



# 基于沉箱浮游稳定性计算原理的浮码头横稳定性计算方法

张兴旺

(中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

**摘要:** 浮码头中的浮箱横稳定性关乎旅游码头运营安全及游客人身安全。JTS 165-7—2014《游艇码头设计规范》发布之前, 工程设计中浮箱横稳定性计算均采用重力式沉箱浮游稳定性计算原理。在梳理沉箱和浮箱计算原理的基础上, 采用理论分析、公式推导、工程案例验证的研究方法, 证实了浮箱横稳定性计算采用重力式沉箱浮游稳定性计算原理是合理可行的。研究成果对后续研究及设计工作具有重要的参考价值。

**关键词:** 横稳定性; 浮游稳定性; 浮码头

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0058-06

## Calculation method of horizontal stability of floating wharf based on calculation principle of caissons floating stability

ZHANG Xing-wang

(China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 102600, China)

**Abstract:** The horizontal stability of the pontoon in the floating wharf is related to the operation safety of the tourist wharf and the personal safety of tourists. Before the issuance of JTS 165-7—2014 *Code for design of marinas*, the calculation principle of the floating stability of the pontoon in the engineering design was based on the calculation principle of the floating stability of the gravity caisson. Based on combing the calculation principles of caissons and pontoons, this paper uses the research methods of theoretical analysis, formula derivation and engineering case verification to verify that it is reasonable and feasible to calculate the floating stability of pontoons by using gravity caisson floating stability calculation principles. The research results of this paper have important reference value for the follow-up research and design work.

**Keywords:** horizontal stability; floating stability; floating wharf

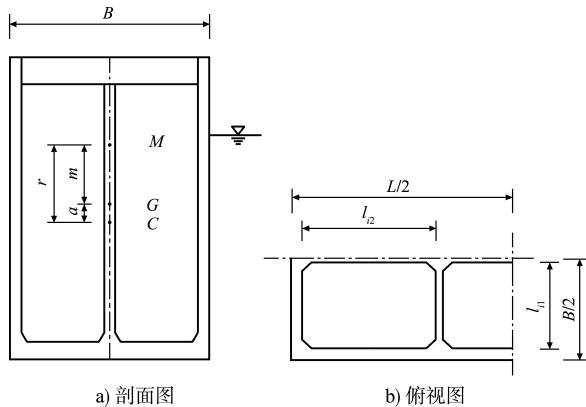
20世纪90年代飞速发展的游艇产业掀起了游艇码头的建设热潮<sup>[1]</sup>, 国内已建游艇码头多采用浮码头结构形式。浮码头处在船舶力、风、浪、流的共同作用下, 运营条件复杂, 根据JTS 165-7—2014《游艇码头设计规范》<sup>[2]</sup>, 应对浮箱横稳定性进行验算, 以保障浮码头的运行安全。

2014年, 交通运输部发布了JTS 165-7—2014《游艇码头设计规范》, 游艇码头的设计有了技术

依据。在此之前, 游艇码头设计中浮箱横稳定性计算主要是参考重力式码头结构中沉箱浮游稳定性的计算原理。本文在梳理两种计算原理的基础上, 对二者的可替代性进行定性分析; 基于现实案例对可替代性进行定量验证, 从而确定基于沉箱浮游稳定性计算原理的浮码头横稳定性计算方法是否可信, 为后续研究及设计工作提供参考。

## 1 沉箱浮游稳定性计算原理

JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[3]</sup>中, 重力式沉箱以定倾高度  $m$ <sup>[4-5]</sup> 表示其浮游稳定性<sup>[6]</sup>。其计算图示见图 1。

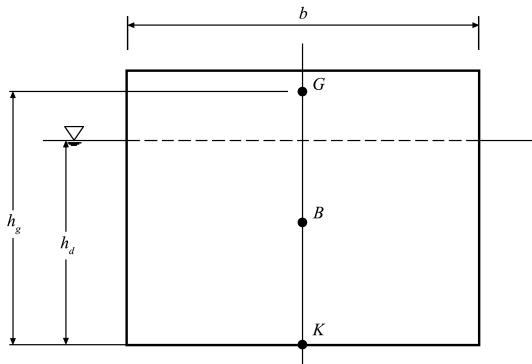


注:  $B$  为沉箱在水面处的宽度(m);  $r$  为沉箱定倾半径(m);  $a$  为沉箱重心到浮心的距离(m);  $M$  为定倾高度(m);  $L$  为矩形沉箱长度(m);  $l_1$ 、 $l_2$  为第  $i$  箱格纵、横向墙之间的净距(m);  $M$  为定倾中心;  $G$  为重心;  $C$  为浮心。

