

家用燃气热水器混合励磁磁水器设计及磁场分析

梁 稳¹, 王宏达², 周高云¹, 马西奎²

(1. 方太厨具有限公司燃气热水部技术中心, 浙江宁波 315300;
2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西西安 710049)

摘 要: 针对电流励磁方式和永磁体励磁方式各自存在的不足, 提出了将电流励磁方式和永磁体励磁方式相结合的家用燃气热水器混合励磁磁水器, 并设计了三种混合励磁结构。首先, 利用磁路法对三种混合励磁结构的内部磁场进行初步分析和计算, 然后采用有限元分析软件 Maxwell 进行数值仿真分析。以磁水器内部的磁感应强度大小为选择标准, 通过对比三种结构内部的磁感应强度分布, 确定出了一种最佳的结构。最后, 针对此最佳磁水器结构, 分析了部件的各个几何尺寸对于其内部磁场的影响。

关键词: 燃气热水器; 磁水器; 磁路; 有限元分析

中图分类号: TM14

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)02-0042-05

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.02.010

Design and magnetic field analysis of water magnetizing devices with hybrid excitation for domestic gas water heater

LIANG Wen¹, WANG Hong-da², ZHOU Gao-yun¹, MA Xi-kui²

1. Technology Center for Gas-fired Hot Water Department of FOTILE, Ningbo 315300, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: In this paper, in view of the shortcomings of both current and permanent magnet excitation mode, a hybrid excitation water magnetizing device for domestic gas water heater is proposed, which combines current and permanent magnet excitation mode, and three hybrid excitation structures are designed. Firstly, the magnetic circuit method is used to analyze and calculate the internal magnetic field of three kinds of hybrid excitation structures. Then, the finite element analysis software Maxwell is used to simulate their internal magnetic field distribution. Taking the magnitude of magnetic induction in the water magnetizing device as the selection criterion, the best structure is determined by comparing the distribution of magnetic induction in the three structures. Finally, for the optimal structure, the influence of the geometric dimensions of the components on the internal magnetic field is analyzed.

Key words: gas water heater; water-magnetizing devices; magnetic circuit; finite element analysis

1 引言

在自来水中, 或多或少都会含有一定的溶解盐、矿物质以及金属颗粒, 这些物质是形成水垢的主要原因^[1]。未经过处理的自来水在通过燃气热水器的热交换器时, 水中的离子会慢慢地沉积在热交换器水管管壁上形成水垢(如 CaCO_3), 如果不及时对其进行有效处理, 就会影响水管中水的流动性。为了防止在水管管壁上形成水垢, 现在一般采用的处理方法有两种: 一种是化学方法, 另一种是物理方法。化学方法就是添加一些化学物品进行处理, 但是它需

要增加其他设备而且对于热水器有腐蚀损害, 尤其是对于家用燃气热水器这种小型电器, 这种处理方法无论是从技术上、制造成本上还是日常维护上都不便于采用。物理方法之一是利用磁场对水进行磁化处理, 使水中的杂质不能形成水垢。一般认为, 对水进行磁处理后溶液内部的结晶作用加快, 从而大大减少了盐类在受热面上的直接结晶和坚硬沉积, 起到了防垢的作用, 在水流的作用下使杂质流出水管^[2], 它比较适用于家用燃气热水器中的水处理。水磁化处理与水磁过滤处理两者的作用原理不

