



## Ku 波段高效率功率可调空间行波管研制

曹林林<sup>1,2</sup>, 肖 刘<sup>1\*</sup>, 尚新文<sup>1</sup>, 李延威<sup>1</sup>, 易红霞<sup>1</sup>, 李 飞<sup>1</sup>,  
王自成<sup>1</sup>, 李 实<sup>1</sup>, 李 宁<sup>1</sup>, 黄明光<sup>1</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 海淀区 100094; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 怀柔区 101408)

**【摘要】** 伴随着卫星通信系统对可变且高效载荷的需求, 空间行波管放大器将加速由单机专用模式向功率可调多任务模式发展。为解决功率可调空间行波管在不同输出功率条件下保持高效率的设计难点, 针对某 Ku 波段螺旋线辐射型空间行波管开展了功率可调高效率的研究。通过设计提高行波管在不同阳极电压下的电子效率、收集极效率和电子流通率, 使 Ku 波段行波管在 500 MHz 工作带宽内连续波输出功率大于 150 W, 总效率大于 68%, 输出功率回退 3 dB 时整管效率大于 60%。

**关键词** 高效率; Ku 波段; 功率可调; 辐射; 行波管

中图分类号 TN124 文献标志码 A doi:10.12178/1001-0548.2021012

## Development of Ku-Band High Efficiency Power Flexible Space Traveling Wave Tube

CAO Lin-lin<sup>1,2</sup>, XIAO Liu<sup>1\*</sup>, SHANG Xin-wen<sup>1</sup>, LI Yan-wei<sup>1</sup>, YI Hong-xia<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1</sup>,  
WANG Zi-cheng<sup>1</sup>, LI Shi<sup>1</sup>, LI Ning<sup>1</sup>, and HUANG Ming-guang<sup>1</sup>

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100094;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences Huairou Beijing 101408)

**Abstract** With the demand of satellite communication system for variable and efficient payloads, space traveling-wave tube (TWT) amplifier will be accelerated from single dedicated mode to power flexible multi-tasking mode. In order to solve the design difficulties of high efficiency power flexible space TWT under different output power conditions, a Ku-band helix radiation cooled space TWT has been studied. By improving the electron efficiency, collector efficiency and electron transmission rate under different anode voltages, in the 500 MHz bandwidth, the Ku-band TWT can generate continuous-wave output power over 150W and the overall efficiency greater than 68%. And the overall efficiency of the TWT is more than 60% when the output power back-off 3dB.

**Key words** high efficiency; Ku-band; power flexible; radiation cooled; traveling-wave tube

空间行波管作为通信卫星使用量最大的单机, 一般根据卫星通信系统的某一需求进行专项设计, 并在运行过程中保持同一工作模式。随着多媒体和高清晰度电视广播对通信流量需求的迅猛增长, 如果仍然采用由小波束组成的多波束有效载荷来增加流量和数据率, 并且对每个波束进行带宽和功率的均匀分配, 就会出现在热点地区能力不足和冷点地区浪费的问题<sup>[1]</sup>。功率可调空间行波管放大器与自适应编码调制技术相接合, 可以对不同波束灵活地分配功率和带宽。功率可调行波管与普通行波管相比, 其最大的特点是可以在不同功率电平下仍然工

作在饱和状态, 且整管效率可以保持在较高的水平<sup>[2]</sup>。功率可调空间行波管作为一个可变且高效的载荷, 能够极大地提升卫星制造、调试和运营的灵活性<sup>[2-3]</sup>。

早在本世纪初, 国外空间行波管制造厂商就开启了功率可调行波管的研制工作。法国 THALES 公司在 2003 年研制出了输出功率 90~140 W 可调的行波管<sup>[4]</sup>; 2009 年文献 [5] 报道了应用于微波功率模块的 Ku 波段功率可调行波管, 实现了输出功率 75~150 W 可调, 输出功率为 75 W 时的效率大于 65%, 最大相移小于 55°; 文献 [6] 在 2013 年实

