

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2010.02.003

轨枕间距对钢轨波磨的影响

Ernesto García Vadillo, José A. Tárrago, Gorka Garate Zubiaurre, Carlos Angulo Duque

(巴斯克大学机械工程系 西班牙 毕尔巴鄂)

孙晓静 聂志理 译(北京交通大学 北京 100044)

摘 要 主要研究轨枕间距对钢轨波磨发展的影响。研究小半径曲线内轨的小矢跨比波磨。这些出现问题的曲线段属于西班牙毕尔巴鄂区域的地铁轨道,铺设着混凝土道床和两层 STEDEF 型支承垫层。当初始轨枕间距为 1 000 mm 时,仅有 92 万组轮对通过后所测得的波磨深度峰-峰值已经达到 0.42 mm。随后更换产生波磨的钢轨,比较列车通过时轨枕上方和轨间中部的内轨垂向、横向加速度。当轨枕间距为 1 000 mm 时,轨间中部出现频率为 204 和 244 Hz 的强烈响应,在轨枕上方却未出现。在相邻轨枕中间铺设一个轨枕,使轨枕间距变为 500 mm,钢轨波磨停止发展。该结论是根据 2 年的观测结果得到的。

关键词 钢轨波磨 轨道动力学 小曲线半径 轨枕间距

中图分类号 U213.4 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2010)02-0013-05

1 波磨概述

列车经常性的通行,尤其当这些车辆参数一致时,可以导致轨头表面产生常规磨耗或波状磨耗。在通常情况下,这些波状磨耗虽然不会危及到运输安全,但是会对轨道基础和地铁车辆产生不利影响,同时也增大

了噪声。

长波波磨和短波波磨之间存在差异^[1],本文谈及的短波波磨是由国际铁路联盟(UIC)根据《2201 钢轨伤损标准》进行分类的。这种伤损是交通荷载作用的结果,其主要特点是在走行面上产生光亮的峰和黑暗的谷这样不规则序列,波长通常为 3~8 cm。

几乎所有的钢轨系统都会在不同位置出现波磨。文献[2]总结了最近在美国进行的一项调查,结果显示,在容易产生波磨的轨道中至少 30% 出现了中度或严重的波磨现象。中度波磨每隔 1~3 年需要打磨一次,而严重波磨则需要每年至少打磨一次。欧洲铁路研究协会(ORE-ERRI)专门指定 D185 委员会负责研究对策。

在列车通过时,即使波磨较难观测,它产生的高电平噪声也能立即被辨识。当同种类型的列车以相同的速度通过时,笔者在同一测点进行的测试结果表明,在波磨发展的初始阶段,即使是在难以观测的情况下,波磨也能使噪声辐射增大 6 dB(A)。如果列车采用弹性车轮,则噪声增大 3.3 dB(A)。

2 波磨产生的原因

波磨问题的首次提出是在 1895 年召开的技术会议上,这与美国俄亥俄州缆车轨道出现的现象有关。在此期间,提出了关于这种现象的多种解释,涉及冶金

收稿日期: 2010-03-15

Review on Short Pitch Rail Corrugation Studies

K. H. Oostermeijer

(Booz Allen Hamilton, Amsterdam, the Netherlands)

Abstract: Short pitch rail corrugation on tangent track has been a problem for railways for more than a century. Rail corrugation is associated with noise nuisance and leads to the increase of maintenance costs. A century of research in many countries world-wide has provided a wealth of information and insight. When the researches are put in the right historical perspective, the outcome of these researches can be paralleled with present day state of the art on engineering and manufacturing of railways and its assets. In this paper, short pitch rail corrugation studies are reviewed and placed in this historical perspective.

