

文章编号 2095-1531(2016)06-0671-07

核磁共振陀螺中原子气室温度场的研究

易鑫,汪之国*,夏涛,徐迪,杨开勇
(国防科技大学光电科学与工程学院,湖南长沙410073)

摘要:为研究核磁共振陀螺中加热机构对原子气室性能的影响,设计了5种典型加热方式。利用有限元分析软件 ANSYS 建立了原子气室的温度场模型,给出了原子气室表面的稳态温度场分布情况。同时设计了探测精度为 0.01 °C 的测温电路,对原子气室表面不同位置的温度进行监控,获得了不同加热方式下原子气室表面的温度变化情况。将仿真和实验结果进行比较,发现误差在 5% 之内,验证了仿真模型的正确性。综合仿真和实验结果比较了不同加热方式下原子气室表面温度分布情况,获得了能够使原子气室表面温度分布最均匀的加热方式。

关键词:核磁共振陀螺;原子气室;加热机构;温度场

中图分类号:V241.557; TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20160906.0671

Research on temperature field in the vapor cell of nuclear magnetic resonance gyroscope

YI Xin, WANG Zhi-guo*, XIA Tao, XU Di, YANG Kai-yong

(College of Optoelectric Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: maxborn@163.com

Abstract: In order to study the influences of the heating mechanism on the vapor cell of the nuclear magnetic resonance gyroscope (NMRG), several different heating methods are designed to heat the vapor cell. The finite element analysis software ANSYS is used to establish a temperature field model of the vapor cell, afterwards the model is simplified and finally the steady-state temperature field of the surface is given. Meanwhile, a temperature measurement circuit with the precision of 0.01 °C is made to detect the temperature of different places on the surface of the vapor cell, thus getting the changes of the surface temperature of different methods. The experimental results are compared with the simulation results, and the calculation error turns out to be less than 5%, which verifies the validity of the temperature model. Based on both of the experimental and simulation results, and after comparison of temperature field of the vapor cell surface through different heating methods, the best heating method is given, which can makes the most uniform temperature field of the vapor cell surface.

Key words: nuclear magnetic resonance gyroscope (NMRG); atom vapor cell; heating mechanism; temperature field

收稿日期:2016-06-13;修订日期:2016-07-29

基金项目:国防科技大学校预研资助项目(No. JC140702)

Supported by Advance Research Project of National University of Defense Technology(No. JC140702)

1 引言

核磁共振陀螺是一种体积小、功耗低、精度高的新型陀螺仪,是下一代高精度微型陀螺仪的首选方案,目前已成为惯性导航领域中的研究热点^[1-3]。核磁共振陀螺中,原子气室是核心部件。原子气室内充有一定量的铷蒸汽、氦气等气体,内壁上镀有抗弛豫膜层。为了使原子气室具备优异的性能,通常需要对其加热到一定温度并保持温度均匀。不同加热方式下,原子气室的温度场将不相同。同时,在实际情况中,原子气室温度场分布无法达到绝对均匀,温度梯度会始终存在,并在一定程度上影响原子气室内物质的分布均匀性,这是研究核磁共振陀螺所必须考虑的问题。因此,如何通过有效的方式获得原子气室温度场分布信息并使得其均匀性良好,是核磁共振陀螺研究中的重要问题。

为了测量物体的温度,通常采用热敏电阻或者热成像仪等。但是在核磁共振陀螺仪中,单纯使用热敏电阻只能探测到原子气室部分位置的温度值,无法获得整个原子气室的温度信息;热成像仪对于尺寸小的原子气室测量精度不高,且在核磁共振陀螺中使用不便。这两种方法都无法有效地获得原子气室温度场分布信息。文献[4-5]利用有限元软件模拟并基于热敏电阻检测的手段,获得了光纤陀螺的温度场信息,文献[6-7]利用同样的方法获得了激光陀螺的温度场信息。本文将这种测温方法应用到核磁共振陀螺中,获得了核磁共振陀螺中原子气室的温度场信息。

在核磁共振陀螺的加热方式上,文献[8]采用加热片加热铜块,通过铜块传递热量给中间的原子气室;文献[9]在小型原子气室的上侧贴有加热片,利用加热片直接传递热量给原子气室。但上述文献中却并未涉及原子气室温度场的分布信息,未考虑温度不均匀的影响。本文根据实验室现有的加热机构,设置了5种典型的加热方式对原子气室进行加热并对温度场进行分析。利用有限元分析软件 ANSYS 建立了核磁共振陀螺加热机构的温度场模型,介绍了热分析的基本原理,

