

基于粒子群算法的无线充 PID 控制器优化设计

黄振华, 薛家祥

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 对于谐振式无线充电系统, 由于负载和线圈耦合变化等扰动影响, 供电池负载充电的电流若只进行开环控制易产生扰动, 故在前向通道中加入经典 PID 控制器, 对系统进行实时有效的闭环控制; 针对经典 PID 控制器的参数无法自适应整定的问题, 提出了利用粒子群算法 (PSO) 自整定设计无线充电 PID 控制器参数的方法, 并进行仿真分析和实验验证, 结果表明: 引入粒子群算法后的 PID 控制器快速性和稳定性都优于经典 PID 控制器, 调节时间减少 0.647 s, 最大超调量下降了 4.1%, 稳态误差下降了 1.04%, 证明了该方法对于改善无线充电系统输出动态特性的可行性和有效性。

关键词: 无线充电; 粒子群算法; PID 控制; 参数优化设计

Optimization Design of Wireless Charging Pid Controller Based on Particle Swarm Optimization

Huang Zhenhua, Xue Jiaxiang

(College of Mechanical and Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: For the resonant wireless charging system, due to disturbances such as load and coil coupling changes, if the current for charging the battery load is only subjected to open-loop control, it is prone to disturbance. Therefore, a classic PID controller is added to the forward channel to effectively implement the closed-loop control of system in real time. Aiming at the problem that the parameters of the classic PID controller cannot be adaptively adjusted, a method of designing the parameters of the wireless charging PID controller using particle swarm optimization (PSO) self-tuning is proposed, and simulation analysis and experimental verification are carried out. The speed and stability of the later PID controller are better than the classic PID controller, the adjustment time is reduced by 0.647s, maximum overshoot decreased by 4.1% and the steady-state error is reduced by 1.04%, which proves the feasibility and effectiveness of this method for improving the dynamic and static characteristics of the wireless charging system.

Keywords: wireless charging; particle swarm optimization; PID control; parameter optimization design

0 引言

当今时代, 电能传输方式主要是依靠导线和金属接触进行传导, 但是这种电能传输方式不可避免的会出现线路破损、老化和易受腐蚀等问题, 易引发人身安全问题, 且输电场合受导线传输局限, 因此人们一直努力探寻一种新的电能传输方式^[1]。而随着人类科技的迅速发展, 尤其是电气工程方面功率器件的重大突破, 人们在无线充电技术方面研究取得了重大成果^[2]。其中, 由 2007 年美国麻省理工学院 (MIT) 的 Marin Soljacic 教授提出的磁耦合谐振式无线充电技术, 并点亮了一盏 2 米外 60 瓦的灯泡, 标志着中等距离无线电能传输技术开始正式进入人们生活日常, 并被广泛应用于电动汽车充电、手机无线充电和医用治疗器械等领域^[3]。

收稿日期:2020-03-30; 修回日期:2020-04-27。

基金项目:福建省自然科学基金项目(2018J01541);2015 东莞市引进第三批创新科研团队项目(2017360004004);广州市南沙区科技计划项目(2017CX009);2017 东莞市军民融合项目(KZ2017-07)。

作者简介:黄振华(1994-),男,湖北黄冈市人,在读硕士研究生,主要从事智能化检测及仪器方向的研究。

但是对于磁耦合谐振式无线充电系统, 由于线圈扰动和电路参数突变等因素影响, 易使系统最后对负载的输出供电不稳定, 因此考虑在供电前加入 PID 控制器保证输出电流稳定且符合要求。而 PID 控制器能够在被控对象系统的结构和系数无法完全确定时, 利用其比例、积分和微分三个环节对系统出现的误差进行调节控制减小, 操作简单且容易设计操作, 因此在一些过多需要长期经验和必须现场调试的场合被人们广为应用^[4]。但是对于 PID 控制器的三个参数选定, 往往同样需要一定的经验, 且参数选定过程一般需要通过大量实验反复调整确定^[5], 过程冗杂麻烦, 且如果参数选定不合系统性能要求, 会严重影响系统的正常预期运行, 甚至导致系统完全不能工作^[6]。Ziegler 和 Nichols 作为最早进行 PID 参数整定研究的研究人员, 提出了 Z-N 整定方法, 奠定了经典控制器整定方法基础, 但依然存在实际模型不易建立, 不适用于时间滞后较大的对象等问题^[7]。因此本文考虑选用智能算法粒子群算法 (PSO) 进行参数自整定, 粒子群算法通过不断迭代自动寻求最佳解, 具有规则简单和求解迅速等优点^[8], 从而保证无线充电系统输出电流的稳定和快速响应调节。

