

## 摘 要

为了满足社会经济发展的需求,我国铁路在既有线上已经成功地实施了五次大提速,目前正在为第六次大面积提速做准备,同时高速客运专线也在紧张有序地筹备和建设中。在高速和重载的条件下传统的有碴轨道结构型式面临着严峻地考验。这为弹性轨枕的工程应用带来了契机。

本文对弹性轨枕枕下垫板材料、物理力学性能、外观形状等进行研究和比选;从理论上对枕下垫板试样静刚度进行近似计算;提出弹性轨枕成型方案和弹性轨枕制作成型工艺流程。对制成的弹性轨枕和普通轨枕分别进行室内基础试验,通过静载和动载试验比较两种轨枕的道床横向阻力、轨枕支承刚度、轨枕荷载力矩、道床的下沉特性和枕下垫板的疲劳耐久性能。试验表明弹性轨枕的道床横向阻力完全满足无缝线路铺设的要求,其支承刚度大大低于普通轨枕,轨枕的荷载力矩也比普轨枕低,道床的初期下沉量远远低于普通轨枕。采用车辆-轨道耦合动力学理论,分析计算了弹性轨枕有碴轨道与普通轨枕有碴轨道在相同工况下轮轨系统各个部件的动力响应。对两种轨道结构的动力响应逐项进行对比分析,并对部分动力响应进行功率谱分析,同时对不同垫板刚度下弹性轨枕的动力响应和不同速度下两种轨道的动力响应也进行分析。分析表明弹性轨枕不仅能减少道床的振动加速度和振动能量,而且还能降低轨道的动力响应作用频率、减少道床和路基的压应力。

以上工作表明,弹性轨枕是目前我国高速重载有碴轨道强化的一项有效的技术对策。它的工程应用不仅在既有提速线上,而且在新建高速线路上都将发挥更加重要的作用。

关键词: 弹性轨枕; 枕下垫板; 有碴轨道; 试验; 车辆-轨道耦合动力学

## Abstract

Ballasted track is a basic track structure used on the railway lines in china. To satisfy the requirements of society and economy, trains have been speed-up five times on the existing railway lines, and now the departments of railway are making preparations for the sixth. At the same time the high speed lines for passenger transport are prepared to be constructed in order. So the conventional ballasted track must be intensified for high speed and heavy haul railway line, this is a chance for the elastic sleeper.

Sleeper pads are resilient elastic pads which are mounted on the base of the sleepers. In this thesis, the material, physical performance and shape of sleeper pads are studied, the sleeper pads stiffness is calculated approximately, and how to produce the elastic sleeper is also discussed. By the contrast test it shows that the ballast lateral resistance, the sleeper supporting stiffness, the sleeper load moment, the ballast subsidence character and the sleeper pads fatigue wear capability of elastic sleeper are more excellent than these of conventional sleeper. The program is accomplished on the base of vehicle and track coupling dynamics theory. Applying this program the dynamical responses of each component in the vehicle and track system were calculated and in despite of elastic sleeper track or conventional sleeper track. These dynamical responses were be analyzed one by one for the two kinds track, also contrasted power spectral density of the part of responses, and researched the trend of all dynamical responses with the sleeper pads stiffness changed or the train speed raised. It reduces the average load on the ballast and the subgrade which axle loads are distributed over a greater number of sleepers, and reduces the direct dynamic forces and vibrations on ballast and helps prevent track subsidence. So the elastic sleeper can improve the long-term life cycle of the track structure and the ballast. Lower loads on the ballast leads to slower deterioration of the ballast from wear and breaking up. Consequently, settling of the ballast is reduce which helps prevent problems associated with track subsidence. This allows for

---

considerable savings on track maintenance costs.

The work enumerated above shows that the elastic sleeper offer excellent elastic properties for ballasted track. Ballast is subjected to particularly intense dynamic loads in bridges and civil works for high-speed lines and in the areas around switches. Applications of the elastic sleeper has proven to be an especially effective solution for high-speed and heavy-haul ballasted track.

**Keywords:** elastic sleeper; sleeper pads; ballasted track; test; vehicle/track coupling dynamics

---

# 第1章 绪 论

## 1.1 引言

随着我国社会经济的迅速发展, 铁路建设已进入了一个空前的发展时期。现代铁路运输对轨道的高平顺性、高稳定性、高耐久性的要求越来越严格。有碴轨道在长期的高速重载列车载荷反复作用下已达到承载能力的极限, 表现在碎石道床的破坏不断加剧, 可用的维修时间越来越少。为此, 不得不采取铺设重型轨和重型枕来强化有碴轨道的技术对策。这虽然有利于提高轨道的稳定性, 有利于保持轨道状态的持久均衡性, 以及有利于高速行车和既有线提速的实施, 但另一方面, 轨道刚度也会随之增大。轨道刚度过大, 只要车轮踏面或轨道表面有微小的不平顺, 轮轨相互动力作用就十分敏感, 并且随着列车速度和轴重的提高而急剧增长和恶化, 同时由此引发的轨道振动噪声, 其影响在城市周边更为突出<sup>[1]</sup>。

特别是在桥梁和隧道等刚性基础上的有碴轨道, 因道床厚度不足, 混凝土枕轨道刚度过大, 道碴粉化速率过快, 道床翻白、板结严重, 甚至道碴出现“液化”现象, 大大增加了养护维修工作量及其费用, 严重影响行车的安全与平稳性。急需寻求一种有效的技术对策, 改善和强化有碴轨道。以往虽曾采取过增大轨下垫板厚度的措施, 但尚难以得到根本性改变, 同时还会受到桥隧相连地段轨道标高的制约。

为此, 以降低有碴轨道的轨道刚度, 提高轨道弹性, 缓和列车冲击作用, 减轻道床振动, 减少道碴粉化, 防止钢轨波磨、减轻养路工作量、延长轨道维护周期和降低轨道振动噪声为主要目的, 弹性轨枕的研发与应用, 已成为当今高速重载有碴轨道强化的一个重大技术动向<sup>[1]</sup>。

日本新干线从上世纪 70 年代开始在高架桥有碴轨道上试铺弹性轨枕以取代碴下橡胶垫板, 目前正在向弹性轨枕化方向发展; 德国高速线规定在有碴桥上设置碴下胶垫, 并在格罗兹(GRÖTZ)轨道上开展过有关枕下弹性垫板的研发工作<sup>[1]</sup>。奥地利格兹耐尔(Getzner)公司研发并成功应用了性能完善、可满足特殊需要的弹性轨枕。弹性轨枕已在世界上许多国家中使用<sup>[4]</sup>。

我国自上世纪 80 年代初开始研制弹性轨枕, 并先后在沈阳局、北京局、

上海局和成都局正线钢轨接头处进行过试铺试验,取得了良好效果<sup>[5]</sup>。在此基础上,铁道部于 1995 年制订了《铁路混凝土轨枕枕下弹性垫板》标准(TB/2629-1995)。在 2004 年发布的《京沪高速铁路设计暂行规定》(铁建[2004]157号)中,又明文规定了在有碴桥上和隧道内“道碴下应铺设碴下胶垫或采用弹性轨枕”的规定。

2004 年 1 月国务院审议通过了我国《中长期铁路网规划》,提出了“扩大规模,完善结构,提高质量,快速扩充能力,迅速提高装备水平”的发展目标。规划到 2020 年,全国铁路网基本建成,营业里程将达到 10 万公里以上,客运专线、高速铁路达到 10000 公里,城市轨道交通达到 4000 公里左右,主要技术装备达到或接近国际先进水平<sup>[6]</sup>。今年是实施《中长期铁路网规划》的第二年,郑西、武广、石太、京津城际等 4 个客运专线建设项目已进入施工准备阶段,同时也是第六次大面积提速调图的准备年。第六次大面积提速后,全路时速 120 公里以上的线路延展长度将达到 22000 多公里,其中 5300 多公里将达到时速 200 公里<sup>[7]</sup>。

为适应既有线提速改造、兴建高速客运专线和城市轨道交通的客观发展需求,根据我国铁路网发展的实际情况,立足国产化,吸收国外先进经验和先进技术,增强自主创新能力,带动相关产业的发展,并为强化有碴轨道提供可靠的技术支持,本文以此为契机,开展了有关弹性轨枕的理论与试验研究工作,以期通过弹性轨枕的成型研究、基础试验、动力仿真分析等理论与试验研究,为我国高速重载有碴轨道的强化寻求有效的技术对策<sup>[8]</sup>。

## 1.2 国内外铁路弹性轨枕的应用

### 1.2.1 我国既有线弹性轨枕的应用

#### 1. 铁道科学研究院的测试结果

为比较弹性轨枕与普通轨枕有碴轨道的使用效果,铁科院曾于 1991 年对试铺在长大线和石太线上的这两种轨道进行了长期观测和动力测试,其结果要点如下<sup>[9]</sup>:

(1) 弹性轨枕轨道钢轨磨耗为 0.017mm/Mt,普通轨枕轨道为 0.029mm/Mt,约降低 41%。

(2) 弹性轨枕轨下截面荷载力矩低于普通轨枕约 5kN·m。

(3) 经试铺两年后的观测, 弹性轨枕轨道道床残余变形积累下沉量平均为 3.28mm, 普通轨枕轨道为 11.28mm, 约减少 70%。

(4) 经试铺三年后道床清筛的观测, 弹性轨枕轨道道碴粉化率为 11.59%, 普通轨枕轨道为 20.85%, 约降低 44%。

(5) 调查表明, 未铺设枕下垫板的钢轨接头一个星期要保养一次, 而铺设以后, 半年甚至一年不需进行保养。一般可减少养护维修工作量 40%, 节省材料消耗量 90%, 预计可延长线路大中修周期 3~5 年。

## 2. 西南交通大学的测试结果

西南交大曾于 1992 年对攀矿密兰线重载矿山铁路钢轨接头部位混凝土枕枕底有无枕下垫板进行了动力测试统计分析, 其结果要点如下<sup>[10]</sup>:

(1) 有比无枕下垫板轨道的轮载变动约降低 3%。

(2) 有枕下垫板的轨下基础弹性系数为 21.9MPa, 无枕下垫板为 28.6MPa, 平均约降低 23%。

## 3. 基本结论

理论研究和试铺试验结果表明, 铺设弹性轨枕尤其是在钢轨接头部位使用, 不仅改善了列车冲击振动在有碴轨道结构中的传递特性, 也改善了道床的振动响应特性, 显现出明显的隔振、减振效果。此外, 对于减轻枕底道碴粉化, 减小道床残余变形积累速率, 提高道床稳定性, 减少轨道维修工作量等都十分有利。

## 1.2.2 日本新干线弹性轨枕的应用

### 1. 研发概况

日本新干线高架桥上有碴轨道为减少养护维修工作量和降低振动噪声, 从上世纪 70 年代开始研制试铺弹性轨枕以来, 经历了由初始型—标准型—实用型—廉价型弹性轨枕的试铺试验过程, 取得了良好的效果, 目前正向着撤除碴下垫层而改用弹性轨枕化的方向发展<sup>[11],[12]</sup>。

1976 年首先在山阳新干线新神户~西明石间试铺初始型弹性轨枕。它是在既有 3T 型混凝土枕的底面和侧面的模板内注入液态氨基甲酸乙酯橡胶(尿烷合成橡胶)模压成型。试铺试验结果表明, 与其相邻区间设有碴下胶垫的轨道比较, 弹性轨枕轨道的轮载变动、轨道和结构物的振动、高架桥下的噪声、碎石道碴的粉化、轨道养护维修工作量等均有明显减少, 轨道不平顺

的发展仅为比较轨道的 1/4, 为岡山以西标准轨道的 1/2。随后又在东北新干线的小山地区、东海道正线的大高高架桥上的试铺试验, 也取得了同样期望的效果。

为此, 在充分发挥已取得的少维修化和减振降噪效果的同时, 考虑到新干线的广泛应用, 以大幅度降低成本和提高耐久性为主要目的, 又研发了标准型弹性轨枕, 并于 1985 年试铺在东海道新干线静冈地区东森下町直线高架桥上, 也取得了所期望的良好效果。

随后, 从改善新干线的环保对策出发, 为防止桥梁、隧道和道床厚度不足地段列车高速运行时的振动噪声, 以及考虑到今后大量铺设的需求, 研发试铺了实用型(4T 型)弹性轨枕, 并于 1988 年在东海道新干线名古屋地区三河安城~名古屋间下行线曲线( $R=2500\text{m}$ )高架桥上进行了试铺试验; 由于防止振动噪声效果显著, 又在名古屋地区作为减振降噪对策区间铺设了 2.8km 弹性轨枕。1989 年又试铺在东海道新干线野州地区米原~京都间上行线曲线( $R=10000\text{m}$ )高架桥上, 并作为新干线 300 系车辆行驶速度 270km/h 的试验区间。

## 2. 弹性轨枕的断面形状

日本新干线高架桥上有碴轨道弹性轨枕有 3T、4T 型和 3H、4H 型。

新干线初始型弹性轨枕是在既有的 3T 型混凝土枕的底面和侧面覆置弹性橡胶层。标准型弹性轨枕是以 4H 型混凝土枕为基础经改进制作的。实用型弹性轨枕是以 4T 型混凝土枕为基础经改进制作的(图 1-1)。为防止轨枕侧面上部道碴因振动而磨损, 改以往混凝土枕两侧面倾斜斜坡为近于垂直状; 为防止捣固杆碰撞轨枕顶部两侧隅角而做成小斜坡; 为防止列车通过时因振动与道碴的摩擦及因道床捣固作业而使弹性橡胶层剥离、损伤, 又事先将粘着弹性橡胶层部分的轨枕底部做成缺口。

近年来, 为了降低新造弹性轨枕的造价和推进既有混凝土枕的弹性化, 又开发了只在轨枕底面覆置弹性橡胶垫板的廉价型弹性轨枕。对于新造弹性轨枕可在灌注水泥灰浆的同时, 安置硫化橡胶垫板或注入尿烷合成橡胶模压成型。对于既有混凝土枕, 可在枕底钻孔用锚杆固定再生橡胶或硫化橡胶垫板, 或在枕底设置模板注入尿烷合成橡胶模压成型。

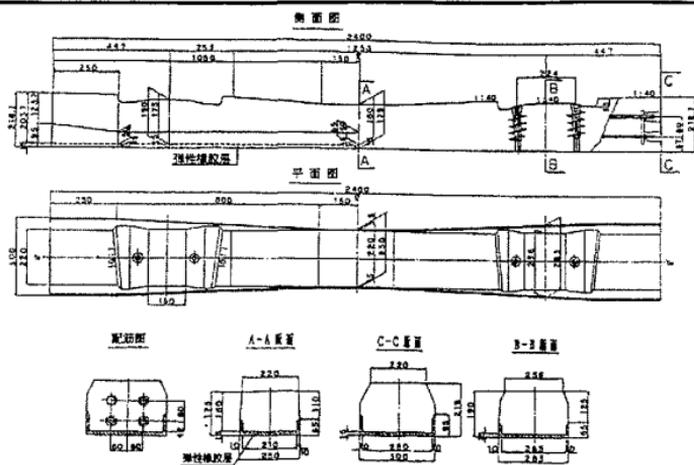


图 1-1 新干线有碴轨道实用型弹性轨枕(4T 型)

### 3. 防振橡胶层

#### (1) 防振橡胶层的形状

为尽量减少成本昂贵的防振橡胶弹性材料的用量,改以往在轨枕侧面几乎全部粘贴橡胶弹性层的作法为主要以轨枕底面为主,底层厚度 15mm,而在侧面为防止弹性层剥离而采用必要的最小高度,距枕底 65~110mm,厚度 10mm。

#### (2) 防振橡胶层的静刚度目标值

根据对弹性轨枕的制作、试铺试验和防振效果的评估认为,弹性轨枕的防振效果与道床捣固作业性两者是相互对立的,因而防振橡胶层的静刚度仍采用大致等同新干线小山综合试验线的试铺试验值,即以标准试件(100×100×25mm)静刚度 9MN/m 为标准。碴上实尺弹性轨枕的静刚度实测目标值为 40MN/m,每组扣件的轨道静刚度为 20MN/m。

#### (3) 防振橡胶材料

可供选用的防振橡胶材料有再生橡胶、硫化橡胶和尿烷合成橡胶。

经对其防振性、耐久性、量产性、经济性等的综合评价结果认为,在尿烷合成橡胶表层增设聚酯纤维的反应喷射(RIM)模塑成型方式为优,因为它抗道床碎石棱角的局部应力强(超过 3MPa),三角锥试验(80℃, 7h, 压入 10mm)无裂痕,无凹陷,防止振动噪声性能优良,使用寿命长,易于批量生

产。

#### 4. 弹性轨枕的耐久性试验

图 1-2 为弹性轨枕和普通轨枕两种轨道的下沉量与载荷重复作用次数的试验结果, 据此可见, 3Hc 型混凝土枕标准有碴轨道与各种类型的弹性轨枕有碴轨道的初始下沉量有很大的不同, 前者约为 15mm, 后者仅为 1.5mm, 相差 10 倍之多。在初始下沉结束后, 3Hc 型混凝土枕标准有碴轨道直至载荷重复作用次数达到 200 万次(相当于通过运量 47Mt)时, 仍继续有较大的下沉。而弹性轨枕有碴轨道, 在荷载重复作用次数 30 万次左右就趋于下沉曲线的渐近直线了, 直到换算通过运量达 210Mt 时, 道床下沉量仍然较小, 说明弹性轨枕的耐久性没有问题。

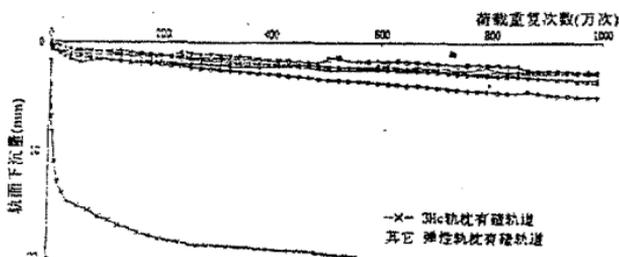


图 1-2 弹性轨枕与普通轨枕有碴轨道下沉曲线的比较

当试验结束后, 取出供试弹性轨枕, 经对采用聚酯纤维补强 RIM 模型成型的防振橡胶层的检查表明, 无压痕, 无折损, 更无剥离现象, 显示出良好的耐久性能。

#### 5. 弹性轨枕道床横向阻力试验

图 1-3 为 3 号混凝土枕和底面形状与其相同的弹性轨枕的道床横向阻力实测比较。弹性轨枕最终的道床横向阻力虽与普通混凝土枕相同, 但当轨枕位移较小时, 同一位移的道床横向阻力却比普通混凝土枕小。这是因和道床碎石相接触的防振橡胶层的弹性变形所致。

在这种道床横向阻力条件下, 通过图 1-4 给出的用能量法计算的轨温上升量与轨道横向变形的关系可知, 弹性轨枕有碴轨道最低臌曲强度的大致目标在 C 点, 与普通混凝土枕没什么不同, 但对轨道臌曲有足够储备的 A 点来说, 轨温上升量却比普通混凝土枕低。然而, 对以 3T(4T)型为基本类型构成的新干线弹性轨枕有碴轨道, 是能够确保横向位移 2mm 时道床横向

