

基于塔内位移观测器和均衡空间低维控制器的 高塔结构振动主动控制系统

文茜茜¹, 张弘毅¹, 陈政清¹, 华旭刚¹, 牛华伟¹, 徐赵东²

(1. 湖南大学桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 湖南长沙 410082;

2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 211189)

摘要: 高塔结构振动适合也需要主动控制技术, 但需要满足位移直接观测和单点控制下的低维高效控制。本文应用现代摄像观测技术, 建立了一套从塔内实时连续观测振动位移的方法, 为高塔结构振动主动控制提供了最直接的位移观测器, 避免了以往只能建立加速度观测器, 经滤波后再与假定的外荷载结合计算输出位移的冗长过程。基于均衡系统空间变换和平衡截断法, 对顶端设置主动质量块的高塔结构进行降维, 可以有效保留结构的主要动力特性。以某施工状态的 700 m 高塔为例, 进行了风振和地震的主动控制仿真分析。结果表明: 以少数位移状态作为反馈信号的降维控制器的控制效果和基于全状态反馈的全维控制器基本一致, 可以作为高塔结构振动的主动控制策略。

关键词: 主动控制; 位移观测器; 均衡空间; 摄像测量; 低维控制器

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)07-1126-13

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.07.005

引言

结构振动控制技术可分为被动控制、半主动控制和主动控制。主动控制技术具有严密的科学理论、更宽的抑制频率范围、较好的振动控制效果和多学科交叉融合的特征, 一直受到学术界的高度关注。高塔结构比较适合也迫切需要主动控制技术^[1-5]。如某国计划建造的观光塔, 高度超过千米, 预计施工期五年, 施工状态的结构周期变化为 5 倍, 且内部空间小, 主动控制是保障其施工安全的理想方式。近年发展迅速的大型风力机也很需要主动控制技术, 风力机塔筒长细比可达 15, 长期处于强烈的振动状态。传统的 TMD 被动控制至少需要两套设备来分别控制 1, 2 阶模态, 并且因塔内行程受限, TMD 减振效果不理想。高塔结构具备主动控制需要的供电条件和设备安装条件, 但也有两个特别的难题: 一是振动位移测量难, 二是一个作动器需要控制多阶模态振动。

主动控制需要实时识别结构振动状态, 即实时准确识别振动位移和速度, 为计算控制力提供依据。在信息技术不先进的时代, 无法实现高塔结构位移

的实时不间断测量, 只能测量到加速度时程, 经过滤波处理后, 基于一定假设间接识别振动状态, 从而大大降低了控制精度, 即降低了主动控制相对被动控制的优越性。目前, 在主动控制的实际应用中, 可以直接采用加速度计监测结构的加速度信号作为反馈^[6-7], 但都仅限于小型的模型试验; 或者通过设计状态观测器来估计结构的位移和速度, 进一步将估计的状态作为反馈信号计算主动控制力^[8]。这些过程都非常繁琐, 增加了控制力的计算时间, 降低了控制精度。近年来, 非接触式测量技术, 尤其是摄像测量技术的发展为大型结构的实时状态观测提供了基础。摄像测量学是将摄影测量学原理、计算机视觉原理、光测实验力学、精密光测技术、数字图像处理与分析等学科交叉融合的一门新兴学科。它将摄像机和照相机作为一次传感器, 对图像处理分析, 可以测量位置、尺寸、速度和加速度等, 特点是以序列图像为主要对象, 实时测量运动目标的动态参数, 其与接触式测量技术相比更具优势。Shang 等^[9]和 Yu 等^[10]提出了一种利用串并联摄像机网络测量大型结构位移和变形的的方法, 通过一个相对简单的光学测量系统测量大型结构中一些感兴趣的部分的相对运动和变形。如果将摄像测量学技术应用于高塔结构

的主动控制系统中,可以直接测量被控结构的位移,直接将位移状态作为反馈信号计算控制力,简化了计算步骤,并且减少了时滞,提高了计算精度。因此,现代测量与信息技术的结合为解决高塔结构位移测量难题提供了条件。

高塔结构的长细比越大,振动包含的模态数就越多,如果直接对其进行主动控制,控制器阶数会很高,导致控制计算的时间延长,控制效果降低^[11-12],所以需要更低维的控制器来减小计算量。模型降维这一思想虽多年前散见于一些工程界的文献中,但多出现在自动控制 and 电路系统领域中。土木工程领域关于模型降维的文献报道很少。Qu等^[13]提出了一种动态凝聚法对系统进行降维,该方法的特点是在原物理空间的子空间中定义降维系统,使得状态向量具有物理意义。Cao等^[14]在最小信息损失方法的基础上,提出了一种改进的方法,解决了原方法没有唯一的降维结果这一问题,并且使总信息损失最小。但是由上述方法得到的降维模型只保留了原始系统的高阶模态,模态质量参与比相对较小,导致低阶特性损失,而土木工程结构的动力特性一般由其低阶模态控制。平衡截断法则较好地解决了上述问题,且能够较好地保留原结构的低阶动力特性^[15]。

平衡截断法最初由 Moore^[16]提出,之后很多学者对其进行了完善和扩展^[17-19]。目前工程中常用的是经 Laub等^[20]改进的计算方法。Xie等^[21]以柔性梁为研究对象,对平衡截断法进行了理论和实验研究,并提出了一种从物理传感器测量中提取平衡模态坐标的方法。Li等^[22]基于改进的平衡截断法设计了一种新的低阶控制器,并用一个10层框架的数值模拟和一个单跨4层钢框架的试验验证了方法的有效性。上述数值模拟和实验表明,低阶控制模型可以有效补偿时间延迟。Chen等^[15]和滕军等^[23]通过比较几种常用的模型降维方法,基于平衡截断法建立了降维模型,采用区域极点配置方法设计了一种新的降维控制器。上述研究表明:平衡截断法是一种可用在土木工程领域的较为可靠的降维技术。

本文以某一高塔结构的主动控制系统为例,提出了适用于高塔结构位移监测的摄像测量法,应用平衡截断法设计了只需要前几阶位移模态的低维控制器,并进行了大量的仿真计算。

1 位移传递摄像测量法建立高塔结构振动状态向量的位移观测器

相比于传统的刚性塔,高柔塔的塔顶位移与塔

高的比值要高出一倍左右,说明位移监测已经成为结构振动监测评价指标中最重要的指标之一。结构主动控制需要实时测量结构响应,采用现代控制理论计算出最优反馈控制力,在位移监测的基础上实现主动控制无疑会提高计算精度,节约计算时间。对于大型的复杂结构,采用非接触式位移测量技术是必要的。非接触式位移测量技术在工程中已经有广泛的应用,具有代表性的有GPS测量、全站仪测量、激光测量、摄像测量等^[24]。Yu等^[25-26]提出的位移传递相机串联网络摄像测量具有多点测量、实时测量、自动化程度高以及可视化等优点,并且适合从高塔内部测量位移,在台风等灾害作用时具有很强的抗干扰能力,可用来长期实时监测高塔结构的位移和变形。

针对高塔内部相邻层之间存在遮挡的问题,将标志点和相机设置为曲线连接的形式,两个相机之间成一定角度固连,标志点和双头相机的布置如图1所示。标志点和双头相机测量编号从下往上依次为 $M_1, S_1, C_1, \dots, M_i, S_i, C_i, \dots, M_n, S_n$,不考虑相机的旋转,双头相机所拍摄的上侧两个、下侧两个标志在水平方向位移量的计算公式为:

$$\begin{cases} h_{M_i}^{C_i} = k_{M_i}^{C_i} (\Delta y_{M_i} - \Delta y^{C_i} - d_{M_i}^{C_i} \cdot \sin \theta^{C_i}) \\ h_{S_i}^{C_i} = k_{S_i}^{C_i} (\Delta y_{S_i} - \Delta y^{C_i} - d_{S_i}^{C_i} \cdot \sin \theta^{C_i}) \\ h_{M_{i+1}}^{C_i} = k_{M_{i+1}}^{C_i} (\Delta y_{M_{i+1}} - \Delta y^{C_i} - d_{M_{i+1}}^{C_i} \cdot \sin \theta^{C_i}) \\ h_{S_{i+1}}^{C_i} = k_{S_{i+1}}^{C_i} (\Delta y_{S_{i+1}} - \Delta y^{C_i} - d_{S_{i+1}}^{C_i} \cdot \sin \theta^{C_i}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 上标“C”为双头相机编号;下标“M”,“S”为标志点编号; h 为合作标志在相机图像中的位移量; Δy 为标志点的位移量; θ 为双头相机的俯仰角变化

