

# 某雷达片式有源模块公差分析及优化

杨婷婷,路伟欣

(中国电子科技集团公司第三十八研究所,安徽 合肥 230088)

**摘要:**片式有源模块是雷达的核心部件,其集成度高但尺寸链公差设计难度大。针对片式有源模块在应力筛选实验后部分信号不通的问题,通过分析两条相互影响的轴向盲配互联尺寸链公差,确定弹性连接器和射频内转接器配合公差问题。针对该尺寸链的轴向盲配公差问题,结合实际情况,完成尺寸链公差优化设计。

**关键词:**尺寸链;片式模块结构;公差分析;公差优化设计

**中图分类号:**TH123 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)06-0069-03

## Tolerance Analysis and Optimization of a Radar Chip Active Module

YANG Tingting, LU Weixin

(The 38th Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

**Abstract:** Chip active module, the core component of radar, is highly integrated but difficult to design dimension chain of tolerance. To solve the problem of partial signal impassability of chip active module after stress screening test, this paper analyzes the dimensional chain tolerances of two axial blind matching interconnections and determines the fit tolerance problem of the elastic connector and the rf internal adapter. Aimed at the problem of axial blind fitting tolerance of the dimensional chain, the optimization design of dimensional chain tolerance is completed according to the actual situation.

**Keywords:** dimensional chain; chip module structure; tolerance analysis; tolerance optimization design

## 0 引言

随着雷达集成度要求的不断提高,片式有源阵列天线已成为目前的重要研究方向<sup>[1]</sup>。片式有源模块作为片式有源阵列天线的核心部件,凭借其鲜明的优点和难度成为研究重点。相比于砖块式模块结构,片式模块结构拥有集成度高、尺寸小、易扩充等优点,但设计难度较大,散热难、公差累积等问题很难解决<sup>[2-3]</sup>。

片式有源模块作为雷达的核心部件,内部信号传输非常重要,信号不通或信号传输质量差将直接影响整个雷达性能。在某片式有源模块的现场调试环节中发现:T/R组件装配后部分组件很难测试正常,现象往往为T/R组件中一两个通道工作正常而其他通道工作不正常,并且测试全部正常的片式模块在完成应力筛选试验后,经测试确认T/R组件损坏多只,其余组件还能工作但内部可能有损伤。

经仔细查找原因发现应力筛选试验后部分T/R组件内印制板上有裂纹,进而导致T/R组件损坏。经分析认为该问题与结构公差不断累积导致部分结构产生一定程度的挤压有关。

本文将针对应力筛选试验后通道工作不正常的问题,对涉及信号传输的结构进行公差分析,完成尺寸链公差的优化,提出解决问题的措施。

片式有源模块内部T/R组件与综合网络模块之间的信号传递由弹性连接器和KK射频连接器传递,而弹性连

接器和KK射频连接器都采用盲配的方式安装(图1),因此对弹性连接器和KK射频连接器的装配公差提出了很高的要求。公差一旦过大就会导致通道信号不通、挤压印制板、接触不良等问题。下文将分别对弹性连接器和KK射频连接器相关结构的公差进行分析,力求在保证弹性连接器和KK射频连接器配合公差在理想范围内的情况下,不额外增加制造成本和难度。

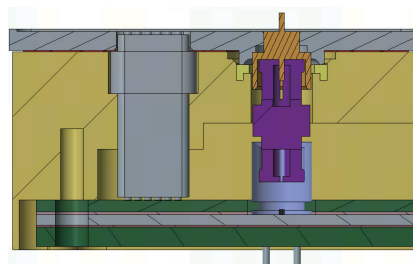


图1 片式有源模块轴向盲配互联结构

## 1 盲配互联公差问题分析

### 1.1 弹性连接器轴向公差分析

弹性连接器轴向盲配装配关系结构简化如图2所示,弹性连接器的两侧弹针分别连接两块印制板的信号,两块印制板之间有T/R盖板、垫片、有缘模块壳体。弹性连接器安装空间 $D1$ 由 $d2$ 、 $d3$ 、 $d4$ 的尺寸公差共同决定。通过尺寸链计算弹性连接器安装空间 $D1$ ,再结合弹性连接器

