

压力机杆系优化求解的变量循序组合响应面法

谢嘉, 赵升吨, 梁锦涛, 马海宽

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了能够切实有效地对机械压力机杆系驱动机构进行优化设计, 采用响应面分析法并结合试验设计方法, 提出了求解该杆系多目标优化问题的变量循序组合响应面法(VSCRSM), 并建立了优化数学模型. 对优化变量及其变化范围进行循序取舍组合和设定, 同时采用响应面分析法多次拟合进行优化求解, 最终得到了优化结果. 与初始设计及变容差遗传算法相比较, VSCRSM优化目标的最小值分别降低了15.85%和5.8%, 并且滑块行程误差仅为0.09%, 不仅解决了初始设计及变容差遗传算法所得结果中滑块行程超出误差范围的问题, 而且实现了压力机杆系的显著优化.

关键词: 机械压力机杆系; 响应面法; 多目标优化

中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0057-06

Variable Sequential Combination Response Surface Methodology for Press Rod System Optimization

XIE Jia, ZHAO Shengdun, LIANG Jintao, MA Haikuan

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To realize a practical and effective optimum design of rod system in double toggle mechanical press, variable sequential combination response surface methodology (VSCRSM) is proposed to solve the multiple objective optimization, then the mathematic models are established. The optimal design variables and their ranges are sequentially combined and set, and response surface methodology is repeatedly employed. The optimization results show that VSCRSM enables to decrease the minimum of the objective function by 15.85 %, compared with the initial design, and by 5.8 %, compared with the flexible tolerance genetic algorithm. VSCRSM confines the error of the slider stroke as 0.09 %, thus the problem is solved that the error is beyond limited range in the initial design and the flexible tolerance genetic algorithm.

Keywords: mechanical press rod system; response surface methodology; multiple objective optimization

机械压力机是金属塑性成形加工领域中最主要的设备之一. 被称为第3代锻压设备的伺服压力机的出现和不断的改进, 使得其在工业生产中的应用更为广泛^[1]. 近年来, 对伺服压力机能量转换机构进行优化设计、以实现最佳滑块运动曲线的研究得到了越来越多的重视. 文献[2-3]中采用了传统的和改进的遗传算法来求解压力机设计中的优化问题, 收

到了一定的效果. 但是, 遗传算法本身存在着早熟现象和局部寻优能力差等缺点, 往往影响求解结果, 甚至得到的结果只是一个局部优化结果. 响应面分析法(RSM)结合了数学方法和统计方法, 统计样本是各个试验的结果, 因此避免了数学表达式的缺陷. 试验的编排按照试验设计理论(DOE)来实施, 保证了样本信息的全面性. RSM最初主要应用在化学工业

和生物学中,后来又广泛地应用在食品学中,近年来,RSM得到了工程界的重视,在结构可靠性分析和动力学分析^[4-5]中得到了一定的发展.目前,国外研究人员将RSM应用到特种电机的结构优化设计中^[6],得到了很好的效果.

本文针对所研制的双肘杆伺服式机械压力机杆系实际优化设计的需求,基于RSM,结合DOE,提出了适合机械压力机杆系多目标优化问题的变量循序组合响应面法(VSCRSM),并建立了优化求解的数学模型.在合理确定压力机杆系优化目标的基础上,对优化设计变量及其变化范围在各个优化设计阶段进行循序取舍组合和设定,最终得到了优化求解结果.经过比较,证明VSCRSM方法是成功和有效的,采用此方法,能够获得具有良好的低速成形特性以及兼顾压力机成本的杆系驱动机构参数.

1 压力机杆系驱动机构及其优化

1.1 压力机杆系驱动机构

双肘杆机械压力机是一种型号为JSD25-63的伺服压力机,其主要的技术参数如下:公称压力为630 kN;滑块行程为45 mm;公称压力行程为4 mm;行程为100~150 r/min.如图1所示,本机构是由一级同步带减速机构串联一级同步齿轮机构,驱动两套参数完全相同的曲柄肘杆机构.

