

Feshbach 共振磁场线圈及大电流稳定控制驱动的设计

韩鸣飞,张进一,颜波,陈帅

(中国科学技术大学近代物理系,合肥 230026)

摘要: Feshbach 共振已成为冷原子研究领域的一种重要实验手段. 碱金属原子的 Feshbach 共振点磁场通常在几百高斯的水平,并且有一定的线宽 Δ ,这就要求产生的外部调制磁场具有一定的稳定度. 设计制作了可以通大电流的亥姆霍兹线圈,用它可以产生需要的强磁场. 通过控制线圈电流的稳定度来提高磁场的稳定度. 利用一个负积分反馈电路来对电流进行控制,测试得到电流的稳定度达到了 1×10^{-5} .

关键词: 玻色-爱因斯坦凝聚; Feshbach 共振; 电流源

中图分类号: O4-33 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2012.01.005

引用格式: Han Mingfei, Zhang Jinyi, Yan Bo, et al. Design of compact coils and a big stable current driver for Feshbach resonance researches[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(1):31-36.

韩鸣飞,张进一,颜波,等. Feshbach 共振磁场线圈及大电流稳定控制驱动的设计[J]. 中国科学技术大学学报,2012,42(1):31-36.

Design of compact coils and a big stable current driver for Feshbach resonance researches

HAN Mingfei, ZHANG Jinyi, YAN Bo, CHEN Shuai

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Atomic Feshbach resonance is one of the important tools in quantum gases experiments. The position of a resonance, B_0 , typically occurs at a few hundred gauss for alkali atoms. The width of a resonance Δ can be relatively smaller, thus requires a stable magnetic field. A set of compact Helmholtz coils were designed, which are capable of carrying a high current for the strong magnetic field while maintaining the required stability. The negative integral feedback loop was used to regulate a current stability up to 10^{-5} .

Key words: Bose-Einstein condensates; Feshbach resonance; current source

0 引言

自 1995 年首次在实验上观测到玻色-爱因斯坦

凝聚(BEC)现象以来^[1-3],冷原子研究领域得到了迅猛的发展,取得了一系列重大的进展.特别是光晶格技术和 Feshbach 共振技术的出现和发展,为研究多

收稿日期:2011-05-05;修回日期:2011-06-10

基金项目:国家重点基础研究发展(973)计划(2011CD921303)资助.

作者简介:韩鸣飞,男,1986年生,硕士.研究方向:冷原子实验. E-mail: atom.hanmf@gmail.com

通讯作者:陈帅,博士/教授. E-mail: shuai@ustc.edu.cn

体系系统提供了崭新的平台。

在碱金属原子 BEC 中,原子之间的相互作用是通过弹性碰撞实现的.原子之间相互作用强度正比于 s 波散射长度 a .而散射长度 a 可以通过改变外磁场 B 来调节,它们的关系(图 1)有如下数学形式:

$$a = a_0 \left[1 - \frac{\Delta}{B - B_0} \right].$$

式中, Δ 发散宽度为一个常数; B_0 是发生 Feshbach 共振^[4-5]时对应的磁场值.因此,通过调节磁场强度可以任意改变原子间的相互作用强度. Feshbach 共

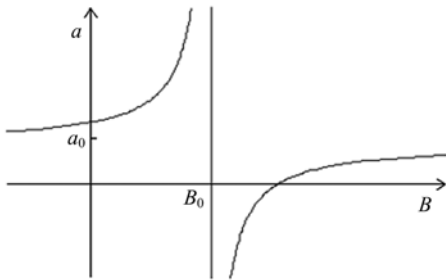


图 1 散射长度 a 与磁场 B 关系

Fig. 1 Scattering length a near a magnetically tuned Feshbach resonance

振技术可以用来实现很多物理现象,如超冷费米子组成超冷分子,使简并费米子结合成分子并进一步蒸发冷却形成分子 BEC, BEC-BCS 相变等.

