

文章编号:1671-6833(2010)04-0089-04

考虑流固耦合的渡槽结构半主动控制研究

王 博, 徐建国, 任克彬, 黄 亮

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 基于渡槽结构流固耦合动力分析模型, 采用结构振动控制原理中的限界 Hrovat 最优控制算法, 进行了南水北调工程某大型渡槽结构变阻尼半主动控制研究; 通过建立大型渡槽的动力分析模型及运动方程, 对比计算了大型渡槽在无控、半主动控制和主动控制 3 种工况下的地震响应差异, 计算结果表明: 主动变阻尼控制装置能有效降低考虑流固耦合的渡槽结构纵向地震响应; 限界 Hrovat 最优控制算法能有效跟踪和实现主动最优控制力。

关键词: 渡槽; 流固耦合; 半主动控制; 限界 Hrovat 最优控制算法

中图分类号: TV312

文献标识码: A

0 引言

为缓解我国华北及西北地区水资源严重缺乏的现状, 决定兴建南水北调水利工程。大型渡槽在南水北调工程中起着重要的作用。确保渡槽在地震作用下的安全将是关系到南水北调水利工程能否正常运营的关键因素之一^[1], 开展渡槽结构减震控制研究是十分必要的。

结构振动控制可以有效地减轻结构在动力作用下的反应和损伤, 有效地提高结构的抗震能力和抗灾性能, 是一种行之有效的抗震减灾对策。目前, 对渡槽结构的控制研究多为被动隔震^[2-3], 其控制效果和实用范围有一定的限制。半主动控制具有所需外加能源少、装置简单、不易失稳并且减震效果较好的优点。笔者结合南水北调工程某大型渡槽, 进行主动变阻尼半主动控制研究, 所得结论对渡槽结构的抗震设计有较好的参考价值。

1 大型渡槽结构流固耦合动力分析模型

将渡槽槽身沿跨长划分为若干薄壁梁段单元^[4], 单元节点设在渡槽横向拉杆、竖向加劲肋和支座上, 薄壁截面扭转中心为 s , 形心为 c , 采用右手坐标系, 坐标原点取在形心 c 处, 纵向坐标零点为渡槽槽身左端起点, 渡槽薄壁梁段单元横截面计算简图及坐标见文献^[4]。

因考虑渡槽截面的约束扭转, 结点位移应包括扭转角 φ 沿单元长度的变化率, 故梁段单元的横向水平位移 u 、竖向位移 v 、扭转角 φ 的形函数 $[N(z)]$ 取为三次 Hermite 多项式, 纵向位移形函数 $[N_1(z)]$ 取为一次多项式:

$$\begin{cases} u = [N(z)] \{u\}^e \\ v = [N(z)] \{v\}^e \\ w = [N_1(z)] \{w\}^e \\ \varphi = [N(z)] \{\varphi\}^e \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\{u\}^e = [u_i \ u'_i \ u_j \ u'_j]^T$; $\{v\}^e = [v_i \ v'_i \ v_j \ v'_j]^T$; $\{w\}^e = [w_i \ w_j]^T$; $\{\varphi\}^e = [\varphi_i \ \varphi'_i \ \varphi_j \ \varphi'_j]^T$ 。由势能驻值原理及虚功原理分别推导单元刚度矩阵和质量矩阵, 具体推导过程见文献^[4]。采用瑞利阻尼假定确定单元阻尼矩阵

$$[C] = \alpha_0 [M] + \alpha_1 [K] \quad (2)$$

式中: α_0, α_1 由振动频率与相应振型阻尼比确定。当槽内有水时, 采用 Westergard 公式将单位面积附加质量计入相应渡槽侧壁和底板上, 槽体一侧单位面积附加质量可按下式计算

$$M_w(z) = \frac{7}{8} \eta \rho \sqrt{hz} \quad (3)$$

式中: $M_w(z)$ 为距离水面 z 处的附加质量; h 为槽内水深; ρ 为水密度; η 为折减系数。

组集渡槽槽身、支架、盆式橡胶支座等单元特性矩阵可得渡槽总体刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵, 求解渡槽在地震荷载作用下的时程动力响

收稿日期: 2010-01-14; 修订日期: 2010-03-13

基金项目: 河南省科技厅基础与前沿技术研究项目(082300440070)

作者简介: 王博(1956-), 男, 河南商丘人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事水工结构抗震研究。

