

轨道力学 及 轨道工程

(美) A.D.Kerr 主编

中国铁道出版社

轨道力学及轨道工程

(论文集)

(美) A.D.Kerr 主编

上海铁道学院轨道教研室 译

中国铁道出版社

1983年·北京

内 容 简 介

轨道力学是一门重要的学科。它的任务是为改进轨道及机车车辆，使之具有可靠的工作性质，以及为轨道制定经济合理的设计、施工及养护方法提供理论基础。本文集收集了涉及轨道结构各个方面的论文计17篇。内容包括：高速轨道结构及有关技术问题；轨道力学模型分析及轨道受力的稳定性问题；轨道噪声问题；钢轨的力学和断裂问题；道床力学问题；扣件力学问题等等。内容比较广泛，对于我国铁路轨道的研究工作，具有一定的指导和参考价值。

本书可供从事轨道工程的研究人员、工程技术人员、大专院校师生、研究生参考用。

Railroad track Mechanics & Technology

Edited by Arnold D. Kerr

Pergamon Press. 1978.

轨道力学及轨道工程

上海铁道学院轨道教研室译

中国铁道出版社出版

责任编辑 陈 健 封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168 $\frac{1}{4}$ 印张：13.25字数：324千

1983年3月第1版 1983年3月第1次印刷

印数：0001—2,000册 定价：2.40元

译者的话

铁路轨道力学及轨道工程国际学术讨论会于1975年4月21日至23日在美国新泽西州Princeton大学召开。这次会议由美国联邦铁路局和Princeton大学联合举办。会议召集人是Princeton大学的A.D.Kerr教授。参加会议的有来自西德、日本、法国、英国、荷兰、加拿大、奥地利及美国的铁路轨道专家。会上宣读了有22位专家参加编写的17篇论文，并进行了讨论。论文的内容非常广泛，包括高速行车轨道的受力及有关设计及施工方面的技术问题，轨道承受温度力及纵、横向力的稳定问题，轨道动力学的分析模型问题，轨道噪声问题，钢轨力学问题和断裂问题，道床力学问题，扣件力学问题等等。会议开得非常成功。会后由A.D.Kerr教授将这次会议上宣读的17篇论文汇编成集，交由美国Pergamon书局于1978年出版正式发行。

本书由上海铁道学院轨道教研室组织力量翻译。全书由童大塏、孙琦二人负责审校，由于受业务水平和外语水平的限制，一定有很多不当甚至错误之处，敬请广大读者批评指正。

一九八一年

序 言 (摘译)

最近公众和联邦政府对铁路的再度重视,促使我们在不同学科的科学方面进行不断的努力,使铁路运输的安全和效率得到进一步的保证和提高。

铁路轨道力学是一门重要的学科,它的任务是为改进轨道及机车车辆,使之具有更可靠的工作性能,以及制订经济合理的养护方法提供理论基础。它的重要性是不言而喻的,因为铁路轨道目前仍然是限制行车速度的主要原因之一,同时轨道的养护费用,对很多铁路来说,仍然占有很大的比重。

长期以来,铁路轨道一直是限制行车速度的一个主要原因,在十九世纪中叶蒸汽机车投入正常使用之后基本上就是这样。嗣后机车的迅速改进,导致行车速度和轮重的不断提高和加大,反过来又对铁路轨道提出不断增长的质量要求。目前很多美国铁路都拥有构造速度为90英里/小时的机车车辆,但很少几段轨道能在这样的行车速度条件下长期使用。这一情况在其它一些国家诸如美国、苏联、日本、法国和西德基本上相同。

在上一世纪,纵向轨枕轨道和横向轨枕轨道都在使用,但后者占其中的压倒多数。横向轨枕原先都是木制的。很多铁路也有使用钢枕的。在过去二十年内,预应力混凝土轨枕不断应用于国外很多铁路,但在美国,并没有被广泛应用。

