基于PID高度跟随控制的激光切割机功率控制系统研究

文/田社斌
大族激光智能装备集团有限公司

基于PID控制算法，对高度跟随功率控制的功能进行测试，能够实现激光切割机随着加工件的变化而快速精确地改变焦点高度，且激光切割机的功率能够随着切割速度的变化而得到实时的控制。最后通过试验对该控制系统的电容传感器的各项性能指标进行测试。

激光切割机是先进的加工制造设备，在钣金加工、工程机械和冶金机械中的应用越来越普及。激光切割机的功率、速度和精度是其主要性能指标。在使用激光切割机加工时，激光焦点和加工件之间的距离及切割机的功率是否恒定会对激光切割机的加工质量造成很大影响。本文基于PID控制算法，对高度跟随功率控制的功能进行测试，能够实现激光切割机随着加工件的变化而快速精确地改变焦点高度，而且激光切割机的功率能够随着切割速度的变化得到实时的控制。

激光切割机功率控制分析

1. 激光功率控制分析

激光切割机进行加工时，加工件的拐角处容易发生过烧或黏连的情况，这是因为在加工时对功率的控制和切割的速度没有形成同步。在拐角的位置进行切割时的速度是先减速再加速，如果功率没有及时调整，会导致在拐角的位置激光发射点密集；而远离拐角的位置激光发射点较稀疏，从而使切缝的质量降低。为了提高激光切割机的切割效果，需要进行激光功率同步控制分析。

在激光切割机进行切割加工时，加工件切割的深度和加工件在单位面积上受到照射的激光发射器的输出功率呈正相关，而加工件单位面积上接受的激光功率是由激光切割机的输出功率和切割的速度共同决定的。在实际加工过程中，激光光斑的直径一般不大于1 mm，以保证切缝不至于过大。为了使加工件的单位面积上受到的激光照射功率和能量比较均匀，需要输出的功率随着切割的速度进行变化。

要想使加工的切缝质量得到保证，需要在切割的过程中保持能量密度不变，在切割的过程中速度需要发生变化，因此激光切割机的输出功率也要随着速度的变化而同步变化。如果切缝的深度增加，需要使切割的速度降低或输出的功率增加。加工件单位面积受到的功率与切缝的深度不是线性关系，而是随着功率的增加，切缝的深度增加越来越慢，而且光滑度越来越差，切割的质量降低。

激光切割机的功率控制信号对输出的功率进行控制，主要有模拟电压和数字PWM两种不同信号形式。输出功率与功率控制信号两者之间也不是线性关系，随着控制信号的增加，输出功率的变化逐渐变得缓慢。这种非线性的关系也使得输出功率的控制更为复杂。

不同的加工件材质对于激光切割机的功率影响

程度不同，不同的激光切割机输出特性不相同，受到控制信号的影响也不相同。采用相同的激光切割机和加工件，切割速度不相同，加工质量也不相同。

激光切割机的加工质量受到输出功率、切割速度和加工件材质共同作用的影响。在实际中很难得到功率控制信号和切割速度之间定量的关系式，大多是通过经验来对两者关系进行大致的确定，以满足加工要求。

2. 电容传感器

激光切割机在工作时，激光通过透镜发射出来，然后被控制器聚焦后经过喷嘴射出，照射到目标待切割工件上，电容传感器为集成式，分为上极板和下极板，中间被绝缘体隔开，充分避免上极板和其他部位之间产生接触和干扰，另外上极板的外部接口也采用屏蔽线，降低受干扰概率，进而通过加设外部保护环来降低传感器边缘效应。传感器下部的云母介质能够提高耐压性能。

电容传感器的介质包括空气介质和固体电介质，工作时固体电介质保持高度一致，空气介质的高度需要随着激光头的高度变化而变化，从而确保待切割加工件与激光切割头之间的相对距离是准确的。为避免焦点偏移距离超出设定值，需要确保空气介质的高度一致。由于电容传感器在空气介质高度相对切割头较低时，其灵敏度符合要求，且非线性误差低，反之，则灵敏度降低，非线性误差激增。

