

悬挂犁机组优化方法

郝培业 徐 敏* 朱亦然*

(农业工程系)

摘 要 采用悬挂犁机组空间力学模型,利用贮备牵引力为目标函数,在性能、边界约束的条件下使用单纯形法和随机方向法对悬挂机构进行了多变量优化设计,获得了满意结果。为适应空间模型需要,在犁体外载表示方面提出并使用了三力三坐标分点表示法。

关键词 悬挂机构,优化设计,贮备牵引力,三力三分点

中图分类号 S219.032.4

1 设计变量

根据农艺要求,我们可以事先确定拖拉机和第一铧之间的横向位置;另外,悬挂机构形态事先亦由制造厂确定。所以,可供改变的参数有:

x_1 ——单犁体幅宽; x_2 ——犁体数; x_3 ——左吊杆长;
 x_4 ——右吊杆长; x_5 ——上拉杆长。

对于三点悬挂,有:

x_6 ——左下悬挂点与上悬挂点的距离;

x_7 ——右下悬挂点与上悬挂点的距离;

x_8 ——两下悬挂点间距离。

由空间力分析模型,有:

x_9 ——广义坐标 α ; x_{10} ——广义坐标 θ_1 。

考虑到纵向位置,将 x_{11} 列为第一铧尖点的 x 向坐标。这样,共有 11 个设计变量,表达成向量形式,就是

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_{11})^T \quad (1)$$

2 目标函数

如果土壤作用在拖拉机驱动轮上的最大推进力为 $P_d(X)$, 机组总阻力为 $R_t(X)$, 则定义:

$$P_s(X) = P_d(X) - R_t(X) \quad (2)$$

为机组的贮备牵引力,对于给定的机组,优化目标应是使 $P_s(X)$ 为最大;对于新设计的机组,应使 $(P_s(X) - \varepsilon)$ 为最大,这里, ε 是一个事先给定的裕量。

文稿收到日期:1990-01-18。

* 现分别在新疆农机鉴定站和西安柴油机厂工作。

3 设计约束

设计约束有性能约束和边界约束之分。边界约束由几何条件确定, 性能约束由设计性能指标和可行工作条件导出。

3.1 性能约束

3.1.1 牵引性能约束 如拖拉机额定牵引力为 P_q , 必须有:

$$g_1(X) = P_t(X) - P_q < 0 \quad (3)$$

3.1.2 运输通过性能约束 如果给定一个向量 X , 则机组悬挂机构就是唯一确定的, 这时, 在运输状态下, 悬挂型的空间位置由广义坐标 α , θ_1 来确定。

事实上, 在该位置时, 总是有 $\alpha = \alpha_{\max}$, 而 θ_1 却可在一定的范围内变动, 故运输通过性能约束的表达式应是:

$$\begin{cases} g_2(X_{10}) = \min[Z_{m1}(X_{10})] - h_0 \geq 0 \\ g_3(X_{10}) = \min[Z_{m2}(X_{10}) - Z_{\min}(X_{10})] / [X_{m1}(X_{10}) - X_{m2}(X_{10})] - \lg \varphi_0 \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 h_0 , φ_0 分别是给定的通过高度和通过角; Z_{m1} , Z_{m2} 分别是第一、二铧尖(当 $\alpha = \alpha_{\max}$ 时)的离地高度; X_{m1} , X_{m2} 是纵坐标。

3.1.3 入土性能约束(入土角) 严格计算入土角是困难的, 而在实际生产中入土角又未必要求十分精确, 所以可采用简化处理方式, 即: 由于耕深和机构提升高度相比差距很大, 可近似地取工作状态下的 X_{10} 的值为铧尖在地表时的 X_{10} 的值。

给 X_9 一个增量, 只要保证 $Z_{m1}(X_9 + \Delta X_9, X_{10})$ 在耕深附近即可。令:

$$X_9 = X_9 + \Delta X_9,$$

如是, 有人土性能约束:

$$g_4(X) = (Z_{m2} - Z_{m1}) / (X_{m2} - X_{m1}) - \gamma_0 > 0 \quad (5)$$

其中 γ_0 为给定入土角。

在平面静力学模型中, 入土性能指标还有入土力矩这一概念, 而对于空间模型, 因无瞬心存在, 这一概念自动消除。事实上, 如果限深轮上的反力足够大, 那么, 当入土时, 这个反力将全部转移在铧刃上, 入土性能当无问题。

