

# 桥式起重机结构参数化建模及分析系统

作者：刘斌

时间：2022. 05. 30

# 目 录

第一章 系统的总体概述 .....	1
1.1 系统的组成 .....	1
1.2 系统的逻辑结构 .....	2
第二章 参数化建模及有限元分析 .....	3
2.1 参数化技术 .....	3
2.2 有限元技术 .....	4
2.3 ANSYS APDL .....	4
2.4 参数化模型的建立 .....	7
2.5 模型的有限元分析 .....	9
第三章 系统的数据管理 .....	10
3.1 数据库 SQLite .....	10
3.2 数据库需求分析 .....	10
3.3 数据库具体设计 .....	12
3.4 数据库与系统的连接 .....	15
第四章 系统的软件实现 .....	17
4.1 软件框架 QT .....	17
4.2 软件功能特点 .....	17
4.3 软件运行流程 .....	20
4.4 软件应用实例 .....	20
第五章 总结与展望 .....	24
5.1 全文总结 .....	24
5.2 研究展望 .....	24
参考文献 .....	26

# 第一章 系统的总体概述

## 1.1 系统的组成

本系统要实现桥式起重机的参数化建模和仿真分析，需要一个图形化界面来获取起重机的信息，然后对数据进行归类管理，再经过计算处理后得到模型和分析结果。因此，整个系统被划分为信息交互模块，数据管理模块，计算处理模块这三大组成部分。系统组成图如图 2.1 所示。

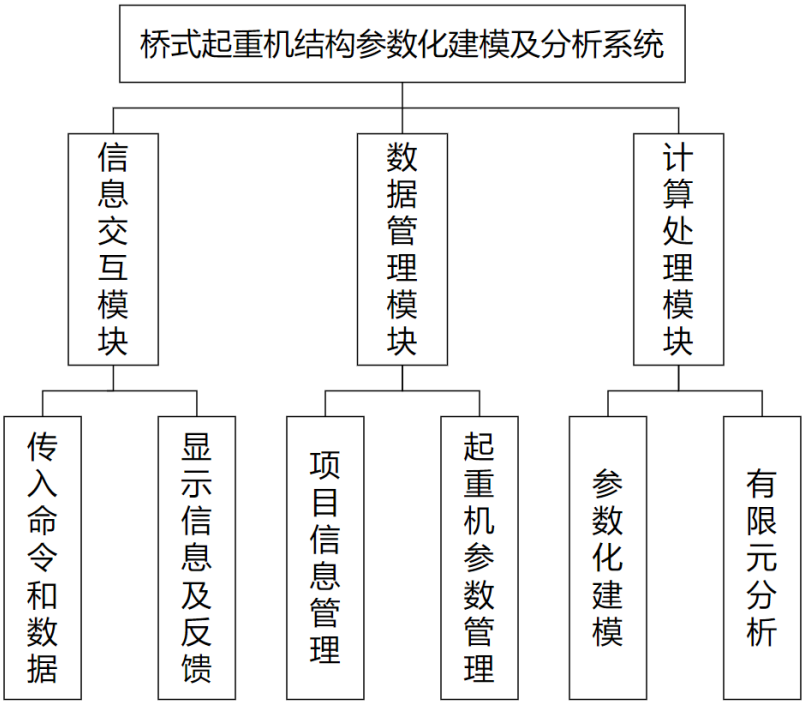


图 2.1 系统组成图

(1) 信息交互模块。这一模块主要依托于图形化用户界面（Graphical User Interface），使系统的操作更加人性化。该模块可以捕获用户的操作指令，并予以反馈，系统通过该模块实现数据输入和结果输出。该模块的启动窗口会显示项目信息，供用户管理；而主窗口会呈现桥式起重机的二维设计图和尺寸编辑框，供用户填写或修改起重机的拓扑信息、技术选项等。同时，该模块负责将建好的模型，以及仿真分析的结果清晰直观地显示到界面上，供用户查看。

(2) 数据管理模块。这一模块依靠着数据库管理系统（Database Management System），可以有序地处理信息交互模块传递过来的数据。该模块又分为项目信息管理和起重机参数管理两个子模块，必先建立项目，才能输入起重机参数信息，而一旦项目删除，相应的参数信息也会被删除。项目信息管理子模块主要负责建立、保存工程项目，实现对项目进行打开、删除、修改等管理操作。起重机参数管理子模块则负责将起重机的参数信息分类

后保存到不同的数据表中，当打开已保存的工程项目时，对应的数据又会被选择出来传递给到信息交互模块；此外，该子模块还提供了接口给计算处理模块提供所需的起重机参数信息。换句话说，数据管理模块是整个系统的“信息中转站”，同时将数据保存下来。

(3) 计算处理模块。这一模块是整个系统的“心脏”，负责实现系统的核心功能——桥式起重机的参数化建模和有限元分析。该模块从数据库中调取建模或者仿真所需要的参数，根据起重机的具体类型，按照一定的算法进行计算处理，生成含有 APDL 命令流的文本文件，这些文件会被导入到 ANSYS 中完成运算；同时，该模块会将相应的运算结果以及模型截图、仿真截图等保存到系统目录下，传递给信息交互模块显示到界面上。

## 1.2 系统的逻辑结构

系统的逻辑结构对系统的开发起到决定性的影响，一个系统的准确、流畅运行离不开科学的逻辑设计。本系统是一个工程软件系统，除了前台运行的交互界面和各组成模块，还包括后台运行的 ANSYS 软件，这是整个系统的支撑，系统逻辑示意图如图 2.2 所示。

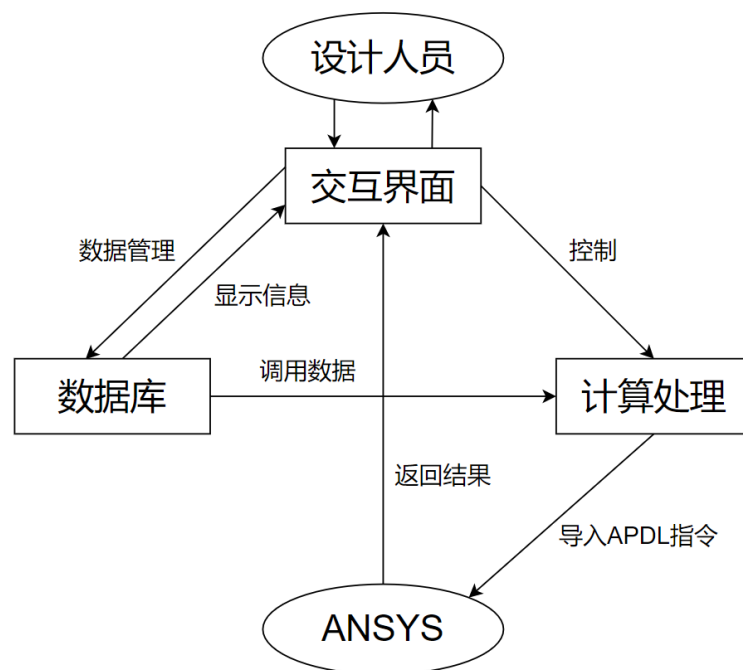


图 2.2 系统逻辑示意图

设计人员通过交互界面输入或修改初始参数，并从界面上获知数据信息、运行结果。交互界面是连接设计人员与后台程序的枢纽，它一方面管理着数据库中的数据（包括项目数据和起重机参数），并把相应的信息呈现出来；另一方面也是系统核心功能的开关，控制着整个计算处理的全过程，包括调用数据、生成并导入 APDL 指令、获取模型和仿真结果等等。可以看出，在系统工作的过程中，设计人员不直接操作 ANSYS 软件，而是通过交互界面来下发指令，系统自动调用 ANSYS 软件在后台完成相应运算工作。

## 第二章 参数化建模及有限元分析

### 2.1 参数化技术

参数化技术是在产品设计过程中，对于类型相同但规格不同的产品，将设计过程编写为一定的程序，给定尺寸要求、技术选择等一些初始条件，计算机进行处理识别后就可以自动来完成产品的设计，在对设计做修改时也很方便，只需要更改相应的参数，其他部分计算机可自行处理，即实现设计过程的自动化。参数化设计技术突出的优点是快速、准确、传递数据可靠，特别是对那些结构形式确定的设计<sup>[33]</sup>。因此，在进行产品的前期设计、后期修改以及不同方案之间的对比时，参数化技术十分有用。

参数化技术近些年来发展迅速，广泛应用于 CAD 系统当中，如 Pro/Engineer、UGNX、CATIA 和 SolidWorks 等等。这得益于参数化技术的诸多优点：