收稿日期: 2019-01-21 修回日期: 2019-09-01

通讯作者: 王宏达 E-mail: whd123@stu.xjtu.edu.cn

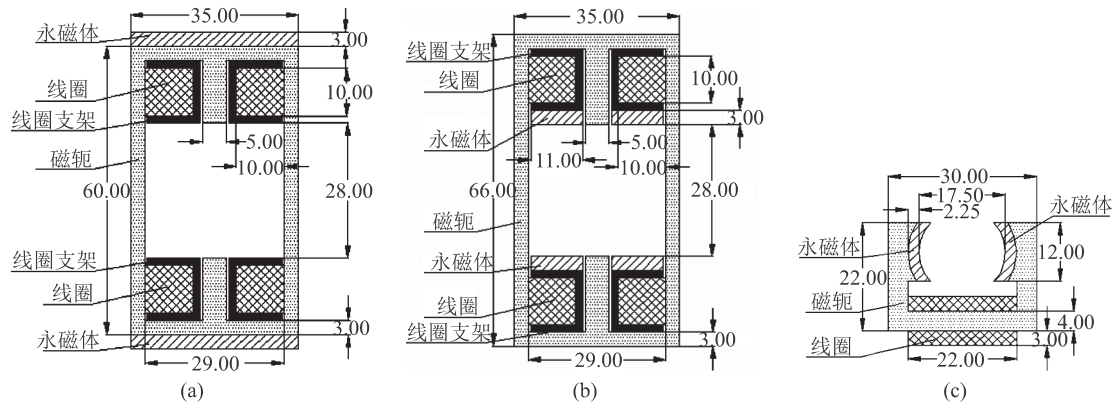


图1 三种混合磁化装置模型：(a)隐极式，(b)面极式1，(c)面极式2

同，对水进行磁化处理是为了防止结垢，而磁过滤是用于滤除铁屑、铁粉等不溶性磁性杂质。

在利用磁场对水进行磁化处理时，所用的磁场一般分为恒定磁场和时变电磁场。燃气热水器的热交换器都是用具有一定厚度的金属铜管绕制而成的，若在铜管外部施加时变电磁场，电磁场的穿透能力会受到集肤效应的限制，使得对水进行磁化处理的效果比较差。对于恒定磁场来说，金属铜管(其磁导率近似等于真空的磁导率)对其穿透能力没有影响。因此，在家用燃气热水器水磁化处理中，一般选用恒定磁场励磁方式。永磁体产生的磁场和在线圈中通入恒定电流产生的磁场都属于恒定磁场。一旦磁体的结构、尺寸和磁化强度确定之后，在使用中是无法调整其产生的磁场强度的大小，但是调整线圈中的电流却可以相应地调整其产生的磁场强度的大小^[3]。本文介绍了一种家用燃气热水器混合励磁(电流励磁和永磁体励磁相结合的方式)磁水器的设计方法，同时基于 Maxwell 软件对其磁场分布进行了有限元数值分析。

2 混合励磁水磁化元件结构设计和磁路分析

2.1 结构设计

为了保证水磁化效果，水磁化元件内部的磁场应该尽可能地大，同时也应尽量节省制造成本。在对燃气热水器水磁化元件进行设计时，为了配合水管的尺寸，我们提出了三种励磁结构，如图1所示，它们沿水管轴线方向的长度均为16 mm。图1a的结构是隐极式，采用两块矩形磁体和两组线圈，磁体不直接面对水管，磁极间气隙较大。图1b和图1c结构都是面极式，磁体直接面对水管。但是，图1b采用四块矩形磁体和两组线圈，气隙较大；而图1c

采用两块瓦形磁体和一组线圈，气隙较小。当正常工作时，线圈电流和磁体产生的磁场共同对流过水管的热水进行磁化处理，通过改变电流的大小和方向就可以对混合磁场的分布和强弱进行一定的调节。

2.2 磁路分析

应用磁路法可以粗略地计算气隙中的磁感应强度。忽略漏磁和磁体的磁阻，三种结构的等效磁路如图2所示。对于隐极式： F_{a1} 、 F_{a2} 是通电线圈的磁势； F_{ma1} 、 F_{ma2} 是磁体的磁势； R_{ag} 是气隙磁阻； R_{a1} 、 R_{a2} 是铁心的磁阻； R_{af} 是外部空气的磁阻。对于面极式1： F_{b1} 、 F_{b2} 是通电线圈的磁势； F_{mb1} 、 F_{mb2} 是磁体的磁势； R_{bg} 是气隙磁阻； R_{b1} 、 R_{b2} 是铁心的磁阻。对于面极式2： F_c 是通电线圈的磁势； F_{mc1} 、 F_{mc2} 是磁体的磁势； R_{cg} 是气隙磁阻； R_c 是铁心的磁阻。根据磁路原理，对于隐极式来说，由于其内部气隙的磁阻远大于磁体的磁阻，相当于磁体将气隙短路，所以磁体发出的磁力线只流入两侧磁轭，它对水管内部的磁场无影响，只由电流励磁提供磁场。对于面极式1来说，由于磁体直接接触气隙，导致磁力线分布与隐极式不同，磁体发出的磁力线有一部分会穿过气隙进入对面的磁体，可以影响内部磁场。面极式2的结构简单，占用体积较小，磁体同样直接接触气隙，磁体发出的磁力线大部分都穿过气隙进入对面的磁体。

