

伺服曲柄压力机设计计算

目录

0	引言	3
1	伺服曲柄压力机技术参数	5
2	伺服曲柄压力机原理与性能设计分析	6
	2.1 伺服曲柄压力机原理与分析	6
	2.2 伺服系统原理与分析	7
	2.3 曲柄压力机数控方法设计	7
	2.4 开关磁阻伺服曲柄压力机的特性分析	9
3	伺服曲柄压力机工艺曲线设计分析	12
	3.1 工艺曲线设计需求分析	12
	3.2 曲柄滑块运动分析	12
	3.2.1 滑块位移与曲柄转角的关系	12
	3.2.3 滑块加速度与转角的关系	14
	3.3 曲柄滑块运动工艺曲线设计计算	14
	3.3.1 滑块运动工艺曲线与曲柄转角的关系	15
4	伺服曲柄压力机负载曲线设计分析	34
	4.1 曲柄、连杆与滑块	34
	4.2.1 连杆与滑块的受力分析	34
	4.2.2 曲轴受转矩：	35
5	伺服曲柄压力机电机功率设计分析	38
5	伺服曲柄压力机电机功率设计分析	38
	5.1 伺服曲柄压力机的能量设计分析	38
	5.3 电机驱动转矩与压力机负载扭矩的关系：	38
7	伺服曲柄压力机工作机构设计	39
	参考文献	41

0 引言

1 伺服曲柄压力机技术参数

2 伺服曲柄压力机原理与性能设计分析

3 伺服曲柄压力机工艺曲线设计分析

4 伺服曲柄压力机负载曲线设计分析

5 伺服曲柄压力机电机功率设计分析

6 伺服曲柄压力机传动机构设计

7 伺服曲柄压力机工作机构设计

0 引言

金属的锻压加工大量采用曲柄压力机，也称为冲床，据不完全统计，我国在用的曲柄压力机冲床数量高达数百万台。目前，锻压生产所用曲柄压力机由高转差率的电动机驱动，由刚性离合器和摩擦离合器控制，存在安全性差、能耗高、故障率高的缺陷。

高转差率电动机的效率低于 GB18613-2012《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》，从 2012 年 9 月 1 日起被强制淘汰，选用高能效的电动机成为压力机换代升级的首要目标。

“开关磁阻电机系统是一种机电一体化节能型调速电机系统。它由开关磁阻电动机、功率变换器及控制器组成。同传统的直流及交流电机调速系统比较，具有以下优点：电机结构坚固、制造成本低；效率高，不仅在额定输出状态下，而且在宽广的调速范围内也能保持高效率运行；一般系统效率达 80%以上；启动转矩大、启动电流小；制动性能好，能实现再生制动，节约电能效果显著；系统调控性能好，四象限控制灵活；具有无刷结构，适合于在高粉尘、高速、易燃易爆等恶劣环境下运行；可以在各行各业应用。”（摘自《中华人民共和国国家发展和改革委员会 中华人民共和国科学技术部 国家环境保护总局 公告 2005 年 第 65 号》）采用节能的开关磁阻电机替代高耗能的传统电机成为企业节能的发展方向。

目前，国外的伺服压力机技术采用永磁伺服技术，抗冲击性能不好，可靠性低、成本高，没有形成对传统压力机的全面替代。

1999 年以来，由山东科汇电力自动化有限公司研发生产的开关磁阻伺服系统，在压力机领域获得广泛应用。在山东理工大学赵婷婷教授的技术支持下，开关磁阻伺服压力机分别在青岛益友锻压机械有限公司、扬力集团等单位进行了研制，各吨位系列的开关磁阻伺服压力机相继诞生，并开始投入批量生产。实际应用证明，与现有压力机比较，开关磁阻伺服压力机的优势明显、特点突出，特别是高效节能、智能数控自动化与高可靠性的独特优势，受到广大用户的积极响应，并获得一致好评。

淄博市能源监测部门的监测，给出了开关磁阻伺服螺旋压力机比摩擦式螺旋压力机节能 67.86%的结果（引自《淄博市能源监测中心检测报告》）

编号 J1010138)，由此，当地政府颁布文件，用节能数控压力机强制淘汰摩擦压力机（引自淄经信节字[2011]77号）。

电机能效新国标的强制执行与开关磁阻伺服电机技术的成熟，为传统压力机的升级换代以及冲压生产节能智能化带来发展机遇。开关磁阻伺服压力机是具有感知、决策、执行功能的智能锻压装备。智能锻压装备作为高端装备制造业的重点发展方向和信息化与工业化深度融合的重要体现，大力培育和发展智能锻压装备产业对于加快锻压业转型升级，提升生产效率、技术水平和产品质量，降低能源资源消耗，实现锻压生产过程的智能化和绿色化发展具有重要意义。

1 伺服曲柄压力机技术参数

5000 吨伺服曲柄压力机技术参数

1、公称压力 F_g /kN: 50000

2、公称压力行程 S_g /mm: 5.84

$$A_1 = P \times \eta \times t = 230 \times 0.3 \times 60 \div 45 = 92 \text{kw}$$

根据 $A_1 = 0.315 F_g h_0$ 得: $h_0 = 5.84 \text{mm}$

3、滑块行程 s /mm: 400

4、行程次数（额定值） n_g /spm: 45

5、行程次数调速范围 n /spm: 30-120

2 伺服曲柄压力机原理与性能设计分析

2.1 伺服曲柄压力机原理与分析

伺服压力机由开关磁阻伺服电机驱动，与传统机械压力机结构不同之处是没有飞轮、离合器、气动制动器及其控制系统。结构组成为：开关磁阻伺服电机经过减速驱动曲柄连杆滑块运动；电机轴设置电磁制动器，电机轴与曲轴端设置位置传感器；制动器和位置传感器连接电机控制器（图 2-1）。

