

研
究
开
发高速动车组半主动悬挂系统
动力学性能仿真分析王凯平¹, 黎剑锋¹, 向贤虎¹, 赵长龙², 李海涛²

(1. 株洲时代装备技术有限公司, 湖南 株洲 421001; 2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司 高速列车系统集成国家工程实验室, 山东 青岛 266111)



作者简介: 王凯平 (1979-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事铁道车辆减振器的开发。

摘 要: 介绍了基于天棚控制理论的半主动减振器原理, 以 CRH380A 动车组头车为研究对象, 对天棚阻尼系数和时滞对车辆动力学性能的影响进行了仿真分析。结果表明: 天棚阻尼系数越大, 车体横向减振性能越优, 但系统允许的最大时滞减小; 天棚阻尼系数的设计要同时考虑横向振动性能和系统时滞的影响。半主动控制模式比被动模式对车体横向振动的改善效果均比较明显, 平均改善率超过 20%。

关键词: 天棚原理; 半主动悬挂系统; 动力学性能; 天棚阻尼系数; 时滞; 高速动车组**中图分类号:** U266.2; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)03-0011-04Simulation Analysis on the Dynamics Performance of the Semi-Active
Suspension System in High-speed EMUsWANG Kai-ping¹, LI Jian-feng¹, XIANG Xian-hu¹, ZHAO Chang-long², LI Hai-tao²

(1. Zhuzhou Times Equipment Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. National Engineering Laboratory for System Integration of High-speed Train, CSR Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China)

Abstract: A semi-active damper principle based on sky-hook theory was described. Taking CRH380A EMUs head car as studying object, influence of sky-hook damping coefficient and time delay of the system on the vehicle dynamics performance was analyzed. The results showed that: the greater the sky-hook damping coefficient was, the better lateral vibration performance of vehicle was, and the biggest system allowable time delay turned smaller. So, lateral vibration performance and system time-delay influence should be considered at the meantime for design of sky-hook damping coefficient. Compared with the passive suspension, the semi-active suspension improved lateral vibration isolated performance of car body obviously, the average improvement rate of which was more than 20%.

Key words: sky-hook theory; semi-active suspension system; dynamics performance; sky-hook damping coefficient; time delay; high-speed EMU

随着动车组运营速度的提升, 其车体的振动性能随着速度提高面临新的挑战, 所以确保车辆运行舒适性已成为重要课题。高速行驶列车乘坐舒适性恶化的原因主要是长波长轨道不平顺、空气动力、车体轻量化等因素而引起的的车身横摇运动和结构振动。高速动车组通常采用传统被动悬挂系统, 其阻尼系数在列车运行过程中不能进行调节, 所以仅仅依靠优化被动悬挂的阻尼参数较难获得非常理想的横向舒适度^[1-2]。

为了同时满足高速与舒适度的要求, 在少数高速动车组上, 已采用车体振动主动或半主动控制技术, 以进一步改善车辆运行性能。主动控制一般是指从外部供给能量, 可以在任何情况下利用作动器得到所需要方向的控制力, 取得较好的控制效果^[3-4]。半主动减振控制可以与主动悬挂一样, 根据车体振动实时地控制阻尼力, 这样, 即使阻尼系数设定得很大, 也不会因轨道不平顺而使振动增大, 同时阻尼力的控制方法与激振力的传递途径无关, 因此对于由空气动力学产生的振动也有减振效果。半主动悬挂系统结构简单, 成本低, 因而具有较好的实际应用价值。与主动悬挂相

收稿日期: 2011-08-12

基金项目: “十一·五”国家科技支撑计划“中国高速列车关键技术研究与装备研制”项目 (2009BAG12A02-A12-2)

比,半主动悬挂几乎不消耗能量,控制机构简单,运行安全性高,能够达到主动悬挂相似的效果。半主动减振器具有广阔的应用前景,目前国外已成功应用在日本E2系、500系、N700系、800系等电动车组上,国内已在南车青岛四方机车车辆股份有限公司制造的CRH2C以及CRH380A等部分车型上均取得了理想的效果^[5-9]。

现以CRH380A高速动车组头车为研究对象,研究二系横向半主动悬挂系统对车辆动力学性能的影响,着重探讨了天棚阻尼系数和时滞对动车组动力学性能的影响,以及在不同速度等级下半主动控制模式对车体振动的隔离性能。

