

# 大学生结构设计大赛中的计算机仿真分析<sup>1)</sup>

张炎圣<sup>2)</sup> 陆新征<sup>3)</sup>

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘要** 针对清华大学2006年结构设计大奖赛的命题而写, 命题是承受移动和冲击载荷的桥梁结构模型设计与制作. 说明通过将计算机仿真分析引入结构设计大赛, 有助于提高结构设计大赛的分析和设计水平, 对于促进土木工程的本科教学也有一定的意义.

**关键词** 仿真分析, 冲击载荷, 移动载荷, 约束条件

## 1 结构设计大赛简介

结构设计大赛由清华大学土木工程系于1994年发起, 至今已发展成全国、乃至全亚洲级别的结构设计大赛, 成为全国高校土木类的一个重要课外活动, 很好地促进土木类的教学和培养工作<sup>[1,2]</sup>.

结构设计大赛的命题一般要求学生用桐木或绘图纸等材料设计制作一个桥梁或建筑结构模型, 满足相应的承载力要求, 并运用所学的专业知识, 尽量使结构轻巧高效. 随着结构设计大赛的开展以及我国土木类本科生教学水平的提高,

题目的难度越来越具挑战性, 这就要求学生的分析、设计能力也要不断提高. 本文主要工作由清华大学土木工程系的本科生完成, 针对清华大学2006年的第12届结构设计大赛命题, 进行细致的分析工作, 达到了结构设计大赛提出的培养学生自主性、研究性、创新性的学习能力的目标.

## 2 本届结构大赛命题

清华大学2006年第12届结构设计大赛的命题是: 承受移动载荷和冲击载荷的桥梁结构模型设计与制作, 结构材料为桐木, 其单轴受拉极限强度的实验值为35 MPa. 要求选手按照净空、跨度以及承载力等要求制作桥梁结构模型. 加载时先将桥梁结构模型安置在铁架上, 不使用任何固定模型的夹具; 然后将组委会提供的桥面板铺上结构模型. 桥面板上沿长度方向均匀设置5个2.5 cm高小坡. 选手自动摇动手轮, 牵引一个15 kg的小车从桥的一端到达另一端. 加载仪器详见图1~图3.

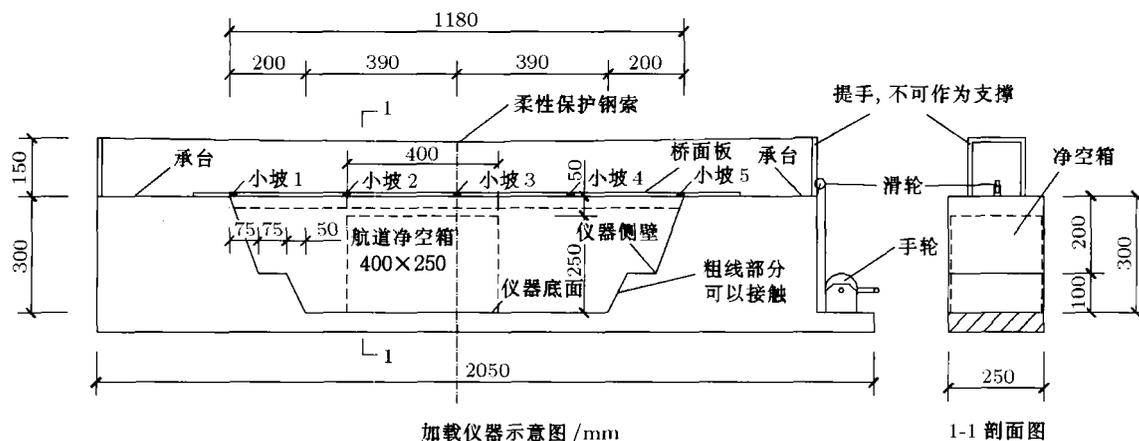


图1 加载台座

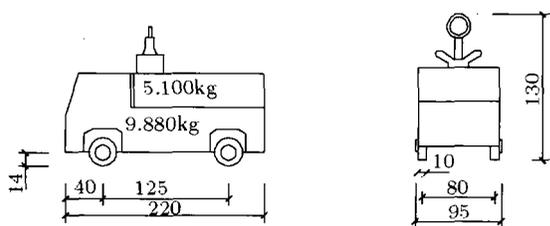


图2 加载小车

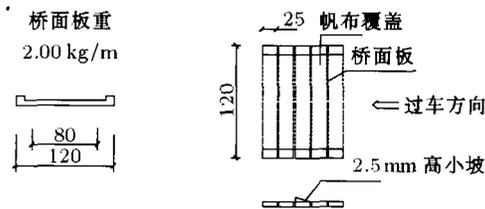


图3 桥面板

2007-04-05 收到第1稿, 2008-11-13 收到修改稿.

