

文章编号:1000-582X(2011)05-130-05

PID 控制及高频逆变技术的 X 射线机电源

张思杰^a, 赵晓宇^a, 曾孝平^a, 彭承琳^b, 郭兴明^b, 石 岭^a

(重庆大学 a. 通信工程学院; b. 生物工程学院 重庆 400044)

摘 要:针对目前的 X 射线机控制精度不高以及稳定性不够的问题,介绍了一种数字化的 X 射线机电源,其中调压电路采用 BUCK 电路的改进形式,高压发生的重点部分采用高频逆变以及软开关技术,使最重要的逆变环节输出稳定。调压电路以及逆变电路中开关管的控制采用 PWM 控制技术,驱动波形输出稳定且容易控制。反馈电路由单片机的软件 PID 来控制,提高了高压的控制精度并减小了体积,而且实现了高压的连续可调。灯丝电源采用高精度的电源芯片,实现了灯丝电流的稳定。通过对电路的分析,计算出了电路所用参数并用 PSPICE 软件进行了仿真。最后的仿真结果表明,理论分析结果与实际的结果一致,设计的电源系统可以稳定运行,达到了 X 射线机所用电源的指标要求。

关键词: PID; 逆变; X 射线机; 电源

中图分类号: TH77

文献标志码: A

The power-supply of X-ray machine adopting PID control and high-frequency inverter technology

ZHANG Si-jie^a, ZHAO Xiao-yu^a, ZENG Xiao-ping^a, PENG Cheng-ling^b, GUO Xing-ming^b, SHI Ling^a

(a. College of Communication Engineering; b. Bioengineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To solve the problem of low control accuracy and low stability of current X-ray machines, a kind of digital power supply for X-ray machine is introduced. In the digital power supply, some key technologies are used to improve the output stability of the high frequency inverter, including improved BUCK circuit for voltage regulating circuit, high frequency inverter and soft switching technology for the high-voltage generator. The PWM control technology is used to control the switch transistor of voltage regulating circuit and inverter circuit, which makes the drive waveform output stable and easy to control. In order to improve the control accuracy, reduce the volume and change high voltage consecutively, the software PID of the microcomputer is used to control the feedback circuit. The high-accuracy power chip is used for the filament power supply to make the filament electric current stable. Through the analysis of the circuit, the parameters of the circuit are calculated and the circuit is simulated by PSPICE software. The results show that the theoretical analysis is consistent with the practical simulation results. The design can meet the requirement of the technology indices of the power supply of the X-ray machines.

Key words: PID; inverter; X-ray machine; power supply

收稿日期: 2011-02-21

基金项目: 重庆市科技攻关项目资助(CSTC, 2007AB5026)

作者简介: 张思杰(1967-), 男, 博士, 重庆大学副教授, 主要从事 X 射线机系统、生物医学信号检测等研究工作,
(E-mail) zhangsj@cqu.edu.cn.

自 1895 年德国物理学家伦琴在研究阴极射线管时发现 X 射线以来, 由于 X 射线的穿透作用等特性, 其已得到广泛的应用, 尤其是在医学, 工业和安检等方面。随着医学和工业等领域的发展, X 射线机的性能指标也不断提高, 其中最重要的就是产生 X 射线的质量。X 射线的产生是由直流高压加在 X 射线管两端, 并给阴极灯丝加热使其发射电子撞击 X 射线管阳极而产生的。故要提高 X 射线的质量, 主要是提高 X 射线管电源的质量。

X 射线管电源的控制实质上就是控制 X 射线管两端的高压电源以及灯丝电流源。高压电源采用直流高频电压源, 高频化的优点在于输出电压的纹波率小, 从而杂散射线少, 出线波谱单纯, 成像清晰, 并且高频有利于减小电源的质量和体积。目前 X 射线机大多都采用高频的。笔者研制的 X 射线机电源高压电源采用直流调压, 高频逆变以及软件 PID 技术来控制反馈的结构, 灯丝电流源采用高精度的电源芯片来设计并由主控制器进行控制, 实现了灯丝电流的稳定。主控制部分采用单片计算机来控制输出指标以及数据通讯, 实现了稳定的 X 射线机电源。

