

分类号:_____

密 级:_____

U D C:_____

单位代码:10078

华北水利水电大学专业硕士学位论文

基于灵敏度分析的立式数控铣床结构优化

Structural Optimization of CNC Vertical Milling Machine Based
on Sensitivity Analysis

学位申请人: 胡家蒙

指导教师: 吴金妹

专业领域: 机械

所在学院: 机械学院

学位类别: 机械硕士

2024年 6月

基于灵敏度分析的立式数控铣床结构优化

摘要

立式数控铣床（CNCVMC）因其多功能性、能进行高精度加工、自动化程度高、灵活性强等优势在现代制造业中具有广泛的应用。然而由于现代设计理念强调轻量化，会采取选用密度低的材料、将结构中的实心部分改为空心结构以及降低结构的安全系数等手段来达到轻量化的目的，导致机床固有频率在一定程度上会降低。本文将 XK7130 型立式数控铣床作为研究目标，使用现代分析工具对其进行有限元分析，结合智能优化算法对机床整机尺寸参数进行调整来实现固有频率的优化。

首先，使用 CAD 建模软件建立起机床的三维模型，通过对三维模型进行几何清理、选择单元类型、网格划分以及定义边界条件等操作建立起各关键零部件和整机的有限元模型。通过对零部件和整机依次进行静力分析和模态分析校核了其变形和固有频率，确定薄弱环节为机床的前两阶固有频率。

其次，通过对机床进行尺寸优化来优化薄弱环节。首先选择整机各筋板以及壁厚为原始尺寸参数，通过最优拉丁超立方试验设计方法和灵敏度分析工具确定了 11 个关键尺寸作为设计变量。确定前两阶固有频率和质量为优化目标。采用响应面多项式拟合 11 个设计变量和 3 个优化目标之间的关系，得出 3 个响应面近似模型作为用于尺寸优化的数学模型。

最后，采用两种智能优化算法对数学模型进行求解。在 MATLAB 软件中运行基于 BP 神经网络改进粒子群算法，粒子群算法通过对 BP 神经网络根据数据集训练出的三个目标函数式进行求解，得出一组最优尺寸和最优目标值；第二种是基于 Isight 软件优化模块的多岛遗传算法对响应面近似模型进行求解，优化后的前两阶固有频率分别提高了 18.3% 和 19.5%，整体质量减少了 1.7%。将两组优化结果进行对比显示多岛优化算法要优于基于 BP 神经网络改进粒子群算法，故将第二组优化结果作为本次研究的最终结果。本文提出了一种适用于机床的结构优化方法，并验证了多岛遗传算法在铣床优化中的适用性，为机床结构优化领域提供了一种有效的优化方案。

关键词：立式铣床；有限元；灵敏度分析；尺寸优化；多岛遗传算法

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF CNC VERTICAL MILLING MACHINE BASED ON SENSITIVITY ANALYSIS

ABSTRACT

CNC vertical milling machine (CNCVMC) has wide application in modern manufacturing industry due to its versatility, ability to perform high-precision machining, high degree of automation, and flexibility. However, due to the modern design concept emphasizes lightweight, will take the selection of low-density materials, the structure of the solid part of the hollow structure, or even reduce the structure of the safety factor and other means to achieve the purpose of lightweight, resulting in a certain degree of machine tool intrinsic frequency will be reduced. In this paper, XK7130 vertical CNC milling machine was taken as the research target, and modern analysis tools were used to perform finite element analysis, combined with intelligent optimization algorithms to adjust the dimensional parameters of the machine tool to achieve the optimization of the natural frequency.

First of all, a three-dimensional model of the machine was established by CAD modeling software, the finite element model of each key component and the whole machine was established by cleaning up the geometry of the three-dimensional model, selecting the cell type, mesh division, and defining the boundary conditions, and so on. Through the static analysis and modal analysis of the parts and the whole machine in turn calibrated its deformation and natural frequency, to determine the weak link for the first two orders of the machine's natural frequency.

Second, weaknesses were optimized by sizing the machine. Firstly, each reinforcement plate and wall thickness of the whole machine were selected as the original dimension parameters, 11 key dimensions were identified as the design variables through the optimal Latin hypercube test design method and sensitivity analysis tool. Determined the first two orders of natural frequency and mass as the optimization objectives. By using response surface polynomials to fit the relationships between the 11 design variables and the three optimization objectives, three response surface approximation models were derived as mathematical models used for sizing optimization.

Finally, two intelligent optimization algorithms were used to solve the mathematical model. The improved particle swarm optimization based on BP neural network was run in MATLAB

ABSTRACT

software, the particle swarm optimization algorithm solved the three objective functions trained by the BP neural network according to the dataset to obtain a set of optimal sizes and optimal target values. The second one is multi-island genetic algorithm based on the optimization module of Isight software for solving the response surface approximation model, and the first two orders of the optimized natural frequency were increased by 18.3% and 19.5%, and the overall mass was reduced by 1.7%. Compared the two sets of optimization results showed that the multi-island optimization algorithm was superior to the improved particle swarm algorithm based on BP neural network, so the second set of optimization results was taken as the final result of this study. This paper proposes a structural optimization method applicable to machine tools and verifies the applicability of multi-island genetic algorithms in the optimization of milling machines, provided an effective optimization scheme for the field of machine tool structural optimization.

Keywords: Vertical milling machine; Finite elements; Sensitivity analysis; Size optimization; Multi-Island genetic algorithm

目 录

1 绪论.....	1
1.1 课题的研究背景及意义.....	1
1.2 研究现状分析.....	2
1.2.1 结构优化研究现状.....	2
1.2.2 机床结构优化研究现状.....	4
1.2.3 优化算法研究现状.....	5
1.3 论文研究内容.....	6
2 整机模型的建立以及静力、模态分析	9
2.1 XK7130 立式数控铣床介绍.....	9
2.2 建模软件介绍.....	10
2.2.1 三维建模软件介绍.....	10
2.2.2 有限元软件介绍.....	10
2.3 立式数控铣床整机建模.....	10
2.3.1 三维模型的建立.....	10
2.3.2 有限元模型的建立.....	12
2.4 立式数控铣床的静力分析	15
2.4.1 静力分析理论基础.....	15
2.4.2 静力分析结果.....	16
2.5 立式数控铣床的模态分析	24
2.5.1 模态分析理论基础.....	24
2.5.2 模态分析结果.....	25
2.6 本章小结	31
3 灵敏度分析.....	33
3.1 灵敏度分析理论基础.....	33
3.2 试验设计	34
3.3 灵敏度分析结果.....	37
3.4 本章小结	40
4 立式数控铣床的多目标优化	43
4.1 结构优化数学模型.....	43
4.2 建立近似模型	44
4.2.1 响应面近似模型理论基础.....	44
4.2.2 精度验证.....	46
4.2.3 响应面近似模型建模结果.....	48
4.3 多目标优化算法.....	53

4.3.1 基于 BP 神经网络改进粒子群算法的尺寸优化.....	53
4.3.2 基于多岛遗传算法的尺寸优化.....	61
4.4 本章小结.....	69
5 总结与展望.....	71
5.1 全文总结.....	71
5.2 研究展望.....	71
参考文献.....	73

1 绪论

1.1 课题的研究背景及意义

随着制造业持续蓬勃发展，市场竞争日益激烈，企业追求在竞争中脱颖而出的目标日益迫切。为了保持竞争优势，提高生产效率，确保产品质量稳定，以及有效控制生产成本，对自动化制造的需求逐渐成为制造企业的当务之急。

自动化制造对我国的发展具有重要的影响和促进作用。自动化生产的广泛应用提升了产出效率和产品品质，并降低了生产成本，使得中国制造业更具竞争力，通过引入自动化设备和智能制造技术，中国制造业能够提高生产力，加快产业升级，从而在全球市场上占据更有利的地位；自动化制造成为中国制造业迈向高质量发展和数字化转型的关键路径，借助自动化设备和智能制造技术，中国制造业实现了生产过程的数字化、智能化和网络化，促进了经济的转型升级，并提升了产业链水平和附加值；自动化制造带来了大量的就业机会和人才培养需求，尽管自动化制造减少了对低技能劳动力的需求，但同时也增加了对高技能人才的需求，促进了人才培养和技能提升；总的来说，自动化制造对中国的发展起到了积极的促进作用。自动化制造不仅提升了制造业的竞争力和创新能力，还推动了产业布局的改进和经济发展水平的提升。同时，它促进了人才培养和城乡发展一体化，为中国经济的持续健康发展提供了重要支撑。

在当前推动自动化制造的进程中，数控铣床作为实现这一目标的关键驱动力，其重要性愈发凸显。数控铣床的出现，使得传统的加工方式得到了根本性的改变。通过计算机数控技术，数控铣床能够实现高精度、高效率的加工，大大减少了人为操作的瑕疵和误差，提高了生产线的稳定性和连续性。因此，在自动化生产的大背景下，数控铣床不仅成为了推动生产方式转型的重要工具，更是实现企业生产优化、提升竞争力不可或缺的利器。

我国是全球最大的数控铣床生产国之一，拥有众多的数控设备制造企业，其中有华东数控、大连机床、航天数控等知名企业。中国数控铣床的生产技术不断提升，产品涵盖了从小型数控铣床到大型数控加工中心的各个领域，能够满足绝大部分生产的需求。随着我国制造业的快速发展，数控铣床市场需求不断增长，特别是在汽车、航空航天、模具制造等行业，对数控铣床的需求量持续增加。尽管我国数控铣床产业取得了显著进展，数控铣床技术水平有所提升，与国际先进水平相比仍存在差距，特别是在一些关键领域仍落后于国际先进水平，如高速高精密切削技术、智能化控制技术等，技术创新不足成为制约产业发展的瓶颈，导致制造出的数控铣床性能无法与国际领先产品竞争。技术水平也仍然存在不稳定性，一些企业的技术水平较高，能够设计和制造高性能的数控铣床，而另一些企业则面临技术水平低、产品质量差的问题，

一些企业依然沿用传统设计理念和制造工艺，难以满足市场对高性能、高精度数控铣床的需求。这些问题促使我国铣床结构设计制造人员积极学习先进国家的制造技术、先进的设计理念以及工艺，应用先进的有限元分析工具和测试技术，对铣床结构进行分析、设计和优化来积累经验，用于制造出更精密、更完善的铣床设备。通过优化现有数控铣床的尺寸、形状以及拓扑等特性，可以提高其加工精度和性能指标，从而提高生产效率，延长设备的使用寿命，实现更短的加工周期和更高的产量。另外，优化数控铣床可以在满足其工作基本需求的情况下，降低能耗和材料损耗，从而降低生产成本，提高企业的盈利能力，也有助于我国铣床行业以及整个制造业的长期发展。

本文通过使用有限元分析软件对 XK7130 型立式数控铣床的静态特性、模态特性进行分析，并通过对整机结构尺寸进行调整来优化其固有频率。立式铣床整机的结构优化不仅有助于提高整机性能和质量，能够为设计人员提供基于详尽分析结果的最佳解决方案选择，减轻设计人员的工作负担的同时提高工作效率，重要的是还能为机床制造业带来更广阔的发展空间。

1.2 研究现状分析

1.2.1 结构优化研究现状

结构优化，就是在实际边界条件下，按照结构设计目标（刚度最大，重量最轻），得出最佳设计参数、最优设计方案。机械结构优化设计的初衷是在原有的设计条件下，对机械整体或者局部进行优化以提升机械设备的效能。作为实体，机械结构具备形状、尺寸和拓扑等固有特性，因此，在进行机械结构优化时，必须充分考虑这些特性，并以其为基础进行调整，以实现最佳的优化效果^[1-3]。除了通过优化结构的天然特性来达到优化目的，还需要考虑结构在工作中承载外界压力时呈现出来的动态特性。随着各学科的发展，学科间的耦合也逐渐成为优化设计的一种方法。

对机械结构进行优化最直接的方法就是对结构的尺寸进行优化，一般是通过调节结构截面尺寸参数或者壳体的厚度来改变结构的特性。尺寸优化是一种较为成熟的技术。学者们对结构优化设计的研究中，在不改变结构的拓扑形式下会选择对其尺寸进行优化。孙丰科等^[4]建立汽车起重机车架的参数化模型，利用灵敏度分析确定适当的设计变量，随后采用多目标遗传算法对车架进行多目标优化，优化后的车架质量减轻，第一阶固有频率提高。于志新等^[5]将汽车车架纵梁和横梁的厚度度量当作设计参数，在有限元求解器中完成了尺寸的优化，把最小化车架柔度当作目标，通过该优化过程，车架的刚度得到了提高。吕明青等^[6]为了提升压力机的锻压能力，调整其主传动装置尺寸，优化后有效地提升了压力机的综合锻压性能。王哲等^[7]采用了有限元分析技术与正交试验设计，通过尺寸优化，获得了吊耳最佳尺寸方案，优化后，吊耳最大应力得

到了减小。方朝等^[8]对经过拓扑优化的车架梁进行了尺寸优化，结果表明优化后的车架质量减轻，随后完成了其最大应力处的精细化设计，优化后的刚度增加。

形状优化类似于形貌优化，其核心思想是在维持结构拓扑恒定的前提下，通过调整构件的截面形状、节点的空间位置以及连续体的形状等几何边界参数，来实现对结构性能的优化^[9-11]。形状优化被应用于许多机械结构的优化过程中。邵佳丰等^[12]使用自由形面变形技术完成了离心压缩机叶片形状的优化，经过形状优化后，压缩机的压缩比和等熵效率均得到了提升，同时流动损失也得到了降低。翟江波^[13]在 TC17 合金双性能盘方面成功实施了预成形形状的优化设计，优化过的形状在经历多次等温度成形后，其应变布局符合设计要求。何力等^[14]使用共轭梯度法形成共轭方向序列对肋板的外形轮廓参数化模型进行优化迭代求解，对肋板进行形状优化。Lukas C. Høghøj 等^[15]为了在多种荷载工况下最大限度地减少受升力和顺应约束的阻力，提出了一种同时优化飞机机翼外部形状和内部拓扑结构的方法。形状优化属于基本设计阶段，通过形状优化可以改变结构的力学性质来达到某些具体要求。

拓扑优化是指确定有限材料在给定设计范围中的空间布局，旨在通过调整材料的空间分布，以优化结构的性能。目前，拓扑优化的主要方法包括均匀化法、变密度法和渐进法等^[16,17]。国内一些学者对机械结构的拓扑优化做了大量研究。刘虎等^[18]建立了一种基于变密度法拓扑优化方法对巡飞弹载光电关键结构光具座进行了轻量化设计，结果与经验设计方案相比，重量降低了 22.4%，同时各项力学性能均满足系统设计要求。武星等^[19]学者将双向渐进法和快速非支配排序遗传算法联合起来，建立了一种新的拓扑结构优化算法，并对悬臂梁结构进行优化来验证这一方法，优化后的结构刚度提高证实这一方法的可行性。胡彪彪等^[20]结合折衷规划法和平均频率法对微压休闲仓进行拓扑优化，经过优化后，结构满足性能设计要求，从而验证了多目标拓扑优化设计方法在舱体结构设计中的合理可行性。Zhong 等人^[21]采用遗传算法对客车车身框架进行多目标拓扑和尺寸优化，使重量减轻了 97.9kg。Chen 等^[22]提出了一种截面贡献分析方法对桁架框架的尺寸进行优化，优化后的小型电动汽车桁架框架重量减轻，性能显著提高。

动态性能优化。机械产品的动态特性指的是机械产品在外力作用下表现在外形上的变化规律和有关运动参数，通常会通过其使用寿命和工作强度反映出来。对机械结构的动态性能优化可以通过提升可承受工作强度来延长产品的使用寿命。使用有限元软件对机械结构的动力学模型进行动态化仿真寻得结构的薄弱环节，通过优化薄弱环节来提高结构的动态性能是学者们常用的方法。薛华等^[23]对高耸塔机的平桥进行动态分析，以分析结果作为优化的目标函数对平桥结构进行动态优化设计。张铈岱等^[24]用有限元分析软件对激光扫描仪的支架进行了模态和谐响应分析，采用设置加强筋增强支架弯曲刚度的方法对支架进行优化设计。高珊等^[25]通过对柱塞泵的 Amesim 仿真模型

仿真得知需通过增加一阶惯性环节的转折频率，即优化下变量缸活塞面积等参数来改善变量泵的动力学特性。

多学科设计优化。多学科设计优化（MDO）的核心概念在于通过协调多个不同学科领域的设计变量和约束条件，以最优化的方式实现整个系统的设计目标。口启慧等^[26]使用一种高空螺旋桨分阶段的多学科多目标优化设计方法开发了一种高空太阳能无人机螺旋桨，结果表明该优化方法具有较强的实用性和可信度。曹付义等^[27]运用 Insight 软件，实现了起重机车架的多学科协作优化，在保证车架强度的前提下，实现了起重机作业时的平顺性与车架结构的轻量化。徐兆可等^[28]采用 Euler 方程、连续伴随优化方法、自由形面变形技术以及一种四边形线性壳单元模型对三维机翼气动结构多学科优化方法开展了研究。Thi Na Ta 等人^[29]将数值优化方法和多体动力学分析结合起来控制设计协同仿真，用于提高数控机床的轮廓精度。Wang 等^[30]采用融合协同优化方法和近似模型技术的多学科优化设计框架，对关键参数进行调整来优化滑翔机的滑翔距离。

1.2.2 机床结构优化研究现状

机床结构设计和优化是研究的重点之一。国内外研究机构通过使用先进的设计和仿真工具，如有限元分析等，不断改进机床的结构设计，以提高其刚度、平稳度和动态特性，从而实现高精度、高效率的加工。

赵海鸣等^[31]分别利用变密度法、响应曲面法建立了机床底座的拓扑优化数学模型和多目标优化模型并对模型进行优化，结果显示底座的重量降低，应力和位移量减少，一阶固有频率也有所增加。

宋增誉等^[32]提出了一种新的基于多目标遗传算法的龙门框架结构拓扑与尺寸优化方法，从而改善了矿物质材料机床龙门框架的整体性能。

王松明等^[33]提出了一种利用中心组合设计的多目标遗传算法对立式五轴机床的滑枕进行优化的方法，经优化后滑枕的最大总变形减小了 23.25%，一阶固有频率提高了 10.89%。

在刘成颖等人^[34]的研究中，应用了拓扑优化方法，以机床立柱为对象，并采用 W 型筋板对立柱进行了优化，这一优化方案有效地提升了整机的动态性能。

胡世军等^[35]提出了一种基于惯性能量平衡原理的优化方法，用于对立式加工中心的固有频率进行优化。

Liu 等^[36]提出了一种采用正交试验设计方法和响应面法建立优化模型，并结合改进的粒子群优化算法和灰色关联分析方法求解模型的优化设计方法对某龙门机床滑座进行多目标优化以提高机床的性能。

Ji 等^[37]提出一种结合 PSO 和 SA 的混合算法对机床结构参数进行优化来达到降低能耗、提高静态和动态性能的目标。

Li 等^[38]介绍了一种应用了自然界中植物枝蔓的自优化生长原理来设计大型机床内部加强筋布局的新方法，采用所提出的方法对实际磨床立柱进行重新设计，结果表明立柱刚度有所提高。

Zhao 等^[39]通过模拟巨型睡莲的叶脉分布原理，提出了龙门加工中心横梁加强筋的3种仿生筋结构，分析结果显示仿生筋结构与传统平行筋结构相比，刚度和前四阶固有频率都有提高。

Shen 等^[40]采用自适应增长法对机床结构进行拓扑优化来优化机床部件的内部加强筋结构，提高了部件的刚度，减轻了质量，并显著提高了机床动态性能。

1.2.3 优化算法研究现状

优化算法是一类基于人工智能和机器学习技术的优化方法，旨在解决复杂、高维度的优化问题，能够在搜索空间中寻找全局或局部最优解。优化算法的研究现状呈现出多样化和交叉融合的特点，研究者们不断提出新的算法和方法，以应对不断增长的复杂优化问题和应用需求。

Wang等^[41]引入改进的 PSO-BP ANN 模型作为替代模型，代替数值模拟来预测印制电路热交换器的努塞尔特数和范宁摩擦因数，最后对翼面鳍片式热交换器进行多目标优化设计。Sun等^[42]为了控制和减小面滚子准双曲面齿轮齿面的热变形误差，采用单因素实验和正交实验构建了BP神经网络，并通过粒子群优化算法获得最优工艺参数。王剑等^[43]提出一种融合粒子群优化和反向传播神经网络的组合算法，用于优化神经网络中的PID控制算法，并将其应用于转台伺服控制系统中，结果表明该算法使得控制系统的精度、稳定性和鲁棒性得到显著提高。史培龙等^[44]提出了一种利用粒子群算法和反向传播神经网络结合的优化方法，来优化无人驾驶汽车路径跟踪器在多种路面附着系数、不同车速下存在的误差较大的问题。Juluru Pavanu Sai等^[45]将粒子群优化算法与非支配排序遗传算法结合的混合方法用于管壳式换热器的设计中，降低了换热器的设计成本。Jafari等^[46]提出一种基于粒子群优化算法（PSO）和文化算法（CA）结合的高效优化算法用于桁架优化设计中。Zhao等^[47]为了克服E387机翼吸力要求大的缺点，采用计算流体动力学与多岛遗传算法相结合的方法对减少阻力的吸力控制进行了优化。Liu等^[48]基于径向基函数代理模型预测和多岛遗传算法优化了空调系统圆形扩散器的结构形式，得到了新型圆形扩散器的最优参数。Mi等^[49]以某类磁流体动封装置的永磁体平均温度和密封间隙平均温度为优化目标，建立了磁流体动封装置的磁场和温度场仿真模型，通过多岛遗传算法优化得到最优冷却结构参数。Guan等^[50]基于正交试验设计和响应面法，对压缩空气储能系统中喷嘴调节涡轮机的进气压力和空气动力学性能进行了建模，通过多岛遗传算法得到了在所需输出功条件下不同基压对应的最佳喷嘴调节方法。Li等^[51]基于变张力绕线理论，提出优化设计流程和优化模型，并使用多岛遗传

算法对预应力钢丝缠绕框架的成本进行优化。He等^[52]选择燃油经济性作为插电式混合动力电动客车的优化目标，建立了基于最优能量管理策略的动力总成参数优化数学模型，最终采用多岛遗传算法和序列二次规划设计了组合优化算法对模型进行求解。Yan等^[53]基于一种新型非圆形通风孔设计方法，结合可变维子模型方法、自主研发的建模和网格划分工具以及多岛遗传算法，提出了一种高效的集成设计优化方法。张之阳等^[54]采用多岛遗传算法建立了翼型优化模型，并采用类形函数变换法对翼型进行参数化拟合，优化所得翼型在不同工况下的升阻比显著高于原始翼型。

综上所述，优化算法在结构优化设计中具有广泛的应用，能够有效地改善结构的性能、降低成本、提高效率，为工程设计提供了重要的支持和指导。

1.3 论文研究内容

第一章 绪论。对研究课题的背景和意义予以清晰阐述，对结构优化的相关内容进行了详细介绍。并分析了机床结构优化以及优化算法的研究现状。

第二章 整机模型的建立以及静力、模态分析。首先对 XK7130 立式数控铣床做了简单介绍，利用建模软件 SolidWorks 构建了立式铣床的三维模型，并将其导入 Ansys Workbench 进行处理，以获得完整的机床有限元模型。根据实际情况对机床零部件和整机进行了静力分析以及模态分析，静力分析结果用于验证其强度是否达标，模态分析结果用于分析其固有频率，最终确定结构薄弱环节为前两阶固有频率。

第三章 灵敏度分析。采用最优拉丁超立方试验设计方法对设计参数和优化目标等数据进行了设计，接着通过分析设计参数对优化目标的灵敏度值，得出对优化目标影响最大的关键尺寸作为最终的设计变量。

第四章 立式数控铣床的多目标优化。以灵敏度分析得到的关键尺寸作为设计变量，以模态分析得出的机床结构薄弱环节作为目标函数建立响应面近似模型。使用了两种优化算法：一是基于 BP 神经网络改进的粒子群算法，二是多岛遗传算法，对近似模型进行求解以获得最优解集。对比两种优化算法求得的最优解集，选出最优方案，并验证了最优解集的准确性。

第五章 结论与展望。对全文在铣床尺寸优化方法上的工作进行了总结，分析了需要改进的部分，并对未来的工作进行了展望和设想。

本文的研究技术路线大致如图 1-1 所示。

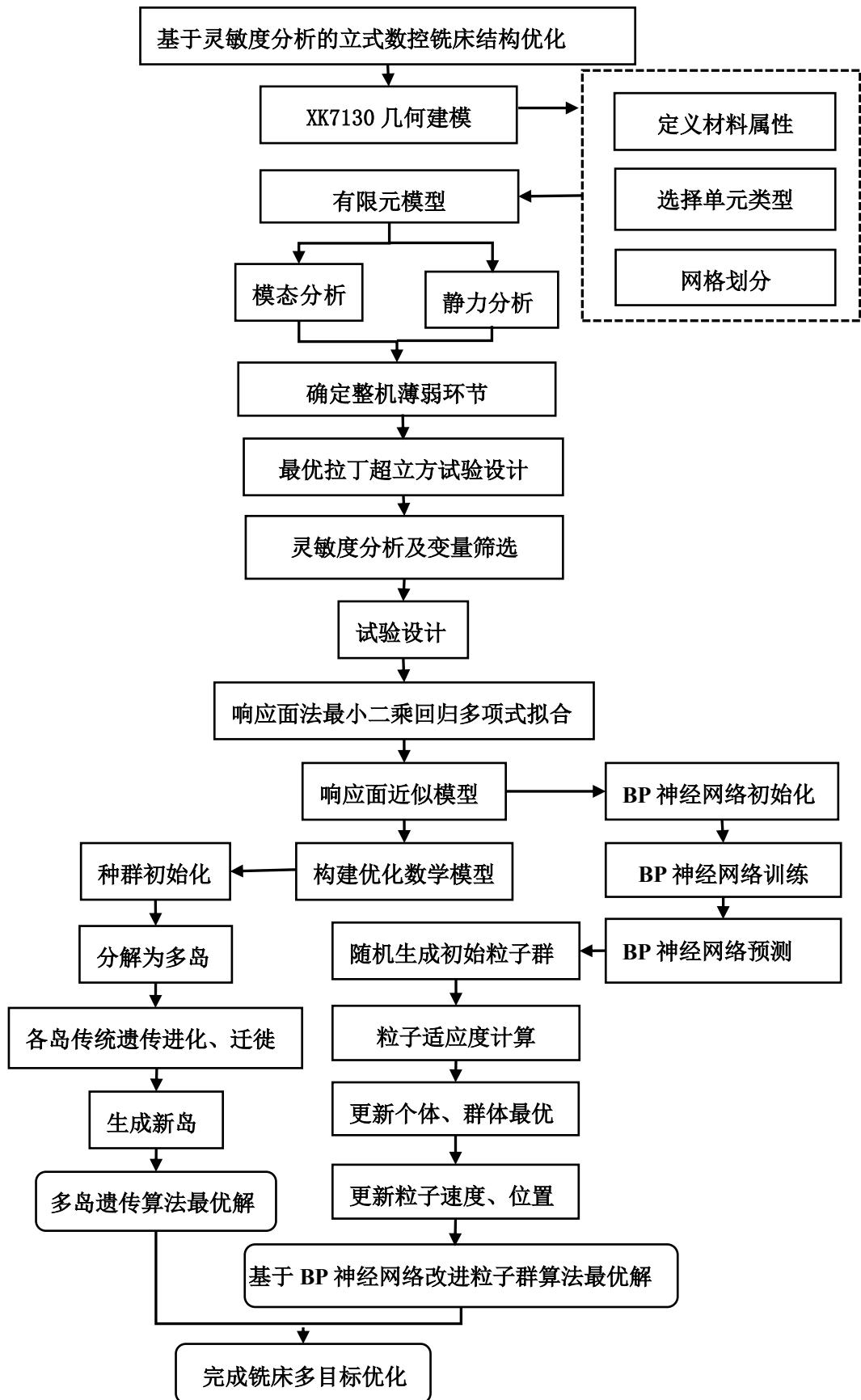


图 1-1 研究技术路线

Fig 1-1 Technical lines of study

2 整机模型的建立以及静力、模态分析

2.1 XK7130 立式数控铣床介绍

本文研究的立式数控铣床型号为 XK7130 是一款高精密、高刚性的高档机械产品，该机床具备一次性装夹复杂零件，如盘类、板类、壳体、凸轮、模具等，继而高效完成钻孔、铣削、镗孔、扩孔及铰孔等多种工艺流程的卓越能力。该机床适应于制造多元种类、中低产量的零件，尤其在应对结构复杂、精度要求严苛的工件时，其优势更为显著。立式铣床结构图如图 2-1 所示。