给出了核磁共振陀螺中加热机构的结构和有限元模型,同时给出了热导率、热生成率、热辐射率等物理参数,得到了稳态情况下原子气室表面的温度场分布信息。同时利用高精度的铂电阻和测温电路,测量了各加热方式下原子气室表面3个典型测温点的温度变化情况。综合仿真和实验结果,给出了不同加热方式下原子气室表面温度场分布信息,并得到了现有加热机构中使原子气室温度最均匀的加热方式,为核磁共振陀螺中加热机构的设计以及进一步优化提供了良好的参考依据。

2 核磁共振陀螺加热机构原理与有限元模型

2.1 热分析的基本原理

在热量传递过程中,有3种基本传递方式:热传导、热对流和热辐射。

热传导是指当物体内部或者不同物体之间存在温差时,热量从高温部分传递到低温部分或者从高温物体传递到低温物体。热传导遵循傅里叶定律^[10]:

$$q'' = -\lambda \text{grad}t, \quad (1)$$

式中, q'' 是热流密度, λ 是导热系数, $\text{grad}t$ 是空间某点的温度梯度。

热对流^[11]是指温度不同的流体之间发生相对运动所导致的热量传递方式,包括自然热对流和强迫热对流两种方式。热对流满足牛顿冷却方程^[12]:

$$q'' = h(T_s - T_b), \quad (2)$$

式中, h 是对流换热系数, T_s 是固体表面温度, T_b 是周围流体温度。

热辐射^[12]是指物体发射电磁能并被其它物体吸收的过程。与热传导和热对流不同,热辐射不需要传热介质。热辐射满足斯蒂芬玻尔兹曼方程^[13]:

$$q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4), \quad (3)$$

式中, q 为热流率, ε 为辐射率, σ 为黑体辐射常数, A_1 为辐射面1的面积, F_{12} 为辐射面1到辐射面2的形状系数, T_1 和 T_2 分别为辐射面1和2的绝对温度。

上述3式是进行热分析的数学基础。

ANSYS 软件进行稳态热分析的一般方程^[14]为:

$$[K]\{T\} = \{Q\}, \quad (4)$$

式中, $[K]$ 是传导矩阵, $\{T\}$ 是节点温度向量, $\{Q\}$ 是节点热流向量。

2.2 核磁共振陀螺加热机构结构及有限元模型

本文使用的核磁共振陀螺加热机构如图1所示,包括外部的保温框和内部的底座、加热片、原子气室4个主要部件。保温框和底座是由聚四氟乙烯材料制成,保温框的边长是50 mm,中间设置有通光孔;加热片包括上、下、前、后、左、右加热片,分别对称地放置在原子气室周围,由细铜丝缠绕在云母片上制成,贴在保温框内壁上,加热片尺寸相同,为22 mm × 22 mm × 2 mm,中间打有12 mm直径的圆孔,且电阻值均为23 Ω;原子气室位于保温框内部,由pyrex材料制成,其内部充了一定量的铷蒸汽、氙气、氮气和氢气,原子气室尺寸为20 mm × 20 mm × 20 mm,内壁厚度为1 mm。

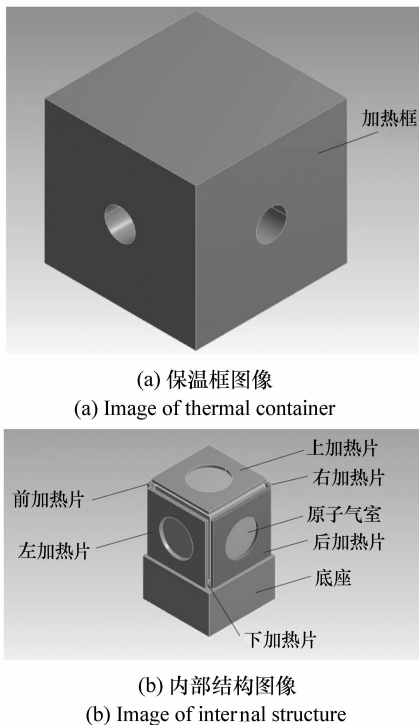


图1 核磁共振陀螺中加热机构示意图

Fig. 1 Schematic of the heating mechanism in NMRG

实验中分别使用5种加热方式对原子气室进

行加热。其中加热方式1仅上加热片加热;加热方式2前、后加热片同时加热;加热方式3前、后、左、右加热片同时加热;加热方式4上、下、前、后加热片同时加热;加热方式5使用全部加热片进行加热。并且各加热方式总加热功率相同。

