

机动水稻插秧机秧爪控制滑道的 计算机辅助设计

梁 锋 潘文渊

吴伟贤 陆俊杰

(农业工程系)

(广东省水电学校)

提 要

本文根据水稻秧苗特点, 定出机动插秧机秧爪在分插秧全过程的理想状态, 归纳了秧爪尖相对运动轨迹的经验方程, 从而得到控制滑道的中心线和轮廓线的方程并绘制出图样, 计算过程由微型电子计算机完成。这一方法的成功, 大大提高设计效率, 将为插秧机同类型机构的优化设计提供参考。

已在全国鉴定的 2Z 系列机动水稻插秧机的分插秧部件——秧爪采用转臂滑道机构控制。这种机构具有较准确地实现所设想的秧爪运动轨迹的优点, 从而使插秧机得到良好的插秧质量。

转臂滑道机构的结构见图 1。

分插轮转臂以一定速度匀速回转, 秧爪排与分插轮转臂为铰接, 控制拐臂与秧爪排端部固定连接, 拐臂端部装有滚子, 其运动受滑道控制。

机构简化为图 2。

设 O 为分插轮轴中心;

P 为秧爪排 (秧爪固定横梁) 中心;

OP 为分插轮转臂;

PM 为秧爪, M 点为秧爪尖;

PN 为控制拐臂,

N 点为滑道滚子中心;

NPM 为刚体。

V_m 为机器前进方向, ω 为分插轮回转方向。

转臂滑道机构的设计过去一直使用经验方法, 滑道中心线由多段不同曲率的圆弧组成, 所得结果并非最佳值。为了逐步实现滑道数据的优化选择, 我们初步应用电子计算机进行辅助设计并取得成果。

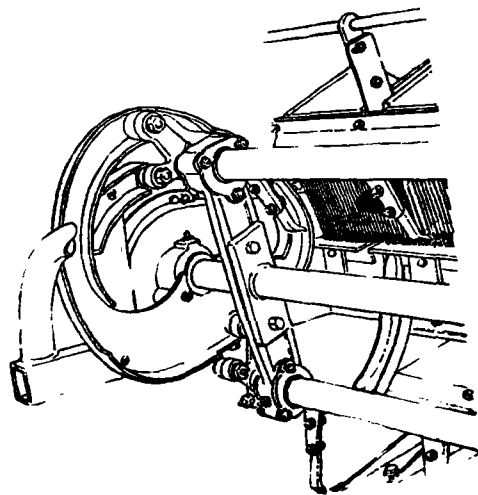


图 1 转臂滑道机构的一般结构

1986年2月14日收稿

结合杂交水稻无土育秧小苗机动插秧机的研制课题, 根据无土小苗高度较小、即为100毫米左右的特点, 分插轮直径选用280毫米。由于无土小苗根系厚度相对稳定, 取秧高度采用定值不作调整。

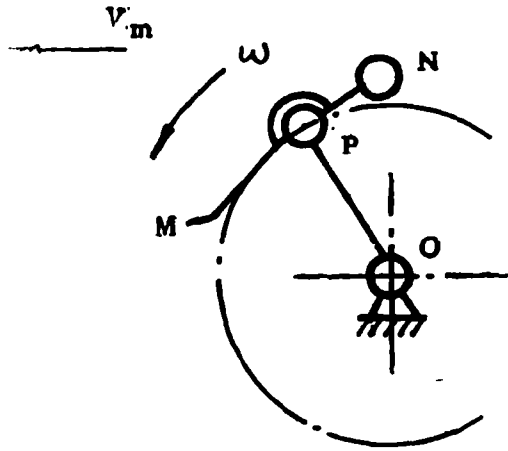


图2 机构示意图

一、秧爪尖运动轨迹及相应的滑道中心线方程的建立

设想秧爪尖相对于机架的运动轨迹如图3所示。按秧爪的工作过程, CB段为分秧和运秧段, BA段为准备插秧和插秧入泥, A点开始, 秧爪不受滑道控制, E点为秧爪插秧后出土重新受滑道控制, EDC段为回程段, 再次准备取秧。秧爪在分插秧全过程的状态均为给定。按各段的特点, 将轨迹曲线分为四段, 即AB、BC、CD和DE, 每一段都用一条二次曲线方程:

$$x^2 + a_1xy + a_2y^2 + a_3x + a_4y + a_5 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{即 } y = \frac{-(a_1x + a_4) \pm \sqrt{(a_1x + a_4)^2 - 4a_2(x^2 + a_3x + a_5)}}{2a_2} \dots\dots\dots (2)$$

