

# 锄铲类土壤工作部件外载荷测力装置

卢博友 薛少平

(西北农业大学机械与电子工程学院, 陕西杨陵·712100)

**摘要** 介绍两种应变式锄铲类农机土壤工作部件外载荷测力装置的结构形式、工作原理。“L型测力装置”测力矩的组桥方式有3种:串联电阻法、并联电阻法、选配 $K$ 值法。其中并联电阻法更便于实际应用。

**关键词** 农业机具, 测力装置, 组桥方式

**中图分类号** S222.50

对锄铲类土壤工作部件的受力测定,作者曾进行过研究,并设计了一种“L型”测力装置<sup>(1)</sup>。本文提出另一种与“L型”功能相同的测力装置,并对“L型”测力装置的组桥方式做进一步探讨。

## 1 工作部件受力特点及测力装置结构型式

### 1.1 工作部件受力分析

锄铲类土壤工作部件,因其结构具有一对称面,所以当这类工作部件工作时,土壤作用于部件上的力,在正常情况下总是与部件的结构对称面对称,因此可将这些力简化为作用于部件结构对称面内一合力 $\vec{R}$ (见图1,此力 $\vec{R}$ 即为本文所论待测量)。

### 1.2 测力装置结构型式

根据测力方法分析(后述)及考虑到既要保证工作部件在机架上的原安装位置基本不变,且又要便于对不同形式的工作部件进行测量,测力装置采用了图2所示的结构形式。图2中,a为管式装置,b为“L型”装置。

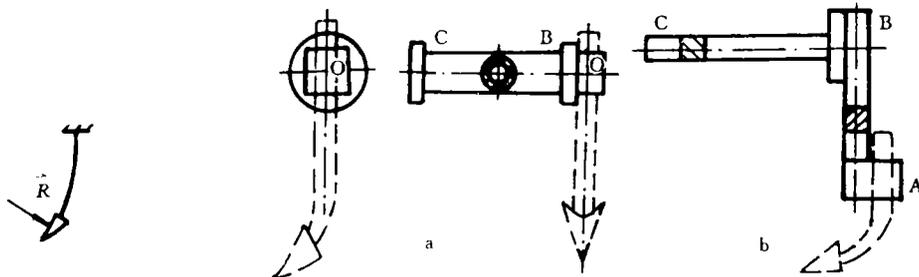


图1 结构对称面合力

图2 测力装置结构

## 2 测力装置工作原理

为测得 $\vec{R}$ 的大小、方向、作用线位置,可将 $\vec{R}$ 分解为水平、铅垂两分力 $\vec{R}_x, \vec{R}_y$ (图3)。当

收稿日期:1993-12-02.

分别测得  $\vec{R}_x, \vec{R}_y$  两力后,  $\vec{R}$  的大小、方向可由如下两式求得:  $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ ,  $\text{tg}\Phi = \frac{R_y}{R_x}$ , 式中  $\Phi$  表示  $\vec{R}$  与水平方向之夹角。  $\vec{R}$  的作用位置由图中  $\rho$  表示。为测得  $\rho$  值大小, 只需测得  $\vec{R}$  对  $O$  点之距  $M_0$ , 则  $\rho$  的大小为:  $\rho = \frac{M_0}{R} =$

$$\frac{M_0}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}$$

由上分析, 只要测得  $\vec{R}_x, \vec{R}_y$  的大小及  $M_0$  之值, 则  $\vec{R}$  力便成为一个完全确定的量。

### 2.1 L 型测力装置测力原理

1) 测  $\vec{R}_x$  方式及原理:  $\vec{R}_x$  力是在图 2b 所示的 AB 杆上进行测量的。由于  $\vec{R}$  的作用线位置总是变化的, 因此  $\vec{R}_x$  的作用线位置总是在上下移动着。为消除作用线位置对测得值的影响, 本处采用了测剪力方式进行测量<sup>(2)</sup>, 布片及组桥型式见图 4 所示。其工作原理如下:

设由于  $\vec{R}_x$  的作用, 使得杆 AB 在截面 a, b 上所产生的最大应变分别为:

$$\epsilon_a = \epsilon_{xa} + \epsilon_{ya} \quad \epsilon_b = \epsilon_{xb} + \epsilon_{yb}$$

式中  $\epsilon_{xa}, \epsilon_{xb}$  —— 由  $\vec{R}_x$  所引起的 a, b 截面上的最大应变;

