

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.006

高速高精运动平台谐振分析与抑制研究^{*}

郑 斌, 史伟民, 杨亮亮^{*}

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对直线电机直接驱动的高速高精运动平台的谐振问题,对高速高精运动平台的控制系统模型、伺服动态刚度模型、移动部件质量、在线辨识算法和积分谐振控制(IRC)谐振抑制方法等内容进行了研究,提出了一种基于递推最小二乘辨识算法在线辨识谐振模型以及 IRC 抑制谐振的控制方案,构建了高速高精运动平台伺服控制系统模型和伺服动态刚度模型,在仿真模型的基础上研究了移动部件质量的变化对系统伺服动态刚度的影响,考虑控制系统伺服动态刚度对谐振的影响,利用在线辨识算法获取到的谐振模型参数设计了 IRC 抑制系统谐振。研究结果表明,该控制方案对系统伺服动态刚度不足造成的谐振现象具有较好的抑制效果,能大大提高系统动态性能。

关键词:直线电机;谐振;积分谐振控制;伺服动态刚度;移动部件质量;抑制

中图分类号:TH113.1;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0037-05

Analysis and suppression of resonance of motion control platform with high frequency and fast response

ZHENG Bin, SHI Wei-min, YANG Liang-liang

(School of Machinery and Automatic Control, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of resonance of the platform of the motion control with high frequency and fast response driven by linear motor, research on the servo control system model, the model of the servo dynamic stiffness, quality of moving parts, online identification algorithm and resonance suppression method of integral resonant control (IRC), a control scheme based on online identification model of recursive least squares identification algorithm and resonance suppression of IRC was proposed. The servo control system model and the model of the servo dynamic stiffness were constructed, based on the simulation, the platform of the motion control with high frequency and fast response driven by linear motor was studied considering the influence of quality change of moving parts on the servo dynamic stiffness and the influence of the servo dynamic stiffness of the control system on the resonance, IRC was designed to suppress resonance on the base of utilizing parameters of resonance model from online identification. The results indicate that the control scheme has a good effect on suppressing resonance which is caused by insufficient of the servo dynamic stiffness, and can greatly improve the dynamic performance of system.

Key words: linear motor; resonance; integral resonant control (IRC); servo dynamic stiffness; quality of moving parts; suppress

0 引言

运动控制系统如今在数控机床和微电子装备中被广泛使用。这类系统通常由上位机软件、运动控制器、伺服驱动器、直线电机及负载等构成。由直线电机直

接驱动的零传动进给系统如今被广泛应用在运动控制系统中。在传统的滚珠丝杠进给系统中,系统刚度主要取决于机械刚度,机械传动柔性环节是造成系统机械刚度不足的一个主要原因。在直线电机直接驱动进给系统中,取消了机械传动环节,系统刚度大大增加,

收稿日期:2014-08-25

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2013BAF05B01);国家自然科学基金资助项目(51305404);浙江理工大学重点实验室优秀青年人才培养基金资助项目(ZSTUMD2012B004)

作者简介:郑 斌(1991-),男,浙江杭州人,主要从事高速高精运动控制技术方面的研究。E-mail:644717687@qq.com

通信联系人:杨亮亮,男,博士,讲师,硕士生导师。E-mail:yangliangliang@zstu.edu.cn

系统动态性能提高,因此取得了广泛应用^[1]。

直线电机进给系统刚度包含机械刚度(导板柔性,结合面参数)和伺服动刚度两个方面。由于直线电机进给系统刚度较大,在低速运行状态时,基本消除了系统谐振影响,但是在高速高精运行状态下,系统的高频段可能会存在共振模式。本研究主要考虑伺服动刚度对共振的影响。在实际运动控制系统中,系统伺服动刚度的影响因素很多,系统伺服控制参数和移动部件质量是影响伺服动刚度的两个主要因素^[2]。伺服动刚度不足会严重影响系统的动态性能,造成系统的谐振现象。以往的大部分文献都是研究控制参数对系统动态性能的影响^[3]。本研究主要研究移动部件质量对运动控制系统动态性能的影响。

