

多重调谐质量阻尼器对简支箱型梁结构低频振动控制的仿真研究^{*}

张新亚¹ 雷晓燕² 罗 锐²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州;

2. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 330013, 南昌//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 为了研究 MTMD(多重调谐质量阻尼器)对简支箱型梁低频振动的控制特性,首先通过对箱梁结构进行模态分析确定受控模态,利用经典扩展定点理论进行 TMD(调谐质量阻尼器)的最优参数设计,并基于位移振幅最小化的原则,建立评价函数分别进行 MTMD 的最优参数设计;进而利用有限元分析软件 ANSYS 进行谐响应分析,研究了 TMD 的设置个数对减振效果的影响,并针对阻尼器的质量改变、刚度改变和阻尼改变进行了参数敏感性分析。研究结果显示:在附加质量相同的情况下,MTMD 的制振效果随着设置阻尼器个数的增加而增强,但个数增至一定程度后,减振效果的提升不再明显;MTMD 在质量、刚度参数发生偏移时的制振稳定性随 TMD 个数的增加而减弱,阻尼参数偏移时的制振稳定性随 TMD 个数的增加而增强。

关键词 简支箱梁;振动控制;多重调谐质量阻尼器;模态分析;参数敏感性

中图分类号 U270.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.01.024

Simulation Research on MTMD Control of Low Frequency Vibration of Simple Support Box Girder

ZHANG Xinya, LEI Xiaoyan, LUO Kun

Abstract In order to study the characteristics of MTMD control of low-frequency vibration of simple support box girder, firstly, the controlled mode is determined by modal analysis of box girder structure, and the optimal parameters of TMD are designed by classical extended fixed-point theory, and based on the principle of minimizing the displacement amplitude, the evaluation function is established to design the optimal parameters of MTMD. Then the finite element analysis software ANSYS is used to conduct the harmonic response analysis. The influence of TMD number on the vibration control effect is studied, and the parameter sensitivity analysis is conducted targeting quality change, stiffness change and damping change. The research results show that the vibration control effect of

MTMD improves with the increase of the number of additional dampers in the case of same additional mass, but the improvement of the vibration control effect is no longer obvious after the number of additional dampers has increased to a certain extent. When mass and stiffness are offset, the vibration control stability decreases with the increase of TMD number, and the vibration control stability improves with the increase of TMD number.

Key words simple support box girder; vibration control; MTMD; modal analysis; parameter sensitivity

First-author's address Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

高架桥具有工后沉降低、节约土地、建设周期短等诸多优点,近年来在城市轨道交通中得到了广泛的应用^[1]。然而,列车通过桥梁引起的桥梁振动问题日益突出,并且轮轨作用激起的桥梁振动还会向四周辐射低频噪声。研究表明桥梁低频结构噪声向四周传播时,衰减慢、穿透力强,更容易给人的身心健康带来长期性的危害^[2-3]。因此寻求有效的振动噪声控制技术,对于保护城市环境以及促进城市轨道交通的发展都具有重要意义。

调谐质量阻尼器(TMD)是一种有效的结构振动控制设备,由附加质量块、弹簧以及阻尼等组成,属于被动式吸振器,常用于地震、风致振动的控制中。近些年在铁路简支桥梁的车致振动控制中,TMD 逐渐得到人们的关注。文献[4]以 Timoshenko 梁为研究对象,分析了在移动荷载下附加 TMD 后的振动控制效果;文献[5]研究了 TMD 对移动荷载作用下桥梁振动的控制规律;文献[6]以南京长江大桥为研究对象,研究了 TMD 在该桥减振控制中的参数敏感性和控制效果。但是 TMD 的鲁棒性较差,

^{*} 国家自然科学基金项目(51868023);江西省教育厅重点课题(GJJ170357)

当本身的阻尼比或者主振动系统的固有频率发生改变时,使其偏离最优设计时减振性能会随之减退。文献[7]首次提出多重调谐质量阻尼器(MTMD),使得TMD的控制效果更加稳定;文献[8]分析了MTMD抑制铁路钢桁梁桥横向振动的振动效果,也发现相对于TMD,MTMD可扩大减振范围、改善减振系统的鲁棒性。

