

工程机械设计中的整体结构有限元分析技术

岳中第 (100024, 中航一集团北京航空制造工程研究所)

林承祯 (100053, 北京机电工业控股(集团)有限责任公司)

摘要 :本文综述了以北京航空制造工程研究所为技术依托单位的 BQCIMS 工程的整体结构分析技术,包括:工程背景与需求,基于 ANSYS/APDL 平台的结构模型参数化技术,整体结构的子结构分析与自动化分析流程。最后,整体结构分析在汽车起重机与矿用重型汽车设计中的成功应用,证明了这种技术的实用性。

1 工程背景与需求

以北京航空制造工程研究所为技术依托单位的北京起重机器厂 CIMS 工程(简称 BQCIMS 工程),是国家 863CIMS 工程资助的北京市信息技术推广示范项目之一。其中,汽车起重机与矿用重型汽车设计中的工程分析是该项目的核心创新技术与提高企业市场快速反映能力的重要手段。北京航空制造工程研究所推广应用航空结构设计中的先进分析技术与方法[1],以国际上先进的工程分析平台—ANSYS 系统[2]为基础,与北京起重机器厂的工程师们紧密合作,利用 ANSYS/APDL 语言进行二次开发,建立了适应汽车起重机[3]与矿用重型汽车[4]设计的整体结构工程分析方法。

汽车起重机与矿用重型汽车,作为一类“大力神”产品,具有其特殊的作业环境,要求良好的力学性能,包括刚度、应力水平、变形、抗干扰性能等。对于工程设计人员来说,零件、结构件及整机的力学性能如何?会不会因强度不够造成破坏事故?这些都是他们必须关心和回答的问题。

对于结构件设计来说,一般地说,它是零部件的组合设计。汽车起重机的主要承力结构件是吊臂、转台、车架。矿用重型汽车的主要承力骨架是整体车架,它又是许多结构件的组合,包括支撑架、前车架、中车架、尾架及若干子构件。结构件有限元分析是产品设计的基础性分析。最基本的分析是进行线性应力分析;对于有些结构件,例如吊臂与车架,还要进行稳定性分析,研究结构件失稳(屈曲)的条件。

对于整体结构设计来说,整体分析是工程师面临的最直接、最重要的问题。汽车起重机整机分析的对象包括若干个受力结构件和机构(回转、变幅、伸缩、起升等);最危险的工况是起重作业工况,力的传递路线是:重物→吊臂→变幅油缸支撑→高架转台→回转支撑→底架→支腿→垂直油缸→地面;矿用重型汽车的传力路线实际上包括了整车的各严重工况(静满载、举升、刹车、转弯)。因此,整体分析往往非常复杂。设计人员在设计过程中要求较快地预测整体结构在不同工况(特别是严重工况)下结构应力水平与变形,以便完善与优化总体设计,变为最急迫而又难以实现的事情。

针对整体分析这一难点问题,本文论述的基于 ANSYS/APDL 平台二次开发的整体结构分析技术,利用 APDL 语言的特点实现结构模型参数化,采用子结构分析的技术策略,实现整体结构的剖分与结构件分析,实现结构件的变换与组装,

最终完成整体结构分析。这种技术策略在汽车起重机与矿用重型汽车的成功应用说明了它的优越性。

2 基于 APDL 的结构模型参数化技术

2.1 参数化设计语言

对于结构的 CAD 模型（通常由点、线、面及实体组合而成）进行参数化特征设计，是现代 CAD 系统的基本功能。但是，对于有限元结构分析系统来说，对复杂组合结构的有限元模型要实现参数化设计，却并非易事。先进的 ANSYS 系统为用户提供了一种建立参数化模型的基本工具——APDL 语言。但是，使用 APDL 语言开发参数化的模型程序，却是用户自己的事情。APDL 是一种面向工程的、结构化的解释性语言。它具有高级算法语言的基本特征与功能。它的表达方式是一系列基本的用户命令串。符合 ANSYS_APDL 语法规则的 FEA 参数模型程序，一般来说，它包括：几何(点、线、面、实体)定义与操作命令，有限元单元划分命令，逻辑控制命令，条件与循环命令，分析流程命令等。用户要对结构件的有限元模型进行参数化设计，必须熟练地掌握这种语言。所有复杂组合结构及整机的 FEA 模型都要用 APDL 语言进行二次开发。

2.2 结构件的参数化

结构件参数的提取是参数化设计的基础。这里的关键是选取能表述结构件几何特征的主要参数。一般地说，结构件的主要参数包括长、宽、高、关键点、连接条件、板厚、型材截面积、材料与物理特性等。我们将对这些参数规范化地命名，设置有关的参数名（或数组名）。例如，我们命名长度参数为 $a[1], \dots, a[n]$ ，宽度参数为 $w[1], \dots, w[m]$ ，高度参数为 $h[1], \dots, h[i]$ ，厚度参数为 $t[1], \dots, t[j]$ ，对于每一个结构件，它都具有这样一组参数。定义结构件名为相应参数组名，并以 EOF 作为结束符，这就构成了一个 APDL 能够调用的结构件的参数模块。集成所有结构件的参数模块，便构成了产品结构的 FEA 参数库文件。

