基于改进 MCS 算法的道路模拟机试验系统*

尹立一¹ 郑书涛¹ 沈 刚^{1,2} 丛大成¹ 韩俊伟¹ (1.哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨 150001; 2.中国矿业大学机电工程学院,徐州 221116)

【摘要】 通过增加积分环节,提出了改进的自适应最小控制合成算法(MCSI)作为道路模拟机试验系统的伺服控制系统外环,以克服振动台在测试中存在的未知时变参数及时变干扰的影响,以提高振动台位移跟踪精度。通过对单通道道路模拟机试验系统动力机构进行建模,并对 PID、MCS 和 MCSI 控制器进行了设计与仿真。仿真结果表明, MCS 及 MCSI 控制器跟踪精度远远高于传统的 PID 控制器,而改进的 MCS 跟踪精度又优于 MCS,并且具有在线调节参数的优点。基于快速原型的 MCS 算法,利用 Matlab/Simulink 建立振动台控制系统模块,在 CCS 集成开发环境中自动生成代码,然后将可执行代码下载到 DSP TMS320C2812 和 TMS320C6713 中,实现了基于 MCSI 的道路模拟机试验系统设计。

关键词:道路模拟机 试验系统 最小控制合成算法 仿真 试验 中图分类号:TP271.31; U467.5⁺25 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2011)12-0055-07

Road Simulator Test System Based on Improved MCS Algorithm

Yin Liyi¹ Zheng Shutao¹ Shen Gang^{1,2} Cong Dacheng¹ Han Junwei¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract

An improved adaptive control methodology based on minimal control synthesis (MCS) for uncertain system with time varying unknown parameters and times-varying disturbances of shaking table during test was presented. The principle of traditional PID and MCS for improving the track accuracy of displacement was analyzed and compared. Minimal control synthesis integral (MCSI) was used as the outer-loop of road simulator test system servo controller. A mathematical model for actuating unit of one channel road simulator test system was built. The three controllers (PID, MCS and MCSI) were simulated. The simulation results showed that the track accuracy of displacement with MCS and MCSI was better than traditional PID, and the track accuracy of MCSI was better than traditional MCS and adaptive MCS and MCSI algorithm had a merit which could online adjust the parameters. In the end, the implementation of a rapid prototyping control system was presented. The Simulink module of road simulator test system was designed by using Matlab/Simulink, The code generated automatically in the CCS integrated development environment. The executable codes were downloaded to the Texas Instruments (TMS320C2812 and TMS320C6713).

Key words Road simulator, Test system, Minimal control synthesis integral algorithm, Simulation, Experiment

引言

传统的振动台伺服控制受固定增益算法的限

制,这种算法对振动台和试件以线性模型来处理,在 试验过程中认为参数是固定不变的。虽然试件的影 响在整个试验过程中可以通过很好的调节予以消

* "921"工程资助项目(SKLRS200803B)

收稿日期: 2010-09-17 修回日期: 2010-10-11

作者简介: 尹立一,博士生,主要从事电液振动台控制系统研究, E-mail: yinliyi@ hit. edu. cn

除,但是由于液压振动台结构复杂,利用传统伺服控制难以消除众多非线性因素^[1]。因此,国内通常采 用国外的振动控制系统消除伺服控制所产生的误 差,如美国 SD 公司采用在线辨识频响函数及在线 迭代的方法来解决非线性因素^[2]。

最小控制合成算法(MCS)是对参考模型自适 应控制 MRAC 的巨大发展^[3]。该算法已经成功应 用于多个领域^[4~6],并且该算法已经被证明具有很 好的稳定性和鲁棒性^[7~8]。本文提出利用改进的 MCS 算法(MCSI)来提高液压振动台的位移跟踪精 度,进而实现振动台加速度具有很高的响应精度。

1 改进的 MCS 算法

常规增量式 PID 控制器的离散形式为

$$u(k) = u(k-1) + k_{p}(e(k) - e(k-1)) + k_{i}e(k) + k_{d}(e(k) - 2e(k-1)) + e(k-2))$$
(1)

