

Fundamental Philosophy and Status of Boring Chatter Active Control*

Dazhong Wang, Shujing Wu

College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai
Email: wdzh168@hotmail.com

Received: Mar. 28th, 2012; revised: May 6th, 2012; accepted: May 18th, 2012

Abstract: Boring chatter instability in the metal cutting process turn out to be the main factor affecting which constrains the surface quality and processing efficiency. Studying cutting chatter mechanism and its variation in flutter is one of the theoretical core of cutting chatter suppression with an important theoretical value. In this paper, the fundamental philosophy in the study on cutting chatter mechanism and active control is summarized. The main theoretical works on boring chatter active control with guaranteed stability and performance are reviewed. From the trend of recent study, we point out that the high efficient active control will be the focus of the afterward study in this area.

Keywords: Boring; Chatter Mechanism; Active Control

镗削颤振主动控制的研究现状*

王大中, 吴淑晶

上海工程技术大学机械工程学院, 上海
Email: wdzh168@hotmail.com

收稿日期: 2012年3月28日; 修回日期: 2012年5月6日; 录用日期: 2012年5月18日

摘要: 镗削颤振是金属切削过程中产生的不稳定现象, 成为影响和制约零件加工表面质量及加工效率提高的主要因素。深入开展切削颤振形成的机理研究, 是实现切削颤振抑制的理论核心之一, 具有重要的理论价值。本文总结了颤振形成的机理和主动控制的基本思路, 回顾了近年关于镗削颤振及保证稳定性的主要研究成果, 并根据近年来预测控制研究的发展趋势, 指出高效主动控制逐渐成为这一领域研究的热点。

关键词: 镗削; 颤振机理; 主动控制

1. 引言

金属切削颤振的本质是指发生在切削刀具与工件之间的机床闭环切削系统的动态不稳定现象。由于颤振的影响, 工件表面的加工精度降低, 刀具磨损和破损加剧, 产生的噪声过大。为了满足工件加工的自动化、高效率以及高精度的要求, 国内外高度重视切削过程中的颤振控制。

纵观切削颤振控制理论的研究进程, 不难发现针对镗削颤振机理和主动控制的研究取得了丰硕的成果, 极大地推动了该领域理论与实践的发展, 但在镗削颤振机理与主动控制方面还有很多问题需要解决。本文将回顾国内外镗削颤振相关理论的发展, 综述其研究的主要问题和解决问题的主要思想, 并分析研究中的主要难点及有待解决的问题。

纵观切削颤振控制理论的研究进程, 不难发现针对镗削颤振机理和主动控制的研究取得了丰硕的成果, 极大地推动了该领域理论与实践的发展, 但在镗

*资助信息: 教育部留学回国人员科研启动基金(1568), 上海市教育委员会科研创新项目(12YZ148)。

削颤振机理与主动控制方面还有很多问题需要解决。本文将回顾国内外镗削颤振相关理论的发展，综述其研究的主要问题和解决问题的主要思想，并分析研究中的主要难点及有待解决的问题。

2. 镗杆颤振抑制问题

因镗杆细长容易引起切削颤振，所以刀具振动控制研究始于镗杆精密镗孔方面^[1]，后来扩展至车削领域。为简化研究常假设工件刚度足够大而忽略其振动，刀尖处振动衰减程度和工件表面精度成为判断控制效果的主要依据。近年国际上在振动控制理论及执行器研究方面成果卓著^[2-6]，促进了刀具振动特别是镗杆颤振主动控制理论的发展。

瑞典科学家 M. N. Cornel 等人采取振动控制方法^[7]，设计了较强阻尼能力的复合材料阻尼器，这种阻尼器提高了被控对象的静态刚度。切削系统的动力学建模实验可分为模态实验和切削实验，前者靠激振器作为激励源(称静态方法)，后者用动态切削力作为激励源(称动态方法)。日本科学家 M. Yoshitaka^[8]提出一种利用矩阵逆估计三维动态切削力 - 振动传递函数矩阵的方法。M. Yoshitaka 通过切削实验获得数据并按该方法求出了传递函数矩阵，与机床静止时使用锤击法获得的结果进行比较，结果表明机床在静止时和动态切削时的动力学特性具有显著不同。由于切削点处刀具和工件的相对加速度无法测量，分别测量主轴和工件三个方向的加速度并认为其差值就是切削点处相对加速度，动态切削力则由置于工件下方的动态测力仪获得。在对数据进行处理获得三维动态切削力 - 振动传递函数矩阵后，将该矩阵预测的动态切削力与实验结果比较，结果十分吻合。

