




高速铁路桥上 CRTSⅢ型板式 无砟轨道无缝线路纵向力研究

张鹏飞 桂 昊 © 著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

>>>> 【 前 言 】

CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路可满足高速铁路对运营安全性和行车平稳性的严格要求。随着我国高速铁路持续发展和“走出去”战略的实施，CRTSⅢ型板式无砟轨道作为我国自主研发的新型无砟轨道结构广泛应用于高速铁路桥上无缝线路。桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向力传递机理有别于桥上有砟轨道无缝线路和桥上纵连板式无砟轨道无缝线路，其梁-板-轨相互作用机理较复杂且相关研究还较少，轨道层间相互作用力过大将引起钢轨折断，层间接触部分开裂，以及内部凸台、弹性垫层及隔离层结构伤损等病害，从而影响桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路的安全服役状态，甚至危及桥上行车安全；因此亟须对桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向力进行全面的的研究，用以指导桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路的铺设施工及养护维修工作，保障线下结构的稳定性和桥上行车的安全性。

本书在综合分析国内外桥上无缝线路纵向力研究现状的基础上，结合国家自然科学基金项目“制动条件下高速列车及桥上无砟轨道动力特性研究（51768023）”和广西高校中青年教师科研基础提升项目“桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向力传递机理研究（2021KY1397）”，针对广泛应用于高速铁路的多跨简支梁桥和大跨连续梁桥，分别从静力和动力的角度出发，基于梁-板-轨相互作用机理和有限元法，建立了精细化的桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路空间耦合模型；通过对有限元软件 ANSYS 的二次开发，编制了桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向力计算程序；从静力的角度出发，考虑了多种复杂温度荷载、列车荷载、列车制动荷载和断轨等情

况，研究了桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路伸缩力、挠曲力、制动力和断轨力特性，并对最不利工况进行了总结，且对多种影响因素进行了全面分析，为桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路设计计算方法、荷载选取、结构改进和铺设方法提供了参考；从动力的角度出发，分析了高速列车匀速运行和快速制动条件下桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路结构的纵向、竖向动力特性，为运营过程中桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路结构稳定性提供了理论依据。

本书在写作过程中参考了大量的文献资料，由于参考的文献资料较多，只能将其中主要的文献列入书后，在此谨向所有文献资料的作者表示衷心的感谢和敬意。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正，作者将十分感激并在今后的研究中不断改进和提高。

著者

2021年9月

>>>> 【 目 录 】

1	绪 论	001
1.1	研究背景	003
1.2	板式无砟轨道发展概况	004
1.3	桥上无缝线路纵向力研究现状	009
1.4	现有研究的不足之处	022
1.5	本书主要研究内容及研究思路	023
2	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路空间耦合模型	027
2.1	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向力传递机理 ..	029
2.2	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路空间 耦合模型建立	032
2.3	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向力 计算程序编制	040
2.4	本章小结	048
3	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向静力分析	049
3.1	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路伸缩力计算	051
3.2	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路挠曲力计算	066
3.3	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路制动力计算	074
3.4	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路断缝值计算	083

3.5	桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路检算	098
3.6	本章小结	105

桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向静力

影响因素分析	107
4.1 扣件纵向阻力的影响	109
4.2 小阻力扣件铺设方案的影响	115
4.3 固定支座墩/台顶部纵向刚度的影响	123
4.4 支座布置形式的影响	128
4.5 弹性垫层弹性模量的影响	134
4.6 隔离层摩擦系数的影响	137
4.7 连续梁温度跨度的影响	141
4.8 连续梁截面高度的影响	147
4.9 连续梁相邻简支梁配跨数的影响	153
4.10 简支梁桥跨数的影响	159
4.11 本章小结	165

5 列车运行和制动条件下桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道

无缝线路动力特性分析	167
5.1 列车匀速运行与制动条件下的纵向轮轨力	169
5.2 列车匀速运行条件下桥上无砟轨道动力特性分析	171
5.3 列车快速制动条件下桥上无砟轨道动力特性分析	180
5.4 本章小结	201

6 结论与展望

6.1 结 论	205
6.2 展 望	209

参考文献210

附录 主要符号说明222

1

／
绪
论



1.1 研究背景

铁路无缝线路（Continuous Welded Rail，简称 CWR）是 20 世纪最突出的轨道结构上的改进和创新，它基本消除了传统钢轨接头处的轨缝、折角、台阶等结构缺陷，从而全面提高了轨道的平顺性、稳定性和可靠性^[1-2]。在桥上铺设无砟轨道^[3-6]和无缝线路可减小下部基础沉降，保持线路的高平顺性，从而大大减小了高速列车对轨道、桥梁结构的冲击作用，延长了列车和轨道部件的使用寿命，改善了桥梁的运营条件，极大地减少了线路的养护维修工作量。如今，铁路无缝线路已成为世界各国铁路，特别是高速铁路，最主要的线下结构之一^[7]。

近年来，我国的高速铁路技术体系得到了跨越式发展和不断的完善^[8]。截至 2020 年年底，我国高速铁路运营总里程已达 3.79 万千米，里程稳居世界第一，预计 2030 年我国高速铁路运营里程将达到 4.5 万千米^[9]。随着高速铁路的持续发展，列车行车安全性和轨道、路基、桥梁结构的稳定性受到了设计、施工、运营管理部门的广泛关注，也成了世界各国学者研究的热点^[10,11]。为保障高速列车安全、高速和平稳地运行，满足高速铁路对下部轨道结构稳定性和下部基础的沉降量控制更为严格的要求，无砟轨道、长大桥梁、跨区间无缝线路等技术成为了高速铁路设计和建设过程中的首要选择^[12,13]。

桥上无砟轨道无缝线路的受力相较于路基上无缝线路的受力更为复杂。长钢轨除受轨温变化而产生的基本温度力及来自车轮的轮轨作用力之外，还受到因梁、板、轨之间相互作用而产生的纵向附加力的作用^[14]，这直接影响着桥上无砟轨道无缝线路结构的稳定性。China Railway Track System（简称 CRTS）Ⅲ型板式无砟轨道^[15-16]，作为我国自主研发的一种新型无砟轨道结构，被广泛应用于桥上无缝线路，其梁、板、轨相互作用机理较复杂且相关研究较少。墩台、梁体及轨道层间相互作用力过大将引起钢轨折断，层间接触部分开裂，以及内部凸台、弹性垫层、隔离层结构损伤等病害，从而影响轨道和桥梁结构的安全服役状态，严重时甚至危及桥上行车安全。由此可见，桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向力传递规律及其影响因素是我国高速铁路发展过程中亟待研究的重点课题。

本书在综合分析国内外桥上无砟轨道无缝线路纵向力研究现状的基础上，针对广泛应用于高速铁路的多跨简支梁桥和大跨连续梁，对桥上CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向静力分布规律及其传递规律，以及其在列车运行和制动条件下各结构的竖向、纵向动力特性进行了较为全面的研究，并对各细部结构及荷载参数等设计因素的合理取值提出了建议。预计本书的研究成果对我国桥上无砟轨道无缝线路的设计检算、改进方法及运营维护具有重要的指导意义，可为桥梁结构、轨道结构在运营过程中的稳定性，及它们在复杂环境中的适应性和耐久性提供理论依据和技术支持，进一步丰富和完善我国高速铁路无砟轨道和跨区间无缝线路技术体系，提升我国高速铁路的国际竞争力。

1.2 板式无砟轨道发展概况

板式无砟轨道是以预应力钢筋混凝土轨道板和现浇钢筋混凝土底座板代替普通有砟轨道的碎石道砟作为承力层，并引入沥青混凝土、树脂橡胶等多种弹性材料来提供轨道弹性与限位作用的轨道结构。板式无砟轨道多采用工厂预制的方式，精度高且铺设方便，铺设后轨道刚度均匀，使线路平顺性得到保证。目前板式无砟轨道已广泛应用于我国多条高速铁路线路，优点如下^[17]：