图 1 沉箱浮游稳定性计算图示

当沉箱为矩形时, 定倾高度  $m$  计算公式如下:

$$m = r - a \quad (1)$$



a) 恒荷载下的浮箱

$$r = (I - \sum I_i) / V \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{12} LB^3 \quad (3)$$

$$I_i = \frac{1}{12} l_{i2} l_{i1}^3 \quad (4)$$

式中:  $I$  为沉箱在水面处的断面对纵向中心轴的惯性矩( $m^4$ );  $I_i$  为第  $i$  箱格内压载水的水面对该水面纵向中心轴的惯性矩( $m^4$ );  $V$  为沉箱的排水量( $m^3$ )。

## 2 浮箱横稳定性计算原理

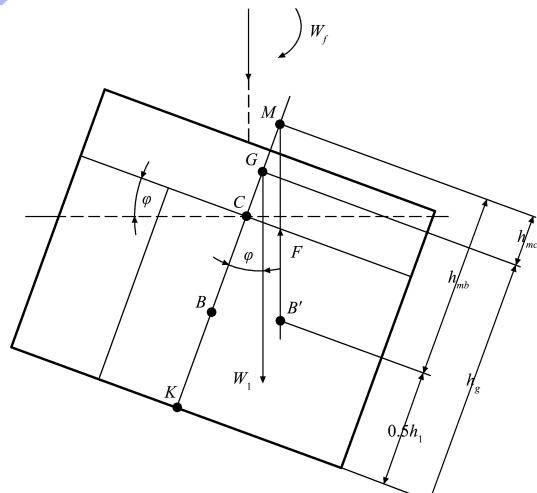
JTS 165-7—2014《游艇码头设计规范》中, 浮箱以横向定倾中心高度  $h_{mc}$  表示其横稳定性。其计算图示见图 2。

浮箱横稳定性计算公式如下:

1) 稳心在浮心以上的高度应按下式计算:

$$h_{mb} = I / V_1 = I \rho g / W_1 \quad (5)$$

式中:  $h_{mb}$  为浮力中心上的定倾高度(m);  $I$  为浮箱水面线截面横惯性矩( $m^4$ );  $V_1$  为浮箱在恒荷载和活荷载作用下的排水量( $m^3$ );  $\rho$  为水的密度( $t/m^3$ );  $W_1$  为恒荷载和活荷载的总和(kN)。



b) 恒荷载和偏心活荷载下的浮箱

注:  $M$  为浮箱横向定倾中心;  $G$  为浮箱重心;  $C$  为浮箱漂心;  $B$  为浮箱静止时的浮心;  $B'$  为浮箱倾斜时的浮心;  $K$  为浮箱艉部;  $W_1$  为恒荷载和活荷载的总和;  $F$  为浮力;  $M_f$  为作用力矩。

图 2 浮箱横稳定性计算图示

2) 浮箱在恒荷载和活荷载作用下的吃水应按下式计算:

$$h_1 = V_1 / A = W_1 / (\rho g A) \quad (6)$$

式中:  $h_1$  为浮桥恒荷载和活荷载作用下的吃水(m);  $V_1$  为浮桥恒荷载和活荷载作用下的排水量( $m^3$ );  $W_1$  为恒荷载和活荷载的总和(kN);  $A$  为

浮体在水面上的截面积( $m^2$ )； $\rho$  为水的密度( $t/m^3$ )。

3) 浮箱横向定倾中心高度应按下式计算：

$$h_{mc} = h_{mb} + 0.5h_1 - h_g \quad (7)$$

式中： $h_{mc}$  为横向定倾中心高度( $m$ )； $h_{mb}$  为浮力中心线上的定倾高度( $m$ )； $h_1$  为浮箱在恒荷载和活荷载作用下的吃水( $m$ )； $h_g$  为从浮箱舭部到重心的高度( $m$ )。

### 3 计算原理可替代性定性分析

#### 3.1 两种计算原理的一致性分析

为了验证 JTS 165-7—2014《游艇码头设计规范》发布之前工程设计中采用沉箱浮游稳定性计算原理计算浮码头横稳性的合理性，本文首先对二者的计算原理进行可替代性分析。