式中 $k_a \ k_i \ k_a$ — 比例、积分、微分系数

图 1 为改进的 MCS 与传统伺服控制器相结合 的控制框图。假定被控对象(包括振动台、液压缸、 传感器及被试件)的状态空间是可控的,其状态方 程为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{p} = \boldsymbol{A}_{p}\boldsymbol{x}_{p} + \boldsymbol{B}_{p}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{d}$$
(2)

式中 A_{p} 、 B_{p} — 被控对象参数矩阵,可以是时变 且未知的

u——控制矢量

d——未知的内部或外部干扰

参考模型用线性状态方程表示为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{m} = \boldsymbol{A}_{m}\boldsymbol{x}_{m} + \boldsymbol{B}_{m}\boldsymbol{r} \tag{3}$$

式中 A_m 、 B_m ——已知的参考矩阵

- **x**_m——参考模型的状态矢量
- r——连续输入函数矢量

MCS 算法为^[9]

其中

$$\boldsymbol{u}(t) = K_r(t)\boldsymbol{r}(t) + K(t)\boldsymbol{x}_p(t)$$
(4)

$$K(t) = \int_{0}^{t} \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{y}_{e}(\tau) \boldsymbol{x}_{p}^{\mathrm{T}}(\tau) \,\mathrm{d}\tau + \boldsymbol{\beta}(\tau) \boldsymbol{x}_{p}^{\mathrm{T}}(\tau) \quad (5)$$

$$K_{r}(t) = \int_{0}^{t} \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{y}_{e}(\tau) \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\tau) \,\mathrm{d}\tau + \boldsymbol{\beta}(\tau) \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\tau) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_{e}(t) = \mathbf{C}_{e} \mathbf{x}_{e}(t) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{x}_{e}(t) = \boldsymbol{x}_{m}(t) - \boldsymbol{x}_{p}(t)$$
(8)

$$C_e = \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \tag{9}$$

 β_n]

$$\boldsymbol{B} = \operatorname{diag}[B_1 \quad B_2 \quad \cdots \quad B_p] \qquad (10)$$

$$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{11}$$

$$\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_{m} + \boldsymbol{A}_{m}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} = -\boldsymbol{Q} \quad (\boldsymbol{Q} > 0) \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \operatorname{diag} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_p \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{\beta} = \operatorname{diag} [\boldsymbol{\beta}_1 \quad \boldsymbol{\beta}_2 \quad \cdots$

- *K_r(t)*—MCS的状态前馈增益(典型应用时,*K_r*(0)=0)
 - α——积分权值矩阵
 - β----比例权值矩阵
- $\mathbf{y}_{e}(t)$ ——输出误差矢量
- $\boldsymbol{x}_{e}(t)$ —— 状态误差矢量
- P——李亚普诺夫的解,为正定对称阵
- *C*_e——输出误差矩阵,也称线性补偿器,利 用实用解法确定为*C*_e=1^[10]

Q——严格正实矩阵

改进的 MCS 算法是在原 MCS 算法的基础上, 将积分作用考虑进去,改进后的 MCS 与传统 PID 的 结构非常相似,并且可以消除 MCS 算法难以克服的 伺服阀偏移现象。改进 MCS 控制律可以表示为

$$\boldsymbol{u}(t) = K_r(t)\boldsymbol{r}(t) + K(t)\boldsymbol{x}_p(t) + K_I(t)\boldsymbol{x}_I(t)$$

其中
$$\mathbf{x}_{I}(t) = \int_{0}^{t} [\mathbf{r}(\tau) - \mathbf{y}_{e}(\tau)] d\tau$$
 (14

$$K_{I}(t) = \int_{0}^{t} \boldsymbol{\alpha} \boldsymbol{y}_{e}(t) \boldsymbol{x}_{I}^{\mathrm{T}}(\tau) \,\mathrm{d}\tau + \boldsymbol{\beta}(t) \boldsymbol{x}_{I}^{\mathrm{T}}(t) \quad (15)$$

$$\boldsymbol{y}_{e}(t) = \boldsymbol{C}_{e}\boldsymbol{x}_{I}(t) \qquad (16)$$

由图 1 可以看到 MCSI 的状态反馈增益、状态 前馈增益及积分增益经 MCSI 自适应调整后,补偿 到原伺服控制系统。



2 控制器设计

图 2 是基于 MCSI 算法的振动台控制系统框 图。由于液压振动台的频宽很低、阻尼很小,采用三 状态控制器来提高系统的稳定性和频宽; MCS 算法 用于在线校正跟踪误差并改善振动台的性能; 外置 式伺服阀控制器解决各个液压缸一致性较差问题, 与三级伺服阀的位移构成闭环回路; 参考模型用于





