

# 船式拖拉机气层减阻影响因素分析与参数优化研究\*

张三强<sup>1,2</sup>, 邹星<sup>1,2</sup>, 陈源<sup>1,2</sup>, 章桃娟<sup>3</sup>

(1. 湖北工业大学, 武汉市, 430068; 2. 湖北省农业机械工程研究设计院, 武汉市, 430068;  
3. 浠水县农业技术推广中心, 湖北黄冈, 438200)

**摘要:**针对船式拖拉机船壳在水田泥浆环境中作业行进阻力大的问题,对船式拖拉机船壳气层减阻进行研究。通过构建仿真模型,对影响气层减阻性能的泥浆来流速度和气流量两个因素进行分析,并对船壳底板凹槽结构进行参数优化,研究不同深度凹槽结构的气层减阻性能。研究表明:泥浆来流速度增大在一定程度上会使气层产生破裂,导致总阻力增大,而气流量大小则直接影响气层的覆盖率。其中 0.03 m 凹槽深度船壳结构的减阻效果最好,绝对减阻率值为 27.2%。

**关键词:**船式拖拉机;气层减阻;参数优化

**中图分类号:**S291.81 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2022)01-0020-07

张三强, 邹星, 陈源, 章桃娟. 船式拖拉机气层减阻影响因素分析与参数优化研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(1): 20-26

Zhang Sanqiang, Zou Xing, Chen Yuan, Zhang Taojuan. Research on influencing factors and parameter optimization of boat-type tractors using air layer drag reduction [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(1): 20-26

## 0 引言

减小船式拖拉机在水田土壤中的滑行阻力是提高运行效率的有效手段,传统减小滑行阻力的方案多为对船壳结构本身进行改进,周明刚等通过研究船壳表面凹坑结构的排布、凹坑的大小和深度变化对总阻力的影响,结果表明采用等距排列,凹坑直径为 8 mm 深度为 5 mm 时减阻率可达 5.4%,在其后续的凸包结构对减阻率的影响研究中,同样得出具有一定减阻效果的结论。杨晖等<sup>[1]</sup>改变船壳底板弧形个数和弧形幅值研究减阻性能变化,主要通过弧形数改变船底壁面剪切力减小阻力,结果表明单弧幅值为 35 mm 减阻效率为 7.6%。戚得众等<sup>[2-3]</sup>研究发现船底增设档条能够船底减少两侧的泥浆泄漏,在对比有无档条阻力变化时,研究发现增设档条使船底含水量增加形成泥水层起到润滑减阻的效果,但档条会带来额外的附加阻力,过高的档条反而使行驶阻力增大,且档条凸于船壳表面会对船体操纵性产生的影响,如转向行驶时,凸起档条会产生额外阻力。气层减阻技术作为新兴的节能减排技术能够提供更好的减阻效果,欧勇鹏等<sup>[4]</sup>研究平板气层流动特征中发现凹槽深度对气层波动的波长几乎没有影响,波长长度与水的来流速度呈正相关;吴浩

等<sup>[5]</sup>研究变水深平板气层减阻,试验结果表明气层覆盖处的局部摩擦力几乎为零,气层减阻能够有效减小平板阻力;秦立果等<sup>[6]</sup>研究沟槽结构与结构排布发现盾鳞结构减阻率可达 17.86%。通过研究船式拖拉机船壳气层减阻的影响因素,并对船壳底板凹槽结构进行优化,进一步优化减阻效果。

## 1 计算模型

### 1.1 三维模型

参考实际船式拖拉机三维尺寸构建船壳模型,并对计算结果影响不大的特征结构进行简化,具体参数如表 1 所示。

表 1 船模的基本参数  
Tab. 1 Basic parameters of ship model

参数	数值
船长/m	3.0
船上表面宽/m	1.2
船底板宽/m	0.76
船高/m	0.6
设计吃水/m	0.3
船底凹槽长度/m	1.5
船底凹槽宽度/m	0.7

收稿日期:2020 年 10 月 28 日 修回日期:2020 年 12 月 28 日

\* 基金项目:湖北省自然科学基金(2018CFB542);国家重点研发计划(2018YFD0301300)

