

基于双  $\Sigma$  形金属条的双向左手材料\*田子建<sup>1)†</sup> 陈文超<sup>1)</sup> 樊京<sup>2)</sup>

1) (中国矿业大学(北京), 机电学院信息工程研究所, 北京 100083)

2) (南阳理工学院电子与电气工程学院, 南阳 473004)

(2012年9月18日收到; 2012年11月16日收到修改稿)

提出了一种基于双  $\Sigma$  形金属条的双向型左手材料结构. 该结构由介质基板和两个反面对称放置在介质基板两侧的  $\Sigma$  形金属条构成, 在电磁波平行入射和垂直入射两种情况下, 都能够实现双负特性 ( $\epsilon < 0, \mu < 0$ ). 通过利用 HFSS 软件仿真、等效参数提取, 分析验证了该结构在 X 波段具有双向特性和左手特性. 该结构的双向特性拓宽了电磁波的入射角度, 对左手材料的多维化和多向化发展提供了参考价值.

关键词: 左手材料, 双  $\Sigma$  形金属条, 双向

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.62.074102

## 1 引言

左手材料 (left-handed metamaterials, LHMs) 是一种介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  同时为负的材料, 最早是由前苏联的 Veselago<sup>[1]</sup> 在 1968 年从理论上提出的, 但自然界并未发现  $\epsilon$  和  $\mu$  同时为负的天然物质, 所以一度陷入停滞. 直到 2000 年, Smith<sup>[2]</sup> 首次提出了金属线和 SRRs 的组合结构, 人工实现了  $\epsilon$  和  $\mu$  同时为负的材料, 并实验证实了负折射现象<sup>[3]</sup>, 从此奠定了左手材料的研究基础. 由于左手材料所具有的奇异电磁特性, 使其成为了物理界研究的焦点, 它在光学成像, 微带传输线, 天线雷达, 电磁隐身和电磁加热等领域<sup>[4-7]</sup> 都具有广阔的应用前景.

随着左手材料的快速发展, 出现了越来越多的设计形式, 根据电磁波的入射方向, 左手材料可以分为两种: 一种是电磁波平行入射介质基板实现左手特性, 如对称环结构<sup>[8]</sup>、H 形结构<sup>[9]</sup>、 $\Omega$  形结构<sup>[10]</sup>、双 S 形结构<sup>[11]</sup> 等; 一种是电磁波垂直入射介质基板实现左手特性, 如金属线对结构<sup>[12,13]</sup>、树枝形结构<sup>[14]</sup>、渔网形结构<sup>[15,16]</sup> 等. 上述的两种类型分别从两个不同方向实现了双负特性, 但并不能满足两个方向同时实现双负特性, 而如今随着左手材

料研究的不断发展, 多维数<sup>[17,18]</sup> 和多方向的左手材料才能更好的满足实际应用的需求.

本文提出了一种基于双  $\Sigma$  形金属条的双向型二维左手材料结构. 该结构由介质基板和两个反面对称放置在介质基板两侧的  $\Sigma$  形金属条构成, 在电磁波平行入射和垂直入射两种情况下, 都能够实现双负特性. 当电磁波垂直射入介质基板的情况下, 介质基板两侧的  $\Sigma$  形金属条相互耦合, 形成磁谐振从而产生负磁导率, 而  $\Sigma$  形金属条本身的等离子体效应产生负介电常数, 从而实现双负特性. 当电磁波平行射入介质基板的情况下, 介质基板两侧的  $\Sigma$  形金属条由于反相对称放置, 会形成环形电路, 从而形成了磁谐振同时产生负磁导率, 负介电常数也由  $\Sigma$  形金属条本身的等离子体效应产生, 也实现了双负特性. 通过利用商业电磁软件 HFSS 对该结构进行仿真、等效参数提取, 分析验证了该结构在 X 波段具有双向特性和左手特性.

2 双  $\Sigma$  形结构单元设计与分析

$\epsilon$  和  $\mu$  是描述电磁特性的两个重要物理量, 要实现左手特性就要同时满足  $\epsilon$  和  $\mu$  为负, 所以设计左手材料要考虑电谐振和磁谐振发生在重叠

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 51134024) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2012AA062203) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: tianzj0726@126.com

的频段.

