

文章编号: 1674—8247(2018)02—0005—04

速度锁定器理论模型及铁路桥梁抗震适用性分析

秦煜^{1,2} 杨超华¹ 吴多³ 肖金辉¹ 王威娜¹

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;
3. 长安大学, 西安 710064)

摘要:为更好开展速度锁定器桥梁抗震设计, 本文针对速度锁定器产品众多且原理性能各异现状, 通过分析其理论模型和数值模拟方法, 对其进行分类并讨论其工作机理, 研究速度锁定器的铁路桥梁抗震适用范围、对结构的影响和应用方式等。研究表明: (1) 速度锁定器可分为胶泥弹簧、机械控制流量阀门、胶泥小孔限流、硅油小孔限流等四类; (2) 速度锁定器的本质是仅与速度相关且不耗能的临时锁, 固结多个构件使之共同承力, 可采用刚性连杆或 Maxwell 模型进行数值模拟; (3) 速度锁定器不适用于需要耗能以减小震害的桥梁; (4) 速度锁定器临时锁定构件增大了整体刚度, 导致输入全桥的总地震效应增大。

关键词:速度锁定器; 工作原理; 力学模型; 刚性连杆; Maxwell 模型

中图分类号: TU411.01 **文献标志码:** A

Theoretical Model of Lock-up Device and Applicability Analysis of Seismic Design of Railway Bridge

QIN Yu^{1,2} YANG Chaohua¹ WU Duo³ XIAO Jinhui¹ WANG Weina¹

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
3. Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In view of the current situation that lock-up device products are numerous and the mechanics and performance are different, in order to serve seismic design better, by analyzing the theoretical model and numerical simulation, this thesis classifies the lock-up devices and discusses their working mechanism and study the range of seismic application of lock-up device in railway bridge, affect to the structure and application way. The results of the study show that: lock-up device can be divided into four types: glue-mud spring, mechanical control flow valve, pore limiting of flow of glue-mud and limited flow of silicon oil. The nature of lock-up device is that it is only related to speed and it could seem as a temporary lock that doesn't consume the energy, solidifying multiple components of bridge together to bear the external load, could be numerical simulated by using rigid connecting rod or Maxwell model. The lock-up device is not suitable for seismic bridge that needs consuming the energy. The temporary locking component of lock-up device increases the overall stiffness and in this way the total seismic effect input into the total bridge increases.

Key words: lock-up device; working principle; mechanical model; rigid connecting rod; Maxwell model

收稿日期: 2017-05-25

作者简介: 秦煜(1983-), 男, 高级工程师, 工学博士(后)。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408083, 51508064); 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2016shmszx30014); 重庆市前沿与应用基础研究计划项目(cstc2016jcyjA0128); 宁夏回族自治区高等学校科研项目优秀青年基金(NGY2017005)

引文格式: 秦煜, 杨超华, 吴多, 等. 速度锁定器理论模型及铁路桥梁抗震适用性分析[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(2): 5-8.

QIN Yu, YANG Chaohua, WU Duo, et al. Theoretical Model of Lock-up Device and Applicability Analysis of Seismic Design of Railway Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 5-8.

速度锁定器(Lock-up Device 或 Shock Transmission Unit)类似于液体黏滞阻尼器,但其并不耗能,如同一个仅与速度相关的开关。速度锁定器多用于多跨连续梁,其两端各与主梁、活动墩相连。在地震作用下,墩梁之间的速度差达到阈值时,速度锁定器开始工作将墩梁锁定,活动墩变为固定墩,从而使多个桥墩共同分配承担地震作用。对位于活跃地震带区域的桥梁工程,具备优良的抗震性能至关重要。作为被动抗震设备的速度锁定器具有简单、经济、实用等特点,近年来在国内铁路桥梁抗震领域中得到了较为广泛的应用。速度锁定器产品众多且原理性能各异,国内尚无相关规范标准,因此有必要开展速度锁定器的原理模型和抗震适用性分析。

国内外已对速度锁定器的相关问题进行了研究。Taylor^[1]介绍了美国 Taylor 公司速度锁定器的设计变量和控制参数,及该设备在悉尼 Lanier 大桥的工程应用实例。Brown 等人^[2]论述了速度锁定器在桥梁工程的设计和施工技术。Liang^[3]分析了速度锁定器孔隙参数及其对慢速动试验、快速移动试验和模拟动态试验的影响。颜志华等人^[4]从设计参数选取和减震效果方面研究了速度锁定器在铁路桥梁减震设计中的应用。余小华等人^[5]基于桥梁专业有限元软件 Midas-Civil 研究了速度锁定器的数值模拟方法。刘桓龙等人^[6]基于 Matlab 建立了速度锁定器仿真模型并进行了动态特性测试。已有研究主要集中在速度锁定器的工程应用^[4,7-8]、锁定支座的设计和应用^[9-12]等。但关于各类速度锁定器的原理模型及抗震适用性的相关工作尚较为少见,需进一步研究。