3.1.4 耕深稳定性能约束 限深轮反力 N_{Lz} , 正常工作状态下应有约束:

$$\begin{cases} g_5(X) = N_{Lz} - N_{L0} \geq 0 \\ g_6(X) = N_{L1} - N_{Lz} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 N_{L0} 和 N_{L1} 分别是允许的最小、最大正压力。

3.1.5 耕宽稳定性能约束 犁侧板约束反力之和, 在正常状态下应在一定范围之内,

$$\begin{cases} g_7(X) = \sum_{j=1}^m N_{pj} - N_{p0} \geq 0 \\ g_8(X) = N_{p1} - \sum_{j=1}^m N_{pj} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

故有

其中 N_{p0} , N_{p1} 是允许的最小和最大反力。

如耕宽变化, θ_1 有增量 $\Delta\theta_1$, 应有约束:

$$g_9(X) = \frac{-\partial y_i}{\partial x_{10}} = -\frac{1}{Z\Delta x_{10}} [y_i(x_{10} + \Delta x_{10}) - y_i(x_{10} - \Delta x_{10})] < 0 \quad (8)$$

以保证达到新的平衡。

3.1.6 偏牵引约束 由空间力模型计算的偏牵引力矩 M_p , 正常工作状态下应使:

$$\begin{cases} g_{10}(X) = M_p - M_{p0} \geq 0 \\ g_{11}(X) = M_{p1} - M_p \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 M_{p0} , M_{p1} 是允许的最小和最大偏牵引力矩。

此外, 按常规, 性能约束中还应包括前轮垂直载荷约束和液压提升能力约束, 但实际运算中上述约束均能满足, 故不再考虑。

3.2 边界约束

x_1 ——离散变量, 取标准犁幅; x_2 ——离散变量, 取自然数;

x_3 —— $[l'_{10}, l'_{11}]$, x_4 —— $[l'_{30}, l'_{31}]$, x_5 —— $[L_{60}, L_{61}]$ 。

由拖拉机给定的调整范围确定, 故有

$$\begin{cases} g_{12}(X) = x_1 - l'_{10} \geq 0 \\ g_{13}(X) = l'_{11} - x_1 \geq 0 \\ g_{14}(X) = x_4 - l'_{30} \geq 0 \\ g_{15}(X) = l'_{31} - x_4 \geq 0 \\ g_{16}(X) = x_5 - L_{60} \geq 0 \\ g_{17}(X) = L_{61} - x_5 \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

又, x_6, x_7, x_8 构成悬挂三角形, 取 L_{40}, L_{50}, L_{20} 为它们可取的最小初值, L_{41}, L_{51}, L_{21} 为它们可取的最大初值, 又有

$$\begin{cases} g_{18}(X) = x_6 - L_{40} \geq 0 \\ g_{19}(X) = L_{41} - x_6 \geq 0 \\ g_{20}(X) = x_7 - L_{50} \geq 0 \\ g_{21}(X) = L_{51} - x_7 \geq 0 \\ g_{22}(X) = x_8 - L_{20} \geq 0 \\ g_{23}(X) = L_{21} - x_8 \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} g_{24}(X) = x_6 + x_7 - x_8 \geq 0 \\ g_{25}(X) = x_8 + x_7 - x_6 \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

由油缸行程和拖拉机后轮距限制, $x_9: [\alpha_0, \alpha_1]$, $x_{10}: [\theta_{10}, \theta_{11}]$, 则广义坐标边

界约束是:

$$\begin{cases} g_{26}(X) = x_9 - \alpha_0 \geq 0 \\ g_{27}(X) = \alpha_1 - x_9 \geq 0 \\ g_{28}(X) = x_{10} - \theta_{10} \geq 0 \\ g_{29}(X) = \theta_{11} - x_{10} \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

最后, 对于 x_{11} : $[M_{10}, M_{11}]$, 有:

$$\begin{cases} g_{30}(X) = x_{11} - M_{10} \geq 0 \\ g_{31}(X) = M_{11} - x_{11} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

共计31个不等式, 性能约束不等式11个, 边界约束20个.

