文章编号：1000-4750(2008)01-0167-06

基于 MRFD 的爆炸冲击隔震体系及其半主动控制

杜义欣，*刘晶波，王立彬

(清华大学土木工程系，北京 100084)

摘　要：为有效减少爆炸冲击荷载对防护工程内人员及设备等的伤害，利用磁流变液阻尼器(MRFD)能够提供连续可调库伦阻尼力的特点，建立了基于 MRFD 的爆炸冲击隔震体系。对该体系进行了几种基于瞬时最优主动控制算法的半主动控制数值仿真分析，结果表明：选用合适的半主动控制算法及恰当的控制参数，利用 MRFD 进行冲击隔震，能有效控制结构在爆炸冲击荷载作用下的加速度反应。

关键词：爆炸冲击；隔震；仿真；磁流变液阻尼器(MRFD)；半主动控制

中图分类号：TU352.1　　**文献标识码**：A

A BLAST SHOCK ISOLATION SYSTEM WITH MRFD AND THE SEMI-ACTIVE CONTROL

DU Yi-xin , *LIU Jing-bo , WANG Li-bin

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To effectively reduce the damage of personnel and equipment in civil defense engineering subjected to blast shock wave, a shock isolation system with magnetorheological fluid dampers (MRFD) is established. MRFD can provide continuous and regulable coulomb friction, which is much efficient to reduce the accelerate response of the structure. The numerical simulation is completed by using a few semi-active control algorithms based on the instantaneous optimal active control algorithm. The results prove that the right semi-active control algorithms with suitable parameters can efficiently mitigate the structural response of acceleration.

Key words: blast shock; isolation; simulation; magnetorheological fluid damper (MRFD); semi-active control

爆炸冲击荷载下的地下人防指挥结构，往往在结构尚未发生破坏时，结构内部就会产生剧烈的爆炸冲击震动环境，造成人防指挥所内部人员和设备的损害。岩土中爆炸冲击波作用下结构底板的震动加速度反应持时短、峰值高、频带宽，与风荷载或地震荷载相比有很大的不同。为了避免爆炸冲击震动对防护工程内人员和设备的损害，承受爆炸冲击荷载的地下防护工程必须采取可靠的隔震措施，而地下防护结构底板特殊的加速度反应使隔震设计变得相当困难[1]。目前，地下防护结构底板的隔震措施中最有效的是以钢丝绳隔震器为代表的被动隔震方法[2]。被动隔震主要靠粘滞阻尼衰减地板震动的能量，需要相对较长的时间，震动衰减相对缓慢。由于爆炸冲击荷载持时非常短，结构运动几乎在瞬时就达到了峰值，致使粘滞阻尼的隔震效果非常有限，如何有效地降低爆炸冲击荷载下地下结构的加速度反应成为了该领域的重要课题。

磁流变液具有随外加磁场强度变化而变化的流变性能，能够实现表观粘度、剪切屈服强度无级可调，并且其反应时间仅为几毫秒[3]。利用磁流变液

收稿日期：2006-04-27；修改日期：2006-11-13

基金项目：国家人防科研十五计划(人防办 2002-22)；清华大学基础研究基金(JC2003007)

作者简介：杜义欣(1979－)，男，河北保定人，博士生，从事结构动力反应和震动控制方面的研究(E-mail: yxdu@163.com)；

*刘晶波(1956－)，男，辽宁新宾人，教授，博士，博导，从事结构工程和防灾减灾工程研究(E-mail: liujb@tsinghua.edu.cn)；

王立彬(1983－)，男，山东烟台人，硕士生，从事结构振动控制方面的研究(E-mail: wanglb@tsinghua.org.cn).

