

空压机齿轮传动系统减振自动化改进设计

齐连山

中车福伊特传动技术（北京）有限公司 北京 102202

摘要：螺杆空压机齿轮传动系统高速运行过程中，齿轮啮合、转子转动易诱发振动问题，干扰设备稳定运行。本文结合齿轮箱整体结构特性，从基础构型、减振构造、智能调控及集成优化多个维度开展改良设计，通过优化腔体、齿轮与轴系结构强化设备刚性，增设缓冲、隔振结构削弱振动传递路径。依托嵌入式传感监测与自适应调控技术，匹配设备多变运行工况，结合一体化集成改造优化整机结构性能，可有效抑制传动系统振动，提升空压机运行精度与工况适配性能。

关键词：空压机；齿轮传动；振动抑制；自动化调控；结构优化

引言：螺杆空压机是工业生产中不可或缺的核心供气设备，齿轮传动系统作为机头动力传输的核心单元，运行状态直接决定设备的工作效率与服役年限。设备长期连续运转工况下，齿轮啮合冲击、转子高速旋转及结构形变等多重因素，都会引发整机振动现象，加速传动部件磨损，破坏设备传动精度。依托结构改良结合智能控制的方式，优化齿轮箱整体构型、阻断振动传递、实现工况自适应调节，可有效解决传统设备振动缺陷，提升空压机综合运行性能。

1 空压机机头齿轮箱基础结构设计

1.1 机头齿轮箱整体腔体结构设计

空压机齿轮箱腔体用于容纳主动齿轮、被动齿轮、阴阳转子轴系等全部传动部件，整套传动基础剖面结构

如图1所示。电机输出扭矩带动主动齿轮啮合被动齿轮，同步驱动阴阳转子完成空气压缩，齿轮箱腔体将齿轮啮合区域完整包裹，形成封闭运行环境。腔体采用一体化铸造成型，内部空间尺寸匹配齿轮传动行程与转子装配要求，壁厚按照满负荷交变载荷设计，能够缓解设备运转带来的结构微变形。内部规整空间可理顺润滑油路，让润滑介质均匀覆盖齿轮、轴承，持续起到冷却防护作用^[1]。箱体外侧预留定位销孔与安装贴合面，可与转子机头精准对接装配，保证整套传动部件同轴度。腔体做分区加厚刚性优化，搭配定向加强筋与圆弧过渡边角，减轻齿轮啮合、转子高速转动引发的箱体抖动，从源头减少振动向外传递。

Basic Structure基本结构

CRRC VOITH

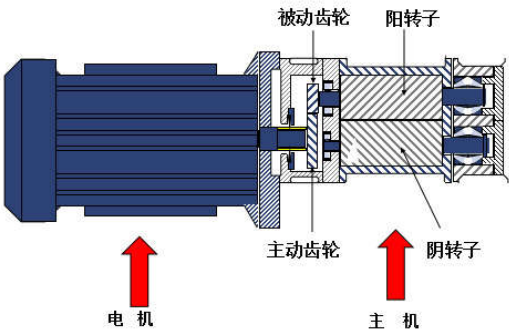


图1 空压机齿轮箱腔体传动基础剖面结构图

1.2 齿轮箱内置传动齿轮结构设计

齿轮是空压机机头动力传递核心部件，主要作用是同步驱动阴、阳转子旋转，结构设计以传动平稳、低冲击为核心目标。齿轮采用高精度磨齿标准齿形，齿面平

面度、齿廓形位公差严格匹配机头额定转速工况。齿轮模数、齿宽根据机头排气量、转子输出扭矩计算确定，保证啮合过程载荷均匀连续，避免阴阳转子转速偏差引发撞击振动。齿轮选用高强度耐磨合金整体锻制，材质

密度均匀,可长期适配机头24h连续压缩工况。齿轮中心内孔与转子传动轴采用过盈精密配合,加工公差控制在微米级,杜绝运转过程齿轮偏移、转子啮合错位。齿根过渡圆角做平滑抛光处理,降低应力集中系数,减少长期高速运转下齿根疲劳损耗,提升齿轮、转子同步运转平顺性。

1.3 齿轮箱轴系装配结构设计

轴系承担齿轮定位、机头转子扭矩传导双重功能,主轴采用整体锻造工艺成型,轴身全部精磨加工,降低转子转动摩擦阻力。轴系分段轴径差异化设计,分别匹配齿轮、轴承、转子安装尺寸,实现各传动部件分层有序装配。轴体内部开设轻量化减重槽,在保证抗弯、抗扭强度前提下,降低机头转子高速旋转惯性阻力。轴系采用阶梯轴肩限位结构,精准约束轴向窜动与径向跳动,控制转子运转偏心幅度。轴身两端与箱体通孔间隙精密匹配,搭配密封件形成密闭装配体系,长期运行下仍可维持机头转子传动精度稳定。

