文章编号：1000－8152(2001)05－0641－06

振荡控制理论及其应用

梁春燕　李旻智　谢剑英
(上海交通大学自动化研究所·上海，200030)

摘要：振荡控制是指通过引入零均值的高频振荡信号来改善系统动态特性的方法．本文对振荡控制理论的研究现状进行了回顾，总结了振荡控制近年来的研究成果，指出了该理论在研究中存在的问题和研究方向，最后探讨了它的发展前景．振荡控制在某些状态或输出难以测量、反馈控制难以实施的系统控制中不失为一种比较优秀的控制方法．

关键词：振荡控制；高频振荡；平均理论
文献标识码：A

Theory and Applications of Vibrational Control

LIANG Chunyan, LI Minzhi and XIE Jianying
(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University·Shanghai, 200030, P.R. China)

Abstract: Vibrational control is referred to the effect of changing the properties of dynamic systems caused by introduction of high-frequency vibrations with zero mean value. This paper reviewed the research status of vibrational control technique. The main theoretical and application results as well as achievements of vibrational control are concluded, also the problems existing in current vibrational control study along with the research directions for furture are pointed out. Finally, the development prospect of vibrational control is discussed. It is shown that the vibrational control is an excellent method in case where the tradi-tional techniques fail to be used.

Key words: vibrational control; APAZ(almost periodic function with the averag value equal to zero); average principle

1　引言(Introduction)

自动控制理论中有反馈和前馈两个主要的原理，要采用这些方法，状态量(反馈)或干扰量(前馈)应该可测，并且需要引入一个合适的附加外部控制信号．但是，在实际应用中仍存在一些系统，既需要用自动控制的原理来进行控制，又不能测量状态量、干扰量和/或引入外部控制信号．那么在这种情况下，是否有采用自动控制的可能性？在自动控制中，有没有第三种方法，既不需要一些测量值，也不需引入附加的外部控制信号？

60 年代，控制界著名学者 R.E.Bellman 等人建立了一套基于 N.N.Bogogliubov 平均理论[1]的振荡控制理论(vibrational control)，该理论的提出是对上述问题的一个完美解答，是通过采用零均值激励来达到期望的动态响应，特别适用于某些状态或输出难以测量、反馈控制难以实施的系统．振荡控制方法是最近发展起来的一种比较新的控制方法，后来经过 S.M.Meerkov 等学者的后续研究[2－7]，逐步构成了其基本的理论体系．

振荡控制一问世，就在粒子加速器的聚焦控制、化学反应器过程控制[8]等许多场合得到了应用，获得了比较好的系统性能．振荡控制理论的出现为自控界学者的研究开辟了一块崭新的天地．本文对其研究现状及发展前景进行评述．

2　振荡控制理论基础(Basic theory of vibrational control)

2.1　振荡控制理论的提出(Presentation of vibrational control)

振荡控制理论的提出是源于一个著名的实验：倒立摆的稳定性问题．倒立摆系统是典型的不稳定系统，其运动特性与火箭的飞行及机器关节运动等有许多相似之处．在倒立摆系统中所能测量到的信息比较少，一般仅有摆的位置信号可测，因而用传统的反馈控制方法设计倒立摆系统的控制器有一定的困难．如果在支承点的垂直方向加入高频振荡信号 APAZ，振荡的振幅足够小，频率足够大，则可以改善倒立摆自身的稳定性．

假设在倒立摆支承点的垂直方向引入一个沿垂直线的振荡，振荡信号按照 $\mu \sin \omega t$ 规律产生，则系统的线性化方程为：

$$\ddot{x} + \lambda \dot{x} - \frac{g - \mu\omega^2 \sin\omega t}{l} x = 0, \tag{1}$$

$\lambda > 0$，是 Rayleigh 系数．在 $\omega \gg 1$ 的情况下，根据平均理论[1]的原理，可以得到(1)式的平均方程：

$$\ddot{y} + \lambda \dot{y} - \left(\frac{g}{l} - \frac{\omega^2 \mu^2}{2l^2} \right) y = 0. \tag{2}$$

收稿日期：1999－08－09；收修改稿日期：2000－02－29．

(2)式的平凡解 $y=0$ 的稳定性渐近保证了(1)式的平凡解 $x=0$. 因此,在 $\omega^2\mu^2/2l>g$ 的情况下,振荡 $\mu\omega^2\sin\omega t$ 改变了平均系统中恢复力因子的符号,使平均系统渐近稳定,同时也使最初的系统渐近稳定.