Key words: rail corrugation; rail defect; wear; wheel-rail contact

Chinese translation by: Zhang Hougui, Liu Weining, Liu Shuang (Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

学、动力学和摩擦学。

文献[3]给出了其中一个最完整的提要,包括钢轨波磨的特性、成因和处理措施。根据两种机制将钢轨波磨分成6类:一种确定波长的机理(取决于车轮簧下质量与轨道的弹性组成的系统的共振,轨枕的共振等);一种是损伤的机制(磨损、塑性流变、转动接触疲劳等)。

导致波磨形成的破坏机理可能是黏着滑动或转动滑行,文献[4-7]已经采用了这种理论。在这些情况中,由于在与轮轨蠕变荷载和塑流相关的高塑流区出现负斜率,从而出现了自激振动。

另外,破坏机制可以成为高频动力学和微分磨损间的反馈。在第二种情况中,如果在钢轨走行面的纵剖面存在极其微小的起伏,当一组轮对通过时,这个微小的起伏将会导致轮轨力和塑性流动的波动,从而导致钢轨表面磨损率的变化。轮轨接触点的切向荷载与其引起的塑性流动之间的关系,包括初始线性段和一个水平稳定段,这个观点在文献[8]中已提出,并且文献[9-10]还提出了假设。

钢轨的磨耗率一般与能量消耗有关,即每个轮子通过的磨损率与切向荷载和塑性流动(或相关滑行速度)的乘积成正比。有的学者采用下式表示这种关系。

$$R = KT\gamma/A \tag{1}$$

式中, R 为磨耗率, K 为常数, T 为切向荷载, γ 为黏着/转动率, A 为赫兹接触面积。

一些学者已经研究了产生波磨的钢轨走行面上材料性能的变化情况,记录了峰顶耐磨性和低谷耐磨性两个因子之间存在的差异。在式(1)的实际应用中,分析结果时必须考虑到此时波磨已经开始发展的客观事实。

3 小曲线半径的波状磨耗

根据 EUSKOTREN(巴斯克铁路)的要求,学者们研究了已经在毕尔巴鄂区域内某些线路出现的波状磨耗。即使运行的列车没有任何变化,当用 STEDEF 板式轨道替换道砟轨道,并将轨枕间距由 600 mm 增大到 1 000 mm 时,这种波状磨耗也会自发性地发生。道砟轨道铺设轨枕木,并且不使用垫板。新型的板式轨道使用刚度为 144 MN/m、阻尼为 38.2 MN·s/m 的弹性垫板,以及刚度为 17.1 MN/m、阻尼为 3.5 MN·s/m 的套靴。

图 1 给出了这种波状磨损的图片,可以看到只有

内轨才出现波磨。此区段的曲线半径为 180 m,坡度为 10‰,铺设质量为 54 kg/m 的 UIC 钢轨,使用双块式轨枕和 Nabla 弹性扣件,运行的列车类型是相同的,在列车两端各有一节动车,中间有一节拖车。列车以平均 50 km/h 的速度通过观测点,每个动力转向架只有一个牵引电机,轮轴重量为 8(空载)~10.5 t(满载),仅有 92 万组轮对通过后就出现了图 1 所示的波磨。

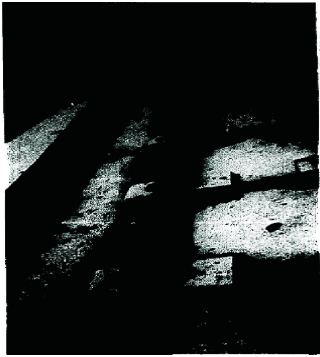


图 1 毕尔巴鄂区域钢轨轨头上的波磨

为了研究这种波磨现象,并评价一些处理措施的效果,采用了一段 24 m 长的试验段(轨枕间距为 1 m)。

4 波状磨耗

上文所提到的波磨在阳光呈直角入射时用肉眼可以观察到,但量化研究则需要使用专业仪器,这些专业仪器可以测试只有几微米深度的磨耗。

笔者采用两台仪器来组成一台轮廓仪。一台仪器是 Mitutoyo 直尺,模拟数显 SD-M 和 572-407 读数器,总长为 1 174 mm;另外一台仪器是 Mitutoyo 数字刻度盘指示器。每台仪器都有连接器,以便将记录传给 Mitutoyo Mux-10 转换器,264 位串行,接着再通过 RS-232-C 连接器和专用软件反馈到手提电脑上。

为了得到函数 $z = z(x)$,需要用直接得到的读数对刻度盘显示器和夹紧工具重量引起的附加挠度进行修正,式中的 z 和 x 分别是在钢轨上测得的波磨深度和纵向尺寸。然后,不用考虑轨道上的支承间距是否相同,就可以比较不同测试日期同一测点的数据。

