

冷原子干涉仪中二维磁光阱线圈的优化设计

樊鹏格^{1,2}, 吴易明¹, 贾森¹, 王先华¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大通量冷原子源是实现高精度冷原子干涉仪的关键技术之一。为获得大通量冷原子源, 通常采用二维磁光阱(2D-MOT)和三维磁光阱(3D-MOT)的级联结构, 其中 2D-MOT 的磁场分布是影响其性能的重要因素。通过数学建模及有限元分析, 对 2D-MOT 中不同构造(长方形、跑道形、马鞍形)的反亥姆霍兹线圈进行数值计算, 分析了不同构造线圈的磁场分布及因在制造与装配过程中产生的偏心、线圈不对称、平行度及内径不对称误差造成的磁场零点漂移和磁场梯度变化。分析结果表明, 在偏心误差 $C < 1.14$ mm, 线圈不对称误差 $\Delta I < 0.016$ A, 平行度误差 $\theta < 1.02^\circ$ 时, 马鞍形线圈产生的磁场梯度更有利于制备大通量冷原子源。该结果为冷原子干涉仪 2D-MOT 的磁场系统设计和加工提供了理论指导。

关键词: 大通量冷原子源; 冷原子干涉仪; 2D 磁光阱; 反亥姆霍兹线圈; 有限元分析

中图分类号: O431.2; TL62*2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0618003

Optimization design of two-dimensional magneto optical trap field coils for cold atom interferometer

Fan Pengge^{1,2}, Wu Yiming¹, Jia Sen¹, Wang Xianhua¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: High flux of cold atoms is one of the key technologies to realize high-precision cold atom interferometer. The approach of concatenation of two-dimensional Magnetic Optical Trap (2D-MOT) and three-dimensional Magnetic Optical Trap(3D-MOT) is generally used to obtain high flux of cold atoms. The magnetic field distribution of 2D-MOT is the key influencing factor in this appliance. In this paper, three different(rectangular, race-track and saddle)mathematical models of Anti-Helmholtz coils in 2D-MOT were established to analyze the magnetic field distribution. Then, the magnetic field zero drift and the change of magnetic field gradient caused by the error of eccentricity, coils asymmetry, parallelism and inside diameter asymmetry were analyzed, which were produced in the manufacture and installation process using finite element analysis. Results show that the magnetic field gradient provided by saddle coils is more conducive to produce high flux of cold atoms when eccentricity error is less than 1.14 mm, coils asymmetry error is less than 0.016 A and parallelism error is less than 1.02° . This work may provide theoretical guidance for the design and fabrication of magnetic system of 2D-MOT of cold atom interferometer.

Key words: high flux of cold atoms; cold atom interferometer; 2D magnetic optical trap; anti-Helmholtz coils; finite element analysis

收稿日期: 2015-10-24; 修订日期: 2015-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(11404387); 西部之光项目(Y329451213)

作者简介: 樊鹏格(1990-), 女, 硕士生, 主要从事冷原子干涉技术方面的研究。Email: fanpengge2010@163.com

导师简介: 吴易明(1975-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电精密测量技术方面的研究。Email: wym34@opt.ac.cn

0 引言

冷原子干涉仪在高精度惯性导航, 基本物理常数测量, 基本物理定律验证及地质探矿等方面具有广阔的应用前景^[1-5]。在高精度冷原子干涉仪中, 大通量冷原子源必不可少, 它可以实现磁光阱(MOT)中原子的快速装载, 从而提高冷原子干涉仪的输出信噪比^[6]。为了获得大通量的冷原子源, 目前多采用双 MOT 方式来代替单 3D-MOT 实现原子的冷却与囚禁。其中 2D-MOT 和 3D-MOT 级联的结构应用最为广泛, 因为其减少了一维磁光阱的约束, 使被冷却的原子在磁光阱中的驻留时间降低从而减少碰撞损失, 进而提高原子通量^[6-7]。2D-MOT 中一般采用长方形线圈提供磁场梯度^[6], 所形成的磁场分布限制了磁光阱囚禁原子总数, 导致原子干涉仪的条纹对比度得不到提高。跑道形和马鞍形的线圈构造虽然很早就有, 但在 2D-MOT 中还未有应用。参考文献[8]采用跑道形线圈为原子干涉仪提供导引磁场, 使得磁场梯度分布显著改善。因而, 通过比较不同构造的磁场线圈产生的磁场分布, 选择一种更有利于囚禁大通量冷原子源的线圈构造是一项很有必要的研究工作。

