

文章编号: 1001-0920(2001)03-263-07

时滞滤波器抑制残留振荡: 理论、方法及应用

梁春燕, 钟庆昌, 谢剑英
(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: 回顾了时滞滤波器的发展背景和近年来的研究状况, 介绍了时滞滤波器的各种设计方法和主要研究领域。时滞滤波器可从根本上避免激发对象的振动模态而消除残留振荡, 在柔性结构系统中得到了广泛的应用。最后对时滞滤波器技术中存在的问题及未来的研究方向进行了探讨。

关键词: 时滞滤波器(TDF); 输入整形; 残留振荡; 灵敏度曲线

中图分类号: TP 271

文献标识码: A

Time Delay Filter to Reduce Residual Vibration: Theory, Methods and Applications

LIANG Chun-yan, ZHONG Qing-chang, XIE Jian-ying

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Review of the development of time delay filter is presented. Firstly, the concept and essence of time delay filter are given out. Time delay filter is a method for reducing residual vibrations in computer controlled machines. Vibration is eliminated by convolving a sequence of impulses with a desired system command to produce a shaped input. Then, important research fields of time delay filter are mainly divided into seven parts, including new design method, optimal time delay filter design, nonlinear and adaptive time delay filter. Time delay filter technique is applied to mechanical structure with flexible modes widely. Finally, several problems pending further investigation are discussed.

Key words: time delay filter (TDF); input shaping; residual vibration; insensitivity curves

1 引言

高精度定位机械系统, 如硬盘读写头、坐标测量机、工业机器人等, 在从一个位置运动到另一个位置时, 定位速度、精度是很重要的性能指标。但由于振动模态的存在, 系统在快速定位时总会产生残留振荡, 影响定位的精度和速度。最初研究航天飞机的远程操纵系统(RMS)时, 当从一个位置移动到一个新的位置时, 宇航员需要等待约 50s 才能使操纵器的振荡停止。另外一些实验也表明, 约 30% 的操作时

间被浪费在等待 RMS 振荡的稳定上, 这种时间上的浪费是不能容忍的。

为了抑制这种残留振荡, 常用的办法是增加阻尼、提高刚度或者建立复杂的数学模型并采用复杂的控制算法来实施闭环控制。前两种方法需要加大机构的质量, 这不但会使成本增加, 而且有时是不可能的; 第三种方法由于相对复杂而应用较少。因此, 探索其它方法以消除残留振荡具有重要的理论价值和实用价值。时滞滤波器作为一种简单而有效的开环控制方法, 便是对上述方法的有益补充。

收稿日期: 1999-10-08; 修回日期: 1999-11-30

作者简介: 梁春燕(1974—), 女, 山东济宁人, 博士生, 从事时滞控制、工业过程控制等研究; 谢剑英(1940—), 男, 福建龙岩人, 教授, 博士生导师, 从事计算机过程控制、网络与信息系统等研究。

2 时滞滤波器技术

2.1 posicast 控制

1952年, Calvert 等在研究中^[1]利用部分输入延迟来消除振荡。后来, Tallman 建议采用 posicast 控制方法^[2], 将一个给定振幅的阶跃按照时间段分成两个小幅度值的阶跃。在悬垂物的移动实验中, 将垂直悬挂的重物移动到一半距离时, 重物会产生半周期的摆动, 并达到末端位置。这时迅速移动重物到末端位置, 而载荷仍保持在原位置。这种方法称为 positive-east 或 posicast 控制。该方法可以最终消除残留振荡, 但由于鲁棒性较差, 而且要求系统必须是高度线性的, 仅存在一个准确的共振模态, 所以没有得到广泛的应用。

2.2 时滞滤波器控制

1990年, Singer 等人利用时滞滤波器(TDF)的控制方法来消除残留振荡^[3], 并应用在航天飞机远程操作系统中。TDF 也称为输入整形器, 是时滞控制^[4]的一个主要分支。作为一种前馈型的开环控制方法, 其滤波器结构在简单情况下与 posicast 方法相似。它以半振荡周期的整数倍作为时间延迟值, 能完全消除系统的残留振荡。这项技术已引起了许多专家学者的重视。

