

船式拖拉机船体行驶阻力的研究*

区颖刚·· 邵耀坚

(农机系)

提 要

船式拖拉机在深软水田中工作、或在河网地区为进行田间转移而在水中行驶时,船体是其主要的支承部件。本文根据水池试验得到的船模和船拖原型船体在不同前进速度下行驶阻力的试验结果,研究了船体在水中的行驶阻力,提出了降低阻力的途径。为研究船体在水田泥中的滑行阻力,研制了一条土槽进行试验。结果表明:田面有泥浆薄层时船体滑行阻力将大大降低。引入液体润滑理论对泥浆薄层的润滑作用进行了探讨,并用电子计算机对土槽试验数据进行回归分析,提出了船体滑行阻力的半经验表达式。船体在稀软田中滑行阻力的实测和预测值看来是相当一致的。文中列出的阻力系数值可供预测同类条件下的船拖船体滑行阻力时参考。

前 言

船式拖拉机(简称船拖、又名机耕船)是我国创制的一种新型水田动力机械。一个接地面积较大的船体,使它能在其他拖拉机无法行驶的深水田中工作。有的船拖,如广东的中山一10型,船体排水体积较大,能在水中浮起并自行推进,在河网地区可通过河道方便地进行田间转移。实践表明,船体行驶阻力的大小对船拖性能的好坏有极大的影响。因此,研究船体阻力形成的机理,寻找降低行驶阻力的途径,在理论和实践上都很有意义。

有关船式拖拉机的研究,国外的文献未见报道。与此有关的,主要有D. Gee—Clough对机动插秧机浮板阻力的试验^[1], M. G. Bekker对雪撬阻力的论述^[2]。国内对船拖的研究很多,但应用地面—车辆系统力学理论从土壤—船体系统的角度探讨船体阻力问题的文献,还不多见。主要有史滦平、邓京生^[3]、吴起亚^[4]等的论述。

* 本文是区颖刚硕士论文的主要部分,邵耀坚是指导教师。

本文承洛阳拖拉机研究所邓卓荣高级工程师,广东省农机研究所何宪率高级工程师,程立沂付所长和华南农学院伍丕奔付教授,李傑才付教授评阅,并得到本系王前健讲师的指教。全部试验工作都是在罗锡文、张泰岭同志的全力协助下完成的。中山大学船池试验室及本院农机系计算机室给予大力支持,在此表示感谢。

• • 1979——1982硕士研究生

这些研究表明, 船体等滑板类元件的行驶阻力, 主要为压实阻力和滑行阻力。田面有无泥浆水, 对滑行阻力的大小有极大的影响。但泥浆水在滑行中的作用, 还需要从理论上深入进行分析。船拖船体在水中阻力的研究, 则还未见报道。

