

# 钢包吊摆 - 液晃耦合建模与动态特性研究

聂国强, 孟文俊

(太原科技大学 机械工程学院, 山西太原 030024)

**摘要:** 为研究钢包吊运过程中钢液晃动与吊摆的耦合情况及影响因素, 根据等效动力学原理建立了钢包吊运系统的质量-弹簧-阻尼模型, 推导出了其运动方程, 建立了钢包吊运系统的多体动力学-两相流有限元耦合模型进行有限元数值模拟, 验证了三阶模态等效模型的有效性。然后基于等效模型分析不同参数对钢包吊运系统的影响。结果表明: 钢丝绳摆动幅值随着绳长的增加先增加后减小, 在钢丝绳长8 m附近时达到最大值, 且摆动幅值随着小车加速度的增加而增加。钢液晃动的剧烈程度随着钢包载液率的增加而减小。钢液晃动会随着钢丝绳长的增加而减小, 但是随着钢包载液率的增加, 这种影响越来越小。该等效模型可为钢包吊运系统的精准定位控制方案提供理论基础。

**关键词:** 液位波动; 摇摆特性; 吊运系统; 铸造起重机; 等效模型

## 作者简介:

聂国强 (1997-), 男, 硕士生, 从事铸造起重机关键技术研究工作。E-mail: 994099102@qq.com

## 通讯作者:

孟文俊, 男, 工学博士, 教授, 博士生导师。E-mail: 1603173155@qq.com

中图分类号: TG232.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2023)

09-1109-07

## 基金项目:

山西省重点研发计划项目 (智能化铸造起重机远程控制关键技术研究与应用202003D111009)。

## 收稿日期:

2022-11-24 收到初稿,

2023-02-11 收到修订稿。

铸造起重机是钢铁冶炼厂的主要生产设备, 用于转炉加料以及转炉时勾兑钢液, 在将钢包吊运至连铸回转台上时, 将盛有金属液的钢包迅速吊运到浇注口的上方进行浇注, 这一过程要求起重机的动作迅速而准确。由于钢丝绳的摆动, 轻则加大起重机的运行时间, 造成钢液过早的冷却, 降低产品的质量和工作效率, 重则导致金属液溅到浇注口外, 引发安全事故<sup>[1]</sup>。钢包中的钢液在吊运过程中由钢包的周期性摆动所激励而产生晃动, 反过来又造成了钢包负载的重心的偏移, 这种影响对其吊运系统的防摇、精确定位、大小车运行, 以及浇注等后续工艺过程都会产生诸多不利影响。随着智能化时代的到来, 铸造起重机也将逐步实现无人化, 钢包吊运系统作为重要的一环 (图1), 其系统的表现就显得越来越重要。因此建立一套相对准确的数学模型为其精准定位控制提供基础至关重要, 探索钢包吊运系统的耦合情况及影响因素也格外重要, 而吊运钢包中存在的钢液晃动现象就是其中的关键之一。



图1 铸造起重机钢包吊运系统

Fig. 1 Ladle lifting system of casting crane

近年来, 针对充液容器内的液体晃动问题, 不少学者采用数值模拟或者试验的方法进行研究并取得了一定的成果: 王琼瑶<sup>[2]</sup>为研究部分充液罐车不同挡板下的晃动情况, 基于VOF法对充液罐车进行建模, 利用准静态液体模型法进行验证后, 分析了不同形状挡板的防晃能力。杨琦<sup>[3]</sup>利用VOF法对正弦激励下的矩形容器的晃动特性进行研究, 得出了晃动幅值随外部激励的变化而变化的结论。包文红<sup>[4]</sup>利用Fluent软件对液罐车不同激励和挡板的晃动进行了分析。黄中烈<sup>[5]</sup>基于势流模型建立了圆柱储箱的液-固耦合模型, 得出了水平挡板的防晃性能优于竖直挡板的结论。王鹏翔<sup>[6]</sup>通过将人工激发的矩形容器内的液体晃动撤除, 测得容器内液体一阶模态参数并与有限元数值解及理论结果进行比较, 结果表明: 试验结果与理论结果吻合。A.Kaneshige<sup>[7]</sup>通过采集充液容器内的液位数据, 将晃动部分等效为一个具有阻尼的单

摆模型,并提出了一种基于构造模型的陷波滤波器抑制晃动的控制方法。刘惠康<sup>[8]</sup>将钢包内钢液的晃动简化为单摆振动,基于拉格朗日方程建立了吊运系统双摆模型。并提出自适应神经网络-模糊控制的方法减小晃动。Marcus V. G.de Morais<sup>[9]</sup>通过基于等效质量-弹簧模型对悬挂的矩形容器晃动进行求解,结果表明,等效质量弹簧模型的结果与试验结果的误差在10%左右。