来进行拟合。由于方程式(1)有5个未知的待定系数 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , 故一般需要有5个条件来建立一个5元线性方程组。求解该5元线性方程组就可以求得 $a_i (1 \leq i \leq 5)$ 。求得秧爪尖轨迹曲线方程之后, 就可以推算出相应的滑道中心线(相应地也分为四段), 最后由滑道中心线推出轮廓线。

(一) AB段方程的建立

在弧AB上适当地选取5个点, 其中A、B两点已经确定(图4)。设各点坐标为 $(x_i, y_i) i = 1, 2, \dots, 5$ 。为了保证所求得的曲线在点A (x_1, y_1) 处的切线方向与经验曲线的切线方向相吻合, 可以选取点 (x_2, y_2) 比较靠近A (x_1, y_1) 。把5个点的坐标代入方程(1), 得一5元线性方程组:

$$x_i y_i a_1 + y_i^2 a_2 + x_i a_3 + y_i a_4 + a_5 = -x_i^2 \dots\dots\dots (3)$$

$(i = 1, 2, 3, 4, 5)$

下表是一组原始数据。

i	1	2	3	4	5
x_i	61.5	63	76.5	97	103
y_i	-223.5	-213.5	-194	-175.5	-171

计算结果: $a_1 = -2.2758; a_2 = 2.19137; a_3 = -685.798; a_4 = 1108.906; a_5 = 145488.69$ 。

AB段的曲线方程为:

$$x^2 - 2.2758xy + 2.19137y^2 - 685.798x + 1108.906y + 145488.69 = 0 \dots (4)$$

为了描出所求的曲线，把 a_i ($i = 1, \dots, 5$) 的值代入 (2) 式，然后加密 x 求出相应的 y 值。从秧爪尖轨迹曲线出发求出滑道曲线 (图 5)。

秧爪尖在AB上任一点为 $M(x_M, y_M)$ ，求相应的滑道点 $N(x_N, y_N)$ 。显然有

$$\begin{cases} x_M = -R\sin\theta + d\sin\alpha \dots (5) \\ y_M = -R\cos\theta - d\cos\alpha \dots (6) \end{cases}$$

由 (5) 得： $\sin\alpha = \frac{x_M + R\sin\theta}{d}$

即： $\alpha = \arcsin \frac{x_M + R\sin\theta}{d}$

从图中容易看出：

$$\theta = 360^\circ - \arcsin \left| \frac{x_M}{y_M} \right| - \varphi$$

..... (7)

或者写为：

$$\theta = 360^\circ - \arcsin \left| \frac{x_M}{y_M} \right| - \arccos \frac{R^2 + x_M^2 + y_M^2 - d^2}{2R\sqrt{x_M^2 + y_M^2}}$$

并且有：

$$\begin{cases} x_N = -R\sin\theta - r \sin [180^\circ - (\beta - \alpha)] \\ y_N = -R\cos\theta + r \cos [180^\circ - (\beta - \alpha)] \\ x_N = -R\sin\theta - r \sin (\beta - \alpha) \\ y_N = -R\cos\theta - r \cos (\beta - \alpha) \end{cases}$$

其中 β 是 $\angle NPM = 179.6^\circ$ (是一个常数)