将给定的加速度信号转换为位移和速度信号,然后 输入到三状态控制器和 MCS 自适应机构中。

2.1 三状态控制器

三状态控制器作为振动台的一个基本控制器被 广泛应用于振动台控制系统中,分为三状态前馈控 制器和三状态反馈控制器,代表位移、速度和加速度 3种状态。图3是三状态控制器的原理框图,其中 T(s)是三状态前馈控制器,它由3个前馈增益构 成,即 K_{dr} 、 K_{vr} 和 K_{ar} ,用于提高参考信号跟踪性能; S(s)是三状态反馈控制器,它由3个反馈增益构成, 即 K_{dr} 、 K_{vr} 和 K_{af} ,用于调节整个控制系统的鲁棒性和 抗干扰性能。





由文献[11]得

$$\begin{cases} K_{df} = \frac{\omega_r \omega_{nc}^2}{K_v \omega_h^2} \\ K_{vf} = K_{df} \left(\frac{2\xi_{nc}}{\omega_{nc}} + \frac{1}{\omega_r} \right) - \frac{1}{K_v} \\ K_{af} = K_{df} \left(\frac{2\xi_{nc}}{\omega_r \omega_{nc}} + \frac{1}{\omega_{nc}^2} \right) - \frac{2\xi_h}{K_v \omega_h} \end{cases}$$
(17)

已知 $\omega_h = 280 \text{ rad/s}, \xi_h = 0.15, K_v = 25.47 \text{ L/s},$ $\omega_r = 560 \text{ rad/s}, \xi_{nc} = 0.7, \omega_{nc} = 336 \text{ rad/s}, 可得到反馈$ 增益 $K_{df} = 31.6608 \langle K_{vf} = 0.1492 \langle K_{af} = 0.0005 \rangle$

为保证系统增益不变,取 $K_{dr} = K_{df}$,可得 $K_{dr} =$ 31.6608、 $K_{tr} = 0.1319$ 、 $K_{ar} = 0.0003$ 。

2.2 伺服阀控制器

道路模拟机试验系统采用的 MOOG792 高响应 三级伺服阀属于内置式伺服阀控制器,所以控制参 数不可调,使得伺服阀在高频范围内工作时,各个伺 服阀之间的一致性,特别是相位的一致性较差,从而 导致振动台本身的一些主要技术指标,如横向比、均 匀度等,在频率较高的范围内比较差。因此,设计外 置式伺服阀控制器解决该问题^[12]。伺服阀控制器 原理如图 4 所示,主要包括:



Fig. 4 Principle of servo controller

(1)信号的输入和前馈控制器:将计算机输出的 ±10 mA 电流形式指令信号转换为 ±10 V 电压信号,再经前馈控制器调整后,输出阀控器的指令信号。其中,前馈为一阶前馈控制环节,通过调整前馈控制器拐点频率进一步提高伺服阀的频宽。

(2)位置闭环:伺服阀阀芯位移信号经过调理 后形成标准的±10V信号后,作为伺服阀的位置闭 环控制的反馈信号,与指令信号做差。

(3)速度反馈控制器和比例控制器:速度反馈 控制器是阀控器的重要组成部分,通过调节速度反 馈增益和比例控制器增益可以大大提高伺服阀的频 宽。

(4)伺服阀驱动:经上述控制器调整后,产生伺 服阀驱动信号,经伺服驱动器转换为±40mA的功 率驱动信号,驱动伺服阀动作。此外,为了消除摩擦 力等非线性因素的影响,在伺服驱动信号中加入了 高频信号,其频率和幅值可调。

(5) 阀芯位移输出:伺服阀阀芯位移信号经过 调理后形成标准的±10 V 信号后,一方面作为伺服 阀的位置闭环控制,另一方面经过电压-电流转换后 输出至计算机,用于实时监测。