本文拟通过理论分析和船模水池试验, 以及土槽中船体的试验, 对船拖船体在水中的阻力及水田中的滑行阻力, 特别是泥浆水在滑行中的作用机理, 作初步探讨。

一、试验设备简介

为了在较理想的条件下研究船体阻力, 研制了一条室内土槽及一船拖船体 (图 1-1)。

土槽内宽1.6米、长20米、深1米。两边装有钢轨。试验台车装载着测试仪器, 由钢丝绳牵引在钢轨上前后运动, 经传感器带动原型试验船体在土槽中滑行。

牵引阻力由BLR-1/200型拉压传感器——Y6D-3A应变仪——X-Y函数记录仪测定并记录。

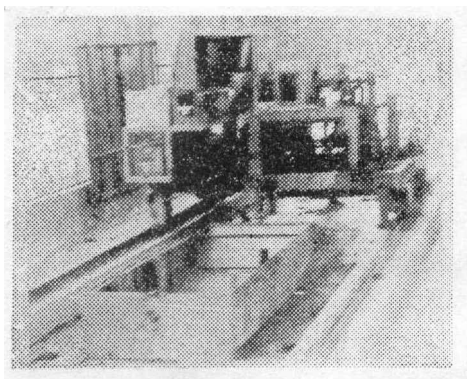


图 (1-1) 试验土槽及船体

二、船式拖拉机船体在水中的行驶阻力

根据船舶理论, 船体阻力是船体与水在船体浸湿表面上相互作用, 产生连续分布的表面力造成的。如图 (2-1), 作用在各微元上的切向力 τ 在船体运动方向X上的投影的总和就是粘性摩擦阻力 R_f 。各个流体动压力 P_n 在X上的投影总和就是压差阻力 R_r , 通常称为剩余阻力, 它由涡流阻力及兴波阻力两部分组成〔3〕〔6〕。

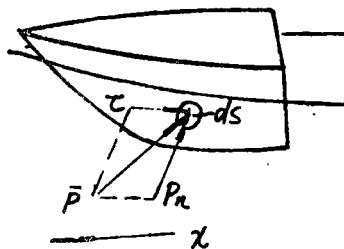


图 (2-1) 船体在水中运动的阻力

船舶在水中的阻力由试验测定。由于相似理论的成功应用, 一般都用船模在船舶水池中试验, 然后由相似理论、量纲分析法换算出所求的船体阻力。

由理论分析可得实船阻力计算式

$$R = R_f + R_r = C_f \frac{1}{2} \rho u^2 s + C_L^3 C_r \frac{1}{2} \rho u_M^2 S_M \quad (2-1)$$

式中: C_f 为摩擦阻力系数

U 为速度

C_r 为剩余阻力系数

ρ 为流体密度

C_L 为几何相似条件

S 为船体湿水面积

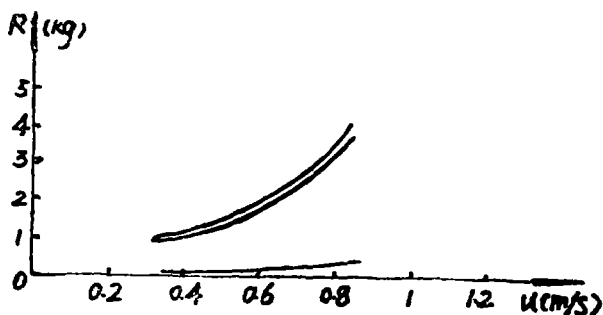
本文的船拖船体阻力数据是根据中山大学船模水池测定的阻力换算的。为了进行对比、验证, 还在土槽中灌满水用试验船体进行了试验。

两组试验数据如图(2-2)、(2-3)。结果表明:

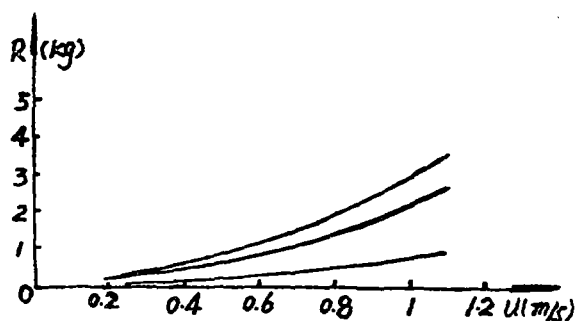
1. 船拖船体在水中的阻力不大, 在两组试验中, 阻力值都没有超过 5 kg。

2. 摩擦阻力在总阻力中只占一小部分, 船体阻力主要是剩余阻力。

3. 土槽中试验船体的摩擦阻力小于换算船体的摩擦阻力, 但总阻力却大于后者。这主要是由于实际的试验船体表面上有很多突起的螺钉头, 交界面也不够光滑, 引起很大的附加涡流阻力所至。



图(2-2) 水池船模数据换算的船体阻力



图(2-3) 试验船体在土槽中(灌水)的阻力

三、船式拖拉机船体在水田中的滑行阻力

(一) 考虑泥浆作用时船体滑行阻力分析

1. 泥浆的动力特性: 稀泥浆是粘土颗粒在水中的悬浊液, 是一种非牛顿流型的塑性流变体^[5]。其流动服从宾汉定律: $\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dy}$ (3-1)

