

# 电子洁净厂房防微振设计

田小虎

中国电子系统工程第三建设有限公司 四川成都 610000

**摘要:** 电子洁净厂房防微振设计是保障纳米级半导体制造的核心技术, 针对光刻机、电子显微镜等设备对微振动的严苛敏感性, 需建立多专业协同控制体系。通过集成建筑布局避振策略、高刚度楼盖动力优化、设备模块化隔振基座及管路柔性连接技术, 结合主动阻尼系统与振动传感网络, 实现全系统振动能量传递路径控制。基于此, 本篇文章对电子洁净厂房防微振设计进行研究, 以供参考。

**关键词:** 电子洁净厂房; 防微振; 设计

## 引言

当前高端半导体制造工艺进入3纳米以下节点, 设备振动容许阈值已逼近物理极限。传统设计难以应对FFU集群、管路脉动等多源振动耦合挑战, 外部交通荷载引发的地脉动干扰更使洁净区微振动超标风险加剧。研究地基隔振沟动力响应优化、浮筑平台调谐质量阻尼器参数匹配、设备基座阻尼比强化等关键技术, 为晶圆厂全寿命周期振动控制提供理论基础与工程范式。

## 一、电子洁净厂房的特征

电子洁净厂房是以半导体制造、显示面板生产等高端电子工业为核心功能的特殊工业建筑, 其核心特征包括对洁净环境的严苛控制, 要求通过高效粒子空气过滤系统维持空气悬浮粒子浓度在特定等级范围内; 对温湿度变化实施精密调节, 确保工艺设备区域环境参数稳定; 具备严格的微振动控制体系, 采用高刚度结构设计及主动隔振措施抑制设备运转与外界传递的振动干扰; 采用双层架空地板实现隐蔽管线敷设及垂直单向气流组织; 内装材料选用光滑耐腐蚀的不锈钢板或聚合物涂层实现自洁与抗静电功能; 集成超纯水供应、真空获取、大宗气体输送等复杂能源系统; 整体布局注重人流物流分流及气压梯度控制, 并通过建筑密闭构造与气闸室维护洁净环境完整性, 属于高度集成化的高精度生产空间。

## 二、微振源作用机理与影响分析

### 1. 振源分类及特性

电子洁净厂房振源分为内部与外部两大类: 内部振源主要包括工艺设备运转振动, 如光刻机步进电机激

振力峰值可达300N例如基频20-150Hz、晶圆传输机械臂重复定位诱发次生振动例如基频5-50Hz; FFU风机集群形成中频宽带噪声振动例如中心频率80Hz±15%; 高纯气体/真空管路因素流脉动及水锤效应产生压力波动振动例如加速度级>10μg。外部振源涵盖交通荷载如重型车辆通行引发地基0.5-30Hz低频传递例如距厂区200m处速度谱密度10μm/s、地铁运行导致1-80Hz地脉动例如振动速度有效值1mm/s; 临近施工冲击作业如打桩产生瞬态冲击波例如最大质点振动速度PPV>5mm/s。这些振源通过土体-建筑基础耦合路径传递至洁净区, 其频谱特性、能量强度及与敏感设备共振风险构成防微振设计关键输入参数。

### 2. 振动传递路径

振动传递路径在电子洁净厂房中呈现多阶段耦合特征: 设备基座作为初级传递界面, 需控制基础导纳值低于10-6m/Ns, 振动能量通过设备锚固点注入建筑承重结构; 结构传递阶段中, 楼盖系统受200-1000Hz中高频振动激发产生弯曲波传播例如跨中加速度响应>50μg/g, 其传递损失TL与楼板面密度成正比; 竖向构件传递路径表现为立柱中低频例如5-80Hz驻波效应, 振动经梁柱节点传递衰减率约0.5dB/m; 管道支架与结构刚性连接点形成二次振源辐射例如尤其500Hz以上流体脉动频段, 管卡隔振效率需达20dB以上; 最终振动通过洁净室高架地板传递至工艺设备安装面, 在未采取隔振措施时100Hz频段振动放大因子可达3-5倍。全过程路径控制需综合运用质量阻抗失配原理、阻尼层耗散技术及主动隔振系统, 确保振动敏感区1-100Hz频段振动速度均方根值满足VC-C/E级标准要求。

