

基于软件校准的短波发射机 功率控制系统设计

曹青琳¹, 丁莉²

(1. 西宁城市职业技术学院, 西宁 810000;

2. 青海师范大学, 西宁 810000)

摘要: 为提升短波发射机功率的稳定性, 提出基于软件校准设计短波发射机功率控制系统; 该系统借鉴 MVC 设计模式搭建基础框架; 将功率计与短波发射机相连, 实时采集工作状态下的短波发射机功率数据, 通过信号处理器实施处理后并存储; 将数据发送到控制器, 通过控制器校准短波发射机功率与预期之间的偏差, 以偏差量为输入, 利用改进 PID 运算得出控制量, 生成控制命令; 通过输入输出信号接口板输出命令, 控制驱动装置调节短波发射机运行参数, 实现功率控制; 结果表明: 与对比系统相比, 所设计系统应用 100 s 内短波发射机的功率变化曲线与预期曲线之间的拟合优度指数更接近于 1, 证明本系统控制表现较好, 更能维持短波发射机功率稳定, 达到了研究目标。

关键词: 软件校准; 短波发射机; MVC; 改进 PID; 功率控制系统

Design of Shortwave Transmitter Power Control System Based on Software Calibration

CAO Qinglin¹, DING Li²

(1. Xining Urban Vocational & Technical College, Xining 810000, China;

2. Qinghai Normal University, Xining 810000, China)

Abstract: In order to improve the stability of shortwave transmitter power, a shortwave transmitter power control system based on software calibration is proposed. The system draws on the model, view and controller (MVC) design mode to build basic framework, connects the power meter with the shortwave transmitter, collects the power data of the shortwave transmitter under the working conditions in real time, processes and stores it through the signal processor, sends the data to the controller. The device calibrates the deviation between the power of the short-wave transmitter and the expectation through the control, takes the deviation as the input, uses the improved PID operation to obtain the control amount, and generates the control command; through the input and output signal interface board to output the command, the driving device is controlled to adjust the operating parameters of the short-wave transmitter and achieve power control. The results show that, compared with the comparison system, the goodness-of-fit index between the power variation curve of the short-wave transmitter and the expected curve within 100 s is closer to 1.0 in the designed system, which proves that the system has better control performance and can maintain the short-wave, the transmitter power is stable and the research objective is achieved.

Keywords: software calibration; short wave transmitter; MVC; improve PID; power control system

0 引言

为方便人们随时随地能够交换信息, 实现信息之间的传递与共享, 通信技术发挥了独一无二的作用。短波发射机是通信技术实现和应用过程中的重要组成设备之一, 其作用是通过发射短波波段无线电信号来实现信息的传输, 原理是将要传输的信息转换为短波无线电信号形式, 然后在发射器的作用下, 发射出去^[1]。短波发射机对工作环境要求较高, 一旦受到外界环境的干扰, 如温度、气候、湿度等, 都会造成发射机功率的波动, 从而导致稳定性下

降, 而发射机功率的波动会使得无线电信号中包含大量噪声, 进而造成通信信号失真, 导致通信信号质量下降, 最终无法准确传递信息^[2]。面对这种情况, 如何有效控制短波发射机功率, 维持功率稳定成为通信领域研究的重点内容。

针对上述问题, 为有效控制短波发射机功率, 很多专家和学者都进行了相关研究, 并取得了一定的研究成果。例如, 张娜在其发表的文章中针对数字电视发射机, 开发了一种“N+1”控制系统, 在该研究中首先分析了发射机

收稿日期: 2022-03-23; 修回日期: 2022-05-19。

基金项目: 西宁市教育科研重点课题(ZYJS18003)。

作者简介: 曹青琳(1973-), 女, 河北藁城人, 硕士, 副教授, 主要从事职业教育方向的研究。

引用格式: 曹青琳, 丁莉. 基于软件校准的短波发射机功率控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 87-92.

