

文章编号:1671-1637(2012)03-0060-07

车辆系统空气弹簧失气安全性分析

高 浩, 罗 仁, 池茂儒, 戴焕云

(西南交通大学, 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:建立了具有刚度衰变特性的空气弹簧失气模型和非线性粘滑接触模型,结合车辆系统动力学,模拟空气弹簧失气动态过程与失气后的应急状态,分析了空气弹簧失气后车辆系统的稳定性与空气弹簧突然失气对车辆动力学性能的影响,研究了不同失气过程时长、运行速度与曲线通过工况下空气弹簧失气车辆的安全性。计算结果表明:空气弹簧失气后车辆临界速度由 $623 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 大幅降低为 $351 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。空气弹簧突然失气导致轮轨垂向力减小,轮重减载率增大,且失气过程越短,轮重减载率越大,失气过程为 0.2 s 时轮重减载率达到 0.651 。车辆运行速度低于 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车速对轮重减载率和轮轨力影响不明显,当大于 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,减载率随车速增大迅速增大。车辆通过曲线时,在圆曲线上失气最危险,轮重减载率最大为 0.652 。

关键词:车辆工程;空气弹簧;失气过程;车辆动力学;粘滑模型;刚度衰变;运行安全性

中图分类号:U270.11

文献标志码:A

Safety analysis of railway vehicle in leakage process of air spring

GAO Hao, LUO Ren, CHI Mao-ru, DAI Huan-yun

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The leakage model of air spring with stiffness decay characteristics and the nonlinear stick-slip contact model were established. The dynamic process in loss of gas and the state of emergency after loss of gas were simulated by combining the two models with vehicle system dynamics. The stability of vehicle system with air spring failure was analyzed. The impact of air spring's sudden leakage on the dynamics performance of vehicle was simulated. The running safeties of vehicle under different times of loss of gas, different speeds and curve negotiation conditions were studied. Analysis result shows that the critical speed of vehicle system with air spring failure significantly decreases from $623 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ to $351 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Because of air spring's sudden leakage, wheel-rail vertical force decreases and reduction rate of wheel load increases. The shorter the leakage process is, the greater reduction rate of wheel load is. It reaches 0.651 when the leakage time is 0.2 s . The influence of speed on reduction rate of wheel load and wheel-rail force is not obvious when vehicle speed is less than $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. But, when it is greater than $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, reduction rate of wheel load increases rapidly with speed increase. Leakage occurring on circular curve is most dangerous when vehicle runs, and the maximum of reduction rate of wheel load is 0.652 . 2 tabs, 12 figs, 15 refs.

Key words: vehicle engineering; air spring; leakage process; vehicle dynamics; stick-slip model;

收稿日期:2012-01-12

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG12A01-A02);铁道部科技研究开发计划项目(2010J003-E);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0664)

作者简介:高 浩(1984-),男,江苏徐州人,西南交通大学工学博士研究生,从事车辆系统刚柔耦合动力学研究。

导师简介:戴焕云(1966-),男,河北赤城人,西南交通大学研究员,工学博士。

stiffness decay; running security

Author resumes: GAO Hao(1984-), male, doctoral student, +86-28-86466221, gaohao526@163.com;

DAI Huan-yun(1966-), male, researcher, PhD, +86-28-86466221, daihuanyun@163.com.

0 引言

在车辆运营中首先要保证车辆的运行安全性,悬挂部件故障严重影响车辆系统的安全性。空气弹簧是高速列车二系悬挂的主要部件,主要由空气弹簧本体、附加气室、高度调节阀与差压阀等部件组成。空气弹簧不仅起到支撑车体质量的作用,同时能隔离和衰减轮轨传递到车体的振动,因此,该部件出现故障会对车辆系统的平稳性和安全性产生很大影响。空气弹簧故障的形式有多种,如阀门故障、充气故障、高度调节故障和橡胶囊破裂等^[1-3]。其中空气弹簧本体橡胶囊破裂是一种常见的故障形式,会导致空气弹簧内的气体突然释放,二系支撑作用瞬间消失,然后应急弹簧起作用,整个过程时间较短,二系悬挂整体刚度剧烈变化,二系悬挂力随之变化,冲击车体和构架,甚至导致安全问题。

