

# 齿轮齿条爬升式升船机系统的自振特性和稳定性

程载斌<sup>1</sup> 刘玉标<sup>2</sup> 梁乃刚<sup>2</sup>

(1. 中海石油研究中心, 北京, 100027; 2. 中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

**摘要:** 研究包括塔柱、承船厢、提升钢索、滑轮组、平衡重、厢内水体、驱动机构和限位装置在内的齿轮齿条垂直爬升式升船机系统, 讨论其自振特性和稳定性; 根据系统的设计方案, 通过动力学相似原则将塔柱简化为空间桁架模型; 将承船厢视为空间梁、板和集中质量系统, 厢内水体离散为三维容器流体单元; 将驱动机构和限位装置简化为弹簧单元; 利用有限元程序ANSYS建立升船机系统的参数化流-固耦合有限元模型, 通过求解大型特征值问题, 得到系统的自振特性, 并讨论弹簧刚度、承船厢竖向位置对系统自振特性的影响。利用自振频率为零时系统失稳的力学概念, 讨论系统的稳定性。

**关键词:** 流固耦合; 自振特性; 稳定性; 三维有限元; 齿轮齿条垂直爬升式升船机

## FREE VIBRATION CHARACTERISTICS AND STABILITY ANALYSIS OF VERTICAL GEAR-RACK TYPE SHIP-LIFT SYSTEM

CHENG Zai-bin<sup>1</sup> LIU Yu-biao<sup>2</sup> LIANG Nai-gang<sup>2</sup>

(1. China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) Research Center, Beijing, 100027, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

**Abstract:** Free vibration characteristics and stability of vertical gear-rack type ship-lift system are discussed. The ship-lift system is composed by ship lift towers, chamber, lift cables, pulleys, counters, water in chamber, drive mechanism and guiding devices. According to the design scheme of ship-lift system, the towers are simplified to space truss model based on dynamic similarity principle. The chamber is treated as space beam-plate-masses system. The water in chamber is modeled as fluid element contained within 3D vessels. Drive mechanism and guiding devices are simplified to spring elements. A parameterize fluid-solid interaction FEM model of the ship-lift system is presented by using finite element code ANSYS. The eigen-value system is solved to steadily obtain its free vibration characteristics and stability. Then the effect of spring stiffness and vertical position of chamber are also discussed. In the last of paper, critical vertical spring stiffness is given by the mechanical concept that system stability will be critical when it has a zero free frequency.

**Key words:** fluid-solid interaction; free vibration characteristics; stability; 3D FEM; vertical gear-rack type ship-lift system

“齿轮齿条式爬升式”方案是垂直升船机的一种重要设计型式, 具有较高的安全可靠, 其与“钢丝绳卷扬式”方案的关键不同之处在于承船厢驱动设备的安装位置与运行方式, 以及安全保障系统的机构形式和工作机理。按照“齿轮齿条爬升式”方案的设计条件与运行要求, 对承船厢驱动设备采用“齿轮-齿条”爬升、安全保障装置采用“长螺母-短螺杆”的型式。与驱动齿轮同步运行的螺杆安全锁定机构用于升船机平衡条件丧失时对承船厢进行支承, 避免承船厢失稳倾斜, 使系统免遭破坏。

作者简介: \* 程载斌 (1978—), 男, 山西人, 博士, 主要从事工程力学研究。(E-mail:chengzaibin@126.com)  
刘玉标 (1961—), 男, 湖南人, 副研究员, 硕士, 主要从事工程力学与结构减振研究。  
梁乃刚 (1944—), 男, 河南人, 研究员, 博士, 主要从事固体力学与材料损伤研究。

齿轮齿条爬升式升船机系统是一个非线性、多结构与多介质耦合的复杂系统，对各子系统独立研究难以保障系统的安全可靠性设计目标。在大比尺模型试验难以实现和工程实施经验相对缺乏的情况下，建立合理的整体系统力学模型进行计算分析，并指导工程设计，成为有效的研究手段。本文研究包括塔柱、承船厢、提升钢索、滑轮组、平衡重、厢内水体、驱动机构和限位装置在内的齿轮齿条垂直爬升式升船机系统，讨论其自振特性和稳定性。利用有限元程序ANSYS建立升船机系统的参数化流-固耦合有限元模型，通过求解大型特征值问题，得到系统的自振特性，并讨论弹簧刚度、承船厢竖向位置等对系统自振特性的影响。最后利用自振频率为零时系统失稳的力学概念<sup>[1]</sup>，给出临界的竖向弹簧刚度。

