

## 多轴联动功能的电火花线切割机床方案设计与实现

## Design and Realization of Multi-Axis Synchronized Driving EDM Wire Cut Machine

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 李丹 张春华

**[摘要]** 对航空航天大直径薄壁环形零件,传统的线切割机床需要配备专用工装满足零件的等分或不等分及与发动机轴线的倾斜角度,不利于研制零件快速反应与低成本要求。据此,分析了多轴联动电火花线切割加工这类零件的可行性,并从机床结构、硬件、软件及编制程序等方面提出了方案。经加工验证,这些措施有效地提高了薄壁零件切分加工质量和加工效率,并降低了生产成本。可见,用多轴电火花线切割机床加工这类零件是一种行之有效的办法。

**关键词:** 切分 夹角 窄切缝 多轴联动 电火花线切割

**[ABSTRACT]** In aviation and space industry, there is a kind of parts with big diameter, thin wall, ring shape. The traditional EDM wire cut machine needs to be equipped with special fixture to fulfill equal or unequal divisions and the angle formed by the parts and motor axis. But this kind of special fixture cannot meet demands of high efficiency and low costs. Because of this reason, the feasibility of the processing of the kind parts by the multi-axis synchronized driving EDM wire cut machine is analyzed, meanwhile a plan is made on machine structure, hardware, software and programming. Through the actual experiments and approval, this processing may effectively enhance thin wall parts segmentation quality, high efficiency and reduce low costs. Multi-axis EDM wire cut machine is the effective solution for processing this kind of parts.

**Keywords:** Segmentation Included angle Narrow slot Multi-axis synchronized EDM wire cutting

轻量化技术是采用现代设计方法和有效手段对产品进行优化设计或使用新材料在确保产品综合性能指标的前提下,尽可能降低产品自身重量,以达到减重、降耗、环保、安全的综合指标。薄壁零件是应用轻量化技术设计的一个典型案例。

薄壁零件是航空航天发动机中关键零部件之一,因其具有直径大、壁厚薄、重量轻、结构紧凑等特点而被广泛应用。特别是有一类零件,先将其整环车削为薄壁零

件,然后再切分为等分或不等分的若干个环段零件,在使用时又将切分的零件组合在一起成为一个整环,以满足设计功能的要求。图1所示为某航空发动机风扇静子内环薄壁零件,被装配在机匣内与叶片实现良好配合,此类材料多为高温耐热钛合金。

由图1可知,该类零件是将机械加工完成的薄壁整环零件分割为8等分环段零件,然后再将这8个环段零件装配到机匣内,其零件结构特点和难点如下:

(1) 环型薄壁件,分割成8等份,一致性要好,综合误差小于 $\pm 0.1\text{mm}$ ,装配到对开机匣内,不能凸出机匣结合面,且凹下最大不超过 $0.1\text{mm}$ 。

(2) 分割每段端部过发动机轴线的角度为 $5^\circ \pm 36'$ ,缝隙为 $0.22\text{mm}$ ,保证倾斜角有很大难度。

(3) 切缝表面粗糙度为 $1.6\mu\text{m}$ 。

(4) 被切割端面及其邻近表面光滑,无烧痕,重熔层小于 $0.02\text{mm}$ 。

从零件的结构、尺寸关系和材料可以看出,该零件是难加工零件,机械加工无法实现 $0.2\text{mm}$ 的缝隙加工;再者,零件要求被切割端面表面光滑,无烧痕,重熔层小于 $0.02\text{mm}$ ,这样其他加工方法也无法保证。而电火花线切割加工是用沿着自身轴线方向运行的电极丝作为工具电极对工件进行切割的电火花加工方法,其主要特点如下。

(1) “以柔克刚”。加工时,工具电极与工件材料不接触,两者之间基本没有宏观机械作用力,因此能用“软”的工具电极加工“硬”的工件。电火花线切割加工无需制造成形电极或刀具,只需采用 $\phi 0.05\sim 0.28\text{mm}$ 的圆电极丝,工件材料的去除量少。