2.3 仿真

图 2 中,道路模拟机试验系统电液伺服系统为 四通阀控制对称液压缸位置跟踪系统,整个动力学 模型可用以下方程表示^[13]:

伺服阀流量方程为

$$Q_l = K_q x_v - K_c p_l \tag{18}$$

其中 $p_1 = p_1 - p_2$

式中 K_q —流量增益,m³/(s·m)

$$K_c$$
——伺服阀流量压力系数,m³/(s·Pa)

x_v——三级伺服阀水平位移,由 LVDT 测量

p1-----负载压力,由两腔压力差构成

*p*₁、*p*₂——液压缸两腔内的压力

对于电液伺服阀,其动态特性可用二阶环节描述为

$$Q_m = \frac{K_v \omega_v}{s^2 + 2\zeta_v \omega_v s + \omega_v^2} i$$
(19)

式中 Q_m ——伺服阀理论流量,m³/s i——伺服阀控制电流,A K_v ——伺服阀流量增益,m³/(s·A) ω_v ——伺服阀固有频率 ζ_v ——伺服阀阻尼系数 液压缸的连续性方程

$$Q_l = K_q x_v - K_c p_l = A \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + C_{lc} p_l + \frac{V_l \,\mathrm{d}p_l}{4\beta_e \,\mathrm{d}t} \quad (20)$$

式中 Q1-----负载流量

V,——两个液压缸总体积,m³

 β_{e} ——流体体积弹性模量,Pa

- *C_{te}*——总泄漏系数,m³/(s·Pa)
- y---活塞杆水平位移

液压缸与负载的力平衡方程为

$$m \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = A p_l - F - B_c \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} - K_s y \qquad (21)$$

式中 m——台体与被试件总质量,kg

- B。——液压系统粘性阻尼,N·s/m
- F-----由激振产生的外力,N

K。——耦合刚度

取状态变量 $\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} y & \dot{y} & p_t \end{bmatrix}^{\mathsf{T}}$,得到系统状态方程为



采用 MCS、MCSI 算法及三状态控制器为主要 控制策略进行仿真,与传统的 PID 控制相比较。为 了验证 MCS 和 MCSI 算法的跟踪精度,采用两组对 比仿真,分别仿真 PID、MCS 和 MCSI 3 种控制策略。 第1次采用正弦参考信号,第2次采用白噪声作为 参考信号,各个控制器的参数如表1所示。

表 1 各控制器仿真参数 Tab.1 Simulation parameters of controllers

控制器	参数	数值	控制器	参数	数值
PID	Р	5	MCS	$K_r(\boldsymbol{\alpha})$	3600[1…1]
	Ι	1		$K_r(\boldsymbol{\beta})$	360[1…1]
	D	0.51		$K(\boldsymbol{\alpha})$	1800[1…1]
三状态前 馈控制器	K_{dr}	1		$K(\boldsymbol{\beta})$	180[1…1]
	K_{vr}	0.004 68	MCSI	$K_r(\boldsymbol{\alpha})$	3 600 [1…1]
	K_{ar}	0.000013		$K_r(\boldsymbol{\beta})$	360[1…1]
三状态反 馈控制器	K_{df}	1		$K(\boldsymbol{\alpha})$	1800[1…1]
	K_{vf}	0. 588 3		$K(\boldsymbol{\beta})$	180[1…1]
	K_{af}	0.0019		$K_I(\boldsymbol{\alpha})$	120[1…1]
				$K_I(\boldsymbol{\beta})$	12[1…1]

常规 PID 控制和 MCS 及 MCSI 控制的系统位移 跟踪特性曲线如图 5 所示,图 6 是系统位移跟踪误 差曲线。在 MCSI 的控制下,其跟踪精度较传统 PID 控制提高了很多,较 MCS 算法也有一定的提高。这 主要在于参数的自适应调节可有效处理系统中的非 线性和不确定因素,并且该算法随着仿真的进行可 以逐渐减小误差,显示了其自适应能力。

