

提高前车架镗孔加工精度的方法

吴惠彬

厦门厦工机械股份有限公司 福建厦门 361023

摘要：针对XG956装载机前车架加工中存在的铰接孔变形问题进行分析研究，通过工艺试验分析出各种原始误差对镗孔加工精度的影响规律，总结控制加工误差的方法，并且找到了进一步减少内孔变形、提高加工精度的途径。

关键词：装载机；前车架；加工精度；系统误差；椭圆度；残余应力；热变形；误差补偿

1 序言

XG956装载机前车架由铰接座、翼箱、转斗缸和支承梁4大部分组成。铰接孔均装配有关节轴承，

且与轴承有微过盈量，通过铰接销连接后车架，是关键受力支承件。铰接装配如图1所示。如果铰接座孔的孔径过小，则会加大装配难度；如果铰接座孔

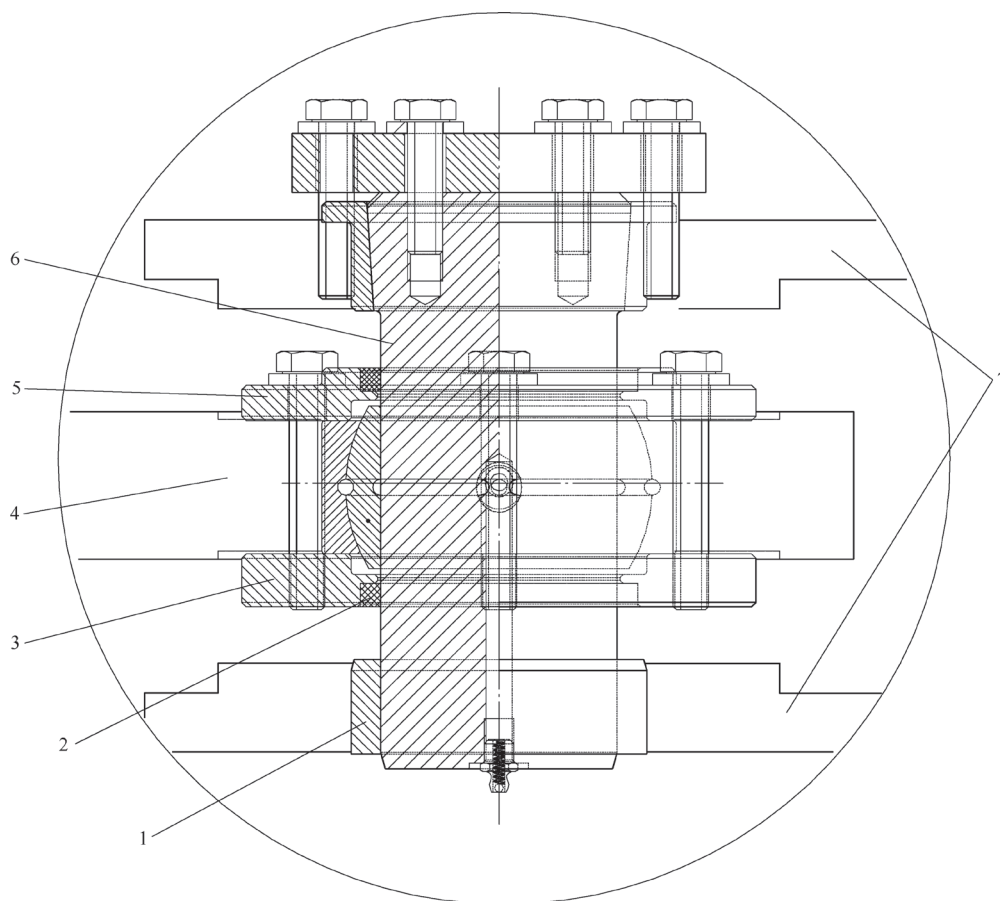


图1 铰接装配示意

1—钢套 2—防尘圈 3、5—法兰 4—前车架 6—销轴 7—后车架

的孔径太大,则关节轴承会与铰接座孔有相对位移趋势,加速底座孔的磨损,并且有效过盈量减少,配合强度降低;如果铰接座孔椭圆度超差,则关节轴承转动不灵活。综上,由于铰接孔尺寸超差会引发诸多问题,因此铰接座孔的孔径对整机质量影响极大。

2 加工精度影响因素的分析方法

加工精度影响因素的分析方法一般分为因素分析法和统计分析法。本试验先用统计分析法寻找误差的出现规律,初步判断产生加工误差的可能原因,然后运用因素分析法进行分析、试验,以找出影响加工精度的主要原因。