（1）轨道平顺性高，刚度均匀，轨道几何形位保持持久，养护维修工作量少。

（2）轨道板实行工厂机械化预制，制作精度高，大大提高了生产效率，加快了施工进度。

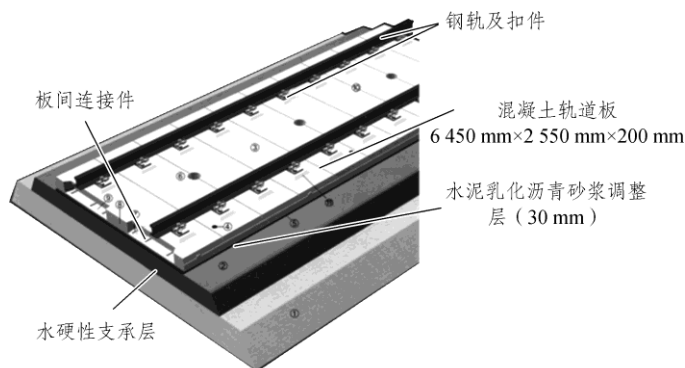
（3）轨道建筑高度低、自重轻，工程投资更经济。

（4）轨道板与底座板之间采用乳化沥青砂浆作为隔离层和调整层，便于施工过程中调整误差，以及运营后的维修养护工作。

1.2.1 国外板式无砟轨道发展概况

1. 德国博格板式无砟轨道

德国博格板式无砟轨道是世界上最早的纵连板式无砟轨道^[18]，是由 Max Bögl（博格）公司于 20 世纪 70 年代末开始研发，经过不断优化和改进，最终完善的板式无砟轨道系统，如图 1-1 所示。该轨道系统遵循从上至下刚度逐层递减的设计理念，它的标准预制轨道板为横向预应力混凝土预制板，轨道板之间通过板间纵向螺杆和夹紧装置进行纵连，并对板间接缝浇筑混凝土进行封闭，从而形成全线纵连板式无砟轨道结构。德国博格板式无砟轨道主要应用于路基段。



轨道板纵向设计：与 Rheda、Zublin 型相同，弹性地基梁
轨道板横向设计：按 650 mm 宽的轨枕设计

图 1-1 德国博格板式无砟轨道

2. 日本单元板式无砟轨道

日本单元板式无砟轨道发展较早，应用最为广泛^[19]。20 世纪 70 年代，日本将板式无砟轨道作为铁路建设的国家标准进行推广，90 年代初日本提出采用普通 A 型轨道板取代 RA 型轨道板，实现了板式轨道结构形式上的统一，如图 1-2 所示；此外，日本还研制出了应用于寒冷地区的双向预应力框架式轨道板和解决噪声、振动问题的减振 G 型轨道板^[20]。截至 21 世纪初，日本单元板式无砟轨道累计铺设里程已超 2 700 km，主要应用于隧道和桥梁段。

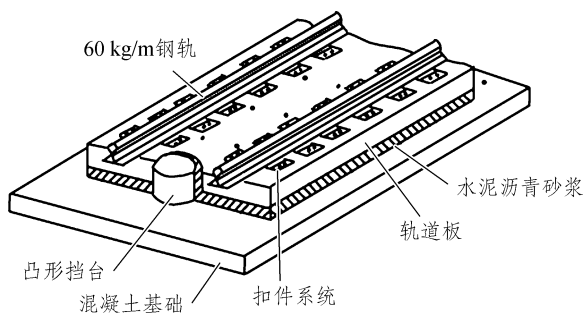
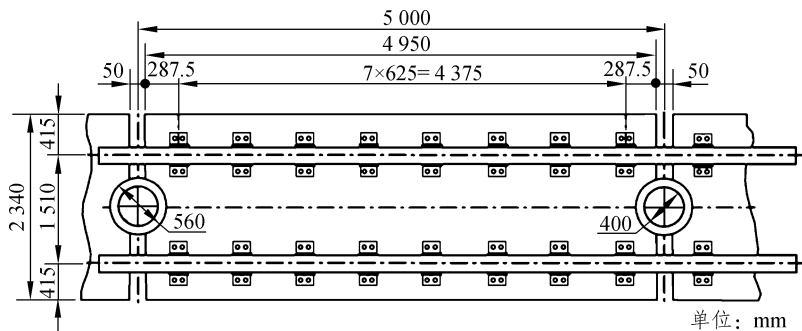


图 1-2 日本普通 A 型板

除此之外，其他国家在板式无砟轨道研制、铺设方面也取得了较大进展，如采用现浇钢筋混凝土道床的 PACT 型无砟轨道，以及用于城市轨道交通中振动敏感地段的浮置板轨道等。

1.2.2 国内板式无砟轨道发展概况

20 世纪 60 年代，我国研发了多种无砟轨道结构形式，并进行了大量的试铺和试验，其中包括 80 年代曾试铺过的沥青整体道床。

21 世纪以来，我国高速铁路通过从国外引进先进技术及装备，并对所引进的多种无砟轨道进行了大型的综合试验，充分消化吸收了国外先进的无砟轨道技术，并逐渐形成了具有我国技术特色的 CRTS I 型板式^[21]、双块式无砟轨道^[22]，CRTS II 型板式^[23,24]、双块式无砟轨道^[25]，以及应用于盆区的无砟道岔板^[26]等结构体系。2008 年，京津高速铁路正式投入运营，它的无砟轨道铺设比例超过了 90%。在对国外无砟轨道技术进行消化吸收的同

时，由我国自主研发的 CRTSⅢ型板式无砟轨道也成功应用于成灌、盘营、成绵乐（眉乐段）、郑徐及昌吉赣等多条高速铁路^[27]，标志着具有我国自主知识产权的高速铁路无砟轨道结构形式已逐渐形成并完善。我国不同形式无砟轨道铺设情况如表 1-1 所示，其中板式无砟轨道以 CRTS I 型、CRTS II 型和 CRTSⅢ型板式无砟轨道为主要代表。



表 1-1 我国不同形式无砟轨道铺设情况

无砟轨道结构类型		应用线路
预制板式 无砟轨道	CRTS I 型板式	哈大、沪宁城际、广珠、广深港、宁安、哈齐等
	CRTS II 型板式	京津、京沪、沪杭、合蚌、合福（安徽段）、津秦等
	CRTS III 型板式	成灌、盘营、成绵乐（眉乐段）、郑徐、昌吉赣等
现浇式无 砟轨道	岔区板式	武广、京沪、沪杭、京石、石武等
	双块式	武广、郑西、兰新、太中银、包西、合福（福建段）等
	轨枕埋入式	武广、郑西、哈大等

1. CRTS I 型板式无砟轨道

我国在对日本普通 A 型板式无砟轨道技术的引进和吸收的基础之上，形成了 CRTS I 型板式无砟轨道系统^[28]，并成功应用于哈大、哈齐高速铁路，以及沪宁、广珠城际铁路等多条线路。CRTS I 型板式无砟轨道主要由钢轨、弹性分开式扣件系统、预应力轨道板、凸形挡台、周围树脂填充材料、水泥乳化沥青砂浆调整层（低弹性模量 CA 砂浆层）和底座板等结构组成^[29-32]。图 1-3 所示为桥上 CRTS I 型板式无砟轨道。