(二) BC段方程的建立

为了使AB段和BC段曲线在连接点B处有相同的切线，首先要利用已求出的AB段的方程求得在B点处的导数。

(1) 式对 x 求导得：

$$2x + a_1y + a_1xy' + 2a_2y \cdot y' + a_3 + a_4y' = 0 \dots (8)$$

$$y' = - \frac{2x + a_1y + a_3}{a_1x + 2a_2y + a_4}$$

把B点的坐标 x_B, y_B 代入上式得：

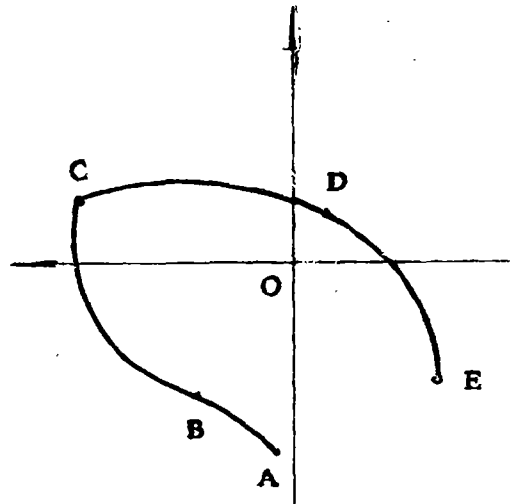


图 3 设想的秧爪尖运动轨迹

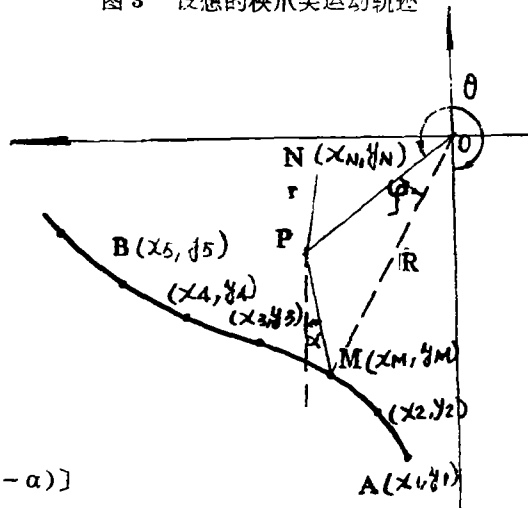


图 4 秧爪尖AB段轨迹

$$y' \Big|_{\substack{x=x_B \\ y=y_B}} = - \frac{2x_B + a_1 y_B + a_3}{a_1 x_B + 2a_2 y_B + a_4} \dots\dots\dots (9)$$

把(8)改为下面的形式:

$$(y + xy') a_1 + 2yy' a_2 + a_3 + y' a_4 = -2x \dots\dots\dots (8)'$$

要确定这个方程的四个待定系数,除了取定

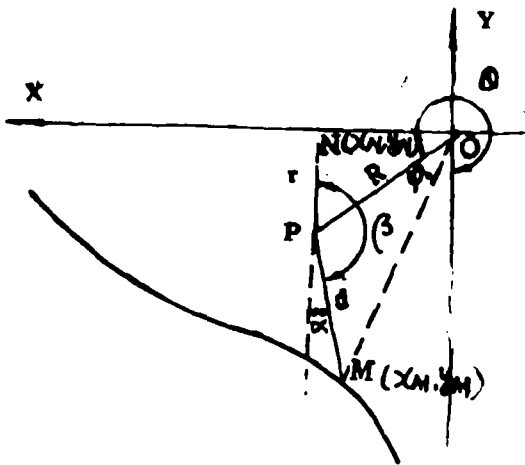
$$(x_1, y_1) = (x_C, y_C)$$

$$(x_4, y_4) = (x_B, y_B)$$

外再任取两点 (x_2, y_2) 和 (x_3, y_3) 。

故BC段有线性方程组:

$$\begin{pmatrix} x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 y_4 & y_4^2 & x_4 & y_4 & 1 \\ y_B + x_B y'_B & 2y_B y'_B & 1 & y'_B & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_1^2 \\ -x_2^2 \\ -x_3^2 \\ -x_4^2 \\ -2x_B \end{pmatrix} \dots\dots\dots (10)$$



5图 AB段滚子中心N的相应位置

在(9)式中的 a_i 是AB段方程的待定系数。现取

i	1	2	3	4
x_i	179	187.5	184	103
y_i	39	18.5	-85.4	-171

利用(9)式,得:

$$y' \Big|_{\substack{x=x_4 \\ y=y_4}} = 0.7248$$

代入(10),解线性方程组,得:

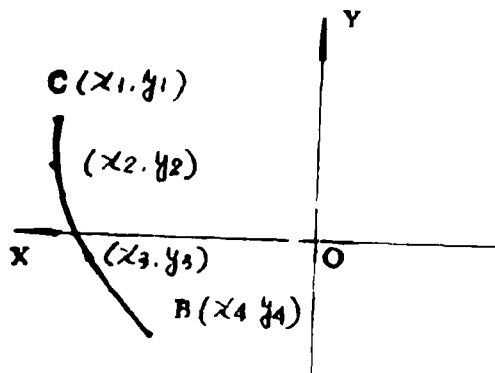


图6 秧爪尖BC段轨迹

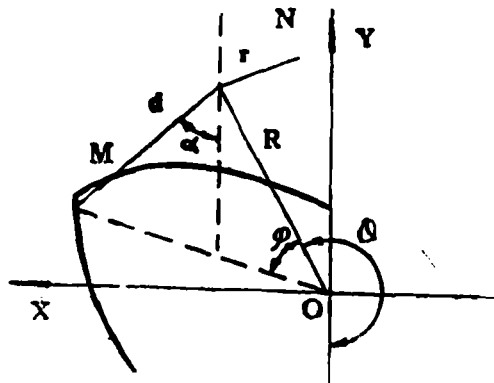


图7 BC段滚子中心N的相应位置

$$\begin{cases} a_1 = -1.60586 \\ a_2 = -3.56106 \\ a_3 = -1308.2454 \\ a_4 = 89.41237 \\ a_5 = 215274.7426 \end{cases}$$