(2) “精密微细”。由于脉冲放电的能量密度可精确控制,两极间又无宏观机械作用力,因此可实现精密微细的加工,能够方便地加工复杂形状型孔、微孔、窄缝、窄槽等。

(3) 直接采用精加工和半精加工一次加工成形,一般不需要中途转换。

(4) 只对工件材料进行图形轮廓加工,不破坏其他部分,图形内外的余料还可利用。

(5) 自动化程度高,操作方便,加工周期短,成本低。

从上述分析可以得出,电火花线切割加工由于具有

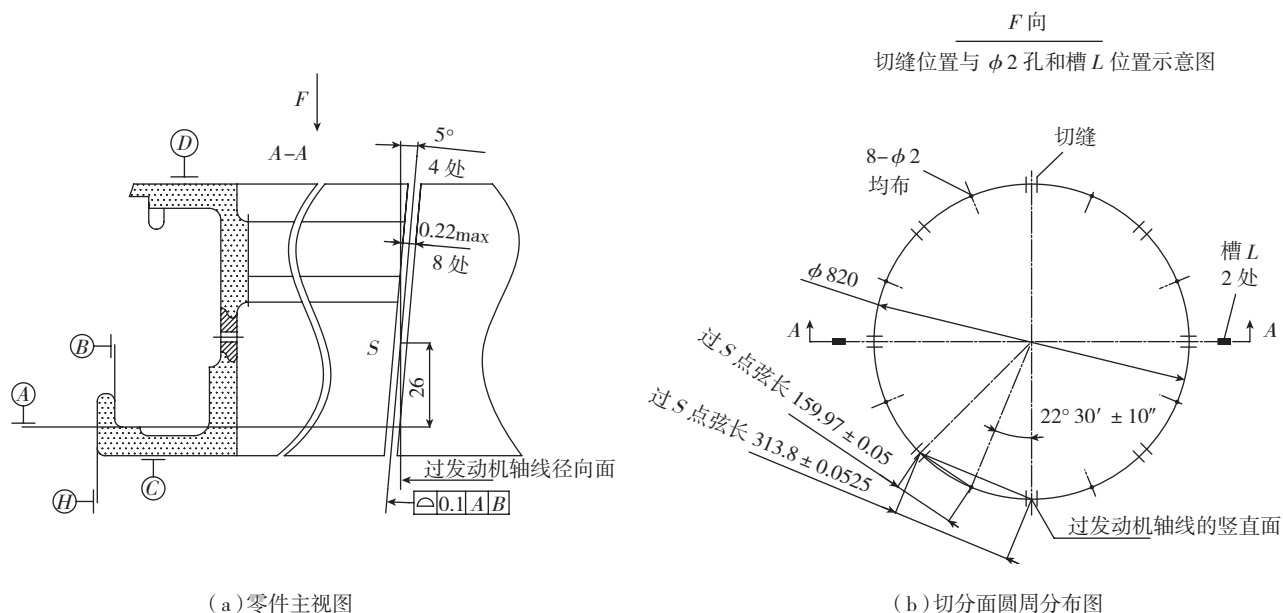


图1 航空发动机风扇静子内环薄壁零件示意图

Fig.1 Schematics of fan stator inner ring thin wall parts of aeroengine

独特优点,能够满足这类零件的加工要求,电火花线切割加工是目前解决这类零件最好的加工工艺方法。

## 1 电火花线切割工艺性分析

从零件图样要求及材料来看,采用电火花线切割工艺切分此零件的难度和影响因素主要有以下几点。

### (1) 机械传动精度的影响。

线切割机床的机械传动精度高,加工效果好;传动精度低,加工效果差。如果传动精度达不到应有的要求,就无法实现工件的尺寸加工。

a. 坐标工作台传动精度的影响。电火花线切割加工的尺寸精度在很大程度上取决于坐标工作台的传动精度。因此,在设计和制造线切割机床的过程中必须充分考虑到机床在长期使用中能够维持必要的刚度和精度,以满足生产上对加工质量的要求。

b. 走丝机构传动精度的影响。走丝机构是机床重要的组成部分之一,它直接影响着加工效果。走丝速度越快,影响越大。电极丝在放电加工区域移动的平稳程度取决于走丝机构的传动精度。电极丝运动不平稳、速度不均匀,不但影响丝的使用寿命,还影响加工效果,严重时可能把电极丝拉断。