(1) 清晰直观。参数化技术会创建一组和模型特征有关的参数，描述模型的几何拓扑信息、几何参数等，设计人员通过改变参数的数值来改变模型的尺寸大小、技术要求、材料质地等信息，模型的各项特征就迅速发生改变，并呈现到眼前，十分直观。

(2) 可变性。模型在实际设计过程中不可能一次达到最终效果，需要不断地对它进行修改和完善，尤其是在模型的整体结构几乎不变时，采用参数化设计技术来修改模型不仅十分便捷，还可以对各种不同的方案直观地进行比较，以实现优化模型的目的。

(3) 可重复性。在设计系列化产品时，尤其是基本结构相同、形状相似的产品，如果每个产品都进行单独的建模，会做很多重复工作，效率极低，这时候利用参数化技术能够大量减少重复建模的过程，极大地提高工作效率。

(4) 约束性。参数化技术的本质是约束，利用约束关系（比如尺寸约束）来表达模型，而约束关系可以由一组参数来定义，通过修改参数就能修改约束关系，进而控制设计结果。

目前参数化设计技术大致可分为以下五种方法：

(1) 尺寸驱动法。当某一尺寸被修改时，根据尺寸约束求解它所在的尺寸链，得到新的尺寸值，在满足结构约束的前提下，调整模型的形状。

(2) 变量几何法。将几何模型定义成一系列特征点，作为为变量形成一个约束方程组，求解方程组获得特征点，即可获得需要的模型。

(3) 人工智能法。将约束关系作为事实读入系统，通过规则推理出新的事实，即几何形体的细节，不断循环，直到构造出符合要求的整个模型。

(4) 基于图论的约束求解方法。该方法将几何约束系统用图表示，运用图论的知识将约束网格归约成约束树，大大减少了问题求解的耦合度和求解规模。

(5) 基于生成历史的过程构造法。该方法会记录几何体素在图形构成过程中的先后顺序以及连接关系，生成历程树，捕捉设计者的意图。

借助于参数化技术，本系统将起重机的几何尺寸、材料特性等信息进行参数化处理，由计算机完成相应的计算分析工作，可以快速地得到起重机模型，大大提高了生产力。在

模型生成后，还可以对模型进行反复修改和调整，从而得到最佳的设计结果。

## 2.2 有限元技术

有限单元法（Finite Element Method），是将连续体的计算域离散为有限个互不重叠的子单元，各单元再通过节点相互连接组成整体，即“化整为零、积零为整”。有限单元法先对每个单元选择单元基函数（一般是满足一定条件的插值函数），再用基函数的线性组合进行逼近，代入积分方程，得出各单元的有限元方程后，联立得到总体的有限元方程组，然后对边界条件进行处理，求解此方程组，即可获得问题的解。当单元足够小时，可以得到十分精确的解。

有限单元法经过半个多世纪的发展，它的理论不断经过完善，已经十分成熟。而且伴随着计算机技术的飞速发展，有限单元法在工程领域内取得了充分且广泛的应用，尤其是在机械、土木、材料、电子、军工等领域，并极大提升了相应行业的设计水平。

有限单元法可以分为位移法、力法和混合法。

- （1）位移法：基本未知量全部取节点位移。
- （2）力法：基本未知量全部取节点力。
- （3）混合法：基本未知量一部分取节点位移，一部分取节点力。

其中节点力的应力分量比节点位移的位移分量多。所以力法的基本未知量最多，计算十分复杂；而位移法的基本未知量较少，计算起来相对简单，只需要使用经典力学知识就可以求解，故而位移法的应用最为普遍。

有限单元法的分析过程如下：

- （1）将待分析的连续体进行离散化，建立单元和节点。
- （2）确定单元的位移模式。
- （3）分析单元特性，列出几何方程、物理方程和单元刚度方程。
- （4）建立表示整个结构点平衡的方程组。
- （5）求解获得节点位移，单元的应变和应力。

有限单元法如今被应用在很多 FEA 软件中，比如 ANSYS，ABAQUS，MSC 等。本系统是设计桥式起重机，进行有限元仿真分析，故选用机械工程领域常用的 ANSYS 软件来进行开发。

## 2.3 ANSYS APDL

### 2.3.1 ANSYS 软件

ANSYS 软件是一款大型的 FEA 软件，以有限元技术为核心，用来求解很多物理场问题。这款软件能够与大多数 CAD 软件联合使用，支持导入这些软件建立的模型进行分析计算，而且它能够在个人计算机、工作站或者巨型计算机上运行。作为国际上最流行的有限元分析软件，ANSYS 在工程上有着广泛的应用，比如机械、桥梁、建筑、飞机、船舶等

等。

ANSYS 的功能十分强大，具体体现在以下几个方面：

(1) 前处理能力强。ANSYS 可以进行实体建模，并对模型划分网格，也可以直接构造有限元模型。此外，ANSYS 还能够和很多主流的大型 CAD 软件的对接，如 AutoCAD、SolidWorks 等。

(2) 分析计算能力强。ANSYS 提供了对各种物理场量的分析，是一款综合性极高的是有限元分析软件。它能够分析计算的内容几乎遍及所有物理领域，包括力、电在内的一些常见物理量和一些非常见物理量。它可以做静力学分析，也可以做动力学分析；可以分析线性问题，也可以分析非线性问题。

(3) 后处理能力强。ANSYS 有两个后处理器：POST1 和 POST26，它们可以获取计算分析的结果，并将它们以图表等形式显示出来，或者输出到文件中。

(4) 开发友好。ANSYS 提供了很多二次开发工具，比如宏 (Marco)、用户界面设计语言 (UIDL)、参数化设计语言 (APDL)、用户可编程特性 (UPFs) 和工具命令语言 (Tcl)，用户可以用来进行开发或者功能扩充。

### 2.3.2 APDL 简介

APDL 全称 ANSYS Parametric Design Language，即 ANSYS 参数化设计语言。APDL 是一种解释性语言，类似于 FORTRAN，不区分大小写，用于自动实现通常性的任务，利用参数 (变量) 创建模型。APDL 除了和其他计算机语言一样支持分支、循环外，还有宏、参数、缩写、重复执行命令、访问 ANSYS 数据库等特性。ANSYS 程序要运行起来，需要很多条命令来驱动，有些命令给出参数信息，比模型的几何参数、单元类型参数、材料参数和载荷参数等等，这些参数可以直接赋值或者通过表达式间接赋值；有些命令实现功能，比如划分网格、定义边界、添加约束、施加载荷等等。此外，还有一些命令专门负责处理计算结果，比如设置背景、改变视角、截取图片等，本系统就是利用 APDL 的这一特性将模型呈现到交互界面上的。

用户可以使用其他计算机语言来编写特定的程序，将 APDL 命令组织起来，实现从建立模型、划分网格、选择材料，到定义边界条件、施加载荷与约束、分析求解的全过程参数化。

简单来说，ANSYS 能实现的所有功能，都可以通过 APDL 编程来实现，本系统就是借助于这一特性来开发的。

### 2.3.3 基于 C++ 的 APDL 开发

C++ 作为一种高级程序设计语言，具备很强的数据处理能力，而且可以对文件进行读、写等操作。因此，用 C++ 来编写一定的应用程序，使系统输出包含 APDL 命令流的文件，再将文件导入 ANSYS 中，ANSYS 即可完成相应运算。

ANSYS 能够识别并运行多种格式的命令流文件，比如扩展名为 “\*.log”、“\*.txt” 格式的文件，还可以是用户自定义的宏命令文件。ANSYS 可以对这些文件进行批处理，即一次性处理一系列文件，故可以将命令流分成若干模块，写成单独的文件，重复用到的模块还可以写成宏文件，就像搭积木一样，把负责不同功能的模块组合起来。详细的规划和明确的分工可以让整个工程事半功倍。

使用 C++开发 APDL 实现参数化的基本流程如图 3.1 所示。C++应用程序接收到传入的起重机参数后，经过计算处理，生成 APDL 命令流，并将命令流写入到文件中，本系统使用 Windows 自带记事本的格式 “\*.txt”。这些 APDL 命令流文件会存放到系统文件夹（datafile）中， ANSYS 在后台被启动后会调用这些命令流文件进行分析运算，运算结果（包括工程文件 “\*.db”、截图文件 “\*.jpg” 等）则会被保存到系统文件夹中。在 ANSYS 运算的过程中，会产生一些中间文件和日志文件，他们将被存放到临时文件夹（temp）中。整个过程都是在后台运行，系统会通过临时文件夹中的 lock 文件来检测运行情况，lock 文件在运算结束后会被删除，这时系统再去查询运算结果，并呈现到交互界面上。

