

文章编号: 2095-4980(2020)04-0633-06

## 大功率馈源类产品低PIM结构设计

李瑜华, 景莉莉, 张明涛, 张乔杉, 弓金刚

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 通过星载低无源互调(PIM)馈源的创新设计, 结合某型号大功率馈源产品实例, 详细阐述了低 PIM 馈源设计的仿真分析方法和试验验证结果。利用低 PIM 扼流法兰抑制连接面处产生三阶交调频率的传导电流来抑制 PIM 产物, 可降低 PIM 值 40 dB 以上; 对于其他非三阶频率点的交调性能则通过传统的增强法兰压强的方式来改善。并与国外同类产品性能进行了比较, 充分证明了该设计的正确性和技术水平。

**关键词:** 大功率馈源; 低 PIM; 结构设计

中图分类号: TN802

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2017235

## Low PIM structural design for high-power feed product

LI Yuhua, JING Lili, ZHANG Mingtao, ZHANG Qiaoshan, GONG Jingang

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** The spaceborne low Passive Intermodulation(PIM) feed is designed for some type of high-power feed product. The simulation analysis method and the test results are given in detail. The proposed design utilizes choke flange with low PIM to depress the conduction current with third-order intermodulation frequency on the joint face in order to reduce the product of PIM, and the PIM value can be decreased by more than 40 dB. To decrease PIM for other non-third-order frequencies, the pressure of flange can be enhanced. The performance is compared with those of similar foreign products, which fully shows the validity of the design and its technical level.

**Keywords:** high-power feed; low Passive Intermodulation; structural design

随着我国长寿命大容量空间卫星有效载荷技术的不断发展, 微波部件承受的功率越来越大, 这对微波部件的抗无源互调(PIM)设计技术提出了更高要求。PIM 现象一旦产生, 噪声电平将提高, 系统不能正常工作, 严重影响大功率微波部件的性能, 甚至威胁整个卫星的使用寿命。为减少地面设备的体积和质量, 增强地面设备的机动性, 同时为提高卫星接收灵敏度, 星载天线口径越来越大, 有的达到几十米。在天线尺寸较小时, 暂且可以使用收发分开的方式来避免 PIM 问题, 但对于几十米口径的天线进行收发分开 2 套天线, 其代价太大。因此研究大功率微波部件特别是星载大型反射面天线低 PIM 设计方法已迫在眉睫<sup>[1-2]</sup>。

国际上从 1968 年空间首例 LES-5 卫星 UHF 天线 PIM 问题发生至今, 针对 PIM 问题研究已近 50 年, 如今依然是研究的热点和难点。PIM 具有机理复杂、影响因素多和随时间变化的特性, 使得问题定位难, 不易彻底解决。近年来国内大功率、宽带、高灵敏接收载荷应用日益广泛, 在轨和在研产品 PIM 异常现象也日益增多, 目前已成为困扰星载载荷产品研制的一个突出问题<sup>[3-4]</sup>。对于星载馈源类产品, 国内外包括西安分院此前从未开展过具有三阶 PIM 产物的收发共用馈源产品的研制, 也未开展过该类馈源产品三阶 PIM 性能测试试验。

### 1 PIM 现象概述

PIM 是在大功率条件下, 由于微波无源部件的非线性产生互调产物的现象<sup>[5]</sup>。在收发共用天线系统中, 由于大功率发射信号与接收通道的微弱信号处于同一通道内, 天线部件非线性产生的 PIM 产物进入接收通道, 落入接收频带的 PIM 分量可能干扰接收系统的正常工作<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2017-09-15; 修回日期: 2019-04-08

作者简介: 李瑜华(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事卫星天线结构设计工作。email:yhli4\_1794@126.com

