

移动载荷作用下囊式浮桥动力响应分析

● 王欢欢^{1,2} 杨勋^{1,2} 金先龙^{1,2}

¹上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240

²上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240

摘要：

针对一种新型囊式浮桥，分析了其在移动载荷作用下的动力响应问题。基于ALE方法描述浮桥周边流体及囊内气体，采用拉格朗日方法描述浮桥结构，并结合罚函数方法实现结构与流体之间的耦合。通过与以往试验数据的比较，验证了此方法的可行性。建立了囊式浮桥的三维有限元模型，确定了浮桥的初始平衡位置。在此基础上，模拟了重载卡车在浮桥上的通行过程。通过比较浮桥中部承重板的位移，研究了载重、速度及拼装间隙等因素对浮桥位移响应的影响。针对作为浮桥关键结构的囊体，分析了其不同时刻的最大一阶主应力，以及最大应力出现的位置。研究结果可为这类新型浮桥的设计提供参考依据。

关键词：囊式浮桥，ALE方法，动力响应，移动载荷

浮桥建造的历史十分悠久，相对于固定桥梁，其具有结构简单及经济性良好等优点。传统型的浮桥，多以舟船或浮箱进行搭建。面对现代化的工程需要，如抢险救灾、快速登陆等突发状况，此类浮桥存在一定的不足。为实现快速便捷轻量化搭建，囊式浮桥在结构和设计上进行了创新和突破^[1,2]，其实例如图1所示。由于采用空气填充作为浮体的方式，其重量已大大降低，并可以快速拼装，能够满足大型装备及车辆的顺利通行。

对于浮桥的研究，早期的研究者们较多的是将浮桥简化为弹性基础梁进行计算^[3-5]。Wu等^[6]研究了静水中移动载荷作用下系泊铰接浮桥的动力响应问题，其中浮桥被简化为弹性基础梁，系泊系统则采用线性弹簧进行模拟，并通过附加质量来考虑浮桥周围水动力的影响；Ertekin等^[7]将浮桥简化为二维梁单元模型，对均匀水流和静态载荷作用下线性连接的军用浮桥进行了水弹性响应分析。简化梁单元方法虽然提高了计算效率，但与实际情况存在一定的偏差。近年来，随着多体系统动力学和有限元技术的发展，对浮桥的研究方法更加多样化，且大大提高了计算的精度^[8-12]。为了对浮桥的承载能力进行校

核，同时也为保证浮桥工作的安全性，研究者们对移动载荷作用下浮桥的动力响应问题进行了大量的研究。Sedarat等^[13]进行了浮桥的非线性动力学分析，有限元模型为精细三维实体模型，同时对浮桥上导轨及列车进行了建模，并应用多尺度方法分析了列车通过时浮桥的动力响应；付世晓等^[14]基于超单元方法建立了浮桥三维动力响应分析控制方程，研究了移动载荷作用下非线性连接浮桥的动力响应特性；王丙等^[15]利用传递矩阵法，分别建立了桥节、脚舟和接头的传递矩阵并组装成传递方程，对带式浮桥和分置式浮桥在不同荷载移动速度和不同连接接头刚度时的动力响应进行了计算，得到了浮桥中部接头处的位移和受力时程曲线。



图1 囊式浮桥示例

以上研究在对浮桥周边水体作用进行处理时，多采用一些等效方法进行替代，如弹簧单元、附加质量法。对于囊式浮桥这种新型浮桥，在工作过程中囊体会发生较大的变形，所以不能直接利用弹簧单元进行替代，而应当考虑到水体与囊体之间的耦合作用。移动载荷通过时，囊体不仅要承受外部水体的压力，同时也要受到内部增压气体的作用。另外浮桥整体会发生上下浮动，周围水体也会发生变化。在流固耦合、液体大幅晃动研究领域，任意拉格朗日-欧拉（ALE）方法因综合了拉格朗日及欧拉方法的各自优点而得到了广泛的应用^{[16][17]}。因此，本文拟基于ALE方法，解决流体与浮桥囊体间的流固耦合问题，并利用非线性显式动力学软件LS-DYNA，分析囊式浮桥在移动载荷作用下的动力响应问题，研究结果可为这类新型浮桥的设计提供必要的参考。

1. 计算方法与控制方程

1.1 ALE算法

在Lagrangian描述中，网格与材料域是重合的，网格随着材料一起变形。这种方法的优点是可以精确地描述结构边界的运动，且多用于固体结构的应力应变分析。但应用此方法处理大变形问题时，网格会发生畸变，从而使计算终止或者引起严重的误差。对于Eulerian方法，网格在整个分析过程中始终保持空间位置不变，材料可以在固定的空间网格中流动，能够避免网格畸变的问题，但是在处理移动边界和相互作用问题上是非常困难的。因此，研究者提出了集合两种方法优点的任意拉格朗日-欧拉（ALE）方法。