这种通过引入参数振荡(零均值的高频振荡信号)来改善系统动态特性的方法被称为振荡控制(vibrational control). 振荡控制与前馈和反馈控制的原理不同,其控制信号(振荡)不依赖于状态值或干扰量,仅仅是独立的时间变量 t 的函数. 振荡控制对某些状态或输出难以测量、反馈控制难以实施的系统有着特殊的意义.

美国学者 S.M.Meerkov 对振荡控制理论进行了深入的研究,提出了振荡控制的稳定性判据[2],讨论了振荡控制保证线性、自治系统在过渡过程中达到期望特性的可能性,及引入振荡信号后,系统在一定条件下仍能保持振荡不变性,即系统输出对外界干扰的不敏感性. Meerkov 的研究成果奠定了振荡控制发展的理论基础.

振荡控制提出以后,立即引起了许多学者的兴趣. 文[9]利用振荡控制来实现其平均系统极点的任意配置,文[10]研究了一类线性系统在扰动区间上的镇定问题,对 Rayleigh 及 Vanderpol 方程所描述的动力系统也进行振荡稳定性分析[11],文[12]基于振荡控制理论,提出了一种消除时间最优控制系统中奇异振荡状态的方法等等.

2.2 振荡控制基本理论(Basic theory of vibrational control)

如果一类系统描述为:

$$\dot{X}=F(X,\lambda), \tag{3}$$

式中 $X\in\mathbb{R}^n$ 为系统的状态变量,$\lambda\in\mathbb{R}^m$ 为系统的结构参数向量. 在(3)式的系统结构参数向量 λ 中加入零均值高频振荡 APAZ 向量函数:

$$\lambda(t)=\lambda_0+f(t), \tag{4}$$

式中 $f(t)$ 为 APAZ 向量函数,λ_0 为系统结构参数的标称值,则(3)式变换为:

$$\dot{X}=F(X,\lambda_0+f(t)). \tag{5}$$

下面先介绍几个稳定性的概念[3].

定义 1 若对任意的 $\delta>0$,存在一个 APAZ 向量 $f(t)$,使得(5)式具有满足

$$\|\bar{X}^*-X^*(\lambda_0)\|<\delta \tag{6}$$

的渐近稳定周期解 $X^*(t),t\in(-\infty,+\infty)$,则(3)式的稳定解 $X^*(\lambda_0)$ 称为可振荡稳定的(vibrationally stabilizable 或 v-stabilizable). 式中 $\bar{X}^*(t)=\bar{X}^*=\lim\limits_{T\to\infty}\dfrac{1}{T}\int_0^T X^*(t)\mathrm{d}t$,$\bar{X}^*(t)$ 是 $X^*(t)$ 的平均.

定义 2 如果 $X^*(\lambda_0)$ 是可振荡稳定的,并且 $X^*(t)=\text{const}=X^*(\lambda_0)$,$-\infty<t<+\infty$,那么 $X^*(\lambda_0)$ 称为是全局振荡稳定的(totally vibrationally stabilizable 或 t-stabilizable).

定义 3 如果平衡点 $X^*(\lambda_0)=[X_1^*(\lambda_0),\cdots,X_n^*(\lambda_0)]^{\mathrm{T}}$ 中的某一元素 $X_i^*(\lambda_0)$ 对任意的 $\delta>0$,存在一个 APAZ 向量 $f(t)$ 和 $\lambda_1=\text{const}$,使系统 $\dot{X}=F(X,\lambda_1+f(t))$ 有渐近稳定周期解,$X^*(t)=[X_1^*(t),\cdots,X_n^*(t)]^{\mathrm{T}},t\in(-\infty,+\infty)$,且第 i 个元素满足

$$\|\bar{X}_i^*-X_i^*(\lambda_0)\|<\delta, \tag{7}$$

则 $X^*(\lambda_0)$ 称为是部分振荡稳定的(partially vibrationally stabilizable 或 p-stabilizable).

