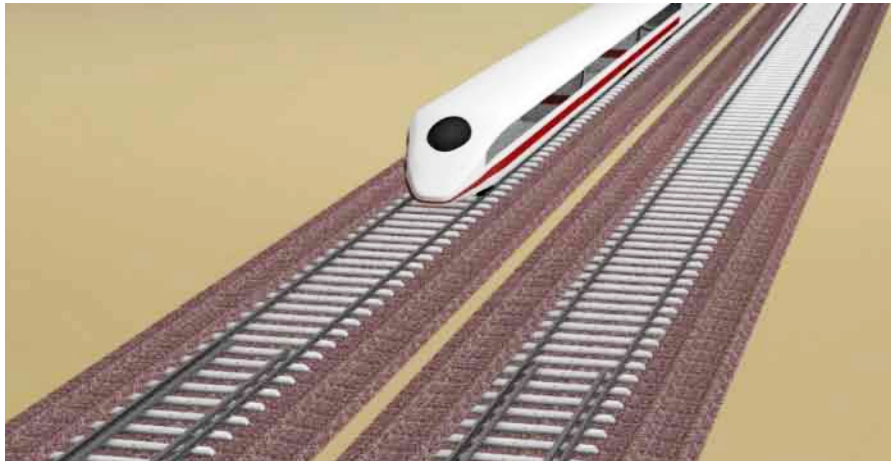


# 对过渡段进行刚度优化，提高线路可用性

Martin Quirchmair: 格士纳公司系统研发部，高级工程师，奥地利

Harald Loy: 格士纳公司系统研发部，部门经理，高级工程师，奥地利



## 摘要

铁路过渡段通常需要较多的维护工作，即使在现代化铁路网中也是如此。不同上部结构的突然转变会造成轨道参数的不连续，如钢轨挠度和基础模量。列车驶过时，该区域的动态受力突然增大，从而导致上部结构加速磨损。通过使用现代计算方法设计的高质量弹性元件可以有效改善轨道道床质量，从而提高铁路线路的可用性。本文主要讨论了过渡段中出现的典型问题。实际的应用案例展示了 Sylomer® 和 Sylodyn® 制成的弹性产品在轨道刚度优化方面的优势。此外，文章还阐述了使用有限元 FEM 建模软件进行设计的优势和益处。该设计方法基于在实验室中测定的材料特性和来自现场测量的结果。

如同链条总是在最弱的一环断裂一样，铁路网络中轨道维护的时间是由最薄弱部分的状况所决定，而过渡段通常就是薄弱环节之一。过渡段位于上部结构和道床连续支撑发生中断以及轨道下部结构的刚度改变的区域 (图 1)。

典型的过渡段出现在无砟轨道和有砟

轨道的交界处，或开放式轨道穿越土工结构的区域 (例如桥梁、隧道或涵洞)。此外，同类型轨道结构中也可能出现不连续面。如对减振要求高的住宅区，可以在有砟轨道下铺设柔软的、具有隔振性能的弹性道砟垫，而在其他开放的区段没有此类减振要求。这种情况下，对有道砟垫的区段和无道砟垫区段的交界处的过渡段处理也应该加以重视。

利用传统的分析方法如 Zimmermann 连续梁理论，只能将过渡段拆分、分段研究，而借助数据建模计算方法 (FEM 有限元分析法)，可以将过渡段作为整体考虑。这样便可以非常精确地分析轨道参数突变的关键部位，并通过有针对性的使用弹性部件对过渡段进行优化。在轨道上进行的实地测量可以验证计算模型的准确性，并不断进行针对性调整和改进。

## 过渡段常见病害

仔细检查铁路上部结构，经常可以在过渡段发现问题。由于刚度的变化引起的钢轨挠度差，以及不同类型的上部结构的过渡而引起的轨道参数的突然变化会导致

动态应力增加。铁路车辆必须在过渡段跨过一个“台阶”，这会导致列车经过时轮轨作用力的突然增加 (取决于“台阶”的高度)。这些可明显感受到的冲击会显著加快过渡段上部结构的磨损，长期作用下，会导致道床下沉和个别部件的损坏 (图 2)。