在ALE描述中包含三个坐标系：Lagrangian坐标系、Eulerian坐标系以及参考坐标系。对于一个指定的函数*f*，三者间的转换关系为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(X_i, t)}{\partial t} &= \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} + (v_i - u_i) \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} + w_i \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (1)$$

其中，*X_i*表示Lagrangian坐标，*i*表示参考网格，*x_i*表示Eulerian坐标。*v_i*和*u_i*分别为材料和网格速度，*w_i*为对流速度。各坐标系之间的转换关系如图2所示。

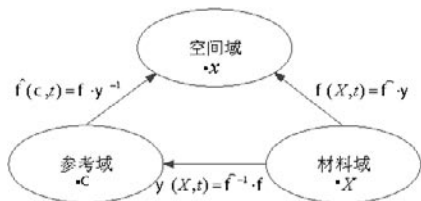


图2 在Lagrangian, Eulerian和 ALE域之间的映射

基于ALE描述下的流体连续性方程、动量方程和能量方程分别为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - c_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} \right)_x + c_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial E}{\partial t} + c_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \right) = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i \quad (4)$$

式中，*c_j*为ALE描述下的对流速度；*v_i*为流体质点的物质速度；*x_i*和*x_j*为空间坐标；*b_i*为流体力；*σ_{ij}*为应力张量；*ρ*为流体密度；*E*为总能量。

对于ALE控制方程，有两种求解途径，一种为求解全耦合方程，但计算工作量巨大，解耦过程复杂。另一种为算子分解法，将控制方程表述的物理过程分解为扩散和对流两个过程，从而克服了计算上的困难。算子分解法在计算的过程中，将每个时间步分为两个子步。首先执行拉格朗日过程，此时网格随物质运动，计算速度及由外力引起的内能变化量。在Lagrangian计算步中，由于没有材料流过单元边界，其质量将自动守恒，其动量与能量平衡方程为

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} \Big|_x = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i \quad (6)$$

其次执行Eulerian计算步，即为对流计算过程。在该计算步中，网格边界上所传送的质量、内能和动量被计算，也可将该过程看作是将运动的网格重新映射到原来的位置或指定的位置。

1.2 流固耦合

基于Lagrangian描述的结构质量方程、动量方程为：

$$\rho_s(X, t) J(X, t) = \rho_0(X, t) J_0(X, t) \quad (7)$$

$$\rho_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_x = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho_s b_i \quad (8)$$

式中，*ρ_s*为固体密度；*J*为空间和材料坐标间的Jacobian行列式；*u*为固体结构位移；*X*为Lagrangian坐标。

对动量方程在空间进行离散，得到系统在时刻*t*的求解方程为

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = Q(t) \quad (9)$$

对于结构的动力响应求解，采用显式算法，在

时域内采取中心差分离散方法,然后在每个时间步长内计算位移、速度、加速度变化。

在流体和结构的耦合边界处理上,需要满足几何相容和力的平衡条件,即

$$v_s = v_f = \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_x, F_s = -F_f \quad (10)$$

式中, v_s 、 v_f 为耦合界面上流体速度和结构材料速度; F_s 、 F_f 为流体和固体结构作用在耦合界面上的作用力与反作用力。

对于流固耦合界面上的作用力,采用了罚函数方法进行处理,原理如图3所示。首先,对于每个结构节点,搜索包含该节点的多物质ALE单元;然后,通过计算穿透速度与时间来计算流体节点的穿透深度 Z ;最后基于罚函数的耦合力通过正比穿透深度进行计算。耦合力可以看作是节点总力中的一个外部力,在此基础上,通过计算每一时间步的总节点力,可以得到流体和结构体耦合界面上每一点的速度、位移和应力等,从而实现流固耦合界面上的相互作用,即耦合计算。

根据流体边界与结构点的相对位移计算出的数值耦合力为:

$$F_s = \frac{d^2 Z}{dt^2} + \xi \frac{dZ}{dt} + \frac{m_s + m_f}{m_s - m_f} \frac{\alpha K_f A_f^2}{V_f} Z \quad (11)$$