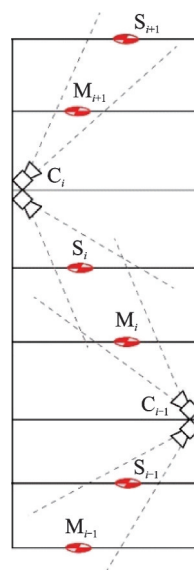


图1 内部摄像法测量结构位移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structural displacement measured by internal videometric method

量; d 为双头相机与合作标志之间的距离, k 为图像对标志的放大倍数, d 和 k 的数值可通过标定得到。

式(1)可列出 $4n$ 个方程, 存在 $4n+2$ 个未知数,

$$\begin{bmatrix} \Delta y_{C_1} \sin \theta^{C_1} & \Delta y_{M_2} & \Delta y_{S_2} & \cdots & \Delta y_{C_{n-1}} \sin \theta^{C_{n-1}} & \Delta y_{M_n} & \Delta y_{S_n} \end{bmatrix}^T = N h \quad (2a)$$

$$N = \begin{bmatrix} -k_{M_2}^{C_1} & -k_{M_1}^{C_1} d_{M_1}^{C_1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -k_{S_1}^{C_1} & -k_{S_1}^{C_1} d_{S_1}^{C_1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -k_{M_2}^{C_1} & k_{M_2}^{C_1} d_{M_2}^{C_1} & k_{M_2}^{C_1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -k_{S_2}^{C_1} & k_{S_2}^{C_1} d_{S_2}^{C_1} & 0 & k_{S_2}^{C_1} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_{M_n}^{C_{n-1}} & k_{M_n}^{C_{n-1}} d_{M_n}^{C_{n-1}} & k_{M_n}^{C_{n-1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_{S_n}^{C_{n-1}} & k_{S_n}^{C_{n-1}} d_{S_n}^{C_{n-1}} & 0 & k_{S_n}^{C_{n-1}} \end{bmatrix}^{-1}, h = \begin{bmatrix} h_{M_1}^{C_1} \\ h_{S_1}^{C_1} \\ h_{M_2}^{C_1} \\ h_{S_2}^{C_1} \\ \vdots \\ h_{M_n}^{C_{n-1}} \\ h_{S_n}^{C_{n-1}} \end{bmatrix}.$$

标志点的位移可写为:

$$\begin{bmatrix} \Delta y_{M_2} \\ \Delta y_{S_2} \\ \vdots \\ \Delta y_{M_n} \\ \Delta y_{S_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} N h = v N h \quad (2b)$$

式中 $v \in \mathbf{R}^{2(n-1) \times 4(n-1)}$; $N \in \mathbf{R}^{4(n-1) \times 4(n-1)}$; $h \in \mathbf{R}^{4(n-1) \times 1}$ 。

假设结构有 a 个自由度, 需要布置 b 个观测点, 由式(2)可知, 需要 $b/2$ 个双头相机, 基于上述摄像测量原理测到的标志位移向量为 X_{sr} , 那么有:

$$X_{sr} = v_b N h \quad (3)$$

式中 $v_b \in \mathbf{R}^{b \times 2b}$; $N \in \mathbf{R}^{2b \times 2b}$; $h \in \mathbf{R}^{2b \times 1}$ 。

式(3)即是主动控制中的输出方程, 由于输出量 X_{sr} 为位移, 故称为位移观测器。

位移传递摄像测量法需要将图像信号转换为数值信号, 因此会在雨天、大雪天等不利环境下产生噪声影响, 可根据噪声的先验信息采用自适应滤波或者卡尔曼滤波等方法进行滤波处理。

2 高塔结构的简化和降维

为了提高控制效率, 在设计结构的主动振动控制策略时, 有必要将结构模型进行一系列简化。本节首先提取原有限元模型在其中一个方向的质量和刚度矩阵, 将三维有限元模型简化为平面串联质点模型, 然后采用平衡截断技术由物理空间转化到均衡空间, 进一步对质点模型降维建立低维控制器。三维有限元模型、平面质点模型和降维之后的质点模型的低阶动力特性基本一致。

如果有两个及以上已知量, 那么方程组可解。假设 Δy_{M_i} 和 Δy_{S_i} 为稳定点, $\Delta y_{M_i} = \Delta y_{S_i} = 0$, 方程(1)可写为如下形式:

2.1 有限元模型简化

以某施工状态的一个高塔结构(高 711.36 m)为例, 对多维模型进行降维分析。对图 2 所示的结构有限元模型进行模态分析, 给出结构前 9 阶模态参数如表 1 所示, 可以看出, 该塔结构高, 扭转响应小, 以水平振动为主。为说明本文方法, 在主动控制简化模型中, 只考虑结构的 z 向来进行主动减振控制研究。

图 3 为平面串联质点模型, 其质量矩阵为对角矩阵, 取 ANSYS 模型对应节点的上、下节段各一半质量, 采用柔度法可得到结构的柔度矩阵, 对其求逆即可得到刚度矩阵。由表 1 可知, 有限元模型 z 向前 4 阶模态累计质量参与系数已经达到了 92.1%, 据此图 4 给出了质点模型与有限元模型前 4 阶模态振型对比, 可以看出, 前 4 阶模态振型基本吻合, 平面质点模型能够较好地反映原有限元模型 z 向的动力特性。

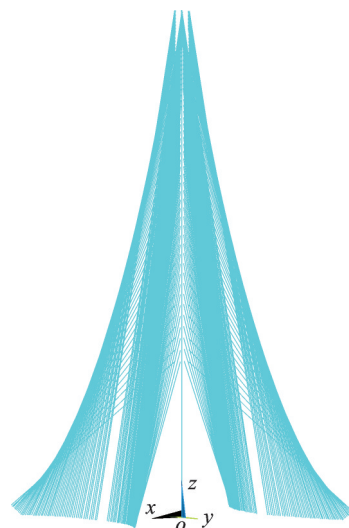


图 2 三维有限元模型

Fig. 2 3D finite element model

表 1 有限元模型前 9 阶模态参数

Tab. 1 The first nine order modal parameters of finite element model

模态阶数	频率/Hz	周期/s	z向累计质量参与系数	振型描述
1	0.065	15.38	0.560	z向1阶平动
2	0.084	11.90	0.560	x向1阶平动
3	0.216	4.63	0.818	z向2阶平动
4	0.218	4.59	0.818	x向2阶平动
5	0.569	1.76	0.818	x向3阶平动
6	0.574	1.74	0.885	z向3阶平动
7	0.882	1.13	0.885	塔体1阶扭转
8	1.113	0.90	0.885	x向4阶平动
9	1.123	0.89	0.921	z向4阶平动

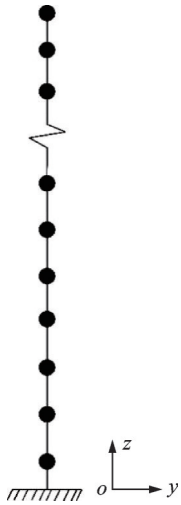


图 3 平面串联质点模型

Fig. 3 Particle model in series

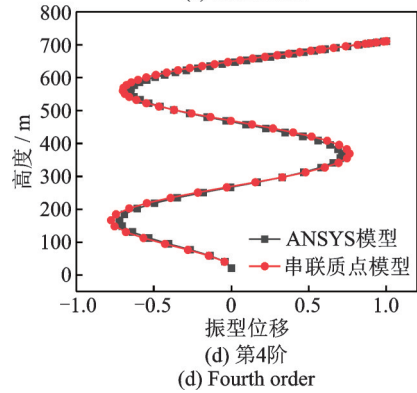
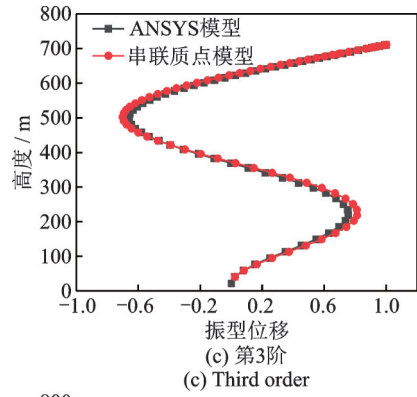
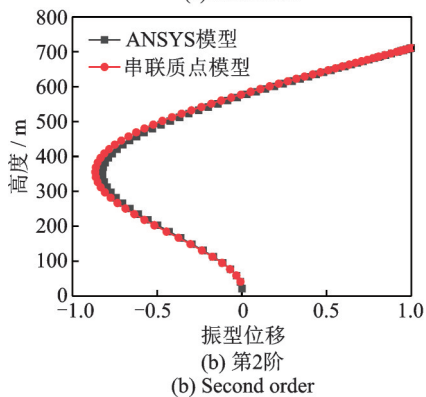
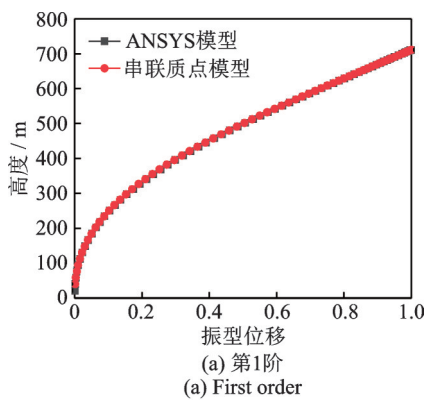