目前,高速列车二系悬挂均采用空气弹簧,国内外学者对空气弹簧的刚度特性和减振特性进行了大量的研究。在以往的动力学计算中假设空气弹簧在正常工作范围内的刚度为线性,采用线性弹簧和阻尼模拟空气弹簧^[4-5]。刘增华等采用有限元法研究了空气弹簧垂向刚度特性^[6-7];李芾等研究了空气弹簧垂向动态特性^[8];原亮明等采用非线性有限元技术研究了空气弹簧横向非线性刚度^[9];罗仁等采用气体状态方程建立空气弹簧模型,并考虑了空气弹簧附加空气室、节流孔和高度调整阀等^[10];赵洪伦等采用基于复刚度法研究了带附加气室空气弹簧振动特性,并通过试验对模型进行了验证和修正^[11];Toyofuku等通过试验和理论的方法研究了空气弹簧的主、附空气室、连接管路和节流孔等对空气弹簧动态特性的影响^[12-13]。以上研究是基于空气弹簧正

常工作状态的,目前对空气弹簧故障发生过程的刚度变化及对车辆动力学性能影响的研究还很少。在进行空气弹簧故障工况动力学性能评估时,一般只考虑车辆悬挂系统故障之后的特性,没有考虑发生故障过程中的动力学性能的变化。在进行空气弹簧故障工况仿真时一般采用应急弹簧直接代替空气弹簧,这种处理方式的前提是上下磨耗板的摩擦因数足够大,仿真过程中不会出现相对滑动;在实际情况中,由于磨耗板的摩擦因数较小,上下磨耗板存在粘着和滑动2种状态,应急的横向刚度和粘滑摩擦是串联关系,因此,这种力学模型不够准确。在以上研究的基础上,本文建立了高速列车空气弹簧失气过程的力学模型,在失气过程中使用刚度衰变模型,当应急弹簧起作用后使用粘滑接触模型。在整车动力学仿真模型中前转向架使用空气弹簧失气过程模型,后转向架使用正常空气弹簧模型,分析了在空气弹簧失气过程中高速列车的动力学性能和安全性。

1 动力学模型

1.1 车辆系统动力学模型

车辆系统包括1个车体、2个构架、8个轴箱、4个轮对共15个刚体,其中车体、构架有纵移、横移、浮沉、侧滚、点头和摇头6个自由度,轴箱只有1个绕轮对旋转的自由度,轮对有纵移、横移、点头和摇头4个独立自由度,全车共42个独立自由度。车辆一系采用转臂定位方式,安装有钢弹簧与垂向减振器。二系安装空气弹簧、横向止挡、横向减振器、抗蛇行减振器、垂向减振器、牵引拉杆与抗侧滚扭杆等。其中前转向架空气弹簧采用失气过程模型,后转向架采用传统线性弹簧-阻尼模型。车辆简图见图1,其正常情况下的蛇行临界速度为 $623 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

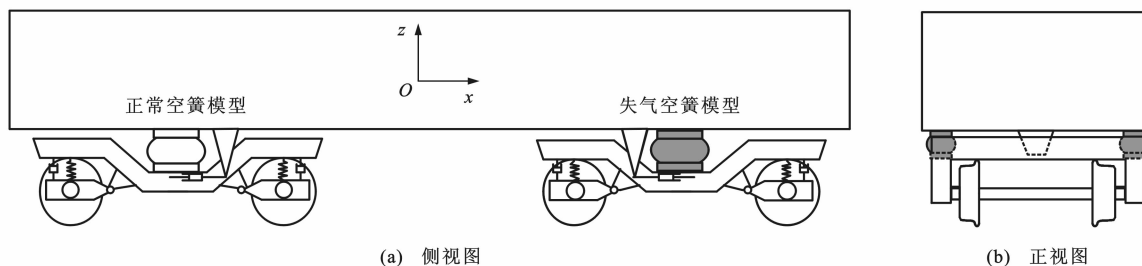


图1 车辆模型

Fig. 1 Vehicle model

1.2 空气弹簧失气过程的动力学模型

车辆系统使用的空气弹簧本体一般由上盖板、橡胶气囊、下座和应急橡胶弹簧组成,车体或摇枕上的空气弹簧座与空气弹簧上盖板相连,构架上的空气弹簧座与应急弹簧相连。在上盖板和应急弹簧接触面上设有磨耗板。空气弹簧简图见图 2,为了分析失气过程动力学性能的变化过程进行以下假设。

