

# 基于固有模态的单层球面网壳减震控制

刘怡鹏, 罗永峰, 相 阳

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 简要介绍并总结了目前大跨度空间结构多重调频质量阻尼器(MTMD)减震控制的发展过程及研究现状. 建立了网壳结构 MTMD 减震控制系统动力学基本方程并进行解耦分析, 进而提出了基于控制特定的固有模态的单层球面网壳结构分布多重调频质量阻尼器(D-MTMD)减震设计方法与步骤. 建立了一个单层球面网壳数值模型, 分别考虑水平、竖向地震输入两类工况, 对不同震动控制方案的网壳采用 El Centro 波进行时程分析, 并对计算结果进行分析对比. 计算结果表明, 该减震控制方法可以有效减小结构地震响应. 同时, 根据数值计算结果, 总结提出了一些关于减震控制效果优化的建议.

**关键词:** 固有模态; 单层球面网壳; 分布多重调频质量阻尼器; 减震控制

**中图分类号:** TU393.3

**文献标志码:** A

## Seismic Vibration Control Analysis of Single Layer Spherical Reticulated Shell Based on the Natural Modes

LIU Yipeng, LUO Yongfeng, XIANG Yang

(College of Civil Engineering, Tongji university, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The developments and research status of seismic vibration control of long-span spatial structures using multiple tuned mass damper (MTMD) are introduced in this paper. The dynamic equation of reticulated shell with MTMD vibration control system is derived and solved. Based on controlling selected natural modes, the design procedure of distributed multiple tuned mass damper (D-MTMD) seismic control method of the single layer spherical reticulated shell is proposed. A numerical model of single layer reticulated shell is built. By the method of time-history analysis with "El Centro seismic waves", the dynamic responses of the reticulated shell structure equipped with different seismic vibration control schemes are computed, analysed and

compared under horizontal and vertical seismic excitations. The numerical results show that the proposed seismic vibration control method is efficient in reducing dynamic response of reticulated shell structures. Beyond that, some suggestions for seismic vibration control optimization design are summarized.

**Key words:** natural mode; single layer spherical reticulated shell; distributed multiple tuned mass dampers; seismic vibration control

虽然结构振动控制技术在土木工程中的应用研究已有近 40 年的历史, 但目前的研究主要集中在多、高层房屋及高耸结构中, 而在大跨空间结构的振动控制方面, 尤其在工程中的应用研究则较少, 目前尚处于起步阶段. 调频质量阻尼器(TMD)系统在高层及高耸结构振动控制中已被验证为经济有效的手段之一. 然而, 由于其控制频带窄、自振周期长、安装不便等特点<sup>[1-3]</sup>, 在大跨度空间结构中的应用仅仅停留在理论分析方面.

近年来, 国内外学者逐渐对 TMD 在大跨度空间结构振动控制的适用性进行研究. 叶继红等<sup>[4-5]</sup>利用 TMD 系统对各类网壳结构进行了振动控制分析研究, 提出了采用传递函数算法及非线性数学规划方法确定其最优控制参数. 胡继军等<sup>[6]</sup>将 TMD 应用于网壳的风振控制中, 利用提出的 TMD 影响函数, 优化了 TMD 系统中的一些参数, 并对控制模态的干扰问题进行了分析. 林勇建等<sup>[7]</sup>采用频域分析方法对柱面网壳进行了风振响应计算, 并对其采用多重调谐质量阻尼器(MTMD)减振控制进行了研究, 通过数值分析计算, 得到最优总质量比、阻尼比等参数. 唐柏鉴<sup>[8]</sup>提出了“振型分组、多组 MTMD 分别控制”的控制策略, 分析了频宽、阻尼比和质量比

收稿日期: 2015-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51378379)

第一作者: 刘怡鹏(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢结构. E-mail: liuyip12@126.com

通讯作者: 罗永峰(1957—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为钢结构. E-mail: yfluo93@tongji.edu.cn

的参数影响规律,并用时程分析法检验了该理论的准确性及其减震效果,并结合工程实例对大跨度屋盖结构 MTMD 减震控制进行研究,提出了网格屋盖结构竖向 MTMD 的振动控制方程。

日本学者对大跨度空间结构的 MTMD 减震系统已有较深入的研究,1996 年, Yamada<sup>[9]</sup>对网壳结构 TMD 振动控制进行了探索性研究,但研究模型比较简单,仅为两节点,自由度数量较少,局限性强。Yoshinaka 等<sup>[10]</sup>通过在大跨度空间结构中分别采用单 TMD 系统与多调频质量阻尼器(MTMD)系统进行了理论分析和数值计算,并对两者减震效率进行了分析对比。Tsuda 等<sup>[11]</sup>将理论用于实际,提出一种用于大跨度空间结构双向地震控制的振动控制装置 BD-TMD (Bi- Directional- TMD),并用数值方法进行了振动控制效果验算,得到了满意的效果。Yamakawa 等<sup>[12]</sup>则提出一种概率优化的方法来预估 MTMD 系统的具体布置参数,并验证了其有效性。总体来说,在大跨度网壳结构 TMD 振动控制方面研究相对较少,而且仅限于简单模型,对于 MTMD 在网壳结构中优化配置的方法尚没有一个最优配置方案。

本文根据大跨度网壳结构整体动力响应特性,建立多自由度 D-MTMD 减震控制系统动力学基本

方程,并对方程进行解耦及求解,进而提出一种基于控制结构固有模态的 D-MTMD 减震控制方案,同时,进行理论分析,进一步对该减震控制方案进行优化。最后,对一单层凯威特球面网壳数值算例进行分析,研究在水平及竖向地震荷载作用下,不同减震控制方案的控制效果,同时验证了本文减震控制方法的有效性及其减震效果。

