

激光切割机电部件的定位误差分析及实时校正技术

王瑞 殷跃飞

海宁红狮宝盛航空科技股份有限公司

DOI:10.12238/ems.v7i9.15267

[摘要] 激光切割技术广泛应用于精密加工,对电部件定位精度要求极高,本文聚焦激光切割机电部件的定位误差问题,运用理论分析与实验验证相结合的方法,深入剖析误差产生的多方面原因,并针对性地提出实时校正技术方案,通过对激光切割机在实际加工过程中电部件定位误差的研究,得出采用实时校正技术能够显著提升定位精度的结论,为激光切割机电部件定位精度的优化提供了有效参考。

[关键词] 激光切割机;电部件;定位误差;实时校正

在现代制造业当中,激光切割机以高精度和高效率等优点在各种材料加工制造方面得到了广泛运用。而电部件是激光切割机中最核心的部件,它的定位精度的高低直接关系到激光切割质量与效率。但在实际操作中,电部件常因诸多因素产生定位误差而降低切割质量和造成材料浪费。所以,深入分析激光切割机电部件定位误差,研究相关实时校正技术有实际意义。

一、激光切割机电部件定位误差的产生原因

激光切割机电部件定位精度的高低直接决定了加工质量的好坏,其定位误差来自机械结构、控制系统多重因素交互影响,从机械结构的层面上看,激光切割机在长时间高频次下工作容易造成关键部件的磨损。如直线导轨承载电部件作往复运动过程中,其表面滚珠不断地和滚道摩擦,使导轨直线度降低,从而引起电部件的轨迹发生偏移;丝杠螺母副传动时,如果有制造上的螺距误差或者装配上的同轴度偏差将使电部件的位移产生周期性误差^[1]。另外,机械结构刚性不足还可能诱发定位误差,在电部件快速移动或者负载大等情况下,框架结构微小形变将传递到电部件上,从而干扰电部件精准定位。

控制系统运行的稳定性和精度对于电部件定位有明显影响,伺服电机控制参数如果不按照实际工况进行优化,例如速度环增益过大引起系统振荡或者位置环比例系数设定不合适等,都将造成电机响应滞后或者超调等问题,并直接体现在电部件定位失准上。同时数控系统中插补算法的准确性决定着理论轨迹和实际路径之间的吻合程度,如果该算法对于曲线轮廓的加工比较粗糙,则在复杂图形的裁剪中,电部件实际运动轨迹与理想轨迹存在偏差而出现轮廓误差。

二、激光切割机电部件定位误差分析方法

(一) 进行理论建模分析

理论建模分析,通过建立数学模型系统性地研究了激光切割过程中机电部件定位误差的影响因素,从而为误差溯源和优化提供了理论支持。根据多体系统动力学理论将激光切割机拆分成若干刚体和柔性体单元并通过构建坐标系来描述零件之间的相对运动关系,将牛顿-欧拉方程和拉格朗日方程相结合,导出了电部件在运动时的动力学模型。模型构建时充分考虑了机械结构刚度和阻尼参数及伺服系统动态特性等因素,以实现电部件不同运行状态下运动行为的仿真和对可能出现定位误差的预测,以控制系统为研究对象,根据传递函数建立了控制模型,把伺服电机、驱动器和控制器等部件抽象成数学模块并分析了各个环节参数对系统稳定性和精度的影响。如通过对位置环、速度环和电流环PID参数进行整定来观测电部件定位误差变化趋势,并运用根轨迹法和频率响应法等控制理论工具对控制系统参数进行优化配置^[2]。

(二) 进行实验测量分析

实验测量分析以准确的仪器和科学的测试方案获得电部件定位误差实际数据,是检验理论模型和优化校正策略至关重要的方法,激光干涉仪用于测量电部件线性定位误差、直线度误差和垂直度误差,仪器以激光波长为基准可实现亚微米级的测量精度,可以实时地记录电部件不同部位的实际位移偏离理论值情况,画出误差曲线,对误差分布规律进行分析,利用三坐标测量仪检测被切割工件的尺寸,比较实测尺寸和设计尺寸,反推出电部件加工时定位误差。针对复杂曲面切割问题,采用三维激光扫描仪采集工件表面点云的数据,利用数据处理软件对CAD模型的偏差进行了分析,并对误差大的区域进行了定位,为之后的修正指明了方向。