气隙中的磁场可以看作由磁体励磁和电流励磁的线性叠加。根据磁路的基尔霍夫第二定律，有

$$F = \sum H_d L_m + \sum NI = K_f H_g l_g = \frac{K_f B_g l_g}{\mu_0} \quad (1)$$

式中 H_d 为磁体工作点的磁场强度， L_m 为磁体的长度；

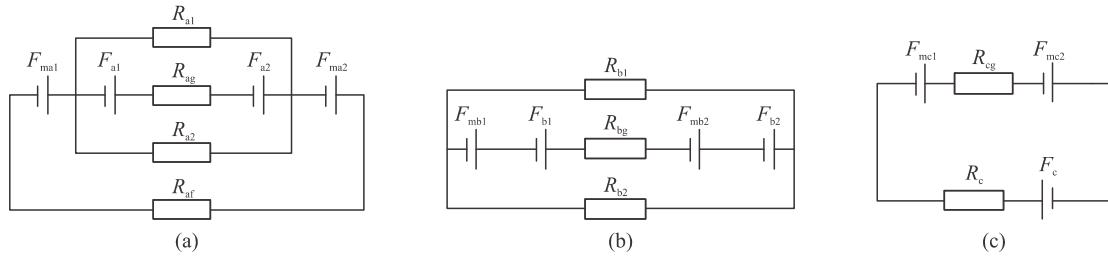


图 2 三种混合磁化装置的等效磁路: (a)隐极式的等效磁路, (b)面极式 1 的等效磁路, (c)面极式 2 的等效磁路

NI 为电流励磁的安匝数, K_f 为漏磁系数(忽略漏磁时 K_f 为 1), H_g 为气隙中的磁场强度, l_g 为气隙长度, B_g 为气隙中的磁感应强度。

不难看出, 只有电流励磁时, 气隙中的磁感应强度为

$$B_g = \frac{\mu_0 \sum NI}{K_f l_g} \quad (2)$$

只有磁体励磁时, 气隙中的磁感应强度为

$$B_g = \frac{\mu_0 \sum H_d L_m}{K_f l_g} \quad (3)$$

另一方面, 当磁体单独励磁时, 假设混合励磁水器的磁路是非理想磁路, 根据磁体的特性, 那么有

$$H_d L_m = K_f H_g l_g \quad (4)$$

$$B_d S_m = K_f B_g S_g \quad (5)$$

式中 K_f 为磁阻系数, 忽略磁轭磁阻时 K_f 为 1; B_d 为磁体工作点的磁感应强度; S_m 为磁体的截面面积; S_g 为气隙的截面面积。与气隙磁阻相比, 磁轭的磁阻较小, 可以忽略不计, 所以取 K_f 为 1。

对于钕铁硼永磁体, 其退磁曲线可看作为一条直线, 因此工作点的磁感应强度

$$B_d = B_r - \mu_0 \mu_{tm} H_d \quad (6)$$

式中 B_r 为磁体的剩余磁感应强度, μ_{tm} 为永磁材料的相对磁导率。由(7)式可以计算出^[4],

$$\mu_{tm} = \frac{B_r}{\mu_0 H_{cb}} \quad (7)$$

式中 H_{cb} 为磁体的磁感矫顽力。

将(5)式代入(6)式中, 得到

$$\frac{K_f B_g S_g}{S_m} = B_r - \mu_0 \mu_{tm} H_d \quad (8)$$

将(4)式代入(8)式中, 且利用 $B_g = \mu_0 H_g$, 得到

$$\frac{K_f \mu_0 H_d L_m S_g}{K_f L_g S_m} = B_r - \mu_0 \mu_{tm} H_d \quad (9)$$

最后, 可以得到磁体工作点的磁场强度为

$$H_d = \frac{B_r}{\mu_0 \left(\mu_{tm} + \frac{K_f L_m S_g}{K_f L_g S_m} \right)} \quad (10)$$