1.2 压力机杆系的多目标优化

由图1b机构的运动学分析可知,滑块的运行曲线由杆系参数决定,因此将本文杆系优化设计变量定义为

$$\mathbf{X} = [l_1, l_2, l_3, l_4, d_1, d_2] = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] \quad (1)$$

伺服压力机在使工件产生塑性变形的过程中,要求滑块有较低的塑性成形工作速度,以防止工件产生裂纹而失效,并且可以减少冲击和噪声,提高模具的寿命.因此,低速成形要求压力机工作时,在上模接触金属坯料前应降低速度,使上模与金属坯料的接触速度降低,并且在公称压力行程的范围内,希望速度波动越小越好,以减小冲击,提高模具寿命,保证产品质量.研究发现,在满足所有约束的条件下,公称压力行程范围内速度的变化实际上是一个单调的减速过程,在公称压力行程范围内,以速度波动最小为优化目标,机构优化的最小化第1目标为

$$f_1(\mathbf{X}) = \int_{\theta_s}^{\theta_d} ((v(\theta) - v_m)^2 d\theta / (\theta_d - \theta_s))^{1/2} \quad (2)$$

式中: θ_d 、 θ_s 分别为滑块在下死点处(即公称压力行

程结束和开始时)所对应的曲柄角度; v 为滑块速度; v_m 为滑块在公称压力行程范围内的平均速度.

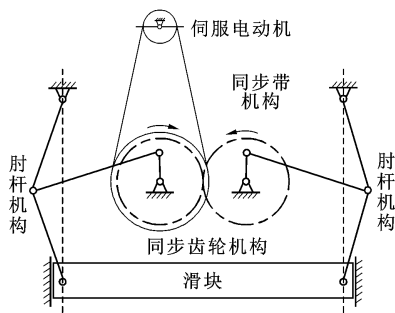
JSD25-63型伺服压力机在冲压阶段的曲柄阻力矩与冲压转角的关系^[7]如图2所示.从图2中可以看出,作用在曲柄上的阻力矩随着冲压转角的增大而增大,并且变化较大.由于曲柄上的阻力矩是靠主驱动伺服电动机提供的力矩来克服的,可使过大的冲压阶段曲柄上的阻力矩迅速提高伺服电动机的力矩,因此造成伺服电动机功率的增大.机构优化的最小化第2目标为

$$f_2(\mathbf{X}) = \theta_d - \theta_s \quad (3)$$

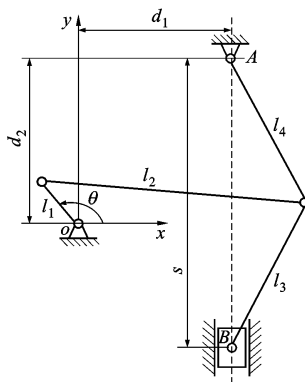
可以看出式(2)、式(3)之间是相互矛盾的,为了使它们都能达到优化,将优化问题的第1、第2目标综合为

$$f_{1,2}(\mathbf{X}) = \omega_1 f_1(\mathbf{X}) + \omega_2 f_2(\mathbf{X}) \quad (4)$$

式中: ω_1 、 ω_2 为权重系数.选择 ω_1 为0.6~0.9,同时 ω_2 在0.1~0.4之间变化.当 ω_1 接近0.8、 ω_2 接近0.2时, $f_{1,2}$ 最小.取多组权重系数优化比较后,最后确定 $\omega_1=0.8$ 、 $\omega_2=0.2$.



(a)驱动机构整体示意图



(b)单边曲柄肘杆机构

o:同步齿轮;A:机身;B:滑块; l_1 :曲柄长度; l_2 :连杆长度; l_3 :下轴杆长度; l_4 :上轴杆长度; d_1 :同步齿轮转轴与机身铰接处的水平距离; d_2 :同步齿轮转轴与机身铰接处的垂直距离; θ : l_1 的角度; s :滑块位置

图1 JSD25-63型伺服压力机驱动机构

在式(4)优化目标求解的过程中,发现滑块行程有较大的变化,为了保证约束的有效性,将其作为优化目标融入式(4)进行优化求解,并作为优化问题的第 3 目标.