工作长度与公差,便可分析弹性连接器实际工作长度是否符合要求以及此处轴向公差设计是否合理<sup>[4-6]</sup>。

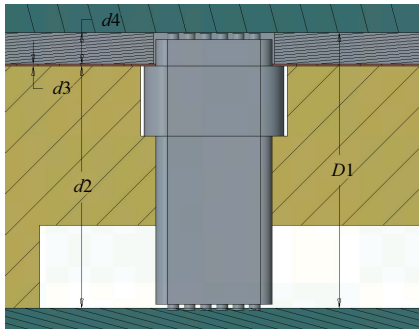


图2 弹性连接器盲配互联结构简图

建立以整个弹性连接器长度( $D1$ )作为封闭环的尺寸链  $D1=d2+d3+d4$ 。其中  $d2$  是有缘模块壳体的厚度尺寸,  $d3$  为某具有一定延展性的垫片的厚度,  $d4$  为某组件盖板的厚度,尺寸见表1。由于部分尺寸在结构中无法直接标注,只能通过其他尺寸间接获得。

表1 尺寸链组成环尺寸表<sup>[7]</sup> 单位:mm

代号	传递系数 $\xi_i$	名义尺寸 $A_i$	上偏差 $E_S$	下偏差 $E_I$
$d2$	1	13.900	+0.050	-0.050
	-1	3.500	+0.050	-0.050
$d3$	1	0.100	+0.020	-0.020
$d4$	1	1.800	+0.020	-0.020
	-1	0.465	+0.015	-0.015

由于弹性连接器轴向盲配尺寸链不长,所以采用极值法计算封闭环的尺寸及公差<sup>[5]</sup>。带入下式即可计算封闭环的名义尺寸及上、下偏差。

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \xi_i A_i \quad (1)$$

式中: $A_{\Sigma}$  为封闭环名义尺寸; $A_i$  为各组成环名义尺寸; $\xi_i$  为传递系数。

$$\begin{cases} E_{S,\Sigma} = \sum_{p=1}^m E_{S,p} - \sum_{q=1}^n E_{I,q} \\ E_{I,\Sigma} = \sum_{p=1}^m E_{I,p} - \sum_{q=1}^n E_{S,q} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E_{S,p}$ 、 $E_{I,p}$  分别为增环上、下偏差; $E_{I,q}$ 、 $E_{S,q}$  分别为减环下、上偏差。

通过计算得到  $D1 = 11.835 \pm 0.135$ ,即弹性连接器实际工作长度在 11.7~11.97 范围内<sup>[8-9]</sup>。对比性连接器理想工作长度为  $11.9 \pm 0.15$  mm,可以得到图3。

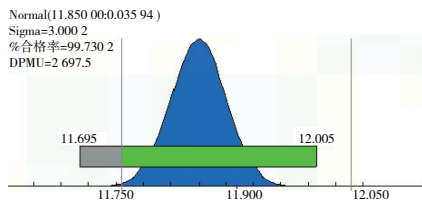


图3 封闭环的尺寸分布图

依据尺寸链分析的计算结果可知,极端状态下弹性连

接器可能被过度压缩,但弹性连接器实际长度不在理想工作长度范围内的概率并不大。

## 1.2 射频互连轴向公差分析

射频轴向盲配互连装配关系简化结构如图4所示。射频信号采用由两个射频连接器和内转接器组成的嵌入式连接器传递。若内转接器与射频连接器之间的配合为过盈配合,则会导致盖板和印制板受到挤压,而其受力是需严格控制的。若内转接器与射频连接器之间的间隙过大,则会导致整个模块电能下降。因此应严格控制射频连接器与内转接器之间盲配的轴向配合公差。

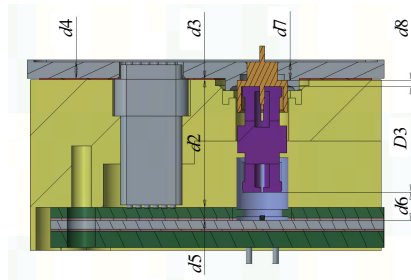


图4 射频内转接器盲配互联结构简图

通过尺寸链计算上、下射频连接器与内转接器的接触面之间的间距  $D3$ ,再结合射频 KK 内转接器尺寸,可计算 KK 内转接器的配合公差。

建立以 KK 内转接器安装空间  $D3$  作为封闭环的尺寸链  $D3=d2+d3+d4+d5-d6-d7-d8$ ,其中  $d2$ 、 $d3$ 、 $d4$ 、 $d5$  为增环, $d6$ 、 $d7$ 、 $d8$  为减环。 $d5$  为射频连接器安装定位面与印制板上表面之间的距离, $d6$  为射频连接器安装定位面与内转接器接触面之间的距离, $d7$  为某组件盖板上表面到射频连接器安装定位面之间的距离, $d8$  为射频连接器安装定位面与内转接器接触面之间的距离。由于部分尺寸在结构中无法直接标注,只能通过其他尺寸间接获得(表2)。

