



上海大学  
Shanghai University

## 课程论文

COURSE PAPER

**上海大学图书馆有限元模拟分析**

**台湾宜兰南方澳大桥断裂模拟与分析**

翟晗锋

理论与应用力学

17121632

# 上海大学图书馆有限元模拟分析

翟哈锋

(上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

**摘要:** 上海大学图书馆是上海大学的标志性建筑, 其处在上海大学的中心地带。上海属亚热带季风性气候, 常年多雨多风, 在夏季常常会遇到强烈的台风。因此, 对于图书馆进行风载测试具有重大意义。通过使用 ANSYS 中的 workbench 模块, 可对图书馆进行建模并使用 fluent 进行风力加载模拟。进行模拟后通过观测模拟结果中的应力应变可以分析出该建筑在遭遇强风时哪些部分较脆弱, 如何能够更好的进行改进。这些研究和视角可以帮我们更好地理解建筑设计及其风载效果。

**关键词:** 有限元 流体力学 结构计算

**中图分类号:** O302

**文献标志码:** A

## The FEM Simulation and Estimation of the Library of Shanghai University

Zhai Hanfeng

(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, No.99 Shangda Rd,  
Shanghai 200072 China)

**Abstract:** The library of Shanghai University is a symbolic building in Shanghai University, which is located at the center of Shanghai University. Shanghai is located in the subtropical area, which is rainy and windy all year round and will sometimes encounter Typhoon in summer. Thence, it is significantly important to measure the ability of the library to resist wind load. By using the module of workbench in ANSYS could help us work out how the structure reacts under the load. Furthermore, it is implementable to estimate the weak point of the structure by observing the emulation of the process and then refine the structure. These insights provide guidelines for the development of architecture design and fluid mechanics.

**Key words:** finite element method; fluid mechanics; structural calculation

## 引文

通过在《有限元及应用》这门课上的学习, 我学到了如何利用有限元方法通过计算机软件对传统的力学问题进行建模计算和分析。同时, 我们也学习到了有限元方法矩阵运算的本质和其不同网格的性质、有应用的领域等等。通过利用有限元仿真软件, 我们可以对结构、热学、流体等物理过程进行模拟计算, 并通过这些仿真结果优化相应的设计。

因为对于流体有着一定的兴趣, 同时结合上海经常多风的外界条件; 我选择了上海大学地标性建筑图书馆进行风载模拟。同时, 我认为进行相关的模拟首先可以帮我更好的了解到这座图书馆在遭遇强风时较真实的受力情况和变形情况, 同时也可以学习到图书馆周围的空气的流动情况; 观察这些模拟结果可以帮助我更好地理解弹性力学中学到的对物体内力分析方法和流体力学中学到的流体流动的性质, 同时也为我未来进行其他学习研究打下良好基础。

## 1 建模

### 1.1 外层建筑建模

根据图片观察可知，因为其侧面最终汇与一点，从这两个角度观察可以分析出图书馆的主体结构是一个三角形；又因为从正面观察可以发现其正面是一个向内凹的圆形侧面，因此可以判断出整个图书馆主体结构是分为两层的，外层是一个三角形挖去一个圆柱形的立体形体，而内层更像是一个圆锥的外截面。

所以，在建模中，首先对外层结构建模，首先在  $xz$  平面绘制如图 2 所示的挖去半圆后的三角形平面，其中，相关数据为三角形的高为 30m，底为 40m，挖去圆的半径为 13m。之后在 Geometry 模块中 DesignModeller 打开方式中，使用 Extrude 命令，将图书馆外层结构拉伸成体。拉伸高度为 10m。拉伸结束后外层结构示意图如图 2 右图所示。



图 1 上海大学图书馆外观图

Fig. 1. The exterior of Shanghai University Library

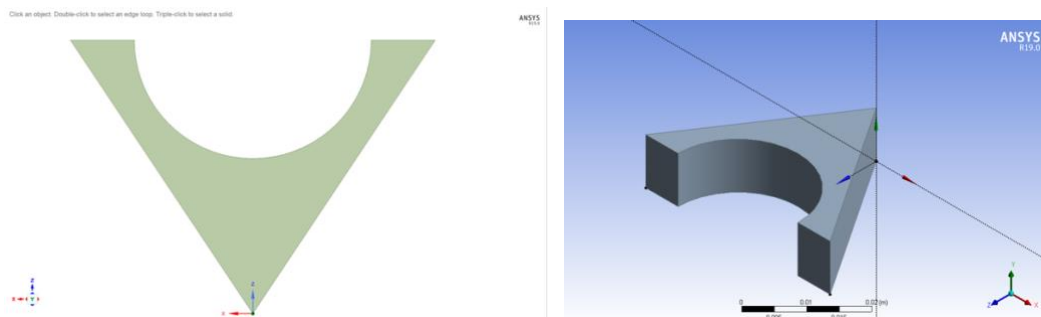


图 2 上海大学图书馆外层结构建模图

Fig. 2. The modelling figure of the outside shape of the library

### 1.2 内层建筑建模

根据上一部分中对于图书馆结构的分析中已知了图书馆的总体构建。因此，在创建了外层结构的模型建模后，需要对内层结构进行建模。由外观图可以看出，内层结构是从上至下截面圆面积逐渐减小的趋势；因此有很多种建模方式都可以实现这一特征，本文中，我先在图书馆外层结构沿  $z$  轴（沿三角形高方向）比三角形底向内移 2m，建立新的坐标轴

（称为坐标系 1）；然后再将 y 轴移至紧贴图书馆外层结构的内壁建立新坐标轴（称为坐标系 2）；之后紧贴内壁创建梯形，再绕坐标轴 1 旋转（采用 **Revolve** 命令），生成整体的图书馆主体结构，如图 3 所示。

