

# 基于物理规划的湿式多盘制动器不确定性优化设计\*

于森 石博强 姜勇

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 湿式多盘制动器设计中存在许多不确定因素。考虑这些不确定因素,应用物理规划方法对制动器进行优化设计,并与传统线性加权优化模型结果进行比较,证明物理规划方法应用于湿式多盘制动器不确定性优化设计模型是可行的,比传统线性加权法更符合实际要求。

**关键词:** 物理规划 湿式多盘制动器 不确定性 优化设计

中图分类号: TH122; U463.51<sup>+</sup>2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0022-05

## Application of Physical Programming in Uncertainty Optimization Design of Multi-disc Wet Brake

Yu Miao Shi Boqiang Jiang Yong

(College of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

### Abstract

There are many uncertain factors in the design of multi-disc wet brake. Considering of that, optimization design was applied with physical programming. Results of physical programming were compared with the traditional linear weighted-sum optimization. It is feasible to apply physical programming method to uncertainty optimization design of multi-disc wet brake. It meets the actual needs better than the linear weighted-sum method.

**Key words** Physical programming, Multi-disc wet brake, Uncertainty, Optimization design

### 引言

不确定性优化设计是指设计过程中考虑设计变量、设计参数、设计决策和系统分析模型等不确定性的影响,得到相对上述不确定性变化不敏感、约束条件可靠和目标函数稳健的最优设计结果<sup>[1]</sup>。不确定性存在于工程设计的各个阶段,在总体方案设计阶段,湿式制动器设计问题通常可描述为若干个设计准则,有些设计准则相互冲突,因而需要针对多种设计方案进行比较和折衷,得到满足设计准则偏好的最优妥协方案。湿式多盘制动器设计问题可抽象为优化设计问题求解。优化设计问题的建立需要选择设计变量,将设计准则抽象为约束条件和目标函数,这一过程本身就存在不确定性。某一设计准则可以选择为约束条件,也可以选择为目标函数,目标函数可以是单目标函数,也可以是多目标函数。因

此,不同的优化设计问题可得到不同的最优设计方案。在优化设计问题的建立和求解过程中,若不考虑客观存在的不确定性,将优化设计问题作为确定性问题求解,可能会漏掉工程实际可接受的最优方案。本文将物理规划方法应用于制动器的优化设计中,以得出适用于客观实际的结果。

### 1 物理规划法

对于多目标优化问题,要求各个目标都达到最优一般较难,尤其是在各目标之间存在矛盾时。目前,多目标问题在传统的设计优化中常采用线性加权和方法实现,但是线性加权和方法对于复杂的工程问题得到 Pareto 解的计算成本很大,并且有可能丢失 Pareto 点,不能获得满意的设计。为此 Messac A 提出采用物理规划方法构造新的优化设计模型替代传统的优化设计模型。

物理规划能从本质上把握设计者的偏好,大大减轻大规模多目标设计问题的计算负担,并将整个设计过程置于一个更加灵活、自然的框架中;物理规划中需要设计者设定的各设计目标偏好区间的边界值具有实际的物理意义,这与传统的基于权重的多目标优化方法完全不同,使得它无论对一般技术人员还是专家都更容易使用;物理规划无论对于凸有效域还是凹有效域,改变各设计目标的偏好区间,得到的最优解可以达到有效域中的任一点<sup>[3]</sup>。

物理规划方法同等对待设计准则,没有将设计准则抽象为约束条件和目标函数,而是结合工程实际情况,定量和定性描述设计问题,将设计准则分为软、硬两大类,并进行设计准则偏好分类,规定物理规划字典顺序,建立设计准则等级函数,构造物理规划优化设计模型。物理规划不属于优化方法,而是一种通过设计准则的映射构造优化设计模型的方法,物理规划优化设计模型可表述为标准的优化设计模型,采用优化方法求解。物理规划的设计流程如图1所示。