英国学者 A. Madkour 等^[9]阐述了主动控制的智能学习算法，对切削过程中的振动控制有指导意义。该文综合了最小二乘法(RLS)、进化遗传算法(GAS)提出振动主动控制。文献[10]提出了一种刀具的监测方法，利用通信过程估算刀尖伺服控制切削力，该项基于外扰的切削力测量技术已经在镗削加工上得到了应用。文献[11]提取不同条件下的振动信号的特性，以磁流变液为介质，通过人工神经网络的回归模型，建立抑制镗削振动的在线监测和控制。

文献[12]提出在镗杆内设置减振器，利用涡流和永久磁场间的相互作用控制镗杆的振动状态，该方案

可以使模态衰减至 38 分贝和 60 赫兹带宽。E. Budak 等人^[13]认为，车削和镗削包含了一个多维度的动态系统，并对刀尖的几何模型与其稳定性进行研究，获得了刀尖半径区域极限稳定条件。该研究解决了动态系统的极限稳定性问题，其模拟试验的结果如图 1 和图 2 所示。

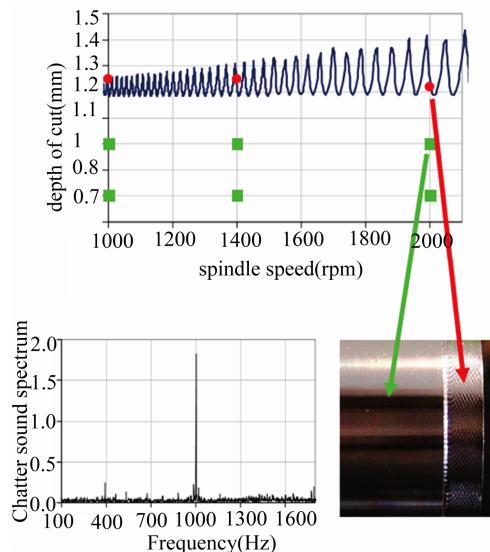


Figure 1. The chatter sound and a finish surface

(—: analytical, ■: stable cut, ●: chatter)

图 1. 颤振声音与表面光洁度

(—: 图线分析, ■: 稳定状态, ●: 颤振状态)

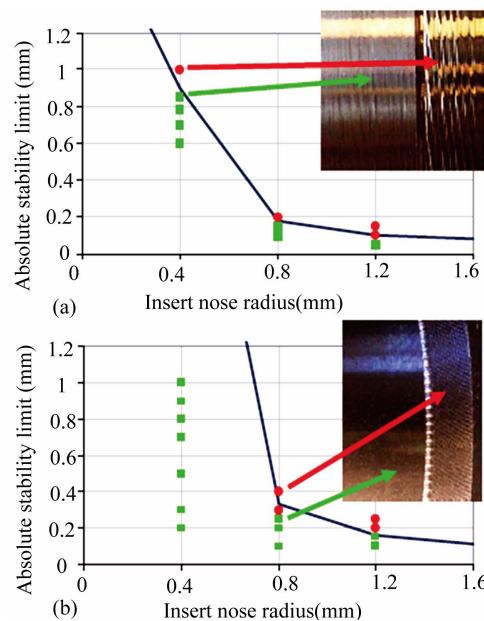


Figure 2. Experimental results and the analytical solutions

(—: analytical, ■: stable cut, ●: chatter)

图 2. 实验结果和解决方案分析

(—: 图线分析, ■: 稳定状态, ●: 颤振状态)