### (2) 电极丝及其走丝速度的影响。

a. 电极丝材料的影响。目前,高速走丝线切割加工的电极丝是快速往复运行的,电极丝在加工过程中反复使用,电极丝的材料不同,对切割速度等工艺指标的影响也不同。常用的电极丝材料有钼丝、钨丝和钨钼丝,在高速走丝线切割中最普遍采用的是钼丝、

钨钼合金丝(W20Mo、W50Mo)。常用的电极丝规格为 $\phi 0.10\sim 0.30\text{mm}$ ,当需要切割较小的圆角或窄槽时也有用 $\phi 0.06\text{mm}$ 钼丝的,钨丝耐腐蚀,抗拉强度大,但脆而不耐弯曲,且因价格昂贵,仅在特殊情况下使用。

b. 电极丝直径的影响。电极丝的直径对切割速度的影响较大。若电极丝直径过小,则承受电流小,切缝也窄,不利于排屑和稳定加工,不能获得理想的切割速度。因此,在一定的范围内,电极丝的直径加大是对切割速度有利的。但是,电极丝的直径超过一定程度会造成切缝过大,反而又影响了切割速度的提高,因此,电极丝的直径又不宜过大。同时,电极丝直径对切割速度的影响也受脉冲参数等综合因素的制约。

c. 电极丝上丝、紧丝的影响。电极丝上丝、紧丝是线切割操作的一个重要环节,它的好坏直接影响电极丝的张力。过松时电极丝张力小,电极丝的抖动大,影响工件的加工质量和切割速度;过紧时电极丝张力大,其振动的振幅减小,放电效率相对提高,可提高切割速度,但容易断丝。

d. 走丝速度的影响。走丝速度高可减少断丝和短路机会,提高切割速度,但走丝速度提高会使电极丝的振动增大,又会影响切割速度。

## 2 电火花线切割机床方案设计与实现

### 2.1 电火花线切割加工机床方案的设计

针对风扇静子内环,采用电火花线切割加工工艺,本单位与北京迪蒙卡特公司就线切割机床结构功能进行探讨。由于环段件较多,直径为 $400\sim 800\text{mm}$ ,分割段

数有 2、4、6、8 等份,角度为  $5^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 。若在传统的电火花线切割机床上加工,每一种零件就要做一种夹具,每一套夹具制作费用约 8~10 万人民币,并且夹具制作周期长,影响零件加工进度且管理维护成本高。为此,提出在原有电火花线切割机床上加装回转工作台与电极丝自动拉斜角,经双方多次探讨,确定了如图 2 所示的电火花线切割机床结构,以满足不同环段件的加工要求。

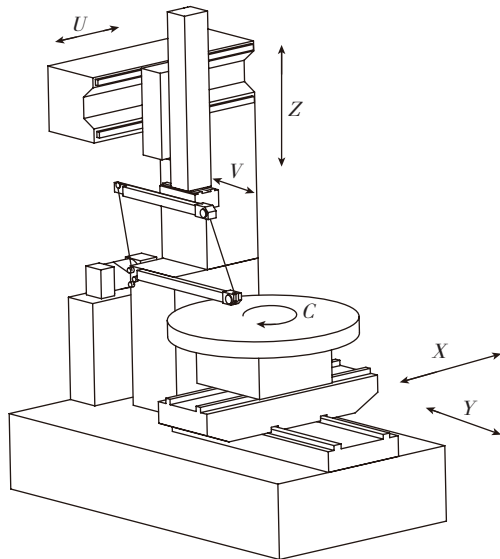


图2 多轴电火花线切割机床结构示意图

Fig.2 Structure schematic of multi-axis EDM wire cut machine

该机床结构特点是在  $X$ 、 $Y$  运动轴上安装一个直径 1000mm 的回转工作台  $C$  轴,采用北京迪豪卡特公司独有的四连杆锥度切割技术,可以完成零件在 200mm 高度下  $X$  方向  $\pm 30^{\circ}$  的角度切割。机床控制系统软件采用全新设计,针对风扇静子内环类零件,软件设计了五轴联动功能( $X$ 、 $Y$ 、 $U$ 、 $V$ 、 $C$ ),采用了直纹面运算算法。将零件与  $C$  轴中心找正后只需输入工件高度、上导轮中心到下导轮中心距离、工件底面到下导轮中心距离和零件直径,机床根据这些参数自动计算出零件在  $Y$  轴上的最高点,电极丝倾斜到零件所要求的角度进行切割加工。由于机床安装了回转工作台,又采用了五轴联动系统,这样不论什么尺寸规格的环段类零件切割,都无需制作对应的夹具,只需不同数量的垫块即可,大大节约了零件加工成本。

