

先进数字化制造中的工程分析及其应用

岳中第、刘 彬、高光波 (100024, 北京航空制造工程研究所)

摘要：综合若干工程应用范例，针对先进数字化制造的重要环节—数值化仿真，在 ANSYS/APDL 平台上进行二次开发，建立了实用的工程分析技术，包括：需求分析，模型参数化，子结构技术，整体分析的自动化流程等。成功的实践表明这种技术途径具有可行性与有效性。

1 前言

我国正在成为一个“世界制造工厂”，引来八方客商。先进的数字化制造技术，正在成为人们的日常语言。但是，这并不意味着：我国也是先进制造专利技术的大国。我们制造了许多产品，但都是引进发达国家的图纸或生产线；我们甚至不惜花巨资引进全部专利技术，但没有来得及消化，产品已经换代或升级。

在这期间，以有限元分析方法为基础的计算力学经历了由简单到复杂、由线性到非线性分析的发展过程。结构分析要解决的实际工程问题，早已不是一个简单的零件或结构件，而是多个复杂结构件的组合结构，或整个产品的大型复杂问题。ANSYS 作为国际上最为知名的通用有限元分析系统之一，在我国许多行业获得了成功的工程应用。近八年来，在北京航空航天大学制造工程研究所，我们基于 ANSYS 平台进行的二次开发，先后解决了搬运行业汽车起重机的三大结构件及其整体分析[1]，矿用重型汽车（4X2）的整体车架结构分析[2]，车用天然气铝胆复合材料气瓶的整体分析[3]，以及 6X6 载重越野汽车的车载平台的静特性分析等。随着对 ANSYS 工程应用的深入，我们也摸索到如何基于 ANSYS 平台进行二次开发更为有效。

我们的实践表明，采用像 ANSYS 这样的先进分析手段，能够使我们更快地消化已经引进专利的设计技术与制造方面的绝巧（Know-how）。

2 结构模型参数化技术

2.1 参数化的需求分析

产品的系列化、标准化，从数字化设计来说，最根本的事情是建立产品结构的参数化模型。不管是引进产品图纸，还是产品模仿设计，直至建立生产线，作为“世界制造工厂”的中国，已经变得十分快速。对于产品结构（CAD），做到几何模型参数化，已经成为设计师最容易实现的基本要求。但是，结构分析（CAE）是产品性能评定与优化的最重要环节，也是消化专利与制造“绝巧”的基本手段，要求参数化模型与 FEA 离散化数值模型相结合，才有真正的实用意义。由于机械设计分析与数值化制造过程的复杂性，如何引进可对产品性能进行优化（包括系列化与标准化）的参数化模型，成为专业设计师与分析师最为关注的事情。

作为结构件局部分析，必须引进局部的边界条件，以建立理想化的分析模型。但是，从总体分析来看，局部的边界条件往往使结构的实际传力状况发生扭曲，结构件之间的弹性连接变为了刚性连接，无法正确反映结构件之间的实际连接关系。利用结构件的这种局部分析结果评估结构整体承载作用力后的结果，往往导致较大的误差。因此，结构件分析不能替代整体分析，已成为设计人员的共识；在工程设计中，整体结构分析由于规模大、难度高，往往成为十分迫切与关键的瓶颈问题。今天大容量、高速度计算机技术的发展使整体分析变为十分现实的问题，飞机的整体分析[4]，起重机及汽车的整体结构分析，都是这类结构分析的典型例子。因此，引进可对结构件与整机性能进行优化的参数化模型，不仅是必需而且也可能了。

汽车起重机、矿用重型汽车、越野载重汽车，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？引进可对结构件与整机性能进行优化的参数化模型，就能帮助他们回答所关心的问题。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、越野载重汽车的主要承力骨架是整体车架，它们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。结构件有限元分析往往只是产品的基础性分析。整体分析是工程师们面临的