图 4 前 4 阶模态振型对比

Fig. 4 Comparison of the first four order modes

2.2 质点模型转化为均衡空间的低维模型

实际工程中结构简化之后自由度数仍然较多,如果直接用原结构来进行控制器设计,会导致控制器的计算时间过长,进而产生较大的时滞,导致所需要的控制力增大,控制效果降低。过大的时滞还有可能使结构响应发散,控制力单幅增大。因此需要对模型进行降维处理以方便控制器的设计,提高控制效果。

对于结构主动控制系统,需要按照状态空间的形式设计控制器,实时计算出结构所需要的控制力,从而传达给作动器对结构做出控制。对该高塔结构来说,在不考虑减振装置的情况下,结构模型在状态空间模型的阶数仍然有 134 个,模型的阶数比较高,因此需要进一步对简化模型进行降维。本节采用平衡截断法对简化模型进行降维。

2.2.1 平衡截断法的基本理论

假设线性定常控制系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + EF \\ X_p = CX \end{cases} \quad (4)$$

式中 X 为 $2a$ 维状态向量; U 为 m 维控制输入向量,且 $U = -GX_{sr}$, 其中 G 为 $m \times p$ 维矩阵; F 为 f 维外激励荷载向量; X_p 为输出状态向量,是 p 维向量,且 $X_p = [X_{sr} \ \dot{X}_{sr}]^T$; A 为 $2a \times 2a$ 维状态矩阵; C 为 $p \times 2a$ 维输出矩阵,且 $p \leq 2a$; B, E 分别为 $2a \times m, 2a \times f$ 维作用位置矩阵。

上述系统的能控性矩阵 W_c 和能观性矩阵 W_o 分

别为:

$$\begin{cases} W_r(0, t_f) = \int_0^{t_f} e^{\tau A} B B^T e^{\tau A^T} d\tau \\ W_o(0, t_f) = \int_0^{t_f} e^{\tau A^T} C C^T e^{\tau A} d\tau \end{cases} \quad (5)$$

其中, t_f 表示大于0的时间常数, 能控性矩阵 W_r 和能观性矩阵 W_o 分别为以下李雅普诺夫方程的解:

$$\begin{cases} A W_r + W_r A^T + B B^T = 0 \\ A^T W_o + W_o A + C^T C = 0 \end{cases} \quad (6)$$

对上述控制系统进行坐标变换 $X = TZ$, 可以得到特征值不变的均衡系统, 其中 T 为非奇异矩阵, 代入式(4)中可以得到如下均衡系统:

$$\begin{cases} \dot{Z} = A_b Z + B_b U + E_b F \\ Y = C_b Z \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$A_b = T^{-1} A T; B_b = T^{-1} B; E_b = T^{-1} E; C_b = C T.$$

根据文献[20]计算变换矩阵 T 的方法, 有如下公式:

$$\begin{cases} T = L_r V \Lambda^{-1/2} \\ T^{-1} = \Lambda^{-1/2} S^T L_o^T \end{cases} \quad (8)$$

式中 L_r 和 L_o 分别为矩阵 W_r 和 W_o 经 Cholesky 分解得到的下三角矩阵, 即 $W_r = L_r L_r^T, W_o = L_o L_o^T$; S, V, Λ 分别通过对下三角矩阵的乘积进行奇异值分解得到, 即 $L_o^T L_r = S \Lambda V^T$, 另外, $\Lambda = \sigma_i(L_r^T L_o) = \lambda_i^{1/2}((L_r^T L_o)^T (L_r^T L_o)) = \lambda_i^{1/2}(L_r^T L_r L_o L_o^T) = \lambda_i^{1/2} \cdot (W_r W_o)$, 其中, σ_i 为表征系统状态可控性与可观性的特征值, 为大于0的实数; $\lambda_i^{1/2}$ 表示特征值的平方根。

均衡系统中的状态变量按照特征值 σ_i 由大到小排列, 特征值的大小反映了系统状态的综合可控、可观性。均衡截断法即把均衡系统中较小特征值(对应结构较高模态频率)对应的状态向量舍弃掉, 只保留前 r 阶对系统输入、输出影响较大的状态向量。现考虑所有的系统状态向量, 并将均衡系统写成分块矩阵形式, 原均衡系统(7)可以写为:

$$\begin{cases} \begin{cases} \dot{Z}_r \\ \dot{Z}_l \end{cases} = \begin{cases} A_{b11} & A_{b12} \\ A_{b21} & A_{b22} \end{cases} \begin{cases} Z_r \\ Z_l \end{cases} + \begin{cases} B_{br} \\ B_{bl} \end{cases} U + \begin{cases} E_{br} \\ E_{bl} \end{cases} F \\ Y = \begin{cases} C_{br} & C_{bl} \end{cases} \begin{cases} Z_r \\ Z_l \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中 Z_r 为保留的状态; Z_l 为舍弃的状态。

如果直接去掉式(9)第一式的第二行, 降维模型可以写为:

$$\begin{cases} \dot{Z}_r = A_{b11} Z_r + B_{br} U + E_{br} F \\ Y_b = C_{br} Z_r \end{cases} \quad (10)$$

为了尽可能多地考虑被舍弃的状态向量 Z_l 的影响, 可以将式(9)的第一式改写为:

$$\begin{cases} \dot{Z}_r \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} A_{b11} & A_{b12} \\ A_{b21} & A_{b22} \end{cases} \begin{cases} Z_r \\ Z_l \end{cases} + \begin{cases} B_{br} \\ B_{bl} \end{cases} U + \begin{cases} E_{br} \\ E_{bl} \end{cases} F \quad (11)$$

进而可以得到所谓考虑残差的降维模型:

$$\begin{cases} \dot{Z}_r = \tilde{A}_{br} Z_r + \tilde{B}_{br} U + \tilde{E}_{br} F \\ Y_b = \tilde{C}_{br} Z_r + \tilde{D}_{br} U + \tilde{F}_{br} F \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\tilde{A}_{br} = A_{b11} - A_{b12} A_{b22}^{-1} A_{b21}; \tilde{B}_{br} = B_{br} - A_{b12} A_{b22}^{-1} B_{bl}; \tilde{E}_{br} = E_{br} - A_{b12} A_{b22}^{-1} E_{bl}; \tilde{C}_{br} = C_{br} - C_{bl} A_{b22}^{-1} A_{b21}; \tilde{D}_{br} = -\tilde{C}_{bl} A_{b22}^{-1} B_{bl}; \tilde{F}_{br} = -C_{bl} A_{b22}^{-1} E_{bl}.$

2.2.2 模型降维

分析式(8)中的非奇异变换矩阵 T , 可以发现矩阵第1和第2列包含了1阶模态信息, 包含1阶模态振型位移和1阶模态振型速度, 以此类推, 矩阵 T 第 i (i 为奇数) 和第 $i+1$ 列包含了原结构第 $(i+1)/2$ 阶模态。图5给出了矩阵 T 前4列归一化之后的结果。从图5中可以看出: 前4列包含了原结构第1和第2阶模态信息。