物理规划的偏好分为4种类型:类型1设计准则越小越好;类型2设计准则越大越好;类型3最优设计趋于某一值最好;类型4设计准则在某范围内

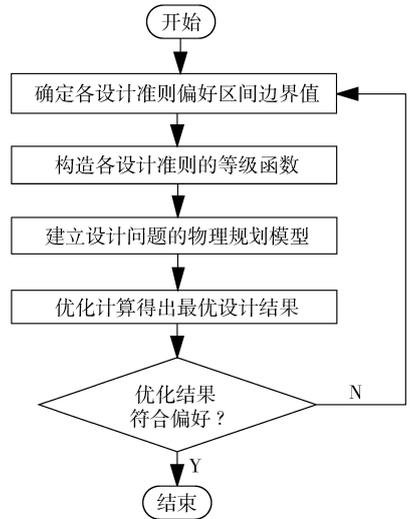


图1 物理规划设计流程图

Fig. 1 Flow chart of physical programming

最好。每个类型又由“软”型和“硬”型组成,分别用“S”和“H”表示,如图2所示。设计准则 $g$ 映射为相应的等级函数 $h$ ,等级函数越小代表设计最优,优化设计问题描述等价于最小化等级函数。软设计准则等级函数分区如图3所示,软设计准则可行区分为极好、较好、一般、较差和极差5级<sup>[2]</sup>。对于等级函数的构造文献[4]已详细说明,本文不做赘述。

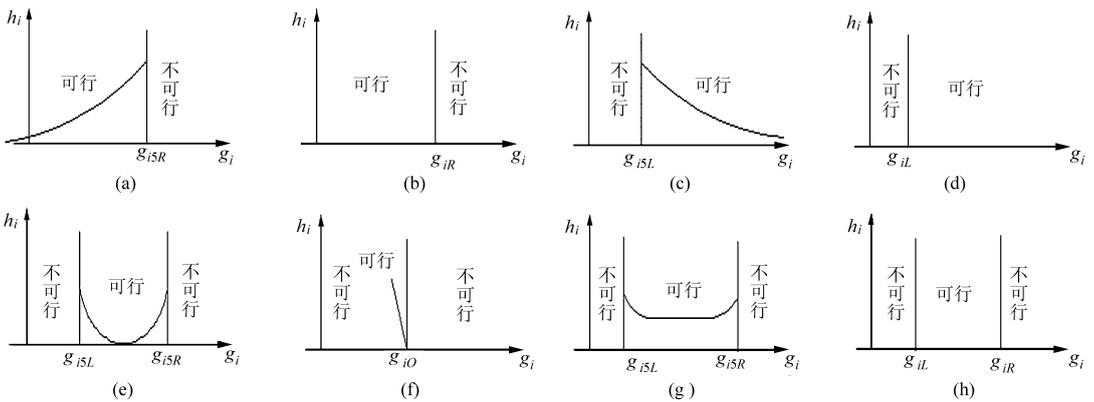


图2 物理规划偏好设计准则类型

Fig. 2 Classification of preference for each design metric

- (a) 类型 1,1-S (b) 类型 1,1-H (c) 类型 2,2-S (d) 类型 2,2-H
- (e) 类型 3,3-S (f) 类型 3,3-H (g) 类型 4,4-S (h) 类型 4,4-H

## 2 湿式多盘制动器优化设计模型

### 2.1 优化设计原则

对于湿式多盘制动器,制动过程中的磨损已不再是制动器失效的主要形式,而是摩擦表面不均匀的摩擦热引起摩擦偶件出现热-弹性变形。所以在设计制动器时既要从几何特性考虑,又要考虑热机现象对制动器的性能影响以及应力分布、摩擦机理

等。

摩擦表面压力分布主要分为3种:表面压力均匀分布;表面压力与半径成正比分布;表面均匀磨损,表面压力与半径成反比分布。其中表面压力与半径成反比分布有利于降低最高温度和最大热应力,是一种更合理的设计原则。要想达到表面压力与半径成反比分布,可以通过调整以下方面实现<sup>[5-6]</sup>:

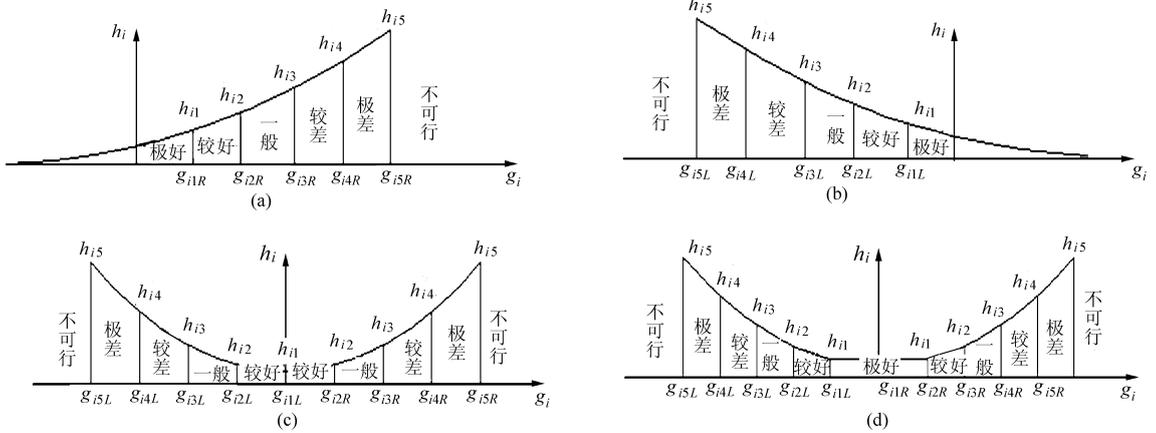


图3 软设计准则等级函数分区

Fig. 3 Class function regions for soft design criterion

(a) 1-S (b) 2-S (c) 3-S (d) 4-S

(1) 改变活塞的形状,减小外径处的刚度,使活塞压力中心靠近内径处,其内径端压力分布明显高于外径端,从而使热流密度沿半径方向均匀分布成为可能;同时,良好的刚度分布还可以减少各摩擦副衬片压力分布之间的差异性,使各摩擦副衬片压力分布同时接近理想分布。

(2) 提高支撑盘的刚度,改进支撑盘的安装形式,在支撑盘外侧靠近内径处增加轴向固定支撑。通常支撑盘外侧的浮动油封能起到轴向固定支撑的作用。

(3) 采用合理的摩擦偶件厚度也可以使各摩擦副衬片压力分布同时接近理想分布。

根据某一湿式多盘制动器具体的适用环境,遵循表面均匀磨损设计的原则,其优化设计问题可描述为如下10个设计准则:活塞外径为250 mm左右;活塞内径为170 mm左右;摩擦片外径250 mm左右;摩擦片内径170 mm左右;摩擦片数量6片左右;系统油压10 MPa左右;一次制动后制动元件的温升小于5℃,且越小越好;制动力矩小于地面附着力矩;制动距离小于11 m,且越小越好;摩擦片厚度4 mm左右。

提高制动器的工作效率,缩短制动距离,对保证作业、行驶安全非常重要。因此,在制动器最优化设计中,应以制动距离最小作为最优化设计的目标。另外,制动器失效形式主要是制动过程中摩擦片温度过高产生的翘曲和磨损,因此应把制动器温升最小作为另一个优化目标。

## 2.2 传统优化设计模型

### (1) 设计变量

选择活塞内外径、摩擦片内外径、摩擦片厚度、

制动油压和摩擦片数量7个参数作为设计变量。

### (2) 目标函数

以制动距离最小和一次制动后制动元件的温升最小作为目标函数。

### (3) 约束条件

活塞外径  $g_1$ : 200 ~ 300 mm; 活塞内径  $g_2$ : 160 ~ 180 mm; 摩擦片外径  $g_3$ : 200 ~ 300 mm; 摩擦片内径  $g_4$ : 160 ~ 180 mm; 摩擦片数量  $g_5$ : 1 ~ 10; 系统油压  $g_6$ : 8 ~ 12 MPa; 一次制动后制动元件的温升  $g_7$ : 小于等于5℃; 制动力矩  $g_8$ : 小于等于地面附着力矩; 摩擦片厚度  $g_9$ : 3 ~ 5 mm; 制动距离  $g_{10}$ : 小于等于11 m。