综上所述,针对充液容器的晃动问题,不少学者采用数值模拟或试验的方法进行研究,证明了有限元数值模拟在充液容器晃动问题上的准确性,但是现有研究主要针对平移运动下的充液容器的晃动。事实上并非所有的充液容器的运动状态是平动的,如液罐车在颠簸路面、上下坡行驶,钢包吊运过程中的复合运动等。针对充液系统的复合运动导致的晃动。本研究针对吊运钢包系统中双向耦合问题,建立其吊运-液晃双向耦合等效模型,利用Comsol多物理场耦合软件对

钢包吊摆-液晃耦合系统进行有限元数值模拟。通过将建立的模型与数值模拟的结果进行比较以验证所建等效力学模型的有效性,并分析不同系统参数对耦合系统的影响。

## 1 等效力学模型

本研究采用一系列的质量-弹簧-阻尼构成的等效力学模型来近似钢包内钢液晃动情况。图2中的这些质量-弹簧-阻尼中的每一个都代表了钢液的各个模态。根据参考文献[10-11]:容器内的对称模态主要由纵向激励激发,反对称模态仅由横向激励激发,对称模态并不会引起钢液水平方向的质心变动。假设钢液的晃动状态仅由横向加速度引起,忽略垂直加速度对钢液晃动的影响、在小车工作平面,忽略钢包内钢液圆周方向旋转流动。多个质量-弹簧-阻尼系统或者一系列单摆的力学模型可以等效出钢包内钢液与钢包的力学状

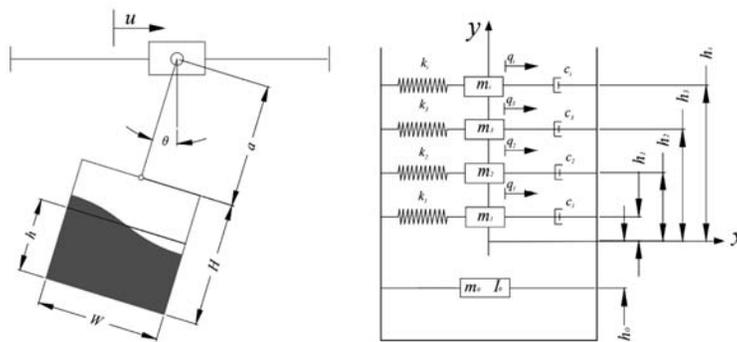


图2 吊运钢包系统等效力学模型

Fig. 2 Equivalent mechanical model of ladle lifting system

态,进而表示钢液自由表面在外部激励下的真实动力学特性。该模型由质量 $m_c$ 、直径 $W=2R$ 、高度 $H$ 和相对于其质心的质量惯性矩 $I_c$ 的刚性容器组成,它盛装了深度为 $h$ 的钢液。内部钢液以一个质量为 $m_0$ 惯性矩为 $I_0$ 的与钢包刚性连接的质量块和 $n$ 个通过弹簧及阻尼器连接到钢包容器的一系列质量块 $m_i$ 表示。其中质量块 $m_0$ 表示钢液非晃动部分,一系列质量块 $m_i$ 表示钢液晃动部分质量。其中 $m_i$ 、 $k_i$ 和 $c_i$ 分别表示等效质量,等效弹簧刚度和第 $i$ 阶模态的等效粘性阻尼; $h_i$ 表示从液体质心 $h/2$ (在其静止条件下)到等效的第 $i$ 个质点 $m_i$ 的距离; $h_0$ 是液体中心到刚性部分质量 $m_0$ 的垂直距离。等效粘性系数 $c_i$ 用来表示钢液与钢包容器内壁的边界摩擦(stokes边界阻尼)。等效模型参数 $m_0$ 、 $h_0$ 、 $m_i$ 、 $h_i$ 、 $c_i$ 取决于容器的形状、钢液载液率 $h/W$ 以及钢液的物理特性。

钢包通过长度为 $a$ 的钢丝绳连接到小车上。小车在水平方向上以加速度 $\ddot{u}(t)$ 移动,而钢包在 $xy$ 平面上以摆动角 $\theta$ 摆动。每个质量块 $m_i$ 沿钢包横轴移动,相对于钢包具有相对位移 $q_i(t)$ 。每个 $q_i(t)$ 代表对应于第

阶晃动模态的广义位移。在定义容器质心、液体固定质量 $m_0$ 和第 $i$ 个点质量块 $m_i$ 的位置向量后,对时间取导数得到速度向量,进而得到容器的动能、势能,并根据拉格朗日方程得到全耦合非线性微分方程:

$$\begin{aligned} & \left( I_{eq} + \sum_{i=1}^n m_i q_i^2 \right) \ddot{\theta} + 2 \left( \sum_{i=1}^n m_i q_i \dot{q}_i \right) \dot{\theta} - \sum_{i=1}^n m_i l_i \ddot{q}_i + \\ & \left( M_i \sin \theta - \cos \theta \sum_{i=1}^n m_i q_i \right) g = \left( M_i \sin \theta + \cos \theta \sum_{i=1}^n m_i q_i \right) \ddot{u} \quad (1) \\ & - l_i \ddot{\theta} + \ddot{q}_i - q_i \dot{\theta}^2 + 2 \zeta \omega_i \dot{q}_i - g \sin \theta + \omega_i^2 q_i = -\cos \theta \ddot{u} \end{aligned}$$