图 1-3 桥上 CRTS I 型板式无砟轨道

2. CRTS II 型板式无砟轨道

我国通过对德国博格板式无砟轨道技术引进、吸收和再创新，研制了 CRTS II 型板式无砟轨道系统^[33-35]，并在此基础之上将其成功应用于桥梁段^[36]，目前已成功应用于京津、京沪和沪杭等多条高速铁路线路。CRTS II 型板式无砟轨道主要由钢轨、弹性分开式扣件系统、预应力轨道板^[37,38]、水泥乳化沥青砂浆调整层（高弹性模量 CA 砂浆）^[39,40]、路基上的支承层、桥梁上的混凝土底座板、“两布一膜”滑动层、侧向挡块及台后锚固结构^[41]等结构组成。图 1-4 所示为桥上 CRTS II 型板式无砟轨道。

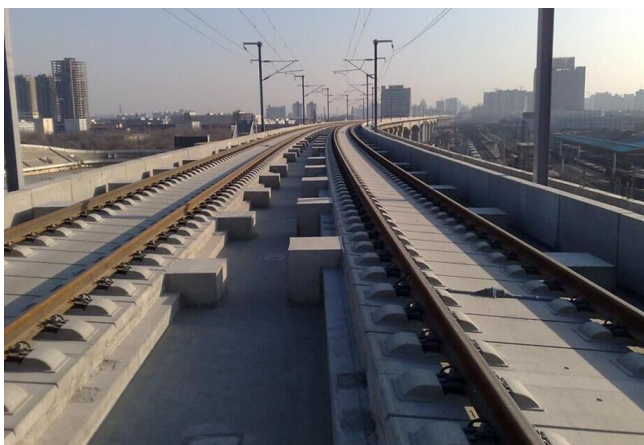


图 1-4 桥上 CRTS II 型板式无砟轨道

3. CRTS III 型板式无砟轨道

在对国外无砟轨道技术进行消化吸收的同时，由我国自主研发的 CRTS III 型板式无砟轨道系统也应运而生^[42-46]，它最大的特点是彻底取消了 CRTS I 型的凸台和 CRTS II 型板的端刺限位方式；同时也取消了作为板下填充材料用的 CA 砂浆层，改用免振捣的自密实混凝土材料^[47,48]。CRTS III 型板式无砟轨道的轨道板采用横、纵双向预应力混凝土结构，使轨道板的抗裂性和耐久性得以提高，并通过板下预留的两排门型筋和内设钢筋网片的自密实混凝土层连接成复合结构；填充层的自密实混凝土与底座之间设置中间隔离层；限位采用底座上的限位凹槽^[49]。CRTS III 型板式无砟轨道由钢轨、弹性扣件、轨道板、自密实混凝土层、隔离层及具有限位功能的钢筋混凝土底座板等部分组成。图 1-5 所示是桥上 CRTS III 型板式无砟轨道。

目前，CRTSⅢ型板式无砟轨道已在郑徐、昌赣高速铁路等长大线路上得以成功应用^[50]。



图 1-5 桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道

1.3 桥上无缝线路纵向力研究现状

在过去的几十年里，国内外学者对桥上无缝线路纵向力进行了大量的研究，归纳起来主要采用的方法有解析法、有限元法及试验研究方法。

1.3.1 国外桥上无缝线路纵向静力研究现状

国外桥上无缝线路纵向力计算理论以日本及欧洲的国际铁路联盟（International Union of Railways，简称 UIC，UIC 是法文全称的缩写）的研究最具代表性，两者均在高速铁路的建设中得到了极大的发展。

1. 日本

20 世纪 60 年代初，日本在新干线上铺设了大量的无缝线路，提出了在计算桥上无缝线路伸缩力时采用梁轨相互作用法^[51]，如图 1-6 所示；1979 年，佐藤裕等在其专著《日本东海道新干线轨道研究》^[52]中介绍了新干线的轨道设计方法，推导了桥上铺设长钢轨时梁轨相互作用力；2007 年，日

本铁道科技研究所的松本信行等^[53]以本四联络线上的南（北）备赞-濑户大桥为例，介绍了桥上无缝线路的设计原则及扣件阻力控制等情况。



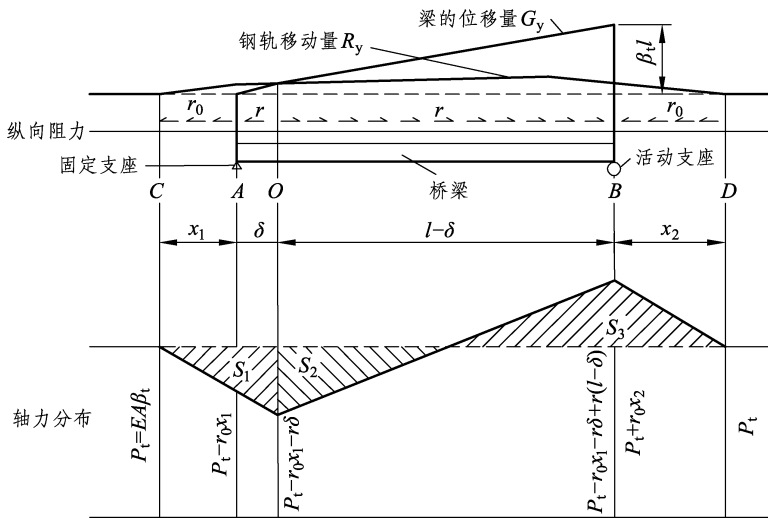


图 1-6 日本桥上无缝线路伸缩力计算原理

2. 欧洲

(1) 捷克的梁轨相互作用分析模型。

1974 年，捷克学者 Frýba 提出了“准静态分析理论”^[54-57]，即假定钢轨和桥梁为抗弯刚度无穷大的等截面弹性轴力杆，将线路纵向阻力假定为线弹性变化，视制动力和牵引力为静力荷载，将集中力用数学形式表示为均布荷载，列出轴向平衡微分方程并采用拉普拉斯变换法求解微分方程组；但该方法并未考虑梁体弯曲、墩顶位移、桥梁下部结构刚度和纵向阻力非线性的影响。

(2) 德国双线性阻力计算模型。

1964 年，德国学者 Siekmeier^[58]采用试验的方法对线路纵向阻力-纵向位移关系进行了研究，但受加载设备能力的限制，线路的纵向位移不足 1 mm。在此基础上，1980 年，Seraphim^[59]截取了 10 m 长的线路进行加载，使线路纵向滑移 10 cm 以上，测定了纵向滑移阻力规律，结果表明轨排中的道床在线路与路基相对位移超过 4 mm 后开始发生松动。Talker^[60]于 1978 年对另一段线路的滑移试验也得出了类似的结果。德国学者提出的梁-轨联结模型假定钢轨与梁体的连接为纯拉压或纯抗弯杆件，钢轨与道床的连接可采用桁架或抗弯杆件两种方式，如图 1-7 所示。Moelter^[61]分析了桥梁发生挠曲变形时梁体与桥台间以及相邻桥梁间上拔力的产生机理，介绍了梁

体之间闭合装置与开放装置的适用条件。2006年至2009年间，德国累斯顿工业大学 P.Ruge 和 C.Birk 教授等^[62-64]指出欧洲规范在计算纵向附加力时采用先单独计算后线性相加进行检算的方法存在不足，提出了考虑前期加载历程的桥上无缝线路纵向附加力计算方法，并对比了该方法与传统线性叠加法之间的差异。