1 天棚控制原理

半主动悬挂系统的控制算法依据的是天棚控制理论。图1是天棚阻尼器的结构。假设车体旁边有不可移动的侧墙,在墙体和车体之间装有1个天棚阻尼系数为 C_{sky} 的油压减振器。假设油压减振器的阻尼系数足够大,这时车体相对墙体便不会产生振动,如果减振器安装在车体和转向架之间可以取得同样的效果,这便是天棚减振器的控制理论。实际上,当车体的横向速度与减振器活塞横向相对速度方向相同的时候,阻尼力对车体做负功,这时减振器提供设定的阻尼力,加速衰减车体的振动;当车体的横向速度和减振器活塞横向相对速度方向相反的时候,阻尼力对车体做正功,这时阻尼力取最小值,避免构架将振动传给车体。

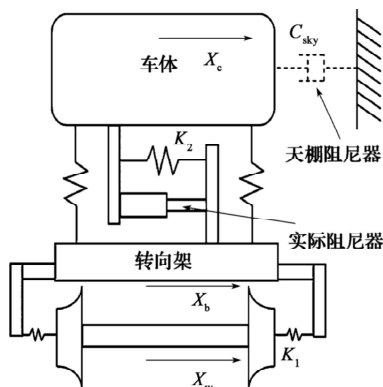


图1 天棚阻尼器

半主动悬挂是非线性系统,控制对象的模型复杂,如果根据控制的模型进行控制,则控制将非常复杂,调整难度也大。用虚拟减振器控制原理,则不需要控制对象的模型,控制器结构非常简单,调制参数少,便于调整。

2 半主动减振器的原理

从天棚控制理论可以看出,横向半主动减振器的阻尼力不但要能在“提供”与“不提供”之间切换,而且要求阻尼力的幅值能连续可调。

图2为新型横向半主动减振器的原理图,开关阀1、2用来实现在“提供”与“不提供”之间切换,采用比例

电磁阀,能在一定控制范围内无级控制衰减力。由于能无级选择衰减力,因此可以适应不同状况进行最佳控制,从而提高了振动隔离性能。

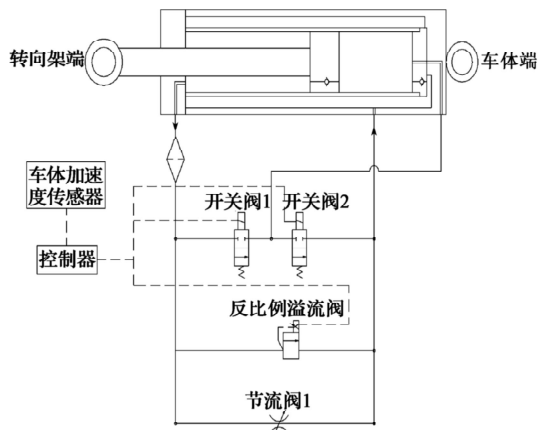


图2 半主动减振器原理图

通过控制实际阻尼力的最大值来模拟天棚阻尼力,在相对速度较低的情况下,实际减振器产生的阻尼力达不到天棚阻尼力时,能够维持一定的阻尼系数不变,在相对速度较高的情况下,实际阻尼力达到天棚阻尼力。另外,为了避免复杂化,选取特定活塞速度下的力与电流关系进行设计,对于由活塞速度不同产生的力的误差不进行补正。

减振器采用天棚控制原理时,将车体的加速度积分,求出绝对速度,令其与天棚阻尼系数 C_{sky} 相乘,便是指令作动器发生的作用力。通过控制器指令发出的作用力与车体和转向架的相对运动无关,仅与车体本身的横向速度有关。根据运行中车体速度的方向来控制开关阀的开启和关闭,通过车体速度的大小,来调节比例溢流阀的控制电流可以得到连续可调的减振器阻尼力。

3 建模与仿真研究

利用多体动力学计算软件Adams/Rail建立横向和垂向耦合的动车组头车动力学模型,模型中充分考虑了悬挂系统以及轮轨接触方面的非线性因素。在Matlab/Simulink中建立半主动的控制模型,通过Adams/Rail和Matlab/Simulink的联合仿真,来模拟高速动车半主动悬挂系统动力学性能。