磨耗测试结果显示,图 1 所示的波磨深度峰峰值达到 0.42 mm。图 2 给出了沿轨头的磨耗,图 3 给出了测试段内一个具体测点的空间频率谱。可以看出,波磨的平均波长为 66.6 mm。在相同地段,有一些测点的波长低于 62.1 mm。

从图 1 和图 2 可以看出,波磨主要出现在两个轨枕间的中部,而在轨枕上方基本消失。

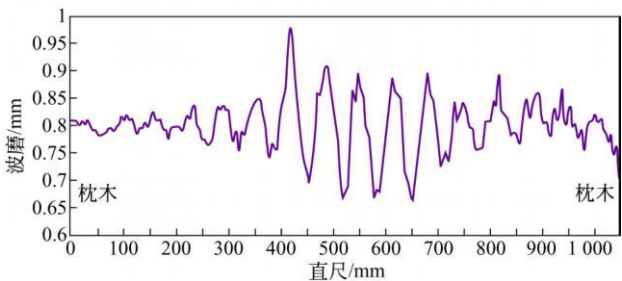


图2 毕尔巴鄂区域内轨轨头波磨断面图

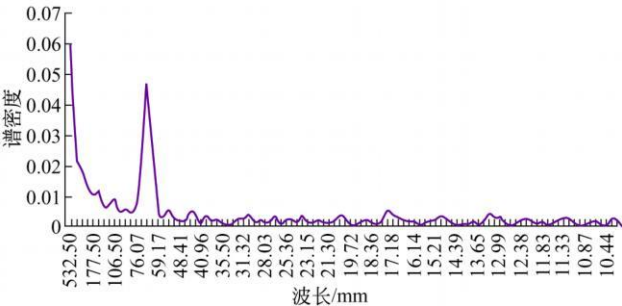


图3 毕尔巴鄂区域相应的波磨谱密度

5 波磨修正

根据测得的谱密度值可以清楚地得出，考虑到列车行驶速度后测得的频率范围为 209 ~ 230 Hz。

简化模态分析后可以看出，在轨枕间距的中部存在 448 Hz 具有高相干性的垂向固有频率，但它在轨枕上方未出现(此固有频率为反向共振频率)。这就是钢轨的 pp 模态，对应的波长等于 2 倍的轨枕间距(见图 4)。当频率达到 896 Hz(即双倍固有频率)时，轨枕间距中部的相干性为 0。当测到的波长等于轨枕间距时，对应的是自由振动模态的频率，并且轨枕间距的中间点相当于一个节点。

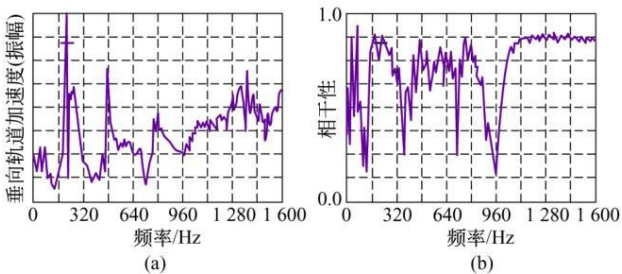


图4 轨间中部(顶部)垂向轨道加速度和相干性

本文的实测值略低于文献给出的数值，这是因为在毕尔巴鄂区域轨枕间距是 1 m，而标准轨枕间距为 0.60 ~ 0.70 m。

对于横向运动，在轨枕间距中部存在 212 Hz 的共

振频率，并在轨枕上转变成反向共振。这是钢轨横向运动的 PP 模态，对应的波长等于两倍的轨枕间距(见图 5)。

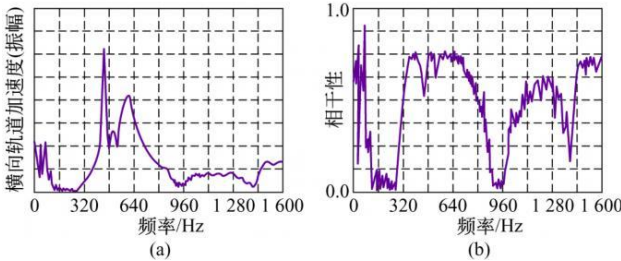


图5 轨间中部(顶部)横向轨道加速度和相干性(底部)