阻力值的，对于轨道臌曲稳定性没有特别的问题。

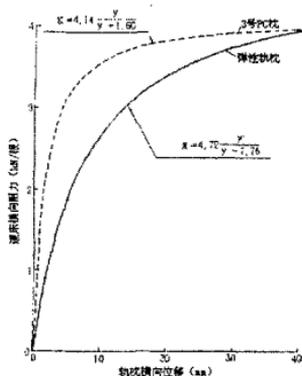


图 1-3 弹性轨枕道床横向阻力

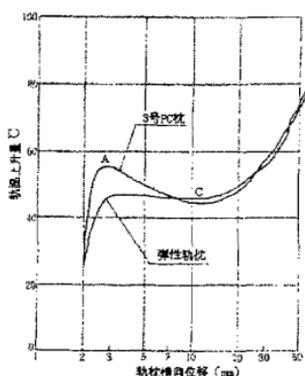


图 1-4 弹性轨枕有碴轨道臌曲稳定性

## 6. 弹性轨枕的试铺试验效果

### (1) 静冈地区的试铺效果

根据对东海道新干线下行线东森下町直线高架桥(高度约 7m)上试铺后 3Tc 型混凝土枕+碴下垫层与试铺后 3H 型弹性轨枕两种轨道减振降噪实测效果的比较可知，钢轨加速度无论是在非焊缝还是焊缝处，试铺后虽比试铺前高出 1~2dB，但道床加速度却恰恰相反，由于铺设弹性轨枕比普通轨枕约降低 7dB，而钢轨和道床的振动加速度之差，试铺前为 37dB，试铺后为 46dB，两者相差 9dB，表明道床振动水平的降低，这也有利于降低地面的振动与传播。至于高架桥下 0.3m 处的噪声级，铺设弹性轨枕后，在非焊缝处约降低 2dB(A)，焊缝处约降低 1dB(A)。显然，若铺设弹性轨枕便可撤除碴下胶垫。

### (2) 名古屋地区的试铺效果

#### 1) 地面振动降低效果

实测列车通过时两种轨道在高架桥柱傍和距高架桥 25m 处地面垂向振动级及其距离衰减效果的比较如下：

①随着列车速度的提高，地面减振效果越明显；

②地面减振效果在高架桥柱傍和距高架桥 25m 处基本是相同的，当列车速度为 200km/h 时约降低 3dB。

③地面减振效果频谱分析表明，在 10~25Hz 和 50Hz 以上频域减振效果

明显。

### 2) 轨道振动降低效果

实测列车通过时两种轨道减振效果的比较如下:

①道床振动加速度级的降低效果, 当列车速度为 220km/h 时, 非钢轨焊缝处约为 8dB, 焊缝处约为 5dB。

②高架桥中心振动加速度级的降低效果, 当列车速度为 220km/h 时, 非钢轨焊缝处约为 3dB。

### 3) 轨道少维修效果

为了解弹性轨枕有碴轨道试铺前后轨道养护维修的状态, 利用新干线电气轨道综合试验车, 对长 2.8km 的全高架桥区间(直线和 R2500m)轨道高低、轨向不平顺发展进行的调查结果可知, 每百日轨道不平顺发展平均值, 高低不平顺试铺前为 0.36mm, 试铺后为 0.25mm; 轨向不平顺试铺前为 0.33mm, 试铺后为 0.14mm, 可见, 弹性轨枕有碴轨道具有良好的少维修效果。

### (3) 野洲地区的试铺效果

对 300 系高速列车以 270km/h 速度行驶, 弹性轨枕的减振效果如下:

①地面振动降低效果显著, 即使是走行速度 270km/h 也与现行运营速度 220km/h 时试铺前的振动级相同, 甚至还低。

②在非钢轨焊缝处走行速度 270km/h 时钢轨压力约降低 10kN, 这是由于弹性轨枕的弹性使钢轨压力分散的结果。

③在非钢轨焊缝处走行速度 270km/h 时道床振动加速度级约降低 3~4dB。并且, 铺设弹性轨枕后在走行速度 270km/h 条件下的道床振动加速度级比试铺前的振动加速度级还低。

## 1.3 本论文的主要工作

有碴轨道是目前我国铁路最主要的轨道结构型式。由于我国人口多, 幅员辽阔, 仅有的铁路营业线路根本不能满足社会经济日益增长的需求, 作为铁路行车基础的有碴轨道结构一直处于满负荷工作状态。到目前, 我国铁路已经进行了五次大面积提速, 为适应经济发展的进一步需要, 铁路正在跨越式的向高速、重载方向发展。由此, 传统的有碴轨道在高速、重载条件下必须进行强化处理, 这为弹性轨枕的工程应用提供了良好的契机<sup>[13]</sup>。

日本在 70 年代开始研制弹性轨枕, 70 年代中后期在线路上进行试铺,

---

并取得了良好的效果。奥地利、德国、美国等国家现在已经将弹性轨枕产品化。而我国虽然在早期对弹性轨枕进行过初步研究，但尚未形成系统，更没有推广使用。本论文基于此基础作如下几个方面的工作：

1. 根据相关标准研制成型弹性轨枕。对枕下垫板材料、物理力学性能、外观形状等进行研究和比选；从理论上对枕下垫板试样静刚度进行近似计算；提出弹性轨枕成型方案和弹性轨枕制作成型工艺流程。

2. 对制成的弹性轨枕和普通轨枕分别进行室内基础试验，通过静载和动载试验比较两种轨枕的道床横向阻力、轨枕支承刚度、轨枕荷载力矩、道床的下沉特性和枕下垫板的疲劳耐久性能。

3. 采用车辆-轨道耦合动力学理论，计算出弹性轨枕有碴轨道与普通轨枕有碴轨道在相同工况下轮轨系统各个部件的动力响应。对两种轨道结构的动力响应逐项进行对比分析，并对部分动力响应进行功率谱分析，同时对不同垫板刚度下弹性轨枕的动力响应和不同速度下两种轨道的动力响应也进行分析。

4. 分析弹性轨枕的工程应用前景。从弹性轨枕降低道床振动加速度、减少道床和路基的压应力，有效地保护碎石道床，延缓道床的变形和破损方面结合室内试验结果和动力学性能仿真分析结果，分析说明弹性轨枕在既有提速线上和在新建高速线路上的应用前景。

---

## 第 2 章 弹性轨枕的成型研究

弹性轨枕的关键部件是枕下垫板,其材质一般为橡胶。如何将混凝土轨枕和橡胶垫板两种性质完全不同的物体合而为一,并且还能在长期的高速重载列车反复作用下保持良好的弹性性能,且垫板与轨枕结合牢固不分离,这也是弹性轨枕在成型之初必须研究的问题。为了使弹性轨枕的弹性性能尽可能地保持长久,枕下垫板材料的选择是关键所在。以往国外铁路曾经选用过硫化橡胶、尿烷合成橡胶等,但由于制作成本太高推广使用很困难,故在广泛参考橡胶材料物性及其经济性的基础上选择三元乙丙(EPDM)橡胶作为弹性轨枕枕下垫板材料<sup>[14]</sup>。在制作成型方面主要考虑了两种成型方法,一种为粘结成型,另一种为锚固成型。并通过试验比较两种成型方法在成型工艺和粘结牢固方面的优劣。

### 2.1 弹性轨枕枕下垫板技术标准

#### 2.1.1 枕下垫板技术要求

##### 1. 外观质量

枕下垫板应表面平整、边缘整齐,外观质量符合表 2-1 的规定。外观检查可用目测、钢板尺和游标卡尺进行<sup>[15]</sup>。

表 2-1 枕下垫板的外观质量

缺陷名称	要 求
缺 角	在四个角上的缺角总面积不得大于 100mm <sup>2</sup> 。
缺 胶	在两个工作面上因杂质、气泡、水纹、闷气造成的缺胶面积每处有不得大于 100mm <sup>2</sup> 、深度不得大于 1mm 的缺陷,且每块垫板缺胶不得超过三处。
海绵状物	在工作面上不允许有海绵状物;在四个角上允许有不超过缺角允许限度的海绵状物。

##### 2. 物理机械性能

橡胶材料因为是几种化学材料通过化学作用有机地结合在一起,其成分比例、化合温度、硫化时间等都会影响橡胶垫板的物理机械性能,所以对其物性必须通过试样试验严格控制。参考相关标准枕下橡胶垫板的物理机械性能应符合表 2-2 的规定。

表 2-2 枕下垫板的物理机械性能

序号	项 目		单 位	要 求	试 验 方 法
1	邵尔 A 型硬度		°	75~85	GB531
2	静刚度		MN/m	40~60	TB2629
3	恒定压缩永久变形		%	≤25	GB1683
4	拉伸强度		MPa	≥6	GB528
5	扯断伸长率		%	≥150	GB528
6	撕裂强度		N/cm	≥250	GB529
7	橡胶成份定性分析		EPDM		GB7764
8	耐棱性能	外 观	—	无龟裂	将正三角锥 90° 顶点压入 7mm 70℃、24h 热处理， 室温下放置 1h 后测定
		深 度	mm	≤4	
9	耐热性能	拉伸强度	MPa	≥4.5	GB3512
		扯断伸长率	%	≥100	
10	耐水性能	拉伸强度	MPa	≥4.5	在蒸馏水中室温下 浸渍 96h 后测定
		扯断伸长率	%	≥100	
11	耐碱性能	拉伸强度	MPa	≥4.5	在氢氧化钙饱和溶液中 室温下浸渍 96h 后测定
		扯断伸长率	%	≥100	
12	耐疲劳 性能	外 观	—	无撕裂 无剥离	TB2629
		残余压陷量	mm	≤4	

## 2.1.2 枕下垫板验收规则

### (1) 产品质量验收标准

枕下垫板的验收应按批进行。相同原材料、配方和工艺生产的枕下垫板为一批。

枕下垫板产品质量采用 GB2828 规定的正常检查二次抽样方案，以缺陷数表示批的质量。检查水平(IL)和合格质量水平(AQL)应符合表 2-3 的规定。

(2) 枕下垫板质量一致性检验由制造厂的技术检验部门进行，逐批检验表 2-3 中带※号以外的各项次。

(3) 枕下垫板交货验收，供需双方对产品质量有异议时，可从该批产品中重新抽样，由铁道部检验部门进行复检。

表 2-3 产品质量验收检查合格水平

组号	检查项目	检查水平(IL)	合格质量水平(AQL)
外形 尺寸	长度	1	6.5
	宽度		
	厚度		
缺陷	缺角	1	6.5
	缺胶		
	海绵状物		
物 理 机 械 性 能	硬度	S-1	2.5
	扯断强度		
	扯断伸长率		
	压缩永久变形		
	撕裂强度	S-1	2.5
	静刚度※		
	老化后扯断强度		
	老化后扯断伸长率		
疲劳后缺损※	S-1	4.0	

## 2.2 枕下垫板的选择

### 2.2.1 枕下垫板材料的选择

枕下垫板的基材采用三元乙丙(EPDM)橡胶材料及其改性材料, 增强材料或填料有碳黑、陶土、钙粉等。并开发有多种配方<sup>[16]</sup>。

### 2.2.2 枕下垫板物性指标目标值

枕下垫板试样的邵尔 A 型硬度、静刚度、恒定压缩永久变形、拉伸强度、扯断伸长率、撕裂强度、橡胶成份定性分析、耐热性能、耐久性能的试验方法按表 2-2 中相关标准进行。热空气老化试验前后的试件在抽取的同一垫板上取样。每个垫板试样老化前后的拉伸强度、扯断伸长率、恒定压缩永久变形为所取 3 个试样的平均值。而试样耐棱性能、耐水性能、耐碱性能则是按表 2-2 中规定的方法进行的<sup>[17]</sup>。

根据三元乙丙橡胶材料与增强材料的比例分别研制出了三种配方的枕下垫板试样，并进行了物理力学试验，其物性指标见表 2-4。

表 2-4 枕下垫板物性指标目标值及测试值

项 目	单 位	目标值	测试值			
			配方 26#	配方 27#	配方 28#	
邵尔 A 型硬度	°	75~85	82	79	82	
静刚度	kN/mm	40~60	41.6	40.1	39.5	
恒定压缩永久变形	%	≤25	5	7.2	8	
拉伸强度	MPa	≥6	9	8	8	
扯断伸长率	%	≥150	279	268	262	
撕裂强度	N/cm	≥250	403	336	334	
耐棱性能	外 观	-	无龟裂	无龟裂	无龟裂	无龟裂
	深 度	mm	≤4	1.9	2	2.1
耐热性能	拉伸强度	MPa	≥4.5	9.4	8.5	8.5
	扯断伸长率	%	≥100	163	194	198
耐水性能	拉伸强度	MPa	≥4.5	8.8	7.9	7.8
	扯断伸长率	%	≥100	155	195	205
耐碱性能	拉伸强度	MPa	≥4.5	8.1	7.1	7
	扯断伸长率	%	≥100	151	205	187
耐疲劳性能	外 观	-	无剥离、 无断裂	无剥离、 无断裂	无剥离、 无断裂	无剥离、 无断裂
	残余压缩量	mm	≤4	-	-	一般<1mm 个别<3mm

从测定的物性指标结果来看，配方 28#橡胶垫板在扯断伸长率等指标方面优于其它两种配方，所以选择 28 号配方的橡胶作为枕下垫板。

### 2.2.3 枕下垫板形状尺寸的选择

考虑到弹性轨枕在有碴轨道中应有的作用，为提高轨道弹性和耐久性，又不至于影响道床捣固作业和轨枕横向阻力特性，以及便于弹性轨枕的制作成型等因素，确定试验用 II 型桥枕枕下橡胶垫板的形状尺寸如图 2-1 所示。枕下垫板顶面为平行纵向沟槽，底面为圆弧形凹槽，垫板四周边缘呈厚

6mm、倒角 120°的形状。其长度为  $800 \pm_3^{+0}$  mm，宽度为  $200 \pm_0^{+4}$  mm，厚度为  $15 \pm_0^{+2}$  mm。

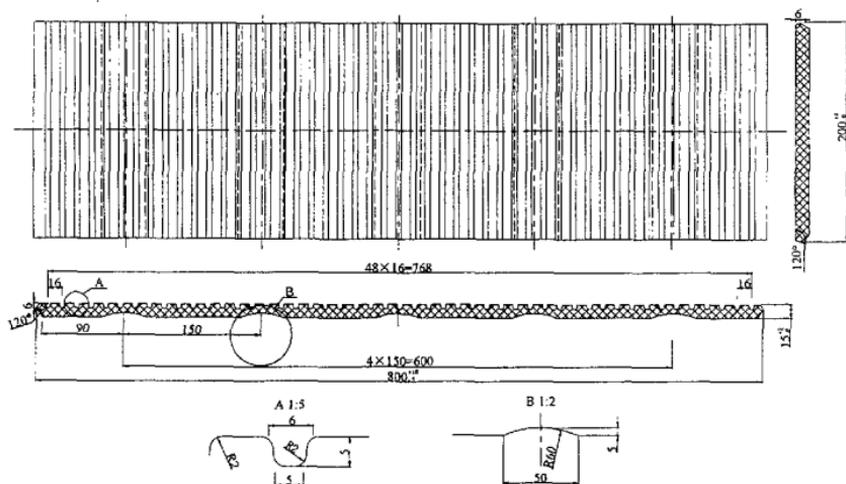


图 2-1 枕下垫板形状尺寸(单位 mm)

### 2.3 枕下橡胶垫板垂向静刚度的设计计算

枕下垫板设计静刚度是按垫板静刚度试样尺寸计算的，其形状尺寸如图 2-2 所示。计算中，形状系数  $\mu$  采用相应于无限长柱型胶垫的计算公式。但在计算外形系数  $S$  时，是计算整块胶垫试样的外形系数。考虑到沟槽型胶垫变形主要是由两沟槽之间的长方柱产生，所以最后计算橡胶垫板垂向刚度时(式(2-9))可近似采用长方柱的高即  $h_1$  值为  $h$  值<sup>[18]</sup>。

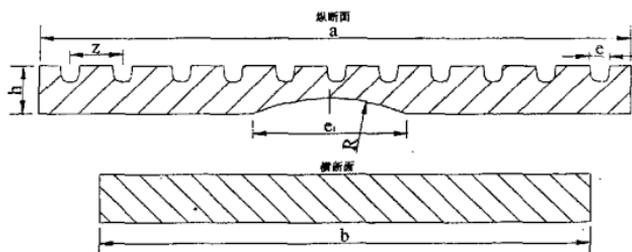


图 2-2 橡胶垫板试样剖面图

如图 2-2 和图 2-3 所示, 试样计算长  $a=180\text{mm}$ , 宽  $b=150\text{mm}$ , 高  $h=15\text{mm}$ , 上沟槽宽  $e=6\text{mm}$ , 下凹槽宽  $e_f=50\text{mm}$ , 圆弧半径  $R=60\text{mm}$ , 上表面沟槽数量  $n=11$ , 沟槽间距  $z=16\text{mm}$ , 沟槽倒角  $R_2=2\text{mm}$ , 凸台宽  $x=10\text{mm}$ , 高  $h_f=5\text{mm}$ , 直线  $\overline{DE}=1.64\text{mm}$ ,  $\overline{CB}=1.82\text{mm}$ , 弧  $\widehat{CE}=2.75\text{mm}$ , 曲线  $\overline{ABCE}=7.32\text{mm}$ 。

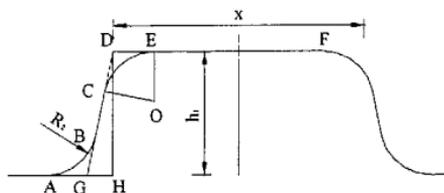


图 2-3 橡胶垫板凸台端面尺寸

具体计算如下:

(1) 平均承载面积:

$$A_c = \frac{A_{\text{上承载面}} + A_{\text{下承载面}}}{2} = 1.56 \times 10^4 \text{ mm}^2 \quad (2-1)$$

(2) 自由侧面积:

$$A_f = 2(bh + ah - nA_{\text{凹槽端}} - A_{\text{圆拱端}}) + 2nA_{\text{凹槽侧}} = 40816 \text{ mm}^2 \quad (2-2)$$

(3) 外形系数:

$$S = \frac{A_c}{A_f} = 0.38 \quad (2-3)$$

(4) 垂向形状系数:

$$\mu = 1.33 + 1.1S^2 = 1.49 \quad (2-4)$$

(5) 剪切弹性模量:

$$G = \frac{7.55HS + 55}{100 - HS} = 32.95 \text{ kgf/cm}^2 \quad (2-5)$$

式中  $HS$ ——邵尔硬度, 此取 80

(6) 杨氏模量

橡胶状物质的抗剪弹性模量  $G$  一般为  $10\text{kgf/cm}^2$ , 而其体积弹性模量  $B$  为  $104\text{kgf/cm}^2$  左右, 两者相差很大。当考虑微小变形时, 根据弹性理论, 可

得泊桑比  $\nu$  与杨氏模量  $E$  的简单关系如式(2-7)。

泊桑比:

$$\nu = \frac{3B-2G}{6B+2G} \approx \frac{1}{2} \quad (2-6)$$

杨氏模量:

$$E = 2(1+\nu)G = 3G = 9.885 \text{ N/mm}^2 \quad (2-7)$$

(7) 修正系数:

当橡胶垫板相对压缩变形  $\varepsilon$  较大和  $h$  较小时, 则必须通过式(2-8)进行修正。

$$K(\varepsilon) = \frac{(1+\varepsilon) - (1+\varepsilon)^2}{3\varepsilon} \quad (2-8)$$

(8) 垂向刚度:

$$K_z = (A_0 \mu E / h) K(\varepsilon) \quad (2-9)$$

计算垂向刚度时, 应预先设定橡胶垫板的相对变形  $\varepsilon$ , 由式(2-8)计算出  $K(\varepsilon)$ , 再由式(2-9)计算出  $K_z$  值, 根据  $K_z$  值和设定的荷载值算出变形值与相对变形  $\varepsilon'$ , 并将  $\varepsilon'$  与设定的  $\varepsilon$  进行比较。然后运用循环迭代法进行计算, 直到  $\varepsilon'$  值与  $\varepsilon$  值的相对误差小于 5% 时为止。据此便可得出所研发的枕下橡胶垫板垂向静刚度设计计算值为 41.5kN/mm。

## 2.4 弹性轨枕的成型方法

为比较弹性轨枕不同成型方法在长期反复荷载作用下的优劣, 设计了两种成型方案, 同时为了对比不同粘结剂的使用效果对枕下垫板的粘结也进行了分组, 并分别对它们进行了疲劳耐久性能试验。

### 2.4.1 粘结成型

#### 1. 制作方法

将 II 型桥枕枕底做成凹槽, 凹槽尺寸 804×202×6mm, 倒角 120°, 槽内嵌入粘结枕下垫板制成, 其结构如图 2-4 所示<sup>[19]</sup>。

