

## 高温超导滤波器在航天技术中的应用

余世刚<sup>1</sup>, 王 镨<sup>1</sup>, 周 毅<sup>1</sup>, 马 沛<sup>1</sup>, 宁 银<sup>1</sup>, 申 健<sup>2</sup>

(1. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000; 2. 空军驻甘肃地区军事代表处, 兰州 730000)

**摘 要:** 提出了一种高温超导滤波器在航天中应用的方法, 分析了高温超导滤波器在航天器中应用的优势, 可以改善接收机的灵敏度, 降低噪声系数, 减小接收天线的接收面积, 增加航天器的测控距离等。设计了高温超导滤波器在轨验证装置, 并在卫星中成功使用。

**关键词:** 高温超导滤波器; 航天器; 接收机

中图分类号: V443.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2014)07-0857-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.07.016

## Application of High-Temperature Superconductive Filter in Space Technology

SHE Shi-gang<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>1</sup>, MA Pei<sup>1</sup>, NING Yin<sup>1</sup>, SHEN Jian<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Institute of Space Technology and Physics, Lanzhou 730000, China;

2. Air Force Military Representation Office in Gansu Area, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** A way of the application of high-temperature superconductive (HTS) filter in the space is presented, and advantages of the HTS filter used in the space technology field to improve the sensitivity of the receiver, reduce the noise factor of the receiver, decrease the antenna received area, increase the TT&C coverage of spacecrafts, and so on are analyzed. An on-orbit verification device of the HTS filter is designed in this paper, this device has been successfully used in satellites of China.

**Key words:** High-temperature superconductive filter (HTS); Space craft; Receiver

### 0 引 言

1987年, 临界温度超过液氮温度(77 K)的高温超导体(简称 HTS)被首次发现, 为微波技术的发展开辟了广阔的空间, 国际上一批著名的微波领域的专家, 相继投入了该领域的研究工作。经过近 20 年的探索, 高温超导技术的应用已出现重大突破。高温超导滤波器与常规滤波器相比, 其优点是插入损耗小、带外抑制高、带边陡度好、体积小、重量轻、Q 值高, 还可实现非常窄的通带。当用于接收前端的时候, 系统噪声系数小、灵敏度高、抗干扰能力强。许多国家已将其用于移动通信、卫星、雷达等系统,

美国等发达国家先后进行了高温超导微波器件的卫星飞行试验, 印度也从二十一世纪初开始积极组织高温超导滤波器的卫星飞行实验, 表明超导微波器件是推动航天事业发展的最具活力的创新技术之一。美国等工业发达国家已经将高温超导技术用于通信卫星、侦察卫星、深空探测和天地高速空间数据传输系统<sup>[1-6]</sup>。

我国在高温超导薄膜制备、超导滤波器创新设计和制备工艺, 以及带通、带阻滤波器的超导集成等方面取得了一定的成果<sup>[7]</sup>。高温超导滤波器的诸多优点, 在通信系统中得到了大量的应用<sup>[8-13]</sup>, 在航天技术中也会有比较广泛的应用前景。可以用于

通信卫星、天基信息传输系统、深空探测等方面。将高温超导滤波器用于航天技术最需要验证的就是它能不能经受住航天发射时的力学环境,发射升空后在太空中能不能正常工作。本文提出了高温超导滤波器在航天中的应用方法,分析了高温超导滤波器在航天技术中应用的优势,设计了一种高温超导滤波器空间试验验证装置,在我国的高新技术试验卫星上得到了应用。

### 1 高温超导滤波器在航天应用方法

在航天技术中,可以分别在航天器和测控基站上使用高温超导滤波器,在航天器上使用,可以提高航天器接收机的灵敏度,增加地面测控天线的仰角范围,增加 GEO、MEO、LEO 卫星的测控范围和每周期的测控时间,增加航天器的测控距离;在测控基站上使用,在达到同样的接收效率的时候,可以减小航天器上发射机的发射功率,从而减小航天器上发射机的复杂程度和代价,并减小天线的体积。特别是针对深空探测任务,上述意义更加重大。所以高温超导滤波器在深空探测的测控应答机、数据传输链路上将有广阔的使用前景。高温超导滤波器一般应安装在接收天线与接收机之间,需配备真空室、制冷机一起使用,见图 1。

