

# 大型内齿圈高位置度精度销孔加工方法

张金梦, 张琰, 陈永祥

重庆齿轮箱有限责任公司 重庆 402260

**摘要:** 以大型风电内齿圈为研究对象, 基于销孔位置度理论分析, 结合销孔实际加工情况, 采用加工变形预控制技术、对称错位加工技术、正反面对中技术以及优化检测评估方式, 共同保证销孔高位置度精度技术要求。改进后的销孔加工方法同时解决了齿圈变形和定位误差难题。

**关键词:** 风电齿轮箱; 内齿圈; 销孔; 位置度

## 1 序言

为提高内齿圈与箱体的互换性, 提升螺栓安全系数, 减小螺栓断裂风险, 对销孔的位置度精度要求不断提高, 而大型内齿圈自重大, 多属于薄壁件, 易变形, 对生产加工提出了新的难题。下面以大型风电内齿圈为研究对象, 结合零件自身特性, 基于理论计算、软件分析, 多角度攻克销孔加工难题, 为装配精度和效率提供保障。

## 2 销孔位置度定义

位置度是一个形体的轴线或中心平面允许自身位置变动的范围, 是限制被测要素的实际位置对理想位置变动量的指标。理想位置由基准和理论正确尺寸确定。假设某孔理想轴心线对基准平面 $X$ 、 $Y$ 轴的坐标值为 $(a, b)$ , 实际轴心线对基准平面 $X$ 、 $Y$ 轴的坐标值为 $(x, y)$ , 则该孔实际位置对理想位置的偏离量为 $(f_x, f_y)$ , 即 $f_x = x - a$ ,  $f_y = y - b$ , 则该孔实际轴心线的位置度误差值 $W = 2\sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 。

## 3 零件加工技术要求

内齿圈结构尺寸及加工技术要求如图1所示。销孔位置度要求 $\phi 0.08\text{mm}$ , 两面均布, 在同一剖面角度差 $\leq 0.05^\circ$ , 要求表面粗糙度值 $Ra = 1.6\mu\text{m}$ 。按照传统方法加工后, 利用三坐标以 $A$ 、 $B$ 基准建立坐标系, 采用极坐标法检测, 位置度为 $\phi 0.051 \sim \phi 0.091\text{mm}$ , 销孔位置度超差。

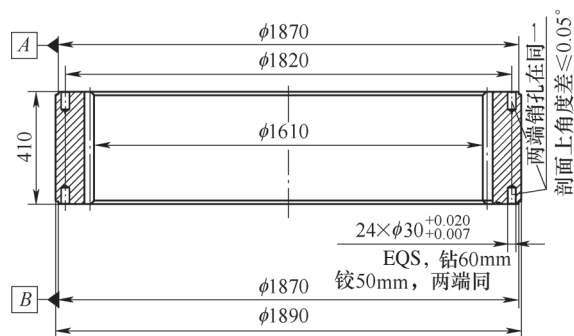


图1 内齿圈结构尺寸及加工技术要求

## 4 优化加工方式

为进一步控制销孔加工位置精度, 通过如下方式进行工艺优化。

### 4.1 加工变形预控制技术

根据产品实际结构, 设计内齿圈专用工装 (见图2), 通过有限元分析, 最终确定8点均布定位销、4点均布限位块, 从而更有利于减小应力集中, 控制加工变形。工装应力分布如图3所示。