3.1 天棚阻尼系数对车辆动力学性能的影响

实际应用中,天棚阻尼系数的选取是在一定的运行速度下,通过对车体横向平稳性指标和加速度均方根值的优化选取,同时也要考虑加速度最大值、轮轨横向力、轮轴横向力、脱轨系数的影响。本文中,车辆以300 km/h的速度在德国低干扰谱线路上运行时,仿真了天棚系数 C_{sky} 从10 kNs/m变化到200 kNs/m时车辆系统的动力学响应,以分析天棚系数 C_{sky} 对车辆系统横向性能的影响。

结果表明,随着 C_{sky} 的增大,车体横向平稳性指

标、车体横向加速度均方根、轮轨横向力、轮轴横向力、脱轨系数(如图3~图7所示)均减小,且下降趋势趋缓,但随着 C_{sky} 的增大,车体横向加速度最大值(如图8所示)出现先降后升趋势。当 C_{sky} 大于100 kNs/m时,车体加速度峰值增加,加速度出现更多尖峰,即高频成分明显增多。高频成分的增加一方面会减弱半主动装置改善车辆平稳性的效果,另一方面也会对控制系统的设计带来更大的难度。

综上所述,天棚阻尼系数 C_{sky} 大小宜在50~100 kNs/m之间取值。

3.2 时滞对车辆动力学性能的影响

实际应用中的半主动悬挂系统

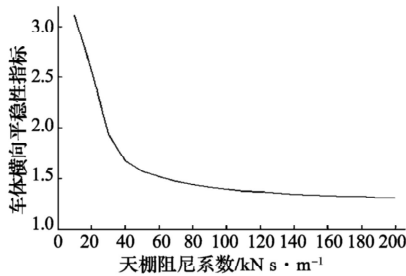


图3 天棚阻尼系数对横向平稳性的影响

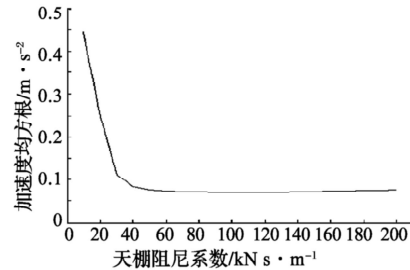


图4 天棚阻尼系数对横向加速度均方根的影响

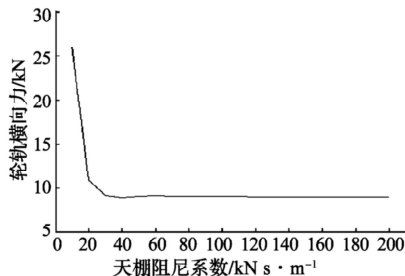


图5 天棚阻尼系数对轮轨横向力的影响

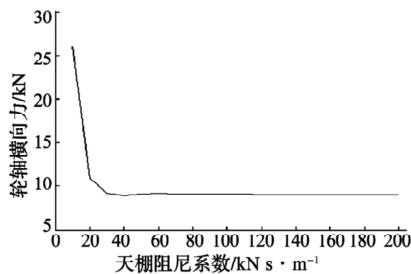


图6 天棚阻尼系数对轮轴横向力的影响

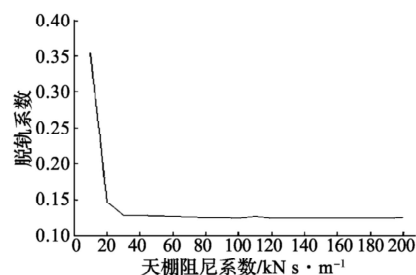


图7 天棚阻尼系数对脱轨系数的影响

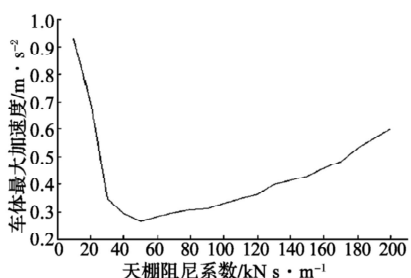


图8 天棚阻尼系数对横向最大加速度的影响

不可避免存在一系列的时滞因素,如信号采集、传输、处理导致的时滞,油路系统压力传递过程中的时滞,各种阀尤其是比例阀的响应时滞^[10]。为研究系统时滞对半主动悬挂系统车辆动力学性能的影响,本计算中,车辆以300 km/h的速度运行在德国低干扰谱激励下的轨道上,天棚阻尼系数 C_{sky} 取60 kN s/m,分别计算时滞从10 ms变化到105 ms时,车体横向振动和运行安全性指标的变化,计算结果见表1。