在实际加热机构中,为了探测温度,在加热机构内放置了铂电阻测温电路。由于铂电阻和导线对温度的影响比较小,且不利于建模,故对核磁共振陀螺加热机构温度模型进行简化,得到了如图2所示的有限元模型。有限元模型共划分节点115 500个、单元41 434个。

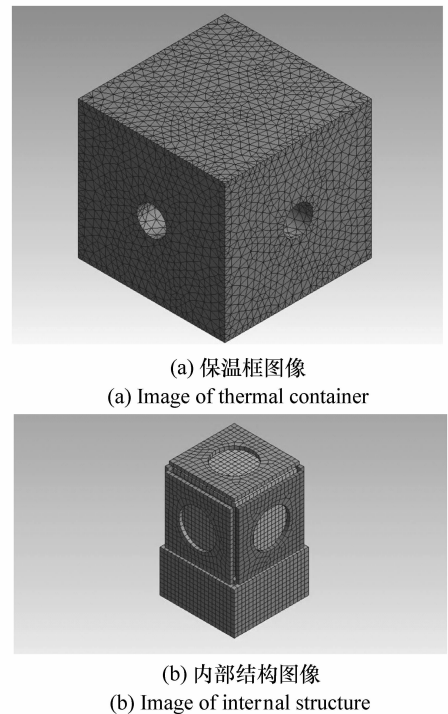


图2 核磁共振陀螺加热机构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the heating mechanism in NMRG

2.3 参数计算

为了对有限元模型进行求解,需要获得模型中各材料的热导率、热源的热生成率、各辐射面的辐射率以及各接触面的对流换热系数。

在加热机构中,保温框和底座是由聚四氟乙烯制成;加热片是由导线绕制在云母片上,主要考虑云母片的热导率;原子气室是由pyrex材料制成,气室内有多种气体存在,由于氮气的量占多,因此只考虑氮气的热导率。材料热参数如表1所

示。

表1 材料热参数

Tab.1 Thermal parameters of 4 different materials

材料	热导率(W/m·K)
聚四氟乙烯	0.25
云母	0.71
pyrex	1.2
氮气	0.02

加热机构中的各加热片, 体积为 $7.4 \times 10^{-7} \text{ m}^3$, 电阻为 23Ω 。在 5 种不同的加热方式下, 由于电流的不同, 单个加热片的热生成率也不同。表 2 是不同加热方式下单个加热片的热生成率。

表2 不同加热方式下单个加热片的热生成率

Tab.2 Heat production rate of a single heating film under different heating methods

加热方式	加热电 流/A	等效功 率/W	热生成率 $\times 10^7 /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	1.20	33.12	4.48
2	0.85	16.61	2.24
3	0.60	8.31	1.12
4	0.60	8.31	1.12
5	0.49	5.52	0.75

再考虑热对流对温度场的影响。在本加热机构中, 换热面较多, 内部换热比较复杂, 主要考虑以下的换热情况: (1) 加热框外表面与外界环境的无限空间对流换热; (2) 原子气室前、后侧外表面和前后加热片外表面的有限空间对流换热; (3) 原子气室左、右侧外表面和左、右加热片外表面的有限空间对流换热; (4) 原子气室上侧外表面和上加热片的有限空间对流换热; (5) 原子气室下侧外表面和下加热片的有限空间对流换热。由于不同加热方式下温度的分布不同, 因此原子气室的上、下、前、后、左、右侧各外表面的对流换热不能够直接等效, 而应该分别进行考虑, 并计算各对流换热系数^[15]。

热辐射也是影响温度场分布的重要因素。在本加热机构中, 主要考虑两种热辐射情况: (1) 加

热框外表面和外界环境的热辐射; (2) 原子气室外表面和各加热片外表面之间的热辐射。其中, 加热框的热辐射率为 0.91, 加热片的热辐射率为 0.91, 原子气室的热辐射率为 0.9。

