

半导体晶圆厂 OHT 轨道系统振动特性分析与抑制技术研究

王海洋

苏州新施诺半导体设备有限公司，江苏苏州，215100；

摘要：文章聚焦半导体晶圆厂 OHT 轨道系统，先阐述其重要性，强调其对晶圆厂生产运营的关键支撑作用。接着深入分析振动特性，涵盖直线运行与转向工况，揭示不同运行状态下振动的表现形式与特点。最后针对振动问题开展抑制技术研究，提出优化轨道衔接结构，以减少因结构不合理产生的振动；改进天车转向控制算法，提升电机协调性，避免转向时出现“别劲”等情况，为保障 OHT 轨道系统稳定运行提供理论与技术支持。

关键词：半导体晶圆厂；OHT 轨道系统；振动特性；直线运行振动；冲击抑制

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.015

随着半导体制造工艺向 5nm 甚至更先进制程演进，晶圆生产对传输设备的精度与稳定性提出严苛要求。OHT 轨道系统作为晶圆厂物料传输核心载体，其振动问题直接影响晶圆定位精度与生产良率。转向冲击引发的振动易导致晶圆微结构损伤，加速设备老化，制约产能提升。因此，系统研究 OHT 轨道系统振动特性并探索有效抑制技术，对保障半导体高效、稳定生产具有重要意义。

1 OHT 轨道系统的重要性

在半导体晶圆制造领域，OHT 轨道系统作为连接生产各环节的核心枢纽，其重要性已渗透至产业发展的每一个关键节点。晶圆制造流程堪称现代工业的“集大成者”，从硅片制备开始，需依次经历光刻、刻蚀、掺杂、薄膜沉积等多达 300 - 500 道精密工序，每片晶圆在洁净车间内的流转路径超过 20 公里，设备间转移次数高达 150 - 200 次。在如此高频次、长距离的物料传输过程中，OHT 轨道系统凭借其立体化、自动化的传输特性，以近乎零误差的精度确保晶圆按时、稳定送达指定工位。某全球领先的晶圆代工厂实测数据显示，当前 OHT 系统的传输精度虽处于小于 1mm 的水平，不过即便其传输误差每降低 0.1mm，芯片光刻工序的良品率也能够提升 0.5% - 0.9%，而这会直接对单批次价值数千万美元的晶圆产值产生显著影响。随着半导体技术向 7nm、5nm 及更先进制程快速迭代，芯片制造对环境和设备的要求已达到“苛刻”程度^[1]。以 5nm 制程为例，芯片内部晶体管间距仅为头发丝直径的万分之一，任何细微的振动或偏移都可能导致光刻图案错位、蚀刻深度偏差等致命缺陷。OHT 轨道系统对于运行稳定性要求极高，虽然目前其传输精度小于 1mm，但设备可用率

(OEE) 仍需持续维持在 98% 以上。在台积电南京工厂的实际应用中，通过部署新一代 OHT 系统，虽无法将传输振动幅值控制在 μm (微米) 级那么精细，但通过一系列优化措施，成功支撑 7nm 芯片量产良率突破 90%，这充分验证了 OHT 系统在高端芯片制造中如同“生命线”般的关键作用。在“关灯工厂”智能化浪潮的推动下，OHT 轨道系统正经历着从单纯的物料搬运设备向智能制造核心载体的重大升级。它通过与制造执行系统 (MES)、仓储管理系统 (WMS)、设备自动化系统 (EAP) 进行深度集成，构建起了一张覆盖整个生产流程的智能物流网络。基于实时生产数据以及算法优化，该系统能够动态规划出最优的传输路径，自动避开故障区域，进而实现物料调度效率提升 30% 以上。