研究一类线性系统:

$$\dot{X}=AX, \tag{8}$$

式中 $X\in\mathbb{R}^n$ 为系统的状态变量,$A\in\mathbb{R}^{n\times n}$ 为系统的结构参数矩阵,A 的元素 $|a_{ij}|(i,j=1,2,\cdots,n)$ 为实常数.

引入振荡后得到的系统为:

$$\dot{X}=(A+B(t))X. \tag{9}$$

$B(t)$ 是类三角矩阵,其结构为:

$$B(t)=\begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ k_{2,1}\sin\omega_{21}t & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ k_{3,1}\sin\omega_{31}t & k_{3,2}\sin\omega_{32}t & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n,1}\sin\omega_{n1}t & k_{n,2}\sin\omega_{n2}t & k_{n,3}\sin\omega_{n3}t & \cdots & k_{n,n-1}\sin\omega_{m}t & 0 \end{Vmatrix}.$$

根据平均理论的方法,通过简单的变量变换,将振荡的微分方程(9)式化为一种标准形式:

$$\begin{cases}\dot{y}=(A+\bar{B})y,\ A=\|a_{ij}\|_{i,j=1}^n,\\ \bar{B}=\|\bar{b}_{ij}\|_{i,j=1}^n=\text{const},\ y\in E_n.\end{cases} \tag{10}$$

其中矩阵 $\bar{B}=-(A^{\mathrm{T}}\odot C)$,符号 $\odot$ 表示点乘($\bar{b}_{ij}=-a_{ij}c_{ij}$),$c_{ij}=\lim\limits_{T\to\infty}\int_0^T F_{ij}^2(t)\mathrm{d}t$,$F_{ij}(t)$ 是时间 t 的零均值周期函数,记(10)式为(9)式对应的平均系统.

定义 4[9] 如果存在一个向量 C,使得系统(8)相对于输出 $Y=CX$,$|A,C|$ 对为可观测的,则系统(8)称为基本可观测的.

定理 1[2] 若系统(8)是基本可观测的,则系统(8)可振荡稳定的充要条件为:

$$\mathrm{tr}(A)<0. \tag{11}$$

定理 2[13] 在振荡控制中,快速振荡或几乎振荡系统的可控性、可观测性可以用与之相关的线性、时不变平均系统的可控性、可观性来分析.

3 振荡控制理论的研究进展(Research development of vibrational control theory)

振荡控制在 70 年代后期有了迅速的发展,Meerkov, Bentsman 和 Lehman 等一大批著名学者均致力于振荡控制的研究,取得了斐然的成绩. 纵观这一时期的研究成果,振荡控制的发展可以概括为四个方面:线性系统的振荡控制、非线性系统的振荡控制、反馈振荡控制和滞后系统的振荡控制. 线性系统的振荡控制在 80 年代初由 Meerkov 进行了详细的理论综合以后[2],到现在已经发展得比较成熟,在此不再赘述. 下面对非线性系统的振荡控制、反馈振荡控制和滞后系统的振荡控制三个方面分别进行论述.

3.1 非线性系统的振荡控制(Vibrational control of nonlinear system)

对于非线性系统,虽然针对一些特殊的非线性情况进行

了探讨[14~16]，但并没有形成完整的理论．由于振荡控制在实际中有着广泛的应用，如粒子束、等离子体、激光和化学反应器等，而它们均存在一定的非线性，所以进一步地发展非线性振荡控制是必要的．文献[3,4]对非线性振荡控制进行了比较完善的理论分析．

考虑一类非线性系统结构如(3)式所示，参数振荡由(4)式给出，则非线性系统可重新描述为：

$$\begin{cases} \dot{X} = F(X,\lambda_0) + F_1(f(t),X), \\ F_1:\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n. \end{cases} \tag{12}$$

其中，$F_1(\cdot,\cdot)$ 是一线性化矢量函数，(12)式是有振荡参数的非线性系统的一类子系统．$F_1(f(t),X)$ 有下面几种类型：

1) $F_1(f(t),X) = L(t)$，$L(t)$ 是 APAZ 矢量，这种振荡称为向量可加性振荡(vector additive)．在特殊情况下，如果仅存在 $L(t)$ 的最后分量不为零，这种振荡也称为 AP-强迫振荡(AP-forcing)．