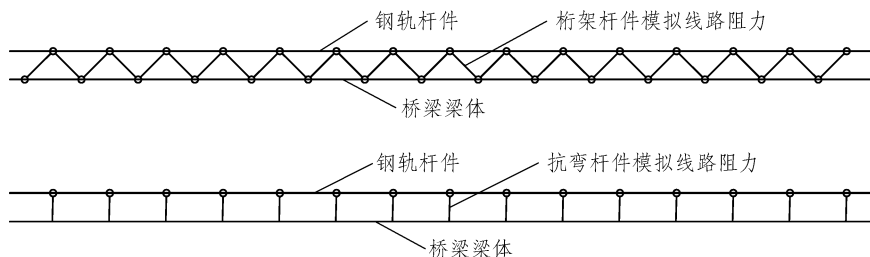


图 1-7 德国梁轨联结模型

(3) UIC 标准中的计算模型。

20 世纪 60 年代开始，UIC 试验研究所针对列车制动/起动条件下无缝线路与下部桥梁结构的相互作用关系进行了研究，并在 2001 年对其进行了完善^[65]，提出采用梁单元模拟桥梁和长钢轨，采用线性弹簧单元模拟墩台顶刚度，而线路纵向阻力则需要采用非线性弹簧来模拟，为减小边界条件的影响，并规定路基段钢轨计算长度至少取 100 m，如图 1-8 所示。

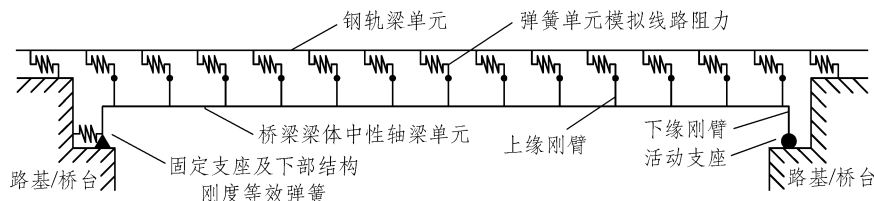


图 1-8 UIC 梁轨相互作用模型

(4) 其他非线性阻力模型。

1964 年，鲍列耶夫柯^[66]推导了一种解析算法，用于计算桥上长钢轨纵向力，但该方法未考虑梁体弯曲的影响；1989 年，荷兰代尔夫特理工大学的 Coenraad Esveld^[67]阐述了采用有限元法计算桥上无缝线路纵向力的思想，并对几种应用较为广泛的纵向阻力模型进行了总结；2003 年，英国的 Place 和 Davis 等^[68]在考虑线路纵向阻力非线性变化的基础上，分别采用线性反应谱法和非线性时程法分析了地震作用下桥上无缝线路纵向力特性。

3. 其他国家

1982年,印度学者 A.S.Arya 和 S.R.Agrawal^[69]提出了用于分析梁轨相互作用的传递矩阵法,该方法考虑了梁体竖向位移和墩顶纵向位移,但并未考虑轨道的竖向位移,且其解析能力有限,不适宜用于分析未知数较多的长大跨度桥梁;2009年,Rui Calcada^[70]总结了国际上对于梁轨相互作用的多种方法和成果,P. Ramondenc 等^[71]详细阐述了梁轨相互作用机理,详细介绍了无缝线路纵向附加力的形成机理,提出“桥梁必须适应线路而非线路必须适应桥梁”的设计理念;2011年,Roman Okelo 和 Afisu Olabimtan^[72]提出采用有限元法建立三维模型,可更好地完善对梁轨相互作用关系的空间描述;2013年,H. Sedarat 等^[73]建立了精细化的有限元模型,对比分析了支座布置对浮桥上梁轨相互作用的影响。

1.3.2 国内桥上无缝线路纵向静力研究现状

我国桥上无缝线路纵向静力计算方法的发展可分为以下几个阶段^[12]。

1. 常阻力迭代求解法

假定桥上长钢轨位于无缝线路固定区,桥梁因伸缩或挠曲变形导致桥上长钢轨产生伸缩或挠曲附加力,再通过假定钢轨发生纵向位移范围为未知量,可对应得到钢轨附加拉压面积之和,用迭代法即可求得拉压面积之和为零时所对应的钢轨发生纵向位移范围。1987年,卢耀荣等^[74]假定梁轨相对位移为未知量,建立了相应的非齐次微分方程,并采用龙格-库塔(Runge-Kutta)法进行求解,但由于该方法需先用有限单元法求解梁的位移曲线,在计算长大桥梁时易造成误差积累,所得数据精度较低,一般只用于简化计算。

2. 非线性阻力的微分方程数值解法

20世纪80年代起,我国研究人员开始求微分方程的非线性解,其中包括指数型非线性阻力及分段线性阻力的微分方程数值解法,通常采用欧拉法或四阶龙格-库塔法进行数值积分^[75,76]。1990年,杨少宏详细探讨了采用微分方程解法计算挠曲力的思想^[77],并通过对线路纵向阻力分段线性化,将原有的非线性微分方程简化为线性微分方程进行求解。

3. 基于广义变分原理的解析求解法

从梁、轨体系的能量观点出发，基于广义变分原理，将边界条件转变为变分问题，求解梁轨相互作用的平衡方程^[78,79]；不过该方法需要预先得知钢轨纵向力的大致分布形状，并假定出合理的形函数，故通用性不强。

4. 有限元数值求解法

有限元法以变分原理为基础，其中包括最小势能原理、最小余能原理和混合变分原理。该方法计算精度高、通用性强，且能适应各种复杂荷载及结构。随着计算机硬件和软件的飞速发展，有限元法得到了广泛的应用，我国桥上无缝线路有限元模型可分为以下几类：

(1) 单层阻力模型。

采用带刚臂的刚架模拟桥梁的挠曲变形和纵向位移，采用抗弯杆件、抗拉压杆件或弹簧模拟线路纵向阻力，如图 1-9 所示。

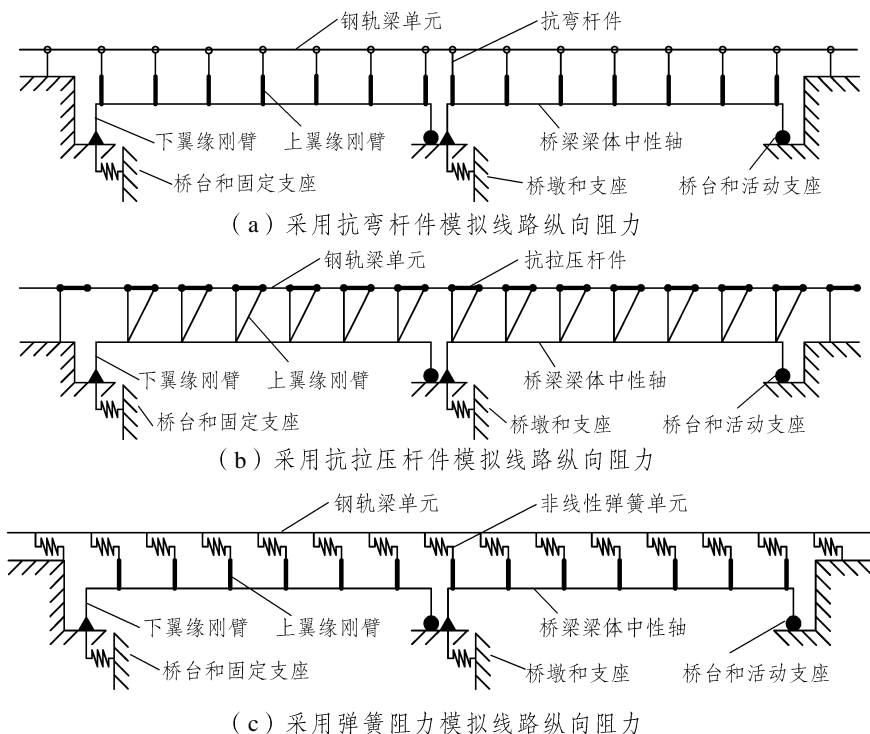


图 1-9 单层阻力模型

中南大学闫斌等^[80]以哈齐高速铁路上某一(77+3×156.8+77)m系杆拱连续梁桥为例,根据拱肋、横向支撑、吊杆、梁、桥墩及轨道位置之间的相互作用,建立了考虑大跨度系杆拱连续梁桥与多股轨道相互作用的模型,采用钢-混凝土组合截面梁单元模拟钢管混凝土(CFST)拱肋,对该桥上无缝线路的铺设进行了探讨,分析了长钢轨纵向力、墩顶纵向力和不平衡负载情况下的扭矩。