收稿日期: 2021-01-10; 修回日期: 2021-03-11

作者简介: 曹林林 (1983-), 男, 博士生, 主要从事空间行波管高效率技术方面的研究。

通信作者: 肖刘, E-mail: xiao19992001@163.com

现了双管可调行波管放大器应用于卫星通信；2018年文献[7]报道了Q波段空间行波管THL40040C的性能，其能够在不同发射电流下实现输出功率20~40 W可调；文献[8]在此研究基础上进一步提升性能，实现了在37.5~42.5 GHz工作频带内，输出功率35~70 W功率可调，输出功率为70 W时的效率大于50%；德国TESAT公司研制出了在轨功率可调微波功率模块<sup>[9]</sup>；美国L-3公司的9100H型K波段空间行波管饱和输出功率回退4 dB，行波管放大器效率仅下降7%<sup>[10]</sup>；9110HxR型空间行波管饱和输出功率大于170 W，效率大于64%，输出功率回退3 dB能够在-20℃~86℃温度区间内稳定工作<sup>[11]</sup>。与国外厂商相比，国内对功率可调空间行波管的研究相对滞后。2020年，中国电子科技集团公司第十二研究所报道了Ka波段功率可调空间行波管的设计研制工作，实现了在1 GHz工作带宽内50~100 W功率可调，饱和效率大于61%，输出功率回退3 dB时效率大于54%<sup>[12]</sup>。

高通量卫星平台中空间行波管的用量大幅增加，行波管的功耗、热耗是平台设计的重要因素。Ku波段空间行波管作为广播通信和数据传输卫星载荷的关键部件，根据应用需求不同调整功率量级，并提高功率回退效率，降低平台热负荷具有十分重要的工程应用价值<sup>[13-17]</sup>。本文以Ku波段150 W空间行波管为研究对象，对其开展功率可调、高效率的研究。

## 1 理论分析

行波管输出功率调节可以通过两种方式实现：

1) 改变输入功率；2) 改变阴极发射电流。方式1)简单易实现，但是行波管的效率下降明显。与方式1)相比，方式2)不但可以使阴极电流密度降低，阴极寿命得到提升，而且行波管的热耗会变小，有效地减小行波管的散热压力。

行波管的效率可以近似地表示为<sup>[18]</sup>：

$$\eta_{\text{total}} = \frac{T_{\text{RF}}\eta_e}{1 - \eta_c(1 - \eta_e)T_{\text{beam}}} \quad (1)$$

式中， $\eta_{\text{total}}$ 表示行波管整管效率； $\eta_e$ 表示电子效率； $\eta_c$ 表示收集极效率； $T_{\text{beam}}$ 表示电子流通率； $T_{\text{RF}}$ 代表输能系统匹配。

由上式可知，行波管效率与上述参数有关，设计中优化提升各参数，使每个参数都达到最佳状态，实现效率最大化。功率可调行波管由于阴极发射电流发生改变，工作状态也会随之变化。但是电

流变化前后的整管结构保持不变，即电子枪、慢波结构、聚焦磁系统和收集极没有变化。因此设计过程中需要重点考虑以下几方面问题：首先，调节阳极电压改变阴极发射总电流大小，电子注的注腰半径和注腰位置也会随之变化。行波管如何在不同阳极电压下，保持高的电子流通率是实现行波管高效稳定工作的关键问题之一。其次，由于填充比减小，互作用能力下降，在高频系统设计时除了考虑电子注的互作用效率外，还需要平衡功率回退前后的电子注性能。最后，由于功率回退后电子注相互作用后分布状态的不同，如何综合考虑收集极的结构和电场分布也是设计的关键问题。

Ku波段辐冷型空间行波管主要技术指标如表1所示。

表1 主要技术指标

指标	指标值
工作带宽/MHz	500
输出功率/W	≥150
效率/%	≥68
输出功率可调能力/dB	-3~0
输出功率回退3 dB效率/%	≥60
饱和增益/dB	≥50
功率回退3 dB饱和增益/dB	≥40
相移/°	≤45
散热方式	辐冷型

根据行波管主要技术指标要求，合理规划分配设计参数。开展研究不同阳极电压下高性能电子注成型、传输设计；变电流的高效率互作用分布设计以及较大冗余范围的高效率多级降压收集极设计。

## 2 设计方案

### 2.1 电子枪

电子枪作为行波管的核心部件，主要功能是产生一个具有行波管所需尺寸和电流的电子束，使之与电磁场交换能量实现信号放大<sup>[19]</sup>。降低阳极电压减小阴极发射电流，实现行波管输出功率回退3 dB工作的同时，电子注的注半径和注腰位置也会随之变化。然而行波管的结构未发生变化，周期磁聚焦系统也不会因为阳极电压的变化而发生变化。本设计采用双阳极电子枪结构，合理设计电子枪的阴极、聚焦极、阳极以及离子阱的结构，使阴极发射电流变化前后的电子注半径大小以及注腰位置能适应同一套磁聚焦系统，且电子注波动较小。