2.3 时滞滤波器基本原理

时滞滤波器作为一个前馈单元, 包含一系列不同幅值和时滞的脉冲序列。将期望的系统输入和脉冲序列进行卷积, 产生一个整形的输入来驱动系统, 即输入整形。TDF 的基本结构为

$$C(s) = A_1 + \sum_{i=1}^n A_i e^{-s t_i} \quad (1)$$

其中, A_i 和 t_i 是脉冲序列的幅值及其对应的时滞, n 是 TDF 中脉冲的个数。整形过程如图 1 所示。

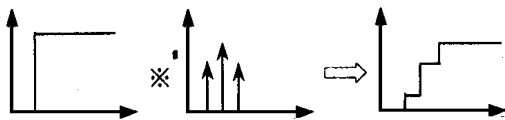


图 1 时滞滤波器对输入进行整形

最简单的时滞滤波器包括两个脉冲: 第 1 个脉冲在零时刻产生振荡; 第 2 个脉冲延迟一定时间后产生的振荡与第 1 个振荡反向, 幅值大小相同。如图 2 所示, A_1 和 A_2 的响应叠加后振荡完全消除, 这就要求 A_2 必须有适当的幅值。

目前, 时滞滤波器的基本设计方法主要有: 零极点抵消法、脉冲响应法、矢量图法、灵敏度曲线法

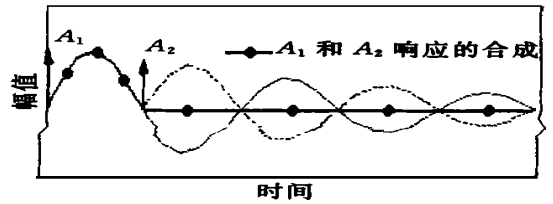


图 2 两脉冲滤波器的振荡消除过程

和相平面分析法等。

2.4 时滞滤波器抑制残留振荡

考虑无摩擦弹簧-质量系统, 对其进行力学分析, 得到系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{Ms^2 + k} \quad (2)$$

这是一个具有无阻尼振动模态的典型实例, 已有多反馈控制方案可以达到控制目标。但是反馈控制付出的代价是很大的, 而时滞滤波器作为一种开环控制策略却可以很好地发挥其优势。

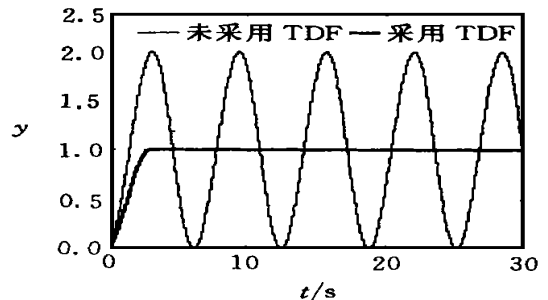


图 3 弹簧-质量系统的响应

假设 $M = 1\text{kg}$, $K = 1\text{N/m}$, 设计时滞滤波器的参数为 $A_1 = 0.5$, $A_2 = 0.5$, $t_1 = 0$, $t_2 = 3.14$ 。图 3 示出了采用 TDF 和不采用 TDF 两种情况下, 期望质量 M 定位于期望位置 $y_d = 1\text{m}$ 时系统的响应。显然, 在没有引入 TDF 时, 系统持续振荡, 不能准确定位于期望的位置, 而是围绕期望的位置摆动; 引入 TDF 后, 质量 M 准确地定位于期望的位置, 几乎完全抑制了残留振荡。

3 时滞滤波器的发展及主要研究领域

近 10 年来, 尤其是 20 世纪 90 年代中期, 对时滞滤波器的研究相当活跃, 在众多学者不懈努力下, 时滞滤波器技术不断发展, 日臻成熟。由于 TDF 的简单易用性, 对模型误差的鲁棒性, 以及能与随机激励实时作用, 使它在控制中很快流行开来。目前, 对时滞滤波器技术的研究主要集中在新的时滞滤波器设计方法、时滞滤波器的最优性、自适应时滞滤波器等研究领域。下面分别加以阐述。