1 电源系统结构

根据 X 射线机电源的需求, 本系统采用工频市电来供电, 分别输出 X 射线管灯丝电源和 120 kV 的 X 射线管阳极电源, 以保证 X 射线机的正常工作。电源系统结构如图 1 所示, 整个系统由高压发生器、灯丝电源、辅助电源以及采样单元和单片机中央控制器组成, 其中辅助电源为主控制电路、显示模块等供电。

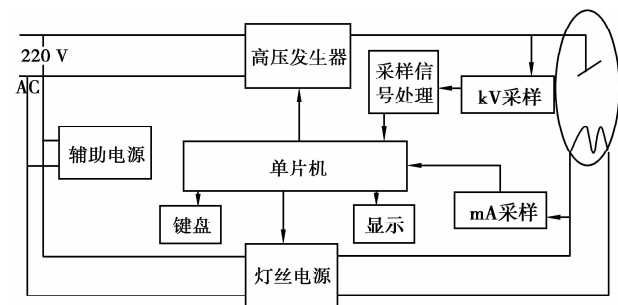


图 1 电源系统结构

2 系统主要构成部分

2.1 高压电路

高压电路是 X 射线机高压发生器部分的电路,

其作用为供给 X 射线管阳极直流高压。如图 2 所示, 工频市电进入高压发生器, 先经 EMI 滤波以及整流, 变为低噪声直流信号, 再由 BUCK 调压电路调成稳定的直流电压 200 V, 然后由高频逆变将其转换成交流方波信号, 经过高频变压器升压为大约 20 kV, 最后再经 6 倍压整流输出直流高频 120 kV 供给 X 射线管。高压系统采用闭环控制, 用采样电压来控制 BUCK 调压部分, 使其输出稳定。

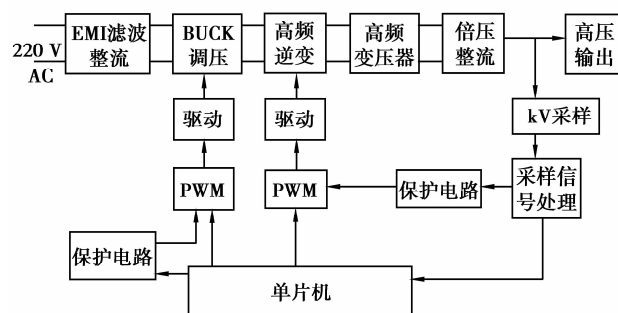


图 2 高压发生器结构

2.1.1 控制单元

为了稳定 X 射线机高压发生器的输出, 本电源系统采用闭环控制, 反馈的电压信号需要经过一个控制单元来处理, 然后由控制单元输出一个精确的误差给 PWM 控制器。控制单元一般采用比例-积分 (PI) 调节器来实现, 如图 3 所示。它是一种模拟调节器, 根据系统的误差, 利用比例和积分来计算出控制量进行控制, 电路中所需元器件的参数由补偿网络的传递函数来决定。由于模拟 PI 调节器是采用硬件电路来控制, 故在设计过程中需计算元器件的参数, 选择所采用的运放, 参数选择好以后在实际的运行中还需要进行调试, 因而设计和实现过程比较繁琐并且调整起来不灵活。而软件 PID 控制是把模拟 PI 调节器数字化了的控制方法, 增加了微分的控制方法且可以选择合适的 PID 控制方法, 其设计过程中基本不需要元器件, 参数的整定比较灵活, 控制起来更加方便, 故本系统控制单元采用软件 PID 来控制。即先从输出端采样一个正负 kV 信号, 并由采样信号处理电路将其合成为一个 kV 信号, 经由模数转换进入单片机, 由单片机编程计算误差值输出给 PWM 控制模块, 从而输出驱动信号给调压电路, 稳定了高压的输出。由于在电路的启动、结束或大幅度增减设定时, 短时间内系统输出有很大的偏差, 会造成 PID 运算的积分积累而造成的系统的较大超调, 因此 PID 控制单元采用积分分离式 PID 控制方法。软件 PID 控制的流程如图 4 所示, K_1 、