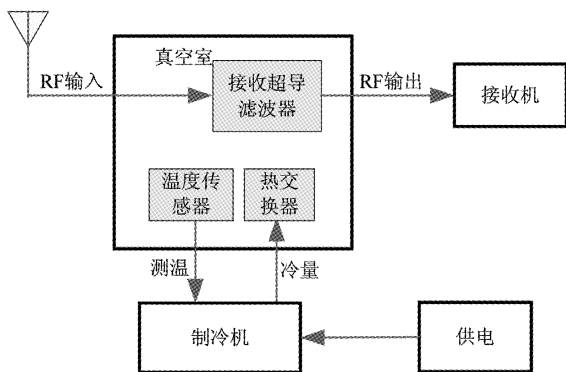


图 1 高温超导滤波器在航天器上应用框图

Fig. 1 Application diagram of HTS filter in spacecraft

高温超导滤波器在航天器上有两种安装方法,一种是将滤波器安装在真空室内,制冷机冷头与其紧密接触安装,进行热交换,使其达到超导状态,见图 2,此种方式适合制冷机制冷功率比较低的场合。另一种是将其与低噪声放大器一起组合成高温超导子系统,共同放在真空室内,制冷机冷头指与滤波器

和 LNA 紧密接触安装,进行热交换,使其达到超导状态,见图 3,对于制冷机制冷功率比较高的场合,这种方式更加有效。无论用哪种方式,航天器上都应配备空间制冷机,制冷机与高温超导滤波器、低噪声放大器需集成组装成一体。需要特别注意的是,冷头与应用器件均置于真空室内,冷头与应用器件需采用良好的热连接,对应用器件需采用绝热支撑以防止冷头受力损坏,并满足力学环境条件,同时还应采取采用防辐射、防漏热等措施,保证系统的可靠性和稳定性。

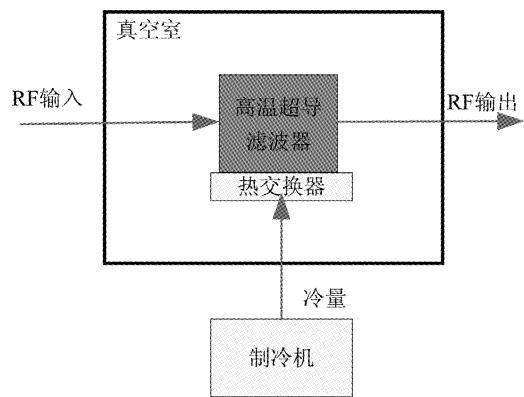


图 2 超导滤波器与制冷机组示意图

Fig. 2 Sketch map of Combine the HTS filter and the cooler

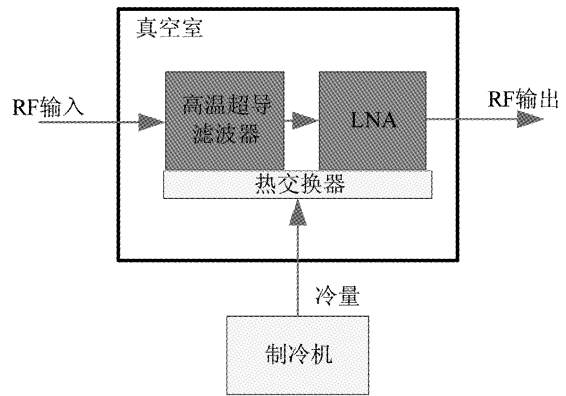


图 3 高温超导子系统与制冷机组示意图

Fig. 3 Sketch map of Combine the HTS filter subsystems and the cooler

在航天中应用的时候,需要将滤波器集成在真空室内,所以真空室是非常重要的部件,其功能是将高温超导滤波器和斯特林制冷机冷头进行结构集成和热集成。真空室内部存在复杂热集成,包括绝热、导热、热屏蔽等,同时还要为滤波器提供高强度结构支撑,使真空室内集成组件满足航天器发射带来的

