

作动器 / 传感器优化配置的研究进展*

刘福强 张令弥

南京航空航天大学振动工程研究所, 南京 210016

摘要 给出了作动器 / 传感器优化配置问题的数学描述, 综述了作动器 / 传感器优化配置方法的发展现状. 阐述了振动控制和模态试验中作动器 / 传感器优化配置的关系. 并给出需要进一步研究的几个问题.

关键词 作动器 / 传感器, 优化配置, 振动控制, 模态试验, 参数识别

1 引言

在航空、航天、机械、土木等工程实践中, 为了预测结构系统的响应, 监测其工作状态, 进而控制其工作性能, 都需要建立较精确的数学模型. 目前常采用有限元分析方法或者试验模态分析的方法来得到描述结构系统特性的模型. 由于材料性能、边界条件等的影响, 采用有限元方法得到的模型与真实结构之间常常存在误差. 因而通过模态试验, 采用模态参数识别的方法得到描述结构系统的模态参数, 从而进行有限元模型相关分析和修正具有重要的实用意义. 此外, 科学技术的进步对结构系统的稳定性、形状与定位精度等提出了一系列新的要求, 为了满足这些性能指标, 往往需要对其进行振动控制^[1~3].

在进行模态试验时, 不适当的激振器(作动器)配置位置可能导致某阶或某些模态弱激励, 而不适当的传感器配置位置将影响识别参数的精度. 同样振动控制中作动器 / 传感器的配置位置将直接影响闭环控制系统的性能, 甚至可能导致其不稳定. 此外, 传感器和作动器本身都需要一定的成本, 而且与传感器配套使用的数据采集和处理设备、作动器 / 激振器的驱动装置的代价较高, 从经济方面考虑, 希望采用尽可能少的作动器和传感器. 因此确定作动器 / 传感器的最佳数目, 并将它们配置在最优位置, 具有重要的实用价值. 而且对宇航、水下结构和核电站等工程结构来说, 对作动器和传感器的数量和位置有一定的限制, 因此更需要事先对它们进行周密的优化配置. 此外, 对将作动器和传感器等与结构系统集成于一体的智能结构来说, 作动器 / 传感器的优化配置也十分重要^[2].

要进行作动器 / 传感器的优化配置, 首先要确定优化配置准则, 也即优化的目标函数. 其次, 必须选用适当的优化计算方法. 下面我们根据作动器 / 传感器的使用目的不同, 分别从振动控制和模态试验的角度讨论优化配置方法的发展情况. 首先给出作动器 / 传感器优化配置的

收稿日期: 1999-09-20, 修回日期: 2000-03-27

* 国家自然科学基金资助项目 (59675015)

数学模型,接着说明这两种情况下作动器/传感器优化配置的发展现状,再讨论振动控制和模态试验中作动器/传感器优化配置的区别和联系,最后提出了需要深入研究的几个问题。

2 作动器/传感器优化配置问题数学描述

对属于分布参数系统的工程结构来说,理论上需要采用偏微分方程描述其运动形式。但实际上,往往采用有限元方法对其离散化,从而建立用常微分方程表达的控制模型。一般情况下,线性时不变系统的运动方程为

$$M\ddot{p} + D_p\dot{p} + Kp = Bf, \quad y = C_d p + C_v \dot{p} + Df \quad (1)$$

其中 p 为 $n \times 1$ 的位移向量; M 为 $n \times n$ 的对称正定质量矩阵, K 为 $n \times n$ 非负定对称刚度矩阵, n 为自由度数; D_p 为阻尼矩阵,为介绍方便,本文假设为比例阻尼,但本文结论不难推广到任意阻尼的情况; B 为 $n \times r$ 作动器位置矩阵, f 为 $r \times 1$ 控制力向量, r 为作动器数; y 为 $m \times 1$ 测量向量, m 为传感器数目; C_d, C_v 为输出系数矩阵,当采用位移传感器时, $C_v = 0$, 当采用速度传感器时, $C_d = 0$; D 为作动力的直接输出项。根据模态叠加原理,将系统响应表示成

$$p = \sum_{i=1}^n \phi_i \eta_i = \phi \eta \quad (2)$$

其中 ϕ_i 为第 i 阶振型向量, $\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$, η_i 为第 i 阶模态坐标, $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]^T$, 上标 T 表示转置。将式 (2) 代入式 (1) 得到

$$\ddot{\eta} + D_r \dot{\eta} + \Lambda \eta = \phi^T B f = \Gamma f, \quad y_d = C_d \phi \eta + C_v \phi \dot{\eta} + Df = \bar{C}_d \eta + \bar{C}_v \dot{\eta} + Df \quad (3)$$

这里 $D_r = \text{diag}(2\xi_1\omega_1, 2\xi_2\omega_2, \dots, 2\xi_n\omega_n)$; Γ 为 $n \times r$ 作动器影响系数矩阵; \bar{C}_d, \bar{C}_v 分别为 $m \times n$ 的传感器位移、速度影响系数矩阵; ξ_i 和 $\omega_i, i = 1, 2, \dots, n$, 为开环系统的模态阻尼比及频率。

一般情况下,有限元模型的模态数 n 较多。进行模态试验时,往往只对远小于 n 的 n_t 个模态感兴趣,因此这时式 (3) 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\eta}_i + 2\xi_i\omega_{ni}\dot{\eta}_i + \omega_{ni}^2\eta_i &= \phi_i^T B f = \Gamma_i f, \quad i = 1, 2, \dots, n_t \\ y_t &= \sum_{i=1}^{n_t} C_{di}\phi_i\eta_i + \sum_{i=1}^{n_t} C_{vi}\phi_i\dot{\eta}_i + Df = \sum_{i=1}^{n_t} C_{di}\eta_i + \sum_{i=1}^{n_t} C_{vi}\dot{\eta}_i + Df \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