本次研究的重点是机床的六个主要组成部件，包括基座、床身、工作台、滑鞍、立柱和主轴箱。各部件间的连接以及运动方式总结如下：

- (1) 基座用螺栓固定在地面上；
- (2) 床身使用 11 个螺栓与基座实现固定连接；
- (3) 主轴箱与立柱之间的连接、定位和导向是通过滑块和导轨机构实现的，同时，主轴箱沿 Y 轴方向的移动则由滚珠丝杠副驱动；
- (4) 立柱通过螺栓安装于床身上；
- (5) 工作台和床身之间通过滑鞍连接、定位和导向，通过电机驱动滑座和工作台完成 X 方向和 Z 方向上的运动。



1.基座；2.床身；3.工作台；4.滑鞍；5.立柱；6.主轴箱

图 2-1 立式铣床结构图

Fig 2-1 Vertical milling machine structure

2.2 建模软件介绍

2.2.1 三维建模软件介绍

SolidWorks 作为全球首款基于 Windows 操作系统的三维计算机辅助设计（CAD）软件，于 1997 年纳入法国达索系统公司的麾下^[55]，是一种机械设计自动化应用程序。由于软件组件繁多，功能强大，SolidWorks 已成为主要的三维计算机辅助设计解决方案之一，普遍应用于工程设计和工业领域，涉及航空航天、机械、交通、国防、医疗机械等领域。

该软件涵盖了零件、装配体和工程图三个模块。零件模块支持基于特征的实体建模，借助于拉伸、剖切、扫描、放样等操作，完成产品的设计，同时提供了钣金设计能力。装配设计模块除了可以完成零件之间的装配外，还可以实时显示装配体的全部运动轨迹，并能对移动中的零件进行干涉检验及间隙检测。从最初的草图到最终结果，均以 3D 模型形式呈现。这些模型可生成工程图，也可以通过添加配合生成装配体^[56]。

2.2.2 有限元软件介绍

ANSYS 由全球最大有限元分析软件公司之一的 ANSYS 公司开发，该软件可以与 SolidWorks、Pro/Engineer、AutoCAD 等 CAD 软件联接，并完成数据的交流与互通。

该软件架构包含三个主要模块：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。前处理模块负责建构实体模型和模型的网格划分，分析计算模块不仅囊括了结构分析、流体动力学分析、热电耦合分析还能实现多物理场的耦合仿真。此外，分析计算模块还具备灵敏度分析等优化分析能力^[57]。后处理模块能够将计算结果输出为等值线图、梯度图等图像以及图表、曲线等比较直观的形式。ANSYS Workbench 相比于经典界面 APDL 的后处理功能要更强大，其前处理也较为智能化。

2.3 立式数控铣床整机建模

2.3.1 三维模型的建立

通常情况下，建立结构三维模型有两种主要方法：一种是在有限元软件的建模模块中创建 3D 模型，软件 ANSYS、ABAQUS、COMSOL 等都提供建模功能，一般按照从上到下或自下向上的次序建立模型，在建模时直接对不相关部分进行简化以及几何清理，采用这种建模方式可以省去从建模软件导出模型再导入的步骤，也不用对导入时出现错误的部分模型进行修复，能减少很多工作量，该方法适用于简单结构的三维建模；另一种是在第三方建模软件例如 SolidWorks、Pro/Engineer、AUTO CAD、CATIA

里进行三维建模，之后输出为能被有限元分析软件接受的中间格式通过其与建模软件的接口进行连接和导入，这种方式与在有限元软件里直接建模相比稍显复杂，可能会出现导入时特征丢失或者线、面丢失的情况，但是可以很方便并且准确地建立起复杂装配体的三维模型，在导入前对模型进行几何清理和简化就可以避免部分出错，是建立复杂模型的首选方法。本文所研究的对象是由六个部件装配成的复杂装配体，其中可能用到扫描、放样等复杂操作，考虑到 ANSYS workbench 中 Design Modeler(DM)和 Space Claim(SC)模块对于复杂装配体的操作效率低以及精度不高的问题，选择采用专业的三维建模软件 SolidWorks 来创建立式铣床的三维模型。立式铣床的三维模型如图 2-2 所示。

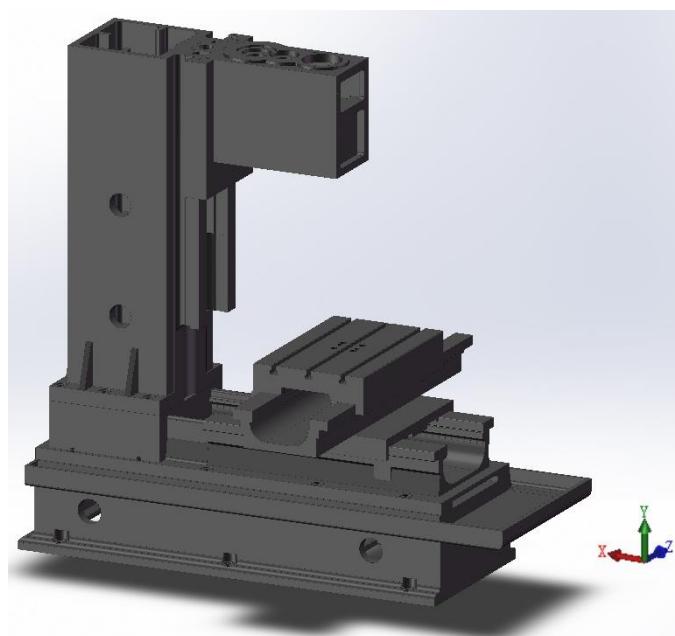


图 2-2 立式铣床三维模型

Fig 2-2 3D model of the vertical milling machine

建立三维模型后要导入到有限元分析软件开展结构分析，如果模型不简化，在前处理阶段就需要将网格划分得尽可能小，以适应模型的微小细节，导致分析耗时与计算工作量的显著增大，就要求计算机有更大的内存。特别是当模型本身就很庞大时，不对模型进行简化就会导致分析效率低下或者计算结果收敛性差。因此，有必要简单处理模型。简化模型的原则如下：

(1) 对结构特性影响较小的孔可以进行适当的简化，删除孔特征，使其变成实体。为了满足实际工作的需要，某些零部件要加工出螺纹孔、通油孔、销钉孔等不同的工艺孔，这些非连接、无支撑的工艺孔对结构的刚度和变形不产生大的影响，反而会出现应力集中的现象，有孔的位置需要划分小于其他位置的网格尺寸，导致网格数量剧增工作量增加的同时可能会使网格质量不达标，影响后续的求解计算，这时还需要手

动划分孔位置的网格，增加工作人员的操作难度，使工作不能顺利进行。

(2) 对结构特性没有太大影响的圆角进行适当简化，平化圆角为直角。实际生产中考虑到安全问题或者工艺要求会对工程结构的零部件进行圆角处理，圆角的存在并不会对整体结构分析结果的刚度、变形以及应力等产生太大影响，但圆角存在的位置在划分网格时会产生较小的网格尺寸使网格数量增加，降低工作效率，网格发生畸变时会影响分析计算的顺利进行。

(3) 对几何模型中存在的可以合并的小的平面进行合并，对有较小锥度和较小曲率的面进行平化处理，对分析结果产生较小影响的沟槽可以直接删除特征。

2.3.2 有限元模型的建立

有限元模型是用于后续有限元分析的计算模型，它为有限元的计算提供了必要的初始参数。与 3D 几何模型不同，有限元模型将一系列空间结构分离为有限数量的单元，各个单元有一定数量的节点，将整个系统视为一系列只在节点上连接的单元。该模型包含了对象的结构形状、材料参数、施加载荷、约束条件等特性的描述。尽管建模的关键是离散，但在围绕离散任务时，还需要完成许多与之相关的工作，包括几何清理、单元类型和数量的选择、单元特性的定义、单元质量评估，以及确定边界约束等。建立有限元的步骤如下：

(1) 导入模型

ANSYS 导入界面对应不同建模软件支持不同的文件导入格式。比如，在 SolidWorks 建立的三维几何装配体保存为后缀为 “.x_t” 的文件，可在 ANSYS Workbench 的几何结构选项卡处直接导入到 Design Modeler(DM)或 Space Claim(SC)模块进行下一步处理，也可以不通过 “.x_t” 等中间格式而是以 SolidWorks 装配体自动保存的正常格式.SLDASM 或零件自动保存的.SLD 格式直接导入 ANSYS 中，方法是找到 ANSYS 文件夹下的 CAD 配置管理器并打开，选择 SolidWorks 下的 Workbench 关联接口，就能将.SLDASM 文件导入到 ANSYS。

(2) 几何清理

在模型导入后，软件之间存在不兼容或者精度不匹配等问题导致几何模型会出现缺失面、分割边、分割边、重复边、曲线间隙、重复曲线等问题，这些问题需要修复后才能保证单元的质量。可以通过 Space Claim(SC)界面结构树中的检查几何体功能检查可能存在的错误，Space Claim(SC)提供修复功能，并且具备自动检测并填充缺失面的功能，同时提供间距工具以消除各面之间的间隙。对几何模型一一检查之后，逐一修复错误以确保模型的正确和完整。

(3) 材料属性定义

在对模型进行几何清理后，需要根据实际情况定义工程数据，包括材料以及材料

的各种属性。本次研究的数控铣床是灰铸铁 200 铸件，HT200 是一种强度较高的铸铁材料，具有铸造性高、减振性能优良、强度高、耐磨性好等特点，主要用于铸造车床身、汽车发动机气缸等需要承受重力和振动的零件。灰铸铁 200 的属性参数：杨氏模量 $E=135\text{GPa}$ ，密度 $\rho=7200\text{kg/m}^3$ ，泊松比 $\gamma=0.31$ 。

(4) 单元类型选择

单元类型需依据结构的类别、几何特征、受力情况以及所需的精度要求等因素选择。有限元分析可供选择的单元类型包括梁单元(Beam)、杆单元(Link)、板单元(Plane)、壳单元(Shell)、质量单元(Mass)、刚体单元(Rigid)等多种类型。杆单元(Link)仅能承载杆向的拉、压力，而不具备承载弯矩的能力；梁单元可以承载拉、压力以及弯矩；壳单元般用于壳体结构，需要对结构进行抽壳处理，但对于比较复杂的装配体结构，抽壳难度较大。本研究选择对机床进行四面体单元划分，四面体单元对复杂结构适应性好，可以快速生成网格。

(5) 网格划分

网格划分是建立有限元模型的核心任务之一，网格划分的精细度对于模型的合理性和后续分析结果的精确度很重要，在进行网格划分时，需要考量网格数目、网格的疏密程度以及单元协调性等因素。网格数目的多少直接关系到计算时耗和计算精度，一般情况下网格数目越多计算结果精度会提高但同时计算时耗也会增多，考虑到工作效率以及计算机性能，应该选择合适的网格尺寸生成合适的网格数目。在存在较小平面和曲面处应该减小网格尺寸来加密网格以确保计算结果的精确度。本课题考虑到各部件可能存在不同程度的变形，选择两种尺寸的网格对模型进行划分，基座、床身、立柱、工作台和滑鞍划分尺寸为 20mm 的四面体网格，由于主轴箱结构较为复杂，主轴箱划分为 10mm 的四面体网格。划分后的机床各零部件及整体的节点数和单元数如下表：

表 2-1 模型零部件及整机节点和单元数目

Table 2-1 Number of nodes and cells of model parts and complete machine

零部件	节点数目	单元数目
主轴箱	328898	210551
立柱	125683	73053
工作台	40650	22402
滑鞍	54573	33316
床身	98597	58457
基座	129230	70873
整机	777631	468652

(6) 单元质量检查

为了确保分析计算结果的精确和合理性，在划分完网格之后要检查单元质量是否达标。用户可以根据网格质量标准来判断单元质量是否良好，一般会对比以下参数：

①Element Quality：标准是单元体积和边长之比。理论上，该比值越接近 1，即体积与边长之比越接近 1，网格质量越好。

②Aspect Ratio：对于三角形和四边形网格来说，纵横比等于 1 表示该网格是等边三角形或是正方形，即网格质量较好，因此纵横比最优值是 1。但实际划分网格时很难实现边长比接近 1，因此一般纵横比不大于 5 即表示纵横比达标。

③Jacobian Ratio：在单元内部，特定点处雅可比矩阵行列式之最大值与最小值的比值。用来判断单元的实际形状与其标准形状的差别程度，数值越大表示网格越扭曲，数值为 1 时表示质量最好，雅可比不大于 40 都在可接受范围内。

④Warping Factor：计算单元期望投影高度的差值。翘曲系数最好的值为 0，值越大说明翘曲程度越高。

⑤Parallel Deviation：单元对边矢量点积中余弦值得出的最大夹角。最优值是 0，说明两对边平行， 150° 为最高上限。

⑥Maximum Corner Angle：单元的最大角。三角形为 60° 最优，说明三角形为等边三角形；四边形 90° 最优，说明四边形是矩形。

⑦Orthogonal Quality：单元中间位置到邻近单元中间位置的向量，包括单元中间位置到各个面的向量。数值范围一般是 0-1，值为 0 时质量最差，最优值是 1。

本研究通过查看 ANSYS Mechanical 界面 Mesh 下的网格质量规范对单元质量进行了检查。检查所有网格的单元质量，单元质量最大值为 0.99997，平均值为 0.837；对网格的纵横比进行检查，平均值为 1.46；网格的雅可比最大值是 1，平均值为 0.957；网格的最大拐角角度平均值是 67.33° ，由于模型是由四面体网格划分的，对于三角形网格来说 60° 为最优角度，该模型网格最大拐角角度算是良好；对网格的正交质量进行检查，正交质量最大值为 0.991，平均值为 0.931。通过对网格质量标准进行检查，发现该模型网格质量较高，说明该有限元模型对分析计算结果具有较高的置信度。

(7) 边界条件定义

网格划分只是加载节点和单元信息，并不能进行分析，有限元建模的最后一步是定义边界约束。边界条件显示了模型和外界的相互作用，因此要尽量根据实际情况进行定义，本研究基于机床的实际工作情况将机床基座通过六个螺栓实现与地面的固定约束。

完成以上步骤，机床整机有限元模型建立完毕，模型如下图所示：

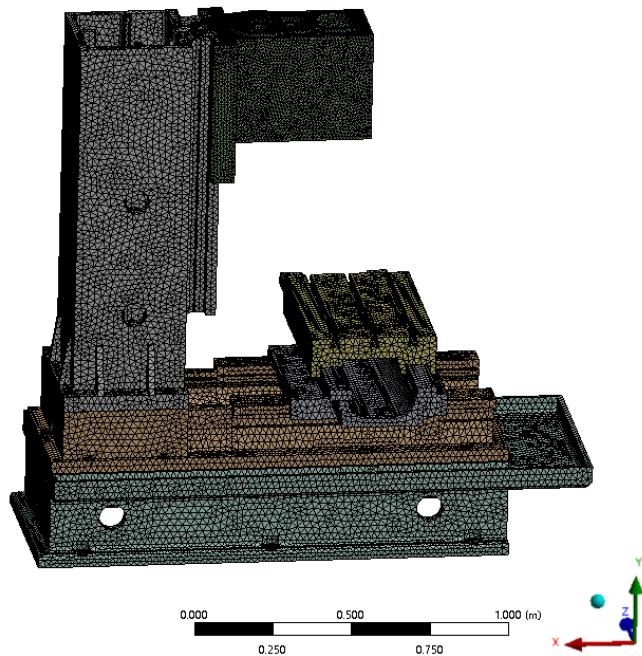


图 2-3 立式铣床有限元模型

Fig 2-3 Finite element model of vertical milling machine

2.4 立式数控铣床的静力分析

有限元法通过将方程转化为有限个单元来描述问题，并根据每个单元的性质和结构来进行分析和求解。这种方法可以有效地减少计算时间，并且可以求解复杂问题，使结果更加准确和可靠。

2.4.1 静力分析理论基础

静力分析涉及弹性力学、理论力学以及材料力学方面的知识。有限元法用于求解偏微分方程，物体要具有连续性和均匀性。连续性是把物体宏观看作是一个连续体，即物体无间隙地充满整个物体，连续可导；均匀性是材料均匀，即物质均匀分布在物体内部，其物理性质如泊松比、密度和弹性模量等不会因为坐标的不同而变化。这两个性质也是弹性力学解决问题的两个假设，弹性力学旨在揭示物体在其发生形变时与所承受应力之间的内在关联。

静力分析研究结构在给定静力载荷作用下的响应，可以分为线性分析和非线性分析，大多数工程问题通过线性分析就能得出较为满意的结果，分析的目的是确定结构的应力、应变、变形等参数。静力分析和动力学分析不同的一点是：动力学符合牛顿第二运动定律，分析则是求解这一运动方程，而静力分析则忽略结构惯性以及所受阻力对结构本身的影响。表示任一结构力与关系的数学表达式被称为运动方程，常见的多自由度体系运动方程为：

$$[m]\{\ddot{u}(t)\} + [c]\{\dot{u}(t)\} + [k]\{u(t)\} = \{p(t)\} \quad (2-1)$$

其中: $\{\ddot{u}(t)\}$ 是体系加速度矢量;

$\{\dot{u}(t)\}$ 是体系速度矢量;

$\{u(t)\}$ 是体系位移量;

$[m]$ 是整个体系的惯性质量矩阵;

$[c]$ 是整个体系的阻尼矩阵;

$[k]$ 是整个体系的刚度矩阵;

$\{p(t)\}$ 是整个体系的力矢量。

动力学符合这一运动方程,由于静力分析时要忽略结构惯性和所受阻力对其本身的影响,因此静力分析符合如下方程:

$$[k]\{u(t)\} = \{p(t)\} \quad (2-2)$$

这时的惯性质量矩阵 $[m]$ 和阻尼矩阵 $[c]$ 是零矩阵。

2.4.2 静力分析结果

本研究将机床在实际工况下部件所承受载荷施加在机床上,使用求解器对机床零部件以及整机进行静力分析,根据经验可知基座和滑鞍对整机静力分析结果影响不大,因此本研究不对基座和滑鞍进行静力分析。最终结果以应力云图、位移云图等形式展示并判断其强度是否符合标准。

2.4.2.1 床身静力分析结果

床身属于铣床的基本组件,也属于机床大件,承载着立柱、工作台以及床身和工作台之间的连接件,加工零件的重力也承载在床身上,因此床身的强度关系着机床加工的精度,对整个机床的稳定性起着至关重要的作用。本研究在床身与立柱连接的面上施加立柱和主轴箱的总质量 5561N,在床身上施加工作台和滑鞍的质量 3140N,并加载床身自身的重力,将底面设置为全约束,通过求解器对其所受应力和变形进行求解。床身应力云图、位移云图如图 2-4、2-5。分析图 2-4 可知,最大应力集中在床身与立柱连接面上,最大应力为 2.04MPa。床身属于铸件且极限应力远大于所受最大应力,因此认为床身的强度符合要求。

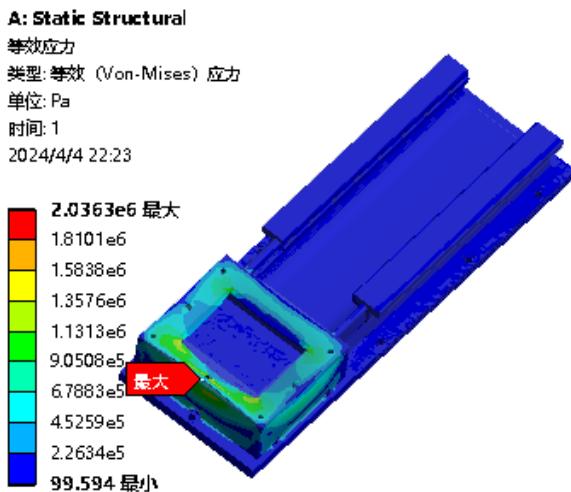
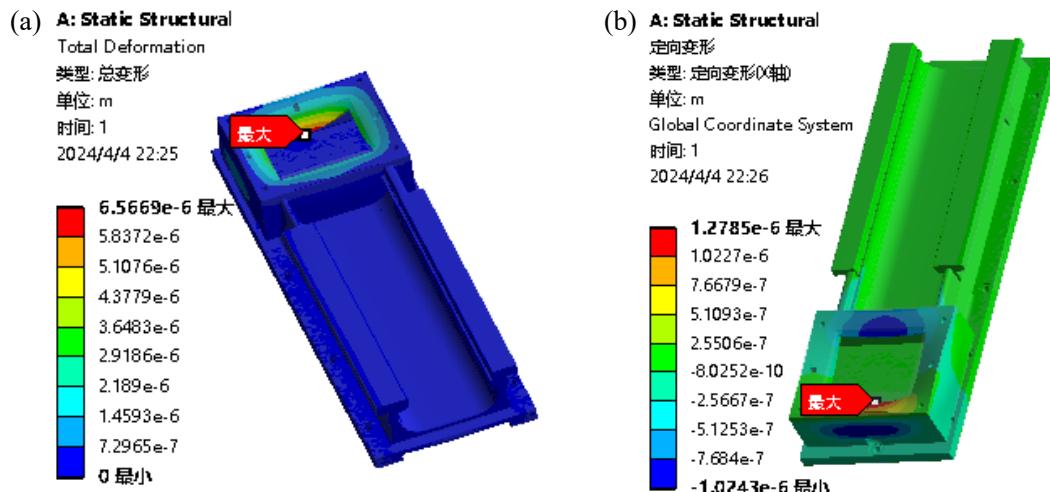


图 2-4 床身应力云图

Fig 2-4 Stress cloud of the bed

由图 2-5 (a) 可知, 床身的最大变形出现在与立柱连接面的边缘, 最大值为 $6.57\mu\text{m}$ 。由图 2-5 (b) 可知, 床身在 X 方向上的最大变形是 $1.28\mu\text{m}$, 发生在床身与立柱连接面上。观察图 2-5 (c) 可知, 床身在 Y 方向上的最大变形发生的位置与在 X 方向上的位置接近, 都在立柱接触面上, 最大值为 $1.07\mu\text{m}$ 。由图 2-5 (d) 可知, 床身在 Z 方向上的最大变形是 $0.17\mu\text{m}$, 发生在立柱接触面下边的壁上。综上分析可知床身在重力作用下的总变形较小。



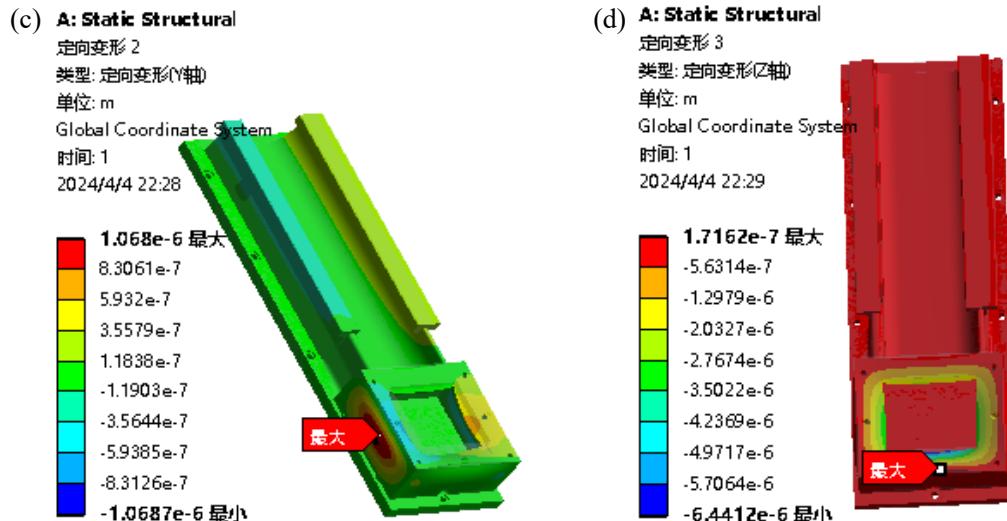


图 2-5 床身位移云图

(a) 总位移云图; (b) X 轴位移云图; (c) Y 轴位移云图; (d) Z 轴位移云图

Fig 2-5 Deformation clouds of the bed

(a) Total deformation cloud; (b) X-axis deformation cloud; (c) Y-axis deformation cloud; (d) Z-axis deformation cloud

2.4.2.2 工作台静力分析结果

工作台属于机床的核心组件，工件放置在工作台上，其强度关系到工件加工的精度和质量。本研究校核自重作用下工作台的强度，将其与滑鞍的接触面设置为全约束。静力结果由应力和变形的形式显示。工作台应力云图、位移云图如图 2-6、2-7 所示。由图 2-6 可知，工作台承受的最大应力值为 0.36MPa，出现在中部螺栓孔位置。床身属于铸件且极限应力远大于所受最大应力，因此认为工作台的强度符合要求。

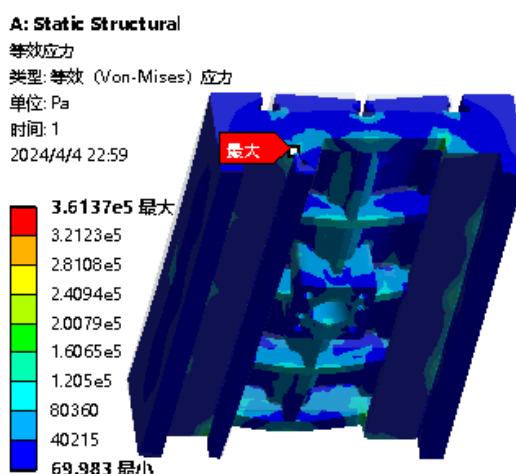


图 2-6 工作台应力云图

Fig 2-6 Stress cloud of the table

由工作台的位移云图图 2-7 (a) 可知, 最大变形发生在工作台中间位置, 最大变形为 $0.39\mu\text{m}$ 。通过分析图 2-7 (b) 可知, 工作台 X 方向的最大变形为 $0.08\mu\text{m}$, 位置在底部两筋板交叉的地方。由图 2-7 (c) 可知, 工作台 Y 方向的最大变形是 $0.09\mu\text{m}$, 发生在顶面。观察图 2-7 (d) 可知, 工作台在 Z 方向上的最大变形是 $0.38\mu\text{m}$, 在其中间位置产生。综合分析可知总变形较小, 因此工作台静刚度满足设计要求。

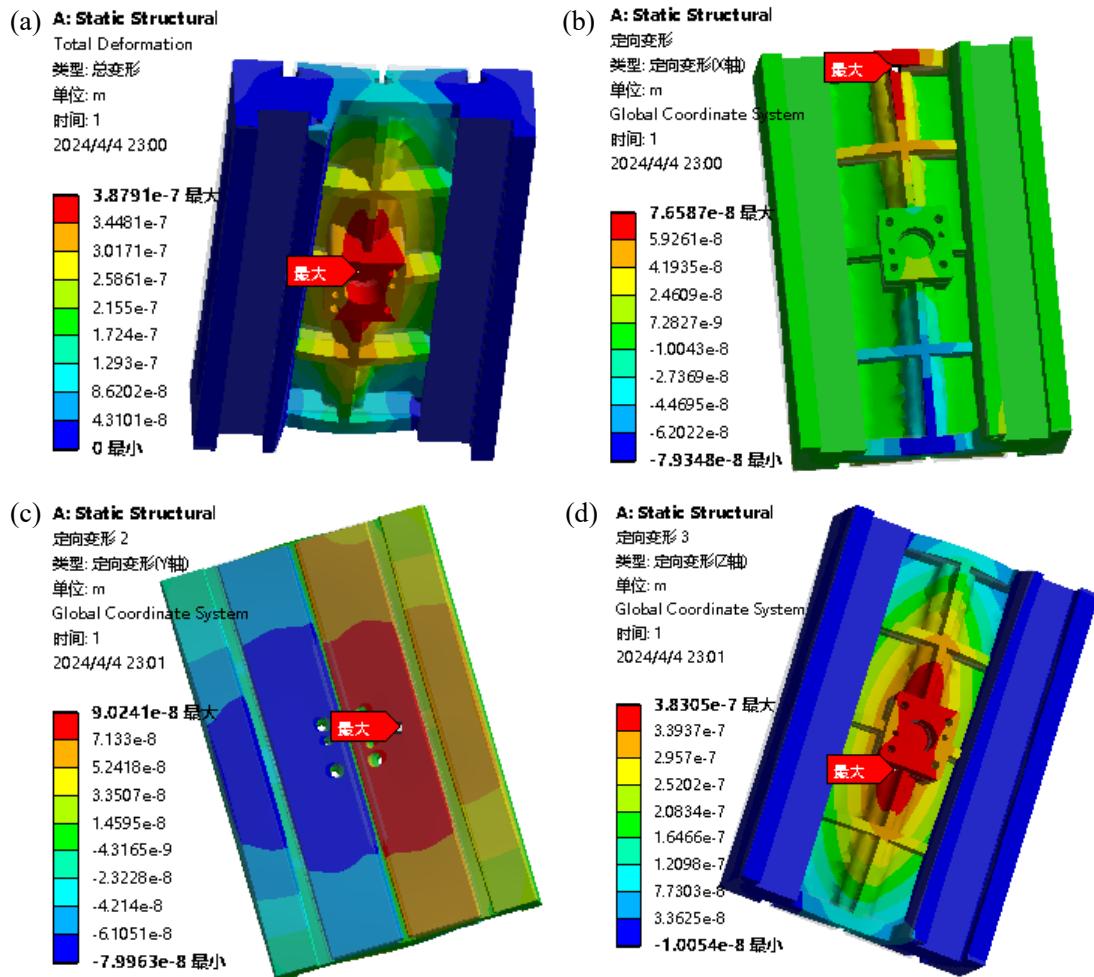


图 2-7 工作台位移云图

(a) 总位移云图; (b) X 轴位移云图; (c) Y 轴位移云图; (d) Z 轴位移云图

Fig 2-7 Deformation clouds of the table

(a) Total deformation cloud; (b) X-axis deformation cloud; (c) Y-axis deformation cloud; (d) Z-axis deformation cloud

