

铁道车辆横向开关半主动悬架系统研究*

丁问司

(华南理工大学交通学院 广州 510641)

卜继玲

(西南交通大学机车车辆研究所 成都 610031)

摘要: 采用半主动悬架系统是提高铁道车辆横向平稳性能的途径。提出一种基于天棚原理的横向开关半主动悬架系统,能方便、简单地运用于现有的高速铁道车辆。仿真计算和实测结果均表明:与采用被动悬架相比,铁道车辆采用开关半主动悬架系统时车体横向加速度和横向速度值均有下降,横向平稳性能得到改善。

关键词: 机车车辆 半主动控制 悬架系统 减振器

中图分类号: TH122 U270.1

0 前言

我国铁路提速以来,铁道车辆均普遍存在横向平稳性性能不佳的问题。为提高铁道车辆横向平稳性指标,在横向悬架系统中采用主动或半主动减振技术是十分必要的。

与主动悬架系统相比,半主动悬架系统以可控阻尼器代替主动悬架系统中的主动力作动器,以可控阻尼元件产生实时变化的阻尼力来改善列车性能。半主动悬架系统在设计时以耗散系统内部能量为约束条件,其阻尼控制所需能量与主动悬架系统所需能量相比微不足道,从原理上克服了主动悬架系统的致命弱点。同时,配置半主动减振系统对目前已定型的车型影响很小,使得针对现有的悬架系统的改进容易实施,因此列车采用横向半主动悬架系统来提高横向平稳性指标有着巨大的优势。

1 横向开关半主动减振控制策略

半主动悬架技术用于车辆系统(尤其是汽车系统)垂向振动控制已有大量研究成果。然而,铁道车辆运动形式的特殊性,使得其横向悬架系统在采用半主动减振技术上与垂向悬架系统存在差别。

目前,在高速列车上横向半主动悬架系统研究中采用了基于开关控制的天棚的减振方式^[1],其原理如图1所示。

假设铁道车辆沿一道虚拟的刚性墙移动,在虚拟墙与车体之间通过一虚拟减振器的作用来减小车体振动,此虚拟减振器即为天棚减振器。天棚减振器在铁道车辆运行时需始终处于工作状态以提供横向减振力。由于天棚减振器是虚拟的,其实际应提

供的减振力只能由安装于车体与转向架间的实际横向减振器来模拟实现。

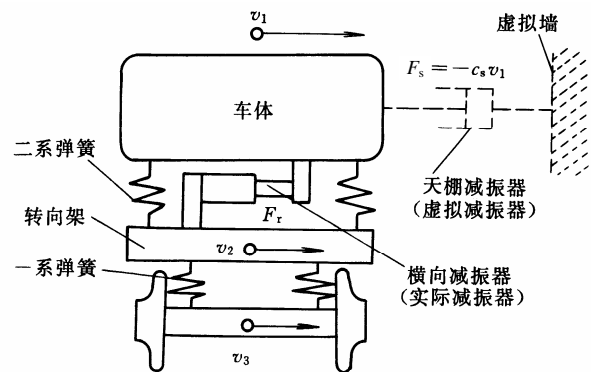


图1 列车横向天棚减振控制原理

一般说来,按照天棚原理,铁道车辆横向半主动振动控制规则为

$$\begin{cases} F_t = -c_s v_1 & v_1(v_1 - v_2) > 0 \\ F_t = 0 & v_1(v_1 - v_2) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

按式(1)设计的悬架系统称为“连续变化阻尼半主动悬架系统”。为满足式(1)的要求,实际横向减振器的阻尼力不但要能在“可提供”与“不提供”之间不断切换,而且由于实际横向减振器能提供的阻尼力只能为 $F_t = c_r(v_1 - v_2)$,为使 $F_t = F_s$,必须要求 $c_r = c_s v_1 / (v_1 - v_2)$,由于 v_1 和 $v_1 - v_2$ 是连续变化的,所以,实际横向阻尼减振器的阻尼系数 c_r 也要求能连续变化。

严格按照式(1)来实现对列车的横向振动的控制是十分困难的,它需要多个高精度的加速度传感器、速度传感器以及一套复杂的控制系统。另外,由于用于实时调整阻尼力的比例节流阀的设计、制造、使用难度大,使得使用维护费用增高,且难以保证在控制系统失效时列车运行的安全性。