结构件的连接关系为：伺服电机输出轴键固连小带轮，小带轮通过V 带传动连接大带轮，大带轮键固连传动轴的一端，传动轴通过轴承连接机身，传动轴的另一端键固连小齿轮，小齿轮与大齿轮相互齿轮传动，大齿轮键固连接曲柄轴的一端，曲柄轴通过轴承连接机身，曲柄轴的中部通过轴承连接连杆的大端，连杆的另一端滑动连接滑块。

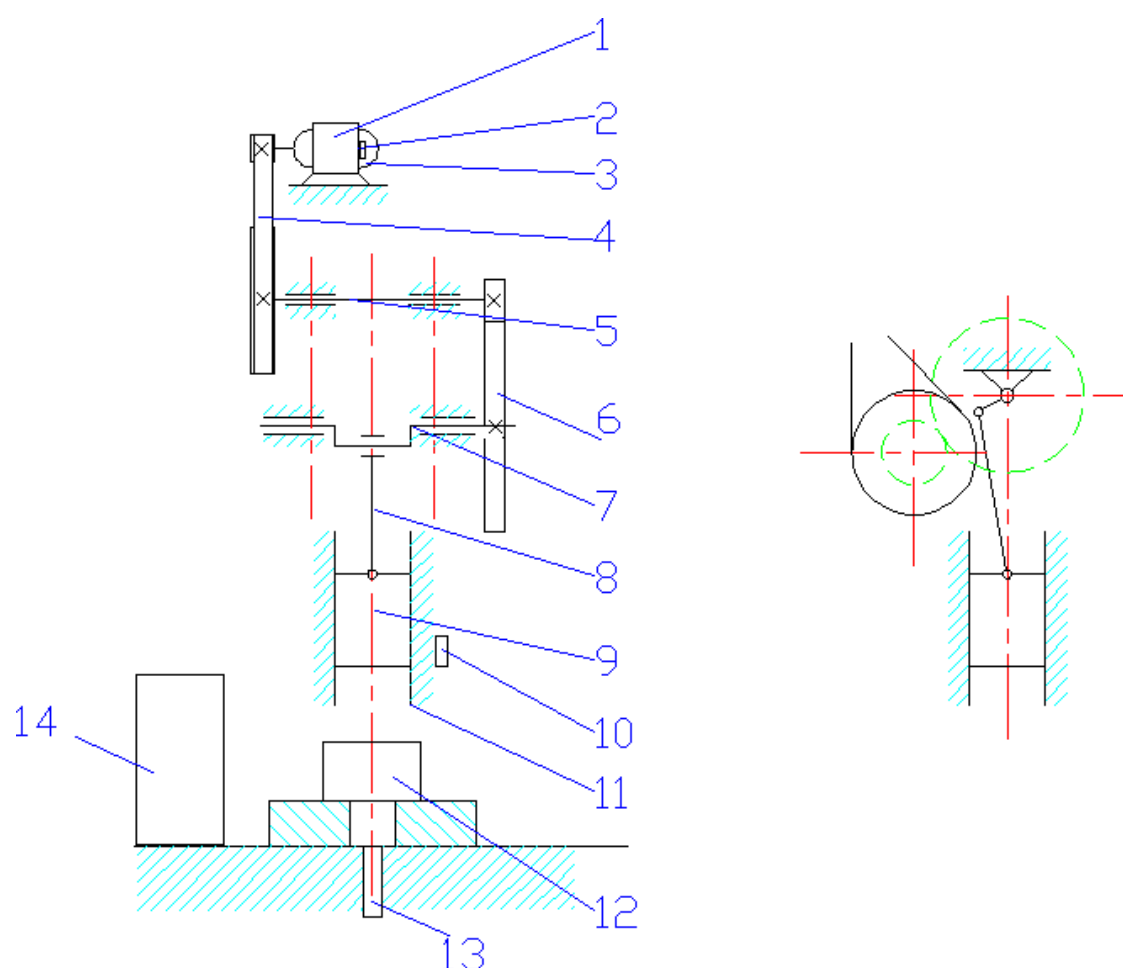


图 2-1 伺服曲柄压力机原理图

1、开关磁阻伺服电机 2、角位移传感器 3、制动器 4、皮带传动 5、传动轴
6、齿轮传动 7、曲轴 8、连杆 9、滑块 10、传感器 11、机身 12、模具 13、
液压缸 14、电机控制器

工作原理：

压力机起动时，开关磁阻伺服电机以大起动转矩由零速加速旋转，通过减速传动带动曲柄连杆滑块运动，电机在起动加速过程提供的能量储存于系统转动惯量，其能量为 $\frac{1}{2} J_e \omega_e^2$ ，此能量（可由电机转速数控值决定）大于等于额定工作能量 E_g ，压力行程时，电机全速降，释放此能量，实施冲压；位置传感器给出滑块上止点的位置，通过电机控制器传给伺服电机。单击状态下，当滑块靠近上止点时，伺服电机减速，制动器实施制动，滑块停在上至点，完

成一个工作循环。

开关磁阻伺服曲柄压力机与传统曲柄压力机的原理比较：

$$E = \frac{1}{2} J_e \omega^2 = \frac{1}{2} J_1 (\omega^2 - \omega_2^2) \quad (2-1)$$

2.2 伺服系统原理与分析

伺服系统有永磁伺服系统和无永磁伺服系统两种。考虑到压力机的冲击性负载特性，主运动采用无永磁体的开关磁阻伺服系统驱动。

开关磁阻伺服系统（SRD）由电机（SRM）及控制器两大部分组成。其电机定、转子由冲有凸极和凹槽的硅钢冲片叠压而成。转子上既无绕组也无永磁体，定子的相绕组为集中绕组。结构设计如图 2-2 所示。以图中三相 12/8 极定、转子的相对位置作为起始位置，依次给 B→C→A 相绕组通电，转子即会逆着励磁顺序以逆时针方向连续旋转；反之，则电机顺时针方向转动。绕组电流是单向的，有效避免了直通短路。

当绝缘栅双极晶体管（IGBT）S1、S2 导通时，A 相绕组从直流电源 U 吸收电能，而当 S1、S2 关断时，绕组电流经续流二极管 D1、D2 继续流通，并回馈给电源 U。因此，SRD 的特点是具有再生作用，系统节电、效率高。