### (4) 优化结果

用线性加权法对制动器进行优化设计,加权因子分别为1和0.5,优化结果为:活塞外径217.5 mm,活塞内径178.4 mm,摩擦片外径299.5 mm,摩擦片内径165.5 mm,摩擦片数量7.3,摩擦片厚度5 mm,系统油压8.7 MPa,温升2.7℃,制动力矩105 376 N·m,制动距离3.58 m。

## 2.3 物理规划优化设计模型

将湿式多盘制动器设计目标和约束条件作为设计准则进行偏好分类,建立设计准则偏好结构见表1。其中制动力矩  $g_8$  应越大越好,但为了防止打滑其值也应小于地面附着力矩,所以这条设计准则既包含“软”型3-S也包含“硬”型1-H。规定物理规划字典顺序,建立湿式多盘制动器设计准则等级函数,设计准则  $g_5$ 、 $g_6$ 、 $g_8$  和  $g_{10}$  的等级函数见图4~7。

表 1 湿式多盘制动器偏好设计准则结构

Tab. 1 Preference regions for multi-disc wet brake

设计变量	类型	$g_{1L}$	$g_{1R}$	$g_{2L}$	$g_{2R}$	$g_{3L}$	$g_{3R}$	$g_{4L}$	$g_{4R}$	$g_{5L}$	$g_{5R}$
活塞外径 $g_1/\text{mm}$	4-S	200	210	220	230	240	260	270	280	290	300
活塞内径 $g_2/\text{mm}$	4-S	160	162	164	166	168	172	174	176	178	180
摩擦片外径 $g_3/\text{mm}$	4-S	200	210	220	230	240	260	270	280	290	300
摩擦片内径 $g_4/\text{mm}$	4-S	160	162	164	166	168	172	174	176	178	180
摩擦片数 $g_5$	4-S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
系统油压 $g_6/\text{MPa}$	3-S	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0
温升 $g_7/\text{°C}$	1-S						1	2	3	4	5
制动力矩 $g_8/\text{N}\cdot\text{m}$	2-S, 1-H	103 553	104 553	105 553	106 553	107 553					
摩擦片厚度 $g_9/\text{mm}$	3-S	3.0	3.4	3.6	3.8	4.0	4.0	4.2	4.4	4.6	5.0
制动距离 $g_{10}/\text{m}$	1-S						3.5	4.0	6.0	8.0	11.0

