

合肥先进光源磁铁电源自优化控制器设计

邓超 胡保进 周梁缘 陈一飞 张海燕 高辉

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 合肥先进光源(Hefei Advanced Light Facility, HALF)是基于衍射极限储存环的第四代同步辐射光源,其电子束能量为2.2 GeV,发射度设计目标小于100 pm·rad。由于合肥先进光源需要上千台磁铁稳流电源,磁铁稳流电源要求长期稳定度在 5×10^{-5} 以内,且在改变电流工作点时应避免阶跃响应超调,实现平滑过渡,采用常规比例-积分-微分控制器(Proportional-Integral-Derivative Controller, PID)参数整定的经验凑试法需要耗费大量时间。针对以上要求,设计一种基于多项式回归和遗传算法的PI控制器参数自整定算法,并在磁铁稳流电源样机上完成开发和验证。测试结果表明,其主要技术指标满足使用要求,调试效率显著提高。

关键词 合肥先进光源, 磁铁稳流电源, 多项式回归, 遗传算法

中图分类号 TL503.3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240276

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240276

Design of a self-optimizing magnet power supply controller for Hefei Advanced Light Facility

DENG Chao HU Baojin ZHOU Liangyuan CHEN Yifei ZHANG Haiyan GAO Hui

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract [Background] The Hefei Advanced Light Facility (HALF) is a fourth-generation synchrotron radiation source based on a diffraction-limited storage ring. Its electron beam energy is 2.2 GeV, with an emittance target of less than 100 pm·rad which requires stability within 5×10^{-5} for the magnet steady-state power supply and reduces overshoot in step response when changing the current operating point. Due to the need for over a thousand magnet steady-state power supplies at HALF, the empirical tuning method using conventional proportional-integral-derivative (PID) controller parameters requires a significant amount of time. [Purpose] This study aims to design a PID controller parameter auto-tuning algorithm for the magnet steady-state power supply of HALF, to achieve optimal PI parameters. [Methods] Based on polynomial regression and genetic algorithms, an auto-tuning algorithm for PI controller parameters was developed for the magnet steady-state power supply controller. Then, BUCK circuit structure was adopted for the magnetic steady current power supply, and the simulation and physical experiment verification of the prototype of the magnetic steady current power supply were carried out. Finally, this algorithm was integrated with the supervisory computer system to record various data points. Development and testing of this algorithm were conducted on the magnet steady-state power supply to verify the stability of the output current. [Results] The test results of the power supply step response and output current stability show that the step response achieves a smooth transition, and the rising speed is increased several times. The output current stability is within $1 \times$

超级陶聚装置关键技术攻关项目、合肥先进光源项目资助

第一作者: 邓超, 男, 1996年出生, 2019年毕业于常熟理工学院, 现为硕士研究生, 研究领域为加速器高精度稳流电源控制技术

通信作者: 张海燕, E-mail: zhy@ustc.edu.cn

收稿日期: 2024-08-26, 修回日期: 2024-12-06

Supported by the Super Tau-Charm Facility Key Technology Research Project and HALF Project

First author: DENG Chao, male, born in 1996, graduated from Changshu Institute of Technology in 2019, master student, focusing on high precision steady current power supply control technology for accelerators

Corresponding author: ZHANG Haiyan, E-mail: zhy@ustc.edu.cn

Received date: 2024-08-26, revised date: 2024-12-06

10^{-5} . The key technical indicators meet the operation requirements and significantly improve the debugging efficiency. [Conclusions] The algorithm proposed in this paper provides an effective method for improving the debugging efficiency of large-scale power supplies in the future.

