

摘 要

在悬臂自升式海洋钻井平台设计中,悬臂梁的设计是影响到平台整体作业能力的重要工作。在平台方案设计阶段,由于总体设计方案频繁修改,平台整体尺寸不断变化,相应地悬臂梁设计尺寸也随之频繁修改,而每次修改都需要对新方案下悬臂梁的结构强度做出计算和校核,结构计算的最可靠的方案是有限元分析。悬臂梁有限元结构建模是一个耗时的复杂工作,如果设计模型频繁修改,工作量巨大。因此,研究和开发针对悬臂梁结构设计的、支持参数化设计修改的,有限元建模、加载、分析校核以及工程图生成等功能的软件工具,对于悬臂梁结构方案设计优化意义重大。

为此,本文研究和开发了基于 VB6.0 的悬臂自升式海洋钻井平台悬臂梁的参数化建模和绘图,实现了可视化参数输入系统,主要研究内容如下:

(1) 研究分析了悬臂梁钻台区、中间区及铺管甲板区的长度同普通框架、加强框架区的相互位置及相互距离等关系,实现对其实现参数化建模。研究分析悬臂梁的各个尺寸间的关系,并找出几个对其影响较大的参数。分析悬臂梁处于不同外伸及横移状态下的受力及约束情况,并对其实现参数化加载。

(2) 以 ANSYS 为分析工具,南海 4 号悬臂梁的结构形式为基础,使用户输入较少一些参数,就可以迅速生成悬臂梁建模、加载分析的命令流,调用 ANSYS 并进行有限元分析运算,并提取其分析结果。

(3) 用 VB6.0 为开发工具,通过 OLE 调用 AutoCAD,迅速生成悬臂梁的三视图等图形。

本文用参数化建模、分析及绘图化思想,建立了悬臂梁整个参数化模型,使设计者只需修改一些参数就可以完成全模型有限元及绘图工作,大大降低了设计者的工作量。

关键词: 自升式平台; 悬臂梁; 参数化; ANSYS

RESEARCH OF DESIGN TOOL FOR CANTILEVER OF THE JACKUP PLATFORM

Abstract

In the design process of the Jack-up platform, the design of cantilever beam is very important for the global operational capacity of the platform. During the platform's design, the global design scheme needs to be modified due to many factors, the platform also needs to be modified, so the cantilever beam needs to be modified in size. The structural calculation and verification must be made for each revising. The most reliable of structural calculation is the finite element analysis program. It is a complex and time-consuming work to establish the finite element structural model of the cantilever and it will be tremendous workload if the design model frequent changes. Accordingly it will be of significance to study and develop a tool which can make parameters design, finite element modeling, loading, analysis and generating graphics and so on.

To solve the above problem, the writer does some research in the creation of parametric modeling and drawing graphics for the cantilever of jack-up platform based on VB6.0. The writer made achievement of visualization of a system of input parameters, the main contents are as following:

1 Some researches were made among the length of the drilling area, the connecting area and the deck and the mutual location of the common framework and the strengthened framework, and the parametric modeling was succeeded in them. The relationships were analyzed about various dimensions of the cantilever, and some parameters which influence on the cantilever mostly were found. The forces and constraints of the cantilever which was in different overhangs and transverses were studied, and the parametric loading was also succeeded in them.

2 A system was succeeded on the basis of the cantilever structure of NH4 platform and ANSYS software, which can make the user input less parameters and generate the cantilever modeling and loading order flow rapidly, then it call ANSYS FEM analysis computation, finally, the results can be extracted from the analysis.

3 The system can call the AutoCAD through OLE based on VB6.0. It also can generate the three-view graphics of the cantilever and other graphics quickly.

In this paper, on the thinking of parametric modeling, analysis and mapping, the entire parameter model of the cantilever was established. So that the designer can complete the finite

element model and the entire mapping work by making some modification of some parameters, it can reduce the workload of the designer greatly.

Key Words: Jack-up platform; Cantilever; parametric; ANSYS

独创性说明

作者郑重声明：本硕士学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含为获得大连理工大学或者其他单位的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

作者签名： 李昊 日期： 2008.1.5

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连理工大学硕士、博士学位论文版权使用规定”，同意大连理工大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

作者签名： 李昊

导师签名： 陈明

2008年1月5日

1 绪论

1.1 论文背景及意义

随着社会的发展和科技的进步,人类对于能源的需求也愈来愈大。石油工业是能源工业中最主要的组成部分,当陆上油气资源经过长期、大规模开发之后,世界范围内的油气勘探与开发已转向了占地球表面 71%左右的海洋,并逐渐形成了投资高、风险大、高技术密集的能源工业新领域。目前,世界上已经被证实的石油储量中海洋石油占 50%,预计到 2015 年海洋石油产量将占世界石油总产量的 39%。我国海域辽阔,其中大陆架面积约 110 万平方公里。渤海、黄海、东海和南海都有大面积的沉积盆地,其中具有油气勘探价值的面积在 60 万平方公里以上,近海海域累计探明石油地质储量为 24.1 亿吨,近海石油储量可达 50~150 亿吨,这是我国海上石油天然气开发的丰富资源基础。海洋平台是海洋石油天然气资源开发的基础性设施,是海上生产作业和生活的基地,它为开发和利用海洋资源提供了海上作业与生活的场所。海洋平台的设计和建造水平,在一定程度上标志着海上石油的开发水平。自上世纪 40 年代后期第一座钢质海洋石油钻井平台在墨西哥湾建成投产以来,海洋平台的发展经历了由简单到复杂的过程。平台的建筑材料从木材到钢材,到钢筋混凝土;结构形式从固定式到移动式等多种结构形式;作业水深 2~3 米,发展到几百米,甚至近千米。

海洋平台^[1-6]大体上可以分为移动式平台和固定式平台两大类。移动式平台包括坐底式平台、自升式平台、半潜式平台和钻井船;固定式平台包括钢质导管架平台、混凝土重力式平台、张力腿式平台和牵索塔式平台。早期的平台都是固定式平台,1896 年,美国人以栈桥连陆方式在加利福尼亚距海岸 200 多米处打出了第一口海上油井,它标志着海上石油工业的诞生。到了 20 世纪 40 年代,第一台专门用于海上石油钻探开采的平台建成。虽然此平台的工作水深只有 7 米,但是这项技术进步却使海上石油工业出现突飞猛进的发展。到 1979 年全世界近海已有 7000 余座固定式海洋石油钻探生产平台。第二次世界大战后,海洋石油钻探开采技术突飞猛进,可开发深度越来越大,并能在各种复杂的海况情况下开采石油。20 世纪 50 年代以后,研制成功各种移动式钻井平台,克服了固定式平台不能重复使用的缺点,并大大增加了工作水深。移动式海洋石油钻井设备拥有自己的浮力结构,可以用拖船拖航。有的还拥有自己的动力设备,可以自航。进入 20 世纪 70 年代,海上石油平台的数量猛增,特别是半潜式平台。1965 年还只有 70 台,截至 2001 年 3 月浮动石油平台已超过 600 台,遍布世界各个沿海地区。统计分析,

大约 41% (267 座) 的海洋石油平台的年龄超过 20 年, 其中相当一部分将在未来 5 年内更新, 即每年大约需要更新 50 余座海洋油气平台。

据研究表明, 海上石油天然气资源主要存在于大陆架。由大陆架、大陆坡和大陆隆三部分组成的大陆边缘占海洋总面积 25%。大陆架一般是指由陆地向外延伸到水深 200 米左右的海域; 大陆坡由大陆架向外延伸到水深 2500 米处; 大陆隆则由大陆坡再向外延伸到 4500 米水深。根据石油天然气生成于沉积岩的正确假设, 油气生成取决于沉积层的厚度。大陆边缘的沉积层厚达数千米, 它们的油气潜在资源比深海海底大得多。据专家估计, 大陆边缘含有的油气潜在资源占海底总的油气资源的 99%, 而深海海底沉积中只占 1%。自升式平台的结构形式和特点最适于在中浅深度海域工作, 又由于自升式平台具有所需钢材少, 造价低, 在各种海况下都能平稳进行钻井工作等优点, 因而在海上石油开发中得到广泛应用。据资料预测, 未来 5 年海洋油气开发将继续保持活跃, 海洋油气平台的需求也将保持较高的水平, 常规悬臂自升式平台市场需求将呈现出繁荣的景象。

1.2 海洋平台研究现状

海洋平台结构在服役期间要承受复杂的载荷, 各种结构失效造成的平台事故损失严重。为了使昂贵的平台能安全长期地运营, 对海洋平台诸多方面的研究自海洋平台出现以来就不断地进行着。

对于海洋平台所受载荷研究, 主要集中在风、浪、流等环境载荷上, 而波浪载荷也是研究的重点^[10]。波浪载荷与波浪理论密切相关, 常用的波浪理论有线性波理论、坦谷波理论和椭圆余弦波理论, 而在海洋工程界采用更多的则是 Stokes 发展的有限波幅理论^[9]。自从 1951 年 Morison 和他的同事们在大量试验与理论研究基础上提出著名的 Morison 公式计算平台桩腿波浪力以来, 一直沿用至今^[7]。关于海洋平台波浪响应的研究进行的也很多, Dario Boote 等分析了海洋平台结构在非线性时域内的响应, 并利用 ANSYS 非线性有限元模型计算了平台整体结构的极限强度和剩余强度^[12]。G.J.Grundlehner 研究了处于升船状态的自升式平台, 在典型恶劣深水海况下的动力响应, 结果显示动力响应的不确定性主要与波峰模型、Morison 公式和阻尼有关^[16]。英国 Najafian^[38]等用随机抽样技术对波浪和流作用下海洋结构随机响应的概率分布进行了研究, 不仅分析了几个实际平台的实测数据, 而且对群桩结构的随机响应进行了抽样分析, 得到了各参数的概率分布。荷兰 Karadeniz^[39]对波浪和地震载荷联合作用下海洋结构的运动进行了谱分析, 首先对波浪和地面运动进行了随机描述, 即波浪谱和地震的表示形式, 然后对结构的水动

力阻尼和附加质量及波浪和地震力在频谱内作了数学描述,最后得到系统的传递函数和运动响应。Hartnett 和 Mullarkey^[40, 41]应用谱分析技术,对大型导管架平台的随机响应问题进行了研究,与有限元分析技术结合,建立平台的刚度阵、质量阵,将平台模拟成空间刚架结构,每个构件为三维梁单元,并考虑了剪切力的影响。Han 和 Benaroya^[42]采用 P-M 谱和 Morison 方程建立随机波浪力计算模型,并比较了顺应式海洋平台在被模拟成线性、非线性两种模型的情况下对随机波浪的响应。

在平台结构的应力计算方面,有限元分析方法日趋成熟。戴大农等采用三维等参元和三维相对自由度壳元的组合模型和子结构技术对海洋平台管节点的应力进行了有限元分析^[16]。在整体结构有限元分析中,由于构件众多,经常采用等效刚度法,将实际结构中的组合型材简化成刚度等效的梁单元—等效梁^[18, 19]。欧进萍^[43]等采用实测冰压力时程,对渤海辽东湾北部的 JZ-202 MUQ 平台结构进行了冰振反应分析,计算了不同设计冰厚、不同作用方向和标高及平台桩腿有无正倒锥体的结构反应,探讨了正倒锥体对减轻冰力和结构反应的作用。曲月霞和王永学^[44]假定冰厚为具有对数正态分布的随机变量,并考虑了冰的刚度、破碎长度及清除应力随冰厚的变化,建立了海冰与近海结构物动力相互作用的随机数学模型。分析了冰和结构的各种参数对海冰作用下平台结构振动的影响,对不同动力特性的导管架平台结构简化模型,进行了海冰作用下结构自激振动响应的数值计算。张运良^[45]对冰荷载作用下结构动力响应研究现状进行了综合评述。

屈曲也是结构的主要失效模式之一。关于等值梁和矩形板的屈曲已经有了精确解^[20, 21],关于类似平台甲板单层板格屈曲和后屈曲的研究也非常活跃。Shanmugam 等对受轴向和横向压力作用的四边简支加筋板的屈曲进行了试验研究,结果表明随着板柔度的增加,加筋板的极限承载能力下降的非常快^[22]。我国学者王震鸣等探讨了有缺陷金属和复合材料加筋板壳的面板在局部屈曲前后的有效刚度问题。给出了加筋板在外载荷作用下面板先发生局部屈曲,或局部屈曲载荷与整体屈曲载荷相近时承载能力的近似计算方法,指出了提高加筋板壳承载能力的主要途径^[23]。王永军、崔维成利用 EPM 法的基本思想推导了船体平板和加筋板格在联合载荷作用下的压缩极限强度计算公式,公式中考虑了残余应力和初始挠度的影响^[24]。Antonio F. Mateus 等利用非线性有限元分析方法研究了典型船舶与海洋工程板架结构的屈曲与后屈曲行为,分析中重点考虑了腐蚀的影响^[25]。

据统计,在金属机械结构的断裂事故中,有 80%以上是由疲劳引起的。疲劳破坏也是船舶与海洋工程结构主要的失效模式之一。对于船舶结构的疲劳问题,在二十世纪六十年代就已引起造船界的关注,而人们对海洋平台结构的疲劳研究则要更早一些。1980 年 Alexander Keyland 号半潜式平台在北海翻沉,造成一百余人葬身海底,调查分析的

结果表明,结构的疲劳是事故的重要原因之一。由于海洋平台结构疲劳破坏的事故时有发生,并且造成巨大的损失,因而海洋工程结构的疲劳破坏日益引起重视。目前世界各主要船级社的平台建造与入级规范都建立了各自的疲劳强度校核方法与许用应力范围衡准。在船舶与海洋工程界中,关于结构的疲劳破坏进行了大量的研究^[37]。在对结构的疲劳损伤和寿命估算中,通常采用 Miner 线性累积损伤理论和 S-N 曲线来计算,并通过试验总结出一些规律^[29]。近年来,断裂力学的方法在疲劳分析中的应用越来越广泛。丁克勤、柳春图等利用断裂力学方法对海洋平台用钢的疲劳裂纹扩展进行了系统研究,在试验基础上总结出确定裂纹扩展曲线的快速方法^[27, 28]。

早期的疲劳分析都是在确定性的意义上进行的,认为计算的有关参量都有确定的数值。但事实上海洋工程结构的疲劳是一个受大量不确定因素影响的复杂现象,而且大多数影响因素从本质上讲是随机的^[36]。例如,由海浪无规则运动引起的波浪载荷是随机的,由材料性能的分散性和材料性能测试过程中不确定性因素得到的结构疲劳强度是随机的,另外在疲劳计算中由假设和简化造成的计算结果与结构真实内力之间的误差也是随机的。后来虽然引入 P-S-N 曲线方法,但它只是对确定性方法的局部改进。随着认识的深入和科技的进步,可靠性理论在结构的疲劳分析中的应用飞速发展。朱启宪从实用的观点叙述了有关海洋平台可靠性设计的主要问题和采用可靠性安全系数法的主要步骤。C. Guedes Soares 等对含有多裂纹结构的疲劳可靠性进行了研究,并分析了裂纹初始扩展时间与初始裂纹长度对可靠度的影响。

1.3 自升式平台及悬臂梁结构

1.3.1 自升式平台

自升式平台产生于 1951 年,目前在世界范围内具有最为广泛的应用,数量不断攀升,在移动式平台家族中占据主要地位。自升式平台数量随年份的变化趋势见图 1.1。据 RIG LOCATOR 的调查报告表明,截至 1999 年底,太平洋及中东地区的移动式钻井装置共 165 座,其中自升式平台 135 座,占总数的百分之八十以上。1999 年在建的 30 座平台中,有 10 座是自升式平台。

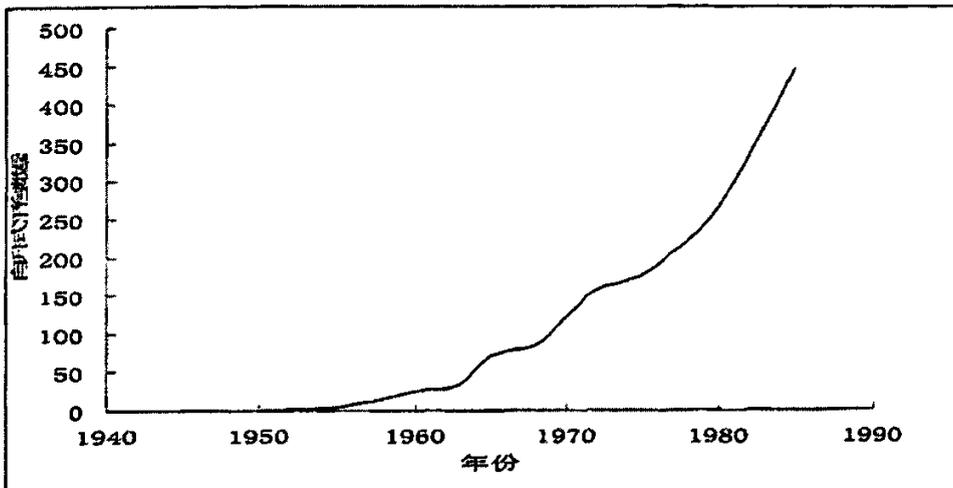


图 1.1 自升式平台数量随年份变化图

Fig.1.1 The count changed by year of Jack-ups

自升式平台由平台主体、桩腿和升降机构三部分组成。

平台主体的平面形状一般有三角形(三桩腿)、矩形(四桩腿)和五角形(五桩腿)等。平台主体通常是一个具有单层底或双层底的单甲板箱形结构。其内部根据作业、布置和强度要求设有纵舱壁和横舱壁,但在桩腿之间的连线上必须设置强力舱壁作为平台主体的主桁材。

桩腿的作用主要是在平台主体升起后支撑平台的全部重量,并把载荷传至海底。桩腿的结构形式分为壳体式和桁架式两类。壳体式桩腿由钢板焊接成封闭形的结构,其横断面有圆形和方形两种,早期的自升式平台桩腿多为圆柱壳体。为配合升降装置,桩腿上有的设有销孔,有的装有齿条。壳体式桩腿一般用于工作水深 60~70m 以下,深水的自升式平台都采用桁架式桩腿。桁架式桩腿由弦杆、斜撑杆和水平撑杆组成,在弦杆上装有齿条。为适应海底地貌和土质的不同情况,桩腿下端可设计成单独带桩腿箱,亦称桩靴,早期的自升式平台也有设计成整体沉垫的形式。

升降装置装在平台主体和桩腿的交接处,升降机构能使桩腿和平台主体实现上下相对运动,或把平台主体固定于桩腿的某一位置。升降装置常用的有电动液压式和电动齿轮齿条式两类。电动液压升降装置常用于壳体式桩腿,它利用液压缸中活塞杆的伸缩带动环梁上下运动,并利用锁销将环梁和桩腿锁紧而实现平台和桩腿的相互运动。电动齿轮齿条升降装置常用于桁架式桩腿,它由电动机经过减速机构带动齿轮转动,使齿轮与桩腿上的齿条啮合而完成平台主体与桩腿之间的相互运动,当电动机处于制动状态时,则可将平台主体固定于桩腿的某一位置。

1.3.2 悬臂梁结构

自升式平台依据平台钻井区域结构形式的不同可分为槽口式自升式平台和悬臂梁式自升式平台。槽口式平台在主体的尾端开有槽口，钻台及井架位于井口槽的上面，钻台上的钻杆向下通过井口槽到达海底。悬臂梁式平台不在主体结构上开槽，但在甲板上设有两道相互平行的钢梁，钻台及井架安置在钢梁上，钢梁可在滑轨上移动并连同钻台及井架一起伸向平台尾端舷外，成为悬臂式结构。相比之下，悬臂式平台不仅可以钻勘探井，还可以钻生产井，也可进行修井作业，而且井架活动范围大，每次插桩作业钻井数量多，因此比槽口式平台具有更高的效率。不过，悬臂梁的载荷受强度的限制比较大。

悬臂梁结构大体上分为三个区域：钻台区、铺管甲板区和中间区。悬臂梁结构按照其腹板形式可分为两种，一种为单腹板结构形式，如南海4号和941钻井平台的悬臂梁(如图1.2)；还有一种为双腹板结构形式，如三角悬臂轻型自升钻井平台的悬臂梁，其典型横剖面如图1.3。