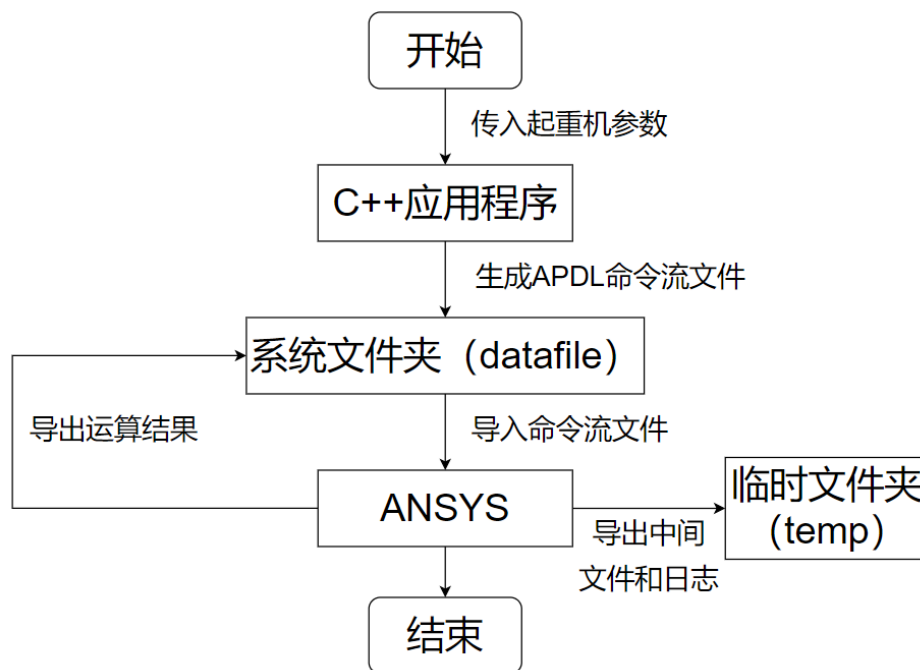


图 3.1 参数化流程图

### 2.3.4 系统对 ANSYS 的调用

系统对 ANSYS 的后台调用是通过 Qt 的 QProcess 类来实现的，这个类可以在后台启动 ANSYS，并与之进行信息交互。

具体的实现需要调用 start()函数，该函数需要传入两个参数，第一个参数是要启动的程序，选择 ANSYS 的安装路径，即 “ANSYSxxx.exe” 所在的位置，xxx表示 ANSYS 的版本号。第二个参数是启动参数，包括：



- (1) 设置 ANSYS 的 Simulation Environment，默认-b 为 ANSYS Batch。
- (2) 设置 ANSYS 的 License，默认-p ane3fl 为 ANSYS Multiphysics。
- (3) 设置计算结果保存路径（-dir 引导）。
- (4) 设置输入的文档（-i 引导）。
- (5) 设置输出的文档（-o 引导）。

示例：D:\ANSYS192.exe -b -p ane3fl -dir D:\workplace -i input.txt -o output.txt。

## 2.4 参数化模型的建立

### 2.4.1 起重机模型的简化

桥式起重机的结构示意图（横截面图）如图 3.2 所示，一般由桥架（主梁和端梁）、带吊钩的起重小车、驾驶室、轨道、辅助滑线架、交流磁力控制盘、电阻箱、大车驱动电动机、主滑线等部分组成。可以看出，桥式起重机的结构复杂，直接对其进行建模十分不便，需要简化模型。

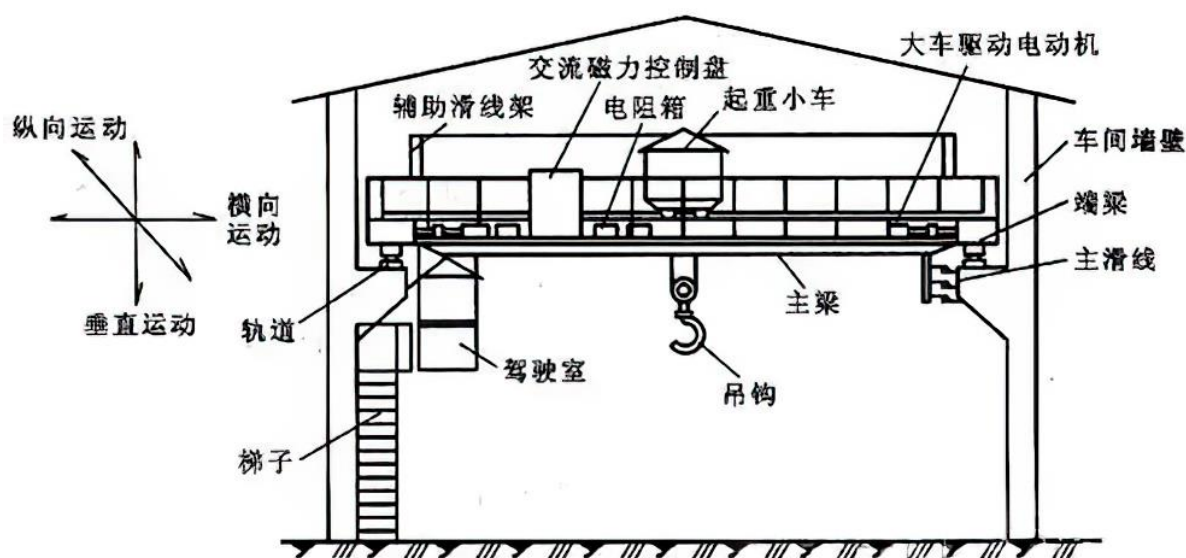


图 3.2 桥式起重机结构示意图

经过简化后，系统主要对桥架部分进行建模，而且只考虑主梁和端梁。桥架形式繁多，有桁架式、箱型式等等，本系统主要针对箱型结构的桥架。桥架可分为单梁桥架和双梁桥架，本系统对这两种类型起重机的建模及分析都提供支持。

### 2.4.2 主、端梁模型的建立

起重机桥架的主梁、端梁均为箱型结构梁，具体建模过程如下。

- (1) 定义单元类型

ANSYS 单元库中提供了 100 多种的不同单元类型，单元的自由度数和空间维度由单

元类型决定。单元类型必须在前处理器 PREP7 中进行定义。桥架是细长的梁结构，故本系统选用 “beam188” 梁单元，这是一个线性梁单元。

### （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。对于 “beam188” 梁单元而言，可以给定截面，ANSYS 可以通过截面自动计算出单元实常数，截面类型分为通用截面和自定义截面。本系统采用自定义梁截面，梁截面选用 “mesh200” 单元。自定义梁截面会生成对应的 “\*.sect” 文件，在生成有限元模型时通过其参考号和名称进行读入。

### （3）设置材料属性

梁的单元类型需要设置材料属性，包括材料是线性还是非线性、各向同性还是正交异性等等。桥式起重机的桥架是钢材质，需要设置杨氏模量和泊松比，默认杨氏模量为 210000GP，泊松比为 0.3。

### （4）生成模型

建立好坐标系后，先定义关键点的坐标，即梁横截面的位置，再读入自定义截面，设置等截面和变截面所在梁的部位，将各单元连接起来，形成雏形，最后调整梁的体积。对于端梁而言，它是左右完全对称的梁，建立单侧模型后，镜像所有节点与单元即可。

主、端梁模型的建立基本类似，单梁桥架的主梁模型图如图 3.3 所示。

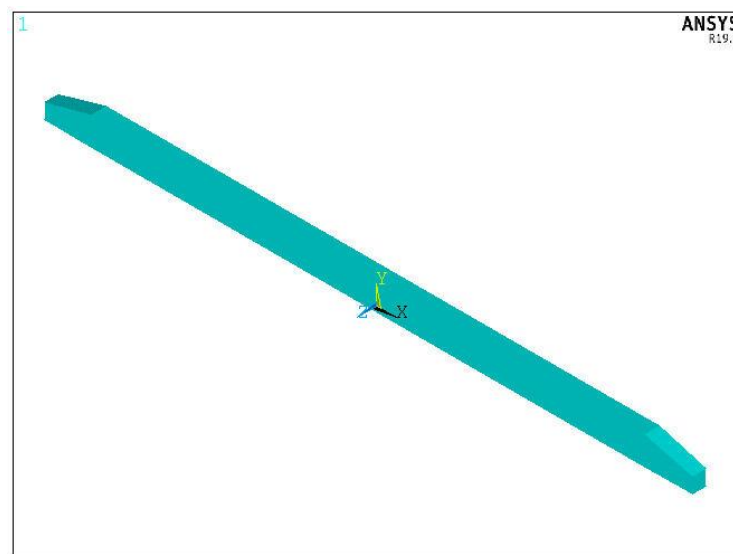


图 3.3 主梁模型图

## 2.4.3 整机模型的建立

在依次建立主梁和端梁的模型后，整合起来便可得到整机的有限元模型。具体流程如下：创建节点，生成台车单元，将主梁和端梁连接起来，设置约束（旋转约束）以及节点间的耦合。至此，桥式起重机的参数化模型建立完毕，下面可以对模型进行有限元分析。