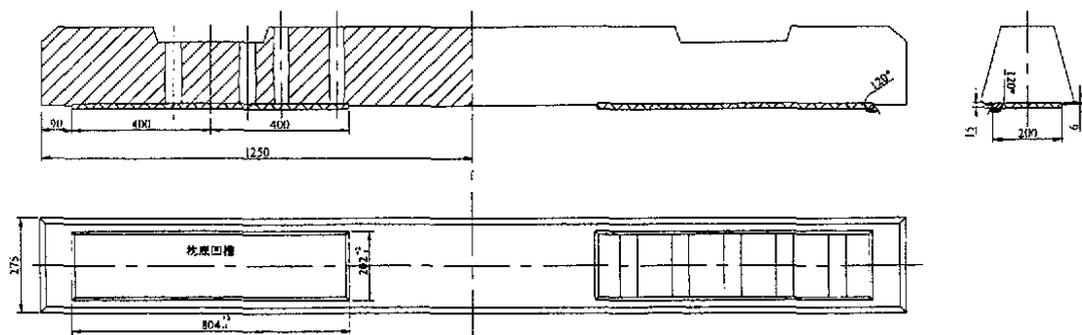


图 2-4 II 型弹性桥枕嵌粘成型

## 2. 制作条件

制作成型过程中，应满足下列要求<sup>[20]</sup>：

(1) 防止雨水、灰尘等浸入。制作场所必须配备防雨设施，这是因为雨水会使混凝土轨枕处于潮湿状态，而潮湿和灰尘都会成为促使枕下垫板剥离和降低粘着强度的原因。

(2) 粘结成型时环境温度最好在 10℃ 以上，因为橡胶垫板与混凝土之间粘结剂的硬化和强度的增长直接受温度的影响。

(3) 场地宽敞。在粘结成型过程中，由于粘结剂硬化需要一定的时间且须加压，所以制作场地必须足够宽敞，以提高工作效率。

(4) 严禁烟火。粘结剂需要有机溶液稀释，有机溶液的挥发性很强，在有限的空间里遇火易发生爆炸。

(5) 防止环境污染。不合格的橡胶垫板应回收，不能丢弃污染环境。

## 3. 粘结成型工法

### (1) 粘结剂

粘结剂采用的一是成品粘结剂 700W 型(分组为粘结 1 型)，二是研制单位自己配制的冷粘剂 C-4 型(分组为粘结 2 型)。

### (2) 粘结成型工序

弹性轨枕枕下垫板的粘结，是在混凝土轨枕蒸汽养生完结之后并且轨枕底面充分干燥的状态下进行的。轨枕底面按图 2-4 预先设置成凹槽形。

枕底凹槽表面必须用研磨机研磨平整，除去水泥敷浆膜。枕下垫板粘结面打磨成粗糙面，并用压缩空气、丙酮等仔细清除两粘结面上的灰尘、油污，然后再涂抹底层处理剂和粘结剂。

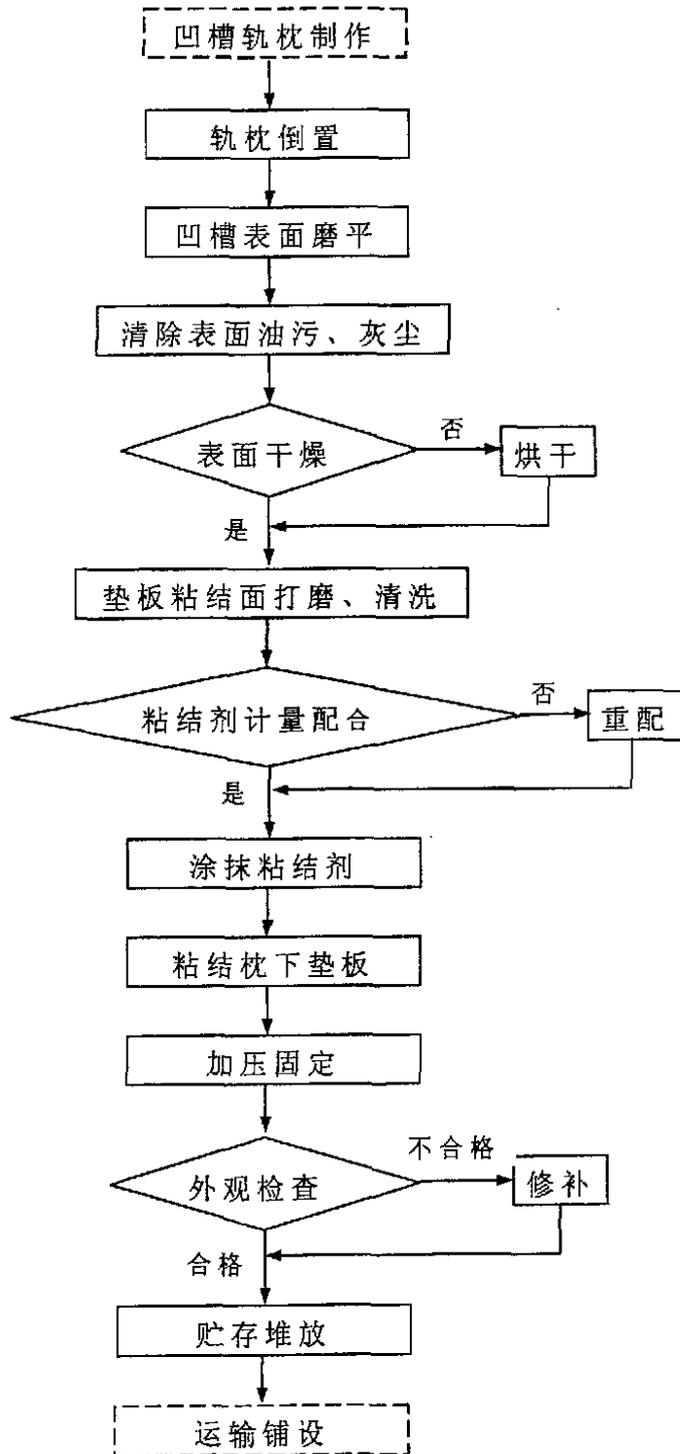


图 2-5 枕下垫板粘结成型工序

粘结的时候，粘结剂应均匀地涂抹，当其适合于粘结状态时再粘结，粘结之后立即用木槌或滚子滚压，以使其充分密贴不出现分离，然后一直静置加压固定养生到产生最大粘结强度为止。

弹性轨枕的堆放储存，以用方木条相互隔离并平放堆积为原则，堆放以 8 层为限，地基应坚固、无不均匀下沉。

运输与铺设时，注意不使弹性轨枕遭受过大冲撞作用和与底面产生摩擦，以免缺角或枕下垫板剥离<sup>[21]</sup>。

枕下垫板粘结成型工序按图 2-5 所示进行，成型实物粘结 1 型见图 2-6、粘结 2 型见图 2-7。

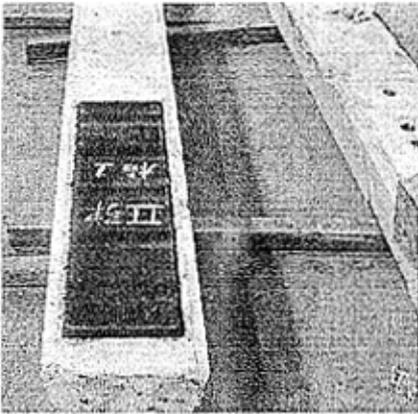


图 2-6 粘结 1 型



图 2-7 粘结 2 型

#### 2.4.2 锚固成型

作为对比和备选成型方案，还分别采用了粘锚和锚杆固定的制作方法。其中粘锚法的粘结方法同上；而锚杆固定法是在轨枕底面与橡胶垫板固定孔相对应的位置上钻孔并预埋锚杆固定铁座(图 2-8)，再用特制螺帽(图 2-9)固定橡胶垫板。两种成型实物见图 2-10 和图 2-11。

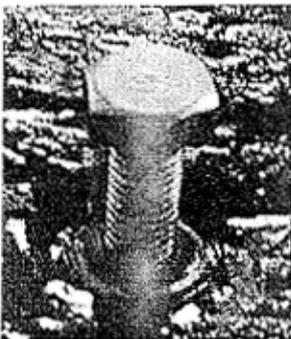


图 2-8 锚杆与锚杆座



图 2-9 固定螺帽



图 2-10 粘锚型

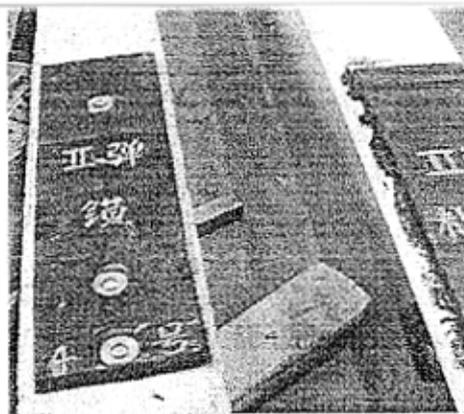


图 2-11 锚杆型

## 第 3 章 弹性轨枕室内基础试验及分析

为对所研制的弹性轨枕在正式上道试铺之前,了解和掌握其在有碴轨道中的作用及若干基本特性和应用技术问题,采取在室内铺设实尺轨道的方法,通过静载和动载基础试验比较弹性轨枕和普通轨枕的道床横向阻力、轨枕支承刚度、轨枕荷载力矩、道床的下沉特性和枕下垫板的疲劳耐久性能。

### 3.1 基础试验概要

#### 1. 试验仪器设备

(1) AMSLER 脉冲疲劳试验机:最大荷载 500kN,精度 500N;示值允许偏差 $\leq 1\%$ 。

(2) DDS32 数据采集仪:采集通道 64 个;采集频率范围 0~10000Hz。

(3) TOSHIBA 笔记本电脑:处理器主频 Intel Pentium 4 2.4GHz;硬盘可用空间 30G。

(4) 位移传感器:量程 0~10mm。

(5) 百分表:量程 0~10mm。

(6) 压力传感器:量程 0~50kN;非线性误差 $\leq 2\%$ ;输出灵敏度 2.00mV/V。

(7) 电阻纸式应变片:规格 5×80mm;电阻值  $119 \pm 0.27\% \Omega$ ;灵敏系数  $2.032 \pm 0.26\%$ 。

(8) 机械千斤顶:量程 0~50kN。

#### 2. 试验数据采集系统

试验数据采集系统是由测试传感器、数据采集仪、数据监控和存储设备组成。本次试验所使用的采集系统是基于 32 位处理器的动态数字集成采集系统,它集信号的采集、过虑、放大与模数转换为一体,通过外接电脑可方便地监控和获取精确的数字采集信息,工作原理如图 3-1 所示。

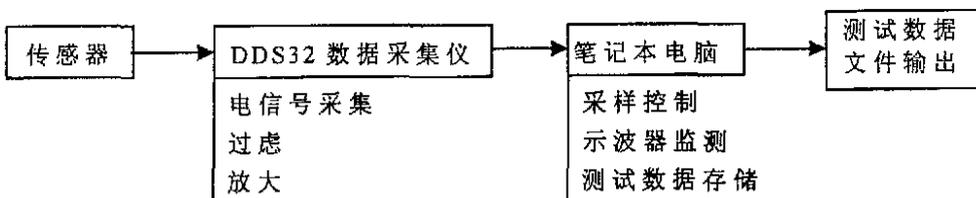
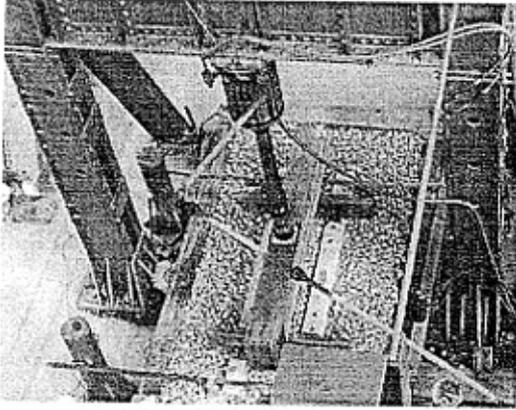


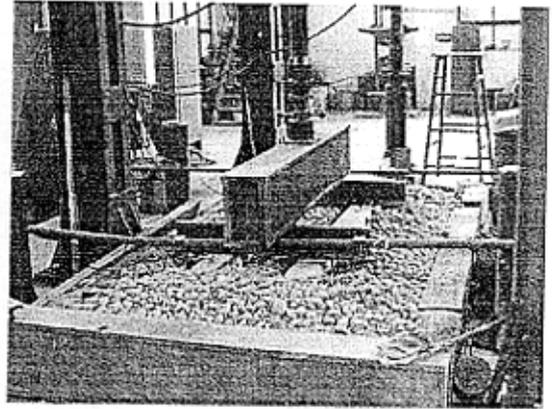
图 3-1 试验数据采集系统原理图

### 3. 试验轨道布置

实尺弹性轨枕和普通轨枕试验轨道是在室内钢筋混凝土基础上构筑的道碴槽内铺设短轨排标准有碴轨道。试验轨道的布置见图 3-2。



a) 试验轨道俯视图



b) 试验轨道平视图

图 3-2 试验轨道布置

试验轨道组成<sup>[22]</sup>:

- (1) 钢轨: 60kg/m, 长 1200mm。
- (2) 轨枕: II 型普通桥枕和 II 型弹性桥枕各 2 根, 间距 540mm。
- (3) 扣件: II 型弹条, 扭力矩 80N·m; 轨下胶垫 60-10-11 型。
- (4) 道床: 碎石道碴, 厚度 250mm, 肩宽 450mm。

### 4. 试验荷载

- (1) 静载: 0~400kN。
- (2) 动载: 疲劳荷载  $P_{min}=60\text{kN}$ ,  $P_{max}=400\text{kN}$ ; 循环特性  $\gamma=0.15$ ;  
加载频率  $f=8.33\text{Hz}$ ; 疲劳次数  $N=400\times 10^4$  次。

### 5. 其它要求

- (1) 环境温度  
要求  $20\pm 5^\circ\text{C}$ 。

- (2) 贴片

电阻应变片粘贴前, 首先必须使用研磨机、砂纸将贴片处磨平(与所测应变方向成  $45^\circ$  角打磨); 并用丙酮或乙醇将应变片和贴片处的油污、尘埃等清除干净; 最后用贴片抹刀利用 502 胶或 AB 胶完全粘贴<sup>[23]</sup>。

- (3) 铺设整道

试验轨道的铺设应符合工务技术标准, 并按试验要求整道<sup>[24]</sup>。

## (4) 位移传感器的安装

位移传感器安装支架必须牢固，传感器顶针与被测面须垂直。

## 3.2 测试方法

## 3.2.1 道床横向阻力的测试方法

## 1. 压力传感器的标定

测试之前，用疲劳试验机对压力传感器进行标定，找出压力值与电压值之间的对应关系（见表 3-1），并据此拟合出相应的压力传感器标定曲线如图 3-3，再由此计算出标定系数为 4.5kN/V。

表 3-1 压力传感器标定压力值与电压值的对应关系

压力值(kN)	0	10	20	30	40	50
电压值(mV)	0.000	0.221	0.442	0.662	0.883	1.115

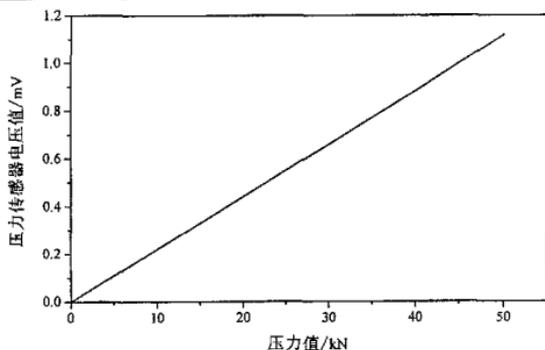


图 3-3 压力传感器标定曲线

## 2. 道床横向阻力的测试步骤

(1) 正式试验之前须用脉冲疲劳试验机对道床进行稳定作业，以静载  $P_{min}=40\text{kN}$ ，动载  $P_{max}=200\text{kN}$ ，频率  $f=8.33\text{Hz}$  连续稳定三次，每次稳定 1 小时后停机捣固整道。

(2) 测试前要求将轨枕受力端修理平整，千斤顶和压力传感器必须安装在轨排中心位置，加载横梁不能与道碴有接触，百分表安装在轨排非受力端钢轨轨头侧面。

(3) 匀速加载，分别记录百分表读数为 1.0mm、2.0mm、3.0mm、4.0mm、

5.0mm、6.0mm、7.0mm、8.0mm、9.0mm、10.0mm 时压力传感器相应的电压输出值。

(4) 卸载，将轨排恢复到初始位置，整道。

(5) 重复(2)~(4)的测试过程两次<sup>[25]</sup>。

道床横向阻力测试组装图图 3-4，图 3-5 为其测试框图。

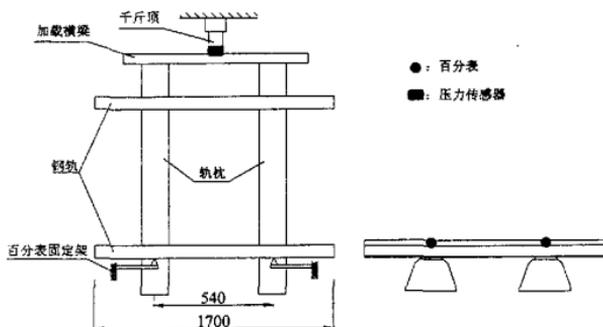


图 3-4 道床横向阻力测试组装图 (单位 mm)

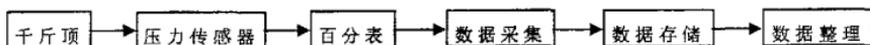


图 3-5 道床横向阻力测试框图

### 3.2.2 枕下支承刚度的测试方法

#### 1. 位移传感器的标定

道床稳定后，按图 3-6 安装固定好位移传感器，并用标定塞尺分别对各位位移传感器逐一进行标定。各位位移传感器的标定位移值与电压输出值的对应关系见表 3-2，其标定曲线如图 3-7 所示。

表 3-2 位移传感器标定位移值与电压输出值对应关系

位移值(mm)	0	0.5	0.75	1.0	1.5	1.75	2.0	2.5	3.0	3.5	
电 压 值 (V)	一位	0.003	0.245	0.375	0.514	0.761	0.913	1.032	1.268	1.492	1.727
	二位	0.001	0.270	0.395	0.516	0.758	0.965	1.045	1.283	1.482	1.739
	三位	0.004	0.232	0.358	0.521	0.764	0.894	1.030	1.250	1.497	1.689
	四位	0.006	0.232	0.372	0.505	0.761	0.879	1.021	1.272	1.503	1.752

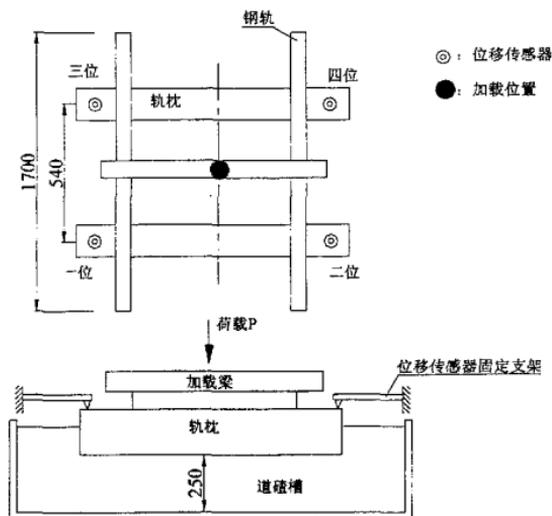


图 3-6 枕下支承刚度测试组装图 (单位 mm)

