

压浪板与阻流板对 M 型滑行艇 迎浪运动的影响

曹亚龙，易文海，高志亮

武汉理工大学交通学院武汉 430063

摘要：船舶加装水动力附体以获得更优的快速性与耐波性是水动力学研究的热门方向。针对迎浪状态下 M 型滑行艇的减阻及减摇问题，提出了附加压浪板及阻流板的两种方案，采用基于黏流理论的 CFD 仿真软件 STAR-CCM+，通过数值模拟方法研究了压浪板及阻流板对波浪增阻、纵摇及升沉幅度、航行姿态及垂向加速度的影响。结果显示，参数适宜的压浪板对阻力及纵摇和升沉幅值均有改善作用；位置合适的阻流板在不显著影响阻力性能的情况下可以改善航行姿态；对于垂向加速度，压浪板和阻流板均有减缓作用。与此同时，对压浪板与阻流板的水动力机理给出了合理的解释。

关键词：M 型滑行艇；压浪板；阻流板；CFD；迎浪运动

1 引言

小型艇在高海况环境下的耐波性问题一直没有得到很好的解决^[1]。国内外关于耐波性研究的热点集中在如何减小横摇上，为此发展出了舳龙骨、减摇鳍、减摇水舱等在实船上取得良好效果的减横摇措施，但关于如何减小纵摇和升沉运动（统称纵向运动）的研究却比较少见，专为减纵摇的半潜艏、T 型翼、艏鳍等附体在实船上的应用还不常见。虽然船舶的纵向运动阻尼相对横摇运动阻尼来说很大，一般认为船舶的纵摇不会很严重，但对于小型艇，特别是小型的动力增升艇，在高海况环境中的纵向复原力矩未必很大，纵摇问题便成为制约小型艇性能发挥的突出问题。如何在不显著牺牲其他性能的情况下，减少小型艇的纵向运动量，是船舶界普遍关注的重要问题^[2]。

M 型滑行艇是近十几年来出现的新型动力增升艇，它本身就拥有着优良的快速性与耐波性^[3]，在小型艇领域具有十分广阔的推广前景。M 型滑行艇的纵向运动区别于其他滑行艇的最大不同在于升力涵道的设计，位于船舶中体两侧的升力涵道可以吸收波浪能量最大的船舶兴波，将之转化为船体动升力，与此同时压缩外界的空气进入升力涵道，在船底形成复杂的液—气两相混合流动，既通过减小湿表面积而减小了摩擦阻力，也通过泡沫水流的垫升作用减缓了船舶迎浪下的纵摇。在本身就具备较优纵摇特性的 M 型滑行艇之上，探讨通过增设水动力附体进一步减摇的可行性，在挖掘船型潜力的角度具有工程实践意义。

压浪板与阻流板是较为常见的改善船舶性能的水动力附属装置。压浪板的历史较早，可追溯到 20 世纪 80 年代，阻流板的历史较迟，发源于 90 年代末^[4]。国内外对于这两者的研究都是工程实践先于理论解释，在广泛的实践中证明压浪板与阻流板的确对很多船型的阻力、耐波等性能都有改善^[5-8]，排水型船舶、动力增升船舶等均有附加这两种附体的实际应用；但是对于压浪板与阻流板的研究却仍显不足，目前主要通过模型试验与数值计算的方法进行研究，尚无统一的理论进行全面概括，不同学者的研究在解释水动力机理方面有相互矛盾的地方。

本文基于计算流体动力学（CFD, computational fluid mechanics）软件 STAR-CCM+，首先对 M 型滑翔艇光体情况下的迎浪运动进行数值模拟，与模型试验结果进行了对比验证。然后设计了一系列不同参数的压浪板与阻流板，使用相同的数值模拟方法，分别对比分析了附加这两种水动力附体后 M 型滑翔艇在波浪中的阻力、纵摇与升沉幅值、航行姿态、垂向加速度等的变化，验证了压浪板与阻流板对 M 型滑翔艇上述性能的改善效果，并得到了合适的参数。在此基础上，分析了压浪板与阻流板对 M 型滑翔艇迎浪运动的影响，探讨了背后的水动力机理。

2 研究对象与计算模型

2.1 研究对象

研究对象为某 M 型滑翔艇船模，该艇模型的主尺度见表 1 所示，在没有附加任何水动力附体的情况下，该艇的光体外观见图 1。在物理水池中针对该 M 型滑翔艇，在不同参数的规则波下进行了拖曳试验，测得了不同航速下的阻力、纵摇与升沉的时历数据。

表 1 M 型滑翔艇的主尺度

船长	吃水	排水量
(m)	(m)	(kg)
2.5	0.168	136.66

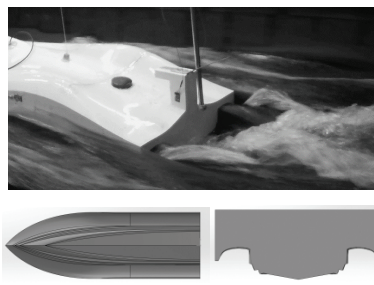


图 1 M 型滑翔艇光体的外观示意

2.2 计算模型

2.2.1 数值方法

采用商业 CFD 软件 STAR-CCM+，对 M 型滑翔艇船模在设计工况下的纵向运动进行模拟计算。计算模型采用基于求解雷诺平均纳维-斯托克斯（RANS）方程的方法，选择 SST $k-\omega$ 湍流模型，建立数值波浪水池，用流体体积法（VOF）进行自由液面的捕捉。利用 SIMPLEC 压力修正算法对速度和压力场进行耦合，采用二阶隐式时间离散格式对瞬态项进

