文章编号:1004-2474(2017)02-0228-08

冷原子陀螺仪二维磁场系统容差设计研究

李 攀,刘元正,王继良,严吉中

(西安飞行自动控制研究所,陕西西安 710065)

摘 要:磁场系统作为磁光阱的重要组成部分,在高精度冷原子陀螺仪中占着重要地位。随着陀螺体积的减 小和集成度的提高,磁场系统的制造和装调误差对陀螺性能的影响不断增大。这些误差将引起磁场零点漂移和磁 场梯度变化,降低捕获效率和原子团的质量,从而影响陀螺性能。该文通过理论分析对二维磁场系统的主要制造 和装调误差进行了筛选,并利用实验设计和 Ansoft 仿真完成了"虚拟"实验。基于实验结果的数学回归,对关键制 造和装调参数设计了合理的容差限,并进行了试制验证。该工作为小型化冷原子陀螺仪二维磁场系统的设计和制 造提供了理论指导。

关键词:冷原子陀螺仪; 磁光阱; 磁场系统; 误差分析; 容差设计 **中图分类号:**TM142;U666.1 **文献标识码:**A

A Tolerance Design Method for Two-Dimension Magnetic Field System of Cold Atom Gyroscopes

LI Pan, LIU Yuanzheng, WANG Jiliang, YAN Jizhong

(Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: As one key part of the magneto-optical trap, the magnetic system occupies an important position in high precision cold atom gyroscope. With the continuous decrease of gyroscope volume and improvement of integration, the effect of fabricating and assembly errors of magnetic system on gyroscope performance is constantly increasing. These errors will cause the magnetic field zero drift and field gradient change, reduce work efficiency and quality of cold atom clouds, ultimately affect the gyroscope performance. The main manufacturing and assembly errors of the two-dimension magnetic field are selected by theoretical analysis, and the "virtual" experiments are completed via the experimental design and Ansoft simulation. Based on mathematical regression of the experimental results, the reasonable tolerance limit of key manufacturing and assembly parameters are designed and the validation of the trial manufacture is carried out. The theoretical direction for the design and manufacture of the two-dimension magnetic system of the miniaturized cold atom gyroscope are provided.

Key words: cold atom gyroscope; magneto-optical trap; magnetic field system; error analysis; tolerance design

0 引言

航空惯性导航系统因具备完全的自主性、极高 的连续性及可用性已成为现代军用领域导航的核 心。长时间导航精度不能满足很多任务需求,是航 空惯性导航系统唯一的硬伤。以其为核心构成的组 合导航在一定程度上弥补了这种缺陷,成为现代主 要导航方式,但这并不能彻底解决日益复杂战场环 境下的导航可用性和可靠性问题。冷原子陀螺的问 世为航空精密级惯导系统(PINS)实现带来了曙光。

基于原子干涉仪的冷原子陀螺是一种超高精度

的惯性传感器。由于典型原子的德波罗意波长比可 见光波长短 3×10⁴ 倍,根据 Sagnac 效应的理论公 式,原子干涉仪的理论精度比光学干涉仪高出 6× 10¹⁰ 倍^[1]。作为下一代超高精度的惯性传感器,冷 原子陀螺纯惯性导航的理论精度达到 5 m/h,可独 立完成长时间、远航程的导航任务^[2],在超高精度导 航、远程导航、广义相对论效应测量及量子引力研究 等领域有不可替代的作用^[3-8]。

以目前的技术发展趋势,在未来 5~10 年研制 成功可装备应用的 5 m/h 的 PINS 已是公认的趋势。因此,《美国空军地平线》、《美国国防技术清单》

收稿日期:2016-05-28

基金项目:总装十二五航空支撑基金资助项目(61901060301)

作者简介:李攀(1983-),男,陕西西安人,高级工程师,主要从事量子传感器技术的研究。E-mail:lp_forever5281@sina.com。

等中都明确了这种趋势和重要研究方向^[9-10]。精度 是惯性导航的唯一缺陷。为此,必须采用各种复杂 的、有隐患的组合导航技术来满足军事领域导航应 用,冷原子陀螺将克服传统惯性传感器性能低的缺 陷,在 PINS 军事领域显示其优势。

