

球形储罐 CAD 系统研究

机械设计理论专业

研究生 何元新 指导教师 郑忠俊

摘要

计算机辅助设计与制造 (CAD/CAM) 技术已经和传统的制造业紧密结合, 不仅改变了制造业设计和制造各种产品的传统作业方式, 而且有利于提高企业的创新能力、技术水平和市场竞争能力, 也是进一步向计算机集成制造系统 (CIMS) 发展的重要技术基础。

球形储罐是化学工业、石油工业及其它一些行业中广泛使用的重要化工设备, 其研究和开发倍受重视。球罐设计和 CAD/CAE 技术的结合, 将极大地提高设计质量和设计效率, 缩短新产品开发周期。但是, 由于 CAD/CAE 软件开发自身专业性强, 现有的化工设备 CAD/CAE 软件还落后于计算机应用技术发展的现状, 在开发、维护、扩充和升级等方面还存在一系列问题。因此, 研究和开发一套实用的专用化工设备 CAD 系统具有重要的现实意义和实用价值。

本文将球罐设计专业知识与计算机辅助设计知识相结合, 以 VB6.0 为开发平台, 以 AutoCAD、Ansys 为支撑软件, 采用参数化设计和模块化设计思想, 用 VB、APDL 等编程方法对球罐 CAD 系统的开发进行了研究。论文的主要成果和特色如下:

1. 把传统的球罐设计与计算机辅助设计技术相结合, 开发了具有绘图和有限元分析功能的球罐 CAD 系统。

2. 本系统的强度计算模块完全按照 GB12337—1998《钢制球形储罐》的有关规定计算, 并且建立了计算所需图表数据库, 材料数据库, 还可以对材料数

数据库进行更新和维护。

3. 开发了球罐 CAD 系统的 ANSYS 专用分析模块,可以把按《规范》计算确定的结构尺寸和材料的球罐在 ANSYS 中进行有限元分析,也可以在 ANSYS 中用开发的计算模块重新按《规范》计算球罐结构尺寸,选择材料,再进行有限元分析。

4.开发了球罐瓣片结构尺寸参数化绘图模块。

关键词:球形储罐 CAD CAE 参数化设计 有限元分析

Research on CAD System of spherical Tank

Major: Mechanical Design and Theory

Graduate student: HE Yuan-xin

Advisor: ZHENG Zhong-jun

Abstract

The technology of Computer Aided Design and Manufacturing has integrated with traditional manufacturing. It has not only changed the conventional mode of designing and manufacturing products, but also helped to improve the ability of innovation, the level of technology and the ability of market competition of enterprises. It is also the important technical foundation for further development toward CIMS.

The spherical tank, as a kind of important chemical equipment, is widely used in chemical industry, oil industry and other industries. People attach importance to the research and development. The design of tank integrated with CAD/CAE can improve the quality and efficiency of design, and shorten the development cycle of product. But because the development of CAD/CAE software is very professional, the existing CAD/CAE software of chemical equipments lags behind the development of computer application technology, and there is a series of problems in development, maintenance, expansion and upgrade. So it is meaningful and useful to study and develop a special chemical industry CAD software system.

This paper integrates the tank design knowledge with CAD knowledge. It uses visual basic6.0 program language and AutoCAD and ANSYS software and adopts

parameterization and modularization idea. It studies the development of spherical tank CAD system with VB, APDL. There are outcomes and character of this paper as followings:

1. Integrates the traditional spherical tank design knowledge with CAD knowledge and develops the spherical Tank CAD System which can plot and finite element analysis.

2. This system's strength calculation module is based on GB12337-1998 *the Steel spherical tank*. Graph table database that calculation requires and material database are established, and the material database can be refreshed and maintained.

3. This system develops the special analysis module of spherical tank CAD system. We can analyze the model based on the strength calculation module with ANSYS. We can also calculate the tank frame dimension with module in ANSYS and select materials, and then embark on finite element analysis.

4. This system develops the parameterization plot module of petal of tank in AutoCAD.

Keywords: spherical tank; CAD; CAE; parametric Design; finite element analysis;

1 绪论

随着科学技术的飞速发展,特别是 Internet/Web 技术的蓬勃发展,信息化浪潮席卷全球,信息技术对制造业也产生了极其深刻和全面的影响,使制造业的发展打上了明显的信息化烙印,使制造业的竞争环境、发展模式及运行效率与活动空间发生了深刻变化^[1]。我们必须抓住这个机遇,使我国在最短的时间内从制造业大国转变为制造业强国。

1.1 制造业信息化及发展趋势

制造业信息化是将信息技术、现代管理技术与制造技术相结合,并应用到企业产品生命周期(Life-Cycle)全过程和企业运行管理的各个环节,从而提高企业市场竞争能力的过程^[2]。

1.1.1 制造业信息化的意义

制造业是一个国家国民经济的强大后盾,制造企业的先进与否是衡量一个国家经济实力的标准。我国经过多年的努力奋斗,制造业及其信息化体系的建设已经取得了一定的成就,如资金运转效率增幅 18.4%、网络营销应用率增幅 36.8%,企业财务决算速度增幅 13.1%,但与发达国家相比仍有很大的差距^[3]。

所以我们要大力推进制造业信息化建设,具有重要意义^[4]如下:

- (1) 制造业信息化有助于企业降低决策中的不确定性和风险;
- (2) 制造业信息化促进企业管理模式与组织模式的变革;
- (3) 企业规模越大,对信息系统的依赖性也就越强,信息系统也就越复杂;
- (4) 制造业信息化已成为加快国民经济结构战略调整的重要力量。

1.1.2 制造业信息化的发展趋势

由于制造业在国民经济中的主导地位,今后很长的一段时间,制造业信息化仍将受到广泛重视和重点发展^[5]。

(1) 计算机单元技术(CAD, CAPP, CAM, PDM, MPR-II, FMS 等)进一步深化、提高和完善。

(2) 企业的各种计算机辅助单元技术应用系统在网络和数据库的支持下进行信息集成和过程集成,真正实现同类、异类单元系统的无缝连接,保证数据

行信息集成和过程集成,真正实现同类、异类单元系统的无缝连接,保证数据自由、完整、快速通讯和共享,实现各个环节的协调、并行协同工作。

(3) 面向产品全生命周期的信息化,满足从市场分析、设计、制造、销售、服务到回收整个生命周期内各个环节的功能需求。

1.2 CAD/CAM 技术及其应用概况

广义上说,CAD/CAM 技术包括产品构思、二维绘图、三维几何设计、有限元分析、数控加工、仿真模拟、产品数据管理、网络数据库以及这些技术的集成^[6]。

1.2.1 CAD/CAM 技术简介

计算机辅助设计与制造(Computer Aided Design and Manufacturing,简称 CAD/CAM)是计算机科学、电子信息技术与现代设计制造技术相结合而形成的新兴学科,是一种与计算机结合、各尽所长、应用多学科方法综合进行问题求解的先进技术。该技术起源于上个世纪五十年代,至今已有极大的发展和广泛的应用。CAD 技术的采用使得企业能够在很短的时间内完成高质量、高性能产品的开发、设计、制造和销售过程,从而提高自己的市场竞争力^[7]。

广义 CAD 包括设计和分析两个方面。设计是指构造零件的几何形状、选择零件的材料,以保证整个设计的统一性而对零件提出的功能要求和技术要求等。分析是指运用数学建模技术,如有限元、优化设计技术等,从理论上对产品性能进行模拟、分析和测试,以保证产品设计的可靠性^[8]。总之,一个好的计算机辅助设计系统既能充分发挥人的创造性作用,又能充分利用计算机的高速分析计算能力,即要找到人和计算机的最佳结合点^[9]。

CAD/CAM 系统由相关的硬件及软件组成,硬件主要指计算机及其网络系统,从广义角度来说,硬件还应包括加工及运输装置等,软件则包括系统软件、支撑软件、应用软件等。

1.2.2 CAD/CAM 技术研究及应用现状

国外的 CAD/CAM 技术起步较早,成效较大,如波音 777 实现了“无图纸”设计和制造,同时国外开发了一批优秀成熟的 CAD/CAM 软件,如 Unigraphics (UG)、Pro/Engineer、I-DEAS、CATIA、SolidEdge、SolidWorks、AutoCAD、

这些软件应用和发展比较成熟,具有强大的二维绘图或三维曲面造型能力、结构有限元分析能力、计算机辅助制造能力、产品数据管理能力、虚拟仿真能力等等。

近年来,我国 CAD 技术的开发和应用也取得了较大的进步,除对许多国外软件进行汉化和二次开发(如天正 CAD)外,还诞生了不少具有自主知识产权的、符合我国国情和标准的 CAD 系统,如高华 CAD、开目 CAD、gs-cad98 CAD、CAXA、金银花(Lonicera)、InteCADTool、大恒通用机械 CAD 系统、XTMCAD、PICAD 等。

但是我国的 CAD/CAM 软件不管从产品开发水平还是从商品化、市场化程度都与发达国家有不小的差距。我国 CAD 技术开发创新少、仿制多;缺乏理论研究和算法的研究;信息集成技术落后;数据交换格式和标准化落后。

1.2.3 CAD/CAM 技术发展趋势

随着科学技术,特别是信息技术的飞速发展,推动了世界经济一体化和全球制造的发展趋势, CAD / CAM 技术呈现出下列发展趋势^{[10][11]}。

(1)网络化,即基于 Internet/Intranet 网络和 Web 技术的远程异地协同设计和制造;

(2)集成化,即指 CAD/CAM/PDM 与快速原型制造(PPM)形成设计制造过程集成, CAD/CAM 与 ERP 的集成;

(3)智能化,指多代理(Multi-Agent)系统与分布或人工智能、专家系统在 CAD/CAM 中的应用;

(4)虚拟化,指基于虚拟现时技术以虚拟设计制造 CAD/CAM 系统,适用于敏捷制造、动态联盟企业建模需要的 CAD/CAM 技术。

随着电子、计算机、信息等高新技术的不断发展,企业为适应市场需求的多变性与多样化,制造技术正朝着数字化、集成化、网络化、敏捷化、虚拟化、智能化、精密化、柔性化、和绿色化的方向发展^[12]。

1.3 压力容器 CAD 技术国内外现状

1.3.1 国外压力容器的制造和 CAD 现状

国外的压力容器设计制造技术已经积累了丰富、成熟的经验,由于密封在压力容器设计中的重要地位,北美、欧洲为此进行了大量全面并持久不懈的研究和开发工作,取得了很大的成果。如美国压力容器研究委员会(PVRC)应 ASME 的要求对螺栓法兰连接进行了深入的研究,得出了重要的结论,推进对 ASME 的修订和法兰设计规范的改变^[13~15];欧洲承压设备研究委员会 (EPERC)对法兰和垫片的标准化也进行了大量深入研究^[16~17],欧洲标准协会(CEN)下属法兰及其接头技术委员会(TC74)也做了大量研究工作,欧盟还提出了相应的法兰、螺栓和垫片尺寸标准,形成了一整套法兰接头的标准体系^[18]。美、日、欧等压力容器制造强国积极推进统一的国际标准,以建立一个压力设备的通则,用以保证压力设备的安全使用,消除各国标准中可能出现的技术壁垒,在相互标准认可的基础上,实现承压设备产品的全球自由贸易^[19]。对于大量的常规压力容器而言,长期实践证明采用简单易行的传统设计方法完全可以满足容器的安全要求^[20],但是国外的压力容器普遍采用了按分析设计,并且有一些功能强大,成熟的压力容器有限元专业软件,如: Codeware COMPRESS Build 6245 等。

国外的设计项目从招标前的初步设计到最后中标后的详细设计都把有限元分析做为分析设计的工具广泛使用^[21]。现在,压力容器向高压、大容量方向发展,如果采用传统设计方法,将会很困难或不可能。

为了满足压力容器高压和大型化的需要,很多企业都开发了调质高强度钢板,如新日铁公司的 WELTEN610 和 NKK 公司的 NK-HITEN610 等,这些高强度钢在世界范围得到了广泛应用^[22]。

国外压力容器现场制造技术也很成熟,如日本制钢所(JSW)早已开发了大型加氢反应器现场组焊技术,在加拿大等地创造了不少业绩。

1.3.2 我国压力容器的制造和 CAD 现状及特点

我国的压力容器设计制造与国外先进水平相比有较大差距,长期以来,由于种种原因,我国容器的设计在技术上没有显著地进步,产品设计的经济

性考虑得也不够^[21]。

压力容器的设计方法分为按规则设计和按分析设计，按规则设计是指采用弹性力学的相关理论和假设进行设计，只是一个粗略的设计，很多关键部位的计算太复杂而采用经验设计；按分析设计指按现代设计方法（如有限元等）对容器各部分进行精确的设计计算。

我们的设计方法普遍采用传统的按规则设计，能够按分析设计制造检验的还不多。

随着技术的进步和有关规范的颁布，现在，压力容器 CAD 技术得到了很大发展。我国很多企业和单位采用了一些压力容器设计的专业软件，如麻省理工学院的 ASPENPlus 系统(石油化工流程模拟系统)；浙江大学基于 Pro/E 开发的管道设计系统；全国化工设备设计技术中心站开发的一些软件：如 SW6-1998 过程设备强度计算软件包，PVCAD V3.0 化工设备 CAD 施工图软件包，PVDS V2.0 压力容器设计技术条件专家系统，ComCAD 2.0 化工设备标准零部件绘图软件包，TANK1-1.0 拱顶罐辅助设计软件包，VAS2.0 压力容器分析设计软件；合肥通用机械研究所开发 RCPVCAD 压力容器 CAD 系统；克莱特科技 2006 年 1 月推出了其最新版本的 PVDesktop5.0 等，还有图库类软件如：LANSYS HF ,LANSYS HL ,LANSYSHU 等，分别有约 900 套浮头式换热容器、500 套浮头式冷凝器、230 套 U 形管式换热器标准图纸,直接选用最为方便^[23]。

上述很多软件都是基于 AutoCAD 图形平台开发的二维设计软件，虽然其设计结果符合压力容器的设计规范，但都没能实现与著名分析软件的集成。其中，全国化工设备设计技术中心站开发的 VAS2.0 压力容器分析设计软件，针对压力容器的各类部件和结构，按照 JB4732-95 的要求，进行有限元分析计算，但是又没有图形处理的能力。

1.4 本文研究的背景、意义和主要内容

1.4.1 本文研究的背景和意义

由于能源对我国的重要性，现在及以后很长一段时间将是我国石油与化工工业充满发展活力的关键时期，同时也是我国大型石油化学工业园区快速发展时期^[24]。所以对化工压力容器的需求将是十分巨大的。

但是，我国压力容器设计制造技术水平总体不高，由于设计制造原因引起

的损失也很大,如:1980~1988年我国共发生1200起锅炉压力容器爆炸事故,其中由于设计制造质量低劣而发生的爆炸事故约占33%^[25]。近几年爆炸事故再度上升,达到150起/年,恶性爆炸和毒气泄漏事故时有发生^[26]。加上由于有关政策的调整,许多技术力量相对薄弱的中小企业也取得了压力容器的设计资格^[23]。对这些企业而言,如何在市场经济条件下,实现计算机辅助设计,满足行业主管部门对计算机辅助设计的基本要求,提高企业在行业中的竞争力,是十分迫切的任务。所以,企业对专业化工CAD软件有强烈的需求。

在化工压力容器,球罐与圆筒形容器使用非常普遍,相比之下球罐具有以下特点^[27]:

1. 球罐的表面积最小,即在相同容量下球罐所需钢材面积最小。
2. 球罐壳板承载能力比圆筒形容器大一倍,即在相同直径、相同压力下,采用同样钢板时,球罐的板厚只需圆筒形容器板厚的一半。
3. 球罐占地面积小,且可向空间高度发展,有利于地表面积的利用。

由于这些特点,再加上球罐基础简单、受风面小、外观漂亮,可美化工程环境等原因,使球罐的应用越来越广泛。

在我国,球罐的设计计算主要还是按规则设计,用传统设计十分复杂,繁琐,主要存在以下几方面的问题:

1. 设计和加工涉及的参数、计算公式、图表众多。每确定一个方案要做很多次的计算,手工计算极易出错。
2. 传统设计中,还要求设计人员必须具有丰富的专业知识和实践经验。
3. 传统计算只是粗略的计算,很多关键的部位都没有计算,而只是按经验来设计,通常都采用过于保守的设计,造成浪费。

由上可见,传统设计方法除计算繁琐、极易出错外,还有多种因素影响其设计结果的可信度和准确度。因此,如何避免大量繁琐的重复设计计算与绘图工作,同时满足设计、制造加工等多方面的要求已成为一个函需解决的问题。此外,为了缩短球罐设计生产周期,提高市场竞争力,也迫切要求加速设计、绘图、制造等过程。

基于以上种种原因,本课题研究开发了球罐专用CAD系统,本系统与AutoCAD、ANSYS无缝连接,具有按传统强度计算、有限元分析、二维绘图的功能,同时,本系统采用模块化开发,可以不断地丰富其内容,因而具有很好的

开放性。

本系统目前具备的功能，已经大大节省了设计人员的时间和精力，对优化设计方案、减少设计及绘图中的人为错误、缩短工程周期，具有较好的实用价值。

1.4.2 本文研究的主要内容

本文基于 WindowsXP 操作系统平台，以 AutoCAD2004 与 ANSYS9.0 为支撑软件，开发了正切式球罐 CAD 应用软件，主要包括以下几个方面的内容：

1. 开发 CAD 系统的常用软件平台及工具的介绍和分析；
 2. 球罐的设计计算过程；
 3. 球罐 CAD 系统的界面设计；
 4. 球罐 CAD 系统的程序设计；
 5. 实现强球罐强度设计、校核、有限元分析、出图等主要功能模块的设计；
- 在以后的各章节中将作详细介绍。

2 系统软件平台

由于 AutoCAD 绘图软件在我国工程领域广泛使用和化工容器设计领域 ANSYS 分析软件的绝对占有率, 本系统就以这两种软件为支撑软件。Visual Basic 是一种可视化的, 面向对象和采用事件驱动方式的结构化高级程序设计语言, 可用于开发 Windows 环境下的各类应用程序, 开发平台就选用了易学易用的 VB6.0。

2.1 VB6.0 简介

Basic 语言是 20 世纪 60 年代由 John G.Kemeny 和 Thomas Kuntz 发明的。它是一种非结构化语言, 易于理解, 易于学习。但是由于 Basic 语言是一种解释语言, 运行起来速度较慢。直到 20 世纪 80 年代末期, 被誉为“Visual Basic 之父”的 Alan Cooper 在 Basic 的基础上成功的建立了很多 Windows 开发工具思想和理念, 将 Basic 的易学易用与可视化编程方法及事件驱动结合起来, Visual Basic 才流行起来。现在, VisualBasic 已经成为 Windows 编程的几大设计软件之一, 受到广大研究开发人员的青睐^[28]。