3 稳态温度场分析

在 ANSYS 中设置完各参数并对模型加载之

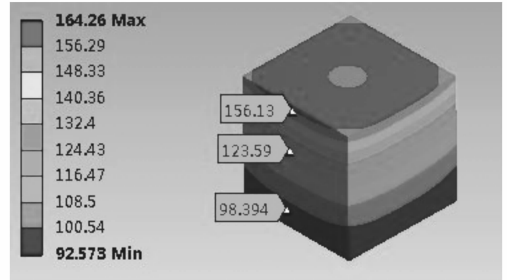


图3 加热方式1下原子气室表面稳态温度场

Fig.3 Temperature field of the surface of atom vapor cell under heating method 1

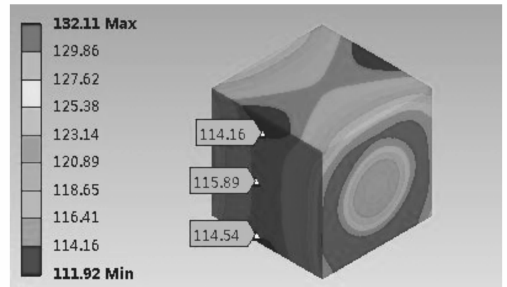


图4 加热方式2下原子气室表面稳态温度场

Fig.4 Temperature field of the surface of atom vapor cell under heating method 2

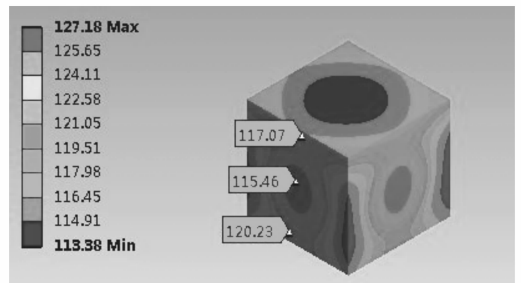


图5 加热方式3下原子气室表面稳态温度场

Fig.5 Temperature field of the surface of atom vapor cell under heating method 3

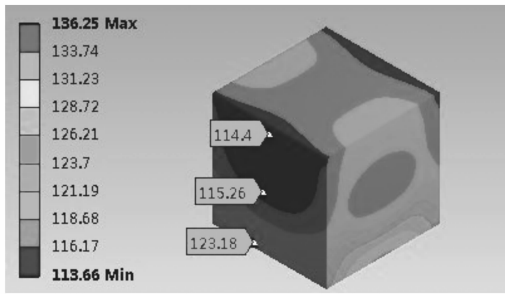


图 6 加热方式 4 下原子气室表面稳态温度场

Fig. 6 Temperature field of the surface of atom vapor cell under heating method 4

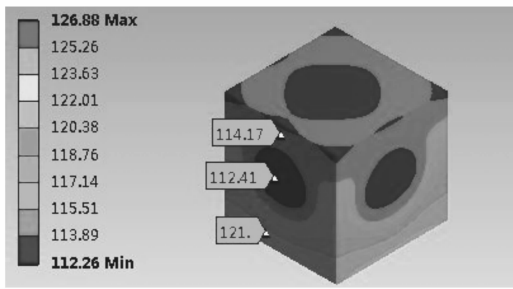


图 7 加热方式 5 下原子气室表面稳态温度场

Fig. 7 Temperature field of the surface of atom vapor cell under heating method 5

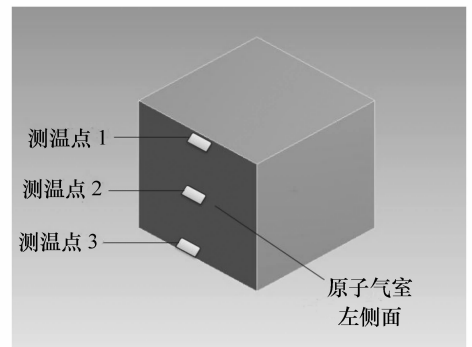


图 8 测温点位置示意图

Fig. 8 Position of temperature detecting point

后,设置初始温度为 25 ℃,并对稳态温度场进行求解,如图 3 ~ 图 7 所示,得到各加热方式下原子气室表面的稳态温度场分布。

在图 3 ~ 图 7 中,可以很明显地看到原子气室表面不同的颜色,通过比照左边的温度标尺可以得到相应位置的大致温度,再通过 ANSYS 软件

内置的温度探针,得到精确的温度值。同时,通过各图也可以得到原子气室温度的最大值和最小值。

4 温度测量与实验结果

为了获得实际加热机构的温度数据,并验证仿真结果的正确性,在原子气室左侧面的 3 个测温点放置了高精度的 PT1000 铂电阻,利用测温电路来探测这 3 个位置的温度,测温点位置如图 8 所示。