3 试验验证

3.1 硬件设计

硬件方面,参考 SD 公司 Jaguar、MTS 和 Pulsar 振动控制器,设计了多 DSP 控制器以提高数据处理 和运算能力^[14]。图 7 是道路模拟振动台控制系统 的硬件结构,利用 DSP TMS320C2812 进行数据采 集,DSP TMS320C6713 算法处理与通信,嵌入式处 理器 S3C2410 与上位机 LabVIEW 进行数据传输。





该控制系统需要完成 CPU 之间的数据交换,选择双 口 RAM 来完成它们之间的数据与信息交换。这 样,既保证了实时数据采集和运算,又保持了两者之 间的数据同步。道路模拟振动台中的位移反馈信 号、加速度反馈信号、压力反馈信号的输出量经相关 传感器采集后,利用变送器输入到控制器中;各种数 字信号利用 eCAN 模块进行收发。







3.2 软件实现

软件方面,提出了基于 DSP 快速原型^[15-16]的 MCS 算法与传统的伺服控制相结合的控制策略。 ETTIC6000 利 用 Real-Time Workshop 直接从 Simulink 模型生成 TI C6000 DSP(C67x 浮点和 C62x/C64x 定点 DSP)的高效代码,无需传统的 DSP 编程过程。ETTIC6000 能自动生成 CCS 工程。开 发人员在 Simulink 环境下建立控制系统模型和适时 DSP 算法,并进行模型仿真,一旦仿真结果满意,即 可利用 JTAG 接口完成代码生成、加载、执行及与目 标 DSP 进行通信等功能。利用这种从概念设计到 适时实现的继承开发环境,可以大大缩短产品开发 周期,加快产品上市时间^[17]。其工作原理如图 8 所 示。



图 8 Matlab 与 DSP 的开发环境

Fig. 8 Development environments of Matlab and DSP

3.3 试验结果分析

试验采用哈尔滨工业大学电液伺服仿真与试验 系统研究所(IEST)为某单位研制的8通道道路模 拟机试验系统。其主要参数如表2所示。

表 2 振动台主要参数 Tab.2 Main parameters of shaking table

参数	数值
单轮最大静载荷/kN	75
最大动载荷/kN	7 500
工作频率/Hz	0.1~100
最大位移/mm	± 150
最大速度/m·s ⁻¹	2.5
车轮轴头最大垂向加速度/m·s ⁻²	200
控制方式	加速度和位移

道路模拟机试验系统位置闭环试验结果如图 9 所示,对 PID、MCS 和 MCSI 3 种控制策略分别采用 了频率 10 Hz、幅值 3 mm 的正弦信号和 1 ~ 10 Hz 随 机信号进行了试验。从图 9a、9b、9c 中可以看到,普 通的 PID 控制滞后要大于 MCS 和 MCS 算法;对于 跟踪精度, MCS 和 MCSI 优于 PID, 而 MCSI 又能够 在 MCS 基础上进一步提高精度,但是对伺服阀的零





偏改进较小。而从图 9d、9e、9f 中可以看到,对于 MCS 在峰值处所存在的干扰问题,由于 MCSI 带有 积分能够很好地起到补偿。所以,改进的 MCS 算法 可以应用于道路模拟试验机的位置闭环控制。

4 结束语

针对道路模拟试验机系统的位移跟踪控制问

题,提出了一种 MCSI 算法的设计方案,该控制器在 原有的 MCS 性能基础上增加了积分环节,其具有在 线调节参数,能克服内部参数变化和外部干扰的能 力,可以不依赖被控对象的精确数学模型。采用多 DSP 的硬件系统及其快速原型控制提高了数据处理 能力,也保证了实时交互的可靠性,为 MCSI 算法实 时运行提供了保证。

参考文献

- 延皓.基于液压六自由度平台的空间对接半物理仿真系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
 Yan Hao. Research on hybrid simulation system of space docking based on 6-DOF platform driven by hydraulic actuators[D].
 Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- 2 关广丰.六自由度液压振动试验系统控制策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
 Guan Guangfeng. Research on control strategy of 6-DOF hydraulic vibration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- 3 Benchoubane H, Stoten D P. The decentralized minimal controller synthesis algorithm [J]. Int. J. Control, 1992, 56(4): 967 ~983.
- 4 Stoten D P, Benchoubane H. Empirical studies of an MRAC algorithm with minimal controller synthesis algorithm [J]. Int. J. Control, 1990, 51(4):823 ~ 849.