制造的磁流变液阻尼器(MRFD)具有体积小、功耗少、阻尼力大、动态范围广、频响高、连续可调等优点，是结构实施半主动、智能控制的理想装置[4−5]。在土木工程领域，半主动控制在高层、桥梁结构的风振和地震反应控制中已有较多的应用，并且理论也日趋完善[6−7]，但对爆炸冲击震动控制的研究尚处于起步阶段，成果甚少。

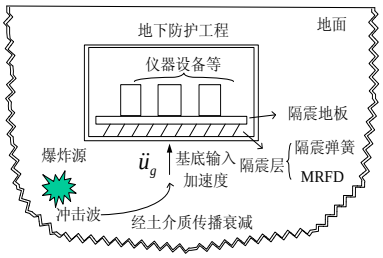
鉴于 MRFD 在高层和桥梁结构中取得的良好隔震效果，并且其可调的库伦滑动摩擦阻尼力对加速度衰减具有良好效果，本文探讨了以磁流变阻尼器作为驱动元件的隔震体系在冲击隔震中的应用方法和前景，并分析了半主动控制方法的效果。

1 基于 MRFD 的冲击隔震体系

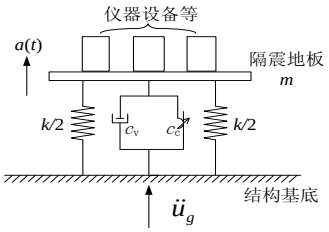
对于爆炸冲击荷载作用下的地下防护工程结构，可以仿照高层结构地震控制建立其冲击隔震体系。该隔震体系与地震隔震体系有很大区别，主要存在以下三个方面：1) 爆炸冲击波与地震波的频谱特性不一样。爆炸冲击荷载与地震荷载相比，作用时间短、频带宽、富含高频分量并且加速度峰值大；2) 隔震效果评判指标不一致。冲击隔震体系中，影响防护结构内人员和设备安全的主要因素是结构的绝对加速度反应[1]，而地震隔震中是用顶层位移反应和层间位移角等以相对位移定义的控制指标来衡量结构的安全程度；3) 阻尼器安装方式不一样。地震隔震体系中主要以斜支撑的形式安装在结构层间，而爆炸冲击隔震体系中阻尼器安装在基底。

图 1(a)给出了某一地下防护工程在爆炸冲击荷载下的隔震示意图，该防护工程的隔震层设置了隔震弹簧和 MRFD。图 1(b)给出了该隔震体系的简化模型。地下防护工程的混凝土隔震地板及其上部仪器、设备等简化为集中质量。隔震体系的刚度由隔震弹簧和阻尼器的刚度提供，阻尼由 MRFD 的粘滞阻尼提供。

常规武器(如炮航弹等)在地下防护工程周围的岩土介质中爆炸时产生冲击波，经土介质传播后引起地下结构的震动，将结构底板处的震动加速度时程记为 $\ddot{u}_g$ (即地下防护工程内隔震体系的输入地震动)，这一震动通过隔震弹簧 k 和阻尼器 c (包括粘滞阻尼 c_v 和可调库伦阻尼 c_c)传递到防护工程的混凝土隔震地板，从而引起隔震地板的震动 $a(t)$，$a(t)$ 可被近似看作隔震地板之上人员及仪器设备的震动情况。



(a) 设置 MRFD 隔震层的地下防护工程



(b) 基于 MRFD 的冲击隔震体系简化模型

图 1 基于 MRFD 的爆炸冲击隔震体系及其简化模型

Fig.1 The sketch of the shock isolation system

图 2 给出了基于 MRFD 的冲击隔震体系的半主动控制流程。其中设计的关键问题即为冲击隔震体系相关参数的确定以及恰当的半主动控制算法的选择。

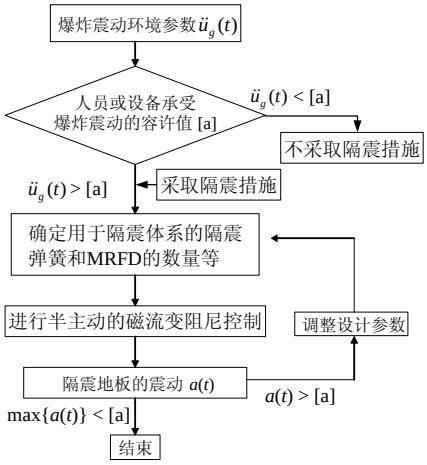


图 2 冲击隔震体系的半主动控制设计流程图

Fig.2 Semi-active control design of the shock isolation system

2 MRFD 的半主动控制算法

2.1 主动控制算法

具有 n 个集中质量的多自由度线性定常系统，安装有 r 个控制装置，在一维冲击作用下的运动方程为：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}}(t)+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{X}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{E}\boldsymbol{U}(t)+\boldsymbol{F}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中：$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{K}$ 分别为体系的 $n\times n$ 维质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$\boldsymbol{X}(t)$，$\dot{\boldsymbol{X}}(t)$，$\ddot{\boldsymbol{X}}(t)$ 为体系