BC段的方程为：

$$x^2 - 1.60586xy - 3.56106y^2 - 1308.2454x + 89.41237y + 215274.7426 = 0$$

利用(2)式，可以给出足够密的x求出相应的y值。

在求相应的滑道曲线方程时，若秧爪尖M(x_M, y_M)在x轴的下方即x_M>0, y_M≤0时，自然可以利用公式(7)，但当M(x_M, y_M)在x轴的上方，即x_M>0, y_M>0时，则(7)式要变为：

$$\begin{aligned} \theta &= 180^\circ + \arctan \left| \frac{x_M}{y_M} \right| - \varphi \quad (\text{参阅图5}) \\ &= 180^\circ + \arctan \left| \frac{x_M}{y_M} \right| - \arccos \frac{R^2 + x_M^2 + y_M^2 - d^2}{2R\sqrt{x_M^2 + y_M^2}} \dots\dots\dots (7') \end{aligned}$$

其余各式不变。应当指出这时的α为负值。

(三) CD段和DE段方程的建立

选择D点是一个十分特殊的点。这D点是当秧爪PM和分插轮转臂OP重合时，秧爪尖所处的位置。因为这种重合只有一次，故要求曲线CD和DE在D点的切线DT以及点D的座标满足条件：

$$\begin{cases} DT \perp OD \dots\dots\dots (11) \\ OD = \sqrt{x_D^2 + y_D^2} = R - d \dots\dots\dots (12) \end{cases}$$

首先建立CD的方程：

为了使机械运转平稳，亦要求CD段与BC段在C点有一阶光顺。

故可取：(图8) (x₁, y₁) = (x_C, y_C) (x₃, y₃) = (x_D, y_D)

由于在D点有(11)式的限制，故只能在弧线CD上再选取一个任意点，为了保证取秧的角度可以把这点(x₂, y₂)取在C点的附近。于是得到方程组：

$$\begin{pmatrix} x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ y_C + x_C \cdot y'_C & 2y_C \cdot y'_C & 1 & y'_C & 0 \\ x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 y_3 & y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \\ y_D + x_D \cdot y'_D & 2y_D \cdot y'_D & 1 & y'_D & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_1^2 \\ -2x_C \\ -x_2^2 \\ -x_3^2 \\ -2x_D \end{pmatrix} \dots\dots (13)$$

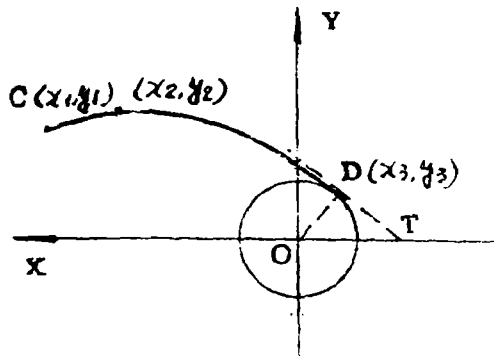


图8 秧爪尖CD段轨迹

其中 y_c 可按(9)式计算(只要将相应的B点坐标换上C点的坐标),这儿的 a_i 当然是BC段的 a_i 了,而 y'_D 可以根据(11)式如下计算:

因OD的斜率 $k_o = \frac{y_D}{x_D}$

而 $DT \perp OD$, 故有:

$$y'_D = -\frac{1}{k_o} = -\frac{x_D}{y_D}$$

现取:

i	1	3	3
x_i	17	47.5	-14.49569
y_i	399	42	14.49569

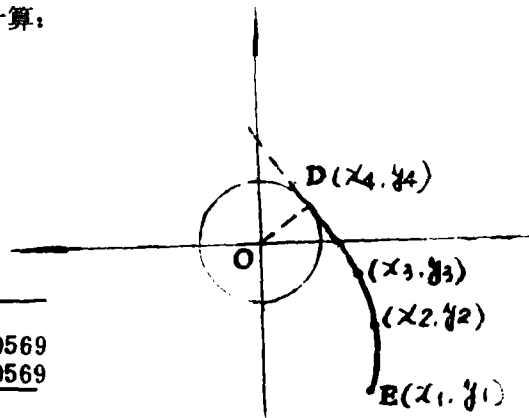


图9 秧爪尖DE段轨迹

$$y'_C = -\frac{2 \times 179 - 1.60586 \times 39 - 1308.2454}{-1.60586 \times 179 - 2 \times 3.56106 \times 39 + 89.41237} = -2.12878423$$

$$y'_D = -\frac{x_D}{y_D} = 1$$

解联立方程组(13), 得CD段方程式的结果:

- $a_1 = -2.927224558$
- $a_2 = 9.396543478$
- $a_3 = -101.3868471$
- $a_4 = -142.0407034$
- $a_5 = -2210.354917$

CD段的方程式为:

$$x^2 - 2.927224558xy + 9.396543478y^2 - 101.3868471x - 142.0407034y - 2210.354917 = 0$$

