第24卷 第4期 力学进展 Vol. 24 No. 4
1994年11月25日 ADVANCES IN MECHANICS Nov. 25, 1994

波动控制的方法和展望*

王 泉 王大钧 智 洋
北京大学力学系（邮政编码100871）

提要 本文综述了近年来关于大型空间结构中波动控制研究的背景、方法和结果，并且就波动控制中的几个关键问题提出了展望.

关键词 大型空间结构；波动控制；动力学模型

1 前 言

近年来，柔性空间结构的研究受到越来越多的重视. 美国等一些国家发射了不少空间飞行器，这些大型空间结构包括带柔性附件的刚体、空间机械手，以及尺寸很大的太阳能帆板. 传统的把整个结构作为刚体的处理方法已不能很好地满足设计需要. 在70年代便开始了大型空间结构动力学与控制的理论研究，90年代，已经有了部分工程应用研究. CSI 计划就是旨在研究控制与结构在动力学上的相互作用. 在理论研究的成果中发展比较成熟的，是以模态控制方法为主的结构振动控制的研究. [1—3]较系统地综述了这方面的工作，在[1]中还提出了研究中的几个关键问题. Meirovitch[4-10] 和 Balas 等人[11-14] 的工作最为经典. 目前，由于空间实施计划的需求，这方面的工作更加引起各方面的重视. 确切地说，结构控制应包括两方面的内容：行波的动力学与控制——波动控制；驻波的动力学与控制——振动控制.

目前，结构的波动控制尚处于初级阶段，但却引起航天工程、机器人等高科技领域的高度重视. 除了基于两种控制方法之间联系的考虑之外，还取决于：①许多特点为长、柔一维构件的空间结构，被认为是由许多建模为一维波导（wave guide）的结构元素组合而成. 在构件长度方向的一些扰动传播，表现出明显的波动传播行为. 象太阳能帆板等大型二维结构的情况也是如此. ②基于模态方法的振动控制研究要求结合主动与被动控制手段来镇定被激励起的所有模态，这在很多情况下是不可能的. 而在阻尼模型不是很清楚的情况下，以阻尼机制去衰减高阶模态还不能用于所有的情况. 因此，对于那些很大很柔的结构的研究，会更加困难. ③ Hagedorn[15] 曾指出，波的描述比结构的模态描述具有更强的鲁棒性. 意思是指在建模中，高阶模态是很不准的. 尤其对于频率密集结构，它的低阶模态对结构参数也是非常不鲁棒的. 而波动模型的数学描述是准确的，它能很好地捕获传播空间上局部区域的力学

* 国家自然科学基金和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目，

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行为以及设计控制器的邻域的重要性能.

这样一些亟待解决的问题，给波动控制研究提供了广阔的前景．从文献来看，国内外现有的工作还不多，理论工作进展不大，还需要理论研究及新方法的推出．在工程应用方面，波动控制也有很大意义.

波动控制研究要求力学、数学理论、控制方法和计算相结合．问题本身既是动力学问题，又是控制问题．要把两者很好地结合起来，需要做许多工作.

2 波动控制的设计方法

波动控制的方法大致分两大类．一类是以 Meirovitch 为代表的，以成熟的模态方法去处理波动控制问题的可行性及分析；另一类是以 von Flotow 为代表的从波动自身角度来设计的研究方法.

2.1 独立模态空间控制（IMSC）及直接反馈控制[16-18]

关于IMSC方法的详细论述可参见[16]，在那里 Meirovitch 利用此方法研究了弦及 Euler 梁的波动控制问题.

对于一分布参数系统，

$$Lu(x,t)+m\partial^2u(x,t)/\partial t^2=f(x,t) \quad (0<x<l) \tag{1}$$

边条件

$$B_iu(x,t)=0, \quad x=0 \text{ 或 } l \quad (i=1,2,\cdots,n)$$

B_i 的阶数小于 L 的阶数．L,B_i 为算子，定义域为 Hilbert 空间的稠密域.

其特征问题为

$$LW(x)=\lambda mW(x) \quad (0<x<l)$$

其中 $W(x)$ 满足 $B_iW(x)=0$，$x=0$ 或 l.

模态函数对于质量正交归一化，

$$(W_s,mW_r)=\delta_{rs}, \qquad (W_s,LW_r)=\omega_r^2\delta_{rs}$$

$(\cdot,\cdot)$ 为内积，δ_{rs} 为 Kronecker δ 函数.