2.4.2.3 立柱静力分析结果

立柱底端借助螺栓与床身实现紧固连接, 上端通过导轨与主轴箱连接, 立柱的强度直接影响主轴箱加工的稳定性。设置立柱底面为全约束, 在立柱与主轴箱连接的地方施加主轴箱的重量 1536N , 并添加立柱自身的重力, 分析此情况下立柱的强度, 通

过求解器对其所受应力和变形进行求解。立柱应力云图、位移云图如图 2-8、2-9 所示。由图 2-8 可知，立柱在承受自身重力和主轴箱重力时所受最大应力是 3.346MPa，最大应力在与床身连接的螺栓孔处。立柱为灰铸铁铸件，3.35MPa 远小于极限应力，故其强度符合要求。

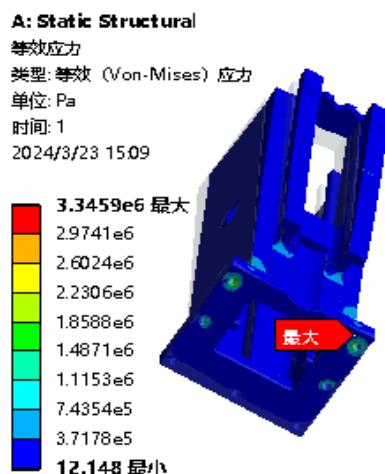
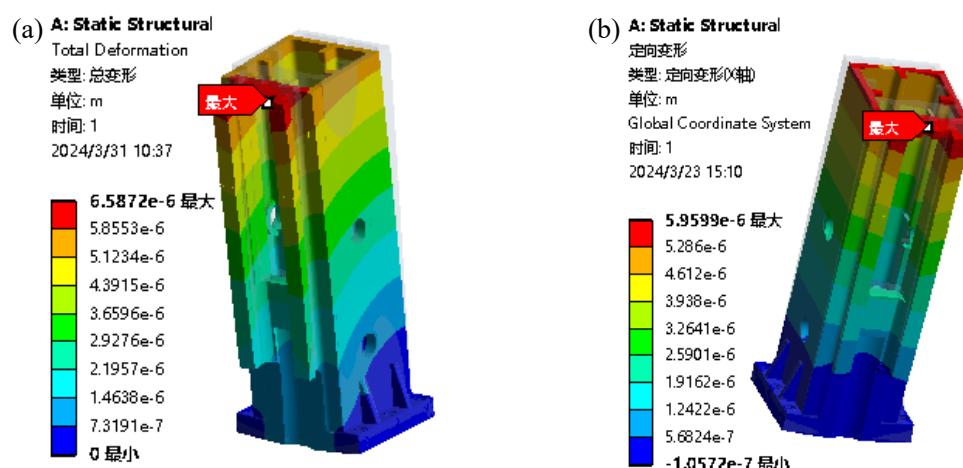


图 2-8 立柱应力图

Fig 2-8 Stress cloud of the column

由图 2-9 (a) 可知，立柱的最大变形出现在其与主轴箱连接的导轨顶部，最大值为 $6.59\mu\text{m}$ 。由图 2-9 (b) 可知，立柱在 X 方向上的最大变形为 $5.96\mu\text{m}$ ，发生的位置与总位移发生的位置一致。观察图 2-9 (c) 可知，立柱在 Y 方向上的最大变形出现在立柱其中一个支撑筋板上端，最大值为 $0.98\mu\text{m}$ 。由图 2-9 (d) 可知，立柱在 Z 方向上的最大变形是 $2.88\mu\text{m}$ ，发生在导轨顶端。综上分析可知立柱在约束以及重力作用下的总变形较小。



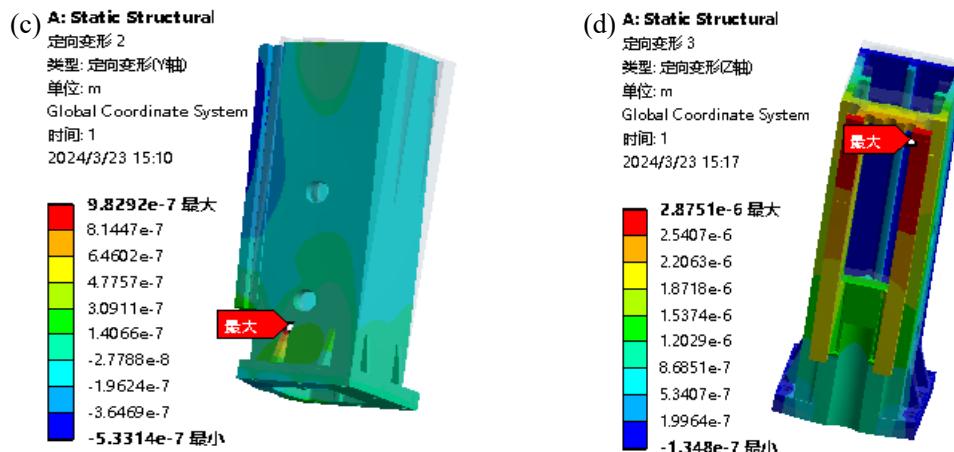


图 2-9 立柱位移云图

(a) 总位移云图; (b) X 轴位移云图; (c) Y 轴位移云图; (d) Z 轴位移云图

Fig 2-9 Deformation clouds of the column

(a) Total deformation cloud; (b) X-axis deformation cloud; (c) Y-axis deformation cloud; (d) Z-axis deformation cloud

2.4.2.4 主轴箱静力分析结果

机床的主轴系统安装在主轴箱里，其中一端通过导轨与立柱相连沿着竖直方向上下运动，主轴系统中电动机驱动主轴带动刀具对零件进行加工，其静态特性的好坏关系着零件加工精度和质量的好坏。本研究将主轴箱与立柱连接的螺栓孔设置为全约束，在其结构上加载重力，研究其在自重作用下的应力和位移来校核其强度。主轴箱的应力云图和位移云图如图 2-10、2-11 所示。由图 2-10 可知主轴箱所受最大应力为 4.42MPa，出现在用于固定主轴箱的螺栓孔处。最大应力出现在此处的原因可能是主轴箱只有一端与立柱连接，相当于悬臂梁结构，但由于主轴箱为灰铸铁铸件，该材料的许用应力为 200MPa，所受最大应力远小于 200MPa，认为主轴箱的强度较高。

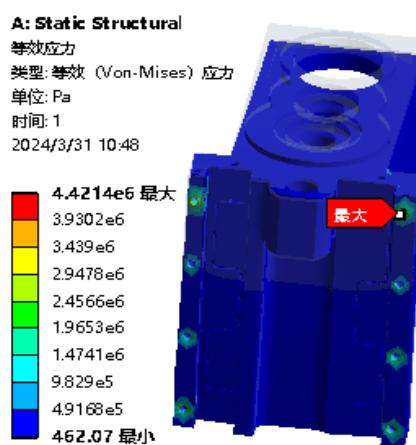


图 2-10 主轴箱应力图

Fig 2-10 Stress cloud of the spindle box

分析主轴箱的位移云图 2-11 (a) 可知, 主轴箱的最大变形发生在顶面右侧边缘处, 最大值为 $2.73\mu\text{m}$ 。通过分析图 2-11 (b) 可知, 主轴箱 X 方向的最大值为 $0.16\mu\text{m}$, 位置在与立柱接触部分的底端。由图 2-11 (c) 可知, 主轴箱 Y 方向的最大变形为 $0.10\mu\text{m}$, 出现在与立柱连接的面上。观察图 2-11 (d) 可知, 主轴箱 Z 方向的最大变形是 $0.95\mu\text{m}$, 在顶面最右侧处产生。综合分析可知主轴箱的总变形较小。

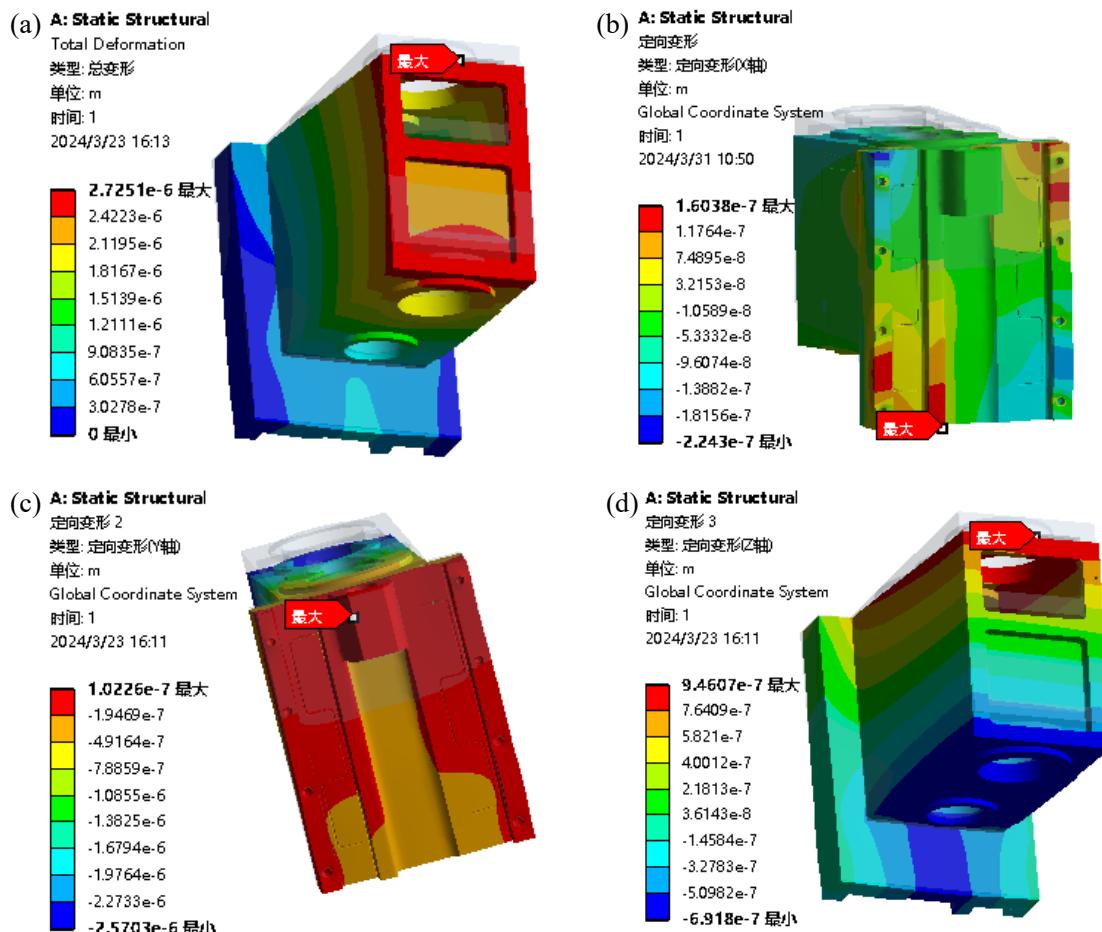


图 2-11 主轴箱位移云图

(a) 总位移云图; (b) X 轴位移云图; (c) Y 轴位移云图; (d) Z 轴位移云图

Fig 2-11 Deformation clouds of the spindle box

(a) Total deformation cloud; (b) X-axis deformation cloud; (c) Y-axis deformation cloud; (d) Z-axis deformation cloud

2.4.2.5 机床整机静力分析结果

机床整机等于各零部件的集合, 但由于存在结合面以及工作时各零件之间存在相互作用, 整机的强度不完全等于所有零部件强度的叠加。本研究将主轴箱位置设置为工作极限位置, 将基座底端设置为全约束模拟与地面固定的状态, 对整机在自身重力作用下的应力和位移状态进行分析, 从而校核其强度。对模型进行求解, 得出整机的

应力云图和位移云图如图 2-12、2-13 所示。观察应力云图 2-12 可得出所受最大应力为 2.98MPa，出现在主轴箱与立柱相连接处。机床整机为灰铸铁铸件，材料的许用应力远远大于主轴箱与立柱连接处所受的最大应力，表明整机抵抗破坏的能力较强。

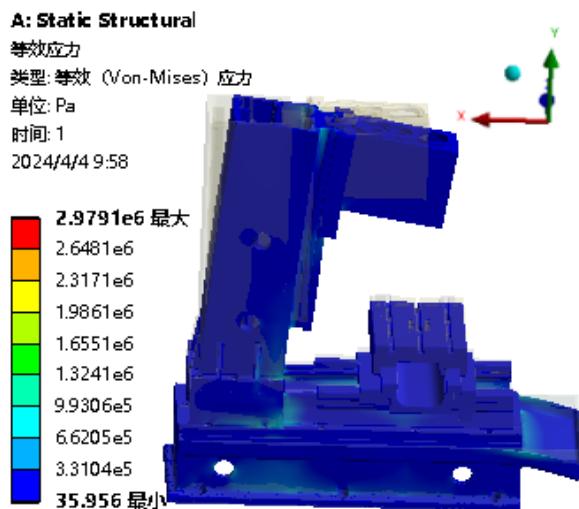
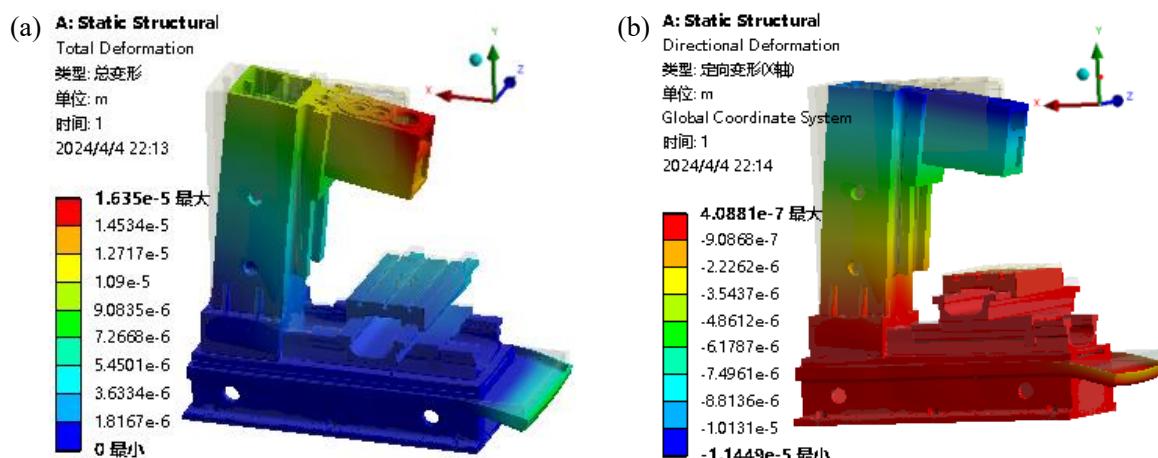


图 2-12 机床应力云图

Fig 2-12 Stress cloud of the machine

由整机的位移云图 2-13 (a) 可以知道，整机的最大变形为 $16.35\mu\text{m}$ ，发生在主轴箱右侧，是因为加工刀具安装在主轴箱中间偏右位置。由图 2-13 (b) 可知，机床在 X 方向上的变形量为 $11.45\mu\text{m}$ 。由图 2-13 (c) 可知，机床在 Y 方向上的变形量为 $11.81\mu\text{m}$ 。由图 2-13 (d) 可知，机床 Z 方向的变形量为 $1.53\mu\text{m}$ 。综合分析可知整机的总位移较小。



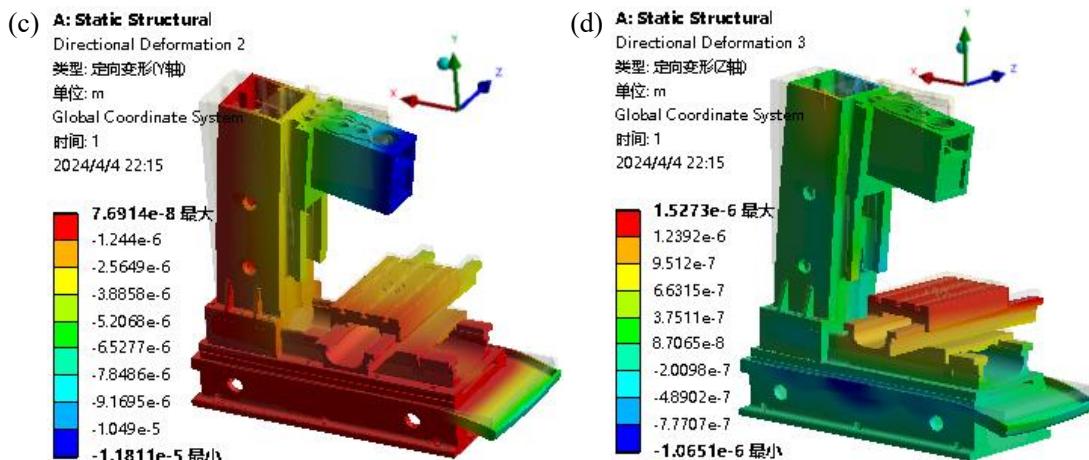


图 2-13 机床位移云图

(a) 总位移云图; (b) X 轴位移云图; (c) Y 轴位移云图; (d) Z 轴位移云图

Fig 2-13 Deformation clouds of the machine

(a) Total deformation cloud; (b) X-axis deformation cloud; (c) Y-axis deformation cloud; (d) Z-axis deformation cloud

2.5 立式数控铣床的模态分析

对结构进行静力分析是为了计算结构节点上的应力应变以及位移进而得知结构的强度和刚度即静态特性，而结构模态分析则是通过计算出频率、模态振型这些本质特征来描述结构是怎样运动的，也就是结构的动态特性。模态是指机械结构的固有振动特征，每一阶模态都有独特的固有频率、阻尼比和模态振型。模态分析是研究机械结构动态特性最主要的方法之一。

2.5.1 模态分析理论基础

系统的固有特性与外部激励的影响无关，而是取决于系统本身的结构和材料。模态分析原理是将结构物理空间里的复杂问题、耦合方程组进行解耦，得到一组运动方程，通过求解出方程的特征值和特征向量来描述系统实际工作时的频率和模态振型。模态分析旨在提取结构的模态参数，以此为基础对系统进行振动特性的深入探究、故障诊断与预测，并为其动态性能的优化设计奠定基础。根据求解出的频率，可以预测当有外力作用时结构模态振型和结构的振动趋势，能帮助设计工程师设计出更优的结构。

根据上一小节的介绍可知，多自由度结构的运动满足式 (2-1)，系统的固有频率实际是方程的特征值，该方程为二元非齐次微分方程，求解方程的第一步就是先假设 $p(t) = 0$ 将其转换为二阶齐次微分方程，刚好对应着结构在无外力作用即自由振动时的

运动状态，对于处于自由振动状态的结构来说阻尼对该结构影响小到可以忽略，那么此时结构的运动学微分方程就可以简化为如下方程：

$$[m]\{\ddot{u}(t)\} + [k]\{u(t)\} = 0 \quad (2-3)$$

其中： $\{\ddot{u}(t)\}$ 是体系加速度矢量；

$\{u(t)\}$ 是体系位移量；

$[m]$ 是整个体系的惯性质量矩阵；

$[k]$ 是整个体系的刚度矩阵；

该二阶齐次微分方程时域解具有自然指数形式 $u = U e^{st}$, 将 $u = U e^{st}$ 代入式 (2-3) 求解得到方程：

$$([m]s^2 + [k])\{U\} = \{0\} \quad (2-4)$$

根据 Cramer 法则：由 a 个方程组成的 a 元齐次线性方程组的系数行列式非零时，方程组只有零解，而式 (2-4) 的解表示结构的固有频率为非零解，即得到方程：

$$|([m]s^2 + [k])| = 0 \quad (2-5)$$

该方程是该结构的特征方程，求解矩阵 $([m]s^2 + [k])$ 可得其特征值和特征向量，其中特征值从小到大排序就代表各阶固有频率的平方，特征向量代表各阶振型。

2.5.2 模态分析结果

实际工程中的结构属于连续体通常是无限维的，具有无穷多个自由度，因此模态也有无穷阶。然而，只有前几阶模态主导着结构的运动，所以只计算前几阶模态就可以知道结构的动力学特性^[58]。本研究使用兰索斯算法根据实际需要只提取零部件的前六阶非零自由模态和机床整机的前六阶约束模态来分析整机以及关键零部件的固有特性。由于基座和滑鞍对最终分析结果影响不大，因此不单独对基座和滑鞍的模态进行分析。

2.5.2.1 床身模态分析结果

本研究不对床身施加任何载荷和约束，只分析床身的自由模态。提取床身前 12 阶模态中除去接近零和值为零的模态，得到前六阶自由模态。床身的前六阶振型云图如图 2-14。由图 2-14 (a) 可知，床身的一阶固有频率为 134.89Hz，床身整体绕 X 轴转动。由图 2-14 (b) 可知，床身的二阶固有频率为 302.2Hz，床身沿 Y 轴水平振动。观察图 2-14 (c) 可知，床身三阶固有频率为 317.68Hz，床身沿着 X 轴水平上下振动。分析图 2-14 (d) 可知，床身的四阶固有频率为 455.96Hz，床身围绕 X 轴扭转振动。由图 2-14 (e) 可知，床身的五阶固有频率为 565.98Hz，床身右端沿着 Y 轴水平振动。对图 2-14 (f) 进行分析可知，床身的六阶固有频率为 678.6Hz，床身绕着 X 轴扭转振动。一旦结构的固有频率与激振频率恰好吻合，便会引发共振现象。床身主要受驱动滑鞍完

成在 X 方向运动的电机影响, 已知横向 X 进给电机扭矩为 $10N \cdot m$, 此时的激振频率为 46Hz, 而床身的固有频率远大于激振频率, 可知床身不易发生共振。

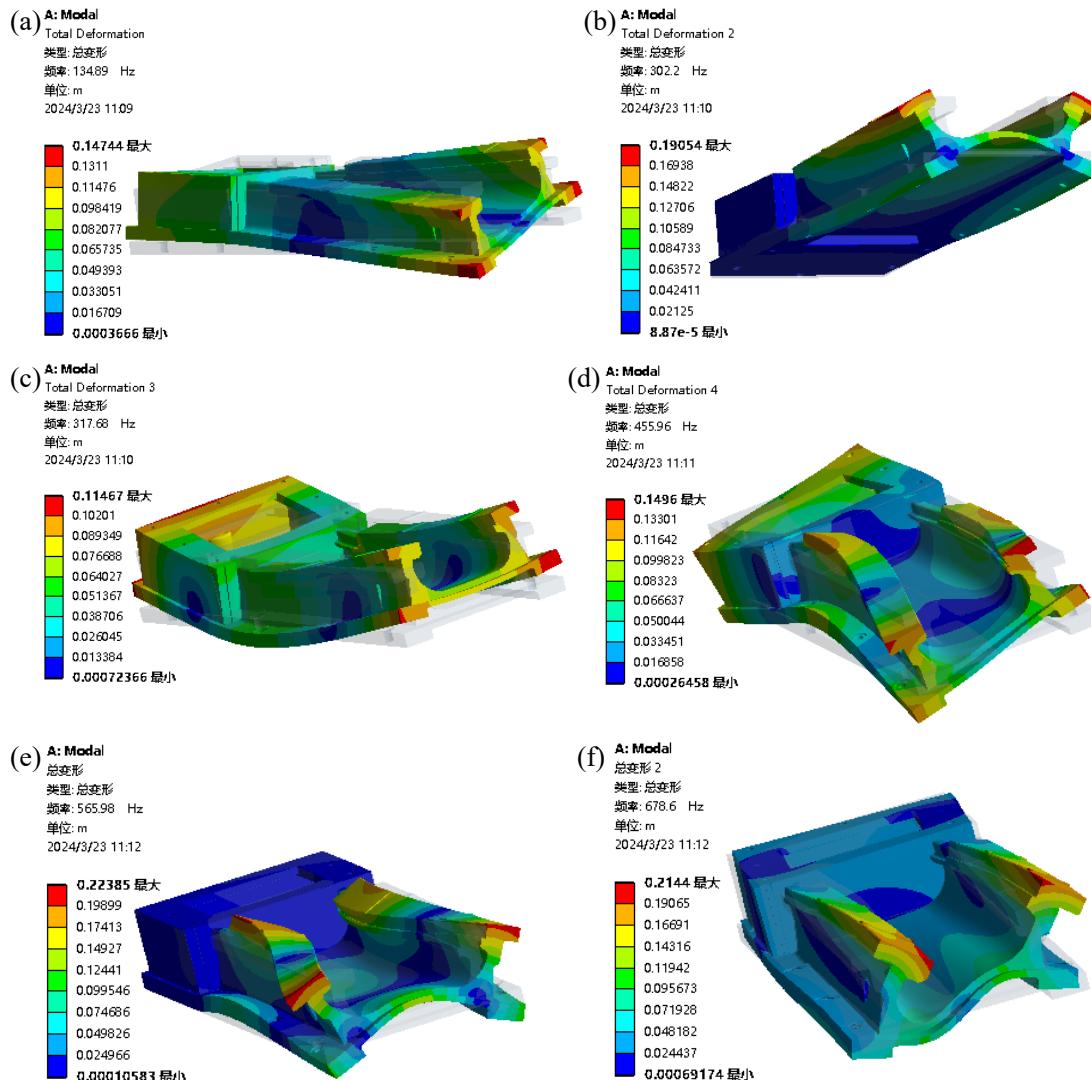


图 2-14 床身前六阶振型云图 (a)-(f): 一至六阶振型云图

Fig 2-14 Clouds of the first six modes of vibration of the bed

(a)-(f): Clouds of the first to sixth modes of vibration

2.5.2.2 工作台模态分析结果

工作台有限元模型建立完成之后, 不施加外部激励和约束, 分析工作台的自由模态。除去工作台前 12 阶模态中接近零和值为零的模态, 只提取前六阶自由模态, 得到工作台的前六阶振型云图如图 2-15 所示。由图 2-15 (a) 可知, 工作台的一阶固有频率为 293.01Hz, 振型表现为围绕 X 轴扭转振动。由图 2-15 (b) 可知, 工作台的二阶固有频率为 541.12Hz, 表现为整体沿 Y 水平振动。分析图 2-15 (c) 可知, 工作台的三阶固有频率是 835.74Hz, 整体沿着 X 轴和 Y 轴水平振动。对图 2-15 (d) 进行分析可知, 工作台四阶固有频率为 934.17Hz, 表现为工作台沿 X 轴平动。由图 2-15 (e) 可知, 工

作台的五阶固有频率为 981.88Hz，工作台绕着 X 轴转动。由图 2-15 (f) 可知，工作台的六阶固有频率为 1323.4Hz，工作台绕 X 轴扭转振动。驱动工作台在 Y 方向运动的电机产生的激振频率为 46Hz，可知工作台不易产生共振。