行离散。

2.2.2 计算域与边界条件

由于流场关于船体中纵剖面对称，故只取一半计算域进行计算（即左舷）。进流边界采用速度进口条件，距船 3 倍波长（ λ ）；出流边界采用压力出口条件，距船 8λ ；计算域上下表面采用壁面边界条件，分别距船 0.8 倍船长（ L ）和 2 倍船长；计算域左右边界采用对称平面条件，其中左边界距船 $1.4L$ 。计算域与边界条件如图 2 所示。

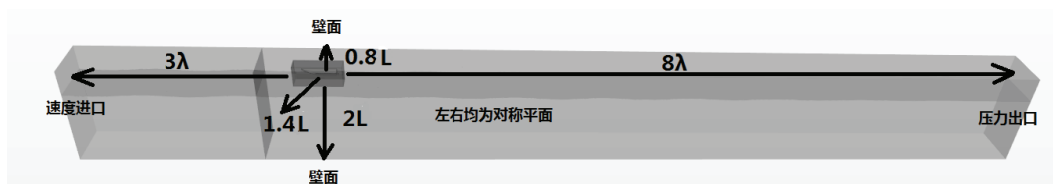


图 2 计算域与边界条件

为了消除计算域进口到船之间波浪的二次反射，在造波区域中设置了 2λ 的附加力源区；同时为了消除计算域出口的波浪反射，在压力出口前设置了 6λ 的阻尼区。

2.2.3 计算网格

计算采用动态重叠网格技术，应用 STAR-CCM+ 的 DFBI 六自由度运动模块，进行了 M 型滑艇迎浪运动的模拟。船体表面的边界层采用棱柱层网格，由于边界层网格的大小对湍流精度影响很大，综合考虑计算成本与精度之间的取舍，将棱柱层网格定为 5 层， Y^+ 值控制在 150 以下。计算域的其余网格采用切割体网格进行划分（图 3）。在重叠网格区域及四周进行网格加密，以满足重叠网格的插值精度要求；在远离重叠网格的区域，流场网格的尺寸逐渐增大；此外，在自由液面附近同样进行网格加密，以获得更精确的水动力结果。网格总数控制在 200 万以内。

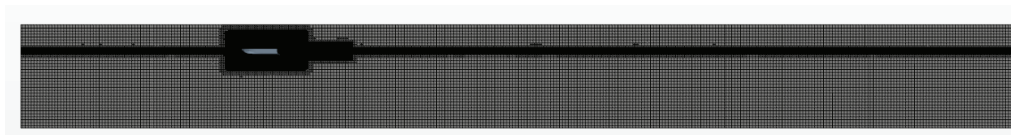


图 3 网格划分

2.3 计算模型验证

对该艇开展 CFD 数值仿真，将计算得到的船体纵摇频响、升沉频响、阻力平均值与试验结果进行比较，两者吻合较好（图 4 和图 5）。可以看到，在体积弗汝德数为 1.366，对应航速为 10kn 的低速段，数值仿真的结果与试验值相比最大误差在 7% 以内，而在体积弗汝德数为 2.737，对应航速为 20kn 的高速段，数值仿真的结果与试验值相比偏小 20% 左右。这与其他文献中报道的滑艇阻力 CFD 预报精度相符^[9-10]。

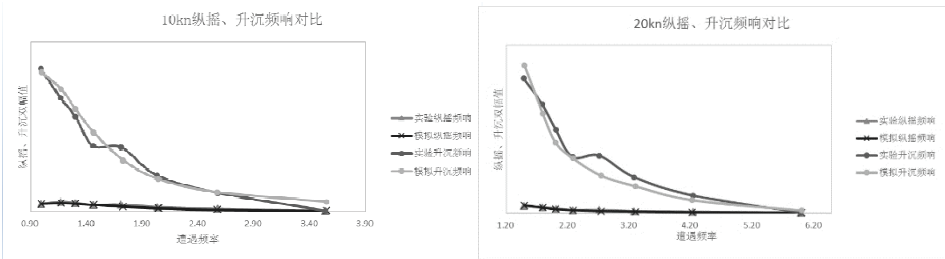


图 4 10kn 与 20kn 纵摇和升沉频响曲线的试验、仿真对比

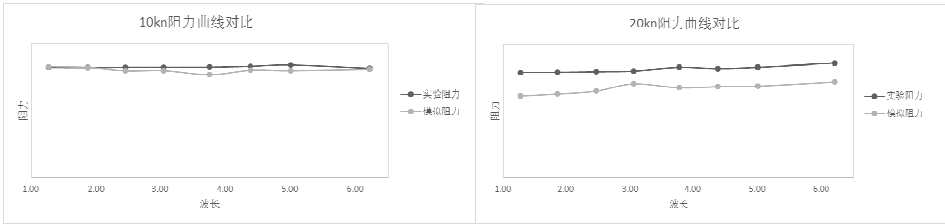


图 5 10kn 与 20kn 阻力曲线的试验、仿真对比

3 水动力附体设计

选取高速段波高、波长最大的工况为研究工况，在此基础上进行附加压浪板与阻流板的研究。由于在该工况下 M 型滑艇的纵向运动频响最大，所以该工况下的减摇减阻更有意义。该研究工况如表 2 所示。

表 2 研究工况

	波高	波长	试验纵摇	试验升沉	模拟纵摇	模拟升沉
单位	(mm)	(m)	(°)	(mm)	(°)	(mm)
数据	124	6.21	7.94	143.162	8.306	152.8

M 型滑艇的压浪板改变参数只考虑了长度 L 与安装角 α ，其宽度覆盖了整个船底滑行面，厚度为 5mm,形状为普通矩形平板。其外形示意如图 6 所示，参数控制如表 3 所示。