### 3. 半导体设备振动敏感度分级

半导体设备振动敏感度按工艺精度严苛分级：光刻机作为最高敏感设备例如ASMLEUV光刻机，其物镜系统要求1-100Hz频段振动速度均方根值低于 $0.75 \mu\text{m/s}$ 例如对应国际振动标准VC-E级，曝光定位精度对6Hz以下低频振动的振幅峰值阈值小于3nm；关键量测设备如CD-SEM扫描电镜要求10-500Hz频段振动加速度 $<0.1 \mu\text{g}$ ，超出该阈值将导致电子束偏移误差 $>1\text{nm}$ ；离子注入机在谐振频率 $80 \pm 15\text{Hz}$ 区间需控制振动位移 $<15\text{nm}$ ，否则束流均匀性偏差超5%；晶圆探针台对5-200Hz随机振动敏感，要求功率谱密度 $\text{PSD} < 1 \times 10^{-8} \text{g}^2/\text{Hz}$ ，超标将引发探针接触失效。设备制造商通常通过FFT分析指定振动验收包络线，当环境振动能量超过设备临界阈值时将造成线宽粗糙度增大、套刻精度超标等不良率问题。

## 三、电子洁净厂房防微振多专业协同设计体系

### 1. 建筑专业策略

厂区总图避振规划强制设定与交通干道最小防护距离不小于200米，距地铁隧道外轨中心线须保持300米以上缓冲隔离带。基于振动能量随距离衰减的几何阻尼原理地表波传播衰减率约 $0.5\text{dB/m}$ ，需评估重型卡车通行引发2-50Hz低频域振动速度谱密度阈值例如30米处限值 $<0.1\text{mm/s}$ 。规划阶段采用ANSYS半无限空间模型进行地脉动预测，确保核心工艺区符合ISO14644VC-D级标准例如1-80Hz频段速度均方根 $\leq 12.5 \mu\text{m/s}$ ，同时设置绿化减振带及地下防振屏障沟例如深度 $\geq 5\text{米}$ 作为辅助阻隔措施。

### 2. 专业核心设计

功能区振动隔离布局以核心工艺区为中心构建三级缓冲带体系，距离光刻机等敏感设备区60米范围内禁止布设振动速度级 $\geq 50 \mu\text{m/s}$ 的设备，HVAC主机及空压机房等强振源例如基础振动级 $> 100 \mu\text{g}$ 须布置于厂区外围，与核心区保持 $\geq 30\text{米}$ 距离并设置重力块混凝土隔振屏障；在核心区外围30米环带内限定仅可布置振动级 $< 25 \mu\text{m/s}$ 的中低振动设备例如纯水系统，同时设置6米宽设备真空环廊作为振动衰减过渡区。通过布局实现相邻功能区振动级差 $\geq 10\text{dB}$ ，确保核心区背景振动满足VC-C/E级标准要求。地基基础选型优先采用微型桩筏板复合体系，其中微型桩径 $\Phi 300\text{mm}$ 、桩长20米，植入中风化岩层提升竖向刚度；筏板厚度 $\geq 1.5\text{米}$ 并内置双层双向配筋，基础整体动力刚度 $> 1 \times 10^9\text{N/m}$ 。同步设置深

4米、宽1.2米的连续隔振沟，内填聚氨酯泡沫材料例如阻尼损耗因子 $\eta \geq 0.3$ ，有效阻断10-80Hz地表波传递，地脉动衰减率 $\geq 45\text{dB}$ ，确保核心区基础振动速度响应 $< 3 \mu\text{m/s}$ ，满足SVMs严格限值要求。