式中: $(i=1, 2, \dots, n)$ ;  $l_c$ 、 $l_0$ 、 $l_i$ 分别是小车到钢包质心、钢液固定质量 $m_0$ 和第 $i$ 个集中质量 $m_i$ 的距离; $g$ 是重力加速度; $\zeta$ 和 $\omega_i$ 分别是钢液晃动阻尼比和钢液晃动的 $i$ 阶晃动模态频率。

分别由等效模型与横向激励下的解析解的力和力矩等效、自然频率的等效可以求得等效模型参数:

$$\frac{m_n}{m_f} = \frac{2R \tanh(\zeta_{ln} h/R)}{\zeta_{ln} (\zeta_{ln}^2 - 1) h}, \frac{m_0}{m_f} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m_n}{m_f} \quad (2)$$

$$\omega_{1n}^2 = \frac{g}{R} \zeta_{1n} [\tanh(\zeta_{1n} h/R)] \quad (3)$$

式中： $\zeta_{1n}$ 为Bessel第1类函数一阶导数的根，由低到高排列，对应于晃动频率的特征值， $\zeta_{11} \sim \zeta_{15}$ 为 $\zeta_{1i}=1.841\ 2$ 、 $5.331\ 4$ 、 $8.536\ 3$ 、 $11.706$ 、 $14.863$ 。质量块的高度根据质量矩守恒： $h_0 = -\frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^n m_i h_i$ 其中 $h_0$ 为固定质量到钢液质心高度 $h/2$ 的距离。 $m_f$ 为钢包内钢液质量， $m_f = \rho \pi R^2 h$ ，晃动阻尼比 $\zeta$ 由式(4)确定：

$$\zeta = \frac{2.89}{\pi} \sqrt{\frac{\nu}{R^{3/2} g^{1/2}}} \quad (4)$$

式中： $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 是指钢液的运动粘度； $\rho$ 是钢液的密度； $\mu$ 是钢液的动力粘度。

系统对于小车等效转动惯量 $I_{eq}$ 由公式(5)计算得：

$$I_{eq} = I_c + m_c l_c^2 + I_0 + m_0 l_0^2 + \sum_{i=1}^n m_i l_i^2 \quad (5)$$

负载对小车的等效力矩为：

$$M_f = m_c l_c + m_0 l_0 + \sum_{i=1}^n m_i l_i \quad (6)$$

其中钢液相对于其质心的转动惯量为<sup>[12]</sup>：

$$I_0 = m_0 R^2 \left( \frac{(h/R)^2}{12} - \frac{1}{4} + 4 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\zeta_{1n}^2 (\zeta_{1n}^2 - 1)} \left( \frac{4}{\zeta_{1n} h/R} \tanh \frac{\zeta_{1n} h}{2R} - 4 \right) \right) \quad (7)$$

微分方程满足初始条件：

$$\theta(0) = \theta_0, \quad q_i(0) = q_{i,0}$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}(0) &= \dot{\theta}_0, \quad \dot{q}_i(0) = \dot{q}_{i,0} \\ (i &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $\theta_0$ 和 $\dot{\theta}_0$ 是钢丝绳的初始摆角和初始摆动速度； $q_{i,0}$ 、 $\dot{q}_{i,0}$ 是质量块质量 $m_i$ 相对于钢包壁的初始位移和速度。考虑到实际工况中钢包是以静止开始搬运，因此运动方程中的初始条件设为零初始条件。通过假设小的振荡角 $\theta$ 和小的表面波振荡 $q_i$ 来线性化，式(1)简化为式(9)：

$$\begin{aligned} I_{eq} \ddot{\theta} - \sum_{i=1}^n m_i l_i \ddot{q}_i + m_i g \theta - g \sum_{i=1}^n m_i q_i &= M_f \ddot{u} \\ -l_i \ddot{\theta} + \ddot{q}_i + 2\zeta \omega_i \dot{q}_i - g \theta + \omega_i^2 q_i &= -\ddot{u} \\ (i &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (9)$$

等效模型中钢液自由液面在钢包内壁处的高度为<sup>[13]</sup>：

$$\delta(t) = \eta(\pm R, 0, t) = 2R \sum_{i=1}^n \cos \left[ \pi i \left( \frac{\pm R}{2R} + 0.5 \right) \right] q_i(t) \quad (10)$$

