

高速开关阀在液压缸起动与到位过程中的速度控制研究

高钦和 宋海洲 刘志浩 董庭琼 杨志勇

第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室,西安,710025

摘要:为了研究液压缸起动和到位过程中的速度控制问题,设计了高速开关阀与液压缸并联连接的油路,即将高速开关阀连接于液压缸有杆腔与无杆腔之间。分别针对液压缸起动和到位两个过程的速度控制问题,开展了仿真与实验研究。研究结果表明,高速开关阀能有效降低液压缸起动时的活塞最大加速度和到位时的活塞末速度,实现起动过程和到位过程中的速度控制。

关键词:液压系统;高速开关阀;速度控制;仿真

中图分类号:TH137.7

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.010

Research on Speed Control in Starting and Stopping Processes of Hydraulic Cylinder with HSV

Gao Qinhe Song Haizhou Liu Zhihao Dong Tingqiong Yang Zhiyong
Lab. of Armament Launch Theory & Technology, National Key Discipline,
The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shanxi, 710025

Abstract: A hydraulic loop that HSV connected between rod cavity and no—stem cavity of hydraulic cylinder was designed to study the speed control problem in the starting and stopping processes of hydraulic cylinder. The starting and stopping speed control problem of hydraulic cylinder was studied by simulation and experiments. Research results show that HSV can reduce the maximum starting acceleration and the final velocity effectively, and can realize the speed control in the starting and stopping processes of hydraulic cylinder.

Key words: hydraulic system; high speed on—off valve(HSV); speed control; simulation

0 引言

高速开关阀具有价格低廉、结构紧凑、抗污染、重复性好以及响应速度快等优点^[1-3]。它能通过脉冲信号进行控制,易于实现计算机控制技术与流体控制技术的有机结合。

目前,高速开关阀在液压缸速度控制中的应用成为了一个热点问题。文献[4-5]得出高速开关阀在不同占空比脉冲控制下的液压缸速度值,证明了其对液压缸速度控制的有效性,但未对起动和到位时的速度控制开展研究。文献[6]得出液压缸的行程曲线,说明了通过高速开关阀调节液压缸速度实现位置控制的有效性,未对速度控制进行研究。文献[7]设计了液压缸起动和到位的加速度曲线,但未针对速度控制开展实验研究。而实际工程运用中,液压缸在起动与到位过程中伴随着冲击,且到位过程中的冲击往往较大,需要通过速度控制实现冲击控制。

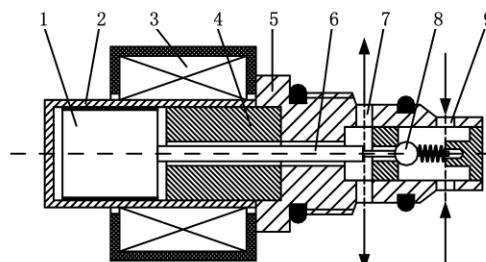
本文在研究高速开关阀的特性^[8]和 PWM (pulse width modulation)控制原理^[9-10]的基础上,

通过仿真与实验研究高速开关阀在液压缸起动和到位过程中的速度控制问题,得出了较佳的控制区段。

1 高速开关阀速度控制系统

1.1 高速开关阀介绍

实验采用的高速开关阀为贵州红林车用电控技术有限公司生产的二位二通螺纹插装式常闭高速开关阀,其内部结构原理如图1所示。



1. 衔铁 2. 衔铁管 3. 线圈 4. 极靴 5. 阀体
6. 顶杆 7. 出油口 8. 球阀 9. 进油口

图1 高速开关阀结构原理图

高速开关阀的数学模型包括通流面积方程和高速开关阀流量方程。

收稿日期:2011-12-19

高速开关阀的通流面积方程为

$$\bar{A}_{\text{hsv}} = \frac{\pi}{2} D \bar{x}_{\text{hsv}} \sin 2\theta \quad (1)$$

式中, D 为球阀直径; θ 为球阀座半角; \bar{x}_{hsv} 为球阀平均位移, 其计算方法参见文献[8]。

高速开关阀流量方程为

$$Q_{\text{hsv}} = C_d \bar{A}_{\text{hsv}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (2)$$