Key words Hefei Advanced Light Facility, Magnet steady-state power supply, Polynomial regression, Genetic algorithm

目前国内各个加速器磁铁稳流电源的控制系统普遍采用经典的比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制策略,将被控对象归纳为一个传递函数后,根据系统动态特性和期望的闭环频率响应特性,通过解析计算来确定控制参数大致范围,再利用经验凑试法来手动调整PID控制器参数,这种方法不但要求具备深厚的理论知识和丰富的整定经验,而且难以确保控制器参数最优化^[1-3]。实际上,在加速器领域针对PID控制器参数自整定算法的研究与应用较少。文献[4]中提出了一种基于神经网络参数自整定方法,该方法自适应性强、调节效率高,可以根据系统的实时动态响应进行调整,但在初始值选择不当的情况下可能导致闭环系统不稳定,需要人为设定的参数较多,并且实时响应也不如传统PI控制器迅速,限制了其实用性;文献[5]提出一种将神经网络与模糊控制相结合的模糊神经网络参数自整定算法,该算法能够实现较好的动态响应特性,鲁棒性好,可以提高系统的控制精度,但容易陷入局部最优,随着系统复杂度增加,其模糊规则库可能变得庞大且难以维护;文献[6]提出一种基于遗传算法的参数自整定方法,该方法全局优化能力强,能够在较大的搜索空间中寻找接近最优解,适应度函数的精确性直接影响遗传算法的性能和最终结果,需要手动计算适应度函数,自动化程度不足。

为了提高合肥先进光源(Hefei Advanced Light Facility, HALF)磁铁稳流电源的调试效率,设计了一种基于多项式回归和遗传算法的PI控制器参数自整定算法,该算法首先需要收集大量的系统输入输出数据,后采用多项式回归建立关于系统稳定度的目标函数,再利用遗传算法得到全局范围内的最优解,最后在磁铁稳流电源样机上进行了测试,与传统经验凑试法进行对比,验证算法的可行性,并作为经典PID控制算法的补充。

1 算法介绍

1.1 多项式回归

多项式回归是线性回归的一种扩展,使用曲线来拟合数据,处理自变量和因变量之间存在的非线性

关系,可通过增加自变量的高次项来逼近实测数据,从而在数据拟合方面提供优越的性能。然而,如果过度追求紧密地贴合训练数据,可能会忽略一般趋势,导致过度拟合^[7-8]。考虑到模型的复杂度和过拟合风险,使用二元二次多项式回归,具体如式(1)。

$$f(x,y) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3y + a_4y^2 + a_5xy \quad (1)$$

式中: x 为PI控制器中的 K_p , y 为PI控制器中的 K_i 。

为了使拟合的曲线 $f(x,y)$ 能够尽可能地反映所有数据点的变化趋势,同时要求误差尽可能小,通常根据“偏差平方和最小”即最小二乘原则来拟合曲线,如式(2)所示。

$$\sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i) - S_i]^2 \quad (2)$$

式中: δ_i 代表误差; S_i 为PI控制器参数实测对应的稳定度。

将 N 个点带入曲线 $f(x,y)$,利用“法向量”方程组进行求解,得到最小二乘法的法方程组,其矩阵形式如式(3),再对其两边左乘 A^T ,可得式(4)。

$$A_{n \times 6} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & y_1 & y_1^2 & x_1 y_1 \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & y_n & y_n^2 & x_n y_n \end{pmatrix} \quad \vec{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_5 \end{pmatrix} \vec{y} = \begin{pmatrix} f(x_1, y_1) \\ \vdots \\ f(x_n, y_n) \end{pmatrix} \quad A_{n \times 6} \vec{a} = \vec{y} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i) x_i y_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

最终,由式(4)通过矩阵运算可解出多项式系数,得到磁铁稳流电源关于系统稳定度的目标函数。

1.2 遗传算法

遗传算法模拟生物遗传学中“优胜劣汰”的规则,通过模拟自然选择过程在一个广泛的解空间内不断逼近最优解^[9-11]。在遗传算法中个体通常为某个问题的解,而种群为解的集合,将PI控制器参数

序列作为初始化种群,磁铁稳流电源关于系统稳定度的目标函数作为适应度函数,通过不断地交叉、变异、编码、解码和选择,最终得到全局范围内的最优解^[12]。

其主要有如下三个执行过程:

(1) 编码解码:将不同的实数用二进制字符串表示,不需要了解一个实数对应具体二进制数值,只需保证有映射关系即可,解码时逆向计算,可得到对应的实数。

(2) 适应度和选择:适应度函数为系统稳定度的目标函数,根据适者生存规则,个体对应的适应度函数值越小,对环境的适应度越好。选择不意味着完全以适应度高低为导向,单纯选择适应度高的个体将导致算法快速收敛到局部最优,算法遵循原则:适应度越高,被选择的概率越高,适应度越低,被选择的概率越低,其选择的概率如式(5)。

$$p = f(x_i, y_i) / \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i) \quad (5)$$