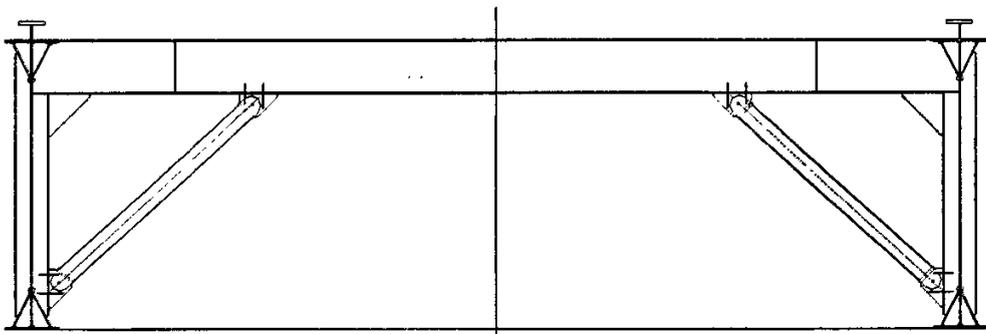


图 1.2 南4平台悬臂梁典型横剖面图
Fig.1.2 The body plan of the cantilever of NH4

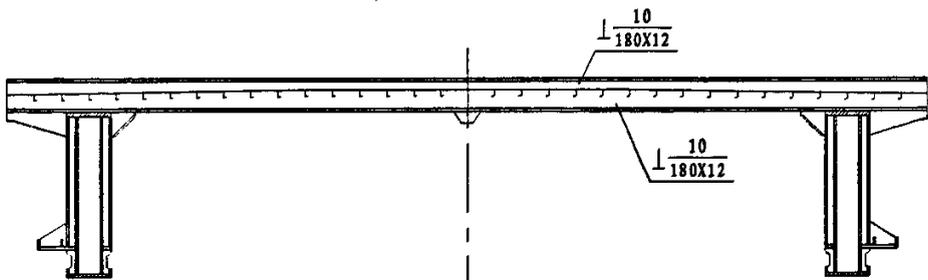


图 1.3 三角悬臂轻型自升钻井平台的悬臂梁
Fig.1.3 The body plan of the cantilever of SANJIAO

1.4 本文研究工作及主要内容

本文通过对自升式平台悬臂梁设计工具的研究，建立了悬臂梁的参数化设计模型及绘图程序，主要研究内容分为三部分：

(1) 悬臂梁参数化有限元分析：是设计工具的主要组成部分。该部分研究分析了悬臂梁的主要组成部分和结构，利用 ANSYS 的二次开发语言 APDL 建立了悬臂梁参数化的建模、加载、求解、后处理报告生成等一系列过程。

(2) 基于 AutoCAD 二次开发的悬臂梁参数化绘图：是悬臂梁设计工具的重要组成部分。由于悬臂梁在设计过程中，其尺寸受到许多因素的影响而不断改变，如果用手工绘图，其工作量是巨大而繁琐的，这就决定了参数化绘图的必要性。

(3) 悬臂梁设计工具的实现：在悬臂梁设计过程中，设计者不仅需要尽快看到悬臂梁的设计图纸，还需要尽快知道目前这个方案的有限元分析的结果，以便设计者尽快做出决策。这就需要将有限元分析和绘图能够实现一体化运行，使设计工作的功能更加齐全。

2 ANSYS 软件及分析步骤

2.1 ANSYS 软件介绍

ANSYS 是用于计算机辅助工程的有限元分析程序，该程序是一个功能强大灵活的设计分析及优化软件包，它可在大多数计算机及操作系统上运行，它的文件可在其所有的产品系列和工作平台上兼容，在 PC 机上生成的模型同样可运行于巨型机上。

ANSYS 有近三十年的发展历史，经过多年的发展，目前已有许多国际化大公司以 ANSYS 软件作为其标准，ANSYS 的用户包括未来杂志“Global100”中排名前十位的工业公司。ANSYS 程序一直在不断地进行发展，其逐渐增加的功能具体如下：结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体动力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、大应变和有限转动功能以及利用 ANSYS 参数设计语言(APDL)的扩展宏命令功能。其菜单系统使用户能够通过对话框、下拉式菜单和子菜单进行数据输入和功能选择，为用户使用 ANSYS 提供了导航。实体建模特性包括基于 NURBS 的几何表示法、几何体素及布尔运算。

ANSYS 可浮动运行于从 PC 机、NT 工作站、UNIX 工作站直至巨型机的各类计算机及操作系统中，数据文件在其所有的产品系列和工作平台均兼容。其多物理耦合的功能，允许在同一模型上进行各式各样的耦合计算，如：热-结构耦合、磁-结构耦合以及电-磁-流体-热耦合等，在 PC 机上生成的模型同样可运行于巨型机上，这样就保证了所有的 ANSYS 用户的多领域多变工程问题的求解。

ANSYS 软件能与大多数 CAD 软件实现数据共享与交换，利用 ANSYS 的数据接口，可精确地将在 CAD 系统下生成的几何数据传如 ANSYS，如 Pro/Engineer、NASTRAN、I-DEAS 和 AutoCAD 等，并通过必要的修补可准确地在该模型上划分网格并求解，这样可以节省用户在创建模型过程中所花费的大量时间，极大地提高工作效率。

2.2 ANSYS 分析步骤

ANSYS 软件^[60]含有多种有限元分析的能力，包括从坚定线性静态分析到复杂非线性动态分析。一个动态的 ANSYS 分析过程可分为以下三个步骤：

- (1) 创建有限元模型
- (2) 施加载荷进行求解
- (3) 查看分析结果

ANSYS 软件的强大与其有着很多的模块应用有很大的关系,其模块化结果如图 2.1 所示。

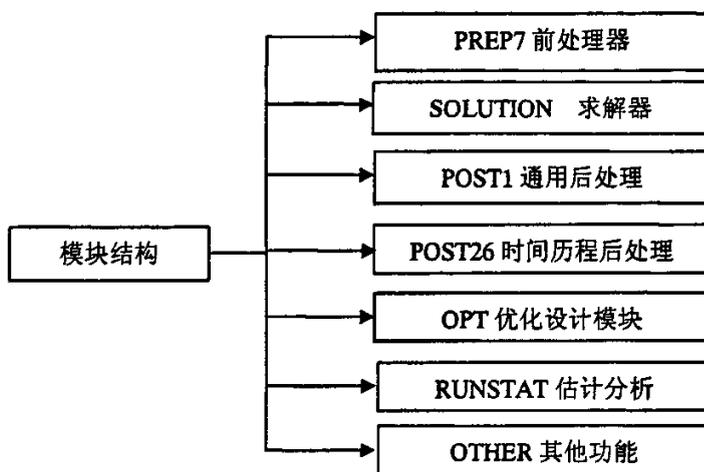


图 2.1 ANSYS 程序的模块化结构

Fig. 2.1 The modularized structure of ANSYS

2.2.1 前处理模块

ANSYS 软件的前处理模块主要实现三种功能：参数定义、实体建模和网格划分。

(1) 参数定义

ANSYS 程序在进行结构建模的过程中，首先要对所有被建模型的材料进行参数定义。包括定义使用单位制，定义所使用单元的类型，定义单元的实常数，定义材料的特性以及使用材料库文件等。

在单位制的指定中，ANSYS 并没有为分析指定固定的系统单位。除了磁场分析外，可以使用任意一种单位制，只要保证输入的所有数据都是使用同一单位制里的单位即可。

单元类型的定义是结构进行网格划分的必要前提，ANSYS 程序根据所定义的单元类型进行实际的网格划分。而单元实常数的确定也依赖于单元类型的特性。

材料的特性是针对每一种材料的性质参数，例如在对材料进行线性分析的过程中，首先要知道这种材料的弹性模量和泊松比。在一个分析过程中，可能有多个材料特性组，

每一组材料特性有一个材料参考号，ANSYS 通过独特的参考号码来识别每一个材料特性组。

对于每一有限单元分析，尽管可以分别定义材料特性，ANSYS 程序允许用户将一材料特性设置存储进一个档案材料库文件。然后，在多个分析中取出该设置重复使用，这样可以大大提高工作效率。

(2) 实体建模

在实体建模过程中，ANSYS 程序提供了两种方法：从高级到低级的建模与低级到高级的建模。

对于一个有限元模型，图元的登记从低到高分别是：点、线、面和体。ANSYS 程序提供了很多高级图元的建立，如球体、圆柱等。当用户直径构建高级图元时，程序则自动定义相关的低级图元(面、线和关键点)。此外，用户也可以先定义点、线、面，然后由所定义的图元生成体。无论用户采用哪种方式建模，都需要进行布尔操作来组合结构数据，以构建用户想要得到的模型。例如加运算、减运算、相交、删除、重叠和粘贴等。

(3) 网格划分

ANSYS 系统的网格划分功能十分强大，使用起来十分便捷。从使用选择的角度来讲，程序的网格划分系统可以分为系统智能划分和仍选择划分两种。从网格划分的功能来讲，则包括四种划分方式：延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划分。延伸划分是将一个二维网格延伸成一个三维网格单元。映像网格划分则是将一个几何模型分解成为几部分，然后选择合适的单元属性和网格空值，分布加以划分生成映像网格。ANSYS 程序提供了六面体、四面体和三角形的映像网格划分。自由划分是由 ANSYS 程序的网格自由划分器来实现的，通过这种划分可以避免不同组件在装配过程中网格不匹配带来的问题。自适应网格划分是在产生了具有了边界条件的实体模型以后，用户指示程序自动产生有限元网格，分析、估计网格的离散误差，然后重新定义网格大小，再次分析计算、估计网格的离散误差，直至误差低于用户定义的值或者达到用户定义的求解次数。

2.2.2 求解模块

求解模块是程序用来完成对已经生成的有限元模型进行力学分析和有限元求解的。在此阶段，用户可以定义分析类型、分析选项、载荷数据和载荷布选项。

(1) 定义分析类型和分析选项

用户可以根据所施加载荷条件和所要计算的响应来选择分析类型。例如，要计算固有频率和模态，就必须选择模态分析。在 ANSYS 程序中，可以进行下列类型的分析：

静态(或稳态)、瞬态、调谐、模态、谱、挠度和子机构。另外,有一点要说明的是,并不是所有分析类型对所有的学科都有效。例如,模态分析对于热力模型无效。

分析选项允许用户自定义分析类型。典型的分析选项是求解的方法、应力硬化的打开和关闭以及 Newton-Raphson 选择。

(2) 载荷

一般所谓的载荷应该包括边界条件(约束、支承或边界条件场的参数)和其他外部或内部作用载荷。在 ANSYS 程序中,载荷分为六类:

- ① DOF 约束
- ② 力
- ③ 表面分布载荷
- ④ 体积载荷
- ⑤ 惯性载荷
- ⑥ 耦合场载荷

另外,还要注意与载荷相关的两个重要术语:载荷步和子步。载荷步仅仅指可求得解的载荷配置。例如,在结构分析中,可以将风载荷施加于第一个载荷步,第二个载荷步施加重力等。载荷步对于将一个瞬态载荷历程曲线划分成几段也是有用的。子步是指一个载荷步中增加的步长。主要是为了瞬态分析或非线性分析中提高分析精度和收敛。子步也称时间步,代表一段时间。

(3) 指定载荷步

载荷步选项是用于更改载荷步的选项,如子步数、载荷步的结束时间和输出控制。根据所作分析的选项,载荷步选项可有可无。

ANSYS 提供的分析类型如下几种:

① 结构静力分析

用来求解外载荷引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响并不显著的问题。ANSYS 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析,而且可以进行非线性分析,例如塑性、蠕变、膨胀、大变形及接触问题的分析。

② 结构动力分析

结构动力分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。相对于静力分析,动力分析要考虑载荷随时间的变化以及阻尼和惯性影响,如旋转机械产生的交变力,爆炸产生的冲击力,地震产生的随机力等。ANSYS 可以进行的结构动力分析类型有:瞬态动力分析、模态分析、谱响应分析以及随即振动响应分析。

③ 结构屈曲分析

屈曲分析是用来确定结构失稳的载荷大小与在特定的载荷下结构是否失稳的问题。ANSYS 中的稳定性分析主要分为线性分析和非线性分析两种。

④ 结构非线性分析

结构的非线性问题分为材料非线性、几何非线性和单元非线性三种。在 ANSYS 程序中，可以求解静态和瞬态的非线性问题

⑤ 热力学分析

热力学分析主要包含三种类型：传导、对流和辐射。ANSYS 程序对热力学问题可以进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热力学分析还可以进行模拟材料的固化和熔解过程的分析，以及模拟热与结构应力之间的关系的耦合问题的分析。

⑥ 电磁场分析

电磁场分析主要可以完成以下几类问题的分析：二维、三维静态电磁场的分析；二维、三维随时间变化的低频电磁场的分析；三维高频电磁场的分析。以解决电磁场的相关问题，如电容、电杆、涡流、电磁场分布、运动效应等问题。主要应用于发动机、变压器、加速器、调制器等在电磁场作用下工作设备的设计和分析问题

⑦ 声场分析

声学分析主要是用来研究在流体(气体、液体等)介质中声音的传播问题，以及在流体介质中固态结构的动态响应特性。

⑧ 压电分析

压电分析主要可以进行静态分析、模态分析、瞬态分析和谐波响应分析，可用来研究压电材料结构在随时间变化的电流或机械载荷响应特性。主要适用于谐振器、振荡器以及其他电子材料的结构动态分析。

⑨ 流体动力分析

ANSYS 程序中的流体动力分析功能用来分析二维、三维流体动力场的问题。可以进行传热或绝热、层流或湍流，压缩或不可压缩等问题的研究。主要用于超音速喷管中的流程，使用混合流研究估计热冲击的可能性，弯管中流体的三维流动，以及管路系统中热的层化和分离问题的设计和研究工作。

2.2.3 后处理模块(POST1 和 POST26)

ANSYS 程序的后处理过程紧接在前处理和求解过程之后，它可以通过友好的用户界面，很容易地获得求解过程的计算结果并对这些结果进行运算。例如，这些结果可能包括位移、温度、应力、应变、速度及热流等，输出形式有图形显示和数据列表两种。交互式后处理过程中，图形可联机输出到显示设备上，也可以脱机输出到绘图仪上。由

于后处理阶段完全同 ANSYS 前处理和求解阶段集成在一起, 故求解结果已存于数据库且能立即查看。

当完成计算以后, 可以通过后处理器查看结果。ANSYS 程序的后处理包含两个部分: 通用后处理模块(POST1)和时间历程后处理模块(POST26)。通过程序的菜单操作, 可以很方便地获得求解的计算结果。结构文件的输出形式有图形显示和数据列表显示两种。

(1) 通用后处理模块(POST1)

通用后处理器可以用于查看整个模块或选定的部分模块在某一步(时间步)的结果。可以获得等值线显示、变形形状以及检查和解释分析的结果和列表。POST1 也提供了很多其他的功能, 包括误差估计、载荷工况组合、结果数据的计算和路径操作等。通过单击主菜单中的 **General Postproc** 可以直接进入到通用后处理模块。

(2) 时间历程后处理模块(POST26)

POST26 为时间历程后处理模块, 可用于查看模型的特定时间步内的结果。可获得结果数据对时间(或频率)的关系的图形曲线以及列表。如绘制位移-时间列表, 应力-应变曲线等。另外, POST26 还具有其他的功能: 可以进行曲线的代数运算, 变量之间可以进行加、减、乘、除运算以产生新的曲线; 也可以取绝对值、平方根、指数、对数、以及求最大和最小值等; 并且也可以求出曲线的微积分运算; 还能够从时间历程结果中生成谱响应。

在求解阶段, 分析结果写入 ANSYS 数据库及结果文件。单个子步的结果作为数据集存贮。每个数据集可用的数据量和类型由所完成的分析类型及求解阶段设置的选项来控制。对于某个分析的每一载荷步, 用户可指定每个子步、最终子步、或最终子步和中间子步的组合写数据集, 用户同样可以选择写什么范围的数据组, 如位移、应力及反作用力。

2.3 参数化设计语言 (APDL)

2.3.1 什么是 APDL

ANSYS 参数化设计语言^[40] (ANSYS Parameter Design Language, APDL)是一门用来自动完成有限元常规分析操作或通过参数化变量方式建立分析模型的脚本语言, 用建立智能化分析的手段为用户提供自动完成有限元分析过程, 即程序的输入可设定为根据指定的函数、变量以及选用的分析类型来做决定, 是完成优化设计和自适应网格的最主要的基础。APDL 允许复杂的数据输入, 使用户实际上对任何设计或分析属性有控制权, 如分析模型的尺寸、材料的性能、载荷、边界条件施加的位置和网格的密度等。APDL

扩展了传统有限元分析的范围，并扩展了更高级运算包括灵敏度研究、零件库参数化建模、设计修改和设计优化等。

APDL 具有下列功能，对这些功能用户可根据需要进行组合使用或单独使用。

- ① 标量参数
- ② 数组参数
- ③ 表达式和函数
- ④ 分支和循环
- ⑤ 重复功能和缩写
- ⑥ 宏
- ⑦ 用户程序

所有这些全局控制特性，允许用户按需要改变该程序以满足特定的建模和分析需要。通过精心计划，用户能够创建一个高度完善的分析方案，它能在特定的应用范围内使程序发挥更大的效率。

2.3.2 APDL 的特点

ANSYS 软件提供了两种工作模式，即人机交互方式(GUI 方式)和命令流输入方式(BATCH 方式)。

前者对于初学者特别是已经习惯使用 Windows 操作界面的广大用户来说，似乎要容易掌握一些，用户不需要记住编程语言的使用规则与命令的使用格式等。只要用鼠标在图形上进行操作即可。对于一个简单的有限元分析模型来说，这也许是要来得更快一些，但对于一个复杂的有限元模型，使用 GUI 方式的缺点就会显露出来。由于一个分析的完成往往需要进行多次的反复，特别是当要对模型进行修改后再进行分析时，在 GUI 方式中就会出现大量的重复操作，这些重复工作有时会占有大量的计算时间。简单而繁杂的重复工作有时甚至会影响到设计人员的心情，从而造成模型分析质量的下降。另外使用前者往往会生成大量的文件，对于一个较大的分析模型，其生成的数据文件也许是几兆字节，有时会是几十兆字节，甚至达到几百兆字节，这么大的数据文件在交流时，是非常不方便的。

而对于后者来说，它具有下列优点：

(1) 可以减少大量的重复工作，特别适用于经少许修改(如修改网格的密度)后需要多次重复的场合，可为设计人员节省大量的时间，以利于设计人员有更多的精力来从事产品的构思。

(2) 便于保存和携带，一个 APDL 的 ASCII 文件一般只有几十千字节，最多也只有几百千字节，其数据文件的容量仅为 GUI 数据文件的千分之一，无论是在网上或平常的交流都很方便。

(3) 不受 ANSYS 软件的系统操作平台的限制，即用户使用 APDL 文件既可以在 Windows 平台进行交流，也可以在 UNIX 或其它的操作平台上运行。而用 GUI 方式生成的数据文件则不能直接交流。

(4) 不受 ANSYS 软件的版本的限制。一般情况下，ANSYS 软件以 GUI 方式生成的数据文件只能向上兼容一个版本，也就是 ANSYS10.0 版本的软件只能直接调出 ANSYS9.1 版本的数据文件，而不能直接调用 ANSYS8.1 及以前的数据文件。而 APDL 文件则不存在这个限制，仅有个别命令会有影响。

(5) 在进行优化设计和自适应网格分析时，则必须使用 APDL 文件系统。

(6) 利用 APDL 方式，用户很容易建立参数化的零件库，以利于其快速生成有限元分析模型。

(7) 利用 APDL 可以编写一些常用命令的集合即宏命令，或者是制作快捷键，并将其放在工具栏上。

(8) 可以利用 APDL 从事二次开发。

尽管有上述有优点，但在使用 APDL 中也会遇到下列的缺点：

(1) 在 ANSYS 软件中对应于每个 GUI 方式的操作，基本上都有一个操作命令与之对应，这样就生成了大量的操作命令，要记住这些命令有很大困难。

(2) APDL 文件方式不直观，由于其属于一种脚本语言，必须要将输入文件中的命令执行完后才能得到结果，这对于不习惯进行程序调试的人来说，容易产生厌烦的心理，甚至会认为太难而放弃使用。

总之，APDL 方式对于一个大型的复杂模型来说，是利大于弊。但 APDL 文件不能按其它语言像 FORTRAN, C, C++ 等语言的编写方式去做，若要这样做，其难度会更大。一般的方法是充分利用第 1 次分析时生成的 LOG 文件，对这个文件作适当的修改即可得到自己的命令流文件，再添加一些 APDL 控制命令，就可以得到 APDL 命令文件了。