表1 不同时滞对车辆动力学性能的影响

时滞 / ms	横向平稳性指标	改善率 / %	加速度最大值 / m · s ⁻²	改善率 / %	加速度均方根 / m · s ⁻²	改善率 / %	轮轨横向力 / N	脱轨系数
被动	2.211	-	0.860	-	0.249	-	5 834	0.083
10	1.507	31.8	0.285	66.9	0.078	68.7	9 104	0.125
20	1.512	31.6	0.314	63.5	0.088	64.7	9 169	0.126
30	1.521	31.2	0.367	57.3	0.096	61.4	9 456	0.129
40	1.532	30.7	0.364	57.7	0.098	60.6	9 680	0.133
50	1.549	29.9	0.312	63.7	0.094	62.2	9 993	0.137
60	1.568	29.1	0.284	67.0	0.087	65.1	10 243	0.141
70	1.602	27.5	0.272	68.4	0.083	66.7	10 257	0.140
80	1.655	25.1	0.299	65.2	0.084	66.3	10 550	0.145
90	1.733	21.6	0.362	57.9	0.092	63.1	10 619	0.146
100	1.848	16.4	0.375	56.4	0.110	55.8	10 280	0.141
105	2.253	-1.9	0.985	-14.5	0.210	15.7	10 057	0.138

从以上结果可知,时滞对半主动系统的性能影响很大,时滞越大,车体横向平稳性指标越大,车体横向振动越剧烈;在100 ms内,车体横向平稳性指标变化较为平缓,较被动悬挂改善16%以上;车体最大加速度以及加速度均方根值改善较为明显,说明此时半主动悬挂系统对车体振动有良好的抑制作用;系统时滞超过100 ms后,半主动减振效果接近被动悬挂,甚至丧失改善振动的功能。

同时随着时滞的增大,车辆轮轨横向力和脱轨系数亦相应地增大,这是因为半主动控制实际上是把车体的振动转移到转向架上的缘故,由于它们数值增加不大,不会危及车辆运行安全性。因此,在天棚阻尼系数为60 kN s/m时,半主动悬挂系统允许时滞要控制在100 ms以内。

图9为不同天棚阻尼系数时,半主动悬挂系统取得理想的振动隔离性能时,系统最大允许时滞曲线图。从图9中可以看出,随着天棚阻尼系数的增大,系统最大允许时滞基本呈下降趋势,也就是说,系统时滞越大,半主动减振系统有良好抑制效果所允许的天棚阻尼系数越小。因此,天棚阻尼系数的设计要同时考虑

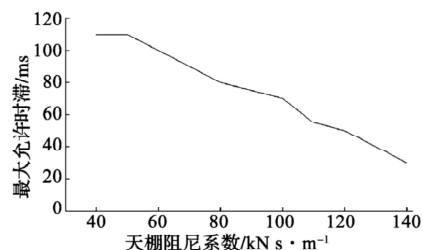


图9 天棚阻尼与最大允许时滞的关系

横向振动性能和系统时滞的影响。

3.3 速度对半主动减振性能的影响

实际运行中,列车速度是不断变化的。为了比较不同速度等级下,半主动控制模式比被动模式对车辆振动性能改善的情况,在天棚阻尼系数取为 60 kN s/m,系统时滞为 80 ms 时,计算了列车速度从 200 km/h 变化到 350 km/h 时,车体横向振动性能改善情况,结果见表 2。

表 2 不同速度下被动模式与半主动模式振动改善

速度 / km.h ⁻¹	被动模式			半主动控制模式					
	横向平稳 性指标	最大 加速度	加速度 均方根	横向平稳 性指标	改善 率/%	最大加 速度	改善 率/%	加速度 均方根	改善 率/%
200	1.859	0.483	0.129	1.529	17.8	0.355	26.5	0.065	49.6
250	2.083	0.682	0.193	1.607	22.9	0.343	49.7	0.077	60.1
280	2.151	0.828	0.226	1.632	24.1	0.351	57.6	0.082	63.7
300	2.211	0.860	0.249	1.655	25.1	0.299	65.2	0.084	66.3
320	2.316	0.924	0.278	1.751	24.4	0.479	48.2	0.097	65.1
350	2.409	0.968	0.322	1.834	23.9	0.505	47.8	0.113	64.9