大量研究表明，PIM 主要由材料非线性、接触非线性和表面非线性引起，但产生以上 3 种非线性的原因多种多样，导致产生 PIM 的机理错综复杂。目前认为材料自身的非线性、由于接触形成的绝缘体—金属—绝缘体结构产生的非线性隧穿电流<sup>[8]</sup>、表面污染所引起的接触电容以及由于表面污染引起的局部场增强效应进而引发场发射和二次电子倍增效应是引起 PIM 的主要因素。铁磁材料是重要的 PIM 源，这是因为在外加电场的作用下，铁磁材料中磁畴取向一致，使得磁导率显著增大。常见的铁磁性材料有铁、镍、钴以及这些金属的合金、镧系元素、镁与铝的合金等。介质材料 PIM 问题也受到极大关注，2005 年英国贝尔法斯特王后学院开展了微带线和多层 PCB 结构中 PIM 产生机理及抑制方法的研究<sup>[5]</sup>，对介质、导带以及两者结合产生的 PIM 分别进行了研究，研究了长度、衬底材料微带线制作工艺对微带线 PIM 的影响，图 1 为微带线 PIM 随长度的变化曲线。且 PIM 分量主要来自异质金属之间的接触电现象。

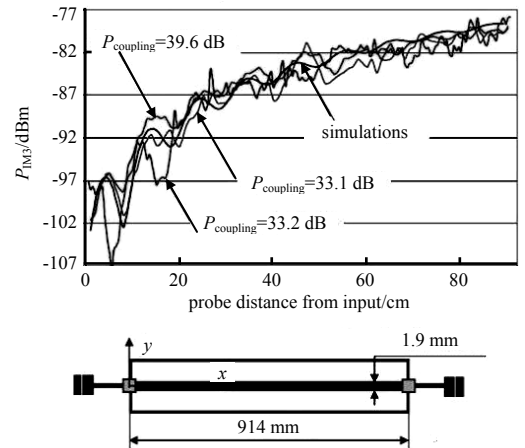


Fig.1 Research results of microstrip line PIM  
图 1 微带线无源互调研究结果

在大功率条件下，当输入 2 个或 2 个以上载波时，由于微波部件的非线性，产生载波的不同谐波和或差频信号现象，如图 2 所示。

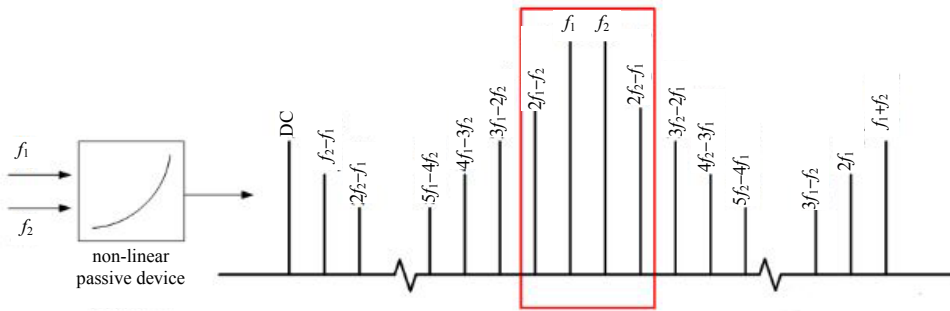


Fig.2 Spectrum distribution diagram generated by PIM  
图 2 无源互调产生的频谱分布图

PIM 是信号失真的一种形式，当 2 个或多个频率信号处于同一无源射频部件时，由于非线性电压-电流关系，多个频率信号混频组合产生的互调产物，其频率为各种谐波的和或差<sup>[6]</sup>。在  $N$  个载波信号下，设输入信号频率为  $f_1, f_2, \dots, f_N$ ，PIM 产物的频率按式(1)计算。

$$f_{PIM} = m_1 f_1 + m_2 f_2 + \dots + m_N f_N \tag{1}$$

式中： $f_{PIM}$  为 PIM 产物的频率的数值； $f_N$  为输入信号频率的数值； $m_N$  为任意整数，可以为正数、负数或者零。

对无源射频部件而言，互调失真由非线性源产生，典型的非线性源有金属间相互接触的松紧情况、不同的材料、锈蚀物、灰尘和污染物等。PIM 属于多载波通信系统中的正常现象，只能够在研制过程中严格控制、减轻量级，不能根本消除。当互调产物信号强度与接收信号强度近似时，会对通信系统的信号接收产生干扰，严重时会造成阻塞接收信号，进而造成通信系统无法工作。