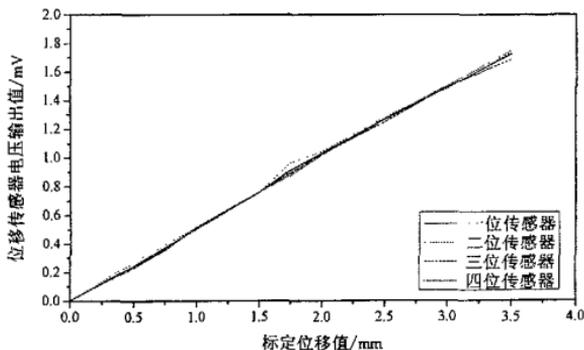


图 3-7 位移传感器的标定曲线

由此, 可明显看出位移传感器的输出值与对应的标定值之间呈线性关系, 且 4 个传感器的输出值之间相差很小, 可以近似地认为它们的标定系数是一致的。通过线性拟合计算出位移传感器的标定系数为  $2.05\text{mm/V}$ 。

## 2. 枕下支承刚度的测试步骤

(1) 松开钢轨扣件, 预加静载  $200\text{kN}$  三次, 每次卸载后停留  $10\text{s}$  左右, 再重新加载, 然后进行正式测试。

(2) 以 2~3kN/s 的速度均匀加载, 分别记录荷载为 40kN、80kN、160kN、240kN、320kN、400kN 时各位位移传感器相应的电压输出值。

(3) 卸载后停留 3 分钟再重复试验(2)两次。

测试框图见图 3-8。

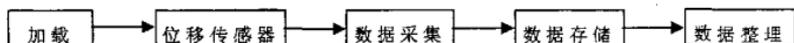


图 3-8 枕下支承刚度测试框图

### 3.2.3 轨枕荷载力矩的测试方法

#### 3.2.3.1 荷载力矩的标定

##### 1. 标定原理

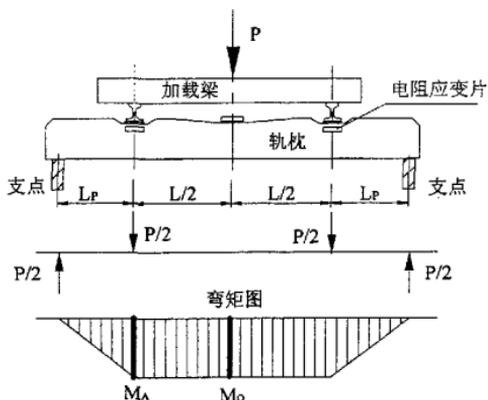


图 3-9 轨枕荷载力矩的标定原理图

轨枕轨下和中间截面荷载力矩的标定, 其原理如图 3-9, 它是利用刚性支座对轨枕荷载力矩进行标定, 使得轨枕组成一个简支梁, 由给定的已知力  $P$  及其作用距离  $L_p$  求出轨下截面弯矩  $M_A = PL_p/2$ , 中间截面弯矩  $M_O = M_A$ , 然后按式(3-1)求出各种弯矩范围下的截面标定系数<sup>[26]</sup>。

$$K_f = M_f / H_f \quad (3-1)$$

式中  $K_f$ ——截面标定系数 (kN·m/V);

$M_f$ ——标定的荷载弯矩 (kN·m);

$H_i$ ——相应于标定弯矩  $M_i$  的应变片电压值 (V)。

## 2. 标定方法

### (1) 桥路组成

轨枕轨下和中间截面荷载力矩的标定分别按双臂和单臂组成半桥桥路。

### (2) 荷载范围的确定

根据不同类型轨枕设计荷载力矩反算加载范围, 对于 II 型桥枕承轨槽最大加载值确定为  $80\text{kN}^{[27]}$ 。

### (3) 标定过程

以  $2\sim 3\text{kN/s}$  的速度均匀加载, 分别记录荷载为  $20\text{kN}$ 、 $30\text{kN}$ 、 $40\text{kN}$ 、 $50\text{kN}$ 、 $60\text{kN}$ 、 $70\text{kN}$ 、 $80\text{kN}$  时轨下截面和中间截面应变片相应的电压输出值。

## 3. 标定结果

根据标定记录数据经过线性回归拟合出标定曲线 (图 3-10), 再计算出轨下和中间截面荷载力矩标定系数分别为  $239.8\text{kN}\cdot\text{m/V}$  和  $60.5\text{kN}\cdot\text{m/V}$ 。

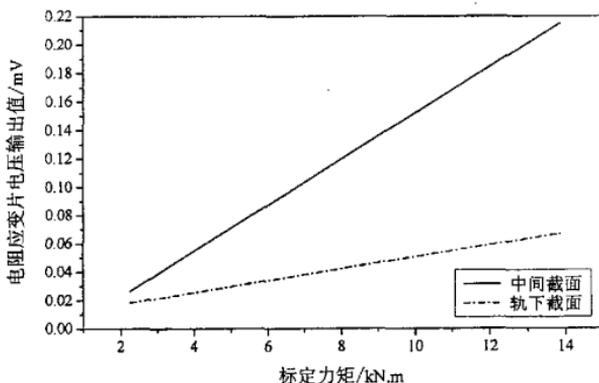


图 3-10 轨枕荷载力矩标定曲线

### 3.2.3.2 轨枕荷载力矩的测试步骤

(1) 将被测试轨枕组成短轨排置于道床中, 测试组装图及测试框图分别见图 3-11 和图 3-12。

(2) 预加静载  $200\text{kN}$  三次, 每次卸载后停留  $10\text{s}$  左右, 再重新加载, 检查应变片、数据采集仪工作是否正常, 然后进行测试。

(3) 以 2~3kN/s 的速度均匀加载, 分别记录荷载为 40kN、80kN、160kN、240kN、320kN、400kN 时轨下截面和中间截面应变片相应的电压输出值。

(4) 卸载后停留 3 分钟再重复试验(3)两次。

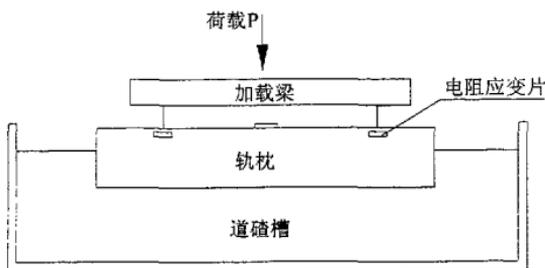


图 3-11 轨枕荷载力矩测试组装图

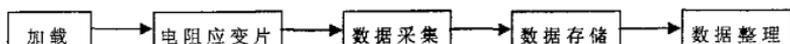


图 3-12 轨枕荷载力矩测试框图

### 3.2.4 道床下沉特性试验方法

(1) 按图 3-2 铺设试验轨道, 并按工务技术标准要求整正轨道。

(2) 按图 3-6 安装连接好位移传感器。

(3) 以动载 200kN 实施道床稳定 3 次, 每次 1 小时后重新整道。

(4) 脉冲疲劳试验是以静载  $P_{min}=60\text{kN}$ , 动载  $P_{max}=400\text{kN}$ , 频率  $f=8.33\text{Hz}$  的动载条件连续加载 400 万次。

(5) 用数据采集仪和笔记本电脑分别采集和储存时间  $T=20$  分钟(1 万次)、40 分钟(2 万次)、1 小时 40 分钟(5 万次)、3 小时 20 分钟(10 万次)、5 小时(15 万次)、6 小时 40 分钟(20 万次)、8 小时 20 分钟(25 万次)、10 小时(30 万次)、以后每间隔 6 小时 40 分钟(20 万次)的轨枕下沉位移值。

### 3.2.5 枕下胶垫耐久性试验方法

弹性轨枕的耐久性试验与道床下沉特性试验同步进行, 在测试道床下沉特性的同时也测试了弹性胶垫的耐久性。试验结束后, 取出弹性轨枕,

观察枕下胶垫的变化状况,检查其有无压痕、折损、开裂、剥离等现象,并记录检查结果,保存试样或实物照片。

### 3.3 测试结果与分析

#### 3.3.1 道床横向阻力测试结果与分析

图 3-13 为弹性轨枕和普通轨枕两种试验轨道道床横向阻力测试结果。

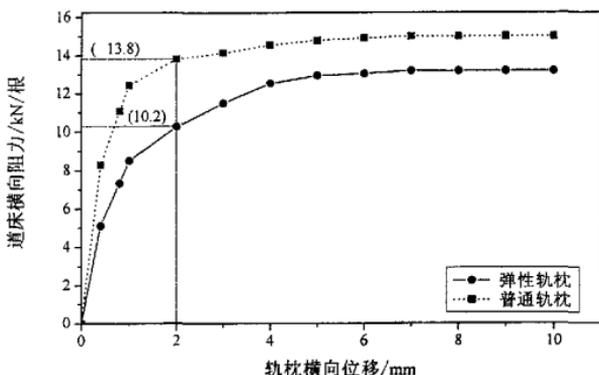


图 3-13 道床横向阻力测试结果

由图 3-13 可见,弹性轨枕的道床横向阻力要比普通轨枕的小些,这是因为橡胶垫板与碎石相接触部分的摩擦系数较小的缘故。但随着通过运量的增加,胶垫压缩变形的积累,弹性轨枕的摩擦系数将会随之增大。

当轨枕横向位移为 2mm 时,试验轨道道床横向阻力的测试值 II 型普通桥枕为 13.8kN/根,II 型弹性桥枕为 10.2kN/根。根据以往对 II 型混凝土枕有碴轨道的现场实测统计结果一般为 9.8kN/根,可见弹性轨枕试验轨道接近该值,它说明不会对桥上无缝线路的稳定性带来影响<sup>[28]</sup>。

#### 3.3.2 轨枕支承刚度测试结果与分析

(1) 枕下垫板试样刚度值(见表 3-3)

试样尺寸 180×150×15mm, 试验荷载 20kN~80kN。

表 3-3 枕下垫板试样刚度

项目		静刚度 (kN/mm)
设计目标值		40~60
理论计算值		41.5
测试值	配方 26#	41.5
	配方 27#	40.1
	配方 28#	39.5
老化值 (配方 28#)		57.5

本次试验所采用的枕下垫板均为 28#配方。经过疲劳试验 400 万次以后, 尽管老化刚度增大了 1.46 倍, 达到 57.5kN/mm, 但仍在期望目标值以内。

## (2) 枕下支承刚度实测值

图 3-14 为枕上荷载与轨枕位移的实测曲线, 表 3-4 为两种轨枕的枕下支承刚度实测值。据此可知, 在同一荷载作用下, 弹性轨枕枕下支承刚度明显低于普通轨枕枕下支承刚度 3.5~5 倍, 表明弹性轨枕有碴轨道弹性性能大大优于普通轨枕有碴轨道。

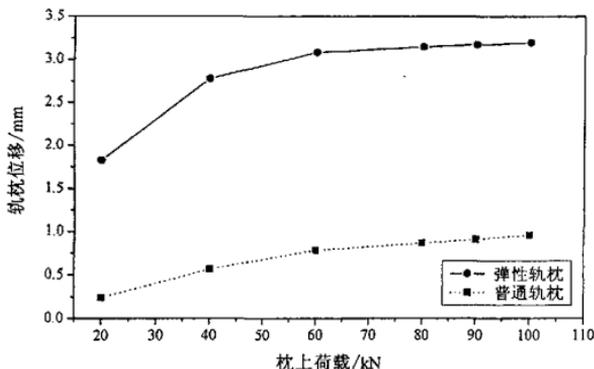


图 3-14 枕上荷载与轨枕位移实测曲线

表 3-4 枕下支承刚度实测值

枕上荷载(kN)	40	50	60	70	80	90	100
普通轨枕(kN/mm)	70	74	77	85	93	99	105
弹性轨枕(kN/mm)	14	17	19	23	25	28	31

### (3) 试验轨道综合刚度计算值

轨道综合刚度根据轨下胶垫刚度（取  $K_p=100\text{kN/mm}$ ）和枕下支承刚度实测值按串联弹簧模式计算，其结果见表 3-5。据此可知，弹性轨枕有碴轨道综合刚度与木枕有碴轨道综合刚度（25~30kN/mm）持有同等水平，并且明显低于普通混凝土枕有碴轨道<sup>[29]</sup>。

表 3-5 试验轨道综合刚度计算值

荷载(kN)	40	50	60	70	80	90	100
普通轨枕轨道(kN/mm)	41	43	44	46	48	50	51
弹性轨枕轨道(kN/mm)	12	15	16	19	20	22	24

“高质量、低刚度”一直是现代轨道设计所追求的基本技术目标。随着高速新线建设和既有线提速，在不改变原有轨道结构设计的基础上，弹性轨枕是目前实现轨道低刚度化的最优技术路线。

### 3.3.3 轨枕荷载力矩测试结果与分析

图 3-15 和图 3-16 为弹性轨枕和普通轨枕荷载力矩的测试结果。由此可见，在同一承轨槽荷载作用下，弹性轨枕比普通轨枕的轨下截面荷载力矩约降低 1.5kN·m 左右，而中间截面随着荷载的增大弹性轨枕的荷载力矩增幅明显比普通轨枕缓慢，这表明弹性轨枕在高速重载的运营条件下更利于改善轨枕的受力状态。

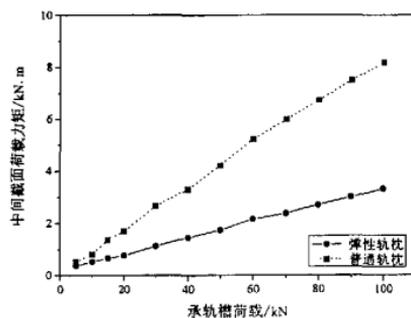
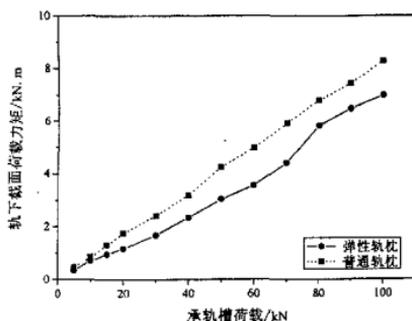


图 3-15 轨下截面轨枕荷载力矩测试结果

图 3-16 中间截面轨枕荷载力矩测试结果

### 3.3.4 道床下沉特性试验结果与分析

#### (1) 测试结果

图 3-17 为弹性轨枕和普通轨枕两种有碴试验轨道道床下沉特性的实测结果, 表 3-6 为道床下沉量实测值。

表 3-6 道床下沉量实测值

通过运量 $x$ (万 t)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
普通轨枕 $Y_P$ (mm)	0	8.92	10.37	11.26	11.87	12.49	13.00	13.31	13.47
弹性轨枕 $Y_T$ (mm)	0	3.47	4.17	4.73	4.93	5.24	5.5	5.65	5.86

### (2) 结果分析

由图 3-17 可知, 普通轨枕有碴轨道与弹性轨枕有碴轨道的初始下沉量有很大的不同, 前者约为 10mm, 后者仅为 3mm, 相差 3 倍之多。在初始下沉结束后, 普通轨枕有碴轨道直至载荷重复作用次数达到 150 万次(相当于

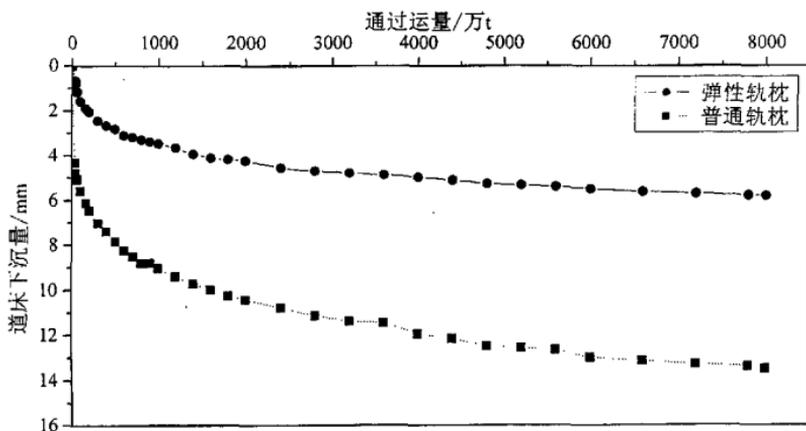


图 3-17 道床下沉特性测试结果

通过运量 3000 万 t) 时, 仍继续有较大的下沉。而弹性轨枕有碴轨道, 在荷载重复作用次数 50 万次左右(相当于通过运量 1000 万 t) 就趋于下沉曲线的渐近直线了, 直到换算通过运量达 8000 万 t 时, 道床下沉量仍然较小, 说明弹性轨枕有碴轨道显著优于普通轨枕有碴轨道, 有利于大大减轻线路养护维修工作量。

### (3) 道床下沉回归曲线

图 3-18 为对道床下沉量实测值的回归曲线。影响道床下沉快慢的三个重要轨道动力参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  回归值见表 3-7<sup>[30]</sup>。

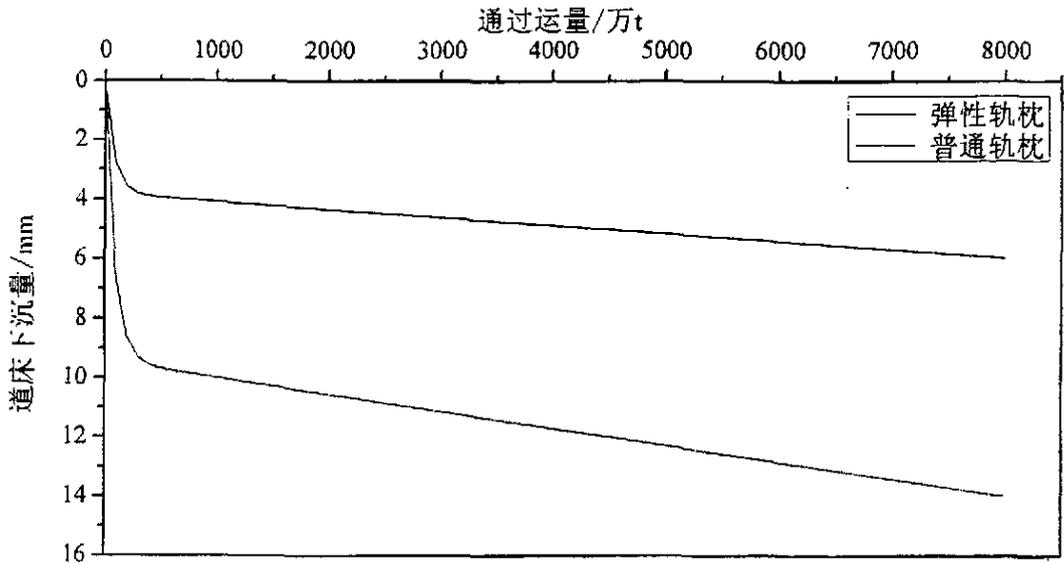


图 3-18 道床下沉回归曲线

表 3-7 道床下沉动力参数回归值

动力参数	压实下沉系数 $\alpha$	流动下沉系数 $\beta$	捣固质量系数 $\gamma$
普通轨枕	1.152	0.0568	9.43
弹性轨枕	1.296	0.0267	3.81

两种试验轨道的道床下沉曲线表达式分别为<sup>[31]</sup>：

$$\text{普通轨枕轨道: } y_p = -9.43e^{-1.152x} + 0.0568x + 9.43 \quad (3-2)$$

$$\text{弹性轨枕轨道: } y_t = -3.81e^{-1.296x} + 0.0267x + 3.81 \quad (3-3)$$

一般，可用大  $\alpha$ 、小  $\beta$ 、小  $\gamma$  值作为判别有碴轨道承载能力和残变速率优劣的基本标准。显然，实测结果表明，弹性轨枕有碴轨道的各项动力学指标均大大优于普通轨枕有碴轨道，表明了弹性轨枕是强化有碴轨道的有效技术对策。弹性轨枕化有可能成为未来轨道结构的发展方向<sup>[32]</sup>。