3.1 新的时滞滤波器设计方法

最近研究领域比较活跃的是时滞滤波器新方法的设计。许多学者相继提出一些启发式的设计思想来设计新型滤波器, 以消除柔性系统中的残留振荡。

零极点对消法是应用最广泛、最直观的一种方法, 它是通过将 TDF 的零点配置在对象的极点上来进行分析。Tuttle 等^[5] 和 Lucy^[6] 采用零极点对消方法设计单输入和多输入系统的时滞滤波器, 直接根据系统方程进行求解, 计算简单, 并减少了时滞滤波器的长度, 加快了反应速度。

一般时滞滤波器的脉冲幅值是常数, Lucy 等^[7] 分析了柔性机械臂的常数幅值 TDF 的特点, 提出两种变幅值的 TDF, 即 ZV-RB 和 ZVD-RB。幅值与系统的频率、阻尼和移动的位移有关, 是一种次最优的控制序列, 能使模型误差的鲁棒性得到很大提高, 但也牺牲了时间最优来获取鲁棒性的提高。

系统上升时间受时滞滤波器长度的限制, 所以减少滤波器的长度是很有必要的。TDF 一般包含正幅值的脉冲, 但通过放松允许有负脉冲的约束条件, 含负幅值的 TDF 脉冲序列长度可大大减小^[8]。负幅值脉冲在一段时间内易产生溢出, 因此 Lucy 等^[9] 提出一种单位幅值的时滞滤波器设计方法, 避免了脉冲的溢出, 而且设计的各种负整形器明显地减少了系统时滞, 提高了响应速度。

Magee 等^[10] 提出一种新的最优随机时滞滤波器(OATF), 以消除一类弹性系统的残留振荡。OATF 的时滞值不依赖于系统的参数, 当系统有很大的不确定性时, 仍有很好的鲁棒性。

Singhose 等^[11] 采用矢量图法设计 TDF 滤波器, 该方法只需知道系统自然频率和阻尼的估计值, 便可设计有一定鲁棒性的滤波器。还可通过改变向量的幅角来提高系统鲁棒性。

考虑到实际系统中的柔性模式并不是单一的, 一些学者对多模态系统的 TDF 设计也进行了深入研究^[12, 13]。多模态系统的 TDF 设计方法一般有: 1) 级联法: 为每个模态设计相应的滤波器, 然后将所有模态的时滞滤波器进行级联, 组合成一个完整的滤波器, 以抑制所有模态的振荡; 2) 联立方程法: 直接根据系统的灵敏度曲线建立一系列的约束方程, 通过求解方程组来得到滤波器。这两种方法对系统的两种模态误差均有很好的鲁棒性。级联法设计简单, 且对高模态的不敏感性比联立方程法要高; 联立方程法比较直接, 得到的滤波器包含的脉冲个数少, 减少了运行时间。

Singer 等^[14] 还提出了第 3 种方法: 首先在灵敏度曲线上选择一些满足残留振荡最大幅值的频率波带, 在这些特定的频率波带中分别选择一些采样频率, 计算其残留振荡; 然后将各频率段的残留振荡与期望振荡值的差平方后累加求和, 构成目标函数 J , 求取保证 J 最小的 TDF 序列。对于多模态系统, 则在每个模态处分别选择频率采样点和不同的阻尼系数, 再按上述方法求解。

3.2 时滞滤波器的最优性

时滞滤波器技术与时间最优有着密切的关系。Lucy 等^[15] 揭示了时间最优时滞滤波技术与一定系统的时间最优控制的一致性, 表明提高时间最优时滞滤波器可有許多可行的简单方法和策略。