2) $F_1(f(t),X) = B(t)X$，其中 $B(t)$ 是 APAZ 矩阵，这种振荡称为线性可乘性振荡(linear multiplicative)．

3) $F_1(f(t),X) = B(t)\Gamma(X)$，$\Gamma:\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$，这种振荡称为非线性可乘性振荡(nonlinear multiplicative)．

非线性系统在向量可加性、线性可乘性和非线性可乘性振荡情况下分别存在着一定的稳定性振荡条件[3]．在线性系统中，仅存在 t-stabilizability，它与系统的线性部分有关；而在非线性系统中，还存在 v-stabilizability 和 p-stabilizability 稳定性，是线性可乘性振荡中系统稳定的典型形式，受线性和非线性部分的相互影响．同时，在这三种振荡类型下，非线性系统均是振荡可控的[4]．Bellman 等人还推出了使系统局部动态稳定的振荡参数的计算公式，是分析全局过渡态特性的有效工具

Bentsman[17]等人在非线性可乘性振荡下对非线性振荡控制理论进行了深入的研究，对于复杂的非线性系统，解决了怎样选择稳定的振荡来保证其有效的振荡运动方式，及怎样沿振荡的轨迹建立一个近似的平均运动，来表示其动态特性的特点，进一步证明了振荡控制的主要优点，即系统不能在线跟随系统的动态过程进行测量，或测量装置比较难以实现时，能够保证系统达到期望的运行轨迹．

对不稳定、有 Neumann 边界条件约束的、抛物线型的分布参数系统(DPS)在振荡控制下，存在着一定的系统稳定的条件[17]．同时文[17]还给出了在线性可乘性和 AP-强迫性两种振荡形式下振荡参数的选择方法，并分析了由偏微分方程所描述的 DPS 系统在振荡控制中的过渡特性．

在 AP-强迫振荡控制的一类非线性系统的不变性研究中[18]，提出了与振荡频率和振幅相关的实际计算公式，及被控参数中稳态点的振荡幅度，并对 Rayleigh 方程所描述的系统展开了具体的讨论．

由于在实际应用中，基于 N. N. Bogogliubov 的平均理论在非线性系统的分析和应用中存在着一定的困难(主要是计算上的困难)，并且需要一些必要的、过分依赖于系统结构的微分近似，因而带来许多误差，这限制了理论结果在实际中的应用，一些学者开始将重点放在平均理论的研究上，提出了一些改进的平均理论算法[19,20]，如 Bentsman[19] 提出了一种基于泰勒级数展开的平均方法，使近似的平均系统得到了直接分析解．

3.2　反馈振荡控制(Feedback vibrational control)

在开环振荡控制中，系统参数的高频振荡在实际系统中不容易实现，APAZ 信号有时难以加入到控制对象的参数中来改变对象的结构特性．于是有了另一种间接的方法，在控制器中加入 APAZ 信号，即反馈振荡控制．

我们知道每一个渐近稳定的线性系统 $G(s)$ 有它的绝对稳定区间$[0,a_{max}]$的最大边界，能否通过在反馈环路中增加一动态的成分来提高其最大边界值？答案当然是肯定的，在 $G(s)$ 的输出部分和 $n(y)$ 的输入之间增加一个装置，如图 1 所示，将这个装置选为一线性、周期控制器(L.P.C)．这样在线性系统的开环部分加入零均值的周期性控制信号，就组成了一种闭环反馈振荡控制器．增加的控制器(L.P.C)显著地提高了无记忆非线性不确定系统的鲁棒稳定性．

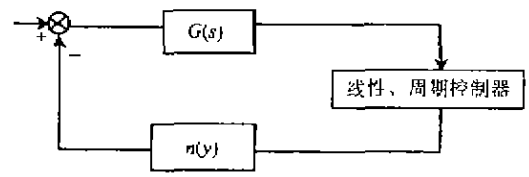

图 1　反馈振荡控制结构图

Fig. 1　Structure of feedback vibrational control

定理 3[5]　如果系统 $G(s) = n(s)/d(s)$，$d(s)$，是 Hurwiz 多项式，相对阶次为 1，则存在一控制器，能够保证平均系统在区间$[0,\infty]$上的绝对稳定性．