将位移 $u(x,t)$ 展开成

$$u(x,t)=\sum_{r=1}^{\infty}W_r(x)\eta_r(t)$$

$\eta_r(t)$ 为模态坐标，$f(x,t)$ 按 $W_r(x)$ 展开为

$$f(x,t)=\sum_{r=1}^{\infty}W_r(x)f_r(t)$$

其中 $f_r(t)=(W_r(x),f(x,t)) \quad (r=1,2,\cdots)$，为模态力.

这样得到模态坐标的方程如下：

$$\ddot{\eta}_r(t)+\omega_r^2\eta_r(t)=f_r(t) \quad (r=1,2,\cdots) \tag{2}$$

由波动问题的初始位移 $u(x,0)$ 及初速度 $\dot{u}(x,0)$ 可以得到 $\eta_r(t)$ 的初始值 $\dot{\eta}_r(0)$，$\dot{\eta}_r(0)$ $(r=1,2,\cdots)$.

对（2）进行状态反馈控制

$$f_r(t)=-h_r\dot{\eta}_r(t)-g_r\eta_r(t)$$

这里出现的观测溢出、控制溢出等的分析及模态滤波器(modal filter)的提出，在[19—21]

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中有详细说明.

[16]的计算结果表明，所设计的控制力作用在扰动的邻域. 换句话说，控制力是“追踪”扰动的.

直接输出反馈[22]的基本思想是把传感器和激励器放在一起，这样可把输出的信号进行直接反馈. 令在 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 上放置激励器与传感器，系统的控制方程为

$$Lu(x,t)+m\ddot{u}(x,t)=\sum_{i=1}^{n}F_i(t)\delta(x-x_i) \tag{3}$$

令测量值 $y_j=u(x_j,t)$，$(j=1,2,\cdots,n)$，则直接输出反馈方法要求

$$F_j(t)=-g_jy_j(t)-h_j\dot{y}_j(t)\quad(j=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

截取系统前 n 阶模态，写成方程

$$\ddot{\eta}(t)+H\dot{\eta}(t)+(\Omega^2+G)\eta(t)=0 \tag{5}$$

其中，

$$G=\sum_{i=1}^{n}g_i\overline{W}(x_i)\overline{W}^T(x_i)$$

$$H=\sum_{i=1}^{n}h_i\overline{W}(x_i)\overline{W}^T(x_i)$$

$$\overline{W}(x_i)=[W_1(x_i),\cdots,W_n(x_i)]^T$$

$$\eta(t)=[\eta_1(t),\cdots,\eta_n(t)]^T$$

然后可根据线性二次规划方法解 G、H.

[11]中详细论述了IMSC方法和直接输出反馈方法研究波动控制问题，指出对于一个波动控制问题，如果需要描述波动的模态较多，那么直接输出反馈方法比IMSC方法有效，而对于那种相对要求描述波动的模态不是很多或者高阶的模态可以由结构内部的阻尼波动地予以控制的结构，IMSC方法显得简便且有效.

如引言所述，很多情况下大型空间结构的柔性已使成熟的振动控制方法在应用上有了很大限制. 近年来，以传递函数方法为主要思想处理波动控制问题的研究工作有了一定发展，最具代表性的是 von Flotow 的波动吸收（wave-absorbing）控制方法.

2.2 波动吸收方法[23-29]

以一悬臂梁的波动控制为例（图1），控制问题要求在边界上设计 M_c, V_c，使波动得以抑制.

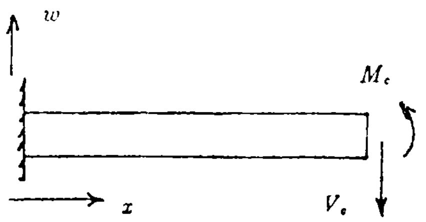

图 1

梁方程为

$$EI\frac{\partial^4W}{\partial x^4}+\rho A\frac{\partial^2W}{\partial t^2}=F(x,t) \tag{6}$$

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.   http://www.cnki.net

边条件 $$W(0,t)=0,\quad \frac{\partial W(0,t)}{\partial x}=0$$

$$EI\frac{\partial^2 W(l,t)}{\partial x^2}=M_c,\quad EI\frac{\partial^3 W(l,t)}{\partial x^3}=V_c$$

