

大型航天器结构离线组合加工误差分析及控制

张霞 高立国 刘汉良 乐毅
(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)



摘要: 为解决大型航天器结构无法在线组合加工的瓶颈问题, 提出了大型航天器结构精测→拆卸零件并加工→复装的离线组合加工方法, 分析了离线组合加工过程的误差产生来源, 并提出多项误差控制措施。最终, 尺寸范围为 $\Phi 2600\text{mm} \times 5600\text{mm}$ 的某大型舱体结构上 200 余个舱外支架经过离线组合加工, 其线性尺寸公差精度达到 $\pm 0.1\text{mm}$, 角度尺寸公差达到 $\pm 3'$, 满足设计精度要求。

关键词: 大型航天器结构; 离线组合加工; 误差控制

Error Analysis and Control in Large Spacecraft Off-line Combination Processing

Zhang Xia Gao Liguo Liu Hanliang Yue Yi
(Beijing Spacecraft Manufacturing Factory, Beijing 100094)

Abstract: In order to solve the problem that online combined machining of large spacecraft cannot be carried out, the method of off-line combination processing is proposed. The error sources in off-line combination processing are analyzed, and some measures are proposed to reduce error. Finally, more than 200 brackets out of large spacecraft which size is $\Phi 2600\text{mm} \times 5600\text{mm}$ are successfully produced, the dimensional accuracy is $\pm 0.1\text{mm}$, angular dimensional tolerance is $\pm 3'$, meeting the product design requirements.

Key words: large spacecraft; off-line combination processing; error control

1 引言

大型航天器结构为了满足空间姿态的有效控制和载荷的正常运转, 对很多设备零件都提出了与整器坐标系相关的线性尺寸及形位尺寸公差。由于整器在焊接装配过程中不可避免地产生积累误差^[1~3], 设备安装零件在装配后很难一次性达到精度要求, 需要在整器焊接装配完成后, 再将整个航天器放置到大型机床上进行在线组合加工。然而, 随着航天器结构尺寸的不断增大, 在线组合加工会存在以下问题: 需要配备行程足够且价格昂贵的超大型加工中心以及多个大型工装; 大型航天器结构在转运至机床工作台上进行组合加工的过程风险因素较多; 在线组合加工占用生产研制主线, 对产品生产周期起到关键性影响。

因此, 除了整舱焊接完毕后不可拆卸部位必须在线组合加工外, 对于可拆卸的零件可采用离线组合加工方法^[4], 即首先进行精测确定加工余量后, 将此类零件拆卸后单独加工, 以解决在线加工带来的上述问题。

2 离线组合加工方法

2.1 离线组合加工过程

大型舱体离线组合加工的过程如图 1 所示。利用离线组合加工方法加工大型舱体舱外支架时, 首先在整器坐标系下利用激光跟踪仪进行精测, 使用精测数据拟合出零件在整舱上的位置及余量状态, 拆卸零件后根据精测数据进行加工, 零件加工完毕后复位到大型舱体上, 之后调试以满足精度要求。