结果表明,在不同的列车速度等级下,与被动模式相比,半主动模式对车体横向振动的改善效果均比较明显,平均改善率超过 20%。随着速度的增加,横向平稳性指标和横向振动加速度的改善效果呈现先升后降的趋势,在速度 300 km/h 时,改善率取得最大值。

4 结论

①在半主动控制模式中,天棚阻尼系数越大,车体横向平稳性指标越小,轮轨横向力、轮轴横向力、脱轨系数等均变小,且趋势趋缓,但车体最大加速度会增大,横向振动性能会恶化,因此,对 CRH380A 动车组头车,天棚阻尼系数可在 50~100 kNs/m 范围内取值。

②随着半主动系统时滞增大,车体横向振动性能恶化,同时车辆轮轨横向力和脱轨系数增大,这是因为半主动控制实际上是把车体的振动转移到转向架上

的缘故。在天棚阻尼系数为 60 kN s/m 时,半主动悬挂系统允许时滞要控制在 100 ms 以内,此时横向振动性能较被动悬挂改善 16% 以上。

③随着天棚系数的增大,系统允许的最大时滞单调减小,因此,天棚阻尼系数的设计要同时考虑横向振动性能和系统时滞的影响。

④不同的列车速度等级下,半主动控制模式比被动模式对车体横向振动的改善效果均比较明显,平均改善率超过 20%,改善效果随列车速度呈先升后降趋势,在速度 300 km/h 时,改善率取得最大值。

参考文献:

- [1] 佐佐木 君章. 改善高速列车的横向乘坐舒适度——半主动悬挂减振装置的应用 [J]. 铁道学报, 2004, 26(1): 105-115.
- [2] Sasaki.Kimiaki Semi-Active Suspension System [J]. Railway Technology Avalanche, 2003(1): 5.
- [3] 小泉 智志. 日本住友金属主动控制技术 [J]. 国外铁道车辆, 2004(1): 34-37.
- [4] 姚建伟, 嘎 尼. 采用主动悬挂技术是改善机车横向动力学性能的有效途径之一 [J]. 铁道机车车辆, 2002 (S1): 177-179.
- [5] 陈 海. 日本 E2 系-1000 型新干线电动车组 [J]. 国外铁道车辆, 2005(5): 1-7.
- [6] 张耀宏. 500 系列动车的半主动悬挂系统 [J]. 国外内燃机车, 1998(5): 8-12.
- [7] 陈 海. 日本新干线 N700 系电动车组 [J]. 国外铁道车辆, 2006(6): 1-9.
- [8] 周贤全. 九州新干线 800 系电动车组的开发 [J]. 国外铁道车辆, 2007(5): 1-3.
- [9] 张卫华. 高速转向架技术的创新研究 [J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 8-18.
- [10] 刘宏友, 等. 半主动悬挂系统动力学性能仿真分析 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 61-66.

(上接第 5 页) RAMS/LCC 试验系统和正在开展中的软件测评,在企业内部开展产品的 RAMS/LCC 测评的条件已经逐步具备,结合 IRIS 认证和 SIL 认证以及现有的质量管理体系和检测能力,可以为机车车辆的品质再提升提供有力的支撑。就新技术的研发而言,未来几年的设想是,以网络为纽带,将各 1:1 试验系统组合起来,配置半实物仿真系统,使得整车的电子装置的软硬件在 RAMS/LCC 试验室完成地面上的“完整系统的完整工况的完整重现”测试,建设机车车辆电气系统的数字化样机。

参考文献:

- [1] IEC 61133, 铁路应用—机车车辆制成后投入使用前的试

验 [S].

- [2] IEC 61377, 铁路应用—机车车辆组合试验 [S].
- [3] IEC 60310, 铁路应用—机车车辆牵引变压器和电抗器 [S].
- [4] IEC 60349, 电力牵引—铁路与道路车辆用旋转电机 [S].
- [5] IEC 60571, 铁路机车用电子设备 [S].
- [6] IEC 61375-1, 铁路电子设备—列车总线 第 1 部分: 列车通信网络 [S].
- [7] IEC 61375-2, 铁路电子设备—列车总线 第 2 部分: 列车通信网络一致性测试 [S].
- [8] 陈高华, 等. TCN 产品一致性测试技术的研究 [J]. 机车电传动, 2007(2).
- [9] EN 50126, 铁路应用 可靠性, 可用性, 可维护性和安全性技术条件和验证 [S].
- [10] ISO/IEC 9126-1, 软件工程产品质量第 1 部分: 质量模型 [S].