二维磁光阱是冷原子陀螺仪的重要组成部分, 主要用于对工作原子进行预冷却,用于装载三维磁 光阱。与其他装载方案相比,二维磁光阱装置简单 且紧凑,束流大,准直好,传播轴可不通光^[11]。使用 二维磁光阱可增加陀螺的装载率,降低背景蒸气原 子对工作原子的干扰。

与三维磁光阱相比,二维磁光阱的磁场系统较 复杂,其制造和装调误差易引起二维磁系统的性能 变化,改变预冷原子束的位置、方向、速度和密度,并 最终降低二维磁光阱形成的原子束质量,影响三维 磁光阱的捕获率。

通过分析发现,二维磁光阱线圈的制造和装调 误差间的单位、性质不完全相同,对磁场参数的影响 也难以进行线性叠加,所以传统的容差设计法(如等 公差法、等精度法等)不适合。

本文基于理论分析,通过数学建模和仿真,对二 维磁系统的主要制造和装调误差进行了筛选,结合 实验设计和计算机仿真进行"虚拟"实验,利用数学 回归形成设计模型并完成容差设计,最后通过实物 验证,为小型化冷原子陀螺仪二维磁场系统的设计 和制造提供了理论依据。

1 理论分析

1.1 载流直导线的磁场

考虑无穷长直导线产生的磁场。设一点 P,其 与导线的垂直距离为 r₀,向直导线引垂线,垂足为 O,如图 1 所示。其中,I 为电流,l 为电流元到 O 的 距离。



图 1 直线电流的磁场 根据毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律,任意电流元

Idl 在点 P 产生的磁场垂直纸面向里,其大小[12-13]为

$$\mathrm{d}B = \frac{\mu_0 \, \mathrm{I} \mathrm{d}l \sin \theta}{4\pi r^2} \tag{1}$$

式中: μ_0 为真空电导率; θ 为电流元 Idl 到点 P 的连 线与导线间的夹角;r 为点 P 与电流元 Idl 的间距。

设电流元到 O 的距离为 l,则有

$$l = -r_0 \cot \theta \tag{2}$$

$$r = \frac{r_0}{\sin \theta} \tag{3}$$

从而

$$dB = \frac{\mu_0 I \sin \theta d\theta}{4\pi r_0} \tag{4}$$

对式(4)中 $\theta=0 \sim \pi$ 积分可得到无穷长直导线 在点 P的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0}$$
(5)

对于有限长度导线,其结果与式(5)类似,只是 积分范围处于点 P 与导线两端连线与导线所成角 度 Θ_1 和 Θ_2 之间,即

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \Theta_1 - \cos \Theta_2)$$
(6)

1.2 1对矩形线圈形成的磁场

现在考虑1对通电矩形线圈形成的磁场,如图 2所示。矩形线圈的长、宽分别为 a、b,间距为 L,2 个线圈的载流方向相反。



图 2 通电矩形线圈

以2个线圈的中心为坐标原点构建坐标系,*x* 轴的磁感应强度是长度为*a*的4条导线的累加,与 长度为*b*的4条导线无关。

选择 x 轴上任一点 P(x,0),4 条导线在 P 点的 磁感应强度累加如图 3 所示,其中 Bx_i 代表第 i 条 导线在 P 点的磁感应强度。利用式(6)可得 P 点的 磁感应强度为

$$B_{x} = \frac{\mu_{0} IL}{\pi [L^{2} + (b - 2x)^{2}]} \frac{2a}{\sqrt{a^{2} + L^{2} + (b - 2x)^{2}}} -$$







对于 B_y ,要考虑 2 个方向共 8 条导线的作用, 其磁感应强度为

в —	$\mu_0 Ib$	2a			
$D_y =$	$\pi[b^2+(L-2x)^2]$	$\sqrt{a^2+b^2+(L-2x)^2}$			
	$\mu_0 Ib$	2a+			
	$\pi \left[b^2 + (L+2x)^2 \right]$	$\sqrt{a^2+b^2+(L+2x)^2}$			
	μ_0 Ia	<u> </u>			
	$\pi \left[a^2 + (L - 2x)^2 \right]$	$\sqrt{b^2 + a^2 + (L - 2x)^2}$			
	μ_0 Ia	26			
	$\pi \left[a^2 + (L+2x)^2 \right]$	$\sqrt{b^2 + a^2 + (L + 2x)^2}$			
		(8)			

