



引用格式:王强,苏小平,鲁宜文. Kriging 近似模型在副车架轻量化设计中的应用试验[J]. 轻工学报,2018,33(2):95-101.

中图分类号:U463.32 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.02.014

文章编号:2096-1553(2018)02-0095-07

Kriging 近似模型 在副车架轻量化设计中的应用试验

Application experiment of the Kriging approximate model in
lightweight design of subframe

王强,苏小平,鲁宜文

WANG Qiang, SU Xiaoping, LU Yiwen

南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211816

School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

关键词:

副车架; Kriging 近似
模型; 轻量化设计

Key words:

subframe; Kriging
approximate model;
lightweight design

摘要:针对现有副车架轻量化设计要么优化效果不理想、要么对模型精度要求较高的问题,采用 Kriging 近似模型替代物理模型对副车架进行了轻量化设计:利用拉丁超立方试验设计方法对副车架的重要特征点进行采样,建立 Kriging 近似模型,并将副车架参数化;以副车架质量为目标函数,选取 11 个厚度尺寸作为设计变量对其进行优化,通过约 400 次的迭代得到最优解.优化后的副车架质量为 11.3 kg,较优化前减轻 10.3%,跳动工况下最大应力值仍满足屈服条件,且自由模态频率也满足模态要求,较好地实现了轻量化设计.该方法的优点在于既实现了较好的优化效果,又无需在不同软件间转换,有效避免了模型的失真.

收稿日期:2017-04-23

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20130941)

作者简介:王强(1990—),男,江苏省连云港市人,南京工业大学硕士研究生,主要研究方向为汽车 CAE.

通信作者:苏小平(1965—),男,江苏省南京市人,南京工业大学教授,博士后,博士研究生导师,主要研究方向为机械产品多体动力学仿真与汽车 NVH.

Abstract: The light weight design of the subframe is either not ideal, or the accuracy of the model should be higher. To deal with the problems, the Kriging approximate model was used to make a lightweight design for the subframe. Firstly, the Latin hypercube sampling test design method was used to sample the important feature points of the subframe, and the Kriging approximate model was combined to parameterize the subframe. Then, the fatigue of subframe was taken as the target parameter, and 11 thickness dimensions were selected as design variables and optimized. The optimal solution was obtained through about 400 iterations, and the optimized subframe quality was 11.3 kg, which was reduced by 10.3% compared with that before optimization. The maximum stress value under beating condition still satisfied the yield condition, and the free model frequency also met the model requirement, which realized the lightweight design better. The advantage of this method was that it not only achieved better optimization results, but also did not need to transform among different softwares and effectively avoided the distortion of the model.

0 引言

随着有限元分析的迅速发展,仿真技术被大量应用于工程设计与优化,尤其是在汽车零部件轻量化设计中得到了广泛应用.不管是新能源汽车还是传统汽车,零部件轻量化是实现节能减排、促进汽车工业进步发展的重要手段.传统的有限元分析在涉及多学科、多目标的复杂优化问题上计算慢、效率低,而近似模型能够减少计算量、提高分析效率且能满足一定的设计要求.因此,用近似模型代替有限元模型进行分析是当今研究的前沿与热点.

在近似模型替代有限元模型的研究中,试验设计是首要问题,并且对近似模型的构建和精度影响很大.它在整个设计空间选取有限个能够反应设计空间特性的样本点,找到每个样本点所对应的设计响应,从而拟合出它们之间的函数关系^[1].由于拉丁超立方设计是一种效率高、均衡性能好,能够反映随机变量的整体分布,并能将成对相关数控制得非常小的试验设计方法,非常适合作为试验设计的采样方法.采样过后即可拟合近似模型,现有的近似模型较多,而 Kriging 近似模型具有良好的近似能力和独特的误差估计功能,是当前最具代表性和最具应用潜质的近似模型之一^[2].它是由一个参

数模型和一个非参数随机过程联合构成的,并能够处理高维数据,具有较好的灵活性和较强的预测能力^[3].目前国内专家在 Kriging 近似模型优化方面做了大量研究:韩忠华^[4]提出了 Kriging 近似模型优化算法的优化机制和优化框架;许瑞飞等^[5]利用 Kriging 近似模型对翼型进行气动优化设计,使翼型阻力系数降低了 33.6%;张勇^[2]将 Kriging 近似模型应用于汽车车身的轻量化设计,使薄壁梁质量减少 25%.虽然文献中的 Kriging 近似模型相对于其他优化算法能够较好地分配物理模型的优化权重,得到更好的优化结果,但是由于其发展时间较短,有些优化算法不够成熟,因此没有得到广泛应用.