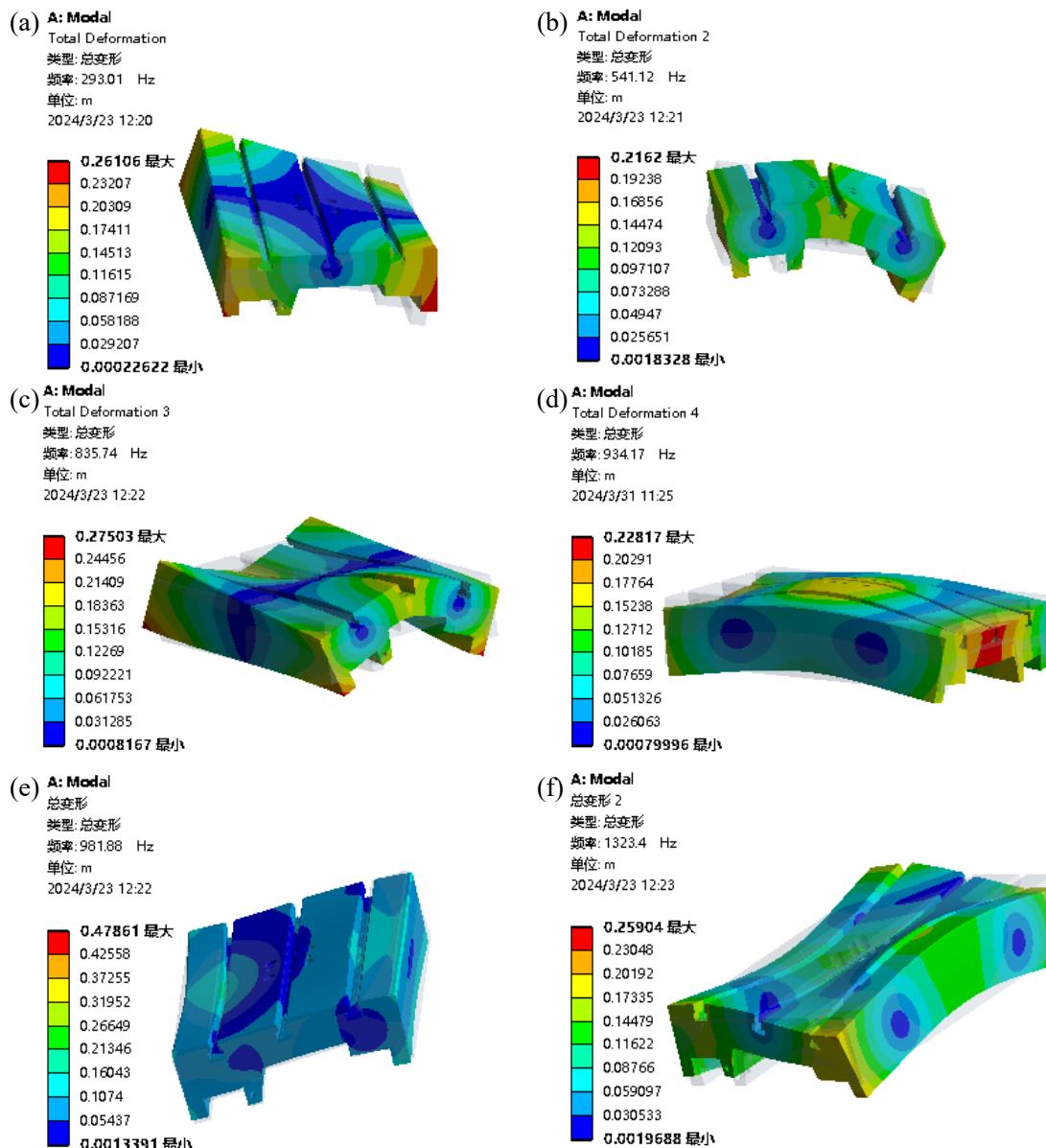


图 2-15 工作台前六阶振型云图 (a)-(f): 一至六阶振型云图

Fig 2-15 Clouds of the first six modes of vibration of the table

(a)-(f): Clouds of the first to sixth modes of vibration

2.5.2.3 立柱模态分析结果

本研究设置最大模态阶数为 12，使用求解器求解立柱的自由模态，除去接近零的模态，提取前六阶非零模态。立柱的前六阶振型云图如图 2-16 所示。由图 2-16 (a) 可知，立柱的一阶固有频率为 275.97Hz，立柱围绕着 Z 轴扭转振动。分析图 2-16 (b) 可

知, 立柱的二阶固有频率为 291.09Hz, 立柱绕 Z 轴转动。由图 2-16 (c) 可知, 立柱的三阶固有频率为 427.65, 前后两壁和左右两壁分别沿着 X 轴和 Y 轴水平振动。由图 2-16 (d) 可知, 立柱的四阶固有频率为 472.59Hz, 表现为沿着 Y 轴平动。由图 2-16 (e) 可知, 立柱的五阶固有频率为 572.23Hz, 整体围绕 Z 轴扭转振动。由图 2-16 (f) 可知, 立柱的六阶固有频率为 582.5Hz, 围绕 X 轴和 Y 轴水平振动。立柱主要受驱动主轴箱在 Z 轴方向移动的电机影响, 升降 Z 向进给电机扭矩为 15N · m, 此时的激振频率为 50Hz, 可知立柱不易因固有频率和激振频率重合而产生共振。

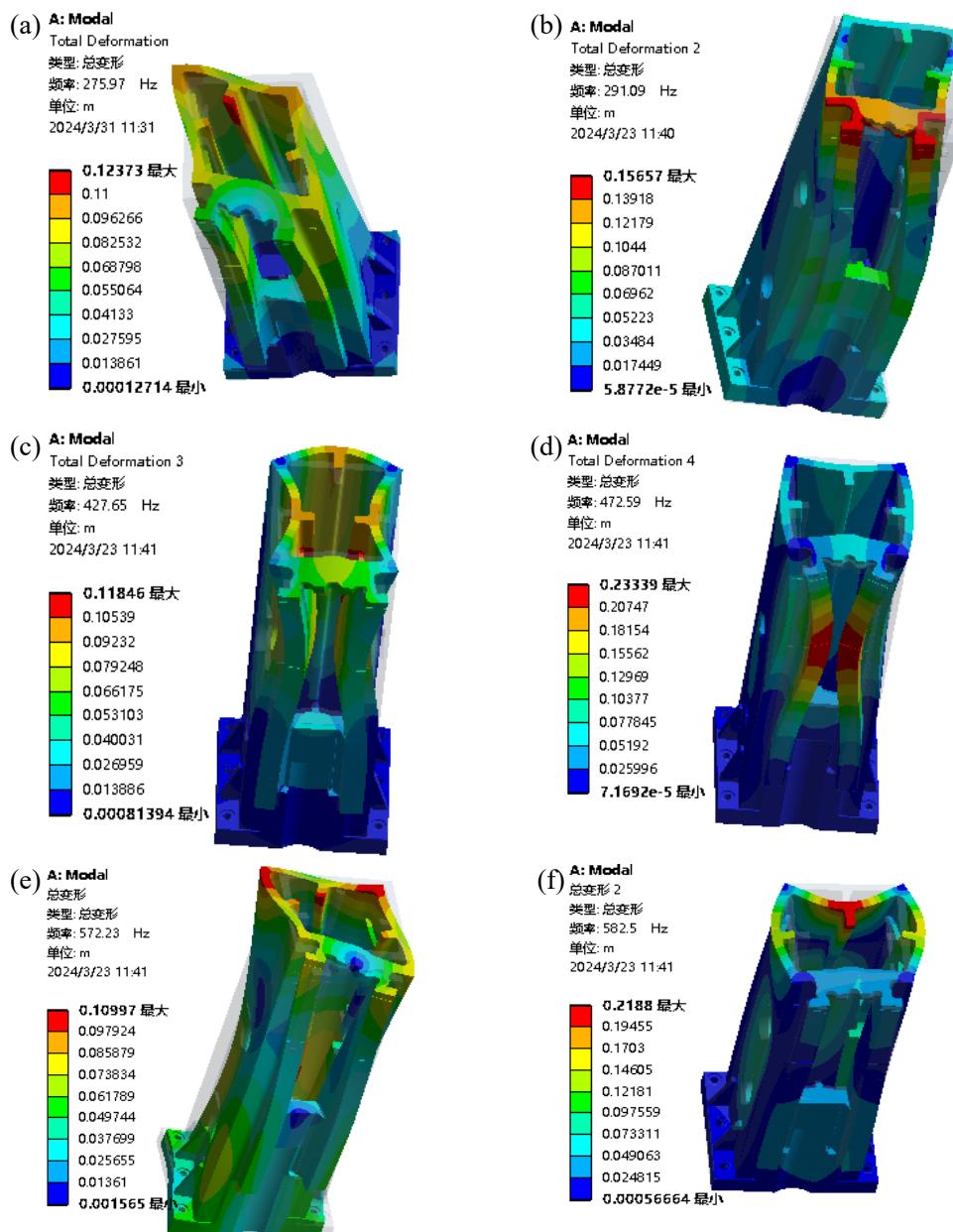


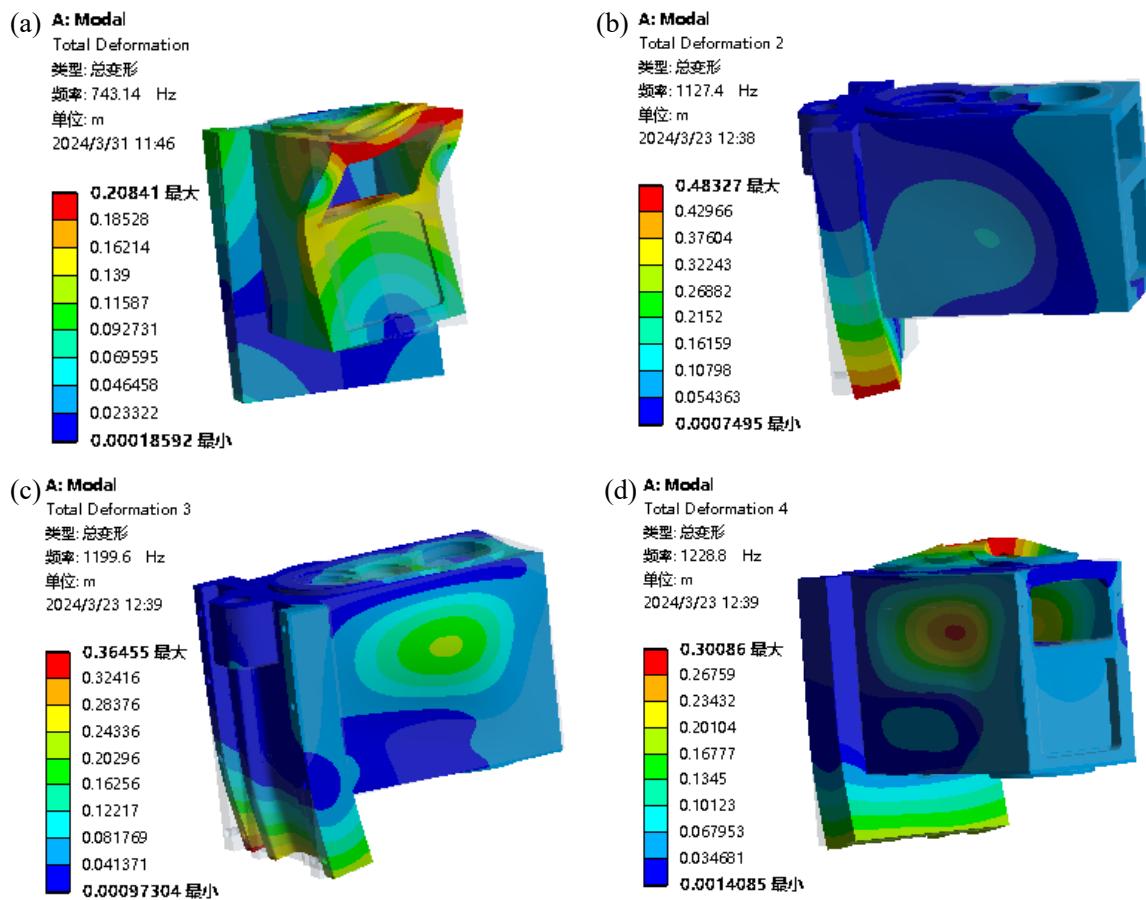
图 2-16 立柱前六阶振型云图 (a)-(f): 一至六阶振型云图

Fig 2-16 Clouds of the first six modes of vibration of the column

(a)-(f): Clouds of the first to sixth modes of vibration

2.5.2.4 主轴箱模态分析结果

对主轴箱有限元模型进行完善之后，不施加外部激励和约束对其自由模态进行求解。将最大模态阶数设置为 12，省略前几阶中接近零的模态，提取前六阶非零模态。得到主轴箱的前六阶振型云图如图 2-17 所示。分析图 2-17 (a) 可知，主轴箱一阶固有频率是 743.14Hz，表现为整体围绕 Z 轴扭转振动。分析图 2-17 (b) 可知，主轴箱的二阶固有频率为 1127.4Hz，振动表现为主轴箱沿着 X 轴平动。由图 2-17 (c) 可知，主轴箱三阶固有频率为 1199.6Hz，表现为整体沿着 Y 轴水平振动。分析图 2-17 (d) 可知，主轴箱的四阶固有频率是 1228.8Hz，变现为其沿着 Y 轴水平振动。分析图 2-17 (e) 可知，主轴箱五阶固有频率为 1273.1Hz，整体绕着 Z 轴扭转振动。由图 2-17 (f) 可知，主轴箱的六阶固有频率为 1344.4Hz，振动表现为绕着 Z 轴扭转振动。由于驱动刀具的电机最高转速为 3000rpm，此时的激振频率为 50Hz，而主轴箱的固有频率远高于 50Hz，可知主轴箱在工作中不易发生共振。



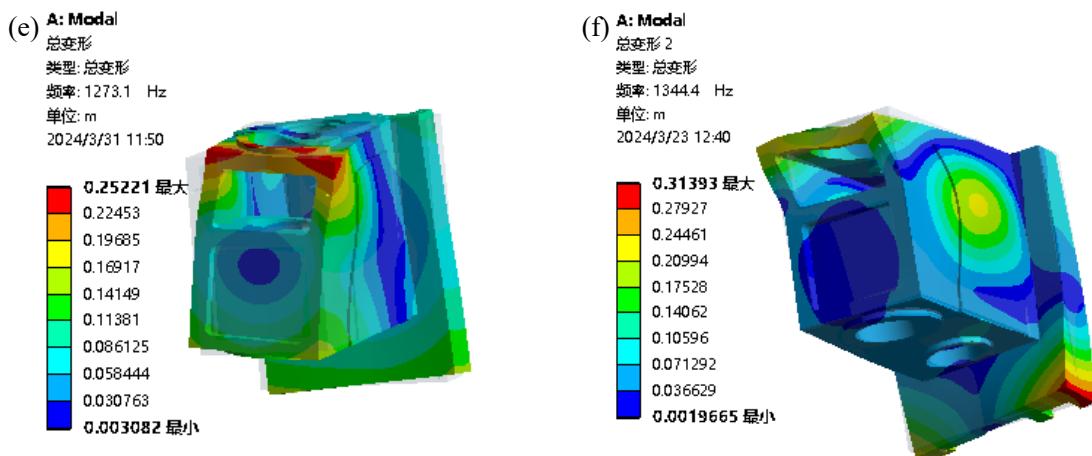


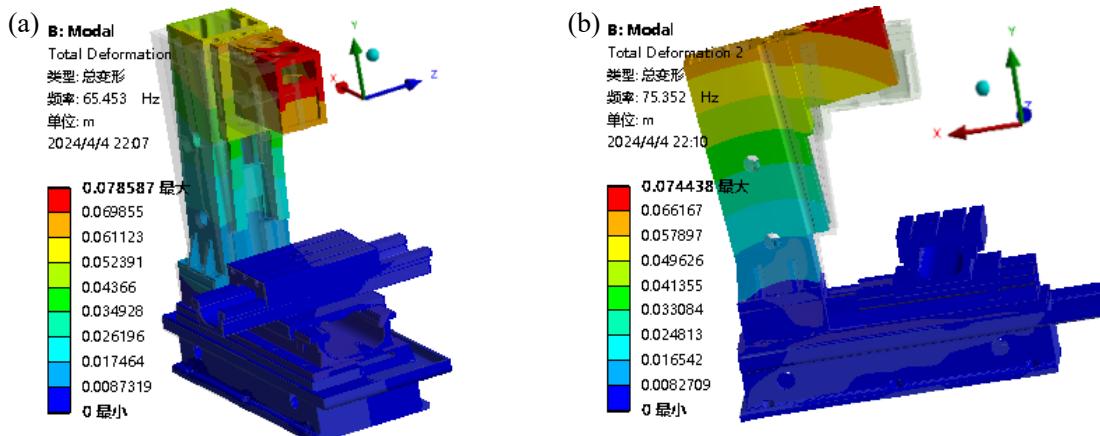
图 2-17 主轴箱前六阶振型云图 (a)-(f): 一至六阶振型云图

Fig 2-17 Clouds of the first six modes of vibration of the spindle box

(a)-(f): Clouds of the first to sixth modes of vibration

2.5.2.5 机床整机模态分析结果

机床有限元模型搭建完成之后，根据实际工作状况将机床基座底部设置为全约束，设置最大模态阶数为 6，对整机的约束模态进行分析，提取前六阶模态数据，得到的整机振型云图如图 2-18 所示。由图 2-18 (a) 可知，机床的一阶固有频率为 65.5Hz，机床上方，立柱和主轴箱同时围绕 Y 轴扭转振动。由图 2-18 (b) 可知，机床的二阶固有频率为 75.4Hz，表现为立柱和主轴箱同时沿 X 轴左右摇摆振动。由图 2-18 (c) 可知，机床的三阶固有频率为 144.19Hz，振动表现为围绕 Y 轴扭转振动。分析图 2-18 (d) 可知，机床的四阶固有频率为 157.83Hz，表现为整体围绕 Y 轴扭转振动。由图 2-18 (e) 可知，机床五阶固有频率为 211.68Hz，基座右端沿 X 轴水平振动。由图 2-18 (f) 可知，机床的六阶固有频率为 226.38Hz，表现为主轴箱带动立柱沿 X 轴水平振动，同时基座最右端也沿 X 轴方向平动。



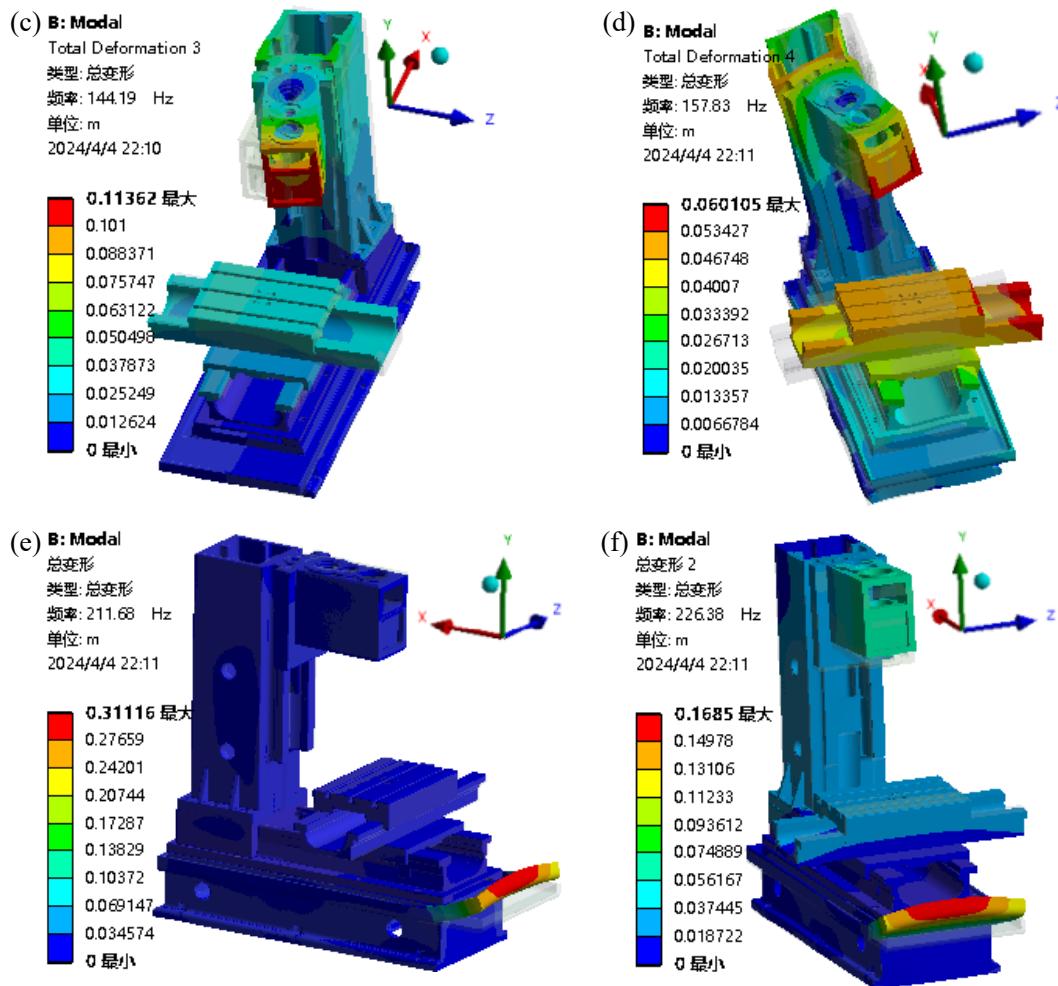


图 2-18 机床振型云图 (a)-(f): 一至六阶振型云图

Fig 2-18 Clouds of the first six modes of vibration of the machine

(a)-(f): Clouds of the first to sixth modes of vibration

综合机床工作时最高转速为 3000rpm 考虑，发现机床的前两阶固有频率较低，在工作时易因为接近激励频率而产生共振，故整机前两阶固有频率为机床的薄弱环节。

2.6 本章小结

本章建立起机床各零部件和整机的三维模型，将三维模型导入有限元软件，对三维模型进行几何清理、选择单元类型、网格划分以及定义边界条件，建立其有限元模型，对结构有限元模型进行了静力分析来校核结构的强度，结果表明关键零部件和整机的强度都符合设计要求；接着对有限元模型进行了模态分析，分析可知关键零部件的固有频率皆在安全范围内，分析整机的模态可知整机的前两阶固有频率较低，容易落入共振频率范围内，因此确定机床的前两阶固有频率为整机的薄弱环节。

3 灵敏度分析

结构优化实质是筛选最优结果，首先确定需要优化的目标，在本研究中优化目标为前一章有限元分析结果中机床的薄弱环节即前两阶固有频率，但由于不能一味追求高固有频率而忽略了机床质量的无限增加，因此确定前两阶固有频率和质量为优化目标。其次要确定对优化目标产生直接影响的因素，本研究选择机床各零部件的关键筋板厚度、壁厚等作为优化变量。机床是比较复杂且庞大的结构且由于加工零件的需要，其内部结构复杂，导致优化变量数量很多，但并不是每个尺寸都对优化目标产生影响，如果不进行筛选而是对每个尺寸都进行优化，不仅会增加机械设计师的工作量，还可能会错过最优的优化结果，因此要通过灵敏度分析为后续结构优化做出铺垫。

3.1 灵敏度分析理论基础

灵敏度分析是在设计过程中评估设计参数或系统输入变量对特定目标函数或输出响应的影响程度的过程。可以帮助确定不同变量对最终结果的贡献程度，从而帮助更好地理解它们之间的关系。在各个领域都有广泛的应用，如工程设计、金融建模、环境科学等。灵敏度分析的主要目的是识别那些对输出结果影响最大的输入变量，从而帮助理解复杂系统的优化决策过程。

灵敏度分析的关键要素包括：

- ①目标识别：确定分析的目的和需要考虑的输出变量。
- ②输入参数：识别所有可能影响输出的输入参数。
- ③参数范围和分布：为每个输入参数定义合理的变化范围或概率分布。
- ④模型评估：运行模型以评估不同输入参数组合下的输出。
- ⑤灵敏度度量：使用特定的统计或数学方法来量化每个输入参数对输出的影响程度。

⑥结果解释：分析和解释灵敏度分析的结果，确定哪些参数是对输出结果影响最大的。

分析灵敏度的方法有两种：局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。局部灵敏度分析专注于单一输入参数在有限范围内的变化对输出结果的影响，而全局灵敏度分析则考虑所有输入参数在其整个可能范围内变化时对输出的综合影响。机床筋板厚度和壁厚等尺寸对优化目标产生的是综合影响，因此本研究对机床采用全局灵敏度分析。

在实际结构优化问题中，结构性能指标对机床各尺寸 L 的变化梯度就是灵敏度^[59]，从数学的角度表述，设存在一可导函数 $F(l)$ ，其对应的一阶灵敏度为：

$$S = \frac{\Delta F(l)}{\Delta l_i} \quad (3-1)$$

$$S = \frac{\partial F(l)}{\partial l_i} \quad (3-2)$$

式(3.1)表示差分灵敏度; 式(3.2)表示微分灵敏度。

优化变量与结构性能指标之间的灵敏度可以表示为下式:

$$S_{ml} = \frac{\partial m(l_1, l_2 \dots, l_n)}{\partial l_i} \quad (3-3)$$

$$S_{kl} = \frac{\partial k(l_1, l_2 \dots, l_n)}{\partial l_i} \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial l_i} = -\frac{1}{\beta_\gamma} \{B_\gamma^T\} \left(\delta_\gamma^2 \frac{\partial M}{\partial l_i} + \delta_\gamma \frac{\partial C}{\partial l_i} + \frac{\partial K}{\partial l_i} \right) \{B_\gamma\} \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial \{B_\gamma\}}{\partial l_i} = -\frac{1}{2\alpha_\gamma} \{B_\gamma\}^T \left(2\delta_\gamma \frac{\partial M}{\partial l_i} + \frac{\partial C}{\partial l_i} \right) \{B_\gamma\}^2 \quad (3-6)$$

$$+ \sum_{p=1}^{2n} \frac{1}{\alpha_p(\delta_p - \delta_\gamma)} \{B_p\}^T \left(\delta_\gamma^2 \frac{\partial M}{\partial l_i} + \delta_\gamma \frac{\partial C}{\partial l_i} + \frac{\partial K}{\partial l_i} \right) \{B_\gamma\} \{B_p\}$$

其中: $\delta_\gamma = \omega_\gamma^2$, $\gamma = 1, 2 \dots, n$; $\delta_p = \omega_p^2$, $p = 1, 2 \dots, n$;

$$\alpha_\gamma = \{B_\gamma\}^T \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix} \{B_\gamma\}; \alpha_p = \{B_p\}^T \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix} \{B_p\};$$

B_γ ——固有频率 ω_γ 对应的模态振型;

B_p ——特征向量组成 $2n \times 2n$ 维的一组基;

K ——刚度矩阵; C ——阻尼矩阵; M ——质量矩阵;

l_i ——优化变量, $i = 1, 2 \dots, n$ 。

3.2 试验设计

灵敏度分析通常涉及对参数空间进行采样以获取数据, 通过对参数空间进行适当的采样, 可以更全面地了解系统或模型对参数变化的响应。对参数空间进行采样就要用到试验设计方法, 试验设计是一种系统性的方法, 用于计划实验以系统地获取数据, 从而可以有效地分析结果并得出可靠的参数组合, 为灵敏度分析提供数据基础。试验设计通过对关键变量的系统研究来最大化的获取信息, 通过使用随机化、区组设计等技术来控制或减小混杂因素的影响, 从而提高试验的内部有效性, 通过重复性、随机化和其他设计原则来提高试验的可靠性, 同时合理的试验设计可以在保持试验效果的同时减少试验的规模和成本。研究人员需要考虑研究的目标、因素的数量和水平, 来确定最适合的试验设计方法。

试验设计方法在本质上可以分为两大类: 全因子设计和分数因子设计。在全因子设计中, 需要考虑所有可能的因素水平组合, 以充分了解各个因素对试验结果的影响, 这种设计通常涉及对每个因子的每个水平进行组合, 生成一个完整的试验矩阵。全因

子设计适用于相对较小数量的因素和水平，其目标是全面了解各个因素的主效应和交互效应。分数因子设计是一种在全因子设计中的折中方案，分数因子设计是在保留试验效果的同时减少试验数量的方法，这种设计考虑了因素的部分组合，通过选择主要因素和交互因素的一个子集，使得试验规模更为可行。分数因子设计适用于当因素和水平的数量较大时，而全因子设计会变得不切实际的情况。本研究的优化变量和水平的数量都较大，采用全因子设计比较不切实际，因此选择分数因子设计方法。

常见的分数因子设计方法有 Plackett-Burman 设计、二因子分数设计、Taguchi 方法、拉丁超立方试验设计和最优拉丁超立方设计等。最优拉丁超立方设计是对传统拉丁超立方设计的改进，目的是在相同的采样点数量下提高设计的优化性能，它通过优化样本点的布局，以最大程度地提高采样的效率和信息获取，两种设计方法对于两个变量的实际问题关于样本点的分布状况如图 3-1、图 3-2 所示。传统拉丁超立方主要用于试验设计和参数采样，以获取对系统行为的全局了解，而优化后的拉丁超立方通常是为了在有限的试验点数下，找到模型的全局最优解，即优化算法与采样方法的结合。其关键目标之一是最小化样本点之间的总变差，即样本点在设计空间内分布的度量，通过降低总变差，可以更均匀地覆盖整个设计空间；针对设计空间的不同区域，尤其是对于可能包含系统关键特征的区域，最小化其不均匀性，有助于在关键区域进行更密集的采样；最大化每个样本点到其最近邻点的最小距离，有助于确保在设计空间中有足够的分散性，减少采样点之间的相关性；不仅适用于低维空间，还可以扩展到高维设计空间，确保在多维情况下同样能够优化采样点的布局。设计每个因子的级数等于点数，优化组合可在 n 个因子定义的 n 维空间内均匀分布点数。

