文章编号：1006-1355(2019)03-0073-05+102

基于Taguchi改进算法的脱水机悬挂系统参数优化研究

陈 剑[1,2]，何俊杰[1,2]，李士爱[1,2]，高彬彬[1,2]，王开明[1,2]

(1. 合肥工业大学 噪声振动工程研究所，合肥 230009；
2. 安徽省汽车NVH工程技术研究中心，合肥 230009)

摘 要：高速脱水机减振悬挂系统是其工作状态下抑振性能的基本保证，其中悬挂系统参数的波动更是直接影响高速脱水机的抑振效果。利用高速脱水机的动力学模型建立其筒体振幅的响应面模型，以该响应面模型为优化目标，悬挂系统参数为优化对象，分别采用传统遗传算法和基于Taguchi改进方法的混合遗传算法进行参数优化。对两种优化方法应用蒙特卡洛法进行算法分析。基于优化结果，开展高速脱水机多工况筒体振动试验研究，并进行对比验证。结果表明，基于Taguchi改进方法的混合遗传算法具有更优的精确性和稳健性，对于工程应用具有指导意义。

关键词：振动与波；高速脱水机；悬挂系统；混合遗传算法；Taguchi方法；抑振

中图分类号：TH113.1 **文献标志码：**A **DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1355.2019.03.014

Parameters Optimization Research of Vibration Suspension System of Dehydrators based on Taguchi Improved Algorithm

CHEN Jian[1,2], *HE Junjie*[1,2], *LI Shiai*[1,2], *GAO Binbin*[1,2], *WANG Kaiming*[1,2]

(1. Institute of Sound and Vibration Research, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Automotive NVH Engineering Technology Research Center, Hefei 230009, China)

Abstract : The vibration damping suspension system of the high speed dehydrator is the basic guarantee of its vibration suppression performance, and the fluctuation of the suspension system parameters directly affects the vibration suppression effect of the high speed dehydrator. Based on the dynamic model of the high speed dehydrator, the response surface model for the barrel amplitude analysis is established. With the response surface model as the optimization target, the parameters of the suspension system are optimized by using the traditional genetic algorithm and hybrid genetic algorithm based on the Taguchi improved method respectively. Monte Carlo method is applied to analyze the two optimization methods. Based on the optimization results, the vibration test of the high speed dehydrator under various operating conditions is carried out. The computation results are compared with those of the test. The results show that the hybrid genetic algorithm based on Taguchi improvement method has better accuracy and robustness, and has guiding significance for engineering applications.

Keywords : vibration and wave; high speed dehydrator; suspension system; hybrid genetic algorithm; Taguchi method; vibration suppression

高速脱水机脱水过程的振幅大小是消费者购买时最直观的感受，也是评价其性能指标的重要因素。对高速脱水机的悬挂系统参数进行抑振优化，无疑会增加高速脱水机的市场竞争力，对于我国的高速脱水机开发起到十分有效的促进作用[1]。

高速脱水机的悬挂系统参数优化研究与洗衣机、汽车悬置系统的参数优化研究方法上具有通用性。文献[2]通过序列二次规划算法和广义简约梯度法两种方法，对滚筒洗衣机动态特性进行优化对比。文献[3]以汽车动力总成悬挂系统6自由度解耦为目标函数，使用遗传算法求解悬挂系统的全局最优解。文献[4]采用响应面法构建驾驶室内声压级的2阶多项式近似模型，使用遗传算法进行模型优化。文献[5]选用遗传算法进行悬挂系统刚度参数初步优化，以信噪比作为评价指标采用Taguchi方法进行多次稳健优化。

遗传算法是一种通用的全局优化搜索算法[6]，应用领域广泛，发展成熟。但是遗传算法本身随机算法的性质和不确定性规则，导致其容易陷入局部最

收稿日期：2018-07-16

作者简介：何俊杰（1995-），男，安徽省六安市人，硕士研究生，主要研究方向为NVH与CAE分析。

通信作者：陈剑，男，教授，博士生导师。
E-mail: hfgd8216@126.com

优解且优化结果不稳定。本文选用振幅的响应面函数作为优化目标，结合Taguchi方法对传统遗传算法进行嵌入式替换改进。优化完成后与传统遗传算法的优化结果对比验证该方法的有效性，并通过高速脱水机筒体振动实验进行验证，对工程应用具有指导意义。