K_2 、 K_3 、 ε 根据系统输出在调试中设定。

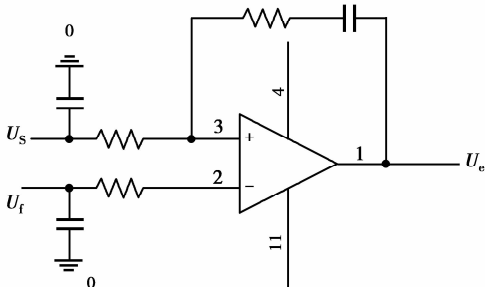


图 3 比例-积分 (PI) 调节器

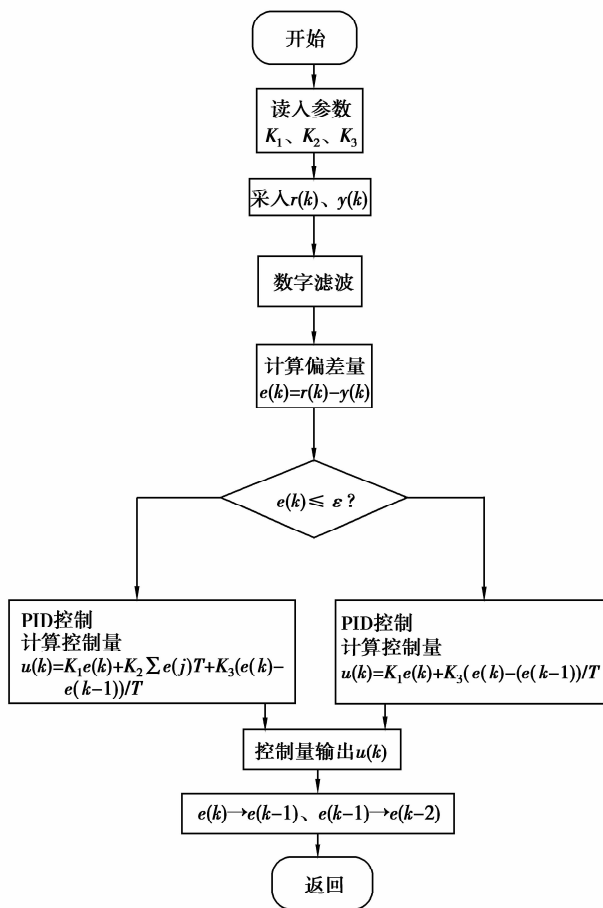


图 4 PID 控制流程

2.1.2 BUCK 调压电路和逆变电路

BUCK 调压电路和逆变电路是高压发生器主电路拓扑的核心部分, BUCK 电路为系统提供稳定的直流电压, 逆变电路为系统提供升压所需的交流电。本系统中调压电路采用最基本 BUCK 电路的改进形式, 如图 5 所示。在续流二极管 D_2 上并联了一个辅助开关管, 这样就使得电路能够双向传递能量, 在主开关管 S_1 开通而 S_2 关断期间, 电路就相当于 BUCK 变换器, 将能量从输入端传递到后级电路, 在