针对直线电机进给系统伺服动刚度不足导致的系统谐振现象,在以往大多是采用自适应控制的方法实时校正伺服控制参数以获取较好的动态性能。自适应控制的算法难度较大,而且算法导致的大计算量也对系统的实时性提出了挑战。IRC 谐振抑制是一种较前沿的抑振方法,文献[4]将 IRC 用于硬盘微执行器的谐振抑制,而且和陷波器抑制谐振法的对比结果显示了 IRC 设计结构简单和实际实施过程中不易受外界干扰的优点,文献[5]将 IRC 应用于压电式电子管的谐振抑制,并且推导出了 IRC 设计参数的计算公式。以上文献中所采用的方法都是离线的,并且在计算积分参数时必须采用反复试错法以取得合适的参数。

本研究提出一种适用于运动控制平台的在线 IRC 抑振方法,在离线仿真分析的基础上,设计一种在线辨识谐振模型并且采用在线查表法设计 IRC 的方案^[6-9]。最后通过对比仿真和实际平台实验结果,验证设计方案在运动控制平台中的应用效果。

1 伺服动刚度研究

为了研究直线电机进给伺服系统移动部件(直线电机定子,工作台和工件)质量变化对伺服刚度的影响,需要确定伺服控制系统模型和伺服刚度模型。本研究所研究的运动控制平台采用位置和内部电流环二重反馈控制。控制系统传递函数简化框图如图 1 所示。其中,位置环采用 PID 控制,电流环采用 PI 控制,直线电机模型一般采用图 1 所示二阶执行机构环节来表示。

伺服动刚度 K_d 可定义为移动部件干扰力 F_t 与系统的最大响应位移 $\Delta x_{\max}$ 之比,即:

$$K_d = \frac{F_t}{\Delta x_{\max}} \quad (\text{单位: N}/\mu\text{m}) \quad (1)$$

根据图 1 中传递函数,推导出伺服动刚度的表达式:

$$K_d(s) = \frac{a_0 s^5 + a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s}{b_0 s^3 + b_1 s^2 + b_2 s} \quad (2)$$

其中: $a_0 = 2\pi m f_d R_a T_i T_1$; $a_1 = 2\pi f_d T_1 (m R_a + m K_i + b R_a T_1)$; $a_2 = K_i K_p K_i T_i + 2m\pi K f_d + 2b\pi f_d R_a T_i + 2b\pi f_d K_i T_i$; $a_3 = K_i (K_f K_p + 2b\pi f_d + 2\pi f_d T_i K_f K_p)$; $a_4 = 2\pi f_d K_i K_f K_p (1 + 2\pi f_i T_i)$ 。

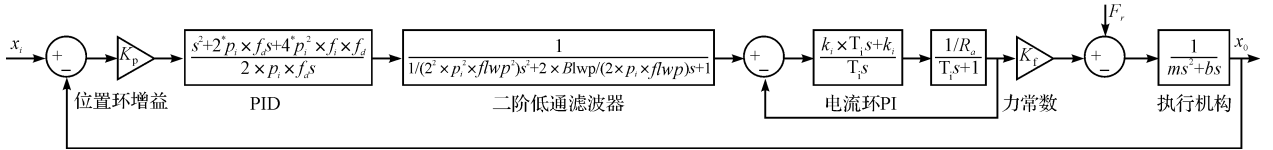


图 1 控制系统传递函数简化框图

X_i —位置环指令输入, X_o —位置环指令输出, K_p —位置环增益, f_i —位置环积分频率, f_d —位置环微分频率, $flwp$ —二阶低通频率, $Blwp$ —二阶低通相对阻尼, K_i —电流环增益, T_i —电流环积分时间常数, R_a —直线电机电枢电阻, T_1 —时间常数, K_f —直线电机电力常数, F_t —干扰力(切削力, 风阻力等), m —移动部件质量, b —直线电机阻尼系数

本研究在图 1 所示仿真模型中研究移动部件质量对伺服动刚度的影响时,需设置合理的控制系统参数,其中 $K_p = 100\ 00$, $f_d = 50$, $f_i = 0.1$, $flwp = 500$, $Blwp = 0.8$, $K_i = 2\ 400$, $T_i = 1\ 500$, $K_f = 40$, R_a 和 T_1 是直线电机的特性常数,一旦选定电机,这两个参数就不会改变。移动部件质量在 300 kg, 450 kg 和 600 kg 时,系统的 980 N 阶跃干扰力输入响应和单位阶跃位置输入响应分别如图 2、图 3 所示。

