

编者按 我国城市轨道交通建设正处在一个高速发展期,在为乘客出行提供极大方便的同时,也引发了振动噪声扰民和钢轨异常波浪形磨耗(简称“波磨”)问题。异常波磨会恶化轮轨关系,增大轮轨振动和噪声,减少钢轨与车轮的使用寿命,发展严重时会导致轨道扣件失效,危及行车安全。本刊2010年第2、3期的“热点研讨”栏目,将城市轨道交通的波磨问题提出,并编译汇集了国外针对波磨问题的研究论文,希望能对解决新建线路异常波磨问题、改进在建线路减振降噪措施以及新建城市轨道交通注意预防波磨现象起到警醒和促进作用。

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2010.03.001

钢轨波磨研究综述

佐藤吉彦¹ 松本晃² 克诺特·克劳斯³

(1. 铁路轨道系统研究所 日本千叶 263-0041; 2. 国家交通安全与环境实验室 日本东京 182-0012; 3. 柏林技术大学航空航天研究所 德国柏林 D-10587)

王文斌 译

(北京交通大学 北京 100044)

摘要 在日本,以前出现的钢轨波磨并不严重,但近年来则变得日益广泛。自19世纪末以来,全世界出现了众多预防波磨的报告,但是有关理论没有完整地解释波磨的形成机理,目前也尚无圆满的对策解决波磨问题。由于列车提速、新型车辆引入等原因,波磨的形成趋势也更加明显,因此有关波磨的研究变得愈加重要。在这种情形下,笔者对过去有关波磨的研究,以及当今全世界范围内正在进行的研究进行了评述,尤其着重在日本的研究。本文分别对参考文献、20世纪70年代的研究工作、钢轨波磨、短波波磨和近年来在日本的研究进行了评述。

关键词 钢轨波磨 车轮/钢轨接触 接触应力 磨损

中图分类号 U213.4 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2010)03-0001-10

1 钢轨波磨研究概况

近年来,日本钢轨波磨已成为一个严重的问题。以前的研究者注意到,只有在钢轨直接固定在钢桥枕木上、轨道牢固地固定在隧道内坚实的道床上(而不是

使用现代化的板式轨道)、靠近车站制动和加速区段,才会发生波磨现象,而普通直线轨道不会发生这种磨损。至今,在新干线上的钢轨也依然如此。

1953年,对日本已有的线路进行了钢轨波磨的总体情况调查(当时新干线尚未出现)。1958年,在国际铁路会议协会(IRCA)召开的大会上讨论了全世界的钢轨波磨形势。同年,Birmann研究了可能导致波磨的原因。此后的大约15年间,有关研究几乎停顿,ORE进行的调查问卷证实了这一情况。至20世纪70年代,开始了几项新工作:1975年,Johnson和Gray发表论文指出,盘式磨光机上某些类型的波磨能够在理论上进行解释,并通过试验证实;1977年,澳大利亚的Mair研究了特长波波磨形成的原因;1978年,Eisenmann发表了一项对短波波磨的研究报告;1979年,Daniels等开始在普韦布洛(Pueblo)的FAST轨道上进行试验性研究。

1983年,有关钢轨波磨的2次座谈会在柏林技术大学和伦敦召开,会上讨论了Frederick和Budgen、Clark和Kalker的论文。Frederick在1986年的第二次钢轨/车轮系统力学和磨损国际会议上,Valdivia在博士论文(1987/1988)中首次提出了新的理论。以后的10年内,柏林技术大学(TUB)(Valdivia,Knothe和Hempelmann)与BR研究所(Frederick和Sinclair)进行

收稿日期:2010-03-05 修回日期:2010-04-12

作者简介:佐藤吉彦,男,工学博士,主要从事轨道交通控制技术的研究,satoy@saz.so-net.ne.jp

了大量合作,提出了更加利于解决短波波磨问题的方案。Kalousek 于 1992 年研究了温哥华 Skytrain 上出现波磨的原因。1 年以后,Grassie 和 Kalousek 提出根据特性、成因和应对措施对波磨进行分类。在欧洲,Ilias (1996,柏林),Igelan (1997,哥德堡)和 Müller (1998,柏林)在他们的博士论文中继续进行有关波磨的研究。

在日本,研究者们已注意到并研究了钢轨波磨及其相关问题。值得一提的是,近 10 年来,这类研究愈加活跃。其中,多数研究致力于解释由于列车提速导致的钢轨波磨问题,包括引入摆式列车、直线电机驱动的地铁等车辆。近 10 年有关波磨的主要研究是 Suda 和 Matsumoto 及其同事进行的工作。这些研究集合了日本地铁协会(JSA)的研究项目,重点研究了急转弯处波磨的形成机理和应对措施。铁路技术研究所(RTRI)和东日本铁路等给出了上述项目的研究结论。

在接触力学和钢轨/车轮系统磨损的第五次会议中,第一、二作者分两部分给出了汇报。在编稿时,Wear 杂志的编辑建议我们对其进行修订,主要通过指明推荐人、并将第一和第二部分融合为一部分,补充在澳大利亚和英国进行的研究。意识到这一点之后,本论文已经在 Klaus Knothe 的帮助下经过了全面修订。

2 早期的调查研究

2.1 初步意见

1950—1980 年,出版了数百篇调查和评论以及参考文献,虽然并非都可用,但是对于笔者已知的信息都已做了简要介绍。

在德国,自 1895 年,波磨问题日益严重,首次波磨调查研究可追溯至 1925 年。1953 年,德国的 Fink 发表了主要针对最长 5 cm 的短波钢轨波磨(德国的 Riffeln)的评论论文。自 1898 年开始,有关论文超过 50 篇,并提出了新的摩擦化学理论。

1954、1961 和 1977 年,英国铁路(BR)研究文库出版了钢轨波磨参考目录^[1],主要在英国使用。

1958 年,Birmann 发表了研究论文^[2],本文第 2.2 节将对其进行详细讨论。Satoh^[3]概括了该论文,并将其传播至日本。

同一年,在 IRCA 的第 17 次会议上提出了 2 项钢轨波磨报告,介绍了新南威尔士国营铁路和西班牙国家铁路进行的钢轨波磨研究^[4,5],Miyahara 对这些报告进行了总结,并将其传播至日本^[6]。