2.1.1 VB6.0 的特点

在 Visual Basic 环境下, 利用事件驱动的编程机制, 新颖易用的可视化设计工具, 使用 Windows 部的应用程序接口 (APD 函数, 以及动态链接库 DLL), 动态数据交换 DDE), 象的链接与嵌入(OLE), 开放式数据连接(ODBC 等技术, 可以高效、快速地开发出 Windows 环境下功能强大, 图形界面丰富的应用软件系统。其总体特点^[29]如下:

1) 可视化编程

Visual Basic 提供了可视化设计工具, 把 Windows 界面设计复杂性“封装”起来, 只需要按程序设计要求的屏幕布局, 用系统提供的工具, 在屏幕上画出各种所需的“部件”, 图形对象, 并设置这些图形对象的属性, 从而可以大大提高程序设计的效率。

2) 为面向对象的程序设计

Visual Basic 应用面向对象的程序设计方法(OOP)把程序和数据封装起来作

为一个对象，每个对象有自己的属性和方法，程序员摆脱具体的数据格式和程序的束缚，集中精力研究设计要处理的对象。

3)结构化设计语言

Visual Basic 是解释型语言，在输入代码的同时，解释系统将高级语言分解翻译成计算机可以识别的机器指令，并判断每个语句的语法错误。在设计 VisualBasic 程序的过程中，随时可以运行程序，而在整个应用程序设计好之后，可以编译生成可执行文件(EXE)，直接在 Windows 环境之下运行。

4)事件驱动编程机制

Visual Basic 通过事件来执行对象的操作。一个对象可能产生多个事件，每个事件都可以通过一段程序来响应。在用 Visual Basic 设计大型应用软件时，不必建立具有明显开始和结束的程序，而是编写若干微小的子程序，即过程(SUB)。这些过程分别面向不同的对象，由用户操作引发某个事件来驱动完成某种特定的功能，或者由事件驱动程序调用过程来执行指定的操作。

5)访问数据库

Visual Basic 系统具有很强的数据库管理功能。利用数据控件用户可以直接连接 Microsoft Access 数据库，并提供了强大的数据存储和检索功能。同时 VisualBasic 还能直接编程和访问其他外部数据库，比如 dBase, FoxPro, Paradox 等。Visual Basic 提供开放式数据链接 ODBC (Open Database Connection)功能可以通过直接访问或建立链接的方式使用并操作后台大型数据库，如 Sybase, SQL Server, Oracle 等。

6)动态数据交换(DDE)技术

利用动态数据交换(Dynamic Data Exchange)技术，可以把一种应用程序的数据动态地链接到另一种应用程序中去，使两种完全不同的应用程序可以交换数据，进行通信，在 Windows 环境下为多个应用程序之间以 Client/Server 方式建立了一条动态数据交换通道。

7)对象的链接与嵌入(OLE)

OLE(对象的链接与嵌入)技术是将每个应用程序都看作是一个对象(Object)，将相同的对象连接起来，再嵌入到某个应用程序中去，从而可以得到具有声音、影像、图像、动画、文字等各种信息的集合式文件。

8)动态链接库(DLL)

Visual Basic 可以通过动态链接库(Dynamic Linking Library)技术将 C/C++ 或汇编语言编写的程序加入到 Visual Basic 应用程序中, 可以像调用内部函数一样调用其它语言编写的函数。此外, 通过动态链接库, 还可以调用 Windows 应用程序接口(APD 函数, 实现程序之间链接的功能。

2.1.2 用 VB6.0 开发 AutoCAD

用 VB 进行 AutoCAD 二次开发, 是基于新的 ActiveX 自动化界面技术 (ActiveX Automation Interface)。ActiveX Automation 是微软公司的一个技术标准, 以前被称为 OLE (对象链接与嵌入), 其宗旨是在 Windows 系统的统一管理协调不同的应用程序, 准许这些应用程序之间相互沟通、相互控制。每个应用程序决定自己的哪些信息暴露出来, 这些暴露出来的信息可以被其他程序操纵, 这个标准被微软公司极力推广, 许多软件开发商也积极响应^[30]。

AutoCAD 从 R14 版本就增加了 ActiveX 自动化服务功能 (ActiveX Automation Server Capabilities), 也就是说完全可以作为服务程序, 用户可以从其他 ActiveX 客户程序操作 AutoCAD。除了不能控制 AutoCAD 界面元素外, Automation 尽可以随心所欲地做一切工作, 用户完全可以把 AutoCAD 当成自己程序中的一个盛放图形的窗口, 用到时打开、编辑、打印出图, 不用时关闭, 继续做自己的事情, 完全不必理会 AutoCAD 本身^[31]。用 VB 进行 AutoCAD 二次开发, 不仅简单易学, 功能强大, 还可以实现仅用 AutoCAD 不能或不易实现的功能和效果, 例如, 进行三维动画模拟、图形参数化设计等。

2.2 AutoCAD 开发工具

AutoCAD 是目前最为流行的二维工程图形处理软件, 其强大的生命力不仅在于它完善的绘图功能、良好的用户界面、易学易用的操作特点, 而且在于它开放的结构体系, 为用户提供了多种二次开发的工具^[32]。

2.2.1 AutoLisp/ Visual LISP 开发工具

Autolisp 是最早的二次开发工具, 它是嵌入在 AutoCAD 内部, 是解释型 API, 以解释方式运行, 运行速度相对较慢, 另外源代码裸露, 安全性差。但移植性最好, 一个 Autolisp 程序可在所有的 AutoCAD 平台运行, 此外使用方

便灵活,学习起来较容易。Visual LISP,是一种面向对象的开发环境,是编译型 API,与 Autolisp 完全兼容,能提供 Autolisp 所有的功能,是 AutoLISP 的扩展和延伸^{[33][34]}。

2.2.2 ADS 开发工具

它是 AutoCAD 开发系统(AutoCAD Development System)的简称。ADS 的编程界面可使用户用 C 语言来实现 AutoCAD 的用户化,既可运行第三方开发的 ADS 应用程序,也可以编写自己的 ADS 应用程序。与 AutoLisp 相比,ADS 程序的优越性如下:(1)具备错综复杂的综合大规模处理能力;(2)由于是编译开发环境,可以检查程序设计语言的逻辑错误,且执行速度快;程序源代码的可读性好于 Lisp;(3)引入 C 高级语言后,ADS 也同样具有面向对象的功能,程序层次分明,清晰可读从而使软件的可维护性得到提高;(4)经过良好封装,ADS 的程序代码许多时候比 AutoLisp 更简洁;(5) ADS 的程序能够减少程序出错的概率。

但同样 C 语言的介入也会产生许多问题。如 C 语言比 Lisp 语言复杂得多,难以在短时间内掌握;ADS 程序的隐藏错误会导致 AutoCAD,乃至操作系统崩溃;由于是编译运行,不易见到代码的效果;C 语言的 ADS 程序一般比 AutoLisp 程序的源代码要繁冗。由此可见,ADS 开发者必须先对 C/C++ 语言编程技术及 AutoCAD 功能有较深入的了解^[35]。随着 AutoCAD 技术的发展,ADS 已经被 ObjectARX 技术所取代。

2.2.3 VBA 开发工具

VBA (Visual Basic for Application)是一个引入对象的程序设计环境,为用户提供类似 Visual Basic(VB)语言所拥有的功能。一般说来 VBA 和 VB 的主要差异类似 AutoLisp 和 Lisp 间的差异,即 VBA 可以执行存取 AutoCAD 环境的所有资源。此外,VBA 可以整合其他具用 VBA 能力的应用程序,这使 AutoCAD 可以成为其他应用程序(Word 或 Excel)的 AutoCAD 控制器。从运作上来看,VBA 通过 AutoCAD ActiveX Automation 接口将信息传送给 AutoCAD.而 AutoCAD VBA 也允许 VBA 环境与 AutoCAD 同时执行并通过 ActiveX Automation 接口提供 AutoCAD 程序。如此,AutoCAD、ActiveX AutoCAD 与 VBA 结合方式,提

供极强大的接口,不仅可以操作 AutoCAD 内部对象件,更可以在其他的应用程序之间传送或接收数据。与 AutoLISP 相比, VBA 在进程内运行速度比 AutoLISP/VisualLisp 应用程序快,更适合于开发用户界面占主体的应用软件^[36]。

2.2.4 ObjectARX 开发工具

ObjectARX 是一种用来开发 AutoCAD 应用程序的编译语言编程环境。它使用面向对象的 C++ 应用程序开发机制,以动态链接库形式和 AutoCAD 运行在相同的地址空间并且直接操作 AutoCAD 数据结构和代码,可直接访问 AutoCAD 的图形数据库和图形系统;可以定义类似于 AutoCAD 内置命令的自定义命令;使用户可以用 MFC 库来创建标准 Windows 风格的图形用户界面;用户还可以根据扩展的 ARX 协议机制动态地扩展 AutoCAD 功能^[37]。此外还可以运用 ObjectARX 库和其他 AutoCAD 编程接口(比如 AutoLISP 或 VBA)结合使用,从而可以跨 API 集成。与其它几种开发工具相比, ARX 应用程序更加高效、更能充分利用 AutoCAD 开发的体系结构。但由于 ARX 复杂繁锁,必需掌握 VC 语言,所以使用 ARX 开发工具的工程技术人员并不多。

2.2.5 ActiveX Automation 开发工具

ActiveX Automation 是微软公司基于 COM(组件对象模型)体系结构开发的一项技术,是 AutoCAD 的新编程接口。他提供了我们可以从 AutoCAD 内部或外部,以程序的方式来定义 AutoCAD 的结构。其方式是开放 AutoCAD 对象给“外部世界”。开放这些对象后,就可以使用许多不同的程序语言(如 Visual Basic、C++、Delphi 和 Java)来存取对象。ActiveX Objects(ActiveX 对象模型)对象是 ActiveX 技术的基础,每一个对象就代表 AutoCAD 的一个元素。AutoCAD 是以层结构来组织对象的,其顶层对象就是 Application,下面是 Preferences 与 Document。然后,再透过对 Preferences 对象的操作,我们可以在执行 VBA“编辑视窗”功能后,设定所需要的值。Document 对象包含: ModelSpace、PaperSpace、Blocks、Layers、Plot 与 Utility 等对象。最底层的对象是点、线、圆、图块等 AutoCAD 能画出的图形。可见在 AutoCAD 中使用 ActiveX 接口具有两个优点,一是更多编程环境可以编程访问 AutoCAD 图形;二是与其他 windows 应用程序共享数据变得更加容易^{[38][39]}。

2.3 ANSYS 简介

2.3.1 ANSYS 在工程中的应用

近 40 年来,随着计算机的飞速发展和广泛应用以及有限元理论的日益完善,出现了许多通用和专业的计算软件,并在各个领域得到了广泛的应用。其中较为著名的通用大型有限元软件有 ANSYS、ALGOR、ABAQUS、MSC.NASTRAN 和 MSC.MARC 等^[33]。

ANSYS 软件作为一个大型通用有限元分析软件,能够进行结构、热、流体、电磁以及声学等学科的研究,广泛应用于土木工程、地质矿产、水利、铁道、汽车交通、国防军工、航天航空、船舶、机械制造、核工业、石油化工、轻工、电子、家用电器和生物医学等一般工业及科学研究之中。ANSYS 软件是第一个通过 ISO 9001 质量认证的大型有限元设计软件,是美国机械工程师协会 (ASME)、美国核安全局 (NQA) 及近二十种专业技术协会认证的标准分析软件^[34]。

在我国,ANSYS 软件是唯一被中国铁路机车车辆总公司选定作为本行业进行有限元分析的基本软件,是第一个通过中国压力容器标准化技术委员会认证并在国务院十七个部位推广使用的分析软件,近十年来,ANSYS 软件在压力容器行业发挥着巨大作用,成为压力容器分析设计的事实上的标准。ANSYS 为推动 CAE 分析设计在该领域的普及做出了卓有成效的工作,为提高我国压力容器分析设计水平做出了巨大的贡献^[35]。

2.3.2 ANSYS 二次开发技术简介

APDL 即 ANSYS 参数化设计语言 (ANSYS Parametric Design Language) 是 ANSYS 软件二次开发的工具之一。作为一种参数化语言,它可以用来自动完成一些通用性强的任务或参数化建模。APDL 是优化设计和自适应划分网格的基础,为一般问题的求解提供了许多简单高效的手段。

APDL 具有多种功能:参数、表达式和函数、分支和循环、重复功能和复写、宏和用户子程序。

进行有限元分析的过程中,假设求解结果表明有必要对程序进行修改设计,那么就必须改变模型的几何形状和尺寸,并重复分析,当模型复杂或修改较多

时，整个过程需要耗费大量的时间和精力，严重影响程序设计和工程应用效率[47]。

ANSYS 程序中的参数化设计语言 APDL 用建立智能分析的手段为用户提供自动完成上述循环的功能，即程序的输入可以根据指定的函数、变量以及选出的分析标准作决定。APDL 允许复杂的数据输入，使用户实际上对任何设计或分析的属性都有控制权，如尺寸、材料、载荷、约束位置和网格密度等^[36]。

2.4 本章小结

本章简要介绍了球罐 CAD 系统的开发平台、支撑软件。由于我国工程领域广泛应用 AutoCAD 进行二维图形处理，压力容器行业有限元分析软件广泛采用了 ANSYS，所以我们以这两种软件作为本系统的支撑软件并介绍了它们的开发技术。同时，简要介绍了开发平台 VB6.0 的特点和它对 AutoCAD 的开发技术。

3 球罐强度设计

3.1 球罐结构设计要点

球罐的结构形式是多种多样的,根据不同的使用条件(介质、容量、压力、温度),选用不同的材料;根据不同的设计制造水平,选用不同的结构形式。我国现在使用的球罐,多以球壳板的组合方案的不同分为橘瓣式与橘瓣和足球瓣组成的混合式两种^[37]。

球罐结构的合理设计必须考虑多种因素:盛装物料的性质、设计温度和压力、材质、制造装备和技术水平、安装方法、焊接和检验要求、操作方便可靠性、自然环境的影响等等。要做到满足各项工艺要求,具有足够的强度和稳定性,结构尽可能简单,使其压制成型、安装组对、焊接、检验、操作、监测和检修等实施容易。

球罐的结构设计应包括以下内容:

- (1) 根据工艺参数的要求确定球罐结构的类型及几何尺寸;
- (2) 确定球壳的排板方法(分带、分片);
- (3) 确定球壳板的几何尺寸;
- (4) 支撑结构的确定;
- (5) 人孔和工艺接管的选定、布置以及开孔补强的设计;
- (6) 球罐的附件,如内外盘旋梯、爬梯、平台的设计;
- (7) 保冷结构的设计(有要求时);
- (8) 对基础的技术要求;
- (9) 有要求时,对防地震、防雷的设计等。

球罐的强度计算是球罐设计中最核心的部分,由于世界各国普遍采用正切柱式支撑球罐,我们这里将按照国家有关规范^[38]介绍正切式球罐的计算。

3.2 球罐强度计算实例

我们以一个实例按 GB12337-1998《钢制球形储罐》规定，对正切式球罐的强度计算方法进行分析研究。

3.2.1 设计条件

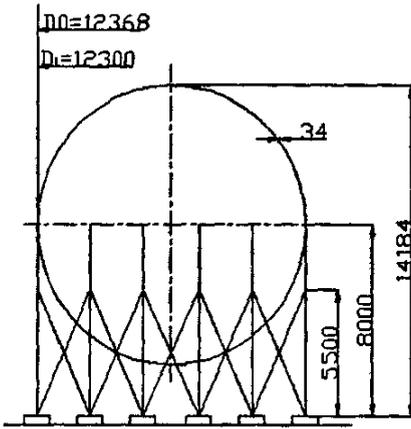


图 3-1 球罐整体结果尺寸

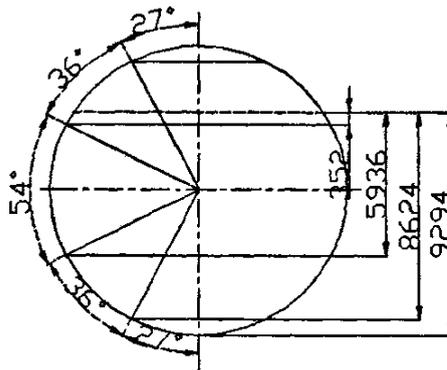


图 3-2 各带液柱高度

球罐几何尺寸如图 3-1 所示。

设计压力： $P=1.6\text{MPa}$

设计温度：常温

水压试验压力： $P_T = 1.25P \frac{[\sigma]}{[\sigma]_T} = 2.0\text{MP}$

球壳内直径： $D_i = 12300\text{mm}$

储存物料：液化石油气

充装系数： $k=0.85$

地震设防裂度：8 度

基本风压值： $q_0 = 600\text{N/m}^2$

基本雪压值： $q = 600\text{N/m}^2$

支柱数目： $n=10$

球罐造场地：II 类场地土、近震、B 类地区

3.2.2 球壳计算

1、计算压力：

$$P=1.6\text{MPa}$$

根据球罐结构计算出的各液柱高度如图 3-2 所示。球壳各带的物料液柱高度:

$$h_1=0$$

$$h_2=352\text{mm}$$

$$h_3=5936\text{mm}$$

$$h_4=8624\text{mm}$$

$$h_5=9294\text{mm}$$

物料高度: $\rho_2=480\text{kg/m}^3$ 重力加速度: $g=9.81\text{m/s}^2$

球壳各带的计算压力: $P+h_i \times \rho_2 \times g \times 10^{-9}$ MPa

$$P_{c1}=1.6+0=1.6\text{MPa}$$

$$P_{c2}=1.6+352 \times 480 \times 9.81 \times 10^{-9}=1.602\text{MPa}$$

$$P_{c3}=1.6+5936 \times 480 \times 9.81 \times 10^{-9}=1.628\text{MPa}$$

$$P_{c4}=1.6+8624 \times 480 \times 9.81 \times 10^{-9}=1.641\text{MPa}$$

$$P_{c5}=1.6+9294 \times 480 \times 9.81 \times 10^{-9}=1.644\text{MPa}$$

2、球壳各带的厚度计算:

球壳内直径: $D_i=12300\text{mm}$

设计温度下球壳材料 1 6 Mn 的许用应力: $[\sigma]=163\text{MPa}$

焊缝系数: $\phi=1$

厚度附加量: $C=C_1+C_2=0+1=1\text{mm}$

$$\therefore \delta_{d1} = \frac{P_{c1} \cdot D_i}{4[\sigma] \Phi - P_{c1}} + C = \frac{1.6 \times 12300}{4 \times 163 \times 1 - 1.6} + 1 \approx 31.26\text{mm}$$

$$\delta_{d2} = \frac{P_{c2} \cdot D_i}{4[\sigma] \Phi - P_{c2}} + C = \frac{1.602 \times 12300}{4 \times 163 \times 1 - 1.602} + 1 \approx 31.30\text{mm}$$

$$\delta_{d3} = \frac{P_{c3} \cdot D_i}{4[\sigma] \Phi - P_{c3}} + C = \frac{1.628 \times 12300}{4 \times 163 \times 1 - 1.628} + 1 \approx 31.79\text{mm}$$

$$\delta_{d4} = \frac{P_{c4} \cdot D_i}{4[\sigma] \Phi - P_{c4}} + C = \frac{1.641 \times 12300}{4 \times 163 \times 1 - 1.641} + 1 \approx 32.04\text{mm}$$

$$\delta_{d5} = \frac{P_{c5} \cdot D_i}{4[\sigma] \Phi - P_{c5}} + C = \frac{1.644 \times 12300}{4 \times 163 \times 1 - 1.644} + 1 \approx 32.09\text{mm}$$

