

# 某机载雷达柱式天线框架的研制

## Development of Columnlike Antenna Frame in Airborne Radar

中国电子科技集团公司 38 所 朱春临 左防震

**[摘要]** 通过实例介绍了使用定制铝板折弯成 U 形件,在其上精加工出精密安装孔、面,再将其他部件与其组装成天线框架的工艺方法。研制过程中成功解决了大尺寸铝板折弯、U 形件工艺过程刚性增强和铸造铝合金热处理强化等技术难题,产品实物已经通过相关力学试验和飞行试验。对天线框架研制中的工艺工作要点做了简要说明,还介绍了研制工艺策划工作。

**关键词:** 天线框架 工艺设计 产品实现

**[ABSTRACT]** A sort of process method by an example is introduced, which includes custom aluminum bented into a U-shaped, after finishing precision surface and holes using for mounting, then other parts of the antenna frame are assembled into. Techncl problems, such as large-size aluminum benting, rigid of U-shaped enhancing and cast aluminum alloy strengthening, are solved successfully, and the product has passed relevant mechanical and flight tests. Main points of the development for the antenna frame are described briefly, and process planning is introduced as also.

**Keywords:** Antenna frame Process design Product realization

在现代机载雷达中,相控阵技术已经得到广泛的应用。相控阵雷达的核心是天线,而天线框架作为天线零部件的安装平台和精度基准,正受到越来越多的关注。相控阵雷达天线框架按照结构形式主要分为板式、箱式、柱式等,目前主要的工艺方法有铆接、焊接后精加工或者采用板材整体加工成形等。本文介绍了一种使用铝板折弯成 U 形件,在其上精加工出精密安装孔、面,再将连接部件与其组装成形的柱式天线框架的工艺设计与实现过程。

### 1 工艺设计分析

某机载雷达天线框架的外形尺寸为 5216mm × 764mm × 418mm,主要由 U 形件、端轴、盲配板等构成,其结构外形如图 1 所示。天线框架端轴与安装在机腹下的天线座挂架相连,天线阵面在天线座的驱动下可沿俯仰轴转动,在载机上实现俯仰向机械扫描功能。

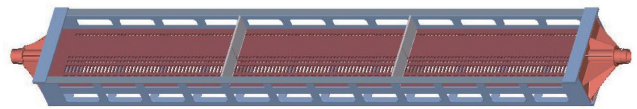


图1 天线框架三维图

Fig.1 Three-dimen sional model of antenna frame

#### 1.1 设计要求

天线框架是雷达天馈系统的安装平台和承力结构件,作为系统精度基准,其静态需要实现的主要功能包括:保证天线辐射单元在法向(Z向)、方位(X向)、俯仰(Y向)3个方向的位置一致性;保证天线阵面相对于安装支点(前、后端轴)的位置精度。图2是天线框架的剖视图,其设计要求如下:

- (1)前、后端轴转动部分同轴度为 0.30mm;
- (2)天线安装面平面度为 0.20mm,对前、后端轴轴线平行度为 0.4mm;
- (3)天线安装面孔系精度为  $\pm 0.1\text{mm}$  (X、Y向);
- (4)盲配板孔系精度为  $\pm 0.1\text{mm}$  (X向)、 $\pm 0.03\text{mm}$  (Y向);
- (5)天线安装面与盲配面深度尺寸公差为  $\pm 0.15\text{mm}$  (Z向)。