1 无线充电流 PID 控制器

如图 1 所示是共振式无线充电系统工作的原理简化框

图, 其工作原理为: 首先由电网输出 220V 交流电至整流滤波电路中, 经滤波整流后处理为低频直流电压, 再输出至半桥逆变电路逆变为高频交流电压, 高频交流电在发射端中的 LC 振荡回路中产生振荡电流, 当接收端的 LC 振荡电路频率设定与发射端相等, 两端线圈便实现频率共振, 通过强耦合磁场, 接收线圈产生接收回路输入电压, 输入电压经过整流滤波为直流电压输出至 RCD 钳位反激电路, 最后输出稳定和预期要求的的充电电流供给负载。

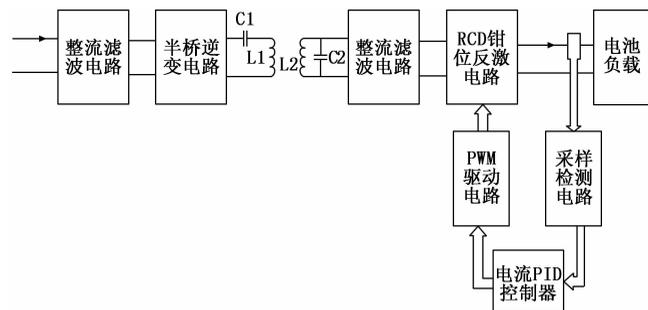


图 1 磁耦合式无线充电系统框图

而在实际工作时, 由于负载变化和线圈耦合情况易变化等因素影响, 输出电流在开环控制过程中易发生波动偏移, 如果不进行有效干预会逐渐偏离正常限定值, 严重情况下甚至会损害充电设备造成事故。因此考虑在给负载充电前加入电流 PID 控制器进行闭环控制, 通过对 MCR-WCT 系统的实际输出进行电流实时采集检测, 将其与设定参考电流值的偏差输入 PID 控制器, 然后控制器将调节电路输送至 MCR-WCT 系统中的占空比, 从而将输出值恢复至设定值范围, 保证输出电流的快速调节和稳定输出。

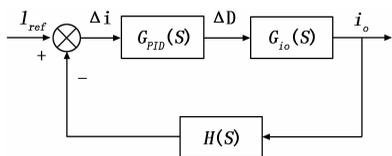


图 2 经典 PID 电流闭环控制

将 MCR-WCT 系统电流输出控制环节简化为闭环负反馈系统, 计算出其闭环传递函数有:

$$\Phi(s) = \frac{G_{PID}(s)G_{i_o}(s)}{1 + G_{PID}(s)G_{i_o}(s)H(s)} \quad (1)$$

其 PID 控制器传递函数有:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

PID 控制器对于线性控制往往能发挥较大作用, 但是在非线性或者动态特性时变系统控制效果却不太理想^[9], 主要是因为式 (2) 中的 K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数无法在线自整定, 而系统能否正常工作一般主要取决于这三个参数, 但无线充电系统由于线圈耦合和负载变化等因素可能导致输出不稳定, 即难以满足 MCR-WCT 系统需自动调整以适应工况不断变化的性能需求, 因此需设计一种控制器参数随系统工作变化而自动调整以实现预期输出的方案。

2 基于粒子算法的 PID 参数控制

粒子群算法 (PSO), 作为一种借助计算机技术发展而提出的一种新型智能优化算法, 主要受启发于鸟儿和鱼的群体觅食行为研究^[10]。它的算法基本核心就是: 在一个群落中, 利用独立个体间的信息进行互相交流传递, 从而在一个待求解区域中, 使原本无序的群体运动问题逐渐演化为有序可寻的过程, 最终以寻取求解问题的最优解^[11]。

