

黏滞阻尼器在大跨斜拉桥减震设计中的应用

尚 晋

(大连职业技术学院, 辽宁 大连 116035)

摘要:为揭示黏滞阻尼器对大跨斜拉桥减震效果的影响规律,需对黏滞阻尼器进行参数分析及优化设计。文章以某斜拉桥项目为工程背景,建立空间动力模型,基于非线性动力时程分析方法,对设置了阻尼器后的大跨斜拉桥结构动力响应进行计算和分析。结果表明:通过选择合适的阻尼器参数和布置位置,可有效降低结构主梁和塔顶纵向位移,同时改善墩底受力,解决大跨度斜拉桥的抗震问题;综合考虑阻尼器制作和安装等因素,该桥阻尼系数取 $6\ 000\ \text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$,速度指数取 0.4 时可以取得较好的减震效果;综合不同位置的阻尼器布置方案下结构地震响应分析结果,提出了该桥阻尼器布置的最优方案。

关键词:斜拉桥; 减震设计; 参数分析; 黏滞阻尼器; 地震响应

中图分类号:U448.27;U442.5

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)04-0050-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.04.048

Application of viscous dampers to seismic mitigation design of long-span cable-stayed bridges

SHANG Jin

(Dalian Vocational and Technical College, Dalian 116035, Liaoning, China)

Abstract: In order to reveal the influence law of viscous dampers on the seismic reduction effect of long-span cable-stayed bridges, parameter analysis and optimization design of viscous dampers are carried out. Taking a certain cable-stayed bridge project as the engineering background, a spatial dynamic model is established. Based on the nonlinear dynamic time history analysis method, the dynamic response of the long-span cable-stayed bridge with dampers is calculated and analyzed. The results show that by selecting appropriate damper parameters and placement positions, the longitudinal displacement of the main beam and tower top of the structure can be effectively reduced, while improving the stress on the pier bottom and solving the seismic problem of long-span cable-stayed bridges; Taking into account factors such as the production and installation of dampers, a damping coefficient of $6\ 000\ \text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ and a velocity index of 0.4 can achieve good seismic reduction effect for the bridge; Based on the seismic response analysis results of the structure under different damper layout schemes, the optimal damper layout scheme for the bridge is proposed.

Key words: cable-stayed bridge; seismic mitigation design; parameter analysis; viscous damper; seismic response

地震破坏范围广,严重威胁公路交通系统,削弱了道路的安全性,不仅阻碍了灾区的救援工作,还可能会加剧泥石流、滑坡等次生灾害的发生,对人民的日常生活造成极具破坏性的影响^[1]。我国基础交通设施建设日新月异,特别是大跨斜拉桥以其

自身独有的特点受到了设计者的青睐,为各地的经济发展注入了活力。大跨度斜拉桥具有形式多样、外形美观、结构受力合理等优点,在实际工程中应用十分广泛^[2-3]。近些年,我国地震频发,斜拉桥在地震作用下的安全性问题日益突出,因此,大跨

收稿日期:2024-07-15

基金项目:大连职业技术学院(大连开放大学)校级科研课题(ZK2024YB07)

作者简介:尚晋(1987—),男,高级工程师,从事桥梁工程方面的研究工作。

斜拉桥的抗震性能也越来越受到设计者的关注。

大跨度斜拉桥作为受力复杂的特种桥梁结构, 往往需要采取减隔震措施来减小地震作用响应。陈百奔等^[4]研究了长周期地震动作用下非线性黏滞阻尼器对大跨斜拉桥减震效果的影响。贾毅等^[5]研究了采用摩擦摆支座和液体黏滞阻尼器的减隔震混合装置对大跨度斜拉桥抗震性能的影响, 确定了较为合理的减隔震装置参数。杨吉新等^[6]基于 3 种纵向抗震体系对高度超过 200 m 的大跨斜拉桥黏滞阻尼器的布置方式进行了研究。王志伟等^[7]基于 Maxwell 模型, 研究了组合梁斜拉桥设置液体黏滞阻尼器对结构的减震效果及其参数设置问题。由此可见, 不同跨径及结构形式的斜拉桥适用的黏滞阻尼器参数及布置形式不尽相同, 具有自身的独特性, 大跨斜拉桥中黏滞阻尼器装置的设计通用性不强。因此, 本研究以一座主跨为 290 m 的斜拉桥为工程背景, 采用非线性时程分析法研究阻尼器在大跨度斜拉桥抗震分析中的作用及影响, 同时对阻尼器进行参数敏感性分析及优化设计, 考察其减震效果, 得到阻尼器的参数变化规律与布置方案, 以期可为同类桥梁设计提供参考。