- 5 Stoten D P. Implementation of MCS on a servo hydraulic testing machine [J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Systems and Control Engineering, 1992, 206(13):189 ~ 194.
- 6 Stoten D P, Gómez E G. Adaptive control of shaking tables using the minimal controller synthesis algorithm [J]. Phil. Trans.
 R. Soc. A, 2001, 359:1 697 ~ 1723.
- 7 Stoten D P, Benchoubane H. Robustness of a minimal controller synthesis algorithm [J]. Int. J. Control, 1990, 51(4):851 ~ 861.
- 8 Eduardo G Gómez. Application of the MCS algorithm to the control system of the Bristol shaking table [D]. Bristol, UK: University of Bristol, 1999.
- 9 Stoten D P, Benchoubane H. The minimal control synthesis identification algorithm [J]. Int. J. Control, 1993, 58(3):685 ~ 696.
- 10 Shen G, Lv G M, Ye Z M, et al. Implementation of electrohydraulic shaking table controllers with a combined adaptive inverse control and minimal control synthesis algorithm [J]. IET Control Theory & Applications, 2011, 13(5):1471 ~ 1483.
- 11 韩俊伟. 三向六自由度大型地震模拟振动台的研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1996.
 Han Junwei. The study on 3-dimension 6-DOF large scale seismic simulating apparatus[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1996. (in Chinese)
- 12 沈刚,黄其涛,韩俊伟,等.基于 DSP 快速原型控制的道路模拟振动台控制系统设计[J].农业机械学报,2009,40(6):109~116.

Shen Gang, Huang Qitao, Han Junwei, et al. Application of cascade control system in starch production-line based on rapid prototyping of DSP [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):109 ~ 116. (in Chinese)

- 13 李洪人.电液控制系统[M].北京:国防工业出版社,1990.
- 14 Moon Ho Kang, Yoon Chang Park. A real-time control platform for rapid prototyping of induction motor vector control [J]. Electrical Engineering, 2006,88(6):473 ~ 483.
- 15 Darko Hercog, Milan Curkovic, Karel Jezernik. DSP based rapid control prototyping system for engineering education and research[C] // Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design Munich, 2006:2292 ~ 2297.
- 16 Shen Gang, Cong Dacheng, He Jingfeng, et al. Research on three-axis six-DOF shaking table based on rapid prototyping of DSP algorithms using SIMULINK [C] // The 2nd International Symposium on System and Control in Aeronautics and Astronautics, Shenzhen, 2008.
- 17 Karabetsos S H, Stavrou P D, Pikasis E K, et al. Design and implementation of an OFDM transceiver framework using Matlab and the TMS320C6713 DSK[C] // EUROCON 2005 International Conference on Computer as a Tool, 2005, 1:554 ~ 557.

(上接第 31 页)

8 杨荣山,黄向东,袁仲荣,等.多目标优化方法在悬架几何设计上的应用[J].华南理工大学学报:自然科学版,2009, 37(7):85~89.

Yang Rongshan, Huang Xiangdong, Yuan Zhongrong, et al. Application of multi-objective optimization methods to geometric design of suspension [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(7): 85 ~ 89. (in Chinese)

- 9 姚辉学,侯永涛,王国林,等.车辆制动器参数化数据库设计[J].机械工程学报,2008,44(10):255~259. Yao Huixue, Hou Yongtao, Wang Guolin, et al. Parameterized database design of vehicle brakes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10):255~259. (in Chinese)
- 10 李军. ADAMS 实例教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2002.
- 11 李瑜婷,赵治国,章桐. 基于 ADAMS 的双横臂悬架性能多目标优化研究[J].中国制造业信息化,2009,38(17):30~34.
 Li Yuting, Zhao Zhiguo, Zhang Tong. The ADAMS-based multi-objects optimization of double beams vehicle suspension
 [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2009,38(17):30~34. (in Chinese)
- 12 张洪欣. 汽车设计[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2002.