## 2 大功率馈源类产品低 PIM 产生机理

大功率低 PIM 扼流法兰的接触非线性都是金属-金属形式<sup>[7]</sup>，实际产品的微观接触状态并非理想的平面与平面接触，而是局部状态下斑点式接触，存在着众多的不连续性，微观连接形貌如图 3 所示。这些连接位置在高低温变情况下，由于热应力的原因，会产生滑移和接触状态的变化(如从接触状态到不接触状态)，导致局部接触斑点压强的变化，从而导致接触面积变

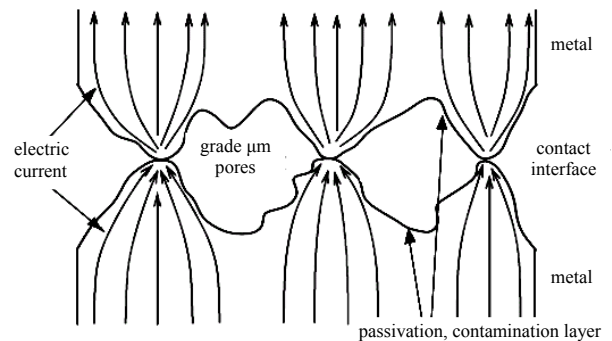


Fig.3 Schematic diagram of micro metal connection  
图 3 微观金属连接示意图

化,使接触电阻变化,电压、电流随之变化,由于电压-电流的非线性从而产生了 PIM 跳动。接触非线性产生 PIM 的机理需要进一步在微观层面进行说明。图 4 为利用激光共聚焦显微镜表征得到相应试样的表面粗糙结构三维立体图和二维截面的粗糙轮廓曲线图<sup>[8]</sup>。

建立如图 5 所示的分析模型及应力云图,当法向位移为 1 nm 时(刚接触),粗糙表面只有 1 个粗糙峰实现接触,此时接触应力较小;当法向位移为 15 nm 时,粗糙表面接触应力和实际接触面积都明显增大。当最初接触时,粗糙表面实际接触面积约为 0.000 8 μm<sup>2</sup>(总面积为 4 μm<sup>2</sup>),当接触力增大到 100 μN (25 MPa)时,实际接触面积增大为 0.27 μm<sup>2</sup>。随着法向位移的增大,粗糙表面接触粗糙峰个数增加,有效接触面积增大。

图 6 表示实际接触面积与接触电阻间关系。随着接触力增大,实际接触粗糙峰个数不断增加,实际接触面积增大,接触电阻不断减少。当接触力达到一定值后接触面积变化减慢,接触电阻变化趋于平缓。对于由此产生的互调电流的量级国内外文献均未查到,需要进行试验进一步探索。