式中, ξ 为阻尼系数; m_s 和 m_f 分别为固体和流体质量; α 为缩放质量; A_f 、 V_f 、 K_f 分别为单元面积、单元体积和单元容积模量。

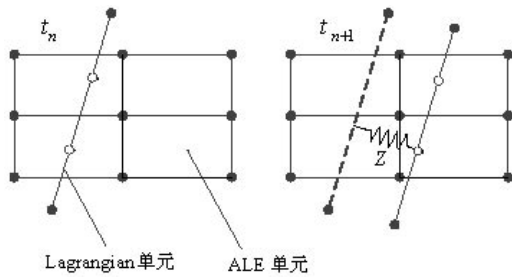


图3 罚函数耦合

2. 囊式浮桥数值计算模型

2.1 浮桥有限元模型

囊式浮桥由连续的浮桥模块快速拼装而成,浮桥模块主要由承载板、囊体及裙带组成。其中囊体直径为1.525m,主体长度为7.625m;承载板长6.10m,宽3.05m,厚0.45m,两者之间通过裙带进行连接。浮桥模块几何尺寸如图4所示。

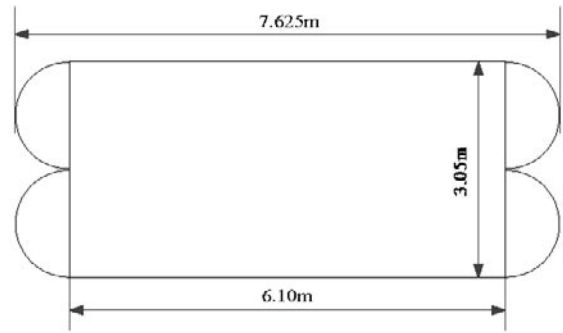


图4 浮桥模块几何尺寸

在建立浮桥模块的有限元模型时,囊体、裙带单元采用了基于Lagrangian描述的Belytschko-Tsay薄壳单元,每层单元沿壳厚方向取3个积分点。考虑到固体单元网格本身以及与流体单元网格的匹配,网格过小,极其耗费计算时间,网格过大,无法保证计算精度,将单元网格大小控制在0.25m左右。裙带与浮囊和承载面之间采用共节点方法连接在一起。承载面采用了基于Lagrangian描述的六面体实体单元模型和刚体材料模型,承载面与囊体之间以及相邻囊体之间的接触关系通过动态接触算法进行了定义。浮桥模块有限元模型如图5所示。

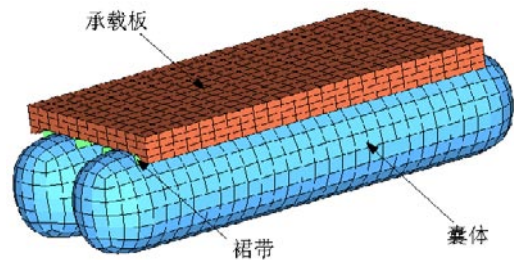


图5 浮桥模块有限元模型

相邻的浮桥模块采用铰链结构进行拼装,模块之间的间隙为2cm,其几何示意图如图6所示。根据浮桥设计要求,浮桥承载面之间的可以相互转动,但不允许有相互平动,在此采用LS-DYNA中提供的铰链模型来模拟承载面间的相互转动。浮桥整体由20个模块组装而成,约60m长,重约58吨。为分析浮桥在移动载荷作用下的动力响应,同时也为更接近于浮桥的实际工作状态,在此采用了重载卡车进行移动载荷的模拟。卡车有限元模型如图7所示,为节约计算时间,卡车建模采用了刚体模型。

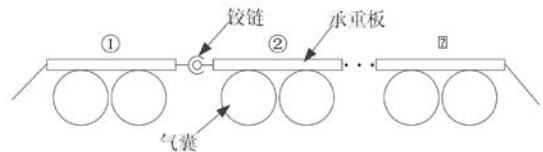


图6 铰链联接示意图

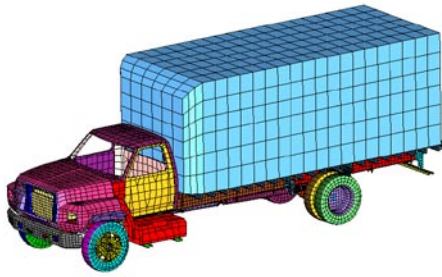


图7 重载卡车有限元模型

2.2 结构及流体材料模型

在浮桥结构中，囊体是整个浮桥系统的核心。浮桥需要满足重载车辆的通行，所以要求囊体具有非常高的承载能力。另外为减小囊材料的存放空间，要求囊体材料柔韧性好，易折叠；为保证囊体材料的使用寿命，还要求材料耐磨、耐老化、耐腐蚀。因此囊体采用了织物复合材料制成，并具有良好的性能。在有限元分析中，需要确定囊体织物复合材料的力学性能参数，但对于编织复合材料来说，其结构比较复杂，通过理论方式很难预测其力学性能，因此可以采用试验的方法进行确定。试验结果表明囊体材料可视为横观各向同性材料。囊体厚度约为3.5mm，材料的密度和泊松比分别为1150.2 kg/m³、0.34，应力应变本构关系如图8所示。

