

数字程序控制线切割机

郑州大学数学系翻印

1973年12月

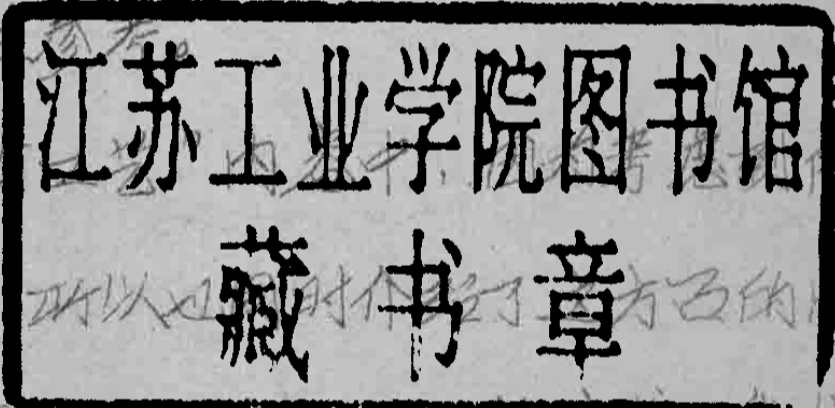
前 言

数字程序控制线切割机是一台由小型电子计算机控制的机床，它的使用对于精密冲模的制造、新产品的试制、特别是起小型元件的试制提供了很多方便。

本站自1971年5月份起组织有买数字控制线切割机的学习班、技术讨论会、报告会等技术交流活动以来，现在制造与使用数字控制线切割机的单位正在不断增加。为了推广这项新技术，现将前阶段技术交流中积累的技术资料选择在理函一部分，以供各单位参考。

这里在“线切割机床”方面，由于各厂技术力量参差不齐，有的极线切割机仍有不少的潜力，所以也适当地作了一些方面的内容。

数字控制线切割机技术还是开始不久的一项新技术，我们对它很多方面的认识还是很浅的，有待不断的摸索与实践，因此这里所云的内容对有些问题可能没有解释清楚、甚至也可能是认识错误的。这些材料，仅供参考。



目 录

线切割机床工艺

(上海电表厂) (1)

数字程序控制线切割机晶体管高频电源

(浦江电表厂) (49)

数字程序控制线切割机高频电源线路调试

(自动化仪表三厂) (62)

数字程序控制线切割机的程序编制

(上海钟厂) (67)

数字程序控制线切割机操作使用体会

(医用电子仪四厂) (101)

线切割机床与工艺

(上海电表厂)

一、电火花线切割技术的发展

电火花加工是项先进的科学技术，它是利用电能对金属材料进行“切削”加工，但它的加工方法不同于一般金属切削工艺，需要依靠锋利的刀具、强烈的切削力，而是利用脉冲放电，在电极与被加工金属之间形成脉冲放电通道产生高温（10000℃左右）足以使在放电通道接触处很少金属体积在放电瞬间熔化和气化，达到切削的目的。因此这种方法可方便的加工硬质合金、热处理淬硬的工具钢材，韧性的以及不锈钢耐热钢钨钼铜等导电材料。

电火花加工技术在国内得到广泛应用的穿孔机床普遍的应用于模具制造方面，在提高模具制造质量、提高模具使用寿命、提高劳动生产率、缩短模具制造周期，减轻模具制造强度等方面，显示了其他加工方法难以达到的优越性能。

但是事物总是一分为二的，电穿孔机床也存在一定的缺点。最主要的是需要制造精度的电极，这就需要其他高精度的机床配合，而且电极在使用过程中有损耗，在一定程度上影响电火花加工的应用范围。

(一) 靠模仿形线切割工艺

人们为了解决生产中不断发生的矛盾，研究成功一种新的应用细金属丝做工具电极的电火花线切割机床。它是用细金属丝作为工具电极，在电蚀加工进行时，电极丝以缓慢的速度移动，使新的电极丝连续不断的补充更替在电蚀加工区受耗损的电极丝，同时电极丝的移动也有利于屑末的排出，从而避免了一般电火花加工时因电极的损耗对加工精度的影响。

当切割加工零件时，不需制造相应的工具电极，只要制造一块靠模仿形样板，电极丝沿着仿形样板边缘进给，就能切割

出各种精密的几何形状来。

线电极仿型切割工艺的出现，对加工精密硬质合金模具带有狭缝的精密零件等方面，较之电火花穿孔加工方法又有了进一步的发展。但是这种仿形线切割工艺的性能，并不是十分完美的，它存在着的主要缺点：

- (1) 生产效率不高，正常生产约仅 2 毫米²/分。
- (2) 加工范围不大，工件厚度 20 毫米以上就难以加工。
- (3) 电极损耗大，一般只作一次性使用。
- (4) 虽不要做刀具电极，但还要做高精度的靠模样板等。