式中 τ_0 为动切应力, η 为塑性粘度, $\frac{dv}{dy}$ 为速度梯度。

参数 τ_0 、 η 都随泥浆成份及含水量变化。表(3-1)、(3-2)分别为土槽中水田土壤的机械组成及表层泥浆参数值。

将 τ_0 值代入(3-1)式可知其作用很小, 可忽略不计, (3-1)式简化为

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3-2)$$

泥浆是一种流变体, 而土壤上层的塑性土壤虽然也有流变性, 但在地面——车辆力学的问题中, 由于作用时间很短, 一般都没有考虑其流变性质, 所以, 两者的力学性状及它们对船体的作用应该按不同的理论分别考虑。

2. 船体滑行阻力分析: 根据泥浆存在时船底在田面的滑行状态, 本文引用液体动力润滑理论^[7]来讨论泥浆水在滑行中的作用。这个作用包括两个方面: 一是泥浆的润滑作

表 (3-1)

土 槽 土 壤 机 械 组 成

砂粒含量 (>0.01mm)			粘粒含量 (<0.01mm)				土壤质地
>0.05mm	0.05~0.01mm	合 计	0.01~0.005 mm	0.005~0.001 mm	<0.001 mm	合 计	
45.83%	11.47%	57.3%	7.3%	16.65%	18.75%	42.7%	

表 (3-2)

土槽水田泥的泥浆粘度及动切力测定值*

编 号	水 土 比	η'	η	τ_0	流 型	气 温
1	800%	1.5			牛顿流型	34°C
2	500%	1.8			牛顿流型	
8	300%	2.5			牛顿流型	
4	200%	3			牛顿流型	
5	100%		6	5	宾汉流型	
6	70%		8	7.5	宾汉流型	
7	50%		15	22.5	宾汉流型	

*表中 η' 为牛顿流体的动力粘度系数(厘泊); η 为宾汉流体的塑性粘度系数(厘泊); τ_0 为动切力(达因/厘米²)

用,二是泥浆本身的液体摩擦阻力作用。如图(3-1),考虑一与船体固连在一起的坐标系o-xyz,在船底泥浆层中取一边长为dx、dy、dz的微元体,它沿x方向的平衡方程:

$$pdydz + (\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy) dx dz = (p + \frac{\partial p}{\partial x} dx) dy dz + \tau dx dz \quad (3-3)$$

式中p为压应力, τ 为剪应力。

考虑(3-2)式及液体润滑理论的一维雷诺方程

$$\frac{dp}{dx} = -6\eta u \frac{h-h_0}{h^3} \quad (3-4)$$

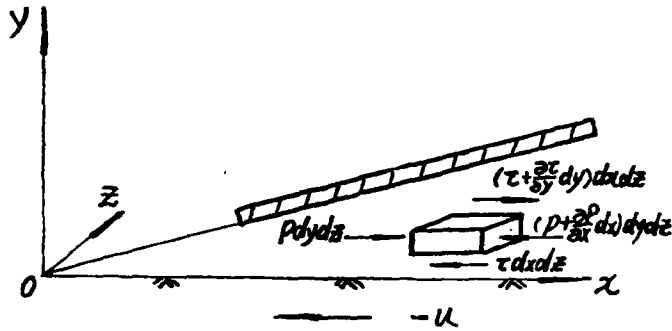
式中h为x处的泥浆层厚度, $\bar{h}$ 为 $\frac{dp}{dx} = 0$ 处的h值。

$$\text{可得压力分布方程: } p = \frac{6\eta u A}{h_0} \left[\frac{1}{h} - \frac{h_0 h_1}{(h_1 + h_0) h^2} - \frac{1}{h_1 + h_0} \right] \quad (3-5)$$

$$\text{及泥浆液体摩擦阻力方程: } R_1 = k_1 u \quad (3-6)$$

式中 $k_1 = \eta B \zeta f(u, p_0, L, \eta)$ 为液体摩擦系数。

方程(3-5)说明, 泥浆层的承压能力与滑行速度成正比, 而承载能力大, 润滑作用就大。方程(3-6)则表明, 泥浆层的液体摩擦阻力 R_1 也是随速度的增加而增加的, 且与 p_0 、 L 、 η 等因素有关, 这些因素间关系很复杂, 需要由试验来确定。



