、综合要耗费很大代价进行模型辨识,且往往不能得到预期的效果,所以人们常用 PID 控制器,并根据经验进行参数整定。同其它控制方法一样,几十年来。PID 控制的参数自整定方法和技术也处于不断发展中。

然而实际工业生产过程往往具有非线性、时变不确定性,难以建立精确的数学模型,用于常规 PID 参数整定方法繁杂,其参数往往整定不良、性能欠佳,对运行工况的适应性差。因此寻求一种新的控制方法成为控制领域的迫切需求。针对 PID 控制器参数整定不易的局限,我们运用模糊数学的基本理论和方法,把规则的条件、操作用模糊集表示,并把这些模糊控制规则及有关信息作为知识存入计算机知识库中,然后计算机根据控制系统的实际响应情况,运用模糊推理,自动实现对 PID 参数的最佳调整,实现模糊 PID 控制。

2.2.2 控制器软件设计

该控制器软件设计首先计算 PID 控制的传递函数,通过 PID 控制方法得出另一等价形式,利用向量法找出模糊子集特点,在误差加权基础上计算子集模糊量和实际输出量,最后在模糊 PID 控制器的输出端增加一个积分环节,从而完成基于模糊 PID 控制的嵌入式电子节能控制器软件设计。具体过程如下:

PID 控制的传递函数可以表示为:

$$G(s) = K_p + K_i/s + K_d s \tag{3}$$

式中, K_p 表示比例增益, K_i 表示积分增益, K_d 表示微分增益。

PID 控制器的另一等价形式可以表示为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_d e(t) \right] \tag{4}$$

式中, T_i 表示积分时间常数, $T_i = \frac{K_p}{K_i}$; T_d 表示微分时间常数,

$T_d = \frac{K_d}{K_p}$, $u(t)$ 代表 PID 控制器的输出变量, $e(t)$ 表示 PID 控制器的输入变量, $d(t)$ 代表偏差变量。

设定论域 U 到闭区间 $[0,1]$ 的任意映射 μ_A 可以表示为:

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1] \quad u \rightarrow \mu_A \tag{5}$$

确定 U 的一个模糊子集 A , $\mu_A(u)$ 表示 u 对于 A 的隶属度, μ_A 被称为模糊子集的隶属函数。

当 U 表示有限集 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 时,通过向量法对模糊子集进行表示为:

$$A = (A(u_1), A(u_2), \dots, A(u_n)) \tag{6}$$

式中,隶属度为 0 的项不能省略。

为了满足嵌入式电子节能控制器被控对象的要求,加入调整因子 α ,对误差及误差变化进行加权:

$$U = - \frac{\alpha E + (1 - \alpha) EC}{2} \tag{7}$$

通过上述论述,设定 $r(k)$ 表示嵌入式电子节能控制器给定被控量, $u(k)$ 表示模糊 PID 控制器的输出控制量; $y(k)$ 表示反馈检测量; $e(k)$ 表示各变量的误差, $e(k) = r(k) - y(k)$; $e_c(k)$ 表示各变量误差的变化值; K_e 表示输出误差的量化因子; K_{ec} 表示误差变化的量化因子; K_u 表示输出比例因子。通过 $e(k)$ 和 $e_c(k)$ 乘上量化因子,得到模糊量,即:

$$E = K_e e(k) \tag{8}$$

$$EC = K_{ec} e_c(k) \tag{9}$$

通过将嵌入式电子节能控制器模糊输出量乘上比例因子 K_u 后,得到实际输出量:

$$\Delta u(k) = K_u U \tag{10}$$

在模糊 PID 控制器的输出端增加一个积分环节:

$$u(k) = \sum \Delta u(k) \tag{11}$$

功率因素角 φ 的变换范围是 0—180 度,因此按照公式:

$$E = \frac{6}{\varphi} \times \left[x - \frac{0 + \varphi}{2} \right] \tag{12}$$