对于 B_z,只需考虑 4 条长度为 b 的导线的作用,其结果与 B_x 类似,即

$$B_{z} = \frac{\mu_{0} IL}{\pi [L^{2} + (a - 2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + L^{2} + (a - 2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0} IL}{\pi [L^{2} + (a + 2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + L^{2} + (a + 2x)^{2}}}$$
(9)

1.3 二维磁场线圈

从上述分析可看出,如果以 z 轴作为原子传播 轴,那么上述矩形线圈会在原子传播方向存在干扰 磁场,且 B_x 和 B_y 也不能保持一致。所以,为改善 磁场均匀性并消除干扰磁场,二维磁光阱磁场系统 通常采用四线圈设计,如图 4 所示。此时 z 轴的磁 场被抵消,而 x 和 y 轴磁场保持一致。



$$B_x$$
和 B_y 可将式(7)、(8)相加获得
 $B_x = B_x =$

$$\frac{\mu_{0}IL}{\pi[L^{2} + (b-2x)^{2}]} \frac{2a}{\sqrt{a^{2} + L^{2} + (b-2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}IL}{\pi[L^{2} + (b+2x)^{2}]} \frac{2a}{\sqrt{a^{2} + L^{2} + (b+2x)^{2}}} + \frac{\mu_{0}Ib}{\pi[b^{2} + (L-2x)^{2}]} \frac{2a}{\sqrt{a^{2} + b^{2} + (L-2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ib}{\pi[b^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2a}{\sqrt{a^{2} + b^{2} + (L+2x)^{2}}} + \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L-2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L-2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\sqrt{b^{2} + a^{2} + (L+2x)^{2}}} - \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}}} + \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}}} + \frac{\mu_{0}Ia}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{2b}{\pi[a^{2} + (L+2x)^{2}]} \frac{$$

多重线圈是上述线圈的累加,利用 MATLAB 进行仿真可完成线圈设计(I=2 A,线圈内径 $a_{inner}=$ 38.5 mm,线圈内径 $b_{inner}=20$ mm,L=45 mm,径向 线圈匝数 $n_{radia}=6$,轴向线圈匝数 $n_{axial}=6$,导线直径 d=1 mm),并得到磁场分布如图 5 所示,其中 D 为 距磁场中心的距离。考虑到陷俘光直径一般不超过 Ø 20 mm,故仅需考虑磁场中心±10 mm 范围内的 磁场梯度。对±10 mm 范围内的磁场进行拟合,可 得磁场梯度 dB=0.113 8 T/m,符合二维磁光阱磁 场梯度大于 0.1 T/m 的经验性要求。



图 5 轴向和径向磁场变化图

2 误差因子筛选

考虑二维磁场系统在实际工程制造中可能存在制造误差,主要是装配误差和加工误差。其具体反映包括线圈间存在错位(相对于预安装位置存在平移/旋转)和线圈间存在差异(线圈绕制匝数不同、线圈绕制内径不同等)。

为简化模型,本文作者固定3个线圈,将误差仅 体现在1个线圈上。根据计算结果可确定原子传播 轴的漂移 Δ 和偏转 δ,并以新的传播轴重新计算磁 场分布。

2.1 线圈相对于预安装位置存在平移 C

由于线圈沿 x, y 轴移动等效,下面就 2 种情况 对线圈相对于预安装位置存在平移产生的错位误差 进行分析,包括线圈沿 y 轴正向移动 C_1 和沿 z 轴正 向移动 C_2 。仿真结果如图 6 所示。



图 6 线圈错位对磁场的影响

由图 6 可看出,对于原子传播轴的漂移 Δ ,线圈 垂直于 z 向的移动会使原子传播轴沿线圈移动方向 平移,其大小小于线圈平移距离的 1/2;而线圈沿 z 向的移动对 Δ 改变不明显。对原子传播轴偏转 δ , 只有单线圈沿 z 向的移动 C_2 会使原子传播轴显著 偏转,而 C_1 对原子传播轴影响较小。对于磁场梯度 dB,线圈垂直于 z 向的移动较沿 z 向移动影响 更大。