碱金属原子 Feshbach 共振点对应了一个很大的磁场 B_0 ,通常为几百高斯,并且共振点附近存在一个共振线宽 Δ ,这就对外加的扫描磁场 B 的稳定度提出了要求,需要磁场 B 的相对稳定度远小于 Δ/B_0 .例如,我们要观察⁸⁷Rb 与⁴⁰K 混合的 Feshbach 共振,理论计算的⁸⁷Rb $|1, 1\rangle$ 和⁴⁰K $|9/2, -5/2\rangle$ 两能态间的 Feshbach 共振点 $B_0 = 464.02$ G,共振线宽 $\Delta = 0.42$ G, $\Delta/B_0 = 9 \times 10^{-4}$.所以要观察到这两能态的 Feshbach 共振,则需要 BEC 尺度内能够产生这么强的磁场,并且磁场的相对稳定度应远小于 $\Delta/B_0 = 9 \times 10^{-4}$ 这个值^[6].我们的工作就是在实验上产生这样一个稳定的强磁场.

1 Feshbach 共振的实验设计

1.1 Feshbach 共振磁场线圈

为了产生均匀强磁场,根据真空腔尺寸,我们绕制了一对亥姆霍兹线圈,通同向的电流后在中心位置产生磁场 B .亥姆霍兹线圈产生的磁场在中心点附近,可以近似看做是均匀的.我们实验上实现的

⁸⁷Rb 原子 BEC 直径为 $60 \mu\text{m}$,通过理论计算可以知道,在这个范围内,我们制作的亥姆霍兹线圈在中心产生磁场 B 的梯度小于 1.4×10^{-3} G/cm,相对中心点磁场变化幅度为 6×10^{-8} .可见中心磁场在 BEC 尺度内具有很好的均匀性.中心位置产生的磁场大小正比于流经线圈的电流大小.经过测试,我们绕制的磁场线圈每 10 A 电流在亥姆霍兹线圈中心位置产生 33.4 G 的磁场强度,即 $B = 3.34 I$.

要产生 Feshbach 共振所需要的强磁场,就要给线圈通大电流,这时线圈的发热问题就显得重要了.为帮助线圈散热,我们在绕制完线圈后,用一种导热好的环氧树脂胶(型号 ZB6208,导热系数 $1.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)将线圈黏贴到一个热沉上,并且给热沉通水循环来导出线圈发散出的热量,达到保护线圈的目的.线圈和热沉的实物图如图 2 所示.图 3、图 4 为没有水冷循环和有水冷循环两种情况下,给线圈通 150 A 电流时线圈和热沉温度随通电时间的变化.可见有水冷的情况下线圈和热沉温度都能够控制住.



图 2 Feshbach 线圈及热沉实物图

Fig. 2 Photo of the Feshbach coil and heat sink

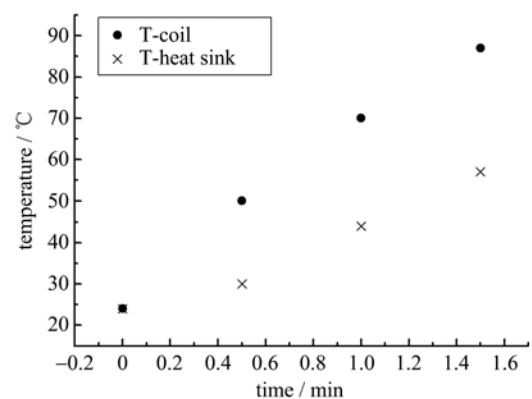


图 3 不通水冷的情况下线圈和热沉的温度随通电时间的变化

Fig. 3 Growth of Feshbach coil and heat sink temperature under 150 A current without water cycle

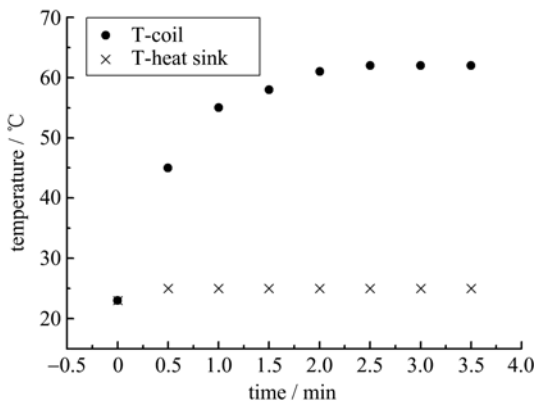


图 4 通水冷的前提下线圈和热沉的温度随通电时间的变化

Fig. 4 Growth of Feshbach coil and heat sink temperature under 150 A current with water cycle

