

车辆脱轨问题的探讨

陈 淮<sup>1</sup> 杜晓伟<sup>1</sup> , 曾庆元<sup>2</sup>

( 1. 郑州工业大学土木建筑工程学院 ,河南 郑州 450002 ; 2. 长沙铁道学院土木建筑工程学院 ,湖南 长沙 410075 )

摘 要 : 车辆脱轨条件和评定指标是衡量车辆安全运行的重要指标. 根据车辆运行状态 ,从单轮脱轨条件和评定指标、轮对脱轨条件和评定指标、由轮重减载引起脱轨的条件、脱轨系数与轮压减少率的关系等 4 个方面对车辆的脱轨安全度进行了探讨 ,分析了影响车辆脱轨的因素 ,并指出车辆脱轨评定条件的适用情况. 结果表明 ,采用作用于轮对的侧向力  $H$  与作用于脱轨侧车轮的垂直力  $P_1$  之比检算车辆的脱轨安全度较为合理.

关键词 : 车辆 ; 脱轨 ; 安全性

中图分类号 : U 211.5 文献标识码 : A

列车只有在轮轨处于正常接触状态时才能保证其运行安全性. 由于列车与轨道的动力相互作用 ,列车运行激起了列车各车辆的复杂空间振动及轨道结构的复杂振动( 竖向、横向振动 ). 实践证明 ,在不利情况下 ,列车轨道系统的振动可能破坏列车正常运行的条件 ,引起车辆车轮脱轨或倾覆事故. 找出引发列车脱轨的条件 ,保证列车安全正常运行 ,已成为自铁路问世以来一个重要的研究课题<sup>[1]</sup> ,车辆脱轨的条件和评定指标是一个非常复杂的问题 ,至今国内外均未很好解决. 下面先摘录文献<sup>[2]</sup> 中该节的主要内容 ,然后再进行一些探讨.

1 列车脱轨条件与评定指标<sup>[2]</sup>

1.1 单轮脱轨条件与评定指标

列车与轨道系统的空间振动 ,使轮轨间相互作用的动压力发生变化. 如图 1 所示 ,如果单轮侧向水平动压力  $Q_1$  大到一定程度 ,使作用于其上的垂直动压力  $P_1$  不足以阻止该车轮上爬时 ,踏面逐渐抬起 ,达到临界状态时 ,如果此时  $P_1$  还不增大 ,则在侧压力  $Q_1$  作用下 ,车轮在转动的同时 ,继续上爬 ,超过临界状态 ,直至爬上钢轨 ,出现脱轨事故.

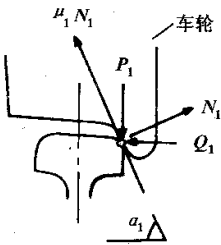


图 1 车轮脱轨过程

当车轮在轨头上处于既不下滑又不上升的临界状态 ,根据平衡条件得

$$\frac{Q_1}{P_1} = \frac{\text{tg}\alpha_1 - \mu_1}{1 + \mu_1 \text{tg}\alpha_1} , \tag{1}$$

式中 :  $\mu_1$  为轮缘与钢轨间的摩擦系数 ;  $\alpha_1$  为通过轮缘圆弧面上的拐点所作切线与水平线的倾角 ,简称轮缘角. 此式为轮缘与轨头接触力的平衡方程式 ,它表示轮轨相互作用的临界状态. 通常称  $Q_1/P_1$  值为单轮脱轨系数 ,以  $P_k$  表示. 列车运行中 ,如果  $P_k$  值超过上式右边值 ,则车辆有脱轨的可能性. 按我国车辆标准 ,车轮轮缘角  $\alpha_1 = 69^{\circ}12'$  ,摩擦系数  $\mu_1 = 0.2 \sim 0.3$  ,代入式( 1 ) ,可得  $P_k$  的临界值为

$$P_k = \left( \frac{Q_1}{P_1} \right)_{\text{cr}} = 1.65 \sim 1.30 . \tag{2}$$

收稿日期 :1999-12-01 ; 修订日期 :2000-01-11

基金项目 河南省自然科学基金资助项目( 004040100 )

作者简介 陈 淮( 1962- ) ,男 ,河南省淮阳县人 ,郑州工业大学教授 ,博士 ,主要从事结构动力分析和桥梁结构分析方面的研究.