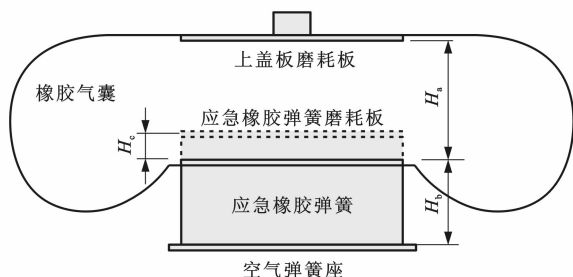


图 2 空气弹簧

Fig. 2 Air spring

(1) 将空气弹簧失气发生到上盖板磨耗板与应急弹簧磨耗板接触过程定义为失气过程,空气弹簧失气发生在时刻 t_0 ,失气过程时长为 t_e 。

(2) 在空气弹簧失气发生过程中,二系悬挂刚度由正常刚度线性或指数函数衰减至给定刚度。

(3) 假设前转向架右侧弹簧发生破裂,左右空气弹簧相互连通,右侧空气弹簧失气导致左侧弹簧也出现同样的失气过程,且比右侧弹簧失气过程延迟 τ ,延迟时间长度与空气弹簧支撑方式、附加气室中间有误差压阀、各阀的进排气速度等有关。

(4) 在空气弹簧失气瞬间,应急弹簧由于突然失去垂向压力,迅速从工作长度恢复到自然长度。

(5) 上盖板磨耗板与应急弹簧磨耗板接触后,可能产生垂向脱离,纵向和横向会粘着或相对滑动。

(6) 不考虑二系垂向压力变化导致的空气弹簧失气速度的波动。

根据以上假设对空气弹簧失气过程进行建模。在图 2 中: H_a 为空气弹簧簧体工作高度; H_b 为应急弹簧工作高度; H_c 为工作时应急弹簧的压缩量。空气弹簧失气过程主要分为两阶段:第 1 阶段为空气弹簧由正常工作突然失气,二系悬挂刚度衰变至零;第 2 阶段为直至上盖板磨耗板与应急弹簧磨耗板接触,此时二系悬挂由空气弹簧演变为上盖板与应急弹簧之间的粘滑接触问题。本文建立刚度衰变模型和非线性粘滑接触模型,实现空气弹簧失气过程动态模拟。

1.2.1 刚度衰变模型

空气弹簧失气过程也是二系悬挂刚度衰变的过程,失气发生的原因不同导致刚度衰变的方式不同,

本文假设空气弹簧刚度线性或指数衰变。空气弹簧刚度为 K_a ,应急弹簧刚度为 K_1 ,空气弹簧失气前二系悬挂刚度为两者串联刚度,即

$$K_0 = K_a K_1 / (K_a + K_1) \quad (1)$$

假设空气弹簧失气过程中二系悬挂刚度从 K_0 指数衰变至 0,当上盖板磨耗板与应急弹簧磨耗板接触时二系悬挂垂向刚度突变为 K_1 。二系悬挂刚度 K_s 变化见式(2)和图 3

$$K_s = \begin{cases} K_0 & t \leq t_0 \\ K_0 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{t - t_0}{t_e} \right)^2} \right] & t_0 < t \leq t_1 \\ K_1 & t > t_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$t_1 = t_0 + t_e$$

式中: t 为变化时间。

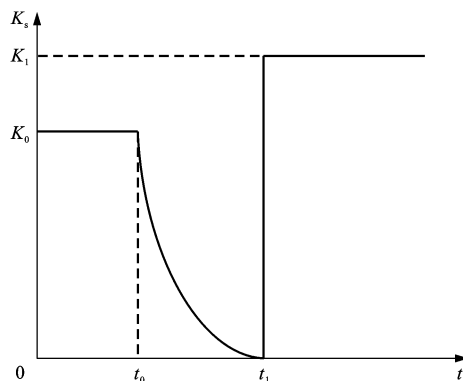


图 3 悬挂刚度变化曲线

Fig. 3 Changing curve of suspension stiffness

1.2.2 粘滑接触模型

当上盖板磨耗板与应急弹簧磨耗板接触后,垂向为开放式约束,可能产生垂向脱离。两磨耗板之间摩擦因数较小,纵向和横向会产生相对滑动。本文采用非线性粘滑接触模型模拟这种应急状态,该模型垂向为非线性接触力元,横向和纵向为摩擦力元与弹簧-阻尼串联力元组成的粘滑模型,见图 4^[14]。在图 4 中: K_{1z} 为应急弹簧垂向刚度,其非线性关系见图 5; C_{1z} 为应急弹簧垂向阻尼; K_{1x} 为应急弹簧横向和纵向刚度; C_{1x} 为应急弹簧横向和纵向阻尼; μ 为上盖板磨耗板与应急弹簧磨耗板之间的摩擦因数;点 P_c 、 P_b 和 P_f 分别为上盖板磨耗板、应急弹簧磨耗板和空气弹簧座上的点。在计算过程中,点 P_c 和 P_f 的位置由车辆动力学计算获得,点 P_b 位置由粘滑接触模型计算获得。