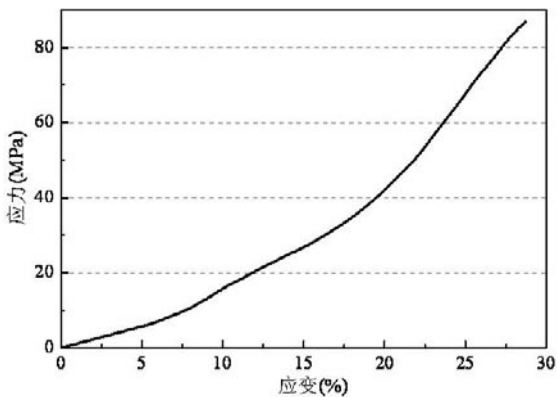


图8 囊体材料的本构曲线

如图9所示，浮桥动力响应过程涉及的流体主要分为三部分，囊外海水、囊外空气及囊内增压气体，其中囊内气体压力为115KPa。流体单元采用了多物质ALE单元描述，为避免耦合计算过程中求解偏导数，利用了LS-DYNA提供的NULL空材料本构模型和状态方程来共同描述流体材料特性。对于囊外空气和内部增压气体，气体状态方程采用EOS_LINEAR_POLYNOMIAL模型。压力随着单位体积的内能线性变化，可表述为：

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (12)$$

式中， P 为压力， F_0 为初始比内能， C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 和 C_6 为自定义常数， μ 为体积变化率。

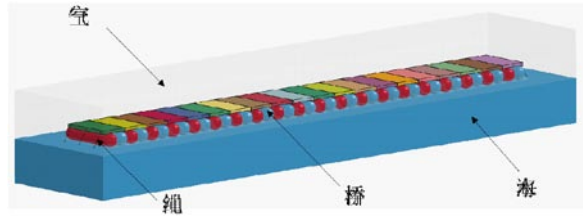


图9 整体有限元模型

对于海水的材料模型，则采用了Gruneisen方程进行描述：

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E_0 \quad (13)$$

式中， E_0 为单位体积内能， C 为 $u_s - u_p$ 曲线截距（ u_s 为冲击波速度， u_p 质点速度）， S_1 、 S_2 和 S_3 为 $u_s - u_p$ 曲线斜率系数， γ_0 为Gruneisen系数， a 为对 γ_0 的一阶体积修正。

2.3 并行计算方法

在流体-浮桥耦合系统的模拟中，采用了三维有限元建模技术，模型中包含了大量的几何非线性、材料非线性问题。在求解时，为保障计算精度及计算的稳定性，需要采用较小的时间步长。另外，对于流-固耦合界面、结构间接触界面进行处理时，也占用了大量的计算机资源。为此基于上海超算中心蜂鸟计算平台，利用非线性动力学软件LS-DYNA对囊式浮桥的动力响应进行了模拟，并对分区方法进行了优化。

基于递归坐标二分法，采用C语言和MPI信息交换接口设计了考虑流体-结构耦合计算的负载均衡分区方法。在分区时，首先输入有限元模型单元及节点信息文件，搜索包含耦合界面及接触界面的单元和节点；然后根据空间拓扑关系，将以上搜索到的单元和节点平均分配到各子区域中；最后再对其他未包含耦合计算及接触计算的单元和节点进行分配。8分区拓扑结构如图10所示。

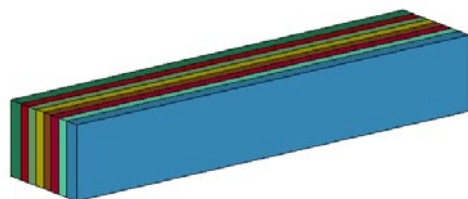


图10 拓扑分区图（8分区）

3. 囊式浮桥动力响应分析

3.1 数值模型验证

2009年, Pratt^[18]在波浪水槽中利用1/3比例模型进行了浮桥加载的静态测试。试验模型由12个浮桥模块组成, 长度约为12.2m。根据相似准则, 原型和模型各物理量之间的关系如表1所示。

