

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.08.013

基于粒子群算法的阀控变量机构控制参数优化*

卫立新,张 瑞,周 围,宁志强,化建辉,高有山*

(太原科技大学 机械工程学院,山西 太原 030024)

摘要:比例阀控制的柱塞缸系统存在 PID 参数手动整定繁琐的问题,为了解决四配流轴向柱塞马达变量机构的控制参数整定问题,提出了一种基于粒子群算法(PSO)的并行协同设计方法。首先,采用了伺服比例阀和与斜盘固定连接的角度位移传感器组成的 PID 闭环,对四配流轴向柱塞马达斜盘倾角进行了控制,改变了四配流轴向柱塞马达的输出轴转速;然后,采用 Simulation X,搭建了变排量四配流轴向柱塞马达和阀控变量机构的模型;最后,提出了一种脱离液压仿真软件平台的基于粒子群算法的并行协同设计方法,解决了四配流轴向柱塞马达变量机构控制参数整定问题,并将其用于 PID 参数自动寻优整定,以减少控制系统跟踪误差。研究结果表明:与未经优化控制参数的系统相比,优化控制参数后,马达斜盘摆角的超调量减少了 21%,柱塞腔内部的压力峰值降低 3.4 MPa,马达转速平稳;该结果可为后续搭建变排量四配流轴向柱塞马达物理样机提供理论依据。

关键词:轴向柱塞马达;液压系统;粒子群算法;多线程并行协同;控制参数整定;比例阀;斜盘倾角

中图分类号:TH137;TH-39

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)08-1118-07

Optimization of control parameters of valve-controlled variable mechanism based on PSO

WEI Li-xin, ZHANG Rui, ZHOU Wei, NING Zhi-qiang, HUA Jian-hui, GAO You-shan

(School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The piston cylinder system controlled by proportional valve has the problem of tedious manual tuning of PID parameters. In order to solve the problem of tuning the control parameters of the variable mechanism of the four-distribution axial piston motor, a parallel collaborative design method based on particle swarm optimization (PSO) was proposed. Firstly, the swashplate inclination of the four-port axial piston motor was controlled by PID closed-loop control composed of servo proportional valve and the angular displacement sensor fixedly connected with the swash plate, and changed the output shaft speed of the four-port axial piston motor. Then the Simulation X was used to model the variable displacement four-port axial piston motor and the valve-controlled variable mechanism. Finally, a parallel collaborative design method based on particle swarm optimization algorithm was proposed to solve the control parameter tuning problem of variable mechanism of four-port axial piston motor without hydraulic simulation software platform, which could be used for automatic optimization and tuning of PID parameters to reduce control tracking error. The results show that compared with the system without optimizing the control parameters, after optimizing the control parameters, the overshoot of the swing angle of the motor swashplate is reduced by 21%, the peak pressure in the plunger cavity is reduced by 3.4 MPa, and the motor speed is stable, which provides a theoretical basis for the subsequent construction of the physical prototype of the variable displacement four-port axial piston motor.

Key words: axial piston motor; hydraulic system; particle swarm optimization(PSO); multi-thread parallel cooperation; control parameter tuning; proportional valve; swashplate inclination

收稿日期:2021-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(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);太原科技大学研究生创新项目(XCX212048)

作者简介:卫立新(1998-),男,山西曲沃人,硕士研究生,主要从事电液伺服系统控制方面的研究。E-mail:1872738559@qq.com

通信联系人:高有山,男,教授,博士生导师。E-mail:gaoyoushan@tyust.edu.cn

0 引言

挖掘机的作业能量消耗过程由行走、回转、挖掘等几部分构成,其中,回转机构的能耗占比高达 40% 之多,对挖掘机回转机构的节能研究颇为重要。

在液压挖掘机回转平台中,通常都是通过调节主控阀通流液阻产生的背压,以此来对其进行调速的。在其调速过程中,必须以主控阀的节流损失,以此来保证回转平台的可操作性。但这样做会产生较大的能量损耗,并导致系统的发热,降低其中液压元件的可靠性,缩短其寿命。

轴向柱塞马达具有排量大、扭矩高和噪音小等优点,因而被广泛应用于挖掘机的回转机构中。四配流窗口轴向柱塞马达作为一种新的执行机构,将传统两配流和三配流窗口结构发展为可单独控制的四配流窗口结构,这为挖掘机等类似的回转机械的节能提供了一种新方案。

在四配流轴向柱塞马达的设计建模方面,王猛等人^[1]采用了机液耦合的方法,对四配流轴向柱塞马达的设计参数进行了优化选择,以便获得更好的柱塞马达结构参数。高有山等人^[2]分析了四配流轴向柱塞马达的各项特性及负载特性,并模拟了挖掘机的回转机构;该研究可为柱塞马达的节能提供一定参考。刘洋等人^[3]基于虚拟样机分析了两口轴向柱塞马达的输出特性,验证了柱塞马达机-液耦合模型具有较好的计算精度。