S_2 开通而 S_1 关断期间, 电路将能量从负载回馈到输入端, 从而改善了输出电压波形, 使其不失真, 实现了能量的双向传输, 提高了电源的工作效率。逆变电路采用加入辅助二极管的极谐振 PWM 逆变器, 如图 5 所示, 以左边为例, 包括 2 个开关管 S_3 、 S_4 , 2 个反馈二极管 D_3 、 D_4 , 2 个缓冲电容 C_2 、 C_3 , 2 个谐振电容 C_4 、 C_5 , 一个谐振电感 L_2 , 一个钳位二极管 D_6 和一个续流二极管 D_5 。电感 L_2 在稳态时作为存储能量的元件, 在开关过程中与谐振电容 C_4 、 C_5 构成谐振电路。 C_2 、 C_3 作为开关管的无损耗关断电路, 续流二极管 D_5 和钳位二极管 D_6 分别与 C_4 、 C_5 并联连接。开关管 S_3 和 S_6 的控制信号, S_4 和 S_5 的控制信号分别是一样的, 由 PWM 波形产生器 SG3525A 来供给, 两组开关管交替闭合。这个逆变电路可以形成开关管及整流二极管零电压导通, 并能消除电路中所有主要寄生成分的影响。

2.1.2.1 BUCK 调压电路设计

BUCK 调压电路是闭环调压的核心电路, 这部分电路稳定性, 可靠性决定了输出电压的稳定度和精度。BUCK 电路分为电感电流连续和不连续两种工作模式, 为了稳定电路输出, 本电路取临界模式为计算依据。设 t_1 为电感电流开始下降的时刻, t_2 为电感电流开始上升的时间, 则当主开关管导通时, 电感电流的上升量为

$$\Delta i_{L_1} = \int_0^{t_1} \frac{V_s - V_o}{L} dt = \frac{V_s - V_o}{L} D_1 T_s, \quad (1)$$

式中: V_s 为输入电压, V_o 为输出电压, D_1 为主开关管导通占空比, T_s 为主开关管开通时间, L 为谐振电感。

当主开关管关断时, 电感电流的下降量为

$$\Delta i_{L_2} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{V_o}{L} dt = \frac{V_o}{L} D_2 T_s, \quad (2)$$

式中, D_2 为主开关管关断占空比。

临界电感可以表示为

$$L_c = \frac{V_o^2}{2P_o f_s} (1 - D_1), \quad (3)$$

式中: P_o 为输出功率, f_s 为开关频率。

输出的纹波电压为

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt = \frac{\Delta i_{L_2}}{8C} T_s = \frac{V_o D_2}{8LC} T_s^2, \quad (4)$$

则电容 C 为

$$C = \frac{V_o}{8L \Delta V_o f_s^2} (1 - D_1). \quad (5)$$

2.1.2.2 逆变电路设计

逆变电路为高压发生器的核心部分, 其输出为

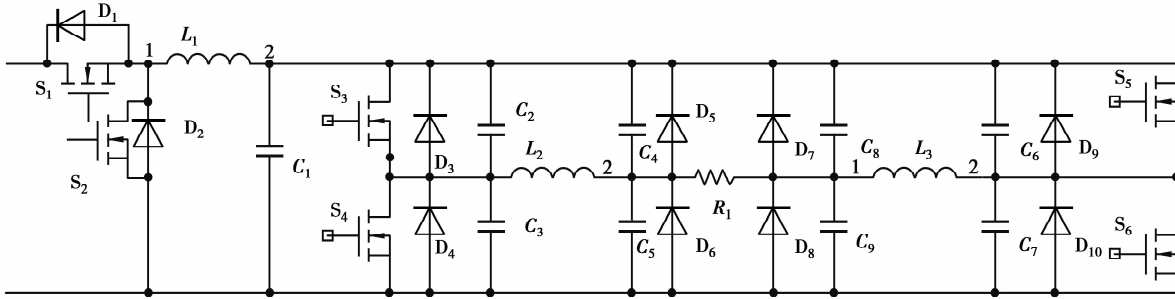


图 5 BUCK 调压电路和逆变电路

高频变压器原端提供所需电压。本系统采用的逆变电路为加入辅助二极管的极谐振逆变器,由于其中开关管是零电压条件下导通的,故谐振参数的选择极其重要。首先确定谐振电路的谐振频率为

$$F_r = 10F_s \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2\pi} \right), \quad (6)$$

