

电镀电源双环控制系统设计

刘平, 徐瀚, 臧甲杰, 陈睿科

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 电镀电源具有低压、大电流工作特性,传统的电压控制模式因动态响应慢和不能动态限流等缺陷而难以满足控制要求. 经比较分析,提出了使用电压外环、电流内环的双环控制器控制方案. 对电镀电源系统进行建模分析,按照先电流内环后电压外环的顺序设计双环控制器. 对系统模型使用伯德图进行环路稳定性分析,设计环路参数,并根据双环系统工作时电路出现的条件稳定现象对电流环路参数进行修正,并对设计的环路进行了试验. 试验结果表明,双环控制系统正常工作,具有实用价值.

关键词: 电镀电源;双环控制;环路稳定性

中图分类号: TM919 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.019

0 引言

目前,直流电镀因具有低压、大电流等特点得到广泛应用,具有良好的发展前景^[1-2]. 设计需要保证电镀电压的稳定,输出电流的可控,同时控制系统具有较高的调节灵敏度和控制精度. 通过试验可知,直流电镀电源输出电压的变化速度滞后于电流. 传统电压控制方式不能直接实现对输出电流的控制,并且响应慢,无法实现精确限流,且传统电流控制模式难以保持槽压稳定. 笔者将双环控制器理论应用于电镀电源中,提出控制策略,且针对传统双环控制研究和数字 PID 控制研究中较少涉及的双环参数匹配和条件稳定现象^[3-5],笔者着重进行分析,综合单环和双环环路的要求,对相关参数进行取舍调整,消除条件稳定现象,设计出电流内环可单独工作的电镀电源双环控制器.

1 原理与设计

电压外环作为决策环保持输出电压稳定;电流内环作为功率环按照电压外环的误差电压输出电流,从而稳定输出电压;电源具有自动切换的恒流、恒压模式,实现快速调整和精确限流. 结构如图 1 所示,电压环采样值和电压设定值比较输出误差信号 U_e ;采用电压跟随器结构的比较环,输出固定的输出电压 U_s ,用于限制输出的最大电

流; U_s 和 U_e 作比较取较低者作为输出 U_i ;电流环采样输出电路中的电感电流与 U_i 做比较得到误差电压 U_p ; U_p 信号送给 PWM(脉冲宽度)控制器,在控制器内部 U_p 电平与震荡频率信号作比较后得出对应的脉宽信号进而驱动半桥开关管. 当电压环饱和即 $U_e > U_s$ 时,电路工作在电流单环控制模式下,系统以恒流模式工作,此工作模式多见于系统启动或者电压设定变化时. 当电源正常工作时电压环退出饱和,即 $U_e < U_s$ 时,电路工作在电压电流环串联即双环控制模式下. 这种模式通常工作在系统负载缓慢变化的情况下.

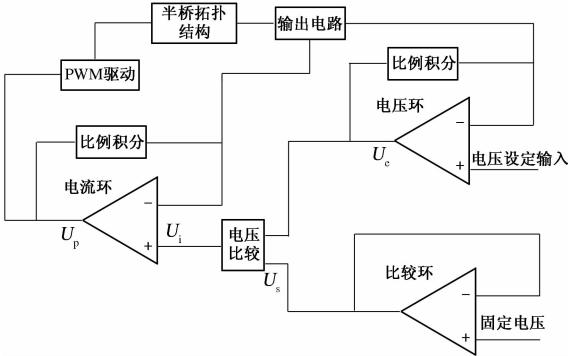


图 1 双环控制结构框图

Fig. 1 The structure diagram of double loop control

1.1 系统模型的建立

开关电源是一个非线性系统,但可用小信号分析法近似转为线性时不变系统分析,时域模型

收稿日期:2015-01-20;修订日期:2015-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10275021)

作者简介:刘平(1957—),男,河北邯郸人,郑州大学教授,博士生导师,主要从事开关电源、电路原理、射频电路和等离子体等方面的研究,E-mail:iepliu@zzu.edu.cn.

转化为频域模型^[6-7]. 电路有单环和双环工作模式,需分别对两种情况建模,用伯德图法分析,使之满足稳定性准则^[8].

1.1.1 双环控制模型的建立

当图 1 所示系统工作在电压双环控制模式时,电路频域模型^[9]原理框图见图 2.