但是,以上研究针对的对象都是定排量马达。因此,有必要对四配流轴向柱塞马达进行改进,通过增设变量机构的方式,将其改进为变排量四配流轴向柱塞马达,并将其应用于大惯性负载的回转调速机构中,以提高液压系统的稳定性。

此外,变排量轴向柱塞泵/马达变量机构控制中,大多采用 PID 闭环控制,在其控制过程中,其参数调整繁琐;同时,当采用仿真软件平台对此进行仿真时,对内存和 CPU 的要求又很高^[4]。

针对以上问题,笔者提出一种基于粒子群算法(PSO)^[5-7]的并行协同设计方法,以此来解决四配流轴向柱塞马达变量机构的控制参数整定问题。

1 变排量四配流马达工作原理

1.1 轴向柱塞马达基本原理

变排量四配流窗口轴向柱塞马达拥有和普通轴向柱塞马达相似的机械结构,有控制系统、液压系统等。

变排量四配流窗口轴向柱塞马达配件结构图,如图 1 所示。

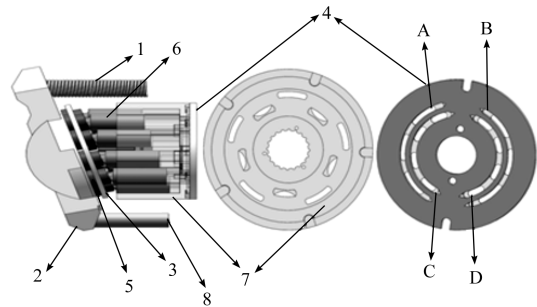


图 1 四配流窗口轴向柱塞马达配件结构图

1—弹簧;2—斜盘;3—回程盘;4—配流盘;5—滑靴;6—柱塞;7—缸体;8—活塞;A、B—主控腔内侧配流窗口;C、D—辅控腔配流窗口

变排量四配流窗口轴向柱塞马达的变量机构以液压缸驱动活塞,顶开斜盘,压缩弹簧,改变斜盘倾角。此处把配流盘从普通双腰形窗口(A、B)“一进一出”改为并联双排方式。其中,A、B 窗口为一对配流窗口,C、D 窗口为另一对配流窗口,外侧的 A、B 窗口构成主控腔内侧,C、D 窗口则构成辅控腔,形成“两进两出”的配流方式。

变排量四配流窗口轴向柱塞马达有特殊的配流窗口,可以同时处在泵工况、马达工况或者马达泵/工况。当主控腔单独供给高压油时,马达旋转,而处于辅空腔的窗口,就可以看作泵,把油液从油箱中吸入到蓄能器中储存起来,达到回收能量的目的;当马达需要高速旋转时,主控腔和辅控腔的工况都变成马达状态,都供给高压油,使得马达高速旋转;当马达需要快速制动时,在辅控腔电磁换向阀控制下,可与主控腔处于相反工况,反向充油,达到快速制动的条件^[8]。

变排量四配流轴向柱塞马达势能回收原理图如图 2 所示。

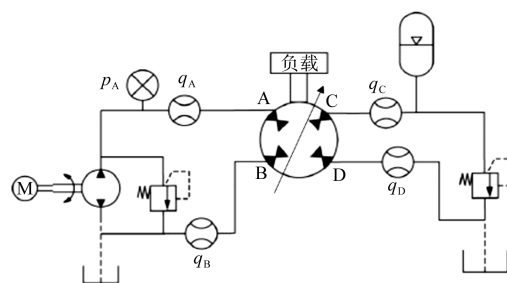


图 2 变排量四配流窗口轴向柱塞马达势能回收原理

液压马达主轴每旋转一圈,就可以根据其腔内容积变化得到马达具体流量变化的大小(即马达排量),则变排量四配流轴向柱塞马达的理论排量为:

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 R z \tan \gamma \quad (1)$$