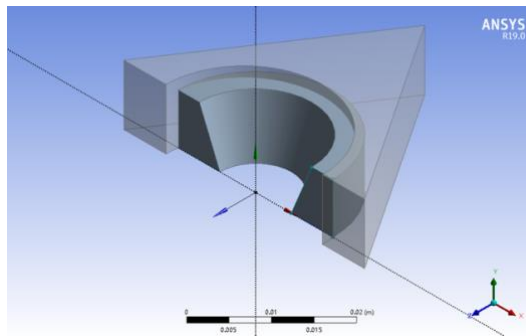


图 3 图书馆主体结构图

Fig. 3. The figure of the main structure of the library

### 1.3 图报厅建模

同时，图书馆报告厅也是图书馆整体结构中必不可少的一部分。同时，该部分是经常被忽视到的。通过对图书馆报告厅的全方位观察与分析，图报厅的结构是一个扇形结构形成的柱，通过一个立方体与图书馆的主体结构相连接；因此，其建模思路也相对较清晰，首先建立一个矩形平面与图书馆主体结构相连，再次使用 **Extrude** 命令，将其拉伸成体；然后，对于图报厅的环绕结构有两种建模思路，我均尝试了：一种是在底面建立扇形平面，然后使用 **Extrude** 命令拉伸成体；第二种测试在矩形区域连接处建立另一矩形，然后在矩形的底边中点建立新的坐标轴，然后对新建立的矩形平面对该坐标系竖直轴使用 **Revolve** 命令。通过任一方法都可完成图书馆结构的构建。之后使用 **Boolean** 操作中的 **Unite** 命令将图书馆的各结构全部选中，使其结合成为一个整体。同时，点击 **Engineering Data**，在选择材料选项中添加混凝土（Concrete）。完整建模后图书馆整体的外观结构图如图 4 所示。

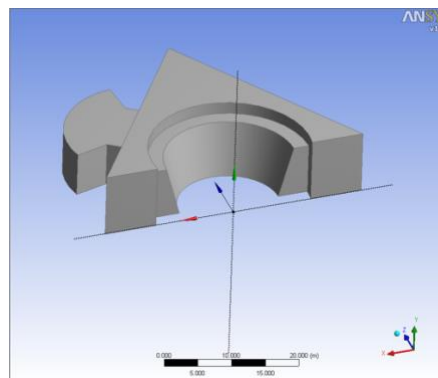


图 4 图书馆整体结构图

Fig. 4. The figure of the whole structure of the library

### 1.4 流域建模

完成了对图书馆整体结构的建模，因为流体分析的需要，我们还需要对图书馆建立流域。建立流域的方法有很多种。本次建模中，首先将工作平面调整至 xz 平面；然后在 xz

平面中，在图书馆底部结构的基础上建立一个相对较大的、可以包裹住图书馆整体结构的矩形；然后，对该矩形采用 **Extrude** 命令使其拉伸成体，注意，此时在使用 **Extrude** 命令时要选择 **Add Frozen** 选项，避免流域结构和图书馆的结构合成一个整体。

建立完这个立方体（流域结构）后，我们要进行 **Boolean** 操作中的 **Subtract** 操作，这一操作的目的是要将流域结构中同图书馆重叠部分挖去，方便之后步骤进行流体分析。同时，需要注意的是，在进行 **Subtract** 操作时，要选择保留原始结构（**Preserve Tool Bodies**），这样做的目的是为了之后步骤对图书馆固体分析时可以观察到图书馆结构。同时，考虑到流场中流体的流入和流出方向，分别选择流入面和流出面，在 **Geometry** 选项中添加 **Group Selection** 并分别命名为 **Inlet** 和 **Outlet**；同时，选中被减去的图书馆结构接触面并设置为 **Fluid Walls**。完成全部操作后，流体的结构形态如图 5 所示。

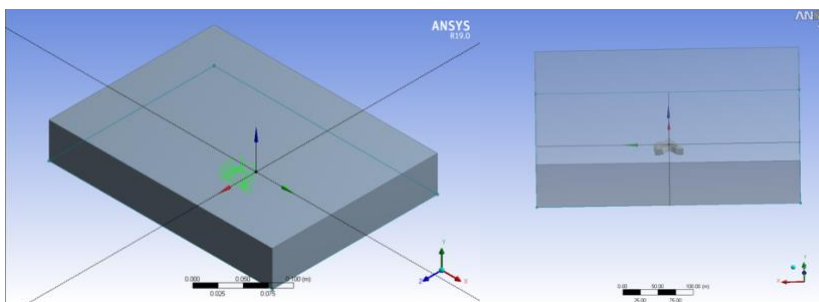


图 5 流场结构图

Fig. 5. The figure of the structure of fluid field

## 2 网格划分

### 2.1 固体网格

在完成图书馆建模部分的工作后，要进行到运算前沿工作中另一非常关键的工作，即是画网格。网格绘制的疏密和选择影响甚至决定了仿真结果的真实性和可靠程度；同时，网格结构的绘制也影响着计算机内存的占用和运算情况。

首先需要做的就是对与固体部分，也就是图书馆的结构进行网格绘制；先选择该结构进行最基础的 **Method** 操作，然后对于与流体接触相对较密切的前端弧线部分进行适当的 **Meshing** 和 **Sizing** 操作，使得相对应部分的网格更加密；网格绘制结果如图 6 所示。

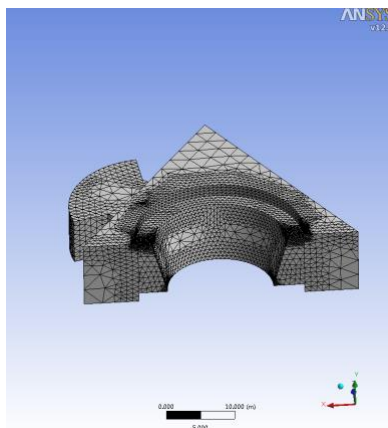


图 6 图书馆结构网格图

Fig. 6. The meshing of the structure of library

## 2.2 流体网格

采用前文中相同的思路，对流域场进行网格划分；同样选中被挖去的结构部分，进行相应的网格优化，其他部分则采用计算机默认 Method 网格。相应部分网格如图 7 所示。