(3) 交叉变异:交叉指每个个体由其父亲和母

亲繁殖产生,子代个体基因部分来自父亲,部分来自母亲,这里的交配点是随机产生的。父亲个体为 q_1^i ,母亲个体 q_2^i ,新个体 q^{i+1} ,交叉操作如式(6)。通过交叉后的子代可能发生变异,使得其基因既不来自父亲也不来自母亲,在某个位置上变为相反数值,变异操作可以保持群体多样性。交叉和变异不是必然发生的,而是有一定概率发生,目的是让算法朝着优化的方向进行,并且跳出局部最优解。

$$q^{i+1} = aq_1^i + (1-a)q_2^i \quad (6)$$

式中: a 为0~1的随机数。

1.3 控制系统算法设计

基于多项式回归和遗传算法的PI控制器参数自整定算法对传统PID控制器进行了重要的改进,引入了参数自整定机制。该算法依赖大量的系统输入输出数据,其控制系统方框图如图1所示^[13],通过多项式回归对输入输出数据进行建模,得到关于系统稳定度的目标函数,再利用遗传算法进行寻优,最终得到最优PI参数。

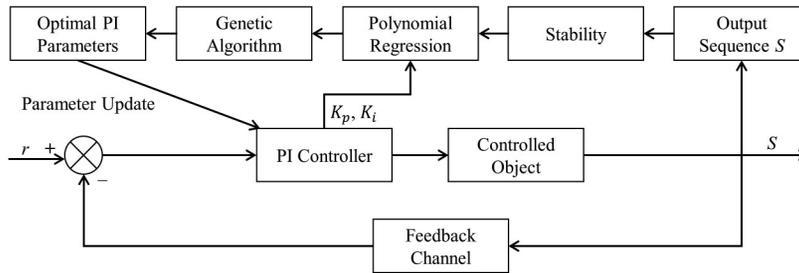


图1 控制系统方框图
Fig.1 Block diagram of the control system

2 自适应控制器设计

合肥先进光源磁铁稳流电源控制器采用ZYNQ-7000系列系统级芯片(System on Chip, SoC)作为核心控制芯片,集成双核ARM Cortex-A9与现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA),提供了高度的灵活性和强大的处理能力。利用可编程逻辑部分设计高精度模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)和高分辨率脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM),并通过高级可扩展接口(Advanced eXtensible Interface, AXI)总线实现了可编程逻辑与片上处理系统高速数据交互。系统通过RS485总线与人机交互触摸屏通信,作为电源本地控制终端,同时配备W5500以太网收发器和ePort-G集成式RJ45插座(通信速度可达千兆),通过以太网收发器充当电源的远程控制终端接

入HALF上层的EPICS控制系统^[14]。为监测电源系统其他模拟量(母线电压和输出电压等),需要较高分辨率和采样率的多通道的A/D转换器。通过对分辨率在16-bit、采样率200 kSPS(kilo-Samples Per Second)的多通道ADC的比较,选择ADI公司的AD7606作为磁铁稳流电源控制器的多通道A/D转换器,该转换器能够准确还原各种信号变化,避免出现混叠现象,可以根据输入信号的幅度选择合适的输入范围,更好地适配这些信号,满足控制器的需求。图2为合肥先进光源磁铁稳流电源控制卡实物。

在电流闭环反馈系统中,对于A/D转换器的选择至关重要。由于电源要求最小分辨率 1×10^{-5} ,至少需要18位的ADC才能满足要求,考虑控制板卡的通用性,同时在动态快校电源上使用,需要高采样率以满足响应速度的需求,ADI公司的LTC2377-20

