

基于多核 CPU 的复杂液压产品快速并行优化方法

宁志强^{1,2} 卫立新¹ 张瑞¹ 权龙³ 化建辉¹ 高有山¹

(1. 太原科技大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 山西工程技术学院机械电子工程系, 阳泉 045000;

3. 太原理工大学机械与运载工程学院, 太原 030002)

摘要: 为缩短复杂液压产品的研发周期和提高系列化产品的开发效率,提出一种基于多核 CPU 的复杂液压产品快速并行优化方法。该方法利用粒子群算法寻求产品设计参数的优化和性能指标的约束,将每个仿真程序视作粒子群个体。采用两级加速策略,即 CVMODE 求解器加速和多核 CPU 加速。以非对称轴向柱塞泵三角槽优化设计为研究对象,通过物理样机试验对 CVMODE 求解器加速方法的准确性进行验证,结果显示,试验与仿真结果吻合度较高。利用粒子群算法对三角槽主要参数进行优化以降低泵输出流量脉动。对比三角槽结构优化前后的流量脉动率,结果显示,在不增加柱塞腔压力的条件下,非对称轴向柱塞泵三角槽优化后的流量脉动相比优化前降低了 36%。该方法可脱离专业仿真软件平台,能够独立运行于 Windows 操作系统,解决液压动态仿真对专业软件依赖的问题,且多进程比多线程编程更容易实现。在 8 核 CPU 工作站仿真条件下,与 SimulationX 平台仿真方法相比,该多核 CPU 并行方法的仿真效率提高 10 倍以上,与双核计算机并行运行效率相比提高近 5 倍。

关键词: 复杂液压产品; 液压仿真软件; 多核 CPU; 多进程并行优化; 样机试验

中图分类号: TH38; TH137.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)04-0441-09

OSID:



Rapid Parallel Optimization Method of Complex Hydraulic Product Based on Multi-core CPU

NING Zhiqiang^{1,2} WEI Lixin¹ ZHANG Rui¹ QUAN Long³ HUA Jianhui¹ GAO Youshan¹

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China
2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China
3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030002, China)

Abstract: In order to shorten development cycle of hydraulic product and improve development efficiency of serialized products, a rapid parallel optimization method based on multi-core CPU for complex hydraulic product was proposed. The rapid parallel optimization method focuses to the parameter optimization and performance constraints of complex hydraulic product utilizing particle swarm optimization algorithm, treating CVMODE simulated program as a particle. The method adopted two-stage strategies for speed, which included CVMODE strategy and multi-core CPU strategy. Selecting triangle groove design of variable-displacement asymmetric axial piston pump as the research object, the realization process of parallel optimization based on multi-core CPU was designed. Firstly, the accuracy of CVMODE simulated program was verified through prototype experiments. The experiments results showed that the experiment results of physical prototype agreed well with that by CVMODE simulated program. Secondly, the main parameter of triangle groove was optimized to reduce flow pulsation using PSO. The flow pulsation before and after the optimization was analyzed. Analysis result showed that the outcomes of optimization lowered flow pulsation by 36% without pressure increase of plunger cavity. The proposed method solved the optimization problem that the simulation of hydraulic system was dependent on professional simulation software, and the simulated program can run independently in windows.

收稿日期: 2021-12-21 修回日期: 2022-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875381)、山西省研究生创新项目(2021Y695)、山西省回国留学人员科研项目(2020-124)和太原科技大学研究生创新项目(XCX212048)

作者简介: 宁志强(1986—),男,博士生,山西工程技术学院讲师,主要从事电液控制研究,E-mail: aningzhiqiang@126.com

通信作者: 高有山(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事机电液控制理论,研究,E-mail: gaoyoushan@tyust.edu.cn

Compared with multi-threading, this multi-process parallel method had the advantages of easy programming. On the eight core CPU processor, the efficiency of the multi-core parallel method was 10 times greater than that of SimulationX and it was about five times greater than that of dual-core processor.

Key words: complex hydraulic product; hydraulic simulation software; multi-core CPU; multi-process parallel optimization; prototype experiment

0 引言

复杂机械产品的参数如尺寸、零部件选型等将对产品性能产生影响,同时产品性能也会有各种限制条件,复杂机械产品优化设计往往具有多维非线性特征,因此获取全局最优解需要较大计算量。复杂产品关键参数的优化问题是机械优化设计的一个重要研究方向^[1-2]。液压技术在工业设备领域应用广泛,对液压产品性能要求逐渐向高压、高速、大功率的方向发展。随着计算机硬件性能的极大提升,液压仿真技术也得到飞速发展,逐渐成为液压产品设计人员必不可少的开发工具^[3]。

智能优化算法与液压仿真软件结合是一种发展趋势,可极大减轻设计人员重复设计过程^[4-5]。德国亚深工业大学早期开发的 DSH 是一款液压系统仿真软件,具有面向原理图建模的功能,但不具备优化模块。浙江大学对 DSH 软件进行了二次开发,扩充了一些液压仿真模块和优化模块^[6]。国内学者运用优化工具对液压产品进行了参数设计^[7-10]。

当前液压仿真软件进行优化设计和人机交互方面存在一些问题。液压产品进行参数优化时,需提前安装专业仿真软件,无法脱离仿真平台独立运行在 Windows 操作系统。在仿真软件平台进行参数优化时,主要是以串行迭代进行优化,专业仿真平台对内存和 CPU 需求很高,一台计算机同时运行两个仿真平台非常缓慢,因此基于仿真平台软件的并行仿真不易实现,且高性能工作站携带不便。此外,仿真软件的人机交互界面不友好,更改参数初始值需手动输入,模型参数较多时,手动修改参数操作烦琐,重复工作量大。