由于电子枪结构未变化，所以导流系数也不

变。根据导流系数 $P_\mu$ 计算公式:

$$P_\mu = I_0/U_a^{3/2} \times 10^6 \quad (2)$$

式中,  $I_0$  为电子注电流, 单位为 A;  $U_a$  为阳极电压, 单位为 V。根据高频互作用仿真计算结果, 输出功率回退 3 dB 后所需的阴极发射电流与输出功率回退前相比下降了约 39%, 即  $I_{\text{回退后}} = I_{\text{回退前}} \times 61\%$ 。由式 (2) 计算可得到输出功率回退 3dB 时的阳极电压  $U_{\text{回退后}} \approx U_{\text{回退前}} \times 72\%$ 。回退后的阳极电压比回退前的阳极电压降低了约 28%。

电子枪过渡区磁场采用周期聚焦磁场, 为了获得较小的电子注波动, 磁场第一个峰值的位置一般设在电子注注腰位置附近, 因此在设计电子枪时要确保阴极发射电流变化前后的电子注注腰位置变化很小。由于磁系统未变, 所以电流变化前后的布里渊磁感应强度  $B_b$  不改变,  $B_b$ (高斯) 计算公式如下:

$$B_b = 833I_0^{1/2}/(r_0U_0^{1/4}) \quad (3)$$

式中,  $I_0$  为电子注电流;  $r_0$  为电子注半径, 单位为 cm;  $U_0$  为电子注电压。由于功率回退前后仅通过改变阳极电压改变了电子注电流大小, 而磁场和工作电压未发生变化, 所以根据式 (3) 可推导出: 功率回退后的电子注注腰半径减小约 22%。

利用 MTSS<sup>[20]</sup> 对电子枪进行建模, 分别针对电子枪的阴极、聚焦极、阳极以及离子阱的结构进行优化设计。电子枪在不同输出功率状态下的仿真结果如图 1 和表 2 所示。由表 2 可以看出, 阳极电压  $U_a$  降低 28%, 阴极发射电流  $I_K$  下降 39%, 电子注注腰半径  $r$  减小 24%, 注腰位置  $L$  基本不变。

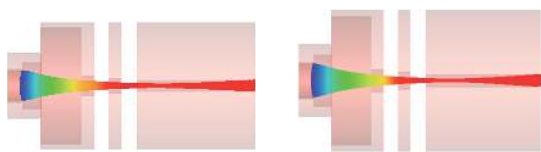


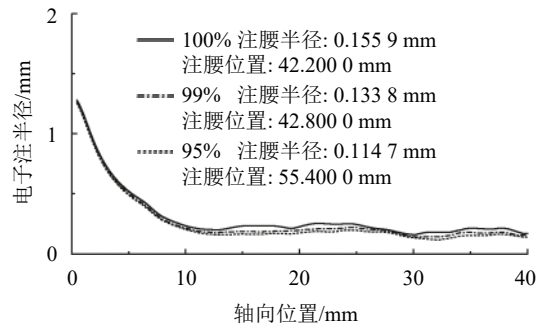
图 1 不同输出功率状态下的电子注轨迹仿真结果

表 2 电子枪仿真结果

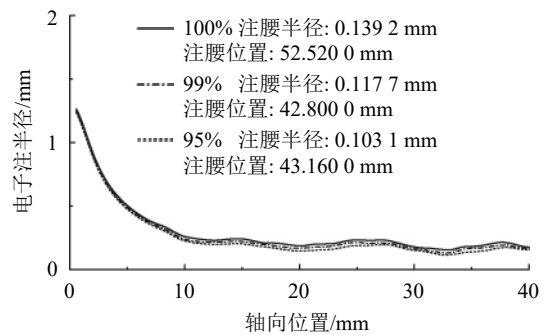
输出功率/W	阳极电压/V	发射电流/mA	注腰半径/mm	注腰位置/mm
>150	$U_a$	$I_K$	$r$	$L$
>75	$U_a \times 72\%$	$I_K \times 61\%$	$r \times 76\%$	$L \times 97\%$

综合考虑不同阳极电压下的电子注状态, 优化设计电子枪过渡区磁场, 使不同电压下电子注都能满足互作用要求。利用 MTSS 对加载过渡区磁场后的电子枪模型进行三维仿真计算, 阴极发射电流变