E, I, ρ, A 分别为梁的材料、结构参数。

令 $$y=(W,\theta,M,V)^T$$

其中 $\theta=\partial W/\partial x$，$M=EI\partial^2 W/\partial x^2$，$V=EI\partial^3 W/\partial x^3$。

对方程（6）进行 Fourier 变换，得方程如下（为方便计，不改变符号）：

$$dy/dx=[A]y+\{u\} \tag{7}$$

其中，

$$[A]=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{EI} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ \omega^2\rho A & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\quad \{u\}=\begin{Bmatrix}0\\0\\0\\F(x,\omega)\end{Bmatrix}$$

方程（6）的波动解为

$$\frac{dW}{dx}=\begin{bmatrix}-i\sqrt{\omega/a} & & & 0\\ & -\sqrt{\omega/a} & & \\ & & i\sqrt{\omega/a} & \\ 0 & & & \sqrt{\omega/a}\end{bmatrix}W \tag{8}$$

其中 $a=\sqrt{EI/\rho A}$。

把W写成 $W=(a_1,a_2,b_1,b_2)^T$，其中 a_1,a_2 为向终端方向传播的幅值，b_1,b_2 为向始端传播的波的幅值，也就是 a_1,a_2 的反射波的幅值。a_2,b_2 为在长度方向上迅速衰减的波幅值。

终端的控制力可写成

$$\begin{bmatrix}M_c\\V_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}y(l,\omega) \tag{9}$$

经整理有如下关系式：

$$b=Sa+BF_{\mathrm{EXT}} \tag{10}$$

其中

$$b=[b_1,b_2]^T,\quad a=[a_1,a_2]^T,\quad F_{\mathrm{EXT}}=[M_c,V_c]^T$$

$$S=\begin{bmatrix}\frac{i+1}{i-1} & \frac{-2}{i-1}\\ \frac{Zi}{i-1} & -\frac{i+1}{i-1}\end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix}\frac{1}{M_0(i-1)} & \frac{-1}{V_0(i-1)}\\ \frac{i}{M_0(i-1)} & \frac{-1}{V_0(i-1)}\end{bmatrix}$$

$$M_0=\omega\sqrt{\rho AEI},\ V_0=\sqrt{\omega/Q}\,M_0$$

令

$$F_{\mathrm{EXT}}=C(\omega)\begin{bmatrix}W\\ \theta\end{bmatrix}_{\mathrm{TIP}} \tag{11}$$

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$\begin{bmatrix} W \\ \theta \end{bmatrix}_{\rm TIP}$ 表示 W,θ 的终端值。现在的目的就是设计 $C(\omega)$。

把（10）写成

$$b = S_{\rm CL} a \tag{12}$$

其中，

$$S_{\rm CL} = \left\{ I - BC\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ i\theta_0 & \theta_0 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \left\{ S + BC\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -i\theta_0 & -\theta_0 \end{bmatrix} \right\} \tag{13}$$

若波被吸收，有

$$S_{\rm CL} = 0 \tag{14}$$

由（14）即可确定 $C(\omega)$。

这里存在的问题是控制力矩的实现以及终端W,θ的测量。[24]对这个问题给予了分析与实施。

Flotow 的这一思想，形成了波动控制的主要依据。对于现行波动控制研究，大体上有两种方法。第一个就是波动吸引方案。另一个是波的发散方案，其目的就是使波发散到邻域上，并使之逐渐衰减掉。TANAKA 的主动下沉法（Active Sink Method）就是第二种方法的一个例子。

2.3 主动下沉法[30-31]

仍以（6）所示的弹性梁为例。令解为

$$W(x,t) = \xi(x)e^{j\omega t}$$

代入方程，有

$$-\xi(x) = C_1 e(-jkx) + C_2 e(-kx) + C_3 e(jkx) + C_4 e(kx)$$

其中 $k = \rho A\omega^2/EI$，$i = \sqrt{-1}$。

令

$$E = (-\xi, \theta, M/EI, Q/EI)^T,\quad C = [C_1, C_2, C_3, C_4]^{-T}$$

其中 θ 为转角，M,Q 为截面剪力及弯矩。

$$Z = B(x)C = KD(x)C$$

其中，

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -jK & -K & jK & K \\ -K^2 & K^2 & -K^2 & K^2 \\ jK^3 & -K^3 & -jK^3 & K^3 \end{bmatrix},\quad D(x) = \begin{bmatrix} e(-jkx) & & & \\ & e(-kx) & & \\ & & e(jkx) & \\ & & & e(kx) \end{bmatrix}$$