1 工程案例

1.1 工程概况

斜拉桥跨径布置为 (126 + 290 + 126) m, 全长 542 m, 为三跨双塔单索面预应力混凝土结构。结

构体系为半漂浮体系, 塔墩固结, 墩梁之间设竖向支座。

主梁为预应力混凝土箱梁, 采用单箱三室的结构形式, 主梁全宽 26.8 m, 横隔梁纵向标准间距为 6 m, 厚度为 0.5 m, 桥梁两端设有实心段横隔梁, 作为端部受力构件的同时起到压重作用。

桥塔为单柱式单索面混凝土结构, 上塔柱采用单箱单室的外侧带凹槽的六边形截面, 截面尺寸为 3.6 m × 6.6 m (横 × 纵)。桥塔下塔柱采用中间留有人洞的实体截面, 截面尺寸为 3.6 m × 6.6 m (横 × 纵)。主墩采用直径为 2.5 m 的群桩基础, 单个承台下设置摩擦桩 18 根, 梅花形布置。边墩采用钻孔灌注桩 3 × 2 (横 × 纵) = 6 根, 直径为 1.8 m。桥梁总体布置如图 1 所示。

1.2 计算模型

根据斜拉桥的总体布置情况, 基于通用有限元软件 Midas Civil 建立了该桥的动力空间分析模型。考虑拉索的垂度影响, 采用桁架单元对其进行模拟, 同时考虑了斜拉索成桥状态的初始几何刚度影响。除斜拉索外, 其余单元均采用空间梁单元进行模拟。考虑桩土效应影响, 在 Midas Civil 动力有限元模型中用节点弹性支撑来模拟土弹簧, 其刚度根据规范采用 m 法进行计算得到。有液体黏滞阻尼器的模型中阻尼器采用非线性边界条件的一般连接模拟。时程分析时采用非线性直接积分法。有限元模型如图 2 所示。

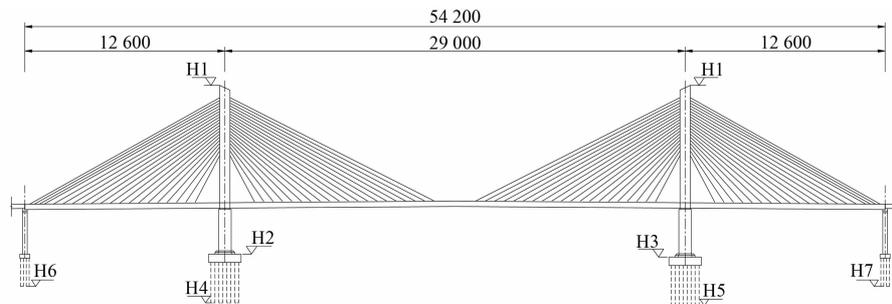


图 1 总体布置

cm

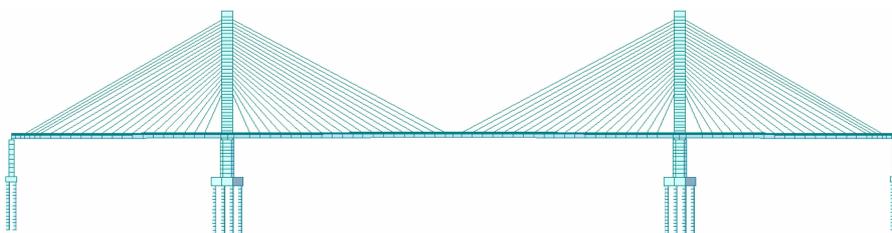


图 2 有限元模型

2 液体黏滞阻尼器

阻尼器的设置不会改变桥梁结构自振周期和刚度，只是通过内部黏滞流体阻尼材料的流动增大结构阻尼，达到消耗地震能量的目的，可以显著地控制地震作用下结构的振动。正是基于这些优点，黏滞阻尼器在斜拉桥上应用较为广泛，设计者常常选用黏滞阻尼器作为减震装置控制斜拉桥结构位移以及内力^[8]。