## 1 大跨度网壳结构 MTMD 系统运动方程

目前,对于结构 MTMD 系统的理论研究,将结构简化为一单自由度体系,然后将单个 TMD 分为多个不同频率的小质量块,以降低单个 TMD 对地震反应频率的敏感性,组成集中多调频质量阻尼器(C-MTMD)系统<sup>[13]</sup>,对结构进行震动控制,如图 1a 所示。对于形态复杂的大跨度空间结构,由于自由度众多、频率分布密集、振型形态复杂,宜将多个 TMD 装置布置于空间结构的不同(特定)位置,组成 D-MTMD(分布调频质量阻尼器)系统<sup>[14]</sup>,如图 1b 所示。其中  $K_0, C_0$  为主结构的刚度和阻尼,  $K_{ti}, C_{ti}$  为第  $i$  个 TMD 的刚度和阻尼。

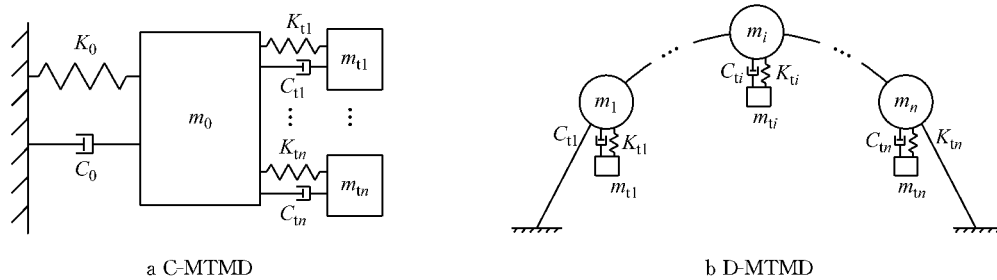


图 1 两类 MTMD 减震系统示意图

Fig.1 Two seismic vibration control systems

针对网壳结构 D-MTMD 减震控制系统,可建立结构运动学微分方程如下:

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = p_{\text{eff}} + p_{\text{tmd}} \quad (1)$$

式中:  $M, C$  和  $K$  分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $u, \dot{u}, \ddot{u}$  分别为结构节点位移、速度和加速度向量; 外荷载向量包括有效地震力  $p_{\text{eff}}$  和 TMD 作用力  $p_{\text{tmd}}$ , 具体表达式如下:

$$p_{\text{eff}} = -M \cdot I \cdot \ddot{u}_g \quad (2)$$

$$p_{\text{tmd}} = S \cdot [C_t (\dot{u}_t - S^T \cdot \dot{u}) + K_t (u_t - S^T u)] \quad (3)$$

同时,可列出 MTMD 的运动微分方程为

$$M_t (\ddot{u}_t - S^T \cdot \ddot{u}) + C_t (\dot{u}_t - S^T \cdot \dot{u}) + K_t (u_t - S^T \cdot u) = -M_t \cdot S^T \cdot \ddot{u} \quad (4)$$

式(2)~(4)中,  $M_t, C_t$  和  $K_t$  分别为 MTMD 的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,由于各 TMD 均独立运动,以上矩阵均为对角矩阵;  $u_t, \dot{u}_t, \ddot{u}_t$  分别为 MTMD 的位移、速度和加速度向量。

$S_{n \times m}$  为由 0 或 1 组成的 MTMD 位置矩阵,  $I_{1 \times n}$  为荷载分布行向量,在地震作用分析中,荷载分布与质量分布相同,故此处为单位向量,  $n$  为网壳自由度,  $m$  为 MTMD 自由度数,  $\ddot{u}_g$  为地震荷载向量。

由于结构固有振型的正交性,对式(1)利用  $u = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot q_i$  进行解耦,并结合式(2)~(4),可得:

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = (\varphi_j^T \cdot M \cdot I \cdot \ddot{u}_g - \varphi_j^T \cdot S \cdot$$

$$\mathbf{M}_t \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t) / M_j; j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$  分别为第  $j$  阶振型的广义坐标的位移、速度和加速度向量;  $\xi_j$  为第  $j$  阶振型阻尼比;  $\omega_j$  为第  $j$  阶振型圆频率;  $M_j$  为第  $j$  阶振型广义质量。

在线性条件下,由式(5)可知:

(1) 当没有 MTMD 控制时,结构的第  $j$  阶振型动力响应由广义力  $\boldsymbol{\varphi}_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{I} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_g$  引起,广义力的大小可看作振型分布  $\boldsymbol{\varphi}_j^T$  与荷载空间分布  $\mathbf{M} \cdot \mathbf{I} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_g$  的向量内积,即为两向量分布的相似程度,两者越接近,该振型引起的动力响应则越大<sup>[15]</sup>;

(2) 当设有 MTMD 控制后,式(5)右端中的第 2 项为原结构第  $j$  阶振型受到的 MTMD 的有效控制力  $\mathbf{F}_j^T$ ,它可分解为两项的乘积,如式(6)所示,其中第一个括号内的表达式可看做振型分布  $\boldsymbol{\varphi}_j^T$  与 MTMD 在原网壳自由度坐标系统中的质量分布  $\bar{\mathbf{m}}_t = \mathbf{S} \cdot \mathbf{M}_t \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t$  间的向量内积;第二个括号内的表达式可看作各个 TMD 加速度响应的代数和,由 TMD 控制原理,当单个 TMD 与整个网壳产生加速度共振时,即  $f_{\text{tmd}} = f_j$  时,各 TMD 动力响应最大,其中  $\mathbf{E}$  为单位向量;

$$\mathbf{F}_j^T = \boldsymbol{\varphi}_j^T \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{M}_t \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t = (\boldsymbol{\varphi}_j^T \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{M}_t \cdot \mathbf{E}) \cdot (\mathbf{E}^T \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t) \quad (6)$$