即假定一个场景: 在一片地区中只有一个食物, 此时有一群鸟在随机进行觅食活动。但是这群鸟并不知道该食物的确切位置, 只知道食物与自己目前位置的距离。所以为了寻找食物, 鸟群便在觅食过程中不断与其它鸟儿交流此时自己与食物的距离, 从而知道自己距离食物最近的位置和鸟群此时距离食物最近的位置, 通过如此不断信息交流, 整个鸟群便逐渐靠拢食物源, 直至最终寻找到空间中这唯一的一块食物, 即找到了问题的最佳解决方案^[12]。

所以在粒子群算法中, 上述场景中的每只鸟便是一个粒子, 粒子间信息相互分享传递, 通过共同协作交流寻找到唯一食物, 即所求问题的最终解。本文引入粒子群算法, 利用其自学习特性对 PID 控制器的 K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数在求解空间中自寻优得最佳组合值, 改善系统的动静态性能, 保证无线充电系统的输出电流稳定输出。如图 3 所示是加入粒子群算法的 PID 控制器系统的结构框图。

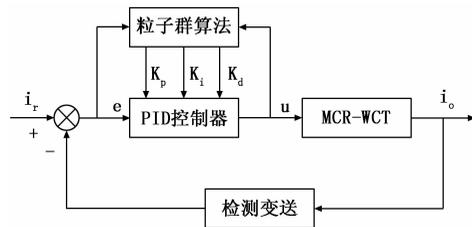


图 3 粒子群算法系统结构框图

2.1 适应度函数

粒子寻优算法中, 为了判断在搜索空间中当前所搜寻解与最优解的趋近程度, 则需要引入一个适应度函数来进行计算判断, 以使所求解逐步趋近最优解。而适应度函数的构建也十分关键, 因为它决定了所求解趋近最优解的准确性和快速性, 只有对不同系统选择对应合适的适应度函数, 才能实时兼顾局部和全局搜寻过程的搜寻能力。针对 MCR-WCT 系统, 本文的适应度函数选取如公式 (3), 选择对时间与误差绝对值的乘积进行累积分求得:

$$fitness = \int_0^t |e(t)| dt \quad (3)$$

其中, $e(t)$ 为绝对误差。

2.2 粒子群参数初始化

PSO 算法运行前首先需要各项参数进行初始定义, 因此定义求解空间维度为 m , 随机分布粒子个数为 n , 而每个粒子代表着 PID 控制器里待优化的一个参数集 $\{K_p, K_i, K_d\}$, 每一维则代表着一个待优化参数。其中, 第 i 个粒子

在第 m 维中的位置用矢量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im})$ 表示, 速度用矢量 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{im})$ 表示。

2.3 粒子位置和速度更新

在每次迭代过程前, 首先对粒子位置和速度随机初始化, 然后对每个粒子根据公式 (3) 计算出各自目标函数解。迭代过程中, 粒子则主要依据不断趋优的粒子个体历史寻找到的局部最佳解 p_{best} 和粒子群整体所搜寻到的最佳解 g_{best} 这两个值, 来计算获取个体的位置和下一次迭代所搜寻的方向, 从而逐渐趋于最优解。

依据逐步趋向最佳粒子的规律, 粒子速度和位置更新计算分别根据公式 (4) 和 (5) 求得:

$$v_{ij}^{t+1} = \omega v_{ij}^t + c_1 r_1 (p_{best_i} - x_{ij}^t) + c_2 r_2 (g_{best} - x_{ij}^t) \quad (4)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \quad (5)$$

上式中, v_{ij}^{t+1} 和 v_{ij}^t 分别表示粒子速度在 $t+1$ 时刻和 t 时刻的 j 维分量, x_{ij}^{t+1} 和 x_{ij}^t 分别表示粒子位置在 $t+1$ 时刻和 t 时刻的 j 维分量; ω 为惯性权重, 取值非负; c_1 和 c_2 分别为粒子的独立认知因子和群体学习因子, 且 c_1, c_2 的取值范围为 $[0, 4]$; r_1 和 r_2 则为随机数, 取值范围为 $[0, 1]$ 。