黏滞阻尼器的种类很多，常见的类型：常规液体黏滞阻尼器、熔断型液体黏滞阻尼器、限位型液体黏滞阻尼器、锁定装置、摩擦型液体黏滞阻尼器等^[9-10]。最为常见的是典型的液体黏滞阻尼器，其广泛被应用于悬索桥、斜拉桥、拱桥等缆索承重桥梁及大跨径梁桥^[11]。典型的液体黏滞阻尼器的阻尼力与速度的关系可以是线性的，也可以是非线性的，可表示为

$$F = CV^\alpha \quad (1)$$

式中： F 为阻尼力，kN； C 为阻尼系数，kN·s/m； V 为阻尼器两端的相对速度，m/s； α 为速度指数，一般取值为 0.3~1.0^[12]。

控制阻尼器效果的两个主要指标为速度指数和阻尼系数^[13-14]，设计者可以通过定量的精确计算来设计阻尼器各项参数作为斜拉桥减震产品，最终达到减震的设计要求。

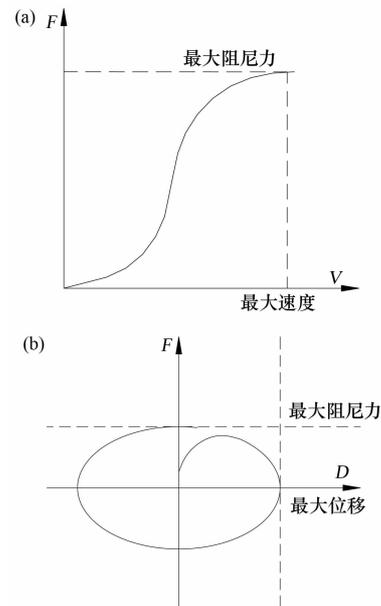
目前关于阻尼器的恢复力模型主要有：线性模型、Maxwell 模型、Kelvin 模型、分数导数模型等^[15-18]。本文采用软件中的 Maxwell 模型来模拟，液体黏滞阻尼器的简化模型如图 3 所示。

3 阻尼器参数分析

3.1 参数分析

由式(1)可以看出，阻尼器的主要参数为阻尼系数 C 和速度指数 α 。本文主要研究对比阻尼系数 C 和速度指数 α 对斜拉桥结构主梁位移、塔顶位移及主墩受力等关键控制部位的地震动力响应的影响，并找出相应的影响规律，从而得到背景工程较合理的黏滞阻尼器设置参数。

对背景工程进行阻尼器参数分析计算时，以下分析内容基于将阻尼器设置在塔梁连接处，每

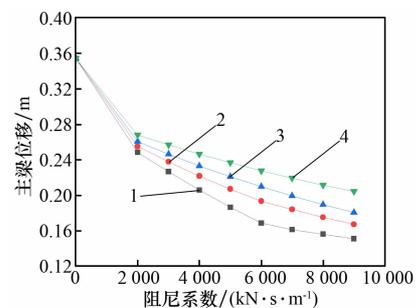


(a) 速度与阻尼力关系；(b) 位移与阻尼力关系

图 3 典型液体黏滞阻尼器的简化模型

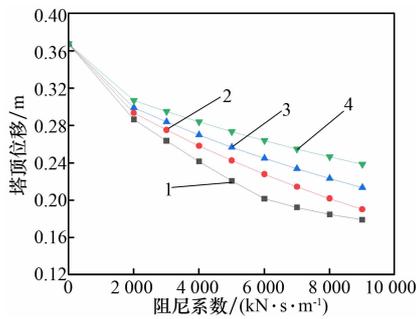
个主塔与主梁位置处设置两个纵向阻尼器，全桥共计 4 个纵向阻尼器的情况下得到的。

根据本斜拉桥结构布置特点，同时考虑现实工程中的实际应用取值范围，在参数分析计算中，对滞阻尼器速度指数 α 依次取值 0.4、0.6、0.8 和 1.0，对阻尼系数 C 依次取值为 2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000 进行敏感性分析，共计 32 种参数组合。对于采用不同阻尼器参数的有限元模型进行动力计算，并详细分析本项目斜拉桥关键部位在相同的地震作用下的动力响应结果。本项目工程所处地区为 7 度地震烈度区，加速度峰值为 0.15g，E2 重要性系数为 1.7，调整后的加速度峰值为 0.255g。采用不同的阻尼器参数对比研究结构关键部位的地震响应情况，其变化规律如图 4~7 所示。