表 3 压浪板的参数设置

L	α
(mm)	(°)
25/50/125	0
	5
	10
	15
	20

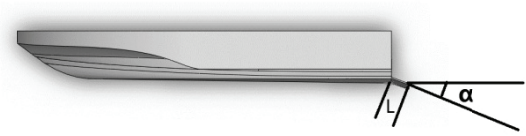


图 6 压浪板外形示意

阻流板为垂直向下延伸的一块矩形平板，厚度为 5mm。在艉封板处，改变的参数为阻流板的高度 H ；之后选取一固定高度 H 的阻流板，控制其在船底的安装位置（距艉封板的距离为 x ）进行研究。阻流板的外形示意如图 7 所示，参数控制如表 4 所示。

先前光体的仿真模拟已经验证了模拟计算方案的可行性，光体附加了压浪板与阻流板后，模拟计算不改动其他设置，仅导入修改后的船体模型，在压浪板与阻流板处进行网格加密，用同样的计算方案分别进行仿真计算。

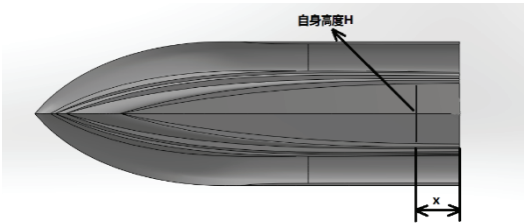


图 7 阻流板外形示意

表 4 阻流板参数设置		
单位	x (mm)	H (mm)
只改变 H	0	5
		10
		15
		25
只改变 x	50	10
	100	
	125	
	250	

4 计算结果分析

4.1 压浪板

4.1.1 纵摇与升沉量

模拟结果显示，不同长度 L 与安装角 α 的压浪板可以有效减小 M 型滑艇迎浪运动中的纵摇与升沉幅值。在计算选取的参数内，随着 L 和 α 的增大，减小纵摇和升沉幅值的效果越来越好，但也需注意到，在 L 与 α 较小的情况下，纵摇幅值与升沉幅值产生了微弱的增加。计算结果如图 8 所示，减少的百分比如表 5 所示。

可以发现，若要达到相同的减缓纵摇与升沉幅值的效果， L 更大的压浪板所需的 α 越小；也即相同 α 的压浪板中， L 越大者效果越好。压浪板的设置改变了船底压力分布，将水动力作用中心前移（图 9），缩小了水动力作用中心与船体重心之间的力臂长度，相当于减小了由波浪导致的浮力变化产生的水动力扰动，由此提高了 M 型滑艇的耐波性。

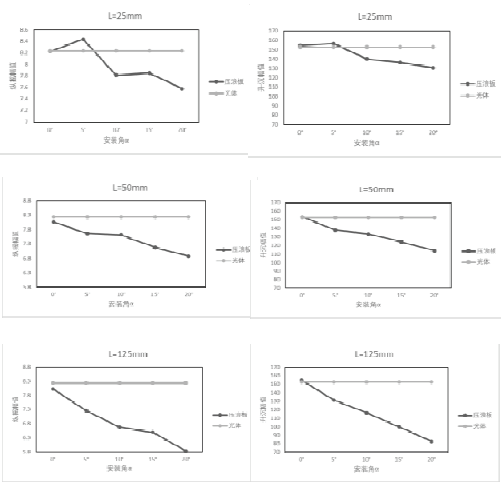


图 8 压浪板纵摇和升沉计算结果

表 5 纵摇和升沉减少的百分比

L (mm)	α ($^{\circ}$)	纵摇减少 (%)	升沉减少 (%)
25	0	-0.11	1.11
	5	2.44	2.49
	10	-5.14	-8.32
	15	-4.64	-10.81
	20	-7.99	-14.35
50	0	-2.11	0.59
	5	-7.04	-9.83
	10	-7.60	-12.65
	15	-12.78	-18.81
	20	-16.47	-25.36
125	0	-2.53	1.38
	5	-11.82	-14.02
	10	-18.96	-23.72
	15	-21.13	-34.47
	20	-29.22	-45.74



图 9 $L=50\text{mm}$ 的压浪板的水动力作用中心随 α 的增大而前移

4.1.2 阻力性能

对于相同 L 的压浪板，随着 α 的增加，总阻力呈现出先减少后增加的特点。也即存在某一安装角 α_0 使得总阻力最小，换言之压浪板确实可以减少 M 型滑行艇在波浪中的阻力。阻力减小的百分比如表 6 所示。

可以发现，随着 L 的增加，最佳安装角 α_0 变小。当 L 和 α 都较大时，阻力恶化很快，此时附加压浪板得不偿失。为了探讨阻力变化的机理，将总阻力分为剩余阻力（兴波阻力+黏压阻力）和摩擦阻力分别研究。结果如图 10 所示，变化的百分比如表 7 所示。

表 6 各压浪板总阻力减小的百分比

L (mm)	α ($^{\circ}$)	总阻力减少幅度 (N)	百分比 (%)
25	0	-0.96	-0.90
	5	-2.43	-2.29
	10	-2.70	-2.55
	15	-0.94	-0.88
	20	1.15	1.08
50	0	-0.22	-0.21
	5	-2.70	-2.55
	10	-0.48	-0.45
	15	4.49	4.24
	20	12.50	11.80
125	0	-0.46	-0.44
	5	-0.80	-0.75
	10	8.86	8.36
	15	25.23	23.82
	20	51.17	48.31