1 算法理论

1.1 遗传算法优化

遗传算法(Genetic Algorithm，GA)[7]是由Holland等发扬而来的一种通过模拟生物进化过程，按照适者生存原则对染色体进行选择，并进行若干次迭代获取最优解的全局优化搜索算法。

1.2 Taguchi正交优化

Taguchi正交试验法是一种利用正交表来进行试验条件选择和多因素组合的试验方法，可以用较少的试验次数获取最佳的多因素多水平组合形式。设计因子的选择及变量的水平划分根据试验需求具体决定。

1.3 改进的混合遗传算法

其本质即用Taguchi正交优化代替传统遗传算法中的染色体变异过程。降低算法的不可靠性，剥夺局部最优值对整个种群的控制权，得到更优参数组合的父代染色体。

采用Taguchi正交优化进行嵌入式替换改进，引入评价指标D来描述正交表L_m方案的优劣性。即选择每一代父代染色体中前10 %的个体适应度值作为基准$F_n\left(1\leqslant n\leqslant \dfrac{N}{10}\right)$($N$为染色体总个数)。逐一对前10 %适应度值的父代染色体进行衍生操作。任意一个拥有i个节点的父代染色体$c_n\triangleq\left[x_1,x_2,\cdots,x_i\right]$的所有节点值按照Taguchi正交表的因素水平进行重新赋值，生成m个衍生染色体，每个衍生染色体的适应度值f_{nk}用来计算评价指标$D_{nk}(1\leqslant k\leqslant m)$，评价指标具有望小特性。采用最优评价指标的衍生染色体替换原本所选的父代染色体。第n个父代染色体的第k组正交组合的评价指标D_{nk}计算公式的具体表达形式为

$$D_{nk}(f_{nk},\ F_n)=f_{nk}-F_n,\quad 1\leqslant k\leqslant m \tag{1}$$

将脱水机振动模型与遗传算法优化模型建立联系。染色体的节点值即为脱水机3个自由度方向的刚度和阻尼$\{x,y,z,u,v,w\}$，每个节点编码相互独立且顺序固定。适应度函数的构建采用响应面法，本文选取振幅数值为适应度函数$f(x,y,z,u,v,w)$，其数值直接反映振动偏移程度，具有望小特性。衍生染色体与原染色体对比时，遵循特性接收准则，选择两种染色体中评价指标较小者接收，接收的染色体占据原染色体在染色体群中的编码位置。另一个染色体舍弃。

采用改进的混合遗传算法(Hybrid Genetic Algorithm，HGA)对某型高速脱水机的悬置参数进行优化。算法流程图如图1所示。采用Taguchi正交优化替代染色体变异，嵌入整个迭代流程。

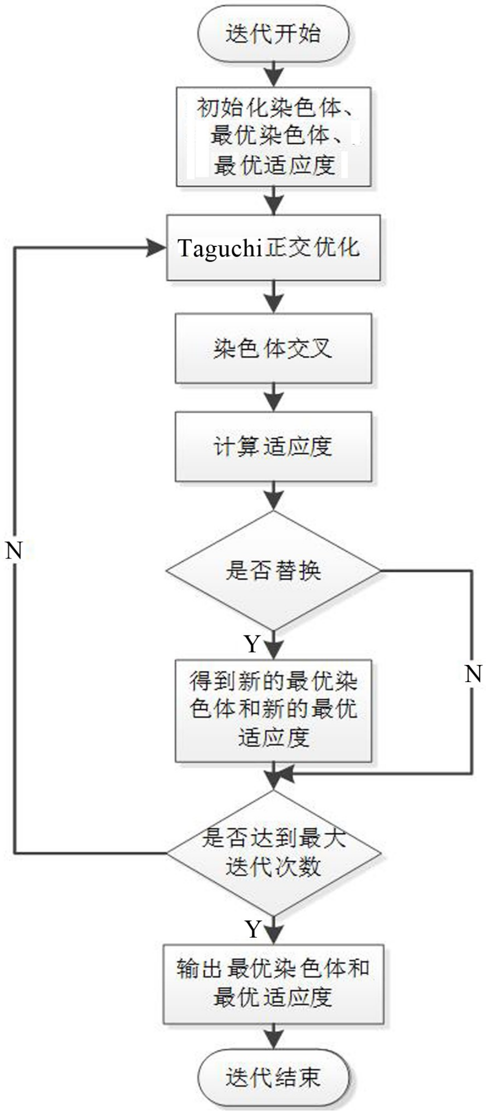

图1 改进的混合遗传算法流程图

2 模型的建立与优化

响应面法(RSM)起源于统计学和数学，用来对所研究的响应量受多变量影响的问题进行模拟分析，并最终对变量进行优化[8]。根据若干组取样点的结果拟合出的响应面可以真实地预测表达出对于输入变量改变系统的响应值。