$\epsilon_{ya}, \epsilon_{yb}$  —— 由  $\vec{R}_y$  所引起的 a, b 截面上的最大应变。

由测剪原理有:

$$R_x = \frac{EW}{L}(\epsilon_a - \epsilon_b) = \frac{EW}{L}(\epsilon_{xa} + \epsilon_{ya} - \epsilon_{xb} - \epsilon_{yb}) = \frac{EW}{L}(\epsilon_{xa} - \epsilon_{xb}^*)$$

式中  $E$  —— 材料弹性模量;  $W$  —— AB 杆抗弯截面模量;  $L$  —— a, b 两截面间距离

\* (因  $R_x$  对杆所产生轴向拉应力及弯曲应力在 a, b 两截面的最大值相等, 故  $\epsilon_{ya} = \epsilon_{yb}$ )

由上式可见,  $\vec{R}_x$  的大小正等于 a, b 截面最大应变之差, 又由图 4 测量桥知, 电桥输出也等于  $R_1, R_2$  两片阻值变化之差值, 即此种测量方式, 其电桥输出与  $\vec{R}_x$  作用线位置变化无关, 而仅与其大小有关。

2) 测  $\vec{R}_y$  方式及原理: 从理论上讲,  $\vec{R}_y$  的大小可在 AB 杆上采用测轴力的方法进行测量, 但用此法不易解决灵敏度与刚度间的矛盾。故改为在 BC 杆上进行测量。为说明测力原理, 取测力装置的 O 点为简化点, 把  $\vec{R}$  向 O 点简化, 简化后得一力矢  $\vec{R}' (\vec{R}' = \vec{R})$  及一力偶  $M_0 (M = \rho R = L_1 R_x + L_2 R_y)$  (图 5a), 图中  $\vec{R}'_x, \vec{R}'_y$  为将  $\vec{R}'$  沿水平、垂直方向分解之值。因为  $\vec{R}'_y = \vec{R}_y$ , 欲测  $\vec{R}_y$  的大小, 只需测得  $\vec{R}'_y$  的大小就行了。考虑到消除  $M_0, \vec{R}'_x$  对测  $\vec{R}'_y$  的影响, 此外仍采用与测  $\vec{R}_x$  相同的测剪方法进行测量, 布片及组桥见图 5a, b, c. 其中 b

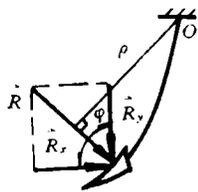


图 3 合力作用及分解

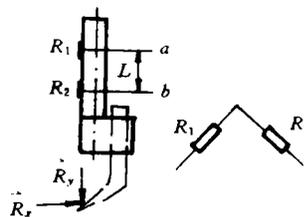


图 4 测  $R_x$  力布片及组桥

为半桥测量, c 为全桥测量。

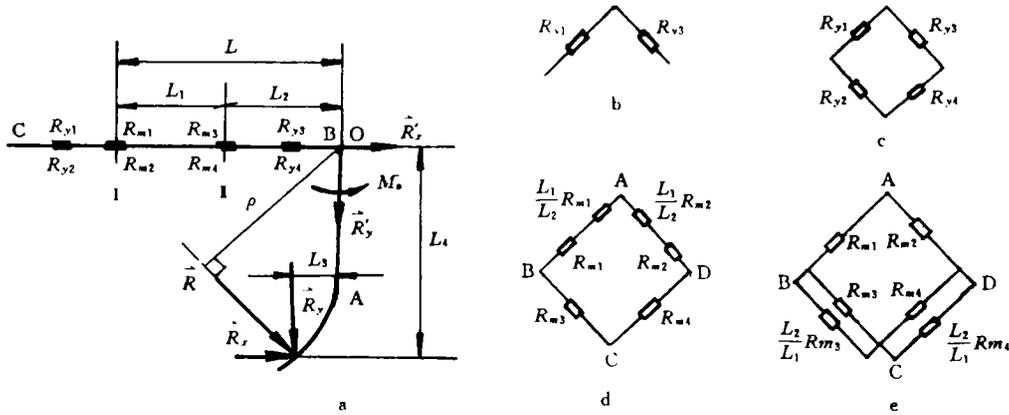


图 5 测  $R_y, M_o$  力布片及组桥示意图

3) 测  $M_o$  方式及原理:  $M_o$  值也在 BC 杆上测取, 布片及组桥见图 5a, d, e. 测量原理如下: 设 BC 杆的 I, I 截面在 O 点诸力作用下的最大应变为  $\epsilon_1$  及  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_1$  及  $\epsilon_2$  可由下式求得<sup>(3)</sup>:

$$\epsilon_1 = (M_o - R'_y L) / EW + R'_z / EF \tag{1}$$

$$\epsilon_2 = (M_o - R'_y L_2) / EW + R'_z / EF \tag{2}$$

在图 5 所示的测  $M_o$  桥中, 根据电桥特性知由  $R'_z$  所引起的应变讯号不影响电桥的输出值, 故从 (1)、(2) 两式可取掉  $R'_z / EF$  项, 得:

$$\epsilon_1 = (M_o - R'_y L) / EW \tag{3}$$

$$\epsilon_2 = (M_o - R'_y L_2) / EW \tag{4}$$

由式 (3) 得

$$M_o = \epsilon_1 EW + R'_y L \tag{5}$$

由 (4) 式得

$$R'_y = (M_o - \epsilon_2 EW) / L_2 \tag{6}$$

将 (6) 式代入 (5) 式, 经整理得:

$$M_o = \frac{L_2}{L_2 - L} EW (\epsilon_1 - \frac{L}{L_2} \epsilon_2) = \frac{L_2}{L - L_2} EW (\frac{L}{L_2} \epsilon_2 - \epsilon_1) = \frac{L_2}{L_1} EW (\frac{L}{L_2} \epsilon_2 - \epsilon_1) \tag{7}$$

或

$$M_o = EW \frac{L}{L_1} (\epsilon_2 - \frac{L_2}{L} \epsilon_1) \tag{8}$$

(7), (8) 两式表明,  $M_o$  值需用两个测量桥分别测得  $\epsilon_1, \epsilon_2$  后方可求得, 如此, 不仅占用测量线路多, 且使数据处理工作加重。以下讨论采用一个测量桥便可测得  $M_o$  的可能途径。

在讨论以前, 先规定, 如图 5a 所示,  $R_{m1}, R_{m2}$  为测  $\epsilon_1$  的应变片,  $R_{m3}, R_{m4}$  为测  $\epsilon_2$  的应变片, 及令  $R_{m1} = R_{m2}, R_{m3} = R_{m4}$

$$\text{现分析式 (8): 令 } \bar{\epsilon}_1 = \frac{L_2}{L} \epsilon_1 \quad \text{则 } M_o = EW \frac{L}{L_1} (\epsilon_2 - \bar{\epsilon}_1) \tag{9}$$

由 (9) 式知,  $M_o$  与  $(\epsilon_2 - \bar{\epsilon}_1)$  成正比, 可见, 若在一个测量桥中能直接测出  $\epsilon_1$  与  $\bar{\epsilon}_1$  的差值来, 则  $M_o$  可用一个电桥测得。根据电桥的加减特性, 若令电桥的测  $\epsilon_1$  桥臂与测  $\epsilon_2$  的桥臂相邻, 且测  $\epsilon_1$  的桥臂反应出的应变值不是  $\epsilon_1$  而是  $\bar{\epsilon}_1$ , 测  $\epsilon_2$  的桥臂反映出的应变值为  $\epsilon_2$ 。

则可实现上述目的。为此,对  $\bar{\epsilon}_1 = \frac{L_2}{L} \epsilon_1$  做如下变换:

由  $\epsilon_1 = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{mi}^{(2)}}{R_{mi}}$  得

$$\bar{\epsilon}_1 = \frac{L_2}{L} \epsilon_1 = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{mi}}{L/L_2 R_{mi}} = \frac{1}{KL/L_2} \frac{\Delta R_{mi}}{R_{mi}} (i = 1, 2) \quad (10)$$

式中  $K$ ——应变片灵敏度系数,  $\Delta R_{mi}$ ——阻值为  $R_{mi}$  的应变片的阻值变化量。

根据(10)式,得出使测  $\epsilon_1$  的桥臂反映出应变值为  $\bar{\epsilon}_1$  的途径有两种:

a) 在测  $\epsilon_1$  的桥臂 AB, AD 上分别串入阻值为  $\frac{L_1}{L_2} R_{m1}$ ,  $\frac{L_1}{L_2} R_{m2}$  的非工作电阻, 则该两桥臂电阻值分别为:

$$R_{AB} = R_{m1} + \frac{L_1}{L_2} R_{m1} = \frac{L}{L_2} R_{m1}, R_{AD} = \frac{L_1}{L_2} R_{m2} + R_{m2} = \frac{L}{L_2} R_{m2} \text{ (图 5d)}$$

由  $\epsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R}$  得电桥 AB 的输出应变为:

$$\epsilon_{AB} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{m1}}{R_{AB}} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{m1}}{L/L_2 R_{m1}} = \frac{L_2}{L} \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{m1}}{R_{m1}} = \frac{L_2}{L} \bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}_1$$