Singh 等^[16] 从频域的角度设计线性系统的鲁棒时间最优控制器。该控制输入在考虑到机械手输出达到饱和、时滞滤波器的零点对消系统所有极点这两个约束条件时, 使时滞滤波器的最大时滞时间最小。Tuttle 等^[17] 为 LTI 和 SISO 系统设计了一种考虑实际约束的时间最优控制方法, 如控制序列尾部的长度限制, 对模型分子、分母动态的灵敏性等, 并进一步证明: 为得到最优的系统性能, 必须考虑系统分母动态的所有可能形式, 如刚性、实数和复数模态等。

3.3 增加新的约束条件设计时滞滤波器

最近的研究成果表明, 可根据一定的期望特性来推导不同类型的时滞滤波器, 即根据基本的时滞滤波方程, 再添加一些新的约束条件来共同求解 TDF 脉冲序列。例如, 一些系统需要调整运动时产生的偏差值, Banerjee^[18] 就是将该条件添加到 TDF 的求解方程中, 提出一种新的存在位移限制的时滞滤波器。在一些限制油量的系统中, 需要有好的油耗特性的实际输入序列。Singhose 等^[19] 提出一种新的有期望油耗效率的时滞滤波器, 并进一步考虑了耗油量、过渡偏差和模型误差的鲁棒性, 对柔性太空船提出一种开关命令控制输入。

3.4 时滞滤波器的自适应策略

时滞滤波器技术最初是由线性、时不变系统发展而来的。为将其更好地应用于时变、与结构相关的动态系统, 许多学者开始研究时滞滤波器的自适应策略。Khorrami 等^[20] 采用非线性控制器和单模态 TDF 来消除两关节柔性臂的残留振荡, 在设计中采用了实时 FFT 算法来辨识系统模态, 自适应地调节控制器和 TDF 的参数。

Tzes 等^[21] 建议采用自适应预补偿方法, 将在线

估计模型频率的辨识方法与时滞滤波的思想结合起来,共同调整 TDF 中的重要参数。Bodson^[22] 采用递归最小二乘法进行系统辨识,然后用自适应算法来调整 TDF 的参数。该算法比较简单,比文献[21] 计算量小,易于实时运行。

3.5 非线性时滞滤波器

随着 TDF 设计方法日趋成熟,一些学者将研究重点从线性系统转移到非线性系统。Dimitry 等^[23] 对非线性柔性系统提出一种新的非线性前馈控制器,该控制器结合了前馈和反馈控制,利用计算非线性柔性系统的一种有效算法来设计最优前馈时滞滤波器。Khorrami 等^[24] 对柔性关节机械臂的设计进行非线性研究,将输入预补偿器与基于刚性体的控制器相结合,并在内环控制器(刚性控制)采用了非线性反馈规律。该方法还可进一步扩展到多关节机械手。

3.6 时滞滤波器在跟踪控制中的应用

跟踪问题是控制中的研究热点之一。在时滞滤波器出现以后,它的振荡抑制特性使许多学者开始将时滞滤波应用于跟踪控制。在二维 $X-Y$ 定位系统中,Rattan 和 Singhose^[25,26] 等对几乎所有的控制速度、轨线起始角度、阻尼和频率等参数的可能情况都进行了验证,研究结果表明:含有 TDF 的系统比无 TDF 的系统有更好的跟踪性能,可以显著提高对圆形和方形空间轨迹的跟踪能力。

3.7 时滞滤波器与其它方法的比较

作为前馈环节,TDF 与其它一些前馈方法仍存在着某些不同之处。

Lucy^[7] 将时间最优控制作为一种特殊的 TDF,在响应速度、对模型误差的鲁棒性、过渡态偏差、对未建模高模态的激励和应用的方便性等方面,与时滞滤波器进行比较,发现 TDF 可用在任何未整形的输入上,而时间最优方法则需要根据期望的位移来计算切换时间;在系统模态的控制方面,TDF 控制系统的柔性模态、刚性模态由未整形的输入来控制,而时间最优方法则控制系统的柔性和刚性模态两方面。相比之下,TDF 是一种更有效的方法。