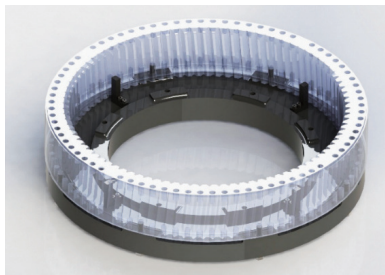


图2 内齿圈专用工装

基金项目: 传动链关键部件优化设计和批量制造工艺及检测技术 (2018YFB1501304)。

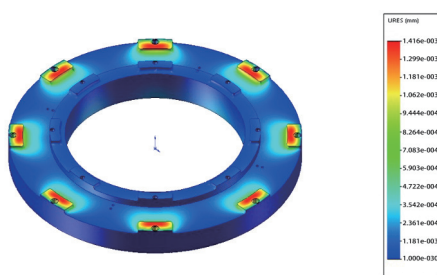
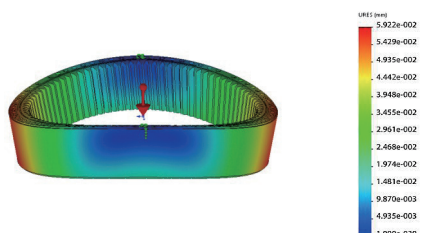
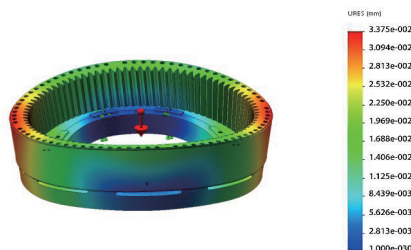


图3 工装应力分布

使用此工装进行吊装，一方面可有效避免零件因自重过大引起的吊装变形，使得最大变形由0.059mm减小至0.034mm；另一方面可提高操作人员装夹找正的效率，增强零件整体刚性和稳定性。使用工装前后内齿圈吊装位移分布对比如图4所示。



a) 内齿圈吊装位移分布



b) 内齿圈+工装吊装位移分布

图4 使用工装前后内齿圈吊装位移分布对比

#### 4.2 对称错位加工技术

由于机床（车铣复合中心）工作台旋转轴定位精度为 $\pm 5''$ ，重复定位精度为 $\pm 2.5''$ ，因而为减小工作台回转误差累积，将加工方式由逐孔加工优化为对称错位加工，使加工应力分布对称化，有效地避免了加工过程中零件的异常变形。两种加工方式的参数对比见表1。

表1 两种加工方式的参数对比

| 加工方式   | 极限角度误差累积 | 距离误差/mm |
|--------|----------|---------|
| 逐孔加工   | 3'       | 0.546   |
| 对称错位加工 | 7.5''    | 0.046   |

#### 4.3 正反面对中技术

内齿圈两端销孔要求角度误差 $\leq 0.05^\circ$ ，若按

照传统划线加工方法，即通过机床引零件中心与某销孔的延长线到外圆，翻面后通过延长线与外圆交点，确定另一端对应销孔位置，则找交点时误差较大，易导致两端销孔的角位移偏差较大。

若通过找正板（见图5）进行找正，则可提高翻面角度精度。找正原理如图6所示，找正方法为：①精镗一端销孔，找正工装，通过内齿圈上的螺孔拧紧，销孔定位并找正工装。②通过两端销孔B，找到工装与销孔圆心在一条线上的C点位置，并精镗C孔。③内齿圈翻面，通过找两个C处销孔，确定直线CC的位置，即保证两面中心重合。

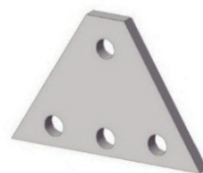


图5 找正板

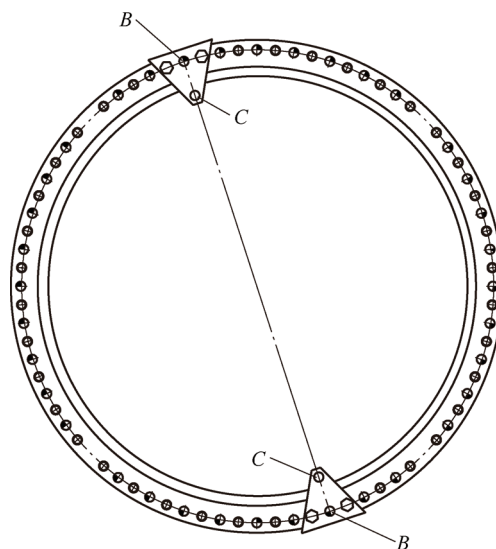


图6 找正原理

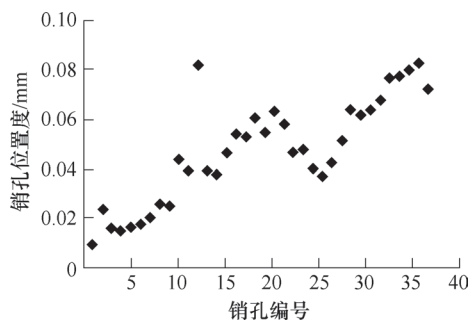
优化前后内齿圈两端销孔的角位移偏差对比见表2。优化后角位移偏差降低50%~60%。