应方程为

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{u}\} = -\mathbf{M}\{\mathbf{I}\}\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (4)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为渡槽结构整体质量阵、整体阻尼阵、整体刚度阵; $\{\ddot{\mathbf{u}}\}$ 、 $\{\dot{\mathbf{u}}\}$ 和 $\{\mathbf{u}\}$ 分别为渡槽系统相对于地面的加速度、速度和位移列阵。

2 控制计算方法

在一维水平地面加速度 $\ddot{x}_g(t)$ 作用下, 安装 m 个变阻尼减震控制器的 n 自由度渡槽结构的运动方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = -\mathbf{M}\{\mathbf{I}\}\ddot{x}_g(t) + \mathbf{B}_s \mathbf{U} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{M}_{n \times n}$ 、 $\mathbf{C}_{n \times n}$ 、 $\mathbf{K}_{n \times n}$ 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{X}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{X}}(t)$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}(t)$ 分别为结构的位移、速度和加速度反应列向量; $\{\mathbf{I}\}_{n \times 1}$ 是元素为 1 的列向量; \mathbf{B}_s 是变阻尼减震控制器产生的控制力作用位置矩阵; $\mathbf{U}_{m \times 1}$ 是减震控制器产生的控制力列向量; $\ddot{x}_g(t)$ 是地震地面运动加速度。

定义 $\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(t) \\ \dot{\mathbf{X}}(t) \end{bmatrix}_{2n \times 1}$ 为系统的状态向量,

在状态空间中, 由 (5) 式描述的受控结构系统可以用如下状态方程描述:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{D}\mathbf{F}(t) \\ \mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \mathbf{I}_n \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times p} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_s \end{bmatrix}_{2n \times p}$, $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times r} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{M}\{\mathbf{1}\} \end{bmatrix}_{2n \times 1}$, 采用经典

线性最优控制 (LQR) 算法, 引入二次型最优性能指标^[5]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T [\mathbf{Z}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{U}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{U}(t)] dt \quad (7)$$

式中: \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为权矩阵。根据极值条件, 可求得最优控制力为:

$$\mathbf{U}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{Z}(t) \quad (8)$$

即: $\mathbf{U}(t) = -\mathbf{G}\mathbf{Z}$, \mathbf{G} 称为增益矩阵, \mathbf{P} 是以下 Riccati 矩阵代数方程的解:

$$-\mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} - \mathbf{Q} = 0 \quad (9)$$

限界 Hrovat 最优控制算法具有较好的控制效果^[5], 限界 Hrovat 最优的主动变阻尼控制算法可表示为:

$$c_d(t) = \begin{cases} c_{d\max} & u\dot{x} < 0 \text{ 且 } |u/\dot{x}| > c_{d\max} \\ c_d = |u/\dot{x}| & u\dot{x} < 0 \text{ 且 } |u/\dot{x}| < c_{d\max} \\ c_{d\min} & u\dot{x} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

3 算例

结合南水北调工程某大型渡槽进行动力分析, 槽身每跨长 28 m, 总长 84 m, 槽内设计水位为 2.21 m, 弹性模量 2.55×10^4 MPa, 每两跨间设置伸缩缝, 槽身与支架间设有盆式橡胶支座连接; 支架采用 H 型框架结构, 高 11.2 m, 弹性模量 2.55×10^4 MPa, 底部固结处理, 渡槽简化模型如图 1 所示。在相邻槽身间设置控制装置, 安装位置如图 2 所示。

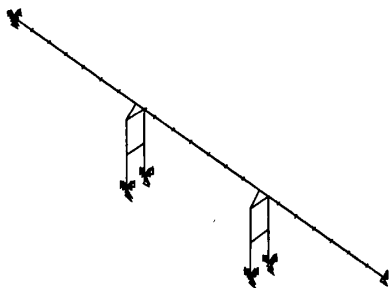


图1 渡槽简化模型

Fig. 1 Aqueduct simplified model

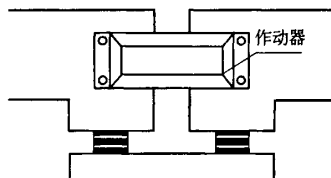


图2 作动器安装位置

Fig. 2 Actuator installation position

由于地震波的特性随震源、传播路径和场地的变化而不同, 故笔者采用 El Centro—NS 波和 Tianjin—NS 波进行分析, 将地震波加速度峰值调整为 0.4 g。采用 MATLAB 编程, 经过试算, 确定权矩阵系数 α 、 β , 得到 LQR 最优控制力。假定结构主动变阻尼半主动与主动控制的控制效果相同, 主动变阻尼控制装置提供的阻尼系数可调倍数为 8 倍, 从而得出控制装置最大和最小阻尼系数, 如表 1 所示。