式中： d —柱塞直径； R —缸体分布圆半径； z —柱塞个数； γ —斜盘倾角。

1.2 马达变量机构控制系统

四配流轴向柱塞马达变量机构主要由伺服比例阀、单柱塞液压缸、齿轮泵组成，其变量机构仿真模型如图 3 所示。

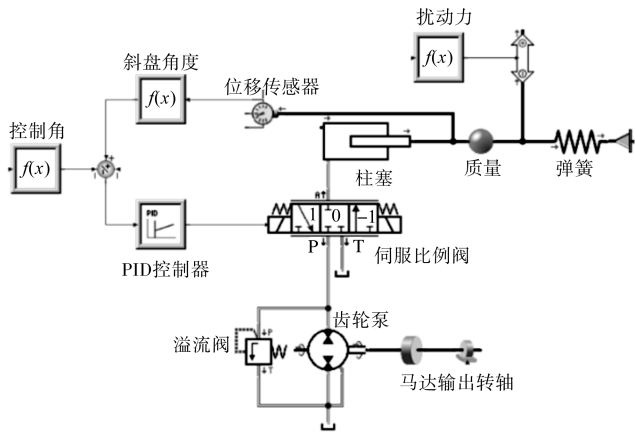


图 3 变量机构仿真模型

伺服比例阀与斜盘固定连接的角位移传感器组成闭环控制，利用电液控制斜盘角度，获得四配流轴向柱塞马达的变排量控制；斜盘角度控制采用 PID 控制来实现^[9,10]。

斜盘目标角度为 γ ，系统中的斜盘角度为 γ_1 ，液压缸柱塞在最右位置为 x_i 。当 γ 小于 γ_1 时，伺服比例阀会接收到变量信号，使得伺服比例阀到达右位，阀口打开，高压油由液压系统经伺服阀的开口进入液压缸一腔，活塞杆运动位移 x_0 ，并推动斜盘转动 β 。此时，伺服阀开口量 $x_v = x_0 - x_i$ ；

γ 大于 γ_1 时，情况类似。

活塞杆运动位移 x_0 与斜盘转角 β 间关系为：

$$\tan\beta = \frac{x_0}{L_d} \quad (2)$$

式中： L_d —液压缸对斜盘的作用力臂长。

由式(1,2)可知：变排量四配流轴向柱塞马达与活塞位移 x_0 存在线性关系。当入口流量一定时，控制活塞的位移就可以改变马达斜盘的角位移，也即达到了控制马达转速的目的。

马达斜盘倾角位置控制回路方框图如图 4 所示。

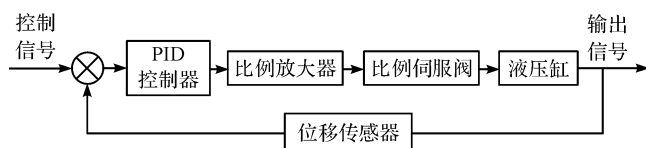


图 4 马达斜盘倾角位置控制回路方框图

在该系统中，比例放大器增益为 K_1 ，通过它可以

改变系统响应的超调量与控制精度。

在工程实际中，当变量机构的固有频率较小时，电液伺服比例阀的传递函数可以看作惯性环节，其它情况看成二阶振荡环节^[11]，因此，此时的电液伺服比例阀将其等效为二阶振荡环节，即：

$$\frac{Q}{I} = \frac{K_{sv}}{\omega_{sv}^2 s^2 + 2\zeta_{sv} s + 1} \quad (3)$$

式中： K_{sv} —伺服阀流量增益； ω_{sv} —伺服阀固有频率，rad/s； ζ_{sv} —液压阻尼比。

控制液压缸的传递函数为：

$$\frac{Y}{Q} = \frac{1}{A_p S \left(\frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + \frac{s^2}{\omega_h^2} + 1 \right)} \quad (4)$$

式中： A_p —斜盘转动部分折算到活塞杆上的面积； ω_h —液压缸的固有频率。

该系统中的视位移传感器为比例环节，其增益为 K_f 。

该系统采用 PID 进行闭环控制^[12,13]，其中不同的 PID 参数对系统的响应大不相同。

当 $K_p = 1, K_i = 1, K_d = 1$ ，且设定的斜盘目标角度为 12° 时，马达变量机构控制系统的响应特性如图 5 所示。

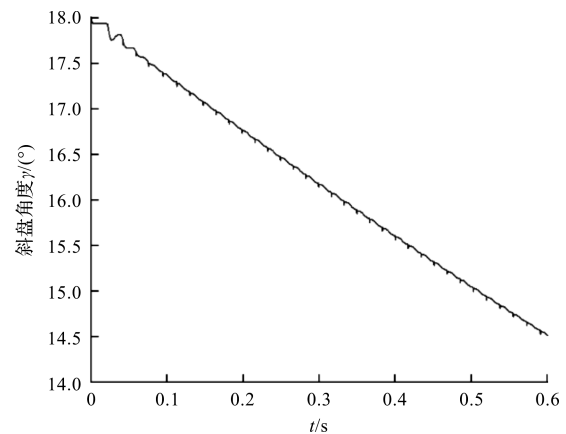


图 5 $K_p = 1, K_i = 1, K_d = 1$ 时系统的角度响应特性

图 5 中，系统不仅响应缓慢，且存在波动。由此可见，PID 控制参数的整定对斜盘角度系统性能具有较大的影响。

目前，工程中 PID 控制参数的整定方法主要有：工程整定法，基于规则的 Z-N 整定法、GPM 法，基于神经网络、模糊逻辑、仿生智能算法的智能整定方法。其中，工程整定法应用较多，但它在面对复杂系统时存在计算过于复杂的问题；采用基于规则的整定方法时，其规则受到主观的影响较大。