1.2 Feshbach 磁场线圈的电流控制

要在实验上实现 Feshbach 共振,不仅需要达到一个很高的磁场强度,还要求磁场具有很高的稳定度,而通过磁场线圈的电流稳定度就决定了磁场的稳定度,因此需要抑制电流噪声.我们使用的电源(型号 Agilent 6671A)恒压模式下稳定度 10^{-4} 量级,不能满足实现 Feshbach 共振所需要的条件,于是我们设计并制作了一套电路控制系统,用于控制电流的开启关断,并且进一步提高电流的稳定度.图 5 是整个电流控制驱动电路的原理图.

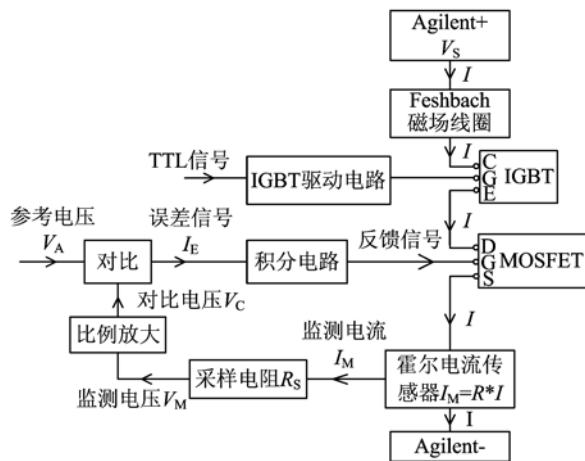


图 5 电流控制驱动电路原理图

Fig. 5 Scheme of the current control driver

我们让电流先经过一个 IGBT (CM200HA-24H),用 TTL 信号通过驱动电路来控制它的开关,从而控制电流的开启和关断.然后利用一个负积分反馈系统来进一步提高电流的稳定度,其原理如下:

电流通过一个 MOS 管(型号 IXFN200N07)后,用霍尔电流传感器(型号 CSNR161)来监测电流的大小,传感器输出了一个监测电流 I_M ,它通过一个 40Ω 的采样电阻后对应了一个监测电压 V_M ,将 V_M 按一定比例放大得到对比电压 V_C , V_C 与输入的模拟电压 V_A 进行对比,两者的差值会形成一个误差信号,这个误差信号通过一个积分电路后会对 MOS 管的 V_{GS} 电压产生调制,使通过 MOS 管的电流发生变化.这是一个负反馈控制回路,输入的参考电压 V_A 的值对应了一个固定的电流值,而且当电流偏离这个值时,探测到的误差信号通过积分电路来调制 MOS 管的 V_{GS} ,把电流拉回来,这样就提升了电流的稳定度.

在通大电流时,MOS 管和 IGBT 管的散热问题会很严重.我们采用了两个办法来解决散热问题:①制作了一个水冷热沉,用来给 IGBT 和 MOS 管散热;②利用多个 MOS 管并联,将电流分解为多个支路,这样流经每个 MOS 管的电流变小了,就缓解了单个 MOS 管的发热问题.这时,如果仅用一个积分反馈回路来同时控制并联的多个 MOS 管,由于不同 MOS 管的等效结电阻 R_{DS} 不同,就会有电流分配不均的问题,导致某一个 MOS 管过热.我们采用了多个积分反馈电路对每一个 MOS 管进行控制.这种做法还会带来另一个好处,就是多路独立控制电流导致的总路电流相对稳定度会比分路电流的相对稳定度好.原因如下:假设有 N 个 MOS 管并联,并且每个 MOS 管都有一个单独的积分反馈电路来控制它的电流稳定度,每一支路的电流完全相等,即 $I_1 = I_2 = \dots = I_i = \dots = I_N$,因为每一路的控制都相同,那么每一支路的电流噪声也是完全相等的,即 $\Delta I_1 = \Delta I_2 = \dots = \Delta I_i = \dots = \Delta I_N$,又因为每一支路都是相对独立的,那么总路的电流为 $I = N * I_i$,总路电流噪声

$$\Delta I = \sqrt{N \cdot \Delta I_i^2} = \sqrt{N} \cdot \Delta I_i,$$

可以求出总路的电流相对稳定度为

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\sqrt{N} \cdot \Delta I_i}{N \cdot I_i} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\Delta I_i}{I_i}.$$