相对于地面的位移、速度和加速度反应向量；$\ddot{u}_g(t)$ 为由爆炸冲击引起的基底加速度输入；$\boldsymbol{F}=-\boldsymbol{M}\boldsymbol{I}_1$，$\boldsymbol{I}_1$ 为单位列向量；$\boldsymbol{U}(t)$ 为 r 维控制力向量；$\boldsymbol{E}$ 为 $n\times r$ 维控制装置位置矩阵。

当主动控制采用瞬时最优控制(IOC)算法时，所需的控制力向量及反馈增益矩阵为[4]：

$$\boldsymbol{U}(t)=-\boldsymbol{L}\begin{Bmatrix}\boldsymbol{X}(t)\\ \dot{\boldsymbol{X}}(t)\end{Bmatrix}=-\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{K}}\boldsymbol{X}(t)-\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{C}}\dot{\boldsymbol{X}}(t) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{L}=-\frac{\Delta t}{2}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q},\quad \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{E}\end{bmatrix}$$

式中：Δt 为采样周期；$\boldsymbol{Q}$ 为状态向量权矩阵，$\boldsymbol{R}$ 为控制力向量权矩阵，$\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 用来调整结构反应与控制力两者之间的相对重要程度；$\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{K}}$ 和 $\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{C}}$ 是增益矩阵 $\boldsymbol{L}$ 相应于位移状态向量 $\boldsymbol{X}(t)$ 和速度状态向量 $\dot{\boldsymbol{X}}(t)$ 的分块矩阵。将式(2)代入式(1)，整理得：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}}(t)+(\boldsymbol{C}+\boldsymbol{E}\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{C}})\dot{\boldsymbol{X}}(t)+(\boldsymbol{K}+\boldsymbol{E}\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{K}})\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{F}\ddot{u}_g(t) \tag{3}$$

由此可见，IOC 主动控制改变了结构的刚度和阻尼。

2.2　MRFD 的恢复力模型

本隔震体系采用阀型 MRFD，恢复力模型利用基于 Bingham 的本构关系[3]：

$$P(t)=\frac{12\eta LA_P}{\pi Dh^3}A_P\dot{x}(t)+\frac{3\tau_y L}{h}A_P\,\mathrm{sgn}[\dot{x}(t)],$$

$$A_P=\frac{\pi}{4}[(D-2h)^2-d^2] \tag{4}$$

式中，涉及到 MRFD 的设计参数包括：空隙间距 $h=2\mathrm{mm}$，缸体内径 $D=100\mathrm{mm}$，活塞轴直径 $d=60\mathrm{mm}$，活塞有效长度 $L=60\mathrm{mm}$，流体表观粘度 $\eta=1.0\,\mathrm{Pa\,s}$，流体最大屈服应力 $\tau_{y\max}=50\,\mathrm{kPa}$，最小屈服应力 $\tau_{y\min}=0$，即不考虑零磁场时的剩磁影响。计算得到 MRFD 的粘滞阻尼系数 $c_v=5.57\times10^3\,\mathrm{N\,s/m}$，MRFD 所能提供的最大库伦阻尼力为 $c_c=19.85\,\mathrm{kN}$。

2.3　基于 IOC 算法的半主动控制算法

IOC 算法是基于位移反应优化指标提出的，是否有利于加速度反应的控制，需要进行研究验证。并且，由于 MRFD 可以实现的控制力受控制力方向和大小的限制，不能在任意瞬时都达到主动控制算法的要求，只能通过调整其参数，使所产生的阻尼力尽可能接近主动最优控制力。因此在实际应用中，考虑到经济效益等因素，一般只能采取半主动控制算法[3]。