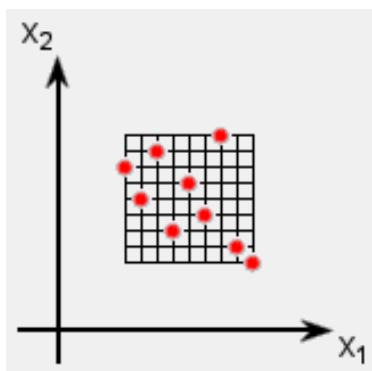


图 3-1 拉丁超立方采样

Fig 3-1 Latin hypercube sampling

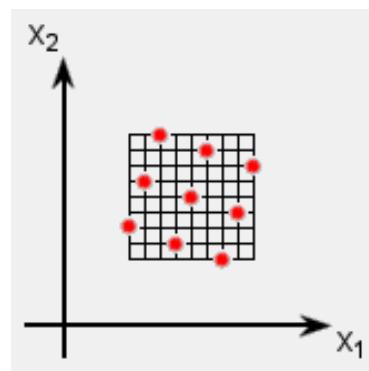


图 3-2 最优拉丁超立方采样

Fig 3-2 Optimal latin hypercube sampling

本研究采用最优拉丁超立方设计对设计变量数据进行采集，而最优拉丁超立方设计的首要工作就是确定参与试验的因素以及每个因素的不同水平，本研究的试验因素是对结构固有频率和质量产生影响的机床各零部件筋板厚度以及壁厚，机床各零部件

关键筋板厚度以及壁厚尺寸的结构简图如图 3-3 所示，各尺寸参数对应的取值范围如下表 3-1 所示。

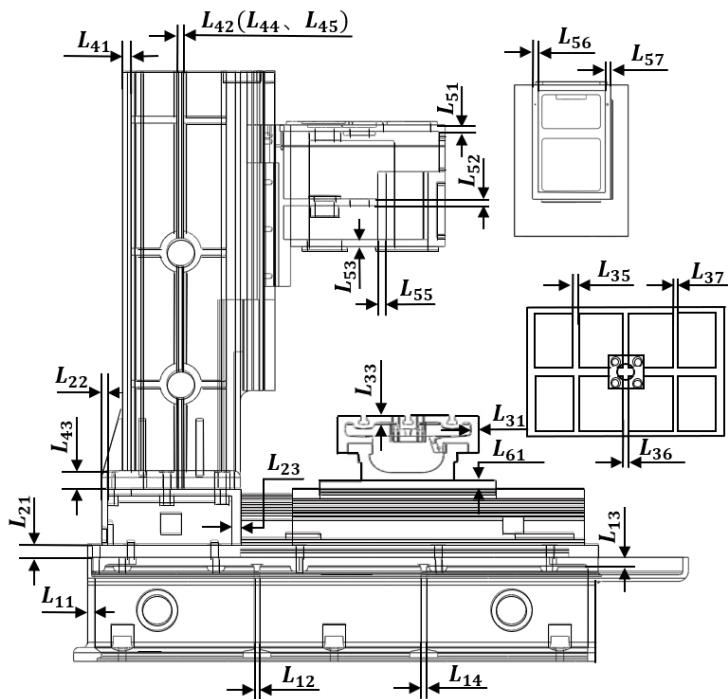


图 3-3 机床各尺寸位置简图

Fig 3-3 Sketch of the position of each dimension of the machine

表 3-1 尺寸参数的变化范围

Table 3-1 Range of variation of dimensional parameters

名称	参数名	初始值(m)	取值范围(m)
基座左侧壁厚	L_{11}	0.02	(0.012 0.028)
基座一筋板厚	L_{12}	0.016	(0.0096 0.0224)
基座上壁厚	L_{13}	0.025	(0.015 0.035)
基座二筋板厚	L_{14}	0.016	(0.0096 0.0224)
床身底板厚	L_{21}	0.04	(0.024 0.056)
床身左侧壁厚	L_{22}	0.018	(0.0108 0.0252)
床身右侧壁厚	L_{23}	0.025	(0.015 0.035)
工作台侧壁厚	L_{31}	0.022	(0.0132 0.0308)
工作台顶板厚	L_{33}	0.022	(0.0132 0.0308)
工作台一筋板厚	L_{35}	0.015	(0.009 0.021)
工作台二筋板厚	L_{36}	0.015	(0.009 0.021)
工作台三筋板厚	L_{37}	0.015	(0.009 0.021)
立柱左侧壁厚	L_{41}	0.025	(0.015 0.035)

表 3-1 (续)

名称	参数名	初始值(m)	取值范围(m)
立柱一筋板厚	L_{42}	0.02	(0.012 0.028)
立柱底板厚	L_{43}	0.05	(0.03 0.07)
立柱二筋板厚	L_{44}	0.02	(0.012 0.028)
立柱三筋板厚	L_{45}	0.02	(0.012 0.028)
主轴箱顶板厚	L_{51}	0.018	(0.0108 0.0252)
主轴箱中间筋板厚	L_{52}	0.02	(0.012 0.028)
主轴箱底板厚	L_{53}	0.02	(0.012 0.028)
主轴箱圆弧筋板厚	L_{55}	0.025	(0.015 0.035)
主轴箱前侧壁厚	L_{56}	0.018	(0.0108 0.0252)
主轴箱后侧壁厚	L_{57}	0.018	(0.0108 0.0252)
滑鞍底板厚	L_{61}	0.03	(0.018 0.042)

接着在每个维度上生成均匀分布的随机样本，这样可以确保每个因素的每个水平都得到充分考虑，常见的方法是使用拉丁方块（Latin Square）的技术。

3.3 灵敏度分析结果

试验设计得到的数据用于分析优化变量对机床性能指标影响的灵敏度。本研究使用 Isight 对机床各零部件的关键筋板厚度和壁厚对优化目标的灵敏度进行分析，从 24 个尺寸中找出关键尺寸。Isight 提供了强大的灵敏度分析工具，其工作流如下图 3-4 所示。

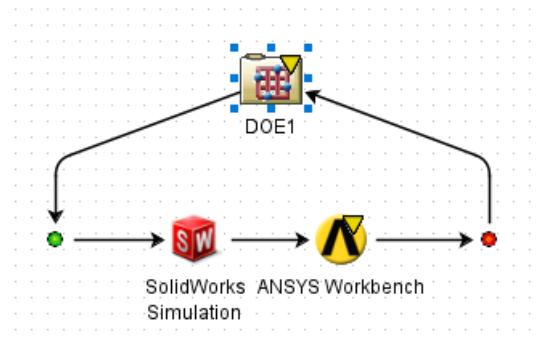


图 3-4 灵敏度分析工作流

Fig 3-4 Sensitivity Analysis workflow

在使用 Isight 进行灵敏度分析前，首先要建立模型，就需要先完成与其他工程软件的集成和调用，如图 3-4 所示，分析过程中需要用到 SolidWorks 和 ANSYS Workbench，将最优拉丁超立方试验设计得到的各个因素值作为 SolidWorks 中机床几何模型的尺寸

输入对几何模型进行重建，重建后的模型重新导入 Workbench 中，根据最初的网格划分和边界条件设置重新计算出前两阶固有频率等响应值，这些步骤都由 Isight 对两个软件进行调用完成，而在 SolidWorks 中重建的模型导入 Workbench 则是在两个软件完成集成的前提下进行。对得到的因素值和响应值数据进行结构灵敏度分析，得出结果如图 3-5、3-6、3-7 所示。

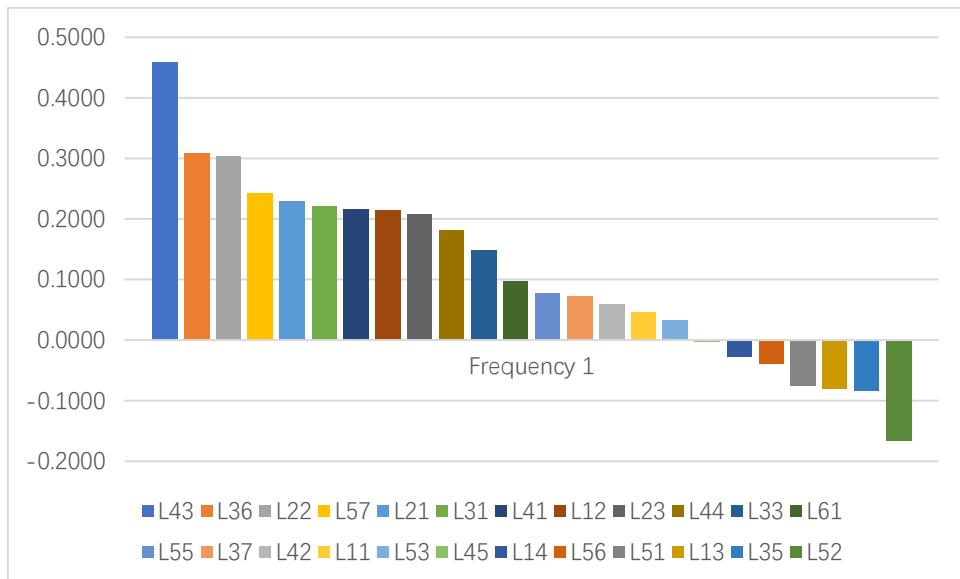


图 3-5 厚度尺寸对一阶固有频率贡献图

Fig 3-5 Thickness dimension contribution plot to first-order natural frequency

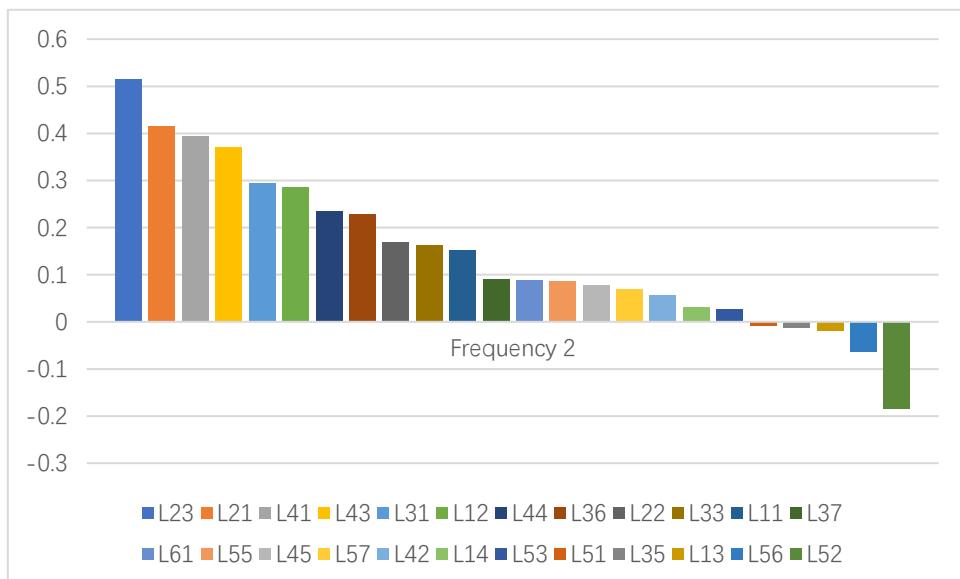


图 3-6 厚度尺寸对二阶固有频率贡献图

Fig 3-6 Thickness dimension contribution plot to second-order natural frequency

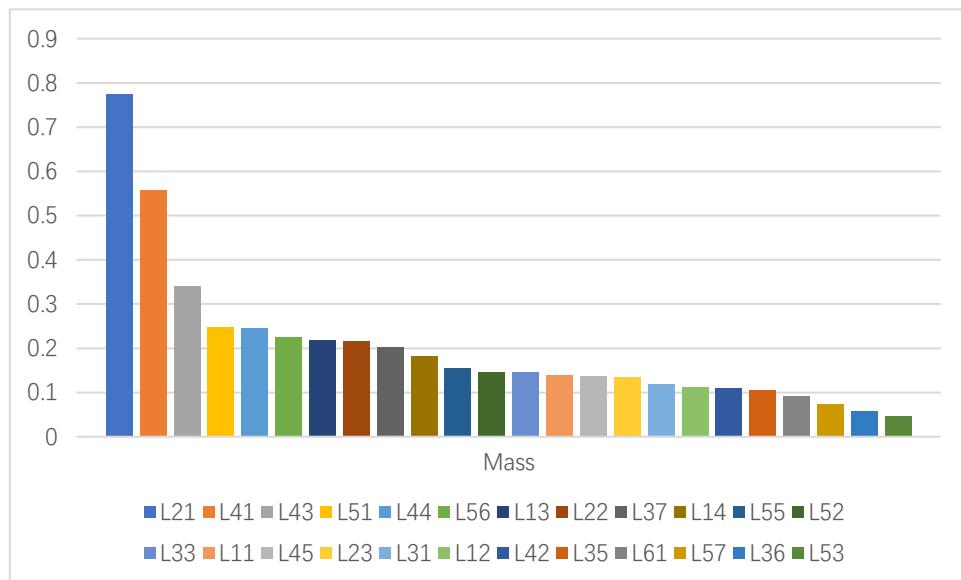


图 3-7 厚度尺寸对质量贡献图

Fig 3-7 Thickness dimension contribution to mass

通过分析以上贡献图，可以得出厚度尺寸对一阶、二阶固有频率和质量的灵敏度值，如表 3-2 所示。

表 3-2 尺寸对一阶、二阶固有频率和质量的灵敏度值

Table 3-2 Sensitivity values of dimensions to first and second-order natural frequencies and mass

尺寸名称	一阶固有频率灵敏度	二阶固有频率灵敏度	质量灵敏度
L_{11}	0.045	0.152	0.138
L_{12}	0.214	0.285	0.113
L_{13}	-0.080	-0.018	0.219
L_{14}	-0.027	0.030	0.182
L_{21}	0.228	0.416	0.775
L_{22}	0.302	0.170	0.216
L_{23}	0.208	0.514	0.135
L_{31}	0.221	0.294	0.118
L_{33}	0.148	0.163	0.146
L_{35}	-0.084	-0.013	0.104
L_{36}	0.308	0.229	0.058
L_{37}	0.072	0.091	0.201
L_{41}	0.216	0.395	0.557
L_{42}	0.059	0.056	0.109
L_{43}	0.459	0.370	0.340

表 3-2 (续)

尺寸名称	一阶固有频率灵敏度	二阶固有频率灵敏度	质量灵敏度
L_{44}	0.182	0.234	0.245
L_{45}	-0.002	0.078	0.137
L_{51}	-0.075	-0.009	0.248
L_{52}	-0.166	-0.184	0.147
L_{53}	0.033	0.027	0.045
L_{55}	0.076	0.086	0.155
L_{56}	-0.039	-0.064	0.225
L_{57}	0.243	0.070	0.075
L_{61}	0.098	0.088	0.091

灵敏度值有正有负，灵敏度为正值表示随着厚度尺寸的增大或减小，性能指标同时增加或减小，即成正相关；灵敏度为负值则说明随着厚度尺寸的增大或减小，性能指标减小或增大，即成负相关。从表 3-2 中数据可知，尺寸参数 L_{43} 、 L_{36} 、 L_{22} 、 L_{57} 、 L_{21} 对一阶固有频率的贡献较大，其中随着尺寸的增大，机床的一阶固有频率增大；尺寸 L_{31} 、 L_{41} 、 L_{23} 、 L_{44} 、 L_{52} 对一阶固有频率的贡献次于尺寸 L_{43} 、 L_{36} 、 L_{22} 、 L_{57} 、 L_{21} ，其中一阶固有频率随 L_{31} 、 L_{41} 、 L_{23} 、 L_{44} 的增大而增大；随尺寸 L_{52} 的减小而降低。分析二阶固有频率贡献数据可知，尺寸参数 L_{23} 、 L_{21} 、 L_{41} 、 L_{43} 对二阶固有频率的贡献最大，随着尺寸的增大，机床的二阶固有频率也增加；尺寸 L_{31} 、 L_{44} 、 L_{36} 、 L_{52} 对机床二阶固有频率的贡献次于尺寸 L_{23} 、 L_{21} 、 L_{41} 、 L_{43} ，其中尺寸 L_{31} 、 L_{44} 、 L_{36} 与二阶固有频率成正相关；尺寸 L_{52} 与二阶固有频率成负相关。通过分析尺寸参数对机床质量的贡献度可知，尺寸 L_{21} 、 L_{41} 、 L_{43} 对机床质量的贡献度最大，随着尺寸的增大，机床的质量也增大；尺寸 L_{51} 、 L_{44} 、 L_{56} 对机床质量的贡献度次之，与机床质量成正相关。

本研究以提高模态分析得出的机床薄弱环节性能指标即一阶和二阶固有频率为主要目标，但同时要控制机床质量不能过大，要使机床总质量在合理范围内而一阶和二阶固有频率达到最大，综合考虑以上数据，决定选取尺寸 L_{21} 、 L_{22} 、 L_{23} 、 L_{31} 、 L_{36} 、 L_{41} 、 L_{43} 、 L_{44} 、 L_{51} 、 L_{52} 、 L_{56} 作为后续优化中的关键尺寸，进一步对结构进行尺寸优化。

3.4 本章小结

基于第二章有限元分析结果，确定机床前两阶固有频率为薄弱环节，优化薄弱环节的同时机床的质量不能无限增加，因此确定本研究的优化目标为前两阶固有频率和机床质量，通过对机床的筋板厚度、壁厚等尺寸进行优化来得到最优目标。由于在实

际情况中并不是所有的尺寸都对优化目标有影响，且由于机床整体结构比较复杂，尺寸参数比较多，对 24 个尺寸参数做了灵敏度分析。使用了最优拉丁超立方试验设计方法设计出数据集，这一过程是通过 Isight 集成 SolidWorks 和 Ansys Workbench 完成的，最终筛选出对 3 个优化目标贡献度大的 11 个尺寸作为设计变量，这 11 个设计变量是 L_{21} 、 L_{22} 、 L_{23} 、 L_{31} 、 L_{36} 、 L_{41} 、 L_{43} 、 L_{44} 、 L_{51} 、 L_{52} 、 L_{56} 。

4 立式数控铣床的多目标优化

结构优化是通过调整结构的设计参数，以达到特定性能指标和约束条件的最佳化过程。传统的结构优化通常使用传统的数学规划如线性规划、非线性规划以及优化方法来改进结构的性能，这些方法通常基于数学模型和算法，旨在在给定的设计空间内找到最优的结构参数。对机床进行结构优化是通过调整结构的关键尺寸参数，使薄弱的性能指标在约束条件下达到最优。在许多实际问题中，往往存在多个目标，而这些目标可能是互相矛盾的，即改善一个目标可能会导致其他目标的下降。多目标优化的目标是找到一组解，这组解在多个目标下都表现良好，形成一个称为“帕累托前沿(Pareto Front)”的集合，结构的多目标优化通常通过优化算法来实现。实现多目标优化首先要对问题进行建模，将多目标问题转化为数学模型。

4.1 结构优化数学模型

通过数学语言来描述和表示实际问题、系统或现象的抽象表示就是数学模型，数学模型通常包括变量、方程、参数等数学元素，通过这些元素来描述实际工程问题中的性能指标和设计变量与其的关系。一般可以表达为：

求设计变量

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (4-1)$$

使目标函数

$$[f(x)]_{min} \text{ 或 } [f(x)]_{max} \quad (4-2)$$

满足约束条件

$$g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4-3)$$

$$h_k(x) \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (4-4)$$

$$h_l(x) \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, q \quad (4-5)$$

其中， n 是设计变量数； m 为性能约束条件数； p 为几何约束条件数； q 为设计变量间约束条件数。

(1) 设计变量是优化过程中通过分析确定的可以帮助实现优化目的的结构参数。拓扑优化中它可以是板壳的单元密度，尺寸优化中它可以是截面尺寸或者壳体厚度，形状优化中可以是边界的节点集。设计变量在优化过程中可能会不断变化，目标函数也会随着设计变量的变化而变化，设计变量的选择至关重要，应把那些对目标函数影响程度显著的参数作为设计变量。本研究所构建数学模型中的设计变量，是经由灵敏度分析筛选出的关键尺寸，旨在缩减计算工作量。

(2) 约束条件是根据实际情况附加在设计变量上的边界条件。比如在减轻机械产品总体质量的同时，又要保证结构的刚度或者要避免结构发生应力集中。在给定约束

条件之前要先建立约束响应，所有满足约束条件的单元就组成了优化设计域，优化设计过程就变成了寻找最优解的过程。

(3) 优化设计的任务是对各个设计方案进行对比，最终选出一个可行的最优设计方案，而最能反映设计方案优劣的就是目标函数。目标函数由设计实际决定，反映了与设计变量的关系，是优化设计中的关键组成成分^[60]。在对复杂的结构进行优化设计的过程中，目标函数可能不只一个，根据优化过程的难度大小可以将目标函数划分为单一目标函数和多目标函数。在实际优化问题中，往往需要优化的目标为多个。本研究优化问题中的目标函数有三个：机床一阶、二阶固有频率和机床质量。

4.2 建立近似模型

在对实际工程问题中的机械结构进行优化时，其目标函数即响应与设计变量（尺寸参数）之间的关系一般都是隐性的，而且比较复杂，尤其是设计变量对应多个优化目标的情况，优化目标与设计变量之间的关系一般是非线性的，对这样的问题建立数学模型可能导致较高的计算成本，有时解析解可能都不存在。为了解决这一问题，可以使用近似方法来降低模型的复杂性，将复杂问题转化为更容易处理的形式，从而提高计算效率降低计算成本。近似模型采用简化的数学形式，使用多项式拟合、插值等技术来逼近真实情况，并能提高目标函数的光滑性，有利于更快地收敛到最优值。构建近似模型常用的方法有克里金插值(Kriging)、径向基神经网络、正交多项式、响应面等。克里金插值法可以在小样本数据情况下进行建模，考虑空间相关性，适用于涉及空间分布的数据，但克里金模型本质上是线性的，对于包含非线性关系的数据，可能表现较差；径向基神经网络具备强大的非线性逼近能力，可以处理非线性问题，并在一些情况下能够更好地捕捉输入和输出之间的复杂关系，但在数据少时，可能出现过度拟合的现象，降低其在新数据上的泛化能力；正交多项式的正交性质使得在使用这些多项式作为基函数时，计算内积等操作更加简便有助于模型求解，能够提供全局逼近的能力，即在整个定义域内都能较好地逼近目标函数，但由于它本质上是线性的，对于包含非线性关系的数据，可能表现较差。

4.2.1 响应面近似模型理论基础

通过进行少量的试验在小范围内相对精确地逼近函数，用基本的表达式展现出来是响应面近似模型的优势^[61]。响应面近似法实际是基于输出变量与输入变量的最小二乘回归多项式拟合，基于输入变量的多项式函数，通过最小化实际观测值和模型预测值间残差的平方和，以数据拟合的方式寻求最适宜的多项式表达式。

通过设计最优拉丁超立方试验得出样本数据集 $Q(x, y)$ ，集合 Q 内各个数据点 $Q_i(x_i, y_i), (i = 1, 2, \dots, n)$ 属于多项式：

$$f(x_i) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \cdots + a_m x_i^m \quad (4-6)$$

其中, n 为设计变量个数即样本维度; m 为多项式阶数; $a_j (j = 0, 1, 2, \dots, m)$ 为模型的各项系数。

集合 Q 各组数据点的误差平方和:

$$S = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2 \quad (4-7)$$

使误差平方和 S 最小的多项式各项系数 a_j 为最优, 此时误差平方和 S 对各项系数 a_j 的偏导数值应该为 0, 即:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_j} &= \frac{\partial \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2}{\partial a_j} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial [(a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \cdots + a_j x_i^j + \cdots + a_m x_i^m - y_i)^2]}{\partial a_j} \\ &= \sum_{i=1}^n [2(a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \cdots + a_j x_i^j + \cdots + a_m x_i^m - y_i) x_i^j] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4-8)$$

整理后如式(4-9), 转化为矩阵形式如式(4-10):

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n (a_0 x_i^j + a_1 x_i^{j+1} + a_2 x_i^{j+2} + \cdots + a_j x_i^{2j} + \cdots + a_m x_i^{j+m}) \\ &= a_0 \sum_{i=1}^n x_i^j + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{j+1} + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^{j+2} + \cdots + a_n \sum_{i=1}^n x_i^{j+m} \\ &= \sum_{i=1}^n (x_i^j y_i) \end{aligned} \quad (4-9)$$

令:

$$x = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}$$

$$\text{则: } y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n (x_i y_i) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 y_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n (x_i^m y_i) \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

其中:

$$Xa = y$$

$$\alpha = X^{-1}y$$

将数据集 Q 中数据点代入上式即可求出多项式的最优系数矩阵。

除了使用代数法求多项式系数，还能用矩阵法求解系数，使用矩阵法可以将误差平方和 S 拆分为矩阵，令：

$$X_v = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^m \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \cdots & x_3^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^m \end{bmatrix}, \alpha = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, y_r = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

则 S 可以转换为以下形式：

$$S = (X_v \alpha - y_r)^T (X_v \alpha - y_r) \quad (4-11)$$

而对于最优多项式系数，仍满足误差平方和 S 对各项系数 a_m 的偏导数值为 0，即：

$\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0$ ，对式子进行推导可得：

$$\begin{aligned} dS &= d[(X_v \alpha - y_r)^T (X_v \alpha - y_r)] \\ &= d[(X_v \alpha - y_r)^T] (X_v \alpha - y_r) + (X_v \alpha - y_r)^T d(X_v \alpha - y_r) \\ &= [d(X_v \alpha - y_r)]^T (X_v \alpha - y_r) + (X_v \alpha - y_r)^T d(X_v \alpha - y_r) \\ &= (X_v d\alpha)^T (X_v \alpha - y_r) + (X_v \alpha - y_r)^T X_v d\alpha \\ &= (X_v \alpha - y_r)^T X_v d\alpha + (X_v \alpha - y_r)^T X_v d\alpha \\ &= 2(X_v \alpha - y_r)^T X_v d\alpha \end{aligned} \quad (4-12)$$

由于 S 是关于 $a_j (j = 0, 1, 2, \dots, m)$ 的多元函数，又多元函数的全微分：

$$dS = \sum_{j=0}^m \left(\frac{\partial S}{\partial a_j} da_j \right) = \left(\frac{\partial S}{\partial a} \right)^T da \quad (4-13)$$

通过矩阵法求得多项式的最优系数向量如下：

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2(X_v^T X_v \alpha - X_v^T y_r) = 0 \quad (4-14)$$

$$\begin{aligned} X_v^T X_v \alpha &= X_v^T y_r \\ \alpha &= (X_v^T X_v)^{-1} X_v^T y_r \end{aligned}$$

4.2.2 精度验证

近似模型通常用于代替真实的结构分析模型，是结构优化设计过程中的关键环节。模型的精度影响着优化算法的收敛性，导致优化结果的偏差，因此需要谨慎评估和控制近似模型的精度，精度验证作为验证模型是否可靠的关键步骤，有助于评估模型的泛化能力，一个具有良好泛化能力的模型可以对新数据进行精准的推测，而不仅仅是在训练时使用的数据集上表现良好。主要通过评价以下参数来判断模型精度是否满足需要：

(1) 确定系数 R^2

确定系数 R^2 表示模型对因变量（观测数据）变异性的阐述程度。确定系数表示模型所揭示的因变量变异程度相对于总体变异程度的占比。在回归分析中，确定系数描述了模型拟合数据的程度，即模型预测值与实际观测值的一致性程度。确定系数 R^2 的计算涉及到总平方和、回归平方和、和残差平方和：