将其转化为 $[-3, 3]$ 间变化量,将上式去逆运算得到 K_e ,同样方法求出 EC, K_{ec}, U, K_u 。

上述论述中,本文选用模糊 PID 控制方法对嵌入式电子节能控制器进行设计。通过分析模糊 PID 控制原理,通过输入输出的隶属度函数的确定,利用模糊推理和模糊规则,得到电子节能控制器的模糊控制过程。

3 实验结果与分析

为证明本文提出的嵌入式电子节能控制器的设计与实现方法的有效性,以 Intel P4 2G 处理器为硬件环境, MATLAB2008a 为平台,运用对比法将本文提出的节能控制器设计与文献 [8] 和文献 [9] 所提节能控制器设计方法进行比较,完成本次实验。

首先对比三种节能控制器设计方法的节能效果,分别对比安装三种方法的节能控制器与不安装节能控制器节能控制器的能耗,设其单位为焦,对比结果如图 2 所示。

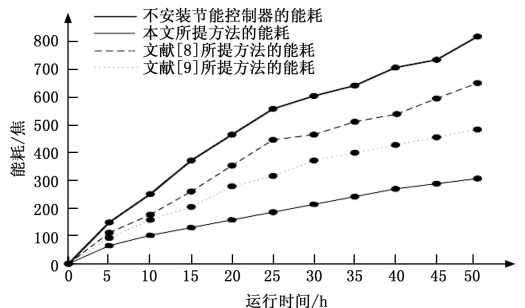


图 2 节能控制器运行效果对比

通过图 2 可以看出，不安装节能控制器的系统能耗最大，呈急速上升状态，说明已经不再适用于现阶段控制系统，即将被淘汰；文献 [8] 所提方法的系统能耗较大，开始运行 25 小时内呈急速上升状态，25 至 50 小时内能耗减缓，改方法下的控制器不能满足现阶段的工作需求；文献 [9] 所提方法的能耗比文献 [8] 方法能耗低，系统运行 50 小时内均呈上升状态，但依然不够理想；本文所提设计方法设计的节能控制器在使用后能量消耗相比其他方法是最低的，并且随着时间的变化，平均每小时消耗的能量比较统一，说明本文所提方法能够有效提高节能效果。

然后对比三种方法的控制准确度，设控制准确度单位为 %，通过实验，得到三种节能控制的准确度对比，对比结果如图 3 所示。

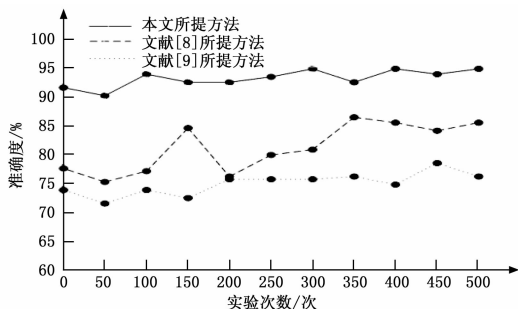


图 3 3 种方法控制的准确度对比

通过对图 2 的分析可知，文献 [9] 所提方法精准度最差，持续在 70%~80% 之间波动，已经不适用于现阶段节能控制器发展；文献 [8] 所提方法相比文献 [9] 方法略好，但精准度依然不理想，最高达到 85%，最低在 75%，且波动较大，精准度极不稳定，说明其在实际应用中不可靠；本文所提方法控制器的准确度相对最高，在 90%~95% 之间，满足现阶段电子节能控制器的需求，且波动小，精准度稳定，说明本文所提方法节能控制器对机器的损耗较小。

对 3 种节能控制器设计方法的结构复杂度与时间复杂度进行对比，设结构复杂度单位为 M，时间复杂度单位为 O，通过计算得到 3 种方法的结构复杂度和时间复杂度对比，对比结果如表 1 所示。