当温度变化时,铂电阻的阻值发生改变,通过测温电路的放大作用,最后输出电压信号到采集卡上,利用 LABVIEW 程序采集电压信息并得到探测位置的温度值,并记录下来。程序的采样速率为 10 kHz,温度测量精度约为 0.01 ℃。不同加热方式下各测温点仿真和实验数据如表 3 所示。

表 3 各加热方式下各测温点仿真和实验结果

Tab. 3 Simulation and experimental results of every detecting points under different heating methods

加热方式		1	2	3	4	5
测温点 1/℃	仿真值	156.13	114.16	117.07	114.40	114.17
	实验值	158.36	116.02	121.38	117.78	110.44
测温点 2/℃	仿真值	123.59	115.89	115.46	115.26	112.41
	实验值	130.10	115.42	119.71	120.04	107.56
测温点 3/℃	仿真值	98.39	114.54	120.23	123.18	121.00
	实验值	102.63	111.80	125.58	129.11	115.54
最大相对误差/%		5.00	2.45	4.26	4.59	4.73

通过实验结果和仿真结果相比较可以看出,

最大相对误差在 5% 以内,验证了核磁共振陀螺

加热机构仿真模型的正确性。

5 分析与讨论

在核磁共振陀螺中,原子气室的温度场分布受多种因素的共同影响。不同加热方式下,热源分布会不一样,加热机构中的热传导、热对流和热辐射效应也不相同,进而使得原子气室的温度场分布产生差异。实验结果验证了仿真模型的正确性,因此可以根据仿真模型中原子气室表面温度场分布情况来比较各加热方式的优劣。不同加热方式下原子气室的最大温差仿真值如表4所示。

表4 各加热方式下原子气室表面温度(单位:°C)

Tab.4 Surface temperature of atom vapor cell under different heating methods(Unit:°C)

加热方式	最高温度	最低温度	最大温差
1	164.26	92.57	71.69
2	132.11	111.92	20.19
3	127.18	113.38	13.80
4	136.25	113.66	22.59
5	126.88	112.26	14.62

通过表4可以发现,加热方式3对应的原子气室表面温度均匀性最佳,其次是加热方式5,而加热方式2和4对应的温度均匀性较差,加热方式1对应的均匀性最差。

由于加热方式1中的加热片不具有对称性,而另外4种方式中加热片都是对称放置,因此方式1中的温度场分布均匀性最差,并在原子气室中产生了一个从上到下逐渐降低的温度梯度。加热方式2加热片虽然是对称放置,但是由于只有两个加热片,对于立方体结构的原子气室来说,温度均匀性会较差。

参考文献:

- [1] 刘院省,王巍,王学锋. 微型核磁共振陀螺仪的关键技术及发展趋势[J]. 导航与控制,2014,13(4):1-6.
LIU Y SH, WANG W, WANG X F. Key technology and development tendency of micro nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. *Navigation and Control*, 2014, 13(4):1-6. (in Chinese)
- [2] 秦杰,汪世林,高溥泽,等. 核磁共振陀螺技术研究进展[J]. 导航定位与授时,2014,1(2):64-69.
QIN J, WANG SH L, GAO F Z, et al.. Advances in nuclear magnetic resonance gyroscope[J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2014, 1(2):64-69. (in Chinese)
- [3] 周鹏,李夜兰. 国外核磁共振陀螺技术专利研究[J]. 战术导弹技术,2015(4):5-9.

再比较加热方式3、4、5。原子气室的温度会受到热辐射、热传导和热对流的共同影响,由于各加热片的位置对称,因此这3种方式下的热辐射效应在各个方向上都是对称的;再来看热对流和热传导效应,根据加热机构的结构可以发现,在前、后、左、右4个方向上这两种效应对称的,但是在上、下这两个方向上,由于原子气室和下侧底座直接接触,同时原子气室上表面和下表面接触的气体空间和另外4个表面接触的气体空间不一样,导致热对流和热传导效应在这两个方向上和其它方向并不相同。因此,使用前、后、左、右加热片的方式4相比于仅使用前、后加热片的方式2并没有改善温度均匀性,同样的,使用全部加热片的方式5相比于使用前、后、左、右加热片的方式3也没有改善温度均匀性。方式3由于在热辐射、热传导和热对流3个效应上具有更加良好的各向同性,因此该方式下的原子气室表面温度均匀性达到最佳。