(3) 若第  $j$  阶振型为网壳动力响应的主要贡献振型,为减小该阶振型在动力荷载下的动力响应,由以上(2)分析知,可将 MTMD 的质量分布  $\bar{\mathbf{m}}_t$  按结构振型向量分布  $\boldsymbol{\varphi}_j^T$  布置,同时使各 TMD 自振频率  $f_{\text{tmd}}$  与网壳主结构第  $j$  阶自振频率  $f_j$  相等,此时 MTMD 有效控制力  $\mathbf{F}_j^T$  达到极大值,第  $j$  阶振型广义力达到极小值,达到最佳控制效果;

(4) 若 MTMD 质量分布  $\bar{\mathbf{m}}_t$  按第  $j$  阶振型  $\boldsymbol{\varphi}_j^T$  布置,即控制了第  $j$  阶振型. 对第  $k$  阶振型 ( $k \neq j$ ) 来说,由于  $\boldsymbol{\varphi}_j^T$  与  $\boldsymbol{\varphi}_k^T$  正交,而与  $\bar{\mathbf{m}}_t$  同向,故  $\bar{\mathbf{m}}_t$  与  $\boldsymbol{\varphi}_k^T$  正交,即  $\mathbf{F}_k^T = 0$ ,也就是基于特定模态布置的 MTMD 不会对其他未控制的模态响应产生影响。

## 2 单层球面网壳结构 D-MTMD 减震设计方法

大跨度单层网壳结构的动力特性与高耸、多高层结构不同,主要体现在:(1) 主要贡献振型数量多,频率分布密集,振型耦联效应强;(2) 主要贡献振型的形态复杂,无法简化为单质点 TMD 减震控制系统;(3) 不论水平还是竖直方向地震输入,各质点的位移动力响应主要以竖向( $z$  向)震动为主。

基于网壳结构的动力特性及第 1 节的理论分析,针对单层网壳结构的减震控制,本文通过归纳与简化,提出以下基于固有模态的单层球面网壳 D-MTMD 减震控制设计方法与步骤:

(1) 对结构进行动力模态分析,遴选出质量参与系数高的一阶或几阶振型,作为减震设计的控制振型;

(2) 确定 D-MTMD 的总质量  $m_t$ . 考虑到结构可容许的附加荷载,可假设  $m_t = 0.05 \cdot m_s$  ( $m_s$  为整个网壳结构质量);

(3) 确定 D-MTMD 数量  $m$ . 由第 1 节的理论推导可知,当所有节点均布置 TMD 且质量按控制振型向量分布时,网壳震动控制效果最佳. 但考虑到实际工程情况,没有必要控制网壳的所有节点,故仅选取振型向量中位移相对较大的节点进行控制. 可根据网壳结构或控制振型复杂程度,施工布置便利性以及控制的精细化程度确定控制点的个数,并根据控制节点在控制振型中的位移大小,按比例确定 D-MTMD 控制质量分布  $\bar{\mathbf{m}}_t$ ,使  $\bar{\mathbf{m}}_t$  与所控制振型  $\boldsymbol{\varphi}_j^T$  尽量同向;

(4) 根据 TMD 振动控制理论,当 TMD 自振频率与激励频率(工程中一般取所控振型频率)接近时,控制效果最佳. 通过调整各 TMD 刚度  $k_t$ ,使各 TMD 自振频率  $f_{tj}$  与所控振型的频率  $f_{sj}$  相等,以达到最佳控制效果;

考虑到 D-MTMD 装置在实际大跨度网壳结构中的施工与安装,同时由于网壳结构位移动力响应主要以竖向位移为主,故本文仅设置竖向 TMD 装置即可进行网壳结构减震控制。

## 3 单层球面网壳 D-MTMD 减震算例分析

为验证本文基于控制固有模态的单层球面网壳 D-MTMD 减震控制方法,本节建立一单层凯威特球面网壳数值模型,分别考虑水平方向和竖直方向地震输入两类工况,对控制前后网壳的地震响应进行分析对比,通过数值计算结果说明本文减震控制方法的有效性和适用性。

### 3.1 单层网壳结构模型

K6 凯威特单层网壳跨度为 40 m,矢高为 10 m,矢跨比为 1/4,结构杆件均采用  $\Phi 150 \times 4$  钢管,钢材弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  MPa,结构阻尼比为 0.02,不考虑材料非线性. 将网壳结构自重及各类荷载均等

效为节点集中质量,每节点为 4 000 kg,动力分析中采用集中质量矩阵.杆件均采用铁木辛柯空间梁单元模拟,每根杆件分为两个梁单元.网壳采用周边固定约束支座,约束节点数为 36,非约束节点数为 91,  $x, y, z$  三向总动力自由度数为 273,相应地总振型数也为 273 个.

对该结构进行模态分析,分别统计出水平方向( $x$  向)和竖直方向( $z$  向)的主要参振振型参数,见

表 1—2,各振型形态见图 2—3.