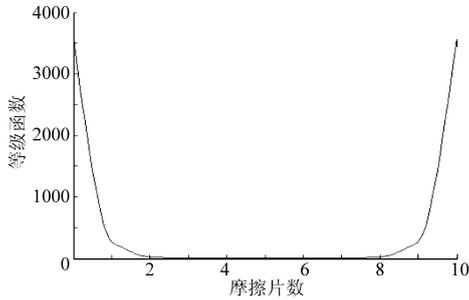


图 4 摩擦片数设计准则 4-S 等级函数

Fig. 4 4-S level function of friction plate number

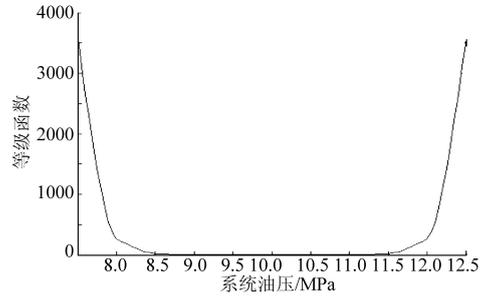


图 5 系统油压设计准则 3-S 等级函数

Fig. 5 3-S level function of system oil pressure

物理规划设计模型为

$$\begin{cases}
 \min_{\mathbf{X}} F(\mathbf{X}) = \min_{\mathbf{X}} \left\{ \lg \left( \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} h_i(g_i(\mathbf{X})) \right) \right\} \\
 g_{15L} \leq g_1(\mathbf{X}) \leq g_{15R} & (4-S) \\
 g_{25L} \leq g_2(\mathbf{X}) \leq g_{25R} & (4-S) \\
 g_{35L} \leq g_3(\mathbf{X}) \leq g_{35R} & (4-S) \\
 g_{45L} \leq g_4(\mathbf{X}) \leq g_{45R} & (4-S) \\
 g_{55L} \leq g_5(\mathbf{X}) \leq g_{55R} & (4-S) \\
 g_{65L} \leq g_6(\mathbf{X}) \leq g_{65R} & (4-S) \\
 g_7(\mathbf{X}) \leq g_{75R} & (1-S) \\
 g_{85L} \leq g_8(\mathbf{X}) \leq g_{8U} & (2-S, 1-H) \\
 g_{95L} \leq g_9(\mathbf{X}) \leq g_{95R} & (3-S) \\
 g_{10}(\mathbf{X}) \leq g_{105R} & (1-S)
 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]$

### 3 优化设计结果与分析

应用 Matlab 遗传算法工具箱对物理规划优化设计模型(1)进行求解,优化结果为:设计变量  $\mathbf{X} = [213.5, 174.5, 278.5, 165.5, 7.2, 9.6, 4.2]^T$ 。设计目标  $g_1(\mathbf{X}) = 213.5, g_2(\mathbf{X}) = 174.5, g_3(\mathbf{X}) =$

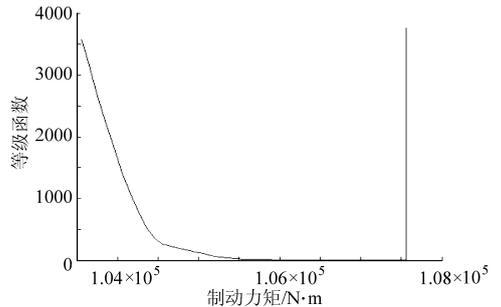


图 6 制动力矩设计准则 2-S & 1-H 等级函数

Fig. 6 2-S & 1-H level function of braking torque

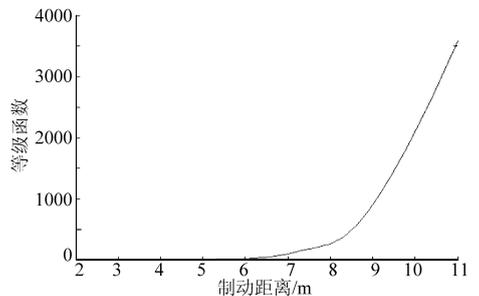


图 7 制动距离设计准则 1-S 等级函数

Fig. 7 1-S level function of braking distance

$278.5, g_4(\mathbf{X}) = 165.5, g_5(\mathbf{X}) = 7.2, g_6(\mathbf{X}) = 9.6, g_7(\mathbf{X}) = 3.39, g_8(\mathbf{X}) = 107\ 230, g_9(\mathbf{X}) = 4.2, g_{10}(\mathbf{X}) = 3.53$ 。由于实际设计变量结构尺寸应取整

数,对上述优化结果稍调整得: $g_1(\mathbf{X}) = 214, g_2(\mathbf{X}) = 175, g_3(\mathbf{X}) = 279, g_4(\mathbf{X}) = 166, g_5(\mathbf{X}) = 7, g_6(\mathbf{X}) = 9.8, g_7(\mathbf{X}) = 3.48, g_8(\mathbf{X}) = 106\ 940, g_9(\mathbf{X}) = 4.2, g_{10}(\mathbf{X}) = 3.54$ 。