相对而言,智能 PID 参数整定^[14-17]方法由于具有较强的适应能力,更具有其优势。因此,笔者将粒子群算法应用于该系统的 PID 参数整定。

2 并行协同仿真方法主程序框架

协调仿真方法的主要原理为,基于群体智能优化算法,每个可执行程序可视作一个群体粒子,可执行程序的输入为智能算法分配和调整,可执行程序的输出为液压系统的优化目标函数,以及是否满足约束条件的判断结果。

群体智能并行协同仿真方法的主要结构如图 6 所示。

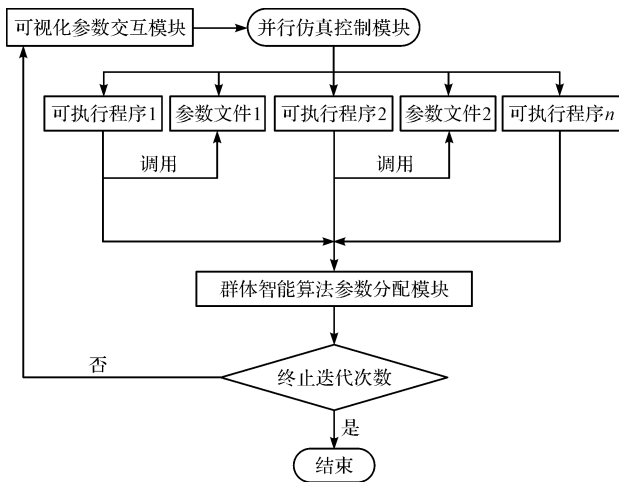


图 6 群体智能并行协同仿真方法结构图

该仿真方法主要包括:

(1) Dos 可执行程序。C 语言程序具有较高的运行效率,由 C 代码生成。由专业仿真软件建立模型,得到脱离平台单独运行的可执行文件;

(2) 基于群体智能优化算法的参数分配模块,其每一个单独运行的程序就是一个优化粒子,即一组设计变量。需读取多个进程生成的目标函数和约束条件情况,并重新分配设计参数;

(3) 可视化参数交互模块。专业仿真软件存在人机交互性差、专业化程度高、参数输入和结果显示较为繁琐等问题,故人机交互界面需尽量追求简捷操作;

(4) 并行仿真控制模块,作用为开启多线程计算。因 Dos 可执行文件运行后无法返回,并及时通知群体智能优化算法的参数分配模块,故需多线程并行模块实时监控每一轮迭代是否结束,且必须在一轮迭代所有粒子完成计算后,才能进行下一步参数调整,否则会因数据文件不能共享造成错误。

3 变量控制参数并行仿真整定程序

笔者设计了一种单模型的并行优化机制,即变排量四配流轴向柱塞马达并行仿真优化机制,其结构如图 7 所示。

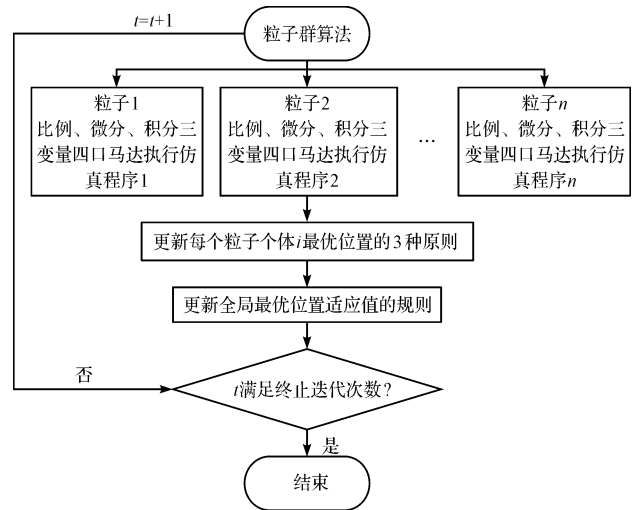


图 7 变排量四配流轴向柱塞马达并行仿真优化机制

该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斜盘角度仿真程序,并分别赋以不同的参数值,在经过一次迭代后,粒子群算法优化器能接收到多组仿真程序的适应值和约束条件判断结果;更新每个粒子的参数,能够同时并行仿真 n 个可执行文件,以实现提高计算效率的目的。