力学环境要求。图4为其内部结构示意图。

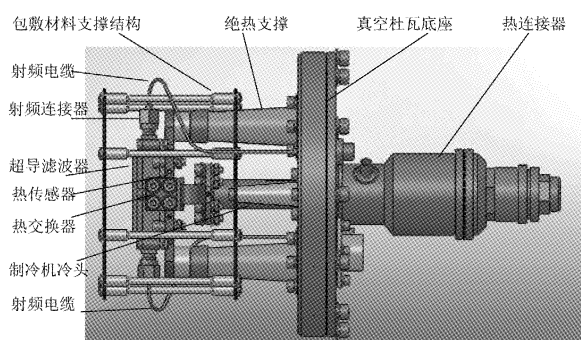


图4 真空室内部结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the vacuum chamber structure

在地面试验时采用动态分子泵抽的方法实现真空,进行分系统的联试试验。在产品交付时,采用冷焊方法实现短期静态真空,保护高温超导滤波器,以防水汽等损坏器件。真空室设计有放气嘴,在航天器发射前将其打开,在轨飞行时真空室处于对外界开放状态,利用天然的良好真空环境。

在设计真空室是需要特别注意的是:

### 1) 绝热支撑

由于冷头为薄壁结构,不能承受较大的力学载荷,否则会损坏制冷机冷头内部排出器的正常运行,或影响间隙密封性能。因此,高温超导滤波器不能直接安装在冷头端部,而是必须通过绝热支撑的办法将高温超导滤波器及热交换器支撑起来,通过质量很小的柔性导热带将冷头端部与冷板连接起来,实现冷量传递。

### 2) 柔性热连接

柔性导热带采用高热导率铜箔,多组连接,在连接两端通过钎焊等方法减小接触热阻。

### 3) 多层绝热包敷

多层绝热主要作用是防辐射漏热。在空间环境热损主要以辐射漏热为主,由于器件的表面积较大,因此,采用多层绝热包裹的方法减小辐射漏热。

通过上述手段,可以确保高温超导滤波器在太空正常工作,达到应用目的。

## 2 高温超导滤波器在航天技术中应用的优势分析

与普通滤波器相比,高温超导滤波器能在插损很低的情况下对所需通带提供非常高的选择性。且由于工作在低温环境,系统产生的热噪声也很小。

根据需要可以把接收机低噪声放大器 LNA 也放入 HTS 滤波器工作所需的低温环境中,组合成高温超导子系统来使用<sup>[2,4]</sup>,而 LNA 的增益可以降低来自接收机其余部分的噪声。噪声系数的降低和对带外干扰的良好抑制是高温超导滤波器子系统优于传统滤波器子系统的根本原因。

在使用超导滤波器和 LNA 后,接收机性能改善可以用等效噪声系数来表征。与室温相比,工作在温度  $T$  且插损为  $1/G_1$  ( $G_1 < 1$ ) 的 HTS 滤波器的噪声系数为<sup>[14]</sup>

$$F_1 = 1 + \frac{1 - G_1}{G_1} \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (1)$$

式中:  $T$  为高温超导滤波器的工作温度,  $T_0$  为室温,  $F_1$  为 HTS 滤波器的噪声系数,  $G_1$  是 HTS 滤波器的增益。

如果滤波器被冷却到接近绝对零度时,  $T \ll T_0$ , 则没有附加噪声,因而  $F_1 = 1$ 。而当  $G_1 = -0.5$  dB 且  $T = 77$  K 时, HTS 滤波器的噪声系数为  $F_1 = 1.03$  (0.14 dB)。

对于一个接收机来说,总的噪声系数为

$$F_0 = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} \quad (2)$$

式中:  $F_2$  为 LNA 的噪声系数,  $G_2$  为 LNA 的增益,  $F_3$  为接收机其余部件的噪声系数,则当增益  $G_2$  足够大时,公式的第三项的影响变得很小,可忽略不计。故接收机的噪声系数主要由其前端也就是由高温超导滤波器和 LNA 来决定。

在这种情况下,如前所述,超导带来两大好处:低的工作温度和通带内接近无损耗的信号传播使得  $F_1$  接近于 1。而 LNA 带来的噪声很小,实际上,系统的有效噪声系数约为 0.5 dB,对应于  $F_0 = 1.12$ 。而通常的普通滤波器和置于常温下的低噪声放大器使得接收机的噪声系数一般为 4~5 dB 左右。