3. 颤振主动预测控制

针对镗杆细长容易颤振，伊朗 B. M. Imani 等^[14-16]给出了一个动态镗削过程模拟模型，预测镗削过程中某一切削条件下刀具与工件的振动状况。同传统方法比较，不仅能够预测稳定区域，还能预测切削力及振幅和稳定频率，该文献提出的动态模型对切削力和振动频率的预测误差在±15%以内，其刀具的几何路径使用 B-样条参数曲线进行描述(图 3)，该法可以模拟不同刀具几何路径，其模型可以为切削刀具制定相关参数。

J. R. Pratt 等^[17]针对镗杆受力选取两个正交方向，实施阻尼模式的主动控制。该文献对切削力、切削厚度的多项式函数进行描述，使用摄动法确定线性不稳定区域，实施从亚临界到超临界的主动控制技术，采用单自由度模型对镗杆颤振稳定性进行分析，该方法对抑制颤振效果明显。针对主动控制的自适应数字控制器，在解决镗杆振动问题上存在局限性，文献[18]提出模拟控制器方案，并同基于反馈滤波算法的自适应数字控制器进行比较研究，该项成果可使镗杆的振动保持在约 50 分贝的水平。

国际上普遍对切削主动控制，特别是镗杆颤振的主动控制研究高度重视，已经由传统的被动控制思想向主动控制思想转变，理论上有所突破。但各国对镗杆的主动控制研究都停留在仿真和实验室阶段，所用的介质都停留在液压或磁流变液上，由于密封等原因致使镗杆的结构复杂、外形庞大，其发展趋势仍都集中在如何设计合理的控制执行装置和控制方法上。

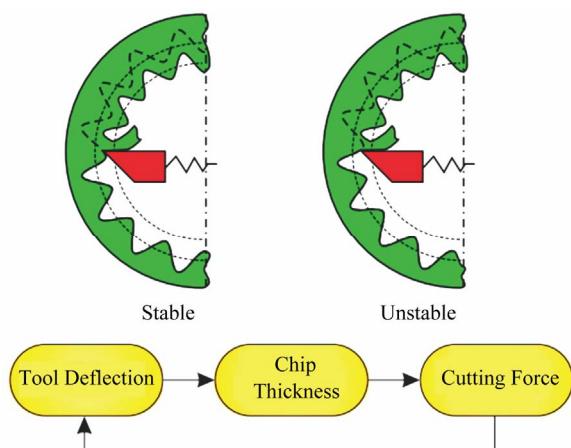


Figure 3. Regenerative chatter mechanism in boring operation
图 3. 镗削再生颤振机理

4. 镗杆颤振主动控制研究的进展

镗削振动主动控制与普通的振动控制相比，无论是理论方面还是实验科学方面都有很大差别。近年，国内学者对镗削颤振主动控制进行了大量研究，在《机械工程学报》、《中国机械工程》、《振动与冲击》、《振动工程学报》等杂志上发表了许多理论计算、实验技术方面的研究成果。

王民等在文献[19]中系统地介绍了镗杆颤振控制方法及国内外的发展现状，分析了镗杆各种抑振手段的技术特点，并展望了镗杆在颤振抑制方法上的发展方向。王民、胡李波等^[20,21]在理论基础上通过实验分析动力减振镗杆的减振效果和动态性能，并测定其最佳状态下的性能参数。在频率 121 Hz 左右对应模态参数分别为：阻尼比 5.15，模态质量 1.16 kg，模态阻尼 130 N·s/m，模态刚度 1,180,000 N/m。在频率 336 Hz 左右对应的模态参数分别为：阻尼比 4.82，模态质量 3.37 kg，模态阻尼 362 N·s/m，模态刚度 4,180,000 N/m。梅德庆、孔天荣^[22,23]和张春良^[24,25]等多年致力于微制造平台和镗削系统颤振主动控制的研究。综合 PID 控制、LQC 控制、 H_∞ 控制、模糊控制、神经网络控制等振动主动控制算法，提出了磁流变自抑智能镗杆的控制策略，该磁流变液在线圈作用下相当于在镗杆末端增加了一个刚度和阻尼系数可由外加磁场强度调控的粘弹性弹簧，以实现改变镗杆动态特性的目的。