因之靠模仿型线切割工艺局限性还较大，不能在模具制造精密零件加工等方面广泛使用。

存在这些缺点的主要原因，根据该厂靠模仿形线切割工艺分析，较为一致的认为是放电切割过程中切屑的排除和靠模样板等问题。

在靠模仿形线切割机床上，电极的移动速度每秒仅 $5-15$ 毫米左右，在电蚀过程中产生的屑末，不能得到及时的排泄，相反得不到及时排泄的屑末，不断在隙缝中因阻塞而发生短路故障，使脉冲能量得不到充分的利用。

人们为了设法提高线切割机器的生产效率，提高加工稳定性，采取了改变电规准、改进线架导轮等结构，试用高压喷射工作介质等方法，试图将隙缝里屑末及时排泄出，但是都得不到预期的效果。

(二) 阳极机械线切割工艺

我厂为了解决模具生产的落后问题，在 1961 年开始研究线切割技术，摸索试验电火花线切割加工工艺，考虑到阳极机械加工方法有很高的生产效率，因之我们首先试验了把阳极机械加工原理引用到线切割加工方面来。通过不断的实践改进，终于创制成功应用阳极机械原理的线切割加工工艺与机床。

阳极机械线切割加工原理，是采用直流电流，以水玻璃作

为工作介质，电极丝必须作高速移动，在直流电的作用下，在被加工工件表面产生具有较高绝缘强度的阳极薄膜。当高速移动的电极丝与被加工工件表面凸点接触或接通时，因放电击穿而产生脉冲溶化，熔化的金属屑末由高速移动的电极丝排开，即达到切割加工的目的。

阳极线切割的主要工艺特点：

1. 应用一段 $\phi 0.015$ 毫米长度约 150~200 公分的钨丝做工具电极丝切割缝宽为 0.065 毫米。
2. 电极丝快速移动速度每秒 10 公尺。
3. 应用直流电作为切割电源，水玻璃作为工作介质。
4. 能切割厚达 50 毫米左右的淬硬钢材，生产率可达 12 毫米²/分切割硬质合金生产率 3 毫米²/分。
5. 在切割过程中，进给速度与电极丝对工件的电蚀速度相适应不会出现短路现象，进给连续均匀。
6. 由于正常切割加工不发生短路现象，有利于采用先进的自动控制技术，我们试验成功了简易数字程序控制的装置，可任意的切割较精密复杂的几何形状，加工尺寸精度也很高。

阳极机械线切割工艺与机床的试制成功，在模具制造方面应用，取得了较好的技术经济效益：

1. 简化模具制造工艺，缩短生产周期，冲模型腔部分不用刨、车、铣、磨电穿孔设备加工，可一次线切割成型。
2. 提高模具生产效率，降低成本，加工冲裁 1 毫米以上冲裁模时，可在一块钢坯上一次加工出套副冲模的凸模、凹模、固定板、卸料板、推块等四、五个主要零件，实现冲模无废料套材加工。
3. 冲模制造质量得到了提高，热处理后加工，消除了淬火变形，凸模、凹模刃口间隙均匀，精细复杂模具可在块加工，不需镶银，有利于提高结构强度。
4. 降低劳动强度，实现自动化操作，由于应用了数字程

序控制技术，能方便的加工精密复杂的形状。

但是阳极机械线切割工艺，在某些方面还有一定的缺点。例如：

1、基于阳极机械加工原理，工作介质在直流电的作用下，必须在被加工工件表面产生具有绝缘强度的阳极钝膜，才能在电极丝的高速移动下产生脉冲放电进行切割加工。但阳极钝膜的产生，是依据各种金属材料性能而定。对铜、铝等常用有色金属就不能产生阳极钝膜，这就不能产生脉冲放电过程，就不能进行切割加工，加工范围不广，仅局限于黑色金属。

2、切割表面光洁度较差，有条纹

3、用水玻璃做工作介质，粘性大，对操作及机床维护带来一定困难。

(三) 快速走丝切割工艺

为了解决上述矛盾，提出了在原来阳极机械线切割机床上，试验其他切割电源来改进切割性能。我们先后试验了RC弛张式电源、电子管高频脉冲电源，在采用电子管高频脉冲电源时，获得了较好的加工性能：既能切割各种金属材料，切割效能又较阳极机械切割有所提高，既保持发展了阳极机械线切割的良好性能，又解决了它的不足之处。通过实践试验，使我们认识到快速走丝原理的加工特性，是阳极机械线切割与高频脉冲线切割两者所具有的共性。

在原来的阳极机械线切割机床上用电子管高频脉冲电源加工与靠模仿形线切割机加工相比较，二者所用的电源、电极丝、工作介质等都是基本相同的，但加工性能却出现相差悬殊的结果。前者生产效率高、加工过程稳定；后者生产效率低，加工过程不稳定。

二者加工性能差异的主要原因，是在于电极丝的移动速度，原来阳极线切割工艺要求电极丝以每秒10公尺的速度运动。而靠模仿形线切割工艺，电极丝移动速度仅每秒5~15毫米。