激光头与待切割工件之间的距离测量电路是将电容空气介质的高度变化转化为频率信号，高度变化导致频率变化，频率的变化直观且线性地反映出上下极板之间的数值，即可实现距离的实时测量。所以，调频式测量电路的优点是容易进行数字输出，能够抗干扰，信号传输距离长，高灵敏度和稳定性，缺点是频率的输出为非线性，需要误差补偿。其原理如图1所示。

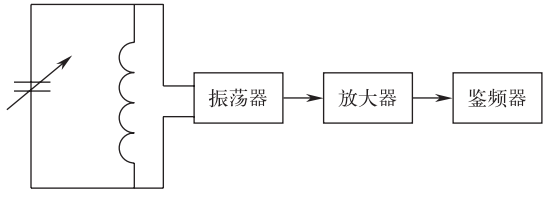

图1　调频式测量原理

功率控制系统硬件设计

1. 总体设计

激光切割的功率控制系统需要借助电容传感器体现切割头的高度变化，从而实现功率的跟随控制。其具体技术实现步骤是：

1）测量电路设计。采用调频式电路，目的是将上下极板之间的距离变成频率信号，实现切割头至工件的距离测量。

2）信号转化电路。DSP进一步将采集到的频率信号进行非线性校正，得到反映出焦点实时高度的数字量。然后通过高速DA将其转化为标准的模拟信号，实现数控伺服系统的控制输入信号。

3）伺服控制电路。伺服电动机收到控制信号后带动激光头移动，并在第二个高度信号到来前保持该高度。

4）测量调整电路。使用DSP编码器反馈回来的速度信号，转化为高精度PWM信号后，实现对输出信号的精准控制和调整，保证切割功率匀速且匀量的输出。

至此，控制输出功率实现了激光切割焦点高度跟随控制的目的，切割质量更均匀高效，降低了切割工件的废品率。总体设计如图2所示。

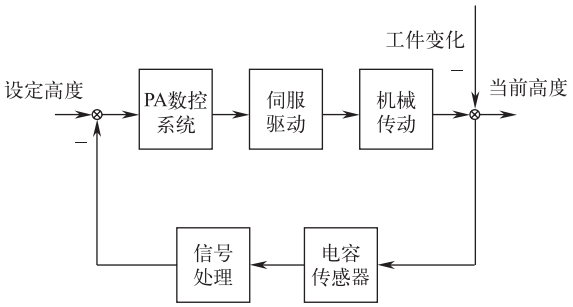

图2　总体设计图

2. 各组成设计

首先对DSP最小系统电路进行设计，包含存储器、仿真接口及启动开关等通用模块和隔离电源模块。

在对电容传感器信号检测处理设计中，采用电容反馈式振荡器设计调频振荡电路，使用高频三极管保证电路的稳定性。采用载波传输形式将调频信号进行叠加，使用同轴电缆内芯传输直流电源后，将低频直流信号过滤得到高频振荡信号，实现电容信号转化为频率信号。然后使用信号放

大电路进一步放大输入信号，需要借助具有共模抑制比高以及信噪比更高特征的电路，方能得到失真小、频率稳定的波形。使用高速低耗和高精度的整形滤波电路将正弦信号转化为方波信号，使用信号转换电路将数字信号转化为模拟信号，满足数控系统的需求。

对于激光功率同步控制电路设计，编码器信号采集电路对X、Y轴的激光头速度进行采集，PWM隔离驱动电路根据切割速度对激光切割机的输出功率进行控制。

数控系统由工控机、PCI总线卡、IO及轴控卡组成，在Windows系统上运行PLC，从而减少硬件的成本。控制板通过编码器对电动机的速度进行测量，对激光切割机的输出功率进行调整，通过电容传感器测量焦点高度后转化为模拟量，经数控系统PID控制后，根据加工件的距离变化进行调整，使焦点高度保持不变。此外，通过串口通信电路、存储器电路及IO接口进行相关参数的配置和保存控制。

