

文章编号:1673-2049(2017)04-0078-07

# MTMD 应用于海洋平台结构的参数优化研究

石 岩<sup>1</sup>, 苏 锐<sup>2,3</sup>, 陶 雪<sup>3</sup>, 张纪刚<sup>3</sup>

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 中垠地产有限公司, 山东 济南 250101;  
3. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:**针对调谐质量阻尼器(TMD)只对某个频率控制有效果,并且 TMD 质量和体积较大,不适合应用于处在复杂海洋环境中海洋平台结构的问题,在对 TMD 应用于海洋平台的减震进行充分研究之后,提出了在海洋平台结构上采用多个调谐质量阻尼器(MTMD)进行减震控制,分析 MTMD 对海洋平台结构的振动控制效果。以 JZ20-2 海洋平台为研究对象,采用并联的形式将多个不同的 TMD 与海洋平台结构相连,通过输入 3 种地震波,观察施加不同 MTMD 的海洋平台体系的位移及加速度反应,并对 MTMD 系统的基本特性进行研究。结果表明:TMD 的质量对海洋平台减振效果有着较大影响,在已知质量系数的前提下,MTMD 的阻尼系数和 TMD 的个数对控制结构的振动起着重要影响,而且这些参数存在优化问题。

**关键词:**海洋平台;振动控制;地震作用;MTMD;参数优化

中图分类号:P751

文献标志码:A

## Study on Parameter Optimization of MTMD Applied to Ocean Platform Structure

SHI Yan<sup>1</sup>, SU Rui<sup>2,3</sup>, TAO Xue<sup>3</sup>, ZHANG Ji-gang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China;  
2. Zhongyin Real Estate Ltd. Company, Jinan 250101, Shandong, China; 3. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China)

**Abstract:** In the light of the problems that tuned mass damper (TMD) only had the effect on a frequency control, and TMD's mass and volume were large, that was not suitable for application to the offshore platform structure in complex environment. Therefore, authors made full research on the TMD applied in offshore platform, and put forward the use of multiple tuned mass dampers (MTMD) in the offshore platform structure to control the vibration, and analyzed the vibration control effect of the MTMD on the offshore platform structure. The JZ20-2 offshore platform was used as the study object, and several different TMDs were connected in parallel to the offshore platform structure. By inputting three different seismic waves, the displacement and acceleration responses of the offshore platform system with different MTMD were observed. The basic characteristics of MTMD system were studied. The results show that the quality of TMD has a great influence on the offshore platform. On the premise of a known quality factor, damping coefficient of MTMD and the number of TMD have important effects on vibration control of structures, and these parameters exist an optimization problem.

收稿日期:2016-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51378271,51678321);山东省高校优秀科研创新团队计划项目

作者简介:石 岩(1978-),女,吉林通化人,讲师,E-mail:470663896@qq.com。

**Key words:** offshore platform; vibration control; earthquake; MTMD; parameter optimization

# 0 引 言

导管架式平台结构所处的海洋环境具有明显的动力荷载特征,其中地震作用是一种比较典型的动力荷载。调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)对于结构地震反应控制良好<sup>[1-2]</sup>,它是目前工程中应用最广的控制方法之一,也被应用于海洋平台振动控制领域当中<sup>[4-6]</sup>。TMD 的主要作用是将结构的振动传递给 TMD,由 TMD 的阻尼元件来耗散能量,以达到减小结构振动的目的。TMD 系统也存在着一些缺陷,如其有效性对结构固有频率的波动较为敏感,当把 TMD 用于结构抗震时,其有效频带较窄等。陆建辉等<sup>[7]</sup>进行了 TMD 优化参数研究,得出优化范围内参数的失调对结构的影响较敏感。嵇春艳<sup>[8]</sup>通过不同模式下的 TMD 参数优化得出,TMD 对相应模态外的减振效果会产生不利效果。李黎等<sup>[9]</sup>提出,由于结构的非线性理论计算与实际工程施工建造之间存在误差等原因,人们很难使 TMD 的自振频率与结构的自振频率完全一致。

为弥补 TMD 的不足,已有研究者通过将多个 TMD 与结构相连来达到更好的减振效果<sup>[10-13]</sup>。本文针对以上状况,提出采用多个调谐质量阻尼器(MTMD)通过并联形式与海洋平台结构相连,进行 MTMD 应用于海洋平台上的参数优化研究,以期对海洋平台在地震作用下的反应有着更好的控制效果。