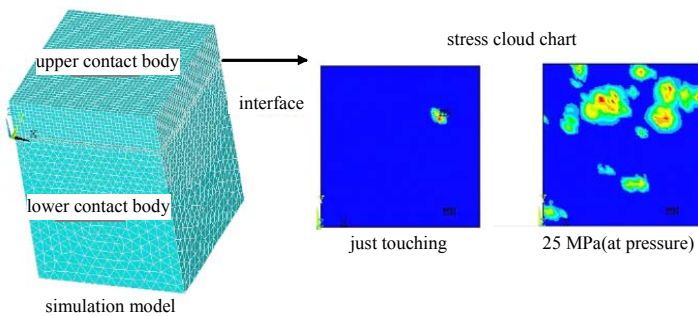


Fig.5 Diagram of contact area varying with pressure  
图 5 接触面积随压力变化图

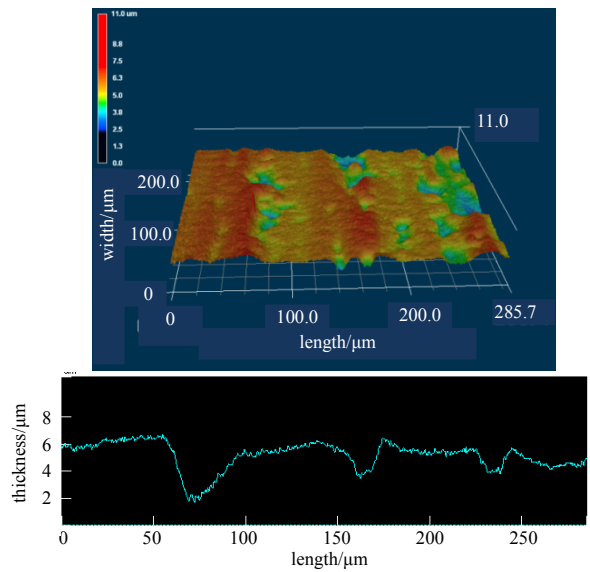


Fig.4 Three-dimensional image and 2D contour curve of surface morphology of silver-plated parts of aluminum alloy  
图 4 铝合金镀银部件表面形貌的三维图像和二维轮廓曲线图

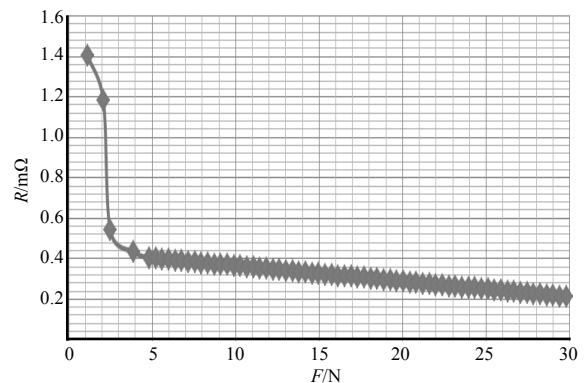


Fig.6 Pressure vs. contact resistance  
图 6 压力与接触电阻关系曲线

在高低温温变过程中,接触状态有粘着接触、滑动接触、未接触等多种状态,各种状态也无法保持稳态,多种变化的状态导致了接触电阻的变化,电压、电流也随之变化。无源部件的电压-电流的非线性由此产生,分析如下:

非线性电流  $I$  和接触结构压降  $U$  之间的非线性关系,一般可采用式(2)表示:

$$I = I_0(e^{U/U_T} - 1) \tag{2}$$

为能够进行 PIM 分析,将式(2)的非线性关系进行幂级数展开,如式(3)所示:

$$I = C_1U + C_2U^2 + C_3U^3 + \dots \tag{3}$$

式中  $C_i$  为特定系统的非线性强弱程度。该幂级数能够描述微波部件接触结构的电压-电流非线性关系,因此求得各阶谐波分量的系数也就充分掌握了系统的特性,从中也就知道 PIM 产物的情况。

对于 2 个激励信号的情形,可表示为如式(4)所示:

$$U = U_1\cos(\omega_1t) + U_2\cos(\omega_2t) \tag{4}$$

将式(4)代入(3),经过整理可得式(5)。

在  $2f_1-f_2$  频率点的三阶互调产物为:

$$I_{\text{pim3}} = \frac{3}{4}C_3U_1^2U_2 + \frac{5}{4}C_5U_1^4U_2 + \frac{15}{8}C_5U_1^2U_2^3 + \frac{105}{64}C_7U_1^6U_2 + \frac{105}{16}C_7U_1^4U_2^3 + \frac{195}{32}C_7U_1^2U_2^5 + \dots \tag{5}$$

从上述机理分析可以看出，当工作环境温度变化时，大功率馈源类产品低 PIM 引起结构热应力，导致局部接触压强的变化，压强变化引起电压、电流随之变化，电压-电流表现出非线性，从而产生 PIM 异常跳动。