三、激光切割机电部件定位误差的实时校正技术

(一) 基于传感器的实时校正

以传感器为核心的实时校正技术,通过布设各种高精度传感设备和搭建实时监测网络来准确捕获激光切割机电部件在工作时的定位、震动情况、温度和其他关键参数的改变,为误差校正实时提供数据支持,在实践中,激光干涉仪是一种能够对电部件线性位移误差进行实时监测的高精度位移测量传感器,是以激光波长为测量基准,能够在亚微米级精度下得到电部件真实位置和理想位置之间的偏差数据并实时传送到控制系统中^[3]。当发现误差大于阈值时,控制系统马上触发校正指令驱动电部件微量调整以达到动态补偿定位误差,另外加速度传感器还可以对机床的振动进行实时的监控,激光切割机进行高速切割或者复杂路径的加工过程中,机床的振动将使电部件发生微小的位移从而影响定位精度。加速度传感器实时获取振动信号并对其频率和幅值等特性进行分析,并向控制系统反馈振动数据。该控制系统将振动信息和电部件位置数据相结合,预测出振动对定位误差影响的变化趋势,预先调节电部件运动参数以抑制振动干扰。温度传感器的主要功能是追踪机床关键部分的温度波动,因为温度的改变可能导致机械部件发生热变形,从而引发定位上的误差。温度传感器实时获取温度数据,控制系统基于预设热变形模型计算温度变化引起的误差量并实时修正电部件位置,保证切割精度不会受到温度波动的影响。

(二) 在算法优化基础上进行实时校正

以算法优化为核心的实时校正技术着眼于通过对控制系统中算法逻辑进行改进来增强激光切割机电部件位置确定的精度和动态响应能力。就路径规划算法而言,常规直线插补与圆弧插补算法对于复杂曲线轮廓的处理容易出现较大轮廓误差,通过采用NURBS(非均匀有理B样条)插补技术,我们可以更为精确地模拟复杂的曲线,从而减少需要插补的节点数量,并降低由于节点误差累积所导致的定位误差。同

时结合前瞻控制算法在切割路径规划阶段对路径上加减速变化、拐角等位置进行预先预判,对电部件运动速度曲线进行优化,避免了由于速度突变而造成惯性冲击,从而有效地降低了定位误差,误差补偿算法中,广泛采用了机器学习误差预测算法。为了建立误差预测模型,收集了大量的加工数据,这些数据包括电部件的历史定位误差、加工参数和环境参数等,然后利用神经网络和支持向量机等机器学习模型进行了训练。该模型可根据当前加工条件实时地预测出电部件潜在的定位误差并反馈至控制系统以事先校正其运动轨迹。

(三) 根据反馈控制实时修正

基于反馈控制实时校正技术是建立在闭环控制理论基础上的激光切割机电部件定位误差动态监测和自动校正技术,该技术通过搭建实时反馈回路来实现,在位置反馈控制方面,以编码器为核心反馈元件对电部件的真实位置进行实时检测,并反馈至伺服驱动器及控制器。所述控制器比较所述实际位置和所述预设位置并计算定位误差,并根据所述误差的大小输出对应控制信号驱动所述伺服电机对所述电部件进行位置调节直到所述误差被消除。该闭环位置控制方式能有效地抑制由于机械传动误差和负载变化所导致的定位偏差并保证电部件总是按预设轨迹动作,在反馈控制中,速度反馈控制也是一个重要环节。速度传感器对电部件运动速度进行实时监测并反馈给控制系统。控制系统在检测出实际转速偏离设定转速后通过调整伺服电机转速来稳定电部件运动速度。平稳的速度控制既有利于改善切割表面质量又可降低速度波动引起的定位误差。另外力反馈控制对激光切割有重要影响。切割过程中力传感器对切割头和工件间的接触力进行实时检测,接触力出现异常改变时表明切割路径有可能出现偏差或者切割参数有待调整。控制系统依据力反馈信号对电部件位置或者切割参数进行适时调节,以避免由于切割力不均匀造成电部件发生偏移,从而达到高精度切割加工目的。