# 1 海洋平台结构模型

本文研究所选平台为锦州 JZ20-2 平台,该平台是导管架式平台,位于渤海辽东湾,1991 年建成投入使用,平台设计服役期 20 年,设计水深 15.5 m。平台由桩、导管架、导管架端帽及甲板结构组成,结构总高 24.8 m。平台导管架由 4 条腿桩组成,腿桩直径约为 1.5 m,各腿桩双斜布置,结构斜面呈正四边形,导管架的水下部分分为 2 个水平层,标高分别为-15.5 m 和-3.5 m,导管架的水上部分分为 2 个水平层,标高分别为+5.85 m 和+10.0 m。桩穿过导管腿打入土层,桩的直径为 1 060 mm,入土深度约为 60 m。海洋平台结构如图 1 所示<sup>[14]</sup>。本文方案中 MTMD 安装于平台的上层甲板+17.000 m 标高处,布置方案如图 2 所示。

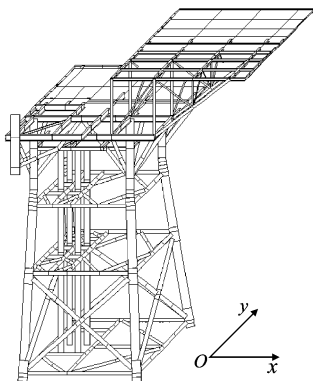
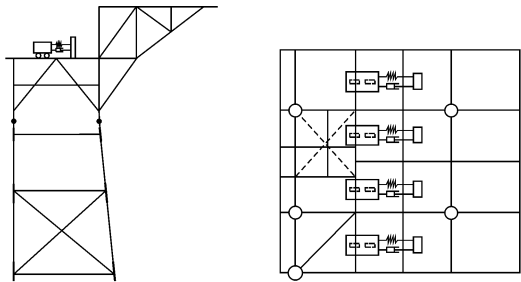


图 1 海洋平台结构  
Fig.1 Ocean Platform Structure



(a) MTMD立面布置 (b) +17.000 m标高处MTMD平面布置

图 2 MTMD 布置方案  
Fig.2 Layout Scheme of MTMD

# 2 模态分析

## 2.1 平台结构模态分析

当 TMD 安装在结构上时,其固有频率一般调整到结构的自振频率附近,引起共振反应并且耗散吸收结构的振动能量,最终减小结构的动力反应,故 TMD 对频率非常敏感,只有频率在某一范围内 TMD 才会对结构有控制作用。对 JZ20-2 平台进行模态分析,海洋平台结构模型的前 5 阶频率如表 1 所示,振型如图 3 所示。前 5 阶频率不同方向的有效质量如表 2 所示,通过对应振型图可知振型的控制方向,为 TMD 的布置提供了帮助。

表 1 海洋平台结构前 5 阶频率  
Tab.1 The First Five Order Frequencies of Ocean Platform Structure

