

平衡潮理论教学中平动与惯性离心力的探讨

张世崧

海军大连舰艇学院军事海洋与测绘系, 辽宁 大连

收稿日期: 2023年11月21日; 录用日期: 2023年12月19日; 发布日期: 2023年12月26日

摘要

本文结合《海洋概论》授课实践, 对潮汐平衡潮理论教学中容易产生错误认识的平动、惯性离心力问题做了深入思考。基于物理中平动的定义, 分析出地球公转不作平动; 基于流体力学中亥姆霍兹速度分解公式, 提出了海水平动的判断方法; 最后也清楚解释了平衡潮理论简化条件在惯性离心力合理性假设中的应用。对于新学习潮汐理论的学生而言, 这些内容都将起到至关重要的作用。

关键词

平衡潮理论, 平动, 亥姆霍兹速度分解, 惯性离心力

Discussion on Translational and Inertial Centrifugal Force in the Teaching of Equilibrium Tide Theory

Shisong Zhang

Department of Hydrography and Cartography, Dalian Navy Academy, Dalian Liaoning

Received: Nov. 21st, 2023; accepted: Dec. 19th, 2023; published: Dec. 26th, 2023

Abstract

Combining with the teaching practice of "Introduction to Ocean", this paper makes a deep thought on the problems of translational and inertial centrifugal force, which are easy to produce wrong understanding in the teaching of tidal equilibrium tide theory. Based on the definition of translation in physics, it is analyzed that the earth does not rotate in translation. Based on the Helmholtz velocity decomposition formula in fluid mechanics, a method of judging seawater translational motion is proposed. Finally, the application of the simplified condition of equilibrium tide theory to the hypothesis of the rationality of inertial centrifugal force is explained clearly. For students new to tidal theory, these will play a crucial role.

Keywords

Equilibrium Tide Theory, Translation, Helmholtz Velocity Decomposition, Inertial Centrifugal Force

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1687年，牛顿提出了著名的平衡潮理论。其主要思想是：地球为一个圆球，不考虑陆地的存在，其表面被等深的海水所覆盖，海水在天体引潮力的作用下形成潮汐椭球，潮汐椭球的长轴始终指向天体，对着和背着天体的海面会形成高潮，地球自转到潮汐椭球的不同位置所对应的潮高是变化的，周而复始的变化呈现出海水周期性的涨落规律[1]。平衡潮理论的建立对于我们深入了解潮汐的本质和规律起到了很重要的作用。

以往在平衡潮理论的教学过程中，授课重点偏重于理论应用，常直接采用动画演示地月系统的相对位置关系，视觉冲击带动了学习热情，也保证了教学效果，学生对直观可见的平衡潮分布特征掌握的很好。但对于平衡潮理论成立的条件以及抽象力学知识的解释还存在错误理解，尤其是对平动问题、惯性离心力大小相等问题等仍有错误认识。本文结合课堂授课实践，对上述问题做了深入的思考，剖析问题产生的根源和实质，对晦涩难懂的知识做了系统性的梳理，给出地球公转不作平动的具体分析过程，而后提出海水平动的判断方法；最后也清楚解释了平衡潮理论简化条件在惯性离心力中的应用，这些都为后续有关潮汐理论的学习奠定良好的理论基础。

2. 理论教学中的平动问题

2.1. 地月系统平动分析

地球绕地月公共质心运动，是不是平动？包括《力学》在内的很多刊物都认为公转必定是平动，根据物理中平动的定义：如果各个时刻，物体中任意一条直线始终彼此平行，那这种运动才是平动，平动亦称平行移动[2]。按照定义，取物体上任意两点连成直线(图1中的黑色线段和红色线段)，看它们在运动中是否始终保持平行，便是判别是否作平动的方法。以地月系统为例，连接南、北极的地轴，它始终指向北极星附近，如果在地球公转中地轴始终保持平行移动，即作平动。与地轴平行的地球上其他两点的连线，在地球公转中也作平动[3]。相反，所有与地轴不平行的地球上任意两点的连线(如赤道直径等)，在地球自转中会不断地发生旋转，所以必然在地球的公转中作的就不是平行移动，即不作平动。详情可见下图1。