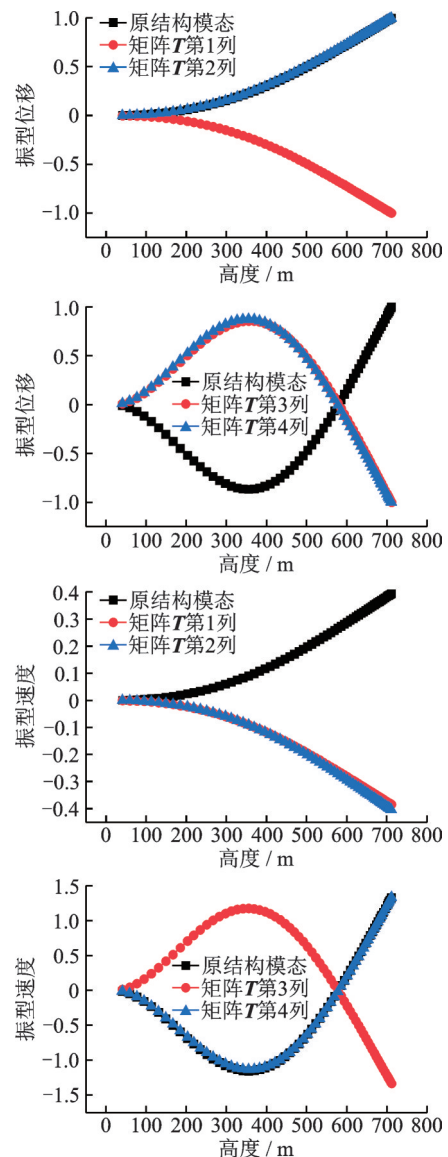
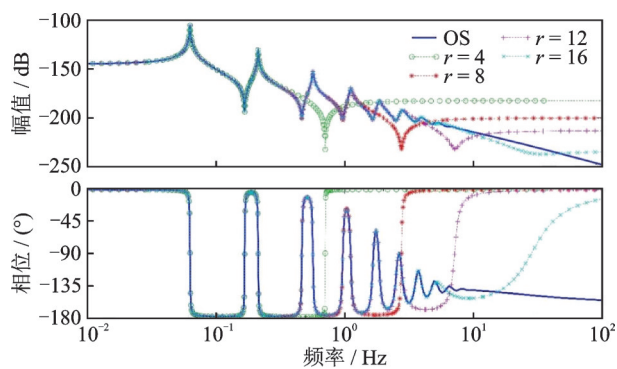


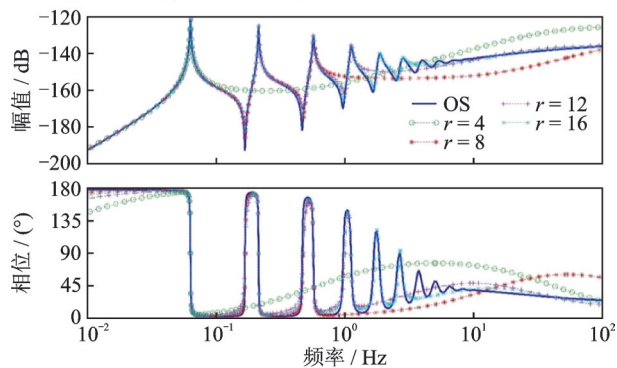
图5 T 矩阵信息图

Fig. 5 Information diagrams of T -matrix

图 6 给出了保留不同维数时顶层位移和加速度传递函数与原系统(OS)的接近程度。从图 6 中可以看出:随着 r 的增大,曲线重合得越多,说明保留的维数越高,传递函数越接近原系统,动力特性保留得越完整。但是维数过高则没有达到降维的目的,控制器计算过程仍然很慢,因此在满足精度要求的前提下要适当地设计保留维数。



(a) Curves of displacement transfer function



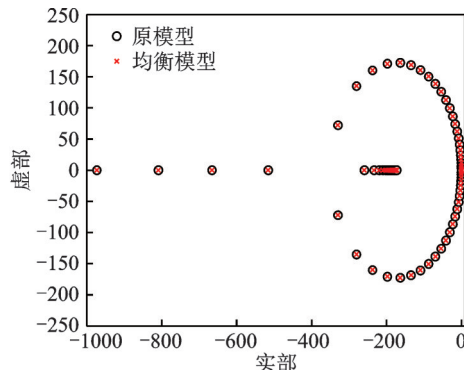
(b) Curves of acceleration transfer function

图 6 原模型和低维模型顶层位移和加速度传递函数对比
Fig. 6 Comparison of transfer functions of top-level displacement and acceleration of original model and low-dimension model

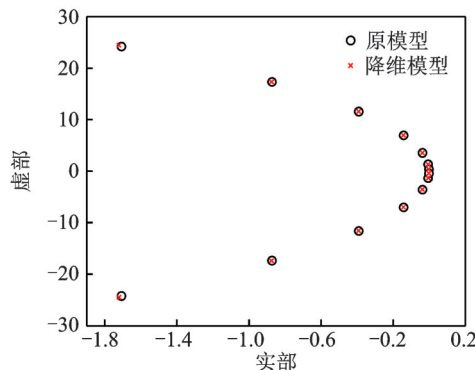
采用平衡截断法进行降维之后,给出原模型(134 维)和降维模型的极点对比如图 7 所示。可以看出,对模型进行非奇异变换之后形成的均衡模型极点保持不变;降维之后的低维模型可以很好地保留原模型前 7 阶的振型信息,而质点模型前 7 阶振型质量参与系数达到 95.3%,因此在之后的计算中将质点模型保留 14 维。从图 6 中可以看出,在 0~4 Hz 内,位移传递函数和原模型基本重合,加速度传递函数偏差很小。

3 基于 LQR 控制算法和 AMD 设计低维模型控制器

以施工状态的某高塔结构为背景,设计多点反



(a) 原模型与均衡模型极点对比
(a) Comparison of poles between original model and equilibrium model



(b) 原模型与降维模型前 7 对极点对比
(b) Comparison of the first seven pairs of poles between original model and low-dimension model

图 7 极点对比图

Fig. 7 Comparison of poles

馈、单点控制的 AMD 控制系统,在此基础上进行低维控制器的仿真,本文只验证降维控制器的有效性,为了计算方便,只选择一个方向进行控制。如图 8 所示,整个 AMD 系统位于标高为 711.36 m 的楼面,作用在结构的 y 轴方向,由质量块、作动器、导轨、弹簧、限位器和其他必要的装置组成。

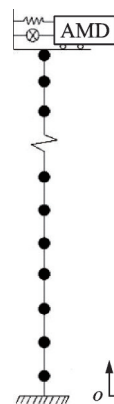


图 8 AMD 布置示意图

Fig. 8 Layout schematic diagram of AMD

由于高塔还在施工阶段,首先可以对施工阶段的结构进行过程仿真,得到结构动力参数随施工度的变化关系;也可以在不同施工阶段对结构动力特性参数进行测试、识别,根据识别的结构参数对结

构模型进行修正。上述两种方法均可得到施工阶段的模型参数,进而得到随施工阶段变化的作动器增益矩阵,用于振动控制算法。

3.1 线性二次型LQR的基本原理

土木工程结构的振动控制总是可以看作无限域上的行为,所以无限域时间区间 $[0, \infty)$ 的二次型最优控制是结构振动主动控制的理论基础。对于线性定常状态系统(4),选择半正定对称加权矩阵 Q 和 R ,构造二次型性能控制指标:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [X^T(t)QX(t) + U^T(t)RT(t)] dt \quad (13)$$

那么满足使 J 极小的最优控制向量 $U(t)$ 存在且唯一,由下式决定:

$$U(t) = -GX = -R^{-1}B^T PX(t) \quad (14)$$

其中,矩阵 P 为如下黎卡提方程的解:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (15)$$

3.2 基于LQR理论的低维控制器设计

降维过程的首要要求是精度,要求降维模型的特性与实际受控对象的特性近似度高,但仅仅满足精度要求,对于以主动控制为目的的降维来说是不够的。因为实际工程中存在这样一种情况:用精度好的降维模型设计出的控制器作用于受控对象时的控制性能,并不优于用精度稍差的降维模型设计出的控制器。因此还需考虑在降维的同时进行控制器的设计。低维模型的控制器设计有两种选择,第一种是直接对降维的低维模型进行控制器设计,第二种是对原结构进行控制器设计之后,采用平衡降维技术对整个闭环系统进行降维。

