

喷气织机主气缸传动机构特性

无锡轻工业学院

陈怀清

国内喷气织机大多采用单独供气方式，提供引纬气流的主要部件是主气缸。主气缸活塞的运动有两种传动方式：其一是曲柄连杆机构传动活塞作往复运动，如图1，曲柄1通过连杆2传动活塞3在气缸4内作往复运动；其二是等径凸轮传动主气缸的活塞，如图2，等径凸轮1回转时推动转子2，转子2的芯轴固定在活塞杆上，因而活塞3在气缸4内作往复运动。这两种气缸经多年实践证明对老机改造的喷气织机是能够满足织造工艺要求的。为进一步了解主气缸的工作原理，我们对这两种传动机构的运动规律进行了理论分析，从活塞运动规律来阐述主气缸的工作特性。

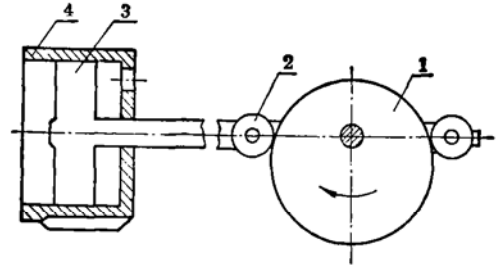


图2 等径凸轮式主气缸

一、曲柄式主气缸的活塞运动特性

1. 运动分析

在七十年代初无锡各有关纺织厂设计制造了用曲柄连杆机构传动的主气缸，其主要参数为：曲柄半径3厘米，连杆长度18.8厘米；气缸直径14.6厘米。结构示意图参阅图1。为了了解该机构的工作特性，兹对活塞的运动分析如下：

作机构简图3，曲柄回转中心 O ，曲柄半径 OA ，连杆 AC ，当曲柄 OA 绕回转中心 O 点转动时，从起始位置 OA_0 转过 θ 角到达 OA 位置，活塞从 C_0 到 C ，其位移为 S 。设曲柄半径 $OA=r$ ，连杆长度 $AC=l$ ，作 AM 垂直于 OA_0 ，则 $OM=r\cos\theta$ ， $A_0M=OA_0-OM=r-r\cos\theta$ ， $AM=r\sin\theta$ 。因此可建立活塞位移方程：

$$S=MC-MC_0$$

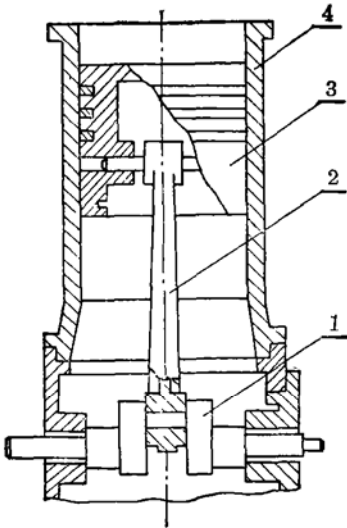


图1 曲柄连杆式主气缸

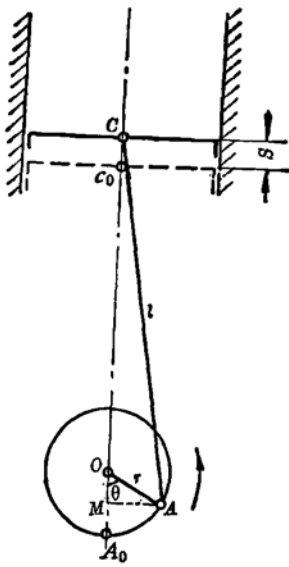


图3 曲柄式主气缸机构简图

在三角形 AMC 中:

$$MC = \sqrt{AC^2 - AM^2} = \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}$$

同时:

$$MC_0 = A_0 C_0 - A_0 M = l - (r - r \cos \theta)$$

$$\begin{aligned} \therefore S &= \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta} - [l - (r - r \cos \theta)] \\ &= l \left(1 - \frac{r^2}{l^2} \sin^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} - [l - (r - r \cos \theta)] \quad (1) \end{aligned}$$