功率控制系统软件设计

电容传感器的输出频率约为10 MHz，需要对频率测量的程序进行设计，而且输出的频率和焦点的高度之间是非线性的关系，需要进行校正，将输出频率进行模拟量转化，实现PID高度跟随控制。还需要通过速度采集程序、PWM输出控制程序、PC参数配置程序及等离子干扰滤除程序等实现系统的稳定性。

1. 输出频率测量程序设计

对于输出频率的测量使用多周期同步测量频率的方法，用D触发器作为门控，分别累计基准频率和待测量频率的变化次数，并将累加值放入累加器。将门控信号开启后，在需测量的频率信号到达第一个上升沿时开始计数，在门控信号消失后的待测量频率信号脉冲上升沿到来时停止计数作为触发条件，从而避免直接测量的脉冲误差。

采用多周期同步测量频率的误差，主要是在基频信号计数时最多的一个脉冲的误差，只是受到门控的时间和基频信号频率的影响，选择合适的门控时间和基频信号频率，能同时满足快速测量和提高精度。其实现的流程如图3所示。

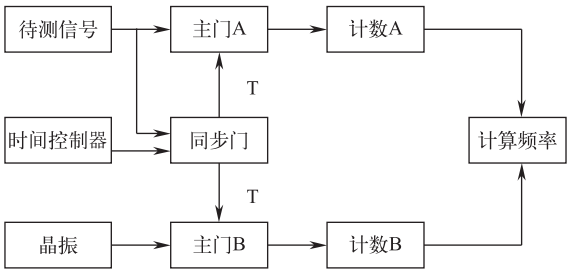

图3　多周期同步测量频率的实现流程

2. 输出频率与焦点高度线性拟合校正设计

采用二乘曲线拟合法对电容传感器输出频率与焦点高度之间的非线性进行校正，构造n次多项式对非线性特性关系进行近似，n取值越大，精度越大，所占用的资源也越多。因此n的取值要合适，不仅能满足测量精度的需要，也能够使计算的速度不至于过低。根据最小二乘法原理来计算各系数，使方差能够最小，从而得到最优近似方程。拟合校正的流程如图4所示。在焦点高度比较低时，输出频率的变化非常迅速，高度越高，输出频率的变化越平缓，采集点的选择上要在高度低时选择密集一些，高度高时稀疏一些，使拟合的精度提高，可使用上位机对点的数量和位置进行调整。

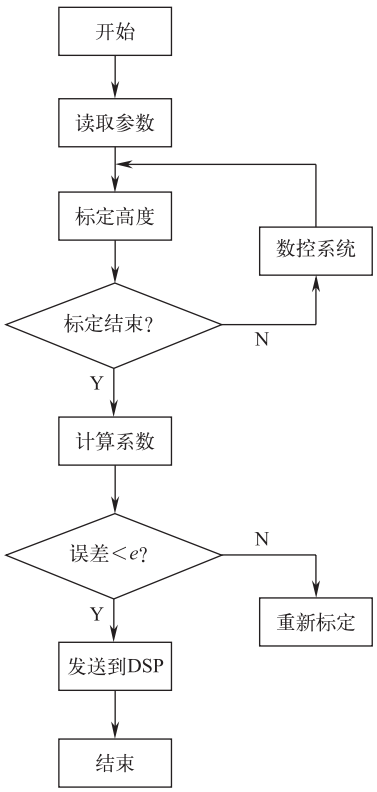

图4　最小二程曲线拟合校正流程

3. PID控制设计

PID控制法是常用的位置伺服系统控制方法，可以采用PID进行高度跟随的控制。在普通的PID控制中使用积分环节能够减少静差，使精度得到提高，但是在控制开始时或是在设定的数值变化比较大时，容易因系统的短时间偏差造成积分的积累，使整个系统出现超调，更严重的会出现抖动。使用积分分离式的PID控制能够实现偏差，超出一定的数值时，通过PD进行控制，使超调现象得到减少，从而使系统的响应速度得到提高，使系统的控制精度得到提升。其控制流程如图5所示。