式中, C_d 为流量系数; p_1 为有杆腔压力; p_2 为无杆腔压力; ρ 为油液密度。

根据建立的数学模型对高速开关阀进行建模仿真, 仿真结果如图 2 所示。

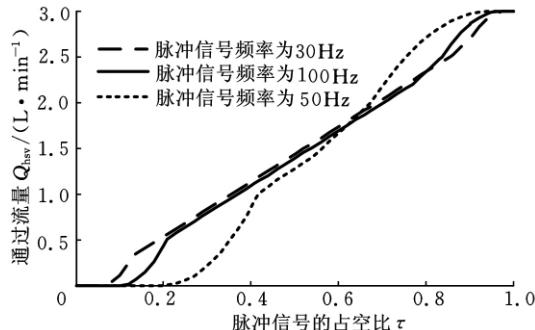


图 2 高速开关阀的流量特性

如图 2 所示, 高速开关阀的通过流量与脉冲信号的占空比和频率有较大关系。占空比越大, 通过流量就越大; 频率越高, 通过流量的死区和饱和区就越大, 与占空比之间的线性区间就越小。可见, 改变高速开关阀的脉冲控制信号能有效地控制通过流量, 通过流量控制可以实现对执行元件速度的控制。根据高速开关阀自身的特性, 本文采用频率为 50Hz 的脉冲控制信号, 通过改变脉冲控制信号的占空比实现对通过流量的控制。

1.2 液压油路介绍

设计高速开关阀与液压缸并联连接的实验油路(将高速开关阀连接于液压缸有杆腔与无杆腔之间)来研究液压缸的收缸过程, 如图 3 所示。

速度控制系统采用的位移传感器, 安装在垂直放置的液压缸上, 并使用 NI PCI-6221 数据采集卡采集液压缸上的位移传感器信号, 经 LabView 处理后输出脉冲控制信号, 将其放大后对高速开关阀进行控制。

1.3 脉宽调制信号设计

高速开关阀的控制信号采用 PWM 脉宽调制信号, 占空比根据活塞位移信号进行设置。对活塞位移信号的处理分为两步: ① 将活塞行程进行分段处理; ② 分别设置各段的脉冲占空比函数。

设活塞的有效行程为 l , 将活塞行程分段后, 分别针对起动速度控制与到位速度控制两种形

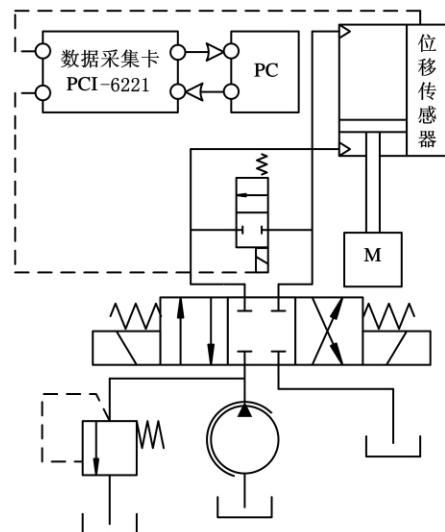


图 3 高速开关阀的并联应用油路

式, 设计其脉冲占空比函数分别如下:

$$\tau_1 = \begin{cases} (x - n_1) / (0.2 - n_1) & x \in (n_1, l] \\ 0 & x \in [0, n_1] \end{cases} \quad (3)$$

$$\tau_2 = \begin{cases} 0 & x \in (n_2, l] \\ (n_2 - x) / n_2 & x \in [0, n_2] \end{cases} \quad (4)$$

式中, τ_1 、 τ_2 分别为起动、到位速度控制下高速开关阀脉冲控制信号的占空比; x 为活塞位移; n_1 为起动速度控制时液压缸的分段位置; n_2 为到位速度控制时液压缸的分段位置。

本文设计的起动速度控制阶段为 $(n_1, l]$, 其中 n_1 值分别设为 $0.9l$ 、 $0.8l$ 、 $0.7l$ 、 $0.6l$ 、 $0.5l$ 、 $0.4l$ 、 $0.3l$ 、 $0.2l$, 针对不同的 n_1 值进行仿真与实验研究, 然后得出较佳的控制区段。到位速度控制的原理与起动速度控制相同, 其中 n_2 值分别设为 $0.8l$ 、 $0.7l$ 、 $0.6l$ 、 $0.5l$ 、 $0.4l$ 、 $0.3l$ 、 $0.2l$ 、 $0.1l$ 。