1.4 机头齿轮箱密封与支撑结构设计

空压机机头齿轮箱密封件布置在箱体拼接缝、转子轴伸端,选用邵氏硬度65±5的高弹性耐磨氟橡胶材质,全覆盖封堵所有装配缝隙。密封结构一方面阻挡粉尘、水汽侵入箱体内部,另一方面防止润滑油渗漏,维持机头齿轮、转子轴承洁净润滑环境。齿轮箱底部设置厚度25mm的加厚刚性支撑基座,作为箱体与机头机身连接载体,均匀分散齿轮、转子运转产生的交变振动载荷。支撑点位按照箱体应力分布对称布置,弱化局部受力集中引发的整机晃动。支撑与机身贴合面整体铣削打磨,平面度 $\leq 0.02\text{mm}$,提高装配贴合度,保证齿轮箱、机头转子主机安装姿态平整稳定。

2 空压机机头齿轮箱本体减振结构设计

2.1 齿轮箱箱体抗振构型设计

齿轮箱箱体采用整体一体浇筑成型,力学性能均匀,可承受机头转子持续交变冲击载荷。箱体表面增设等间距加强筋,筋条沿应力传递主路径排布,大幅提升箱体整体刚度,抵消转子高速转动产生的激振力。箱体各区域壁厚差异化设计,高应力区加厚处理,削弱机头高频运转带来的板面弹性形变波动^[2]。箱体所有外角采用大圆弧过渡,消除直角结构应力集中点,均衡箱体全域受力。整体刚性构型可有效抑制齿轮啮合、转子旋转诱发的箱体共振,大幅降低箱体表面振动幅值。

2.2 齿轮箱内部啮合缓冲结构设计

针对机头齿轮啮合瞬时冲击问题,在齿轮啮合区间增设厚度3mm的聚醚醚酮柔性缓冲适配结构,吸收轮

齿接触瞬间冲击动能,减少振动向阴阳转子传递。全部轮齿工作面做镜面抛光,表面粗糙度 $R_a \leq 0.2\mu\text{m}$,降低齿面摩擦激励,优化转子运转平稳性。齿轮装配预留0.015mm微量缓冲间隙,适配机头高速升温带来的构件热形变,规避齿轮卡死或间隙过大撞击。缓冲衬块紧贴齿轮啮合区域布置,持续耗散传动冲击能量,平稳驱动机头阴阳转子同步转动,减少冲击振动持续传导至转子腔体,优化整套传动运行工况。

2.3 齿轮箱支座减振构造设计

支座兼具箱体承载与振动隔离功能,阻断机头振动向空压机整机机架扩散。支座主体采用铸钢高刚性基体,满足机头整机承载需求;基体内部填充高阻尼柔性减振材料,材料固有频率匹配机头常规运转频段,高效吸收齿轮、转子产生的振动能量。支座与箱体接触面采用大平面贴合设计,扩大受力接触面积,分散机头局部集中振动力。支座外形贴合箱体底部应力分布,重构振动传递路径,减少振动向整机外部扩散;支座安装基面精铣找平,保障减振结构持续稳定发挥效能。

2.4 齿轮箱振动传导阻断结构设计

在齿轮箱箱体与机头机架衔接处设置多层复合振动阻断构件,分层结构可同时阻隔振动纵向、横向传递。构件内部填充高密度阻尼材料,振动能量穿过程中持续耗散;阻断垫全覆盖填充装配缝隙,消除振动传导直通通道,避免机头振动沿机架大面积扩散。阻断层厚度、阻尼参数依据齿轮箱、机头转子固有振动频率匹配设计,将振动约束在齿轮箱局部区域,降低整机其余结构受振动干扰程度。

3 空压机机头齿轮箱自动化改良设计

3.1 齿轮箱传动间隙优化结构设计

齿轮啮合间隙、转子轴系配合间隙是机头振动产生的主要诱因,本结构采用精密间隙匹配方案优化设备运行稳定性。齿轮啮合副设置微米级间隙自适应结构,严格控制轮齿活动余量,杜绝间隙过大引发金属撞击振动,保证阴阳转子同步平稳运转^[3]。轴系与箱体配合端加装精密限位衬套,缩减转子转动配合间隙,降低微动摩擦产生的持续性振动。间隙参数可随机头温升动态微调,补偿热膨胀带来的尺寸变化,长期维持传动配合精度。高精度间隙控制消除不规则机械碰撞振动源,提升机头传动运行平稳性。

3.2 齿轮箱运行状态自动化感知结构设计

齿轮箱集成嵌入式高精度传感监测体系,振动传感器、转速传感器、压力传感器预埋于箱体预设点位,紧贴机头齿轮、阴阳转子核心传动区域。整套多传感一体

化布置结构如图2所示。

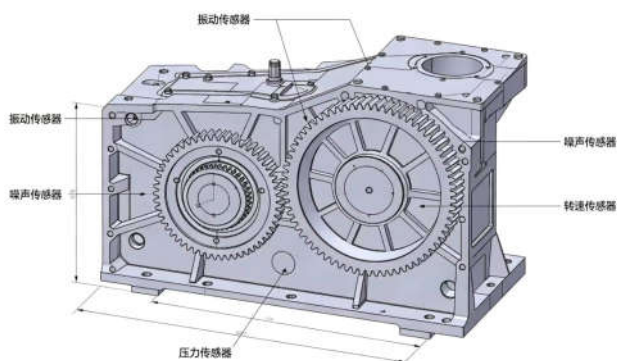


图2 空压机齿轮箱多传感器一体化布置结构图

传感器可实时采集箱体振动幅值、转子转速、机头排气负荷等动态工况数据。传感元件与箱体本体一体化嵌入,不干涉齿轮、转子正常运转;信号采集单元24h不间断采集设备运行数据,采集精度满足自动化调控需求,实现机头齿轮箱全工况智能化在线监测。