3 机械加工中原始误差归纳与因素分析

机械加工中原始误差归纳与因素分析^[1]如图2所示。

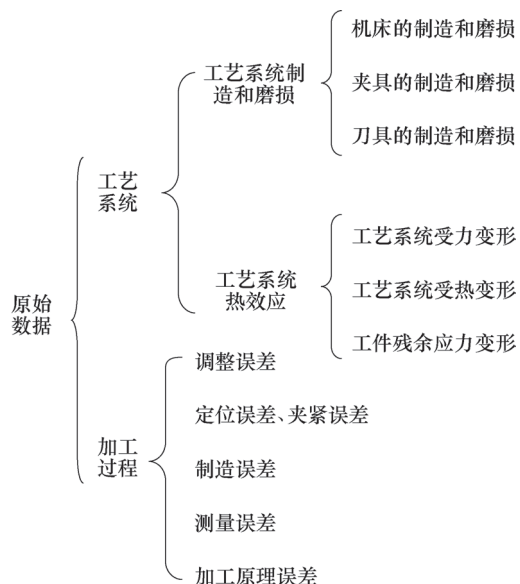


图2 原始误差归纳与因素分析

按照图2,对各因素进行研究如下。

1) 为消除工件焊接残余应力的影响,对11台车架进行试验,均焊后放置3天,车架编码为001~011。

2) 为研究工艺系统受热变形的影响,规定工件镗孔完成后下线空冷时间统一为20min,此时摸工件外表面手感微凉。以往钻孔工序没有喷乳化液冷却,为了弄清该因素对孔径变化的影响效果,此次抽出3台喷乳化液做对比试验,其余8台按照目前车间模式,加工完成后统一时效时间为18h。

3) 研究工艺系统受力变形的影响。工艺系统加工中受力包括切削力、传动力、惯性力、夹紧力和重力等。车间的镗孔专机采用工作台进给,虽然镗刀刀尖在切削力和重力作用下有挠度存在,但工作台进给方式镗杆伸出长度不变,可以忽略切削力、重力的影响,传动力和惯性力因为无法避免,所以也可忽略其影响。为排除夹紧力变形干扰,在最后精镗时稍微放松夹具,且精镗余量减小到0.4mm。

4) 为研究工艺系统制造和磨损因素,此次试验均采用校准精确的刀具,为排除机床因素影响,将对某高精专机与某老旧专机分开检测数据。

5) 为尽可能减少加工过程误差,调整、装夹和制造都严格按照机械加工工艺规程,测量孔径要求同一个人检测,减少人为因素的影响。

4 前期试验数据处理

前期对试验数据进行处理如下。

1) 为了掌握孔呈椭圆状态变化规律,将孔分“十字轴”方向进行研究,即划分成竖直与水平状态,如图3所示。

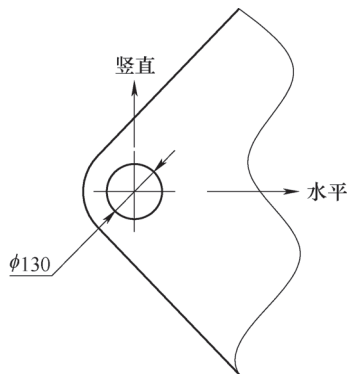


图3 孔的竖直与水平方向

2) 镗孔完成后下线冷却,上钻孔专机钻法兰孔,加工完毕冷却时效18h。横坐标数据记录4种状态的孔径,即镗孔即时孔径、空冷钻孔前孔径、钻孔即时孔径、时效18h孔径。纵坐标记录孔径偏差。

3) 鉴于以往 $\phi 120\text{mm}$ 与 $\phi 130\text{mm}$ 孔径放置几天后都会缩小,此次抽9台在精镗试切时人为放大孔径,暂定 $\phi 120^{+0.02}\text{mm}$ 、 $\phi 130^{+0.01}\text{mm}$,在后面试验中需要验证这个误差补偿的合理性。

