目录

[第一章 绪论 4](#_Toc198391772)

[1.1 研究背景与意义 4](#_Toc198391773)

[1.2 国内外研究现状及发展趋势 4](#_Toc198391774)

[1.3 本文研究内容与结构安排 4](#_Toc198391775)

[第二章 相关理论 5](#_Toc198391776)

[2.1 不确定度理论基础 5](#_Toc198391777)

[2.1.1 不确定度的定义与分类 6](#_Toc198391778)

[2.1.2 不确定度的合成与传播 6](#_Toc198391779)

[2.1.3 不确定度在制造领域的应用意义 6](#_Toc198391780)

[2.2 测量不确定度与误差分析 6](#_Toc198391781)

[2.3 不确定度理论对数控加工建模的支撑作用 7](#_Toc198391782)

[本章小结 7](#_Toc198391783)

[第三章 加工不确定度理论与建模 7](#_Toc198391784)

[3.1 加工不确定度的来源 7](#_Toc198391785)

[3.1.1 工件定位误差 7](#_Toc198391786)

[3.1.2 机床定位误差 7](#_Toc198391787)

[3.1.3 刀具运动误差 7](#_Toc198391788)

[3.1.4 主轴误差 7](#_Toc198391789)

[3.1.5 卡具误差 7](#_Toc198391790)

[3.1.6 夹紧变形 7](#_Toc198391791)

[3.1.7 切削力误差 8](#_Toc198391792)

[3.1.8 环境误差 8](#_Toc198391793)

[3.1.9 热处理与残余应力变形 8](#_Toc198391794)

[3.2工序不确定度模型与工艺链不确定度模型。 8](#_Toc198391795)

[3.3 加工不确定度分类 9](#_Toc198391796)

[3.4 加工不确定度的评估方法 9](#_Toc198391797)

[3.5 不确定度控制与优化策略 9](#_Toc198391798)

[3.6 加工不确定度理论的工程应用 9](#_Toc198391799)

[3.7 数字孪生概述及其与不确定度建模的融合 9](#_Toc198391800)

[本章小结 9](#_Toc198391801)

[第四章 软件编写 10](#_Toc198391802)

[3.1 计算软件架构整体设计 10](#_Toc198391803)

[本章小结 10](#_Toc198391804)

[第四章 案例应用 10](#_Toc198391805)

[4.1 界面设计 10](#_Toc198391806)

[4.2 软件开发平台介绍 10](#_Toc198391807)

[4.3 基于开源库实现功能完成 10](#_Toc198391808)

[4.4 软件计算结果验证 10](#_Toc198391809)

[4.5 本章小结 10](#_Toc198391810)

[第五章 仿真 10](#_Toc198391811)

[第六章 总结与展望 10](#_Toc198391812)

[6.1 全文总结 10](#_Toc198391813)

[6.2 研究展望 10](#_Toc198391814)

[参考文献 10](#_Toc198391815)

[致谢 11](#_Toc198391816)

# 绪论

## 1.1 研究背景与意义

制造业作为国家经济发展的基础和支柱，对提升综合国力、促进产业升级、保障经济安全具有战略性作用。自改革开放以来，我国制造业迅速发展，逐步建立起完备的产业体系，并在全球制造业中占据重要地位。然而，随着国际产业竞争日趋激烈，尤其是制造业向智能化、高精度、高质量方向发展的趋势日益显著，我国制造业在技术创新、精度控制和产品质量等方面仍面临诸多挑战。

数控加工（CNC）技术以其高效率、高精度、高自动化的优势，广泛应用于航空航天、精密仪器、汽车制造、医疗器械等高端制造领域，已成为制造业升级的关键支撑技术。当前，随着产品结构的日益复杂和精度要求的不断提高，如何有效降低数控加工过程中的不确定性，提高加工精度，成为研究热点。

加工精度的不确定性来源于加工系统内部结构误差、刀具磨损、环境变化、材料不均匀性等因素，这些因素的综合作用导致加工过程难以完全预测与控制。因此，深入研究加工精度的不确定度建模及控制方法，尤其是结合新兴的数字孪生技术，实现对加工过程的实时预测与优化控制，对提高加工质量与效率具有重要的理论意义和实际价值。

## 1.2 国内外研究现状及发展趋势

近年来，国内外学者围绕加工精度不确定度及其控制方法进行了广泛研究，取得了一系列重要成果。

国际上，Altintas等学者提出了基于实时监测与控制的数控加工精度优化方法，通过在线数据分析实现了加工误差的实时校正；Armendia等验证了数字孪生技术在加工不确定度控制中的有效性，尤其在工业环境下的实际应用效果显著；Irino等则通过构建高保真数字孪生模型，实现了机床热误差的实时动态补偿。