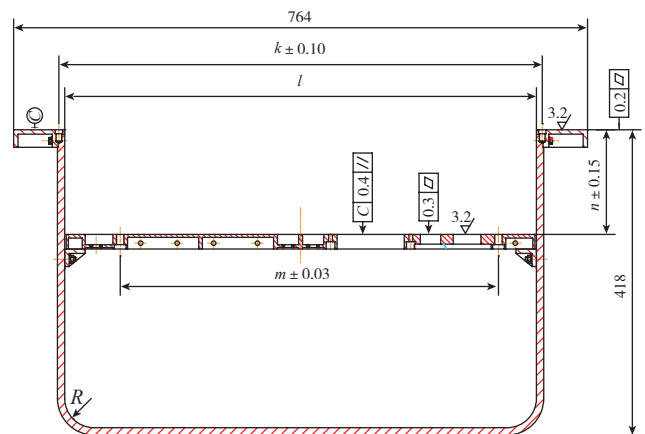


图2 天线框架剖视图

Fig.2 Cutaway view of antenna frame

这些技术要求涉及大跨度外圆同轴度保证、窄长条大面精密铣削和密集高精度孔系加工等工艺技术难题。同时,受到装机条件、系统安装和维修维护等诸多条件

的限制,天线框架两个侧面设计了许多减轻、安装窗口,需要安装件参与受力,框架自身刚性较差。综合考虑到天线框架尺寸规模、精度要求与刚性不足等工艺技术难点,可以看出,产品对工艺技术提出了严峻的挑战。

## 1.2 工艺分析

工艺方案初步设计要基于现有工艺知识和制造资源,将所有设计要求落实分解成有保证、可实现的工序要求,对无法分解的项目开展工艺试验<sup>[1]</sup>。在本天线框架工艺方案初步设计时,主要有3条实现方案可供选择。方案一称为加工法,就是将留有加工余量的零件组装成天线框架毛坯后,再在大型数控龙门铣上一次全部加工实现所有技术要求。方案二称为装配法,就是将设计要求逐条分解到具体零件上,最后在工装夹具上完成精密装配。方案三称为合成法,就是采用边加工边装配策略,逐步依次实现设计要求。3条方案对保证上述5条设计技术要求的难易程度对比如表1所示。

表1 3种工艺方案比较

工艺方案	设计要求(1)	设计要求(2)	设计要求(3)	设计要求(4)	设计要求(5)
加工法	困难	容易	容易	困难	困难
装配法	容易	困难	困难	容易	中等
合成法	中等	容易	中等	容易	中等

加工法对于机床能够加工到的部位容易保证精度,但对大跨度外圆同轴度保证、深腔密集高精度孔系加工等难以实现。装配法降低了工艺难度,但对于窄长条零件来说,由于基准面的影响因素,装配精度不容易保证。合成法综合了加工法与装配法的优点,首先尽可能采用整体加工的方案,以最大限度地减少各零件之间的累积误差;同时将直接加工困难的部分分离成独立的零件,既保证了尺寸精度,又具有可实现性。

## 2 工艺方案研究

### 2.1 方案设计

采用合成法方案以后,(2)、(3)、(4)项技术要求由零部件直接加工保证,(1)、(2)项技术要求最终通过装配保证。前、后端轴转动部分同轴度由框架安装孔同轴度、前后端轴安装面对转轴平行度以及装配误差等3部分构成。天线安装面与盲配面深度尺寸由天线安装面与盲配板安装面距离减去盲配板厚度形成。工程设计时,组成环公差主要在平均公差的基础上,根据组成环尺寸大小、结构工艺特点和加工难易程度等进行适当调整得到初步数值,复核计算满足设计要求后确定。本设计中,取框架两端安装孔加工同轴度 $\delta_1=0.20\text{mm}$ ,端轴

安装面对转轴平行度 $\delta_2=0.10\text{mm}$ ,装配误差 $\delta_3=0.10\text{mm}$ ,根据均方根法对天线框架前、后端轴转动部分装配同轴度 $\delta$ 核算如下:

$$\begin{aligned}\delta &= \sqrt{\delta_1^2 + 2 \times \delta_2^2 + \delta_3^2} = \sqrt{0.2^2 + 2 \times 0.1^2 + 0.1^2} \\ &= 0.265\text{mm} < 0.30\text{mm} \quad \circ\end{aligned}$$

取天线安装面与盲配板安装面距离公差为 $\pm 0.08\text{mm}$ ,盲配板厚度公差为 $\pm 0.05\text{mm}$ ,根据极值法进行封闭环尺寸链计算,得出天线安装面与盲配面深度尺寸公差为 $\pm 0.13\text{mm}$ ,小于设计要求的公差值 $\pm 0.15\text{mm}$ 。

