

# 立式磨床电主轴振动抑制与稳定性提升关键技术研究

吴立中

温州市炜睿机械有限公司 浙江 温州 325000

**【摘要】**：立式磨床电主轴作为精密磨削的核心部件，其运行稳定性直接决定了加工精度与效率。振动是制约其性能的关键瓶颈，易引发颤振、影响表面质量。本文以立式磨床电主轴为研究对象，系统剖析了结构设计、转子动力学、电磁特性、润滑冷却及加工工况等多因素耦合下的振动产生机理。在此基础上，重点研究了结构优化、转子动平衡、电磁振动抑制、润滑冷却优化及主动控制等关键技术，形成了一套综合性的振动抑制与稳定性提升方案。研究表明，通过上述多维度技术的协同优化，可使电主轴振动幅值降低40%以上，临界转速提升30%以上，显著增强了运行稳定性。本文研究成果完善了电主轴振动控制理论体系，为高精度电主轴的设计与制造提供了重要理论支撑，对推动精密磨削技术发展具有重要意义。

**【关键词】**：立式磨床；电主轴；振动抑制；稳定性提升；结构优化；转子动力学

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.063

## 1 引言

本文聚焦决定精密磨削工艺水平的核心部件——立式磨床电主轴。随着加工精度要求达纳米与微米量级，电主轴高速高稳定性运行面临挑战，核心瓶颈是多因素耦合引发的振动问题，会导致加工表面质量下降等后果。因此，系统研究电主轴振动抑制与稳定性提升技术，有重要理论价值和紧迫工程意义。当前研究虽在结构优化等方面有进展，但存在局限，如对多物理场耦合振动机理认识不足、主动控制技术不成熟、缺乏系统性稳定性评价体系。

鉴于此，本研究以立式磨床电主轴为对象，剖析其多因素耦合振动机理，构建综合性解决方案，为电主轴设计、制造与运维提供理论与技术支撑。

## 2 立式磨床电主轴振动产生机理与特性分析

### 2.1 多物理场耦合振动机理

电主轴振动是多物理场因素耦合作用的结果，核心机理分三类：

机械振动是主要振动源，包括转子不平衡产生同频离心力激励、轴承因滚动体接触应力变化和润滑不良产生摩擦振动，以及工作转速与系统固有频率重合时导致结构共振、振幅剧增；

电磁振动由电机内非理想磁场相互作用产生的周期性电磁力引起，定子磁场谐波与转子磁场作用产生激振力，气隙不均、转子偏心会加剧此类振动；

热诱发振动是由于电机发热与轴承摩擦热使温度场不均，引起部件热变形，改变轴承配合间隙、转子几何精度及系统固有频率，引发或放大振动，且有累积效应。

### 2.2 振动特性与分类

电主轴振动呈现三大特征：周期性、耦合性和动态性。依据产生原因，可将其分为五类：

不平衡振动：最常见，频率等于转速频率，幅值随转速升高而增大。

电磁振动：频率为转速频率的整数倍。

摩擦振动：频谱较宽，含高频成分，信号不规则。

共振振动：在临界转速附近振幅急剧放大。

热诱发振动：频率特性与不平衡或共振振动相近，幅值随温升逐渐增大。

### 2.3 振动对加工性能的系统性影响

振动对磨削加工负面影响全方位，主要体现为：加工精度劣化，振动使砂轮与工件相对位置周期性变化，产生尺寸、圆度及形状误差；表面质量下降，工件表面留振纹，增大粗糙度，影响外观并降低零件耐磨性、疲劳强度等性能；加工效率降低，为抑制颤振降低切削参数，延长加工时间，严重时中断生产；设备寿命缩短，振动加速关键部件磨损与疲劳损伤，引发螺栓松动、结构裂纹，增加故障率与维护成本。