如图 2、图 3 所示,随着系统移动部件质量的增加,系统抵抗位置偏差的能力变弱,伺服动刚度减小,过渡时间变长并且振荡次数增多,超调量变大且调整时间变

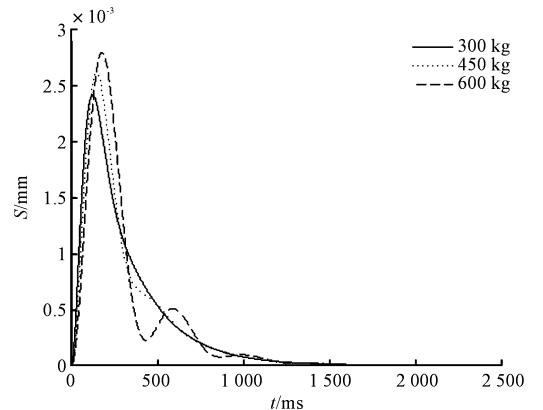


图 2 阶跃干扰力输入响应

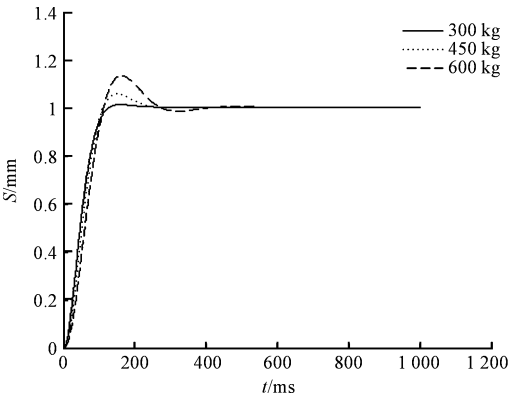


图3 单位阶跃位置输入响应

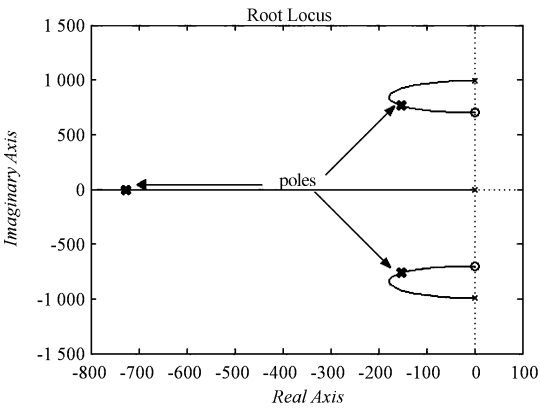


图5 根轨迹

长,系统动态性能变差。

2 系统谐振分析及抑制

上述研究表明移动部件质量的增加会造成系统伺服动刚度的不足,并且严重影响系统动态性能。当外在干扰力的频率和系统共振频率相等时,此时伺服动刚度最小,系统产生谐振现象。其谐振方程典型形式如下:

$$G(S) = \frac{\Gamma}{s^2 + 2\zeta w_p s + w_p^2} \tag{3}$$

本研究针对系统谐振采用 IRC 抑制方法。其结构如图 4 所示。其中,前馈环节是一个常数, $C(s) = -k/s$ 是一个积分环节,且 $k > 0$ 。的计算采用根轨迹方法,作出多项式 $s(s^2 + w_p^2) - kd(s^2 + w_p^2 + (\Gamma/d))$ 的根轨迹,选取 k 值以获得合适的极点,以保证 IRC 控制回路有足够大阻尼抑制谐振。

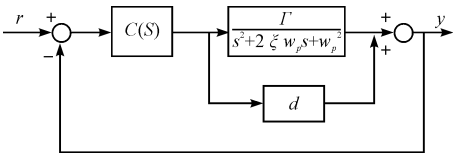


图4 IRC 结构框图

为了研究 IRC 的抑振效果,本研究分析表 1 参数所示谐振方程。计算得到参数 $d = -2$, 多项式 $s(s^2 + w_p^2) - kd(s^2 + w_p^2 + (\Gamma/d))$ 的根轨迹如图 5 所示。从图 5 中看出,当极点开始远离初始极点慢慢往零点移动时阻尼逐渐变大,当极点达到所取 k 值为 730 左右时阻尼最大,继续靠近零点阻尼变小。所以取得 k 值为 730。抑制谐振前后的效果如图 7 所示。