(四) 对多源数据进行融合校正

多源数据融合校正技术将激光切割机工作时不同传感器、控制系统和加工过程等多维度数据进行融合,并利用数据融合算法对数据之间的关联信息进行深入挖掘,从而为定位误差校正工作提供更加全面和精确的决策依据。在实践中,对激光干涉仪所采集到的位置、加速度传感器振动、温度传感器热变形等信息与数控系统加工参数进行了融合。首先利用数据预处理技术对每个源数据分别进行滤波、降噪和归一化处理以去除其中干扰因素并改善其质量,再利用卡尔曼滤波、D-S证据理论以及其他数据融合算法对经过预处理的数据进行融合分析。如采用卡尔曼滤波算法将位置数据与振动数据相融合并通过构建系统状态方程与观测方程来预测电部件位置状态,并且结合实际观测数据对其进行校正,有效地抑制了噪声干扰和提高了定位误差探测精度。多源数据融合可对定位误差成因进行更加全面的分析,既可辨识单一因素引起的误差,又可找出多种因素耦合影响下复杂的误差模式,根据融合数据构建了较为准确的误差模型,并制定有较强针对性的修正策略,从而达到了高效修正激光切割机电部件定位误差,促进激光切割机整体加工精度与稳定性的目的。

(五) 对智能模型进行补偿校正

智能模型补偿校正技术在人工智能和大数据技术的支持下构建准确的误差预测和补偿模型,使激光切割机电部件定位误差得到智能处理。深度学习模型是这一技术的核心,它通过采集大量含有各种工况、环境参数和设备状态的电部件位置误差数据,我们对深度学习模型如卷积神经网络(CNN)

和长短时记忆网络(LSTM)进行了深入的训练。这些模型能自动地对数据中复杂的特征和规律进行学习,挖掘出误差发生的内在关联因素并在此基础上准确地预测出电部件在各种加工场景中可能存在的定位误差,以LSTM网络为例,该网络特有的门控机制使得该网络在对带有时间序列特征的误差数据处理中表现优异,能有效地捕捉到误差随时间的动态变化趋势。智能模型能够在预测到定位误差时根据预设补偿规则产生对应补偿指令。比如对于热变形引起的错误,该模型可以将温度传感器数据和历史热变形规律相结合来计算电部件各个关键部位变形量,以及将补偿位移指令发送到控制系统以驱动电部件反向调节以抵消热变形的效应。另外,以强化学习为核心的智能模型可以在实际处理过程中进行自我优化并通过和切割环境进行互动,依据校正效果对补偿策略进行反馈和调整,使得补偿模型适应性及准确性不断提高,以达到有效补偿定位误差,确保激光切割加工的准确性。

(六) 自适应控制修正

自适应控制校正技术是通过激光切割机工作时参数变化和外部环境扰动的实时感知,对控制策略和参数进行自动调节,使其能够适应复杂多样的工作条件,从而达到对电部件定位误差进行动态校正的目的。该项技术以自适应控制理论为基础,构造了一个含有参数辨识、控制器调整及误差校正等功能的闭环系统。激光切割机工作过程中,该系统先实时识别机械结构内部参数如磨损程度、伺服电机性能衰减情况和外部参数如环境温度和振动强度。例如,我们可以通过监测伺服电机的电流和转速等关键信号,并采用递推最小二乘法等参数识别技术,实时估算电机的转动惯量、摩擦系数等核心参数的变动情况,根据参数识别的结果,自适应控制器具有自动调节控制参数的能力,例如PID控制器的比例、积分和微分系数,从而优化电部件的运动控制策略。自适应控制系统在发现机床振动增强后,可以动态地调节速度环及位置环控制参数以减小电部件的运动速度并提高阻尼系数来抑制振动对于定位精度的影响;如果检测到机械结构由于长时间使用而使传动间隙变大,该系统会自动校正插补算法的补偿参数并对间隙误差进行补偿。除此之外,自适应控制校正技术也能与其他类型的校正技术进行协同操作,例如通过与传感器实时监测数据的结合,以进一步提升校正过程的时效性和准确度,本实用新型使得激光切割机能够在各种工况下对电部件保持高精度定位,从而有效地增强了装置加工的稳定性与可靠性。

结束语

激光切割机电部件定位误差对激光切割质量与效率有着至关重要的影响,通过深入剖析误差成因,研究并运用实时校正技术,能有效地提高电部件定位精度,进而促进激光切割机整体性能的提高。在今后的发展过程中,伴随着相关技术的发展与革新,我们相信激光切割机电部件定位误差分析与修正技术会越来越完善,从而为制造业高质量发展提供更加强大的支撑。

[参考文献]

- [1] 马烁,刘江宁,张志同,柳天骄.激光切割机智能化远程控制界面设计[J].物联网技术,2025,15(10):82-85.
- [2] 王成军,孙博文.基于TRIZ理论的激光切割机改进及设计[J].科技创新与应用,2025,15(15):129-132.
- [3] 王靖,舒雷,林毓培,段书凯.基于任务均衡的双臂三维激光切割机分区算法研究与验证[J].西南大学学报(自然科学版),2025,47(06):213-223.