## 2.5 模型的有限元分析

### 2.5.1 约束条件

在进行有限元分析之前，需要对模型施加约束，限制模型的自由度，同时要确保约束条件的准确性和真实性。对于模型使用的 beam188 梁单元而言，有 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动六个自由度。由于桥式起重机在实际工作时是静止不动的，故而在对模型进行有限元分析时，需要施加所有的平动约束和转动约束，保证模型不发生任何位移和翻转，约束施加在端梁的支撑面处，即端梁大车轮处。

### 2.5.2 载荷分析

作用在桥式起重机的载荷有固定载荷、起升动载和惯性载荷。固定载荷又分为集中载荷和均布载荷，集中力包括小车自重、货物重量等；均布载荷有轨道、栏杆自重等。起升动载指的是小车上的起升机构在上升或下降时，产生与其加速度相反方向的惯性力，这时候需要引入起升动载系数，与小车、吊具、货物的总自重相乘。惯性载荷是指小车在桥架上水平移动时，会产生一定的惯性力，其以集中力的形式作用在主梁上。

### 2.5.3 计算求解

在施加完约束和载荷后，即可求解，获取应力、位移最大值，并截取应力云图和位移云图。单梁桥式起重机模型的应力云图如图 3.4 所示。

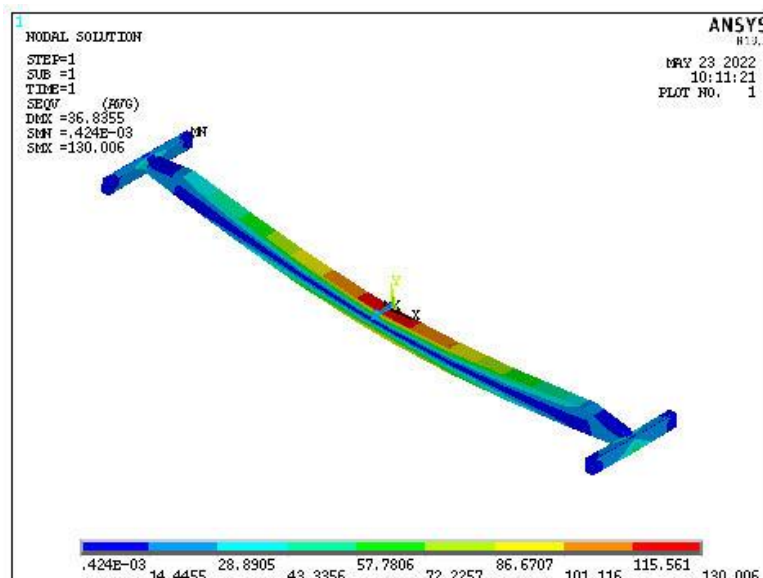


图 3.4 应力云图

## 第三章 系统的数据管理

### 3.1 数据库 SQLite

本系统包含着不同种类的桥式起重机机型，每种机型又包含着各种各样的参数，这些数据复杂多样，要按照一定的规则来进行存放，因此需要借助“数据库”这一专业的工具来进行数据的管理。数据库能够按照特定的逻辑存放大量数据，而且可以根据描述随时存放和查取，效率很高。数据库作为十分重要的基础技术，是确保本系统能够稳定运行的基石。

当前的数据库技术分为关系型数据库和非关系型数据库，本系统采用前者，以最小关系表的形式保存数据。目前主流的数据库有 Oracle、MySQL、SQL Server、SQLite 等，考虑到桥式起重机的参数数据库相对较小，而且数据库与该软件系统可放在同一计算机上，不需要服务器，因此选用 SQLite 数据库来实现对本系统的数据管理。

SQLite 数据库十分轻巧，是一个由 C 语言写成的库，格式稳定<sup>[18]</sup>。“麻雀虽小，五脏俱全”，虽然 SQLite 很小，但是它功能齐备，支持很多 SQL 语句，包括系统中需要用到的建表、查询等操作，非常适合本系统的开发。

SQLite 数据库是世界上使用最多的数据库引擎，这得益于它的很多特性：

- (1) SQLite 是无服务器的，不需要专门的服务器进程来维持其运行。
- (2) SQLite 遵守 ACID，可从多个线程进行安全地存取。
- (3) SQLite 不需要配置，这意味着不需要安装或管理。
- (4) SQLite 非常小，是轻量级的。
- (5) SQLite 不需要任何来自外部的依赖。

SQLite 的数据库引擎实现了自给自足，无需服务器，也无需任何配置。而且该引擎通过“库”的形式嵌入到了程序内部，成为系统的一个组成部分，而不是独立运行。与其他常见的客户—服务器式通信的数据库有所不同，SQLite 使用了在编程语言内的直接 API 调用的通信方式，这在很大程度上能够减少系统消耗，降低系统延时。本系统的所有数据均是本地化数据，在单机上进行数据存取，无需连接服务器，与 SQLite 数据库十分契合。

### 3.2 数据库需求分析

#### 3.2.1 数据管理概要

数据管理的大致流程如下：新建项目后，系统将根据项目编号和设备名称这一核心信息来创建项目（其中项目编号作为后续其他所有数据的查询索引），项目创建完成后，先存放起重机机型；再根据相应的机型存放桥式起重机参数（因为每种起重机的参数不一样，所以需要设计不同的数据表）；然后存放载荷与约束参数（这对于不同类型的起重机是一致的）。数据存放结束后，系统可以对项目的起重机类型、起重机参数、载荷与约束参数这些数据进行维护、查询、管理和统计等工作。

### 3.2.2 数据信息

系统的数据核心是桥式起重机的信息，包括整体参数信息、主梁参数信息、端梁参数信息和载荷与约束参数信息这四个方面，各方面包含的信息如下所示：

(1) 整体参数信息。包括基距、轨距、车轮直径、车轮高度、主梁高度、端梁高度、起升/下降速度、小车运行速度、小车起/制动时间、小车左极限位置、小车右极限位置等。

(2) 主梁参数信息。包括主梁长度、主梁宽度、主梁带箱边宽度、主梁截面宽度、主梁截面高度、翼板厚度、腹板厚度、变截面斜率、主梁结构质量等。

(3) 端梁参数信息。包括端梁整体长度、端梁分段长度、端梁宽度、车轮距离、端梁带箱边宽度、端梁截面宽度、翼板厚度、腹板厚度、端梁结构质量等。

(4) 载荷与约束参数信息。包括整机重量、小车重量、吊具重量、货物重量、小车位、小车基距等。

### 3.2.3 功能需求

本系统要实现桥式起重机的参数化建模及分析，数据管理要求实现“项目管理”和“参数管理”这两大功能。

项目管理，即存储、修改和读取在系统中的工程项目，其核心信息是项目编号和设备名称。当用户创建新的项目时，需要输入这两项基本信息，这也意味着项目被存储下来。当用户下次启用系统时，系统会读取之前存储过的工程项目，供用户打开。此外，用户也可以修改项目的基本信息，甚至删除工程项目。

参数管理，即对桥式起重机的参数进行录入、查询、修改和删除，具体如下：

(1) 参数录入是实现系统核心功能的基础，起重机整体参数和梁参数录入为实现参数化建模做准备，而载荷与约束参数录入为仿真分析做准备。

(2) 参数查询分为以下三种情况：①打开项目时，根据项目编号查询当前起重机的各项数据，将它们显示在图形界面预留的接口处；②参数化建模时，要根据特定的查询条件（主要是项目编号），选择桥式起重机的参数，比如基距、轨距、结构质量等等，建立起节点、单元和截面；③仿真分析时，则要查询载荷与约束信息，对模型进行加载，获得应力、位移、疲劳等仿真结果。

(3) 参数修改是为了方便用户随时更新起重机参数。

(4) 参数删除会发生在两种情况下：一是工程项目被用户删除时，起重机参数信息随之删除；二是当项目中的起重机类型发生变更时，旧的起重机参数信息会被删除，同时录入新的起重机参数信息。