3.2.1 第一种控制器设计方法

基于如式(12)所示的降维模型,根据LQR算法(14)设计的低维模型控制器为:

$$U_r = -R_{br}^{-1} B_{br}^T P_{br} Z_r \quad (16)$$

由于状态 Z_r 是均衡系统下的状态,并没有实际的物理意义,必须进行如下变换与真实的状态建立联系:

$$\begin{bmatrix} Z_r \\ Z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}^{-1} & T_{12}^{-1} \\ T_{21}^{-1} & T_{22}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_l \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中 X_r 为前 r 个真实状态; X_l 为后 l 个真实状态。

将式(17)重新改写为如下形式:

$$\begin{bmatrix} Z_r \\ Z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{rr} & T_{rl} \\ T_{lr} & T_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{r'} \\ X_{l'} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(18)中的矩阵 T 是在考虑实际布置的观测点位置之后由式(17)中的 T 重排得到的。令 $Z_l=0$,并将式(3)代入式(18),有:

$$\begin{aligned} Z_r &= (T_{rr} - T_{rl} T_{ll}^{-1} T_{lr}) X_p = \\ & (T_{rr} - T_{rl} T_{ll}^{-1} T_{lr}) \begin{bmatrix} v_b N h \\ v_b N \dot{h} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

将式(19)代入式(16),便可以得到低维模型控制器:

$$U_r = -R_{br}^{-1} B_{br}^T P_{br} (T_{rr} - T_{rl} T_{ll}^{-1} T_{lr}) \begin{bmatrix} v_b N h \\ v_b N \dot{h} \end{bmatrix} \quad (20)$$

3.2.2 第二种控制器设计方法

基于LQR算法(14)对原简化结构模型进行控制力设计,使用坐标变换 $X=TZ$ 后,均衡系统的控制力可以写为: $U(t) = -R^{-1}B^T PTX(t)$,然后对闭环的控制系统进行降维,控制器为:

$$\begin{aligned} U_r &= -(R^{-1}B^T PT)_{br} Z_r = \\ & -(R^{-1}B^T PT)_{br} (T_{rr} - T_{rl} T_{ll}^{-1} T_{lr}) \begin{bmatrix} v_b N h \\ v_b N \dot{h} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

由于在进行控制器设计之后再降维可能会截断AMD的信息,因此本文采用第一种控制器设计方法进行计算。

3.3 降维模型在外激励作用下的振动主动控制

取AMD的质量为第1阶模态质量的0.8%(1000 t),为了提高AMD运行的安全性,限制AMD的行程,设置AMD系统的刚度为20 kN/m。

取高塔结构振型较大处的位移和速度向量构造降维控制器的状态向量,速度向量可由位移向量经过滤波之后微分求得,因此本文在第8,16,21,32,38,42,67个质点高度处布置标志点采集位移信号,可分别在第18,35,50个质点高度处设置双头相机。此处之所以将速度向量加入构造低维控制器的状态向量中,是因为在计算过程中发现如果只有位移向量,那么式(19)中的转换矩阵 $T_{rr} - T_{rl} T_{ll}^{-1} T_{lr}$ 为病态矩阵,会导致控制系统极不稳定。

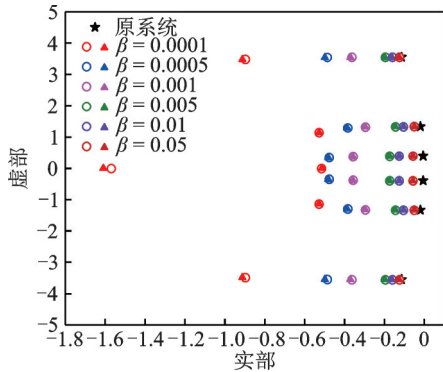
计算时假设结构的阻尼比为0.015,全维控制器采用的加权矩阵如下:

$$Q = \alpha \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}, R = \beta \quad (22)$$

式中 K 和 M 分别表示结构的刚度矩阵和质量矩阵。

结构的控制力只与 α/β 有关,只要两者比值相同,那么控制效果就相同。取 $\alpha=40000$ 和不同的 β 值,对比原系统、全维控制系统和降维控制系统的复模态特征值,可以发现主动控制主要改变前几阶频率和阻尼比。图9给出了不同 β 值情况下前3对极点的对比,图中横坐标为系统特征值的实部,表示角频率与阻尼比的乘积,纵坐标为系统特征值的虚部,表示角频率。

从图 9 中可以看出:(1)1 个 AMD 控制系统至少可以实现前 3 阶模态的控制;(2) β 值较小时,主动控制力同时改变了结构的模态频率和阻尼比,且阻尼比增加很大,意味着需要很大的能量输入;(3)随着 β 值的增加,模态阻尼比增加幅度减小,结构的模态频率不再发生变化,主动控制力主要以阻尼力的形式作用在结构;(4) β 值越小,附加阻尼比越大,意味着需要更大的输入能量,因此要调整 β 值,使输入能量不过大的情况下仍然能有预期的减振效果。



注:○表示全维控制系统;▲表示低维控制系统。

图 9 极点对比图

Fig. 9 Comparison of poles

3.3.1 脉动风荷载激励

脉动风实际上是空气的三维紊流,它包括顺风向、横风向和垂直向的紊流。为了方便计算,本文只考虑顺风向紊流的影响。空间上某一点的顺风向脉动风速谱采用 Kaimal 谱形式。

结合《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[27] 中的体型系数 μ_{st} , 可得到不同高度节点上的风荷载为:

$$F_i(t) = 0.5\rho\mu_{st}V_i^2A_i + \rho\mu_{st}\bar{V}V_iA_i; i = 1, 2, \dots \quad (23)$$

式中 μ_{st} 为塔的体型系数; ρ 为空气密度; V_i 为各加载点的脉动风速; \bar{V} 为各加载点的平均风速; A_i 为迎风面积。

计算时,体型系数取为 0.55, 10 m 高度处的平均风速为 30.5 m/s。地面粗糙度选用 A 类, A 类地貌的高度为 300 m, 当达到梯度风高度之后可认为风速不变, 300 m 以内按照指数率计算。

根据强风时的观察表明, 一阵阵风的作用在结构的迎风面上各点处的风速和风向并不是完全同步的, 有的甚至是几乎无关的, 因此对于建筑结构上的脉动风压必须研究其空间相关性。一般来讲, 考虑到建筑结构前后风压的相关性比较复杂, 从安全的角度认为结构前后的脉动风压是完全相关的, 主要研究脉动风压的上下和左右相关性。

关于脉动风压频率域的相关性系数即相干函数的具体表达式形式很多, 从实用、简单的角度出发,

通常用到的是只与两点间距离有关的 Shiotani 等^[28] 在试验基础上获得的公式:

$$\begin{cases} \rho_y(y, y') = \exp\left(-\frac{|y - y'|}{L_y}\right) \\ \rho_z(z, z') = \exp\left(-\frac{|z - z'|}{L_z}\right) \end{cases} \quad (24)$$

式中 $\rho_z(z, z')$ 和 $\rho_y(y, y')$ 分别表示垂直和水平方向脉动风压的相干系数; $z - z'$ 和 $y - y'$ 分别表示垂直和水平方向两点间的距离; 一般来讲, L_y 取为 50, L_z 取为 60。

对于迪拜塔, 横向尺寸比竖向尺寸小很多, 因此仅考虑脉动风荷载竖向的相关性。采用谐波合成法进行结构各主要点的脉动风速合成。图 10 和 11 分别为仿真得到的脉动风速时程曲线和理论风速谱与模拟风速谱的对比。从图 11 中可以看出, 模拟的风速谱与 Kaimal 谱吻合较好。图 12 为得到的风荷载时程曲线。得到每个节点上的风荷载曲线之后, 分别计算结构在无控、全维控制器和低维控制器作用下的位移和加速度响应, 计算过程中取 $\alpha = 40000$, $\beta = 0.01$ 。全维控制器和低维控制器的模拟运行时间分别为 1.70 和 0.42 s, 可见降维能够缩短控制力计算时间。被控结构顶层响应如图 13 和 14 所示。

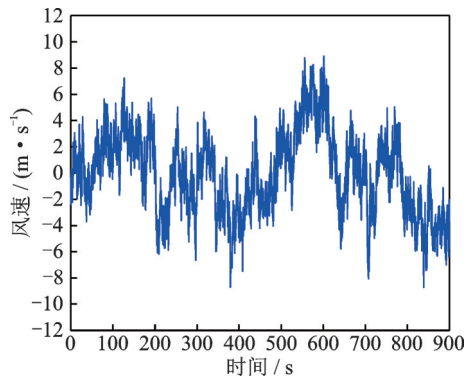


图 10 707.5 m 处 10 年一遇的脉动风速时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of fluctuating wind speed once in ten years at 707.5 m