2.4 惯性权重

参数 ω 称为惯性权重, 可理解为物理学中的惯性, 即反映着粒子的过去运动状态对其之后运动趋势的影响。惯性权重值的引入保证了粒子群算法的寻优精确性和快速性, 因为在搜寻过程不同时期速度和精度要求不同, 所以只有对搜寻过程的不同时期根据迭代过程合理调整搜寻范围和速度, 才能充分保证寻优全过程较快且搜寻结果精确^[13]。

在搜索前期, 搜索范围较大因此可以考虑设定搜索速度较快才能保证全局搜索范围大, 则此时权重值应选用较大值; 而到后期是则为局部搜索, 应当考虑适当降低搜索速度以保证搜索精度和算法收敛, 则此时应当选用较小权重值进行搜索, 从而在整体搜索过程兼顾粒子的搜寻速度和精确度。因此, 为保证的取值随算法迭代变化, 本文考虑采用线性递减权重 (LDW) 策略, 取值公式为:

$$\omega(t) = \omega_{ini} - \frac{\omega_{ini} - \omega_{end}}{t_{max}} t \quad (6)$$

式 (6) 中, ω_{ini} 为起始迭代时的惯性权重值, ω_{end} 为最终迭代次数的惯性权重值; t 为目前迭代次数, t_{max} 为设定的最大迭代次数。在本文中, 依据典型权重设置有, $\omega_{ini} = 0.9$, $\omega_{end} = 0.4$ 。

2.5 算法实现的步骤

1) 种群初始化, 设定粒子数和搜寻空间维度, 且对所有粒子位置和速度进行限制和随机初始化。

2) 设定算法的最大迭代次数, 且定义初始迭代次数为 1, 开始进行迭代循环。

3) 第一次迭代时, 设置第 i 个粒子赋值为个体最佳解 p_{best} 和整体最佳解 g_{best} , 然后在后续迭代过程中依据适应度函数依次求得各个粒子适应度值, 且根据适应度值与粒子历史适应度值比较, 若当前粒子较优则进行更新替换为个

体最佳解, 否则维持不变; 同理, 再将当前最优粒子与群体已寻得最优粒子进行比较, 选择较优者作为整体最佳解。

4) 依据更新公式 (4) 和 (5) 来进行粒子的速度和位置更新, 且如果粒子位置和速度值超出限定范围, 则将与粒子最接近的边限定值赋值给粒子, 继续进行迭代运算。

5) 循环终止条件判断: 当前迭代次数是否达到设定最大迭代次数, 若等于则退出循环, 输出搜寻到的最优解; 否则直至满足循环终止条件。

具体算法流程图如图 4 所示。

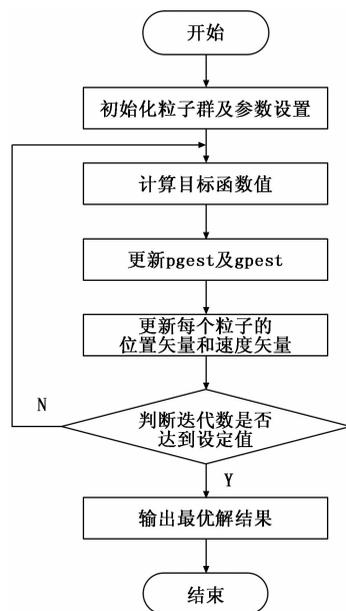


图 4 粒子群算法流程图

3 MATLAB/simulink 仿真分析

本文选用 Matlab 软件中的 Simulink 可视化仿真工具, 通过在 Simulink 中构造基于 PSO 算法的无线充电系统输出电流控制器模型, 并实现算法程序编程求得控制器最优参数组合, 进行 PID 控制器参数的优化设计和实验仿真分析。由于谐振式无线充电系统属于高阶系统且具有非线性, 现为方便后续对系统的仿真分析和计算, 对谐振式无线充电高阶系统进行降阶近似处理, 忽略二阶以上谐波分量的影响^[14], 得到系统开环传递函数:

$$G_w(s) = \frac{k}{(s - \omega_1)(s - \omega_2)} \quad (7)$$

其中, $k = 2, \omega_1 = 0.5, \omega_2 = 0.25$ 。

在算法优化搜寻过程中, 依据经典控制法所设计选定的 PID 控制器参数限定 K_p, K_i, K_d 的搜寻范围分别为 $[0, 100], [0, 50], [0, 20]$, 在此范围内依次将不同参数组合代入系统, 比较选取迭代过程中各粒子适应度函数, 最小值即为最终 PID 控制器参数最佳组合值, 表明此参数组合下控制器效果最优。

对于粒子群算法寻优过程, 对各参数进行初始化有粒

子总数 $n=50$, 搜索空间维数 $m=3$, 学习因子 $c_1=c_2=1$, 最大迭代次数 $t_{max}=100$ 。现仿真设定输出电流参考值为 $i_r=1\text{ A}$, 则输入信号可视为一个单位阶跃信号, 从而得出由粒子群算法整定的 PID 控制器所控制输出的无线充电系统的单位阶跃响应性能。

在 Simulink 中建立仿真模型如图 5 所示, 对系统输入单位阶跃信号, 然后将粒子群算法根据系统性能所自动寻优的参数输入至 PID 控制器, PID 控制器对无线充电系统进行调节控制, 最后用示波器检测并显示系统最后输出电流波形, 以通过仿真验证粒子群算法对于 PID 控制器参数自寻优设计的可行性。

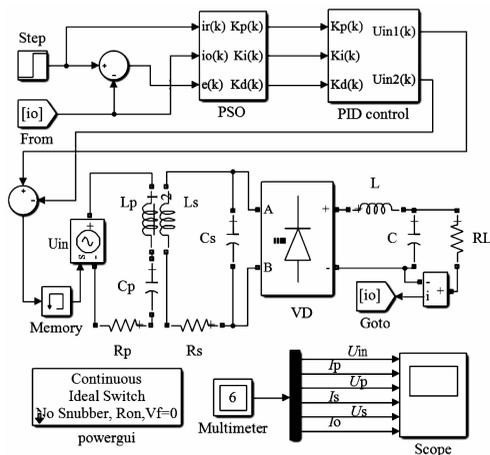


图 5 Simulink 仿真模型

经 PSO 算法和 Z-N 法整定的控制器的输出仿真波形分别如图 6 所示:

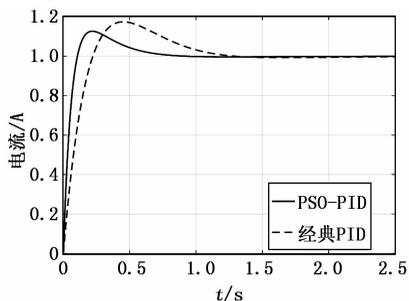


图 6 PSO 算法 PID 控制与经典 PID 控制对比

为便于比较, 列表分别经 Z-N 整定法和基于粒子群算法整定确定的最优 PID 参数和性能指标如表 (1) 所示, 对比分析易知: 基于粒子群算法优化后的 PID 控制器动静态各性能都较优于经典 PID 控制, 调节时间减少了 0.647 s, 最大超调量下降了 4.1%, 输出电流稳态值也从 0.981 2 A 上升至 0.991 4 A, 稳态误差下降了 1.04%。

而对于粒子群算法的寻优过程, 其迭代收敛过程曲线如图 7 所示。易知, 粒子群算法的寻优速度较快, 当迭代至 32 次左右时, 即寻得较优解。则表明在实际应用中对于控制器参数寻优过程迅速, 能够对于系统工况变化及时作出调整, 保证系统对线圈耦合变化等突发情况作出及时反