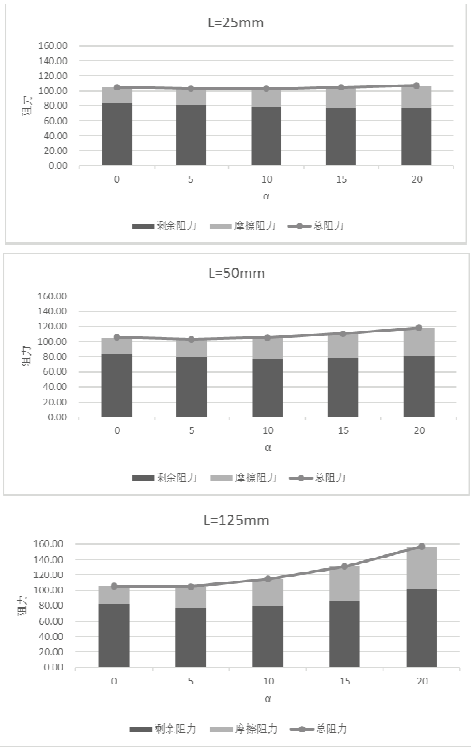


图 10 阻力成分的变化

表 7 阻力成分变化的百分比

L (mm)	α ($^{\circ}$)	剩余阻力 (%)	摩擦阻力 (%)
25	0	-0.81	-1.08
	5	-4.58	7.05
	10	-7.61	18.69
	15	-8.47	30.44
	20	-8.78	41.45
50	0	-1.05	3.28
	5	-6.74	15.24
	10	-8.60	33.08
	15	-7.77	53.86
	20	-4.45	77.71
125	0	-3.04	9.83
	5	-9.02	33.26
	10	-6.56	68.94
	15	2.09	111.63
	20	20.18	161.86

结果表明剩余阻力整体上是减小的，随着 α 的增大，减小趋势减弱；在 L 较大的情况下，剩余阻力出现了增加。而摩擦阻力基本随着 L 与 α 的增大而不断增加，没有减小的趋势。由此可见，压浪板减阻主要是由于减小了剩余阻力，压浪板反而会增加摩擦阻力。由于剩余阻力占比较大，所以在整体上呈现出了阻力减少的效果；但是压浪板减阻效果不大，本文计算中不超过 3%。

剩余阻力的大小可以简单用 M 型滑翔艇的兴波情况进行反映。如图 11 所示，为某一相同时刻压浪板 $L=50\text{mm}$ ， α 从 5° 增加到 20° 的 M 型滑翔艇的兴波情况，可见最大兴波高度与剩余阻力大小的变化情况相一致。

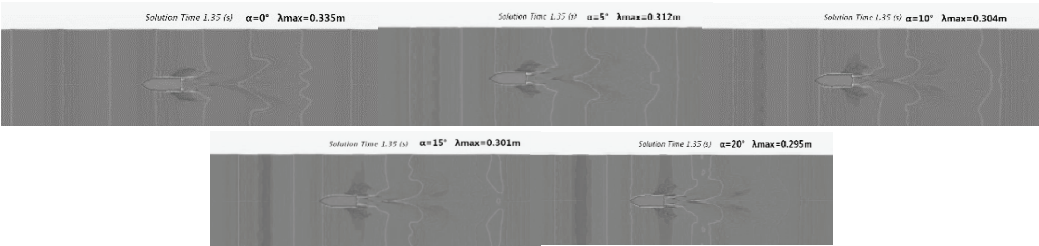


图 11 随着 α 的增加，最大兴波高度依次减小

摩擦阻力的大小可以由湿表面积的大小来反映。如表 8 所示，湿表面积的大小与摩擦阻力的大小变化趋势相一致，压浪板增加了湿表面积。

表 8 湿表面积的变化

L (mm)	α (°)	湿表面积 (m^2)	湿表面积变化 (%)	摩擦阻力变化 (%)
25	0	0.46	-0.43	-1.08
	5	0.49	6.18	7.05
	10	0.51	10.01	18.69
	15	0.55	19.89	30.44
	20	0.59	28.90	41.45
50	0	0.46	-0.62	3.28
	5	0.49	7.26	15.24
	10	0.56	21.12	33.08
	15	0.64	39.11	53.86
	20	0.74	59.62	77.71
125	0	0.48	3.98	9.83
	5	0.56	20.55	33.26
	10	0.69	50.40	68.94
	15	0.88	90.73	111.63
	20	1.09	136.18	161.86

4.1.3 航行姿态

当水流流过压浪板时，由于压浪板的阻碍作用，产生了一个附加力矩 M ，力矩 M 的存在改变了船舶的航行姿态，使得纵倾角减小。原理如图 12 所示。

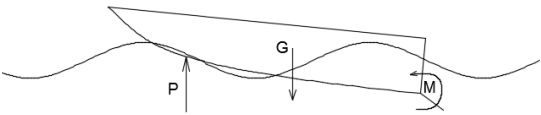


图 12 压浪板产生的附加力矩阻碍了艇体上抬

计算结果同样验证了这一点，表 9 给出纵摇均值与升沉均值的模拟结果。需注明的是，这两者均为曲线离散后求取算术平均的统计值。

可见纵摇的均值与升沉的均值随着压浪板 L 和 α 的增加而不断减小。特别是纵摇的均值在 L 和 α 很大的情况下减少幅度超过 100%，也即出现了首倾，这对于 M 型滑行艇的设计来说是不利的，会导致埋首，发生危险。

表 9 纵摇均值与升沉均值						
L	α	纵摇均值	升沉均值			
(mm)	(°)	(°)	(mm)			
25	0	-4.688	111.9	5	-4.357	104.6
	5	-4.095	110.8	10	-3.414	94.8
	10	-4.097	101.8	15	-2.525	85.2
	15	-3.508	96.8	20	-1.689	76.7
	20	-2.982	90.6	0	-4.375	105.5
50	0	-4.64	108.6	5	-3.645	95.6
				10	-2.172	79.9
				15	-0.462	66.8
				20	1.178	55.2