2.2 线圈相对于预安装位置存在倾斜

线圈沿 x, y 和 z 轴旋转的角度分别为 θ_1, θ_2 和 θ_3 , 仿真结果如图 7 所示。



由图 7 可看出,线圈绕 z 轴的旋转对 Δ 影响较 大; θ_2 对 δ 的影响较大, θ_1 对 δ 的影响较小, θ_3 对 δ 无影响。线圈旋转对 dB 影响不大。

2.3 线圈绕制匝数不同

定义线圈非对称指标 $\alpha = \Delta N/N$,其中, $N = n_{radial} \cdot n_{axial}$ 为线圈设计的总匝数, ΔN 为绕制误差。 仿真结果如图 8 所示。



由图 8 可看出,线圈绕制误差 α 对原子传播轴 的位置影响更大,而对磁感应强度的影响相对较小。 2.4 线圈骨架不对称

定义内线圈骨架不对称指标 $\beta = \Delta S/S$,其中, S= $a \cdot b$ 为线圈内径包络的面积, ΔS 为与设计指标 的误差。考虑线圈长边 a 存在制造误差 β_1 和线圈 短边 b 存在制造误差 β_2 两种情况。仿真结果如图 9 所示。



图 9 线圈骨架不对称对磁场的影响

由图 9 可看出, β_1 对 δ 影响大, β_2 对 Δ 影响较大; $(\Omega, \beta_1, \beta_2)$ 对磁场梯度 dB 的影响都较小。

2.5 误差因子筛选

由以上分析可知,同轴度误差 C、平行度误差 θ、 α及β都会对磁场产生影响,设计中须限定。为最 大化误差因子的影响,在计算机仿真中,将根据实 验水平对每个误差因子选择误差影响最大的一种方 式。

考虑到二维磁光阱的一般性要求,控制阈值选择 dB \geq 0.1 T/m, $\Delta \leq$ 1 mm, $\delta \leq$ 1°。

3 容差设计

3.1 实验设计

为降低计算量并提高回归精度,实验设计采用 最优近似饱和设计。取 $C_{\lambda}\alpha$ 及 β 作为四因子采用 最优近似饱和设计(R415D)进行回归设计,各因子 的编码自变量(x_i)的编码水平j和实际自变量(z_i) 的实际水平如表1所示。

表1 最优近似饱和设计实验因子及水平

因子	间距 δ_i	编码自变量 xi 的设计水平 xji						
		-1.00	-0.60	-0.25	-0.05	0.05	1.00	
			实际自	变量 <i>z_i</i>	的实际水	平 z_{ji}		
C	1.240	0.03	0.520	0.960	1.200	1.330	2.500	
θ	2.270	0.02	0.930	1.720	2.180	2.400	4.560	
α	0.110	0	0.042	0.079	0.100	0.110	0.210	
β	0.036	0	0.014	0.027	0.034	0.037	0.071	

注:*x_{ji}和 z_{ji}*下标*i*表示编码,*j*表示设计水平,如 *x_{1i}*代表编码自 变量 *x_i*的设计水平+1。

表1中,-1水平代表常规条件下加工能达到的极限精度,对于车加工形成的C和 θ ,对应标准公差等级7,通过查表可得;绕制的 α 可达最小,即 $\alpha=0;$ 对于车加工形成的 β ,计算结果近似为0。+1 水平代表控制阈值下所能取到的极值。实施水平间 距 δ_i 为

$$a_{i} = \frac{z_{1i} - z_{-1i}}{x_{1i} - x_{-1i}}$$
 (11)

从而编码水平 j 对应的实际水平为

 $z_{ji} = z_{-1i} + \delta_i \left(x_{ji} - x_{-1i} \right) \tag{12}$

3.2 "虚拟"实验

δ

由于几个误差因子同时作用会导致理论计算量 急剧增加,因此,使用 Ansoft 进行仿真计算。使用 仿真计算进行"虚拟"实验代替实际实验,既可减少 其他影响因素对实验结果的影响,又可加快设计进 度,降低设计成本,其结果如表 2 所示。

表 2 实验方案及结果

过程 -		编码	变 量			磁场参数	
	x_1	x_2	x_3	x_4	$y_1(\Delta)$	$y_2(\delta)$	$y_3(dB)$
1	-1.00	-0.25	-0.25	-0.25	0.420 0	0.133 0	0.127 7
2	-0.25	0.05	1.00	-1.00	1.066 0	0.626 0	0.123 4
3	-0.25	-1.00	0.05	1.00	0.7130	1.157 0	0.126 2
4	-0.25	1.00	-1.00	0.05	0.276 0	0.651 0	0.129 7
5	1.00	-0.60	1.00	1.00	1.304 0	1.596 0	0.122 3
6	1.00	1.00	-0.60	1.00	0.615 0	0.894 0	0.127 5