在本文中, 磁体选用 NdFeB50, 其剩余磁感应强度 $B_r=1.44$ T, 磁感矫顽力 $H_{cb}=995$ kA/m。将电流激励设置为 6 A/mm²。分别计算得到隐极式气隙中的 $B_g=0.0538$ T(忽略漏磁), 面极式 1 气隙中的 $B_g=0.135$ T(根据经验, K_f 的值取为 2), 面极式 2 气隙中的 $B_{cg}=0.176$ T(忽略漏磁)。

值得指出的是, 磁路法计算得到的气隙磁感应强度的精度有限, 只是一个粗略的计算结果, 它不能给出各个部分的磁场分布特性。因此, 磁路法只能用于在初步设计中对气隙中的磁感应强度进行估算。

3 有限元仿真及结果分析

3.1 仿真模型

有限元法适用于解决几何形状复杂的问题, 是目前应用最广泛和最有效的数值方法之一。Ansoft Maxwell 是一款优秀的有限元分析软件, 本文采用它对混合励磁水磁化元件结构中的磁场进行详细的数

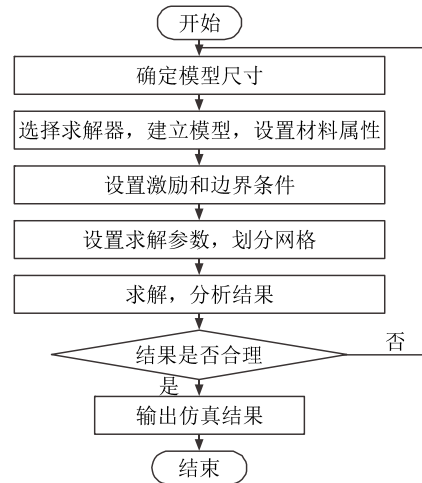


图 3 Maxwell 有限元分析流程

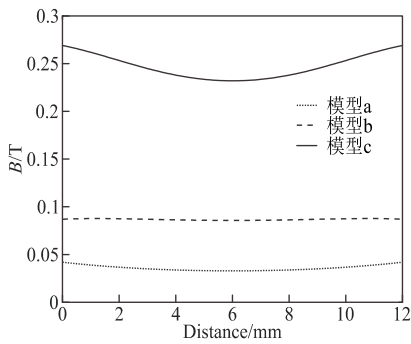


图4 磁极中心连线上的磁感应强度比较

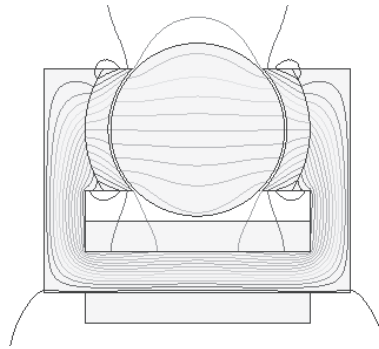


图5 电磁化装置磁场分布

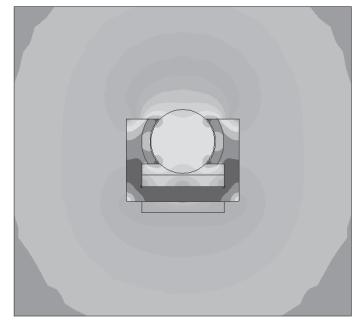


图6 电磁化装置磁感应强度等值图

值分析。按照磁路法计算磁场时的尺寸等比例地建立有限元仿真模型。具体计算过程如图3所示。在这里，我们选择静磁场(magnetostatic)求解器。

在实际计算中，磁轭选用硅钢片^[5]，磁体的参数和电流的大小分别与在磁路法计算磁场时所选取的相同。边界条件设置为无穷远边界条件，求解域设置为空气。