模态试验的目的就是通过合理地选取作动器的位置以确定 Γ_i , 从而尽可能大地激励感兴趣模态; 通过合理地选取传感器位置以确定 C_{di} 和 C_{vi} 向量, 使得传感器测量的响应中各阶感兴趣模态独立并且尽可能大地包含其分量, 从而保证感兴趣模态的识别精度或其他要求。

在振动控制中,广泛使用的模态控制方法往往只控制少数的低阶模态。设被控模态数为 n_c , 通常有 $n_c \leq n_t$ 。这时式 (3) 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\eta}_j + 2\xi_j\omega_{nj}\dot{\eta}_j + \omega_{nj}^2\eta_j &= \phi_j^T B f = \Gamma_j f, \quad j = 1, 2, \dots, n_c \\ y_d &= \sum_{j=1}^{n_c} C_{dj}\phi_j\eta_j + \sum_{j=1}^{n_c} C_{vj}\phi_j\dot{\eta}_j + Df = \sum_{j=1}^{n_c} C_{dj}\eta_j + \sum_{j=1}^{n_c} C_{vj}\dot{\eta}_j + Df \\ f &= g(y_d) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $g(\cdot)$ 表示函数关系。合理地确定 Γ_j 向量, 使得作动器能最大程度地影响被控模态; 合理选取传感器位置以确定 C_{dj} 和 C_{vj} 向量, 使得传感器测量的响应中尽可能大地包含被控模态的分量, 以保证闭环控制系统的性能。

比较式(4)和(5)可知,当进行模态试验时,结构系统是一个开环系统;而进行振动控制时,结构系统是一个闭环系统.正是这一点,使得这两者中的作动器和传感器配置有很大的不同.

3 作动器 / 传感器优化配置准则

3.1 振动控制中作动器 / 传感器优化配置准则

针对振动控制,目前已提出了多种作动器 / 传感器优化配置准则,主要的有可控度 / 可观度准则、系统能量准则、系统响应准则、可靠性准则、控制溢出 / 观测溢出准则等,以下分别说明.

3.1.1 基于系统可控性 / 可观性的准则

可控性和可观性是控制系统理论中的重要概念,控制系统的设计必须要保证系统是可控和可观的,因此基于结构系统的可控性 / 可观性的优化配置准则首先得到了重视.在控制系统理论中,都是先建立其状态方程,再利用状态方程的系数矩阵来判别其可控性 / 可观性^[4].Hughes和Skelton^[5]针对二阶常微分方程,利用其系数矩阵的对称性、正定性等特点,提出了一些简化的可控性 / 可观性判别准则.不过这些准则都是可控性 / 可观性的定性度量,它们只能判别系统是可控还是不可控,可观还是不可观,至于可控和可观的程度如何,没有提出定量的指标.文[6]将可控性 / 可观性推广到一般离散系统,在将系统物理坐标转换到模态坐标的前提下,分析了每个模态的可控度 / 可观度.这样对维数很大的系统,计算非常简单.应用可控性 / 可观性条件,还可确定所必需的作动器 / 传感器数目.Hamdan和Nayfeh^[7]基于一阶和二阶微分方程,当系统的特征值互不相同,利用作动器 / 传感器的影响系数矩阵给出了可控度 / 可观度的一种度量方法.他们定义的可控度、可观度以及综合度量指标不仅与频响函数的留数有着密切的关系,而且与平衡实现中的奇异值相关连.为了衡量当存在重频或密频模态时系统的可控度 / 可观度,可对作动器 / 传感器的影响系数矩阵进行奇异值分解,根据奇异值的大小来确定可控度 / 可观度,奇异值越大,则可控度 / 可观度越大^[8].

对完全可控 / 可观的线性系统,能够找到一个可逆变换,将可控性 / 可观性矩阵转换到平衡坐标下,得到Hankel矩阵的奇异值,它们也可表征系统的可控度 / 可观度^[9].由于平衡坐标同时表示了可控性和可观性,这样给作动器 / 传感器的优化配置带来了方便.Lim^[10]根据各阶模态在可控性和可观性格兰姆矩阵交集上的加权投影定义系统的可控度 / 可观度,它也具有平衡实现的优点.进一步,Gawronski和Lim^[11]利用格兰姆矩阵的对角占优性,将系统Hankel矩阵的奇异值近似表示为每个作动器和传感器所得到的Hankel矩阵奇异值之和,给作动器和传感器的优化配置带来了方便.Viswanathan等^[12]以“恢复区域”的大小作为可控度的度量,定义其为在有界控制力作用下,在有限时间内能够恢复到平衡状态的初始扰动的大小,还给出了恢复区域的上限计算表达式.Schmitendorf^[13]给出了恢复区域的精确表达式.总的说来,这样定义的可控度计算麻烦,使用不方便,但它揭示了可控度的深层含义.针对线性离散系统,文[14]根据格兰姆矩阵行列式值、迹以及特征值定义了三种可控度 / 可观度指标,它们也考虑到了上面5个因素的影响,而且几何和物理意义清楚,研究表明这种基于格兰姆矩阵所定义的可控度 / 可观度指标具有较好的使用价值.