2 建模与仿真研究

2.1 数学与仿真建模

根据液压系统原理图, 采用节点容腔法对液压系统建模如下:

$$\left. \begin{aligned} mx &= p_1 A_1 - p_2 A_2 - mg - \beta_e \dot{x} \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{\beta_e}{V_1 + A_1 \dot{x}} (Q_1 - A_1 x - Q_x - Q_{\text{hsv}}) \\ \frac{dp_2}{dt} &= \frac{\beta_e}{V_2 + A_2 \dot{x}} (A_2 x + Q_x + Q_{\text{hsv}} - Q_2) \\ Q_1 &= C_d A_v \sqrt{2(p_p - p_1) / \rho} \\ Q_2 &= C_d A_v \sqrt{2p_2 / \rho} \\ Q_x &= k_x (p_1 - p_2) \quad F = k\delta + c\dot{\delta} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, m 为等效活塞质量; A_1 为有杆腔活塞的有效受力面积; A_2 为无杆腔活塞的有效受力面积; β_e 为油液黏性阻尼系数; g 为重力加速度; V_1 为有杆腔的初始容积; β_e 为油液的弹性模量; Q_1 为进入有杆腔的流量; Q_x 为从有杆腔

泄露到无杆腔的流量; V_2 为无杆腔的初始容积; Q_2 为流出无杆腔的流量; k_s 为泄露系数; A_v 为换向阀通流面积; p_p 为系统压力; F 为碰撞力; k 为等效弹簧刚度; c 为等效阻尼系数; δ 为接触点法向穿透深度。

根据已建立的数学模型,建立 Simulink 仿真模型如图 4 所示,其中占空比模块是根据式(3)或式(4)而建立的。

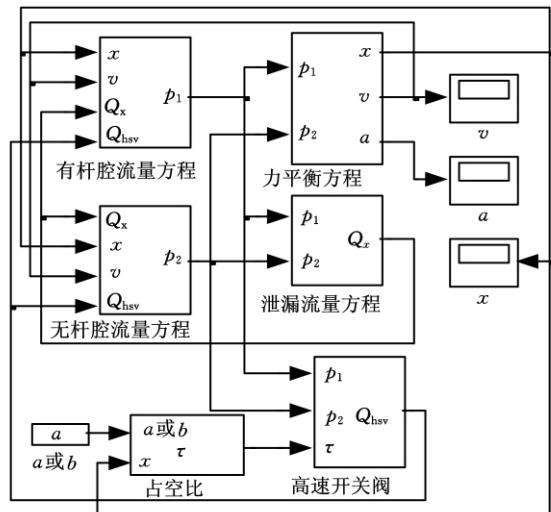


图 4 液压系统仿真模型

2.2 仿真研究

2.2.1 起动速度控制仿真研究

根据式(3)搭建系统仿真模型中的占空比模块,然后设置不同的 n_1 值对液压系统进行仿真研究,得起动速度控制结果,如图 5 所示。图 5 中的曲线从左到右分别为 n_1 等于 l 、 $0.9l$ 、 $0.8l$ 、 $0.7l$ 、 $0.6l$ 、 $0.5l$ 、 $0.4l$ 、 $0.3l$ 、 $0.2l$ 的速度仿真曲线。为了使起动速度控制结果更加直观,图 5 中的曲线表示未加碰撞模型的仿真结果。

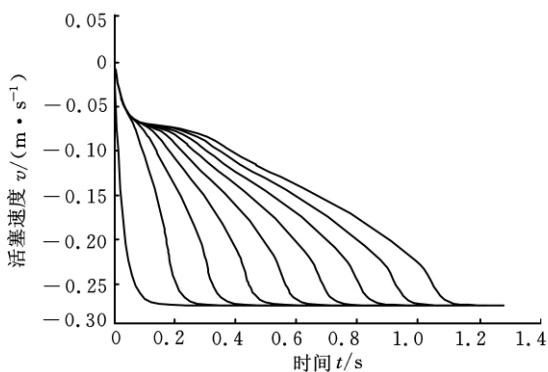


图 5 起动速度控制效果

从图 5 可以看出,不对液压缸进行起动速度控制时,活塞速度急剧上升,而控制时,速度上升速度趋缓。仿真得出未进行起动速度控制时,活塞最大加速度为 -12.41 m/s^2 ;进行起动速度控制时,活塞最大加速度为 -6.53 m/s^2 。起动速度控制能有效降低起动过程中的活塞最大加速度,

