doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2021.01.004

空投波浪测量浮标降落仿真与结构强度分析

尼建军[1]，李宏武[1]，魏晓辉[2]，刘　宁[2*]，董　涛[2]
（1. 海军装备部驻天津地区第一军事代表室，天津 300131；2. 国家海洋技术中心，天津 300112）

摘　要：为了更快、更安全地获得海浪参数，本文设计了一种无需降落伞的新型空投波浪测量浮标（Air-launched Wave Measurement Buoy，AWMB），阐述了其工作原理与关键设计。与普通空投浮标不同，该浮标依靠减速板达到安全降落的要求，结合有限元方法，通过计算减速板展开过程中所受到的不同阻力，获得减速板 13 种展开角度的阻力系数，并对数据进行 3 次曲线拟合，同时将展开机构视为曲柄滑块机构，从而计算出减速板展开速度，模拟浮标降落的运动状态。针对浮标降落中受到的空气阻力，校核主要受力结构的强度，对应用海洋固体材料的减速板结构进行改进，为该新型空投波浪测量浮标的降落安全性提供了理论依据。

关键词：空投浮标；阻力系数；结构强度；MEMS 传感器
中图分类号：P751　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1003-2029（2021）01-0028-07

波浪测量浮标作为观测和收集海浪数据的主要仪器，可以长期、自动、定点、定时、全天候地对海浪高度、传播方向、波浪周期、功率谱和方向谱等水文要素进行观测和数据收集[1]。波浪测量浮标通过分析其在海面上的运动状态，以此来反映出海浪的情况[2]，现在的波浪测量浮标有两种，一种是基于加速度传感器的波浪测量浮标，另一种是基于 GPS 的波浪测量浮标。

在浮标和测波仪器方面，最著名的是荷兰 Datawell 公司的 Directional Waverider 测波浮标系列，其中 MkIII 型波浪浮标，内部有罗盘和加速度传感器，内部电池可以支持工作 3 年左右，而另一型号测波浮标 DWR-G 型波浪浮标是利用 GPS 测量波浪[3-4]；美国 InterOcean 公司研制的 S4ADW 系列方向波浪测量仪，利用高分辨率压力传感器来测量海绵波引起的波动，进而反馈波浪参数；另外还有挪威 Fugro Oceanor 公司的 Wavescan 型浮标，挪威 Aanderaa 公司生产的 DB4700 型浮标，它们基本都配有一个单轴加速度传感器、一个电磁罗盘和一个双周倾角传感器。

近年来，国家海洋技术中心研制了 SBF6-1 型波浪浮标、SBF7-1 型波浪浮标，山东省科学院海洋仪器仪表研究所研制了 SBF3 型波浪浮标遥测系统，中国海洋大学研制了 SZF 型波浪测量浮标。这几款波浪浮标均是的利用重力加速度传感器来测量波浪[5-7]。

这些传统的波浪测量浮标均是通过船载、人工的方式进行布放，海上作业的时间较长，有较大的风险。为了改变这种浮标布放方式，将航空技术与波浪浮标结合，通过无人机或其它飞行器投放。本文设计了一种新型空投波浪测量浮标，从而实现目标海域的波浪快速实时观测。对于空投浮标的研究，大部分基于反潜声呐浮标的研制，其它类型浮标的研究资料较少。

收稿日期：2020-05-17
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2016YFC1400501）
第一作者：尼建军（1978-），男，工程师，主要从事海洋观测技术海洋水文数据处理研究。E-mail: joe_ni787@sina.com
通讯作者：刘宁（1977-），男，副研究员，主要从事海洋观测技术研究。E-mail: liun0726@163.com

该型号空投波浪测量浮标利用 MEMS 加速度传感器反馈浮标的运动状态，从而获得波浪参数。本文对浮标的结构进行设计与研究，利用有限元方法和 Python 软件对降落过程进行了数值模拟，并校核其关键部位强度，论述了浮标空投的可行性与安全性。

1　AWMB 结构设计

1.1　AWMB 的设计要求及工作原理

AWMB 设计的要求如下：（1）拥有较高的自动化，发射后无需人为控制；（2）满足从空中投放的要求，安全入水；（3）准确采集处理海浪的参数；（4）通过卫星通信。其工作原理如图 1 所示。