为解决以上问题,多核 CPU 加速技术是一个可行的途径。多核 CPU 技术的出现使得并行计算的广泛应用成为可能,计算机上多核 CPU 技术使并行计算技术的应用推向微型计算机^[11]。多核 CPU 相比早期单核处理器有了较大的计算性能提升,且处理器的核心数有增多的趋势,主要代表性企业有 Intel 和 AMD 公司^[12]。国内外文献中关于液压产品多核并行优化方法的相关报道较少。本文提出一种基于多核 CPU 的复杂液压产品快速多进程并行优化方法。以三角槽参数优化为研究对象,利用泵出口压力试验验证 COVDE 求解

器仿真模型的准确性,在此基础上通过粒子群算法寻优来降低输出流量脉动。

1 多核并行优化方法框架

多核 CPU 的复杂液压产品快速并行优化方法的主要原理为基于群体智能优化算法,对 CVOICE 仿真程序动态调整仿真参数。CVOICE 求解器能提高仿真速度,是本文提出的第一级加速策略。COVDE 可执行仿真程序看作群体智能算法的群体粒子,每个粒子(COVDE 可执行程序)被分配给不同的设计参数,参数化过程通过对参数文件的写入来实现。从 COVDE 可执行程序生成的输出文件中可提取产品性能参数,并计算出群体粒子的适应值,同时判断是否满足产品性能约束条件。区别于传统的串行优化仿真方法,每个 COVDE 可执行程序是一个 dos 程序,通过 ShellExecute 函数即可启动运行,自动生成一个进程,同时启动多个 dos 程序则进程分配权归操作系统所有,不需要人为干预。以多个 dos 进程同时进行仿真可充分利用多核处理器,与群体优化算法模块进行数据交互,直到满足迭代终止条件。基于群体智能优化算法的参数分配模块通过群体进化策略来动态分配设计参数。鉴于专业液压仿真软件人机交互性差,可视化交互模块也是必要的组成部分。多核 CPU 并行优化方法主要框架结构如图 1 所示。

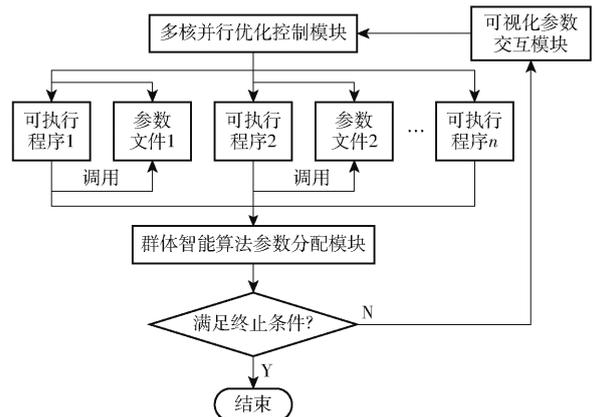


图 1 多核并行优化方法框图

Fig. 1 Frame of multi-core parallelism optimization

2 非对称轴向柱塞泵配流盘设计

变排量非对称轴向柱塞泵(VAPP)可用于挖掘

机动臂能量回收^[13-16]。VAPP与普通泵的最大区别在于把普通配流盘的两个配流窗口设计成为3个配流窗口,配流窗口A和B分别接差动缸的无杆腔和有杆腔。通过改变斜盘倾角使配流窗口A和B获得不同的流量达到驱动液压缸运动,而不需要其他辅助元件。通过改变斜盘角度可使VAPP处于马达工况或泵工况,处于马达状态时差动缸无杆腔的部分液压油通过配流窗口T存在蓄能器中。当VAPP处于泵工况时,蓄能器中的液压能被释放出来,减少电机做功,从而达到势能回收和利用的目的。非对称轴向柱塞泵结构如图2所示。

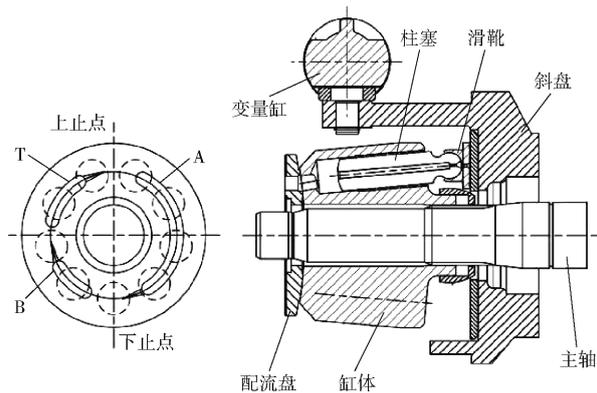


图2 非对称轴向柱塞泵结构图

Fig.2 VAPP structure diagram

景健^[17]对非对称轴向柱塞泵配流盘建模时,将三角槽结构配流面积的变化过程划分成腰型孔变化区域和三角槽变化区域,并对非对称泵物理样机进行了试验。试验结果表明该方法能够合理模拟非对称轴向柱塞泵配流面积。因此,本文采用该方法对非对称轴向柱塞泵建模。

三角槽不同阶段的划分如图3所示,具体配流面积计算方法如下:

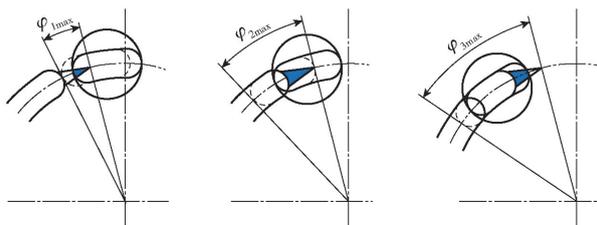


图3 三角槽配流窗口过程划分

Fig.3 Dividing of flow procedure of triangle groove

(1) 加速增大阶段(0 < phi <= phi_1max)

在加速增大阶段,柱塞腔底孔仅与三角槽部分连通。配流面积定义为位于柱塞腔底孔与三角槽相交处的三角槽顶面所包围的面积。图4为配流盘三角槽的结构,柱塞腔底孔与三角槽之间的配流面积为

$$A_1(\varphi) = \frac{R^2 l \varphi^2}{2L} \quad (1)$$

式中 l ——三角槽宽度(底边长)
 L ——三角槽长度 φ ——转角
 R ——柱塞腔底孔分布圆半径

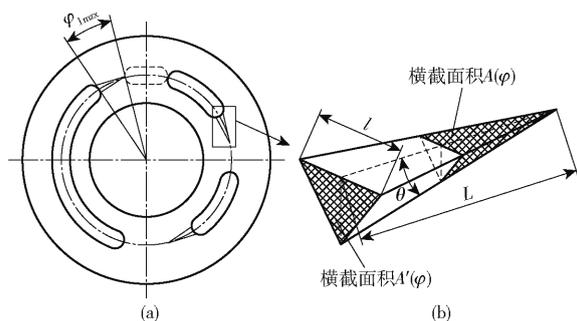


图4 配流盘三角槽结构图

Fig.4 Triangle groove structure of valve plate

(2) 稳定阶段(phi_1max < phi <= phi_2max)

在稳定阶段柱塞腔底孔与配流盘三角槽完全接通,此时配流面积为

$$A_2(\varphi) = \frac{R^2 l \varphi_{1max}^2}{2L} \quad (2)$$

(3) 加速减小阶段(phi_2max < phi <= phi_3max)

在加速减小阶段,柱塞腔底孔与三角槽部分接通,其配流面积为

$$A_3(\varphi) = \frac{R^2 l}{2L} [\varphi_{1max}^2 - (\varphi - \varphi_{2max})^2] \quad (3)$$

腰型孔变化区域内的配流面积分为弓形增大、线性增大、稳定、线性减小和弓形减小,如图5所示配流面积计算方法为:

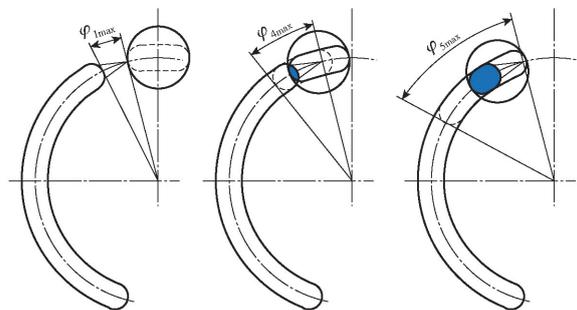


图5 腰型孔配流窗口过程划分

Fig.5 Dividing of flow procedure of waist window

(1) 弓形增大阶段(phi_1max < phi <= phi_4max)

柱塞腔底孔与腰型孔接通,其配流面积形状为弓形,如图5所示。配流面积为

$$A_2 = 2(S_{sec} - S_{\Delta}) = 2r^2 \arccos\left(\frac{R}{r} \sin \frac{\varphi'}{2}\right) -$$

$$2R \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \frac{\varphi'}{2}} \sin \frac{\varphi'}{2} \quad (4)$$

其中 $\varphi' = \varphi_{4max} - \varphi$ (5)

式中 S_{sec} ——柱塞腔底孔与腰型孔形成的扇形面积
 S_{Δ} ——扇形面积中包含的三角形面积
 r ——腰形槽半径

(2) 线性增大阶段 ($\varphi_{4\max} < \varphi \leq \varphi_{5\max}$)

此时柱塞腔底孔与配流盘腰型孔重叠面积轮廓为腰型轮廓。其配流面积为

$$S_3 = \pi R^2 + 2Rr(\varphi - \varphi_{4\max}) \quad (6)$$

(3) 稳定阶段 ($\varphi_{5\max} < \varphi \leq \varphi_{6\max}$)

柱塞腔底孔与配流盘腰型孔完全连通,如图6所示,其配流面积为

$$S_3 = \pi r^2 + 2Rr(\varphi_{5\max} - \varphi_{4\max}) \quad (7)$$

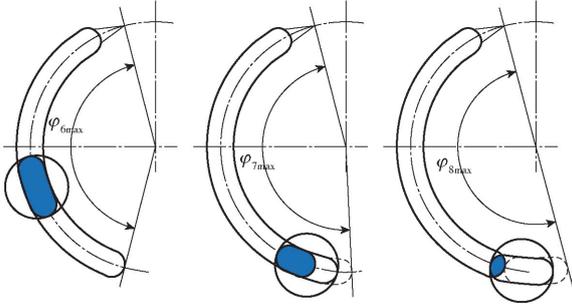


图6 腰型孔配流窗口过程划分

Fig.6 Dividing of flow procedure of waist window

(4) 线性减小阶段 ($\varphi_{6\max} < \varphi \leq \varphi_{7\max}$)

配流面积形状仍为腰型孔轮廓,但其变化趋势为线性减小,如图6所示,配流面积为

$$S_3 = \pi r^2 + 2Rr(\varphi_{7\max} - \varphi) \quad (8)$$

(5) 弓形减小阶段 ($\varphi_{7\max} < \varphi \leq \varphi_{8\max}$)

