# 起竖系统的优化设计

李忠明 焦宗夏 王克军

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

**摘 要**: 对起竖系统的优化设计从快速性、受力情况等方面进行了分析,确定了优化目标. 对每个目标函数进行无量纲化处理,采用传统的线性加权法进行了多目标优化求解. 采用均匀试验设计确定样本点,基于协同仿真获得样本数据,建立了多项式响应面模型,对某起竖系统关键支点的位置进行了多学科优化. 通过构造的评价函数,同传统的多目标优化方法得到的结果进行比较,分析了 2种方法的差异,表明了多项式响应面方法的有效性,为起竖系统的进一步开发和设计提供了有利的工具.

**关 键 词**: 起竖系统; 多目标优化; 试验设计; 响应面模型

**中图分类号**: TP 391. 7

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965 (2007) 02-0176-04

## Optimum design of erecting system

Li Zhongming Jiao Zongxia Wang Kejun

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Optimum design of erecting system was analyzed from the points of view of rapidity and acting force, and the objective function of optimization was established. Each objective function was nondimensionalized, and the multiobjective optimization function was solved by conventional weighting method. Sample point was appointed by uniform design. The polynomial response surface model was set up based on sample experimental data of collaborative simulation. Multidisciplinary design optimization of the position of key pivots on some erecting system was carried out. The polynomial response surface method was compared with conventional multiobjective optimization method through the evaluation function constructed. It shows that the polynomial response surface method is effective by analyzing the difference between the two methods. This method is a favorable tool for further development and design of erecting system.

Key words: erecting system; multiple objective optimization; design of experiment; response surface model

某大型起竖装置需要将负载从水平状态推动到垂直状态,通常采用液压驱动的方案,这样可以充分发挥液压系统行程长、推力大的特点. 该起竖装置要求起竖过程具有一定的快速性和稳定性,而液压缸活塞面积、与负载铰接点的位置等对起竖过程的动态特性有着显著的影响[1],这就涉及到机械结构运动学、液压系统设计等学科的内容. 多学科设计优化 (MDO, Multidisciplinary Design Optimization)是工业界新兴起的一门新技术,它通过综合考虑各学科的相互作用产生的协同效应,从整个系统的角度来进行复杂系统的设计,得到系统的整体最优解. 近似模型技术是当前 MDO 研究中的热点之一[2-3].

本文考虑系统的整体性能要求,从机械结构和液压系统的设计角度出发,对该装置的设计进行了多目标、多学科的优化,基于仿真模型的协同计算,采用均匀试验设计和响应面近似模型等手段,证明了优化设计的有效性.

**收稿日期**: 2006-03-22

**基金项目**: 武器装备预研基金资助项目 (51474040304HK0101)

**作者简介**: 李忠明 (1977 - ),男,山东德州人,博士生, lzm@asee. buaa. edu. cn.

## 1　起竖系统分析

图 1为起竖机构简化示意图. 其中, $O_2O_3$ 为起竖液压缸,推动负载绕支点 $O_1$ 转动; $h$为 $O_1$, $O_2$ 的垂直距离; $L_1$ 为 $O_1O_2$ 的距离; $L_2$ 为 $O_2O_3$ 的距离; $L_3$ 为 $O_1O_3$ 的距离; $e$为 $O_1O_2$ 的水平距离. 设负载重力对 $O_1$ 的转矩为 $M$,忽略风载荷等因素的影响,负载在起竖角度 α时,应满足力矩平衡方程:

$$FL_3\cos\varphi = M \tag{1}$$

其中, $F$为液压缸作用力; φ为液压缸与负载垂线的夹角. 式 (2)为求解 φ所用到的公式:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi_1 \tag{2}$$

$\varphi_1$ 为液压缸与负载的夹角:

$$\varphi_1 = \arccos\frac{L_2^2 + L_3^2 - L_1^2}{2L_2L_3} \tag{3}$$

其中

$$L_1 = \sqrt{e^2 + h^2}$$

$$L_2 = \sqrt{L_1^2 + L_3^2 - 2L_1L_3\cos(\alpha + \theta)}$$

$$\theta = \arctan(h/e)$$

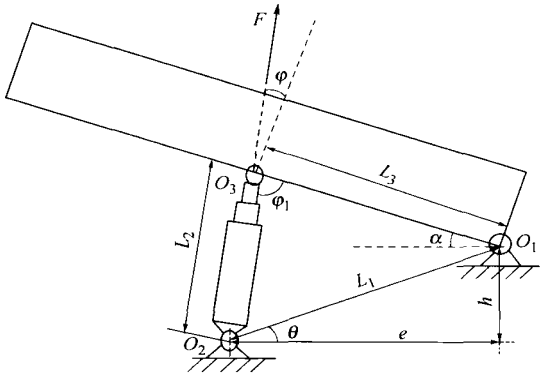


图 1　起竖机构简化图

## 2　多目标优化设计

对于复杂系统的优化设计,要考虑到系统的性能、效率、受力状况等多个方面. 对于该类起竖系统有自己本身独特的设计要求和特点,本文从以下方面进行了分析.

### 2 1　快速性设计

起竖系统要求在一定时间内完成起竖动作,这就需要该机构的设计应该具有快速性的特点. 起竖时间为 $t = s/v$, $v$为活塞面积和流量控制率的函数,在活塞面积和流量控制率一定的情况下, $v$为确定值,此时要求液压缸的行程 $s$要尽量短. 设液压缸在初始位置的长度为 $L_0$,负载达到垂直状态时的长度为 $L_m$,则液压缸的行程为

$$s = L_m - L_0 = \sqrt{e^2 + (h + L_3)^2} - \sqrt{L_1^2 + L_3^2 - 2L_1L_3\cos(\alpha_0 + \theta)} \tag{4}$$

其中 $\alpha_0$ 为负载初始位置与水平面所夹的锐角.

起竖过程需要液压缸具有长行程的特点,受安装空间的限制,通常采用多级液压缸来驱动负载. 液压缸的行程越长则要求级数越多,会使液压缸的加工制造费用增加. 所以从费用的角度也是希望液压缸的行程越短越好. 从式 (4)看出液压缸的行程受支点位置的影响.

### 2 2　举升力系数设计

举升力系数反映了起竖机构的受力情况,同时它影响到液压系统的油压. 举升力系数为

$$K = \frac{F}{G} \tag{5}$$

其中 $G$为负载重量,为一定值. 举升力系数在起竖过程中随着液压缸作用力 $F$变化,为了改善起竖系统的受力状况,应减小举升力系数. 本文取最大举升力系数为优化目标,对于该类起升设备,在初始位置时驱动负载的作用力最大,计算公式如式 (6)所示,此时的举升力系数最大.

$$F_{max} = \frac{M}{L_3\cos\varphi_0} \tag{6}$$

其中 $\varphi_0$ 为初始位置对应的夹角.

从式 (6)中可以看出, $F_{max}$取决于液压缸的初始位置,即 $O_2$, $O_3$ 两个支点的位置,因此要求支点的布局要使得初始位置作用力尽可能的小. 这样最大作用力的优化设计问题也归结到支点的位置布局设计上.

通过以上分析可知,为了满足快速性和举升力系数的要求必须对液压缸支点的位置进行多目标的优化设计. 求解多目标优化问题,有线性加权法、理想点法等多种方法,本文取式 (4)和式 (6)为优化目标,采用线性加权法进行了优化求解. 为了消除目标值相对大小对优化结果的影响,要先将每个单目标函数做无量纲化处理. 本文采用函数值除以中值的方法,如式 (7)所示:

$$\bar{f} = \frac{f(x)}{f_m} \tag{7}$$

其中 $f_m$ 为自变量变化范围内目标函数值的中值.

线性加权方法的目标函数为

$$f_w = w_1\bar{f}_1 + w_2\bar{f}_2 \tag{8}$$

其中, $w_1$, $w_2$ 为权重系数; $\bar{f}_1$, $\bar{f}_2$ 分别为式 (4)、式 (6)对应目标函数无量纲化后的结果.

## 3 响应面方法

### 3.1 多项式响应面模型

近似模型是近年来多学科设计优化中的一个研究热点,使用一个计算量小的代理模型来代替原有的高精度分析模型进行计算,不仅克服了原有模型计算量大的缺点,而且能够消除掉数值计算噪声[4]. 多项式响应面模型是一类常用的近似模型[5],它通过多项式来拟合自变量和响应量的函数关系. 二阶多项式响应面的数学表达式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n}\beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n}\beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\beta_{ij} x_i x_j \tag{9}$$

其中, $n$为自变量的个数; $x_i$, $x_j$为自变量; $\beta_i$, $\beta_{ii}$, $\beta_{ij}$为待定系数. 在获得足够样本点数据的情况下,利用最小二乘法可以求出待定系数. 取 $L_3$, $h$, $e$为自变量,起竖时间和最大作用力为响应量,建立起竖系统的多项式响应面模型.