表2 尺寸链组成环尺寸表 单位:mm

代号	传递系数 $\xi_i$	名义尺寸 $A_i$	上偏差 $E_S$	下偏差 $E_I$
$d2$	1	13.900	+0.050	-0.050
	-1	3.500	+0.050	-0.050
$d3$	1	0.100	+0.020	-0.020
$d4$	1	1.800	+0.020	-0.020
	-1	0.465	+0.015	-0.015
$d5$	1	1.054	0.100	-0.100
$d6$	-1	2.300	+0.050	-0.050
$d7$	-1	1.500	+0.020	-0.020
$d8$	-1	2.000	+0.020	-0.020
	1	1.500	+0.020	-0.020

组成环和封闭环的尺寸偏差服从正态分布,采用概率法对以  $D3$  作为封闭环的尺寸链进行公差分析。

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \xi_i A_i \quad (3)$$

$$T_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} \quad (4)$$

式中:  $T_{\Sigma}$  为封闭环公差;  $T_i$  为各组成环的公差。通过此公式计算所获得的标准差  $T_{\Sigma}$  为“ $3\sigma$  原则”得到的概率公差。

依据尺寸链公差分析,通过概率法计算后得到  $A_{\Sigma} = 8.589$ 、 $T_{\Sigma} = 0.14$ 。可知上、下射频连接器与内转接器的接触面之间的间距  $D3 = 8.589 \pm 0.14 = 8.6^{+0.129}_{-0.151}$ 。再结合射频内转接器长度  $L_0$  为  $8.6^{0}_{-0.05}$  mm,通过计算能够得到内转接器与射频连接器之间的配合公差为  $0^{+0.179}_{-0.151}$  mm,可能存在较大间隙或挤压变形。

通过概率可以计算配合公差落在  $0_0^{+0.3}$  范围内的概率:

$$P = \Phi\left(\frac{0.3-Z}{\sigma_0}\right) - \Phi\left(\frac{0-Z}{\sigma_0}\right) \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} 3\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} = 0.1487 \\ Z = A_{D3} - A_{L_0} = 0.014 \\ \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du \end{cases}$$

计算可以获得  $P = 61.0\%$ ,即射频轴向盲配垂直互连的配合公差落在理想范围  $0_0^{+0.3}$  内的概率为  $61.0\%$ 。有  $40.0\%$  的概率该垂直互联会出现信号不好或者挤压问题,需要进行改进<sup>[10]</sup>。

当射频轴向盲配垂直互连出现挤压时,对有源模块进行力学仿真分析,模型及结果如图 5 所示, KK 内转接器安装在 TR 盖板与印制板之间,极限工况下对印制板挤压力为  $1188.8$  N,有限元分析时该载荷以均布力形式施加在配合区域,在壳体安装脚处施加全约束。在射频内转接器与弹性连接器共同作用下, T/R 组件印制板应力响应最大值达到  $149$  MPa,出现在射频内转接器作用点下方,接近材料极限应力极限  $170$  MPa。此时再进行随机振动实验陶瓷印制板便会达到应力极限碎裂。