把结果与列车通过这些可能产生波磨的钢轨时产生的加速度(横向及垂向，轨枕上方及轨枕间距中部)进行对比。用新钢轨替换已产生波磨的钢轨后，仍然可以得到同样的结果。因此，记录的加速度不是由轮对在产生波磨的钢轨上行驶所引起的。

图 6 给出了内轨轨头横向加速度的测量值，包括轨枕上方(顶部)和轨枕间距中部(底部)。在轨枕间距中部，列车主要在 204 ~ 244 Hz 频段内产生激励，但这些频率成分却未出现在轨枕上方。

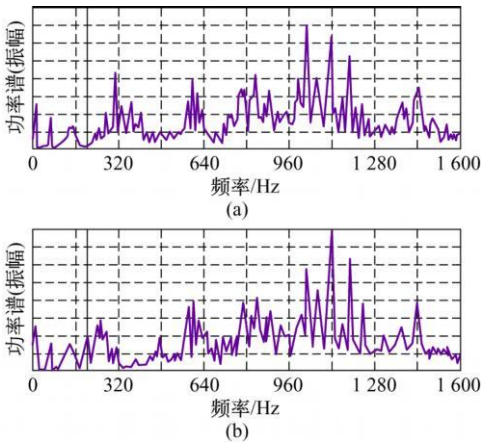


图6 列车通过时轨枕(顶部)和轨间中部(底部)内轨轨头的横向加速度

为了充分增大钢轨的横向固有频率，在试验段的 6 跨轨枕中间插入中间轨枕，如图 7 所示。插入的轨枕与原有轨枕完全相同，使用 Nabla 弹性扣件、弹性垫片和套靴。在产生磨耗的钢轨被更换 3 个月后，铺设中间的轨枕工作于 1994 年完成。其后，使用本文介绍的专业仪器对波磨的发展进行了规律性监测，目前波磨已经基本停止发展了。这点甚至可以用肉眼来核实。

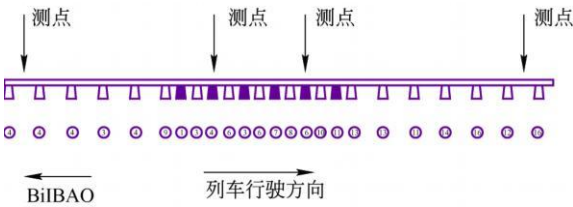
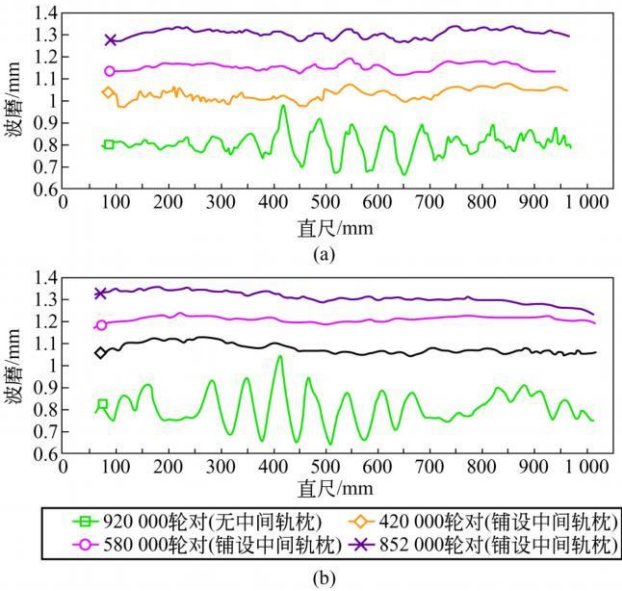