第一作者:张三强,男,1982 年生,湖南永州人,博士,讲师;研究方向为振动与噪声控制、结构优化设计。E-mail: zhangsanqiang@163.com

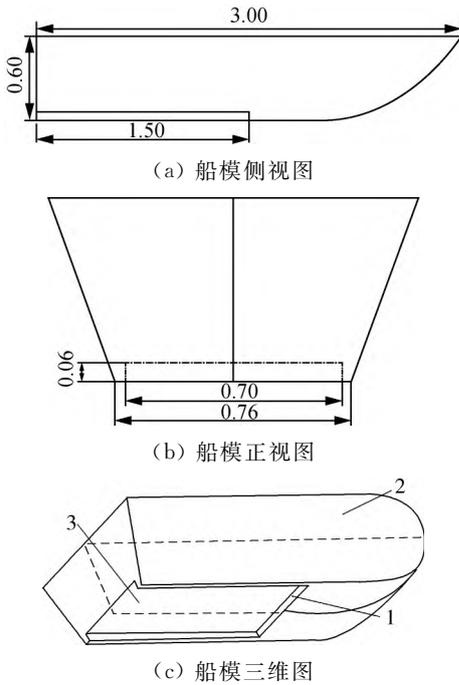


图 1 船壳三维模型

Fig. 1 3D model of ship

1. 空气注入口 2. 船壳 3. 船底凹槽

1.2 水田土壤模型

在船式拖拉机滑行阻力仿真模拟研究中,通常将流体介质假设为质地均匀的土壤泥浆,其运动规律符合宾汉流体的流变特性,流变特性方程<sup>[7-16]</sup>

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}, \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0, \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  —— 剪切强度;

$\tau_0$  —— 屈服强度;

$\eta_p$  —— 塑性黏度;

$\dot{\gamma}$  —— 剪切速率。

水田泥浆参数取样于湖北省农业科学院试验田,由 DHR-2 流变仪测得具体参数如表 2 所示。

表 2 水田泥浆参数

Tab. 2 Paddyfield parameters

名称	塑性黏度 / (Pa · s)	屈服强度 / Pa	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )
水田泥浆	0.21	6.8	1 269

将所测参数代入式(1),可得本模型中流变特性方程

$$\begin{cases} \tau = 6.8 + 0.21\dot{\gamma} & \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (2)$$

1.3 仿真模型

为模拟空气与水田土壤泥浆对船壳阻力的影响,本文采用 VOF 两相流的方法模拟计算,设计吃水线深

度为 0.3 m,流域大小为 21 m × 5 m × 5 m,入口设置为速度入口,出口为压力出口,凹槽空气入口设置为质量流量入口,计算流场具有对称性故仅对计算域一半进行求解,剖面设置为对称面,其余壁面设置为光滑壁面,由于水田土壤泥浆为高黏度的悬浊液,在研究中通常采用 Bingham 流体模型分析其流变特性。

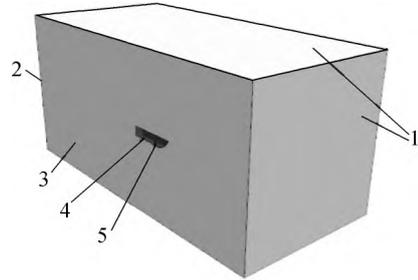


图 2 边界条件设置

Fig. 2 Boundary conditions

1. 速度入口 2. 压力出口 3. 对称面 4. 船壳 5. 质量流量入口

根据船舶阻力理论,船体阻力是船体与液体环境在船体湿表面上相互作用,采用量纲分析

$$C_t = C_f + C_r - C_{f,cavity} + \Delta C_f \quad (3)$$

式中:  $C_t$  —— 总阻力系数;

$C_{f,cavity}$  —— 气层凹槽摩擦阻力系数;

$C_r$  —— 剩余阻力系数。

气层能够减小船壳底板湿表面积,故需减去  $C_{f,cavity}$  为气层凹槽摩擦阻力系数,  $\Delta C_f$  为粗糙度补贴系数。

由于水田泥浆具有黏附作用,需额外考虑泥浆带来的附加阻力<sup>[7]</sup>,修正后

$$C_t = C_f + C_r - C_{f,cavity} + \Delta C_f + k_r C_r \quad (4)$$

式中:  $k_r$  —— 土壤作用系数;