3.1.2 基于系统能量的准则

在作动器 / 传感器的优化配置准则中,基于系统能量的指标也得到了重视.李俊宝等^[15]采用闭环模态耗散能因子来评价结构振动阻尼控制中引入的模态主动阻尼的相对大小,从而建立一个多目标优化问题,研究了主动构件的最优配置.顾荣荣等人^[16]从有效衰减能量出发,由Lyapunov第二法定义目标函数,进行了柔性结构振动控制的激振器和传感器的优化配置.Chen等^[17~19]采用输出速度反馈,基于系统耗散能指标,研究了主动构件和被动阻尼元件的优

化配置问题. 在独立模态空间控制方法中, Baruh 和 Merovitch^[20] 采用系统所消耗的能量为目标函数, 得出了它与作动器配置位置无关的结论. Lu 等^[21] 基于能量耗散的速度进行主动构件的优化配置. Schulz 和 Heimbold^[22] 利用速度反馈, 提出了一个基于系统耗散能的优化配置准则, 同时考虑作动器 / 传感器配置位置以及控制增益, 得到了作动器 / 传感器的优化配置位置以及相应的控制增益. 文 [23] 以系统耗散能的积分作为目标函数, 采用与文 [22] 类似的方法求解作动器 / 传感器的优化配置位置以及确定控制增益. 由于这里考虑的是系统的总能量, 包含了控制力所引起的陀螺效应, 它比系统耗散能指标更能反映实际情况. Bhargava 等^[24] 通过试验确定作动器功率因子与输入电能之比, 它表征了电能转化为机械能以产生希望响应的能力, 因此可用来配置作动器. 文 [25] 为使控制能量最小, 而直接以实际控制力的范数为作动器配置准则.

当采用与能量有关的准则同时优化作动器 / 传感器位置和控制增益时, 往往与系统的初始状态有关. 文 [22] 假设结构受到脉冲载荷的作用, 而产生的系统响应作为初始状态. 也可假设它为均匀分布在单位球上的随机变量, 然后取迹消除初始状态对目标函数的影响^[23].

3.1.3 基于系统响应的配置准则

闭环系统的响应是我们进行控制的依据, 因此可采用系统响应作为作动器和传感器、控制增益优化的准则. Sunar 和 Rac^[36,37] 以悬臂梁自由端变形的绝对值之和作为目标函数, 认为作动器越靠近固定端控制性能越好. Anderson 和 Hangood^[28] 以结构系统上所选的一些重点的响应的均方值为优化目标, 并简化为矩阵的迹来优化配置主动和被动阻尼元件. Kang^[29] 等在研究采用压电作动器 / 传感器控制复合梁时, 定义了结构阻尼因子 SDI (Structural Damping Index), 即模态阻尼比为优化的准则. 由于模态阻尼考虑到了幅值衰减和调节时间, 它比阻尼比更好地反映了作动器 / 传感器配置位置和控制增益对闭环系统的响应的影响.

3.1.4 基于失效和可靠性的配置准则

对航空、航天结构来说, 在其发射过程以及空间结构的展开和重构中, 作动器和传感器都可能失效, 由于其修复和更换的成本太高, 因此希望当作动器和传感器部分失效时, 其余的作动器和传感器仍能实现对结构的控制以满足使用要求. Matunaga 和 Onoda^[30] 分析了作动器失效的各种形式, 建立了分析模型, 将考虑作动器失效时的优化配置问题表示为以容许误差为约束条件的极大极小问题. Baruh 和 Choe^[31,32] 研究了作动器 / 传感器位置与系统可靠性的关系, 分析了作动器 / 传感器失效对系统可控性 / 可观性的影响, 然后在作动器 / 传感器的优化配置中考虑失效因素, 以确保在发生故障的情况下, 闭环系统的性能不至于受到太大影响. 他们还研究了后备传感器的配置问题^[33].

3.1.5 基于控制 / 观测溢出的配置准则

在控制过程中, 不可避免地存在溢出现象. 控制溢出和观测溢出的产生, 不仅会影响系统性能, 而且会导致闭环系统的不稳定. 因此, Choe 和 Baruh^[34] 从作动器的影响系数矩阵出发, 以系统能量从被控模态转移到未控模态最小, 以及控制力对未控模态的作用最小定义了两个与控制溢出有关的目标函数, 研究了作动器的优化配置问题. 文 [20] 提出采用独立模态空间控制方法时, 基于控制溢出最小的考虑, 作动器应尽量靠近未控模态的节线. Jalihal 等^[35] 研究主动构件在智能桁架结构中的优化配置时, 认为主动构件配置在所控模态能导致其长度变化最大的位置时控制溢出最小. Ryou 等^[36] 在优化配置传感器时, 采用观测溢出最小的优化指标.

3.1.6 基于其他性能指标的配置准则

Fabunmi^[37] 根据数值代数中频率和阻尼比与特征多项式的关系, 推导了它们与控制增益、作动器 / 传感器配置位置之间的表达式, 得到了闭环性能指标对这些参数的灵敏度, 根据灵敏度即可确定反馈增益与作动器 / 传感器位置. Jalihal 等^[38] 根据主动构件的强度要求, 将其配置在预紧力最小的位置. Maghami 和 Joshi^[9] 根据传递函数的零点在调节和跟踪问题以及局部控制方法中的重要性, 以传递函数的零点越靠近左半平面越好来优化配置作动器 / 传感器.

Baycan 等^[39]将主动构件配置在其位移量最小的位置, 以实现自适应结构的位置控制和满足对结构的预紧要求. 文 [40~42] 以同时考虑结构响应和控制力的大小的线性二次型为目标函数研究作动器 / 传感器的优化配置问题.

对结构系统进行控制的目的是为了增加模态阻尼或者改变系统刚度等, 以便满足结构的时域或频域的性能要求. 这不仅与控制时作动器 / 传感器的数目、位置有关, 而且与控制方法、增益等有关. 在基于系统可控性 / 可观性的配置准则中, 都没有考虑后面因素的影响. 采用基于系统能量的配置准则进行作动器 / 传感器的优化配置时, 还可同时考虑控制方法和增益的影响. 随着科学技术的发展, 对结构的使用要求的提高, 结构系统的一体化设计是重要的发展方向, 可以预见, 这种考虑控制增益的作动器 / 传感器配置方法^[22]将得到进一步的发展. 而基于系统响应的优化准则与所考虑的具体问题密切相关, 计算一般较复杂. 基于控制 / 观测溢出的配置准则一般与别的准则配合一起使用.

