DOI:10.3969/j.issn.1001 -4551.2015.03.009

基于遗传算法的计量泵投料系统优化*

丁言丰,余世明*
(浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310023)

摘要:针对计量泵投料系统的多泵协同工作问题,提出了带精英选择和个体迁移的多目标遗传算法的优化调度方法。对每一台泵的工作状态和流量进行了合理地调度,使系统整体运行达到最优。在系统运行过程中,将实际流量与目标流量之差的平方最小作为系统的第一目标,将系统的总功耗最小作为第二目标,建立了投料系统优化问题的数学模型。利用 Matlab 平台编写优化调度算法,进行了算法有效性和可行性的分析。最后结合实际系统,将算法用 Java 语言实现,并嵌入到实际系统中。Matlab 仿真实验结果表明,遗传算法经过 15 ~20 代的迭代运算之后,就可以对目标流量为 800 L/H 进行合理地流量优化分配,还能有效地降低系统的总功耗,满足实验的设计需求。实际系统的运行结果表明,该优化调度算法执行效率高,优化效果明显。

关键词:计量泵投料系统;优化调度;多目标;遗传算法
中图分类号:TH38;TH39;TP312 **文献标志码**:A **文章编号**:1001 -4551(2015)03 -0343 -06

Optimal of metering pump feeding system based on genetic algorithm

DING Yan-feng, YU Shi-ming
(College of Information and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the problem that the multi-pump synergy work of metering pump feeding system, an optimized scheduling with elitist selection and individual migration of multi-objective genetic algorithm was put forward. The work state and flow of each pump were scheduled reasonably to make the whole system operating optimal. The squared minimum of difference between the actual and the targeted flow was regarded as the first target, and the minimum total system power consumption was regarded as the second in operation. The mathematical model of feeding system optimization was established. Firstly, the optimized scheduling algorithms was written using Matlab platform to analyze the effectiveness and feasibility of the algorithm. The Matlab simulation results indicate that the genetic algorithm after 15 ~20 generations iteration, you can target the flow of 800 L/H reasonable flow optimization allocation, but also effectively reduce the total power consumption of the system to meet the needs of the experimental design. Finally, combined with real system, the algorithm was implemented in Java language and embedded into the real system. The operation of real system indicate that the optimal scheduling algorithm implementation of high efficiency, optimize the effect is obvious.

Key words: metering pump feeding system; optimal scheduling; multi-objective; genetic algorithm

0 引 言

计量泵投料系统在石油产品的加工、化工原料配料混合和各种药物的配料生产中得到了广泛的应用[1]。有些化工生产时具有强酸、强碱,人工不方便操作,计量泵投料系统的使用不仅提高了产品的生产效率,而且产品生产更加安全。在生产过程中往往需要几台或者几十台泵分别投入不同的物料进行混合搅拌来生产出一种产品。为了使生产的产品质量得到保证,研究者必须对每一台泵的流量进行优化调度,同时

收稿日期:2014 -10 -31
基金项目:浙江省重大科技专项计划资助项目(2011C11089)
作者简介:丁言丰(1989 -),男,浙江宁波人,主要从事嵌入式系统开发以及 PC 端应用软件开发方面的研究. E-mail:dyf20081124@126.com
通信联系人:余世明,男,教授,硕士生导师. E-mail:ysm@zjut.edu.cn

需要保证每台泵都能够在高效区运行,使每一台泵的性能达到最优。本研究将实际的总流量和目标流量差的平方最小作为第一目标,来保证产品的质量。如今有超过 40% 的工业过程都需要泵系统来完成特定的任务[2]。在系统的工作过程中,计量泵的耗能占主要比重。在此基础上,为了使整个泵组的损耗最小,就必须保证泵组工作在最佳运行状态。本研究将此作为第二目标进行优化调度。

