

中文摘要

随着城市改造的加快，建筑物迁移技术作为一种新兴技术得到越来越广泛的应用，然而由于建筑物迁移工程是涉及多学科交叉的复杂工程，其理论研究尚不完善，缺少针对迁移建筑结构进行质量分布计算、托换结构设计、支点布置优化和建筑结构应力分析的智能化软件。

本文研究的主要目的是将计算机辅助设计应用于建筑物迁移工程，开发出迁移工程仿真设计系统，实现迁移工程的自动化、智能化监测控制，为制定安全、经济的迁移工程方案提供有力理论依据和辅助工具。本课题针对迁移工程的设计及建筑物的结构内力分析进行研究，迁移工程建筑结构内力的分析处理采用目前广泛使用的大型有限元分析软件 ANSYS 作为参数化建模、分析及结果处理工具。论文主要研究内容如下：

- (1) 采用 ANSYS 的 APDL 语言建立迁移建筑物的参数化有限元模型。
- (2) 归纳建筑物迁移工程中各种托换结构的设计方法，重点设计不同的托换桁架结构形式，得出受力合理且经济实用的托换桁架结构形式。
- (3) 迁移工程中上部结构与基础分离后，结构处于复杂的动态边界条件下。本文根据建筑物迁移工程特点对结构所处的动态位移边界条件提出模型位移约束的加载算法；针对多支点液压缸支点布置的特点进行载荷力的简化和加载，采用“支点附加小刚度铰支杆”法解决约束不足的问题。
- (4) 基于建筑物重量分布设计出不同的液压缸支点布置方案，通过对不同方案的分析计算，得出最优的液压缸支点布置方案，使迁移过程中建筑物受到的内应力减小，保证迁移建筑物平稳移动，减少上部结构的变形。
- (5) 针对迁移工程各阶段对迁移建筑物进行结构内力分析，对结构产生较大影响的阶段得到建筑物受力较大部位，为改进控制措施提供依据。

课题采用 ANSYS 的 APDL 语言建立参数化模型，方便计算及数据处理，减少重复性劳动。结构分析的成果应用于工程实践，可以提高迁移工程的安全性和科学性，节约工程成本。

关键词：建筑物迁移；APDL；动态边界条件；托换结构；支点布置；结构内力分析

ABSTRACT

With the acceleration of urban reconstruction, building moving technology has gained more and more application as a new engineering technology. However because building moving technology is a multi-disciplinary complex project, the theoretical research is still not perfect, there is a lack of an intelligent Finite Element Analysis software for moving building structure which is used for mass distribution computation, underpinning structure designing, optimization of the supporting point arrangement and stress analysis of building structure.

The purpose of this paper is applying computer aided design to the building moving engineering and developing moving engineering simulation design system to achieve automatic and intelligent supervisory control of building moving, which can be a strong theoretical basis and a helpful tool for designing safe and economical building moving project. This paper studies the relevant problems in project designing and analysis of the internal force of the building structure, the analysis of internal force of the building structure uses large-scale finite element analysis software ANSYS as a parametric modeling, analysis and results processing tool. The main contents of this paper are listed as follows:

- (1) This paper uses ANSYS-APDL language to build the parametric finite element model.
- (2) The designing method of various underpinning structure is summarized, and several important underpinning trussworks are designed to obtain the reasonable load, economical and practical underpinning trusswork.
- (3) When the upper structure is separated from the basis during the building moving, the structure is in a complex variational boundary condition. The loading method of the displacement constraints of the model is given by studying the characteristics of the building moving engineering, and the control force is simplified and loaded according to the characteristics of multicylinder supporting points arrangement of the building moving project. The added hinged bearing struts method is applied to solve lack of constraints.
- (4) Different arrangement plans of cylinder supporting point are designed based on the mass distribution, an optimum plan is gained by comparing the results, which can lower the internal stress of the building and ensure building moving

smoothly and reduce deformation of the upper structure.

- (5) This paper analyses the internal force of the building for several stages of the moving engineering, gaining positions with larger stress of the building in the stage that has great influence on the structure, and the result gives the basis for improving controlling measures.

This paper uses ANSYS-APDL language to build the parametric model. It is easy to calculate and process data and can reduce repetitive work by applying APDL language. The results of structural analysis can be applied to engineering practice to increase the safety and scientific character and reduce project cost.

KEY WORDS: building moving; APDL; variational boundary conditions; underpinning structure; supporting point arrangement; analysis of internal force

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：刘立肖 签字日期：2009 年 5 月 30 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：刘立肖

导师签名：洪鹰

签字日期：2009 年 5 月 30 日

签字日期：09 年 6 月 1 日

第一章 绪论

1.1 建筑物迁移技术的背景和意义

建筑物迁移，是指在保持建筑物整体性和可用性不变的前提下，将其从原址移至新址，其中包括建筑物所在高度和方位的任何变动。

1.1.1 建筑物迁移技术的背景

建筑物迁移技术最早从欧美国家开始应用，欧美国家对于有继续使用价值或有文物价值的建筑物，不惜花费重金运用整体迁移的方法将其转移到合适位置予以重新利用和保护。另外，众多发达国家对环境保护要求较高，建筑物的整体迁移技术在一些发达国家得到了迅速发展，迁移技术较为成熟，基本实现了机械化和自动化。

我国的建筑物迁移始于上世纪 60 年代，经过 40 余年的发展已经取得了很多成就，建筑物迁移技术在我国的应用历史虽然较短，但近年来，该项技术在我国得到了迅速的发展，应用范围日益广泛、结构形式多样。随着城市建设的迅速发展，道路交通状况不断改善。旧城的改造、道路和高速公路的拓宽改造，使得许多建筑物由于与城市建设相冲突而不得不拆除。但有些建筑物仍有使用价值，还有一些建筑物具有历史文物的保存价值，如果全部拆除会造成很大的浪费和经济损失。我国共有 600 多个大中型城市，2000 多个小型城市，每年因此造成上百亿元的经济损失。但如果对这些建筑物根据周围条件与环境规划的要求，在允许的范围内实施整体迁移，使其得以保留，不仅可以节约造价、节省工期、减少建筑垃圾，而且使城市规划更加灵活，从而取得良好的经济效益和社会效益^[1]。

1.1.2 建筑物迁移技术的意义

建筑物迁移技术的出现和发展对于我国的城市建设、城市改造和建筑物改造具有重要意义，其推广应用不但可以满足城市总体规划要求，还可以节省人力、物力、建设资金和迁移安置费用，并能大幅度缩短工期，减少社会矛盾。

与拆除重建相比，采用建筑物迁移技术具有以下优点^{[2][3]}：

(1) 节省资金。大量的建筑物迁移工程调查表明,整体迁移费用与拆除重建费用的比例在 1/6~1/2 之间。建筑物装饰越豪华,节省费用越高。

(2) 采用建筑物迁移技术可减少对生活的影响。采用整体迁移技术,除楼房底层外,建筑物在建筑物迁移施工期间一般仍可正常使用。

(3) 节省工期。建筑物迁移工程的工期一般只要 3~6 个月,拆除重建则至少需要 1~2 年。

(4) 保护环境,节省资源。拆除建筑物产生大量建筑垃圾,重建又需要消耗大量的建筑材料,耗能、耗电。

(5) 减少了用户的搬迁费用和商业建筑停业期间的间接损失。

(6) 城市规划将更加灵活。

综上所述,建筑物整体迁移技术为城市建设和旧城改造开辟了一条新道路,必将在我国经济建设中发挥重要的作用。

1.2 国内外建筑物迁移工程现状

建筑物迁移技术应用在国外已有 100 多年的历史,在我国也有十几年的实践,该项技术与拆除重建相比具有明显的经济效益、社会效益和环保效益。国内外均有不少成功的工程实例。这些案例各具特点,为该项技术的成熟发展积累了丰富的经验。

1.2.1 国外迁移工程现状

建筑物迁移技术在国外最早发端于 19 世纪的 20 年代,尤其在欧美国家应用居多。世界上最早的建筑物整体迁移技术出现在新西兰^[4],工程技术人员采用蒸汽机车作为牵引装置,将新普利茅斯市一座一层民宅移到新址。

现代建筑物整体迁移始于 20 世纪初。1901 年美国依阿华大学三层高的科学馆整体平移过程中,采用圆木滚轴滚动装置,利用螺旋千斤顶将建筑物顶起,并提供水平牵引力^[5]。

20 世纪 80 年代以来,在欧美出现了一批具有代表性的建筑物迁移工程。1982 年,英国伯明翰的一所会计事务所,由于超市扩建,将其移至 5 英里外的地方,其托换结构为钢筋混凝土板,采用液压缸将建筑顶起后放入滚动装置进行迁移^[7]。1983 年,英国兰开夏郡 Warrington 市一座历史悠久的学校建筑,由于道路拓宽,将其纵向平移 15 米^[8]。

1998 年,美国一所豪华别墅,从波卡罗顿长途跋涉到达 100 多英里以外的

达皮斯城，创造了平移距离的世界记录。工程采用了一艘特殊的船体作为运输工具，通过调节船体中的水量来保证平稳性^[9]。

1999年1月，美国明尼苏达州的 Shubert 剧院由第五大街迁移到第七大街时采用自身带有动力装置的平板拖车。为了增加其整体性，在墙下浇注了混凝土墙对建筑物进行了加固^[10]。

1999年6月，美国卡罗莱纳州角海岸的一座高61米，重44000 kN的灯塔为避免海岸的不断侵蚀，将其移至1600英尺外的地方，由于地形原因，移动轨迹长达2900英尺^[11]。这项工程采用了当时世界上最先进的液压顶升系统。

1999年9月，丹麦哥本哈根机场由于扩建，将长110m、宽34m，高2层（局部3层）的候机厅从机场一端移至另一端。整个工程使用了60台多轮平板拖车，车上安装了自动化模块和电脑设备，在4天之内平移了2500m^[12]。

分析前述实例，建筑物迁移技术在发达国家已发展到相当高的水平，基本实现了机械化和自动化。迁移技术应用范围也不仅仅局限在建筑工程中，目前已经拓展到大型设备迁移和其他领域。

1.2.2 国内迁移工程现状

自从20世纪80年代以来，我国的建筑物迁移技术得到了迅速发展，取得不少成功经验。至今为止的上百个工程中既包括了框架结构，也包括砖混结构、甚至组合结构。迁移的建筑物有住宅、办公楼、酒店、纪念馆、文物建筑，也有塔和桥梁。移动方向有纵向、横向、斜向和水平旋转迁移。

国内最早的迁移技术出现在煤矿矿井建设中，有关采矿文献中曾介绍过小恒山矿排矸井井塔迁移^[3]。

1993年11月30日“浙江日报”报道，上海外滩有一建于1907年，高52m，重400t，号称“天文台”的古建筑，被搬迁到离原地24.2m的新位置，这是我国首次文物建筑整体平移^[3]。

1995年，河南孟州市政府办公楼迁移工程集横向移动、纵向移动和旋转于一身，在当时创造了建筑物搬迁总重量、旋转角度、移动距离和搬迁建筑面积四项全国第一，由上海大世界吉尼斯总部颁发了证书^[13]。

1999年12月，山东临沂市L形的国家安全局办公楼，高34.5m、共9层、上有35.5m高的铁塔，实现了先自东向西平移96.9m、再向南平移74.5m，累计平移171m，创造了我国框架结构双向平移距离最长的记录^[15]。

2001年5月，南京江南大酒店成功平移26m，解决了带伸缩缝建筑的一体托换的同步控制难题，就位连接中采用了滑移隔震技术，将迁移后的房屋抗震能力提高60%~80%^[16]。

2001 年底, 辽河油田兴隆台采油厂旧办公楼迁移工程中, 先向南平移, 然后将大楼分割成东、西两部分, 转向 90° 后分别向东、西平移。

2002 年 7 月, 江都市供电局生产调度楼迁移工程中将框架和砖混结构托换到一起, 并进行双向迁移^[17]。

2003 年上海音乐厅的顶升与迁移, 采用了液压悬浮式滑动技术、计算机控制的液压同步顶升和移位技术, 引起国内外建筑界的普遍关注^[18]。

2005 年 12 月, 辽宁省高 80m、地下一层、主体 12 层(突出小塔楼 18 层)大连公安交通指挥中心平移 31.2m, 工程技术人员成功攻克了高低错落、体形复杂给等一系列难题。

近几年来, 我国建筑物迁移技术已经达到了较高的水平, 整体迁移工程较多, 但实施过程中很多迁移工程都是凭借经验和估算进行设计的, 采用偏大的安全系数进行计算, 导致结果经济合理性的下降。科学化及优化设计还存在很大的问题, 缺少相应的建筑物结构内应力的分析系统。为了使建筑物迁移技术真正科学化, 减少工程的风险性, 推动该技术进一步科学化和成熟化, 开发一套完善的、具有通用性、高度自动化的建筑物迁移虚拟仿真软件系统具有重要的理论和应用意义。

1.3 迁移建筑物结构内力分析现状

建筑物迁移工程因其很大的经济、社会和环境效益, 以及对历史文物的保护等种种优点, 决定了该技术在将来城市建设和旧城改造中有着很大的市场应用前景。随着城市建设的加快, 建筑物迁移技术作为一种新兴技术得到越来越广泛的应用, 然而由于建筑物迁移工程是涉及多学科交叉的复杂工程, 尚未有适用的理论和方法来模拟建筑物在迁移过程中所受到的作用。关于建筑物迁移的文献不少, 但多数仅限于工程施工技术方面, 没有针对建筑物迁移工程的结构分析软件。施工单位仅能使用通用结构计算软件, 在简单的假设前提下对建筑物做初步的分析^[19]。目前常用的建筑结构计算程序主要有: PKPM 系列、TBSA 系列和 SAP 系列等, 其他一些结构计算程序如 ETABS 等在国外很流行, 但国内实际上使用的不多。以上这些软件是针对待建建筑物, 采用现有设计规范而开发的, 未考虑迁移工程的特殊环境, 因而不适用于建筑物迁移工程。

针对国内缺少对迁移建筑物进行质量分布计算、托换结构设计、支点布置优化和建筑结构内应力分布等进行有限元分析的研究现状, 前期工作已经研究了一套建筑物顶升平移装备, 为了能够实现迁移工程的自动化、智能化监测控

制以及计算机辅助设计，提出建筑物迁移虚拟仿真的可视化软件系统的研究。建筑物迁移虚拟仿真系统是以 ANSYS 的 APDL 语言为内核有限元分析语言及 OpenGL 作为虚拟仿真环境开发的迁移建筑物设计仿真系统。该仿真软件的开发将实现：通过对建筑物迁移工程数学模型的计算及仿真分析，可以真切地观察和感受到建筑物内力随各影响因素的变化情况，为用户提供直观的分析结果，为工程相关决策人员制定方案提供依据，并能对工程可靠性和经济性进行估算和优化。

1.4 本课题研究的内容

本课题针对迁移工程的设计及建筑物的结构内力分析进行研究，迁移工程建筑结构内力的分析处理采用有限元分析软件 ANSYS 作为参数化建模、分析及结果处理工具。具体的研究内容如下：

- (1) 将建筑结构抽象简化为承重框架结构，归纳模型所使用的有限元单元，利用 ANSYS 提供的 APDL 参数化设计语言编写分析程序，实现迁移建筑物的参数化建模、参数化网格划分、参数化分析求解及后处理。
- (2) 针对迁移工程中建筑物处于复杂的动态边界条件下，建立区别于普通建筑物的边界约束条件的加载算法。研究建筑物非承重结构、液压缸支点力加载的方法。
- (3) 归纳建筑物迁移工程中各种托换结构的设计方法，为了获得较为合理的托换结构，设计出不同的结构形式。研究受力合理且经济实用的托换桁架设计方法。
- (4) 研究迁移建筑物液压缸支点的布置方法，设计液压缸支点布置的最优方案，对迁移过程中的各种情况进行预测，确定各种可控因素，使迁移过程中建筑物受到的内应力减小，保证迁移建筑物平稳移动，减少上部结构的变形。
- (5) 针对迁移工程各阶段对迁移建筑物进行结构内力分析，对结构产生较大影响的进程阶段，得到建筑物受力较大部位，为改进控制措施提出依据。

第二章 ANSYS 软件和建筑模型有限元基础

2.1 ANSYS 软件介绍

ANSYS 是由美国 ANSYS 公司开发的一种大型通用有限元分析软件。由于其在解决结构、热、流体、电磁、声学等工程问题中的突出表现，使其在工程界中得到了广泛的应用。