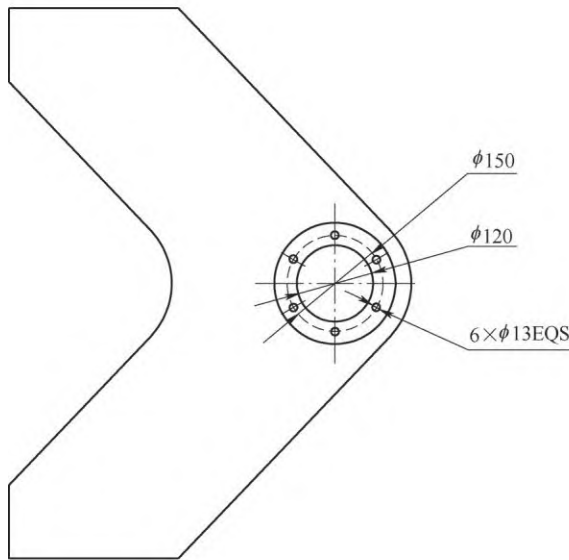
5 数据分析

据以往经验, $\phi 120\text{mm}$ 与 $\phi 130\text{mm}$ 孔变化规律不一致。 $\phi 120\text{mm}$ 与 $\phi 130\text{mm}$ 铰接孔周围法兰孔分布如

图4所示。

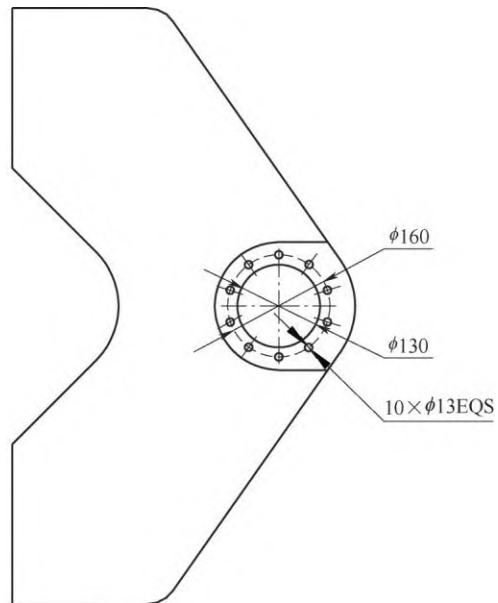
5.1 $\phi 120\text{mm}$ 孔数据分析

(1) 孔径偏差变化数据 $\phi 120\text{mm}$ 孔加工过程4种状态孔径偏差变化范围数据如下。



a) $\phi 120\text{mm}$ 孔周围法兰孔分布

1) 竖直方向。某高精机床加工4种状态数据为 $\phi 120_{+0.02}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.01}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.03}^{-0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{+0.02}^{+0.02}\text{mm}$ ，某老旧机床加工4种状态数据为 $\phi 120_{+0.03}^{+0.03}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.02}^{+0.02}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.04}^{+0.02}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.02}^{+0.03}\text{mm}$ 。



b) $\phi 130\text{mm}$ 孔周围法兰孔分布

图4 $\phi 120\text{mm}$ 与 $\phi 130\text{mm}$ 铰接孔周围法兰孔分布示意

2) 水平方向。某高精机床加工4种状态数据为 $\phi 120_{-0.01}^{-0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.04}^{-0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.02}^{-0.02}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.02}^{+0.02}\text{mm}$ ，某老旧机床加工4种状态数据为 $\phi 120_{-0.01}^{+0.03}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.03}^{+0.02}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.06}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 120_{-0.03}^{+0.02}\text{mm}$ 。

(2) 具体表现 $\phi 120\text{mm}$ 孔竖直状态经镗孔、冷却和钻孔，直径不断缩小，到18h时效阶段迅速恢复。

(3) 结论 镗孔后随着温度下降，孔径冷缩变小，到钻孔阶段，挤压铰接孔，孔径继续缩小，待残余应力释放和重新分配，孔径继而恢复到和初始状态接近。

5.2 $\phi 130\text{mm}$ 孔数据分析

(1) 孔径偏差变化数据 $\phi 130\text{mm}$ 孔加工过程4种状态孔径偏差变化范围数据如下。

1) 竖直方向。某高精机床加工4种状态数据为 $\phi 130_{-0.01}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.02}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.02}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.03}^{+0.01}\text{mm}$ ，某老旧机床加工4种状态数据为 $\phi 130_{-0.01}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.01}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.01}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.01}^{+0.01}\text{mm}$ 。

2) 水平方向。某高精机床加工4种状态数据为 $\phi 130_{+0.01}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.02}^{+0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.05}^{-0.03}\text{mm} \rightarrow$

$\phi 130_{-0.05}^{-0.03}\text{mm}$ ，某老旧机床加工4种状态数据为 $\phi 130_{-0.01}^{-0.01}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.04}^{-0.03}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.06}^{-0.05}\text{mm} \rightarrow \phi 130_{-0.06}^{-0.04}\text{mm}$ 。

(2) 具体表现 $\phi 130\text{mm}$ 孔表现为在钻孔过程中，某老旧机床加工时在竖直方向有微小膨胀，到时效阶段有一定恢复量，但比初始状态有些微收缩。某高精机床加工时在竖直方向维持微小收缩状态。