阶次	1	2	3	4	5
频率/Hz	0.788 13	1.020 80	1.592 20	2.559 40	3.134 00

## 2.2 基于 TMD 的平台结构模态分析

根据图 2 所示的 MTMD 布置方案,对 JZ20-2 海洋平台施加 MTMD。分别对 1%,5% 质量比

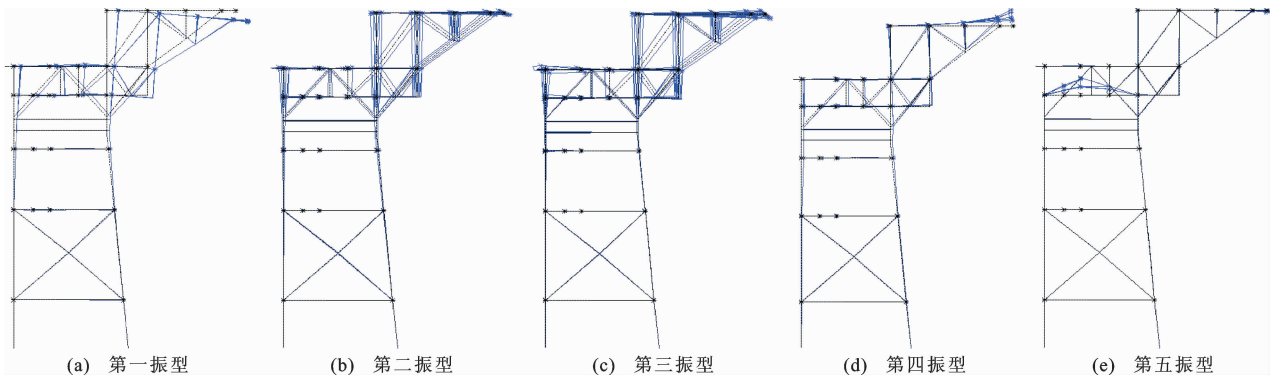


图 3 海洋平台结构前 5 阶振型

Fig. 3 The First Five Order Vibration Shapes of Ocean Platform Structure

表 2 海洋平台结构前 5 阶有效质量

Tab. 2 The First Five Order Effective Masses of Ocean Platform Structure

阶次	有效质量/kg		
	X 向	Y 向	Z 向
1	472 752.000(47%)	3. 142 68	10 439. 500
2	518. 393	86 487. 500 00(86%)	0. 005
3	213. 002	582 451. 000 00(58%)	14. 140
4	205 907. 000(20%)	157. 930 00	48 365. 000
5	109. 463	63. 860 00	43 955. 000(69%)

注:括号内数字为有效质量占该方向总质量的百分比。

(TMD 质量与主结构的质量比)和不同 TMD 个数情况下海洋平台进行模态分析,并提取前 10 阶的自振频率进行对比分析,初步验证 MTMD 对海洋平台结构动力反应的影响。1%质量比下结构前 10 阶频率如表 3 所示,5%质量比下结构前 10 阶频率如表 4 所示。

表 3 1%质量比下海洋平台结构前 10 阶频率

Tab. 3 The First Ten Order Frequencies of Ocean Platform Structure with 1% Mass Ratio

平台结构	频率/Hz									
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
原结构	0. 788 13	1. 020 80	1. 592 20	2. 069 40	2. 559 40	3. 134 00	3. 254 90	3. 308 00	3. 390 10	3. 611 10
1 个 TMD	0. 000 00	0. 468 28	0. 792 69	1. 020 58	1. 592 20	2. 069 90	2. 559 40	3. 134 00	3. 254 90	3. 308 00
3 个 TMD	0. 000 00	0. 000 00	$1. 80\times 10^{-10}$	0. 466 91	0. 470 90	0. 471 17	0. 794 95	1. 021 30	1. 592 30	2. 070 20
5 个 TMD	0. 000 00	0. 000 00	$0. 10\times 10^{-9}$	$0. 13\times 10^{-9}$	$0. 15\times 10^{-9}$	0. 460 18	0. 469 38	0. 471 13	0. 471 15	0. 471 16

表 4 5%质量比下海洋平台结构前 10 阶频率

Tab. 4 The First Ten Order Frequencies of Ocean Platform Structure with 5% Mass Ratio

平台结构	频率/Hz									
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
原结构	0. 788 13	1. 020 80	1. 592 20	2. 069 40	2. 559 40	3. 134 00	3. 254 90	3. 308 00	3. 390 10	3. 611 10
1 个 TMD	$0. 26\times 10^{-9}$	0. 454 36	0. 798 64	1. 020 80	1. 592 20	2. 070 70	2. 559 40	3. 134 00	3. 254 90	3. 308 00
3 个 TMD	0. 000 00	0. 000 00	0. 000 00	0. 442 72	0. 459 59	0. 460 81	0. 818 50	1. 023 00	1. 592 00	2. 073 10
5 个 TMD	0. 000 00	0. 000 00	0. 000 00	0. 000 00	$0. 74\times 10^{-10}$	0. 432 24	0. 453 89	0. 460 69	0. 460 80	0. 460 83

由表 3,4 可以看出,施加 TMD 的海洋平台结构自振频率明显降低。施加 5 个 TMD 的平台结构前 10 阶频率都在 0. 5 Hz 下,属于低频范畴,并且恰好避开了地震波频谱较大值对应的频带。不同质量比对结构模态影响不大,为了更好地看出地震反应下的抗震效果,对施加 MTMD 的平台结构进行地震作用下的动力反应分析。

