一种 Q/V 频段天线馈源组件差模耦合器 加工工艺方法^①

王艳枝,胡 赫

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

摘 要:Q/V 频段天线馈源组件差模耦合器结构较复杂,呈现集成化、小型化、多端口特点,对加工及装配精度 要求较高,受现有工艺设备精度限制问题,加工难度较大。为利用现有工艺设备实现该产品封闭结构、多级小间隙 配合、四通道精密对接加工及装配,介绍了一种 Q/V 频段天线馈源组件差模耦合器加工工艺方法。该方法基于工 艺尺寸链理论,通过创新优化工艺尺寸链设计、修配法装配、交互式工艺流程设计等措施相结合,适当降低加工难 度,利用现有设备可达精度进行加工,达到设计要求。该方法为类似具有多级装配且精度要求较高的产品工艺设计 及结构设计提供新的思路。

关键词:Q/V频段;馈源组件;差模耦合器;工艺尺寸链;工艺设备 中图分类号:TP393 文献标识码:A 文章编号:1674-7135(2021)06-0017-07 DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2021.06.003

Manufacturing technology of the differential mode coupler of Q/V-band antennas feed assemblies

WANG Yanzhi, HU He

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

Abstract: The differential mode coupler of Q/V-band antennas feed assemblies has complex structure, integration, miniaturization and multiport characteristics. The product has high requirements for machining and assembly accuracy, and it is difficult to process due to the accuracy limitation of existing process equipment. In order to realize the closed structure, multistage small gap fit, four channel precision butt machining and assembly of the product by using the existing equipment, this paper provide a new manufacturing technology of the differential mode coupler of Q/V-band antennas feed assemblies. the technology is based on process dimensional chain theory by innovating and optimizing the design of process dimension chain, by means of assembly with repair method and interactive process flow design, the technology appropriately reducces processing difficulty, and realizes the design requirements by using the existing equipment. The method provides a new idea for process design and structure design of similar products with multi-level assembly and high assembly accuracy.

Key words: Q/V-band; feed assemblies; differential mode coupler; process dimensional chain; manufacturing equipment

0 引言

Q/V 频段是毫米波频段中最适合开展卫星通信 业务的频段,该频段的通信载荷已开始逐步进入商 业卫星市场^[1]。Q/V 载荷是高通量(high throughput satellite, HTS)通信卫星和甚高通量(very high throughput satellite, VHTS)通信卫星关口站主要使用

① 收稿日期:2021-09-02;修回日期:2021-11-06。

作者简介:王艳枝(1977—),高级工程师,主要研究方向为卫星有效载荷无源、有源及天线产品机械加工工艺。 E-mail:1474162861@ qq. com

的载荷,代表着 HTS 卫星发展的主要方向,也是国际航天在 HTS 卫星研制上的重要方向。HTS 卫星 多波束天线涉及的关键技术有宽带小型化多端口馈 源组件技术、集成化、轻量化馈源阵列技术等^[2],馈 源组件将实现用户波束、关口站波束、校准波束、合 一宽带小型化多端口馈源组件的发展趋势^[2];同时 对加工、电镀、装配等生产制造提出了更高要求,对 工艺技术、工艺设备等也提出更新、更高要求。虽然 机械加工向超精密方向发展,超精密加工技术目前 已进入纳米加工时代,加工精度可达 0.025 μm^[3], 但资料显示,国内对于 Q/V 频段馈源制造技术处于 研究阶段,现有工艺设备不能完全满足 Q/V 频段天 线馈源组件差模耦合器产品精度要求,加工工艺方 面暂无其它馈源类产品可以继承或借鉴。

文章主要介绍基于现有设备精度,开展的Q/V 频段天线馈源组件差模耦合器加工工艺研究,利用 工艺尺寸链理论,通过创新优化工艺尺寸链设计, 以工艺组件形式加工缩短尺寸链、以实测值驱动尺 寸链最大公差传递共用、合理确定零件及组件公差 精度,通过修配法装配控制镀层公差累积,工艺流 程交互设计等方法,解决了现有工艺设备精度限制 问题,利用现有设备可达精度进行加工,实现多零 件、多级配合小间隙、封闭结构、四通道精密对接加 工及装配。

