

基于 Matlab 的固钉器传动结构软件设计及应用策略

孟子博 孟令威^{*}(通讯作者) 吴齐睿 白金石

长春工业大学人文信息学院, 吉林长春, 130122;

摘要: 本文设计一款基于 Matlab 的固钉器传动结构软件, 旨在让用户输入数据库后快速给出技术方案, 并让用户了解技术方案的可行性, 提升设计效率。研究阶段, 在分析固钉器结构基础上, 针对固钉器结构软件从气缸程序模块、传动杆系统程序模块、数据输入程序模块入手设计, 并在对应用方法进行分析后, 通过与实体平台验证的对比论证软件的精度与可行性。

关键词: Matlab; 固钉器传动结构; 气缸程序模块; 数据输入程序模块

DOI: 10.69979/3041-0673.25.07.015

固钉器隶属现代工业领域的精密装配核心设备, 其工作原理是通过机电液一体化系统或是启动系统, 将电能转化为可控的机械力, 继而帮助施工人员实现微米级精度的紧固作业。为实现固钉器传动结构的配置研发效率提升, 保障设计背景下固钉器的性能水平, 有必要设计预计模型仿真的设计软件, 让用户通过输入技术参数便可获取最佳的设计方案, 从而提升设计的效率以及精准度。

1 固钉器概述

不同于传统气动锤、粗放式敲击作业形式, 固钉器能够在有限空间内构建一个“动力输入→传动调控→执行输出”的闭环控制链, 通过行星齿轮组、锥齿轮系的啮合参数非对称设计, 可让设备的扭矩传递效率提升至 90%以上, 并有效将振动幅度控制在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 范围以内。图 1 为固钉器结构示意图:

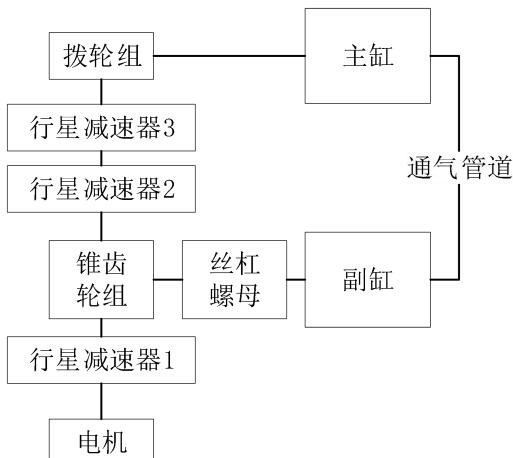


图 1 固钉器结构示意图

如图 1 所示, 固钉器由电机、3 个行星减速器、锥齿轮组、拨轮组、主缸与副缸、丝杠螺母、通气管线联

合组成。

其中, 电机作为系统的心脏部分, 负责在固钉器使用期间实现扭矩的线性输出。具体可采用永磁同步电机, 该型式电机可以突破传统异步电机对恒转矩的限制, 确保施工阶段在遇到钛合金等高硬度材料时, 系统可通过频率的自动补偿机制来维持满足施工要求的恒定扭矩输出。行星减速器可通过与锥齿轮组的啮合, 确保动力单元惯性矩得到有效控制, 同时降低高频往复运动中的响应延迟问题。锥齿轮组方面, 主锥齿轮的螺旋角、从动锥齿轮的齿顶圆螺旋角所形成的位差, 可基于非对称设计在有效抑制轴向窜动, 确保齿轮啮合力分布均匀度有效提升, 同时配合自润滑涂层, 可有效降低摩擦系数, 降低固钉器的能耗。拨轮组负责在作业期间的路径选择, 同时负责让螺钉的预紧力分布均匀度有效提升。主缸与副缸联合构成液压回路系统, 二者基于交叉耦合算法所形成的动态平衡, 在螺钉紧固期间可有效施加轴向力, 并基于侧向补偿运动降低工件的装夹误差。丝杠螺母作为精密传动组件, 可有效地缓解固钉器作业期间的瞬间冲击加速度, 避免对工件造成损坏。

2 钉器传动结构软件设计

2.1 气缸程序模块

气缸程序模块功能定位在于负责将压缩空气的压力能转化为活塞杆的直线运动动能, 通过建立包含摩擦系数、密封泄漏率、温度膨胀系数的多状态方程来对气缸的输出力进行精准控制。该模块分为 3 层, 即信号预处理层、能量转换层、诊断层。