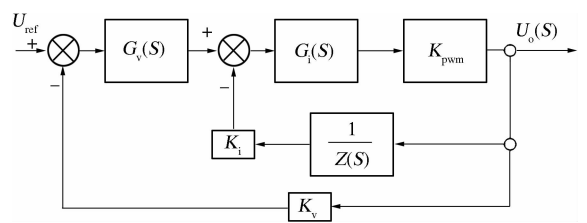


图 2 双环控制原理框图

Fig. 2 The schematic diagram of double loop control

其中 U_{ref} 为设定输入的电压基准值; $G_v(S)$ 为电压外环误差放大器的传递函数; $G_i(S)$ 为电流内环的误差放大器传递函数; K_{pwm} 为主电路的近似传递函数; K_v 为电压采样系数,取 0.5; K_i 为电流采样系数,取 0.01; $Z(S)$ 为滤波回路和的负载的总阻抗.

DC-DC 变换器的传递函数较复杂^[10],这里采用实验的方法得出近似值. 工作在电流连续模式的开关电源输出电压正比于开关管占空比, PWM 控制器输出占空比正比于信号电压输入,因而主电路的电压输出 y 和 PWM 驱动器电压输入 x (图 1 中 U_p) 可近似等效函数: $y = K_{pwm} \cdot x + b$, 其中 b 为系统的损耗. 测量逆变器主电路在频率恒定条件下,不同 x 对应输出 y ,经曲线拟合得出 $K_{pwm} = 5.2146$. 输出电路为 LC 滤波电路和等效负载, $L = 20 \mu H$, $C = 13200 \mu F$. 负载电阻取轻载时的极端情况 $R = 0.1 \Omega$. 输出电路的传递函数为 $\frac{1}{Z(S)}$, 其中 $Z(S) = \frac{RCL S^2 + LS + R}{RCS + 1}$. 化简电流环^[11],得等效传输函数 $T_{ic}(S)$:

$$T_{ic}(S) = \frac{G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot Z(S)}{Z(S) + G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot K_i} \quad (1)$$

双环开环传输函数:

$$T_v(S) = G_v(S) \cdot K_v \cdot T_{ic}(S) = \frac{K_v \cdot G_v(S) \cdot G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot Z(S)}{Z(S) + G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot K_i} \quad (2)$$

1.1.2 电流环模型的建立

同理对单独工作时的电流环进行分析,系统模型如图 3 所示,写出其开环传递函数:

$$T_i(S) = \frac{G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot K_i}{Z(S)} \quad (3)$$

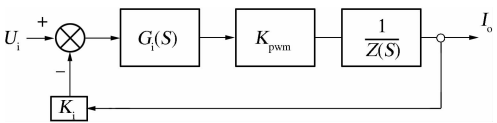


图 3 电流环模型

Fig. 3 The current loop model

1.2 电流环参数的设计

由于电流环需要独立工作,设计需从电流环着手,需要协调电流环和电压环的相关参数,避免条件稳定现象,保证系统稳定. 由公式(3)写出电流环开环传递函数:

$$P_{ii}(S) = \frac{K_{pwm} \cdot K_i}{Z(S)} \quad (4)$$

其开环伯德图见图 4. 分析可得环路穿越频率较低且接近 LC 滤波器的谐振尖峰,系统增益过小,需要进行补偿.

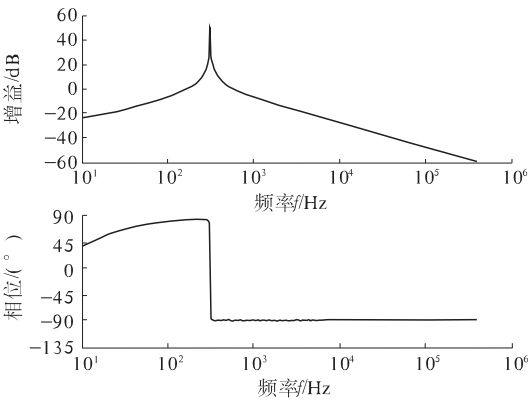


图 4 补偿前电流环伯德图

Fig. 4 The current loop Bode diagram before compensation

1.2.1 条件稳定现象与电流环设计

对电流环补偿,理想的方法是采用二型误差放大器引入两个极点和一个零点,硬件电路见图 5,误差放大器传递函数:

$$G_i(S) = \frac{(\frac{1}{C_1 S} + R_2) \frac{1}{C_2 S}}{(\frac{1}{C_1 S} + R_2 + \frac{1}{C_2 S}) R_1} = \frac{1 + SC_1 R_2}{SR_1 (C_2 + SR_2 C_1 C_2 + C_1)} \quad (5)$$

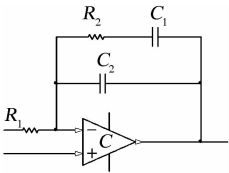


图 5 误差放大器

Fig. 5 The error amplifier

选取合适的参数,使穿越频率为 1 kHz,穿越频率处斜率为 -1,相位裕度大于 60°,电流环得到较好的补偿.使用二阶误差放大器的电压外环时,双环开环传递函数伯德图见图 6(直接使用 1.3 节中电压环参数).