1 研制难度

1.1 结构特点

Q/V 频段馈源组件是天地一体化卫星馈电链路 天线的核心,差模耦合器则是 Q/V 频段馈源组件中 的重要部分。差模耦合器主要由网络 1、网络 2、耦 合枢纽、四件盖板等共计 7 个零件组成,结构示意图 如图 1 所示。

由于合成网络1、合成网络2、耦合器枢纽零件 上分别设计四通道,各四通道最终通过装配,在X、 Y、Z 三方向精密对接,形成四个相连的微波通道,且 无调整垫片等调整件进行装配调整,对接示意图如 图2所示。



该产品采用较新结构设计,具有集成化、小型 化、多端口特点,将常见的分体结构设计成一体结 构,看似装配零件数减少,装配结构更加简单,图纸 尺寸公差精度要求并不高,但由于存在*X*、*Y*、*Z*三方 向四通道精密对接需同时装配的要求,实际装配难 度较高。



各零件配合处尺寸公差要求如图3所示。



Fig. 3 Drawing design fits dimension of part

1.2 工艺难点

前期生产的四臂 TM01 模行波耦合器,其四臂 需要通过合成网络形成一路差通道,合成网络主要 由魔 T 和弯波导组成,合成网络均设计成分体结 构,合成网络分成两个对称部分^[4],分别设计两个 通道,与中间耦合腔体连接,装配结构简单,装配较 易保证。与之相比,该差模耦合器属于新结构,其中 合成网络1、合成网络2的四通道采用一体化设计 形成封闭包围结构,同时与四件盖板、耦合枢纽的四 通道进行对接。在无垫片等调整件的情况下,实际 上对零件加工尺寸精度、形位精度、以及装配精度保 证提出了更高的要求,需实现多零件、多级配合小间 隙、封闭结构、四通道精密对接加工及装配。

工程中常在导体表面涂覆电导率高的金属材料 提高导电率,达到降低导体损耗的目的^[5]。该产品 为提高导电率,在零件上采用镀银设计。镀层精度 控制、镀层公差累积增加了加工及装配难度。

7 个零件 16 处镀银面形成各处配合,其中 *X* 方向 4 处配合、*Y* 方向 4 处配合,如图 4 所示。设计要求 *X* 或 *Y* 单个方向装配间隙 0.03 mm。



图4 X 向4 处配合及 Y 向4 处配合



若按完全互换法(也称极值法)装配, $X ext{ of } Y$ 向四处配合对应组成环平均公差 $T_{av,L} = 0.03/4$ =0.0075 mm(按式1计算),即若按等公差法分解,各组成环分配到的公差仅0.0075 mm,即使不按等公差法,组成环的公差最大也不能超过封闭环公差0.03 mm,还需同时包括平面度等形位公差。

极值法计算组成环平均公差:

$$T_{\rm av,L} = \frac{T_0}{\sum_{i=1}^{m} |\zeta_i|}$$
(1)

式(1)中,下角标 0 表示封闭环,*i* 表示组成环 及其序号,*m* 表示组成环个数。 ζ 表示传递系数,对 以直线尺寸链中增环的传递系数 ζ_i =+1,减环的传 递系数 ζ_i =-1。 T_0 表示封闭环公差。

按现有工艺设备精度(现有数控铣设备定位精度0.005 mm,重复定位精度0.003 mm),同时受刀 具精度、加工变形等影响,零件加工尺寸精度、平面 度、平行度、对称度等形位精度不易保证。同时因为 零件加工尺寸精度、形位精度公差累积对装配影响 较大,16处镀银面镀层公差累积对装配也有一定影 响,因此产品装配精度也较难保证。