国内方面，王金江等研究了数字孪生驱动的数控机床虚拟调试技术，有效提高了机床运行参数的优化能力；张希阳等提出了五维数字孪生框架，实现了数控系统的仿真优化和性能评估；庄可佳等研究了刀具磨损的数字孪生预测技术，实现了刀具状态的高精度实时监测。

尽管已有研究取得一定进展，但仍存在若干问题和挑战：

（1）高保真数字孪生模型构建的统一标准与方法体系尚未完全建立；

（2）多源数据融合技术尚需进一步优化，数据处理效率和实时性仍需提高；

（3）缺乏对加工过程实时反馈控制和动态适应性调整的深入研究。

未来研究趋势将聚焦于以下几个方面：

（1）利用人工智能技术提高加工误差预测和模型自适应调整能力；

（2）完善数字孪生系统的实时反馈功能，推进闭环控制机制在实际生产中的应用；

（3）强化多学科交叉融合，扩展数字孪生系统在制造领域的应用深度和广度。

## 1.3 本文研究内容与结构安排

本论文以加工精度不确定度为研究对象，结合不确定度理论和数字孪生技术，构建加工精度的不确定度模型和控制方法。具体研究内容包括：

（1）梳理数控加工过程中各类误差来源，并建立系统性分类体系；

（2）基于标准不确定度合成理论，构建工序级与工艺链级加工不确定度的数学模型；

（3）开发相应的软件工具，实现对所构建模型的数值分析与仿真；

（4）探讨将加工不确定度模型嵌入数字孪生系统的技术实现路径，以推动智能化加工系统的发展。

全文结构安排如下：

第一章为绪论，介绍了选题研究背景、研究意义和国内外研究现状及发展趋势，明确研究内容和技术路线。

第二章系统阐述不确定度理论的相关基础知识及其在制造领域中的应用。

第三章分析加工不确定度的来源，建立工序级和工艺链级的不确定度模型。

第四章介绍基于理论模型的软件实现过程及系统架构。

第五章通过具体案例，验证理论模型和软件工具的有效性与实用性。

第六章对全文研究内容进行总结，提出未来进一步研究的方向。

程序设计所使用的软件

本次毕业设计所使用的开发工具为Qt 4.11.1，可支持Linux（32位及64位）、Mac OS 以及 Windows10系统，本次毕业设计选择使用Windows 环境下进行窗口程序的开发。

# 第二章 相关理论

## 2.1 不确定度理论基础

随着制造技术的发展，加工精度已成为衡量产品质量和制造水平的重要指标。不确定度作为表征测量结果可信程度的参数，是加工质量评估中不可或缺的概念。其理论基础为数控加工过程中的误差建模与精度分析提供了有力支持。

### 2.1.1 不确定度的定义与分类

根据国际标准化组织（ISO）的定义，不确定度是“表征合理赋予被测量值的分散性，与测量结果相关的参数”。按其获取方式，不确定度分为A类和B类两种：

A类不确定度：通过重复测量并进行统计分析获得，主要反映随机误差影响。

B类不确定度：通过其他方式评估获得，如仪器规格说明、校准报告、经验数据或参考文献，主要反映系统误差。

### 2.1.2 不确定度的合成与传播

在实际评估中，多个独立不确定度源需要合成为一个总的不确定度，通常采用方和根法：

其中 为各个不确定度分量。

当测量结果是多个变量函数关系的输出时，不确定度传播可采用误差传播定律：

此方法广泛应用于机械加工中多参数影响的联合评估。

### 2.1.3 不确定度在制造领域的应用意义

不确定度理论为加工精度提供量化标准，有助于：

（1）明确精度范围，判断加工结果是否达标；

（2）优化工艺流程，识别主要误差源并制定针对性改进措施；这也是本毕业设计主要研究的问题。

（3）实现生产过程的质量控制与风险预警。

通过合理评估与控制不确定度，可有效提升产品一致性、降低返工率，推动精益制造与智能制造的发展，大力降低产品的生产成本，缩短产品的生产周期。

## 2.2 测量不确定度与误差分析

测量不确定度理论是对“误差”进行科学建模的重要方法，强调将随机性与系统性因素进行综合考虑。

在实际测量中，变量的测量值受到诸多误差源影响，这些误差源可分为两类：

\* 不变误差源：在每次测量中产生相同影响，如设备零偏，属系统误差。

\* 可变误差源：在测量过程中具有波动性，属随机误差。

标准不确定度是误差源总体标准差的估计值，其数学表达式为：

其中， 为样本均值， 为第次测量值。

例如，某尺寸测量值为 4.80 cm，估计范围为 4.75～4.85 cm，其中 4.80 cm 是最佳估计值，0.05 cm 是对应的不确定度。

传统误差通常分为“随机误差”和“系统误差”，对应不确定度中的随机不确定度和系统不确定度两种成分。这种理论框架为机械加工、测量系统的性能评估和误差建模提供了坚实基础。