第二次世界大战以后,全世界很多铁路都铺设了无缝线路(焊接长钢轨轨道)。这一新技术避免了在结构上削弱轨道的钢轨接头。可以预期,无缝线路能减少轨道和机车车辆的养护费用,并降低能量消耗。但是,彻底消灭钢轨接头,会增加夏季中轨道臃曲和冬季中钢轨断裂的可能性。

为适应轴重的增加,钢轨断面正在不断增大,轨枕间距也在

减小。但是，减小轨枕间距不能超过一定限度，钢轨断面也不能无限制增大。因此，最近正在设法改用一块连续的钢筋混凝土板，以代替原来的单根轨枕，从而从根本上消灭轨枕间距。采用这一设计，钢轨用锚固在混凝土板中的扣件加以固定。可以预期，这种轨道将明显降低它的养护工作量，行驶高速列车时尤其是这样。

但是，由于修建这种新型轨道费用高昂和存在一些有待解决的技术问题，很多铁路正在努力提高横向轨枕轨道的质量，以适应高速重载列车运行的需要。

轴重的迅速增加，特别是美国已开始使用 125 吨重车，使钢轨磨耗加剧和钢轨伤损增加。这一情况由于存在种种有待解决的技术问题，而向人们提出了轴重不断增长是否经济的问题。

铁路轨道的发展主要是依据不断摸索，反复实践而取得的。随着轴重和行车速度的增加和轨道结构的改变，设计工程师需要对每一次改动对轨道响应的影响，有一个深刻的了解，以便作出最合理的设计。而负责使用和养护轨道的铁路工程师也需要这种知识，以便更安全和更经济地使用它们。铁路经济人员也要知道每次改动所需要的投资，以便对所经营的业务进行合理的核算。

在缺乏合理解决这些问题方案的情况下，召开一次有国内外轨道专家参加的会议，将是非常有益的。

这次学术讨论会的目的，是在有时代意义的轨道力学及轨道工程领域里，提出一些技术发展水平的述评，以补充目前正在进行的研究工作，并提供一个讲台，使铁路工程师及研究工作者们有机会对这一领域里的新发展和老大难问题交换意见。为此，我们邀请了很多专家提出他们各自专业领域里的论文。他们在铁道工程及科研方面的丰富经验，大大提高了这次会议论文和讨论的质量。

这次会议的技术论文内容包括高速行车轨道（横向轨枕轨道和板式轨道）的技术问题，轨道承受温度力及纵、横向力的稳定问题，轨道动力学问题，钢轨的力学问题和断裂问题，道床的力

学问题等等。所有宣读的论文以及正式讨论中的有关内容，均已收入本论文集之中。

美国Princeton大学教授
会议召集人，论文集主编
A. D. Kerr

目 录

- 一、高速铁路的轨道结构
..... J.Eisenmann[童大坝译] (1)
- 二、高速铁路上轮载变化的原因及其影响
..... Y.Sato, Y.Satoh[童大坝译] (25)
- 三、超高速条件下铁路轨道的受力及工作状态,
SNCF (法国国有铁路) 在今后高速铁路线
上 (行车速度为200~300公里/小时) 所采用
的标准
..... A.Prud'homme[童大坝译] (43)
- 四、横向力对轨道移动的影响
..... C.O.Frederick[孙琦译] (78)
- 五、受阻热膨胀条件下铁路轨道的横向臃曲
..... A.D.Kerr [毛经权译] (114)
- 六、轨道-道床纵向和横向阻力的测定
..... P.Dogneton [毛经权 王午生译] (143)
- 七、高速铁路有碴轨道动弹性模量的最新研究
..... F.Birmann[毛经权译] (172)
- 八、轨道结构噪声测试和评价方法的现状
..... L.Steinbeisser[孙琦译 李扬斌校] (199)
- 九、铁路轨道动力学分析模型的发展
..... D.R.Ahlbeck等 [童大坝译] (215)
- 十、美国预应力混凝土轨枕的发展情况
..... J.W.Weber [孙琦译] (241)
- 十一、混凝土板式轨道钢轨扣件的力学问题
..... B.Bramall [冯洁明译] (260)