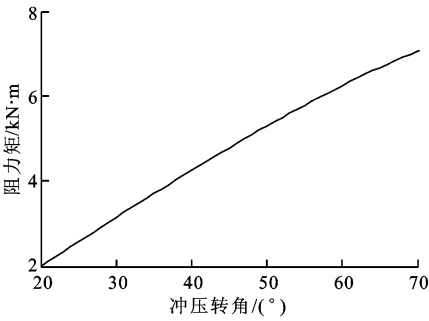


图 2 曲柄阻力矩与冲压转角的关系

滑块行程(45 mm)的优化目标

$$f_3(\mathbf{X}) = s(\theta_u) - s(\theta_d) \tag{5}$$

式中: θ_u 为滑块在上死点处对应的曲柄角度.

2 变量循序组合响应面法

根据 JSD25-63 型伺服压力机杆系驱动机构多目标优化问题的研究,本文提出了结合 DOE、RSM 各自特点的 VSCRSM 方法,其求解过程如图 3 所示.

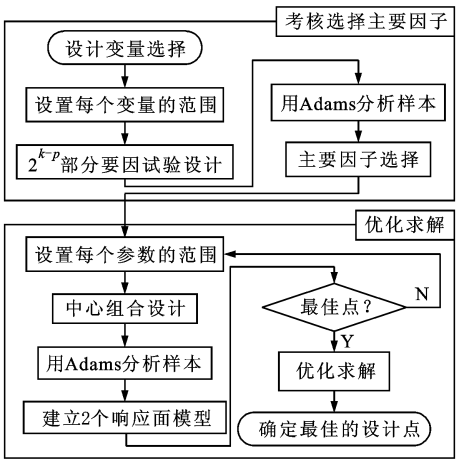


图 3 求解压力机杆系优化问题的过程

2.1 选择主要因子

影响优化结果的因子很多,在优化求解之前,应该通过筛选试验来选择重要的因子,其过程有 2 个目的:①选择对优化结果敏感性强的因子;②初步考核各因子的变化趋势,把握优化求解中变量变化的总体情况.

由于选择主要因子的过程不是最终的优化求解,只是从总体上把握优化问题,因此方法要简单,

在不影响分析结果的情况下,试验次数要尽量地少.采用 2^{k-p} (k 表示设计变量个数, $p=1,2,3,\cdots,n$) 部分要因试验设计,可避免多余的试验,而且也能获得优化求解所需的足够信息.由于 Adams 是优秀的动力学分析软件,因此利用它进行本文的运动学分析,进行各个试验,完全能够得到足够的精度.

2.2 优化求解

由于参数的变化范围开始不知道,所以需要变量及其变化范围进行循序取舍组合、设定,以及多次建立响应面数学模型,才能最终寻求到真正的优化解.一般的二阶数学模型为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \tag{6}$$

式中: ϵ 为随机误差; β 为回归系数, β 的估计值可以采用最小二乘法通过回归分析计算得到.

为了拟合二阶数学模型,每个杆系变量因子必须包含 3 个水平级.本文采用中心组合设计(CCD)来进行试验设计,并建立二阶数学模型.CCD 是在 2^k 要因试验设计(或 2^k 部分要因试验设计)的基础上增加若干点^[8]扩充得来的,这些增加的点为若干个中心点及 $2k$ 个距离中心点为 $\pm\alpha$ 的点.

3 杆系参数优化结果

3.1 1/2 部分要因试验设计和参数选择结果

将 VSCRSM 应用于 JSD25-63 型伺服压力机,按照优化过程进行计算分析.在 2^{k-p} 部分要因试验^[8]设计中,对于 6 个设计变量,要使全部主效果和二阶交叉效果都能够单独估计,只能选择分辨力为级别 6 的试验方式,即 $p=1$,得到 1/2 部分要因试验设计,试验次数为 32 次.