(3) 结论 $\phi 130\text{mm}$ 孔冷却后在水平与竖直方向均有收缩，但钻孔后，水平方向受钻孔挤压力缩小，并且造成竖直方向拉长率比竖直方向冷缩率更大，故 $\phi 130\text{mm}$ 孔椭圆度很大。

5.3 总结

$\phi 120\text{mm}$ 与 $\phi 130\text{mm}$ 孔在试验条件一样的情况下收缩率不一样，这是因为 $\phi 130\text{mm}$ 铰接孔周围钻10个 $\phi 13\text{mm}$ 法兰孔，而 $\phi 120\text{mm}$ 铰接孔周围钻6个 $\phi 13\text{mm}$ 法兰孔，钻孔挤压力的不同造成椭圆度不一样，从而可知钻孔工序与铰接座的结构形式影响了孔的变形。

6 系统误差

系统误差分为常值误差与变值误差，我们的主

要目的是找到系统的常值误差。从以上结论可知，孔沿一个方向的收缩是呈现一定规律的，只要把这个收缩误差找到，便可以利用误差补偿方式输入一个初始的反变形量，来达到抵消误差的目的。

6.1 铰接座 $\phi 120\text{mm}$ 孔径数据

$\phi 120\text{mm}$ 镗孔即时状态的试验数据表明，从11台车架11组的竖直和水平偏差数据中得出椭圆度都在 0.03mm 误差范围内， $\phi 120\text{mm}$ 镗孔即时状态孔径变形不明显。从这组数据可得出机床本身的精度是能保证的，并且镗孔工序精度也是稳定的，可以认为输入的初始数据是能够保证设计图样要求的。 $\phi 120\text{mm}$ 孔时效18h后的最终状态试验数据见表1。

从表1可以看出，孔径水平与竖直方向的公共缩小区间为0，椭圆度平均 $<+0.02\text{mm}$ ，视为合理，且从最终状态看，孔径超差 $+0.03\text{mm}$ ，故将初始误差补偿 $\phi 120^{+0.02}\text{mm}$ 修正为 $\phi 120\text{mm}$ 。

6.2 铰接座 $\phi 130\text{mm}$ 孔径数据

$\phi 130\text{mm}$ 镗孔即时状态的试验数据表明， $\phi 130\text{mm}$ 镗孔即时状态孔径变形很小，得出椭圆度都在 0.03mm 误差范围内。从这组数据可得出机床本身的精度是能保证的，并且镗孔工序精度也是稳定的，可以认为输入的初始数据是能够保证设计图样要求的。 $\phi 130\text{mm}$ 孔时效18h后的最终状态试验数据见表2。

表1 $\phi 120\text{mm}$ 孔时效18h后的最终状态试验数据 (单位: mm)

车架编号	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011
试切值	0	0.02	0.02	0.02	0.02	0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
竖直直径偏差	+0.01	+0.02	0	+0.01	0	-0.02	+0.02	+0.03	+0.01	+0.01	-0.02
水平直径偏差	0	0	-0.02	-0.01	-0.01	-0.03	+0.01	0	+0.02	-0.02	-0.01
椭圆度	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01
冷却	有	无	无	有	无	无	无	有	无	无	无
验证效果	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证

表2 $\phi 130\text{mm}$ 孔时效18h后的最终状态试验数据 (单位: mm)

车架编号	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	011
试切值	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
竖直直径偏差	-0.03	0	-0.015	-0.03	-0.02	-0.01	0	-0.01	+0.01	+0.005	+0.01
水平直径偏差	-0.05	-0.04	-0.05	-0.04	-0.03	-0.045	-0.06	-0.06	-0.04	-0.05	-0.05
椭圆度	0.03	0.04	0.045	0.01	0.02	0.055	0.06	0.05	0.05	0.055	0.06
冷却	有	无	无	有	无	无	无	有	无	无	无
验证效果	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证	已验证

从表2可以看出， $\phi 130\text{mm}$ 孔水平收缩很大，平均收缩 -0.04mm 。在竖直方向，车架编号001~005使用某高精机床加工的平均收缩 -0.019mm ，但是车架编号006~011使用某老旧机床加工的平均收缩为0。从 $\phi 130\text{mm}$ 孔最终数据来看，在输入一个反变形误差 $+0.01\text{mm}$ 的初始条件下，孔竖直直径偏差基本都在图样要求内，但水平直径偏差都略超出下差范围，尤其是使用某老旧机床加工的工件椭圆度更大，平均超 0.05mm ，综合以上所有数据，分别模拟出 $\phi 120\text{mm}$ 和 $\phi 130\text{mm}$ 最终孔径状态如下。

