

扫描电子显微镜的扫描电路研制

涂晶晶, 忻云龙, 谢东珠*

(上海师范大学 数理学院, 上海 200234)

摘要: 报导了采用高速、高精度、低噪声的数模转换器设计扫描电子显微镜的扫描电路, 其扫描速率可达到每秒 10^6 像素, 讨论了电路中的噪声对图像分辨率的影响, 提出了一种矫正扫描线圈电感所引起的电流非线性的方法, 应用到扫描电子显微镜 DXP-10 中, 得到了较好的扫描图像。

关键词: 电子显微镜; 模拟电路; 噪声抑制

中图分类号: TH 742.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5137(2012)02-0122-06

0 引言

19 世纪末发现轴对称磁场具有聚焦电子束的效应, 类似于玻璃透镜对可见光的聚焦作用。到 1926 年 Hans Busch 从理论和实验上对这种效应进行了系统的阐述, 使得这一效应很快地用于电子显微镜的设计^[2-3]。利用这一效应, Ruska 和 Knoll 在 1932 年研制成世界上第一台透射式电子显微镜^[3]。随着技术的发展, 扫描电子显微镜在 1965 年问世。经过近 80 年的发展, 目前电子显微镜在国外已经发展到一个很高的水平。中国在 20 世纪 70 年代对扫描电子显微镜进行研究, 但由于种种原因使得电子显微镜的研制进展很慢, 目前我国的电子显微镜研制水平与国外先进水平还有相当的差距。

电子显微镜可分为两类: 扫描电子显微镜和透射电子显微镜。其主要组成部分由: 电子枪、电子光学系统、图像采集、显示系统和真空系统等组成。电子显微镜的图像分辨率和清晰度受到电子束斑的大小、加速电压的稳定性、电子光学系统中磁透镜的像差和像散、图像采集电子学的噪声、机械部件震动, 以及扫描信号的噪声和非线性引起的电子束不规则偏转等的影响^[2, 4-5]。扫描电子显微镜需要噪声低、线性好的扫描信号, 本文作者主要研究如何减小扫描信号的噪声和改善扫描信号的非线性对图像的影响。

1 扫描信号及噪声影响的分析

电子显微镜是通过改变扫描线圈产生的磁场来改变电子束的偏转角度, 从而使电子束扫描样品的表面来得到其扫描图像的。电子束必须是均匀的扫描样品表面, 否则得到的图像将会产生畸变; 因此, 由扫描线圈产生的磁场必须线性均匀地变化, 从而要求通过扫描线圈的电流也是均匀变化的。

图 1 是扫描电流信号产生的原理框图, 整个扫描电路主要由 3 个部分组成: 控制部分 (MCU)、数/模转换器 DAC 和电流放大部分。MCU 控制 DAC 的输出以产生扫描信号, 同时控制电流放大模块将 DAC 产生的扫描信号放大至所需幅度, 送入扫描线圈产生扫描磁场实现电子扫描。DAC 部分的核心是

收稿日期: 2011-12-19

基金项目: 上海师范大学一般科研项目 (SK201118)

作者简介: 涂晶晶 (1985 -) 男, 上海师范大学数理学院硕士研究生; 忻云龙 (1952 -) 男, 上海师范大学数理学院副教授, 硕士研究生导师; 谢东珠 (1962 -) 男, 上海师范大学数理学院副教授。

* 通信作者

高速、高精度、低噪声的数模转换器,其作用是将精确的数字扫描信号转换成模拟电流信号。

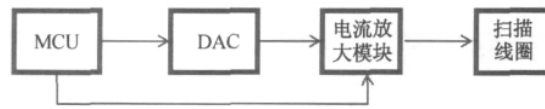


图1 扫描电流信号产生的原理框图

电子显微镜图像的分辨率由电子束斑大小、聚焦磁透镜的各种像差和像散以及扫描电路的噪声等多种因素决定。为了分析扫描电路噪声对图像的影响,这里不考虑聚焦透镜的像差等影响。假设电子束斑是直径为 D 的圆形,且电子束在样品表面扫描相邻两点相切时对应扫描线圈里的电流变化为 ΔI ,如图 2 所示,此时两束斑点中心之间的距离为 $d = D$ 。电路中的噪声会引起扫描线圈中电流变化从而使相邻两束斑产生重叠,假设噪声引起的电流变化为 Δi ,一般认为相邻两个束斑重叠面积小于电子束斑面积的 20% 时则两个束斑是可以分辨的^[2,5],如图 3 所示,阴影面积为圆面积的 20%。由此几何关系可得:

$$\theta - \sin\theta \leq \frac{\pi}{5} \quad (1)$$

$$d = D \times \cos \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

方程(1)可用数值求解得 $\theta \leq 1.626 \text{ rad}$,即 $\theta \leq 93.2^\circ$,代入(2)式可得 $d \geq 0.69D$ 。即扫描点实际移动的距离 d 只要大于电子束斑直径的 0.69 倍,则相邻两点的电子束斑被认为是完全分开的。因为相邻两扫描点的距离与线圈中电流变化 ΔI 是线性关系,因此只要扫描线圈中由噪声引起的电流变化 $\Delta i \leq 0.31\Delta I$,则相邻两扫描点被认为是可以分开的。

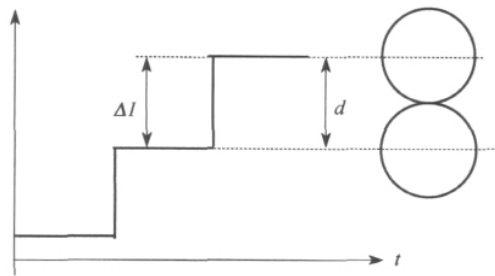


图2 扫描信号与扫描电子束斑的位置关系示意图

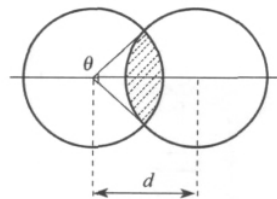


图3 噪声引起两相邻扫描点的重叠示意图

2 扫描信号噪声的抑制

根据前面的论述,要能清晰地分辨相邻两个扫描点,噪声电流必须满足 $\Delta i \leq 0.31 \times \Delta I$,其中 ΔI 是相邻两个偏转点相切时对应的电流变化。一般来说,电路中的噪声包括元器件的热噪声、电路耦合进来的外部噪声以及数字电路的开关噪声等。热噪声电压计算公式 $U_n = \sqrt{4K_b TBR}$,其中 K 为玻尔兹曼常

数 T 为温度, B 为带宽, R 为电阻值. 假设电子显微镜的采样频率为 $1 \times 10^6 \text{ Hz}$, 室温下 (300 K), 在 1 MHz 扫描信号的频带内, 热噪声电压 $U_n = 7.42 \times 10^{-8} (R)^{1/2}$ (信号放大电路的等效输入阻抗为 $1 \text{ k}\Omega$, 电压的放大比例是 $1:1$, 扫描线圈的等效电阻为 8Ω , 外接限流电阻最大为 $2.1 \text{ k}\Omega$, 可得噪声电压 $U_n = 4.13 \times 10^{-6} \text{ V}$), 由此估算出热噪声电流引起的电子束偏移很小, 可以不考虑. 外部噪声信号是指通过各种方式耦合进电路的噪声信号, 如从电源、地线等耦合进电路的噪声信号. 从电源耦合进的噪声信号, 主要是由于电源的波动引起模拟信号的变化, 如 DAC 的参考电压由于供电电压波动而波动, 从而引起高速 DAC 产生的模拟信号失真. 因此需要尽量减小电路耦合的外部噪声. 针对电源噪声和接地噪声分别采用了不同的方法进行抑制, 图 4 是扫描信号放大部分的电路原理图.

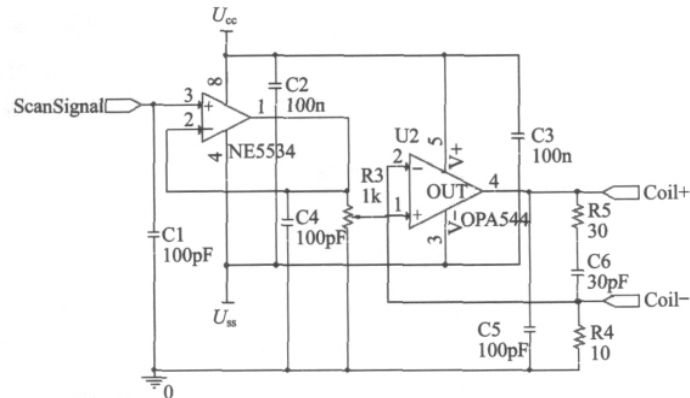


图 4 扫描信号放大电路原理图

为了抑制电源的噪声, 在电路的设计过程中, 电源的入口接一个足够大的退耦电容 (典型值为 $470 \mu\text{F}$), 集成电路芯片的每一个电源引脚也接一个合适的退耦电容 (典型值为 $0.1 \mu\text{F}$); 为了抑制接地噪声, 应将扫描信号的模拟信号地与数字信号地、电源地实行单点连接; 模拟信号地与数字信号地不直接连接, 可有效的将模拟信号地与数字信号地隔离. 除了以上所采取的措施外, 扫描信号的每一级放大过程中, 还加入了滤波措施, 如图 4 电路原理图中电容 $C1$ 、 $C4$ 、 $C5$ 都可将扫描信号中的高频噪声滤去, 使电路中的噪声电压进一步减小. MCU 通过调节 $R3$ 的滑动端改变输入到扫描线圈的电流幅度, 使扫描线圈中产生的噪声电流满足前面所分析的噪声水平要求即可.