### 3.2 均匀试验设计

对于构造响应面模型的样本数据点的获取,需要通过试验设计来完成,它决定了样本点的个数和空间分布情况[6]. 比较常用的试验设计方法有正交设计、中心复合设计、均匀设计等. 采用均匀试验设计可以用更少的试验次数获得期望的结果,而且具有一定的稳健性. 均匀试验设计方案可以使得试验点更均匀地分布在整个设计空间,更能充分地反映出系统的性能. 本文采用 3因素 5水平的 25次均匀试验设计的方法来安排仿真试验[7],得到数据点,试验方案参考文献[7],考虑篇幅限制,设计表不予列出,仅给出某起竖系统的设计变量名称及其上下限,如表 1所示.

表 1 设计变量表

| 边界 | $L_3$/m | $h$/m | $e$/m |
|---|---|---|---|
| 上限 | 4.0 | 1.5 | 3.5 |
| 下限 | 3.0 | 1.0 | 2.5 |

为了处理的方便,将设计变量做线性变换,将变化范围统一到 $[-1, 1]$区间内.

### 3.3 仿真试验

本课题组针对起竖系统的设计,开发了多学科设计与仿真研究平台. 在该系统中集成了不同学科的仿真软件,可以方便地建立起竖机构的液压、机械以及控制模型,并支持协同仿真. 建立了起竖系统的整体模型之后,在活塞面积、流量控制率等其它参数不变的情况下根据均匀设计表,进行全数字仿真试验.

## 4 优化结果

分别利用传统的线性加权方法和基于响应面的优化方法,对某起竖系统进行了优化设计. 对于构造响应面模型的响应量观测值也采用了式(8)所示的方法,将起竖时间和最大作用力做了线性加权处理,将 2个响应量转化为 1个. 权值的大小反映了 2个目标的相对重要程度,针对不同的设计要求可以调节权重值. 本文用到的权重系数与线性加权优化方法中的一致, $w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$. 同时以式(8)为评价函数来比较优化结果的优劣. 取初值为 $x_0 = [3.2 \quad 1.3 \quad 3.0]$, 2种优化方法的得到的优化结果如表 2所示. 通过评价指标 $f_w$可以看出,响应面法的优化结果要优于线性加权法的优化结果.

表 2 优化结果表

| 优化方法 | $L_3$/m | $h$/m | $e$/m | $f_w$ |
|---|---|---|---|---|
| 线性加权法 | 3.38 | 1.50 | 2.96 | 0.88 |
| 响应面法 | 3.62 | 1.15 | 3.12 | 0.85 |

负载在起竖过程中,流量控制率要随着起竖角度的变化而改变. 由于流量的变化会造成起竖速度的变化,同时由于通常采用多级伸缩缸,在换级时由于活塞作用面积的变化也会造成起竖速度的变化,或者为减小液压缸换级带来的冲击要进行流量的实时调节[8]. 在响应面模型中,由于取起竖时间作为响应量,因而包含了这些因素的影响. 而在线性加权模型中只是以液压缸行程最小(式(1))为目标函数,没有涉及到这些因素,而且若想加入这些因素,则需要复杂的公式推导.

起竖时间

$$t = \frac{s}{v(t)} \tag{10}$$

其中, $s$为液压缸行程; $v(t)$为速度,其大小与流量和活塞面积有关.

$$v(t) = \frac{Q(t)}{A(t)} = \frac{Q(c(t))}{A(t)} \tag{11}$$

其中, $Q(t)$为流量,它是流量控制率 $c(t)$的函数; $A(t)$为活塞面积,为离散值 $A_1, A_2, \cdots, A_n$,随着起竖时间变化. 以三级液压缸为例:

$$A(t) = \begin{cases} A_1 & t \le T_1 \\ A_2 & T_1 < t \le T_2 \\ A_3 & T_1 < 1 \end{cases}$$

其中 $T_1$, $T_2$为液压缸换级时刻.