表1 各物理量的比例关系

物理量	原型	1/3比例模型
承载板, 长×宽×厚(m)	3.05×6.10×0.45	1.017×2.033×0.15
囊体半径(m)	1.525	0.508
模块质量(Kg)	2721.6	100.8
载荷重量(Kg)	72000	266.7

利用上述的数值计算方法, 建立了与试验模型尺寸一致的有限元模型。试验中载荷加载在浮桥的中部位置, 在此利用有限元模型进行了同等条件下的模拟, 载荷加载条件保持一致。浮桥模型在中部载荷作用下的变形如图 11所示, 如图所示, 浮桥中部模块下沉比较明显, 浮桥两端模块略有上浮。浮桥不同位置的垂向位移如图12所示, 浮桥的最大位移约为0.23m, 试验值和仿真值的分布规律一致且吻合较好, 证明了该模拟方法的正确性和可行性。

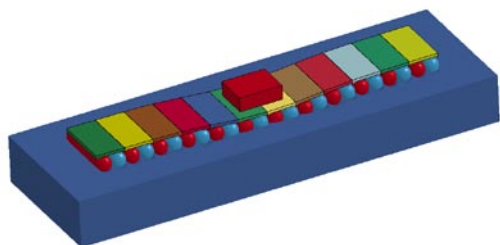


图11 1/3比例浮桥模型在中部载荷作用下的变形

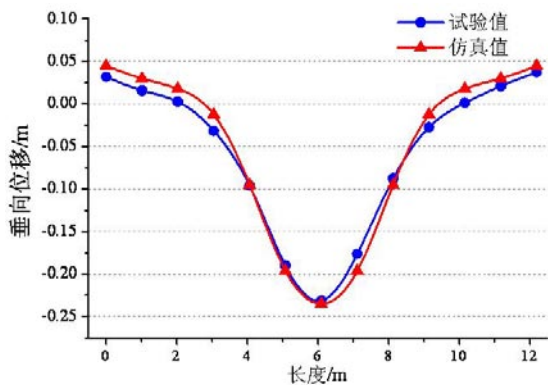


图12 浮桥各模块垂向位移

3.2 浮桥初始状态

在浮桥的初始有限元模型中, 浮桥距离水面有一定距离, 如图13所示。在重力与水浮力的共同作

用下, 浮桥在水中上下浮动并达到平衡状态, 此时浮囊底部部分浸于水中。图14为浮桥在重力方向的位移, 由图可见, 浮桥在水中经历较长时间的下沉与上浮过程后, 浮桥最终静止在水中, 此时承载板垂直位移为0.15m。



图13 浮桥的初始及平衡位置

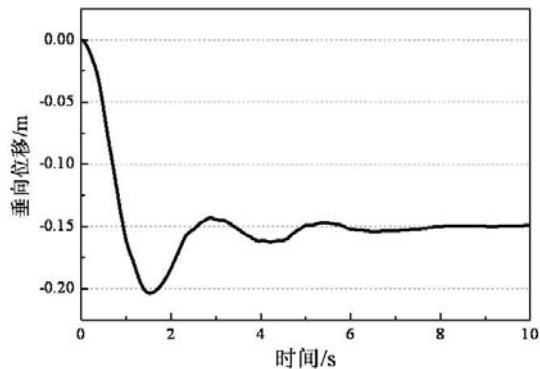


图14 浮桥垂向位移

3.3 动力响应分析

为保障浮桥的通行安全, 以及研究载荷对浮桥动力响应的影响, 分析了四组不同的载重量, 总重分别为20、30、40及50吨。在初始设计时, 浮桥需满足50吨卡车单车道安全通过。基于浮桥的初始状态, 模拟了载重车辆在浮桥上的行进过程。图 15为总重量为30吨的车辆在浮桥上的通行过程, 当车辆位于浮桥一端时开始启动, 加速到4m/s时以稳定速度前进。如图所示, 当车辆移动时, 位于车辆下部的浮桥模块下沉非常明显, 车辆两侧附近的浮桥模块略有上浮。

