

大功率柴油机曲轴尺寸精度检验与误差分析

王江燕 李秀卿 王炳琦 宋正军 张 杨

潍柴重机股份有限公司 内燃机与动力系统全国重点实验室 山东 潍坊 261108

摘 要：大功率柴油机曲轴是整机动力输出的核心枢纽，其尺寸精度直接决定设备运行稳定性与服役寿命。本文针对曲轴主轴颈、连杆轴颈、曲拐结构及轴向、径向配合尺寸等关键检验项目，梳理精密检测设备、基准装夹方式及标准化检验流程，系统划分线性偏差、几何形状、位置度、同轴度与平行度四类加工误差。深入分析设备磨损、工装定位偏移、工艺参数失配及人工环境干扰等误差诱因，并提出对应的精度控制策略，可为大功率柴油机曲轴加工精度管控与品质优化提供技术参考。

关键词：大功率柴油机；曲轴；尺寸精度；形位误差；检测工艺

引言：大功率柴油机长期承受高温高压交变载荷，曲轴作为连接活塞与飞轮的核心传动构件，尺寸精度状态直接关系整机运转平稳性与机械损耗水平。当前曲轴加工环节中，机床精度衰减、工装定位偏移、工艺参数波动及作业环境干扰等多重因素叠加，使各类尺寸与形位误差持续生成，对装配适配精度构成严峻挑战。有必要从检验项目、检测设备、误差类型及成因控制等维度展开系统分析，厘清精度失控的演变路径，为加工品质管控提供理论支撑。

1 大功率柴油机曲轴关键尺寸精度检验项目

1.1 主轴颈尺寸精度检验

主轴颈为曲轴主要支撑结构，承接整机运转过程的径向载荷与支撑作用力，成型精度对曲轴旋转平稳性起到决定性作用。精度检验工作聚焦主轴颈圆柱面的成型质量，重点把控径值均匀性与表面成型规整度。检测作业覆盖轴体完整工作面，排查切削加工残留的成型偏差，管控轴体圆柱度与直径成型精度^[1]。

1.2 连杆轴颈尺寸精度检验

连杆轴颈是曲轴动力传递的核心结构，与连杆构件相互配合完成动力输出作业，成型尺寸精度直接关联动力传输的平稳程度。精度检验围绕轴颈整体径值与成型面规整状态开展，严格把控加工成型的尺寸标准度。检测工作注重轴体工作面的成型一致性，减少加工偏差带来的传动配合间隙波动。

1.3 曲轴曲拐几何尺寸检验

曲轴曲拐承担连接主轴颈与连杆轴颈的作用，空间几何参数决定曲轴整体运动轨迹与动力输出特性。几何尺寸检验针对曲拐成型间距、结构延展形态以及曲柄结构成型厚度开展精细化检测工作。全面把控各组曲拐的成型均匀程度，保障多组曲拐结构参数保持统一状态。

1.4 曲轴轴向与径向配合尺寸检验

曲轴轴向与径向维度的配合尺寸是保障整机装配精度与空间布局合理性的核心参数。轴向尺寸检验侧重把控曲轴整体延展长度、各轴段间距以及结构端面的成型位置精度。径向尺寸检验聚焦各轴体径向成型规格与结构同轴状态，规整轴体空间排布形态。

1.5 曲轴油孔附属尺寸检验

油孔是曲轴关键功能性附属结构，其加工精度直接影响柴油机曲轴内部润滑系统的运行效果与构件配合寿命。该环节检验核心为油孔孔径精度与孔位规整度，需核对油孔成型尺寸是否符合设计标准，排查孔位偏移、孔径偏差、孔口毛刺等加工缺陷，保障润滑油流通顺畅、供油均匀，规避因油孔精度不达标引发的轴体磨损、润滑失效等故障问题。

2 大功率柴油机曲轴尺寸精度检验设备与工艺

2.1 尺寸精度检验常用精密设备

曲轴尺寸精度检测依托多款高精度专用设备完成数据采集与形态判定，主流检测设备包含三坐标测量仪、曲轴专用测量机、圆度仪、外径千分测微仪。精密长度与径值测量设备可以捕捉轴体细微尺寸偏差，适配主轴颈与连杆轴颈高精度检测需求。几何测量设备能够识别构件空间形态偏差，针对曲拐结构、轴体相对位置完成精准检测。曲轴专用大型构件检测设备适配曲轴整体尺寸跨度与自重特性，规避普通量具测量范围不足带来的检测局限。

2.2 曲轴基准定位装夹方式

精准可靠的定位装夹是保障检测数据真实有效的核心前提，装夹状态直接决定曲轴各类尺寸检测的精准程度，不同检测设备适配差异化专属定位方案。三坐标测量仪采用多点支撑+水平调平定位模式，依托可调支撑