2.3 产品的 FEA 参数库与模型库

产品结构往往是由几个主要承力结构件组成的。产品参数文件包含了它们相应的参数模块。这些参数模块的任何参数值的改变，都会引起有关结构件的有限元模型的改变，也就引起整个结构的改变。系列化的产品便是这些参数的系列变化。产品结构性能优化设计便是这些参数的优化。产品结构件与整体结构的 FEA 模型程序，正是利用 ANSYS/APDL 语言，引用参数库中相应参数模块，进行二次开发得到的。我们以型号名来命名产品的 FEA 模型库，它不仅包括产品的参数库文件，也包括结构件模型程序、载荷文件、工况控制文件等。这里，以六边形臂 QY25D 模型库为例，说明它的构成。图 1 表明了 FEA 模型库的逻辑树，主要包括：

❖ BQCDB.LIB	产品方案设计参数文件
❖ BQDDB.LIB	产品详细设计参数文件
❖ CRANE.LIB	宏子程序文件
❖ BQC100.A	吊臂方案设计模型程序
❖ BQC200.A	双墙高架转台方案设计模型程序
❖ BQC300.A	车架方案设计模型程序

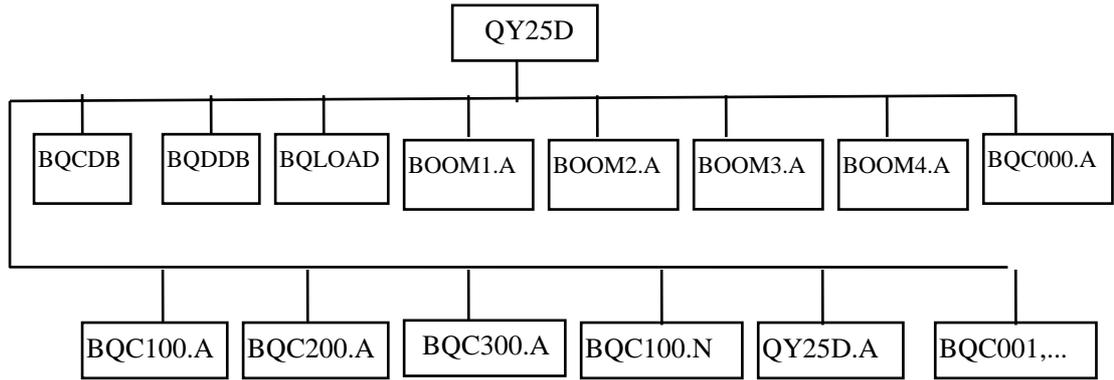


图 1 QY25D 型号模型程序库的逻辑树

- ♣ BQC000.A 整体方案设计模型程序
- ♣ BQC100.N 吊臂方案设计的稳定性分析模型程序
- ♣ BOOM1~4.A 基本臂及二、三、四节臂详细设计模型程序
- ♣ BOOM1~4.N 基本臂及二、三、四节臂稳定性分析模型程序
- ♣ QY25D.A 基于底架详细设计模型的整体模型程序
- ♣ BQC001~BQC004 结构件模型产生器

从产品模型库表明，参数的修改可直接得到修改的结构模型。这可对同一结构形式的产品进行方案的比较及参数优化，而且使系列化设计成为可能。

3 整体结构的子结构分析技术

3.1 整体结构的剖分与子结构分析

整体结构的基本特点是结构规模大、组合形式复杂。目前，国际上解决大型复杂结构的分析问题通常选择子结构方法，或者结构超单元方法。由于超单元实际上是子结构的一种表达形式，因此这里仅简介子结构分析技术。

对于任何一个大型复杂结构，我们总可以划分为若干部分或结构件（简称为子结构），它们靠边界节点与整体结构相关连。如果我们将所有的子结构的边界节点组成一个集合，那么这个集合便表征了这个大型复杂结构的连接骨架，我们称之为边界结构。只要我们把各子结构对有关边界节点的刚度效应（或影响）计算出来，并施加在这些边界节点上，则解决大型复杂结构的分析问题，便转变为求解规模小得多的若干子结构及边界结构问题。

当然，如果边界结构与子结构的规模也很大，还可以再剖分为若干二级或三级的子结构。但是，这种多重子结构的使用，将带来分析流程的复杂化。因此，如何有效地剖分整体结构便成了问题的关键所在。

我们用 K 表示子结构的总刚度矩阵， U 表示子结构的总位移矩阵， P 表示子结构的总载荷矩阵； K_i 表示仅与子结构内部节点相关的刚度矩阵， K_b 表示仅与子结构边界节点相关的刚度矩阵， K_{ib} 表示子结构内部节点与边界节点相关联的刚度矩阵； P_i 表示仅与子结构内部节点相关的外载荷矩阵， P_b 表示仅与子结构边界节点相关的载荷矩阵； U_i 表示子结构的内部节点位移矩阵， U_b 表示