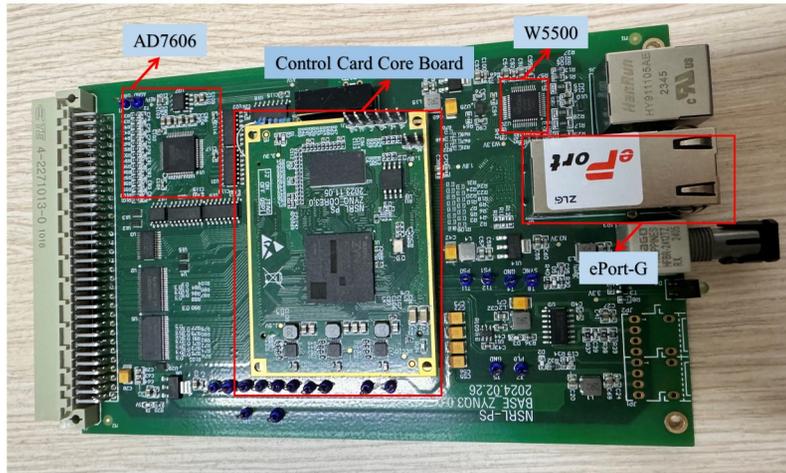


图2 合肥先进光源磁铁稳流电源控制卡实物图
Fig.2 Snapshot of the magnet steady-state power supply controller board for HALF

是一款具有基准电压和全差分输入的 20 位 500 kSPS 逐次比较型 ADC，能够以极高的精度对电流进行采样和量化，为电流闭环反馈系统提供极其精细的电流信息，高采样率使其能够迅速响应电流的变化，确保控制系统能够及时做出调整，有效抑制电流波动，极大地提高了系统的稳定性和可靠性，能够满足现在和将来更高要求的应用。在电源处理算法调节上，采用软件低滤波算法对高精度 ADC 采集的原始数据进行处理，保留 1 kHz 以下的信号并转化成真实的电流输出值，对真实电流输出值与给定电流值的误差进行 PI 控制，使得实际输出电流值达到给定目标值。

基于多项式回归和遗传算法的 PI 控制器参数自整定算法，算法首先在预设的参数范围内随机生成众多 PI 参数组合并进行初步筛选，在此过程中，将输出电流从 0 A 上升到 1 A，同时对超调量施加限制，将符合要求的 PI 参数保留，接着对这些保留下来的 PI 参数进一步筛选，测试其 5 min 短期稳定度是否达到 5×10^{-5} ，将符合要求的 PI 参数保留并记录其稳定度。最终可得到 N 组 PI 参数及其对应的稳定度数据，通过对 N 组数据分析，可使用二元二次多项式回归对 N 组数据进行建模，再利用遗传算法在全局范围内搜索最优解，整个参数整定流程如图 3 所示。

在 N 组 PI 参数中选取 40 组数据进行建模，完整参数自整定过程约需要 5 h，可得到系统最优 PI 参数，节约了大量磁铁稳流电源调试时间，当系统负载发生变化时，只需重复上述流程即可再次获得最优 PI 参数。通过这种高效、可靠的参数自整定算法，能够灵活应对各种负载条件。

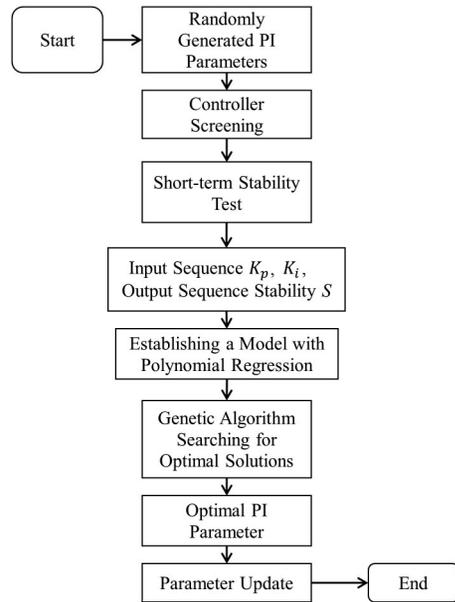


图3 参数自整定算法流程图
Fig.3 Flow chart of parameter auto-tuning algorithm

3 仿真与实验

3.1 磁铁稳流电源

合肥先进光源磁铁稳流电源采用 H 桥或 BUCK 电路结构，为了确保仿真与实验结果的准确性，特别选取了基于 BUCK 电路结构的磁铁稳流电源样机进行仿真与实物实验验证。