又因为:

$$\left(1 - \frac{r^2}{l^2} \sin^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{r^2}{l^2} \sin^2 \theta$$

$$\sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$$

代入(1)式并化简得:

$$S = \left(r - \frac{r^2}{4l} \right) + \frac{r^2}{4l} \cos 2\theta - r \cos \theta$$

若以曲柄的角速度 ω 和时间 t 的乘积代表角位移 θ , 即 $\theta = \omega t$, 代入上式得活塞位移方程:

$$S = \left(r - \frac{r^2}{4l} \right) + \frac{r^2}{4l} \cos 2\omega t - r \cos \omega t \quad (2)$$

活塞的速度方程:

$$v = \frac{ds}{dt} = r\omega \sin \omega t - \frac{r^2 \omega}{2l} \sin 2\omega t \quad (3)$$

活塞加速度方程:

$$a = \frac{dv}{dt} = r\omega^2 \cos \omega t - \frac{r^2}{l} \omega^2 \cos 2\omega t \quad (4)$$

由方程式(2)、(3)、(4)可以作活塞的位移、速度和加速度曲线如图4、图5和图6。

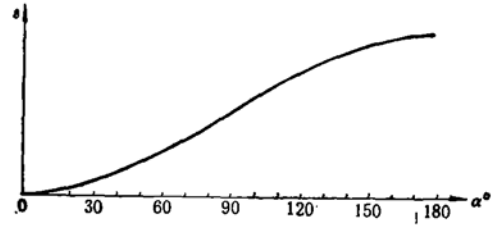


图4 曲柄式主气缸活塞位移曲线

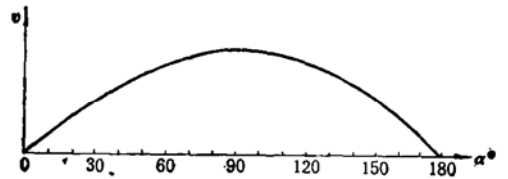


图5 曲柄式主气缸活塞速度曲线

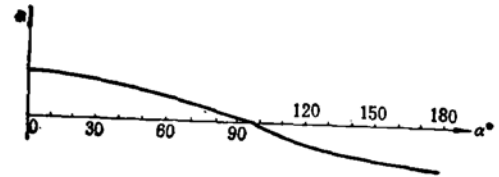


图6 曲柄式主气缸活塞加速度曲线

按照喷气织机引纬工艺要求, 当纬纱从定长盘上定长后, 经脱纱器引入主喷管喷入梭口时, 气流必须有足够的速度才能具有足够的牵引力将纬纱引过梭道。主喷管喷射气流的速度与活塞的运动速度直接有关, 也就是说当气缸容积和主喷管直径不变时, 主喷管内的气流速度与活塞速度成正比。由于活塞速度是按图5曲线变化的, 因此我们必须研究一下这样的活塞速度变化规律是否符合织造工艺的要求。大家都知道, 喷气织机在主轴 $130^\circ \sim 135^\circ$ 时是定长盘脱纱时间, 纬纱从定长盘上脱下来之前, 出气阀门就应该打开, 活塞继续运动使具有一定压力和一定流

速的空气从主喷管里喷出，从脱纱开始到引纬结束这一段时间内，若活塞具有较大的速度，则主喷管喷出的空气也必具有一定的流速。若在引纬阶段，活塞速度变小的话，则主喷管内的空气流速也将变小。因此我们必须研究一下曲柄连杆传动的活塞最大速度在什么时候出现，它与织机工艺时间的配合是否良好？为此可用公式(4)并求其极大值，

$$\text{令 } \frac{dv}{dt} = 0$$

$$r\omega^2 \cos\omega t - \frac{r^2}{l}\omega^2 \cos 2\omega t = 0$$

将 $\cos 2\omega t = (2\cos^2\omega t - 1)$ 代入上式解得：

$$\cos\omega t = \frac{l \pm \sqrt{l^2 + 8r^2}}{4r}$$

将 $r=3$ 厘米， $l=18.8$ 厘米代入上式得：

$$\cos\omega t = -0.1517$$

$$\omega t = (180^\circ - 81^\circ 17') = 98^\circ 43'$$

就是说活塞从压气开始转过 $98^\circ 43'$ 就

达最大速度 v_{\max} ，由公式(3)知：

$$\begin{aligned} v_{\max} &= r\omega \left(\sin 98^\circ 43' - \frac{r}{2l} \sin 2 \times 98^\circ 43' \right) \\ &= 3\omega \left(0.9885 + \frac{3}{2 \times 18.8} \times 0.2996 \right) \\ &= 3.04\omega \text{ 厘米/秒} \end{aligned}$$

