

文章编号:1006—2106(2003)01—0065—04

我国高速铁路轮轨系统尚应深入研究的几个技术问题

屈晓辉*

(铁道第三勘察设计院, 天津 300142)

提 要: 高速铁路轮轨系统技术是确保列车高速行驶安全的关键。轮轨系统技术条件的影响因素;最高行车速度、运输组织、机车车辆和线路结构等重大问题应深入研究。本文结合日、德等国高速铁路情况,提出设计运营工作中存在的问题,可供立题研究。

关键词: 高速铁路;轮轨系统;技术问题

中图分类号: U213 **文献标识码:** A

自 20 世纪 90 年代初,我国对高速铁路进行了大规模的技术开发,取得了较全面、系统的研究成果。但因不具备高速试验场地条件,许多需要通过试验的技术参数无法取得试验数据,一些专题研究还缺乏新的认识和深入的研究,加之研究成果转化不及时,高速铁路设计未能形成自有的一套完整理论,其中在轮轨系统待深入研究的的技术问题更多。

1 高速铁路的动力特性及轮轨系统技术特点

动力效应是高速铁路最基本的技术特点之一。主要表现为高速行车时车体振动加剧及空气动力学效应两方面,与普通铁路有很大,甚至本质上的差别。

1.1 高速行车的振动特性及国外试验研究与运营概况

据德国、日本试验研究显示:在常规铁路的车辆转向架条件下,行车速度达 120~150 km/h 时,车轮作用在钢轨上的横向力不变而垂向力猛增。在高速试验时,在轨道质量处于中等水平条件下,随着速度的提高,车轮垂直力、水平力及轨道应力的变化幅度都随之增大。速度达 200 km/h 时,轨道的弯曲应力迅速增大到允许值,随后又迅速变化到最低值,可能导致卸载。高速行车的这一特性会发生极为不利的后果:首先是垂向力(P)减小和横向力(Q)增大导致脱轨系统(Q/P)加大和发生蛇行运动;其次由于垂向力减小,抑制

轨排横移的阻力随之减小,在温度应力作用下,对无缝线路的横向稳定性极为不利;另外由于车体振动加剧(据日本专家介绍:在轨道状态优良的直线上运行的车体振动也随速度提高而加强),导致对轨道质量的加速破坏及轮轨加速磨损,变形后的轨道和磨损的轮轨又会加剧车体振动,从而进入恶性循环。高速铁路最根本、最重要的目标——安全行车与舒适度都将遭到威胁或破坏。

此外,国外试验和运营经验还表明,轮轨系统技术条件不同,效果大不相同。日本和法国在轴重和轨道结构类型相同条件下试验时,日本在速度为 230 km/h 时,便频繁出现横向力超过容许的 60 kN,最大达 88 kN;脱轨系数大量超过容许的 0.8 值,最大达 1.12,并大量发生蛇行运动;道碴振动加速度达 24 m/s^2 以上。经过 10 次运行试验后,轨道不平顺幅值由小于 3 mm 扩大为 8 mm。在运营中,东海道新干线有碴轨道线路以投入运营第二年开始,便大量发生了路基沉降、翻浆冒泥、道碴粉化、道床板结、钢轨严重磨损、钢轨焊接头大量折损等严重问题,为此花费了 10 年的时间,进行全面更换设备、整治病害,并迫使长期限速运行。

法国试验速度达 400 km/h 以上时,横向力最大值仅为 27 kN,道碴振动加速度仅为 10 m/s^2 ,仅少数接近 15 m/s^2 ,与 200 km/h 的旅客列车处于相同数量级;根据 270 km/h 的运营线路测得的脱轨系数最大为 0.6~0.8,低于法铁规定的极限值 1.2;在高速列车轴重为 17 t 时,动力稳定线路的轨道横向阻力达

126 kN。试验和运营证明,各种轮轨作用力都远低于导致线路产生塑性变形的极限值。以理论研究著称的德国,从 1970 年开始,用了 20 年、耗资 6.4 亿马克进行了高速铁路轮轨系统技术经济极限的研究,并得出结论:运用状态良好的(有碴)轨道设备,轮轨系统的极限速度可以达到 400 km/h 以上,按转向架的稳定性则可达到 500 km/h 以上。1991 年投入运营的第一代高速铁路,线路技术条件和法国高速铁路比较接近,由于荷载条件区别较大,采用客货混运模式,运营初期还比较正常。但当运营 5 年以后,轨道状态出现道碴弹性差,钢轨磨损严重,轨道几何尺寸恶化,列车横向速度增大(达 20~50 mm/s)。德国专家认为如果轨道不平顺状态继续发展,不仅将来的维修费用会很大,而且还有脱轨的危险!