非线性粘滑接触模型有复杂的非线性力学特性^[15],分为 3 种状态,即粘着、滑移和脱离,3 种状态下接触法向力 F_z 和横向力 F_x 的计算公式以及三者之间的转换条件见图 6。

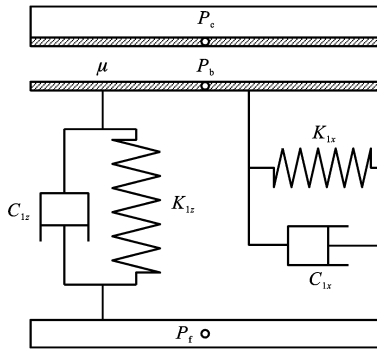


图4 粘滑接触模型

Fig. 4 Stick-slip contact model

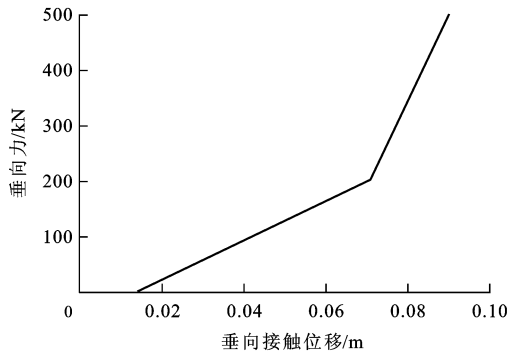


图5 应急弹簧的垂向刚度

Fig. 5 Vertical stiffness of emergency spring

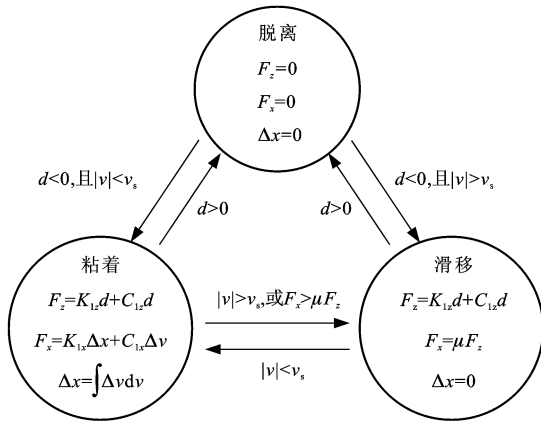


图6 粘滑接触力元数学模型

Fig. 6 Mathematics models of stick-slip contact force elements

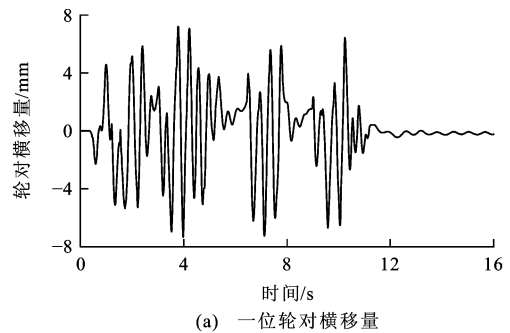
在图6中： Δx 为应急弹簧横向变形量； Δv 为应急弹簧横向变形速率； v 为上下磨耗板之间即图4中点 P_c 和 P_b 之间的横向相对移动速度； v_s 为粘着限制速度，当 v 低于该值时，力元由滑移状态变为粘着状态，一般设为很小的值，如 $0.001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； d 为应急弹簧垂向压缩量，当 $d > 0$ 时，上下磨耗板脱离。假设初始时刻力元处于粘着状态，在每一积分步，根据上一时刻的状态和状态切换条件确定当前时刻力元的状态，并根据图6中对应的计算公式计