块托举曲轴轴段，借助水平仪校准构件整体姿态，保证检测基准与设计基准重合；曲轴专用测量机以曲轴两端中心孔作为定位基准，通过顶尖顶紧中心孔完成轴向限位，还原曲轴标准旋转中心。检验作业依托曲轴中心孔与设计基准平面完成空间定位，保持构件摆放姿态贴合标准装配形态。合理调控夹持力度与支撑点位，夹持力一般控制在200~500N范围内，规避外力作用引发的构件弹性形变，维持曲轴加工完成后的原始结构状态^[2]。

2.3 各关键尺寸标准化检验流程

不同结构类型的曲轴尺寸对应差异化的标准化检验流程，适配各类结构的成型特征与精度管控要求。轴颈回转类尺寸通过多点位全域采集方式完成检测，每个轴颈截面至少采集8个测点，充分反映轴体整体成型均匀程度。轴向延展与空间间距尺寸按照逐层检测的作业模式推进，保证整体尺寸与分段尺寸的检测完整性。附属功能结构尺寸采用专项检测流程匹配结构特性，实现曲轴全部关键尺寸的系统化、规范化检测，稳定各类参数检测的作业标准。

2.4 检验过程操作规范与管控要点

检验作业全程需要遵循严谨的操作规范，细化各环节作业管控标准。作业前期完成设备状态调试与校准工作，设备预热时间不少于30min，保证设备运行状态符合检测精度要求。作业过程严格遵循标准化操作动作，稳定数据读取与记录状态，减少人为操作带来的数据偏移。检测环境温度应控制在20±2℃，相对湿度不超过60%，规避外界干扰因素影响检测作业开展。

3 大功率柴油机曲轴尺寸加工误差类型与特征

3.1 线性尺寸偏差误差

线性尺寸偏差是曲轴加工中最常见的基础误差，主要表现为曲轴轴颈直径、轴段长度、曲柄臂厚度等基础线性参数偏离设计标准。该误差多源于切削加工阶段，切削余量把控不均、机床进给波动等工况问题，均会引发参数偏移。此类误差形态直观，单一偏差对曲轴整体几何结构影响较小，但多部位偏差累积会显著降低曲轴装配精度。为直观展示误差参数特征，整理核心线性尺寸误差如表1所示。

表1 核心线性尺寸误差

检测线性参数	标准允许偏差范围(mm)	实际加工偏差区间(mm)	误差主要特征
主轴颈直径	±0.02	±0.02~0.05	偏差波动较小，多为正向偏大或负向偏小，均匀性较好
连杆轴颈直径	±0.02	±0.02~0.06	受动力切削负荷影响，偏差略大于主轴颈，局部易出现极值偏差
曲柄臂厚度	±0.03	±0.03~0.07	厚度尺寸跨度大，偏差累积效应明显，批量加工离散性较强
曲轴轴段间距	±0.04	±0.04~0.08	受工序定位影响，偏差具有方向性，易出现同向偏移现象

3.2 几何形状误差

几何形状误差针对曲轴各类回转结构与成型曲面的形态规整度产生影响，改变构件标准几何成型状态。曲轴轴颈圆柱面的成型形变、曲面弧度不规整、端面平面度偏移等问题，都属于典型的几何形状误差^[3]。圆柱度误差通常控制在0.005~0.015mm范围，平面度偏差不得超过0.02mm。切削加工中的刀具磨损、机床主轴运转晃动、构件受力形变都会引发结构形态畸变。这类误差会破坏轴体表面的成型均匀性，让规整的几何结构出现不规则形变，影响曲轴运转过程中的表面贴合效果，加剧机械运转过程中的磨损程度。

3.3 位置度几何误差

位置度几何误差聚焦曲轴各组成结构的空排布状态，体现结构实际排布位置与设计标准位置的偏移程度。曲轴各曲拐的空间排布、轴段衔接位置、附属结构布设点位都会出现不同程度的位置偏移。位置度偏差一般控制在0.05~0.15mm以内，加工装夹过程中的定位偏

移、机床坐标校准偏差都会诱发此类误差生成。位置度误差会打乱曲轴整体结构的排布秩序，改变构件间的空间配合关系，影响曲轴旋转运动的平衡状态，造成动力传递过程出现运转不稳的问题。

3.4 同轴度、平行度配套形位误差

同轴度与平行度误差属于曲轴核心的配套形位误差，直接决定多段轴体、结构平面的相对成型精度。同轴度误差体现在曲轴多段主轴颈、连杆轴颈的中心轴线无法保持统一直线状态，轴线偏移会造成旋转过程的偏心运动。平行度误差主要出现于曲柄臂平面、轴体端面等结构，结构平面无法保持标准平行状态会改变整体受力分布规律。两类误差通常伴随出现，属于关联性较强的形位误差类型，对曲轴高速旋转的平衡性能、整机装配的贴合精度都会产生直接影响，也是制约大功率柴油机曲轴加工品质的关键误差类型。

