

单脊波导裂缝天线面阵的研制

Development of Single-Ridge Waveguide Slotted Array Antenna

中国电子科技集团 38 研究所 朱春临 汪方宝 殷东平

[摘要] 分析了某机载雷达单脊波导裂缝天线面阵的结构特点和制造要点。在此基础上拟定了天线面阵精密制造流程,并阐述了其中的关键工艺措施。

关键词: 机载 裂缝天线面阵 制造要点 工艺措施

[ABSTRACT] The structure features and main manufacturing points of a single-ridge waveguide slotted array antenna are analyzed. Based on this, a precise manufacturing procedure involving various specialized technologies is brought up. And the critical technical measures for the process are also explained.

Keywords: Airborne Slotted array antenna Main manufacturing points Technical measures

1 项目介绍

非对称单脊波导裂缝线阵是一种新型相控阵天线辐射单元,具有增益高、副瓣电平低、能满足宽角扫描以及抗干扰能力强的优点,在机载雷达、通信等领域有广泛的应用前景。图 1 为某机载雷达的波导裂缝阵列天线。该阵列天线外形尺寸为 400mm×1 600mm,由 4 块面阵拼装而成。



图 1 天线面阵

Fig.1 Array antenna

每个天线面阵由馈电腔和辐射板真空钎焊成形,布置多路单独馈电的裂缝线源。单路线源结构为非对称单脊共线形式,即在普通单脊波导的两侧与辐射裂缝相对应的位置上布置不对称的凹台(图 2)。这种结

构形式的优点是可以压缩波导宽边的尺寸,但也使馈电腔变得很复杂。

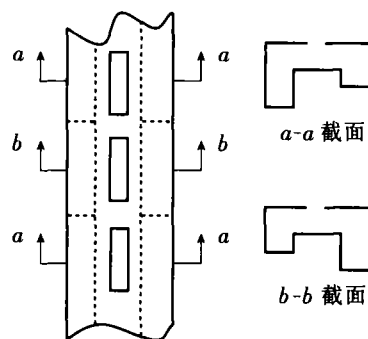


图 2 单路线源截面

Fig.2 Single-channel section of array antenna

这种单脊波导裂缝天线面阵具有以下特点:

- 精密复杂结构: 馈电腔内密布凸脊和非对称凹台;辐射板上共有 384 处长度各不相同的裂缝;零件尺寸精度要求 $\pm 0.02\text{mm}$,粗糙度 $R_a 1.6\sim 0.8\mu\text{m}$;
- 大面积薄壁、薄板类零件,刚性差:面阵外形尺寸 400mm×400mm,总厚度仅 $(14\pm 0.05)\text{mm}$,馈电腔壁厚要求 $(1.5\pm 0.02)\text{mm}$;
- 高组装和成形精度:面阵成形后辐射缝相对于波导单脊和凹台位置精度 $\pm 0.02\text{mm}$,平面误差要求小于 0.1mm。

2 天线制造要点分析及流程设计

通过分析天线面阵的结构特点,可以看出其制造的要点是:天线面阵结构设计需适应精密制造要求;解决好大面积低刚性天线零件的可靠装夹问题;精密薄壁薄板零件加工的精度保证和变形控制;狭长密集焊缝组件整体成形的钎焊质量和平面精度控制。