Singhose 等^[27] 将时滞滤波器技术与一般的数字滤波器进行比较,研究结果表明,时滞滤波器实质上是一种滤波技术,但比传统的滤波器的长度短,振荡小,有很大的不灵敏性,因此更容易应用到机械系统中。

4 时滞滤波器的鲁棒性

当控制对象能被精确建模时,基本时滞滤波器可以很好地抑制对象的振动模态,达到零振动(ZV)。但是,当控制对象的自然频率或阻尼系数存在建模误差时,残留振荡依然存在。因此,提高 TDF 对系统参数变化的鲁棒性至关重要。

Singer 和 Seering 的主要贡献之一是定义了模型参数不确定时系统的鲁棒性。Magee 等^[28] 为了更好地描述残留振荡的特点,重新定义了残留振荡的概念。理论和实验结果均表明,系统参数的大范围变化对系统的残留振荡有很大的影响。

Singer 等^[3] 通过建立多个约束方程,以求得高阶滤波器的脉冲幅值和时滞,即增加滤波器中的脉冲个数,提高对系统频率和阻尼误差的鲁棒性。当系统的自然频率有很大变化时,Singer 等^[29] 采用“频率采样”方法得到一组约束方程,然后求解时滞滤波器的脉冲序列,使系统的残留振荡最小。

为了更好地适应系统的不确定性,Singhose 等^[30] 提出一种多峰滤波器,通过在系统的极点或极点附近配置 TDF 的多重零点来提高系统的鲁棒性。这种多峰滤波器还可与最优化策略结合起来,设计残留振荡最小的 TDF。考虑到系统柔性模态的阻尼和振荡的已知不确定性,Lucy 等^[31] 提出一种混合 TDF 设计方法,以得到近似最优的残留振荡,在目标函数中,根据期望的模型误差对系统参数变化范围的可能性分布进行加权。该方法设计简单、直接,而且对自适应控制器的在线整定很有价值。

许多研究方法仅讨论 TDF 对模型频率误差的鲁棒性,而忽略了阻尼误差。Lucy^[32] 同时考虑了频率误差和阻尼误差,定义了“全不灵敏性”的概念,以表示柔性系统的频率和阻尼的不确定性,使得对各种时滞滤波器的性能分析更加全面。

5 时滞滤波器的应用

随着时滞滤波器理论的不完善与发展,其应用也越来越广,涉及到各种高精尖设备,特别是在柔性机器人和柔性空间结构两个基本领域获得了良好的控制效果。

Christian 等^[33] 首先将 TDF 技术应用在多关节柔性机器人中,取得了很好的效果;Magee 等^[34] 对长距离柔性机械手控制装置进行研究,采用 TDF 技术成功地减少了机械手的振荡。

为了探索和验证适用于宇宙环境的控制技术,麻省理工学院模拟带有多个定位仪器的侦察卫星,

设计了 MACE 实验装置。Tuttle 等学者^[35] 将 TDF 技术应用于 MACE 实验装置, 轨道运行实际测试结果表明, TDF 能够快速实现定位且无残留振荡。

在柔性空间结构中, Singh 等^[36] 研究了柔性太空船机械臂三维旋转定位系统, 实验结果表明, 通过该方法可消除系统的残留振荡。Banerjee^[18] 成功地将时滞滤波器应用于空间长天线模型。

时滞滤波器还应用到其它机械装置中。Singhose 等^[37] 利用 TDF 减小坐标测量机的结构变形程度, 提高了工作效率和可重复精度。Singhose 等^[38] 将 TDF 成功地应用在起重机上, 消除了运动过程中悬垂物的摆动。钢铁厂需将溶化的钢水快速、无泼溅地移动到成形车间, 为此, Feddema 等^[39] 提出两种 TDF 设计方法, 控制机器人无泼溅地运送敞口容器。作为该技术的一个实验性拓展, Kazuhiko 等^[40] 还将 TDF 应用到自动倾泻系统的液体振荡控制中。