$C_r$  —— 土壤外附力系数。

2 凹槽结构气层减阻影响因素分析

2.1 泥浆来流速度影响分析

参考船式拖拉机在水田耕作的实际工作速度 3~9 km/h,近似分析泥浆来流速度为 1.0~2.5 m/s 时对凹槽结构气层减阻性能的影响。

2.1.1 泥浆来流速度对气层形态影响

如图 3 所示,当泥浆来流速度为 1.0 m/s 时,船底凹槽气层达到完全覆盖,并且在尾部有空气溢出,在凹槽两侧并未观察到气体泄漏现象。水的来流速度由 1.0 m/s 增大至 2.5 m/s 时,气层覆盖面积减小,存在此现象的原因是由于泥浆来流速度的增大使湍流程度加剧,破坏了气层的稳定性,导致气层难以稳定形成与保持。船底凹槽中气层形态呈凹型,船底凹槽两侧气层长度大于中间气层长度,其原因有二:空气在船底流动具有横向扩散的特性<sup>[8]</sup>;空气沿壁面流动时更容易保持连续。

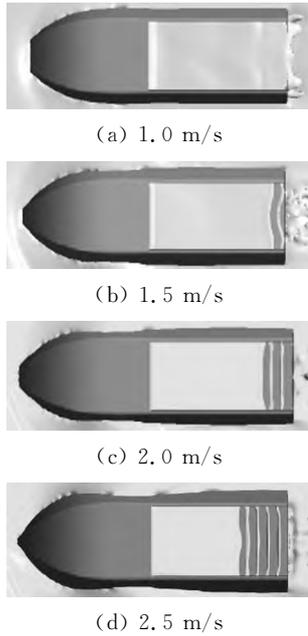


图3 不同泥浆来流速度气层覆盖率变化

Fig. 3 Air layer coverage of different mud inlet velocity

### 2.1.2 泥浆来流速度对船侧波高影响

如图4所示,水的来流速度为2.5 m/s时船首波高约为0.26 m,其值与1.0 m/s的波高相差约0.2 m,与水的来流速度增大,船侧波高随之增大的运动规律相符。由于泥浆来流速度为1.0 m/s和1.5 m/s时数值较低,船侧兴波高度整体变化不大,在船体后侧波高基本与自由液面持平。

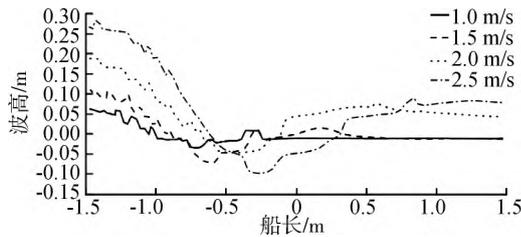


图4 不同泥浆来流速度船侧波高

Fig. 4 Wave heights of different mud inlet velocity

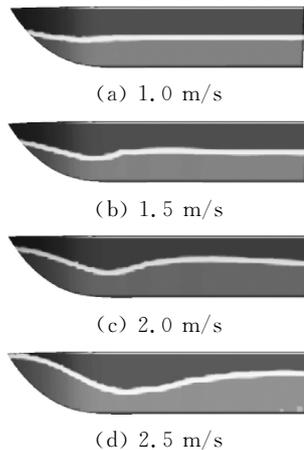


图5 不同泥浆来流速度船侧波高变化

Fig. 5 Wave heights of different mud inlet velocity

### 2.1.3 泥浆来流速度对船体阻力影响

如图6所示,泥浆来流速度为1 m/s时,剩余阻力为36 N,当泥浆来流速度增至2.5 m/s时,剩余阻力为139 N,而摩擦阻力仅略有增大。随着泥浆来流速度的增大,船体受到的摩擦阻力和压阻力均有增大,其中压阻力增大的幅度较大。根据船舶力学理论,水的来流速度是影响兴波阻力的主要原因,当水的来流速度增大时,船舶所受的压阻力会明显增大,此结论与图中描述相符。

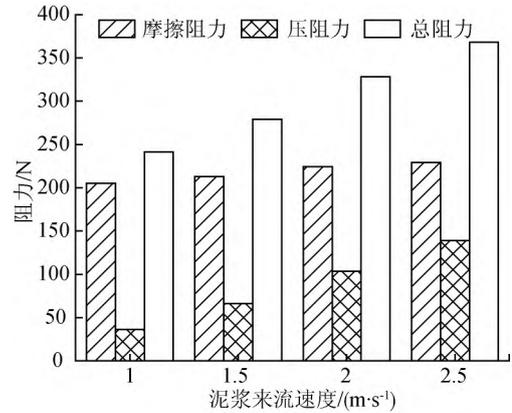


图6 不同泥浆来流速度各阻力变化

Fig. 6 Resistance of different mud inlet velocity

由于气层覆盖面积随着泥浆来流速度的增大而减小,导致总阻力进一步增大,而对于平底船而言则不受气层覆盖率的影响,故可推断出气流量一定时,泥浆来流速度增大,气层减阻的绝对减阻率减小。