工作原理，然后通过设计的中央控制系统同时控制每台发射机的开关和切换器，实现了数字电视发射机各功能的自动化切换^[3]。邹炜在其发表的文章中设计了一种自动调谐系统，在该系统当中在发射机上大范围布设了分布式传感器组，采集发射机处于工作状态时的运行大数据，然后借助保护算法对这些采集到的大数据进行预处理，得出反馈电压数值，最后利用这些数据实时调节发射机输出功率大小，维持其稳定输出，最终实现发射机长期可靠工作，提高其工作稳定性^[4]。

虽然前人研究都取得了一定的研究成果，但是由于缺乏有效的校准算法，无法进行精准地控制，导致短波中仍包含大量的噪声。针对上述问题，开发一种基于软件校准的短波发射机功率控制系统。通过本系统以期提高短波发射机工作稳定性，改善通信信号发射质量。

1 基于软件校准的短波发射机功率控制系统设计

受到工作环境的影响，短波发射机功率难以避免地会出现波动，导致传输出去的无线电信号失真，使得传递的信息出现偏差，影响了信息传达的准确性。面对上述问题，为提高无线通信质量，对短波发射机功率进行有效控制是十分必要的^[5]。在此背景下，设计一种基于软件校准的短波发射机功率控制系统。下面针对系统设计步骤进行具体分析。

1.1 系统基础框架搭建

借鉴 MVC 设计模式，搭建基于软件校准的短波发射机功率控制系统的基础框架^[6]。MVC 设计模式如图 1 所示。

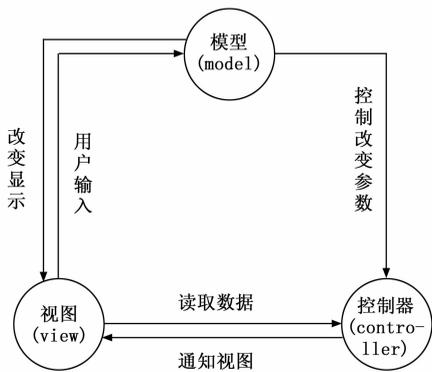


图 1 MVC 设计模式

在 MVC 设计模式当中，主要包括了三部分，即模型 (model)、视图 (view) 和控制器 (controller)。其中，模型的作用是编写应用程序以及管理数据库；视图的作用是负责人机交互，实现交互操作的可视化；控制器的作用是负责执行控制程序^[7]。

MVC 设计模式的优点在于耦合性较强，能最大程度地集成和协调各种物理设备，从而提高系统开发效率。此外，重用性高，能极大节省系统开发成本^[8]。

基于此，借鉴 MVC 设计模式设计本系统框架结构，即数据库层、业务逻辑层、控制层以及界面显示层。下面进

行分析。

1) 数据库层：负责监控短波发射机运行状态，采集短波发射机运行参数，并存储到数据库当中。

2) 业务逻辑层：负责编写各种业务逻辑，并存储到各个功能模块当中。

3) 控制层：负责调用并执行各种业务逻辑程序，实现对物理设备的控制。

4) 界面显示层：负责人机交互，用户通过界面输出控制指令，以及显示控制反馈结果^[9]。

1.2 系统总体设计

本文研究短波发射机功率控制系统的总体设计如图 2 所示。

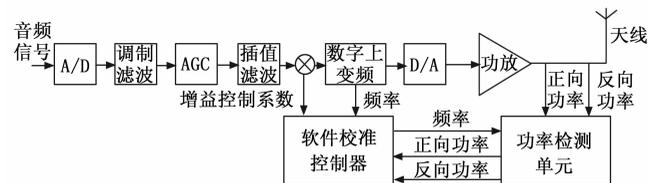


图 2 功率控制系统总体设计框图

由图 2 可知，音频信号输入到天线输出部分是短波发射机的发射通路，其功率控制部分主要由功率检测单元和软件校准控制器，利用功率检测单元实现功率采样，利用软件校准控制器实现发射机功率与预期功率之间的偏差，完成偏差校准。