2.1.1 ANSYS 简介

ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件，可广泛的用于石油化工、航空航天、机械制造、汽车交通、能源、核工业、电子、土木工程、生物医学、水利、家电等一般工业及科学研究。ANSYS 软件还提供了不断改进的功能清单，具体包括：结构高度非线性分析、电磁分析、接触分析、计算流体力学分析、设计优化、自适应网格划分及利用 ANSYS 参数化设计语言扩展宏命令功能。

ANSYS 以其强大的分析能力、友好的人机交互界面和良好的用户开发环境，自 20 世纪末进入我国后，在短短的时间内，应用已遍及到工业的各个领域。尤其是它强大的非线性分析能力，更使其在建筑结构分析设计中得到广泛的应用。而且，ANSYS 给软件的使用者提供了良好的二次开发环境，使用者可以通过对 ANSYS 的二次开发，不断拓展这一软件新的功能。

2.1.2 ANSYS 软件主要特点

主要技术特点：

- 唯一实现前后处理、求解及多场分析统一数据库的一体化大型 FEA 软件
- 唯一能实现多场及多场耦合分析的软件
- 唯一具有多物理场优化功能的 FEA 软件
- 强大的非线性分析功能
- 多种求解器分别适用于不同的问题及不同的硬件配置

- 支持异种、异构平台的网络浮动，在异种、异构平台上用户界面统一、数据文件全部兼容
- 强大的并行计算功能支持分布式并行及共享内存式并行
- 多种自动网格划分技术
- 良好的用户开发环境

ANSYS 自身具有强大的实体建模技术和三维建模能力，可通过自顶向下或自底向上的方式和布尔运算、坐标变换等多种手段，建立起诸如体育场馆、桥梁、大坝等真实地反映工程结构的复杂三维几何模型。ANSYS 提供了智能网格和映射网格两种基本网格划分技术和局部细分等多种网格划分工具，可完成精确的有限元模型。其还具有与 CAD 软件专用的数据接口，能实现与 CAD 软件的无缝几何模型传递，实现不同分析软件之间的模型转换，并可读取多种格式的图形标准文件。

ANSYS 的计算结果不但可以直观地用图形显示出来，为定性判断计算结果和设计的合理性带来了极大的方便，还可以把计算结果以列表的形式输出，并对结果数据进行多种计算处理，使用户定量地计算数据，准确地得出分析结论。提供了许多数据后处理工具，如数据排序、数据运算、单元表、路径结果运算、误差估计、响应谱生成、单点疲劳分析、支反力计算、时间相关数据处理、应力线性化等。ANSYS 还提供有计算报告生成器，按用户选定的报告模板或用户定义的模板生成一个图文并茂的分析报告。

ANSYS 软件的结构分析功能包括非线性(材料非线性、几何非线性和接触非线性)、动力学(模态分析、瞬态动力学分析、谐波响应分析、响应谱分析和随机振动分析)、疲劳、断裂力学及复合材料分析。其涉及结构、热、流体力学、电磁场等学科，能有效地进行各种场的线性和非线性计算及多物理场相互影响的耦合分析。如在结构计算时考虑温度的影响时，就要使用热—结构耦合。多场耦合计算是此产品的突出特色。本课题研究中用到的分析功能主要包括：结构非线性分析、动力学分析中的模态分析、瞬态动力学分析及响应谱分析。

此外，软件还具有有一些其他功能，如子模型，可以在不增加整个模型复杂性和计算量的前提下获得结构中特定区域更为准确的结果，亦可用于研究局部结构的变化情况，如子结构法，可大大节省求解运算时间并提高建模效率；单元死活，可以用来模拟材料添加与去除过程，如山体开挖、大坝修筑、焊接问题等；优化(参数优化和拓扑优化)，用来达到用户预设的优化目标或在指定材料用量后确定结构刚度最大的拓扑形状；二次开发，允许用户用 ANSYS 的 APDL 参数化设计语言、用户子程序、外部命令、UIDL(用户界面设计语言)对软件进行开发。使用 ANSYS 的 APDL(ANSYS Parametric Design Language)参数

化设计语言进行建模及结构内力分析亦是本课题研究中采用的重要手段。

2.1.3 ANSYS 在土木工程中的应用

ANSYS 在世界范围内已经成为土木建筑行业分析软件的主流，其在钢结构和钢筋混凝土房屋建筑、体育场馆、桥梁、大坝、铜室、隧道以及地下建筑物等工程中得到了广泛的应用，可以对这些结构在各种外载荷条件下的受力、变形、稳定性及各种动力特性做出全面分析，从力学计算、组合分析等方面提出了全面的解决方案，为工程师提供了功能强大且方便易用的分析手段。

ANSYS 在我国的很多大型土木工程中都立下了汗马功劳，利用 ANSYS 进行土木工程分析的例子不胜枚举，如：上海金茂大厦、国家大剧院、上海科技馆太空城、重庆市标志建筑朝天扬帆、龙首电站大坝、南水北调工程、二滩电站、龙羊峡电站及三峡工程等等。

2.2 有限元基础理论

有限单元法的基本思想是将问题的连续求解区域离散为一组有限数且按一定方式相互联结在一起的单元的组合体，即单元剖分。由于单元能按不同的联结方式进行组合，且单元本身又可以有不同形状，因此可以模型化几何形状复杂的求解域。

2.2.1 有限元分析理论基础

有限元的基本构成：

- 节点 (Node)：就是考虑工程系统中的一个点的坐标位置，构成有限元系统的基本对象。具有其物理意义的自由度，该自由度为结构系统受到外力后系统的反应。

- 元素 (Element)：元素由节点与节点相连而成，元素的组合由各节点相互连接。不同特性的工程可选用不同种类的元素，ANSYS 提供了一百多种元素，故使用必须慎重选择元素型号。

- 自由度 (Degree Of Freedom)：上面提到节点具有某种程度的自由度，以表示工程系统受到外力后的反应结果。

从数学角度来说，有限单元法是基于变分原理的里兹 (Ritz) 法的一种形式，利用加权余量法来确定单元特性和建立有限元求解方程，运用伽辽金法，通过区域剖分和分片插值，把二次泛函的极值问题化为普通多元二次函数的极值问

题，后者又等价于一组多元线性代数方程的求解。

2.2.2 有限元法分析问题的基本步骤

1、结构的离散化

离散化就是将要分析的结构分割成有限个单元体，在单元的指定位置设置节点，使相邻单元的有关参数具有一定的连续性，构成单元的集合体代替原来的结构。结构离散化时，划分的单元大小和数目应根据计算精度的要求和计算机的容量来决定。

2、选择单元位移插值函数

为了能用节点位移表示单元体的位移、应变和应力，在分析连续体问题时，必须对单元中位移的分布做出一定的假设，一般假定位移是坐标的某种简单函数。假设的单元位移函数只能近似地表示真实的（精确的）位移场，通常采用多项式形式，因为多项式容易进行积分和微分运算。位移函数的选取是有限单元法分析中的关键。

3、分析单元的力学特性，建立单元刚度矩阵

分析单元的力学特性主要包括以下三部分内容：

- (1) 通过几何方程建立单元应变与结点位移的关系式；
- (2) 利用物理方程导出单元应力与结点位移的关系式；
- (3) 由虚功原理推导出作用于单元上的结点与结点之间的关系式及单元的刚度方程。

利用几何方程、本构方程和变分原理得到单元的刚度矩阵和载荷矩阵。设节点力列阵用 $\{F\}$ 表示，节点位移列阵用 $\{d\}$ 表示，则单元的物理方程为

$$[K]\{d\} = \{F\} \quad (2-1)$$

式中 $[K]$ 为单元刚度矩阵。

单元刚度矩阵通常用变分法建立，它的元素实际上就是影响系数，与位移函数、单元形状、单元材料性质及本构关系有关。

4、集合所有单元平衡方程，得到整体结构的平衡方程

先将各个单元刚度矩阵集成整体刚度矩阵，常用的集合方法是对号集成法（直接刚度法）或变分法。集合过程所依据的原理是：在一些单元相互连接的节点处，由于该节点为这些单元所共有，所有该节点处邻接的单元在此处的位移变量相同。然后将各单元的等效节点力列阵集成总的载荷列阵。

结构的节点平衡方程式可由总刚度矩阵表示为：

$$[K]\{u\} = \{P\} \quad (2-2)$$

式中 $[K]$ 为结构总刚度矩阵， $\{P\}$ 为整体节点荷载列阵， $\{u\}$ 为整体节点位移列阵。考虑节点支承条件，适当修改这些方程后，即得到可解代数方程组。

5、求解代数方程组，得到所有节点位移分量。这时必须考虑问题的边界条件，然后求解以便得出未知节点的位移变量，通过这些节点值就能求得体内任一点的数值。

6、单元应变和应力的计算

根据已知结点的位移利用弹性力学方程和位移插值函数算出单元的应变和应力。引入边界条件、修改平衡方程式就是消除整体结构的刚体位移。

有限元法从 20 世纪 50 年代至今，经过了几十年的发展，不断开拓新的应用领域，其范围已经从杆件结构问题扩展到了弹性力学、塑性、粘弹性、粘塑性和复合材料等问题，由平面问题扩展到空间问题，由静力学问题扩展到动力学问题、波动问题和稳定性问题，由固体力学问题扩展到流体力学、热力学和电磁学等问题。在工程分析中的作用已从分析和校核扩展到优化设计等^[25]。

2.3 钢筋混凝土框架结构的有限元模型

对于钢筋混凝土结构建筑来说，一般分为框架结构、框架—剪力墙结构、框—筒结构等。迁移建筑物形式各式各样，实际工程中迁移建筑物主要为钢筋混凝土建筑，其中，钢筋混凝土框架结构应用最为广泛。

与钢结构相比，混凝土结构的非线性现象更为复杂，其中由于材料引起的非线性因素主要包括压区混凝土的弹塑性变形、拉区混凝土的开裂、钢筋的屈服和硬化、徐变、粘结滑移等，加上材料的离散性使得混凝土结构本身与钢结构相比具有高度的材料非线性。

当前框架结构非线性分析中主要采用的有限元模型按照单元划分的精细度和复杂度可以将有限元模型可分为以下几种形式^[27]。

(一)、层间模型

对于框架结构，由于其质量的分布特点，很容易形成以框架楼层为质点，层间抗侧力体系为非线性弹簧单元的多质点串联体系分析模型。层间模型中采用最多的是层间剪切型模型，该模型假定框架结构层间变形以剪切变形为主，

忽略弯曲变形的影响，因而比较适用于层数不多的框架。

(二)、杆系分析模型

杆系分析模型适用范围较层间模型有了很大的拓展。层间模型从宏观层单元角度向人们展示了结构物沿竖向布置的不同所造成的结构总体动力反应规律的差异，而对于由平面布置不同所引起的结构强度、刚度及质量等的变化，并由此引起的框架各杆件进入非弹性阶段的先后次序及破坏程度的不同等，则只能采用杆系模型才能解释和反映。

(三)、杆系一层间模型

为前两种模型的组合，其特点是“静按杆系，动按层间，分别判断，合并运动”。这种模型比杆系模型计算工作量大为减少，又解决了层间模型不能求出各杆件内力的问题，是一种较有实用价值的模型。

(四)、微观有限元模型

该模型在结构弹性分析领域取得了空前的成功；在混凝土结构非线性分析中，平面应力模型在分析剪力墙结构中也取得了较好的效果。但微观有限元模型单元自由度大，分析较耗时。

基于建筑物迁移工程的特点和考虑建筑结构安全方面的因素，本课题对建筑模型的结构分析所要得到的是液压缸支点反力和危险部位，并不要求得到结构的破坏过程，因此采用钢筋混凝土线弹性分析方法。随着微观有限元模型的不断完善，采用此种模型来模拟迁移建筑物，可以分析建筑物在任意载荷作用下的全过程，获得建筑物不同阶段的受力性能，因而微观有限元模型比前面几种模型更适合本课题的研究。

2.4 迁移建筑物采用的有限元单元

对于钢筋混凝土结构，空间梁单元和壳单元可以模拟钢筋混凝土框架、框剪等结构的建筑，非承重结构作为荷载加入结构。

2.4.1 BEAM188 梁单元

BEAM188 梁单元，是具有拉压扭弯能力的单轴元素；每个节点有 6 个自由度，即沿着坐标 X, Y, Z 轴方向的平动自由度和绕着 X, Y, Z 轴的转动自由度，具有应力强化和大变形能力，我们用其模拟框架结构中的梁和立柱^[28]。此单元可以自定义截面尺寸，有利于模拟建筑物中各种不同梁柱的截面。近似的单元有 BEAM4 单元等。

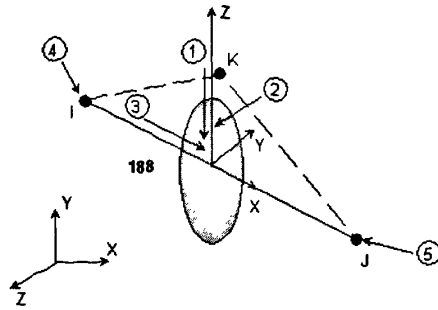


图 2-1 梁(BEAM188)单元

对于梁单元来说单元刚度矩阵为：

$$[K]^e = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

相比 ANSYS 其它梁单元，BEAM188 单元有以下特性^[19]：

- (1) 具有出色的截面数据定义功能和可视化特性；
- (2) 单元形函数为拉格朗日插值多项式，具有线性或二次的位移函数，能满足单元间转动位移协调要求；
- (3) 考虑横截面剪切变形；
- (4) 可以考虑截面的翘曲变形；
- (5) 适合线性、大角度转动和非线性大应变问题，横截面允许使用多种材料属性，具备分析弯曲的、横向的或扭向的稳定问题的能力。

综合考虑结构分析计算各方面要求，为得到较完善的结果数据本课题建筑物模型采用 BEAM188 单元。

2.4.2 SHELL63 壳单元

SHELL63 壳单元具有弯矩和薄膜特性，可承受平面内荷载和法向荷载。单元每个节点具有 6 个自由度：沿着坐标 X, Y, Z 轴方向的平动自由度和绕着 X, Y, Z 轴的转动自由度，并且考虑应力刚化和大变形能力。在大变形分析中可以采用不变的切向刚度矩阵，我们用其模拟建筑物的墙体和楼板^[28]。

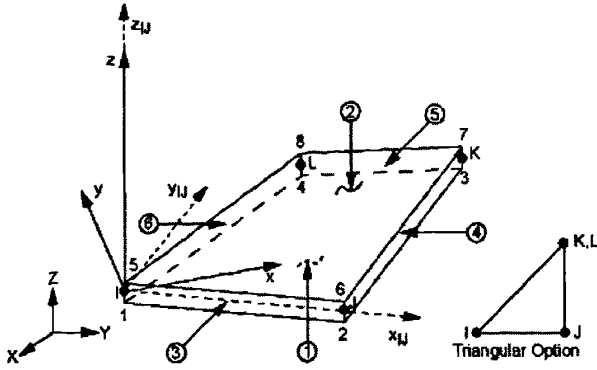


图 2-2 壳 (SHELL63) 单元

节点位移向量:

$$[\Delta]^e = \left[[\Delta]_1^e \quad [\Delta]_2^e \quad [\Delta]_3^e \quad [\Delta]_4^e \right]^T \quad (2-4)$$

节点位移向量分量:

$$[\Delta]_i^e = \left[u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi} \right]^T \quad (i=1,2,3,4) \quad (2-5)$$

薄壳单元的刚度矩阵是由平面单元的刚度矩阵和平板弯曲单元的刚度矩阵叠加而成的，薄壳单元 4 个结点，每个结点有 6 个自由度，则单元的刚度矩阵为 24×24 阶的，写成分块形式为：

$$[K]^e = \begin{bmatrix} K'_{11} & K'_{12} & K'_{13} & K'_{14} \\ K'_{21} & K'_{22} & K'_{23} & K'_{24} \\ K'_{31} & K'_{32} & K'_{33} & K'_{34} \\ K'_{41} & K'_{42} & K'_{43} & K'_{44} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

式中 K'_y 为 6×6 阶的子矩阵，且为：

$$K'_{ij} = \begin{bmatrix} K'_{ij}{}^p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K'_{ij}{}^b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

