# 水下训练服浮心的试验测试方法

张磊 卢来洁 马爱军 石蒙

（中国航天员科研训练中心，北京100094）

摘 要： 目的 提出一种水下训练服浮心测试方法，并给出测试结果。 方法 首先对水下训练服进行中性浮力配平，其次将一定数量的活动配重分别放置在胸部和背包最上层的活动配重袋内，得到两种不同的水下训练服中性浮力姿态。根据力矩平衡原理，可间接计算出水下训练服的浮心。 结果 本文将水下训练服的尺寸调节为适合172cm人体穿着，入水试验并采集数据，计算出水下训练服的浮心为（126.0mm，76.5mm）。 结论 本文提出的水下训练服浮心测试方法可行有效。

关键词：水下训练服；试验；浮心；测试；

中图分类号：R852.81 文献标识码：A 文章编号：

***One Method to Measure Buoyant Center of Spacesuit Underwater Based on Experimental Test.*** Zhang Lei, Lu Laijie, Ma Aijun, Shi Meng.Space Medicine & Medical Engineering,

**Abstract： Objective** A method to measure the buoyant center of spacesuit underwater based on experimental test is put forward and the result is given. **Methods** Firstly, adjusting the removable counterweight, lead blocks, to achieve the neutral buoyancy status of spacesuit underwater. Secondly, put some leads in different lead block bags, chest bags and topside backward bags, to attain different neutral buoyancy posture, the buoyant center can be calculated indirectly on moment equilibrium principle. **Result** In test, the dimension of spacesuit underwater is fit to a standard human body of 172cm stature, the buoyant center of this spacesuit underwater is（126.0mm，76.5mm）based on the experimental data. **Conclusion** The results demonstrate the feasible and effective of the method.

**Key words:** spacesuit underwater; experiment; buoyant center, test

**Address correspondence and reprint requests to：**Zhang Lei. China Astronauts Research and Training Center, Beijing 100094, China

空间站出舱航天员在失重环境下，受到外力的作用，呈现出漂浮或自由旋转等特性。目前，地面上对出舱航天员的训练一般使用模拟失重训练水槽（中性浮力水槽）。要在水下模拟出漂浮感，需要对水下训练服（与舱外服外观、工效相同）进行中性浮力配平和姿态调整。当水下训练服（含服内人体）达到中性浮力状态时，服内人员的漂浮感与出舱航天员相似。理想情况下，水下训练服的重心浮心应重合，这时服内人员会感受到服装的漂浮感以及外力下的运动和转动感[1,2]；而实际情况中，很难做到水下训练服的重心浮心重合，但可以尽量通过移动活动配重块使其接近，从而使水下失重模拟的效果更好[2]。之前的工作曾经利用力矩平衡的方法测试过水下训练服重心浮心间距，可评估水下训练服的中性浮力状态[3]，对中性浮力配平的方案和配平方法影响不大。

水下训练服的浮心是水下训练服的一个关键属性，对水下训练服的中性浮力配平来说尤为重要。如果知道水下训练服的浮心，就能针对不同的服装穿着者，提前给出优化的配平方案[4]，即可节约水下配平时间，又可给出合适的水下训练服姿态，从而提高水下试验的效率。

测试物体的重心，可采用三线法、力矩法等[5]，由于可在地面操作，相对简单，目前也有专用的重心测试设备。而浮心测试除了利用几何外观进行仿真计算的方法外，还可在水下进行实际测量。由于水下训练服外观复杂，无法进行精确的几何仿真，所以需在水下进行实测。

# 1 原理与方法

水下训练服在水下受到重力、浮力的相互影响，达到中性浮力状态后，静止时服装重心浮心的连线平行于铅垂线，且浮心在上方。此时，若对水下训练服施加力偶，将改变水下训练服的姿态, 一种姿态下，可得到一个与浮心相关的力矩平衡方程。不同的姿态可得到多个平衡方程，通过求解方程组，即可间接得到水下训练服的浮心。

由于在水下难以施加已知大小的力偶，本文采用另一种方法得到相同的效果，即利用水下训练服活动配重的位置特性，把已知数量的活动配重块调整到不同位置，从而得到不同的处于中性浮力状态的水下训练服姿态。