根据本单位制造工艺的特点,我们拟定了如图 3 所示的工艺流程,从设计、零件加工和整体成形 3 个主要环节入手,对单元工艺技术进行了有效集成。

本文主要就天线面阵研制的关键技术进行探讨。

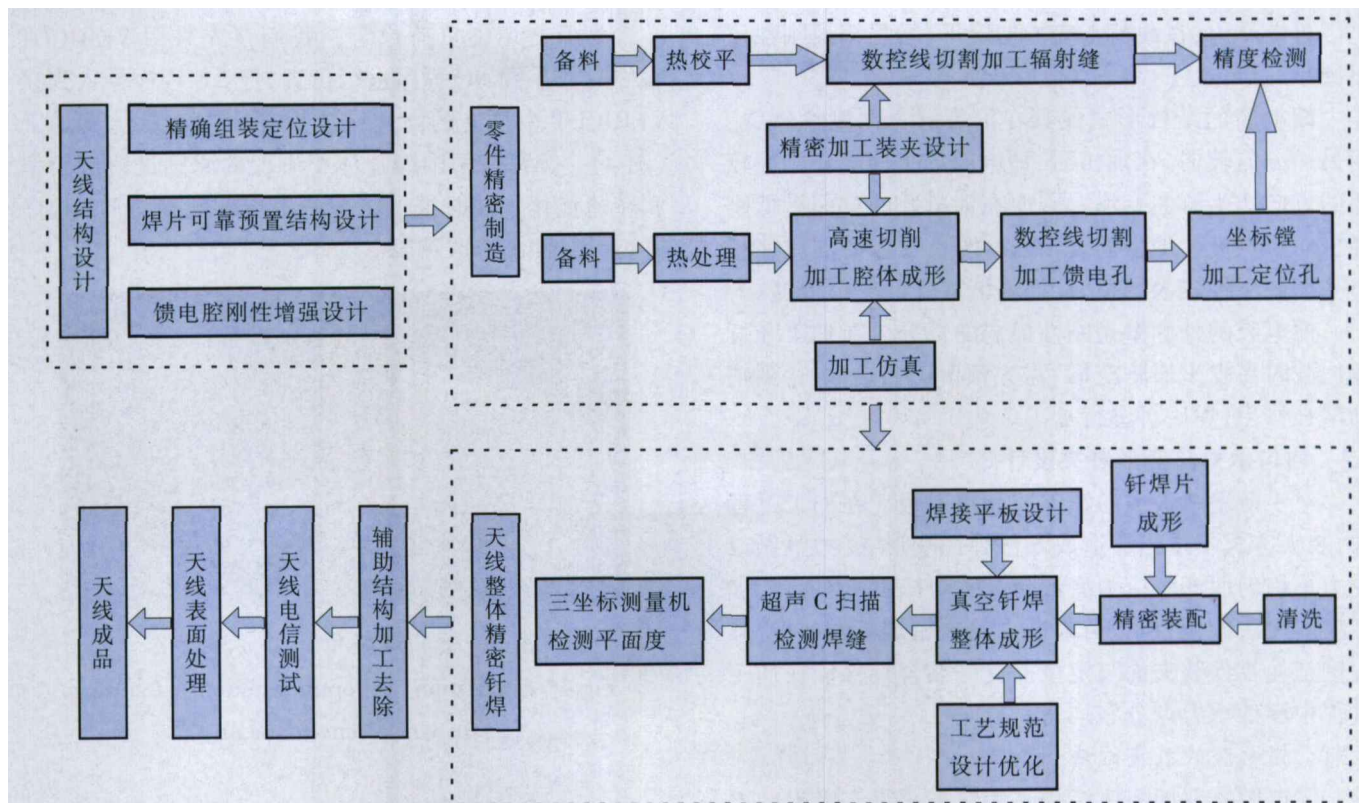


图3 天线面阵精密制造流程

Fig.3 Precision manufacturing procedure of array antenna

3 天线研制的主要工艺措施

3.1 面向制造的面阵设计

3.1.1 精密组装的定位方式设计

定位方式的设计应考虑:

- 制造全过程采用统一的定位基准, 避免因基准不统一而造成误差;
- 定位方法简单易行, 不产生定位干涉和钎焊加载的干涉, 定位精度高;
- 定位基准自身的加工精度容易保证。

对于板类零件, 一般采用大平面加轴线平行的两圆孔的组合表面定位方式。但要保证面阵的组装精度达到 $\pm 0.02\text{mm}$, 两个定位孔的中心距公差带必须非常小。这样的加工精度即使在高精度的加工设备上也难以保证。

针对这种情况, 我们采用一种四点削壁定位方式, 即以十字排列的腰形槽侧边作为定位基准。这种定位方式的特点是大大降低了定位孔中心距的公差要求, 使加工变得容易实现; 通过将4个腰形槽侧边分别平行于机床的X和Y轴布置, 可以得到很高的加工精