综合式(10)和式(11)可得到起竖时间和液压缸行程的关系为

$$t = \frac{sA(t)}{Q(c(t))} \tag{12}$$

由此可见采用起竖时间作为响应量的响应面模型更为合理,计算量也更小,而且表 2中的结果也表明优化效果更加良好.

## 5 结 束 语

本文针对起竖系统的设计进行了分析,得出优化设计的目标. 采用均匀试验设计方案确定样本点,而后基于仿真试验数据,建立了某起竖系统的多项式响应面模型. 把线性加权求解多目标优化问题的方法与多项式响应面方法进行了比较,通过构造的评价函数值进行对比,说明了针对该起竖系统的优化设计,响应面方法要优于传统的多目标优化方法.

### 参考文献 (References)


[1] 黄先祥,高钦和,郭晓松. 大型装置起竖过程的动力学建模研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 271 - 273
Huang Xianxiang, Gao Qinhe, Guo Xiaosong. Dynamic modeling of erected process for large mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(3): 271 - 273 (in Chinese)

[2] Golovidov O, Kodiyalam S, Marineau P. Flexible implementation of approximation concepts in an MDO framework[R]. AIAA-98-4959, 1998

[3] Timothy W S, Timothy M M, John J K. Kriging model for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization[J]. AIAA Journal, 2001, 39(12): 2233 - 2241

[4] Kodiyalam S, Yang R J, Gu L. High-performance computing and surrogate modeling for rapid visualization with multidisciplinary optimization[J]. AIAA Journal, 2004, 42(11): 2347 - 2354

[5] 王小妮,余雄庆. 大展弦比联结翼结构重量估算[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(12): 1289 - 1292
Wang Xiaoni, Yu Xiongqing. Predictions of structural weight for high aspect ratio joined-wings[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(12): 1289 - 1292 (in Chinese)

[6] Kodiyalam S, Lin J, Wujek B. Design of experiments based response surface models for design optimization[R]. AIAA-98-2030, 1998

[7] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:北京科学出版社, 2001
Fang Kaitai, Ma Changxing. Orthogonal and uniform design of experiment[M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)

[8] 高钦和,黄先祥. 多级缸起竖系统运动过程的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1563 - 1565
Gao Qinhe, Huang Xianxiang. Dynamic modelling and simulation of erecting system with multi-stage cylinder[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7): 1563 - 1565 (in Chinese)


(责任编辑:卢　硕)

(上接第 144页)

可以看出,这种情况下 μ > 1,表示在不确定参数摄动下系统不满足准则要求;相应的 Nichols曲线也穿越了表征准则的椭圆区域,两者的结果仍然是一致的. 如果确实存在这种摄动的可能,则控制律设计需要进一步优化.

需要指出的是,如果将表征飞行状态的变量,如高度、马赫数等也看为一种参数不确定性,建立飞机对象和控制器的线性分式变换表达,利用 μ分析方法对准则进行评估,则可以预见,得到的结果可以完全覆盖整个飞行包线,这也是下一步应进行的工作.

## 3 结 束 语

控制律的评估与确认是一项重要的工作,本文针对目前应用的网格法的不足,给出了一种基于 μ分析的方法. 该方法利用线性分式变换建立含不确定摄动的飞机对象模型,采用线性稳定裕度准则对设计的飞行控制律进行了评估与确认. 根据该方法,可以方便地将控制律评估与确认这一鲁棒性能分析问题转化为鲁棒稳定性分析问题. 分析和仿真结果表明,基于 μ分析的方法能克服传统网格法的缺点,网格间的点可以得到评估与确认,同时不存在网格法的"维数灾"问题,是一种很有潜力的先进分析与评估方法.

### 参考文献 (References)


[1] Fielding C, Varga A, Bennani S, et al. Advanced techniques for clearance of flight control laws[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002

[2] Magni J F, Bennani S, Terlouw J. Robust flight control: a design challenge[M]. London: Springer-Verlag, 1997

[3] Bates D G, Kureemun R, Mannchen T. Improved clearance of a flight control law using μ-analysis techniques[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2003, 26(6): 869 - 884

[4] Deodhare G, Patel V V. A "modern" look at gain and phase margins: an $H_\infty/\mu$ approach[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 1998: 325 - 335

[5] Balas G J, Doyle J C. μ-analysis and synthesis toolbox user's guide (version 3.06)[M]. Natick, MA: MUSYN Inc and the MathWorks Inc, 2001


(责任编辑:张　嵘)