表 1 谐振方程参数值

Γ	$2\zeta w_p$	w_p^2
10^6	30	990 000

由图 6 显示,谐振抑制前峰值大概为 30 dB,经过 IRC 抑制后为 5 dB 左右,表明 IRC 抑制谐振能取得较好的效果。

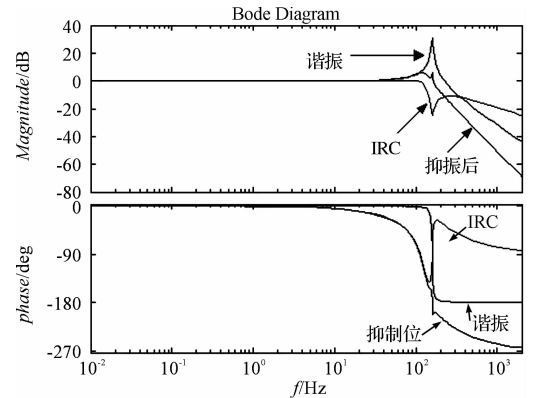


图6 抑制谐振前后效果图

3 在线谐振抑制设计

在运动控制平台实际工作过程中,由于更换工件和其他操作将造成移动部件的质量会随时变化,系统谐振也会随着变化。为此,需要实时矫正 IRC 设计参数以满足抑振要求。设计思路为:采用递推最小二乘法在线辨识谐振模型,然后根据辨识结果实时矫正 IRC 设计参数。控制方案框图如图 7 所示。

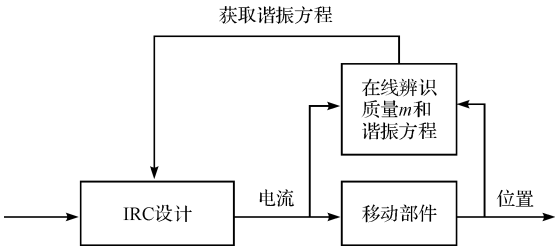


图7 控制方案框图

图 7 中,最小二乘递推算法实时辨识出谐振方程和移动部件质量 m 。依据辨识所得谐振方程,利用公式 $d = -(2\Gamma/w_p^2)(d < 0)$ 可对参数 d 实时矫正。积分环节的参数 k 的计算需要反复试错以获取合适的值,这将导致较大的计算量,不能满足系统的实时性要求。

为了满足系统实时性要求,本研究提出一种参数查表法。在移动部件质量可变范围内,将质量分成均匀的

几段,通过离线实验法计算得出不同质量段的 IRC 设计参数 k ,并且将其制成表格导入计算机中。在系统实际运行中,只需要根据在线辨识得到的移动部件质量 m ,通过简单的查表程序来获取 IRC 设计参数值即可。

4 实验与分析

为了验证实际条件下所提控制方案的可行性,本研究将控制方案使用到实际平台中,平台如图 8 所示。该平台采用位置和内部电流环二环反馈控制,由运动控制卡实现电机控制,运动控制卡采用 DSP 和 FPGA 组合的方案,由两个直线电机构成 $X-Y$ 运动平台,两个直线电机均采用 Baldor 公司的 LMCFO2C-HCO,直线电机的运动位置由 GSI 公司分辨率为 $0.5\mu\text{m}$ 的光栅尺测量,读数头型号为 MII1600-40。伺服驱动器为 Baldor 公司的 FMH2A03TR-EN23,采用电流控制方式。本研究以该平台的 X 轴方向进给系统为研究对象。



图 8 高速高精运动控制平台

在移动部件质量为 450 kg 的情况下,笔者设置实验参数和仿真参数一致,使位置输入信号为零,并且在电机定子处施加扫频干扰力。然后采集电机输入电流信号和输出位置信号进行滤波处理后用于辨识谐振方程,根据辨识得到的结果设计 IRC 抑制谐振。