基于 BUCK 电路的磁铁稳流电源主要由 4 个部分组成：交直流转换模块、MOSFET 开关元件、二阶低通滤波器电路和负载。磁铁稳流电源额定输出 80 A/15 V，经过 BUCK 电路功率转换后，电流通过滤波后供给负载，图 4 为功率转换器模块框图^[15-16]。

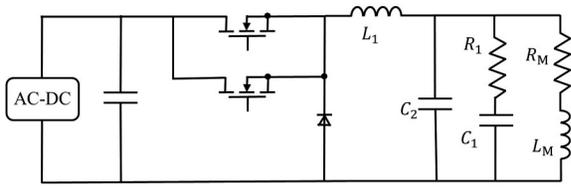


图4 磁铁稳流电源功率转换器模块框图
Fig.4 Block diagram of magnet steady-state power supply power converter module

基于BUCK电路的磁铁稳流电源由PI控制器 $G_{PID}(s)$ 、电源转换链路 $G_{CONV}(s)$ 、低通滤波器 $G_{LPF}(s)$ 和负载 $G_{LOAD}(s)$ 组成,其控制部分结构如图5所示。

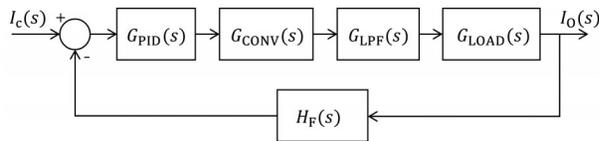


图5 基于BUCK电路的磁铁稳流电源控制部分结构图
Fig.5 Structure diagram of the control section of the magnet steady-state power supply based on a BUCK circuit

对磁铁稳流电源进行数学建模分析,其重要组成部分传递函数如下。

低通滤波器传递函数:

$$G_{LPF}(s) = \frac{1 + C_1 R_1 s}{1 + C_1 R_1 s + 2(L_1 C_1 + L_1 C_2)s^2 + 2R_1 C_1 C_2 L_1 s^3} \quad (7)$$

磁铁负载传递函数:

$$G_{LOAD}(s) = \frac{1}{L_M s + R_M} \quad (8)$$

综上所述,整个磁铁稳流电源传递函数如式(9)所示:

$$G(s) = G_{PID}(s) \cdot G_{CONV}(s) \cdot G_{LPF}(s) \cdot G_{LOAD}(s) \quad (9)$$

3.2 仿真实验

为验证算法的有效性,应用MATLAB仿真软件对系统性能进行分析,将电路中实际参数带入传递函数建立仿真模型,为了简化模拟计算, $G_{CONV}(s)$ 的值为常数“1”,电路中实际参数如表1所示^[17]。

在仿真分析中,主要进行系统阶跃响应测试,为了全面对比不同方法确定的PI参数对系统性能的影响,采用三组不同的PI参数阶跃响应曲线进行对比。使用算法计算得到的PI参数阶跃响应曲线记为Polynomial_ga,通过筛选机制得到的PI参数选择其一阶跃响应曲线记为Pick,通过经验凑试法得到的PI参数阶跃响应曲线记为Experience_trial,在实

表1 电路参数
Table 1 Circuit parameters

参数 Parameters	数值 Value
C_1 / nF	10
C_2 / nF	681
R_1 / Ω	3.3
$L_1 / \mu\text{H}$	3.3
R_M / Ω	0.15
L_M / mH	4

际凑试过程中,经过多次试验和参数调整后,获得了几组表现最佳且性能趋于一致的PI参数,选取其中一组最具代表性的PI参数进行对比测试。对比图如图6所示,电源仿真模型阶跃响应测试数据如表2所示。