化前后的电子注包络仿真结果如图 2 所示。可以看出, 阴极发射电流变化前后的电子注波动较小, 满足设计要求。



a. 150 W 状态电子注包络图



b. 75 W 状态电子注包络图

图 2 加载磁场后不同发射电流的电子注包络仿真结果

## 2.2 慢波系统

空间行波管在具有大功率、高效率、高增益的同时, 也须具备较高的线性度以满足卫星系统的要求。阳极电压变化会产生不同电流状态的群聚过程, 高频互作用设计不仅要保证在不同电流状态下的输出功率、电子效率、增益以及相移等满足技术指标要求, 同时也须考虑互作用后到达收集极入口处的电子能量分布状态, 使收集极效率在功率回退前后依然保持很高的水平。

根据行波管的工作原理可知, 电子注与波需要保持长期的同步, 进行有效的正向能量交换, 从而达到提高电子效率的目的。保持注-波同步的方法主要有两种: 1) 使行波的相速逐渐变慢, 也就是相速渐变; 2) 提高电子注电压, 促使电子注的速度增大, 也称为电压跳变。本设计方案采用负渐变动态相速渐变螺距分布, 对螺旋线的螺距跳变/渐变位置和幅度进行有目的的选择, 使得电子与电磁波充分互作用, 在提高电子效率的同时, 也改善了输出功率与输入功率之间的线性特性。归一化螺距分布图如图 3 所示。



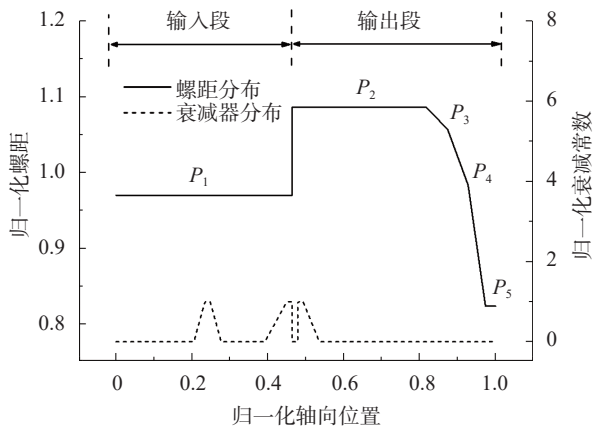


图 3 归一化螺距分布图

输入段采用均匀螺距  $P_1$ , 实现一个群聚良好的电子注, 建立一个增益不小于 20 dB 的增长波; 在输出段开始部分仍然采用均匀螺距, 增大此段螺距  $P_2$  可以对相位进行补偿, 但是增大到一定数值以后电子效率会急速下降, 设计时需要均衡考虑电子效率和相位补偿。输出段后半段螺距  $P_3$ 、 $P_4$  及  $P_5$  渐变减小, 相速降低保持注-波同步, 使群聚电子能够最大程度地将能量交给高频场。螺距  $P_5$  对收集极最大可回收效率有影响, 设定螺距时需要均衡考虑电子效率和最大可回收效率, 实现整管效率最大化。

当行波管输入信号为  $A\cos(\omega_0 t)$ , 则输出信号为  $G A\cos(\omega_0 t + \varphi)$ ,  $\varphi$  即信号放大后的相移:

$$\varphi = \beta_e L(1 - Cy) \quad (4)$$

式中,  $\beta_e$  为电子速度为  $v$  的波的传播常数,  $\beta_e = \omega/v$ ;  $L$  是行波管的长度;  $C$  为皮尔斯增益参量,  $C = (K_c I_0 / 4U_0)^{1/3}$ ;  $y$  为式 (4) 解方程的虚部。由于同步电压  $U_0$  不变, 改变阳极电压调节阴极发射电流  $I_0$  会导致皮尔斯增益参量  $C$  变化, 从而导致相移也随着阴极发射电流变化。为了抑制返波振荡和反射振荡, 在输入端设置两段衰减器, 通过调节衰减器长度和衰减量, 确保行波管稳定工作<sup>[21]</sup>。利用 MTSS 螺旋线行波管模拟软件对注波相互作用结构进行模拟仿真, 阴极发射电流变化前后仿真设计对比结果如图 4 所示。

