

反射板精密加工关键技术与质量控制

瞿凌, 许业林, 白海峰

中国电子科技集团公司第三十八研究所 安徽合肥 230088

摘要: 以某中型反射板为例, 针对其尺寸大、壁薄、结构复杂及精度要求高的特点, 提出精密加工技术及质量控制方法, 保证了零件的相关设计要求。

关键词: 反射板零件; 数控精密加工; 关键技术; 质量控制

1 序言

反射板作为天馈线的结构载体, 在结构与工艺设计时, 除必须满足电性能指标外, 还要考虑质量、体积、安装、运输和维修要求^[1]。图1所示反射板零件材料为5A06铝合金, 外形尺寸为10mm×2964mm×883.2mm, 尺寸较大。内部有数量较多的减轻腔及连接器安装孔位, 加工特征多。设计尺寸精度、几何公差要求高, 属于较典型的中

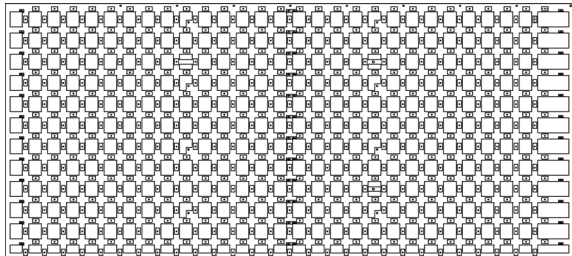


图1 反射板零件外形

多, 机械加工千变万化, 我们要用技术和开发方法提升管理结构效能, 用管理和科学思维厘清技术脉络。技术方法同类同化, 零散批次与生产周期合并累加。通过周期技术关系公式, 提升零件成组化水平, 充实技术模块化内涵。通过专业结构工艺流程获得规范的生产路线, 实现整体匹配、规律生产, 形成一套完整的微小批量零件分组加工技术, 在设计、工艺、操作和物流等细节上精益求精, 全面提升技术和管理水平。

参考文献:

[1] 李福生. 数控机床技术手册[M]. 北京: 北京出版

大型、低刚性薄壁加工件。

2 技术要求及控制难点

数控铣削加工具有高精度、高效率 and 低成本等优势^[2], 能实现不同材料、一定复杂结构零件的加工, 尺寸精度可达微米级(铣削公差等级可达IT7级), 表面粗糙度值 $Ra < 0.1\mu m$ ^[3]。反射板适合在大型数控机床上整体加工成形, 重点是保证各个安装接口的几何精度和加工后整体平面度满足设计要求^[4]。加工过程主要控制难点包括以下几个方面。

(1) 低刚性零件的生产过程变形影响 该中型反射板零件幅面超过 $2.6m^2$, 零件厚度仅10mm, 刚性非常差, 而整个加工过程需多次翻转, 且需要转场进行电镀、装配等多道工序, 在中转及存储过程中极易产生变形。

(2) 薄壁零件加工应力变形控制 零件平面度

社, 1996.

[2] 杨叔子. 机械加工工艺师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[3] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[4] 余光国, 马俊, 张兴发. 机床夹具设计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1995.

[5] (美) 迈克尔·L·乔治. 精益6西格玛[M]. 方海萍, 魏青江, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.

MW 20240605

要求全尺寸范围内自由状态下0.2mm以内，而最薄处仅2.5mm，加工过程中受残余应力、切削参数等影响易出现加工变形。

(3) 高精度零件加工尺寸控制 零件外形尺寸精度要求 $\pm 0.05\text{mm}$ ，包含520多组减轻腔和连接器安装孔，反面耦合孔同轴度要求 $\phi 0.04\text{mm}$ ，其中连接器孔径尺寸精度为0.03mm，相对位置尺寸精度公差要求在 $\pm 0.03\text{mm}$ ，精度等级要求非常高。

(4) 环境因素对长周期零件加工的影响 该零件连续加工时间超过100h，在昼夜温差等环境因素影响下，对零件的定位精度及重复定位精度影响较大。

3 解决方案及控制方法

3.1 专用吊具及保形工装控制变形

零件转运及翻抬过程中减少人力介入，减少翻抬次数，用吊装方式翻抬零件，相对作用力在吊装孔位置，具体为在宽度方向两边各设计2个M12吊装孔，两孔间距为毛坯长度的3/5左右，居中对称。孔中心距宽度方向的外形应 $\geq 30\text{mm}$ ，以保证一定的强度。在此基础上，零件毛坯下料尺寸应等于成形尺寸+加工余量+1倍孔径+单边30mm。图2所示为预制吊装孔。