表 1 列出了 1/2 部分要因试验设计的变量范围和水平级,低水平级对应的各设计变量的最小值是 JSD25-63 型压力机的设计初值,高水平级对应的参数选择阶段的各设计变量的最大值,是对每个变量初值增加一个很小的倍数(0.04 倍)来设定的.这是因为各变量的有效变化范围最初很难确定,而过大的设定范围会掩盖其中的一些变化,所以初步以小的范围来进行考核探索.采用 Adams 软件进行仿真试验获得数据样本,得到滑块位移和速度数据,应用式(2)~式(5)进行简单的计算,对数据进行分析后,得到各设计变量变化影响的主效果.

由各设计变量变化影响的主效果可以看出,曲柄长度越小越有利于 $f_{1,2}$ 取得最小值,同理,连杆长度越大也越有利于 $f_{1,2}$ 取得最小值,但根据设计需

表1 1/2 部分要因试验设计的变量范围和水平级

x/mm

水平级	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>x</i> ₅	<i>x</i> ₆
−1	40.0	240.0	175	175	200	180.0
1	41.6	249.6	182	182	208	187.2

求的约束范围,这2个参数的初值已经分别为最小值和最大值.因此,*x*₁、*x*₂的数值可以在参数选择阶段确定,即保持初值不变.另外,由于上轴杆长度和同步齿轮转轴与机身铰接处的垂直距离对*f*_{1,2}的敏感性较强,因此应先选择作为进一步优化的设计变量.因为下轴杆长度、同步齿轮转轴与机身铰接处的水平距离的敏感性基本相同,不好取舍,所以也同时将其选为进一步优化的设计变量.*f*₃的优化目标是当滑块行程为45 mm时,发现除*x*₁、*x*₂已经确定外,*x*₅对*f*₃的敏感性最强,这说明*x*₅的变化会引起*f*₃(滑块行程)较大的波动.上述的分析可以指导我们在后面进一步优化求解的过程中,对变量及其变化范围进行取舍和设定.

3.2 CCD 试验设计和 RSM 优化求解结果

对于选出的4个杆系设计变量*x*₃、*x*₄、*x*₅和*x*₆,CCD需要进行25次试验.在进行CCD试验设计时,这4个设计变量的变化范围和水平级需首先确定,如表2所示.为了保证CCD试验设计各列之间的正交,对于4个设计变量的CCD试验设计^[8],将α取为1.414.CCD试验设计的4个变量范围是将1/2部分要因试验设计的变量范围扩大了1倍,但对于*x*₆,为了使其最大值不要偏离约束范围太远,以便考察变量在整个约束范围的优化求解情况,将*x*₆的范围扩大了2倍.

表2 CCD 试验设计的4个变量的水平级及范围

x/mm

水平级	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>x</i> ₅	<i>x</i> ₆
−α	153.79	153.79	175.96	146.06
−1	160	160	183	156
0	175	175	200	180
+1	190	190	217	204
+α	196.21	196.21	224.04	213.94

通过25次试验后获得数据样本,然后采用最小二乘法计算得到β的估计值,从而可以得到4个设计变量的拟合响应面数学模型.以此拟合响应面数学模型为依据做如下的分析:①在约束条件下,各参数必须满足*f*₃的优化目标;②尽量使得*f*_{1,2}达到很小,确定出各变量的真正变化范围和变量的取舍结

果.*x*₃、*x*₄和*x*₆的变化范围如表3所示.同时,发现*x*₅的变化范围是很窄的(175~183 mm),因为*x*₅对于滑块行程的敏感性最强,但对*f*_{1,2}的敏感性较弱,因此可以固定*x*₅的数值为180 mm.