为了说明 M 型滑行艇航行姿态的变化，以光体和附加了 $L=50\text{mm}$ ， $\alpha=10^\circ$ 压浪板的 M 型滑行艇为例，展示一个波浪周期内 M 型滑行艇在最大抬升处的运动情况，如图 13 所示。可见压浪板使得纵倾角更小，纵向运动更为和缓。



图 13 压浪板减小了艇体上抬

压浪板除了产生附加力矩 M ，可能还会增加全船的升力，进而影响全船航行姿态，因此对全船的升力进行了监测（表 10）。

表 10 升力的变化							
L (mm)	α ($^{\circ}$)	升力 (N)	百分比 (%)	50	0	670.17	0.03
					5	670.27	0.05
					10	671.73	0.26
					15	670.34	0.06
光体		669.95	/	125	20	670.35	0.06
25	0	670.53	0.09		0	670.23	0.04
	5	670.67	0.11		5	670.30	0.05
	10	670.42	0.07		10	669.97	0.00
	15	670.43	0.07		15	669.75	-0.03
	20	670.32	0.05		20	670.20	0.04

结果显示升力有很微弱的增加，基本可以认为全船升力没有发生改变，也即航行姿态是由压浪板的附加力矩产生的。

4.1.4 垂向加速度

M 型滑翔艇的垂向加速度与耐波性息息相关，垂向加速度越大，适航性越差，尤其是当向下的垂向加速度达到 1 个重力加速度时，全船便处于自由跌落状态，发生运动失稳。M 型滑翔艇附加压浪板后，可以减小向上和向下的垂向加速度，但对向下的垂向加速度减小得不多。计算结果如图 14 所示。

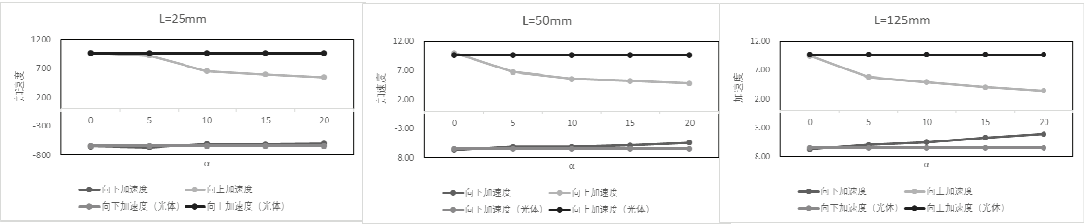


图 14 垂向加速度的变化

4.1.5 小结

综上所述，参数适宜的压浪板可以在阻力、耐波性能上都产生有利的改变。压浪板减阻的途径是减小了剩余阻力，对于摩擦阻力反而会增加。压浪板并未增加船体的升力，压浪板的附加力矩 M 减小了航行时的纵摇角，使得纵向运动更和缓，这也是增加了湿表面积的原因所在。同时，压浪板可以使水动力中心前移，缩短了力臂长度，减小了波浪扰动，进而提高了耐波性。计算模型中，长度为 125mm，安装角为 5° 的压浪板综合效果最好，减小纵摇 12%，减小升沉 15%，减小阻力 1%。

4.2 艏封板位置处的阻流板

安装位置均在艏封板处 ($x=0$)，控制参数为阻流板的高度 H 。

4.2.1 纵摇与升沉量

计算结果显示，艏封板位置处的阻流板同样可以减小纵摇与升沉幅值，且减小的程度相对于压浪板来说更为剧烈（表 11）。

表 11 $x=0$ 处的阻流板的纵摇和升沉结果

H (mm)	纵摇减少幅度 ($^{\circ}$)	百分比 (%)	升沉减少幅度 (mm)	百分比 (%)
5	-0.021	-0.26	-15.1	-9.90
10	-0.762	-9.26	-31.2	-20.45
15	-0.901	-10.94	-44	-28.83

可见，随着 H 的增大，位于艏封板处的阻流板减摇效果趋势变缓，也即阻流板减摇效果随 H 的变化很敏感，较小的 H 即可产生很大的减摇效果， H 增加后，减摇的程度反而下降。

M 型滑艇加装阻流板之后的水动力中心很难捕捉到，但可观察到在阻流板处的局部产生了高压区（图 15）。这样在也产生了类似于水动力中心前移的效果，原理与压浪板类似。

4.2.2 阻力性能

位于艏封板处的阻流板均使阻力产生了恶化效果，且随着 H 的增大，阻力恶化的程度越严重。对其进行阻力成分分析，发现在 H 较小时，剩余阻力相对光体是减小的，但随着 H 增大，剩余阻力很快增加；而摩擦阻力一直增加， H 越大增加越多（图 16）。

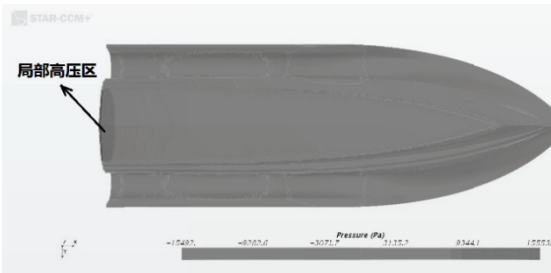


图 15 阻流板处产生高压区

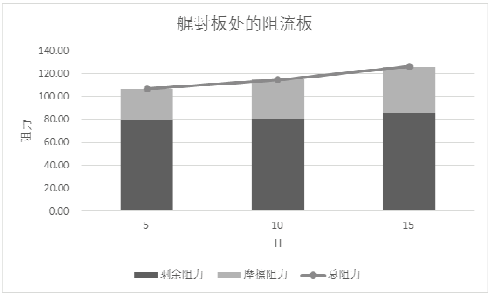


图 16 $x=0$ 处阻流板的阻力成分

但在相同时刻监测船舶最大兴波高度，发现随着 H 的增加，兴波高度却在减小。由此得出剩余阻力的恶化是由黏压阻力的增加而引起的结论。船体湿表面积如表 12 所示，可见摩擦阻力和湿表面积的增加趋势一致。