经验与教训说明,轮轨系统是高速铁路运营质量乃至成败的关键。

1.2 高速铁路的空气动力学效应

普通铁路对环境的影响因素,高速铁路都存在,仅影响程度不同。空气动力学效应是高速列车在高速行驶时特有的速度效应。突出表现的两个典型特征:一是列车头尾部骤然产生高压气流,在车体周围形成微气压波,成为诸如线间距、隧道截面积等技术条件的决定性因素;二是车体与空气摩擦发生剧烈的噪声。当速度达 300 km/h 以上时,空气动力噪声在各种噪声中占主导成份,噪声强度可达到与速度的高阶乘方关系(日本专家介绍:与速度的 6~8 次方成正比),而空气动力噪声采用地面设施进行消能是不可能达到降噪效果的。

根据以上动力特性,铁道科学研究院、西南交大、长沙铁道学院等科研院所在“八五”、“九五”期间开展了大规模的理论研究,运用动力学、随机振动理论替代传统的静态、准静态理论,建立列车-轨道-路基/桥梁一体化动力模型,取得了大量研究成果,为深入认识、完善技术开发和指导试验研究打下了良好基础。

1.3 国外铁路轮轨高速技术发展概况

国外铁路轮轨系统高速技术的运用成功经验,集中体现在优化车辆技术和强化线路结构及优化几何尺寸等方面。

1.3.1 车辆技术条件的优化,主要采取车体轻量化、减轻轴重及簧下质量和加强车体流线等措施。其中对轮轨系统而言最为关键的是轴重和簧下质量。1985 年联合国欧洲经济委员会签署的“欧洲国际铁路干线协议”中规定:速度在 300 km/h 及以下的动车组允许最

大轴重为 17 t。这一规定可能源于法国标准。法国为什么采用 17 t 作为最大轴重?据 1991 年 6 月下旬“中法高速铁路研讨会”上法国专家介绍:在 1955 年高速铁路创造 331 km/h 的世界纪录时,发现设备性能达到了极限,并误认为提高行车速度的主要问题在于加强安全措施和维修工作。为此法国用了 20 多年才达到 200 km/h 的商业运营。

日本自新干线开发之初就十分重视对高速列车的技术开发。其中列车在平直道上车体振动问题是航空科研人员根据飞机在跑道上的振动特性提出来的。80 年代以后,速度竞争激烈化,但受已建成的基础设施和环境问题严重制约,促使日本不得不在优化高速列车技术条件方面下大功夫。主要措施就是减轻轴重、车体轻量化和加强车体流线型化。1991 年投入运营的 300 系动车组,设计速度由原运用车辆的 210~240 km/h 提高到 300 km/h,轴重由 15~17 t 减为 14 t;1996 年的 500 系和 WIN350,设计速度为 320、350 km/h,轴重仅为 11.2 t 和 10 t。前日本铁道研究所轨道室主任佐藤吉彦博士说:“新干线运量增加后,通过总重反而减少了,原因是轴重减轻了”。显然这也是日本新干线不断提高速度的根本原因。

德国第一、二代高速列车最大轴重为 19.5 t,货物列车机轴重 22.5 t。德国专家亦曾认为:轴重对高质量的线路不是主要问题,重要的是降低动车组的平均轴重。但在运营 5 年发生了一系列严重问题,同时法国坚持不允许德国的 ICE 高速列车进入法国高速线上运行以后,德国专家方将轴重问题列入高速列车行驶的主要障碍。这也正是促使德国将第三代高速列车轴重减为 17 t,由动力集中改为动力分散的主要原因。

1.3.2 线路技术条件的优化,主要采取强化线路结构和优化几何尺寸等措施。法国采用“轻量型”荷载和高速专线(全部开行高速列),采用高强度、高轧制精度和高焊接精度的钢轨,双块式轨枕及高性能扣件,高强、耐磨道碴及特大号码道岔,构成当今最优良的轮轨匹配体系。轨道不平顺管理标准为 2~3 mm(10~12.2 m 弦长),在 300 m 区段内轨道状态综合指数标准为 0.3~0.6 mm。运营 10 年后,维修工作量除捣固(捣固线路延长约为正线长度的 35~40%)稍大外,起道延长工作量仅为正线长度的 2~5%。