### 3 地震作用下的参数优化

#### 3.1 地震作用

采用有限元软件 ANSYS 进行结构的减震效果

分析,将平台结构模拟为三维空间框架,杆件单元采用 Beam188 单元,质量单元采用 Mass21 单元,节点为刚性连接。划分完网格后的结构模型见图 4。

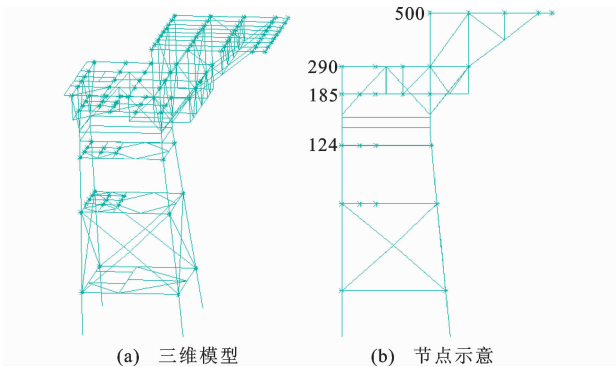


图 4 海洋平台结构简化模型

Fig. 4 Simplified Model of Ocean Platform Structure

首先输入 3 种地震波进行研究,分别为天津波(1976 年,EW)、Taft 波(1952 年,N21E)、El Centro 波(1940 年,SN)。由于渤海位于 8 度地震区,海床地震地面运动加速度为  $400\text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$  (大震),将 3 种地震波峰值进行归一化处理,并观察施加不同 TMD 的海洋平台体系的位移及加速度反应。3 种地震波的原始时程曲线和频谱曲线如图 5~7 所示。