1.3 系统关键硬件设计

本系统关键组成元件包括 7 个，即功率计、信号处理器、传输元件、控制器、驱动装置、输入输出信号接口板以及存储芯片。下面针对这 7 个关键硬件进行具体分析。

1.3.1 功率计

功率计的作用是实时感知工作状态下的短波发射机功率数值，为控制提供参考依据^[10]。功率计主要布设在短波发射机上。该功率计能够精准测量，误差控制在 ±0.5 dB 以内；支持 SCV \ FC \ ST 三种接口，无须复杂转换，数据采集更加灵活方便。休眠电流低至 2 μA。低功耗，使用 14 250 电池供电，每 1 分钟采集发送一次数据，可持续使用 3 年以上。该硬件的主要特点如下：

- 1) 功率测量动态范围宽达 65 dB；
- 2) 分辨率可达 001 dB；
- 3) 自动调零和校正自动量程切换；
- 4) 任意设置测量和显示范围内的频响补偿和偏置数据；
- 5) 液晶显示方式，视觉效果舒适。

1.3.2 信号处理器

信号处理器与功率计相连，主要作用是对功率计采集的信号进行放大、滤波、转换等处理，提高信号质量^[11]。信号处理器是数模混合专用集成电路，其电路图如图 3 所示。

图 3 信号处理器各个引脚和功能如表 1 所示。

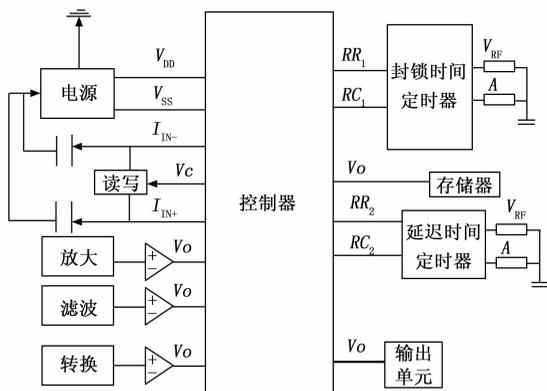


图 3 信号处理器电路图

表 1 信号处理器引脚和功能表

| 引脚 | 功能 |
|--------------------|--------------------|
| V_{DD} | 工作电源正端, 范围为 3~5 V |
| V_{SS} | 工作电源负端 |
| I_B | 运算放大器偏置电流设置端 |
| I_{IN-} | 第一级运放放大器的反相输入端 |
| I_{IN+}, I_{out} | 第一级运放放大器的同相输入端、输出端 |
| V_c | 触发禁止端 |
| V_{RF} | 参考电压及复位输入端 |
| A | 可重复触发和不可重复触发控制端 |
| V_o | 控制信号输出端 |
| RR_1, RC_1 | 输出延迟时间 T_x 的调节端 |
| RR_2, RC_2 | 触发封锁时间 T_i 的调节端 |

1.3.3 传输元件

传输元件是系统信息传递和交互的硬件载体。本系统当中的传输元件为一个传输串口服务器^[12]。该硬件支持 3 路网络链接, 实现 Modbus RTU 与 Modbus TCP 之间的互转, 适合连接支持 modbus RTU 协议的串口设备与 PC 端组态软件之间的通讯。同时, 为确保数据的稳定传输, 采用了拥有稳定的连接处理机制和保活机制的成熟 TCP/IP 协议栈, 可以根据网络和串口数据的通讯情况, 灵活进行流量控制, 实现数据有效传输, 但是一旦发生连接中断, 串口服务器将不断尝试重连直到成功若链接成功, 确保传输的数据不错包、不丢包。

1.3.4 控制器

控制器是本系统的核心硬件, 作用是遵照用户的指令调动控制程序, 控制电动机的启动、调速、制动和关停等^[13]。本系统当中的控制器为一台嵌入式工控机, 具有 CPU 的计算能力、较大的硬盘存储、友好的人机界面等。该工控机为采用 Intel Core i7-3610QE 2.3 GHz 四核处理器, 具有高速反应、操作简单、安全可靠等特点, 7×24 小时稳定运行, 功耗低节能。前置控制面板, 支持 10/100/1 000 Mbps 自适应, 支持网络唤醒、PXE 功能; 可更换千兆网口, 万兆光口, 自定义内外网口, 可多外线叠加流控负载均衡, 灵活组合多种配置, 组网简单; 具备较大内存,