3.1 柱塞马达可执行文件

笔者基于 Simulation X 软件,建立了四配流轴向柱塞马达仿真模型,如图 8 所示(变量机构模型见图 3)。

马达仿真的相关参数如表 1 所示。

表 1 马达仿真相关参数

模型参数	参数值	单位
柱塞直径 d	19	mm
内圈配流柱塞 Z1	5	个
外圈配流柱塞 Z2	5	个
排量	54	ml/r
柱塞分布圆直径	64	mm
柱塞与缸体间隙	0.01	mm
斜盘最大摆角	18	(°)
滑靴与斜盘间隙	0.01	mm
配流盘分度圆直径 $d1$	56	mm
配流盘分度圆直径 $d2$	72	mm
活塞行程	21.5	mm

笔者根据 Simulation X 软件中的模型,导出 C 代码,并利用 VC++ 编译生成可执行文件^[18,19],其运行界面、参数文件和结果输出文件,如图 9 所示。

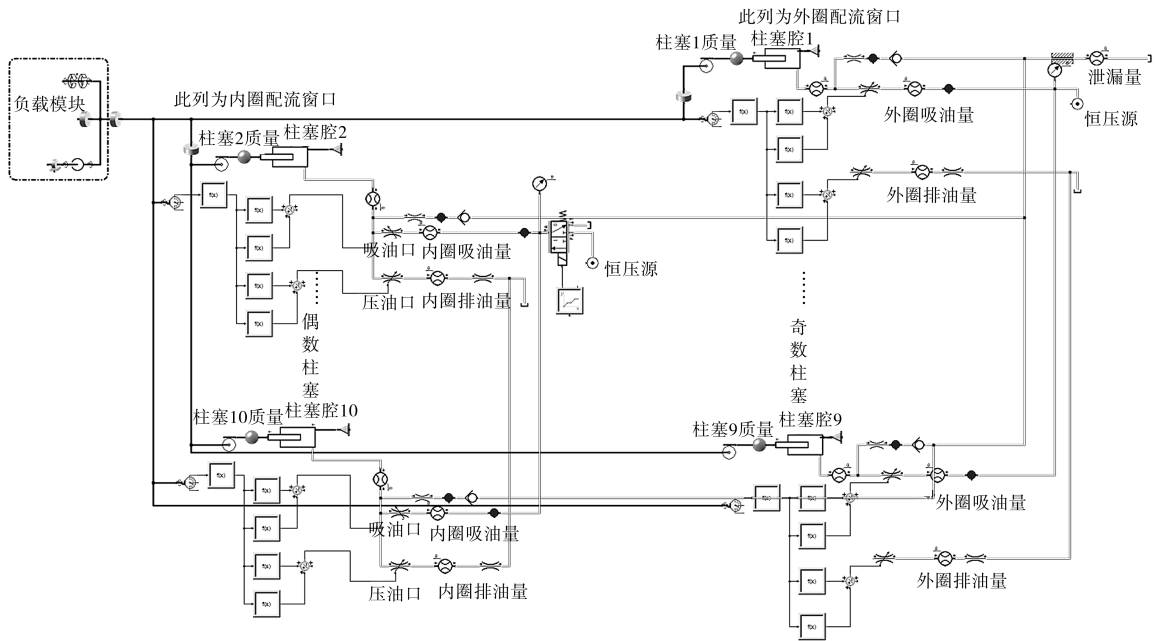


图 8 四配流轴向柱塞马达的 SimulationX 模型四配流轴向柱塞

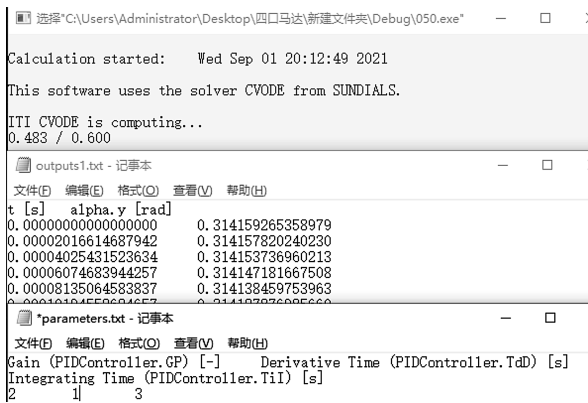


图 9 可执行仿真文件、参数文件和输出文件

3.2 粒子群算法的目标函数

构建变排量四配流轴向柱塞马达并行优化仿真时,粒子群目标函数定义为斜盘角度响应的跟踪误差。

笔者采用的粒子群算法的速度进化方程为:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2r_2(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (5)$$