如图 1 所示为本文提出的基于双  $\Sigma$  形金属条的新型双向左手结构单元, 该结构由介质基板和两个反向对称放置在介质基板两侧的  $\Sigma$  形金属条构成, 利用单个  $\Sigma$  形金属条的等离子体效应产生电谐振, 而利用两侧交叉放置的  $\Sigma$  形金属条实现环形电路, 从而产生磁谐振, 并且要求电等离子体频率高于磁谐振频率才能实现双负.  $\Sigma$  形金属条的长度  $h = 9$  mm, 宽度  $b = 6$  mm, 中间缺口长度  $g = 4$  mm, 中间金属条宽度  $s = 0.9$  mm, 介质基板宽度  $a = 7$  mm, 厚度  $t = 0.5$  mm, 基板介电常数为 9.8, 金属条厚度为 0.035 mm, 结构简单易制作.

本文采用基于电磁场有限元方法的 HFSS 软件进行建模仿真, 当电磁波垂直和平行射入基板, 电磁波将分别沿  $z$  和  $y$  两个方向入射, 电边界 (PEC) 将沿  $x$  方向不变, 磁边界 (PMC) 将根据不同的入射方向而异, 下面将根据电磁波两种不同的入射情况进行仿真分析.

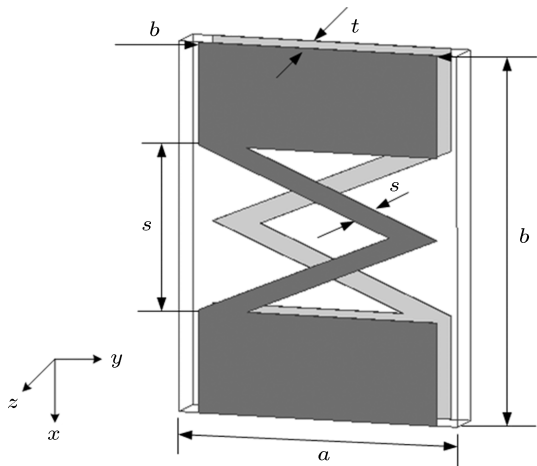


图 1 双  $\Sigma$  形金属条左手材料结构

### 2.1 电磁波垂直入射介质基板

用 HFSS 进行建模, 如图 1 所示, 电磁波垂直入射介质基板, 其中  $z$  方向设为开放边界,  $x$  方向设为电边界,  $y$  方向设为磁边界. 通过仿真实验得到该结构单元的散射参量  $S$  参数, 再通过  $S$  参数提取方法 [19-21] 获得该结构的等效介电常数和等效磁导率, 这里采取 NRW 的提取方法 [20], 通过计算  $S$  参数提取折射率  $n$  和阻抗  $z$ , 继而得到  $\epsilon$  和  $\mu$ ,

$$n = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[ \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right],$$

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}},$$

$$\epsilon = n/z, \quad \mu = nz,$$

其中, 波数  $k = \frac{2\pi f}{c}$ .

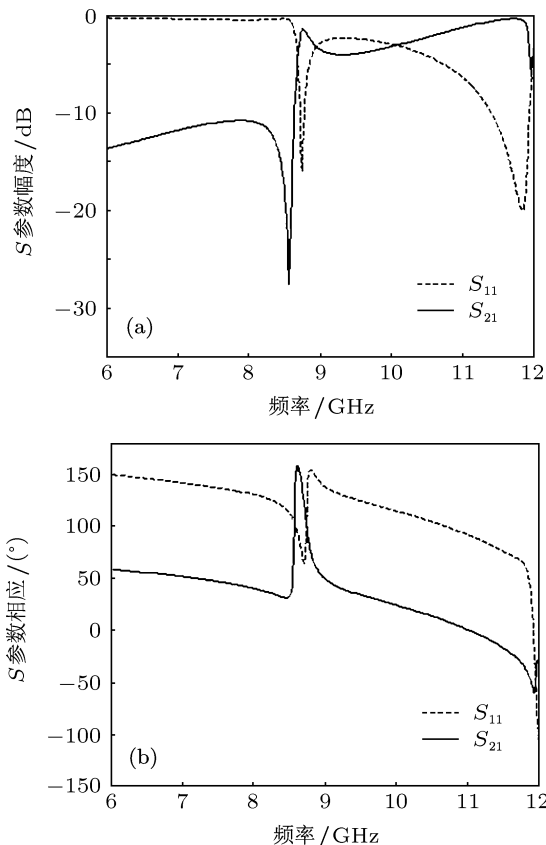


图 2 双  $\Sigma$  形金属条左手材料  $S$  参数 (a)  $S$  参数幅度; (b)  $S$  参数相位;

如图 2 是该结构仿真得出的  $S$  参数的幅度和相位曲线, 可以发现  $S_{21}$  存在传输通带, 并且在 8—9 GHz 之间存在相位突变, 预示着左手通带的存在. 通过参数提取方法提取其等效折射率, 等效介电常数和等效磁导率, 图 3 所示, 该结构在 8.67—9.02 GHz 频带内  $\epsilon$  和  $\mu$  实部同时为负, 出现左手通带, 在 7.73—9.70 GHz 具有负的等效折射率.