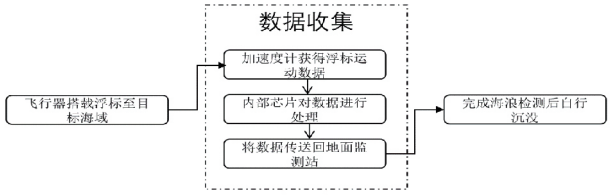

图 1　AWMB 的工作原理

1.2　结构设计

考虑到 AWMB 的运输载具是飞行器，机载吊舱对浮标的结构外形和尺寸有着严格的限制，所以浮标体的外形确定为圆柱形。虽然圆柱状的物体在海洋工程领域应用广泛，对于圆柱绕流现象的研究发展也比较快，但如果利用柱状浮标来监测海浪，由于其为细长型的漂浮圆柱体，要注意 3 点：随波性、卫星通信和运载方式。

1.2.1　随波性

根据横摇经典理论，横摇角相对于波面角的幅频响应函数为 [8]：

$$K=\frac{1}{\sqrt{\left(1-\Lambda^2\right)^2+4\mu^2\Lambda^2}} \tag{1}$$

浮标的直径相对于波长较小，浮标的初稳心高很高，横摇的固有周期很短，其横摇角近似于波面角，即随波漂流。

1.2.2　卫星通信

由于此型号浮标采用的是北斗卫星通信的方式，因此对浮标的横摇运动的稳定性提出了更加严格的要求。较小的横摇角度能够降低天线束宽的要求，提高天线增益，增加系统的通信质量 [9-10]。

1.2.3　运载方式

首先，浮标的整体质量不能太大，尽量减轻浮标的重量，无论对于搭载数量，还是降落过程中的冲击，都是至关重要的。其次，需要合适的减速装置，减缓降落过程中受到的冲击。

综合以上 3 点，省去降落伞及其复杂的开伞和剪伞装置，用一个可以展开的减速板替代，不仅提高了浮标的可靠性，还可以增大初稳心高，优化随波性能 [11-12] 和通信质量。同时，扩展出来的减速板，可以增大浮标摆动的阻尼，以防止被海浪打翻。浮标的主体结构采用厚度为 2 mm 的铝合金圆筒，而减速板是由 8 根主梁和 544 航空伞布制成，其中，主梁是由固体浮力材料加工制成，密度仅为 500 kg/m^3，极大地增加了浮标的储备浮力，提高了稳定性。

浮标由 4 部分组成，从上到下依次为：天线舱、电路模块舱、电池舱和减速板及其启动装置模块。天线舱内部装有北斗卫星天线，加速度传感器、数据处理电路和北斗天线电路装于电路模块舱，电池舱的下部是减速板的启动模块，减速板覆盖于电路模块舱和电池舱表面，如图 2 所示。

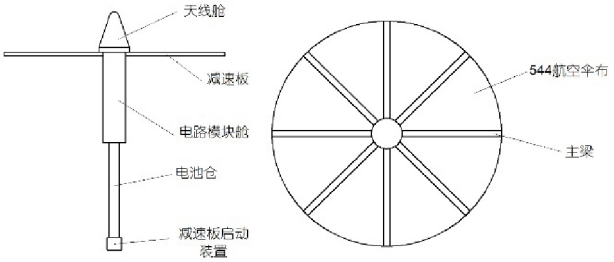

图 2　AWMB 总体布置图与减速板结构及外形

浮标总长 0.887 m，减速板闭合状态时最大直径为 0.124 m，展开状态时最大直径为 0.89 m，续航时间至少一周。以浮标减速板展开状态下所在

平面为基平面，浮标的重心高度为 -0.229 m，浮心高度为 -0.136 m，浮标水线面与基平面重合，初稳心高为 +0.152 m，排水量为 4.36 kg。

2 降落过程分析

2.1 减速板展开过程中阻力系数计算

2.1.1 理论方法及预处理

为了确定浮标在降落过程中减速板展开时的受力情况，在减速板不同的展开角度状态下，进行计算分析，获得不同状态下浮标受到的空气阻力，利用式（2）得到减速板展开过程中阻力系数的变化趋势。

$$C_d=\frac{8F_w}{\pi d^2\rho v^2} \tag{2}$$

$$d=2\times(r+R\sin\theta) \tag{3}$$

式中：F_w 为浮标所受到的空气阻力；d 为减速板沿浮标降落方向投影面的直径；ρ 为空气的密度；v 为浮标降落的速度；r 为电路模块舱的半径；R 为减速板主梁的长度；θ 为减速板主梁与浮标轴线的角度。