4 单犁体外载的三力三分点表示

由单犁体外载测力结果统计分析, 我们还可以知道作用在各分犁体上的外载的大小、方向、作用点. 如: 已知犁耕土壤比阻 k , 有

$$R_x = k \cdot bx_1, \quad R_y = \varphi R_x, \quad R_z = \varphi R_x$$

φ , ψ 是相对固定的系数. 又, 把上述三分力分别简化至 $(0, y_{0i}, 0)$, $(0, 0, z_{0i})$,

$(x_{0i}, 0, 0)$, $i = 1, 2, \dots, x_1$, 选局部坐标系, 原点在各犁体锋尖上, 那么, 由

$$\begin{cases} M_x = R_y z_{0i} = \rho_{yz} R_{yz} \\ M_y = R_z x_{0i} = \rho_{xz} R_{xz} \\ M_z = R_x y_{0i} = \rho_{xy} R_{xy} \end{cases} \quad (15)$$

等式右端, R_{yz} , R_{xz} , R_{xy} 可由 R_x , R_y , R_z 算得 ρ_{xy} , ρ_{xz} , ρ_{yz} 由统计规律选取, 则 z_{0i} , x_{0i} , y_{0i} 可求. 将来可以发现, 这样的简化会给计算带来极大的便利.

我们把这种方法命名为三力—三坐标分点犁体外载表示方法.

另外, 当力点坐标确定后, 包括重心位置、犁轮、犁侧板的参数和力点位置均可通过第一犁尖点转化为统一坐标系, 如第一犁尖坐标向量为 M_1 , 则其它犁上各计算点

$$\text{位置向量: } M_j = A_j \overline{M}_j + B_j \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (16)$$

决定. 其中 A_j , B_j 是各点相对第一犁尖点的坐标转换矩阵.

5 优化方法

综上所述, 对于本问题, 优化模型为:

$$\begin{cases} \min[-P_j(X)] \\ X \in R^n \\ D = \{X | g_{31}(X) \geq 0\} \in R^n \end{cases} \quad (17)$$

由于目标函数和约束条件都是非线性的, 故本问题实质上是一个非线性规划问题.

解有约束非线性规划的优化方法很多,这里采用所谓单纯形法和随机方向法^[2]。这两种方法都是直接寻优方法,适用于如本问题这类约束条件全部是不等式的优化问题,具有程序编制简单,收敛速度快且不需计算梯度等优点。缺点是计算精度较低,输出的是局部最优而不是全局最优,因此,需多个可行初始点。但上述缺点对本题无大影响,由实际工况测取几个初始点相当方便而计算结果要求精度又不高。故选用两法为本题优化方法是合适的。