可以看出总路电流相对稳定度是分路电流相对稳定度的 $N^{-1/2}$ 倍.

我们产生大电流电路的整体结构如图 6 所示,将 Agilent 电源产生的电流,通过 IGBT 后分为 3 路,分别通过并联的 3 个 MOS 管,并且用 3 个反馈电路分别控制每个 MOS 管,用信号发生器(型号

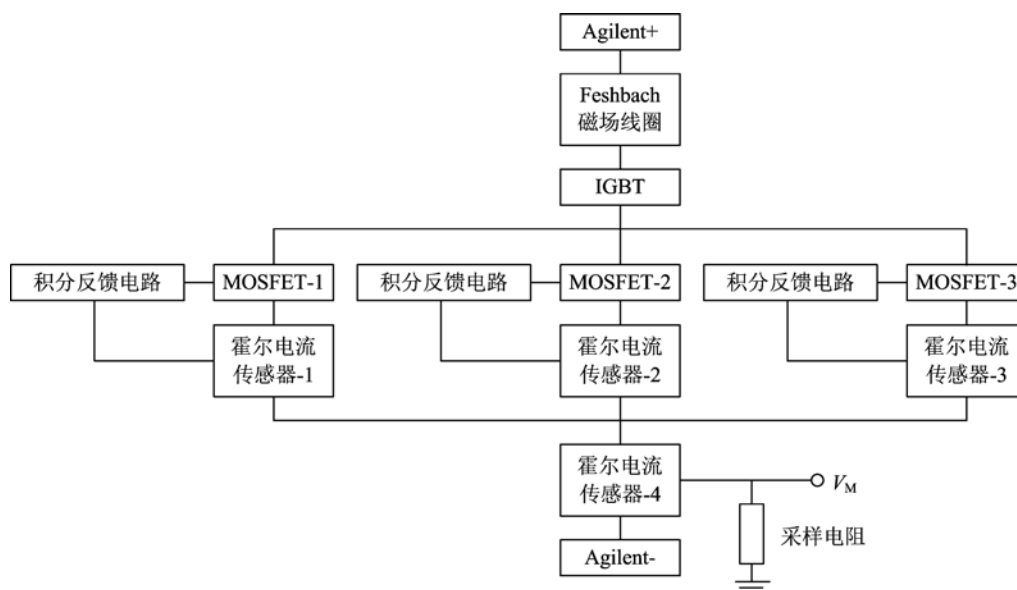


图 6 大电流情况下 3 分路结构示意图

Fig. 6 Scheme of 3 independent control under high current

Agilent33220A)产生一个模拟信号作为 3 路控制的参考电压. 用一个电流传感器来探测总路电流情况, 它输出的探测电流经过一个 40Ω 的采样电阻, 得到一个总路的监测电压 V_M .

1.3 电流噪声理论分析

电路中通过 MOS 管的电流 I 与霍尔电流传感器的比例系数 R 、采样电阻阻值 R_S 、参考电压 V_A 、电源电压 V_S 有一个函数关系:

$$I = f(V_S, R, R_S, V_A),$$

那么 V_S, V_A, R, R_S 的噪声对电流 I 的噪声 ΔI 产生的影响就有如下关系:

$$\Delta I = \frac{\partial f}{\partial V_S} \Delta V_S + \frac{\partial f}{\partial V_A} \Delta V_A + \frac{\partial f}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial f}{\partial R_S} \Delta R_S.$$

结合我们具体的电路构成, 电路中各功能器件的输入输出参数的关系如下:

MOS 管

$$I = F(V_{GS}, V_{DS}),$$

电流采样

$$V_M = R_S \cdot R \cdot I,$$

误差信号

$$I_F = \frac{V_M}{R_1} - \frac{V_A}{R_2},$$

积分反馈

$$V_{GS} = -\frac{1}{C} \int I_E dt + V_{GS_0},$$

电源

$$V_{DS} = F'(V_S).$$

式中, R_1, R_2 为电阻; C 为积分电路中的电容值. 将这些关系式进行迭代, 就得到

$$I = F(V_{GS}, V_{DS}) = F\left[-\frac{1}{C} \int \left(\frac{R_S \cdot R \cdot I}{R_1} - \frac{V_A}{R_2}\right) dt + V_{GS_0}, F'(V_S)\right].$$

则电流噪声 ΔI 为

$$\begin{aligned} \Delta I = & -\frac{1}{C} \frac{\partial F}{\partial V_{GS}} \int \frac{R \cdot I}{R_1} dt \cdot \Delta R_S - \\ & \frac{1}{C} \frac{\partial F}{\partial V_{GS}} \int \frac{R_S \cdot I}{R_1} dt \cdot \Delta R + \\ & \frac{1}{C} \frac{\partial F}{\partial V_{GS}} \int \frac{1}{R_2} dt \cdot \Delta V_A + \frac{\partial F}{\partial V_{DS}} \frac{dV_{DS}}{dV_S} \Delta V_S. \end{aligned}$$

上式表示了各个噪声对电流稳定度造成的影响. 由于反馈中存在积分电路, 所以积分时间(即整个反馈回路的响应时间)会对电流噪声的抑制起到重要的作用. MOS 管的响应时间小于 250 ns , 电流传感器的响应时间小于 500 ns , 那么整个回路的响应时间就应该优于两者之和 750 ns . 我们假设响应时间取最大值 750 ns , 再带入各个器件的具体参数, 可以大致估算出电流的相对噪声

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I}{I} = & -0.3 \times \frac{\Delta R_S}{R_S} - 0.3 \times \frac{\Delta R}{R} + \\ & 0.3 \times \frac{\Delta V_A}{V_A} - 0.3 \times \frac{\Delta V_S}{V_S}. \end{aligned}$$

也就是说, 电源的噪声、采样电阻和电流传感器的噪声、参考电压的噪声经过反馈后对电流噪声的影响衰减为原来的 0.3 倍. 我们实验中电源 (Agilent

6671A)提供的稳定电压 V_S 具有 1×10^{-4} 的稳定度, 参考电压 V_A 由一台信号发生器 (Agilent33220A) 产生, 测量其稳定度为 2×10^{-5} , 采样电阻 R_S 温漂系数为 $5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. 根据这些参数, 电流的稳定度理论上可以达到 10^{-5} 量级.

1.4 电流的开启和关断测试

电源提供 4.7 V 的稳定电压, 用信号发生器提供一个 TTL 信号, 示波器观测总路监测电压 V_M , 作为对电流的监测. 测得电流的开启时间为 1 ms, 关断时间为 100 μs .

1.5 电流的稳定度测试

不加入反馈回路, 电源提供 3 V 稳定电压, 此时电路电流约为 120 A, 用数字万用表 (Agilent34410A) 来长期地观测总路电压 V_M , 这个电压的稳定度就反映了电源恒压模式下输出电流的稳定度, 长期 (3 h 20 min) 测量结果如图 7 所示. 加入反馈电路后, 电源提供 5 V 的稳定电压, 用一台信号发生器给一个 8 V 的电压, 作为反馈电路的参考电压, 对应每一个 MOS 管的电流 40 A, 那么总路电流就是 120 A. 同样用万用表观测总路的监测电压 V_M , 长时间的测量结果如图 8 所示. 测试过程都是数字万用表每 1 s 时间间隔读取一个电压值. 从两个图中都可以看到电流在开始的一段时间里都会有