## 2.2 气流量影响因素分析

气流量的大小直接影响凹槽中气层覆盖情况,而气层覆盖率是评判减阻效果重要标准,选择合适的气流量大小对研究气层减阻性能有着重大的意义。本节将从气流量大小分析气层减阻性能的变化。

### 2.2.1 气流量对气层覆盖率影响

船底凹槽随气流量增大的气层覆盖情况如图7所示。

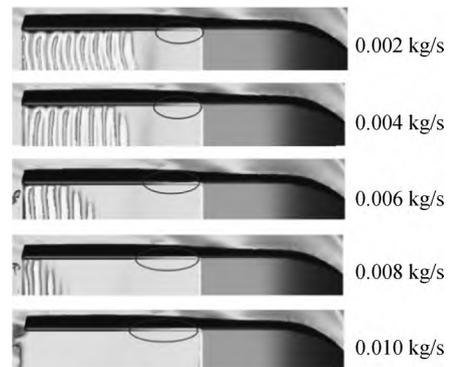


图7 船底凹槽随气流量增大的气层覆盖情况

Fig. 7 Air layer coverage of the bottom groove with increasing air flow

在研究气流量由0.002 kg/s增大至0.014 kg/s过程

中时,研究现象表明由于初始设置气流量过小,气层无法实现完全覆盖,仅在喷口附近有较好的覆盖率,空气在船底凹槽后侧以气泡流流至船尾,随着气流量的增大,气层的覆盖面积越来越大,当气流量增大至 0.01 kg/s 时,气层实现完全覆盖。由于设置船底凹槽较深,仅在喷口附近观察到空气泄漏现象(圆圈标记处),增大气流量后两侧泄漏的空气增大,但在船侧并未观察到明显的溢气泡流,表示其空气总体泄漏量并不大。

### 2.2.2 气流量对船体阻力影响

如图 8 所示,随着气流量的增大,总阻力呈先减小后趋于平缓,最后出现小幅增大。此结论与船底凹槽中的气层覆盖率有直接的关联,当气流增大时,气层覆盖率会明显增大,后趋于饱和,当气流量为 0.012 kg/s 时,总阻力最小,值为 323 N,继续增大气流量会使空气产生泄漏现象,泄漏的空气会使船壳壁面的剪切力局部增大,致使总阻力增大,由于研究中产生的空气泄漏量很小,故使总阻力增幅不大。

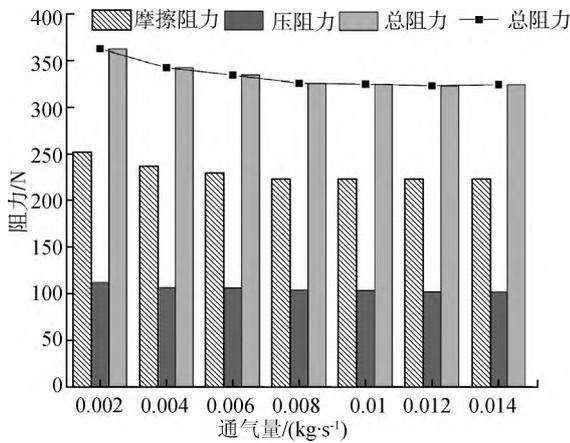


图 8 不同气流量各阻力变化

Fig. 8 Resistance of different air flow

船壳曲率变化较大的首部由于水流的冲击受到的动态压力较大,对比船底气层覆盖于未覆盖的区域动态压力,在有气层覆盖的区域受到的动态压力(颜色较深区域)明显小于未覆盖区域(颜色较浅区域),说明气层在模拟过程中能有效地将船底凹槽与液体环境隔离,减小船体湿润表面积。



图 9 船底动态压力云图

Fig. 9 Dynamic pressure cloud diagram of ship bottom

绝对减阻率和相对减阻率<sup>[12]</sup>

$$\eta_1 = \frac{R_0 - R_{t,air}}{R_0} \quad (5)$$

$$\eta_2 = \frac{R_0 - R_t}{R_0} \quad (6)$$

式中:  $R_0$  ——平底船总阻力;

$R_{t,air}$  ——船壳底板通气的凹槽船总阻力;

$R_t$  ——船壳底板不通气的凹槽船总阻力;

$\eta_1$  ——绝对减阻率;