文中采用有限元分析方法首先对基于冷原子干涉仪的 2D-MOT 中不同构造的反亥姆霍兹线圈 (长方形线圈、跑道形线圈及马鞍形线圈) 进行数学建模与仿真分析。然后分析了线圈主要制造与装配误差对磁场的影响, 再利用插值拟合绘制出误差对磁场的影响曲线, 最后通过比较这三种线圈的磁场分布和误差影响, 优选出一种最适合安装在 2D-MOT 中的线圈构造, 使磁光阱能囚禁更多原子, 实现大通量冷原子源的制备。

1 2D 磁光阱中的磁场线圈

在冷原子的制备过程中, 冷原子的数量和寿命是两个不可调和的矛盾。要获得足够多的冷原子, 就必须降低原子气室的真空度。而真空度的下降会导致冷原子寿命的减小, 从而影响实验的有效持续时间^[7]。为了解决这一难题, 文中实验采用 2D-MOT 和 3D-MOT 级联的装置来冷却和囚禁原子团, 图 1 为磁光阱的工程设计图。

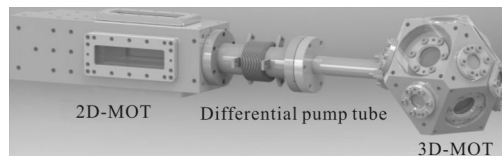


图 1 二维磁光阱和三维磁光阱的级联装置

Fig.1 Applience of concatenation of 2D-MOT and 3D-MOT

如图 1 所示, 2D-MOT 预冷却的原子形成原子束, 通过一段差分管进入 3D-MOT 后得到实验所需的冷原子团。其中差分管不仅可以过滤纵向高速的原子, 还可以维持 2D-MOT 和 3D-MOT 之间的压强平衡, 保证 3D-MOT 的高真空度^[7]。此级联装置第一级采用低真空度的 2D-MOT, 可以获得较高的原子饱和蒸汽压, 提高原子束流的通量, 第二级采用高真空度的 3D-MOT, 对慢速原子束进一步地冷却, 从而在增加原子数量的同时降低原子的温度。由于 2D-MOT 是影响原子数量的重要因素, 所以文中主要对 2D-MOT 中的磁场线圈进行研究。

1.1 2D 磁光阱中的线圈构造

2D-MOT 的结构设计如图 2 所示, 其中不均匀磁场由四个产生横向磁场梯度的反亥姆霍兹线圈 (标注细线部分) 提供。目前, 一般采用长方形线圈, 如图 3(a)所示。参考文献[8]分析了跑道形线圈相较于传统线圈结构的优势: 可产生低的磁场梯度, 允许磁场的动态消除, 可提供表面磁光阱的原位载荷, 易装配等; 参考文献[9]中提到马鞍形线圈, 这种缠绕方式不仅可以保证磁极所需的安匝电流, 还可以减少端板电流对磁场的影响。跑道形和马鞍形线圈的构造如图 3(b)和(c)所示。为了统一线圈模型, 设置三种线圈骨架的长度都为 133 mm, 相邻骨架相距 3 mm, 对称骨架相距 86 mm。长方形和马鞍形线圈骨架的圆角半径为 6 mm, 跑道形线圈骨架半径为 29 mm, 线圈的宽度和厚度都为 11 mm。