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、越野载重汽车的传力路线实际上包括了整车的各严重工况(静满载、转弯、爬坡、刹车)。因此,整体分析往往非常复杂。参数化模型使设计人员在设计过程中能较快地预测整体结构在不同工况(特别是严重工况:路况与作业)下结构应力水平与变形,以便完善与优化总体设计,解决自己最急迫而又难以实现的事情。

车用铝胆复合材料气瓶是今天最受欢迎的环保产品。它最为复杂的技术是铝胆复合材料的合理设计及各种使用条件的数字化仿真。建立结构的参数化分析模型,车用铝胆复合材料气瓶的整体分析变得比较容易。作为基本设计参数,复合材料通过不同厚度与方向的、合理的环型缠绕与螺旋缠绕,使结构大为减重,使强度大为提高。目前这类产品在航空、航天、城市公交、医学救护方面具有广阔的发展空间。

2.2 FEA 的参数化模型

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。对于有限元结构分析来说,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。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,它是一种面向工程的、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。对于所有复杂组合结构及整机的 FEA 模型,我们用 APDL 语言进行二次开发,建立了产品的 FEA 模型程序,这对产品的性能评定,实现其系列化与标准化,具有重要作用。

这里,结构件参数的提取是参数化设计的基础,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、载荷工况等。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。

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变化,也就引起整个结构的变化。系列化的产品便是这些参数的系列变化。产品结构性能的优化设计便是这些参数的合理匹配及优化。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。图 1 以六边形臂 QY25D(25 吨起重机)模型库为例,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
♣ 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

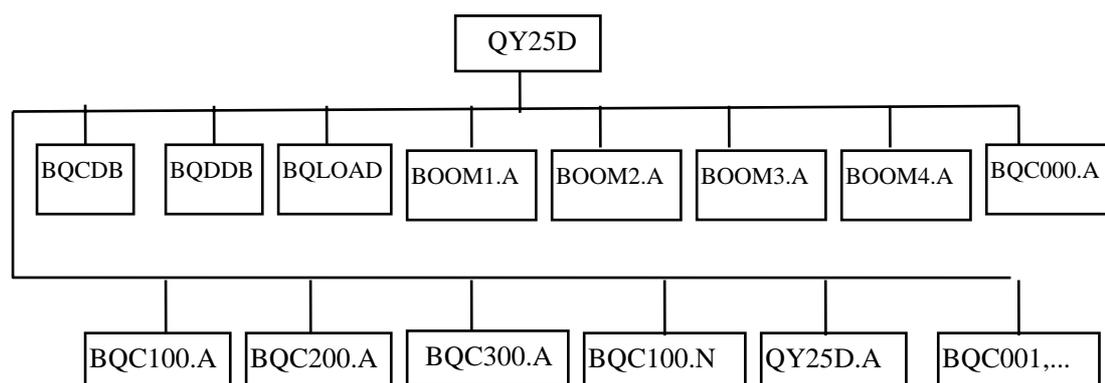


图1 QY25D型号模型程序库的逻辑树

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，从而使系列化设计成为可能。

3 结构的部件分析与整体分析

3.1 结构的剖分与部件分析

整体结构的基本特点是结构规模大、组合形式复杂。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联。如果我们将所有的子结构件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件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件及边界结构问题。当然，如果边界结构与子结构件的规模也很大，还可以再剖分为若干二级或三级的子结构件。但是，这种多重子结构件的使用，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。有关子结构件分析技术，在[4]中作了详细的推导，在此从略。计算机技术的飞越发展及 ANSYS 的强大功能，使人们逐步忘记了求解大规模线性方程组之难。但是，正确地简化与剖分结构，对于它们传力与结果分析，依然重要。