铁道第四勘察设计院(铁四院)李秋义等^[81]和李阳春^[82]根据梁轨相互作用原理,建立了多跨简支梁桥轨-梁-墩有限元模型,采用单位荷载法计算桥墩温差引起的桥上无缝线路钢轨附加力,探究其分布规律及影响因素,指出桥墩温差引起的钢轨附加力随着桥墩高度和墩顶纵向水平线刚度的增加而增大,而桥梁跨度对桥墩温差引起的钢轨附加力影响较小。

西南交通大学张迅^[83]在其硕士学位论文中基于连续梁桥上无缝线路线-桥-墩-基础一体化计算模型,利用APDL语言实现了对ANSYS的二次开发,编制了桥上无缝线路纵向附加力计算程序ALFCWR,分析了桥墩温差荷载引起的连续梁桥上无缝线路纵向力特性^[84]。

王平、谢铠泽等提出了简化的连续刚构桥上无缝线路计算模型与方法^[85],分析了刚构桥及相邻简支梁桥桥墩纵向水平刚度匹配关系对制动荷载下梁-轨快速相对位移的影响^[86],结果表明简化的连续刚构桥上无缝线路模型适用于伸缩、断轨及制动工况下的计算,而挠曲工况下的计算必须依据桥梁实际尺寸建立整体变截面梁模型。

蔡敦锦等^[87]分析了伸缩力的作用规律及桥梁跨数、支座、墩台纵向水平刚度、桥梁跨度对伸缩力的影响,建议在计算桥上无缝线路伸缩力时,可将多跨简支梁桥简化为10跨,多联连续梁桥两侧简支梁简化为5跨。

徐金辉等^[88]分析了某一大跨度双线中承式钢-混凝土结合桁架拱桥上的无缝线路纵向力,指出在对中承式拱桥桥上无缝线路进行检算时,应当考虑拱肋的日温差及挠曲力对拱肋的影响,并建议中承式拱桥的拱肋采用钢管混凝土或钢-混凝土结合桁架结构,以保证拱肋有一定的抗拉强度。

刘婷林等^[89]基于梁-轨相互作用原理,采用有限元法建立线-桥-墩一体化模型,计算了纵向、横向温度梯度下桥墩位移对梁轨相互作用的影响,指出在设计桥上无缝线路时需要考虑桥墩纵向温度梯度和梁体整体温差的叠加。

魏贤奎等^[90]建立了上承式拱桥上无缝线路断缝计算力学模型,分析了桥梁结构、墩台刚度及股道数等因素对钢轨断缝的影响,指出断缝与拱肋温差近似呈线性关系,且采用公式法会低估钢轨断缝。

中南大学戴公连、闫斌等^[91,92]建立了桥塔-缆索-轨道-梁体-桥墩-桩基的斜拉桥有限元模型,探究了斜拉桥上无缝线路纵向力分布规律,并采用非线性弹簧单元模拟轨道和桥梁之间的纵向阻力来建立连续梁桥上轨道-桥梁-桥墩-基础系统一体化有限元模型,比较并研究了分别采用常阻力扣件和小阻力扣件时各工况下桥上无缝线路的纵向力。结果表明:在计算斜拉桥上附加伸缩力和挠曲力时需考虑相邻桥梁的影响,计算时可将相邻简支梁跨简化为 6 跨;小阻力扣件可有效降低桥上无砟轨道和无缝线路之间的附加力,减少钢轨伸缩调节器的使用。

兰州交通大学孙伟龙等^[93]对高寒地区某一钢-混结合梁桥梁梁轨相互作用规律进行了分析,对在高寒地区钢-混凝土结合梁桥上铺设无缝线路提出了合理化建议。

(2) 双层阻力模型。

采用双层非线性弹簧单元分别模拟桥上有砟轨道无缝线路的扣件纵向阻力和道床纵向阻力,如图 1-10 所示,也可分别模拟 CRTS I 型板式无砟轨道的扣件纵向阻力和轨道板与 CA 砂浆层间的摩擦力。

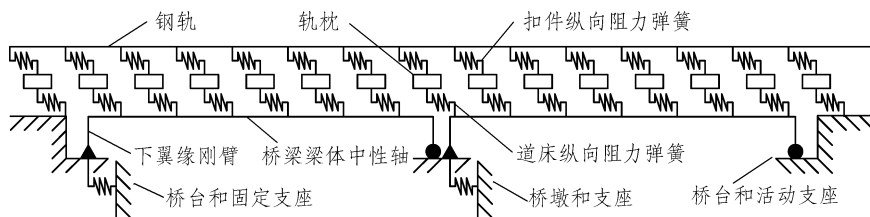


图 1-10 双层弹簧阻力模型

西南交通大学陈杨^[94]在其硕士学位论文中对简支梁桥上 CRTS I 型板式无砟轨道纵向静力进行了分析,对比分析了有无凸型挡台对梁-板-轨相互作用的影响,结果表明凸型挡台在一定程度上可以阻止轨道板纵向位移,降低钢轨纵向力,凸台内部纵向受力从台顶往下逐渐减小。

邢梦婷、王平^[95]建立了桥上纵连板式无砟轨道无缝线路的线-板-桥-墩一体化计算模型,研究了挠曲力作用下荷载参数变化对梁轨相互作用的影响。

谢铠泽等^[96,97]针对刚构桥和连续梁桥上 CRTS I 型板式无砟轨道,分别建立了两种线-板-桥-墩一体化计算模型,分析了刚构桥梁端轨下垫板窜出、凸台裂缝及凸台周围填充树脂离缝等病害产生的原因。

为探究桥墩在工后沉降及温度梯度荷载作用下所引起的高墩大跨桥上无缝线路梁轨相互作用规律,以新建铁路长沙至昆明客运专线玉屏至昆明段内某一高墩(89+168+89)m连续刚构桥梁+(33+56+33)m连续梁桥为例,基于所建立的线-桥-墩一体化有限元模型,胡志鹏等^[98]分析了桥墩不均匀沉降和均匀沉降对钢轨纵向力、线路高低不平顺及墩台受力的影响;张亚爽等^[99]分析了高桥墩在纵向、横向温差作用下对桥上长钢轨纵向力的影响,指出在设计高墩大跨桥上无缝线路时需考虑高墩在纵横向温差作用下对桥上无缝线路的影响。

罗华朋等^[100,101]以高墩大跨连续刚构桥上 CRTS I 型板式无砟轨道为研究对象,分别分析了高墩大跨桥墩在整体升温和纵向温度梯度条件下,桥上无砟轨道无缝线路的受力及其平顺性,建议在设计高墩大跨桥上无缝线路时,考虑桥墩升温这种特殊荷载对桥上无缝线路所引起的竖向不平顺,且应考虑梁体升温和桥墩温度梯度最不利的组合来检算墩台刚度。

(3) 三层阻力模型。

三层阻力模型多用于桥上 CRTS II 型板式无砟轨道这种特殊结构,它的层间纵向阻力由上至下分别为钢轨与轨道板之间的扣件、轨道板与底座板之间的 CA 砂浆层、底座板与梁跨之间的“两布一膜”滑动层,这 3 层约束均采用非线性弹簧模拟,桥梁采用梁单元或平面单元模拟,如图 1-11 所示。