转子上固定有齿盘，定子上装有检测齿盘转动的光电传感器，转子角位移以电脉冲信号的方式传送给 SRD 控制器，由 SRD 控制器控制电机的工作运动。

SRD 控制器包括嵌入式微处理器、PLD 可编程逻辑器件、IGBT 驱动电路、光电隔离、通信接口、显示屏、键盘、电力电子器件及软件（图 2-3）。微处理器把输入信息、反馈信息处理计算，结果传给可编程逻辑器件，PLD 控制驱动单元和 IGBT 的导通与关断，因定、转子的两凸极对齐位置下电感最大 L_{max} ，不对齐位置下电感最小 L_{min} ，可通过控制电流的斩波值 i 、开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ，来控制电机运行。

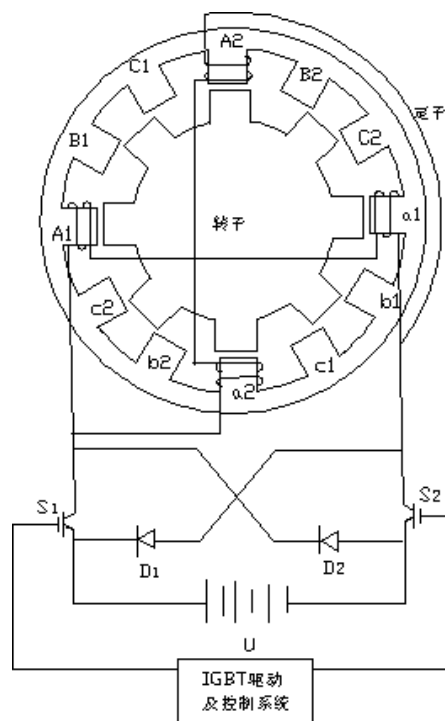


图 2-2 SRM 控制原理图

2.3 曲柄压力机数控方法设计

驱动压力机的开关磁阻伺服系统工作在用户设定的转速数值。具体数控方法如下：

电机定子相电流和转子瞬时转矩及其运动方程为：

$$M_e = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2-2)$$

$$M_e - M_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-3)$$

式中 i --相电流(A)

θ --转子角位移

M_e --电机转矩 (N·m)

t --时间(s)

M_L 为负载转矩(N·m)

J --电机转子及工作运动部分的转动惯量 (kg·m²)

L --相电感(H)

ω --电机角速度(s⁻¹)

考虑 $\frac{dL}{d\theta}$ 电感上升沿或下降沿的斜率近似为 K ，则电机的转矩可写为

$$M_e = \begin{cases} \frac{1}{2} K i^2, \omega_{n+1} > \omega_n \\ -\frac{1}{2} K i^2, \omega_{n+1} < \omega_n \end{cases}, K \in R^+ \quad (2-4)$$

在额定转速以下电机运行在电流斩波状态，把 (2-3)、(2-4) 式合并，并写成数值的形式，则斩波电流瞬时值为：

$$i = \begin{cases} \sqrt{\frac{J \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{t_{n+1} - t_n} + M_L}{K/2}}, & \omega_{n+1} > \omega_n \\ \sqrt{\frac{J \frac{\omega_n - \omega_{n+1}}{t_{n+1} - t_n} - M_L}{K/2}}, & \omega_{n+1} < \omega_n \end{cases} \quad (2-5)$$

由电流计算值，给定电流上限幅值 $i_H = i + \Delta i_0$ 和下限幅值 $i_L = i - \Delta i_0$ 。若检测电流值 $i_c > i_H$ ，IGBT S1、S2 同时关断，迫使电流下降；若检测电流 $i_c < i_L$ ，IGBT 导通，电流又开始上升，以此实现对电流斩波值的限定。

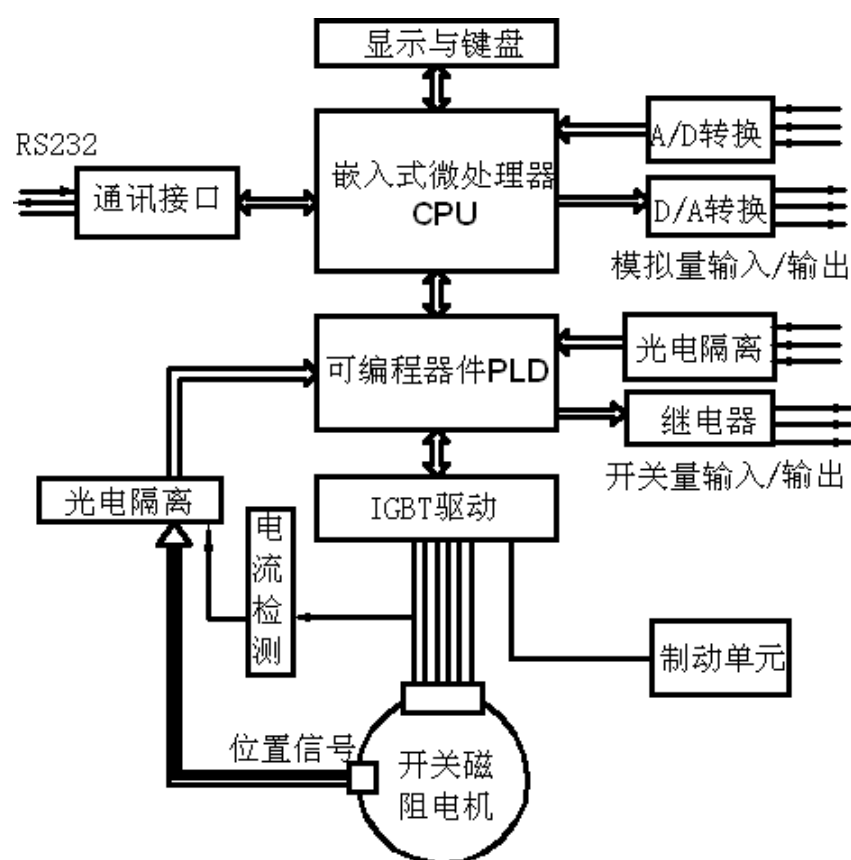


图 2-3 SRD 控制器系统框图

数控方法由图 3 的控制电路实现。根据反馈的转子位置信号，确定上止点和下止点的位置，并计算出转速反馈值 ω_n ，根据 PID 算法使 ω_{n+1} 逼近 ω ，根据公式 (5) 计算电流斩波值 i ；PLD 根据位置编码通过驱动电路控制 IGBT 的导通与关断。