在有砟轨道到无砟轨道的过渡段中，由于道砟的移动和磨损造成的道床下沉不可避免。因此，必须定期捣固轨道，以防止轨枕下方出现空隙和悬吊。维护周期取决于列车速度和作用在上方的动态应力。

由于采用坚固的混凝土结构，无砟轨道很少或者甚至不会下沉，从而导致有砟轨道的行车面比无砟轨道低。再加上刚度的局部变化，引起的钢轨挠度差会对上部结构产生显著增大的动态应力，这将导致钢轨基座周围产生过载。

随着时间推移，在过渡段区域经常出现的磨损迹象会加剧轨道病害。因道砟过度磨损而导致的泛白、因单位荷载过高造成的下沉以及钢轨表面的短波波磨 (图 3) 是经常出现的问题。轨枕下方的悬空和空吊会导致过载，从而产生的严重后果，如弹条、螺栓和轨枕出现裂缝，乃至相关部件的断裂。

在钢轨表面形成的短波波磨可以被视为是由不同上部结构的显著不同的固有频率导致的现象。这些可以归结为由高动态力导致的不同振动激发机制产生的结果。

上述提及的损坏情况会导致过渡段维护工作增加，从而增加线路运营的成本。

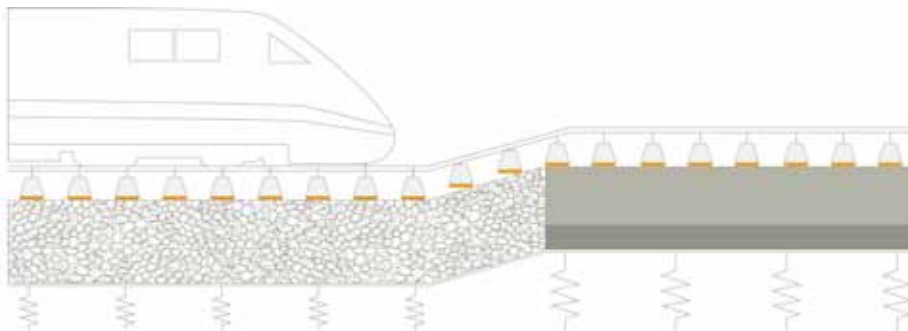


图 1: 在过渡段，参数的改变会在轨道内形成不连续断面

## 维护工作的增加



图 2: 有砟轨道到无砟轨道过渡段发生的病害



图 3: 过渡段发生磨损的表现: 道砟泛白 (左图)、道床下沉 (中图) 和短波波磨 (右图)

最大限度的保持路网运营是每家铁路运营商的主要关注点。众所周知，“时间就是金钱”，任何由于维护工作造成的线路关闭都会造成利润损失，因此必须尽量减少因维修而导致的线路关闭。过渡段虽只是整体路网的一小部分，其损毁却会产生预期之外的高额维护费用。

美国铁路网络运营商大约每年支出2亿美元用于过渡段的维护。而在欧洲，该数字约为8500万欧元。例如，来自荷兰的数据显示，与正常的区间轨道相比，过渡段需要二至四倍的维护费用。

与路网的其他区段相比，过渡段的长度可谓微不足道。通过使用高性能的上部结构弹性部件和经过技术优化的综合解决方案，可以很快收回额外附加的投资成本，而且铁路网络的持续运营得到了保障。

## 对过渡段的要求

为制定有效的解决方案，需要了解确

切的要求。其中轴重和行车速度作为最重要的设计条件需要明确。

过渡段优化方案设计主要遵循以下主要原则：

- 在轨道刚度出现突变的地方，减少动态作用力
- 调整轨道的现有刚度差
- 减少沉降，尤其是在过渡段至固定约束点区域
- 考虑成本和收益，选取过渡段的最佳长度

一般而言，传统有砟轨道太硬，且常常需要连接到较柔软的区段，如带有高弹性垫板的无砟轨道。

然而过渡段中允许的挠度或刚度差应该是多少，过渡段应设置多长的距离？针对这些问题，多年来国际上已经制定了多种尺寸设计指南。例如可以建议，相邻区段的刚度变化应该使得计算的挠度差不超过0.2 mm至0.5 mm。

