DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2024.01.003

# 基于 3D 打印技术的微波开关设计与实践

#### 邱润锁,崔宗涛,李志鹏

(中国空间技术研究院西安分院,西安710000)

摘 要:文章介绍了一种基于3D 打印技术的 R 型波导开关的设计方法,并对影响微波开关性能指标的射频参数、切换时间进行了验证。验证结果表明,微波开关的射频指标无恶化,切换时间缩短,微波开关可靠性得到提升。通过3D 打印技术的应用,减轻开关重量17%以上,生产周期缩短60%以上。文章论述了微波开关射频指标、切换时间的设计过程和验证结果,解决了 X 频段 R 型波导开关切换时间长和重量大的不足,为波导微波开关制造提供了一种新的途径。

关键词:波导开关;设计仿真;3D 打印;减重 中图分类号:V443 文献标志码:A 文章编号:1674-7135(2024)01-0013-08

## Design and practice on application of 3D printing technology in microwave switch

QIU Runsuo, CUI Zongtao, LI Zhipeng (China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an, 710000)

Abstract: In this paper, a design method of R-type waveguide switch based on 3D printing technology is introduced. And the RF parameters and switching time which affect the performance of microwave switch are verified. The verification results show that the RF test results meet the requirements, the switching time is shortened, Hence, the reliability of the microwave switch is improved. Through the application of 3D printing technology, the weight of the switch is reduced by more than 17%. The production cycle is shortened by more than 60%. The design process and verification results are discussed in this paper. The shortcomings of long switching time and heavy weight of R-type waveguide switch in X-band are solved. A new way for manufacturing waveguide microwave switch is provided.

Key words: R-type waveguide switch; 3D printing; light weight

#### 0 引言

微波开关的主要功能是进行微波通道状态切换,在卫星有效载荷系统中,通常会对核心硬件设备通过微波开关的环备份,实现更多的连接状态。 当部分硬件设备发生故障时,通过微波开关的状态 切换,用系统中备份的硬件设备替代故障硬件设 备。尤其在转发器系统中的接收机、高功率放大器 等高失效率的产品使用微波开关进行备份,将大幅 提升系统的可靠性[1-5]。

随着我国航天型号任务的持续增长以及新的 卫星技术不断发展,卫星通信容量越来越高,微波 开关的需求数量持续增大。特别是高通量卫星技 术的快速发展,有效载荷数量巨大,单星数量高达 数百台甚至上千台,因此,对轻量化、小型化的微波 开关更加青睐。而对于 X 及以下频段波导开关,在 以下方面亟需提升:(1)重量重,需要轻量化产品;

基金项目:国家研发课题(编号:2022JCJQLB006)

收稿日期:2023-05-09; 修回日期:2023-08-25

引用格式:邱润锁,崔宗涛,李志鹏. 基于 3D 打印技术的微波开关设计与实践[J]. 空间电子技术,2024,21(1):13 – 20. QIU R S,CUI Z T,LI Z P. Design and practice on application of 3D printing technology in microwave switch[J]. Space Electronic Technology, 2024,21(1):13-20.

(2)系统转动惯量大导致开关切换时间长;(3)射频 部分加工工序繁多,生产周期长。就以上问题,基 于3D打印技术的应用,对微波开关的主要性能指 标,如射频参数、切换时间进行了设计仿真和实验 验证。结果表明:(1)射频指标满足要求;(2)切换 时间缩短;(3)微波开关的生产周期缩短;(4)产品 重量减轻;(5)为微波开关的制造提供了一种新的 途径。

### 1 R型波导微波开关的构成和工作 原理

R型波导微波开关的结构如图1所示,包含遥 控遥测部分、驱动部分、射频部分。其工作原理是 遥控遥测部分发出控制信号给驱动部分,驱动部分 带动射频部分运动到指定位置,达到射频信号在4 个不同端口之间的切换。R型波导微波开关的射频 部分结构如图2所示<sup>[6-7]</sup>,(a)是直通道导通状态 示意图,(b)是弯通道导通状态示意图。



图1 波导微波开关

Fig. 1 microwave waveguide switch



图 2 R 型波导微波开关射频部分

#### Fig. 2 The RF of R-type microwave waveguide switch

R型微波开关的射频部分由射频腔体和射频转 子组成,是开关的主要零部件,其结构如图3和图4 所示,材料为铝合金(2A12),结构复杂。传统制造 方法是通过机械加工完成,主要工序包含数控粗 铣,稳定化处理,数控精铣,电火花,慢走丝,精车, 钳等,工序繁多,需要约30天完成,生产周期长。