式中： $\delta(t)$ 为钢包内壁液位高度变化，用来表征等效模型中钢液晃动程度。

根据公式(10)，利用MATLAB进行计算，在不同参数下对吊运系统等效模型进行分析，模型参数为了尽可能符合生产实际选取了一组具有代表性的参数，钢液动力粘度系数随其温度、各元素含量等影响，查阅相关文献[14]设置 $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，系统模型详细参数见表1。

表1 钢包吊运系统参数  
Table 1 Parameters of ladle lifting system

钢包						钢液		
绳长 $a/m$	高度 $H/m$	半径 $R/m$	质量 $m/t$	阻尼比 $\zeta$	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	动力粘度 $\mu/(Pa \cdot s)$	运动粘度 $\nu/(m^2 \cdot s^{-1})$	质量 $m/t$
13.2	3.5	1.5	30	$1.4 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^3$	0.2	$3 \times 10^{-5}$	90

## 2 有限元数值模拟及其验证

### 2.1 有限元数值模拟

采用数值模拟的方法对钢包吊摆-液晃耦合系统进行求解，利用Comsol多场耦合软件对钢液晃动的钢包吊运系统进行仿真。采用VOF模型来模拟钢液的运动，引入两相流体积分数来捕捉钢液的自由液面运动，通过引进相体积分数这一变量，实现对每一个计算单元相界面的追踪，每个计算单元都会记录下各相流体在不同时刻的体积分布。两相流体介质的积分连续方程分别为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + v_1 \cdot \nabla(\alpha_1) &= F/\rho_1 \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + v_2 \cdot \nabla(\alpha_2) &= F/\rho_2 \end{aligned} \quad (11)$$

动量方程由两相流体介质共用：

$$\begin{aligned} \frac{\rho \partial (v)}{\partial t} + \rho v \nabla \cdot (v) &= \nabla \cdot \mu [(\nabla v + \nabla v^T)] - \nabla p + \rho g + F \\ \alpha_1 + \alpha_2 &= 1 \\ \rho &= \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \\ v &= \alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中： $v_1$ 、 $v_2$ 分别是钢液和空气速度矢量； $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 分别表示钢液、空气的体积分数； $F$ 为界面力源； $\mu$ 表示钢液动力粘度； $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 分别表示钢液、空气的密度； $p$ 表示钢液压力。

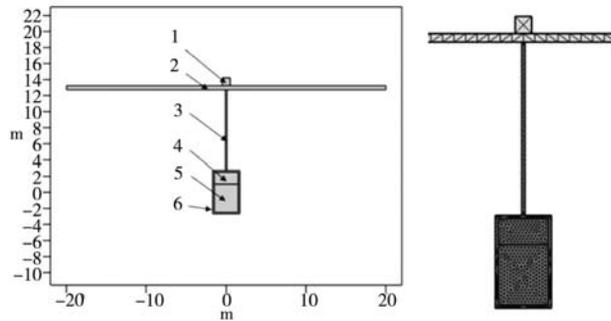
钢液自由表面边界需要满足条件：

$$\frac{\partial v_{1n}}{\partial t} + \frac{\partial v_{1t}}{\partial n} = 0 \quad (13)$$

$$-p + 2\mu \frac{\partial v_{1n}}{\partial n} = -p_0 \quad (14)$$

式中： $v_{ln}$ 表示垂直于钢液自由液面的法向速度； $v_{lt}$ 表示切向速度； $p_0$ 表示钢液自由液面气体一侧的大气压力。耦合面按照滑移边界条件： $v_n=0$ 。

小车在轨道方向上自由移动，小车下方通过钢丝绳吊着钢包，钢包盛有钢液。如图3所示，该几何模型一共有6个域，钢包内部定义为流体域，并添加变形域，其上部分定义材料属性为空气，其下面部分定义材料属性为钢液，其密度设置为 $7\ 000\text{ kg/m}^3$ 、动力粘度设置为 $0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。钢液部分的流体流动模型选择层流模型，流体域包含重力，参考压力水平设置为标准大气压，温度设置为常温（ $20\text{ }^\circ\text{C}$ ）。相场设置选择与流体域一致，其余选项为默认。多体动力学部分将轨道定义为刚性域1并采用固定约束，小车和钢丝绳分别定义为刚性域2、3，钢包定义为刚性域4，添加质量属性



1. 小车 2. 轨道 3. 钢丝绳 4. 空气 5. 钢液 6. 钢包

图3 钢包吊运系统几何模型及网格划分

Fig. 3 Geometric model and mesh division of ladle lifting system

$30\ 000\text{ kg}$ ，惯性矩 $5\ 300\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，重力 $-300\ 000\text{ N}$ 。小车与轨道、钢丝绳与小车、钢包与钢丝绳采用装配体关系；钢包、空气、空气部分设置为联合体关系；其中小车与轨道之间的连接定义为棱柱关节，钢丝绳与小车间的连接定义为铰链关节，钢包与钢丝绳之间的连接定义不可转动；耦合边界定义为钢包内壁，耦合类型选择全耦合，网格划分有物理场控制，网格大小选择较细化。给予小车以特定的加速度 $u(t)$ 相对于轨道水平运动，进而研究吊运钢包在吊运过程中的钢液波动影响下的偏摆情况，如图4。