子结构的外部节点位移矩阵。我们将有平衡方程：

$$KU = P \quad (1)$$

$$\text{其中, } K = \begin{bmatrix} K_i & K_{ib} \\ K_{ib}^t & K_b \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_i \\ P_b \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} U_i \\ U_b \end{bmatrix}。$$

$$\overline{K}_b = K_b - K_{ib} K_i^{-1} K_{ib}^t \quad (2)$$

$$\overline{P}_b = P_b - K_{ib} K_i^{-1} P_i \quad (3)$$

这里, \overline{K}_b , \overline{P}_b 就是子结构的仅与边界节点相关联的等效边界刚度矩阵与等效边界载荷矩阵。它们对整体结构的贡献与子结构的贡献相当,因而被称之为超单元。一旦边界节点的位移已知,结构的内节点的位移便由公式

$$U_i = K_i^{-1}(P_i - K_{ib} U_b) \quad (4)$$

对子结构的分析,其主要计算工作量是消除该子结构的内部节点自由度,得到它的等效矩阵。从(2)(3)式可以看出,如果各子结构的边界节点越少,则这些等效矩阵的规模也越小,最终的边界子结构的规模也越小,其运算速度也越快。因此,划分复杂结构为多个子结构的一个基本方法,就是要尽量控制子结构的内部节点规模适当,并且具有边界节点的数目较少。例如,充分利用结构的链式、外伸等特点,合理划分子结构,可收到较好的效果。

3.2 子结构的变换与组装

在一般整体结构分析中,使用了四种坐标系。其中,节点坐标系确定了节点自由度的方向;元素坐标系规定了元素刚度(载荷)矩阵与子结构之间的变换矩阵;子结构坐标系将确定子结构等效边界刚度(载荷)矩阵向整体结构的组装的变换矩阵;整体坐标系通常取世界系。

对于子结构分析来说,子结构的几何建模与应力分析是在子结构的局部坐标系下进行的。但是,子结构的等效刚度(载荷)矩阵却必须按总体坐标系进行组装。因此,每一个子结构在组装之前,需要对等效边界刚度(载荷)矩阵进行坐标变换。我们设B为子结构对总体系的变换矩阵(通常它由整体系的三个节点确定:节点1定义原点,节点1-2方向定义X向,节点1-2连线与节点1-3定义连线构成的平面法线确定Z向,由Z与X向构成的平面法线定义Y向),则整个结构的边界子结构的刚度(载荷)矩阵为

$$K_z = \sum_n B_n \overline{K}_{bn} B_n^t \quad (5)$$

$$P_z = \sum_n B_n \overline{P}_b \quad (6)$$

值得说明,这里 $\sum_n \dots$ 是按总体结构的边界节点编号位置,对号叠加的。因此,整体结构的边界平衡方程为:

$$K_z U_z = P_z \quad (7)$$

给定整体结构六个刚体自由度的约束,求解(7),我们将得到整体边界结构

的位移。再经过整体边界位移向子结构的坐标变换，执行（4）式，将求得子结构的内部节点自由度。

3.3 整体结构模型的简化准则

对于整体结构的分析，不仅需要将所有结构件及机构加以考虑，而且需要将作业过程中的不同载荷工况加以考虑。为了控制整体结构分析的规模，整体模型的建立既要尽量理想化、简单化、典型化，又要较客观地反映出整体（特别是结构件连接部位）的应力分布、变形(刚度)及失效等问题。整体结构的作业运动表明，有必要选择多种典型的作业工况加以计算；同时还要根据工程规范，考虑风载、惯性载、作业场地的不平等多因素对整体结构受力的影响。由于整体结构的复杂性与控制结构分析规模的需要，整体结构模型的简化基于下述原则：

- ◆ 确保整体结构的传力路线完整
- ◆ 确保整体结构典型作业工况的实用性
- ◆ 关键结构件的参数化
- ◆ 将结构件参数化与整体结构参数化统一
- ◆ 对结构的细节结构作重要简化
- ◆ 整体结构有限元建模及分析流程自动化。

3.4 整体结构模型的集成

集成结构件模型以实现整体结构建模，实际上变成了结构件模型的组装与连接。

结构件的组装必须在总体系下进行。第一步要设置子结构坐标系，定义原点与坐标系方向，第二步要调用相关结构件的模型程序自动产生几何模型，最后还要恢复总体系。

结构件的连接，也是在总体系下进行的。不同的连接方式需要建立不同的连接结构，以便模拟结构件在总体结构中的传力关系。例如，汽车起重机，吊臂与转台之间就有变幅油缸；吊臂转动轴，卷扬机的钢丝绳等连接件都必须给予简化；回转支撑结构的上下垫圈可作为曲梁元；滚珠与螺栓柱的模拟支撑结构要参与转台与车架平台的抗弯，都是值得关注的技术要点。又例如，矿用汽车的发动机的机架、减速器的支撑架、转向机构等，均参与了车架的总体受力，在大胆简化时也必需建立相应模拟结构的有限元模型。

4 整体结构分析的自动化流程

4.1 整体结构模型参数化

整体结构模型参数化是以子结构参数化为基础的。由于整体结构的子结构划分是以关键结构件为实体。因此，结构件的参数化与整体结构的参数化可以有机地结合起来，建立统一的结构参数库文件。

4.2 结构件的 FEA 模型程序

结构件的模型自动产生程序是以 APDL 语言为平台开发的，它将调用结构参数库文件的相关模块。只要一旦实现结构件的参数化，它的几何模型自动产生程序便以宏子程序方式建立与调用。这就构成了结构件几何模型的宏程序库。结构件与整体结构的几何模型均调用这个宏程序库产生，这十分有利于整体结构分析