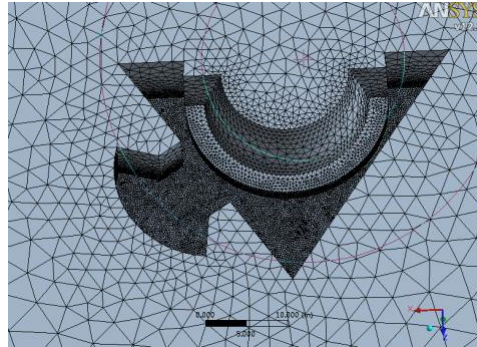


图 7 流场中图书馆结构网格图

Fig. 7. The meshing of the structure of library in fluid field

## 3 施加载荷及相关条件

完成了网格操作后，打开相应的Fluid模块中Solution选项进行问题求解；在求解界面中，首先设置重力，其后在Models选项中启用湍流模型，选择Viscous Laminar中的k-epsilon (2 eqn) 模型，其他保持默认；然后选择流体材料：在Materials选项中点击在Fluent Database库中选择空气为流体类型；同样操作，在Cell zone Conditions中确定区域为流体并选择流体类型为空气；

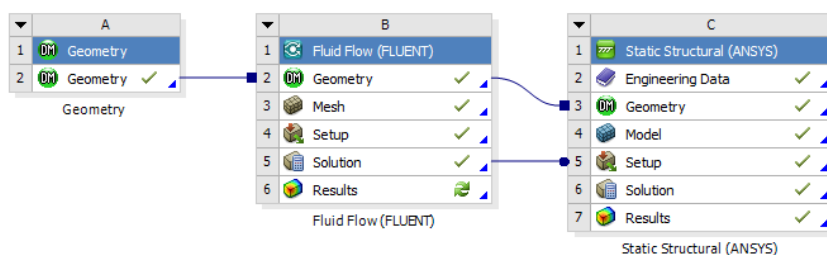


图 8 workbench 操作界面

Fig.8. The operating interface of workbench

其后，需要设置边界条件，这也是求解的关键步骤；在边界条件选项中选择流体入口（Inlet），湍流强度和湍流度为 5，而进口速度选择 20m/s；其中，20m/s 是 8 级风的强度，选择该强度也是为了检验该建筑在如此强风情况下的各种力学情况。



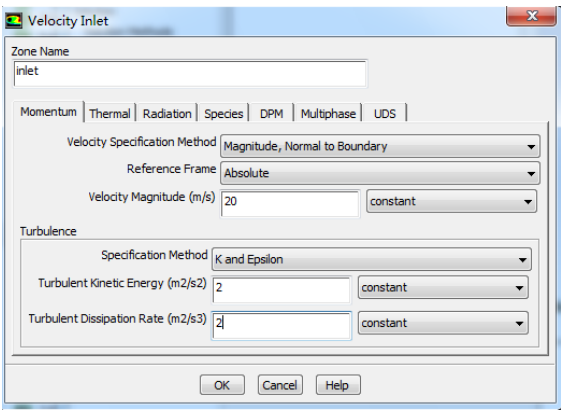


图 9 边界条件的设置

Fig.9. The setting of the boundary conditions

同时，在求解前可以看到整个流域场的进口、出口和整体网格划分状况如图 10 所示。

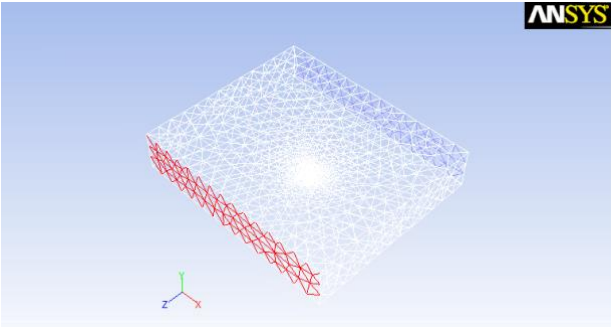


图 10 流域网格划分情况

Fig.10. The meshing of the fluid field

## 4 计算及结果

### 4.1 流域结果

完成所有条件的设置之后，对整体进行求解，设置迭代步数为 700 步后进行计算，计算完成后，首先打开后处理中的流体分析，沿图书馆中线设置一平面就整个流场劈开，放大该平面就可以观察到流体与图书馆想接触的部分的受力如图 11 所示。

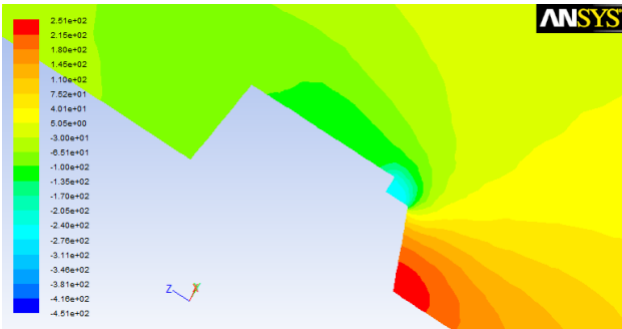
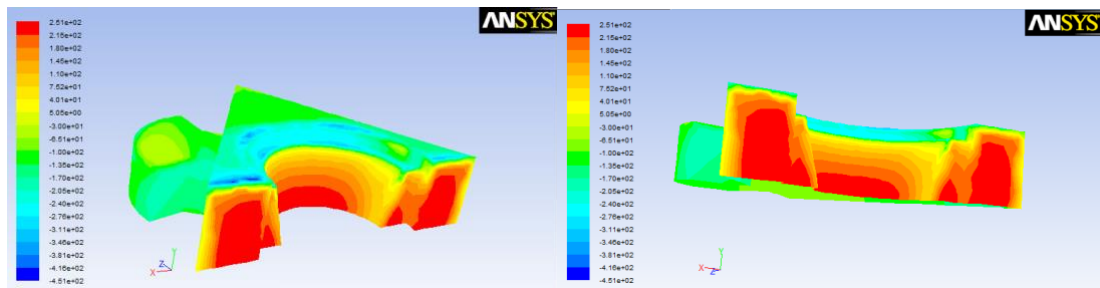


图 11 流场计算结果

**Fig.11.** The calculating results of the fluid field

对图 11 进行观察分析，我们可以看到在整个流场中，图书馆下方结构，即整个图书馆的入口处，进入到图书馆正门之前的一段距离之内，整个流场中的风力是最强的；就意味着，在大风从正方向吹向图书馆的时候，在进入图书馆之前的部分是风最大的。同时，我们也可以看出整个风力的递减趋势是沿着一根包围住图书馆前结构的曲线递减的。