4 大功率柴油机曲轴尺寸误差产生成因与控制方法

4.1 机床设备运行产生的误差成因

机床设备是曲轴加工成型的核心载体,设备运行状态的不稳定会直接转化为构件加工尺寸误差。机床传动结构长期运行后会出现磨损松动,传动精度出现衰减,加工过程中进给位移无法维持标准精度状态,造成轴径、轴段长度等线性尺寸出现偏移。设备主轴运转精度下降会引发回转跳动,破坏曲轴轴颈的圆柱成型形态,催生各类几何形状误差。设备温度变化会引发机身结构微量形变,改变加工基准位置,干扰整体加工成型精度。长期负荷运行带来的设备精度衰减,会持续放大各类尺寸偏差,影响曲轴加工的一致性。

4.2 工装夹具定位产生的误差成因

工装夹具承担曲轴加工过程的定位与固定工作,定位精度与夹持稳定性直接决定成型尺寸的标准程度。工装定位基准长期使用后会出现磨损,基准平面规整度下降,曲轴装夹位置出现细微偏移,诱发位置度偏差。夹具夹持力度调控不当会让曲轴构件产生弹性形变,加工完成卸载外力后形变恢复,造成成品尺寸与加工尺寸出现偏差。工装装配校准不到位会改变曲轴空间摆放姿态,多段轴体轴线、结构平面相对位置出现偏移,催生同轴度与平行度等形位误差。工装结构适配性不足也会让大型曲轴加工过程出现轻微晃动,加剧尺寸误差的生成。

4.3 加工工艺参数引发的误差成因

加工工艺参数的合理匹配是保障曲轴尺寸精度的重要基础,参数设定不合理会引发多种类型的加工误差。切削速度、进给量与切削深度的不合理搭配会改变切削受力状态,让轴体表面出现不均匀切削,破坏结构几何规整度。切削过程产生的切削热会让曲轴局部结构出现热形变,冷却后结构尺寸出现收缩偏移,形成稳定的线性尺寸偏差^[4]。工序排布不合理会让构件承受多次叠加的切削应力,内部应力分布失衡,后期释放过程中引发结构微变形,改变成品尺寸与几何形态。参数固化程度不足会让批量加工的尺寸稳定性下降,出现差异化加工偏差。

4.4 人工操作与环境因素误差成因

加工与检测环节的人工操作行为及外部作业环境,会对曲轴尺寸精度产生间接且持续的影响。操作人员对装夹校准、参数调试的把控精度存在差异,细微操作偏差会累积为成型尺寸误差。作业环境的温度波动会改

变机床与曲轴构件的热变形状态,干扰加工与检测数据的准确性。环境振动会传递至加工工位,破坏切削过程的稳定性,让成型表面出现细微形态偏差。作业环境粉尘、杂物堆积也会影响基准贴合精度,间接诱发各类尺寸与形位误差。

4.5 各类型尺寸误差针对性控制方法

针对机床设备诱发的误差,可落实周期性设备检修与精度校准工作,建议每运行2000h进行一次主轴精度检测,及时修复磨损传动结构,稳定主轴回转精度,把控设备运行温度,弱化设备精度衰减带来的加工偏差。针对工装夹具误差,需要定期打磨校准定位基准,基准面磨损超过0.03mm即应更换或修复,规范夹持力度调控标准,优化工装装配校准流程,提升大型曲轴装夹的稳定性和定位精准度。针对工艺参数误差,可结合曲轴结构特性优化切削参数配比,完善工序排布流程,增设应力释放工序,抑制切削热与应力形变带来的精度偏差。针对人工与环境误差,可统一标准化作业流程,强化操作规范性,搭建稳定恒温的作业环境,隔绝外部振动与杂物干扰,全方位压缩各类误差的生成空间。

结束语

曲轴尺寸精度管控是一项贯穿加工与检测全流程的系统性工程。从主轴颈圆柱度到曲拐空间排布,从线性尺寸偏差到同轴度形位误差,各精度指标之间存在紧密耦合关系,单一环节的失控均会向整机装配与运行状态传导。落实设备周期性校准、工装基准定期打磨、切削参数优化匹配及作业环境稳定控制等措施,能够从源头压缩各类误差的生成空间。持续完善精度管控体系,方能保障大功率柴油机曲轴在长期服役中维持稳定的动力输出特性与结构完整性。

参考文献

- [1]张益铭,白巴特尔,朱小龙,等.基于深度学习的柴油机故障诊断系统开发[J].内燃机与配件,2025(6):5-11.
- [2]刘典云,李章恒,李瑞,等.柴油机试验过程中影响NOx排放的因素分析[J].内燃机与配件,2022(24):61-63.
- [3]王威,吴春玲,韩松,等.基于机器学习的柴油机性能预测[J].汽车实用技术,2022,47(19):123-129.
- [4]翟学超,李劲松,杨兆宇,等.增压中冷柴油机净功率测量的不确定度研究[J].内燃机,2024,40(6):19-24.