## 2.3 不确定度理论对数控加工建模的支撑作用

在后续章节中，本论文将基于本章所述的不确定度理论，对数控加工过程中多种误差来源进行系统建模，并建立工序级和工艺链级的加工不确定度分析框架。该框架可作为数控加工精度优化与过程控制的理论依据，也是构建数字孪生系统的重要基础。

## 本章小结

本章围绕不确定度理论的基本定义、分类方法、传播规律及其在制造领域中的意义进行了系统论述。通过明确不确定度的数学处理方法和应用背景，为后续的加工误差建模和数字孪生系统设计提供了理论支撑。

# 第三章 加工不确定度理论与建模

加工制造过程中因存在各种误差影响因素导致加工结果不能准确确定，也存在着不确定性。因此，加工不确定度是与加工制造过程中产生的物理量及加工质量相联系的参数，表征零件加工过程中各影响因素对加工结果的分散特性。加工不确定度是对可能影响加工结果的误差区间的估计，以物理量或加工结果范围的标准偏差或标准偏差的若干倍表示。前者为标准不确定度，后者为与一定置信水平相关的扩展不确定度。

加工不确定度理论是测量不确定度理论在机械加工领域的具体应用和拓展。它不仅考虑了测量过程中的不确定度因素，还涵盖了加工过程中各种因素对加工精度的影响。加工不确定度理论为提高加工精度、优化加工工艺以及质量控制提供了重要的理论基础。

## 3.1 加工不确定度的来源

在机械加工过程中，由于多种误差因素的综合作用，导致加工结果存在不确定性。加工不确定度反映了各类误差源对加工质量的影响程度，是进行精度分析和工艺优化的重要依据。

### 3.1.1 工件定位误差

工件定位误差是指因夹具精度不足、定位基准不一致或操作不当等因素导致工件实际位置与理论位置存在偏差。这种误差影响加工尺寸精度和位置精度。

### 3.1.2 机床定位误差

机床自身存在结构误差、运动误差和数控系统误差等，这些误差直接影响刀具轨迹与工件之间的相对位置，是加工误差的主要来源。

### 3.1.3 刀具运动误差

刀具在加工过程中的安装误差、磨损及振动会导致其实际路径偏离理论轨迹，从而影响工件表面质量和尺寸精度。

### 3.1.4 主轴误差

主轴回转精度不良、轴向和径向跳动以及装配不当会引发加工中的同轴度误差，尤其在高速旋转下更为明显。

### 3.1.5 卡具误差

卡具制造误差、安装误差和使用磨损等因素导致夹紧位置不准确，可能引起工件位移或振动，降低加工稳定性。

### 3.1.6 夹紧变形

夹紧过程中，工件因受力不均而产生弹性或塑性变形，特别是在薄壁件加工中尤为突出。

### 3.1.7 切削力误差

切削过程中由于切削力变化引发的误差，受材料不均匀性、刀具状态及切削参数影响，是动态加工不确定度的重要组成部分。

### 3.1.8 环境误差

环境温度、湿度和振动等外部因素会导致机床热变形或系统不稳定，间接影响加工精度。

### 3.1.9 热处理与残余应力变形

热处理工艺或切削过程中产生的残余应力在后续加工或冷却过程中释放，引起零件变形，影响后续工序的精度。

## 3.2工序不确定度模型与工艺链不确定度模型。

工序的加工不确定度包含对前道工序加工不确定度*U*（*i*-1）的继承和本道工序的再生不确定度*R*（*i*）两部分，如图10所示。



图 10工序加工不确定度的再生与继承

其中，<+>代表两不确定度的合成，遵循如下计算法则：

假设不确定度,,则合成不确定度为：

本道工序的再生不确定度*R*(*i*)是本道工序误差源*P*（*i*）通过贡献系数*C*(*i*)的综合作用结果。

确定各工序误差源*P*(*i*)贡献系数（灵敏度）*C*(*i*) 和继承系数*G*(*i*)，工艺链加工不确定度建模工作即可完成。

通过生产实践进行估计或测定，环境误差与材料的膨胀系数及几何尺寸有关，可以通过下式来计算：

其中*L*—工件的几何尺寸，*∆T*为环境温度变化，*μ*—工件材料的膨胀系数。

对于大直径齿轮来说，径向尺寸远大于轴向，因此其径向环境误差比轴向误差值大。

本加工不确定度模型的作用在于：在新的零件进行加工前进行工艺仿真，从而对各工序及全工艺链产生的误差进行评估，找到粗大误差项采取工艺措施对误差进行控制，从而保证最终加工精度；同时也可利用该加工不确定度模型进行误差分配，降低工艺风险、控制加工成本。