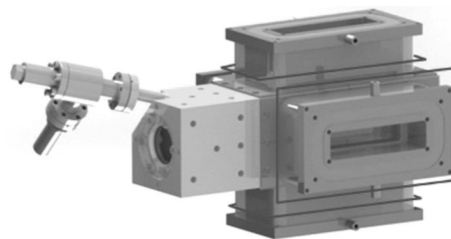


图 2 二维磁光阱工程设计图

Fig.2 Engineering design graph for 2D-MOT

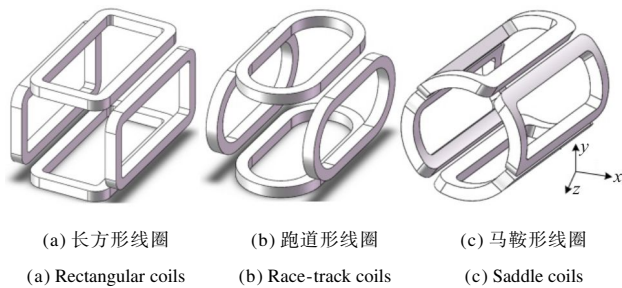


图 3 磁场线圈模型

Fig.3 Magnetic field coils models

1.2 不同线圈的磁场分布

设置铜线圈匝数 N 为 230，所通电流为 1 A，网格划分最大尺寸为 4 mm，求解线圈的静磁场分布。由于 2D-MOT 是利用横向磁场产生的散射力对原子进行冷却和囚禁的，所以只考虑横向磁场的分布情况。经有限元分析求解得到三种线圈的横向磁场分布如图 4 所示，这三种线圈产生的磁场都为四极型磁阱，对原子有较好的囚禁效果。

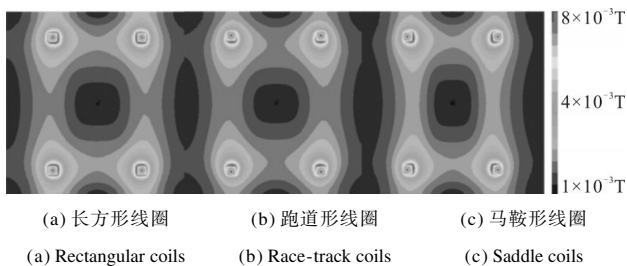


图 4 轴向磁场分布图

Fig.4 Magnetic field distribution of axial

三种线圈的中心轴线磁场分布如图 5 所示，接近磁场零点处马鞍形线圈的磁场梯度最小，磁光阱中原子的碰撞损失率较小，原子寿命较长，有利于大通量冷原子源的制备。而远离磁场零点处马鞍形线

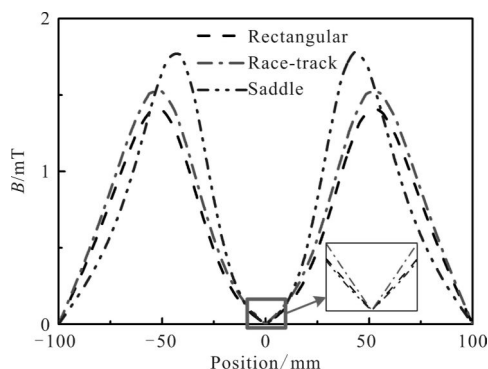


图 5 中心轴线磁场分布图

Fig.5 Magnetic field distribution of central axis

圈的磁场梯度最大，磁光阱深较大，更有利于囚禁冷原子，提高磁光阱的性能。

2 误差分析

以上分析了理论状态下三种线圈的磁场分布，但是在实际制造与装配过程中，会存在各种误差，如线圈位置不对称(简称偏心误差 C)，线圈的电流不相等(简称线圈不对称误差 ΔI)，线圈位置不平行(简称平行度误差 θ)及线圈内径不相等(简称内径不对称误差 k)等^[10]。这些误差会导致磁场分布的变化(磁场零点漂移和磁场梯度变化)，改变磁光阱中原子的运动状态，从而影响冷原子的囚禁情况。因而，必须分析和比较这些误差对三种线圈磁场分布的影响。

由于 2D-MOT 中 4 个反亥姆霍兹线圈是相互对称的，为了简化模型，仅考虑 x 轴正方向线圈(设为线圈 1)的误差(如图 3 所示)。定义偏心误差 C 为线圈 1 沿 x 轴正方向偏移的距离，线圈不对称误差 $\Delta I = I - I_1$ ， I_1 为线圈 1 所通电流，平行度误差 θ 为线圈 1 沿 y 轴转动的角度，内径不对称误差为线圈 1 内径与理论内径的比值。设置误差参数如表 1 所示。

表 1 误差参数表

Tab.1 Error parameters

Parameters	Error					
C/mm	0	2	4	6	8	10
$\theta/(\text{^\circ})$	0	1	2	3	4	5
$\Delta I \cdot N/\text{A}$	0	5	10	15	20	
k	1	0.95	0.9	0.85	0.8	

2.1 三种线圈磁场误差分析

根据表 1 所示的误差参数，对长方形、跑道形和马鞍形线圈模型调整后，利用有限元分析计算其静磁场分布，得到三种线圈的各项制造与装配误差引起中心轴线磁场分布的变化如图 6~8 所示，其中图(a)为偏心误差引起磁场分布的变化，图(b)为线圈不对称误差引起磁场分布的变化，图(c)为平行度误差引起磁场梯度的变化，图(d)为内径不对称误差引起磁场分布的变化。