上述描述的为多目标求解问题,对于多目标优化问题,传统的求解方法有主要目标法、同一目标法、功效系数法、分层序列法,但求解起来计算效率低、精度差,无法满足要求。遗传算法借鉴生物界自然选择和自然遗传学机理能够进行迭代自适应概率性搜索,跳出局部最优,能够以比较大的概率获得全局最优解[3-4]。同时遗传算法具有思想简单、易于实现、算法健壮等优点[5],适合求解多目标复杂的优化问题。

本研究用 Java 软件实现该计量泵投料系统的优化调度的界面和遗传算法,通过遗传算法求解最佳运行的流量分配,来远程控制各台泵的运行和参数的设置,从而使系统达到最优。

1 投料系统优化运行的数学模型

1.1 投料系统结构体系图

整个系统主要可以分为 3 个组成部分,用户交互层、数据传输层和现场控制层。用户交互层是可视化的用户操作界面,用户可以通过专用的软件实现现场计量泵的优化调度、现场数据展现,还可以实现远程的控制。数据传输层实现的是以太网数据和 CAN 数据的交互和传输。现场控制层实现了计量泵工业现场的各种物料的直接投加、同时也可以展现现场数据。系统的结构框架如图 1 所示。

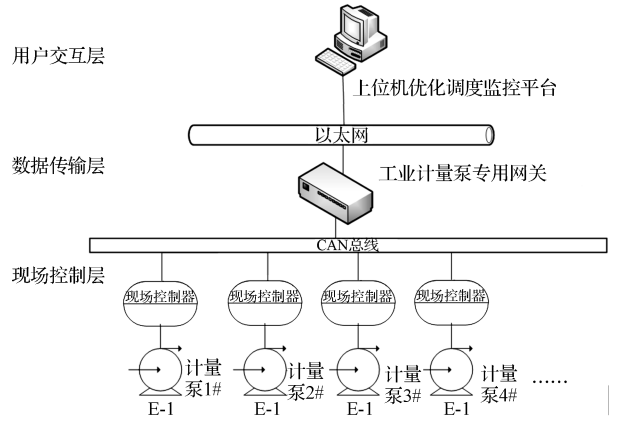

图 1 投料系统的系统结构框图

1.2 计量泵性能曲线拟合

计量泵在投料体统中是关键的设备,其性能主要包括流量与轴功率($Q-P$)、流量与扬程($Q-H$)、流量与效率($Q-\eta$)这 3 条曲线。本研究主要研究流量与轴功率的拟合曲线。计量泵在额定转速下的 $Q-P$ 曲线可表示为[6]:

$$P_0 = \mathrm{A} + \mathrm{B}Q_0 + \mathrm{C}Q_0^2 \tag{1}$$

式中:A,B,C—拟合参数。

由于该系统主要用的是调速泵,调速泵的比率为:

$$Q/Q_0 = S, P/P_0 = S^3 \tag{2}$$

式中:S—调速比,$S = n/n_0$;Q_0, P_0, Q, P—额定转速 n_0 和转速 n 下的流量和功率。

由式(1,2)可得调速泵的性能曲线为:

$$P = \mathrm{A}S^3 + \mathrm{B}S^2Q + \mathrm{C}SQ^2 \tag{3}$$

上述的计量泵性能曲线为优化问题数学模型的基础,为求解优化问题得到数学描述。

1.3 投料系统目标函数

对于生产一种特定的产品,一个投料系统需要 n 种物料进行一定比例的投加混合后,以一定的流量 Q 排入特定的容器中进行搅拌。本研究对于每一种物料的投加都使用特定的调速泵来完成这一投料任务,在投料过程中可以有多台泵同时投加一种物料,也可以单独一台泵投加一种物料。对那些多台泵同时投加一种物料的计量泵,本研究要进行流量的合理分配和调度,使每一台泵工作在最佳状态。每一种物料的流量用 Q_{mi} 表示,其中 i 表示第几种物料。为了满足所设定的目标流量 Q,需要对每一台泵的流量进行合理的调度,使实际总流量与目标总流量的差的平方最小,并且使每一台泵工作在高效区,来达到投料系统的总耗能最小。