文章针对 BJ84 波导开关,结合 3D 打印工艺技 术特点和精度特性,仿真分析 3D 打印技术对微波 开关射频性能和切换时间的影响。



图 3 射频腔体(机械加工重量:164.3g) Fig. 3 RF cavity(Machined weight:164.3g)



图 4 射频转子(机械加工重量:56.0g) Fig. 4 RF rotor(Machined weight:56.0g)

#### 2 3D 打印技术特点

#### 2.1 开关 3D 打印零件技术方案

射频腔体、射频转子是实现微波开关射频传输 和切换功能的核心零件。采用 3D 打印技术制造, 需满足:(1)3D 打印产品的技术指标与机械加工产 品相当;(2)3D 打印产品的重量显著减小。

根据上述原则,结合机械加工微波开关的设计 方案,我们选用 AlSi10Mg 铝合金粉末为原料,采用 激光选区熔化(selective laser melting, SLM)工艺技 术对射频腔体和射频转子进行 3D 打印实验。

3D 打印设备主要技术参数如表 1 所列。3D 打 印零件完成后需要去应力退火,消除零件残存的内应 力,同时保证零件具有与机械加工零件相当的力学性 能,性能指标如表 2 所列。最后,对零件表面进行磨 粒流抛光,以达到与机械加工零件相当的表面质量。

从工艺设计开始到完成零件交付,用时约13

#### 天,相较机械加工生产周期明显缩短。

表1 3D 打印设备技术参数

Tab. 1 Technical parameters of 3D printing equipment

指标	主要参数
工艺类型	选区激光熔化(SLM)
设备型号	EOS M290
设备厂家	德国 EOS
最大成形尺寸	$250~\mathrm{mm}\times250~\mathrm{mm}\times325~\mathrm{mm}$
激光类型	单模连续光纤激光器
波长	$1070$ nm $\pm10$ nm
功率	400 W
光束质量	M2≤1.1
光纤芯径	14 μm
光纤插座类型	QBH
成形精度	$\pm 0.05 \text{ mm}$
粉末层厚	20 µm ~ 100 µm(可调)
扫描速度	7 m∕ s
最大功率	20 KW

#### 表 2 3D 打印材料强度 Tab. 2 Strength of 3D printing matericals

西日	井中田士	实测值	
坝日	项目	机械加工	3D 打印
$R_m$ /MPa	250 ~ 350	280	330
$R_p 0.2/MPa$	170 ~ 230	190	200
A/%	8~15	13	9
Z/%	8~15	13	9

#### 2.2 结构轻量化设计

3D 打印的射频腔体和射频转子内部采用空腔 晶格点阵结构<sup>[8]</sup>,如图 5 和图 6 所示。使用轻量化 设计软件 magics,经过"原始模型抽壳→壳体内部空 腔晶格点阵填充→壳体和点阵合并"的设计过程, 结合零件抗力学要求<sup>[9]</sup>,对空腔晶格的尺寸反复修 正,达到轻量化最优结果。3D 打印的射频腔体和射 频转子的理论重量分别是107.4g(减重至原模型的 66.6%)和44.0g(减重至原模型的78.5%)。



(b) 点阵结构局部形貌





(a) 点阵结构全貌

(b) 点阵结构局部形貌

图 6 射频转子内部空腔晶格点阵结构 Fig. 6 Internal cavity lattice structure of RF rotor

#### 2.3 尺寸精度

目前铝合金3D打印零件尺寸精度可以控制在 0.05 mm 以内,表面粗糙度约6.4(Ra)<sup>[10-11]</sup>,3D 打印 零件经过磨粒流抛光后,表面粗糙度可达1.6(Ra), 与机械加工零件表面粗糙度相当;而机械加工零件 尺寸精度可达到 0.01 mm,表面粗造度在 0.8(Ra) ~1.6(Ra)之间。可以看出,在尺寸精度方面,3D 打印零件存在一定差距,因此,针对 3D 打印零件, 对 BJ84 波导开关射频性能进行进一步仿真分析。

#### 射频仿真 3

在 BJ84 波导开关射频通道中,会将标准波导进 行压缩以减小开关体积,开关的转子和底座之间存 在转动缝隙;在开关使用方面,设计了避免多余物 进入的透波薄膜;这些设计必然影响射频传输的不 连续性,如图7所示。主要包括波导口防尘薄膜、转 子与底座的缝隙、阻抗变换段、高次模等因素[7]。