### 3.3.5 枕下胶垫耐久性能试验结果与分析

#### (1) 试验条件

疲劳最大荷载 400kN，承轨槽作用荷载 100kN，作用次数  $400 \times 10^4$  次，相当于通过运量 8000 万 t。

#### (2) 试验结果

试验结束后，取出供试验的弹性轨枕，检查其四种成型方法制作的枕

下垫板与碎石道碴相接触的表面状态，其结果分别见图 3-19~图 3-22。



图 3-19 粘结 1 型

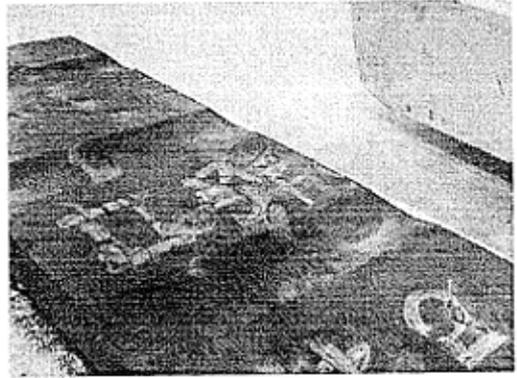


图 3-20 粘结 2 型

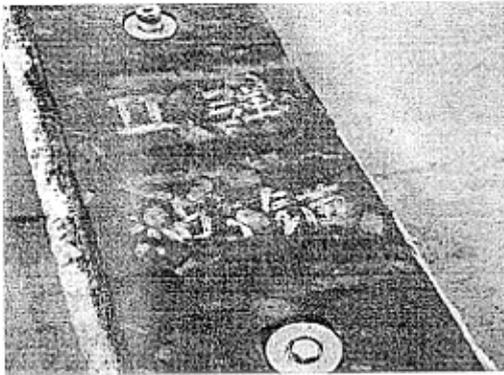


图 3-21 粘锚型



图 3-22 锚杆型

### (3) 结果分析

经对四种成型方法制作的弹性轨枕枕下橡胶垫板外观的仔细检查，均无剥离、无撕裂、无穿透、无严重磨损，但局部有残余压溃现象，其压痕面积不超过 5%，压陷量大小不一，分布也不均匀，压陷深度一般小于 1mm，最大不超过 3mm，显示出良好的耐久性性能。

## 3.4 基本结论

通过在室内对实尺弹性轨枕和普通轨枕有碴轨道的基础试验，其基本结论如下：

### (1) 关于道床横向阻力

弹性轨枕道床横向阻力实测值为 10.2kN/根，该值能满足普速铁路无缝线路稳定性对道床横向阻力 $\geq 8\text{kN/根}$ 的要求，同时也符合既有线提速改造和

新建时速 200km 客货共线铁路对道床横向阻力 $\geq 10\text{kN/根}$ 的基本要求。

#### (2) 关于枕下支承刚度

弹性轨枕枕下道床支承刚度是普通轨枕枕下道床支承刚度的 20~30%，它明显地降低了轨道刚度，提高了轨道弹性，有利于强化有碴轨道，改善轨道的振动冲击作用，适应于既有线全面提速战略工程的需要。

#### (3) 关于轨枕荷载力矩

弹性轨枕轨下截面荷载力矩低于普通轨枕轨下截面荷载力矩，这有利于改善轨枕的受力分布状态。

#### (4) 关于道床下沉特性

弹性轨枕有碴轨道的道床初期下沉量仅仅是普通轨枕有碴轨道的 1/3，回归的道床下沉特性曲线明显优于普通轨枕。这有利于减缓道床残余变形积累速率，减少线路养护维修工作量及其费用，可以延长线路综合维修周期。

#### (5) 关于道床捣固作业性能

试验轨道道床经过用捣固镐冲碴和捣固作业后，抬起轨枕检查枕下垫板状态，均无任何破损现象，并且不影响道床捣固作业性能。

#### (6) 关于耐久性性能

弹性轨枕通过运量 8000 万 t 后，枕下橡胶垫板无剥离、无撕裂、无穿孔，也无严重磨损，预计其使用寿命平均可达到两个线路大修周期。

#### (7) 关于枕下橡胶垫板的性能

枕下垫板基材采用三元乙丙 (EPDM) 橡胶，较其他橡胶材料有利于延长使用寿命，物理机械性能按国家标准及研发目标值各配方方案均符合设计期望值。

枕下垫板形状尺寸符合工程应用技术要求。

#### (8) 关于弹性轨枕的制作

采用嵌入粘结成型制作的弹性轨枕，被认为是目前比较现实可行的方法。

#### (9) 关于弹性轨枕的成本

在研制开发阶段，弹性轨枕成本以控制在普通轨枕的 2.0 倍以内为宜。

## 第 4 章 弹性轨枕有碴轨道动力学性能仿真分析

车辆—轨道耦合动力学作为崭新的理论体系,已经在现代铁路工程领域中得到广泛应用。为实现机车车辆与轨道结构参数的最佳匹配及系统安全设计和管理,提供了强有力的理论分析工具。从车辆与轨道整个大系统的角度出发,分析弹性轨枕对车辆和轨道结构的动力学响应,可以更加真实地反应弹性轨枕对车辆和轨道系统良好的动力学性能<sup>[31]</sup>。

根据车辆—轨道耦合动力学理论,采用 Visual FORTRAN 90 计算机语言编制了动力学性能仿真分析软件 VETIS (Vehicle/Elastic Track Interaction Simulation)<sup>[34,35]</sup>。运用该软件计算出弹性轨枕有碴轨道与普通轨枕有碴轨道在相同工况下轮轨系统各个部件的动力响应。通过对两种轨道结构动力响应的对比分析,表明弹性轨枕不仅能够提高轨道弹性、缓和列车冲击、减轻道床振动、减少道碴粉化、延长轨道维护周期,还能保持行车的安全性与平稳性。由此,为弹性轨枕的工程应用提供充分的理论依据。

### 4.1 弹性轨枕有碴轨道动力学分析原理

#### 4.1.1 车辆—弹性轨枕有碴轨道耦合动力学模型

以我国高速车辆为例建立车辆动力学模型,其转向架为无摇枕、无摇动台、无旁承的高速转向架结构<sup>[36]</sup>;中央悬挂模型包括空气弹簧提供的三个方向刚度及阻尼、由橡胶块提供的横向止挡、由横向减振器提供的中央横向阻尼和牵引装置提供的三个方向刚度;轴箱悬挂模型包括由轴箱弹簧提供的三个方向刚度、由轴箱定位装置提供的水平刚度,一系的垂向阻尼则由悬挂在轴箱弹簧外侧的一系垂向减振器提供<sup>[37]</sup>。

以我国目前既有线提速有碴轨道为例建立轨道动力学模型,其钢轨采用连续弹性离散点支承上的无限长 Euler 梁模型,考虑钢轨的垂向、横向和扭转自由度,垂向、横向刚度和阻尼均由轨下胶垫提供<sup>[38]</sup>。轨下基础沿纵向离散,离散以各轨枕支点为基元,每个支承单元采用双质量(轨枕和道床)三层(钢轨—轨枕—道床—路基)弹簧—阻尼振动模型。轨枕视为刚性体,考

虑轨枕的垂向、横向以及刚体转动，枕下垫板与轨枕粘结和道床一起提供轨枕的垂、横向刚度和阻尼。道床沿竖向不再分层，而是沿纵向离散为刚性质量块，道床块之间由剪切刚度元件和剪切阻尼元件相连，道床和路基之间用线性弹簧和阻尼元件连接，且只考虑道床的垂向振动<sup>[39]</sup>。车辆—弹性轨枕有碴轨道耦合系统相互作用动力学模型如图 4-1 所示。

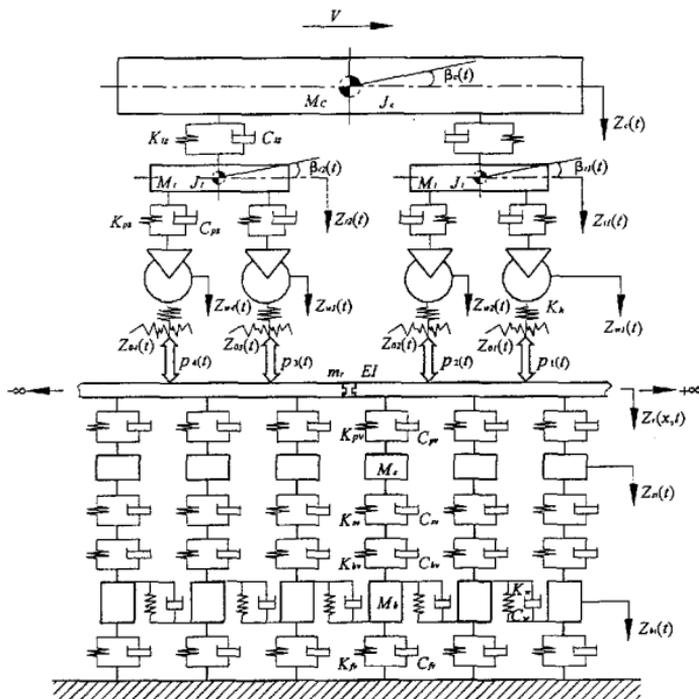


图 4-1 车辆—弹性轨枕有碴轨道耦合模型主视图

#### 4.1.2 车辆—弹性轨枕有碴轨道系统动力学运动方程

以下只给出了各部件的运动方程，具体的各部件受力和方程推导详见文献[33]。

##### 1. 车辆系统运动方程

##### (1) 轮对( $i=1\sim 4$ )

横向运动

$$M_w \left( \ddot{Y}_{wi} + \frac{V^2}{R_{wi}} + r_0 \ddot{\phi}_{sewi} \right) = -F_{y/Li} - F_{y/Ri} + F_{Lyi} + F_{Ryi} + N_{Lyi} + N_{Ryi} + M_w g \phi_{sewi} \quad (4-1)$$

沉浮运动

$$M_w \left( \ddot{Z}_{wi} - a_0 \ddot{\phi}_{sewi} - \frac{V^2}{R_{wi}} \phi_{sewi} \right) = -F_{Lzi} - F_{Rzi} - N_{Lzi} - N_{Rzi} + F_{z/Ri} + F_{z/Li} + M_w g \quad (4-2)$$

侧滚运动

$$I_{wx} \left( \ddot{\phi}_{sewi} + \ddot{\phi}_{wi} \right) - I_{wy} \left( \ddot{\beta}_{wi} - \Omega \right) \left( \dot{\psi} + \frac{V}{R_{wi}} \right) = a_0 \left( F_{Lzi} + N_{Lzi} - F_{Rzi} - N_{Rzi} \right) - r_L \left( F_{Lyi} + N_{Lyi} \right) - r_{Ri} \left( F_{Ryi} + N_{Ryi} \right) + d_w \left( F_{z/Ri} - F_{z/Li} \right) \quad (4-3)$$

摇头运动

$$I_{wz} \left[ \ddot{\psi}_{wi} + V \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{R_{wi}} \right) \right] - I_{wy} \left( \dot{\phi}_{sewi} + \dot{\phi}_{wi} \right) \left( \dot{\beta}_{wi} - \Omega \right) = a_0 \left( F_{Lxi} - F_{Rxi} \right) + a_0 \psi_{wi} \left( F_{Lyi} + N_{Lyi} - F_{Ryi} - N_{Ryi} \right) + M_{Lxi} + M_{Rxi} + d_w \left( F_{z/Li} - F_{z/Ri} \right) + a_0 \left( N_{Lxi} - N_{Rxi} \right) \quad (4-4)$$

旋转运动

$$I_{wy} \ddot{\beta}_{wi} = r_{Ri} F_{Rxi} + r_{Li} F_{Lxi} + r_{Ri} \psi_{wi} \left( F_{Ryi} + N_{Ryi} \right) + r_{Li} \psi_{wi} \left( F_{Lyi} + N_{Lyi} \right) + M_{Lyi} + M_{Ryi} + N_{Lxi} r_{Li} + N_{Rxi} r_{Ri} \quad (4-5)$$

(2) 构架 ( $i=1, 2$ )

横移运动

$$M_i \left[ \ddot{Y}_{ii} + \frac{V^2}{R_{ii}} + (r_0 + H_{iw}) \ddot{\phi}_{seii} \right] = F_{y/L(2i-1)} + F_{y/L(2i)} - F_{y/Li} + F_{y/R(2i-1)} + F_{y/R(2i)} - F_{y/Ri} + M_i g \phi_{seii} \quad (4-6)$$

沉浮运动

$$M_t \left[ \ddot{Z}_{ii} - a_0 \ddot{\phi}_{sen} - \frac{V^2}{R_{ii}} \ddot{\phi}_{sen} \right] = \quad (4-7)$$

$$F_{z1L} - F_{z1L(2i-1)} - F_{z1L(2i)} + F_{z1R} - F_{z1R(2i-1)} - F_{z1R(2i)} + M_t g$$

侧滚运动

$$I_{xx} (\ddot{\phi}_{ii} + \ddot{\phi}_{sen}) = \quad (4-8)$$

$$- [F_{y1L(2i-1)} + F_{y1R(2i-1)} + F_{y1L(2i)} + F_{y1R(2i)}] H_{tw}$$

$$+ [F_{z1L(2i-1)} + F_{z1L(2i)} - F_{z1R(2i-1)} - F_{z1R(2i)}] d_w$$

$$+ (F_{z1R} - F_{z1L}) d_s - (F_{y1L} + F_{y1R}) H_{Bt} + M_{xst}$$

摇头运动

$$I_{zz} \left[ \ddot{\psi}_{i(L,R)} + V \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{R_{ii}} \right) \right] = \quad (4-9)$$

$$[F_{y1L(2i-1)} + F_{y1R(2i-1)} - F_{y1L(2i)} - F_{y1R(2i)}] l_i$$

$$+ [F_{z1R(2i-1)} + F_{z1R(2i)} - F_{z1L(2i-1)} - F_{z1L(2i)}] d_w + (F_{x1L} - F_{x1R}) d_s$$

点头运动

$$I_{yy} \ddot{\theta}_{ii} = [F_{z1L(2i-1)} + F_{z1R(2i-1)} - F_{z1L(2i)} - F_{z1R(2i)}] l_i \quad (4-10)$$

$$- [F_{x1R(2i-1)} + F_{x1R(2i)} + F_{x1L(2i-1)} + F_{x1L(2i)}] H_{tw} - (F_{x1L} + F_{x1R}) H_{Bt}$$

(3) 车体

横移运动

$$M_c \left[ \ddot{Y}_c + \frac{V^2}{R_c} + (r_0 + H_{tw} + H_{Bt} + H_{cB}) \ddot{\phi}_{sec} \right] = \quad (4-11)$$

$$F_{y1L1} + F_{y1L2} + F_{y1R1} + F_{y1R2} + M_c g \phi_{sec}$$

沉浮运动

$$M_c \left[ \ddot{Z}_c - a_0 \ddot{\phi}_{sec} - \frac{V^2}{R_c} \ddot{\phi}_{sec} \right] = \quad (4-12)$$

$$-F_{z1L1} - F_{z1L2} - F_{z1R1} - F_{z1R2} + M_c g$$

侧滚运动

$$\begin{aligned}
& I_{cx} (\ddot{\phi}_c + \ddot{\phi}_{\text{sec}}) = \\
& - (F_{yL1} + F_{yLR1} + F_{yL2} + F_{yLR2}) H_{cB} \\
& + (F_{zL1} + F_{zLR1} - F_{zR1} - F_{zR2}) d_s - M_{xs1} - M_{xs2}
\end{aligned} \quad (4-13)$$

点头运动

$$\begin{aligned}
& I_{cy} \ddot{\beta}_c = (F_{zL1} + F_{zLR1} - F_{zL2} - F_{zLR2}) l_c \\
& - (F_{xL1} + F_{xLR1} + F_{xL2} + F_{xLR2}) H_{cB}
\end{aligned} \quad (4-14)$$

摇头运动

$$\begin{aligned}
& I_{cz} \left[ \ddot{\psi}_c + V \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{R_c} \right) \right] = (F_{yL1} + F_{yLR1} - F_{yL2} - F_{yLR2}) l_c \\
& + (F_{xR1} + F_{xLR2} - F_{xL1} - F_{xLR2}) d_s
\end{aligned} \quad (4-15)$$

## 2. 轨道系统运动方程

### (1) 钢轨运动方程

钢轨垂向、横向振动微分方程为四阶偏微分方程；钢轨扭转振动微分方程为二阶偏微分方程。引入钢轨正则振型坐标  $q_{zk}(t)$  (垂向)、 $q_{yk}(t)$  (横向)、 $q_{\tau k}(t)$  (扭转)，则得钢轨关于三者正则振型坐标的常微分方程如下<sup>[40]</sup>：

垂向

$$\begin{aligned}
\ddot{q}_{zk}(t) + \frac{EI_y}{m_r} \left( \frac{k\pi}{l} \right)^4 q_{zk}(t) = - \sum_{i=1}^N F_{Vi} Z_k(x_i) + \sum_{j=1}^4 P_j Z_k(x_{pj}) \\
(k=1 \sim NMZ)
\end{aligned} \quad (4-16)$$

横向

$$\begin{aligned}
\ddot{q}_{yk}(t) + \frac{EI_z}{m_r} \left( \frac{k\pi}{l} \right)^4 q_{yk}(t) = - \sum_{i=1}^N F_{Li} Y_k(x_i) + \sum_{j=1}^4 Q_j Y_k(x_{pj}) \\
(k=1 \sim NMY)
\end{aligned} \quad (4-17)$$

扭转

$$\begin{aligned}
\ddot{q}_{\tau k}(t) + \frac{GK}{\rho I_0} \left( \frac{k\pi}{l} \right)^4 q_{\tau k}(t) = - \sum_{i=1}^N M_{Fi} \Theta_k(x_i) + \sum_{j=1}^4 M_{Gj} \Theta_k(x_{pj}) \\
(k=1 \sim NMT)
\end{aligned} \quad (4-18)$$

钢轨垂向、横向和扭转位移表达式分别为：

垂向位移

$$Z_r(x, t) = \sum_{k=1}^{NMZ} Z_k(x) q_{zk}(t) \quad (4-19)$$

横向位移

$$Y_r(x, t) = \sum_{k=1}^{NMY} Y_k(x) q_{yk}(t) \quad (4-20)$$

扭转角位移

$$\phi_r(x, t) = \sum_{k=1}^{NMT} \Theta_k(x) q_{rk}(t) \quad (4-21)$$

(2) 轨枕运动方程

弹性轨枕垂向刚度和阻尼可用串连的方式与道床刚度和阻尼组合起来。由于枕下垫板的厚度较薄，其横向刚度和阻尼暂时无法确定，故轨枕的横向运动暂不考虑枕下垫板的影响<sup>[41]</sup>。因此，弹性轨枕垂向刚度和阻尼为：

$$K_{Esv} = \frac{K_{sv} K_{bv}}{K_{sv} + K_{bv}} \quad (4-22)$$

$$C_{Esv} = \frac{C_{sv} C_{bv}}{C_{sv} + C_{bv}} \quad (4-23)$$

垂向运动

$$M_s \ddot{Z}_s + 2(C_{Esv} + 2C_{pv}) \dot{Z}_s - 2C_{pv} (\dot{Z}_{rL} + \dot{Z}_{rR}) + 2(K_{Esv} + 2K_{pv}) Z_s - 2K_{pv} (Z_{rL} + Z_{rR}) - K_{Esv} (Z_{bL} + Z_{bR}) - C_{Esv} (\dot{Z}_{bL} + \dot{Z}_{bR}) = 0 \quad (4-24)$$

横向运动

$$M_s \ddot{Y}_s + 2(C_{bh} + C_{ph}) \dot{Y}_s - C_{ph} (\dot{Y}_{rL} + \dot{Y}_{rR}) + aC_{ph} (\dot{\phi}_{rL} + \dot{\phi}_{rR}) + 2(K_{bh} + K_{ph}) Y_s - K_{ph} (Y_{rL} + Y_{rR}) + aK_{ph} (\phi_{rL} + \phi_{rR}) = 0 \quad (4-25)$$