## 1 升船机系统力学模型

升船机主体部分包含四大子系统：塔柱子系统、承船厢子系统、平衡重子系统和主提升子系统。以塔柱子系统两对称轴的交点为原点建立整体系统力学模型。模型中所有材料参数的取值均参照文献[2]。

### 1.1 塔柱子系统

塔柱子系统由两两对称，四组基本相同的钢筋混凝土薄壁筒体塔柱构成，主要由基础底板、两侧塔柱和顶部机房、以及顶部中控室和观光平台等组成。本文建立了塔柱子系统的三种力学模型：1) 基础底板、墙体及顶部连接由三维有限元块体单元Solid65生成，该单元采用整体式模型模拟钢筋混凝土材料，将钢筋弥散于整个单元中，视加筋混凝土为连续均匀材料，求出的是一个统一的刚度矩阵。本文模型中考虑0.06%的配筋率；2) 将顶部机房简化为集中质量Mass21单元，按设计将质量分布在塔柱结构顶端，楼梯板采用板壳单元Shell63，顶部连接梁采用Timoshenko梁单元beam188；3) 采用动力学相似的原则将整个塔柱子系统生成空间桁架模型，整个结构被分割成单独的梁，垂直的梁是主要的垂直荷载承重结构，而水平的梁则根据整个建筑的承重能力和刚度联接到垂直梁。不同梁的截面根据塔柱结构中的钢筋混凝土筒体和联系梁确定，截面性能用程序计算。通过对系统自振特性反复试算，应用动力学相似的原则验证了三种力学模型具有较好的一致性<sup>[3]</sup>。

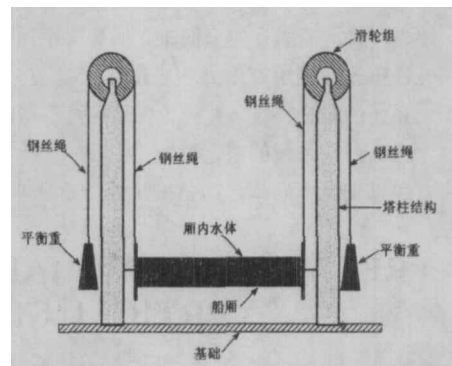


图1 升船机主体部分示意图(横断面)

1.2 承船厢子系统

承船厢子系统包括承船厢结构、厢内设备及厢内水体。承船厢结构中梁、板的结构尺寸均参照设计报告图纸，厢体结构内所有的纵梁、横梁均采用BEAM44三维梁单元；厢内设备简化为承船厢结构的附加质量，采用mass21单元；底铺板采用SHELL63板单元；厢内水体采用FLUID80单元模拟，该单元用于模拟容器内无净流率的水体，适于计算静水压力及流-固耦合作用力，并能计算惯性效应、液面晃荡等问题；水体与承船厢的接触面通过耦合约束防止水体泄漏和保证压力作用的传递<sup>[4]</sup>。

### 1.2 承船厢子系统

1.3 平衡子系统和主提升子系统

根据平衡重子系统和主提升子系统的结构布置、型式及其功能，钢索简化为单向拉伸杆单元LINK10，钢索预拉力通过给LINK10单元施加初始应变模拟；平衡滑轮组选用圆截面主纵梁和工字梁单元BEAM44模拟，通过释放滑轮中心主纵梁的节点转动自由度模拟滑轮的转动；平衡重组采用MASS21质量单元，共128块。