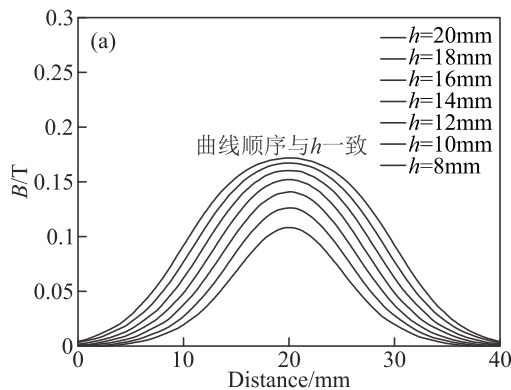
3.2 仿真结果及其分析

对上述三种励磁结构的模型进行数值计算仿真，取磁极中心连线上的磁感应强度分布进行对比，结果如图4所示。

可以看出，在隐极式结构和面极式1结构的水管内部磁感应强度分布都比较均匀，但是其磁感应强度却比面极式2结构中的磁感应强度要小得多。在隐极式和面极式1中的磁路有三条支路，其中间磁路气隙较大，大部分磁通从两侧铁心支路中流过，流过气隙支路的磁通较少，而在面极式2中大部分磁通从气隙通过。另一方面，隐极式和面极式1的结构都要比面极式2的复杂，使得制造成本相应地要高一些。

3.3 几何尺寸对磁场分布的影响

根据上面的仿真结果分析，我们选择面极式2



作为家用燃气热水器混合励磁磁水器的模型。其中的磁场分布如图5所示，可以看出水管内部的磁感应强度分布比较均匀，靠近水管边缘处磁力线分布比较稀疏，磁感应强度值略小于中间区域。磁感应强度分布的等值曲线如图6所示，可以看出，在永磁体外比较远处的磁感应强度近似为0；水管内部的磁感应强度分布均匀；永磁体内部边缘处磁感应强度比较大，且最大值出现在边角位置，这是由瓦型永磁体形状和极性相对且水平平行放置所决定的。下面我们详细分析几何尺寸对磁场分布的影响。

显然，在气隙长度 l_g 和励磁线圈匝数一定的情况下，磁体的长度 L_m 和磁水器沿水管轴线方向的长度 h 对磁化效果影响最大。现在，就来详细分析这两个参数对水管轴线和两磁极中心连线磁场分布的影响，三维有限元仿真结果分别如图7和图8所示。

由图7和图8可以看出，(1)沿水管轴线上的磁感应强度是关于中心点对称分布的，两磁极中心连线上的磁感应强度是关于水管轴线对称分布的；(2)在水管轴线上，如果设磁感应强度值达到0.15 T的区间总长度为 D_1 ；在两磁极中心连线上，磁感应强度值达到0.2 T的区间总长度为 D_2 ，表1中给出了 D_1 和 D_2 与 L_m 和 h 之间的关系。