最大支持 128 GB。

1.3.5 驱动装置

驱动装置的用途是在电源的作用下带动短波发射机中的发射装置做功, 在控制器的命令下调节发射功率^[14]。本系统当中的驱动装置为二相混合式, 可以高频斩波, 正弦波矢量控制, 具有较强的抗干扰性、运行平稳、可靠性好、噪声小等优点。具体功能特点如下:

- 1) 供电电源: 交流 AC18 V~80 V/4 A (或直流 DC20 V~100 V/5 A)。
- 2) 每相最大驱动器电流为 7.2 安培。
- 3) 采用精准细分正弦波电流控制技术, 低噪音, 高平稳性。
- 4) 电机锁相时, 电机电流自动分流。
- 5) 具有欠压、过压、过流保护等。
- 6) 内部跳线可改变单/双脉冲控制, 出厂设置为单脉冲。
- 7) 内部测试 (TEST): 内部测试时电机一直运转, 不需要外部控制。通过改变驱动器细分数或外接电位器 (RES 端子) 可以改变电机的运行速度。

1.3.6 输入输出信号接口板

输入输出信号接口板提供控制系统与短波发射机的连接接口^[15]。该输入输出信号接口板提供 5 个输入信号端和 6 个信号输出端, 并且搭载了高速固态继电器, 能满足高使用频率和高响应速度的要求。所有输入输出信号端都采用先进的光电隔离和滤波技术, 能有效隔离外部电路的干扰, 增加系统的稳定性。

1.3.7 存储芯片

存储芯片在系统中的作用主要是放置数据以及控制程序, 方便系统读取, 是系统中必不可少的硬件之一^[16]。本系统当中的存储芯片卡片体积小巧, 储存容量达到 128 Mbit。

1.4 系统软件设计

软件是系统控制程序实现的关键, 主要包括各种业务逻辑, 指导系统物理设备的运行。本系统软件包括登录注册模块、信号采集处理模块、串口通信模块以及软件校准控制模块^[17]。下面针对这 4 个模块程序进行具体分析。

1.4.1 登录注册模块

登录注册模块是系统的基础功能模块, 在使用系统前, 需要用户进行注册并登录, 以保障系统安全^[18]。登录注册过程如下。

步骤 1: 用户点击进入系统初始界面;

步骤 2: 用户在登录窗口输入信息, 判断该账号是否存在。

步骤 3: 该账号若存在, 判断输入的登录密码是否正确? 若正确, 系统赋予该用户登录权限, 并进入主页; 若不正确, 则重新回到登录页面, 重新进行登录操作。

步骤 4: 该账号若不存在, 系统转入注册页面, 按照注册程序, 用户进行账号注册, 输入个人信息。

步骤 5: 判断账号是否注册成功。若成功, 重新转入登录页面, 按照注册信息进行系统登录; 若不成功, 重新进行注册^[19]。

以上流程为系统的登录注册程序, 是系统最基础的程序。

1.4.2 信号采集处理模块

信号采集处理模块主要是控制功率计执行短波发射机功率信号采集和处理工作^[20]。该模块主要程序过程如下。

步骤 1: 功率计接入系统;

步骤 2: 判断是否成功接入: 若成功, 进入下一个环节; 若不成功, 则重新接入;

步骤 3: 功率计初始化;

步骤 4: 设置功率计采集相关参数;

步骤 5: 功率计开始采集;

步骤 6: 采集是否结束? 若结束, 对数据进行预处理; 若未结束, 则继续采集;

步骤 7: 预处理包括放大、滤波等处理。

$$\text{放大函数: } F_1(x, y) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot F(x, y)' \quad (1)$$