当织机转速 $n=360$ 转/分， $\omega = \frac{\pi n}{30} = 37.68$

则：

$$\begin{aligned} v_{\max} &= 3.04\omega = 3.04 \times 37.68 \\ &= 114.5 \text{ 厘米/秒} \end{aligned}$$

由(4)式可以求得最大加速度 a_{\max} ：

$$\text{令 } \frac{da}{dt} = 0 \quad -r\omega^3 \sin\omega t + \frac{2r^2}{l}\omega^3 \sin 2\omega t = 0$$

解得： $\omega t=0$ 代入(4)式得：

$$\begin{aligned} a_{\max} &= r\omega^2 \cos 0^\circ - \frac{r^2}{l}\omega^2 \cos 0^\circ \\ &= 3\omega^2 - \frac{9}{18.8}\omega^2 \\ &= 2.52\omega^2 \text{ 厘米/秒}^2 \end{aligned}$$

表1 曲柄式主气缸的活塞运动特性

项 目	活塞运动特性	一 般 规 律	曲柄式气缸(无锡造)特性
曲柄半径		r	$r=3$ 厘米
连杆长度		l	$l=18.8$ 厘米
活塞直径		D	$D=14.6$ 厘米
活塞冲程		$S_{\max}=2r$	$S_{\max}=6$ 厘米
气缸容积		$V = \frac{\pi}{4} D^2 S_{\max}$	$V=1003$ 厘米 ³
运动方程	位 移	$S = \left(r - \frac{r^2}{4l} \right) + \frac{r^2}{4l} \cos 2\omega t - r \cos \omega t$	
	速 度	$v = r\omega \left(\sin \omega t - \frac{r}{2l} \sin 2\omega t \right)$	
	加 速 度	$a = r\omega^2 \left(\cos \omega t - \frac{r}{l} \cos 2\omega t \right)$	
活塞最大速度		$v_{\max}=3.04\omega$ 厘米/秒	当 $n=360$ 转/分， $v_{\max}=114.5$ 厘米/秒
活塞最大加速度		$a_{\max}=2.52\omega^2$ 厘米/秒 ²	当 $n=360$ 转/分， $a_{\max}=3581$ 厘米/秒 ²
最大速度时间 (以气缸曲柄表示)		$\theta(v_m) = \cos^{-1} \frac{l \pm \sqrt{l^2 + 8r^2}}{4r}$	$\theta(v_m)=98^\circ 43'$
最大速度时间 (以织机主轴表示)		$\theta'(v_m) = \text{供气时间} + \theta(v_m)$	当供气时间为 65° 时 $\theta'(v_m)=163^\circ 43'$
最大加速度时间 (以气缸曲柄表示)		$\theta(a_m) = 0^\circ$	$\theta(a_m)=0^\circ$
最大加速度时间 (以织机主轴表示)		$\theta'(a_m) = \text{供气时间} + \theta(a_m)$	当供气时间为 65° 时 $\theta'(a_m)=0^\circ + 65^\circ = 65^\circ$

当织机转速 $n=360$ 转/分, $\omega=37.68$ 代入上式得:

$$a_{\max}=2.52(37.68)^2=3581 \text{ 厘米/秒}^2$$

通过上面分析可以归纳曲柄式主气缸的活塞运动特性见表 1。

2. 压气过程

喷气织机的主气缸是一只小型空气压缩机, 空气受压的过程是多变过程, 气体压力和容积的变化遵循如下方程:

$$PV^m=K \quad (5)$$

式中: P ——气缸中空气的压力;

V ——气缸中空气的容积;

m ——压缩指数, 小型空压机可取 1.25;