关于副车架的轻量化研究,鲜见有学者采用 Kriging 近似模型报道,常用的方法主要是基于灵敏度分析的优化、基于 Optistruct 的优化和基于 Isight 的优化.李锦等^[6]基于灵敏度分析对副车架进行优化,使副车架质量减少了 6.79%;丁荣等^[7]利用 Optistruct 对副车架进行优化,使副车架质量减少 9.28%.王卫等^[8]基于 Isight 对副车架进行了优化,使副车架质量减少 12.1%.虽然以上方法都可以应用于副车架轻量化研究,但是它们对模型的精度要求较高,并且需要高配置的服务器进行计算.鉴于

此,本文拟通过拉丁超立方对副车架选取特征点,拟合 Kriging 近似模型,以模态和应力作为约束条件,对副车架进行轻量化设计,并对几种可用方法在副车架轻量化设计中的效果进行比较.

1 拉丁超立方采样

在进行拉丁超立方采样时,首先将整个设计区域分为若干个等概率子区间,然后进行 r^n 随机采样. 其中, r 为试验次数, n 为因子数. 图 1 为此次采样的示意图,其中试验次数为 78 次,因子数为 21 个,采样时将成对相关数尽量控制到接近于 0.

2 Kriging 近似模型的建立与精度校验

2.1 模型建立

Kriging 近似模型包含线性回归部分和非参数部分,是比其他近似模型更具有“统计性”的近似技术,而且模型的有效性不受随机误差的影响. Kriging 近似模型假设系统响应值与自变量之间的真实关系可表示为

$$y(x) = f^T(x)\beta + Z(x) \tag{1}$$

式中, $f^T(x)$ 为已知的回归模型; β 为相应的待定参数; $Z(x)$ 为统计过程,其均值为 0,方差为 σ^2 ,协方差为

$$\text{cov}(Z(x), Z(w)) = \sigma_z^2 R(x, w)$$

式中, x, w 为 n 个采样点里的任意两点; R 为两个样本点的相关函数.

本试验 Kriging 近似模型主要通过以下步骤建立: 1) 采用拉丁超立方采样初始样本点; 2) 通过数值分析程序得到样本的响应值; 3) 利用 Kriging 算法拟合得到目标函数; 4) 判断是否收敛,如果收敛则停止,否则将得到的最优设计加入样本转到第 3 步继续执行^[9]. 图 2 为运用 Kriging 近似模型经过 3 次优化迭代,而收敛到最优设计点的过程示意图.

2.2 精度检验

近似模型的精度决定其能否取代物理模型进行运算,因此精度检验非常重要. 近似模型的精度检验,通常由拟合优度 (R^2)、相对平均绝对误差 (R_A) 和相对绝对误差 (R_M) 3 个指标来判断: R^2 取值范围越接近于 100%, 表示拟合得越好,若小于 90%, 则需重新拟合; R_A, R_M 分别从数据离散程度和局部误差考虑,数据越小越稳定^[10], 其中 R_A 不能超过 30%, R_M 不能超过 20%. 表 1 为此次近似模型的精度校验结果. 此次近似模型的响应有质量和最大应力,从质量、最大应力中 R_A, R_M, R^2 这 3 个检验指标的检验值可以判断出该近似模型符合要求,可以取代物理模型进行后续设计.

