

高硬度半导体材料数控加工刀具数据库系统

刘杰

海宁跨界国际半导体制造有限公司，浙江海宁，314400；

摘要：高硬度半导体材料（如碳化硅、氮化镓、蓝宝石等）因其优异的热稳定性、电性能与机械强度，在新一代光电器件、5G芯片和功率器件制造中得到广泛应用。然而，这类材料极难加工，对数控加工刀具提出了极高要求。传统的刀具选型主要依赖经验和人工判别，效率低、容错差，已难以支撑复杂多变的工艺需求。本文围绕“高硬度材料数控加工”场景，提出构建刀具数据库系统的理论框架与实践路径，系统分析刀具属性建模、数据库架构设计与加工工艺适配规则，旨在实现加工刀具的高效选型、参数推荐与生命周期管理，为智能制造提供数据支持与决策基础。

关键词：高硬度材料；数控加工；刀具数据库；智能选型；加工参数；碳化硅

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.050

1 刀具数据库系统的架构与功能设计

1.1 刀具数据模型的标准化构建

就高硬度半导体材料加工所呈现出的复杂性而言，数据库系统最为紧要的任务便是构建起科学且合理的刀具数据模型。该模型得将刀具的各类情况都囊括其中，像物理属性方面，就有刀具几何参数、材料以及涂层这些；在性能参数上，则涵盖了耐磨性、热导率以及断屑能力等；还有应用记录部分，包括适配材料、典型切削深度以及故障原因等等。依据 ISO13399 标准来着手，能够搭建起“刀具—加工参数—应用环境”这样的三元数据结构，其能够对多刀体组合、多刀片配置予以支持，并且还能实现自定义参数的拓展。所有的数据字段都应当具备让机器可以读取的特性，要和 CAD/CAM 接口、PLM 系统以及数控机床控制系统相适配，以便能够实现自动调用，从而为后续的数据流通以及系统集成奠定根基。借助标准化的元数据定义手段，刀具信息能够达成跨平台的共享以及自动识别，进而为加工任务给予精准且迅速的数据支撑。

1.2 多维数据库结构与索引机制设计

高效的数据库系统必然要有可扩展的架构以及能够快速做出响应的能力。就架构方面来讲，刀具数据库在设计上采用了分层结构，其中基础数据层主要是用来存储原始刀具的各种属性以及厂家的相关资料；关系映射层的作用在于建立起刀具和材料、工艺、设备等之间的关联索引；而应用服务层则是为了支撑用户进行交互以及实现智能调度等操作。在数据存储的方式这方面，要把关系型数据库（比如 PostgreSQL）和图数据库（像

是 Neo4j）二者的优势相结合，如此才能实现针对刀具结构关系、参数匹配路径等进行高效查询的目的。索引机制呢，是以工件材料、加工方式（像粗加工、精加工、磨削这些）作为主键，再结合用户输入的加工场景相关信息，通过调用加工实例以及反馈结果等来进行动态的排序和推荐，这样可以在很大程度上提升查询的效率以及决策的准确性。另外，系统还需要嵌入数据同步以及备份相关的机制，要能够支持在多终端进行部署，以此来确保工厂级别的刀具数据始终保持一致性以及具备可用性。

1.3 刀具生命周期管理与数据闭环机制

刀具生命周期管理在达成精益制造方面属于极为重要的一个环节。借助数据库系统去搭建起一条从‘选型开始，历经入库、上机、加工，再到出现磨损，直至最后退役’这样完整的全周期管理链条。此系统需要实时地把每一把刀具的使用次数、磨损的具体状态、所使用的机台以及相关工艺参数都一一记录下来，而且要能够对刀具寿命展开动态的预测，同时做好预警设置方面的相关工作。把机床的运行数据和传感器所获取的信息相互结合起来，便可以对刀具损耗模式加以分析，进而提出更为合理的刀具使用策略或者是替代方案，以此来让刀具状态以及库存管理能够同步实现优化。与此同时，系统还应当设立起相应的反馈机制，收集操作员针对刀具使用效果所给出的评估数据，从而形成一个经验数据的闭环，以此来辅助算法模型持续不断地进行迭代，进而提升系统的智能决策能力，切实达成‘依靠数据来指导选择，凭借结果去优化数据’这样的正向循环。

2 高硬度材料加工特性的刀具适配建模

2.1 材料物理特性与切削机制分析

高硬度半导体材料在加工期间，其物理响应颇为复杂，这主要是因为它具备高硬脆性、有着高熔点、呈现低热导率以及具有高化学惰性等特点。这些物理方面的属性致使其在开展机械加工之时，特别容易出现诸如崩边、裂纹不断扩展、产生热裂以及发生表面烧伤之类质量缺陷情况。尤其是当切削深度处于微米甚至达到亚微米级别的时候，这对于刀具的切削能力以及耐热性能无疑是提出了极为严峻的挑战。碳化硅来举例，它的硬度能够高达 25 GPa，属于典型的那种难加工材料。传统的硬质合金刀具在进行高速切削作业的情况下，会由于瞬时遭受热冲击而出现失效的状况。所以呢，要加工这类材料就需要运用像 PCD、PCBN 等这样的超硬材料刀具，并且还要结合采用负前角或者微小前角的设计方式，以此来减少切削力以及摩擦热的产生情况。