2 工艺措施

由于受现有工艺设备精度限制,为实现多零件、 多级配合小间隙、封闭结构、四通道精密对接加工及 装配存在一定难度,必须采取合理的工艺设计方案 解决精度保证问题。

2.1 尺寸链校核计算零件及装配精度

产品在设计、加工和装配都需要进行复杂的尺 寸链计算,以保证零件的制造精度和产品的装配精 度。工艺尺寸链的计算正确与否是保证质量的关 键^[3]。按图3设计尺寸公差建立 *X* 向装配尺寸链, 如图5所示。先对设计零件精度、装配精度进行校 核,验算零件图上标注的各组成环在加工后能否满 足装配要求。

装配尺寸链是指全部组成环为不同零件的设计尺寸(零件图上标注的尺寸)所形成的尺寸链, 封闭环是指尺寸链中在装配或加工过程中最后自 然形成的那个环,组成环是指尺寸链中对封闭环 有影响的全部环,组成环分为增环和减环^[6]。该 产品通过零件加工、装配后零件间保持一定间隙, 该间隙就是装配尺寸链中的封闭环 A₀。其中增环 A₁,减环包括 A₂ 及两处 A₃。封闭环的公差是所有 组成环公差之和。

根据设计使用条件,设计要求合成网络、盖板、 耦合枢纽之间的装配间隙在 0~0.03 mm 之间,即 封闭环 A_0 应为 $0_0^{+0.03}$ 。



如表1所列,通过表1中公式进行尺寸链公差校核。

Tab. 1Dimensional chain formula			
项目	公式/mm		说明
尺寸公差值	T = ES-EI	(2)	其中 ES 指尺寸上偏差, EI 指尺寸下偏差。
封闭环的 基本尺寸	$L_0 = \sum_{i=1}^m \zeta_i L_i$	(3)	下角标0表示封闭环, <i>i</i> 表示组成环及其 序号, ζ 表示传递系数,对以直线尺寸链中 增环的传递系数 ζ_i =+1,减环的传递系数 ζ_i =-1。 <i>m</i> 表示组成环个数。 <i>L</i> 表示增环
封闭环的 极值公差	$T_{0L} = \sum_{i=1}^{m} \zeta_i T_i$	(4)	同上
封闭环的 中间偏差	$\Delta_0 \sum_{i=1}^m \zeta_i (\Delta_i + e_i \frac{T_i}{2})$	(5)	e表示相对不对称系数,在稳定的工艺过程中,工件尺寸趋近正态分布,可取 e=0。 其它同上
封闭环的 上偏差	$ES_0 = \Delta_0 + \frac{1}{2}T_0$	(6)	同上
封闭环的 下偏差	$EI_0 = \Delta_0 - \frac{1}{2} T_0$	(7)	同上

表1 尺寸链相关公式^[6]

由式(2)计算: A_1 的公差 $T_1 = 0.03$, A_2 的公差 $T_2 = 0.04$, A_3 的公差 $T_3 = 0.06$ 。

由式(3)计算:封闭环 A_0 的基本尺寸 $L_0 = A_1 - A_2$ - $A_3 - A_3 = 0$ (带入图纸尺寸)。

由式(4)计算:封闭环极值公差 $T_0 = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = 0.03 + 0.04 + 0.06 + 0.06 = 0.19_{\odot}$

已知: A_1 的中间偏差 $\Delta A_1 = +0.015$, A_2 中间偏 差 $\Delta A_2 = 0$, A_3 中间偏差 $\Delta A_3 = 0$ 。

由式(5)计算:封闭环 A_0 中间偏差 ΔA_0 = +0.015-0-0-0=+0.015

由式(6)计算:封闭环 A_0 上偏差 ES_0 =+0.015+0.19/2=+0.11。

由式(7)计算:封闭环 A₀ 下偏差 EI₀ = +0.015-0.19/2=-0.08。

则,封闭环A₀极限尺寸=0+0.11 -0.08(按零件公差加工形成)≠0+0.03 0(按装配要求)。

即若直接按零件公差加工,最终的装配会出现 过渡配合,最大间隙可能达到+0.11 mm,最大过盈 量可能达到0.08 mm,而不一定能满足设计要求的 装配间隙0~0.03 mm(即0+0.03 0)。