当考虑由接收机的非线性带来的交调失真 IMD 时,等效噪声系数  $F$  为

$$F = F_0 + \frac{N_{\text{IMD}}}{N_{\text{in}}} \quad (3)$$

式中:  $N_{\text{in}} = KT_0B$  是输入端的环境噪声功率,  $K$  为波尔兹曼常数;  $T_0$  为输入端的环境温度;  $B$  是信道带宽;  $N_{\text{IMD}}$  是给定频率下相对接收机输入端的交调 IMD 噪声功率。

交调失真将放大干扰信号中的波动,由交调失真带来的干扰会使得等效噪声系数发生波动,这样就会造成实际接收机的噪声系数大于 4 ~ 5 dB,最大可以达到 9 ~ 10 dB。在使用了高温超导滤波器之后噪声系数可以降低很多。HTS 滤波器的选择性可以有效滤除带外信号,从而降低带外信号带来的放大器和接收机其余部分的交调失真。也就是说,在使用传统滤波系统时,  $N_{\text{IMD}}/N_{\text{in}}$  对有效噪声系数影响很大,但使用 HTS 滤波器子系统时噪声系数会接近于  $F_0$ 。

所以高温超导滤波器的使用,将有效地提高接收机的灵敏度,降低发射端的发射功率需求,这在微波频段,特别是在毫米波频段将是十分有意义的。比如在 K 频段,由于固态器件的限制,功率放大器增加 3 dB 所引起的代价是相当大的。

### 3 空间试验验证系统的设计和实现

为验证我国自主研发的高温超导材料、器件和斯特林制冷机能够经受航天发射和空间飞行的考验,可以在空间环境中正常工作,中国航天兰州空间技术物理研究所研制了高温超导滤波器试验系统。对高温超导滤波器在航天中的应用进行了有益的探索,该系统已经于 2012 年 10 月在卫星上得到应用,验证了高温超导滤波器在航天中是可以应用的。这个系统的组成框图见图 5。

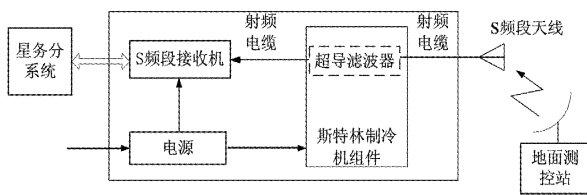


图 5 高温超导滤波器试验系统框图

Fig. 5 Chart of the HTS filter test system

该试验系统主要由高温超导滤波器、斯特林制冷机组件(包括制冷机本体、制冷机控制器、安装底板、真空室及热集成组装等)、试验专用 S 频段接收机、接收天线、电源转换器等组成。

系统以 S 频段(2.02 ~ 2.10 GHz)测控信号作

为试验验证信号。将高温超导滤波器置于接收天线和 S 频段接收机之间,通过接收机处理接收到的信号,将其解调,得到的测控副载波信号送到星务系统进行处理。高温超导滤波器安装在一个真空室内,并与制冷机冷头紧密结合。制冷机为高温超导滤波器提供大约 77 K 的低温环境,制冷机、电源、接收机都能够提供相应的遥测信号来证明各个设备的工作状态是否正常。

试验中使用了中国科学院物理研究所研制的 S 频段高温超导滤波器,其外形尺寸为:长: 75 mm,宽: 35 mm,高: 25 mm。是一个 10 阶切比雪夫带通滤波器。仿真的传输特性和反射特性曲线如图 6 所示。