本文基于工作介质和原理,对速度锁定器进行分类并讨论其机理;研究速度锁定器的理论模型和数值模拟技术;针对铁路桥梁,分析速度锁定器的抗震适用范围、对结构的影响、新的应用方式等。

1 速度锁定器分类和工作原理

1.1 速度锁定器分类

根据工作介质和原理的发展,速度锁定器可大体分为四类:第一类是以硅质胶泥为工作介质的液体弹簧;第二类是设置机械控制流量阀门;第三类是以硅油为介质的小孔限流技术;第四类是以硅质胶泥为介质的小孔限流技术。

1.2 工作原理

(1) 以硅质胶泥为工作介质的液体弹簧

硅质胶泥是硅液(有机硅高分子化合物)与填加

粉剂的混合物,具有黏弹性和体积可压缩性。将胶泥装入密闭液压筒中,根据工程需要预先施加一定的预压力。当活塞柱受到的外压力小于预压力时,活塞柱静止不动。当外压力大于预压力时,活塞柱向筒内移动,胶泥被压缩并对活塞柱产生反作用力,直至与外压力相等。在此过程中,胶泥将部分外压力做功转化为弹性势能,即如同“液体弹簧”。当外压力减小或撤消后,胶泥体积自行膨胀至复原,将活塞柱推向或推回原位^[13-14]。如图1所示,此类设备无液体回路,仅单向承压,属于限制流动的低精度液压装置。

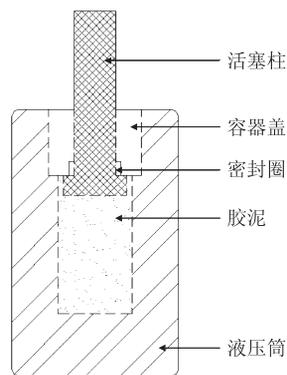


图1 液体弹簧构造示意

(2) 设置机械控制流量阀门

常用工作介质是二甲基硅油。类似于单出杆黏滞液体阻尼器,在活塞头内设置提升式阀门^[15],以机械方式控制硅油流量实现锁定功能。德国 Lisega 公司型号 31 的锁定装置如图2所示,A 是活塞头,B 是主控制阀门,C 是蓄油器。受到地震作用时,由于阀门进行工作状态的时间极短,装置内部压力迅速增大而易损坏,因此阀门通常设计为可更换部件。

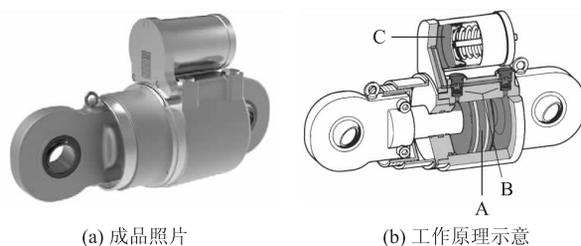


图2 德国 Lisega 公司的锁定装置

(3) 以硅油为介质的小孔限流技术

常用工作介质是二甲基硅油。类似于单出杆黏滞液体阻尼器,在活塞头设置大长径比的圆形孔或特殊形状的限流孔。当墩梁相对速度大于设计值时,活塞头以一定速度相对于油缸运动挤压硅油,由于液体黏滞摩擦等原因^[16],硅油无法通过间隙或活塞孔(圆形

孔或限流孔),活塞头产生微小位移后即停止,从而形成锁定。美国 Taylor 公司制造的锁定装置如图 3 所示。通过调整活塞头与缸壁之间的间隙或活塞孔的形状参数,可得到各型号的速度锁定器,但其对制造技术水平要求甚高。