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2017ZX04007001) 资助项目。

作者简介: 张霞 (1987), 工程师, 机械设计制造及其自动化专业; 研究方向: 主要从事星船结构制造及CAD/CAM。

收稿日期: 2017-11-27

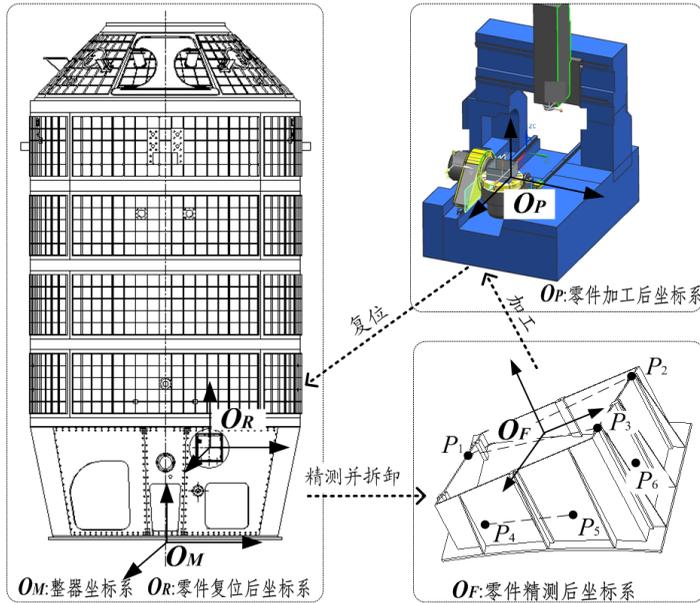


图1 大型舱体离线组合加工过程

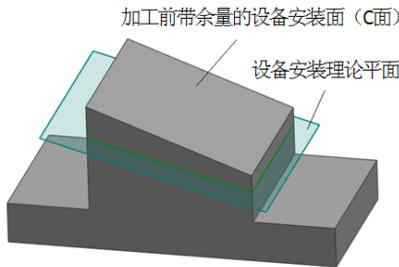


图2 理论平面与加工前C面位置关系

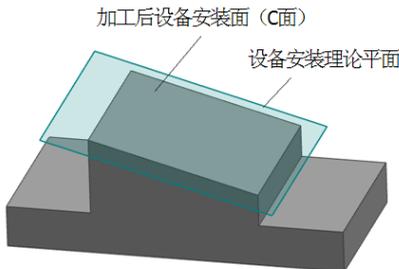


图3 理论平面与加工后C面位置关系

具体过程如下：首先，零件加工时，设备安装面需要留足够的组合加工余量。在零件首次装配到大型舱体上后，精测装配状态下带余量的设备安装面（C面），得到带余量的设备安装面初次装配时的准确边界和法向矢量，以拟合零件装配后带余量的设备安装面

（C面）的真实位置，如图2所示。之后，拆卸零件，以精测得到的带余量的设备安装面（C面）为基准，依据设计图纸或模型构建零件的实体三维模型，真实模拟大型舱体实际状态下零件首次装配时的空间状态。最后，根据实体模型和理论的设备安装面位置关系确定去除余量的大小，建立基于零件的加工坐标系，生成数控刀轨并进行零件加工，使零件复位后，设备安装面（C面）刚好落在设备安装理论平面之内（图3），从而达到传统在线组合加工的效果。

2.2 离线组合加工理论依据

2.2.1 整器坐标系向零件精测后坐标系的转换

设以6个精测点建立的零件精测后坐标系记为 O_F ，依据齐次变换的原理，可得到这6个精测点构造的加工模型，设离线组合加工零件在零件精测后坐标系下的定义为 $X_F(0)$ ，在整器坐标系的定义为 $X_M(0)$ ，则有如下关系：

$$X_M(0) = {}^M R_F(0) X_F(0) + {}^M T_F(0) \quad (1)$$

其中 ${}^M R_F(0)$ 为 O_M 到 O_F 的旋转矩阵， ${}^M T_F(0)$ 为 O_M 到 O_F 的平移矩阵。

设绕 O_F 三个轴 x_F 、 y_F 、 z_F 旋转 α 、 β 、 γ ，并沿这三个轴平移 x_0 、 y_0 、 z_0 ，则有：

$$\begin{cases} {}^M R_F^0(0) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \\ {}^M T_F(0) = [x_0 \quad y_0 \quad z_0]^T \end{cases} \quad (2)$$

当 α 、 β 、 γ 是高阶小量时，通过计算可近似为：

$${}^M R_F^0(0) = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & -\beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ \beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

若零件的第 i ($i=1,2,\dots,n$) 个面或孔 x_i 尺寸 d_i ($d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{im}$)^T，则：

$${}^M R_F^i(0) = \begin{bmatrix} {}^M R_F^0(0) & O_{3 \times 3} & O_{3 \times i_m} \\ O_{3 \times 3} & {}^M R_F^0(0) & O_{3 \times i_m} \\ O_{i_m \times 3} & O_{i_m \times 3} & I_{i_m \times i_m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

整个零件从整器坐标系向零件精测后坐标系转换的旋转矩阵可以表示为：

$${}^M R_F(0) = \begin{bmatrix} {}^M R_F^1(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & {}^M R_F^n(0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.2 零件精测后坐标系向零件加工后坐标系的转换