设定浮标的降落速度为 12 m/s，在减速板展开过程中，会形成伞状锥形区域，因此，此时的流体并不是理想流体，而是有旋、无粘的，湍流模型采用标准 *k-e* 模型。以减速板主梁与浮标轴线的角度为变量，每隔 7.5 度，计算在此状态下浮标沿轴线方向的压力状况，获得降落的空气阻力。

计算网格采用四面体网格，采用 ICEM CFD 进行网格划分。浮标与流体界面的网格如图 3 所示。

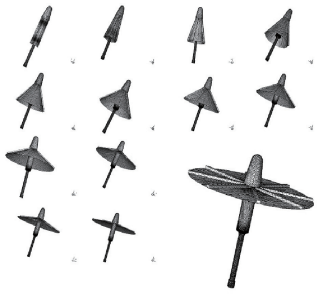

图 3 13 种状态下的网格分布图

2.1.2 计算结果及分析

各种状态下，浮标所受到的空气阻力以及对应的阻力系数如表 1 所示。阻力系数随角度变化的趋势如图 4 所示（0 至 15°的计算结果无效）。

表 1 计算结果

角度 θ/(°)	投影直径 d/m	空气阻力 F_w/N	阻力系数 C_d
0	0.124	0.409	0.579
7.5	0.194	1.266	0.478
15	0.298	4.519	0.732
22.5	0.396	10.515	0.969
30	0.490	17.403	1.044
37.5	0.578	25.250	1.093
45	0.656	33.598	1.127
52.5	0.724	42.419	1.167
60	0.782	50.126	1.184
67.5	0.830	57.214	1.199
75	0.862	62.068	1.205
82.5	0.884	64.102	1.184
90	0.890	63.528	1.158

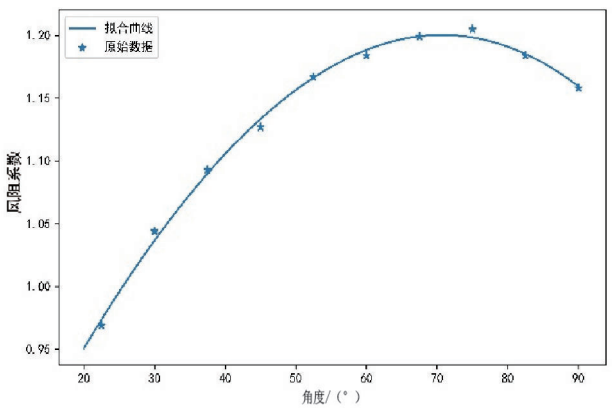

图 4 阻力系数随角度变化的趋势图

由图 4 可知，对于圆锥面物体，当圆锥母线与轴线之间的角度小于 15°时，已经不符合式（2）定义的空气阻力系数的计算；而对于大于 15°的，

阻力系数将随角度增大而先增大后减小，在 75°处，阻力系数达到最大。对数据进行三次曲线拟合，获得阻力系数随角度变化的函数：

$$C_d=-1.74\times10^{-7}\theta^3-6.908\times10^{-5}\theta^2+0.01237\theta+0.7322 \quad (4)$$

2.2　浮标降落过程的运动状态

减速板的展开机构为曲柄滑块机构，如图 5 所示。其中，杆 AB 为减速板的主梁，杆 BC 为支撑杆，用于将减速板撑起，滑块附着在浮标电池舱上，与支撑杆相连。当滑块沿着浮标体作竖直向上的运动时，通过支撑杆将减速板的伞面骨架撑起，从而达到减速板展开的目的。

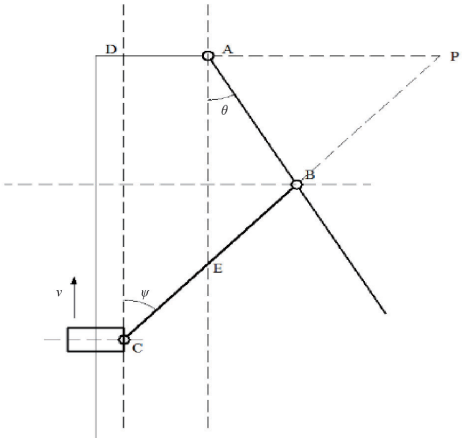

图 5　减速板的展开机构示意图

减速板的展开速度决定了整个浮标空投的最低高度、减速状态以及入水速度，因此，对减速板展开速度的分析尤为重要。图 5 中的 P 点为主梁 AB 与滑块的速度瞬心，B 点的运动矢量方程为：