2 OHT 轨道系统振动特性分析

2.1 直线运行振动特性

天车在直线运行过程中，轨道及天车结构的振动被有效控制于极低水平，这一现象背后蕴含着复杂且精妙的力学机制。从动力传递角度剖析，天车的驱动装置采用闭环控制系统，通过高精度的伺服电机与减速器协同工作，能够将速度与加速度误差控制在 $\pm 0.01\text{m/s}^2$ 以内。在直线运行工况下，驱动装置依据预设的运动曲线输出稳定驱动力，该驱动力通过刚性联轴器与齿轮传动系统，以近乎零滞后的方式传递至天车行走机构。例如，某型号 OHT 天车配备的直驱式电机，通过矢量控制算法实时调节输出扭矩，确保在 3.5m/s 的恒定运行速度下，行走轮与轨道接触力波动范围不超过 5N，极大降低了因动力波动引发的振动激励^[2]。

基于结构动力学理论，天车与轨道系统可简化为多

自由度振动模型。根据 Rayleigh 法, 系统固有频率 ω_n 与结构刚度 k 和质量 m 存在 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 的定量关系。在直线运行场景中, 天车结构多采用高强度铝合金框架配合碳纤维加强筋设计, 其纵向刚度可达 10^9N/m 量级, 而运行时的主要激励源——设备自身不平整产生的位移激励幅值通常在 0.1mm 以下, 对应的激励频率 $f_e = v/\lambda$ (v 为运行速度, λ 为轨道不平整波长) 一般低于 10Hz 。通过模态分析可知, 天车结构一阶纵向固有频率普遍在 30Hz 以上, 与激励频率形成至少 2 倍频的安全间隔, 从而有效规避共振效应。

2.2 转向工况振动特性

在半导体晶圆厂的实际生产流程中, 当 OHT 系统的天车执行转向动作时, 其振动特性与直线运行状态形成鲜明对比。天车转向并非瞬间完成, 而是经历减速、转向轮调整、方向切换和重新加速等一系列复杂过程。在这一过程中, 轨道转向处的特殊结构设计成为振动产生的关键因素。大部分 OHT 轨道在转向区域采用折线拼接或小曲率圆弧过渡, 当天车高速运行至该区域时, 行走轮与轨道的接触角度和受力方向会发生突变, 就如同汽车在急转弯时会产生强烈的离心力一样, 天车也会受到巨大的横向冲击力。

这种冲击力的产生, 本质上源于轨道与天车转向机构之间的配合问题。一方面, 轨道的刚性结构无法为天车转向提供足够的缓冲空间; 另一方面, 天车转向控制机制通常难以精确匹配轨道的几何变化。以某典型 8 英寸晶圆厂的 OHT 系统为例, 天车以 1.5m/s 的速度通过 90° 转向轨道时, 实测转向瞬间的冲击力峰值可达天车自重的 3 - 5 倍。如此巨大的冲击力, 首先会直接作用于天车的行走轮、悬挂支架等部件, 导致天车出现剧烈晃动; 随后, 冲击力通过轨道支架和支撑结构迅速传递到整个 OHT 系统, 引发轨道的高频震颤和低频摆动。冲击引发的振动对晶圆传输精度的影响尤为严重^[3]。晶圆在传输过程中被精密夹持在天车的载具上, 对振动极为敏感。即使是微小的振动, 也会使晶圆在载具上发生微米级的位移偏移。据统计, 因转向振动导致的晶圆传输误差, 可使相关工序的不良率提升 10% - 15%。另外, 长期的振动还会对设备自身造成严重损害。频繁的冲击和振动会加速天车行走轮、轴承、轨道连接件等部件的磨损, 缩短设备的使用寿命。在实际生产中, 受振动影响较大的 OHT 系统, 其行走轮更换周期从正