4.2.3 航行姿态

由于阻流板是垂直于水流的一块平板，对水的阻碍作用比压浪板更强，因而产生的附加力矩 M 更大，对船舶姿态的调整作用更明显。如表 13 所示，阻流板减小了纵摇均值与升沉均值， H 越大，纵摇均值与升沉均值越小。

表 12 湿表面积的变化

H (mm)	湿表面积 (m^2)	百分比 (%)	摩擦阻力 变化 (%)
5	0.56	22.22	30.98
10	0.68	46.76	60.59
15	0.81	76.49	93.43

表 13 $x=0$ 处的阻流板对航行姿态的改变

H (mm)	纵摇均值 ($^\circ$)	升沉均值 (mm)
5	-3.347	96.5
10	-1.924	81.8
15	-0.69	71.9

同样监测 M 型滑行艇附加阻流板后船底升力的变化, 如表 14 所示。可见升力有微弱增加, 基本可视为无变化。

4.2.4 垂向加速度

艏封板处的阻流板可减小向上和向下的垂向加速度, H 越大效果越好, 向上的垂向加速度的减小效果比向下的垂向加速度的减小效果好 (图 17)。

表 14 船底升力变化

H (mm)	升力 (N)	百分比 (%)
5	670.49	0.08
10	670.29	0.05
15	670.37	0.06

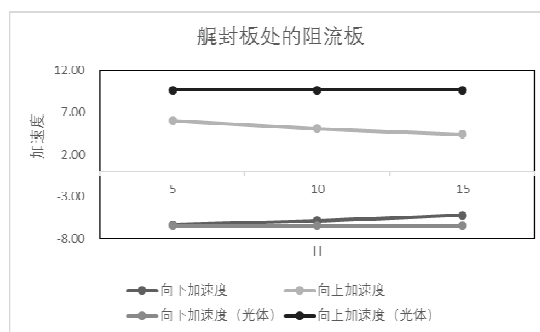


图 17 垂向加速度变化

4.2.5 小结

艏封板处的阻流板可以减摇, 但无法减阻。其机理和压浪板类似, 但影响的剧烈程度大于压浪板。换言之, 阻流板本身即可视为安装角为 90° 的压浪板, H 很小的改动就能产生和压浪板 L 和 α 变化很大相同的效果。但牺牲阻力是安装在艏封板处的阻流板的缺点, 如何进一步实现阻流板对 M 型滑行艇迎浪运动的减阻, 是需要考虑的新问题。

4.3 安装在船底的阻流板

为了探索阻流板减阻的可行性, 不将阻流板安装在艏封板处, 而是前移到船底滑行面处, 以距艏封板的距离 x 为变化参量进行研究。此时固定了阻流板的高度 $H=10\text{mm}$ 。

4.3.1 阻力性能

以 x 为变量的阻流板在阻力方面发生了很有趣的现象, 随着 x 的增加, 阻流板越远离船尾, M 型滑行艇的总阻力呈现出先减小后增大的现象 (图 18)。

对其阻力成分进行分析, 发现剩余阻力在 x 较小时相对光体是下降的, 随着 x 的增加, 剩余阻力缓慢增加, 在 x 很大时, 剩余阻力剧烈增加, 相对光体增加很多; 而摩擦阻力相对光体来说虽然是增加的, 但随着 x 的增加却在不断下降, 在 x 很大时, 摩擦阻力相对光体出现了下降。结果如图 19 所示, 变化的百分比如表 15 所示。

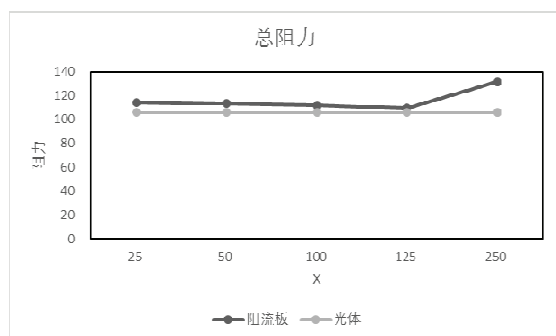


图 18 总阻力变化

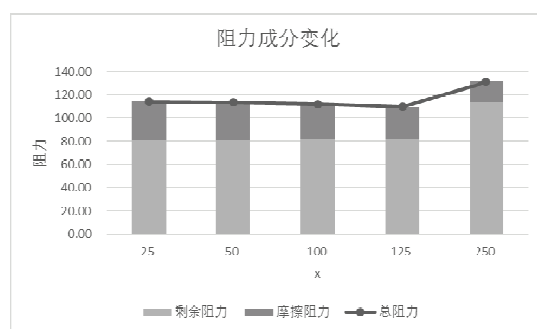


图 19 阻力成分变化

表 15 阻力成分变化的百分比

x (mm)	剩余阻力 (%)	摩擦阻力 (%)
25	-4.33	56.60
50	-3.99	52.22
100	-3.23	41.97
125	-3.17	31.36
250	34.45	-16.12

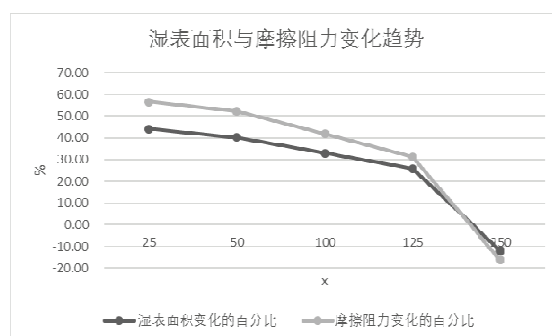


图 20 湿表面积与摩擦阻力的变化的百分比

与压浪板和艏封板处的阻流板相似，兴波情况同样验证了剩余阻力的变化情况。而湿表面积的变化趋势也验证了摩擦阻力的变化趋势（图 20）。

$x \neq 0$ 处的阻流板后发现产生了空气层（图 21）。空气层在整个波浪周期都存在，这是湿表面积减小的原因。但是当 x 很大的情况下空气层反而消失（图 22）。此时的湿表面积减少是由下文所述的航行姿态变化所致。