表 1 网壳  $x$  向主要振型参数

Tab.1 Parameters of dominate structural modes in  $x$  direction

	模态阶数				
	2	4	14	94	95
频率/Hz	3.28	3.70	3.89	10.35	12.86
$x$ 向振型参与系数	391.57	152.89	126.4	301.3	144.94
$x$ 向振型质量参与系数/%	42.1	6.4	4.4	24.9	5.8

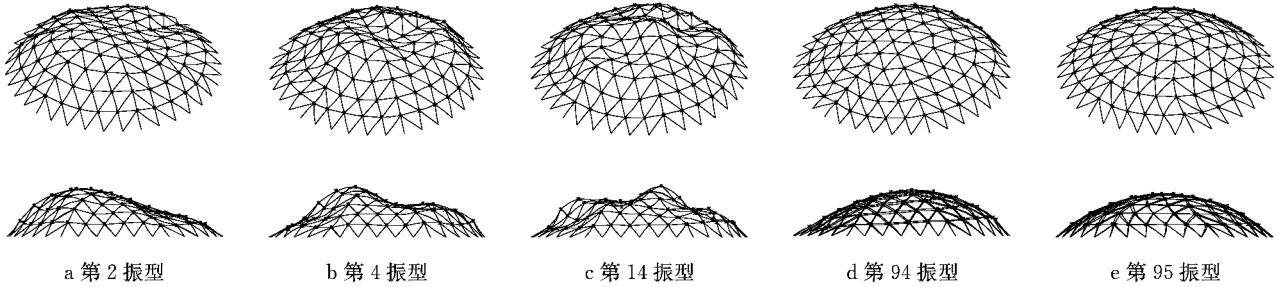


图 2 网壳  $x$  向主要振型简图

Fig.2 Dominate structural modes in the  $x$  direction

表 2 网壳  $z$  向主要模态参数

Tab.2 Parameters of dominate structural modes in  $z$  direction

	模态阶数				
	21	91	103	145	195
频率/Hz	4.05	6.45	18.39	32.30	43.99
$z$ 向振型参与系数	60.05	511.12	253.13	-112.6	67.31
$z$ 向振型质量参与系数/%	0.99	71.8	17.6	3.5	1.2

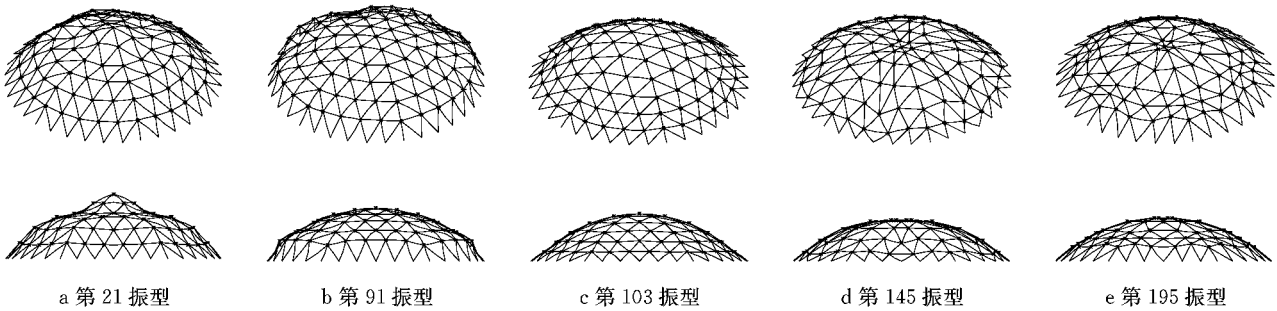


图 3 网壳  $z$  向主要振型简图

Fig.3 Dominate structural modes in the  $z$  direction

为了了解单层球面网壳 D-MTMD 减震控制前后的结构动力响应,以下选择一些有代表性的节点位移时程响应和杆件内力时程响应,说明各 D-MTMD 控制方案的减震效果.图 4 为所关注的节点和杆件所在位置示意图.

### 3.2 水平地震减震控制分析

选取网壳结构  $x$  向主要参振模态(即第 2 阶和第 94 阶)以及次要参振模态(第 71 阶),分别进行减震控制.本文仅研究 D-MTMD 单模态减震控制,即每种控制方案仅选取该控制振型相对位移较大的点布置 TMD,控制点取 10 个.各 TMD 质量根据对应

点在控制振型中的相对大小按比例确定,刚度则根据  $k_{ti} = 4\pi^2 f_i^2 m_t$  确定.各控制方案的 TMD 配置见表 3,表中  $I_{MPF}$  为该振型对应的质量参与常数(mass participate factor, MPF).不考虑各 TMD 的阻尼效应.

对减震控制前后的单层球面网壳结构采用时程法进行分析,选取 El Centro(N-S)地震波,输入  $x$  向(水平)单向激励. El Centro 地震波数据输入采用加速度原始记录,仅取前 30 s,不修正,加速度峰值为 0.342  $g$ ,卓越周期为 0.56 s.所选节点竖向位移响应和杆件轴力响应计算结果见表 4.表中的最大值及