紧随其后的调查论文包括了当时最广泛的调查信息,由 Krabbendam 根据 1961 年荷兰铁路(NS)的调查

信息编制^[7]。1977 年,ORE 给出了有关钢轨/车轮磨损和出现波磨的报告^[8]。

Hempelmann 的论文给出了近期的调查结果^[9]。

这些论文中的 4 篇需要进行更详细的讨论。

2.2 Birmann 的评论

尽管多数为试验性论文,但是 Birmann 主要审核了部分理论论文,共有 107 项参考文献,Satoh 总结了 Birmann 的论文并将其传播至日本。Birmann 在第一部分介绍了针对德国测试区段钢轨和轮对的振动特性,以及统计分析试验研究结果,第二部分主要介绍了钢轨材料。论文给出了在德国的轨道试验,研究钢轨材料对形成钢轨波磨的影响,并得出结论;同时讨论了偏聚影响的部分细节,以及物理-化学对摩擦的影响(Fink 理论)和腐蚀的影响;最后,从材料、轨道结构以及车辆结构等方面讨论了防止形成波磨的措施,并分析了钢轨打磨后回火和加热的影响。论文在结尾处提及了由于铁路系统持续发展而导致的钢轨波磨增加。

在 Birmann 的论文中,分别讨论了机械因素和钢轨材料因素,但未提及相容的数学理论。

2.3 IRCA 问卷调查

在 1958 年 IRCA 的第 17 次会议上,2 名研究者,Vogan(新南威尔士国营铁路)^[4]和 Delgado(RENFE)^[5]报告了有关钢轨波磨的调查研究。Miyahar 总结了这些报告,并将其传播至日本。这些报告包括的内容有:波磨的实际情况包括波磨类型、波长和幅值、成因和发展、以及钢轨硬度的影响;材料影响包括加工和质量、物理特性、合金钢轨、轨枕、道砟、基床以及钢轨接头;轨道以外的其他因素包括牵引和机车车辆、运行频率和速度、环境、运营、轮箍和钢轨;钢轨波磨的影响;波磨形成的预防与减轻;波磨磨光机;试验研究;由于材料和加工、车轮压力、车轮动力学、钢轨振动、钢轨残余应力、车轮和钢轨的相互作用以及氧化而导致波磨的理论;理论研究者提出的防治方法等。

2.4 日本的早期调查研究

为了响应 IRCA 于 1958 年第 17 次会议提出的波磨问卷调查,成立于 1953 年的日本国有铁路的波磨调查研究涵盖了如下各部门 1958 年的数据:帝都高速运输管理局(TRTA)、大阪(TDOS)交通部、以及近畿铁路有限公司(KNR)。调查研究解释了当时日本波磨的实际情况、材料的影响,以及其他非轨道因素的影响^[10]。

在 22 000 km 的轨道线路上,有 800 处出现了波磨,其中 48% 的波磨波长为 500 ~ 1 500 mm,30.6% 的波

磨波长为 200 ~ 500 mm, 有 12% 的波磨波长小于 100 mm。也就是说, 多数波磨的波长大于 200 mm (不过, 在当时的德国, 多数波磨的波长约为 50 mm, 而在当时的法国, 多数波磨的波长则小于 120 mm)。在日本, 67% 的波磨是由磨损导致的, 但是有 33% 显示出非波动弯曲 (可能是在轧厂进行矫正时形成的, 其波长为 1 m)。根据曲线半径对波磨钢轨分类如下: 弯曲半径大于 800 m 以及在直线轨道上, 每 100 km 轨道出现 5 处波磨; 弯曲半径为 600 ~ 800 m 时, 出现 3.6 处波磨; 弯曲半径为 400 ~ 600 m 时, 出现 3.0 处波磨; 弯曲半径为 200 ~ 400 m 时, 出现 1.6 处波磨。由此可以看出, 与弯曲半径小于 500 m 的轨道相比, 直线轨道和弯曲半径较大的轨道上更易出现波磨。

2.5 ORE 问卷调查

ORE 向成员管理部门发送了有关波磨研究的问卷调查, 并于 1977 年分析了问卷回答^[8]。管理部门对这些问题非常关注, 但是除了已有的了解外, 其回复中未能给出更多新的内容。考虑到所关注问题的复杂性, 已取得比较成功的研究结果, 以及减少波磨经济损失所采用的经验解决方案, 因此没有必要实施新的系统化研究。不过, 仍然建议继续就波磨问题交换信息。

2.6 中期总结

第一个不足之处是多数论文都着重现象观察, 并力图对其进行解释。几乎没有形成并通过论证的、能够解释观察研究结果的相容数学模型。

第二个不足之处是未能充分给出不同类型波磨之间的不同点。原因非常简单: 未能充分形成对钢轨波磨进行分类的理论。尽管如此, Birmann 和 Krabbendam 还是区分了短波波磨 (德国: Riffeln) 和长波波磨 (德国: Wellen, 等波长) 之间的差异。

以现代观点重新审视这些论文, 可以发现它们包含了非常有价值的表象信息, 部分信息可通过现在的理论进行解释。在这之后 20 年, 研究者们才能够对波磨进行分类。

3 20 世纪 70 年代的尝试

尽管 ORE 于 20 世纪 70 年代准备进行数次新的尝试, 以弄清楚波磨现象, 人们还是只局限于考虑 Carson、Johnson 和 Gray 的成果, Mairie 的研究 (包括轨道动力学的部分说明), Eisenmann 的研究以及 FAST 的试验。

3.1 接触共振和塑性变形

Carson 和 Johnson 1971 年的论文^[11]以及 Johnson 和

Gray^[12]扩展了 Gray 1972 年博士论文的研究, 考虑了盘片上的接触共振和塑性变形。研究者在盘式磨光机上进行了试验, 所出现的波磨可用一种新的理论进行解释。由于不规则性, 系统以接触共振的模式振动。如果阻尼很低而负载很高, 则振动会很严重, 足以导致增幅的塑性压痕, 从而增大了下一个周期的振动。Johnson 和 Gray 明确区别了如下两项之间的不同: 波长由接触共振的频率决定; 准周期模式的形成和增大是由塑性变形导致的。这应该是首次区分了波长确定机理和损坏机理之间的差异。