度; 误差最大的地方是零件的4角, 中心区域定位精度很高, 符合雷达天线实际使用的要求; 定位块和定位槽之间可选择很小的配合间隙, 从而得到很高的定位精度。

3.1.2 焊片可靠预置结构设计

由于腔体壁厚只有1.5mm, 钎焊缝细长, 如何将焊片可靠地装配在板和腔之间必须十分注意。结合真空钎焊工艺特点, 我们采用了销式榫头结构。即在在馈电腔壁上均匀设计布置榫头。这种结构的优点是:

- 榫头和腔体一起成形, 位置精度高;
- 有效地将低刚性的辐射板和焊片辅助定位;
- 销孔和榫头设计有一定的间隙, 可以辅助定位, 但不会产生定位干涉;

· 装配时零件处于自由状态, 利用工件自重和压板固定, 不会产生装夹变形, 焊后应力变形小。

3.1.3 馈电腔的刚性增强设计

零件受载荷变形的数学模型:

$$KU = F,$$

式中, K 为零件整体刚性矩阵; U 为零件各节点的位移矩阵; F 为零件所受载荷矩阵。

可以看出,在载荷不变的情况下,增强零件刚性可以减小变形量。

馈电腔的结构形式使其在沿裂缝方向刚性较强,而另一方向较弱。在加工后,馈电腔的平面会在刚性较弱的方向产生弯曲变形,因而在馈电腔的背面沿低刚性方向重点设计加强筋可在减轻零件重量的同时使整个平面的刚性较为均衡,从而降低零件的变形程度。

馈电腔的外侧壁是刚性最弱的部分,在加工和钎焊加载时易发生塌陷变形。需先预留工艺余量,达到辅助增强作用,焊后再进行加工。

3.2 均匀承力防变形装夹设计

对于薄壁薄板类的馈电腔和辐射板,在加工过程中,装夹方式不适当会造成零件弹性变形、受力颤振或受力不均匀而产生应力变形,致使零件表面质量差,加工精度无法保证。所以可靠装夹是精密加工的前提,其关键是使零件装夹面与定位面良好贴合及保证在加工过程中零件承力点分布均匀。

3.2.1 馈电腔的装夹方法

馈电腔是双面腔体结构,无法采用真空吸附的方式。如果按照常规加工的装夹方法,在零件四边搭压板,则在加工过程中由于切削力和切削热的影响,难以保证面阵中间部分与定位面贴合。所以我们设计了专门的数控铣支撑夹具,采用底面螺钉吊紧的装夹方式。在馈电腔结构设计时即考虑均匀布置工艺螺钉孔,通过提高装夹面和夹具定位面的平面精度,保证馈电腔在加工时底面与定位面完全贴合,不产生弹性变形,同时可以满足一次装夹中内腔型面的加工连续性,确保加工精度要求。

3.2.2 辐射板的装夹方法

真空吸附是薄板类零件加工时常用的装夹方法,但辐射板上密布通缝,精加工这些裂缝时会使吸附失效。磁性吸附的方法可以很好地解决这个问题,并且具有操作简便、夹持均匀、贴合可靠的优点。同时设计了线切割支撑夹具。夹具体是两面精磨的钢板,平面度和两面平行均为 0.05mm,并事先加工出 384 个长槽以让开辐射槽。

3.3 零件精密制造工艺要点

3.3.1 馈电腔数控加工工艺设计

为保证薄壁馈电腔加工精度和减少变形,必须降低切削过程中切削力和切削热以及切削不均匀性。高速切削加工的切削力和切削热比常规加工低很多,因此很适合作为馈电腔的精加工方法。

为保持切削负荷稳定,我们首先采用 VERICUT 软件对数控铣 NC 程序进行仿真。把 NC 程序导入到在 VERICUT 中建立的高速铣虚拟环境中进行仿真加工(图 4)。按每齿切削碎片体积不变的原则进行进给率和转速优化,同时根据仿真中出现的问题对 NC 程序进行针对性的修改编辑。