刚体转动

$$J_s \ddot{\phi}_s + 2(d^2 C_{Esv} + 2d^2 C_{pv} + 2b^2 C_{pv}) \dot{\phi}_s + 2dC_{pv} (\dot{Z}_{rL} - \dot{Z}_{rR}) - 2b^2 C_{pv} (\dot{\phi}_{rL} + \dot{\phi}_{rR}) + 2(d^2 K_{Esv} + 2d^2 K_{pv} + 2b^2 K_{pv}) \phi_s + 2dK_{pv} (Z_{rL} - Z_{rR}) - 2b^2 K_{pv} (\phi_{rL} + \phi_{rR}) + dK_{Esv} (Z_{bL} - Z_{bR}) + dC_{Esv} (\dot{Z}_{bL} - \dot{Z}_{bR}) = 0 \quad (4-26)$$

## (3) 道床运动方程

左侧道床垂向

$$\begin{aligned}
 & M_b \ddot{Z}_{bLl} + (C_{Esv} + C_{fv} + 2C_w) \dot{Z}_{bLl} + (K_{Esv} + K_{fv} + 2K_w) Z_{bLl} \\
 & - C_{Esv} \dot{Z}_{sl} - K_{Esv} Z_{sl} - C_w \dot{Z}_{bL(i+1)} - K_w Z_{bL(i+1)} + K_{Esv} d\phi_s \\
 & + C_{Esv} d\dot{\phi}_s - C_w \dot{Z}_{bL(i-1)} - K_w Z_{bL(i-1)} + F_{bLRl} - M_b g = 0
 \end{aligned} \quad (4-27)$$

右侧道床垂向

$$\begin{aligned}
 & M_b \ddot{Z}_{bRl} + (C_{Esv} + C_{fv} + 2C_w) \dot{Z}_{bRl} + (K_{Esv} + K_{fv} + 2K_w) Z_{bRl} \\
 & - C_{Esv} \dot{Z}_{sl} - K_{Esv} Z_{sl} - C_w \dot{Z}_{bR(i+1)} - K_w Z_{bR(i+1)} - K_{Esv} d\phi_s \\
 & - C_{Esv} d\dot{\phi}_s - C_w \dot{Z}_{bL(i-1)} - K_w Z_{bR(i-1)} + F_{bLRl} - M_b g = 0
 \end{aligned} \quad (4-28)$$

道床边界条件为

$$\begin{cases} Z_{bL0} = \dot{Z}_{bL0} = 0 \\ Z_{bL(N+1)} = \dot{Z}_{bL(N+1)} = 0 \end{cases} \quad (4-29)$$

$$\begin{cases} Z_{bR0} = \dot{Z}_{bR0} = 0 \\ Z_{bR(N+1)} = \dot{Z}_{bR(N+1)} = 0 \end{cases} \quad (4-30)$$

## 4.1.3 动力学仿真计算程序

根据以上车辆-弹性轨枕有碴轨道耦合动力学模型和理论,利用已有的轮轨接触程序,采用 Visual FORTRAN 90 计算机语言编制了动力学性能仿真分析软件 VETIS,其程序流程见图 4-2<sup>[42]</sup>。

VETIS 动力学性能仿真软件能够分析车辆以不同速度在轨道上运行时,车辆的安全性、舒适性以及车辆和轨道各个部件的动力学性能响应。通过修改输入文件里轨道结构的参数,可以计算普通轨枕有碴轨道和弹性轨枕有碴轨道在相同车辆运行工况下各自结构的动力学性能响应。

VETIS 程序所获得的仿真结果包括:

- (1) 车体、构架和轮对的位移、速度和加速度随时间的变化历程;
- (2) 钢轨、轨枕和道床的位移、速度和加速度响应;
- (3) 轮轨力的响应;以及钢轨-轨枕动反力和其他各连接部件的动作用

力响应。

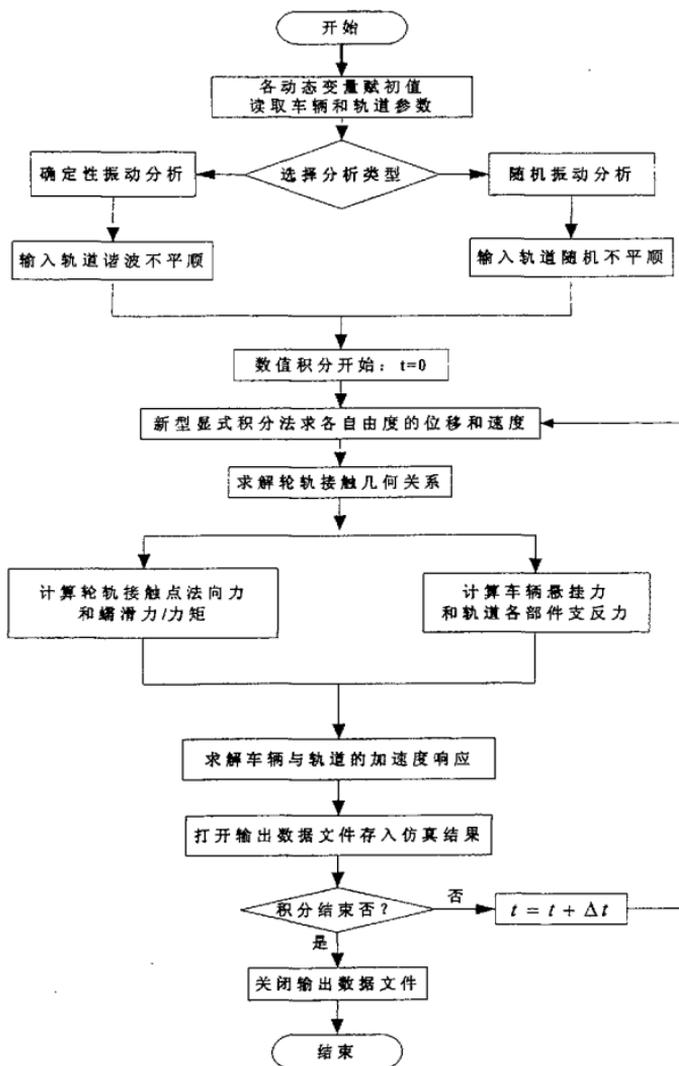


图 4-2 VETIS 程序流程图

## 4.2 动力学仿真计算条件

机车车辆选用“中华之星”动车，运行速度为 120km/h 和 250km/h。  
轨道结构如下：

- 钢轨 60kg/m
- III型混凝土轨枕，枕下垫板刚度 40 kN/mm
- 道床厚度 400mm

车辆和轨道结构具体参数见表 4-1 和表 4-2<sup>[22]</sup>。

表 4-1 “中华之星”动车结构参数

符号	名 称	数 值	单 位
$M_c$	车体质量	59364	kg
$M_t$	转向架质量	5631	kg
$M_w$	轮对质量	1843	kg
$K_{px}$	一系悬挂纵向刚度(每轴箱)	30.80	MN/m
$K_{py}$	一系悬挂横向刚度(每轴箱)	4.88	MN/m
$K_{pz}$	一系悬挂垂向刚度(每轴箱)	0.89	MN/m
$K_{tx}$	二系悬挂纵向刚度	0.32	MN/m
$K_{ty}$	二系悬挂横向刚度	0.32	MN/m
$K_{tz}$	二系悬挂垂向刚度	0.89	MN/m
$K_{\varphi c}$	抗侧滚刚度	8.30	MN/m
$K_{sx}$	二系横向止档刚度	30	kN/m
$C_{sy}$	二系横向止档阻尼	500	KN.s/m
$C_{pz}$	一系悬挂垂向阻尼	30	KN.s/m
$C_{tz}$	二系悬挂垂向阻尼	45	KN.s/m
$d_w$	一系悬挂横向跨距之半	1.025	m
$d_s$	二系悬挂横向跨距之半	1.025	m
$l_c$	车辆定距之半	5.73	m
$l_t$	转向架轴距之半	1.50	m
$a_0$	两滚动圆跨距之半	0.7465	m
$R_0$	车轮滚动圆半径	0.525	m

表 4-2 轨道系统结构参数

符 号	名 称	数 值	单 位
$M_r$	钢轨单位长度质量	60.64	kg/m
$M_s$	轨枕质量	340	kg
$M_b$	道床离散块质量	682.6	kg
$E$	钢轨弹性模量	$2.059 \times 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>
$I_o$	钢轨极惯性矩	$3.741 \times 10^{-3}$	m <sup>4</sup>
$GK$	钢轨扭转刚度	$1.9587 \times 10^5$	N.m/rad
$d$	左右轨中心线距离之半	0.755	m
$l_s$	轨枕长度	2.6	m
$L_s$	轨枕间距	0.60	m
$K_{ph}$	扣件的横向刚度	$3.0 \times 10^7$	N/m
$C_{ph}$	扣件的横向阻尼	$6.0 \times 10^4$	N.s/m
$K_{pv}$	轨下胶垫的垂向刚度	$6.0 \times 10^7$	N/m
$C_{pv}$	轨下胶垫的垂向阻尼	$7.5 \times 10^4$	N.s/m
$K_{bh}$	道床块横向刚度	$1.09 \times 10^7$	N/m
$C_{bh}$	道床块横向阻尼	$4.0 \times 10^4$	N.s/m
$K_{bv}$	道床块垂向刚度	$1.2 \times 10^8$	N/m
$C_{bv}$	道床块垂向阻尼	$5.88 \times 10^4$	N.s/m
$K_{bw}$	道床块剪切刚度	$7.8 \times 10^7$	N/m
$C_{bw}$	道床块剪切阻尼	$8.0 \times 10^4$	N.s/m
$K_f$	路基离散块刚度	$6.5 \times 10^4$	N/m
$C_f$	路基离散块阻尼	$3.1 \times 10^4$	N.s/m

轨道不平顺类型选择了如下两种。

### ① 有缝线路低接头

目前国内许多提速线路都有有缝线路存在,低接头是有缝线路最为常见的一种脉冲激励源,也是道床翻白、冒浆等病害的主要发生部位。其大小设置为最大限值  $0.02\text{rad}^{[43]}$ 。

### ② 高速线路高低随机不平顺

由于我国目前没有高速线路的轨道随机不平顺谱,故选用美国六级高低

随机不平顺轨道谱<sup>[44]</sup>。

### 4.3 不平顺引起的动力响应对比分析

#### 4.3.1 行车的安全性与平稳性

图 4-3 为“中华之星”动车以时速 250km/h 通过设置有不平顺轨道谱的线路时两种轨枕轨道上的轮重减载率对比计算结果。统计分析表明,普通轨枕轨道上的平均最大轮重减载率为 0.40,而弹性轨枕轨道上的平均最大轮重减载率仅为 0.28,使用弹性轨枕后平均最大轮重减载率降低了 30%。足见弹性轨枕完全能够保证良好的轮轨接触关系,相比于普通轨枕更有利于列车的行车安全。

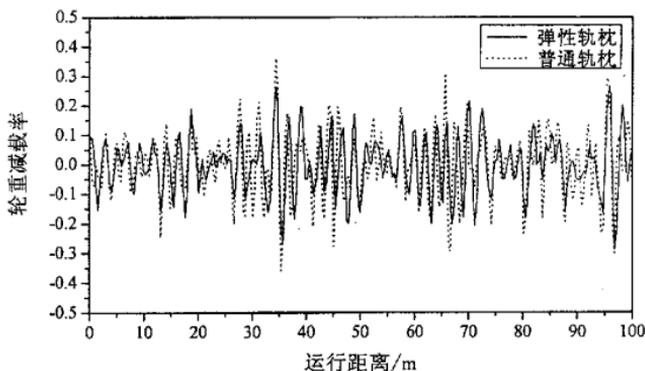


图 4-3 车辆通过轨道不平顺时轮重减载率的对比

表 4-3 给出了车辆高速通过高低不平顺轨道谱时两种轨枕轨道上车体垂向平均最大振动加速度和平稳性指标的计算结果。两种轨道上的车体平均最大振动加速度值都小于客车优级标准 0.0925g,而平稳性指标也都属于客车运行平稳性等级中的良好级(2.5~2.75),可见采用弹性轨枕对车体振动的影响与普通轨枕相比差别很小<sup>[45]</sup>。因此,弹性轨枕的应用能够保证车辆运行的安全性和平稳性。

表 4-3 车体垂向振动响应结果

指 标	弹性轨枕有碴轨道	普通轨枕有碴轨道
车体垂向平均最大加速度(g)	0.088	0.086
车体垂向平稳性指标 $W$	2.67	2.66

### 4.3.2 轮轨垂向作用力响应

图 4-4 给出了有缝线路低接头轮轨垂向作用力计算结果。弹性轨枕与普通轨枕相比,显著降低了轮轨作用力  $P_2$ , 普通轨枕轨道上的  $P_2$  力为 192kN, 而弹性轨枕仅为 150kN 是前者的 78%。由于  $P_2$  力是对轨道变形及轨下基础结构的破坏起主要作用的轮轨力, 因此, 弹性轨枕的这种减振效果无疑会对轨下基础结构起保护作用<sup>[46]</sup>。

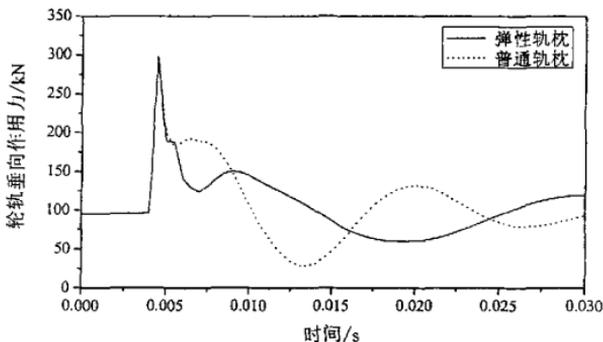


图 4-4 120km/h 车辆通过低接头时轮轨垂向作用力对比

图 4-5 为动车车辆在轨道高低不平顺谱线路上运行时两种不同轨枕有碴轨道上轮轨垂向作用力的计算结果。平均最大轮轨作用力弹性轨枕为 112.2g, 比普通轨枕 122.6g 低 8.5%左右。可见, 弹性轨枕大大优于普通轨枕轨道, 有利于改善轮轨相互动力作用关系。

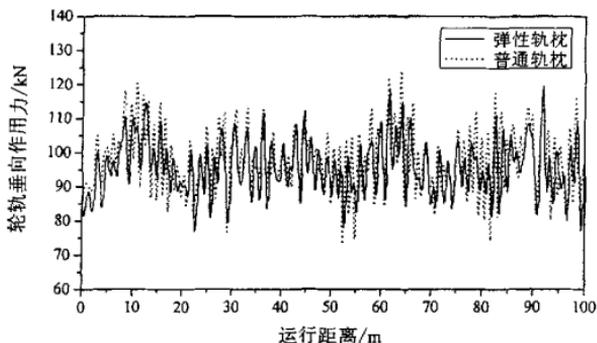


图 4-5 250km/h 车辆通过随机不平顺时轮轨垂向作用力对比

### 4.3.3 钢轨垂向位移响应

弹性轨枕降低了轨道的综合刚度,在相同的载荷作用下,与普通轨枕轨道相比弹性轨枕轨道的钢轨垂向位移必然增大。钢轨垂向位移过大是直接导致轨道不平顺的主要因素,因此必须在允许的范围内尽量减少钢轨的垂向位移<sup>[47]</sup>。图 4-6 为车辆高速通过高低不平顺线路时两种轨道的钢轨垂向位移计算结果。其中,普通轨枕轨道的钢轨平均垂向位移为 0.92mm,弹性轨枕轨道钢轨的平均垂向位移为 1.50mm,是前者的 1.63 倍。这也是钢轨的初始位移,提高弹性轨枕的支承刚度可以降低该值,但弹性轨枕刚度过大又体现不出它的优越性,所以弹性轨枕的刚度值必须从系统的角度出发综合考虑。在钢轨振动幅度方面,弹性轨枕轨道的钢轨最大振幅为 0.79mm,而普通轨枕为 0.57mm,两者相差较小仅为 0.22mm。由于目前我国铁路普遍采用重型轨与重型枕来强化有碴轨道,因此可以降低因钢轨位移较大而对线路产生的不良影响。

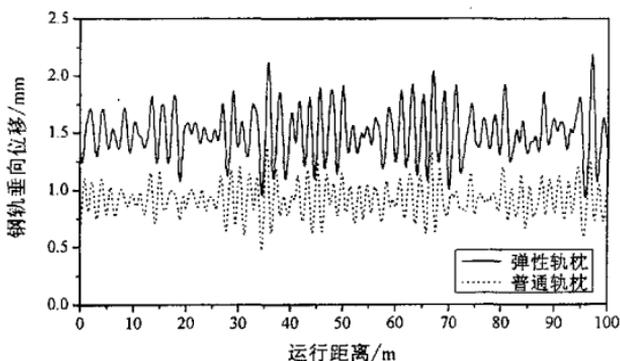


图 4-6 250km/h 车辆通过随机不平顺时钢轨垂向位移对比

### 4.3.4 轨枕垂向振动响应

轨枕是轨道结构的重要部件,承受来自钢轨的压力和振动并将其传递给道床。普通有碴轨道上的轨枕弹性主要由道碴提供,这是因为道碴承受轨枕施加于其上的荷载时,原来嵌合在一起的粒状颗粒能作少量的移动,使轨枕具有了一定的弹性性能。而弹性轨枕的弹性除了道床道碴提供以外,更主要的是由枕下垫板的刚度决定。当枕下刚度变小,轨枕弹性提高后,在相同的

轮轨激励下弹性好的轨枕加速度必然大于普通轨枕加速度。如果轨枕振动加速度过大,可能会导致轨枕螺栓松动,甚或引起扣件断裂,从而使钢轨失去扣压力。剧烈的振动与冲击,还可能导致轨枕产生裂纹,及至断裂而完全丧失工作能力。图 4-7 和图 4-8 分别给出了两种不平顺工况下两种不同轨枕垂向振动加速度响应的计算结果。从图中可以看出,弹性轨枕的振动加速度只比普通轨枕的略大。车辆通过低接头时弹性轨枕最大振动加速度为 65.9g,普通轨枕的为 60.2g,两者相差 9.5%。而在随机不平顺工况下它们的平均最大振动加速度相差更小,弹性轨枕为 14.1g,普通轨枕为 12.9g,相差仅为 1.1g。与此相反,在通过低接头时钢轨的最大振动加速度弹性轨枕轨道反而比普通轨枕轨道小约 8%。由此表明,虽然在增加轨枕弹性的同时会使轨枕振动加速度略有增大,但是相比于普通轨枕这种增加幅度对弹性轨枕本身工作性能以及对轨道其它结构的影响很小。

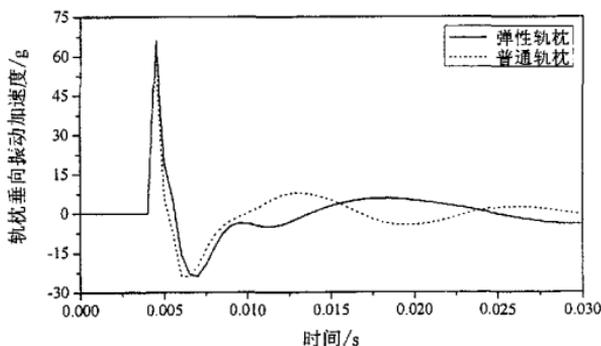


图 4-7 120km/h 车辆通过低接头时轨枕垂向振动加速度对比

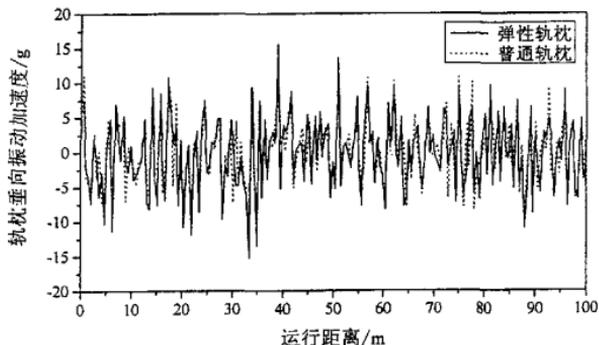


图 4-8 250km/h 车辆通过随机不平顺时轨枕垂向振动加速度对比

## 4.3.5 道床垂向振动响应

高速重载列车在轨道上引起的轮轨振动，将会给轨道破坏以严重影响，其程度不仅与轮轨力的大小有关，还与轨道振动加速度有关。道床振动加速度过大，可使道碴颗粒破碎，相互间嵌制力和摩擦力降低，从而加速道床残余变形积累和轨道不均匀下沉，引起道床板结与沉陷，产生边坡坍塌等严重后果。所有这些均将带来轨道日常维修工作量的剧增。根据我国的观测统计资料，75%的日常维修工作量是用于道床及与道床变形有关的作业上<sup>[48]</sup>。试验结果表明，道床残余变形下沉速率  $\beta$  与道床应力  $\sigma_b$  及道床加速度  $a_b$  的平方之积成正比： $\beta \propto \sigma_b a_b^2$ <sup>[49]</sup>。这充分说明，道床振动加速度对道床乃至轨道的工作能力影响重大。图 4-9、图 4-10 分别给出了两种不平顺工况下两种不同轨枕有碴轨道道床垂向振动加速度响应的计算结果。