#### 波导 R 型开关射频结构示意图 图 7 Fig. 7 Schematic diagram of structure of waveguide R-type switch

对波导开关射频设计中涉及的阻抗变换段进 行仿真分析。由于小型化、轻量化的需求,转轴直 径需要进行压缩,也就是转轴中射频通道波导 b 边 变窄,在保证开关输入、输出口为标准波导的前提 下,在传输通道内加入阻抗变换段来实现良好的射 频信号传输,如图7所示。

在仿真软件 HFSS 中建模时需要根据实际情况

加入影响传输不连续的因素。在阻抗变化段中优先 选取四分之一波长变换器,四分之一波长变换器对于 匹配负载阻抗的传输线,是简单实用的电路。四分之 一波长变换器能够以有规律的方式应用于有较宽带 宽的多节变换器设计,为了满足波导开关宽频带的性 能要求,这里采用多节四分之一波长阻抗变换器。

如图 8 所示,给出了一个两节四分之一波长变换器原理图<sup>[12]</sup>,它由长度为  $\Delta Z$  的增量组成,随着节数的升高,从一节到另一节阻抗改变  $\Delta Z(z)$ ,因此不连续处产生的反射系数增量如式(1)所列。

$$\Gamma = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n} = \frac{(Z + \Delta Z) - Z}{(Z + \Delta Z) + Z}$$
(1)

通过正确选择 Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, 总可以使 3 节变化器 在 3 个频率上得到全匹配<sup>[13-14]</sup>。



#### 图 8 四分之一波长变换器原理图

Fig. 8 Schematic of impedance transformer

更重要的是,3D 打印射频转子的通道、过渡段 尺寸、位置精度、角度偏差都将影响开关的射频性 能,合适的允差范围设计必须满足现有 3D 打印工 艺要求。因此,在标准仿真模型的基础上(机械加 工模型),需要对影响射频性能的每个过渡段进行 允差范围分析。具体步骤为:

- (1) 弯通道过渡段尺寸允差范围仿真;
- (2) 直通道允差范围仿真;
- (3)转轴与底座匹配允差仿真。

在 HFSS 中建模,如图 9 所示,结合 3D 打印工艺 特点,对通道内过渡段长度、宽度、角度进行允差仿真 分析,以弯通道过渡段 2 仿真为例,如图 10 和图 11 所示,给出了弯通道过渡段 2 尺寸和角度允差范围的 仿真结果曲线。以此方法,对各通道的每个过渡段的 尺寸范围和角度范围均进行仿真分析,得出了影响微 波开关射频性能的过渡段 1、过渡段 2、过渡段 3 的允 差范围值,如表 3 和表 4 所列。在此范围内,3D 打印 开关的射频性能能够满足微波开关技术指标要求。

针对 BJ84 波导开关,将机械加工尺寸模型(模型尺寸为设计中值)与3D 打印模型(模型过渡段宽度和角度取上下极限值)进行仿真比对,开关射频仿真结果如图 12 所示。可以看出,在7 GHz~9 GHz内,3D 打印开关的回波损耗、插入损耗与机械加工

开关相当,隔离度指标略差,但所有指标都在开关 设计要求范围之内。



图9 射频仿真模型





transition section(length)

表 3 射频仿真允差分析结果

Tab. 3RF simuation	tolerance	analysis	results
--------------------	-----------	----------	---------

(curved channel)

弯通道	宽度/mm	角度/(deg)
过渡段1	9.87~10.02	4.9~5.2
过渡段2	6.41~6.65	29.7 ~ 30.5
过渡段3	4.92~5.12	15.3 ~16.0

表4 射频仿真允差分析结果(直通道)

Tab. 4RF simuation tolerance analysis results

(straight channel)

直通道	宽度/mm	长度/mm
过渡段1	7.1~7.3	$4.9 \pm 0.1$
过渡段2	4.96 ~ 5.16	$8.5 \pm 0.1$
过渡段3	3.45 ~ 3.65	$7.58 \pm 0.08$



图 11 弯通道过度段 2(角度)仿真曲线 Fig. 11 The simulation results of the second

transition section (angle)



图 12 射频通道机械加工尺寸与 3D 打印尺寸仿真结果对比 Fig. 12 Comparision of simulation results between machining size and 3D printing size