式中, $F_1(x, y)$ 代表放大后信号输出; R_2 代表电阻; R_1 代表相位; $F(x, y)'$ 代表原始信号。

$$\text{滤波函数: } F_2(x, y) = e^{-0.347 \left[\frac{F(x, y)'}{F_0} \right]^n} \quad (2)$$

式中, $F_2(x, y)$ 代表滤波后的信号输出; $F(x, y)'$ 代表原始信号; F_0 代表截止频率; n 代表滤波器阶数; 0.347 代表衰减率系数。

步骤 8: 将处理好的信号进行打包;

步骤 9: 建立存储队列;

等待存储队列所有数据包都完成存储后, 实现基础数据采集。

1.4.3 串口通信模块

串口通信模块的作用是将存储器当中的数据包转发到控制器当中, 具体过程如下。

步骤 1: 传输元件初始化, 并设置模块参数;

步骤 2: 按照读取频率读取数据库当中的数据包;

步骤 3: 建立转发队列;

步骤 4: 按照转发频率转发数据包;

步骤 5: 转发队列是否为空? 若为空, 完成数据转发; 若队列不为空, 则继续转发数据包^[21]。

串口通信模块设计中, 若是需要转发的数据过大, 还需要编写通信堵塞控制算法, 以防止在通信过程中丢失数据包, 以影响后续数据校准, 保证功率控制的准确性。

1.4.4 软件校准控制模块

软件校准控制模块是系统核心功能模块, 该模块主要是利用改进 PID 算法对控制参数进行实时校准, 实现对短波发射机功率的控制^[22]。PID 算法工作原理是根据功率计实时采集短波发射机工作参数, 然后与设置的预期参数进行对比, 校准是否符合预期标准, 并计算二者之间的差值,

根据差值按照比例 (proportional)、积分 (integral)、微分 (differential) 进行运算, 得出控制参数, 实现对短波发射机功率的控制^[13]。简而言之, PID 算法是通过实时校准误差来进行控制, 使得短波发射机功率能够不断靠近预期, 维持发射功率稳定。原理公式如下:

$$A(t) = B(t) - C(t) \quad (3)$$

式中, $A(t)$ 代表短波发射机实际功率与预期之间的偏差量; $B(t)$ 代表输入的预期功率值; $C(t)$ 代表实际短波发射机实际功率值。

按照 $A(t)$ 控制被控对象运行, 其控制公式如下:

$$D(t) = K_p A(t) + \frac{\int_0^t A(t) dt}{T_i} + K_p K_d \frac{dA(t)}{dt} \quad (4)$$

其中:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (5)$$

$$T_d = \frac{K_d}{K_p} \quad (6)$$

式中, $D(t)$ 代表 PID 输出的短波发射机功率控制量; K_p 、 K_i 、 K_d 分别代表比例、积分以及微分系数; T_i 代表积分时间常数; T_d 代表微分时间常数。

PID 三个参数是实现控制的关键, 但是基础的 PID 缺乏灵活性, 每一个工况都需要重新设置 PID 参数。针对这一点, 利用模糊逻辑对 PID 参数进行实时整定, 即构建一种基于模糊 PID 的软件校准控制器, 如图 4 所示^[24]。

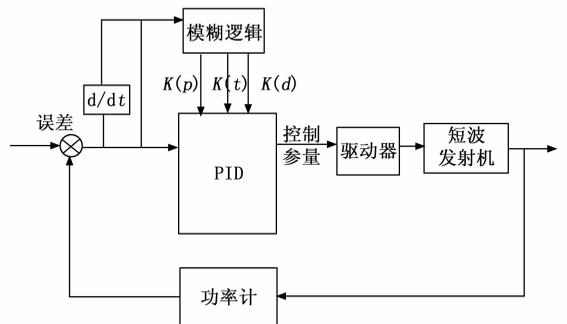


图 4 基于模糊 PID 的软件校准控制器

常规 PID 控制器的控制算为

$$u(t) = K_{(p)} e(t) + K_{(i)} \int_0^t e(t) dt + K_{(d)} \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