(图 3-1) 泥浆润滑作用原理

船底在田面滑行时, 由于泥浆润滑层很薄, 当田面或船底不平时都有部分船底和土层直接接触。因此, 船体的滑行阻力还包括船底和塑性表土层间的粘附摩擦阻力, 按王瑞麟^[1]、吴起亚等推荐的公式, 这个阻力可用下式计算:

$$R_2 = S (C_r + p_0 \operatorname{tg} \delta) \quad (3-7)$$

式中 C_r 为土壤外附力、 δ 为外摩擦角、 s 为船底接地面积。由于泥浆的润滑作用, 这种直接接触只发生在部分船底面上, 故应乘上一系数 K_2 , 可称为土壤作用系数, 是一无量纲值。

综上所述, 船体滑行阻力 R_c 可表为:

$$R_c = R_1 + R_2 = k_1 u + k_2 s (C_r + p_0 \operatorname{tg} \delta) \quad (3-8)$$

式中 $K_1 = \eta B \zeta f(u, p_0, L, \eta)$, 而 k_2 与土壤、泥浆的情况有关。这两个参数需要由试验确定。

为了探讨(3-8)式是否反映了船体在有田面泥浆水的水田中滑行阻力的变化规律, 及确定式中的系数 k_1 、 k_2 , 本试验研究了速度 u 、比压 p_0 、船体长宽比及土壤条件对船体滑行阻力的影响。

3. 试验方法: 试验在土槽中进行。在试验中, 为了专门研究滑行阻力, 必须造成一种没有压实作用的纯滑行状态。为此, 让船体通过准备好的土壤, 它将在田面上压出一条与其比压相适应的沟, 以后再重复通过, 经测定发现田面不再发生新的沉陷, 测定第一次通过后各次的土壤承压能力, 也没有明显变化。这样, 每次通过后, 处理好田面稀泥浆, 用土壤外附力、内聚力仪测定土壤的法向外附力, 使其前后保持一致, 就可以认为在船拖这样小比压下有限次的重复通过, 没有引起土壤性质的变化, 所测得的船体阻力, 完全当滑行阻力处理。

(二) 试验结果及分析

1. 田面泥浆水层对阻力的影响: 试验结果见表(3-3)。试验土壤的承压强度、含水率, 外附力、外摩擦角如图(3-2)。

结果表明, 薄层泥浆水的存在对减小船体与塑性土壤层间的阻力确实起了很大作用。它象一层润滑剂, 使滑动阻力大大降低, 试验结果也表明, 阻力与表层土壤本身的

表 (3-3)

有、无田面泥浆水时的船体滑行阻力

		承压强度较低的田			承压强度较高的田	注
		$P_0 = 0.02$ kg/cm ²	$P_0 = 0.04$ kg/cm ²	$P_0 = 0.06$ kg/cm ²	$P_0 = 0.02$ kg/cm ²	
船体牵引阻力	无田面泥浆水	45	48	60	97	$\mu = 0.2$ 米/秒
R_c 的平均值	有田面泥浆水	13.5	20	41	40	

