

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.04.004

# 我国地铁轨道结构技术与展望

任 静<sup>1</sup>, 陈 鹏<sup>1,2,3</sup>, 郑瑞武<sup>1,2,3</sup>, 孙大新<sup>1,2,3</sup>,  
何雪峰<sup>1,2,3</sup>, 曲 村<sup>1,2,3</sup>, 李静敏<sup>1,2,3</sup>, 康 锴<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037; 2. 城市轨道交通绿色与安全建造技术国家工程研究中心, 北京 100037; 3. 北京市轨道结构工程技术研究中心, 北京 100037)

**摘 要:** 为深入探讨我国地铁从战备辅助向现代化都市引擎转型的技术演进逻辑与自主创新路径, 系统梳理我国地铁轨道结构 60 多年的发展历程。以钢轨与无缝线路、扣件、道岔、整体道床及减振轨道结构 5 大关键组成部分为主线, 系统阐述其技术发展情况: 除根据项目需求逐步采用高速铁路钢轨相关的技术外, 结合地铁小半径曲线多、过载频率高的特点, 在小半径、道岔等地段采用耐磨性好的钢轨; 扣件呈现百花齐放态势, 形成以 DT、ZX、WJ 等系列扣件为代表的标准图体系, 且设计技术、制造工艺方面持续取得进步; 道岔从沿用国铁标准逐步发展到适配地铁工程建设需求的以城轨系列等为代表的标准图体系; 整体道床确立以混凝土长枕埋入式为主的标准体系, 并发展出预制装配化技术等新型道床结构; 减振轨道结构形成涵盖从扣件、轨枕到道床类减振的多元化技术体系。展望未来, 轨道结构技术将在设计、施工、运维及运营线改造等方面得到持续发展, 中国地铁技术标准也将逐步走向国际化。

**关键词:** 我国地铁; 轨道结构; 技术发展; 技术标准; 道岔; 扣件; 整体道床

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)04-0034-09

## Review of Technological Development and Prospects for Metro Track Structure in China

Ren Jing<sup>1</sup>, Chen Peng<sup>1,2,3</sup>, Zheng Ruiwu<sup>1,2,3</sup>, Sun Daxin<sup>1,2,3</sup>,  
He Xuefeng<sup>1,2,3</sup>, Qu Cun<sup>1,2,3</sup>, Li Jingmin<sup>1,2,3</sup>, Kang Kai<sup>1,2,3</sup>

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037; 2. National Engineering Research Center of Green & Safe Construction Technology in Urban Rail Transit, Beijing 100037; 3. Beijing Engineering Research Center of Track Structure, Beijing 100037)

**Abstract:** To explore in depth the technological evolution logic and independent innovation path of metro in China from combat readiness assistance to modern urban engine transformation. Focusing on five key components: rail and continuously welded rail, fasteners, turnouts, monolithic track bed, and vibration-damping track structures, the technological progress in each area is elaborated: in addition to the adoption of high-speed rail technologies based on project requirements, the characteristics of metro systems—such as numerous small-radius curves and frequent overloading—have also driven the application of wear-resistant rails in locations like sharp curves and turnout sections; fasteners have diversified into a standardized system represented by series such as DT、ZX、WJ, with continuous improvements in design and manufacturing; turnouts have evolved from national railway standards to urban rail series such as Cheng Gui suited to metro engineering needs; the monolithic track bed has established a standard system centered on concrete long-sleeper embedded types, alongside new structural forms such as prefabricated and assembled technologies; and vibration-damping track structures have formed a diversified technical system covering fasteners,

收稿日期: 2026-06-04 修回日期: 2026-06-15

第一作者: 任静, 女, 硕士, 教授级高级工程师, 从事城市轨道交通轨道结构工程设计及技术创新工作, 3095743209@qq.com

通信作者: 陈鹏, 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事城市轨道交通轨道结构工程设计及技术创新工作, 55974844@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB3713000)

引用格式: 任静, 陈鹏, 郑瑞武, 等. 我国地铁轨道结构技术与展望[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(4): 34-42.

sleepers, and track-bed solutions. Looking ahead, track structure technology will continue to advance in design, construction, maintenance, and upgrading of in-service lines, while China's metro technical standards are progressively moving toward internationalization.