①总平方和（TSS）：衡量因变量的总变异性，是第 i 个观测值与所有观测值均值之差的平方和。

$$TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

②回归平方和（RSS）：衡量模型对因变量的解释程度，是模型预测值与观测值均值之差的平方和。

$$RSS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

③残差平方和（ESS）：衡量模型未能解释的变异性，是实际观测值与模型预测值之差的平方和。

$$ESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

确定系数 R^2 的计算公式为：

$$R^2 = \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{ESS}{TSS}$$

其中， R^2 越接近 1，表示模型对数据的解释越好，即近似模型越精准；越接近 0，表示模型对数据的解释越差，也就表示近似模型的精度越差。

(2) 最大绝对值误差

最大绝对值误差是衡量模型预测误差的统计指标。对于每个样本，它计算模型的预测值与实际观测值之间的绝对误差，然后在整个数据集中找到这些绝对误差的最大值。

给定一个模型的预测值 \hat{y}_i 和实际观测值 y_i ，样本*i*的绝对误差 E_i 计算方式为：

$$E_i = |y_i - \hat{y}_i|$$

最大绝对误差（MAE）为所有样本中绝对误差的最大值：

$$MAE = \max_i E_i$$

最大绝对值误差的计算不考虑误差的方向，只关注其绝对值。因此，最大绝对值误差越小，说明模型在整个数据集上的预测越精准，也就表示模型的精度越高。

(3) 均方根误差

均方根误差反映了模型预测值与实际观测值的平均差异，考虑每个预测误差的平方，并在计算平均值后取平方根，对预测误差的幅度进行了加权以得到一个与原始观测值相同单位的度量。样本*i*的预测误差*E_i*:

$$E_i = y_i - \hat{y}_i$$

其中，*y_i*是模型的实际值；*ŷ_i*是预测值。

均方根误差（RMSE）的表示为：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}}$$

其中，*MSE*是所有平方误差的均值，表达式为：

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2$$

其中，*E_i*²是每个样本的预测误差的平方；*n*为样本数量。

均方根误差小说明模型预测能力强，表明模型的精度高。

（4）相对均方根误差

相对均方根误差是均方根误差（RRMSE）的一种标准化形式，将均方根误差与实际观测值的范围进行归一化，旨在考虑实际观测值的幅度，从而更好地反映模型的相对精度。

$$\text{RRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\text{Range}}$$

其中，*Range*是实际观测值的范围，即实际观测值最大值与实际观测值最小值之间的差； $\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i)^2}$ ；*n*为样本数量。

较小误差值直观地反映了近似模型具有较高的精度水平，相反，若相对均方根误差值偏大，则意味着存在相对显著的误差现象。

4.2.3 响应面近似模型建模结果

近似模型通常需要进行试验设计来收集数据，首先，明确定义问题中的优化目标和对优化目标产生影响的设计变量（因变量），通过灵敏度分析得出的关键尺寸作为设计变量，机床性能指标即结构一阶二阶固有频率和机床质量作为优化目标；用最优拉丁超立方试验设计方法获取样本点，使用样本点数据来拟合近似模型。本研究基于Isight的近似模型工具建立响应面近似模型，响应面模型阶数需要根据实际情况选择，若不清楚因变量和自变量之间关系为几阶则需要尝试探索，本研究采用二阶响应面模型，选择模型验证方法为交叉验证。近似模型建立完成之后对模型进行误差分析，机床的一阶固有频率、二阶固有频率和机床质量关于设计变量的近似模型各项误差如表4-1所示。

表 4-1 响应面近似模型误差值

Table 4-1 Response surface approximation model error values

	一阶固有频率	二阶固有频率	机床质量
R ²	0.811	0.892	0.971
平均绝对误差	0.15647	0.11362	0.06789
均方根误差	0.19886	0.15281	0.09208
最大绝对误差	0.21485	0.28493	0.27527

通过分析表 4-1 中的误差值，确定参数 R² 值接近 1，由于 R² 不总能完全描述模型的预测能力，因此还需要结合平均绝对误差、均方根误差、最大绝对误差来进行综合评估。通常平均绝对误差和均方根误差可接受最大值为 0.2，最大绝对误差允许最大值为 0.3。观察表 4-1 发现平均绝对误差、均方根误差、最大绝对误差都在可接受范围内，表明该模型精度较好。采用响应面法得到样本点的一阶固有频率、二阶固有频率和机床质量的实际值与近似模型的预测值如图 4-1、4-2、4-3 所示。图 4-1、4-2、4-3 表示试验设计数据集的实际值与近似模型预测值之间的关系，数据点越接近斜线就说明实际值与预测值之间的差异越小，表示近似模型有较高的精确度。

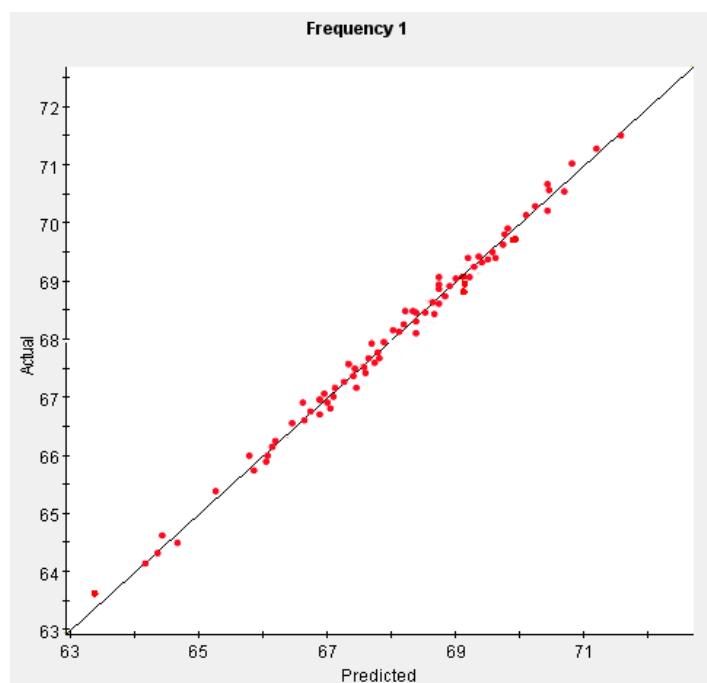


图 4-1 一阶固有频率预测值与实际值对比图

Fig 4-1 Plot of predicted vs. actual first-order natural frequencies

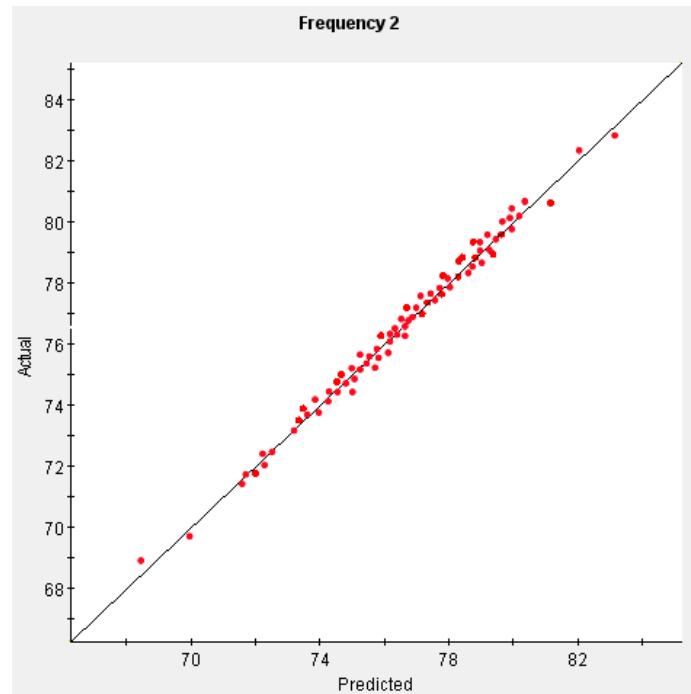


图 4-2 二阶固有频率预测值与实际值对比图

Fig 4-2 Plot of predicted vs. actual second-order natural frequencies

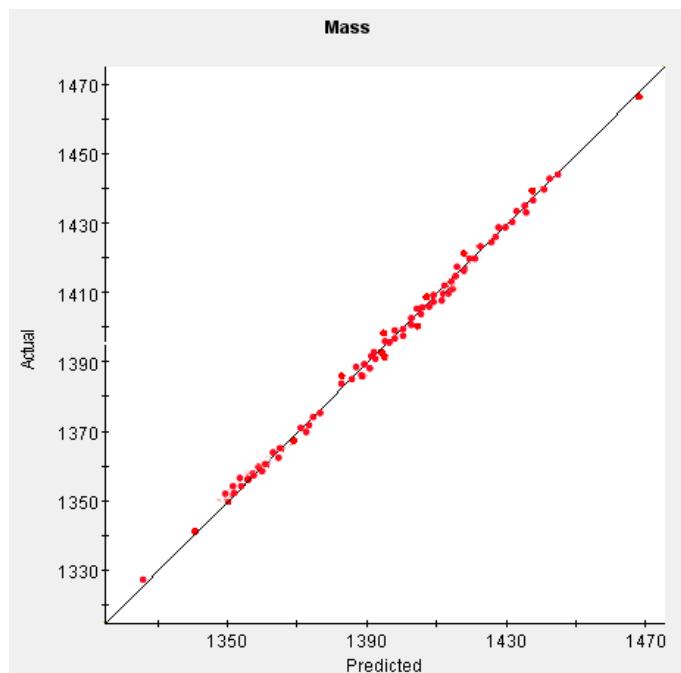
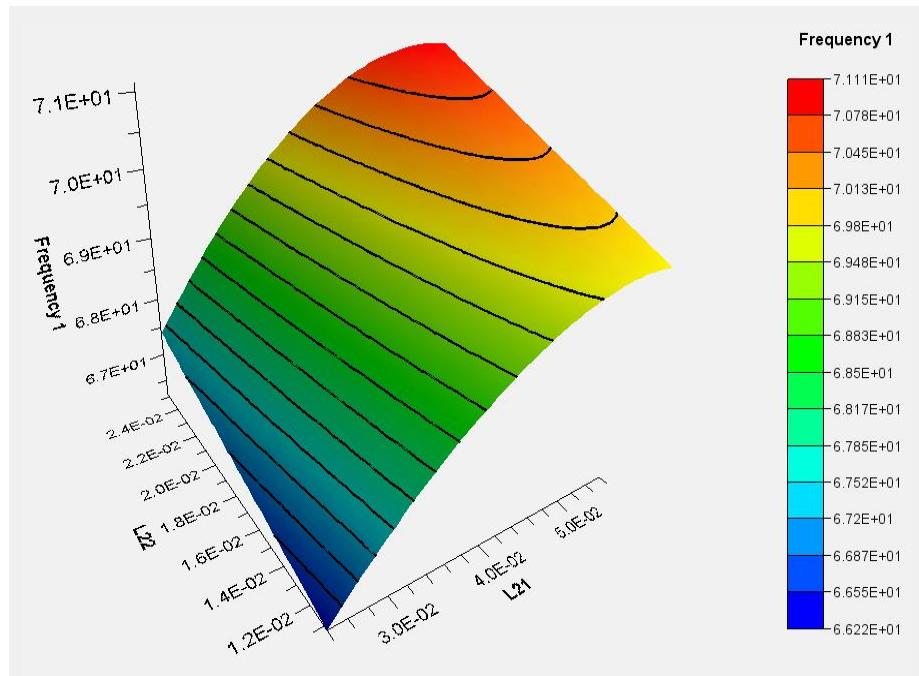
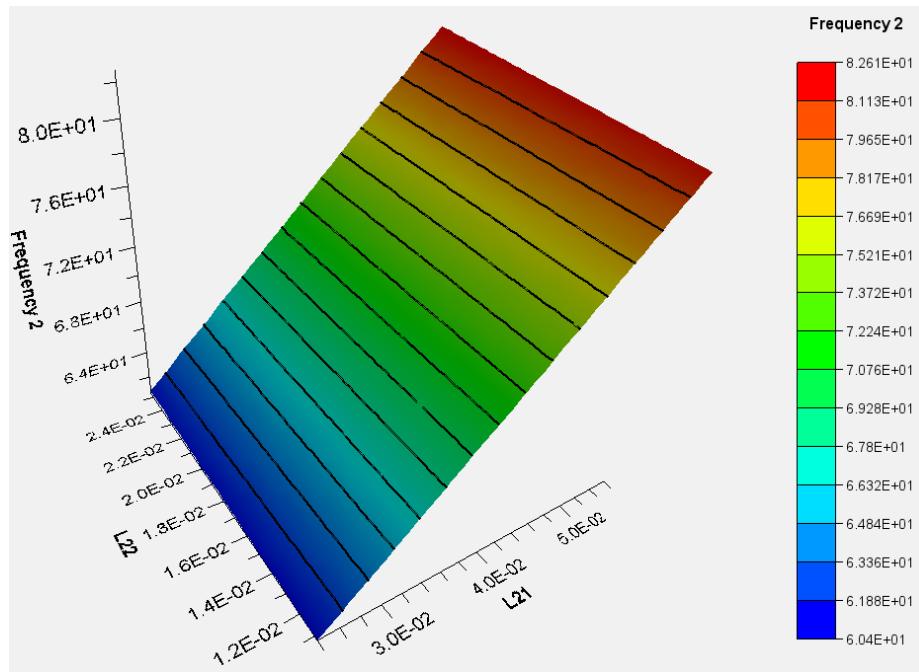
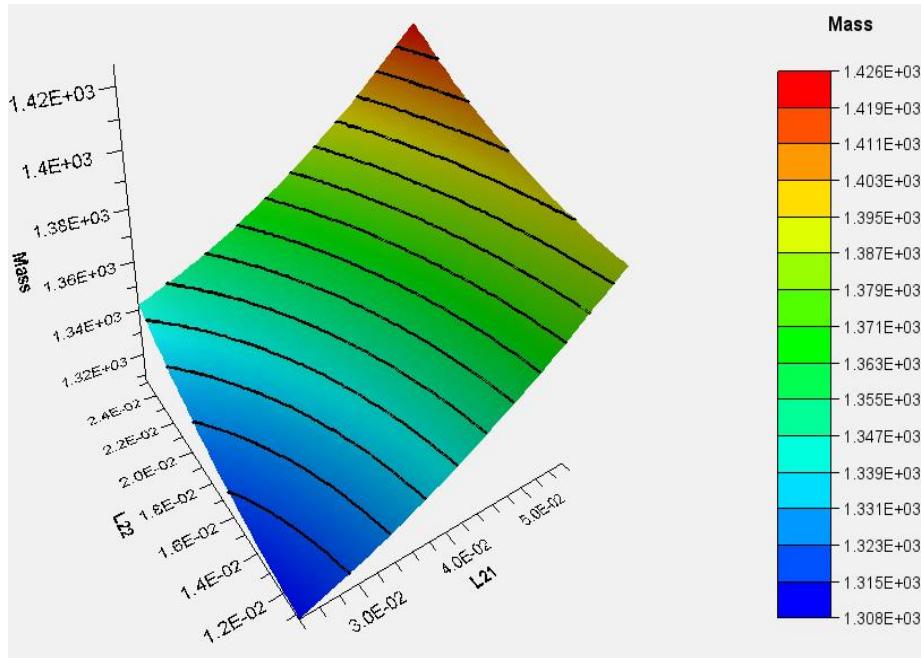


图 4-3 质量预测值与实际值对比图

Fig 4-3 Plot of predicted vs. actual quality

由于设计变量较多，响应曲面数量较大，仅展示 L21、L22 与一阶固有频率，
L21、L22 与二阶固有频率，L21、L22 与机床质量的响应面如图 4-4、4-5、4-6 所示。

图 4-4 L_{21} 、 L_{22} 与一阶固有频率的拟合曲面Fig 4-4 L_{21} 、 L_{22} and the first-order natural frequency of the fitted surface图 4-5 L_{21} 、 L_{22} 与二阶固有频率的拟合曲面Fig 4-5 L_{21} 、 L_{22} and the second-order natural frequency of the fitted surface

图 4-6 L_{21} 、 L_{22} 与质量的拟合曲面Fig 4-6 L_{21} 、 L_{22} and the mass of the fitted surface

将 11 个设计变量 L_{21} 、 L_{22} 、 L_{23} 、 L_{31} 、 L_{36} 、 L_{41} 、 L_{43} 、 L_{44} 、 L_{51} 、 L_{52} 、 L_{56} 表示为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_8 、 x_9 、 x_{10} 、 x_{11} ，一阶固有频率、二阶固有频率和机床质量分别表示为 y_1 、 y_2 、 y_3 ，三个优化目标函数表达式如下：

$$\begin{aligned} y_1 = & 58 + 607.2x_1 - 1441.9x_5 + 1310.5x_6 + 330.2x_8 - 1215.8x_{10} \\ & + 3241x_1x_4 + 4588x_1x_6 - 10644x_1x_8 - 14282.3x_1x_9 \\ & - 14651.5x_1x_{10} + 18827.7x_1x_{11} + 2744.5x_2x_7 + 5553.3x_3x_4 \\ & + 20189.1x_3x_6 + 6840.9x_3x_8 + 16769.1x_3x_9 - 14682.5x_3x_{11} \\ & - 4373.3x_1^2 - 15628.7x_3^2 - 5050.2x_4^2 + 51417.1x_5^2 \\ & - 39212.4x_6^2 + 42047.1x_{10}^2 - 13412.8x_{11}^2 \end{aligned} \quad (4-15)$$

$$\begin{aligned} y_2 = & -5.2 + 1517.9x_1 - 835.2x_4 + 2076.1x_6 + 760.4x_8 + 1046.3x_9 \\ & + 505.2x_{10} + 641.9x_{11} + 8403.7x_1x_4 - 18631.6x_1x_5 \\ & - 29136.4x_1x_8 - 39606x_1x_9 + 9656.1x_2x_3 + 16114.4x_2x_5 \\ & - 11309.1x_2x_7 + 60455.7x_2x_8 + 25543.9x_2x_9 - 36787.6x_2x_{10} \\ & - 45115.1x_2x_{11} + 24456.4x_3x_4 + 20840.1x_3x_5 - 9829.9x_3x_7 \\ & - 21904.9x_3x_8 - 38744.5x_6^2 + 5398.9x_7^2 \end{aligned} \quad (4-16)$$

$$\begin{aligned}
 y_3 = & 1283 - 930.4x_4 + 1726.3x_6 - 1331.1x_7 + 7943.3x_9 - 8334.6x_{11} \quad (4-17) \\
 & + 15294.8x_1x_4 - 70399.1x_1x_5 - 12897.3x_1x_6 + 43652x_1x_8 \\
 & - 18640.6x_1x_9 - 74976.7x_2x_3 - 143307.5x_2x_5 \\
 & + 186334.9x_2x_9 - 119686x_2x_{10} + 191164.8x_3x_5 \\
 & - 45419.4x_3x_6 + 36685.2x_1^2 + 117998.9x_2^2 + 49399x_6^2 \\
 & + 18800.5x_7^2 - 26628.8x_8^2 - 265975.2x_9^2 + 64527.2x_{10}^2 \\
 & + 250933.2x_{11}^2
 \end{aligned}$$

式 (4-15)、(4-16) (4-17) 为使用响应面法得到的近似模型, 下一节将用优化算法求解近似模型以寻得最优目标值。

4.3 多目标优化算法

在面对复杂机械结构时可能会出现许多复杂的组合优化问题, 这时传统的优化手段 (如牛顿法、单纯形法等) 不能在短期里实现寻优。多目标优化算法用于解决具有多个目标函数的复杂优化问题。在多目标优化问题中, 解空间中的解不再是一个点, 而是一个向量, 因为每个解都要同时优化多个冲突的目标函数, 这些目标函数难以在同一解中同时最小化或最大化, 因此存在帕累托前沿, 在这个前沿上没有其他解能够在所有目标上同时取得更好的结果。帕累托前沿代表了问题的非支配解集, 也就是在解空间中无法找到其他解能够在所有目标上都优于它们。多目标优化算法的任务是在这个前沿上搜索尽可能多的高质量解, 这些算法通过在解空间中进行搜索、演化或者优化, 逐步生成一系列近似帕累托前沿的解集。这类算法涵盖了多种启示法和元启示法, 例如遗传算法、粒子群优化、神经网络等, 通过模拟自然进化过程、模拟鸟群或鱼群中个体的协同行为, 通过选择、交叉和变异操作演化出一组个体代表问题解的候选解、通过更新粒子的位置和速度寻找全局最优或帕累托前沿。这些算法的共同目标是在考虑多个目标函数的情况下, 找到一组解决方案, 这组解决方案在帕累托前沿上均衡地分布, 能够为决策人提供多样化的选择。

4.3.1 基于 BP 神经网络改进粒子群算法的尺寸优化

1986 年, Rumelhart 和 McClelland 所在的团队提出了反向传播神经网络即 BP 神经网络这一概念^[62], 从 BP 神经网络这一名称可以知道, BP 神经网络可以分为两个部分: BP 和神经网络。BP 意思是“反向传播”, 也是 BP 算法的核心, 将实际输出值与模型预测值间的误差进行反向传播, 以此来校正网络中的权值 ω 和偏置 b , 通过最速下降法计算误差对每个权重的梯度, 然后按照负梯度的方向更新权重, 逐步减小误差并提高网络性能, 是一种多层前馈网络。由于不需要事先了解输入和输出之间的数学关系, 提高了结构优化工作的效率。该网络最显著的特点是信号传播为正向而误差传播为反向。BP 神经网络的流程图如下:

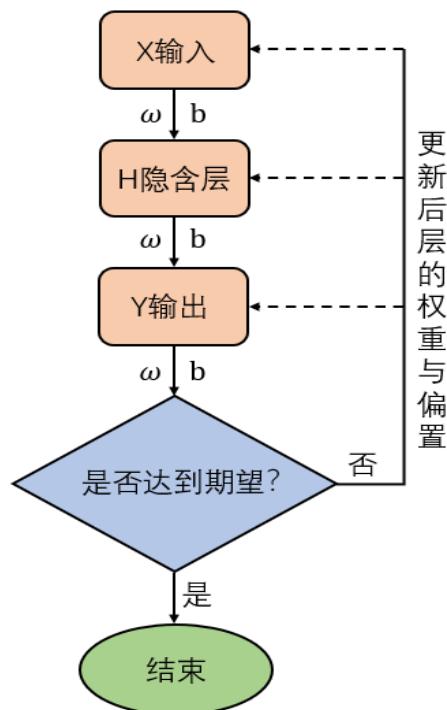


图 4-7 BP 神经网络流程图

Fig 4-7 BP Neural Network Flowchart

如图 4-7 所示，BP 神经网络包括三层，即输入层、输出层和隐藏层。输入层是网络的第一层，负责接收外部输入特征，每个输入节点代表输入数据的一个特征，输入层的节点数目由输入特征的维度所决定；隐藏层位于输入层和输出层之间，用于提取和学习输入数据中的特征，可以有一个或多个隐藏层，每个隐藏层包含多个节点，在隐藏层和输出层的每个节点之间都有权重连接，用于调整输入信号的强度；输出层负责生成网络的最终结果。BP 神经网络的操作流程被划分为两个核心环节。第一个环节实现信号的正向传递，在正向传递阶段，输入数据传递给输入层的节点，通过权重和偏差的线性组合计算每个隐藏层和输出层节点的输入，并对每个隐藏层和输出层节点的输入应用激活函数，目的是产生节点的输出，最后输出层的节点生成网络的最终输出。第二个环节实现误差的反向传播，在反向传播阶段，使用损失函数计算网络的预测与实际之间的误差，使用链式法则通过逐层反向传播误差来计算损失函数对网络参数（权重和偏置）的梯度，最终使用梯度下降法根据梯度的方向更新网络的权重和偏差以减小损失。重复进行正向传递和反向传播至满足预设终止条件，如达到最大迭代次数或误差收敛，从而实现 BP 神经网络的学习和训练。BP 神经网络作为一种预测算法，其通过模拟实际输入和输出之间的映射函数，能够学习复杂的非线性关系，使得模型更接近实际数据的特点，使其广泛应用于工程领域。这一特性对于解决粒子群算法中适应度函数要求高的问题非常有帮助。

在对 BP 神经网络相关内容进行设置时，输入层、输出层以及隐含层的节点数的选择很关键，其中隐含层的节点数并非固定不变的，而是需要仔细选择，因为隐含层的节点数直接影响着构建出的神经网络结构的性能。根据 BP 神经网络的相关理论基础，通常认为隐藏层神经元节点数应介于输入层与输出层节点数之间^[63]。在本次研究中，将隐含层的神经元节点数量设定为 50，为了避免由于增加隐含层数量引起的过拟合问题，不再增加额外的隐含层。本研究中 BP 神经网络模型图如图 4-8 所示。

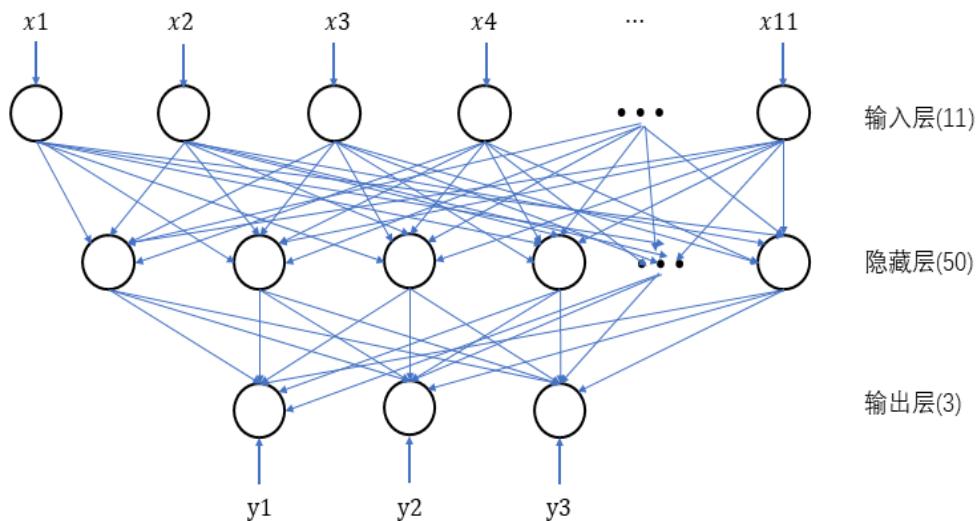


图 4-8 BP 神经网络模型图

Fig 4-8 BP neural network model

在开始构建 BP 神经网络之前，需要准备好用于训练和测试的数据。本次研究用于训练 BP 神经网络模型的数据集数量为 50，采用了随机划分的方式对数据集进行划分，每个单独的数据作为一个划分单位，具体划分数据的 80% 当训练集，10% 当测试集，另外 10% 当验证集。在神经网络的训练过程中，设置学习速率为 0.1，用以调控每次参数更新时的步伐大小；最大训练次数为 200000 次，即网络进行训练的最大迭代次数；训练的容许误差阈值为 0.0001，即网络在训练过程中所追求的损失函数的最小值为 0.0001。当训练循环达到预设的最大训练次数，或是当模型预测值与实际目标值的偏差低于预先设定的容许误差阈值时，网络训练进程终止。最终 BP 神经网络对 50 组数据进行训练得出的三个目标函数的预测值和实际值的对比以及误差如图 4-9、4-10、4-11 所示。从图 4-9~4-11 可以看出，BP 神经网络训练出的三个目标函数的预测值与实际值基本一致。