表 1 3 种方法的时间复杂度和结构复杂度对比

方法	结构复杂度/M	时间复杂度/O
本文所提方法	75	67
文献[8]所提方法	89	79
蚊香[9]所提方法	94	82

通过表 1 可以知道，文献 [9] 所提方法的结构复杂度和时间复杂度均是三种方法中最高的，说明其系统计算时间长，且不利于系统后期维护，增加工作量，效率低下，不适用于现阶段的节能控制应用；文献 [8] 所提方法相对较好，但仍然不够理想；本文所提方法结构复杂度和时间复杂度均是最低的，节能计算时间较短，说明本文所提方法的节能控制器在后期维护时具有较大的优势。

最后对 3 种节能控制器设计方法设计的节能控制器的运行功率进行对比，设运行功率单位为 W，通过实验，得到 3 种

节能控制器设计方法设计的节能控制器的运行功率对比，对比结果如图 4 所示。

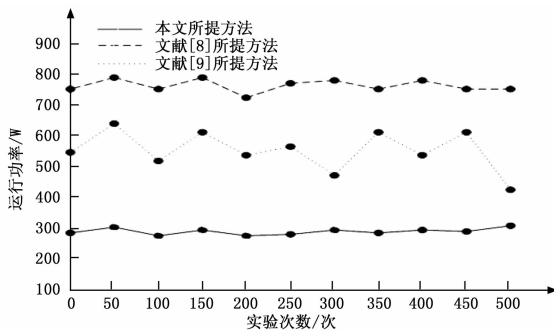


图 4 3 种方法运行功率对比

从图 4 可以看出，文献 [8] 所提方法运行功率最大，均在 700~800 W 之间波动，在现阶段工业对于控制器的需求来说，即将被淘汰；文献 [9] 所提方法运行功率较大，且极不稳定，高至 650 W，低至 400 W，能耗高，适用性差，不利于工作效率的提高；本文所提方法的运行功率最小，说明所提方法设计的节能控制器运行能耗较低、运行功率较平稳、运行较为稳定，具有良好的现实实践意义。

综上所述，本文所提方法能够有效提高节能控制器的节能效果，运行功率较低，说明其能耗较少。并且本文所提方法设计的节能控制器结构复杂度和时间复杂度都较低，有利于后续维护工作的顺利进行。本文所提方法的节能控制器能够

4 结束语

节能在发展的过程中占据重要地位，是实现环境保护的重要手段。通过安装节能控制器，能有效降低能源消耗，提出的嵌入式电子节能控制器的设计与实现方法，能够有效降低能量消耗，控制效果较好，对推动节能控制的发展起着积极作用。

参考文献：

- [1] 伍世云, 罗江, 王益艳, 等. 基于单片机的高校教室照明节能智能控制系统的设计 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (23): 180-182.
- [2] 王磊, 冯茜. 嵌入式智能加热炉在线温度控制方法研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33 (2): 373-377.
- [3] 陆仲达, 王丽婧, 徐凤霞. 基于自适应模糊控制的节能装置研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (7): 2412-2414.
- [4] 王莉丽, 宋小芹. 基于嵌入式的智能电气节能控制研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (19): 255-258.
- [5] 吕凯, 姜芊宇, 王琦, 等. 低压配电系统的智能化节能控制方法研究 [J]. 科技通报, 2016, 32 (7): 184-187.
- [6] 刘龙, 李钟慎. 教学楼智能化节能控制系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (12): 1876-1882.
- [7] 蒋俊祁. 基于嵌入式的分布式电源节能控制系统的设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (6): 88-92.
- [8] 杨世平, 余浩, 刘金刚, 等. 液压挖掘机动力系统设计及其节能控制 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (5): 152-160.
- [9] 冯涛, 高蒙. 基于 TMS320F2812 的校园节能控制系统 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (4): 86-91.
- [10] 郑龙, 程良伦. 中型智能油压机高效节能控制系统的设计 [J]. 机床与液压, 2015, 43 (7): 119-123.