日本高速列车初期轴重及运输组织模式与法国相同,但因轨道、路基标准低,运营初期导致失败。后来结合新干线运量大、通过总重大及劳动力择业特点(极少人选择维修职业),尤其是通过 70 年代中期试铺板式轨道取得成功(据 1997 年统计,有碴轨道每年维修工作量是正线长度的 2.4 倍,而板式轨道仅为正线长度

的 3%;维修费用,有碴轨道为年均 547 万日元/km,而板式轨道仅为 18.6 万日元/km)。从而基本放弃了有碴轨道,改为全面采用板式轨道。经过近 30 年运营,显示了优良的综合效益。

德国重蹈日本覆辙之后,到 90 年代后期才采取两项重大措施:一是进一步强化有碴轨道结构,即将轨枕长度由 2.6 m 增加为 2.8 m,道床厚度由 30~35 cm 增加为 40 cm 等;二是在新建汉诺威~柏林和科隆~法兰克福两条新线时,推广采用了无碴轨道。强化程度甚至超过日本新干线。

2 我国高速铁路需深入研究的轮轨系统技术问题

我国未曾针对高速铁路的荷载及运营条件开展过轮轨系统技术综合研究。虽然从技术开发之初就确定了“追踪世界先进水平,一步到位”的技术政策,最高速度定为 300~350 km/h,但要实现这一目标,必须依赖于系统设备设施全面配套,与达到世界先进水平,还存在一定差距。

2.1 高速铁路轮轨技术的基本特点及主要问题分析

1997 年以前,作为京沪高速铁路预可研设计依据的轮轨系统基本条件是:运输组织模式为高中速混跑;高速列车最高速度为 300 km/h,动力车轴重 19.5 t,定员 1 000 人/列,2010、2015 年运量最大区间分别达 70 对和 80 对;中速列车为在高速线和既有线跨线运行的直达旅客列车,按韶山 8 型机车牵引,轴重 22 t,定员 1 300 人/列,上述年度运量最大区段列车密度为 54 对和 64 对。高中速列车日通过总量最大达 12 万 t 以上(超过日本新干线负荷)。

线路结构主要特点是:路基工程占全线约 64%(840 km),桥梁及高架桥占 35%(约 460 km),隧道占 1.5%(约 20 km)。全线按有碴轨道设计。各项技术标准由科研单位于“八五”、“九五”期间,在借鉴国外经验基础上研究确定。

从最初确定的轮轨技术条件,运用国外经验教训对比分析,在运输与荷载条件方面对线路而言实属集各国最不利条件于一体,并采用有碴轨道结构。还未能把这一切同轮轨系统技术上的可行性与合理性有机联系起来,对当时一些外国专家的质疑也领会不深。世行专家佑滕博士曾经指出:“高中速混跑国际上没有先例,大轴重、大列车重量对线路变形、沉降的影响如何?荷载条件与线路高标准维修质量能不能达到平衡?”。法国专家甚至说,“高中速混跑会带来一系列关键性问题。如果出了问题,肯定是你自己的问题,而不是

引进高速列车的问题”。他们所指都是轮轨系统问题。当然,由于我国技术储备少,又受试验研究条件所限,研究过程中难免会存在这样那样的问题和不足。

1997 年底,铁科院提出的《京沪高速铁路主要技术条件及成本效益分析》(CETE-2)研究报告,较为深刻地揭示了很多问题,并提出了许多重大原则的改进意见,为深入进行轮轨系统技术的研究创造了良好条件。

2.2 京沪高速铁路轮轨系统技术待研究的主要内容

京沪高速铁路轮轨系统技术条件的影响因素包括最高行车速度、运输组织、机车车辆和线路结构等众多重大问题。

2.2.1 300 km/h 与 160 km/h 匹配条件,过去只从线路平面条件方面进行过研究。有没有其他问题?估计现在也难以说清楚,更不可能用定量解释。CETE-2 建议运营初期最高速度为 250 km/h 可能是比较稳妥的。因为我国不论京沪或其他高速铁路,初期都不具备国外实际 300 km/h 那样的运营和技术合理匹配的条件。