其中 $K'_{ij}{}^p$ 为 2×2 阶子矩阵, $K'_{ij}{}^b$ 为 3×3 阶子矩阵。且:

$$[K]_{ij}{}^b = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} k_{11} &= 3H[15b_1^2\xi_0 + 15a_1^2\eta_0 + (14 - 4\mu + 5b_1^2 + 5a_1^2)\xi_0\eta_0] \\ k_{12} &= -3Hb[(2 + 3\mu + 5a_1^2)\xi_0\eta_i + 15a_1^2\eta_i + 5\mu\xi_0\eta_j] \\ k_{13} &= 3Ha[(2 + 3\mu + 5b_1^2)\xi_i\eta_0 + 15b_1^2\xi_i + 5\mu\xi_j\eta_0] \\ k_{21} &= -3Hb[(2 + 3\mu + 5a_1^2)\xi_0\eta_i + 15a_1^2\eta_j + 5\mu\xi_0\eta_i] \\ k_{22} &= Hb^2[2(1 - \mu)\xi_0(3 + 5\eta_0) + 5a_1^2(3 + \xi_0)(3 + \eta_0)] \\ k_{23} &= -15H\mu ab(\xi_i + \xi_j)(\eta_i + \eta_j) \\ k_{31} &= 3Ha[(2 + 3\mu + 5b_1^2)\xi_j\eta_0 + 15b_1^2\xi_j + 5\mu\xi_i\eta_0] \\ k_{32} &= -15H\mu ab(\eta_i + \eta_j)(\xi_i + \xi_j) \\ k_{33} &= Ha^2[2(1 - \mu)\eta_0(3 + 5\xi_0) + 5b_1^2(3 + \xi_0)(3 + \eta_0)] \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

$$\text{式中 } H = \frac{Eh^3}{720(1 - \mu^2)ab}, \quad \xi_0 = \xi_i\xi_j, \quad \eta_0 = \eta_i\eta_j, \quad a_1 = \frac{a}{b}, \quad b_1 = \frac{b}{a}$$

式(2-9)中参数如图 2-3 所示:

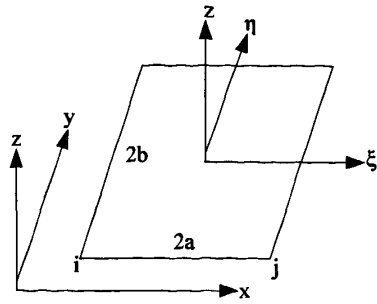


图 2-3 壳单元尺寸参数

2.5 本章小结

本章将有限元分析理论应用于建筑物迁移工程结构分析中,主要结论如下:

- (1) 阐述了有限元的基本理论和分析问题的步骤和方法。
- (2) 根据建筑物的结构形式将其分类,进一步介绍了钢筋混凝土框架结构建筑的有限元理论。
- (3) 针对钢筋混凝土框架结构建筑物模型,归纳出所需的单元,阐述了单元的特性,为迁移工程设计提供理论依据,也为其它形式的建筑物迁移结构分析提供了思路。

第三章 迁移建筑物的参数化建模及边界条件

3.1 ANSYS 中几种建模方法

ANSYS 中有两种建立有限元模型的方法：实体建模和直接生成。

1. 实体建模法，首先生成能描述模型的几何形状的几何模型，然后指示 ANSYS 程序按照指定的单元大小和形状对几何体进行网格划分产生节点和单元。
2. 直接生成法，需要首先定义每个节点的位置和单元的连接关系，然后再定义较高级的图元，即先建立点，再由点连成线，然后由线组合成面积，最后由面组合建立体。

具体操作还可分为以下几种方法：

a) 自底向上法

自底向上的建模方法是指在构造几何模型时首先定义几何模型中最低级的图元——关键点，然后再利用这些关键点定义较高级的图元，即先建立点，再由点连成线，然后由线组合成面，最后由面组合建立体。在自底向上构造模型时可以不总是按照点生成线、线生成面、面生成体这样严格的顺序生成高级图元。可以直接通过作为顶点的关键点来定义面和体，中间的图元可以在需要时自动生成。例如，定义一个长方体可用它的八个顶点(关键点)来定义，ANSYS 程序会自动的生成该长方体中所有的面和线。

b) 自顶向下法

自顶向下建模方法是指一开始就通过较高级的图元来构造模型，程序自动定义相关的面、线及关键点。此方法直接建立较高单元对象，其所对应的较低单元对象一起产生，对象单元高低顺序依次为体积、面积、线段及点。

c) 组合使用前两种方法

自底向上和自顶向下这两种方法可以根据需要自由组合使用。建模的最终目的是为了对构造的几何模型划分网格以生成节点和单元得到有限元模型。因此，在建立模型之初，就需要考虑网格的划分，要使用自由网格划分还是映射网格划分。自由网格划分时，模型的建立比较简单，只要所有的面或体能接合成一个体就可以。映射网格划分时，平面结构一定要由四边形或三角形面积相接而成，立体结构一定要由六面体相接而成。对于建立的模型还可以通过布尔

运算对其进行操作以生成更为复杂的形体。布尔运算对于采用自底向上和自顶向下两种方法构成的图元均有效。

对于实体建模，需要描述模型的几何边界，以便生成有限元模型前建立对单元大小和形状的控制，然后让 ANSYS 自动生成所有的节点和单元。与之对比，直接生成方法必须直接确定每个节点的位置，以及每个单元的大小、形状和连接关系。采用命令流方式往往更便于实现有限元模型的直接生成。

3.2 有限元参数化技术

实现迁移建筑物参数化建模首先要提取出可以描述建筑物体型特征的各项参数，这些参数包括结构图形参数和规则参数。结构图形参数包括关键点的坐标，线段的长度和剖分信息等控制点和控制尺寸；规则参数可以是一种关系的描述，也可以是一个计算公式，甚至是一个复杂的方程组。

3.2.1 参数化原理

参数化建模涵盖面很广，通常主要是指参数化造型。它是一种使用重要几何参数快速构造和修改几何模型的造型方法，这些重要的几何参数包括控制形体大小的尺寸和定位形体的方向矢量等。参数化建模也指由应用软件生成的图形具有参数化的功能。具体可理解为图形的所有尺寸是参数化的，可以动态修改。根据如何得到参数值，可以将常见的参数化方法分成以下的几种：代数法、人工智能法、直接操作法和语言描述法^[22]。

1. 代数法

代数法是指把尺寸的约束转化为联立方程组，求解方程，从而得到满足尺寸的约束解。通常使用的是变量设计法。所定义的任何尺寸约束均可以作为操作几何形体的参数。修改这些参数求出受影响的约束方程，可以获得满足新定义约束的几何模型。

2. 人工智能法

人工智能法是通过推理机制逐步构造物体的几何模型。它使用一些简单的规则进行推理，系统提取约束，与规则的条件进行匹配，从而推出一些中间结论，再把这些中间结论作为事实继续推理，最终求出物体的所有特征点，构造出几何图形。人工智能法在进行参数设计比较好的途径之一，随着人工智能科学的不断发展，这种方法将占主导地位。

3. 直接操作法

直接操作法中用户可以直接修改图形的内部状态。所有的目标都用图形来表示，用户可以通过直接控制点来修改目标的位置，方向和目标的大小等。也可以将许多目标组合起来形成复杂的目标。这种方法简单、直观，但是要求对所构造的物体概念非常清晰。

4. 语言描述法

语言描述法则是使用语言描述图形的方法。用户使用造型语言来定义带有参数的体素，再用这些体素来描述几何图形。也可以先绘制体素，系统自动生成几何体的描述语言，再修改描述语言中的某些参数，以生成新的体素。

本文的迁移建筑物的参数化建模采用的即是 ANSYS 软件提供的 APDL 的语言描述法。APDL 语言能较容易地控制计算流程、获得内部计算数据及数据的输入输出等，大大方便了建模、计算及数据处理，同时使有些凭手工无法想象的工作成为可能。

3.2.2 ANSYS 的参数化程序设计 APDL 语言介绍

ANSYS 提供的一种 APDL(ANSYS Parametric Design Language)参数化设计语言，是用来自动完成某些功能或建模的一种脚本语言，它是对 ANSYS 进行定制和二次开发的基础。APDL 语言不仅可以提供一般程序语言的功能，还提供简单界面定制功能，实现参数交互输入、消息机制、界面驱动和运行应用程序等，还允许复杂的数据输入，使用户实际上对任何设计和分析属性有控制权，进而可以实现迁移建筑物的参数化建模和分析。

参数化程序设计语言 APDL 实质上由类似于 FORTRAN 的程序设计语言部分和 1000 多条 ANSYS 命令组成。其中，APDL 语言与其它编程语言一样，具有参数、数组表达式、函数、流程控制、重复执行命令、缩写、宏以及用户程序等。标准的 ANSYS 程序运行是由 1000 多条命令驱动的，这些命令可以写进 APDL 程序，命令的参数可以赋确定值，也可以通过表达式的结果或参数的方式进行赋值。从 ANSYS 命令的功能上讲，它们分别对应 ANSYS 分析过程中的定义几何模型、划分单元网格、材料定义、添加载荷和边界条件、控制和执行求解和后处理计算结果等指令。因此用户可以利用 APDL 语言将 ANSYS 命令组织起来，编写出参数化的用户程序，从而实现有限元分析的全过程，即建立参数化的模型、参数化的网格划分与控制、参数化的材料定义、参数化的载荷和边界条件定义、参数化的分析控制和求解以及参数化的后处理。采用 ANSYS 的 APDL 语言进行参数化编程开发可以使人为干预尽量减少和简化，减少重复性劳动、提高建模效率，保证结果的一致性。

3.2.3 迁移建筑物的参数化

迁移建筑物主要是钢筋混凝土结构建筑，主要包括框架、框剪、框筒结构等，对于这些形式的建筑物，尽管在外观上差异很大，但是作为主要的承重结构来说，无非是其中的框架骨架，对于建筑物迁移中容易发生危险的地方也恰恰是这些主要承重结构。对于这些框架骨架来说，较易用参数化的形式描述出来，因此参数化更可行。通过对建筑主要承重部分的简化，主要基本参数包括建筑物总长、总宽、总高、楼层数、框架柱行方向柱数、框架柱列方向柱数和柱间距等。

为研究建筑物在迁移过程中的受力特点，首先进行结构分析，将建筑模型抽象为结构受力模型，抽象和简化包括三个环节：结构构件的抽象和简化、建筑物所受载荷的抽象和简化及约束的抽象和简化。结构分析后，采用有限元分析软件 ANSYS 进行建筑物的参数化建模。

参数定义是参数化建立几何模型的重要一步，一般是在进入前处理器之前把需要的几何尺寸参数全部定义好，这样便于管理和修改参数赋值，不会导致混乱。而如果根据需要随时在程序流程的不同位置创建参数，会使参数定义散乱地分布在参数化建模程序中，容易导致出现同名参数。将参数写在单独的 APDL 宏文件里面进行封装，有限元分析软件运行建模命令前通过命令调用宏文件。在 ADPL 语言中，宏命令可以嵌套，在宏文件中可以直接调用其他的宏文件来运行，例如在文件夹中有一个 aa.mac 文件，还有一个 bb.mac 文件，在 aa.mac 中可以调用宏文件 bb.mac。因此对于结构分析返回的参数以及需要手动输入的参数可以存储在 *.mac 文件中。

参数化分析的主要过程参照图 3-1 所示。

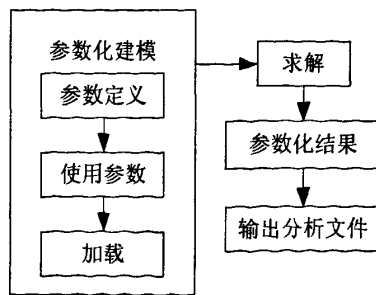


图 3-1 参数化分析过程

3.3 ANSYS 建立迁移建筑物模型

3.3.1 模型创建步骤

迁移建筑物模型创建步骤如下：

1. 首先选取适当的单元类型，本课题研究采用的单元主要有 BEAM188 梁单元和 SHELL63 壳单元。

2. 定义单元实常数，单元实常数是依赖单元类型的单元特性，如梁单元的横截面特性，采用 SECTYPE 命令为梁单元定义不同的截面形式和截面大小。

梁单元 BEAM188 常用的实常数有：面积 (AREA)、惯性矩 (IZZ)、高度 (HEIGHT)、剪切变形常数 (SHERZ) 和初始应变 (ISTRN) 等。

3. 定义材料属性，大多数单元类型在程序分析时都要指定材料特性，常用的有弹性模量 EX、泊松比 PRXY 和密度 DENS 等。ANSYS 程序可以选择的材料特性可以是：

- *线性或者非线性
- *各向同性、正交异性或非弹性
- *不随温度变化或者随温度变化

4. 创建几何模型，本课题采用自底向上的方式进行建模。即：首先定义关键点，然后依次是相关的线、面、体。

5. 最后通过自由或者映射剖分方法划分有限元模型。

3.3.2 应用实例

某公寓为 6 层钢筋混凝土框架结构，楼长 48m，楼宽：16m，层高：4m，柱间距：8m，采用 C30、C20 混凝土，框架梁、柱截面尺寸及材料性能见表 3-1，结构平面如图 3-2 所示

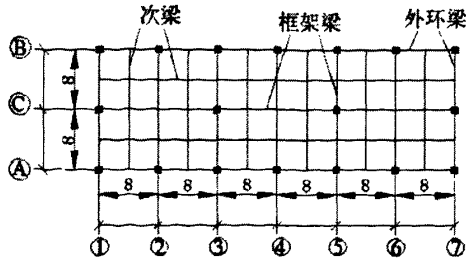


图 3-2 建筑物结构平面示意图

主要承重构件的材料力学性能参数:

混凝土 C30, 弹性模量 $E = 3.25 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 泊松比 $\nu = 0.2$, 密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

混凝土 C20: 弹性模量 $E = 3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 泊松比 $\nu = 0.2$, 密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

表 3-1 框架梁柱截面尺寸及选用材料

| 名称 | 所用材料 | 所用单元 | 截面尺寸 (m) | |
|-----|------|----------|--------------|---------------|
| 外墙 | C30 | Shell 63 | B=0.12 | |
| 内墙 | C20 | | B=0.1 | |
| 框架柱 | C30 | Beam 188 | b=0.6, h=0.6 | |
| 梁 | 外环梁 | C30 | Beam 188 | b=0.4, h=0.5 |
| | 内框架梁 | C30 | Beam 188 | b=0.3, h=0.45 |
| | 次梁 | C30 | Beam 188 | b=0.3, h=0.35 |
| 楼面板 | C20 | Shell 63 | B=0.12 | |

经密度折算处理, 梁、柱密度取 $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$, 楼面板密度取 $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ 。C30 混凝土考虑钢筋分布, 刚度等效处理后, 混凝土弹性模量调整为 $E = 3.34 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。

3.3.3 框架结构建模部分命令流

```

/REP7
!定义单元类型
ET,1,BEAM188
ET,2,SHELL63

!定义材料属性
MP,EX,,,
MP,PRXY,,
MP,DENS,,
    
```

!定义梁单元形状和尺寸

SECTYPE,1,BEAM,RECT

SECDATA,,

SECTYPE,2,BEAM,RECT

SECDATA,,

!定义实常数

R,,,

!建立关键点

K,1

K,,LL

KFILL,1,

KGEN,,,

/VIEW,1,1,1,1

!建立框架柱

*DO,1,1,,

 L,1,I+NNUM1

*ENDDO

LGEN,CN1,1,,

!框架柱赋材料属性及划分单元

LATT,1,,1,,,,1

LESIZE,ALL,,

LMESH,ALL

LSEL,U,,,ALL

!建立梁模型

*DO,1,1,,

 L,1,,

*ENDDO

LGEN,,1,,

```
LATT,1,,1,,,  
LESIZE,ALL,,  
LMESH,ALL  
LSEL,U,,,ALL
```

!建立楼板模型

```
*DO,I,,,  
  A,,,,  
*ENDDO  
AGEN,,,,,  
AATT,,,  
AESIZE,ALL,,,  
AMESH,ALL  
ALLS  
NUMMRG,ALL  
NUMCMP,ALL
```

```
SAVE,FRAME MODEL,DB
```

```
FINI
```