柱塞腔底孔与配流盘重叠面积轮廓变为弓形,

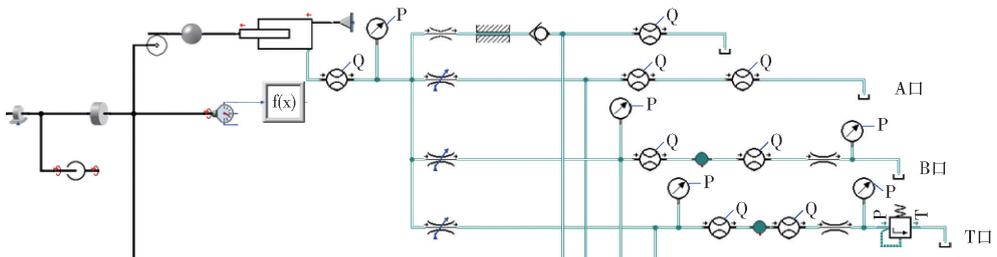


图7 非对称轴向柱塞泵 SimulationX 仿真模型

Fig.7 VAPP model of SimulationX

根据 SimulationX 软件中非对称轴向柱塞泵模型,导出 C 代码。VC++6.0 通过 Open workspace 打开 C 代码中后缀名为 dsw 的文件,编译生成 CVODE 求解器的 dos 可执行文件,其运行界面如图8所示。



图8 CVODE 仿真程序

Fig.8 CVODE executable program

如图6所示,配流面积为

$$A_2 = 2(S_{sec} - S_{\Delta}) = 2r^2 \arccos\left(\frac{R}{r} \sin \frac{\varphi'}{2}\right) -$$

$$2R \sqrt{r^2 - R \sin^2 \frac{\varphi'}{2}} \sin \frac{\varphi'}{2} \quad (9)$$

其中

$$\varphi' = \varphi - \varphi_{7\max} \quad (10)$$

3 CVODE 仿真模型试验验证

3.1 非对称泵 CVODE 求解器可执行程序

在 SimulationX 软件中建立非对称泵变量机构仿真模型,如图7所示。SimulationX 软件采用物理对象建模方法,且能提供模型导出代码功能,SimulationX 模型能以 C 代码形式导出,导出时可选择定步长求解器和 CVODE 求解器。导出的 C 代码可生成独立的后缀名为 exe 的 CVODE 可执行程序、同时生成具有固定文件名及文件类型的模型参数文件(parameters.txt)、仿真控制参数文件(solversettings.txt)和仿真结果文件(Outputs1.txt)。所生成的 dos 可执行文件能够在 Windows 操作系统下运行,不需要安装 SimulationX 软件平台就可以运行。通过 VC++ 自动执行 CVODE 仿真程序的调用函数为 ShellExecute(NULL, "open", "CVODE.exe", NULL, NULL, SW_SHOWNORMAL)。

3.2 试验验证 CVODE 求解器的准确性

通过样机试验验证 CVODE 求解器的 dos 可执行程序仿真的准确性。试验过程所使用的设备参数见表1,图9为样机实物图和试验方案^[18-20]。试验和仿真条件设为:非对称轴向柱塞泵转速为 600 r/min,斜盘倾角设定为 18°,B 口和 T 口加载压力分别取 5、10、15、20 MPa。当对 B 口进行加载,且

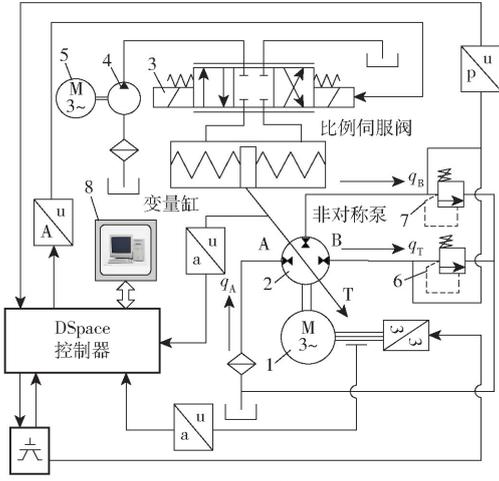
表1 试验设备参数

Tab.1 Proposed system parameters

部件	类型	性能参数
角位移传感器	CP-2UK-R260 型	检测 ±30° 内的角度
比例伺服阀	4WRPEH6C4B12L 型	最大输出流量为 12 L
流量压力传感器	SCLV-PTQ-300 型	最大流量为 300 L/min
直动式溢流阀	DBDS6P10B/315 型	最大调定压力为 31.5 MPa