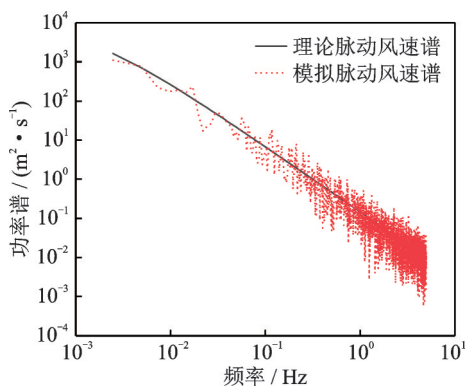


图 11 707.5 m 处理论和模拟风速谱对比

Fig. 11 Comparison of theoretical and simulated wind speed spectra at 707.5 m

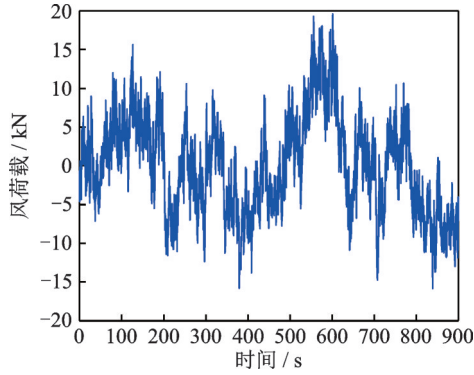
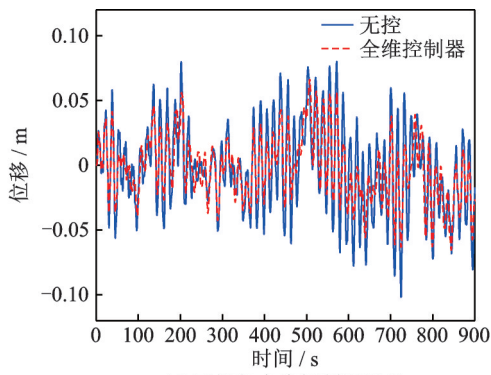


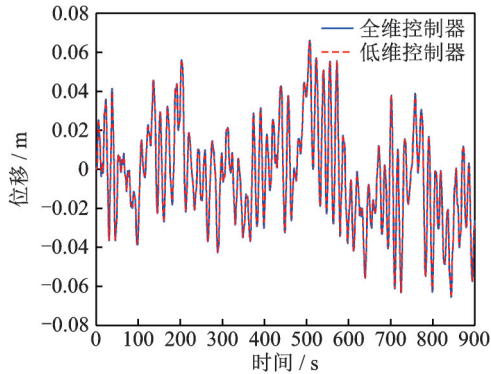
图 12 707.5 m 处 10 年一遇的脉动风荷载时程曲线

Fig. 12 Time-history curve of fluctuating wind load once in ten years at 707.5 m



(a) 无控与全维控制器对比

(a) Comparison between uncontrolled and full-dimension controller



(b) 全维与低维控制器对比

(b) Comparison between full-dimension and low-dimension controller

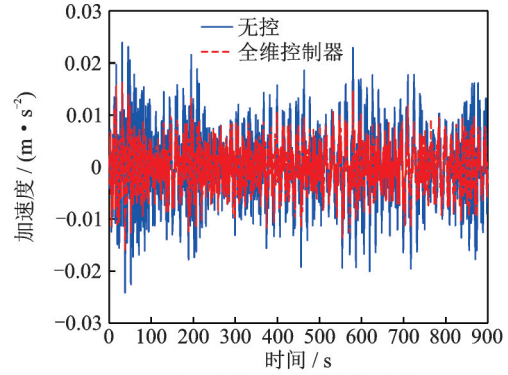
图 13 脉动风作用下结构的位移曲线

Fig. 13 Displacement curves of structure under fluctuating wind

从图 13~17 中可以看出:

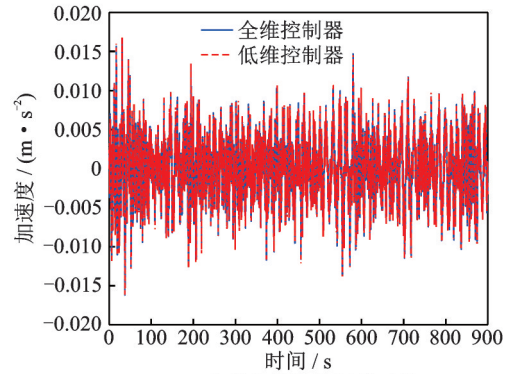
(1) 基于低维模型设计的控制器与全维控制器相比,计算得到的结构响应和主动控制力基本一致,在不考虑时滞的情况下,低维控制器能够较好地控制外激励荷载作用下的动态响应。

(2) 低维控制器能够较好地控制顶层位移响应;无控状态下结构的顶层位移峰值和均方值分别为 0.102 m, 0.034 m;低维控制作用下顶层位移峰值和均方值分别为 0.066 m, 0.025 m;控制效果分别为 35.3% 和 26.5%。



(a) 无控与全维控制器对比

(a) Comparison between uncontrolled and full-dimension controller



(b) 全维与低维控制器对比

(b) Comparison between full-dimension and low-dimension controller

图 14 脉动风作用下结构的加速度曲线

Fig. 14 Acceleration curves of structure under fluctuating wind

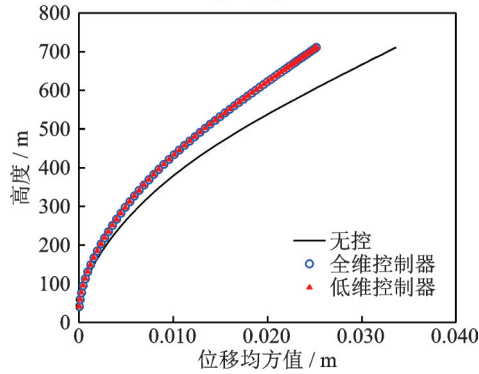
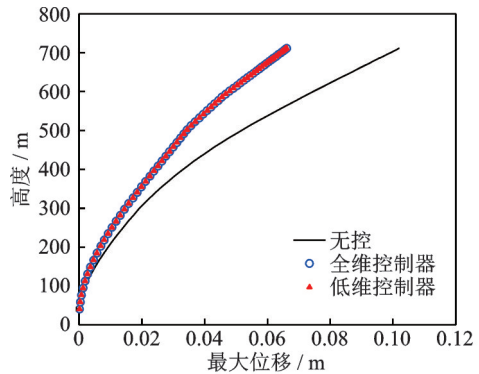


图 15 位移响应随结构高度的变化

Fig. 15 Variation of displacement response with structure height

(3) 无控状态下,顶层结构在风荷载作用下的加速度最大值为 0.024 m/s²,在低维控制器作用下的

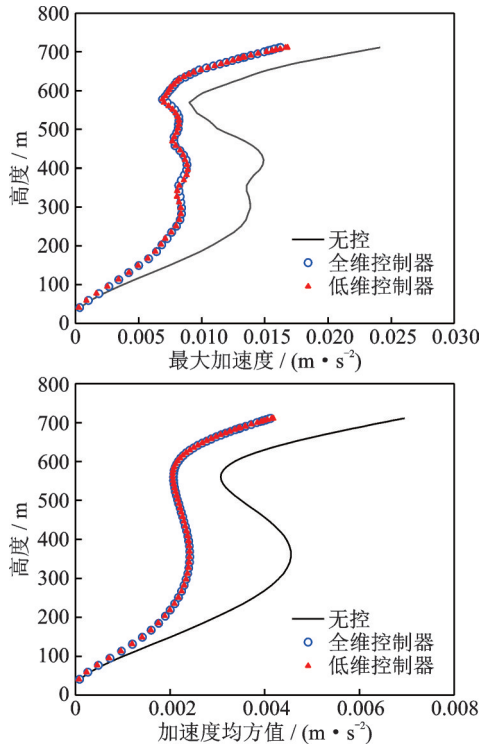


图 16 加速度响应随结构高度的变化

Fig. 16 Variation of acceleration response with structure height

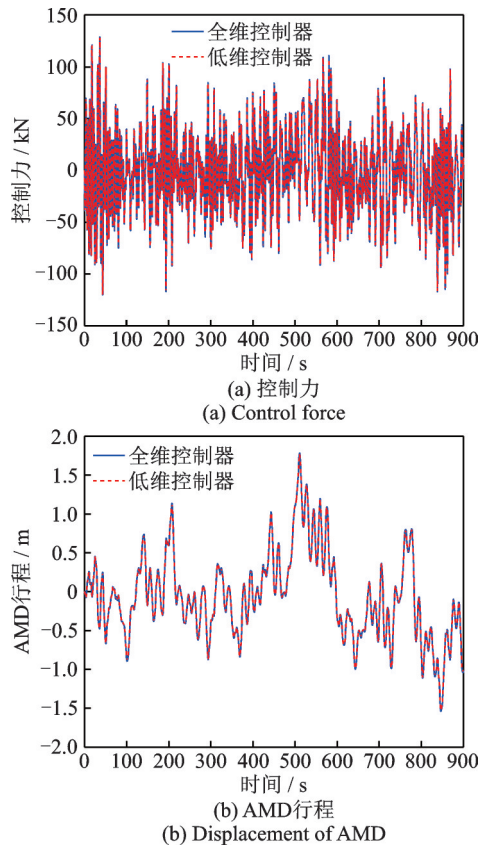


图 17 全维与低维控制系统作用下控制参数的对比

Fig. 17 Comparison of control parameters under the full-dimension and low-dimension control systems