式中: i —微粒 i , $i = 1, 2, 3 \dots n$, n 为群体中的微粒数; j —微粒的第 j 维, $j = 1, 2, 3 \dots D$; t —微粒的进化代数; $v_{ij}(t)$ —第 t 代时微粒 i 在第 j 维方向上的速率; w —惯性权重; c_1 —认知系数,用于调节微粒飞向自身最好位置方向的步长; r_1, r_2 —两个相互独立服从均匀分布的随机数,一般取 $r_1 = r_2$; $p_{ij}(t)$ —前 t 代进化中微粒 i 在第 j 维方向上的个体历史最优位置; $x_{ij}(t)$ —第 t 代时微粒 i 在第 j 维方向上的位置; c_2 —社会系数,用于调节微粒向全局最好位置飞行的步长; $p_{gj}(t)$ —前 t 代进化中所有微粒在第 j 维方向上的群体历史最优位置。

对于最小化问题而言,个体历史最优位置 $p_{ij}(t+1)$ 目标函数值越小,相应的适应值就越好,其更新方程为:

$$p_{ij}(t+1) = \begin{cases} p_{ij}(t) & f(x_{ij}(t+1)) > f(p_{ij}(t)) \\ x_{ij}(t+1) & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

群体历史最优位置 $p_{gj}(t+1)$ 更新公式如下:

$$p_{gj}(t+1) = \arg \min \{f(p_{ij}(t))\} \quad (7)$$

在进化过程中,为了尽可能地减少微粒离开搜索空间的可能性,通常将 v_{ij} 限定在一定范围之内,即 $|v_{ij}(t+1)| \leq v_{max}$, (式中, v_{max} —微粒的最大速度上限)。

相应地,微粒 i 的位置进化方程为:

$$x_{ij}(t+1) = v_{ij}(t+1) + x_{ij}(t) \quad (8)$$

四配流轴向柱塞马达并行优化仿真中,标准粒子群算法的执行流程见图 7。

3.3 变排量四配流轴向柱塞马达并行优化仿真

基于粒子群算法的变排量四配流轴向柱塞马达并行优化仿真程序采用 C++ 编写,其 MFC 界面简洁,可实现可视化和参数化,程序界面如图 10 所示。

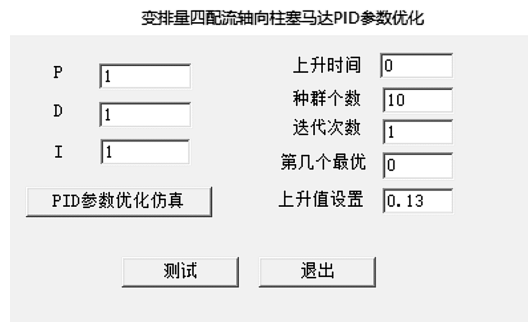


图 10 柱塞马达并行优化仿真程序界面

在 0.6 s 的相同仿真时间条件下,笔者进行了仿真效率对比。其中,工作站的主要参数如表 2 所示。

表 2 工作站的主要参数

操作系统	处理器型号	内存(RAM)
Windows10 X64	Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU@2.9GHz	8.00 GB

在表 2 的运行条件下,仿真效率对比情况如表 3 所示。

表 3 仿真时间对比。

	Simulation X 仿真平台运行	单个独立可执行文件运行	基于粒子群并行仿真程序
时间	95 s 左右	16 s 左右	20 次迭代共 7 min
单个耗时	95 s 左右	16 s 左右	21 s

由表 3 可知:就单个运行时间而言,与 Simulation X 仿真平台运行时间相比,其效率提高了 10 倍以上;与单个独立的可执行程序相比,其效率提高了 5 倍;

相较于普通的 PID 参数整定,它实现了脱离仿真软件调整 PID 参数、自动寻找最优 PID 参数的目的,解决了手动调整所造成的参数调整繁琐,无法做到参数自动调整的问题;并且其仿真效率提升较为明显。

基于粒子群并行仿真程序,经过 1 轮迭代,即 20 次可执行文件运行(10 次初始化、10 次优化),可以得到不同迭代次数的跟踪误差图,如图 11 所示。

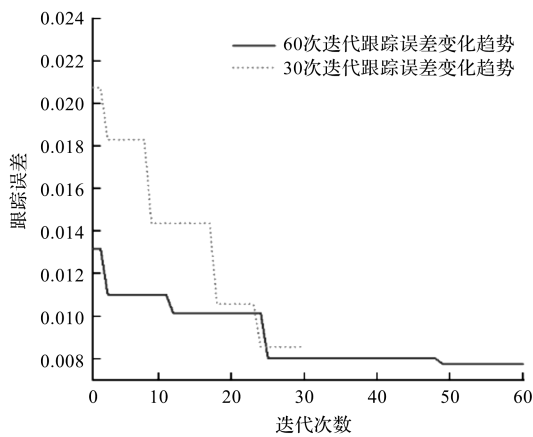


图 11 迭代 60 次与迭代 30 次跟踪误差图

从图 11 中不难发现:迭代 60 次与迭代 30 次,其跟踪误差值随着迭代次数的增加反而越来越小。

在每次迭代之后都会产生一组 PID 参数,每一组的参数都对斜盘倾角有影响,其控制曲线如图 12 所示(图中为 3 组不同 PID 参数对斜盘倾角的影响)。

由图 12 可知:在未对 PID 参数进行改进时,斜盘倾角出现超调现象;30 次迭代产生的 PID 参数虽然减小了超调量,但其响应时间变长;进行 60 次迭代产生的 PID 参数对斜盘角度的控制效果最佳,既减小了 21% 的超调量,又不影响系统的响应时间。