6 时滞滤波器技术中存在的问题及发展前景

近几年, 时滞滤波器技术得到了广泛深入的研究, 对时滞滤波技术的设计方法、鲁棒性、多模态系统的 TDF 设计等方面做了大量的工作, 并取得了丰硕的研究成果。但仍存在一定的局限性, 主要表现在以下几方面:

1) 在前期的整形算法中, 柔性系统的模型均假设为线性、二阶、时不变系统。当存在多模态时, 则将系统的数学模型假设为解耦的, 但还没有任何的结论可以证明这种理想化的假设。

2) 大多数 TDF 算法中的时滞值是系统参数的函数, 一般为阻尼振荡周期一半的整数倍。假设柔性系统占优的第一个振动模态非常慢, 则通过上述方法求得的全部时滞会变得非常长, 结果可能导致包含 TDF 的闭环系统变得不稳定。

3) 在自适应时滞滤波器的设计中, 系统辨识的时间应保证在时滞范围之内, 这就对辨识方法提出了很高的要求。

如何进一步研究时滞滤波器, 充分发挥时滞特性潜在的优点, 具有重要的理论意义和实用价值。现阶段, 值得深入研究的方向主要有:

1) 加强分析设计方法的研究, 提出更有价值、更简单的分析设计方法。为提高 TDF 的鲁棒性, 脉冲个数的增加必然要牺牲系统响应时间, 而且输入

切换次数的增加可能导致系统的不稳定。

2) 研究提高鲁棒性的新方法。迄今为止, 提高时滞滤波器鲁棒性的方法除了零导数系列方法外, 只有极不灵敏法及由此衍生的多峰法。

3) 加强最优时滞滤波器的研究, 寻求满足各种不同性能指标的最优时滞滤波器。

4) 自适应时滞滤波器的设计已进行了一些工作, 但如何设计更好的辨识方法来自动调整 TDF 的参数, 仍需进一步研究。

5) 非线性系统的时滞滤波器设计是一个研究的难题。

6) 对多自由度系统的时滞滤波器设计还没有进行深入研究。

7) 加强时滞滤波器与其它控制方法之间的对比研究。

8) 目前, 时滞滤波器的应用领域仅限于抑制振动模态, 如何将时滞滤波器应用到其它领域(比如过程控制领域), 也是值得深入研究的。文献[41]提出一种适用于典型工业过程的时滞滤波器, 对一阶纯滞后过程的控制相当有效。

9) 开拓更多、更广泛的应用实例, 设计专有的时滞滤波器, 为国民经济建设服务。

7 结 语

本文对时滞滤波器技术的研究现状进行回顾, 总结了近年来的研究成果, 介绍了时滞滤波器在空间机构、柔性机器人、坐标测量机等领域的应用。最后指出了该理论在研究中存在的一些问题, 并提出了一些值得深入研究的方向。

参考文献:

- [1] Calvert J F, Gimple D J. Method and applications for control of system output in response to system input. United States of American, Patent No. 2, 801, 351. 1952-07-30.
- [2] Tallman G H, Smith O J. Analog study of dead-beat posicast control[J]. IRE Trans of Autom Contr, 1958, 3(1): 14-21.
- [3] Singer N C, Seering W P. Preshaping command inputs to reduce system vibration[J]. ASME J of Dyn Syst, Meas & Contr, 1990, 112(1): 76-82.
- [4] Youcef Toumi K, Ito O. Time delay controller for systems with unknown dynamics[J]. ASME J of Dyn Syst, Meas & Contr, 1990, 112: 133-142.
- [5] T D Tuttle, W P Seering. A zero-placement technique for designing shaped inputs to suppress multiple-mode

vibration [A]. Proc of the ACC[C]. Baltimore, 1994. 2533-2537.