取球壳名义厚度 $\delta_n=34\text{mm}$

3.2.3 球罐质量计算

球壳平均直径: $D_{cp} = 12334 \text{ mm}$

球壳材料密度: $\rho_1 = 7850 \text{ kg/m}^3$

充装系数: $k = 0.85$

水的密度: $\rho_3 = 1000 \text{ kg/m}^3$

球壳外直径: $D_o = 12368 \text{ mm}$

基本雪压值: $q = 600 \text{ N/m}^2$

球面的积雪系数: $C_s = 0.4$

球壳质量:

$$m_1 = \pi D_{cp}^2 \cdot \delta_n \cdot \rho_1 = \pi \times 12334^2 \times 34 \times 7850 \times 10^{-9} \approx 127558 \text{ kg}$$

物料的质量:

$$m_2 = D_i^3 \cdot \rho_2 \cdot k \times 10^{-9} = \pi / 6 \times 12300^2 \times 480 \times 0.85 \times 10^{-9} \text{ kg} \approx 397534 \text{ kg}$$

液压试验时液体的质量:

$$m_3 = \pi / 6 \cdot D_i^3 \cdot \rho_3 \times 10^{-9} = \pi / 6 \times 12300^2 \times 1000 \times 10^{-9} \text{ kg} \approx 974348 \text{ kg}$$

积雪质量:

$$m_4 = \pi / 4 g \cdot D_o^2 \cdot q \cdot C_s \times 10^{-6} = \pi / 4 \times 9.81 \times 12368^2 \times 600 \times 0.4 \times 10^{-6} \text{ kg} \approx 397534 \text{ kg}$$

保温层质量:

$$m_5 = 0 \text{ (无保温)}$$

支柱和柱杆的质量:

$$m_6 = 8500 \text{ kg}$$

附件的质量:

$$m_7 = 6500 \text{ kg}$$

操作状态下的球罐质量:

$$m_0 = m_1 + m_2 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 \approx 543031 \text{ kg}$$

液压实验状态下的球罐质量:

$$m_T = m_1 + m_3 + m_6 + m_7 = 1116906 \text{ kg}$$

球罐最小质量:

$$m_{\min} = m_1 + m_6 + m_7 = 142558 \text{ kg}$$

3.2.4 地震载荷计算

1. 自振周期:

$$T = \pi \sqrt{\frac{m_0 H_0^3 \xi \times 10^{-3}}{3nE_s I}}$$

式中：拉杆影响系数： $\xi = 1 - \left(\frac{l}{H_0}\right)^2 \left(3 - \frac{2l}{H_0}\right)$

支柱底板至球壳中心的距离 $H_0 = 8000\text{mm}$

支柱数目： $n = 10$

支柱材料 10 号钢的常温弹性模量： $E_s = 192 \times 10^3 \text{MPa}$

支柱外直径： $d_0 = 426\text{mm}$

支柱内直径： $d_i = 408\text{mm}$

支柱横截面的惯性矩：

$$I = \frac{\pi}{64} (d_0^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{64} \times (426^4 - 408^4) \approx 2.564 \times 10^8 \text{mm}^4$$

支柱底板底面至拉杆中心线与支柱中心线交点处的距离： $l = 5500\text{mm}$

故拉杆影响系数：

$$\xi = 1 - \left(\frac{5500}{8000}\right)^2 \times \left(3 - \frac{2 \times 5500}{8000}\right) \approx 0.232$$

球罐的基本自振周期：

$$T = \pi \sqrt{\frac{543031 \times 8000^3 \times 0.232 \times 10^{-3}}{3 \times 10 \times 192 \times 10^3 \times 2.564 \times 10^8}} \approx 0.6566\text{s}$$

2、地震力：

球罐的水平地震力： $F_e = C_z a m_0 g$

式中： C_z ——综合影响系数，对于球罐 $C_z = 0.45$

α ——对应于 T 的地震影响系数： $\alpha = \left(\frac{T_g}{T}\right)^{0.9} \alpha_{\max}$

T_g ——特征周期，对于二类场地 $T_g = 0.3\text{s}$

α_{\max} ——地震影响系数最大值， $\alpha_{\max} = 0.45$

$$\alpha = \left(\frac{0.3}{0.6566}\right)^{0.9} \times 0.45 \approx 0.2224$$

$$\therefore F_e = 0.45 \times 0.2224 \times 543031 \times 9.81 \approx 5.331 \times 10^5 \text{N}$$

3.2.5 风载荷计算

球罐的水平风力:
$$F_w = \frac{\pi}{4} D_0^2 k_1 k_2 q_0 f_1 f_2 \times 10^{-6}$$

式中: k_1 ——风载体形系数。 $k_1 = 0.4$

ξ_1 ——系数, $\xi_1 = 1.94$ (据 GB12337 表 17)

k_2 ——风振系数 $k_2 = 1 + 0.35 \xi_1 = 1 + 0.35 \times 1.494 \approx 1.523$

f_1 ——风压高度变化系数, $f_1 = 0.92$

f_2 ——球罐附件增大系数, 取 $f_2 = 1.1$

$$F_w = \frac{\pi}{4} \times 12368^2 \times 0.4 \times 1.523 \times 600 \times 0.92 \times 1.1 \times 10^{-6} \approx 4.444 \times 10^4 \text{ N}$$

3.2.6 弯矩计算

由水平地震力和水平风压力引起的最大弯矩: $M_{max} = F_{max} L$

F_{max} 为 $(F_e + 0.25F_w)$ 与 F_w 的大者

$$F_e + 0.25F_w = 5.442 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\therefore F_{max} = 5.442 \times 10^5 \text{ N}$$

力臂 $L = H_0 - l = 8000 - 5500 = 2500 \text{ mm}$

$$M_{max} = 5.442 \times 10^5 \times 2500 = 1.361 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

3.2.7 支柱计算

1. 单个支柱的垂直载荷:

(1) 重力载荷

操作状态下的重力载荷:
$$G_0 = \frac{m_0 g}{n} = \frac{543031 \times 9.81}{10} \approx 5.327 \times 10^5 \text{ N}$$

液压试验状态下的重力载荷:

$$G_T = \frac{m_T g}{n} = \frac{1116906 \times 9.81}{10} = 1.096 \times 10^6 \text{ N}$$

(2) 支柱的最大垂直载荷:

支柱中心圆半径: $R = Ri = 6150 \text{ mm}$

最大弯矩对支柱产生的垂直载荷的最大值 (按 GB12337 表 19)

$$(F_l)_{\max} = 0.2000 \frac{M_{\max}}{R} \approx 4.426 \times 10^4 N$$

拉杆作用在支柱上的垂直载荷的最大值 (按 GB12337 表 19)

$$(P_{l-j})_{\max} = 0.3236 \frac{IF_{\max}}{R} \approx 1.575 \times 10^5 N$$

以上两力之和的最大值 (表 19)

$$(F_l + P_{l-j})_{\max} = 0.1176 \frac{M_{\max}}{R} + 0.3078 \frac{IF_{\max}}{R} \approx 1.758 \times 10^5 N$$

2. 组合载荷:

操作状态下支柱的最大垂直载荷:

$$W_0 = G_0 + (F_l + P_{l-j})_{\max} \approx 7.805 \times 10^5 N$$

液压试验状态下支柱的最大垂直载荷:

$$W_T = G_T + 0.3 \times (F_l + P_{l-j})_{\max} \frac{F_w}{F_{\max}} \approx 1.100 \times 10^6 N$$

3. 单个支柱弯矩:

(1) 偏心弯矩

操作状态下赤道线的液柱高度: $h_{oe} = 3144 mm$

液压试验状态下赤道线的液柱高度: $h_{Te} = 6150 mm$

操作状态下物料在赤道线的液柱静压力:

$$P_{oe} = h_{oe} \rho_2 g \times 10^{-9}$$

$$= 3144 \times 480 \times 9.81 \times 10^{-9} = 0.015 MPa$$

液压状态下物料在赤道线的液柱静压力:

$$P_{Te} = h_{Te} \rho_3 g \times 10^{-9}$$

$$= 6150 \times 1000 \times 9.81 \times 10^{-9} = 0.06 MPa$$

球壳的有效厚度: $\delta_e = \delta_n - c = 34 - 1 = 33 mm$

操作状态下球壳赤道线的薄膜应力:

$$\sigma_{oe} = \left(\frac{(P + P_{oe})(D_i + \delta_e)}{4\delta_e} \right)$$

$$= \frac{(1.6 + 0.015) \times (12300 + 33)}{4 \times 33} \approx 192.5 MPa$$

球壳内半径: $R_i = 6150 mm$

球壳材料的泊松比: $\mu = 0.3$

球壳材料 16MnR 的弹性模量: $E = 206 \times 10^3 = \text{MPa}$

操作状态下支柱的偏心弯矩:

$$\begin{aligned} M_{o1} &= \frac{\sigma_{0e} R_1 W_0}{E} (1 - \mu) \\ &= \frac{150.9 \times 6150 \times 7.085 \times 10^5}{206 \times 10^3} \times (1 - 0.3) = 2.234 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

液压试验状态下支柱偏心弯矩

$$\begin{aligned} M_{T1} &= \frac{\sigma_{Te} R_1 W_T}{E} (1 - \mu) \\ &= \frac{192.5 \times 6150 \times 1.100 \times 10^6}{206 \times 10^3} \times (1 - 0.3) \cong 4.425 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

(2) 附加弯矩:

操作状态下支柱的附加力 W 弯矩:

$$\begin{aligned} M_{o2} &= \frac{6E_s I \sigma_{0e} R_1}{H^2_0 E} (1 - \mu) \\ &= \frac{6 \times 192 \times 10^3 \times 2.564 \times 10^8 \times 150.9 \times 6150}{206 \times 10^3 \times 8000^2} \times (1 - 0.3) \cong 1.455 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

液压试验状态下支柱的附加弯矩:

$$\begin{aligned} M_{T2} &= \frac{6E_s I \sigma_{0e} R_1}{H^2_0 E} (1 - \mu) \\ &= \frac{6 \times 192 \times 10^3 \times 2.564 \times 10^8 \times 192.5 \times 6150}{206 \times 10^3 \times 8000^2} \times (1 - 0.3) \cong 1.857 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

(3) 总弯矩

操作状态下支柱的总弯矩: $M_o = M_{o1} + M_{o2} = 1.678 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$

液压试验状态下的总弯矩: $M_T = M_{T1} + M_{T2} = 2.300 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$

4. 支柱稳定性校核:

根据前面的计算, 支柱选用: $\phi 426 \times 9$ 钢管

计算长度系数: $k_3 = 1$

单个支柱的横截面面积:

$$A = \frac{\pi}{4}(d_0^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4}(426^2 - 408^2) \cong 111790 \text{mm}^2$$

支柱的惯性半径:

$$r_i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{2.564 \times 10^8}{11790}} \cong 147.5 \text{mm}$$

支柱长细比:

$$\lambda = \frac{k_3 H_0}{r_i} = \frac{1 \times 8000}{147.5} \cong 54.24$$

支柱材料 10 号钢的常温屈服点: $\sigma_s = 205 \text{MPa}$

支柱换算长细比:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_s}{E_s}} = \frac{54.24}{\pi} \times \sqrt{\frac{205}{192 \times 10^3}} \approx 0.564$$

$$\bar{\lambda} > 0.215$$

系数: $\alpha_2 = 0.986$ $\alpha_3 = 0.152$

当 $\bar{\lambda} \leq 0.215$ 时, $\phi_p = 1 - \alpha_1 \bar{\lambda}^2$

当 $\bar{\lambda} > 0.215$ 时,

$$\phi_p = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[(\alpha_2 + \alpha_3 \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2) - \sqrt{(\alpha_2 + \alpha_3 \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2} \right]$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 系数, 对轧制钢管截面 $\alpha_1 = 0.41, \alpha_2 = 0.986, \alpha_3 = 0.152$

对焊制钢管截面 $\alpha_1 = 0.65, \alpha_2 = 0.965, \alpha_3 = 0.300$

弯矩作用平面内的轴心变压支柱稳定系数:

$$\phi_p = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[(\alpha_2 + \alpha_3 \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2) - \sqrt{(\alpha_2 + \alpha_3 \bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2} \right]$$

$$\approx 0.908$$

等效弯矩系数: $\beta_m = 1$

截面塑性发展系数: $\gamma = 1.15$

$$z = \frac{\pi(d_0^4 - d_i^4)}{32d_0} \approx 1.204 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

单个支柱的截面系数:

$$\text{欧拉临界力: } W_{Ex} = \pi^2 E_s A / \lambda^2$$

$$= \pi^2 \times 192 \times 10^3 \times 11790 / 54.24^2 \approx 7.594 \times 10^6 \text{ N}$$

支柱材料的许用应力:

$$[\sigma]_k = \frac{\sigma_s}{1.5} = \frac{205}{1.5} \approx 137 \text{ MPa}$$

操作状态下支柱的稳定性校核:

$$\frac{W_0}{\phi_p A} + \frac{\beta_m M_0}{\gamma z \left(1 - 0.8 \frac{W_T}{W_{Ex}}\right)} \approx 79.3 \text{ MPa} < [\sigma]_k$$

液压试验状态下支柱的稳定性校核:

$$\frac{W_T}{\phi_p A} + \frac{\beta_m M_T}{\gamma z \left(1 - 0.8 \frac{W_T}{W_{Ex}}\right)} \approx 121.5 \text{ MPa} < [\sigma]_k$$

稳定性校核通过。

3.2.8 地脚螺栓计算

1. 拉杆作用在支柱的水平力

拉杆和支柱间的夹角:

$$\beta = \arctg \frac{2R \cdot \sin \frac{\pi}{n}}{l} = \arctg \frac{2 \times 6150 \times \sin \frac{\pi}{10}}{5500} \approx 34.6^\circ$$

拉杆作用在支柱上的水平力:

$$F_c = (p_{i-j})_{\max} \text{tg} \beta = 1.575 \times 10^5 \times \text{tg} 34.6^\circ = 1.087 \times 10^5$$

2. 支柱底板与基础的摩擦力

支柱底板与基础的摩擦系数: $f_s = 0.4$

对于 钢—混凝土 $f_s = 0.4$, 钢—钢 $f_s = 0.3$

支柱底板与基础的摩擦力:

$$F_s = f_s \frac{m_{\min} g}{n}$$

$$\begin{aligned}
 F_s &= fs \frac{m_{mn} g}{n} \\
 &= 0.4 \times \frac{142558 \times 9.81}{10} \\
 &\approx 5.594 \times 10^4 N
 \end{aligned}$$

3. 地脚螺栓:

因 $F_s < F_c$, 球罐必须设置地脚螺栓 (当 $F_s \geq F_c$ 可不设地脚螺栓)

每个支柱上的地脚螺栓个数: $n_d = 2$

地脚螺栓材料的许用剪切应力:

$$[\tau]_B = 0.4\sigma_s = 0.4 \times 224 = 90 MPa$$

地脚螺栓的螺纹外径:

$$d_B = 1.13 \sqrt{\frac{F_c - F_s}{n_d [\tau]_B}} + C_B = 1.13 \times \sqrt{\frac{1.087 \times 10^5 - 5.594 \times 10^4}{2 \times 90}} + 3 \approx 22.3 \quad \text{mm}$$

选取 M30 的地脚螺栓

3.2.9 支柱底板

1. 支柱底板直径

基础采用钢筋混凝土, 其许用应力: $[\sigma]_{bc} = 3.0 MPa$

地脚螺栓直径: $d = 30 \text{mm}$

支柱底板直径:

$$\begin{aligned}
 D_{b1} &= 1.13 \sqrt{\frac{W_{\max}}{[\sigma]_{bc}}} \\
 &= 1.13 \times \sqrt{\frac{1.100 \times 10^6}{3.0}} \\
 &\approx 684.2 \text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{b2} &= (8 \sim 10)d + d_0 \\
 &= (8 \sim 10) \times 30 + 426 \\
 &\approx 726 \text{mm}
 \end{aligned}$$

选底板直径 $D_b = 700\text{mm}$

2. 底板厚度:

底板尺寸示意图如图 3-3 所示

底板的压应力:

$$\begin{aligned}\sigma_{bc} &= \frac{4W_{\max}}{\pi D_b^2} \\ &= \frac{4 \times 1.100 \times 10^6}{\pi \times 700^2} \\ &\approx 2.86\text{MPa}\end{aligned}$$

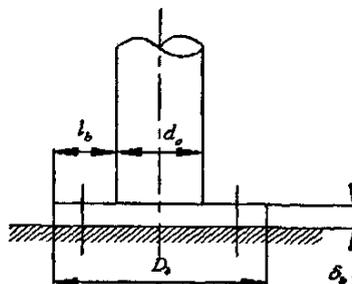


图 3

—3 底板尺寸示意图

底板外边缘至支柱外表面的距离:

$$l_b = \frac{700 - 426}{2} = 137\text{mm}$$

底板材料: Q235-A, $\sigma_s = 225\text{MPa}$

底板材料的许用弯曲应力: $[\sigma]_b = \frac{\sigma_s}{1.5} = \frac{225}{1.5} \approx 150\text{MPa}$

底板的腐蚀裕量: $C_b = 3\text{mm}$

底板厚度:
$$\delta_b = \sqrt{\frac{3\sigma_{bc}l_b^2}{[\sigma]_b}} + C_b$$

$$\sqrt{\frac{3 \times 2.86 \times 137^2}{150}} + 3 \approx 35.8\text{mm}$$

取 $\delta_b = 40\text{mm}$

3.2.10 拉杆计算

1. 拉杆螺纹外径计算

拉杆的最大拉力:

$$F_T = \frac{(P_{i-j})_{\max}}{\cos \beta} = \frac{1.575 \times 10^5}{\cos 34.6^\circ} \approx 1.913 \times 10^5 N$$

拉杆材料: Q235-A, $\sigma_s = 215 MPa$

拉杆材料的许用应力: $[\sigma]_T = \frac{\sigma_s}{1.5} = \frac{215}{1.5} \approx 43.3 mm$

选取拉杆的螺纹公称直径为 M56, 所以拉杆选用: $\phi 56$ 圆钢

2. 拉杆连接部位的计算:

拉杆连接部位结构如图 3-4 所示。

(1) 销子:

销子材料: 35, $\sigma_s = 295 MPa$

销子材料的许用剪切应力:

$$[\tau]_p = 0.4\sigma_s = 0.4 \times 295 = 118 MPa$$

销子直径: $d_p = 0.8 \sqrt{\frac{F_T}{[\tau]_p}} = 0.8 \times \sqrt{\frac{1.913 \times 10^5}{118}} \approx 32.2 mm$