由图 4 的仿真结果所示, 在工作频带内行波管饱和输出功率  $\geq 176.4$  W, 电子效率  $\geq 39.95\%$ , 增益  $\geq 61.33$  dB; 输出功率回退 3 dB 时, 电子效率  $\geq 30.82\%$ , 增益  $\geq 46.18$  dB。

Ku 波段行波管在中心频率点的相移与 AM/PM 仿真结果如图 5 所示, 仿真结果显示输出功率 150W

时的相移  $\leq 37.83^\circ$ , 辐相转换系数  $\leq 3.72^\circ/\text{dB}$ ; 输出功率回退 3 dB 后的相移  $\leq 32.36^\circ$ , 辐相转换系数  $\leq 2.77^\circ/\text{dB}$ , 设计冗余量满足技术指标要求。

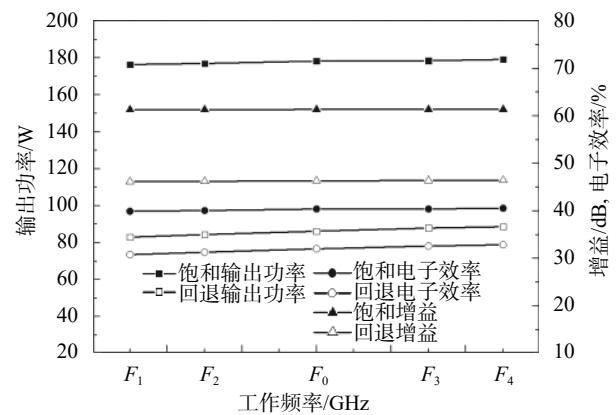


图 4 输出功率、电子效率和增益仿真对比图

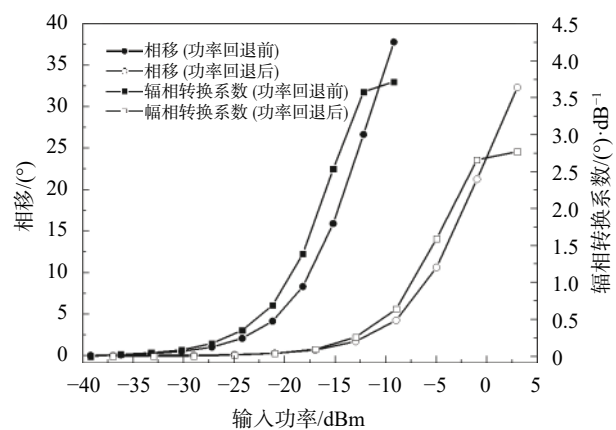


图 5 输出功率回退前后中心频点相移和辐相转换系数仿真结果

根据收集极入口处的电子能量分布, 采用四级降压收集极结构, 输出功率 150 W 状态下的收集极最大可回收效率为 90.21%, 功率回退后的收集极最大可回收效率为 91.78%, 回退前后收集极最大可回收效率相差不大, 通过合理设计收集极电极结构和电位分布, 可以获得较高的回收效率。

### 2.3 收集极

收集极要尽可能多地回收相互作用后的电子能量, 避免这部分能量全部以热能的形式损耗掉。电子注在进入收集极之前的纵向速度是零散的, 特别是高电子效率的情况下, 相互作用后的电子速度零散更为严重, 如何最大限度地回收不同速度的电子, 使所有电子打到收集极电极上都得到充分的减速, 将电子能量转化为电势能回馈给电源系统是多级降压收集极设计的关键<sup>[13]</sup>。Ku 波段空间行波管采用非轴对称四级降压收集极<sup>[22]</sup>的设计方案, 通

过优化收集极各电极结构、极间距离及各级电压, 确保在输出功率回退 3 dB 后依然拥有较高的回收效率。同时对收集极铜电极表面进行离子溅射处理, 抑制收集极二次电子发射, 使得输出功率回退前后的回流电流也保持在较低的水平。

利用 MTSS 对收集极进行仿真优化, 输出功率回退前后的收集极效率仿真结果如图 6 所示, 仿真结果显示饱和状态下的收集极效率  $\geq 77.31\%$ ; 功率回退后收集极效率  $\geq 77.12\%$ 。功率回退前后收集极效率基本保持不变, 且维持在较高的回收效率水平, 满足设计指标要求。