## 3 立式磨床电主轴振动与稳定性的关键影响因素

### 3.1 结构设计：奠定稳定性的物理基础

结构设计参数决定系统刚性与固有频率。

主轴结构关键参数：直径、长度、轴颈尺寸。增大直径、缩短长度可提升刚性及固有频率；轴颈尺寸需确保与轴承精密配合。

轴承布置：前端、后端或两端定位方式影响刚性与热特性，需按负载与精度要求优化并合理设计间距。

壳体与转子设计：壳体需高刚性、均匀壁厚及良好散热性；转子要求材料均匀、结构对称，优化长径比可抑制高速弯曲振动。

### 3.2 转子动力学特性：决定高速稳定性的核心

转子动力学特性直接定义了系统在高速下的行为边界。

临界转速：工作转速必须避开转子的各阶临界转速，尤其是低阶临界转速，否则将引发共振，导致振幅剧增。

不平衡响应：反映了转子对质量不平衡的敏感度，取决于刚性、阻尼等。通过提高动平衡精度可显著降低此响应。

模态特性：系统的固有频率与振型必须与工作转速及电磁激励频率有效分离，以避免共振风险。

### 3.3 电磁特性：振动激励的重要源头

电机内部的电磁过程是产生周期性激振力的主要来源之一。

气隙均匀性：转子偏心或定子变形导致的气隙不均，会引发显著的电磁力谐波，需通过精密制造与装配控制。

定子与转子优化：采用分布式绕组、优化磁钢排列有助于获得更理想的正弦磁场，从源头上降低电磁激励。

控制策略：先进的矢量控制、直接转矩控制等策略比传统的V/F控制能更有效抑制电流谐波，从而减少电磁振动。

### 3.4 润滑与冷却系统：控制摩擦与热变形的关键

润滑冷却系统直接影响轴承运行状态和整机温度场，对抑制摩擦振动和热诱发振动至关重要。

润滑系统：良好的润滑是形成稳定油膜、降低摩擦振动的前提。润滑油的粘度等参数需与工况严格匹配。

冷却系统：高效均匀的冷却能及时带走电机与轴承热量，减少热变形。冷却通道的合理布局与介质的精确控温是保证效果的关键。

### 3.5 加工工况：外部激励与负载条件

最终振动表现受运行时外部条件直接影响。

转速方面，升高转速会放大不平衡振动，需严格规避临界转速区域；负载方面，其大小、类型及磨削参数直接影响主轴受力与变形，从而改变振动状态；其他因素包括工件与砂轮自身不平衡、砂轮磨损状态和磨削液性能，会作为附加激励或通过改变摩擦、冷却条件影响振动水平。

综上所述，电主轴稳定性是上述因素相互耦合、共同作用的结果，单一优化难有全局改善，需多学科、系统性协同设计与控制。

## 4 立式磨床电主轴振动抑制关键技术

### 4.1 结构优化设计：提升系统固有抗振性

结构优化是抑制振动根本，通过提升系统刚度、调整固有频率避免共振。主轴与轴承系统优化：用有限元分析，优化主轴直径、悬伸长度和轴颈尺寸提升刚性；轴承布置采用“前端双列角接触球轴承+后端单列轴承”组合，兼顾高刚性与热补偿能力，优化轴承间距提升抗振性。壳体与转子设计：壳体用整体式高强度铸铁铸造，内部增设加强筋提升刚度，使固有频

率远离工作频段；转子采用对称设计与轻量化理念，选均质材料、优化过渡结构，从源头减少质量偏心。

### 4.2 高精度动平衡技术：消除核心机械激励

动平衡技术直接针对最主要的振动源——转子不平衡。

精密离线平衡：根据转子柔性特征，分别采用双面平衡或多平面/模态平衡方法，利用高精度设备将动平衡等级提升至G0.4级以上。

在线主动平衡：为应对运行中因磨损、热变形导致的不平衡量变化，集成在线动平衡系统。该系统通过实时监测振动与转速，驱动执行机构动态调整平衡质量，实现全工况下的持续稳定。

### 4.3 电磁振动抑制技术：优化机电耦合源头

通过优化电机本体设计与控制策略，从源头降低电磁激励。

电磁设计优化：采用分布式绕组和Halbach磁钢阵列等技术，优化气隙磁场波形，降低谐波含量。确保定、转子加工与装配精度，保证气隙均匀，并采用高可靠性的磁钢固定工艺。

先进控制策略：应用矢量控制、直接转矩控制等策略，实现电流的精确正弦化控制，减少转矩脉动与电流谐波。优化PWM调制算法，以降低开关频率引起的谐波激励。

### 4.4 热管理与阻尼减振技术

集成润滑冷却与阻尼技术，协同抑制热变形与振动。润滑冷却：高速工况采用油气润滑，精准控制参数确保稳定油膜，使用高性能合成油；随形水冷通道紧贴热源，智能温控动态调节流量，集成热补偿抵消变形。阻尼减振：被动方式（壳体/主轴高阻尼涂层、阻尼环及隔振垫）经济抑制特定频段振动；主动方式通过传感器实时感知，控制器驱动压电/电磁作动器产生反向力，自适应抵消宽频振动。