对该渡槽进行地震响应分析, 表 2 给出了渡槽结构系统位移响应峰值; 图 3 和图 4 分别给出了渡槽结构系统位移和加速度时程曲线; 图 5 和图 6 分别给出了渡槽结构系统节点相对速度与半主动控制力和半主动控制力与主动控制力关系曲线。

表 1 渡槽结构系统各装置最大和最小阻尼系数

Tab. 1 Maximum and minimum damping coefficient of aueduct system		
coefficient of aueduct system		
$c_{idmax}/(N \cdot S \cdot m^{-1})$	7.34×10^7	6.67×10^7
$c_{idmin}/(N \cdot S \cdot m^{-1})$	9.17×10^6	8.45×10^6

表 2 渡槽结构系统位移响应

Tab. 2 Displacement response of aueduct system						
项目	最大位移/mm (Tianjin—NS)			最大位移/mm (El Centro—NS)		
	无控	半主动	减震率	无控	半主动	减震率
槽身	15.22	10.08	33.8%	14.05	9.8	30.2%
左墩顶	9.04	6.13	32.2%	8.43	5.84	30.7%
右墩顶	19.58	12.60	35.6%	17.85	12.62	29.3%

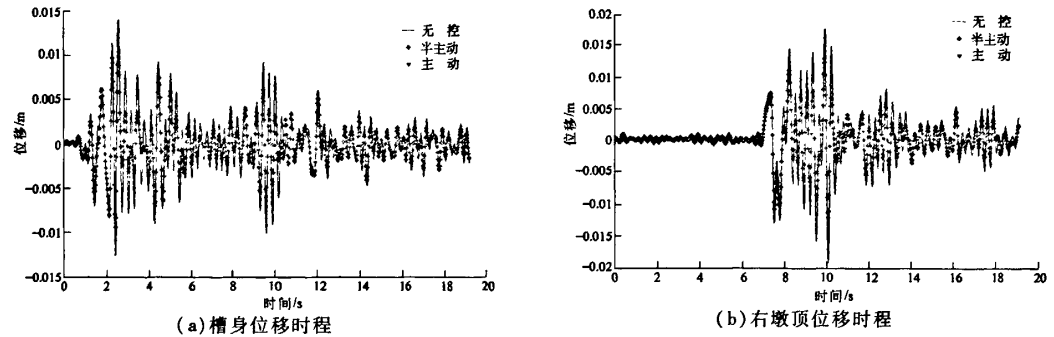


图 3 渡槽结构地震位移反应时程曲线
Fig. 3 Displacement time history curve of aqueduct structure under earthquake

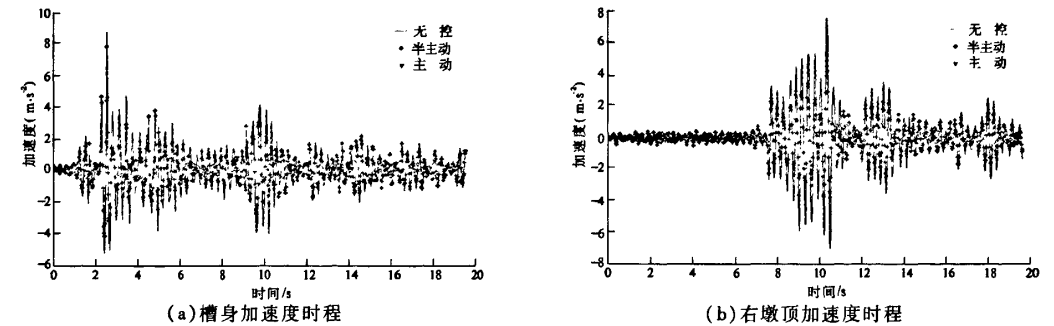


图 4 渡槽结构加速度反应时程曲线
Fig. 4 Acceleration time history curve of aqueduct structure under earthquake