对金属法兰的研究表明，一般情况下，偶数次交调分量低于邻近奇数次交调分量约 20 dB，因此在实际预算时，主要关心奇数阶的交调分量。另一方面，阶数每提高一奇数阶，交调产物约降低 24 dB，因此，最终关心的是最低奇数阶的交调产物分量，同时可得，4 阶的 PIM 电平与 7 阶的 PIM 电平相当。这种规律对所有的接触非线性都适用，测试 Hybrid 卫星有效载荷的 PIM 性能，测试显示 PIM 阶数每增加一级，PIM 电平降低 24~26 dB。故最低奇数阶 3 阶交调产物分量的抑制是重点和难点。

### 3 大功率馈源类产品低 PIM 扼流法兰原理及仿真分析

低 PIM 法兰扼流法兰结构，在馈源法兰连接时，因为工艺问题，如果直接连接而不是理想的圆滑连接，会出现高次模和电流损耗现象。为了避免这个问题，可以依据 1/4 波长线的变换原理，使得另外一端开路的线在波导接头这边实现短路，即利用空气实现射频的短路。图 7 为不同的法兰结构形式。

对某型号天线中 3 阶 PIM 问题进行分析以及交调频率统计，发现 3 阶 PIM 主要集中在以下频段内频率的交调： $f_{d1}=11.450:0.005:11.750$  与  $f_{d2}=12.600:0.005:12.750$ 。其中  $f_{d2}=12.600:0.005:12.750$  的相对带宽约为 1.2%，该频段较窄，具有通过采用扼流结构进行连接面电流抑制进而降低 PIM 产物的可能。

通过抑制连接面处产生 3 阶交调频率的传导电流，达到抑制 PIM 产物的目的。对于其他非 3 阶频率点的交调性能，则通过传统的增强法兰压强的方式来改善。Choke/Plain 型连接中保证法兰连接面的接触压力能提供当前产品现有 PIM 性能(4 阶及以上应用)，而其中的扼流环将降低法兰连接面的传导电流(主要针对 3 阶交调频率激励下的传导电流抑制)，进而达到进一步抑制 PIM 产物的目的。

通过试验验证对 3 阶 PIM 产物的抑制作用。图 8 中，在法兰连接点为冷点(Cold Point)，其磁场(对应于电流)强度(约  $4.71 \times 10^{-2}$  A/m)较波导口一红点(约 7.28 A/m)弱约 43 dB，达到了对连接面电流的抑制作用。