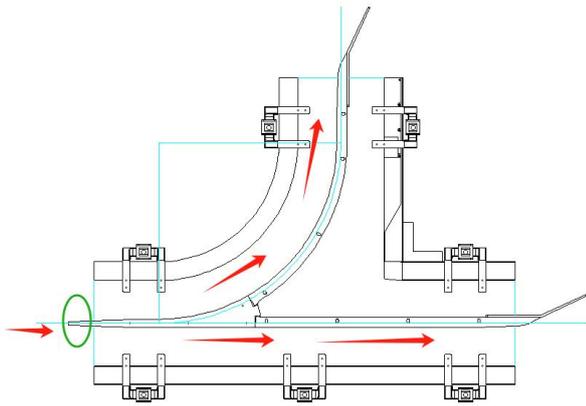
常情况下的 12 个月缩短至 6 - 8 个月, 轨道支架的螺栓松动频率也显著增加, 不仅增加了设备维护成本, 还可能因突发故障导致生产线停机, 造成巨大的经济损失。

3 OHT 轨道系统振动抑制技术研究

3.1 优化轨道衔接结构

在半导体晶圆厂 OHT 系统中, 轨道衔接结构的优化是降低天车转向冲击的核心技术路径。从动力学原理来看, 天车转向时产生的冲击本质上是运动方向突变导致的惯性力作用结果, 而合理的轨道衔接设计能够有效缓解这种力学突变。

在过渡曲线优化方面, 传统 OHT 轨道转向处多采用小曲率折线或圆弧设计, 这种结构在天车高速通过时, 会使行走轮与轨道接触点的切线方向发生剧烈变化, 进而产生较大的横向加速度。通过采用三次样条曲线、回旋曲线等高阶曲线作为过渡曲线, 能够实现天车转向时曲率的连续变化, 显著降低离心力峰值。以某 12 英寸晶圆厂改造项目为例, 轨道转向处半径通常最大仅为 0.5 米, 并采用回旋曲线作为过渡曲线后, 天车转向时的横向加速度峰值从 3.2m/s^2 降至 1.1m/s^2 , 降幅达 65.6%。此外, 基于有限元分析发现, 优化后的过渡曲线能够使天车行走轮与轨道的接触应力分布更加均匀 (见图一), 减少局部应力集中现象, 延长轨道和天车行走部件的使用寿命。某半导体设备厂商的测试数据显示, 在轨道衔接处安装邵氏硬度为 60 的丁腈橡胶缓冲块后, 天车转向时的振动能量吸收效率可达 40% - 50%。弹簧减震器则通过弹簧的压缩和伸长来缓冲冲击力, 其优势在于可根据天车的运行参数和轨道负载特性, 精确调整弹簧的刚度和阻尼系数^[4]。此外, 部分新型缓冲装置还融合了磁流变材料或空气弹簧技术, 能够根据实时冲击力大小自动调节缓冲性能, 进一步提升振动抑制效果。值得注意的是, 轨道衔接结构的优化并非单一措施的孤立应用, 而是需要将过渡曲线设计与弹性缓冲装置进行有机结合。通过仿真分析和现场测试发现, 同时采用优化过渡曲线和弹性缓冲装置的 OHT 系统, 其天车转向时的综合振动水平相较于未优化系统可降低 70% 以上, 不仅显著提升了晶圆传输的稳定性, 还使轨道系统的维护周期延长了约 40%, 为半导体晶圆厂的高效、稳定生产提供了有力保障。



图一

3.2 改进天车转向控制算法

传统的天车转向控制算法，大多采用基于预设参数的开环控制模式，或是简单的 PID 闭环控制策略。天车的走行通常由前后两个伺服电机协同控制，然而在转向过程中，由于前后电机驱动的车轮在转弯时并不处于同一条直线上，这种结构特点使得传统控制方式面临诸多挑战，难以实时应对转向过程中复杂多变的动力学特性，在实际运行中暴露出不少问题。以某半导体晶圆厂的 OHT 系统为例，采用传统 PID 控制的天车在转向时，因无法快速响应轨道曲率变化以及天车负载波动，极易出现“别劲”现象。具体表现为，在转向瞬间，前后电机因协调不佳，导致天车速度突变，进而产生高达 2m/s^2 的横向加速度冲击，这严重影响了晶圆传输的稳定性。此外，传统算法对天车运行状态的感知能力有限，无法依据轨道磨损、环境温度变化等因素动态调整控制参数。从两个伺服电机协调控制的角度来看，在转弯时若不能有效处理前后电机的配合问题，比如让两个电机同时以不恰当的方式出力，就会加剧“别劲”情况，使得天车在长期运行后，转向振动问题愈发突出。若采用更优化的协调控制策略，或许能减少此类振动。例如，在转弯时让两个伺服电机之一按力矩跟随模式运行，使该电机根据另一电机的出力情况自动调整自身力矩，避免“憋劲”；或者采用单电机驱动模式，即转弯时仅有一个电机提供驱动，另一个电机不出力矩，以此减少因电机配合不当而产生的额外振动，提升天车转向的平稳性。