3.2 模态试验中作动器 / 传感器优化配置准则

模态试验中目前所发展的作动器 / 传感器的配置准则, 大致可分为以下几类.

3.2.1 识别误差最小准则

由于多数情况下首先采用参数识别方法处理模态试验的结果, 因此很多文献以识别参数的误差最小来优化配置作动器 / 传感器. Kammer 提出了有效独立法 (Effective Independence, EFI), 其基本思想是逐步消除那些对目标振型的独立性贡献最小的自由度, 以使目标振型的空间分辨率能得到最大程度的保证^[43], 还考虑了测量噪声的情况^[44]. Park 和 Kim^[45]在保证目标振型独立性的同时, 提出了每次循环中消去传感器最大数目的一个准则. Liu 和 Tasker^[46]考虑采用多参考点 Ibrahim 时域法 (Multiple-Reference Ibrahim Time Domain) 时, 采用扰动分析方法推导了传感器位置与识别方差的关系, 配置传感器以使识别方差最小. Lim^[47,48]基于目标模态独立性的考虑, 结合特征系统实现算法, 以 Hankel 矩阵的条件数最小为目标配置作动器和传感器. 类似地, Bergman 等^[49]和 Sanayei 等^[50]也研究了识别误差与作动器 / 传感器位置之间的关系. 刘中生等^[51]基于识别误差的大小, 研究了重频模态的识别条件和布局方法. Rafajlowicz^[52]揭示了信息矩阵与输入谱密度和测量位置的关系, 在频域中研究用于参数识别的作动器 / 传感器的优化配置问题. Bayard 等^[53]采用与 EFI 方法密切相关的 D 域准则, 将最优输入及传感器配置解耦, 从而可以分别考虑两者的优化配置. Tongco 等^[54]以一个 63 自由度的平面桁架为试验对象, 研究了 D 域准则在优化配置传感器中的有效性.

3.2.2 可控度 / 可观度准则

与振动控制中作动器 / 传感器的优化配置一样, 模态试验中作动器 / 传感器的优化配置也可以采用可控度 / 可观度的优化配置准则. Shih 等^[55]定义了二阶常微分方程的可控度 / 可观度, 并揭示了它与频响函数之间的关系, 根据各自由度对该定义贡献的大小来配置作动器 / 传感器. 也可采用 Xing 等^[14]定义的离散系统可控度 / 可观度来配置传感器, 因为它直接反映了识别方差的大小. Lim^[47]根据可控性矩阵的条件数研究了参数识别时作动器的优化配置问题. Reynier 和 Hisham^[56]采用格兰姆矩阵的最小特征值最大来配置传感器.

3.2.3 模态应变能准则

模态应变能方法 (MKE)^[57,58]的基本思想是具有较大模态应变能的自由度上的响应也比较大, 将传感器配置于这些位置上将有利于参数识别. 其缺点是依赖于有限元模型的划分, 如果划分得较粗, 则传感器也将分布得较远. 还可以对模态应变能进行加权平均来确定传感器的位置^[57,58]. 与模态应变能相近的一个概念是原点留数 (Driving-Point Residue, DPR)^[58], 它能衡量某一自由度上单位作用力所激起的响应大小. 采用 DPR 方法时, 仍然可能识别不出某阶或某些模态, 因此 Clerck 和 Avitabile 直接采用各自由度上模态响应的乘积来配置激振器^[59]. Salama 等^[60]以模态应变能为目标, 研究了用于模型相关和修正的激振器和传感器优化配置问题.

3.2.4 模型缩减准则

在模型缩减中常常将系统自由度区分为主要和次要自由度, 缩减后的模型将保留那些主要的自由度, 而去掉那些次要的自由度. 将传感器配置在这些主要的自由度上测得的响应, 应能较好地反映系统的低频模态. 用于模型缩减的常用方法有 Guyan 缩聚法 (Guyan Reduction)^[61], 改进缩聚法 (Improved Reduced System, IRS)^[62], 近似循环缩聚 (Successive Approximate Reduction, SAR)^[63] 等方法, 这些方法都能用于优化配置传感器^[64]. 根据模型缩减的观点, 也可将传感器配置在结构的静力变形与目标模态之间的误差最小的自由度上^[65].

3.2.5 插值拟合准则

有时传感器优化配置的目的是为了能利用有限测点的响应来构造未测量点的响应. Baruh 和 Choe^[32] 在利用有限测点的响应提出模态滤波器时, 采用样条函数插值的方法得到其余各点的响应, 这时以插值拟合的误差最小来配置传感器, 得到了对简支梁传感器应均匀分布的结论. 文 [66] 将传感器布置于 Chebychev 多项式的零点, 认为这样能使振型的插值误差最小.

3.2.6 其它优化准则

用于模态试验的作动器 / 传感器的配置方法, 还有一些别的配置准则. 主分量分析法^[67] 也可用于配置传感器. Schedlinski 和 Link^[68] 采用振型矩阵和质量矩阵乘积的 QR 分解来配置作动器. 为了进行模型修正, Lallement 等配置的传感器位置使扩充后的振型或频响函数误差最小^[69]. 模态试验中常采用相关分析来检验识别振型的好坏. Breitfeld^[70] 使模态置信因子 (Modal Assurance Criterion, MAC) 矩阵的非对角线元素值最小来配置传感器. Stabb 和 Blesloch^[71] 采用结构的静态变形, 考虑缩减后的模型模态与全尺度模型模态的正交性配置传感器.

在这些准则中, 基于识别误差最小准则的方法使用得最多. 基于可控度 / 可观度的准则反映了与振动控制中作动器 / 传感器优化配置的联系, 在控制系统试验建模中使用得较多. 模型缩减类方法只能保证低阶模态的精度, 但低阶模态不一定是目标模态. 基于模态应变能的方法是循环方法, 计算比较简单. 插值拟合类方法与有限元模型无关, 只能应用于形状简单的一维和二维结构的传感器配置.