电极丝速度的快与慢不仅是数量上的差异，在切割加工性

能方面产生着质另上的差异，从实践试验中表明，电极丝速度的快与慢这一矛盾，起着规定和影响生产率的高与低，加工厚度的大与小，进给过程中的短路与开路等方面的矛盾。

快速走丝式线切割工艺特性

快速走丝式线切割工艺，电极丝以每秒 10 公尺左右的线速度运动，较之慢速走丝式存在的不利条件转化为有利条件。

(1) 在电蚀过程中产生的屑末，能被高速运动的电极丝从切割隙缝中及时排泄出，消除了屑末在隙缝中，因未能及时排泄引起阻塞而发生短路的现象。

(2) 乳化液等工作介质，依靠吸附在高速运动电极丝四周的特性以及惯性作用，能迅速充分的补充到电蚀加工区域，保证了电蚀加工有效的进行。

(3) 对电极丝的冷却作用。使受热的电极丝能快速的退出加工区域，进入液体介质冷却，提高了电极丝功率负载能力，有利于提高生产率。

(4) 消电离作用，电极丝的快速运动有助于减少放电后所残留的离子和避免电弧放电等。

由于快速走丝改变了切割加工的条件，切割加工的性能就得到显著改善，这就促进了线切割这项技术在生产领域得到广泛的推广应用。

快速走丝的主要工艺特性

1. 生产率较之慢速走丝线切割高 10 倍左右，一般切割钢及硬质合金稳定在 $15 \sim 30$ 毫米²/分，最高可达 50 毫米²/分左右。

2. 加工厚度范围大，能正常切割厚度在 50 毫米的工件，而慢速走丝仅能加工厚度在 20 毫米以下的工件，较厚工件加工时极不稳定，甚至不能加工。

3. 由于排屑条件的改变，工作介质的充分供应，如进给速度与电蚀速度相适应，不会产生短路现象，因之在快速走丝

式线切割机构上根本变革了一般电火花加工机床必须有一套整火花间隙自动调整的结构，这就有利于在线切割机床上应用先进的数字程序控制技术。

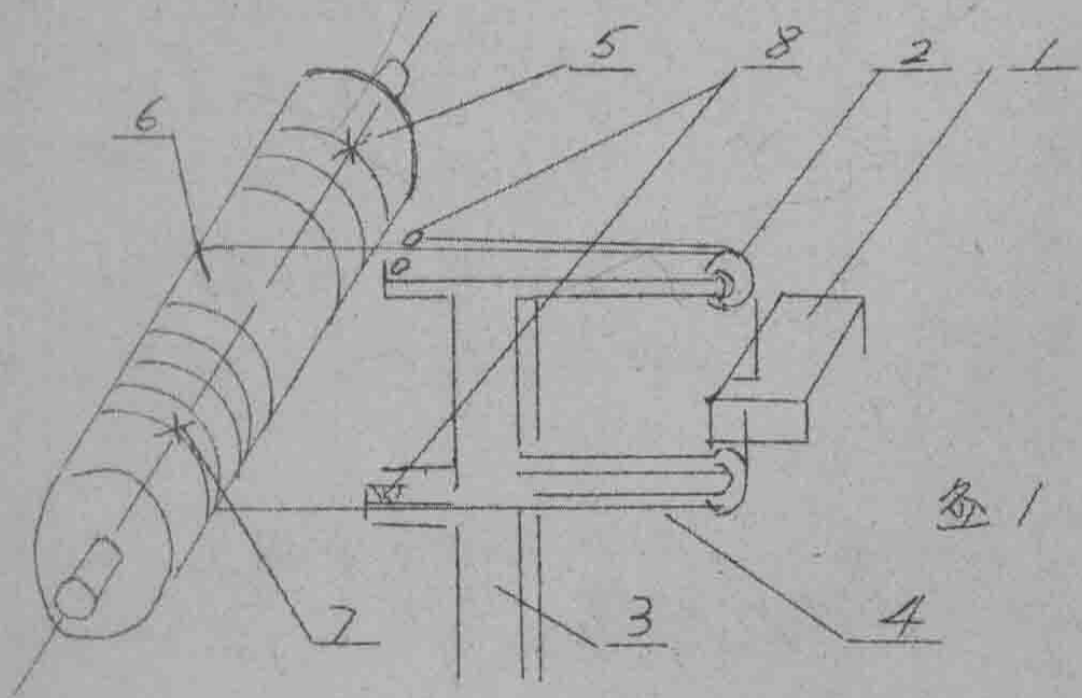
4. 电极丝利用率得到提高，通常线切割机床用 $\phi 0.1 \sim 0.15$ 毫米的钼丝作为电极丝，快速走丝电极丝通过电蚀加工区域的时间极为短暂，电极丝只是周期性地反复循环使用，因之电极丝在电蚀过程中本身的耗损在整根电极丝上是极为均匀的。电极丝的拉力强度也是逐渐降低的，在正常情况下不会出现电极丝的某点强度突然下降而发生断丝现象。电极丝的使用寿命就显著延长，能为国家节约大量贵重金属。