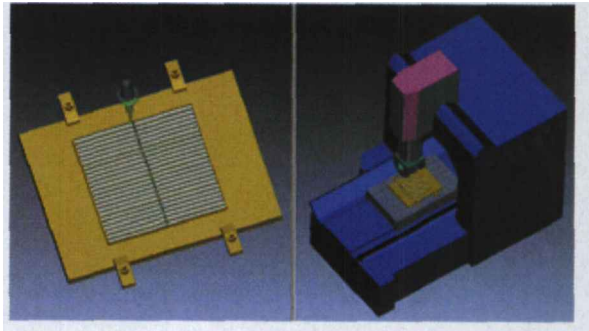


图 4 虚拟环境中加工仿真优化

Fig.4 Simulation and optimatizon of machining in virtual environment

此外除前述的装夹方式外,还需针对高速切削特点进行加工工艺设计:

- 根据零件材料特点,选择高耐用度、刃口锋利的涂层硬质合金刀具;
- 与常规数控加工相比,采用高转速、大进给和小切深的切削参数;
- 采取高速顺铣、恒定冷却的切削方式;
- 按加工中实时刚性逐渐降低的原则,采用从中间向两边对称进行的加工路线,从中心向外环切和逐层进给的走刀策略;
- 平滑过渡,降低进刀、转折和急速转向冲击。

3.3.2 馈电腔加工误差分配方法

馈电腔的内腔、脊形馈电口和馈电口两侧的定位孔是在不同工序中完成的。不同要素的加工都会产生一定的误差,需根据定位方式分析。误差的分布规律是中间最小、越往两侧误差越大。这些误差尤其是两侧的累积误差会影响下一道精加工工序的精度,所以必须尽量减少这些误差及其造成的精度损失。具体分析如下:

(1)加工波导内腔时,要确定合适的铣削顺序:先加工中间的波导脊、非对称凹台,然后依次向两侧加工。这种加工顺序比从一端开始的加工顺序产生的累积误差减小一半,而且也符合零件刚性要求。

(2)为了保证面阵脊形馈电口与波导腔内壁的位置精度,在加工时,先用数控线切割按馈电腔定位孔的要求在夹具上加工出相同的削壁定位孔。这样做的优点是在加工出定位孔的同时也找正了馈电腔的中心位置,消除了线切割的找正误差,节省了加工时间。此外,确定基准中心后,还应根据波导内腔的实际位置对每个输入口的中心线尺寸进行补偿修正。

(3)面阵每12路线源与一个整体口径变换刚性连接,通过12组输入口两侧的定位孔保证其精确组装。每组定位孔对输入口中心线对称度的要求为0.05mm。如果只是单独保证每个输入口定位孔的位置要求,则会使12组定位孔产生较大累积误差,不能保证天线和口径变换的装配精度。通过坐标镗床高精度的光学镜头找正输入口位置,我们采用了“误差对半均分”的方法,这种误差分配办法可以将累积误差的大小减半,使12组定位孔整体位置精度得到保证,进而保证了天线和口径变换的精确连接。

3.3.3 辐射板精密加工方法选择

辐射板是带通槽的薄板,这类零件一般可采用数控铣或者数控线切割的方法加工。考虑辐射板厚度仅1mm,刚性差,裂缝宽度很窄且相互间距小,很容易产生变形,所以选择数控线切割的加工方法。虽然数控线切割与数控铣相比效率稍差,但也有装夹简单、零件加工变形小、无需去毛刺、无小直径刀具刚性差的影响等优点。而且可以利用设备自带的自动穿丝功能和多件同时加工来提高辐射板裂缝的加工效率。

此外,为保证辐射槽对定位基准的位置精度,采用辐射槽和定位孔一次加工完成的方法,可以减少多次基准转换带来的误差。

3.4 整体钎焊工艺要点

天线面阵成形采用真空钎焊工艺。真空钎焊是一种无钎剂精密焊接方法,与其他大面积钎焊,如盐浴焊、气体保护焊等相比较,具有夹具简单、焊接变形小、精度高、焊后无需清洗的优点。

天线面阵零件厚度薄,焊缝密集,钎焊面积大,为保证焊接质量的要求,除选择合适的钎焊工艺参数外,还应考虑焊接夹具的设计和可靠的钎料放置方式。

3.4.1 真空钎焊夹具设计

合理的装夹是保证零件获得高质量钎焊接头和平面精度的必要手段,其中最重要的是基准平板的设计。采用奥氏体不锈钢作为平板材料,利用其高温稳定性保证钎焊温度下有足够的刚性和强度,还可重复使用。