建立响应面的核心点在于构建精确的输入变量响应函数，一般通过低阶多项式的形式来表达对于参数输入变量的响应。具体表达形式为

$$y(x)=\sum_{i=1}^{N}a_i\,b_i(x)\qquad(2)$$

在式(2)中：$y(x)$即表示响应面函数，a_i表示基函数系数，$b_i(x)$表示基函数，N表示基函数个数。

响应面函数的精度和函数的阶次、基函数的个数成正比。本文采用2阶多项式进行响应面函数的拟合，该2阶响应面函数的基函数个数与变量个数的关系为

$$N=1+C_n^1+C_n^1+C_n^2=C_{n+2}^2=\frac{(n+2)\times(n+1)}{2\times 1}\qquad(3)$$

在式(3)中：N表示基函数个数，n表示变量个数。

高速脱水机的实物图及结构部件示意图如图2和图3所示。图4为动力学模型示意图，其中Or、Xr、Yr、Zr表示的是悬置单元的静坐标系。

图2 高速脱水机实物图

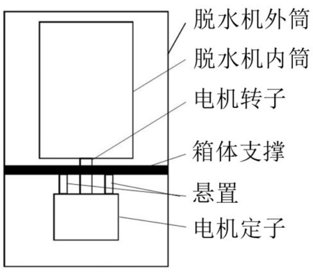

图3 结构部件示意图

根据高速脱水机的动力学模型和式(2) 2阶响应面函数，采用拉丁超抽样法在仿真数据中获取样本点及其响应值，以建立高速脱水机筒体振幅的响应面函数。响应面函数的基函数形式及其系数如表1所示。

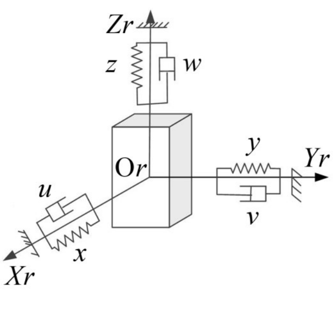

图4 动力学模型示意图

表1 振幅响应面模型多项式基函数及其对应系数

基函数$\beta_i(x)$	系数a_i	基函数$\beta_i(x)$	系数a_i
1	9.928 6	yv	−1.140 6
x	−0.222 57	yw	0.467 9
y	−0.093 76	zu	−0.478 69
z	0.149 73	zv	2.361
u	−38.549	zw	−2.161 6
v	−55.872	uv	200.11
w	−41.555	uw	140.44
xy	0.01577	vw	50.751
xz	0.002 458 1	x^2	−0.002 187 1
xu	−0.191 03	y^2	0.006 933 2
xv	1.273 9	z^2	0.009 210 2
xw	−0.135 23	u^2	218.52
yz	−0.016 981	v^2	115.53
yu	0.004 170 8	w^2	233.21

确定筒体振幅为优化目标，悬挂系统3个方向的刚度和阻尼为优化变量。进行Taguchi正交优化时染色体节点值的因素采用等距五水平划分，分布如表2所示。根据设计参数的个数(6个)和水平数(5个)设计L_{25}Taguchi正交设计表[9]。

表2 因素水平划分表

水平/(%)	x	y	z	u	v	w
80	x_1	y_1	z_1	u_1	v_1	w_1
90	x_2	y_2	z_2	u_2	v_2	w_2
100	x_3	y_3	z_3	u_3	v_3	w_3
110	x_4	y_4	z_4	u_4	v_4	w_4
120	x_5	y_5	z_5	u_5	v_5	w_5

分别采用GA和HGA两种算法在MATLAB中对所建模型实施参数优化，默认工况为空载。2种算法的刚度和阻尼参数在Xr、Yr、Zr 3个方向的优化结果如表3所示。

表3 参数优化表

算法	刚度/(N·mm^{-1})			阻尼/(N·s·mm^{-1})			振幅/mm
	x	y	z	u	v	w	
GA	14.7	7.06	5	0.03	0.09	0.09	3.52
HGA	15	5.03	5.07	0.04	0.07	0.09	3.35