所以,在加工中不能完全按照图纸公差进行零件加工。封闭环的公差小于或接近各组成环的公差 之和时,就要压缩各组成环的公差,从而提高了零件 的加工难度^[7]。在零件工艺设计中,工艺尺寸链的 计算正确与否是保证产品质量的关键^[7]。如何安 排各组成环的公差,直接影响各组成环的加工难易 程度和可实现性,必须合理安排各组成环的公差,利 用现有加工条件,满足设计的零件图纸要求前提下, 同时满足及装配要求。

2.2 缩短尺寸链增大组成环公差

根据"最短尺寸链原则",在装配精度既定的条件下,组成环数目越少,则组成环分配到的公差就越大,组成环所在部位的加工就越容易^[8]。

所以尽量缩短装配尺寸链,建立工艺组件(耦 合枢纽+两件盖板1+两件盖板2),以工艺组件形式 加工配合面,如图6所示。将A₃、A₂、A₃合并成工艺 组件A₅;合并后有效缩短装配尺寸链,只要采用各 种方法保证A₁、A₅两个组成环的精度即可保证装配 要求,被合并的A₃、A₂、A₃加工精度只要保证图纸要 求即可,不再被装配要求限制。

根据极值法计算组成环 A₁、A₅ 平均公差 T_{av,L}= 0.03/2=0.015 mm(按式(1)计算);各组成环分配 到的公差加大了,适当降低了加工难度,但对于现有 设备还是不能可靠稳定地保证。



Fig. 6 Shortened assembling aimension chain

2.3 实测值驱动尺寸链最大公差传递

为了使尺寸链中各组成环分配到的公差最大 化,首次采用以实测值驱动尺寸链实现最大公差传 递共用的方法。先将某一组成环按最大公差加工, 再将该组成环加工后测量所得实测值放入尺寸链, 则相当于在尺寸链中该组成环公差等于0,其它组 成环可以分配到最大范围的公差。

即将 A₁ 按 0.03 mm 公差加工,加工后测量 A₁ 实测值,根据 A₁ 实测值驱动 A₅ 加工。A₅ 同时可以 分配到 0.03 mm 最大公差。如图 7 所示。两处组 成环可以同时使用最大公差 0.03 mm;采用现有生 产条件可以更可靠地保证。



2.4 修配法装配解决电镀公差累积

因为装配配合面全部有镀层,电镀在实际操作 中也存在镀层公差,虽然零件加工已经按镀层理论 厚度考虑扣除镀量,按扣镀后的镀前工艺尺寸控制, 但涉及装配的镀层较多,若单面按实际镀银厚度存 在 0.5~1 µm 公差计算,8 面镀层累积公差将达 到 4~8 µm,必须将电镀镀层厚度公差考虑到装配 环节。因为电镀后无法进行调整,所以必须通过加 工环节减小或弥补电镀公差累积。

2.4.1 确定修配环

由于该电镀公差累积相对较小,可以采用修配 法装配,将多个零件的电镀误差在修配环去除。但 应选择容易加工并且对其它装配尺寸链没有影响的 组成环作为修配环(补偿环的一种)^[8]。所选的修 配件应该修配方便且修配量不应过大,修配量太大 会影响形位精度等。根据该结构特点,合成网络四 端面 A₁ 尺寸因为操作不便,不适合作为修配环;将 工艺组件(耦合器枢纽+四盖板)的四处法兰端面 A₅ 尺寸作为尺寸链中的修配环,零件公差较大,修配后 也容易保证零件精度要求,可以在平台上研磨去除 部分材料,比较便于操作及检验。其公差累计如图 8 所示。

2.4.2 提高修配精度

修配环尺寸确定时,应考虑使其修配量足够且 最小,因为修配工作一般都是通过后续加工(如锉、 刮、研等),修去修配环零件表面上多余的金属层, 从而满足装配精度要求^[9]。