图7 中间轨枕和测点

图8给出了两个测点的波磨深度,对两种情况产生的波磨进行了比较:(a)为更换新钢轨并铺设中间轨枕后产生的波磨曲线;(b)为相同测点没有铺设中间钢轨时,自1993年开始通过92万组轮对后产生的波磨曲线。(b)主要是用于对比参考,所有曲线均采用相同的比例。为了更加清楚地举例说明,图8所示的设置中间轨枕后的测试值相对于其前值做了上移,在纵轴中只显示了一个比例。



注:各图中,较低的曲线代表铺设中间轨枕前92万组轮对通过后的波磨。铺设中间轨枕后没有产生波磨。所有曲线采用相同比例

图8 两点的波磨断面比较

截止到最后一次测试,铺设中间轨枕后又有85.2万组轮对通过测试段,产生的波磨与铺设中间轨枕前的测试结果存在很大差异。此外,最后进行的两次测试间隔几个月,期间有27.2万组轮对通过,但是测得的波磨深度基本相同。

在测试期间,铺设中间轨枕区段的钢轨波磨得到了有效控制,并且沿车行方向相邻轨枕间的钢轨波磨也得到了控制。这些区段的钢轨波磨在随后的几个月

逐渐减轻。

6 结论

笔者调查了小曲线半径内轨的波磨现象,曲线半径约为180 m,轨距为1 m。轨道铺设在STEDEF型混凝土道床上,使用了双块式轨枕、弹性套靴和Nabla扣件,钢轨质量为54 kg/m;线路坡度为40‰,轨枕间距为1 000 mm。所有行驶的列车参数相同,列车两端各有1节动车,中间有1节拖车,列车通过测点的平均速度为50 km/h。每个动力转向架的两组轮对由同一个牵引电机提供动力,根据乘客数量的变化轴重为8~10.5 t。

笔者研究的波磨现象并未在轨枕上方出现,但是却在两个轨枕间迅速发展。这是这种波磨的一个特性,据此可以将其从众多的,尤其是文献[3,6,10]描述的波磨中区别出来。文献[6]描述的波状磨耗沿钢轨呈现连续形状,或者主要在轨枕的爬升侧呈现一种形状。

在文献[3]提到的“弹性轨枕型”波磨类型中,这种固定波长的波磨形式产生的机理是:弹性轨枕套靴的弯曲自振频率没能正确地控制,使轨头产生了反向共振,同时垂向轮轨接触力达到最大值,因此也使得轨枕上方产生的波磨变得严重。笔者研究的波磨与这种波磨的另外一个不同之处是,笔者研究的波磨并未像在文献[3]提到的波磨一样与车辆运行方向形成30°角。

在文献[3]提到的“车辙槽型”类型下的波磨也同样在毕尔巴鄂区域出现,其产生的主要因素为动力转向架、小曲线半径和内轨磨耗等。但是,毕尔巴鄂区域的轨枕上方几乎没有产生波磨,而在文献[3]提到的“车辙槽型”波磨并不包含这种情况。

在“弹性轨枕型”和“车辙槽型”波磨中,黏着滑动加剧了差分磨耗的发展。笔者研究的区段尽管没有证据表明发生了黏着滑动和存在曲线尖叫声,但是仍出现了大的横向塑性流动。有学者提到:由于车辆的轮对和转向架结构之间接触点的“刚度”较大,当曲线半径低于125 m时会产生曲线尖叫声。

与式(1)相一致的关于这种波磨形成原因的一种解释是:通过曲线段的第一组轮对和转向架产生了大的横向蠕变,特别是在轨枕间的中部,轮轨内接触面上产生法向力,导致内轨相应部分产生差分滑移。

笔者通过轨道简化模态分析和新钢轨上列车加速度分析,表明钢轨的第一阶横向弯曲模态是波长固定机理。上文中提到的某些频率明显低于一些文献

所提供的数值,主要是由于笔者采用了较宽的轨枕间距。

使用新钢轨替换磨损的钢轨后,依然会产生波磨。随后发现,铺设中间轨枕后波磨停止发展。铺设中间轨枕的主要作用在于增大钢轨第一阶固有频率,从而补偿确定波磨波长的机制。当 85.2 万个轮轴通过后,并未出现波磨。

感谢 EUSKOTREN(巴斯克铁路)同意发表本论文,并感谢所有参考文献的作者。

(译自 *Wear*, 2008, 265, 1231–1237. 因原文的参考文献[11–21]未找到,故在文中的标注位置作了适当处理)