理论上零件在数控机床上可以找正零件精测后坐标系 O_F 进行加工，但是离线组合加工是将零件拆卸后单独加工，因此实际操作时，只能通过找正零件上的特征，如零件的面、边等来完成零件加工后坐标系 O_P 的找正。设离线组合加工的零件在零件精测后坐标系下的定义为 $X_F(0)$ ，在零件加工后坐标系下的定义为 $X_P(0)$ ，依据齐次变换，并参照式 (1)，同样有：

$$X_F(0) = {}^F R_P(0) X_P(0) + {}^F T_P(0) \quad (6)$$

通过整器坐标系向零件精测后坐标系的转换以及零件精测后坐标系向零件加工坐标系的转换，得到整器坐标系向零件加工坐标系的旋转、平移矩阵，最终完成整器坐标系向零件加工坐标系的转换。

3 离线组合加工误差

从大型舱体离线组合加工过程可以看出，离线加工与在线加工相比会引入更多种类的误差，有可能导致最终加工尺寸发生偏离。工艺人员分析在线加工时，只要通过考察加工设备的行程精度即可凭经验判断可行性，而离线加工由于过程较复杂，存在多次误差传递^[5, 6]，存在加工超差的风险。因此有必要分析离线加工过程的误差产生来源，并采取适当的工艺措施以减小离线组合加工的加工误差，提高一次加工合格率。

3.1 离线组合加工误差源

在线加工方法是所有与整器相关的尺寸均留组合加工余量，装配完成后将整舱放置在大型或超大型机床上，整器坐标系即零件加工坐标系，因此误差项

只存在加工误差一项。离线加工与在线加工相比，引入了精测数据拟合零件的实际位置，因此除了加工误差外，还有定位、找正和复位误差，以及这三项误差的传递，如图 4 所示。

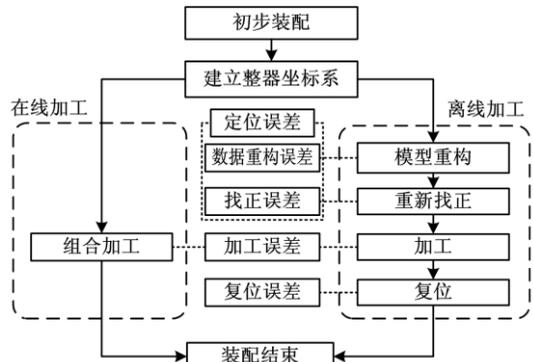


图 4 在线与离线加工流程及误差源

a. 数据重构误差：离线组合加工过程中使用精测数据在计算机上重构的零件位置和实际零件位置会存在的偏差称之为数据重构误差。该误差来源于被测零件加工误差和精测时测量系统的误差。与加工误差相比，测量系统的误差是数据重构误差的主要来源，主要受环境温湿度、精测操作准确性、精测仪器状态等多项因素的影响；

b. 找正误差：零件放置在机床上加工时，是通过找正零件上的特征（例如选取已加工零件的一个面轮廓找正），完成零件加工坐标系的找正的，由于零件本身存在制造误差，因此通过特征找正的坐标系存在偏差；

c. 定位误差：数据重构误差和找正误差的组合；

d. 加工误差：零件组合加工时产生的加工误差；

e. 复位误差：零件复位装配时由于与第一次放置位置不一致产生的误差称为复位误差。

以上各项误差传递流程如图 5 所示，最终影响离线组合加工的尺寸。

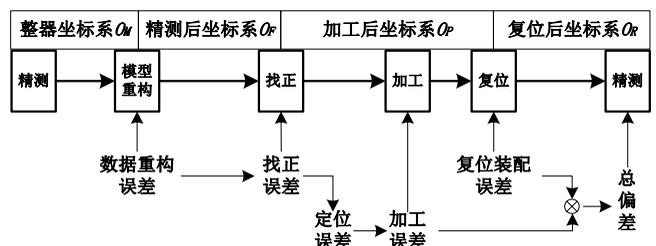


图 5 离线加工误差传递流程

3.2 离线组合加工误差控制措施

离线加工过程较复杂,存在多种误差传递,其中找正误差、定位误差、加工误差的控制方法与在线加工相同,可控制。对于复位误差来说,可以通过在舱体与离线组合加工的零件上增加刻线控制误差在 $0.1\sim 0.15\text{mm}$ 之内,离线组合加工误差主要来源于数据重构过程中的精测误差,以下主要分析精测误差的控制措施。