2.3.3 参数化变量的使用

参数即 APDL 的变量，用户在定义时不必精确地指明参数类型，无论是整型还是实型，所有的数值类型都将保存为双精度类型。若使用一个没有定义的参数，ANSYS 软件将会以一个非常小的数 2^{-100} 来代替。如 “a=b”，若 “b” 事先没有定义即没有付值，则有 “a= 2^{-100} ”。

有两种类型的参数，即标量和数组。不超过 8 个字符的字符串也可赋给一个参数，但必须要用单引号括起来。APDL 也提供几种类型的数组参数，即数值型、字符型、字符串型和表格类型等。表格类型是一种自动添加数值的特定的数值类型。

(1) 定义参数

参数的命名规则:

- ① 必须以字母开头，长度不超过 32 个字符。
- ② 只能包括字母、数值和下划线。
- ③ 一般不能以下划线开头，以下划线开头的参数为系统隐含参数(在 ANSYS 系统中不显示，只能由编写代码的人员自己知道)，只能用于 GUI 和宏中。
- ④ 以下划线(_)结尾命名的参数可以用*STATUS 命令成组列表显示，也可以成组利用*DEL 进行删除。
- ⑤ 不能使用宏专用的局部参数名称 ARG1~ARG9 和 AR10~AR99。

⑥ 不能使用*ABBR 命令定义的缩写。

⑦ 不能使用 ANSYS 标识字(Label)。(如: TEMP,UX,ALL,PICK,CHAR 等)

变量定义与赋值有以下 6 种途径:

- ① 利用命令*SET 命令进行定义与赋值。
- ② 利用赋值号“=”进行定义与赋值。
- ③ 利用菜单路径 Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters 或命令输入窗口进行定义与赋值
- ④ 在启动时利用驱动命令进行定义与赋值。
- ⑤ 利用*GET 及其等效函数提取 ANSYS 数据库数据进行定义与赋值。
- ⑥ 利用*ASK 命令进行定义与赋值。

在 ANSYS 运行中，使用在线的取值函数，每个取值函数能够从某个指定的项目中返回一个指定的值。

对于某些项，必须要使用在线取值函数来替代“*GET”命令。取值函数的自变量本身就是一个参数名，也可以是其它的取值函数。如:

NELEM(ENUM,NPOS)!返回第 ENUM 个单元在位置 NPOS 的节点编号

NX(NELEM,ENUM,NPOS)

(2) 字符参数

一般来说，字符参数主要是为文件提供文件名和文件的扩展名。可以将所期望的文件名赋给一个字符参数，这个参数就可以在所需要文件名的任何地方使用，而扩展名的

定义也与此相同。特别是在批处理方式下，用户可以通过改变文件名的方式多次运行。但要注意的是，字符参数的字符串个数不能超过 8 个。总的来说，字符参数使用于下列场合：

适用于任何可使用命令域的自变量(也就是说，可以是数字和字母输入的地方)；

适用于“*USE”宏命令的自变量(Utility Menu>Macro>Execute Data Block)；

可在用“*USE”，命令调用宏或者是在是一个“未知命令”的宏时，作为自变量。

(3) 参数的删除

对用户已经定义好的参数，当需要对其中某个参数进行删除时，可采用下列方法之一：

① 菜单删除：选择菜单 Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters，弹出图 2-2 所示对话框，选择 Items 变量列表中的变量，然后单击 Delete 按钮删除之。

② *SET 命令赋空值删除，对于字符参数则赋值为”(空字符串)

例如，要删除 Width 变量，执行命令：

```
*SET,Width,
```

③ “=” 命令赋空值删除，对于字符参数则赋值为”



图 2.2 定义/赋值/删除变量对话框

Fig2.2 Scalar Parameters Tab

例如，要删除 Width 变量和 File_name 字符变量，执行命令：

```
Width=
```

```
File_name=”
```

④ 参数的保存与恢复

如果用户已经在 ANSYS 软件的操作界面上定义了参数，那么可以将它们保存为一个文件，然后再通过读取操作将这些参数读入到其它的操作界面中。但在读入文件时，文件中的参数将会取代当前已经存在的参数，或者将文件中的参数添加到当前已定义参数阵列中。

⑤ 参数名的置换

(1) 数值型参数的置换

当在一个数值型命令域内输入一个参数名时，ANSYS 会自动将参数名所表示的值置换该参数。但如果该参数在输入之前没有赋值(也就是没有定义)，则 ANSYS 软件在没有给出警告的情况下会以一个接近于零的值“2⁻¹⁰⁰”来置换该参数名。若在参数使用过后，在重新定义该参数，大多数情况下其有效的范围将在定义参数之后。

当用单引号将参数名括起来后，就可以防止参数的置换，如'XYZ'等。这也就是字符串的使用，它必须是在非数值域中才能使用。相反，也可以通过用百分号“%”将参数名括起来，在标题、子标题和文件名中进行参数的强制置换，如：

```
/TITLE, Temperature Contours At Time=%Tm%
```

其意义是：用参数 TM 的数值置换并生成一个标题。即该标题被使用时计算机内的时间来置换 Tm。

(2) 字符型参数的置换

一般说来，在一个字符型命令域中使用字符参数，其值也会被自动地置换。下面主要介绍字符参数的强制置换和使用限制。

与数值型参数一样，在某些置换不能进行的场所，字符参数也可以采用强制置换。只要将字符参数名用百分号“%”括起来即可。强制置换一般在"/TITLE"，"/STITLE"，"/TLABEL"，"ABBR"，等命令中有效。

在下列类型的域内，字符参数的强制置换也是有效的。

任何文件名和扩展名的变量。这些变量可在如"/FILENAME"，"RESUME"，"/INPUT"，"/OUTPUT"，和“FILE”的命令中使用时(直接置换也是有效的)。

任何 32 个字符的域内，一个典型的例子是宏名的定义(直接置换无效)。

在任何命令域内作为一个命令名使用、在域 1 即命令行中第一个逗号前的区域内也可作为一个“未知命令”宏名。

另外字符参数也可以用在以下命令中：“*ASK”，“*CFWRITE”，“*IF”，和“*ELSEIF”，“*MSG”，“PARSAV”，和“PARRES”，“*VREAD”，“VWRITE”。

(3) 参数的动态置换

对于允许进行动态替换的场合，任何时候更新参数的值，无论先后顺序凡引用他们的命令都回自动采用信的参数值更新执行结果。能实现动态替换的命令有：/TITLE、*ABBR、/STITLE、/AN3D 和 /TLABEL 等。

⑥ 参数化数组

除了上述介绍的标量参数之外，ANSYS 软件也允许定义数组参数，按大小可分为一维数组(由行组成)、二维数组(由行、列组成)和三维数组(由行、列和面组成)。

ANSYS 允许定义 3 种类型，它们分别是：

(1) ARRAY 数值型数组

ARRAY 数值型数组是缺省的数组类型，用于存储整型或实型数据，行、列和面的下标是从 1 开始的连续整数。

(2) CHAR 字符型数组

CHAR 字符型数组用于存储字符串的数组，行、列和面的下标是从 1 开始的连续整数。

(3) TABLE 表

TABLE 表用于存储整数或实数，是一种特殊的数值型数组，可以实现在数组元素之间的线性插值算法。可以给每一行、列和面定义数组下标，并且下标为实数(而不是连续的整数)，可以根据下标实现数据插值算法。

另外，还有 STRING 字符串数组，即利用*DIM-STRING 可以将字符串输入到数组中，其列和面的下标从 1 开始，行号由字符在字符串中的位置确定。

2.3.4 流程控制

ANSYS 程序总是逐行执行命令，即按顺序逐条语句地执行命令。但是，有时需要改变程序执行的顺序、重复执行语句块等，这就需要一套控制程序流程的方法，APDL 提供的流程控制有以下几种：

*GO 无条件分支

*IF-*IFELSE-*ELSE-*ENDIF 条件分支

*DO-*ENDDO 循环

*DOWHILE 循环

(1) *GO 无条件分支

*GO 是最简单的分支命令，是用来将程序流程转移到指定标识字所在行并执行后面的流程，中间跳过的所有命令行均不被执行，*GO 命令使用格式如下：

*GO, Base

其中：Base 是无条件分支的动作，有以下两种：

① : label: 以冒号(:)开头的标识字, 最大长度为包含 8 个字符的字符串, 可以位于同一文件中的任何位置行。程序读取该命令后, 直接跳转到后边的第一个: label 标识字处。

② STOP: 流程运行该行时将退出 ANSYS 程序。

(2) *IF-*IFELSE-*ELSE-*ENDIF 条件分支

APDL 可以有选择地执行多个语句块中的一个, 通过比较两个数的值(或等于某数值的参数)来确定当前所满足的条件值。*IF 命令的使用格式如下, []中值域表示可以不输入。

***IF, VAL1, Oper1 , VAL2, Base 1 [, VAL3, Oper2, VAL4, Base2]**

其中: VAL 1 是比较的第一个数值(或数字参数);

Oper 1 是比较运算符, 有以下八种:EQ(等于)、NE(不等于)、LT(小于)、GT(大于)、LE(小于或等于)、GE(大于或等于)、ABLT(绝对值小于)、ABGT(绝对值大于);

VAL2 是比较的第二个数值(或数字参数);

Base1 是第一个条件(Oper1)为真时执行的操作, 如果后面没有第二个条件(Oper2), 则 Base1=THEN; 如果后面有第二个条件(Oper2)则 Base1 取下列值, 从而将两个条件组合成一个更复杂的条件:

AND: 表示 Oper1 与 Oper2 条件同时为真时结果为真;

OR: 表示 Oper1 与 Oper2 都为假时结果为真;

XOR: 表示 Oper1 与 Oper2 都为假时结果为真。

VAL3 是比较的第三个数值(或数字参数);

Oper2 是比较运算符, 与 Oper1 一样, 但用于比较 Val3 和 Val4 ;

VAL4 是比较的第四个数值(或数字参数);

Base2 是两个条件(Oper1 与 Oper2)为真时执行操作, Base2=THEN .

一个完整的 IF-THEN-ELSE 条件结构的最简单形式如下, 表示只有一个条件。如果条件为真则执行包含的语句块, 否则跳过并执行*ENDIF 命令的下一条语句:

.....

***IF 命令行 ! 起始行**

..... ! *IF 命令行条件为真时执行的命令行

***ENDIF 命令行 ! 结束行**

.....

(3) *DO-*ENDDO 循环

DO 循环按指定的次数循环执行一系列命令。*DO 命令和*ENDDO 命令分别是循环体的开始和结束行的标识字。一个完整的 DO-ENDDO 结构的一般形式如下：

```
.....  
*DO 命令行      ! 起始行  
.....          ! 循环语句块  
*ENDDO 命令行  ! 结束行  
.....
```

*DO 命令的使用格式如下：

*DO, Par, IVAL, FVAL, INC

其中：Par 是循环控制变量，只能是数值型变量；IVAL, FVAL 和 INC 分别是循环控制变量的起始值、终止值与步长，INC 缺省时为 1。

(4) *DOWHILE 循环

*DOWHILE 循环执行这样一种循环功能：重复执行循环体，直至外部控制参数发生改变为止。*DOWHILE 命令的使用格式如下：

*DOWHILE, Parm

其中，Parm 是循环判断条件，如果 Parm 为真则执行下一次循环，如果 Parm 为假（小于或等于 0.0）则循环终止。

3 参数化有限元分析

3.1 南 4 悬臂梁的结构特点

自升式平台悬臂梁的结构形式多种多样，由于时间限制，不能将所有的悬臂梁的形式都进行分析。由于南海 4 号自升式钻井平台工作性能非常优异，目前应用的最广泛，整体性能比较好，因此，本文选择南 4 平台的悬臂梁进行研究。

根据南 4 平台悬臂梁的设计图纸(图 3.1)进行研究分析，总结出其结构具有以下几个特点：

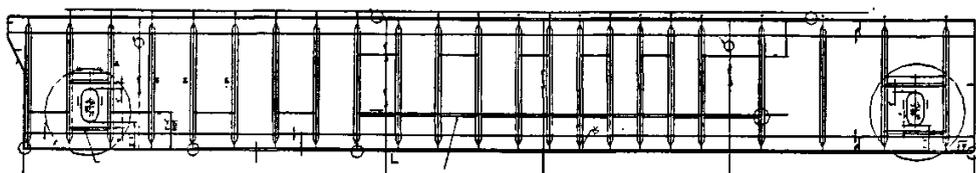


图 3.1 南 4 悬臂梁主视图
Fig.3.1 The plan views of SH4

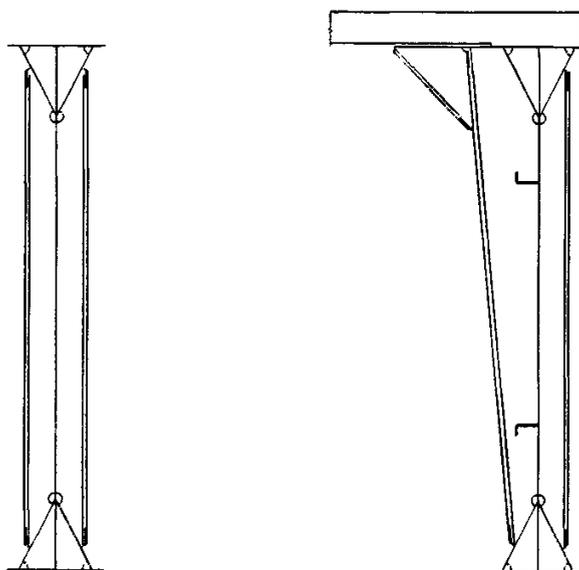


图 3.2 强弱框架剖视图
Fig3.2 The body plan of web frame and common frame

(1) 悬臂梁主体按照自尾部至首部可分为五部分：尾部伸长区、钻台区、过度区、堆管甲板区和首部伸长区。

(2) 悬臂梁腹板部分自尾至首设置强弱框架，强弱框架间距呈现处规律性的分布、且有过度区域。具体来说，即是钻台区设置普通框架 1 区，其框架间距相同，过度区设置普通框架 2 区，其间距也相同，堆管甲板区设置普通框架 1 区，其间距亦相同，堆管甲板自左开始的几个框架设置普通框架 3 区，其等间距的插入相应的强框架中。

(3) 钻井区设置水平横梁以支撑钻台底座，水平横梁下设置斜撑撑杆及垂直肘板，在水平横梁的水平面内设置水平撑板。

(4) 自尾至首上下面板呈连续分布，且处于同一高度，腹板同上下面板连接处设置两侧斜板和纵向加强筋以加强结构强度。

(5) 堆管甲板区设置纵骨和肋骨以加强结构强度。其肋骨间距要同其下面腹板上的强框架加强筋的间距要一一对应。

3.2 建模路线

根据以上南 4 悬臂梁的特点，本文确定建模路线如下：

(1) 该悬臂梁是平面左右对称，因此可以建立对称性模型，可以大大减少建模工作量，降低模型规模，提高求解精度。

(2) 先建纵向结构，后建横向结构。即先建纵向的腹板、面板、上下两侧斜板、强弱框架、加强筋等，后建横向的水平横梁、斜撑撑杆、堆管甲板等。

纵向结构中最关键的一点是强弱框架的分布及定位(包括排列的次序和相互的间距)。普通框架按照间距不同分为 3 种，分别为钻台区(间距 1500mm)、过度区(间距 1300mm)和堆管甲板区(间距 2000mm)，其中在堆管甲板区将三个普通框架等间距的插入到堆管甲板区前三个强框架中。强框架间距分为两种，甲板起始位置间距为 2000mm，最后两个框架间距是用来中和剩余距离的，由于用户给出的堆管甲板长度有可能不是 2000mm 的整数倍，所以设定这个框架间距来中和，其间距值应该在[2000,4000]范围内。在建模过程中，只需要给出不同类型的框架的个数及起始的位置，程序就可以按照自尾至首依次判断每个框架位置究竟是强框架还是弱框架，及判断处其交错关系后建立一系列的框架及其附属的肘板。其中，由于判断各个类型框架间相互位置的程序过长，这里仅将普通框架 1 区同各个类型框架的位置比较关系列出如下。

```
*if,i_COMMON,LT,N_COMMON_FRM(1)+1,then
  x_common=X_COMMON_FRM(1)+i_COMMON*S_COMMON_FRM(1)
  *if,i_WEB,LT,N_WEB_FRM(1)+1,then
    x_web=X_WEB_FRM(1)+i_WEB*S_WEB_FRM(1)
```

```

*if,x_web,LT,x_common,then
    x_common=x_web
    IsFrameOrWeb=1
    i_WEB=i_WEB+1
    i_COMMON=i_COMMON-1
*endif
*elseif,i_WEB,LT,N_WEB_FRM(1)+N_WEB_FRM(2)+2
    x_web=X_WEB_FRM(2)+(i_WEB-N_WEB_FRM(1)-1)*S_WEB_FRM(2)
    *if,x_web,LT,x_common,then
        x_common=x_web
        IsFrameOrWeb=1
        i_WEB=i_WEB+1
        i_COMMON=i_COMMON-1
    *endif
*else

*if,i_WEB,LT,N_WEB_FRM(1)+N_WEB_FRM(2)+N_WEB_FRM(3)+3,then

x_web=X_WEB_FRM(3)+(i_WEB-N_WEB_FRM(1)-N_WEB_FRM(2)-2)*S_WEB_FRM(3)
    *else
        x_web=1e8
    *endif
    *if,x_web,LT,x_common,then
        x_common=x_web
        IsFrameOrWeb=1
        i_WEB=i_WEB+1
        i_COMMON=i_COMMON-1
    *endif
*endif
x_end=x_common

```

上述命令流中，N_COMMON_FRM(1)表示普通框架 1 的个数，X_COMMON_FRM(1)表示普通框架 1 的起始位置，S_COMMON_FRM(1)表示普通框架 1 之间的间距，N_WEB_FRM(1)表示强框架 1 的个数，X_WEB_FRM(1)表示强框架 1 的起始位置，S_WEB_FRM(1)表示强框架 1 的间距，N_WEB_FRM(1)表示强框架 1 的个数，N_WEB_FRM(2)表示强框架 2 的个数，

$X_WEB_FRM(2)$ 表示强框架 2 的起始位置, $S_WEB_FRM(2)$ 表示强框架 2 之间的间距, $N_WEB_FRM(3)$ 表示强框架 3 的个数, $X_WEB_FRM(3)$ 表示强框架 3 的起始位置, $S_WEB_FRM(3)$ 表示强框架 3 之间的间距。

如此将其余两类普通框架也同其余各个强框架的位置比较判断后, 即可建立出这一系列的有着相互位置关系及建立顺序的一系列加强筋。

横向结构中先建水平横梁, 两根水平横梁和腹板上的钻台区的加强筋的位置要一一对应, 两根水平横梁所围成的区域即为钻台区域, 水平横梁上设置钻台下底座、钻台和井架等。水平横梁间的腹板上面板承受钻台区载荷, 水平横梁下设置斜撑撑杆(斜撑撑杆两端通过眼板和水平横梁及腹板连接), 水平横梁和腹板间设置垂直肘板, 和上面板间设置水平撑板。尔后建铺管甲板区, 铺管甲板设置纵骨和肋骨, 肋骨和纵骨均为 T 型材。其中, 纵骨间距为 500mm, 肋骨间距同腹板上的强框架加强筋保持一一对应关系, 甲板两侧边缘同肋骨要留有 50mm 的焊缝距离。

(3) 单元网格划分。选择两种单元, shell163 和 beam24, 强弱框架位置处的加强筋和堆管甲板上的纵骨和肋骨用 beam24, 其他所有的结构均用 shell163。网格细化完毕, 将模型生成另一半后既得到完整模型。

基本建模过程如下一系列图所示

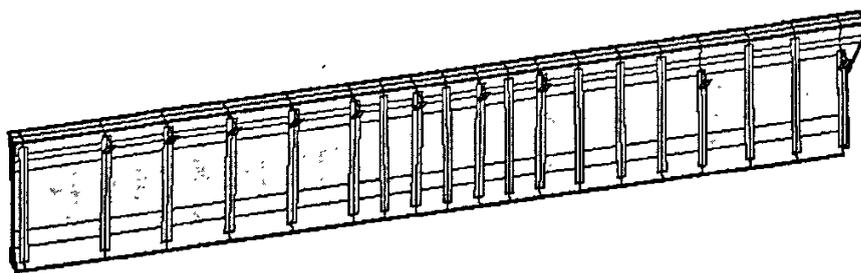


图 3.3 悬臂梁几何模型(单侧)

Fig.3.3 The geometric model of cantilever(unilateral)