表3 CCD 试验设计的3个变量的变化范围

x/mm

水平级	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>x</i> ₆
−α	154.06	170.68	176.22
−1	160.00	175.00	180.00
0	187.50	195.00	197.50
+1	215.00	215.00	215.00
+α	220.94	219.32	218.78

对于*x*₃、*x*₄和*x*₆,CCD需要进行15次试验.在进行CCD试验设计时,需首先确定3个变量的变化范围和水平级,如表3所示.同样,为了保证CCD试验设计各列之间的正交,设α为1.216^[8],得到3个变量的*f*_{1,2}(*x*)、*f*₃(*x*)的响应面数学模型如下

$$f_4 = 122.532 - 0.276\,91x_3 - 0.249\,506x_4 - 0.206\,988x_6 + 0.001\,115\,39x_3^2 + 3.057\,81 \times 10^{-4}x_4^2 + 1.110\,78 \times 10^{-3}x_6^2 + 6.556\,05 \times 10^{-4}x_3x_4 - 1.317\,46 \times 10^{-3}x_3x_6 - 6.048\,19 \times 10^{-5}x_4x_6 \tag{7}$$

$$f_5 = 171.047 - 0.070\,864\,4x_3 - 0.497\,6x_4 - 0.366\,132x_6 - 1.301\,11 \times 10^{-3}x_3^2 + 9.404\,88 \times 10^{-4}x_4^2 - 1.183\,57 \times 10^{-3}x_6^2 - 5.199\,66 \times 10^{-4}x_3x_4 + 3.310\,53 \times 10^{-3}x_3x_6 + 4.051\,54 \times 10^{-4}x_4x_6 \tag{8}$$

采用多重相关系数*R*²和修正后的多重相关系数*R*_a²检验拟合回归数学模型的拟合程度,经过计算,*f*₄的*R*²为95.16%,*R*_a²为91.86%;*f*₅的*R*²、*R*_a²的值分别为99.94%和99.82%,说明式(7)、式(8)的数学模型拟合较好.

根据式(7)、式(8),可以得到6个预测的响应面,如图4所示.得到的优化解为:*x*₃=183.445 mm,*x*₄=219.32 mm,*x*₆=218.778 mm.为了符合实际应用和加工杆件的方便,最终JSD25-63型伺服压力机杆系优化设计变量*X*的圆整值为*X*^{*}=[40, 240,183,219,180,219] mm.

4 优化结果比较

4.1 3种方法的求解结果

初始方法设计结果、文献[3]中提出的变容差遗传算法(FTGA)的设计结果和VSCRSM方法的设

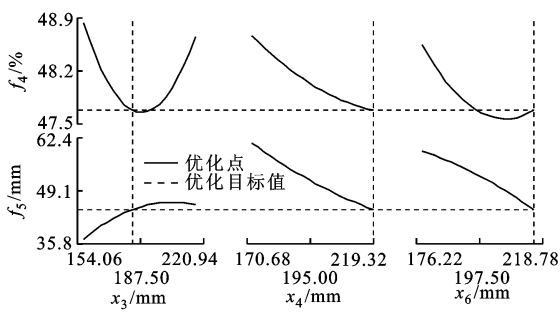


图 4 响应面优化图

计结果如表 4 所示. 为了验证由 VSCRS M 方法得到的拟合数学模型的精确性, 将 VSCRS M 方法计算得到的求解结果再用 Adams 软件进行试验验证, 得到相对于 2 个拟合模型 f_4 、 f_5 的 Adams 软件的求解结果分别为 47.752%、44.96 mm, 因此, f_4 的优化结果误差为 0.64%, f_5 的相对误差为 0.11%, 具有足够的精确性, 完全可以预测实际模型.