机械强度也有关系。这与前面的分析是一致的。

2. 牵引速度对阻力的影响：试验结果如图 (3-3)、(3-4)。

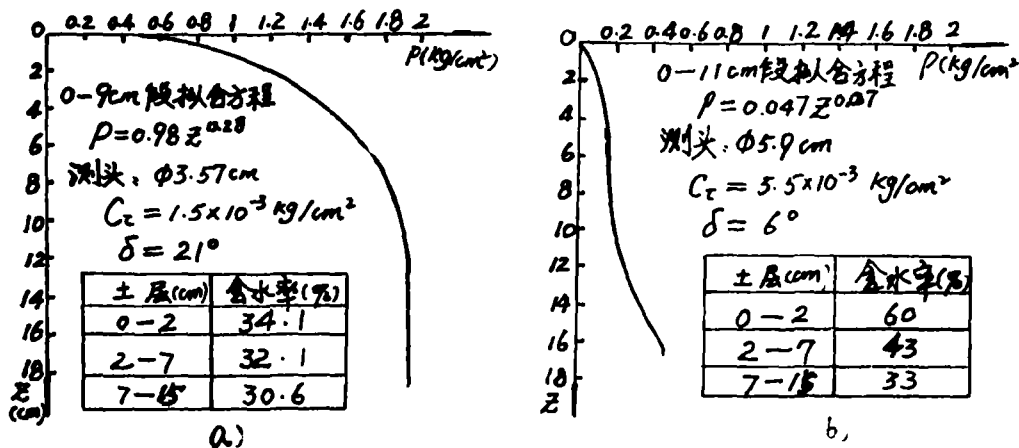


图 (3-2) 土壤的承压强度及含水率、外附力、外摩擦角值

用电子计算机对试验数据进行曲线拟合, 图 (3-3) 中数据的拟合方程为:

$$\left. \begin{aligned} p_0 = 0.02 \text{ kg/cm}^2 \text{ 时, } R_c &= 35u^2 - 57.93u + 51.32 \\ p_0 = 0.04 \text{ kg/cm}^2 \text{ 时, } R_c &= 69.8u^2 - 98.1u + 87.7 \\ p_0 = 0.06 \text{ kg/cm}^2 \text{ 时, } R_c &= 68u^2 - 88.5u + 101.3 \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

图 (3-4) 中数据的拟合方程为:

$$\left. \begin{aligned} p_0 = 0.02 \text{ kg/cm}^2 \text{ 时, } R_c &= 2.18u + 12.89 \\ p_0 = 0.04 \text{ kg/cm}^2 \text{ 时, } R_c &= 10.39u + 19.96 \\ p_0 = 0.06 \text{ kg/cm}^2 \text{ 时, } R_c &= 19.72u + 27.85 \end{aligned} \right\} \quad (3-10)$$

结果表明, 速度对滑行阻力有明显的影响, 这正是泥浆动力润滑的特征。

再看图 (3-3), 如前所述, 泥浆水的液体润滑作用及阻力与速度成正比。所以开始时, 阻力可看成土壤的吸附摩擦阻力。随着速度增加, 泥浆水的润滑作用逐渐增加, 土壤的吸附摩擦作用减小, 虽然这时泥浆本身的液体摩擦阻力增加了, 但总的结果是阻

力下降,所以这一阶段,可以不考虑泥浆本身的摩擦阻力,而将阻力的下降看作完全是由于吸附摩擦阻力变化的结果。也就是说,在(3-8)式中,设 $k_1=0$,而 k_2 是个随速度变化的量。而到了某一点以后,阻力值开始上升,我们知道,随着速度增加,泥浆的润滑作用增加,土壤的吸附摩擦阻力不会增加,所以这时的阻力增加就应看作是泥浆的液体摩擦阻力增加造成的。而土壤的吸附摩擦作用也可以认为这时已下降到一个极限,以后都是常数,等于总阻力值最低点的值。这个点,是两种作用的转折点,称为稳定点。

而图(3-4)的情况,实测阻力值从 $u=0.15\text{m/s}$ 开始一直上升,没有出现一个开始下降然后上升的过程。可以认为,这是由于在这种土壤较松软的情况下,速度很小时,土壤的粘附摩擦作用就已降到极限。因此,为了简便,这里直接将 $u=0$ 取作稳定点。

