

星载天线馈电部件的容差分析

万继响 钟鹰 王五兔

(中国航天科技集团公司五院西安分院，西安 710000)

摘要：本文提出了一种适用于星载天线馈电部件的有效容差分析方法，并以一个典型圆锥波纹喇叭的驻波比为例，对喇叭的槽深作容差分析，理论计算结果与测试结果吻合良好，验证了本文方法的有效性。采用本文方法可以分析馈电部件存在加工误差后的电性能，并根据分析结果给出合理的加工精度，有着非常重要的现实意义。

关键词：波纹喇叭；容差分析；驻波比

Tolerance Analysis of the Feed Components for the Satellite Antenna

WAN Ji-xiang ZHONG Ying Wang Wu-tu

(Xi'an space radio academic institution, Xi'an , China,710071)

Abstract: An efficient tolerance analysis method of the feed components for the satellite antenna is presented in this paper. The sensitivity of a typical corrugated conical horn VSWR performance with respect to the manufacturing tolerance of slot depths is examined through tolerance analysis. Simulated results agree well with measure datas and found that this method is valid. Using this method , the feed components electrical performance can be obtained in the existing manufacturing condition, then the reasonable manufacturing tolerance can be given , which is very significative.

Key words: tolerance analysis; corrugated horns; VSWR

1 引言

反射面天线是星载通信天线最主要的形式，主要由反射器和馈电系统两部分组成。而馈电系统可以说是反射面天线的心脏，它在很大程度上决定了反射面天线的性能，因此在整个星载天线系统中占有非常重要的地位。

为了设计出满足性能要求的馈电部件，必须考虑加工因素带来的影响，即对设计好的部件进行加工容差分析。在这方面，国内外已有一些相关工作^{[1][2][3]}。然而，这些工作仅采用单一方法进行部件的加工误差分析，这些分析并不全面和彻底，很难预测出最坏情况，因此设计出的产品仍可能出现不合格的情况。

显然，关于馈电部件的容差分析方法仍有待深入，为了解决这一问题，本文总结在上述工作的基

础上，针对其缺点又提出了在加工误差范围内通过优化的方法来寻找器件最坏特性的容差分析方法。通过上述多种容差分析方法的综合分析，可更全面、更有效地分析加工误差对产品性能的影响，并根据分析的结果找出关键尺寸、确定合理的加工精度。由于设计考虑了加工误差等因素的影响，因此无需试验调节，就设计出结构紧凑，性能优异的馈电部件，可保证产品性能，提高产品合格率，缩短研制周期，降低成本等，有着非常重要的现实意义。

2 馈电部件的容差分析方法

2.1 随机加工误差分析

随机误差分析是被广泛采用的一种容差分析方

法，通过在馈电部件最优尺寸的基础上加一定的随机误差来实现，步骤如下：

- 1) 对所有结构参数设置一个加工精度；
- 2) 在加工精度范围内，设置容差分析的次数(比如 10 次)；
- 3) 计算馈电部件特性，找出最坏的情况；
- 4) 第 3)步中，如果最坏情况仍比规定的指标好，则可选择一个更宽松的加工精度，重复 1)~3)步。另一方面，如果第 3)步中的最坏情况不能满足指标要求，则需要选择一个更苛刻的加工精度，重复 1)~3)步。

通过上述分析一般存在如下两种结果：

- 1) 最坏情况满足规定指标且加工精度可实现，则投产一套产品即可保证成品率；
- 2) 在目前加工极限能力情况下部分分析结果不满足规定指标要求，此时根据不满足情况的百分比决定投产数量，以能够有一套产品合格。当然，如果某些尺寸过于敏感，也可以考虑加入调试环节或更改设计。

2.2 均匀加工误差分析

均匀加工误差分析就是对所关心的参数在加工精度范围内同时加上或者减去一个相同的变化量。一般情况下，可以只考察两种极端的情况，即：

- Case 1：在所有结构参数同时加上加工精度；
- Case 2：在所有结构参数同时减去加工精度。

2.3 参数扫描

对所有关心的设计参数在加工误差范围内进行参数逐个扫描，可考察每个参数独立变化对电性能的影响程度，并可从中找出关键尺寸，加工优先保证。

2.4 最坏情况分析

随机加工误差分析主要是从概率的角度来考察加工误差对器件性能的影响；均匀加工误差分析主要从加工误差出现极端的情况来分析；参数扫描主要是从单个参数的加工误差来分析其对性能的影响。显然，通过上述三种容差分析以后，对于大多数部件而言是足以保证其加工后的性能，但是对于那些随结构参数变化性能特别敏感的部件而言，仍无法百分之百保证。因此，必须有手段预测出加工误差所能引起的器件性能最恶劣的情况，这只有通