图 21 阻流板后出现空气层

图 22 x 较大时空气层消失

将阻流板前移，虽然总阻力减小后相对于光体依旧是增加的，但如若在进一步考虑改变 H 的基础上，合理控制阻流板的 x 和 H ，是否会使总阻力下降是个需要进一步探讨的问题，本文未进行深入研究。

4.3.2 纵摇和升沉量

计算结果显示，在 x 较小时，纵摇和升沉幅值相对光体均减小，但随着 x 的增加，纵

摇和升沉幅值在增加,最后超过光体的值,在 x 较大时,纵摇和升沉的幅值反而大幅下降,相比光体又减小。结果如图 23 所示。

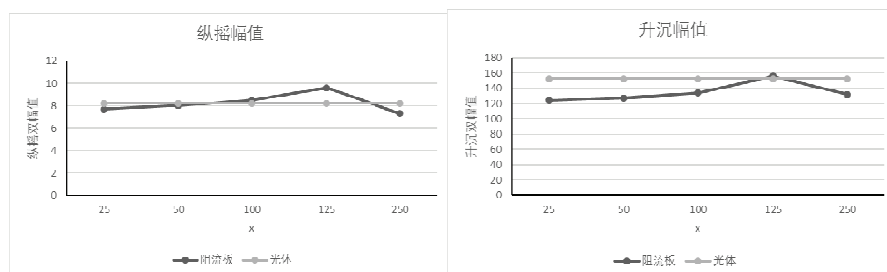


图 23 纵摇和升沉幅值的变化

4.3.3 航行姿态

x 较小时,纵摇均值和升沉均值相对光体下降很多,但随着 x 的增加,纵摇均值和升沉均值在缓慢增加,当 x 较大时,纵摇均值和升沉均值剧烈增长,升沉均值接近光体,纵摇均值甚至超过光体很多(图 24)。

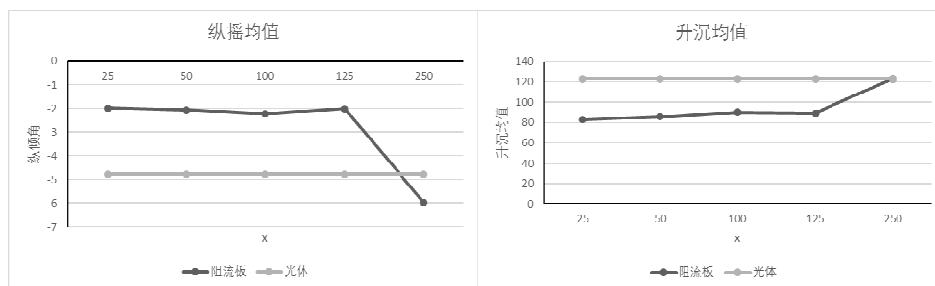


图 24 航行姿态变化

究其原因, M 型滑行艇在某一瞬时会绕着空间上的某一点 O 的轴线发生纵摇, O 称之为转动中心, O 点不与重心 G 点重合, 位于船体靠后的部分。当遭遇波浪船体抬升时, 位于 O 点后面的阻流板产生的附加力矩 M 阻碍了波浪扰动力矩, 减小了纵倾角; 而位于 O 点前面的阻流板产生的附加力矩 M 却增加了波浪扰动力矩, 增大了纵倾角。原理如图 25 所示。



图 25 阻流板位置影响航行姿态的原理

由于 x 的增加,使得阻流板到 O 点的距离减小,阻流板的附加力矩也减小,这导致了纵摇均值和升沉均值的缓慢增加。而当 x 很大时,阻流板位置超过 O 点,使得纵摇均值相对光体增加,船体抬升更剧烈,导致前文 x 很大时船体湿表面积减小。这也是导致前文

所述 M 型滑行艇纵摇和升沉幅值随 x 变化的原因。

对 M 型滑行艇的升力进行监测（表 16），同样发现升力微弱增加，基本视为相对光体无变化。

表 16 升力变化

x (mm)	升力 (N)	百分比 (%)
25	670.34	0.06
50	670.37	0.06
100	670.47	0.08
125	670.38	0.06
250	670.22	0.04

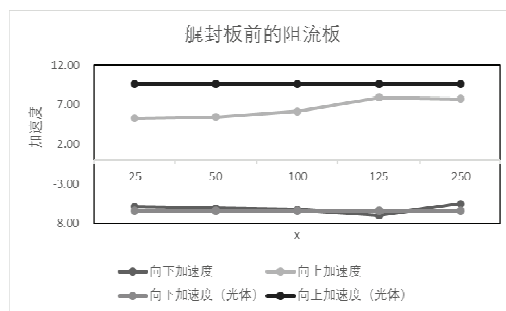


图 26 垂向加速度的变化

4.3.4 垂向加速度

结果如图 26 所示，随着 x 的增加，阻流板对垂向加速度的减小效果变弱，当 x 较大时，减小垂向加速度的效果又增加。

4.3.5 小结

阻流板的安装位置 x 变化时，发生了有趣的现象。当 x 在转动中心 O 之后时，阻流板后面产生空气层，通过减小湿表面积而减小了摩擦阻力，虽然最终的总阻力依旧比光体大，但若考虑此时变化 H ，阻力能否减至光体之下值得进一步探究。但不幸的是 x 的增加使得减摇的效果却在下降，因此设计阻流板时必须综合考虑阻力和耐波两者的性能需求。与安装在艇封板位置的阻流板相比，前移的阻流板会改善阻力性能，降低一部分减摇性能（相对光体仍旧减摇），这在设计中值得参考借鉴。