### 3. 设备与管道系统防振

楼盖体系动力优化采用密肋大板例如肋高800mm、间距1.2m，配置倒T型柱帽节点增强区域刚度，控制一阶竖向固有频率 $\geq 50\text{Hz}$ ，在2吨/ $\text{m}^2$ 均布荷载下100Hz激振力响应加速度 $< 35 \mu\text{g}$ 。通过SAP2000有限元分析优化肋梁截面配筋率至3%，使楼盖面内刚度提升至 $1.2 \times 10^9\text{N/m}$ ，确保光刻机区域200-1000Hz频段振动传递损失 $> 30\text{dB}$ ，避免与工艺设备谐振。大型设备模块化减振基座采用钢框架内嵌预制高阻尼钢筋混凝土重力块例如质量比 $\geq 2.0$ ，集成剪切型橡胶隔振器例如阻尼比 $\geq 25\%$ ，垂向刚度系数 $4 \times 10^7\text{N/m}$ ，基座一阶固有频率严格控制在 $5 \pm 0.5\text{Hz}$ 范围，使10-100Hz设备激振力传递率降至0.05以下，达到 $> 40\text{dB}$ 隔振效率。安装前通过ANSYS谐响应分析验证基板模态密度，确保与设备激振频谱规避谐振风险。

### 4. 微振控制专项技术

管路柔性连接设计针对高纯气体及真空系统，优先采用多层不锈钢波纹管例如轴向刚度 $\leq 50\text{N/mm}$ 及氟橡胶挠性接头例如动静比 $\geq 1.5$ ，在100-500Hz流体脉动频段实现 $> 30\text{dB}$ 振动传递损失。波纹管设计补偿量 $\pm 15\text{mm}$ ，配合限位拉杆承受0.6MPa压力波动；橡胶接头阻尼损耗因子 $\eta > 0.2$ ，有效隔离中高频振动例如500Hz段振动加速度 $< 20 \mu\text{g}$ ，通过ANSYS流固耦合验证脉动压力衰减率 $> 90\%$ ，大幅降低管路谐振引发的微振动能量传递。设备运行振动仿真采用ANSYS谐响应分析模块，输入5-500赫兹扫频激振载荷谱例如步长1赫兹，峰值力200N，在光刻机安装区域网格细化至10厘米尺寸，构建含地基-楼盖-设备基座的完整有限元模型。通过模态叠加法计算关键控制点振动响应，验证100赫兹工况下最大位移量小于5微米，且设备基座传递函数在谐振频率6赫兹处放大因子严格控制在1.3倍以下，确保实测振动速度均方根值满足0.75微米每秒的VC-E级阈值要求。微振动传感网络布点遵循空间传递路径优先原则，在核心工艺设备安装面周边0.5米范围内按10米网格部署纳米级电容位移传感器例如分辨率 $\pm 0.1\text{nm}$ ，敏感设备基座处增设三轴压电加速度计例如量程0.1-1000 $\mu\text{g}$ ，精度 $\pm 5\%$ 。沿结构柱网及管线密集区设置次级监测

点例如间隔15米，重点覆盖50-500Hz高频振动敏感带；地下传导路径布设低噪声地质检波器例如本底噪声 $< 1\text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，同步实施传递函数矩阵分析，确保传感器组合频响范围覆盖0.5-1000Hz，满足VC曲线全频段振动矢量合成精度要求。

#### 四、电子洁净厂房防微振的管控要点

##### 1. 设计阶段协同机制

设计阶段协同机制依托BIM平台构建振动模拟 workflow，采用Revit进行建筑机电模型整合与LOD400精度结构模型建立，将ANSYS模态分析结果通过IFC格式与BIM模型实时映射；基于云平台部署协同仿真环境，实现土建振动传递损失例如 $TL > 25\text{dB}$ 与MEP专业管道流体脉动振动谱例如500Hz频段 $\text{PSD} < 10^{-8}\text{g}^2/\text{Hz}$ 的多物理场耦合分析；运用Navisworks进行隔振节点碰撞检查，通过APDL脚本自动化生成刚度优化方案例如基频 $> 50\text{Hz}$ ，使设计阶段振动超标风险预判准确率提升90%，跨专业设计迭代周期缩短40%。