续表							
计把		编码	变 量			磁场参数	
过住	x_1	x_2	x_3	x_4	$y_1(\Delta)$	$y_2(\delta)$	$y_3(dB)$
7	1.00	1.00	1.00	-0.60	1.237 0	0.816 0	0.122 3
8	-1.00	-0.05	-1.00	1.00	0.345 0	0.494 0	0.129 5
9	-1.00	1.00	-0.05	-1.00	0.425 0	1.220 0	0.127 2
10	-1.00	-1.00	1.00	-0.05	1.076 0	0.326 0	0.123 3
11	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.073 1	0.007 6	0.130 1
12	1.00	1.00	-1.00	-1.00	0.407 0	1.094 2	0.128 8
13	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.185 0	0.793 0	0.122 8
14	1.00	-1.00	-1.00	1.00	0.467 0	1.523 8	0.129 3
15	-1.00	1.00	1.00	1.00	1.165 0	0.602 0	0.123 1

由表 2 可看出,任意处理均满足 d $B \ge 0.1$ T/m 的控制指标,故只需计算 Δ 和 δ 。

3.3 数学回归

由于简单的一次回归误差太大,将使用下列模 型进行二次回归:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i \le i}^{n} b_{ij} x_i x_j$$
(13)

式中:n为自变量的数目;b₀为回归方程的常数项; b_i为一次项的偏回归系数;b_{ij}为二次项的偏回归 系数。

使用 Minitab 进行多轮数学回归。若数学回归 的结果中有系数未达到显著水平(*p*<0.05),将其 并入误差项继续进行回归,直到得到最终的回归 方程。

对于磁场参数 y_1 (即磁场零点漂移),从最终回 归的方差分析(见表 3)可看出,回归达到极显著水 平($F > F_{0.01}(5,9) = 6.06$),回归方程的复相关系数 $R_{sq} = 0.997;偏回归 t 检验中,所有系数均达到极显$ 著水平(<math>p < 0.01),如表 4 所示。

表 3 实验方差分析

	·// 0	X 4 X 4	24 1/1	
来源	自由度	方差	均方	F
回归	5	2.369 00	0.474 00	671.81
残差	9	0.006 35	0.000 71	
总	14	2.375 00		
	表4 偏	回归系数 b	的 t 检验	
回归项	系数	系数标准误	t	Þ
常数	0.655 0	0.016 00	40.98	0
x_1	0.105 0	0.079 40	13.23	0
x_3	0.420 0	0.008 07	52.00	0
x_4	0.080 6	0.007 94	10.14	0
x_3^2	0.085 2	0.018 60	4.57	0.001
$x_1 x_4$	-0.033 3	0.009 21	-3.61	0.006

回归方程为

 $y_1 = 0.655 + 0.105x_1 + 0.420x_3 +$

$$0.080 \ 6x_4 + 0.085 \ 2x_3^2 - 0.033 \ 3x_1x_4$$

(14)

对于磁场参数 y_2 (即原子传播轴偏转 δ),从最 终回归的方差分析表(见表 5)可看出,回归达到极 显著水平($F > F_{0,01}(10,4) = 14.54$),回归方程的复 相关系数 $R_{sq} = 0.988;偏回归 t$ 检验中,除 b_2 达到 显著水平(p < 0.05)外,其余系数均达到极显著水 平(p < 0.01)如表 6 所示。

表5 实验方差分析

来源	自由度	方差	均方	F
回归	10	3.152 0	0.315 00	116.79
残差	4	0.010 8	0.002 70	
总	14	3.163 0		
	表6 偏日	回归系数 b 自	的 <i>t</i> 检验	
回归项	系数	系数标准误	t	Þ
常数	0.406 0	0.044 7	9.08	0.001
x_1	0.188 0	0.017 5	10.71	0
x_2	0.059 8	0.016 1	3.72	0.021
x_3	0.079 1	0.016 9	4.68	0.009
x_4	0.131 0	0.016 1	8.13	0.001
x_2^2	0.167 0	0.035 3	4.73	0.009
x_4^2	0.320 0	0.038 7	8.27	0.001
$x_1 x_2$	-0.155 0	0.018 8	-8.23	0.001
$x_1 x_4$	0.111 0	0.017 8	6.25	0.003
$x_{2}x_{3}$	-0.104 0	0.019 2	-5.39	0.006
$x_{2}x_{4}$	-0.318 0	0.018 6	-17.11	0

