

复杂立方结构零件的柔性制造工艺

董钺¹, 赵磊², 卫晓栋²

1. 空军装备部驻新乡地区军事代表室 河南新乡 453000

2. 新乡航空工业(集团)有限公司 河南新乡 453000

摘要: 基于复杂立方结构零件的结构特点和工艺方案, 提出使用柔性制造系统(FMS)进行加工以提高加工效率和质量。通过优化工艺方案、夹具和刀具等具体措施, 合理安排生产, 实现了零件在FMS生产线的柔性加工, 取得了良好效果。

关键词: 壳体零件; 立方结构; 工艺优化; 柔性制造; FMS生产线

1 序言

复杂立方结构零件是航空附件厂常见的壳体零件, 其外形包容面呈立方结构, 其中5、6个面均需要使用加工中心进行加工, 具有加工内容多, 尺寸、几何公差要求严格的特点。以某拳头产品壳体零件(见图1)为例, 零件一有5个面需要使用加工中心进行加工, 零件二有6个面需要使用加工中心进行加工。

两种零件在以往的加工过程中, 存在以下共同点。

1) 二者需要的设备均以加工中心为主, 根据零件结构特点, 需要使用三轴加工中心、四轴加工中

心及五轴加工中心等设备。

2) 两种零件精加工均以孔系加工为主, 孔系结构复杂, 需要的刀具数量多, 对加工过程稳定性要求较高。

我公司零件的生产特点为多品种、小批量, 换型频繁。在传统离散型制造模式下, 零件在各工序、各工种之间反复周转, 工序间的等待、准备时间较长; 每次加工需要重复进行夹具设置、刀具准备及对刀试切等工作, 导致全局设备效率(OEE)常年保持在30%~40%的较低水平, 大大延长了零件的生产周期。以零件一为例, 据统计, 一批12件零件, 精加工周期在40天左右。在反复周转零件过

案等, 学会在实际工作中融会贯通, 不固守现有的工艺方法和思路。工艺没有最好, 只有更好, 在实际应用中要持续改进, 不断创新。

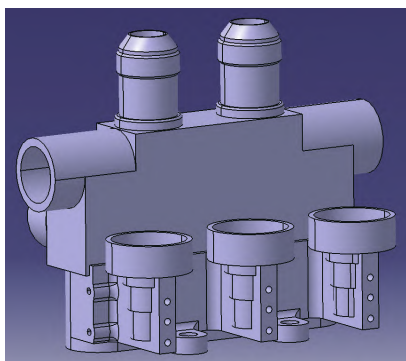
参考文献:

- [1] 张政民, 王忠平, 宋福田. 轨道车辆薄壁铝型材的典型加工工艺[J]. 新技术新工艺, 2013(9): 80-83.
- [2] 徐宗涛, 肖冲. 高速动车组薄壁类铝型材零件机械加工工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020(11): 140-141.
- [3] 孙明. 浅析铝合金板类型材的高速加工工艺[J]. 科技创新与应用, 2013(16): 53.

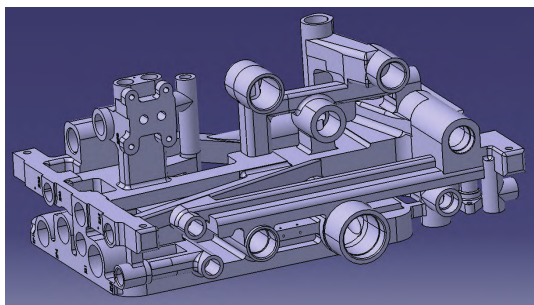
专家点评

超长铝合金型材由于其特殊的中空薄壁结构, 因此在高速切削加工中存在变形、振动、加工噪声大和刀具磨损快等问题。作者综合考虑以上因素, 制定可行的解决方案, 通过提高工艺刚性, 改善加工中的振动、变形和噪声问题; 通过设计工装夹具, 实现型材的快速装夹与拆卸; 粗加工采用锯切方法快速去除大部分余量; 数控加工采用宏程序、自定义子程序等方法, 提高了编程效率。