2.1.1 信号预处理层

信号处理层, 用小波降噪算法来将气压传感器采集

到的高频噪声滤除，频段控制在 0.1~1KHz 频段。同时，建立 ARIMA(2, 1, 2) 实现序列模型进行气压波动的预测，引入动态补偿机制对环境温度进行修复 (-20°C~80°C)，消除其对气体体积的影响。

2.1.2 能量转换层

能量转换层设计阶段，使用伯努利方程建立气压→速度→位移关系式，如式 1：

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v^2 + P_{atm} + \frac{F_{frict}}{A_p} \quad (1)$$

式 1 中， P_0 表示气缸入口总压力，单位 Pa， ρ 表示设计空气密度（设 1.225kg/m^3 ）， v 代表活塞流速，单位 m/s ， P_{atm} 表示气压，常规值为 101325pa ， F_{frict} 代表摩擦力、单位 N， A_p 为活塞有效面积，单位 m^2 。随后，开发非线性摩擦补偿模型，获取静摩擦系数、动摩擦系数以及法向力。其中，静摩擦系数，用于描述物体在静止状态下开始滑动所需要的最小力、法向力二者的比值。动摩擦系数，表示物体运动过程中，滑动摩擦力、法向力的比值。其中，法向力为垂直于接触面所施加的力，法向力直接影响摩擦力的大小。通过逐步增加施加在物体上的水平力，同时记录物体开始运动的瞬间，此刻，水平力、法向力二者比值即为“静摩擦系数”。随后，在物体处于恒定滑动状态下，测量滑动摩擦力，该摩擦力与法向力的比值即为“动摩擦系数”。法向力，则通过测量接触界面的压力来直接获取。

随后设计双阶段能量转化路径。其中，快速充气阶段，使用滑模控制实现在 0.1s 之内让压力达到设定值。精准输出环节下，使用模糊 PID 算法维持压力稳定在 $\pm 0.5\%$ 水平。表 1 为气缸效率的评价矩阵：

表 1 气缸效率评价矩阵

参数	优化目标	指标
压力波动率	动态稳压	$\leq 3\%$
形成精度	精准定位	$\pm 0.05\text{mm}$
泄漏率	降低能耗	$< 0.1\%/\text{h}$

2.1.3 诊断层

诊断层，建立数字孪生体进行气缸健康状态预测，开发故障特征库，特征库内包含 20 种典型故障模式，从而确保早期故障预警率达到 90% 以上。

2.2 传动杆系统程序模块

传动杆系统程序设计，采用力学仿真+智能匹配+动

态优化的三维框架，设计目标在于保证扭矩的传递效率 $>90\%$ ，整个模块包括多体动力学仿真层、智能匹配层、动态优化层。

2.2.1 多体动力学仿真层

基于 Matlab 搭建三维传动系统模型，包括锥齿轮组模型、连杆机构模型。其中，锥齿轮组模型使用 Craig-Lynch 接触应力公式来计算齿面的接触强度，如式 2：

$$\sigma_{contact} = \frac{2KT}{d_1^2 \cos \beta} (1 + \frac{u_2}{u_1})^{-1} \quad (2)$$

式 2 中， K 表示材料的弹性系数， T 表示传递扭矩、 β 为锥角， d_1 为小齿轮直径。连杆机构使用 Newmark- β 法进行动力学仿真，以 M 质量矩阵、 G 重力向量、 C 阻尼矩阵为依据进行各个节点加速度的计算。如式 3：

$$a_i = M^{-1}(C_{vi} + G) \quad (3)$$

在此基础上，提取前 5 阶的固有频率来设计模态阻尼比优化算法，确保将功臣频率偏移量控制在 $\leq 3\%$ 范围内。

2.2.2 智能匹配层

智能匹配层内，建立传动比→转速匹配数据库，存入 800 组实验数据库（传动比-转速匹配数据），基于非线性回归模型快速识别出对传动精度影响较大的关键参数。实验数据，主要包括主缸直径、传动比、扭矩、最佳转速与效率。如表 2：

表 2 传动比-转速匹配数据库（部分参数）

主缸直径 (mm)	扭矩 (N·m)	传动比	最佳转速 (rpm)	效率 (%)
100	500	3.2	120	91.2
150	1200	2.1	250	93.5
200	2000	1.5	400	95.8
.....