在对流场进行完分析后，我们需要对图书馆的结构进行分析；在结果显示中，勾选图书馆的结构进行观察，观察结果如图 12 所示

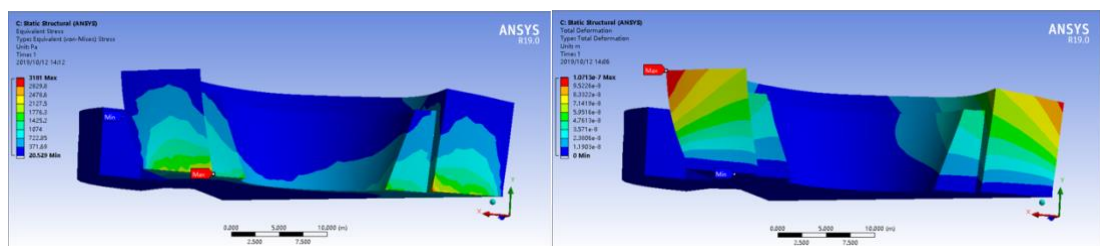
**图 12** 图书馆流场计算结果**Fig.12.** The calculating results of the library structure in fluid field

通过对图书馆结构在风场中的显示结果，我们可以看出，图书馆正对风场的五个面首风最强，且具有从中心向四周递减的趋势；同时，图书馆的上方结构中出现了一部分区域风力处在极小值。同时，在风正向吹向图书馆时，图报厅的受风很小，只有上方部分区域达到首风的平均大小。通过这些分析我们也可以看出，图书馆整体的建筑结构在面对风正向吹来时，正向五个面的靠中心的区域都是受风强度较大的区域。

## 4.2 固体结果

完成对流场进行的分析后，需要对图书馆结构的固体进行分析。首先如图 8 确定整个流体部分的计算完成并且结果已经确定；然后勾选静态结构分析（Static Structural）中的 Model 模块进行分析。

进入模块后，将整个流场部分进行解除效果（Suppress）操作，将流场的功能解除；同时选中固体部分重新进行上述的画网格操作，网格优化等并进行更新。然后，在载荷中引入上述步骤中已经计算完成的风力载荷，选择接触面为固体区域并进行计算。完成计算后点击选择图书馆结构等应力（Von-Mises Stress）和变形（Deformation）进行观察，观察结果如图 13 所示。

**图 13** 图书馆固体结构应力与变形**Fig.13.** The stress and deformation of the library structure



通过对固体结构进行的观察，我们可以得出如下结论：首先通过对左图应力的观察我们可以总结出应力的分布与上述流体部分风力强度的分布规律是相同的，应力是在对风面最强且由中心向四周递减；同时，对于变形的分析我们也可以看出，变形是由中心向四周扩散的变形趋势，也意味着在图书馆遇风载荷时，顶层的建筑物结构变形较大；还可以观察出图书馆顶层的外沿两个角部分是变形最大的区域。

## 5 力学分析

通过上述对于图书馆的各部分，各个角度的分析我们已经可以得出图书馆建筑结构在面对 8 级强风时的受力与变形规律；在已知这些变形规律后，我们需要利用我们已知的力学知识再结合得出的变形规律对图书馆进行力学分析和结构优化并提出优化建议。

首先，根据上问对于图书馆结构的场风中流体分析和结构分析和固体结构应力分析（图 11、图 12 和图 13）均显示出图书馆正风面由外向内、由上至下的应力强度和风场强度逐渐增加、尤其是根据图 11 中的流场分析可以明显的观察出风力在建筑结构的坡底有明显的增强和集中现象，因此进行如图 14 所示结构优化。

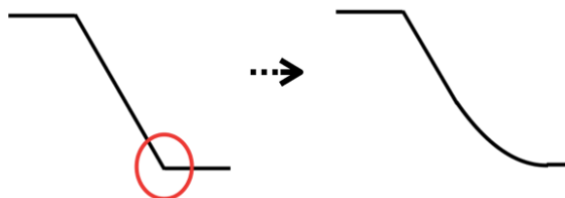


图 14 图书馆受风结构优化

Fig.14. The refinement of the library structure

如图 14 所示，因为建筑结构和地面所形成的明显的棱角（图中红色区域标记），致使了风强度在此处的集中和流体无法顺畅流通；若将结构进行如图所示优化，将此处改为弧形，将相对的减少流体在此处与建筑结构题的摩擦，同时对此处的风里有明显的缓解；又因为此处是图书馆的入口部分，所以对此处进行优化后学生在进入图书馆前受到的风强度将减小，这对于体验来说是一大明显改善。

同时，根据变形分析（如图 13 右图所示），图书馆在受风时，建筑结构的变形趋势是向四周外张的趋势，并且整个建筑结构最外侧的两个角（图 15 红色区域标记）是变形最大的区域；这一变形趋势短期内不会有明显影响，但在上海这一多风区域，长期的变形会使建筑结构不稳固。因此，加强整体建筑的稳固程度非常重要；所以，对图书馆进行如图 15 所示结构优化。

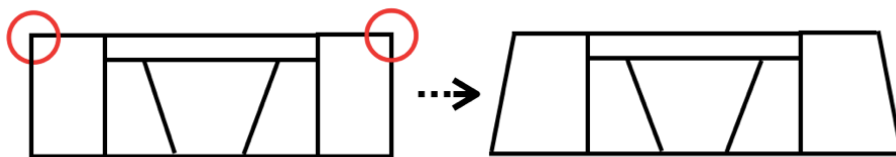


图 15 图书馆受风结构优化

**Fig.15.** The refinement of the library structure

在该优化方案中，为了如图 13 右图所示的变形趋势，将图书馆的底部加宽，改变原有的竖直建筑结构，这样的结构首先可以抵抗风强度较大时建筑物向四周外伸的变形趋势；同时，这样的建筑结构还能够降低整个建筑结构的重心，提高整体结构的稳固和牢固性。

## 6 学校整体分析

同时，为了更真实的分析整个上海大学校园的流体流动情况以及图书馆周遭建筑的流动受力情况；对图书馆及其周围的建筑进行建模分析计算也是必要和重要的。因此，通过多角度的图片和视频对图书馆进行观察和分析，可以大体总结出上海大学图书馆周围建筑物的排列方式。