目前,有关TMD在高架桥梁中的应用研究已有较多文献报道,但是MTMD抑制高架混凝土箱梁振动研究鲜为少见。本文利用有限元数值仿真技术,研究了MTMD的减振效果,并探讨了MTMD的参数敏感度。研究结论可为高架桥梁的减振设计提供参考。

1 MTMD 设计理论

对于TMD采用经典扩展定点理论^[9]进行最优参数设计。该理论认为TMD存在最优频率比 α 和最优阻尼比 β ,计算表达式如下:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \mu} \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (2)$$

式中:

μ ——TMD的质量 m 与主质量 M (即箱梁的模态质量)的比值。

MTMD的设计是利用位移振幅最小化的评价函数进行最优化设计,即考察并列设置多个调谐质量阻尼器的主振动系统位移振幅曲线的极大值,把这些极大值放在一起构成一个评价函数,利用登山法^[9]进行数值解析,求解最优设计参数。

登山法是一种常用的优化算法,其原理是首先在搜索空间随机选取一点作为迭代初始点;然后在其邻域内随机产生一点,计算其函数值;若该点函数值优于当前点,则用当前点替换初始点作为新的初始点继续在邻域内搜索,否则继续在邻域随机产生另一个点与初始点进行比较,直到找到比其优秀一点或连续几次都找不到比其优秀的点则终止搜索过程。

其中求解二重调谐质量阻尼器(其 μ 为 μ_2)的最优调谐条件如下:

1) 最优频率比:

$$\alpha_1 = 0.403(\mu_2 + 0.131)^{-0.437} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = -0.72\mu_2 + 1.03$$

2) 最优阻尼比:

$$\beta_1 = (\mu_2/17.6)^{0.285} - 0.06 \quad (4)$$

$$\beta_2 = (\mu_2/3.06)^{0.377} - 0.05$$

四重调谐质量阻尼器(其 μ 为 μ_4)的最优调谐条件如下:

1) 最优频率比:

$$\alpha_1 = 0.2193(\mu_4 + 0.0699)^{-0.5487}$$

$$\alpha_2 = 0.2721(\mu_4 + 0.1301)^{-0.6289} \quad (5)$$

$$\alpha_3 = 0.7697(\mu_4 + 0.8667)^{-1.9992}$$

$$\alpha_4 = 1.1327e^{-0.9314 \times \mu_4} - 0.0953e^{-72.417 \times \mu_4}$$

2) 最优阻尼比:

$$\beta_1 = (1.3066 \times 10^{-4} \times \mu_4)^{0.0772} - 0.3040$$

$$\beta_2 = (1.9270 \times 10^{-3} \times \mu_4)^{0.1355} - 0.1786 \quad (6)$$

$$\beta_3 = (2.9512 \times 10^{-2} \times \mu_4)^{0.2405} - 0.0883$$

$$\beta_4 = (0.2877 \times \mu_4)^{0.4319} - 0.0248$$

六重调谐质量阻尼器(其 μ 为 μ_6)的最优调谐条件如下:

1) 最优频率比:

$$\alpha_1 = 0.1867(\mu_6 + 0.0328)^{-0.4735}$$

$$\alpha_2 = 0.2127(\mu_6 + 0.0486)^{-0.5001}$$

$$\alpha_3 = 0.2307(\mu_6 + 0.0897)^{-0.6031} \quad (7)$$

$$\alpha_4 = 0.9683(\mu_6 + 0.9871)^{-3.5789}$$

$$\alpha_5 = 1.0837e^{-2.2288 \times \mu_6} - 0.0556e^{-99.420 \times \mu_6}$$

$$\alpha_6 = 1.1897e^{-0.8450 \times \mu_6} - 0.1389e^{-73.535 \times \mu_6}$$

2) 最优阻尼比:

$$\beta_1 = (5.7835 \times 10^{-4} \times \mu_6)^{0.1957} - 0.0518$$

$$\beta_2 = (1.3704 \times 10^{-3} \times \mu_6)^{0.2098} - 0.0485$$

$$\beta_3 = (1.1732 \times 10^{-2} \times \mu_6)^{0.2884} - 0.0262$$

$$\beta_4 = (2.8652 \times 10^{-2} \times \mu_6)^{0.3162} - 0.0256 \quad (8)$$

$$\beta_5 = (1.9782 \times 10^{-1} \times \mu_6)^{0.2884} - 0.0018$$

$$\beta_6 = (5.1454 \times 10^{-1} \times \mu_6)^{0.5677} - 0.0038$$

所以在选定 μ 之后,可计算出相应的 α 和 β ,并根据相应的 α 和 β 值,可计算MTMD中阻尼器相应的阻尼 C 和弹簧刚度 K :