$\eta_2$  ——相对减阻率。

绝对减阻率和相对减阻率变化趋势如图 10 所示,其趋势与总阻力变化相对应,气流量从 0.002 kg/s 逐渐增大至 0.014 kg/s 时,绝对减阻率和相对减阻率逐步增大,然后趋于平缓,最后出现小幅下降。气流量为 0.012 kg/s 时绝对减阻率和相对减阻率最大,分别为 21.9% 和 25.3%,由于相对减阻率大于绝对减阻率,说明凹槽结构带来较大的附加阻力仍具优化空间,下一节将从凹槽结构参数分析气层减阻性能。

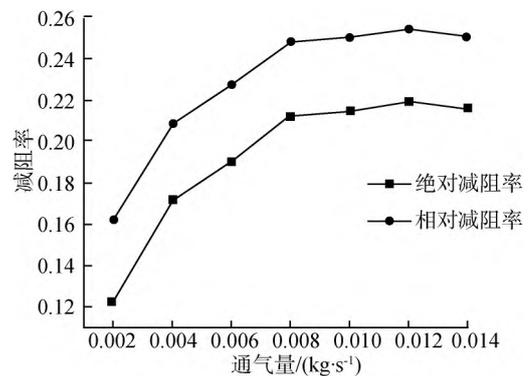


图 10 绝对减阻率和相对减阻率

Fig. 10 Absolute drag reduction rate and relative drag reduction rate

### 3 凹槽深度参数优化研究

气层覆盖率是影响减阻率的主要因素,而凹槽结构本身同样会带来附加阻力,基于前文研究结果表明凹槽的槽型结构仍具有改进空间,本节研究不同槽型结构,与气层减阻技术相结合,分析其减阻性能,下面对不同深度槽型结构进行计算分析。

通过绝对减阻率与相对减阻率的对比,结果表明不通气凹槽船对于减阻效果产生负优化,其阻力增大主要受凹槽深度的影响,在凹槽船的基础上针对凹槽深度变量设计槽型 A,分别对 0~0.06 m 凹槽深度进行研究,其余尺寸不变,如图 11 所示。

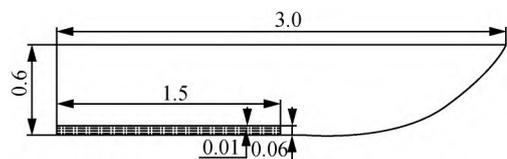


图 11 0~0.06 m 凹槽深度船壳模型

Fig. 11 0~0.06 m groove depth of ship model

### 3.1 不同气流量下气层形态分析

对不同凹槽深度的船壳底板凹槽注入空气时,随着气流量的增大各深度凹槽均能由气层部分覆盖增至完全覆盖,不同点在于不同深度的凹槽达到最大饱和所需的气流量大小不同,基本符合凹槽深度越大所需气流量越大的变化规律。