本系统数据管理部分的核心任务就是实现管理的系统化和规范化，为参数化建模及分析部分、图形化界面显示部分提供数据接口，协调作业，保证系统运行的流畅性、高效性、便捷性。

### 3.3 数据库具体设计

#### 3.3.1 E-R 模型

E-R 模型全称 Entity-Relationship Model，即实体-联系模型。E-R 模型提供了表示实体类型、属性和联系的方法，不受任何 DBMS 约束，在数据库设计中被广泛用作数据建模的工具<sup>[10]</sup>。

通常在数据库概念设计阶段，E-R 模型被用于描述要储存在数据库中的信息，搭建一个概念模型，为后续阶段做基础准备。具体而言，在逻辑设计期间，概念模型会被映射到逻辑模型上（比如关系模型）；而在物理设计期间，概念模型会被映射到物理模型上。

E-R 模型的作用：①E-R 模型有助于数据库的设计，给出了在数据库设计过程中如何表示实体以及实体之间联系的方法。②E-R 模型可以将事物在现实世界中的意义以及关联性映射到概念模型上。

本系统的 E-R 模型如图 4.1 所示。

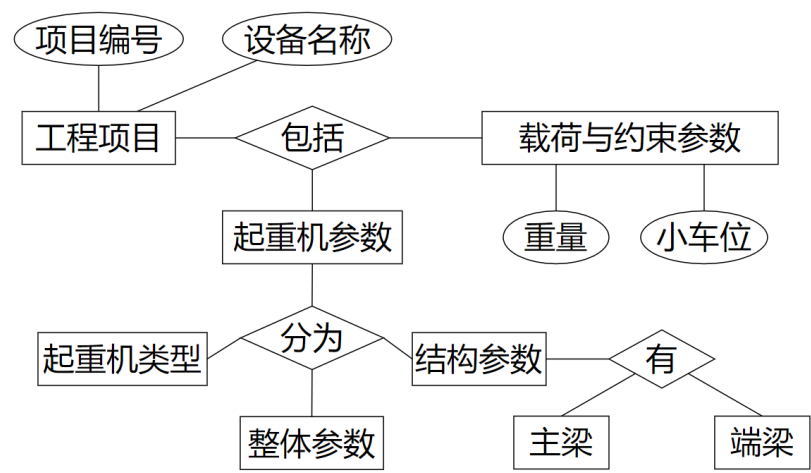


图 4.1 E-R 模型图

#### 3.3.2 数据字典

数据字典是对系统数据模型中数据对象的描述的集合。本系统中的数据字典分为 5 类：工程项目数据字典；起重机类型数据字典；总体参数数据字典；单结构参数数据字典；载荷与约束参数数据字典。其中总体参数数据字典和单结构参数数据字典涵盖了多种类型起重机的数据对象的集合，因而并非字典中所有的数据项都会被使用，不同类型的起重机在构建数据库时只选用相应的数据项。

(1) 工程项目数据字典如表 4.1 所示。

表 4.1 工程项目数据字典表

名称	数据类型	非空	备注
----	------	----	----

projectOrder	varchar	否	项目编号
craneName	varchar	是	设备名称

(2) 起重机类型数据字典如表 4.2 所示。

表 4.2 起重机类型数据字典表

名称	数据类型	非空	备注
projectOrder	varchar	否	项目编号
craneType	varchar	是	起重机类型

(3) 总体参数数据字典如表 4.3 所示。

表 4.3 总体参数数据字典表

名称	数据类型	非空	备注
projectOrder	varchar	否	项目编号
B	double	是	基距
S	double	是	轨距
D	double	是	车轮直径
H0	double	是	车轮高度
H1	double	是	端梁高度
H2	double	是	主梁高度
H3	double	是	主梁间距
LS	double	是	起升/下降速度
RS	double	是	小车运行速度
BT	double	是	小车起/制动时间
L1	double	是	小车主极限位置
L2	double	是	小车右极限位置

(4) 单结构参数数据字典分为主梁参数数据字典和端梁参数数据字典。主梁参数数据字典如表 4.4 所示；端梁参数数据字典如表 4.5 所示。

表 4.4 主梁参数数据字典表

名称	数据类型	非空	备注
projectOrder	varchar	否	项目编号
L	double	是	主梁整体长度
LV	double	是	主梁分段长度
H1	double	是	截面宽度
H2	double	是	边缘截面高度

H3	double	是	截面高度
H4	double	是	中心截面高度
tfs	double	是	上翼板厚度
tfx	double	是	下翼板厚度
tw	double	是	腹板厚度
W1	double	是	主梁带箱边宽度
W2	double	是	主梁宽度
S1	double	是	斜率之水平距离
S2	double	是	斜率之垂直距离
G1	double	否	图纸质量
G2	double	否	质量的计算系数
selectG	int	是	主梁质量选项



表 4.5 端梁参数数据字典表

名称	数据类型	非空	备注
projectOrder	varchar	否	项目编号
L	double	是	端梁整体长度
LV1	double	是	端梁分段长度
LV2	double	是	车轮距离
LV3	double	是	双主梁间距
H1	double	是	截面宽度
H2	double	是	边缘截面高度
H3	double	是	中心截面高度
tfs	double	是	上翼板厚度
tfx	double	是	下翼板厚度
tw	double	是	腹板厚度
W1	double	是	端梁带箱边宽度
W2	double	是	端梁宽度
G1	double	否	图纸质量
G2	double	否	质量的计算系数
selectG	int	是	端梁质量选项

(5) 载荷与约束参数数据字典如表 4.6 所示。

表 4.6 载荷与约束参数数据字典表

名称	数据类型	非空	备注
projectOrder	varchar	否	项目编号
MW	double	是	整机重量
TW	double	是	小车重量
SW	double	是	吊具重量
GW	double	是	货物重量
TP	double	是	小车位
TB	double	是	小车基距

### 3.4 数据库与系统的连接

数据库需要和系统软件连接上, 进行数据交互, 实现数据的增加、删除、修改和查询, 才能发挥功用。数据库与软件连接的方式有很多种, 包括常见的“ODBC”, “JDBC”, 以及

数据库服务商提供的 API 来实现数据库访问。

ODBC 全称 Open Database Connectivity，即开放式数据库连接，由微软提供。ODBC 为各种数据库建立了统一的应用程序接口，程序内部使用 SQL 语句来执行对数据库的操作。此外，用户直接将 SQL 语句发送到 ODBC，也能够被识别应用，因为它本身也支持 SQL 语言。应用程序在通过 ODBC 管理数据库时，所有的操作都由相应 DBMS 的 ODBC 驱动程序来完成，并不直接与数据库管理系统进行通信。

JDBC 全称 Java Database Connectivity，即 Java 数据库连接，由 SUN 提供。它也建立了一套规范，为关系型数据库提供了面向对象的应用程序接口，用户可以通过这些接口来访问数据库。此外，JDBC 也是 java 核心类库的一部分，能十分友好地嵌入到 Java 程序中。JDBC 的接口中定义了很多类，比如用来与数据库连接的类、陈述 SQL 语句的类、表示结果集的类，通过这些特殊的类，用户编写的应用程序可以轻松地管理数据库中的数据。不同类型的数据库配备有专门的 JDBC 驱动程序，它往往由数据库的生产厂家提供。

相比之下，ODBC 和 JDBC 有如下区别：①ODBC 是程序性的；JDBC 是面向对象的。②ODBC 可用于任何语言，但仅可以选择在 Windows 平台上使用；JDBC 只能用于 Java 语言开发的程序中，但可以在任何平台上使用。③ODBC 的代码很复杂，很难学习；JDBC 的代码更简单，更容易运行。

对于本系统而言，软件程序使用 C++ 进行开发，不适合使用只限于 Java 语言的 JDBC 方式，故采用 ODBC 方式与数据库进行连接。本系统的应用程序在 Qt 环境下编写的，Qt 中的 QSql 模块提供了对数据库的支持，它是基于 ODBC 方式实现的。QSql 模块使用了数据库驱动与不同的数据库接口实现通信，使得这个模块的接口独立于具体的数据库。QSql 模块中的 QSqlDatabase 类提供一个通过数据库连接来访问数据库的接口，QSqlQuery 类则可以使用 SQL 语句来实现与数据库交互。