## 2.2 电火花线切割加工机床方案的实现

### 2.2.1 机床硬件概述

该机床共有  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $U$ 、 $V$ 、 $C$  6 个工作轴。其中, $X$ 、 $Y$  轴为机床转台水平移动加工轴( $X$  轴为短轴, $Y$  轴为长轴),均采用 P3 高精密级双螺母滚珠丝杠、日本 THK 直线滚动导轨、松下交流伺服电机驱动系统,具有反向

间隙、螺距误差补偿功能, $X$ 、 $Y$  轴均安装了光栅尺,以实现位置补偿全闭环控制,可实现高精度加工; $C$  轴为回转轴,采用台湾产精密回转工作台; $Z$  轴为机床上导轮垂直移动坐标轴,机床的下导轮为固定导轮,加工时可根据零件的高矮调整  $Z$  轴高度,从而调整上导轮高度,达到稳定的最佳效果的加工; $U$  轴与  $V$  轴是机床上导轮水平移动控制轴, $U$  轴与  $X$  轴平行, $V$  轴与  $Y$  轴平行,加工时机床通过调整这两个坐标轴,实现电极丝倾斜角度数控调整的目的,且加工高度  $Z$  越高,理论电极丝倾斜角度相对越小。

机床主体为大壁厚、高精度树脂砂铸造件;机床导轨和丝杠采用集中润滑系统;机床具有一套独立的涨丝机构,用来保持电极丝的恒张力和减少电极丝的跳动,可确保电极丝运动的稳定性,从而确保较高的加工精度和较低的表面粗糙度,具体结构如图 3 所示。

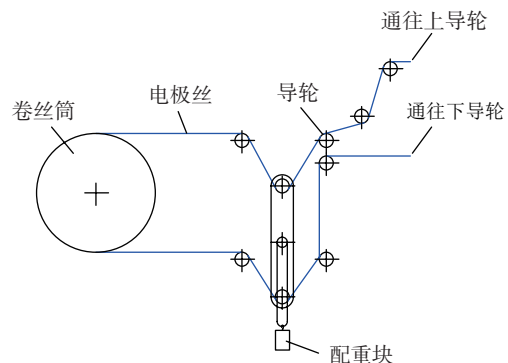


图3 电火花线切割机床结构

Fig.3 Structure of EDM wire cut machine

机床自带电压检测装置,检测钼丝与零件间的电压差,如果钼丝与零件之间发生碰触,则发生短路,检测电压差小于设定电压,则机床报警,钼丝自动进行短路回退,防止钼丝继续行进造成钼丝断裂。

机床还具备:(1)自动定位功能,即机床出厂时会测定一个机床固有坐标系,加工坐标系原理类似于数控铣加工,该功能能够实现自动回零功能;(2)断电记忆功能,如果加工中发生断电事故,机床将自动记录断电时的钼丝位置,重新供电后开机后可以继续加工;(3)断丝保护功能,即钼丝断裂后机床自动停止运行。

机床更具备自动找正功能,利用机床自带的电压传感器,机床还可以实现自动找槽中心和自动靠边功能。原理为向一个方向不停移动钼丝,直到钼丝碰触到零件边缘,电压传感器报警,系统记录此时钼丝在机床坐标系中的位置,之后系统再向另一个方向一直移动钼丝,直到碰触到零件,系统再将两次得到的坐标值相加后除以 2,所得即为零件槽的中心,利用这种功能可以方便地实现零件找正。

## 2.2.2 编程系统概述

该机床的编程系统主要通过集成的 CAXA 软件及该公司自主研发的编程插件来实现,程序的输入可以通过 3 种形式进行:

(1) 利用机床上电脑里安装的 CAXA 软件直接进行图形绘制,之后对图形进行加工路线的生成,然后通过电脑里的集成编程软件进行程序生成,对零件进行加工;

(2) 利用 U 盘将图形文件直接传入机床电脑中,之后生成程序,加工零件;