选取销子直径 $d_p = 36 mm$

(2) 耳板厚度:

耳板材料: Q235-A, $\sigma_s = 225 MPa$

耳板材料的许用压应力: $[\sigma]_c = \frac{\sigma_s}{1.1} = \frac{225}{1.1} = 205 MPa$

耳板厚度: $\delta_c = \frac{F_T}{d_p [\sigma]_c} = \frac{1.913 \times 10^5}{36 \times 205} \approx 25.9 mm$

选取耳板厚度为 28mm

(3) 翼板厚度

翼板材料: Q235-A, $\sigma_s' = 235 MPa$

$$\delta_a = \frac{\delta_c}{2} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_s} = \frac{25.9}{2} \times \frac{225}{235} \approx 12.4mm$$

翼板厚度:

选取翼板厚度为 14mm

(4) 连接焊缝强度验算

A 焊缝单边长度: $L_1 = 350mm$

A 焊缝焊脚尺寸: $S_1 = 9mm$

支柱或耳板材料屈服点的较小值: $\sigma_s = 205MPa$

角焊缝系数: $\phi_o = 0.6$

焊缝许用剪切应力:

$$[\tau]_w = 0.4\sigma_s \phi_o = 0.4 \times 205 \times 0.6 = 49MPa$$

耳板与支柱连接焊缝 A 的剪切应力校核:

$$\frac{F_T}{1.41L_1S_1} = \frac{1.913 \times 10^5}{1.41 \times 350 \times 9} \approx 43.1MPa < [\tau]_w$$

B 焊缝的单边长度: $L_2 = 200mm$

B 焊缝焊脚尺寸: $S_2 = 10mm$

拉杆或翼板材料屈服点的较小值: $\sigma_s = 215MPa$

焊缝许用剪切应力:

$$[\tau]_w = 0.4\sigma_s \phi_o = 0.4 \times 215 \times 0.6 = 52MPa$$

拉杆与翼板连接焊缝 B 的剪切应力校核:

3.2.11 支柱与球壳连接最低点 a 的应力校核

1. a 点的剪切应力:

柱壳连接部位结构如图 3-5 所示。

支柱与球壳连接焊缝单边的弧长: $L_w = 2037mm$

球壳 a 点处的有效厚度: $\delta_{ea} = 33mm$

操作状态下 a 点的剪切应力 $D_b l_b d_o \delta_b$:

$$\tau_0 = \frac{G_0 + (F_i)_{\max}}{aL_W \delta_{ea}} = \frac{5.327 \times 10^5 + 4.426 \times 10^4}{2 \times 2037 \times 33} \approx 4.3 \text{MPa}$$

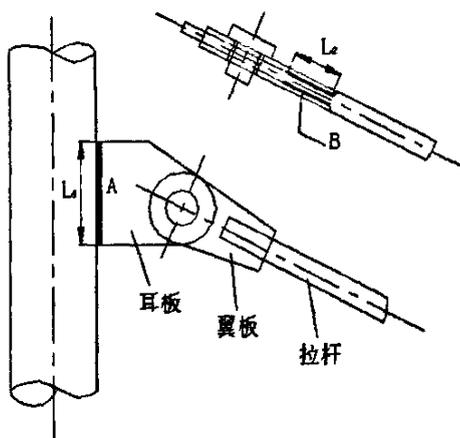


图 3-4 支柱、耳板和翼板连接

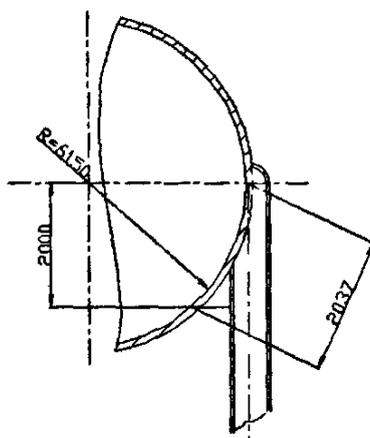


图 3-5 柱壳连接

液压试验状态下 a 点的剪切应力:

$$\tau_T = \frac{G_T + 0.3(F_i)_{\max} \frac{F_W}{F_{\max}}}{2L_W \delta_{ea}} = \frac{1.096 \times 10^6 + 0.3 \times 4.426 \times 10^4 \times \frac{4.444 \times 10^4}{5.442 \times 10^5}}{2 \times 2037 \times 33} \approx 8.2 \text{MPa}$$

2. a 点的纬向应力

操作状态下 a 点的液柱高度: $h_{0a} = 5144 \text{mm}$

液压试验状态下 a 点的液柱高度: $h_{Ta} = 8150 \text{mm}$

操作状态下物料在 a 点的液柱静压力:

$$P_{0a} = h_{0a} \rho_2 g \times 10^{-9} = 5144 \times 480 \times 9.81 \times 10^{-9} = 0.024 \text{MPa}$$

液压试验状态下液体在 a 点的液柱静压力:

$$P_{Ta} = h_{Ta} \rho_3 g \times 10^{-9} = 8150 \times 1000 \times 9.81 \times 10^{-9} = 0.08 \text{MPa}$$

操作状态下 a 点的纬向应力:

$$\sigma_{01} = \frac{(P + P_{Ta})(D_i + \delta_{ea})}{4\delta_{ea}} = \frac{(1.6 + 0.024) \times (12300 + 33)}{4 \times 33} \approx 151.7 \text{MPa}$$

试验状态下 a 点的纬向应力:

$$\sigma_{T1} = \frac{(P_T + P_{Ta})(D_i + \delta_{ea})}{4\delta_{ea}} = \frac{(2.0 \times 0.08) \times (12300 + 33)}{4 \times 33} \approx 194.3 \text{MPa}$$

3. a 点的应力校核:

操作状态下的 a 点的组合应力:

$$\sigma_{0a} = \sigma_{01} + \tau_0 = 151.7 + 4.3 = 156.0 \text{MPa}$$

液压试验状态下的 a 点的组合应力:

$$\sigma_{Ta} = \sigma_{T1} + \tau_T = 194.3 + 8.2 = 202.5 \text{MPa}$$

应力校核:

$$\sigma_{0a} = 156.0 \text{MPa} < [\sigma]' = 163 \text{MPa}$$

$$\sigma_{Ta} = 202.5 \text{MPa} < 0.9\sigma_s = 0.9 \times 325 = 292.5 \text{MPa}$$

校核通过

3.2.12 支柱与球壳连接焊缝的强度校核

$$G_0 + (F_i)_{\max} \text{ 和 } G_T + 0.3(F_i)_{\max} \frac{F_W}{F_{\max}} \text{ 两者中的较大值}$$

$$G_0 + (F_i)_{\max} = 5.327 \times 10^6 + 4.426 \times 10^4 = 5.770 \times 10^6 \text{ N}$$

$$G_T + 0.3(F_i)_{\max} \frac{F_W}{F_{\max}} = 1.096 \times 10^6 + 0.3 \times 4.426 \times 10^4 \times$$

$$\frac{4.444 \times 10^4}{5.442 \times 10^5} = 1.097 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\text{故 } W = 1.097 \times 10^6 \text{ N}$$

支柱与球壳连接焊缝焊角尺寸: $S = 9 \text{mm}$

支柱与球壳连接焊缝的剪切应力:

$$\tau_w = \frac{W}{1.41L_w S} = \frac{1.097 \times 10^6}{1.41 \times 2037 \times 9} \approx 42.4 \text{MPa}$$

支柱或者球壳材料屈服点的较小值: $\sigma_s = 205 \text{MPa}$

焊缝的许用剪切应力:

$$[\tau]_w = 0.4\sigma_s \phi_a = 0.4 \times 205 \times 0.6 = 49 \text{MPa}$$

应力校核:

$$\tau_w = 42.4 \text{MPa} < [\tau]_w \text{ 则通过}$$

3.3 强度计算模块开发

球罐的强度计算是球罐设计的核心,传统的计算方法是以弹性力学为基础,以旋转薄壳的无力矩理论为基本计算式,进行一系列简化后的计算^[39]。传统计算方法只是大略的计算,要对球罐各部分进行精确的计算是非常复杂的,国内能进行按分析设计、制造、检验球罐的厂家不多。按分析设计,采用 ansys 软件进行计算是很好的选择,本系统既采用了传统的计算方法,又能根据传统算法确定的尺寸进入 ansys 软件建模、加载、求解、后处理。

下面是程序总框图

如图 3-6 所示,当我们进入球罐 CAD 系统后,输入设计条件,如果条件参数合理,将进一步进行材料选择,然后按照 GB12337-1998《钢制球形储罐》规定的强度计算方法计算球罐各部分的强度,计算过程中也会要求选择材料和确定一些几何参数,球罐的几何结构尺寸确定后,还可以进入 ANSYS 软件进行有限元分析,最后可以进入 AutoCAD 软件绘图。当然,还可以开发其他功能模块。

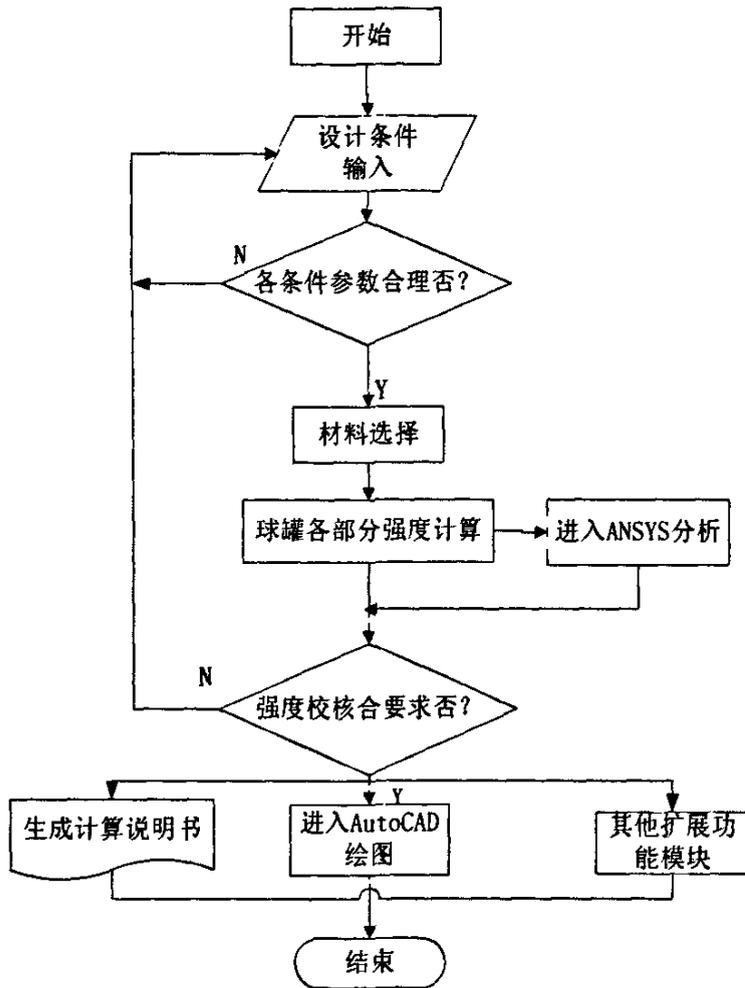


图 3-6 程序总框图

3.3.1 球罐数据库设计

如今，数据库编程技术取得了很大的进步。据统计有 40% 的应用程序需要与数据库进行交互，利用数据库技术编制出来的程序易于维护和管理，特别是一些需要对大量数据进行处理程序，采用数据库技术的优点更加明显^[40]。

数据库(DataBase)是以一定的组织方式存储在计算机中按某种规则相互联系的数据集合。它不仅包括数据本身，而且包括相关数据之间的关系。

在 GB12337-1998 中，很多计算都是依据大量的图表中的数据进行的，如我国主要地区基本雪压值、风压值，场地土的特性周期，各种材料数据，各种

系数表等等，为了使程序可以处理这些数据，必须采用数据库技术。

VB 在 GUI 设计、绘图、制表、运算、通信和多媒体开发方面都具有简单易行、功能强大等优点。同时，VB 在数据库开发方面也具有强大的功能。VB 能够读取和访问 Access、Excel、DbaseX、Foxpro、Btrieve 和 ODBC 等多种数据库，并能利用 VB 自身所带的数据库引擎创建 Access 数据库。

1. 在 VB 中可以访问的数据库有以下三类^[41]：

(1) Jet 数据库

数据库由 Jet 引擎直接生成和操纵，具有灵活快速的特点，VB 使用的 Jet 引擎数据库与 Microsoft Access 相同。

(2) ISAM 数据库

ISAM 数据库（索引顺序访问方法数据库）可以有多种不同的数据库，如：Dbase、FoxPro、Paradox 等，在 VB 中可以生成并操作这些数据库。

(3) ODBC

ODBC（开放式数据库连接），是 Microsoft 公司推出的连接外部数据库的标准。VB 可以访问任何支持 ODBC 标准的数据库，例如：Microsoft SQL Server、Oracle 等。ODBC 提供了能够访问大量数据库的单一接口，使前端客户应用的开发独立于后端服务器。

2. VB 访问数据库的接口

在 VB6.0 中，可以使用的数据库访问接口有 3 种：数据访问对象（Data Access Objects, DAO）、远程数据库对象（Remote Data Objects, RDO）、ActiveX 数据对象（ActiveX Data Objects, ADO）。数据访问接口是一个对象模型，它代表了访问数据的各个方面。在数据访问技术不断发展的过程中，DAO、RDO 和 ADO 代表了该项技术发展的不同阶段。

ADO 扩展了 DAO 和 RDO 所使用的对象模型，包含较少的对象，更多的属性、方法（和参数）及事件。ADO 实际是一种提供访问各种数据类型的连接机制。ADO 设计为一种极简单的格式，通过 OLEDB 的方法与数据库连接。可以使用任何一种 OLEDB 数据源，既适合于 SQL Server、Oracle、Access 等数据库，也适合于其他格式的文件，如 Excel 表格等，是一个便于使用的应用程序层接口。ADO 是一种更加简单、灵活的对象模型，已成为广泛使用的数据库访问接口^[42]。

3.VB 访问数据库方法简介

VB 访问数据库的方法一般可以分为 3 种：数据控件法、使用数据库对象变量进行编程、直接调用 ODBC2.0API。第一种方法操作简便、灵活、易于掌握，是三种方法种编码量最小的，不必了解更多的细节。第二种方法可以控制多种记录集类型、纪录集合对象，可以存取存储过程和查询动作，可以存取数据库集合对象等。第三种方法，可以直接参与结果集的开发、管理及规范化，对结果集游标提供了更多的控制，并且提供了更多的游标类型和执行动作，能够确定 ODBC 驱动程序及 SQL 的一致性级别，可以更好的控制 Windows 的执行调度及资源利用^[43]。

本系统需要的数据库并不是大型数据库，所以我们可以直接采用 VB 自己的 Jet 引擎数据库。下面简略介绍一下这种数据库的生成。

- (1) 在 VB 主菜单中单击“外接程序(A)|可视化数据管理器(V)”，出现可视化数据管理器界面，如图 3-7 所示。

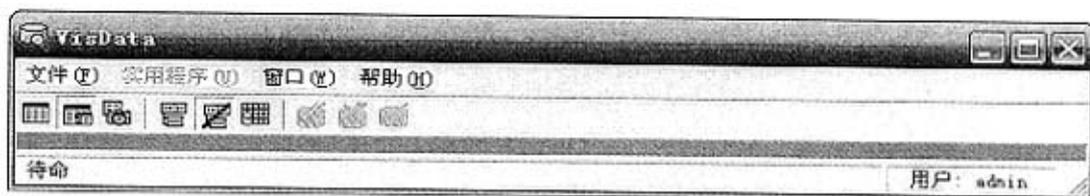


图 3-7 数据管理器

VB 可视化数据管理器是一个功能强大的数据库和数据表开发工具。

- (2) 单击“文件|新建(N)|Microsoft Access(M) | Version 7.0 MDB(7)”菜单项。

VB 数据库的默认类型为 Microsoft Access 数据库类型，Version 7.0 MDB 为最新版的数据库类型，因此选择该类型的数据库。数据库文件的扩展名为 .MDB，在创建数据库时不必输入扩展名，可视化数据管理器将自动为数据库生成扩展名。

- (3) 在单击菜单后将出现文件保存对话框，在对话框中选择磁盘驱动器和文件夹名称，给数据库命名后，将出现数据库窗口，如图 3-8 所示。

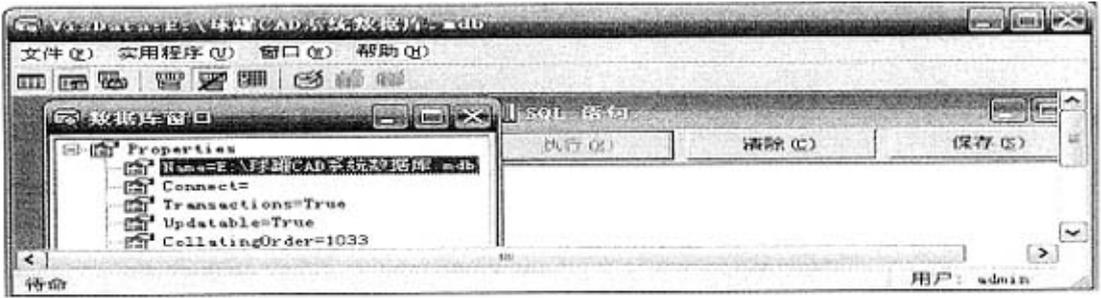


图 3- 8 数据库窗口

(4) 右键单击刚建好的数据库名称，选择新建表。

(5) 单击“新建表 (T)”后，弹出数据表结构设计器，如图 3- 9，该设计器是对一个数据表中的字段名称、类型、大小等的定义，还可以对数据表进行各种操作，如显示每一个字段的结构信息、增加或删除字段、建立索引、对每一字段进行有效性输入规则的定制等，定义好后，单击”生成表 (B)”就可以了。我们采用这种方法来生成本系统所需的所有数据表。

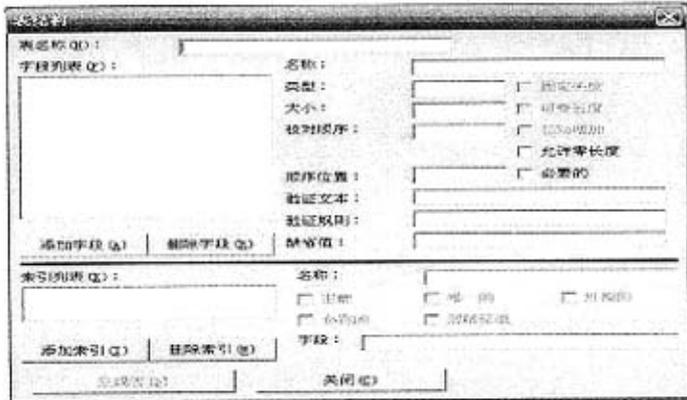


图 3- 9 表结构设计器

由前面的介绍我们知道，VB 与数据库连接时，数据控件法操作简便、灵活、易于掌握，所以本系统就采用数据控件法进行数据库的连接操作。我们用选择地区确定风载荷来说明数据控件法在本系统的使用方法。