## 1.2 轮对脱轨条件与评定指标

实际上,一个整体轮对脱轨时,爬轨侧的轮轨间作用力  $Q_1, P_1$  受到另一侧轮轨间作用力  $Q_2, P_2$  的影响,如图2所示,假定左侧车轮达到脱轨

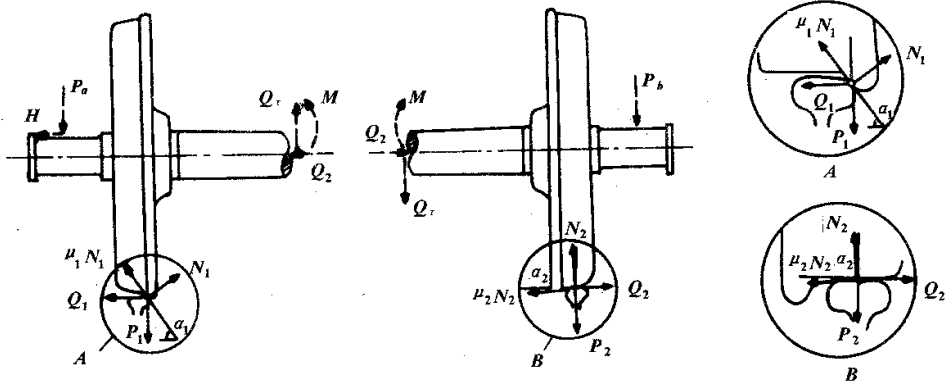


图2 轮对脱轨的作用力关系

为了求得脱轨系数,将车轮轴在中间切开,根据隔离体的平衡条件,可得轮对脱轨条件

$$\frac{H}{P_1} \geq \frac{Q_1}{P_1} - \frac{P_2}{P_1} \left( \frac{\tan \alpha_2 + \mu_2}{1 - \mu_2 \tan \alpha_2} \right), \quad (3)$$

式中:  $P_1, P_2$  分别为作用于爬轨侧和非爬轨侧车轮的轮压力;  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为左侧和右侧轮轨接触点的切线与水平线的夹角,  $\alpha_1$  是轮缘角,  $\alpha_2$  是踏面侧角,我国标准踏面率为 1/20;  $\mu_1$  是左侧轮缘与钢轨侧面的摩擦系数;  $\mu_2$  是右侧车轮踏面与钢轨顶面的摩擦系数。因  $\tan \alpha_2$  很小,可略去,则得轮对脱轨条件的简化式为

$$\frac{H + \mu_2 P_2}{P_1} \geq \frac{Q_1}{P_1} = \frac{\tan \alpha_1 - \mu_1}{1 + \mu_1 \tan \alpha_1}. \quad (4)$$

因为轮缘上  $\alpha_1 = 68^\circ \sim 70^\circ$  的点是不常和钢轨侧面接触的,表面光洁度较差,而且常有锈污;而踏面和钢轨顶面的接触点经常滚压,光洁度较高;所以  $\mu_1 > \mu_2$ ,通常取  $\mu_1 = 1.2\mu_2$ 。

根据理论分析和试验研究,目前我国车辆科研部门建议采用的脱轨系数安全指标为

$$\frac{Q_1}{P_1} = 1.2 \text{ (危险限度)}; \quad (5)$$

$$\frac{Q_1}{P_1} = 1.0 \text{ (允许限度)}. \quad (6)$$

脱轨系数  $Q_1/P_1$  不超过“危险限度”是安全的,不超过“允许限度”是希望达到的。式(5)、式(6)限度指标适用于低速脱轨情况,至于高速脱轨问题,有待试验研究。

### 1.3 由轮重减载引起脱轨的条件

由上述分析可知,影响脱轨的主要参数为:作用于车轮的垂直力  $P_1$  和侧向力  $Q_1$ ,二者是同时

的临界状态,此时轮对承受着车体传来的横向力  $H$  (包括轮对本身的水平惯性力)和垂直力  $P_a, P_b$ 。假定  $H$  全部作用在轮对左侧轴颈上。

存在的。关于引起脱轨的原因,过去多认为是侧向力增大的结果,近年来在实践中发现,有时侧向力不大,而轮重严重减载时,也会脱轨。即当左右侧轮重偏载过大而侧向力  $H$  极小时,也可能脱轨。在图2中,若  $P_2 \gg P_1$ ,当  $H=0$  时,右侧车轮踏面的摩擦力仍可使左侧轮缘爬上钢轨。

设  $\bar{P} = (P_1 + P_2)/2$ ,  $\Delta P = (P_2 - P_1)/2$  (7) 式中:  $\bar{P}$  为左右车轮的平均载重;  $\Delta P$  表示车轮载重减载量;  $\Delta P/\bar{P}$  为爬轨侧车轮的轮重减载率。