针对加工后的中型反射板存在残余应力的释放问题，短期内采用专用的平板进行摆放，让自身的重力约束零件变形，中转时再采用竖直的摆放方式。图3所示为专用保形工装。



图2 预制吊装孔

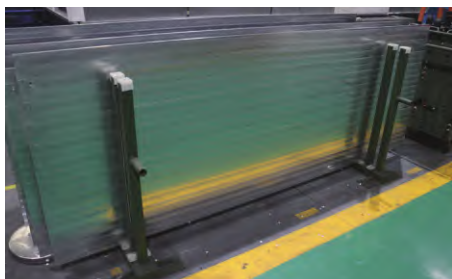


图3 专用保形工装

3.2 低应力装夹加工及适当的热处理控制残余应力

(1) 低应力装夹方式减少装夹应力 毛坯件要求借助行车竖起工件，目测工件变形区域，并作好标记。工件变形如图4所示。

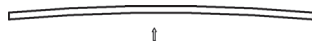


图4 工件变形示意

加工基准平面时依据“变形区域标记”，将零件放置在工作台上，自然状态下在适当位置给予垫置，以保证原变形状态。在两长侧边用压板及圆棒配合侧顶固定毛坯零件，长侧边单边3处固定。毛坯侧顶装夹如图5所示。



图5 毛坯侧顶装夹

平面加工时分粗铣面和精铣面，分多次翻面加工，根据厚度方向的余量及每次完工后平面度进行一定调整，在平面度 $< 0.5\text{mm}$ 或厚度余量 $< 1\text{mm}$ 时采用精铣面参数。基准面完成后，再经过多次翻转完成零件的平面加工，最终保证平面度在0.2mm以内。

(2) 层切参数和下刀方式控制 采用合理的粗加工层切参数、下刀方式，以减少加工变形。

1) 层切参数控制。反射板零件材料去除量主要在腔体面，为保证零件平面度，在编制粗加工程序时要采用分层铣削策略，单边保留1mm余量用于精加工精修。

在一般编程软件设置时，层数会根据设定的腔深与设定的层切深度进行运算，并向上取整计算实际加工层数，这时层切深度的设置要注意与腔深的匹配性，不同腔深的切削深度可略有不同。针对该类反射板的粗加工，制定相关参数及层切深度见表1。

2) 下刀进给方式控制。零件外形属于典型的薄

表1 粗加工参数及层切深度

加工方式	刀具直径/ mm	转速/ (r/min)	进给速度/ (mm/min)	每层切削深度/ mm
高速加工	10	15000	6000	1.2~1.4

壁板式零件，材料结构的改变直接影响工件的变形程度，加工刀具在整个加工过程要保证良好的切削性能。由于板式零件的Z向强度不够，因此刀具直接下刀时会引起零件的颤动，加剧刀具底齿的磨损，降低切削性能。该类反射板零件的下刀方式见表2。

表2 反射板零件的下刀方式

下刀方式	应用环境	备注
钻底孔	深腔	首选
螺旋下刀	常规	—
斜线下刀	窄腔	—

(3) 适当的热处理进一步降低内应力 热处理对该零件的平面控制起至关重要的作用，在实际经验中，热处理后的成形平面度大小直接决定着在后续平面加工中来回翻转的次数。在热校平加工时，应保证基板的平面度每1000mm×1000mm控制在0.1mm以内，每炉厚度方向叠加的零件数量应不超过4层，长度及宽度方向在炉内的位置，不超过炉膛加温区域的80%。应适当增加重物的压力，适当延长在炉中的保温时间，以毛坯单件热处理后变形量不超过1mm为最佳。

3.3 真空吸附及高速铣削控制零件加工精度

采用复合型孔隙真空吸附的装夹方式（见图6），使整个零件基准面与工装面完整贴合，能较好地解决薄壁平板类的装夹困难问题，减小了装夹误差造成的尺寸精度误差。

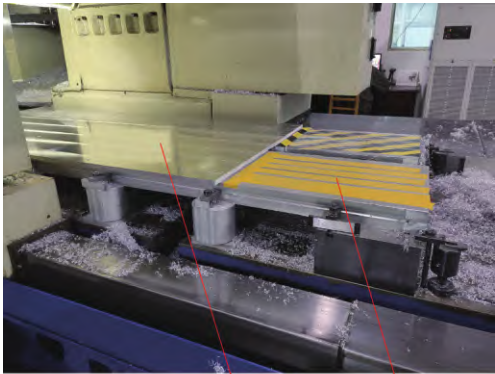


图6 数控铣削真空吸附装夹

该中型反射板加工在高速龙门铣床上完成。选择机床时，应关注机床控制系统的加减速控制功能，这是影响零件加工精度和表面质量的重要因素。不同型号或结构及控制器在机床拐角减速程度均不相同，为保证机床运动平稳，实现过渡时间最短、加减速控制最优，才能使机床更好地满足高精度加工的需求。反射板在高速加工方式下，必须对切削方式加以规范，尽可能规避上述机床特性。在编程时选择的切削方式应为高速切削（即全程圆弧摆线式切削）。