表 1 整定参数和性能指标的对比

控制参数	经典 PID			PSO-PID		
	Kp	14.0785	48.0763			
	Ki	11.3341	55.6609			
性能指标	Kd	4.3719	10.3812			
	σ	1.174	1.126			
稳态值	ts/s	1.253	0.606			
	$i_0(\infty)$	0.9872	0.9914			

应, 实现系统的快速响应和电流的稳定输出。

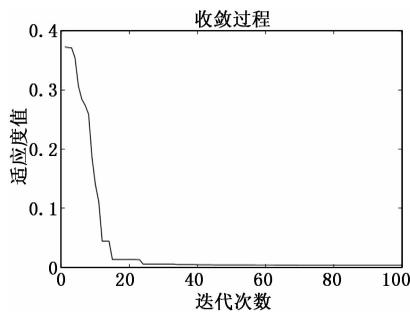


图 7 粒子群算法的收敛曲线

最后, 根据粒子群算法寻优得到的参数设计无线充电电流 PID 控制器, 并进行充电电流波形测试实验, 此次试验负载选用的是 48V/100AH 钛酸锂电池组, 且设置半桥输入电压为 220V, 充电电压设定为 48V。如图 8 所示为加入粒子群算法后 PID 控制的充电电流波形图, 依波形易看出开始进行充电后充电电流能够迅速上升并稳定在设定电流值, 超调量较小并迅速回调稳定, 且充电过程中电流波形平稳, 能够实现对电池组负载的稳定充电, 表明基于粒子群算法的无线充电电流 PID 控制器对于控制输出充电电流效果较理想。



图 8 充电电流波形

4 结束语

针对于谐振式无线充电系统输出电流不稳定的问题, 本文提出了一种基于粒子群算法自整定无线充电电流 PID 控制器参数的方法, 该方法计算简单且效率较高, 能够对无线充电系统提供给负载充电的输出电流实现良好控制, 保证了稳定输出提高系统稳态性。该算法与经典 PID 控制相比控制效果更理想, 能够较为准确整定 PID 参数, 且经过优化整定后的 MCR-WCT 系统的电流输出能够实现快速

调整, 稳定性也得到较大改善。经过充电实验验证, 表明该方法可有效保证无线充电输出电流稳定输出在设定值, 具有实际应用意义。

参考文献:

- [1] 李超. 磁耦合谐振式无线输电技术简述 [J]. 智慧工厂, 2018 (9): 43-44.
- [2] 尚云博. 磁耦合谐振式无线输电技术发展及应用 [J]. 中国建材科技, 2016, 25 (3): 82-83.
- [3] K Parmesh, Rashmi Prafullakumar Neriya, M Varun Kumar. Wireless Charging System for Electric Vehicles [J]. International Journal of Vehicle Structures & Systems, 2017, 9 (1): 23-26.
- [4] 陈文静. 基于智能控制的 PID 控制方式的研究 [J]. 电子测试, 2020 (5): 117-118.
- [5] Roger Miranda-Colorado, Luis T. Aguilar. Robust PID control of quadrotors with power reduction analysis [J]. ISA Transactions, 2020, 98: 47-62.
- [6] 穆克, 苏成利. 一种改进的模式识别自整定 PID 控制方法 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (7): 1531-1534.
- [7] Abolfazl Simorgh, Abolhassan Razminia, Vladimir I. Shiryaev.

System identification and control design of a nonlinear continuously stirred tank reactor [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 173: 16-31.

- [8] 叶海平. 基于改进粒子群算法自整定伺服系统 PID 控制器的研究 [J]. 内蒙古工业大学学报 (自然科学), 2018, 37 (5): 382-386.
- [9] 杜美君, 张伟, 谢亚莲. 基于粒子群算法的 PID 控制器参数优化 [J]. 电子科技, 2019, 32 (6): 7-11.
- [10] 袁春元, 蔡锦康, 王新彦. 基于粒子群算法的车辆悬架 PID 控制器研究 [J]. 中国农机化学报, 2019, 40 (5): 91-97.
- [11] Yi Ye, Yin Chenbo, Gong Yue, et al. Position control of nonlinear hydraulic system using an improved PSO based PID controller [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 83: 241-259.
- [12] 李瑞瑞. 基于粒子群算法的广义预测控制及其应用研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
- [13] 皮倩瑛, 叶洪涛. 一种动态调节惯性权重的粒子群算法 [J]. 广西科技大学学报, 2016, 27 (3): 26-32.
- [14] 周继昆, 吴付岗, 张荣. LCL 型 IPT 系统广义状态空间平均法建模与分析 [J]. 科技通报, 2015, 31 (11): 215-219, 224.