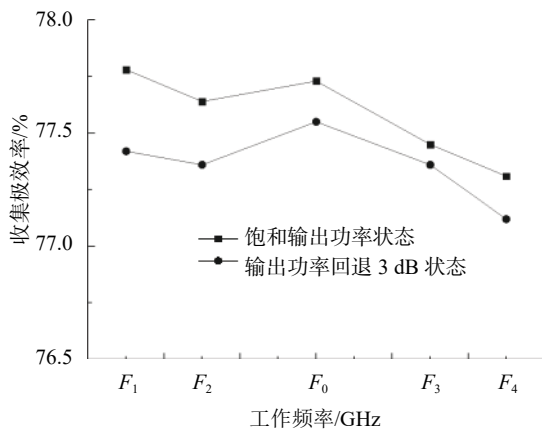


图 6 输出功率回退前后收集极效率对比

### 3 测试结果

根据以上设计方案完成了 Ku 波段辐冷型空间行波管研制, 整管实物图如图 7 所示。

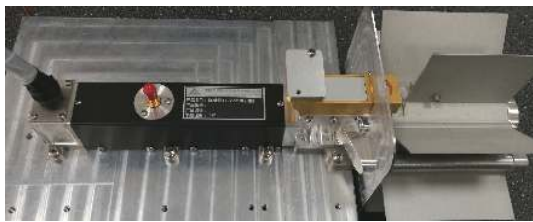


图 7 Ku 波段 150 W 辐冷型空间行波管

经测试, 行波管在整个工作频带范围内的输出功率、效率和增益测试结果曲线如图 8 所示。从测试结果可以看出, Ku 波段空间行波管在工作频带内, 连续波最大饱和输出功率为 158 W, 最大总效率为 70.18%, 最大饱和增益为 60.29 dB; 输出功率回退 3 dB 时, 最大总效率为 63.05%, 最大增益为 46.01 dB。

Ku 波段空间行波管主要技术指标的测试结果如表 3 所示。Ku 波段空间行波管在 500 MHz 的工

作频带内螺旋线电流不超过 0.93 mA; 相移  $\leq 44.6^\circ$ ; 群时延波动  $\leq 0.467$  ns, 行波管在具备高效率的同时, 具有良好的副特性。整管结构设计在保证可靠性的同时, 进行了轻量化优化设计, 整管重量不超过 1 kg, 满足卫星系统使用要求。

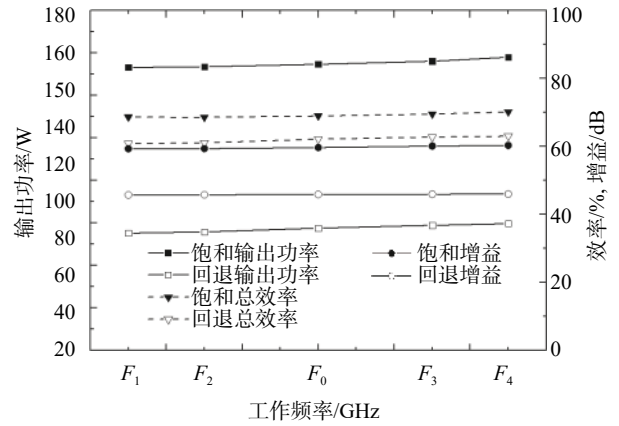


图 8 Ku 波段空间行波管输出功率、效率和增益测试结果

表 3 Ku 波段空间行波管主要测试结果

测试参数	测试结果
工作带宽/ MHz	500
输出功率/ W	$\geq 153.2$
效率/%	$\geq 68.60$
输出功率可调能力/ dB	-3~0
输出功率回退 3 dB 时效率/%	$\geq 60.85$
饱和增益/ dB	$\geq 59.35$
回退 3 dB 饱和增益/ dB	$\geq 45.76$
螺旋线电流/ mA	$\leq 0.93$
相移/ (°)	$\leq 44.6$
群时延波动/ ns	$\leq 0.467$
重量/ kg	<1
散热方式	辐冷

输出功率回退前后的电子效率、收集极效率仿真结果与实测值的对比分别如图 9 和图 10 所示。由图中所示结果可知: 在工作频带内, 实测输出功率 150 W 状态下的电子效率  $\geq 33.48\%$ , 收集极效率  $\geq 77.76\%$ ; 输出功率回退 3 dB 后的电子效率  $\geq 27.11\%$ , 收集极效率  $\geq 76.98\%$ 。由于在仿真过程中, 忽略了线路损耗和其他损耗, 输能驻波比按照理想状态设置, 导致电子效率仿真结果偏高。收集极入口处的电子分布状态仿真结果与实际情况存在差别, 致使收集极效率仿真结果与实测值有一定的偏差。加之行波管零、部组件加工误差, 整管装配焊接等工艺误差的影响, 加大了仿真结果与实测结果的偏差。整管测试结果满足技术指标要求, 研制