从图 6~8 可以看出，各制造与装配误差对三种线圈磁场分布的影响相似，线圈偏移会严重降低磁场性能，引起磁场零点沿 x 轴方向漂移，改变磁场梯度。线圈偏移越大，磁场分布的畸变就越严重；线圈

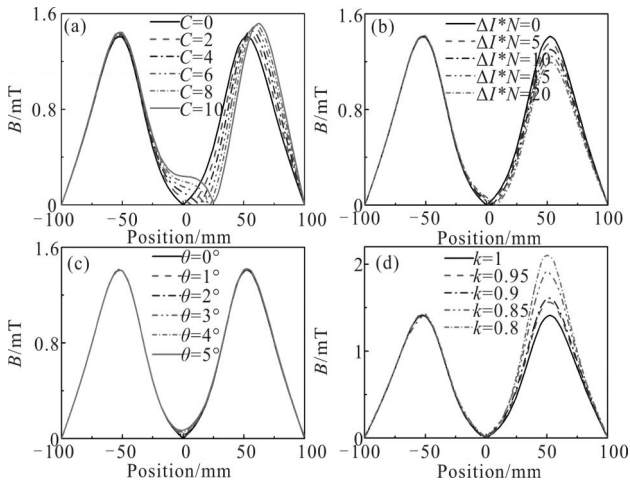


图 6 长方形线圈各项误差对磁场分布的影响

Fig.6 Effects of the errors of rectangular coils on magnetic field distribution

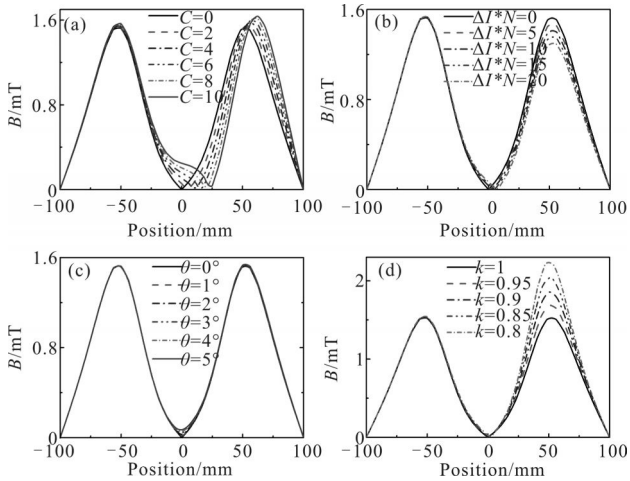


图 7 跑道形线圈各项误差对磁场分布的影响

Fig.7 Effects of the errors of race-track coils on magnetic field distribution

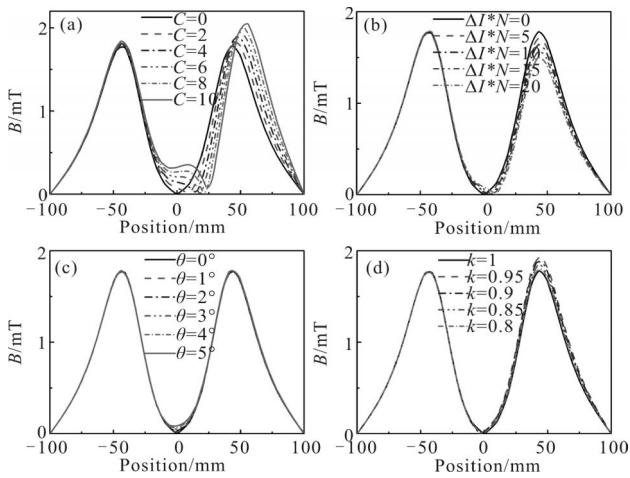


图 8 马鞍形线圈各项误差对磁场分布的影响

Fig.8 Effects of the errors of saddle coils on magnetic field distribution

不对称引起磁场零点的漂移和磁场梯度的变化,与线圈偏心误差不同的是线圈不对称引起的变化幅度较小;平行度误差主要引起磁场零点沿 y 轴方向漂移,对磁场梯度基本不造成影响;内径不对称误差主要引起磁场梯度的变化,使得单面阱深增大,与长方形线圈相比,跑道形线圈单面阱深的变化更有规律,而马鞍形线圈的单面阱深增大较小。