将  $H=0$  及式(7)代入式(3),经整理后可得脱轨条件为

$$\Delta P/\bar{P} \geq \frac{\frac{\tan \alpha_1 - \mu_1}{1 + \mu_1 \tan \alpha_1} - \frac{\tan \alpha_2 + \mu_2}{1 - \mu_2 \tan \alpha_2}}{\frac{\tan \alpha_1 - \mu_1}{1 + \mu_1 \tan \alpha_1} + \frac{\tan \alpha_2 + \mu_2}{1 - \mu_2 \tan \alpha_2}}, \quad (8)$$

当  $\alpha_1 = 68^\circ \sim 70^\circ$ ,  $\alpha_2 = \tan^{-1} \frac{1}{20}$ ,  $\mu_1 = 0.3 \sim 0.32$ ,  $\mu_2 = \mu_1/1.2$  时,  $\frac{\Delta P}{\bar{P}}$  的允许限度为 0.6。

根据理论分析及试验研究,目前我国车辆科研部门建议采用的轮压减少率安全指标为

$$\frac{\Delta P}{\bar{P}} = 0.65 \text{ (危险限度)}; \quad (9)$$

$$\Delta P/\bar{P} = 0.60 \text{ (允许限度)}. \quad (10)$$

### 1.4 脱轨系数与轮压减少率的关系

脱轨系数与轮压减少率是衡量车辆是否脱轨的2种指标,它们都是由作用于车轮垂直力和侧向力的平衡条件导出,这是二者的相同点。其不同点是:分析脱轨系数时,侧向力  $H > 0$ ;计算轮压减少率时,  $H = 0$ 。这种情况只有车辆低速运行时才有可能发生。所以  $\Delta P/\bar{P} < 0.6$  应理解为静

的轮压减少率,而不能作为运行中动的轮压减少率.在一般情况下,应以脱轨系数  $Q_1/P_1$  作为衡量脱轨安全度的指标.我国车辆研究部门的试验研究表明,货物列车运行速度在  $10 \sim 20 \text{ km/h}$  范围内,曲线半径小于  $300 \text{ m}$  时,容易发生因轮压减少而脱轨的事故.因此,对于小半径曲线上低速运行车辆,采用轮压减少率作为衡量脱轨安全度的指标,仍具有一定实际意义.

上述车轮脱轨都是车轮爬上钢轨.当车轮承受过大的冲击荷载时,还有可能使车轮跳离钢轨而引起脱轨.这种脱轨称为轮缘跳上钢轨.爬上钢轨多数发生于车辆低速通过小半径曲线时,跳上钢轨则多数发生于车辆高速运行中.

## 2 车辆脱轨问题的讨论

(1)图2中侧向力  $H$  加在左侧车轮的轮颈上,值得商榷.因为  $H$  来源于车体、构架、轮对等的侧向惯性力及作用于车辆上的侧向风力,轮对以上的惯性力和风力是通过构架与轮对之间的弹簧系统传给轮对的,如何会只作用在一侧车轮的轴颈上?轮对侧向惯性力更不可能这样.所以式(3)只能理解为最不利情况的脱轨条件.

(2)车辆在小半径曲线上低速运行,横向摇摆力小,其离心力不一定很小,为何采用基于  $H=0$  的式(9)、式(10)来衡量车辆的脱轨安全度?

(3)高速列车车轮跳离钢轨而脱轨,应理解为由于过大的车轮向上惯性力和车辆横向摇摆力引起.横向摇摆力使车辆产生侧倾力,车轮向上惯性力与侧倾力均使轮压减少.所以日本对高速铁路桥梁限制轮压减少率与车体侧向水平振动加速度<sup>[3]</sup>是合理的.

(4)脱轨顾名思义为车轮脱离钢轨,轮轨间的接触压力当然不存在.轮轨接触压力的减小,意味着轮轨脱离(即车轮脱轨)的倾向增加.当接触压力接近于零,表示脱轨在即,此时很小的侧向力  $H$  亦使脱轨系数接近于无穷大.所以按脱轨系数  $Q/P$  的大小来衡量车轮脱轨安全度是合理的.确切地说,轮压接触压力  $P=0$  是脱轨的标志,车辆脱轨时的运动状态从  $P=0$  去寻找.脱轨危险限度  $Q/P=1.2$  只是说明危险倾向,不是真正脱轨,否则日本学者假定  $Q/P>2.0$  发生脱轨<sup>[3]</sup>如何理解?

(5)根据问题(1),侧向力  $H$  只能说朝向有脱轨倾向的一侧,而不能说  $H$  全部作用在脱轨侧车轮的轴颈上,式(3)所示的脱轨条件建立在此基

础上,所以此式值得商榷.