3 副车架轻量化设计

副车架轻量化设计的优化目的是:在有限元分析的基础上,建立副车架优化模型,将试验

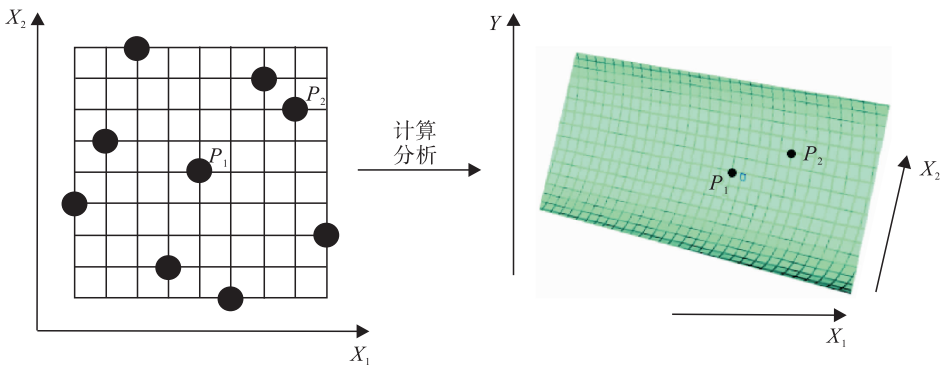


图 1 拉丁超立方采样示意图

Fig. 1 Sketch map of Latin hypercube sampling

设计与 Kriging 近似模型相结合,对优化模型进行求解,在满足应力需求的情况下,使副车架质量最小,从而实现轻量化.

3.1 副车架有限元分析

本文通过有限元软件 Hyper Mesh 用长度为 3 mm 的单元对副车架的各个零部件进行离散处理,得到副车架有限元模型(如图 3 所示).其中四边形单元 25 432 个,三角形单元 295 个;焊缝利用 Cweld 单元模拟,螺栓用 Bolt 连接.副车架材料性能参数如下:抗拉强度 600 MPa,屈服强度 420 MPa,弹性模量 210 GPa,密度 7900 kg/m³,泊松比 0.3.

副车架受力复杂,难以通过直接测量获得,本试验利用 Adams 进行整车仿真,获得制动、跳动、转弯 3 种典型工况下副车架与悬架连接点的受力情况^[8,11],如表 2 所示.将仿真得到的 3 种典型工况受力在 Hyper Mesh 中相应地加载在有限元模型上,并提交到 Radioss 中进行静强度的线性分析,求解得到 3 种典型工况的实际最大应力分别是 205.1 MPa, 240.9 MPa, 235.2 MPa.

3.2 副车架优化模型的建立

1) 目标函数.本设计的优化目标为副车架的质量最小,其目标函数为

$$\min m$$

式中, m 为副车架质量.

2) 设计变量. Kriging 近似模型建立后,副车架和设计变量情况如图 4 所示.本设计以副车架的各零部件厚度作为设计变量,简化建立 11 个厚度变量,并将厚度变量变化范围设为 $\pm 20\%$ ^[8].设计变量 T_1-T_8 的初始值为 2.5 mm,优化区间为 2.25 ~ 2.75 mm.设计变量 T_9, T_{10} 和 T_{11} ,初始值分别为 3 mm, 3 mm 和

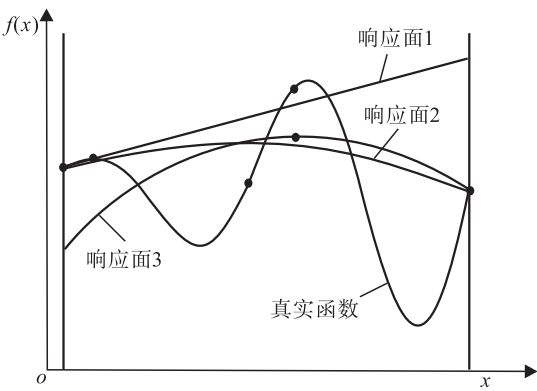


图 2 近似模型经 3 次迭代后的示意图
Fig. 2 The schematic diagram of approximate model after 3 iterations

表 1 近似模型精度校验结果

Table 1 The accuracy of approximate model %			
响应	R_A	R_M	R^2
质量	0.88	0.15	98.91
最大应力	19.02	5.42	94.25