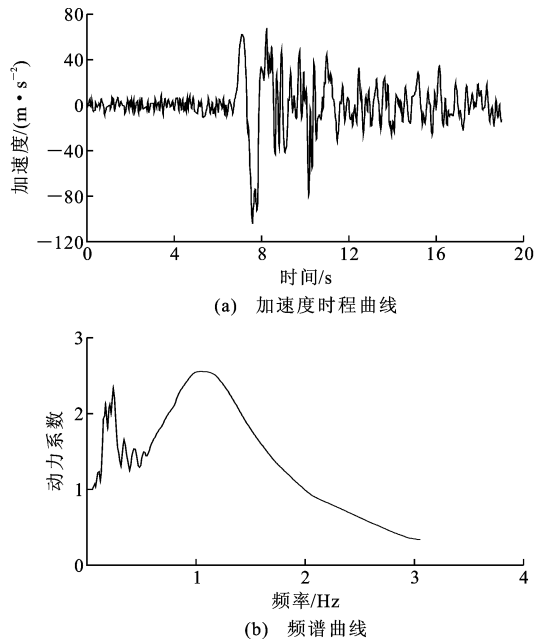


图 5 天津波的原始时程曲线和频谱曲线

Fig. 5 Original Time History Curve and Spectrum Curve of Tianjin Wave

### 3.2 MTMD 质量的影响

TMD 对单自由度结构体系响应的运动方程<sup>[15]</sup>为

$$m\ddot{x}(t) + (c + c_d)\dot{x}(t) + (k + k_d)x(t) -$$

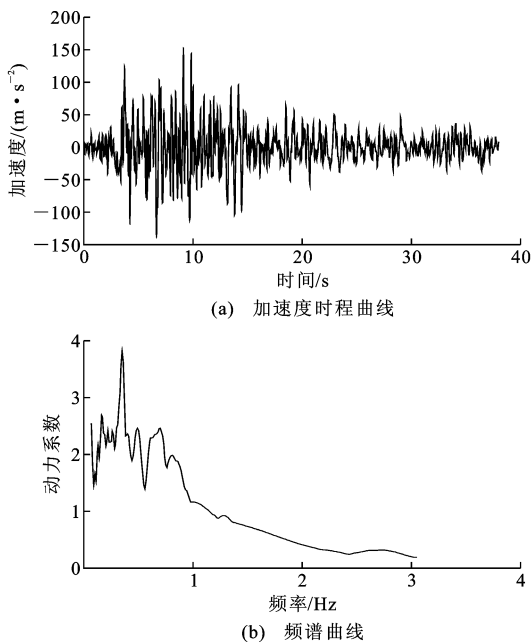


图 6 Taft 波的原始时程曲线和频谱曲线

Fig. 6 Original Time History Curve and Spectrum Curve of Taft Wave

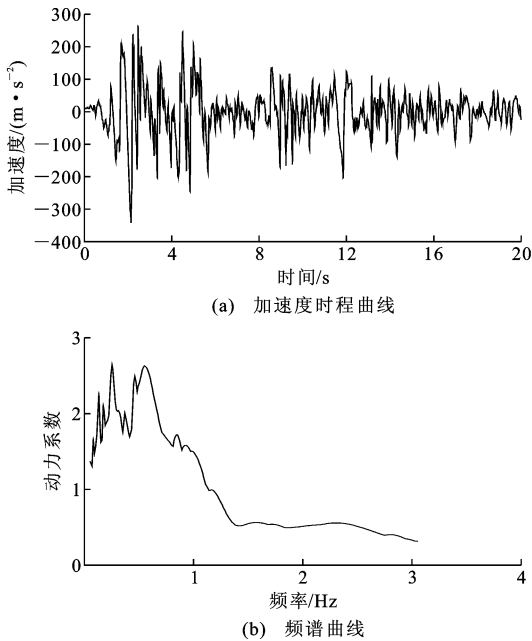


图 7 El Centro 波的原始时程曲线和频谱曲线

Fig. 7 Original Time History Curve and Spectrum Curve of El Centro Wave

$$c_d \dot{x}_d(t) - k_d x_d(t) = p(t) \quad (1)$$

式中: $t$  为时间; $m, c, k$  分别为主结构的质量、阻尼和刚度; $c_d, k_d$  分别为 TMD 的阻尼和刚度; $x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$  分别为主结构的位移、速度和加速度; $x_d, \dot{x}_d$  分别为 TMD 的位移和速度。

分别取 TMD 质量为主结构的 1%, 2%, 5%, 并

根据最小加速度响应得到 TMD 优化刚度  $\bar{\lambda}_{\text{dopt}}$  和阻尼  $\bar{\xi}_{\text{dopt}}$  的经验公式分别为

$$\bar{\lambda}_{\text{dopt}} = \frac{1}{\sqrt{1+\mu}} + (0.096 + 0.88\mu - 1.8\mu^2)\zeta + (1.34 - 2.9\mu + 3\mu^2)\zeta^2 \tag{2}$$

$$\bar{\xi}_{\text{dopt}} = \sqrt{\frac{3\mu(1+0.49\mu-0.2\mu^2)}{8(1+\mu)}} + (0.13 + 0.72\mu + 0.2\mu^2)\zeta + (0.19 + 1.6\mu - 4\mu^2)\zeta^2 \tag{3}$$

式中： $\mu$  为子结构与主结构的质量比； $\zeta$  为阻尼参数。

由式(2)和式(3)得到相应的刚度和阻尼比。通过施加不同地震波得到海洋平台水上水平层 124 节点和下层甲板处 185 节点的最大位移和最大加速度变化,如表 5 所示。由表 5 可以看出,TMD 质量取 5%时,最大位移和最大加速度减小幅度最大,减震效果最好。考虑到更大的质量在实际应用中难以实现,因此先取 5%的 TMD 质量为研究对象进行 TMD

表 5 TMD 质量对海洋平台结构反应的影响

Tab.5 Influence of TMD Quality on Response of Offshore Platform Structure

地震波	平台结构	质量比/%	124 节点		185 节点	
			最大位移/m	最大加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	最大位移/m	最大加速度/(m·s <sup>-2</sup> )
天津波	原结构		0.100 229 0	4.732 37	0.221 165 0	8.254 10
	加 TMD	1	0.097 665 9(2.5%)	4.668 25(1.4%)	0.215 308 0(2.7%)	8.189 56(0.7%)
		2	0.092 649 7(7.4%)	4.569 42(3.4%)	0.210 384 0(4.9%)	7.992 16(3.4%)
		5	0.084 165 7(16.0%)	4.213 91(10.9%)	0.183 817 0(16.9%)	7.668 13(7.2%)
Taft 波	原结构		0.049 321 5	5.078 75	0.086 749 7	5.945 63
	加 TMD	1	0.048 308 1(2.7%)	5.035 99(0.8%)	0.084 400 5(2.7%)	5.928 92(0.4%)
		2	0.044 321 8(10.2%)	5.000 13(1.4%)	0.078 612 3(9.4%)	5.892 11(1%)
		5	0.038 509 0(22.5%)	3.899 12(23.1%)	0.065 670 8(24.3%)	4.841 05(18.5%)
El Centro 波	原结构		0.037 891 9	1.849 09	0.095 938 6	2.903 38
	加 TMD	1	0.037 131 9(2.0%)	1.834 49(0.8%)	0.094 333 3(1.7%)	2.898 88(0.1%)
		2	0.036 459 2(3.6%)	1.823 64(1.4%)	0.092 164 2(4.0%)	2.846 59(2.0%)
		5	0.031 010 6(18.2%)	1.698 96(8.1%)	0.077 464 3(19.3%)	2.557 75(11.9%)