# 2 建模与分析

对水下训练服建模[6]，由于水下训练服基本左右对称，本文不考虑Y方向，因此可在XZ平面上分析水下训练服的姿态， 坐标系XOZ为水下服本体坐标系，X轴指向胸前， Z轴指向头顶，原点位于水下训练服小车固定孔的连线中心；坐标系X’OZ’为铅垂坐标系，可由坐标系XOZ旋转得到，旋转角度即为水下训练服的前倾角度θ。

Buoyancy

**Z**

Z’

θ

**O**

X’

**X**

Basal gravity

Gravity

Removable counterweight

**图1 坐标系及力矩分析**

**Fig.1 Reference frame and analysis of moments**

图1给出了一例水下训练服中性浮力姿态的力矩平衡示例图。图中，重力（图中虚线）包含两个部分，一是基础重力，包括水下训练服、假人以及中性浮力状态需要的活动配重；二是可移动活动配重，用于改变水下训练服的姿态。

记水下训练服浮力为，浮心为（xf，zf）；基础重力为，基础重心为（xg，zg）；活动配重重力为，重心为（xa，za）；服装前倾角度为θ。则在坐标系X’OZ’中，以原点为基准，可得到力矩方程[7,8]：

·xg’ + ·xa’ + ·xf’ = 0 （1）

式中，xf’、 xg’和xa’分别为浮心、基础重心和活动配重重心在铅垂坐标系X’OZ’的x轴数值，可分别由其在本体坐标系XOZ中的坐标通过旋转变换得到[9]。

x’ = x· cosθ+z· sinθ （2）

由于活动配重在水下除了对水下训练服施加重力外，自身还受到水的浮力，为降低计算难度，可将活动配重看做密度为铅密度减去水密度的材料，则其对水下服的影响仅有重力而无浮力,文献[6]指出，该处理方法不影响水下训练服的姿态。此时的活动配重重力应为，由此水下训练服的浮力应为+。

调整活动配重位置，可得到另一种水下训练服中性浮力姿态，由此得到另一个力矩方程，两个力矩方程组成一个方程组。方程组中，浮力、基础重力、活动配重及其位置皆可实测获得。求解这个方程组，就能得到水下训练服的浮心，并可计算出水下训练服的重心浮心间距。

# 3 实际测试与结果

将一个60kg、172cm的假人装入水下训练服，水下训练服的尺寸调整合适。将服装的腿部、臂部分别捆绑，防止水下训练服姿态变化时腿部和臂部因浮力而相对移动，从而影响测试结果。将水下训练服吊起，利用遥控吊秤测得水下训练服重力为238.0kg，考虑中性浮力的原理，该数据也就是水下训练服入水后的浮力，但需减去可移动活动配重的浮力0.3kg，即为237.7kg。

水下联系方式入水后进行中性浮力配平，取8块活动配重块为可移动活动配重，不考虑其自身的浮力，重量为3.4kg，分别放置在胸部配重袋和背包最上层配重袋，稳定后进行水下拍照以分析水下训练服前倾角度。

水下训练服出水干燥后，保持此时的假人和中性浮力配平需要的活动配重铅块状态不变，进行重心测试，得到水下训练服重心位置为（133.5mm，43.2mm），由力矩分解可求出基础重力为234.3kg，重心为（129.5mm,58.7mm）。

经水下拍摄图像测量，并参考建模仿真数据，可测出可移动活动配重位置为（385.0mm,199.0mm）时，即可移动活动配重在胸部配重袋内，水下训练服倾角为24.2°；可移动活动配重位置为（-215.0mm,704.0mm）时，即可移动活动配重在背包最上层配重袋内，水下训练服倾角为-6.7°。

将上述已知量代入公式，求解方程组，可得到含活动配重的水下训练服浮心为（124.5mm，76.6mm），重心浮心间距为18.6mm。由于中性浮力配平需要的活动配重皆有记录，见表1，活动配重位置可由模型得到，则根据力矩合成方法，可计算出不含所有活动配重的水下训练服浮心为（126.0mm，76.5mm）。