从而削弱起动时的冲击,实现液压缸由低速向高速的平稳转换。

因高速开关阀的使用产生的最大加速度如图 6 所示,其值随着 n_1 的增大而增大,当 n_1 等于 $0.9l$ 时,产生的加速度最大,为 -2.29 m/s^2 ,小于起动过程中的加速度,即高速开关阀对系统产生的影响可以忽略。

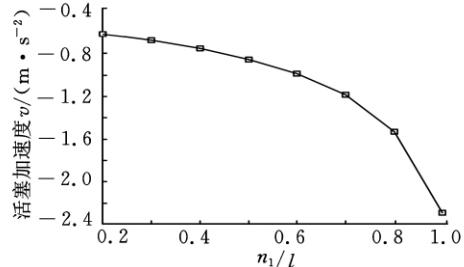


图 6 高速开关阀对活塞加速度的影响

2.2.2 到位速度控制仿真研究

液压系统仿真模型中的占空比模块按式(4)建立,即可得到位速度控制仿真模型。设置不同的 n_2 值进行仿真研究,得到位速度控制结果,如图 7 所示。图 7 中的曲线(分散部分)从左到右依次为 n_2 等于 $0.8l$ 、 $0.7l$ 、 $0.6l$ 、 $0.5l$ 、 $0.4l$ 、 $0.3l$ 、 $0.2l$ 、 $0.1l$ 时的速度仿真曲线。

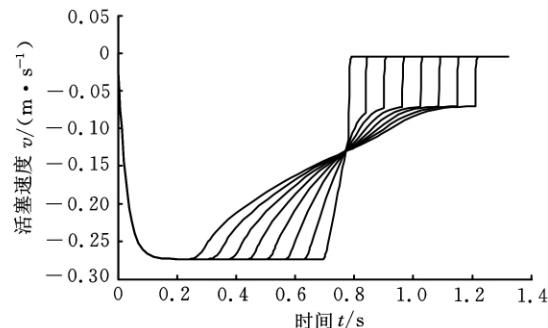


图 7 到位速度控制效果

另外,可以得到在不同控制区间下的活塞末速度值,如图 8 所示。可以看出,未对液压缸进行控制时,活塞的末速度为 -0.27 m/s ,活塞末速度值在对液压缸进行速度控制后降低,且随着控制区间的增大而减小。当 n_2/l 等于 0.1 时,活塞末速度为 -0.11 m/s 。当 n_2/l 在 $[0.2, 0.8]$ 之间时,活塞速度变化不大,变化差值在 $[0.071, 0.079] \text{ m/s}$ 之间变化,控制效果相同。

从仿真结果看,高速开关阀对液压缸的起动速度控制和到位速度控制,都能较好地降低起动时活塞最大加速度值和到位时活塞末速度值,即有效削弱起动时和到位时的冲击,实现液压缸在起动和到位过程中的有效速度控制。

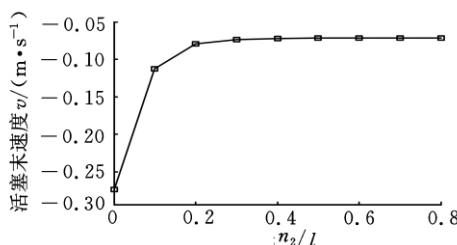


图 8 到位速度控制的活塞到位速度

3 实验验证

基于 FESTO 液压实验平台搭建油路, 连接相应的电控设备进行实验。

实验系统所用元件的参数如表 1 所示。

表 1 系统元件参数列表

序号	参数	值
1	最大阀芯位移 (mm)	1.3
2	球阀直径 (mm)	5
3	球阀座半角 (°)	20
4	有杆腔活塞面积 (mm ²)	120
5	无杆腔活塞面积 (mm ²)	200
6	液压缸有效行程 (mm)	200
7	溢流阀调定压力 (MPa)	3.5