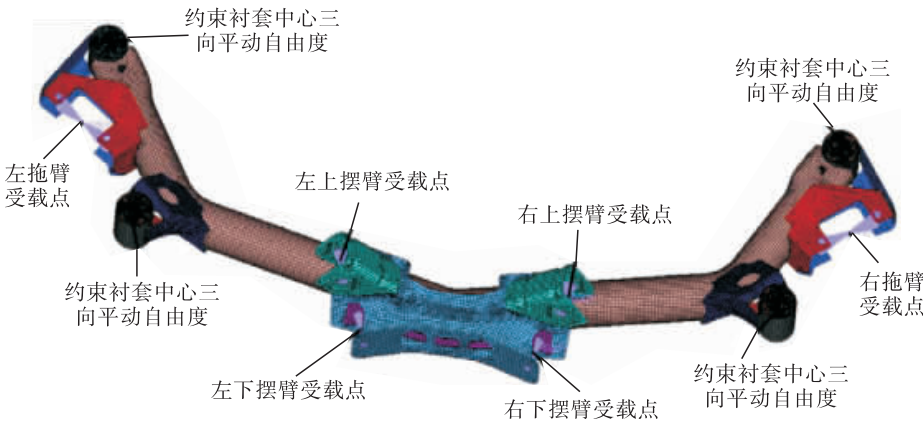


图 3 副车架有限元模型
Fig. 3 The finite element model of sub frame

表2 3种工况下副车架与悬架连接点的受力情况

Table 2 The force conditions for the connection point of the subframe and suspension under three conditions

受力点	制动工况			跳动工况			转弯工况		
	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z	F_x	F_y	F_z
左拖臂	-3177	1479	-1531	314	859	-2881	877	135	60
右拖臂	-3169	-1452	-1339	324	-761	-2731	-1258	291	64
左上摆臂	463	-2276	-151	778	-3883	-1110	330	1401	638
右上摆臂	432	2167	-337	681	3480	-1733	-521	2349	-505
左下摆臂	-342	1539	1257	-1010	3879	1675	-1064	3167	1563
右下摆臂	-319	-1456	1269	-923	-3574	1648	1915	5554	51

4 mm;优化区间分别为 2.65 ~ 3.32 mm,2.65 ~ 3.32 mm和 3.60 ~ 4.40 mm.

3)约束函数. 将副车架在各工况中最大应力作为第 1 个约束条件、副车架 11 个零件厚度区间作为第 2 个约束条件,其数学优化模型如下:

$$\begin{cases} \lambda \sigma_m \leq \sigma_s \\ U_1 \leq X \leq U_2 \end{cases}$$

其中, λ 为强度安全因数,本文取 1.2; σ_m 为副车架最大应力; σ_s 为副车架材料屈服强度; U_1, U_2 分别为尺寸区间极限; X 为设计变量可行域.

4 优化结果与校验分析

4.1 优化结果

本文各设计变量对输出变量的影响程度如

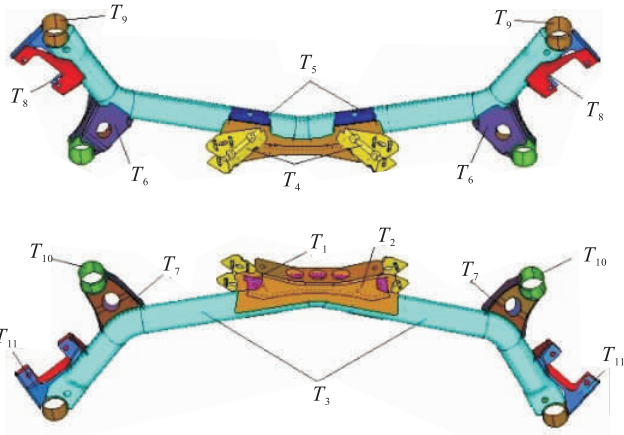


图4 参数化后的副车架和设计变量

Fig.4 The subframe and the design variables after parameterization of the subframe

图 5 所示. 由图 5 可知, T_1, T_4, T_6 这 3 个设计变量的厚度与副车架质量负相关,其余则为正相关; T_3, T_7, T_9, T_{10} 这 4 个设计变量对副车架质量的影响程度均超过 20%,为优化的重点.

副车架的优化曲线如图 6 所示,经过约 400 次迭代运算之后收敛,获得质量最优解,为 11.3 kg. 由于整个优化过程都是在基于式①构建的 Kriging 近似模型上进行的,所以在优化迭代过程中,通过对初始构建的近似模型的多次更新,得到了各个设计响应的高精度近似模型. 优化过程节省了大量的计算成本,提高了优化效率.