基于瞬时最优主动控制算法，分析对比了目前常用于结构震动控制的五种半主动控制算法[3−7]在冲击隔震中的应用。表 1 给出这五种控制算法的表达式，式中，$f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 分别表示 MRFD 在外加磁场为零和磁场最大时所能提供的库伦阻尼力；x 是 MRFD 的相对位移；u_d 为 MRFD 提供的控制力；u 为由主动控制算法得到的最优控制力。

表 1　基于 IOC 算法的半主动控制算法

Table 1　Semi-active control based on IOC algorithm

算法	公式
Semi 1(简单 Bang-Bang)	$u_d(t)=\begin{cases}c_v\dot{x}+f_{\max}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (x\dot{x}>0)\\ c_v\dot{x}+f_{\min}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (x\dot{x}\leqslant 0)\end{cases}$
Semi 2 (转换开关)	$u_d(t)=\begin{cases}c_v\dot{x}+f_{\max}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (\dot{x}\ddot{x}>0,\ \text{即}x\dot{x}<0)\\ c_v\dot{x}+f_{\min}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (\dot{x}\ddot{x}\leqslant 0,\ \text{即}x\dot{x}\geqslant 0)\end{cases}$
Semi 3(最优 Bang-Bang)	$u_d(t)=\begin{cases}c_v\dot{x}+f_{\max}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (u\dot{x}<0)\\ c_v\dot{x}+f_{\min}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (u\dot{x}\geqslant 0)\end{cases}$
Semi 4 (界限开关)	$u_d(t)=\begin{cases}c_v\dot{x}+f_{\max}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (u\dot{x}<0\text{且}\lvert u\rvert>f_{\max})\\ c_v\dot{x}+f_{\min}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (\text{其它情况})\end{cases}$
Semi 5 (界限滑动)	$u_d(t)=\begin{cases}c_v\dot{x}+f_{\max}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (u\dot{x}<0\text{且}\lvert u\rvert>f_{\max})\\ c_v\dot{x}+\lvert u\rvert\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (u\dot{x}<0\text{且}f_{\min}\leqslant\lvert u\rvert\leqslant f_{\max})\\ c_v\dot{x}+f_{\min}\,\mathrm{sgn}(\dot{x}) & (\text{其它情况})\end{cases}$

2.4　权矩阵的选取

在瞬时最优控制(IOC)设计时，权矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和权矩阵 $\boldsymbol{R}$ 是两个重要的控制参数，对控制效果和控制力具有显著的影响。一般来说，$\boldsymbol{Q}$ 越大，受控结构反应越小，控制效果越好；$\boldsymbol{R}$ 越大，则控制输入越小，控制效果越差。但是，实际情况并非严格如此，因此权矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和权矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的确定需进行试算取值，本文选取：

$$\boldsymbol{Q}=\alpha\begin{bmatrix}\boldsymbol{K} & \boldsymbol{C}/2\\ \boldsymbol{C}/2 & \boldsymbol{M}\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{R}=\beta\boldsymbol{I}_r \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{I}_r$ 为 $r\times r$ 维单位阵，$\alpha=1$，$\beta=10^{-8}$ 或 4.0×10^{-9}。

3　冲击隔震控制指标

对于冲击隔震的隔震效果，主要考察结构在爆炸冲击荷载作用下绝对加速度相对于结构基底输入的衰减情况，本文采用两种控制指标来进行对比分析。

3.1　加速度峰值

目前应用较多的冲击隔震控制指标只考虑加速度反应峰值，加速度峰值隔震率由下式定义：

$$\eta_1=\frac{\max(|\ddot{u}_g(t)|)-\max(|a(t)|)}{\max(|\ddot{u}_g(t)|)} \tag{6}$$