式中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数, $e(t)$ 代表系统误差。令误差变化率为

$$ec = \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

在本文控制器的设计中, 输入为 $e(t)$ 和 ec , 输出为 PID 控制器参数的变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。根据 e 与 ec 的变化特点进行 K_p 、 K_i 、 K_d 参数的整定:

1) 当 $|e|$ 较大时, 为提高系统的跟踪性, K_p 取较大值, K_d 取较小值, 为避免系统响应出现超调, K_i 取 0。

2) 当 $|e|$ 较小时, 为提高系统的稳定性, K_p 和 K_i 均取较大值, 此时当 $|ec|$ 较大时, K_d 取较小值, 当 $|ec|$ 较小时, K_d 取较大值。

3) 当 $|e|$ 和 $|ec|$ 均为中等大小时, 为使系统具有较小的超调, K_p 和 K_d 取较小值, K_i 适当取值即可。

根据上述参数整定原则完成模糊规则表的制定,

通过改进 PID 实现了功率发送的稳定性, 有效控制了短波发射机的工作状态^[25]。

2 系统实现与测试

为测试所设计系统的控制性能, 进行系统实现与测试, 同时在相同测试条件下, 以“N+1”控制系统、自动调谐系统的应用结果作为对比项, 以 MATLAB 作为工具, 进行对比分析。

2.1 测试环境搭建

控制系统的目标是控制短波发射机的功率, 因此以一台短波发射机作为对象, 搭建系统测试环境。短波发射机主要用于机动用户与车载台或固定台的短波通信。该发射机特点如下: 第一中频 9 MHz, 下变频, 搭载滚切波器; 400 MHz HRDDS; 缔造 C/N 特性优越的基准振荡电路; 混合式 SDR 结构, 同时搭载窄带 SDR 和宽带 SDR; 采用 18 比特 A/D 转换器, 具备数据的高分辨处理能力; 高精度步进马达, 实现干扰信号最大 70 dB 的衰减量; 主副接收机完全独立的双通道接收电路。

将系统硬件搭建在一起, 并将功率计布置在图 6 短波发射机上, 实时采集工作参数, 然后传输到系统上, 通过系统处理后, 输出校准后的控制参数, 控制图 6 短波发射机功率。

2.2 系统控制方案

系统控制方案受控端和控制端、操控软件三部分组成, 首先短波发射机主机及天线架设到空旷的野外或远端合适的地点, 控制器的控制端与受控端有线相连, 然后控制端放置在工作地点(如地下指挥所无线通信室), 通过传输元件连接功率计收发短波发射机功率数据, 系统操控计算机进行相关运算, 现场操作人员通过操作工控机对远端的短波发射机进行远程功率控制操作, 完成短波发射机功率控制流程。

2.3 功率控制预期与实际曲线

功率控制预期即功率随着时间的推移而要实现的控制标准。以 100 s 作为一个时间段, 要求短波发射机在这段时间内维持功率在 30~35 W 之间。

利用 MATLAB 中的 simulink 工具建立模糊 PID 控制模型, 利用该模型对图 6 短波发射机的功率进行控制。控制后, 绘制 100 s 内短波发射机的功率变化曲线。

短波发射机功率控制预期与实际曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 100 s 内短波发射机的功率变化预期和实际曲线存在一些差异, 其中主要集中在前 10 s, 因为

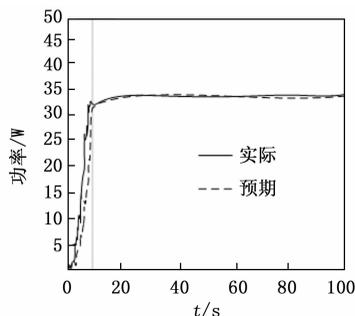


图 5 100 s 内短波发射机的功率变化预期和实际曲线图

前 10 s 的功率控制并不在预期内, 因为系统在初始时, 需要进行调试, 从而发生波动。基于此, 在后期对比计算时, 可以将前 10 s 的功率轨迹排除在外。

2.4 评价指标

评价指标选择拟合优度指数作为评价标准。短波发射机功率实际变化曲线越接近预期, 拟合优度指数越高, 就越接近 1, 系统功率控制表现越好。拟合优度计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{S}{T} \quad (7)$$