注:括号内数字为减震效果,下文同。  
参数分析。

3.3 TMD 阻尼系数的影响

由于质量系数和阻尼系数是 TMD 重要的控制系数<sup>[2-3,8]</sup>,接下来保持 TMD 质量为主结构的 5%不变,分别计算阻尼系数后的最大位移和最大加速度反应。为了讨论阻尼系数的影响,分别取 TMD 质量为 5%时相应的阻尼系数 0.142 3,质量为主结构的 2%时相应的阻尼比 0.092 3,质量为 1%时相应的阻尼比 0.066 9,并且为了分析大阻尼系数的影响,增加阻尼系数为 0.2 时的工况,分析结果如表 6 所示。由表 6 可以看出,保持 TMD 质量不变时,减小或增大阻尼系数都会增大地震反应,减震效果不如原阻尼系数。因此,阻尼系数对结构的振动效果有着明显的影响,对于同一 TMD 来说,阻尼系数应在合适的值域内,欠阻尼和过阻尼均会引起失调,导致减震效果下降。

3.4 TMD 个数的影响

由于 MTMD 是由多个 TMD 组成,每个 TMD 的频率可不相同,它们以结构被控振型频率为中心分布在一定范围之内<sup>[9]</sup>。为了对 MTMD 参数进行

研究,把被控结构简化成单自由度体系。接下来讨论 TMD 数量对控制效果的影响,其中 MTMD 总质量为主结构的 5%,结构阻尼系数为 0.142 3,将总质量分解为多个小质量以增加 TMD 数量,分别取 3 个(单个质量系数为 1.67%)、5 个(单个质量系数为 1%)、7 个(单个质量系数为 0.714%)。随着质量的划分,得到不同的最大位移和最大加速度如表 7 所示。由表 7 可以看出,保持 MTMD 总质量不变,当 TMD 个数增多时,最大位移的减小效果有明显提高,但在 Taft 波和 El Centro 波下,对最大加速度的减小效果反而不如单个 TMD。对于整体效果而言,当 TMD 增加到一定数量后,减震效果增幅减缓,综上所述,TMD 数量可以取为 5 个。

4 结 语

- (1)TMD 质量对海洋平台减震效果有很大影响,质量越大则减震效果越好。
- (2)在已知 TMD 质量系数时,MTMD 的阻尼系数和 TMD 数量对地震响应控制也起着重要作用,阻尼系数应在合适的值域内,欠阻尼和过阻尼均