2.2 比较误差对三种线圈磁场性能的影响

为研究主要制造与装配误差对三种线圈磁场的影响,根据中心轴线磁场分布的数据确定磁场零点漂移,以新的磁场零点建立坐标系确定磁场梯度。由于囚禁光直径一般不超过 20 mm^[10], 仅需考虑磁场中心±10mm 范围内的磁场梯度。因此只需对±10 mm 范围内的磁场进行线性拟合,求得磁场梯度。考虑到实验中误差参数只能选择有限数据,必须通过插值获得中间参数。实验选择可建立平滑曲线的三次样条插值法。根据实验所得的零点漂移 Δ(mm)和磁场梯度值 dB(G/cm)(1 T=10⁴ G),对数据进行三次样条插值,得到数值解,绘制出误差对磁场的影响曲线,如图 9 所示,其中图(a)为偏心误差对磁场零点漂移的影响,图(b)为偏心误差对磁场梯度的影响,图(c)为线圈不对称误差对磁场零点漂移的影响,图(d)为

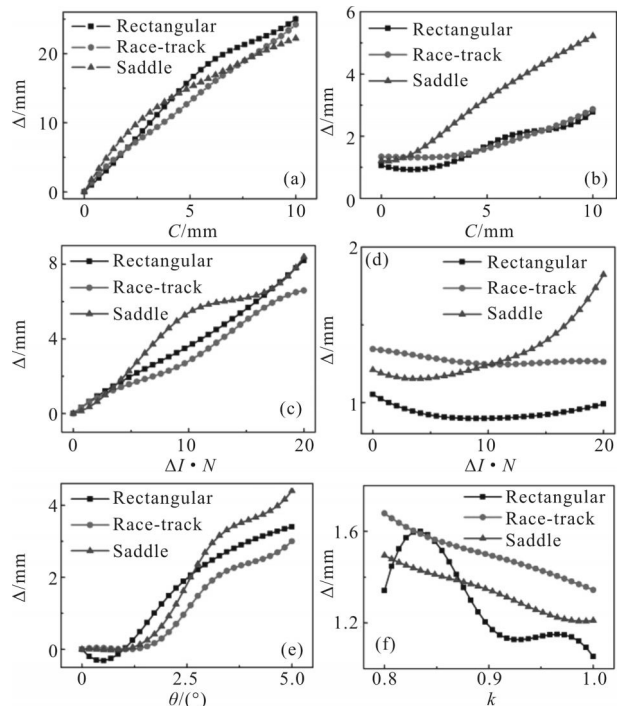


图 9 三线圈各项误差对磁场的影响

Fig.9 Effects of the errors of three coils on magnetic field

线圈不对称误差对磁场梯度的影响,图(e)为平行度误差对磁场零点漂移的影响,图(f)为内径不对称误差对磁场梯度的影响。

线圈沿 x 轴正向偏移时,三种线圈的磁场零点都沿 x 轴以大致相同的比例偏移,而磁场梯度的变化有很大不同,当 $C > 1.14 \text{ mm}$ 时,马鞍形线圈的磁场梯度增长得很快,跑道形和长方形线圈增长幅度不大,而在 $C < 1.14 \text{ mm}$ 的范围内,偏心误差对马鞍形和跑道形线圈的影响很小,而长方形线圈的磁场梯度减小。

线圈电流存在误差时,会导致磁场零点位移增大,同时引起磁场梯度先减小后增大,但变化幅度不大。当 $\Delta I \cdot N < 3.75 \text{ A}$, 即 $\Delta I < 0.016 \text{ A}$ 时长方形和跑道形线圈的磁场零点漂移以相同比例增长,马鞍形线圈的零点漂移比这两种线圈都小;当 $\Delta I > 0.016 \text{ A}$ 时,长方形和跑道形线圈的磁场零点漂移比马鞍形线圈小。

线圈绕 y 轴转动产生平行度误差时,引起磁场零点沿 y 轴漂移。 $\theta < 1.02^\circ$ 时,马鞍形和跑道形线圈的磁场零点基本不发生漂移,而长方形线圈的磁场零点先沿 y 轴负向移动,随后沿 y 轴正向移动,变化明显; $\theta > 1.02^\circ$ 时,三者以不同的比率增长,跑道形线圈增长得最慢,长方形和马鞍形线圈的零点漂移在 $\theta = 2.65^\circ$ 时有一个交点。