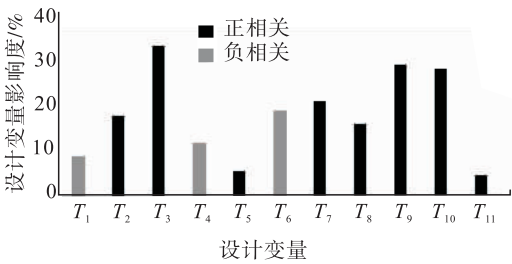


图5 设计变量对输出变量的影响程度

Fig.5 The influence degree of design variables on output variables

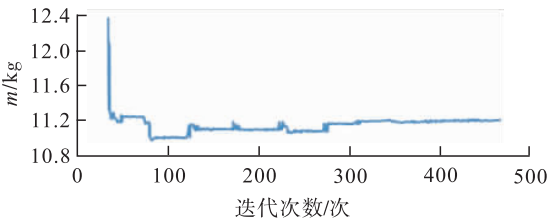


图6 副车架优化曲线

Fig.6 The curve of optimization of subframe

4.2 优化结果校验

1) 强度校验. 确定优化方案之后, 将新的有限元模型分别施加 3 种工况的力重新提交到 Radioss 里进行计算. 由结果可知, 最大受力仍然出现在跳动工况下, 应力值为 336.5 MPa, 如图 7 所示. 虽然受力较优化之前上升了 95.6 MPa, 但是仍可满足屈服条件, 并且安全系数为 1.25^[8], 符合预期目标.

2) 模态校验. 优化后的副车架需要具备良好的模态特性, 以避免发生共振. 由于路面的激励频率在 25.0 Hz 以下, 四缸四冲程发动机的激励频率为 66.7 ~ 100.0 Hz, 因此副车架的自由模态频率应大于 100.0 Hz^[6]. 本文对副车架进行自由模态分析, 副车架优化前后首阶固有频率对比如图 8 所示. 优化后首阶固有频率为 112.8 Hz, 较优化之前减少了 13.0 Hz, 但仍然大于 100.0 Hz, 可满足模态要求.

4.3 不同方法优化效果对比分析

将本文方法与另外两种优化方法对副车架的优化效果进行对比, 结果见表 3. 由表 3 可知, 本文试验的优化效果不如文献[8]的优化

效果好, 一是因为两个模型在赋予材料属性的时候有所区别; 二是因为文献[8]使用的 Isight 软件集成了多款有限元软件, 在分析的时候需要在不同软件中进行数据转换处理, 因此容易使模型失真, 以至于在优化的时候可以得到更好的效果. 本文是基于 Kriging 近似模型对副车架进行优化, 在有限元模型建立、分析、优化的过程中无需在不同软件间进行转换, 虽然轻量化程度不及 Isight 软件, 但有效避免了模型的失真. 两种轻量化设计方法各有优缺点, 在具体使用过程中, 如果对有限元软件非常精通, 能够保证模型在各软件间的转换不失真, 始终保持高精度, 使用 Isight 进行轻量化分析可以得到较好的效果; 而如果无法保证模型在有限元软件中的精度, 且计算机配置一般, 则利用本文方法可以得到比较好的结果.