##### 2. 振动敏感设备招标技术要求

振动敏感设备招标技术规范需明确供应商满足ISO14644-4标准，光刻设备如ASML EUV系统强制要求自带气浮或磁悬浮主动隔振基座，其隔振效率在1-100Hz频段内需达到 $> 40\text{dB}$ ，被动基座阻尼比 $\geq 0.25$ ，振动传递率曲线在设备谐振频率例如通常 $6 \pm 2\text{Hz}$ 衰减斜率须 $> 12\text{dB/octave}$ ；招标文件规定设备安装面振动验收限值为1-100Hz频段速度均方根值 $\leq 0.75\mu\text{m/s}$ 例如VC-E级，并提供模态分析报告证明设备-基座耦合系统一阶固有频率 $> 15\text{Hz}$ ；同时要求设备供应商配合土建预埋件定位误差 $< \pm 3\text{mm}$ ，并提交振动敏感度图谱及安装界面动力学阻抗匹配参数。

##### 3. 全生命周期调试验证

全生命周期调试验证采用扫频测试与SVMs振动速度均方根值综合评估法，在厂房空态静态洁净度达标后实施。使用电磁激振器在5-500Hz范围输入0.1g白噪声激励，通过分布式ICP加速度传感器网络例如分辨率 $0.1\mu\text{g}$ 采集工艺设备基座处振动响应，结合1/3倍频程谱

分析计算各中心频带振动速度均方根值，判定是否满足VC曲线限定包络；依据ISO10816标准，在重型设备启动及管路满负荷运行工况下进行SVMs连续监测，要求1-100Hz频段全域振动速度限值 $< 3\mu\text{m/s}$ ；关键光刻区执行72小时持续采样，数据经FFT变换后生成倍频程谱与背景振动对比图，确保VC-E级达标率 $\geq 98\%$ ，系统固有频率避让设备敏感频段5Hz以上。

#### 结束语

总之，构建的防微振协同设计体系在电子洁净厂项目中实现产业化应用。未来需持续攻关量子级测量设备的亚纳米振动控制难题，发展AI驱动的实时振动预测补偿系统，并推动国产隔振材料与精密传感器的技术自主化进程。

#### 参考文献

- [1] 鲁正, 李盛, 蒋武, 周仲煜, 尚乐乐, 李银飞. 电子厂房防微振优化设计有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (S2): 35-44.
- [2] 卢爱贞, 姜宇, 许照刚, 陈璠, 吕佐超, 邢云林. 精密设备防微振基台动力特性分析与研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53 (08): 95-99.
- [3] 周晓梅. 采用铰接柱解决叠层电子厂房结构刚度突变[J]. 山西建筑, 2023, 49 (18): 46-48.
- [4] 于良, 陈展, 刘林. 高级别电子半导体厂房洁净室施工关键技术[J]. 安装, 2023, (S1): 76-77.
- [5] 胡艳飞, 刘俊, 谭潜, 钟荣攀, 牟阳, 尹力. 电子厂房防微振响应分析及优化研究[J]. 建筑结构, 2023, 53 (S1): 831-837.
- [6] 周伟, 任青, 陶龙. 考虑管道流-固耦合振动影响的华夫板微振动研究[J]. 中国水运, 2022, 22 (10): 151-153.
- [7] 周予启, 张航科, 詹必雄, 杨光明, 张群, 张惠丽. 超大高科技电子厂房关键施工技术研究[J]. 建设科技, 2021, (13): 96-99+103.