3. 船板长宽比的影响: 用两块面积相同,长宽比不同的平板进行试验,结果如图(3-5)。

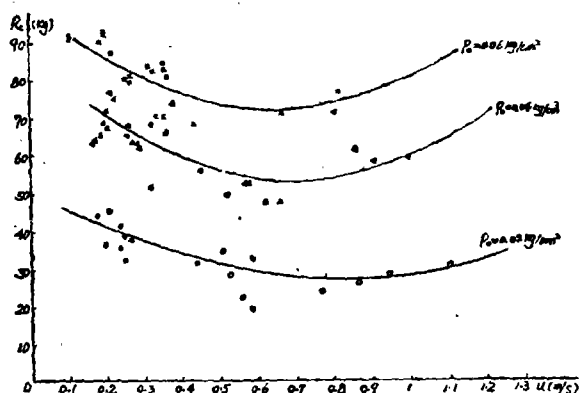
结果表明,在试验的几种速度及比压下,长板的阻力都小于宽板的阻力,接地比压越大差别越明显。

4. 船体滑行阻力表达式:
如前面分析,船底滑行阻力可表为(3-8)式:

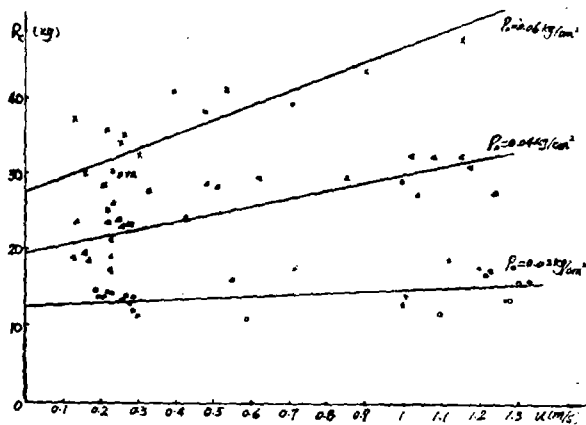
$$R_c = R_1 + R_2$$

$$= k_1 u + k_2 s (C_\tau + p_0 \tan \delta)$$

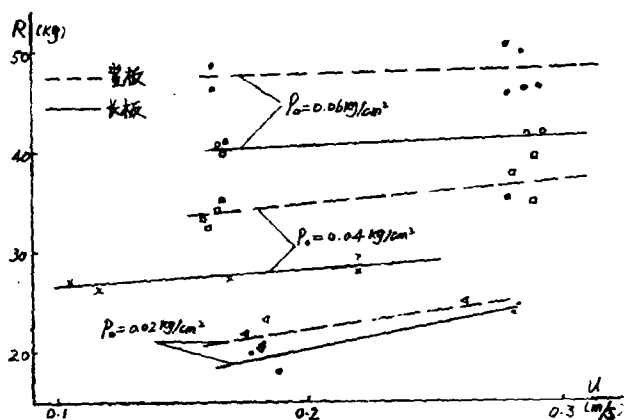
以上试验结果表明,此式反



图(3-3) 有田面泥浆水时的船体滑行阻力
(承压强度较高黏田)



图(3-4) 有田面泥浆水时的船体滑行阻力
(承压强度较低的田)



图(3-5) 船板长宽比对船体阻力的影响。

映了船体在有田面泥浆水的水田中的阻力变化规律。式中 u 、 s 、 p_0 及 C_τ 、 δ 等参数都可以预先确定或测定。而液体摩擦系数 k_1 和土壤作用系数 k_2 是需由试验确定的经验参数,在上述试验情况下得到的阻力系数 k_1 、 k_2 值见表(3-4)、(3-5)。