### 1.3 平衡子系统和主提升子系统

1.4 连接条件

承船厢与塔柱在水平方向通过对称布置在承船厢两侧的四套纵导向机构和顶紧装置以及四套横导向机构联系，在竖直方向通过对称布置在船厢两侧

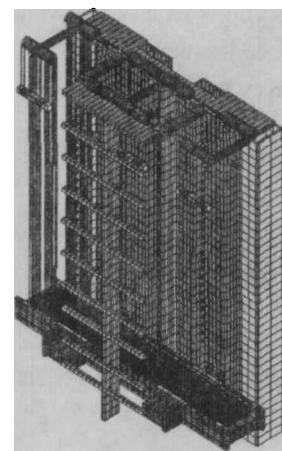


图2 升船机系统有限元模型

的驱动机构、安全机构、对接锁定装置等构成。塔柱与承船厢的竖向作用采用四个竖向非线性弹簧单元COMBIN39模拟，位于承船厢侧翼驱动横梁的正下方。纵/横导向机构分别采用四个纵向、四个横向非线性弹簧单元COMBIN39模拟。竖向弹簧刚度用以描述承船厢和塔柱结构之间的竖向相对变位以及由竖向不平衡载荷导致的两者相互作用力之间的关系。

模态分析时，纵、横向导轨的水平耦合作用采用COMBIN14单元模拟，单个弹簧的刚度值分别取170MN/m和65MN/m；而塔柱、承船厢的竖向耦合作用采用杆单元LINK8单元模拟，通过对承船厢工作状态和液气弹簧的力-变形分析，可得其刚度值。模态分析中将分析竖向弹簧刚度的影响，而其非线性因素在动态响应分析中考虑。

生成的升船机整体系统力学模型如图2所示。

## 2 升船机系统的自振特性

### 2.1 计算方法

升船机系统自振特性的计算属于典型的结构动力学无阻尼模态分析，其基本方程是大型特征值问题

$$\mathbf{K}\Phi = \mathbf{M}\Phi\Omega^2 \quad (1)$$

其中： $\mathbf{K}$ 为半正定的总体刚度矩阵，如果刚体运动和机构被抑制，则 $\mathbf{K}$ 正定；如果有的自由度没有质量则 $\mathbf{M}$ 是半正定的总体质量矩阵，如果所有的自由度与正质量相关联，则 $\mathbf{M}$ 是正定的； $\omega$ 为各阶模态的固有频率向量， $\omega^2$ 为特征值； $\Phi$ 为振型向量，即特征向量。如果非零的 $\Phi$ 能满足方程(1)，其系数矩阵的行列式 $[\mathbf{K} - \mathbf{M}\Omega^2]$ 必须为零，它是 $n$ 次多项式，这里 $n$ 为自由度数，它的根就是特征值。对于 $n > 4$ ，不存在闭合形式求解多项式根的方法，所有求解特征值的方法都是迭代法<sup>[5]</sup>。

鉴于升船机系统有限元模型的自由度数较大，且需要考虑水体的流动，为了减小运算量，需采用Reduced方法，计算中采用Guan缩减法，通过选取主导自由度子集来计算特征值和特征向量，其计算结果的精度取决于缩减质量阵的近似程度，即取决于主导自由度的数目和位置。关于上述算法的基本过程和选取主导自由度的原则可参考文献<sup>[4-6]</sup>。

在求解大型特征值问题时，若系统的特征值为正，则系统为稳定系统，系统的特征值为负，则系统为非稳定系统，系统的特征值为0，则系统处于稳定和不稳定之间的临界状态。

### 2.2 系统自振特性

针对塔柱结构为三维桁架模型的升船机整体系统模型，采用Reduced方法求解大型特征值问题，得到了升船机整体系统的自振特性。计算模型总自由度数为15855，主导自由度数为7411，选取的位置为塔柱结构、塔柱顶部附加质量、承船厢两侧主纵梁、平衡重组、滑轮组及厢内水体自由表面所有节点。

计算时考虑安全机构、齿轮齿条、液气弹簧等对承船厢竖向作用的两种工况：

1) 未锁定状态：螺母柱间隙存在，竖向只有齿轮齿条与液气弹簧的作用，通过对该状态下塔柱与承船厢之间的力-位移分析，取竖向弹簧标准刚度值为27.5MN/m；

2) 承船厢锁定：螺母柱间隙消失，竖向不平衡载荷由安全机构承当，其等效刚度可通过分析极限载荷时螺母螺牙和螺杆螺牙之间的接触变形获得<sup>[7]</sup>，本文取值为10000MN/m。