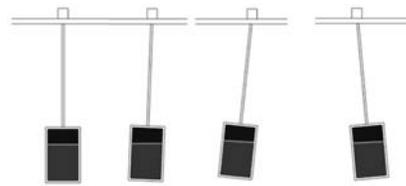


图4 液位波动及摆动图

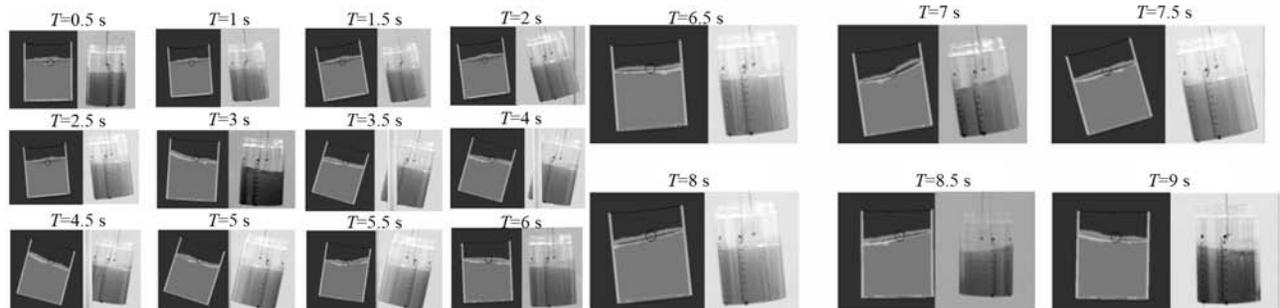
Fig. 4 Liquid level fluctuation and swing diagram

## 2.2 模型验证

由于钢包吊运系统实际工况环境复杂，特别是钢液的高温高密度等因素，难以进行测量和实验，且实际上出于安全考虑铸造起重机不允许超载运行。为验证本研究采用的有限元数值模拟的有效性，本研究搭建了一个物理模型进行试验。图5a为整个试验方案，高速相机可以高频采集快速变化的图像，高速相机距离试验台一定距离，小车下方吊着一个透明容器，



(a) 试验台



(b) 对照图

图5 试验台及对照图

Fig. 5 Test bench and comparison diagram

容器内承装液态水（这里数值模型的参数设置是以水的参数设置的，模型验证仅仅是验证数值方法的有效性，并不是直接和实际的钢液对比），为了容易区分，水中加入墨水以增加其分辨率。以给定加速度让小车移动并减速停止，比例模型参数为：液体动力粘度 $\mu_m$ 、容器内径 $W_m=100$  mm、容器高度 $H_m=150$  mm、容器质量 $M_m=0.1$  kg、液体深度 $h_m=90$  mm、液体密度

$\rho_m=1\ 000$  kg/m<sup>3</sup>、钢丝绳长 $a_m=200$  mm。

通过高速相机高频采集图像，测得每一帧容器的摆角数据与本研究采用的有限元数值模拟结果进行对比，为了简化测量，采集了间隔0.5 s的摆角数据（表2），通过数据对比，试验的结果和仿真的结果误差并不大。考虑到有限元数值模拟与实际情况的差别，一定程度上证明了本研究采用的数值模拟方法的有效性。

表2 摆角结果对比  
Table 2 Comparison of swing angle results

时间/s	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
数值	1.40	4.83	8.23	10.37	8.13	-1.81	-8.50	-11.25	-13.46	-15.36	-10.91	2.30	5.31	7.34	13.33	5.65	-0.46	0.12
试验	1.50	4.90	8.50	12.00	7.50	-1.50	-9.50	-10.50	-12.00	-13.50	-11.50	1.50	6.50	8.00	11.5	5.50	-0.5	0
误差	0.10	0.07	0.27	1.63	0.63	0.31	1.00	1.75	1.46	0.86	0.69	0.80	1.19	0.66	1.83	0.05	0.04	0.12

### 3 算例分析

为验证等效模型的有效性及其不同模态对计算结果的影响、探索不同工况下各种晃荡模态的激发程度以及晃荡对吊运系统的影响，通过对不同工况钢包吊运系统钢丝绳摆偏特性进行分析，分别得到了等效模型和数值模拟的钢包吊运系统加速、匀速、制动及残余摆动阶段的摆角响应。