框架结构的整体有限元计算模型如图 3-3 所示：

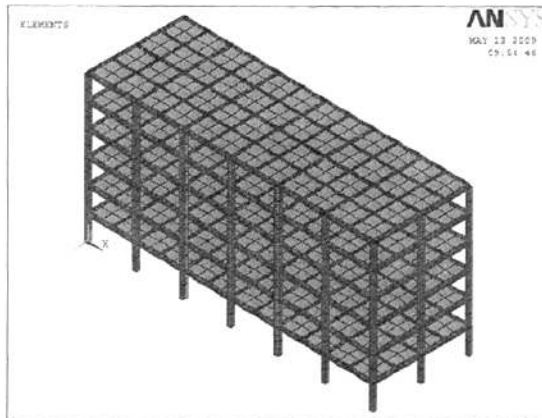


图 3-3 框架结构的有限元计算模型

3.4 迁移建筑物模型的边界条件

根据建筑物迁移工程特点,本课题将迁移建筑物模型的边界条件分为以下两类:迁移建筑物的位移约束载荷和迁移建筑物的力约束载荷。

迁移工程前既有建筑物约束加载比较简单,结构底部处于6自由度完全约束状态载。迁移工程中建筑物位移和受力不断变化,结构处于复杂的动态边界条件下,需建立区别于普通建筑物的边界约束条件的加载算法。迁移工程的几个主要阶段:加固托换、切割分离、顶升、迁移和就位连接,建筑物底部将可能产生差异沉降或水平扭转,表现在有限元模型上为结构模型的边界条件动态变化。各阶段中以顶升、迁移和就位连接过程对建筑物上部结构影响最大。工程中建筑物的迁移设备采用液压缸进行顶升和平移,由于液压系统的工作特性、各液压缸支点所处地面的沉降以及各支点间的耦合作用,结构处于反复加载和卸载过程^[29]。课题通过研究边界条件变化对结构产生影响的规律确定控制液压缸支点位移的方法,保证迁移工程中各液压缸支点处于同一平面内,防止建筑物扭转或倾斜。

3.4.1 迁移建筑物的位移约束载荷

有限元分析中的载荷除了传统意义的载荷(重力、集中力、温度、电势等)外,还包括位移边界条件。在模型建立之前,应该确定所分析模型的工作环境、作用载荷的种类、大小、方向,作用位置等,这是保证分析正确的前提条件。

当迁移建筑物与基础切割分离以后,其结构底部约束由6自由度完全约束,变为竖直方向单向约束,如果仅考虑支点力边界条件,就结构分析而言是约束不足的。必须根据迁移工程中几个阶段的实际情况提取约束条件,每个阶段的边界条件都不同。

迁移工程中位移边界条件的改变主要体现在建筑物被顶升的过程中,建筑物迁移前需要进行结构托换,确定液压缸支点布置方案后,将液压缸布置在托换桁架的相应位置,切断上部结构和原基础的连接,框架柱切割后,建筑结构上部荷载传给托换桁架,进而顶升阶段建筑物位移边界条件为:建筑结构由框架柱底部全部位移约束变为液压缸对建筑物支点位置处的位移约束,且各液压缸支点的位移由于耦合作用处于动态变化中。液压缸支点间存在相对位移,因此施加在模型上的相对位移也有变化。

模型位移约束加载的命令流如下:

```
*DO,1,1,CN1,1
```

```

*DO, J, 1, CN2, 1
  NSEL, S, LOC,
  NSEL, R, ,,
  NSEL, R, ,,
  D, ALL, UX,
  .....
*ENDDO
*ENDDO

```

3.4.2 迁移建筑物的力约束载荷

根据建筑物迁移工程特点，本课题将迁移建筑物模型的力约束载荷分为两类：迁移建筑物的结构载荷和液压缸施加的力载荷。

建筑物的结构载荷，又可分为下列三类^[31]：

- a) 永久荷载（恒荷载）：在结构使用期间，其值不随时间变化，或其变化与平均值相比可以忽略不计的荷载，例如结构自重。自重是指材料自身重量产生的荷载（重力）。当建筑物给定以后，建筑物的尺寸和各种建筑材料的用量就已经确定了，所以，只要根据材料用量和材料密度，就很容易计算出该结构上的永久荷载。
- b) 可变荷载（活荷载）：在结构使用期间，其值随时时间变化，且其变化与平均值相比不可忽略不计的荷载。例如楼面活荷载、屋面活荷载和积灰荷载、吊车荷载、风荷载、雪荷载等。
- c) 偶然荷载：在结构使用期间不一定出现，一旦出现，其值很大且持续时间较短的荷载。例如爆炸力、撞击力等。

按分布方式建筑物的结构荷载又可分为：集中荷载、均布荷载和非均布荷载。建筑结构各部分构件的传力次序，一般是楼板荷载传到次梁上，然后再从次梁传到主梁上，许多情况下楼板的荷载会直接传到框架梁上，这时框架梁上受到的是均布力，即所谓的均布荷载。

1. 结构荷载的施加

实例中建筑物模型包含框架柱、外环梁、次梁和楼板等，只要设置了模型各部分的材料属性和密度，ANSYS 软件即可自动计算出结构的总自重。而对于墙荷载的处理，一般的做法是将墙板作为均布线荷载施加在梁上。

计算实例模型的墙荷载大小为 1200kg/m

模型施加墙荷载后如图 3-4 所示：

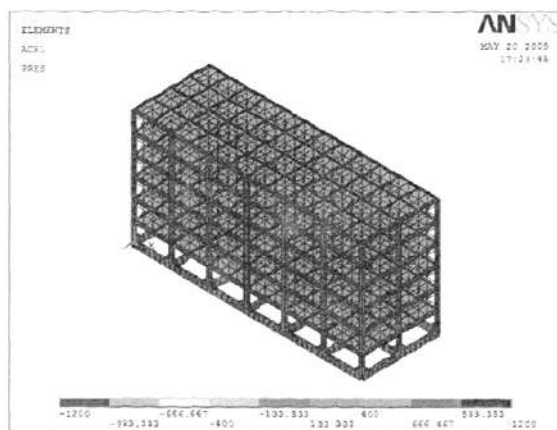


图 3-4 施加墙荷载后模型

2. 多点支撑液压缸的力荷载施加

建筑物迁移的基本原理是多点支撑建筑物，并施力使其平稳移动，各支点需克服重力和摩擦力，使建筑物按照一定的运动方向缓慢前进。

建筑物与基础切割分离后，力约束边界条件由建筑物框架柱承受结构载荷，变为托换结构承受液压缸支点竖向的单向荷载，必须按最小影响原则补充不足的边界条件。本文采用“支点附加小刚度铰支杆”模拟迁移建筑物的边界条件。即在每个支点处假设存在一个轴向与迁移方向相同的小刚度铰支杆，用来平衡多余或者不足的支点作用力。该方法既不改变建筑物的可动性，由于其小刚度也没有限制建筑物的自由变形，同时还能满足有限元求解的需要。

“支点附加小刚度铰支杆”实施方法和步骤如下^[29]：

1. 计算某相同运动方向上的所有支点在同一个平面内时各支点的反力 N_i ，

$i=1,2,\dots,n$ ， n 为支点总数。

2. 计算各同运动方向支点的最大安全区不同步度 δ_d^s 。根据工程需要，选取迁移速度 q_d ，然后求得各支点力在绝对同步下的力增量 ΔF_{di} ，以及总体加惯性

$$\text{力 } \Delta F_d = \sum_{i=1}^n \Delta F_{di}$$

3. 取比最大不同步度 δ_d^s 大一个数量级的距离作为该运动附加小刚度铰支杆的总体平均伸长量，即 $\Delta l_d = 10 \times \delta_d^s$ ，由于小刚度铰支杆的平均伸长量大于最

大安全不同步度一个数量级，故支点附加小刚度铰支杆的存在对建筑物真实变形影响很小。

4. 根据支点附加小刚度铰支杆的假设平均伸长量 Δl_d 和由 q_d 得到的该运动方向的加速度力 ΔF_d 的大小计算铰支杆的总体等效刚度，如式(3-3)所示

$$K_d = \frac{\Delta F_d}{\Delta l_d} \quad (3-3)$$

5. 每个支点的反力大小作为加权系数，分配总体等效刚度到各支点的铰支杆，如式(3-4)所示。

$$K_i = \frac{N_i \times K_d}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (3-4)$$

6. 施加与运动方向垂直的约束。

“支点附加小刚度铰支杆”原理如图 3-5 所示：

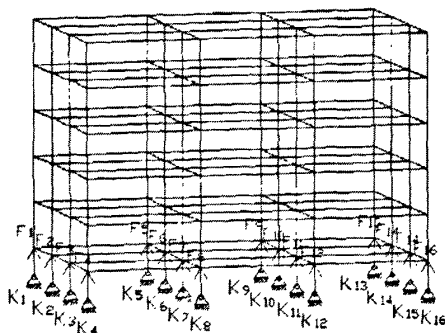


图 3-5 “支点附加小刚度铰支杆”原理图

图中标记为 K_i 的铰支座杆即为“支点附加小刚度铰支杆”。

3.5 本章小结

本章研究了 ANSYS 中建筑物的建模方法,提出了建立参数化建筑物模型的编程算法以及模型边界条件的处理方法。主要结论如下:

- (1) 阐述了 ANSYS 的 APDL 参数化设计语言特点,针对典型迁移建筑物将建筑结构抽象简化为框架承重结构,利用 APDL 语言进行编程,实现了迁移建筑物的参数化建模。
- (2) 迁移工程中结构与基础分离后,结构处于动态的位移边界条件下。根据建筑物迁移工程特点对建筑结构所处的动态位移边界条件进行抽象和简化,提出了模型位移约束的加载算法;根据迁移建筑物的结构特点进行载荷力的抽象和简化,提出了模型力约束的加载算法。
- (3) 针对多支点液压缸支点布置的特点进行液压缸载荷力的简化和加载,采用“支点附加小刚度铰支杆”理论建立了区别于普通建筑物的边界约束条件的加载算法,解决了迁移建筑物约束不足的问题,该方法既不改变建筑物的可动性,由于其小刚度也没有限制建筑物的自由变形,同时还能满足有限元求解的需要。

第四章 迁移建筑物托换结构设计及支点布置研究

4.1 托换结构概述

托换是指采用托换技术来解决地基处理和基础加固问题以及解决建筑物平移、房屋纠偏或者地下工程中荷载转换等问题^[38]。

4.1.1 托换体系的组成和作用

迁移工程中的结构托换体系由上部结构加固托换桁架和柱托换节点组成，是迁移技术中最关键的技术环节。建筑物迁移就位连接后，托换结构仍为主要受力结构时称为维持性托换；如果荷载完全转移到就位连接节点上，则称为临时性托换。为保证托换结构具有足够的整体性和稳定性，既能有效的传递顶升或顶推荷载，又能保证上部结构不受影响，通常将托换结构设计成水平桁架体系^[39]。托换体系包括柱下的托换节点、墙下的托换梁以及斜撑，如图 4-1 所示

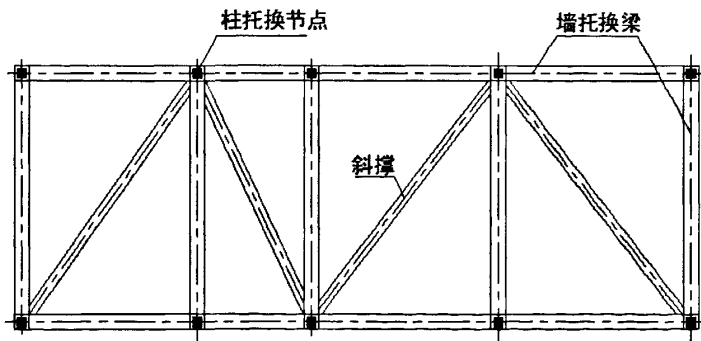


图 4-1 托换结构平面示意图

墙、柱托换的作用是改变上部结构竖向荷载的传力途径，上部结构和基础分离后，荷载首先传给托换节点，然后通过液压缸支点传递到迁移轨道上。托换桁架起到传递水平荷载和加强平面刚度的作用。

4.1.2 托换结构的设计原则^[37]

托换结构是建筑物在迁移过程中的基础，它应能可靠地对上部结构进行托换和传递液压缸顶推力，因此，它必须满足：

- (1) 与原结构的竖向受力构件有可靠的连接，保证原结构的荷载能有效的传递到托换结构上。
- (2) 在迁移工程中，能明确而有效的传递水平力，不对上部结构产生影响。
- (3) 具有足够的强度，保证在上部结构荷载和顶推荷载的作用下不发生破坏。
- (4) 具有足够的刚度，不能因其变形过大而在上部结构中产生附加应力，造成上部结构的破坏或增大迁移阻力。通常的做法是在托换桁架中设置一定数量的水平支撑。
- (5) 具有足够的稳定性。

4.2 柱的托换形式及设计方法

4.2.1 柱的托换方法

对于框架结构而言，由于柱的载荷较大，而截面尺寸又较小，故托换要求很高。常用的柱的托换方法主要有钢筋混凝土包柱式托换法、分荷托换法、植筋托换法和型钢对拉螺栓托换法。

①钢筋混凝土包柱式托换法，即包裹式托换，沿建筑物平移方向将外包梁适当延长，以将建筑物的上部荷载均匀的传递到轨道上。当柱下荷载较小，而建筑物又有特殊要求的情况下，可采用在柱下直接托换的单梁式托换方式，但其托换梁与柱的连接构造和建筑物上下分离时的施工难度较大。

②带竖向斜撑分荷柱托换法，柱下荷载较大时，可考虑采用带竖向斜撑的托换方式，以便更均匀的传递荷载，减小较大的局部压力和作用在轨道上的弯矩。分荷托换结构^[39]是由柱前后对称设置的钢筋混凝土分荷斜柱和斜柱上部的钢筋混凝土抱柱箍组成，并与柱及托架形成完整的一体，提高了分荷结构的节点刚度和传力的可靠性，如图 4-2 所示，将柱荷载经分荷斜梁结构传至托换梁，然后通过底部顶升装置传给轨道。

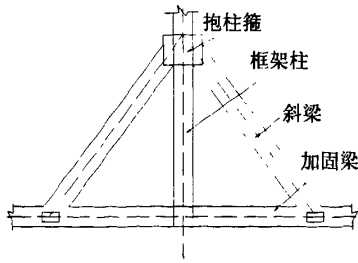
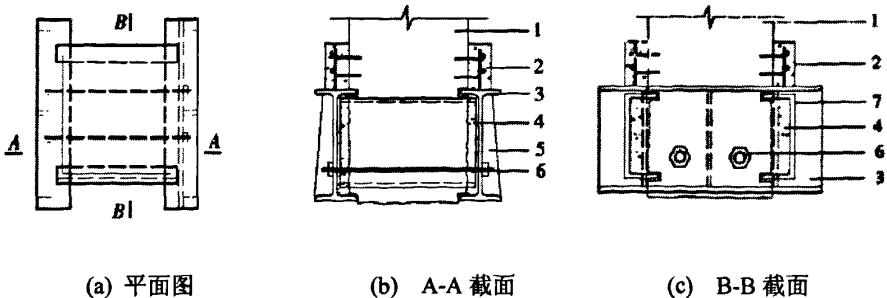


图 4-2 带竖向斜撑分荷柱托换

③植筋柱托换法，植筋起两个作用，一个是销栓抗剪作用，当外包混凝土和柱的结合面结合紧密时，剪跨比较小情况下，植筋的抵抗剪力作用相当大。第二个作用是拉接新旧混凝土的作用。当柱受到竖向荷载时，外包混凝土受到向外的推力，四周的小梁和植筋共同将混凝土拉住，使结合面受压，从而产生了界面的摩擦力。

④型钢对拉螺栓柱托换法^[3]，具体构造如图 4-3 所示，型钢对拉螺栓柱托换节点由包柱型钢、对拉螺栓、填充混凝土和上部围护结构组成。一般在迁移方向上设工型钢，与迁移方向垂直方形焊接槽钢。为增加托换能力，型钢翼缘和柱接触部位的混凝土保护层凿毛，也可凿成齿槽。为防止型钢卡入部位上部保护层局部受压破坏，在节点上部设围护结构。型钢外部刚度薄弱部位应设加劲肋。为保证填充混凝土填充饱满，可加入膨胀剂。当柱轴力特别大时，需要螺栓数量较多时，可在两个方向穿螺栓^[3]。型钢对拉螺栓柱托换方法托换荷载高，托换节点高度小，施工精度要求高，用钢量大。适用于托换荷载 3000kN 以上，托换节点高度受限小于 600mm 时。植筋柱托换节点托换荷载围广，节点尺寸大，对植筋粘结要求高。适用于尺寸较大的柱托换节点。