(a) 变排量非对称泵样机



(b) VAPP试验原理

图9 变排量非对称泵样机和试验方案

Fig. 9 VAPP prototype and experiment method

- 1. 电动机 2. 非对称泵 3. 比例伺服阀 4. 液压泵 5. 变量机
- 构电动机 6, 7. 溢流阀 8. DSpace 控制器

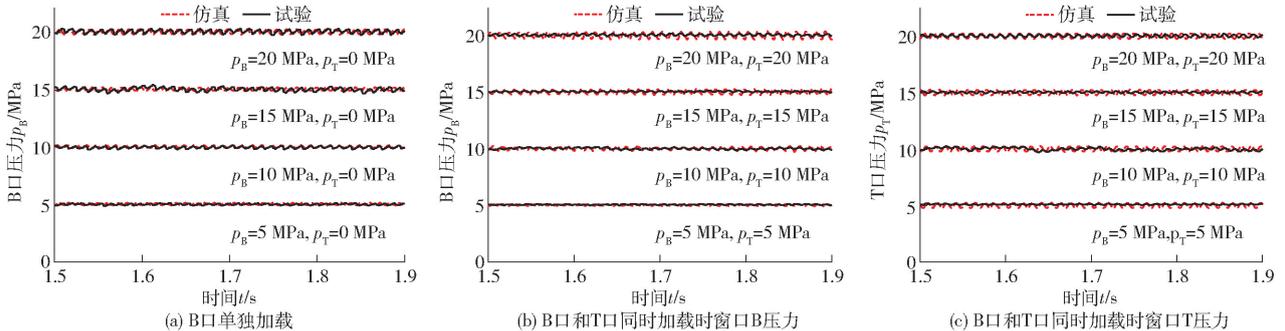


图10 试验和仿真结果对比

Fig. 10 Comparison of test results and simulation results

4.1 三角槽优化参数选取

三角槽长度和宽度对流量脉动和柱塞腔压力具有较大的影响,鉴于三配流口的配流槽尺寸限定,三角槽长度优化的空间较小,因此选取三角槽宽度作为设计变量。为研究三角槽宽度对B口和T口流量脉动影响,选取不同的三角槽宽度进行仿真,分别取三角槽宽度为1,3 mm进行仿真。由图11a可知,随着B口三角槽宽度变小,B口流量脉动变小;由图11b可知,随着T口三角槽宽度变小,T口流量脉动变小;由图11c可知,随着B口和T口三角槽宽度变小,柱塞腔压力变大。在非对称泵设计中,要求泵出口流量脉动较小,同时也要求柱塞腔压力较小,但

T口不加载时,B口在4个不同压力等级下,样机试验和仿真结果如图10a所示。从图10a中可知,仿真与试验结果基本吻合,B口的压力脉动随着加载压力的提高而增大,总体脉动幅值仍然较小。当对B口和T口同时加载压力时,B口和T口分别在4种压力等级下的压力情况如图10b、10c所示。仿真结果和试验结果基本一致,B口和T口的工作压力呈现一定周期性波动,且T口压力脉动幅值略大于窗口B。通过试验验证,结果表明压力实测和CVMODE可执行程序得到的仿真曲线吻合度较高。

4 配流盘并行优化的实现过程

针对液压产品开发特点,设计了一种多核并行优化机制。非对称轴向柱塞泵模型复杂度相对较高,因此可以在仿真方案中设计多个可独立运行的仿真程序,分别赋不同的参数值,在经过一次迭代后,微粒群算法优化器能从输出文件output.txt中获取计算结果,得到粒子群算法所需的目标函数适应值和约束条件判断结果,粒子群算法更新每个粒子的参数。粒子群算法具有并行性,每个粒子的适应值计算相互独立,因此能够同时多进程并行运行多个可执行程序,以实现提高计算效率的目的。多进程运行的启动方式借助ShellExecute函数实现。

流量脉动较小和柱塞腔压力较小的要求存在冲突,因此,本文提出通过改变B口和T口三角槽宽度,在限制最大柱塞腔压力的同时,达到B口和T口的流量脉动值最优化。

4.2 目标函数和约束条件

粒子群算法的目标函数设置为B口和T口的流量脉动率之和,即目标函数

$$\sigma_{all} = \sigma_B + \sigma_T \tag{11}$$

其中

$$\begin{cases} \sigma_B = \frac{2(q_{Bmax} - q_{Bmin})}{q_{Bmax} + q_{Bmin}} \\ \sigma_T = \frac{2(q_{Tmax} - q_{Tmin})}{q_{Tmax} + q_{Tmin}} \end{cases} \tag{12}$$

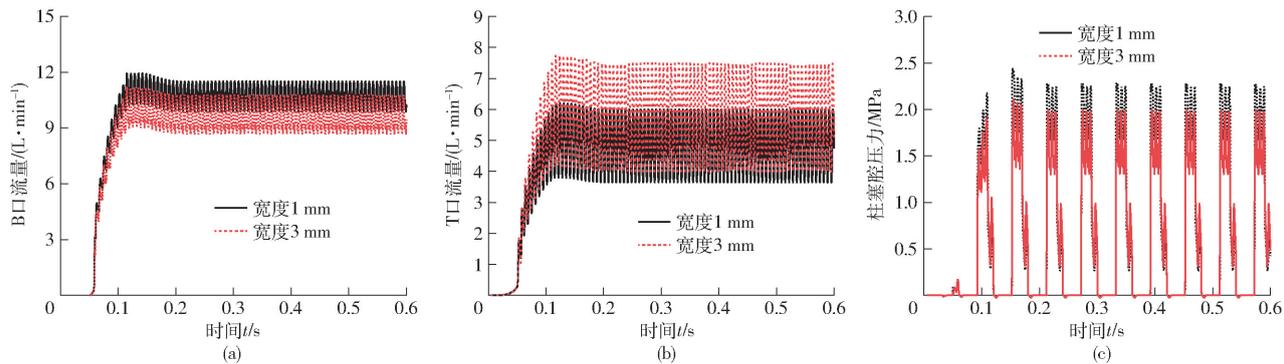


图 11 不同宽度的三角槽对流量脉动和柱塞腔压力的影响

Fig. 11 Effect of different triangle groove on flow pulsation and chamber pressure