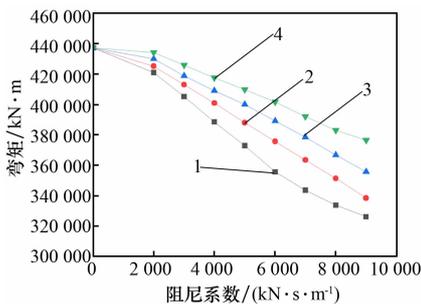
α : 1—0.4; 2—0.6; 3—0.8; 4—1.0。

图 4 主梁梁端纵向位移



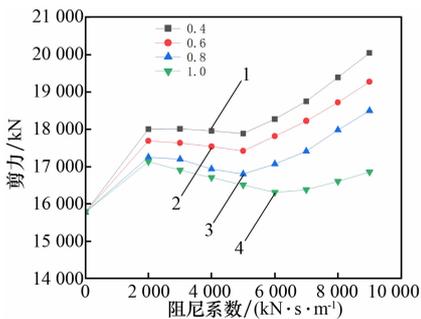
α : 1—0.4; 2—0.6; 3—0.8; 4—1.0。

图5 主塔塔顶纵向位移



α : 1—0.4; 2—0.6; 3—0.8; 4—1.0。

图6 主墩墩底纵向弯矩



α : 1—0.4; 2—0.6; 3—0.8; 4—1.0。

图7 主墩墩底纵向剪力

由图4~6可知,安装液体黏滞阻尼器后结构各关键部位的地震响应显著下降,特别是对结构位移的控制作用更加显著;在阻尼器速度指数一定的情况下,当阻尼器阻尼系数逐渐增大时,主梁、主塔纵向位移以及主墩墩底纵向弯矩随之相应减小,但是随着阻尼系数的不断增大,下降速率均趋于平缓;在阻尼系数一定的情况下,主梁梁端和主塔塔顶纵向位移以及主墩墩底纵向弯矩与速度指数的变化规律一致,即随着后者的减小而减小,且这种差别随着阻尼系数的增加而变大。

由图7可知,主墩墩底纵向剪力与阻尼系数的关系存在两个变化点,在阻尼系数较小和较大时,主墩墩底纵向剪力与阻尼系数变化规律一致,

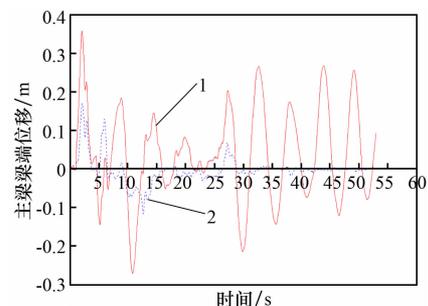
即随着后者的增大而增大,但在中间段附近时,主墩墩底纵向剪力与阻尼系数变化规律相反,即随着后者的增大而减小;当阻尼器阻尼系数一定时,主墩墩底纵向剪力与速度指数变化规律相反,即随着速度指数的减小而变大。

通过以上参数分析可知,设置了黏滞阻尼器的大跨斜拉桥,其主梁纵向位移、主塔塔顶纵向位移以及墩底的纵向弯矩均得到了有效的改善。但是,在选择阻尼器参数时,并非阻尼系数越大越好,在阻尼系数达到一定数值之后减震的效果逐渐减弱,对墩底的纵向剪力产生了增大效应。

由以上分析得出,合理地设置黏滞阻尼器可以明显降低斜拉桥关键结构参数的地震响应结果,通过对阻尼器的参数敏感性分析可以得到较合理的阻尼器参数,但这仅仅是从桥梁结构受力的角度进行的分析,与此同时,还应考虑阻尼器自身的受力情况以及安装制作等条件及经济成本。综上所述,在考虑了结构受力及经济成本的综合因素下,该桥在阻尼系数取6000 kN·s/m,速度指数取0.4时可以取得较好的减震效果。

3.2 减震效果分析

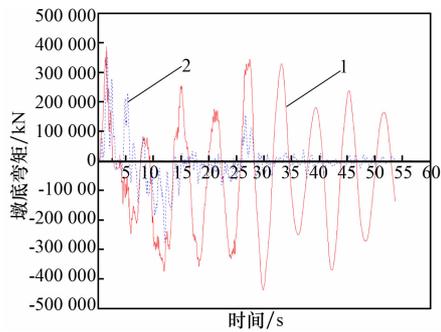
斜拉桥采用阻尼器是为了减小地震作用下的响应,即减小地震作用下结构内力和结构位移。为了更加直观地查看阻尼器对大跨斜拉桥的减震效果,在经过上述阻尼器参数分析后确定的合理参数条件下,采用时程曲线图进一步对比有无阻尼器时的主梁梁端纵向位移和主墩墩底纵向弯矩的地震响应情况,结果如图8、9所示。