3.2.1 温度补偿

精测时尽量保证环境温度、湿度处于保证精测仪器最佳精度所要求的环境条件^[7, 8]。

一般需要进行离线组合加工的产品尺寸较大,温度对尺寸的影响较为显著,精测时应增加温度补偿,以抵消温度对被测产品尺寸的影响。

3.2.2 精测基准坐标系的设置

因离线组合加工的设备零件最终为总装时安装设备提供支持,因此精测基准坐标系应与整器基准坐标系一致,一般应选择在星箭或舱体对接面的圆心或中心位置,以消除或减小坐标系不一致造成的误差。

坐标系建立平面上的离散点最好包络整个舱体对接面,对选取点拟合面的平面度进行判读,以检查选取离散点的质量。

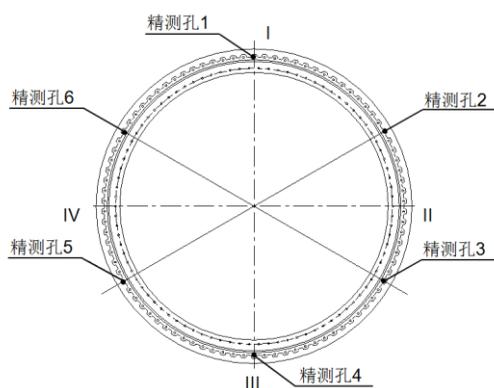


图6 对接面上的精测孔分布示意图

星箭或舱体对接面上应具有能够建立坐标系原点和指向的精测找正孔,精测孔的数量应该能够支持对

精测基准的自验证。如图6所示,在对接面上等分6个精测孔,其中精测孔1与精测孔4位于I—III象限面上,可通过拟合6个精测孔和位于象限面上的精测孔1、精测孔4分别建立两个坐标原点,检查两种方式创建原点的误差值是否在精测孔规定的公差范围内。

3.2.3 精测点的设置

精测时,激光跟踪仪测球放置的精测点应选择位于光洁、无加工变形且尺寸精度要求较高的平整面上。

一般直接选择位于待加工面上,以减少离散点转换的误差。精测点应尽可能覆盖整个精测面,测点之间距离越远越能减少测量面形位公差导致的测量误差,每个面选取至少4个测点,以检查精测点的共面度是否在可接受的范围内。

从刚体自由度约束的分析得知,除了待加工面可以确定3个自由度外,还应至少选择与待加工面相邻的一条边和一个点来最终确定零件的另3个自由度,以形成完整约束。但是实际测量时,应尽可能地选择与待加工面相邻的所有边(即每条边各取至少2点),这是因为待加工面的实际外轮廓与理论外轮廓也存在加工误差,使用多条边检查轮廓可避免此加工误差对测量精度的影响,如图7所示。对于待加工面与整器坐标系只有平行度或角度公差要求的可无需检测待加工面相邻的边。

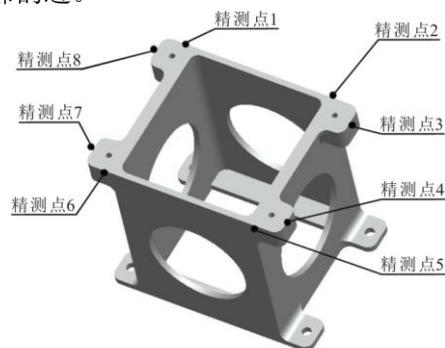


图7 支架零件精测点分布示意图

4 工程实例

表1 某型号密封壳体结构舱外支架尺寸精度检测结果

序号	项目	设计值/mm	复位后实测值/mm	结论
1	支架1上R1点沿轴向距离	3920 ± 0.1	3920.10	合格
2	支架2上R9点到R1点沿轴向距离	632.5 ± 0.1	632.47	合格
3	支架3上R1点到I、III象限面距离	839.9 ± 0.1	839.85	合格
4	支架4上R2点到R1点径向距离	1809.6 ± 0.1	1809.57	合格
5	支架5组件F-F剖面与I、III象限面的角度	$40^{\circ}\pm 3'$	39.9864°	合格

(下转第20页)