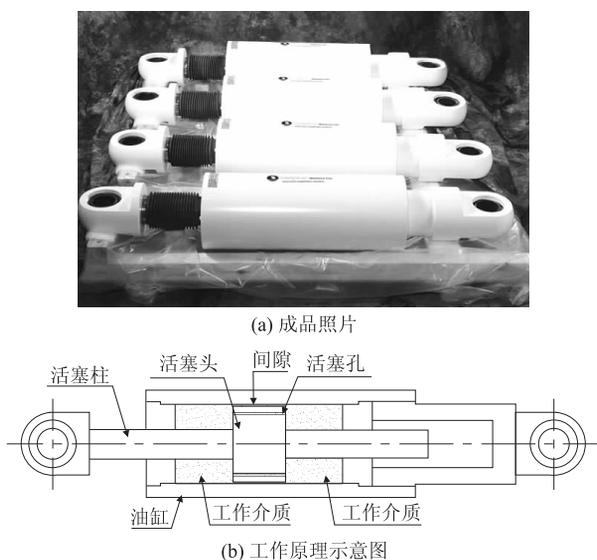


图3 美国 Taylor 公司的锁定装置^[1]

(4) 以硅质胶泥为介质的限流小孔技术

此类锁定装置类似于图 3,区别在于工作介质是硅质胶泥,在活塞头设置圆形孔。当墩梁相对速度大于设计值时,活塞头以一定速度相对于油缸运动挤压胶泥,由于胶泥分子链和链段运动的内摩擦阻力较大等原因^[17],硅质胶泥无法通过圆形孔,活塞头产生一定位移后即停止,从而形成锁定。硅质胶泥性能不稳定,易受工作环境因素影响。

2 速度锁定器理论模型和数值模拟方法

2.1 速度锁定器理论模型

速度锁定器应用于桥梁抗震设计时,针对具体工程设置速度阈值 V_0 ,其力学模型如式(1)^[18-19]。

$$F = \begin{cases} 0 & V \leq V_0 \\ 0 \sim F_{\max} & V > V_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_{\max} ——最大锁定力。

由式(1)可见,当墩梁相对速度 $V \leq V_0$ 时,即在温度变化等荷载引起的低速运动下,速度锁定器随墩梁相对位移自由活动,理论上对结构无任何影响;当墩梁相对速度 $V > V_0$,速度锁定器开始工作成为刚性连杆,锁定桥墩与主梁。

2.2 数值模拟方法

通常采用两种方法,进行速度锁定器有限元数值模拟。

(1) 刚性连杆

速度锁定器模拟为刚性连杆,该连杆将桥墩与主梁(或其他桥梁构件)的相对位移固结。在地震作用下,刚性连杆内力即为速度锁定器的总承载力,并据此确定速度锁定器的规格和数量。

(2) Maxwell 模型

速度锁定器具有强烈的频率依赖性,可用 Maxwell 模型(粘壶-弹簧串联模型)进行模拟。该模型中阻尼单元与弹簧单元串联如图 4 所示。

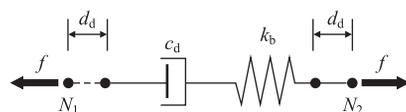


图4 Maxwell 模型示意

Maxwell 模型计算公式为:

$$f = C_d \cdot \text{sign}(\dot{d}_d) \cdot \left| \frac{\dot{d}_d}{V_0} \right|^s = k_b d_b \quad (2)$$

$$d = d_d + d_b \quad (3)$$

式中: C_d ——黏壶的阻尼;

V_0 ——参考速度;

S ——速度指数;

k_b ——弹簧的等效刚度;

d_d ——阻尼单元位移;

d_b ——弹簧单元位移;

f ——输出力。

等效刚度 k_b 为:

$$k_b = F/d \quad (4)$$

式中: F ——速度锁定器的承载力;

d ——速度锁定器锁定过程中出现的位移。

3 速度锁定器抗震适用性分析

(1) 抗震适用范围

速度锁定器自身不耗能,仅是转移和分散地震动输入桥梁结构的能量。因此,一般情况下速度锁定器不宜单独用作大位移量的漂浮体系、上部结构自重特别大、高烈度区特殊结构等桥梁的罕遇地震抗震措施。

在本质上,对于整个桥梁结构(全桥),黏滞液体阻尼器增大了原结构体系的阻尼及延长了自振周期(属于减震设计),而速度锁定器是将多个构件临时固结为一个整体抵抗地震作用(属于使全桥共同承力的