(四) 快速走丝机构的原理

电极丝的移动速度，根据试验所知，可在较大范围内有效地进行切割，在模型试验中，我们分别试验了2.5, 5, 7.5, 10, 13米/秒的线速度。试验表明线速度较快能得到较好的生产效率及切割厚度较大的工件。

在线速度达到7.5米/秒以上时，能有效的切割50公厘厚度的工件。这对于一般冲模制造中，凸模凹模的高度均已适用。为了满足在电极丝传动装置设计结构方面的要求，选用了10米/秒左右的线速度。

对如何获得每秒达10米的电极丝线速度是解决快速走丝线切割的关键之一。我们通过实践试验，并不断改进，制成往复式快速卷绕装置，结构示意图如盘1所示。



- 盘1
- 1—工件；2—导轨；3—线架；4—电极丝；5—电极丝首端；6—线筒；7—电极丝尾端；8—导架。

工具电极是用一根 150~250 米左右长的钼丝卷绕在丝筒 6 上，丝筒也是使电极丝获得每秒 10 米线速度的传动机构。电极丝的卷绕过程，先将电极丝首端与固定丝筒 6 右端，然后使电极丝在一定的拉力状态下，丝筒作逆时针方向旋转，将电极丝卷绕到丝筒上。丝筒 6 在作逆时针方向旋转的同时向右端移动，使金属丝在卷绕时按一定的螺旋节距整齐地绕在丝筒上，电极丝的排列节距约为 0.12~0.18 毫米之间，按采用电极丝的直径来决定。一般如选用 $\phi 0.1$ 的钼丝，则节距约为 0.12 毫米即可。

为使电极丝排列整齐，在丝筒前有导架 8 作定位，导架固定在设备上不作移动。当将一定长度的电极丝绕在丝筒上后，将电极丝剪断，并将电极丝的尾端 7 绕经一对导轮 1，再把尾端送回丝筒张紧后固定在丝筒左端，绕丝即为完毕。电极丝自丝筒引出，经一对导轮 2 回到丝筒形成电极丝快速移动的通道，处在上下一对导轮间的金属丝即为切割工作区。

电极丝每秒 10 米的移动线速度，由丝筒传动获得。丝筒直径为 $\phi 125$ 毫米，转速为 1440 转/分，由电动机直接带动，丝筒圆周线速度即为电极丝移动线速度。为了使 150~250 公尺的电极丝长时期的在 10 米左右的线速度移动，因之丝筒的运动，必须是时的作顺时针方向和逆时针方向旋转，当丝筒作顺时针方向运动时，丝筒右端在释放电极丝，左端在卷绕电极丝，丝筒本身在作自右向左的移动，排列释放与卷绕电极丝，此时处在上下一对导轮间工作区的电极丝上获得每秒 10 公尺自上向下的运动速度。反之，当丝筒作反时针方向运动时，丝筒左端在释放电极丝，右端卷绕电极丝，丝筒本身作自左向右的移动，排列释放与卷绕电极丝。此时处在上下一对导轮间切割工作区的电极丝获得每秒 10 公尺的自下向上的运动速度。

丝筒定时作顺逆方向旋转，是由控制三相电动机的倒顺向开关来达到的，当丝筒在顺时针方向旋转，丝筒右端在释放电极

丝，当电极丝释放离首端5尚有5公尺左右时，令倒顺开关动作使电动机作逆时针方向旋转，丝筒立即改变为右端卷电极丝、左端释放电极丝，丝筒继续按逆时针方向旋转至左端释放电极离尾端7尚有5公尺左右时，又令倒顺开关动作，使电动机作顺时针方向旋转。如此周而复始，顺利的解决了电极丝每秒10公尺的移动线速度问题。

按照使用电极丝的长度及电极丝移动的线速度就能计算出丝筒电动机的换向周期。

$$\text{换向周期} = \frac{\text{电极丝全长} - 2 \times \text{换向留量}}{\text{电极丝线速度}}$$

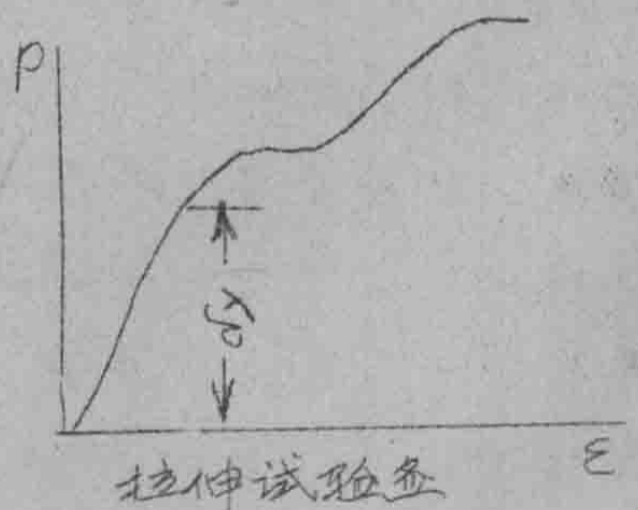
如果电极丝全长 = 200 米，换向留量 = 5 米，线速度 = 10 米/秒，则：