就过渡段长度而言，可以应用工程经验法则：一方面根据需要选取足够长度以尽可能地实现平稳过渡（考虑优化效果）另一方面应尽可能减少过渡段的长度（考虑成本因素）。根据实际情况，通常使用0.5秒、0.7秒或1秒规则。过渡段的长度由上述时间的通过长度决定，换言之，取决于列车通行速度。这样，短小的建筑结构和高速度线路将需要非常长且昂贵的过渡段。因此，必须找到平衡点。还需要考虑的是，过渡段不得短于绝对最小长度，即转向架之间的间距。

## 过渡段常见问题的应对方法

过渡段是轨道的薄弱部分，这已经成为行业共识。为此，已经有了多种试图缓解该问题的方法。尽管各种方法均有各自

的优点，缺陷亦很明显，例如，在维护便利性或维护成本方面。

通常，过渡段的处理原则是将轨道局部过大的刚度梯度通过增加渐变长度来加以缓和。刚度的变化应连续平稳地或者分阶段平稳变化，从而尽可能地减少上部结构所受动态作用力。这就需要把过渡段划分为不同部分。

比如在高速线路上，过渡段可划分为六个或更多部分。此类解决方案代表了最高水平，运用了所有可能的技术手段和经济投入。这些解决方案通常包含护轨、道砟粘接（图4）或过渡搭板。得益于经验的不断累积，多年来通过对设计的不断改善，这些解决方案能够非常好的满足要求。然而，从经济角度而言，此类解决方案十分昂贵，对于普通轨道（非高速铁路）的大部分过渡段并不适用。因而，许多应用中采用的是更为简便和低成本解决方案。

一个值得推荐分段解决方案的替代或者补充方案，就是使用由聚氨酯弹性材料定制成的上部结构部件。鉴于该材料的特有属性，既可以非常精确地调整上部结构的刚度（弹性属性），同时材料和道砟的嵌入互补关系可对道砟提供长期保护（塑性属性）。

## 通过特定的弹性部件进行刚度优化

连接不同类型的上部结构，需要知道各个区段的轨道参数。通过使用高性能弹性体可以确定上部结构的刚度，消除不确定的刚度水平。过渡段的各个部分的竖向挠度可进行针对性地调整和优化。

根据上部结构具体情况可以使用钢轨垫板、弹性垫板、弹性轨枕垫、弹性道砟垫、质量弹簧系统或套靴轨枕的弹性垫板



图 4: 沿过渡段的护轨 (左图)，道砟胶粘来稳定道砟的方式 (右图)



等弹性部件来调整刚度(图 5)。

高质量聚氨酯弹性产品(如 Sylomer® 和 Sylodyn®)在这些应用中具有明显优势。基于橡胶材料的产品会在使用中出现塑化剂挥发,长期使用性能不能得到保证。与此相比,聚氨酯材料的刚度在整个使用周期内都能维持稳定不变,确保产品的有效性。

聚氨酯弹性材料的特性丰富多样,可根据实际问题的要求进行针对性调整。Sylomer® 和 Sylodyn® 材料可以根据需要提供出色的动态特性或者高塑性。例如,当用于钢轨垫板和弹性垫板时,动静刚度比是最重要的。在此类应用中,是无需任何塑性特性的。另一方面,当使用弹性轨枕垫进行道砟保护时,塑性变形是一个理想属性,因为它能够增加接触面积,显著减少道砟和轨枕之间的接触应力。道砟与轨枕垫的互锁效应也可减少道床沉降,减少道砟移位,从而提高上部结构轨道的稳定性。

基于聚氨酯材料的多样性和适应性可以生产各种刚度精细分级的产品,从而能够完美匹配过渡段各个区段的不同轨道参数。调整轨道弹性的另一大优势是能够延缓道床沉降。因为振动显著降低减少了道砟移动,进而保持了道砟稳定。根据研究,道床中的道砟碎石开始加速磨损的临界频率大约是在 30 Hz,这个频率因素在高速线路下尤其明显。超过该频率之后道砟结构将更易损毁,而在此频率范围内,减少振动振幅也可延长有砟轨道的使用寿命。

## 工程实例

大多数过渡段都位于标准区间轨道



图 5: 弹性产品, 用于优化上部结构

中,不同类型的轨道通常直接相连而没有中间缓冲部分。通过将上述方式将过渡段分段设计可显著缓解由此产生的问题。而且安装额外的弹性部件(如轨枕垫、钢轨垫板或弹性垫板)无需重新修建整个上部结构,如下图墨西哥某铁路的一座桥梁改造实例所示。