3.2 非悬挂质量和轨道共振及总体塑性变形

轴负载非常高的轨道上, 波长为 200 ~ 300 mm 的长波钢轨波磨是非常常见的磨损。为了理解波长是如何确定的, 需要首先大体了解轨道动力学。虽然 Timoshenko 已经分析了在轨道上移动的车轮的力学特性, 但是今天用于分析不同类型钢轨波磨的模型最早出现在 20 世纪 70 年代。来自澳大利亚的 Mair 于 1977 年分析了连续支撑轨道上非悬挂质量的垂直动力学特性, 并认为这就是确定重载波磨波长的机理^[13-14]。Johnson 和 Gray 则认为, 波磨是由总体塑性变形导致的。

Mair 用过的简单轨道模型对于某些波磨类型来说已经足够。不过, 对于短波波磨, 还需使用更复杂的轨道模型, 无论是从理论上还是从试验中, Grassie 等人进行了大量的研究工作^[15]。对于这些成果, 已有的动力学轨道模型都是可用的。之后的 10 年, Ripke 和 Knothe 提出了用于不连续支撑轨道的更通用的理论模型^[16], 并得到广泛应用。

3.3 加工硬化和残余应力

1978 年, Eisenmann 提出了一种新的理论^[17]。该理论解释了钢轨头残余应力导致的短波波磨, 这种应力是在钢轨制造过程中产生的, 可随运营时间而发生变化。他指出: “现在通常认为, 在工作压力下, 靠近车轮接触面的钢轨将硬化 6 ~ 8 mm。这种硬化是由弯曲压应力和激活压应力尤其是直接位于车轮下方的压应力导致的”, 最终导致“纵向斜面区域中和钢轨头横向在重复压力影响下产生残余压应变”。随后 Eisenmann 还提及了所谓的巴辛格效应, 并假定所有这些影响最终导致短波钢轨波磨的形成。

Eisenmann 似乎已经从冶金调查研究中得出了自己的理论。不久之前, 研究者们开始利用数学模型研究加工硬化和残余应力对波磨形成的影响^[18]。

3.4 在普韦布洛 FAST 轨道上的试验

1979 年,FAST 的技术人员建立了试验轨道,意在提供具有更好应对波磨措施的铁路。其中一项试验为首先帮助理解波磨的形成,然后根据这些数据建立有关波磨机理的研究^[19]。论文介绍了 FAST 钢轨波磨试验的布局设置、测量和实施,随后对影响波磨形成的因素进行了评估和讨论;说明了轨道维护中的波磨影响;讨论了钢轨打磨;评述了当前有关波磨机理的理论。最后,做出总结,给出了收费服务应用和进一步研究的建议。

4 对钢轨波磨的分类

1993 年,Grassie 和 Kalousek 审查了 42 份参考文献,并出版了题为《钢轨波磨:特性、致因和治理措施》的论文^[20],可帮助人们了解 1970—1990 年之间进行的研究工作。他们根据丰富的经验,将波磨分为 6 个类组:①重载波磨(200 ~ 300 mm);②轻轨波磨(500 ~ 1 500 mm);③弹性支撑块轨枕波磨(45 ~ 60 mm);④接触疲劳波磨(150 ~ 450 mm);⑤车辙波磨(50 mm(电车),150 ~ 450 mm);⑥钢轨轰鸣波磨(25 ~ 80 mm)。多数车辙波磨在德国被称为波浪磨损(长波波磨),而轰鸣波磨则被称为 Riffeln(短波波磨)。

虽然研究者们并不完全同意 Grassie 和 Kalousek 的分类,但都认可这种分类的基本概念,即引入波长确定机理和破坏机理,用以对图 1 所示的波磨进行分类。Johnson 和 Gray 的论文、Frederick 的论文、Valdivia 的博士论文(第 5.1 部分),以及 Suda 的论文(第 6.1 部分)都记载有这两种不同机理的基本概念。

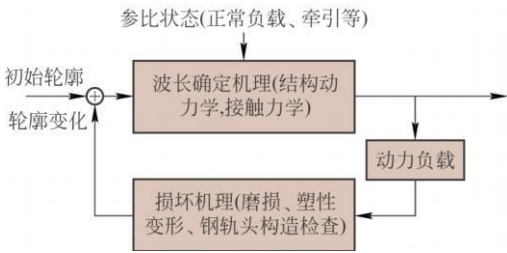


图 1 结构动力学、接触力学(波长确定机理)以及破坏机理^[20-21]反馈循环

波长确定机理是由轮对和轨道之间的动力相互作用得出的,因此,有必要在全部研究频率范围内建立轨道和轮对模型。破坏机理是由塑性变形(塑性弯曲或塑性流动)、滚动接触疲劳及磨损得出的。图 1 中的图形有助于确定钢轨波磨主要是由结构动力学还是材料特性导致的,这两个方面都集成于反馈循环中。

Grassie 和 Kalousek 指出,多数类型的波磨已为人们所知,因此在本文第 5 节中,将着重介绍短波“轰鸣钢轨”波磨,根据文献^[20]所示,这一类型的波磨人们还所知不多。

4.1 自激车辙波磨

Clark、Foster^[22]和 Clark^[23]等人可能是最初研究特殊“车辙波磨”的。其研究内容为高蠕变条件下可变轮对和不连续支撑轨道系统的自激振动。同时,还考虑了由轨道刚度变化导致的马修振动,以及由车轮-钢轨蠕变力导致的滚动-滑动振动,这两种振动可分别或共同解释钢轨运行面上的长波或短波波磨。蠕变特性必须在达到最大值后降低,并且存在较大蠕变,方可获得达到导致自激振动所必须的负阻尼。这种情形发生在急转弯轨道上,而非直线轨道上。

4.2 日本的车辙波磨

Sumi 等人于 1991 年^[24]提出了日本曲线轨道上的波磨致因:“如前所述,各处都存在由于各种综合因素导致的波磨。内外钢轨之间不规则滑动是导致曲线轨道波磨的最大原因,这种滑动足以导致轮对的扭转振动。由轮对扭转振动速度决定的磨损量可导致波磨。这可解释为列车速度对波磨波长的影响。根据实验室得出的滚动和滑动摩擦系数,相对于实际产生波磨,在限制性更大的条件下更易导致扭转振动的转移或继续(有限循环),这意味着得出车轮和钢轨之间的实际滚动和滑动摩擦系数是非常重要的。对于轮对的扭转振动,还需考虑制动、电机和轨道的影响。”