将物理规划结果和应用传统线性加权优化设计模型优化的结果进行比较,各设计目标结果与偏好区间对应如表2所示。

由表2可知,各设计目标落在不同的偏好区间,

物理规划优化模型结果中摩擦片内径、摩擦片数和厚度、系统油压、制动力矩和制动距离处于很好区间;活塞内径和摩擦片外径处于一般区间;活塞外径和温升处于较差区间;无设计目标落在极差区间。但线性加权优化模型结果中除活塞外径和温升优于物理规划模型活塞外径值外,其余结果均比物理规划优化模型结果差。

表2 优化结果与偏好区间对应表

Tab.2 Optimization results and preference regions for multi-disc wet brake

设计变量	区间									
	极差区	较差区	一般区	很好区	极好区	很好区	一般区	较差区	极差区	
活塞外径 $g_1/\text{mm}$	200	210 *	** 220	230	240	260	270	280	290	300
活塞内径 $g_2/\text{mm}$	160	162	164	166	168	172	174 *	176	178 **	180
摩擦片外径 $g_3/\text{mm}$	200	210	220	230	240	260	270	* 280	290 **	300
摩擦片内径 $g_4/\text{mm}$	160	162	164 **	166 *	168	172	174	176	178	180
摩擦片数 $g_5$	1	2	3	4	5	6	* 7 **	8	9	10
系统油压 $g_6/\text{MPa}$	8	8.5 **	9	9.5	* 10	10	10.5	11	11.5	12
温升 $g_7/^\circ\text{C}$						1	2 **	3 *	4	5
制动力矩 $g_8/\text{N}\cdot\text{m}$	103 553	104 553	** 105 553	106 553	* 107 553					
摩擦片厚度 $g_9/\text{mm}$	3	3.4	3.6	3.8	4	4	4.2 *	4.4	4.6	** 5
制动距离 $g_{10}/\text{m}$						2 *	** 4	6	8	11

注: \* 物理规划优化模型结果; \*\* 线性加权优化模型结果。

## 4 结束语

物理规划优化设计模型综合考虑了各个设计准则对设计的影响,在制动距离、摩擦片数、系统油压和温升几个存在冲突的设计准则之间折衷,与线性

加权优化模型相比物理规划优化设计模型得到的最优方案符合设计准则的偏好程度更高。因此,物理规划方法应用到湿式多盘制动器不确定性优化设计模型的建模上是可行的,比传统线性加权法更符合实际要求。

## 参 考 文 献

- 李晓斌,向杨蕊,金振中,等.不确定性设计优化理论与方法研究[J].机械设计,2007,24(9):1~4.  
Li Xiaobin, Xiang Yangrui, Jin Zhenzhong, et al. Study on the optimization theory and methodology of uncertainty design [J]. Journal of machine design, 2007,24(9):1~4. (in Chinese)
- 李晓斌,张为华,王中伟.基于物理规划的固体火箭发动机不确定性优化设计[J].固体火箭技术,2006,29(3):165~168.  
Li Xiaobin, Zhang Weihua, Wang Zhongwei. Uncertainty optimization design of solid rocketmotor based on physical programming[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006,29(3):165~168. (in Chinese)
- 田志刚,黄洪钟,姚新胜,等.模糊物理规划及其在结构设计中的应用[J].中国机械工程,2002,13(24):2131~2133.  
Tian Zhigang, Huang Hongzhong, Yao Xinsheng, et al. Fuzzy physical programming and its application to structural design [J]. China Mechanical Engineering, 2002,13(24):2131~2133. (in Chinese)
- 董书革,饶绮麟.基于偏好设计的物理规划理论[J].北京科技大学学报,2009,31(2):250~255.  
Dong Shuge, Rao Qilin. Physical programming theory based on preference design[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009,31(2):250~255. (in Chinese)
- 孙冬野,俞昌义,诸文农,等.湿式多片制动器活塞压盘设计方法[J].工程机械,1997(11):16~18.  
Sun Dongye, Yu Changyi, Zhu Wennong, et al. Design method of the pressure plate on the piston of wet-type [J]. Construction Machinery and Equipment, 1997(11):16~18. (in Chinese)