过优化方法实现。对于不同的器件，所关心的性能各不相同，优化的目标也会有所不同，这里仅以波纹喇叭回波损耗为例进行最坏情况分析，其他部件类似分析。

对于波纹喇叭，通常情况仅优化波纹喇叭槽深^[4]就可以实现低回波损耗，优化的目标函数为：

$$f = \sum_{i=1}^m [\max(RL_0 - RL(f_i, \vec{d}), 0)] \quad (1)$$

式中 m 表示计算的频点数目， f_i 表示第 i 个频点， RL_0 为回波损耗目标值，以正 dB 表示。 $\vec{d} = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ 表示 N 个波纹槽深度构成的矢量，为优化变量。优化时，使得目标函数 f 最小化，如果性能满足指标要求，则 $f = 0$ ，优化退出。

对于加工误差最坏情况分析，需要找出的是喇叭的最坏特性而不是最优特性即进行喇叭特性的反向优化，这可通过求(1)式倒数的最小值来实现，此时目标函数如下：

$$f = \frac{1}{\sum_{i=1}^m [\max(RL_0 - RL(f_i, \vec{d}), 0)]} \quad (2)$$

值得指出的是，上式表示的是对所有频点的一个累加效应。然而，在实际的喇叭分析中，有时波纹喇叭特性仅仅在某个窄带内明显恶化，而在其余频点上性能良好，此时按上式公式优化，得到的最坏情况可能并不是“最坏”情况。为此，还应找出在工作频带内单个频点的最坏回波损耗，确保喇叭性能可靠。此时目标函数为：

$$f = \frac{1}{\max_{i=1}^m (\max(RL_0 - RL(f_i, \vec{d}), 0))} \quad (3)$$

3 设计实例

为了验证方法的有效性，以一个 C 频段波纹喇叭的驻波比为例进行容差设计。图 1 给出了优化后的上下行工作频带内的回波损耗(黑实线)，均优于 -31dB，满足设计要求。

为了考察加工因素对喇叭驻波性能的影响，取槽深为变量。首先，采用随机容差分析方法来考察随机加工误差对波纹喇叭性能的影响。由于环加载波纹喇叭加工难度较大，这里将加工精度设为 0.1mm，这与现行的加工能力基本相符。在加工精度范围内，随机选 10 组结构参数进行分析，如图 1 所

示。从图 1 中可以看出：随机误差对下行驻波比影响较大，对上行驻波比几乎没有影响。最坏情况下，回波损耗仍优于-30dB。

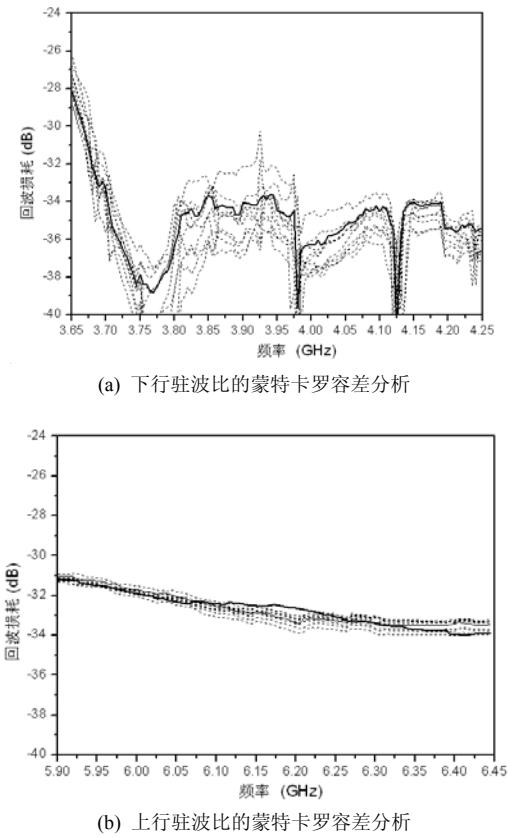


图 1 波纹喇叭驻波比的蒙特卡罗容差分析

由于上行驻波比对随机误差不敏感，因此接下来主要对下行驻波比进行均匀加工误差分析。在进行均匀加工误差分析时以 $\pm 0.2mm$ 的最极端加工误差进行分析，即对所有槽深加上或减去 $0.2mm$ 。分析结果如图 2 所示，可以看出：在此情况下，主要会影响频带特性的移动，由于设计时留有足够的保护带宽，因此回波损耗变化并不明显。