同理得DE段方程为:

$$x^2 - 0.7136xy - 0.4315y^2 + 182.7136x - 141.2117y + 4426.116 = 0$$

x_D 和 y_D 的数据一定要满足 $\sqrt{x_D^2 + y_D^2} = R - d$ 。在计算滑道中心线时,仍可以用前面所用的各个公式(即在1中所用的各公式)只是公式(7)要分开四段计算:

CM₂段, $x_M > 0, y_M > 0$, 可用公式(7), 即:

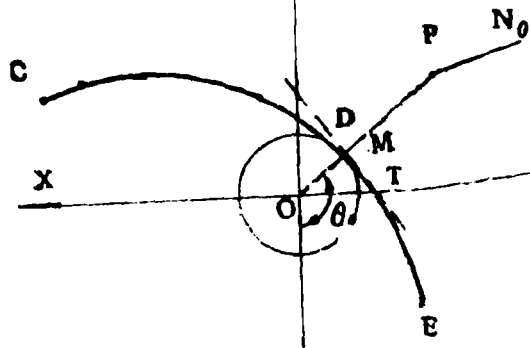


图10 CD和DE段滚子中心N的相应位置

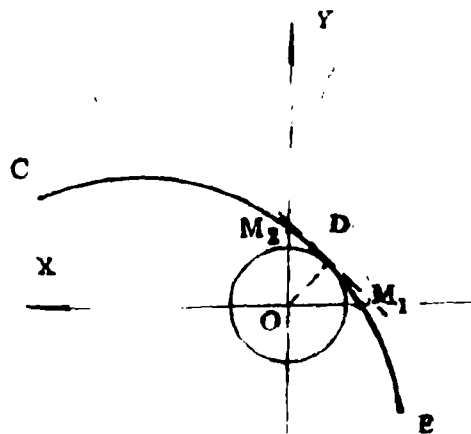


图11 CDE曲线的分段

$$\theta = 180^\circ + \arctg \left| \frac{x_M}{y_M} \right| - \arccos \frac{R^2 + x_M^2 + y_M^2 - d^2}{2R\sqrt{x_M^2 + y_M^2}}$$

M₂D段, $x_D \leq x_M < 0$, $y_M > 0$, 则

$$\theta = 180^\circ - \arctg \left| \frac{x_M}{y_M} \right| - \arccos \frac{R^2 + x_M^2 + y_M^2 - d^2}{2R\sqrt{x_M^2 + y_M^2}}$$

DM₁段, $x_{M1} \leq x_M < x_D$, $y_M > 0$, 则

$$\theta = 180^\circ - \arctg \left| \frac{x_M}{y_M} \right| + \arccos \frac{R^2 + x_M^2 + y_M^2 - d^2}{2R\sqrt{x_M^2 + y_M^2}}$$

M₁E段, $x_M < x_{M1}$, $y_M \leq 0$, 则

$$\theta = \arctg \left| \frac{x_M}{y_M} \right| + \arccos \frac{R^2 + x_M^2 + y_M^2 - d^2}{2R\sqrt{x_M^2 + y_M^2}}$$

二、滑道内外轮廓线的设计

由于滑道中心线已被确定, 滚子的半径 R_0 亦为已知, 因此求解滑道轮廓线在数学上是求半径为 R_0 、圆心在滑道中心线的一簇圆的包络曲线。具体求法如下:

$$\text{圆簇方程: } (x - x_N)^2 + (y - y_N)^2 = R_0^2 \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{对 } x_N \text{ 求导, 得: } 2(x - x_N)(-1) + 2(y - y_N)(-y'_N) = 0$$

$$(x - x_N) = -(y - y_N) \cdot y'_N$$

$$(x - x_N)^2 = (y - y_N)^2 \cdot y'^2_N$$

$$(y - y_N)^2 = \frac{(x - x_N)^2}{y'^2_N}$$

$$\text{代入 (14) 式, 得: } (x - x_N)^2 + \frac{(x - x_N)^2}{y'^2_N} = R_0^2$$

$$\text{最后可得: } x = x_N \pm \frac{R_0 |y'_N|}{\sqrt{y'^2_N + 1}}$$

$$y = y_N - \frac{1}{y'_N} (x - x_N) = y_N \mp \frac{1}{y'_N} \cdot \frac{R_0 |y'_N|}{\sqrt{y'^2_N + 1}}$$

$$\text{其中: } y'_N = \frac{dy_N}{dx_N} = \frac{\frac{dy_N}{dx_M}}{\frac{dx_N}{dx_M}} = \frac{R \sin \theta \cdot \frac{d\theta}{dx_M} - r \sin(\beta - \alpha) \frac{d\alpha}{dx_M}}{-R \cos \theta \frac{d\theta}{dx_M} + r \cos(\beta - \alpha) \frac{d\alpha}{dx_M}}$$

$$\text{由: } \begin{cases} x_M = -R \sin \theta + d \sin \alpha \\ y_M = -R \cos \theta - d \cos \alpha \end{cases}$$