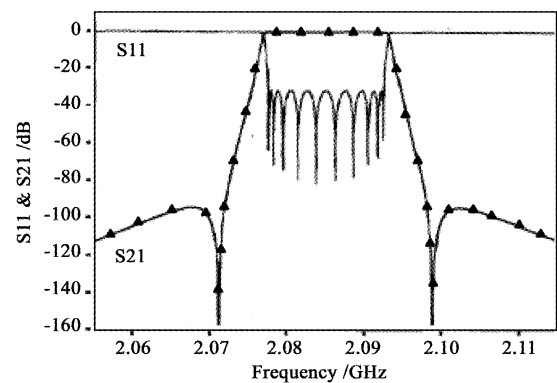


图 6 高温超导滤波器传输特性和反射特性曲线

Fig. 6 Curve of HTS filter transport and reject frequency characteristic

从图中可以看出,滤波器的插入损耗(S21)在通带内接近于 0 dB。其输入、输出端口反射曲线带内值均小于 -35 dB,对应的驻波比为 1.04 : 1。

滤波器达到的指标如下:

- 中心频率:S 频段
- 3 dB 带宽:16 MHz
- 中心频率插损:0.1 dB
- 输入输出驻波比:优于 1.5 : 1
- 带外抑制:优于 80 dB

S 频段高温超导滤波器结构见图 5,由底 1、超导芯片 2、SMA 接头 3、屏蔽盒框 4、紧固螺丝 5、屏蔽盒盖 6、调谐螺丝 7 等组成。其中滤波器的屏

屏蔽盒由屏蔽盒底、盒框和盒盖三个部分组成,屏蔽盒底采用了与超导基片热膨胀系数相近的铁金属材料,屏蔽盒底直接与超导芯片用银胶粘接在一起,盒盖、盒框均采用了黄铜材料。为了提高整个屏蔽盒的导电性,在屏蔽盒底、盒框和盒盖的表面镀金。超导芯片与屏蔽盒底之间用导电银胶粘合在一起;超导芯片的输入、输出引线与 SMA 接头用金线连接在一起。盒底与盒框、盒框与盒盖之间,分别用 6 枚螺丝进行固定,为了提高滤波器的抗振动性能,在每一枚紧固螺丝 F 放置了不锈钢垫圈,对于紧固螺丝用环氧树脂进行固定。

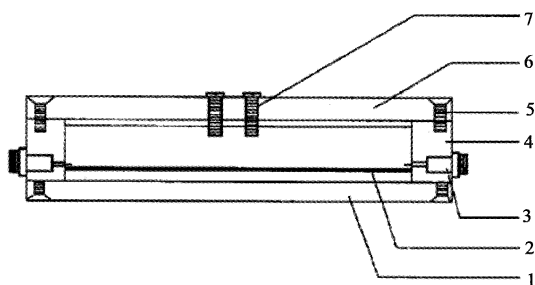


图7 高温超导滤波器的结构

Fig.7 Structure of HTS filter

S 频段高温超导滤波器屏蔽盒底与制冷机冷头通过热交换器连接在一起,与制冷机实现热交换,将高温超导滤波器的温度降到 77 K。屏蔽盒底与制冷机热交换器之间采用机械螺栓进行固定,达到良好的热接触,以减小它们之间的热阻。

制冷设备使用的是兰州空间技术物理研究所研制的斯特林制冷机,其主要技术指标如下:

- a) 制冷功率:0.8 W;
- b) 制冷温度:77 K;
- c) 制冷温度稳定度:30 min 内波动 $\leq 0.5$  K;

该装置随卫星发射升空,完成了验证试验。在试验过程中,通过遥测信号监测制冷机的冷头温度、超导滤波器的温度、S 频段接收的信号强度和接收机锁定状态等参量。通过试验,得到如下结果:

在卫星测控段,当超导滤波器的温度达到 78 K 以下的时候,通过 S 频段接收机的信号强度和锁定状态信号表明滤波器已经进入超导状态,S 频段接

收机能够接收并解调出信号;当滤波器的温度高于这个温度的时候,滤波器的插损变大,直到转换到非超导工作状态,S 频段接收机不能接收和锁定信号。该实验验证了高温超导滤波器能够在太空正常工作,同时验证了我国研制的高温超导滤波器和斯特林制冷机能够经受住航天发射和空间飞行环境的考验,完全可以应用于航天工程。