式中, R^2 代表拟合优度; S 代表实际值和预期值之间的离差平方和; T 代表实际值和预期值之间的总体平方和。

2.5 校准精度分析

为保证测试结果具有对比性, 在相同测试条件下, 利用“N+1”控制系统、自动调谐系统对图 6 中的短波发射机进行 100 s 内的功率控制, 得出控制结果, 然后根据控制结果绘制短波发射机的功率变化实际曲线, 再然后分别计算本系统实际控制曲线以及两种对比方法控制结果曲线与预期曲线之间的拟合优度指数。结果如表 2 所示。

表 2 校准精度分析

| 工况(短波发射机布置距离/m) | 所设计系统 | “N+1”控制系统 | 自动调谐系统 |
|-----------------|---------|-----------|---------|
| 100 | 0.982 2 | 0.847 1 | 0.785 9 |
| 200 | 0.954 1 | 0.821 5 | 0.814 4 |
| 300 | 0.862 5 | 0.871 1 | 0.784 7 |
| 400 | 0.947 8 | 0.833 6 | 0.824 1 |
| 500 | 0.952 8 | 0.836 5 | 0.778 9 |
| 600 | 0.968 7 | 0.814 1 | 0.792 5 |
| 700 | 0.984 4 | 0.872 2 | 0.801 4 |
| 800 | 0.975 7 | 0.869 2 | 0.803 6 |
| 900 | 0.957 4 | 0.811 7 | 0.814 2 |
| 1 000 | 0.955 6 | 0.847 1 | 0.789 2 |

从表 2 中可以看出, 随着短波发射机布置距离的增大, 与“N+1”控制系统、自动调谐系统应用相比较, 所设计系统应用控制下, 100 s 内短波发射机的功率变化曲线与图 7 预期曲线之间的拟合优度指数更大, 更接近 1, 说明本系统控制表现更好, 更能维持短波发射机功率稳定, 避免信

息丢失,提高无线通信质量,达到了研究目标,改善了当前短波发射机存在的问题。

3 结束语

综上所述,短波发射机是无线电通信领域的重要设备,起到信号转发的重要作用。维持短波发射机功率稳定是当前通信领域一直致力提高和改善的问题,短波发射机功率稳定直接关系到无线电波的质量,关系到通信是否失真,是否清晰。基于上述背景,设计一种基于软件校准的短波发射机功率控制系统。该系统通过实时采集短波发射机功率数值,实时进行误差校准来控制其功率变化,以便让功率一直在预期范围内波动,从而达到稳定功率的目的。最后通过系统实现与分析,证明了所设计系统的控制性能,达到了研究目标,实际波动一直控制在预期范围内。然而,本研究由于个人的能力以及时间的不充足,软件功能模块设计上有待进一步细化,优化控制系统设计。

参考文献:

- [1] 何秀华,王登峰,窦好刚,等.微波大功率发射机的小型化宽脉冲设计[J].微波学报,2020,36(4):38-42.
- [2] 张瑞,田永全,赵阳,等.基于STM32微控制器稳定平台数字控制系统的设计[J].弹箭与制导学报,2020,40(5):69-71,75.
- [3] 邹炜.基于分布式传感器组的发射机功率自动调谐系统设计[J].电子器件,2020,43(5):1121-1127.
- [4] 张娜.数字电视发射机“N+1”自动化控制系统设计与应用[J].电视技术,2020,44(3):15-16.
- [5] 王伟,陈义成,朱闪闪,等.基于功率控制的涡扇发动机控制系统设计[J].科学技术与工程,2020,20(3):1230-1237.
- [6] 赵云波,袁征,朱创.无线网络化控制系统的功率感知事件触发策略及其闭环稳定性[J].控制理论与应用,2020,37(4):881-887.
- [7] 邵煜伟,陶洪琪.基于GaN的输入谐波控制射频功率放大器设计[J].电子技术应用,2021,47(4):67-70,76.
- [8] 栾楠.W波段大功率回旋行波管发射机关键技术[J].现代雷达,2021,43(2):77-81.
- [9] 张鹏,王玮,徐丙垠,等.基于自适应功率输出控制的电流互感器取电电源设计方法[J].电力系统自动化,2020,44(3):194-200.
- [10] 张文,王哲,张涛,等.精准负荷控制系统通信方案及