1) 清华大学骨干人才支持计划, 国家自然科学基金项目(50808106).

2) 张炎圣, 1984年生, 男, 福建福州人, 清华大学土木工程系2003级本科生.

3) 陆新征, 1978年生, 男, 安徽芜湖人, 清华大学土木工程系副教授. E-mail: luxinzheng@263.net

针对以上命题,在本次比赛中,选手主要关心的问题包括:

(1) 设置斜坡以后,小车经过斜坡后的冲击载荷如何考虑?

(2) 小车过桥的速度是由选手控制,小车的速度是慢一些好还是快一些好?

(3) 利用加载设备的台座侧壁提供侧向反力,这一约束条件的可靠程度如何?

由于涉及车轮和桥梁,以及桥梁和台座的接触摩擦,需进行非线性分析<sup>[3]</sup>,所以本文采用在非线性分析方面功能较强的 MSC.MARC 软件<sup>[4,5]</sup>对命题进行仿真模拟。

实际参赛者制作的桥梁结构形式可能多种多样,包括鱼腹梁桥,箱形梁桥,张弦梁桥,拱桥,等等。本文并不针对某个作品进行分析,仅是建立具代表性的拱桥模型,并通过改变有关参数,得出冲击载荷、约束条件以及小车速度的影响。其结论对拱桥适用,对其它结构形式的桥梁也有一定参考价值。

### 3 小车过桥有限元模型

#### 3.1 计算模型简化

因为铺设桥面板的需要,所以比赛桥梁结构均采用两幅主结构,再用横向支撑连成整体。因此,把分析模型简化为平面应力问题,即只研究一幅主结构,施加的小车载荷也取一半。在横向支撑足够的情况下,做以上假设是合理的。

#### 3.2 几何建模和单元划分

图 4 是小车过桥的几何模型,梁有 16 跨,总的跨度为 1180 mm;拱有 14 跨,总的跨度为 1030 mm。根据赛事组委会提供的材料,梁和拱采用 5 mm×6 mm 截面的木杆,其余构件采用 3 mm×5 mm 截面的木杆。单元属性设定,除了拉车的线采用杆单元,其余都用四边形单元划分。其中,小车的车轮以及桥梁的节点处单元划分较细。经过试验,桥梁结构划分的精细度达到了要求。桥梁的材料为桐木,小车材料为钢材,材性参数根据组委会提供的有关试验结果。

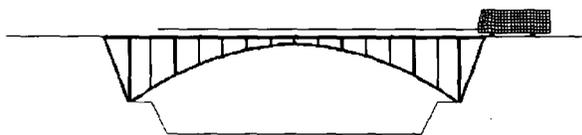


图 4 桥梁、铁架、小车的有限元模型

#### 3.3 连接和接触设置

对于本文而言,为了能够真实模拟小车过桥过程,连接和接触设置是分析的关键所在。其中,为了模拟车轮在桥面上的滚动,需要设置车轮和车身之间的连接。本文采用将车轮圆心和车轴节点的平动自由度耦合,而放松转动自由度的方法来模拟。这样,车身被拉着走的时候,车轮就会绕着圆心转动,从而模拟了小车的行进。

模型中建立了 3 对接触体:车轮-铁架;车轮-桥梁;桥梁-加载台座。3 对接触体的摩擦系数都定为 0.5<sup>[4,6]</sup>。其

中,车轮与桥梁都为变形体,而加载台座为刚体。

#### 3.4 边界条件设定

首先给整个模型施加重力,待其在重力下受力平衡后对牵引绳施加恒定牵引速度,为了分析速度大小的影响,对  $V=20\text{ mm/s}$  和  $40\text{ mm/s}$  进行了参数讨论。