算力元的垂向力和横向力。

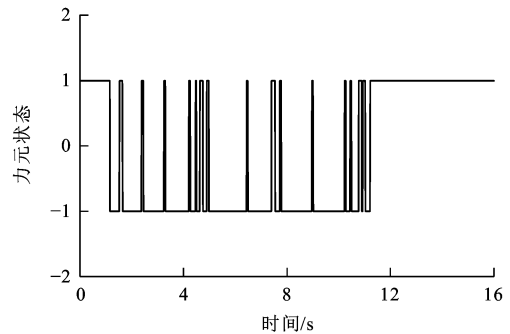
2 空气弹簧失气过程仿真

2.1 粘滑接触失气故障模型稳定性分析

将粘滑接触模型用于车辆系统动力学模型中，模拟空气弹簧故障后的应急状态，分析空气弹簧故障状态下车辆系统的稳定性。采用1000 m长的京津线轨道谱作为轨道激励，1000 m以后撤掉轨道激励，观察轮对是否可以回到平衡位置，以此判断车辆系统的稳定性。应急弹簧横向刚度为 $2.5 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ ，垂向刚度为图5所示非线性关系，上下磨耗板之间的摩擦系数为0.09。通过计算得到空气弹簧故障后系统的临界速度为 $351 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，相对与正常车辆系统的临界速度 $623 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，失气后车辆系统的临界速度大幅降低约44%。图7、8分别为 $351 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $352 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时轮对横移量和粘滑接触力元状态。粘滑接触力元状态的值为0表示脱离，为1表示粘着，为-1表示滑移。在速度为 $351 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时轮对可以收敛到平衡位置，粘滑力元最后处于粘着状态；速度为 $352 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时轮对出现不稳定的间歇式振荡，无法完全回复到平衡位置，粘滑力元随之出现间歇式粘滑切换，且滑动状态为主，说明车辆系统处于不稳定状态。由于失气后二系悬挂变成粘滑接触力元，其饱和横向力为滑动摩擦力，其对横向振动的衰



(a) 一位轮对横移量



(b) 粘滑接触力元状态

图7 $351 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时轮对横移与力元状态Fig. 7 Wheelset lateral displacement and force element state at $351 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

减能力及横向运动的约束不够。

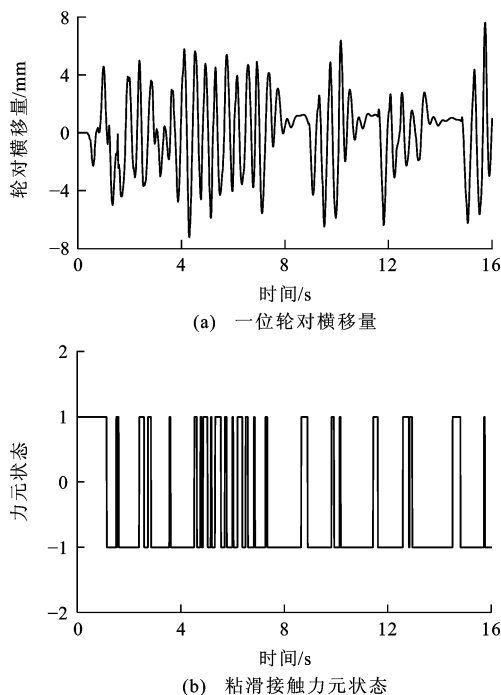


图 8 $352 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时轮对横移与力元状态

Fig. 8 Wheelset lateral displacement and force element state at $352 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

2.2 空气弹簧失气过程仿真结果

将刚度衰变模型结合粘滑接触模型形成空气弹簧失气过程动力学模型,对空气弹簧失气过程进行仿真,分析失气过程中各项动力学性能指标的变化。车辆运行速度为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,轨道不平顺为京津线轨道谱,其他参数见表 1。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

失气开始时间/s	1.0
右侧失气过程时长/s	0.2
左侧失气迟滞时长/s	0.2
正常二系悬挂垂向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.203
正常二系悬挂横向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.133
应急弹簧横向刚度/($\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$)	2.5
磨耗板间垂向距离/m	0.035
摩擦因数	0.09
粘滑力元初始状态	1

图 9 中显示了整个失气过程二系垂向力和垂向位移的变化。在失气瞬间,由于垂向刚度快速衰变,二系悬挂垂向力迅速减小,右侧先失气使右侧悬挂力减小量比左侧大,导致车体前端下沉的同时出现左右倾斜,并经过一段时间最终达到平衡。在失气瞬间,轮轨垂向力、轮轨横向力、轮重减载率和脱轨

系数出现明显的波动。这是由于空气弹簧突然失气,车体产生的作用力无法传递到构架,构架由压紧状态反弹到自然状态,轮轨力随之突然减小,车体缺少支撑而快速下落,当空气弹簧上盖板与应急弹簧接触时产生比较大的冲击,引起轮轨垂向力增大。图 10 为整个失气过程的轮轨垂向力和轮重减载率,可见一、二位轮对出现较大的减载现象,右轮轮轨力最大减小到 20.3 kN ,左轮最大减小到 27.2 kN ,最大减载率达到 0.651 ,超过了减载率的限定值 0.650 。可以看出两侧轮对同时减载说明在失气瞬间车辆安全裕量很小,需要采取相应的防范措施。