Kabamba 和 Meerkov 对这类闭环反馈系统在状态空间和输入输出反馈形式下控制器的稳定性问题[21]进行了研究，并分别给出了在这两种形式下控制器的结构．

在闭环振荡控制系统的鲁棒稳定性问题的研究中，确定了保证闭环振荡系统稳定性的未建模不确定性的上界[22]．使多胞形系统稳定的振荡控制器存在的充分必要条件是：当且仅当多胞形系统中的每一个顶点多项式的特征值之和为负值．这个条件的提出使闭环振荡控制在实际应用中不会因缺少鲁棒稳定性的依据而受到阻碍．

对于 SISO 线性时不变系统稳定控制器的参数化形式，一般采用 Youla 方法．Kabamba 等人[23]又提出了一种新的参数化形式，利用这种参数化方法得到的平均闭环传递函数可以表达为一阶增益的稳定传递函数的仿射函数，为设计者在设计稳定控制器时，保证平均系统和原来系统均能达到期望的时域特性提供了灵活的设计方法．

振荡控制是通过在系统的结构参数中加入零均值的高频信号，来改变系统的动态特性．但是由于轨迹不变性条件的约束，限制了极点配置的可能性．Kabamba[24]等人提出了在复杂系统的一定部位引入振荡控制来配置系统极点的充分必要条件．Lee Soodong[25]等人先用平均理论得到系统的标准结构，然后证明了通过反馈振荡控制不仅可以配置系统极点，还可以重新配置系统的零点(在一定情况下可以任意配

置)这种零点配置技术应用到了有限增益界限和分散固定模式的系统

3.3 滞后系统的振荡控制(Vibrational control of time-lag systems)

许多实际的系统在它们的状态空间描述中均包含时间延迟,在Bentsman[6]和Lehman[7]等人的文章中,振荡控制的研究已经开始涉及到小滞后线性系统;Bentsman和Lehman[26]对小滞后非线性系统的振荡控制也进行了研究,后来这些研究成果经Bentsman[27]等人做了系统的归纳.但是由于延迟时间大小的约束,这些成果在实际应用中的推广受到了限制.

在Bentsman和Lehman[26]的研究中,消除了延迟时间大小的限制,但是也仅仅局限于对线性系统的讨论.不久,Letuman[29]提出了滞后时间任意大小但有界的非线性系统的振荡控制策略,并将该控制方法运用到了化学反应器的实际应用中.在Bentsman[27]和Lehman[30]等人研究成果的基础上,Letuman[31]又做了细致的工作,主要是针对线性可乘性振荡,提出了对任意大小、固定、有界延迟时间的非线性滞后系统稳定振荡存在的条件,并给出正确选择振荡的振幅、相位和频率的一些准则

定理4[32] 反馈振荡控制系统在一定条件下是t-stability和vδ-stability[31]稳定的,并且对于一个固定的、足够小的振荡周期,振荡系统和其相应的平均系统之间存在σ-全局稳定性.

Shujaee[33]等人对一类线性、有界大滞后系统的振荡控制进行了研究,消除了滞后时间大小这一约束条件,与文献[6,7]相比,对大滞后系统振荡参数的选择过程相对比较复杂.对于延迟时间在0到有界、任意大范围内的系统,可以用恒定振幅、相位和频率的振荡来使其稳定.

Shujaee[34]对微分延迟系统的平均理论也进行了一些改进,并用该平均理论来辅助设计振荡控制器,这种反馈振荡控制器具有下面的特点:1)与时下变控制器相比,具有非常好的鲁棒性.2)对未建模的滞后没有鲁棒性.

对快速时变延迟系统的振荡控制也进行了研究[35],并提出了稳定性判据.

