

双刀鼓铣刨机动态特性分析及铣刨精度控制策略研究

姚国伟

杭州纳财机械设备有限公司 杭州 萧山 311254

【摘要】：双刀鼓铣刨机是道路建设与维护核心设备，其动态特性与铣刨精度决定路面施工质量和工程效率，对交通基础设施升级意义重大。本文围绕其技术痛点展开研究。对比传统机械式控制方法的局限性，提出现代智能控制策略，提升设备对复杂工况的适应性。本文成果明确了动态特性与铣刨精度的内在关联，提供精度控制方案，为设备设计、施工工艺及行业技术升级提供理论与实践参考。

【关键词】：双刀鼓铣刨机；动态特性分析；振动特性；模态分析；铣刨精度；智能控制策略；模糊神经网络

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.060

1 引言

随着交通基建快速发展，道路维护修复愈发重要。双刀鼓铣刨机是道路施工养护关键设备，用于沥青路面翻新等作业，通过双刀鼓协同工作，比传统单刀鼓铣刨机在作业效率和质量上有显著提升。

实际应用中，其动态特性影响设备稳定性、可靠性及铣刨效果，铣刨精度是衡量性能的关键指标，精确控制铣刨深度对保证路面平整度、延长道路寿命至关重要，如高速铣刨作业中精度偏差会带来诸多问题。

研究双刀鼓铣刨机动态特性分析及铣刨精度控制策略意义重大。从设备性能提升看，了解动态特性可优化设计、提高抗振性和稳定性、降低磨损故障、延长寿命；精准控制策略能确保作业按要求进行、提高质量、减少浪费、降低成本。从行业发展看，研究成果可为相关制造业提供技术支持，推动行业进步，提升国际竞争力，促进道路建设养护行业可持续发展。

2 双刀鼓铣刨机动态特性分析

2.1 动态特性影响因素探讨

刀具材质对动态特性影响显著。目前常用硬质合金刀具，如YG8硬质合金刀具，具有高硬度、良好耐磨性和抗冲击韧性，铣刨普通沥青路面时能稳定工作，减少磨损和破损。而普通碳钢刀具因硬度和耐磨性不足，易出现磨损加剧、变形等问题，影响动态特性。

刀具几何形状也很重要。切削角度、刃口形状和螺旋角等参数直接影响切削力大小和方向。合理的切削角度（前角10°-20°、后角5°-10°）可使刀具更有效切入工件，减少切削力波动。

铣刨机的转速和进给量是重要作业参数。转速过高会使刀具离心力增大、切削温度升高，加剧刀具磨损和铣刨机振动，如铣刨水泥路面时转速超150r/min会加快刀具磨损、增大振动幅度。进给量过大使切削力剧增，导致设备运行不稳定。

工件材料特性也不可忽视。不同路面材料力学性能差异

大，水泥混凝土路面硬度高、强度大，铣刨时需大切削力，易产生振动和噪声；沥青混凝土路面较软，但高温时黏稠，易黏刀，影响切削力稳定性。

2.2 振动特性分析

刀具不平衡是常见原因之一。制造和安装时，工艺误差或刀具磨损不均会使刀具重心偏离旋转轴线，高速旋转产生离心力引发振动，且转速越高离心力越大。

切削力变化也是重要因素。铣刨中，切削力随路面材料不均、刀具切入角度和铣刨深度变化而波动。路面有裂缝、坑洼或硬度不均时，切削力瞬间改变产生冲击载荷，通过刀鼓传递引发振动。

振动直接影响铣刨质量。过度振动使刀具跳动，降低路面平整度，出现波浪或凹凸，影响行车安全与舒适。还会加剧刀具磨损且不均，缩短寿命、增加成本。

振动对设备寿命影响显著。持续振动使部件承受交变应力，易导致疲劳损坏。如机架焊缝可能开裂，传动系统部件加速磨损，降低可靠性和寿命。

2.3 模态分析

模态分析是研究双刀鼓铣刨机动态特性的重要手段，可揭示其结构固有振动特性，为优化设计和避免共振提供依据。模态分析通过数学方法确定结构固有频率和振型。固有频率反映结构刚性和质量分布，不同结构固有频率不同，如铣刨机刀鼓和机架。振型描述结构在对应固有频率下的振动形态，模态分析通常会得到多阶固有频率和振型，每阶都代表一种振动特性。

模态分析在双刀鼓铣刨机研究中至关重要。一方面，它能帮助工程师了解结构薄弱环节。通过分析振型，可发现易产生较大变形或应力集中的部位，进而针对性地优化结构设计。

3 铣刨精度影响因素分析

3.1 设备结构因素

铣刨机的结构刚度对铣刨精度至关重要。若刚度不足，设

备在铣刨时易受外力影响变形。比如机架钢材强度不够或设计不合理，承受大切削力时会弯曲或扭曲，导致刀鼓位置偏移、铣刨深度偏差、路面平整度难保证。研究显示，机架刚度降低10%，铣刨深度偏差可能增加 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