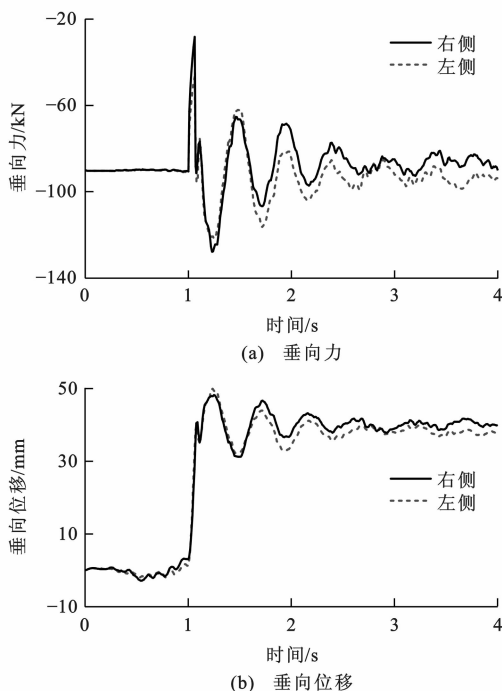


图 9 二系垂向力与位移

Fig. 9 Vertical forces and displacements of secondary suspension

3 空气弹簧失气故障安全性分析

3.1 失气过程时长对减载率的影响

空气弹簧破口的大小直接影响失气的速度,失气速度越快,整个空气弹簧失气过程越短,二系悬挂的刚度突变对车辆安全性影响越大。图 11 为失气过程时长对轮重减载率的影响,可见失气时间越短,轮轨间的冲击越大,轮对减载越严重。当失气过程时长小于 0.2 s 时,轮重减载率超过标准限定值 0.650 。时长为 0.1 s 时,减载率将达到 0.730 ,严重影响车辆运行安全性。当失气过程时长超过 0.6 s 时,对减载率的影响已经不明显。

3.2 不同运行速度时失气对安全性的影响

考察车辆系统在无轨道激励和京津线轨道谱激

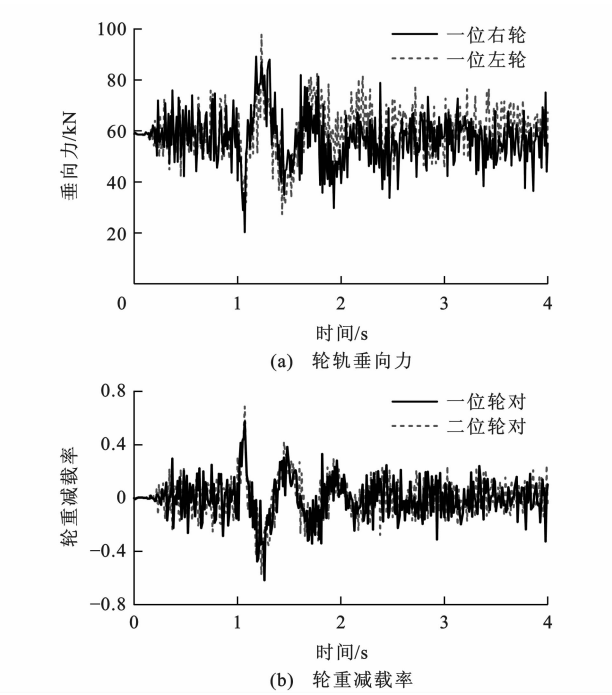


图 10 轮轨垂向力和轮重减载率

Fig. 10 Wheel-rail vertical forces and reduction rates of wheel load

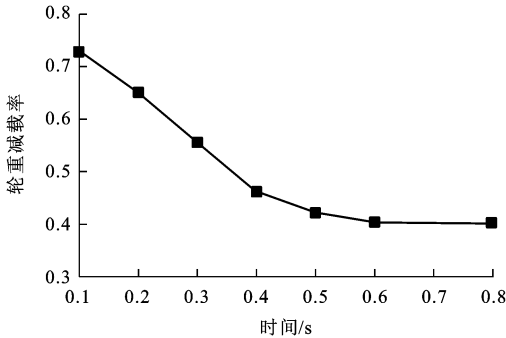


图 11 失气时长对减载率的影响

Fig. 11 Influence of leakage time length on reduction rate of wheel load

扰下,不同速度等级运行时空气弹簧突然失气对车辆系统安全性的影响。图 12 为不同速度等级下最小轮轨垂向力(发生在失气瞬间约 1.1 s)和轮重减载率。在无轨道激励的情况下,最小轮轨垂向力和轮重减载率不受速度变化的影响;当存在轨道激励且速度低于 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,速度变化对最小轮轨垂向力和轮重减载率的影响不大;当速度大于 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,最小轮轨垂向力随速度增大迅速减小,轮重减载率随速度增大迅速增大,因此,在高速运行过程中,空气弹簧突然出现失气将威胁车辆运行安全性。