与结构件分析的协调。同时，整体结构分析的某些结果也可以作为结构件的边界条件以自动方式引入。

4.3 整体结构分析的基本步骤

现在，我们可以对整体结构分析的基本步骤作出一定的规范：

- ◆ 建立以结构件为基本模块的参数库文件
- ◆ 以 APDL 为平台，开发结构件 FEA 模型的宏程序库
- ◆ 调用宏程序库，开发整体结构模型的集成程序
- ◆ 建立整体结构的自动化分析流程
- ◆ 建立后置处理流程

4.4 流程设计

基于上述技术路线，我们很容易按功能设计需求，建立若干结构自动分析流程。图 2 便是基于 ANSYS/APDL 二次开发的一般分析流程框图。其中，FEA 模型程序是利用 ANSYS 的 APDL 语言开发的，与新产品的结构设计紧密相关；它引用结构的模型参数及载荷数据文件；解算器及后处理器是 ANSYS 的基本功能模块。这里，我们建立的基本分析流程有：

- ❖ 结构件分析流程；实现各结构件 FEA 模型自动产生与应力分析；
- ❖ 整体结构分析流程：实现整体结构的各结构件 FEA 模型生成、组装及应力分析。
- ❖ 结构件稳定性分析流程 - 实现相关结构件 FEA 模型生成及稳定性分析。

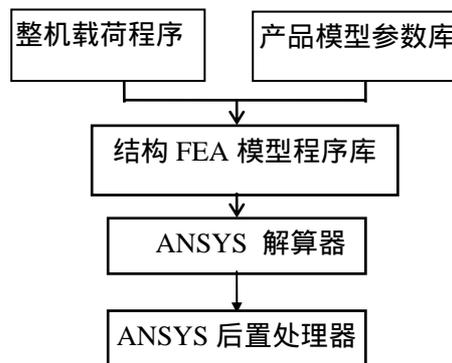


图 2. 基于 ANSYS_APDL 的二次开发流程

5 整体结构分析在重型机械设计中的应用

5.1 汽车起重机 QY25D 的整体结构分析

我们对北京起重机器厂六面体四节臂的汽车起重机 QY25D 进行了整机结构有限元分析。这是该行业对整机分析的第一次尝试。全结构划分为三个子结构及若干连接结构，建立了两个用于整机分析的程序流程：

A. 全机方案设计的有限元参数化模型产生程序，其主要功能是对全机方案设计模型进行有限元分析。在分析过程中，整机模型具有 3067 个节点；shell63 元素 3149 个，beam4 元素 133，link8 元素 1 个；有效自由度为 17597。

B. 具有详细设计车架模型的全机有限元参数化模型产生程序，其主要功能是对具有车架局部加强的整机模型进行有限元分析。在分析过程中，整机模型具

有 4367 个节点, shell63 元素 4471 个, beam4 元素 217, link8 元素 1 个; 有效自由度为 25166。

方案 A 与方案 B 比较表明, 模型网格局部细化, 会使模型分析规模增大。图 3、4 表明整机分析的应力分布云图。整机应力水平与分布的合理性证明了本文介绍的方法的正确性。但是, 场外应用表明, 结构件的局部稳定性还是值得重视的。

5.2 矿用重型汽车 BJZ3480 车架的的整体分析

我们对北京重型汽车制造厂的 BJZ3480 型车架进行了整体有限元分析。整体结构划分为五个子结构, 若干个连接结构。最终的整体模型具有 6769 节点, 7105 有限元元素, 其中, 壳单元(shell63)有 7027 个, 梁单元(beam4)有 78 个; 结构总自由度数 40614。整体结构分析得到了车架在举升、刹车、转弯及静满载等四种不同工况下的变形与应力水平(见图 5、6、7、8)。这是该厂第一次对如此复杂的组合结构进行有限元分析, 结果令人满意。

5.3 QY25D 吊臂的屈曲分析

我们采用整体结构参数化建模中的吊臂结构件模型, 进行带几何大变形的非线性屈曲分析[4], 使用的 ANSYS 基本算法是: 自动载荷增量方法、Newton_Raphson 迭代法、及带修正的 Newton_Raphson 自动迭代法。通过多工况的非线性屈曲分析证明, QY25D 的吊臂在工程规范内使用是稳定的。但是, 在结构全伸状态时, 干扰主要是侧载, 超过最大总吊重 10% 的情况下, 结构将失稳, 其临界载荷因子是 0.8, 失稳前的最大 Von Mises 应力 25kg/mm^2 。图 9、10 是在严重工况下失稳前的变形与应力云图。

稳定性分析表明, 即是结构的线性静应力水平在许用应力范围内, 结构的稳定性分析还是非常必要的。

6 参考文献

- [1]. 岳中第: “多重子结构分析的超元矩阵方法”, 航空学报, 第 1 卷第二期, 1980。
- [2]. ANSYS User's Manual for Revision, Volume IV, Theory, Swanson Ansys System, Inc.
- [3]. 汽车理论, 余志生主编, 清华大学, 机械工业出版社, 1981。
- [4]. 底盘设计, 诸文农, 吉林工业大学, 机械工业出版社, 1981。