- 十二、铁路钢轨的可靠性估算
..... R.K.Steele [吴觉波译] (281)
- 十三、轮-轨接触应力问题
..... B.Paul [寿采和译] (302)
- 十四、钢轨断裂力学简述..... D.H.Stone[吴觉波译] (332)
- 十五、铁路道碴的选择和性能
.....G.P.Raymond等[刘惠明 赵谷明译](349)
- 十六、道床力学问题的探讨
.....K.Klugar[赵谷明译] (370)
- 十七、铁路道床在重复荷载条件下的变形
..... M.J.Shenton[王午生译] (391)

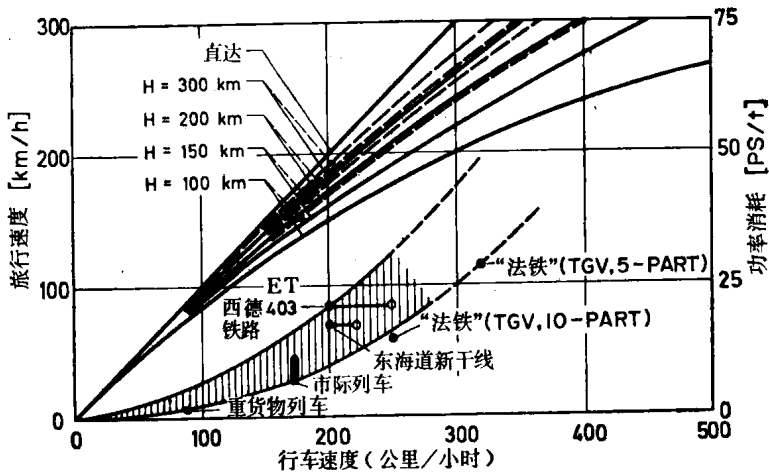
一、高速铁路的轨道结构

西德慕尼黑工业大学

地面运输工程研究所教授 J. Eisenmann

1. 前言

世界各国已经完成或正在进行的大量研究工作及实物试验，使我们有根据地认为，对轮轨体系来说，每小时250~300公里的计划速度，在技术上和经济上都是可能的。因此，根据停站距离的不同，旅行速度可以达到200~250公里/小时（见图1—1），使一段600至800公里的旅程，能在不足三小时内完成。这样，每吨列车重量的设备功率消耗将小于20~25马力，或者是每座位20马力；对一架飞机来说，则是每座位200马力。



停站、加速、减速及误点增加时间——10分钟，
 5分钟， H = 停站距离。

图 1—1 行车速度对旅行速度及功率消耗的关系

高速行车要求轨道上弹性铺设的钢轨有一个正确的线路方向和较低的养护费用。本文在讨论一种经过改进的有碴轨道的同时，也将讨论一种铺设在刚性路面上的轨道结构即具有能正确安装钢轨的轨道结构。这种轨道结构，根据试验期间所积累的经验来看，养护费用很低。在下面介绍的第一部分中，将说明有碴轨道存在的问题，以及结构改进的可能性，随后将讨论一种采用混凝土路面板的轨道结构。本文所述都是近年来慕尼黑工业大学地面运输工程研究所的研究成果。

2. 有 碴 轨 道

传统的有碴轨道上浮铺的轨排，随着行车速度的提高，对养护工作提出日益增高的要求。这是因为，轨道要有一个正确的方向，以及随着行车速度的提高，轨道应力也将不断增加，从而导致道床内部颗粒的大规模再分布和轨枕支承条件的迅速破坏。与此同时，轨排将下沉15至20毫米。根据行车速度和列车类型的不同，每通过10至50百万吨运量后，需要进行轨道的检修，借助起道作业把轨道恢复到原来的位置[1,20]。