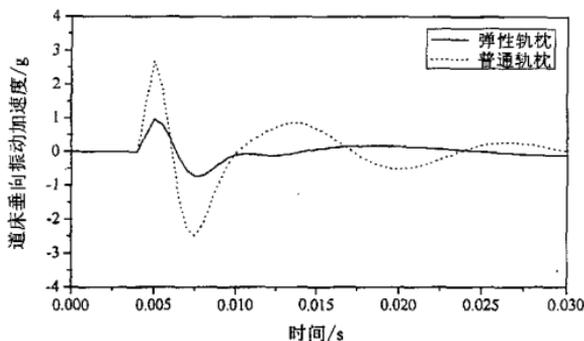


图 4-9 120km/h 车辆通过低接头时道床垂向振动加速度对比

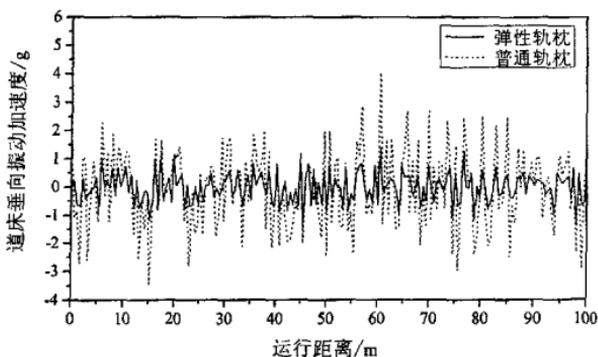


图 4-10 250km/h 车辆通过随机不平顺时道床垂向振动加速度对比

由图 4-9、图 4-10 可以看出,动车车辆通过低接头时弹性轨枕有碴轨道道床最大垂向振动加速度为  $0.95g$ ,普通轨枕则为  $2.69g$ ,前者仅为后者的 35%。当车辆通过随机不平顺时平均最大道床垂向振动加速度,弹性轨枕为  $1.3g$ ,比普通轨枕  $2.8g$  要低 54%。道床振动加速度幅值大幅度减少,道床随时间而变化的残余变形积累减小,因而使道床稳定性得以长久保持。日本新干线试铺试验表明,弹性轨枕有碴轨道道床初期下沉量是普通轨枕的  $1/10$ ,约为  $1.5\text{mm}$  左右。室内试验结果也表明,普通轨枕有碴轨道道床初期下沉量约是弹性轨枕的 3 倍。由此可见,弹性轨枕的应用不仅可以大大降低道床振动加速度和残余变形积累速率,还有利于改善轨下基础的工作状态,减少道床残余变形,延长有碴轨道的维修周期和使用寿命。

#### 4.3.6 道床顶面压应力响应

道床承载着轨枕传递下来的轮轨作用力,同时提供给轨枕一定的弹性,缓冲由此而传递给路基的压力。既有提速线上,在长期频繁的高速重载列车作用下路基下陷、轨道变形,特别是桥隧等刚性基础地段道碴粉化、道床翻白等轨道病害非常严重。这说明由轨枕传递给道床和路基的作用力很大,而有枕下胶垫的弹性轨枕正好可以极大地缓和轨枕与道碴之间的作用力和振动,有效地保护道碴,减少对道床的破坏和路基的下沉。图 4-11 和图 4-12 分别给出了在两种不平顺工况下两种不同轨枕有碴轨道道床顶面压应力的计算结果。

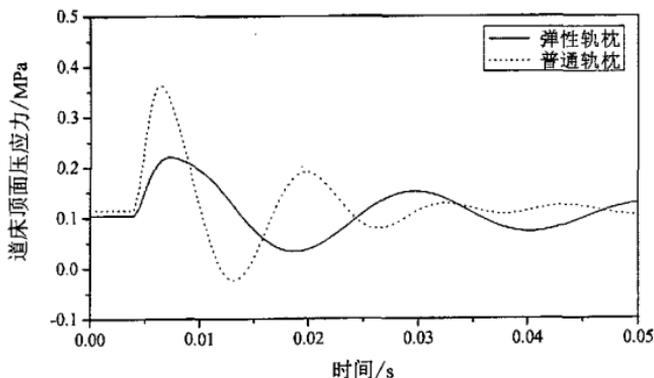


图 4-11 120km/h 车辆通过低接头时道床顶面压应力对比

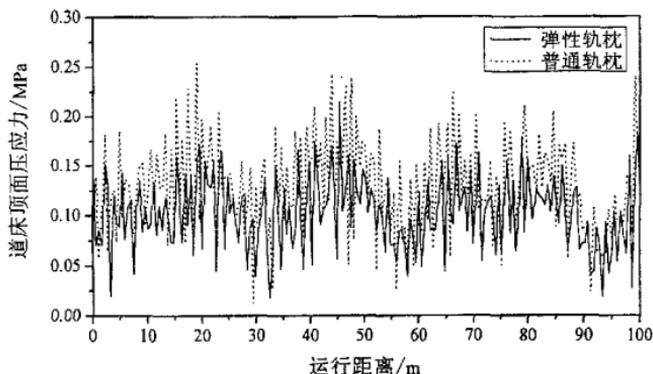


图 4-12 250km/h 车辆通过随机不平顺时道床顶面压应力对比

由图 4-11 可以看出, 车辆通过低接头时道床最大压应力弹性轨枕仅为 0.22MPa, 而普通轨枕为 0.36MPa, 前者仅为后者的 61%。当通过轨道谱不平顺时, 从图 4-12 中能明显看出在相同的不平顺位置弹性轨枕有碴轨道道床顶面压应力普遍比普通轨枕的压应力小, 综合其平均最大压应力弹性轨枕为 0.17MPa, 普通轨枕为 0.24MPa, 采用弹性轨枕的道床顶面平均最大压应力比普通轨枕降低了 30%。道床受压力降低, 则道床传递到路基的压应力也随之相应减小, 在不平顺工况下, 与普通轨枕有碴轨道相比弹性轨枕有碴轨道路基顶面压应力也减少了约 20%。较小的路基压应力有利于轨道的稳定性和线路几何形位的保持<sup>[50]</sup>。由此可见, 由于道床振动加速度和道床、路基压应力的降低, 必将大大缓解道碴粉化、道床翻白、道床板结和路基下沉等轨道病害。

#### 4.4 动力响应功率谱分析

枕下弹性垫板不仅可以减少轨道系统的动力响应幅值, 而且还能降低系统的动力响应频率。图 4-13 为车辆以 250km/h 的速度通过随机不平顺时两种轨道的轮轨垂向力功率谱密度对比计算结果。弹性轨枕轨道的轮轨垂向力作用中频为 30Hz 左右, 而普通轨枕的为 40Hz 左右。由于轮轨作用力的频率降低, 则轨道系统各部件的动力响应频率也相应降低, 这反映了车轮与轨道共同弹性变形的耦合共振弹性轨枕优于普通轨枕<sup>[51]</sup>。

图 4-14 为相同工况下两种轨道道床振动加速度功率谱密度计算结果。

由图可见,道床振动加速度主频弹性轨枕为 32Hz 左右,而普通轨枕为 42Hz 左右,弹性轨枕低于普通轨枕约 10Hz。更为关键的是,道床的振动能量在 20Hz 以下的低频段弹性轨枕低于普通轨枕,而在 30Hz 以上的高频段弹性轨枕道床的振动能量也要比普通轨枕的低,并且随着频率的增加两者的差距越来越明显。研究认为,25Hz 以下的低频振动和 40~80Hz 的中频振动是造成道床变形的主要因素<sup>[52]</sup>。由此,弹性轨枕的道床振动主频不仅比普通轨枕的低,而且在造成道床主要变形的振动频率范围内,其振动能量明显低于普通轨枕道床的振动能量。则道床的下沉变形、道碴粉化、道床板结等病害都将得到极大地改善和缓解,对减少养护维修工作量、延长维修周期有着最直接的作用。这充分说明了弹性轨枕对道床良好的隔振、减振作用,以及非常有效的保护作用。

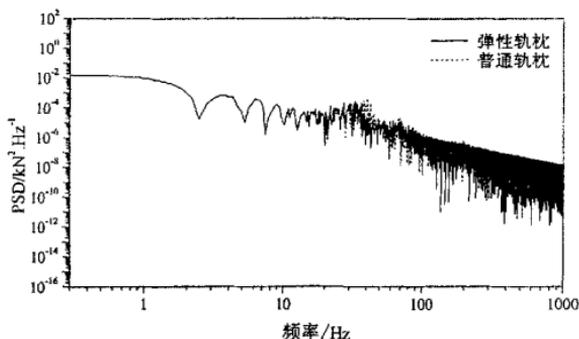


图 4-13 250km/h 车辆通过随机不平顺时轮轨垂向力功率谱密度对比

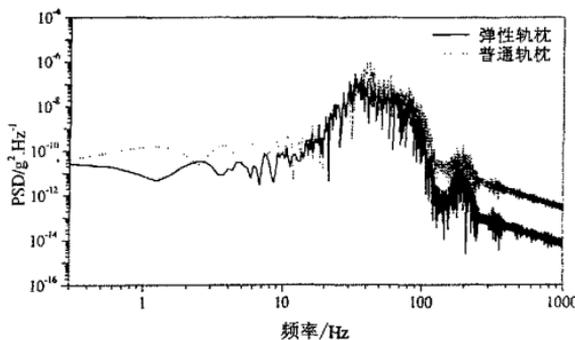


图 4-14 250km/h 车辆通过随机不平顺时道床振动加速度功率谱密度对比

## 4.5 弹性轨枕的刚度效应

就轮轨系统而言,弹性轨枕枕下垫板刚度的变化必定会引起系统各个部件动力响应的改变。枕下垫板刚度过小会大幅度降低轨道的综合刚度,虽然有利于保护枕下结构,但钢轨位移也会相应增大,这不利于保持轨道结构的稳定性和平顺性。枕下垫板刚度太大,其减振、隔振的作用又不能很好地得到体现。因此,研究轨道结构动力响应随枕下垫板刚度变化而变化的趋势,是确定枕下垫板合理刚度的必要方法。经过计算分析,轮轨系统动力学性能响应对枕下垫板刚度变化比较敏感的有钢轨位移、轮轨低频作用力和道床振动加速度<sup>[53]</sup>。

钢轨位移随枕下垫板刚度变化的趋势如图 4-15 所示。从图中可以明显看出,钢轨位移随着枕下垫板刚度的减小而急剧增大。在 20~40 kN/mm 的低刚度区,钢轨位移增大量为 0.78mm,而在 100~120kN/mm 的高刚度区,钢轨位移的增大量仅为 0.07mm。如果钢轨位移较大,将直接影响线路特别是无缝线路几何不平顺的发展速率,加大养护难度、增加维修工作量。

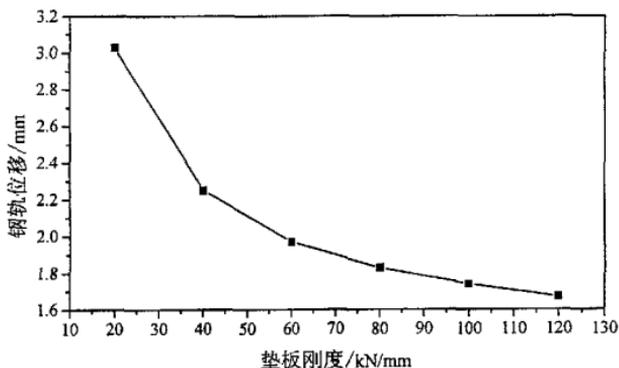


图 4-15 枕下垫板刚度变化对钢轨位移的影响

弹性轨枕有碴轨道轮轨作用力  $P_2$  与道床振动加速度随枕下垫板刚度变化的趋势如图 4-16、图 4-17 所示。与钢轨位移的变化趋势相反,随着枕下垫板刚度的降低,轮轨力  $P_2$  与道床振动加速度响应值均呈非线性减小。垫板刚度越小,轮轨作用力  $P_2$  和道床振动加速度越小,对枕下结构来说减振效果也越明显。

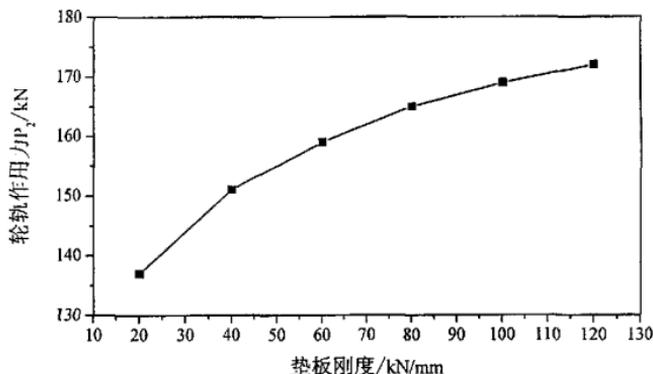
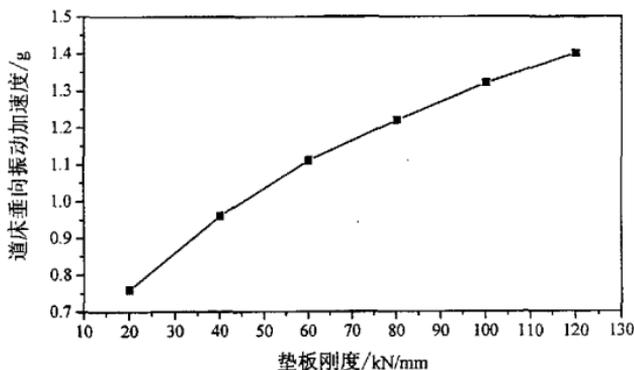
图 4-16 枕下垫板刚度变化对轮轨  $P_2$  力的影响

图 4-17 枕下垫板刚度变化对道床振动加速度的影响

由此可见，在有碴轨道道床刚度一定的情况下，采用低刚度枕下垫板有利于改善轮轨低频作用力和枕下结构的动力响应水平，但是刚度过小又会引起钢轨位移的增大。因此在综合分析轮轨系统各个部件的动力响应基础上，弹性轨枕枕下胶垫刚度以 40~60kN/mm 为宜。

#### 4.6 弹性轨枕的速度效应

如前所述，弹性轨枕可以通过减小轮轨作用力  $P_2$  来改善列车与轨道的相互作用关系。当列车运行速度提高时， $P_2$  力的变化趋势如图 4-18 所示。在弹性轨枕有碴轨道上列车运行速度每提高 10km/h， $P_2$  力约增加 4.8kN；而

普通轨枕则增加至 7.9kN。可见，随着既有线提速，采用弹性轨枕有利于降低  $P_2$  力，当列车速度为 250km/h 时，弹性轨枕轨道的  $P_2$  力仅相当于普通轨枕轨道列车速度为 145km/h 的  $P_2$  力。

道床振动加速度随速度变化的趋势如图 4-19 所示。列车运行速度每提升 10km/h，弹性轨枕有碴轨道道床振动加速度约增加 0.075g，而普通轨枕却增加 0.211g。并且随速度的提高，两种不同轨枕有碴轨道道床振动加速度的差值越来越大，当速度为 100km/h 时两者相差 1.46g，但在 250km/h 时却相差 3.49g。同时道床振动加速度的绝对值弹性轨枕远远低于普通轨枕，250km/h 时的道床振动加速度值比普通轨枕 100km/h 时的值还低 15%。

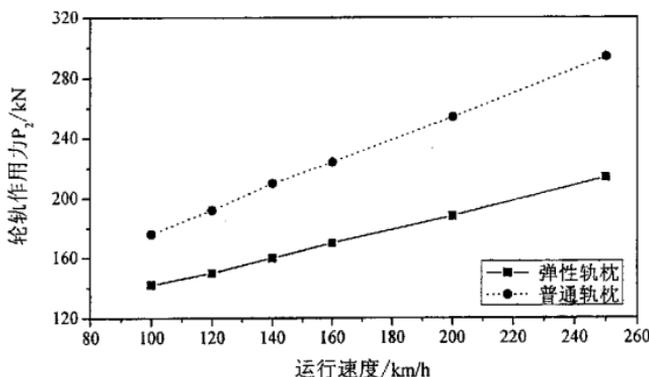


图 4-18 速度变化对轮轨作用力  $P_2$  的影响

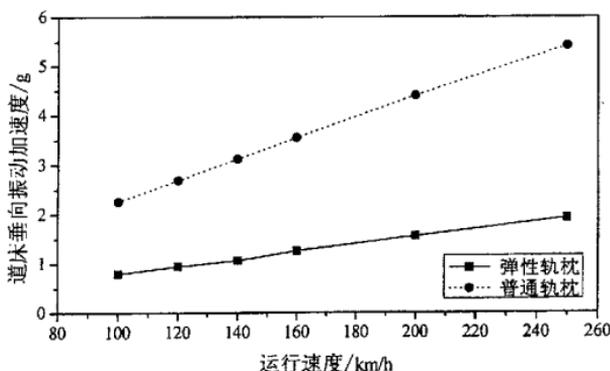


图 4-19 速度变化对道床振动加速度的影响

随着列车运行速度的不断提升,不管是轮轨冲击低频力,还是道床振动加速度响应,与普通轨枕相比弹性轨枕都显示了极大的优越性。由此可见,弹性轨枕不仅能满足既有线不断提速的需要,还能满足高速新线建设强化有碴轨道的需要。

## 4.7 基本结论

借助 VETIS 软件对比计算了弹性轨枕有碴轨道与普通轨枕有碴轨道在相同工况下系统各个部件的动力响应,以及弹性轨枕的刚度效应和速度效应。归纳起来,可得如下几点结论:

(1) 弹性轨枕有碴轨道能保证行车的安全性和平稳性。

(2) 弹性轨枕能大大降低轮轨低频作用力,缓和列车对轨道的冲击。

(3) 弹性轨枕轨道钢轨垂向位移略大于普通轨枕,但在重型轨和重型枕强化后,可以消除钢轨垂向位移对轨道的不良影响。

(4) 弹性轨枕轨道的轨枕振动加速度比普通轨枕轨道的略有增加,但并不影响其工作性能和其他结构的动力响应水平。

(5) 弹性轨枕能显著降低道床振动加速度、道床顶面压应力以及路基顶面压应力,从而可减小道床残余变形、道碴粉化、道床翻白和板结等病害,减轻养路工作量,降低维修成本,延长轨道的使用寿命。

(6) 弹性轨枕不仅能降低轨道系统的动力响应值的大小,而且还能减少动力响应的作用频率,更加有利于对轨下基础结构的保护。

(7) 弹性轨枕枕下胶垫刚度以 40~60kN/mm 为宜。

(8) 随着既有线提速、高速新线兴建及城市轨道交通的发展,铺设弹性轨枕优于普通轨枕。

(9) 至于弹性轨枕的线路维护周期有可能比普通轨枕有碴轨道延长 1~1.5 倍,尚需运营实践的验证。

## 第 5 章 弹性轨枕工程应用分析

有碴轨道是铁路传统的轨道结构,它具有弹性好、造价低廉、更换与维修养护方便、吸噪特性好等优点。因此从诞生之日起历经 170 多年,到科学技术发生翻天覆地变化的今天,有碴轨道结构仍未被淘汰,足见其具有不可替代的优势。然而随着行车速度和列车轴重的提高,其缺点也更加显露,轨道破损加剧、维修工作量显著增加、维修周期明显缩短,为此必须采取有效的技术措施进行强化处理<sup>[54]</sup>。轨道破损的主要对象是碎石道床,统计表明 60~80%的养路工作量都用于道床作业。只要能有效地减少道床的变形和破损,有碴轨道不仅在既有提速线上,而且在新建高速线路上都将发挥更加重要的作用。