表 4 杆系参数的求解结果

方法	X/mm						f_5 /mm	f_4 /%
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6		
初始	40	240	175	175	200	180	37.67	56.746
FTGA	40	240	175	165	190	198	46.62	50.691
VSCRS M	40	240	183	219	180	219	44.91	47.445

4.2 求解结果的比较

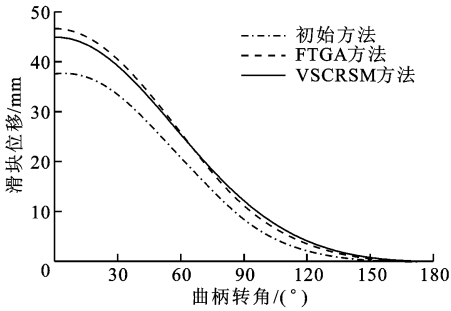
将 VSCRS M 方法与初始方法及 FTGA 的优化求解结果进行比较(见表 5), 从中可以看出: ①对于公称压力行程 4 mm 内的速度波动和冲压转角综合的优化目标, VSCRS M 方法的优化求解结果比初始设计降低了 15.85%, 比 FTGA 方法降低了 5.8%; ②如目标函数确定时所预期的, 在追求优化问题第 1 目标的过程中, 获得的接触速度最小, 在 VSCRS M 方法的优化求解结果中, 公称压力行程 4 mm 内的速度最大值比初始设计降低了 12.04%, 比 FTGA 方法降低了 5.64%; ③对于公称压力行程 4 mm 内的曲柄转角, VSCRS M 方法的优化求解结果比初始方法降低了 19.44%, 比 FTGA 方法降低了 6.45%; ④对于公称压力行程 4 mm 内曲柄所受的阻力矩, VSCRS M 方法相对于初始方法降低了 15.49%, 相对于 FTGA 方法降低了 6.25%; ⑤对于滑块行程, 初始方法的相对误差达 16.29%, FTGA 方法的相对误差为 3.6%, 它们均大于允许误差 ± 1 mm, 而 VSCRS M 方法的优化求解结果的相对误差只有 0.09%, 完全可以满足设计的要求.

表 5 杆系参数的优化结果比较

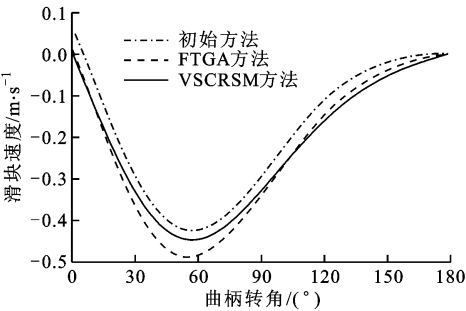
方法	f_4 /%	最大速度/ 度·m·s ⁻¹	曲柄转 角/(°)	阻力矩/ N·m	行程相对 误差/%
初始	56.745 8	0.176 9	72	7 100	16.29
FTGA	50.691 0	0.164 9	62	6 400	3.60
VSCRS M	47.752 3	0.155 6	58	6 000	0.09
c_1 /%	-15.85	-12.04	-19.44	-15.49	-99.45
c_2 /%	-5.80	-5.64	-6.45	-6.25	-97.5

c_1 : VSCRS M 方法的优化结果相对于初始设计结果的减小率;
 c_2 : VSCRS M 方法的优化结果相对于 FTGA 优化结果的减小率.

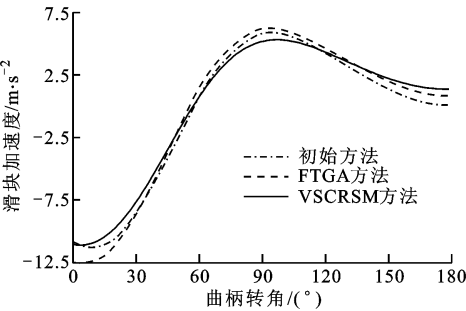
由图 5 可以看出, 初始方法设计的滑块运动特性最差, FTGA 方法求解的结果较好, VSCRS M 方法求解的结果最好. 图 5a 中滑块位移曲线表明, 在公称压力行程 4 mm 范围内, 由初始方法、FTGA 方法和 VSCRS M 方法设计得到的曲柄转角分别为