(1) $\phi 120\text{mm}$ 铰接孔最终状态 ①水平方向。某高精机床加工 $\phi 120\text{mm}$ 孔径收缩 -0.008mm ，某老旧机床加工 $\phi 120\text{mm}$ 孔径平均收缩 -0.005mm 。②竖直方向。某高精机床加工 $\phi 120\text{mm}$ 孔径膨胀 $+0.008\text{mm}$ ，某老旧机床加工 $\phi 120\text{mm}$ 孔径平均膨胀 $+0.005\text{mm}$ 。

(2) $\phi 130\text{mm}$ 铰接孔最终状态 ①水平方向。某高精机床加工 $\phi 130\text{mm}$ 孔径平均收缩 -0.042mm ，某老旧机床加工 $\phi 130\text{mm}$ 孔径平均收缩 -0.048mm 。②竖直方向。某高精机床加工 $\phi 130\text{mm}$ 孔径平均收

缩 -0.019mm ，某老旧机床加工 $\phi 130\text{mm}$ 孔径平均膨胀 $+0.0001\text{mm}$ 。

可以看出 $\phi 130\text{mm}$ 孔变“扁”的程度比 $\phi 120\text{mm}$ 孔大，对于 $\phi 130\text{mm}$ 孔主要应解决的是椭圆度超差问题。

7 试验结论

由以上数据分析可知，原始误差对加工精度的影响中，工件残余应力引起的误差是影响孔变形的最关键因素。

残余应力是指外部载荷去除后，仍残存在工件内部的应力。由于零件中的残余应力往往处于一种很不稳定的相对平衡状态，在常温下特别是在外界某种因素的影响下，很容易失去原有状态，使残余应力重新分布，零件产生相应的变形，从而破坏原有的精度，因此必须采取措施消除残余应力对零件加工精度的影响。

影响工件铰接孔变形的残余应力主要包括：①钻孔加工挤压力的重新分布。铰接座的结构形式差异，即10个法兰孔与6个法兰孔钻孔的挤压力不同，造成 $\phi 120\text{mm}$ 与 $\phi 130\text{mm}$ 孔变形不一致。②焊接应力的逐步释放。试验工件虽然在焊接后时效3天，但是不足以释放所有应力，尤其是加工过程中的振动使得应力重新分布加快。

8 解决措施

综合考虑产品结构不变和专机加工的实际情况及其局限性，采取如下措施。

(1) 减少或消除残余应力 ①减少工件焊接残余应力。利用振动时效原理，给工件施加一个与固有谐振频率相一致的周期激振力，产生共振，使工件内部产生微观变形而重新分布，使得残余应力得以消除和均化。②合理安排工艺过程。本工艺中，因钻孔时一般为精度IT12级的粗加工，低精度加工产生的受力变形和热变形将影响到前道镗孔工序的精加工，使得工件冷却后，孔的收缩量已超过精度规定值，产生加工误差，故可钻孔之后再精镗铰接孔^[2, 3]。

(2) 减少热变形 ①焊接件校正后须放置到完全冷却。②镗孔后上钻孔专机时间间隔保证40min以上，加速达到工艺系统的热平衡状态。③减少孔

加工的毛坯余量。

(3) 误差补偿 人为地加入一定值误差，其大小与工件加工变形量相等，方向相反，从而使之相互抵消。误差补偿办法为试切值 $\phi 120_{-0.01}^0\text{mm}$ 、 $\phi 130_{0}^{+0.01}\text{mm}$ 。

9 结束语

以上措施实施后，有效地提高了 $\phi 120\text{mm}$ 与 $\phi 130\text{mm}$ 铰接孔的加工精度，装配质量得到极大改善，提高了产品质量。

参考文献：

- [1] 侯志楠. 影响机械加工精度的几种因素及其相关对策研究[J]. 教育教学论坛, 2010 (18): 85, 19.
- [2] 杨叔子. 机械加工工艺师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 尹成湖, 周湛学. 机械加工工艺简明速查手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.

MW 20240528

专家点评



本例中，前车架铰接孔的收缩变形具有一定的规律，作者通过工艺试验和数据分析，得出工件残余应力引起的误差是影响镗孔加工精度的主要因素。

本例中的工艺研究非常实用，试验数据的处理和分析能力较强，先用统计分析法寻找误差的出现规律，再用因素分析法弄清各种原始误差对加工精度的影响，逐项查找，抓住关键，最终得出正确的结论，做到有理有据、真实准确。