接下来,就是天线框架主体部分工艺成形方法确定。考虑到机载使用环境、柱式结构、安装窗口的存在等不利因素,焊接、整体加工和铆接方法都难以满足要求。本设计中,提出一种使用整块铝板折弯成U形件,利用折弯塑性变形来提高部件局部刚性,并围绕这些局部刚性增强部位构建空间主承力框,再在相应部位安装上连接件后整体加工成形。

本设计中的技术难点是要在低刚性U形件上实现高精度安装孔、面加工,工艺设计时必须针对基准统一、装夹可靠、工艺刚性增强以及精度保持等采取相应措施。为此,工艺方案设计时需要考虑以下几点:

(1)使用专用安装平台,避免多次装夹中安装基准的不一致性;

(2)采用工艺刚性增强支撑,增加天线框架加工过程工艺系统刚性;

(3)通过边加工边装配,使天线框架的刚性在加工过程中逐步增强,最后进行高精度的安装面、孔加工。

### 2.2 工艺路线设计

天线框架主要工艺流程可以概括为:定制折弯专用铝合金板材,设计大圆弧折弯模具,在大型折弯机上成形为U形件。折弯件粗加工出减轻、安装窗口后在专用平板上使用工装进行刚性增强,加工出安装面、孔后再与结构件组装,接下来继续进行安装面、孔精加工。加工过程中对U形件基准边监测,并随着精加工的进行不断采取工艺保形措施。最后将精密加工成形的安装板以及热处理强化处理的端轴与部件组装,并在机床上对天线框架的制造精度进行在线检测。图3为天线框架的主要工艺流程图。

天线框架工艺研制过程重点需要解决的技术问题包括材料选择及定制、折弯模具设计加工及试模、两种安装平板设计制造、刚性增强工装设计制造、U形件高速加工技术和ZL205A铝合金热处理强化处理等。工艺上需要对其中的主要单元技术进行有效集成才能最终保证天线框架的设计要求,同时,在天线框架研制过

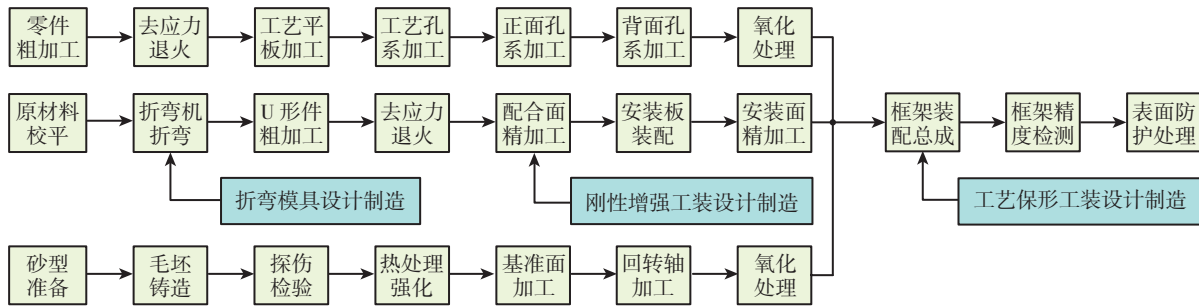


图3 天线框架工艺流程  
Fig.3 Process of antenna frame

程中要发挥工艺策划在产品实现过程的指导性作用。天线框架工艺策划工作的思路是：以 U 形件成形为主线、分步骤实施、尽可能并行同时开展工作和工艺试验提前开展以降低风险。

### 3 关键工艺实现

#### 3.1 U 形件工艺设计

U 形件采用板料直接折弯成形工艺,材料采用 5A06 (O) 高强度防锈铝合金板,其抗拉强度和抗腐蚀性等综合指标要优于同状态的 2A12 铝板。板料厚度选择主要取决于天线的力学要求,同时兼顾成形工艺的需要。为了保证铝板良好的折弯性能,工艺上采用专门定制的铝板,保持材料纹向与折弯母线方向一致。同时,毛坯板的校平处理也是工艺上必须考虑的。校平机上机械校正方法可以改善局部凹凸不平,但会增加内部应力,并对长度方向大弯无能为力。所以本方案中采用了一种热处理校平的方法,图 4 显示了热处理校平的工艺参数曲线,考虑到尺寸因素,在低温阶段安排了一段较长的保温时间。热处理校平工艺的使用同时可以有效改善铝合金材料折弯开裂倾向。