式中 q_{Bmax} 、 q_{Tmax} ——B 口、T 口最大流量

q_{Bmin} 、 q_{Tmin} ——B 口、T 口最小流量

优化设计变量分别为三角槽 B 口和 T 口的宽度 l_B 和 l_T , 如图 4b 所示。约束条件为柱塞腔最大压力不得大于限制值。约束条件的施加方法, 最常

见的有惩罚函数法等方法, 但无法将约束条件公式化, 不适合采用惩罚函数法, 因此提出一种约束条件处理策略, 通过 3 个规则处理约束条件。基于粒子群算法的非对称泵多核并行优化流程图如图 12 所示。

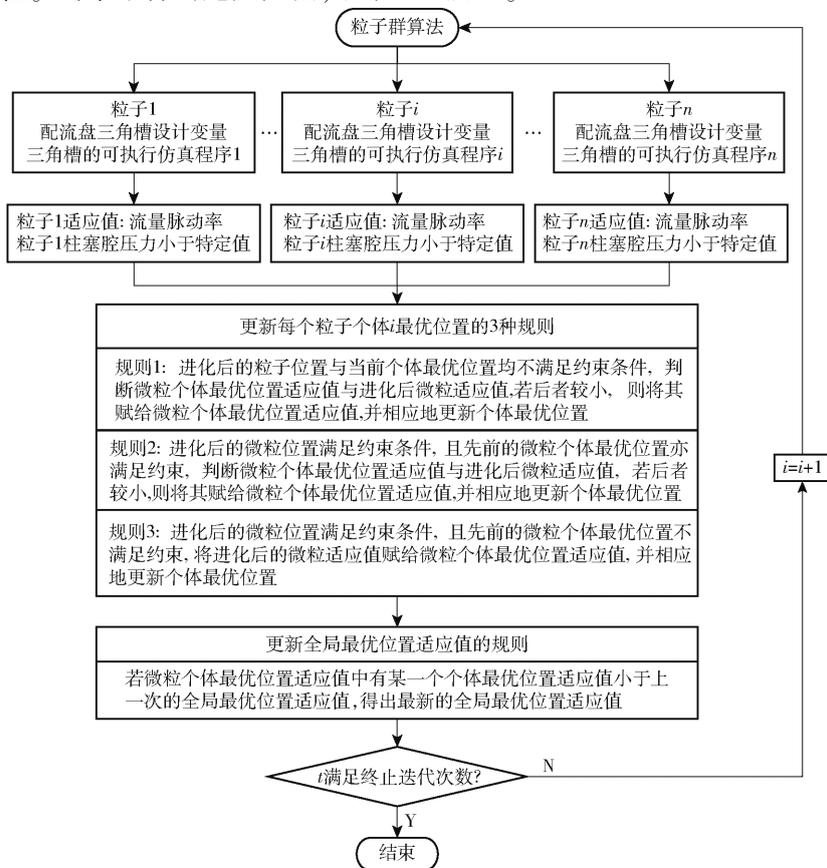


图 12 非对称泵多核并行优化流程图

Fig. 12 Flowchart of VAPP parallelism optimization

4.3 三角槽多核并行优化对比

利用 VC++ 软件进行 SimulationX 软件的二次开发, 编制出友好的人机交互界面, 如图 13a 所示, 多进程并行优化界面如图 13b 所示。

优化前配流盘 B 口和 T 口三角槽宽度均为 2 mm, 流量脉动率之和为 0.763 268, 柱塞腔压力为 2.3 MPa。在 20 轮迭代过程中, 约束条件设为柱塞

腔压力为 2.3 MPa, 优化后 B 口和 T 口三角槽宽度分别为 3 mm 和 1.46 mm, B 口和 T 口脉动率之和下降为 0.491 952 78, 即柱塞腔压力不变的情况下, 通过优化三角槽宽度使出口脉动率降低了 36%。排量为 45 mL/r 时 20 次迭代过程脉动率变化趋势如图 14 所示, 优化后流量和压力如图 15 所示。