两边对 x_M 求导, 得:

$$1 = -R \cos\theta \cdot \frac{d\theta}{dx_M} + d \cdot \cos\alpha \cdot \frac{d\alpha}{dx_M}$$

$$\frac{dy_M}{dx_M} = R \cdot \sin\theta \cdot \frac{d\theta}{dx_M} + d \cdot \sin\alpha \cdot \frac{d\alpha}{dx_M}$$

解上面的方程组得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta}{dx_M} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & d \cdot \cos\alpha \\ \frac{dy_M}{dx_M} & d \cdot \sin\alpha \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -R \cos\theta & d \cdot \cos\alpha \\ R \sin\theta & d \cdot \sin\alpha \end{vmatrix}} = \frac{d \cdot \sin\alpha - d \cdot \cos\alpha \cdot \frac{dy_M}{dx_M}}{-R \cdot d \cdot \cos\theta \cdot \sin\alpha - R \cdot d \cdot \sin\theta \cdot \cos\alpha} \\ \frac{d\alpha}{dx_M} = \frac{\begin{vmatrix} -R \cos\theta & 1 \\ R \cdot \sin\theta & \frac{dy_M}{dx_M} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -R \cdot d \cdot (\cos\theta \cdot \sin\alpha + \sin\theta \cdot \cos\alpha) \end{vmatrix}} = \frac{-R \cdot \cos\theta \cdot \frac{dy_M}{dx_M} - R \cdot \sin\theta}{-R \cdot d \cdot (\cos\theta \cdot \sin\alpha + \sin\theta \cdot \cos\alpha)} \end{array} \right.$$

化简得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta}{dx_M} = \frac{\cos\alpha \cdot \frac{dy_M}{dx_M} - \sin\alpha}{R \cdot \sin(\alpha + \theta)} \\ \frac{d\alpha}{dx_M} = \frac{\cos\theta \cdot \frac{dy_M}{dx_M} + \sin\theta}{d \cdot \sin(\alpha + \theta)} \\ \frac{dy_M}{dx_M} = -\frac{2x_M + a_1 y_M + a_3}{a_1 x_M + 2a_2 y_M + a_4} \end{array} \right.$$

三、计算框图的编制

应用上述结果进行滑道设计时可按如下框图编制计算机程序。

(一) 设计的原始数据

$B = 179.6$ ——图 5 中的 $\angle\beta$, 即拐臂与秧爪的夹角。

$R = 140\text{mm}$ ——分插轮半径; $R_1 = 70\text{mm}$ ——拐臂长度;

$R_2 = 15\text{mm}$ ——大滚子半径; $D = 119.6829$ ——秧爪长度;

θ : 分插轮转臂逆时针转过的角度, 即图 5 中的 θ 角。

(二) 计算时选用的方程形式

AB和CD段, 秧爪尖运动轨迹大致与x轴同向, 选用方程形式为:

$$y = \frac{-(a_1 x + a_4) + \sqrt{(a_1 x + a_4)^2 - 4a_2(x^2 + a_3 x + a_5)}}{2a_1}$$

BC段走向与y轴大致同向, 选用方程形式:

$$x = \frac{-(a_1y + a_3) - \sqrt{(a_1y + a_3)^2 - 4(a_2y^2 + a_4y + a_5)}}{3}$$

DE段走向大致与y轴同向，选用方程形式为：

$$x = \frac{-(a_1y + a_3) + \sqrt{(a_1y + a_3)^2 - 4(a_2y^2 + a_4y + a_5)}}{2}$$

(三) 计算机输出计算结果

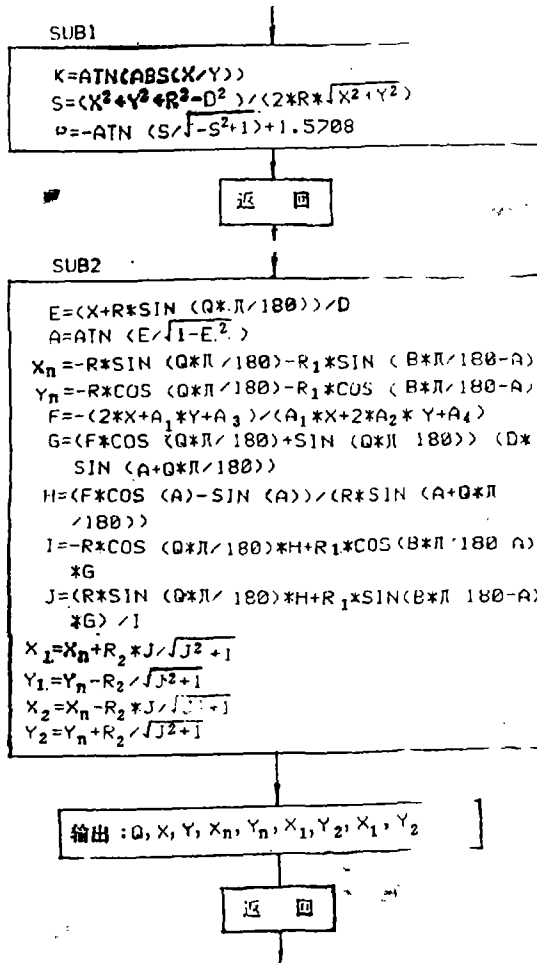
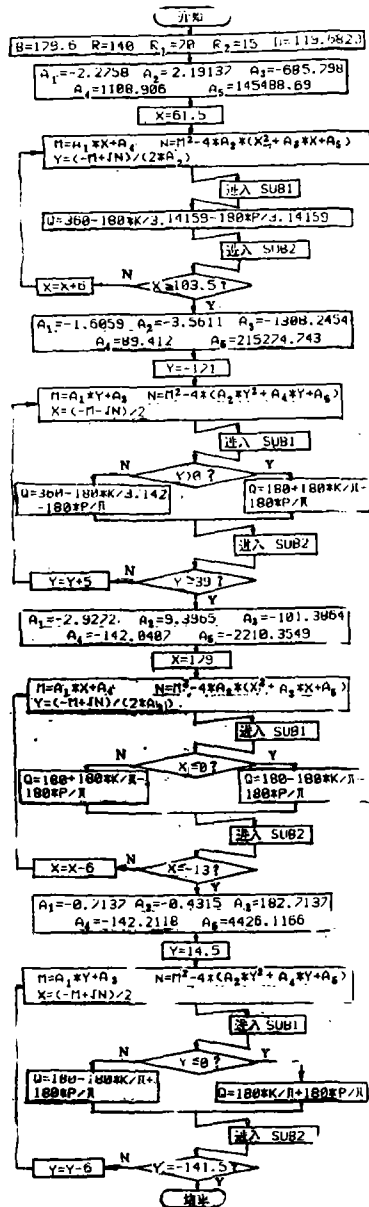
计算结果以θ为变量，得各x、y值。

(x, y) : 秧爪尖运动轨迹座标;

(x₁, y₁) : 滑道外轮廓线座标;

(x_N, y_N) : 滑道中心线座标;

(x₂, y₂) : 滑道内轮廓线座标。



输出: Q, X, Y, X_N, Y_N, X₁, Y₂, X₁, Y₂

四、计算机设计滑道的初步实践

依据上述方法,我们已于1983年试制成第一个应用计算机设计的滑道,并安装在2Z—28型机动插秧机上作了性能试验,证明符合分插秧要求。

(一) 计算机打印得秧爪运动轨迹及滑道中心线

图12为计算机打印得秧爪运动轨迹及滑道中心线。下方为秧爪运动轨迹,上方为滑道中心线。

(二) 试制的第一个应用计算机设计的滑道

图13是1983年试制成的第一个应用计算机设计的滑道,适用于2Z—28型机动插秧机,适应秧苗高度为350毫米以下,插秧穴距可在100~200毫米范围。

(三) 插秧性能试验结果

1985年,我们对应用计算机设计的滑道作了插秧性能试验并拍摄得秧爪在入土段的绝对运动(相对于地面)轨迹(图14)。

从图14可见,秧爪满足垂直下插、插后从已插秧苗后方脱秧出土的插秧要求,并且,对插秧穴距有很好的适应性。

另外,秧爪在全过程运转平稳。

由于是初次尝试,对滑道的取秧高度未考虑可以调整,因而对秧根堆放厚度的适应性不够,仅能插植特定的无土育秧小苗。如需要调整取秧高度,可以改变取秧段滑道的方程修改设计方案。