3.2 结构件的变换与组装

在一般整体结构分析中，使用了四种坐标系：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）矩阵与结构件之间的变换矩阵；子结构件坐标系将确定子结构件等效边界刚度（载荷）矩阵向整体结构的组装的变换矩阵；整体坐标系通常取全局系。对于子结构件分析来说，子结构件的几何建模与应力分析是在子结构件的局部坐标系下进行的。但是，子结构件的等效刚度（载荷）矩阵却必须按总体坐标系进行组装。因此，每一个子结构件在组装之前，需要对等效边界刚度（载荷）矩阵进行坐标变换。ANSYS 提供结构件坐标系的变换功能，使我们十分容易地实现了不同方向的吊臂、转台与车架的组装。

3.3 整体结构模型的简化准则

对于整体结构的分析，不仅需要把所有的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，实现整体结构分析建模，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全局系下进行。第一步要设置子结构件坐标系，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，最后还要组装并回复到全局系。

结构件的连接，也是在全局系下进行的。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，矿用汽车及越野载重汽车的发动机的机架、减速器、分动箱的支撑架、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。

3.5 整体结构分析的自动化流程

整体结构模型参数化是以子结构件参数化为基础的。由于整体结构的子结构件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。

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。

我们基于 ANSYS 平台，对多个工程应用项目进行了整体分析，其基本步骤也进行了一定的规范：

- ♣ 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 模型程序库；
- ♣ 调用宏程序库，开发整体分析模型的集成程序；
- ♣ 建立整体结构的自动化分析流程；
- ♣ 建立后置处理流程。

图 2 便是基于 ANSYS/APDL 二次开发的一般分析流程框图。

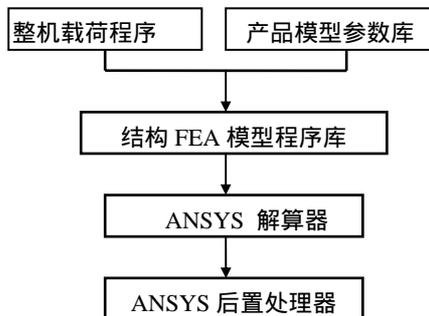


图 2. 基于 ANSYS/APDL 的二次开发流程

4 基于 ANSYS 平台的二次开发分析技术在数字化制造工程中的应用

4.1 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。全结构划分三个子结构件及若干连接结构，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，结构件的局部稳定性还是值得重视的。