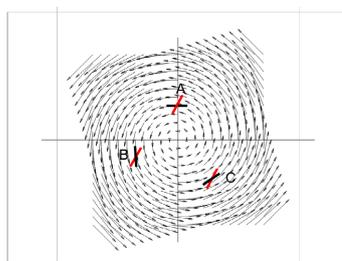


Figure 1. Translational and non-translational diagrams

图1. 平动与非平动示意图

2.2. 海水平动的判断方法

海水属于液态流体，因流体内各质点内聚力较小，故易于发生流动，尤其是在受到干扰后，海水不能自由地保持固定的形状。不同于固体，地球表面覆盖的海水受到外力的作用，除了会发生平移、旋转运动以外，还会发生形状的变化，即变形。变形又可分为线变形与角变形[4]。变形之后的海水，在各个时刻，是否还能保持平行运动需要通过理论公式来判断。

以某海水微团二维平面运动为例，根据流体力学中亥姆霍兹速度分解公式可知，单位时间、单位长度线段边的长度变化量用线变形速率来表示；单位时间流体微团各边角度改变量用角变形速率来表示。单位时间流体微团各边逆时针转过角度的平均值用旋转角速度来表示[5]。下图2中，A点初始速度为 (u, v) ，因微团边界AD、AB距离很短，端点间的速度变化可近似为线性关系，经 dt 时间后，ABCD微团变形为AB'C'D'，对角线AC与AC'的夹角为 $d\theta$ ，AD边逆时针转过的角度为 $d\theta_1$ ，AB边顺时针转过的角度为 $d\theta_2$ ，即：

$$d\theta_1 = \frac{\partial v}{\partial x} dt, \quad d\theta_2 = \frac{\partial u}{\partial y} dt \quad (1)$$

角变形速率：

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}(d\theta_1 + d\theta_2) \quad (2)$$

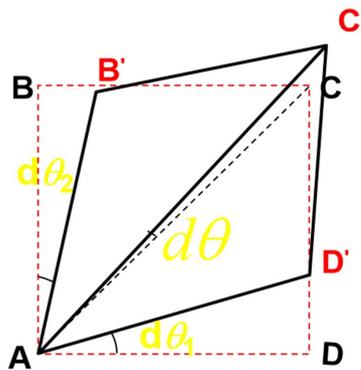


Figure 2. Seawater microclump deformation map
图2. 海水微团变形图

旋转角速度：

$$\overline{\omega_z} = d\theta = \frac{1}{2}(d\theta_1 - d\theta_2) \quad (3)$$

若选取上图中的对角线作为判断平动的参考线，当 $d\theta_1$ 与 $d\theta_2$ 大小相等时， $\overline{\omega_z} = 0, \varepsilon_{xy} \neq 0$ ，即旋转角速度为0，但角变形速率不为0。这表明海水微团只作变形不作旋转运动。流体微团尺寸较小，若选用对角线来表征旋转的平均水平，因对角线始终保持方向不变，即使流体公转运动的轨迹是圆，也依然是作平动。所以海水自身的旋转角速度是否为0，就是判断海水是否作平动的依据。

3. 平衡潮理论简化的惯性离心力

平衡潮理论(又称潮汐静力学理论)是把动力学问题简化成静力学的问题来处理。它忽略纬度差异所产生的地转偏向力以及带来延迟的内摩擦力，认为海水在月球引潮力的作用下开始离开原来的平衡位置作

相应的上升或下降；又因为它忽略海水的粘滞性及惯性，所以在重力和月球引潮力共同作用下，瞬时达到新的平衡位置；再因为它不考虑陆地的影响，认为地球是被等深的海水所覆盖，所以平衡后的海水变形形成潮汐椭球。