5 短波波磨

短波波磨主要发生在高速线路的直线轨道(或者具有较大半径的曲线轨道)上。准周期模式的波长为 2 cm 和 8 ~ 10 cm 之间。自从 1980 年以来,研究者们日益意识到这一问题。大部分相关研究工作主要是在英国铁路(BR)、牛津大学和 TUB 完成。

5.1 1994 年之前的短波钢轨波磨

在 Frederick、Bugden^[25]和 Bugden^[26]的论文中可以找到在 BR(部分与牛津大学合作)进行的多数实验调查记录,这些论文在柏林(1983 年 6 月)钢轨波磨问题座谈会和伦敦(1983 年 9 月)钢轨波磨讨论会上进行了讨论。研究者们介绍了对该问题的调查研究,包括钢等级的影响,详细讨论了波磨的金相组织、打磨和初始钢轨粗糙度的影响,为重新开始波磨研究提供了极好的契机。

在 BR 和柏林技术大学进行的独立研究强化了理论工作。Frederick 在 1986 年^[27]的论文中显示了如何利用测量动柔度结合蠕变/力-蠕变定律,以及钢轨磨损公式,量化的车轮和钢轨垂直、横向和纵向力的动态响应,以预测通过的轴是否可加深或消除钢轨表面周期性模式下形成的特定波长的波磨。在通过的波频率下,周期性磨损加深初始不平顺,初始钢轨粗糙度可形成波磨。这一假设可用于解释在 BR 线路的直线轨道上观察到的短波波磨。

在柏林技术大学,虽然从纯分析角度进行研究,但是 Valdivia 得出了相同的假设^[21-28]。综合法向和切向接触力学方程,对车轮和钢轨响应进行计算,最后进行磨损分析。波磨的形成,一方面被作为结构动力学和接触力学之间的反馈循环,另一方面则是长期磨损过程的结果(图 1)。“波磨增加速度”(磨损特征值的实际部分)显示了轨枕间特定位置、特定波长的钢轨粗糙度的增加或降低。Hempelmann^[9]、Hempelmann 和 Knothe^[29]继续 Valdivia 在柏林的研究工作,Hempelmann 查看了 128 篇论文,描述了轨枕间完整磨损模式的形成,并进行了大量的参数研究,以确定关键参数。Frederick, Valdivia 和 Hempelmann 指出,两端铰支模式频率下的反谐振是形成短波钢轨波磨的最可能原因。尤其是在英国铁路,发现了多个短波钢轨波磨的案例。Hempelmann 还提出,如果蠕变达到最大值,则在相应的谐振频率下,高度横向动柔度可能导致波磨。

ORED 上的 185 位委员^[30],在理论和数值模拟方面仔细比较了两种算法。他们发现这两种算法提供的结果几近相同。

5.2 RATP 出现的波磨

Tassilly 和 Vincent 的论文中讨论的波磨类型,初看起来似乎与轰鸣钢轨波磨完全不同,Grassie 和 Kalousek 将其归类为“弹性支撑块轨枕波磨”。前者是将轨道设于混凝土上,在钢轨和轨枕之间设有橡胶垫,而后者,则在轨枕和混凝土之间设有橡胶套。波磨发生在曲线轨道而非直线轨道上,有关详细信息,可参考文献^[31-32]。与 Frederick 和 Valdivia 类似,分析中也使用了完全线性模型。首先,曲线轨道上转向架的参考状态由非线性准静态曲线分析决定,然后进行线性动态分析和线性磨损分析。波磨形成速度最大时的频率与以下两个因素相对应:垂向轨道的反谐振及具有两种一致负效应的横向轮对谐振。

5.3 温哥华轻轨出现的波磨

温哥华的公共交通系统开始运行不久即遇到了严重的钢轨和车轮波磨问题。Grassie 和 Kalousek 将其也归类为“轰鸣钢轨型”波磨。车上的轮对定位不准确、车轮和钢轨之间形成“滚动-滑动”振荡以及车轮踏面和钢轨之间摩擦力过大都与波磨的形成有关。补救措施包括将轮对定位不准的误差降低至弧度 $\pm 10 \text{ min}$,在车轮上涂摩擦改进剂,将车轮踏面和钢轨之间的摩擦特性由负影响改为正影响,重新修正轨道,并打磨钢轨,将直线轨道的长度四等分并使其轮廓不同。这些补救措施几乎消除了系统的波磨。该事件由 Kalousek 和 Johnson^[33]于 1992 年报告。

5.4 波长恒定机理

Frederick, Valdivia 和 Hempelmann 的模型形成了频率恒定机理。根据这一机理,短波钢轨波磨的波长应与车速成比例,这似乎与实验数据相反。Müller 在其博士论文中指出,除了频率固定机理,还存在短波波磨波长固定机理^[34]。Müller 在 Valdivia, Frederick 和 Hempelmann 的研究思路采用了线性模型。Müller 的研究表明,其他结构因素影响也可导致波磨的形成,如:1 600 ~ 1 800 Hz 的高度横向钢轨动柔度,有时候接近 300 Hz 较低垂直钢轨动柔度,甚至更高的横向轮对动柔度。不过,如果完全不考虑结构动力学,而只考虑接触力学的影响,则发现只有在 2 和 8 ~ 10 mm 之间固定波长带内的初始钢轨粗糙度可增加波磨的形成概率,并最终产生波磨。Müller 将其称为接触力学过滤效应。如果考虑结构力学,则波磨的波长为车速除以低垂向动柔度或高横向动柔度的频率。由于存在数个与不同结构动力学效应有关的频率,因此,当波磨波长位于波长带以内,即接触力学过滤功能促进波磨产生时,才考虑这些频率。

5.5 稳定性分析

众所周知,临界速度可以由低频范围内车辆和轨道相互作用而确定。轮对不规则振荡可变得不稳定。类似不稳定是否可在高频范围内导致自激振动,并最终形成波磨,这还需进一步的讨论确定。在 Gash 等人^[35]的论文中,确实观察到了这种不稳定性。不过,由于采用了与实际不符的轨道模型,还需进行新的尝试。与此同时,Bhaska 等人^[36]的论文和 Müller 的博士论文^[34]中重新论证了这一问题。两次结果都相同:利用切合实际的轨道模型具有足够的阻尼,如:具有钢轨垫,可抵消由于接触力学效应导致的自激效应。