2.2.2 运输组织主要是跨线中速列车问题,CETE-2 建议采用专用机车牵引,技术条件较 SS8 有所改善。但从轮轨接触条件,尚应对跨线中速列车的数量及其在既有线上的运距等适当加以限制。因为中速机车车辆技术条件毕竟存在问题还较多。

2.2.3 关于高速列车实行下既有线延伸运行,这是法、德等国改善服务质量的成功经验。但法、德等国自 70 年代以后,对凡有直通旅客列车运行的既有线,均已按 160~200 km/h 完成技术改造,包括改造平面、加强轨道、更换道岔、强化路基基床表层等,德国还规定严寒地区路基必须设防冻层。即使如此,法国 TGV 高速列车最初在东南部曲线较多的既有线上运行后,发现轮缘磨耗严重,每走行 6 万 km 便需镟轮,直到后来加装了轮缘润滑装置才有所好转。考虑德国 ICE 翻车就是发生在既有线上,同时结合我国既有线条件技术状况及客货运量强度大的实际,实行高速列车下既有线运行,应对既有线条件进行认真调查研究与评估。

2.2.4 机车车辆方面,无论引进还是自行研制,都应充分考虑京沪高速铁路高中速混跑和运量人两个基本特点,严格控制轴重和簧下质量,加强对跨线运行的列车车轮的磨损监测,避免磨损的车轮对线路造成破坏(日本试验显示:车轮擦伤长度为 50 mm 和 70 mm 时,在 200 km/h 条件下,道床振动加速度是无擦伤车轮的 2.7 倍和 4.3 倍)。

2.3 线路结构几个需进一步研究的问题

2.3.1 关于轨道结构类型。CETE-2 建议:“正线路基上应铺设无碴轨道”。按这一建议设计,京沪高速铁路铺设无碴轨道的长度将达 500 km 左右,占正线总长约 38%,与原设计相比,算得上是一项技术原则的重大改进。

为什么要采用无碴轨道?这在国外也曾引发过很多争论。很多外国专家在技术交流时也很慎重。如 1996 年 8 月下旬在《中国京沪高速铁路桥隧设计参数建议值》国际评审会议(6 国 7 位专家参加)上,多数专家所提出的意见是针对轨道和路基沉降如何改进的问题。虽然“建议值中没有无碴轨道内容,但荷兰专家的发言内容几乎全部都是无碴轨道,并列举了板式轨道 10 大优点,同时又说,荷兰对两种轨道类型也存在争论;1998 年 5 月在中、德、法联合专题研讨会上,德国专家竭力推荐设计运用“生命周期”(综合考虑造价、运营和维修成本的评价方法)概念,对有碴轨道和无碴轨道进行比选,结论并明显倾向推荐无碴轨道。

1999 年第一期《铁路工程师》(中文版)发表了德国工学博士 Edgar Darr 的“轨道结构形式的比较:有碴轨道和无碴轨道”文章中就两种轨道类型作了如下评述:

“随着有碴轨道结构在高速列车荷载多年作用后磨损现象的趋严重,而无碴轨道结构却能保持几乎不变的使用状态;

在评价轨道结构的质量时,最重要一点是所建造的高水平的轨道几何质量,在运营荷载作用下能否长久保持。无碴轨道结构在这一方面具有决定性优势;

为了评估结构的稳定性,至少要经过 1.5 亿 t 的通过总重和几个夏-冬周期的运营时间才能得出结论;

一种能满足高速运输需要的所谓重型有碴轨道,其造价比值会变得对无碴轨道更为有利;

目前已认识到,有碴轨道在长期的高速列车荷载作用下已达到承载能力的极限;

鉴于有碴轨道在高速条件下出现的日益严重的磨损现象,德国铁路决定在未来的快速铁路线上将基本采用无碴轨道结构”。

可以认为,以上是德国专家从运营教训中作出的最重要的总结之一,也可以说是通过运营实践检验以后,对过去关于轮轨系统理论研究结论的修正。不过前提应该是在德国的轮轨系统技术条件下,不应包括法国技术在内。