本文以铁牛-55配1L-330机组和丰收-35配1L-230为例,分别进行优化。机构简图见文献[1],计算运行逻辑框图见图1,图2。附表为优化结果。

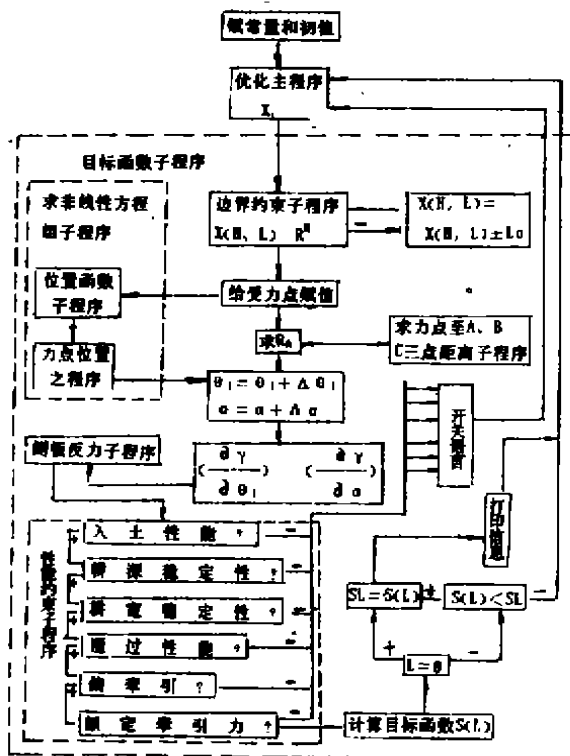


图1 计算运行逻辑框图

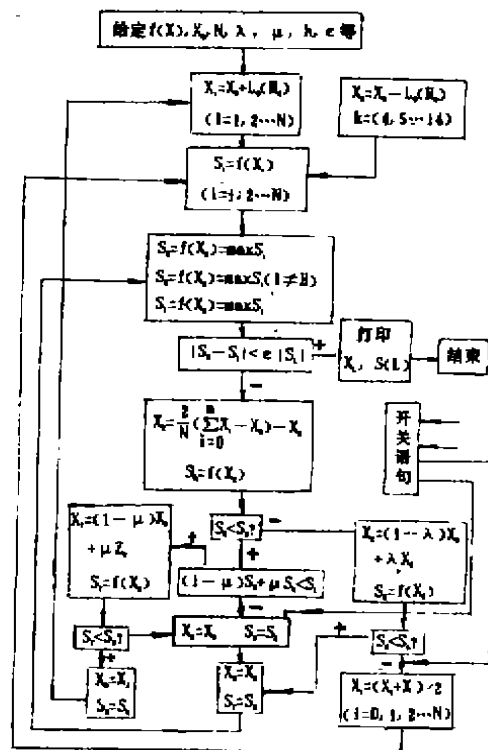


图2 单纯加速框图

6 优化结果分析

1) 前人的研究表明:当假想牵引点向犁沟移动时,犁所需的牵引力较小而直线行驶性能变坏^[1]。这和计算结果非常一致。因为在计算过程中发现 x_{10} (即 θ_1)减小,目标函数迅速变优而偏转力矩迅速上升,这相当于虚牵引点向犁沟移动。理论和实验得到了相互引证。

2) 高度调节机组目标函数变优的途径有两个:一是使后轮增重增加,二是减小侧板摩擦力;而位调节机组目标函数变优的途径却只有一个:减少侧板摩擦力,这和实验结果也是一致的。

3) 计算结果表明,优化收益在22.17%~28.90%之间。这说明不增加任何投资,

只要合理调整悬挂机构各参数就可以提高生产效率的前景相当乐观。

附表 优化结果

参数和变量	铁牛-55 配套 1L-330				丰收-35 配套 1L-230			
	$\beta = 8^\circ$		$\beta = 15^\circ$		$\beta = 8^\circ$		$\beta = 15^\circ$	
初值和优化值	$\bar{x}_0$	$\bar{x}^*$	$\bar{x}_0$	$\bar{x}^*$	$\bar{x}_0$	$\bar{x}^*$	$\bar{x}_0$	$\bar{x}^*$
x_1	300	300	300	300	300	300	300	300
x_2	3	3	3	3	2	2	2	2
x_3	505	389	505	397	686	686	686	686
x_4	473	491	473	527	700	739	700	735
x_5	575	637	575	537	700	712	700	712
x_6	785	763	785	734	730	624	730	635
x_7	755	800	755	783	600	624	600	635
x_8	792	649	792	769	600	754	600	702
x_9	-0.31	-0.36	-0.39	-0.26	0	0.56	0	0.83
x_{10}	-0.15	-0.06	-0.15	-0.12	0.39	0.30	0.39	0.10
x_{11}	-600	-630	-600	-591				
侧板反力	417	278	459	318	220	55	217	50
后轮增重	354	419	365	468	480	485	355	360
目标函数	-509	-632	-482	-614	-316	-386	-237	-303
收益(%)	24		27		22		29	

注: 工况: $k=0.5$; $\alpha=200$; $\alpha=20^\circ$; $\xi=32^\circ$

参 考 文 献

- 1 郝培业. 悬挂犁机组的空间力学模型. 西北农业大学学报, 1988(2): 29~38
- 2 汪祥. 机械优化设计. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 3 迪·贝克. 假想牵引点位置和犁耕所需牵引力. 国外拖拉机, 1984(6): 14~17

The Optimal Design of Mounted Plough Set

Hao Peiye Xu Min Zhu Yiran

(Department of Agricultural Engineering)

Abstract Based on the spatial statics model of the mounted plough set and under the conditions of the performances and the boundary constraints, the multi-variable optimal design of mounted plough set was conducted using traction force as an objective function and simplex and stochastic direction method. The satisfactory results were obtained. In order to suit the needs of the statics, a new external force representation of the plough (three forces—three points) was first developed and used.

key words mounted plough set, optimal design, traction force, three forces—three points