式中, F_s 为开关管频率。

由上式可知,满足 F_r 的 L ,谐振电容 C_r 值有很多,故要使开关管的损耗最小。开关管的总损耗为

$$P_Q = \lambda_1 (\chi - 1) \left(\frac{\chi - 2}{\chi} \right)^2 + \lambda_2 \chi, \quad (7)$$

式中, λ_1, λ_2 为相关系数。

令 $\frac{dP_Q}{d\chi} = 0$, 可得到最小的 χ 值。故可得参数如下

$$Z_r = \frac{U_s}{I_o (\chi_{\min} - 1)}, \quad (8)$$

$$L = \frac{Z_r}{2\pi F_r}, \quad (9)$$

$$C_r = \frac{L}{Z_r^2}, \quad (10)$$

$$C_c = \left(\frac{1}{Z_r} - \frac{I_o}{U_s} \right)^2 L, \quad (11)$$

式中: U_s 为输入电压, I_o 为输出电流, C_r 为谐振电容, C_c 为吸收电容。

2.2 灯丝电源

灯丝电源是为阴极 X 射线管灯丝提供电源的,使其发射电子,撞击阳极产生 X 射线。本系统中灯丝电源采用 DC-DC 降压芯片 AP1538 来设计,如图 6 所示。AP1538 是一个固定频率 300 kHz 的降压转换器,输入电压范围为 3.6~18 V,输出为 0.8~ V_{cc} 可调,输入电压经过滤波进入转换器,输出电压经稳压和滤波再通过电流传感器输出给灯丝加热,电流传感器是为了检测灯丝的电流值。OCSET 外接电阻 R_1 为设置最大输出电流,FB 端为反馈端,由电阻 R_2 和 R_3 分压分压后输入反馈进行控制。EN

为输出使能端,由中央控制单元单片机来控制,高电平为正常工作,低电平关闭输出。通过调节 R_2 的值可以改变输出电压,进而使灯丝电流连续可调。

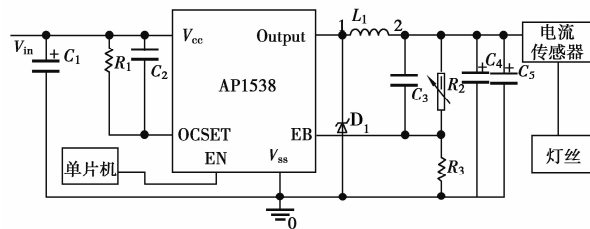


图 6 灯丝电路

3 部分电路仿真结果

运用 PSPICE 仿真软件,根据以上分析和计算的结果对文中所列部分电路进行了仿真。首先对 BUCK 调压电路做了仿真,根据计算,仿真时所用的参数为 L_1 为 0.47 mH,电容 C_1 为 22 uF,在设定最大占空比为 0.72 的条件下,仿真的结果如图 7。从图中可以看出,输出电压恒定在 200 V,输出稳定,输出纹波很小。其次对逆变电路进行了仿真,根据谐振频率的计算并去一定的裕量,仿真时所用参数为 $C_2 = C_3 = 2\ 200$ pF, $C_4 = C_5 = 0.087$ uF, $L_2 = 360$ μ H,二极管 D_3, D_4 为快恢复二极管, D_5, D_6 为普通二极管,图中两个桥臂是对称的,故参数一样。仿真结果如图 8 所示,输出电压基本为方波,且幅值为 200 V,满足系统所需逆变电压。电路的整体仿真结果如图 9 所示,即为逆变以后的输出经高频变压器升压为 20 kV,再经 6 倍压整流为 120 kV,由图可得,输出经一定的上升时间后,稳态为 120 kV。图 10 是输出电压 120 kV 下在输出端加上负载,使电路输出为 50 kW 的仿真,由图可知,本系统输出功率稳定,满足 X 射线管所需电源指标。