4 作动器 / 传感器优化配置计算方法

作动器和传感器常常配置在结构系统与有限元分析所对应的表面节点上, 因此它是一个组合优化问题, 也即整数规划问题. 设需要将 m 个作动器或传感器配置在 n 个可选位置上, 如果采用穷举法需要计算 $n!/[m!(n-m)!]$ 次目标函数. 显然, 当 n 和 m 很大时, 需要的计算次数太多, 用穷举法往往难以求解. 当考虑控制增益时, 则同时包含有连续变量和离散变量, 对这种优化问题的求解, 还没有一种很好的方法. 由于组合优化问题的难度, 它的求解仍然是研究的热点之一. 目前已提出了多种处理方法, 需要根据具体情况选用.

4.1 非线性规划优化方法

对梁、板等形状规则的结构, 我们可能得到振型与固有频率的解析表达式. 这时作动器和传感器的优化配置就可直接采用非线性规划的方法求解, 如拟牛顿法, 递推二次规划法等. 而对于一些复杂结构的作动器 / 传感器优化配置问题, 可以采取一些措施, 将离散变量转化为连续变量求解, 如 Branch & Bound 方法^[72,73], Abdullah 法^[27] 等. 如果目标函数为线性函数, 而且变量的规模较小, Branch & Bound 方法是非常有效的; Abdullah 法能够适应复杂的情况. 这些方法利用了非线性规划优化方法已经比较成熟的优点, 但是他们都需要用到目标函数的梯度, 因此往往会陷于局部最优解. 此外, 采用优化方法得到的结果还需要进一步调整到其对应的有限元模型的节点, 这种转化可能使原来的解变得不可用.

4.2 序列法

它可分为累积法及逐步消去法. 其基本的作法是不断地从剩余的可选位置中选取一个最优

的加到优化配置中去, 直至达到希望的数目为止. Tolson 和 Huang^[74] 采用这种方法配置作动器以用于形状控制.

逐步消去法与累积法相反, 它每次从剩余的作动器 / 传感器的可选位置中去掉一个或多个对目标函数贡献最小或较小的可选位置, 一直到只剩下希望数目的可选位置为止. DeLorenzo^[75] 基于代价分析法, 采用这种逐步消去法寻优, 研究了随机最优控制方法中的作动器 / 传感器优化配置问题. 本文作者也采用这种方法优化配置作动器 / 传感器^[76]. 在模态试验中配置作动器 / 传感器时, 使用得最多的就是这种逐步消去法. 如基于 EFI 和模型缩减的传感器配置方法一般都采用逐步消减的方法得到优化配置结果, 这种方法通常得到的只是次优解.

4.3 推断算法

Hafkta 和 Adelman^[77] 在研究形状控制问题时, 提出了两种推断算法: WOBI (worst-out-best-in) 以及 ESPS (exhaustive single point substitution). WOBI 方法是首先任意选取 N 个位置, 然后从这 N 个位置每次循环去掉一个使目标函数变化最小的位置, 再从其余 $N_p - N$ 位置中补充一个位置, 如果这时目标函数有改善则保留这个位置. 这个过程一直重复到收敛为止, 这里 N_p 表示可选位置. 而 ESPS 方法过程与 WOBI 类似, 不过它是在每次循环中对所有 N 个位置都要进行替换操作. Hakim 等人^[78] 还将推断算法用于平面和空间智能桁架结构主动构件的优化计算中. 推断方法类似于梯度类方法, 也容易陷于局部最优解.

4.4 随机类方法

随机类方法与推断类方法有相似的地方, 只是它的位置替换方法是根据概率进行, 因而不会陷于局部极小点. 随机类方法主要有模拟退火算法和遗传算法.

模拟退火算法起源于统计力学和热动力学, 首先由 Metropolis 等^[79] 提出, 然后 Kirkpatrick 等^[80] 首先将其应用到求解组合优化问题. 可以在理论上证明, 模拟退火算法能够以概率 1 收敛于全局最优解. 其最大的问题是需要选择初始温度、退火速度等参数, 由于这些参数随具体问题而变化, 因此较难合理地选取这些参数, 从而不能控制搜索的效率, 可能导致搜索时间过长. Chen 等^[17,18] 采用模拟退火算法研究了主动构件和被动阻尼元件的优化配置问题. Menon 等^[81] 采用一种类似模拟退火算法的优化方法研究了振动控制中主动构件的优化配置. Salama^[60] 也采用模拟退火算法配置作动器 / 传感器以用于模型相关分析.

遗传算法起源于达尔文的生物进化理论, 它模拟自然界“适者生存”的机制, 由 Holland 教授所创立. 其基本思想就是在遗传计算过程中, 适应度较大的个体基因得到遗传, 而适应度较差的个体的基因会逐渐地消失. Rao 和 Pan^[23] 采用遗传算法研究了平面桁架结构中的作动器优化配置, 得到了最优配置. Ryou 等^[36] 基于遗传算法, 研究了压电传感器和作动器的形状和最优配置, 实现了对薄板的振动控制. Yao 等^[82] 采用遗传算法研究参数识别时传感器的优化配置问题. 虽然遗传算法在组合优化问题中已得到了应用, 但它仅是生物进化系统的简单近似模拟, 遗传算法本身还需要更深入地研究. 由于随机类方法不易陷于局部最优解, 它们在解决组合优化问题上具有发展前景.