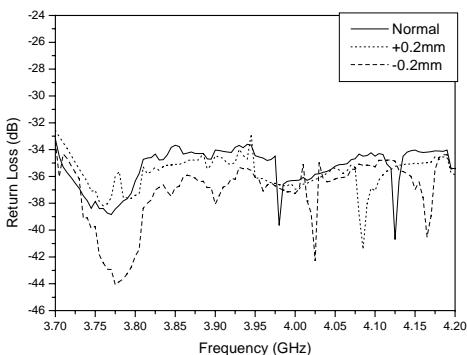


图 2 下行驻波比均匀加工误差分析

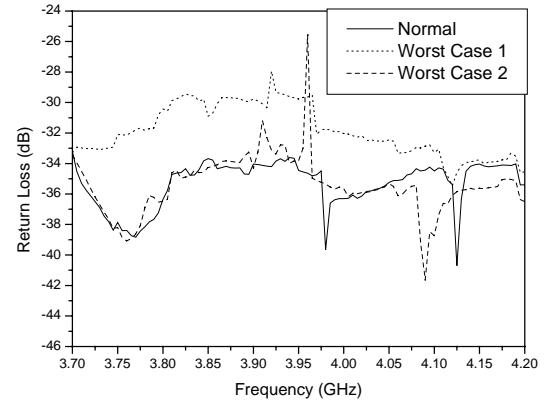


图 3 下行驻波比的最坏容差分析

最后，为了确保喇叭性能，又进行了最坏情况分析，具体分两种情况：

Case 1：在 $\pm 0.2mm$ 范围内采用式(2)作目标函数进行容差分析，找出整个频带内整体最坏的回波损耗；

Case 2：在 $\pm 0.2mm$ 范围内采用式(3)作目标函数进行容差分析，找出单个频点最坏的回波损耗。

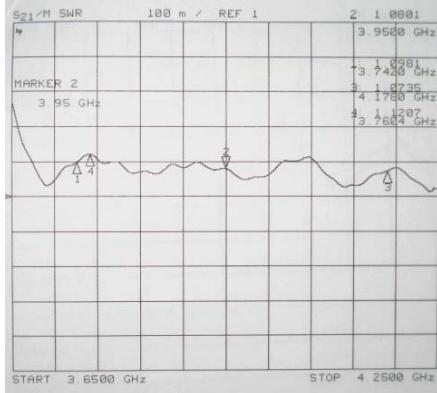
分析结果如图 3 所示，在 Case 1 情况下，下行驻波比整体恶化，最差回波损耗在-28dB 左右；在 Case 2 情况下，单个频点的最坏回波损耗已恶化到-25dB，但仍可接受。因此，该波纹喇叭容差分析结果满足要求，可进行投产。

4 测试结果

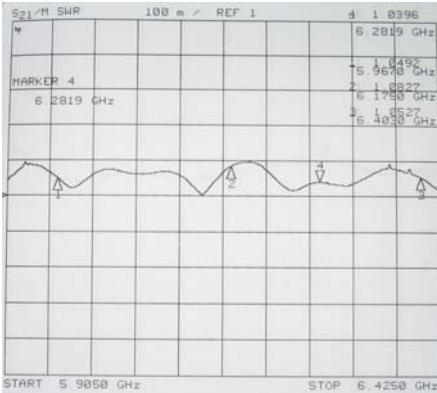
对加工出的波纹喇叭(如图 4 所示)进行测试，驻波比特性如图 5 所示，在下行工作频带内驻波比优于 1.12，在上行工作频带内驻波比优于 1.1。测试结果与理论结果比较吻合，并满足设计要求。



图 4 波纹喇叭的实物



(a) 波纹喇叭实测的下行驻波比



(b) 波纹喇叭实测的上行驻波比

图 5 波纹喇叭的驻波比特性

5 结论

本文提出了一种四种容差分析方法，实际设计中应同时采用以保证器件性能的可靠。最后，本文以驻波比为例对一个典型波纹喇叭的槽深进行了容差分析，结果表明：1) 随机容差分析可以预知部件特性随加工误差变化的剧烈程度；2) 相比随机加工误差，均匀加工误差对喇叭性能影响较小；3) 单个频点的最坏分析结果在某种意义上比总体的最坏分析结果更坏。

参 考 文 献

- [1] Tao Shen and Kawthar A. Zaki, "Waveguide Branch Couplers for Tight Couplings," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-48, pp. 2432~2438, Dec. 2000.
- [2] B.M. Park, P.Ramanujam, F.Boldissar, C.Shin, "Sensitivity analysis of square waveguide iris polarizers," in IEEE M TT - S Int. Symp. Dig., 1994, pp. 1058~1061.
- [3] 王五兔, “紧凑式波纹喇叭的容差分析,” 中国空间科学技术, No.2, PP.35~39, 1998.
- [4] 王五兔, “星载紧凑式波纹喇叭的宽带优化方法,” 空间电子技术, No.3, PP.25~29, 1997.

作者简介：

万继响，男，博士，主要研究领域为星载天线及馈电部件的优化设计等；钟鹰，男，研究员、博士生导师，主要研究领域为星载天线总体设计等；王五兔，男，研究员、天线首席专家，主要研究领域为星载天线总体设计等。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>