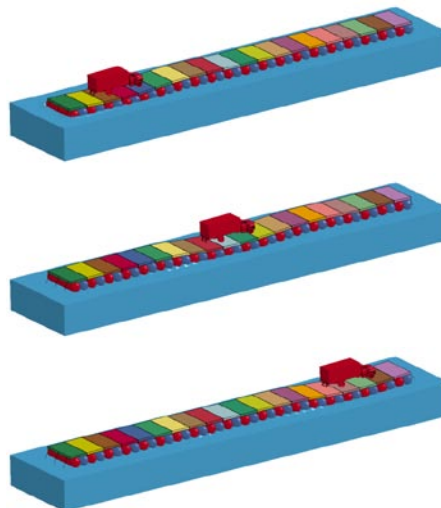


图15 载重卡车(30吨)通行过程

为研究移动载荷作用下浮桥的位移响应变化，选取了浮桥中部的承重板进行比较。图16为中部承重板垂向位移时程曲线，不同载荷时的最大位移分别为0.416m、0.505m、0.579m及0.649m。如图所示，当载荷接近时，浮桥模块会先发生上浮，然后下沉，当载荷离开时，浮桥又迅速上浮。负载从20吨增加到50吨，浮桥的最大吃水量逐渐上升。当载荷为50吨时，承重板板面距离水面仍有0.9m左右的距离，车辆可以安全顺利通过。

不同速度下浮桥的垂直位移如图17所示。在载荷相同的状况下，随着速度的增加，最大垂向位移稍有增加。这是由于当载荷移动时，浮桥位移变形波也在传播，当速度增加时，会产生位移波堆积现象^{[15][19]}。

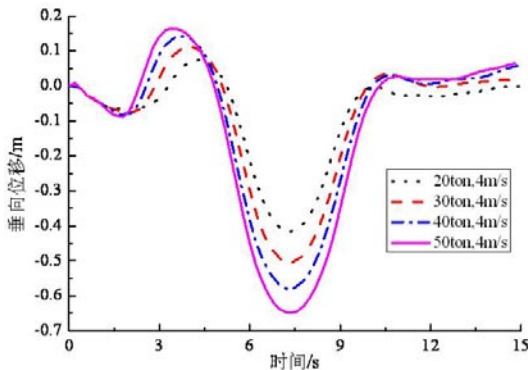


图16 不同载重下中部垂向位移

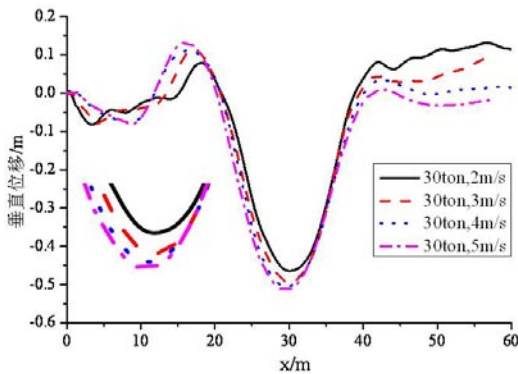


图17 不同速度下模块垂向位移

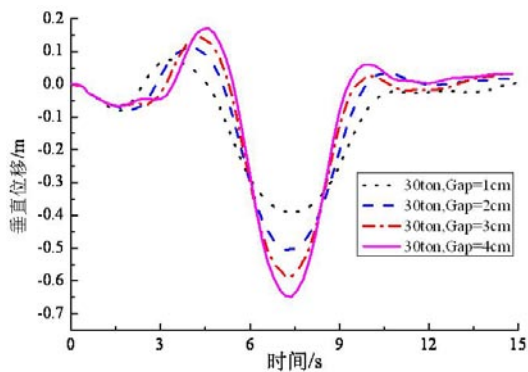


图18 不同间隙下模块垂向位移

相邻模块之间的间隙对浮桥的位移响应的影响如图18示，最大位移分别为0.390m、0.505m、0.585m、0.647m。在载荷重量相同的状况下，间隙对浮桥垂向位移的影响非常明显，且随着间隙的增大，浮桥上下波动的幅度明显增大。为了避免较大的垂向位移，在浮桥拼装时应尽量缩小相邻模块之间的间隙。

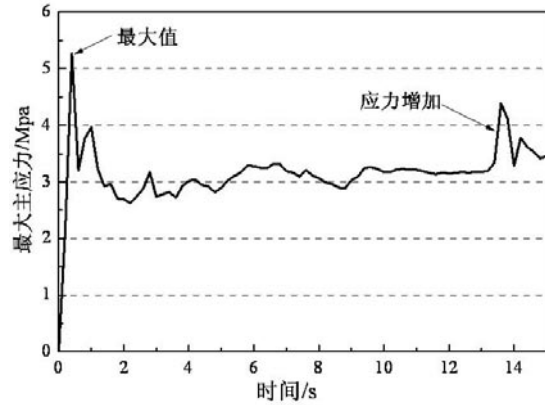
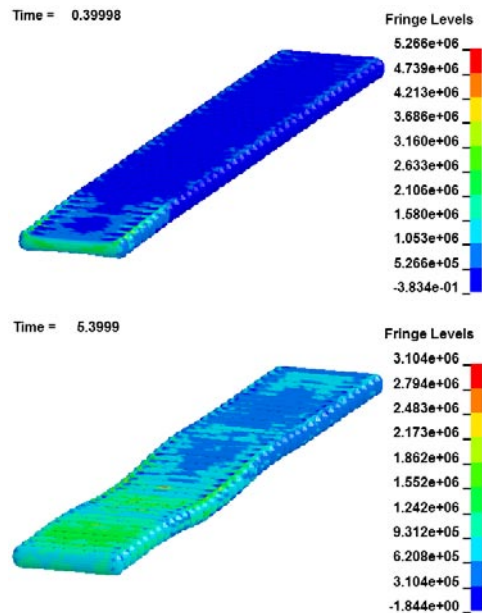