采用前述步骤建好“我国主要地区基本风压值表”，添加好数据，就可以与前台 VB 程序连接了。确定风载荷的界面设计如图 3- 10 所示。

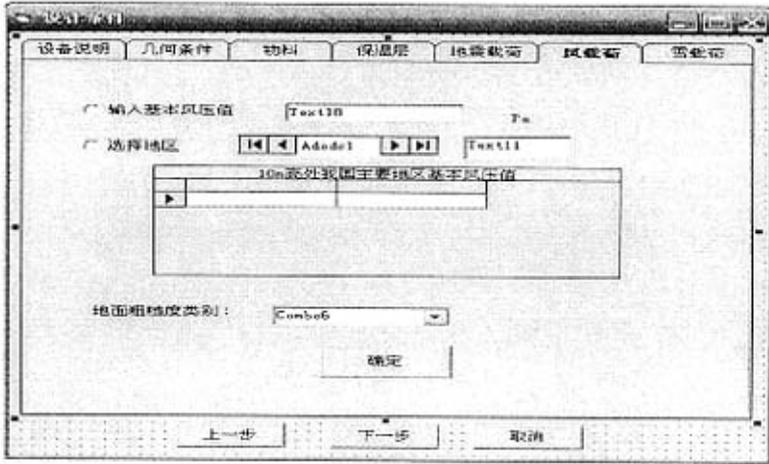


图 3— 10 确定风荷载界面

在图中，我们可以看到有一个 DataGrid 控件，该控件是为了显示我国各主要地区基本风压值，它必须和数据源相结合才会有数据显示，我们可以看到 DataGrid 的属性栏中的 DataSource 与 Adodc1 绑定，即 `DataSource Adodc1`，而 Adodc1 与前面建好的“我国主要地区基本风压值表”绑定了，可以看到 Adodc1 的属性栏中 RecordSource 的值为我们建好的风压值表 `RecordSource 我国主要地区基本风`，这就引入了数据源，当程序运行时，DataGrid 控件中就可以显示我国主要地区的风压值。而通过直接单击 DataGrid 显示的地区来取出风压值，就依赖于控件 Text11 了，我们看到在 Text11 的属性栏中，DataSource 与 Adodc1 绑定，DataField 与风压值表中的风压值绑定，`DataField 风压值 (Pa)`，`DataSource Adodc1` 这样，当单击不同的地区时候，Text11 中就会得到不同的风压值，然后将风压值传给 Text18，这样，我们就通过选择不同的地区而得到了不同的风压值了，当然，Text11 的 visible 要设为 False。后面球壳材料的选择，及其他材料选择，当需要通过单击表格选取时都可以采用这种方法，因为这中方法几乎不用编写代码就可以实现提取不同的数据，是一种简便实用的方法。

3.3.2 系统安全性设计

球罐的传统强度计算方法计算公式很多，要确定的参数也很多，计算过程复杂，采用手工计算容易出错，效率低，我们利用 VB6.0，采用可视化编程技

术，把一些复杂的程序代码封装起来，构成对象，设计过程中在主窗口设计的对象布局就是运行后的界面，所见既所得，非常方便。具体的运行界面见后面运行实例。本球罐 CAD 系统界面友好，只需输入参数，进行一些必要干预，系统将严格按照 GB12337—1998《钢制球形储罐》进行计算、校核，并可自动生成计算说明书。

在系统的运行过程中，为了保证系统的安全，某些操作要具有一定权限的用户才可以使用，如材料表的添加、修改、删除等，系统的登陆也可以进行权限认证。这就要求系统具有权限认证功能，我们采用用户名加密码的认证方式。首先，我们创建一个用户权限表，结构如表 3— 1 所示。

表 3— 1 用户权限表

字段名称	字段类型	字段大小	索引	忽略空值
用户名	TEXT	20		否
密码	SINGLE	4	关键、唯	否

在表中将“密码”字段设计成关键且唯一的字段，是因为每一个用户的密码都不一致。

当我们单击“添加新材料”时，进入权限认证，如果通过权限认证，则弹出添加材料对话框。其过程代码如下：

```
Private Sub Command5_Click()
Dim msg
oldmark = Data3.Recordset.Bookmark
msg = Trim(InputBox("请输入用户密码：", "权限认证"))
msg = "密码 like '" & msg & "'"
Data3.Recordset.FindFirst msg
If Data3.Recordset.NoMatch Then
MsgBox ("对不起，你无权增加新材料")
Else
frmform5.Show
End If
```

End Sub

我们还为系统设置了用户权限管理的功能,它使各种用户具有不同的权限,可以增加、删除、修改用户权限等等操作。

3.3.3 球罐计算模块设计

球罐的计算模块是严格按照 GB12337—1998《钢制球形储罐》计算方法、步骤来计算和校核的。

3.3.4 计算说明书的自动生成

当强度计算完毕后,可能希望生成一个计算说明书,可以直接打印,或输出到其他文字处理软件中。无论采用什么方法来设计打印程序,都是一个很复杂的设计任务,而我们知道,在 VB 中,利用数据库技术,可以直接生

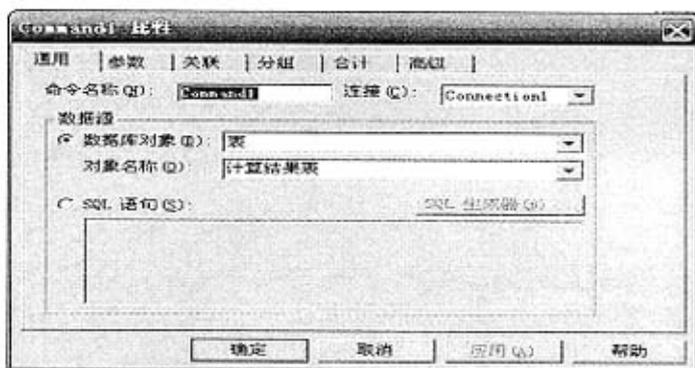


图 3-11 添加 Command1

成报表,报表可以直接打印和输出到其他文字处理软件中,这样,我们就避开了复杂的打印程序设计,而只需设计相对简单一点的报表。

VB 中的报表也是要数据库技术的支持,我们首先要建立一个球罐结果数据库,用来保存前面强度计算过程中产生的结果,然后建立报表,使报表与这个结果数据库绑定,这样,生成的报表就会随着不同参数计算所得结果而产生各自的结果报表。下面介绍一下在 VB 中生成报表的方法。

要引入数据源,我们要在程序中添加数据环境设计器 Data Environment,使其与球罐结果数据库连接,连接后要测试一下看是否连接成功。

测试连接成功后,在数据环境中添加命令 Command1,用来与结果数据库中的结果表相连,如图 3-11 所示。

现在,添加报表设计器 DataReport1,我们可以看到,报表分为了几个区域,分别为:报表标头,页标头,细节,页注脚,报表注脚。我们可以在不同的区

分别为：报表标头，页标头，细节，页注脚，报表注脚。我们可以在不同的区域布置不同的控件，如图 3-7 所示。

为了使报表中的数据根据前面的参数变化而变化，就必须将报表中的某些显示控件与数据库中的相关字段绑定，如 `DataField` 设计压力，从图 3-12 中可以看到“设计压力”标签后的文本框已经和结果数据表中的“设计压力”字段绑定了。这样，运行时就会随不同的设计压力显示不同的压力值。

在报表注脚和页注脚等位置可以单击右键插入一些控件如时间、页码、图像等等，使报表更加完善。

报表还可以直接打印和输入到其他文字处理软件，这部分功能是报表设计器自带的功能，不需要我们设计。



图 3-12 球罐计算说明书设计界面

在强度计算模块中，可以看到我们采用了各种技术使传统强度计算模块界面友好，使用方便、简单，并且功能比较完善。

3.3.5 强度计算模块运行实例

我们按前面的框图，大概介绍一下系统运行流程。进入系统后，如图 3-13 所示，单击 Enter 按钮，弹出确定设计条件界面，如图 3-14 所示，填写设备说明，如果球罐结构采用国标，输入设计条件如图 3-14a，按规范分为橘瓣式与混合式，选定容积后，球壳分带范围就确定了，选定分带数后，支柱根数的

选择范围也就确定了。如果是自定义球罐结构，则在图 3-14a 中输入自定义结构的有关参数，将弹出图 3-14b，确定自定义结构所需的其他参数。如果在国标和自定义结构中切换，必须单击界面上的  按钮来切换。

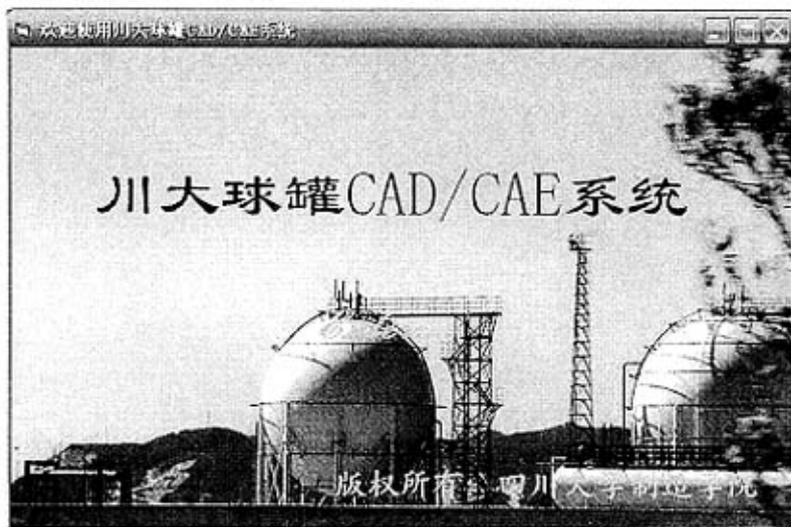


图 3-13 系统启动界面

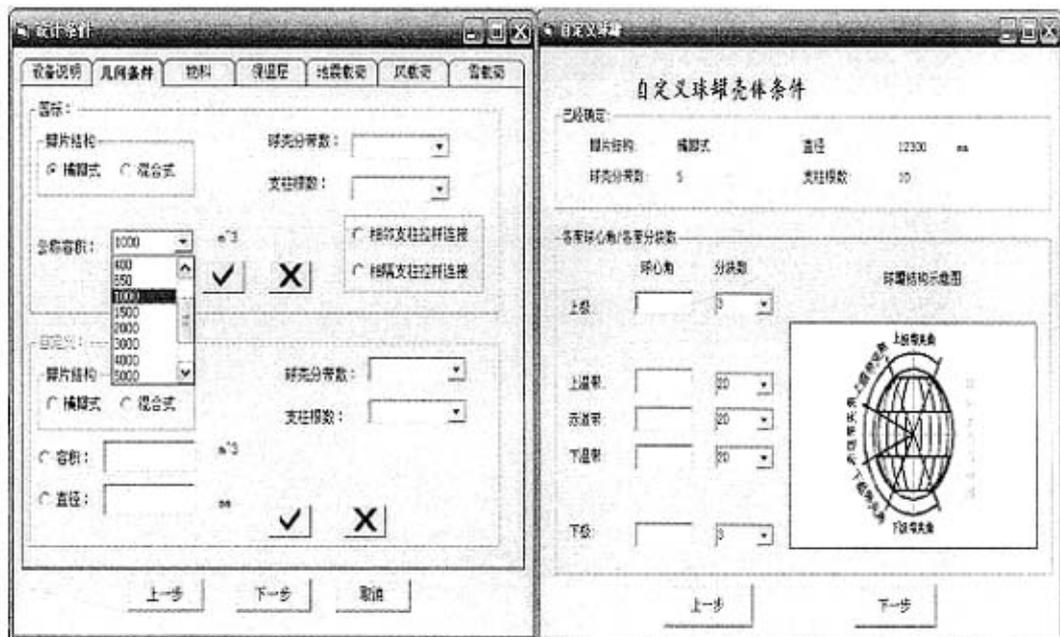


图 3-14a 几何设计条件（国标）

图 3-14b 几何设计条件（自定义）

确定了几何条件后，依次确定其他条件。如物料和保温层的输入界面如图

3—15, 图 3—16 所示。

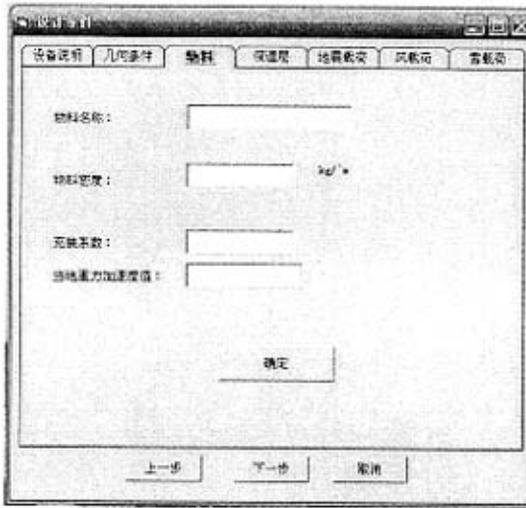


图 3—15 确定物料

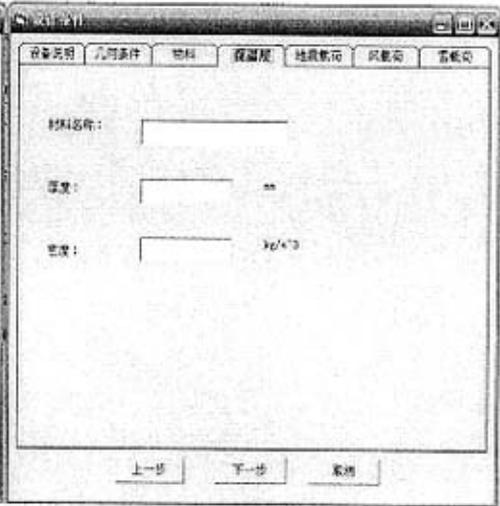


图 3—16 确定保温层

在地震影响区建造球罐要考虑地震载荷,地震的计算非常复杂,按 GB12337—1998 计算,输入界面如图 3—17 所示。

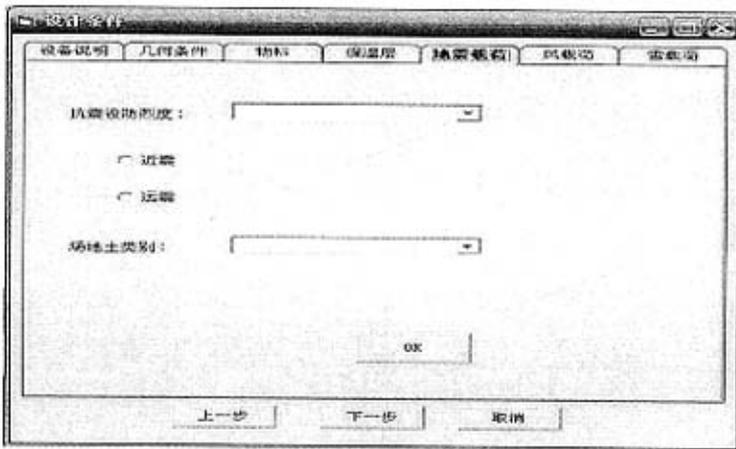


图 3—17 确定地震载荷

风载荷的计算也非常复杂,按 GB12337—1998 简化计算,如图 3—18,可以手动输入基本风压值或者选择球罐建造地区来确定风压值,单击地区后,该地区的风压值自动出现在输入风压值后的文本框中。雪载荷是静载荷,雪压值也分手动输入和选则地区确定,如图 3—19 所示。



图 3- 18 确定风载荷



图 3- 19 确定雪载荷

球壳是球罐中最关键的部分，其选材和强度设计是球罐强度设计的重中之重，其材料选择界面如图 3- 20，可以单击材料表直接选择，也可以输入材料名称从表中查询选择，得到材料在设计温度下的许用应力。



图 3- 20 确定球壳材料

随着技术的发展，有很多新材料出现，也可以向球壳材料表中增加新材料，单击“增加新材料”按钮，则弹出权限认证对话框，如图 3- 21，有增加材料权限的用户才可以增加新材料，输入用户密码后，弹出增加新材料对话框，如图 3- 22，就可以进行添加材料，删除材料，修改材料的操作。



图 3-21 权限认证



图 3-22 修改或增加新材料

如果输入的密码不对, 将会弹出提示对话框。如图 3-18 所示。

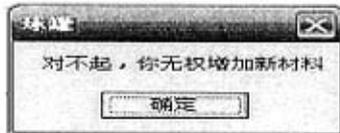


图 3-23 提示对话框

单击强度计算按钮后弹出如图 3-24 所示界面, 光标停留在文本框中, 等待输入根据前面的计算的各球带厚度和腐蚀裕量、厚度附加量所确定的球壳名义厚度。



图 3-24 球壳计算

然后按照 GB12337-1998 中计算强度的顺序, 依次计算各部分的强度。下图 3-25, 是球罐质量计算的界面。



图 3-25 球罐质量计算

图 3-26 是支柱计算的界面，其他就不一一列举了。所有的计算完毕后，既按传统设计方法的强度计算也就完成了，球罐各部分的几何尺寸，材料也都确定下来了，这时候，可以单击下面“生成计算说明书”生成计算说明书，