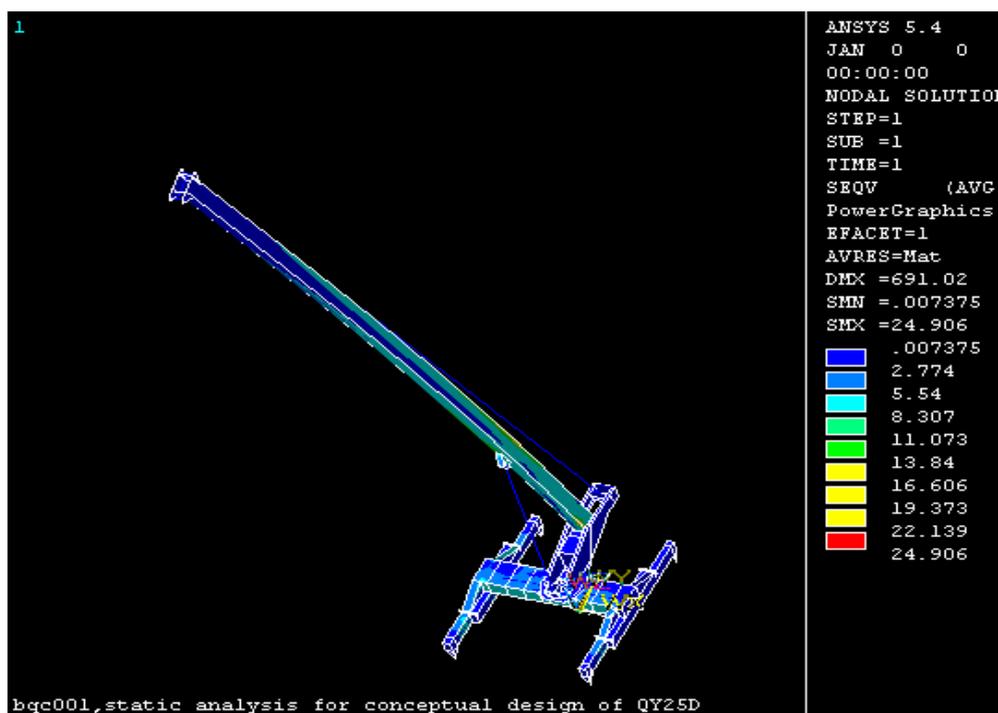


图 3 QY25D 整机分析的 Von Mises 应力分析云图

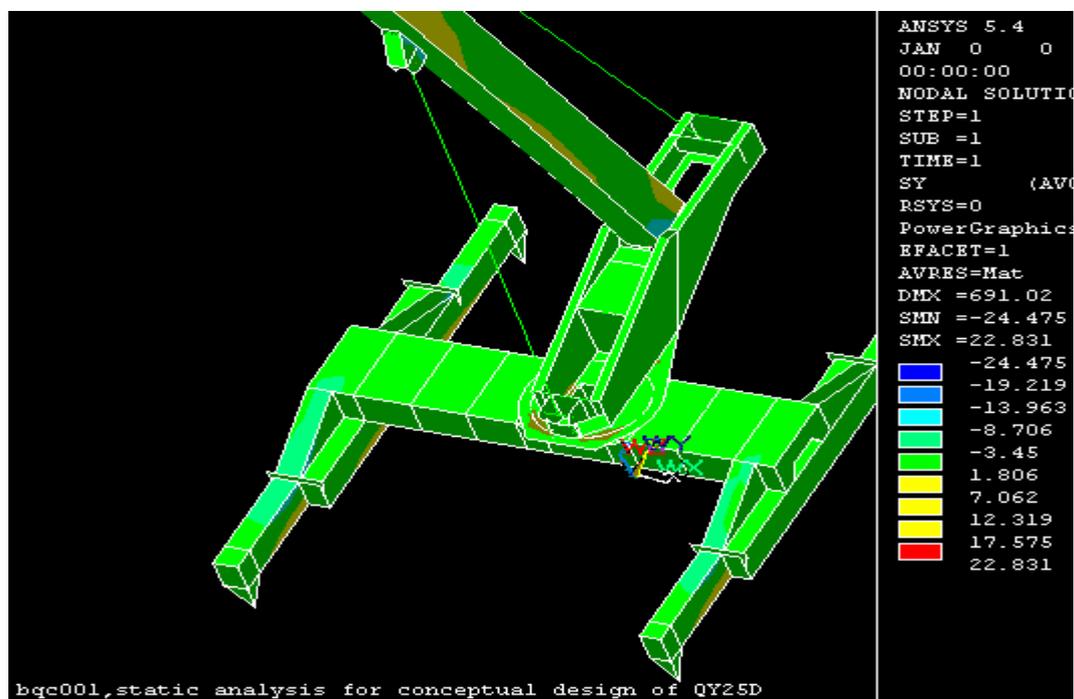


图 4 整机分析的 Y 向局部变形与应力分析云图