方案具有可行性。

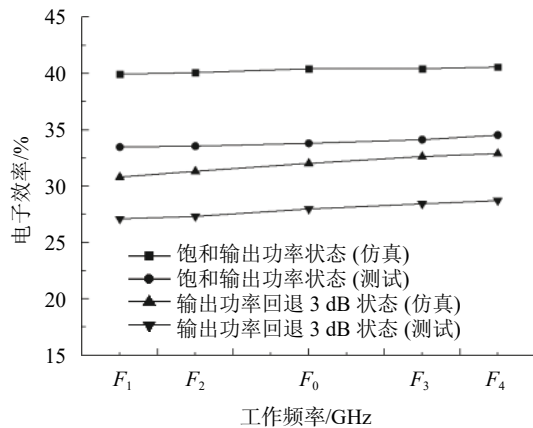


图9 电子效率仿真结果与实测结果对比

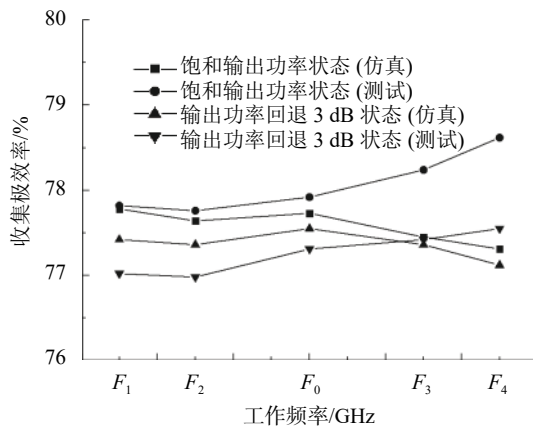


图10 收集极效率仿真结果与实测结果对比

## 4 结束语

根据卫星通信系统对功率可调空间行波管的使用需求, 具体分析了行波管功率回退设计中存在的难点, 提出了一种 Ku 波段高效率功率可调空间行波管的设计方案, 根据设计方案研制出样管并进行了测试。测试结果显示行波管在工作频带内, 饱和输出功率  $\geq 153.2$  W, 总效率  $\geq 68.60\%$ , 当输出功率回退 3 dB 时, 总效率  $\geq 60.85\%$ 。Ku 波段功率可调高效率空间行波管的成功研制, 对于其他波段行波管开展功率可调高效率技术的研究, 具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 李卓成. 国外空间行波管放大器现状与发展[J]. 空间电子技术, 2012, 9(4): 28-34.  
LI Zhuo-cheng. The current status and development trend of space travelling wave tube amplifier[J]. Space Electronic Technology, 2012, 9(4): 28-34.
- [2] 李卓成. 可调空间行波管放大器发展综述[J]. 空间电子技

术, 2014, 11(3): 7-11.

LI Zhuo-cheng. The progress summary of space flexible travelling wave tube amplifier[J]. Space Electronic Technology, 2014, 11(3): 7-11.