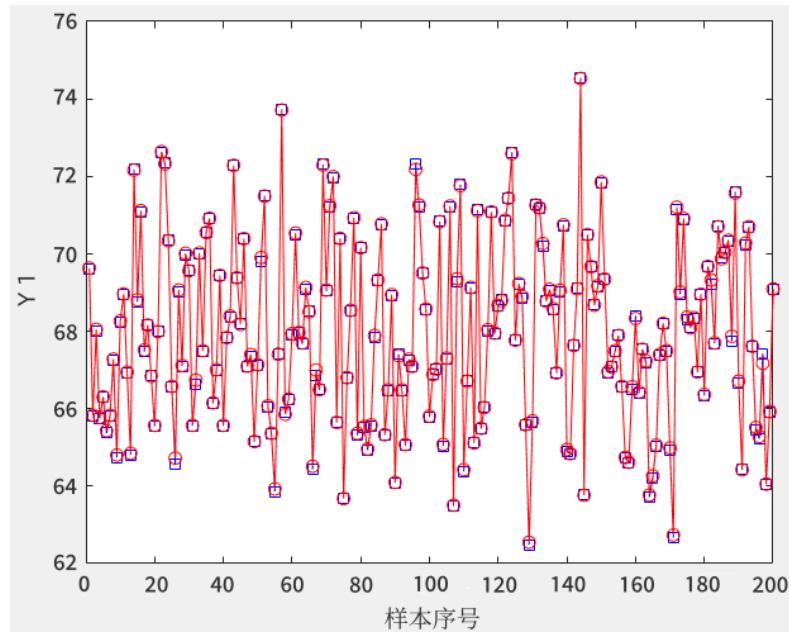


图 4-9 一阶固有频率预测与实际对比图

Fig 4-9 Plot of predicted vs. actual first-order natural frequencies

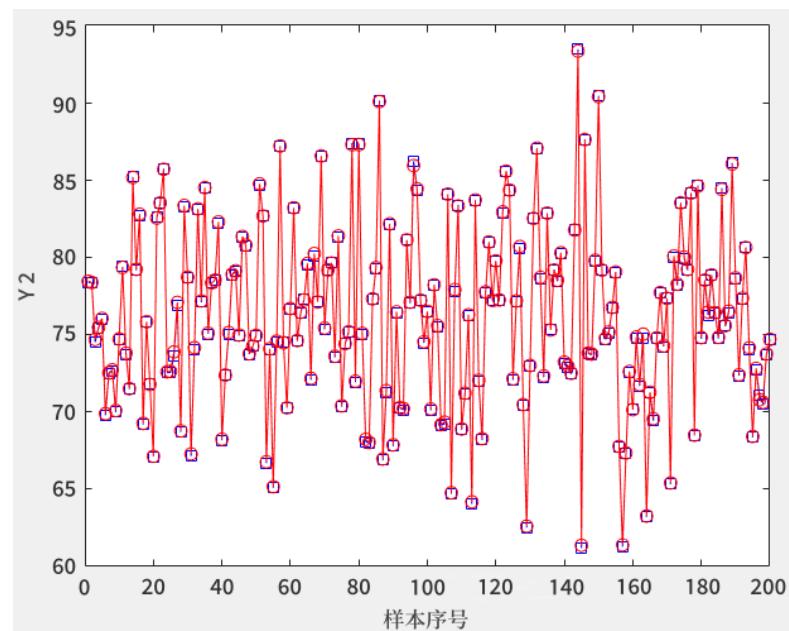


图 4-10 二阶固有频率预测与实际对比图

Fig 4-10 Plot of predicted vs. actual second-order natural frequencies

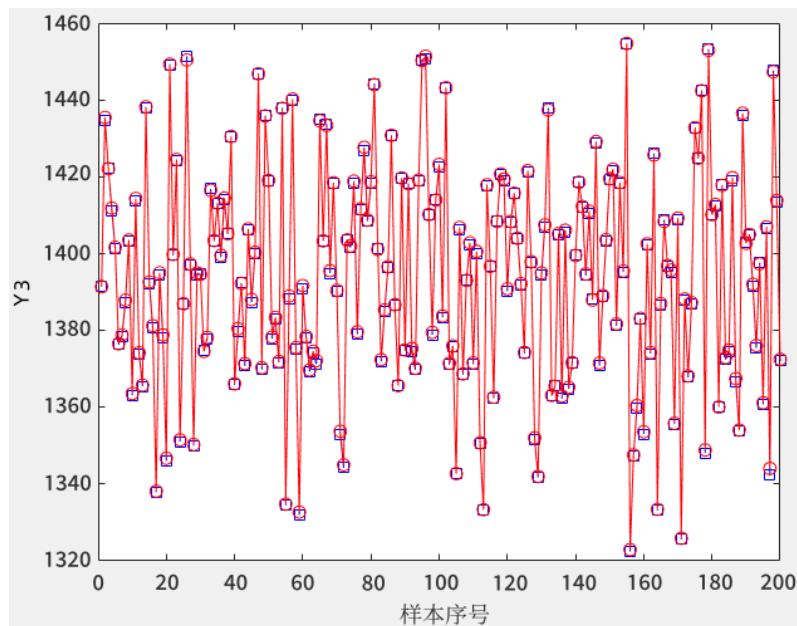


图 4-11 质量预测与实际对比图

Fig 4-11 Plot of predicted vs. actual mass

图 4-12~4-16 展示了训练集、验证集、测试集以及总体预测结果的精度情况。图 4-12~4-15 中的回归系数 R 值都接近 1；由误差直方图 4-16 可知，大部分误差值都在 0.02 左右。综合以上数据可知，本次研究中 BP 神经网络预测精度较高，该模型较好。

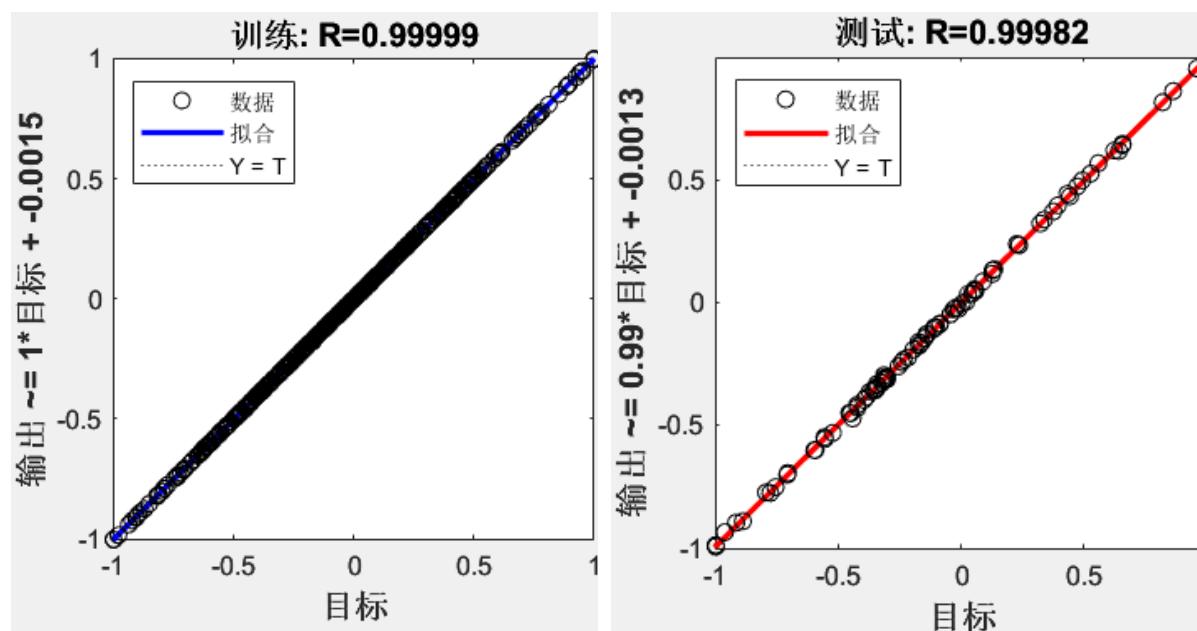


图 4-12 训练集回归图

Fig 4-12 Training set regression plot

图 4-13 测试集回归图

Fig 4-13 Test set regression plot

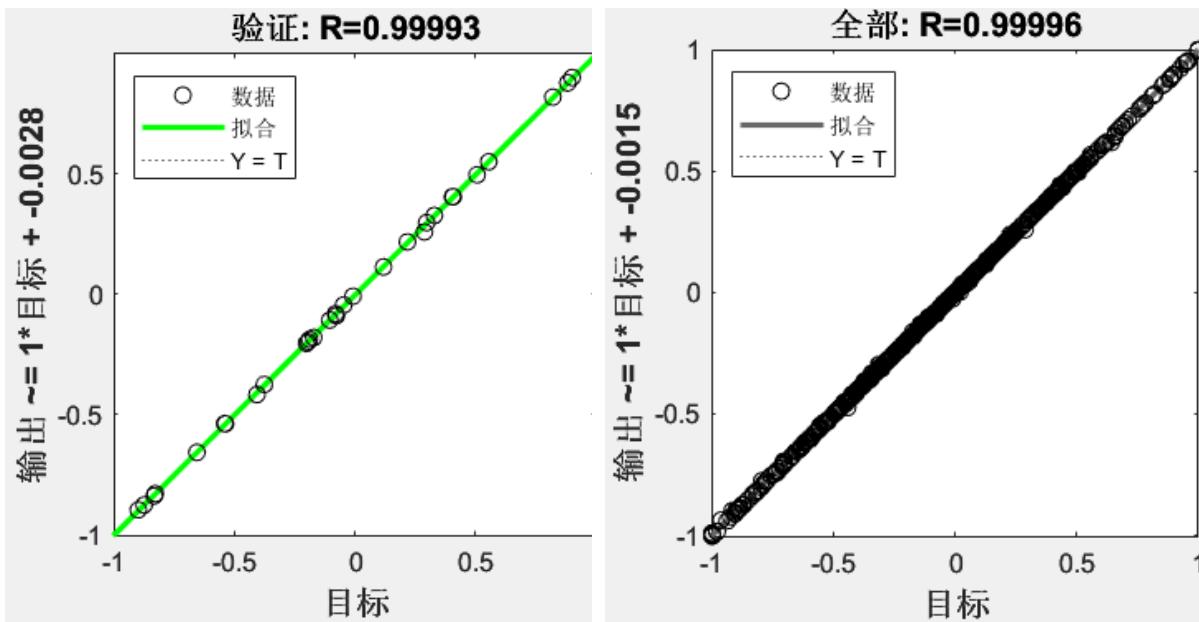


图 4-14 验证集回归图

Fig 4-14 Validation set regression plot

图 4-15 总体回归图

Fig 4-15 Overall regression plot

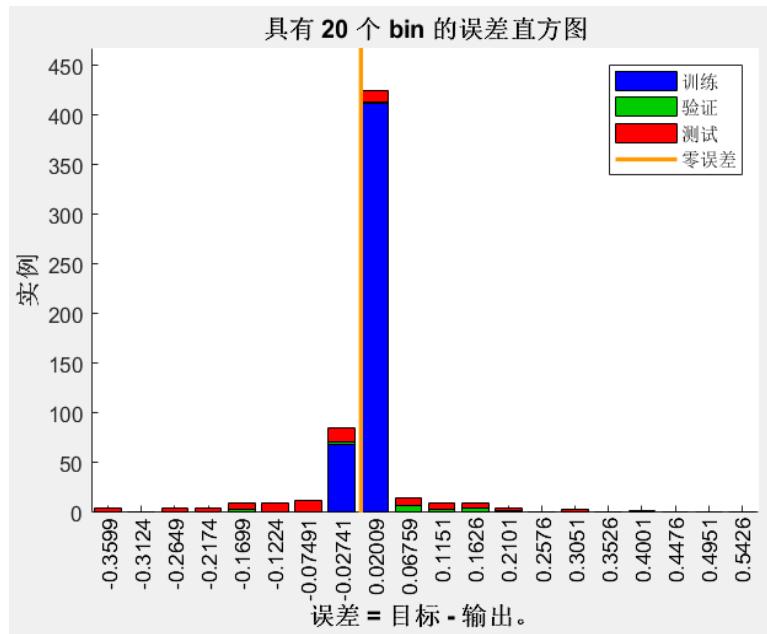


图 4-16 误差直方图

Fig 4-16 Histogram of error

本研究将通过 BP 神经网络训练出的三个目标函数作为将要解决的优化问题的数学模型，运用粒子群算法对该模型进行求解，即构成基于 BP 神经网络改进粒子群优化算法。该算法程序包含七个部分，BP 神经网络训练程序为第一个子程序，主程序为粒子群算法求解程序，其余的子程序包括初始化程序，粒子群位置边界检查程序，训练后归一化处理程序，最优模型调用程序。在主程序中，待优化参数为由灵敏度分析得来的 11 个关键尺寸参数，表示为 $x_1 - x_{11}$ ，三个优化目标分别为一阶固有频率、二阶固有

频率和机床质量，表示为 y_1, y_2, y_3 ，程序中 input 和 output 分别代表训练数据的输入样本和输出样本。BP 神经网络训练得到的目标函数经过归一化程序的处理，调用主程序的粒子群算法对其进行求解，设置主程序粒子群的初始种群大小是 40，进化次数是 1000。运行主程序得到 11 个参数和 3 个优化目标的迭代图如图 4-17~4-20 所示。各设计变量以及三个目标的优化结果如表 4-2 所示。

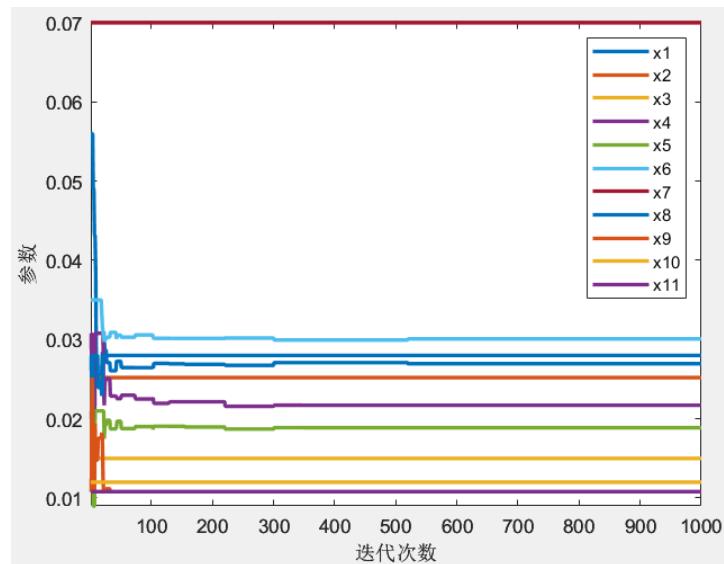


图 4-17 参数迭代图
Fig 4-17 Iterative graph of parameters

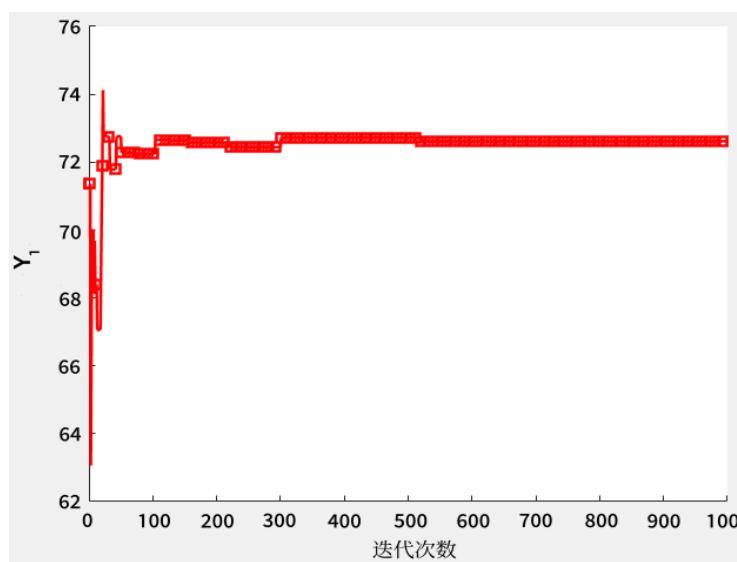


图 4-18 一阶固有频率迭代图
Fig 4-18 Iterative graph of the first order natural frequency

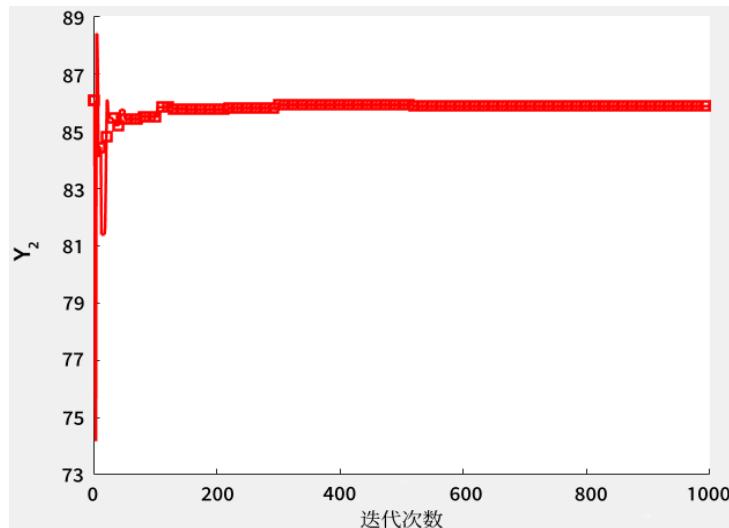


图 4-19 二阶固有频率迭代图

Fig 4-19 Iterative graph of the second order natural frequency

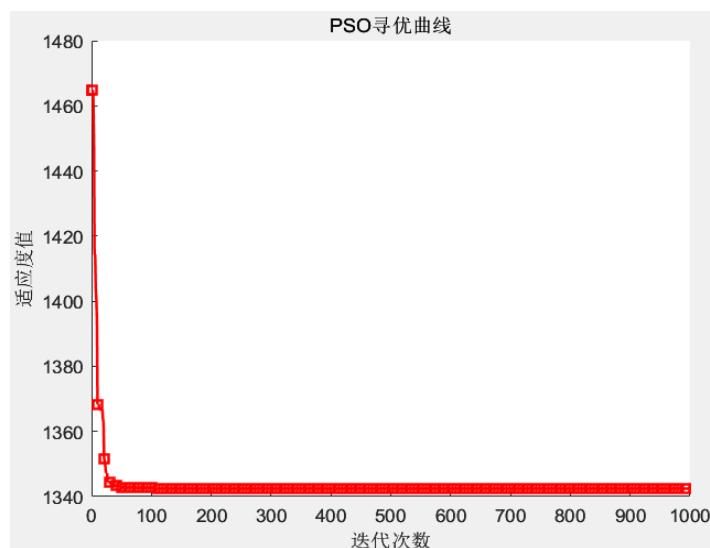


图 4-20 质量迭代图

Fig 4-20 Iterative graph of the mass

表 4-2 基于 BP 神经网络改进粒子群算法优化后的设计参数以及性能指标值表

Table 4-2 Optimized design parameters and performance index values based on improved particle swarm algorithm with BP neural network

尺寸参数和性能指标	优化前	优化后
L_{21} (m)	0.04	0.027
L_{22} (m)	0.018	0.025
L_{23} (m)	0.025	0.015
L_{31} (m)	0.022	0.022
L_{36} (m)	0.015	0.019
L_{41} (m)	0.025	0.03

表 4-2 (续)

尺寸参数和性能指标	优化前	优化后
L_{43} (m)	0.05	0.07
L_{44} (m)	0.02	0.028
L_{51} (m)	0.018	0.0108
L_{52} (m)	0.02	0.012
L_{56} (m)	0.018	0.0108
一阶固有频率(Hz)	65.5	72.8
二阶固有频率(Hz)	75.4	86
机床质量(kg)	1417.7	1342.4

分析表 4-2 可知，使用基于 BP 神经网络改进粒子群算法通过对机床尺寸参数进行优化来优化机床的性能指标，使得机床的一阶固有频率从原来的 65.5Hz 增加到现在的 72.8Hz，提高了 11.1%；使机床的二阶固有频率从 75.4Hz 增加到 86Hz，提高了 14.1%；机床的质量从原来的 1417.7kg 减少到 1342.4kg，减少了 5.3%。在整体质量减少的基础上，机床的前两阶固有频率有了显著增加，使机床较优化前不易受到激振频率的共振影响，在达到期望优化效果的同时也验证了这一优化算法在机床结构优化工作中的有效性。

4.3.2 基于多岛遗传算法的尺寸优化

传统的数值优化和直接搜索技术在寻找全局最优解时往往不会很顺利，原因是这些算法易陷入局部最优状态而无法精准寻得全局最优点。而全局探索优化法避免了这种局部最优的困扰，在整个设计空间中进行全面搜索，从而能够有效求解全局最优解。例如差分进化算法、模拟退火算法、遗传算法和多岛遗传算法，都属于全局探索优化法。

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是一种启发式搜索算法，受到达尔文的进化理论的启发发展而来。该算法借鉴生物界“自然选择”和“遗传法则”的运作机制，展开对最优解或其近似的系统性探寻，本质上属于随机性质的全局搜索优化方法。遗传算法的基本流程如下：

①开始时，随机生成一个初始种群，种群中的每个个体都是由一组基因（或称为参数）编码而成，都代表了问题的一个潜在解决方案；

②对种群中的每个个体，借助适应度函数对其在问题环境中的优劣加以评判，该函数通常用于评价个体所对应问题解决方案的优劣水平，是目标函数的一种映射；

③通过一定的选择策略（如轮盘赌选择、竞争性选择等），于现有种群中筛选出一

组个体，用于产生下一代种群；

- ④对选取的个体执行交叉和变异操作以产生新的个体；
- ⑤将新个体组合成下一代种群，作为下一次迭代的种群；
- ⑥循环步骤 2 至 5，直至满足终结标准，在达到终结标准后，对最终的种群实施译码，从而获取问题之最优解或其合理近似解。

虽然遗传算法具有广泛的应用领域和良好的鲁棒性，但是其探索整个设计空间的能力受限，容易陷入局部最优解并提前收敛。

多岛遗传算法（Multi-Island Genetic Algorithm, MIGA）是 Insight 软件内置的一种算法，由日本 Doshisha 大学知识工程学部的 M.Kaneko、M.Miki 及 T.Hiroyasu 等学者改良并进一步完善而成^[64]。多岛遗传算法常用于解决复杂的优化问题，特别是在大规模搜索空间和多模态优化问题中表现出色。

多岛遗传算法基于遗传算法进化而来。在多岛遗传算法体系内，同其他遗传算法相似，每个设计点均被视为独立个体^[65]，且具备根据目标函数值与约束惩罚所确定的特定适应度指标。目标函数值及惩罚分值愈高，相应个体之适应度值随之提升。各个个体皆由一个染色体表示，涉及的设计参数之值被转化成含“0”和“1”字符的二进制字符序列。这种转换被称为个体的“编码”。通过“选择”、“交叉”和“变异”等遗传操作，每个个体群体（一组设计点）都会发生改变^[66]。然后对群体中的每个设计进行评估，确定其适应度值。新的设计群从原始设计集中选出：这是一个基于适者生存方案的过程。新设计方案经由遗传交叉操作产生：选取两独立个体的染色体于两点处实施交叉，使得两点间基因在二者染色体间相互置换，从而衍生出一对全新个体。基因变异操作针对改变染色体中随机抽取的基因数值进行变更，从而进一步增加群体的变异性，以防止进化过程中出现停滞现象^[67]。在多岛遗传算法中，前代最优个体会被完整保留而不做任何调整，这种操作被称为“精英策略”。精英化保证了最好的遗传物质被带到子代。

相较于传统遗传算法，多岛遗传算法的核心特征在于：其将单一大规模个体群体细分为多个小型子群体，即所谓的“岛”，所有常规遗传操作均独立于各个子种群内部逐一实施^[68]。继而周期性地从各个岛中挑选若干个体，并将它们迁移到其他岛屿。迁移过程受控于两项参数：迁移间隔，即每次迁移之间相隔的世代数；迁移比率，即迁移时从每个岛屿移出个体所占总数量的百分比例。相较于传统的遗传算法，MIGA 在计算效率和全局优化能力方面都有显著提升，非常适合不连续设计空间的优化问题。将个体种群划分为多个子种群有助于避免算法陷入局部最优解，增强了对全局范围的搜索能力，从而加快了收敛进程，并提升了算法整体的稳健性。多岛遗传算法的原理图如图 4-21 所示。

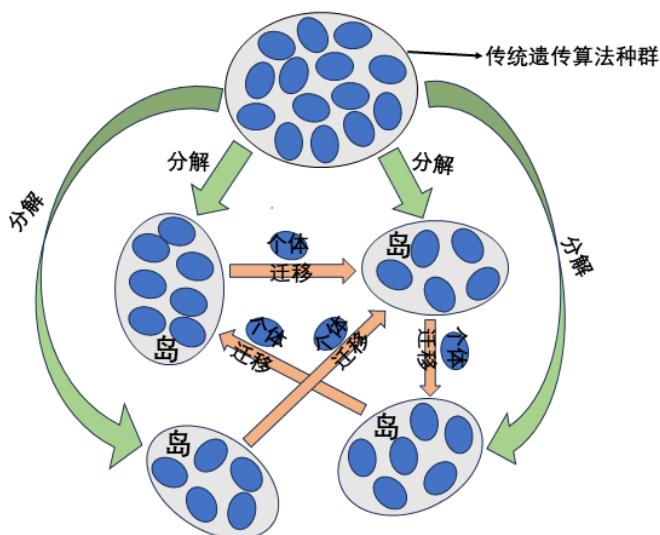


图 4-21 多岛遗传算法原理图

Fig 4-21 Schematic diagram of MIGA

4.3.2.1 确定优化数学模型

(1) 确定设计变量

本研究根据对机床有限元模型进行分析得出机床的薄弱环节，要对机床的尺寸进行调整来优化薄弱环节，通过对尺寸参数进行灵敏度分析得出的机床关键尺寸作为使用多岛遗传算法优化数学模型的设计变量，即设计变量为：

$$X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6 \ X_7 \ X_8 \ X_9 \ X_{10} \ X_{11}]$$

(2) 决定约束条件

实际问题中机床的尺寸不可能为无限值，因此用于优化的数学模型的约束条件其一是设计变量的取值范围；根据对机床模态进行分析得出前两阶固有频率较低，第二个约束条件是前两阶固有频率要高于最初的固有频率值。

(3) 目标函数

在优化薄弱环节的同时还要考虑机床的质量，本研究将优化数学模型的目标函数设定为追求机床质量的最小化。

因此，用于本次尺寸优化问题的数学模型如下：

$$\begin{aligned} X &= [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6 \ X_7 \ X_8 \ X_9 \ X_{10} \ X_{11}] \\ Y_1 &> 66\text{Hz}, Y_2 > 75\text{Hz}; \\ \text{Minimize } &Y_3 \end{aligned} \tag{4-1}$$

4.3.2.2 多岛遗传算法优化结果

优化数学模型建立之后，在 Insight 中集成 Optimization 和 Approximation 两个组件，将建立的二阶响应面近似模型导入优化组件使用多岛遗传算法对尺寸进行优化，设置

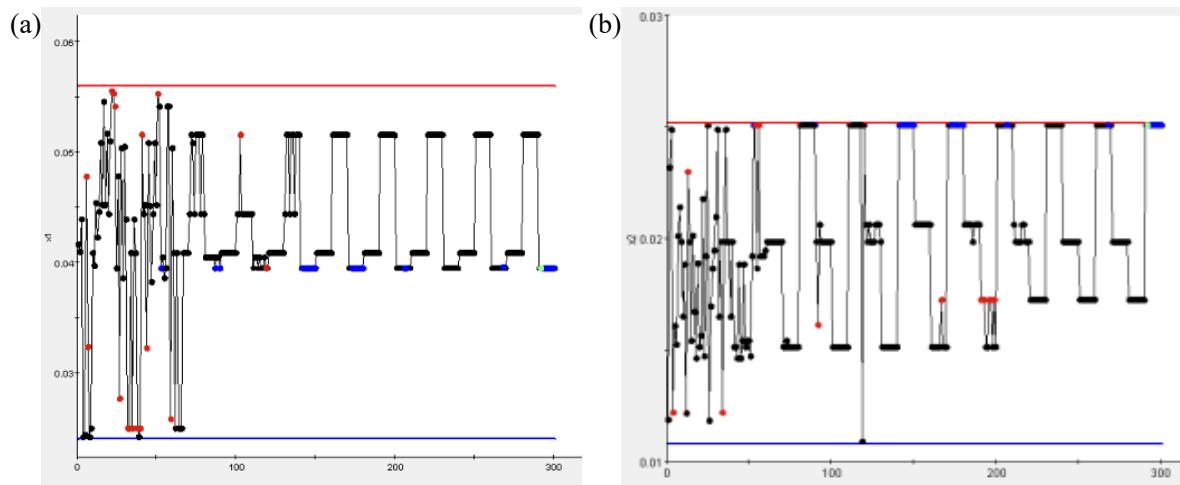
初始种群个数为 10，岛数为 3，进化代数为 10，交叉概率为 0.8，变异率为 0.001，岛之间迁移比率为 0.01。具体参数设置如表 4-3 所示。