- [6] Lucy Y Pao. Multi-input shaping design for vibration reduction. Automatica, 1999, 35(1): 81-89.
- [7] Lucy Y Pao, William E Singhose. A comparison of constant and variable amplitude command shaping techniques for vibration reduction[A]. Proc of the 4th IEEE Conf on Contr Appl[C]. Albany, 1999. 875-881.
- [8] B W Rappole, N C Singer, W P Seering. Input shaping with negative sequences for reducing vibrations in flexible structures[A]. Proc of the ACC[C]. San Francisco, 1993. 2695-2699.
- [9] Lucy Y Pao, William E Singhose. Unity-magnitude input shapers and their relation to time-optimal control [A]. Proc of the 1996 IFAC World Cong[C]. 1996.
- [10] David P Magee, Wayne J Book. Optimal filtering to minimize the elastic behavior in serial link manipulators[A]. Proc of the ACC[C]. Philadelphia, 1998.
- [11] W E Singhose, W P Seering, N C Singer. Shaping inputs to reduce vibration: A vector diagram approach [A]. Proc of the IEEE Int Conf on Rob & Autom[C]. Cincinnati, 1990. 922-927.
- [12] E A Crain, W E Singhose, W P Seering. Derivation and properties of convolved and simultaneous two-mode input shapers[A]. Proc of the Int Fed of Autom Contr World Cong[C]. San Francisco, 1996. 441-446.
- [13] T Singh, G R Heppler. Shaped inputs for a multi-mode system [A]. IEEE Int Conf on Rob & Autom [C]. 1993. 484-489.
- [14] N Singer, L Pao, W Singhose *et al.*. An efficient algorithm for the generation of multi-mode input shaping sequences [A]. Proc of the IEEE Int Conf on Contr Appl[C]. Dearborn, 1996.
- [15] Lucy Y Pao, W E Singhose. On the equivalence of minimum time input shaping with traditional time-optimal control[A]. Proc of the 4th IEEE Conf on Contr Appl[C]. Albany, 1995.
- [16] T Singh, S R Vadali. Robust time-optimal control: Frequency domain approach[J]. J of Guid, Contr & Dyn, 1994, 17(2): 346-353.
- [17] Timothy D Tuttle, Warrant P Seering. Creating time-optimal commands with practical constraints[J]. J of Guid, Contr & Dyn, 1999, 22(2): 241-250.
- [18] A K Banerjee. Dynamics and control of the WISP shuttle-antennae system[J]. J of Astron Sci, 1993, 41(1): 73-90.
- [19] William E Singhose, Bart W Mills, Warren P Seering. Closed-form methods for generating on-off commands for undamped flexible spacecraft[J]. J of Guid, Contr & Dyn, 1999, 22(2): 378-382.
- [20] F Khorrani, S Jain, A Tzes. Adaptive nonlinear control and input preshaping for flexible-link manipulators [A]. Proc of the ACC[C]. San Francisco, 1993. 2705-2709.
- [21] A Tzes, S Yurkovich. An adaptive input shaping control scheme for vibration suppression in slewing flexible structures[J]. IEEE Trans on Contr Syst Tec, 1993, 1(6): 114-121.
- [22] Marc Bodson. An adaptive algorithm for the tuning of two input shaping methods[A]. Proc of the ACC[C]. Albuquerque, 1997. 1340-1344.
- [23] Dimitry G, George Y. Nonlinear input shaping control of flexible spacecraft reorientation maneuver[J]. J of Guid, Contr & Dyn, 1998, 21(2): 264-270.
- [24] F Khorrani, Sandeep J, Anthony T. Nonlinear control with input preshaping for flexible-link manipulators[J]. J of Guid, Contr & Dyn, 1998, 21(2): 264-270.
- [25] K S Rattan, V Feliu. Feedforward control of flexible manipulators[A]. Proc of the IEEE Int Conf on Rob and Autom[C]. Nice, 1992. 788-793.
- [26] W Singhose, N Singer. Effects of input shaping on two-dimensional trajectory following[J]. IEEE Trans on Rob & Autom, 1996, 12(6): 881-887.
- [27] W Singhose, N Singer, W Seering. Comparison of command shaping methods for reducing residual vibration[A]. Proc of the Third Eur Contr Conf[C]. Rome, 1995. 1126-1131.
- [28] Magee D P, Book W J. Experimental verification of modified command shaping using a flexible manipulator[A]. Proc of the 1st Int Conf on Motion and Vib Contr[C]. Yokohama, 1992. 553-558.
- [29] N C Singer, W P Seering. An extension of command shaping methods for controlling residual vibration using frequency sampling[A]. Proc of the IEEE Int Conf on Rob & Autom[C]. Nice, 1992. 800-805.
- [30] W Singhose, L Porter, N Singer. Vibration reduction using multi-hump extra-insensitive input shapers[A]. Proc of the ACC[C]. Seattle, 1995. 3830-3834.
- [31] Lucy Y Pao, Mark A Lau. Expected residual vibration of traditional and hybrid input shaping designs[J]. J of Guid, Contr & Dyn, 1999, 22(1): 162-165.