3.3 齿轮箱减振自动化调控结构设计

调控系统依托机头实时传感数据实现动态自适应调节,电动执行机构布置在减振核心结构处。调控单元同步对接齿轮间隙自适应组件、支座阻尼调节模块,根据机头实时负荷、振动数据自动调整结构工作参数。系统可自主微调阻尼刚度、齿轮啮合间隙,适配机头轻载、额定、重载不同工况;执行元件响应速度匹配机头负荷切换节奏,负荷突变产生振动增量时快速干预抑制。智能化动态调控使齿轮箱减振性能实时匹配机头运行状态,实现传动性能自适应优化。

4 空压机机头齿轮箱集成化优化设计

4.1 减振结构与齿轮箱一体化设计

摒弃传统后期加装减振配件的模式,将阻尼减振结构在齿轮箱铸造阶段同步集成。箱体浇筑时预留内嵌安装槽,减振阻尼块直接嵌入箱体内部,适配机头转子装配空间。箱体加强筋升级为复合阻尼筋板,在承载基础上增加振动耗能功能,持续耗散转子运转振动能量^[4]。一体化布局减少外置配件装配间隙与松动隐患,压缩机头整机占用空间,提升齿轮箱与转子主机结构整体性与紧凑度。

4.2 自动化组件与齿轮箱嵌入式集成设计

传统外置传感器、电控线路易受机头振动、油气侵蚀,本方案采用嵌入式集成设计解决该缺陷。结合机头齿轮、转子分布位置,在箱体侧壁、端面预留标准化嵌入式安装工位,统一布置传感采集元件与电控执行器。工位加工精度匹配组件安装标准,装配贴合紧密,保持箱体外表面平整;箱体内部开设隐蔽式走线槽,信号线、供电线缆全部内置收纳,杜绝线路外露磨损、结构干涉风险。嵌入

式布局缩短信号传输距离,拉近监测元件与机头传动区域距离,提升数据采集精度与电控响应速度。

4.3 齿轮箱适配机头工况的结构优化设计

围绕螺杆空压机机头全区间变负荷工况完成结构改良,机头压缩空气过程负荷持续波动,齿轮与转子受力同步动态变化。优化箱体应力分布,差异化调整各区域结构刚度,提升箱体抵御交变载荷能力。优化齿轮啮合精度与转子轴系装配间隙,缓解机头负荷切换时啮合冲击与转子跳动,保障动力传输平稳。重新规划箱体内部润滑油路与散热腔体,适配机头连续高负荷、间歇启停两类工作模式,稳定齿轮、转子工作温度,维持润滑介质性能,让齿轮箱性能适配机头全部动态工况。

4.4 齿轮箱整体结构稳定性优化设计

针对机头长期连续运行引发的结构疲劳、转子偏移问题开展稳定性优化。调整箱体各面板厚度,重新规划加强筋疏密排布,全方位提升箱体整体刚度,均匀分散转子高速传动动态载荷。箱体所有装配对接端面整体精磨,提高平面度与对位精度,保证整机装配后齿轮、转子轴系同轴度达标。升级轴系、齿轮轴向径向限位结构,强化转子定位约束,抑制长期高速运转下构件微量偏移、松动。优化箱体局部外形,均衡全域应力分布,减少应力集中点位,延缓传动部件疲劳损耗,确保机头整套转子传动系统长期保持稳定结构与精准传动精度。

结束语

通过对空压机齿轮箱基础结构、减振体系、自动化调控模块及集成构型的系统性优化,有效解决了齿轮啮合与转子运转产生的振动问题,削弱了振动传递与结构形变带来的不良影响。一体化结构设计简化了设备构造,提升了整体结构刚度,智能化调控体系可适配不同负荷工况的运行需求,稳定设备传动精度,延长核心传动部件使用寿命,为工业空压机齿轮传动系统的减振改良与性能升级提供实用参考。

参考文献

- [1]梁浩.关于车用空压机减振降噪改进的讨论[J].内燃机与配件,2024(3):42-44.
- [2]赵天,于磊,樊令举,等.某地铁车辆空压机橡胶减振器的设计及试验研究[J].铁道车辆,2023,61(6):59-65.
- [3]王强,孙磊,刘帅.小型空压机测试台减振设计[J].流体测量与控制,2023,4(1):54-57.
- [4]陈磊,刘中华,刘政.地铁车辆空气压缩机吊挂方式对模态参数的影响及减振形式优化[J].城市轨道交通研究,2025,28(1):129-133.