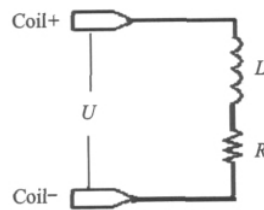


图 5 扫描线圈等效电路图

3 扫描信号的线性化方法

扫描线圈可等效为电感 L 和电阻 R 的串联, 如图 5 所示. 如果在线圈两端加上线性扫描电压信号 $U = K_1 t$, 则流过线圈的电流满足方程:

$$L \frac{dI}{dt} + IR = U = k_1 t \quad (3)$$

(3) 式的解为

$$I(t) = \left(\frac{k_1}{R}t - \frac{k_1 L}{R^2} \right) + \frac{k_1 L}{R^2} e^{-k_1 t/L} \quad (4)$$

由(4)式可见, 即使加在线圈两端的扫描电压信号是线性的, 但由于电感是非线性元件, 流过扫描线圈的电流也是非线性的, 而电子显微镜的偏转线圈中需要的是线性变化的电流. 本研究所用的电子显微镜 DXP-10 的扫描线圈 $R=8 \Omega$ $L=1.8 \text{ mH}$; 假设 $U=10^4 t$ (即 $K_1=10^4 \text{ V/s}$) 则由(4)式得到线圈中电流随时间的变化关系如图 6(a) 所示. 从图 6(a) 可以看出在 $t < 300 \mu\text{s}$ 时间内电流的非线性很明显, 如图 6(a) 中的插图所示.

为了在扫描线圈中得到线性变化的电流, 需要消除(4)式中的非线性指数项. 为此在线圈的两端加上线性电压信号 $U=k_2 t + k_2 L$, 此时方程(3)的解为 $I(t)=k_2 t$, 即流过线圈的电流随时间线性变化, 如图 6(b) 所示. 这样的线性扫描电流信号在线圈中将产生随时间线性变化的磁场, 从而保证电子束在样品表面进行均匀扫描.

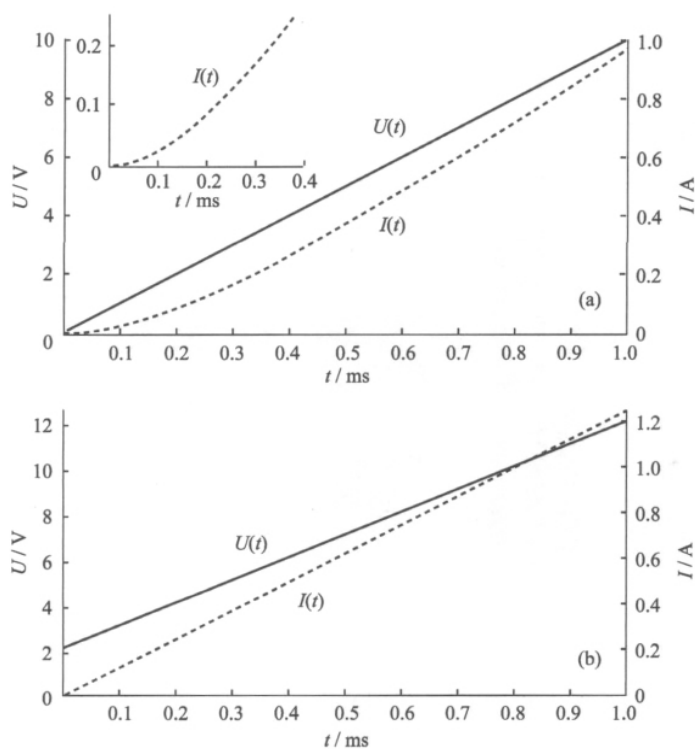


图 6 扫描线圈中电压和电流随时间的变化关系

4 扫描电路测试及应用

扫描电路在 MCU 控制程序的控制下, 产生扫描信号并放大后将其送入扫描线圈. 整个过程在一块 PCB 上完成, 以减小了模拟信号在传输的过程中受到不必要的干扰. 图 7 为用示波器从扫描电路的输出端获取的扫描电压信号. 从图 7 中可看出相邻两扫描点的电压变化 $\Delta V = 18 \text{ mV}$, 而噪声引起的电压变化 $\Delta v \approx 4 \text{ mV} \leq 0.31 \times \Delta V = 5.58 \text{ mV}$, 满足在扫描信号分析中所述的噪声水平要求.