**表1 不考虑活动配重的水下训练服浮心计算**

**Table1 Analysis of buoyant center of spacesuit underwater involving the counterweight**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Counterweight location | Num | Buoyancy(kg) | Buoyant Center（x,mm） | Buoyant center（z,mm） |
| Head | 16 | 0.7 | 150.6 | 732.5 |
| Chest | 0 | 0.0 | 385.0 | 199.0 |
| Arm | 10 | 0.4 | 205.5 | 228.5 |
| Ankle | 26 | 1.1 | 300.0 | -935.0 |
| Back topside | 6 | 0.2 | -215.0 | 704.0 |
| Back2 | 15 | 0.6 | -215.0 | 495.0 |
| Back3 | 15 | 0.6 | -215.0 | 407.0 |
| Back4 | 2 | 0.1 | -215.0 | 319.0 |
| Back5 | 5 | 0.2 | -215.0 | -47.6 |
| spacesuit underwater  including Counterweight |  | 237.7 | **124.5** | **76.6** |
| spacesuit underwater  without Counterweight |  | 233.8 | **126.0** | **76.5** |

# 4 结论与讨论

由于水下训练服外观组成结构复杂，从外形仿真的角度难以给出准确的水下训练服浮心。本文通过试验首次给出了水下训练服的浮心位置，即利用力矩平衡原理，通过移动部分活动配重即可得到水下训练服的浮心，试验证明该方法简单方便有效，在将来的应用中可进行进一步的研究。

从测试过程来看，水下训练服浮心的测试精度受到如下因素的影响：

1. 显然，选择的两种水下训练服姿态（对应两个力矩方程）差异越大，则浮心测试精度越高，进一步的研究中，可考虑增加移动的活动配重数量，使水下训练服的姿态变化较大；
2. 水下训练服的倾角误差，本文通过水下服侧面拍照后分析图像得到，存在角度误差。将来进一步研究中，建议设计一个支架，通过水下训练服的小车安装孔，限制水下训练服只能前后旋转，得到精确的倾角；
3. 水下训练服的浮力存在误差，首先是中性浮力的误差，实际上很难达到理想的中性浮力；其次是测试误差，需要通过无线吊秤称重，并结合水下训练服配重分布来确定，且由于出水后水下训练服含水，存在测试误差。将来进一步研究中，可对水下训练服含水材料对服装浮力的影响加以分析；

水下测试时，还受到脐带、服装关节变化、活动配重位置等的细微影响，可通过多次测量的方法降低其影响，另外，文中进行的浮心测试未考虑Y方向。实际上，利用本文的方法同样可以测试出浮心在Y方向的数据。

**参考文献**

1. Ernest R. Bell and Jr. David Coan. A Review of the Approach to ISS Increment Crew EVA Training[R]. AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition18-20 September 2007: AIAA 2007-6236
2. 陈善广主编.航天员医学工程学发展60年[M].北京:科学出版社,2009:212-213
3. 皋宇翔，黄伟芬，马爱军等.水下训练航天服重心浮心间距的一种试验测试方法[J].航天医学与医学工程，2013(2): 137-139
4. 马爱军,张磊,刘巍,等.水槽训练航天服中性浮力配平方法[J].载人航天,2008(2):1-3
5. Elena M.Gutierrez,etc. Comparison and evaluation of two common methods to measure center of mass displacement in three dimensions during gait[J] .[Human Movement Science](javascript:goQK('0167-9457');), Volume 25, 2006(2):238-256.
6. 张磊,马爱军,卢来洁,等.水下训练航天服固定配重设计仿真[J].航天医学与医学工程,2015(3):218-222
7. 骆行,张欢编著.[机械工程力学](http://21.71.66.19:8088/markbook/BookSearch.jsp)[M].成都:电子科技大学出版社,2007:45-48
8. 朱炳麟主编.理论力学[M].北京:机械工业出版社，2001：23-28
9. [鲍建宽](http://21.71.66.101/kcms/detail/%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20search.aspx?dbcode=CJFQ&sfield=au&skey=é²å»ºå®½&code=07283012;). 坐标转换的方法及应用[J].现代测绘，2014（5）：3-7