MW 20240423



a) 零件一



b) 零件二

图1 壳体零件

程中,各工序设备精度、人员能力不同,生产要素的变化对零件加工质量带来各种不稳定因素,零件一平均合格率为83%。

如何提高零件的加工制造效率、合格率,提高全局设备效率(OEE),答案就是智能制造。智能制造生产线由于预先设置,几乎消除了机床多个环节的设置等待时间,且受人为因素影响小,理论上可实现6000~8760h/年的运行,全局设备效率(OEE)可以高达85%,效率可提高2.5倍。智能制造是解决产能不足及效率低的良方^[1]。

2 智能制造生产线的选型

对于形如零件一、零件二的立方结构零件,宜采用卧式加工中心进行加工。卧式加工中心具有结构紧凑、刚性强、加工效率高、加工精度高、深长孔加工时易排屑以及一次装夹可以加工多个表面等优点。结合我公司现有设备、资金水平,选择采购具有2台卧式加工中心、10个工作托盘的柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)。FMS生产线布局如图2所示,其中机床2为原有设备,刀库容量60把,机床1为新采购设备,刀库容量120把。

柔性制造系统由一组数控机床及其他自动化工

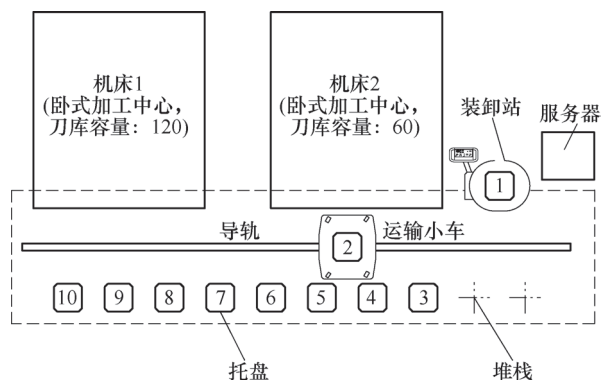


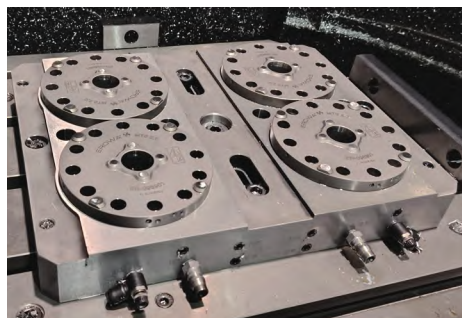
图2 FMS生产线布局

艺设备构成,是一个由计算机信息控制系统和物料自动储运系统共同组成的整体,一般由加工、物料运输和计算机信息3个子系统组成,具有生产灵活性高、设备利用率高、产品质量高且质量稳定等特点^[2]。

为了提高夹具装卸效率,在工作托盘上设计、安装了零点定位系统。零点定位系统具有定位精度高、夹具装卸快捷等特点。为了方便在卧式加工中心上实现不同定位情况下各面的加工,设计了方箱式、平铺式零件定位系统(见图3),并对各零点定位器之间的距离进行了标准化设计,提高了夹具的