$$C = 4\pi\alpha\beta fm \quad (9)$$

$$K = 4\pi^2\alpha^2 f^2 m \quad (10)$$

式中, f 为主结构的受控模态频率。

2 箱梁 MTMD 最优参数的确定

2.1 有限元模型的建立与精度校验

基于有限元分析软件ANSYS建立箱梁结构有限元模型如图1所示。模型中梁体采用solid45单元模拟,结构参数见表1所示,其单元数为26800,节点35904个。简支箱型梁长32m,为双线行车梁型。

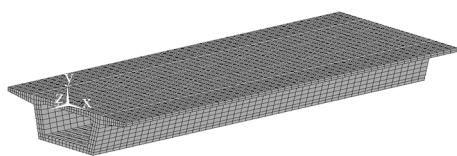


图1 箱梁三维有限元模型

表1 有限元模型结构参数

结构	参数	取值
桥梁	弹性模量/GPa	34.5
	密度/(kg/m ³)	2 500
	泊松比	0.2

计算箱梁模型自由模态频率,并与文献[10]中缩尺试验模型的实测结果进行对比,基于相似比尺进行误差分析如表2所示,发现试验结果与模态分析结果吻合良好,验证了有限元模型的精度及适用性。

表2 箱梁结构仿真与试验模态频率对比

阶数	有限元模态频率/Hz	缩尺试验模态频率/Hz	理论相似比尺	误差/(%)
1	12.925	129.103	0.100 664	0.55
2	16.738	162.603	0.100 664	2.26
3	25.176	249.994	0.100 664	0.04
4	29.192	未识别	0.100 664	
5	29.243	266.359	0.100 664	8.12

2.2 受控模态分析

本文通过对箱梁结构进行模态分析,采用振型贡献率确定箱梁减振受控模态^[11]。振型贡献率定义为:

$$\zeta = \frac{\text{振型有效质量}}{\text{总质量}} \times 100\% \quad (11)$$

在箱梁底板的4个角点建立4个弹簧-阻尼单元 Combine14 模拟桥梁弹簧支座,支座的竖向刚度为 3.38×10^6 kN/mm,阻尼为 10^5 N·s/m。对上述箱梁有限元模型进行模态分析计算,得到箱梁的前10阶固有频率及振型贡献率如表3所示。

由表3分析可以看出,箱梁 x 、 y 、 z 方向的前10阶振型总贡献率均大于95%,即说明前10阶的振型已经满足确定箱梁受控模态分析的需要。这里主要关注箱梁竖向的动力学响应,故只研究箱梁在竖向(y 方向)上的模态。可以发现 y 方向上第2阶模态,也即一阶竖弯模态贡献率达85%,模态振型如图2所示。故确定第2阶为受控模态,频率为5.960 Hz。

2.3 MTMD 最优参数的确定

现阶段研究认为 TMD 减振效果随质量比 μ 的

表3 箱梁自振频率及振型贡献率

阶数	固有频率/Hz	x 方向	y 方向	z 方向
1	5.273	0.562 88	0	0
2	5.960	0	0.854 32	0
3	10.281	0	0	0.910 00
4	11.299	0.403 02	0	0
5	13.712	0	0	0
6	15.787	0	0.008 67	0.089 48
7	22.660	0	0	0
8	24.071	0	0.127 58	0
9	28.114	0.000 56	0	0
10	34.189	0.014 28	0	0
振型贡献率总和		0.980 74	0.990 57	0.999 48

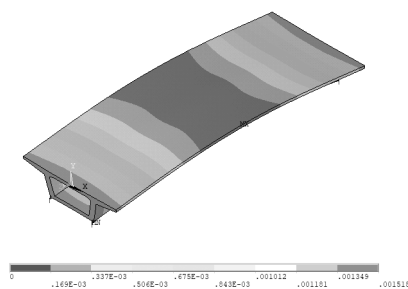


图2 受控模态振型图

增加而增强,但经综合考虑控制效果、经济与结构安全等多种因素,MTMD 的 μ 取值不宜过大,一般取2%~5%^[12]。本文选定 μ 为0.02,将 μ 代入设计理论公式,计算 MTMD 最优调谐参数见表4所示。