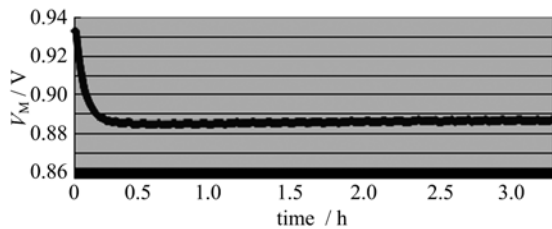


图 7 Agilent 电源稳定度长期测试结果

Fig. 7 Test result of the stability of Agilent power supply in a long time

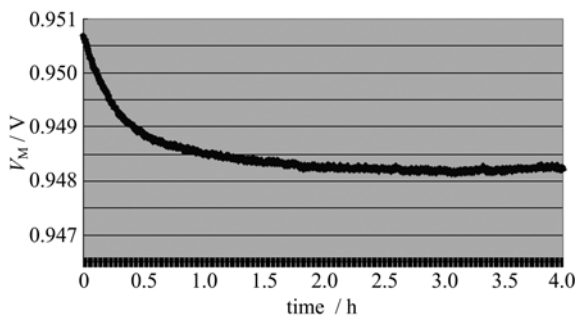


图 8 加入反馈控制后电流稳定度的长期测试结果

Fig. 8 Test result of the stability of current using feedback control in a long time

一个漂移, 这是因为大电流情况下, 整个系统的温度会上升 (导线会加热到很高的温度, IGBT 和 MOS 管因功耗过大而被加热, 电流传感器的功耗也很大, 有明显的发热现象), 整个系统状态会随温度升高而有一个漂移, 一段时间后, 系统各器件温度恒定, 电流就稳定不再会有漂移了. 对测量的数据进行分析, 我们取一段时间的均方差作为稳定度的一个标准, 均方差除以这段时间的电压均值作为相对稳定度.

不加反馈的情况下, 电流经过一段时间温漂达到稳定后的 3 h 内, 监测电压 V_M 的均方差计算结果为 6.5×10^{-4} , 平均值为 0.886 26, 所以它在 3 h 内的相对稳定度为 $6.5 \times 10^{-4} / 0.886 26 \approx 7.3 \times 10^{-4}$. 这是长时间稳定度的一个指标. 我们再来看短期稳定度, 我们取一小段时间间隔 (20 min) 来看电压的抖动情况, 如图 9 所示, 可看到电压有一个周期性的抖动, 我们挑出抖动最强的 1 min, 如图 10 所示, 计算这 1 min 的相对稳定度为 3.0×10^{-4} .

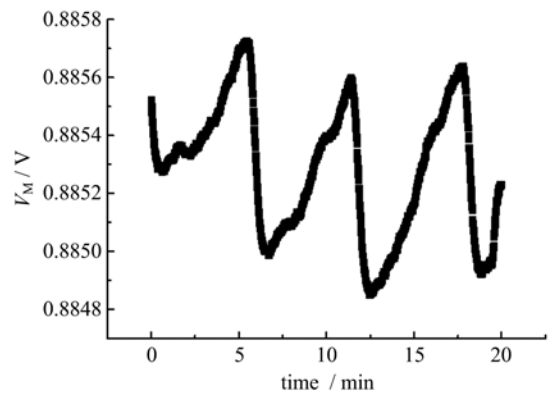


图 9 不加反馈控制 20 min V_M 监测结果

Fig. 9 V_M in 20 min without feedback control

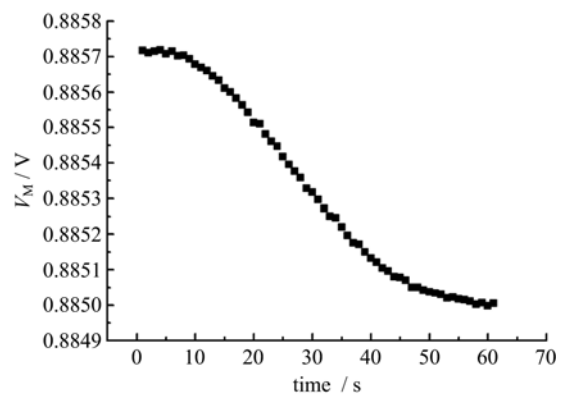


图 10 不加反馈控制 1 min V_M 的监测结果

Fig. 10 V_M in 1 min without feedback control

加入反馈控制电路后, 电流稳定后的长时间 (2 h 10 min) 里, 电压相对稳定度计算结果为 3×10^{-5} .