5.6 考虑非线性

在以上第5节讨论的所有研究中,都采用了线性模型,损坏机理仅研究磨损。在 Ilias^[37]和 Igeland^[38]的博士论文中引入几何非线性和力学非线性,但不包括横向振动。研究发现,即使考虑相对较小的波磨深度,非线性效应也非常重要。

Bohmer 首次尝试了将塑性变形和磨损一起作为损坏机理进行研究^[87],具有非常重要的意义,不久的将来,很可能会弥补力学研究和冶金研究之间的缺口。

6 日本的研究

日本的 Suda (东京大学)和 Matsumoto 及其同事 (TSNRI 和 SMT 合作研究)近 10 年来进行了有关波磨的主要研究,这些研究合并了 JSA 的研究课题,并从各种不同的角度研究了急转弯处波磨的形成机理和应对措施。RTRI 和东日本铁路公司等进行的研究反映了上述研究的成果,日本有关急转弯轨道波磨的研究在近 10 年来获得了很大进展。

6.1 Suda 的研究

1986—1991 年,Suda (东京大学实验室)利用滚动表面实验模型对波磨机理进行了研究。他主要利用塑性变形模型对波磨的形成和发展进行了解释^[39-42]。Suda 将车轮/钢轨系统作为自激振动系统,这一系统中同时出现接触振动和表面变形,并介绍了波磨在重复接触反馈循环稳定条件下发展或减少的边界条件。

自 1991 年,Suda 等人^[43],以及 Suda 和 Komine^[44]进行利用高性能合金控制波磨形成的研究。所用的金属为 Fe-5Ni-15Mn 合金,并通过在模型试验台上的试验,研究采用高性能合金制造钢轨对减少波磨形成的影响。

Suda 参与了 JSA 的研究项目,第 6.2 部分对该项目进行了说明,并从 1995 年开始,他利用难度逐步提高的滚轴试验台开始对滚动/滑动接触面上的波磨现象进行试验性研究^[45-48]。随后,Suda 制造了可控制接触面滑动的新试验台。其研究证实,波磨是由纵向和横向蠕变导致的。

自 1998 年,东日本铁路公司开始了对通勤线上急拐弯处低速钢轨波磨的研究。Suda 等人参与了部分研究工作^[49]。除了波磨现象外,Suda 等人还利用小波分析研究了波磨的探测方法^[50]。

6.2 交通部和住友的合作研究^[51]

1993 年春天,交通部交通安全和妨害研究所

(TSNRI)的 Matsumoto 和 Sato 与住友金属技术(SMT)的 Tanimoto 和 Kangol (Oka)开始合作研究。该研究的目的在于研究波磨的形成机理,并防止地铁曲线轨道上形成波磨。他们认为全尺寸实验与数字模拟都非常重要,因此他们始终都采用两种方法进行研究,并比较两者的结果。自 1994 年开始,他们研究加入了 JSA 的研究项目,1 年以后,他们开始自己进行研究。

作为基础研究,他们利用配备有 TSNRI 的全尺寸导向架滚动试验台研究了轨道特性,如爬行力,其中配备的 TSNRI 可模拟曲线条件^[52-53]。他们研究了测量方法,并成功测量了导向架/轨道的相对位置/力、以及商用地铁线上轨道接触力的波动^[54]。他们还尝试研究了在商用线路上的钢轨波磨,并对波磨钢轨的形状进行了三维测量。

根据全尺寸试验台、商用线试验和数值模拟,他们发现轨道曲线段钢轨波磨是由车轮和钢轨之间的黏滑振动导致的,这种黏着滑动则是由较大的蠕变(纵向或横向)和车轮/轨道接触面上的垂直力波动导致的^[55-57]。部分以前的报告指出,波磨是由黏滑导致的,但是这些理论的依据为较大蠕变速度范围内的负摩擦特性。不过,根据 Matsumoto 的研究,车轮荷载振动导致的最大蠕变力的变化远远大于负摩擦特性导致的最大蠕变力。因此,Matsumoto 及其同事认为形成钢轨波磨的黏滑主要是由车轮负载振动导致的。

同时,他们试图找到形成波磨的应对措施。在商用线上进行的列车运行试验提供了数个可预防波磨的有效方法^[58],如不对称钢轨打磨(尤其是低速钢轨)、优化磨损车轮轮廓、采用固体润滑剂进行润滑等。

根据前面提及的研究,他们通过数值模拟分析了波磨的发展过程^[59]。

6.3 JSA 进行的研究^[60]

1985 年至 1988 年,JSA 进行了直线电机驱动地铁系统 (Linear metro)的实用研究项目,从 1987 年开始,在 Osaka Nanko 试验轨道上利用试验车辆进行了列车运营试验。在几乎可以实际应用的时候,由于此时采用类似直线电机驱动和钢质车轮的加拿大轻轨列车受到了严重波磨的影响,他们担心这种铁路也容易受到波磨的影响。1987 年秋天,JSA 向加拿大派遣了调查委员会,委员会由东京大学的 Ieda 教授、TSNRI 的 Matsumoto、和 JSA 来自汽车制造商的成员、以及轨道施工人员组成。经研究,他们在报告中指出,加拿大直线电机系统钢轨波磨是由加拿大系统所造成的,日本不会

受此影响。

1990 年春天,首辆直线电机地铁在大阪开通,第二辆于 1991 年春天在东京开通。大阪地铁未出现钢轨波磨,但是东京地铁半径为 160 m 的急转弯处发生了波磨。Matsumoto 及其同事开始了先前所述的波磨研究,以解决这一问题。

由于 JSA 认为直线电机地铁是下个世纪的主要地铁系统,因此解决波磨问题非常重要。JSA 于 1994 年春天组织了研究委员会,以调查波磨的形成机理。该委员会由 Iguchi 教授任主席、由九州大学的 Sumu 教授、Suda 教授、TSNRI 的 Matsumoto 和其他来自汽车制造业、轨道施工者和地铁操作人员组成。在该研究中,项目的实用研究分 3 组进行,即东京大学的 Suda 组、来自 TSNRI 的 Matsumoto 组和身为日立有限公司前导向架工程师的 S. Ishida。

Suda 主要通过模型试验台和数值模拟进行研究,Matsumoto 主要进行全尺寸试验台试验、列车运营试验和数值模拟研究,而 Ishida 和 Furuta 则主要进行 FEM 分析研究^[61]。