3 MTMD 减振效果分析

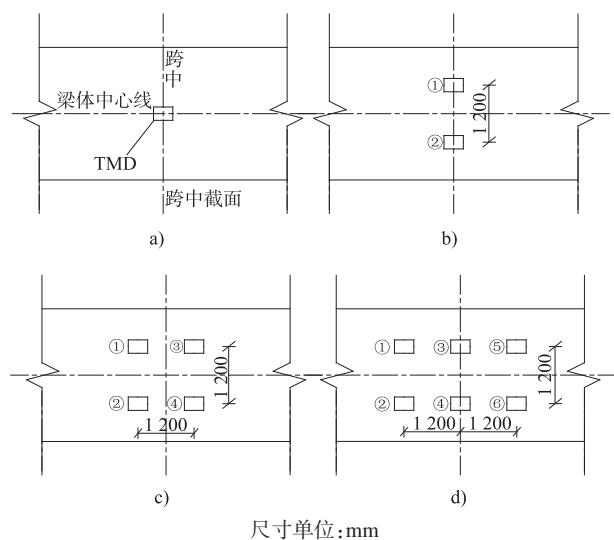
在箱梁有限元模型中添加 MTMD 减振设备,质量块选用 MASS21 单元进行模拟,弹簧阻尼元件选用 COMBIN14 单元模拟。将 MTMD 设备悬挂于箱梁跨中截面腔内的顶板上,设计平面布置见图3所示,对应最优设计参数取值见表4所示。选取跨中顶板421节点为振动响应监测点,如图4所示。

在图4所示加载点,施加频率为6 Hz、幅值为4 600 N的简谐荷载,通过瞬态分析计算在不同的TMD 附加个数下,振动监测点的加速度时域响应,其时程曲线如图5所示。可以发现设置TMD 对于抑制桥梁结构的共振有很好的效果,而MTMD 制振效果更佳,并且随设置个数的增加,效果也增强。

图6为设有MTMD 前后箱梁振动监测点的幅频响应。由分析可知,在一阶竖弯固有频率5.960 Hz处,谐响应幅值出现极大值。并且设置MTMD 后,固有频率附近的加速度响应明显降低,相对于未安

表4 MTMD 最优调谐参数

TMD 数/个	$\mu/\%$	α	β	M/kg	m/kg	f/Hz	$K/(\text{N/m})$	$C/(\text{N}\cdot\text{s/m})$
2	1.00	0.949	0.059	464 285.3	4 642.9	5.960	5 860 000	19 530
	1.00	1.023	0.066	464 285.3	4 642.9	5.960	6 810 000	23 550
4	0.50	0.909	0.029	464 285.3	2 321.4	5.960	2 690 000	4 600
	0.50	0.958	0.030	464 285.3	2 321.4	5.960	2 990 000	5 010
	0.50	1.013	0.032	464 285.3	2 321.4	5.960	3 340 000	5 650
	0.50	1.061	0.034	464 285.3	2 321.4	5.960	3 660 000	6 290
	0.33	0.900	0.024	464 285.3	1 532.1	5.960	1 740 000	2 490
	0.33	0.934	0.027	464 285.3	1 532.1	5.960	1 870 000	2 900
6	0.33	0.966	0.027	464 285.3	1 532.1	5.960	2 000 000	3 000
	0.33	1.002	0.028	464 285.3	1 532.1	5.960	2 160 000	3 230
	0.33	1.036	0.030	464 285.3	1 532.1	5.960	2 310 000	3 580
	0.33	1.077	0.023	464 285.3	1 532.1	5.960	2 490 000	2 850