1) 由图 1 可知，沉箱的定倾高度  $m$  即为定倾中心  $M$  在重心  $G$  以上的高度，由图 2 可知，浮箱的横向定倾中心高度  $h_{mc}$  即为定倾中心  $M$  在重心  $G$  以上的高度，二者均表示定倾中心高于重心的距离，其含义一致。

2) 沉箱的定倾高度  $m$  和浮箱的横向定倾中心高度  $h_{mc}$  均表示长度物理量，二者单位均为  $m$ ，其量纲一致。

3) 沉箱的定倾高度  $m$  衡量了沉箱的浮游稳定性，横向定倾中心高度  $h_{mc}$  衡量了浮箱的横稳性，二者功能类似。

基于以上分析，笔者认为沉箱浮游稳定性计算原理和浮箱横稳性计算原理具有可替代性，也即工程设计中可以采用沉箱浮游稳定性计算原理计算浮码头浮箱的横稳性。

#### 3.2 两种计算原理的差异性分析

JTS 167—2018《码头结构设计规范》要求近程浮运时，沉箱的定倾高度不小于 0.2 m；远程浮运时，以块石和砂等固体物压载的沉箱定倾高度不小于 0.3 m，以液体压载的沉箱定倾高度不小于 0.4 m。JTS 165-7—2014《游艇码头设计规范》则要求浮箱的横向定倾中心高度大于 0 m。其差异性

如下：

1) 沉箱主要是在陆上专业化预制场预制完成后，经过较远距离的水上拖运，到达重力式码头修建地点，再定位并注水下沉。而浮箱则在临近海边及内河岸边的预制场预制后，经卡车运输至现场，再吊装下水锚固，或短距离拖运后定位锚固。考虑到沉箱的拖运环境更为恶劣，因此关于其定倾高度的要求更为苛刻。

2) 浮箱主要用于游艇码头，需要通行或承载人群，因此 JTS 165-7—2014《游艇码头设计规范》中横向定倾中心高度的计算公式中考虑了人群等活荷载的作用效应。

### 4 计算原理可替代性定量验证

#### 4.1 计算公式推导验证

通过对两种计算原理的梳理可知，稳定性计算均基于定倾半径(定倾高度)、浮心、重心三者之间的关系，其物理意义是明确的，也即两本规范所述的计算理论不应有区别。沉箱浮游稳定性计算用于沉箱的拖运工况，此时沉箱内一般配有压载水，沉箱上部没有人群等活荷载；浮箱横稳性计算则用于浮码头的运营工况，此时浮箱内一般充填固体材质的聚苯乙烯泡沫，浮箱上部有人群等活荷载。为了进一步研究对比两种计算原理的可替代性，约定不考虑压载水和上部活荷载，此时对沉箱浮游稳定性、浮箱横稳性的计算公式作如下变形：

$$m = r - a \quad (8)$$

$$h_{mc} = h_{mb} + 0.5h_1 - h_g = h_{mb} - (h_g - 0.5h_1) \quad (9)$$

对比两公式，只要证明  $r = h_{mb}$ ， $a = h_g - 0.5h_1$ ，即可证明  $m = h_{mc}$ ，也即两种计算原理具有可替代性。

由于  $r = (I - \sum I_i) / V$ ，当不考虑压载水和上部活荷载时， $\sum I_i = 0$ ， $V = V_1$ ，代入得：

$$r = I / V_1 = h_{mb} \quad (10)$$

式中： $h_g$  为从浮箱舭部到重心的高度； $h_1$  为浮箱

吃水深度,  $0.5h_1$  则为从浮箱舭部到浮心的高度。故而由几何关系,  $h_g - 0.5h_1$  为重心到浮心的距离, 即:

$$a = h_g - 0.5h_1 \quad (11)$$

结合以上推导可知,不考虑压载水和上部活荷载时,  $m=h_m$ , 即两种规范推荐的计算原理的确具有可替代性。

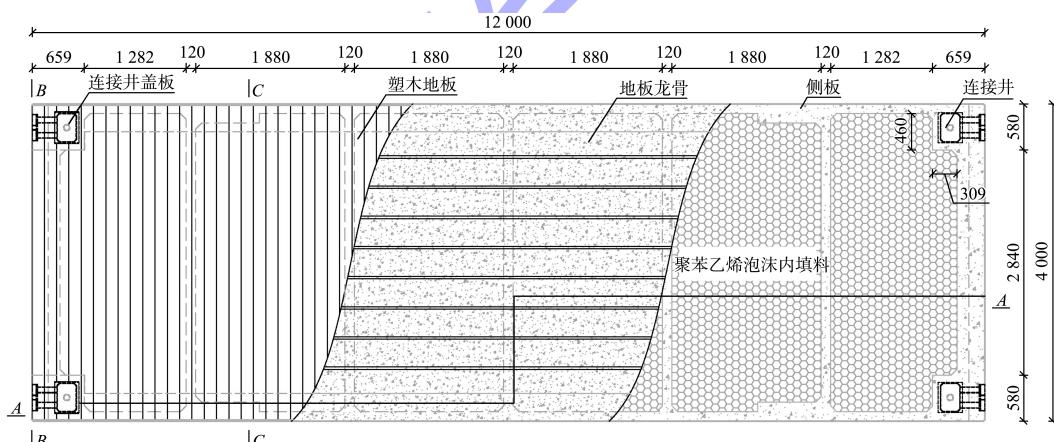
浮箱排水量  $V_1$  正相关于活荷载, 通过式(5)、(6)可知,  $h_{mb}$  反相关于活荷载,  $h_1$  正相关于活荷载, 代入式(7)试算发现, 浮箱的横向定倾中心高度即横稳定性与活荷载之间呈现非线性关系。一定范围内, 浮箱的横稳定性随活荷载的增加而减小, 超出范围后横稳定性又随活荷载的增加而增大, 这里不再展开论述。

## 4.2 工程案例实践验证

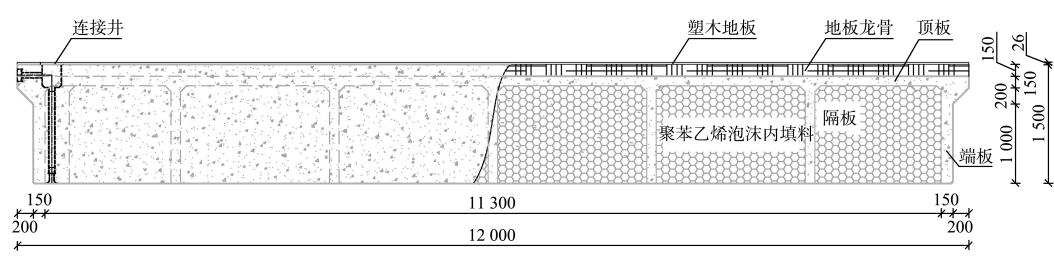
以一个浮桥单元为例, 分别采用沉箱浮游稳定性计算原理计算其定倾高度  $m$ , 采用浮箱横稳定性计算原理计算其横向定倾中心高度  $h_{mc}$ , 进一步