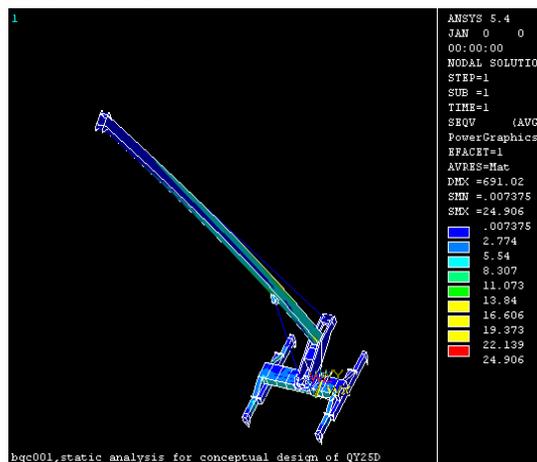


图3 QY25D 整机分析的 Von Mises 应力分析云图

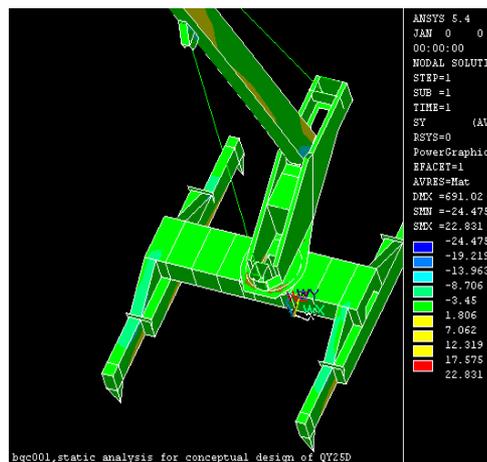
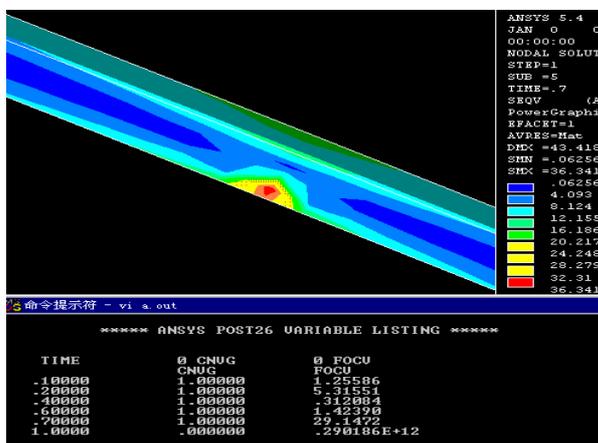


图4 整机分析的 Y 向局部变形与应力分析云图

5.2 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。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，在结构全伸壮态时，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 $25\text{kg}/\text{mm}^2$ 。图 5 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。



5. 第 3 节吊臂在工况 3 失稳前的变形与应力云图

4.3 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 BJZ3480 型车架进行了整体有限元分析。这是该厂从英国引进的生产图纸，但是没有引进结构强度分析报告。整体结构划分为五个子结构，若干连接结构。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 6、7、8)。现场的事故也表明，严重的应力部位预测是可信的。这样建立的 BJZ3480 的参数化模型，对于它的系列化设计，结构的优化设计，无疑是令人满意的。