承船厢相对塔柱结构的竖向位置考虑底部、中部和顶部三种情况，计算中厢内水位为正常水位3.5m。

针对不同工况，本文进行了大量的计算分析。考虑到厢内水体自由面的低阶振型较多，经反复试算，对系统前1000阶振型进行计算分析。

通过对工况1、承船厢位于中部时升船机系统的模态计算结果分析可知：

1) 升船机整体系统振型丰富、密集，包括密集的厢内水体自由表面振型、运行系统流-固耦合振型及整体系统流-固耦合振型，频率范围为0.0176~12.7350Hz；将升船机系统作为整体研究，得到较多的整体流-

固耦合振型，这在单独对各子系统的研究中难以得到：

2) 出现了承船厢作为整体的纵向、横向翻转和竖向升降振型，当这些振型被激励时，将对运行系统的稳定性和安全机构的强度造成影响；

3) 与单独塔柱结构的自振特性相比，与其相似的整体系统耦合振型频率相近，因此除运行系统自身振型外，考虑运行系统的质量与连接刚度对塔柱结构基本振型的影响不是很大。

通过对工况2、承船厢位于底部时整体升船机系统的模态计算结果分析可知：

- 1) 升船机整体系统振型丰富、密集，除整体系统流-固耦合模态外，大都为厢内水体自由表面的振型；
- 2) 承船厢较少出现绕主轴方向的翻转振型，某些是由于塔柱振动耦合所致；
- 3) 竖向刚度和承船厢位置的改变对系统主要的耦合振型影响较小，对系统的振型分布有一定的影响。

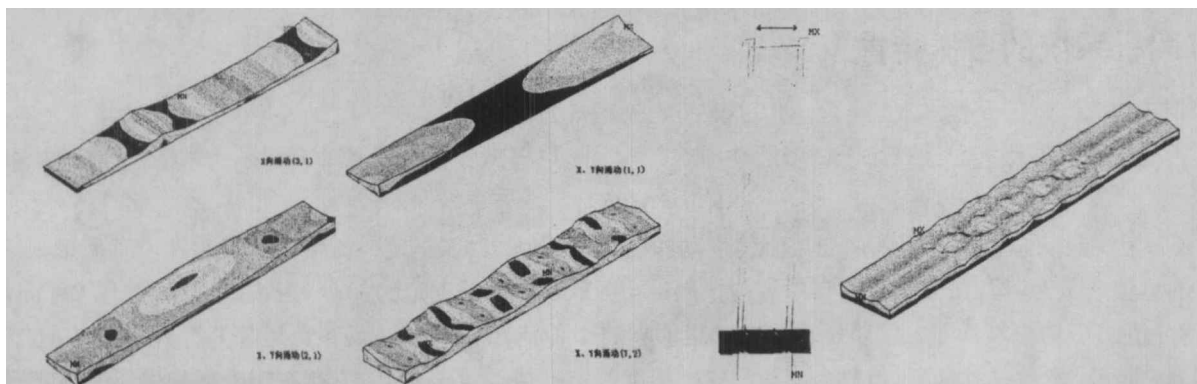


图3 厢内水体部分振型（工况2）

图4 整体系统第125阶振型（工况2）

### 2.3 参数影响

本节主要研究竖向弹簧刚度、承船厢竖向位置对升船机整体系统自振特性的影响，主要分析结果为动不稳定振型、翻转/升降振型的出现频率，因为这类振动特性一旦被激起，将对升船机系统的稳定性及安全机构的强度有较大的影响。

#### 2.3.1 竖向刚度影响

大量的计算结果表明：当竖向弹簧刚度较小时，将出现频率为零的振型，意味着运行系统存在动不稳定模态，可能发生动力失稳。表1所示为竖向刚度不同时，动不稳定振型出现次数的统计值。计算分析表明：运行系统不稳定模态出现的竖向弹簧临界刚度值约为9MN/m。

表1 动不稳定振型出现次数

| 竖向刚度 (MN/m) | 出现次数 | 自振特性            |
|-------------|------|-----------------|
| 1           | 2    | 承船厢纵向、横向翻转，水体随动 |
| 1.5         | 1    | 水体纵向涌动          |
| 5           | 1    | 水体纵向涌动          |
| 8           | 1    | 水体纵向涌动          |
| 10          | 0    |                 |