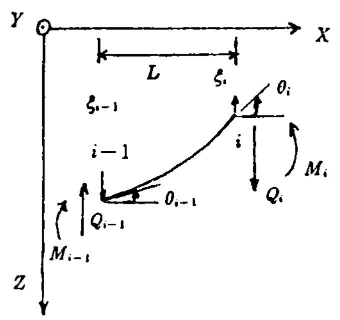

图 2

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

下面根据图2求出波动传播的传递函数．令

$$Z(0)=Z_{i-1},\ Z(l)=Z_i,\ Z_i=KD(l)C,\ Z_{i-1}=KD(0)C$$

则有

$$Z_i=KD(l)K^{-1}Z_{i-1}=T(l)Z_{i-1}$$

由 $Z(x)$ 与 $\xi(x)$ 的关系式 $Z(x)=K\xi(x)$，可得

$$\xi_i=K^{-1}T(l)K\xi_{i-1}=D(l)\xi_{i-1}$$

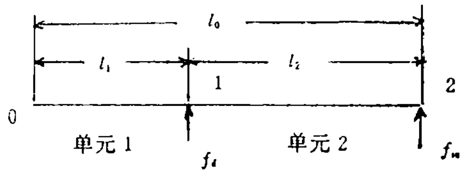

图 3

由图3所示的结构分析图，f_{in} 为外力，f_d 为在梁上设置的控制力．令

$$f_d=[0,0,0,-f_d/EI]^T$$
$$f_{in}=[0,0,0,-f_{in}/EI]^T$$

可导出

$$\xi(x)=K^{-1}T(x-l_1)(T_1Z_0+f_d) \tag{15}$$

式（15）即为设计控制力的依据．其中 $Z_0=(-\xi,0,0,0)_x$．

[30]给出了几种情况下的控制力的设计．同样的思考方法，还可见[32]．下面给出一种作者提出的递减法的波动控制方案[33]．

2.4 递减法

考虑一分布参数系统

$$\ddot{u}+L_n u=0 \tag{16}$$

L_n 的意义与（1）中相同．

式（16）的波动解写成

$$u(x,t)=e^{iK(x-ct)} \tag{17}$$

这里假定只研究向右传播的并且幅值为1的解，其中 K 为波数，c 为波速．

对（16）施加一反馈算子 L'，得新系统如下：

$$\ddot{W}+L_nW=L'W \tag{18}$$

它的波动解为

$$W(x,t)=A(x)e^{iK(x-ct)}=A(x)u(x,t) \tag{19}$$

K 与 c 同上．而 $A(x)$ 为所研究的衰减因子．

整理式(16)—(19)，进行比较得

$$u[(L_nA(x)+C_n^j(iK)^{n-j}\sum_{j=1}^{n-1}L_jA(x)]=L'A(x)u \tag{*}$$

其中 $L_j=\partial^j/\partial x^j$，$C_n^j=\frac{n!}{j!(n-j)!}$．

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（*）即为反馈算子L'及衰减因子 $A(x)$ 所满足的关系式．也就是分布参数系统中波动控制设计的准则．

应该指出，当前从控制手段来讲，还不能够对任何形式的反馈算子得以实现．因此并不是任何形式的L'都有意义．但随着智能材料的研究和发展，一些有物理意义的算子可以在技术上得以实现．

下面以 Euler 梁为例，对（*）加以讨论．此时

$$L_n = L_4 = \partial^4/\partial x^4$$

令

$$L' = g_1\partial^3/\partial x^3 + g_2\partial^2/\partial x^2.$$

L'的意义为分布参数形式的剪力及弯矩．而 g_1 和 g_2 为待定的参数．把L'代入（*），得下式：

$$\begin{aligned} u\left[\frac{d^4A}{dx^4} - 4\frac{d^3A}{dx^3}\frac{du}{dx} + 6\frac{d^2A}{dx^2}\frac{d^2u}{dx^2} - 4\frac{dA}{dx}\frac{d^3u}{dx^3}\right] &= g_1\left[u\frac{d^3A}{dx^3} + A\frac{d^3u}{dx^3} + 3\frac{du}{dx}\frac{d^2A}{dx^2} + 3\frac{d^2u}{dx^2}\frac{dA}{dx}\right] \\ &\quad + g_2\left[u\frac{d^2A}{dx^2} + A\frac{d^2u}{dx^2} + 2\frac{du}{dx}\frac{dA}{dx}\right] \end{aligned} \tag{20}$$