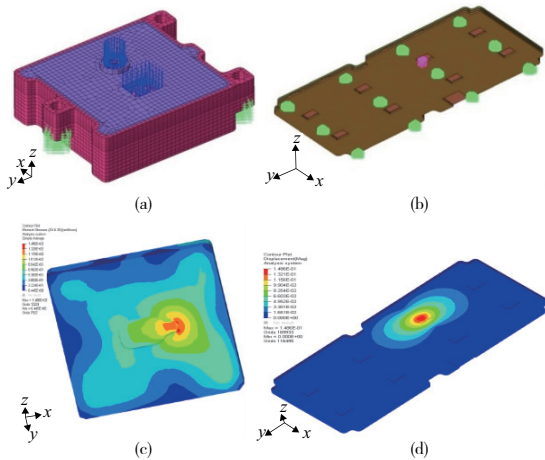


图 5 力学分析有限元模型及结果

## 2 解决措施及影响分析

### 2.1 盲配互联尺寸链优化

缩短尺寸链是减小封闭环公差带最有效的方式之一。在综合考虑各个位置的公差配合、保证整个模块的屏蔽密

封性能的前提下,尽可能缩短整个尺寸链的长度。

合理分配公差范围是公差优化的重要部分。在此盲配互联结构中,多个尺寸同时存在于两个尺寸链中,因此在调节尺寸公差时需综合考虑其尺寸公差对两条尺寸链的影响。

安装板厚度  $d2$ 、延展性垫片的厚度  $d3$  和某组件盖板的厚度  $d4$  都同时存在于两条盲配尺寸链之中,所以两条尺寸链既相互独立又相互影响。通过缩短尺寸链环数、合理分配公差范围两种有效途径,优化后的尺寸链公差分配如表 3 所示。

表 3 优化后尺寸链组成环尺寸表 单位:mm

代号	传递系数 $\xi_i$	名义尺寸 $A_i$	上偏差 $E_S$	下偏差 $E_I$
$d2$	1	10.520	+0.025	-0.025
$d3$	1	0.100	+0.020	-0.020
$d4$	1	1.800	+0.020	-0.020
$d5$	-1	0.465	+0.015	-0.015
$d6$	1	1.054	+0.100	-0.100
$d7$	-1	2.300	+0.020	-0.020
$d8$	-1	1.500	+0.020	-0.020
$d9$	-1	0.500	+0.020	-0.020

由于尺寸  $d4$  相关的其他尺寸涉及更重要的参数性能,  $d4$  无法直接标注只能通过其他尺寸间接计算。

### 2.2 优化后盲配互联尺寸链计算

盲配互联尺寸优化后,采用极值法对以弹性连接器工作长度  $D1$  作为封闭环的尺寸链进行公差计算,能够得到

$$D1 = d2 + d3 + d4 = 11.955 \pm 0.08$$

尺寸  $D1$  在弹性连接器理想工作长度  $11.9 \pm 0.15$  mm 范围内。

盲配互联尺寸优化后,采用概率法对以 KK 内转接器安装空间  $D3$  作为封闭环的尺寸链进行公差计算,能够得到:

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \xi_i A_i = 8.709 \quad (6)$$

$$T_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} = 0.113 \quad (7)$$

即 KK 内转接器安装空间  $D3 = 8.709 \pm 0.113$ ,结合 KK 内转接器尺寸  $L_0 = 8.6^{0}_{-0.05}$ ,能够得到 KK 内转接器安装的配合公差为  $0^{+0.272}_{-0.004}$ 。

通过概率法可以计算配合公差落在  $0_0^{+0.3}$  范围内的概率:

$$P = \Phi\left(\frac{0.3-Z}{\sigma_0}\right) - \Phi\left(\frac{0-Z}{\sigma_0}\right) \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} 3\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} = 0.124 \\ Z = A_{D3} - A_{L_0} = 0.134 \\ \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du \end{cases} \quad (9)$$

(下转第 76 页)

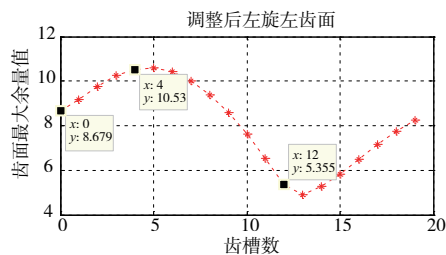


图 11 MATLAB 各齿面余量最大值

### 3 结语

从图 8—图 11 三维模型和 MATLAB 计算结果可以看出,无论是最大值误差还是最小值误差都是存在的。主要原因如下:1)在包容齿面方程推导过程中,最大、最小包容齿面余量是以分度圆处余量为基准来算的,用此表示齿面其余部位余量是存在原理误差的;2)在 MATLAB 齿面最大值和最小值求解计算中,都用到了 MATLAB 函数,此函数提供大型优化算法(内部映射牛顿法)和中型优化算法(二次规划法),不同优化算法之间也存在计算误差。但从对比结果可以看出,无论最大值还是最小值,误差值都控制在 0.06 mm 以内,而工程应用一般在 0.1 mm 级内进行调整,所以,这个误差可以接受的。

#### 参考文献:

- [1] KIM H Y, KIM S R, AHN J H, et al. Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1/2/3): 273-278.