图6为本文建立的等效模型在分别考虑模态数*i*=1, 2, 3, 情况下的计算结果与数值模拟对比，所建立的等效模型基本接近数值模拟的结果，随着的增加等效模型的结果越靠近数值模拟的结果。由于*i*=3时，等效模型的计算结果基本与数值模拟结果一致，故后面的计算均取*i*=3。

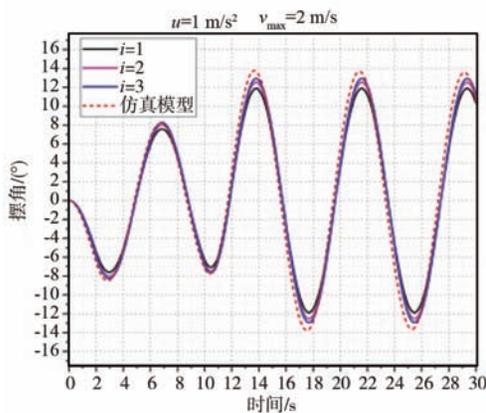


图6 考虑不同模态的计算结果  
Fig. 6 Calculation results considering different modes

为研究钢液液位波动对钢包吊运系统的影响，在表3参数激励下，得到了小车的加速度与速度响应图（见图7-8），钢丝绳摆角响应及钢包内壁液位波动图（见图9-10），分别对比等质量刚体模型、等效模型与数值模拟的摆角响应。利用等效模型及数值模拟两种方法进行计算，以验证等效力学模型的有效性。

表3 激励参数  
Table 3 Excitation parameters

加速度 /(m·s <sup>-2</sup> )	最大速度 /(m·s <sup>-1</sup> )	加速 阶段/s	匀速 阶段/s	制动 阶段/s	残余摆动 阶段/s
1	2	0~2	2~10	10~12	12~30
1	4	0~4	4~10	10~14	14~30

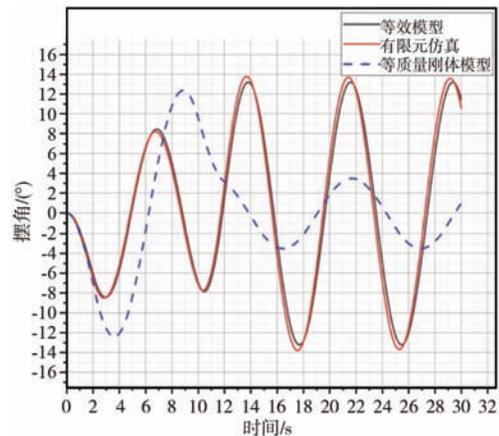


图7  $u=1$  m/s<sup>2</sup>,  $v_{max}=2$  m/s钢包摆角响应对比  
Fig. 7 Comparison of ladle swing angle response at  $u=1$  m/s<sup>2</sup> and  $v_{max}=2$  m/s

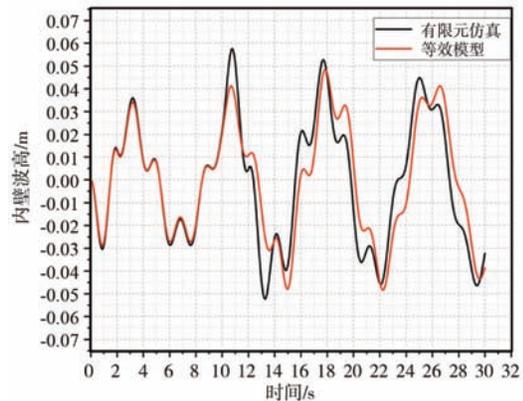


图8  $u=1$  m/s<sup>2</sup>,  $v_{max}=2$  m/s内壁波高对比  
Fig. 8 Comparison of wave heights on the inner wall with  $u=1$  m/s<sup>2</sup> and  $v_{max}=2$  m/s

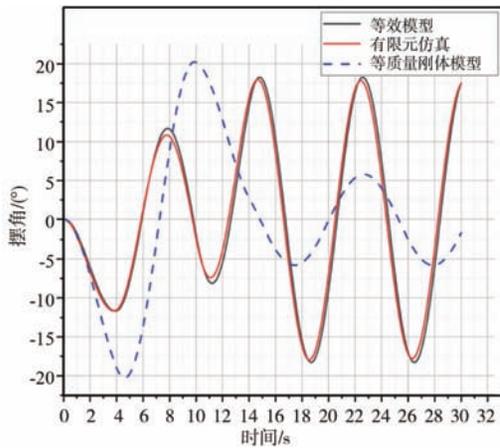


图9  $u=1\text{ m/s}^2$ ,  $v_{\text{max}}=4\text{ m/s}$  钢包摆角响应对比  
Fig. 9 Comparison of ladle swing angle response at  $u=1\text{ m/s}^2$  and  $v_{\text{max}}=4\text{ m/s}$