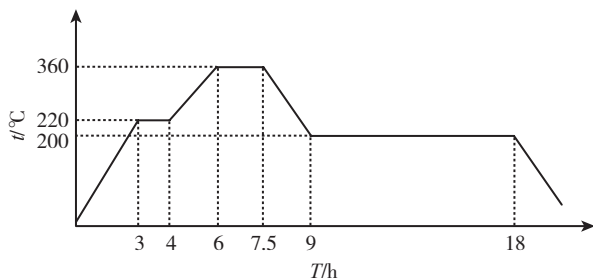


图4 热处理工艺参数曲线  
Fig.4 Curve of heat treatment

折弯圆角的选择,是成形工艺的开裂倾向与冷作强化效果的折中,本设计中折弯内圆角取 4 倍板料厚度。折弯模具设计应考虑模具加工所需的刚强度外,还应考虑零件成形时的回弹补偿和成形调整,确保相邻二侧

折弯边的垂直度。模具材料选择 42CrMo 合金钢,经调质处理后硬度要求不低于 HRC25。上模采用多件分段短模,拼接成需要长度,工作面精磨成形,安装后保证模具长度方向直线度不大于 0.1mm。模具圆弧半径和成形压力进行计算如下所示<sup>[2]</sup>。

模具圆弧半径计算:

$$R = r / [1 + 3 \times \delta_s \times r / (E \times w)] = 0.9756 r$$

式中,  $R$  为模具圆弧半径,  $r$  为折弯半径,  $\delta_s$  为材料屈服强度,  $E$  为材料弹性模量,  $w$  为材料厚度。

成形压力核算:

$$P = 0.7 \times B \times w_2 \times \delta_b / (r + w) = 7.937 \times 10^{-3} \times \delta_b$$

式中,  $P$  为成形压力,  $B$  为材料宽度,  $\delta_b$  为材料抗拉强度。

在折弯设备选择上除满足工作行程与吨位要求以外,还必须设有下扰度补偿机构和下死点保压延时功能,从而保证零件折弯精度。同时为获得更好的尺寸精度,上模连接部分最好也能够装有补偿机构,用于抵消工作台和上模的扰度。

#### 3.2 端轴工艺设计

天线框架端轴为方圆变换壳式结构,主要精度要求是基准面形状精度和回转部分尺寸精度以及相对基准面位置精度。异形壳式结构非常适合采用铸造工艺方法,作为承力结构件零件自身强度要求高,综合两方面考虑,端轴采用 ZL205A 高强度铸造铝合金,该材料是目前铸造铝合金中抗拉强度最高的,其力学性能达到某些黑色金属和锻造铝合金的水平。合金的热裂倾向和显微疏松倾向较大,但略优于 ZL201 合金,应严格控制其铸造和热处理强化工艺过程。

考虑到端轴属于承受较大载荷的结构件,工艺上选择“淬火 + 不完全人工时效”的热处理强化规范,以提高材料的屈服强度,同时保持好的塑性。淬火的加热温度取决于铸件晶粒大小,针对低压铸造工艺特点,淬火温度设置为  $(540 \pm 5)^\circ\text{C}$ ; 保温时间则取决于零件尺寸大小与材料厚度,本次设置为 6h。在加热方式选

择上为了减少铸件内外温度差,一般选择阶梯加热的渐进方式,本设计中采用了盐浴加热的方式,很好的保证了铸件内部温度场的一致性。为了保证材料的强化效果,铸件从出炉到入水的时间必须控制在5~12s之间。不完全人工时效处理的规范是:160℃,保温4h,空气冷却。在精密加工工艺流程安排上,采取分步实现的策略,即首先对基准面进行首次精加工,并以此对回转部分精加工,最后以回转部分为基准对基准面进行再次精加工,从而满足端轴基准面形状精度和回转部分尺寸精度以及相对基准面位置精度。