- [2] HUNDT W, LEUENBERGER D, REHSTEINER F, et al. An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique [J]. CIRP Annals, 1994, 43(1): 295-298.
- [3] KHUDBIN L V, GURYANIKHIN V F, YUGANOV V S. Use of low-frequency acoustic signal for real-time monitoring of grinding process [J]. Russian Engineering Research, 2019, 20(8): 83.
- [4] 刘海宁. 数控蜗杆砂轮磨齿机自动对刀技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [5] 张国辉, 彭宁. AE(声发射)技术在成型砂轮磨齿机上的应用[J]. 机械工程师, 2011(10): 145-146.
- [6] 彭宁, 李春艳, 郭璐. 数控成形磨齿机测头自动对刀技术和余量分配的研究[J]. 机械工程师, 2015(1): 200-201.
- [7] 吴彬彬, 黄筱调, 方成刚, 等. 数控成形磨齿机在线测量系统标定误差的辨识及补偿[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(6): 74-77.
- [8] 张虎, 黄筱调, 方成刚, 等. 砂轮修整误差对数控成形磨齿加工精度的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 26-32.
- [9] 石照耀, 叶勇. 广义极坐标法测量渐开线轮廓误差的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(2): 140-142, 153.
- [10] 刘俊辉, 狄成宝, 罗有朋. 基于 VERICUT 的偏心放置分段式齿圈铣齿方法研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(1): 161-163, 176.

收稿日期: 2022-04-20

#### (上接第 71 页)

计算得到  $P=99.5\%$ , 即优化后盲配互联尺寸基本可以保证产品合格率满足要求。

在开展研究之前, 内部 T/R 组件一次装配后所有通道测试全部正常的概率只有 75%, 测试正常组件经过试验后仍正常的概率只有 85%, 即一次装配无问题组件约为 64%。优化后方案成功保障了弹性连接器和内转接器的配合公差。优化之后内部 T/R 组件一次装配后所有通道测试全部正常概率为 100%, 且通过后期所有试验验证后仍 100% 测试正常。

### 3 结语

本文针对有源模块轴向盲配信号不通故障, 开展了详尽的轴向盲配公差分析。通过分析两条相互影响的盲配尺寸链, 发现结构尺寸链公差设计不合理, 公差累积导致垂直盲配互联问题, 并计算了盲配公差出现问题的概率。

结合实际情况, 针对该盲配互联问题, 开展优化设计。采用尽量缩短尺寸链、合理分配公差范围两种手段开展优化设计。成功优化后的方案, 弹性连接器装配尺寸 100% 在理想工作长度范围内, 内转接器的配合公差 99.5% 在目标配合公差范围内, 顺利通过所有试验验证。

#### 参考文献:

- [1] 王小陆, 王周海, 邹永庆. 片式有源阵列天线关键技术研究[J]. 微波学报, 2012, 28(增刊 2): 160-162.
- [2] 石海然, 江涛, 薛欣. 一种微小卫星片式有源相控阵天线的设计与实现[C]//2019 年全国微波毫米波会议论文集(上册). 广州: [s.n.], 2019: 79-82.
- [3] 康颖, 雷国忠, 崔敏, 等. 某瓦片式数字收发组件的多层互联结构设计[J]. 火控雷达技术, 2021, 50(3): 80-84.
- [4] 胡志敏, 黄美发, 钟艳如, 等. 基于尺寸链图形理论的公差计算方法[J]. 机械设计与制造, 2007(12): 106-108.
- [5] 何景熙. 复杂尺寸链分析计算理论及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [6] 霍春景, 单红波, 赵一民, 等. 基于统计过程控制的变速箱尺寸链优化设计方法研究[J]. 机械传动, 2018, 42(7): 66-70, 76.
- [7] 王志, 王贵成. 传递系数法在判断增环和减环中的应用[C]. 全国机械设计教学研讨会议, 武夷山: [s.n.], 2007: 139-140.
- [8] 朱延娟, 祁磊. 复杂结构的公差分析及优化[J]. 机电一体化, 2015, 21(4): 39-44.
- [9] 阎艳, 余美琼, 王国新, 等. 平面尺寸链公差分析算法研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(7): 799-802.
- [10] 于风云. 尺寸链原理在零件精度设计中的应用[J]. 机械设计与制造, 2009(8): 86-87.

收稿日期: 2022-06-01