5 振动控制和模态试验中的作动器 / 传感器优化配置对比

在模态试验和振动控制中, 作动器 (激振器) 的作用都是对结构系统施加一定的作用力, 而传感器都是检测其响应信号. 而且如第二节所示, 两者的数学模型也相似. 因此, 用于模态试验和振动控制中的作动器 / 传感器的优化配置是两个联系很紧密的问题. 例如, 我们知道特征系统实现算法^[83] 中 Hankel 矩阵是可控性矩阵和可观性矩阵的乘积. 为了进行振动控制, 可根据格兰姆矩阵定义的可控度和可观度来优化配置作动器 / 传感器^[14]. 而为了进行模态试验, 可根据可控性矩阵的秩来配置作动器, 而根据 Hankel 矩阵的秩来配置传感器^[47]. 而且 Bergman 等^[49] 为使识别误差最小, 得到的作动器 / 传感器优化配置位置也能满足振动控制的要求.

但是如图 1 所示, 在振动控制中存在反馈作用. 而且一般模态试验中需要识别的模态数目要多于振动控制时被控模态数. 因此它们之间也存在较大的区别 (表 1). 对振动控制来说, 作动器的位置应对被控模态的作用最大而对未控模态的影响最小, 而从传感器得到的测量响应中包含未控模态的成分应尽可能小, 以防止控制溢出 / 观测溢出的产生. 而对模态试验来说, 要求测试信号的信噪比高, 作动器 / 传感器的配置通常对目标模态以外的成分不作要求. 因此多数情况下, 两者要求的作动器 / 传感器的配置位置是不同的.

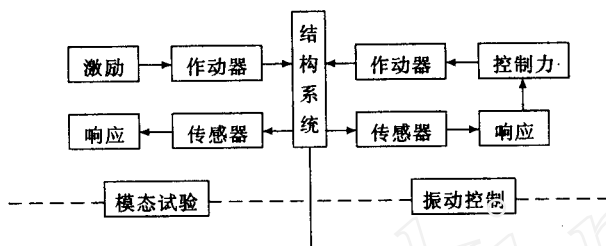


图 1 模态试验与振动控制中作动器 / 传感器优化配置

表 1 模态试验和振动控制中作动器 / 传感器的优化配置对比

	模态试验	振动控制
目的	识别频率、阻尼比、振型等参数	控制结构系统的响应
系统特征	开环	闭环
配置模型	有限元分析模型	有限元分析模型或试验模态模型
优化方法	逐步消减法为主	多种多样
涉及的模态数	较多	较少
传感器种类	通常采用加速度传感器	位移、速度、加速度传感器等
传感器 / 作动器数	较多	较少

6 需要进一步研究的几个问题

(1) 现有的优化配置方法, 大多基于有限元分析模型. 由于不可避免存在有限元建模误差, 从而对作动器 / 传感器的优化配置结果产生不利影响. 因此需要考察模型误差对优化配置结果的影响程度.

(2) 现有的优化配置方法, 大多给定了作动器 / 传感器的数目, 如何确定作动器 / 传感器的最优数目仍是一个较棘手的问题.

(3) 对宇航结构来说, 作动器 / 传感器的优化配置往往需要同时满足在轨模态试验和振动控制的双重要求. 需要进一步协调它们之间的关系.

(4) 在振动控制中, 控制系统的性能不仅与作动器 / 传感器的配置位置有关, 而且与控制增益相关. 同时考虑控制增益的作动器 / 传感器优化配置位置有利于提高控制系统的性能. 进一步在结构系统设计阶段就考虑到控制增益、作动器 / 传感器的优化配置等问题, 实现结构与控制系统的一体化设计, 是一个值得研究的课题.

(5) 目前的优化配置计算方法, 不仅计算复杂, 计算效率较低, 而且往往只能得到次优解. 尽管随机类优化方法显示较好的前景, 但还有待于进一步提高计算效率和可靠性.

参 考 文 献

- 1 李俊宝. 智能桁架结构设计、建模与阻尼控制的理论和实验研究. [博士论文]. 南京: 南京航空航天大学, 1996
- 2 刘福强. 柔性智能桁架结构振动主动控制及相关问题研究. [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 1999
- 3 黄文虎等. 航天柔性结构振动控制的若干新进展. 力学进展, 1997, 27(1): 5~18
- 4 段广仁. 线性系统理论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.