平板的基准面直接影响天线成形精度,其平面度可按天线精度的一半来设计。此外,还需认真考虑如何有效地使活性剂到达焊缝位置以去除氧化膜,所以在平板上设计了专门的结构,利用辐射缝作为活性剂的通道。

3.4.2 钎料成形和可靠预置方式

根据面阵的结构特点,采用铝钎料箔片作为焊片。焊片厚度很薄,与焊接接缝的形式相同,成型具有一定的难度。采用刀具切削的方式很容易使焊片边缘出现波浪形毛刺;采用冲切的方式则需要多品种的冲模,批量小时经济性较差。实际加工中我们采用线切割的方法,成形质量较好,但生产效率稍低。

钎焊片按照馈电腔上定位榫头的位置加工出小孔,组装时将对应的孔套入分布式定位榫头中,使之可靠地水平装夹在零件之间。钎料量的使用原则是既保证零件具有足够的钎着率和致密圆角,又不会产生钎料的堆积或在零件表面过多的漫流。

3.4.3 真空钎焊焊缝质量检测

天线面阵钎焊缝的检测采用超声C扫描的方法,其原理是利用空气声阻抗值低而对声压反射率高的特点,如果钎焊缝处存在未焊透或者气孔,则会产生很强的超声回波被探头接收,从而呈现与正常钎焊缝不同的影像。图5为天线面阵局部超声C扫描成像图。

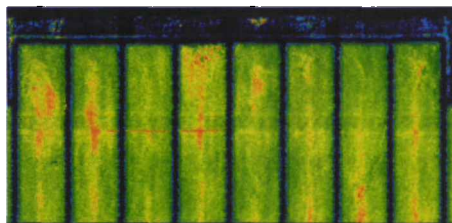


图5 天线面阵局部焊缝成像

Fig.5 Detection imaging of local brazing seam in array antenna

4 结束语

单脊波导裂缝天线面阵的制造涉及工艺技术多,具有很大的难度。按上述工艺,我们完成了零件精密加工和整体成形,经超声C扫描和三坐标测量机检测表明,焊缝钎着率高,馈电腔和辐射板的精度和表面粗糙度达到设计要求,焊接后面阵基本无变形,平面度 $<0.1\text{mm}$;辐射缝和单脊凹台位置精度达到 $\pm 0.02\text{mm}$ 。

通过该天线面阵的研制,其中制造难点的解决思

(下转第79页)

波位置分布。

为了进一步说明带包覆层星孔药柱的结构特点,利用扫描成像系统提供的层析分析功能,对药柱进行层析。计算机层析成像是用计算机再现被检验对象的层析面或片的图形。特征扫描系统提供的是超声反射层析图,取不同深度层 H 的声场信息,利用反射信号的振幅和渡越时间能够精确地判断出不连续性或材料界面的大小和位置,对于缺陷类型的识别,需要由外及

里地分析各层的检测信号。层析成像的方法是:先选择层析的范围,然后调整幅度闸门的高度,声波幅值超过闸门的点用红色标在成像图中,低于阈值的用其他颜色标注,见图 3(a)。图 4 所示为 0~49mm 范围内的幅度成像层析图,阈值为 30mV,表明药柱自外表面向下 34mm 内没有超过阈值的反射波,星孔结构位于 34~49mm 范围内,并且在药柱的一端星孔结构消失,缺陷出现在星孔处。