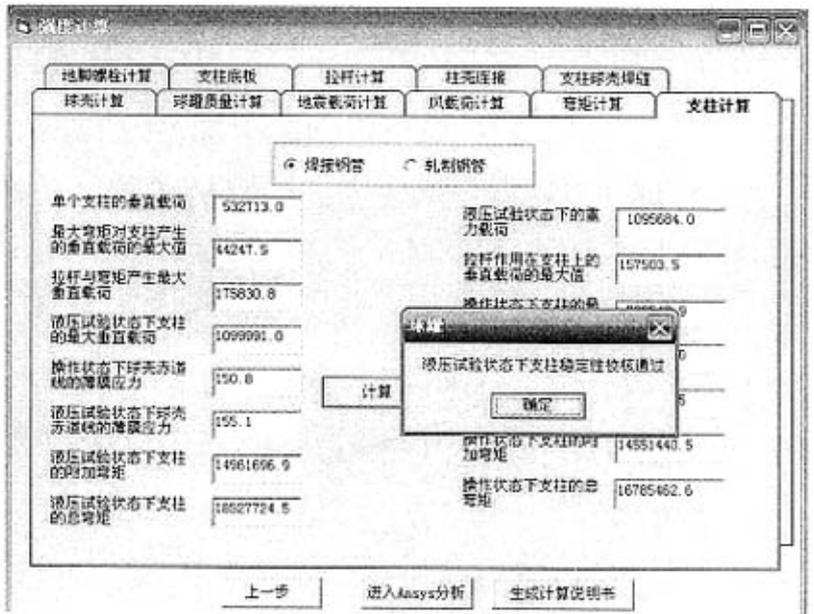


图 3-26 支柱计算

如图 3-27，也可以单击“进入 ansys 分析”按钮，将自动启动 ansys 软件，根据前面的计算结果，进行有限元分析。

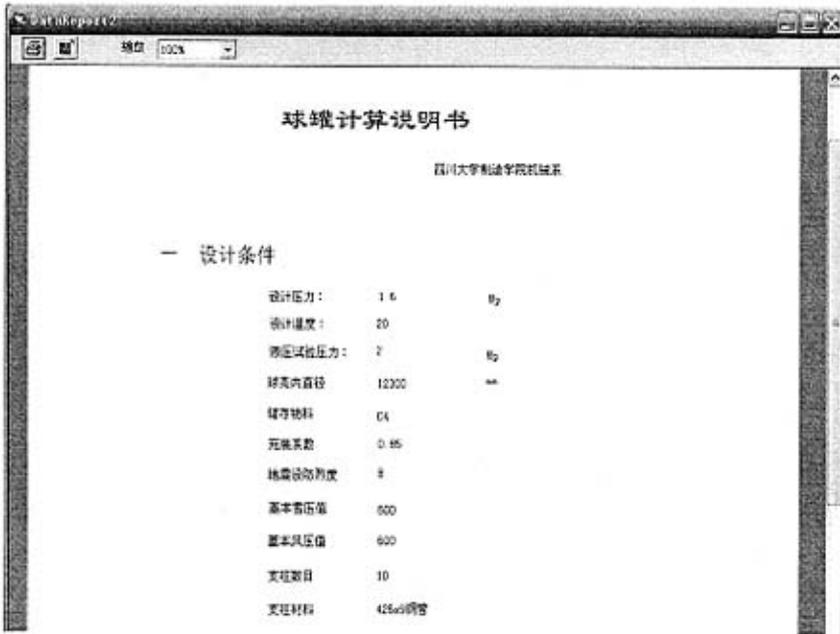


图 3-27 计算说明书

3.4 有限元分析模块开发

3.4.1 有限元方法概述

有限元方法是一种广泛应用于解决应力分析、传热学、电磁学和流体力学等工程问题的数值方法。随着科学技术的飞速发展,进行机械设计的方法也越来越先进,特别是近年来由于计算机技术的突飞猛进,使我们可以借助计算机实现机械的有限元设计,使设计结果更加精确。

有限元的基本思想,首先是对求解的弹性区域进行离散化,即把具有无限多个自由度的连续体,化为有限多个自由度的结构物,其次是选择一个表示单元内任意点的位移随位置变化的函数式,并按插值理论,将单元内任一点的位移通过一定的函数关系用节点位移来表示。这种假设的试函数称为位移函数,在一般情况下,它应满足单元间位移的连续性。随后从分析单个的单元入手,用变分原理来建立单元方程。接着再把所有单元集成起来,并与节点上的外载荷相联系,得到一组以节点位移为未知量的多元线性代数方程,引入位移边界条件后即可求解。解出节点位移,再根据弹性力学几何方程和物理方程算出各

单元的应变和应力^[44]。

随着电子计算机的发展,有限元法迅速发展为在计算数学、计算力学、和计算工程科学领域最有效的现代计算方法。经过 40 多年的发展,已经使各种不同的有限元方法形态相当丰富,理论基础相当完善,并且开发了一批通用和专用有限元软件,ANSYS 就是其中的佼佼者^[45]。国外压力容器研究者利用 ANSYS 软件进行有限元分析,取得了卓有成效的工作^[47-48]。

3.4.2 球罐有限元分析模块开发

● 分析步骤

我们要在 ANSYS 中进行球罐的应力分析,分为以下 4 个步骤:

1. 建立球罐模型和划分网格。
2. 给球罐添加载荷(载荷组合),施加约束。
3. 在 ANSYS 中对球罐进行求解。
4. 对求解结果进行后处理,分析结果。

3.4.2.1 球罐模型的建立和网格的划分

● 建模方法

ANSYS 提供了实体建模和直接生成模型这两种生成模型的方法。实体建模需要对单元大小及形状进行控制,然后 ANSYS 程序自动生成所有的节点和单元。直接建模,则是在定义 ANSYS 实体模型之前,必须确定每个节点的位置,以及每个单元的大小、形状和连接。

两种建模方法各有优缺点^[46]如下:

1. 实体建模的优点

- (1) 利用实体建模,相对处理的数据较少。
 - (2) 支持使用面和体及布尔运算。
 - (3) 能进行自适应网格划分,便于几何改进和单元类型的变化。
- 对于庞大或复杂的模型,特别是三维模型,采用实体建模更合适。

2. 实体建模的缺点

- (1) 需要大量的计算时间。
- (2) 与直接建模相比,有时候建模过程可能更加繁琐,需要更大的存储

(1) 需要大量的计算时间。

(2) 与直接建模相比,有时建模过程可能更加繁琐,需要更大的存储空间。

在某些条件下,实体建模可能会出现网格划分失败。

3. 直接建模的优点

(1) 对简单模型或小模型而言,建模速度更快。

(2) 使用户对模型几何形状、节点和单元的数目进行有效控制。

4. 直接建模的缺点

(1) 在建模的过程种需要大量时间思考模型的细节。

(2) 分析过程中不能使用网格自适应划分技术。

(3) 生成的模型在优化方面缺乏通用性。

(4) 修改网格参数比较困难。

(5) 直接建模的过程很乏味,要求用户花大量的精力在网格的细节,另外由于建模的沉闷可能出现错误。

总的说来,直接建模要逐个建立点、线、面、体,这对于复杂模型是相当乏味的,并容易出错。实体建模一般比直接建模简便,效率更高,是一般建模的首选方法。

球罐的建模采用两种方法都可以,本系统采用直接建模方法,因为本系统的球罐模型是球面,而不是空心的球体,ANSYS 中不能直接生成球面。我们采用先建立关键点,再生成线,扫描生成球面,支柱也是采用类似方法。

● 单元选择

ANSYS 单元库中有接近 200 种不同的单元类型,以适应各种不同的分析情况,我们进行球罐建模之前应定义球壳、支柱、拉杆等的单元类型。这样,我们就决定了单元的:

1. 自由度(也代表了分析的领域——结构、热、电场等)

2. 单元维数(二维空间或三维空间)

选取单元时,尽量做到能选择点而不选择线,能选择线而不选择平面,能选择平面而不选择壳,能选择壳而不选择三维实体,选择维数最低的单元去获得预期的结果^[44]。

球罐结构都是薄壳结构，我们选壳单元而不选三维实体单元，球壳采用 8 节点的 SHELL93 单元，其单元模型如下：

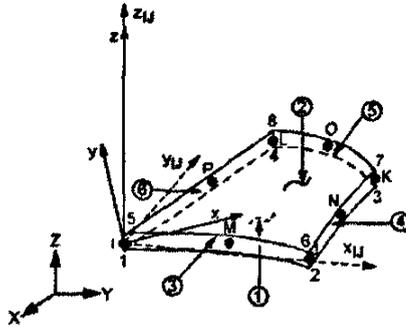


图 3-28 SHELL93 单元图

SHELL93 单元有 8 个节点，6 个自由度，因为有中间节点，故适用于曲面壳建模。

支柱和底板也属薄壳结构，我们也选用 SHELL93，当然可以选用其他壳单元，但应特别注意不同单元在连接处的协调情况，如果不协调，求解时会在不同的单元之间传递不适当的力或位移。

● 利用模型的对称性

在 ANSYS 计算模型中，除可以建立与真实模型一样的几何模型外，还可以根据模型的几何对称特征，建立简化对称模型，从而减少建模工作量，有利于控制计算规模，达到节约计算时间，缩短分析周期的目的。

1. 平面对称模型

当分析模型的几何结构、材料分布和载荷分布同时相对于某一个平面具有对称性时，该模型相对该平面对称，可以建立相对该平面的 1/2 对称模型分析计算；当有更多对称面时，每增加一个对称面，模型的规模就减少一倍，计算效率相对提高。

2. 平面反对称模型

与对称模型类似，当分析模型的几何结构和材料分布相对某平面具有对称性，但是载荷相对该平面具有反对称性，也可以建立相对该平面的 1/2 模型分析求解，在求解时不是在对称平面上的点、线、面上施加对称位移边界条件，

而是施加反对称位移边界条件。与对称模型相比，反对称模型仅仅是载荷反对称，其他与对称模型一样具有对称性特点。

3. 轴对称模型

某些几何体的几何形状。材料分布和载荷分布均绕某一轴线存在对称性，如所有旋转体，它们的旋转横截面代表其对称面，这时，可以只建立旋转横截面来分析计算。

4. 循环对称模型

有些模型结构在圆周方向具有重复性，材料分布和载荷分布也具有循环对称特性时，我们只需建立模型的一个扇区，来分析计算。创建这种模型时，必须在扇区的两个端面上施加合理的边界条件，保证与完整模型的真实变形趋势完全一致。

球罐是一个对称结构，而且其受力也对称，建模时采用哪一种对称结构呢？这要看分析的目的，如果是分析球罐地震载荷，风载荷等，因为最多把球罐简化平面对称的，这时如果简化只能采用平面对称，如果是分析内部的压力，因为支柱和拉杆，根据上面各种对称的特点，只能把球罐简化为循环对称。

● 合理简化分析模型

一些小的细节对有些分析来说并不重要，不必在模型种体现，以免使模型过于复杂。但在有些结构分析中，小的细节如倒角和孔可能存在应力集中，就不能简化，但对模态分析这些细节又不重要，所以细节的取舍主要取决于分析的目的。

有时候，如果仅一点小细节破坏了结构的对称性，那么可以忽略这些细节（或相反把它视为对称的），当然，必须权衡模型简化带来的好处于精度降低的代价，来决定怎么处理细节。

球罐上面有很多附件，还有很多开孔，显然，如果全部考虑所有细节，那我们的分析将无从下手，我们应根据分析的目的，合理的建立球罐模型，如分析整个球壳的受力，可以先略去附件，开孔等的影响，把球罐看为一个循环对称结构，只分析一个基本的扇区，如图 3-29 所示，这样就节约了计算时间，对感兴趣的分析结果影响又很小，结果还可以扩展。基本扇区可以扩展，如图 3-30，扩展为平面对称模型后可进行地震、风载荷的分析。对其他重要的分析，

如开孔补强等，再另外处理。

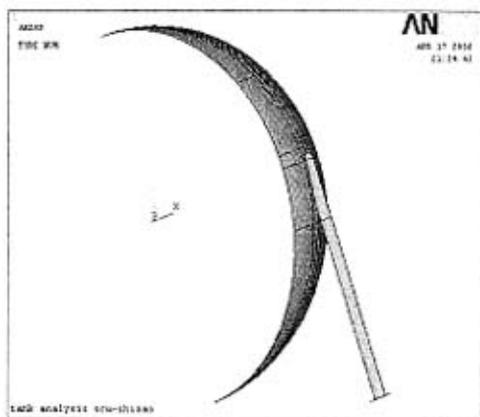


图 3-29 球罐基本扇区图

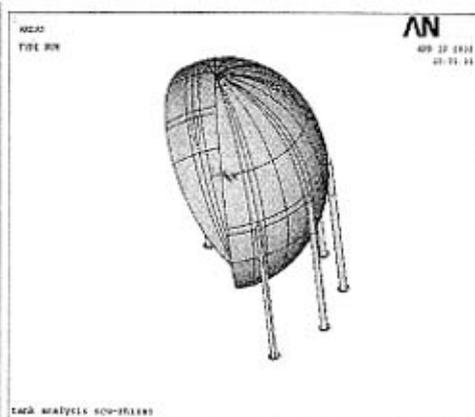


图 3-30 球罐扇区扩展图

● 确定合适的网格密度

怎样划分网格才是合理的，需要凭借一些经验，一般可按如下原则：

1. 评估初步分析结果，合理细化网格密度

与先前独立得出的试验分析或已知分析解对比，对已知解和结果相差太大的地方进行网格细化。

2. 对比分析不同网格密度的分析结果，确定合理的网格密度参数

对一个认为是合理的网格划分进行初始分析，然后对危险区域利用两倍的网格重新划分，比较两者的结果，如果差别很小，就认为网格是足够的，否则应继续细化直到两次获得近似相等的结果为止。

3. 利用子模型合理简化模型网格

如果细化网格测试显示只有模型的一部分需要更细的网格，可对模型进行子模型建模以放大危险区。

网格划分密度很重要，如果太粗糙，那么结果可能包含严重的错误，如果网格过于细致，将花费过多的计算时间，浪费计算机资源，而且模型太大，可能导致计算无法进行。所以我们要认真考虑网格密度问题。

球罐的柱壳连接处受力复杂，我们应将其网格细化。

3.4.2.2 球罐有限元分析模块的界面设计

ANSYS软件中当需要对不同参数、不同载荷的各种方案进行分析计算的时候,都要经过建立模型,定义载荷,求解和解释结果,不同的方案都重复上述步骤,这是相当繁杂、费时的。

在本系统中,我们要设计出球罐专用分析系统的交互界面,使用户的输入简单方便且不易出错,我们可以通过多种方法定制各种 ANSYS 图形用户界面(GUI)或者调用 ANSYS 已有的图形用户界面,实现用户与程序交互对话机制。主要包括:利用 UIDL (User Interface Design Language) 设计自己的菜单系统;参数输入对话框的设计;调用 ANSYS 已有的对话框;宏中实现拾取操作;定制工具条按钮与缩写等。

按照上述技术我们能够做出球罐专用分析系统的交互界面,但是本系统界面复杂,众多,还希望在界面中插入图片,并且还要进行一些很复杂的操作,采用 ANSYS 所提供的方法来实现就相对较复杂。

我们希望能用另外一种语言来做球罐有限元分析的界面,由于 VB 在做界面方面的强大优势,当然是我们的第一选择,并且由于在 ANSYS 环境中可以驱动其他应用程序,如 VB、VC++等编程语言创建的*.exe 文件。可以用 VB 编写好前处理界面,生成 exe 文件,让 ANSYS 驱动,从而就解决了 ANSYS 本身的界面技术所不能解决的问题。具体的交互界面见后面的运行实例。

3.4.2.3 球罐有限元分析模块运行实例

当我们按传统的强度计算方法计算完毕后,球罐各部分的几何尺寸和材料都已经确定好了,由于传统的强度计算只是一个大略的计算,一些关键受力部位由于按分析设计计算太复杂,反而没有计算,而有限元方法相对于工程来说是一种精确计算。有必要把前面计算结果导入到 ansys 软件中进行有限元分析计算。

在图 3-26 中,单击 进入Ansys分析,程序将自动启动 ansys 软件,这时,我们发现软件的工具条中多了一个按钮 TANK,如图 3-31 所示。

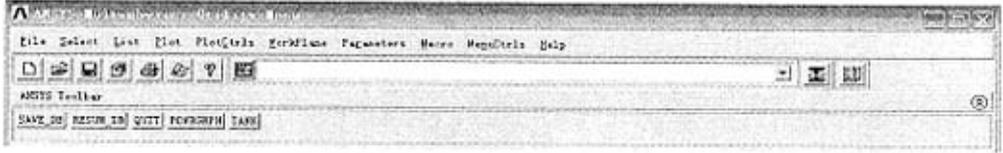


图 3-31 球罐分析专用按钮

TANK 按钮就是我们进行球罐有限元分析的专用模块按钮,单击 TANK 按钮,将弹出图 3-32,可以根据前面的计算结果进行分析,也可以重新输入设计条件,计算必要的参数,选择好材料,然后让 ansys 建模,划分网格,分析计算,后处理。

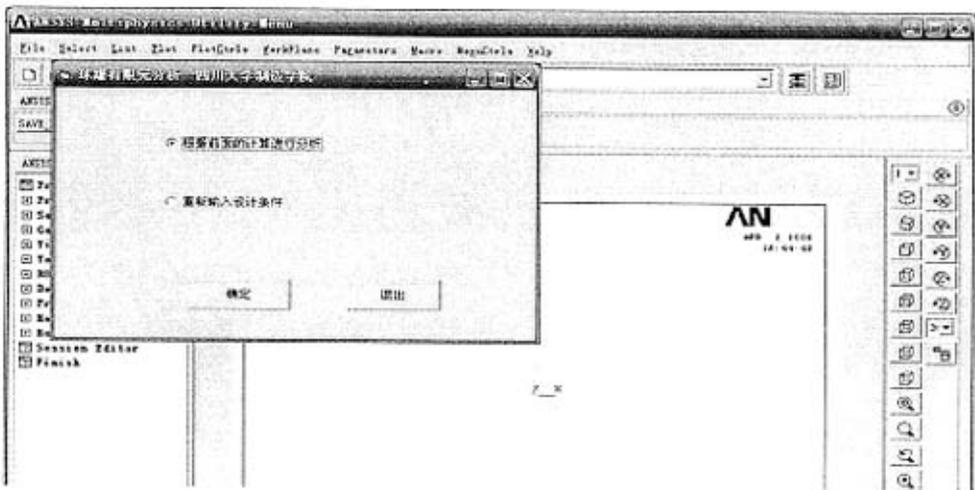


图 3-32 球罐分析启动界面

当选择“按前面的计算进行分析”,单击确定按钮,将弹出确定球罐尺寸的对话框,如图 3-33,前面计算出来的球罐各部分的尺寸显示在文本框中,这些文本是改动不了的,如果单击“新分析”按钮,就可以输入其他已知的球罐结构数据,从而进行一个新球罐的有限元分析。

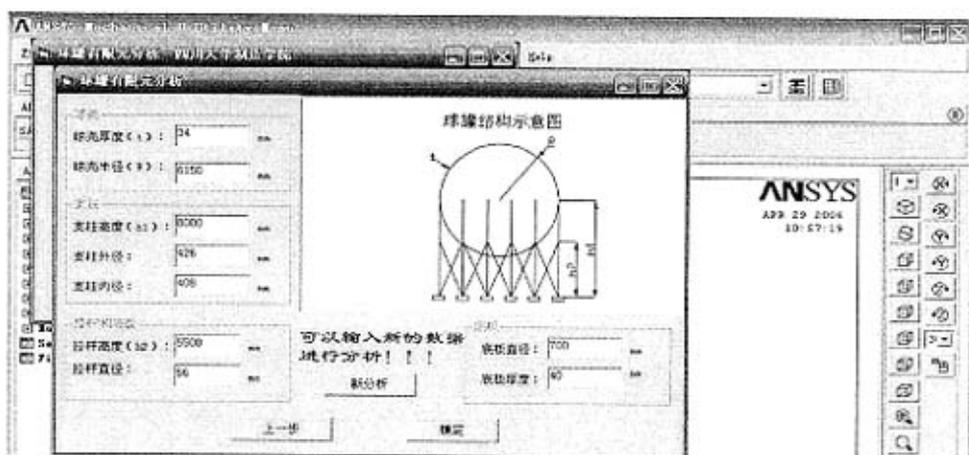


图 3-33 几何尺寸确定

单击图 3-33 的确定按钮，将会弹出载荷组合工况对话框，如图 3-34 所示。

在 JB4732 标准中根据应力产生的原因及作用性质或对容器强度的影响给予了分类，对不同性质的应力强度分别采用极限分析、安定性或疲劳分析的观点加以限制，但在具体评定这些应力时为了处理问题方便，将各种应力折算成弹性应力状态来处理（将应变完全看作弹性应变），因此应力实质是虚拟的，实际采用的是应变控制。这样的处理方法为工程应用提供了方便。