- 5 Hughes P C, Skelton R E. Controllability and observability of linear matrix-second-order systems. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47: 415~420
- 6 Ahmadian M. Controllability and observability of general linear lumped-parameter systems. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1985, 8(5): 669~672
- 7 Hamdan A M A, Nayfeh A H. Measures of modal controllability and observability for first- and second-order linear systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1989, 12(3): 421~428
- 8 Liu Zhongsheng, Wang Dajun, Hu haichang. Measures of modal controllability and observability in vibration control of flexible structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*; 1994, 17(6): 1377~1380
- 9 Maghami P G, Joshi S M. Sensor-actuator placement for flexible structures with actuator dynamics. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1993, 16(2): 301~307
- 10 Lim K B. Method for optimal actuator and sensor placement for large flexible structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1992, 15(1): 48~57
- 11 Gawronski W, Lim K B. Balanced actuator and sensor placement for flexible structures. In: Proceedings of SDM Conference. AIAA-95-3259-cp. 1995. 1871~1880
- 12 Viswanathan C N, Longman R W, Likins P W. A degree of controllability definition: fundamental concepts and applications to modal systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1984, 7(4): 222~230
- 13 Schmitendorf W E. An exact expression for computing the degree of controllability. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1984, 7(4): 502~506
- 14 Xing guangqian, Bainum P M. Actuator placement using degree of controllability for discrete-time systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1993, 114: 508~516
- 15 李俊宝, 刘华, 张令弥. 自适应桁架结构振动控制中主动构件的基准配置. *航空学报*, 1996, 17(5): 755~759.
- 16 顾荣荣, 董忠飏等. 挠性结构主动减振中传感器和激励器的优化配置. *振动与冲击*, 1995, 14(3): 12~18.
- 17 Che Songtsuen, Fan Yihua, Lee Anchen. Effective active damping design for suppression of vibration in flexible systems via dislocated sensor/actuator positioning. *JSME International Journal, Series C*, 1994, 37(1): 225~231
- 18 Chen Gunshing, Bruno R J, Salama M. Optimal placement of active/passive members in truss structures using simulated annealing. *AIAA Journal*, 1991, 29(8): 1327~1334
- 19 Chen G S, Bruni R, Salama M. Selection of active member locations in adaptive structures. In: Laurenson R M ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-89-1287-cp. 1989. 1127~1135
- 20 Baruh H, Merovitch L. On the placement of actuators in the control of distributed-parameter systems. In: Laurenson R M ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-81-0838. 1981. 611~618
- 21 Lu L Y, Utku S, Wada B K. Location selection for vibration controllers in space crane as adaptive structures. In: Prasad B ed. Proceedings of AIAA SDM Conference. AIAA-90-1167-cp, 1990. 2375~2380
- 22 Schulz G, Heimbold G. Dislocated actuator/sensor positioning and feedback design for flexible structures. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1982, 5(6): 361~367
- 23 Rao S S, Pan Tzong-shii. Optimal placement of actuators in actively controlled structures using genetic algorithm. *AIAA Journal*, 1991, 29(5): 942~943
- 24 Bhargava A, Chaudhry Z, Rogers C A. Experimental determination of optimal actuator locations based on the actuator power factor. In: Baker M ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-95-1138-cp, 1995. 3515~3522
- 25 Levine W S, Athans M. On the determination of the constant output feedback gains for linear multivariable systems. *Transaction on Automatic Control*, 1970, AC-15: 44~48
- 26 Sunar M, Rao S S. Distributed modeling and actuator locations for piezoelectric control systems. *AIAA Journal*, 1996, 34(10): 2200~2203
- 27 Sunar M, Rao S S. Thermopiezoelectric control design and actuator placement. *AIAA Journal*, 1997, 35(2): 534~539
- 28 Anderson E H, Hangood N W. A comparison of algorithms for placement of passive and active dampers. In: Mckinnis C ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-94-1656-cp, 1994. 2701~2714
- 29 Kang Y K, Park H C, Hwang W, Han K S. Optimum placement of piezoelectric sensor/actuator for vibration control of laminated beams. *AIAA Journal*, 1996, 34(9): 1921~1926
- 30 Matunaga S, Onoda J. Actuator placement with failure consideration for static shape control of truss structures. *AIAA Journal*, 1995, 33(6): 1161~1163
- 31 Baruh H. Actuator failure detection in the control of distributed systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1986, 9(2): 181~189
- 32 Baruh H, Choe K. Sensor failure detection method for flexible structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1987, 10(5): 474~482
- 33 Baruh H, Choe K. Sensor placement in structural control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1989, 12(2): 245~253
- 34 Choe K, Baruh H. Actuator placement in structural control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1991, 15(1): 40~46
- 35 Jalihal P J, Utku S, Wada B K. Actuator placement in prestressed adaptive trusses for vibration control. In: Sierakowski R L ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-93-1694-cp, 1993. 3312~3318

- 36 Ryou J K, Park K Y, Kim S J. Electrode pattern design of piezoelectric sensors and actuators using genetic algorithms. *AIAA Journal*, 1998, 36(2): 227~233
- 37 Fabunml J A. Sensitivity of closed-loop modal parameters of controlled structures to sensor/actuator placement and feedback gains. In: Giles G L ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-92-2322-cp, 1992. 1587~1594
- 38 Jalihal P, Utku S, Wada B K. Optimal location of redundants for prestressing adaptive trusses with bucking consideration. In: Giles G L ed. Proceedings of AIAA SDM conference. AIAA-92-2343-cp, 1992. 412~417
- 39 Baycan C M, Utku S, Das S K, Wada B K. Optimal actuator placement in adaptive precision trusses. In: Giles G L ed. Proceedings of AIAA SDM conference. AIAA-92-2344-cp, 1992. 418~422
- 40 Xu K, Warnitchai P, Igusa T. Optimal placement and gains of sensors and actuators for feedback control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1994, 17(5): 929~934
- 41 Abdulah M. Optimal location and gains of feedback controllers at discrete locations. *AIAA Journal*, 1998, 36(11): 2109~2116
- 42 Devasia S, Meressi T, Paden B, Bayo E. Piezoelectric actuator design for vibration suppression: Placement and sizing. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1993, 16(5): 859~864
- 43 Kammer D C. Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1991, 14(2): 251~259
- 44 Kammer D C. Effect of noise on sensor placement for on-orbit modal identification of large space structures. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1993, 114: 436~443
- 45 Park Y S, Kim H B. Sensor placement guide for model comparison and improvement. In: Wick A L ed. Proceedings of the 14th International Modal Analysis Conference. 1996. 404~409
- 46 Liu Chinchao, Tasker F A. Sensor placement for multi-input multi-output dynamic identification. In: Baker M ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-95-1114-cp, 1995. 3327~3337
- 47 Lim T W. Actuator/sensor placement for modal parameter identification of flexible structures. *Modal Analysis: the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 1993, 8(1): 1~13
- 48 Lim T W. Sensor placement for on-orbit modal testing. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1992, 29(2): 279~285
- 49 Bergman M, Longman R W, Juang J N. Optimization of actuator and sensor placement for on-orbit identification in large flexible spacecraft. In: Prasad B ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-90-3526-CP, 1990. 1785~1790
- 50 Sanayei M, Onipede O, Babu S R. Selection of noisy measurement locations for error reduction in static parameter identification. *AIAA Journal*, 1992, 30(9): 2299~2239
- 51 刘中生, 于民, 王大钧, 陈德成. 模态参数识别中的激振点和测量点的布局. *宇航学报*, 1995 (2): 26~32
- 52 Rafajlowicz E. Optimal experimental design for identification of linear distributed-parameter systems: Frequency domain approach. *Transaction on Automatic Control*, 1983, 28(7): 806~808
- 53 Bayard B S, Hadaegh F Y, Meldrum D R. Optimal experiment design for identification of large space structures. *Automatica*, 1988, 24(3): 357~364
- 54 Tongco E, Meldrum D. Optimal sensor placement of large flexible space structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1996, 19(4): 961~963
- 55 Shih Y T, Lee A C, Chen J H. Sensor and actuator placement for modal identification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1998, 12(5): 641~659
- 56 Reynier M, Hisham A K. Sensor location for updating problems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1999, 13(2): 297~314
- 57 Larson C B, Zimmerman D C, Marek E L. A comparison of modal test planning techniques: excitation and sensor placement using the NASN 8-bay truss. In: Allemang R ed. Proceedings of the 12th IMAC conference. 1994. 205~211
- 58 Chung Y T, Moore D. On-orbit sensor placement and system identification of space station with limited instrumentations. In: MacDonald K L ed. Proceedings of 11th IMAC conference. 1993. 41~46
- 59 Clerck J P, Avitabile P. Development of several new tools for modal pretest evaluation. In: Wick A L ed. Proceedings of 14th IMAC conference, 1996. 1527~1532
- 60 Salama M, Rose T, Garba J. Optimal placement of exciters and sensors for verification of large dynamical systems. In: Kedward K T ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-87-0782. 1987. 1024~1031
- 61 Guyan R J. Reduction of stiffness and mass matrices. *AIAA Journal*, 1965, 3(2): 380
- 62 O'Callahan J. A procedure for an improved reduced system(IRS) model. In: Demichele D J ed. Proceedings of the 7th IMAC conference. 1989. 17~21
- 63 Zhang D W, Li S. Succession-level approximate reduction (SAR) technique for structural dynamic model. In: Richardson M H ed. Proceedings of the 13th IMAC conference. 1995. 435~441
- 64 Penny J E T, Friswell M I, Garvey S D. Automatic Choice of Measurement locations for dynamic testing. *AIAA Journal*, 1994, 32(2): 407~414
- 65 Flanigan C C, Botos C D. Automated selection of accelerometer locations for modal survey tests. In: Demichele D J ed. Proceedings of the 10th IMAC conference. 1992. 1205~1208
- 66 Pape D A. Selection of measurement locations for experimental modal analysis. In: Allemang R ed. Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference. 1994. 34~41