$$\text{换向周期} = \frac{200 - 2 \times 5}{10} = 19 \text{ 秒}$$

在电动机的使用上，令电动机每间隔19秒左右换向旋转是允许的。

在切割加工中，我们要求一对导轮之间作为切割工作区的电极丝，必须保持在张直状态。在电极丝的传动结构中，电极丝的张直是利用了材料本身特有的机械性质——弹性变形能。

我们知道通常用作电极丝的金属材料，均有一弹性极限值 Δy ， Δy 是电极丝承受拉伸而不致发生任何永久变形最大应力值，当材料在弹性范围内时，外力所作的功转变为储藏在材料内部的弹性变形能。这种弹性变形能就象拉长的橡皮筋一样，内部有一股张紧作用力。



利用这一原理，在卷绕电极丝到丝筒上去时，在电极丝上预加一在电极丝弹性极限范围内的拉力，使电极丝在弹性变形

的状态下卷绕到丝筒上去。这样就把外加的拉力贮藏到电极丝内部，使卷绕到丝筒上的电极丝本身恒有一张紧的拉力，用以达到电极丝张直的目的。

根据以上原理，电极丝材料必须采用弹性与能较好的材料，一般均选用钼丝做电极丝，如用 $\phi 0.1$ 毫米这一规格钼丝做电极丝绕线时预加的拉力约在150克左右。

一、主机

线切割机床主要由主机及数字程序控制台二部分组成，主机的进给操作信号由数字程序控制台操纵控制。

(一) 主机的技术特性：

| | | | |
|---|-----------------|-------------------|--------------------|
| 1 | 纵横导轨行程(坐标工作台) | 80 × 150 | 毫米 |
| 2 | 工件高度 | 50 | 毫米 |
| 3 | 每一脉冲进给量 | 0.001 | 毫米 |
| 4 | 加工精度 | ± 0.015 | 毫米 |
| 5 | 加工光洁度 | ▽ 6 ~ ▽ 7 | |
| 6 | 生产效率(稳定值) | 15 ~ 35 | 毫米 ² /分 |
| 7 | 功率 | 0.5 | 瓩 |
| 8 | 机床外形(长 × 宽 × 高) | 600 × 1000 × 1500 | 毫米 |

主机主要由(1)丝筒、(2)丝架、(3)坐标工作台、(4)床身等部分组成，丝筒、丝架、坐标工作台等主要部件在床身上面。机床本身为生铁铸件，内部安装机床电源电路，上侧部装有操作机床的控制面板及工具箱等。现将机床主要部件结构原理分述如下：

(一) 走丝筒部分

1、走丝筒的结构如各图所示，丝筒为一个 $\phi 125 \times 100$ 毫米的薄壁空心圆柱体，与主轴2、滚珠轴承4，一起安装在—对左右支架11上，支架11固定在拖板13上。在主轴2的右端，通过联轴45、9与电动机10相联接。联轴45的结构：

联轴 45 固定在主轴 2 的右端，用 $\phi 6$ 锥销固定。在联轴 45 上装有二只带有锥销的短轴，在短轴 7 上装有塑料套管，塑料套管即起绝缘作用，在切割加工时丝筒电极丝接触切割电源负极须与电动机接触线相隔绝，又起缓冲作用，对电动机换向瞬时的冲击作用力起缓冲作用。

联轴 49 装在电动机 10 的轴上，电动机 10 通过联轴 4 传动丝筒，所以电动机转速即为丝筒转速。电动机为立式三相功率 250 瓦转速每分钟为 1440 转。电动机与固定板 20 之间也应有绝缘套 21 使二者隔绝。

丝筒主轴装有二组减速齿轮组 12、传动丝杆 15、使拖板 13 和丝筒一起作左右向移动的排丝运动。丝筒每转一转拖板移动的距离即为排丝节距，一般如常用 $\phi 0.1$ 毫米的粗丝做电极丝，则丝筒每转一节的拖板移动量为 0.125 毫米即可。

减速齿轮组 12 的齿值即为丝筒每转一节的移动量与传动丝杆 15 牙距之比，如丝杆的牙距为 1.5 毫米，则丝筒主轴 2 与丝杆 15 的速比为 $\frac{0.125}{1.5} = \frac{1}{12}$ 。

为了便于调查拖板传动丝杆 15 与螺母的配合间隙，采用双螺母结构，固定螺母 19 紧旋在螺母座 18 上，旋动调整螺母 16 可调节丝杆与螺母的配合间隙。丝杆与螺母的配合间隙不应较大，间隙较大则在丝筒倒顺转换向处出现迷丝现象，容易在该处造成松丝。