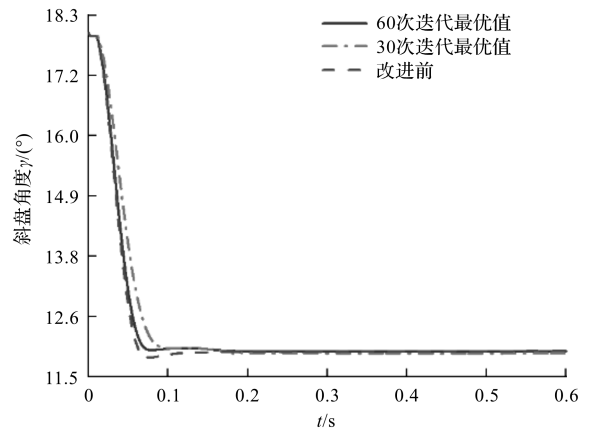


图 12 不同迭代次数对斜盘倾角的影响

因此,此处得到最佳的 PID 控制参数为: $P = 0.66, I = 0.01, D = 3.61$ 。

在 0 s 到 1.3 s 时,单侧供给 20 MPa 高压油驱动马达;在 1.3 s 后,另一侧开始供给 15 MPa 高压油,两侧同时供给对马达进行二次增速处理;从 3 s 开始,通过 PID 控制斜盘倾角,使其摆角减小,并进行 3 次增速处理。

PID 调控下的马达转速如图 13 所示。

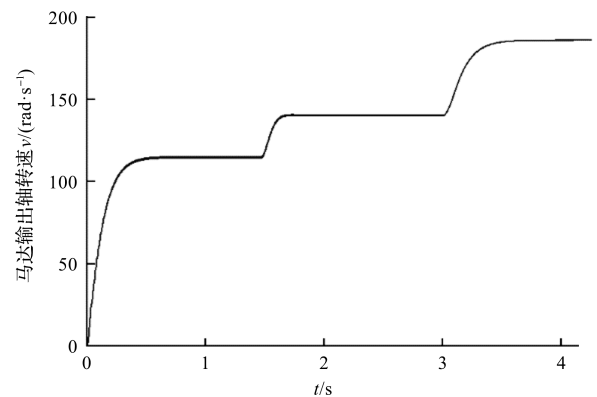


图 13 PID 调控下的马达转速

图 13 中,在输入流量一定的情况下,减小其斜盘倾角,可使得马达转速进一步提高,而且马达转速平稳^[20]。

同时,在上述调速过程中,通过观察柱塞腔的压力,可以得到柱塞腔压力比较图^[21],如图 14 所示。

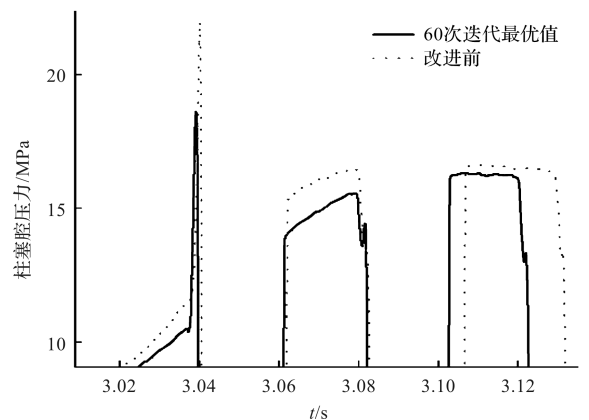


图 14 柱塞腔压力比较图

由图 14 可以看出:经过 PID 参数优化后,柱塞腔压力峰值比优化前(有超调现象)的压力峰值降低了 3.4 MPa。

4 结束语

为了解决四配流轴向柱塞马达变量机构的控制参数整定问题,笔者提出了一种基于粒子群算法(PSO)的并行协同设计方法。首先,采用 PID 对四配流轴向柱塞马达斜盘倾角进行了闭环控制;然后,采用 Simulation X 搭建了变排量四配流轴向柱塞马达和阀控变量机构的模型;最后,提出了一种基于粒子群算法的并行协同设计方法,解决了四配流轴向柱塞马达变量机构控制参数整定问题。