6 结论

本文在加热机构中设计了5种不同的加热方式对原子气室进行加热,并建立了加热机构的有限元模型,对稳态温度场进行了仿真,得到了不同加热方式下的原子气室表面温度场分布。同时利用铂电阻和测温电路,对测温点温度进行测量,得到的温度实验值和仿真值吻合度比较高,相对误差在5%之内,验证了仿真模型的正确性。综合仿真和实验结果比较了这5种加热方式下原子气室表面温度场均匀性的差异,得到了现有加热机构中温度均匀性最佳的加热方式。本文的测温方法和结果为核磁共振陀螺中加热机构的设计与优化提供了良好的参考。

- ZHOU P, LI Y L. Patent information research on the nuclear magnetic resonance gyroscope technology[J]. *Tactical Missile Technology*, 2015(4):5-9. (in Chinese)
- [4] 张耀麒, 曾辉, 牟炳富, 等. 光纤陀螺光纤环温度瞬态效应的模拟仿真[J]. *半导体光电*, 2014, 35(2):197-200.
ZHANG Y Q, ZENG H, MOU B F, *et al.*. Simulation of temperature transient effects in FOG fiber coil[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(2):197-200. (in Chinese)
- [5] 陈静, 董钧. 光纤陀螺非线性误差的温度特性研究[J]. *导航与控制*, 2014, 13(1):33-38.
CHEN J, DONG J. Research about nonlinear error of fiber optic gyroscope under different temperature[J]. *Navigation and Control*, 2014, 13(1):33-38. (in Chinese)
- [6] 于旭东, 张鹏飞, 汤建勋, 等. 机抖激光陀螺温度场的有限元模拟与实验[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4):913-920.
YU X D, ZHANG P F, TANG J X, *et al.*. Finite element analysis and experiments of temperature fields of mechanically dithered ring laser gyroscopes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):913-920. (in Chinese)
- [7] 杨慧哲. 温度误差对激光陀螺零偏温度补偿精度的影响分析[J]. *光学与光电技术*, 2014, 12(2):98-100.
YANG H Z. Effect of temperature error on the temperature compensation accuracy of RLG's bias[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(2):98-100. (in Chinese)
- [8] WYLLIE IV R. The development of a multichannel atomic magnetometer array for fetal magnetocardiography[D]. Wisconsin; University of Wisconsin-Madison, 2012.
- [9] BULATOWICZ M, LARSEN M. Compact atomic magnetometer for global navigation[C]. 2012 IEEE on Position Location and Navigation Symposium, IEEE, 2012:1088-1093.
- [10] 许光映, 王晋宝, 韩志. 基于分数阶热传导方程激光加热瞬态温度场研究[J]. *应用数学和力学*, 2015, 36(8):844-854.
XU G Y, WANG J B, HAN ZH. Study on the transient temperature field based on the fractional heat conduction equation for laser heating[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, 36(8):844-854. (in Chinese)
- [11] 彭岚, 毛娜, 王飞, 等. 双向温度梯度作用下 Cz 池内热对流的数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2015(6):1325-1328.
PENG L, MAO N, WANG F, *et al.*. Numerical simulation of thermocapillary convection in czochralski configuration with bidirectional temperature gradients[J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2015(6):1325-1328. (in Chinese)
- [12] 李伟斌, 熊永红. 热辐射基础实验[J]. *物理实验*, 2003, 23(1):9-12.
LI W B, XIONG Y H. Foundational experiments of thermal radiation[J]. *Physical Experiment*, 2003, 23(1):9-12. (in Chinese)
- [13] 刘颖, 范永青, 徐金涛. 光纤陀螺组合的热设计及分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(12):3750-3754.
LIU Y, FAN Y Q, XU J T. Thermal design and analysis for fiber optic gyroscope combination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12):3750-3754. (in Chinese)
- [14] 吴国勇, 顾启泰, 郑辛, 等. 环形激光陀螺温度模型[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2003, 43(2):180-183.
WU G Y, GU Q T, ZHENG X, *et al.*. Thermal model of ring laser gyro[J]. *J Tsinghua Univ(Sci & Tech)*, 2003, 43(2):180-183. (in Chinese)
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
YANG SH M, TAO W Q. *Heat Transfer*[M]. Beijing:Advanced Educational Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:



易鑫(1992—),男,江西宜春人,硕士研究生,2014年于国防科技大学获得学士学位,主要从事激光与光电子技术方面的研究。E-mail: 1091184065@qq.com



汪之国(1982—),男,山东临城人,博士,讲师,2003年于吉林大学获得学士学位,2010年于国防科技大学获得博士学位,主要从事激光与光电子技术方面的研究。E-mail: maxborn@163.com