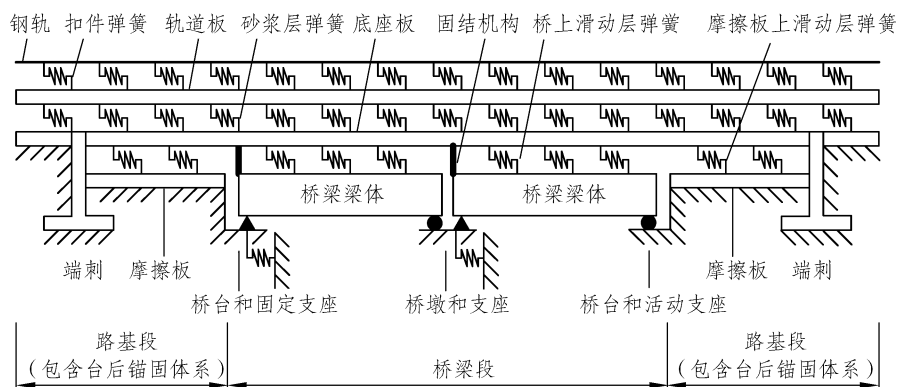


图 1-11 三层弹簧阻力模型

针对桥上 CRTS II 型板式无砟轨道这种特殊结构,朱乾坤等^[102]和方利等^[103]等采用三层弹簧阻力模型,分析了列车制动荷载作用下的纵向力传递规律及其影响因素,指出在检算时应考虑多种制动荷载位置的影响,“两布一膜”滑动层和固定支座梁端的固结机构在一定程度上可隔离梁-板-轨的相互作用。

西南交通大学吴青松等^[104]探究了 CRTS II 型板式无砟轨道在桥上应用时所能适应的最大温度跨度。

陈嵘等^[105]针对简支梁和连续梁桥上 CRTS II 型板式无砟轨道无缝线路的结构特点,对其梁-轨作用规律进行了较为全面的分析,表明了滑动层摩擦系数对于该种轨道结构的重要性。

刘成等^[106]分析了桥上纵连板式无砟轨道墩/台位移引起的作用力,指出在设计中需考虑该因素的影响,且应考虑墩顶位移和梁体伸缩两种荷载的耦合作用。

中南大学戴公连等^[107]对桥上无砟轨道的非线性温度模式进行了长期监测,并基于此分析了桥上长钢轨纵向力及纵连的轨道层间的相对位移,建议改进固结机构的作用,指出连续梁固定支座墩顶处的轨道板也需与固结机构相连,在考虑实测温度工况及制挠力耦合作用的基础上,对比了纵连板和单元板式无砟轨道应用于桥上无缝线路时的受力规律及桥梁理论最大温度跨度,并比较制动墩墩顶刚度、扣件阻力等参数对无缝线路受力及最大温度跨度的影响^[108]。

(4) 空间整体刚臂模型。

考虑两根钢轨与桥梁间的纵向相互作用,钢轨视为杆单元,线路阻力采用杆单元模拟,桥梁采用带多向刚臂的构架模型,桥梁及基础均采用杆单元模拟,如图 1-12 所示^[109,110]。

中南大学戴公连、刘文硕等^[111]针对高速铁路提篮拱桥这种复杂的大跨结构,建立了钢轨-纵梁-横梁-吊杆-基础耦合系统的力学模型,研究了提篮拱桥上无缝线路的传递规律,对比分析了纵向阻力模型、纵向约束条件及拱肋内倾斜度等一些敏感因素对纵向力的影响。

闫斌等^[112]指出与连续梁相邻的简支梁刚性墩所受的伸缩力非常大,需要特别考虑其刚度设置和支座的选择,减小纵向阻力在使得连续梁上钢轨内部应力减小的同时会使得梁-轨相对位移迅速增大,提出了增大简支梁刚性墩刚度的建议。

徐庆元^[113]在其博士学位论文中基于有限元法建立了梁-轨相互作用空间刚臂模型，研究了秦沈客运专线上某多跨简支箱梁桥上有砟轨道长钢轨的纵向受力，进一步考虑了挠曲力计算时的动力效应。

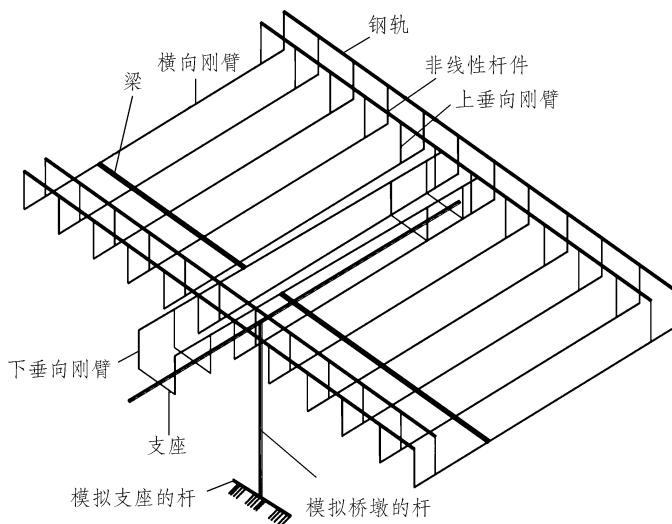


图 1-12 空间整体刚臂模型

华东交通大学孔文斌^[114]在其硕士学位论文中结合了京沪高铁工程实际，根据某长大无砟轨道桥上无缝线路的梁-轨相互作用原理，对比了桥梁跨数、刚性墩刚度、线路阻力等因素对长钢轨纵向受力的影响。

西南交通大学段翔远等^[115,116]建立了考虑桥梁-墩台-基础相互作用的一体化计算模型，研究了高墩大跨连续刚构桥在温度荷载、风荷载等作用下产生的竖向变形、横向变形、纵向变形对无砟轨道的影响，分析了静风荷载对桥梁纵向位移、横向位移的影响，以及不同桥型对静风荷载抵抗能力的影响。研究表明，温度变化会使得高墩大跨桥梁产生梁端转角，进而影响该处扣件系统纵连式无砟轨道的受力，由静风荷载产生的桥梁横向位移不会影响无缝线路稳定性，但由于静风荷载而产生的梁体及桥墩纵向位移将会影响梁-轨相互作用；作者通过进一步对比不同桥型对静风荷载的抵抗能力，指出采用刚构桥梁较连续梁桥更有利于控制风荷载对桥梁变形的影响。

5. 空间整体实体模型

随着计算技术的发展，部分学者直接将钢轨、轨枕、桥梁、墩台采用

实体单元（或部分为梁单元）来模拟，如图 1-13 所示。



图 1-13 空间整体实体模型

北京交通大学陈鹏^[117]在其博士学位论文中采用 ANSYS 建立了用于无砟轨道设计计算的有限元分析模型，并运用 ABAQUS 分析了中高速条件下车辆、无砟轨道、路基及桥梁系统的动力响应，对路基及桥梁上无砟轨道系统的动力响应水平进行了较为全面的评价。

北京交通大学曲村^[14]在其博士学位论文中考虑高速车辆、无缝线路、无砟轨道和长大桥梁之间的相互作用机理，采用理论和试验相结合的研究方法，分别针对长大桥上 CRTS I 型、CRTS II 型板式和双块式无砟轨道，对其纵向静力特性以及横向、垂向动力特性展开研究，从设计检算的角度对各结构的参数取值提出了合理化的建议^[118]。

北京交通大学乔神路^[119]在其博士学位论文中自主建立了高速铁路桥上无砟道岔的精细化空间耦合模型，采用以静为主、动静结合的分析方法，对高速铁路桥上无砟道岔的参数影响规律及典型设计难题进行了系统研究^[120]，设计、开展了高速铁路桥上无砟道岔的现场综合试验，并对高速铁路桥上无砟道岔典型工点进行了系统检算评估。