同时，传动系统精度也不可忽视。其齿轮、链条等部件长期使用会磨损，使传动间隙增大，导致动力传递不平稳，影响刀鼓转速和旋转精度，造成路面波浪形或局部铣刨深度不一致。

为优化结构设计提高铣刨精度，可从多方面着手。机架设计上，采用合理结构形式，如增加加强筋、优化布局，选用高强度高韧性材料，增强抗变形能力。传动系统方面，选用高精度部件并定期维护更换，确保传动间隙合理；采用先进传动技术，如同步带传动，其精度和稳定性更高，能有效提高铣刨精度。

3.2 刀具因素

刀具磨损和安装精度是影响铣刨精度的重要因素。随着铣刨作业持续，刀具刃口因与路面材料摩擦而逐渐磨损变钝，切削性能下降，切削力增大且不稳定。刀具磨损到一定程度，会出现铣刨深度不足、路面不平整等问题，铣刨水泥路面时，严重磨损会使路面有划痕和凸起，深度偏差达 $\pm 1\text{mm}$ 以上。

同时，刀具安装精度也直接影响铣刨精度。若刀具在刀鼓上安装不牢固或位置不准确，高速旋转会产生不平衡力，加剧刀鼓振动，使切削轨迹偏差。

为合理选择和使用刀具，应根据路面材料性质和作业要求选合适材质和形状的刀具，如铣刨硬度高的水泥路面，选用硬质合金刀具并采用合适切削角度和刃口形状。

3.3 切削参数因素

切削参数中的转速、进给量和切削深度显著影响铣刨精度。转速过高，刀具离心力增大、振动加剧，还会使切削温度升高、加速刀具磨损。铣刨沥青路面时，转速超 $150\text{r}/\text{min}$ ，刀具磨损加快，路面平整度误差可能超 $\pm 3\text{mm}$ 。进给量过大，切削力剧增，超出铣刨机承载能力，导致铣刨深度不稳定、路面不平整。若进给量设为 $10\text{m}/\text{min}$ ，超出最佳范围 $5\text{-}8\text{m}/\text{min}$ ，铣刨深度偏差可达 $\pm 2\text{mm}$ 。切削深度过深，刀具承受切削力过大，易损坏且影响精度。铣刨 10cm 厚沥青路面，切削深度设为 8cm 会使路面严重不平整，需多次返工。

为提高铣刨精度，要根据路面材料特性、刀具性能和铣刨机技术参数合理调整切削参数。铣刨不同路面材料时，通过试验和经验确定最佳组合。对于沥青路面，转速 $100\text{-}120\text{r}/\text{min}$ 、进给量 $5\text{-}8\text{m}/\text{min}$ 、切削深度 $3\text{-}5\text{cm}$ 较合适。

3.4 外界环境因素

外界环境因素如温度、湿度和振动等对铣刨精度有不可忽

视的影响。温度变化会使铣刨机各部件热胀冷缩，影响设备几何精度。

湿度主要通过改变路面材料性能影响铣刨精度。高湿度环境下，沥青路面的沥青粘性降低、强度受影响，铣刨时刀具与路面材料的切削作用改变，易出现铣刨不平整。湿度达80%以上时，铣刨后的沥青路面可能局部松散、掉粒，影响质量。

振动是常见干扰因素。铣刨机工作时自身振动，周围环境如过往车辆、其他设备的振动也会传递到铣刨机上。过多振动使刀具切削力不稳定，难以保证铣刨深度和路面平整度。靠近大型建筑工地的道路铣刨，路面平整度误差可能比正常情况增加 $\pm 2\text{mm}$ 。

针对这些外界环境因素，需采取相应措施。温度变化大时，提前对铣刨机预热或冷却，使部件达热平衡，减少热胀冷缩影响。高湿度环境下，可等路面干燥后作业，或采用特殊刀具和工艺。为减少振动影响，可在铣刨机上安装减振装置，如橡胶减振垫、弹簧减振器等，降低外界振动传递；同时合理安排施工时间和场地，避免在振动源附近作业，确保铣刨精度。

4 铣刨精度控制策略研究

4.1 传统控制方法概述

传统双刀鼓铣刨机主要用机械式控制方法调节铣刨精度，通过丝杠螺母、齿轮齿条等机械结构直接调整，操作人员手动旋转丝杠或操作齿轮手柄使铣刨鼓升降至设定深度。小型铣刨机常采用手动丝杠调节，操作人员凭经验和目测转动丝杠确定深度后作业。

机械式控制方法结构简单、成本低、可靠性高，因机械结构直观，易理解和维护，在乡村道路简易维护、小型停车场路面修整等对精度要求不高的场合仍有应用价值，对预算有限的施工单位经济实用。

但该方法缺点明显。一是精度控制差，因机械间隙、磨损及操作误差，难以实现高精度控制，铣刨深度误差约 $\pm 5\text{mm}$ 。二是操作灵活性不足，实时调整铣刨深度时响应慢，难适应复杂路面。三是对操作人员技能要求高，需丰富经验和熟练技巧，否则易出现铣刨深度不均、路面不平整等问题。