2.3.2 在轨道基础——路基沉降问题上值得研究,主要是“工后允许沉降 10 cm”问题。应该明确:10 cm 的

沉降是否能满足轨道标准的维修质量要求?高质量高速行驶的关键在于轨道的平顺性和动刚度的均匀性,路基面不应发生塑性变形,10 cm 的沉降、尤其是不均匀沉降会产生何种影响?沉降分析计算的可靠度如何?同时应特别指出:允许沉降 10 cm 系采用日本新干线 70 年代制订的路基规范。可是,日本自从新干线运营初期吃够了路基问题的苦头(东海道新干线路基连同加固、整治病害投资比桥梁还贵),后来修建新线时大量采用高架桥替代路基(东北、上越新干线路基仅占 5%和 1%)。据佐藤博士介绍,日本新干线路基沉降,现在是按不超过 2~3 cm 控制。说明 70 年代规定的“允许沉降 10 cm”,日本已不再采用,实际上也已不需要这一规定。

2.3.3 欧洲各国都对路基进行过长期研究,已取得丰富的运营经验,并通过国际铁路联盟(UICS 标准)将技术条件达到基本统一。德国 DS836 规范中规定:“土路基和基础的沉陷尽可能在上部建筑铺设和线路运营前消除”;“路堤轻度沉陷差(指 10 m 长度内为 2 cm 的沉陷)应在轨道一系列维修措施中消除”;对软弱粘性土层、抗剪强度不足的地基规定采用换填、打桩、深层振动和振动捣固夯实等措施。并指出,计算设计路基沉降值的准确率为 50%;而深层软弱地基的桩基(钢、混凝土或木桩),则由土壤的侧压力来支承荷载。从上述规定可见,一方面对沉降要求是严格的,但另一方面对深层软弱地层的地基加固措施的可靠度并没有确定,也未规定允许沉降值。

1996 年针对高速铁路发生的问题,德国通过专家会议讨论,提出采用钢管桩、注浆松土桩、铸铁桩等穿透软弱地层达到有承载能力的地层。即将规范规定的摩擦桩改为支承桩,达到切实控制沉降。此法在柏林~汉诺威新建高速铁路中应用。

路堤的地基应有足够的承载力、压实到位、排水设计合理,除桥头一定范围需特殊处理外,一般地段还应考虑路堤自身沉降(据分析自身沉降约为路堤高度 0.1~0.5%)。自身沉降量大部分可在施工期间(一般指 6 个月以上)完成。因此当路堤高度不很高时,工后沉降一般不会成为有害沉降。

从以上日、德对路基沉降采取的措施可见,路基沉降既不是单纯路基技术问题,也不是单纯的经济问题,主要是满足轨道技术条件的要求。其次,日、德两国的措施相比,日本采用高架桥的方式对控制沉降效果更好。另外,按照上述措施,只需设计时尽量控制路堤高度和加施工质量管理,工后沉降实际完成可以控制在极度小的、对轨道无害的范围,甚至有可能为在路基上

(下转第 64 页)

去了高速线的广泛受益性,减少了建设高速线的作用和意义,而既有线仍需承担约 70%的跨线车和短途客运,形成不能实现高速线与既有线客货分线运行的局面。高速线不应是“贵旅线”,它应具有广泛受益的宗旨,并提高自身的生存能力。反复探讨运输组织模式的意义也就在于此。

3.4 初步结论

以上分析,未来的京沪高速线上将运行时速为

300 km、200 km 和 160 km 三种基本速度级的旅客列车将是客观的需要。随着高速铁路网的逐渐形成和既有路网的改善,高质量高速度的客车车辆大量生产和普及,高速线上必将逐步减少时速 160 km 和 200 km 客车的行驶数量。高速列车也将逐渐驶离高速线进入既有路网,并逐步扩大其走行范围,达到如欧洲一些国家高速列车兼容于高速线和既有线。实现这个过程在我国需要较长时间,这是中国高速铁路的特点之一。

EXPLORATION ON SEVERAL PROBLEMS FOR JING-HU HIGH SPEED RAILWAY

CHEN Ying-xian

China Railway Fourth Reconnaissance and Design Institute

Abstract: Combined with the situations of construction of high speed railways in Japan, the paper analyzes the era's background of construction of Jing-Hu high speed railway in China. The standards for construction of Jing-Hu high speed railway are proposed, and the transportation organization mode for Jing-Hu high speed railway has been expounded further and explored.