高峰、孟光等^[26-29]依托机械系统与振动国家重点实验室，提出基于铣削过程的主动控制理论。通过对铣刀和机床分别进行振动控制，实现铣削过程振动减低的目的。在此基础上设计了一种新型的减振调节装置，并对该装置进行了仿真研究，为进一步研制切削振动主动控制装置提供了理论依据。刘强等^[30]对颤振稳定性临界点进行了研究，通过阻尼优化进一步提高颤振抑制的效果，可以消减 37% 的振动。邓志党等^[31]对文献^[25]中智能镗杆所使用的磁流变阻尼器力学模型的研究现状进行了调查，并对各种模型进行对比分析，讨论了目前磁流变阻尼器研究中几个亟待解决的问题。刘鹏、孔繁森等利用压电执行器，构造了切削振动主动控制实验系统，并分析了该系统的控制机理^[32]，依据以振抑振的思想，采用位移反馈策略对切削过程的振动行为进行干预，进而实施对振动的主动控制，达到了明显的减振效果，为将来制作更具商业前

景的智能刀杆奠定了基础。孔繁森、刘春颖等^[33]以压电陶瓷作为控制元件，采用遗传算法对压电片的贴放位置进行了优化，对镗杆再生型颤振进行主动控制仿真研究，通过在镗杆中内置压电叠堆并在镗杆外粘贴压电片两种途径，有效控制了镗削过程的颤振幅度。此外，国内众多学者^[34-41]均在镗杆控制执行器或主动控制算法方面有所建树。在镗削主动控制理论方面，建立满足实际要求的切削加工过程闭环控制模型是很困难的，所以现今多数停留在实验室阶段。

5. 镗杆颤振的模型跟踪主动控制

目前镗削颤振主动控制方法，均将镗杆视为一个单模态动力学系统，以模态参数固定不变为前提，建立整个系统的控制模型。而实际的镗削系统则是包含无限振动模态的连续系统，在抑制目标模态振动的同时，可能激发其他模态振动。另外，准确获取目标振动模态的动力学参数也是困难的，因为整个镗杆-工件-夹具系统整体动态特性是随着金属去除过程和机床运动部件的运动在发生变化。这些都为准确制订主动反馈控制系统的控制算法设置了障碍。现代智能控制方法虽然存在一定缺陷，但它为复杂系统的控制提出了新的途径，为了避免采用智能控制的盲目性，还需要采用非线性系统动态分析和数值模拟技术，全面解析系统的动力学行为。

解决上述存在问题的可行方案就是引入模型跟踪控制方法^[42-49]。模型跟踪控制在执行实际切削系统与参照模型之间的跟踪时，重心是如何保证系统的稳定性。模型跟踪控制方法，与传统的基于模态的主动振动控制方法相比，该方法不是基于简化的集中质量单模态切削系统模型，而是基于实际的分布式切削系统模型，增强了对系统模型不确定性的鲁棒性。未来镗杆模型跟踪主动控制系统，在结构形式上应该是柔性的。镗杆的工作参数可以在线自动调节，对工作对象及环境的适应性具有柔性，也就具有智能性。镗削振动主动控制是当前机械设计及制造领域受到广泛关注的前沿课题之一，具有重要的理论和应用价值。通过设计模型跟踪主动控制算法和控制器，有望在切削振动主动控制技术方面形成突破。

6. 结束语

过去十几年中，半主动控制、主动控制研究成为

镗削稳定性分析研究的主流，取得了长足的进展，新理论与新方法相继提出，为镗削颤振主动控制的实际应用提供了理论基础。本文认为，控制法则的确立是切削振动主动控制系统的理论核心，它直接决定了控制的效果，解决切削振动主动控制存在存在的可行方案是引入先进主动控制方法。

参考文献 (References)