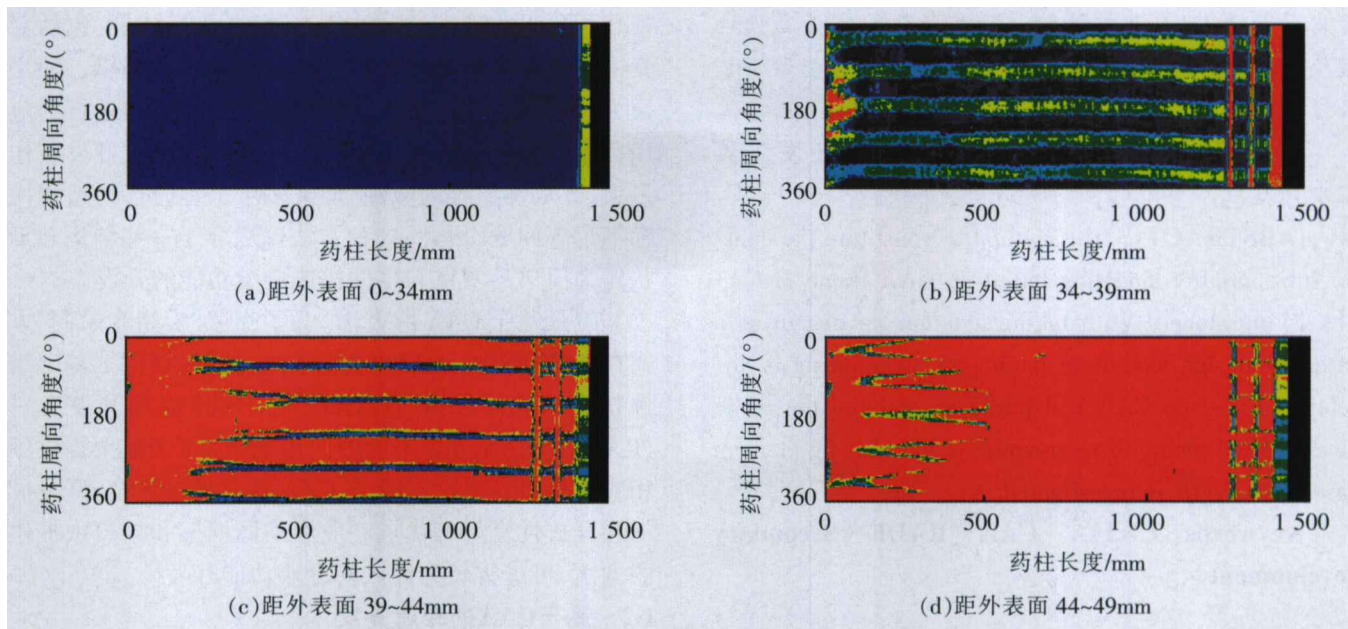


图 4 包覆层药柱的层析成像

Fig.4 CT imaging of solid propellant with inhibitor

4 结束语

本课题设计完成了特征扫描成像系统,并使用这套设备对多种结构的药柱进行了扫描成像,检测结果表明,特征扫描成像检测方法可提高超声检测药柱的可靠性,可对检测结果进行多种形式的显示,系统软件还提供了频谱分析及层析成像的功能。制作的系统已用于某企业药柱的日常检测。

参 考 文 献

- [1] 隋玉堂,杨兴根. 火箭发动机界面脱粘分析及检测新方法. 飞航导弹,2001,1:43-48.
- [2] 杨挺青,罗文波,徐平. 黏弹性理论与应用. 北京:科学出版社,2004:1-11.
- [3] 考尔斯基 H. 固体中的应力波. 北京:科学出版社,1958:104-109.
- [4] Barcohen Y, Crane R L. Acoustic-backscattering imaging of subcritical defects in composites. Materials Evaluation,

1982, 40(9):970.

- [5] Teagle P R. The quality control and non-destructive evaluation of composite aerospace components. Composites, 1983, 14(4):115.

(责编 钟元)

(上接第 75 页)

路得到了验证,可以对今后类似产品的研制提供了一定的借鉴。

参 考 文 献

- [1] 叶尚辉,李在贵. 天线结构设计. 西安:西北电讯工程学院出版社,1986.
- [2] 上海市大专院校机械制造工艺协作组. 机械制造工艺学.福州:福建科学技术出版社,1995.
- [3] 张冲,汪方宝,朱春临. 基于 VERICUT 的虚拟制造技术.合肥工业大学学报,2004,27(1):109-112.
- [4] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册,焊接分册. 北京:航空工业出版社,1996. (责编 根山 依然)

2008 年第 1 期·航空制造技术 79