(3) 利用网络接口将图形文件传入机床电脑,之后生成程序,加工零件。

输入图形文件的格式可以为 CAXA 文件,也可以是 CAD 文件。

如果加工的零件没有斜度,即零件的上下截面完全重合时,只需要将零件的这个截面图绘制出来并利用机床电脑生成程序即可。如果为锥度零件,即上下截面尺寸及位置不同,则需要在画图时将零件的上下两个截面都画出来,之后分别生成程序,再将两组程序进行集成之后机床可自动实现搬度补偿,具体方法如下。

由于线切割机床电加工系统的特殊性,机床搬度实际上是通过机床的上导轮在两个方向上的直线插补来实现的,即下导轮保持不动,上导轮沿  $U$  轴和  $V$  轴进行移动,带动钼丝移动,实现钼丝角度偏移,由于导轮是有一定直径的,当钼丝偏移至一定程度时,钼丝容易跳出导轮沟槽,造成跳丝事故,因此要保证导轮直径始终与钼丝平行,机床设置有一个四连杆机构,保证导轮能沿中心轴进行旋转,上下导轮直径保持在一条直线上,且该条直线与钼丝重合。

线切割机床在工作时,零件处于上下导轮之间,且零件高度位置不一定,上导轮随零件高度的变化而变化,因此,为准确控制所调整的角度,必须要知道以下几个参数:

- (1) 机床工作时上下导轮中心高度差;
- (2) 零件角度偏移基准面高度;
- (3) 零件加工部分高度。

下面以  $V$  轴偏转  $30^\circ$  为例具体说明如何实现电极丝的倾斜角度。图 4 给出了电极丝未偏转角度的示意图。当输入上下导轮高度差  $H$ 、零件角度偏移基准面与下导轮中心高度差  $h$ 、偏转角度  $30^\circ$  时,出现  $Y$  轴未补偿前的状态,如图 5 所示;通过  $V$  轴补偿公式  $V=H \times \tan 30^\circ$  计算,并补偿,得出如图 6 所示的  $Y$  轴补偿后的状态。

设导轮  $V$  型槽半径为  $R$ ,则机床上导轮在  $Y$  轴上产生的直线插补值为:

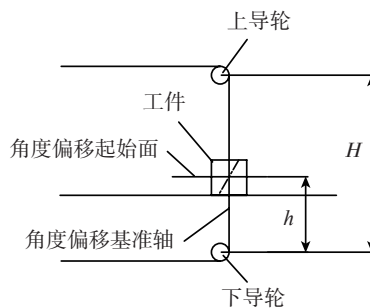


图4 电极丝未偏转角度时示意图

Fig.4 Schematics under not-inclined mode of wire

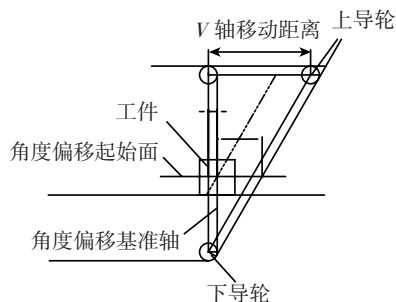


图5 搬度前, Y轴补偿前状态

Fig.5 Y axis state before compensation

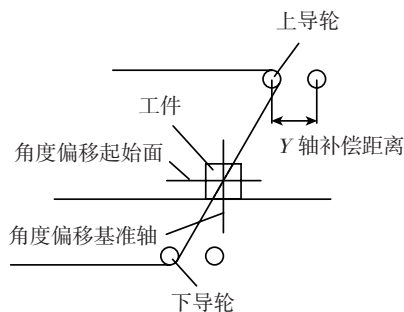


图6 搬度后, Y轴补偿后状态

Fig.6 Y axis state after compensation

$$Y = \frac{hV}{H} - R + \frac{R}{\cos 30^\circ} \quad (1)$$

在编制程序时,需要画出钼丝与零件上表面接触位置截面图、钼丝与零件下表面接触位置截面图。 $V$  轴方向转  $30^\circ$ ,钼丝切割移动方向为沿  $X$  轴直线切割,则画图编程时就需要画两条与  $X$  轴平行的直线,设零件加工部分高度为  $h_1$ ,则两条平行直线的距离为:

$$d = h_1 \times \tan 30^\circ \quad (2)$$

编制斜度程序时需要注意,上下两部分程序图形的切割起始点必须为相同的点,且两部分程序的条数需要 (下转第 46 页)