委员会于 1996 年春天完成了最终报告,Suda 和 Matsumoto 的研究结果如本文第 6.1 和第 6.2 节所述。

用于治理东京地铁波磨的措施为 TSNRI 制定的优化磨损轮廓和利用润滑油润滑低速钢轨。直至今天,尚未在东京地铁线路上形成严重的波磨。

6.4 JR 集团的研究

虽然类别不总是相同,但是近年来日本铁路线路发生的波磨现象日益增加。Kyushu 进行的波磨研究意在调查半径小于 400 m 的急转弯轨道上的波磨。他们尝试扩大轨距、利用 DHH 钢轨等应对措施^[62]。

1998 年,东日本铁路公司开始了对通勤线急转弯轨道低速钢轨波磨形成机理的研究,本项目的研究包括在商用通勤线路上进行火车运营测试^[49]。

RTRI 的 M. Ishida 分析了日本铁路线钢轨波磨的形势,并观察了波磨钢轨表面的塑性流动^[63-64]。

7 结语

如果要了解波磨的形成,有必要对这一现象进行系统化研究,包括试验和理论研究。Birmann 在 1958 年参考的论文有 107 篇,Hemplemann 在 1994 年查看过的论文有 118 篇。不过,Krabbendam 在 1961 年查看过的论文均与同一类波磨有关,数量达到 900 ~ 1 000 篇!因此,世界上已有的有关钢轨波磨的论文超过 1 500 篇。

Grassie 和 Kaousek 于 1993 年根据他们的经验提出

了波磨的分类,非常有利于将来的研究。6 类中的 5 种波磨,不但已识别出其特性,而且已确认其成因、甚至治理措施。他们对于第 6 种波磨的意见是(轰鸣型钢轨波磨)还需对波长确定机理进行研究。根据第 5.4 节的解释,显然存在“接触过滤”现象,这种现象导致形成的波磨波长介于 2 和 8 ~ 10 cm 之间。“弹性支撑块轨枕”型波磨和“两端铰支模式”型波磨只是两种可能的类型。Heinsch 等人^[65]的研究证实了两端铰支模式型波磨的存在。不过,该论文还指出,这一问题尚未得到解决。论文还不能解释为什么在同一条线路上,相同的额定负载下,会出现两种明显不同的波磨。似乎只有钢轨材料不同,因此改进材料和磨损模型是非常有必要的。仅将磨损作为损坏机理可能不足以解释为什么某些钢轨形成波磨的速度比其他钢轨快。

进一步来讲,摩擦改进剂将车轮踏面和钢轨之间的摩擦特性由负改为正,研究者们已注意到这适用于温哥华的轻轨列车。

在日本的近期研究中,Suda 等人于 1986 年开始对钢轨波磨进行理论和试验研究,并于 1988 年向全世界公布结果^[39]。波磨取决于图 1 所示的系统的稳定性,后续研究的成果研制了波磨模拟器^[48]。1993 年,Matsumoto 及其同事开始研究急转弯轨道上的波磨,并指出,波磨主要出现在直线电机驱动的地铁上。Matsumoto、Suda、Ishida 和 Sumi 参加了 JSA 的研究项目,并进行全尺寸试验台试验、模型试验台试验、列车运营试验、现场调查和数值模拟,成功研究了低速急转弯轨道上钢轨波磨的形成机理,并提出了治理措施^[60]。根据 Matsumoto 的结论,这种类型的波磨是由车轮和钢轨之间的黏滑振动导致的,而黏滑振动则是由较大的蠕变(纵向或横向)、以及车轮/钢轨接触面上的垂直力波动导致的^[55-57]。除了新干线上尚未出现波磨外,这种类型的波磨是日本铁路上最典型的波磨,因此这些研究的结果影响了其他研究组,如 RTRI、东日本铁路公司等研究。

近年来日本出现的波磨主要分为 3 个类型:①低速钢轨急转弯轨道上出现短波波磨;②直线或较缓轨道上出现短波钢轨波磨;③高速钢轨急转弯处出现中等波长的波磨。第 1 种类型的波磨是早期日本铁路出现的主要波磨类型,属于 Grassie-Kalousek 分类的第 3 类。第 2 种可能属于第 6 类波磨,是由列车加速导致的。最后一种为第 1 类波磨,是引入摇摆式列车后在车辆倾斜不足的急转弯处产生的。据第 6 节所述,对

类型①的研究在近年来的日本已非常先进,对③的研究也已众所周知,但是如前所述,对②类的研究尚未得出令人信服的解释。

(译自 *Wear*, 2002, 253: 130-139)