滞后系统的振荡控制是一个非常复杂的问题.对于小滞后系统,有限维系统可以近似化简为普通微分方程(ordinary differential equation)所描述的振荡控制的滞后系统,但这种方法对于延迟时间是任意但有界的时滞系统并不理想,需要解决的是如何将平均理论应用到更广泛的一类时滞微分系统.直到最近,平均理论在滞后系统中的应用才有了进一步的发展[32,33],建立了滞后系统的平均微分延迟方程,这种新的平均理论首先被应用到有界大滞后快速振荡系统中,随之应用于一般的时间滞后系统中,并将它扩展到更加广泛的微分延迟方程,进一步发展了振荡控制理论.平均理论是振荡控制方法的核心部分,仍然需要进行深入的研究

4 振荡控制理论的应用(Applications of vibrational control)

振荡控制在粒子加速器的聚焦控制[36]、化学反应器过程控制[8]等许多场合得到了应用,这些工业过程都存在着一些严重的非线性,实施反馈控制比较困难,则可以采用振荡控制的方法来解决问题,取得反馈控制难以取得的效果.

例如,在化工厂连续搅拌反应器(CSTR)过程控制中,状态量的在线测量比较困难,而且有很大的时间延迟,另外对于一些状态变量,还需要采用多种复杂的控制策略.如果采用振荡控制,对反应物的流速加入振荡,引起S形稳态曲线的改变,使CSTR的工作点处在渐近稳定周期性边界上,接近恒定流速时反应器的下稳定稳态点.这种控制装置显著地提高了生产率,降低了能源消耗.并且,如果对反应物的流速和浓度均加入振荡信号,下仅提高了产量,而且减小了反应器温度摆动的幅度.

目前,振荡控制的研究成果已广泛应用于化工过程、长机械臂、宇宙飞船上的太阳硅板、粒子束、等离子体、倒立摆等实际系统中,来保证系统的稳定性,改善其动态特性.

当然,振荡控制理论的应用也存在一定的局限性.在一些情况下,引入振荡信号并下能改变平均方程的参数,原系统的稳定性将下能被改善.例如,当一个单摆系统含有振荡延迟因素时,是不能通过引入振荡信号来使原系统稳定的振荡控制所表现出来的是动态系统的结构特性.而且有许多对象下允许施加APAZ信号,另外要求APAZ信号的频率要远远大于系统的自振频率,这些都限制了振荡控制的应用.

5 对振荡控制理论发展的思考和展望(Expectation to the development of vibrational control theory)

振荡控制与控制理论的其它领域相比还下很成熟,其发展前景不容忽视.在近年来下断发展的同时,也出现了一些值得注意的问题和动向.现阶段,值得深入研究的方向有:

1) 反馈振荡控制在非线性系统、滞后系统、时间最优控制系统中的可控性、鲁棒性和稳定性问题需进一步深入.

2) 时间延迟是复杂工业过程中常见的现象,在滞后系统的振荡控制中,应多考虑其在实际系统中的易用性,对延迟时间变化的振荡控制还需深入.

3) 为了解决实际应用中的困难,对非线性、滞后系统中的平均理论还需要进一步研究.

4) 有些学者对分布式、分散式系统的振荡控制也进行了研究[13,37],得到了使系统稳定振荡的条件,提出了设计反馈振荡控制器的方法,对该方向可以进一步研究.

5) 在反馈振荡控制中任意配置零极点的能力.

6) 对某些实际系统来说,振荡控制还有实现上的困难,振荡的幅度和频率受限制是它的一个主要缺点.为了克服应用中的困难和在设计中能够得到简单的控制,对振荡控制的下利因素需进一步研究[38].

6 结束语(Conclusion)

振荡控制是一种比较优秀的控制方法,对非线性、闭环反馈和滞后系统的振荡控制控制研究已经初具规模.振荡控制的发展从线性到非线性,从开环到闭环反馈,从一般系统到滞后系统,理论体系越来越完善、具体,研究领域包括稳定性、鲁棒性和可控性分析.

振荡控制区别于其他传统控制方法的主要特点,即不需要状态或干扰的测量值,而是采用零均值激励来达到期望的动态响应,决定了它特别适用于某些状态或输出难以测量、反馈控制难以实施的系统,也奠定了振荡控制在实际系统中的应用地位.目前,振荡控制在国外研究的比较多,在国内对振荡控制的研究还没有深入开展,希望能引起我们的关注.