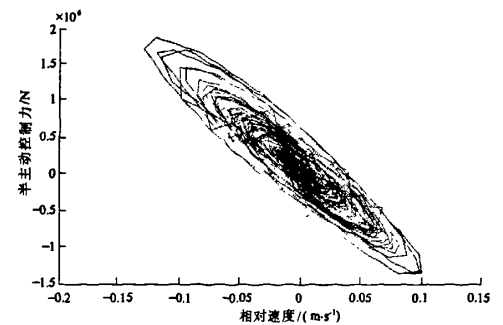


图 5 节点相对速度与半主动控制力关系曲线
Fig. 5 The correlation curve between relative velocity and semi-active control force

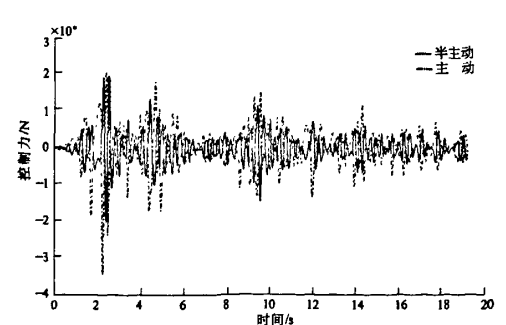


图 6 渡槽结构控制力时程曲线
Fig. 6 Control force time history of aqueduct structure

从计算结果可以看出,在考虑流固耦合的渡槽跨间伸缩缝位置安装主动变阻尼控制装置,对结构地震响应具有较好的控制效果.结合表 2 和图 3 可以看出,槽身和墩顶最大位移降低了 30%

左右,对槽身和墩顶的位移控制效果较好;从图 4 可以看出,在某一时刻半主动控制对加速度会有所放大,这是因为半主动控制装置在对结构实施控制的同时对结构施加反向控制力的结果,但是从整体看对渡槽结构系统的加速度反应有明显的控制效果;从图 5 可以看出,主动变阻尼控制装置是以阻尼力的形式提供控制力,它只能实现与结构运动方向相反也即阻止结构运动的力,所以主动变阻尼控制装置是无条件稳定的;从图 6 可以看出,采用界限 Hrovat 最优控制算法,主动变阻尼装置能有效地跟踪和实现目标主动最优控制力。

4 结论

通过以上计算与分析,可以得出以下结论:

(1)应用主动变阻尼控制装置对考虑流固耦合的渡槽结构进行纵向半主动控制,具有明显的控制作用,是一种行之有效的防震减灾方法;

(2)在考虑流固耦合的渡槽结构跨间伸缩缝位置安装主动变阻尼装置,在整体上能控制结构的加速度反应,但在局部会有加速度放大情况,在

工程实际中应予以考虑;

(3)对考虑流固耦合的渡槽结构实施主动变阻尼控制,在不同频谱成分的地震波激励下,总体都能取得不错的控制效果,但控制效果呈现局部差异;

(3)对渡槽结构实施主动变阻尼控制,具有较好的鲁棒性,采用界限 Hrovat 最优控制算法能有效地跟踪和实现目标主动最优控制力。

参考文献:

- [1] 陈厚群.南水北调工程抗震安全性问题[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(1):17-22
- [2] 张俊发,刘云贺,王克成.设置叠层橡胶支座梁式渡槽的地震响应分析[J].水利学报,1999(1):50-54.
- [3] 张俊发,刘云贺.铅芯橡胶支座减震技术在渡槽中的应用研究[J].水利学报,1999,10:65-69.
- [4] 王博.大型渡槽结构地震反应分析理论与应用[D].上海:同济大学建工系,2000.
- [5] 欧进萍.结构振动控制[M].北京:科学出版社,2003.

The Semi-active Control Study In consideration of the Fluid-solid Interaction of the Aqueduct Structure

WANG Bo, XU Jian-guo, REN Ke-bin, HUANG Liang

(School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001)

Abstract: Based on the aqueduct structure model for dynamic analysis of fluid-solid interaction, the branch-and-bound Hrovat optimal control algorithm is put out to the study the semi-active control based on active variable damping for large aqueduct. It is concluded that active variable damping control device can effectively control response of longitudinal vibrations. The Hrovat optimal control algorithm can track and achieve the target active control force effectively.

Key words: aqueduct; fluid-solid interaction; variable damper control; semi-active control; branch-and-bound Hrovat optimal control algorithm