第一目标函数为:

$$\mathrm{Min}f_1(x) = \left| \left(\sum_{i=0}^{n} Q_{mi} \right) - Q \right|^2 \tag{4}$$

该目标函数表明了每一种物料的流量总和与目标设定流量之差的平方最小。同时反映了该产品的生产质量,目标函数的值越小,产品质量就越高。

第二目标函数为:

$$\mathrm{Min}f_2(x) = \sum_{i=0}^{n} A_iS_i^3 + B_iS_i^2Q_i + C_iS_iQ_i^2 \tag{5}$$

该目标函数反映了每一台计量泵的功耗的总和,为了节省系统的生产成本,系统的总功耗要尽量的小。

1.4 投料系统约束条件

(1)物料比例:对于上面的假设,每一种产品都有

几种物料混合,所以物料之间有一个比例关系的约束:

$$K_i Q_{m1} = Q_{mi} \quad i = 2,3,4\cdots n;$$

$$Q_{tol} = \sum_{i=1}^{n} Q_{mi}$$

(2)物料的流量范围:每一种物料的流量可以波动的范围:

$$Q_L \leqslant Q_{mi} \leqslant Q_H$$

(3)调速比:为了使计量泵工作稳定,计量泵的转速不宜过低或者过高,所以调速比需要得到约束:

$$S_{min} \leqslant S_i \leqslant S_{max}$$

(4)流量:为了使每一台计量泵都能工作在最高运行效率范围内,对流量也要进行一定的约束:

$$Q_{min} \leqslant Q_i \leqslant Q_{max}$$

其中:K_i—常数,每一种物料的流量和第一种物料的比例关系;Q_{m1}—其中的第一种物料的流量;Q_{mi}—第 i 种物料的流量,根据流量的比例关系可以有一定的波动范围;Q_{tol}—系统的实际总流量;Q_L,Q_H—每种物料流量可以波动的范围;Q_L—该物料所需流量的最小值,Q_H—该物料所需流量的最大值,为流量的弹性约束;S_i—各台泵的调速比;S_{min}—最小调速比限制;S_{max}—调速比的上限值;Q_i—各台泵的流量;Q_{min},Q_{max}—最小和最大允许的流量分配,为流量的刚性约束。

当流量分配为零时,表示计量泵工作状态为停机、不工作状态。

显然该系统的数学模型既含有等式约束、又含有不等式约束,而且目标函数有多个,该系统是一个多目标非线性的复杂优化问题。用一般的多目标求解方法、主要目标函数法、功效系数法等求解比较复杂、而且精度也不高。考虑到遗传算法基于自然选择和遗传学机理的全局搜索性能,高效、鲁棒性强,所以本研究用遗传算法来求解该优化问题。

2　遗传算法的应用

2.1　遗传算法概述

遗传算法模拟种群遗传的机制和自然生存适应的原则,在每次迭代中保留一组优选解,并按某种指标从解群中选取较优的个体,利用一些遗传算子对其进行运算,产生新一代的候选解群,重复该过程,直到满足某种收敛指标为止[7]。

从上述的定义可以了解到遗传算法在求解复杂优化问题上比起传统方法的优势,所以本研究采用遗传算法来求解投料系统的优化问题是合适的选择。

2.2　遗传算法求解多目标优化模型

在多目标优化中,由于各个目标之间的解是无法相互比较,有可能是互相冲突和矛盾的,要使得各个目标都取得最优解是不太现实的,也是比较困难的。所以多目标问题的解一般为一组 Pareto 最优解集[8]。

根据上述分析的投料系统的目标函数和约束条件,笔者采用带精英选择和个体迁移的多目标优化的遗传算法来求解系统的 Pareto 最优解集[9],算法的具体步骤的程序流程如图 2 所示。