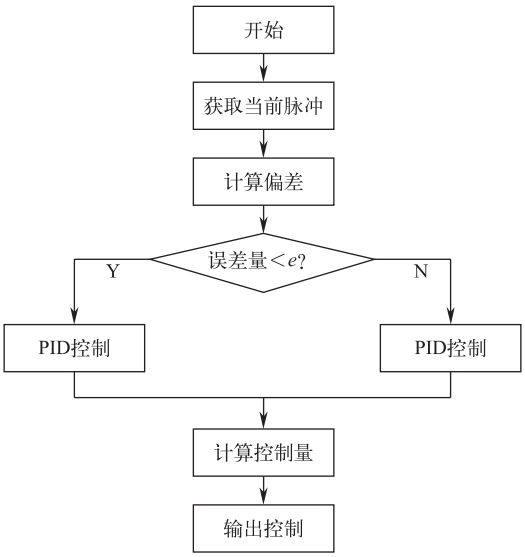

图5　积分分离式PID控制流程

4. 速度采集和PWM输出控制设计

激光能量的控制是通过反馈的速度来得到PWM输出值，从而实现能量与速度的跟随。为了使调整的实时性得到保障，在对程序进行设计时需要使用中断任务来完成控制。采用基于PC技术的PA系统进行设计，其接口可以将第三方的软件接入，采用MSComm控件实现串口通信，可以设置转速、PWM 控制的方式、输出频率及调整周期，并将数据传输给DSP控制板。

5. 等离子干扰滤除设计

激光切割机在工作时，激光通过透镜进行聚焦，会生成很多热量，这些热量被加工件吸收后会熔化甚至发生气化，并向空气中飞溅。当激光切割机的输出功率增加到一定的数值时，会使加工件发生大量的金属气化并离解，对加工的质量造成很大的影响，设计滤波方式消除等离子云的干扰。实现过程是通过判断振荡频率的变化是否在标定的范围之内，从而确定等离子干扰的存在与否。

试验验证系统效果

电容传感器的主要性能指标有分辨率、灵敏度、线性关系度和输出稳定性。首先通过试验来验证电容传感器是否达到要求，再基于适宜的PID参数来验证功率控制系统对提高切割加工质量的效果。

1. 电容传感器输出稳定性测试和线性度校正

对电容传感器每隔5 min测量其1 h内的频率，从而测试电容传感器的输出稳定性，记录测量频率数值见表1。

表1　电容传感器频率测量数值

时间/min	频率/MHz	偏差/Hz	时间/min	频率/MHz	偏差/Hz
0	9.325 6	0	35	9.325 8	200
5	9.325 8	200	40	9.325 6	0
10	9.325 7	100	45	9.325 5	－100
15	9.325 5	－100	50	9.325 6	0
20	9.325 6	0	55	9.325 7	100
25	9.325 5	－100	60	9.325 8	200
30	9.325 7	100			

通过电容传感器的频率测量数值可知，最大偏差为300 Hz，其稳定性非常高，在工作的过程中抖动很小。

在加工件上取10个点进行最小二乘曲线拟合，以此来对拟合的精度进行验证，具体的数值见表2。

表2　测试点高度与频率数值

高度/mm	频率/MHz	偏差/Hz	高度/mm	频率/MHz	偏差/Hz
0.1	8.981 3	－0.016	3	9.372 1	－0.019 1
0.5	9.083 1	0.002 2	4	9.428 3	－0.021 2
1	9.192 2	0.022 2	6	9.450 5	－0.010 6
1.5	9.257	0.012 6	8	9.462 6	0.015 1
2	9.305 1	－0.000 3	10	9.464 3	－0.015 3

通过对数值进行二次曲线拟合，拟合的精度不高，误差比较大，而进行三次曲线拟合，拟合的精度较高，误差较小，最大误差仅为0.022 2 mm，远远小于0.01 mm的最小检测误差，因此使用三次曲