本研究采集输出位置数据得到扫频干扰力输入响应如图 9 所示。

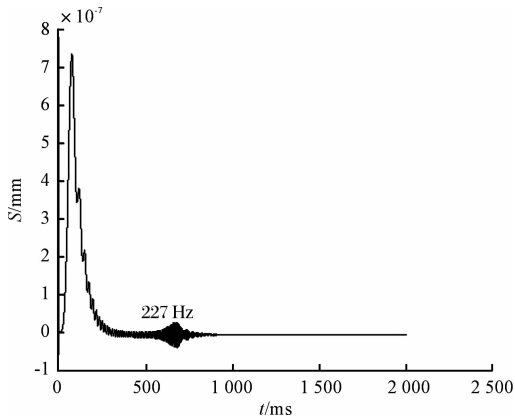


图 9 扫频干扰力输入响应

如图 9 所示,在扫频干扰力的作用下,位置输出总体趋于收敛。但是在频率为 227 Hz 附近,位置偏差突然变大,收敛过程不够平滑。由此表明在频率为 227 Hz 附近系统抵抗位置偏差的能力较弱,存在明显的谐振现象。

根据输入/输出数据辨识得到的离散化谐振方程如下式所示:

$$\frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (4)$$

参数 a_1, a_2 和 b_1, b_2 如图 10、图 11 所示。

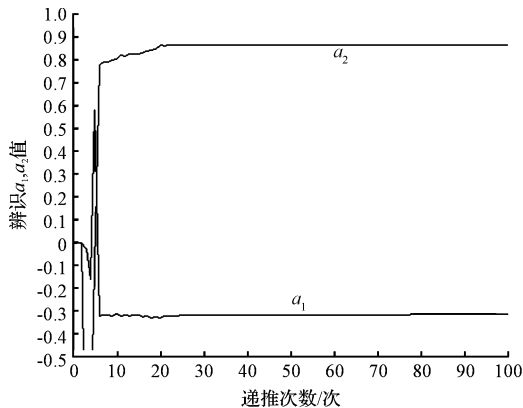


图 10 参数 a_1, a_2

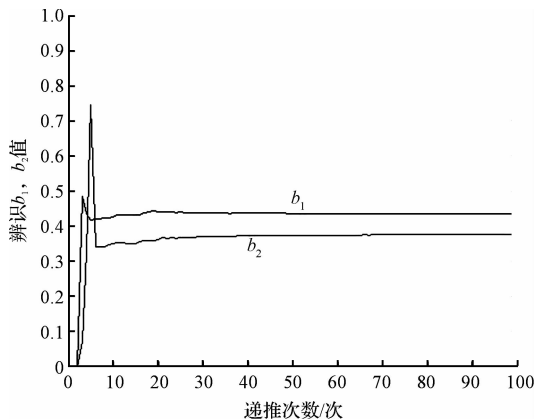


图 11 参数 b_1, b_2

如图 10、图 11 所示,采用最小二乘递推算法辨识谐振方程参数时,辨识过程趋于收敛,在递推次数达到 50 左右时辨识参数收敛。

辨识得到的离散谐振方程经双线性变换后谐振方程参数如表 2 所示。谐振方程伯德图如图 12 所示。

表 2 谐振方程参数值

Γ	$2\xi w_p$	w_p^2
10.6×10^5	52.5	20.3×10^5

如图 12 所示,系统在频率为 227 Hz 处存在 28 dB 左右的谐振。

在系统中加入了 IRC 后,其扫频干扰力输入响应如图 13 所示。谐振伯德图效果如图 14 所示。

如图 13 所示,位置输出趋于收敛,在频率为 227 Hz

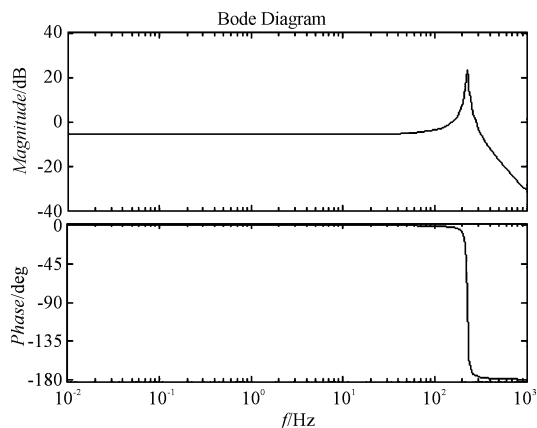


图12 谐振伯德图

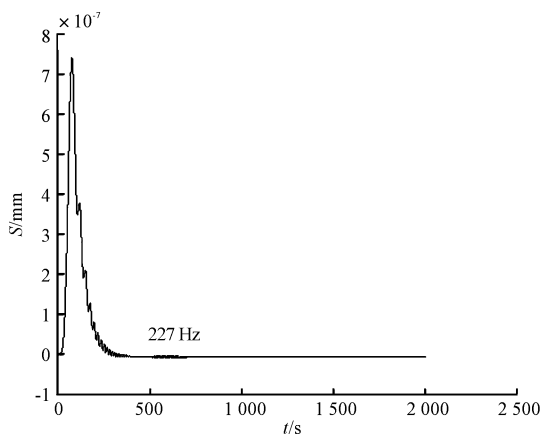


图13 加入 IRC 的扫频干扰力输入响应

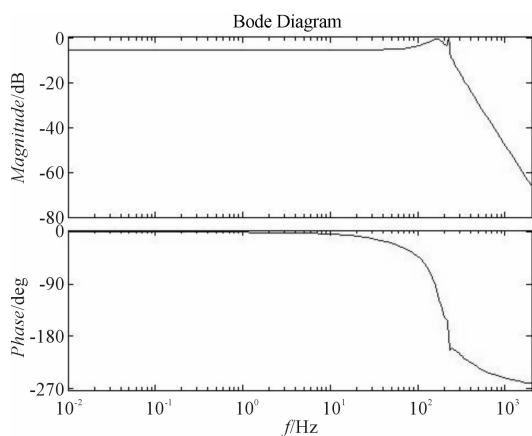


图14 加入 IRC 的谐振伯德图

附近的位置偏差明显变小,收敛过程变得较平滑。如图14所示,加入 IRC 后谐振峰值大概为 5 dB,和图12对比,抑制了 23 dB 的位置偏差。由此可以判断,IRC 在实际系统中抑制谐振效果较好。

5 结束语

本研究提出的高速高精运动平台谐振抑制的控制方案得到了实验验证,实验结果表明,该控制方案对高速高精运动平台的谐振抑制具有较好的抑制效果,并为以后的研究提供了重要的参考依据。

本研究虽然已经获得了较好的抑制谐振的效果,但是并没有完全消除谐振的影响。在下一阶段,本研究将在控制方案上做进一步优化,以获得更好的谐振抑制效果。

参考文献 (References) :

- [1] 汪木兰,张崇巍,林 健,等. 数控机床用直线电机伺服试验平台开发及应用[J]. 中国机械工程,2012,23(3):274-278.