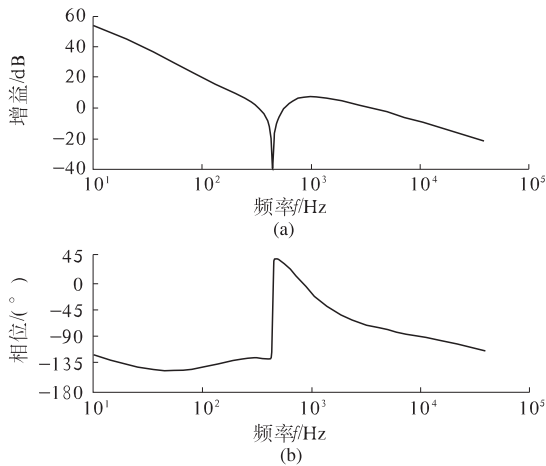


图 6 补偿后系统双环伯德图
Fig.6 The double loop Bode diagram after compensation

当机器冷启动尤其是启动时设定电压从零开始调节时,在低电压输出时出现输出震荡,示波器量图见图 7,图中 1 通道测量量为电流环参考电压输入 U_i ,2 通道测量量为开关管单路驱动脉冲簇,在 25 ms 时间尺度上明显观察到电源输出呈现周期性震荡断续现象.

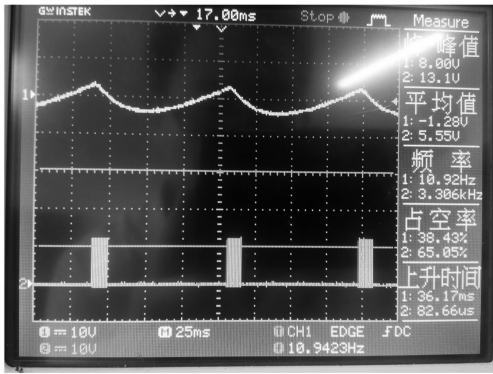


图 7 条件稳定现象波形图
Fig.7 Waveform diagram for the phenomenon of conditional stabilization

当电路工作在双环模式时,电流环引入的低频极点在电流环等效传递函数 $T_{ic}(S)$ 中会产生较低的低频相位裕度,如果电压环采用二阶误差放大器,那么此时系统的开环传递函数相位裕度虽然在穿越频率处满足要求,然而在低频段相位裕

度较低,例如在图 6 中,最低仅为 30°,由于电路离散参数的影响出现条件稳定的现象^[12].因而需要对电流环的补偿参数进行修正或对电压环增加一个补偿环节.但由于电镀电源对于电流的控制精度要求不高,因而采用修改电流环参数的方法,仅引入单极点,用来衰减电流环高频增益,提高系统双环时的低频稳定裕度.修改图 5 所示误差放大器,用导线代替 C_1 ,选取合适的增益使电流环穿越频率提升为 1 kHz,取 $R_1 = 1\text{ k}\Omega$, $R_2 = 2\text{ k}\Omega$, C_2 取 1 nF,其电流环误差放大器对应的开环传递函数:

$$G_i(S) = \frac{R_2}{R_1 R_2 C_2 S + R_1} \cdot \tag{6}$$

1.3 电压外环的设计

由公式(1)、(2)得出电压环误差放大器无比例积分补偿时环路开环传递函数 $P_{iv}(S)$ (公式 7),对应的伯德图见图 8.

$$P_{iv}(S) = K_v \cdot T_{ic}(S) = \frac{K_v \cdot G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot Z(S)}{Z(S) + G_i(S) \cdot K_{pwm} \cdot K_i} \cdot \tag{7}$$

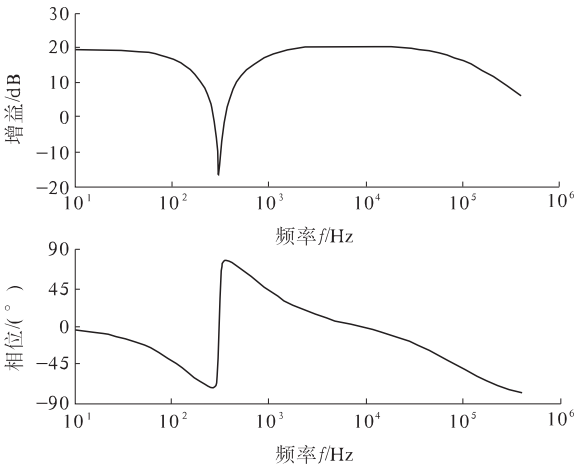


图 8 电压环补偿前伯德图

Fig.8 The voltage loop Bode diagram before compensation

此时其低频增益低,高频增益高,穿越频率远大于 20 kHz(开关频率),因而需要进行补偿.使用图 5 的二型误差放大器进行补偿,引入 40 dB 的增益,一个初始 0 dB 极点,一个 170 Hz 零点,一个 800 Hz 极点.补偿后电压环误差放大器的传递函数 $G_v(S)$:

$$G_v(S) = \frac{(1/C_1 S + R_2) \cdot 1/C_2 S}{(1/C_1 S + R_2 + 1/C_2 S) R_1} = \frac{1 + S C_1 R_2}{S R_1 (C_2 + S R_2 C_2 + C_1)} \cdot \tag{8}$$

零点频率 $F_z = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$, 极点频率 $F_p = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$, 计算可得 $R_1 = 2.4\text{ k}\Omega$, $R_2 = 2\text{ k}\Omega$, $C_1 = 470\text{ nF}$, $C_2 = 100\text{ nF}$. 式(8)带入式(2)中求得双环工作时的开环传递环数伯德图, 见图 9.

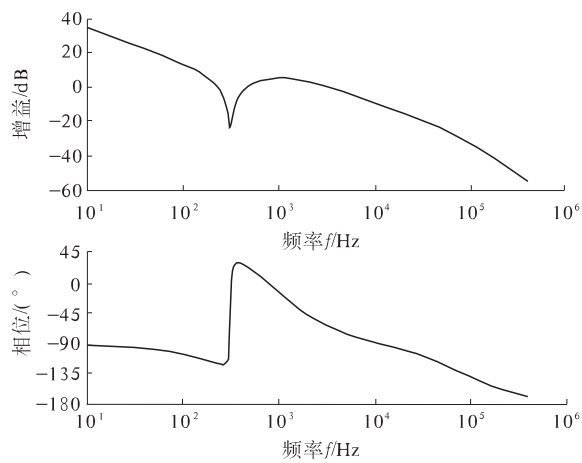


图 9 双环控制器开环伯德图
Fig.9 The open loop Bode diagram
of double loop controller

分析图 9 可知, 系统穿越频率为 3.3 kHz, 满足采样定理要求, 穿越频率处斜率为 -1, 谐振尖峰处相位裕度大于 60°, 由于噪声叠加点不同, 低频段有较高的增益用于消除低频干扰, 高频段增益较低用于消除高频干扰^[13]. 当系统负载变化时, $Z(S)$ 也会相应的变化, 当负载增大, 谐振尖峰变得平滑, 下冲减小, 在谐振频率附近相位裕度增大, 其余特性与图 9 中相比不变, 因而在重载情况下的系统稳定性仍然满足要求.

2 控制环路验证试验

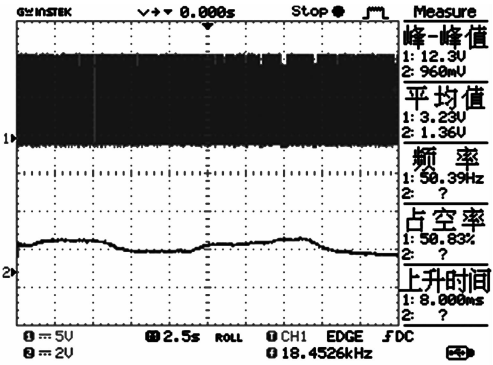
把设计好的双环控制电路进行闭环硬件验证, 测试主电路参数如表 1 所示.

表 1 试验测试主电路参数

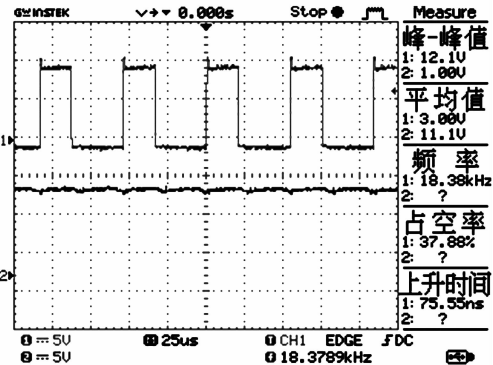
Tab.1 The experimental parameters of main circuit	
逆变器指标	参数
逆变器结构	半桥拓扑结构
整流输出结构	全波整流, LC 滤波输出
电压输入	三相交流 380 V
开关频率/kHz	18.6
试验输出电压/V	11
试验输出电流/A	110
开关控制芯片	SG3525