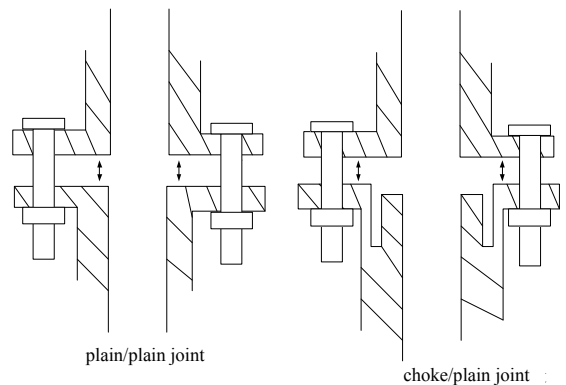


Fig.7 Common flange connection and choke flange connection  
图 7 普通法兰连接与扼流法兰连接

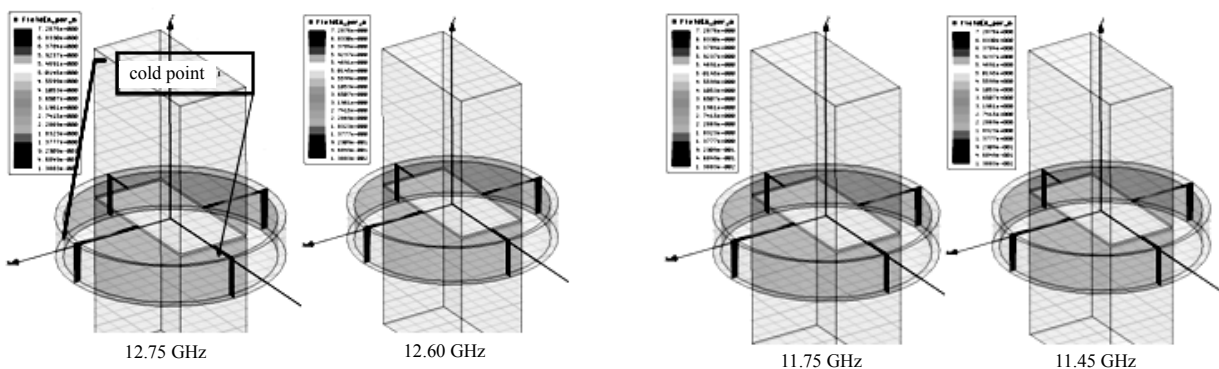


Fig.8 Distribution of magnetic field in choke ring  
图 8 扼流环中磁场分布

采用扼流法兰设计某型号大功率馈源类产品各法兰连接，见图 9，结合工作频率及带宽，反复优化扼流槽半径及槽深尺寸(表 1)，经过仿真比对，开发定量扼流槽尺寸软件，使法兰金属连接点的磁场强度小于波导口磁场强度 40 dB 以上，达到了对连接面产生 3 阶频率的交调频率传导电流的抑制作用。同时优化大功率馈源类产品各法兰增压带尺寸及对应接触面积，通过个人开发定量化压紧验证软件，保证接触面压强大于 69 MPa，达到较高的设计要求。

表 1 扼流槽尺寸  
Table1 Size of choke groove

screw specifications	screw material	torque range / (N·m)	analysis torque / (N·m)	number of screws	equivalent coefficient	preload /N	contact area /mm <sup>2</sup>	pressure /MPa	pressure verification
M2	8.8 grade steel	0.29-0.31	0.3	8	0.2	6 000	80	75	PIM passing verification
M4	8.8 grade steel	2.5-2.9	1.3	6	0.2	9 750	695	14.03	PIM passing verification
M2.5	titanium alloy	0.6-0.8	0.7	8	0.2	11 200	695	16.12	please perfect

#### 4 大功率馈源类产品低 PIM 扼流法兰应用情况及国外对标情况

通过对某卫星天线大功率馈源 3 阶 PIM 结构设计,采用扼流法兰,通过抑制连接面处产生 3 阶交调频率的传导电流来达到抑制 PIM 产物的目的。对于其他非 3 阶频率点的交调性能则通过传统的增强法兰压强的方式来改善。通过试验验证,3 阶 PIM 测试性能达到-135 dBm 以下,优于国外同类产品(德国 Astrium 公司)。如表 2 所示。

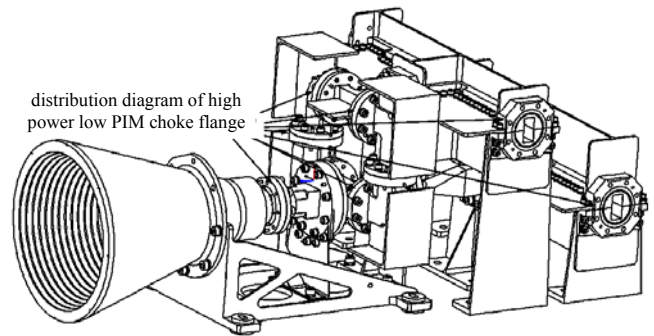

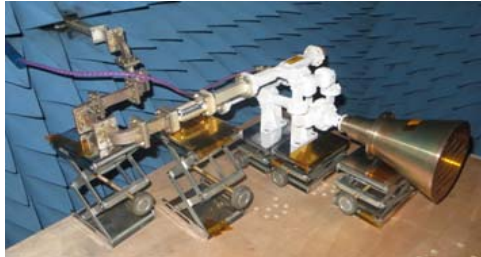


Fig.9 Low PIM model of choke flange of feed source assembly  
图 9 馈源组件扼流法兰低 PIM 模型