(上接第86页)

- [18] ZHU X, LYU S, WANG X, et al. TPH-YOLOv5: Improved YOLOv5 Based on Transformer Prediction Head for Object Detection on Drone-captured Scenarios [C] //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021: 2778-2788.
- [19] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: Convolutional Block Attention Module [M]. Ferrari V, Hebert M, Sminchisescu C, et al. Computer Vision-ECCV 2018. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2018, 11211: 3-19.
- [20] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster r-cnn: towards real-

仿真试验系统设计[J].电测与仪表,2021,58(8):49-56.

- [11] 董星言,杨金波,王辉,等.基于特种车辆永磁同步电机同步控制系统设计[J].微特电机,2021,49(11):58-61,66.
- [12] 石元博,王建辉,方晓柯,等.基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计[J].控制与决策,2021,36(4):947-952.
- [13] 李冬冬,张立新,李春志,等.基于PLC控制的棉田水肥一体化控制系统设计[J].农机化研究,2021,43(6):100-104.
- [14] 宋定宇,高琳.基于STM32的动力锂离子电池极片轧机控制系统设计[J].仪表技术与传感器,2020(6):83-86,91.
- [15] 郑丽楠,陈世明.一种采用干扰观测器控制的交流伺服调速系统设计[J].中国工程机械学报,2020,18(3):258-263.
- [16] 施永,徐冬,于鸿儒,等.基于系统辨识建模的微网二次电压频率控制器参数设计方法[J].电力系统自动化,2020,44(13):89-97.
- [17] 朱伟,王虹,李首滨,等.基于嵌入式软PLC的掘进机控制系统设计[J].工矿自动化,2020,46(2):100-106.
- [18] 谢天,谢良喜,孙欢,等.基于51单片机的液压机械臂闭环控制系统设计[J].机床与液压,2020,48(5):6-10.
- [19] 钟维辉,于津,张盼华.高精度的短波发射机功率校准控制系统设计[J].计算机测量与控制,2020,28(3):128-131,137.
- [20] 张若琦,惠悦,翁婉莹,等.基于控制环叠加正交频分复用信号实现直流微网载波通信的变换器设计方法研究[J].中国电机工程学报,2021,41(16):5423-5434.
- [21] 南敬昌,陶成健,高明明,等.可重构多波段功率放大器设计与研究[J].微波学报,2020,36(2):1-9.
- [22] 杨蕾,李胜男,黄伟,等.永磁同步发电机自适应分数阶PID控制设计[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):49-58.
- [23] 段登燕,裴家涛,祖瑞,等.电机一变距螺旋桨动力系统功率优化控制[J].航空学报,2021,42(3):80-91.
- [24] 张科,刘刚,王秀茹,等.逆变器单神经元自调节PID电流控制策略研究[J].电气传动,2021,51(11):62-67.
- [25] 孙洁,王兴楠,孙晔,等.基于PLC的工业云平台控制系统设计[J].电气传动,2020,50(7):69-73.

time object detection with region proposal networks [C] //IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6):1137-1149.

- [21] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot MultiBox detector [M]. Leibe B, Matas J, Sebe N, et al. Computer vision-ECCV 2016. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2016, 9905: 21-37.
- [22] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: An incremental improvement [EB/OL]. (2018-04-08) [2018-12-25]. <http://arxiv.org/abs/1804.02767>.