#### 4 结 论

高温超导滤波器与普通滤波器相比,有通带窄、差损小、带边陡峭等特点,在改善接收系统的灵敏度,增加作用距离等方面具有很多优势。如果在航天器上使用高温超导滤波器,可以增加测控和通信距离,减小发射机功率和天线面积,在航天技术中有广泛的应用前景。经过航天飞行验证,我国研制的高温超导滤波器和斯特林制冷机能够经受住航天发射和空间飞行环境的考验,在空间能够正常工作,可以在卫星测控与通信、数据传输等方面发挥重大的作用。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Nisenoff M. The high-temperature superconductivity space experiment (HTSSE): present status and future challenges[J]. Supercond. Sci. Technol, 1996,9(4A):174-177.
- [ 2 ] 汤宇龙,张祥昆. 高温超导滤波器国内外研究进展[J]. 空间电子技术. 2010,7(1),96-100. [ Tang Yu-long, Zhang Xiang-kun. Domestic and oversea research progress of high temperature superconducting microwave Filters[J]. Space Electronic technology, 2010, 7(1):96-100. ]
- [ 3 ] 何豫生. 高温超导微波器件在移动通信中的应用[J]. 物理, 2002,31(4):205-213. [ He Yu-sheng. Application of high temperature superconducting microwave devices in mobile communications[J]. Physics, 2002, 31(04): 205-213. ]
- [ 4 ] Willemsen B A. HTS filter subsystems for wireless telecommunications [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond, 2001, 11(1): 60-67.
- [ 5 ] Jedamzik D, Menolascino R, Pizarroso M, et al. Evaluation of HTS sub-systems for cellular basestations [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond, 1999,9(6): 4022-4025.
- [ 6 ] Hong J S, McErlean E P, karyamapudi B K. a High temperature

- superconducting filter for future mobile telecommunication systems [J]. IEEE Trans. Microw, Theory Tech., 2005, 53(6):1976-1981.
- [7] 羊恺,王占平,补世荣,等. 高温超导 X 波段带通滤波器研制[J]. 宇航学报, 2002, 23(6): 91-102. [Yang Kai, Wang Zhan-ping, Bu Shi-rong, et al. The development of HTSC X-band bandpass filter [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(6): 91-102.]
- [8] Zhang Q, Li C G, Wang Y F, et al. An HTS band pass filter for a meteorological radar system and its field tests [J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 922-925.
- [9] 吴树兴,张智江,张范. 高温超导滤波器子系统的进展[J]. 现代电信科技, 2007(12): 34-37. [Wu Shu-xing, Zhang Zhi-jiang, Zhang Fan. Progress in high temperature superconducting filter subsystem [J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2007(12): 34-37.]
- [10] 吴树兴. 3G 无线接入实用性研究—高温超导滤波器子系统在 CDMA 网络中的性能[D]. 北京邮电大学, 2009. [Wu Shu-xing. Research on the wireless access technologies applied to 3G [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.]
- [11] 何晓锋,张雪强,王跃辉,等. 高温超导收发子系统设计[J]. 低温物理学报, 2010, 32(3), 186-189. [He Xiao-feng, Zhang Xue-qiang, Wang Yue-hui, et al. Design of an HTS transceiver subsystem [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2010, 32(3): 186-189.]
- [12] 何艾生,黎红,张雪强,等. 超导滤波器、超导卫星接收机和超导气象雷达的研究进展[J]. 物理, 2006, 35(7): 599-650. [He Ai-sheng, Li Hong, Zhang Xue-qiang, et al. Recent developments of high temperature superconducting microwave filters, satellite-to ground receivers, and meteorological radar [J]. Physics, 2006, 35(7): 599-650.]
- [13] 朴云龙,魏斌,张晓平,等. CDMA 移动通信用高温超导滤波器的研制[J]. 低温物理学报, 2006, 28(4): 321-324. [Piao Yun-long, Wei Bin, Zhang Xiao-ping, et al. An HTS filter subsystem for CDMA system [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2006, 28(4): 321-324.]
- [14] Pettai R. Noise in receiving systems [M]. Wiley, New York, 1984.

作者简介:

余世刚(1972-),男,博士,高级工程师,主要从事空间无线电技术、通信技术、星间测量技术研究和应用工作。

通信地址:兰州市 94 号信箱(730000)

电话:(0931)4585355

E-mail:sheshg@sina.com

(编辑:张宇平)