为了提高行车速度而提出的更高要求，可以通过采用重型钢轨，尤其是通过加大轨枕支承面积（见图1—2）而得到满足。可是，这些尝试会受到结构方面的限制。对标准的DB（德意志联邦铁路）轨排来说，目前每米轨道长度的支承面积为8,700厘米²，通过改用长280厘米、宽33厘米的轨枕，可增加到12,000厘米²。这样可以使道床压力减少22%*[2]。还可以在钢轨扣件上增加一块软橡胶垫板，使之得到进一步的显著改进。在德意志联邦铁路 Bielefeld~Hamm 间一段专门为无碴轨道设计铺设的B70S型混凝土轨枕（见图1—3）线路上，高速行车试验指出，轮对的作用有所改善，同时轨道的养护工作量也有明显的降低[3]。作为对比，改用UIC60型重轨（120磅/码）后，道床应力较长期

* $(8700/12,000)^{2/4} = 0.78 (-22\%)$ ，这对单独轮载是正确的。

对新线来说，有碴轨道在隧道内部及桥梁上的状态是非常重要的，因为此时道床支承在一个刚性的基底上。钢轨及道床荷载分布的变化，将在道床内部产生较高的应力，并在运营条件下不断发生状态的变化。在东海道新干线上，已经观察到这种影响。在道床及刚性支承间铺设弹性垫层，就完全有可能使钢轨及道床的荷载分布得到改善。在这一领域里，还有很多研究工作要做。

根据在营业线上取得的大量测试资料，轨道应力及轮载（特别是主动轮轮载）的动力变化，随行车速度的增加而增大。当行车速度为200公里/小时时，用数学上定义为标准偏差（即均方差）来表示的离散程度，将是低速时的二倍。对良好状态轨道的量测结果指出，低速时的变异系数（标准偏差对平均值的比值）为10至20%，而当时速为200公里时，则为20至40%〔6, 7〕。对相当于三倍标准偏差的99.7%统计可靠性来说，当时速为200公里时，车轮动荷载的峰值一方面将增加一倍，另一方面则降低为零。这将有助于产生轮对的不稳定运动，即把轮对在直线上自然出现的正弦运动，转变成轮缘对钢轨的强制接触。

轮载及轮载波动的影响，可借助于AASHO道路试验中根据经验确定的响应特征，用附录1推导的关系式加以估算。其结果将是轮载及轮载动力波动对轨道状态变化的一种量的说明。这一说明对给定的轨道结构是正确的。当轨道结构变更时，例如钢轨重量或轨枕类型改变时，则可根据轨枕底部道床压力的不同进行换算。这里也使用四次方，得出一个换算系数 $(\sigma_{z2}/\sigma_{z1})^*$ 。式中 σ_{z2} 相当于轨道结构变更后的道床压力；道床压力可用Zimmermann法〔6〕进行计算。当道床压力减少22%时，养护费用将降低 $[100 \times (1 - 0.78^4)] = 63\%$ ，相应的荷载通过系数将提高 $[(1/0.78)^4 \times 100 - 100] = 170\%$ 。

应用这一关系式的前提是轨枕底部道床压力不超过容许值。假定道床面承受均布压应力，根据实验结果及现场经验，其值应不超过3.0至4.0公斤/厘米²，随通过荷载的性质而异。与此同时，也必须考虑到列车在曲线上行驶时由于轮载的再分布而增加的压

力。如假定只承受静载，其相应的容许道床压力大致为1.8至2.4公斤/厘米²。计算道床压力时，应取最不利的路基面条件。考虑到这一点，可假定路基面的反力系数为15至20公斤/厘米³，相当于一个石质或冻结的路基面〔4〕。

附录1提出的理论研究指出，当轮载动力波动的标准偏差为常值时，16吨轴每通过一次，在其对轨道状态的变化上，相当于18吨轴通过 $6.55/10.50 = 0.62$ 次。轮载的变化仍然是十分重要的。这样，当轮载动力波动的变异系数从0.15增为0.30时，对轨道状态的最终影响系数将增加一个倍数 $1.56/1.14 = 1.36$ 。而当变异系数从0.20增为0.40时，这个倍数将是 $2.04/1.24 = 1.65$ 。由此可见，轮载动力变化的离散程度对轨道状态破坏累进增长的影响是明显的。因此，当行车速度提高到200公里/小时，使轮载动力变化的变异系数增加一倍时，车轴每通过 $1/1.36 = 0.74$ 次至 $1/1.65 = 0.61$ 次，对轨道状态破坏的影响和低速时车轴每通过一次的影响完全相同。如果把高速行车所要求的轨道正确方向考虑在内，从而需要更经常地检修轨道时，那么，在200公里/小时速度所出现的轨道方向的变化，仅能依靠把轴重从18吨减为16吨方能得到部分补偿。如有可能，应同时设法减少高速行车时车辆轮载的动力变化。