试验主要探究双环控制系统在恒流模式和恒压模式下的稳定性及输出特性. 通过示波器观察 PWM 控制器 SG3525 的两路驱动脉冲输出情况和在图 1 中电压比较器的输出电压 U_i . 快速调高输出电压设定值, 迫使系统进入恒流模式, 观察此时 SG3525 的驱动脉冲变化情况, 保持输出电压设定值不变, 观察 SG3525 的驱动脉冲变化, 此时为双环恒压模式, 实验波形图如图 10 所示. (a) 图为示波器周期为 2.5 s 的图像, 1 通道(上部)为 SG3525 的单路驱动波形, 2 通道(下部)为 U_i . 快速多次调节电压输出设定值, 可见 U_i 值明显变化但没有超过 3.6 V 的 U_s 限定电压, 在 3.6 V 附近电压环饱和, 系统工作于单环恒流模式, 其余工作在双环恒压模式. 由 1 通道波形可看出, 整个过程中驱动输出波形连续稳定. (b) 图是示波器周期为 25 μ s 时的双环恒压模式下 SG3525 驱动输出和系统电压输出波形图. 1 通道(上部)为 SG3525 单路驱动, 驱动占空比稳定于 37.9%, 2 通道(下部)测量电压输出, 电压平均值 11.1 V, 输出稳定.

由试验可得出此时双环控制系统响应速度良好, 电流电压模式系统稳定, 环路参数满足电镀电源设计要求.



(a) 示波器周期为 2.5 s



(b) 示波器周期为 25 μ s

图 10 实验波形图

Fig.10 The experiment waveform diagram

3 结论

笔者提出在电镀电源中使用双环控制器解决传统控制方法的弊端. 对电镀电源系统建模分析, 得出电流电压环的设计参数, 分析条件稳定现象, 重新匹配两环路参数, 通过试验验证环路设计满足要求. 在本设计中, 电流内环虽然满足使用需求但其本身增益较低, 使得系统控制精度仍有改进的空间, 所以下一步的工作是进一步协调内外环参数, 提高系统调节精度.

参考文献:

- [1] 杜桂平, 姜立新. 电镀电源现状及展望[J]. 新技术新工艺, 2005(6): 69-70.
- [2] 林金堵, 吴梅珠. PCB 电镀铜技术与发展[J]. 通信电源技术, 2009(12): 27-31.
- [3] 刘顺新, 张建兴, 米高祥, 等. 基于 DSP 的智能型能馈电式蓄电池放电装置研制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(1): 85-87.
- [4] 陈瑞, 周梁. 基于双环控制的 PWM 逆变器的研究[J]. 通信电源技术, 2006, 23(1): 19-21.
- [5] 闫永兴, 张志, 朱维龙, 等. 一种高精度大功率电镀电源设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(18): 54-56.
- [6] 蔡宣三. 开关电源的瞬态建模和分析(I)[J]. 电源世界, 2002(9): 59-65.
- [7] 徐志宇, 许维胜, 吴启迪, 等. DC-DC 变换器 LTI 模型的实验验证研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(3): 33-38.
- [8] SANJAYA M. 精通开关电源设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 200-201.
- [9] 裴文. DC-DC 开关变换器建模、仿真与补偿网络设计研究[D]. 合肥: 安徽大学控制工程学院, 2014.
- [10] 蔡宣三. 开关电源的频域分析与综合(I)[J]. 电源世界, 2002(9): 60-65.
- [11] 王建辉, 顾树生. 自动控制原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 36-37.
- [12] ABRAHAM I, KEITH B, TAYLAR M. Switching Power Supply Design[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 376-377.
- [13] 王建辉, 顾树生. 自动控制原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 42-43.

The Design of Double Loop Control System for Electroplating Power Supply

LIU Ping, XU Han, ZANG Jiajie, CHEN Ruike

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Electroplating power supply has the working characteristics of low voltage and high current. It is difficult for the traditional voltage mode to meet the control requirement due to low dynamic response and defects of dynamic current limiting. This paper proposes to use double loop controller through the comparative analysis, which is made up of an current inner loop and a voltage outer loop. The double loop controller is designed in the sequence of current inner loop firstly, the voltage outer loop secondly via the modeling analysis of electroplating power supply system. This paper analyses the stability of the circuit by using the Bode diagram. The design of the parameters of the circuit is also illustrated. According to the phenomenon of conditional stabilization when the circuit of double loop system works, parameters of the current are corrected. And the parameters are tested by experiments. The hardware verification proves that the controller can work normally. This system has practical value.

Key words: electroplating power supply; double loop control; loop stability