尺寸单位:mm

图3 MTMD 平面布置图

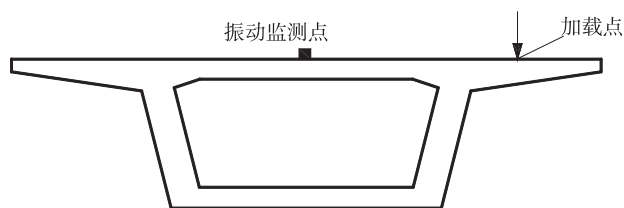


图4 跨中截面特征点

装 TMD 时, 单个 TMD 可使幅频响应极值减少 32.7%, 二重 TMD 可减少 33.9%, 四重 TMD 可减少 36.4%, 六重 TMD 可减少 36.5%。可以发现随着设置 TMD 个数的增加, 减振效果逐渐增强, 但是四重之后制振性能增加不再明显。

4 MTMD 参数敏感性分析

TMD 的鲁棒性体现在参数最优化设计后其控制效果在种种变化因素作用下仍能维持稳定。按照

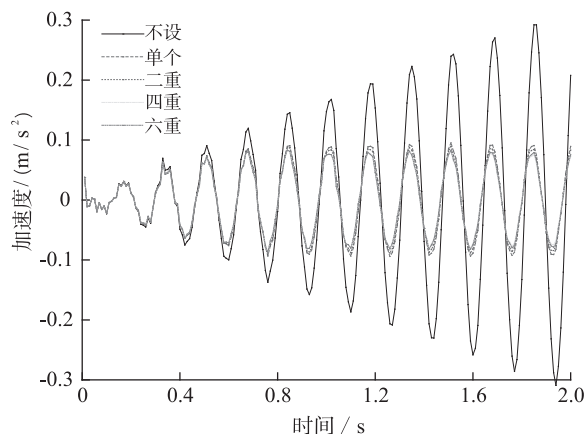


图5 设有 MTMD 前后的箱梁加速度时程曲线

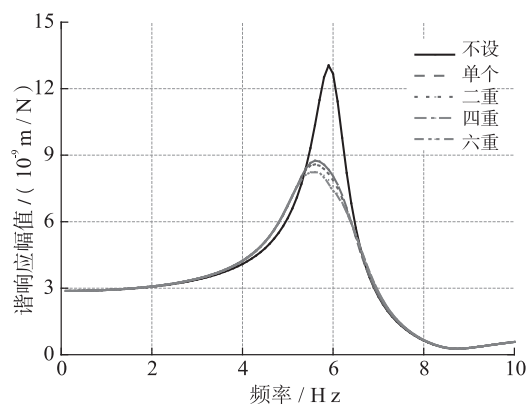


图6 设有 MTMD 前后的箱梁幅频响应

最优设计参数进行 TMD 的制作, 能使 TMD 达到最优的吸振效果。但实际上 TMD 对结构进行振动控制时, 被控结构及 TMD 的加工与制作过程中, 不可避免地会出现参数的制作误差, 故有必要去研究这些误差对减振效率的影响。即需对 MTMD 设备的质量参数、刚度参数和阻尼参数进行敏感性的分析。

4.1 MTMD 质量敏感性分析

现对简支箱梁桥一阶竖向振动控制问题进行质量参数偏离的敏感性分析。其中,MTMD 的质量分别按照设计质量的 50%、60%、70%、80%、90%、100%、110%、120%、130%、140%、150%进行取值,设计质量即按表 4 取值。进行质量参数分析时,刚度及阻尼系数均按照设计参数进行取值。计算各工况下跨中截面振动监测点的谐响应幅值,如图 7 所示。

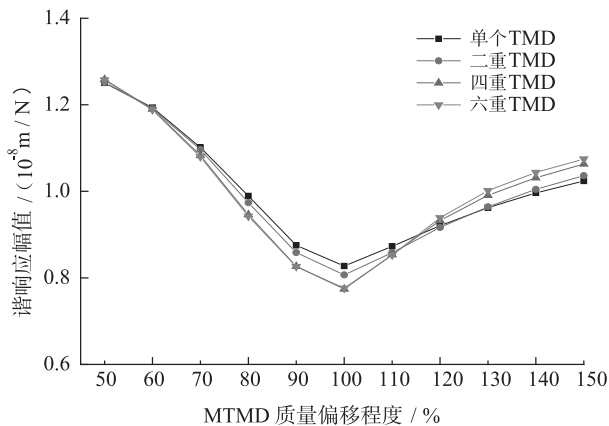


图 7 MTMD 质量敏感性对比

根据图 7 可以发现,随着质量向着正、负方向的偏移,谐响应幅值上升,阻尼器的减振效果均发生明显的下降。在质量发生较小程度的偏移 (70%~110%) 时,调谐质量阻尼器制振性能仍然随着设置个数的增加呈升高的趋势。但是在质量偏移较大时,特别在质量取值大于 120% 时,可以明显发现随着设置个数增加,敏感性也相应提高。MTMD 整体制振稳定性随设置个数的增加而减弱,负向偏移稳定性较正向差。