附录1中推导的关系式，也可以用来评价不同类型列车对轨道状态破坏的影响。因此，如果我们假定轮载动力波动的变异系数为常值，那么由一台轴重为19.3吨的六轴机车及八辆轴重为12吨的客车组成的列车，和轴重为14.7吨的32轴动车组组成的列车是相当的。两者具有相同的座位。由此可见，机车牵引列车和轴重相同的动车组列车相较，前者具有相对有利的性能是明显的。在轴重为19.3吨的机车作用下的道床压力，对于线上使用的标准轨道来说（UIC60型钢轨，I型木枕或B70型轨枕），较上述的容许值3公斤/厘米²为小。此外，评价不同列车类型时，导向力也是十分重要的。

3. 刚性路面上的轨道结构

采用刚性路面板和弹性铺设的钢轨，可以消除有碴轨道绝大部分的非线性变形特征。有碴轨道的非线性变形，是因为轨枕在道床中铺设不密贴而产生的，并随通过荷载的增加而不断发生变化。数值上，这种非线性变形可用轨枕下面的空隙（原点位移值）来描述，或对不受力的钢轨扣件用钢轨和轨枕间的空隙来描述。在轨道变形性质与动轮载之间，还有一个需要继续研究的相关规律。除那种无可避免的轨道不平顺外，轮对簧下质量也在这里起相当大的作用。

根据前已进行的研究和所考虑的问题，对计划速度为 250 公里/小时以上及运量很大的铁路，必须采用一种不用道床的新型轨道。对高速旅客列车及低速重货物列车混合使用的铁路，采用这种无碴轨道即使在低速条件下也是恰当的，这样既可减少对轮对稳态运行起主要作用的轮载动力变化，同时也可形成一条基本上免除维修的线路。这里精心设计是前提，并且要有一段结构上得到全面考虑并能防止冻胀的路基。在支承体系的任何一点上，受列车荷载、温度变化及含水量影响而产生的材料内部应力，不容许超过重复应力条件下的抗拉强度。此外，这种结构应具有非常简便地调整其垂直及水平方向的可能性。施工中出现的误差以及嗣后出现的其它不平顺，都能由此而得到整正，这种整正应能在不长期封锁线路的条件下进行。更为重要的是，扣件上所有易受磨损的部件，都能非常简便地进行互换，这对弹性中间垫层尤为重要。

根据一些国家对各种类型无碴轨道所进行的实物试验〔8,9,10,11,12〕，这种新型的轨道结构可推荐供今后铁路使用。现有的铁路施工经验以及四十多年的公路施工经验指出，适应高速行车的铁路轨道，能通过采用一种连续配筋混凝土支承板而得到完全满足。我们可以把它分为两类，一类是不出现裂缝的结构，另一类是出现裂缝受控制的，并且是具有弹性联接的结构〔13〕。对

第一种类型，配筋率根据混凝土质量的不同，为其断面积的0.7至0.9%，而第二种类型则为0.3至0.4%。同时，裂缝出现受控制的结构，还能避免在扣件附近出现裂纹，后者会导致轨枕早期损坏。此外，应用连续配筋能保证路面板底部与承重层之间的结合，从而提供特别有利的支承条件，使之成为一个经济的结构物[14]。

这种支承体系应为一种多层结构，其弹性模量从上到下逐步减小，以消除混凝土路面中经常出现的翻浆冒泥，从而避免路面板支承条件的变更以及由此产生的损坏。多层结构的优点，还在于能使连续配筋混凝土板的厚度进一步减少，后者根据钢轨铺装型式的不同，可限制为14至20厘米。因此，可以把取决于混凝土路面板厚度的钢筋用量定得很低，这是经济上取得合理解决的一个重要前提。