a) 方箱式



b) 平铺式

图3 零点定位系统

通用性。

3 原工艺方案及存在的问题

为了使零件一、零件二适应在FMS生产线上加工，必须对原工艺方案进行分析，确定是否符合生

产线的工艺流程。

零件一的结构如图4所示。为了实现资源的合理利用，我公司将零件一的粗加工进行外协，仅完成精加工工序。

零件一原精加工工艺方案见表1。

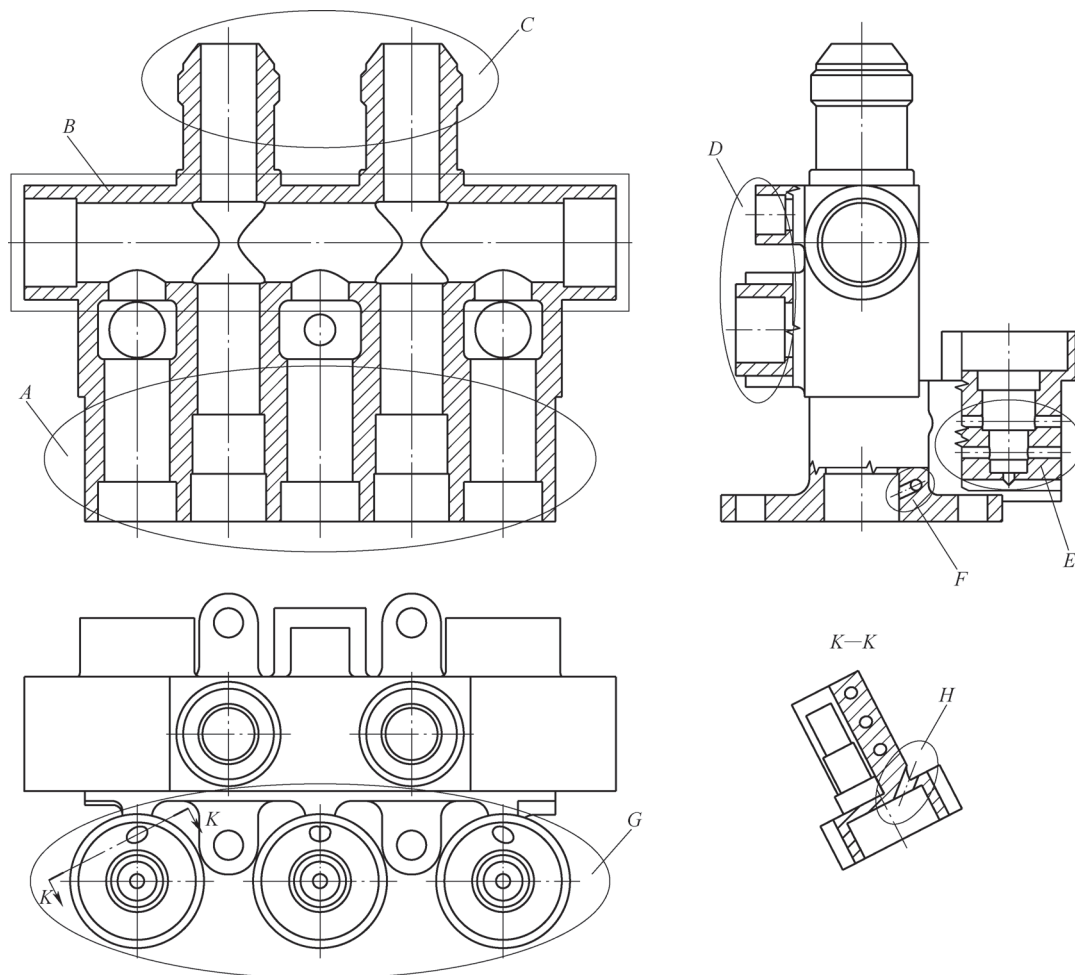


图4 零件一的结构

表1 零件一原精加工工艺方案

工序号	工序名称	加工内容	设备
1	加工中心加工	加工G结构	三轴加工中心
2	加工中心加工	加工B结构	卧式加工中心
3	加工中心加工	加工A结构	卧式加工中心
4	加工中心加工	加工E结构	三轴加工中心
5	加工中心加工	加工D结构	三轴加工中心
6	车工	加工C结构一处管接头	数控车床
7	车工	加工C结构另一处管接头	数控车床
8	钳工	钳工去毛刺	—
9	钳工	加工F处斜孔	钻床
10	加工中心加工	加工H处斜孔	五轴加工中心