(a)位移曲线



(b)速度曲线



(c)加速度曲线

图 5 3 种方法设计的滑块运动曲线结果的比较

108°~180°、118°~180°和122°~180°。图5b中滑块速度曲线表明,在上述曲柄转角范围内,VSCRS方法得到的运行曲线速度的最大值相对于初始方法、FTGA方法最小,变化最均匀,整个变化过程中更接近于匀变速运动,这在图5c中的滑块加速度运动曲线中表现得更为明确。VSCRS方法得到的滑块运行的加速度变化范围最小,并且从压力行程开始,加速度值的变化在慢慢减小,在临近下死点时,加速度值相对初始方法和FTGA方法,明显地表现出变化的减弱性,并可以看出加速度保持一定的数值,说明这时模具的上模在用相对恒定的力冲压加工金属坯料。这表明在压力机冲压阶段,模具的上模在接触金属坯料前,两者接触速度降低,加速度、冲压力趋于稳定,从而减小了冲击,提高了模具的寿命,保证了产品质量。因此,VSCRS方法可以很好地满足JSD25-63型伺服压力机杆系设计的优化需求。

5 结 论

对于JSD25-63型伺服压力机,其杆系驱动机构的优化目标在公称压力行程4 mm内时,滑块行程为45 mm,其速度波动和曲柄所受阻矩最小。为了能够进行切合实际和有效的优化求解,基于RSM并结合DOE,本文提出了适合机械压力机杆系多目标优化问题的变量循序组合响应面法,建立了优化求解的数学模型。本文方法在确定优化目标的基础上,从参数选择入手,采用RSM逐层深入,最终确定出了优化问题的设计变量及其范围,并且得到了真正的最优解。

参考文献:

- [1] AZPILGAIN Z, ORTUBAY R, BLANCO A, et al. Servomechanical press: a new press concept for semi-solid forging[J]. Diffusion and Defect Data: Part B Solid State Phenomena, 2008, 141/142/143(3): 261-266.
- [2] 赵升吨,何予鹏,杨辉. 双曲柄串联低速急回机构及其遗传算法优化[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(9): 913-916.
ZHAO Shengdun, HE Yupeng, YANG Hui. Series-double-crank mechanism with low-speed and quick-return motion and its genetic algorithm optimization[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 913-916.
- [3] SHANG Wanfeng, ZHAO Shengdun, SHEN Yajing. A flexible tolerance genetic algorithm for optimal problems with nonlinear equality constraints[J]. Advanced Engineering Informatics, 2009, 23(6): 253-264.
- [4] 苏成,李鹏飞,韩大建. 结构可靠度计算的Neumann展开响应面法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2009, 37(9): 13-17.
SU Cheng, LI Pengfei, HAN Dajian. Neumann-expansion response surface method for calculating structure reliability[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(9): 13-17.
- [5] 熊俊涛,乔志德,韩忠华. 基于响应面法的跨声速机翼气动优化设计[J]. 航空学报, 2006, 27(3): 399-402.
XIONG Juntao, QIAO Zhide, HAN Zhonghua. Optimum aerodynamic design of transonic wing based on response surface methodology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(3): 399-402.
- [6] HONG D K, WOO B C, KANG D H. Application of fractional factorial design for improving performance of 60 W transverse flux linear motor[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(7): 1-3.
- [7] 尚万峰. 开关磁阻电动机伺服直驱机械压力机的关键技术研究[D]. 西安:西安交通大学, 2009.
- [8] 胡运权,张宗浩. 试验设计基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1997: 77-139.

[本刊相关文献链接]

- 伺服压力机加工工艺的Bezier模型及其优化研究. 2012, 46(3): 31-35.
- 平面蜗轮连续分度飞削加工及工艺试验研究. 2010, 44(7): 95-99.
- 直角法兰双辊夹持扩旋成形有限元模型的确定. 2010, 44(5): 66-70.
- 气压熔融挤压快速成形材料及成形工艺研究. 2010, 44(1): 100-104.
- 板料成形回弹三维光学测量技术研究. 2009, 43(9): 51-55.
- 聚苯乙烯快速成形加工参数对表面粗糙度的影响. 2007, 41(3): 344-347.

(编辑 管咏梅)