式中，$a(t)=\ddot{X}(t)+\ddot{u}_g(t)$ 为隔震地板的绝对加速度反应。该控制指标对保障人员或设备安全均适用。

3.2 冲击剂量值

对于爆炸冲击荷载，由于作用时间短，仅针对加速度反应峰值的控制，有时在对人员安全的评价方面并不全面，Griffin M J 等人在采用冲击台研究人体全身受冲击振动的不舒适性时，于 1980 年提出了振动剂量值 *VDV* (Vibration Dose Value)的概念[8]，能合理评价冲击反应对人员安全的影响[9]。冲击剂量值隔震率为：

$$\eta_2=\frac{VDV^{\ddot{u}_g}-VDV^{a}}{VDV^{\ddot{u}_g}} \tag{7}$$

式中：$VDV^{\ddot{u}_g}$ 为由结构基底输入加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 得到的冲击剂量值；VDV^{a} 为由结构绝对加速度 $a(t)$ 得到的冲击剂量值。该控制指标主要适用于保障人员安全方面。冲击剂量值的计算公式如下：

$$VDV=\left\{\int_0^T a_w^4(t)\,\mathrm{d}t\right\}^{1/4},\quad a_w(t)=w\cdot a(t) \tag{8}$$

式中：$a_w(t)$ 为实际震动加速度的频率加权值；w 为频率加权系数，本文取 0.6。

加速度峰值隔震率 η_1 对保障人员安全及保证设备正常使用两方面均适用，冲击剂量值隔震率 η_2 则能更合理评价冲击反应对人员安全的影响。因此本文对两种隔震指标的隔震效果均进行了分析。在实际应用中，由于各种设备之间的差异，不同设备的耐受限需要根据厂家提供的指标确定，因此在确定隔震目标的时候，需针对具体情况权衡而定。

4 冲击隔震体系隔震效果分析

为验证基于 MRFD 的冲击隔震体系用于爆炸冲击荷载作用下的隔震效果，本文按照实际结构参数，设计了一个装有 4 个磁流变液阻尼器的地下防护结构隔震地板体系，并进行了数值仿真分析。

4.1 结构参数

以典型浅埋土中箱型人防结构的隔震设计作为算例[10]，按一定距离常规武器侧面爆炸时结构底板中心产生的竖向加速度反应时程作为隔震地板的基地输入(如图 3 所示)。

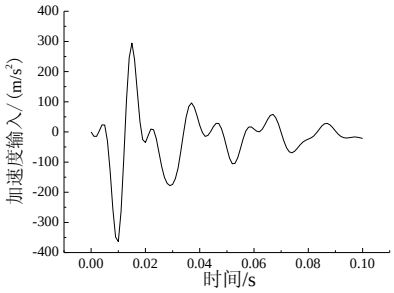


图 3 基底加速度输入时程曲线

Fig.3 Time history of base-acceleration input

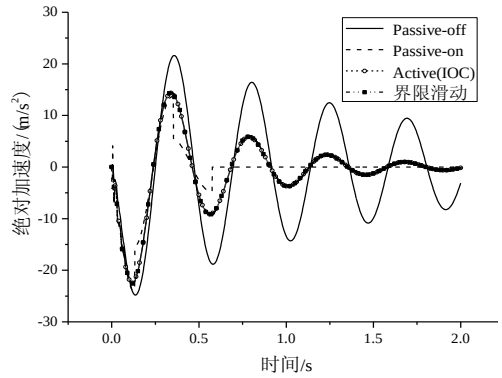
结构质量考虑混凝土隔震地板重量和其上人员设备等，取 $m=1.8\times10^4$ kg，隔震弹簧刚度 $k=3.6\times10^6$ N/m，隔震体系的阻尼由安装在混凝土底板四角的 4 个 MRFD 提供，总的粘滞阻尼 $c=2.23\times10^4$ N s/m。冲击隔震体系的简化模型如 图 1(b)所示，输入加速度峰值为 363 m/s$^2\approx$37g，由输入加速度计算得到的冲击剂量值 $VDV^{\ddot{u}_g}=53.184$ m/s$^{1.75}$。