图 4 为电磁波垂直入射介质基板的情况下, 在谐振点前后  $\Sigma$  形金属条表面的电流分布. 介质基板两侧的  $\Sigma$  形金属条相互耦合, 形成磁谐振从而产生负磁导率, 而  $\Sigma$  形金属条本身的等离子体效应产生负介电常数. 如图, 前后两面的金属条电流方向相反, 这是对磁谐振的响应结果, 并且每个金属条本身中部细条的电流和两端的电流方向也相反, 这是由于谐振电流和非谐振电流之间的相互作用 [22].

## 2.2 电磁波平行入射介质基板

电磁波平行入射介质基板, 其中  $y$  方向设为开放边界,  $x$  方向设为电边界,  $z$  方向设为磁边界. 如图 5 是该结构用 HFSS 软件仿真得出的  $S$  参数的幅

度和相位曲线, 可以发现  $S_{21}$  在 8—9 GHz 之间存在传输通带, 并且存在相位突变, 预示着左手通带的存在. 提取其各项等效参数如图 6 所示, 该结构在 8.58—8.88 GHz 频带内  $\epsilon$  和  $\mu$  实部同时为负, 出现左手通带, 在 8.05—9.07 GHz 具有负的等效折射率.

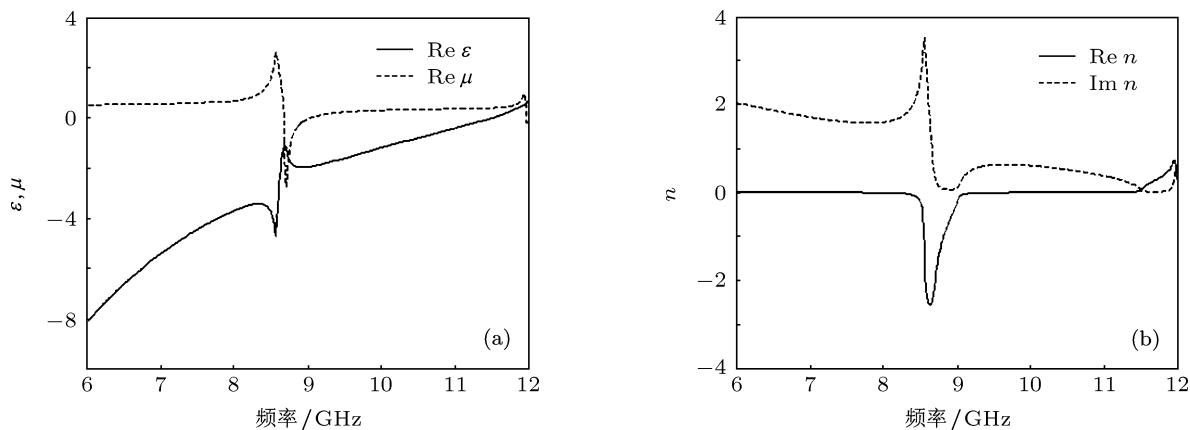


图 3 等效介电常数、磁导率和折射率 (a)  $\epsilon$  和  $\mu$  实部; (b) 折射率  $n$

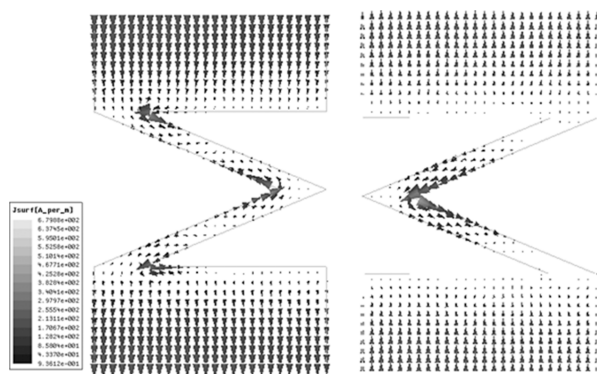


图 4 电磁波垂直入射的电流分布

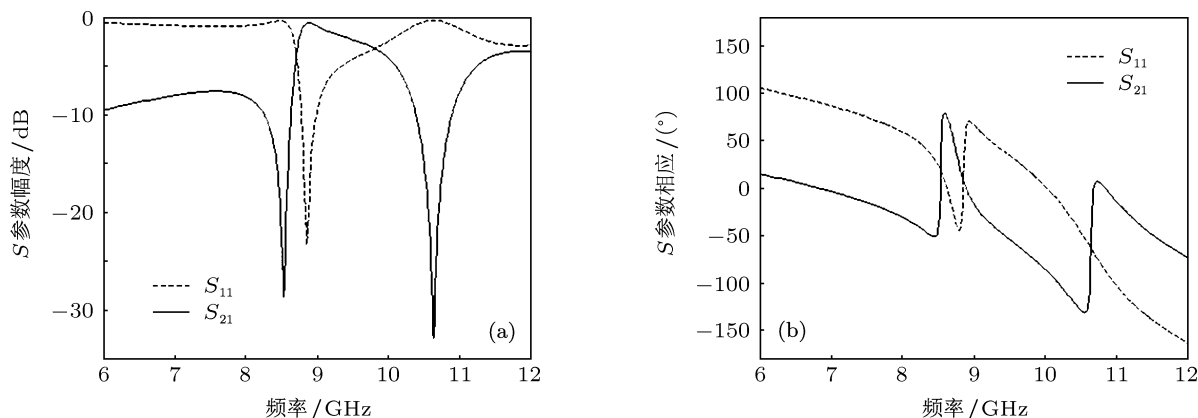