### 3.3 盲配板工艺设计

盲配板正反两面有密集的高精度安装孔系,工艺难点是大面积薄板可靠夹持的实现。大面积薄板可靠夹持方式主要有压板加压、螺钉吊紧和真空吸附等。零件厚度达到20mm真空吸附存在一定风险,压板无法加压到盲配板中间部分,所以我们最终选择螺钉吊紧的方式。在安装板正反两面预留300个工艺吊装螺纹孔,将坯件两面精光后钻攻工艺螺纹孔,将零件用螺钉连接紧固在高精度铸铁平板表面,从而保证零件底面与定位面完全贴合,装夹可靠。

### 3.4 框架精密加工

由于铝板折弯成型的U形件毛坯刚性极差,不采取刚性增强措施无法进行精密切削加工。在专用铸铁平

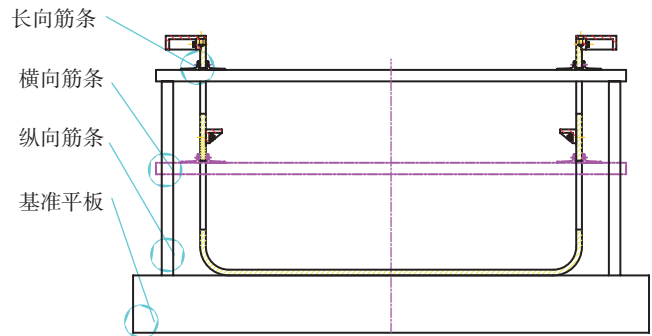


图5 U形件刚性增强

Fig.5 Rigidity buildup of U-shaped sample



图6 实物加工状态

Fig.6 Machining of antenna frame

表2 基准边测量数据

状态	数值												mm
	0	0.1	0	-0.15	0.1	-0.3	-0.15	0.95	1.1	0.8	0.3	0	
自由状态	0	0.1	0	-0.15	0.1	-0.3	-0.15	0.95	1.1	0.8	0.3	0	
装夹状态	0	-0.1	0	-0.05	-0.1	-0.1	-0.1	1	1.1	1	0.45	0.15	
成品状态	0	-0.1	-0.25	-0.35	-0.3	-0.3	-0.2	-0.25	-0.15	-0.15	-0.15	-0.1	

板上从X、Y、Z三个方向使用工艺筋条对毛坯进行固定和刚性增强,并随着加工的进行不断对已加工要素采取保形措施,如图5所示。

为了保证U形件在工艺刚性增强过程中内部微应力,装夹过程中利用百分表对基准边进行监控。基准边上相同点在自由状态、装夹状态和成品状态的测量数据如表2所示,数据表明:百分表监控下自由、装夹状态测量数据基本没有变化;成品状态零件刚性明显增强,基准边直线度数据变好。

为了进一步弥补工艺系统刚性不足给切削加工带来的不利影响,高速铣削被应用到天线框架平面加工中。由于采用了高的切削速度、合适的进给量和小的切削深度的高速铣策略,大量铣削热被切屑带走,加工表面温度较低,铣削力下降,有利于获得好的表面质量,加工颤现象有比较明显改善,图6为实物加工状态图片。

## 4 结束语

本文用一个实例介绍了某机载有源相控阵雷达天线框架的工艺设计与实现,产品实物已经通过有关力学试验和飞行试验。研制过程中成功解决了大尺寸铝板折弯、U形件工艺过程刚性增强和铸造铝合金热处理强化等技术难题。同时在特殊设备资源快速利用、工艺过程仿真分析验证和制造周期控制等方面还有待进一步开展研究工作。

### 参考文献

- [1] 邓学忠,冉启奎. 精密复杂零件的工艺设计过程分析. 航天制造技术,2011(3):24-28.
- [2] 冯炳尧,韩泰荣,蒋文森. 模具设计与制造简明手册. 上海:上海科学技术出版社,1997.

(责编 深蓝)