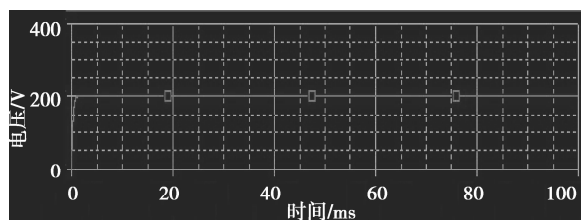


图 7 BUCK 调压电路仿真

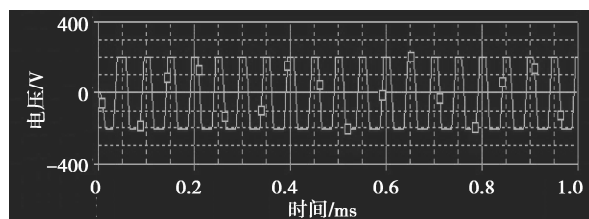


图 8 逆变电路仿真

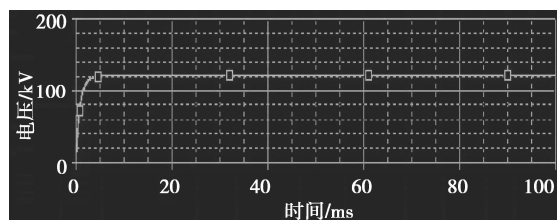


图 9 系统输出电压仿真

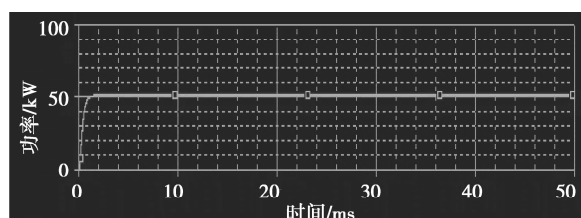


图 10 50 kW 功率仿真曲线

4 结 语

采用了软件 PID 控制技术以及高频逆变技术,设计了一种新型的 X 射线机电源,在 BUCK 调压环节实现了功率的双向传输,高频逆变技术采用了结实型极谐振逆变器,增加了电源的可靠性;并且将高精度电源芯片引入了 X 射线灯丝电流的控制以稳定灯丝电流。仿真结果表明,该电源系统工作正常,可以用于 X 射线机的电源系统。

参考文献:

[1] LIU SHU-LIN, LIU JIAN, YANG YIN-LING, et al. Design of intrinsically safe buck DC/DC converters[C]// Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines & Systems, September 27-29, 2005, Nanjing, China. Beijing: China Electrotechnical

Society, 2005: 1327-1331.

- [2] ALONSON J M, ORDIZ C, GACIO D, et al. Closed-loop regulated power supply for ozone generation based on buck converter and current-fed push-pull resonant inverter[C/OL]// 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, America, September 8-10, 2009: 1-10. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5278749.
- [3] XIE SHAO-JUN, FAN YING, ZHOU DAKE. Research on a novel inverter based on DC/DC converter topology[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2002, 18(4): 341-345.
- [4] ALMAZAN J, VAZQUEZ N, HERNANDEZ C, et al. A comparison between the buck, boost and buck-boost inverters[C/OL]// Power Electronics Congress, 2000. CIEP 2000. VII IEEE International, Acapulco, Mexico, October 19, 2000: 341-346. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=891437.
- [5] TOMESE M. Modeling and simulation of a series resonant inverter [C/OL]// EURCON, 2007. The International Conference on Computer as a Tool, Warsaw, September 9-12, 2007: 1512-1517. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4400319.
- [6] YE Z M, JAIN P K, SEN P C. Analysis and design of full bridge resonant inverter for high frequency AC distributed power system application [C/OL]// Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE, November 6-10, 2005: 8. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1569074.
- [7] DE DONCKER R W, LYONS J P. The auxiliary resonant commutated pole converter[C/OL]// Industry Applications Society Annual Meeting, 1990, Conference Record of the 1990 IEEE, Seattle, USA, October 7-12, 1990: 1228-1235. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=152341.
- [8] LAI J S, YOUNG R W SR, OTT G W, JR, et al. A delta configured auxiliary resonant snubber inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(3): 518-525.
- [9] DEDE E J, JORDAN J, ESTEVE J, et al. On the design of a high power IGBT series resonant inverter for induction forging applications[C/OL]. AFRICON, 1996, IEEE AFRICON 4th, September 24-27, 1996: 206-211. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=563107.