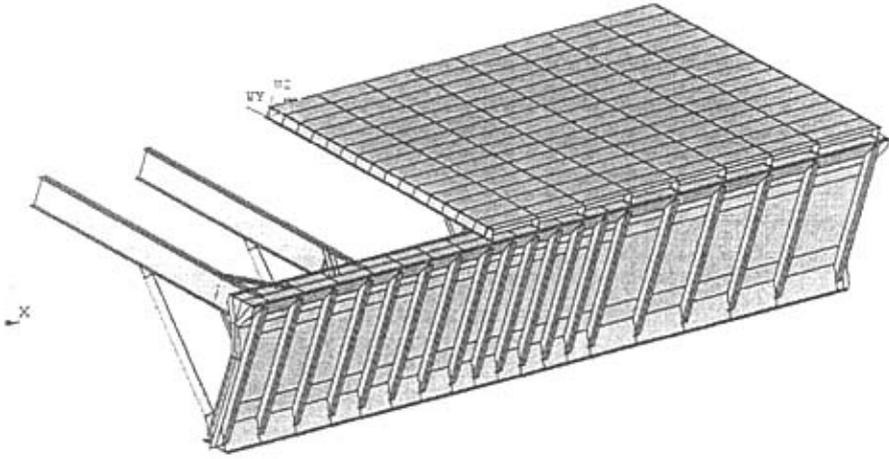


图 3.4 悬臂梁几何模型(半体)
Fig3.4 The geometric model of cantilever(half)

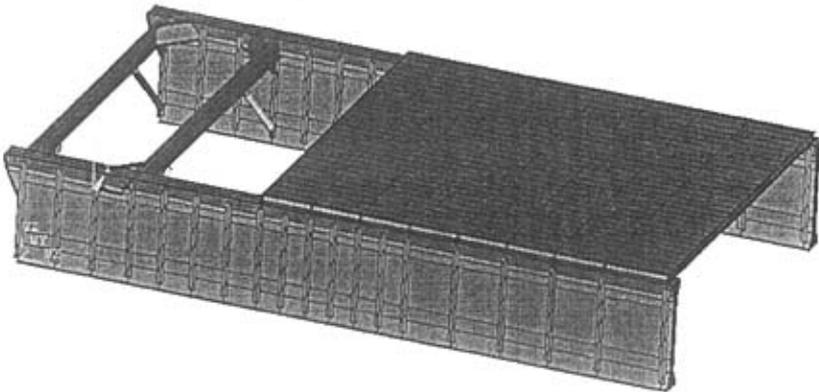


图 3.5 悬臂梁几何模型(整体)
Fig.3.5 The geometric model of cantilever(overall)

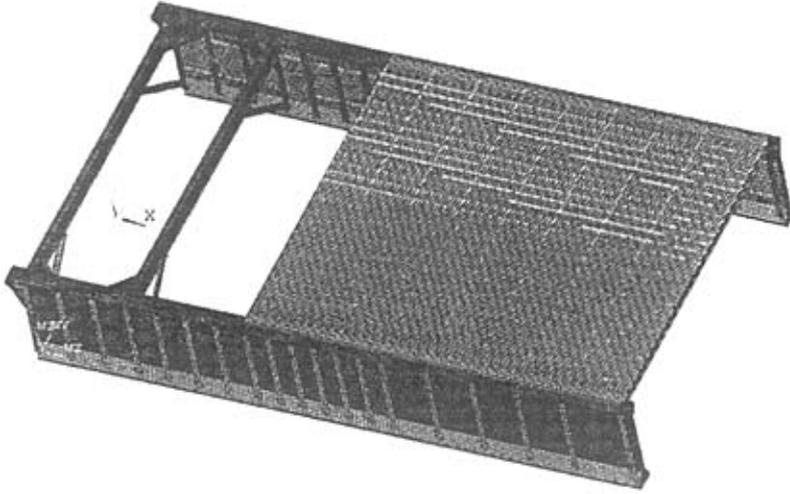


图 3.6 悬臂梁有限元模型（整体）

Fig.3.6 The finite element model of cantilever (overall)

3.3 载荷及约束施加

自升式平台悬臂梁的受力主要来自两方面，钻台区的载荷和堆管甲板上的载荷。钻台区的载荷包括了钻台、下底座、井架和钩载等，堆管甲板区的载荷主要是是其上面存储的大量管子。悬臂梁主要有两种运动方式，即外伸和横移。外伸即是悬臂梁通过液压移动系统在滑轨上前后移动，且在任何位置都能够被移动系统固定。横移即是钻台靠液压滑动系统在钻台底座上沿平台横向滑动，并能实现定位。悬臂梁在处于横移状态下的受力情况如图 3.7 所示，图中 F_1 和 F_2 表示两侧面板所受到的压力， Y 表示悬臂梁横移的距离， G 表示钻台区总重量， B 表示悬臂梁的宽度。

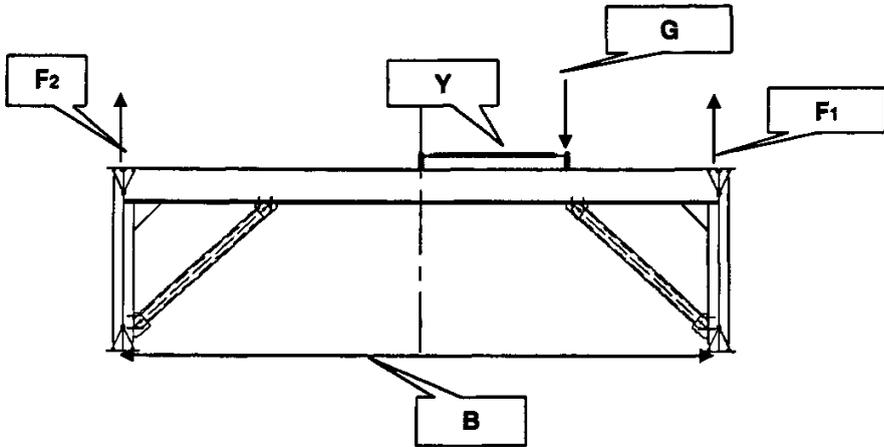


图 3.7 横移状态下悬臂梁受力示意图

Fig.3.7 The analysis of transverse skidding cantilever

由上图可得到如下的方程:

$$\begin{aligned}
 F_1 + F_2 &= G_1 \\
 F_1 \times B &= G_1 \times \left(\frac{B}{2} + Y\right)
 \end{aligned}
 \Rightarrow
 \begin{cases}
 F_1 = G_1 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{Y}{B}\right) \\
 F_2 = G_1 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{Y}{B}\right)
 \end{cases}$$

由以上方程可得出悬臂梁左右面板上的作用力，即可施加其载荷。堆管甲板区安装有可移式管子堆场支柱，储存大量管子，这堆管子重量施加在堆管甲板上。载荷施加部分命令流如下：

```

asel,s,loc,z,H_CANTILEVER
asel,r,loc,x,X_TRAN_I_1-0.5*B_TRAN_I,X_TRAN_I_2+0.5*B_TRAN_I
asel,r,loc,y,-0.5*B_CANTILEVER-0.5*B_TOP_BEAM,-0.5*B_CANTILEVER+0.5*B
_TOP_BEAM
sfa,all,1,PRES,(0.5-EXTEND_BEAM_TRAN/B_CANTILEVER)*WEIGHT_DRILLIN
G/(X_TRAN_I_2-X_TRAN_I_1+B_TRAN_I)/B_TOP_BEAM
asel,s,loc,z,H_CANTILEVER
asel,r,loc,x,X_TRAN_I_1-0.5*B_TRAN_I,X_TRAN_I_2+0.5*B_TRAN_I
    
```

asel,r,loc,y,-0.5*B_TOP_BEAM+0.5*B_CANTILEVER,0.5*B_TOP_BEAM+0.5*B_CANTILEVER

sfa,all,1,PRES,(0.5+EXTEND_BEAM_TRAN/B_CANTILEVER)*WEIGHT_DRILLING/(X_TRAN_I_2-X_TRAN_I_1+B_TRAN_I)/B_TOP_BEAM, EXTEND_BEAM_TRAN

其中, $H_{CANTILEVER}$ 表示悬臂梁的高度, $X_{TRAN_I_1}$ 表示水平横梁 1 位置, B_{TRAN_I} 表示水平横梁宽度, $X_{TRAN_I_2}$ 表示水平横梁 2 位置, $B_{CANTILEVER}$ 表示悬臂梁宽度, B_{TOP_BEAM} 表示上面板宽度, $EXTEND_BEAM_TRAN$ 表示悬臂梁横移距离, $B_{CANTILEVER}$ 表示悬臂梁的宽度, $WEIGHT_DRILLING$ 表示悬臂梁钻台区重量。

当悬臂梁处于外伸状态下, 其重量载荷主要通过固定在主甲板上的几个底座来承受, 底座同时可以对悬臂梁进行约束。而悬臂梁外伸的距离, 即可将底座对悬臂梁进行反方向的运动同等距离来实现。图 3.8 即是外伸状态下的悬臂梁通过底座固定的示意图。

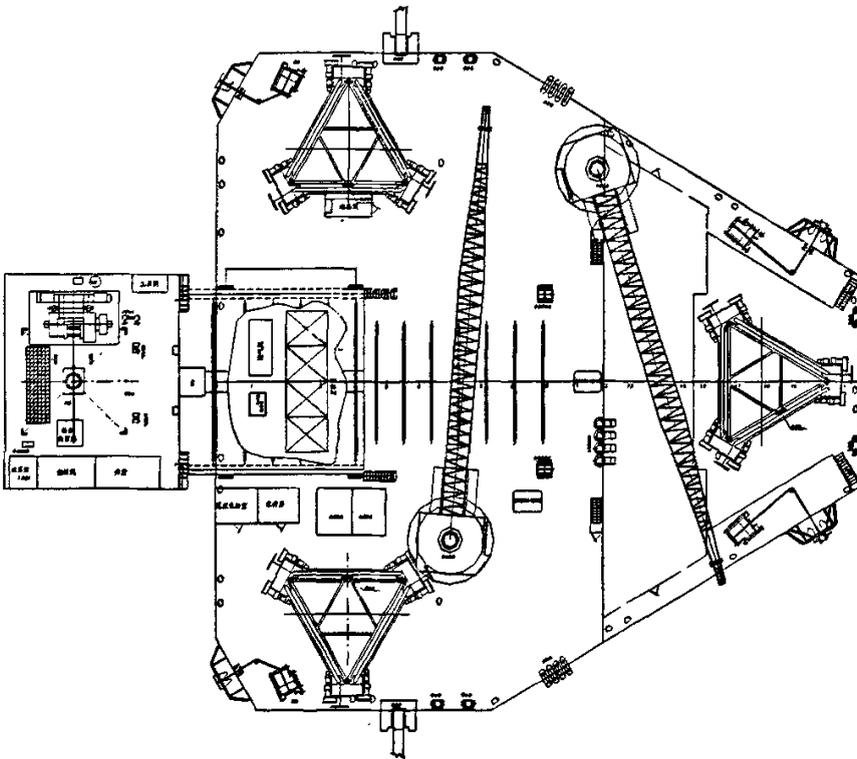


图 3.8 外伸状态下的悬臂梁俯视图

Fig3.8 The vertical view of longitudinal skidding cantilever

3.4 报告生成方法

报告生成器是创建分析报告的工具，允许在有限元分析过程中抓取图像和获取数据，并将这些图形和数据信息编辑整理成 HTML 格式的报告。报告生成器创建报告的步骤如下：

(1) 启动报告生成器，并报告存储名称与存储目录。

(2) 抓取用于创建报告需要的数据，包括模型、载荷、边界条件、求解或结果等的图像、数据表格和列表信息。抓取数据有三种方式：报告生成器抓取工具、第三方的外部 HTML 编辑器或第三方的外部演示报告制作软件。

(3) 利用抓取的信息组装成完整报告。



图 3.9 浏览报告内容

Fig.3.9 View the contents of the report

在这里抓取了 4 个数据，分别是单元数目与节点数目、边界支撑反力、最大与最小平动位移和最大与最小强度及等效应力。生成的报告如图 3.9 所示。

3.5 参数化实现

悬臂梁结构比较复杂，反应其尺寸的参数又非常多，而对于自升式平台的设计者来说，有目的的选择一些能够反应悬臂梁主要特征的参数显得非常有意义和应用价值。基于以上目的，本文将悬臂梁的参数分为三类：用户给定值、系统固化值和因变值。

用户给定值即是平台设计者认为能够反应悬臂梁主要特征的一些参数。主要有以下一些值：

悬臂梁长度	T0
悬臂梁宽度	T1
悬臂梁高度	T2
钻台区长度	T3
堆管甲板长度	T4
钻台区面板宽度	T5
钻台区面板厚度	T6
钻台区腹板宽度	T7
钻台区载荷	T8
甲板载荷	T9
外伸长度	T10
横移长度	T11
底座 2 距离	T12
底座 3 距离	T13

系统固化值即是一些在建模过程中，其尺寸不发生变化的一些值，如一些肘板，首尾端的长度等。主要有以下一些：

首段伸长区长度	300mm
尾段伸长区长度	750mm
普通框架 1 间距	1500mm
普通框架 2 间距	1300mm
普通框架 3 间距	2000mm
普通框架 3 个数	3
强框架 1 间距	2000mm

强框架 2 个数	2
纵向加强筋高度	1200mm
水平横梁高度	850mm
水平横梁宽度	300mm
水平撑杆长度	1800mm
水平撑杆厚度	110mm
斜撑撑杆外径	150mm
斜撑撑杆厚度	10mm
甲板纵骨间距	500mm
堆管甲板高度	240mm

因变值就是建模过程当中需要用到的，同时可以由用户给定值和系统固化值得到的一系列数值。主要有以下一些：

普通框架 1 个数：

$$N_COMMON_FRM_1 = \text{Int}(T3 / 1500) - 1$$

普通框架 2 个数：

$$N_COMMON_FRM_2 = (\text{Int}((T0 - T3 - 750 - 300 - T4 + 100) / 1300)) - 1$$

普通框架 2 起始位置：

$$X_COMMON_FRM(2) = T3$$

普通框架 3 起始位置：

$$X_COMMON_FRM_3 = X_WEB_FRM_1 + 1000$$

强框架 1 个数：

$$N_WEB_FRM_1 = \text{Int}(T4 / 2000) - 2$$

强框架 1 起始位置：

$$X_WEB_FRM_1 = T0 - 750 - 300 + 100 - T4$$

强框架 2 间距：

$$S_WEB_FRM_2 = T0 - X_WEB_FRM_2 - 300 - 750$$

强框架 2 起始位置：

$$X_WEB_FRM_2 = X_WEB_FRM_1 + 2000 * (N_WEB_FRM_1 + 1)$$

甲板宽度：

$$B_PIPE_DECK = T1 + (\text{Int}(T5 / 200)) * 100$$

甲板起始位置：

$$X_WEB_FRM_1 = T0 - 750 - 300 + 100 - T4$$

这样,通过用户给定值、系统固化值和因变值三类值即可实现用户给定一些值,就能够迅速生成一套悬臂梁的方案,实现了基于 APDL 的参数化建模。

3.6 ANSYS 调用方法

3.6.1 基本原理

每运行一次 ANSYS 生成一段 *.log 文件,该文件记录了 ANSYS 运行过程中的每一个命令,以便在系统崩溃或用户发生重大错误时,用 /input 命令 *.log 文件重新执行命令,并且 ANSYS 为使用者提供了 batch 功能,利用此功能可以实现 *.log 文件的后台调用,利用这一功能,我们可以利用自己熟悉的编程软件生成或修改 *.log 文件中相应的参数,并调用 ANSYS 程序计算,在主程序的调用过程中主程序必须实现以下四个功能:

- (1)要实现前处理参数输入功能;
- (2)根据用户输入的参数生成 ANSYS 宏命令文件;
- (3)将生成的宏命令文件提交给 ANSYS 程序进行批处理操作;
- (4)程序需要判断 ANSYS 的批处理操作何时结束。

ANSYS 程序调用的关键是第(3), (4)步,将这两步工作封装在一个可以由多种开发工具调用的控件中,供开发者使用,这将大大简化开发程序的代码。

3.6.2 ANSYS 调用实现

(1) *.log 文件的提交

首先在 VB 开发环境中生成一个普通工程,然后执行“文件”菜单中的“添加工程”命令,在打开“添加工程”对话框并在其中选择“ActiveX 控件”并确定。在建立的控件设计器中添加一个命令按钮和一个计时器,然后调整为合适大小并设置相应各种属性,注意要将计时器的 Enabled 属性设置为 False; Interval 属性设置为 3000。

在按钮控件中添加如下代码:

```
Private Sub Command1_Click()  
    Dim x  
    x=Shell("X:\.....\ Files\Ansys Inc\v100\ANSYS\bin\intel\ansys100 -b -i  
    Y:\.....\inputname — OY:\.....\outputname")  
    Timer 1.Enabled=True  
End Sub
```

其中 X:\.....、为 Ansys 安装路径。Y:\.....、为输入、输出文件的放置位置, inputname 和 outputname 是用 APDL 语言编写的 ANSYS 输入文件名和结果输出文件名。

(2) 判断 ANSYS 计算结束

判断 ANSYS 程序计算完毕的方法有两种,第一种是在程序中通过取得 ANSYS 软件运行完成时提示框的句柄,然后取得上面“Solution is done”的字符串,如果取到相应的字符就可以判定 ANSYS 计算完毕。但是 Batch 命令计算过程是在后台完成,计算结束的时候并没有提示窗口显示,并且在 VB 中使用这一方法过于烦杂,本文也没有对此方法进行过验证。第二种判定方法是在运行目录中寻找 file.err 文件是否存在,因为只有 ANSYS 程序运行完后才一会写这一文件,所以可以通过判定此文件是否存在而检测 ANSYS 程序是否完成。

综上所述,本文程序选择第二种方法判定 ANSYS 计算是否结束。

在计时器中添加如下代码:

```
Private Sub Timed_Timer()  
    If Dir("Z:\.....\file.err")<>" " Then  
        MsgBox(计算完毕!)  
        Timer 1.Enabled=False  
    End If  
End Sub
```

其中的 Z:\.....\为生成执行文件后的执行位置。

完成以上步骤后,将所有生成文件保存。这样具有 ANSYS 软件调用功能并可以判断计算是否完成的控件就具备实用功能了。

以上的控件的使用方法如下:

- (1) 启动 visual basic, 建立一个标准 EXE 工程。
- (2) 执行“工程”菜单中的“添加用户控件”命令, 打开“添加用户控件”对话框。
- (3) 选择对话框中的“现存”选项卡, 打开文件目录列表框。
- (4) 在列表中找到刚才保存文件中的***.ctl 文件。
- (5) 单击“打开”按钮。

3.7 程序实现功能

根据上述方法, 开发出了自升式平台悬臂梁设计工具(其界面如图 3.10), 该工具有以下一些优点:

- (1) 允许用户可以根据实际计算工况, 输入特定的计算参数, 包括长度、宽度、板厚等。
- (2) 用户在每个文本框内输入参数时, 右边的两个图片框即可显示该数值在主视图及俯视图中的位置及范围。

(3) 用户在输入各种参数以后、进行计算之前可以对输入的数据进行修改、添加和删除操作,以保证输入正确的参数。

(4) 可自动生成参数化建模、网格细化、加载、生成报告和数据提取的命令流文件,并在后台调用 ANSYS 分析软件,对命令流文件进行加载,且对生成的报告结果进行数据读取,并将其处理后得到设计者希望得到的数据反应到 VB 的操作界面上去。