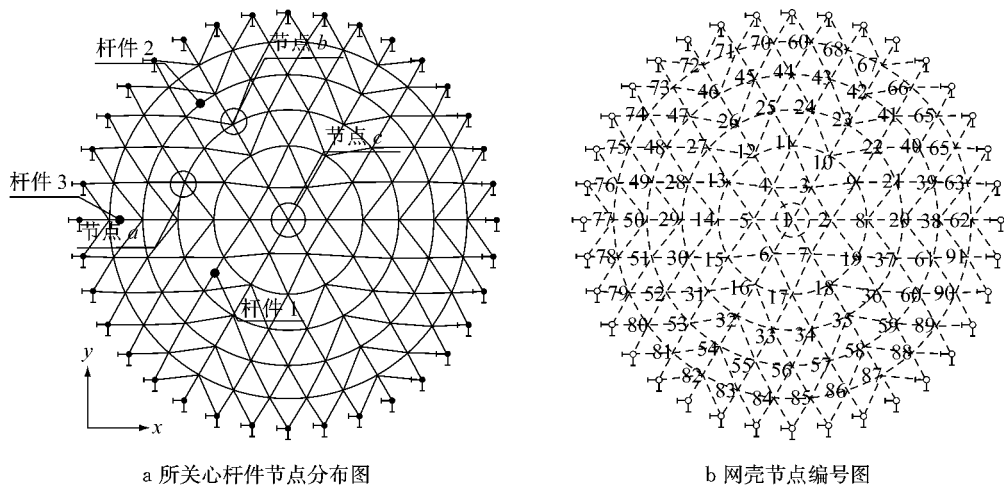


图 4 网壳数值模型

Fig.4 Numerical model of reticulated shell

表 3 水平地震减震控制 D-MTMD 布置方案

Tab.3 Layout schemes of D-MTMD vibration control in horizontal earthquake

控制方案	控制振型	详细布置方案					
方案一	第 2 阶	节点号	13,19	20,29	9,15	28,37	27,36
	$f_2=3.28\text{ Hz}$	质量/kg	1 836	1 835	1 827	1 803	1 798
	$I_{MPF}=42.1\%$	刚度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	782	781	778	768	766
方案二	第 94 阶	节点号	21,30	39,51	28,37	49,61	20,29
	$f_{94}=10.35\text{ Hz}$	质量/kg	1 859	1 842	1 822	1 815	1 762
	$I_{MPF}=24.9\%$	刚度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	7 868	7 795	7 708	7 678	7 455
方案三	第 71 阶	节点号	2,5	4,7	6,3	8,14	10,12
	$f_{71}=4.89\text{ Hz}$	质量/kg	2 556	2 556	2 556	715	715
	$I_{MPF}\approx 0$	刚度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	2 415	2 415	2 415	678	678

表 4 不同减震方案下网壳时程反应计算结果比较(水平)

Tab.4 Comparison of time-history response results in different vibration control schemes (horizontal earthquake)

控制方案	节点 a 竖向位移		节点 b 竖向位移		杆件 1 轴力		杆件 2 轴力	
	最大值/mm	均方根/mm	最大值/mm	均方根/mm	最大值/kN	均方根/kN	最大值/kN	均方根/kN
控制前	16.7	4.4	9.7	2.4	45.4	12.8	152.6	35.9
方案一	10.6	2.3	6.1	2.0	27.9	7.7	138.7	35.0
方案二	25.0	5.8	8.3	2.1	37.4	8.4	136.9	30.1
方案三	17.1	3.8	9.0	2.0	43.5	9.9	149.7	29.9

均方根指对应各时间步动力响应的统计结果(下同). 限于篇幅,本节仅列出杆件 1 在控制前后的轴力响应时程曲线,如图 5a~5c 所示.

由表 4 中的计算结果可看出:(1)在水平地震作用下,各减震控制方案对减小网壳结构震动均有一定效果,总体来说,网壳减震效果方案一>方案二>方案三;(2)由于“减震控制方案一”所控制的振型(第 2 振型)参与系数最大,且最接近地震波卓越周期,所以减震效果最佳.从水平地震作用下位移较大的节点 a 来看,加速度响应减小 47%左右;(3)由于三种控制方案设置的 D-MTMD 仅为竖向控制,径向杆(杆件 1)减震效果较好,而环向杆(杆件 2)减震效果相对较低.

### 3.3 竖向地震减震控制分析

对竖向地震减震控制采用同样的分析方法,选

取网壳结构 z 向主要参振模态(91 阶,107 阶)以及次要参振模态(第 2 阶),分别进行减震控制.由于竖向震动主要参与振型比较简单,且为使结构不产生偏心,各控制点关于结构对称布置,控制点取为 7(6)个.各 TMD 质量和刚度的取法与水平地震分析相同.此外,本节增加方案四,对网壳所有节点(91 个)进行控制,控制振型与方案一相同,即控制第 91 阶振型.各控制方案的 D-MTMD 配置见表 5,不考虑各 TMD 的阻尼效应.

采用相同的时程分析方法,输入 z 向(竖直)El Centro(N-S)地震波,地震波参数同 3.2.所选节点竖向位移响应和杆件轴力响应计算结果见表 6;限于篇幅,仅列出节点 c(顶点)在控制前后的竖向位移响应时程曲线,如图 6a~6d 所示.