## 第四章 系统的软件实现

### 4.1 软件框架 QT

本系统属于典型的桌面工业软件，目前可做相关开发的框架主要有 MFC 和 Qt。这两者都是基于 C++ 的软件框架，相比之下，MFC 只能应用在 Windows 平台上，而 Qt 支持跨平台，编译出的程序可多平台运行。此外，由于 Qt 对底层细节做了友好的封装，用户不必处理一些烦人的 Windows API，就能够开发出界面美观的应用程序，而且 Qt 还可以自定义控件。在综合考虑后，本系统选用 Qt，以便后期借助其跨平台特性移植到其他计算机系统或者嵌入式设备中。

用 Qt 来开发桌面程序有以下优点：

(1) 封装好。Qt 对底层做了独特的封装，模块化程度高，还支持自定义封装，各控件的协同工作十分简单。

(2) 界面漂亮。Qt 可以轻易地做出好看的使用界面。

(3) 跨平台。Qt 支持的操作系统有很多，诸如常见的 Windows 系统、Linux 系统、安卓系统和 iOS 系统。

(4) 对硬件配置要求低。低端工控机的硬件配置可能是连一个图形系统都跑不起来的，而 Qt 可以直接写屏幕实现图形界面，不依赖图形系统。

(5) 功能丰富。Qt 不仅有 GUI 功能，还融合了网络通信、多媒体处理、数据库访问等底层功能。

### 4.2 软件功能特点

桥式起重机结构参数化建模及分析系统作为一个工业软件，除了要求实现起重机参数的输入和计算结果的输出这一核心功能，还需要能够建立、保存工程项目，并可以对项目进行打开、删除、修改等管理功能。所以软件最终设计了两个窗口，“启动窗口”来执行项目的新建、打开等工作，“主窗口”负责执行单个项目的核心功能（参数化建模与分析）。其中“主窗口”支持同时运行和管理多个工程项目，互不干扰，方便用户在不同项目之间来回切换。

#### 4.2.1 软件启动窗口

软件的启动窗口有“打开项目”、“新建项目”、“退出系统”三个执行选项，其 UI 布局如图 5.1 所示。前两者实现项目的打开和新建功能，点击后分别进入启动窗口的二级界面——打开界面和新建界面。



图 5.1 启动窗口

如图 5.2 所示，启动窗口的打开界面会呈现已经建立过的项目，选中后即可打开相应项目，选中后右键也可执行“打开”、“删除”、“编辑”和“查看属性”等功能。启动窗口的新建界面则会根据已经建立项目的编号自动累加，提供新建项目的项目编号，输入设备名称即可新建。



图 5.2 打开界面和新建界面

#### 4.2.2 软件主窗口

软件的主窗口的 UI 布局如下：最上侧是菜单栏，左侧是导航栏，右侧是中心界面，如

ANSYS Parametric Engineering Design (APDL) interface showing the configuration of a crane model.

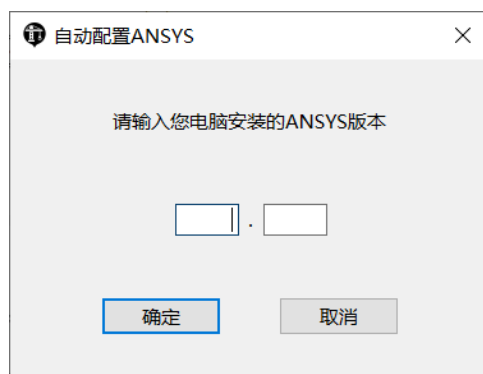
**Menu Structure:**

- ANSYS配置 (ANSYS Configuration)
- 帮助 (Help)
- 002 Test\_2
  - 起重机参数设置 (Craner Parameter Settings)
    - 起重机机型 (Craner Model)
    - 总体参数 (General Parameters)
    - 主梁参数 (Main Beam Parameters)
    - 端梁参数 (End Beam Parameters)
    - 载荷与约束设置 (Load and Constraint Settings)
    - 计算结果 (Calculation Results)

**Crane Models:**

- 类型1 (Type 1):** A single-beam crane configuration. It features a central trolley and end carriages. The main beam is shown in a side view and a cross-section labeled "主梁截面" (Main Beam Section). The end beam is shown in a side view and a cross-section labeled "端梁截面" (End Beam Section).
- 类型2 (Type 2):** A double-beam crane configuration. It features two parallel main beams and a central trolley. The main beam is shown in a side view and a cross-section labeled "主梁截面" (Main Beam Section). The end beam is shown in a side view and a cross-section labeled "端梁截面" (End Beam Section).

菜单栏下有“文件”、“ANSYS 配置”和“帮助”三个菜单项。“文件”项有打开、新建、退出三个选项，与启动窗口相同，前两者可实现项目的打开和新建功能，点击后可以分别打启动窗口的二级界面——打开界面和新建界面。“ANSYS 配置”分为手动配置和自动配置。手动配置即用户自行访问电脑目录，在硬盘中寻找 ANSYS APDL 的启动项所在的路径；自动配置如图 5.4 所示，用户输入电脑安装的 ANSYS 的版本号后，自动寻找 ANSYS APDL 的启动项所在的路径。路径获取后被保存起来，实现与 ANSYS 软件的对接。



导航栏的一级目录是“项目名称”，项目名称由已打开项目的项目编号和设备名称共同组成，独一无二；项目名称下面有“起重机参数设置”、“载荷与约束设置”和“计算结果”三个二级目录；起重机参数设置下面又有“起重机机型”、“总体参数”、“主梁参数”、“端梁参数”四个三级目录，其中起重机机型选择的不同的影响着总体参数、主梁参数、端梁参数这三项对应的界面。

中心界面的功能是：显示左侧导航栏中目录选项要展现的内容，接受用户输入的信息，呈现建模以及仿真运行的结果。参数输入界面提供了两种类型起重机的二维平面图，帮助用户更好地输入起重机参数信息；结果输出界面则预留了计算要求等选项以及仿真分析云图的位置。

## 4.3 软件运行流程

软件运行流程如图 5.5 所示。

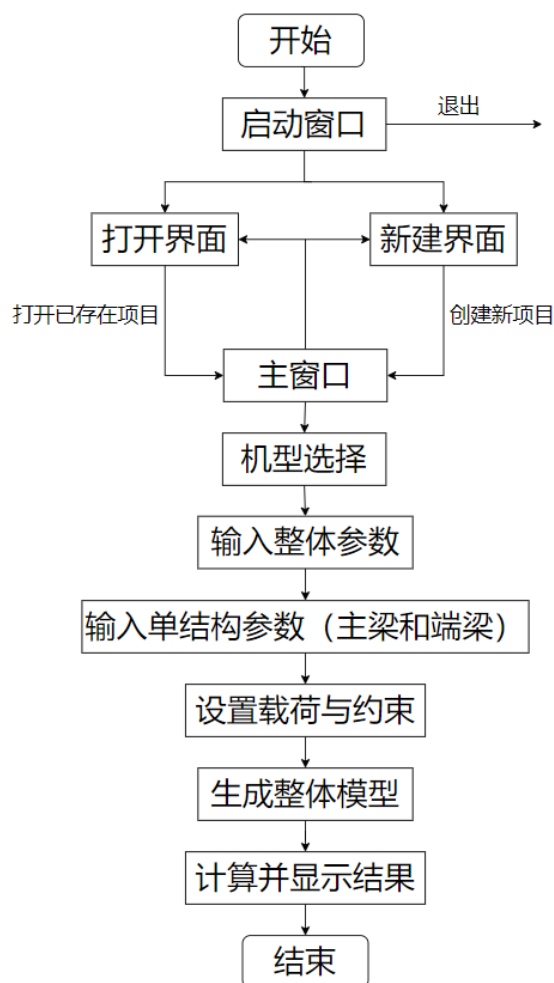


图 5.5 软件运行流程图

## 4.4 软件应用实例

### 4.4.1 创建项目并选择机型

打开软件后选择打开选项即可打开已经保存过的工程项目，或者选择新建选项创建新的工程项目，如图 5.2 所示。进入主窗口后，中心界面会显示出可供选择的起重机机型，目前有单梁（类型 1）和双梁（类型 2）两种类型，如图 5.3 所示，点击圆钮和图片均可切换当前项目的机型。

## 4.4.2 输入起重机参数

总体参数输入界面主要输入起重机的大体参数，例如基距、轨距、车轮参数、梁高、小车位的左右位置等等，如图 5.6 所示。总体参数决定了起重机模型的大小，后续的参数输入都依托于总体参数，所以这一步至关重要。要注意模型的坐标系原点为轨距中点，所以小车左极限位置  $L1$  一般为负数。保存整体参数后，当前项目的起重机类型将被重新确定，保存到数据库中，而项目之前所保存的所有起重机参数将被清除或者覆盖掉。