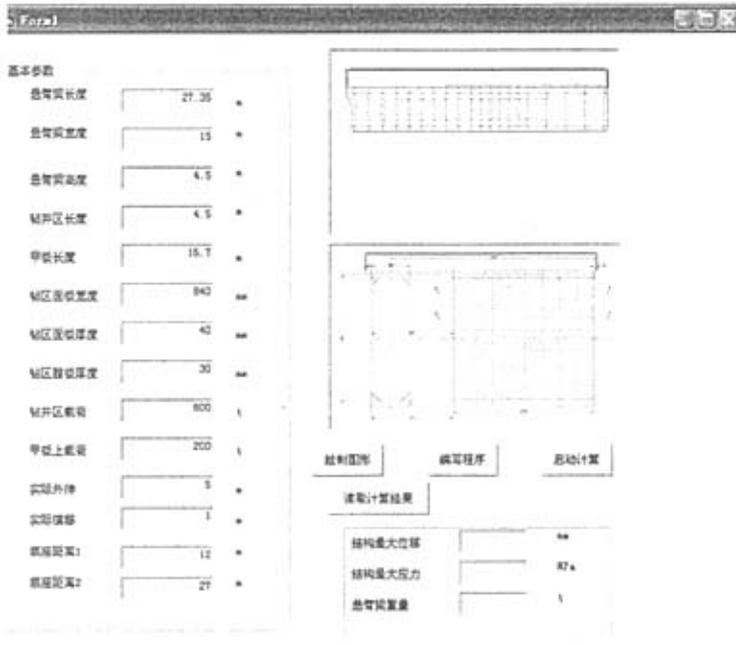


图 3.10 程序操作界面

Fig.3.10 The operating procedures interface

3.8 本章小结

本章首先介绍了采用的南海 4 号钻井平台悬臂梁的结构形式及其特点,然后以其结构为母型,创建出一套适用应用分析的参数化悬臂梁模型,使其可以实现参数化建模、加载、生成报告等功能。再利用 VB6.0 对该参数化分析的命令流文件进行封装并实现可视化界面输入,使其能够实现调用 ANSYS 并进行分析计算,还可以从结果文件中提取数据。

4 悬臂梁的参数化绘图

自升式平台悬臂梁的绘制工作是一个比较复杂的过程，而在设计的过程当中，悬臂梁的尺寸是一个不断变更的过程，因此，将绘图过程实现参数化的绘制会是非常有意义和应用价值的。

4.1 概念

所谓参数化绘图，就是将图形的尺寸与一定的设计条件(或约束条件)相关联，即将图形的尺寸看成是“设计条件”的函数。当设计条件变化时，图形尺寸就可以随之相应更新。

参数化绘图是相对于交互式绘图而言的。早期的 C 系统只能提供交互式绘图功能，交互式绘图只能是手工绘图的简单替代。只有参数化绘图，才能充分发挥 CAD 准确、快速的特点。如果把参数化绘图看成一种功能和目标，那么处在不同的角度，就会有不同的理解：

(1) 从用户的角度看，参数化绘图是一种功能，如典型的 CAD 支撑软件 Pro Engineer 和 MDT (Mechanical DeskTop) 等。用户可以方便的重定义模型和更新显示结果，任何交互式的尺寸改动都会立即导致整个模型的变化。也就是说，修改一个尺寸后，图形中相关尺寸就会自动更新。因此，为了满足各类不同用户的绘图要求，所开发的绘图软件应该是参数化绘图软件。

(2) 从软件开发者的角度看，参数化绘图是一种目标，是指程序员开发的应用程序所生成的图形具有参数化的功能。具体可以理解为图形的所有尺寸是参数化的，可以动态的修改。但是这一过程是借助应用程序来实现的，由应用程序负责与用户交互，当用户想修改图形的某一尺寸时，应用程序负责更新这一尺寸及相关尺寸。因此，针对具体的应用开发项目，所开发的绘图软件应该是参数化绘图软件。

4.2 工具介绍

AutoCAD 的开发工具^[54]，有时也可以称为 AutoCAD 开发系统，或者称作 AutoCAD API(应用程序接口)，它的主要开发工具 AutoLISP/Visual LISP、VBA、ADS/ARX/ADSRX、ObjectARX、Visual Basic 等。他们各具特点：

4.2.1 AutoLISP/VisualLISP

AutoLISP(List Processing Language)是嵌入 AutoCAD 内部的 Lisp 语言。1985 年 6 月推出的 AutoCAD2.17 版本向用户提供了 AutoLISP 二次开发环境。AutoLISP 是一种解释型语言, 可用来修改和扩充 AutoCAD 系统菜单和命令、设计对话框驱动程序、实现对图形数据库的修改和访问等。AutoLISP 代码不需要编译即可执行, 与 AutoCAD 通信简单, 是 AutoCAD 的第一代二次开发工具。

AutoLISP 具有很强的表处理功能, 是人工智能程序设计的有力工具之一。从 AutoCAD 14.0 开始, AutoCAD 提供了 Visual LISP 开发工具。其实际上是 AutoLISP 的编程环境, 在很大程度上克服了 AutoLISP 效率低下和保密性差的缺陷。AutoLISP 程序的结构为:

```
{注释部分}
{全局变量初始赋值}
{子函数定义} //局部注释
.....
{子函数定义}
{主函数定义}
```

图形的绘制和数据的处理在多个子函数中完成。子函数在主函数中定义合成为一个新的 AutoCAD 命令。

AutoLISP 语言结构清晰, 层次分明, 是一门接近于数学语言的语言。与其他各种计算程序设计语言比较, 有它自己的独特之处, 具有表现在如下几个方面:

- (1) AutoLISP 语言是一种表处理语言, 递归是其主要控制结构, 这是它的显著特点。
- (2) AutoLISP 语言具有丰富的数据类型, 它所提供的有关符号的特征值和特征表的相应操作, 使得它可以方便地实现个中搜索。

不过 AutoLISP 语言也有它自身不足的一面, 主要表现在以下几个方面:

- (1) 它的语言开发环境没有集成性, 使得程序的编辑与调试不很方便;
- (2) 在菜单设计方面比较逊色;
- (3) AutoLISP 语言对文件的操作, 没有象 C 语言那样提供打开文件后既能读又能写的过程, 它在文件输出和修改方面的功能显得比较弱;
- (4) 由于常规计算机体系结构与 LISP 特点不相适应, 因此 AutoLISP 语言在常规计算机上运行效率低下、性能差。

AutoLISP 语言是 Lisp 语言和 AutoCAD 有机结合体。AutoLISP 继承了 Lisp 语言的编程规则, 在程序代码中有许多繁多的括号, 编程中很容易出现括号不匹配的错误。程

序文件以文本形式进行存储，不经过编译，保密性差。它以解释方式运行，不适合编写大型程序，运行速度较慢。

4.2.2 ADS/ARX

4.2.2.1 .ADS

ADS (AutoCAD Development System)是 AutoCAD R11 版本提供的 C 语言开发工具，该系统能充分利用 C 语言的结构化编程手段，使应用程序以外部可执行文件的方式在 AutoCAD 环境中运行。ADS 实际是一组可以用 C 语言来编写 AutoCAD 应用程序的头文件和目标库文件。ADS 应用程序是可以在 AutoCAD 环境中运行的可执行文件，它和 AutoCAD 建立通信联系，向 AutoCAD 发布命令，并获得命令执行结果。ADS 应用程序既可以充分利用 AutoCAD 本身具有的强大的功能，同时又拥有 C 语言运行函数库的全部功能。

ADS 和 AutoLISP 应用程序本身一样，实际上都是一个个独立的进程(Process，操作系统把系统中运行的每一个应用程序称为一个进程)，它们之间的通信是通过 IPC(Inter-Process Communication，进程通信)机制来实现的。既 AutoLISP 应用程序作为一个独立的进程，与 AutoCAD 系统之间进行通信，然后在通过 AutoLISP 实现与 AutoCAD 的通信。既 ADS 不能直接与 AutoCAD 进行通信，因此，对于 AutoCAD 来说，ADS 应用程序等价于用 AutoLISP 编写的程序。AutoLISP 和 ADS 应用程序都只能使用静态的 AutoCAD 命令集和系统提供的结构化函数，因而在程序运行速度和功能上还是受到很大限制。

4.2.2.2. ARX

从 AutoCAD13 版本开始，AutoCAD 提供了更为高级的开发工具 ARX。ARX(AutoCAD Runtime Extension)是在 ADS 基础上发展起来的一种面向对象的 C 语言编程环境。ARX 以 C++为基本语言，充分发挥了面向对象编程的诸多优势，使得应用程序运行速度更快，访问和操作图形数据库更为方便。ARX 与 ADS 及 AutoLISP 的最大差异就是在于它的应用程序是动态链接库(DLL)程序，共享了 AutoCAD 的地址空间，并能直接访问 AutoCAD 的核心数据结构，图形系统以及几何造型核心，能在运行期间实时扩展已有类及其功能，创造能全面享受 AutoCAD 固有命令特权的新命令，从而使得 ARX 程序与 AutoCAD 内核的通信更为紧密，运行速度比 ADS 更快。ARX 的程序结构为：

{头文件}

{宏定义}

{全局变量定义}

{动态链接程序入口函数的定义}

ARX 与 ADS 程序文件结构的不同在于用动态链接库程序入口函数 `acrEntryPoint()` 来替代主函数 `main()`。实质上, ARX 应用程序利用 `acedRegCmds` 到 `addCommand()` 这一函数来注册新的命令。

ARX 的应用程序相比较其它开发工具具有一些显著特点:

(1) 它以 C++ 为基本开发语言, 具有面向对象编程方式的数据可封装性。可继承性及多态性等特点;

(2) 用其开发出的工程 CAD 软件具有模块性好、独立性强、连接简单、使用方便、内部功能高效实用;

(3) 代码可重用性强;

(4) 支持 MFC(Microsoft Foundation Class), 能简洁并高效的实现许多复杂功能。

但是 ARX 也有自身的许多缺陷:

由于 ARX 共享了 AutoCAD 的地址空间, 如果使用 ARX 开发的应用程序一旦失败, 则其进程也随之崩溃, 不利于软件的推广。另外 ARX 依赖于 C++ 语言, 必须经过严格控制的编译、连接才能生成应用程序, 不利于用户的学习掌握。

4.2.3 ObjectARX 对象

ObjectARX (Object AutoCAD Runtime Extension) 是 Autodesk 公司针对 AutoCAD R14 及以上版本推出的第三代开发环境, 它支持面向对象编程, 并同时向下兼容 ADS。ObjectARX 是基于 AutoCAD R13 的 ARX 的升级版本, 即 ARX 从 2.0 版本开始称 ObjectARX。ObjectARX 采用面向对象的 C++ 语言来开发 ObjectARX 应用程序, 它不再是一个独立的进程, 而是一个动态连接库, 它和 AutoCAD 在同一地址空间运行, 能够直接利用 AutoCAD 系统的核心代码, 直接访问和操作 AutoCAD 的数据库、图形系统以及几何造型内核, 在运行期间实时扩展 AutoCAD 具有的类及其功能。ObjectARX 还允许创建或派生新的类, 允许创建与 AutoCAD 内在实体几乎完全等同的新实体, 建立与 AutoCAD 本身固有的命令操作方式完全相同的命令。由于 ObjectARX 比较完善, 一经推出就得到广大开发人员的青睐, 在机械设计、工程分析、建筑结构、化学工程、电气工程等各种需要大量交互计算与绘图的应用领域中发挥重要作用。

但是, 由于 ObjectARX 编程环境采用面向对象的 C++ 语言语法过于复杂灵活, 要求开发人员具备和掌握更多的编程知识, 多编程人员的要求比较高, 不利于开发人员的学习、掌握。

4.3 ActiveX 技术

ActiveX Automation^[40]是微软公司推出的一个技术标准,该技术是 OLE 技术的进一步扩展,其作用是在 Windows 系统的统一管理下协调不同的应用程序,允许应用程序之间相互控制、相互调用。

AutoCAD 作为一种具有高度开放结构的 CAD 平台软件,它提供了强大的二次开发环境。从 AutoCAD R14 版开始,AutoCAD 引入了 ActiveX Automation 技术。由于 ActiveX 技术是一种完全面向对象的技术,所以许多面向对象化编程的语言和应用程序,可以通过 ActiveX 与 AutoCAD 进行通信,并操纵 AutoCAD 的许多功能。ActiveX 是由一系列对象,按一定的层次关系组成的对象结构,每一个对象代表了 AutoCAD 中一个具体的功能。ActiveX 所具备的大多数 AutoCAD 功能,均以方法和属性的方式被封装在 ActiveX 对象中,通过这些方法和属性,可以将 AutoCAD 对象对外“暴露”。一旦将这些对象暴露,就可以用各种编程语言、环境以及应用程序来访问它们。利用 AutoCAD 中的 ActiveX 对象模型,用户可以按照自己的愿望编制和定制 AutoCAD 软件,并和其它支持 ActiveX 的应用程序(如 Microsoft. Word VBA 或 Excel VBA)直接共享数据。

一个对象就是 AutoCAD 的 ActiveX 接口的一个主要构造块,每一暴露的对象描绘了 AutoCAD 的一个具体部分。在 AutoCAD ActiveX 接口中有许多不同类型的对象。例如:

图元(Entity)类对象:如直线、圆弧、多段线、文字、标注等;

样式设置(Style)类对象:如线型、标注样式等;

组织结构(Organizing)类对象:如图层、编组、图块等;

图形显示(View)类对象:如视图、视口等;

文档与应用程序(Document & Application)类对象:如 DWG 文件或 AutoCAD 应用程序本身等。

所有这些对象都具有一种层次的关系,根据它们在 AutoCAD 中的功能,可以组成一种树形结构,称之为对象模型(Object Model)树。对象模型提供了访问下一层对象的途径。

用 AutoCAD VBA 编程时,可以很方便地得到对象模型、对象列表、属性列表、方法列表、事件列表,根据它们可以很方便地进行编程。AutoCAD2002 ActiveX 对象模型见图 4.2 所示。对象列表中主要包括层(Layer)对象、块(Block)对象、选择集(Selectionset)对象、组(Group)对象、点(Point)、线(Line 3Dpolyline 等)、面(Face)对象等等;属性列表主要包括各种对象所具有的可以访问或者是可以修改的属性。属性包括任何对象都具有的公共属性和各种对象独自拥有的属性,主要分为可读可写属性、只读属性两种。

可读可写属性包括颜色(Color)、线型(LineType)、可见(Visible)等等,只读属性包括实体类型(EntityType)、实体名称(EntityName)、句柄(Handle)、标识 Id(ObjectID)等属性。对于私有属性,比如对于直线对象,StartPoint 和 EndPoint 都是它的私有属性等等;方法列表主要包括对应于该对象的操作,分为公共方法和私有方法。比如,ThisDrawing.Utility 对象,它包括很多方法,有 AddArc (以给定的圆心、半径、起点角度和端点角度创建圆弧)、AddLine(创建通过两点的直线)、AddText(创建单行文字)等等;事件列表主要对应于对象的响应。比如,当图形中的对象被修改时触发 ObjectModified 事件,对象被添加到图形中时触发 ObjectAdd 事件,主应用程序窗口取消激活前触发 AppDeactivate 事件等等^[8]。

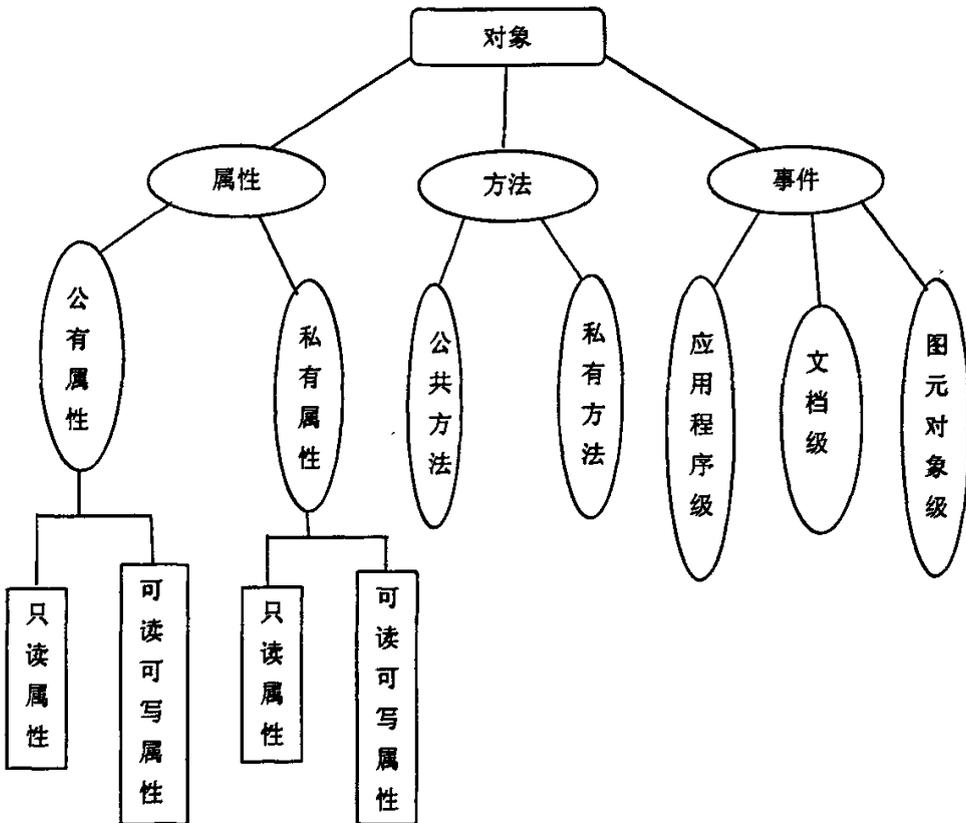


图 4.1 AutoCAD2006 ActiveX 对象组成

Fig.4.1 The constitute of AutoCAD2006 ActiveX object

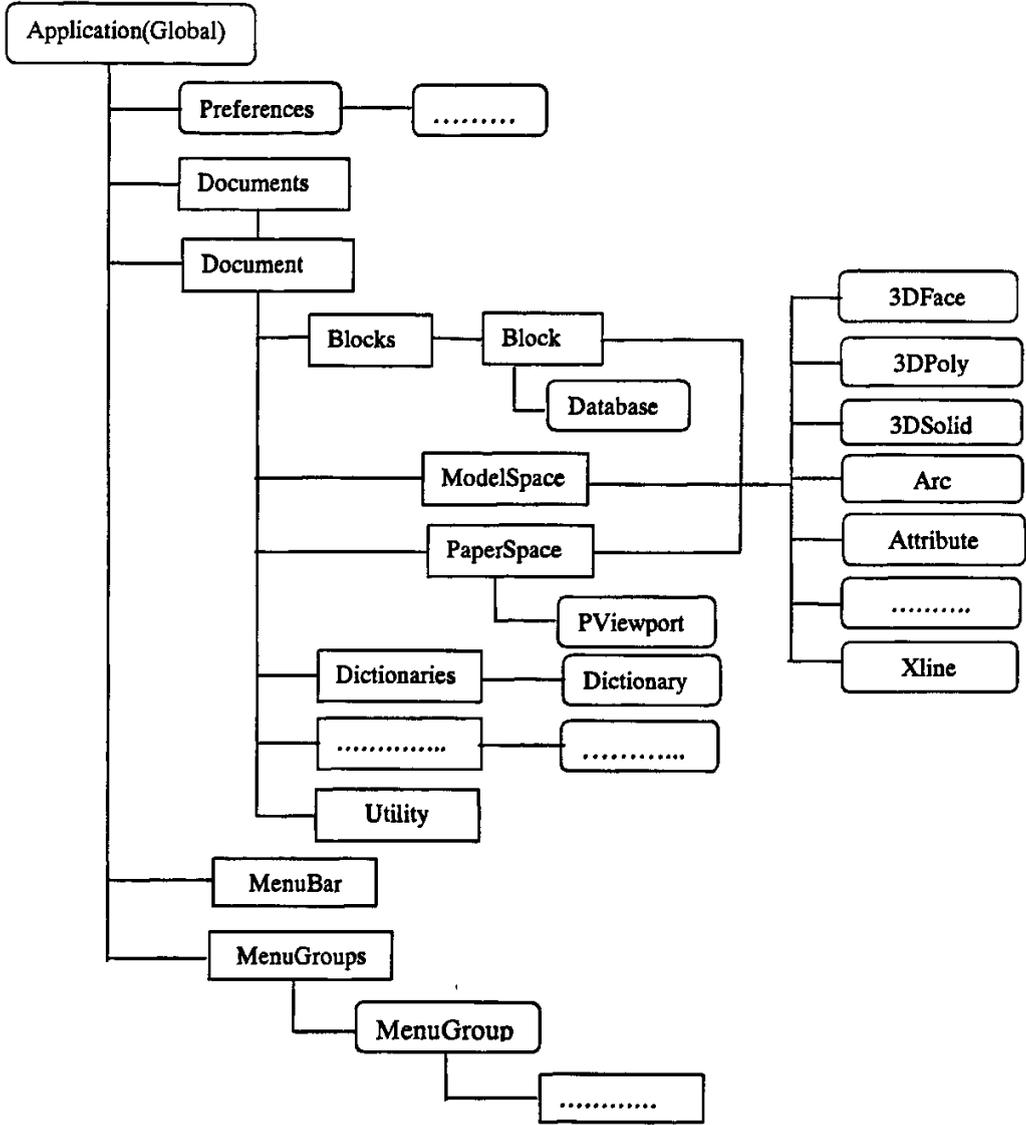


图 4.2 AutoCAD2006 ActiveX 对象模型(局部)
Fig.4.2 The model of AutoCAD2006 ActiveX object