1—减震前;2—减震后。

图8 主梁梁端纵向位移时程曲线

由图8、9可知,结构的地震响应在设置了阻尼器后得到了明显的改善,主梁梁端纵向位移和主墩墩底纵向弯矩均有了不同程度的减小,其中



1—减震前; 2—减震后。

图 9 主墩墩底纵向弯矩时程曲线

位移减小的幅度更大。说明选定的阻尼器参数有效,斜拉桥在设置了合理阻尼参数的阻尼器后,其结构的抗震性能得到了提升,有着较好的减震效果。

为了更加准确的表达阻尼器对大跨斜拉桥的减震效果,可以采用减震率来直接对比减震前后的地震响应数值。减震率为

$$M = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S_0 表示减震前结构地震响应结果; S_1 表示减震后结构地震响应结果。

当 M 为正值时,说明增加的阻尼器装置导致了结构地震响应减小,起到了减震效果;当 M 为负值时,说明增加的阻尼器装置导致了结构地震响应增加,起到了反作用效果。黏滞阻尼器采用参数分析后的合理设置参数,对比减震前后斜拉桥结构各关键参数的地震响应数值,计算结果如表 1 所示。

由表 1 可知,结构在设置了阻尼器以后,结构地震响应变化明显,其中,主梁和塔顶纵向位移在阻尼器的作用下减震率在 45% 以上,主墩墩底纵向弯矩

的减震率达到了 18.7%,但与此同时,主墩墩底剪力却反向增大了 15.8%,说明黏滞阻尼器对主墩墩底纵向剪力起到了反作用的效果,对于本项目工程需要引起注意。一般情况下,主塔根部配有大量的纵向和横向钢筋,巨大的实心截面具有足够的抗剪截面和抗剪箍筋,即便是主墩墩底剪力稍微增大一些,抗剪也很容易满足规范要求且在强震下也不会发生脆性破坏。减震设计的主要目标是减小位移和弯矩^[19],因此,在牺牲一部分主墩墩底纵向剪力的情况下,选定的阻尼器能够很好地完成斜拉桥结构的主要减震目标,有效地减小了结构位移和内力,优化了结构地震响应。

4 阻尼器方案优化设计

为了研究阻尼器安装位置对斜拉桥结构地震响应的影响,采用不同的阻尼器布置方案,建立有限元模型,根据计算结果优化阻尼器方案。

斜拉桥黏滞阻尼器常见的安装位置既可以设置在主梁与主塔之间(方案一),也可以设置在主梁与边墩之间(方案二)。在相同的阻尼器参数条件下,对比两种阻尼器安装位置对结构地震响应的影响,探讨阻尼器安装位置对结构的减震效果影响规律。分别计算方案一和方案二下桥梁结构的地震内力及位移,主要参数计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知,对于结构墩底弯矩和塔顶位移,阻尼器两种布置方案的相差不大;跟方案一相比,方案二的主梁端纵向位移和主墩墩底纵向剪力影响均在 20% 左右,但是对边墩墩底纵向弯矩和边墩墩

表 1 结构响应对比分析

关键参数	S_0	S_1	减震率/%
主梁纵向位移/m	0.358	0.169	52.8
塔顶纵向位移/m	0.367	0.201	45.2
主墩墩底纵向弯矩/(kN·m)	437 360.000	355 600.000	18.7
主墩墩底纵向剪力/kN	15 780.000	18 270.000	-15.8

表 2 阻尼器安装方案对比分析

方案	主墩墩底纵向弯矩/(kN·m)	主墩墩底纵向剪力/kN	塔顶纵向位移/m	主梁端纵向位移/m	边墩墩底纵向弯矩/(kN·m)	边墩墩底纵向剪力/kN
方案一	355 600.0	18 270.0	0.201	0.169	8 120.0	580.0
方案二	344 300.0	14 230.0	0.228	0.204	31 600.0	1 950.0
变化率/%	-3.2	-22.1	13.400	20.700	289.2	236.2

底纵向剪力影响较大,变化率均超过230%。这说明方案二的设置方式牺牲了边墩受力,使边墩内力急剧增大的同时减小了主墩墩底的剪力。方案二相较于方案一而言,主梁梁端和塔顶纵向位移没有减小反而增大,主墩墩底内力改善效果不明显,但是边墩内力增加值明显。因此,从全桥结构整体角度出发,方案一的布置要优于方案二。