表(3-4) 液体摩擦系数 k_1 值

土 壤 条 件		k_1 值		
		$p_0 = 0.02$ kg/cm ²	$p_0 = 0.04$ kg/cm ²	$p_0 = 0.06$ kg/cm ²
图(3-2,a)所示 的土壤情况(承压强度较高的土壤)	稳定前	取 $k_1 = 0$		
	稳定后	$35(\frac{u-0.83}{\sqrt{u}})^2$ ($u > 0.83\text{m/s}$)	$69.8(\frac{u-0.7}{\sqrt{u}})^2$ ($u > 0.7\text{m/s}$)	$68(\frac{u-0.65}{\sqrt{u}})^2$ ($u > 0.65\text{m/s}$)
图(3-2,b)所示的土壤情况 (承压强度较低的土壤)		2.2	10.4	19.7
		回归分析得 $k_1 = -6.8 + 438p_0$		

表(3-5) 土壤作用系数 k_2 值

土 壤 条 件		k_2 值			注
		$p_0 = 0.02$ kg/cm ²	$p_0 = 0.04$ kg/cm ²	$p_0 = 0.06$ kg/cm ²	
图(3-2a)所示的土壤情况 (承压强度较高的土壤)	稳定前	$35(\frac{0.83-u}{\sqrt{u}})^2$ ($u < 0.83\text{m/s}$)	$69.8(\frac{0.7-u}{\sqrt{u}})^2$ ($u < 0.7\text{m/s}$)	$68(\frac{u-0.65}{\sqrt{u}})^2$ ($u < 0.65\text{m/s}$)	
	稳定后	0.24	0.28	0.26	
图(3-2b)所示的土壤情况 (承压强度较低的土壤)		0.15	0.18	0.21	

用式(3-8)及表(3-4)、(3-5)中的 k_1 、 k_2 值对类似上面较软田条件下的一组试验进行预测,结果见图(3-6)。从结果可以看出,预测值和实测值还是相当一致的。

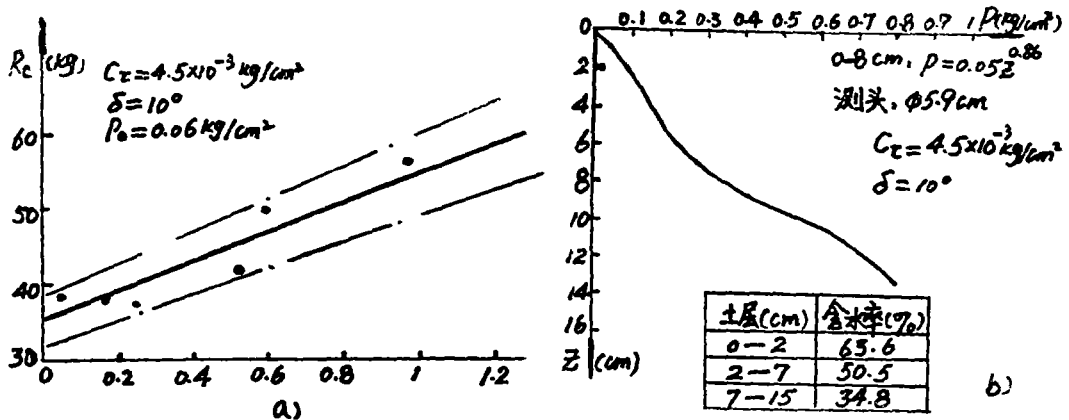


图 3—1) 6) a) 船体滑行阻力预测和实测值的比较 (实线为预测线, 点划线是10%误差线); b) 试验土壤情况。

四、结 论

(一) 由船体在水中的试验发现

1. 在船拖的使用速度范围内, 实测阻力值最大不超过5kg, 但驱动叶轮在水中的试验表明它所能产生的推进力也很有限, 实测值不到10kg。因此, 研究船拖船体在水中的行驶阻力, 改善其受力情况是必要的。