1 柱；2 上部维护结构；3 工字钢；4 填充细石砼；5 加劲肋；6 对拉螺栓；7 槽钢

图 4-3 型钢对拉螺栓柱托换

4.2.2 柱托换节点的设计方法

柱节点的抗剪承载力计算可由下式计算^[40]:

$$V = \gamma(V_b + V_c + V_f) \quad (4-1)$$

式中 V_b 、 V_c 、 V_f 分别为为螺杆、填充混凝土、型钢翼缘承担的抗剪承载力， γ 为综合作用系数。引入综合作用系数是因为三部分在共同承担剪力的过程中受力相互影响，因此采用 γ 统一考虑。其取值由试验确定。

$$V_b = f_{sv} \cdot 2nA_{sv1} \quad (4-2)$$

$$V_c = f_{cv} \cdot A_{cv} \quad (4-3)$$

$$V_f = f_c \cdot A_{ca} \quad (4-4)$$

式中： f_{sv} ——螺杆的抗剪强度；

A_{sv1} ——单根螺杆的截面面积，因为有两个抗剪面，故公式中乘以2；

n ——螺栓根数；

f_{cv} ——填充混凝土界面的剪切强度；

A_{cv} ——新混凝土结合面面积；

f_c ——混凝土抗压强度；

A_{ca} ——柱保护层横截面面积。

综合几种柱托换设计方法，本课题框架柱的托换采用了竖向斜撑分荷柱托换法，并给出了分荷斜撑梁的位置和结构参数，得到如图4-4所示的建筑物托换结构模型。

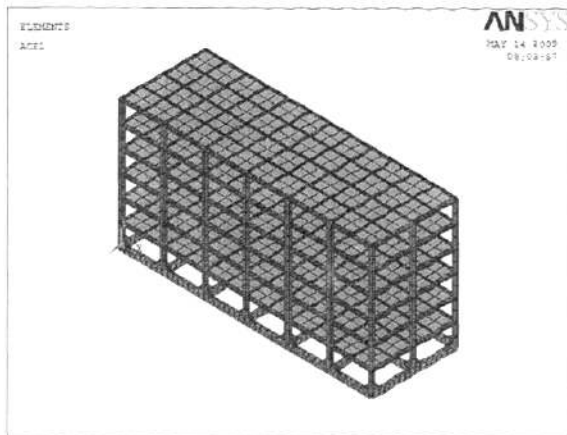
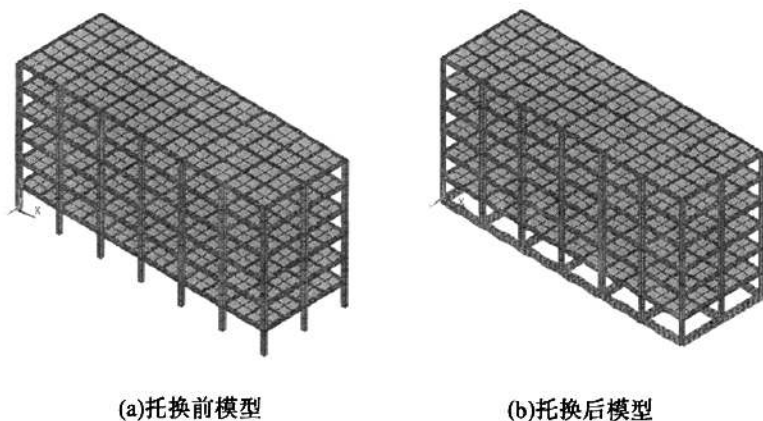


图 4-4 分荷柱托换结构设计建筑物整体模型

第三章实例建筑模型经 ANSYS 分析计算，无分荷斜撑梁时框架柱在梁柱结合处的最大变形为 0.0393。有分荷斜撑梁时框架柱在梁柱结合处的最大变形为 0.0392，位移变形较小，分荷柱托换结构起到了增强建筑物整体刚性的作用。

4.3 托换桁架的设计

托换桁架概念：托换桁架简称托架，由柱节点、墙体托换梁、连梁（互相交叉的斜向连梁习惯称为剪刀撑）组成。托架材料多选用型钢和钢筋混凝土^[3]。下图为设计了托换桁架的建筑物整体模型：



(a)托换前模型

(b)托换后模型

图 4-5 建筑物模型

在托换桁架设计前，必须进行建筑结构内力分析，全面了解建筑物内力状

况^[41]，特别是底层框架柱的内力值，然后根据每个柱子的内力值，对相应柱节点和托换梁进行合理设计。通过 ANSYS 对第三章实例建筑模型的总体重量、重心、底层每个框架柱的轴力进行详细分析。分析结果表明，轴力最大的框架柱 $N=3416\text{kN}$ ，建筑物总重 $W=31389\text{kN}$ ，重心位置坐标 ($X_c = 8\text{m}$, $Y_c = 13.7\text{m}$, $Z_c = -8\text{m}$)。

表 4-1 建筑物各框架柱的轴力 (单位: kN)

| 轴 | Ⓐ | Ⓑ | Ⓒ |
|--------------|--------|--------|--------|
| ① | 899.4 | 966.1 | 1993.1 |
| ② | 1773.3 | 1912.1 | 3416.0 |
| ③ | 1387.5 | 1529.4 | 3416.0 |
| ④ | 1748.5 | 1887.2 | 1993.1 |
| ⑤ | 1387.5 | 1529.4 | 1993.1 |
| ⑥ | 1773.3 | 1912.1 | |
| ⑦ | 899.42 | 966.07 | |
| 结构总自重 31 389 | | | |

本课题中托换桁架模型使用的有限元单元包括 BEAM188 梁单元和 LINK8 杆单元，BEAM188 梁单元在前面章节已有介绍。LINK8 杆单元是一种单轴受拉或压的三维杆件单元，每个节点有 3 个自由度 (X, Y, Z)，可以用于如桁架、悬索、铰等工程的分析中。

在以前的迁移工程中，多采用整浇混凝土楼板作为大底盘来增加结构平面刚度，因为材料用量过大，目前已经较少采用；目前迁移工程中大多采用由托换梁组成的矩形平面托架，因为相邻的两榀缺乏联系，所以整体性较弱，在加载不均匀或者框架自身刚度差的情况下，在水平顶推荷载作用下，就会产生位移不同步、应力集中或结构开裂；因此托架设计中通常增设连梁或斜向支撑（即斜撑杆），形成平面刚度很大的整体托架^[20]。

连梁根据平面刚度大小和传力需要设置。连梁的设置原则为：①沿轴线设置，一般沿结构轴线拉通；②较大空间设置，建议建筑物开间和进深大于 $4\text{m} \times 6\text{m}$ 时设置；③根据施力需要设置，连梁设置可以与轴线平行，也可设计成斜向支撑（如剪刀支撑和米字支撑等）^[3]。

托架在水平或竖向荷载作用下，杆件截面上一一般产生弯矩、剪力、压力或

拉力。本课题为获得最优设计，为第三章实例建筑模型设计了四种结构形式，如图 4-6(a)-(d)所示

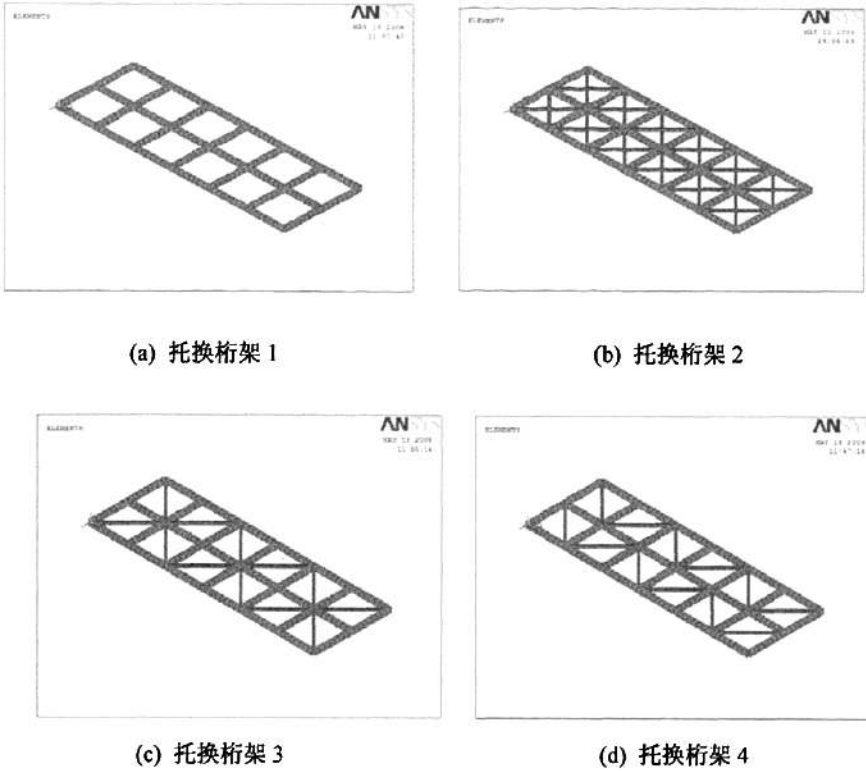


图 4-6 四种不同的托换桁架形式

为了获得较为合理的设计形式，将各种形式输入到模型中，计算在相同受力情况下各种形式的受力状况。经计算比较：

方案 1 的斜撑杆用量最少，正常加载的情况下变形不太大，但是在加载异常的情况下变形很大，存在安全缺陷。

方案 2 的变形较小，而且在异常荷载下整体性也较好，但斜撑杆用量最大。

方案 3 中由托换梁承受主要的顶推力，斜撑杆辅助受力，受力较为均匀合理。斜撑杆用量也较少。

方案 4 是针对方案 3 的改进，避免了个别节点处杆件过多的缺点，整个体系中的杆件最大受力和变形与方案 3 差别不大。

因此采用方案 4 可以使建筑模型获得较合理的受力，而且可以减少杆件的用量。

4.4 迁移建筑物液压缸支点布置方式研究

4.4.1 建筑物迁移的方式

建筑物迁移过程中,根据建筑物结构形式、地基情况、平移过程的载荷不同,建筑迁移工程采取的迁移方式也不同。根据摩擦方式的不同迁移方式通常分为滚动迁移和滑动迁移两种方式。

滚动迁移方式虽然结构简单,成本较低,但滚动迁移对结构安全不利,容易产生误差,迁移进度慢,因此应用受到许多限制。本课题研究的多支点滑动迁移方式具有适用面广,施工方便灵活的特点,且能适应多种工程需要。多支点滑动迁移仅在某些位置布置支点,较之使用滚轴的滚动迁移,施工更加方便、简洁和灵活。通过液压同步控制系统的自适应控制,更能有效地减少上部结构的变形。移动时平稳、安全、精度高,易于调整,适合精确控制,且工期短。

4.4.2 迁移建筑物液压缸支点的设计

当建筑物进行迁移时,液压缸支点的设计是至关重要的。支点布置应避开框架柱、门、窗、洞及薄弱承重构件位置。

框架结构应根据柱荷载大小布置液压缸支点。

$$\text{支点数量可先按下式进行估算: } n = k \frac{Q}{N_a} \quad (4-5)$$

式中: n —支点数量

Q —顶升时建筑物总荷载

N_a —单个液压缸额定荷载值

k —安全系数,可取 1.5~2.0

迁移工程中液压缸支点的设计至关重要。对于被迁移的建筑物,因其各部分重量分布不均,各支点液压缸承受的竖向载荷也不相同,支点液压缸施力的差异较为明显。采用合理的方式布置液压缸支点和计算支点反力尤为重要。以往,在做结构迁移力学分析前,支点平衡力是靠估算和称重来逐步调试得到,非常费时费力。本文中支点数量可先按式 4-5 进行估算,得出估算支点数量,然后设计出不同的液压缸支点布置方案,针对不同方案对模型进行计算,得出最优的支点布置方案。

本文设计的几种液压缸支点布置方案如下文所示

(一)、方案 1 液压缸支点的布置方式如图 4-7 所示

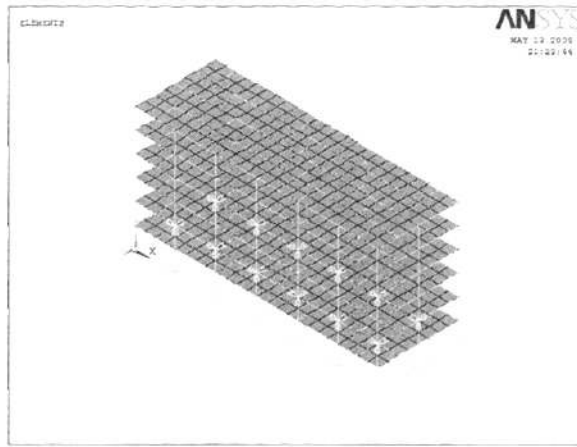


图 4-7 液压缸支点的布置方式 1

计算各液压缸支点承受力载荷大小如表 4-2 所示

表 4-2 各液压缸支点承受力载荷大小 (单位: kN)

| | | |
|--------|--------|--------|
| 1077.8 | 1144.6 | 2201.7 |
| 1983.7 | 2121.8 | 3644.3 |
| 1647.1 | 1787.9 | 3644.3 |
| 1966.7 | 2105.5 | 2201.7 |
| 1647.1 | 1787.9 | 2983.6 |
| 1983.7 | 2121.8 | 3200.1 |
| 1077.8 | 1144.6 | 2983.6 |

(二)、方案 2 液压缸支点的布置方式如图 4-8 所示

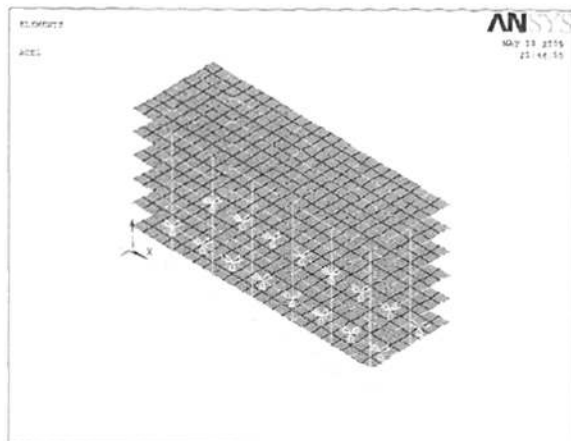


图 4-8 液压缸支点的布置方式 2

计算各液压缸支点承受力载荷大小如表 4-3 所示

表 4-3 各液压缸支点承受力载荷大小 (单位: kN)

| | | |
|---------|---------|---------|
| 1060.2 | 2188.2 | 1130.5 |
| 1435.0 | 221.0. | 1533.6 |
| 1030.3 | 1100.7 | 1101.5 |
| 1224.6 | 2623.0 | 1326.6 |
| 1933.5 | 2458.6 | 2076.7. |
| 1224.6. | 2623.0. | 1326.6 |
| 1030.3 | 1100.7. | 1101.5 |
| 1435.0 | 221.0. | 1533.6 |
| 1060.3 | 2188.2 | 1130.5 |

(三)、方案 3 液压缸支点的布置方式如图 4-9 所示

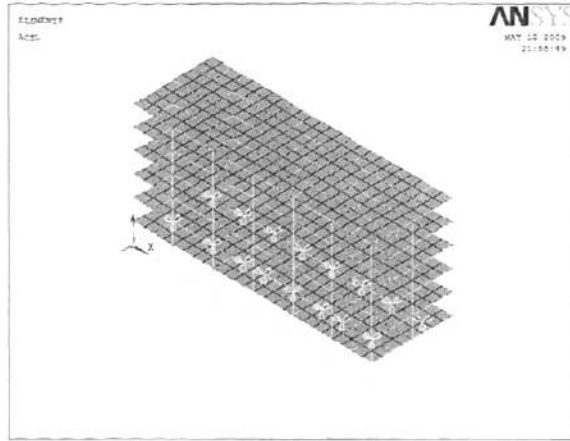


图 4-9 液压缸支点的布置方式 3

计算各液压缸支点承受力载荷大小如表 4-4 所示

表 4-4 各液压缸支点承受力载荷大小 (单位: kN)

| | | |
|---------|---------|---------|
| 1060.2 | 2207.1 | 1130.5. |
| 1431.0 | 301.3. | 1529.2 |
| 1002.7 | 1885.3. | 1073.8 |
| 1206.5. | 1848.3. | 1308.5 |
| 1924.3 | 245.9. | 2067.2 |
| 1206.5 | 1848.3 | 1308.5 |
| 1002.7. | 1885.5 | 1073.7 |
| 1431.0. | 301.3 | 1529.2 |
| 1060.2 | 2207.2 | 1130.5. |