2.4 开关磁阻伺服曲柄压力机的特性分析

开关磁阻伺服系统与其它系统相比有以下优点：

(1) 系统效率高

开关磁阻伺服在其宽广的调速范围内，整体效率比其它调速系统高出至少 10%。在低转速及非额定负载下高效率则更加明显。

(2) 调速范围宽，低速下可长期运转

开关磁阻调速带负荷长期运转的转速范围可在零到最高转速内，电机及控制器的温升低于工作在额定负载时的温升。

(3) 无过冲起动电流

开关磁阻伺服具有软起动特性，电机起动过程没有交流电机起动电流大于额定电流 5~7 倍的现象，而是起动电流平滑增加至所需的电流。设定的电机起动时间越长，起动电流越小。

(4) 高起动转矩，低起动电流

开关磁阻伺服起动转矩达到额定转矩的 150% 时，起动电流仅为额定电流的 30%。

(5) 三相输入电源缺相或控制器输出缺相不烧电动机

开关磁阻伺服若三相输入电源缺相或者欠功率运行或者停转，不会烧毁电机和控制器。电动机输入缺相只会导致电动机输出功率减小，或者有可能导致电动机无法起动。

(6) 过载能力强

开关磁阻伺服过载能力强，当负载短时大于额定负载时，转速下降，保持最大输出功率，

不出现过流现象。当负载恢复正常时，转速恢复到设定转速。

(1) 功率器件控制错误不会引起短路

开关磁阻伺服的上下桥臂功率器件和电机的绕组串联，不存在发生功率器件控制错误导致短路而烧毁的现象。

(2) 可靠性高

开关磁阻伺服的转子无绕组和鼠笼条，电机可高速运转而不变形，机械强度和可靠性均高于其它类设备。定子线圈嵌装容易，端部短而牢固，热耗大部分在定子，易于冷却。转子无永磁体，可有较高的最大允许温升。

(3) 功率因数高

普通交流电机空载时功率因数为 0.2~0.4，满载时为 0.86~0.89；而开关磁阻伺服的功率因数空载时可达 0.995，满载时可达 0.98。

与现有压力机比较，开关磁阻伺服曲柄压力机的突出优势为：

(1) 运动数控 曲柄压力机滑块速度 $v = \frac{\omega}{i} R \left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha \right)$ ，电机角速度 ω 的闭环数控，使滑块运动曲线可根据工艺要求进行数字设置，可以设计特殊的工作特性曲线，进行高

难度、高精度加工，能够实现低速锻冲急回的变速功能。

(2) 生产率高 可以根据工况和自动化连线的需要，在较大范围内数字设定滑块行程次数，其宽范围调速功能，可以有效提高生产率，彻底解决了“不能用连续行程压延较大较深的零件”的难题。

(3) 能量数控 开关磁阻数控曲柄压力机加压能量可数控，数控其速度，即数控其能量。

(4) 智能数控 对不同工艺、不同材料可调用计算机存储的不同工作曲线，使压力机的加工性能、加工范围大大提高。工艺曲线、时间、产量、耗电量等数据可由微机智能存储和处理，易实现制造过程信息化管理的目标。

(5) 制件精度高 没有液压过载保护装置，不存在液体受压变形影响闭合高度，床身弹性变形误差小，压力重复精度高，制件精度高。

(6) 可视化 加压速度、压力、压制时间等工艺参数实时反馈并显示。

(7) 通用性提高 现有压力机根据工艺不同而种类繁多，开关磁阻数控压力机可依工艺调节，而满足不同工艺的需求，使同一台压力机工作在不同工况。

(8) 模具寿命高 因压制工件的能量和速度可准确数控，使模具受冲击速度减小，寿命提高。

(9) 结构简化 曲柄压力机没有了大皮带轮、离合器、液压过载保护装置等，结构极大地得到简化。因滑块能量数控，在吨位仪指示下，打击力不会超载，无需过载保护装置。

(11) 上止点位置可控 摆动工艺的上止点可以任意设定，正常停机时，确保滑块停在上止点，编码器反馈位置信号，在停机前电机减速；当滑块处在上止点时，电机轴制动，确保滑块停在上止点。

(12) 安全性高 在电机制动和制动器作用下，滑块可以在任何位置紧急制动停止。

(13) 节能 在额定点以下工作，开关磁阻电机比其他电机耗能低；在低速阶段，节能更加明显。数控伺服压力机没有离合器结合能耗，滑块停止后，电机停转，也没有了电机、皮带轮空转，能耗显著降低。同时，开关磁阻电机在制动时可变为发电机，能量回馈，重新利用。

(14) 工作可靠性高 与其他电机系统相比，开关磁阻电机转子即无绕组也无永磁体，机械强度高；电机在三相输入电源缺相或者欠功率运行或者闷车的情况下，不会烧毁电机和控制器；功率器件不会发生因控制错误导致短路而烧毁的现象，并且温升高。

(15) 不会闷车 当故障停车时，电机反转回程，不会发生闷车现象。

(16) 可以保压 在下止点压紧工件时，滑块可以短时间停留，实现液压机的保压功能。

(17) 易维护 没有易损易耗件，减少了维护工作、维护时间和维护费用。

(18) 使用方便 模具调试时，能够以极慢的速度寸动下行，不会发生故障，不用配置微调传动，调模试模极为方便，需要外设调模试模液压机，可以在导柱导套接触后，试冲工件，不会发生闷车。