参考文献

- [1] Esweld C. Modern railway track. MRT-productions. D-4100 Duis-burg66. 1989.
- [2] Daniels L E, et al. Rail corrugation; perception and reality. *Railway Track and Structures*. 1994(9): 41–47.
- [3] Grassie S L, Kalousek J. Rail corrugation; characteristics, causes and treatments. *J. Rail Rapid Transit. Proc. Inst. Mech. Engineers. Part F*, 1993(207): 57–68.
- [4] Matsumoto A, Sato Y, et. al. Study on the formation mechanism of rail corrugation on curved track. *Vehicle System Dynamics*. 1996(25): 450–465.
- [5] Matsumoto A, Sato Y, et. al. Wheel-rail contact mechanics at full scale on the test stand. *Wear* [9] (1996): 101–106.
- [6] Clark R a, Scott G A, Poole W. Short wave corrugations-an explanation based on stick-slip vibrations. In *Applied Mechanics Rail Transportation Symposium. AMD Vol. 96, RTD Vol. 2. ASME*. 1998: 141–148.
- [7] Clark R A P. Rail corrugation—recent theories. In *Trach Technology*, Thomas Telford, London. 1985: 89–115.
- [8] Frederick C O. A rail corrugation theory. In *Proc. of the Second International Symposium on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems held at Kingston/RI. July 1986. Waterloo. Ontario(Canada). University of Waterloo Press*. 1987: 181–211.
- [9] Hempelmaon K. Short pitch corrugation on railway rails-a linear model for prediction. In *VDI Fortschritt. Berichte. Reihe12. No. 231. VDI-Verlag. Dusseldorf*. 1994.
- [10] Hempelmaon K, Knothe K. An extended linear model for the prediction of short pitch corrugation. *Wear* [9]. (1996): 161–169.

(编辑:曹雪明)

Effect of Sleeper Spacing on Rail Corrugation

Ernesto García Vadillo, José A. Tárrago,
Gorka Garate Zubiaurre, Carlos Angulo Duque
(University of the Basque Country, Bilbao, Spain)

Abstract: The present paper looks at the effect of sleeper separation on rail corrugation growth. The case under study involves short pitch corrugations on the low rail in sharp bends, the bends in question being those of metro-type railways in Bilbao, with the track on concrete slabs and with two resilient stages of STEDEF type. With an initial sleeper separation of 1 000 mm, corrugation depths measured up to 0.42 mm peak-to-peak after the passing of only 920 000 wheelsets. Following the replacement of corrugated rails with new ones, vertical and transversal accelerations on the low rail were compared above sleepers, and at mid-span, while trains passed by. With a separation distance of 1 000 mm there is, at the mid-span, a sizable response at 204 and 244 Hz that is not present above the sleepers. With the insertion of intermediate sleepers, hence reduction of separation to 500 mm, corrugation growth was found to cease. The results described in this paper derive from two years' observation.

Key words: rail corrugation; rail dynamics

Chinese translation by: Sun Xiaojing, Nie Zhili (Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

上海地铁首创高峰时段运营信息电视直播

自 2010 年 3 月 1 日起,上海轨道交通运营管理中心值班长将在工作日早高峰时间通过电视新闻节目为市民乘客提供最新的地铁运营信息,以便乘客调整出行方案。这也是国内地铁行业首次采用全新运营信息发布形式。

上海地铁运营信息电视直播专栏节目将在周一到周五(工作日)早上 7 时 10 分和 8 时 10 分左右,在上视新闻综合频道《上海早晨》栏目各进行一次直播。

目前上海地铁已通过各种渠道发布运营信息,乘客可从电台、电视直播或上海地铁官网中了解即时运营信息。据悉,上海轨道交通还在积极研究通过手机短信来告知乘客地铁重大应急情况的信息发布方式,尽可能多渠道、全方位地满足全社会对地铁运营信息的知情权,尤其是在突发情况下发布新闻性即时信息,将为乘客提供更快速、更准确的出行提示。

摘编自 www.chinametro.net 2010-03-02