4.4 悬臂梁自动绘图实现

用 VB 来创建 AutoCAD 的应用程序, 首先应在 VB 中引用 AutoCAD 的类型库, 然后使用 CreateObject 和 GetObject 函数与 AutoCAD 建立连接, 并通过应用程序对象来访问需要的功能, 具体步骤如下:

(1) 声明对象变量

Dim 变量名 As 类名

(2) 引用对象(即把对象赋值给变量)

Set 变量名=对象

AutoCAD 对象在 AutoCAD ActiveX 中是开放的, 在 VB 中可以直接操纵, 具体方法:

(1) 在 VB 工程中引用 AutoCAD 类型库, 在工程菜单(Project)中选择引用(Reference)选项, 打开应用对话框, 然后从中选择(AutoCAD2006 Object Library)类型库。

(2) 在程序代码中设置 AutoCAD 程序对象和文档对象。

(3) 通过 AutoCAD ActiveX 对象、属性和方法在 AutoCAD 图形文件中对对象进行处理。

在本节中, 将结合本论文得到的一些经验以编程的方式对 AutoCAD 的常用对象变量及其使用进行讨论:

(1) 开始一个应用程序

如前所述, Application 对象位于 AutoCAD 层次对象结构的顶层, 它代表 AutoCAD 本身, 用户的应用程序从 Application 对象的建立开始:

Dim AcadApp As AcadApplication 建立 Application 对象

Dim thisDrawing As AcadDocument 建立 Document 对象

Dim ModelSpace As AcadModelSpace 建立 Model Space 对象

On Error Resume Next

Set AcadApp=GetObject("AutoCAD.Application")如果 AutoCAD 已经启动, 则直接得到 AutoCAD。

If Err Then

Err.clear

Set AcadApp=CreateObject("AutoCAD.application")如果没有启动, 则运行它。

If Err Then

MsgBox Err.Description

Exit Sub

```

End If
End If
AcadApp.Visible=True           使 AutoCAD 可见

```

```

Set thisDrawing =AcadApp.ActiveDocument   设置 thisDrawing 为当前图形文件

```

```

Set ModelSpace=AcadDoc. Modelspace       设置 ModelSpace 为当前图形空

```

以上代码就是 VB 对 AutoCAD 对象的操作，主要通过 AcadApp, thisDrawing 和 ModelSpace 等对象发生关系，来实现对 AutoCAD 的设置。

(2) 对图形实体的自动操作(生成、编辑、查询)

图形实体指所有画在屏幕上的物体，如直线(Line)、圆(Circle)、弧(Arc)、多义线(PolyLine)、文字(Text)等，它们包含于 ModelSpace 和 PaperSpace 集合对象中，对实体的操作总要从这两个集合开始，向下查找相应实体的方法或属性。ModelSpace 与 PaperSpace 的含义和 AutoCAD 中类似，它们是所有图形实体的集合，要取得图中的某一实体，一般采用遍历或用实体句柄(Handle)查找的方法。用户可以操作 AutoCAD 自动生成、编辑实体或查询实体参数。如下为生成钻台区几个加强筋的主视图的代码：

```

Dim X
For X = 0 To N_COMMON_FRM_1  循环开始
Dim txline As AcadLine      定义各线
Dim st1xline As AcadLine
Dim st2xline As AcadLine
Dim st3xline As AcadLine
Dim st4xline As AcadLine
Dim st5xline As AcadLine
Dim st6xline As AcadLine
Dim st7xline As AcadLine
Dim st8xline As AcadLine
Dim botxpoint(2) As Double  定义起始点
Dim topxpoint(2) As Double
Dim st1xpoint(2) As Double
Dim st2xpoint(2) As Double
Dim st3xpoint(2) As Double
Dim st4xpoint(2) As Double
Dim st5xpoint(2) As Double
Dim st6xpoint(2) As Double

```

```

Dim st7xpoint(2) As Double
Dim st8xpoint(2) As Double
botxpoint(0) = 1500 * X           设置各点坐标
botxpoint(1) = 0
topxpoint(0) = 1500 * X
topxpoint(1) = T2
st1xpoint(0) = 1500 * X + 50
st1xpoint(1) = T5 - 210 - 200 * 2 * (T5 - 210) / (T5 - 190)
st2xpoint(0) = 1500 * X + 125
st2xpoint(1) = T5 - 210 - 200 * 2 * (T5 - 210) / (T5 - 190) + 250
st3xpoint(0) = 1500 * X + 125
st3xpoint(1) = T2 - (T5 - 210 - 200 * 2 * (T5 - 210) / (T5 - 190) + 250)
st4xpoint(0) = 1500 * X + 50
st4xpoint(1) = T2 - (T5 - 210 - 200 * 2 * (T5 - 210) / (T5 - 190))
st5xpoint(0) = 1500 * X - 50
st5xpoint(1) = T2 - (T5 - 210 - 200 * 2 * (T5 - 210) / (T5 - 190))
st6xpoint(0) = 1500 * X - 125
st6xpoint(1) = T2 - (T5 - 210 - 200 * 2 * (T5 - 210) / (T5 - 190) + 250)
st7xpoint(0) = 1500 * X - 125
st7xpoint(1) = T5 - 210 - 200 * 2 * (T5 - 210) / (T5 - 190) + 250
st8xpoint(0) = 1500 * X - 50
st8xpoint(1) = T5 - 210 - 200 * 2 * (T5 - 210) / (T5 - 190)
Set txline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(botxpoint, topxpoint)  生成直线
Set st1xline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(st8xpoint, st1xpoint)
Set st2xline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(st1xpoint, st2xpoint)
Set st3xline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(st2xpoint, st3xpoint)
Set st4xline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(st3xpoint, st4xpoint)
Set st5xline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(st4xpoint, st5xpoint)
Set st6xline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(st5xpoint, st6xpoint)
Set st7xline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(st6xpoint, st7xpoint)
Set st8xline = thisDrawing.ModelSpace.AddLine(st7xpoint, st8xpoint)
st1xline.Color = acRed      变实体颜色为红
st2xline.Color = acRed
st3xline.Color = acRed
st4xline.Color = acRed
st5xline.Color = acRed

```

```
st6xline.Color = acRed  
st7xline.Color = acRed  
st8xline.Color = acRed  
Next 结束循环
```

其中 N_COMMON_FRM_1、T2 和 T5 等均为程序中变量，N_COMMON_FRM_1 表示钻台区普通框架 1 的个数，T2 表示悬臂梁的高度，T5 表示钻台区上面板宽度。

以 ActiveX Automation 方法开发出一套适合南 4 悬臂梁结构形式的参数化二维三视图的程序，以目前方案得到其三视图如下所示：

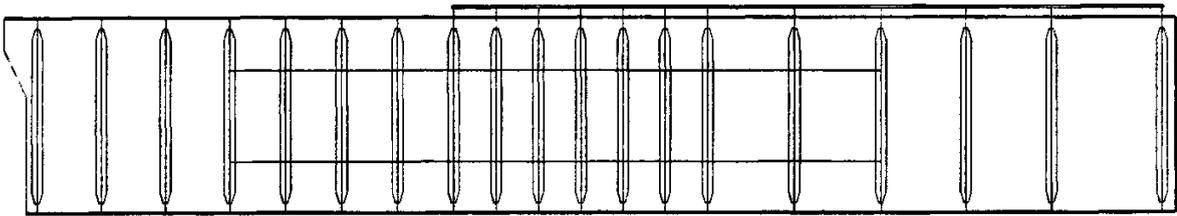


图 4.3 悬臂梁主视图

Fig.4.3 The front view of the cantilever

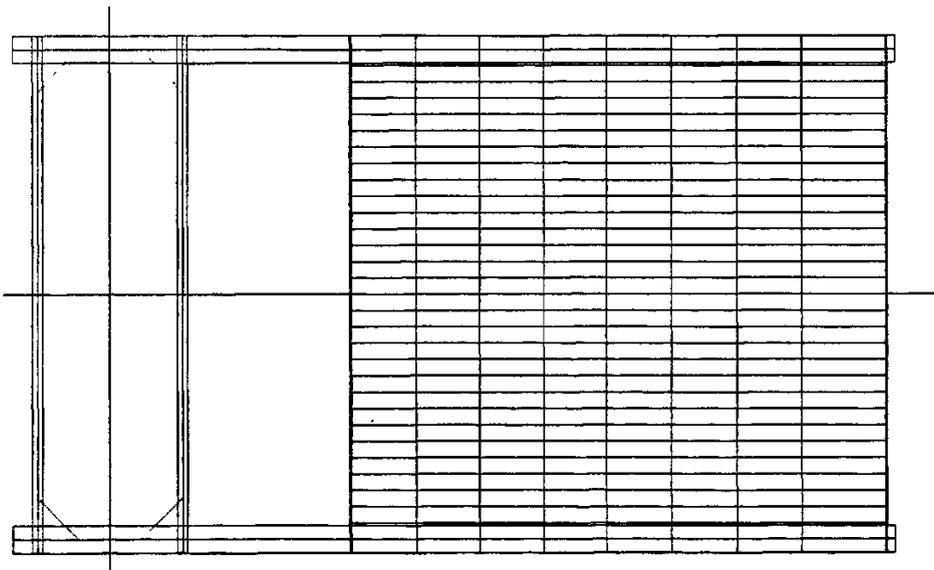


图 4.4 悬臂梁俯视图

Fig.4.4 The vertical view of the cantilever

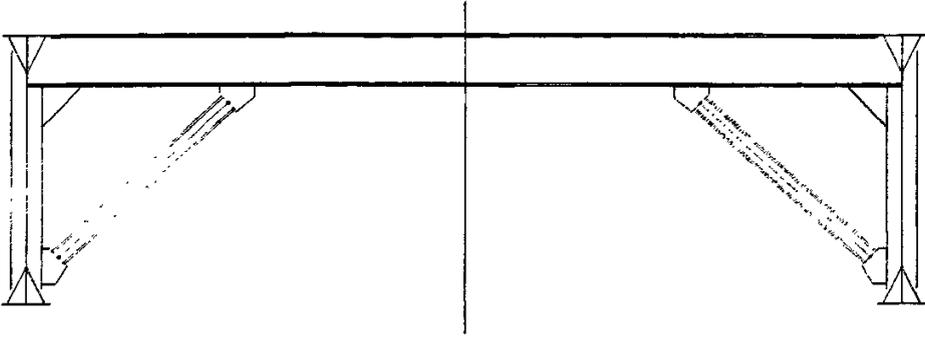


图 4.5 悬臂梁侧视图

Fig4.5 The side view of the cantilever

4.5 本章小结

本章首先介绍了参数化绘图的概念，然后介绍了几种应用于参数化绘图的工具及方法，重点讲述了作者使用的基于 VB6.0 使用 ActiveX 接口作为系统的开发手段，包括其调用 AutoCAD 的方法及路径，并实现了参数化绘图，提高了绘图质量和绘图速度，大大减少了设计者的工作量。

5 计算结果分析比较

本文作者以开发的程序为工具，对如下的一组悬臂梁方案进行分析，其主要参数如下：

悬臂梁长度	27.35 m
悬臂梁宽度	15.00 m
悬臂梁高度	4.50 m
钻台区长度	4.50 m
管子堆场长	16.70 m
管子堆场宽	15.80 m
钻区面板宽度	840mm
钻区面板厚度	40mm
钻区腹板厚度	30mm
钻台区载荷	937t
甲板载荷	120t
底座距离 1	12m
底座距离 2	27m
最大外伸	12.20 m
钻台最大左右横移	3.66 m

采用 ANSYS 软件建立悬臂梁有限元模型，如图 5.1 所示。该模型共 74432 个单元，72926 个节点，单元大小取为 140 mm。单元类型对于壳单元采用 shell63，梁单元为 beam24，其中，支撑斜杆采用壳单元建立实际形状。

主要构件材料特性如下：

屈服极限 = 355 MPa(高强度钢)

屈服极限 = 235 MPa(普通钢)

杨氏模量 = 206 GPa

泊松比 = 0.3

密度 = 7.85 t/m³

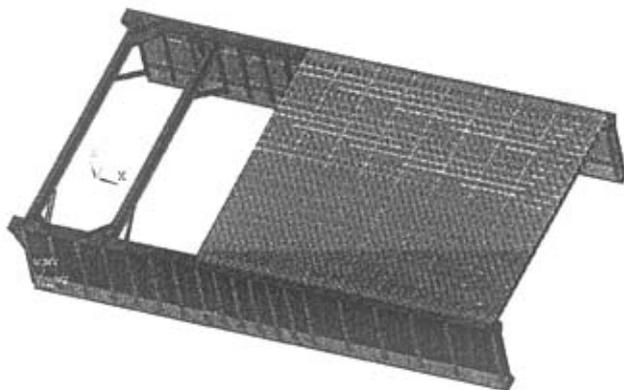


图 5.1 悬臂梁有限元模型

Fig. 5.1 The finite element model of the cantilever

外伸即是悬臂梁钻台区中心线至外底座距离，悬臂梁最大外伸 12.2m，其实际的运动能力达 15.2m，而外伸的范围应该是 $[-3,12.2]$ ，横移范围为 $[0,3.66]$ 。

5.1 应力集中及最大应力分布

笔者分析了该悬臂梁处于许多不同点处的受力情况，以下为部分选取点处的最大应力和最大位移处情况。

该悬臂梁处于外伸 $X=0\text{m}$ ，横移 $Y=2.0\text{m}$ 时，其应力集中点如图 5.2 所示：

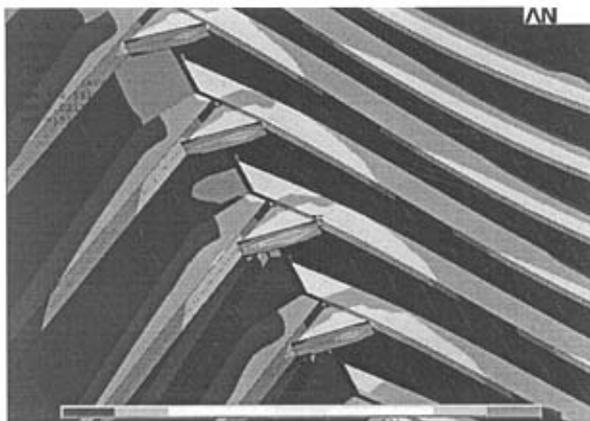


图 5.2 应力集中点（外伸 $X=0\text{m}$ ，横移 $Y=2.0\text{m}$ ）

Fig.5.2 Stress concentration($X=0\text{m}, Y=2.0\text{m}$)

该悬臂梁处于外伸 $X=2.0\text{m}$ ，横移 $Y=3.66\text{m}$ 时应力集中点如图 5.3 所示：

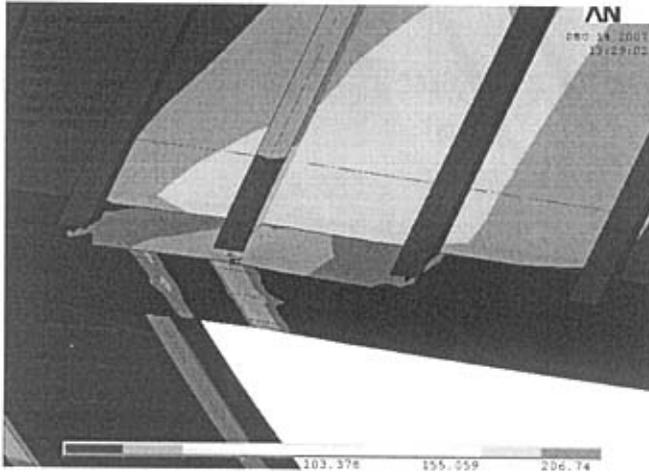


图 5.3 应力集中处(外伸 $X=2.0\text{m}$ ，横移 $Y=3.66\text{m}$)

Fig.5.3 Stress concentration($X=2.0\text{m}, Y=3.66\text{m}$)

该悬臂梁处于外伸 $X=7.0\text{m}$ ，横移 $Y=0.0\text{m}$ 时应力集中点如图 5.4 所示：

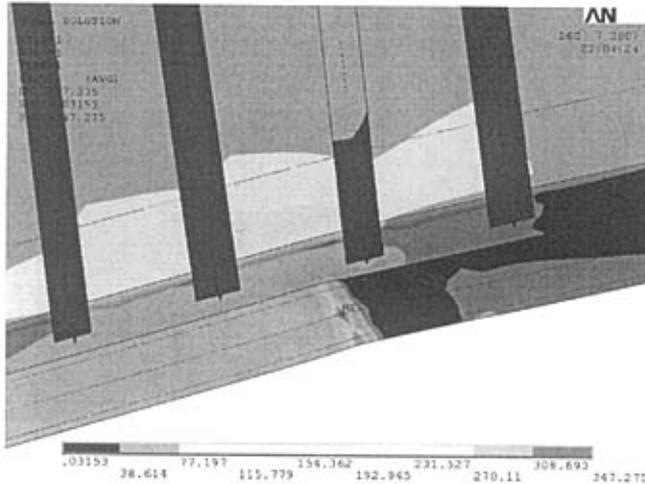


图 5.4 应力集中处图(外伸 $X=7.0\text{m}$ ，横移 $Y=0.0\text{m}$)

Fig.5.4 Stress concentration($X=7.0\text{m}, Y=0.0\text{m}$)

通过对该方案大量位置应力集中处分析得到以下结论：在外伸比较小的情况下，应力集中点有以下几个位置，强框架侧肘板同肋骨的连接处(如图 5.2)；加强筋同侧板连接处(如图 5.3)等。外伸比较大的情况下，应力主要集中在外底座的约束处(如图 5.4)。

该悬臂梁处于外伸 $X=3.0m, Y=0m$ 时，其最大位移点如图 5.5 所示：

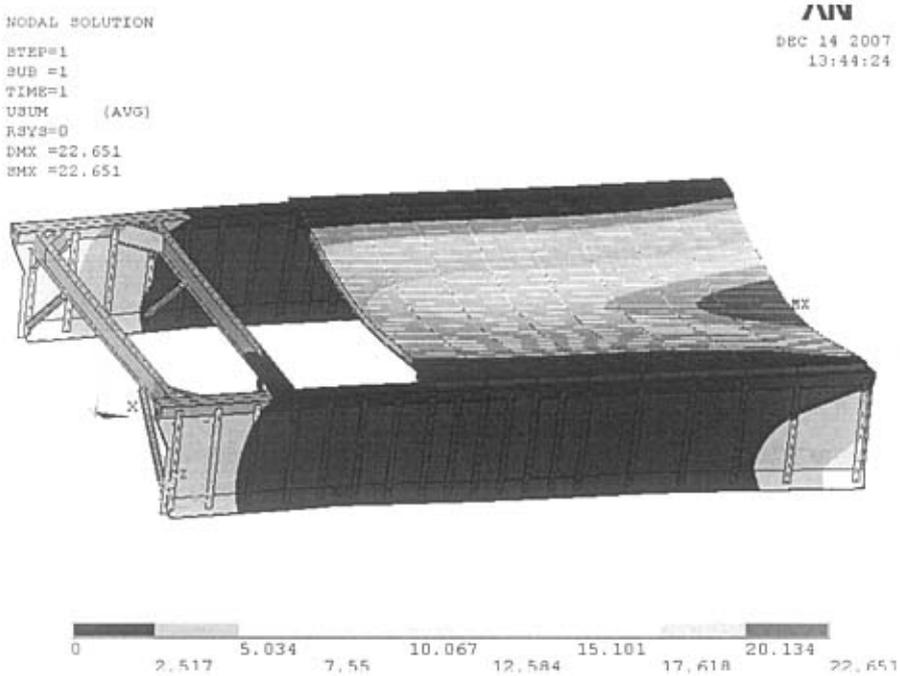


图 5.5 最大位移点 ($X=3.0m, Y=0m$)

Fig.5.5 The largest displacement($X=3.0m, Y=0m$)