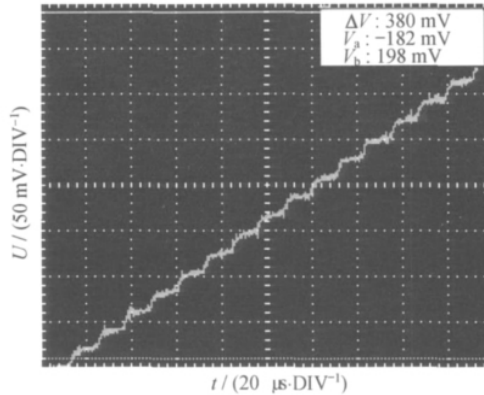
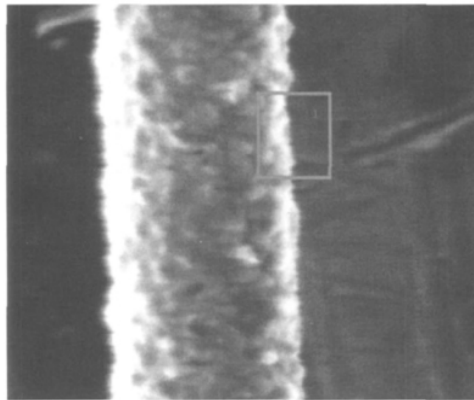


图7 行扫描电压信号

将上述扫描电路用到 DXP-10 扫描电子显微镜中,在中低放大倍数下可以得到比较好的图像,图 8 是用所研制的扫描电路观察直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的铜丝所拍的未经处理的照片.从图 8 上小方框内可看到铜丝的边缘很清晰,说明上述扫描信号的噪声对图像质量的影响已经比较小,其噪声水平是符合要求的.

图8 电子显微镜观察直径 $10\ \mu\text{m}$ 的铜丝

5 总 结

使用高速、高精度、低噪声 DAC 产生电子显微镜扫描信号是可行的,其信号的噪声水平能够满足电子显微镜对扫描信号的要求.数模转换器通过程序的控制,能够有效的纠正线圈中因电感而产生的电流非线性变化问题.

参考文献:

- [1] 西门纪业, 葛肇生. 电子显微镜的原理和设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [2] JON O. Handbook of charged particle optics second edition [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2009.
- [3] ERNST R. The development of the electron microscope and of electron microscopy [M]. Berlin: Nobel Lecture, 1986.
- [4] MUNRO E, ZHU X, LIU H et al. An object pattern post-processor for validation of electron optical modeling [J]. Micro-electronic Engineering, 1999, 46(5): 205 - 208.

- [5] SANDRA V A ,DIRK V D. Resolution of coherent and incoherent imaging systems reconsidered-classical criteria and a statistical alternative [J]. Optics Express 2006 ,14(9) : 3830 – 3839.
- [6] MUNRO E ,ROUSE J ,LIU H et al. Simulation software for designing electron and ion beam equipment [J]. Microelectron-ic Engineering 2006 83:994 – 1002.
- [7] BORN M ,WOLF E. 光学原理(中文版) [M]. 7 版. 北京: 电子工业出版社 2009.
- [8] DONALD A N. Microelectronics circuit analysis and design(third edition) (影印版) [M]. 北京: 清华大学出版社 2007.
- [9] 刘建. 电路分析 [M]. 北京: 电子工业出版社 2010.

The design of a scan signal generator for scanning electron microscope

TU Jing-jing , XIN Yun-long , XIE Dong-zhu *

(College of Mathemaitcs and Sciences , Shanghai Normal University , Shanghai 200234 , China)

Abstract: A scan signal generator for scanning electron microscope is designed based on high speed ,low noise digital to analog converter. The scan rate is up to 10^6 pixels per second. The influence of circuit noise on image resolution is discussed. A method of correcting the current nonlinearity caused by the scanning coil inductance is presented. The developed scanning circuit has been used into the scanning electron microscope DXP – 10 and there are good images have been generated.

Key words: electron microscope; analog circuit; anti-noise

(责任编辑: 顾浩然)