以数值化的形式,定量验证JTS 165-7—2014《游艇码头设计规范》发布之前工程设计中采用沉箱浮游稳定性计算原理计算浮码头横稳定性 的合理性。

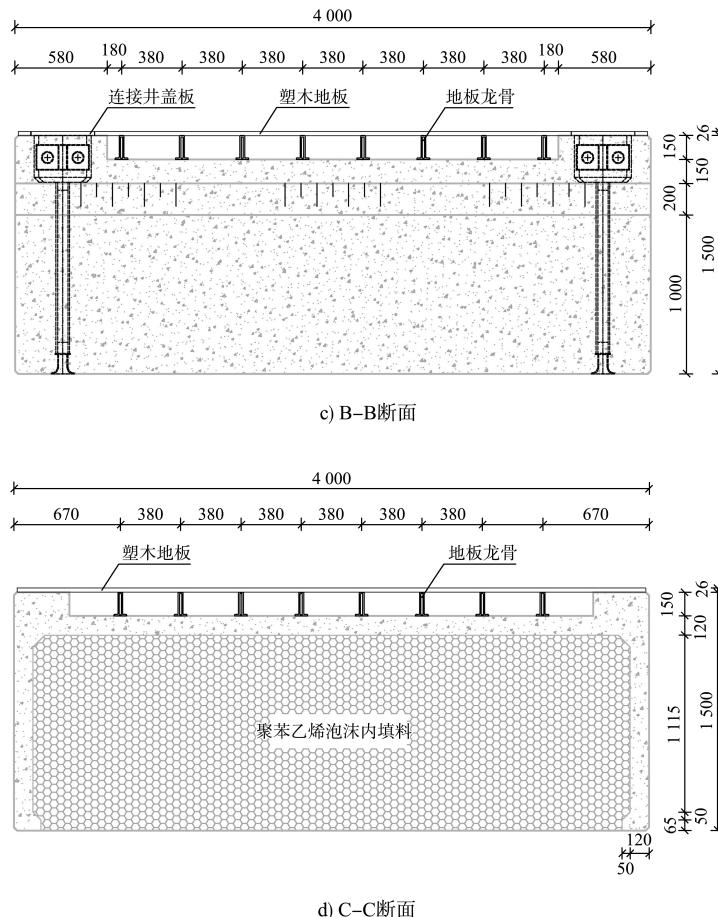
示例浮桥单元外轮廓长 12.0 m、宽 4.0 m、高 1.5 m，下部为钢筋混凝土浮箱，上部为桥面结构及附属设施。浮箱端板厚 0.15 m、侧板厚 0.12 m、顶板厚 0.12 m，浮箱内部设 0.12 m 厚隔板将浮箱隔成若干箱格，箱格内充填高密度聚苯乙烯泡沫。浮箱四角各设一个双孔连接井，用于连接相邻浮桥，连接井下部开竖直孔作为拉簧井，用于穿设锚系设施。对于本示例浮桥单元，其钢筋混凝土浮箱与上部结构深度结合，这里将浮桥单元整体作为浮箱进行计算，浮桥单元结构见图 3，浮桥单元结构尺寸为：部长 12.0 m、宽 4.0 m，浮箱高 1.5 m，底部长 11.6 m、宽 4.0 m，端部内缩长度 0.2 m，顶部两侧突起宽 0.35 m、高 0.15 m，顶板厚、侧板厚、隔板厚均为 0.12 m，端板厚 0.15 m。



a) 俯视图



b) A-A断面



注：箱体为钢筋混凝土材质；内填料为聚苯乙烯泡沫材质；龙骨为铝合金材质；地板为塑木材质。

图 3 浮桥单元结构示意 (单位: mm)

计算中，浮桥单元各材料密度取值见表 1。

表 1 浮桥单元材料密度  $t/m^3$

混凝土	泡沫内填料	不锈钢	铝合金	塑木地板	水
2.45	0.017	7.85	2.70	1.00	1.0

对于图 3 所示浮桥单元，其从浮箱舭部到重心的高度  $h_g$  可利用质量矩平衡关系求出，即浮桥单元对浮箱舭部的质量矩等于浮桥单元各组成部分对浮箱舭部的质量矩之和。从浮箱舭部到重心的高度  $h_g$  可按下式计算：

$$Mh_g = \sum M_i h_{ig} \quad (12)$$

式中： $M$  为浮桥单元(浮箱)总质量(kg)； $M_i$  为浮桥单元(浮箱)各组成部分质量(kg)； $h_g$  为从浮箱舭部到重心的高度(m)； $h_{ig}$  为从浮箱舭部到各组成部分重心的高度(m)。

分别计算示例浮桥单元(浮箱)各组成部分质量、各组成部分重心高度及浮桥单元(浮箱)

总质量，代入上述方程并求解得到从浮桥单元(浮箱)舭部到重心的高度  $h_g = 0.977$  m。

求得浮桥单元(浮箱)舭部到重心的高度  $h_g$  之后，再采用沉箱浮游稳定性计算原理和浮箱横稳定性计算原理分别计算浮桥单元(浮箱)的定倾高度  $m$  和定倾中心高度  $h_{mc}$ ，计算结果见表 2。

表 2 计算结果对比

计算原理	计算内容	计算结果/m
沉箱浮游稳定性计算原理	浮桥单元(浮箱) 定倾高度 $m$	0.89
浮箱横稳定性计算原理	浮桥单元(浮箱) 定倾中心高度 $h_{mc}$	0.89

由表 3 可知，两种计算原理的工程案例验证计算结果完全一致，说明本文前述理论分析和公式推导可信。综上，理论分析、公式推导和工程案例验证均揭示出沉箱的浮游稳定性计算原理和浮箱横稳定性计算原理具有可替代性，因此本文认