该悬臂梁处于外伸 $X=9.0m, Y=0m$ 时，其最大位移点如图 5.6 所示：

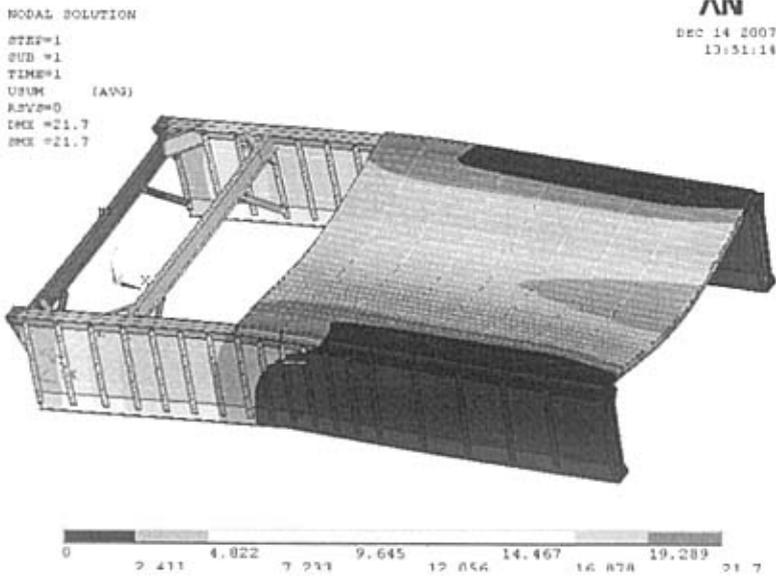


图 5.6 最大位移点 (X=9.0m, Y=0.0m)

Fig.5.6 The largest displacement(X=9.0m, Y=0.0m)

该悬臂梁处于外伸 X=9.0m, Y=3.66m 时, 其最大位移点如图 5.7 所示:

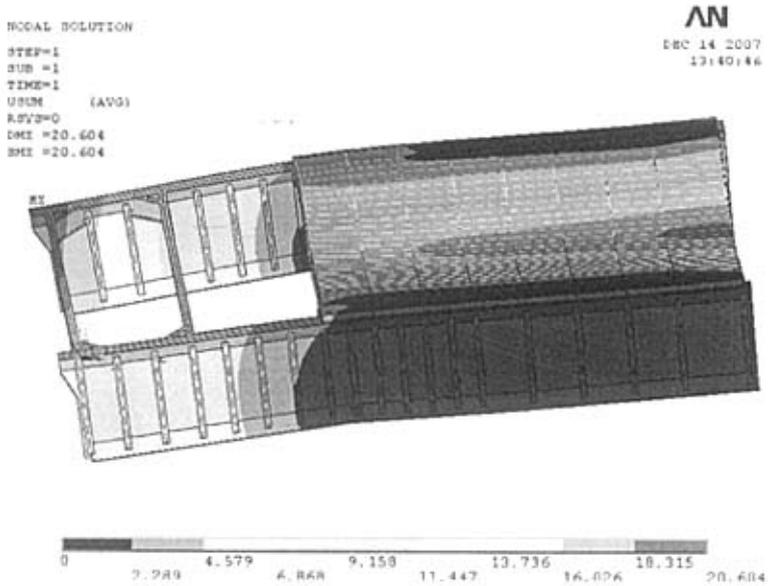


图 5.7 最大位移点 (X=9.0m, Y=3.66m)

Fig.5.7 The largest displacement(X=9.0m, Y=3.66m)

通过对该方案大量位置最大位移发生处分析得到以下结论：外伸比较小的情况下，最大位移点主要处于甲板最内侧中心左右(图 5.5)，而当外伸比较大的情况下，没有横移时，最大位移点处于悬臂梁最外侧的中心左右(图 5.6)，若存在横移，则处于横移一侧最外处(图 5.7)。

5.2 不同高度结果比较

对高度 H 分别为 4.5m、4.5m 和 5.5m 时，悬臂梁在各个不同的工作位置（不同外伸 X 和不同横移 Y ）最大应力分布和最大偏移做了比较得到如下一些结果。下列坐标系中，水平轴表示外伸 X ，纵坐标表示不同工作状态下的最大应力或最大位移，当高度 $H=4.5m$ 时，其各工作位置最大应力及最大位移分布如下：

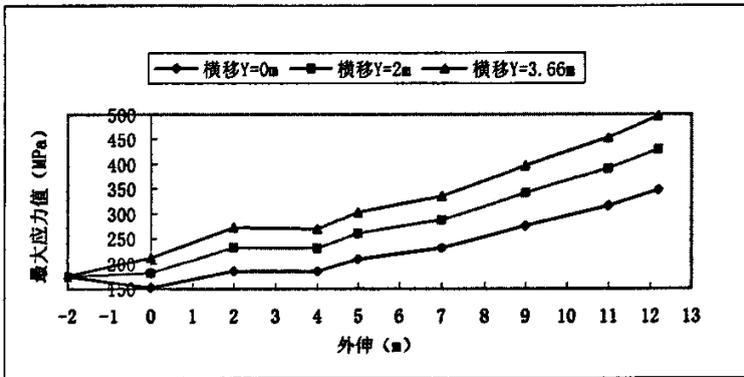


图 5.8 最大应力分布曲线（悬臂梁高度 $H=4.50m$ ）

Fig.5.8 The maximum stress curve($H=4.50m$)

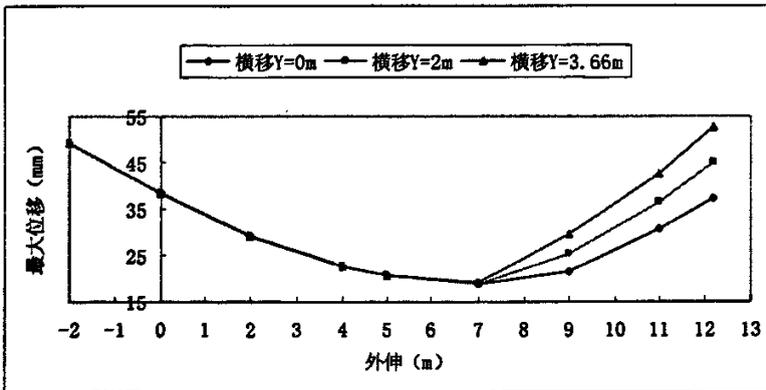


图 5.9 最大位移分布曲线（悬臂梁高度 $H=4.50m$ ）

Fig.5.9 The largest displacement curve($H=4.50m$)

由图 5.8 可得, 随着外伸 X 及横移 Y 的不断增大, 悬臂梁最大应力大体上呈现出增长趋势; 由图 5.9 可得, 随着外伸 X 的不断增大, 其最大位移开始减小, 在 $X=7.0\text{m}$ 左右降到最低点, 后随着外伸 X 的增大, 其最大位移不断增大, 在 $X<7.0\text{m}$ 时, 横移对最大位移影响很小, 而当 $X>7.0\text{m}$ 时, 横移对最大位移的影响明显增大。

悬臂梁高度 $H=5.0\text{m}$ 时, 其最大应力和最大位移分布如图 5.10 和图 5.11 所示:

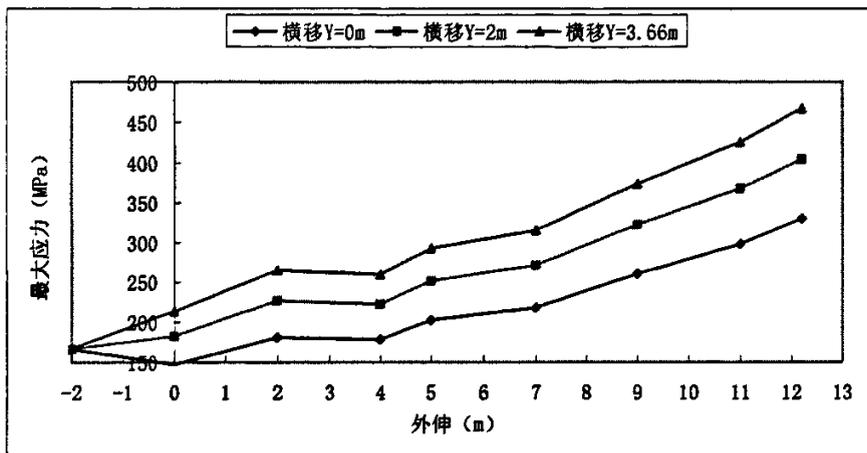


图 5.10 最大应力分布曲线 (悬臂梁高度 $H=5.0\text{m}$)

Fig.5.10 The maximum stress curve($H=5.0\text{m}$)

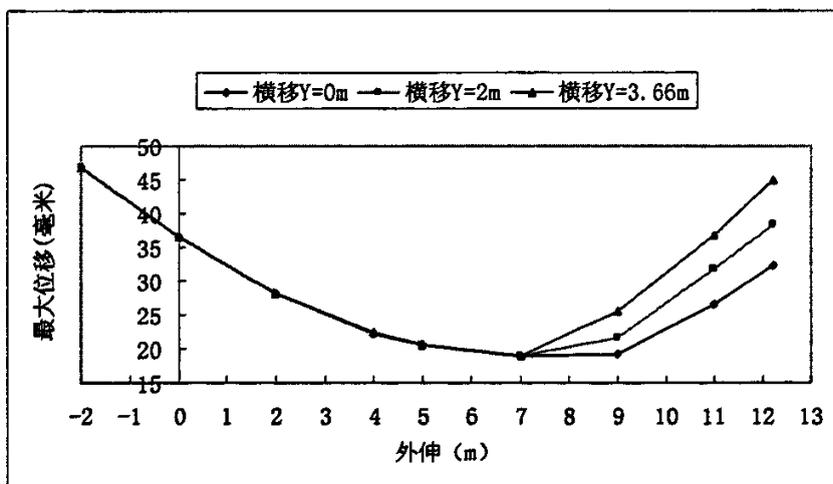


图 5.11 最大位移分布曲线 (悬臂梁高度 $H=5.0\text{m}$)

Fig.5.11 The largest displacement curve($H=5.0\text{m}$)

悬臂梁对高度 $H=5.5\text{m}$ 时，其最大应力和最大位移分布如下：

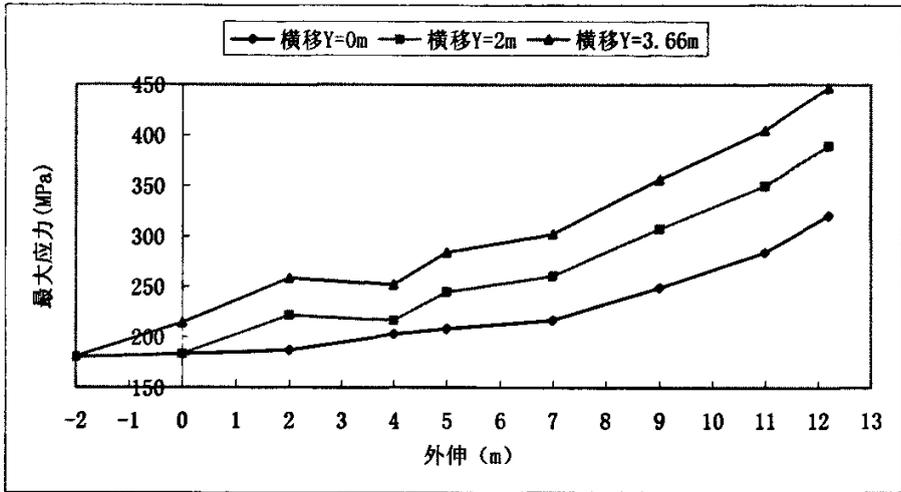


图 5.12 最大应力分布曲线 (悬臂梁高度 $H=5.50\text{m}$)

Fig.5.12 The maximum stress curve($H=5.50\text{m}$)

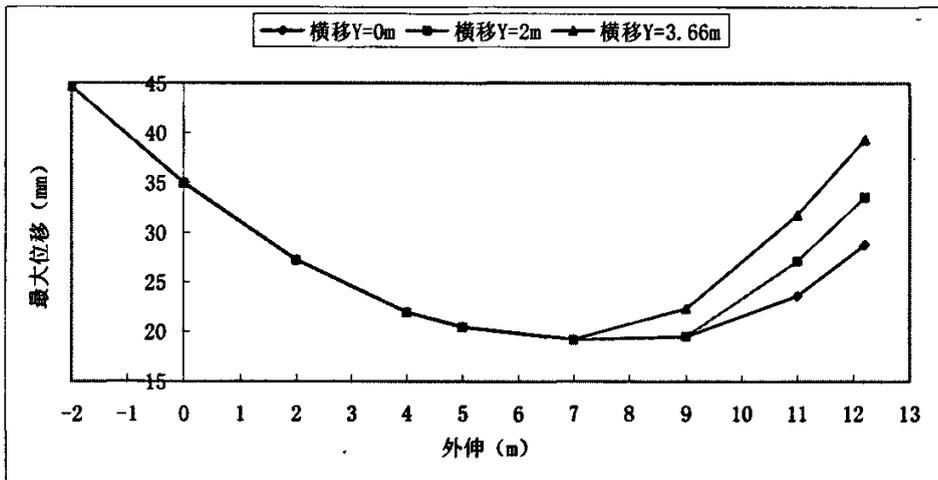


图 5.13 最大位移分布曲线 (悬臂梁高度 $H=5.50\text{m}$)

Fig.5.13 The largest displacement curve($H=5.50\text{m}$)

由图 5.8、图 5.10 和图 5.12 可得，其高度 H 变化的时候，其最大应力随着外伸 X 和横移 Y 的增大而不断增大的趋势是一致的，但随着高度 H 的增大， $X=12.2\text{m}$ 处最大应力值是不断减小的；由图 5.9、图 5.11 和图 5.13 可得，随着外伸 X 的增加，其最大位

移开始有减小的趋势，在外伸 $X=7\sim 8\text{m}$ 处，其最大位移减小至最小，后随着外伸 X 的增大，其最大位移开始增大，横移 $Y=3.66\text{m}$ 时，随着外伸 X 的增大，其最大位移和最大应力增长速度最快， $Y=2.0\text{m}$ 时，次之， $Y=0\text{m}$ 时，最小。随着高度 H 的增大， $X=12.2\text{m}$ 处最大位移值是不不断减小的。

为了更直接地比较高度对最大应力和最大位移的影响，这里将横移 Y 分别 0m 、 2.0m 和 3.66m 三个状态下，高度 H 分别为 4.5m 、 4.7m 、 5.0m 、 5.2m 和 5.5m 的悬臂梁最大应力单独比较如下：

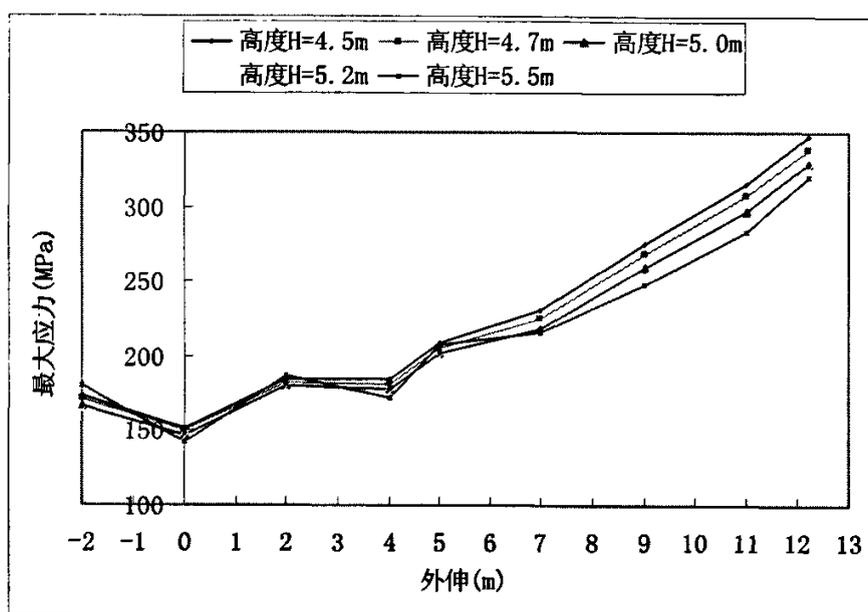


图 5.14 最大应力曲线 (悬臂梁横移 $Y=0.0\text{m}$)

Fig. 5.14 The maximum stress curve($Y=0.0\text{m}$)

由图 5.14 可得，在外伸 $X=-2\sim 5\text{m}$ 时，其最大应力值间关系不是很明朗，但当外伸 $X>5\text{m}$ 时，可以看到，随着高度 H 的增大，其最大应力值是不断减小的，在这里又一次印证了随着外伸 X 的不断增大，其最大应力值是不断增大的。

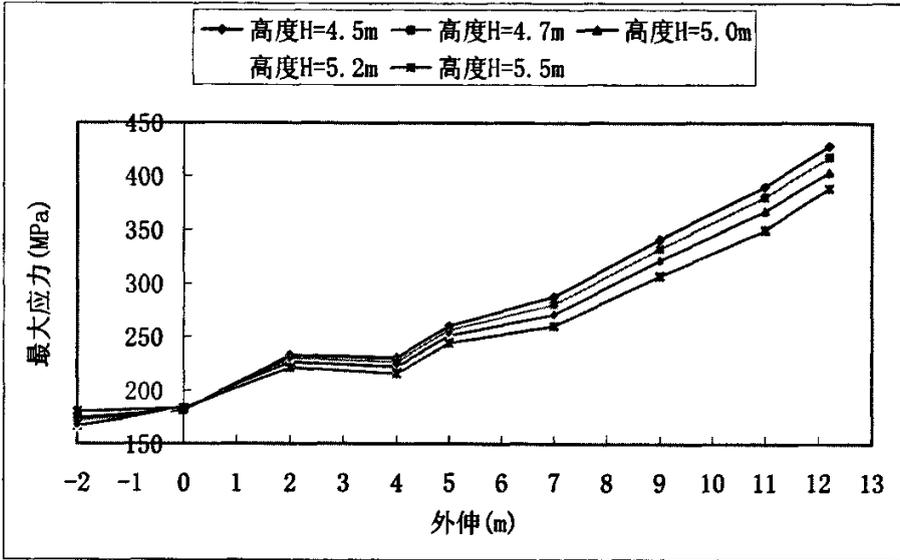


图 5.15 最大应力曲线 (悬臂梁横移 Y=2.0m)

Fig. 5.15 The maximum stress curve(Y=2.0m)

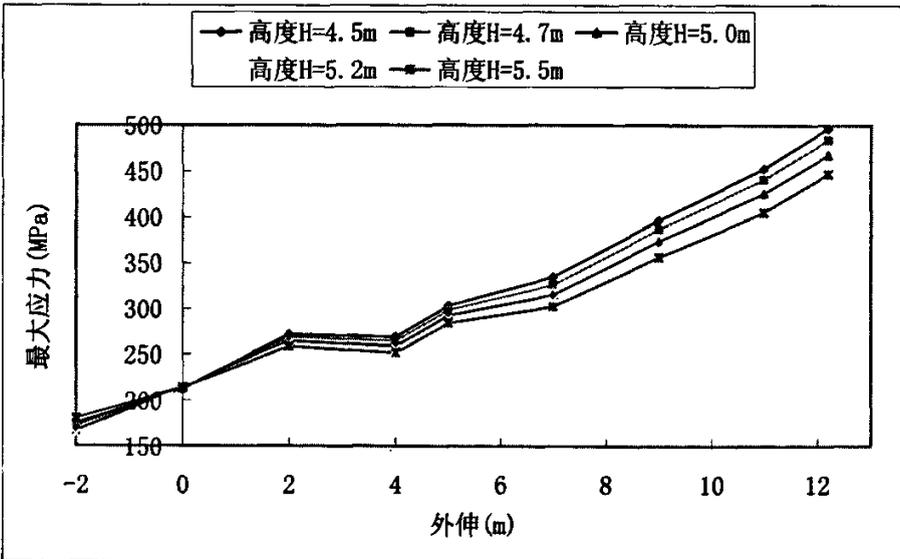


图 5.16 最大应力曲线 (悬臂梁横移 Y=3.66m)

Fig.5.16 The maximum stress curve(Y=3.66m)

由图 5.14、图 5.15 和图 5.16 综合可得，随着高度 H 的增大，其最大应力值也不断变小，当 $X > 6.0\text{m}$ 时，随着高度 H 的增大，其最大应力值是不断减小的，再次印证了随着横移 Y 的增大，其最大应力是不断增大的。