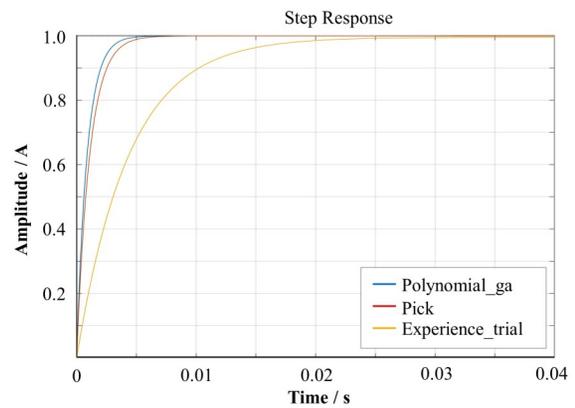


图6 阶跃响应对比
Fig.6 Comparison of step response in power supply simulation model

表2 电源阶跃响应时间仿真数据
Table 2 Power supply step response time simulation data

实验策略 Experiment strategy	阶跃给定电流 / A Step current given / A	系统响应时间 / ms System response time / ms
Polynomial_ga	0 → 1	4.5
Pick	0 → 1	5.5
Experience_trial	0 → 1	25.3

由图6可以看出,三组PI参数在电源从0 A上升至1 A的过程中均实现了基本无超调的平滑过渡,符合设计指标要求。相比之下,经验凑试法得到的PI参数上升速度明显慢很多,在实际应用中响应不够迅速。

3.3 实物实验

通过基于BUCK电路结构的磁铁稳流电源实物来验证算法的有效性。挑选40组经过筛选的PI参数对其建模并求出最优PI参数,对输出电流稳定度

以及阶跃响应进行对比测试，图7为电源测试平台^[18-19]。

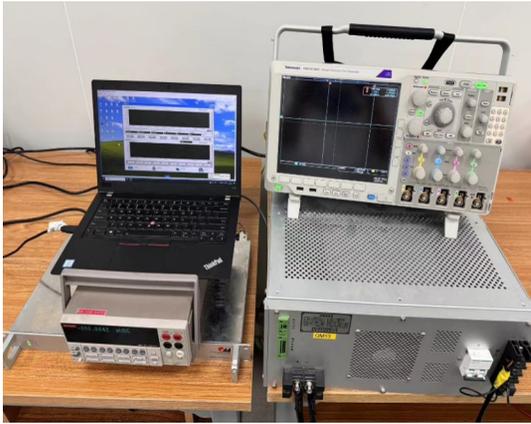


图7 磁铁稳流电源测试平台照片

Fig.7 Snapshot of test platform of steady-state magnet power supply

3.3.1 阶跃响应测试

合肥先进光源磁铁稳流电源运行过程中，电流工作点的变化对阶跃响应超调量有严格要求。为了准确监测电流值，在电源输出线缆外套DCCT(DC

Current Transformer)电流传感器，使用示波器测量DCCT电流传感器回采电流值，通过上位机控制电流从0 A上升到1 A，观察不同PI参数对应的电流阶跃响应曲线。使用算法得到的PI参数，电流阶跃响应曲线如图8(a)所示，通过筛选机制得到的PI参数，电流阶跃响应曲线如图8(b)所示，使用经验凑试法得到的PI参数，电流阶跃响应曲线如图8(c)所示，电源实际阶跃响应测试数据如表3所示。

表3 电源阶跃响应时间数据
Table 3 Step response time data of the power supply

实验策略 Experiment strategy	阶跃给定电流 Step current given / A	系统响应时间 System response time / ms
Polynomial_ga	0 → 1	3.5
Pick	0 → 1	4.2
Experience_trial	0 → 1	23.2