4.2 控制效果对比

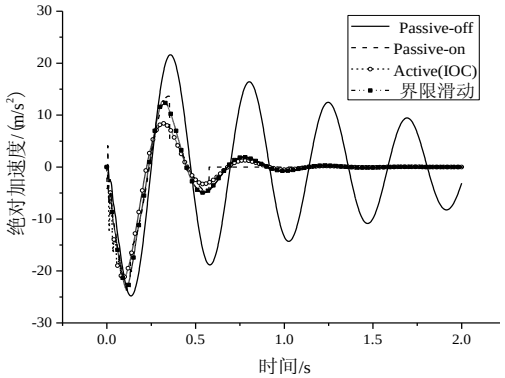
针对图 1(b)所示爆炸冲击荷载作用下的地下防护工程，假设 4 个 MR 阻尼器同步工作，将结构简化为单自由度体系，控制装置位置矩阵 $\boldsymbol{E}=1$，控制力向量权矩阵按第 2.4 节选取。利用中心差分法[11]进行结构被动隔震、瞬时最优控制(IOC)及前述的五种半主动控制的数值仿真，分析各自的隔震效果。

此时，被动-关控制(Passive-off，零磁场时的被动控制状态)、被动-开控制(Passive-on，所加磁场最大时的被动控制状态)、主动控制(IOC)和半主动控制(只给出界限滑动控制的情况)下结构的绝对加速度反应时程曲线如图 4 所示。五种半主动控制算法的控制效果对比如图 5 所示。

表 2 给出了各种控制情况的绝对加速度反应峰值及隔震效果。其中，加速度峰值隔震率 η_1 和冲击剂量值隔震率 η_2 均是相对于结构基底输入加速度计算得到的；表 2 中的“隔震效果对比”是相对被动-关控制状态计算得到的。由表 2 可以看出，基于 MRFD 的冲击隔震体系，无论采用被动控制技术还是半主动控制技术，相对于输入基底加速度时程，加速度峰值隔震率 η_1 均可达到 93%以上，冲击剂量值隔震率 η_2 则可达到 80%以上，半主动控制 *VDV* 隔震率 η_2 可以达到 85%以上。半主动控制效果相对于被动-关控制有较大的提高，加速度隔震率最高提高了 8.84%，*VDV* 隔震率提高了 26.71%。



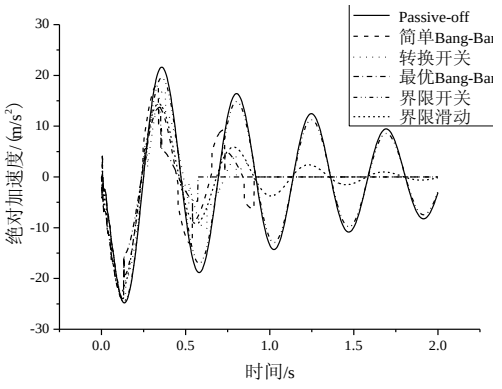
(a) $R = 10^{-8}$



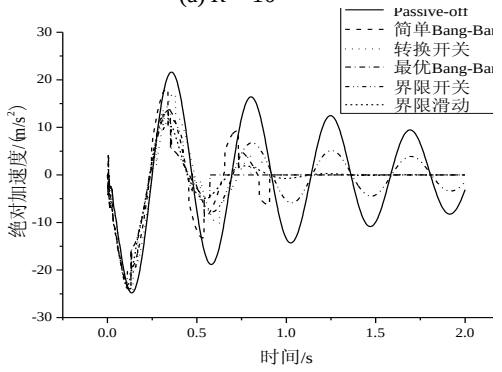
(b) $R = 4.0\times10^{-9}$

图 4　绝对加速度反应时程曲线

Fig.4　Time history curve of absolute acceleration



(a) $R = 10^{-8}$



(b) $R = 4.0\times10^{-9}$

图 5　半主动控制算法的结果对比(绝对加速度)

Fig.5　Comparison of results using the proposed semi-active control algorithms (absolute acceleration)