3.1 起动速度控制实验验证

针对不同的 n_1 值分别开展起动速度控制实验研究。为了使实验与仿真结果的关系描述得更加直观, 列出部分实验验证结果, 如图 9 所示。

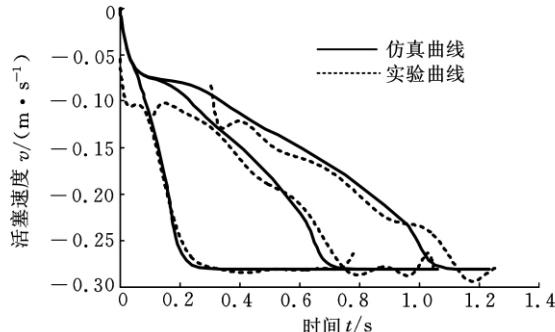


图 9 起动速度控制实验验证

图 9 中的曲线从左到右按相近实线和虚线为一组, 可分为三组, 分别表示 n_1 等于 $0.9l$ 、 $0.5l$ 、 $0.2l$ 时的速度曲线。验证结果表明, 仿真与实验结果的一致性较好, 说明高速开关阀能较好地实现液压缸的起动速度控制, 即实现由低速向高速的平稳转换。实验曲线与仿真曲线之间存在误差, 原因有以下几点: ①建立系统仿真模型时, 忽略了液压油管和拐角处等造成的影响; ②传感器和数据采集卡造成的采集误差, 即系统噪声; ③对实验数据拟合时, 存在拟合误差。经过实验测定系统噪声的均值为 0.488mm, 而最大拟合误差

为 0.106mm, 拟合误差均值小于微米级, 可以忽略。

3.2 到位速度控制实验验证

针对不同的 n_2 值分别开展到位速度控制实验研究。为了使实验与仿真结果的关系描述得更加直观, 列出部分实验验证结果, 如图 10 所示。

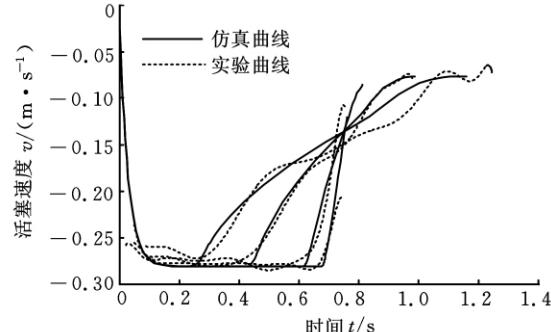


图 10 到位速度控制实验验证

图 10 中的曲线从左到右按相应的实线、虚线分成一组, 可分成四组, 分别表示 n_2 等于 $0.8l$ 、 $0.5l$ 、 $0.2l$ 、 $0.1l$ 时的速度曲线。验证结果表明, 仿真结果与实验结果的一致性较好, 说明高速开关阀能较好地实现液压缸的到位速度控制, 即实现由高速向低速的平稳转换。

4 结束语

研究结果表明, 高速开关阀与液压缸的并联连接方式对液压缸速度控制具有可行性和有效性。当液压缸在不同运动特性之间转换时, 高速开关阀对其速度控制效果较好, 能有效降低起动时的活塞最大加速度和到位时的活塞末速度, 削弱起动过程和到位过程中的冲击。高速开关阀在液压缸起动和到位过程中对液压缸的速度控制存在较佳控制区段。

参考文献:

- [1] 向忠, 陶国良, 谢建蔚, 等. 气动高速开关阀动态压力特性仿真与实验研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2008, 42(5): 845-849.
Xiang Zhong, Tao Guoliang, Xie Jianwei. Simulation and Experimental Investigation on Pressure Dynamics of Pneumatic High-speed On/Off Valve [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(5): 845-849.
- [2] 刘晖, 顾宏斌. 高速开关阀非线性模型及其仿真研究 [J]. 机械科学与技术, 2008, 27(7): 866-870.
Liu Hui, Gu Hongbin. Nonlinear Model for a High-speed Solenoid Valve and its Simulation [J]. Mechanical Science and Technology, 2008, 27(7): 866-870.
- [3] 张志义, 孙蓓, 黄元峰. 高速开关阀位置控制方法