**Keywords:** China metro; track structure; technological development; technological prospects; technological standard; turnout; fastener; monolithic track bed

地铁是现代大城市公共交通的骨干载体之一,轨道结构是地铁工程的基础性核心工程,直接决定列车运行平稳性、行车安全性、振动噪声控制水平及长期运维成本。我国地铁建设始于1965年北京地铁一期工程,自此拉开地铁轨道结构技术探索的序幕。

与国铁相比,地铁具有鲜明的特色:线路灵活,曲线密集且小半径曲线数量多;沿线振动敏感点多且减振降噪要求高;运行间隔、站间距较小,列车频繁加速及制动;轨道施工场地狭小,机械化施工作业受限;维护在夜间停运后的短短几小时内进行,作业效率要求高;不同城市地质条件复杂多样等。轨道系统为满足以上地铁需求,结合国铁技术不断创新发展。

整体来看,我国地铁轨道结构技术可划分为3个阶段。

第1阶段:从0到1研发起步期。依赖国铁技术基础,结合地铁使用条件进行改型设计,并开展相关检测、试验,逐步形成地铁轨道技术标准。

第2阶段:从1到N规模化推广期。1992年版的《地下铁道设计规范》(GB50157—1992)发布实施后,随着全国多个城市地铁开工建设,轨道各部件逐步实现国产化定型、标准化及大批量工程应用。与此同时相关技术标准也推广应用到伊朗德黑兰地铁、朝鲜平壤地铁等国外城市地铁。

第3阶段:自主创新技术蓬勃发展及技术输出时期。随着各城市的规模化建设及运营,为满足轨道施工的高质量、高效率及运营阶段的低成本、少维修等要求,轨道技术在装配化建造、智能检测、智慧运维等方面开展了大量技术创新工作并进行了推广应用。同时积极输出中国标准及技术,应用到越南、哈萨克斯坦等国家的城市轨道交通项目。

本文以轨道结构中的钢轨、扣件、道岔、道床和减振设备5大主要组成部分为对象,阐述地铁轨道结构的技术发展历程,并提出展望。

## 1 钢轨及无缝线路技术

### 1.1 钢轨及接头部件

早期的北京地铁一期工程(1965—1969年)和天津地铁一期工程(1970—1984年)建设时期,采用50 kg/m

普通碳素钢轨和普通线路,基本满足当时运营需求。《地下铁道设计规范》(GB50157—92)颁布实施后,地铁建设步入规范化阶段,60 kg/m(正线用)、50 kg/m(场段用)两大主流地铁轨型正式定型。2000年以后,我国城市轨道交通开始大规模建设,与此同时我国钢轨技术随着高速铁路客运专线的建设已逐步实现跨越式升级,地铁中也相应根据项目需求逐步采用相关的技术,如廓形优化(60 N)、纯净度与抗伤损能力提高、长定尺轧制、钢轨打磨(预防性打磨、修复性打磨)等技术大幅提高钢轨平顺性等。尤其在小半径曲线、道岔轮轨磨耗控制方面采用在线热处理钢轨、合金钢钢轨等耐磨性好的钢轨,大大延长换轨周期。

### 1.2 无缝线路

我国城市轨道交通无缝线路的发展主要经历从普通线路、区间无缝线路到跨区间无缝线路3个阶段:自1969年北京地铁一期工程建成通车至2000年前,国内地铁普遍采用标准25 m或12.5 m钢轨的有缝线路结构,行车经过轨缝处存在噪声和轮轨冲击。2000年后国铁区间无缝线路技术开始逐步应用于城市轨道交通新建线路中,其中北京地铁13号线是国内第一条采用一次性铺设无缝线路的城市轨道交通线路。2010年后我国部分新建地铁线路为减少现场闪光接触焊的接头,开始试点在焊轨基底焊接长钢轨,但仍保留局部伸缩调节器缓冲温度应力。