由于工程分析中采用弹性分析来处理具体问题，因此在球罐应力分析中各种载荷引起的应力就可以分别计算，进而采用线性叠加的方法来计算各种载荷组合工况下的应力。通常情况下，在球罐分析中应分别计算以下各种载荷引起的应力：（1）自重载荷；（2）内压载荷；（3）风载荷；（4）地震载荷；（5）压力试验载荷。必要情况下尚应计算雪载荷。

我们采用了如图所示的载荷组合，当然还可以采用自定义组合。单击确定后，对话框消失，程序的控制交给 ansys，ansys 根据前面的几何参数建模，根据选择的材料定义模型的材料属性，然后自动划分网格，根据载荷组合施加载荷，求解计算，后处理等。

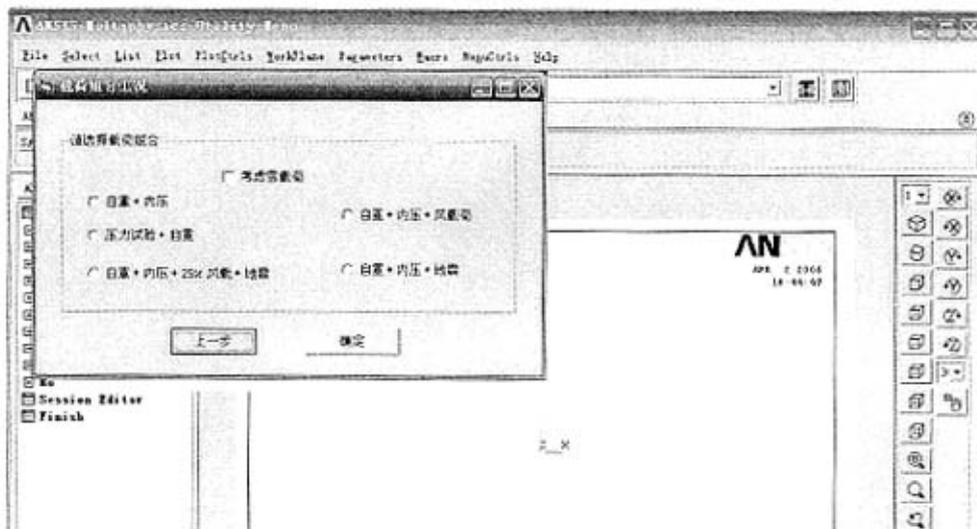


图 3-34 荷载组合

当然，我们有时候可能希望重新输入设计条件，进行有限元分析计算，单击图 3-32 中的“重新输入设计条件”按钮，单击确定，将弹出与前面按传统强度计算类似的对话框，如图 3-35，在其中输入必要的参数，单击下一步，与前面类似，弹出球壳材料选择对话框，同样，在该对话框中可以进行材料的更新操作等，再单击下一步，弹出几何计算结果对话框，相对于前面的传统的强度计算对应的对话框，现在的计算减少了，只需计算一些必要的参数就可以了，单击确定，会弹出确认参数对话框图 3-33，单击下一步，弹出荷载组合对话框，后面的过程就与单击“按前面的计算进行分析”按钮后的分析过程相同。



图 3-35 确定几何尺寸



图 3-36 球壳材料维护

下面图 3-37 和图 3-38 是选自重加内压后的计算结果应力云图。

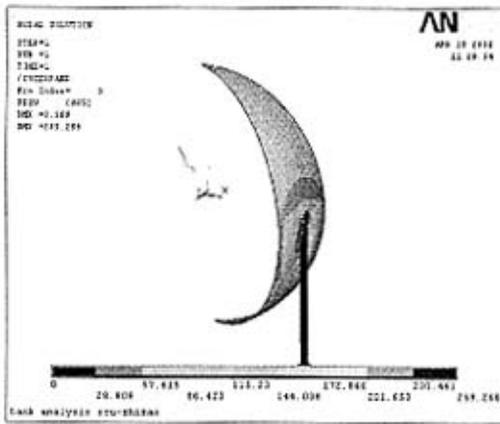


图 3-37 基本扇区应力云图

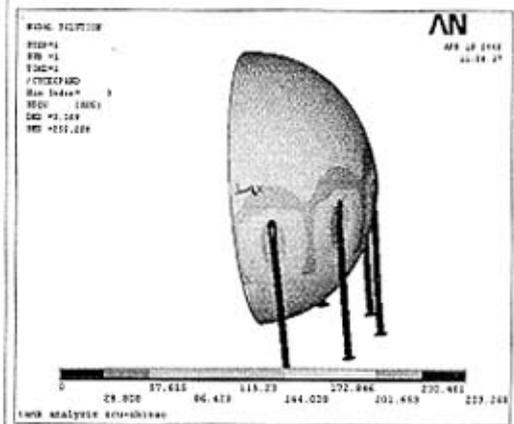


图 3-38 扩展扇区应力云图

我们从图 3-37 的应力云图中可以看到，球罐的柱壳连接处的应力为 250 多 Mp ，已经超过了球壳的许用应力，这主要是我们建立的球罐模型中，柱壳连接处形成了尖角，引起了很大的应力集中，从而产生了过高的应力，而实际的球罐柱壳连接处并不是我们建立的模型那样形成一个很尖的尖角，故实际中并没有产生这么高的应力。

3.5 本章小结

本章通过一个实例详细介绍了球罐各部分强度的设计计算方法，详细介绍了球罐 CAD 系统的传统强度设计计算模块，在计算模块中，可以对建立的工程数据库进行维护。在有限元分析模块中，对按照传统强度计算确定的球罐，进行建模、分网、加载和后处理。从后处理结果中，我们可以看到球罐各部分的应力分布，直观地看到最大应力点。通过有限元分析，对传统计算进行了验证，得出最大应分布点，我们把后处理的结果作为对球罐结构尺寸修改、优化的依据。

4 球壳瓣片设计模块开发

4.1 球壳瓣片的尺寸计算

球壳瓣片一般分为橘瓣式、足球瓣片式和混和式，我国的球罐大多采用橘瓣式和混和式。至今，国家规范中并没有明确的说明采用什么方法来计算瓣片尺寸，有很多研究者提出了一些混合瓣片的算法^[44~54]。有些方法稍嫌晦涩，有些方法涉及的数学理论较高，本系统采用研究者提出的混合式球罐瓣片尺寸的立体算法，这种方法原理简单，计算也不复杂。橘瓣式算法按有关文献^[20]计算，具体算法这里从略。

4.2 球壳瓣片绘制模块设计

球罐设计中的图形处理主要包括瓣片结构图，球罐安装图等，需要说明的是，由于时间关系，本系统暂时只开发了瓣片结构图，因为整个球罐系统中，瓣片结构是处于核心地位。下面简略介绍一下本系统的绘图模块。

如前面第二章所述，AutoCAD 的开发工具有很多，根据本系统的特点，我们可以采用 VBA 和 VB 直接开发两种方法，虽然 VBA 有很多优点，但是由于要在 AutoCAD 的环境中来开发，并且启动 CAD 后要手工加载，而用 VB 直接开发，将 CAD 当成 VB 程序中的一个图形窗口，对其进行打开、绘图、编辑、打印、关闭等操作，我们只需单击 VB 程序中的控件，就可以启动 AutoCAD，自动绘出球壳瓣片图，非常方便。所以绘图模块采用 VB 直接开发 AutoCAD。

4.2.1 绘图模块总体结构设计

当强度计算校核合格后，可启动 AutoCAD 进入本球罐 CAD 系统的绘图模块，本系统开发了瓣片结构尺寸绘制模块，还可以增添更多的模块，如三维图绘制，标准件库等等，系统绘图程序总体框图如下：

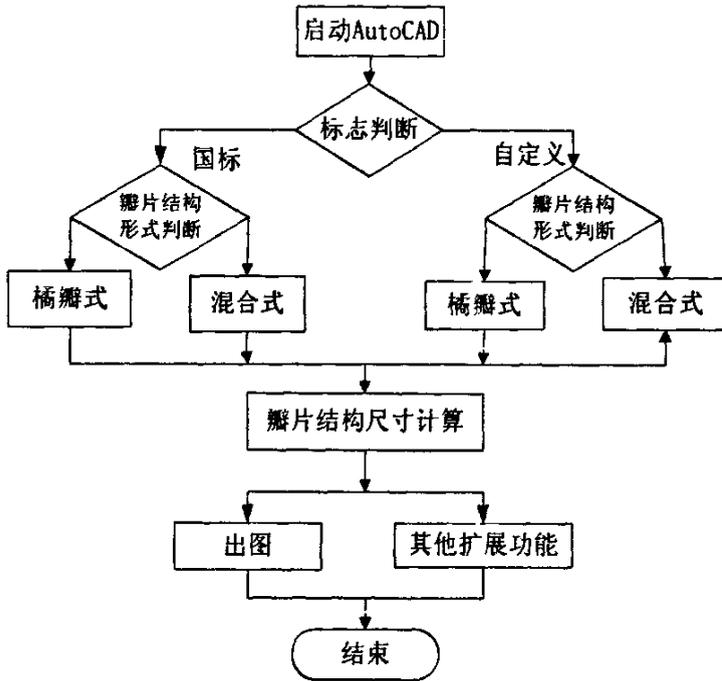


图 4-1 绘图模块框图

启动 AutoCAD 后，根据前面的标志判断出瓣片结构形式，然后进入瓣片结构尺寸计算模块，系统根据结果数据库中提取瓣片尺寸计算所需的参数，计算结构尺寸，绘制结构图。

4.2.2 系统的参数化设计

参数化设计是指先用一组参数通过设计要求来定义几何图形(体素)尺寸数值并约定尺寸关系，然后提供给设计者进行几何造型使用。对产品进行参数化设计时，可以将已知条件和随着设计过程而变化的基本参数用相应的变量代替，当达到设计要求时，根据这些已知条件和基本参数由计算机自动查询图形数据库，再由专门的绘图生成软件自动地设计出图形来并输出到屏幕上。当设计条件发生变化时，图形尺寸便会作相应的变化。其实质就是将图形信息记录在程序中，用一组变量或数组记录图形的几何参数(如点的坐标)，用函数记录几何参数与结构参数(如图形的长、宽等)之间的联系，然后再用一系列调用语句来描述图形的拓朴关系^[57~59]。

本系统的球壳瓣片绘制模块采用参数化设计，球壳瓣片的结构尺寸是根据

我们确定的结构形式(橘瓣式或混合式),公称容积,球壳分带数等等来确定的,我们把这些基本参数用相应的变量代替,当强度模块计算后达到设计要求并启动 AutoCAD 绘图时,系统根据已知条件和基本参数查询相应的图形数据库,再由绘图模块绘出球壳瓣片,标注模块标注尺寸等等。

4.2.3 绘图模块的数据库设计

在球罐的设计计算过程中需要用到大量的数表、线图,详见 GB12337—1998,故需要建立工程数据库。

根据 GB12337—1998 相关数表,建立好球壳瓣片结构尺寸数据库,如图 4-2 所示。绘制符合国标的球壳瓣片结构尺寸时,我们就可以根据已知条件和基本参数,直接查询瓣片结构尺寸数据库,得到相关的数据,再调用参数化绘图模块,绘制瓣片结构图。

公称容积 (m³)	球壳内直径 (mm)	几何面积 (m²)	支柱高度 (mm)	球壳分带数	支柱根数	上极带球心角 (°)	上带带分 (°)	上带带球心角 (°)	上带带分 (°)	赤道带球心角 (°)	赤道带分 (°)	下带带球心角 (°)	下带带分 (°)
50	4500	51	4000	3	4	90	3			90	00		90
120	5100	119	4000	4	5	60	3	55	10	65	10		60
200	5700	187	5200	4	5	60	3	55	12	65	12		60
400	6900	439	5200	4	5	60	3	55	12	65	12		60
400	6900	439	5200	4	8	60	3	55	15	65	15		60
400	6900	435	5200	5	8	45	3	45	16	45	16	45	45

图 4-2 球壳瓣片结构尺寸数据表(橘瓣式)

球壳瓣片结构尺寸数据库的建立方法与前面其他数据库的建立方法一样,都是利用 VB 自带的数据库,由于时间关系,本系统只是建立了球壳瓣片结构尺寸数据库,还应该在绘图模块建立其他数据库,如球罐所需标准件数据库等,在绘制装配图时就可以方便快捷地插入标准件。

4.2.4 VB 与 AutoCAD 的接口设计

用 Vb 进行 AutoCAD 二次开发,首先要将 VB 与 AutoCAD 连接起来,需要以下两个步骤:

- (1) 在编写 VB 代码前,在 VB 编程环境中引 AutoCAD 对象库。
- (2) 编写 VB 程序代码,创建 AutoCAD 对象,启动运行 AutoCAD。

VB 与 AutoCAD 连接后,就可以利用该 AutoCAD 对象及其下级对象的属性和方法等,完成 VB 语言在 AutoCAD 环境中的图形绘制和编辑操作。具体步

骤如下:

(1) 引用 AutoCAD 对象库: 在 VB 编程环境中选【工程】/【引用】命令, 打开【引用】对话框, 选中 AutoCAD Type Library 复选框, 如图 4-3 所示。

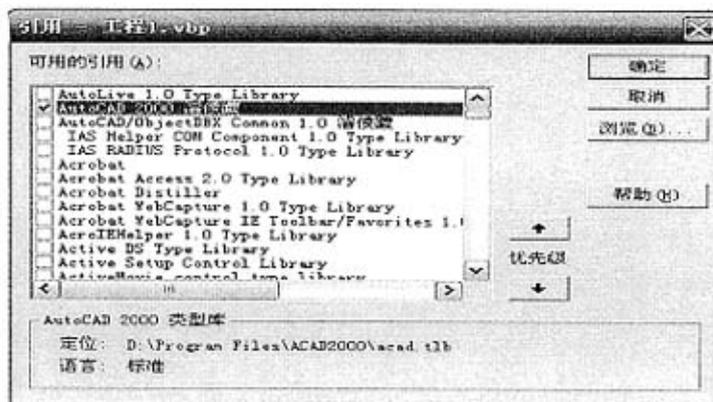


图 4-3 引用 AutoCAD 类型库

(2) 创建 AutoCAD 对象, 启动运行 AutoCAD: 创建 AutoCAD 对象, 启动运行 AutoCAD 的方法可以采用多种方式。

在本系统中只需在一个窗体创建 AutoCAD 对象, 我们只需输入以下代码就可以启动 CAD 了。

```

Dim AcadApp As AcadApplication
Private Sub Command1_Click()
On Error Resume Next
Set AcadApp = GetObject("AutoCAD.Application")
If Err Then
    Err.Clear
    Set AcadApp = CreateObject("AutoCAD.Application")
    If Err Then
        MsgBox ("不能运行 AutoCAD2000,请检查是否安装了 AutoCAD2000")
    Exit Sub
    End If
End If
AcadApp.Visible = True
End Sub
    
```

我们启动 AutoCAD 后, CAD 根据 VB 程序自动绘制球壳瓣片图。

4.2.5 系统绘图工具函数的开发

绘图的时候,如果有很多自己开发工具函数,那么绘图就很方便。本系统绘制的球壳瓣片结构图,主要是一些弧线,为了绘图的方便,也开发了一些工具函数,下面举几个例子。

1. 绘图函数开发

三点(起点、第二点、终点)法创建圆弧函数 AddArc3Pt,首先计算圆弧的圆心和半径,然后根据圆心、起点、和终点,创建圆弧对象,实现代码如下:

```
Public Function AddArc3Pt(ByVal ptSt As Variant, ByVal ptSc As Variant, ByVal ptEn As Variant) As AcadArc
Dim objArc As AcadArc
Dim ptCen As Variant
Dim radius As Double
ptCen = GetCenof3Pt(ptSt, ptSc, ptEn, radius)
Set objArc = AddArcCSEP(ptCen, ptSt, ptEn)
objArc.Update
Set AddArc3Pt = objArc
End Function
```

GetCenof3Pt 是也是开发的工具函数,能够根据 3 点计算出圆心和半径,实现代码如下:

```
Public Function GetCenof3Pt(pt1 As Variant, pt2 As Variant, pt3 As Variant, _
ByRef radius As Double) As Variant
Dim xysm, xyse, xy As Double
Dim ptCen(2) As Double
xy = pt1(0) ^ 2 + pt1(1) ^ 2
xyse = xy - pt3(0) ^ 2 - pt3(1) ^ 2
xysm = xy - pt2(0) ^ 2 - pt2(1) ^ 2
xy = (pt1(0) - pt2(0)) * (pt1(1) - pt3(1)) - (pt1(0) - pt3(0)) * (pt1(1) - pt2(1))
```

```

If Abs(xy) < 0.000001 Then
MsgBox "所用参数无法创建圆形"
Exit Function
End If

ptCen(0) = (xysm * (pt1(1) - pt3(1)) - xyse * (pt1(1) - pt2(1))) / (2 * xy)
ptCen(1) = (xyse * (pt1(0) - pt2(0)) - xysm * (pt1(0) - pt3(0))) / (2 * xy)
ptCen(2) = 0

radius = Sqr((pt1(0) - ptCen(0)) * (pt1(0) - ptCen(0)) + (pt1(1) - ptCen(1)) * (pt1(1) - ptCen(1)))

If radius < 0.000001 Then
MsgBox "半径过小"
Exit Function
End If

GetCenof3Pt = ptCen

End Function

```

三点法创建圆弧函数中的 AddArcCSEP 函数是已知圆心、起点、和终点创建圆弧函数，代码从略。当然，为了实现方便的绘图，还开发了一些其他函数，这里从略。

2. 标注函数开发

球壳瓣片的某些尺寸标准方式按普通的标注方法不能完成，必须开发自己的标注函数，下列就是一个尺寸界线倾斜的标注函数。

```

Public Function AddDimAlignedRot(ByVal pt1 As Variant, ByVal pt2 As Variant, l As Double, angle As Double) As AcadDimAligned

Dim pt3(0 To 2) As Double
Dim pt4(0 To 2) As Double
Dim pt5(0 To 2) As Double
Dim pt6(0 To 2) As Double
Dim location(0 To 2) As Double
Dim line1 As AcadLine

```

```
Dim line2 As AcadLine
```

```
pt3(0) = pt1(0) + l / Tan(angle): pt3(1) = pt1(1) + l: pt3(2) = pt1(2)
```

```
pt4(0) = pt2(0) + l / Tan(angle): pt4(1) = pt3(1): pt4(2) = pt2(2)
```

```
pt5(0) = pt3(0) + 200 / Tan(angle): pt5(1) = pt3(1) + 200: pt5(2) = pt3(2)
```

```
pt6(0) = pt4(0) + 200 / Tan(angle): pt6(1) = pt5(1): pt6(2) = pt5(2)
```

```
location(0) = (pt4(0) - pt3(0)) / 2 + pt3(0)
```

```
location(1) = pt3(1)
```

```
location(2) = pt1(2)
```

```
AcadApp.ActiveDocument.SetVariable "DimSE1", 1
```

```
AcadApp.ActiveDocument.SetVariable "DimSE2", 1
```

```
Set
```

```
AddDimAlignedRot=AcadApp.ActiveDocument.ModelSpace.AddDimAligned(p  
t3, pt4, location)
```

```
AddDimAlignedRot.Update
```

```
Set line1 = AcadApp.ActiveDocument.ModelSpace.AddLine(pt1, pt5)
```

```
Set line2 = AcadApp.ActiveDocument.ModelSpace.AddLine(pt2, pt6)
```

```
line1.Update
```

```
line2.Update
```

```
End Function
```