为提高修配精度,应尽量减少不确定电镀累积 公差影响,将尽量多的实际镀层厚度加入装配尺寸 链,安排其它件先电镀,仅将修配环四盖板暂不电 镀。根据实测值研磨四盖板配合面,四处法兰端面 均匀微调0~5μm以内;修配量较小,容易控制在零 件对称度、平面度、垂直度范围内。

2.5 多级组件交互工艺流程设计

通过装配尺寸链分析优化、确定各组成环的最 大可用公差后,必须通过对零件、组件、工艺组件等 的工艺流程交互设计,实现工艺组件加工、实测值驱 动、镀层计入、修配法控制镀层公差累积,保证零件 配合尺寸及最终装配精度,工艺流程如图9所示。





2.6 利用现有设备精度

通过装配尺寸链分析优化、确定各组成环的 最大可用公差后,结合现有生产设备可达精度,基 本可以确定各零件、组件加工采用的工艺方法及 工艺余量。

对于不直接影响装配的组成环 A₂、A₃,按设备 可达精度控制尺寸精度及平面度要求(可满足图纸 要求)。A₂采用车铣复合设备加工,保证四面内腔、 四面安装盖板面尺寸、与中间通道垂直度、平面度、 对称度。A₃采用数控铣设备加工,法兰端面留工艺 组件加工余量,保证尺寸精度及平面度要求。

对于直接影响装配的组成环A₁、A₅,按0.03 mm 公差控制,设备精度可达。A₁采用慢走丝线切割线 加工,保证尺寸精度及对称度、平面度等形位精度。 工艺组件A₅采用电火花成型加工,留修配余量,保 证尺寸精度及对称度、平面度等形位精度。

通过该方法生产的产品满足图纸尺寸、形状、位 置精度及表面粗糙度等要求及装配要求。产品(如 图 10 所示)已经顺利交付用户,满足电性能要求。



图 10 产品实物图 Fig. 10 Manufactured product

3 结论

给出基于工艺尺寸链理论进行工艺设计的步骤,通过综合考虑各零件、组件的加工工艺性、对装配尺寸链分析优化,明确工艺过程的控制点,目标是将必须保证的精度、可以降低的精度都控制在现有工艺设备可达精度范围内。通过以工艺组件形式加工缩短尺寸链、以实测值驱动尺寸链最大公差传递共用,合理确定零件及组件公差精度;并通过镀层计入装配、修配法装配等控制镀层公差累积;通过对零

件、组件、工艺组件等工艺流程交互设计,利用现有 设备可达精度进行加工,最终保证零件精度及装配 精度。

该方法基于基本的尺寸链理论,便于应用,适 用于单件小批生产,为类似组成环数目较多而装 配精度要求较高的产品工艺设计及结构设计提供 新的思路。

今后将继续深化 Q/V 载荷工艺技术研究,进 一步提高精密加工、装配技术,更好地满足馈源组件 集成化、轻量化、多端口化需求,为后续的 HTS 通信 卫星制造、工程化应用奠定技术基础。

参考文献:

- [1] 左朋,潘琳,马尚. Q/V 频段通信载荷初步分析[J]. 空间电子技术,2017,14(1):31-37.
- [2] 丁伟,陶啸,叶文熙,等.高轨道高通量卫星多波束天线技术研究进展[J].空间电子技术,2019,16(1):62-69.
- [3] 李长河,丁玉成.先进制造工艺技术[M].北京:科学 出版社,2011.
- [4] 卢绍鹏,候管仲.宽带四臂 TM01 模行波耦合器电气及 结构设计[J].空间电子技术,2014,11(2):42-46.
- [5] 郭洪英. Q/V 频段波导传输系统电磁损耗研究[J]. 空间电子技术,2021,18(1):71-74.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.尺寸链 计算方法:GB/T 5847-2004[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [7] 石玉娥.关于工艺尺寸链计算问题探析[J].制造技术 与机床,2014(4):86-89.
- [8] 甘永立.几何量公差与检测[M].5版.上海:上海科学 技术出版社,2001.
- [9] 苏建修. 机械装配中修配法修配量的计算[J]. 制造技术与机床,2002(12):55-57.