除区间无缝线路外,早期少数地铁项目,为进一步提高线路的平顺性,采用跨区间无缝线路,如深圳地铁4号线。

## 2 扣件技术

扣件是轨道系统中连接钢轨与轨枕(或轨道板)的核心设备。从为我国第一条地铁研发的DTI型扣件起,伴随着建设及运营线路的增多,扣件技术经历从借用国铁扣件到根据地铁工程条件开展针对性设计的变革,并呈现百花齐放的趋势。

最早的北京地铁1号线采用DTI型扣件,为弹性分开式有挡肩扣件,弹片扣压,刚度较大(见图1(a))。北京地铁2号线西环部分地段研究采用弹性不分开式

DT II 型扣件，仍为弹片扣压。1978—1980 年，研发圆柱粒子橡胶垫板，扣件动弹性和减振性能有很大提高。为适应不同地质条件和使用条件下的特点，1985 年、1987 年持续开发 DTIV 型、DTIII 型扣件，采用国铁 I 型弹条扣压，均为有挡肩式，分别应用于北京和上海的地铁。

1992 年后，伴随《地下铁道设计规范》颁布，国内启动无螺栓弹条系列、低扣压力弹条系列地铁扣件国产化攻关。先后研制了单趾弹簧扣件、DTVI 型系列扣件(见图 1(b)DTVI2 型扣件)、DTVII 型系列扣件、ZX 系列、WJ 系列、DJK 系列(场段用)弹性分开式无挡肩扣件，实现扣件绝缘、调高、弹性、限位一体化设计，地铁扣件设计参数、制造标准与安装工艺逐步统一，形成适用于正线、场段不同应用场景的扣件体系，在各大城市地铁进行规模化应用。



(a) DT I 型扣件 (b) DTVI2 型扣件

图 1 扣件系统  
Figure 1 Fastening system

2.1 主要扣件类型及技术特点

我国城市轨道交通扣件已形成以 DT 系列、ZX 系列、WJ 系列、单趾弹簧扣件为主流，减振型扣件、车辆基地用 DJK 系列扣件为补充的成熟体系。几种典型扣件及技术特点见表 1。

表 1 典型扣件及技术特点

Table 1 Typical fasteners and technical characteristics

| 扣件名称      | 主要技术特点                                                                                                     | 适用地段                 |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| DTVI2 型扣件 | ①无螺栓扣件，采用自研的 DI 弹条(Φ18 mm)；<br>②无挡肩式，铁垫板下调高量 30 mm；<br>③轨下和板下采用弹性垫板，垂向静刚度 20~40 kN/mm                      | 60 kg/m 钢轨地下、地面线整体道床 |
| ZX-3 型扣件  | ①无螺栓扣件，采用国铁标准 III 型弹条(Φ20 mm)；<br>②扣件结构型式、刚度指标与 DTVI2 型扣件基本一致。调距量为+20、-28 mm                               | 60 kg/m 钢轨地下、地面线整体道床 |
| DTVII 型扣件 | ①小阻力扣件，单个弹条扣压力为 4 kN，钢轨爬行阻力 6 kN/组；<br>②无挡肩式，钢轨调高量 40 mm；轨距调整量+8、-16 mm；<br>③轨下和板下采用弹性垫板，垂向静刚度 20~40 kN/mm | 60 kg/m 钢轨高架线整体道床    |
| WJ-2A 型扣件 | ①小阻力扣件，单个弹条扣压力为 4.5 kN，钢轨爬行阻力 5 kN/组；<br>②扣件结构型式、刚度指标与 DTVI2 型扣件基本一致，铁垫板下采用橡胶垫板，调距量为±16 mm                 | 60 kg/m 钢轨高架线整体道床    |

2.2 扣件技术发展趋势

随着设计手段、生产制造技术的不断进步及工程实践经验的积累，扣件技术的发展呈现出以下趋势。

2.2.1 结构和参数设计更加精细化

在广泛收集国内外大量扣件结构类型及技术参数基础上，结合具体工程需求，利用各类设计软件及力学分析手段，更加系统、详细地研究扣件的服役状态和细部构造，优化设计参数和尺寸，使得扣件的构造设计更加科学，受力更加合理<sup>[1-2]</sup>，如：弹条设计既要考虑材料节省，也要考虑面对大运量、钢轨波磨时的冗余量；扣件弹性垫板不仅要考虑良好的弹性，还要考虑适当的阻尼特性；轨下垫板及铁垫板下垫板弹性的匹配设计等。