2. 船体在水中行驶产生的阻力中, 摩擦阻力只占一小部分, 最大不到0.5kg, 主要是剩余阻力, 特别是由于船体一些表面突起及交界面粗糙, 引起较大的涡流阻力。因此, 减少船体在水中阻力的主要途径应该是: 选用合理的船体形状, 如船头倾角要小, 最好做成流线型; 各个表面的过渡处应圆滑, 尽量减少不必要的表面突起。

3. 船体在水中阻力的研究方法及阻力变化规律, 研究船体在水田泥中的阻力时可参考。

(二) 船体在土槽水田泥中的阻力试验表明

1. 田面薄层泥浆水对船板类大面积滑行行走机构的滑行有十分重要的作用, 它象一层润滑剂, 使船体滑行阻力大大降低。在本试验中, 有无田面泥浆水滑行阻力相差最大达3倍以上。

2. 改变船体滑行速度从0.1~1.3米/秒。结果表明速度对滑行阻力有明显的影响。

3. 长而窄的船板比短而宽的阻力小。因此, 在结构允许时, 船板应有适当的长宽比值。

4. 根据理论分析及用电子计算机对土槽试验数据进行的回归分析, 提出了船体滑行阻力的半径验公式

$$R_c = k_1 u + k_2 s (C_\tau + p_0 \tan \delta)$$

用此式对稀软田中滑行阻力进行了预测, 结果表明预测值和实测值还是相当一致的。

5. 本文在探讨船体滑行阻力机理时, 引入了液体润滑理论来研究泥浆对阻力的影响, 这还是一个新的尝试, 初步结果表明这个方法是可行的。文中得到的阻力系数 k_1 、 k_2 值在使用上式预测同类条件下的船拖船体滑行阻力时可作参考。今后应进一步在各种条件下进行试验, 找出阻力系数与各种参数间的经验表达式, 使上式成为普遍有效的滑行阻力预测公式。

参考文献

- [1] 王瑞麟、张贞良、喻谷源: 土槽中剪切元件的试验和剪应力计算, 《农业机械学报》, 10 (4) 1979, 23—41。
- [2] 史深平、邓京生, 机耕船的发展及其水田作业性能分析, 《农业机械学报》, 10 (2) 1979, 64—74。
- [3] 许维德: 《流体力学》, 国防工业出版社1979年, 第181—185页, 240—269页,
- [4] 吴起亚: 机耕船船体接地比压的选择, 《农业机械学报》, (3)1983, 13—20。
- [5] 袁龙蔚: 《流变学概论》, 上海科技出版社1961年, 第1—20页。
- [6] 蒋维清: 《船舶原理》, 人民交通出版社1979年, 第198—224页。
- [7] A. Gameron. (汪一麟等译): 《润滑理论基础》, 机械工业出版社1976年, 第18—50页。
- [8] M. G. Bekker: 《陆用车辆行驶原理》, 机械工业出版社1962, 第257—276页。
- [9] D. Gee-clough, Recent Research into Vehicle Performance in Wetland Conditions, Proceedings 7th Int. Conf. of ISTVS, P205—237. 1981.

A STUDY ON THE MOTION RESISTANCE OF THE FLOATING BODY OF BOAT-TYPE TRACTOR

Ou Yinggang Shao Yaojian

(Department of Agricultural Machinery)

ABSTRACT

According to the results of the boat model tests and the full-scale boat tests carried out in the test pools, the sailing resistances of the floating boat on water under different velocities are studied in this paper. Some suggestions are proposed to reduce the resistance. In order to study the sliding resistance of the floating boat in paddy field soil, a soil bin is built in which the tests are conducted. The results indicate that the sliding resistance is greatly reduced by the lubrication effect of a thin film plaster on the soil surface. The theory of liquid lubrication is introduced into this study. The data obtained from the soil bin tests are entered into the electronic computer and the regression analysis is made with a special developed program. A semi-empirical expression for sliding resistance of floating boats is presented. The measured and predicted values of the sliding resistance in soft paddy field soil are found in good correlation. The resistance coefficients presented in this paper can be used as the reference to predict the sliding resistance of floating boat under similar conditions.