表 6 阻尼系数对海洋平台结构反应的影响

Tab. 6 Influence of Damping Ratio on Response of Offshore Platform Structure

地震波	平台结构	阻尼系数	124 节点		185 节点	
			最大位移/m	最大加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	最大位移/m	最大加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
天津波	原始结构		0.100 229 0	4.732 37	0.221 165 0	8.254 10
	加 TMD	不变	0.084 165 7(16.0%)	4.213 91(10.9%)	0.183 817 0(16.9%)	7.668 13(7.2%)
		0.092 3	0.089 062 5(11.1%)	4.465 20(5.6%)	0.195 640 0(11.5%)	7.972 30(3.4%)
		0.066 9	0.089 395 1(11.1%)	4.484 81(5.2%)	0.196 477 0(11.4%)	7.990 01(3.2%)
		0.200 0	0.089 479 7(10.7%)	4.404 15(6.9%)	0.196 205 0(11.3%)	7.862 51(4.7%)
Taft 波	原始结构		0.049 321 5	5.078 75	0.086 749 7	5.945 63
	加 TMD	不变	0.038 509 0(22.5%)	3.899 12(23.1%)	0.065 670 8(24.3%)	4.841 05(18.5%)
		0.092 3	0.043 513 0(11.8%)	5.108 72(−0.6%)	0.072 412 0(16.5%)	6.089 47(−2.4%)
		0.066 9	0.045 319 0(8.1%)	5.181 74(−2.1%)	0.077 446 0(10.7%)	6.223 67(−4.7%)
		0.200 0	0.043 445 0(11.9%)	4.931 20(3.0%)	0.073 388 8(15.4%)	5.785 50(2.7%)
El Centro 波	原始结构		0.0378 919 0	1.849 09	0.095 938 6	2.903 38
	加 TMD	不变	0.031 010 6(18.2%)	1.698 96(8.1%)	0.077 464 3(19.3%)	2.557 75(11.9%)
		0.092 3	0.033 541 8(11.5%)	1.903 58(−2.9%)	0.084 169 5(12.3%)	3.000 13(−3.3%)
		0.066 9	0.034 483 3(9.0%)	1.925 81(−3.1%)	0.085 837 1(10.5%)	3.077 53(−6.0%)
		0.200 0	0.033 531 2(11.5%)	1.741 62(5.8%)	0.082 979 0(13.5%)	2.669 19(8.1%)

表 7 TMD 个数对海洋平台结构反应的影响

Tab. 7 Influence of Numbers of TMD on Response of Offshore Platform Structure

地震波	工况		124 节点		185 节点	
			最大位移/m	最大加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	最大位移/m	最大加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
天津波	原始结构		0.100 229 0	4.732 37	0.221 165 0	8.254 10
	改变 TMD 数量	1 个	0.084 165 7(16.0%)	4.213 91(10.9%)	0.183 817 0(16.9%)	7.668 13(7.2%)
		3 个	0.074 121 3(26.0%)	3.893 65(17.7%)	0.173 957 0(21.3%)	7.285 95(11.7%)
		5 个	0.070 553 0(30.1%)	3.628 75(23.3%)	0.165 951 0(25.0%)	6.715 12(18.6%)
		7 个	0.068 036 0(32.1%)	3.492 78(25.0%)	0.162 114 0(26.7%)	6.595 02(20.1%)
Taft 波	原始结构		0.049 321 5	5.078 75	0.086 749 7	5.945 63
	改变 TMD 数量	1 个	0.038 509 0(22.5%)	3.899 12(23.1%)	0.065 670 8(24.3%)	4.841 05(18.5%)
		3 个	0.035 692 8(27.6%)	5.078 33(0.0%)	0.055 279 4(36.3%)	6.165 30(−3.7%)
		5 个	0.029 972 7(39.2%)	5.038 02(0.8%)	0.042 740 7(50.7%)	6.135 24(−3.2%)
		7 个	0.028 853 1(41.5%)	5.002 31(1.1%)	0.040 859 3(52.9%)	6.091 54(−2.5%)
El Centro 波	原始结构		0.037 891 9	1.849 09	0.095 938 6	2.903 38
	改变 TMD 数量	1 个	0.031 010 6(18.2%)	1.698 96(8.1%)	0.077 464 3(19.3%)	2.557 75(11.9%)
		3 个	0.027 739 6(26.8%)	1.737 57(6.0%)	0.063 840 5(33.5%)	2.644 14(8.9%)
		5 个	0.027 567 4(27.2%)	1.644 66(11.1%)	0.062 582 2(34.8%)	2.428 42(16.4%)
		7 个	0.027 509 5(27.4%)	1.630 89(11.8%)	0.062 360 0(35.0%)	2.377 86(18.1%)

会引起失调,而随着 TMD 分解数量的增多,海洋平台结构反应会有所下降,最终趋于平缓。

(3)该海洋平台结构初步取 TMD 总质量为结构质量的 5%,阻尼系数为 0.1423,TMD 个数为 5 个,此种情况下,以天津波为例,124,185 节点的最大位移分别减小 30.1%,23.3%,加速度反应分别减小 25.0%,18.6%,减震效果十分明显。关于海洋平台上 MTMD 的刚度优化等问题有待于进一步

研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] LIN C C,WANG J F,UENG J M. Vibration Control Identification of Seismically Excited m. d. o. f. Structure-PTMD Systems[J]. Journal of Sound and Vibration,2001,240(1):87-115.