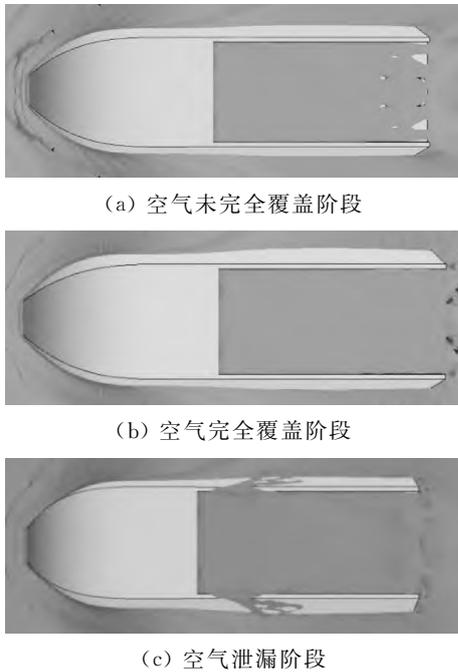


图 12 0.03 m 凹槽深度的气层形态

Fig. 12 Air layer morphology at a groove depth of 0.03 m

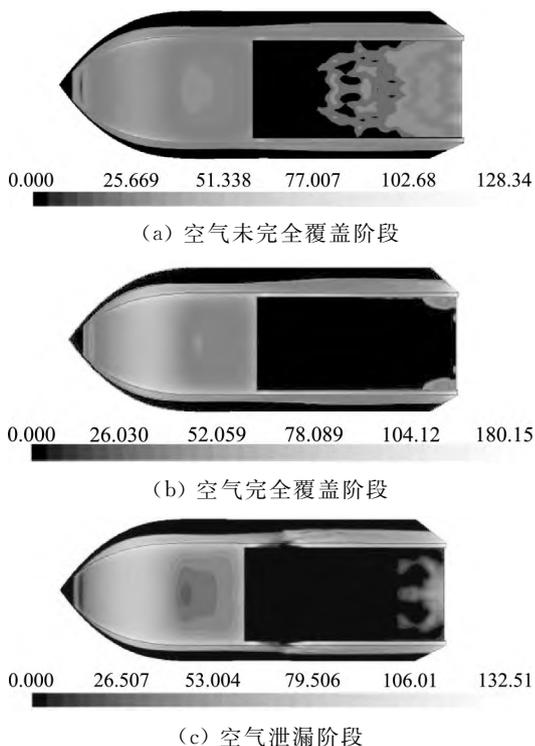


图 13 0.03 m 凹槽深度的壁面剪切应力云图

Fig. 13 Wall shear stress cloud diagram at the groove depth of 0.03 m

如图 12 所示,凹槽深度为 0.03 m 由于凹槽深度的减小使所能容纳的空气总体积减小,在气流量为 0.006 kg/s,富余的空气开始出现少量的溢出现象,当气流量增大至 0.008 kg/s 时,船体两侧空气出现大量泄漏。

如图 13 所示,对于凹槽深度越小的船体所需饱和气流量越小,由于空气在船壳底板凹槽中流经至船体凹槽后侧时气流量会产生衰减,凹槽后侧部分气层厚度会明显减小,气层覆盖的稳定性不如空气入口处,所受到的壁面剪切力也大于凹槽深度大的船体。向船壳底板凹槽注入空气时,在保证空气不产生泄漏的前提下,应尽可能增大气流量,以应对气流量的衰减。

### 3.2 不同凹槽深度结构减阻率分析

在相同通气量的条件下,对不同凹槽深度(0.02~0.06 m)的船壳总阻力进行研究,其总阻力和绝对减阻率如图 14 所示。当通气量从 0.004 kg/s 逐步增加到 0.014 kg/s 时,除凹槽深度为 0.02 m 的结构外,其余凹槽深度的船壳减阻率均为逐步增加,达到某个峰值之后,出现减小。其原因为,气流量越大气层覆盖面积越大,船壳总阻力随气层覆盖面积的增大而减小,当气层覆盖趋于饱和后,总阻力达到最小值。继续增大气流量后,由于船体两侧气体泄漏,导致气层破坏,使得总阻力出现反向增大。不同深度凹槽的船壳所受总阻力存在一个气流量极值,使得绝对减阻率最大,基本变化规律满足凹槽深度越大所需最大气流量越大。

当凹槽深度为 0.02 m 时,由于初始气流量过小无法实现气层完全覆盖,而适当增大气流量后由于凹槽壁面高度限制空气从注入口两侧溢出,空气出现大量泄漏,导致减阻率减小。在船体两侧不产生泄漏的前提下,当满足调整气流量大小均无法实现完全气层覆盖时即可推断该模型已达到最小极限凹槽深度。

对比分析不同凹槽深度(0~0.06 m)的最优减阻率进行,如图 15 所示,凹槽深度为 0 m 时,即为平底船结构时,总阻力约为 413.9 N。随着凹槽深度增加,减阻率逐步优化,当凹槽深度达到 0.03 m 时,减阻效果达到最优,总阻力约为 301.2 N,绝对减阻率为 27.2%,随着凹槽深度参数的继续增加,减阻率出现下降趋势,当深度达到 0.06 m 时,总阻力约为 326.1 N,绝对减阻率为 21.9%。在实际应用中面对复杂水田土壤环境,应当综合考虑气层减阻的抗干扰能力,以及气层破坏后的再形成速率,适当增加一定容错空间,即增大凹槽深度,以提高气流量大小,加速气层破坏后的再形成。