$$\overrightarrow{v_B}=\overrightarrow{v_C}+\overrightarrow{v_{BC}} \quad (5)$$

主梁转动的角速度：

$$\dot{\theta}=\frac{v}{y\tan\varphi-X} \quad (6)$$

$$\tan\varphi=\frac{l_1\sin\theta+X}{y-l_1\cos\theta} \quad (7)$$

$$y=Y-vt \quad (8)$$

式中：$\theta=\angle BAE$，$\varphi=\angle BCD$，$v=vc$，$X=AD$，$Y=CD$，$l_1=AB$，$l_2=BC$。

为了提高其安全系数，设定浮标的质量为 4.5 kg。同时，可以对减速板展开过程的受力简化，即阻力垂直于减速板。其受力面积为减速板垂直方向上投影的面积：

$$A=\pi(R\sin\theta)^2 \quad (9)$$

浮标在降落过程中所受到的空气阻力和降落速度为：

$$F_w=\frac{1}{2}C_dA\rho u^2 \quad (10)$$

$$u_1=\sum_0^T\frac{mg-F_w}{m}t_i \quad (11)$$

将式（4）代入式（11），可以得到关于 θ 的一元三次函数。现设定浮标在高度 800 m 处无初速度释放，释放 1.5 s 后，减速板开始作展开运动，假设为无风状态，浮标此时仅受到重力和空气阻力的作用。利用 Python 进行数值模拟，可以得出减速板的展开过程中浮标所受到的空气阻力，如图 6 所示；浮标下降过程中速度变化和高度变化如图 7 所示。

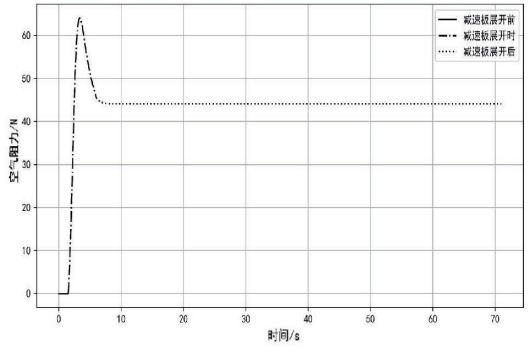

图 6　浮标降落过程中所受到的空气阻力

由图 7 可知，浮标从高度为 800 m 处释放后，到达 719.2 m 时，减速板完全展开，之后在很短时间内达到匀速运动，因此，可以认为 719.2 m 时，就开始作匀速运动了。浮标从释放到入水的过程，耗时 71 s，实际情况下，所用时间可能会更短。