表 2　结构绝对加速度反应峰值及隔震率对比

Table 2　Peak of absolute acceleration and the isolation efficiency

权矩阵 $\boldsymbol{R}$	控制状态	绝对加速度			冲击剂量值		
		峰值/(m/s^2)	η_1/(%)	隔震效果对比/(%)	VDV/($m/s^{1.75}$)	η_2/(%)	隔震效果对比/(%)
	被动-关	24.81	93.17	0	9.91	81.38	0
	被动-开	23.90	93.42	3.64	7.14	86.58	27.94
10^{-8}	IOC	22.48	93.81	9.40	7.57	85.77	23.61
	Semi 1	24.00	93.40	3.24	7.94	85.07	19.85
	Semi 2	24.73	93.20	0.31	7.93	85.10	19.98
	Semi 3	23.97	93.40	3.39	7.18	86.49	27.48
	Semi 4	24.44	93.27	1.50	9.33	82.45	5.77
	Semi 5	22.61	93.79	8.84	7.60	85.71	23.25
4.0×10^{-9}	IOC	21.36	94.12	13.91	6.72	87.36	32.15
	Semi 1	24.00	93.40	3.24	7.94	85.07	19.85
	Semi 2	24.73	93.20	0.31	7.93	85.10	19.98
	Semi 3	23.97	93.40	3.39	7.18	86.49	27.48
	Semi 4	24.19	93.34	2.49	7.45	86.00	24.83
	Semi 5	23.77	93.50	4.19	7.26	86.35	26.71

当采用主动和半主动控制算法时，控制效果的好坏与权矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的取值关系较大，本文通过试算选择了 $\boldsymbol{R}=10^{-8}$ 时加速度峰值隔震效果最好的状态和 $\boldsymbol{R}=4.0\times10^{-9}$ 时 VDV 隔震效果最好的两种状态情况。

由图 4、图 5 和表 2，对比被动控制和半主动控制隔震效果可以看出，针对加速度峰值控制指标，当权矩阵 $\boldsymbol{R}=10^{-8}$ 时，界限滑动的控制结果几乎与主动控制结果重合，优于 Passive-on 和其它几种半主动控制。当权矩阵 $\boldsymbol{R}=4.0\times10^{-9}$ 时，几种半主动控制效果都明显差于主动最优控制，说明 MRFD 由于自身条件的限制，半主动控制只能尽可能接近主动控制效果，体现了半主动控制自身的特点。由于冲击剂量值控制指标考虑了反应衰减的整个过程，可以发现此时最优 Bang-Bang 和界限滑动控制都可以收到较好的控制效果，相对被动的隔震效果可以进一步提高 23%—27%。

4.3　问题讨论

在爆炸冲击隔震问题中，荷载的持续时间很短，例如本文给出的爆炸冲击荷载的总持时只有 100ms，明显比一般的风荷载及地震作用持时短，也即只有在运动过程的初期结构处于受激强迫震动状态，这样可以把整个运动过程分为荷载作用的强迫振动阶段和自由振动阶段两个过程。

经数值分析可以发现，如只在强迫振动阶段实施半主动控制，例如采用简单 Bang-Bang、最优 Bang-Bang 或是界限最优等控制算法，此时加速度峰值的隔震效果(相对于 Passive-off 控制状态)可达

到15%左右，而冲击剂量值的隔震效果则约为14%；如仅在自由振动阶段实施半主动控制，则加速度峰值的隔震效果较差。

从前面的分析可以看出 Passive-on 控制比界限滑动半主动控制效果差，但是优于转换开关等半主动控制，明显好于 Passive-off 隔震效果，说明将磁场调至最大的被动控制对于保障防护工程内人员安全方面也是有效可行的，并且该方法可靠性更强。

5 结论与展望

通过以上分析，可以发现如下问题：

(1) 基于 MRFD 的冲击隔震体系，无论是采用被动控制技术还是采用半主动控制技术，在保障防护工程内人员安全及保证仪器设备正常使用两方面均可以收到理想的隔震效果。

(2) 基于主动控制(IOC)的半主动控制算法，在冲击隔震中的应用，在理论上是有效可行的。经比较，界限滑动控制算法对于两个隔震指标均能起到较好的效果，是冲击隔震体系优选的半主动控制方案。