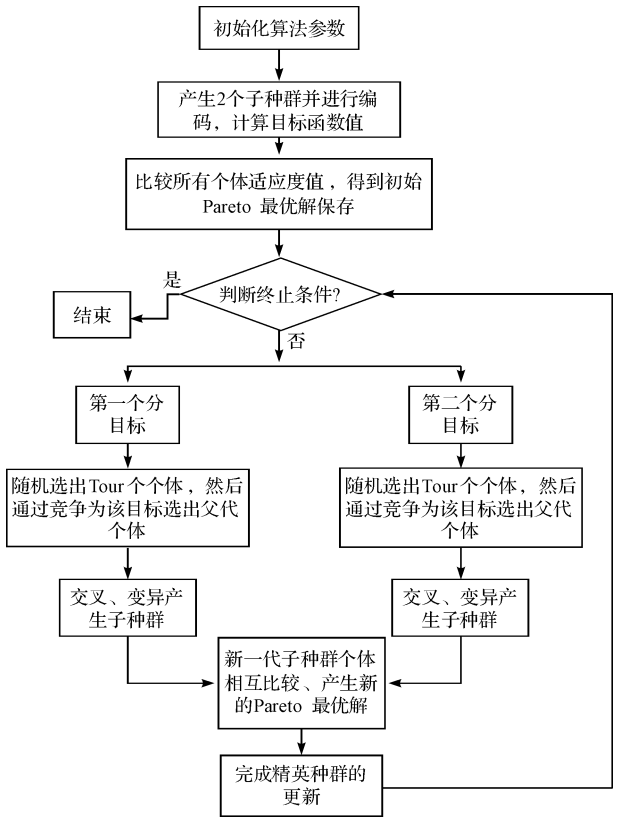

图 2　多目标优化遗传算法流程图

根据投料系统的实际情况,该系统优化问题的染色体采用实数编码,更加符合自然界的遗传特点,比起标准遗传算法中的二进制编码串长会缩短,计算量会大大减少。而且在计算精度方面也会有所提高。

适应度函数的选取是采用对目标函数做相应处理来获得:

$$F(x) = \frac{1}{f^2(x) + 0.001} \tag{6}$$

在适应度函数中加上 0.001 是为了防止 $f(x)$ 的零点的存在,$F(x)$ 值越大,表示适应度越强,$F(x)$ 值越小,表示适应度越弱。

个体的选择算子采用锦标赛的竞赛选择方式,基本思想为每次选取的几个个体中选择适应度最高的个体直接保存到下一代种群中。

个体的交叉算子采用单点交叉、变异算子采用均匀变异。当系统中一种物料由多台泵同时投加时,如果是对于该物料的基因交叉和变异操作,就必须同时交叉和变异这一组泵的基因。这样更好地保证了遗传到下一代基因的有效性,使算法的收敛速度加快,并且最终得到的 Pareto 最优解更加准确。

3 Matlab 仿真实验结果分析

为了检验带精英选择和个体迁移的多目标优化遗传算法对投料系统优化调度的有效性,本研究先在 Matlab 平台下验证。通过目标函数值的变化情况来分析遗传算法优化调度的可行性和合理性。

假设某种产品由 3 种物料混合加工而成,实验中产用 4 台型号为 GM5000/0.3 的隔膜式变频计量泵来作为投料的流量控制机构,1 号泵和 2 号泵用来控制投入物料 m_1,3 号泵用来投入物料 m_2,4 号泵用来投入物料 m_3。实验针对的是投料系统目标总流量为 800.0 L/H 时的流量优化调度任务,假设 3 种物料的投放比例为 m_1: m_2: m_3 = 2: 1: 1,遗传算法的参数设定如表 1 所示。

表 1 遗传算法参数设定

算法的参数设定名称	算法参数设定值
目标子种群规模 *Popsize*	50
交叉概率 P_c	0.9
变异概率 P_m	0.2
竞赛规模 *Tour*	5
最大终止迭代次数	50