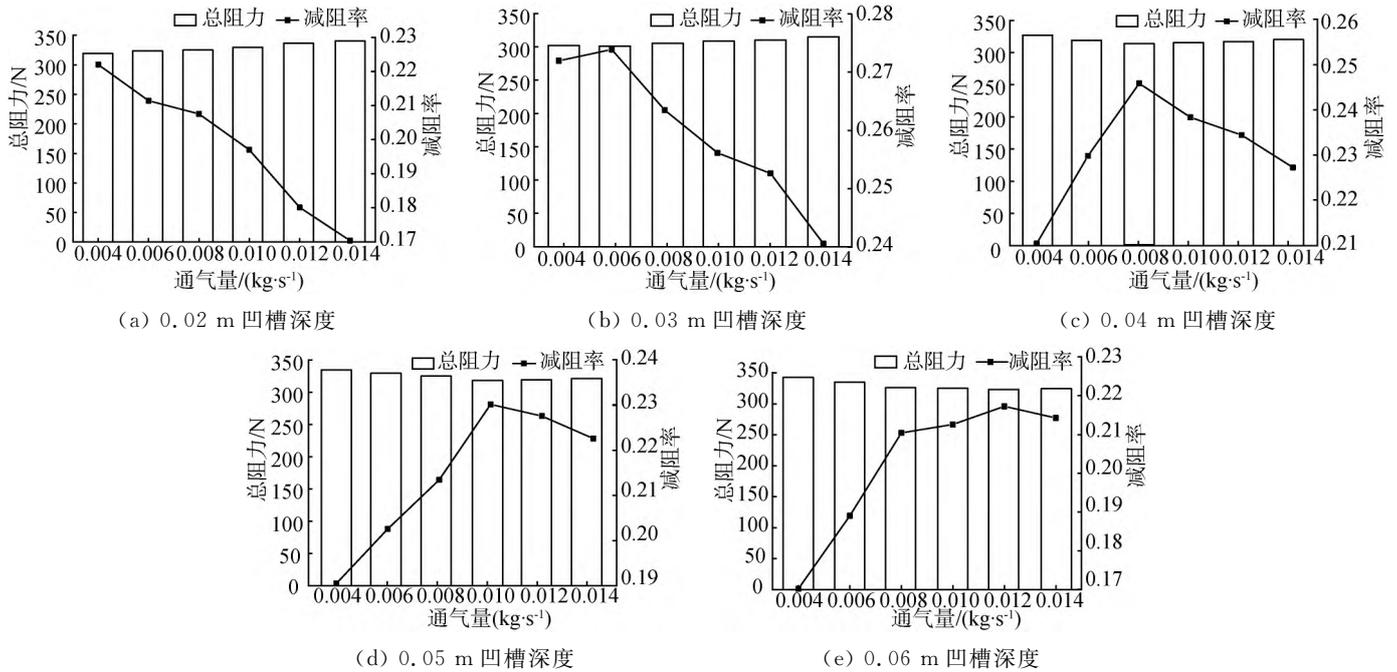


图 14 不同气流量下的阻力变化

Fig. 14 Resistance of different air flow

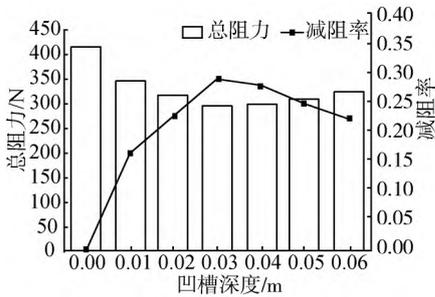


图 15 不同凹槽深度的最优减阻率对比

Fig. 15 Comparison of optimal drag reduction ratios of different groove depths

### 4 结论

- 1) 泥浆来流速度增加会导致船首波高上升,使气层覆盖面积降低,导致阻力增大。
- 2) 气流量直接影响气层的覆盖面积,气流量过小将导致气层覆盖不完全,气流量过大将导致空气产生泄漏,均不利于提升减阻性能。
- 3) 凹槽深度是影响总阻力大小的主要因素之一,在确保气层能完全覆盖的前提下,凹槽深度越小,带来的附加阻力越小。
- 4) 槽型结构底板凹槽最优深度为 0.03 m,其绝对减阻率较 0.06 m 凹槽深度的可提高 5.3%左右,较平底船可提高 27.2%的减阻率。

### 参 考 文 献

[1] 杨晖,陈源,刘明勇. 船式拖拉机船壳减阻综合分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 129—133, 151.

Yang Hui, Chen Yuan, Liu Mingyong. Comprehensive analysis of drag reduction of ship hull of ship type tractor [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(6): 129—133, 151.

[2] 李振镛,李屹,王光善,等. 水垫形成技术在水田耕整机上的应用[J]. 浙江农业大学学报, 1995(6): 551—555.

[3] 李振镛,李劲,李屹,等. “水垫”形成原理在船拖上的应用和试验研究 [J]. 农业机械学报, 1995(4): 41—45. Li Zhenyong, Li Jin, Li Yi, et al. Experimental research on applying the theory of forming water pad to the boat-type tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995(4): 41—45.