在丝筒的两端应装挡圈，以防止断丝绕至轴上，丝筒端与支架之间应装防液挡嘴，以免工作液浸入滚珠轴承中去。

丝筒电动机倒顺转一般用水银开关控制，水银开关的特点是结构紧凑，动作灵敏，换向时响声及震动均很小，使用寿命也较长，也可用交流接触器组成倒顺控制线路。缺点是响声及震动较大，触点容易烧坏等，也有应用先进的无触点换向控制线路。

在丝筒拖板移动结构中，应装有安全行程保险装置，以防倒顺控制开关失误，拖板超出允许行程范围时，能及时切断电动机电源，使拖板传动丝杆等部件免遭损坏。

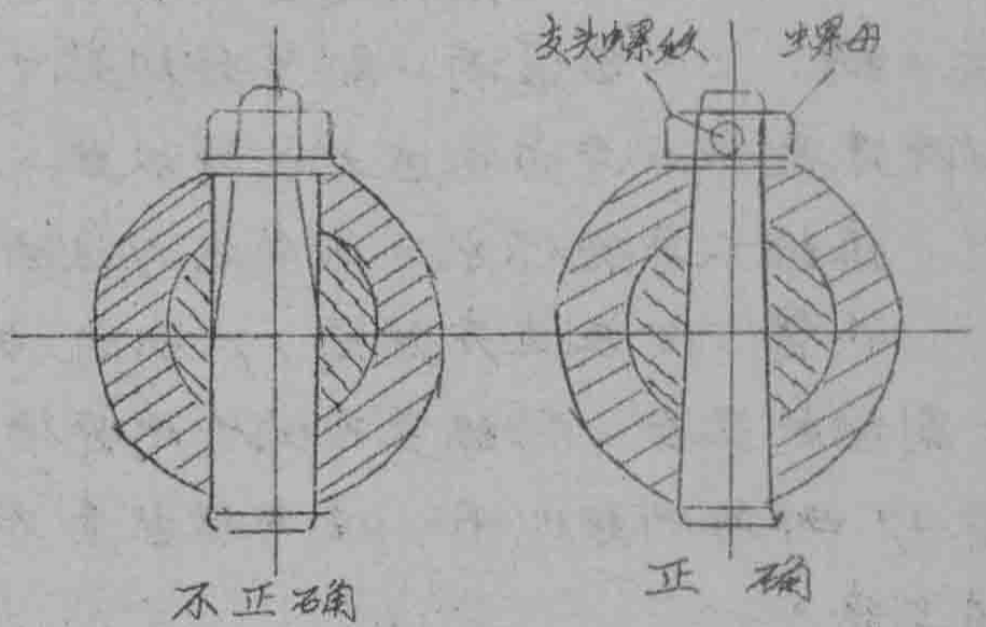
2. 走丝筒加工要点：

(1) 丝筒即是贮存电极丝又是使电极丝获得高速移动的传动元件，因之丝筒具体结构与加工精度是快速走丝机构的关键之一。

a、丝筒一般用45#钢制成，丝筒壁厚不宜大于1.5毫米，制作成薄壁的壳因主要是为了减少转动惯量，使丝筒在瞬时换向转动时，减少传递到联轴口处的扭曲力矩，使联轴口与主轴联接的轴销不因扭剪力矩过大而遭破坏。

b、丝筒加工时应严格保证内孔径对轴心的同心，在与主轴装配时要求径向跳动不大于0.03毫米，如在加工时壁厚不均匀，与装配时径向跳动较大，均会在丝筒高速旋转时出现剧烈跳动，会直接影响机床正常运转，影响加工精度等方已。

(2) 主轴与联轴口的联接。因为丝筒是处在频繁倒顺旋转的条件下工作，连接轴与联轴口的锥销是承受正反两个方向剪切力，因之锥销与销孔的配合已，要求达到完全的紧密吻合，如配合销不紧密，则锥销在正反剪切力的作用下，很易因疲劳而折断。因之在加工锥孔和锥销时，须严格检验两者是否达到紧密吻合。在锥销的紧固螺母上，应装有防止螺母松动的支头螺栓，以防锥销在日常使用中，在正反扭矩的作用下螺母发生松动而飞出（参3所示）



参 3

主轴与联轴口如采用平键作为联接元件时，同样应注意平键与主轴、联轴口键槽的公差配合问题，必须采用压配合。如果采用松动配合也很容易引起在频繁的正反剪切力的作用下而折断。

(3) 丝筒主轴与电动机装配时，应保持在同一中心线上。在加工丝筒的两个支架时，应注意[√]支架底部基准面与侧面的垂直度，滚珠轴承安装孔与底座基准的高度要一致。在装配时，丝筒与主轴装配后应校平衡。丝筒主轴、联轴口、电动机装配时检验转动是否灵活，丝筒的径向跳动应小于0.03毫米。如丝筒与电动机装配同心度不好，开车时会引起机床震动，联轴口与锥销等零件也很容易损坏。