参考文献(References)

[1] Bogoliubov N N. Asymptotic Methods in the Theory of Nonlinear Oscillations [M]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1979

[2] Meerkov S M. Principle of vibrational control: Theory and applications [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1980, 25(4):755 - 762

[3] Richard Bellman. Vibrational control of nonlinear systems: Vibrational stability [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1986, 31(8):710 - 716

[4] Richared Bellman. Vibrational control of nonlinear systems: Vibrational controllability and tranient behavior [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1986, 31(8):717 - 724

[5] Lee S and Meerkov S M. Vibrational feedback control in the problem of absolute stability [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1991, 36(4):482 - 484

[6] Bentsman J, Fakhfakh J and Lehman B. Vibrational stabilization of linear time delay system and its robustness with respect to delay size [J]. Syst. and Contr. Lett., 1989, 12:267 - 272

[7] Bentsman J, Fakhfakh J and Lehman B. Calculation formula for vibrational control of a class of linear time lag systems [J]. Int. J. Control Theory and Adv. Tech., 1989, 5(2):105 - 118

[8] Ali Cinar. Vibrational stabilization of a chemical reactor: An experimental study [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1987, 32(4):384 - 389

[9] Ren Zhang and Xu Demin. A new method of placing zero point-parameter vibration method [J]. Journal of Northwest Industry Univ., 1996, 14(1):22 - 25(in Chinese)

[10] Xu Demin. Vibrational stabilization of linear system under coefficient purturbation [J]. Control Theory and Applications, 1990, 7(4): 25 - 28

[11] Guo Yingqing and Xu Demin. Research of changing dynamical characteristics of system using vibration control [J]. Electrical Equipments, 1997, 20(1):449 - 452(in Chinese)

[12] Ren Zhang and Xu Demin. Vibrational control method of eliminating singularity vibration in the time-optimum system [J]. Control and Decision. 1998, 8(1): 69 - 72(in Chinese)

[13] Runolfsson T and Meerkov S M. Vibrational-feedback control of decentralized systems: A design algorithm, model error concepts and compensation[A]. Proceedings of the IFAC Workshop [C], Sidney. 1986, 121 - 124

[14] Meerkov S M. Condition of vibrational stabilizability for a class of nonlinear systems [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1982, 27(2):485 - 487

[15] Bellman R, Bentsman J and Meerkov S M. Vibrational control of systems with arrhenius dynamics [J]. J. Math. Anal. Appl., 1983, 91(1):152 - 191

[16] Lucke M and Schank F. Response to parametric modulation near an instability[J]. Phys Rev. Lett., 1985, 54(4):1465 - 1468

[17] Bentsman J. Vibrational control of a class of nonlinear systems by nonlinear multiplication vibrations [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1987, 32(8):711 - 716

[18] Balestrino A, Bemuni F and Landi A. Steady-state behavior in the vibrational control of nonlinear systems by AP-forcing [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1994, 39(6): 1255 - 1258

[19] Bentsman J and Hong Keum S. Vibrational stabilization and transient behavior analysis of nonlinear parabolic systems with NEUMANN boundary conditions[A]. Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control[C], New York, 1989, 2:1438 - 1443

[20] Balestrino Aldo. Automatic averaging in the vibrational control of nonlinear systems [A]. Proceedings of the 1994 IEEE Conference on Control Applications [C], New York, 1994, 2:1447 - 1452

[21] Kabamba P T and Meerkov S M. Closed loop vibrational control: State and output feedback stabilizability[A]. Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control[C], New York. 1991, 3:2375 - 2376

[22] Kabamba P T and Meerkov S M. Stability robustness in closed loop vibrational control [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1998, 8(12):1101 - 1111

[23] Kabamba P T, Meerkov S M and Poh E K. Youla parameterzation in closed loop vibrational control[J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1994, 37(7):1455 - 1459

[24] Kabamba P T, Meerkov S M and Poh E K. Pole placement capabilities of vibrational control [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1998, 43(9):1256 - 1459

[25] Lee Soodong, Meerkov S M and Semyon M. Vibrational feedback control: Zeros placement capabilities [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1987, 32(7):604 - 611

[26] Bellman R, Bentsman J and Meerkov S M. Vibrational control of nonlinear systems: Vibrational controllability and transient behavior [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1986, 31(8):717 - 724

[27] Bentsman J, Hong K and Fakhfakh J. Vibrational control of nonlinear time lag systems: Vibrational control stabilization and transient behavior [J]. Automatica, 1991, 27(3):491 - 500