为简化系统的复杂性,提高运行安全性,有必要采用简化的开关式天棚控制规则

* 铁道部科技发展计划项目(2001J001-C)和中国南车集团科技发展项目(2002NCK035)资助。20031004收到初稿,20040420收到修改稿

$$\begin{cases} F_r = -c_r v_1 & v_1(v_1 - v_2) > 0 \\ F_r = 0 & v_1(v_1 - v_2) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

采用控制规则式(2)时, 悬架系统只要能根据反馈信号实时实现减振器的状态切换即可, 大大简化了控制系统的复杂性, 有助于提高悬架系统的可靠性, 保证铁道车辆安全、高速运行。

2 开关式半主动减振器

2.1 原理

图2为开关式半主动减振器系统原理图。由图可看出该减振器较被动式减振器不同之处在于多了一套控制系统, 此控制系统由车体加速度传感器、控制器、两个电磁阀及相应的油路组成。控制规则式(2)所提供的减振力及其状态转换由电磁阀通过不同的状态组合而得到。图中所示为各阀非控制状态(失效)的情形。

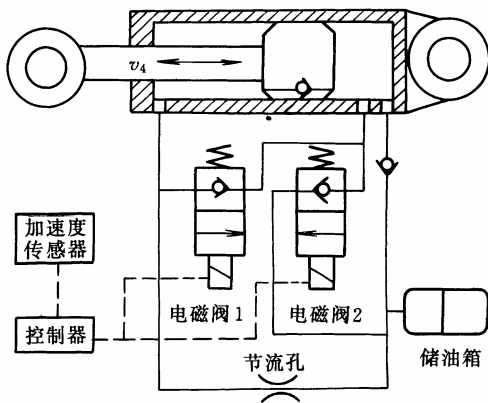


图2 开关式半主动减振器原理图

2.2 横向开关式半主动悬架系统配置

横向半主动悬架系统的配置形式如图3所示, 每个转向架上对称布置两个开关式半主动减振器, 每个转向架上方安置一个横向加速度传感器。一台车配置4个减振器、2个横向加速度传感器和一台控制器。

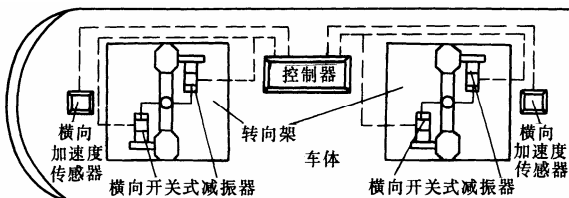


图3 开关式半主动悬架系统的配置形式

2.3 开关式半主动减振器工作原理

如图4、图5所示, 减振器A、B作用在车体与转向架之间, 其对应的控制阀分别为A₁、A₂、A₃、A₄、A₅、B₁、B₂、B₃、B₄、B₅。

在图4所示的状况下, 减振器A、B均向车体提供阻尼力。

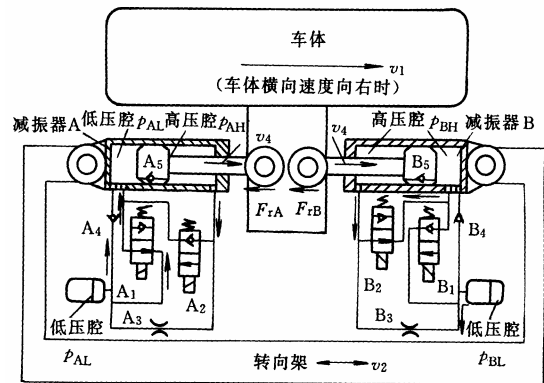


图4 $v_1 > 0, v_1 - v_2 = v_4 > 0$ 时减振器工作状态

在图5所示的状况下, 减振器A、B均不向车体提供阻尼力。

同样可推出车体横向速度向左时减振器的两种不同状态。

不同车体运行状况下, 各阀的状态如表1所示。

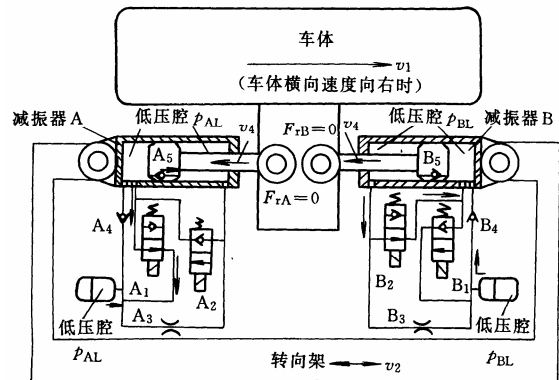


图5 $v_1 > 0, v_1 - v_2 = v_4 \leq 0$ 时减振器工作状态

表1 不同车体运行状况下, 各阀的动作状态 (设速度向右为正)