北京交通大学赵磊^[121]在其博士学位论文中从无砟轨道设计理念出发，通过设计及检算方法的创新，用细部参数现场试验等手段，提出了无砟轨道精细化分析模型，主要由无砟轨道空间设计模型、预应力配筋检算模型及精细化层间病害分析模型构成，并将其应用于无砟轨道设计、检算及病

害分析过程中。

北京交通大学梁淑娟^[122]在其硕士学位论文中以断板条件下长大桥梁上 CRTS II 型板式无砟轨道为研究对象,分析了断板对轨道-桥梁系统受力特性的影响,并基于结构可靠度理论提出了一种病害条件下无砟轨道-桥梁系统可靠性评估方法。

蔡小培等^[123]针对 CRTS II 型板式无砟轨道,分析了轨道层间阻力大小及道床板伸缩刚度等因素对桥上无砟轨道无缝线路长钢轨纵向力与位移的影响,根据桥上无缝线路受力特点及其变形规律,基于光纤光栅测试技术,在渭河特大桥上布设了多个监测点并对其进行长期监测,通过监测数据和理论计算设计出了一套用于渭河特大桥上的伸缩调节器布设方案,且该方案能满足铺设无缝线路的需要和操作要求^[124]。

北京交通大学王冠通^[125]在其硕士学位论文中建立了桥上板式无砟轨道三维实体有限元模型,探讨了桥上 CRTS I 型和 CRTS II 型板式无砟轨道在地震动作用下的受力特性。

北京交通大学安彦坤^[126]等对比分析了箱型梁在整体温差荷载和温度梯度荷载作用下的桥上无缝线路伸缩力,结果表明采用温度梯度荷载的计算结果偏小,但考虑到这种荷载更符合现场实际情况,故需对梁体的温度场进行深入的试验性研究^[127]。

北京交通大学刘克旭^[128]在其硕士学位论文中以 CRTS I 型板式无砟轨道为例,分析了多种复杂温度荷载和轨道病害条件下的桥上无缝线路纵向力学行为。

为研究不同类型的单元式无砟轨道在大跨桥上的适应性,中国铁道科学研究院王继军等^[129]以 CRTS I 型和 CRTS III 型板式无砟轨道为例,对温度荷载作用下轨道各层结构纵向受力与变形、层间错动位移、限位结构受力进行了对比分析,结果表明 CRTS III 型板式无砟轨道更有利于控制无砟轨道-桥梁相对位移及大跨梁端限位结构受力。

华东交通大学张鹏飞、桂昊等分别根据 CRTS I 型^[130-132]、CRTS II 型^[133-135]和 CRTS III 型^[136-138]板式无砟轨道在我国高速铁路多跨筒支梁桥和大跨连续梁桥上的应用情况,充分考虑各轨道结构、桥梁结构的力学特性及纵横垂向的相互作用关系,建立了精细化的有限元模型,研究了温度荷载、列车荷载及列车制动荷载作用下桥上轨道结构的受力与变形特性,

并分析了荷载、轨道、桥梁参数等对轨道结构受力与变形的影响规律，对桥上扣件纵向阻力、固定支座墩（台）顶纵向刚度及滑动层摩擦系数的取值提出了合理的建议。

1.3.3 国内外桥上无缝线路纵向动力研究现状

对于桥上无缝线路纵向力动力特性的研究，Fryba^[139]指出列车制动或起动过桥时，桥梁结构制动或起动，桥梁结构产生的纵向水平力较匀速过桥时大得多。为描述列车制动过程，徐庆元^[113]建立了多质点一维纵向动力计算模型，通过对比纵向静力和动力的计算结果，指出制动工况下结构纵向附加静力计算结果误差可满足工程需求。吴亮秦等^[140]基于列车在桥梁上的制动试验对其制动率进行了研究，结果表明对于常用跨度的简支梁，有效制动率取值范围为 0.09 ~ 0.15。秦顺全等^[141,142]针对武汉天兴洲公铁两用斜拉桥，研究了列车制动荷载作用下结构的动力响应及其控制方法，结果表明 MR 阻尼器可有效地抑制桥梁主梁和桥塔的纵向振动。针对大跨度漂浮体系桥梁，YANG 等^[143]建议采用黏滞阻尼器以减小列车制动荷载作用下结构的纵向振动。

黄栋杰^[144]对 CRH₂ 型动车组制动系统进行了较为详细的研究，通过对列车黏着力、减速度、制动时间和制动距离的计算，得到了列车制动特性曲线；在此基础上，程潜^[145]通过建立考虑高速列车与高架车站的相互作用的动力学模型，研究了 CRH₂ 型动车组制动过程中制动荷载在高架车站内的传递规律，结果表明车辆、轨道和桥梁结构纵向振动响应最大值均出现在列车制动停车瞬间^[146,147]。华东交通大学潘鹏^[148]在其硕士学位论文中基于有限元法和拉格朗日方程，建立了高速列车-无砟轨道-桥梁耦合系统动力分析模型，如图 1-14 和图 1-15 所示，编制了用于分析高速列车-无砟轨道-桥梁耦合系统动力相互作用的计算程序，运用交叉迭代法计算了 CRH₂ 型动车组紧急制动条件下无砟轨道和桥梁结构的动力响应，也得出了类似的结论^[149]。

吕龙等针对某一大跨度公铁两用斜拉桥，建立了三维梁单元有限元动力分析模型，根据高速列车制动模型获得制动力，从动力时程分析的角度，探讨了黏滞阻尼器对列车制动条件下结构纵向振动特性的影响，指出通过在塔梁间设置黏滞阻尼器可有效控制结构的纵向振动^[150,151]；并在此基础上