图 5 双  $\Sigma$  形金属条左手材料  $S$  参数 (a)  $S$  参数幅度; (b)  $S$  参数相位

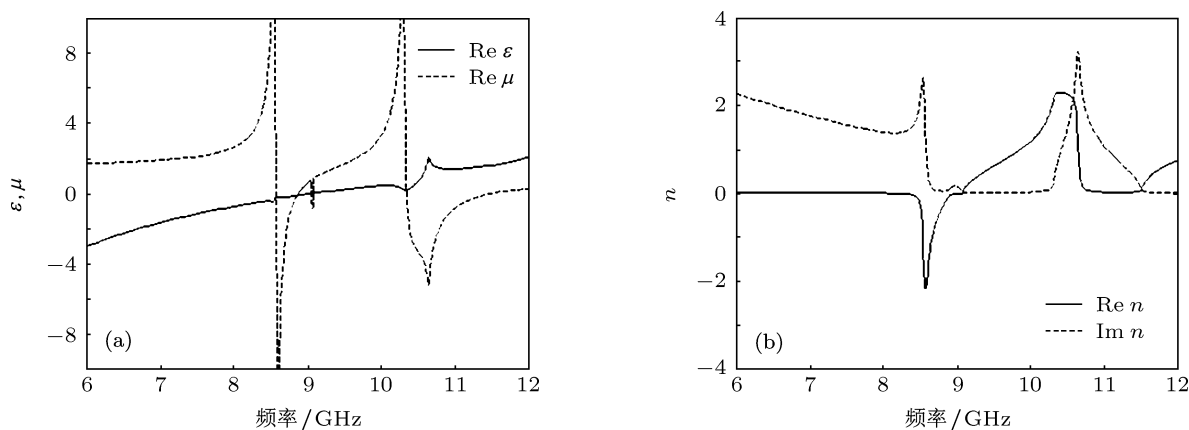


图6 等效介电常数、磁导率和折射率 (a)  $\epsilon$  和  $\mu$  实部; (b) 折射率  $n$

图7为电磁波平行入射介质基板的情况下,在谐振点前后 $\Sigma$ 形金属条的电流分布,前后交叉放置的 $\Sigma$ 形金属条在磁场的作用下相互耦合,产生了三个电流方向一致的谐振环路,引起了负磁导率.而负介电常数的产生与垂直入射时的原理相同,仍由金属条本身的等离子体效应产生.然而由于两种入射方式的电磁波产生了不同的磁谐振,所以相应产生了不同的感生电流,所以会在一定程度上影响结构整体的电谐振,如图3(a)和图6(a)中提取的等效介电常数所示, $\epsilon$ 在数值上存在着差异.

传统的金属线对结构<sup>[12,13]</sup>左手材料中,其前

后对称的线对结构只能在电磁波垂直入射情况下实现了左手特性.通过改变其结构中间部分的对称性,提出了 $\Sigma$ 形金属条结构,由于结构的非对称性,在电磁波平行入射的情况下,前后交叉放置的 $\Sigma$ 形金属条时可以耦合形成三个磁谐振环路,产生了负磁导率,从而使得 $\Sigma$ 形金属条结构实现了电磁波水平和垂直双向入射的左手特性.同时,通过减小 $\Sigma$ 形结构的尺寸参数,可以在更高的频段内实现左手特性,并且对于多角度的光学入射也有着一定的参考意义.