(四)、方案 4 液压缸支点的布置方式如图 4-10 所示

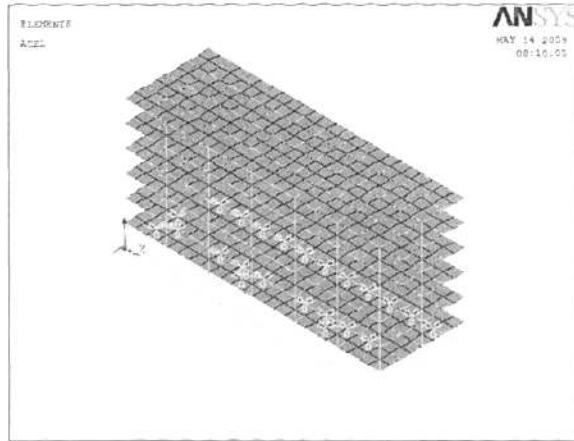


图 4-10 液压缸支点的布置方式 4

计算各液压缸支点承受力载荷大小如表 4-5 所示

表 4-5 各液压缸支点承受力载荷大小（单位：kN）

| | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 925.0 | 990.7 | 420.8 | 1033.1 | 1051.4 |
| 1014.5 | 1090.7 | 234.4 | 837.5 | 1438.2 |
| 992.8 | 1061.9 | 1438.2 | 837.5 | 1483.4 |
| 793.7 | 919.9 | 1483.4 | 837.5 | 1428.0 |
| 784.2 | 904.8 | 234.4 | 837.5 | 1438.2 |
| 987.2 | 1057.7 | 1428.0 | 1033.1 | 1051.4 |
| 979.0 | 1049.5 | 1438.2 | | |
| 784.0 | 904.7 | 234.4 | | |
| 793.7 | 919.9 | 420.8 | | |
| 992.8 | 1061.9 | | | |
| 1014.5 | 1090.8 | | | |
| 925.0 | 990.7 | | | |

方案 1 使用 21 个液压缸布置在框架柱下，大部分液压缸超载过大，布置方案不合理；方案 2 使用 27 个液压缸均匀布置在托架上，从结果看到中间轴线上 6 个液压缸超载较大，超过许用荷载；方案 3 针对方案 2 提出改进，中间轴线只有 2 个液压缸超载；方案 4 使用 39 个液压缸，且将液压缸布置在分荷斜撑梁下，无超载液压缸。

液压缸的许用承载力为 200t，由表格 4-5 结果，所有液压缸无超载，且安

全系数 >1.35 ，将液压缸布置在分荷斜撑梁的位置，使得托架受力更均匀合理，结构整体刚性最好，因此方案 4 为最佳液压缸支点布置方案。

4.5 本章小结

本章研究了保证迁移工程安全合理的托换桁架结构设计方法和迁移工程液压缸支点的布置方案。具体结论如下：

- (1) 本章阐述了托换结构的组成作用和设计原则。重点研究了托换桁架的结构，为了获得较为合理的设计形式，提出了四种托换结构形式，并将各种形式输入到建筑结构整体模型中，计算在相同受力情况下各种结构形式的受力状况。经计算比较得出了受力合理且经济实用的托换桁架结构。
- (2) 本课题中框架柱的托换采用竖向斜撑分荷柱托换法，给出了分荷斜撑梁的位置和结构参数。对于框架结构而言，由于柱的载荷较大，而截面尺寸又较小，故托换要求很高。
- (3) 本文根据经验公式估算液压缸支点数，设计出不同的支点布置方案，然后采用 ANSYS 软件分别对不同方案进行分析计算，得出了最优化的液压缸支点布置方案，使迁移过程中建筑物受到的内应力减小，保证迁移建筑物平稳移动，减少上部结构的变形。

第五章 迁移各阶段建筑结构内力分析

5.1 迁移工程的具体步骤

迁移是一个过程，当给出结构在任意工况下受力分析的离散结果在时间序列上的投射时，就模拟了迁移过程本身。

建筑物迁移工程有以下几个步骤^[43]：

1. 迁移轨道制作：在原址和新址之间制作轨道，并铺设钢板。
2. 结构托换：制作钢筋混凝土托换桁架，将内外承重墙或柱进行结构托换。
3. 结构分离：将建筑物与基础分离，并置于钢筋混凝土托换桁架上，通过液压缸将载荷传给轨道及地基。
4. 同步平移：设置反力支座，通过多液压缸施加顶推力，将建筑物沿轨道平移至新址。
5. 就位连接：将建筑物的墙或柱与新基础的对应墙或柱进行就位连接，进行加固处理，完成迁移工作。

迁移过程中可能对结构产生安全性影响的因素有以下 5 种^[44]：（1）轨道的破坏；（2）轨道沉降差过大；（3）加荷、卸荷和调整支点位移差产生的振动；（4）偶然因素（包括地震、大风等）作用；（5）因扭转过大的扭转位移导致的脱轨。

对于被平移的建筑物，因重量分布不均建筑物各部分对轨道的竖向载荷各不相同，因而移动过程中的摩擦力有所差异，从而导致顶推液压缸施力随摩擦力有所改变。对于被顶升的建筑物，因各项升点的实际载荷不同，顶升液压缸施力的差异显得更为明显，在迁移过程中由于轨道的不平整等原因某个支点处的液压缸的施力也会变化。建筑物要顺利迁移，必须满足多液压缸载荷不均匀同步顶升平移。为保证同步移动，需要实时监控各支点的位移变化以及各缸受力的变化，并适时做出合理调整，避免迁移工程出现危险。

5.2 结构动力学分析

结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。与静力

分析不同，动力分析要考虑随时间变化的力载荷以及它对阻尼和惯性的影响。可进行的结构动力学分析类型包括瞬态动力学分析、模态分析、谐波响应分析及随机振动响应分析。

动态分析包括固有特性分析和响应分析。固有特性由固有频率、振型等一组模态参数构成，它由结构本身（质量和刚度分布）决定，而与外部载荷无关，但决定了结构对动载荷的响应；响应分析是计算结构对给定动载荷的各种响应特性，包括位移响应、速度响应、加速度响应以及动应变和动应力等。

固有特性分析就是对模态参数进行计算，其目的—是避免结构出现共振和有害振型，二是为响应分析提供必要依据。模态参数包括固有频率、模态振型、模态质量、模态刚度和模态阻尼比等，其中最重要的参数是固有频率和模态振型。由于固有特性与外载荷无关，且阻尼对固有频率和振型影响不大，因此可通过无阻尼自由振动方程计算固有特性。本文对建筑结构进行固有特性分析，提取模态参数，为作进一步动力学响应分析提供参考。

5.2.1 模态分析

模态分析是一个线性分析，在模态分析中只有线性分析是有效的。如果分析中指定了非线性单元，即使定义也将被忽略。在模态分析中，只可以施加零位移约束，如果在某个位置上指定了一个非零位移的约束，则程序将以零位移约束代替该约束。如果指定了除位移约束外的其他荷载，则这些荷载将在模态提取中被忽略。但是，程序会计算出相应于所加荷载的荷载矢量。在模态分析中，材料的性质可以是线性的、各项同性的或者正交各向异性的、恒定的或者与温度相关的。分析中必须指定弹性模量 EX 和密度 DENS，而非线性性质被忽略。

ANSYS 模态提取方法^[25]

ANSYS 提供了七种模态提取方法，它们分别是分块 Lanczos 法、子空间法、PowerDynamics 法、缩减法、非对称法、阻尼法和 QR 阻尼法。分块 Lanczos 法、子空间法、PowerDynamics 法和缩减法是最常用的模态提取方法。而阻尼法和 QR 阻尼法允许在结构中存在阻尼。

分块 Lanczos 法：采用一组特征向量来实现 Lanczos 迭代计算。其内部自动采用稀疏矩阵直接求解器（即使指定了求解器）。这种方法的精确程度与子空间方法一样，但速度更快。当知道系统的频率范围时，用分块 Lanczos 法提取模态特别有效，程序求解高频部分的速度与求解低频部分的速度几乎一样快。

子空间法：采用子空间迭代技术，默认使用的求解器是雅可比共扼梯度求解器 JCG。由于该方法采用完整的[K]和[M]矩阵，因此其计算精度很高，但是

速度很慢。这种方法通常用于无法选择主自由度 (MDOF) 的情况,特别是对大型对称特征值求解时。

PowerDynamics 法: 内部采用子空间迭代计算,但采用 PCG 迭代求解器。这种方法明显地比子空间法和分块 Lanczos 法快。但是,如果模型中包含形状较差的单元或病态矩阵时可能出现不收敛。该法特别适用于求解超大模型 (大于 10000 个自由度) 的起阵时可能出现不收敛。该法特别适用于求解超大模型 (大于 10000 个自由度) 的起始少数阶模态。谱分析不要使用该方法提取模态。

缩减法: 该方法用主自由度 (MDOF) 来计算特征值和特征向量。主自由度方法在计算过程中尽管可以生成精确的 [K] 矩阵,但只能生成近似的 [M] 矩阵,这将导致一定的质量损失。因此,这种方法尽管速度非常快,但是精度却不是很高。其计算精度取决于主自由度的数目和位置。

5.2.2 迁移建筑物模态分析

在建筑物移动过程中,顶推液压缸的加载、卸载以及平移轨道起伏不平时,都会使上部结构产生振动,如果振动加速度过大,则可能造成结构损伤。

迁移建筑物的振动主要有竖向振动和水平振动两种形式。竖向振动主要由轨道表面不平、存在混凝土碎屑以及不均匀沉降等引起。水平振动主要由顶推液压缸的周期作用,以及建筑物从静止到移动,加速度引起的振动,特别是,如果液压缸周期作用频率接近建筑物的固有频率时,有可能引发建筑物共振^[45]。因此在建筑物被平移前,应对建筑物的自振频率进行分析。

本课题研究的模态分析采用子空间法,得到结构前 5 阶振型的固有频率和最大振幅处的坐标见下表:

表 5-1 结构前 5 阶振型的固有频率和最大振幅处的坐标

| 阶次 | 第 1 阶 | 第 2 阶 | 第 3 阶 | 第 4 阶 | 第 5 阶 |
|---------|-------------|-----------|------------|-------------|-----------|
| 固有频率 | 0.63 | 0.80 | 0.84 | 2.22 | 2.69 |
| 振幅最大坐标处 | (24,24,-12) | (48,24,0) | (0,24,-16) | (24,24,-12) | (46,24,0) |

前五阶振型云图如图 5-1~5-5 所示

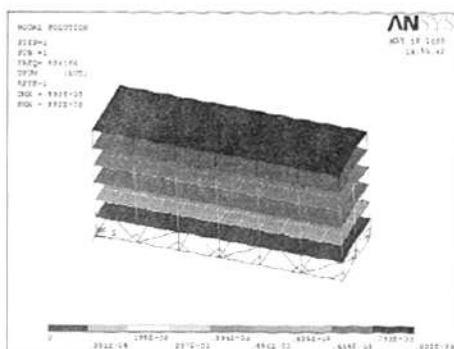


图 5-1 第 1 阶振型

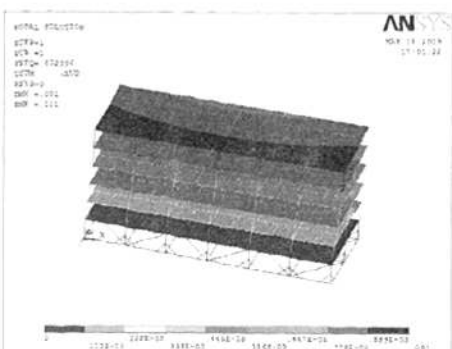


图 5-2 第 2 阶振型

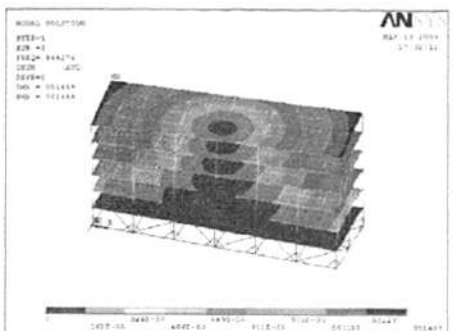


图 5-3 第 3 阶振型

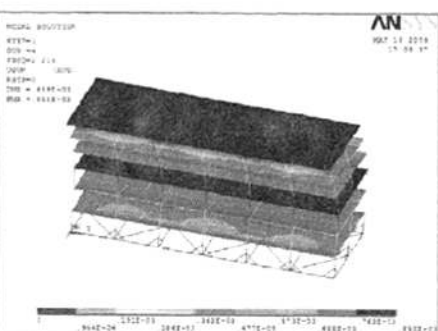


图 5-4 第 4 阶振型

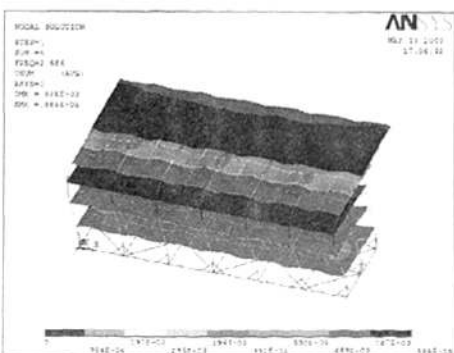


图 5-5 第 5 阶振型

第 1 阶振型以表现为横向平动

第 2 阶振型以纵向平动为主

第 3、4、5 阶是扭转的振动，这主要是由于结构纵横方向刚度不同引起的。

由结果可知结构空间刚度尤以顶层最弱，且振幅有随着阶次增加而增大的

趋势。

5.3 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析有限元法

1.瞬态动力学理论公式:瞬态动力学分析(亦称时间—历程分析)是用于确定承受任意的随时间变化载荷的结构的动力学响应的一种方法。可以用瞬态结构动力学分析确定结构在静载荷,瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力以及力。

瞬态动力学分析的求解的基本运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (5-1)$$

式中: $[M]$ ——质量矩阵; $[C]$ ——阻尼矩阵; $[K]$ ——刚度; $\{F(t)\}$ ——载荷矢量;

$\{\ddot{u}\}$ ——节点加速度矢量; $\{\dot{u}\}$ ——节点速度矢量; $\{u\}$ ——节点位移矢量。

2. 瞬态动力学求解的三种方法: Full (完全) 法、Reduced(缩减矩阵)法及 Mode Superposition(模态叠加)法。

比较这三种方法的优缺点: Full 法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应(没有矩阵缩减),它是三种方法中功能最强的,其优点是:容易使用,不用考虑主自由度或主振型的选择问题;允许包含各种非线性特性(如塑性、大变形、大应变等);采用完整的矩阵,没有涉及到质量矩阵的减缩;一次处理过程可以计算出所有应力、位移;允许施加所有类型的载荷,如节点力、外加的(非零)位移(不建议采用)及单元载荷(压力和温度),接受在实体模型施加的载荷。但是由于全部矩阵参与运算,所要消耗的计算机资源比较大,因而,当模型节点较多时不建议使用此法。

Reduced 法通过采用主自由度及缩减矩阵压缩问题规模,在主自由度处的位移被计算出来后,ANSYS 可将解扩展到初始的完整自由度集上。Reduced 法的优点是比 Full 法开销小,计算速度快。其缺点是:初始解只计算出主自由度处的位移,要得到完整的位移、应力和应变则须进行扩展处理(扩展处理在某些分析应用中可能不必要);不能施加单元载荷(压力、温度等),但允许有加速度;所有载荷必须加在用户定义的主自由度上,这限制了对实体模型上所加载荷的

使用；整个瞬态分析过程中时间步长必须一致，因此不允许使用自动时间步长和变步长；唯一允许的非线性是简单的点点接触（有间隙情形）。

Mode Superposition 法通过对模态分析得到的振型(特征向量)乘上因子并求和来计算结构的响应。此法是 ANSYS/Linear Plus 程序中唯一可用的瞬态动力学分析法。Mode Superposition 法的优点是：对于许多问题，它比 Reduced 法或 Full 法更快且开销较小；在模态分析时施加的载荷可以通过 LVSCALE 命令用于瞬态动力学分析；允许指定振型阻尼（阻尼比为模态数值的函数）。其优点是：整个瞬态分析过程中时间步长必须保持很顶，不允许采用自动时间步长；只允许点点接触的非线性（有间隙情形）；不能用于分析“未固定的（floating）”或不连续结构；当采用 PowerDynamics 模态提取法时，初始条件中不能有瑜伽的载荷或位移；不接收外加的（非零）位移。