(3) 本文所采用的半主动控制算法是基于瞬时最优主动控制发展的，瞬时最优主动控制算法以相对位移为优化指标，在结构抗震领域具有良好的效果。爆炸冲击隔震以绝对加速度作为隔震效果的标准，而不是相对位移。本文计算结果证明采用该控制算法对加速度有一定控制效果，但是不如相对位移控制效果明显。进一步发展以绝对运动参数为优化指标的控制算法可能会达到更好的冲击隔震效果。

(4) 本文讨论的 MRFD 在冲击隔震中应用时，并未考虑阻尼器自身反应时间的影响，而实际上由于冲击荷载作用时间过短，阻尼器的时滞问题可能会成为影响半主动控制应用的关键，进一步的研究结果证明，时滞的存在可能会造成主动控制算法的发散，而不会影响半主动控制算法的收敛问题，但时滞对半主动控制算法的控制效果会有一定影响，经过时滞补偿，半主动控制仍能达到良好的控制效果，限于篇幅，本文未作具体介绍，将另文专门介绍。

(5) 需提高生产工艺，减小 MRFD 的时间滞后问题，以适应半主动控制在冲击隔震中的应用。

基于 MRFD 的爆炸冲击隔震体系是一个较新的课题，国内外还很少开展相关的研究，本文仅从理论上进行了初步探讨，还需要深入开展系统的分析和实验研究。

参考文献：

[1] 杜义欣, 刘晶波, 伍俊. 常规爆炸下地下结构的冲击震动环境[J]. 清华大学学报, 2006, 46(3): 322－326.
Du Yixin, Liu Jingbo, Wu Jun. Blast shock and vibration environment of the underground structure under conventional weapon [J]. Journal of Tsinghua University, 2006, 46(3): 322－326. (in Chinese)

[2] 董宏晓, 李伯松, 贺永胜. 爆炸冲击震动与隔震技术进展[C]// 中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集. 长春: 总参工程兵科研三所, 2004. 1133－1136.
Dong Hongxiao, Li Bosong, He Yongsheng. Vibration subjected to blast shock and development of isolation technologies [C]// Proceedings of the 9th Academic Conference of Protection Engineering Branch of Civil Engineering Institute in China. Changchun: The Third Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, 2004, 1133－1136. (in Chinese)

[3] 欧进萍. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Ou Jinping. Structural vibration control—active, semi-active and smart control [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

[4] 徐龙河, 周云, 李忠献. 半主动磁流变阻尼控制方法的比较与分析[J]. 世界地震工程, 2000, 16(3): 95－100.
Xu Longhe, Zhou Yun, Li Zhongxian. Comparison and analysis of semi-active magnetorheological damping control method [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2000, 16(3): 95－100. (in Chinese)

[5] Jansen L M, Dyke S J. Semiactive control strategies for MR dampers: Comparative study [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(8): 795－803.

[6] Dyke S J, Spencer B F, Sain M K, Carlson J D. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction [J]. Smart Material Structure, 1996, 5(5): 565－575.

[7] 宁欣, 阎石, 王丰. 磁流变阻尼器半主动控制算法的改进[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2004, 20(1): 4－6.
Ning Xin, Yan Shi, Wang Feng. Improvement of the present semi-active control algorithm using MR damper [J]. Journal of Shenyang Arch. and Civ. Eng. Univ., 2004, 20(1): 4－6. (in Chinese)

[8] Griffin M J, Whitham E M. Discomfort produced by impulsive whole-body vibration [J]. Acoustical Society of American, 1980, 68(5): 1277－1284.

[9] 严东晋, 钱七虎, 唐德高. 爆炸冲击振动对人体健康影响的评价[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 100－106.
Yan Dongjin, Qian Qihu, Tang Degao. Estimating the effect of blast shock vibration on health of human-body [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(1): 100－106. (in Chinese)

[10] Izzuddin B A, Fang Q. Rate-sensitive analysis of framed structures part I: Model formulation and verification [J]. Structural Engineering and Mechanics, 1997, 5(3): 221－237.

[11] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Liu Jingbo, Du Xiuli. Structural dynamics [M]. Beijing: Mechanism Industry Press, 2005. (in Chinese)