为了考察振动响应对刚度和阻尼参数变化的敏感程度，开展了刚度和阻尼灵敏度分析。图5给出了其灵敏度分析结果。

结果表明：刚度变化灵敏度高，应以首先优选；阻尼变化灵敏度较低，可次之优选或忽略。

3 基于蒙特卡洛方法的算法分析

3.1 算法的稳健性分析

基于蒙特卡洛分析方法，进行算法的稳健性分

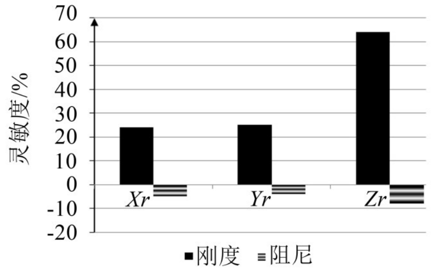

图5 刚度和阻尼参数灵敏度分析

析。分别采用GA算法和HGA算法对优化目标进行1 000次计算并进行正态拟合，两种算法的振幅概率分布图分别如图6和图7所示。

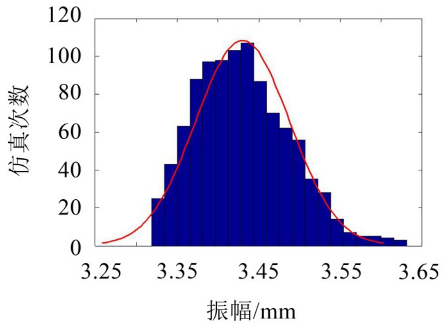

图6 GA算法振幅概率分布图

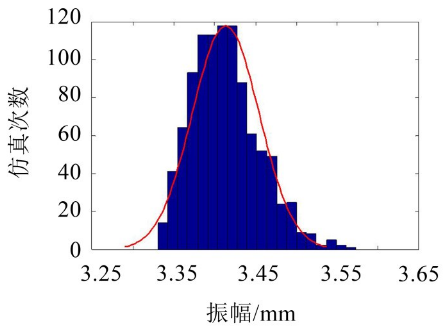

图7 HGA算法振幅概率分布图

GA算法的振幅概率分布近似符合N(3.440 1，0.057 5^2)正态分布，HGA算法的振幅概率分布近似符合N(3.403 6，0.041 1^2)正态分布，其振幅的平均最优值降低了1.07 %，优化算法的精度略微提升；方差降低了48.9 %。优化算法的稳健性大幅提升。

3.2 算法的收敛性分析

为考查两种算法的收敛速度，设定一个振幅检验值为3.5 mm，当优化过程中最优振幅小于检验振幅时，视为达到预期优化效果，第一次达到预期优化效果的代数称为初始优化代。2种算法进行1 000次优化并拟合出概率分布图如图8和图9。

GA算法预期优化代数的概率分布近似符合N(344.115 0，230.917 1^2)正态分布，HGA算法预期优化代数的概率分布近似符合N(140.920 9，161.454 6^2)，其预期优化代数从344缩减到141，优化率达到59 %，优化的收敛速度大幅提升。

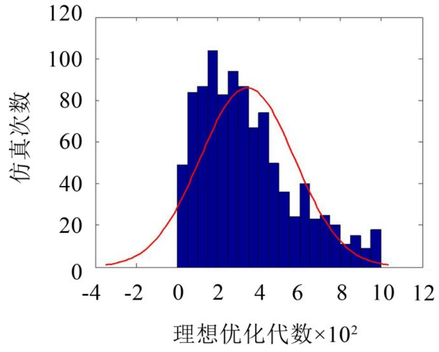

图8 GA算法初始优化代概率分布图

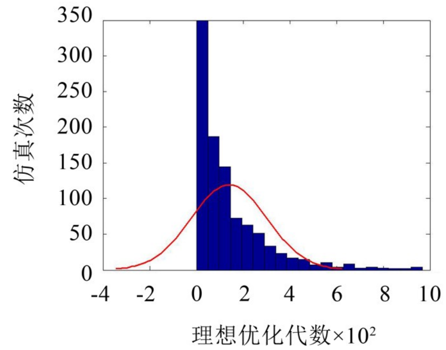

图9 HGA算法初始优化代概率分布图

4 试验研究

为验证算法的优化结果，选择结构形状相同的3组悬置单元作为试验对象，开展刚度测试试验，确保试验模型与理论优化模型的一致性。并使用该悬置单元组成的悬挂系统开展实机振幅测量试验，对比其减振效果。