### 4 模拟结果及其分析

#### 4.1 关键构件和关键点

计算结果表明,梁和拱的中间八跨是危险的区域(图 5)。又因桥梁结构对称,计算结果表明受力情况也基本对称,所以仅分析右边半跨,计算结果进一步表明,图 6 中 6 个点的 Von Mises 应力最大,峰值在 25~35 MPa 之间,很接近组委会提供的桐木抗拉极限的实验值。而且这 6 个点在主要构件(梁和拱)上,其破坏对整体结构的影响很大,所以下面的分析都针对这 6 个点的 Von Mises 应力展开。

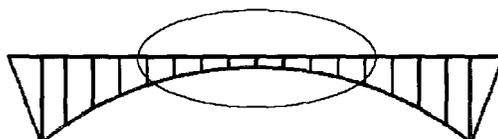


图 5 结构的危险区域

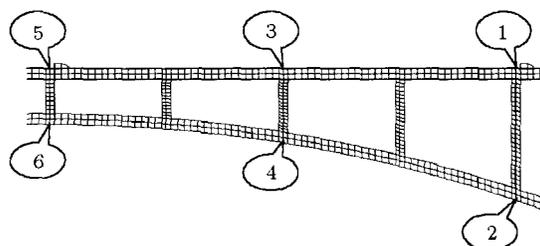


图 6 危险点编号

#### 4.2 冲击载荷的放大效应

分析结果表明,设置斜坡后,冲击载荷产生的放大效应还是相当明显的。其中,3,4 两点由于冲击作用不是在应力达到峰值的时候出现,所以对承载力需求的影响不大。但是对于 1,2,5,6 四个点,冲击作用正好在应力达到峰值的时候出现,使得应力峰值有所提高。其中,2 号点和 6 号点提高最多,如图 7,图 8 所示,其横轴表示小车行进的位置,纵

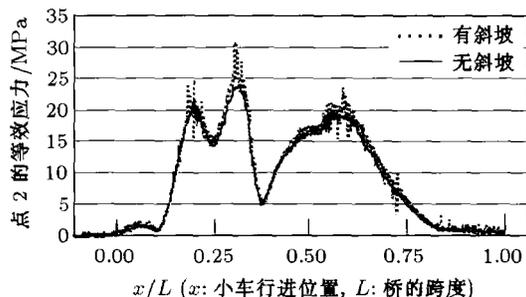


图 7 危险点 2 的 Von Mises 等效应力

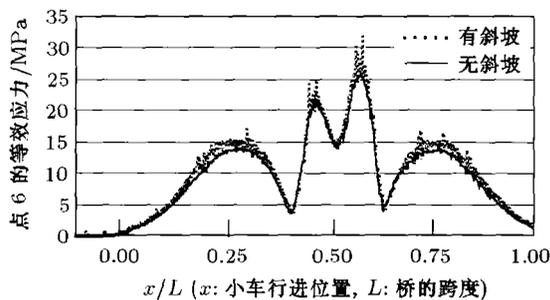


图8 危险点6的 Von Mises 等效应力

轴表示等效应力的值。可见, 2号点和6号点的等效应力分别被放大30%和24%,从而接近材料强度极限值。所以, 建议选手设计时把静载荷增大30%以考虑冲击载荷的影响。

#### 4.3 速度大小对结构的影响

本届结构设计大赛, 不仅较量设计水平、制作水平, 还较量加载技巧, 因为小车速度由选手自行控制。那么, 小车速度是快一些好还是慢一些好? 通过比较小车速度为40 mm/s和20 mm/s两种工况下危险点的等效应力时程, 可知速度的提高, 对6个点的峰值应力都有不同程度的提高。尤其是危险点5和6, 提高的幅度分别达到33%和40%(图9, 图10), 使得应力峰值超过了材料强度极限值。所以, 建议参赛选手在规则允许的范围内, 尽量放慢小车的速度。