对于非对称轴向柱塞泵的设计, 输入设定排量



(a) 可视化界面 (b) 多进程并行优化界面

图 13 二次开发界面

Fig. 13 Secondary development interface

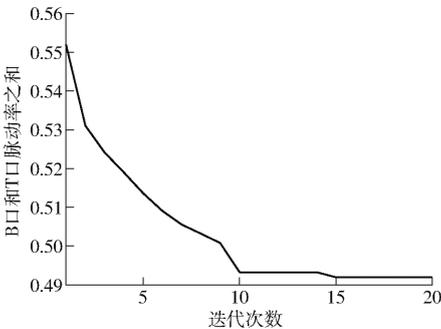


图 14 20 次迭代过程出口脉动率变化曲线

Fig. 14 Variation trend of pulse rate in 20 iterative process

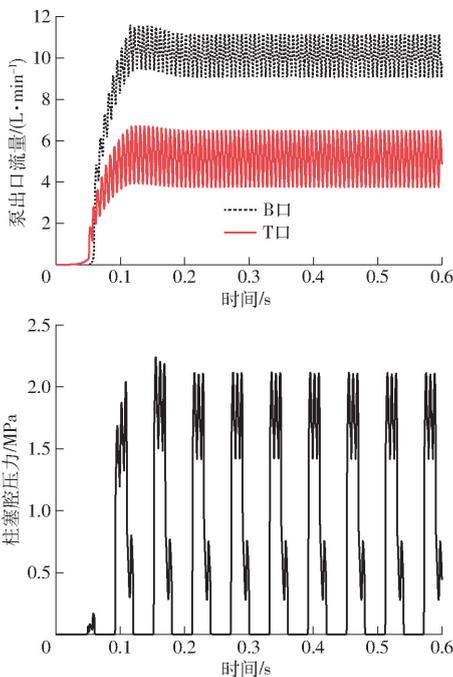


图 15 三角槽参数优化后的输出流量和柱塞腔压力

Fig. 15 Output flow and plunger chamber pressure of optimized triangle groove

为 55 mL/r, 约束条件设定柱塞腔压力不超过 2.3 MPa, 优化后 B 口和 T 口三角槽宽度分别为 1.24、2.62 mm, 无法到达搜索范围下限, 因为三角槽宽度下限值将导致柱塞腔压力大于许可值 2.3 MPa。排量 55 mL/r 时, 在 5 MPa 柱塞腔压力限制条件下, 三角槽宽度达到搜索范围下限值, 即 0.5 mm, 此时柱塞腔压力约束条件不起作用。排量 55 mL/r 相比于排量 45 mL/r, 脉动率下降, 即随着排量的增加, 泵出口脉动率变小。不同排量和压力

限制条件下三角槽尺寸寻优结果见表 2。图 16 为不同排量和压力限制条件下三角槽优化后输出流量脉动率。

表 2 三角槽宽度优化结果

Tab. 2 Optimized result of triangle groove

排量/ (mL·r ⁻¹)	限制压力/ MPa	脉动率	B 口三角 槽宽度/mm	T 口三角 槽宽度/mm
45	2.3	0.491 952	3.00	1.46
55	2.3	0.480 245	1.24	2.26
55	5.0	0.254 007	0.50	0.50

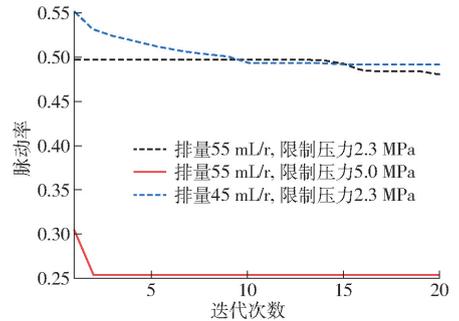


图 16 不同排量和压力限制条件下三角槽优化后输出流量脉动率

Fig. 16 Output flow and plunger chamber pressure of optimized triangle groove with different displacements and pressure limits

5 不同核心数目处理器对运行速度的影响

设置并行优化进行 20 次迭代, 每轮迭代同时并行执行 10 个仿真程序, 共计执行 200 次 dos 仿真程序。对比试验的仿真处理器配置见表 3, 仿真耗时对比见表 4。对于配置 A, Intel(R) Core(TM) i7-10700F 是具有 8 核 16 线程的处理器, 理论上该处理器相比单个 exe 至少可提高 4 倍效率, 实际提高效率为 7 倍左右, 基本符合理论上提升效率; 对于配

表 3 工作站主要性能参数

Tab. 3 Parameters of workstation

运行环境	操作系统	处理器	内存/GB
配置 A	Windows 10 X64	Intel(R) Core(TM) i7 - 10700F CPU@2.9 GHz	16
配置 B		Intel(R) Core i5 - 7200U CPU@2.7 GHz	8

表 4 仿真耗时对比

Tab. 4 Comparison of simulation time

运行环境	项目	SimulationX3.8	单个 exe 程序	并行优化程序
配置 A	总时间	427	117	3 180
	单个耗时	427	117	15.9
配置 B	总时间	510	200	15 600
	单个耗时	510	200	78

置 B, 具有 2 核处理器, 理论上该处理器相比单个 exe 至少可提高 2 倍效率, 实际提高效率约为 2.5 倍, 基本符合理论提升效率。8 核处理器 i7 - 10700F 对比双核处理器 i5 - 7200U 提升约 5 倍效率。并行优化性能与核心数基本成正比, 但也与仿真时所用计算机的实际性能相关。

6 结论

(1) 提出了一种基于多核 CPU 的复杂液压产品快速多进程并行优化方法, 该方法可解决液压产品仿真对专业软件依赖的问题。CVMODE 求解器能加

快仿真速度, 物理样机试验结果与 CVMODE 求解器仿真程序结果吻合度较高, 证明 CVMODE 仿真程序的准确性。在基于粒子群算法的并行优化过程的运行速率与多核 CPU 的核心数目呈正比关系。

(2) 利用粒子群算法对非对称轴向柱塞泵的三角槽宽度参数进行优化, 以降低泵输出流量脉动。研究表明减小三角槽宽度能够降低流量脉动, 但会引起柱塞腔压力上升。在不增加柱塞腔压力的条件下, 运用多核并行优化方法对非对称轴向柱塞泵优化后, 泵出口流量脉动相比优化前降低了 36%。