[28] Lehman B and Bentsman J. Vibrational control of linear time lag systems with arbitrarily large but bounded delays [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992, 37(10):1576 - 1582

[29] Lehman B. Vibrational control of time delay systems [A]. Weiner J and Hale J K(eds). Ordinary and Delay Equations. Pitman Research Notes in Mathematical Series[M], Longman, UK, 1992, 111 - 115

[30] Lehman B and Verriest E. Stability of a continuous stirred reactor with arbitrarily large but bounded delays [A]. Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control [C], New York, 1991, 2:1875 - 1876

[31] Lehman B and Bentsman J. Vibrational stabilization and calculation formulas for nonlinear time delay systems: Linear multiplicative vibrations [J]. Automatica, 30(7):1207 - 1211

[32] Lehman B and Bentsman J. Vibrational control of nonlinear time lag systems with bounded delay: averaging theory, stabilizability, and transient behavior[J]. IEEE Trans. Automat. Contr.,1994,39(5): 898 - 912

[33] Lehman B and Bentsman J. Vibrational control of linear time lag system with arbitrarily large but bounded delay [J]. IEEE Trans Automat Contr , 1992, 37(10):1576 - 1582

[34] Shujaee Khalil and Lehman B. Vibrational feedback control of time delay systems [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1997,42(11): 1529 - 1545

[35] Lehman B and Graef John R. Stability of fast almost periodic systems with special classes of time varying delay [A]. 32nd IEEE Conference on Decision and Control [C], New York,1993, 4:3220 - 3222

[36] Livingston M S High-Energy Accelerators[M]. New York : Wiley-Interscience, 1954

[37] Bentsman J, Meerkov S M and Shu Xianshu. Vibrational stabilizability of a class of distributed parameter systems [A] IFAC Proceedings Series Control of Distributed Parameter Systems [C], Sidney, 1986,3:453 - 457

[38] Balestrino A and Landi A. Vibrational control: from theory to practice[A]. XII IFAC World Congress[C], Sidney, 1993,4:403 - 407

本文作者简介

梁春燕 女.1974年生.上海交通大学自动化研究所博士生.研究领域为计算机过程控制,运动控制,时滞控制等.发表论文20余篇.

李旻智 1978年生.上海交通大学自动化系硕士生.研究方向为时滞控制,现场总线

谢剑英 见本刊2001年第1期第44页.

“何潘清漪优秀论文奖”征文启事

“何潘清漪优秀论文奖”征文活动自1991年开展以来,得到各方面的支持,已进行了四届,共评选出获奖论文九篇.

第五届“何潘清漪优秀论文奖”评选活动即将开始,征文2001年继续由本刊办理,请应征作者注意:

1 文章必须是用中文正式发表过的.因此,寄来的文章应是该文在所发表的刊物的抽印页或复印页.

2.文章需一式五份.

3 请在应征稿的首页左上方注明“何潘清漪优秀论文奖征文”字样.

4.截稿日期为**2002年3月10日**,授奖时间另行通知,申请者可将论文寄到《控制理论与应用》编辑部(地址:广州市 五山 华南理工大学 邮政编码:**510640**).

《控制理论与应用》编辑部

美国哈佛大学教授何毓琦(Y.C.Ho)先生为了庆贺其母亲何潘清漪老太太九十岁生日特设此奖,借以纪念她的母爱,以及她为了支持何先生的事业所付出的辛劳.

授奖对象:

离散事件动态系统(DEDS)方面优秀中文论文的作者.

目　　的:

选拔、奖励、促进和宣扬中国在DEDS领域内得到国际承认的重大成果.

条例与机构:

1.由何毓琦先生提供的何潘清漪奖金总额为5000美元,每次授奖金额1000美元,连续颁发5次(每两次之间间隔至少为一年).5次之后,有可能追加基金继续颁发.

2.世界各地用中文发表的关于DEDS方面的论文都有资格申请奖金.

3.论文由国际专家小组甄别和最终评定.

专家小组成员:曹希仁、陈翰馥、谈自忠(组长)、郑应平、胡保生.

4.如果某年度无合适的论文,该奖可以不颁发,但至少会颁发5次.

5.鼓励获奖者将其论文译成英文,为其发表提供帮助,借此促进在DEDS领域内工作的中国研究人员的国际合作.