表 2 国外同类产品对标情况  
Table2 Alignment of similar foreign products

	Astrium, Germany	tackling key products	comparative advantage
structural style			high efficiency, good economy and light weight of cutting products
structural characteristics 3rd order PIM	high pressure flange, OMT overall processing <-135 dBm@2×110 W	choke flange, sectioning -138.3 dBm@2×130 W	

#### 5 结论

本文提出一种大功率馈源产品扼流法兰结构设计及形式,实现了低 PIM 目标。通过仿真和试验结果显示,利用扼流法兰可降低 PIM 值 40 dB 以上,而对于其他非三阶频率点的交调性能则通过传统的增强法兰压强的方式来改善,说明了设计的可行性。另该结构已应用于星上产品,并与国外产品比较,前景广阔并具有重要应用意义和价值。

#### 参考文献:

[ 1 ] RAMO S,WHINNERY J R,DUZER T V. Fields and waves in communication electronics[M]. New York:John Wiley & Sons, 1994.

[ 2 ] 康行健. 天线原理与设计[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1993. (KANG Xingjian. Antenna principle and design[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 1993.)

[ 3 ] SANGSTER A J,WANG H. An entire domain analysis of a horizontally polarized omnidirectional antenna array[C]// 1994 Second International Conference on Computation in Electromagnetics. London,UK:IET,1994:343-346.

[ 4 ] 王建实. 波导与同轴连接器数据手册[M]. 北京:中国标准出版社, 2001. (WANG Jianshi. Data manual of waveguide and coaxial connector[M]. Beijing:China Standard Press, 2001.)

[ 5 ] 周希朗. 电磁场理论与微波技术基础[M]. 2 版. 南京:东南大学出版社, 2010. (ZHOU Xilang. Fundamentals of electromagnetic field theory and microwave technology[M]. 2nd ed. Nanjing,China:Southeast University Press, 2010.)

- [6] 谢平,廖勇,徐刚. TEM喇叭天线设计与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):68-71. (XIE Ping,LIAO Yong, XU Gang. Design and experiment of TEM horn antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2016, 14(1):68-71.)
- [7] 邱成梯,赵焯旻,蒋全兴,等. 电子设备结构设计原理[M]. 南京:东南大学出版社, 2001. (QIU Chengti,ZHAO Dunshu, JIANG Quanxing,et al. Design principle of electronic equipment structure[M]. Nanjing,China:Southeast University Press, 2001.)
- [8] 许本文,焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1998. (XU Benwen,JIAO Qunying. Fundamentals of mechanical vibration and modal analysis[M]. Beijing:China Machine Press, 1998.)

---

(上接第 619 页)

- [9] YU T,WANG X,JIN J. Cloud-orchestrated physical topology discovery of large-scale iot systems using UAVs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018,14(5):2261-2270.
- [10] YAN X,SONG A,YANG Z. An improved multihop-based localization algorithm for wireless sensor network using learning approach[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015,48(8):247-257.
- [11] CHAGAS S H,MARTINS J B. An approach to localization scheme of wireless sensor networks based on artificial neural networks and genetic algorithms[C]// 10th IEEE International NEWCAS Conference. Montreal,Canada:IEEE, 2012: 137-140.
- [12] HUANG G B,ZHU Q Y,SIEW C K. Extreme learning machine:theory and applications[J]. Neuro Computing, 2016,70(1): 489-501.
- [13] XU Y,LUO X,WANG W. Efficient DV-hop localization for wireless cyber-physical social sensing system:a correntropy-based neural network learning scheme[J]. Sensors, 2017,17(12):135-142.
- [14] SO C I,PERMPOL S,RUJIRAKUL K. Soft computing-based localizations in wireless sensor networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2016,29(8):17-37.
- [15] 邓万宇,郑庆华,陈琳,等. 神经网络极速学习方法研究[J]. 计算机学报, 2010,33(2):279-287. (DENG Wanyu,ZHENG Qinghua,CHEN Lin,et al. Research on extreme learning of neural networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2010,33(2): 279-287.)