4.2 现代智能控制策略

(1) 基于传感器的实时监测与反馈控制

随着传感器技术发展，基于传感器的实时监测与反馈控制在双刀鼓铣刨机铣刨精度控制中广泛应用。激光测距仪是实现铣刨深度精确测量的重要传感器，它发射激光束，测量其反射时间计算铣刨鼓与路面距离，实时获取铣刨深度信息，测量精度达 $\pm 1\text{mm}$ 以内，为铣刨精度控制提供准确数据。作业时，它安装在铣刨机机架上，持续扫描路面并将数据实时传输给控制系统。

加速度计用于监测铣刨时刀具振动情况，刀具铣刨中受各种力作用会振动，过大振动影响铣刨精度且加速刀具磨损。加速度计实时检测振动加速度并传输信号，控制系统分析信号判断刀具工作状态。当振动加速度超阈值，控制系统及时调整工作参数，减少刀具振动，保证铣刨精度和刀具寿命。

实际应用中，传感器采集的数据传输到控制系统，控制系统按预设算法分析处理，发出控制指令调整铣刨机运行参数，如铣刨鼓转速、进给速度、铣刨深度等，实现铣刨精度精确控制。若激光测距仪检测到铣刨深度小于设定值，控制系统控制铣刨鼓下降增加深度；反之则上升减小深度，确保铣刨深度在设定精度范围。

(2) 模糊控制与神经网络控制

模糊控制是基于模糊逻辑的智能控制方法，无需精确数学模型，通过模糊规则控制。在双刀鼓铣刨机铣刨精度控制中，将铣刨深度误差、误差变化率等作输入变量，经模糊化转为模糊语言变量，依模糊规则推理得模糊输出变量，再去模糊化为具体控制量，如铣刨鼓升降量等，以控制铣刨精度。

神经网络控制模拟生物神经网络，经大量样本数据训练，具备对复杂非线性系统的建模和控制能力。在铣刨精度控制中，以铣刨机运行参数为输入，经多层神经元处理学习后输出控制信号，调整工作状态。它能学习不同路面最佳铣刨参数组合，智能控制铣刨精度，如面对不同硬度路面自动调整参数。

将模糊控制和神经网络控制用于双刀鼓铣刨机铣刨精度控制，可发挥两者优势，提高智能化水平。模糊控制处理不确定和模糊信息，神经网络有自学习和自适应能力。结合两者构建模糊神经网络控制系统，能在不同工作条件下自动学习调整控制策略，更精确智能地控制铣刨精度，提高铣刨质量和效率。

4.3 控制策略的对比与优化

不同铣刨精度控制策略各有优劣，实际应用中需据具体需求对比分析，提出优化方案，提高控制效果。传统机械式控制

结构简单、成本低，但精度差、操作灵活性不足，难满足现代高精度道路施工要求。基于传感器的实时监测与反馈控制，能实时获取关键参数并精确调整，精度高、响应快，可适应一定复杂工况，但对高度非线性、不确定性强的路面有局限。模糊控制无需精确数学模型，对不确定和非线性系统适应性好，能快速调整策略，但规则制定依赖经验，不足或不完善会影响效果。神经网络控制自学习和自适应能力强，能处理复杂非线性关系，但训练需大量数据和计算资源，网络设计和参数调整复杂。

为优化策略，可结合多种方法优势。将传感器反馈控制与模糊控制结合，用传感器信息作模糊控制输入，调整运行参数，保证实时精确性，提高复杂工况适应性。将神经网络与模糊控制融合，构建模糊神经网络控制系统，用神经网络自学习优化规则和参数，提高智能化和精度。

5 结论

通过对双刀鼓铣刨机动态特性的深入分析，明确了刀具材质、几何形状、铣刨机转速、进给量以及工件材料特性等因素对动态特性的显著影响。发现刀具不平衡和切削力变化是导致铣刨机振动的主要原因，振动不仅降低铣刨质量，还会缩短设备寿命。通过模态分析，获取了铣刨机关键部件的固有频率和振型，为结构优化提供了重要依据。

在铣刨精度控制策略研究方面，全面剖析了设备结构、刀具、切削参数和外界环境等因素对铣刨精度的影响。提出了基于传感器的实时监测与反馈控制、模糊控制与神经网络控制等现代智能控制策略，并将其应用于实际工程案例中。

本研究成果对于提高双刀鼓铣刨机的性能和铣刨质量具有重要意义。为设备制造商优化产品设计、提高设备稳定性和可靠性提供了理论支持；为道路施工单位提供了有效的铣刨精度控制方法，有助于提高施工效率和工程质量，降低施工成本，推动道路建设与养护行业的技术进步。

参考文献：

- [1] 顾艳静.沥青路面铣刨机找平液压系统动态特性研究[D].陕西:长安大学,2020.
- [2] 李维维,霍建中.路面冷铣刨机刀具和刀座磨损形态及成因探析[J].工程机械,2010,41(12):64-67.
- [3] 薛喜香.机械加工中的刨床和铣床加工效率与精度提升[J].设备管理与维修,2024(18):163-166.
- [4] 陈忠凯,秋实,胡昊,等.基于 ANFIS 的铣刨机切深精度预测[J].环境工程,2014(s1):1061-1064.