竖向弹簧刚度较小时，还出现了较多的承船厢绕主轴方向的翻转振型，这些振型被激励时，可造成较大的导致承船厢倾翻的附加惯性力偶矩，同样对系统的稳定性有较大的影响。

表2所示为竖向刚度不同时，承船厢翻转/升降振型出现的次数统计，高阶振型中由于塔柱振动耦合引起的该类振型不在统计之内。从计算结果可以看出：随着竖向刚度的增加，承船厢翻转/升降振型出现的次数明显下降，尤其是低阶振型，当竖向刚度为200MN/m时，已不出现该类低阶振型。竖向刚度对升船机整体系统主轴方向以塔柱振型为主的低阶振型及承船厢沿主轴方向的摆动振型影响较小。刚度不同时，各振型出现的阶次有所差异，而固有频率值的差别较小。

表 2 翻转/升降振型出现次数

| 竖向刚度 (MN/m) | 出现次数         |              |
|-------------|--------------|--------------|
|             | 低阶 (整体横向一阶前) | 高阶 (整体横向一阶后) |
| 1.5         | 5            | 5            |
| 5           | 5            | 4            |
| 10          | 4            | 3            |
| 50          | 2            | 3            |
| 100         | 1            | 4            |
| 200         | 0            | 3            |
| 400         | 0            | 2            |
| 800         | 0            | 2            |
| 10000       | 0            | 0            |

2.3.2 承船厢竖向位置的影响

承船厢的竖向位置不同时，升船机整体系统的质量分布、刚度分布将有较明显的变化，从而影响整体系统的自振特性。由于系统频率密集，振型丰富，本节分析的结果主要为对系统动态响应起重要作用的低阶整体耦合振型和承船厢相对独立的沿主轴方向摆动振型。

表3给出了竖向刚度为27.5MN/m时，承船厢竖向位置不同时的整体系统自振特性结果：

表 3 承船厢竖向位置影响

| 自振特性       | 承船厢相对塔柱结构的竖向位置 |        |     |        |     |        |
|------------|----------------|--------|-----|--------|-----|--------|
|            | 底部             |        | 中部  |        | 顶部  |        |
|            | 阶次             | 频率 Hz  | 阶次  | 频率 Hz  | 阶次  | 频率 Hz  |
| 整体横向一阶     | 129            | 0.4460 | 126 | 0.4441 | 106 | 0.4272 |
| 整体扭转一阶     | 711            | 0.9226 | 711 | 0.9274 | 710 | 0.9467 |
| 整体纵向一阶     | 713            | 1.0520 | 713 | 1.0400 | 712 | 1.0070 |
| 整体横向二阶     | 732            | 2.2200 | 844 | 2.2260 | 842 | 2.1870 |
| 整体扭转二阶     | 734            | 2.7970 | 846 | 2.8020 | 846 | 2.8080 |
| 整体纵向二阶     | 856            | 3.4480 | 855 | 3.4610 | 854 | 3.4530 |
| 承船厢横向摆动    | 709            | 0.8440 | 709 | 0.8501 | 709 | 0.8923 |
| 承船厢纵向摆动    | 724            | 1.4500 | 724 | 1.4610 | 837 | 1.5130 |
| 承船厢绕 Z 轴转动 | 708            | 0.7376 | 708 | 0.7340 | 706 | 0.7186 |

对承船厢竖向位置位于塔柱底部、中部、顶部三种情况的计算结果表明：

1) 承船厢位于塔柱底部时，连接承船厢的提升钢索较长，承船厢与塔柱之间的振型独立性较强。除厢内水体振型外，竖向刚度较小时，承船厢绕坐标轴Y方向的独立纵向翻转为整体系统的基本振动形式；竖向刚度较大时，整体系统（以塔柱结构为主）沿坐标轴Y方向的横向侧移为系统的基本振动形式；