在这座桥梁上,有砟轨道以传统方式被连接到无砟轨道。由于未对该关键过渡段予以特别注意,很快在该区段出现了磨损造成的道砟泛白现象。此外,高动态作用力的影响使扣件螺栓产生松动,无砟轨道的表面因此发生损毁(图 6)。

通过对损毁情况的深入分析最终找到了一个解决方案。首先利用计算来选择最适合的产品,然后使之相互匹配。

为补偿受损无砟轨道的高低不平,轨座和混凝土支座之间安装了采用特殊塑性 Sylomer® 材料制作的调整板。直接置于轨底下方的钢轨垫板由柔软的高弹性的 Sylodyn®材料制成。这种搭配既可以确

保良好的荷载分布,又具备良好的动态特性。在过渡段区域,为 25 根轨枕装配了弹塑性 Sylomer®材料制成的轨枕垫,这样显著减少了道床沉降,形成了平稳的过渡段。通过实施这个解决方案,该过渡段的磨损大大减少。

最理想的情况应该是在新建轨道时采取预防性措施。例如,德国的一家重载铁路运营商计划在某个过渡段设置过渡搭板。为增加道砟与过渡搭板之间的接触面积首次使用了新型弹塑性道砟垫。该产品在内部实验室试验期间实现的接触面积约为 34%,这个接触面积使道砟与过渡搭板之间的荷载减少 6 8 倍,可以稳定并保护过渡段中的道砟。

为了验证过渡段的计算模型,2014 年秋季进行了现场测量,并于 2015 年夏季进行了重复测量。通过这些现场测量,将所获得的经验和采集到的数据反馈到计算模型中,可进一步改善和提高模型的预测质量。

## 借助计算机模型的自定义解决方案

利用经典的 Zimmermann 方法,即基于无限长的连续弹性基础梁假定,大量静态计算程序都可以计算弯曲线和钢轨挠度。在此基础上开发的分析模型已经过多次验证,而且在具有恒定轨道参数的均匀系统中可得到非常高质量的计算结果。然而,计算过渡段中的刚度突变点时(即刚度突然增大的地方),该模型具有它的局限性。

有限元法(FEM)提供了一种将过渡段作为整体的计算方法。将模型划分成有限数量的单元并进行偏微分计算,这样



图 6: 扣件螺栓松动对无砟轨道造成损坏(左图)通过安装塑料补偿板和弹性轨下垫板解决该问题(中图,右图)

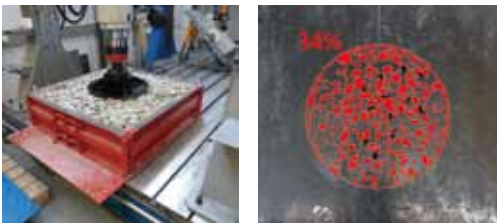


图 7: 在重载条件下, 过渡段的挠度测量 (上图) 以及在实验室测定接触面积 (下图)

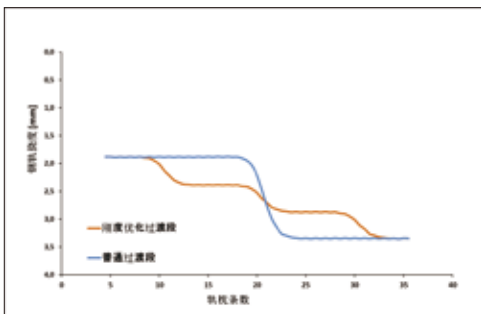
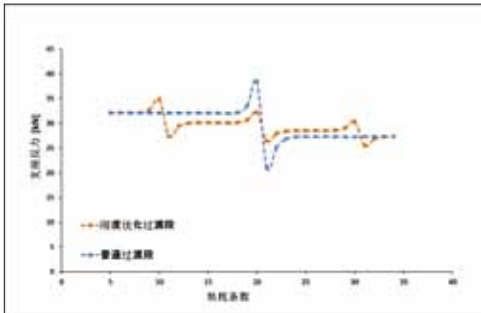
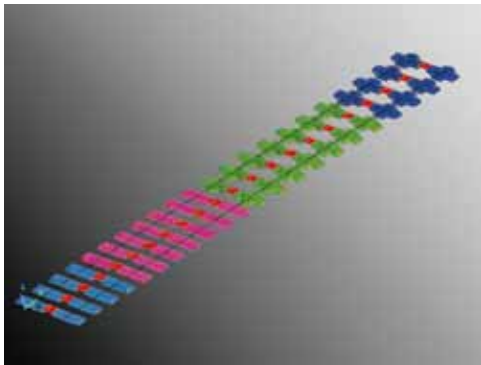