K ——常数。

空气压缩机的 PV 变化曲线如图 7, 当活塞处于最右位置时 (相当于图 1 的最低位置), 气缸容积 V_1 , 对应的空气状态 P_1, T_1 。压气时活塞自 1' 向左运动 (相当于图 1 向上运动), 空气被逐渐压缩, 此时空气容积缩小, 压力升高, 空气状态按 1~2 曲线变化。当活塞到达 2' 位置, 气缸中空气容积为 V_2 , 压力为 P_2 。若压力 P_2 使出气阀门打开, 从而主喷管喷出气流, 活塞再继续向左运动, 气缸内压力不再升高, 气体状态按照 2~3 线段变化。当活塞达最左位置 3' (相当于图 1 中最高位置), 排气过程结束, 这时左端尚留有余隙 V_3 。之后活塞向右运动, 出气阀门关闭, 余隙中的空气沿膨胀曲线 3~4 改变自身状态, 压力大大降低。活塞到达 4' 时气缸内空气压力低于一个大气压, 吸气阀门打开, 自由空气 (一个大气压力的) 进入气缸直到活塞回到右端起始位置。4~1 称为吸气过程, 吸入时为了克服阻力, 气缸内的空气略低于一个大气压 (约 0.98 公斤/厘米²)。1~2~3~4 就是主气缸的一个工作循环。气缸余隙 V_3 应愈小愈好, 因为 V_3 过大它的膨胀过程愈长, 将缩短吸气过程并减少每一循环的吸气体量, 这样就降低了气缸容积的利用率, 一般

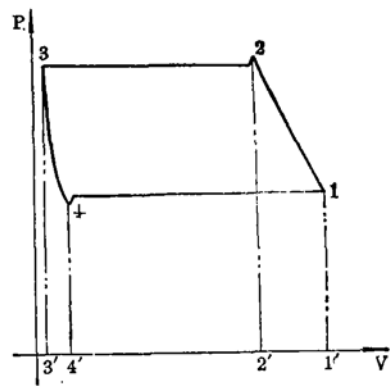


图 7 气缸压容变化曲线

控制在 3% 以内。

若吸气时气缸内空气压力 $P_4 \approx P_1 \approx 0.98$ 公斤/厘米², 主喷管喷射纬纱时的工作压力 $P_2=1.5$ 公斤/厘米², 将这些数据代入 (5) 式:

$$P_1 V_1^m = P_2 V_2^m = K$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{0.98}{1.5} \right)^{\frac{1}{1.25}} = 0.7113$$

考虑气缸余隙 3%, 活塞自 1' 压缩到 2' 所走的距离为 S_{1-2} , 可计算如下:

$$\begin{aligned} S_{1-2} &= (1+3\%)(1-0.7113)S_{\max} \\ &= 0.2974S_{\max} = 0.2974 \times 6 \\ &= 1.78 \text{ 厘米} \end{aligned}$$

就是说活塞从压气开始的起始位置前进了 1.78 厘米时, 气缸内的空气被压缩到 1.5 公斤/厘米² 的压力, 因此 1.78 厘米是工作压力为 1.5 公斤/厘米² 的升压行程, 升压阶段 (空气压缩阶段) 的时间可用曲柄转过多少角度来表示, 其值可由位移公式 (2) 计算:

$$S_{1-2} = 1.78 = \left(r - \frac{r^2}{4l} \right) + \frac{r^2}{4l} \cos 2\omega t - r \cos \omega t$$

将 $r=3$ 厘米, $l=18.8$ 厘米代入上式解得:

$$\omega t = 70^\circ 35'$$

即从活塞开始压气, 曲柄转过 $70^\circ 35'$, 活塞行程为 1.78 厘米, 气缸内压力达到 1.5 公斤/厘米², 出气阀门打开, 开始喷射纬纱。气缸活塞开始压气的时间就是织机的供气时间, 因此, 若织机工艺规定供气时间是织机

主轴转过 65° ，则气缸曲柄 $70^\circ 35'$ 相当于织机主轴转过 $65^\circ + 70^\circ 35' = 135^\circ 35'$ 。若织机定长盘的脱纱时间是 $130^\circ \sim 135^\circ$ ，由于在脱纱之前出气阀门就应该打开，因此要获得气缸压力 1.5 公斤/厘米² (扣除一个大气压即为 0.5 公斤/厘米²) 的话，供气时间应略为提早些。