4.2 MTMD 刚度敏感性分析

现对简支箱梁桥一阶竖向振动控制问题进行刚度参数偏离的鲁棒性分析。其中,MTMD 的刚度分别按照设计刚度的 60%、70%、80%、90%、100%、110%、120%、130%、140%进行取值。进行刚度参数分析时,MTMD 的质量以及阻尼系数均按照设计参数进行取值。计算各工况下跨中截面振动监测点的谐响应幅值,进行设置不同 TMD 个数下,刚度敏感性的对比(见图 8)。

由图 8 可以发现,随着刚度向着正、负方向的偏移,谐响应幅值上升,阻尼器的减振效果均发生明显的下降。在系统质量发生较小程度的偏移 (75%~140%) 时,调谐质量阻尼器制振性能仍然随着附加个数的增加呈升高的趋势。但是在质量取值小于设计质量 75% 时,可以明显发现随着个数增加,敏感性

也相应提高,制振效果变差。MTMD 整体制振稳定性随个数的增加而减弱。

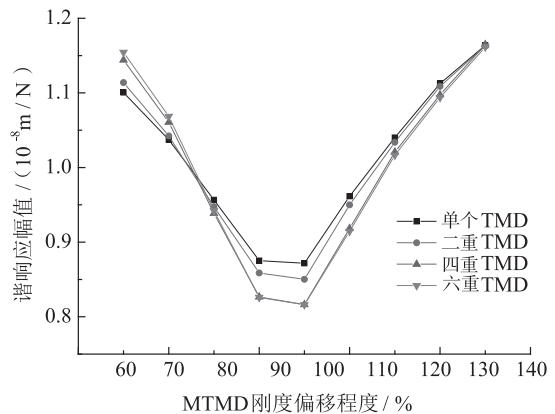


图 8 MTMD 刚度敏感性对比

4.3 MTMD 阻尼系数敏感性分析

现对简支箱梁桥一阶竖向振动控制问题进行阻尼系数偏离的鲁棒性分析。其中,MTMD 的阻尼系数设置分别按照设计阻尼系数的 20%、40%、60%、80%、100%、120%、140%、160%、180%、200%进行取值。进行阻尼系数偏离分析时,质量参数及刚度均按照设计参数进行取值。

计算各工况下跨中截面振动监测点的谐响应幅值(见图 9)。从图 9 可以看出:

- 1) 同等 μ 的情况下,MTMD 的减振效果要优于单个 TMD。
- 2) 与单个 TMD 相比,MTMD 在阻尼系数发生变动的情况下,随设置的 TMD 个数的增加,谐响应幅值的变动较小,意味着受环境因素的影响较小。
- 3) 相对于单个 TMD,如果将 MTMD 阻尼系数设定得比最优值大一些的话,则即使阻尼值发生变化,谐响应幅值的增加也可得到抑制。

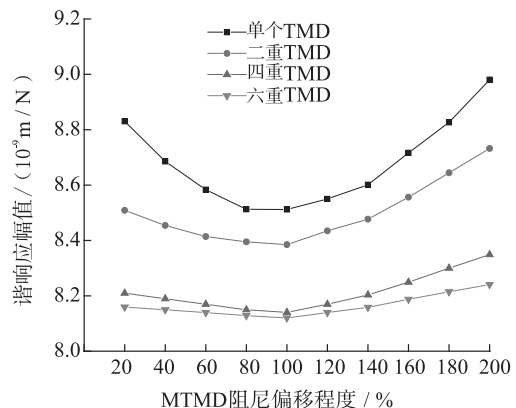


图 9 MTMD 阻尼系数敏感性对比

(下转第 157 页)