比较三种分析方法，对于一般模型，Full 法更安全可行。对于大型的模型，当已知其主自由度时，选用 Reduced 法是比较好的选择。对于结构庞大且受力复杂的模型，花费计算机资源较大时，最好采用 Mode Superposition 法。由于本文模型计算花费时间不是很多，选用 Full 法求解。

5.3.1 上部结构与基础分离过程分析

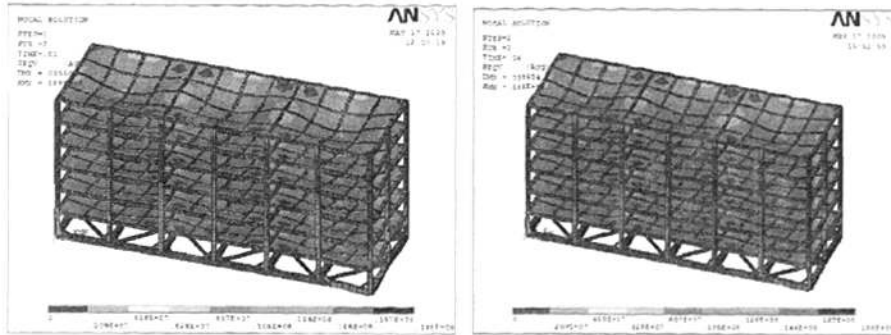
建筑物迁移是一项具有风险性的工程，其影响因素很多且具有不确定性，为制定安全经济的迁移方案，本课题针对迁移工程各阶段对第三章实例模型进行预先计算和分析，为工程决策人制定方案提供依据，并能对工程可靠性和经济性进行估算和优化。

本课题将迁移过程分为以下几个阶段：上部结构与基础分离、托换结束后悬浮状态、顶升液压缸施力时、顶升加速时、水平顶推液压缸施加载荷时及建筑物沿轨道移动。

建筑物迁移前需要进行结构托换，切断上部结构和原基础的连接，框架柱切割后，上部载荷首先传给托换节点，然后通过顶升液压缸传给下轨道，最后传到地基上。建筑物迁移工程中，墙柱在切断过程中和切断后其结构会受到一定程度的影响。上部结构和基础的分离技术分为人工和自动化两种，人工一般采用风镐和人工凿断，工作条件较差，速度慢，对于墙柱结构的震动影响比较大。自动化分离技术采用金刚石切割设备切割时无震动，速度快，但成本较高。在施工空间允许的情况下，也可采用混凝土取芯机和轮片切割机械等。

在结构分离过程中，上部结构的荷载由框架柱转换到托换结构上，必然出现上部结构的局部沉降，我们采用 ANSYS 对结构进行瞬时动力学分析，分析切割过程对结构内力的影响。

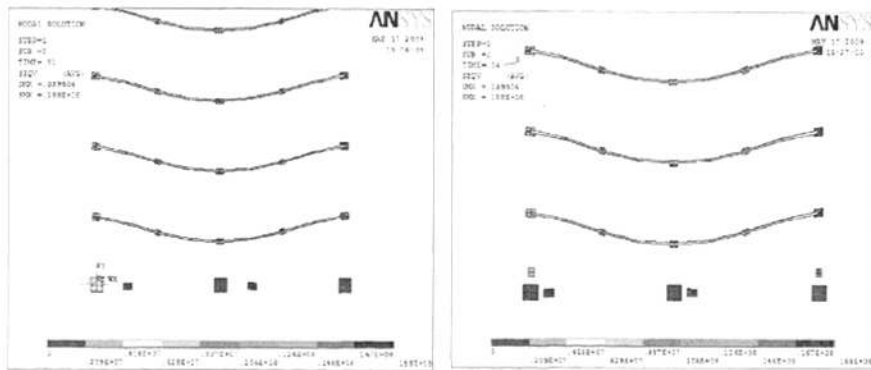
由于结构托换是分步进行的，所有框架柱不会同时切断，本实例分析前排框架柱被切断时对建筑结构产生的影响，采用 ANSYS 分析结果如图 5-6 所示：



(a) 第 1 子步结果

(b) 第 2 子步结果

图 5-6 框架柱切断时各子步等效应力云图



(a) 第 1 子步结果

(b) 第 2 子步结果

图 5-7 框架柱切断时某截面处各子步等效应力云图

由分析结果可看出，框架柱被切断后，在框架柱与托梁交接处存在应力集中现象。因此在设计中，柱与托梁交接处的连接应予以加强。托梁上的应力主要分布在柱子宽度范围内，托梁底部其它部位的应力较小，前排框架柱分荷斜撑梁应力比后排大，且托梁端部应力也较大。结果显示前部托梁比后部托梁应力大很多，由于前排框架柱已经切割完毕，而后部框架柱还未切割，造成前后应力不均匀。且梁柱结合处应力也较大，与实际结果相符。

全部框架柱切断后，结构上部载荷已经通过托换桁架传给托换节点和托换梁，然后通过顶升液压缸传给下轨道，最后传到地基上。在顶升前，首先对建筑物进行称重，称重是为找出所有顶升点的实际载荷压力。在称重开始后，以

ANSYS 软件对建筑模型进行分析计算得到的各项升点载荷压力为依据, 控制各电液比例减压阀出口压力逐步上升, 当顶升液压缸由于压力变化使其施力超过顶升点的载荷时, 活塞伸出使该点产生位移, 压力和位移的实时变化通过压力和位移传感器传回主控计算机。当位移传感器测得微小位移时, 和该位移传感器并联的顶升液压缸停止动作。即电液比例减压阀出口压力停止上升。当压力平稳后, 建筑物的重量完全由顶升液压缸承载, 建筑物处于悬浮状态。对此状态进行结构静力学分析, 分析结果如图 5-8 所示

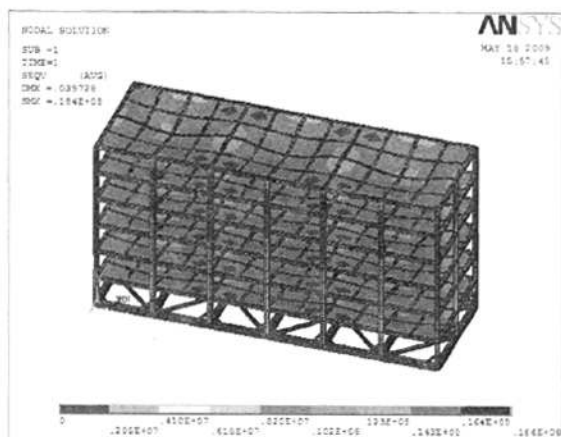
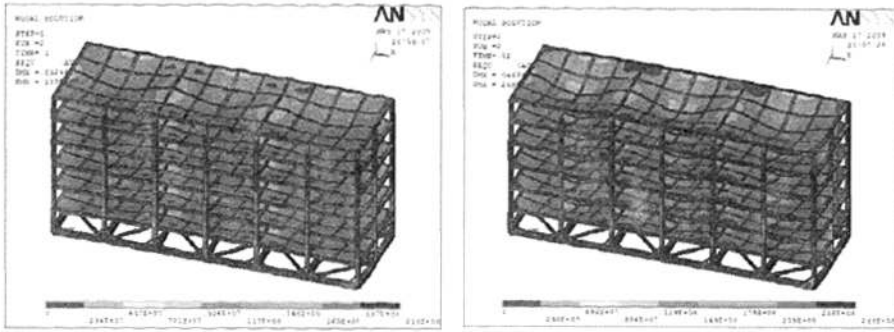


图 5-8 结构静力学分析等效应力云图

结果显示, 托梁端部、框架柱中下部和框架柱分荷斜撑梁上应力较大。

5.3.2 顶升液压缸施力时分析

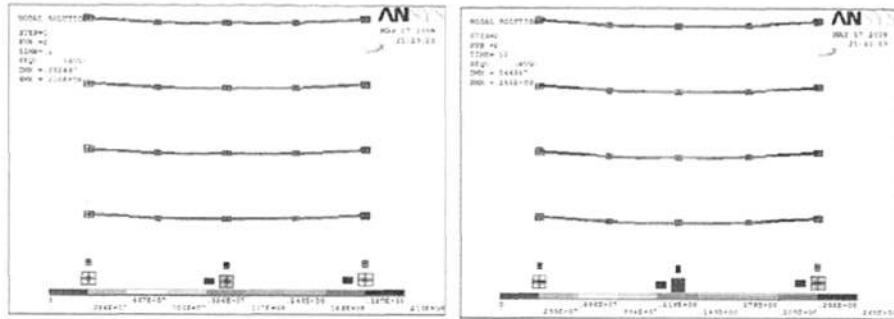
切断全部框架柱, 结构托换完成后由顶升液压缸施加力载荷, 结构受瞬时载荷作用, 分析此瞬时过程对结构产生的影响, 分析结果如图 5-9~5-11 所示



(a) 第 1 子步结果

(b) 第 2 子步结果

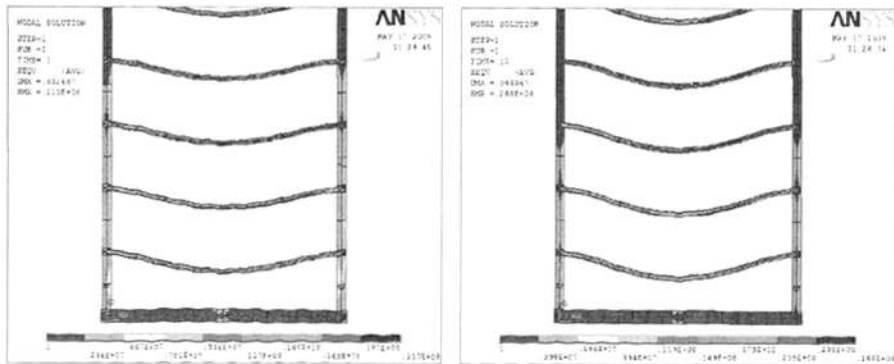
图 5-9 顶升液压缸施力时各子步等效应力云图



(a) 第 1 子步结果

(b) 第 2 子步结果

图 5-10 顶升液压缸施力时第一个截面处各子步等效应力云图



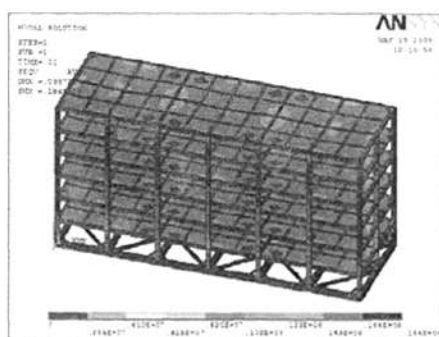
(a) 第 1 子步结果

(b) 第 2 子步结果

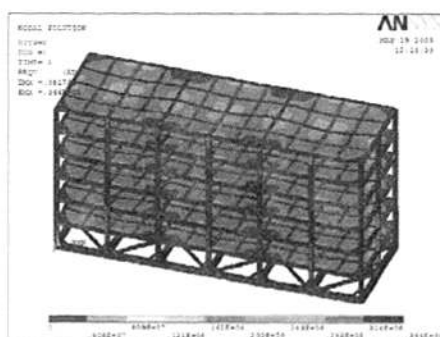
图 5-11 顶升液压缸施力时第二个截面处各子步等效应力云图

5.3.3 顶升加速时分析

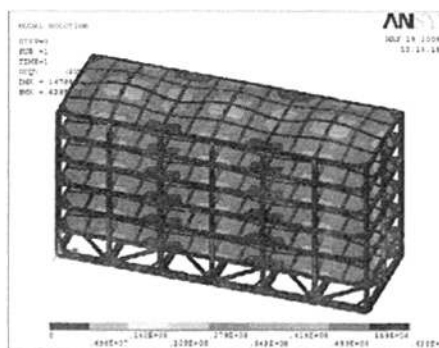
建筑物从静止到竖向运动状态，必然存在加速度，施加变加速进行瞬态时间历程分析。加速度分为9个子步，1~6步的结果分别如下图所示



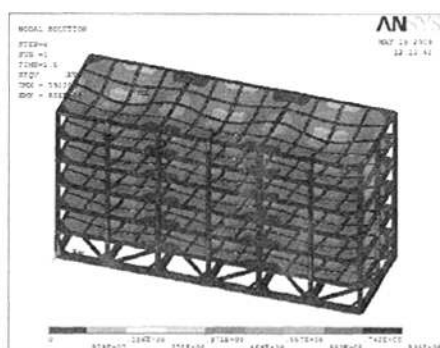
(a) 第1子步结果



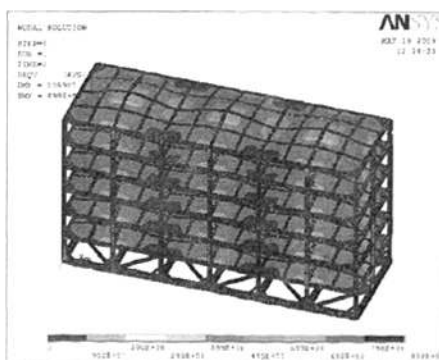
(b) 第2子步结果



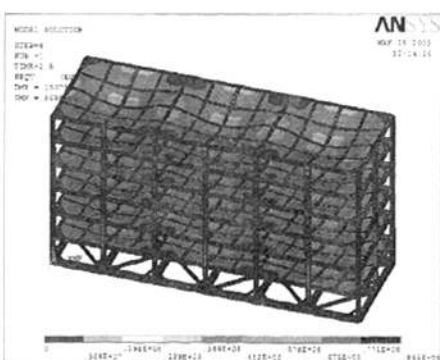
(c) 第3子步结果



(d) 第4子步结果



(e) 第5子步结果



(f) 第6子步结果

图 5-12 顶升加速时各子步等效应力云图

分析前几步结果显示加速度载荷对结构上部、框架柱中下部及分荷托换斜撑梁影响较大，对托换桁架影响较小；后几步结果显示载荷对框架柱底部及托换桁架开始产生较大影响。因此，顶升加速时应控制加载速度平稳且缓慢。

得到不同位置节点的位移和速度时间响应曲线如图 5-13—5-15 所示

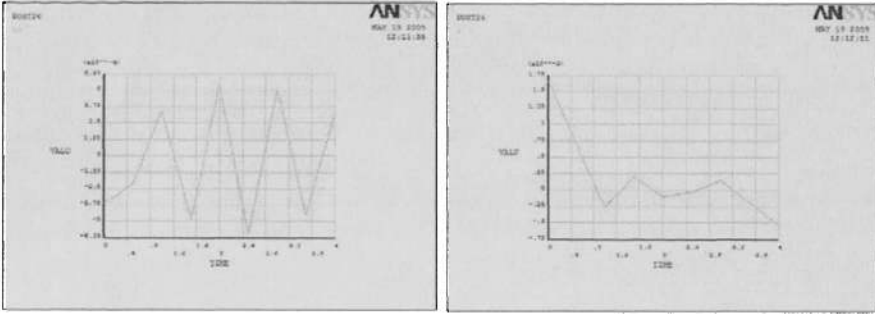


图 5-13 某框架柱底部节点位移曲线和速度曲线

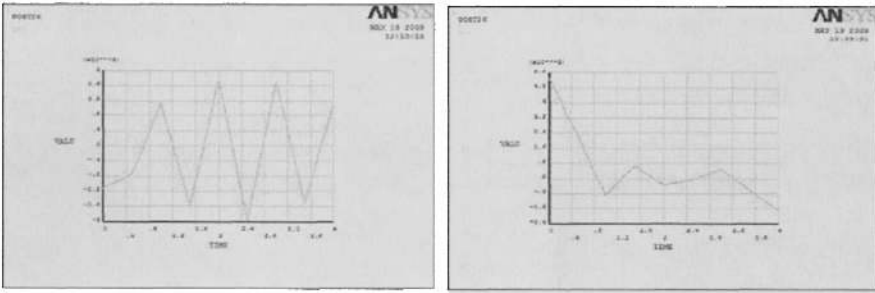


图 5-14 楼层中间节点位移曲线和速度曲线

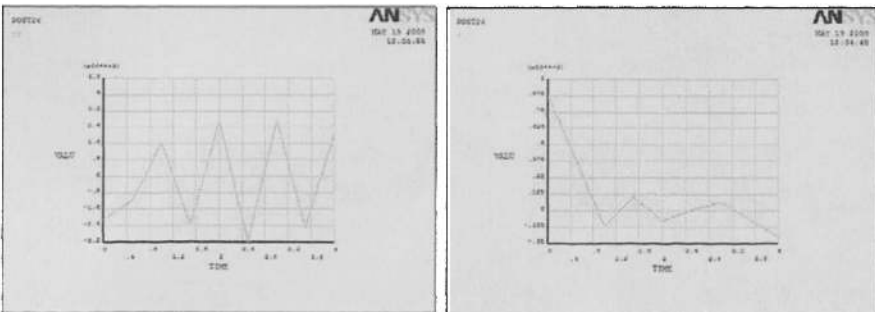


图 5-15 框架柱顶层节点位移曲线和速度曲线

由响应曲线看到下部结构位移和速度幅值比较大，上部结构响应则较缓慢。

5.3.4 顶推液压缸施加水平荷载时分析

目前, 建筑物平移工程中, 各轨道上顶推动力的计算主要依靠经验进行估算。山东建工学院在实际工程中实测的滚动摩擦系数参见表 5-1^[3]。本课题摩擦系数的选取可以借鉴表 5-2 中的数据。