参 考 文 献

- [1] 石建平, 李培生, 刘国平. 基于混合学习果蝇优化算法的冗余机械臂逆运动学求解[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 410 - 416. SHI Jianping, LI Peisheng, LIU Guoping. Inverse kinematics solution of redundant manipulator based on hybrid learning fruit fly optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 410 - 416. (in Chinese)
- [2] 潘阳, 李毅波, 黄明辉. 双联轴向柱塞泵配流盘优化与流量脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 391 - 398. PAN Yang, LI Yibo, HUANG Minghui. Valve plate improvement and flow ripple characteristic analysis for double compound axial piston pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 391 - 398. (in Chinese)
- [3] 武鹏飞, 颜凌云, 包宗贤. 浅析液压系统仿真技术现状及发展趋势[J]. 机床与液压, 2011, 39(8): 133 - 134. WU Pengfei, YAN Lingyun, BAO Zongxian. Status and development trend of hydraulic system simulation technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(8): 133 - 134. (in Chinese)
- [4] 梁全. 液压系统 Amesim 计算机仿真进阶教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [5] 李献, 骆志伟, 于晋臣. MATLAB/Simulink 系统仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [6] 高钦和. 液压系统动态特性建模技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013
- [7] 吴珊, 赵道新. 基于遗传算法的海水液压溢流阀参数优化[J]. 液压与气动, 2016, 40(10): 37 - 41. WU Shan, ZHAO Daoxin. The parameter optimization of seawater hydraulic relief valve based on genetic algorithm[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016, 40(10): 37 - 41. (in Chinese)
- [8] 王志红, 卢梦成. 基于遗传算法的变幅液压系统动态特性优化[J]. 数字制造科学, 2019, 17(1): 59 - 63. WANG Zhihong, LU Mengcheng. Optimization of dynamic characteristics for luffing hydraulic system based on genetic algorithm[J]. Digital Manufacture Science, 2019, 17(1): 59 - 63. (in Chinese)
- [9] 梅元元, 陈奎生. 基于 SimHydraulics 的液压阀参数化设计与优化[J]. 机床与液压, 2013, 41(10): 78 - 80. MEI Yuanyuan, CHEN Kuisheng. Parametric design and optimization for hydraulic valve based on SimHydraulics[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(10): 78 - 80. (in Chinese)
- [10] 董文勇. 一种高压大流量插装式先导型溢流阀的仿真分析与优化设计[J]. 液压与气动, 2021, 45(10): 125 - 133. DONG Wenyong. Simulation analysis and optimization design of a high-pressure and large-flow cartridge pilot operated relief valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(10): 125 - 133. (in Chinese)
- [11] 田佳. 基于粒子群优化算法的多核多线程系统任务调度研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017. TIAN Jia. Research on multi-core and multi-thread system task scheduling based on particle swarm optimization algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] 刘亚鹏. 基于并行优化算法的结构优化设计系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021. LIU Yapeng. Research on structural optimization design system based on parallel optimization algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [13] 权龙. 泵控缸电液技术研究现状存在问题及创新解决方案[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 87 - 92. QUAN Long. Current state problems and the innovative solution of electro-hydraulic technology of pump controlled cylinder[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 87 - 92. (in Chinese)
- [14] ZHANG Xiaogang, QUAN Long, YANG Yang, et al. Output characteristics of a series three-port axial piston pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3): 498 - 505.
- [15] HUANG Jiahai, ZHAO Hu, QUAN Long, et al. Development of an asymmetric axial piston pump for displacement-controlled system[J]. Proc. IMechE Part C: J. Mechanical Engineering Science, 2014, 228(8): 1418 - 1430.
- [16] 张晓刚, 权龙, 杨阳. 并联型三配流窗口轴向柱塞泵特性理论分析及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 151 - 157. ZHANG Xiaogang, QUAN Long, YANG Yang. Theoretical analysis and experimental research on characteristics of parallel

- three assignment windows axial piston pump[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(14):151-157. (in Chinese)
- [17] 景健. 非对称柱塞泵直驱挖掘机液压缸系统特性研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
JING Jian. Research on the characteristics of asymmetric piston pump directed controlled excavator cylinders[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] GAO Youshan, CHENG Jie, HUANG Jiahai. Simulation analysis and experiment of variable-displacement asymmetric axial piston pump[J]. *Applied Sciences*, 2017, 328(7):1-16.
- [19] 贺伟, 黄家海, 郝惠敏. 变排量非对称轴向柱塞泵动态特性分析[J]. *液压与气动*, 2019, 43(10):20-25.
HE Wei, HUANG Jiahai, HAO Huimin. Research on dynamic characteristics of variable-displacement asymmetric axial piston pump[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2019, 43(10):20-25. (in Chinese)
- [20] 黄家海, 贺伟, 郝惠敏. 变排量非对称轴向柱塞泵控制特性分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3):368-376.
HUANG Jiahai, HE Wei, HAO Huimin. Analysis of control characteristics of variable displacement asymmetric axial piston pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3):368-376. (in Chinese)
-

(上接第 431 页)

- [18] HAJDUGA A. Dual motor single shaft powertrain concept[C]//2018 23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR). Poland Miedzyzdroje, 2018: 843-848.
- [19] LEE D H, KIM Y J, CHIO C H, et al. Development of a parallel hybrid system for agricultural tractors[J]. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2017, 62(1):137-144.
- [20] 徐立友. 拖拉机液压机械无级变速器特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
XU Liyou. Study on characteristics of hydraulic transmission of tractor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [21] 姚艳春, 杜岳峰, 朱忠祥, 等. 基于模态的玉米收获机车架振动特性分析与优化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19):46-53.
YAO Yanchun, DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, et al. Analysis and optimization of vibration characteristics of corn harvest locomotive frame based on mode[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(19):46-53. (in Chinese)
- [22] 王斯博, 赵慧超, 李志宇, 等. 电动车永磁同步电机转矩波动分析及测试[J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(9):95-102.
WANG Sibao, ZHAO Huichao, LI Zhiyu, et al. Torque ripple analysis and test of permanent magnet synchronous motor of electric vehicle[J]. *Journal of Electrical Machinery and Control*, 2015, 19(9):95-102. (in Chinese)
- [23] 梁锐. 电动车动力传动系统扭转振动研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
LIANG Rui. Research on torsional vibration of electric vehicle power transmission system[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)