## 3.3 加工不确定度分类

根据误差特征，加工不确定度可分为：

（1）随机不确定度：来源于工况波动、设备噪声、材料不均匀性等；

（2）系统不确定度：源于设备结构误差、装配误差、控制算法等可重复因素；

（3）动态不确定度：由切削力变化、刀具磨损、温升等随时间演化的因素引起。

## 3.4 加工不确定度的评估方法

（1）实验统计法：通过重复加工实验获取样本数据，统计分析计算不确定度；

（2）误差分析法：建立误差源模型，估计每一项误差贡献并合成整体不确定度；

（3）数字孪生法：构建数字模型，基于虚拟仿真和实时数据评估加工过程的不确定度； （4）人工智能法：应用机器学习分析历史数据，实现误差预测与模型自适应。

## 3.5 不确定度控制与优化策略

为降低加工不确定度，可采用如下措施：

（1）误差补偿：采用传感器与控制系统实时修正系统误差；

（2）工艺参数优化：通过试验设计选择最佳切削参数，提高系统稳定性；

（3）环境控制：稳定温度、湿度等条件，减少外部干扰；

（4）实时监测与反馈：采集关键参数实现动态控制与调整；

（5）材料与夹具优化：选择适合的工件材料与夹具结构，提升刚性。

## 3.6 加工不确定度理论的工程应用

加工不确定度理论广泛应用于：

（1）高精度数控加工的精度保障与工艺评估；

（2）刀具寿命预测与换刀策略优化；

（3）复杂结构件加工流程设计与质量控制；

（4）数字孪生制造系统中误差建模与反馈控制模块。

## 3.7 数字孪生概述及其与不确定度建模的融合

数字孪生是通过构建与物理加工过程相对应的虚拟模型，实现对加工状态的实时映射、预测和优化控制。其关键要素包括：

实体系统：如数控机床、工件、环境；

虚拟模型：加工精度数学建模、不确定度传播模型；

数据接口：传感器采集系统、数据融合算法；

智能反馈：基于模型的参数优化与控制策略输出。

将本章建立的不确定度模型集成进数字孪生系统，可实现加工误差的预测与动态补偿，构建面向高端制造的智能控制系统。

## 本章小结

本章系统梳理了数控加工过程中的主要误差源，并从工序级与工艺链级构建了加工不确定度建模方法。分类明确了误差类型，结合不同评估与控制策略，提出将不确定度模型嵌入数字孪生系统以实现闭环反馈优化，为后续章节的软件实现和案例分析奠定了理论基础。

# 第4章 软件开发与实现

## 4.1 系统总体架构

本研究开发了一个基于数字孪生技术的数控加工不确定度建模与分析系统。该系统主要包括数据采集模块、数据处理模块、不确定度建模模块、仿真分析模块和用户交互界面。系统架构如图4.1所示。