4.1 刚度测试试验

4.1.1 试验设备

试验机MTS Model43、配套软件、电脑、被测试件、相关夹具。

4.1.2 试验方法及结果

MTS Model4试验机通过夹具，通过配套软件采集位移和力信号，传递给电脑分析计算出试件拉伸方向的静刚度。MTS Model43测量装置示意图和试验照片如图10、图11所示。

以悬置单元1的z向刚度测试为例，其结果如图12所示。每个试件伸缩测试两次，$K1$、$K2$、$K3$、$K4$表示两次伸缩的4个测试值，K_{avg}表示平均测试值。

表4给出了3组试验悬置单元的测量平均值。其中悬置单元2和悬置单元3分别代表了GA和HGA算法的优化结果，平均误差为1.12 %，在可接

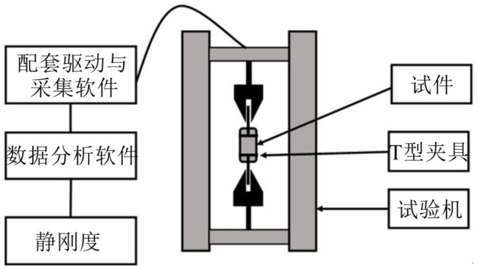

图10　刚度测试装置示意图

图11　刚度测试试验照片

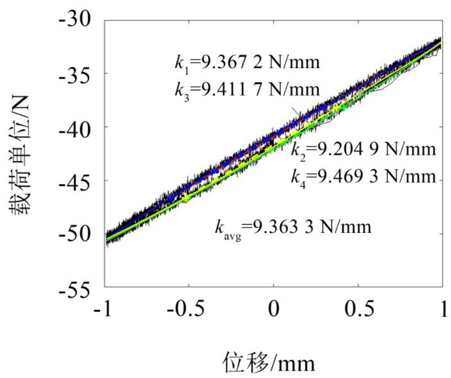

图12　刚度测试结果例图

受的误差范围内。

4.2　筒体振动测量试验

采用某型高速脱水机进行试验验证。测试系统主要测量不同偏心质量下内筒振幅的变化规律。

表4　悬置单元参数表

悬置单元型号	刚度/(N·mm^{-1})		
	x	y	z
悬置单元1	7.28	7.28	9.36
悬置单元2	14.44	6.97	5.06
悬置单元3	15.1	4.98	5.03

4.2.1　试验设备

激光测量传感器、高速脱水机、笔记本电脑、LMS数据采集前端。

4.2.2　试验原理

筒体高速转动时，激光测量传感器拾取x、y、z方向的振动信号，将所得的振动信号通过LMS数据采集前端采集到计算机，进行信号处理即可得到筒体的实时振幅数据。整个测试系统如图13所示。图14为实验样机图。

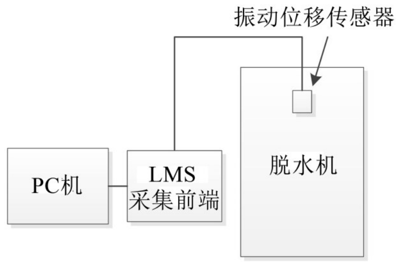

图13　测试系统框图

图14　试验样机图

LMS所得的时域信号图如图15所示，纵坐标为测量点的距离信号，横坐标为测试时间信号。

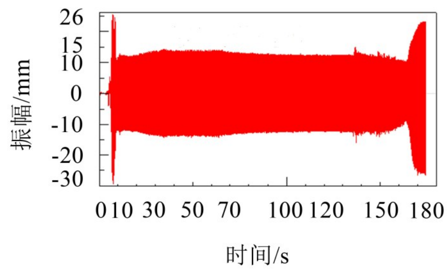

图15　时域振动位移例图

4.2.3　试验结果

由于脱水机启动阶段的筒体振动幅值通常达到最大值，因此取启动阶段的最大幅值作为振幅对比数值。对同一工况采用多次测量求平均处理，将3组悬置的试验结果进行对比如图16所示。

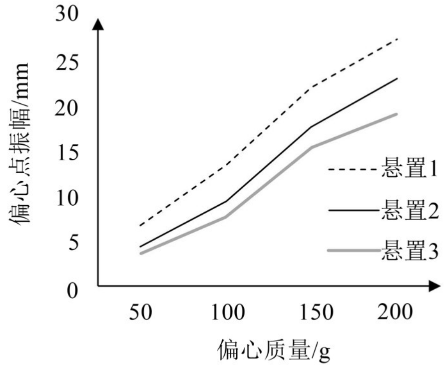

图16　异型悬置试验振幅数据对比图

（下转第102页）