在地月系统中，地表海水所作的运动包括围绕地心的自转以及围绕地月公共质心的公转，受到的力包括来自地球的万有引力、来自月球的引力以及地球自转、公转所产生的惯性离心力[6]。为了直观地解释公转时惯性离心力的大小相等问题，现将复杂运动与受力做匹配分解。地球自转时，海水受地球引力与惯性离心力作用，合力即为重力；地球公转时，根据平衡潮理论，海水受月球引力与惯性离心力作用，合力即为月球引潮力；海水实质上受重力与月球引潮力的共同作用。

从宇宙看地球，不同纬度上海水至地轴的垂直距离不等，所以各纬度上自转运动的惯性离心力大小不相等，但方向相同，都垂直地轴指向外。海水随地球绕地月公共质心公转时，基于前面所做的运动分解，不考虑地球自转的公转运动可以看作平动；再加上平衡潮理论简化了海水变形与旋转问题，潮汐椭球的位置会随着天体位置的改变发生变化，以保证长轴始终指向天体，但所有的改变也都是瞬时完成，达到新位置的海水只有变形，没有旋转，满足平动条件。以地表 A、B、C、D 四点为例，绘公转示意图于图 3，图中 O 为地心，红点为地月公共质心，O 至红点的距离为 $0.73R$ ，R 为地球半径。

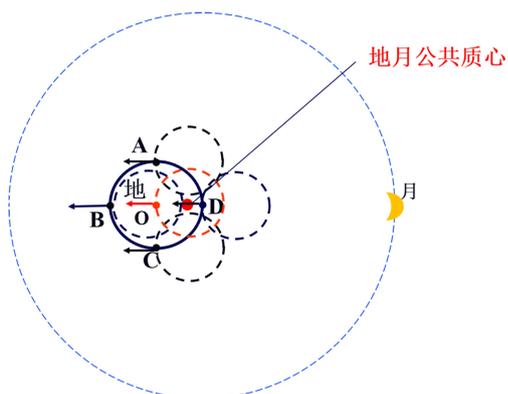


Figure 3. Schematic diagram of inertial centrifugal force in orbit
图 3. 公转时惯性离心力示意图

上图展示了各点的运动轨迹都是以 $0.73R$ 为半径的圆，其与地心的运动轨迹形状相同。根据平动的性质可知，地表各处的惯性离心力在任何时刻都是大小相等、方向相同且背向月球，这一结论是建立在平衡潮理论的简化条件之下，故惯性离心力的同向等大是有适用范围的。

4. 结论

地月系统中，地球围绕公共质心的旋转运动不是平动；判断地表海水自身是否做旋转运动，要看旋转角速度是否为 0；之所以在公转运动中，能依据平动的性质得到地表各处惯性离心力在任何时刻大小相等的结论，是因为平衡潮理论中简化条件的应用；这些简化条件导致了平衡潮理论有明显的缺陷，比如在预报近岸区域潮汐变化规律时，平衡潮理论就不再适用。

致 谢

本文的研究得到了来自《流体力学》课程小组的帮助，复杂海洋环境现象的解释需要用到大学物理、流体力学等其他课程的理论知识作为支撑，讲清楚为什么不仅仅是交代知识应用前提，也是架构交叉学科立体知识网的有效手段，在此对参与研讨的所有老师表示衷心的感谢。

基金项目

海军大连舰艇学院科研发展基金项目《西北太平洋中尺度涡的声传播特性研究》。

参考文献

- [1] 张永刚. 军事海洋学概论[M]. 北京: 海潮出版社, 2021: 129-131.
- [2] 陈文德. 地球平动问题研究[J]. 福建教育学院学报, 2002(7): 15-16.
- [3] 刘序俨, 洪星, 杨军. 平动及其在起潮力中的作用[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(4): 26-30.
- [4] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2021: 99-101.
- [5] 周杰, 严敬, 李焯杰, 王桃. 流体微团运动变形特性分析[J]. 机械设计与研究, 2008, 35(11): 1-3, 7.
- [6] 冯士筭. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 213-214.