同样的,我们取 20 min 的时间段来观察噪声,如图 11 所示,发现电压 V_M 噪声没有明显的周期性,所以我们计算出每一分钟的相对稳定度然后求平均值为 1×10^{-5} . 另外在电压随系统温度漂移的前 1 个小时时间内,1 min 的相对稳定度平均值为 4×10^{-5} . 图 12 为取任意的 1 min 时间,观察电压噪声的情况.

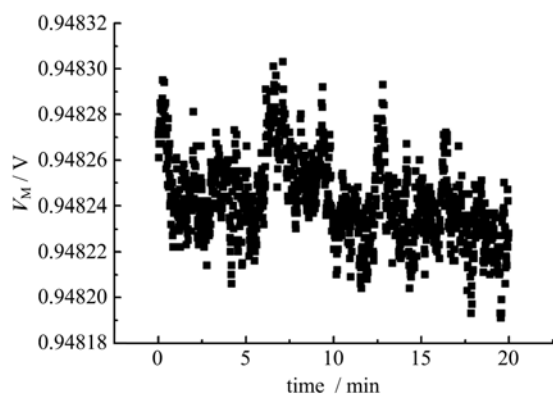


图 11 加反馈控制 20 min V_M 监测结果

Fig. 11 V_M in 20 min with feedback control

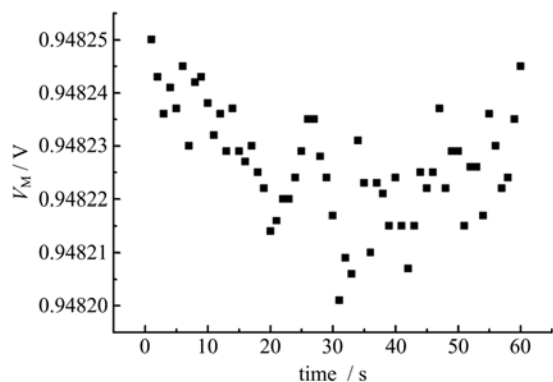


图 12 加反馈控制 1 min V_M 的监测结果

Fig. 12 V_M in 1 min with feedback control

两种情况对比,我们就可以看出,加入积分反馈控制电路后,电流噪声减小了一个量级,达到了 10^{-5} 量级.

2 结论

我们为实现 Feshbach 共振设计制作了可以产生强磁场的线圈,加上水冷后可以承受很大的电流. 实验过程中,通过 TTL 信号可以控制 IGBT 的开关,也就控制了电流的开关;用自行研制的积分反馈电路来控制电流的稳定,使电流的相对稳定度达到了 10^{-5} 量级;通过改变负积分反馈控制电路中输入的参考电压值,就可以改变通过 MOS 管的电流值,也就是改变了磁场强度. 我们现有的电源最大只能提供 150 A 的电流,也就是说最多可以产生 500 G 的磁场强度. 要产生更大的磁场,就必须加大电流,需要适当地再并联几个 MOS 管以减少单个 MOS 管的散热问题.

参考文献 (References)

- [1] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, et al. Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor[J]. *Science*, 1995, 269(5221): 198-201.
- [2] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R, et al. Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(22): 3 969-3 973.
- [3] Bradley C C, Sackett C A, Tollett J J, et al. Evidence of Bose-Einstein condensation in an atomic gas with attractive interactions [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(9): 1 687-1 690.
- [4] Ketterle W, Zwierlein M W. Making, probing and understanding ultracold Fermi gases [DB/OL]. 2008 [2011-05-05]. <http://arxiv.org/abs/0801.2500>.
- [5] Chin C, Grimm R, Julienne P, et al. Feshbach resonances in ultracold gases [J]. *Rev Mod Phys*, 2010, 82: 1 225-1 286.
- [6] Klempt C, Henninger T, Topic O, et al. ^{40}K - ^{87}Rb Feshbach resonances: Modeling the interatomic potential[J]. *Phys Rev A*, 2007, 76: 020701(R).