弹性轨枕能够降低道床振动加速度、减少道床和路基的压应力,有效地保护碎石道床,延缓道床的变形和破损,是当前国内外铁路强化有碴轨道的一项重大技术对策。

### 5.1 既有提速线上的应用分析

2004 年 4 月 18 日,我国铁路成功的实施了第五次大面积提速。此次提速是树立和落实科学发展观的具体体现,是推进铁路跨越式发展的战略举措。与前四次提速相比,在许多方面实现了重大进步和历史性跨越。使客运能力增长了 18.5%;货运能力增长了 15.0%;大秦铁路设计能力为 1 亿吨,2004 年进一步加大扩能改造力度,突破了 1.5 亿吨,达到了 1.53 亿吨,同比增长了 27.0%;京沪、京广、陇海、京山、沈山、哈大等繁忙干线普遍增开 5000 吨系列重载列车,运输能力得到较大提升<sup>[7]</sup>。

2005 年是第六次大面积提速调图的准备年,这次大面积提速将在京哈、京沪、京广、陇海、兰新、胶济、武九、浙赣等线实施。在这些线路部分区段,列车运行时速将达到 200 公里的水平,到时全路时速 120 公里以上的线路延展长度将达到 22000 多公里,其中 5300 多公里将达到时速 200 公里。

为配合好全国铁路大提速,必须对基础工程特别是线路进行强化处理,以保证提速列车运行的稳定性和安全性。以前提速强化处理已经采用过铺设

重型钢轨和重型混凝土轨枕，这种强化措施目的并非是为了增加轨道的强度，而是为了减少轨道变形，保持平顺的列车运行轨面。然而，随着列车速度和轴重的提高，这种强化措施更加重了对碎石道床的破坏，维修更加频繁、维修工作量更加繁重。为保证铁路大面积提速的实施，减少碎石道床的变形和破损是必要条件。为此，必须采取强有力的措施降低道床的振动、减轻道床压应力。

如前所述，室内基础试验所得的弹性轨枕枕下道床支承刚度远比普通轨枕枕下道床支承刚度为低，它明显地降低了轨道刚度，提高了轨道弹性，有利于强化有碴轨道，改善轨道的振动冲击作用，适应于既有线全面提速战略工程的需要。道床下沉特性测试结果表明在相同的工况条件下弹性轨枕有碴轨道的道床下沉曲线特性明显优于普通轨枕有碴轨道，这有利于减缓道床残余变形积累速率，减少线路养护维修工作量及其费用，可以延长线路综合维修周期。这与日本新干线试铺试验结果相似。这也是弹性轨枕良好性能的直接验证。

动力学性能仿真分析表明，弹性轨枕不仅可以保证行车的平稳性、安全性，而且更重要的是可以大大降低道床的振动加速度和振动能量，还可以减少由钢轨传递来的道床压应力和路基压应力。由 4.3.5 节中的公式可知，如果道床平均振动加速度降低 20%，道床压应力降低 10%，则道床残余变形下沉速率将减少 60%左右。另外，根据美国和其它国家的研究成果，道床的变形和破损程度与道床压应力的 3~4 次方成正比<sup>[51]</sup>。在同样的条件下，弹性轨枕降低道床压应力 10%，则就可使道床变形降低 30~40%。

弹性轨枕的速度效应仿真分析表明，随着列车运行速度的提升，不管是轮轨低频作用力，还是道床振动加速度和道床、路基压应力等动力响应的增加幅度，弹性轨枕远远小于普通轨枕。特别是弹性轨枕轨道在中高速条件下的动力响应与普通轨枕轨道中低速条件下的动力响应相当，甚至还低。即是既有线提速后的线路采用弹性轨枕，其轨道系统动力响应与提速前的普通轨枕轨道动力响应水平相近。

由此，弹性轨枕在既有提速线上的应用可以确保道床的变形和破坏程度大大降低，从而极大地缓解因此而造成的线路不平顺和轨道损伤，延长维护周期、减少维修工作量，为我国即将到来的既有线第六次大面积提速提供强有力的技术支持和基础保障。

## 5.2 高速线上的应用分析

目前世界上高速铁路轨道结构主要有两种类型：有碴轨道与无碴轨道。从实践经验看，两种轨道都可运行时速 300 公里的高速列车。如法国高速铁路和日本的山阳新干线均全部或部分铺有有碴轨道。有碴轨道与无碴轨道各有优缺点，在高速铁路究竟铺设何种类型轨道结构，应从技术与经济角度全面衡量决定。目前，我国已经批准了九条高速客运专线，其中郑西、武广、石太、京津城际 4 个客运专线建设项目已进入施工准备阶段，客运专线建设由此开始启动。根据我国现阶段的经济状况和铁路技术水平，全线铺设无碴轨道的时机还不成熟。从技术经济角度出发，时速 300 公里以下的高速线路上，在桥隧等刚性基础地段宜铺设无碴轨道，而大多数路基地段还是应以有碴轨道为主。

法国、德国和日本采用有碴轨道的高速铁路，其行车安全性和舒适性能够得到保证，并且时速 300 公里以下的列车在有碴轨道上运行时，乘车舒适性反而好于无碴轨道。有碴轨道用于高速铁路的主要缺点是维修费用高、维修周期短。根据德国高速铁路的资料，当行车速度为 250~300km/h 时的线路维修费用约为行车速度为 160~200km/h 时的两倍，速度为 250~300km/h 时通过总重达 3 亿吨的道碴就需要全部更换，而在 160~200km/h 时则可通过 10 亿吨总重。法国巴黎到里昂的高速有碴轨道开通 15 年后，对其评价则是“尽管维修周期逐年缩短，轨道道床体系的恶化依然呈严重增长趋势”<sup>[52]</sup>。由此可以看出，高速铁路有碴轨道与既有提速线路一样最主要的缺点还是集中在碎石道床上，而这恰恰又是它的优点所在：经济、吸声、减振、易于维护。如何在保证碎石道床优点的基础上，减缓其缺点的出现，从而可提供经济、有效、实用的适合我国国情的高速铁路轨道结构。弹性轨枕应该成为解决这一问题的主要技术方案。如上节所述，具有适宜刚度的弹性轨枕能够对碎石道床提供有效的保护作用和具有良好的减振、隔振效果，可以极大地缓解道床因列车速度和轴重的提升带来的变形和破坏，使高速铁路具有与既有提速线相近的维修工作量和维修周期。而且弹性轨枕还将大大改善地面与线路周边建筑物的振动，同时降低轮轨系统的振动噪声。日本东海道新干线试铺试验表明，在列车 270km/h 速度行驶下，地面振动与试铺前列车时速 220km/h 的振动级相同，甚至还低。在高架桥上测得的振动噪声下降了 7dB。

因此，弹性轨枕在高速铁路有碴轨道上的应用，必将极大地缓解工务部

---

门的维修压力。在目前我国经济还不十分发达的情况下，有利于推进高速铁路的建设，快速扩充铁路的运输能力，对满足社会经济建设的需要有着十分重要的现实意义。

---

## 结 论

通过对弹性轨枕成型的研究、室内基础试验和动力学性能仿真分析,可以得到以下几点结论:

1. 为使弹性轨枕的弹性性能得以长久保持,枕下垫板材料的选择是关键所在。根据国内外经验和相关标准,确定以三元乙丙橡胶作为枕下垫板的基材,在此基础上对垫板外形及刚度进行方案设计和筛选。对弹性轨枕成型进行了仔细研究,最后确定粘结和锚固两套方案,并制定了严格的弹性轨枕成型制作工艺流程。试验结果表明使用特制粘结剂的轨枕凹槽粘结方案完全可以满足弹性轨枕的粘结要求。

2. 室内基础试验结果表明:弹性轨枕道床横向阻力完全能够满足普速铁路无缝线路稳定性对道床横向阻力 $\geq 8\text{kN}/\text{根轨枕}$ 的要求,同时也符合既有线提速改造和新建时速 200km 客货共线铁路对道床横向阻力 $\geq 10\text{kN}/\text{根轨枕}$ 的基本要求;弹性轨枕枕下道床支承刚度仅为普通轨枕枕下道床支承刚度的 20~30%,它明显地降低了轨道刚度,提高了轨道弹性,有利于强化有碴轨道,改善轨道的振动冲击作用,可适应既有线全面提速战略工程的需要;弹性轨枕轨下截面荷载力矩低于普通轨枕轨下截面荷载力矩,这有利于改善轨枕的受力分布状态;弹性轨枕有碴轨道的道床初始下沉量是普通轨枕道床的 1/3,约为 3mm。回归的下沉特性曲线明显优于普通轨枕有碴轨道,这有利于减缓道床残余变形积累速率,减少线路养护维修工作量及其费用,可以延长线路综合维修周期;弹性轨枕通过运量 8000 万 t 后,枕下橡胶垫板无剥离、无撕裂、无穿孔,也无严重磨损,达到了设计时的物性目标。

3. 动力学性能仿真分析结果表明:弹性轨枕有碴轨道能够保证行车的安全性和平稳性;弹性轨枕能大大降低轮轨低频作用力,缓和列车对轨道的冲击;弹性轨枕轨道钢轨垂向位移大于普通轨枕,但在重型轨和重型枕强化后,可以消除钢轨垂向位移对轨道的不良影响;弹性轨枕轨道的轨枕振动加速度比普通轨枕轨道的略有增加,但并不影响其工作性能和其它结构的动力响应水平;弹性轨枕能显著降低道床振动加速度、道床顶面压应力以及路基顶面压应力,从而可减小道床残余变形、道碴粉化、道床翻白和板结等病害,减轻养路工作量,降低维修成本,延长轨道的使用寿命;弹性轨枕不仅能降

低轨道系统的动力响应值的大小和道床的振动能量,而且还能减少动力响应的作用频率,更加有利于对轨下基础结构的保护;弹性轨枕枕下胶垫刚度以 40~60kN/mm 为宜;随着既有线提速、高速新线兴建及城市轨道交通的发展,铺设弹性轨枕优于普通轨枕。

当然,以上工作只是弹性轨枕有碴轨道研究的一个开端。要达到真正的工程应用尚需在以下几个方面进一步研究和论证。

1. 技术经济效益比较。从目前来看,弹性轨枕的初期投入约是普通轨枕的两倍,如果在运营中能够大量减少维修费用,节约维修成本,且在枕下垫板使用寿命范围内使其减少的养护维修费用大于初期投入,那么,弹性轨枕的应用能够为铁路部门带来良好的社会效益和经济效益,它的大面积推广使用也指日可待。

2. 由于枕下垫板由橡胶制成,橡胶制品都不可避免地面临老化和使用寿命问题。所以,在线路运营中如何确定枕下垫板的刚度硬化曲线,求出垫板的使用寿命,是弹性轨枕工程应用必然面临的又一个问题。

3. 铺设弹性轨枕必然会遇到弹性轨枕与普通轨枕或者其它轨道结构的过渡问题。由于两种轨道结构的综合刚度相差较大,列车通过时钢轨位移有一突变,轨道容易产生折角。因此,尚需进一步研究弹性轨枕与其它轨道结构的过渡问题,以及弹性轨枕因枕下垫板刚度不一而产生的轨道弹性不均对轨道的动态破坏效应问题。

## 致 谢

在论文完成之际，我谨向所有关心、帮助、鼓励和支持过我的老师、同学、亲人和朋友表示衷心地感谢！

首先我要感谢我的导师翟婉明教授，在近三年的研究生学习期间，自始至终都得到了导师的悉心指导和关心。导师良好的国际声誉、深厚的学术造诣、严谨的治学态度、平易近人的为师风范和孜孜不倦的工作精神使我深受启发和感染，获益良多，必将使我终生受益。在生活上，导师也给予了极大的关怀，使我能够很好地完成硕士阶段的学习。在此，我向我的导师翟婉明教授表示由衷的敬佩和深深的谢意！

特别向王其昌教授致以最诚挚的谢意。感谢王老师无私地提供给现场试验的机会和许多宝贵的资料，以及始终如一给予学生在学习上的指导和生活上的许多帮助。对我论文在选题、计划、大纲制定和全部研究、论文编写工作中，所提的忠恳的建议，使我在论文完成过程中理顺了思路，开阔了视野。王教授虽年逾古稀，但工作热情不减、勤耕不辍、思维清晰、令学生钦佩不已！值得晚辈永远学习。感谢蔡成标教授和赵春发老师对学生计算机应用方面所给予的帮助及生活方面所给予的关心！

本论文的完成也离不开研究所其他各位师兄弟和师妹们的帮助。在三年的学习生活中，大家互相帮助，共同进步，结下了深厚的友谊。在离别之际，谨向师兄弟和师妹们表示谢意，并衷心地祝愿他们学业有成，生活幸福！

最后我要感谢我的父母和家人对我学业的支持和鼓励。在我三年的研究生学习期间，他们从精神和物质上给予了无私的帮助，使我更好地投入到学习和工作中，得以顺利完成论文。在此我向他们表达我深深的谢意和感激！

## 参考文献

- [1] 王其昌,钱振地,张雷,罗震.高速有碴轨道弹性轨枕的应用.铁道标准设计,2004,(8)
- [2] 张雷,翟婉明,王其昌.弹性轨枕有碴轨道动力响应分析.铁道标准设计,2005,(5)
- [3] 三浦 重等.实用形有道床弹性まくらぎの開発.RTRI REPORT,Vol.4, No.5 1990.5
- [4] Getzner. Use of sleeper pads in ballasted track. System solutions with elastic materials,2003,(4)
- [5] 上海铁路局杭州工务段.利用废枕木制做轨枕胶合垫板.中国铁道出版社,1977
- [6] 国家发改委.中长期铁路网规划.发改交运[2004]159号
- [7] 铁道部统计中心.2004年铁道统计公报.中国铁道出版社,2005
- [8] 王其昌.铁路线路大修工程.中国铁道出版社,1994
- [9] 王文全.高速弹性轨道.铁道科学研究院,1991
- [10] 王其昌.矿山铁路重载轨道技术参数研究报告.西南交通大学,1992
- [11] 宮本秀郎,松浦范夫.有道床弹性まくらぎの敷設効果.日本鉄道施設協会誌, 1991
- [12] 堀池高広等.低廉化有道床弹性まくらぎの開発.RTRI REPORT, Vol.12, No.3 1998.3
- [13] Coenraad Esveld. Modern Railway Track. 2001
- [14] (苏)加尔莫诺夫著.合成橡胶.秦怀译.化学工业出版社,1988
- [15] 中华人民共和国铁道部.铁路混凝土轨枕枕下弹性垫板.中国铁道出版社,1995
- [16] (日)户原春彦主编.防振橡胶及其应用.牟传文译.中国铁道出版社,1982
- [17] 傅政.橡胶材料性能与设计应用.化学工业出版社,2003
- [18] 龚积球,龚震震,赵熙雍.橡胶件的工程设计及应用.上海交通大学出版社,2003
- [19] 姚明初.混凝土轨枕设计和制造(上,下).中国铁道出版社,1984

- 
- [20] 卢祖文.铁路轨道结构及修理.中国铁道出版社,2002
- [21] 朱玉璘,张亚丽,杨茹果.低发泡聚氨酯弹性体在高速铁路中的应用.合成橡胶工业,1994,17(5)
- [22] 铁道部工务局.铁道工务技术手册—轨道.中国铁道出版社,1998
- [23] 高品贤.振动、冲击及噪声测试技术.西南交通大学出版社,1999
- [24] 铁道部第一工程局.铁路工程施工技术手册—轨道.中国铁道出版社,1996
- [25] 佐藤吉彦.新轨道力学.徐勇译.中国铁道出版社,2001
- [26] 曾树谷.铁路轨道动力测试技术.中国铁道出版社,1988
- [27] 李光明.快速重载轨道技术手册.中国铁道出版社,1999
- [28] 郝赢.铁道工程.中国铁道出版社,2002
- [29] 董大陨.铁路轨道.中国铁道出版社,1985
- [30] 王其昌.碎石道床的下沉及残余变形积累.铁道标准设计,1992,(5)
- [31] 李仲才.发展铁路重载运输铁道线路面临的问题与对策.铁道科学研究院,1986
- [32] 佐藤 裕.轨道力学.铁道现业社,1972
- [33] 翟婉明著.车辆-轨道耦合动力学(第二版).中国铁道出版社,2002
- [34] 彭国伦.Fortran 95 程序设计.中国电力出版社,2002
- [35] W.S Brainerd walter. Fortran 90 编程指南(第三版).高等教育出版社,2000
- [36] 严隽堯.车辆工程.中国铁道出版社,1992
- [37] ZHAI Wan-ming. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering. International Journal for Numerical Methods in Engineering,1996,39(24):4199-4214
- [38] ZHAI Wan-ming, SUN Xiang. A detailed model for investigating vertical interaction between railway vehicle and track. Vehicle System Dynamics, 1994,23(Supplement):603-615
- [39] ZHAI W M, CAI C B, GUO S Z. Coupling model of vertical and lateral vehicle/track interaction. Vehicle System Dynamics. 1996,26(1):61-79
- [40] 倪振华.振动力学.西安:西安交通大学出版社,1986
- [41] 翟婉明,蔡成标,王其昌.高速铁路轨道刚度与胶垫应用.铁道标准设计,1994,(4)
-

- 
- [42] 何光渝,高永利. Visual Fortran 常用数值算法集. 科学出版社,2002
- [43] 卢祖文编. 混凝土轨枕线路维修. 中国铁道出版社,1996
- [44] 铁道部科学研究院. 我国干线轨道不平顺谱的研究报告(1~10),1997
- [45] 翟婉明,陈果. 根据车轮抬升量评判车辆脱轨的方法和准则. 铁道学报,2001,23(2):17-25
- [46] Jenkins H H, et al. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces. Railway Engineering Journal,1974,3(1):2~16
- [47] A.D.Kerr. Railroad Engineering. Class Notes. University of Delaware,1981
- [48] 曾树谷. 重载轨道结构的动力试验. 铁道学报,1988,10(2):66~77
- [49] 罗克奇. 铁路道床振动计算与试验. 长沙铁道学院报,1996,(2)
- [50] Makoto ISHIDA, Shigeru MIURA and Akiko KONO. Track dynamics model and its analytical results, RTRI Report, 11(2), 19-26,1997
- [51] 陈果. 车辆-轨道耦合系统随机振动分析. 西南交通大学博士学位论文,2000
- [52] 范俊杰. 现代铁路轨道. 中国铁道出版社,2001
- [53] 雷晓燕. 轨道力学与工程新方法. 中国铁道出版社,2001
- [54] Makoto ISHIDA. The past and future of track dynamics models. RTRI Report, 14(4), 1-6,2000
- [55] Esveld, Zand, Scheepmaker, Suiker. Dynamics behaviour of railway track. Rail Engineering International Edition. 1996
-

---

## 攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 王其昌,张雷.曲线通过速度列线图.铁道工务,2003,(4)
- [2] 王其昌,蔡成标,张雷,罗震.国内外铁路土路基上无碴轨道的应用.铁道标准设计,2003,(12)
- [3] 高健敏,张雷.日本高速铁路先进技术的近期研究与发展.国外铁道车辆,2004,(2、3)
- [4] 王其昌,钱振地,张雷,罗震.高速有碴轨道弹性轨枕的应用.铁道标准设计,2004,(8)
- [5] 张雷,翟婉明,王其昌.弹性轨枕有碴轨道动力响应分析.铁道标准设计,2005,(5)
-