上,进一步推导了移动荷载下斜拉桥纵向共振速度的估算公式,结果表明当移动荷载速度与估算纵向共振速度接近时,斜拉桥会发生纵向共振现象^[152]。

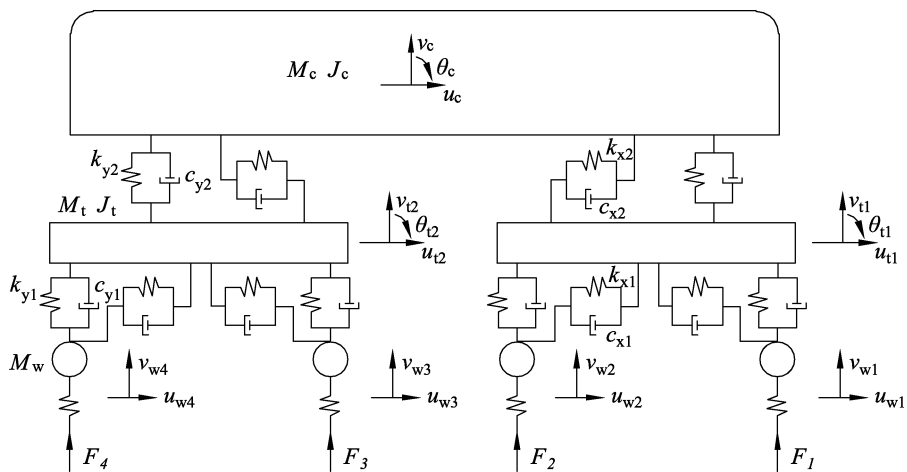


图 1-14 车辆单元模型

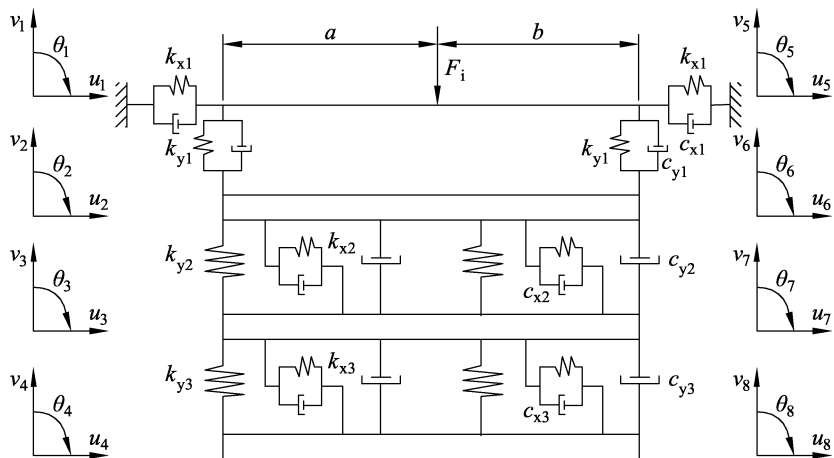


图 1-15 CRTS II 型板式无砟轨道-桥梁单元模型

1.4 现有研究的不足之处

对于桥上无缝线路纵向力的理论计算方法,国内外学者和研究人员开

展了大量的研究并取得了丰硕的研究成果，为解决桥上无缝线路受力变形问题提供了重要参考和措施，但仍存在一些需要完善之处，主要体现在以下几个方面：

(1) 现有研究多倾向于桥上有砟轨道，CRTS I 型、CRTS II 型板式无砟轨道无缝线路，关于我国自主研发的 CRTS III 型板式无砟轨道结构的研究还较少且多集中于路基段，对于桥上 CRTS III 型板式无砟轨道无缝线路设计理论及方法的研究更是少见。

(2) 缺乏能满足计算精度和效率的同时还能反映现场实际情况的空间耦合模型。现有的梁-轨纵向相互作用力学模型大多为二维平面模型或简化的三维模型，在一定程度上缺乏对无砟轨道、桥梁及墩（台）结构力学特性的空间描述，与实际情况存在一定差别。

(3) 在荷载方面，考虑整体温度荷载、列车荷载及列车制动荷载的居多，而在实际运营过程中受到自然环境的影响，混凝土箱梁及无砟轨道结构内部存在竖向、横向非线性温度梯度，且缺乏考虑列车运行或制动过程中的动力作用。

1.5 本书主要研究内容及研究思路

根据桥上无缝线路纵向力研究现状，并针对本书 1.4 节中所总结的不足之处，本书对桥上 CRTS III 型板式无砟轨道无缝线路纵向静力传递规律及其影响因素，以及列车运行和制动条件下轨道结构、桥梁结构动力特性进行系统的研究。本书的主要研究思路如图 1-16 所示，主要工作内容包括：

(1) 针对桥上 CRTS III 型板式无砟轨道无缝线路的结构组成及设计参数，考虑到我国高速铁路广泛应用多跨简支梁桥和大跨连续梁桥，并基于钢轨、无砟轨道、桥梁、墩（台）之间的相互作用机理和有限元法，充分考虑钢轨、扣件、轨道板、自密实混凝土层、凸台、弹性垫层、土工布隔离层、底座板、桥梁梁体和支座等各轨道结构和桥梁结构的尺寸与力学属性，并运用 ANSYS 建立两种桥上 CRTS III 型板式无砟轨道无缝线路空间耦合模型。

(2) 基于 C#高级编程技术和参数化语言 APDL，对 ANSYS 进行二次

开发, 编制桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路纵向力计算程序。该程序可以实现多种结构参数的设置、空间耦合模型的建立、荷载参数的设置、加载计算与数据后处理一体化等功能, 其中结构参数包括各轨道结构、桥梁结构的尺寸及力学属性, 荷载参数包括温度荷载、列车荷载及制动荷载。通过与现有研究成果对比, 验证本书所建有限元模型的正确性, 以及计算程序的通用性和可靠性。

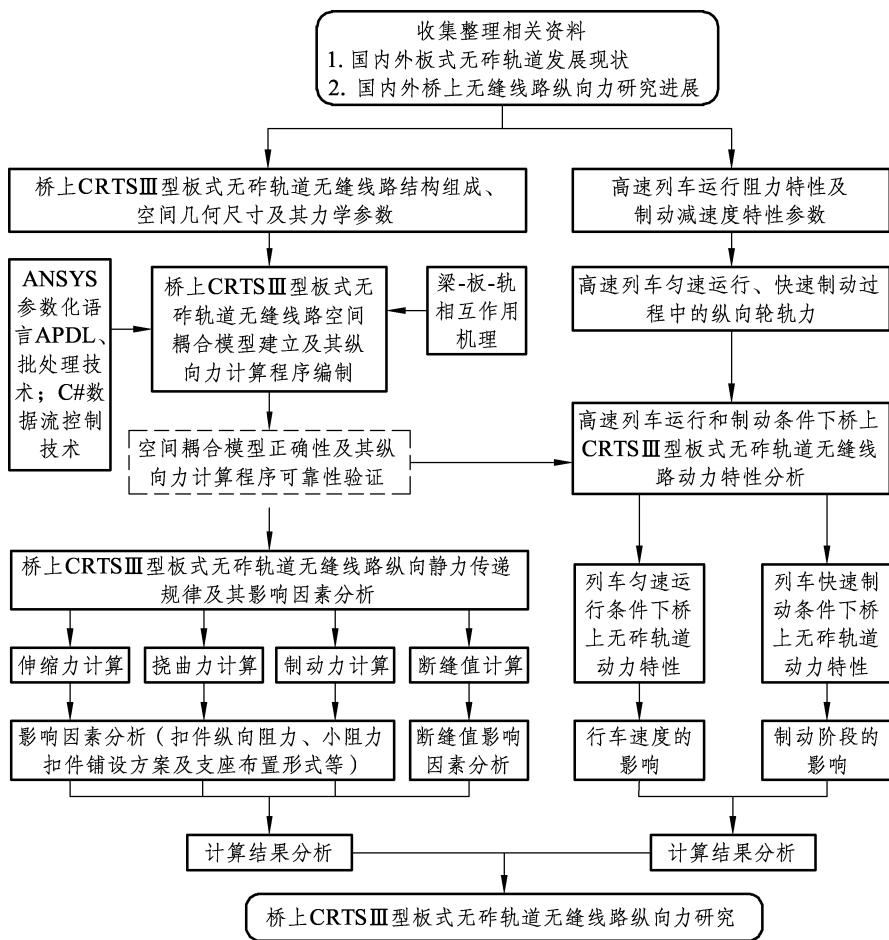


图 1-16 本书研究思路流程图

(3) 针对多跨简支梁桥和大跨连续梁桥, 从静力的角度出发, 研究多种复杂温度荷载、列车荷载、列车制动荷载及断轨条件下桥上 CRTSⅢ型板

式无砟轨道无缝线路纵向力与位移分布规律；并在此基础之上，分别对钢轨强度、断缝值、弹性垫层变形量、层间相对位移进行安全性检算。

（4）针对多跨简支梁桥和大跨连续梁桥，逐个分析扣件纵向阻力、小阻力扣件铺设方案、固定支座墩（台）顶纵向刚度及支座布置形式等因素对伸缩力、挠曲力和制动力的影响。从减小桥上无砟轨道无缝线路纵向力的角度出发，对设计过程中的扣件选型，不同参数的结构选择，以及结构检算过程中桥梁跨数和截面的最优选取方案提出合理化建议。

（5）以双线长大桥梁中间跨作为研究对象，从动力的角度出发，分析高速列车运行和制动条件下无砟轨道、桥梁结构的竖向和纵向动力特性，对运营过程中桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道无缝线路结构稳定性评估提供理论依据；并通过与静力计算结果对比，对桥上无缝线路计算过程中静荷载、动荷载的选取提出合理建议。





028