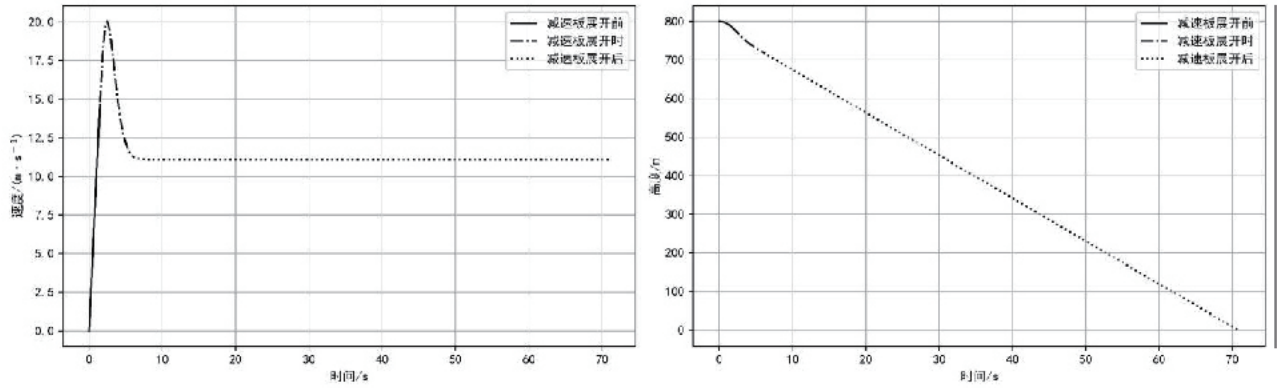

图 7 浮标降落的速度与高度的变化曲线

3 减速板主梁的强度分析

最容易损坏的地方是减速板的主梁结构，由于玻璃微珠复合材料的脆性，会使它在降落过程和入水过程中会出现折断现象，尤其在降落过程中，主梁一旦损坏，必将导致整个浮标的坠毁。如果在入水过程中主梁损坏，因为柔性伞布的包裹，减速板整体依旧可以保持一个拥有浮力的平板，不会影响测波性能。因此，降落过程中，减速板主梁的完整是保证浮标安全性和完整性的关键。减速板主梁采用的海洋固体浮力，如图 8 所示。

图 8 海洋固体浮力材料

在第 2 节中，已经分析得出了在减速板展开的过程中，会受到最大阻力，其值为 64.02 N。此时的减速板还未完全展开，假设圆锥形减速板内部的压力均垂直于板面，所以，可以简化为一个外径为 R_1 内径为 R_2 的圆环，受到垂直于板面向上的压力。因为减速板是由 8 根梁支撑起来的，所以单根梁的单位长度上所受到阻力为：

$$\mathrm{d}F=\frac{F_w}{4(R_1^{\ 2}-R_2^{\ 2})}r\mathrm{d}r \tag{12}$$

网格采用六面体线性单元，整体节点之间的尺寸约为 4 mm，对应力集中的部位添加节点，特别是中部和凹槽相交的孔，增加其网格密度，总共 5 990 个单元，如图 9 所示。

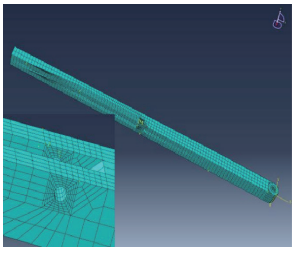

图 9 网格划分和局部细化

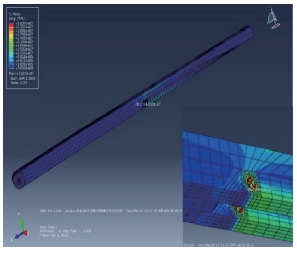

图 10 主梁的应力云图

仿真的应力云图如图 10 所示。最大应力位于中部孔的位置，大小为 36.1 MPa。根据材料的力学性能报告（图 11），所选用的玻璃微珠复合材料的拉伸强度为 23 MPa，因此，这种结构是无法满足要求的。

图 11 力学测试报告

为了能够保证减速板主梁在降落展开过程中不会断裂，特别是中部孔的位置，采取两根复合材料梁夹一根钢板的结构，如图 12 所示。优化后的结构，既可以弥补玻璃微珠复合材料抗拉强度低的缺点，又可以改善材料脆性大的特点，提高了浮标的安全性。而且，经过对浮标进行漂浮实验，新的主梁结构对浮标的重浮心位置影响很小，水面线仍与减速板重合，如图 13 所示。

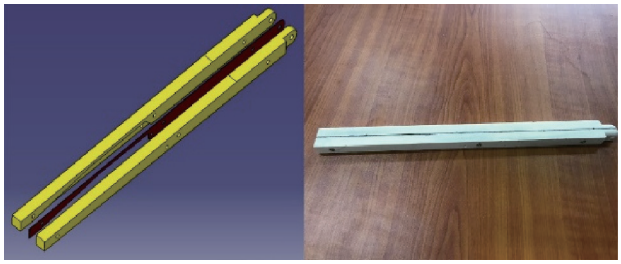

图 12　减速板主梁的新结构

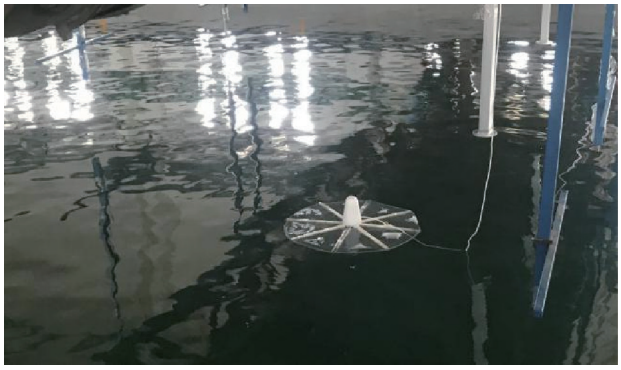

图 13　AWMB 的漂浮状态

4　结　论

本文结合现代航空技术，设计了一款新型无需降落伞的空投波浪测量浮标，并对浮标空中运动过程进行了计算分析，探究了其结构的强度和安全性问题，并提出了可行的解决方案。结合计算结果分析，得出以下研究结论：