数据库刚建立的时候，务必要针对高硬度材料的热力学特性、力学特性以及摩擦学特性展开全面细致的建模工作，进而形成涵盖杨氏模量、断裂韧性、热膨胀系数、弹性回复率、切削比等诸多指标的材料基础数据模块。在完成这一工作的基础之上，再去结合不同切削方式所呈现出的响应规律，像是干式切削或者湿式切削、常规润滑切削或者微量润滑切削、连续切削或者间断切削等这些不同情况，去构建在加工过程当中的应力分布模型以及热传导模型，从而为后续刀具结构的匹配以及参数的推荐给予能够动态适应的相关数据支撑，最终达成以材料属性来推动刀具选型朝着科学化以及工程化方向发展的目标。

2.2 刀具类型与结构参数的适配规则

刀具的结构参数实实在在地决定了它的切削效率以及耐用程度。在对高硬度半导体材料展开加工操作的时候，传统意义上的通用刀具常常会因为刃口出现微观层面的破损情况、发生热膨胀变形现象或者是断屑性能欠佳等原因，进而引发加工过程不稳定这样的问题。所以说，系统所配备的数据库务必要内置那种专门针对高硬材料而设计出来的刀具参数适配模型，这里面涵盖了前角，要知道前角会对切削力以及排屑性能产生影响；还有后角，后角会影响到刀具的耐磨性能；再者就是主偏角和副偏角，它们会对表面粗糙度以及侧向力造成影响；另外还有刃带宽度，刃带宽度能够起到增强刃口强度的作用等等。数据库应当运用知识图谱的方式来搭建起一个‘刀具类型—材料—加工方式’的三维关系网

络，借助规则引擎去筛选出最为优质的参数组合。

再者，把刀具表面涂层相关的数据加以整合，像 TiAlN、CrN、DLC 等涂层性能方面的数据库都涵盖在内，如此一来，系统便能够去分析这些数据对于摩擦热、刀具出现粘附情况以及涂层发生剥落等各类因素所起到的抑制作用，进而达成对刀具本体结构以及其表面处理进行协同优化来建立模型的目的。这个模型需要能够支持用户依据工件的形貌特点、夹持的刚性程度、定位的精度情况等诸多约束条件展开反向的查询操作，从好几个不同的技术层面综合起来去筛选并且匹配出合适的刀具，以此来打破传统依靠经验选刀所存在的那些局限性，让结构参数的适配能够实实在在地拥有可视化、可追溯以及可调整这样的一些特性。

2.3 参数推荐与自适应优化机制

高硬度材料在加工时，其稳定性在相当程度上要依靠切削参数达成精准的匹配才行。数据库系统得融合一套有着学习能力的参数推荐及优化机制，从而实现针对加工过程里的关键变量，像是主轴转速、进给速率、切削深度、切削宽度以及冷却压力等等，展开实时的调控并给出动态的建议。该机制应当建立在统计学、人工智能以及仿真建模等多重基础之上，要通过汇聚历史工艺数据、案例反馈还有加工结果这些方面的内容，从中提取出在典型工况之下的最优参数组合。在算法这个层面来讲，可采用多变量回归分析、贝叶斯优化或者神经网络来开展参数预测的工作，与此同时还要结合 DEFORM 或者 AdvantEdge 等这类仿真工具，针对加工区的切削热、残余应力、刀具载荷等各项指标实施模拟验证，以此来优化推荐的路径。在用户界面这一层面，系统需要能够提供参数自动匹配模式与专家手动调节模式之间灵活的切换功能，并且当出现加工异常的情况，比如刀具崩刃、表面发白、碎屑堆积等的时候，要能依据历史案例达成自学习以及规则的再训练，进而持续提升参数推荐的准确性与适应性。最终，该机制不但可以提升单次加工的成功率以及质量控制的能力，而且还能逐渐积累成为企业级的工艺知识资源，为智能制造流程给予“数据 + 模型 + 反馈”这种闭环式的有力支持。

3 智能制造环境下的数据库系统应用集成

3.1 数据库与数控系统的嵌入式融合

刀具数据库系统属于制造资源管理范畴，并且是其中的核心组件之一。要是它仅仅局限在“信息查询”这个层面的话，那是很难去满足智能制造所提出的闭环需

求的。要想将其价值最大限度地发挥出来，那就必须得让它和数控系统进行深度融合，以此来达成那种依靠信息驱动的自适应制造模式。在数控机床这边呢，刀具数据库应当和 CNC 控制器实现嵌入式集成，从而能够自动去调用选刀结果以及切削参数。借助 RFID 电子标签、二维码识别或者数字孪生映射等相关技术，系统是可以自动识别出上机刀具的具体型号以及其健康状态的，这样就能避免出现人为录入方面的错误以及参数错配的情况，进而确保工艺执行既精确又可控。而在加工程序自动生成这个环节当中，数据库需要通过 CAM 插件或者后处理器接口，把所推荐的刀具参数直接嵌入到 NC 代码里面，以此来实现从“选型—加工—监测”这一整个流程的数据一体化状态。