5 结论

本文采用拉丁超立方试验设计方法进行采样, 用 Kriging 近似模型代替物理模型进行副车架的轻量化设计. 优化后的副车架在满足应力

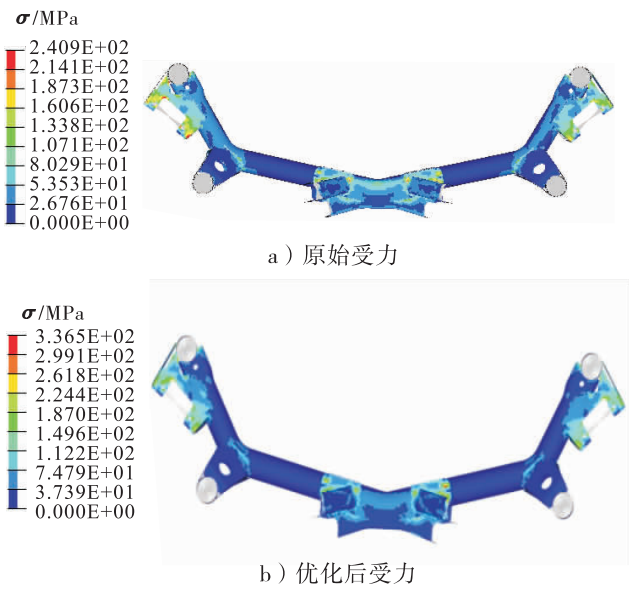


图 7 副车架优化前后受力对比

Fig. 7 Comparison of force before and after optimization of subframe

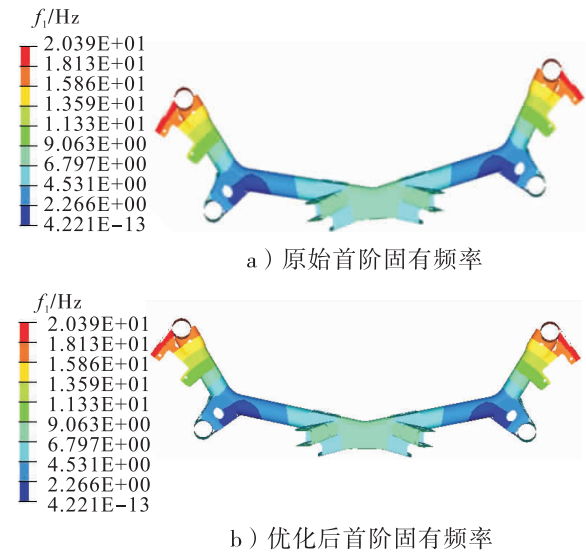


图 8 副车架优化前后首阶固有频率对比

Fig. 8 The comparison of the first order natural frequencies before and after optimization of subframe

表3 不同方法对副车架优化结果对比

Table 3 The comparison of subframe optimization results with different methods

方法	T_1 /mm	T_2 /mm	T_3 /mm	T_4 /mm	T_5 /mm	T_6 /mm	T_7 /mm	T_8 /mm	T_9 /mm	T_{10} /mm	T_{11} /mm	m /kg	f_1 /Hz	σ /MPa	优化效果/%
文献[6]	2.5	2.5	2.5	2.2	2.0	3.0	2.2	2.0	2.5	2.0	2.0	11.745	121.14	386.0	6.79
文献[8]	2.3	2.3	2.2	2.5	2.2	2.8	2.2	2.4	2.5	2.4	3.8	10.98	116.2	310.8	12.1
本文方法	2.5	2.3	2.2	2.5	2.2	2.7	2.3	3.0	2.5	2.6	3.8	11.3	112.8	336.5	10.3
初始设计	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	3.0	4.0	12.5	125.8	240.9	

与模态等特性下,质量由 12.5 kg 减少至 11.3 kg,减重 10.3%,轻量化效果良好.

Kriging 近似模型在副车架轻量化设计中较传统优化方法有较大优势,但与 Isight 优化方法相比,两者各有优缺点. 因此,在轻量化设计中,应该根据硬件配置、实际需求进行选择.

参考文献:

[1] 汪伟,莫蓉,范庆明. 基于响应面模型的跨音速转子叶片气动优化设计研究[J]. 西安工业大学学报,2013,33(2):114.

[2] 张勇. 基于近似模型的汽车轻量化优化设计方法[D]. 长沙:湖南大学,2009.

[3] 张超. 基于克里金(Kriging)近似模型的风管多阀门优化调节方法[J]. 暖通空调,2015,45(7):96.

[4] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报,2016,37(11):3197.

[5] 许瑞飞,宋文萍,韩忠华. 改进 Kriging 模型在翼型气动优化设计中的应用研究[J]. 西北工

业大学学报,2010(4):503.

[6] 李锦,苏小平,王宏楠,等. 基于灵敏度分析的轿车副车架轻量化研究[J]. 机械科学与技术,2013,32(11):1650.

[7] 丁荣,苏小平,王宏楠. 轿车副车架轻量化设计[J]. 机械设计,2015,32(3):37.

[8] 王卫,王东方,缪小冬,等. 基于 Isight 的轿车副车架优化设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2016,37(2):26.

[9] 高月华. 基于 Kriging 代理模型的优化设计方法及其在注塑成型中的应用[D]. 大连:大连理工大学,2009.

[10] 操安喜,刘蔚,崔维成. 载人潜水器耐压球壳的多目标优化设计[J]. 中国造船,2007(3):107.

[11] 李飞. 代理模型预测研究及其在叶轮机械中的应用[D]. 大连:大连理工大学,2014.

[12] 于海莲,王永泉,陈花玲,等. 响应面模型与多目标遗传算法相结合的机床立柱参数优化[J]. 西安交通大学学报,2012,46(11):80.