- 67 Yousuff A, Skelton R E. Controller reduction by component cost analysis. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1984, 29(6): 520~530
- 68 Schedlinski C, Link M. An approach to optimal pick-up and exciter placement. In: Wick A L ed. Proceedings of the 14th IMAC conference. 1996. 376~382
- 69 Lallest G, Ramanitranja A, Cogan S. Optimal sensor deployment: Application to modal updating. *Journal of Vibration and Control*, 1998, 4: 29~36
- 70 Breitfeld T. A method for identification of a set of optimal measurement points for experimental modal analysis. *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 1996, 11: 254~273
- 71 Stabb M, Blesloch P. Application of flexibility shapes to sensor selection. In: Richardson M H ed. Proceedings of the 13th IMAC conference. 1995. 1255~1262
- 72 Sepulveda A E, Jin I M, Schmit Jr L A. Optimal placement of active elements in control augmented structural synthesis. *AIAA Journal*, 1993, 31(10): 1906~1915
- 73 Sepulveda A E, Schmit Jr L A. Optimal placement of actuators and sensors in control augmented structural optimization. In: Prasad B ed. Proceedings of SDM conference. AIAA-90-1055-cp, 1990. 217~230
- 74 Tolson R H, Huang J K. Integrated control of thermally distorted large space antennas. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1992, 15(3): 605~614
- 75 DeLorenzo M L. Sensor and actuator selection for large space structure control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1990, 13(2): 249~257
- 76 刘福强, 张令弥. 振动控制中作动器与传感器优化配置的逐步消减法. 宇航学报, 已录用
- 77 Hafkta R T, Adelman H M. Selection of actuator locations for static shape control of large space structures by heuristic integer programming. *Computers and Structures*, 1985, 20(2): 575~582
- 78 Hakim S, Fuches M B. Optimal actuator placement with minimum worst case distortion criterion. In: Baker M ed. Proceedings of AIAA SDM Conference. AIAA-95-1137, 1995. 3506~3514
- 79 Metropolis N, Rosenbluth A, Rosenbluth M, Teller A, Teller E. Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 1953, 21(6): 1092~1108
- 80 Kirkpatrick S, Gelatt C, Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, 220: 671~680
- 81 Menon R G, Browder A M, Kurdila A J, Junkins J L. Concurrent optimization of piezoelectric actuator locations for disturbance attenuation. In: Sierakowski R L ed. Proceedings of SDM Conference. AIAA-93-1689-cp, 1993. 3269~3278
- 82 Yao L, Sethares A, Kammer D C. Sensor placement for on-orbit modal identification via a genetic algorithm. *AIAA Journal*, 1993, 31(10): 1922~1928
- 83 Juang J N, Pappa R S. An eigensystem realization Algorithm (ERA) for modal parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1985, 8(5): 620~627

ADVANCES IN OPTIMAL PLACEMENT OF ACTUATORS AND SENSORS

Liu Fuqiang Zhang Lingmi

Institute of Vibration Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract A survey on the development on the optimal placement of actuators/sensors for active vibration control and modal tests is given in the paper. The mathematical formulation for optimal placement of actuators/sensors is discussed. Then the correlation between optimal actuator/sensor placement for active vibration control and modal tests is reviewed. Some problems are proposed for further research.

Keywords actuator/sensor, optimal placement, vibration control, modal test, parameter identification