参考文献

References

- [1] Derby. Bibliography on Corrugation of Rails[R]. Research Department Library, 1954, 1961, 1977.
- [2] Birman M, Schienenriffeln, ihre Erforschung und Verhütung. Rail corrugation, research and preventive measures; new results from corrugation research at DB, Part I. Vibrational Investigations, Part II. Material investigations[J]. VDI Z, 1958, 26 and 1958, 30.
- [3] Satoh Y. Study on Rail Corrugation[J]. Tetsudo Senro, 1961, 9(4). (in Japanese).
- [4] Vogan N C. Question 9. Experience Obtained Concerning the Undulatory Wear of Rails, Monthly Bulletin of the International Railway Congress Association[C]. Bulletin of IRCA, 1958, 138. Y. Sato et al. /Wear, 2002, 253: 130-139.
- [5] Delgado L P. Question 9. Experience Obtained Concerning the Undulatory Wear of Rails[C]. Bulletin of IRCA, 1958.
- [6] Miyahara K. Document from Countries on Rail Corrugation[J]. Tetsudo Senro, 1959, 7(2). (in Japanese).
- [7] Krabbendam G. International literature on the formation of short and long wavelengths corrugations on tracks of main lines and of trams[J]. Forschungsdienst der niederländischen Eisenbahnen, 1961.
- [8] ORE S 1012 Formation of Corrugation and Waves on the Rail and Mutual Wear of Wheel and Rail, RP 1. Mutual Rail/Wheel Wear and Corrugatory Wear [R]. ORE, Utrecht, 1977.
- [9] Hempelmann K. Short-pitch corrugation on railway rails; a linear model for prediction [J]. VDI Fortschritt-Berichte, 1994.
- [10] Kato Y. On Rail Corrugation[R]. Tetsudo Senro 1958. (in Japanese).
- [11] Carson R M, Johnson K L. Surface corrugations spontaneously generated in a rolling contact disc[J]. Wear, 1971, 17: 59-72.
- [12] Johnson K L, Gray G G. Development of corrugations on surfaces in rolling contact[J]. Proc. Inst. Mech. Eng. 1975, 189: 45-58.
- [13] Mair R I. Natural frequency of rail track and its relationship to rail corrugation[J]. Civil Engineering Transportation, The Institution of Engineers, Australia, 1977.
- [14] Mair R I. Track design to prevent long-pitch rail corrugation[J]. Bulletin, 1983(84): 289-300.
- [15] Grassie S L, Gregory R W, Harrison D, et al. The dynamic response of railway track to high frequency vertical/lateral/longitudinal excitation[J]. J. Mech. Eng. Sci., 1982, 24-2: 77-90, 91-96, 97-102.
- [16] Ripke B, Knothe K. Infinitely long rail discretely supported by sleepers under harmonic excitation [J]. VDI Fortschritt-Berichte, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [17] Eisenmann J. Corrugation formation on rails[J]. Eisenbahningenieur, 1978, 29(3).
- [18] Böhmer A, Klimpel T. Plastic deformation of corrugated rails; a numerical approach using material data of rail steel [C]//in: Proceedings of the Presentation at The Fifth International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (Fifth CM), Tokyo, Japan, 2000.
- [19] Daniels L E, Blume N. Real corrugation growth performance[C]//Proceedings of The Second International Heavy Haul Railway Conference 28, 1982.
- [20] Grassie S L, Kalousek J. Rail corrugation; characteristics, causes and treatments[J]. IMechE 207(F), 1993.
- [21] Valdivia A. The Interaction between high-frequency wheel-rail dynamics and irregular rail wear—a linear model[J]. Fortschritt-Berichte VDI 12-93, 1988.
- [22] Clark R A, Foster P. On the Mechanics of Rail Corrugation Formation [C]//Proc. 8th IAVSD-Symp. Cambridge, MA, 1983, Swets Zeitlinger (Amsterdam/Lisse), 1984: 72-85.
- [23] Clark R A, Scott G A, Poole W. Short wave corrugations—an explanation based on stick-slip vibrations[J]. Applied Mechanics Rail Transportation Symposium, 1988, 96(2): 141-148.
- [24] Sumi T, Matsumoto Y, Murao M, et al. Generation mechanism of rail corrugation at curved tracks having short radius[J]. Trans., 1991. (in Japanese).
- [25] Frederick C O, Bugden W G. Corrugation Research on British Rail, in: K. Knothe, R. Gasch (Eds.), Proceedings of the presentation of the rail corrugations at the symposium on rail corrugation problems [J]. ILR-Bericht, 1983, 56: 7-33.
- [26] Bugden W G. Characteristics of short-wavelength corrugation on rails[J]. Proceedings of the Presentation of Seminar on Rail Corrugation, Institution of the Mechanical Engineers, 1983.

- [27] Frederick C O. A rail corrugation theory[J]. Proceedings of the Second Conference on the Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, 1986.
- [28] Valdivia A. A linear dynamic wear model to explain the initiating mechanism of corrugation[J]. M. Apetaur (Ed.), The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, Proceedings of the Tenth IAVSD-Symposium, Prague, Swets Zeitlinger, 1987.
- [29] Hempelmann K, Knothe K. An extended linear model for the prediction of short-pitch corrugation[J]. Wear, 1996, 191: 161-169.
- [30] ERRI D185, Rail Corrugation Models[C]//Comparison of results obtained using The Berlin Technical University and the British Rail methods, RP 1, D185; Reduction in Corrugation of Rails, European Rail Research Institute (ERRI), Utrecht, 1993.
- [31] Tassilly E, Vincent N. A linear model for the corrugation of rails[J]. J. Sound Vibrat, 1991, 150(1): 25-45.
- [32] Tassilly E, Vincent N. Rail corrugations: analytical models and field tests Wear, 1991: 163-178.
- [33] Kalousek J, Johnson K L. An investigation of short-pitch wheel and rail corrugations on the Vancouver mass transit system[J]. IMechE 206F, 1992: 127-135.
- [34] Müller S. Linearized wheel-rail dynamics-stability and corrugation[J]. Fortschritt-Berichte VDI, 1998.
- [35] Gasch R, Gross-Thebing A, Knothe K, et al. Linear, Self-excited vibrations as initiating mechanism of corrugation[C]//K. Knothe, R. Gasch (Eds.), Proceedings of the Presentation of the Symposium on Rail Corrugation Problems, Berlin, 1983.
- [36] Bhaskar A, Johnson K L, Wood G D, et al. Wheel-rail dynamics with closely conformal contact[J]. Part 1. Dynamic modeling and stability analysis, Proc. Instn. Mech. Eng. 211 (F), 1997: 11-26.
- [37] Ilias H. Nonlinear Interactions of Wheel-set and Track when Rolling over Profile Irregularities [D]. VDI Fortschritt-Berichte (also Dissertation, TU Berlin), 1996.
- [38] Igeland A. Dynamic train/track-interaction; simulation of railhead corrugation growth under a moving bogie using mathematical models combined with full-scale measurements [D]. Dissertation, Division of Solid Mechanics, The Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1997.
- [39] Suda Y, Iguchi M, Imaizumi H. The mechanism of corrugation phenomenon on rolling surface[J]. Proceedings of the Symposium on the Applied Mechanics Rail Transportation, 1988, 96(2): 29-36.
- [40] Suda Y, Iguchi M. Basic study of corrugation mechanism on rolling contact in order to control rail surfaces[J]. Proceedings of the 11th IAVSD Symposium, 1989(8): 566-577.
- [41] Suda Y. Effects of vibration system and condition on the development of corrugations [J]. WEAR, 1991, 144: 227-242.
- [42] Suda Y. The mechanics for self-generation of corrugations [J]. Jpn. J. Tribol. 1993, 38(12): 1553-1563.
- [43] Suda Y, Nakagami I, Ueno T, et al. Corrugation control by vibration damping with high damping alloy [J]. Proc. Asia-Pacific 1991, 91(3): 98-103.
- [44] Suda Y, Komine H. Contact vibration with high damping alloy[J]. WEAR, 1996, 191: 72-77.
- [45] Suda Y, Nishigaito T, Okamoto K, et al. Creep characteristics with high damping alloy for corrugation phenomenon [C]//Proceedings of the Second Mini Conference on CM 1996: 325-332.
- [46] Suda Y, Nishigaito T, Komine H, et al. Study of corrugation phenomenon on rolling/sliding contact using a corrugation simulator [C]//Proceedings of the Conference (IMechE), 1996, 96(16).
- [47] Suda Y, Komine H, Iwasa T, et al. Study on Mechanism of Corrugation Phenomenon with Longitudinal Slips [C]//Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conf. '99, 1999 (2): 660-665.
- [48] Suda Y, Komine H, Iwasa T, et al. Proceedings of the Fifth CM on the Experimental Study on Mechanism of Rail Corrugation Using Corrugation Simulator, 2000: 66-73.
- [49] Suda Y, Hanawa M, Okumura M, et al. Proceedings of the Fifth CM on the Study on Rail Corrugation in Sharp Curves of Commuter Line, 2000: 171-176.
- [50] Suda Y, Okumura M, Qian B, et al. A New Detecting Method for Rail Corrugation by Using Wavelet Analysis [C]. WCRR '99 1999, 179.
- [51] Matsumoto A, Sato Y, Ohno H, et al. Formation Mechanism and Countermeasures of Rail Corrugation on Curved Track[C]. Proceedings of the 5th CM, 2000.
- [52] Matsumoto A, Sato Y, Tanimoto M, et al. Experimental Study on Wheel/Rail Contact Mechanism on Curved Track (first and second reports) [C]. Proceedings of the Conference of the Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), 1994. (in Japanese).
- [53] Matsumoto A, Sato Y, Nakata M, et al. Wheel/rail con-