(二) 丝架部分

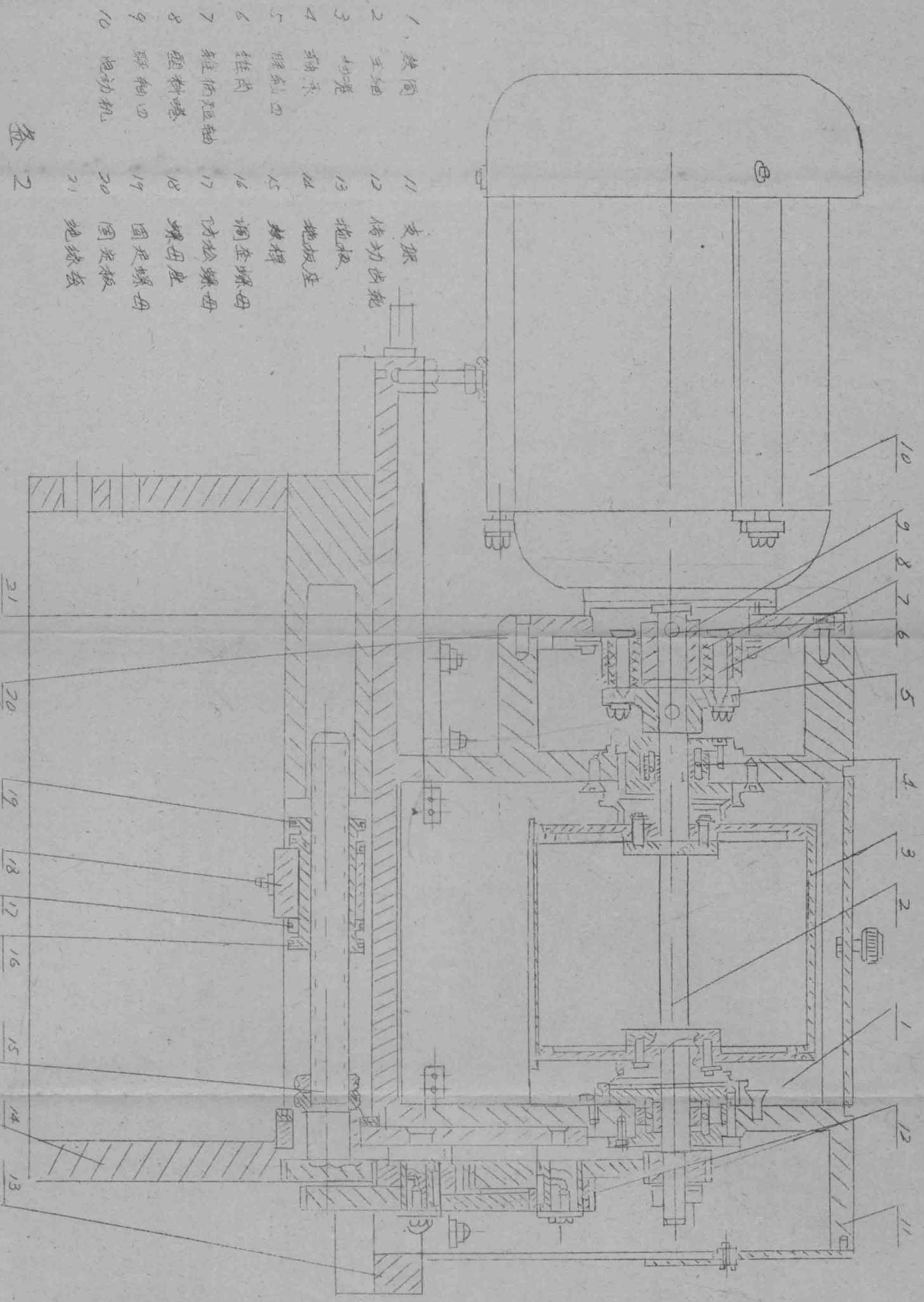
丝架的作用是将丝筒上的电极丝引出丝架二个上下支承的导轮，再返回到丝筒形成电极丝高速运动的通道。上下二个导轮之间的电极丝即为用以切割工件的工作区域。在丝架上装有工作液的供给系统。

1. 丝架结构

丝架安装在走丝筒与坐标工作台之间，丝架的主柱2紧固在坐标工作台的底座上，在主柱2上部装有基座11，在基座11上下两端各装有两条长臂5，长臂5向坐标工作台方向伸展的一端，上下各装有一副导轮机构7，使从左边丝筒17引出的电极丝作水平方向运动的电极丝，经上导轮后作垂直方向运动，再经下导轮作水平方向运动返回到丝筒。

长臂5向右边走丝筒17方向伸展的一端，上下各装有一副挡丝宝石，挡丝宝石的作用是使电极15返回卷绕到走丝筒17时起排队作用，使电极丝整齐地按规定的节距卷绕到丝筒上去。