- [1] M. M. Sadek, S. A. Tobias. Reduction of machine tool vibration. Transcations of ASME, Journal of Applied Mechanics, 1973, 1: 128-135.
- [2] B. Matthijs, S. Maarten. Control relevant blind identification of disturbances with application to a multivariable active vibration isolation platform. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2): 393-404.
- [3] E. Abele, H. Hanselka, F. Haase, D. Schlotte and A. Schiffler. Development and design of an active work piece holder driven by piezo actuators. Production Engineering, Research and Development, 2008, 2: 437-442.
- [4] S. S. Abuthakeer, P. V. Mohanram and G. M. Kumar. Prediction and control of cutting tool vibration in cnc lathe with anova and ann. International Journal of Lean Thinking, 2011, 2(1): 1-23.
- [5] B. Dibakar, N. James. A study on the effects of kalman filter on performance of ipmc-based active vibration control scheme. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(6): 1315-1324.
- [6] T. Alwarsamy, S. Vetrivel and S. Nadarajan. Theoretical cutting force prediction and analysis of boring process using mathcad. World Applied Sciences Journal, 2011, 12(10): 1814-1818.
- [7] D. Lorenzo, A. Andreas and M. N. Cornel. Design and dynamic characterization of composite material dampers for parting-off tools. Journal of Machine Engineering, 2010, 10(2): V57-V70.
- [8] Y. Morimoto, Y. Ichida, R. Sato and K. Takahashi. Estimation of dynamic characteristics of machine structure by pseudo inverse matrix. SICE 2004 Annual Conference, 2004, 2: 1005-1010.
- [9] K. P. Dahal, H. Yu. Intelligent learning algorithms for active vibration control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007, 37(5): 1022-1033.
- [10] B. K. Min, G. O'Neal, Y. Koren and Z. Pasek. A smart boring tool for process control. Mechatronics, 2002, 12: 1097-1114.
- [11] S. Balamurugan, T. Alwarsamy. Machine tool chatter suppression using magneto-rheological fluid damper through artificial neural networks. European Journal of Scientific Research, 2011, 59(4): 547-560.
- [12] H. Mihaita, C. Eugen, S. Neculai-Eugen, B. Mihai, C. Dragoș and F. Claudiu. Experimental research on a wideband passive dynamic absorber useful to increase the boring bars stability. International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 2011, 3(2): 49-54.
- [13] E. Budak, E. Ozlu. Analytical modeling of chatter stability in turning and boring operations: A multi-dimensional approach. Annals of the CIRP, 2007, 56(1): 401-404.
- [14] B. M. Imani, N. Z. Yussefian. Dynamic simulation of boring process. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(14): 1096-1103.
- [15] H. Moradi, F. Bakhtiari-Nejad and M. R. Movahhedy. Tuneable vibration absorber design to suppress vibrations: An application in boring manufacturing process. Journal of Sound and Vibration, 2008, 318(1-2): 93-108.
- [16] N. Z. Yussefian, B. Moetakef-Imani and H. El-Mounayri. The prediction of cutting force for boring process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(12-13): 1387-1394.