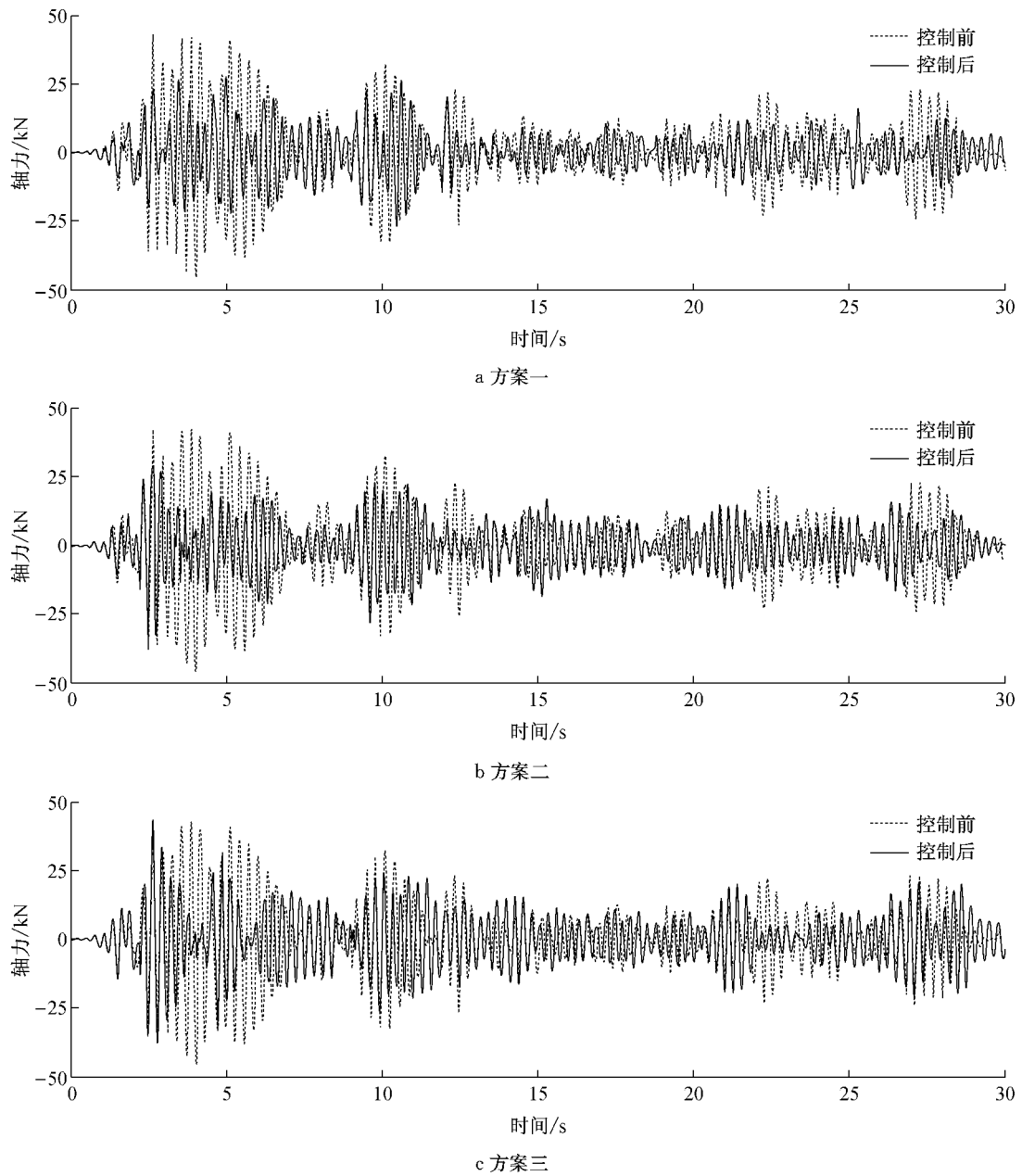


图 5 杆件 1 在不同控制方案下轴力时程响应

Fig.5 Axial force time history response of Member 1 in different vibration control schemes

表 5 竖向地震减震控制 D-MTMD 布置方案

Tab.5 Layout schemes of D-MTMD vibration control in vertical earthquake

控制方案	控制振型	详细布置方案				
方案一	第 91 阶	节点号	1	2,5	3,6	4,7
	$f_{91}=6.45 \text{ Hz}$	质量/kg	2 759	2 573	2 573	2 573
	$I_{MPF}=71.8\%$	刚度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	4 536	4 231	4 231	4 231
方案二	第 103 阶	节点号	38,50	42,54	46,58	1
	$f_{103}=18.39 \text{ Hz}$	质量/kg	2 636	2 636	2 636	2 383
	$I_{MPF}=17.6\%$	刚度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	35 207	35 207	35 207	31 822
方案三	第 2 阶	节点号	13,19	20,29	9,15	
	$f_2=3.28 \text{ Hz}$	质量/kg	3 039	3 037	3 024	
	$I_{MPF} \approx 0$	刚度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	1 294	1 293	1 288	
方案四	第 91 阶 $f_{91}=6.45 \text{ Hz}$ $I_{MPF}=71.8\%$	节点号 质量/kg 刚度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	所有节点(91个) $\sum m_i = 0.05 \cdot m_s$ $k_{ij} = 4\pi^2 f^2 m_i$			