3.3 失气故障曲线通过安全性分析

车辆出现失气故障后通过曲线或在通过曲线过

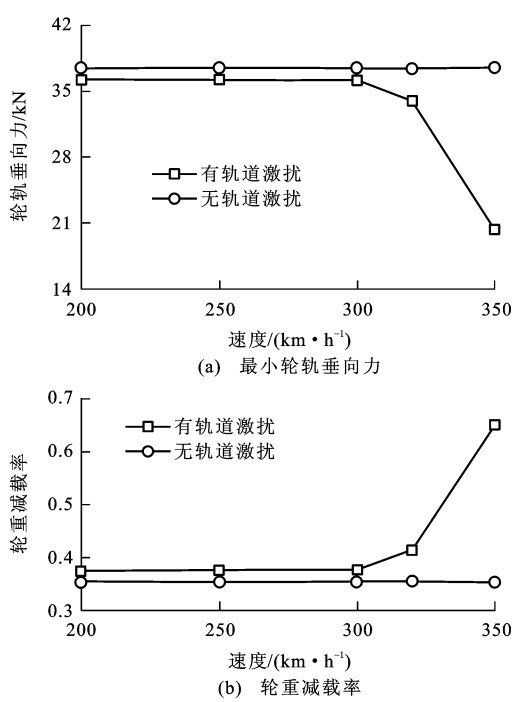


图 12 不同车速下的空气弹簧失气工况

Fig. 12 Leakage conditions of air spring at different vehicle speeds

程中出现失气是比较危险的工况,本文对车辆系统不同失气工况通过曲线的安全性进行分析。采用表 1 中的参数,选取曲线半径为 $5\,500\text{ m}$,超高为 152 mm ,车辆运行速度为 $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,最大欠超高为 41 mm 时,分别计算无失气、稳态失气、缓和曲线中部失气和圆曲线中部失气等工况下的动力学性能指标,见表 2。

表 2 不同工况的动力学指标

Tab. 2 Dynamics indices under different cases

动力学指标	正常	稳态失气	缓和曲线中部失气	圆曲线中部失气
最大轮轨横向力/kN	14.9	15.8	31.0	37.1
最大轮轴横向力/kN	18.8	18.1	31.4	39.9
最大脱轨系数	0.168	0.189	0.479	0.619
最大轮重减载率	0.401	0.434	0.531	0.652

车辆系统在失气故障发生后即稳态失气故障,可以安全通过曲线,但在通过曲线过程中出现失气时,各动力学指标均偏大,特别是在圆曲线上,最大轮重减载率为 0.652,已经超过标准限定值 0.650。在直线上相同工况下,轮重减载率为 0.377,圆曲线上失气比直线上失气引起轮重减载率大的主要原因是曲线引起的减载与空气弹簧引起的减载进行了叠加。车辆以匀速 $266\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 通过曲线,圆曲线上失气的轮重减载率为 0.506,其他动力学指标也相对较小。可见,在圆曲线上空气弹簧失气时,车辆以匀速运行的减载率最小,车辆相对较安全。

4 结 语

空气弹簧失气后车辆系统的稳定性降低,临界速度由 $623 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 降低到 $351 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,降低约为 44%,且车辆系统的失稳形式与传统的蛇行失稳不同,是间歇性的振荡,主要是由于失气后二系悬挂变成粘滑接触力元,饱和横向力为滑动摩擦力,其对横向振动的衰减能力及横向运动的约束不够。