经过电源阶跃响应对比测试，三组PI参数均可实现平滑过渡，通过算法和筛选机制所得PI参数比经验凑试法所得PI参数上升速度快数倍，实物结果与仿真结果一致。

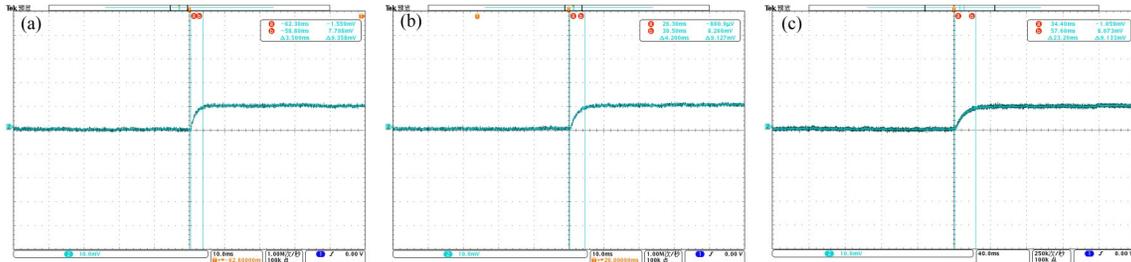


图8 不同PI参数电源阶跃响应曲线 (a) Polynomial_ga, (b) Pick, (c) Experience_trial

Fig.8 Current step response curves with different PI parameters (a) Polynomial_ga, (b) Pick, (c) Experience_trial

3.3.2 输出电流稳定性测试

在电源输出线缆外套DCCT电流传感器，采用7位半高精度数字万用表测量DCCT电流传感器回采电流值，连续测量8 h，通过计算机记录测试曲线。不同PI参数输出电流稳定性测试数据如表4所示。其中电源输出电流稳定度计算公式如式(10)所示。

$$I_{\text{Stability}} = \frac{I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}}{I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}} \quad (10)$$

经过对电源输出电流稳定性严格的对比测试，算法得到的最终PI参数长期稳定度在 1×10^{-5} 以内，相较于另外两组PI参数，稳定度有显著提升。

表4 输出电流稳定性测试数据
Table 4 Stability test data of output current

实验策略 Experiment strategy	输出电流 Output current / A	稳定度 Stability / 10^{-6}
Polynomial_ga	64	5.62
Pick	64	10.9
Experience_trial	64	11.72

4 结语

基于多项式回归和遗传算法的PI控制器参数自整定算法已在磁铁稳流电源样机上完成开发和验证，并在合肥光源上对样机进行了长期测试，各项指标均满足要求。该算法通过建立关于系统稳定度的目标函数并进行求解，获得最优PI参数。测试结果表明，相较于传统的经验凑试法，新的自整定算法在电流阶跃响应时间和输出电流稳定性等关键指标上

均有显著提升。在实际应用中,这种自整定算法能在短时间内找到最优PI参数,缩短调试时间并提高调节精度,从而保证了电源输出的稳定性,能够适应不同负载条件下的变化。应用于电源离线调试阶段,预期在未来大批量电源调试中提高效率,得到最优指标。

作者贡献声明 邓超负责系统的开发和性能测试以及文章的撰写与修订;胡保进负责系统的硬件设计;周梁缘负责搜集和整理资料;陈一飞负责搜集和整理资料;张海燕负责研究的提出、技术方案的设计和论文的修改;高辉负责技术方案的设计和论文的修改。