随着内径不对称误差的增大,马鞍形线圈和跑道形线圈的磁场梯度近似以相同的比例线性增长,而长方形线圈磁场梯度变化起伏较大, $k = 0.83$ 时长方形线圈磁场梯度最大,为 1.6 G/cm 。

根据上述对三种线圈的分析,基于两个方面比较三种线圈的性能:在轴向磁场分布方面,马鞍形线圈的磁场梯度在磁场零点附近较小,而在远离磁场零点附近较大,这样的磁场分布使磁阱中的原子受到更大的囚禁力,且能容纳更多的原子,有利于大通量冷原子的囚禁;在误差影响方面,通过比较三种线圈各项误差对磁场分布的影响,可得出在 $C < 1.14 \text{ mm}$, $\Delta I < 0.016 \text{ A}$, $\theta < 1.02^\circ$ 时,主要制造与装配误差对马鞍形线圈产生的磁场分布影响较小,能较好维持磁光阱的性能。综合分析得出 2D-MOT 中更适宜采用马鞍形线圈提供原子冷却与囚禁所需的磁场梯度。

3 结束语

文中利用有限元方法模拟了 2D-MOT 中三种构造的反亥姆霍兹线圈—长方形、跑道形、马鞍形产生的磁场分布,分析和比较了各自的磁场分布,以及线圈的主要制造与装配误差(偏心误差、线圈不对称误差、平行度误差、内径不对称误差)对磁场分布的影响。分析结果表明,马鞍形线圈的磁场分布更有利于大通量冷原子源的制备,且在一定误差范围内,它能更好地维持磁光阱的性能,所以在冷原子干涉仪 2D-MOT 中更适宜采用马鞍形线圈来提供磁场梯度。文中工作可为今后工程设计中对反亥姆霍兹线圈的加工和制造提供理论指导,对冷原子干涉仪性能的提高有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Weiss D S, Gibble K, Young B, et al. Precision measurements with cold atoms[C]//AIP Conf Proc, 1993, 290(23): 23-28.
- [2] Lu Xuanhui, Wang Jiangfeng. Quantum gyroscope based on an atom interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 293-311. (in Chinese)
陆璇辉, 王将峰. 基于原子干涉的量子陀螺仪 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 293-311.
- [3] Li Runbing, Wang Jin, Zhan Mingsheng. Cold atom interferometers and their applications in space [J]. *Space Physics Colloquium*, 2008, 37(9): 652-657. (in Chinese)
李润兵, 王谨, 詹明生. 冷原子干涉仪及空间应用[J]. 空间的物理学专题, 2008, 37(9): 652-657.
- [4] Zhu Changxing, Feng Yanying, Ye Xiongying, et al. The absolute rotation measurement of atom interferometer by phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(2): 808-815. (in Chinese)
朱常兴, 冯焱颖, 叶雄鹰, 等. 利用原子干涉仪的相位调制进行绝对转动测量[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 808-815.
- [5] Zhou Minkang, Hu Zhongkun, Duan Xiaochun, et al. Precisely mapping the magnetic field gradient in vacuum with an atom interferometer [J]. *Phy Rev A*, 2010, 82(6): 061602-1-061602-4.
- [6] Han Shunli, Lin Qiang. Research on raman -pulse-assisted atom interferometer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
韩顺利, 林强. 拉曼脉冲型原子干涉仪的基础研究[D]. 杭

- 州: 浙江大学, 2010.
- [7] Zhang Yuchi, Qi Lu, Wang Tongyu, et al. Realization and measurement of a high-flux atomic beam [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2013, 19(3): 262–270. (in Chinese)
张玉驰, 亓鲁, 王同雨, 等. 高通量冷原子束流的实现与测量[J]. *量子光学学报*, 2013, 19(3): 262–270.
- [8] Alexey Tonyushkin, Mara Prentiss. Straight macroscopic magnetic guide for cold atom interferometer [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(9): 094904–1–094904–5.
- [9] Zhang Bin, Jin Xiaofeng, Zhang Xiaoqi, et al. The winding device of saddle coils, China, 20111011 9140.7 [P]. 2011–09–14. (in Chinese)
张斌, 金晓凤, 张小奇, 等. 马鞍型铜导线线圈的绕线装置, 中国; 20111011 9140.7[P]. 2011–09–14.
- [10] Li Pan, Liu Yuanzheng, Wang Jiliang. Tolerance design for three-dimension magnetic field system of cold atom gyroscope[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(5): 671–676. (in Chinese)