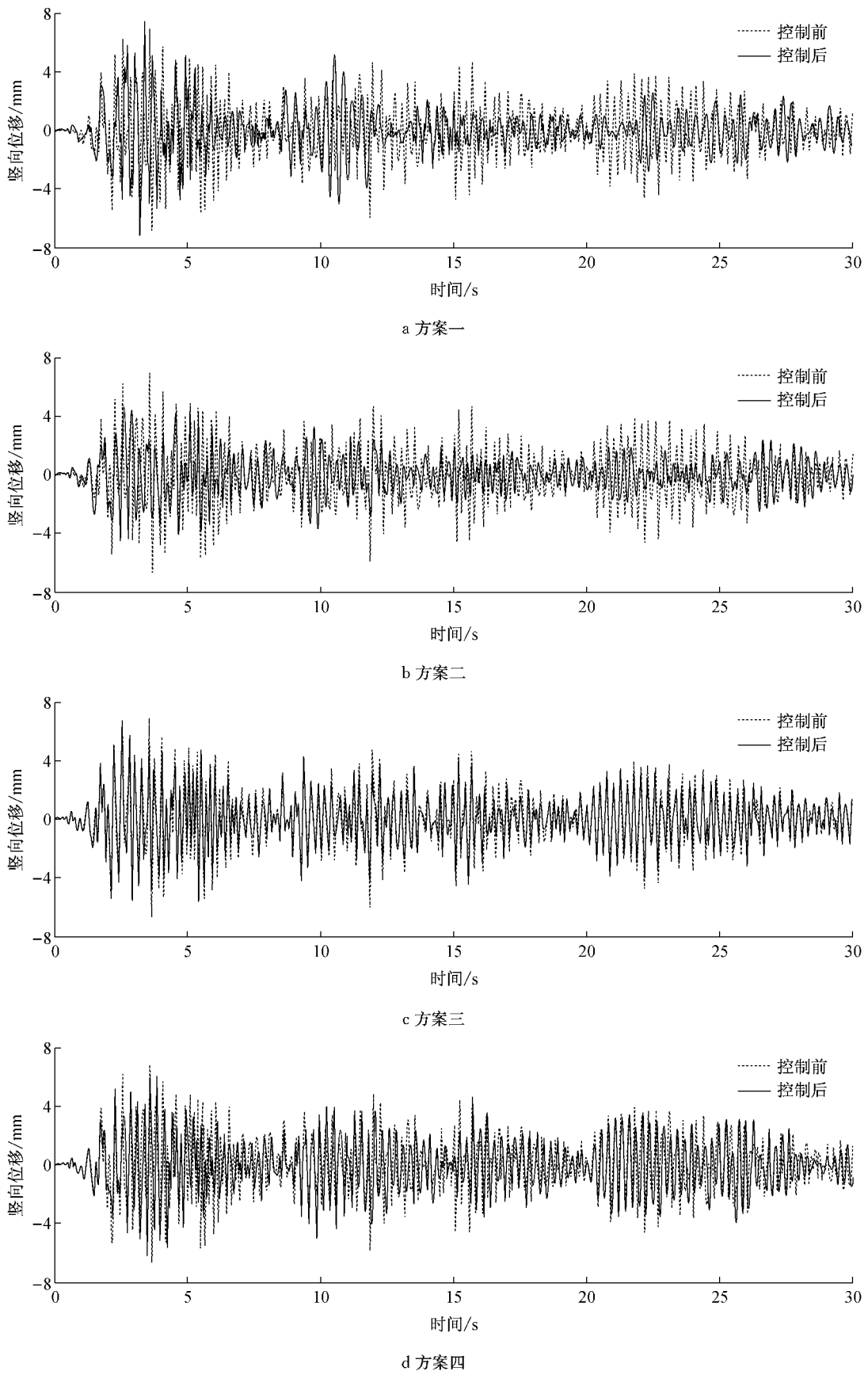


图 6 节点 c 在不同控制方案下竖向位移时程响应

Fig.6 Vertical displacement time history response of Node c in different vibration control schemes

表6 不同减震方案下网壳时程反应计算结果比较(竖向)

Tab.6 Comparison of time-history response results in different vibration control schemes (vertical earthquake)

控制方案	节点 b 竖向位移		节点 c 竖向位移		杆件 2 轴力		杆件 3 轴力	
	最大值/mm	均方根/mm	最大值/mm	均方根/mm	最大值/kN	均方根/kN	最大值/kN	均方根/kN
控制前	4.6	1.1	6.9	1.9	53.5	12.5	44.3	8.0
方案一	4.4	1.2	7.4	1.5	63.6	14.7	37.5	8.1
方案二	4.5	1.2	4.7	1.3	46.3	11.5	35.2	7.7
方案三	3.9	1.0	6.8	1.7	47.5	10.5	42.2	8.1
方案四	4.1	0.9	6.1	1.7	44.8	8.8	41.1	7.5

由表6中计算结果可看出:(1)由于竖向主要贡献振型的频率都较高,远离 El Centro 波卓越频率,故控制效果均不理想;(2)“减震控制方案一”由于控制节点集中在顶点(节点 c)周边,仅对控制区域内的点(如节点 c)位移响应起到一定减震作用,对网壳其他节点和杆件减震效果不大,甚至带来不利作用;(3)对水平地震作用减震效果较好的方案三,对竖向地震控制效果较差;(4)“减震控制方案一”和“减震控制方案四”同样控制第 91 阶模态,但方案四的控制效果明显好于方案一。这是由于 91 阶振型向量中各元素数值相差较小,方案一中简化的 D-MTMD 质

量向量  $\bar{m}'_i$  与振型向量  $\varphi_j^T$  方向相差较大,无法起到理想的控制效果。

### 3.4 不同地震波控制效果对比

为了进一步验证本文提出的减震控制方法的普遍适用性,除第 3.2 节和 3.3 节中选取的 El Centro 波外,选取 Taft 波( $T_g=0.34\sim 0.38$  s)和 Mexico 波( $T_g=2\sim 2.2$  s)对模型分别进行水平和竖向地震反应的计算,并对减震效果进行分析对比,计算结果分别见表 7—8。各方向控制方案均取质量参与系数最大的“方案一”。

表7 不同水平地震波下网壳时程反应计算结果比较

Tab.7 Comparison of time-history response results in different horizontal earthquake waves

地震波	状态	节点 a 竖向位移		节点 b 竖向位移		杆件 1 轴力		杆件 2 轴力	
		最大值/mm	均方根/mm	最大值/mm	均方根/mm	最大值/kN	均方根/kN	最大值/kN	均方根/kN
El-centro	控制前	16.7	4.4	9.7	2.4	45.4	12.8	152.6	35.9
	控制后	10.6	2.3	6.1	2.0	27.9	7.7	138.7	35.0
Taft	控制前	9.0	2.5	4.2	1.3	28.2	7.1	88.3	20.2
	控制后	5.0	1.4	3.7	1.1	18.4	4.7	69.7	20.6
Mexico	控制前	3.8	0.5	1.9	0.3	8.0	1.0	43.0	6.8
	控制后	2.6	0.5	1.6	0.2	6.0	0.9	40.7	7.0

表8 不同竖向地震波下网壳时程反应计算结果比较

Tab.8 Comparison of time-history response results in different vertical earthquake waves

地震波	状态	节点 b 竖向位移		节点 c 竖向位移		杆件 2 轴力		杆件 3 轴力	
		最大值/mm	均方根/mm	最大值/mm	均方根/mm	最大值/kN	均方根/kN	最大值/kN	均方根/kN
El-centro	控制前	4.6	1.1	6.9	1.9	53.5	12.5	44.3	8.0
	控制后	4.4	1.2	7.4	1.5	63.6	14.7	37.5	8.1
Taft	控制前	2.6	0.6	4.0	0.9	28.9	6.4	20.5	4.2
	控制后	2.4	0.5	4.8	1.2	31.1	6.2	19.0	4.1
Mexico	控制前	1.4	0.3	1.7	0.4	8.8	1.8	13.6	3.1
	控制后	1.4	0.3	1.9	0.4	9.4	1.8	14.1	3.1