参考文献

- 1 疏坤, 龙锋利, 韩超. 加速器磁铁稳流电源的自适应型控制器设计[J]. 原子能科学技术, 2017, **51**(6): 1116–1122. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.06.111.
SHU Kun, LONG Fengli, HAN Chao. Self-adaptive controller design for accelerator stabilized magnet power supply[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, **51**(6): 1116–1122. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.06.111.
- 2 Felix J, Lukas T, Mladen H. A novel control concept for highest precision accelerator power supplies[C]. Croatia: Proceedings of the 10th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2002.
- 3 龙锋利. 高精度稳流电源的智能化控制[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2006.
LONG Fengli. Research of intelligent control for high precision stabilized current power supply[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- 4 王威, 李少甫, 吴昊, 等. 基于反向传播神经网络PID的高功率微波炉温度控制[J]. 强激光与离子束, 2024, **36**(1): 59–65. DOI: 10.11884/HPLPB202436.230280.
WANG Wei, LI Shaofu, WU Hao, *et al.* Research on temperature control of high power microwave oven based on back propagation neural network PID[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, **36**(1): 59–65. DOI: 10.11884/HPLPB202436.230280.
- 5 欧国徽, 刘春波, 潘丰. 基于改进模糊神经网络的PID参数自整定算法[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2011, **10**(2): 145 – 149. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-7147.2011.02.004.
OU Guohui, LIU Chunbo, PAN Feng. Self-tuning of PID parameter algorithm based on improved fuzzy neural networks[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2011, **10**(2): 145–149. DOI: 10.3969/j. issn.1671-7147.2011.02.004.
- 6 Rajarathinam K, Comm J B, Yu D L, *et al.* PID controller tuning for a multivariable glass furnace process by genetic algorithm[J]. International Journal of Automation and Computing, 2016, **13**(1): 64 – 72. DOI: 10.1007/s11633-015-0910-1.
- 7 邢彦军, 高若阳, 张玲, 等. 基于多项式回归与线性插值的全场纳米谱学成像背景序列预测[J]. 核技术, 2024, **47**(3): 030102. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2024. hjs. 47.030102.
XING Yanjun, GAO Ruoyang, ZHANG Ling, *et al.* Background sequence prediction for TXM-XANES based on polynomial regression and linear interpolation[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(3): 030102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030102.
- 8 廖彬, 张陶, 于炯, 等. QPR-NN:一种结合二次多项式回归与神经网络的推荐算法[J]. 西安交通大学学报, 2019, **53**(9): 79–87, 136. DOI: 10.7652/xjtuxb201909011.
LIAO Bin, ZHANG Tao, YU Jiong, *et al.* QPR-NN: a new recommendation algorithm combining quadric polynomial regression and neural network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, **53**(9): 79–87, 136. DOI: 10.7652/xjtuxb201909011.
- 9 Chang L Y, Chen H C. Tuning of fractional PID controllers using adaptive genetic algorithm for active magnetic bearing system[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2009, **8**(1): 158–167.
- 10 Cojuhari I, Fiodorov I, Izvoreanu B, *et al.* Tuning of the PID controller to the system with maximum stability degree using genetic algorithm[C]. 2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS). New York: IEEE Press, 2020: 64–68.
- 11 Gong D W, Sun J, Miao Z. A set-base genetic algorithm for interval many-objective optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, **22**(1): 47–60.
- 12 高慕云, 李榜华, 马浩亮, 等. 基于Petri网和改进遗传算法的多资源调度问题[J]. 计算机工程与设计, 2024, **45**(6): 1674 – 1682. DOI: 10.19292/j. cnki. jdxp. 20240620.001.
GAO Muyun, LI Banghua, MA Haoliang, *et al.* Multi-resource scheduling problem based on Petri net and improved genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2024, **45**(6): 1674–1682. DOI: 10.19292/j. cnki.jdxp.20240620.001.

- 13 符占元, 专祥涛. 基于神经网络和遗传算法的PID参数自整定算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, **56**(3): 379–386. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-03-015.
FU Zhanyuan, ZHUAN Xiangtao. PID parameter self-tuning algorithm based on neural network and genetic algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, **56**(3): 379–386. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-03-015.
- 14 Shao Z X, Zhang H Y, Gao H, *et al.* A fast-response and high-stability power supply for a corrector magnet in HALS[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics In Power Electronics, 2020, **8**(3): 2293–2301.
- 15 Liu P, Chen B, Wei P F. A high-power and high-stability power supply design[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, **5**: 307–313. DOI: 10.1007/s41605-021-00250-z.
- 16 Liu P. Research on fast corrector magnet power supply for HEPS[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- 17 朱亚, 张庆磊, 周巧根. 一种新型高梯度四极磁铁的设计及验证[J]. 核技术, 2022, **45**(7): 070102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070102.
- ZHU Ya, ZHANG Qinglei, ZHOU Qiaogen. Design and verification of a novel high gradient quadrupole magnet [J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(7): 070102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070102.
- 18 韩圆颖, 吴亚峰, 董岚, 等. HEPS六极铁标定方案分析[J]. 核技术, 2024, **47**(2): 020201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.020201.
HAN Yuanying, WU Yafeng, DONG Lan, *et al.* Analysis of calibration schemes for HEPS sextupole[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(2): 020201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.020201.
- 19 刘婵, 张继东, 周巧根. 一种基于伸展线法的小孔径四极磁铁测量方法[J]. 核技术, 2023, **46**(6): 060201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060201.
LIU Chan, ZHANG Jidong, ZHOU Qiaogen. A small aperture quadrupole magnet measurement method based on the single stretched wire method[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(6): 060201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060201.