- [3] 周斌, 黄伟波, 贺彬, 等. 行波管放大器在通信、导航卫星中的应用[C]//中国电子学会真空电子学分会第二十届学术年会论文集. 厦门: 中国电子学会真空电子学分会, 2016: 11-16.  
ZHOU Bin, HUANG Wei-bo, HE Bin, et al. Application of TWT amplifier in communication and navigation satellite[C]//The 20th Annual Conference of Vacuum Electronics Branch of Chinese Electronic Society. Xiamen: Vacuum Electronics Branch of Chinese Electronic Society, 2016: 11-16.
- [4] ANDRE F, PASDELOUP R, ROTHACKER H P, et al. Flexible TWT amplifier for space applications[C]//2003 International Vacuum Electronics Conference. Seoul: IEEE, 2003: 48-50.
- [5] BOONE P, FOURNIER J, PERREL M, et al. Advanced flexible Ku band MPM ARTES 3[C]//2009 International Vacuum Electronics Conference. [s.l.]: IEEE, 2009: 1-2.
- [6] ETIENNE C, EMILE T, JEAN M, et al. Very high efficiency dual flexible TWTA, a flexible concept allowing to deal with performances and schedule constraints of telecommunication payloads[C]//2013 International Vacuum Electronics Conference. Paris: IEEE, 2013: 1-2.
- [7] BARSOTTI T, GASTAUD J, PONTIC J, et al. 40W Q wideband space TWT[C]//2018 International Vacuum Electronics Conference. Monterey: IEEE, 2018: 15-16.
- [8] ANDRE F, DEMORY J, GASTAUD J, et al. 80 to 100 Watts TWT in Q-band for space downlink communication[C]// 2019 International Vacuum Electronics Conference. Busan: IEEE, 2019: 1-2.
- [9] GUNTHER J. Improved flexibility by in-orbit-adjustable saturation output power of TWTs[C]//2009 International Vacuum Electronics Conference. Rome: IEEE, 2009: 1-2.
- [10] THOMAS K P, JOHN D M, WILLIAM L M, et al. Space traveling wave tube amplifiers with on-orbit flexible saturated output power[C]//2008 International Vacuum Electronics Conference. Monterey: IEEE, 2008: 177-178.
- [11] DAVID C E, WILLIAM L M. 170-W radiation-cooled, space K-band TWT[C]//2017 International Vacuum Electronics Conference. London: IEEE, 2017: 1-2.
- [12] 申鑫, 闫冠齐, 李泳铮, 等. Ka 波段功率可调空间行波管研制[J]. 真空电子技术, 2020, 1(4): 69-72.  
SHEN Xin, YAN Guan-qi, LI Yong-zheng, et al. Development of Ka-band power flexible space TWTs[J]. Vacuum Electronics, 2020, 1(4): 69-72.
- [13] 廖复疆. 真空电子技术: 信息化武器的核心[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
LIAO Fu-jiang. Vacuum electronics: The heart of an information-based weapon[M]. The 2nd Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [14] 郝才勇. Q/V 频段 NGSO 卫星通信进展[J]. 中国无线电, 2018, 1(8): 33-40.  
HAO Cai-yong. Development of Q/V-band non-geostationary orbit satellite communication[J]. China

- Radio, 2018, 1(8): 33-40.
- [15] 谢珊珊, 李博. 2019 年国外通信卫星发展综述[J]. 国际太空, 2020(2): 30-37.  
XIE Shan-shan, LI Bo. The progress summary of foreign communication satellite in 2019[J]. Space International, 2020(2): 30-37.
- [16] 庞立新, 李杰, 冯建元. 高通量通信卫星发展综述与思考[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(4): 371-376.  
PANG Li-xin, LI Jie, FENG Jian-yuan. Development of high throughput satellite: A survey and review[J]. Radio Communication Technology, 2020, 46(4): 371-376.
- [17] 刘洁, 李成方, 朱晓宇. 2019 年世界通信卫星产业发展分析[J]. 航天系统与技术, 2019, 1(10): 22-27.  
LIU Jie, LI Cheng-fang, ZHU Xiao-yu. Analysis on the development of world communication satellite industry in 2019[J]. Space System and Technology, 2019, 1(10): 22-27.
- [18] 瞿波, 冯进军, 梁晓峰, 等. Ka 波段行波管提高效率研究[J]. 真空电子技术, 2012, 1(2): 7-10.  
QU Bo, FENG Jin-jun, LIANG Xiao-feng, et al. The study of efficiency improvement in Ka-band TWT[J]. Vacuum Electronics, 2012, 1(2): 7-10.
- [19] 周蔚. 行波管电子枪动力学可靠性分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.  
ZHOU Xi. Dynamic reliability analysis of TWT electron gun[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.
- [20] HU Quan, ZHU Xiao-fang, HU Yu-lu, et al. Improvements of MTSS for simulation of millimeter and terahertz vacuum electronic devices[C]//2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu: IEEE, 2018: 1-3.
- [21] 王小宁, 苏小保, 肖刘. 大功率双频段毫米波螺旋线行波管抑制返波振荡的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(11): 1241-1246.  
WANG Xiao-ning, SU Xiao-bao, XIAO Liu. Suppression of backward-wave oscillation in high-power dual-band millimeter wave helix-traveling wave tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(11): 1241-1246.
- [22] MERCYLATHA A, GHOSH S K. An asymmetric highly efficient multistage depressed collector for space TWTs[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2016, 63(5): 2139-2144.

编辑 叶芳