当 x 在 O 点之前，虽然减摇效果会立刻变好，但姿态和阻力会急剧恶化，纵倾角增加得过大，因而不可行。

5 结论

本文基于 CFD 模拟方法，对 M 型滑行艇加装不同参数的压浪板与阻流板后的运动流场进行模拟计算，研究结论概括如下。

（1）压浪板和阻流板这两种水动力附体可显著影响 M 型滑行艇迎浪运动的阻力、耐波性能和航行姿态，在不改变船体线型的情况下，安装简单，成本低廉，对于性能优化有较大作用。

（2）压浪板在减小纵摇和升沉幅度、减小波浪中的阻力、改善航行姿态、减小垂向加速度方面均有改善作用。所有的计算模型均能减摇，且在某一长度 L 下，存在一最佳安装角 α_0 ($\alpha_0 < 20^\circ$)，使得阻力性能最好。 L 越大， α_0 越小。使用该参数进行压浪板的设计

将取得最好的效果。

(3) 阻流板对 M 型滑艇迎浪运动的影响比压浪板更为剧烈, 位于艏封板处的阻流板可以减摇, 但无法减阻, 会恶化阻力性能。

(4) 为优化阻流板的阻力性能, 可以将阻流板安装位置前移, 此时阻流板后产生空气层, 可以通过减小摩擦阻力来优化阻力。虽然本文的计算中总阻力依旧大于光体, 但若与阻流板的高度参数相配合, 是否会使总阻力比光体小还值得进一步研究, 具有挖掘潜力的空间。

(5) 安装在艏封板前的阻流板会削弱减摇的效果, 但相比光体仍旧可以减摇。因而阻流板的具体设计应考虑耐波和阻力性能后进行综合选取。

(6) 阻流板安装位置不能在转动中心 O 之前。此时虽能减摇, 但阻力性能急剧恶化。

(7) 压浪板与阻流板对于 M 型滑艇迎浪运动的水动力机理相类似, 均在于其产生的附加力矩改善了滑艇的航行姿态后, 滑艇整体出现了一系列有利于阻力与耐波性能的变化所致。压浪板与阻流板可以在航行过程中使滑艇维持较小的纵倾角, 提升了阻力与耐波性能。

本研究是在光体 M 型滑艇试验和数值模拟已经做完的基础上做的二次研究, 目的是进一步挖掘 M 型滑艇减摇减阻的空间。出于研究条件的限制, 本文没有对附加压浪板和阻流板的 M 型滑艇的迎浪运动进行试验, 本文得到的结论还需要进一步验证。对于模拟中发现的阻流板后产生空气层的现象, 下一步可以进行深入研究, 讨论在 M 型滑艇上设计断阶的可行性。

参 考 文 献

- 1 邱永吉. T 型翼和尾压浪板对深 V 船型减纵摇影响研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2018.
- 2 Dong Jin Kim, Sun Young Kim, Young Jun You, Key Pyo Rhee, Seong Hwan Kim, Yeon Gyu Kim. Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2013, 5(1).
- 3 黄武刚. M 型艇与槽道型艇的阻力和耐波性比较[J]. 船海工程, 2015, 44(1): 56-59.
- 4 赵超. 阻流板和导流板对滑艇阻力性能的影响研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2013.
- 5 董文才, 姚朝帮. 中高速深 V 型船阻力预报方法及尾板减阻机理[J]. 哈尔滨工程大学报, 2011, 32(7): 848-852.
- 6 刘英和, 吴启锐, 许晟, 等. 尾压浪板升力研究及其对 WPC 耐波性的影响[J]. 中国造船, 2015, (2): 56-63.
- 7 王许洁, 孙树政, 赵晓东, 等. 加装艏板的深 V 单体复合船型水动力性能研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(1): 15-19.
- 8 程明道, 刘晓东, 吴乘胜, 等. 高速排水型舰船加装尾板的节能机理[J]. 船舶力学, 2005, 9(2): 26-30.
- 9 De Marco, Agostino, Mancini, Simone, Miranda, Salvatore, et al. Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull[J]. Applied Ocean Research, 2017, 64: 135-154.
- 10 丁江明, 江佳炳, 秦江涛, 等. 高速滑艇阻力性能 RANS 计算中网格影响因素[J/OL]. 哈尔滨工程

大学学报.

The influence of trimming flap and spoiler on the motion of the M-type planning craft in head waves

CAO Ya-long, YI Wen-hai, GAO Zhi-liang

Transportation College of Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: Loading hydrodynamic appendages on ship to obtain better resistance and seakeeping performance is a hot research direction in hydrodynamics. Aiming at the problem of resistance reduction and anti-pitching of M-type planning craft under the condition of up-waves, two schemes of adding trimming flap and spoiler are put forward. The CFD simulation software STAR-CCM+ based on viscous flow theory is adopted. And the effects of trimming flap and spoiler on added resistance in waves, pitching amplitude, navigation attitude and vertical acceleration are studied by numerical method. The results show that the trimming flap with appropriate parameters can reduce the resistance, the pitching and heaving amplitude. The proper position of the spoiler can improve the navigation attitude without significant deterioration of the resistance and pitch. As for vertical acceleration, both trimming flap and spoiler can mitigate it. At the same time, the hydrodynamic mechanism of trimming flap and spoiler is explained reasonably.

Key words : M-type planning craft; trimming flap; spoiler; CFD; motion in head waves