表2 优化前后内齿圈两端销孔的角位移偏差对比  
(单位: mm)

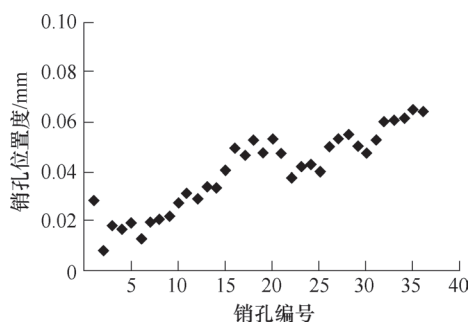
| 零件号  | 划线法两端销孔角位移偏差 | 找正板法两端销孔角位移偏差 |
|------|--------------|---------------|
| FD-1 | 0.045        | 0.020         |
| FD-2 | 0.051        | 0.021         |
| FD-3 | 0.048        | 0.019         |
| FD-4 | 0.046        | 0.018         |

#### 4.4 优化检测评估方式

明确规定以检测销孔所在平面与相应止口外圆作为基准，明确内齿圈检测起始孔，统一销孔检测位置和采集点数量，基于最小区域法的评价原则，通过对初始坐标系的旋转分析、优化初始坐标系下的测量结果，对内齿圈销孔位置度的检测进行分度修正，得到符合位置度误差最小条件的测量数据。优化前后销孔位置度对比如图7所示。



a) 优化前



b) 优化后

图7 优化前后销孔位置度对比

#### 5 结果分析

通过加工和检测方式优化，对同型号内齿圈进行销孔加工（见图8），并重新进行检测，得出销孔



图8 内齿圈销孔的加工

位置度为 $\phi 0.029 \sim \phi 0.055 \text{ mm}$ ，可见优化技术的运用可有效保证大型内齿圈销孔的高位置度精度要求。

#### 6 结束语

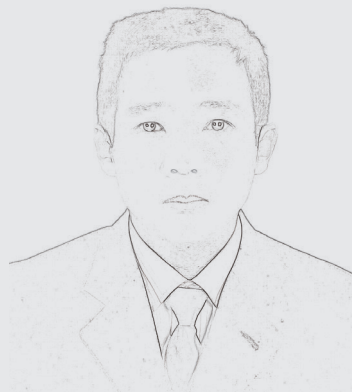
该研究属于国家重点研发计划项目“传动链关键部件优化设计和批量制造工艺及检测技术”，项目编号2018YFB1501304。通过对销孔加工方式的改进，不仅保证了销孔位置度精度，更有利于减小应力集中，控制加工变形，增强零件整体刚性和稳定性，严格确保零件的合格率，并可提升加工效率10%~25%。销孔互换性技术的推广，有助于风电齿轮箱装配精度和效率的提升，更便于塔上维修。该加工技术具有广阔的应用前景。

#### 参考文献：

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 产品几何技术规范 (GPS) 几何公差 检测与验证: GB/T 1958—2017[S]. 北京: 中国质检出版社, 2018.

MW 20210309

#### 专家点评



大型风电内齿圈属于大直径薄壁套零件，加工变形量较大。作者针对齿圈两端的销孔位置度难题，进行理论计算和软件分析，通过加工方式的改进，保证了销孔位置度要求。

正反面销孔对中技术是文章的创新亮点。改进后的销孔加工方法非常实用，同时解决了齿圈变形和定位误差难题，为此类零件的加工积累了经验。