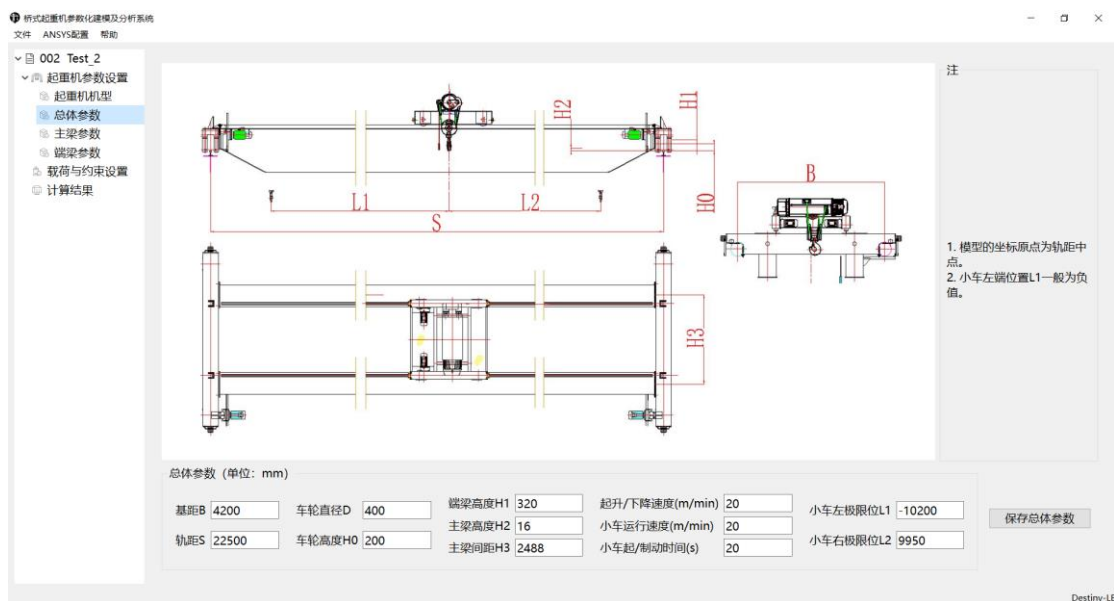


图 5.6 总体参数输入界面

梁参数输入界面包括主梁参数和端梁参数。该界面是通过输入结构的信息来构建结构的有限元模型，主要的参数有梁的长、宽、板厚、板长等尺寸以及变截面位置、斜率，如图 5.7 所示。主梁和端梁都是起重机的单结构，其模型可以单独创建，保存参数后点击生成模型即可。要注意每次生成模型前必须先保存修改后的参数，将结构参数同步到数据库中。



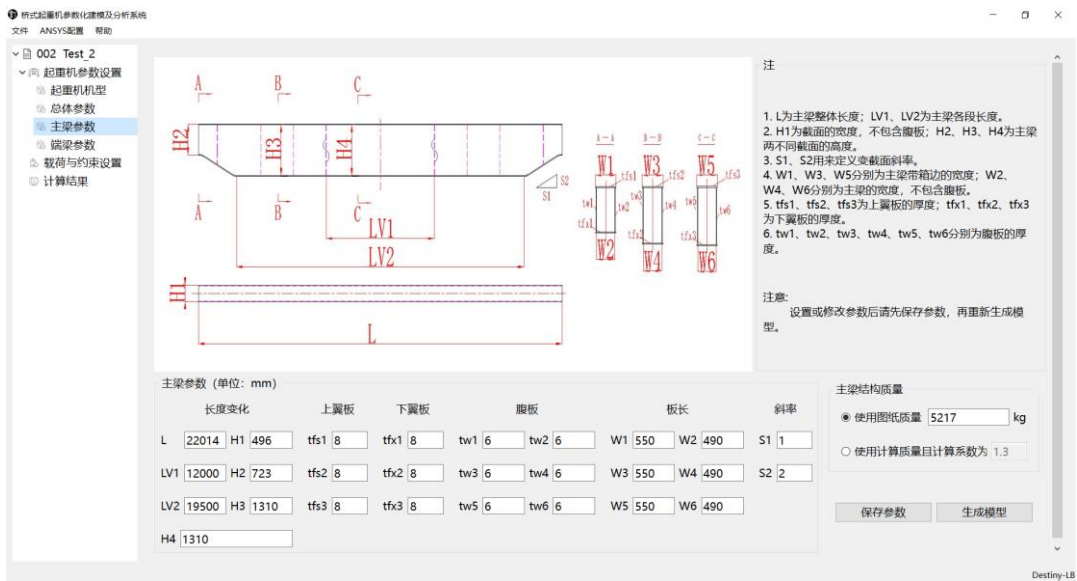


图 5.7 梁参数输入界面

#### 4.4.3 设置载荷与约束

载荷与约束设置界面的主要功能是确定载荷和加载位置。载荷类型有整机重量、小车重量、吊具重量和货物重量；加载位置包括小车位和小车基距，如图 5.8 所示。注意每次生成整体模型前必须先保存修改后的数据，同步到数据库中。



图 5.8 载荷与约束设置界面

通过该界面，可以生成起重机的整体模型。如图 5.9 示，是当前项目的整体模型，由双梁式的主梁以及两端的端梁构成。



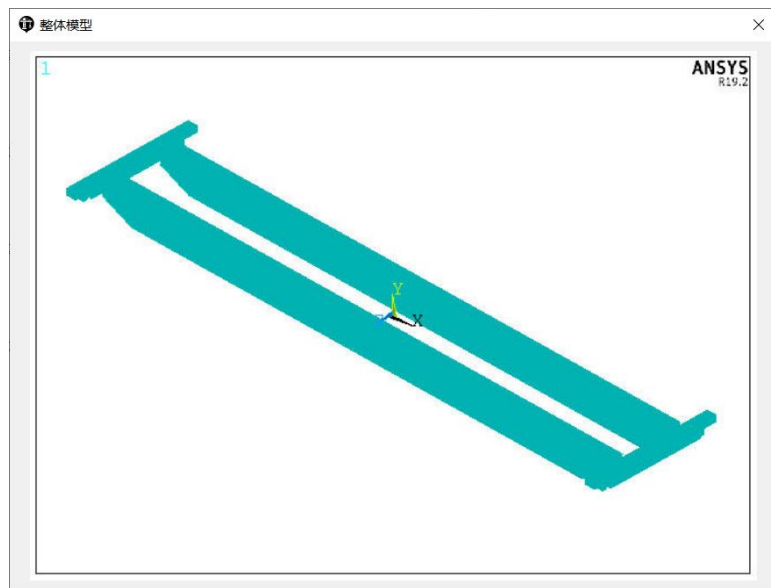


图 5.9 整体模型

#### 4.4.4 计算结果

计算结果显示界面可以选择计算标准，计算载荷和所要计算的构件，来进行有限元分析，如图 5.10 所示。本系统利用 ANSYS 对模型进行应力、位移计算以及疲劳估算，并将计算结果进行显示，显示结果包括最大应力值、最大位移值、应力图、位移图和疲劳示意图。要注意计算结果前必须先生成整体模型。