二、等径凸轮式主气缸的活塞运动特性

1. 运动分析

凸轮式气缸活塞的运动规律决定于凸轮的轮廓曲线，以上海使用得比较广泛的等径凸轮式主气缸为例^[1]进行分析：活塞运动规律由几段不同性质的曲线连接而成， $0 \sim 50^\circ$ 为升压阶段， $50^\circ \sim 150^\circ$ 为等速运动， $150^\circ \sim 170^\circ$ 为等减速运动， $170^\circ \sim 180^\circ$ 为静止时期。位移方程分别如下：

$0^\circ \sim 50^\circ$ 简谐运动：

$$S_{1-t} = \frac{H}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{\beta} \omega t_1 \right) \quad (6)$$

$50^\circ \sim 150^\circ$ 等速运动：

$$S_{2-t} = S_1 + v_2 t_2 \quad (7)$$

$150^\circ \sim 170^\circ$ 等减速运动：

$$S_{3-t} = S_2 + v_2 t_3 - \frac{1}{2} a t_3^2 \quad (8)$$

$170^\circ \sim 180^\circ$ 静止时期：

$$S_{4-t} = S_3 \quad (9)$$

式中： S_1 ——第一阶段末的活塞位移（由设计资料知为 2 厘米）；

S_2 ——第二阶段末的活塞位移；

S_3 ——第三阶段末的活塞位移，亦即活塞总位移（ 5.2 厘米）；

H ——简谐运动辅助圆直径（ 2.17 厘米）；

β ——简谐运动辅助圆圆周角（ $61^\circ \approx 1.05$ 弧度）；

ω ——凸轮角速度（等于织机主轴角速度）；

t ——运动时间， t_1 、 t_2 、 t_3 是第一、二、三阶段的运动时间；

v_2 ——等速运动阶段即第二阶段的加速度；

a ——等减速运动阶段的加速度。

由方程(6)、(7)、(8)可以求得三个阶段的速度方程：

$$0^\circ \sim 50^\circ \quad v_{1-t} = \frac{H\pi\omega}{2\beta} \sin \frac{\pi}{\beta} \omega t_1 \quad (10)$$

$$50^\circ \sim 150^\circ \quad v_{2-t} = v_2 \quad (11)$$

$$150^\circ \sim 170^\circ \quad v_{3-t} = v_2 - a t_3 \quad (12)$$

$$170^\circ \sim 180^\circ \quad v_{4-t} = 0 \quad (\text{静止})$$

由方程式(6)、(7)、(8)及(10)、(11)、(12)可作出 $0 \sim 180^\circ$ 时间内的活塞位移、速度和加速度曲线如图 8、图 9 和图 10。

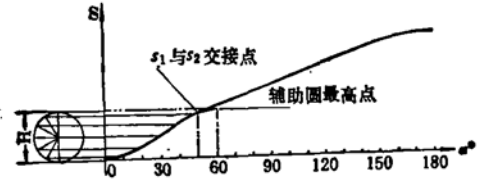


图 8 凸轮式主气缸位移曲线

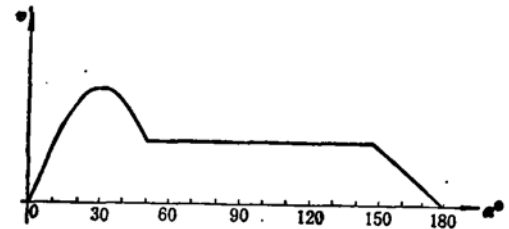


图 9 凸轮式主气缸速度曲线

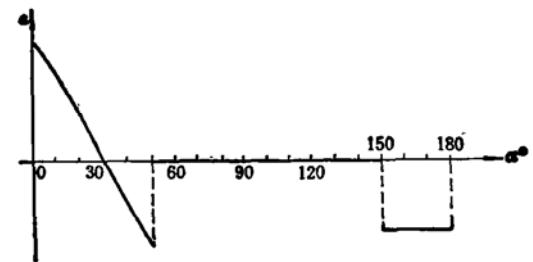


图 10 凸轮式主气缸加速度曲线

用分析曲柄式气缸相同的方法，可以求得凸轮式气缸的活塞最大速度出现在 $\theta(v_m) = 30^\circ 30'$ ，它的最大速度值 $v_{max} = 3.24\omega$ 。当织机转速 $n = 360$ 转/分， $v_{max} = 123$ 厘米/秒。