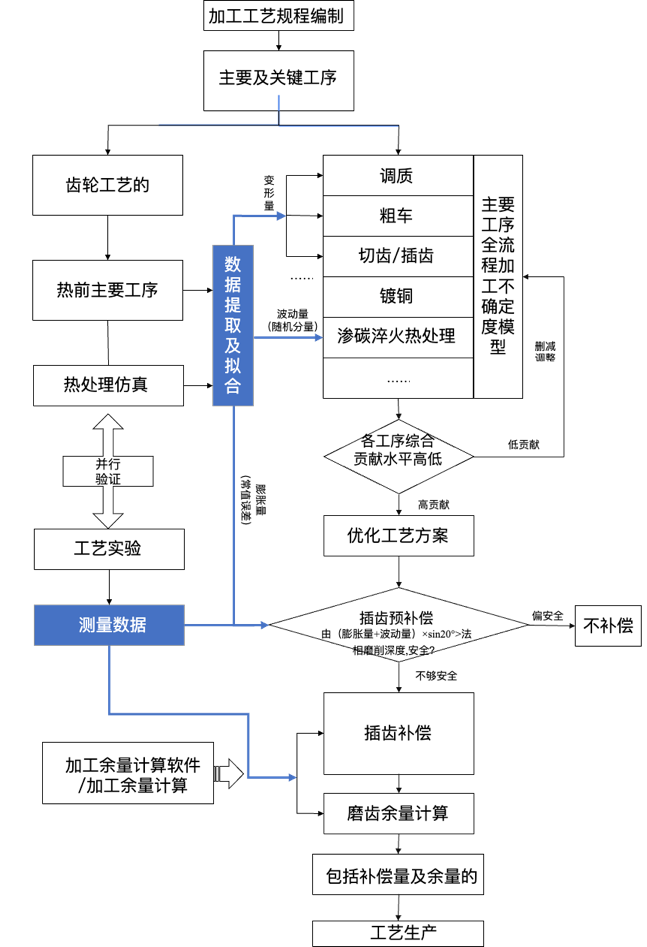


图4.1 系统架构图

| **模块** | **主要职责** |
| --- | --- |
| **Widget** | 软件入口、菜单栏、版权信息 |
| **CHOOSE** | 工序列表管理；调度 INPUT；持久化输入/结果；调用 process\_calc |
| **INPUT** | 对应数据输入的 300+ 个控件：默认值初始化、获取用户输入、即时计算预览 |
| **process\_calc** | 纯算法库。① 构造误差权重等② 逐行合成不确定度③ 递推遗传相关因数 |
| **saveToExcel** | 采用 QXlsx 写入：序号、工序名、误差名称、不确定度数值 |
| **SharedData** | 单例缓存：inputDataList / calculatedResultList / processList |

## 4.2 开发环境与技术选型

工序优化软件在 Windows 操作系统上使用 Qt Creator 4.11.1作为开发平台，Qt Creator 是由 Qt 公司（原诺基亚，现为 The Qt company）开发的一款跨平台的集成开发环境（IDE），专门用于开发使用 Qt 应用框架的程序，支持 C++、QML 和 Python 等语言。Qt Creator 是专为 Qt 开发优化，集成 moc/uic 支持，UI 编辑无缝连接。适合开发 UI 密集型项目，同时开发效率高，支持热重载与实时预览。

软件使用 C++文本编程语言作为开发语言。C++是一种面向对象的编程语言，由 C 语言升级扩展而来。C++与 C 语言的设计思想相似，都是一种过程化的设计思想。同时，C++语言 还具有封装继承和多态的特性。在编程中可以使用指针实现对内存地址的直接操作，因此 C++的代码在运行效率和处理速度上有很大的优势，其主要用于对处理速度要求较高的任务，例如操作系统、大型网络游戏开发等。结合本毕业设计的预想，软件需要接收并处理大量的数据，处理速度和实时性要求较高，因此选择 C++编程语言是最好的选择之一。

本软件采用 Qt 跨平台图形应用程序开发框架进行开发。Qt 具有优良的跨平台特性，广泛支持包括 Linux、Windows 在内的多种主流操作系统。Qt 基于 C++ 编写，具备良好的面向对象结构和模块化设计思想，内部封装了大量高效的 API，极大提升了代码的复用性和开发效率。除图形界面构建外，Qt 还集成了多线程处理、数据库管理、网络通信等功能模块，可满足复杂系统的开发需求。本项目使用 Qt 官方集成开发环境 Qt Creator 进行开发。相比传统方式将 Qt 作为第三方库导入 Visual Studio 的做法，Qt Creator 更加契合 Qt 框架的构建与调试流程，集成度高，支持信号槽机制、界面设计与代码逻辑的无缝连接，大幅提高了开发效率与系统稳定性。

## 4.2 系统架构设计

### 4.2.1 架构设计理念

本系统采用分层结构架构设计，参考了经典的MVC（Model-View-Controller）思想，分为界面层、数据处理层、数据共享层和主程序入口四大部分。该架构有利于各模块职责划分清晰，便于后期维护和功能扩展。通过解耦不同层级的逻辑，可以在不影响其他模块的情况下，对某一层进行独立优化。

### 4.2.2 模块结构说明

1. 界面层（View）：采用 Qt Designer 设计，主要包括 choose.ui、input.ui 和 widget.ui 三个界面文件，分别对应主界面、数据输入界面和整体容器窗口。