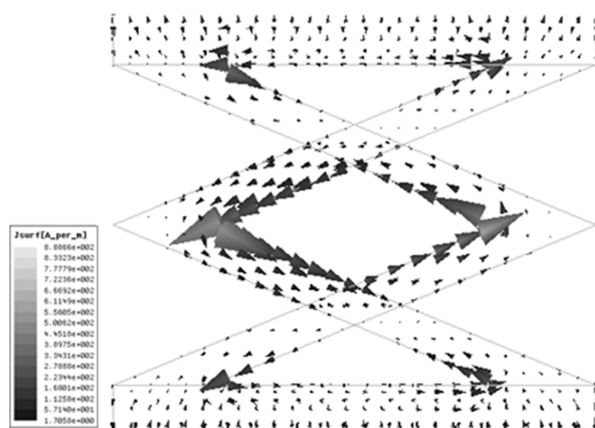


图7 电磁波平行入射的电流分布

### 3 结论

本文根据反向对称放置的 $\Sigma$ 形金属条,提出了一种双向型的二维左手材料结构.通过利用HFSS软件仿真、等效参数提取,当电磁波垂直和平行入

射时分别在8.67—9.02 GHz, 8.58—8.88 GHz频带出现了左手通带,分析验证了该结构在X波段具有双向特性和左手特性.相比传统的左手材料,该结构的双向特性拓宽了电磁波的入射角度,对左手材料的多维化和多向化发展提供了参考价值.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 418
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [4] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [5] Ma H, Qu S B, Xu Z, Wang J F 2008 *Opt. Express* **16** 15449
- [6] Zhou H, Pei Z B, Qu S B, Zhang S, Wang J F, Li Q, Xu Z 2009 *J. Electromagn. Waves Appl.* **23** 953
- [7] Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Chen B W, Wang J F 2008 *Phys. Rev. A* **78** 036608
- [8] Grzegorzczak T M, Moss C D, Lu Jie, Chen X D, Pacheco J Jr, Kong J A 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 2956
- [9] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [10] Ran L, Huangfu J, Chen H, Li Y, Zhang X, Chen K, Kong J A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 073102
- [11] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [12] Zhang S, Qu S B, Ma H, Xie F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3961 (in Chinese) [张松, 屈绍波, 马华, 谢峰, 徐卓 2009 物理学报 **58** 3961]
- [13] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [14] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6078 (in Chinese) [张燕萍, 赵晓鹏, 保石, 罗春荣 2010 物理学报 **59** 6078]
- [15] Mary A, Rodrigo S G, Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 103902
- [16] Menzel C, Paul T, Rockstuhl C, Pertsch T, Tretyakov S, Lederer F 2010 *Phys. Rev. B* **81** 035320
- [17] Guo Y S, Zhang X F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8584 (in Chinese) [郭云胜, 张雪峰 2010 物理学报 **59** 8584]
- [18] Chen C H, Qu S B, Xu Z, Wang J F, Ma H, Zhou H 2010 *Acta Phys. Sin.* **60** 024101 (in Chinese) [陈春晖, 屈绍波, 徐卓, 王甲富, 马华, 周航 2010 物理学报 **60** 024101]
- [19] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 1516
- [20] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [21] Szabó Z, Park G H, Hedge R, Li E P 2010 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **58** 2646
- [22] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114

# Two-dimensional incident left-handed metamaterial composed of double $\Sigma$ -shaped metal strips\*

Tian Zi-Jian<sup>1)†</sup> Chen Wen-Chao<sup>1)</sup> Fan Jing<sup>2)</sup>

1) (School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

2) (Department of Electronics and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

(Received 18 September 2012; revised manuscript received 16 November 2012)

## Abstract

A structure of two-dimensional incident left-handed metamaterial composed of double  $\Sigma$ -shaped metal strips is proposed. The structure consists of a dielectric substrate and two anti-symmetrical  $\Sigma$ -shaped metal strips on each side of it, and the structure presents double negative properties ( $\epsilon < 0$ ,  $\mu < 0$ ), with electromagnetic waves being incident parallel or perpendicular to the substrate. With HFSS software, the two-dimensional incident left-handed properties of the structure are analyzed and verified in X waveband by means of spectrum analysis and effective parameters extracted from S parameters. The two-dimensional incident properties of the structure widen electromagnetic wave angle and are also of reference value for developing multi-dimensional incidence of the metamaterial.

**Keywords:** left-handed metamaterials, double  $\Sigma$ -shaped metal strips, two-dimensional incidence

**PACS:** 41.20.Jb, 78.20.Ci

**DOI:** 10.7498/aps.62.074102

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51134024), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA062203).

† Corresponding author. E-mail: tianzj0726@126.com