笔者利用 Matlab 平台编写优化调度算法,可以得出 Matlab 软件实现算法仿真的部分仿真图如图(3 ~ 5)所示。

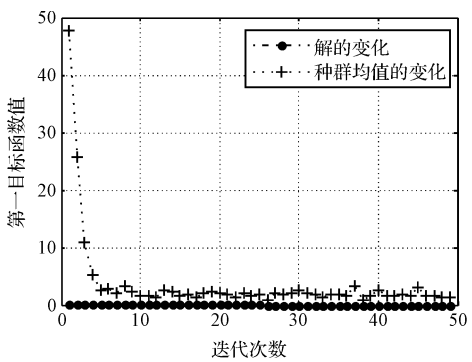

图 3 第一目标函数值的变化

其中,图 3 和图 4 反映了随着遗传进化代数的增加,目标函数值的变化情况和每一代中解的平均值的变化情况。从图 3、图 4 中的曲线可以看出随着进化代数增加,两个目标函数的解都开始收敛于某一个数值,说明遗传算法在处理该优化调度问题方面是可行、合理的。图 5 则说明两个目标函数之和的解的变化和平均值的变化。在算法执行结束之后可以顺利地得到一组 Pareto 最优解集,该解集就可以作为系统最后的优化调度的结果,进行流量的合理分配。

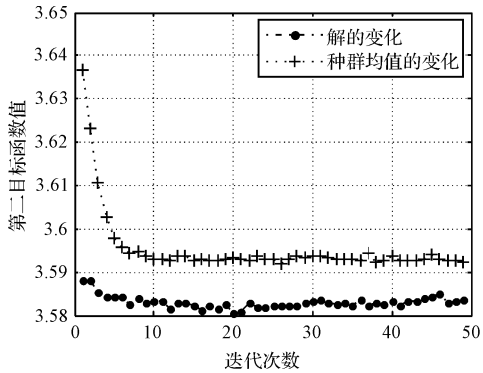

图 4 第一目标函数值的变化

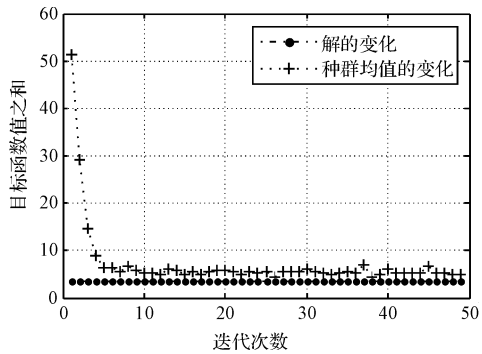

图 5 两个目标函数值之和的变化

由于该多目标问题有大量的 Pareto 最优解,仿真的部分流量最优分配关系如表 2 所示。各台计量泵的流量分配分别为 Q_1、Q_2、Q_3 和 Q_4,其中 Q_1 与 Q_2 为 m_1 的总流量,Q_3 和 Q_4 为 m_2 和 m_3 的流量。

表 2 部分流量优化分配结果

流量/(L · H^{-1})	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
1	190.2	209.5	200.2	200.1
2	190.4	209.5	200.2	199.9
3	188.0	209.7	200.3	200.1
4	188.3	209.5	200.1	200.2

4 优化调度的软件实现

4.1 优化调度软件设计

该软件是针对计量泵投料系统的优化调度控制而开发的。软件整体可以分为算法调度优化、通信配置、设备控制、参数设置、动态流程等模块。软件的优化调度界面设计是在 Eclipse 平台下采用 Java 中的 Swing 组件来完成[10],Swing 有非常好的定制性,它提供了可

编程渲染的模型,使用户可以对渲染细节进行控制,可以很好地反映系统的动态流程过程。Swing 扩展性强,通过接口的方式使用各个定制框架。使得通信配置可以方便的通过 Appache 的 Mina 网络框架与嵌入式工业网关进行数据的良好通信[11]。优化调度控制主界面如图 6 所示。