弹性抗震设计)。所以,对于亟需耗能以减小震害的桥梁应采用黏滞液体阻尼器,而非速度锁定器。

(2) 有利和不利影响

速度锁定器将原本单独抗震的构件锁定为整体,因此可有效减小桥梁某构件的局部地震响应。

地震作用下,速度锁定器临时锁定活动墩与主梁,使得活动墩刚度参与整体刚度计算,增大了全桥刚度,降低了全桥振动周期,增大了输入全桥的总地震效应。

(3) 其他应用方式

列车制动力或牵引力是铁路桥梁的重要纵向水平力,为控制其作用下主梁的纵向位移,可以采用速度锁定器。针对列车制动力和地震作用,可以同时设置速度锁定器和阻尼器。例如,渝利铁路韩家沱长江大桥主桥为(81+135+432+135+81)m双塔双索面钢桁梁半飘浮体系斜拉桥,采用了美国Taylor公司生产的具有熔断功能的4个速度锁定器、以及4个黏滞阻尼器的综合控制系统^[7,14]。列车制动力、大风、多遇地震工况下,速度锁定器将全桥临时固结。设计地震、罕遇地震工况下,速度锁定器熔断退出工作,黏滞阻尼器开始工作耗能减小全桥地震响应。

4 结论

(1)速度锁定器如同仅与速度相关且不耗能的开关,可大致分为:以硅质胶泥为工作介质的液体弹簧、设置机械控制流量阀门、以硅质胶泥为介质的小孔限流技术、以硅油为介质的小孔限流技术等四种类型。

(2)低速运动下,速度锁定器自由位移对结构无影响;高速运动下,速度锁定器临时锁定桥墩与主梁。可采用刚性连杆或Maxwell模型对速度锁定器进行有限元数值模拟。

(3)在本质上,速度锁定器临时固结多个构件使之共同承力,属于弹性抗震设计,不适用于需要耗能以减小震害的桥梁。速度锁定器临时锁定构件增大了整体刚度,导致输入全桥的总地震效应增大。速度锁定器可与黏滞阻尼器等其他减震隔震设备共同使用,以减小不同类型动力荷载作用下的桥梁响应。

参考文献:

- [1] Douglas P. Taylor. Fluid Lock-up Devices-a Robust Means to Control Multiple Mass Structural Systems Subjected to Seismic or Wind Inputs; North Tonawanda, NY 14120-0748.
- [2] RAY N,MANDAL A. Brown, TechStar Inc, USA. TechStar Lock-Up Devices & Anti-seismic Expansion Joints in Southern Asia [C]// IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering - II. Dhaka, Bangladesh,2010:360-365.
- [3] Liang J. Design and Test of Annular Discharge Orifice of Shock Transmission Unit [J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996 (vols 203-210), 2014, 228(8):1391-1397.
- [4] 颜志华,马良喆,陈永祁. 速度锁定装置在津秦客运专线减震设计中的应用[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1):95-100.
YAN Zhihua, MA Liangze, CHEN Yongqi. The application of lock-up device in aseismic design for Jin-Qin passenger line. [J]. Bridge Construction, 2014, 44(1):95-100.
- [5] 余小华, 窦胜谭. 速度锁定器在桥梁抗震中的有限元模拟[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(2):56-59.
YU Xiaohua, DOU Shengtian. Finite Element Simulation of Shock Transmission Unit in Bridge Seismic System [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(2):56-59.
- [6] 刘桓龙, 祝文举, 于兰英. 间隙式桥梁锁定装置的 Matlab 仿真测试研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(1):118-120.
LIU Henglong, ZHU Wenju, YU Lanying. Research on Simulation Test of Gap Lock-up Device Based on Matlab [J]. Machine Tool and hydraulics, 2012, 40(1):118-120.
- [7] 陈克坚, 曾永平, 袁明, 等. 重庆至利川铁路韩家沱长江大桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2012, 42(6):63-67.
CHEN Kejian, ZENG Yongping, YUAN Ming, et al. Overall Design of Hanjiatuo ChangjiangRiverBridge on Chongqing-Lichuan Railway [J]. Bridge Construction, 2012, 42(6):63-67.
- [8] Pritchard B P, Presswood M. The Use of Shock Transmission Units in Bridging. Discussion [C]// Proceedings of The Institution of Civil Engineers. Structures And Buildings, 1996:241-244.
- [9] 周振兴, 闫兴非, 陈巧珊. 新型连续梁用抗震支座(力分布式)的研究、设计和实施 [C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会, 第十九届全国桥梁学术会议论文集(下册). 上海: 人民交通出版社, 2010: 640-647.
ZHOU Zhenxing, YAN Xingfei, CHEN Qiaoshan. The Research Design and Implementation of New Aseismic Bearing (force distributed) in Continuous Beam [C]// Bridge and Structural Engineering Branch of China Civil Engineering Society, The 19th National Bridge Academic Conference Shanghai; China Communications Press, 2010: 640-647.
- [10] 郑晓龙, 樊启武, 金怡新, 等. 速度锁定支座的设计与减震性能分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(10):73-78.
ZHENG Xiaolong, FAN Qiwu, JIN Yixin, et al. Analysis of Design and Seismic Isolation Performance of Luck-up Bearing [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(10):73-78.
- [11] 陈列, 胡京涛. 桥梁减隔震技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
CHEN Lie, HU Jingtao. Seismic Mitigation and Absorption Design of Bridge [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.
- [12] 罗登发, 郭占元, 戴胜勇, 等. 双曲而球型减隔震支座在铁路桥梁上的应用[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1):53-55.
LUO Dengfa, GUO Zhanyuan, DAI Shengyong, et al. Application of Hyperboloid Spherical Isolation Bearing on Railway Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(1):53-55.