为工程设计中可以采用沉箱的浮游稳定性计算原理计算浮码头横稳定性。

## 5 结论

1) 沉箱的浮游稳定性计算原理和浮箱横稳定性计算原理具有可替代性, 也即工程设计中可以采用沉箱的浮游稳定性计算原理计算浮码头横稳定性。

2) 定倾高度  $m$  和定倾中心高度  $h_{mc}$  均表示定倾中心高于重心的距离, 可以表征浮体的稳定性。现行规范关于前者的要求更为苛刻, 后者则考虑了活荷载的作用效应。

3) 定倾高度  $m$  (定倾中心高度  $h_{mc}$ ) 的值与浮体稳定性具有如下关系: ①当定倾高度  $m$  (定倾中心高度  $h_{mc}$ )  $> 0$  时, 定倾中心高于重心, 重力和浮力产生的稳定力偶促使沉箱扶正, 属于稳定平衡; ②当定倾高度  $m$  (定倾中心高度  $h_{mc}$ )  $= 0$  时, 定倾中心与重心重合, 浮体可以停留在任何位置保持平衡, 属于中性平衡; ③当定倾高度  $m$  (定倾中心高度  $h_{mc}$ )  $< 0$  时, 定倾中心低于重心, 重力和浮力产生的倾覆力偶促使沉箱继续倾斜, 属于不稳定平衡。

针对沉箱进行计算时, 应根据拖运距离、压载材质情况, 选定相应的定倾高度  $m$  (定倾中心高度  $h_{mc}$ ) 限值, 而针对浮箱进行计算时, 定倾高度  $m$  (定倾中心高度  $h_{mc}$ ) 满足稳定平衡即可。

## 参考文献:

- [1] 华承昌.国内外游艇产业发展简况[J].船舶工业技术经济信息, 2004(10): 4-8.
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.游艇码头设计规范: JTS 165-7—2014[S].北京: 人民交通出版社, 2014.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [4] 李天一.BIM 模型解算定倾半径来确定浮游稳定性方法及应用[J].技术应用, 2016(10): 312-313.
- [5] 韩凤亭.定倾中心的精确计算及应用[J].港工技术, 1999(1): 37-40.
- [6] 汪汇, 韩重虎.CAD 建模在沉箱浮游稳定性计算中的应用[J].中国水运(下半月), 2012, 12(12): 74-76.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 46 页)

- [2] 郭秀娟, 申勇峰.非洲港口发展格局及趋势分析[J].水运工程, 2019(9): 129-134.
- [3] 季则舟, 杨兴宴, 尤再进, 等.中国沿海港口建设状况及发展趋势[J].中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1211-1217.
- [4] 刘崇, 黄黎明.青岛港口转型与城市空间发展互动研究[J].青岛理工大学学报, 2015, 36(6): 47-52.
- [5] 赵保国, 盖念.互联网消费金融对国内居民消费结构的影响: 基于 VAR 模型的实证研究[J].中央财经大学学报, 2020(3): 33-43.
- [6] 王中江.劳动力价格变化对物价水平的影响研究: 基于 VAR 模型的实证分析[J].洛阳师范学院学报, 2020, 39(2): 57-62.
- [7] 林宝城, 林琳.基于 VAR 的港口物流与区域经济关联性分析: 以福建省港口为例[J].物流工程与管理, 2019, 41(9): 48-51, 56.
- [8] 靳娟, 马瑞强.泸州港口物流与区域经济关系研究: 基于 VAR 模型的实证研究[J].现代商贸工业, 2014, 26(24): 62-64.
- [9] 陈志良.基于 VAR 模型的宁波港口物流与经济增长关系的实证分析[J].物流技术, 2015, 34(2): 154-157.
- [10] 徐帅, 王剑辉, 王博.济南航空物流业发展分析与预测[J].中国经贸导刊(中), 2020(3): 78-80.
- [11] 刘金叶, 高铁梅.我国企业投资对财政货币政策冲击反应的实证分析[J].技术经济与管理研究, 2009(6): 67-70, 76.
- [12] 朱维娅, 王涵, 迟文峰.人民币汇率变动对山东省烟台市农产品进出口贸易的影响: 基于 VAR 模型的实证分析[J].中国市场, 2020(7): 9-11, 13.

(本文编辑 王璁)