- [2] 马 平,陈振环,李劼科,等. 零传动机床的高速直线进给单元的伺服刚度研究[J]. 中国机械工程,2004,15(7):575-581.
- [3] 姚延风,刘 强,吴文镜. 基于刚柔-机电耦合的机床直线电机进给系统动态性能仿真研究[J]. 振动与冲击,2011,30(1):191-196.
- [4] AL-MAMUN A, KEIKHA E, BHATIA C S, et al. Integral resonant control for suppression of resonance in piezoelectric micro-actuator used in precision servomechanism[J]. **A. Al-Mamun et al. /Mechatronics**,2013,23(1):1-9.
- [5] BHIKKAJI B, REZA S O. Integral resonant control of a piezoelectric tube actuator for fast nanoscale positioning [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2008, 13(5):530-537.
- [6] 李力千,王占林,周福章,等. 闭环运动控制系统中被控对象的模型辨识研究[J]. 制造业自动化,2000,22(1):17-20.
- [7] 韩 江,屈胜利,王效杰,等. 伺服系统辨识的仿真与实现[J]. 航空计算技术,2005,35(4):50-52.
- [8] 潘立登,潘仰东. 系统辨识与建模[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [9] 李 杰. 伺服系统惯量识别及谐振抑制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2008.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

郑 斌,史伟民,杨亮亮. 高速高精运动平台谐振分析与抑制研究[J]. 机电工程,2015,32(1):37-41.

ZHENG Bin, SHI Wei-min, YANG Liang-liang. Analysis and suppression of resonance of motion control platform with high frequency and fast response[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(1):37-41.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>