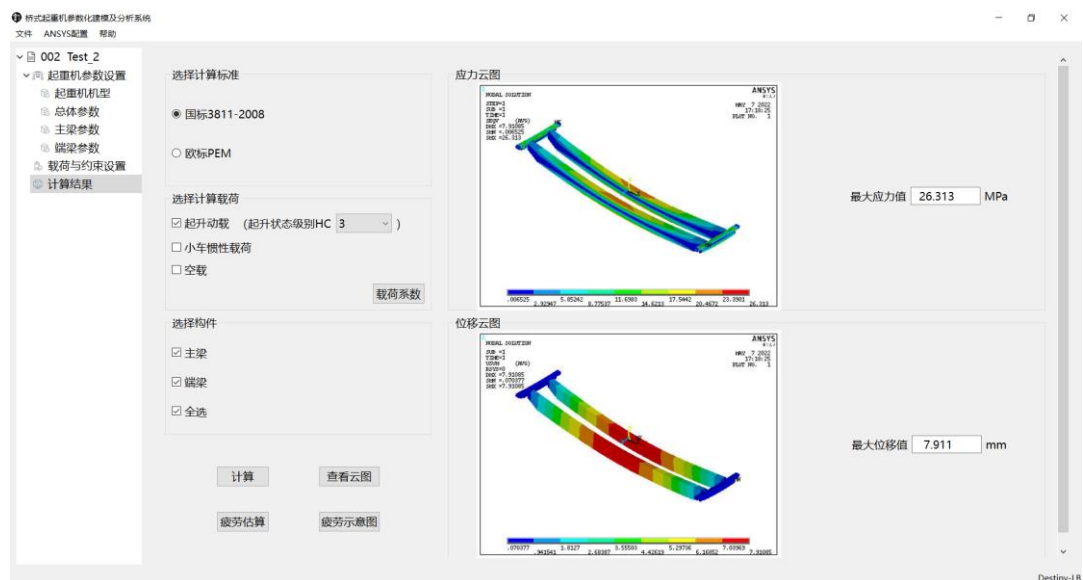


图 5.10 计算结果显示界面

## 第五章 总结与展望

### 5.1 全文总结

本文以参数化技术、有限元技术为基础，在 Qt 开发框架下，利用 ANSYS 参数化语言 APDL，构建了桥式起重机主要部件的参数化建模及分析系统。系统具有图形化交互界面和后台数据库，可以直观便捷的进行各项操作，输入的数据也会按工程项目保存起来。借助此系统，设计人员只需要输入起重机的参数，便可获得起重机的模型和仿真分析的结果，整个流程得到了简化，避免了大量重复性工作，设计效率得到了极大提高。

本文主要论述了以下几方面的内容：

(1) 系统的各组成模块和总体逻辑结构。本系统由信息交互模块，数据管理模块，计算处理模块这三大部分组成，各模块相互协调，确保系统的稳定运行。系统通过交互界面获取设计人员操作命令，对传入的起重机参数进行计算处理后，自动调用后台运行的 ANSYS 完成建模和分析。

(2) 参数化技术和有限元技术在系统中的应用。本系统以 ANSYS 软件为支撑，利用 APDL 工具来实现参数化建模和仿真分析。桥式起重机的模型被简化后，用参数驱动建立符合要求的主梁、端梁模型，并用参数进行模型的约束和加载，实现建模和仿真分析的全过程。

(3) 系统数据库的设计以及数据库与系统的接口技术。本系统依靠 SQLite 数据库储存项目信息和起重机参数信息，起重机参数信息又分为整体参数信息、主梁参数信息、端梁参数信息、载荷与约束参数信息。系统对工程项目的任何操作都要经由数据库来完成，参数化建模和分析也需从数据库调用数据。

(4) 系统的开发框架和软件的运行流程。本系统是在 Qt 框架下开发的，支持跨平台，拥有简洁美观的 GUI 界面。软件的窗口分为启动窗口和主窗口，能够实现项目的打开、删除、修改等功能，支持多个工程同时运行。软件的运行流程为：创建项目并选择机型→输入起重机参数→设置载荷与约束→计算结果。

### 5.2 研究展望

随着现代科技不断发展，计算机技术在机械工程领域得到了越来越普遍的应用，相应技术从业者的工作方式也越来越方便快捷，工作效率越来越高。我相信在未来，包括起重机在内的各种工程机械在设计研发、制造装配方面也会有更高的要求，这就需要研发更先进的设计制造工具，本文所研究的内容只不过是沧海一粟，希望有越来越多从事机械和软科研究的科研人员一起参与进来，为中国的制造业修路架桥、添砖加瓦。

虽然本文已经对桥式起重机参数化建模及分析系统的核心技术和要点展开了研究论述，但是由于能力尚浅，时间有限，本文研究的内容还有很多不足，可从以下几个方面再做进一步的完善：

(1) 增加起重机类型。本系统只针对桥式起重机进行参数化建模和有限元分析，而且目前只包含两种类型的桥式起重机，这远远不够。后续可以增加系统的起重机类型，包括轻型起重机、门式起重机、臂架式起重机以及它们的子机型。

(2) 拓展本系统的功能。除了参数化建模和有限元分析以外，还可以加入动态分析、寿命分析、优化建议、自动生成说明书等更多功能，开发出一套大型的起重机设计系统，以满足各种各样的工程需求。

(3) 建立起标准的数据库。除了起重机类型外，还可以加入材料、工艺等其他起重机设计过程中需要的数据信息，使数据库更加完善和标准化。

(4) 考虑起重机结构的多样性，并提高计算精度，比如焊缝计算、螺栓连接计算等，让模型更加接近真正的起重机实体。

(5) 开发系统自己的有限元分析程序，摆脱对 ANSYS 的依赖。

(6) 建立云服务系统。运用互联网技术，实现起重机设计的远程操作，设计人员只需登录云服务器即可使用系统。

## 参考文献

- [1] 《起重机设计手册》编写组. 起重机设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [2] 钱能. C++程序设计教程[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [3] Abraham Silberschatz. 数据库系统概念[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [4] 胡宗武, 汪西应. 起重机设计与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 张波. Qt 中的 C++技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [6] 郑阿奇. Qt 4 开发实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [7] 孔令德. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- [8] 陈根. UI 设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
- [9] 殷人昆. 数据结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- [10] 吴靖. 数据库原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [11] 王胜永. ANSYS 有限元理论及基础应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [12] 胡仁喜. ANSYS 19.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [13] 尚晓江. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [14] 李占营, 阚川. ANSYS 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, 2017.
- [15] 龚曙光, 黄云清. 有限元分析与 ANSYS APDL 编程及高级应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [16] 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.
- [17] Marc Gregoire. C++高级编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [18] Grant Allen. SQLite 权威指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [19] Mark Summerfield. Qt 高级编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [20] Jasmin Blanchette. C++ GUI Qt4 编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [21] Zhang. Practical guide to Oracle SQL, T-SQL and MySQL [M]. Boca Raton: CRC Press,Taylor & Francis Group, 2018.
- [22] Armstrong. C++ for financial mathematics[M]. Boca Raton: CRC Press,Taylor & Francis Group, 2017.
- [23] Thompson. ANSYS mechanical APDL for finite element analysis[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [24] 李淑华, 李树森. 桥式起重机桥架结构的 ANSYS 有限元分析[J]. 林业机械与木工设备, 2005, 33(6): 28-30.

- [25] 曾春. 基于 ANSYS 的桥式起重机桥架结构有限元动态分析研究[D]. 武汉理工大学, 2006.
- [26] 李洪富. 起重机桁架式单臂架结构的参数化设计与优化[D]. 武汉理工大学, 2014.
- [27] 崔华伟, 徐长生. 桥式起重机桥架结构参数化建模与有限元分析[J]. 中国水运 (学术版), 2006(12): 79-80.
- [28] 付韬韬. 基于 VC++ 和 ANSYS 接口的参数化桥式起重机桥架有限元分析系统[D]. 武汉科技大学, 2008.
- [29] 鲍东. 利用参数化设计技术的起重机快速设计研究[J]. 现代制造工程, 2014(02): 1-5.
- [30] 宋元岭, 卫良保, 左宇飞, 侯明凯, 师玮. 基于 ANSYS Workbench 的桥式起重机双梁桥架有限元分析[J]. 起重运输机械, 2015(07): 44-48.
- [31] 周永升, 许彩云, 王强. 基于参数化建模的桥式起重机有限元分析[J]. 周口师范学院学报, 2019, 36(02): 56-58.
- [32] 陈宇. 基于 VB 与 ANSYS 的门式起重机参数化建模[J]. 军民两用技术与产品, 2018(14): 93-94.
- [33] 邓道林. 基于 VB 可视化技术的港口门座起重机参数化建模及有限元分析[D]. 福州大学, 2011.
- [34] 刘标, 程文明, 栗园园. 基于 VB 与 APDL 的门式起重机结构参数化有限元分析系统开发[J]. 起重运输机械, 2010(12): 9-12.
- [35] 史进, 郑建荣, 俞中建. 基于 APDL 的门式起重机主梁参数化建模与仿真[J]. 起重运输机械, 2009(04): 79-81.
- [36] 魏勇. APDL 环境下的参数化有限元分析[J]. 现代制造工程, 2008(08): 59-61.
- [37] 赵干荣, 徐海涛. APDL 有限元优化技术在结构设计中的应用[J]. 四川建筑, 2006, 26(6): 105-106.
- [38] Nuhoho Raphael Elimeli. An advancement of SQLite database encryption models and secured proxy channels; focus point on Android[J]. 2019.
- [39] Moses Ntanda Kyebambe. Analysis of patterns in patent data: observations and applications [J]. 2018.
- [40] Wei He. Adaptive Control Design for a Nonuniform Gantry Crane with Constrained Tension [J]. 2014.