2) 承船厢位置由底部向顶部变化时，整体扭转一阶振型和整体纵向一阶振型变得越发接近；承船厢沿主轴方向的摆动振型由于钢索变短而逐渐增大，而承船厢绕Z轴转动振型却由于系统整体转动惯量增加而变小；在承船厢位于塔柱顶部情形下，承船厢与塔柱之间提升钢索变短，两者振型的整体性增强；

3) 承船厢竖向位置的变化对系统的振型有一定影响，对系统主要的耦合振型的频率值影响较小。

3 升船机系统的稳定性

升船机运行系统的稳定性是升船机安全运行的重要保证。本文从三个方面来定性分析这类升船机运行系统的稳定性<sup>[8]</sup>。

(1) 运动学

当螺母柱间隙存在,承船厢竖向作用刚度较小时,升船机运行系统可能发生旋转倾翻。升船机运行系统受到的约束使其在运动上具有一定的机动性,主要表现为承船厢绕X或Y坐标轴的翻转运动,这一翻转运动对承船厢升降导轨有较大的破坏作用,旋转角度可能很大,对于安全机构的竖向强度是个极大的考验。

## (2) 静力学

在翻转过程中升船机运行系统承受导致倾翻的附加力偶矩。升船机承船厢翻转时,厢内水体的单向涌动破坏了承船厢、水、船、滑轮组钢索和滑轮组平衡重的局部平衡。承船厢的一端重量减小而另一端重量增大,产生了在旋转过程中导致倾翻的附加力偶矩。

## (3) 动力学

当螺母柱间隙存在,竖向作用刚度较小时,升船机系统存在频率为0Hz的不稳定模态。承船厢翻转运动发生时,升船机运行系统承受导致倾翻的附加惯性力偶矩。厢内水体的单向涌动将造成力矩增大,甚至难以恢复平衡。

综上所述,可以认为齿轮齿条垂直爬升式升船机的运行系统是可能发生失稳的,外界扰动力作用能够造成承船厢的翻转和摆动,从而导致塔柱和船厢的连接装置承受倾覆力矩,设计时需要特别关注齿轮齿条爬升装置、液气弹簧与螺母柱安全锁定机构组成的塔柱与承船厢竖向连接强度。

# 4 讨论

本文建立了齿轮齿条垂直爬升式升船机的整体系统力学计算模型,通过对系统自振特性的分析及其影响参数的讨论,指出齿轮齿条垂直爬升式升船机运行系统是可能发生失稳的,并给出了发生动力失稳的临界竖向连接刚度。齿轮齿条爬升装置、液气弹簧与螺母柱安全锁定机构组成的塔柱与承船厢竖向连接强度承担了系统失稳时的恢复力矩,在设计时需要特别关注竖向连接装置的运动—位移、力—变形关系。

本文计算模型中对齿轮齿条、液气弹簧与安全锁定机构作了一定的简化,依据其运动—位移、力—变形关系将其简化为弹簧元,未能考虑系统的机构运动、液压系统、同步装置等的影响。在本文计算模型基础上,借助柔性多体系统动力学方法建立整体系统更为复杂、完善的模型,分析包括材料非线性、状态非线性等在内的流—固耦合系统的动力响应,可为工程设计、施工及系统的运行、维护提供更具参考价值的信息。

## 参考文献:

- [1] 程耿东,李海涛,阮诗伦. 重力全平衡提升式升船机的自振特性和稳定性分析. 机械强度[J], 2005, (3): 276—281.
- [2] 程载斌. 升船机系统动力学问题与可靠性研究 [D]. 博士学位论文: 中国科学院力学研究所, 北京, 2008.
- [3] 程载斌, 刘玉标, 梁乃刚. 大型升船机结构地震响应分析. 《现代振动与噪声技术》[C]. 北京: 航空工业出版社, 2007, 5: 450—455.
- [4] Release 10.0 Documentation for ANSYS. ANSYS, Inc, 2005.
- [5] Robert D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, Robert J. Witt. Concepts and Applications of Finite Element Analysis [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [6] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [7] 石端伟, 王志浩, 程新娥等. 大螺杆式升船机爬升机构的强度计算. 起重运输机械 [J], 2004, 49—11.
- [8] 喻永声, 弓满峰. 全平衡钢索提升式升船机组合结构自振特性. 计算力学学报 [J], 2003, (5): 568—573.