### 4 切换时间仿真

如前文所述,R型波导开关有4个切换状态。 相邻状态之间的切换角度为45°,即射频转子每转 动45°,可完成一次切换。如图 13 所示,是微波开 关结构图,微波开关的射频转子由轴承 1 和轴承 2 支撑并固定在射频腔体内,驱动电机为45°步进电 机,固定在射频转子上。给驱动电机施加脉冲指令 (宽度 600 ms),驱动电机的转子在电机驱动转矩的 作用下,带动开关转轴系统转动45°到达目标位置, 脉冲指令结束。而此时,开关转轴系统在惯性力的 作用下会继续转动,为确保开关能准确停留在目标 位置,在开关转轴和壳体上设计保持磁钢,在保持 磁钢的作用下,开关转轴系统会在目标位置左右摆 动,直至停止。



图 13 开关结构剖视图

**Fig. 13 Framework of waveguide switch** 给开关施加驱动指令到开关完全停止在目标

适开关起加强幼指受到开关元至停止在目标 位置所经历的时间称之为开关切换时间,对于微波 开关而言,当然希望得到更短的切换时间。

当电机驱动力矩、轴承摩擦力矩、磁钢保持力 一定的条件下,开关转轴系统的转动惯量<sup>[15]</sup>越大, 围绕目标位置的摆动幅度越大,开关切换时间越 长。当驱动指令结束后,开关转轴系统在目标位置 的摆动幅度临界值为 22.5°,当超过 22.5°时,开关 转轴系统会摆动到邻近状态,发生切换错误。反 之,会停留在目标位置。由此可见,较大的摆动幅 度不仅使开关切换时间长,而且存在发生切换错误 的风险,切换可靠性降低;如果减小开关转动系统 的转动惯量,则摆动幅度减小,切换时间变短,开关 切换可靠性也会随之提升。经过计算,传统机械加工 射频转轴的转动惯量为 1.79 \* 10<sup>-5</sup>kg \* m<sup>2</sup>, 而 3D 打 印转轴的转动惯量为 1.21 \* 10<sup>-5</sup>kg \* m<sup>2</sup>, 减少了 32%。在 Maxwell 软件中分别建模,如图 14 所示,对 系统切换时间进行仿真计算,仿真结果如图 15 所示。



图 14 切换时间仿真模型

Fig. 14 The simulation model of switching time





仿真分析结果表明: 3D 打印转轴的微波开关 在指令结束后即停止在目标位置; 而机械加工转轴 的微波开关在指令结束后的摆动幅度仍然较大(约 11°),1200 ms 后, 在目标位置仍有较小摆动, 没有 完全停止。仿真结果表明, 微波开关的射频转轴采 用 3D 打印技术后, 不仅射频指标满足要求, 并且微 波开关的切换时间显著缩短至 600 ms 以内, 开关切 换的可靠性也得到提升。

#### 5 验证结果

如图 16 和图 17 所示,是采用 3D 打印技术完成 的微波开关的射频腔体和射频转子。装配完成的微 波开关如图 18 所示。使用 N5244B 矢量网络分析仪 对 3D 打印开关和机械加工开关的射频指标进行了测 试<sup>[16]</sup>,参数设置如表 5 所列,测试曲线如图 19 所示。



图 16 3D 打印射频腔体 Fig. 16 3D printing RF cavity



图 17 3D 打印射频转子 Fig. 17 3D printing RF rotor



图 18 3D 打印 BJ84 波导开关 Fig. 18 The BJ84 waveguide switch of 3D printing

表 5 测试参数设置

Tab. 5 Parameter setting

频率范围	扫频点数	中频带宽	功率
6.5 GHz ~9.5 GHz	1 601	1 KHz	$0\mathrm{dB}$







如表 6 所列,是 3D 打印微波开关实测值与设 计值对比情况,可以看出 3D 打印微波开关实测值 满足设计要求。

表 6 3D 打印开关技术指标符合性

 Tab. 6
 Conformity of technical indicators of

3D printing switch

项目	设计值	实测值	符合性
工作频段/GHz	7~9	7~9	
插入损耗/dB	≤0.1	≤0.09	$\checkmark$
隔离度/dB	≥66	≥62.96	
驻波比	≤1.2	≤1.18	$\checkmark$
电磁泄露/dBi	≤ -65	≤ -74	$\checkmark$
脉冲宽度/ms	≤600	600	$\checkmark$
切换时间/ms	≤1000	≤590	$\checkmark$
工作温度/℃	$-25 \sim +75$	$-25 \sim +75$	$\checkmark$
质量/g	≤325	322.5	$\checkmark$