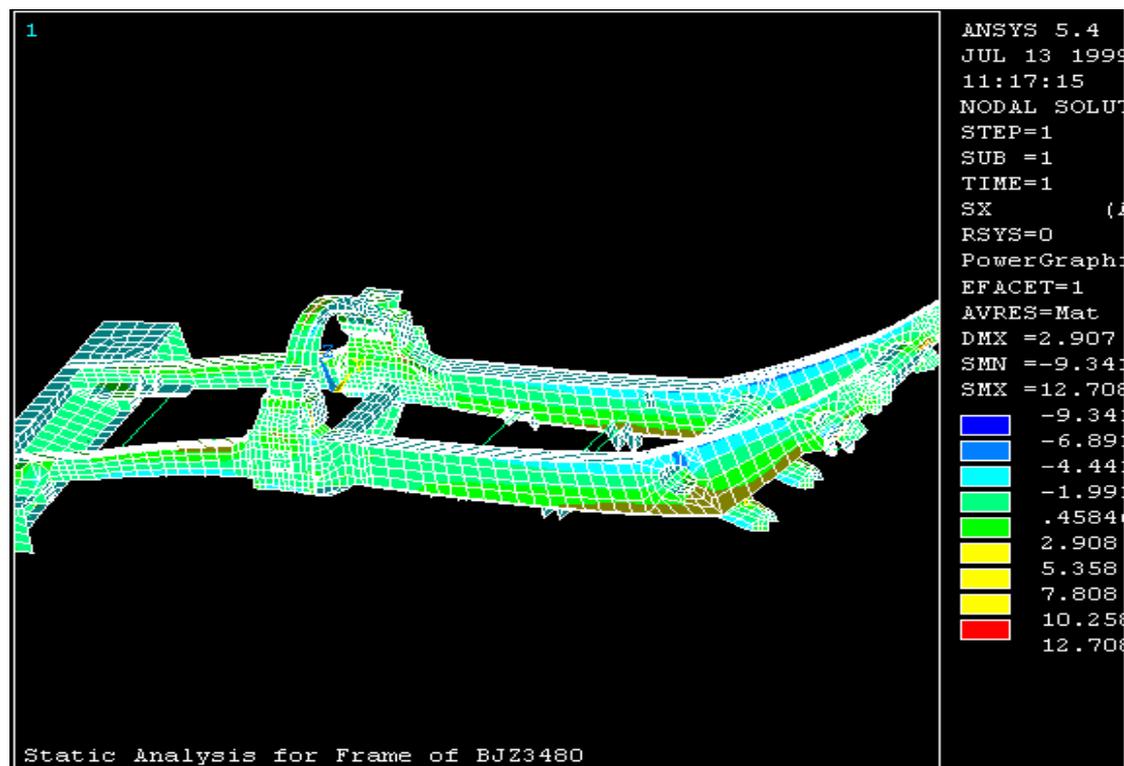


图 5 BJZ3480 车架举升工况的拉压应力云图

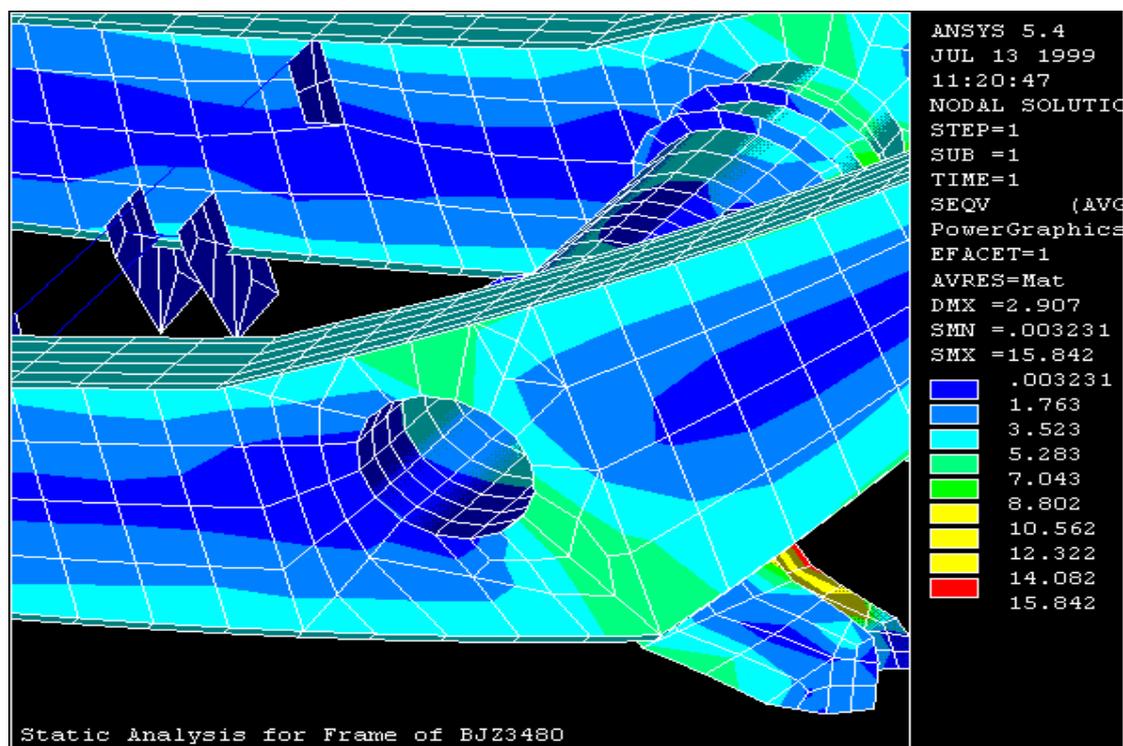


图 6 BJZ3480 举升工况的关键部位综合应力云图