研究结果表明:

(1) 基于粒子群算法的并行协同设计方法可以脱离专业仿真软件,实现 PID 控制参数自动寻优整定;相较于其他专业仿真平台,其系统运行效率得到了提升;

(2) 与未经优化控制参数的系统相比,优化控制参数后,马达斜盘摆角的超调量减少了 21%,马达柱塞的压力冲击减小了 3.4 MPa,马达转速平稳(可为后续开展物理样机试验提供参考)。

在后续的研究过程中,笔者将从物理样机的角度出发,研究变排量四配流轴向柱塞马达的实际工作特性;同时,将其放入液压挖掘机的回转平台系统中,开展挖掘机动能回收利用方面的研究。

参考文献(References):

- [1] 王 猛,王毅然,高有山,等. 四配流窗口轴向柱塞马达机液耦合仿真分析[J]. 液压与气动,2021,45(6):26-32.
- [2] 高有山,程冬宏,孙宣德. 基于 AMESim 的四配流窗口轴向柱塞马达仿真研究[J]. 液压与气动,2019(8):1-5.
- [3] 刘 洋,程 珩,杨泉雄,等. 基于虚拟样机的轴向柱塞马达特性及振动机制分析[J]. 机床与液压,2021,49(16):1-7,16.
- [4] 曾祥彬. 轴向柱塞马达变量机构及配流特性的研究[D]. 福州:福州大学机械工程及自动化学院,2014.
- [5] WU Tie-zhou, ZHOU Cui-cui, YAN Zhe, et al. Application of PID optimization control strategy based on particle swarm optimization (PSO) for battery charging system[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2020(11):528-535.

- [6] TANDAN N, SWARNKAR K K. Tuning of PID controller using PSO and ITS performances on electro- hydraulic servo system[J]. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2015(4):233-235.
- [7] YI Ye, CHEN Bo-yin, YUE Gong, et al. Position control of nonlinear hydraulic system using an improved PSO based PID controller[J]. *Mechanical System and Signal Processing*, 2017,15(1):241-259.
- [8] 成 杰. 四配流窗口轴向柱塞马达配流理论及特性研究[D]. 太原:太原科技大学机械工程学院,2017.
- [9] LUO Q Z, AN A M, ZHANG H C, et al. Non-linear performance analysis and voltage control of MFC based on feed-forward fuzzy logic PID strategy[J]. *Journal of Central South University*, 2019(12):3359-3371.
- [10] PADULA F, VISIOLI A. Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers[J]. *Process Control*, 2011,21(1):6981.
- [11] 宋志安. MATLAB/Simulink 与液压控制系统仿真[M]. 国防工业出版社,2012.
- [12] 陈 帅,汪成文,张震阳,等. 改进模糊 PID 方法及其在电液伺服控制中的应用[J]. 机电工程,2021,38(5):559-565.
- [13] 孙维超,陆宝春,孙祥青. 基于 PID 控制的粉末成型机下冲回弹装置设计[J]. 机电工程,2016,33(12):1492-1495.
- [14] 高 成,庞家腾. 基于遗传算法对 PID 控制器参数的整定[J]. 现代信息科技,2019,3(2):171-172.
- [15] 马浩兴,王东红,罗文龙. 基于多种群遗传算法的液压系统 PID 参数寻优[J]. 包装工程,2020,41(23):204-210.
- [16] 胡迪锋,周向阳,刘 瑛. 一种面向无模型系统的 PID 参数整定法[J]. 控制工程,2020,27(11):1962-1969.
- [17] 陈 林,王恒家,王化明,等. 基于改进粒子群算法的船舶航向 PID 控制研究[J]. 浙江海洋大学学报:自然科学版,2020,39(3):252-257.
- [18] 陶周亮,方建义,苗红涛. Simulation X 二次开发在起落架着陆性能分析中的应用[J]. 中国科技信息,2020(11):30-31.
- [19] 肖仕红,沈亚坤,刘立新,等. 水下液压控制系统浅水测试专用仿真测试软件[J]. 机电工程,2015,32(10):1385-1389.
- [20] 刘海洋,张钰浩,李广超. 三通道特斯拉阀门结构设计与优化[J]. 轻工机械,2020,38(3):59-64.
- [21] 黄 文. 基于电液力伺服系统的液压阀控缸自抗扰控制研究[J]. 液压气动与密封,2020(9):13-16,20.

[编辑:雷 敏]

本文引用格式:

卫立新,张 瑞,周 围,等. 基于粒子群算法的阀控变量机构控制参数优化[J]. 机电工程,2022,39(8):1118-1124.

WEI Li-xin, ZHANG Rui, ZHOU Wei, et al. Optimization of control parameters of valve-controlled variable mechanism based on PSO[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022,39(8):1118-1124.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>