(下转第 142 页)

University of Oxford, 2000: 213-237.

- [17] 王宏宇. 商务推荐系统的设计研究[D]. 安徽: 中国科技大学, 2007.
- [18] O'DONOVAN J, SMYTH B. Trust in recommender systems[C]//In Proceedings of the 10th international conference on Intelligent user interfaces, January 9-12, 2005, San Diego, CA, USA. New York: Association for Computing Machinery, 2005: 167-174.
- [19] 高滢, 齐红, 刘亚波, 等. 基于用户等级的协同过滤推荐算法[J]. 吉林大学学报: 理学版, 2008, 46(3): 489-493.
- GAO YING, QI HONG, LIU YA-BO, et al. A user grade-based collaborative filtering recommendation algorithm [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2008, 46(3): 489-493.
- [20] 郭艳红. 推荐系统的协同过滤算法与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [21] ADOMAVICIUS G, TUZHILIN A. Toward the next generation of recommender systems: a survey of the state-of-the-art and possible extensions [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(6): 734-749.
- [22] 谢明文. 关于协方差、相关系数与相关性的关系[J]. 数理统计与管理, 2004, 23(3): 33-36.
- XIE MING-WEN. The relation of covariance, correlation coefficient and correlation[J]. Application of Statistics and Management, 2004, 23(3): 33-36.
- [23] LANGVILLE A N, MEYER C D. Deeper inside pagerank [J]. Internet Mathematics, 2004, 1(3): 335-380.
- [24] HAVELIWALA T H. Efficient computation of Pagerank [R]. Stanford University: Stanford digital library technologies project, 1999.
- [25] KAMVAR S D, HAVELIWALA T H, MANNING CD, et al. Extrapolation methods for accelerating PageRank computations [C]//The 12th International Conference on World Wide Web, May 20-24, 2003, Budapest, Hungary. New York: Association for Computing Machinery, 2003: 261-270.
- [26] BRIN S, PAGE L. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine [C]// the seventh international conference on World Wide Web, April 14-18, 1998, Brisbane, Australia. The Netherlands: Elsevier Science Publishers, 1998: 107-117.

(编辑 王维朗)

(上接第 134 页)

- [10] MANTIKTALA S. 精通开关电源设计[M]. 王志强, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [11] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [12] 刘凤君. 现代逆变技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [13] 马建林. 数字式乳腺 X 射线机电控系统的设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [14] 张冬梅, 杨苹, 刘军, 等. 基于 UC3875 的双闭环控制稳流型开关电源[J]. 微计算机信息, 2009, 25(19): 127-128.
- ZHANG DONG-MEI, YANG PING, LIU JUN, et al. Double closed-loop controlled stabilized current switching power supply based on UC3875 [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(19): 127-128.
- [15] 王聪, 徐刚. 辅助二极管谐振极逆变器的分析、设计与实现[J]. 电工技术学报, 1998, 13(3): 40-45.
- WANG CONG, XU GANG. The analysis, design and implementation of ADRPI [J]. Journal of electrical technology, 1998, 13(3): 40-45.

(编辑 郑洁)