5 结论

(1) 大跨度斜拉桥设置了黏滞阻尼器后,可以有效地减小结构各关键部位的地震响应,以及主梁和塔顶纵向位移,减震率在45%以上;同时改善了主墩结构受力,其减震率在18%以上,减震效果明显。

(2) 在速度指数不变时,阻尼系数与主梁和塔顶纵向位移以及墩底纵向弯矩反向变化,即随着前者的增大而减小,墩底纵向剪力随之增大;在阻尼系数不变时,速度指数与主梁和塔顶纵向位移以及墩底纵向弯矩同向变化,即随着前者的增大而增大,但墩底纵向剪力减小,且差值随着阻尼系数的增大而变大。

(3) 阻尼器的设置不仅能降低结构地震响应,同时也会对部分参数起到反作用,所以阻尼器型号的确定可以通过参数分析得到,但不是越大越好,需要综合考虑结构响应、阻尼器的制作和安装等因素。

(4) 阻尼器设置位置对于墩底纵向弯矩和塔顶纵向位移影响不大,但对于边墩墩底纵向弯矩和剪力影响较大,从减震效果角度考虑,本工程将阻尼器设置在主梁与主塔之间要优于设置在主梁和边墩之间。

参考文献:

- [1] 肖开乾,徐怀兵,刘敏,等. 大跨度斜拉桥抗震性能分析与减震控制研究[J]. 自然灾害学报,2020,29(1): 57-63.
- [2] 张常勇,王文斌,姚宗健. 大跨度斜拉桥顺桥向阻尼约束体系研究[J]. 桥梁建设,2014,44(6):75-80.
- [3] 徐略勤,刘津成,刘营,等. 独塔宽幅斜拉桥基于能力需求比的抗震性能评估[J]. 桥梁建设,2016,46(4): 11-16.
- [4] 陈百奔,冯仲仁,王雄江. 长周期地震动作用下斜拉桥粘滞阻尼器减震分析[J]. 桥梁建设,2018,48(5):75-80.
- [5] 贾毅,赵人达,李福海,等. 减隔震混合装置对大跨度斜拉桥地震响应的影响[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1411-1418.
- [6] 杨吉新,苗振国,陶金. 高塔大跨斜拉桥纵向抗震体系优化研究[J]. 交通科技,2024(2):55-59.
- [7] 王志伟,李春良. 斜拉桥液体粘滞阻尼器参数敏感性分析[J]. 吉林建筑大学学报,2020,37(4):13-17.
- [8] 范效贵. 铅芯橡胶支座与液体粘滞阻尼器之比较[J]. 四川建筑,2009,29(增刊1):198-199.
- [9] 王龙. 独塔宽幅斜拉桥基于阻尼器的非对称横向抗震约束体系研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.
- [10] 陈倩. 聚硼硅氧烷基速度锁定器阻尼材料的制备与性能研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- [11] 季翔. 粘滞阻尼器在铁路梁桥中的应用范围研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- [12] 卫星,强士中,肖林. 大跨三塔斜拉桥减振黏滞阻尼器参数优化分析[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第二十届全国桥梁学术会议论文集(下册). 西南交通大学土木工程学院,2012:6.
- [13] 陈永祁,耿瑞琦,马良喆. 桥梁用液体黏滞阻尼器的减振设计和类型选择[J]. 土木工程学报,2007(7):55-61.
- [14] 谭中法,易辉. 斜拉桥粘滞阻尼器参数分析[J]. 黑龙江交通科技,2022,45(6):113-115.
- [15] 司盼,唐亮,张征,等. 液化场地装设粘滞阻尼器的桩基-结构体系抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动,2022,42(5):150-157.
- [16] 张兴波. 基于粘滞阻尼器的斜拉桥减震分析和优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- [17] 陈道政,黄冬冬. 基础隔震与黏滞阻尼器减震性能对比研究[J]. 建筑结构,2018,48(24):58-62.
- [18] 靳涛,刘大召,李雪飞,等. 近断层地震动作用下黏滞阻尼器的减震研究[J]. 工程建设,2023,55(1):12-18.
- [19] 朱巍志,张哲,付裕,等. 大连星海湾跨海大桥的减震设计研究[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第二十一届全国桥梁学术会议论文集(下册). 北京:人民交通出版社,2014:21-27.