原工艺方法使用了三轴加工中心、卧式加工中心、五轴加工中心和钻床等设备，并且在加工中心工序之间穿插有车工、钳工工序。

可以看出，零件一的工艺路线同工种之间不连续，工序不集中，加工时需要在多种设备、多个工种之间来回反复周转，耗时较长，加工效率低，不适合智能制造生产线，必须进行优化。

零件二原工艺方案同样存在上述问题。

4 工艺优化

科学合理的工艺技术是生产线运行的基础。工艺设计决定了零件在生产线内设备的流转顺序，决定了各工序的加工内容，并且需要考虑机床的刀库

容量及托盘数量。

4.1 工艺方案的优化

工艺方案优化的方法是以工序连续、集中的原则合理安排各工序加工内容，所有加工中心工序设备统一使用卧式加工中心。优化后的零件一精加工工艺方案见表2。

表2 优化后零件一精加工工艺方案

工序号	工序名称	加工内容	设备
1	加工中心加工	加工A结构	卧式加工中心
2	加工中心加工	加工B、D和E结构	卧式加工中心
3	加工中心加工	加工G结构	卧式加工中心
4	加工中心加工	加工F处斜孔	卧式加工中心
5	加工中心加工	加工H处斜孔	卧式加工中心
6	车工	加工C结构一处管接头	数控车床
7	车工	加工C结构另一处管接头	数控车床
8	钳工	钳工去毛刺	—

4.2 夹具的优化

在工艺方案优化之后，还需进行夹具优化，确保工艺方案得以实施。夹具应使用零点定位系统进行安装，确保有较高的安装精度。根据优化后的工艺方案，对夹具进行结构改进，定位方法、夹紧方法调整等，保证夹具有足够的强度和刚度，敞开性良好，零件定位基准统一，装卸方便，同时尽量应用多工位装夹等技术^[3]。

以零件一的1工序为例，图5所示夹具应用了多工位技术，每个托盘可安装2套夹具。5工序加工的是复合角度斜孔，为了使用卧式加工中心加工该孔，设计了使零件倾斜一定角度的夹具（见图6），与卧式加工中心的旋转工作台配合进行双角度斜孔的加工。

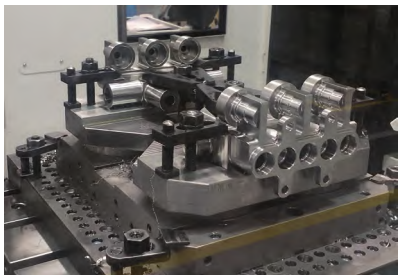


图5 零件一1工序夹具



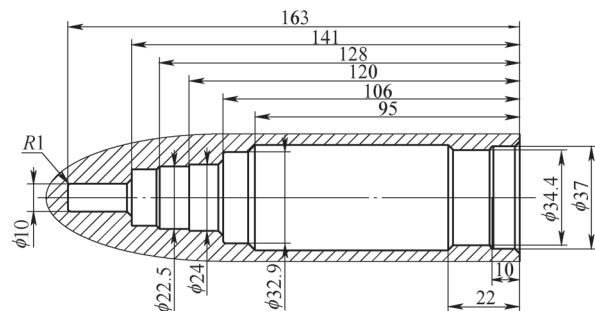
图6 零件一5工序夹具

4.3 刀具程序的优化

为了满足FMS生产线自动化运行，需进行刀具程序优化，优化方向主要包括刀具材料的优化及刀具结构的优化等，以保证加工过程稳定，减少频繁调整刀具的现象发生，并提高加工效率。

以零件一为例，其材料为沉淀硬化不锈钢0Cr17Ni4Cu4Nb，为了提高刀具稳定性和刀具寿命，将原生产过程中使用的高速钢铣刀替换为带耐磨涂层的整体硬质合金铣刀，将普通麻花钻替换为带内冷的整体硬质合金钻头，在数控程序中增加断刀检测等内容，防止在零件加工过程中出现断刀等异常情况。