在失气瞬间,车辆系统的动力学性能发生突变,动力学性能指标突然增大,有些指标如轮重减载率已经达到 0.651,超过限定值 0.650,这说明在空气弹簧失气瞬间,车辆安全裕量很小,需要采取一定的措施保障车辆运行安全性。失气过程时长越短,减载率越大,车辆系统受到的冲击越大。当失气时长小于 0.2 s 时,轮重减载率超过标准限定值;当失气时长超过 0.6 s 时,对车辆安全性影响不明显。车辆运行速度对空气弹簧失气的安全性有一定影响,特别是车速超过 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,轮重减载率随速度增大迅速增大。在车辆通过曲线时,空气弹簧失气故障最危险,此时曲线引起的减载与空气弹簧失气引起的减载叠加,减载率远远大于直线上的值。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 姚小强. 空气弹簧的运用检修及故障分析[J]. 铁道车辆, 2003, 41(3): 37-39.
YAO Xiao-qiang. Operation, inspection, repair and trouble analysis of air spring[J]. Rolling Stock, 2003, 41(3): 37-39. (in Chinese)
- [2] 严波. 25T 型客车空气弹簧运用常见故障分析及处理方法[J]. 机械管理开发, 2011(2): 114, 117.
YAN Bo. Failure analysis and processing method of 25T passenger air spring[J]. Mechanical Management and Development, 2011(2): 114, 117. (in Chinese)
- [3] 张忠平, 王文生, 丁国宾, 等. 空气弹簧漏风故障的调查分析和研究[J]. 铁道机车车辆, 2004, 24(3): 61-63.
ZHANG Zhong-ping, WANG Wen-sheng, DING Guo-bin, et al. Investigation, analysis and studying of the trouble that the air spring leaks out[J]. Railway Locomotive and Car, 2004, 24(3): 61-63. (in Chinese)
- [4] 邬平波, 薛世海, 杨晨辉. 基于弹性车体模型的高速客车动态响应[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 5-8.
WU Ping-bo, XUE Shi-hai, YANG Chen-hui. Dynamic response of high-speed passenger car based on flexible car body model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 5-8. (in Chinese)
- [5] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 高速客车转向架悬挂参数分析[J]. 大连交通大学学报, 2007, 28(3): 13-19.

- CHI Mao-ru, ZHANG Wei-hua, ZENG Jing, et al. Study of suspension parameter of high speed passenger car bogies[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2007, 28(3): 13-19. (in Chinese)
- [6] 刘增华, 李 芾, 傅茂海, 等. 铁道车辆空气弹簧系统最优控制策略及方法研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(1): 26-30.
LIU Zeng-hua, LI Fu, FU Mao-hai, et al. Study on the optimal control tactics and method about rail vehicle air spring systems[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(1): 26-30. (in Chinese)
- [7] 刘增华, 李 芾, 黄运华. 空气弹簧系统垂向刚度特性的有限元分析[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(6): 700-704
LIU Zeng-hua, LI Fu, HUANG Yun-hua. Finite element analysis of vertical stiffness of air spring system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(6): 700-704. (in Chinese)
- [8] 李 芾, 付茂海, 黄运华, 等. 车辆空气弹簧动力学参数特性研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(5): 91-95.
LI Fu, FU Mao-hai, HUANG Yun-hua, et al. Research on car air spring dynamics parameter traits[J]. China Railway Science, 2003, 24(5): 91-95. (in Chinese)
- [9] 原亮明, 宫相太, 刘爽堃, 等. 铁道车辆空气弹簧垂向动态特性分析方法的研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 37-41.
YUAN Liang-ming, GONG Xiang-tai, LIU Shuang-kun, et al. Study on vertical dynamic characteristics analysis method for railway vehicle air spring[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 37-41. (in Chinese)
- [10] 罗 仁, 曾 京, 邬平波. 空气弹簧对车辆曲线通过性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 15-18.
LUO Ren, ZENG Jing, WU Ping-bo. Influence of air spring on curve negotiating property of vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5): 15-18. (in Chinese)
- [11] 赵洪伦, 沈 钢, 张广世. 基于空气弹簧非线性横向刚度的高速客车动力学仿真[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30(11): 1388-1392.
ZHAO Hong-lun, SHEN Gang, ZHANG Guang-shi. Dynamic simulation study of high speed railway car based on nonlinear lateral stiffness of air spring[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(11): 1388-1392. (in Chinese)
- [12] TOYOFUKU K, YAMADA C, KAGAWA T, et al. Study on dynamic characteristic analysis of air spring with auxiliary chamber[J]. JSAE Review, 1999, 20(3): 349-355.
- [13] LIU H, LEE J C. Model development and experimental research on an air spring with auxiliary reservoir[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(6): 839-847.
- [14] NETTER H, SCHUPP G, RULKA W, et al. New aspects of contact modelling and validation within multibody system simulation of railway vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 1998, 29(Sup): 246-269.
- [15] OESTREICH M, HINRICHS N, POPP K. Bifurcation and stability analysis for a non-smooth friction oscillator[J]. Archive of Applied Mechanics, 1996, 66(5): 301-314.