## 参 考 文 献

- 1 王国彪. 国外大型矿用挖掘机的现状与发展[J]. 矿山机械, 1999(11):8~13.
- 2 王新中. 国内外矿用挖掘机发展状况[J]. 矿山机械, 2004(9):52~53.  
Wang Xinzong. Development status of national and foreign mine-used excavator [J]. Mining & Processing Equipment, 2004(9):52~53. (in Chinese)
- 3 马鹏飞, 田齐. 超大型液压挖掘机的发展与进步[J]. 建筑机械, 2000(3):21~22.
- 4 刘静, 潘双夏, 冯培恩. 基于 ADAMS 的挖掘机液压系统仿真技术[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10):109~112.  
Liu Jing, Pan Shuangxia, Feng Pei'en. Study on simulation technology of excavator hydraulic system based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):109~112. (in Chinese)
- 5 马乐, 赵克利, 翟洪岩. 大型矿用挖掘机工作装置仿真[J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(增刊):361~363.  
Ma Le, Zhao Keli, Zhai Hongyan. Simulation of working equipment of heavy mining excavator [J]. Computer Aided Engineering, 2006, 15(Supp.):361~363. (in Chinese)
- 6 白玉琳, 陈进, 李世六, 等. 大型正铲液压挖掘机工作装置虚拟样机研究[J]. 建筑机械, 2008(13):81~84.  
Bai Yulin, Chen Jin, Li Shiliu, et al. Virtual prototyping research of large hydraulic face-shovel working device [J]. Construction Machinery, 2008(13):81~84. (in Chinese)
- 7 武宏伟, 权龙. 负载敏感型挖掘机液压系统能耗分析[J]. 液压气动与密封, 2009(6):34~38.  
Wu Hongwei, Quan Long. Energy loss research of load-sensing excavator's hydraulic system [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2009(6):34~38. (in Chinese)
- 8 Ha Q P, Nguyen Q H, Rye D C, et al. Impedance control of a hydraulically actuated robotic excavator [J]. Automation in Construction, 2000, 5(9):421~435.
- 9 潘玉安, 程洪涛, 姜迪友, 等. 基于 ADAMS 挖掘机工作装置的仿真与优化设计[J]. 煤矿机械, 2009, 30(3):15~17.  
Pan Yu'an, Cheng Hongtao, Jiang Diyou, et al. Based on ADAMS of working equipment of excavator device simulation and design optimization [J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(3):15~17. (in Chinese)
- 10 郭勇, 张德胜, 冀谦. 基于 AMESim 的挖掘机动臂液压回路仿真研究[J]. 建筑机械, 2007(23):96~98.  
Guo Yong, Zhang Desheng, Ji Qian. Study on hydraulic circuit simulation based on AMESim for boom of excavator [J]. Construction Machinery, 2007(23):96~98. (in Chinese)
- 11 郑小军, 陶薇. 基于 AMESim 的液压挖掘机运动和控制仿真[J]. 液压气动与密封, 2009(2):24~26.  
Zheng Xiaojun, Tao Wei. Motion simulation and control parameters of hydraulic excavator based on AMESim software [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2009(2):24~26. (in Chinese)
- 12 郑建荣. ADAMS—虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

~~~~~

(上接第 26 页)

- 6 阎清东, 宿新东. 湿式多片制动器摩擦衬片初始压力分布研究[J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(1):42~46.  
Yan Qingdong, Su Xindong. Lining initial pressure distribution of wet multidisc brake [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 20(1):42~46. (in Chinese)
- 7 Chen Wei, Messac A, Sundararaj G J. Exploration of the effectiveness of physical programming in robust design [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2000, 122(2):155~163.
- 8 范爱芳. 密封湿式圆盘制动器设计[J]. 工程机械, 1998(7):16~19.  
Fan Aifang. Design of sealed wet disk brake [J]. Construction Machinery and Equipment, 1998(7):16~19. (in Chinese)
- 9 刘宝璇, 赵瑞清, 王纲. 不确定性规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 10 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2005.