整理此式为

$$\bar{L}A(x) = 0 \tag{21}$$

$$\begin{aligned} \bar{L} = {} & L_4 - 6K^2L_2 - g_1L_3 + 3g_1K^2L_1 - g_2L_2 + K^2g_2L_0 \\ & + ik(g_1K^2L_0 - 3g_1L_2 - 2g_2L_1 + 4L_3 - 4K^2L_1) \end{aligned}$$

其中 $L_i = d^i/dx^i(i = 1,2,3,4)$.

$A(x)$即为算子 $\bar{L}$ 的特征函数．令

$$A(x) = e^{px} \tag{22}$$

由于 $A(x)$ 为衰减因子，要求 $p<0$.

将式（22）代入（21），

$$p^4 - 6K^2p^2 - g_1p^3 + K^2g_2 - g_2p^2 + 3g_1pK^2 = 0 \tag{23}$$

$$g_1K^2 - 3g_1p^2 - 2g_2p + 4p^3 - 4K^2p = 0 \tag{24}$$

式(23)，(24)为关于 p 的代数方程．给定 p，即给定衰减律，就可以确定 g_1 及 g_2 的值，L'就可以求出．解出的L'可使新系统（18）的波动解与原系统（16）的波动解具有关系（19）所示的表达式．

在[33]中详细地分析了在分布参数系统中点控制情形下$A(x)$的规律及控制方案，同时也分析了集中参数系统中递减法的设计方案．递减法直接对波动解加以研究，与Meirovitch的模态方法相比，具有描述比较准确的特点．另外，Flotow 和 TANAKA 等人的工作都是从传递函数的角度对波动解加以研究的．递减法抛开了这一类用得较多的方法，而直接从研究衰减因子出发，讨论衰减因子与反馈算子的关系，给出了波动控制方法的一个新方向．

以上介绍了波动控制中的一些方法．需强调的是，对于每种方法的设计，要着重考虑它的可行性．关于波动控制的一些实验研究[34-36]，这里就不再赘述．

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.5 几种方法评述

Meirovitch的模态控制方法，发展比较成熟．但正如前言所指出的那样，要抑制所有的模态是非常困难的．并且对任意形态的波动要求模态数目很大，这在动力学及控制方法上都比较困难．另外在控制指标方面，模态控制方法是从能量角度来考虑的．如果提出使波动在结构的某一区域完全衰减这样的指标，模态方程是很难满足要求的．但应该指出，对一些特定的结构，例如材料的阻尼为线性阻尼，模态控制方法可以为波动控制研究提供验证和指导．

而波动吸收方法和主动下沉法都是基于传递函数方法，从波动本身来加以控制的，在问题的描述上是准确的，从控制方法的手段来看易于实现．但这两种方法又都有各自的特点．波动吸收方法是基于边界控制而设计的，优点在于对于那些不能承受执行机构的结构，提供了实现上的方便．而主动下沉法可以满足结构在任一区域的控制要求．

这里还要指出，无论是波动吸收方法还是主动下沉法，都是针对某一频率的波动而研究的，存在两个问题．首先，在建模上没有考虑结构动力学的诸多特性，如Euler梁模型的波动行为属于一种频散波．不同频率的波动，传播的速度不同，这在执行机构的设计中需着重注意．另外，在控制力的实现上还有着困难．尤其在噪声控制中，诸方法面临着技术上实现的难点．

笔者提出的递减法，在方法的提出上给出了一个波动控制的新的研究方向，还需进一步进行深入的研究．

3 建议研究的几个问题

波动控制的研究目前处于初期阶段，有许多问题需要研究和解决．一般说来，一个控制方法的提出可从三个方面来估价，即方法的通用性、算法的可行性及应用的可能性．波动控制的研究毕竟不如已有的振动控制方法发展得成熟．正因为如此，两者的相互借鉴与补充才显得更加重要．笔者在[37—40]中，给出了部分有关的工作．