(下转第290页)

所以与网络中后 $m - r$ 个输入结点相关的结点之间权值的调整是随机的。(证毕)

由此可得如下定理:

定理3 对于一给定的BP神经网络, 设其样本空间为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_l\}$, 且样本空间矩阵 X 的秩为 r , 则该神经网络与一个输入结点个数为 r 的BP神经网络是等价的。

参考文献:

- [1] Lodewyk F A, Wessels Etienne Barnard. Avoiding false local minima by proper initialization of connections [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 3(6): 899-905.
- [2] Jaques de Villiers, Etienne Barnard. Backpropagation neural nets with one and two hidden layers [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 4(1): 136-141.
- [3] Roberto Battiti. Using mutual information for selecting features in supervised neural learning [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1994, 5(4): 537-550.
- [4] Sungzoon Cho, Yongjung Cho, Sungchul Yoon. Reliable roll force prediction in cold mill using multiple neural networks [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1997, 8(4): 874-882.
- [5] Erol Gelenbe, Zhi-Hong Mao, Yan-Da Li. Function approximation with spiked random networks [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(1): 3-8.
- [6] Hao Peifeng, Xu Xinhe. The number of hidden nodes and the initial weights of BP neural network [A]. Proc of '96 Int Conf on High & New Technology and Traditional Industry [C]. Dandong, 1996.
- [7] Lucy Y Pao. An analysis of the total insensitivity of input shaping designs [A]. Proc of the AIAA Guid, Navig & Conf [C]. San Diego, 1996.
- [8] A D Christian, W P Seering. Initial experiments with a flexible robot [A]. Proc of the IEEE Int Conf on Rob & Autom [C]. Cincinnati, 1990. 722-727.
- [9] D P Magee, W J Book. Filtering micro-manipulator wrist commands to prevent flexible base motion [A]. Proc of the ACC [C]. Seattle, 1995. 924-928.
- [10] T D Tuttle, W P Seering. An experimental verification of vibration reduction in flexible spacecraft using input shaping [J]. J of Guid, Contr & Dyn, 1997.
- [11] T Singh, S R Vadali. Input-shaped control of three-dimensional maneuvers of flexible spacecraft [A]. Proc of the AIAA Guid, Nav & Contr Conf [C]. Hilton Head, 1992.
- [12] W Singhose, N Singer, W Seering. Improving repeatability of coordinate measuring machines with shaped command signals [J]. Prec Eng, 1996, 18(4): 138-146.
- [13] W E Singhose, L J Porter, W P Seering. Input shaped control of a planar gantry crane with hoisting [A]. Proc of the ACC [C]. Albuquerque, 1997.
- [14] J Føddema, C Dohrmann, G Parker. A comparison of maneuver optimization and input shaping filters for robotically controlled slosh-free motion of an open container of liquid [A]. Proc of the ACC [C]. Albuquerque, 1997. 1345-1349.
- [15] Kazuhiko T, Masafumi H, Kazuto Y. Modeling and input shaping control of liquid vibration for automatic pouring system [A]. Proc of the IEEE Conf on Dec and Contr [C]. Toyohashi, 1996. 4844-4850.
- [16] 钟庆昌, 谢剑英. 基于输入整形的时滞系统最小拍控制 [J]. 控制与决策, 2000, 15(2): 230-232.

(上接第268页)