与传统机械加工的微波开关进行比对,如表7 所列,可以看出,3D 打印微波开关的射频指标与机 械加工微波开关相当,开关重量更轻,切换时间明 显缩短。

#### 表7 R 波导微波开关技术指标对比

Tab. 7	Comparision	of R-type	waveguide	switch	specification
--------	-------------	-----------	-----------	--------	---------------

对此而且	3D 打印开关	传统制造开关
刈比坝日	(实测值)	(实测值)
工作频段/GHz	7~9	7~9
插入损耗/dB	$0.06 \sim 0.09$	$0.05 \sim 0.08$
隔离度/dB	≥62.96	≥73.3
驻波比	1.13~1.18	1.10~1.14
电磁泄露/dBi	-74 ~ -83	-75 ~ -85
脉冲宽度/ms	600	600
切换时间/ms	240 ~ 590	885 ~1280
工作温度/℃	$-25 \sim +75$	-25 ~ +75
质量/g	322.5	389.5

#### 6 结论

基于 3D 打印技术特点,文章详细论述了 R 型 波导微波开关的射频参数、切换时间的设计仿真 过程和测试、验证情况。结果表明,射频腔体、射 频转子允差范围满足 3D 打印工艺要求,切换时间 显著缩短,开关可靠性得到提升。3D 打印工艺技 术的应用,缩短了开关生产周期,开关减重 17% 以 上,解决了 X 频段 R 型波导开关切换时间长和重 量重的不足,为波导微波开关的制造提供了一种 新的途径。

#### 参考文献:

- [1] 杨军,姜立伟.星载微波开关概述[J].空间电子技术, 2017,14(6):39-43.
- [2] HELSZAJN J, CASANUEVA A, MEDIAVILLA SÁNCHEZ A, et al. A two-port WR75 waveguide turnstile gyromagnetic switch[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(6):1485-1492.
- [3] BERND M. Microwave Switch with transformers: US4806887[P]. 2007-03-20.
- [4] TSOI, PAUL Y. C,T and S-switchs that are mechanically operated by a rotayr actuator:5063364[P].1991-11-05.
- [5] 曾声奎.可靠性设计与分析[M].北京:国防工业出版 社,2011.[6] 崔宗涛,李志鹏,赵刚.波导R型开关射 频转子的设计方法[J].空间电子技术,2018,15(3): 22-26.
- [7] 于万宝. 一种波导开关: ZL201120422395. 6 [P]. 2012-06-20.
- [8] 刘佩玲,陈康敏,赵振华.激光 3D 打印 AlSi10Mg 铝合 金点阵结构材料的组织和力学性能[J].金属热处理, 2020 45(9):8
- [9] 王学刚,段启强,张孟枭,等.3D 打印铝合金的综合力 学性能分析:2016海峡两岸破坏科学与材料试验学术 会议暨第十一届全国 MTS 材料试验学术会议、第十三 届破坏科学研讨会论文集[C].武汉:中国力学学会, 2016:108-108.
- [10] 史振伟,王敏杰,戚文军,等.激光选区熔化 3D 打印 AlSi10Mg 合金的铺粉厚度[J].中国机械工程, 2022, 33(08):959-964.
- [11] 秦艳利,孙博慧,张昊,等.选区激光熔化铝合金及其 复合材料在航空航天领域的研究进展[J].中国激光, 2021,48(14):15-31.
- [11] 秦艳利,孙博慧,张昊,等.选区激光熔化铝合金及其 复合材料在航空航天领域的研究进展[J].中国激光, 2021,48(14):15-31.
- [12] 王文祥. 微波工程技术[M].2版. 北京:国防工业出版 社,2014.

- [13] 梁昌宏. 简明微波[M]. 西安:西安电子科技大学出版 社,2015.
- [14] 孙桂清. 宽带同轴波导转换器的设计[J]. 科技信息, 2010(19):164-165.
- [15] 刘辉. BJ-84 机电控制波导开关设计[J]. 电讯技术, 2002,42(5):78-81.
- [16] 于倩, 苌群峰, 王文涛, 等. Ka 多通道波导开关的微波 性能设计及验证[J]. 现代雷达, 2016, 38(10):65-68.
- 作者简介:邱润锁(1969—),陕西西安人,本科,工程师。主要研究方向为宇航微波开关类产品研发。E-mail:qrs2000@ sohu.com