若考虑侧向力  $H$  作用在整个轮对车轴上并朝向脱轨侧,则由图2可得出

$$H = Q_1 + Q_2, \quad (11)$$

根据平衡条件和式(11),并考虑  $\text{tg}\alpha_2 \approx 0$ , 得出轮对脱轨条件

$$\frac{H}{P_1} \geq \frac{Q_1}{P_1} + \frac{P_2\mu_2}{P_1} = \frac{\text{tg}\alpha_1 - \mu_1}{1 + \mu_1\text{tg}\alpha_1} + \frac{P_2\mu_2}{P_1}. \quad (12)$$

设  $P_2=1.3P_1$ , 将  $\mu_1=0.2$ ,  $\mu_2=\mu_1/1.2$ ,  $\alpha_1=70^\circ$  代入式(12),得脱轨条件  $H/P_1 \geq 1.65 + 0.24 = 1.89$ , 与日本学者假定的脱轨条件  $Q/P > 2.0$  接近<sup>[3]</sup>.若采用式(3)计算,则得脱轨条件  $H/P_1 \geq 1.65 - 0.24 = 1.41$ , 远小于日本学者假定的脱轨条件  $Q/P > 2.0$ .故作者认为式(12)较式(3)合理.因此可按

$$\frac{H}{P_1} = 1.2 \text{ (危险限度)}; \quad (13)$$

$$\frac{H}{P_1} = 1.0 \text{ (允许限度)} \quad (14)$$

检算车辆运行的脱轨安全度.

作用于第  $i$  个轮对的侧向力  $H_i$  是由多种因素引起的<sup>[4]</sup>.它包括由于轮对横向振动所产生的惯性力  $Q_{Ri}$ 、转向架与轮对间的横向弹簧所产生的弹性力  $Q_{Ki}$ 、转向架与轮对间的阻尼力  $Q_{Ci}$  及横向风力  $Q_{Fi}$ .作用于脱轨侧车轮的垂直力  $P_{1i}$  包括轮对与转向架间弹簧的垂直弹性力  $P_{1Ki}$  和阻尼力  $P_{1Ci}$ 、车辆载重及自重引起的垂直压力  $W_{1i}$ 、风力引起的垂直附加力  $P_{1Fi}$ .检算车辆运行的脱轨安全度时,  $H_i$ 、 $P_{1i}$  都可由列车—轨道时变系统的横向振动分析得出<sup>[1]</sup>, 它们是车辆与轨道几何与物理特性及车速的函数.

## 3 结束语

安全是列车运行的前提.所谓安全运行,是指列车运行时,轨道等应具有足够的承载能力和列车具有足够的脱轨安全度,因此世界各国机车车辆动力学性能评价指标是以安全为中心的各项响应数值,车辆脱轨条件和评定指标是衡量车辆安全运行的重要指标.本文对列车的脱轨安全度进行了探讨,分析影响车辆脱轨的因素,说明了车辆脱轨评定条件的适用情况.研究结果表明,采用作用于轮对的侧向力  $H$  与作用于脱轨侧车轮的垂直力  $P_1$  之比检算车辆的脱轨安全度较为合理.

(下转 21 页)

## 参考文献：

- [1] 李德建. 列车—轨道时变系统空间振动分析[D]. 长沙:长沙铁道学院, 1996.
- [2] 王福天. 车辆动力学[M]. 北京:中国铁道出版社, 1981.
- [3] TAJIMA J, OHASHI M, MATSUURA A. 铁路斜拉桥和吊桥(上)[J]. 张 锻, 译. 铁道建筑, 1991(4): 33 – 36.
- [4] 陈 淮. 高架铁路桥横向刚度研究[D]. 长沙:长沙铁道学院, 1993.

## Discussion about Derailment Problem of Vehicles

CHEN Huai<sup>1</sup>, DU Xiao – wei<sup>1</sup>, ZENG Qing – yuan<sup>2</sup>

(1. College of Civil & Building Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002 China; 2. College of Civil Engineering, Changsha Railway Institute, Changsha 410075 China)

**Abstract** :The safety of the running train is an important subject in railway vehicle system dynamics. The condition of derailment and indices of vehicle are important parameters that are defined for safety evaluation of the running train. According to the running condition of vehicle, the paper discusses derailment safety of vehicle in four respects: the coefficient of derailment for a single wheel, the coefficient of derailment for wheel – set, the derailment condition caused by wheel load reduction, relation between the coefficient of derailment and the rate of wheel load reduction. Factors affecting the indices are systematically investigated. Suitable conditions of derailment of vehicle are given. The results show that  $H/P_1$  can be used to evaluate the derailment safety, in which  $H$  is a force acting on wheel – set in the direction of lateral and  $P_1$  is a force acting on the derailment wheel in the direction of vertical.

**Key words** :vehicle; derailment; safety