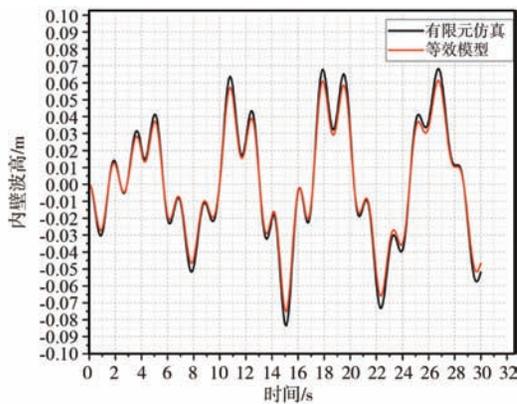


图10  $u=1\text{ m/s}^2$ ,  $v_{\text{max}}=4\text{ m/s}$  内壁波高对比  
Fig. 10 Comparison of wave heights on the inner wall with  $u=1\text{ m/s}^2$  and  $v_{\text{max}}=4\text{ m/s}$

在加速度为  $1\text{ m/s}^2$ ，最大速度为  $2\text{ m/s}$ 、 $4\text{ m/s}$  的情况下，从图7-10可以看出，等质量刚体模型的计算结果与有限元数值模拟及等效模型的计算结果相差很大，在小车相同加速度激励后，等质量刚体的摆动幅值明显高于有限元数值模拟，这是因为在加速过程中，液位波动对吊运系统的影响导致其幅值下降。在残余摆

动阶段液位波动影响的吊运系统摆动幅值相比于等质量刚体模型明显增加，因此对于钢包吊运系统的摇摆特性研究，其钢液晃动的影响不容忽视。从钢丝绳摆角以及液位波动响应来看，等效模型计算的钢丝绳摆角和钢包内壁液位波动的结果与数值模拟结果一致，这说明本文所建立的等效模型是有效的。通过改变钢丝绳长、加速度、钢液深度以研究不同参数下耦合系统液位波动及钢丝绳摆角响应情况，见图11和图12。

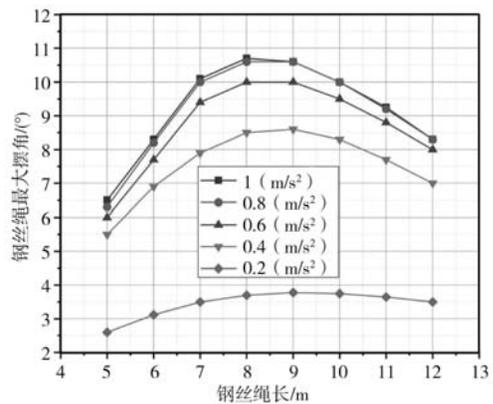
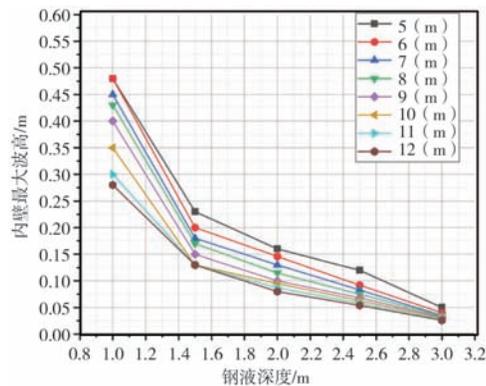


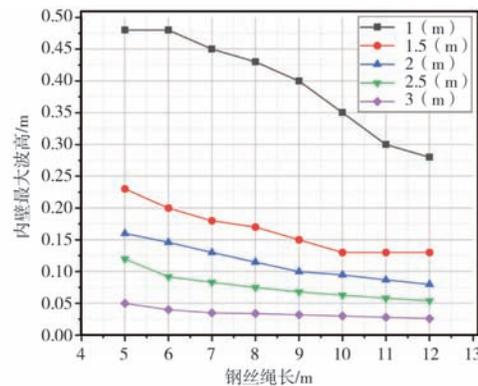
图11 钢丝绳长及加速度对钢丝绳最大摆角的影响  
Fig. 11 Effect of wire rope length and acceleration on maximum swing angle of wire rope

从图11可以看出，钢丝绳的摆动幅值随着钢丝绳长的增加而增加，钢丝绳长在8 m时其摆动幅值达到最大值，随后随着绳长的继续增加而下降。并且钢丝绳摆动幅值随着加速度的增大而增大，因此钢液吊运过程应该尽量避免加速度过大。

从图12可以看出，在加速度  $1\text{ m/s}^2$  不变的前提下，钢液晃动幅值随着钢包载液率（钢液深度）的增加而减小，钢液为1 m深时，晃动幅值达到了  $0.45\text{ m}$ ，这时钢液晃动受钢丝绳长影响较大；随着载液率（钢液深度）的增加，受钢丝绳长的影响越来越小。钢液深度为3 m时，晃动幅值减小到了  $0.05\text{ m}$ 。