(19) 多机同步控制 多台压机连线时，开关磁阻数控系统更容易实现同步控制。

开关磁阻伺服曲柄压力机即保持了机械驱动种种优点，又改变了其工作特性不可调的缺点，能极方便地改变滑块的运动曲线，获得不同的工件变形速度，使机械驱动的成形装备也具有了柔性化和智能化的特点，工作性能和工艺适应性大大提高，保证了冲压件的质量；同时，结构简化，重量减轻，安装、调试、使用方便，无离合器及其气动系统，减少维修、降低能耗，可靠性提高，安全性提高，实现主运动的数字化信息化控制。

开关磁阻伺服曲柄压力机的高效节能、智能数控性能优越，能够逐步替代现有的交流电机和直流电机驱动的各种曲柄压力机，实现传统产业的升级换代。开关磁阻伺服压力机提升了成形加工产业的制件精度的整体水平，将使我国制造业水平进入了高技术低消耗的新阶段。

3 伺服曲柄压力机工艺曲线设计分析

3.1 工艺曲线设计需求分析

由于冲压工艺有冲裁、弯曲、拉深等多种加工方法，不同的加工方法对压力行程、速度等工艺参数有相应的要求，伺服曲柄压力机应满足不同工艺的参数即运动曲线要求。

3.2 曲柄滑块运动分析

3.2.1 滑块位移与曲柄转角的关系

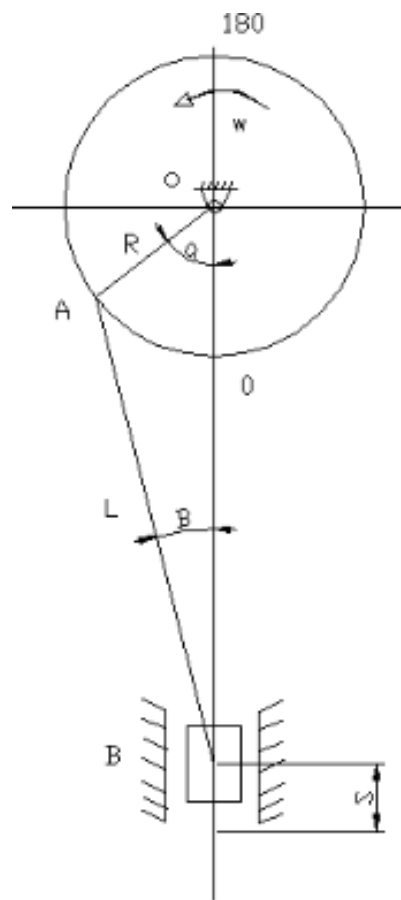


图 3-1 曲柄连杆滑块机构运动分析图

图 3-1 中：

- (1) O 点为曲柄的回转中心；
- (2) A 点为连杆与曲柄的连接点；
- (3) B 点为连杆与滑块的连接点，B 点的运动代表滑块的运动（即分析时滑块可看作点运动）；
- (4) OA 表示曲柄半径R；
- (5) \overline{AB} 表示连杆长度L；
- (6) α 为曲柄与铅垂线的夹角，顺时针为正方向；
- (7) ω 曲柄旋转的角速度，逆时针为正方向；
- (8) s 代表滑块距下死点的距离，向上为正；
- (9) v 代表滑块作往复直线运动的速度，向下为正方向；
- (10) 曲轴在最高点为 180° ，最低点为 0° 度。曲轴从 180° 逆时针正转经过 90° 到 0° ，随后正转经过 -90° 到 -180° 为一工作周期。

根据图 3-2，滑块位移 s 的数学表达式为

$$s = R + L - (R \cos \alpha + L \cos \beta) \quad (3-1)$$

$$\lambda = \frac{R}{L} \quad (\lambda \text{ 连杆系数})$$

由三角函数公式可得： $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$

$$\text{由图 3-2 结构, 可得: } \sin \beta = \frac{R \sin \alpha}{L} = \lambda \sin \alpha$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}$$

$$\therefore s = R[(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda}(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha})]$$

将 $\cos \beta$ 按泰勒公式展开，取前两项得：

$$\cos \beta = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \alpha$$

$$\text{又 } \sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2}$$

$$\therefore s = R \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{4} \lambda (1 - \cos 2\alpha) \right] \quad (3-2)$$

假设，曲柄上止点为 0 度，下止点为 180 度。令 $\alpha = \pi - \theta$

$$\therefore s = R \left[(1 + \cos \theta) + \frac{1}{4} \lambda (1 - \cos 2\theta) \right] \quad (3-3)$$

(3-3) 式中， s 为滑块位移，向上为正方向； λ 为连杆系数， $\lambda = \frac{R}{L}$ ；

R 为曲柄半径。

3.2.2 滑块速度与曲柄转角的关系

根据运动学中位移和速度的微分方程 $v = \frac{ds}{dt}$

又因速度正方向向下，可列以下速度公式

$$v = - \frac{d(2R - s)}{dt} = - \frac{ds}{dt} = - \frac{ds}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = - \frac{ds}{d\alpha} (-\omega) = \omega R \left(\sin \alpha + \frac{1}{2} \lambda \sin 2\alpha \right)$$

$$\text{其中 } -\omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

$$v = \omega R \left(\sin \theta - \frac{\lambda}{2} \sin 2\theta \right) \quad (3-4)$$

(3-4) 式中, ω 为曲柄的角速度, v 为滑块速度, 向下为正方向。

3.1.1 滑块加速度与转角的关系

利用相同的原理可对速度公式进行时间求导得滑块的角加速度

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d}{d\alpha} \left[\omega R \left(\sin\alpha + \frac{1}{2} \lambda \sin 2\alpha \right) \right] (-\omega) = -\omega^2 R (\cos\alpha + \lambda \sin 2\alpha)$$

$$\text{令 } \alpha = \pi - \theta$$

$$a = \omega^2 R (\cos\theta + \lambda \sin 2\theta) \quad (3-5)$$

由以上分析可得滑块的运动学公式:

滑块运动与曲柄转角的关系式

$$\begin{aligned} \therefore s &= R \left[(1 + \cos\theta) + \frac{1}{4} \lambda (1 - \cos 2\theta) \right] \\ v &= \omega R \left(\sin\theta - \frac{\lambda}{2} \sin 2\theta \right) \\ a &= \omega^2 R (\cos\theta + \lambda \sin 2\theta) \end{aligned}$$

(3-6)

滑块运动与时间的关系式

$$\text{匀速运动时, 令 } \theta = \omega t$$

$$\begin{aligned} \therefore s &= R \left[(1 + \cos\omega t) + \frac{1}{4} \lambda (1 - \cos 2\omega t) \right] \\ v &= \omega R \left(\sin\omega t - \frac{\lambda}{2} \sin 2\omega t \right) \\ a &= \omega^2 R (\cos\omega t + \lambda \sin 2\omega t) \end{aligned} \quad (3-7)$$

由公式 (3-6)、(3-7) 可知:

1 滑块的运动特性在曲柄角速度一定时只与曲柄转角刚性有关, 与其他因素没有关系。不同的行程次数时, 由于滑块的速度 v , 加速度 a 都与曲柄的角速度有关, 在不同的行程次数下, 滑块的速度 v , 加速度 a 是变化的。

2 滑块的行程只是在上下止点间循环滑动, 不可随意的刚性缩短或增长。

3 ω 是曲柄滑块的转速, 其大小是由伺服电机通过传动机构按照一定的传动比转换

过来参数 ($\omega_{\text{电}} = \omega_{\text{曲}} \times i$, i 为传动比), 所以计算机控制伺服电动机的角速度可以直接控

制滑块的运动。考虑到 $\theta = \omega \times t$, 滑块运动曲线随时间发生变化。

3.2 曲柄滑块运动工艺曲线设计计算

3.2.3 滑块运动工艺曲线与曲柄转角的关系

根据位移 s 、速度 v 、加速度 a 的公式，

$$\begin{aligned} \therefore s &= R(1 + \cos\theta) + \lambda(1 - \cos 2\theta) \\ v &= \omega R \left(\sin\theta - \frac{\lambda}{2} \sin 2\theta \right) \\ a &= \omega^2 R (\cos\theta + \lambda \sin 2\theta) \end{aligned}$$

式中， R 为曲柄半径， $R = S/2 = 140/2 = 70\text{mm}$ ，

λ 为连杆系数， $\lambda=0.1$

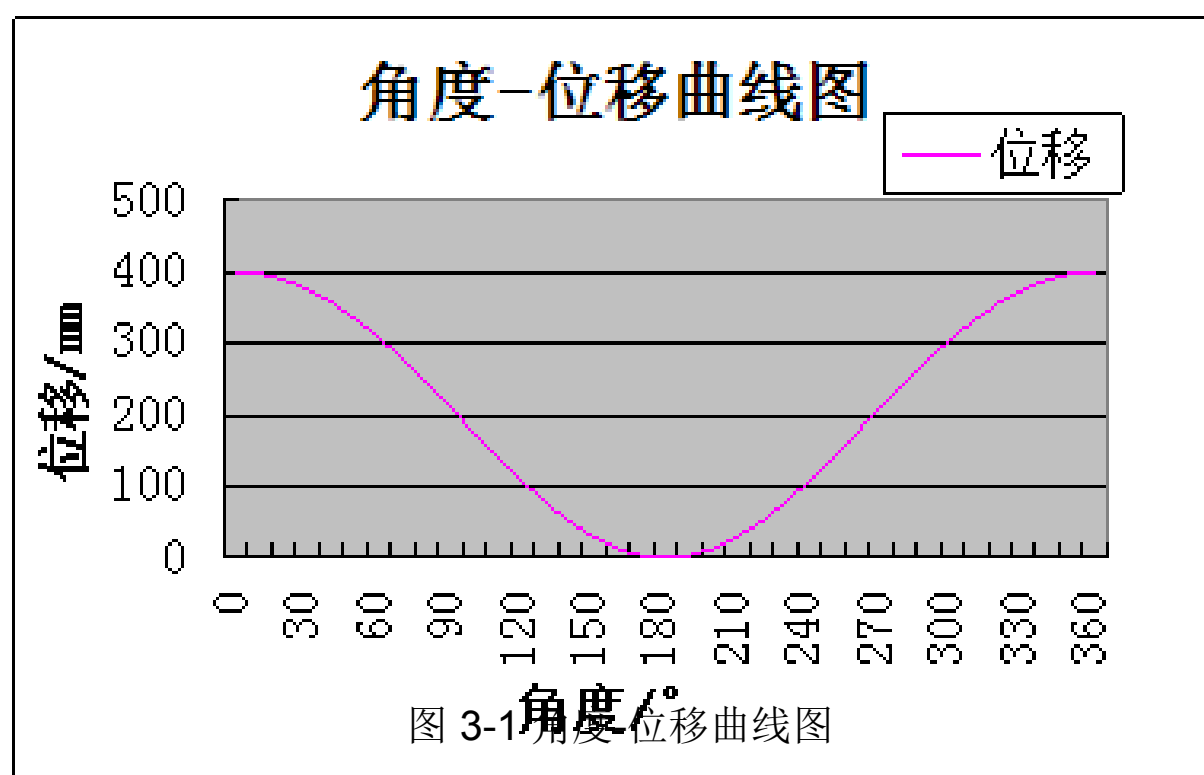
θ 为曲柄转角。

计算得：

表 3-1 角度-位移的对应数据角

序号	度 θ /°	位移 s/mm
	0	400
	10	397.3
	20	389.1
	30	375.7
	40	357.3
	50	334.4
	60	307.5
	70	277.2
	80	244.4
	90	210
	100	174.9
	110	140.4
	120	107.5
	130	77.3
	140	50.9
	150	29.2
	160	13.2
关键点	167	$S_g=5.84$
	170	3.3
	180	0
	190	3.3
	200	13.2

210	29.2
220	50.9
230	77.3
240	107.5
250	140.4
260	174.9
270	210
280	244.4
290	277.2
300	307.5
310	334.4
320	357.3
330	375.7
340	389.1
350	397.2
360	400