图19 囊体最大主应力时程

载荷移动时，囊体不仅要承受内外部流体压力，同时也受到承载板的挤压作用。为防止局部应力超过材料强度极限，需要对其在载荷移动时的应力状况进行评估，校核其最大主应力。图19为30吨卡车经过时，囊体的最大主应力时程曲线。当30吨的卡车位于浮桥的两端时，囊体的主应力值大于其他时刻。囊体不同时刻的主应力分布规律如图20所示。由图可见，当车辆行驶在浮桥的两端时，浮囊承受的应力最大，而当车辆距离浮桥端部一定距离后，浮囊的最大等效应力基本不变。不同时刻下，囊体的最大应力出现在位于车辆下部，且与承重板有接触的囊体区域。



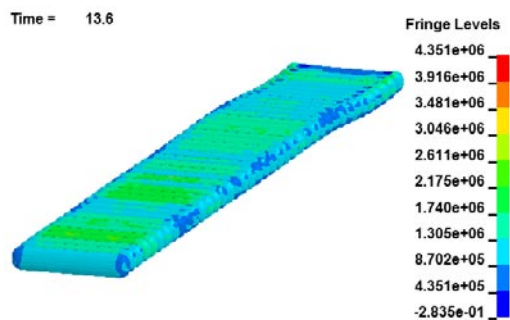


图20 囊体主应力分布 (30吨)

不同载重下的囊体最大主应力值如表2所示。随着载荷的增加，囊体的最大主应力逐渐增大，拉应力值由4.103MPa上升至6.423MPa。对于50吨的载重量，囊体的最大拉应力仍低于复合织物的强度极限，但如果在野外环境中长期使用，可对一些应力值较高的区域如浮桥两端囊体进行加固。

表2 不同载重下的最大主应力

载重(吨)	20	30	40	50
最大主应力 (MPa)	4.103	5.266	5.827	6.423

4. 结论

本文研究了一种新型囊式浮桥在移动载荷作用下的动力响应问题，充分考虑了水体与浮桥之间的耦合作用。模拟了重载卡车在浮桥上的通行过程，分析了载重、速度及间隙等因素对浮桥位移响应的影响，探讨了关键结构囊体的主应力分布，得出的主要结论如下：

(1) 此类新型囊式浮桥具有良好的承载能力，对于50吨的载重车辆，可以满足其安全顺利通行。

(2) 当载荷以一定速度移动时，随着载荷重量的增加，浮桥的垂向位移增加明显；载荷重量一定时，随着速度的增加，最大垂向位移略有增加，这是由于浮桥位移变形波堆积作用造成的。

(3) 间隙对浮桥垂向位移的影响非常明显，且随着间隙的增大，浮桥上下波动的幅度明显增大。为了避免较大的垂向位移，在浮桥拼装时应尽量采用较小的间隙。

(4) 当载荷位于两端时，囊体的最大一阶应力值较大；对于不同的时刻，应力最大的区域出现在位于车辆下部的囊体区域；另外，随着载荷质量的增加，囊体的最大主应力值也相应增大。