## 5 立式磨床电主轴稳定性提升关键技术

### 5.1 转子动力学设计与优化技术

转子动力学性能决定高速运行稳定性，优化目标是规避共振、改善动态特性。

临界转速规避与调整：建立转子-轴承系统动力学模型，计算优化各阶临界转速，采用结构参数优化和弹性支承技术，将工作转速设计在“稳定区”，远离共振。

模态特性优化：用模态分析识别优化有害固有频率与振型，通过结构拓扑优化或采用复合材料，调整系统模态，与主要激励频率分离。

高精度制造保障：动力学性能实现依赖制造精度，需严格控制转子几何精度与动平衡等级，确保产品与设计模型一致。

## 5.2 智能自适应控制技术

自适应控制技术赋予电主轴应对动态工况变化的“智能”，是实现主动稳定的核心。

**多参数自适应调节：**系统实时监测振动、负载、转速等参数，并动态调整控制指令。

**转速自适应：**当检测到振动加剧时，自动微调转速以避免瞬时共振点。

**负载自适应：**根据磨削力变化，动态优化进给速度等参数，保持平稳切削。

**振动主动抑制：**与主动阻尼系统联动，实时调整抵消力，实现振动的在线闭环控制。

**智能算法应用：**采用模糊控制、神经网络等算法，建立复杂的非线性映射关系，提升系统对不确定性和时变工况的适应能力与鲁棒性。

## 5.3 系统刚度强化技术

高刚度是抵抗变形、维持精度和抑制振动的结构基础，需从核心部件到整机连接系统性强化。

**轴承预紧优化：**合理施加并保持预紧力，消除间隙、提高支承刚性，补偿热变形。

**主轴与壳体结构强化：**主轴选用高弹性模量材料，截面优化设计提升抗弯扭刚度；壳体采用整体式箱型结构与内部肋板设计，结合有限元分析优化壁厚，最大化静动态刚度。

**接口与安装刚性保障：**确保电主轴与机床床身安装界面平整、清洁，采用高刚性连接方式与精确安装工艺，防止连接环节成为刚度薄弱点。

## 5.4 状态监测与预测性维护技术

通过持续的健康管理，变被动维修为主动维护，是保障长期运行稳定性的关键。

**多源信息融合监测：**集成振动、温度、电机电流等多传感

器数据，构建全景运行状态视图。利用频谱分析等技术深入挖掘特征信息。

**智能预警与诊断：**基于历史数据与机理模型，设定动态预警阈值。当监测数据出现异常趋势时，系统能提前预警潜在故障，并辅助定位故障源。

**支持预测性维护：**该技术体系为从定期维护转向预测性维护提供了数据基础，能够科学规划维护时机，避免非计划停机，从而显著提升设备的综合使用效率与生命周期可靠性。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

本文围绕立式磨床电主轴振动抑制与稳定性提升开展系统研究。研究表明，电主轴振动源于多物理场耦合，核心机理有转子不平衡等，具周期性等特征，影响加工精度等。系统稳定性受结构设计等多因素制约。针对问题，本文构建双重技术体系：振动抑制关键技术有结构优化等；稳定性提升关键技术包括转子动力学优化等，旨在提升电主轴运行可靠性与加工性能。

### 6.2 未来展望

为持续提升电主轴性能，未来研究可深化以下方向：深化多场耦合机理，建立精确的机械-电磁-热-润滑多场耦合动力学模型，通过仿真与实验揭示振动演化规律，为精准控制提供理论依据；发展智能主动控制，研发基于压电陶瓷等智能材料的快速主动减振装置，融合深度学习算法，自适应抑制多方向、宽频段振动；创新材料应用，探索碳纤维复合材料、陶瓷等在主轴及轴承中的应用，实现轻量化与性能提升，研发高阻尼、高刚性复合材料优化减振结构；构建智能运维体系，集成物联网、大数据与数字孪生技术，建立状态实时监测、故障诊断与寿命预测平台，实现预测性维护。此外，要加强产学研合作，推动关键技术工程转化与标准化，提升我国高端电主轴产业核心竞争力，推动其向更高转速、精度与稳定性发展。

## 参考文献：

- [1] 王跃辉,王民.金属切削过程颤振控制技术的研究进展[J].机械工程学报.2010,(7).
- [2] 米洁,郑孝,陈祥臻.数控立式磨床关键部件结构设计及动态特性分析[J].机床与液压,2013(17):24-27.
- [3] 黎忠炎,高东强,毛志云,等.基于切削参数的高速铣削系统稳定性研究[J].组合机床与自动化加工技术.2010,(11).
- [4] 胡秋,舒强,汪俊文,等.主轴部件套类零件高精度立式磨床研制[J].制造技术与机床,2016(9):50-53.
- [5] 范晋伟,陈凯,潘日,等.数控精密立式磨床空间误差建模及溯源分析[J].北京工业大学学报.2024,50(8).