当行程次数分别为:

$$n_1 = 18,$$

$$n_2 = 27,$$

$$n_g = 45,$$

$$n_4 = 72,$$

$$n_5 = 90, (\text{/min}^{-1}) \text{ 时,}$$

计算得如下数据:

表 3-2 行程次数 $n_1=18$, 滑块速度、加速度数据

序号	角度 $\theta / ^\circ$	位移 s/mm	曲轴转速 n_1 / rpm	滑块速度 $v_1 / \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	滑块加速度 $a_1 / \text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$
	0	400	18	0	781.6
	10	397.3		59.0	766.5
	20	389.1		116.8	722.2
	30	375.7		172.1	650.9
	40	357.3		223.7	556.6
	50	334.4		270.2	444.4
	60	307.5		310.1	319.7
	70	277.2		342.1	188.6
	80	244.4		364.8	56.6
	90	210		376.9	-71.0
	100	174.9		377.7	-190.1
	110	140.4		366.4	-297.4
	120	107.5		342.808079 8	-390.8363343
	130	77.3		307.3	-469.1
	140	50.9		260.8	-532.0
	150	29.3		204.8	-579.8
	160	13.2		141.0	-613.3
关键点	167	Sg=5.84		93.1	-628.5
	170	3.3		71.9	-633.0
	180	0		0	-639.5
	190	3.3		-71.9	-633.0
	200	13.2		-141.0	-613.3
	210	29.3		-204.8	-579.8
	220	50.9		-260.8	-532.0
	230	77.3		-307.3	-469.1
	240	107.5		-342.8	-390.8
	250	140.4		-366.3	-297.4
	260	174.9		-377.7	-190.1
	270	210		-376.9	-71.0
	280	244.4		-364.8	56.6
	290	277.2		-342.1	188.6
	300	307.5		-310.1	319.7

310	334.4	-270.2	444.4
320	357.3	-223.7	556.6
330	375.7	-172.1	650.9
340	389.1	-116.8	722.1
350	397.2	-59.0	766.5
360	400	0	781.6

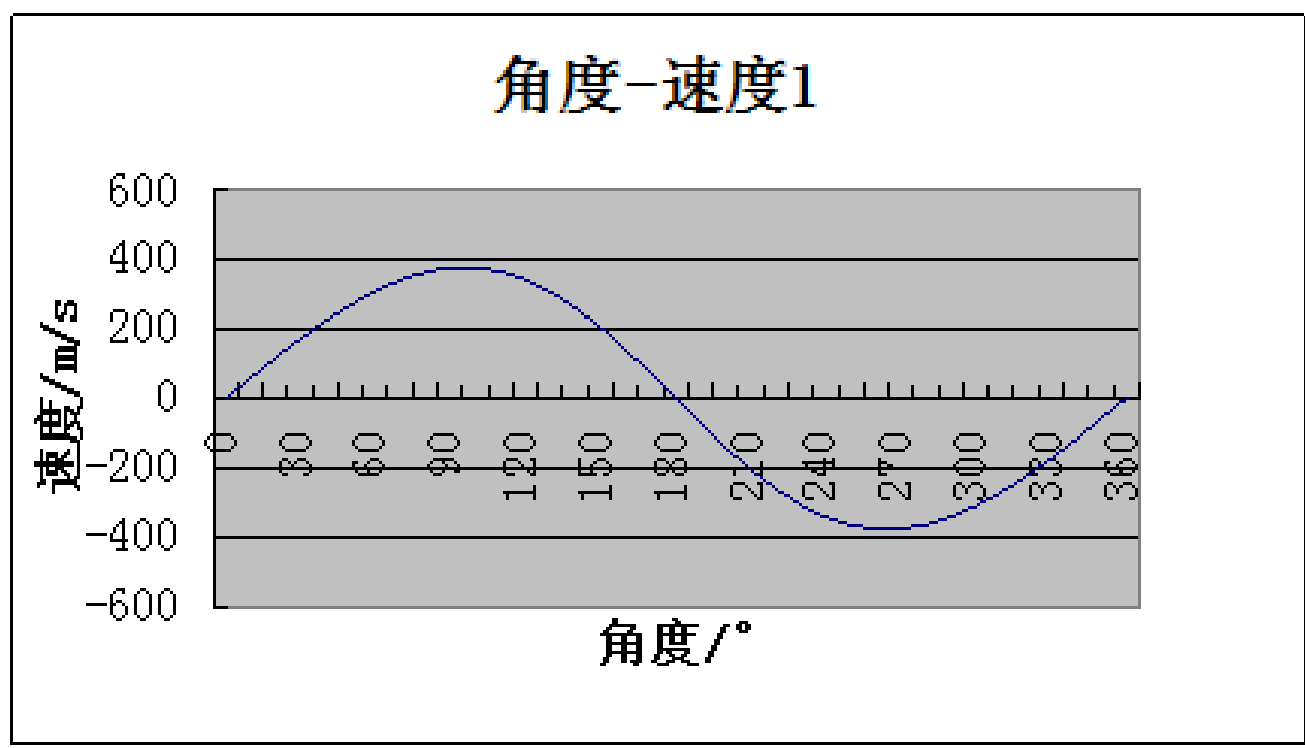


图 3-2 角度-速度曲线图

表 3-3 行程次数 $n_1=27$, 滑块速度、加速度数据

序号	角度	位移	曲轴转速	滑块速度	滑块加速度
	$\theta / ^\circ$	s/mm	n_1 / rpm	$v_1 / \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$a_1 / \text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$
0	0	400	27	0.0	1758.8
10	10	397.2		88.5	1724.8
20	20	389.1		175.2	1624.9
30	30	375.7		258.3	1464.6
40	40	357.3		335.6	1252.6
50	50	334.4		405.3	1000.0
60	60	307.5		465.2	719.5
70	70	277.2		513.2	424.4
80	80	244.4		547.2	127.4
90	90	210		565.5	-159.9
100	100	174.9		566.6	-427.9
110	110	140.4		549.6	-669.3
120	120	107.5		514.2	-879.4
130	130	77.3		461.0	-1055.5
140	140	50.9		391.3	-1197.0
150	150	29.2		307.2	-1304.7