tact mechanics at full-scale on the test stand[J]. WEAR, 1996, 191.

- [54] Matsumoto A, Sato Y, Fujii M, et al. Characteristics of Bogie and Track on Sharp Curve and Their Effects to Formation of Corrugation (from first to fifth reports) [C]. Proceedings of the Conference of the JSME, 1995. (in Japanese).
- [55] Matsumoto A, Sato Y, Fujii M, et al. The formation mechanism of rail corrugation on curved track (first report), longitudinal stick-slip vibration model considering contact stiffness[J]. Trans, 1996, 62; 49-57. (in Japanese).
- [56] Matsumoto A, Sato Y, Tanimoto M, et al. The formation mechanism of rail corrugation on curved track (second report), Basic Formation Mech. [J]. Trans, 1998, 64; 315-322 (in Japanese).
- [57] Matsumoto A, Sato Y, Tanimoto M, et al. Study on the formation mechanism of rail corrugation on curved track [J]. Vehicle Syst. Dynam. 1996, 25.
- [58] Matsumoto A, Sato Y, Tanimoto M, et al. Improvement of curving performance of steerable bogie in urban railway [C]. STECH'96, IMechE, 1996.
- [59] Matsumoto A, Oka Y, Sato Y, et al. Consideration on Growing Process of Rail Corrugation (from first to third reports) [C]//Proceedings of the Conference of JSME, 1999. (in Japanese)
- [60] Japan Subway Association, Report on the Analysis of the Formation Mechanism of Rail Corrugation[R]. 1993. (in Japanese).
- [61] Ishida S, Furuta M. The Effect of Lateral Vibration of Wheel-Track System on the Rail Corrugation[C]//Proc. J-Rail'96, 1996. (in Japanese).
- [62] Date K, Kai S, Shibata H, et al. Countermeasure of Rail Corrugation of Kyusyu Railway Company[C]//Proceedings of the 53th Annual Conference of JSCE IV, 1998. (in Japanese).
- [63] Ishida M, Matsuo K. Plastic Flow on the Surface of Corrugated Rail in a Sharp Curve[C]//Proceedings of the J-Rail'97 on the Plastic Flow, 1997. (in Japanese).
- [64] Ishida M, Moto T, Takikawa M. The Effect of Lateral Creepage Force on Rail corrugation on Low Rail at Sharp Curves[C]//Proceedings of the Fifth CM, 2007; 177-182.
- [65] Hiensch M, Nielsen J, Verheijen E. Rail Corrugation in The Netherlands-Measurements and numerical Simulation [C]//Proceedings of the Fifth CM, Tokyo, 2000; 81-88.

(编辑:曹雪明)

Review on Rail Corrugation Studies

Yoshi hi ko Sato¹ Akira Matsumoto² Klaus Knothe³

(1. Railway Track System Institute, Chiba-shi, Chiba-ken, 263-0041, Japan; 2. National Traffic Safety and Environment Laboratory, Tokyo 182-0012, Japan; 3. Sekr. F5, Institut für Luft-und Raumfahrt, Berlin Technische Universität, D-10587, Berlin, Germany)

Abstract: In Japan, rail corrugations had not been so serious formerly, but it began to be prevailing in recent years. In order to prevent the generation of rail corrugation, many studies have been reported in the world since the end of 19th century, but theories on them have not explained the formation mechanism perfectly and no perfect countermeasures have been established so far. Thus, the studies on corrugation are getting more important, because generation of corrugation shows a tendency to increase due to the speed-up of trains, to the introduction of new vehicles, etc. In such a situation, three authors review the studies on them in the past and those carried out now in the world and more precisely in Japan. The review is on bibliographies, attempts in the 1970 s, classification of rail corrugation, short-pitch corrugation and studies in Japan in recent years.

Key words: rail corrugation; wheel/rail contact; contact stress; wear

Chinese translation by Wang Wenbin (Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

日本《地铁防火规范详解》 中文版已出版

火灾是地铁交通的最大灾害。2003年的韩国大邱地铁火灾事故以后,日本在吸收最新理论和技术之后,制定了新标准。

作为新标准的防火解说,本书增加了许多内容,大大丰富了防火排烟理论和技术。其中,“大火源火灾理念”、“烟浓度的评估”、“疏散时间的计算”、“疏散安全性的评估”及“防火对策”等实现了重大突破,是最新研究成果的精华。运用了大量的图表详尽并完整地阐述了地铁防火排烟理论,是目前理论最先进、内容最全面、实践经验最丰富、算例最详细的标准。可成为从事地铁设计、施工、管理的工程技术人员的指导性技术书籍,也可成为研究人员难得的参考书籍。

征订号:17547;定价:36元;2009年6月出版

主编:日本国土交通省铁道局,土木相关技术标准调查研究会

翻译:北京城建设计研究总院 向上;杨秀仁校对

(刘文昕 供稿)