加速度最大值为 0.017 m/s^2 , 控制效果为 29.2% , 加速度均方值由 0.007 降为 0.004 m/s^2 , 控制效果为

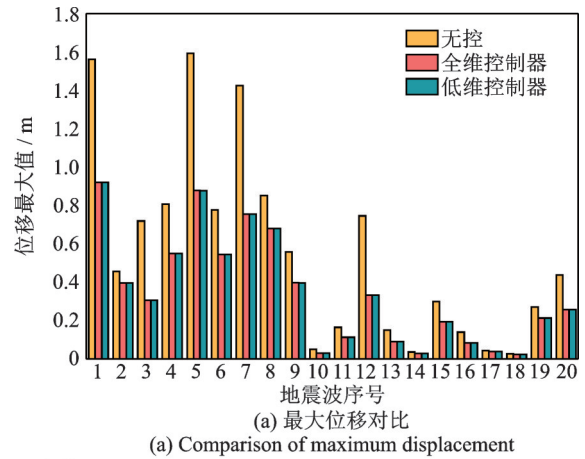
42.9% 。

(4) 施工状态下风致振动的最大控制力不超过 170 kN , AMD 最大行程不超过 2 m 。

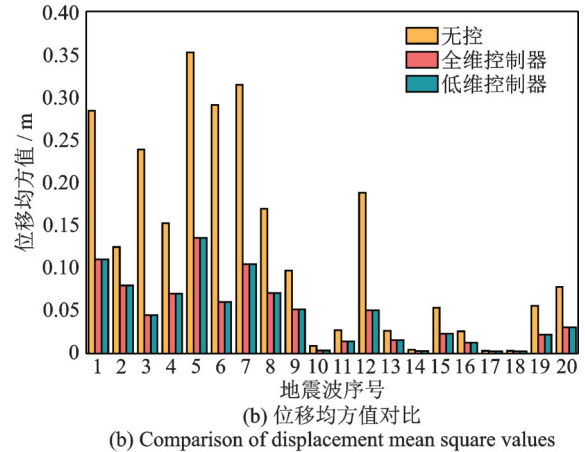
(5) 本文设计的 AMD 实现了较为理想的控制效果。在实际工程中, 从经济角度考虑, 在满足减振需求的前提下还可进一步降低 AMD 的质量。

3.3.2 地震荷载激励

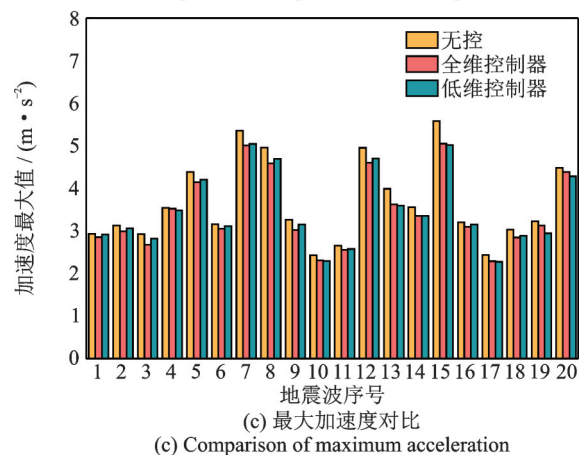
为了进一步验证降维控制器的有效性, 计算了不同地震作用下的结构响应, 从美国伯克利大学太平洋地震工程研究中心随机选取 20 条地震波进行试算, 地震波的基本信息如表 2 所示。对地震波加速度进行比例调整, 使峰值均为 $0.3g$ 。取 $\beta=0.005$, 图 18 为不同地震波作用下响应的柱状图。



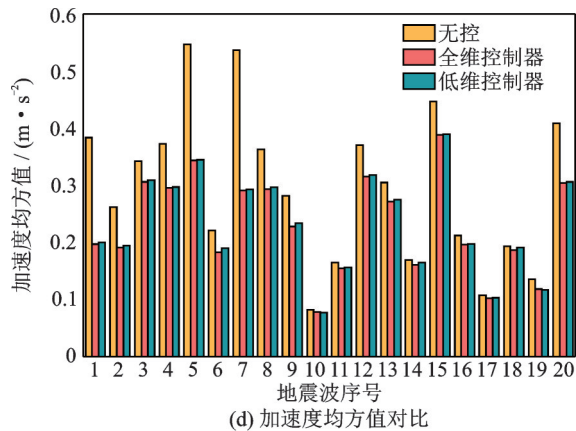
(a) Comparison of maximum displacement



(b) Comparison of displacement mean square values



(c) Comparison of maximum acceleration



(d) Comparison of acceleration mean square values

图18 地震作用下响应柱状图

Fig. 18 Response histograms under earthquake action

从图18中可以看出:

(1) 基于LQR算法设计的降维控制器性能稳

定,与全维控制器控制效果相当,两种控制器作用下的位移响应基本一致,加速度响应略有差异。

(2) 地震波作用下,控制器对位移的控制效果优于对加速度的控制效果,对均方值的控制效果优于对峰值的控制效果;在第5条地震波作用下,无控状态下的结构顶层位移最大,为1.593 m,控制器对位移峰值和均方值的控制效果分别为44.87%和61.61%;第3条地震波作用下,控制器对位移峰值的控制效果最好,为57.56%,同时控制器对位移均方值的控制效果最好,为81.23%。

(3) 对加速度峰值的最佳控制效果为10.08%;在第1条地震波作用下,加速度均方值控制效果达到了47.77%,说明AMD主动控制对地震控制效果明显大于TMD被动控制,后者对抗震可能存在不利影响。

表2 地震波基本信息

Tab. 2 Basic information of seismic waves

序号	年份	地震事件	观测站	震级	机制
1	1979	Imperial Valley-06	Calipatria Fire Station	6.53	strike slip
2	1987	Superstition Hills-02	El Centro Imp. Co. Cent	6.54	strike slip
3	1992	Landers	Desert Hot Springs	7.28	strike slip
4	1966	Parkfield	Cholame-Shandon Array 12 [#]	6.19	strike slip
5	1968	Borrego Mtn	El Centro Array 9 [#]	6.63	strike slip
6	1971	San Fernando	Whittier Narrows Dam	6.61	Reverse
7	1980	Victoria, Mexico	Chihuahua	6.33	strike slip
8	1980	Irpinia, Italy-01	Bagnoli Irpinio	6.90	Normal
9	1978	Tabas	Tabas	7.35	Reverse
10	1935	Helena, Montana-01	Carroll College	6.00	strike slip
11	1992	Cape Mendocino	Petrolia	7.01	Reverse
12	1999	Kocaeli, Turkey	Izmit	7.51	strike slip
13	1940	Imperial Valley-02	El Centro Array 9 [#]	6.95	strike slip
14	1974	Hollister-03	Hollister City Hall	5.14	strike slip
15	1983	Coalinga-01	Parkfield-Vineyard Cany 6W	6.36	Reverse
16	1986	Chalfant Valley-02	Mammoth Lakes Sheriff Subst.	6.19	strike slip
17	1986	Kalamata, Greece-02	Kalamata (bsmt) (2nd trigger)	5.40	Normal
18	1987	Whittier Narrows-01	Newhall-W Pico Canyon Rd.	5.99	Reverse Oblique
19	1989	Loma Prieta	Gilroy Array 2 [#]	6.93	Reverse Oblique
20	1994	Northridge-01	LA-Pico & Sentous	6.69	Reverse