回归方程为

 $y_2 = 0.396 + 0.183x_1 + 0.0604x_2 +$

 $0.071\ 2x_3 + 0.125x_4 + 0.180x_2^2 +$

$$0.316x_4^2 - 0.154x_1x_2 + 0.103x_1x_4 - \\0.0977x_2x_3 - 0.315x_2x_4$$
(15)

考虑到

$$x_i = \frac{z_i - z_{-1i}}{\delta_i} - 1 \tag{16}$$

可得

$$y_{1} = 0.097 \ 8 + 0.112z_{1} + 2.364z_{3} + 3.243z_{4} + 7.765z_{3}^{2} - 0.764z_{1}z_{4}$$
(17)

$$y_{2} = -0.020 \ 0 + 0.191z_{1} + 0.119z_{2} + 1.615z_{3} - 8.362z_{4} - 0.034 \ 6z_{2}^{2} + 251z_{4}^{2} - 0.055 \ 0z_{1}z_{2} + 2.349z_{1}z_{4} - 0.410z_{2}z_{3} - 3.903z_{2}z_{4}$$
(18)

即

$$\Delta = 0.097 \ 8 + 0.112C + 2.364\alpha + 3.243\beta + 7.765\alpha^2 - 0.764C\beta$$
(19)
$$\delta = -0.020 \ 0 + 0.191C + 0.119\theta + 1.615\alpha - 8.362\beta - 0.034 \ 6\theta^2 + 251\beta^2 - 0.055 \ 0C\theta + 2.349C\beta - 0.410\theta\alpha - 3.903\theta\beta$$
(20)

3.4 容差设计

结合回归方程综合考虑,取 $C=1.27 \text{ mm}, \theta=$ 2.40°, $\Delta N=6$, $\Delta a=2.18 \text{ mm}, \Delta b=1.15 \text{ mm},$ 接近 (0,0.05,0.6,0)水平。回归结果为 $\Delta =$ 0.938 mm, $\delta = 0.439^{\circ}$; Ansoft 仿真结果为 $\Delta =$ 0.895 mm, $\delta = 0.388^{\circ}, dB=0.1242 \text{ T/m},$ 符合控制 指标。考虑到上述误差仅考虑了一个线圈存在加工 误差,可取控制指标的1/3 左右作为设计的误差控 制指标,即 $C=0.42 \text{ mm}, \theta=0.80^{\circ}, \Delta N=2, \Delta a=$ 0.73 mm, $\Delta b=0.38 \text{ mm}$ 。

3.5 试制验证

为验证容差设计结果,我们进行了加工试制,如 图 10 所示。



图 10 二维磁系统试制件

使用磁强计对磁系统内磁场进行了实测,与 Ansoft 计算结果比较如图 11 所示,实测值与理论 值基本符合。



4 结束语

2010年,法国进行了世界上首次冷原子重力仪的航空实验^[14];2011年,美国AOSense公司发布了全球首款原子光学传感器商品^[15]——商用冷原子重力梯度仪,噪声小于1×10⁻⁶g/Hz^{1/2}(g=9.8 m/s²);美国DARPA在2010年已完成5 m/h单轴冷原子导航系统的实验室验证,计划于2014年实现广泛平台上的子系统验证,2015年进行不依赖GPS的系统验证^[16](未见报道)。这些进展意味着冷原子陀螺仪的工程化、实用化已迫在眉睫。

本文基于理论分析对二维磁系统的主要制造和 装调误差进行了筛选,结合实验设计和计算机仿真 进行"虚拟"实验,利用数学回归形成设计模型并完 成容差设计,最后通过实物验证。该工作为小型化 冷原子陀螺仪二维磁场系统的工程化设计和制造提 供了理论依据和参考价值。

参考文献:

- [1] CLAUSER J F. Ultra-high sensitivity accelerometers and gyroscopes using neutral atom matter-wave interferometry [J]. Phys B,1988,151(1/2):262-272.
- [2] Committee on Universal Radio Frequency System for Special Operations Forces, Standing Committee on Research, Development, Acquisition Options for U. S. Special Operations Command, National Research Council. Toward a universal radio frequency system for special operations forces [M]. Washington: National Academies Press, 2009.
- [3] 张学峰,许江宁,周红进.原子激光陀螺[J].中国惯性 技术学报,2006,14(5):86-88.
 ZHANG Xuefeng, XU Jiangning, ZHOU Hongjin.
 Atom laser gyroscope [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(5): 86-88.
- [4] 秦永元,游金川,赵长山.利用原子干涉仪实现高精 度惯性测量[J].中国惯性技术学报,2008,16(2): 244-248.

QIN Yongyuan, YOU Jinchuan, ZHAO Changshan. High accuracy inertial measurement based on atom interferometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2008,16(2):244-248.

- [5] FANG J C, QIN J. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications [J]. Sensors, 2012, 12(5): 6331-6346.
- [6] KITCHING J, KNAPPE S, DONLEY E A. Atomic sensors—a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(9):1749-1758.
- [7] 李攀,李俊,刘元正,等. 基于冷原子技术的导航传感器现状与发展[J].激光与光电子学进展,2013,50 (11):110005.

LI Pan, LI Jun, LIU Yuanzheng, et al. Current status and development of navigation sensors based on cold atoms [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50 (11):110005.

- [8] 严吉中,李攀,刘元正.原子陀螺基本概念及发展趋势分析[J]. 压电与声光,2015,37(5):810-817.
 YAN Jizhong,LI Pan,LIU Yuanzheng. Analysis on the basic concept and the development tendency of atomic gyroscopes [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5):810-817.
- [9] United States Air Force Chief Scientist (AF/ST). Report on technology horizons: a vision for air force science & technology during 2010-2030[R]. Washington D. C. :Office of the Air Force Chief Scientist, 2010.
- [10] United States Defense Science Board. Technology and innovation enablers for superiority in 2030[R]. Washington D. C. :Office of the Under Secretary of Defense

for Acquisition, Technology, and Logistics, 2013.

- [11] PETELSKI T. Atom interferometers for precision gravity measurements [D]. France: European Ph D School, 2005.
- [12] 王勇,唐光庆,周静梅,等.石英挠性加速度计磁路仿真 分析与优化设计[J]. 压电与声光,2010,32(4): 551-553.

WANG Yong, TANG Guangqing, ZHOU Jingmei, et al. Simulation analysis and optimized design for the magnetic circuit of the quartz flexibility accelerometer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32 (4): 551-553.

[13] 赵正龙,何忠波,李冬伟,等. 弓张式 GMM 发音振子径 向磁场仿真分析[J]. 压电与声光,2015,37(4): 672-675.

ZHAO Zhenglong, HE Zhongbo, LI Dongwei, et al. Simulation analysis of radial magnetic field distribution of GMM[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37 (4):672-675.

- [14] STERN G, BATTELIER B, GEIGER R, et al. Lightpulse atom interferometry in microgravity[J]. The European Physical Journal D,2009,53:353-357.
- [15] AO Sense. Accelerometer for space applications based on light-pulse atom interferometry [EB/OL]. (2011-09-08) [2013-02-02] https://ehb8.gsfc.nasa.gov/ sbir/docs/public/recent _ elections/SBIR _ 11 _ P1/ SBIR_11_P1_115522/briefchart.pdf.
- [16] SURIANO M A. Robust technology to augment or replace the US reliance on the global positioning system [R]. Maxwell AFB, AL: Air University, 2011.

《压电与声光》厂告免费咨询卡						
姓名:	职务:	职称:	单位:			
地址:			邮编:	电话:		
您对本刊	年	期的 □彩色 [□黑白 □刊花广告			
		公司(厂家		产品/技术感兴趣		
希望:□索取公	、司资料 □	索取产品资料 🗌 询	□问价格 □建立业务	→联系 □其他		
请将卡片寄往(或	〔传真〕:《压电□	丙声光》编辑部 读者服	务部			
通讯地址:重庆南	j 坪 2513 信箱(400060) 电话:023-629)19570 传真:023-62803	425		

复印有效