- Railway Technology, 2015, 6(2):41-44.
- [2] 铁总建设[2013]86号,铁路自然灾害及异物侵限监测系统工程设计暂行规定[S].
Tie Zong Jian She [2013] No. 86, Interim Provision for Engineering Design of Railway Natural Disaster and Foreign Object Invasion Monitoring System[S].
- [3] 铁总运[2014]146号,高速铁路自然灾害及异物侵限监测系统铁路局中心系统总体方案(暂行)[S].
Tie Zong Yun [2014] No. 146, General Scheme for Central System in Railway Administration of High Speed Railway Natural Disaster and Foreign Object Invasion Monitoring System (interim) [S].
- [4] TJ/GW088-2013 高速铁路自然灾害及异物侵限监测系统总体技术方案(暂行)[S].
TJ/GW088-2013 General Technical Scheme of High Speed Railway Natural Disaster and Foreign Object Invasion Monitoring System (interim) [S].
- [5] 中铁二院工程集团有限责任公司. 国家科技支撑计划课题“光纤铁路环境静态安全监测设备及应用示范”研究实施大纲[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2012.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Research Implementation Outline of National Science and Technology Support Plan "Fiber Optic Railway Environmental Static Safety Monitoring Equipment and Its Application Demonstration"[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2012.
- [6] 谢希仁. 计算机网络(第5版)[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
XIE Xiren. Computer Network (Version 5)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [7] 闫二辉,朱敏,毛明敏. 一种基于动态阈值的TCP超时重传策略[J]. 计算机应用研究,2010,27(8):3135-3137.
YAN Erhui, ZHU Min, MAO Mingmin. Timeout Retransmission Strategy Based on Dynamic Threshold[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(8):3135-3137.
- [8] 刘兵,左爱群. 计算机网络基础与Internet应用(第三版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
LIU Bing, ZUO Aiqun. Computer Network Infrastructure and the Application of Internet (Version 3) [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.

(编辑:车晓娟 苏玲梅)

(上接第8页)

- [13] Constantinou M C, Soong T T, Dargush G F. Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit[J]. Center for Earthquake Engineering Research State University of New, 1998.
- [14] M. D. Symans, Constantinou M C. Passive Fluid Viscous Damping Systems for Seismic Energy Dissipation [J]. Iset Journal of Earthquake Technology, 1998, 35(4):185-206.
- [15] 陈永祁. 桥梁工程液体黏滞阻尼器设计与施工[M]. 北京:中国铁道出版社,2012.
CHEN Yongqi. Design and Construction of Liquid Viscous Damper for Bridge Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- [16] 周云. 粘滞阻尼减震结构设计理论及应用[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2013.
ZHOU Yun. Design Theory and Application of Viscous Damping Structure[M]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology Press, 2013.
- [17] 朱闰平,杨军. 弹性胶泥的特性及其减震器的工作原理[J]. 橡胶工业,2005,53(7):427-429.
ZHU Runping, YANG Jun. The Properties of Elastic Cement and How the Shock Absorber Works[J]. Rubber industry, 2005, 53(7):427-429.
- [18] 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,2007,40(7):55-61.
CHEN Yongqi, GENG Ruiqi, MA Liangze. Design and Selection of Fluid Viscous Devices for Shock Control of Bridges [J]. Journal of Civil Engineering, 2007, 40(7):55-61.
- [19] 庄军生. 桥梁减震、隔震支座和装置[M]. 北京:中国铁道出版社,2012.
ZHUANG Junsheng. Bridge Shock Absorption and Isolation Bearing and Installation [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.

(编辑:车晓娟 苏玲梅)