4 结论

本文结合摄像测量技术,考虑残差的均衡截断法和LQR控制算法,建立了一种直接采用位移输出的高塔结构低维控制器,针对某一高耸柔性结构的主动振动控制进行了理论和模拟分析,得到的主要结论有:

(1) 通过位移传递的摄像测量技术,可以实现结构状态的直接观测和实时识别,且测量精度可以达到毫米级别;在塔内观测,可提高抗环境干扰能力,并实现全天候实时连续观测,利用这一特点,建立了主动控制中的位移观测器;测量的结果可以直接作为反馈信号计算所需要的主动控制力,而不需通过加速度信号滤波、设计观测器等一系列操作对振动状态进行估计,从而提高了状态识别和控制的精度,

降低了状态识别计算时滞。

(2)采用柔度法提取刚度矩阵,将有限元模型简化成串联多自由度模型,只考虑 z 轴方向,简化的模型周期与原结构基本一致,前4阶模态振型可以很好地吻合,有效地简化了计算过程。

(3)用考虑残差的均衡截断法降维,低维系统不仅能够保留前几阶模态的局部信息,还能尽可能还原结构的全局动力特性。对本文中的高塔结构来说,前4阶振型 z 向累计质量参与系数已经达到92.1%,可以基本保留原结构的动力特性;对于低维系统,保留维数越多,位移和加速度的传递函数与原结构越吻合,低维控制效果越接近全维控制器的控制效果。

(4)基于线性二次型LQR控制算法设计的低维控制器,通过选定需要控制的少数几个模态,在塔内的底层、中间层、高层布置相应数量的测量相机和标志点,只观测标志点的位移状态便可以得到主动控制力,其减振效果与全状态反馈的全维控制器减振效果基本一致,可以应用于高塔结构的主动控制系统中。

参考文献:

- [1] Cao H, Reinhorn A M, Soong T T. Design of an active mass damper for a tall TV tower in Nanjing, China [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(3):134-143.
- [2] Chen C J, Li Z H, Teng J, et al. A variable gain state-feedback technique for an AMD control system with stroke limit and its application to a high-rise building[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2021, 30(1): e1816.
- [3] Soong T T, Reinhorn A M, Aizawa S, et al. Recent structural applications of active control technology [J]. *Journal of Structural Control*, 1994, 1(1-2):1-21.
- [4] Teng J, Xing H B, Xiao Y Q, et al. Design and implementation of AMD system for response control in tall buildings[J]. *Smart Structures and Systems*, 2014, 13(2):235-255.
- [5] 陈朝骏,李祚华,滕军,等.考虑CSI效应的AMD控制系统构建及其时变时滞补偿[J]. *振动工程学报*, 2018, 31(1):20-29.
Chen Chaojun, Li Zuohua, Teng Jun, et al. Establishment of AMD control system considering CSI effect and its time-varying delay compensation[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2018, 31(1):20-29.
- [6] Enriquez-Zárate J, Silva-Navarro G, Abundis-Fong H F. Active vibration suppression through positive acceleration feedback on a building-like structure: an experimental study[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 72-73:451-461.
- [7] Yang D H, Shin J H, Lee H W, et al. Active vibration control of structure by active mass damper and multi-modal negative acceleration feedback control algorithm [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 392:18-30.
- [8] Chen C J, Li Z H, Teng J, et al. An observer-based controller with a LMI-based filter against wind-induced motion for high-rise buildings[J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017:1427270.
- [9] Shang Y, Yu Q F, Yang Z, et al. Displacement and deformation measurement for large structures by camera network[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54:247-254.
- [10] Yu Q F, Shang Y, Guan B L, et al. Camera series and parallel networks for deformation measurements of large scale structures[C]//*Conference on Automated Visual Inspection and Machine Vision*. Munich, Germany: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2015.
- [11] Chu S Y, Soong T T, Lin C C, et al. Time-delay effect and compensation on direct output feedback controlled mass damper systems[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31(1):121-137.
- [12] Fridman E, Shaked U. An improved stabilization method for linear time-delay systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(11):1931-1937.
- [13] Qu Z Q, Shi Y M, Hua H X. A reduced order modeling technique for tall building with active tuned mass damper[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001, 30(3):349-362.
- [14] Cao Q, Zhang H, Sun Y X. A revised minimum information loss method for discrete-time model reduction [C]//*Proceedings of the 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. Dalian: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006: 1456-1460.
- [15] Chen C J, Teng J, Li Z H, et al. Model reduction techniques for high-rise buildings and its reduced-order controller with an improved BT method[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2021, 78(3):305-317.
- [16] Moore B. Principal component analysis in linear systems: controllability, observability, and model reduction[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1981, 26(1):17-32.
- [17] Fernando K V, Nicholson H. Minimality of SISO linear systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1982, 70(10): 1241-1242.
- [18] Glover K. All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems and their L^∞ -error bounds [J]. *International Journal of Control*, 1984, 39(6): 1115-1193.
- [19] Jonckheere E, Silverman L. A new set of invariants for

- linear systems—application to reduced order compensator design[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1983, 28(10):953-964.
- [20] Laub A, Heath M, Paige C, et al. Computation of balancing transformations and other applications of simultaneous diagonalization algorithms[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987, 32(2):115-122.
- [21] Xie Y, Zhao T, Cai G P. Model reduction and active control of flexible beam using internal balance technique[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2011, 32:1009-1018.
- [22] Li Z H, Chen C J, Teng J, et al. A reduced-order controller considering high-order modal information of high-rise buildings for AMD control system with time-delay[J]. Shock and Vibration, 2017, 2017:7435060.
- [23] 滕军, 陈朝骏, 幸厚冰, 等. 考虑结构高阶振型信息的AMD低维控制器设计[J]. 振动工程学报, 2016, 29(6):1048-1056.
- Teng Jun, Chen Chaojun, Xing Houbing, et al. AMD low-dimensional controller design considering structural high modes information[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(6):1048-1056.
- [24] 冯威武. 基于摄像的大型结构位移测量关键技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
- Feng Weiwu. Research on key techniques for large structure displacement measurement based on photogrammetry[D]. Shanghai: Shanghai University, 2021.
- [25] Yu Q F, Jiang G W, Shang Y, et al. A displacement-relay videometric method for surface subsidence surveillance in unstable areas[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58:1105-1111.
- [26] 于起峰, 尚洋, 伏思华, 等. 大型结构变形及形貌摄像测量技术研究进展[J]. 实验力学, 2011, 26(5):479-490.
- Yu Qifeng, Shang Yang, Fu Sihua, et al. Development of videometrics for large-scale structural deformation and topography measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):479-490.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [28] Shiotani M, Avai H. Lateral structure of gusts in high winds[C]//International Conference on the Wind Effect on Buildings and Structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1967: 535-555.

Active control system of high tower based on displacement observer inside tower and low-dimension controller in equilibrium space

WEN Xi-xi¹, ZHANG Hong-yi¹, CHEN Zheng-qing¹, HUA Xu-gang¹,
NIU Hua-wei¹, XU Zhao-dong²

(1. National Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The vibration of high-rise tower structure requires active control. However, the problem of direct displacement observation and high-efficient low-dimension control strategy under single point needs to be solved. In this paper, a set of real-time continuous observation method of displacement from the inside of the tower is established by using modern video metrics technology, which provides the most direct displacement observer for the active control of the high tower. It avoids the tedious calculation process of building an acceleration observer, and then combining with the assumed external load to calculate the displacement after filtering. By using the equilibrium system space transformation and the equilibrium truncation method, a low-dimension controller is established with AMD at the top of the tower, which can effectively preserve the main dynamic characteristics of the structure. Taking a 700-meter-high tower under construction as an example, the active control simulation analysis under wind-induced vibration and earthquake is carried out. The results show that the control effect of the low-dimension controller with a few displacement states as feedback is basically the same as that of the full-dimension controller based on full state feedback, which can be used as an active control strategy for high tower structures.

Key words: active control; displacement observer; equilibrium space; videometrics; low-dimension controller

作者简介: 文茜茜(1993—),女,博士研究生。Email: wenxx@hnu.edu.cn。

通讯作者: 张弘毅(1991—),男,博士,副教授。E-mail: zhyzzb25@hnu.edu.cn。