- [J]. 机床与液压, 2005, (5): 126-128.
Zhang Zhiyi, Sun Bei, Huang Yuanfeng. Position Control Method of High—speed On—off Valve. Machine Tool & hydraulics, 2005(5):126-128.
- [4] Itoi K, Kurata A, Ikeo S. Adaptive Control of Water Hydraulic Cylinder System with High Speed On—off Valve[C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Fluid Power Transmission and Control. Beidahe, 2007:77-78.
- [5] Mostafa Taghizadeh, Ali Ghaffari, Farid Najafi. Improving Dynamic Performances of PWM—driven Servo—pneumatic Systems Via a Novel Pneumatic Circuit[J]. ISA Transactions, 2009, 48:512-518.
- [6] 郑军, 丁洁, 王晓磊. 基于 56F8300 的液压缸运动速度的 PWM 控制方法研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2011, 31(1):26-29.
Zheng Jun, Ding Jie, Wang Xiaolei. PWM Control Method Research on Hydraulic Cylinder Velocity Based on 56F8300[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology (Natural Science Edition), 2011, 31 (1):26-29.
- [7] 成汝振, 姚平喜. 液压缸无冲击起动与停止的研究[J]. 流体传动与控制, 2011(2):28-30.
Cheng Ruzhen, Yao Pingxi. Research on Non—impact Starting and Stopping Process of Hydraulic Cylinder[J]. Fluid Power Transmission & Control, 2011(2):28-30.
- [8] 陈宝江, 杨树兴, 曹泛. PWM 高速开关阀特性分析[J]. 北京理工大学学报, 1993, 13(3):354-360.
Chen Baojiang, Yang Shuxing, Cao Fan. Investigation on Characteristic of High—speed On/Off Valve [J]. Journal of Beijing Institute of Technology(Natural Science Edition), 1993, 13(3):354-360.
- [9] Taghizadeh M, Ghaffari A, Najafi F. Modeling and Identification of a Solenoid Valve for PWM Control Applications[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2009, 337:131-140.
- [10] 高钦和, 马志刚, 李晓丽. 多缸体系统碰撞模型研究[C]//系统仿真技术及其应用学术会议. 合肥: 2010:120-123.

(编辑 郭 伟)

作者简介:高钦和,男,1968 年生。第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室教授、博士研究生导师。主要研究方向为兵器发射理论与技术。宋海洲,男,1988 年生。第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室硕士研究生。刘志浩,男,1989 年生。第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室硕士研究生。董庭琼,男,1986 年生。第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室硕士研究生。杨志勇,男,1983 年生。第二炮兵工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室博士研究生。

(上接第 46 页)

- [7] 蒋炎坤, 刘刚强. 基于遗传算法的挖掘机工作装置铰点位置优化[J]. 华中科技大学学报, 2011, 39(3): 22-25.
Jiang Yankun, Liu Gangqiang. Optimization of Hinge Position for Working Device of Excavators by Genetic Algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2011, 39 (3): 22-25.
- [8] Timoshenko S P, Gere J M. Theory of Elastic Stability[M]. New York: MoGraw—Hill Book Company, Inc., 1985.
- [9] 马恒, 刘栋栋. 基于遗传算法的桁架结构布局优化设计[J]. 北京建筑工程学院学报, 2005, 21(1):68-71.
Ma Hen, Liu Dongdong. Layout Design Optimization of Truss Structures Using Genetic Algorithm [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2005, 21(1): 68-71.
- [10] Sachin M, Paolo G. Reliability—based Optimal Design of Electrical Transmission Towers Using Multi—objective Genetic Algorithms[J]. Computer—Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2007, 22:282-292.
- [11] Vedat T, Ays_T D. An Improved Genetic Algorithm with Initial Population Strategy and Self—adaptive Member Grouping [J]. Computers and Structures, 2008, 86:1204-1218.
- [12] 魏立新, 李兴强. 基于自适应遗传算法的冷连轧负荷分配优化[J]. 中国机械工程, 2009, 20(20): 2506-2509.
Wei Lixin, Li Xingqiang. Load Distribution Optimizationin Tandem Cold Rolling Based on Adaptive Genetic Algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(20): 2506-2509.
- [13] 刘爱军, 杨育. 含精英策略的小生境遗传退火算法研究及其应用[J]. 中国机械工程, 2012, 23(5): 556-563.
Liu Aijun, Yang Yu. Research on Niche Genetic Annealing Algorithm with Elite Strategy and Its Applications [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(5): 556-563.
- [14] 徐克晋. 金属结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
(编辑 郭 伟)

作者简介:王 欣,女,1972 年生。大连理工大学机械工程学院副教授、博士。研究方向为复杂结构 CAD 与智能计算、结构损伤识别与寿命评估、结构动力学与虚拟仿真。发表论文 30 余篇。王成林,男,1986 年生。大连理工大学机械工程学院硕士研究生。周 杨,女,1986 年生。大连理工大学机械工程学院硕士研究生。徐金帅,男,1982 年生。大连益利亚工程机械有限公司工程师、硕士。