由表 7—8 计算结果可知:(1)“水平控制方案一”对水平地震波的减震效果明显,但由于网壳控制频率远离 Mexico 波卓越频率,虽也有减震作用,但效果最小;(2)“竖向控制方案一”对竖向地震波的减震效果较差,对个别杆件动力响应甚至有所放大,具体原因见 3.3 节中的分析,一是控制频率与输入频率相差较远,二是所控频率简化控制方案所造成的偏差较大,需进一步研究。

## 4 结论

大跨度空间网壳结构的 D-MTMD 减震控制在国内外研究均处于起步阶段。本文通过理论推导,提出了基于固有模态的单层球面网壳结构 D-MTMD 减震控制方法,并对一网壳数值算例进行地震响应时程分析,得出以下主要结论:

(1)基于结构振型分解提出的基于固有模态的



D-MTMD 减震控制方法对网壳结构进行减震控制是可行且有效的;

(2)控制振型的选取是关键因素,不仅需要选取质量参与系数较大的振型,还应使其尽量接近地震波或场地的特征周期;

(3)对空间网壳结构进行 D-MTMD 震动控制,并不是对所有构件都有较好的控制效果,个别杆件的动力响应反而会增大,所以,应该合理制定 D-MTMD 减震控制方案,保证一些重要的杆件有较好的减震控制效果。

本文提出的基于固有模态的单层球面网壳结构 D-MTMD 减震控制方法,在空间结构减震控制设计领域,具有良好的前景.本文仅定性地在弹性范围内验证了该减震控制方法控制单一振型的有效性,在减震控制的空间结构形式、多振型控制组合、控制装置参数优化等方面均还有大量的课题有待研究。

#### 参考文献:

- [1] 廖冰, 罗永峰. 基于振型贡献系数的空间结构振动反应研究[J]. 空间结构, 2014, 20(1): 9.  
LIAO Bin, LUO Yongfeng. Vibration response computation of spatial structures based on mode contribution factors [J]. Spatial Structures, 2014, 20(1): 9.
- [2] 廖冰, 罗永峰, 王磊, 等. 基于质量参与系数的空间结构动力模型简化[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(9): 7.  
LIAO Bin, LUO Yongfeng, WANG Lei, *et al.* A new simplified method for the dynamic model of spatial structures [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(9): 7.
- [3] LUO Yongfeng, WANG Lei, GUO Xiaonong. Threshold value method and its application in dynamic analysis of spatial latticed structures[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(12): 2215.
- [4] 叶继红, 陈月明, 沈世钊. TMD 减震系统在网壳结构中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(5): 10.  
YE Jihong, CHEN Yueming, SHEN Shizhao. The present situation of seismic vibration control of reticulated shell structures using TMD system [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2000, 33(5): 10.
- [5] 叶继红, 陈月明, 沈世钊. 网壳结构 TMD 减震系统的优化设计[J]. 振动工程学报, 2000, 13(3): 376.  
YE Jihong, CHEN Yueming, SHEN Shizhao. Optimum design for reticulated shell structure-TMD systems subjected to seismic excitations [J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(3): 376.
- [6] 胡继军, 黄金枝, 李春祥, 等. 网壳-TMD 风振控制分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3): 31.  
HU Jijun, HUANG Jinzhi, LI Chunxiang, *et al.* TMD control analysis of reticulated shells for wind vibration [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(3): 31.
- [7] 林勇建, 周炬毅, 顾明. 柱面网壳结构 MTMD 风振控制研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(2): 114.  
LIN Yongjian, ZHOU Xuanyi, GU Ming. MTMD control analysis of a cylindrical lattice roof structure for wind-induced vibration [J]. Structural Engineers, 2013, 29(2): 114.
- [8] 唐柏鉴, 王治均. 大跨网格屋盖结构竖向 MTMD 减震控制的参数分析[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 130.  
TANG Baijian, WANG Zhijun. Parametric analysis of vertical MTMD in long-span lattice roof structures [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 130.
- [9] Yamada M. Vibration control of large space structure using TMD system [C]// 15th Asian-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Queensland: ASEC, 1995: 23-30.
- [10] Yoshinaka S, Kawaguchi K. Vibration control of spatial structures using spatially distributed MTMDs [J]. Memoirs of the Faculty of Engineering Osaka City University, 2008, 49: 19.
- [11] Tsuda S, Ohsaki M. Bi-directional seismic vibration control of spatial structures using passive mass damper consisting of compliant mechanism [C/CD]// Proceeding of International IASS Conference. Seoul: IASS, 2012.
- [12] Yamakawa M, Yoshinaka S, Araki Y, *et al.* Estimation of the global optimality for multiple tuned mass damper systems using order statistics [C/CD]// Proceeding of 11th. World Congress on Computational Mechanics, Barcelona: WCCM XI, 2014.
- [13] 李春祥, 黄金枝. 高层钢结构 MTMD 地震反应控制优化设计[J]. 振动与冲击, 2000, 19(1): 37.  
LI Chunxiang, HUANG Jinzhi. The optimum design of MTMD control for earthquake excited steel tall building [J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(1): 37.
- [14] Fu T S, Johnson E A. Distributed mass damper system for integrating structural and environmental controls in buildings [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 137(3): 205.
- [15] 胡仲淹, 罗永峰, 王人鹏, 等. 基于振型遴选与振型构造的空间网壳结构动力分析方法[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 16.  
HU Zhongyan, LUO Yongfeng, WANG Renpeng, *et al.* The dynamic analysis of spatial lattice structures based on mode selection and mode construction techniques [J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 16.