如下是不同高度在不同位置的最大位移分布曲线：

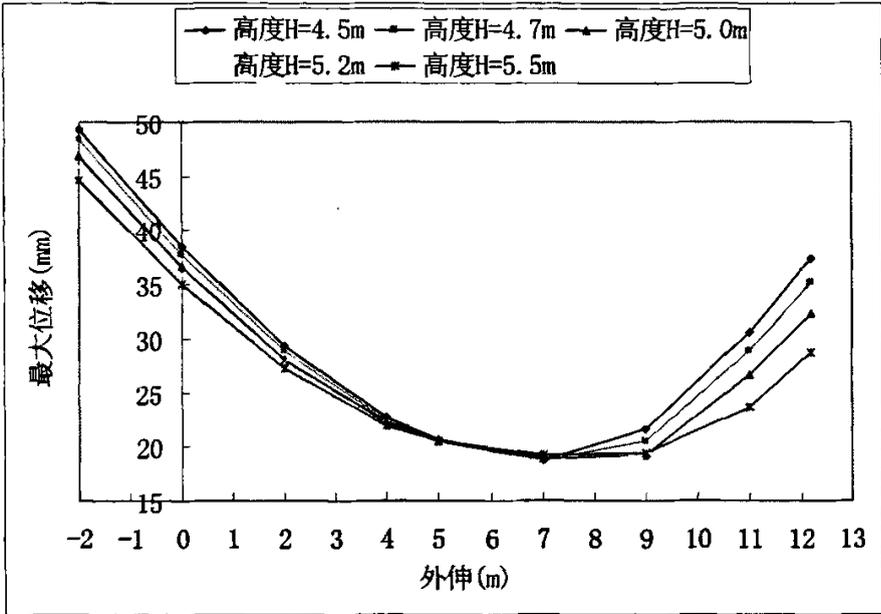


图 5.17 最大位移曲线 (悬臂梁横移 $Y=0.0\text{m}$)

Fig.5.17 The largest displacement curve($Y=0.0\text{m}$)

由图 5.17 可得，在横移 $Y=0\text{m}$ 时，随着高度 H 的增加，其在外伸 $X=-2.0\text{m}$ 和 $X=12.2\text{m}$ 两处的最大位移值都明显减小很多，且随着高度的增大，其最大位移曲线的极小值点的位置有向外侧延伸的趋势。

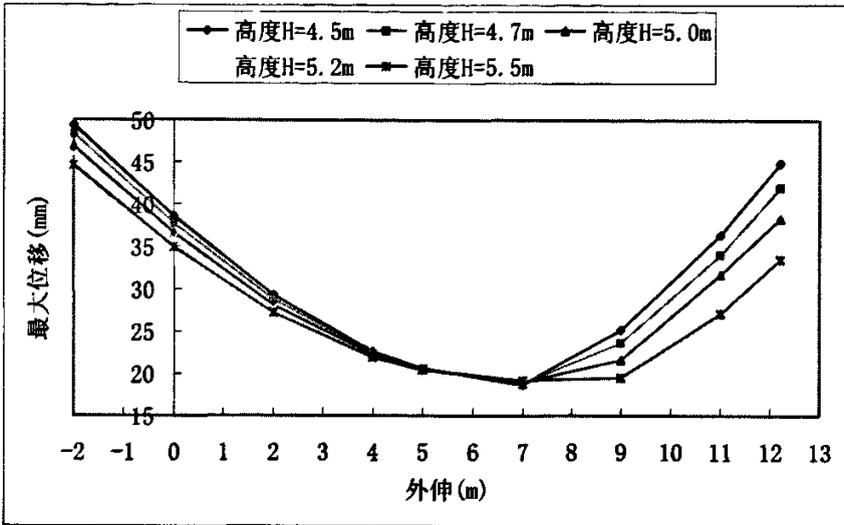


图 5.18 最大位移曲线 (悬臂梁横移 $Y=2.0\text{m}$)

Fig.5.18 The largest displacement curve($Y=2.0\text{m}$)

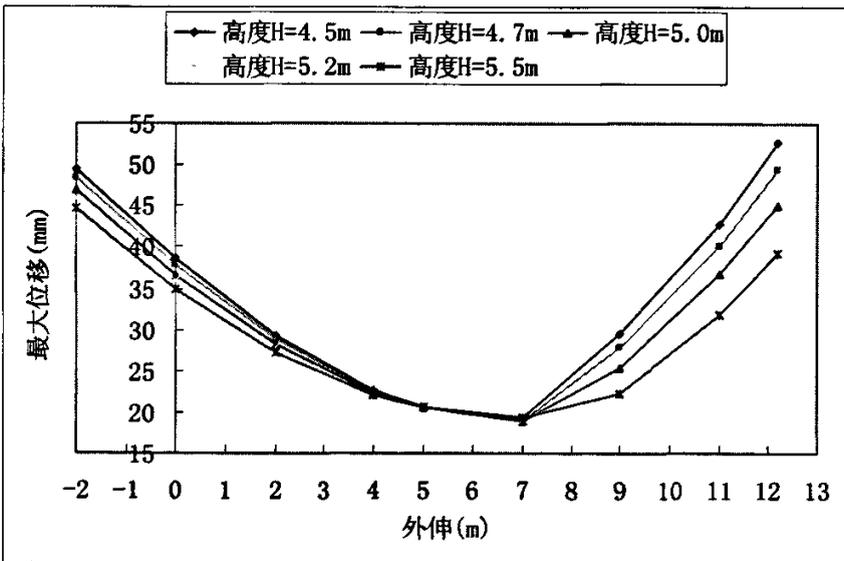


图 5.19 最大位移曲线 (悬臂梁横移 $Y=3.66\text{m}$)

Fig.5.19 The largest displacement curve($Y=3.66\text{m}$)

由图 5.17、图 5.18 和图 5.19 综合可得，随着高度 H 的增大，大体上各个位置处的最大位移值都是不断减小的，在靠近 $X=-2.0\text{m}$ 和 $X=12.2\text{m}$ 处，其最大位移值减小的更为明显些，而在 $X=4.8\text{m}$ 处，其最大位移值减小并不是非常明显。

5.3 重量分布曲线

悬臂梁的重量对与设计者来说是一个非常重要的指标，各高度 H 的重量分布如表 5.1 所示：

表 5.1 悬臂梁重量列表
Tab5.1 The weight list of cantilever

悬臂梁高度(m)	4.5	4.7	5.0	5.2	5.5
悬臂梁重量(t)	203.65	207.83	214.06	218.33	224.55

其重量分布曲线如图 5.20 所示：

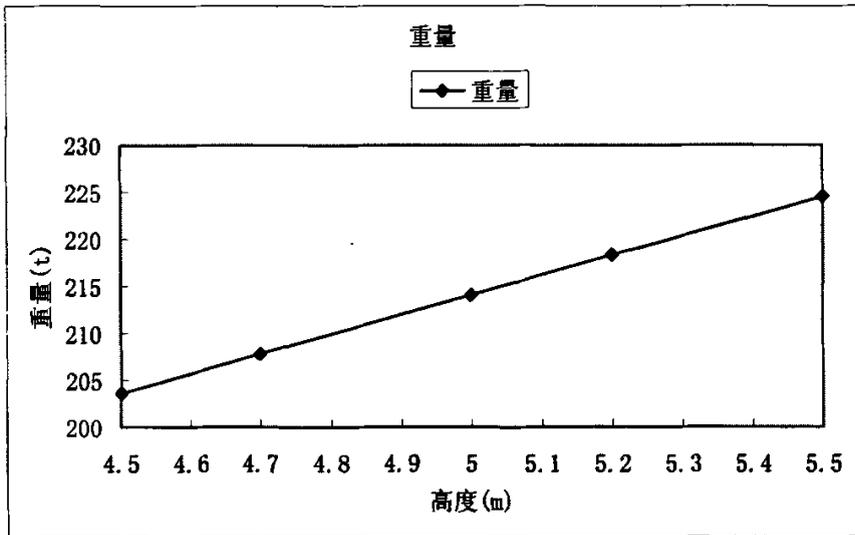


图 5.20 重量随高度 H 变化曲线
Fig.5.20 The weight curve by the height

由图 5.20 可以看到，这种类型的悬臂梁重量随高度基本上呈线性增长。

5.4 本章小结

本章以自升式平台悬臂梁设计工具对不同高度的悬臂梁在不同工作区域下的最大应力及最大变形进行了分析比较,已经得到其最大应力及最大变形的随高度、外伸及横移的变化趋势,表明了所开发的设计工具快速性及实用性。

结论及展望

中国各大海域蕴藏着丰富的石油、天然气及其他自由，随着经济的发展，发展海洋工程对我国将具有重要战略意义，自升式平台在海洋平台中占有重要位置，而悬臂梁的设计工作是自升式平台中关键设计技术之一。

本文以南 4 钻台平台的悬臂梁形式为基础，用 VB6.0 对 ANSYS 进行二次开发，基本实现了在给定一些参数情况下，可快速得到以合适的悬臂梁主体方案及其重量和处于不同外伸和横移条件下的最大应力及最大变形值，还可以迅速生成该悬臂梁的平面三视图，可得出如下结论：

(1) 本文用 ANSYS 的二次开发语言 APDL 通过参数化变量和流程控制实现了系列化结构的参数化分析。VB6.0 实现了可视化输入界面，并可调用 ANSYS 进行分析和提取结果的一体化过程，简化了操作过程。

(2) 在分析比较了各不同 CAD 二次开发语言特点基础上，采用了 VB6.0 使用 ActiveX 接口作为系统的开发手段，将参数化绘图技术以及块技术应用与悬臂梁三视图的绘制上，大大提高了绘图的质量和绘图速度。

(3) 经过实例运用，显示该参数化分析系统可避免大量的重复性分析工作，提高了分析效率，输入界面明了，即使非专业人员也可运用该系统进行悬臂梁的分析工作。

经过一年左右的努力，论文完成了相应的工作，基本上达到了预期目的，但由于个人及时间的原因，论文的研究工作还不够深入，还有许多不足之处，结合论文研究现状展望下一步工作，在以下几个方面还有很大的研究价值：

(1) 本文程序编制的主要目的是为了实现在一种对自升式平台悬臂梁的设计分析工具，由于本人时间及其他原因没能够利用该工具来分析悬臂梁的几个尺寸方面的参数对其整体结构应力和偏移的影响。而研究其各个参数对整体结构的影响是很有意义和价值的事情，进而可以做一些结构优化方面的工作。

(2) 本文选定了南海 4 号钻井平台悬臂梁的结构形式为基础，该悬臂梁是单腹板的形式，虽说选定了结构形式，但它可以实现迅速生成整体悬臂梁的方案，并得到其有限元分析结果。为了给设计者提供更多可供选择的悬臂梁的结构形式，可以继续研究其他形式的悬臂梁，如双腹板式。

参 考 文 献

- [1] 陆文发, 李林普, 高明道. 近海导管架平台. 北京: 海洋出版社, 1992
- [2] 封盛. 海洋平台结构优化设计理论和方法研究: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [3] 孙树民. 海洋平台结构的发展. 广东造船, 2000(4):32- 36.
- [4] 周立伟. 海洋开发的先锋—海洋石油平台. 舰船知识, 1996(10).
- [5] 罗传信. 海洋桩基平台. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [6] 王惟诚, 孙绍述, 宋玉普. 近海混凝土平台. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [7] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- [8] 徐继祖, 李维扬, 汪克让等. 海洋工程结构动力分析. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- [9] 季春群, 孙东昌. 自升式平台上外载荷的分析计算. 海洋工程. 1995(13): 19-24.
- [10] G. J. Grundlehner. Systematic Model Tests on a Harsh Environment Jack-up in Elevated Condition. Marine Structure 1997(10): 159-180.
- [11] 韩继文, 李润培. 海上钻井平台的外在载荷计算方法. 海洋工程. 1984(11): 2-5.
- [12] 过玉卿, 龙靖宇. 改进雨流计数法及其统计处理程序. 武汉钢铁学院学报. 1985(1): 45-48.
- [13] Dario Botte, Donatella Mascia. Dynamic Response of Offshore Platforms in Nonlinear Domain. Marine Structure 1997(10):149-161.
- [14] 聂武. 自升式平台的非线性随机波浪载荷响应. 海洋工程. 1988(6): 9-17.
- [15] G. J. Grundlehner. Systematic Model Tests on a Harsh Environment Jack-up in Elevated Condition. Marine Structure 1997(10):159-180.
- [16] 戴大农, 王助成. 海洋平台管节点的有限元分析. 海洋工程. 1986(4):11-22.
- [17] 欧进萍, 肖仪清, 刘学东, 张兴才, 潘东民. 导管架式平台结构极限承载力分析的整体推进法及其软件, 海洋工程, 1999(17):1-10.
- [18] 赵德廷. 板-肋系统的等效简化在近海平台整体分析中的应用. 中国海上油气. 1993(5):9-12.
- [19] 张世联, 金玉文. 等效梁的刚度分析及应用. 海洋工程, 1994(11): 26-31.
- [20] Bleich, F. Buckling Strength of Metal Structures. McGraw-HillBook Co. Inc. 1953.
- [21] Coan, J. M.. Large-deflection Theory for Plates with Small Initial Curvature Loaded in Edge Compression, J. Appl. Mech. June, 1951.
- [22] Shanmngan, N. E. Arockiasmy, M Local Buckling of Stiffened Plates in Offshore Structures, J. Construct. Steel Research, 1996(38).
- [23] 王震鸣, 梅海. 金属和复合材料加筋板壳承载能力的计算. 力学学报. 1984(1): 3-5.
- [24] 王永军, 崔维成. 联合载荷作用下的板格极限强度. 首届船舶于海洋工程结构力学学术讨论会论文集, 1999:151-159.
- [25] 张连文, 曾广武. 加筋板局部/整体屈曲分析. 首届船舶于海洋工程结构力学学术讨论会论文集, 1999:189-196.

- [26] Antonio F. Mateus, Joel A. blitz. Post-buckling of corroded steel plate:A Comparative Analysis. OMAE98-0584, Proceeding of OMAE98, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineerin.
- [27] 丁克勤, 傅惠民, 柳春图. 确定海洋平台钢裂纹扩展曲线的快速方法. 海洋工程. 2000 18: (7-12).
- [28] 丁克勤, 柳春图. 海洋平台 E36-Z35 钢表面裂纹扩展速率的蒙特卡罗模拟. 海洋工程. 1998(16):90-95.
- [29] 张延宏, 柳春图, 梅红. 管节点疲劳寿命估算的统计分析方法. 海洋工程. 1990(8):15-23
- [30] 朱启宪. 海洋平台结构可靠性的优化设计. 中国海上油气. 1991(3): 1-10.
- [31] Mortagavi, M. M., et. al. A Reliability Based on Screening Procedure for Platform Assessments and Requalification. Procs. of OMAE 1996(2)138-139.
- [32] 陈德勇. 机械可靠性指标评估—贝叶斯方法的理论与应用研究: (硕士学位论文). 北京: 北京科技大学, 1991.
- [33] 张孝令. 贝叶斯动态模型及其预测. 济南: 山东科学技术出版社. 1992.
- [34] 张家新, 汪自力, 朱安庆. 确定船体结构疲劳寿命分布的 Bayesian 方法. 镇江: 华东船舶工业学院学报. 1998(12):73-76.
- [35] J. D. Sorensen M. H. Faber, R. Rackwitz. P. Thoft-Christensen, G. Lebas, Reliability Analysis of an Offshore Structure. OMAE92 Cal gary, ASME paper : 92-130.
- [36] BOKALRHD, T., KARLSEN, A. Reliability Analysis of Fatigue Damage in Offshore Welded Structures. Second International Conference on Offshore Structures, held London, 16-18 Nov. 1982, Paper No. 39.
- [35] Andersen, M. R Fatigue Damage Analysis by Use of Cyclic Strain Approach. Ship Technology Res, 1996(43) 115-123.
- [36] 张家新, 王自力, 朱安庆. 建立船体结构疲劳设计曲线的贝叶斯方法. 镇江: 华东船舶工业学院学报. 2000(14)1-4.
- [37] ABS. Rules for Building and Classing, Mobile Offshore Drilling Units (Part3, Hull Structure and Arrangement, Chapter 2). 2006.
- [38] Najafian q Burrows R, Tickell R G. A review of the probabilistic description of Morison wave loading and response of fixed offshore structures. J, of Fluids and Structures, 1995, 9 (6):585-616.
- [39] Karadeniz H. Uncertainty modeling in the fatigue reliability calculation of offshore structures. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 74 (3):323-335.
- [40] Hartnett M, Mullarkey TP. Numerical evaluation of hydrodynamic loadings on fixed offshore structures. Advances in computational techniques for structural engineering, Edinburgh: Civil-Comp Press, 1996:263-269.

- [41] Hartnett M. The application of a spectral response model to fixed offshore structures. *Computers and Structures*, 2000 (78):355-364.
- [42] Han S M, Benaroya H. Comparison of linear and nonlinear responses of a compliant tower to random wave forces. *Chaos, Solitons and Fractals* 2002 (14):269-291.
- [43] 欧进萍, 段忠东. 海冰作用下平台结构自激振动的参数分析与响应的数值计算. *工程力学*, 2001, 18 (5):8-17.
- [44] 曲月舰, 王永学. 海冰对近海结构物作用的随机模型. *中国海洋平台*, 2000, 15 (2) : 16-19.
- [45] 张运良. 冰荷载的识别及冰激振动的实验与数值模拟. 大连理工大学博士学位论文, 2002.
- [46] 孙丽萍, 聂武. *海洋工程概论*. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000.
- [47] 刘涛, 杨凤鹏. *精通 ANSYS*. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [48] 博弈创作室. *APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例*. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [49] 博弈创作室. *ANSYS9.0 经典产品基础教程与实例详解*. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [50] 刘涛, 杨凤鹏. *精通 ANSYS*. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [51] 刘炳文. *Visual Basic 程序设计教程*. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [52] 孙玉武. 自升式平台后服役期结构强度及损伤评估研究: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
- [53] 张帆. *AutoCAD VBA 二次开发教程*. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [54] 杨帆. 舰船破舱稳性实时计算方法研究: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [55] 邱向荣, 陈焜坤. ANSYS 二次开发及其在起重机轮叉设计中的应用. *机械设计与制造*, 2006(2):51-53.
- [55] Alen G Yong. Foundation Performance of Offshore Jack-up Drilling Rigs. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 110(7).
- [56] 耿元伟. 基于 CATIA 的自升式平台参数化建模方法研究: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.

攻读硕士学位期间发表学术论文和参加科研项目情况

发表的学术论文

李昊, 陈明. 基于 VB 调用 ANSYS 与 AutoCAD 自升式平台悬臂梁设计方法研究(大连理工大学研究生网络期刊, 已录用)

参加的科研项目

参与辽河油田 50000DWT 成品油/原油船技术设计, 其中的结构规范计算部分。

参与中油集团辽河石油勘探局自升式钻井平台, 其中的悬臂梁设计部分。

致 谢

首先，衷心的感谢我的导师陈明副教授，本文是在陈老师的悉心指导下完成的，论文的字里行间无不体现着导师的心血和对我的殷切希望。在两年多的研究生学习期间，陈老师严谨认真的工作作风、广博的知识、把握大局的能力令我受益匪浅。从陈老师那里，我不仅学到了知识，更重要的是从老师那里学到了一种生活态度，一种无论任何事都积极端正的态度。值此论文完成之际，谨向恩师致以衷心的感谢！

感谢纪卓尚教授、林焰教授、马坤副教授、张明霞老师、金朝光老师，除了在专业方面得到他们的指导，纪老师、林老师学术方面的高超造诣，马老师的精益求精的科学态度，张老师的敬业精神，金老师的平易近人，都给我留下了深刻的印象。

感谢陆丛红师姐、邓林义师姐、王运龙师兄、刘志军师兄、张荣鑫师兄、孙承猛师兄、郑玄亮师兄、于雁云师兄、杜松师兄、李玉刚师兄、邬君师姐、宋杨师姐、战翌婷师姐、林海花师姐、张宝吉师兄、吴俊杰师兄、秦品乐师兄、李凯师兄、刘阳师兄、胡丽芬师姐、鲁江师兄、陈静师姐、田雨师姐等在我两年多研究生学习期间给与我的关心和帮助，在这里衷心地感谢你们！

感谢一起度过研究生生活的张梅、邓学雷、吴天宝、刘东、马飞翔、叶茂盛、于多、王永福、孙晋华、董恒建、韩智国等同学，与你们一起学习生活，丰富了我的研究生生活。

感谢同宿舍的关胜宇、杨亮、李晓明同学，两年半的共同生活，大家相互帮助并成为彼此信赖的兄弟。

衷心感谢给我生育之恩和养育之恩的父母，我了解并体会到他们为了我完成学业所付出的巨大心血，是他们长期在精神上、感情上和物质上的支持，才使我能安心学习，顺利完成学业，衷心感谢我的两个姐姐和姐夫，在我生活遇到挫折的时候，是你们给了我克服每个困难的勇气和信心，在这里再次向我亲爱的家人表示衷心的感谢和深深的敬意！