表 5-2 实际工程中平移牵引力 F 和竖向荷载 G 的比例关系

| 参数 | 临沂国家安全局 办公大楼 | 济南种子 公司大楼 | 济南王舍 人供电所 | 莒南岭泉 信用社 | 东营庄 采油厂 |
|-------|-----------------|--------------|--------------|-------------|------------|
| G(kN) | 59600 | 28300 | 19300 | 17400 | 11600 |
| F(kN) | 4227 | 1459 | 923 | 811 | 452 |
| F/G | 1/14 | 1/19 | 1/21 | 1/21 | 1/25 |

水平迁移动力计算公式:

$$F = KfG \quad (5-2)$$

式中 F ——建筑物牵引力

K ——实际工程综合经验系数, 取值 1.5~2.0

f ——摩擦系数

G ——建筑物总重

本课题第三章实例建筑物结构总自重 $G = 36803$ kN, 取 $K = 15$, $f = 1/15$,

计算得水平牵引力 $F = 3680$ kN。

模型施加顶推力后如图 5-16 所示

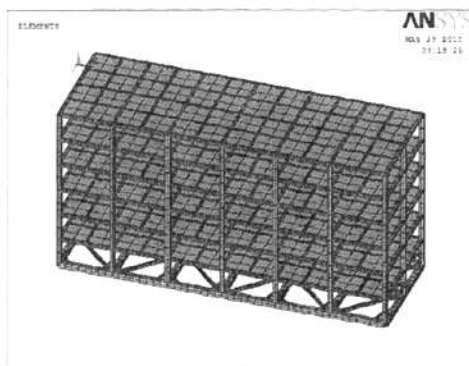


图 5-16 施加水平顶推荷载示意图

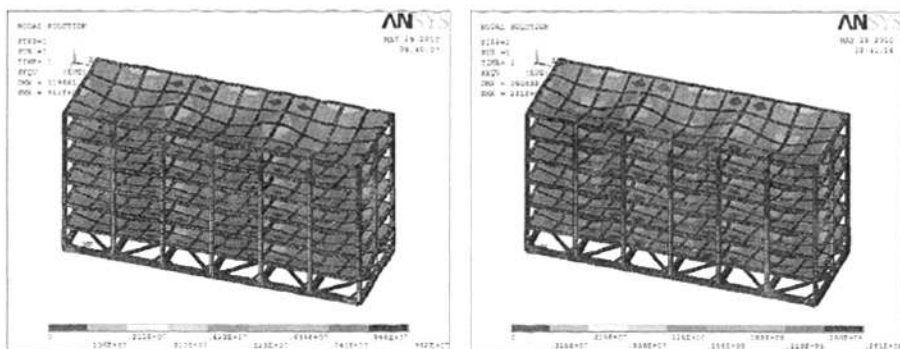


图 5-17 施加水平顶推载荷时各子步等效应力云图

结果显示托换桁架有较大应力和变形,且框架柱和分荷斜撑梁也受力较大,水平载荷对建筑物横向剪切作用较为明显。

5.4 本章小结

本章针对迁移工程各阶段对建筑模型进行分析验证,具体分析内容如下:

- (1) 阐述了 ANSYS 的动力学分析理论和方法。
- (2) 针对建筑模型主要进行了结构动力学有限元分析。
迁移建筑物的模态分析是进行后续瞬时动力学分析的基础,通过模态分析得到了结构振型的固有频率和最大振幅处的坐标。
- (3) 本课题将迁移工程分为以下几个阶段:上部结构与基础分离、托换结束后悬浮状态、顶升液压缸施力时、顶升加速时及水平顶推液压缸施加载荷时。针对迁移工程各阶段分别对迁移建筑物进行了结构内力分析验证,对结构产生较大影响的阶段得出建筑物受力较大部位,为改进控制措施提供依据。

第六章 结论与展望

6.1 结论

随着城市改造的加快, 建筑物迁移技术作为一种新兴技术得到越来越广泛的应用, 然而由于建筑物迁移工程是涉及多学科交叉的复杂工程, 其理论研究和结构分析方法尚不完善, 本文研究主要目的是为了实现建筑物迁移工程的自动化、智能化监测控制, 将计算机辅助设计应用于建筑物迁移工程。

本文采用目前广泛使用的大型有限元分析软件 ANSYS 作为参数化建模和有限元分析工具, 对迁移建筑物托换结构、建筑物迁移各阶段结构内力进行分计算。全文得到如下结论:

- (1) 将有限元理论应用于建筑物迁移工程中, 针对典型迁移建筑物将建筑结构抽象简化为框架承重结构, 利用 ANSYS 提供的参数化 APDL 语言进行编程, 实现了迁移建筑物的参数化建模, 分析求解及后处理。使人为干预尽量减少和简化, 减少重复性劳动, 保证了结果的一致性。
- (2) 迁移工程中结构与基础分离后, 结构处于动态的位移边界条件下。本文采用“支点附加小刚度铰支杆”理论建立了区别于普通建筑物的边界约束条件的加载算法, 解决了迁移建筑物约束不足的问题, 该方法既不改变建筑物的可动性, 由于其小刚度也没有限制建筑物的自由变形, 同时还能满足有限元求解的需要。
- (3) 本课题中框架柱的托换采用竖向斜撑分荷柱托换法, 给出了分荷斜撑梁的位置和结构参数。对托换桁架的结构进行了重点研究, 为获得更为合理的设计形式, 提出了四种托换结构形式, 并将各种形式输入到建筑结构整体模型中, 计算在相同受力情况下各种支撑形式的受力状况。通过分析比较得出了受力合理和经济实用的托换桁架结构。
- (4) 迁移建筑物支点设计中根据经验公式估算液压缸支点数, 设计出不同的支点布置方案, 然后采用 ANSYS 软件分别对不同方案进行分析计算, 得出了最优化的液压缸支点布置方案, 使迁移过程中建筑物受到的内应力减小, 保证迁移建筑物平稳移动, 减少上部结构的变形。对于被迁移的建筑物, 因其各部分重量分布不均, 各支点液压缸承受的竖向载荷也不相同。采用合理的方式布置液压缸支点和计算支点反力在迁移工程设计中至关重要。

- (5) 本课题将迁移工程分为几个阶段, 针对迁移工程各阶段分别对迁移建筑物进行了结构内力分析验证, 模拟工程实施过程中对结构产生较大影响的阶段, 得出建筑物受力较大部位, 为迁移工程的实施提供了依据。结构分析的成果可应用于工程实践, 增加迁移工程的安全性和科学性, 节约迁移成本, 具有较高的经济价值和应用价值。

6.2 工作展望

建筑迁移技术综合了机械、电子、液压传动、控制工程、结构工程等众多学科专业的复杂工程技术, 由于作者的水平和时间有限, 使得本文在许多方面未进行深度和全面研究。为提高迁移建筑物的智能化水平, 以后仍需在以下方面做进一步的工作:

- (1) 进一步完善迁移建筑物设计仿真系统, 开发新的模块, 完善系统的新功能。使系统可以分析各种复杂建筑模型, 如不规则建筑结构和带转换层的建筑结构等。
- (2) 研究液压缸反复加载卸载对于结构的影响, 进行结构的疲劳可靠性分析。
- (3) 完善适用于建筑物滑动迁移方式的水平顶推力计算方法, 以便更为精确的计算水平顶推液压缸施力大小。

参考文献

- [1] 白云, 沈水龙, 建(构)筑物移位技术[M], 北京中国建筑工业出版社, 2006, 1~23
- [2] 李爱群等, 我国房屋平移技术概述, 安徽建筑, 2005, 1(9)
- [3] 李爱群, 吴二军, 高仁华, 建筑物整体迁移技术, 北京, 中国建筑工业出版社, 2006
- [4] Lamar Kay, Pan Deitz, Stan Barber, Photo from southcombe's collection, New Plymouth, New Zealand, The Structural Mover, 1999, 17(1)
- [5] 张天宇, 建筑物整体平移中的动力分析, 福建建设科技, 1998 (4)
- [6] 李爱群, 吴二军, 我国建筑物整体平移技术及工程应用进展, 江苏建筑, 2003, (S1)
- [7] Pryke J F S, Underpinning, framing, jacking-up and moving brick and stone masonry structures, Proceedings of ICE Conference, London, 1982
- [8] Pryke J F S, Re-leveling, raising and re-sitting historic buildings, Proceedings Symposium IABSE, London, 1983
- [9] Kum Browniz, From Boca to Fort Pierce. The Structure Mover, 1997, 17(2).
- [10] ETALOC, The Shubert theater was self-propelled, The Structural Mover, 1999, 17(2)
- [11] Jim Anders, The Hatteras lighthouse, The Structural Mover, 2000, 18(1)
- [12] Gini Koster, Supermove' 99 Copenhagen Airpor [J]. The Structure Mover, 2000, 18(1)
- [13] 建筑信息月报, 我国楼房旋转平移的新记录, 建筑技术, 30(10): 722
- [14] 张天宇, 侯伟生, 建筑物远距离迁移工程实例, 福建建筑科技, 2000, No. 2
- [15] 贾留东, 张鑫, 孙剑平等, 临沂市国家安全局八层办公楼整体平移设计. 工业建筑, 2002, 32(7): 7~10
- [16] 李爱群, 卫龙武, 吴二军, 刘先明, 陈道政, 孙亚萍, 江南大酒店整体平移工程的设计, 建筑结构, 2001, 31(12)
- [17] 吴二军, 江都市供电楼双向整体平移工程静动态实时监测, 工业建筑, 2003, 33(75)

- [18] 吴定安, 上海音乐厅顶升和平移工程的液压同步系统, 液压气动与密封, 2004, (01), 24~26
- [19] 王青, 徐港, ANSYS 梁单元的理论基础及其选用方法, 三峡大学学报(自然科学版), 2005, (04), 336~340
- [20] 何芝仙, 曹菁, ANSYS 参数化编程语言的二次开发及应用, 机械制造, 2007, (05)
- [21] 李新坡, 袁文忠, ANSYS 结构计算二次开发技术研究及应用, 岩土工程技术, 2004,(02)
- [22] 赵海涛, 基于 ANSYS 的拱坝可视化建模和有限元仿真分析: [硕士学位论文], 河海大学, 2004
- [23] 魏勇, 邬向伟, APDL 环境下的参数化有限元分析, 现代制造工程, 2008, (08)
- [24] 雷晓燕, 钢筋混凝土有限元模型的研究, 华东交通大学学报, 1992,(01)
- [25] 欧阳兴, 仿人机器人有限元分析研究: [硕士学位论文], 北京, 清华大学, 2003
- [26] 焦俊婷, 王石榴, 用 ANSYS 分析钢筋混凝土框架结构, 嘉应学院学报, 2004, (06)
- [27] 伍永飞, 钢筋混凝土框架结构静力非线性分析程序研制: [博士学位论文], 同济大学, 2006, 23-27
- [28] release 10.0 documentation for ANSYS
- [29] 郑东强, 基于非概率区间几何模型的建筑物迁移工程多支点控制研究: [博士学位论文], 天津, 天津大学, 2006
- [30] 齐金永, 建筑物迁移虚拟仿真技术研究: [硕士学位论文], 天津大学, 2008
- [31] 方鄂华, 钱稼茹, 叶列平, 高层建筑结构设计, 中国建筑工业出版社, 2003
- [32] 郭华, 高层建筑结构有限元分析: [硕士学位论文] 太原理工大学, 2004
- [33] 于国潍, 汽车起重机车架结构件参数化建模程序开发: [硕士学位论文], 吉林大学, 2008
- [34] 李会军, 王连英, ANSYS 在建筑物平移中的应用, 山西建筑, 2006, (02)
- [35] 吴二军, 李爱群, 陈道政, 江都供电局综合楼双向整体平移方案的选择, 建筑结构, 2003, (04)
- [36] 赵淑敏, 李铁成, 六层不规则砖混结构房屋整体平移技术, 建筑结构, 1999, (03)
- [37] 谭坚贞, 建筑物移位技术的理论分析与工程应用: [硕士学位论文], 兰州理工大学, 2008
- [38] 郭彤, 结构托换技术及其在房屋平移工程中的应用, [硕士学位论文], 南京, 东南大学, 2002, 3~9

- [39] <http://www.shuigong.com/papers/jianzhu/20051231/paper14789.shtml>, 钢筋混凝土分荷结构在房屋平移中的应用
- [40] 吴二军, 建筑物整体平移关键技术研究与应用: [博士学位论文], 南京, 东南大学, 2003: 8-9
- [41] 贾留东, 张鑫, 孙剑平, 徐向东, 临沂市国家安全局 8 层办公楼整体平移设计, 工业建筑, 2002, (07)7~13
- [42] 沈明, 孙亚萍, 楼房平移中支撑方案的对比分析, 工业建筑, 2002,(07)
- [43] 肖聚亮, 建筑物迁移动力系统智能监控研究与应用: [博士学位论文], 天津, 天津大学, 2006: 6, 15~18
- [44] 吴二军, 李爱群, 建筑物整体平移工程的可靠度计算和风险评估, 建筑技术, 2004, Vol.35, No.6
- [45] 姚忠国, 黄自新, 陈高瞻等, 房屋整体平移技术及模拟试验研究, 建筑结构, 1995, 11: 52-57
- [46] 高新艳, 钢筋混凝土框架结构的整体分析与优化设计: [硕士学位论文], 太原理工大学, 2007
- [47] 王忠艳, 于远忠, 数值算法在建筑物平移与顶升技术中的应用, 山西建筑, 2008, (02)
- [48] 黄世伟, 王存杰, 胡春雨, 散装物料运输车载荷模型与施加方法, 专用汽车, 2006, (01)
- [49] 吴晓, 周星元, 如何在 ANSYS 中实现动态边界条件的加载, 武汉科技学院学报, 2005, (05)
- [50] 侯炜, 汽车车架的有限元静动态响应分析: [硕士学位论文], 燕山大学, 2006

发表论文和参加科研情况说明

参与的科研项目：

1. 参与天津市科技发展计划项目“建筑物迁移虚拟仿真技术研究”，项目编号：07JCZDJC09900
2. 参与“自动上下料直角坐标机器人”设计研究项目

致 谢

本论文的工作是在我的导师洪鹰副教授的悉心指导下完成的，洪鹰副教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢洪老师两年来对我的关心和指导。

洪副教授悉心指导我完成了实验室的科研工作，在学习上和生活中都给予了我极大的关心和帮助。洪副教授给予我的谆谆教诲，使我无论在做人还是做事方面都受益匪浅，在此向洪副教授表示衷心的感谢。

感谢王刚教授、王国栋副教授和肖聚亮讲师给予我工作上和生活上的无私指导和帮助。

感谢实验室孙泽雷、刘宏业、张志涛、寥玮、郭小强、宫云飞等同学在实验室工作及撰写论文期间给予我的鼓励和帮助，感谢同宿舍姐妹邢玉明、郑瑞敏和王艳玲同学在两年的研究生生活中给予我的关怀和支持，使我顺利完成论文。

另外也感谢家人及所有的朋友，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

刘立肖

二零零九年五月于天津大学