- [17] J. R. Pratt, A. H. Nayfeh. Chatter control and stability analysis of a cantilever boring bar under regenerative cutting conditions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 359: 759-792.
- [18] A. Henrik, S. Tatiana, C. Ingvar and H. Lars. On the development of a simple and robust active control system for boring bar vibration in industry. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2007, 12(4): 139-152.
- [19] 王民, 区炳显, 管涛, 费仁元. 镗杆颤振控制技术发展综述[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(8): 1143-1147.
- [20] 胡李波, 王民, 李刚. 动力减振镗杆的减振性能研究[J]. 机械设计与制造, 2009, 1: 131-133.
- [21] M. Wang, T. Zan and Y. Yang. Design and implementation of nonlinear TMD for chatter suppression: An application in turning processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50(5): 474- 479.
- [22] D. Q. Mei, T. R. Kong, J. S. Albert and Z. C. Chen. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 1861-1870.
- [23] 梅德庆, 孔天荣, 陈子辰. 基于神经元 S 型传递函数的磁流变阻尼器力学模型研究[J]. 功能材料, 2006, 37(5): 776-779.
- [24] 张春良, 梅德庆, 陈子辰. 基于遗传算法的振动主动控制系统反馈参数优化[J]. 中国机械工程, 2009, 20(24): 2912-2916.
- [25] 张春良, 梅德庆, 陈子辰. 振动主动控制及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011.
- [26] 江浩, 龙新华, 孟光. 铣削主动减振平台设计及控制[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 724-729.
- [27] 江浩, 龙新华, 孟光. 侧铣加工振动与表面轮廓形成[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 730-734.
- [28] 李中伟, 龙新华, 孟光. 基于 Magnus-Gaussian 截断的铣削系统稳定性的半离散分析法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 69-73.
- [29] H. Jiang, X. H. Long and G. Meng. Study of the correlation between surface generation and cutting vibrations in peripheral milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 208 (1-3): 229-238.
- [30] Y. Q. Yiqing, Q. Liu and M. Wang. Optimization of the tuned mass damper for chatter suppression in turning. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(6): 717-724.
- [31] 邓志党, 高峰, 刘献栋, 杜发荣. 磁流变阻尼器力学模型的研究现状[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 121-126.
- [32] 刘鹏, 孔繁森. 基于压电执行器的切削振动主动控制实验研究[J]. 现代制造工程, 2008, 2: 88-90.
- [33] 孔繁森, 刘鹏, 刘春颖. 基于压电智能结构的镗削振动主动控制的仿真与实验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 142-146.
- [34] 王建宏, 王道波. 子空间预测控制算法在主动噪声振动中的应用[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 129-135.
- [35] 李占卫, 郑建国, 李治军. 磁流变阻尼器间隙结构对阻尼力的影响[J]. 磁性材料及器件, 2011, 42(5): 48-63.
- [36] 宋志鹏, 王贵成, 王树林. 高速切削振动的形成及其控制[J]. 工具技术, 2008, 42(10): 94-96.
- [37] 任违, 孔金星, 岳晓斌, 任玥. 减振镗杆动态特性的对比实验分析[J]. 工具技术, 2010, 44(11): 45-48.
- [38] 谢斌斌, 赵淑军, 李萍奎, 马术文, 丁国富. 基于虚拟样机的动力减振镗杆设计研究[L]. 机械科学与技术, 2010, 29(10): 1408-1416.
- [39] 陈刚. 大型电机主轴内孔加工的镗杆谐响应分析[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(12): 1648-1650.
- [40] 秦柏, 邵俊鹏. 基于 ADAMS 的动力减振镗杆径向跳动频域分析及参数优化[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 2177-2181.
- [41] 杨吉茂, 辛舟. 深孔镗杆在推镗和拉镗时的 ANSYS 受力分析[J]. 机械设计与制造, 2011, 7: 128-129.
- [42] H. Kesson, T. Smirnova and I. Claesson. On the development of a simple and robust active control system for boring bar vibration in industry. *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 2007, 12(4): 139-152.
- [43] M. Ishitobi, M. Nishi and K. Nakasaki. Nonlinear adaptive model following control for a 3-DOF tandem-rotor model helicopter. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(8): 936-943.
- [44] S. J. Wu, S. Okubo and D. Z. Wang. Design of model following control system for nonlinear descriptor system in discrete time. *Kybernetika*, 2008, 44(4): 546-556.
- [45] 赵立华, 大久保重范. 不变零点の安定配置を使った非线形ディスクリプタシステムのモデル追从形制御系(基于不变零点安定性的广义非线性系统的模型跟踪控制系统)[C]. 日本电气学会论文志, 2009, 129(3): 424-431.
- [46] I. Salim. Observer-based control of a class of time-delay nonlinear systems having triangular structure. *Automatica*, 2011, 47(2): 388-394.
- [47] 王大中, 大久保重范. 线形中立型むだ时间システムのモデル追从形制御系の设计(时滞线性中立型系统的模型跟踪控制设计)[C]. 日本电气学会论文志, 2008, 128(11): 1660-1667.
- [48] D. Z. Wang, S. J. Wu and S. Okubo. The state predictive model following control system for the linear time-delays. *International Journal of Automation and Computing*, 2009, 6(2): 186-191.
- [49] D. Z. Wang, S. J. Wu and S. Okubo. Design of the state predictive model following control system with time-delay. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2009, 19(2): 247-254.