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
$v_1 > 0$										
$v_4 > 0$	通	断	通	通	断	断	通	通	断	通
$v_4 \leq 0$	通	断	无效	断	通	断	通	无效	通	断
$v_1 \leq 0$										
$v_4 > 0$	断	通	无效	通	断	通	断	无效	断	通
$v_4 \leq 0$	断	通	通	断	通	通	断	通	通	断

由表1可知: 基于上述原理设计的铁道车辆半主动悬架系统只须对车体横向运动速度的方向进行判断, 即可完成控制规则式(2)要求。这大大简化反馈环节、控制环节的复杂程度, 有利于实用。

2.4 控制系统流程

横向半主动悬架的控制系统流程如图6所示。列车过弯道时, 车体的离心加速度同样会被传感器检测到, 由于离心加速度对车体振动不产生影响, 因此必须去除。

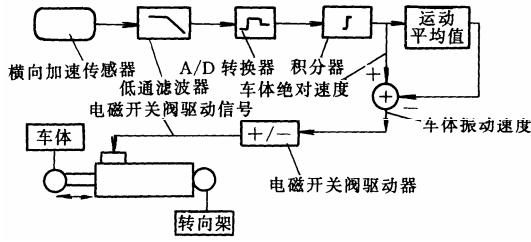


图6 控制系统流程

3 开关半主动系统仿真

为了解列车采用基于天棚原理的横向半主动减振系统的效果，有必要对其进行模拟仿真。为此建立了高速机车基于横向被动悬架和横向半主动悬架的计算机模型^[2]。

考虑整车的横向计算模型共 17 自由度：

轮对横移及摇头(γ_{oi}, ψ_{oi}) $i = 1, 4$;

转向架构架横移、侧滚及摇头($\gamma_{ij}, \Phi_{ij}, \psi_{ij}$) $j=1,$

2;

车体的横移、侧滚及摇头(γ_c, Φ_c, ψ_c)。

整车的动力学方程为

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = G\omega \quad (3)$$

式中 m, c, k ——整车系统的惯量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵

G ——轨道输入分布矩阵

X ——车辆的自由度矢量

ω ——轨道方向及水平不平顺输入矢量

$$X = [\gamma_{oi} \ \psi_{oi} \ \gamma_{ij} \ \Phi_{ij} \ \psi_{ij} \ \gamma_c \ \Phi_c \ \psi_c]^T$$

$i=1, 4 \quad j=1, 2$

利用上述建立的高速机车模型，对广深线蓝箭型高速机车进行了高速运行下的计算机仿真，其主要参数如表 2。

表 2 高速机车参数

质量 m_a/kg	19 500	轴距之半 b/mm	1 500
车体质量 m_c/kg	47 000	构架质量 m_f/kg	2 002
空心轴质量 m_g/kg	621	抗蛇行减振器阻尼 $c_{sv}/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	1 000
驱动制动单元质量 m_m/kg	4 207	一系垂向减振器阻尼 $c_{pz}/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	30
轮对质量 m_w/kg	1 632	二系横向减振器阻尼 $c_{sy}/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	50
一系轴箱纵向定位刚度 $k_{pv}/(N \cdot m^{-1})$	2.59×10^7	二系垂向减振器阻尼 $c_{sv}/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	45
每轴箱一系弹簧横向合成刚度 $k_{py}/(N \cdot m^{-1})$	4.87×10^6	前后构架质心纵向距离之半 L_c/mm	5 440
每轴箱一系弹簧垂向合成刚度 $k_{pz}/(N \cdot m^{-1})$	2.4×10^6	构架每侧二系弹簧垂向合成刚度 $k_{sv}/(N \cdot m^{-1})$	8.86×10^5
构架每侧二系弹簧纵向合成刚度 $k_{sy}/(N \cdot m^{-1})$	3.16×10^5	构架每侧二系弹簧横向合成刚度 $k_{sz}/(N \cdot m^{-1})$	3.16×10^5