**图 16** 图书馆及周围建筑结构图**Fig.16.** The surrounding buildings around the library

如图 16 所示，我们可以看出：在图书馆的东侧方向，有一系列的建筑沿与图书馆三角形斜边平行排列的建筑物，为学生宿舍。这一系列建筑可以简化为用平行排列的表示的等距立方体。因数量众多，在建模过程中简化为三个；同时，在图书馆的西侧方向，有三栋与图书馆底边平行排列的等距建筑物，其分别为 E、F、G 教学楼，在建模中依然中立立方体进行简化表示；同时，在这三栋教学楼的南部，有 J 教学楼，此处简化为扁平的圆柱体表示。

完成建模后，采用同上述相同的步骤。对相应的结构进行画网格、施加风载、流场模拟计算。完成计算后，观察计算结果。

其中，图书馆周围建筑在风载下所受的静压力如图 17 所示。静压就是我们寻常意义上的压力，可以用压力表测量获得。其值是一个绝对压力值，但是在软件中表现为一个相对于操作压力的相对值。根据该图，我们可以看出，在风载下，周遭建筑物正对风向的角度受风压力较大；同时，在正风吹过建筑上方的一片小区域会出现负压，这个现象可以用流体力学中学到的伯努利原理来解释：当流体流过物体表面时，其上方区域流速较快，压力即减小，出现蓝色的负压区域。

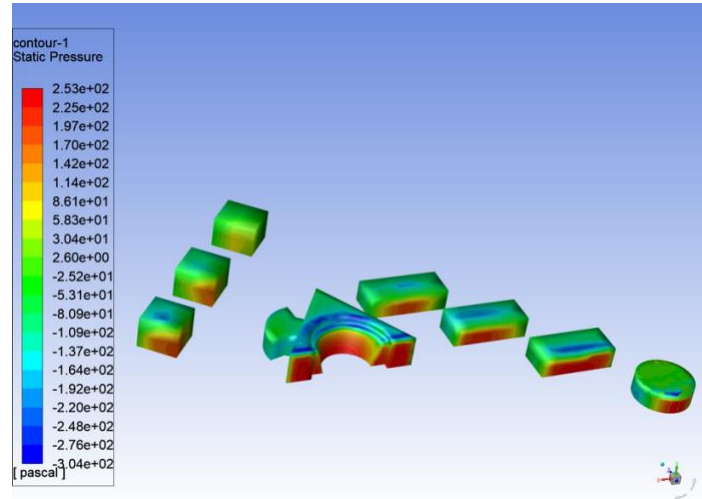


图 17 图书馆周围结构受风静压力

Fig.17. The static pressure of the library and its surrounding buildings

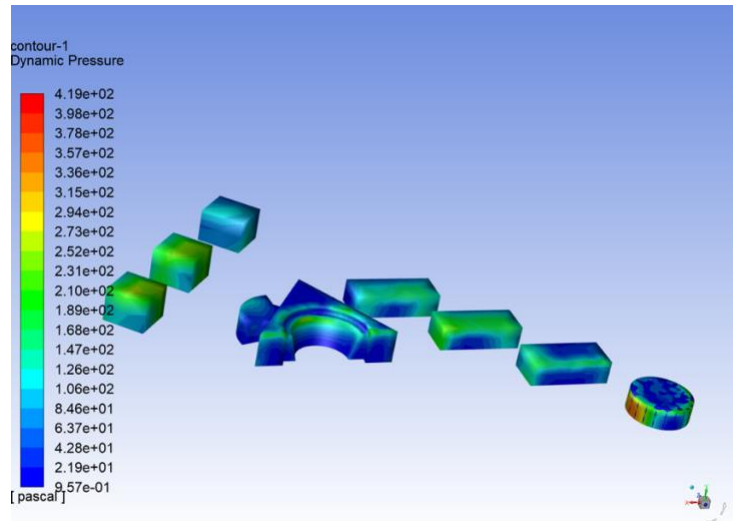


图 18 图书馆周围结构受风动压力

Fig.18. The dynamic pressure of the library and its surrounding buildings

根据图 18 中的动压力显示图，可以观察到整体建筑群的动压与静压力的分布明显区别，二者的分布规律基本相反。首先，动压是与速度有关的。其值为密度与速度平方的乘积的一半。因此很容易得知：在不可压流动中，速度越大的位置，则动压越大。而在该分析结果中，我们可以看出流体流经建筑物时，在整体建筑物的上方区域动压较大，也同时可以推出流体速度较大，这也符合了上述对于静压力的分析。

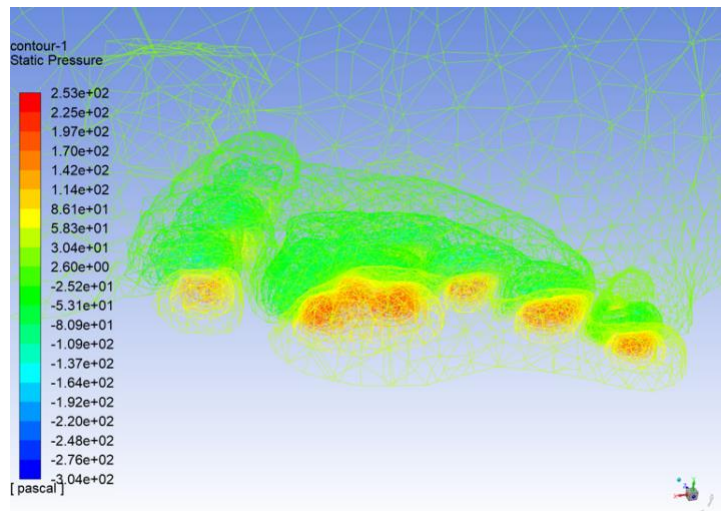


图 19 图书馆周围流体受风静压力

Fig.19. The static pressure of the environmental fluid around the library and its surrounding buildings

最后，观察整体流体在流经建筑群时的静压力，也可以分析出周围部分的流体受力较大，因此，风较大。由图可观察出，与建筑相接触的流体部分受压力较大，这也符合常识判断。同时，流经建筑群的流体在其前方区域受静压力较大。