线拟合能够较好地满足系统的要求。

2. 功率控制系统切割效果试验

功率控制系统切割效果试验所用材料选用多种不同厚度的双层薄膜，所用激光切割机CO_2激光器通过PWM信号来控制激光的输出，并进行打点和膜半切的试验。

在低速时能量不容易跟随，因此选择在速度较低时进行打点试验，通过高倍的放大镜来观察各点的间距是否相等，以此对能量跟随的效果进行判断。能量跟随效果不好时，在拐角速度降低时对功率下降调节的速度太快，造成拐角处的点分布不均匀，各点之间的间距偏大，在切割时在拐角的地方出现切割不透且黏连的情况。在能量跟随效果较好时，在拐角处的点分布均匀，各点之间间距分布均匀，在拐角处的切割效果与直线处的切割效果比较一致。

随着激光切割机的应用越来越广泛，所加工的材料很多是双层薄膜，一层是保护材料，一层是有用材料，对这些材料进行切割加工时需要切透保护材料，而且不能对有用材料造成损伤，要实现膜半切的效果。这些材料的厚度较薄甚至小于1 mm，因此对切割功率控制的要求较高，在实际应用时需要进行多次的调试以达到所需效果。对于切割的质量要求是切缝要光滑而且有用材料没有痕迹。如果拐角处的功率太小，会造成保护材料无法完全切透而出现黏连的情况，拐角处的功率过大会造成有用材料被切割，较好的切割效果是保护材料被切透没有黏连，有用材料没有被切割的痕迹，实现膜半切效果，满足加工的要求。

经过试验证明，电容传感器在对频率进行测量时有较好的稳定性，通过最小二乘曲线拟合能够将电容传感器的输出频率和加工件与切割头距离之间的关系近似为线性关系，能满足功率控制要求。采用基于PID高度跟随控制的激光切割机功率控制系统能够使功率跟随高度变化而使薄膜切割的效果得到提升。

结束语

激光切割机在工业中的应用越来越广泛，为进一步提升激光切割的效果和效率，从而可以为加工厂家输出优质的切割产品，本文基于PID算法的高度跟随控制系统实现了对切割机功率的调节，实现了激光切割机的焦点高度随着加工件的变化而快速精确的改变，而且激光切割机的功率能够随着切割速度的变化而得到实时的控制。最后通过试验对该控制系统的电容传感器的各项性能指标进行测试，在PID的参数适宜的情况下能够使高度跟随控制快速精确，功率随着切割速度的变化切割的效果和质量有着显著提升。**EA**

参考文献

[1] 彭珍．基于DSP的激光切割机高度跟踪系统的研究[D]．武汉：华中科技大学，2012：1-6.

[2] 刘立功，刘福贵，张晗．激光模切系统功率与运动的同步控制[J]．航空精密制造技术，2013，49(2)：27-29.

[3] 邹爱成，王群英，张云．基于微电容检测技术的数控切割机自动调高系统研究[J]．机床与液压，2014(18)：80-82.

[4] 虞瑶．基于CCD的激光切割机高度跟随检测系统的研究[D]．武汉：华中科技大学，2007：8-9.

[5] 王长和．具有多点测量功能的激光切割头位移传感器的研制[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011：8-11.

[6] 王世勇，李迪，陈超．激光切割的功率控制及其与运动的同步控制[J]．华南理工大学学报，（自然科学版），2010，38(3)：118-122.

[6] 刘飞翔．倒车摄像头激光焊接控制系统的研究与设计[D]．赣州：江西理工大学，2021.

[7] 佟玲．离轴式激光切割机理及焦点控制磁力驱动系统研究[D]．沈阳：沈阳工业大学，2018.

[8] 王江．激光切割机高度跟随及功率控制研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.

[9] 王海．电容式激光切割头高度跟随控制系统的研究与实现[D]．武汉：华中科技大学，2016.

[10] 陆鹤．PZT驱动式激光切割机焦点控制系统研究[D]．沈阳：沈阳工业大学，2017.

[11] 吴昊．基于ADRC的激光切割随动系统控制研究[D]．上海：上海交通大学，2020.

[12] 廉志强．基于快速趋近率SMC的PMSM无速度传感器矢量控制研究[J]．电气应用，2021，40(9)：8-14.