2.2.3 动态优化层

动态优化层主要通过设置多目标约束参数实现动态优化，包括目标函数、约束条件。其中，目标函数为每分钟下的效率、磨损量、振动幅值。约束函数为扭矩波动 $\pm 5\%$ ，形成误差 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

2.3 数据输入模块

首先，在软件界面输入方面，用户可以通过传统的键盘、鼠标等输入设备精确地输入参数、指令。这种传统的输入方式，具有高度直观和高效的特点，适用于各

种精细化调整、复杂参数配置。在此基础上，为进一步提升用户设计期间的操作体验，平台引入了 Leap Motion 技术，实现了手势控制。设计阶段，用户可以通过虚拟拖拽的模式调节主缸直径等参数，这种操作模式直观、便于理解。为了保证调节的精度，系统控制精度需要设置在±0.5mm 以内，确保配置的准确性和可靠性。

其次，语音智能方面，本平台利用自然语言处理（NLP）模型，支持 20 条传动机构设计杰顿的常用指令识别。用户只需通过语音输入，即可实现对系统的一系列操控，例如参数设置、模式切换等。语音控制的方式，可有效减轻用户的设计期间的操作负担，使得系统更具易用性和人性化。

最后，在上述基本交互功能之上，平台还引入了基于历史数据的智能推荐模型。通过对用户历史操作数据的训练、分析，系统能够生成多种优化方案来供用户选择。这些方案综合考虑了多参数组合、使用场景及预期效果等因素，为用户提供具备针对性的优化建议。每个方案下，不仅包含了具体的参数配置信息，还详细描述了在不同使用场景下的预期效果，从而帮助用户更好地理解、选择最适合的配置方案。表 3 为系统推荐的方案举例：

表 3 基于数据输入的方案推荐（部分方案）

方案编号	主缸直径 (mm)	扭矩 (N·m)	转速 (rpm)	效率 (%)
A1	120	800	180	92.3
B2	180	1500	320	94.1
C3	250	2500	500	96.5
.....

此外，输入程序模块包含安全校验体系，通过构建参数边界数据库来实现多级校验。一级校验主要开展范围检查，即参数的范围检验。二级校验主要进行组合约束的检查，如扭矩*转速的合理性。三级校验，则主要验证动力学的可行性。

3 固钉器传统结构软件应用

固钉器软件应用期间，可基于用户输入的信息进行数据智能化分析，在验证参数组合特征基础上给出参数组合的平均合格率以及能耗指数。这一过程中，系统基于构建 ARIMA-LSTM 混合预测模型结合 DBSCAN 算法进行工艺参数聚类分析，快速识别最优工艺窗口，生成数字化的工艺报告^[5]。表 4 为基于用户输入参数打钉威力、转速、扭矩、主缸直径、主缸活塞最大行程等数据后，系统反馈的工艺聚类结果：

表 4 基于数据输入分析的工艺参数聚类结果

聚类编号	参数组合特征	平均合格率(%)	能耗指数
C1	高扭矩-低转速-大缸径	99.2	0.78
C2	中扭矩-中转速-标准缸径	96.5	0.92
C3	低扭矩-高转速-小缸径	93.8	1.05

4 结语

为了验证本次设计的固钉器传动结构软件可行性，在完成设计后搭建了 PCIe x16 接口硬件测试平台，对 Matlab 模型进行硬件平台的数据交互，设计 81 种正交试验类验证 Matlab 固钉器传动机构软件的精度。经过验证对比，本次基于 Matlab 设计的软件，在相同参数下，对比硬件测试平台实测值，打钉威力偏差为 1.7%、形成精度偏差在 20%，振动幅度偏差在 4%，效率偏差在 1.3%，证明软件有较高的计算精度，可应用于实际触动结构设计工作。

参考文献

[1] 尹宗明. 基于 Matlab 的机械工程控制基础教学实验设计 [J]. 贵州工程应用技术学院学报, 2024, 42(03): 4

4-50.

- [2] 张利, 文华斌, 罗成兵, 等. 基于 Matlab 的固钉器传动结构软件设计及应用 [J]. 成都工业学院学报, 2024, 27(02): 10-16.
- [3] 张燕刚. 浅谈农业机械结构设计中的软件应用 [J]. 农业开发与装备, 2018, (08): 142-143.
- [4] 袁小会, 蔡逸飞, 刘桂花, 等. 多气缸气动程序电控系统设计 [J]. 机械工程师, 2018, (03): 100-103.
- [5] 肖桦. 基于 Matlab 环境下柴油机气缸内工作过程数据处理程序的开发及应用 [J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(S1): 271-275.

作者简介：孟子博（1997.02-），男，汉族，吉林长春人，助教，硕士学历，研究方向：机械设计。