2. 数据处理层（Model）：负责工艺计算与逻辑处理，主要包括process\_calc.cpp 与 datalayer.cpp。

3. 数据共享层：通过单例类 SharedData 实现数据在模块间的共享，主要定义于 shareddata.h。

4. 主程序入口（Controller）：程序由 main.cpp 启动，通过加载主界面并初始化数据流程控制。

### 4.2.3 模块间通信机制

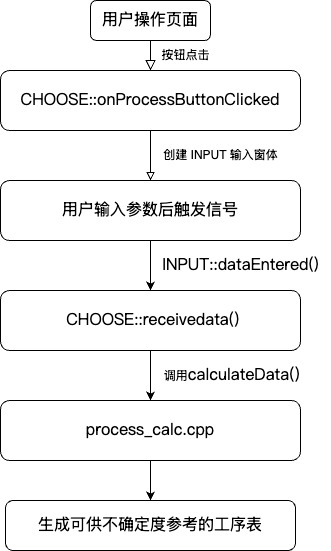
系统使用 Qt 框架提供的信号与槽机制进行模块间通信，保障界面响应与数据逻辑同步执行。通过 connect 函数实现类之间的事件监听与响应，部分使用 lambda 表达式进行槽函数绑定，提高代码灵活性。

connect(inputDialog, &INPUT::dataEntered, this, [=](const QMap<QString,double>& data){

this->receivedata(data, idx);

});

4.2.4 系统模块调用流程图



4.3 核心模块与函数详解

### 4.3.1 CHOOSE 类

CHOOSE 类是主界面控制模块，是系统初始化后首先进入的页面。其主要职责是负责工序的添加、删除、参数输入窗口的调起，以及与 SharedData 的交互与结果显示。通过该模块，用户可以动态管理多道加工工序及其参数流程。

程序启动时，首先执行 CHOOSE 构造函数：

**CHOOSE::CHOOSE(QWidget \*parent)**

该函数调用 ui->setupUi(this) 加载 Qt Designer 设计的 choose.ui 页面。在 UI 加载完成后，程序通过 findChildren<QPushButton\*>() 遍历所有按钮，使用 for 循环配合 auto 关键字逐一判断按钮名称。为避免将非工序按钮（如删除、保存等功能按钮）误绑定操作逻辑，使用 if 条件语句进行名称判断过滤，例如排除名称中包含 delete、pushButton\_35、pushButton\_36 的按钮。

对于实际的工序按钮，系统通过 lambda 表达式将每个按钮的点击信号连接至统一的槽函数 onProcessButtonClicked()，例如：

connect(button, &QPushButton::clicked, this, [=]()

{this->onProcessButtonClicked();});

点击工序按钮后，onProcessButtonClicked() 被触发。其流程如下：

1. 判断该按钮是否为功能按钮，若是则直接返回；

2. 提取按钮的名称，调用 addProcess(const QString &name) 函数；

3. 在右侧的 QTextBrowser 中添加条目，并创建新输入窗口。

添加工序的核心函数如下：

void CHOOSE::addProcess(const QString &name)

该函数将工序名称添加到 QListWidget 中，并在内部数据结构中登记索引与默认初始值，为后续数据输入和计算打下基础。

当输入数据完成后，INPUT 类会发出dataEntered(QMap<QString,double>) 信号。CHOOSE 通过绑定的 receivedata() 函数接收该信号：

void CHOOSE::receivedata(const QMap<QString, double> &data, int idx)

此函数实现了对当前工序数据的接收、验证与 SharedData 更新，并调用 calculateData() 函数计算当前工序的加工结果。

4.3.2 INPUT 类

INPUT 类是系统中的数据输入模块，用于用户在每道工序中输入加工参数数据。本节将结合程序构成和界面交互方式，详细介绍该模块的工作原理与使用方式。

函数原型如下：

void INPUT::setPreviousResults(const QMap<QString,double> &prevData);

该函数用于将前一工序的计算结果作为参考值显示在输入界面中，辅助用户进行当前工序数据的合理输入。输入界面中的每一项参数均由 QLineEdit 控件构成，并配合 QDoubleValidator 设置浮点数校验规则，从而确保输入数据的数值有效性。

数据输入完成后，系统通过如下信号通知主界面：

signals:

void dataEntered(const QMap<QString,double> &data);

该信号携带用户填写的所有数据项，并由主界面（CHOOSE 类）接收并进行后续计算处理。

为避免用户漏填参数或误填非法数值，系统在输入校验失败时会弹出提示框：

QMessageBox::warning(this, tr("警告"), tr("请填写所有参数项，并确保格式正确。"));

这种机制不仅保障了数据质量，也提高了系统在实际使用过程中的容错能力和用户体验。

总体来看，INPUT 模块作为工序级数据的录入接口，既实现了前后工序数据的关联传递，也通过界面校验机制保证了输入数据的有效性。

4.3.3 数据处理函数（process\\_calc.cpp）

主要负责参数计算与逻辑处理，核心函数如下：

buildProcessWeights(int odd, QMap<QString,double> &all, const QMap<QString,double> &in)：根据输入更新每道工序的权重指标。