(精加工);  
 H100=235.42; (加工深度);  
 H200=0.00; (轨迹半径);  
 G90;  
 G24;  
 T84;  
 C790;  
 G01 Z - H100M04;  
 G83 T002;  
 T85; (关泵);  
 M02; (加工结束);

### 3 结论

(1) 本文对大深径比盲孔的电火花加工工艺进行了深入研究,提出的工艺方法能够较好地解决镍基高温合金的低刚性工艺系统构件上的深盲孔加工要求,所加工零件满足了图纸尺寸和表面质量要求,对这类零件的电火花加工有很好的借鉴作用。

(2) 提出的电火花深盲孔专用导向器对大深径比(深径比 $> 45$ 、孔径为 $\phi 5\text{mm}$ )的深盲孔电火花加工是可行的,简化了加工难度,提高了产品质量。

(3) 对镍基高温合金材料电火花加工特性进行了试验,确定了合理的工艺参数;通过优化工艺流程,确定粗、中、精加工工艺方法和余量,得到可实用化的加工速度。

(4) 此工艺方法不仅能够完成圆柱形状的深盲孔电火花加工,而且可以推广到异型孔的加工,如方形、花瓣形、三角形等盲孔的电火花加工。

(责编 谷雨)

(上接第 37 页)

此每加工完一排孔后,将加工深度增加 0.02mm。

采用上述加工方法,完成了正式件的加工,群孔的加工精度、表面质量、位置度等技术指标均符合图纸要求,发散壁等其他非加工部位无烧伤和碰伤。图 6 为加工后火焰筒的局部图,该零件已经顺利交付给用户。

### 4 结论

采用成组电极进行火焰筒群孔加工,具有以下 2 个方面的特点:(1) 采用数控电火花成形机床进行群孔的加工,成组电极由群孔的分布规律、孔径和空间角度所决定;(2) 需要进行充分的工艺参数试验,在加工效率优先的前提下,保证火焰筒群孔的加工精度和表面质量,并实现较低的电极损耗。

经过加工试验验证,在现有的数控电火花成形机床

上采用群孔成组电极电火花加工技术,可以实现航空发动机火焰筒群孔的优质加工,解决了具有干涉结构火焰筒群孔的加工难题,获得了较高的加工效率和较好的表面质量。

(责编 谷雨)

(上接第 41 页)

完全一致,这样才能成功加工出想要的零件,要做到这点,只需要控制图形中加工线条的个数就可以了。利用这个系统就可以完成很多复杂零件程序的编制,只是需要人为设计走刀路线比较复杂。

例如,在设备预验收时试加工的零件的编程图形如图 7 所示。

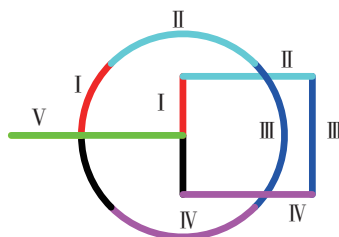


图7 试加工零件的编程图形

Fig.7 Programming graphics of testing parts

其中,相同线条为上下对应的程序段,正方形为上表面图形,圆形为下表面图形,2 个图形的进退刀点为同一点,这样加工出的零件就是一个上表面为方形,下表面为圆形的零件,输入零件高度是为让系统自动计算上导轮在  $U$  轴和  $V$  轴上的运行距离。

机床除去自动编程外也支持手动编程,编程代码与数控铣床代码基本一致,具体代码可以查机床说明书,机床可以实现圆弧插补、直线插补等命令。

采用本方案的机床在工厂运行了近 8 个月的时间,加工了批产型号、科研型号在内的十几批次的 20 余种上千个零件,合格率达到了百分之百,节省了做夹具的费用,缩短了零件的加工周期。

### 3 结束语

电火花加工这种特种加工技术不仅仅是一种用来切断或者粗加工的手段,它相较于传统机加工方式有很多的优势,简单点说就是只要零件能导电,就能进行加工,当机床的主轴精度、加工参数、电脉冲补偿准确到一定程度时,它其实与一台机加设备在加工零件精度方面几乎没有区别,而且电加工所产生的应力几乎可以忽略,所以一台具备多轴联动功能的线切割机床是可以完成更多复杂工况零件的加工的。

(责编 杰一)