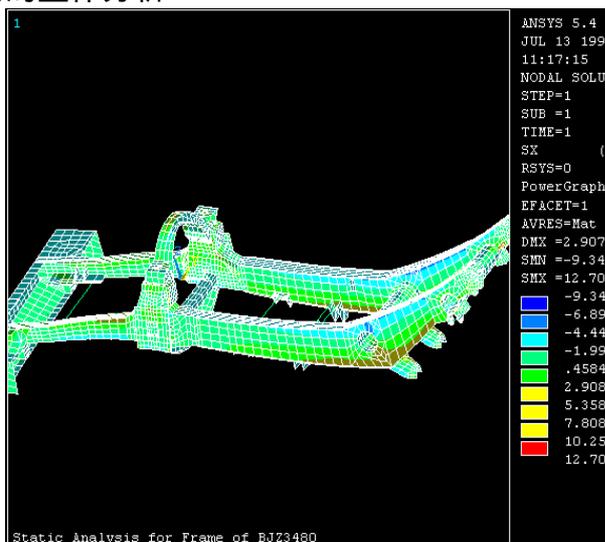


图 6 BJZ3480 车架举升工况的拉压应力云图

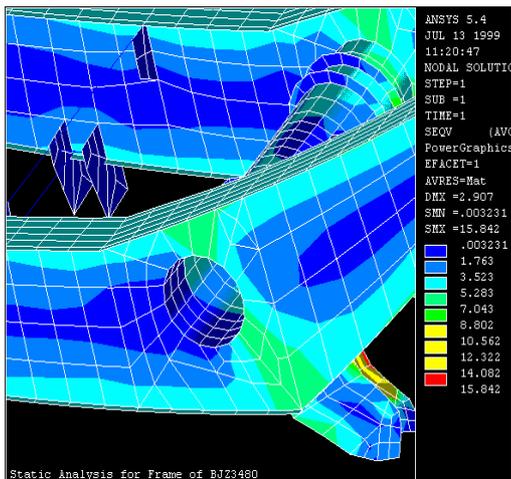


图7 BJJ3480 举升工况的关键部位应力云图

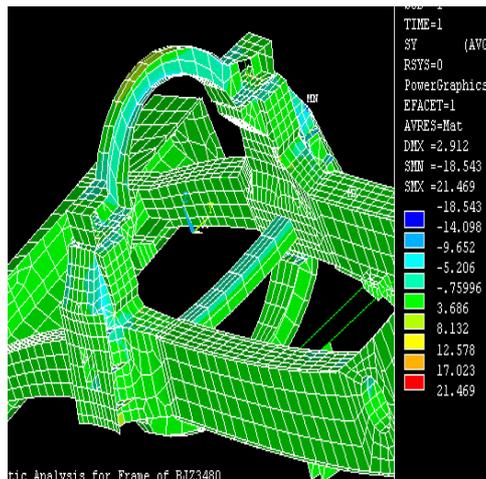


图8 BJJ3480 前车架静满载工况应力云图

4.4 基于 ISO11439 的 CNG-3 型气瓶有限元应力分析

北京航空制造工程研究所 (BAMTRI) 与国际上知名的美国 HyPerComp 公司合作研制 CNG-3 铝胆复合材料气瓶。HyPerComp 使用 Algor FEAS 作为分析工具,我们根据 ISO 11439 国际标准,基于 ANSYS/APDL 平台进行二次开发,建立了 FEACAC 软件包。对于 CNG-3 产品,ISO 设计规范要求:

- ❖ 建立可用的材料非线性分析方法与流程;
- ❖ 建立正确的材料非线性的弹-塑性、应力-应变模型;
- ❖ 建立全缠绕状态的复合材料机械性能参数计算方法;
- ❖ 建立多纤维缠绕层或不同纤维材料构成的材料本构方程与平衡方程;
- ❖ 分析纤维缠绕张力作用下的预应力;
- ❖ 不同压力工况包括:紧缩压力、零压力、工作压力、水压试验压力、最小爆炸压力等;
- ❖ 最大的缺陷尺寸,应能确保在循环压力工况下的安全可靠,同时可保证 LBB 性能。

我们对铝胆复合材料气瓶进行多工况(自紧压力、零压力、工作压力、循环压力、试验压力、最小爆破压力、平均爆破压力)进行分析,所得结果与美方提供的数值分析结果具有相同精度。这里,图 10 所示为 CNG-3 载荷模型,图 11 所示为复合材料层间应力分布,图 12、13 所示为结构局部应力分布。