及

$$\epsilon_{AD} = \bar{\epsilon}_1.$$

b) 令测  $\epsilon_1$  的应变片  $R_{m1}, R_{m2}$  的  $K$  值  $K_{AB}, K_{AD}$  相等且为测  $\epsilon_2$  的应变片  $K$  值的  $\frac{L_2}{L}$  倍, 则

由  $\epsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R}$  有:

$$\epsilon_{AB} = \frac{1}{K_{AB}} \frac{\Delta R_{m1}}{R_{m1}} = \frac{1}{L_2/LK} \frac{\Delta R_{m1}}{R_{m1}} = \frac{L}{L_2} \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{m1}}{R_{m1}} = \frac{L}{L_2} \epsilon_1 = \bar{\epsilon}_1$$

及

$$\epsilon_{AD} = \bar{\epsilon}_1.$$

再分析(7)式, 令  $\frac{L}{L_2} \epsilon_2 = \bar{\epsilon}_2$  则

$$M_0 = EW \frac{L_2}{L_1} (\bar{\epsilon}_2 - \epsilon_1)$$

因为  $\epsilon_2 = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{mi}}{R_{mi}}$

所以

$$\bar{\epsilon}_2 = \frac{L}{L_2} \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{mi}}{R_{mi}} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{mi}}{L_2/L R_{mi}} (i = 3, 4) \quad (11)$$

由(11)式, 亦可得出使电桥桥臂直接反映出  $\bar{\epsilon}_2$  的途径有两种:

A) 在测  $\epsilon_2$  的桥臂 BC, DC 上分别并入两阻值为  $\frac{L_2}{L_1} R_{m3}$ ,  $\frac{L_2}{L_1} R_{m4}$  的非工作电阻 (见图 5e)

则该两桥臂电阻值分别为  $\frac{L_2}{L} R_{m3}$ ,  $\frac{L_2}{L} R_{m4}$ , 由此有:

$$\epsilon_{BC} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{m3}}{L_2/L R_{m3}} = \bar{\epsilon}_2 \text{ 及 } \epsilon_{DC} = \bar{\epsilon}_2$$

B) 令测  $\epsilon_2$  的应变片  $R_{m3}, R_{m4}$  的  $K$  值  $K_{BC}, K_{DC}$  相等且为测  $\epsilon_1$  应变片  $K$  值的  $\frac{L_2}{L}$  倍, 则有

$$\epsilon_{BC} = \frac{1}{K_{BC}} \frac{\Delta R_{m3}}{R_{m3}} = \frac{\Delta R_{m3}}{L_2/LKR_{m3}} = \frac{1}{K} \frac{\Delta R_{m3}}{L_2/LR_{m3}} = \bar{\epsilon}_2 \text{ 及 } \epsilon_{DC} = \bar{\epsilon}_2$$

综上所述,直接测量  $M_0$  可采用以下 3 种措施:串联电阻法(即 a 中讨论情况)、并联电阻法(即 A 中讨论情况)、选配灵敏系数 K 值法(即 b, B 中讨论情况)。

3 种措施的应用特点是:串联电阻法和并联电阻法只能采用全桥法,这是由电桥平衡条件所决定的。选配灵敏度系数法可用半桥法(如将图 5a 中的  $R_{m1}$  与  $R_{m3}$ ;  $R_{m2}$  与  $R_{m4}$  均可组成半桥测量)也可用全桥法测量。串联电阻法要求在测量  $\epsilon_1$  的桥臂上分别串入两非工作电阻,并联电阻法则要求在测量  $\epsilon_2$  的桥臂上分别并入两非工作电阻,为使用方便,在布片时取  $L_1=L_2, R_{m1}=R_{m2}=R_{m3}=R_{m4}=120\Omega$ ,在用串联电阻法进行测量时,便可直接应用应变仪所备的精密无感电阻( $R=120\Omega$ )。而在用并联电阻法时,可直接将电桥盒的内半桥(两臂电阻均为  $120\Omega$ )并入到测量桥桥臂上进行工作。相比之下,并联电阻法较其他各法使用起来都方便。

### 2.2 G 型测力装置测力原理

G 型测力装置是在与工作部件对称面相垂直连接的管形弹性元件上进行测力的。

由于 G 型测力装置的结构形式保证了力  $\vec{R}$  的作用面与弹性元件轴线始终垂直且不沿弹性元件的轴向产生移动,因之就可采用测弯矩方式测取  $\vec{R}_x, \vec{R}_y$ ,用常用的测扭方式测扭矩  $M_0$ ,布片及组桥如图 6 所示。图中  $\vec{R}'_x, \vec{R}'_y$  是将力  $\vec{R}$  平移且分解后的结果。力的简化点是弹性元件的轴线与工作部件对称面的交点 O 点(图 2a)。