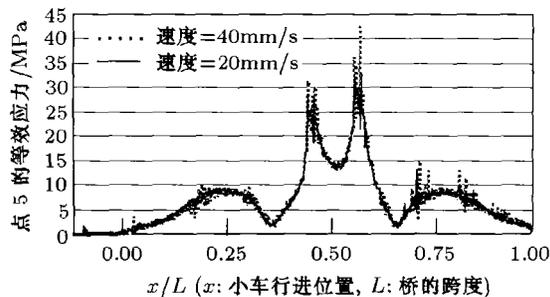


图9 危险点5的 Von Mises 等效应力

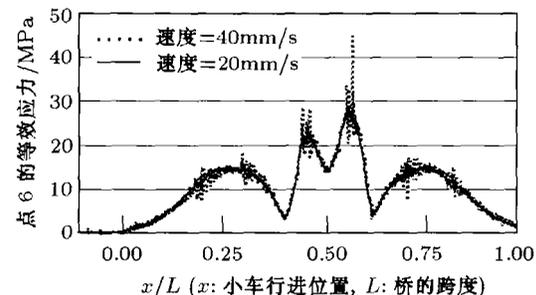


图10 危险点6的 Von Mises 等效应力

#### 4.4 约束条件的可靠程度

往届的桥梁结构模型在加载时, 往往用夹具把模型固定在台座上。然而今年没有任何固定装置, 只是提供台座侧壁。对于拱桥而言, 拱脚会产生较大的推力, 所以侧壁反力的可靠程度尤其重要。通过仿真模拟, 可以分析是否会出现摩擦

力不足导致的结构整体位移, 以及约束条件改变后危险点的应力有何变化。

通过比较梁端、拱脚完全约束和仅靠结构模型和台座摩擦接触两种情况下, 危险点1~6的等效应力时程, 可知依靠摩擦力和侧壁反力, 能够保证结构模型不发生整体位移, 但是相比梁端和拱脚完全约束的情况, 危险点的等效应力峰值都有提高。提高幅度最大的是第1点(图11), 达到68%; 幅度最小的是第5点(图12), 也达到了25%。因此可见, 今年的命题较之往届难度有了较大的提高, 同时建议选手如果用完全约束的简化模型进行计算, 要对计算应力适当增加。

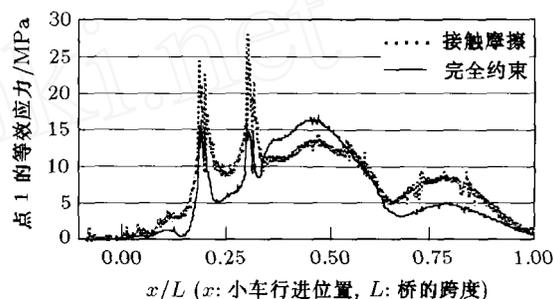


图11 危险点1的 Von Mises 等效应力

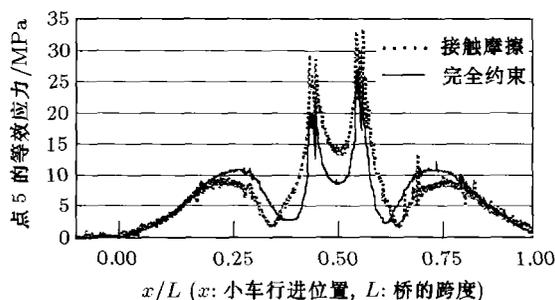


图12 危险点5的 Von Mises 等效应力

## 5 结论

(1) 随着土木类本科生的教学水平不断提高, 结构设计大赛的难度也逐年加大。以本文的拱桥模型为例, 斜坡的设置, 小车速度的增大, 以及约束条件的弱化, 要求在设计时留出适当的安全储备, 对学生概念设计提出了更高的要求。

(2) 面对越来越具挑战性的结构设计大赛, 仅依靠静力分析进行分析, 设计已经不能完全满足大赛命题的要求, 很有必要在此基础上进行有限元仿真模拟, 以提高分析水平和设计质量, 同时提高本科生自主性、研究性、创新性的学习能力。

## 参考文献

- 李越, 孙枕戈. 大学生创新能力培养研究. 清华大学教育研究, 2002, 5: 35~40
- 刘传文, 聂风华, 苏阳等. 清华大学学生课外学术科技活动调查与研究. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2001, 16(S1): 121~125

(下转第102页)