最大加速度出现在 $\theta(a_m) = 0^\circ$ 。当 $n = 360$ 转/分，最大加速度值 $a_{max} = 9.4\omega^2 = 13200$ 厘米/秒²。凸轮式主气缸活塞运动特性如表2。

表2 凸轮式主气缸的活塞运动特性

项 目	活塞运动特性	一 般 规 律	等 径 凸 轮 气 缸 特 性
活 塞 直 径		D	$D = 16$ 厘米
活 塞 冲 程		S_{max}	$S_{max} = 5.2$ 厘米
气 缸 容 积		$V = \frac{\pi}{4} D^2 S_{max}$	$V = 1045$ 厘米 ³
位 移 方 程 (由设计者选定)		$S_{1-t} = \frac{H}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{\beta} \omega t_1 \right)$ $S_{2-t} = S_1 + v_1 t_2$ $S_{3-t} = S_2 + v_2 t_3 - \frac{1}{2} a t_3^2$	$0^\circ \sim 50^\circ$ 为 S_{1-t} $50^\circ \sim 150^\circ$ 为 S_{2-t} $150^\circ \sim 170^\circ$ 为 S_{3-t}
活 塞 最 大 速 度		$v_{max} = 3.24\omega$ 厘米/秒	$n = 360$ 转/分， $v_{max} = 123$ 厘米/秒
活 塞 最 大 加 速 度		$a_{max} = 9.4\omega^2$ 厘米/秒 ²	$n = 360$ 转/分， $a_{max} = 13200$ 厘米/秒 ²
最大速度时间(以凸轮轴表示)		$\theta(v_m) = \frac{\beta}{2}$	$\beta = 61^\circ$ ， $\theta(v_m) = 30^\circ 30'$
最大速度时间(以织机主轴表示)		$\theta'(v_m) = \text{供气时间} + \theta(v_m)$	供气时间 80° 时 $\theta'(v_m) = 110^\circ 30'$
最大加速度时间(以凸轮轴表示)		$\theta(a_m) = 0^\circ$	$\theta(a_m) = 0^\circ$
最大加速度时间(以织机主轴表示)		$\theta'(a_m) = \text{供气时间} + \theta(a_m)$	供气时间 80° 时 $\theta'(a_m) = 80^\circ$

2. 压气过程

凸轮式主气缸在设计时，选定活塞升压行程 2 厘米，凸轮转角 $0^\circ \sim 50^\circ$ 为升压阶段，若供气时间定为 80° ，那么，定长盘脱纱时间 130° 时凸轮刚好转过 50° ，活塞走完升压阶段 2 厘米的动程。活塞的最大动程为 $S_{max} = 5.2$ 厘米。由公式(5)及(6)可以算出脱纱时刻气缸内的空气压力 P_2 可达 1.74 公斤/厘米²，所以在引纬开始时凸轮式气缸的气压大于曲柄式气缸。

三、结 束 语

前面对曲柄式及凸轮式两种喷气织机主气缸的活塞运动进行了分析，对目前使用比较广泛而气缸容积近似相等的两种气缸进行了对比，可归纳它们的特性于表 1、表 2，从

而知道：

(1) 在定长盘脱纱时刻，曲柄式气缸的气压略低于凸轮式气缸。

(2) 若织机车速 $n = 360$ 转/分，在定长盘脱纱时刻曲柄式气缸的活塞速度约为 95.6 厘米/秒，脱纱之后活塞速度继续提高，到 $163^\circ 43'$ 达最大值 114.5 厘米/秒，气流引纬阶段刚好是活塞具有最大速度之时。凸轮式气缸虽然活塞最大速度达 123 厘米/秒，但在定长盘脱纱时活塞速度已由最大值下降到 63 厘米/秒，引纬时活塞是以 63 厘米/秒等速运动，引纬阶段未曾利用其最大速度。

(3) 凸轮式气缸最大加速度比曲柄式大得多，因此其机械振动较大。

参 考 资 料

[1] 《织机》，上海纺织工学院编，82 页。