参考文献：

- [1] Resio D, Fowler J. Ship-to-Shore causeway system for military and emergency operations[J]. Sea Technology, 2010, 51(1): 17-18.
- [2] Russell B R, Thrall A P, Padula J A, Fowler J E. Reconceptualization and optimization of a rapidly deployable floating causeway[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 19(4).
- [3] Thambiratnam D, Zhuge Y. Dynamic analysis of beams on an elastic foundation subjected to moving loads[J]. Journal of sound and vibration, 1996, 198(2): 149-169.
- [4] 段明德. 浮桥整体结构分析的力学模型[J]. 桥梁建设, 1990, 2: 45-54.
- [5] 辛实. 铁路浮桥结构的整体分析[J]. 铁道建筑技术, 1995 (3): 15-18.
- XIN Shi. Structures analysis of railway floating bridge[J]. Railway Construction Technology, 1995 (3): 15-18.
- [6] Wu J S, Shih P Y. Moving-load-induced vibrations of a moored floating bridge[J]. Computers and Structures, 1998, 66(4): 435-461.
- [7] Ertekin R C, Riggs H R, Kim J W, Demirebilek Z. Hydroelastic analysis of floating bridges in current[C]. 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Rio de Janeiro: ASME, 2001.
- [8] Kwon J S. Seismic Response Analysis of a floating bridge with discrete pontoons[J]. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2005, 9(2): 47-58.
- [9] 傅世晓, 崔维成, 林铸明, 等. 间隙对拼组式浮桥静态响应的影响分析[J]. 船舶力学, 2004, 8(4): 86-94.
- [10] 王琮, 付世晓, 韩芸, 等. 波浪作用下带式舟桥的水弹性分析[J]. 上海交通大学学报, 2007, 09: 1441-1444.
- [11] 江召兵, 沈庆, 陈徐均, 等. 多体系统齐次矩阵方法在浮桥运动响应中的应用研究[J]. 计算力学学报, 2010, 06: 1036-1041.
- [12] 陈徐均, 江召兵, 吴广怀, 等. 快速重载作用下长浮桥运动响应的模型试验研究[J]. 船舶力学, 2010, 14(11): 1290-1296.
- [13] Sedarat H, Kozak A, Talebinejad I, et al. Nonlinear dynamic analysis of a track bridge structure designed for a floating bridge[M]. Topics in Nonlinear Dynamics, Volume 1. Springer New York, 2013: 37-45.

- [14] 付世晓, 崔维成, 陈徐均, 等. 移动载荷作用下非线性连接浮桥的动力响应[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 1004-1009.
- [15] 王 丙, 陈徐均, 江召兵, 等. 带式浮桥在不同移动荷载作用下的动力响应分析[J]. 应用力学学报, 2013, 01: 43-48+144-145.
- [16] Farhat C, Geuzaine P, Grandmont C. The discrete geometric conservation law and the nonlinear stability of ALE schemes for the solution of flow problems on moving grids[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 174(2), pp.669-694.
- [17] 管延敏, 叶恒奎, 陈庆任. 基于 ALE 有限元法二维液体晃荡的数值模拟[J]. 船舶力学, 2010, 14(10): 1094-1099.
- [18] Pratt, J.N., Bevins, T.L., Walker, B.E. and Ray, J.C., 2009. Transportable flotation system: U.S. Patent 7,481,176.
- [19] 江召兵, 沈 庆, 陈徐均, 等. 快速移动重载作用下浮桥的波动堆积和移动速度振荡研究[J]. 土木工程学报, 2009, 04: 93-99.

要闻集锦

D-Wave公司将交付全新2000Q量子计算机

据www.top500.org网站2017年1月24日消息报道, D-Wave公司发布了2000Q(具有2000个量子位)的量子计算机, 将提升解决问题的能力。该公司还宣布已经迎来了2000Q量子计算机的第一个客户, 一家致力于网络空间安全的公司——Temporal Defense Systems公司。

与2015年发布的D-Wave 2X(拥有1000个量子位)相比, 2000Q的量子位增加一倍, 并且计划今后量子位每两年增加一倍。长远来看, D-Wave这类机器潜力如何, 不少研究人员仍持怀疑态度。不过, 也有一些研究人员认为用D-Wave量子计算机解决机器学习、网络安全等难题已指日可待。

目前, 研究人员试图利用量子计算机找到新的使用方式。他们正在研究机器学习算法(波兹曼机), 用它来研究在线浏览量模式, 识别出网络攻击。到目前为止, 已经可以证明, 对于小型样本, 在识别诸如可能的

网络攻击等方面, D-Wave量子计算机要比传统计算机更高效, 也更快速。D-Wave的最新一代产品中包括一项特征升级, 当不同量子位组经历退火过程时, 这一升级后的特征能增加过程的可控性。D-Wave公司已经表明, 至少在一个例子中, 其量子计算机将某次计算速度翻了1000番。这一功能很关键, 有望为利用D-Wave量子计算机探索不同类型的机器学习算法(识别更多复杂的网络攻击模式)打开了一扇门。

Temporal Defense Systems公司表示将利用量子计算机独有的计算能力和最先进的网络空间安全技术, 来应对网络空间安全威胁, 为用户提供最高级的安全保护。该公司并未透露其购买2000Q机型的具体售价, 但据D-Wave公司介绍, 其2000Q量子计算机价值约1500万美元。

(肖 湄)