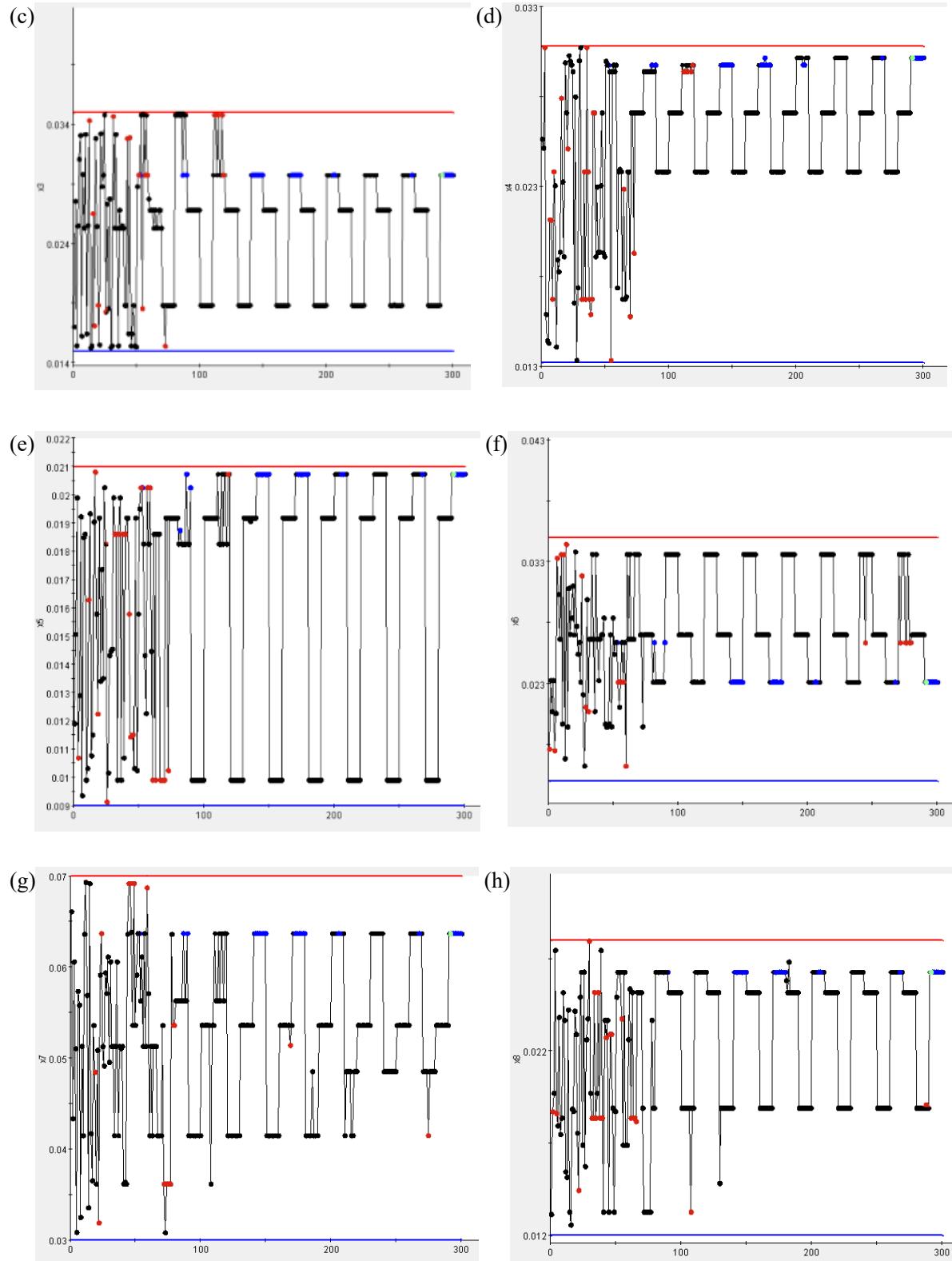
表 4-3 多岛遗传算法参数设置

Table 4-3 MIGA parameterization

设置	值	设置	值
Sub-Population Size	10	Number of Islands	3
Number of Generations	10	Rate of Crossover	0.8
Rate of Mutation	0.001	Rate of Migration	0.01
Interval of Migration	5	Elite Size	1
Rel Tournament Size	0.5	Penalty Multiplier	1000
Default Variable Bound	1000	Max Failed Runs	5

在前两阶固有频率最小值的约束下，寻找设计变量在取值范围之使得机床质量最小的最优值，得到各设计表变量和目标函数迭代曲线如图 4-22 所示。图中红线表示参数取值范围的上限，蓝色的线表示为取值范围的下限，黑色圆点、红色圆点和蓝色圆点分别表示可行设计方案、不可行设计方案和较好的设计方案，绿色圆点则表示最优方案。采用多岛遗传算法得到的最优尺寸和最优目标函数值如下表 4-4 所示。





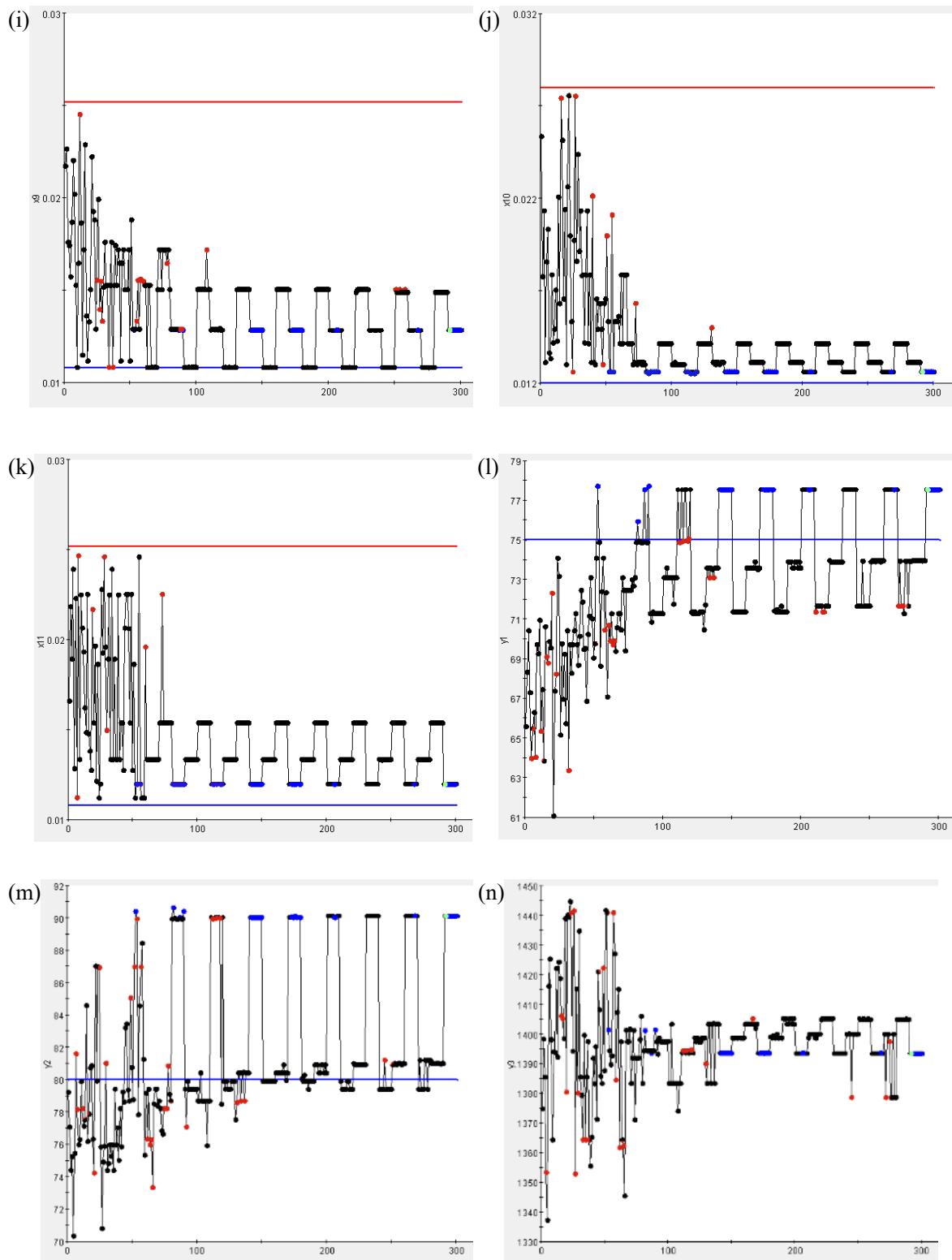


图 4-22 11 个尺寸参数 X_n 和 3 个响应 Y_n 的迭代图

(a)-(k): 尺寸参数 $X_n, n = 1, 2, \dots, 11$; (l) 一阶固有频率 Y_1 ; (m) 二阶固有频率 Y_2 ; (n) 质量 Y_3

Fig 4-22 Iterative plots for 11 parameters and three responses

(a)-(k): Size parameters $X_n, n = 1, 2, \dots, 11$; (l) First-order natural frequency Y_1 ; (m) Second-order natural frequency Y_2 ; (n) Mass Y_3

表 4-4 多岛遗传算法优化结果

Table 4-4 MIGA optimization results

名称	最优值
X_1 (m)	0.0395
X_2 (m)	0.0251
X_3 (m)	0.0298
X_4 (m)	0.0302
X_5 (m)	0.0207
X_6 (m)	0.0231
X_7 (m)	0.0636
X_8 (m)	0.0263
X_9 (m)	0.0128
X_{10} (m)	0.0126
X_{11} (m)	0.012
一阶固有频率 (Hz)	77.5
二阶固有频率 (Hz)	90.1
质量 (kg)	1393.4

4.3.2.3 多岛遗传算法优化前后对比

通过使用多岛遗传优化算法对机床尺寸进行优化，使得机床尺寸在允许范围内时的一阶固有频率从原来的 65.5Hz 增加到 77.5Hz，相比提高了 18.3%，二阶固有频率从原来的 75.4Hz 增加到 90.1Hz，比原来的提高了 19.5%，机床质量从 1417.7kg 降低到 1393.4kg，总体降低了 1.7%。而基于 BP 神经网络改进粒子群算法优化后机床的一阶固有频率从原来的 65.5Hz 增加到现在的 72.8Hz，提高了 11.1%；机床的二阶固有频率从 75.4Hz 增加到 86Hz，提高了 14.1%；机床的质量从原来的 1417.7kg 减少到 1342.4kg，减少了 5.3%。将两种方法优化得到的结果整理后如表 4-5 所示。对比两种优化方案得到的优化结果，发现多岛遗传算法优化后的机床质量减少量低于第一种方案，但是前两阶固有频率增加量要高于第一种，整体优化结果更好。充分证明了使用多岛遗传算法对机床进行优化的有效性和可行性。

表 4-5 两种优化方案优化结果对比表

Table 4-5 Comparison of optimization results of two optimization schemes

		一阶固有频率 (Hz)	二阶固有频率 (Hz)	质量 (Kg)
初始值		65.5	75.4	1417.7
基于 BP 神经网络	优化后	72.8	86	1342.4
改进粒子群算法	对比	+11.1%	+14.1%	-5.3%
多岛遗传算法	优化后	77.5	90.1	1393.4
多岛遗传算法	对比	+18.3%	+19.5%	-1.7%

使用通过多岛遗传算法优化得到的 11 个设计变量更新机床的三维模型，即优化后的模型，将其导入至 Ansys Workbench 软件平台，进行相应的模态分析，各项设置与优化前一致，得到机床有限元模型的前两阶固有频率以及振型如图 4-23 所示。初始机床的前两阶振型云图和固有频率如图 4-24 所示。通过分析图 4-23（a）可知，优化后机床的一阶固有频率为 82.40Hz，而使用多岛遗传算法得出的一阶固有频率为 77.5Hz，两者很接近。由图 4-23（b）可知，优化后二阶固有频率为 89.71Hz，与多岛遗传算法优化得到的二阶固有频率 90.1Hz 基本一致。优化后机床的质量是 1422.5Kg，与多岛遗传算法优化得到的质量相差不多。验证了多岛遗传算法优化结果的准确性。

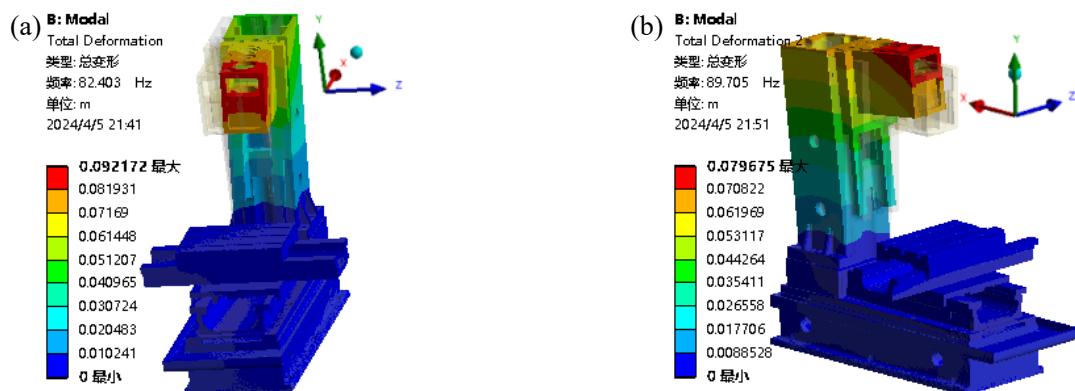


图 4-23 优化后机床前两阶振型云图 (a)优化后机床一阶振型云图; (b)优化后机床二阶振型云图

Fig 4-23 Clouds of the first two modes of vibration of the optimized machine

(a) Clouds of the first mode of vibration of the optimized machine; (b) Clouds of the second mode of vibration of the optimized machine

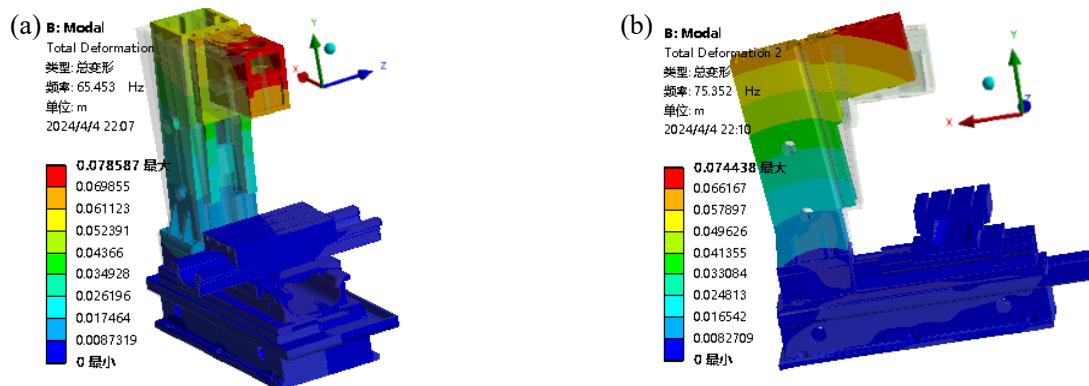


图 4-24 初始机床前两阶振型云图 (a)初始机床一阶振型云图; (b)初始机床二阶振型云图

Fig 4-24 Clouds of the first two modes of vibration of the initial machine

(a) Clouds of the first mode of vibration of the initial machine; (b) Clouds of the second mode of vibration of the initial machine

4.4 本章小结

本章研究了智能优化算法在结构多目标优化中的应用。上一章确定了 11 个设计变量、3 个优化目标。基于 11 个设计变量和 3 个优化目标，运用二阶响应面技术构建了以设计变量为自变量、优化目标为因变量的近似模型，并通过详尽的误差分析确认了该响应面近似模型的精确度，结果显示该响应面近似模型的精度较高，可以应用于智能优化算法中。本研究将两种智能算法应用在了机床的优化问题中。第一种是基于 BP 神经网络改进粒子群算法，BP 神经网络对设计参数和优化目标的数据集进行训练，得出 3 个新的目标函数表达式代替响应面近似模型表达式，粒子群算法对 3 个新的目标函数表达式进行求解，得出一组最优解，一阶固有频率对比优化前提高了 11.1%，二阶固有频率提高了 14.1%，质量减轻了 5.3%。第二种方法是使用基于 Isight 的多岛遗传算法对响应面近似模型进行求解，优化后的一阶固有频率提高了 18.3%，二阶固有频率提高了 19.5%，整体质量减少了 1.7%。对比两种优化方案的结果，基于多岛遗传算法的尺寸优化效果要更好，随后，将优化后的最优尺寸作为新尺寸重新建立机床的三维模型和有限元模型，并采用与初始模态分析同样的设置对优化后的机床再次进行模态分析来验证其结果，最终表明多岛遗传算法得到的结果是可信的，在机床尺寸优化工作中具有可行性。本研究选择多岛遗传算法优化的结果作为本次研究的最终结果。

5 总结与展望

5.1 全文总结

本文结合数控铣床发展现状以及结构优化研究现状，考虑到机床作为推动自动化制造进程的关键驱动力，对 XK7130 型立式数控铣床进行静力分析和模态分析确定了结构的薄弱环节，接着对结构进行尺寸优化来达到优化结构性能指标的目的，其中结合了两种智能优化算法并对比两组优化结果选出更优的一种算法。提出了一种适用于所有机床的结构优化方法，旨在为结构优化专家提供一种优化方案。总结全部工作，得到的结论如下：

(1) 对铣床零部件和整机有限元模型进行静力分析，分析结果中应力和变形表明铣床的强度和刚度都符合设计要求；分析铣床零部件的模态可知低阶固有频率较高，不易落在结构的共振频率内，对铣床整机进行模态分析发现前两阶固有频率较低，有产生共振的可能，因此确定铣床的前两阶固有频率为薄弱环节，选取前两阶固有频率及机床质量作为优化目标。

(2) 确定了优化目标之后，将铣床筋板厚度和壁厚等尺寸作为设计变量，对铣床结构进行尺寸优化来优化其薄弱环节。先用最优拉丁超立方试验设计方法对尺寸参数和响应值等数据进行处理，之后使用 Isight 提供的灵敏度分析工具对尺寸参数进行分析，得出对优化目标灵敏度贡献最高的 11 个关键尺寸作为最终的设计变量。

(3) 根据已知 11 个设计变量和 3 个优化目标，运用响应面法构建了一个包含 11 个设计变量与 3 个优化目标的数学近似模型，并对模型的准确性进行了验证，其精度符合要求。采用基于 BP 神经网络改进粒子群算法求解近似模型，得出一组最优解，其中一阶固有频率对比优化前提高了 11.1%，二阶固有频率提高了 14.1%，质量减轻了 5.3%；随后采用 Isight 多岛遗传算法对近似模型进行求解，优化后的前两阶固有频率分别提高了 18.3% 和 19.5%，整体质量减少了 1.7%。虽然多岛遗传算法优化后的机床质量减少量低于第一种方法，但前两阶固有频率提高量要高于第一种方案，随后，用优化后的最佳尺寸重新构建了机床的三维模型和有限元模型，并使用与初始模态分析相同的设置对优化后的机床再次进行了模态分析以验证其结果，结果表明，通过多岛遗传算法得到的优化结果是可靠的，证明了其在机床尺寸优化工作中的可行性，最终选择多岛遗传算法优化的结果作为本次研究的最终结果。

5.2 研究展望

根据掌握的理论知识和较好的软件使用能力对 XK7130 立式数控铣床进行了有限元

分析以及尺寸的灵敏度分析，并对薄弱环节进行优化，得到了一定的成果。但是由于时间限制和掌握的知识面较窄等原因，对铣床的研究还需继续进行：

(1) 本研究对结构进行了尺寸优化，另外还需研究铣床的拓扑结构对铣床性能的影响以及尺寸优化和拓扑优化结合的优化手段在铣床优化中的适用性。

(2) 本研究使用了两种智能算法对结构进行优化，可以接着研究更多智能优化算法在铣床优化中的应用。

参考文献

- [1] 滕小磊, 吴志学. 机械结构分析与优化设计[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(10): 113-117.
- [2] 裴煜, 万新峰, 程辉, 等. 基于机械结构优化设计应用与趋势研究[J]. 中国设备工程, 2022(5): 126-127.
- [3] 吴金灯. 探析机械结构优化设计的应用及趋势[J]. 机械管理开发, 2021, 36(12): 308-309+312.
- [4] 孙丰科, 高顺德, 徐金帅, 等. 汽车起重机车架多目标尺寸优化设计[J]. 机械, 2022, 49(10): 67-73.
- [5] 于志新, 曹全德, 杨士通. 某载货汽车车架有限元分析及尺寸优化[J]. 机械工程师, 2018(1): 18-20.
- [6] 吕明青, 邵珠峰, 徐道春, 等. 基于遗传算法的六连杆机构尺寸优化设计[J]. 锻压技术, 2022, 47(7): 184-193.
- [7] 王哲, 王宏伟, 周俊, 等. 基于正交试验的盾构机吊耳结构尺寸优化设计[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(4): 66-70.
- [8] 方朝, 赵尚义, 严格, 等. 电动汽车车架的多目标拓扑优化-尺寸优化-精细化设计[J]. 机械设计与制造, 2023(8): 16-22.
- [9] 赵洁. 基于力的算法生形在建筑设计中的应用[D]. 石家庄铁道大学, 2021.
- [10] 谭铭, 杨宇轩, 岑雨昊, 等. 基于遗传算法的多自由度波浪能装置浮体形状优化[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(3): 228-236.
- [11] 晋刚, 何志豪, 王英俊. 基于遗传算法的 5G 频率选择表面形状优化方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 95-105.
- [12] 邵佳丰, 罗晨, 周怡君, 等. 基于自由变形技术的分流叶片形状优化设计[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1315-1323.
- [13] 翟江波. 基于目标应变分布的 TC17 合金双性能盘预成形形状优化设计[J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 118-124.
- [14] 何力, 张延辉, 杨俊. 海上风电平台大尺寸肘板结构形状优化方法[J]. 船海工程, 2022, 51(4): 116-119.
- [15] Høghøj L C, Conlan-Smith C, Sigmund O, et al. Simultaneous shape and topology optimization of wings[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2023, 66(5): 116.
- [16] 赵伟, 郭岗, 贺利乐, 等. HG35A-4Z 型布料机臂架拓扑优化设计研究[J]. 机械设计与制造, 2023(7): 173-176.
- [17] 傅扬威. ADI 数控车床动态特性技术研究[D]. 河南科技大学, 2019.

- [18] 刘虎, 朱镭, 吴妍, 等. 巡飞弹载光电关键结构拓扑优化设计方法[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(5): 296-303.
- [19] 武星, 封硕, 齐峻, 等. 考虑质量约束的多相材料结构拓扑优化新方法[J]. 计算力学学报, 2023, 40(3): 484-490.
- [20] 胡彪彪, 李家春, 罗珊, 等. 微压休闲舱加强筋布局优化及轻量化研究[J]. 机械设计与制造, 2023(8): 208-213.
- [21] Zhong W, Su R, Gui L, et al. Multi-objective topology and sizing optimization of bus body frame[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(3): 701-714.
- [22] Chen J, Kwak Y, Xu M, et al. Topology and modular size optimization of small electric vehicle frame based on cross-section contribution analysis[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64(6): 4287-4304.
- [23] 薛华, 原思聪, 安峰, 等. 基于有限元的异形高耸塔机平桥动态性能优化设计[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(6): 138-142.
- [24] 张铈岱, 刘晓栋, 高锦辉, 等. 激光扫描仪支架动态性能优化设计[J]. 起重运输机械, 2022(23): 37-42.
- [25] 高珊, 郭勇, 程敬敬, 等. 恒功率轴向柱塞泵建模及动态性能优化[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(1): 83-86+90.
- [26] 口启慧, 王海峰, 江泓鑫, 等. 考虑气动-结构的高空螺旋桨多学科优化方法[J]. 航空动力学报: 1-8.
- [27] 曹付义, 李金龙, 崔梦凯, 等. 中小型汽车起重机车架结构多学科优化[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 39-42.
- [28] 徐兆可, 夏健, 高宜胜. 三维机翼气动结构多学科优化方法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(5): 1065-1075.
- [29] Ta T N, Hwang Y L, Horng J H. A Multidisciplinary Approach for Optimization Design of CNC Machine Tools[J]. International Journal of Computational Methods, 2021, 18(08): 2150028.
- [30] Wang S, Yang M, Niu W, et al. Multidisciplinary design optimization of underwater glider for improving endurance[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63(6): 2835-2851.
- [31] 赵海鸣, 蒋彬彬, 李密. 基于拓扑优化与多目标优化的机床底座结构设计[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 100-105.
- [32] 宋增誉, 彭晋民, 胡高尚, 等. 直驱机床矿物质材料龙门框架优化设计及分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(24): 87-93.
- [33] 王松明, 廖映华, 李磊, 等. 基于 CCD 的立式五轴机床滑枕多目标优化[J]. 制造技术与

- 机床, 2023(11): 154-160.
- [34] 刘成颖, 谭锋, 王立平, 等. 面向机床整机动态性能的立柱结构优化设计研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 161-168.
- [35] 胡世军, 李治翔. 基于惯性能量分布的机床动态特性分析及优化[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(2): 65-69.
- [36] Liu S. Multi-objective optimization design method for the machine tool's structural parts based on computer-aided engineering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5): 1053-1065.
- [37] Ji Q, Li C, Zhu D, et al. Structural design optimization of moving component in CNC machine tool for energy saving[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 118976.
- [38] Li B, Hong J, Liu Z. Stiffness design of machine tool structures by a biologically inspired topology optimization method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 84: 33-44.
- [39] Zhao L, Chen W, Ma J. Structural bionic optimization of stiffening ribs of a machine tool crossbeam based on giant waterlily vein distribution[J]. Gaojishu Tongxin/Chinese High Technology Letters, 2008, 18: 806-810.
- [40] Shen L, Ding X, Li T, et al. Structural dynamic design optimization and experimental verification of a machine tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(9): 3773-3786.
- [41] Wang J, Zeng L, Yang K. Multi-objective optimization of printed circuit heat exchanger with airfoil fins based on the improved PSO-BP neural network and the NSGA-II algorithm[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(6): 2125-2138.
- [42] Sun B, Liu H, Tang J, et al. Optimization of heat treatment deformation control process parameters for face-hobbed hypoid gear using FEA-PSO-BP method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 117: 40-58.
- [43] 王剑, 聂宜云. 基于 PSO-BP 算法优化的转台 PID 控制系统仿真研究[J]. 航空精密制造技术, 2023, 59(6): 5-8.
- [44] 史培龙, 常宏, 王彩瑞, 等. 基于 PSO-BP 优化 MPC 的无人驾驶汽车路径跟踪控制研究[J]. 汽车技术, 2023(7): 38-46.
- [45] Sai J P, Rao B N. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II and Particle Swarm Optimization for design optimization of Shell and Tube Heat Exchanger[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 132: 105896.
- [46] Jafari M, Salajegheh E, Salajegheh J. Optimal design of truss structures using a hybrid method based on particle swarm optimizer and cultural algorithm[J]. Structures, 2021, 32:

391-405.

- [47] Zhao D J, Wang Y K, Cao W W, et al. Optimization of Suction Control on an Airfoil Using Multi-island Genetic Algorithm[J]. Procedia Engineering, 2015, 99: 696-702.
- [48] Liu M, Gao R, Jing R, et al. A high-efficiency circle diffuser with low resistance and high jet length[J]. Energy and Buildings, 2023, 296: 113399.
- [49] Mi C, Xiao Y, Yuan S, et al. Optimization design on cooling structure of High-Temperature magnetic fluid dynamic seal device[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 593: 171875.
- [50] Guan Y, Wang X, Zhu Y, et al. Optimal design and research for nozzle governing turbine of compressed air energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 77: 109683.
- [51] Li H, Lang L, Zhang J, et al. Cost Optimization Method of Large-scale Prestressed Wire Winded Framework on Multiple-island Genetic Algorithm[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 673-680.
- [52] Combinatorial Optimization Algorithm of MIGA and NLPQL for a Plug-in Hybrid Electric Bus Parameters Optimization[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2460-2465.
- [53] Yan C, Zhu J, Shen X, et al. Structural design and optimization for vent holes of an industrial turbine sealing disk[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(5): 265-277.
- [54] 张之阳, 刘旭, 吴林艳, 等. 基于多岛遗传算法的翼型多目标优化设计[J]. 中国舰船研究: 1-10.
- [55] 高涛. CAD/CAE/CAM 实例教程[M]. 清华大学出版社, 2014: 13-14.
- [56] 董艳霞. SolidWorks 2012 中文版基础入门与范例精通[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 21-22.
- [57] 庞伟. 中大型圆柱电机轴承减振降噪结构优化及加工控制技术研究[D]. 大连交通大学, 2021.
- [58] 任建新. 臂架式桥梁检测车的实时监控系统设计[D]. 中国计量学院, 2014.
- [59] 杨岩庆. 基于灵敏度分析的液压静力压桩机大身结构优化[D]. 华北水利水电大学, 2023.
- [60] 孟凡龙. 轻卡变速箱壳体静动态特性分析及多目标拓扑优化[D]. 中北大学, 2017.
- [61] 李志刚, 胡国良, 贾慧芳, 等. 基于有限元分析的大型回转窑等载同轴优化[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(8): 1197-1202.
- [62] 李万鹏. 一种基于深度学习和概率图模型的本征分解方法的研究[D]. 浙江大学, 2019.
- [63] 陈刚. 伞杆加工过程中的机器视觉检测系统研究[D]. 浙江工业大学, 2020.
- [64] 李垚. 并联混合动力客车动力源参数匹配和优化[D]. 北京理工大学, 2016.
- [65] 王晓燕. 某大口径火炮高平机的参数化设计与优化[D]. 南京理工大学, 2016.

- [66] 白旭. 基于风险的球柱组合壳结构性能分析[D]. 哈尔滨工程大学, 2014.
- [67] 韩馥骏. 面向数控车间的节能优化与能源管理系统研究[D]. 西南大学, 2022.
- [68] 周玉松, 姜春光, 齐克学, 等. 基于多岛遗传算法的舱口盖结构优化设计[J]. 造船技术, 2022, 50(5): 25-29.