(上接第 74 页)

强度最高为 205 dBm, 最低为 100 dBm, 与实际值基本一致。

3) RF3: 使用基于人工监测频谱监测系统在 90 s 监测时间内, 监测信号强度最高为 225 dBm, 最低为 100dBm; 使用基于开关矩阵监测系统在 90 s 监测时间内, 监测信号强度最高为 310 dBm, 最低为 210 dBm, 实际值在 90 s 监测时间内, 监测信号强度最高为 325 dBm, 最低为 210 dBm。

4) RF4: 使用基于人工监测频谱监测系统在 90 s 监测时间内, 监测信号强度最高为 95 dBm, 最低为 25 dBm; 使用基于开关矩阵监测系统在 90 s 监测时间内, 监测信号强度最高为 245 dBm, 最低为 100 dBm, 实际值在 90 s 监测时间内, 监测信号强度最高为 270 dBm, 最低为 100 dBm。

通过上述研究内容可知, 使用基于开关矩阵监测系统对四路射频输入端处信号监测精准度较高。

5 结束语

针对卫星通信网络管理中心的实际工作需求, 设计了一种基于交换矩阵的卫星通信多信道测控站频谱监测系统。大量收集, 使人力资源从繁重的监控任务中解放出来, 提高了工作效率。使用基于开关矩阵监测系统对四路射频输入端处信号监测系统, 不仅提高了卫星通信和传输的使用可靠性, 还提高了卫星通信管理的自动化水平, 在卫星公司网络管理中心和通信业务监测等领域具有广泛的推广和应用价值。

该系统支持不同类型微波开关的替换和组合, 但需要根据开关配置手动生成针对控制系统的配置文件。各类型

微波开关的自动检测和图形化配置, 使用户功能更加完善, 使用更加方便, 是今后的发展方向。

参考文献:

- [1] 张琪, 林辉. 基于 STK 轨道预报数据的北斗卫星导航系统频谱监测选址分析 [J]. 电信科学, 2018, 34 (5): 72-80.
- [2] 陈富国, 蔡敏, 尹军华, 等. 基于姿态传感的隔离开关位置监测系统设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2019 (3): 101-105.
- [3] 刘红军, 管黄, 朱玉锦, 等. 智能变电站间隔集群测控模式下的运维体系研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (7): 159-165.
- [4] 刘适, 黄晓峰, 毛志毅, 等. 嫦娥四号着陆器测控通信系统设计与验证 [J]. 航天器工程, 2019, 28 (4): 85-93.
- [5] 王旭峰, 董科雨, 周建华, 等. 基于 K60 的远程多通道 OTDR 监测系统设计 [J]. 光通信技术, 2018, 42 (8): 26-29.
- [6] 延野, 钱勇, 段大鹏, 等. 基于 ZigBee 的开关柜局部放电在线监测系统 [J]. 高压电器, 2018, 54 (9): 76-84.
- [7] 赵宏宇, 姚红艳. 毫米波 massive MIMO 系统中混合连接的混合预编码设计 [J]. 通信学报, 2020, 41 (3): 45-52.
- [8] 梁福和. 基于 ZigBee 的煤矿中央变电站监控系统设计 [J]. 煤炭技术, 2019, 38 (6): 167-169.
- [9] 陈俞娴, 郭伟, 桂良启, 等. 基于 ARM 与 FPGA 的气象微波辐射计测控系统设计 [J]. 计算机工程, 2019, 45 (8): 86-91.
- [10] 刘燕都, 焦义文, 陈雨迪, 等. 虚拟化测控站体系结构设计与关键技术 [J]. 电讯技术, 2020, 60 (4): 378-385.