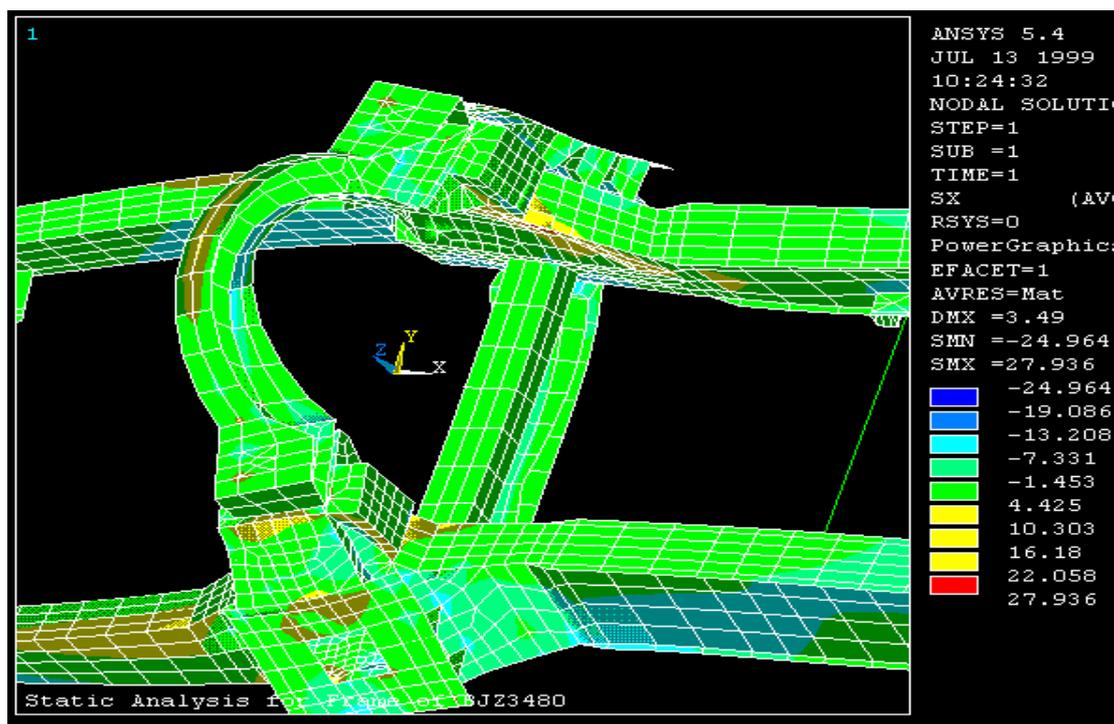


图 7 BJZ3480 支撑架在刹车工况时的拉压应力云图

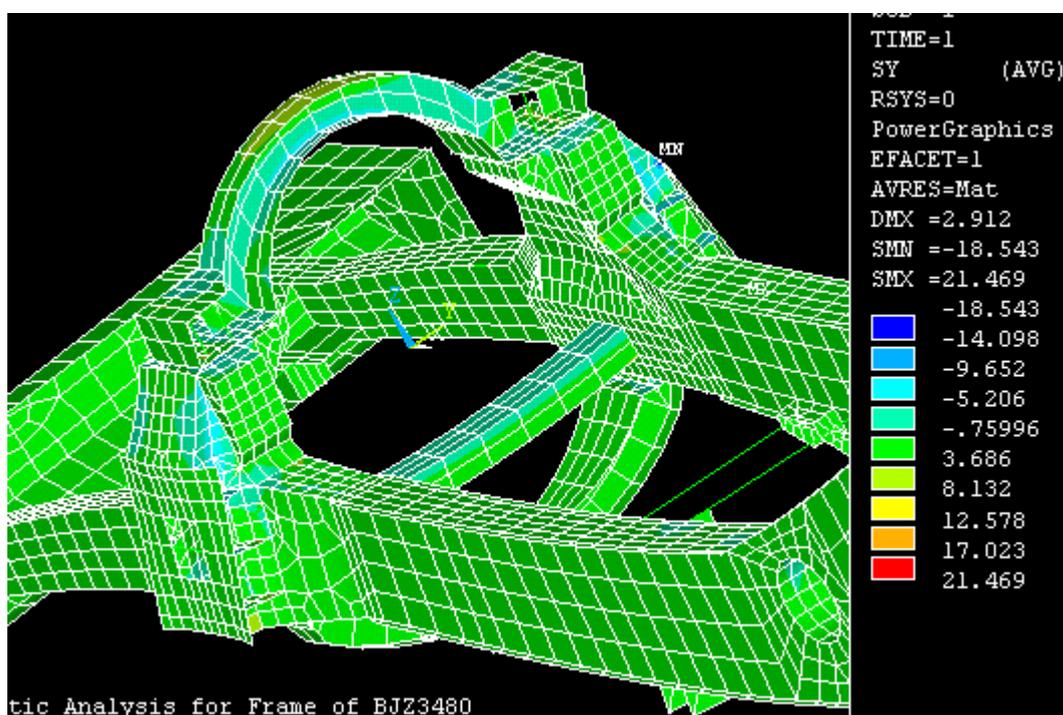


图 8 BJZ3480 车架静满载工况的局部应力云图