图 7~10 为机车以 200 km/h 速度在同一条线路上运行时车体在横向被动悬架与横向开关半主动悬架条件下的横向加速度、横向速度的对比。图 11、图 12 为同一条件下的减振器的阻尼力输出状况的对比。

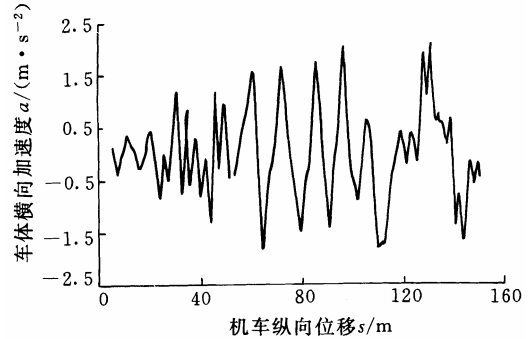


图7 横向被动悬架时车体加速度

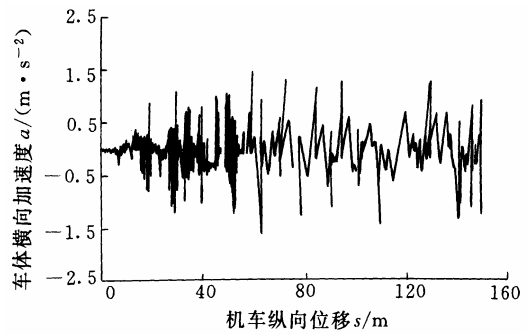


图8 横向开关半主动悬架时车体加速度

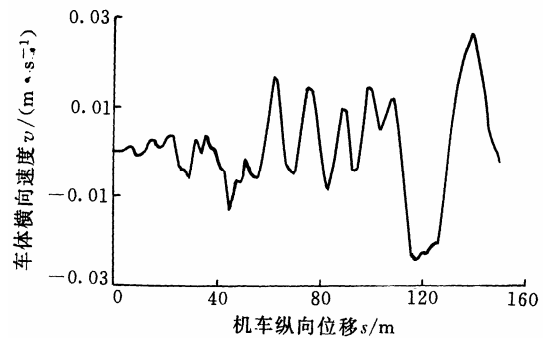


图9 横向被动悬架时车体速度

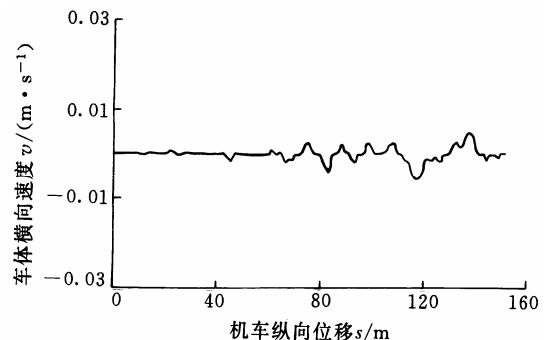


图10 横向开关半主动悬架时车体速度

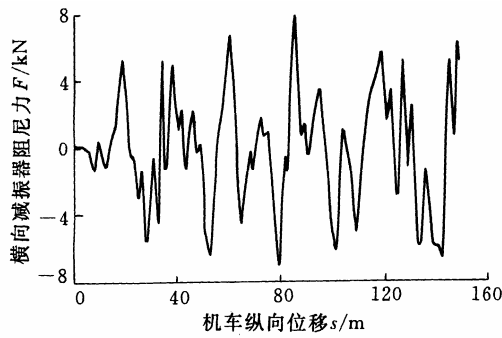


图 11 横向被动悬架时减振器阻尼力

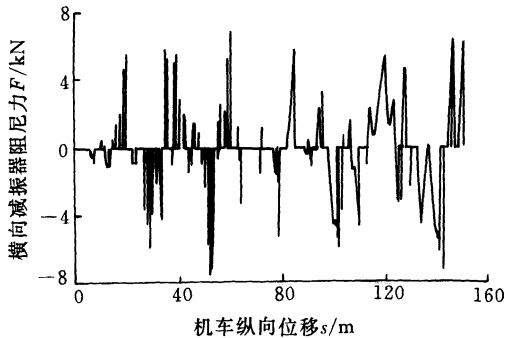


图 12 横向开关半主动悬架时减振器阻尼力

比较以上诸图可知,采用横向开关半主动悬架使得车体的横向加速度、横向速度、减振器阻尼力各方面较采用横向被动悬架均有较大改善。

经动力学计算可得到机车在被动悬架和开关半主动悬架条件下运行时的横向平稳性指标^[3],分别为 2.894 和 2.746,根据标准采用后者时机车的横向平稳性指标由良好上升为优良。