[ 2 ] 房 良,蓝宗建,周 伟. TMD 系统参数有效域的研究

- 究[J]. 工业建筑, 2004, 34(10): 10-12, 49.
- FANG Liang, LAN Zong-jian, ZHOU Wei. Research on Effective Parametric Fields of TMD System[J]. Industrial Construction, 2004, 34(10): 10-12, 49.
- [3] MA R J, ZHANG H T, ZHAO D. Study on the Anti-vibration Devices for a Model Jacket Platform[J]. Marine Structures, 2010, 23(4): 434-443.
- [4] LI H J, HU S J, TOMOTSUKA T. The Optimal Design of TMD for Offshore Structure[J]. China Ocean Engineering, 1999, 13(2): 133-144.
- [5] 黄东阳, 周福霖, 谭平, 等. 可控式 TMD-TLD 混合调频系统对海洋平台的减震控制策略[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(1): 1-4, 36.
- HUANG Dong-yang, ZHOU Fu-lin, TAN Ping, et al. Vibration Control Strategies of Controllable TMD-TLD Hybrid Systems for Offshore Platforms Damping Control Strategy[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(1): 1-4, 36.
- [6] 李 宁, 王树青. 基于状态反馈的海洋平台 TMD 振动控制技术研究[J]. 中国海洋平台, 2011, 26(5): 27-32.
- LI Ning, WANG Shu-qing. The Study on Vibration Control of Offshore Platform with TMD Based on States Feedback[J]. China Offshore Platform, 2011, 26(5): 27-32.
- [7] 陆建辉, 彭临慧, 李华军. 海洋石油平台 TMD 振动控制及参数优化[J]. 青岛海洋大学学报, 1999, 29(4): 733-738.
- LU Jian-hui, PENG Lin-hui, LI Hua-jun. Parametric Study and Optimized Design of a Passive Tuned Mass Damper for an Offshore Oil Platform[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1999, 29(4): 733-738.
- [8] 嵇春艳. 调谐质量阻尼器对海洋平台的减振效果分析[J]. 海洋技术, 2005, 24(2): 114-120.
- JI Chun-yan. Study on the Control Effect of Tuned Mass Damper on Offshore Platforms[J]. Ocean Technology, 2005, 24(2): 114-120.
- [9] 李 黎, 黄尚斌, 张 卉. 结构振动控制中 MTMD 的基本特性研究[J]. 工程力学, 2000, 17(2): 90-96.
- LI Li, HUANG Shang-bin, ZHANG Hui. Fundamental Characteristics Study of Multiple Tuned Mass Damper (MTMD) in Control of Structure Vibration[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(2): 90-96.
- [10] 蔡国平, 孙 峰, 黄金枝, 等. MTMD 控制结构地震反应的特性研究[J]. 工程力学, 2000, 17(3): 55-59.
- CAI Guo-ping, SUN Feng, HUANG Jin-zhi, et al. Characteristic Analysis of MTMD for Seismically Excited Structures[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(3): 55-59.
- [11] 白 桦, 李 宇, 李加武, 等. 斜拉桥拱形钢塔的 MTMD 风振控制研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(1): 22-28.
- BAI Hua, LI Yu, LI Jia-wu, et al. Study on MTMD Control of Wind-induced Vibration for Arch Steel Tower of Cable-stayed Bridge[J]. China Railway Science, 2013, 34(1): 22-28.
- [12] 涂文戈, 邹银生. MTMD 对建筑结构多模态控制的减震分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 174-179.
- TU Wen-ge, ZOU Yin-sheng. Study on Multistory Structures with Multi-mode Control of MTMD[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(5): 174-179.
- [13] 刘保东, 朱 晞. 用 MTMD 控制结构的振动[J]. 噪声与振动控制, 2000(4): 11-14.
- LIU Bao-dong, ZHU Xi. Control of Structure Vibration with Multiple Tuned Mass Dampers[J]. Noise and Vibration Control, 2000(4): 11-14.
- [14] 张纪刚, 嵇煥雯, 江志伟. 基于摇摆墙体系的新型海洋平台振动控制研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增2): 151-155.
- ZHANG Ji-gang, ZHUO Huan-wen, JIANG Zhi-wei. Research on Vibration Control of New Ocean Platform Based on Rocking-wall System[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S2): 151-155.
- [15] 李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- LI Ai-qun. Engineering Structural Vibration Control [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.