## 7 总结

在对整个上海图书馆结构利用有限元计算软件分析的方法进行了相关的力学分析后，值得注意的是，上海大学图书馆这一地标性建筑整体的设计还是非常科学和稳定的；但同时，我也意识到，这个建筑在设计方面依然有很多的不足，比如上文中分析到的图书馆结构在入口周围有明显的流体集中导致底部的风强度很强，这对于进出图书馆的人是并不是友好的体验，也因此我进行了如图 14 所示的优化方案，其目的是为了减少入口周围处的流体集中。同时，根据对与固体的变形分析我们也可以看出在面对强风时图书馆结构的外伸变形对于整个图书馆这一巨大的结构造成了不稳固的隐患，因此我改变图书馆原有的竖直结构并进行了如图 15 所示的优化，其目的是为了抵抗过大的变形和增加图书馆的重心。

但同时，我的优化方案是否会影响图书馆原有的美学设计和设计思想均没有纳入考量范围之内。并且，上海地区虽然多风，但是 20m/s 的 8 级强风确实不常见，利用如此强风进行模拟旨在观察建筑结构在相对极端的条件下的力学性能。还需提到，ANSYS 软件的 workbench 模块仍有很多其他模块在本次模拟仿真中并未充分利用，比如可以对图书馆结构进行热学分析、抗振分析等等。因此，仍有更多的工作有待开展和持续。



# 台湾宜兰南方澳大桥断裂模拟与分析

## The Simulation and Estimation of the Fracture of Taiwan's Nanfang'ao Bridge

### 1 背景简介

南方澳大桥（英语：Nanfang'ao Bridge）为跨越台湾宜兰县苏澳镇南方澳渔港的跨港大桥，串联南方澳环状路线的重要建设，亦是当地的著名地标。前身为 1976 年建成之跨渔港航道高架桥（昵称：驼背桥），后为利于渔船航运，1998 年 6 月于该桥北方新建双叉式单钢拱桥型式的南方澳大桥，旧桥于 2000 年 4 月拆除。2019 年 10 月 1 日上午 9 时 30 分发生桥体坍塌意外，造成 6 人罹难、12 人轻重伤，以及三艘渔船与一台油罐车损毁。交通部规划 3 年内完成重建新的跨港大桥。



图 1 南方澳大桥断裂前后对比图

Fig.1. The figures of Nanfang'ao Bridge before and after the fracture

### 2 桥梁知识

根据所学力学知识对拱结构进行分析可知，拱式结构可以将桥面的竖向载荷转化为一部分的水平推力，即是对两岸边的水平载荷；而随着拱截面弯矩地减小，拱此时主要承受压力，拱和桥体的截面应力分布如图 2 所示。

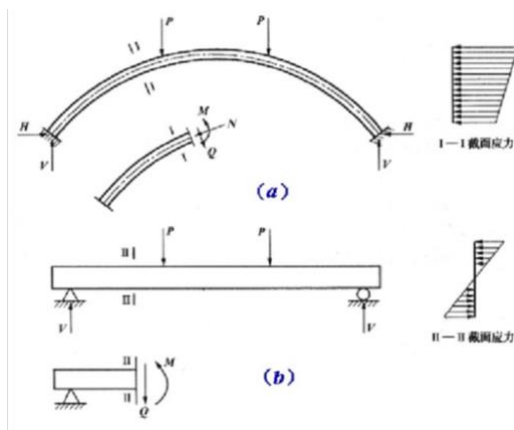


图 2 拱结构的力学分析

**Fig.2.** The mechanical analysis of the arch structure

因此，拱桥的拱结构也同时存在诸多优缺点。首先，该拱结构跨越能力较大、可节省大量的钢材和水泥、耐久性好且维护费用少、并且形式多样而且外形美观。但是，这样设计桥梁也有诸多缺点。首先，这种桥梁跨境大时自重较大、同时因为拱桥结构具有将竖向载荷转化为水平推力的特性增加了下部施工的工程量、并且多孔连续拱桥互相影响需要采用复杂措施、且上承式拱桥建筑高度大可能会增加纵波振动。但是，拱桥结构依然在世界诸多地区和国家被使用，依然是斜拉桥和吊索桥的竞争对手。

拱桥的结构由上部结构和下部结构构成。上部结构由主拱圈和拱上建筑构成；下部结构由桥墩、桥台和基础。拱圈最高处被称为拱顶，拱圈与墩台连接处为拱脚。拱圈横截面型心的连线称拱轴线，拱圈上曲面称拱背，下曲面称拱腹，起拱面与拱腹的交际线称起拱线。其中，拱桥除了直拉型拱桥之外，还有斜拉型拱桥和交叉型拱桥。

**图1.6** 吊杆布置**Figure.1.6** Suspenders' layout**图3** 拱桥的分类[7]**Fig.3.** The classification of arch bridge [7]

### 3 建模及仿真结果

为了对该桥梁进行结构分析，对其进行建模师整体分析中相对较复杂的一个步骤。我采用 workbench 操作界面的 Geometry 模块直接在有限元软件中对其进行建模；通过生成多个坐标系，分别完成桥梁各部分的建模，同时在 Engineering Data 中添加材料选择勾选混凝土（Concrete）并完成建模后，依次序分别对桥梁进行画网格及网格优化和加载操作。其中，根据台湾媒体放出的桥梁断裂过程的视频，可以看到最开始桥梁钝裂的原因是一辆油罐车在桥梁上驾驶使得桥梁承载不够断裂；在此处桥梁断裂的初始诱因就是一集中力施加在桥体受力面，也因此，在有限元软件模拟时，我们也可以在桥体受力平面上施加一集中力，之后进行计算。

在完成计算后，计算结果如图3所示。在该图中，我分别对桥梁结构的 von-Mises 应力和变形进行观察。根据我们在弹性力学课上所学内容，我们可以知道 von-Mises 应力对于各向同性材料计算结果较准确，在此结构中混凝土和桥梁的承重结构中的工业钢