	160	13.2	211.6	-1380.0
关键点	167	Sg=5.84	139.6	-1414.2
	170	3.3	107.9	-1424.3
	180	0	0.0	-1439.0
	190	3.3	-107.9	-1424.3
	200	13.2	-211.6	-1380.0
	210	29.2	-307.2	-1304.7
	220	50.9	-391.3	-1197.0
	230	77.3	-461.0	-1055.5
	240	107.5	-514.2	-879.4
	250	140.4	-549.6	-669.3
	260	174.9	-566.6	-427.9
	270	210	-565.5	-159.9
	280	244.4	-547.2	127.4
	290	277.2	-513.2	424.4
	300	307.5	-465.2	719.5
	310	334.4	-405.3	1000.0
	320	357.3	-335.6	1252.6
	330	375.7	-258.3	1464.6
	340	389.1	-175.2	1624.9
	350	397.2	-88.5	1724.8
	360	400	0.0	1758.8

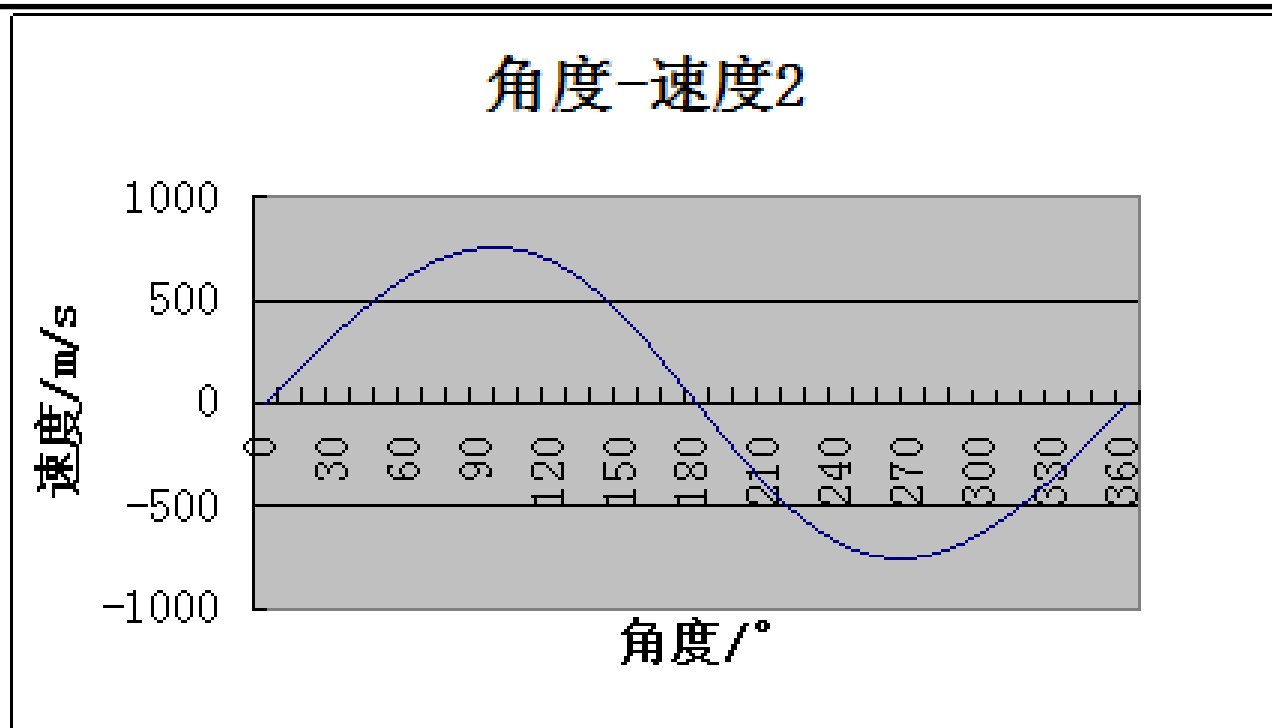


图 3-3 角度-速度

表 3-4 行程次数 $n_1=45$, 滑块速度、加速度数据

序号	角度	位移	曲轴转速	滑块速度	滑块加速度
	$\theta / ^\circ$	s/mm	n_1 / rpm	$v_1 / \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$a_1 / \text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$

0	400	45	0	4885.454179
10	397.2		147.5	4791.1
20	389.1		292.0	4513.7
30	375.7		430.4	4068.3
40	357.3		559.4	3479.3
50	334.4		675.5	2777.7
60	307.5		775.3	1998.5
70	277.2		855.3	1178.7
80	244.4		912.0	353.8
90	210		942.4	-444.1
100	174.9		944.2	-1188.5
110	140.4		915.9	-1859.2
120	107.5		857.0	-2442.7
130	77.3		768.3	-2931.9
140	50.9		652.2	-3325.1
150	29.2		512.0	-3624.2
160	13.2		352.6	-3833.2
关键点	167	Sg=5.84	232.7	-3928.3
	170	3.3	179.7	-3956.5
	180		0	-3907.2
	190		-179.7	-3956.5
	200	13.2	-352.6	-3833.2
	210	29.2	-512.0	-3624.2
	220	50.9	-652.2	-3325.1
	230	77.3	-768.3	-2931.9
	240	107.5	-857.0	-2442.7
	250	140.4	-915.9	-1859.2
	260	174.9	-944.2	-1188.5
	270	210	-942.4	-444.1
	280	244.4	-912.0	353.8
	290	277.2	-855.3	1178.7
	300	307.5	-775.3	1998.5
	310	334.4	-675.5	2777.7
	320	357.3	-559.4	3479.3
	330	375.7	-430.4	4068.3
	340	389.1	-292.0	4513.7
	350	397.2	-147.5	4791.1
	360	400	0	4885.4

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/417046144126006134>