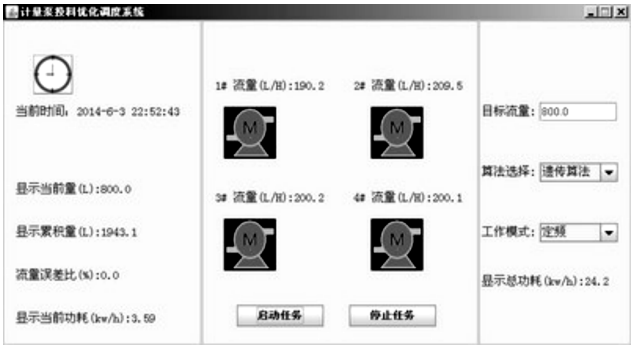

图 6　计量泵投料系统优化调度界面

优化算法用 Java 编写遗传算法 GeneAlg 类嵌入到系统中。在预先设定的流量要求下,系统通过遗传算法,即 GeneAlg 类,计算出合理的流量分配值。然后根据优化的结果,给每一台计量泵设置合理的参数后,启动需要工作的计量泵。同时监控界面会显示每一台计量泵的工作状态和流量、故障等信息。

4.2　遗传算法类的设计

该软件的重要部分就是 GeneAlg 类的编写。GeneAlg 类实现了各种遗传所需的遗传算子和遗传所需的一些行为方法。主要包括以下这些内容:

(1)定义染色体的编码结构,系统中以实数编码,群体的规模 *Popsize*、交叉概率 P_c,变异概率 P_m,锦标赛竞赛规模 *Tour*,连续迭代次数 T_m,各个目标函数的精度,保存 Pareto 最优解的数组等。

(2)在遗传过程中各种功能函数的定义,包括初始化种群的函数,选择、交叉、变异的函数、适应度函数、随机产生概率的函数、更新比较解集产生最新 Pareto 函数、优化控制函数等。用 java 实现的算法的部分程序代码如下:

```
//单个个体
public class Inidividual {
char[ ] chrom = new char[ Constant. CHRLEN];
double value;
double fitness;
}
public static void main(String args[ ]){
        generation = 0;
        //创建算法类
        GeneAlg gas = new GeneAlg ( );
        //种群初始化
        gas. generateInitialPopulation( );
        //种群进化
        gas. EvaluatePopulation( );
    while( generation < 50)
    {
        generation + + ;
        //产生下一代种群
        gas. GenerateNextPopulation( );
        //种群进化
        gas. EvaluatePopulation( );
        //复制最优种群
        gas. PerformEvalution( );
        //输出结果
        gas. OutputTextReport( );
    }
}
```

4.3　投料系统运行实验结果

计量泵投料系统在不同目标流量下,通过遗传算法类的优化调度运行结果如表 3 所示。

表 3　不同目标流量实验运行结果

目标流量/(L·H^{-1})	600	800	1 000	1 200
Q_1/(L·H^{-1})	140.6	180.5	249.5	299.8
Q_2/(L·H^{-1})	160.8	210.4	250.8	300.2
Q_3/(L·H^{-1})	150.2	199.5	248.4	300.2
Q_4/(L·H^{-1})	150.3	200.2	253.2	300.1
流量误差比/(%)	0.31	1.17	0.19	0.03
实际功耗/(kW·h^{-1})	2.42	3.59	4.43	5.86

5　结束语

计量泵在投料系统中的广泛应用,使得本研究对于在该系统中的流量控制、能量消耗需要进行合理地优化调度,使系统的整体性能达到最优。经过上述的优化调度后,系统的能耗降低 5% 左右。在求解多目标优化问题上,由于传统的求解方式过于复杂且优化精度不高,该系统在优化过程中采用遗传算法不但能

(下转第 357 页)

本文引用格式:

丁言丰,余世明. 基于遗传算法的计量泵投料系统优化[J]. 机电工程,2015,32(3):343 - 347,357.

DING Yan-feng, YU Shi-ming. Optimal of metering pump feeding system based on genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(3):343 - 347,357.

《机电工程》杂志:http://www. meem. com. cn