图 8: 有限元模型 (左图), 经计算的最大钢轨挠度 (中图), 计算的钢轨最大支撑反力 (右图)

### 参考文献

1. Freudenstein S, Geisler K, Mölter T, Mißler M and Stolz Ch, Feste Fahrbahnen in Betonbauweise [混凝土无砟轨道], Betonkalender, Sonderdruck, Ernst&Sohn, 2015.
2. Grassie S L, Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments, Review Paper, Germany 2009.
3. Zuada Coelho B E, Dynamics of railway transition zones in soft soils, Dissertation, Delft University of Technology, 2011.
4. Schneider P, Einsatz von Schwellenbesohlungen in Übergangsbereichen, Präsentation 2 [在过渡段使用弹性轨枕垫, 演示 2]. Schwarzenberger Bahn-Gespräche, 2011.

可以深入的研究轨道参数突变位置并提供合理的解决方案。

有限元模型基于由多种弹性部件建立。根据应用的情况, 轨枕下方的各种材料可集中设置为一个弹性层。这样便可以将道砟和下部结构的基础模量以及某些弹性元件的基础模量 (如弹性道砟垫和轨枕垫) 考虑在内。现实中, 位于轨座下方的一段轨枕为承力部分。因此, 建模时轨枕的中间部分被有意忽略以尽可能模拟实际情况 (图 8)。

弹性垫板和钢轨垫板等部件可以单独添加到模型中。如此便可以模拟各个轨座的结构。

关于模型中使用的所有弹性部件, 大量实验室以及实际项目中测得的经验材料数据被整合到模型中, 这可以更准确描述聚氨酯材料的非线性特性。此外, 计算模型也可以对护轨和过渡搭板等特殊结构进行模拟。

除钢轨挠度该模型的静态和动态计算还可提供其它有用数据, 如轨底拉力、轨枕弯矩或支撑反力等。

图 8 中的计算展示了对轨道刚度优化后过渡段不同部分的挠度缓和变化。支座反力在连接点的降低显而易见。虽然在每个区段的端部都会出现支座反力的峰值, 但远远小于优化前的峰值。

过渡段上部结构的负载和设计质量之间有关联。基于特定产品的材料数据, 在模型中针对性地比较和选择各个支撑结构的弹性基础模量, 进而找到

最优的解决方案。这样便可以将对过渡段上部结构施加的应力降至最低。

### 总结

不同类型的上部结构之间的过渡段给铁路运营商带来了巨大挑战。基础刚度的突然变化会加快上部结构部件的磨损, 从而增加维护成本。

由 Sylomer® 和 Sylodyn® 制成的聚氨酯产品在铁路领域的应用已经充分证明, 在轨道中加入适当的弹性部件能显著减缓磨损速度。借助现代模拟计算方法可以在综合考虑不同弹性层的基础上对过渡段进行设计。该模型在实验室试验和现场测量的基础上不断修正、完善, 针对具体问题为客户选择合适的产品。在刚度和道床沉降方面经过优化的过渡段有助于长时间保持持轨道质量, 增强铁路网络的可用性。

为延长使用寿命, 过渡段可以被分为多个部分, 将刚度的突变通过增长的渐变段尽可能缓和。根据问题的具体情况, 应选用不同的弹性材料。如上述工程实例所示, 钢轨垫板、弹性垫板或弹性轨枕垫可在轨道维护中有针对性的使用, 这样既有效地改善现有的过渡段中动态冲击造成的局部病害又无需重新修建整个上部结构。

通过近年来在国际项目中取得的大量知识和经验积累, 我们能够更快速、高效地为铁路网络运营商提供最优的解决方案。www.getzner.com