考虑波动控制的背景和已有的研究工作，我们认为以下几个问题是比较基本的．

①波动与振动的关系　从结构动力学和控制理论的角度把波动和振动问题的数学提法分析清楚，从而才能在控制方法上指出它们的联系与研究方向．

②建模问题　第1，处理波动控制时，建立结构的合理力学模型．例如一个典型的问题，就是波动控制问题中梁的Euler模型与Timoshenko模型的区别与联系．第2，在无穷维模型基础上，研究离散化后对控制所带来的问题本质．第3，给出以上两方面定性及定量化的分析．现有的研究[33]已经指明了初步的结果．

③结构的低阶控制　低阶控制对振动控制而言是很重要的，也是难点和热点．对于波动控制而言，可以依据其自身特点，找出符合控制方法的低阶模型．

④特殊结构的分析与控制　频率密集结构的振动控制目前是一个难点．其原因在于模态函数的敏感性．而在波动问题中，可以避开这一动力学上的困难．探索这一新方法也可以给振动控制提供借鉴．

⑤可控可观性　由于波动的空间局部特性及传播性，其可控可观性会有一些新的特点．因此给出的新的提法，会给方法的研究带来益处．

⑥控制方法的研究　主要是给出适合波动特点的新的控制方法．

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

1 王泉. 结构控制中的若干问题和展望. 大自然探索, **13**, 4 (1993): 46—53
2 Balas M J. *IEEE Trans. Automatic Control*, AC—**27**, 3 (1982): 522—535
3 美国"控制理论未来方向"专门研究小组. 控制理论的未来方向——数学展望 (1988)
4 Meirovitch L, Silverberg L M. *J. Sound and Vibration*, **97**, 3 (1984): 489—498
5 ——, et al. *J. Guid. Control and Dynamics*, **2**, 2 (1979): 101—110
6 ——, Quin R D. *J. Astronautical Sciences*, **35**, 3 (1987): 301—328
7 ——, Sharony Y. Proc. of. 6th VPI/AIAA Symposium on Dynamics and Control of Large Structures (Meirovitch L ed) (1987): 576—601
8 ——, L, Bennighof I K. *J. Sound and Vibration*, 3 (1986): 131—144
9 Quin R D, et al. *J. Guid. Control and Dynamics*, **11**, 6 (1988): 542—553
10 Meirovitch L. *Optimal Control Applications and Methods*, **4** (1983): 365—386
11 Balas M J. Active Control of Large Civil Engineering structures: A Naive Approach. in Structural control (Leipholr H H E ed) North-Holland Publishing Co., Amsterdam (1980): 107—125
12 ——, et al. *J. Guid. Control and Dynamics*, **4**, 6 (1981): 642—649
13 Likins P W, et al. *J. Spacecraft and* Rockets, **10**, 10 (1976)
14 Hughes P C. *J. Guid. Control and Dynamics*, **2**, 6 (1979): 499—503
15 Hagedorn, P, Schmidt J T. Active Vibration damping of flexible stuctures using the travelling wave approach. Proc. Second Inter. Symp. on Spacecraft Flight Dyn. F. R. G. (Oct. 1986); ESA sp—255 (Dec. 1986)
16 Meirovitch L, Bennighof J K. *J. Sound and Vibration*, **111**, 1 (1986): 137—144
17 Bennighof J K, Meirovitch L. *J. Guid. Control and Dynamics*, **12**, 4 (1989): 555—567
18 Meirovitch L. Dynamics and Control of Structures. New York, Wiley (1989)
19 Creedon J F, Lindgren A G. *Automatica*, **6** (1970): 643—660
20 Coradetti T. Proc. AIAA Guid. and Control Conference (1977): 352—358
21 Meirovitch L, Baruh H. *J. Optimization Theory and Application*, **39**, 2 (1983): 269—251
22 ——, ——. *J. Guid. Control and Dynamics*, **55**, 1 (1982): 60—66
23 Lin J G. Proc. 2nd VPI/AIAA Symp. on Dyn. and Control of LFS(Meirovitch L ed) (1979): 1—18
24 Von Flotow A H, Schafer B. *J. Guid. Control and Dynamics*, **9**, 6 (1986): 637—680
25 Mace B R. *J. Sound and Vibration*, **114**, 2 (1987): 253—270
26 Kuehnle A U. Proc. American Control Conference. Pittsburgh, PA (June 1989): 200—270
27 Pines D J, Von Flotow A H. *J. Sound and Vibration*, **142**, 3 (1990): 391—412
28 D W Miller, ——. *ibid*, **126**, 1 (1988): 127—143
29 J Signorelli, ——. *ibid*. **140**, 3 (1990): 475—497
30 Nobuo TANAKA, Yoshihiro KIKUSHIMA. *JSME Inter. J.* Series Ⅲ, **34**, 2 (1991): 159—167
31 ——, ——. *ibid*, **35**, 2 (1992): 236—244
32 蒋式勤, 张若京. 同济大学学报, **20**, 2 (1992): 233—237
33 王泉, 王大钧. 多自由度系统中波动控制方法的研究, 自然科学进展 (待发表)
34 Pavic G, *J. Sound and Vibration*, **49**, 2 (1976): 221—230
35 White W R, Nelson P A. *ibid*, **112**, 1 (1987): 187—191
36 Miller W, Hall R. *J. Guid. Control and Dynamics*, **14**, 2(1991): 350—359
37 Wang Quan, Wang Dajun. A reduced order model about structural wave control based on the concept of degree of controllabiltiy (to be published in IEEE Trans. on Automat. Contr., Sept. 1994)
38 王泉, 王大钧. 结构波动控制中的波动区域可控性和可控度. 科学通报, **39**, 4 (1994): 307—308
39 Wang Quan, Wang Dajun. Some research and new concepts about the controllability of structural wave control. 19th International Symposium on Space Technology and Science, Yokohama, Japan (May 15—24, 1994)
40 ——, Zhi Yang, Wang Dajun. A note on wave control in lumped parameter system. International Conference of Vibration Engineering, Beijing (June 1994)