由于标注的需要，还开发了其他一些标注函数，这里从略。

4.2.6 运行实例

当我们强度设计完成后，各种参数都确定后，就可以出图了，单击 ，系统将会自动启动 AutoCAD，随即自动绘出瓣片结构图，如图 4-4 和图 4-5 所示。

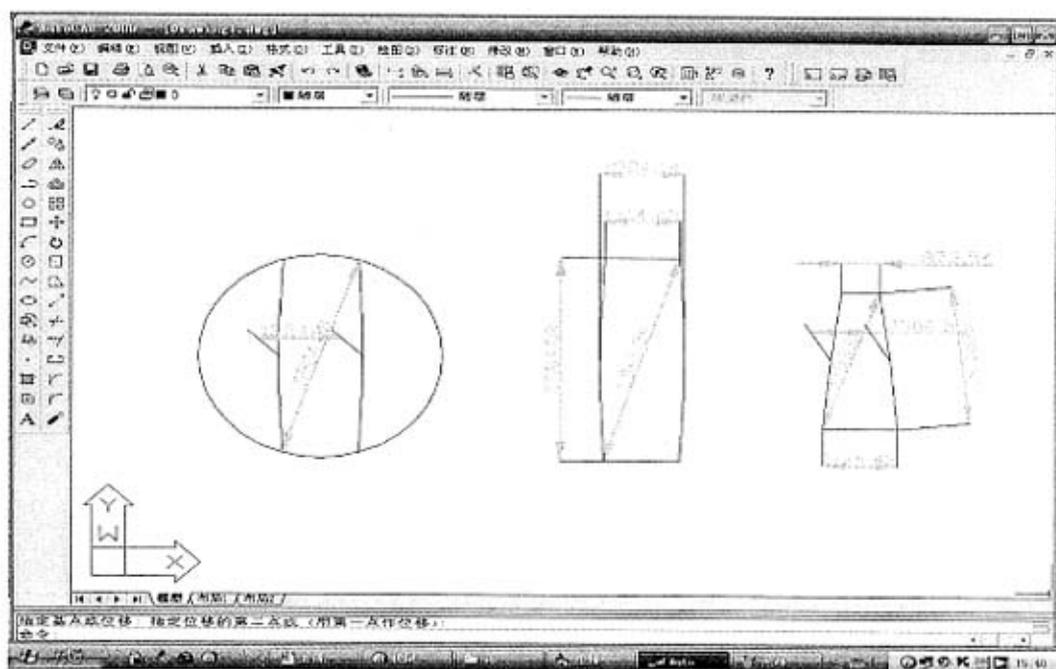


图 4-4 五带橘瓣式球壳瓣片图

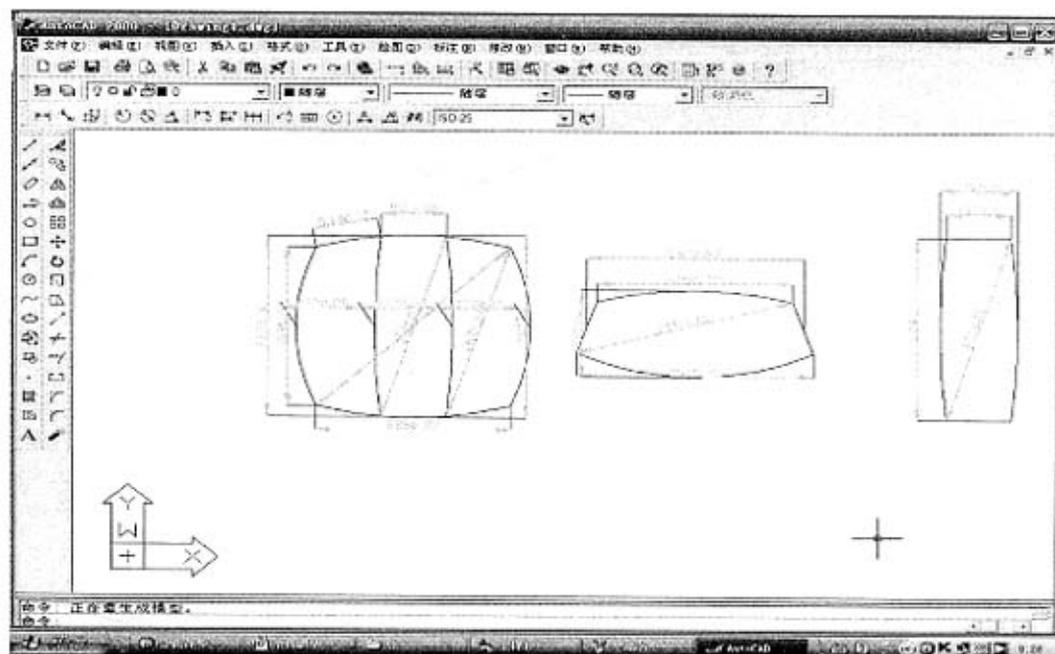


图 4-5 五带混合式球壳瓣片图

4.3 本章小结

本章介绍了球罐 CAD 系统的球壳瓣片设计模块,简要说明了橘瓣式和混合式球壳的计算方法,详细介绍球壳瓣片绘图模块的开发过程和涉及的技术,并给出了一个运行实例。

5 结论和展望

5.1 主要结论

本课题是将球罐设计专业知识与计算机应用知识有机结合的综合性课题；是以 VB6.0 为开发平台，以 AutoCAD、Ansys 为支撑软件，以球罐设计理论为基础，以参数化设计为原理，采用 VB、APDL 等编程方法，研究建立了球罐 CAD 系统。

课题的主要研究总结如下：

1. 利用 VB6.0 的界面设计技术，设计了友好的人机交互界面，使工程人员操作方便，在界面设计的过程中对界面的容错性、稳定性加以了控制。

2. 按照模块化设计技术的要求，完成了主要功能模块的创建与基本功能模块的开发。

3. 本系统的强度计算模块完全按照 GB12337—1998《钢制球形储罐》的有关规定计算，并且建立了计算所需图表数据库，材料数据库，还可以对材料数据库进行更新和维护。

4. 开发了球罐 CAD 系统的有限元专用分析模块，可以把按《规范》计算确定了结构尺寸和材料的球罐在 ANSYS 中进行有限元分析，也可以在 ANSYS 中用开发的计算模块重新按《规范》计算球罐结构尺寸，选择材料，再进行有限元分析。

5. 开发了球罐瓣片结构尺寸参数化绘图模块。

6. 完成了球罐 CAD 系统的测试工作，使之能在各种设计条件下较好的运行。

7. 对涉及到的相关技术和计算方法进行了讨论。

本球罐 CAD 系统具有非常友好的操作界面，运行该系统，通过人机交互，输入必要设计条件，便按国家规范完成球罐的强度设计，并且可进入 ANSYS 进行有限元分析，进入 AutoCAD 绘制零部件二维图形。此外采用模块化的技术还具有良好的扩展能力，可根据需要进一步完善。

5.2 进一步研究工作展望

本系统是比较实用化的研究和开发工程，构造了球罐 CAD 系统的主体框架，实现了球罐的强度计算、图形处理和有限元分析。但由于时间、经验等限

架,实现了球罐的强度计算、图形处理和有限元分析。但由于时间、经验等限制,本文的研究工作和设计系统在很多方面还只是处于阶段性的研究成果,还有一些不足和不完善的地方需要进一步深入的研究和改进。作者认为在今后对本系统的研究和开发中可以从以下几个方面着手:

(1) 为了提高压力容器设计的可靠性但又不浪费材料,只有采用按分析设计、制造和检验。本系统中的有限元分析模块还不是很完善,还可以对压力容器的有限元方法设计分析模块进行深入研究,完善功能模块,如开孔补强模块,焊缝分析模块,热应力分析模块等等。

(2) 本系统只开发了现在应用最广的两种瓣片结构形式的球罐:橘瓣式和混合式,还可以开发其他瓣片形式(如足球瓣等)的球罐计算模块,同时还可以使系统更加智能化,如让系统自己根据一定的条件(如焊缝长度,制造、检验、安装的难易程度等等)给出瓣片选择建议或其他结构设计的建议。

(3) 本系统的绘图模块只开发了瓣片结构尺寸绘制模块,还可以进一步开发其他功能模块,如绘制装配图,安装图,球罐标准件库,材料表的自动生成等。

(4) 在原有数据库结构的基础上,进一步扩充数据库的内容,构建出满足用户需求的更加专业化的数据库。

参考文献

- [1] 李梦群等.先进制造技术导论[M].北京:国防工业出版社,2005,3~4
- [2] 孙家广.制造业信息化的历史重任[J].中国制造业信息化,2003,32(1):13-16
- [3] 马颂得.中国制造业信息化的现状与发展[J].信息化,2006,1-2:16~20
- [4] 范玉顺等.网络化制造系统及其应用实践[M].北京:机械工业出版社,2003,15~17
- [5] 席丹,王亚宁等.现代制造业信息化建设实务[M].北京:电子工业出版社,2005,24~28
- [6] 殷国富,杨随先.计算机辅助设计与制造技术原理及应用.成都:四川大学出版社,2001.9.1~3
- [7] 李建.大力推进制造业信息化[J].中国机电工业,2003,(4):17-19
- [8] David d. Bedworth, Mark R. Henderson and Philip M. Wolfe. Computer-integrated Design and Manufacturing, McGraw-Hill, Inc. 1991
- [9] 温诗铸,黎明主编.机械学发展战略研究[M].北京:清华大学出版社,2003,1:105-201
- [10] 杜平安.制造业信息化的发展现状研究[J].中国机械工程,2003,14(13):10-12
- [11] Lee L. e-manufacturing System: fundamental and tools[J]. Journal of robotics and Computer-integrated manufacturing, 2003
- [12] 姜桂平.先进制造技术及其发展趋势[J].天津职业院校联合学报, 2006,8,34~37
- [13] PVRC Active Project Descriptions & Status[R] | PVRC, 2000.
- [14] Payne J R. New Gasket Factor - A Proposed Procedure [C]. PVP -Vol. 98. N. Y: ASME. 1985. 21230.
- [15] Leon G F, Payne J R. An overview of the US PVRC research program of bolted flanged connections[C] | Proceedings of the ICPVT, Peking SCME, 1989. 147-167.
- [16] Kockelmann H. Characteristics of gaskets for Bolted Flanged Connections[C]. PVP2Vol. 367. N. Y: ASME. 1998. 1210.
- [17] EN 159121 : 2001, Flanges and their joint —Design rules for gasketed circular flange connections2Part1 :Calculation method [S].
- [18] ENV 159122 : 2001, Flanges and their joint —Design rules for gasketed circular flange connections2Part2 :gasket parameters [S].
- [19] 寿比南等. 中国压力容器行业技术标准发展趋势探讨.
<http://www.cscbpv.org.cn/bbs/detail.asp?id=46>
- [20] 段哲军.应力分类和压力容器设计的发展[J].中国氯碱,2005(8), 34-38

- [21] 梅林涛等.有限元在压力容器设计中的应用现状和展望.
<http://www.xinxihua.cn/news/2005/4/23/47715.htm..>
- [22] 仇恩沧.石化设备大型化—压力容器行业的机遇和挑战.
<http://www.cscbpv.org.cn/bbs/detail.asp?id=46>
- [23] 王玉,黄伟昌等.拓展计算机辅助设计在压力容器设计制造中的应用[J].管道技术与设备.2005, No15,43-46
- [24] 韩永奇.“十一五”我国石油和化工发展趋势[J].中国石油和化工,2006,3,33~36
- [25] 肖如怀.在用压力容器的安全使用和管理[J].云南电力技术,1996,24,1, 41~43
- [26] 魏安安等.我国在用化工压力容器安全现状及延寿技术进展[J].化工机械,2005,(32)6,50~53
- [27] 徐英等.球罐和大型储罐[M].北京:化学工业出版社,2005,3~5
- [28] [英]TMS(国际)有限公司著.Microsoft Visual Basic 6.0 高级编程[M].北京:北京大学出版社,2000,60~63
- [29] [美] Steven Holzner. Visual Basic 6 技术内幕[M].北京:机械工业出版社,1999,79~82
- [30] [美] (McFarlane, S.). AutoCAD 数据库连接[M].北京:机械工业出版社,2001.56~60
- [31] 胡荣 喻宁. AutoCAD 2000 开发工具-VBA 及 ActiveX 开发指南[M].北京,人民邮电出版社,1999,24~31
- [32] 冯波,刘晓玲.AutoCAD 二次开发技之比较[J].四川工业学院学报,2003,4,54~57
- [33] 龙震工作室编著.AutoCAD 程序设计实例[M].电子工业出版社,2002,1,72~74
- [34] 方志高,郑忠俊,赵京. AutoCAD 多平台二次开发技术的研究[J].机械,2004,32(10):30-33
- [35] 徐凯,张裕中.CAD 二次开发技术[J].包装与食品机械,2004,(1):15-18
- [36] 韩青峰,吴声松.应用 ActiveX 技术进行 AutoCAD 二次开发[J].工程地质计算机应用,2003,4:13-18
- [37] 华徐勇.基于 ARX 的液压系统 CAD 软件的开发[D].大连:大连理工大学,2003
- [38] 张晋西编著.Visual Basic 与 AutoCAD 二次开发[M].清华大学出版社,2002,2
- [39] 刘良华.应用 Java 语言进行 AutoCAD 二次开发[J].电脑编程技巧与维护,2001,(1)
- [40] 张朝晖.ANSYS 工程应用范例入门与提高[M].北京:清华大学出版社.2004,1~3
- [41] 博弈创作室.ANSYS9.0 经典产品基础教程与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社.2006,3~4
- [42] 余伟炜等.ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M].北京:中国水电出版社.2006,35~37

- [43] 博弈创作室.APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M].北京:中国水利水电出版社.2004,75~77
- [44] 博弈创作室.ANSYS9.0 经典产品高级分析技术与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社.2006,42~45
- [45] 朱荣改等.大型油气储罐的结构型式与变化趋势[J].石油规划设计,2001(9),23~24
- [46] 国家质量技术监督局.GB12337-1998<钢制球形储罐>.北京:中国标准出版社.1999.9
- [47] 丁伯民,蔡仁良.压力容器设计-原理及工程应用[M].北京:中国石化出版社.1992,33~34
- [48] 胡继斌,崇凯.在 ARX 程序中应用 ODBC 访问数据库技术的研究[J].机床与液压,2003,3:247-249
- [49] 李春葆等.Visual Basic 数据库系统设计与开发[M].北京:清华大学出版社.2003,67~69
- [50] 郭琦.visual Basic 数据库系统开发技术[M].北京:人民邮电出版社.2003,108~110
- [51] 王福成等.Visual Basic6.0 数据库开发指南[M].北京:清华大学出版社.2000,76~78
- [52] 黄国权.有限元法基础及 ANSYS 应用[M].北京:机械工业出版社,2004,201-204
- [53] 李黎明.ANSYS 有限元分析实用教程[M].北京:清华大学出版社.2005,162~165
- [54] Derenne M. The PVRC Gasket Performance Characterization Technology For Bolted Flanged Connections[R].TTRL,1997.
- [55] Kockelmann H. The European 2000 Situation in the Field of Bolted Flange Connections[R]. EPERC Bulletin Nr3,2000.
- [56] prEN 13555 :1999 ,Flanges and their joint —Gasket parameters and test procedures relevant to the design rules for gasketed circular flange connections[S] .
- [57] 武思宇,罗伟.ANSYS 工程计算应用教程[M].北京:中国铁道出版社.2004,130~134
- [58] 孙玉辉.混合球罐极板尺寸及排版方案比较计算用表[J].化工设备设计,1997,3,39~41
- [59] 陈盈平.球形储罐球壳板的设计计算[J].煤气与热力,1995,9,47~51
- [60] 李群.球形储罐球壳尺寸、面积的计算[J].石油化工设备技术.2004(25),1,79~82
- [61] 罗张东.混合式球壳瓣片尺寸的一种求法[J].天然气与石油.2003(21),1,84~87
- [62] 彭晓顺.球形储罐球壳板的计算及分瓣方法的比较.压力容器.1997,5
- [63] 孙玉辉.混合式球罐几何尺寸的立体解法.化工设计.1996.no.3
- [64] D. Rollar. An Approach to Computer Aided Parametric Design[J]. Computer Aided Design, 1991, 23(5):123-391
- [65] 郭宝锋等.压力容器壳体 CAD 软件的研究与开发.[J].锻压机械.2002,4,58~59.

攻读硕士学位期间发表的学术论文和参与的科研项目

1. 何元新, 郑忠俊, 郭海洋, 孙军. 蜗杆三维造型技术. 机械研究与应用. 2005, (5)
2. 郭海洋, 郑忠俊, 何元新, 孙军. 渐开线齿轮参数化设计与绘图系统的开发实现. 机械. 2005, (7)
3. 郭海洋, 郑忠俊, 何元新, 孙军. 基于 ObjectARX 与 VLISP 交叉编程实现机械零件的参数化绘图系统. 机械设计与制造, 2005, (7)
4. 孙军, 郑忠俊, 何元新, 郭海洋. ObjectARX 及 VLISP 交叉编程方法在平面四杆机构综合中的应用. 机械设计与制造, 2005, (6)
5. 孙军, 郑忠俊, 何元新, 郭海洋. 平面四杆机构的 ObjectARX 图解法程序设计. 机械, 2005, (5)

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及取得的研究成果。据我所知，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过的研究成果，也不包含为获得四川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谢意。

本学位论文成果是本人在四川大学读书期间在导师指导下取得的，论文成果归四川大学所有，特此声明。

指导老师签字 郑明波 日期 2006.5.29
学生签字 何元新 日期 2006.5.28

致 谢

本论文是在导师郑忠俊教授的悉心指导下完成的。在三年的研究生学习生活中，郑老师以他严谨求实的学术作风、精益求精的治学态度和循循善诱的悉心教诲，使我克服各种困难，圆满完成学业。在此，谨向郑老师致以崇高的敬意和由衷的感谢！

同时，在整个科研工作及论文的撰写期间，孙军，郭海洋同学给予了我非常大的帮助，刘晓波，周清华，孙志国同学也给了我热心的鼓励和支持。侯力教授给了我很多有益的启发和建议。在此谨向他们表示衷心的感谢！

最后，再一次向三年来所有支持和帮助过我的老师、同学和亲友表示衷心的感谢。

何元新

2006年5月 于四川大学