（1）提出了新型空投波浪测量浮标结构组成和设计参数，在理论上验证了浮标安全降落的可行性，并优化了减速板结构；（2）对于减速板不同的开合角度，其沿轴线方向的投影面对应的阻力系数基本保持不变，仅仅在角度比较小的时候不适用，为锥形面的流体阻力计算提供了较为方便的简化方法；（3）该型浮标减速板主梁采用的玻璃微珠复合材料，减轻了浮标的重量，为浮标提供额外的浮力，并初次将这种脆性材料作为功能结构件使用，通过在中部添加韧性材料，很好地解决了材料的强度与脆性问题。

为了更加准确检验浮标降落过程的安全性，今后将进一步开展低空投放试验，对浮标空中运动状态和入水状态进行评测。另外，此类浮标不但适用于机载投放，也可用于船载和水下平台搭载，用于应急情况下的使用。

参考文献：

[1] 毛祖松 . 我国近海波浪浮标的历史、现状与发展 [J]. 海洋技术 , 2007, 26(2):23-27.
[2] 周庆伟 , 封哲 , 汪小勇 , 等 . 基于三种测波方法的实测数据对比分析 [J]. 海洋技术学报 , 2017(3):45-49.
[3] 唐原广 , 康倩 . 波浪浮标测波方法比较 [J]. 现代电子技术 , 2014(15):129-130.
[4] G Jeans, I Bellamy, J J De Vries, et al. Sea trial of the new Datawell GPS directional waverider[C]//IEEE/OES. Seventh Working Conference on Current Measurement Technology. San Diego: IEEE, 2003.
[5] 王军成 . 我国海洋资料浮标技术的发展 [J]. 山东科学 , 1999(4):16-20.
[6] 刘国栋 . 波浪浮标数据处理方法研究 [D]. 天津 : 天津大学 , 2012.
[7] 王永超 . 近海小型海洋浮标标体基本结构的设计研究 [D]. 大连 : 大连理工大学 ,2018.
[8] 李积德 . 船舶耐波性 [M]. 哈尔滨 : 哈尔滨工程大学出版社 , 2007.
[9] 曲少春 , 郑琨 , 王英民 . 圆柱形浮标运动分析与仿真 [J]. 计算机仿真 , 2010(6):371-375.
[10] 唐超 , 卢树军 , 朱江 . 海浪摇摆下的浮标卫星通信系统性能分析 [J]. 通信技术 , 2016, 49(6):729-734.
[11] Ruijia Jin, Ying Gou. Motion response analysis of large-scale structures with small-scale cylinders[J].Ocean Engineering, 2018, 155:65-74.
[12] 陈小邹 , 万宇祥 . 便携式波浪测量浮标总体设计及随浪特性分析 [J]. 舰船科学技术 , 2018, 40(23):72-75.

Falling Simulation and Structural Strength Analysis of Air-launched Wave Measurement Buoy

NI Jian-jun[1], LI Hong-wu[1], WEI Xiao-hui[2], LIU Ning[2], DONG Tao[2]

1. *The First Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Tianjin, Tianjin* 300131, *China*;

2. *National Ocean Technology Center, Tianjin* 300112, *China*

Abstract: In order to obtain wave parameters more quickly and safely, a new type of air-launched wave measurement buoy (AWMB) without parachute is designed, and its working principle and key design are described. Different from the common airdrop buoy, this buoy relies on the air-brake flap to achieve the requirements of safe landing. Combined with the finite element method, the resistance coefficient of 13 kinds of spreading angles of air-brake flap is obtained by calculating the different resistances in the process of spreading air-brake flap, and the data are fitted with a cubic curve. At the same time, the spreading mechanism is regarded as a crank slider mechanism, so as to calculate the spreading speed of air-brake flap and simulate the falling motion of the buoy. In view of the air resistance of the buoy in falling, the strength of the main stressed structure is checked, and the structure of the air-brake flap made of marine solid material is improved, which provides a theoretical basis for the landing safety of the new air-launched wave measuring buoy.

Key words: air-launched buoy; drag coefficient; structural strength; MEMS accelerometer