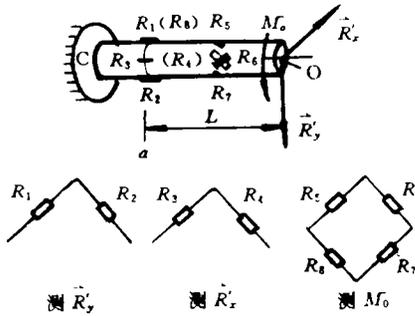


图 6 G 型测力装置测  $R_x, R_y, M_0$  力布片及组桥示意图

测量原理:

1)测  $\vec{R}_x$  原理:如上所述,欲测  $R_x$ ,只需测得  $\vec{R}'_x$ ,设 OC 的截面 a 在  $\vec{R}'_x$  作用下产生的弯矩为  $M=R'_x L$ ,由材力知, a 截面上的弯矩与该截面的抗弯截面模量 W,截面上的最大主应力  $\sigma$  的关系为  $M=\sigma W$ ,又据虎克定律  $\sigma=E\epsilon$ ,所以,  $M=EW\epsilon$ ,于是得:

$$R'_x L = WE\epsilon \quad \text{即} \quad R_x = R'_x = \frac{WE\epsilon}{L}$$

可见只要测得截面 a 的正应变  $\epsilon$ ,则  $R'_x$  就可求得。

测  $R'_y$  原理同上。

2)测  $M_0$  原理,由材力知,在轴受扭时,作用于轴上的扭矩  $M_0$  与轴因  $M_0$  的作用而产生的横截面上的最大剪应力  $\tau_{max}$  以及圆轴的抗扭截面系数  $W_t$  之间的关系为:

$$M_0 = \tau_{max} W_t \tag{12}$$

欲求得  $M_0$ ,须求得  $\tau_{max}$ . 由于在轴受扭的情况下,在轴横截面上的最大剪应力  $\tau_{max}$  与于轴线成  $45^\circ$  方向上的两应力  $\sigma_1, \sigma_3$  的绝对值相等,而  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  又相互垂直、反号等值,即

$$\sigma_1 = -\sigma_3 \quad \tau_{max} = \sigma_1 = |-\sigma_3|, \text{ 又由广义虎克定律: } \sigma = \frac{E\epsilon}{1+\mu} \text{ 得:}$$

$$\tau_{max} = |\sigma| = \left| \frac{E\epsilon}{1+\mu} \right|$$

式中  $\mu$ ——材料的泊松比;  $\epsilon$ ——在  $\sigma$  作用下材料的应变值;  $E$ ——材料的弹性模量  
将(13)式代入(12)式得:

$$M_0 = \tau_{\max} W_a = \frac{EW_a}{1 + \mu} |\epsilon|$$

可见,沿与轴线成  $45^\circ$  方向贴片,测得由主应力  $\sigma_1, \sigma_3$  所产生的主应变  $\epsilon_1, \epsilon_3$ ,便可求得  $M_0$ 。

上述各测量方法中,通过利用电桥工作特性以及选用适当的布片技术,消除了温度变化对测量结果的影响,排除了非测量量对所测量的干扰(片子粘贴位置误差所引起的各力相干情况除外)。

通过对上述两种测力装置的讨论,可以看出,测力装置具有结构简单、测试方便以及工作性能好等特点<sup>[1]</sup>,因之能够满足诸如深耕铲、锄铲、开沟器等锄铲类农机土壤工作部件外载荷的测量问题。

#### 参 考 文 献

- 1 邵维民,李小昱,卢博友. L型四分力传感器及深松铲受力特性测定. 西北农学院学报, 1985(4): 23~35
- 2 丁至成. 农机测试技术. 北京: 农业出版社, 1983
- 3 刘宏文. 材料力学. 北京: 人民教育出版社, 1979

## Force Determination Device of Outer Load for Hoeing and Chiseling Working Parts in Soils

Lu Boyou     Xue Shaoping

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

**Abstract** This paper introduces two kinds of structural patterns and working principles of force determination device for outer load of strain types of farm implementing hoeing and chiseling working parts in soils. "L-type for determination device" to determine force distance has three combination bridge ways: series resistance method; parallel resistance method and matching  $K$  value method, of which series resistance method is convenient to practical use.

**Key words** farm machinery implement, force determination device, combination bridge way