4 线路试验

为研究开关半主动减振悬架对提高铁道车辆横向平稳性的实际效果,株洲电力机车厂在蓝箭型机车上进行了被动悬架和半主动悬架性能的比较。车体横向加速度与横向速度的实测数据(采样周期 5 ms、未滤波)如图 13~16 所示。

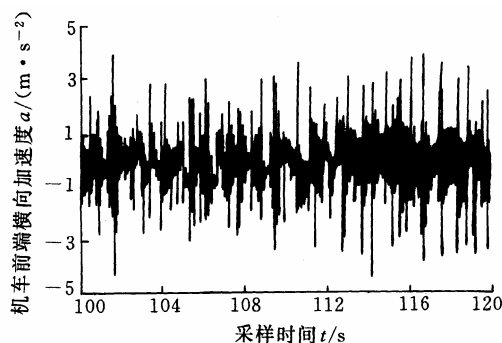


图 13 横向被动悬架时实测车体加速度

对机车以 200 km/h 速度运行的实测数据比较显

示,横向开关半主动悬架方式能有效地减小车体振动的速度和加速度,有助于提高高速铁路车辆的横向振动性能。

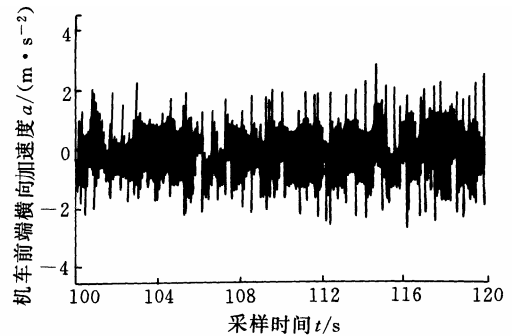


图 14 横向开关半主动悬架时实测车体加速度

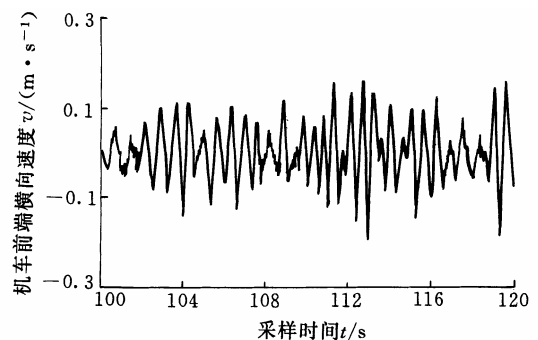


图 15 横向被动悬架时车体速度

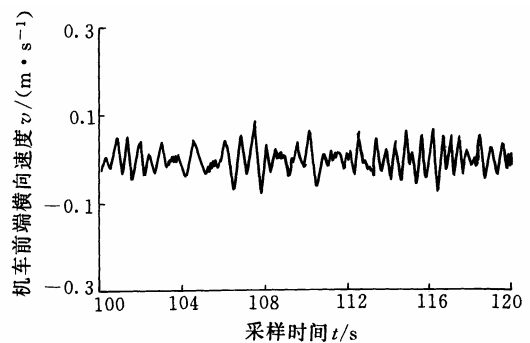


图 16 横向开关半主动悬架时车体速度

5 结论

研究表明:为改善高速铁路车辆的横向振动性能采用横向半主动悬架是必要的;开关式半主动悬架较连续调整阻尼式半主动悬架系统更简单、实用。基于本研究提出的开关半主动悬架系统的仿真计算和实测结果均表明开关式半主动悬架方式能有效改善高速铁路车辆的横向振动性能。

参 考 文 献

- 1 丁问司,卜继玲,刘友梅.我国高速列车横向半主动悬架系统控制策略及控制方式.中国铁道科学,2002,23(4):1~7

(下转第 170 页)