(a) 钢液深度



(b) 钢丝绳长

图12 钢液晃动的影响因素 ( $u=1\text{ m/s}^2$ )  
Fig. 12 Influence factors of liquid steel sloshing ( $u=1\text{ m/s}^2$ )

## 4 结论

(1) 根据铸造起重机吊运钢液的特殊作业状态,建立了其吊运系统的等效力学模型,通过建立钢包吊运系统的质量-弹簧-阻尼模型,推导出了其运动方程,通过试验验证本研究采用数值模拟准确性后,通过对比等效模型和有限元数值模拟的钢丝绳摆角及钢液液面晃动,证明了等效模型是有效的,且吊运过程中钢液的晃动主要表现一阶反对称模态。所建立的等效模型可为后续控制方案的研究提供参考。

(2) 钢包吊运系统在特定钢丝绳长, 8 m左右时,钢丝绳的摆动幅值有个最大值,且其摆动幅值随着小车加速度的增加而增加;小车加速度一定的前提下,钢液晃动的剧烈程度随着钢包载液率的增加而减小,故钢包吊运过程中,在保证与钢包上沿安全距离的前提下,应尽量提高其载液深度;小车加速度一定的前提下,钢液晃动会随着钢丝绳长的增加而减小,但是随着钢包载液率的增加,这种影响越来越小。

### 参考文献:

- [1] KHORSHID E, AL-FADHLI A. Optimal command shaping design for a liquid slosh suppression in overhead crane systems [J]. ASME Dyn Sys Meas Control, 2021, 143 (2): 021005.
- [2] 王琼瑶. 部分充液罐车罐体内液体晃动的动力学特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [3] 杨琦, 李德友, 常洪, 等. 正弦激励下矩形容器内液体晃动特性研究 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (5): 9-19.
- [4] 包文红, 张应龙, 班涛, 等. 液罐车内液体晃动对防波板的冲击仿真 [J]. 油气储运, 2022, 41 (9): 1087-1094.
- [5] 黄中烈, 向宇, 吴文军, 等. 基于液固耦合的圆柱贮箱内液体晃特性研究 [J]. 广西科技大学学报, 2018, 29 (4): 1-5.
- [6] 王鹏翔, 李遇春, 王立时. 矩形容器内液体一阶晃动模态试验识别 [C]//第26届全国结构工程学术会议论文集 (第2册). 2017: 526-529.
- [7] KANESHIGE A, KANESHIGE N, HASEGAWA S, et al. Model and control system for 3D transfer of liquid tank with overhead crane considering suppression of liquid vibration [J]. Cast Met. Res., 2008, 21 (1-4): 293-298.
- [8] 刘惠康, 孙博文, 柴琳, 等. 分组自适应模糊神经网络在双摆吊车上的应用 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (15): 6285-6290.
- [9] DE MORAIS M V G, LOPEZ A A O, MARTINS J F, et al. Equivalent mechanical model of rectangular container attached to a pendulum compared to experimental data and analytical solution [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42 (143).
- [10] RAOUF A I. Liquid sloshing dynamics theory and applications [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [11] 李遇春. 液体晃动动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [12] 马斌捷, 刘桢, 林宏. 航天器贮箱液体的有效转动惯量 (上) [J]. 导弹与航天运载技术, 2011 (1): 21-25.
- [13] HUANG Jie, ZHAO Xincheng. Control of three-dimensional nonlinear slosh in moving rectangular containers [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2018, 140 (8): 081016.
- [14] 顾攀. 含钒铬铁水粘度及熔化性温度研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

## Modeling and Dynamic Characterization of Ladle Swing-Liquid Shaking Coupling

NIE Guo-qiang, MENG Wen-jun

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

### Abstract:

In order to study the coupling of liquid steel sloshing and swing during ladle lifting and its influencing factors. The mass-spring-damping model of ladle lifting system is established according to the principle of equivalent dynamics, its motion equation is derived. The multi-body dynamic-two-phase flow finite element coupling model of ladle lifting system is established for finite element numerical simulation, which verifies the effectiveness of the third-order modal equivalent model. Then the influence of different parameters on the ladle lifting system is analyzed based on the equivalent model. The results show that the swing amplitude of the wire rope increases first and then decreases with the increase of the rope length and reaches the maximum value when the wire rope length is around 8 meters, and the swing amplitude increases with the increase of the trolley acceleration. The severity of liquid steel sloshing decreases with the increase of liquid loading rate of steel ladle. The sloshing of molten steel will decrease with the increase of wire rope length, but with the increase of liquid loading rate of steel ladle, this effect will become smaller and smaller. The equivalent model can provide a theoretical basis for the precise positioning control scheme of the ladle lifting system.

### Key words:

fluid level fluctuation; swinging characteristics; lifting systems; casting cranes; equivalent model