（Steel）均可以考虑为各向同性材料。在结果中，我们可以看出连接桥梁弯拱结构和桥体的钢索受到了很大的应力；同时，桥体平面部分和支撑的桥墩部分之间出现了较大应力，而桥梁实际断裂时也是从该部分进行断裂的。再对桥梁的变形结构进行观察，可得钢索底部与桥体连接部分也发生很大的变形，同时桥梁受力点发生的变形最大，也符合桥梁实际断裂时的破坏形式。但同时，仿真结果显示桥梁的弯拱结构也发生较大变形，而实际上桥梁破坏后弯拱结构并没有发生太多破坏，这可能是该桥在修建时弯拱结构采用的材料和制作工艺使得其具有了较大的强度和刚度，最终使得这一部分没有发生破坏。

同时，在该桥梁破坏后，众多媒体也对桥梁破坏进行了众多的分析和猜测，其中不乏科学的错误的。其中有媒体报道称因该桥梁的桥墩承载能力太差使得桥梁破坏，而有限元模拟结果明确显示在该种加载形式下，桥墩部分并没有受到明显的应力也没有发生明显的



变形；实际破坏后的图片也显示出桥墩部分并没有发生明显破坏，即直接反驳该种推断。也有媒体报道称是因为桥梁钢索断裂导致桥体破坏，这种推测无论从视频中还是有限元模拟的结果中都可以判断是科学的和真实的情况；正是因为桥梁的钢索的疲劳最后诱使灾难发生。

根据有限元计算结果，我们可以看出最大的变形发生在桥体中间承力部分，为  $1.45 \times 10^{-5} \text{m}$ ；最大应力发生在连接桥体与拱形结构钢索中；且中间的钢索应力最大，为 44084N。

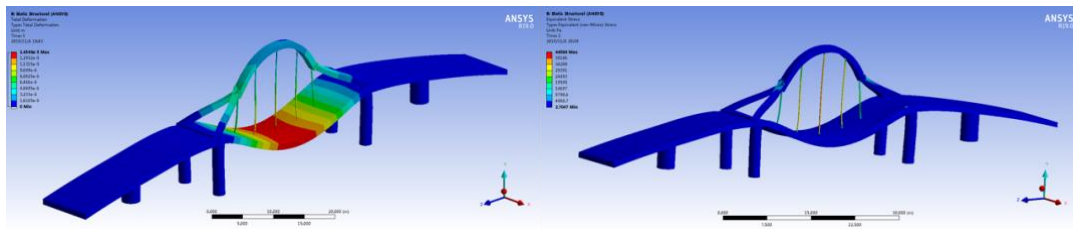


图 4 南方澳大桥变形及应力结果

Fig.4. The deformation and stress of the simulation of Nanfang'ao Bridge

## 4 可行性优化方案

根据上述有限元模拟结果及相关分析，我们可以总结出，桥梁断裂主要由两个主要原因造成：钢索的疲劳与断裂和桥体平面承重部分太多脆弱，尤其与桥墩接触部分。因此，我们可以针对这两个议题对桥梁进行事故分析以及相关优化防止相关事故再次发生。首先，桥梁结构采用了直吊型钢索完成弯拱结构和桥体的连接，该种承重方式有众多优点：首先，其可以节省很多的空间，让车辆有更多的区域和视野通行；其次，这样制造工业相对简单，对于施工单位的难度和挑战相对较小；也因此，这样制造桥梁会大大降低成本，易于快速完工；最后，这样设计的桥梁美观、漂亮。但是，其也有非常致命的弱点，即所有的重量都承载在钢索上，钢索将承载非常大的力，这对钢索的要求非常高。更糟的是，钢索与弯拱结构和桥体若采用焊接连接方法，因为应力对于微小的变形非常敏感，在相应的连接处易产生应力集中，极易对连接结构产生破坏。同时，该桥梁位于滨海地带，常年的海风侵蚀会对金属产生破坏，且海风和汽车经过桥梁时对桥梁产生的激励会引发桥梁的振动，这些因素会导致桥梁结构更加易破坏。因此，这种设计在力学角度分析非常不科学。该种钢索结构必须要进行优化设计改进。

同时，桥梁的破坏不止有钢索的断裂，还有桥体与桥墩的连接部分也发生了破坏。根据我们小组实验项目进行的抗压结构的优化，我们也可以将相同思路应用到桥梁的设计上面。首先，根据图 4 示意图所示，桥体与桥墩部分是直接支撑的，桥墩与桥体间产生的直角将会导致应力集中，最后导致桥体断裂破坏。也因此，根据以上分析，我们可以做出如图 4 右图所示的针对性的优化。首先，在不改变桥梁原本设计的情况下，将原本的直拉承重钢索改为交叉结构，这样，每根钢索相对受力就减小很多，同时，连接处的应力集中现象也可以得到明显缓解。同时，为了缓解桥墩处的受力，采用与抗压结构设计中相同的思路，设计支撑结构连接桥墩与桥体；同时，桥墩桥体支撑体中也可以增加孔洞设计来有效缓解应力集中现象。

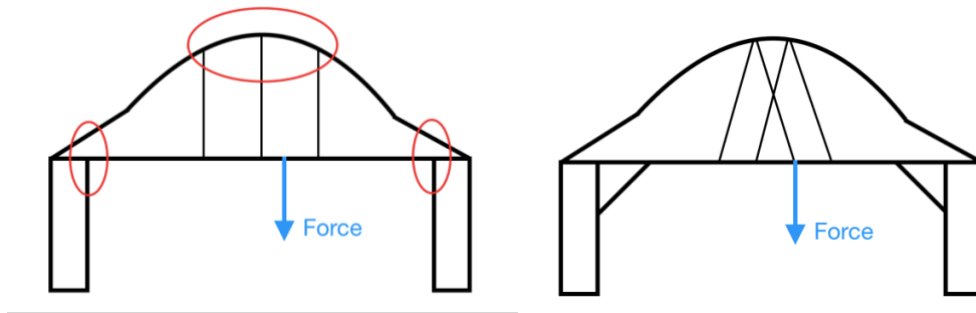


图5 南方澳大桥结构优化

Fig.5. The refinement of Nanfang'ao Bridge structure

根据前文分析可知，作为承受拱结构与桥体作用的主要部分，吊索结构承受了主要的桥体载荷并承受拉力，其也是整个结构中最脆弱的部分；所以，对该结构进行优化是最重要也是首先要考量的因素。因为可知桥墩处的加固会对桥体产生增强效应，所以先不对桥墩进行加固，只将桥体由直拉型吊索改为交叉型吊索，这样可以大大加强桥体的稳定性并且有效减少钢索承力，防止钢索断裂。如图6所示，将直拉型吊索改为交叉型吊索后，可以看到，桥体的变形变为  $1.603 \times 10^{-5} \text{m}$ ，变形相较之前增大了，但是应力变为 36925N，可以看出应力明显减少，足以证明这种交叉网状结构非常有效的减少了吊索的承力，可以大大地提高桥梁的安全性。另外，交叉型吊索支撑的桥体，在一根吊索断裂时仍有其他吊索可以支撑桥体结构，是相对安全可靠的。