作为连续配筋混凝土路面板的承重层，可选用经过胶结料处理的、弹性模量为100,000公斤/厘米²、抗压强度为50~60公斤/厘米²的砾石层。这种经胶结料处理的砾石层尽管抗压强度很低，但和高标号混凝土相比，具有相当高的弯曲抗拉强度(DIN1048, 单独加载试件)，约为其抗压强度的1/4至1/5，而高标号混凝土则为其抗压强度的1/6至1/7。确定经胶结料处理的承重层厚度时，应使超过容许值的弯曲拉应力既不在混凝土板中出现，也不在承重层中出现。

对那种易发生冻胀的底土，考虑到它具有可能导致轨道方向变化的冻胀以及随之而产生的破坏，应在混凝土路面板及经胶结料处理的承重层之间，铺设一层隔热层。根据铁路及公路施工中长年积累的经验，应用聚苯乙烯多孔混凝土(Styropor-concrete)筑成的隔热承重层[15]最为适当。它具有10,000至15,000公斤/厘米²的弹性模量和10公斤/厘米²的弯曲抗拉强度。这一隔热层的厚度，应根据热力学要求进行计算。按照Behr的意见，对德国境内的气候条件来说，17至20厘米已经足够[16]。

对钢轨的弹性铺装，曾经研究过如下一些结构上的可能性：

——单独点支承[8,10,11,12]。在一块传力垫板或在一根添

加轨枕下增铺橡胶垫板,这块橡胶垫板即使在低温时,也要有3至4吨/毫米的弹簧刚度。从而使车轮开始转动时出现的不平顺能得到适当的缓冲,而支点间的次挠度与假定钢轨为弹性铺装时的挠度的比值,则小到几乎可以略去不计。

——钢轨的连续支承〔9〕。这可以通过在钢轨底部铺设一块连续的橡胶垫层来达到。对于这种结构型式,应在两钢轨之间,以适当的间隔设置专门的泄水孔,并和地下排水沟连接,以排除地表水。此外,还必须要有就地焊接钢轨的专门设施。

对那种单独支承的结构型式,可分为把单独支点直接埋置在混凝土路面板中和在工厂中已经装好扣件的添加混凝土轨枕等两种。添加的轨枕有可能使轨排在工地上更简便地安装起来。这样,安装扣件时所必需的钻孔及胶粘作业,可以全部免除。轨道的正确轨距和钢轨的正确内倾度是特别重要的。轨枕的正确垂直位置,根据目前发展情况,可用位于轨枕顶面附近的测杆来保证。测杆可在轨排组装完毕后回收,它用标准螺杆作成,旋入埋置在混凝土轨枕上的螺纹插座之中(见图1—3)。

德意志联邦铁路于1967年在Bamberg-Erlangen铁路的Hirschaid车站上第一次铺设无碴轨道。那里使用了三种不同的预制结构体系,它们在技术上及经济上都不如就地浇注的结构〔11〕。铺设在Hirschaid车站上的轨道结构,其说明见文献〔8〕。1972年在Bielefeld至Hamm间高速试验线上的Rheda及Oelde车站上,对无碴轨道进一步作了二次全面的现场试验。

在Rheda车站设计和建造一段长640米的试验线,并进行测试,是联邦科学研究和技术部主持的轮轨体系适应范围研究计划的一个组成部分。这种轨道的结构设计见图1—4。根据对无碴轨道的现有经验,采用配备弹性扣件的B70S型预应力混凝土轨枕(DB称为B70W-V5型)供联结钢轨用(见图1—3)。在这种轨道结构上,预应力轨枕的作用是把荷载传给路面板,后者为14厘米厚的连续配筋混凝土板,并采用不出现裂缝的设计。由于施加荷载的底面很宽,路面板上的应力是非常小的。在混凝土支