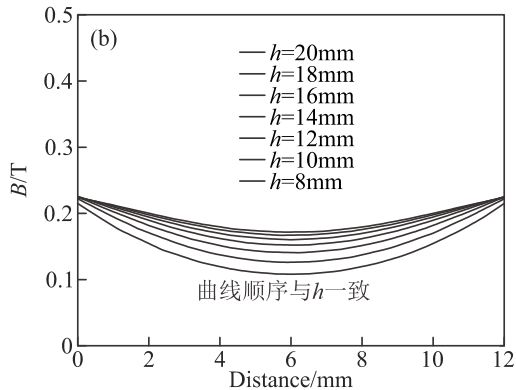


图7 固定 $L_m=2.25$ mm，改变 h 时磁感应强度分布：(a)沿水管轴线，(b)两磁极中心连线上

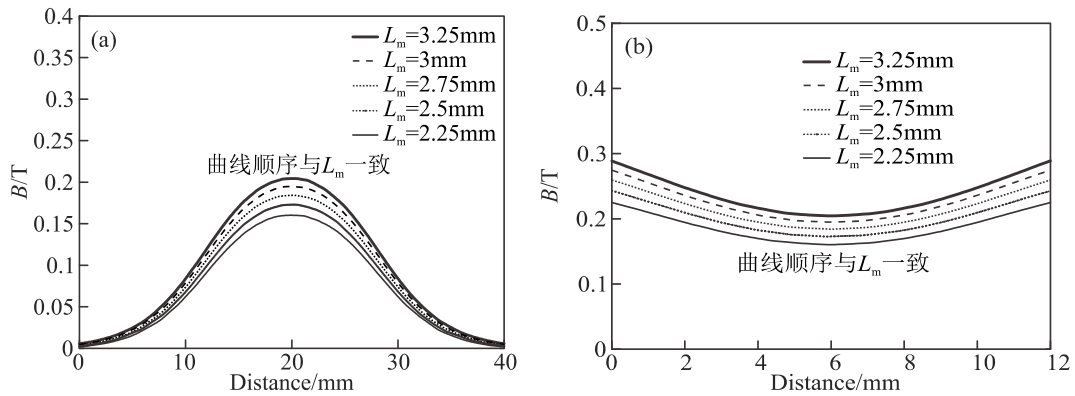


图 8 固定 $h=16\text{ mm}$ ，改变 L_m 时磁感应强度分布：(a)沿水管轴线上，(b)两磁极中心连线上

表 1 L_m 和 h 变化时 D_1 和 D_2 的变化规律 mm

序号	L_m	h	D_1	D_2	序号	L_m	h	D_1	D_2
1	2.25	8	0	0.86	7	2.25	20	10.99	4.03
2	2.25	10	0	1.61	8	2.5	16	8.86	5.24
3	2.25	12	0	2.24	9	2.75	16	10.48	7.06
4	2.25	14	2.40	2.82	10	3	16	11.67	9.36
5	2.25	16	6.21	3.28	11	3.25	16	12.64	12.00
6	2.25	18	8.79	3.67					

由表 1 可知，在 L_m 固定时，随着 h 的增大， D_1 和 D_2 逐渐增大；在 h 固定时，随着 L_m 的增大， D_1 和 D_2 同样逐渐增大。并且，增大 L_m 和 h 的值，都能够使得水管内的磁感应强度增大。但由图 7 和图 8 可知，当 h 增大到一定程度时，水管内的磁感应强度会接近饱和，所以不能无限度地增大 h 。当增大 L_m 时，水管内的磁感应强度也会增大，但是由于受结构尺寸的限制， L_m 的增大也是有限的。

4 结论

电流励磁和永磁体励磁结合的混合励磁方式能够有效地解决电流励磁提供的磁场较小和永磁体只能提供恒定磁场的不足，适用于家用燃气热水器磁

水器的励磁。本文设计了隐极式、面极式 1 和面极式 2 三种混合励磁结构，并对三种混合励磁结构的内部磁场进行了详细的分析和计算。与隐极式结构和面极式 1 结构相比较，由于面极式 2 磁极间的气隙较小，漏磁较小，水管中的磁感应强度较大。另一方面，面极式 2 的结构比隐极式和面极式 1 都要简单，使得制造成本相应地要低一些。

参考文献：

[1] 齐军, 冯巍, 李凤才. 水的磁化处理技术及应用[J]. 武钢技术, 1995, (7): 46-51.
 [2] 韩良敏. 水在磁场作用下的结垢性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
 [3] 潘淑凤, 杨方, 韩春雨. 可控磁场磁化水处理装置的研究[J]. 农机化研究, 2015, (9): 139-142.
 [4] 王以真. 实用磁路设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 29.
 [5] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

作者简介: 梁 稳(1990—), 男, 陕西兴平人, 本科, 工程师, 主要从事燃气热水器相关研究。

(上接 41 页)

对其他微波电路元件的影响，使得环行器更加芯片化；(3)可以与微带天线直接集成在一起，以提高系统集成度，这项工作正在进行中。

参考文献：

[1] Jeffrey L Y, Ryan S A, Benton O, et al. Bandwidth optimization of an integrated microstrip circulator and antenna assembly: part 1 [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2006, 48(6): 47-56.
 [2] Jeffrey L Y, Ryan S A, Benton O, et al. Bandwidth optimization of an integrated microstrip circulator and antenna assembly: part 2 [J]. IEEE Trans Antennas Propag,

2007, 49(1): 82-91.
 [3] Douglas Adam J, Lionel E D, Gerald F D, et al. Ferrite devices and materials [J]. IEEE Trans Microw Theory Techn, 2002, 50 (3): 721-737.
 [4] Helszajn J. The stripline circulator: theory and practice [M]. John Wiley & Sons, 2008.
 [5] 魏克珠, 蒋仁培, 李士根. 微波铁氧体新技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社. 2013.
 [6] 姬晓靓, 罗会安. 双结微带环行器的 CAD 设计[J]. 微波学报, 2014, (6): 158-160.

作者简介: 高 原(1983—), 男, 硕士, 主要研究方向为微波/毫米波铁氧体器件。