[4] 吴浩,董文才,欧勇鹏. 大型平板变水深气层减阻试验技术研究[A]. 中国造船工程学会船舶力学学术委员会, 2015 年船舶水动力学学术会议论文集[C]. 中国造船工程学会船舶力学学术委员会: 中国造船工程学会, 2015: 1—6.

[5] 秦立果,孙红江,浩杨. 鲨鱼皮盾鳞结构减阻性能数值模拟[J]. 中国科技论文, 2019, 14(12): 1271—1277. Qin Liguang, Sun Hongjiang, Hao Yang. Numerical simulation on drag reduction performance of shark skin with denticle structures [J]. China Sciencepaper, 2019, 14(12): 1271—1277.

[6] 区颖刚,邵耀坚. 船式拖拉机船体行驶阻力的研究[J]. 华南农学院学报, 1984(1): 1—10.

[7] Hao W, Yongpeng O, Qing Y. Experimental study of air layer drag reduction on a flat plate and bottom hull of a ship with cavity [J]. Ocean Engineering, 2019, 183: 236—248.

[8] Slyozkin A, Atlar M, Sampson R, et al. An experimental investigation into the hydrodynamic drag reduction of a flat plate using air-fed cavities [J]. Ocean Engineering, 2014, 76: 105—120.

- [9] 吴浩,董文才,欧勇鹏. 平板喷气流场特性及气流量分配策略试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(9): 1220—1226.  
Wu Hao, Dong Wencai, Ou Yongpeng. Experimental study of flow field characteristics and air distribution strategies on a flat plate with air injection [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(9): 1220—1226.
- [10] Park S H, Inwon L. Optimization of drag reduction effect of air lubrication for a tanker model [J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2018, 10: 427—438.
- [11] Latorre R. Ship hull drag reduction using bottom air injection [J]. Ocean Engineering, 1997, 24(2): 161—175.
- [12] Mäkiharju S A, Ceccio S L. On multi-point gas injection to form an air layer for frictional drag reduction [J]. Ocean Engineering, 2018, 147: 206—214.
- [13] 杨晖,刘明勇. 基于CFD的船式拖拉机兴波阻力研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 114—119.  
Yang Hui, Liu Mingyong. Research on wave-making resistance of ship tractor based on CFD [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 114—119.
- [14] 王其和,廖兴红,方娜. 湖北省农机科研政策研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(4): 288—297.  
Wang Qihe, Liao Xinghong, Fang Na. Study on the scientific research policies of agricultural machinery in Hubei province [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(4): 288—297.
- [15] 戴飞,韩正晟,张克平,等. 我国机械化秸秆还田联合作业机的现状与发展[J]. 中国农机化, 2011(6): 42—45, 37.  
Dai Fei, Han Zhengsheng, Zhang Keping, et al. Development present situation of straw returned combined machine used in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(6): 42—45, 37.
- [16] 王树才,邓在京. 加大CAD技术应用力度提高我国农业机械整体水平[J]. 中国农机化, 2003(2): 32—35.  
Wang Shucai, Deng Zaijing. Improve the application of CAD technology, promote the level of agri-machinery technology in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2003(2): 32—35.

## Research on influencing factors and parameter optimization of boat-type tractors using air layer drag reduction

Zhang Sanqiang<sup>1,2</sup>, Zou Xing<sup>1,2</sup>, Chen Yuan<sup>1,2</sup>, Zhang Taojuan<sup>3</sup>

(1. Hubei University of Technology, Wuhan, 430068, China; 2. Hubei Agricultural Machinery Engineering Research and Design Institute, Wuhan, 430068, China; 3. Xishui Agricultural Technology Extension Center, Huanggang, 438200, China)

**Abstract:** Aiming to solve the problem of high traveling resistance of boat-type tractor bottom plate in a complex mud environment, the drag reduction of boat-type tractor air layer was studied. Through the construction of a simulation model, the two main factors affecting the air layer drag reduction performance were analyzed. In the optimization design of the groove structure of the ship bottom, the air layer drag reduction performance of the groove structure of the hull bottom at different depths was studied through simulation experiments. The research results showed that the increase in the inlet velocity causes the air layer to rupture, resulting in a decrease in the drag reduction rate. The airflow directly affects the air layer coverage. The 0.03 m groove depth has the best drag reduction effect with a value of 27.2%.

**Keywords:** boat-type tractor; air layer drag reduction; structural optimization