Key words: high speed railway; construction standards; transportation organization

(上接第 68 页)

铺设板式轨道制造了条件(据日本新干线规定;铺设板式轨道的路堤,在铺设轨道板后,路基积累沉降量应小于 30 mm)。

3 结束语

安全是高速铁路的生命!在现代科技特别是电子、信息技术已高速发展条件下,轮轨系统技术已成为确

保高速铁路行车安全的关键。建议:深入研究轮轨系统技术。着眼于研究我国技术发展政策和最高速度、运输组织、机车车辆技术、线路结构技术等各项技术原则与标准的系统配套;对我国客运特点应从轮轨技术可行性出发,鉴于初期具有运营试验性质,各项运营目标不宜走得太高;自行研制设备应立足于按高速技术要求,尽快促进制造、材料工业上新水平;认真总结秦沈客运专建设经验,利用已有条件加强各种试验。

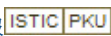
SEVERAL TECHNICAL PROBLEMS WHICH SHOULD BE RESEARCHED DEEPLY CONCERNED WITH WHEEL/RAIL SYSTEM OF HIGH SPEED RAILWAYS IN CHINA

QU Xiao-hui

China Railway Third Reconnaissance and Design Institute

Abstract: The technology of wheel /rail system for high speed railways is a key to guarantee high speed running safety of trains. The influence factors for technical condition of wheel/rail system are; highest running speed, transportation organization, locomotives and cars, track structure, etc. These main problems should be researched deeply. Combined with the situations of high speed railways in Japan, Germany, etc, the paper proposes the problems existing in the design and operation works, provided as reference to set new tasks for the research.

Key words: high speed railway; wheel/rail system; technical problem

作者: [屈晓辉](#)
作者单位: [铁道第三勘察设计院, 天津, 300142](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2003 (1)
被引用次数: 6次

本文读者也读过(8条)

1. [冯晓红](#) [轮轨系统动力学分析的并行计算研究](#)[学位论文]2003
2. [朱剑月](#), [张艳](#), [ZHU Jianyue](#), [ZHANG Yan](#) [轨枕吊空对轨道结构动力性能的影响](#)[期刊论文]-[中国铁道科学](#)2011, 32 (3)
3. [黄继雄](#) [加装扣环机车车轮的力学行为研究](#)[学位论文]2006
4. [王开云](#), [司道林](#), [陈忠华](#), [WANG Kai-yun](#), [SI Dao-lin](#), [CHEN Zhong-hua](#) [高速列车轮轨动态相互作用特征](#)[期刊论文]-[交通运输工程学报](#)2008, 8 (5)
5. [陈泽深](#), [王成国](#) [完整的车辆-轨道系统动力学研究是铁路发展的迫切需要\(1\)](#)[期刊论文]-[铁道机车车辆](#)2004, 24 (2)
6. [陈泽深](#), [王成国](#), [王永菲](#), [CHEN Ze-shen](#), [WANG Cheng-guo](#), [WANG Yong-fei](#) [高速机车车辆动力学模拟中的轮轨接触模型](#)[期刊论文]-[铁道机车车辆](#)2005, 25 (1)
7. [张曙光](#), [Zhang Shuguang](#) [高速列车速度与技术](#)[期刊论文]-[中国铁路](#)2010 (12)
8. [王俊彪](#), [李群仁](#) [高速铁路系统实验室的建设与发展研究](#)[期刊论文]-[中国铁路](#)2009 (11)

引证文献(6条)

1. [孙常新](#), [刘桂香](#), [梁波](#) [基于有限元方法的铁路路基动力响应场分析](#)[期刊论文]-[路基工程](#) 2008 (2)
2. [孙常新](#), [邢矿](#), [姜彤](#), [梁波](#) [铁路路基动力响应的分布规律研究](#)[期刊论文]-[华北水利水电学院学报](#) 2007 (4)
3. [孙常新](#), [刘桂香](#), [孙志高](#), [孙志骅](#) [浅析铁路路基动力响应的场分布及影响因素](#)[期刊论文]-[甘肃科技](#) 2007 (6)
4. [张碧](#) [轨道随机不平顺的数值模拟](#)[期刊论文]-[路基工程](#) 2008 (6)
5. [张碧](#) [高速铁路路基动力响应计算中列车荷载的模拟](#)[期刊论文]-[建材技术与应用](#) 2010 (11)
6. [龙科](#) [客运专线高速车辆部分技术标准的分析和建议](#)[期刊论文]-[铁道技术监督](#) 2005 (12)

引用本文格式: [屈晓辉](#) [我国高速铁路轮轨系统尚应深入研究的几个技术问题](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2003 (1)