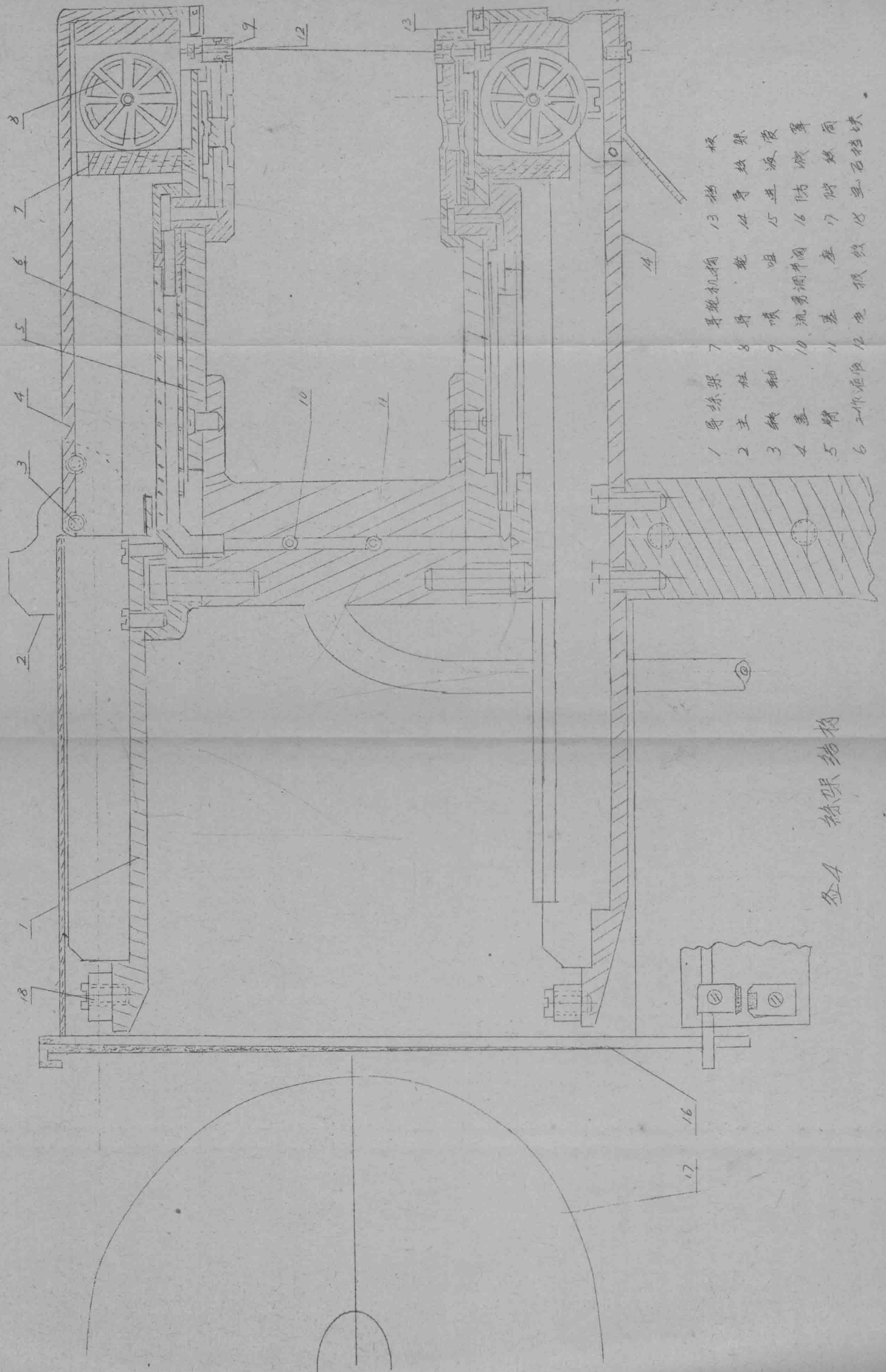
在线切割加工过程中，需要在电极丝与工件间供给充分的工作液，工作液的供给系统就装在丝架上。在前节“快速走丝”



- | | | | |
|----|------|----|------|
| 1 | 铁筒 | 11 | 支板 |
| 2 | 定子 | 12 | 传动轴 |
| 3 | 转子 | 13 | 拖板 |
| 4 | 轴承 | 14 | 拖板座 |
| 5 | 轴套 | 15 | 轴套 |
| 6 | 轴套 | 16 | 调整螺母 |
| 7 | 锥形短轴 | 17 | 防松螺母 |
| 8 | 塑料壳 | 18 | 螺母底座 |
| 9 | 联轴轴 | 19 | 固定板 |
| 10 | 电动机 | 20 | 绝缘板 |
| | | 21 | |

图 2

~1/4~



- | | | | | | | |
|---|-----|----|------|----|---|---|
| 1 | 导流架 | 7 | 导流机构 | 13 | 轴 | 板 |
| 2 | 主转 | 8 | 轮 | 14 | 身 | 架 |
| 3 | 轴 | 9 | 喷 | 15 | 进 | 管 |
| 4 | 盖 | 10 | 流 | 16 | 防 | 管 |
| 5 | 臂 | 11 | 勇 | 17 | 附 | 管 |
| 6 | 工作 | 12 | 在 | 18 | 石 | 块 |

图4 轴承结构