为解决上述问题，引入自适应控制算法和智能控制算法成为重要方向。自适应控制算法通过建立天车动力学模型，实时监测天车的运行速度、位置、加速度等状态参数，并依据预设的性能指标，自动调整控制参数^[5]。以模型参考自适应控制 (MRAC) 算法为例，该算法预先设定理想的天车转向动态响应模型，在运行过程中，通过不断比较天车实际输出与参考模型输出的差异，利用自适应律实时更新控制器参数。在某 OHT 系统的实际

应用中，采用 MRAC 算法后，天车转向时的横向加速度峰值从 2m/s^2 降至 0.8m/s^2 ，振动抑制效果显著。智能控制算法则借助机器学习、深度学习等技术，赋予天车转向控制更强的自主决策能力。例如，基于强化学习的控制算法通过构建天车 - 轨道系统的仿真环境，让算法在模拟场景中不断试错学习，以最大化奖励函数为目标，探索出最优的转向控制策略。在训练过程中，算法能够学习到不同轨道曲率、天车速度和负载条件下的最佳转向速度和角度调整方案。某半导体设备厂商的实验数据显示，采用强化学习算法控制的天车，在通过曲率半径 2m 的转向轨道时，转向过程中的振动能量相比传统算法降低了 60% ，晶圆传输定位误差从 $\pm 15\ \mu\text{m}$ 减小至 $\pm 5\ \mu\text{m}$ ，完全满足高精度工艺要求。另外，结合传感器技术的发展，将激光雷达、高精度编码器等传感器集成到天车控制系统中，能够为控制算法提供更丰富的实时信息。例如，激光雷达可以提前扫描前方轨道的曲率变化和障碍物信息，控制算法据此提前规划转向路径和速度调整策略；高精度编码器则能实时反馈天车的位置和姿态信息，实现更精准的转向控制。

4 结语

文章系统剖析了半导体晶圆厂 OHT 轨道系统直线运行与转向工况下的振动特性，揭示了转向冲击为主要振动源的作用机制，并针对性提出轨道结构优化与控制算法改进的抑制方案。通过理论分析、案例验证与技术创新，有效降低了系统振动水平，为保障晶圆传输精度与生产良率提供了理论支撑与实践路径。面对半导体制程持续升级，后续研究可进一步结合智能传感与数字孪生技术，深化振动特性动态监测与抑制策略优化，推动 OHT 轨道系统向高精度、智能化方向发展。

参考文献

- [1]王硕,孔丽君,王惟丹,李昂,李峰,赵志强.轨道交通装备用功率半导体器件散热器技术标准现状及建议[J].铁道机车与动车,2022,(06):18-20+5.
- [2]漆宇,窦泽春,丁荣军.轨道交通用功率半导体器件应用技术研究[J].机车电传动,2020,(01):1-8.
- [3]王媛,陈佐满,卢金兰,赵家隆,陈钰淇,胡梁宾.具有诱导超导电性和自旋轨道耦合作用的半导体纳米线零偏压电导峰的研究[J].华南师范大学学报(自然科学版),2019,51(01):5-10.
- [4]刘晓斌,周炳海.OHT搬运系统防阻塞调度策略[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(02):176-181.
- [5]朱晓蓉.轨道车厢用半导体照明系统的关键技术的思考[J].科技创新导报,2011,(15):64.