以零件二为例，其材料为铝合金，某处孔结构复杂，尺寸精度要求高，长径比大，原方案使用常规的铣刀、镗刀和倒角刀等刀具进行加工，刀具数量多，对刀过程复杂，加工过程不稳定。新方案设计了带刀柄的聚晶金刚石（PCD）复合刀具，使该孔结构精加工可一次成形，刀具数量减少12把，加工质量稳定，满足上线要求。零件二孔结构及其加工所用复合刀具如图7所示。



a) 零件二某处孔结构



b) 复合刀具

图7 零件二孔结构及其加工所用复合刀具

零件一、零件二工艺优化后，具备了上FMS生产线进行加工的条件。

5 线内排产方法

生产排产调度是生产线实现柔性制造的核心内容，其定义为在生产线有限的生产资源和设备工艺约束条件下，合理安排各个工件在相关设备上的加工顺序和加工时间，以保证所选定的目标的生产性能最优^[4]。

以零件一上线加工为例，其排产需考虑存在各工序需求刀具数量多、线内机床刀库容量小的矛盾，同时还要考虑工艺流程、各工序节拍等因素对排产方案的影响（见表3）。通过沙盘模拟、验证，确定了一种合理的排产方案（见图8，其中“4”指“4工序”，“5”指“5工序”），实现了柔性、连续加工。

表3 零件一单排产影响因素

工序号	工时/h	刀具数量/把	设备	刀库容量
1	5.67	36	机床2	60
2	2.33	22	机床2	60
3	6.0	55	机床1	120
4	0.6	3	机床1	120
5	0.3	3	机床1	120

日期	设备	8:00~12:00, 14:00~2:00			
第一天	机床2	1工序	2工序	1工序	
	机床1	3工序	4	5	3工序
第二天	机床2	2工序	1工序	2工序	1工序
	机床1	4	5	3工序	4
第三天	机床2	1工序	2工序	1工序	2工序
	机床1	3工序	4	5	3工序

图8 零件一上线排产方案

6 实施效果

零件一精加工工序上线加工后，单件加工工时由18.65h降低为14.9h，降低20.1%。每个批次（12件）精加工周期由40天左右降低为12天左右，交付周期缩短70%。平均合格率由83%提升到95%以上。

零件二精加工工序上线加工后，设计、制造复合刀具16把，刀具数量减少62把，刀具使用数量降低79.5%；单件加工工时由36.3h降低为23.8h，降低34.4%。

应用FMS生产线后，两台设备的操作人员由传

统的两班4人减少为两班2人，人员减少50%；全局设备效率（OEE）由40%提高至82%以上。

7 结束语

针对复杂立方壳体工艺、结构特点，选择以卧式加工中心组成的柔性制造生产线（FMS）进行加工。通过优化工艺方案、工装和刀具，实现了零件的柔性制造，提高了加工质量和加工效率。当零件工艺方案成熟后，可进一步研究智能排产、智能调度，逐步向智能工厂发展。

参考文献：

- [1] 王文理，康永峰. 工艺在智能制造生产线设计与运行控制中的重要作用[J]. 航空制造技术，2016（16）：48-51.
- [2] 倪珉. 柔性制造系统在中小企业中的应用和未来的发展[J]. 机械管理开发，2018（8）：227-229.
- [3] 冯之敬. 机械制造工程原理[M]. 北京：清华大学出版社，2008.
- [4] 张贵军，丁情，王柳静，等. 柔性车间生产排产调度优化方法[J]. 计算机科学，2018（2）：269-275.

MW 20240403

专家点评



文章按照立方壳体的结构特点，选择由2台卧式加工中心和10个工作托盘组成的FMS生产线，集数控加工和物料运输为一体，通过工艺方案、工装和刀具的优化，实现零件的柔性制造，逐步向智能工厂发展。文章的亮点是柔性制造生产线，根据零件的结构特征实施工艺优化，集中安排各工序加工内容，实现了数控机床的连续加工和多个物料的自动装卸运输，从生产模式上提高产品质量和加工效率。