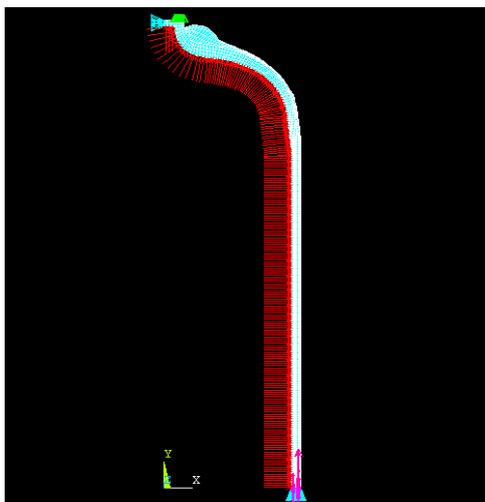


图 10 FEA 的 2D 整体加载模型

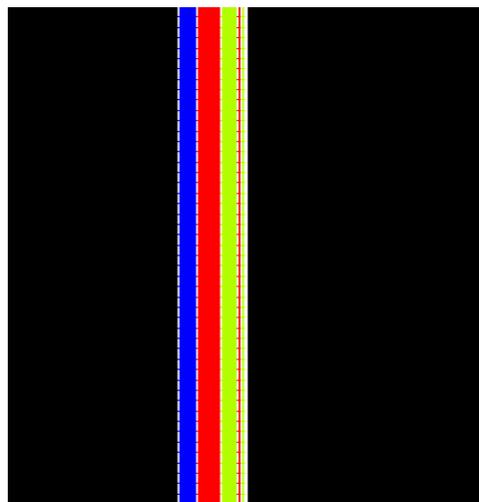


图 11 零压力自紧应力云图

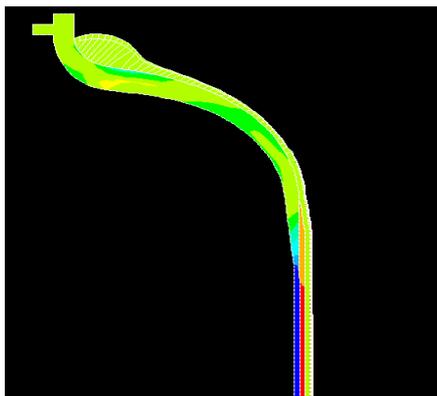


图 12 封头的局部应力分布



图 13 结构过渡段的应力分布云图

4.5 越野载重汽车 SX2190E 车架的整体分析

我们对陕西重型汽车制造厂生产的 SX2190E 越野载重车的整体受力骨架进行了有限元分析。SX2190 标准型是该厂 80 年代从奥地利引进的生产图纸,但是没有引进相应的结构强度分析报告。由标准型进行创新开发的 SX2190E 型车是军用特种越野载重汽车。我们基于 ANSYS/APDL 开发了 SX2190E 整体车架的载荷计算程序 (PRE_LOAD) 及 FEA 数字化模型程序 (SX_FRAME),无疑将填补所缺少的强度分析报告。整体车架的结构分析模型具有 9606 个节点, 9496 个有限元元素,其中,壳单元 (shell63) 有 9394 个,梁单元 (beam4) 有 84 个,实体元 28 个;结构总自由度 57240。通过整体结构分析,能够得到各种严重工况:刹车、爬坡、高速满载、侧倾、转弯及各综合参数工况下的变形与应力水平 (见图 14、15),其结果令人满意。

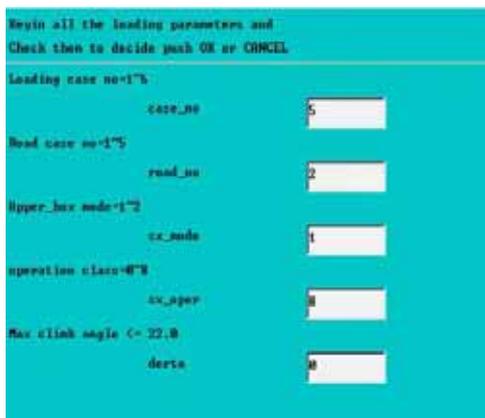


图 13 整车传力分析的用户工况界面图

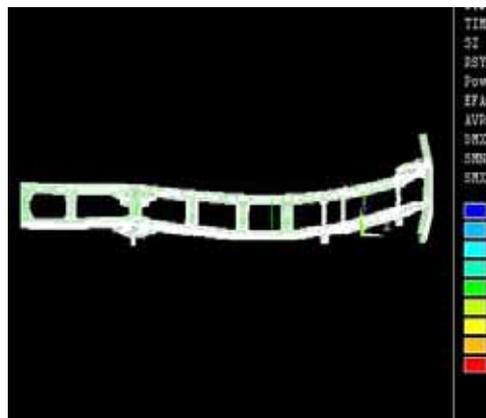


图 14 整体车架静满载急转弯的应力与变形云图

5 基本结论

本文涉及多个领域的成功实践表明,掌握实用的工程分析技术是先进数字化制造的重要环节;依托国际上领先的技术平台,建立合身、有效的技术路线,进行二次开发,是消化外来专利与绝巧,实现技术创新的一种捷径。

6 参考文献

- [1]. 岳中第:“汽车起重机的整机结构分析技术”,《中国科技发展精品文库》(第三辑),2004年4月。
- [2]. 岳中第:“工程机械设计中的整体结构有限元分析技术”,北京航空制造工程研究所论文集,2002年。
- [3]. 岳中第:“基于 ISO 11439 及 ANSYS 平台的 CNG 气瓶有限元应力分析”,航空制造技术,2002年专刊。
- [4]. 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。