calcBFxx(int evenRow, const QMap<QString,double>& d)：计算每个单项的不确定度的结果。

calcGxx(int oddRow, const QMap<QString,double>& d)：计算合成不确定度参数的工艺数据。

4.3.4 数据共享模块 shareddata.h

通过定义 SharedData 单例类，实现全局数据统一调度与访问。

QList<QString> processList：记录所有已添加工序名称。

QMap<int, QMap<QString,double>> processDataMap：每道工序对应的输入与计算结果。

static SharedData& getInstance()：获取单例引用。

4.4 数据导入与导出

导入方式：

手动输入：由 INPUT 窗口逐项录入。

批量导入：支持通过 QFileDialog 选择 Excel 文件并解析。

导出方式：

使用 QXlsx 将所有工序及其计算结果输出为 Excel 表。

表结构包括：工序序号、名称、各项输入参数、计算结果。

用户体验优化：

导出完成后提示是否打开文件所在路径。

导出文件名称自动包含时间戳，避免重复覆盖。

4.5 外部函数库的引入

# 第五章 实验验证与案例分析

## 5.1 实验设计

为了验证所开发系统的有效性，选择典型的铝合金零件作为实验对象，设计了包括粗加工、半精加工和精加工在内的三道工序。在每道工序中，采集关键加工参数，并记录实际加工尺寸。

## 5.2 实验过程

在数控铣床上进行加工实验，使用高精度测量设备（如三坐标测量机）对加工后的零件进行尺寸测量。同时，系统实时采集加工过程中的相关数据，并通过不确定度建模模块进行分析。