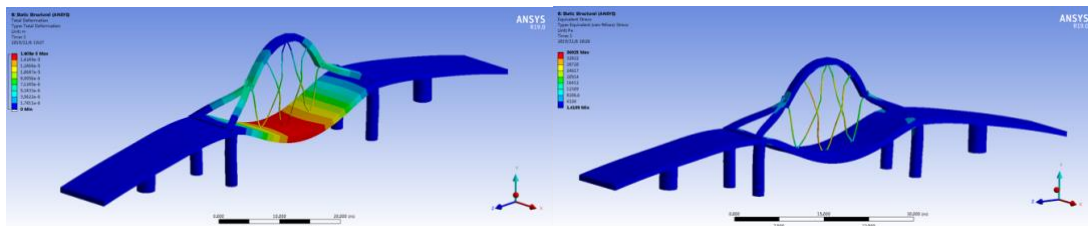


图6 南方澳大桥吊索结构优化

Fig.6. The refinement of the sling of Nanfang'ao Bridge structure

同时，根据我前文中提到的优化方案，我将在桥墩与桥面接触处增加支座以缓解桥面受力；同时，如若桥面真的发生断裂，这个支座也可以提供一部分支撑力防止桥面下陷。增加支座后，桥梁的仿真结果如图7所示。可以看到，桥体的最大变形为  $1.1607 \times 10^{-5} \text{m}$ ，这个结果相较最初的直拉吊索有效减少，可以证明支撑底座可以有效减少桥体变形。同时，桥体承受的最大应力为 27352N，这个结果明显相较起始应力显著减少，可以证明底座的建构也有效减少了钢索的承力。同时，这样底座的存在也可以更加有效的利用桥墩的承力效益。通过应力应变的有效减少，足以证明我对于桥梁结果的优化是成功的。

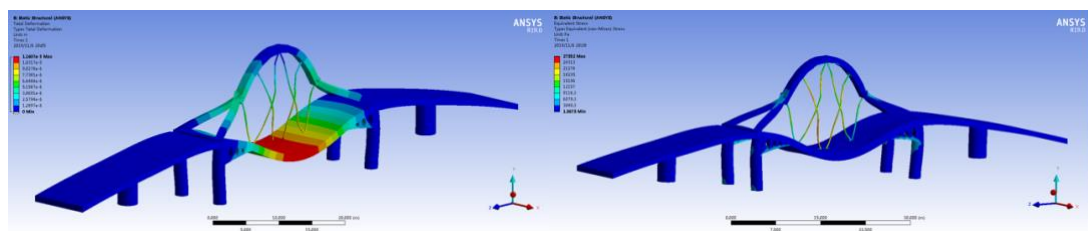


图7 南方澳大桥整体结构优化

Fig.7. The structural refinement of Nanfang'ao Bridge structure

## 5 总结

在本次事故中，一座落成尽 20 年的桥竟会发生如此严重的破坏事故令很多人震惊。该桥梁的破坏本质即是承载结构的脆弱以及力学因素的缺乏考量。该桥外形美观，已成为宜兰的地标之一；但是设计师在设计结构时欠缺考虑到宜兰潮湿、海风侵蚀对于钢筋钢索结构的侵蚀破坏，同时相应部位产生的严重的应力集中现象；这些设计都是存在严重问题的，最后也导致了严重后果。同时，相关单位对于桥梁的缺乏修缮也导致桥梁破坏，根据有限元的模拟，钢索结构的承重也预示着相关单位需要经常性的对于桥梁的承重钢索进行疲劳检查与更换，这也是诱使事故的初始原因。

最后，从这次事故中，我们也可以分析出：事故的主要问题出在桥梁的原始设计上，桥梁的设计师也因此需要承担一定责任，其未来在设计承重结构时也需要考虑到结构的力学分析。也因此，我通过查阅文献和思考提出了上述对于桥梁的优化方案并最终验证了我的方案是可行且高效的。同时，从工程角度来考量，缺乏定期的维修与检查也是桥梁破坏的原因之一。若相关单位人员对桥梁的脆弱部位进行分析与经常性的检查，也许就可以避免悲剧的发生。

### 参考文献：

- [1] 肖鑫. 基于健康监测的钢桁梁桥结构承载力可靠性评估[J]. 铁道标准设计, 64, 2020:1-8.
- [2] 王贤强 1, 张建东 1, 刘朵 1, 王建松 2, 李程焕 3, 高丛 3. 钢结构桥梁对接焊缝横向收缩影响因素分析[J]. 湖南交通科技, 45, 2019:96-98.
- [3] 魏剑峰. 大跨度高速铁路桥梁模态参数频域识别方法研究与应用[J]. 铁道建筑, 59, 2019: 1-3.
- [4] 陈俊杰, 李春良, 张洪铭, 张笑宇. 基于有限元理论的移动荷载作用下三跨连续梁损伤研究[J]. 导北方交通, 9, 2009: 1-7
- [5] 《ANSYS 学习与应用》微信公众. Ansys Fluent 中各种压力的含义. 网络:  
<http://www.leanwind.com/archives/1900.html>
- [6] 童黎. 台湾宜兰县南方澳跨港大桥断裂坍塌, 初步了解: 是桥墩坍塌引发. 网络:  
<https://new.qq.com/omn/20191002/20191002A05P3G00.html>
- [7] 王琴. 桥梁吊索的结构行为分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011:82.