在生产管理层面，数据库需要和 MES 系统完成对接，以此达成订单任务跟刀具资源的自动匹配，让库存能够联动起来，并且排程也能实现联控。与此同时，它还要和 ERP 系统协同实现诸如成本核算、制定采购计划、预测生命周期等诸多功能，进而构建起一个贯穿“数据—指令—执行—反馈”整个链条的刀具管理闭环，以此促使制造企业朝着智能化以及透明化的方向逐步演进。

3.2 基于大数据与 AI 的刀具管理平台建设

在那些存在多基地、多种产品以及多工艺同时并行开展生产活动的制造企业当中，仅仅依靠单一的数据库，已经没办法很好地为全局性的决策提供有力支撑了。在这样的情形之下，就有必要去构建一个搭建于云平台之上的大规模刀具管理系统，以此来达成对刀具使用数据展开集中化采集、进行统一分析并且实现策略共享的目的。该平台能够把各地有关刀具使用的具体情况实时地进行上传操作，进而形成一个包含海量工况数据的池子。而且，还可以借助 AI 算法去创建出针对刀具使用模式的识别模型，依靠这个模型去发现那些典型的失效路径、存在的偏差趋势以及工艺优化方面的机会，最终促使动态更新的知识图谱以及选型推荐模型得以形成。

在管理功能这块儿，平台能够去部署刀具健康度评分机制，针对每一支刀具在不同应用情境下的具体表现来实施打分以及排序的操作，以此来为诸如淘汰、替换、复用这类策略的调整给予有力支撑；与此同时，把订单量、库存量、采购周期等诸多因素综合起来考虑，进而形成智能采购与库存预警方面的策略，从而确保刀具资源供应链可以保持稳定的状态。另外，系统需要对多角色协同操作予以支持，工艺工程师能够上传工艺包以及评估日志，质量管理人员则可以对刀具使用报告展开审

核工作，管理者更是能够通过一键操作就调取全局刀具使用的关键绩效指标（KPI），达成“感知—分析—决策—执行”这样一个全流程的数字化协同效果，促使刀具数据库从数据孤岛的状态朝着企业级智能平台的方向去实现转型。

3.3 典型案例分析与工业应用验证

在某家第三代半导体晶圆加工企业里头，当把该刀具数据库系统引入之后，借助自动选刀以及参数推荐这两项功能，使得碳化硅晶圆边缘倒角的效率得以提升，提升幅度达到了 32% 之多，并且刀具更换周期也变长了，延长的倍数为 1.8 倍，与此同时，制程良率同样有所提升，提升的幅度是 4.5%。此系统和机床 PLC 系统相互联动起来，如此一来，便能够实现刀具信息的自动读取以及参数的锁定，这样就有效避免了人工录入可能出现的错误情况。而在与 MES 系统连通之后呢，又实现了对刀具库存进行自动提醒，还有生产排程的自动优化，进而让车间的响应速度得到了提升。在某家精密光电组件加工厂当中，通过引入云端刀具数据服务平台，达成了跨项目以及跨设备的刀具标准化选型，每年平均下来能够节约刀具采购成本，节约的比例将近 18%，有力地支撑了小批量、多品种且高精密产品的快速交付能力。

4 结语

随着高硬度半导体材料在各类高端制造领域的广泛应用，如何高效、稳定、可控地实现其数控加工成为制程工程的关键任务。刀具数据库系统作为链接工艺知识、加工行为与数字化决策的重要载体，不仅提升了选型效率与加工质量，更为智能制造赋能提供了坚实的数据基础。未来，刀具数据库将进一步与数字孪生、工业互联网、人工智能等前沿技术深度融合，演化为具备自学习、自适应、自迭代能力的智能工艺平台，在高端制造领域发挥更大作用。

参考文献

- [1] 傅守亮, 戚国强, 柳翠. 基于 VS.NET 下教师信息报表系统的实现 [J]. 计算机与现代化. 2008, (1).
- [2] 黄贯生, 张永强, 王笑. 数控刀具管理系统的建设与发展 [J]. 纺织机械. 2007, (1). 54-57.
- [3] 赖斌武, 杨丹. 基于 Web 的刀具集成化管理系统的工作与实现 [J]. 四川兵工学报. 2007, (6).
- [4] 丁娜仁花, 宋时兰, 王太勇, 等. VB 环境下刀具数据库管理系统的开发 [J]. 机床与液压. 2007, (4).