3.3 回风温度传感器读数偏高

压缩机实际运行工况低于设定工况,蒸发器换热不充分,造成压缩机吸气压力越来越低,直至低压开关动作、低压故障出现。针对此故障通过软件修正回风温度传感器读取的数值,将回风温度传感器读取数值减去 2℃作为实际值参与控制。

针对上海轨道交通 13 号线司机室空调机组的低压故障,从上述 3 个方面进行了整改,自 2018 年 2 月整改完成至今未出现一起同类故障,运营实际验证了整改方案完全符合要求。

4 结语

在车辆空调系统的实际运用过程中,出现的故障不仅仅局限于空调机组的低压故障,还存在不出风、风量小、通风机不工作、噪声大、漏水等故障。地铁车辆在空调系统设计时应充分考虑实际应用过程可能遇到的各种情况,采用成熟可靠的方案,来避免

由于设计问题引起各类故障,并应充分考虑空调系统不会由于个别小故障而影响车厢内的舒适性,同时应保证空调机组的可维护性强、软件使用方便^[3]。地铁公司检修部门也需通过对各类故障的分析总结,针对不同类型的故障采取相应的处理,对各类检修规程进行修订使之完善,强化对各类常发故障部件的预防检查措施,加强对空调机组的日常维修保养及定期保养。只有通过一系列举措的实施,才能有效地降低空调系统的故障率及维修成本。

参考文献

- [1] 中国中车浦镇公司.上海市轨道交通 13 号线项目车辆技术规格书[R].南京:中车浦镇车辆有限公司,2013.
- [2] 罗铁军.地铁列车空调常见故障分析与对策[J].现代物业·新建设,2014(4):39.
- [3] 刘国良.广州地铁列车空调系统设计差异分析[J].机车电传动,2007(3):53.

(收稿日期:2019-02-26)

(上接第 115 页)

5 结论

1) 通过模态分析可确定简支箱梁的一阶竖弯模态为设置的 MTMD 的受控模态,受控频率为 5.960 Hz。

2) 在设置 TMD 质量相同的情况下,MTMD 的制振效果优于单个 TMD。但发现设置 4 个与 6 个 TMD 的制振性能差异不明显,可以认为 4 个 TMD 效果最优。

3) 质量、刚度参数灵敏度分析结果显示,MTMD 制振稳定性较单个 TMD 差,设置个数越多则越明显。

4) 阻尼参数灵敏度分析结果显示,MTMD 在阻尼系数发生变动的情况下,谐响应幅值较单个 TMD 变动要小,随设置 TMD 个数的增加,制振稳定性增强。

参考文献

- [1] 李小珍,杨得旺,郑净,等.轨道交通桥梁减振降噪研究进展[J].中国公路学报,2018(7):55.
- [2] PERSSON W K, RYLANDER R. The prevalence of annoyance

and effects after long-term exposure to low-frequency noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001(3):483.

- [3] WAYE K P. Effects of low frequency noise and vibrations: environmental and occupational perspectives [J]. Encyclopedia of Environmental Health, 2011, 4(7):240.
- [4] CHEN Y H, CHEN D S. Timoshenko beam with tuned mass damper to moving loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(2):167.
- [5] 肖新标,沈火明.移动荷载作用下的桥梁振动及其 TMD 控制[J].振动与冲击,2005(2):58.
- [6] 王浩,刘海红,陶天友,等.TMD 对列车作用下大跨钢桁架桥的振动控制研究[J].振动工程学报,2014(3):385.
- [7] 顾萍,王森,吴定俊.TMD 抑制既有铁路钢桁架桥横向振动研究[J].铁道学报,2005(2):85.
- [8] 背户一登.动力吸振器及其应用[M].任明章,译.北京:机械工业出版社,2013.
- [9] 汪振国,雷晓燕,罗锐,等.桥梁结构振动试验相似模型的设计及校验[J].振动与冲击,2018(7):220.
- [10] 江凌.TMD 和 MTMD 在拱桥振动控制中的应用[D].重庆:重庆交通大学,2008.
- [11] 张迅,李小珍,刘全民,等. MTMDs 控制高速铁路简支箱梁桥车致振动噪声的研究[J].振动与冲击,2013(13):194.

(收稿日期:2019-04-07)