反射板共有520余处腔体需要加工，在精加工时，一方面要保证零件的尺寸精度，减少变形，在拐角处要注意减速，以免发生过切及振纹；另一方面对于大型零件，每层的进给精确度会影响到加工效率，编程时应予以关注。在进行连接器尺寸精度较高的孔位加工时，必要时可选择加刀补加工的方式，可有效保证位置度及精度要求。精加工参数及层切深度见表3。

表3 精加工参数及层切深度

加工方式	刀具直径/ mm	转速/ (r/min)	进给速度/ (mm/min)	每层切削深度/ mm
高速加工	10	20000	8000	1~1.2

在常规数控加工情况下，编程往往不会关注加工走向的问题，但是龙门设备在高速进给状态下，因为X向的起始和停止的响应速度要低于Y向，所以在编制反射板程序时，要以Y向为主进给向。第一种走刀方案（Y向为主向）如图7所示，第二种走刀方案（X向为主向）如图8所示，选择第一种走刀

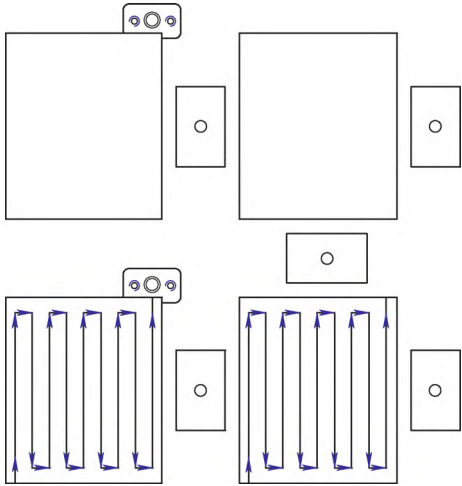


图7 第一种走刀方案（Y向为主向）

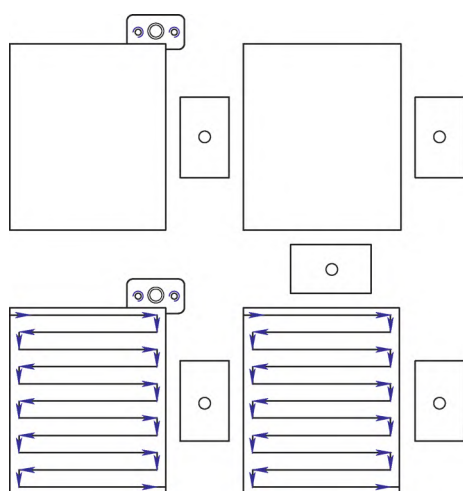


图8 第二种走刀方案 (X向为主向)

方案。

在高速加工中，可以采用每层精修的策略，但是对于反射板这种大型零件的加工，会造成极大浪费，大部分时间是低效的，因而反射板类零件不采用“每层精修”，仅在精加工最后深度时才执行一次精修。精修余量控制见表4。

表4 精修余量控制

加工部位	精修余量/mm
侧面	0.2~0.25
底面	0.15~0.2

3.4 集中加工减少温差影响

在程序设计时，将零件分成6个区域，加工策略是将每个区域内的特征集中加工，不同区域内有位置度要求的特征集中加工，加工周期控制在4h以内，机床不停机，同时设计校刀孔、工艺基准孔等辅助表面，定期检测基准是否偏离，最大限度消除温差带来的影响。

4 结束语

本文着重阐述了反射板零件的吊装及转运方式，粗加工、精加工和热处理等工艺参数选择方法，加工设备选择以及现场环境对反射板加工过程的影响程度，明确相关控制要求，对工艺流程、数控加工路径及参数进行优化，对中型反射板加工经验进行总结，有效控制了中型发射板加工变形，满足图样尺寸和精度要求，为解决类似薄板零件的加工问题提供了借鉴和参考。

参考文献：

- [1] 陈小军, 蔡潇, 王瑶瑶, 等. 一种有源相控阵雷达天线阵面反射板实现结构域工艺研究[J]. 雷达与对抗, 2021, 41 (3) : 43-46.
- [2] 杨扬, 蔡旺. 数控铣削加工工艺参数优化方法综述[J]. 机械制造, 2019, 57 (1) : 57-63.
- [3] 李敏. 毫米波波导器件精密制造工艺技术研究综述[J]. 电子机械工程, 2022, 38 (2) : 1-6.
- [4] 朱丽娜. 某全金属阵列天线阵面的集成制造工艺技术[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50 (4) : 13-16.

MW 20240617

专家点评



文章阐述了中型反射板的数控精密加工过程，根据技术要求和控制难点，制定解决方案，对工艺流程、数控加工路径及参数进行优化，有效控制了加工变形，为类似零件的加工总结了经验。

文章简明扼要，条理清晰，用词准确。亮点是板类零件的数控加工关键技术与质量控制，突出板件的安装和加工方法，通过专用吊具及保形工装控制变形，通过低应力装夹方式及适当的热处理控制残余应力，通过真空吸附及高速铣削控制零件加工精度，解决了薄壁平板的装夹难题，减小了装夹误差造成的尺寸精度误差。