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

METHODS AND CHALLENGE IN STRUCTURAL WAVE CONTROL

Wang Quan Wang Da-jun Zhi Yang
Dept. of Mechanics, Beijing University, Beijing, 100871

Abstract This paper summarizes the background, methods and results concerning the study of wave control based upon the large space structures in recent years, and overviews some prospects for a few basic problems in structural wave control.

Keywords *large space structure; wave control; model of dynamics*

书刊评介

我国湍流研究领域中一本不可多得的好书——《湍流理论》

《湍流理论》一书由著名的湍流理论专家蔡树棠及其助手刘宇陆撰写，钱伟长作序，1993年由上海交通大学出版社出版．这本专著是湍流研究领域不可多得的好书，对此，钱伟长在该书的序中有精辟的论述，谨摘引如下：

“目前似乎有一种流行的看法，认为在科学技术方面中国人样样不如洋人，依我之见，这是一种要不得的妄自菲薄的认识．这本《湍流理论》就是一个例证．翻开本书，有四分之一以上的篇幅是介绍国内学者的工作，特别是我尊敬的老师周培源教授的开创性的工作．他研究湍流60余年，他提出的先解方程后平均的思想和著名的17方程模式早已举世瞩目，这本书里作了详尽的介绍．我们国内学者比国外学者差吗？决不！湍流研究方面如此，其他许多方面也是如此．事实足以使数典忘祖者清醒．……”

“我平时了解到，蔡树棠教授师承周培源教授，治学严谨，学识丰富，处理问题强调物理直观，科学研究注意联系实际．正因为如此，40多年来他在湍流理论及其应用方面发表了数十篇论文，发展和开拓了他导师的工作，尤其在涡旋分析、模式理论、含沙水流湍流研究等方面有重要贡献，……而他的学术贡献在这本专著里已有所反映．”

此外，这本专著还有如下特色：（1）深入浅出，论证严密．全书的七章中涉及湍流理论的基础及其近代发展，内容自洽，浅显易懂．（2）详略有致，重点突出．对一般教科书中常见的经典理论仅作一般介绍，而对模式理论等则详加分析．（3）观点鲜明，自成风格．书中澄清了学术界的一些模糊的认识，叙述时绝不盲从大流，尤其是对湍流理论的若干难点及其起因作了精辟分析．

综观学术界，湍流模式理论风靡一时，且在工程中纷纷得到应用，但是若想把握住这一理论的精髓避免误入歧途，最好读一读这本湍流理论．

蔡树棠与是勋刚等几乎同时推出两本关于湍流的专著，是我国流体力学界的一件盛事，值得庆贺！

戴世强 供稿

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net