## 5.3 实验结果与分析

实验结果显示，系统预测的加工尺寸不确定度与实际测量值具有良好的一致性。通过仿真分析模块，能够有效评估不同工艺参数对加工精度的影响，指导工艺参数的优化选择。

## 5.4 案例分析

以某复杂曲面零件为案例，应用所开发系统进行加工仿真和不确定度分析。结果表明，系统能够准确预测加工误差分布，帮助工程师在加工前进行有效的工艺规划和风险评估。

# 第四章 软件编写

## 3.1 计算软件架构整体设计

软件主要分为三个层，数据层，算法层，服务层。

数据层：input

算法层：process\_calc.cpp

服务层：choose.cpp

## 本章小结

# 第四章 案例应用

## 4.1 界面设计

## 4.2 软件开发平台介绍

## 4.3 基于开源库实现功能完成

## 4.4 软件计算结果验证

## 4.5 本章小结

# 第五章 仿真

# 第六章 总结与展望

## 6.1 全文总结

## 6.2 研究展望

# 参考文献

1. 杨建国.数控机床误差综合补偿技术及应用[D].上海交通大学,1998.
2. 侯书林，朱海等．机械制造基础[M]，北京：北
3. 京大学出版社，中国林业出版社，2007．
4. Niu，P.，Cheng，Q.，Liu，Z.等。基于几何误差特征分析的卧式加工中心的加工精度改进方法。Int J Adv Manuf Technol 112, 2873–2887 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06565-3>
5. Zhang, Z., Yang, Y., Li, G.等。基于铣削稳定性优化的数控机床加工精度可靠性评估。Int J Adv Manuf Technol124，4057–4074（2023）。<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08832-x>
6. WANG Jinjiang, NIU Xiaotong, HUANG Zuguang, XUE Ruijuan. Digital twin-driven CNC machine tool virtual commissioning technology study[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022, (10): 127-132. DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.10.018
7. Zhang Xiyang, Lin Xusheng, Zhou Rui, Hu Yi. Research on the Digital Twin Architecture and Application of CNC System[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(1): 183-198.
8. Zhuang, K.; Shi, Z.; Sun, Y.; Gao, Z.; Wang, L. Digital Twin-Driven Tool Wear Monitoring and Predicting Method for the Turning Process. Symmetry 2021, 13, 1438. <https://doi.org/10.3390/sym13081438>
9. Zhang, L., Liu, J. & Zhuang, C. Digital Twin Modeling Enabled Machine Tool Intelligence: A Review. Chin. J. Mech. Eng. 37, 47 (2024). <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01036-2>
10. Mikel Armendia, Frédéric Cugnon, Luke Berglind, Erdem Ozturk, Guillermo Gil, Jaouher Selmi,Evaluation of Machine Tool Digital Twin for machining operations in industrial environment,Procedia CIRPVolume 82,2019,Pages 231-236,ISSN 2212-8271,https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.040.
11. Moi, Torbjørn; Cibicik, Andrej; Rølvåg, Terje (2020-05-01). ["Digital twin based condition monitoring of a knuckle boom crane: An experimental study"](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630719315742). *Engineering Failure Analysis*. **112**: 104517. [doi](https://en.wikipedia.org/wiki/Doi_(identifier)):[10.1016/j.engfailanal.2020.104517](https://doi.org/10.1016%2Fj.engfailanal.2020.104517). [hdl](https://en.wikipedia.org/wiki/Hdl_(identifier)):[11250/2650461](https://hdl.handle.net/11250%2F2650461). [ISSN](https://en.wikipedia.org/wiki/ISSN_(identifier)) [1350-6307](https://search.worldcat.org/issn/1350-6307).
12. Haag, Sebastian; Anderl, Reiner (2018-01-01).[*"Digital twin – Proof of concept"*](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846318300208).Manufacturing Letters. Industry 4.0 and Smart Manufacturing.**15**:*64–*66.[*doi*](https://en.wikipedia.org/wiki/Doi_(identifier)):[*10.1016/j.mfglet.2018.02.006*](https://doi.org/10.1016%2Fj.mfglet.2018.02.006).[*ISSN*](https://en.wikipedia.org/wiki/ISSN_(identifier)) [*2213-8463*](https://search.worldcat.org/issn/2213-8463).
13. Boschert, Stefan; Rosen, Roland (2016), Hehenberger, Peter; Bradley, David (eds.),[*"Digital Twin—The Simulation Aspect"*](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5),Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers, Cham: Springer International Publishing, pp. *59–*74,[*doi*](https://en.wikipedia.org/wiki/Doi_(identifier)):[*10.1007/978-3-319-32156-1\_5*](https://doi.org/10.1007%2F978-3-319-32156-1_5),[*ISBN*](https://en.wikipedia.org/wiki/ISBN_(identifier)) [*978-3-319-32156-1*](https://en.wikipedia.org/wiki/Special:BookSources/978-3-319-32156-1)*, retrieved 2024-03-16*
14. Elisa Negri (2017). ["A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems"](https://doi.org/10.1016%2Fj.promfg.2017.07.198). *Procedia Manufacturing*. **11**: 939–948. [doi](https://en.wikipedia.org/wiki/Doi_(identifier)):[10.1016/j.promfg.2017.07.198](https://doi.org/10.1016%2Fj.promfg.2017.07.198). [hdl](https://en.wikipedia.org/wiki/Hdl_(identifier)):[11311/1049863](https://hdl.handle.net/11311%2F1049863). [S2CID](https://en.wikipedia.org/wiki/S2CID_(identifier)) [115508540](https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115508540).
15. Allen, B. Danette (2021-11-03).[*"Digital Twins and Living Models at NASA"*](https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699).Digital Twin Summit.
16. Gelernter, David Hillel (1991).Mirror Worlds: or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox—How It Will Happen and What It Will Mean. Oxford; New York:[*Oxford University Press*](https://en.wikipedia.org/wiki/Oxford_University_Press).[*ISBN*](https://en.wikipedia.org/wiki/ISBN_(identifier)) [*978-0195079067*](https://en.wikipedia.org/wiki/Special:BookSources/978-0195079067).[*OCLC*](https://en.wikipedia.org/wiki/OCLC_(identifier)) [*23868481*](https://search.worldcat.org/oclc/23868481).

1. ["Siemens and General Electric gear up for the internet of things"](https://www.economist.com/business/2016/12/03/siemens-and-general-electric-gear-up-for-the-internet-of-things). [*The Economist*](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Economist). 3 December 2016. That technology allows manufacturers to create what David Gelernter, a pioneering computer scientist at Yale University, over two decades ago imagined as 'mirror worlds'.
2. Liu, Mangnan; Fang, Shuiliang; Dong, Huiyue; Xu, Cunzhi.[*"Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications"*](https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-manufacturing-systems).Journal of Manufacturing Systems.**58**:*346–*361.[*doi*](https://en.wikipedia.org/wiki/Doi_(identifier)):[*10.1016/j.jmsy.2020.06.017*](https://doi.org/10.1016%2Fj.jmsy.2020.06.017)*. Retrieved 2024-11-02*.
3. Hernández, L.A.; Hernández, S. (1997-09-01).[*"Application of digital 3D models on urban planning and highway design"*](https://www.researchgate.net/publication/275713871_Application_of_Digital_3D_Models_on_Urban_Planing_and_Highway_Desing).WIT Transactions on the Built Environment. III Conference on Urban Transport and the Environment for the 21 Century. Acquasparta, Italy: WIT Press. pp. *391–*402.

1. ["Digital Engineering - SEBoK"](https://www.sebokwiki.org/wiki/Digital_Engineering). *www.sebokwiki.org*. Retrieved 2022-12-12.
2. *["US DoD Digital Engineering Working Group"](https://ac.cto.mil/digital_engineering/)*. June 2018*. Retrieved 11 Dec 2022*.

# 致谢