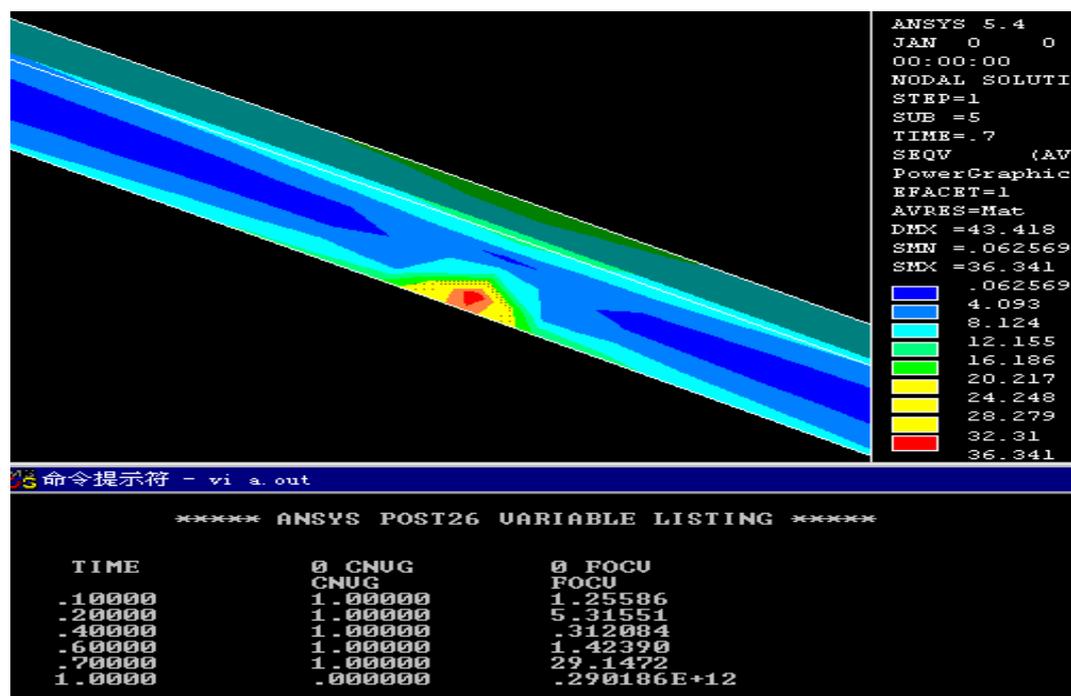


图 9 第 3 节吊臂工况 3 的详细设计模型失稳前的变形与应力云图

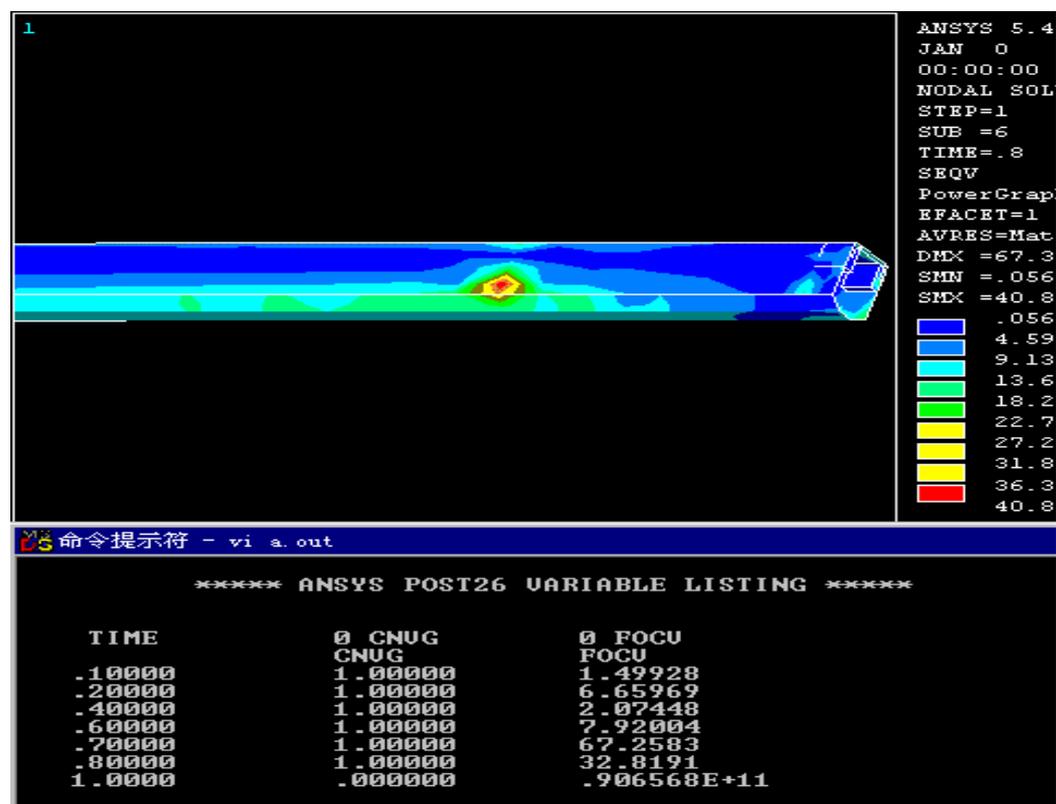


图 10 第 3 节吊臂工况 4 的详细设计模型失稳前的变形与应力云图