在流体力学经典实验中,另一个著名的实验是由英国剑桥大学的 G.I. 泰勒教授 (1886~1975) 完成的,他对流体力学的巨大贡献使他被誉为 20 世纪除普朗特和冯·卡门之外的第 3 位流体力学大师。在测量流体黏性系数的黏度计中,流体常常被放在同轴的圆筒组成的环形域中,转动内筒并测量出转动的角速度和所需的转动力矩,就可以推算出被测流体的黏性系数 (见图 5)。G.I. 泰勒对实验室中黏度计内的流场发生了兴趣,他了解,随着内筒旋转角速度的增加,环形域内流体的流动会发生什么变化? 他的实验研究表明,一个关键的判据是与筒旋转角速度有关的无量纲数——泰勒数。随着泰勒数的增大,环形域内的流动会不断失稳形成各种复杂的旋涡。从静止流体开始,当内筒角速度较低时,可以观察到稳定的轴对称流动,流体微粒的轨迹是一系列同心圆;超过第一个临界值后,出现另一种稳定的轴对称流动,在沿轴向排列的涡环中呈现一种胞腔结构,在相邻的胞腔内流体微粒以反向旋转的空间轨迹运动,形成所谓的泰勒涡 (见图 6); 大于一个更高的临界值后,流动在过渡期后变得不稳定,胞室中出现沿圆周行进的波,形成波状涡;随着泰勒数的进一步增大,流场中会出现结构更加复杂的辫子涡 (见图 6) 和麻花涡,最后成为湍流<sup>[5]</sup>。以上库叶特-泰勒流的复杂程度不亚于圆柱绕流的尾迹,流场的多次失稳和分岔特性一直是流体力学界关心的热点问题,以泰勒-库叶特流为题目的国际研讨会两年一届定期召开,第 16 届库叶特-泰勒流国际研讨会将于今年 9 月在美国普林斯顿大学召开。

实验是科学研究的重要一环,也是检验理论推演结果的唯一标准。提到科学实验,一些人往往联想到现代化的实验室、昂贵的设备和精密的仪器。比如在加速器中裂解亚原子

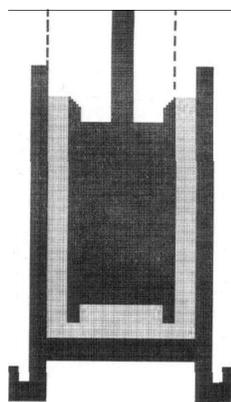
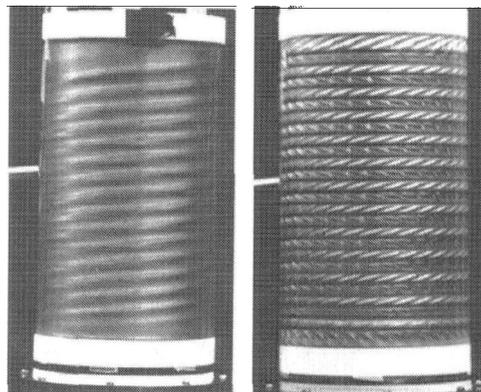


图 5 圆筒式黏度计示意图



(a) 泰勒涡

(b) 辫子涡

图 6

粒子,或在大型风洞中测试新型飞行器的气动力性能,这些实验研究需要大型的、巨额的经费和包括高速计算机和各种检测设备在内的现代科学技术的支持。但是,这仅仅是问题的一个方面,以上流体力学经典实验表明,使用简单的设备可以作出最出色的科学实验,科学实验最关键因素是人类聪明的大脑和创新能力,用最简单的方法解决最复杂的问题,探寻最基本的规律,这是许多杰出科学家一直为之奋斗的目标。以上这些流体力学经典实验的共同之处,都是用简单的仪器和设备,比如玻璃管、水槽和同轴旋转的圆筒,解决了学科发展中最基本的一些科学问题和复杂现象,回答了人们长久以来的困惑和不解,建造了科学史上一座座真正的丰碑,是当之无愧的人类智慧的结晶。

### 参 考 文 献

- 1 Nigel Goldenfeld, Leo P. Kadanoff, Simple Lessons from Complexity. *Science*, 1999, 284: 87~89
- 2 Reynolds O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. 1883. *Philos. Trans. R. Soc.* 174: 935~982
- 3 史里希廷 E. 徐燕候, 徐立功, 徐书轩译. 边界层理论. 北京: 科学出版社, 1988
- 4 Milton Van Dyke. *An Album of Fluid Motion*. Stanford, California: The Parabolic Press, 1982
- 5 Taylor GI. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A* \ bf223), 1923, 289

(上接第 112 页)

- 3 陆新征, 江见鲸. 计算机仿真技术在分析特殊载荷问题中的应用. *计算机工程和应用*, 2002, 38(7): 12~13
- 4 江见鲸, 何放龙, 何益斌等. 有限元法及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2006

- 5 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析. 北京: 清华大学出版社, 2005
- 6 陆新征, 陈勇. 某特大型筒仓侧壁压力有限元分析. *山西建筑*, 2006, 32(2): 1~2