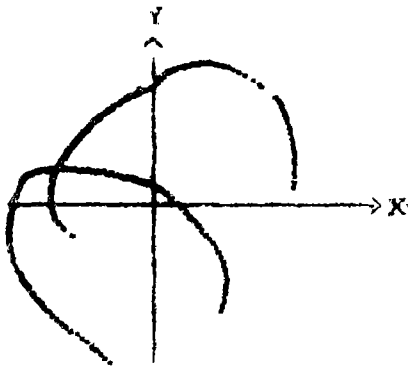


图12 计算机打印得秧爪运动轨迹和滑道中心线

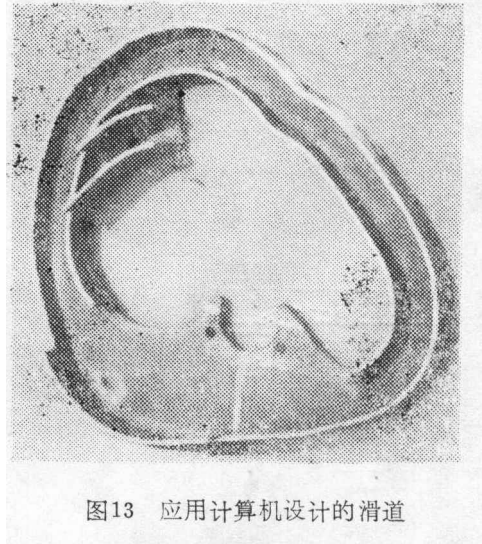


图13 应用计算机设计的滑道

结 论

按照插秧要求,先定出秧爪在分插秧全过程的理想状态,即给出秧爪运动轨迹上的若干特殊点位置,然后由计算机设计控制滑道中心线和轮廓线,同时验证秧爪的运动轨迹,经过对试制部件所作性能试验,证明这一方法是优于传统使用的经验作图法的,可以提高设计效率,从而可多次修改设计方案,逐步得到优化数据,达到改进设计的目的,并且,还可为适应不同秧苗的同类型机构的设计提供参考。

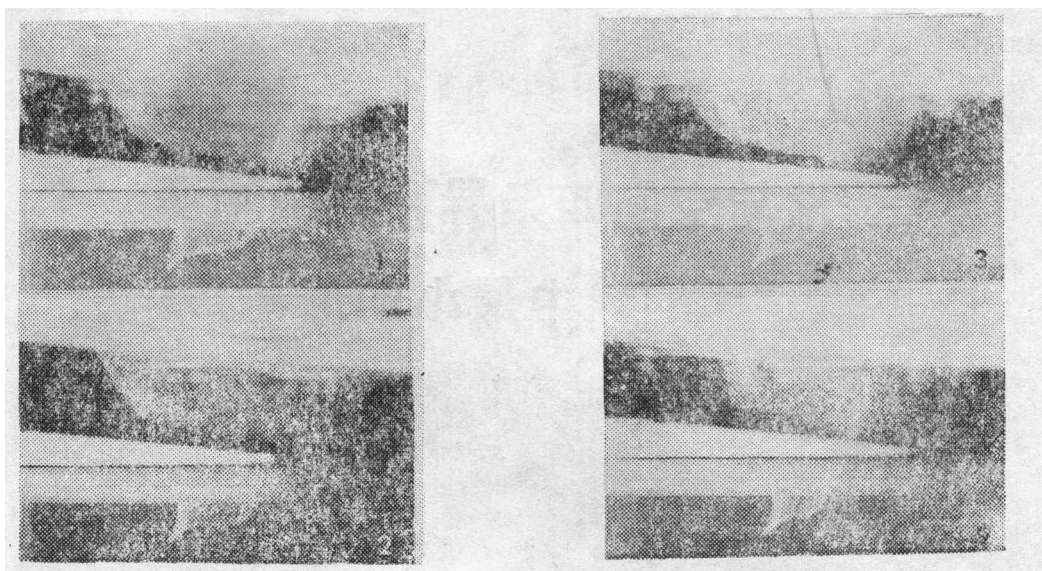


图14 秧爪的插秧段轨迹 (1、2、3、4分别为100、133、165、200毫米穴距)

参 考 文 献

- [1] 北京大学数学力学系编：《高等代数》，102~110，157~159，人民教育出版社。
- [2] 复旦大学数学系主编：《常微分方程》，58~61，上海科技出版社。
- [3] 梁锋：机动水稻插秧机转臂滑道机构的设计（一），《农业机械学报》，10（1）。
- [4] 张世英编：《苹果—I BASIC程序设计》，42~72，184~252，北京师范大学出版社。
- [5] 插秧机统型技术组：机动水稻插秧机转臂滑道机构的设计（二），《农业机械学报》10（4）。
- [6] Г·М·菲赫金哥尔：《数学分析原理》，第一卷137~151，180~186，人民教育出版社。

COMPUTER AID DESIGN ON CONTROL TYPE CLAW-GRIPPER GUIDE WAY OF SELF-PROPELLED TRANSPLANTER

Liang Feng Pan Wenyuen
(Department of Agricultural Engineering)
Wu Weihsien Lu Chunchieh

(The Junior College of Hydro-electric Engineering of Guangdong Province)

ABSTRACT

According to the characteristics of the rice seedling, the ideal condition of separate transplanting process of the transplanter claw-gripper was determined and an empirical equation of the track of gripper tip relative motion has been derived in this paper. Therefore, the equation of center line and contour line of the control guide way could be calculated and plotted with the micro-computer. This method will highly raise the design efficiency, and will be a reference to the CAD of the similar type transplanting mechanism.