2.2.2 结构构造更加简洁

随着各城市运营线的增加，轨道养护维修量日益增大，人工成本不断增加。扣件作为轨道设备中的易损部件，在轨道系统的养护维修工作量中占比较大。通

过简化扣件结构、减少扣件零部件数量、提升扣件拆装便利性、提高扣件零部件的标准化程度等方式，降低养护维修工作量，提高各类扣件零部件资源共享的程度，已逐步成为行业共识。

2.2.3 制造精度日益提高

在扣件结构设计不断精细化的同时，各部件的生产加工技术也得到飞速发展，全自动弹条成型工艺的出现及高精度铸造工艺的应用，使得扣件的加工精度得到很大提高，各部件之间的配合误差越来越小，大幅提高扣件的安装精度，提升轨道几何尺寸的保持能力，改善轨道结构的整体受力状态，减缓轨道结构的劣化速度。

3 道岔技术

道岔是轨道结构的重要组成部分。地铁道岔普遍采用单开道岔及交叉渡线，个别线路采用对称道岔、三开道岔，早期线路还采用过复式交分道岔。地铁正线一般采用 9 号道岔，折返区段有些项目也采用 12 号道岔，车辆段一般采用 7 号道岔。

早期地铁道岔直接选用国铁标准道岔,技术成熟,极大地缩短工程应用周期,但也存在适应性及匹配性较差的问题。2000 年后的地铁道岔借鉴国铁提速道岔技术标准,采用 AT 尖轨、弹条扣件,轨下及板下设置橡胶垫板,提升道岔的稳定性、平顺性和弹性。2008 年北京奥运会后开通的地铁线路逐渐采用 2 个牵引点、弹性可弯曲线尖轨道岔,实现跨区间无缝线路,道岔内一般采用冻结接头,减少活接头式直线尖轨道岔病

害和振动噪声问题。

近些年,为满足通过速度和减振降噪需要,借鉴国铁高速道岔设计经验,推广应用可动心轨辙叉道岔,消除固定型辙叉有害空间。

3.1 道岔类型及技术特点

我国地铁道岔种类较多,逐步形成以城轨系列和专线系列道岔为主、衍生道岔为辅的格局。几种典型道岔及技术特点见表 2。

表 2 典型道岔及技术特点

Table 2 Typical switches and technical characteristics

| 道岔型号                                        | 主要技术特点                                                                                                                                                                         | 适用地段                    |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 50 kg/m 钢轨 9 号道岔<br>(地岔 11)                 | ①容许通过速度:直向为 80 km/h,侧向为 35 km/h;<br>②普通断面可弯式曲线尖轨,采用联动内锁闭装置,尖轨设 1 个牵引点;<br>③高锰钢整铸辙叉,不分开式护轨;<br>④弹片分开式楔型扣件,轨下设置橡胶垫板,铁垫板下设置塑料垫片;<br>⑤轨下基础为短轨枕或木枕                                  | 50 kg/m 钢轨碎石及<br>整体道床线路 |
| 60 kg/m 钢轨 9 号道岔<br>(DCZ211、DCZ311)         | ①容许通过速度:直向为 80 km/h,侧向为 30 km/h;<br>②60AT1 活接头式直线尖轨。采用联动内锁闭装置,尖轨设 1 个牵引点;<br>③高锰钢整铸辙叉,H 型可调护轨;<br>④DI 弹条扣件,轨下及铁垫板下设置橡胶垫板;<br>⑤轨下基础为短轨枕或预应力长岔枕                                  | 60 kg/m 钢轨碎石及<br>整体道床线路 |
| 60 kg/m 钢轨 9 号道岔<br>(城轨 237、专线 9761-I、II 等) | ①容许通过速度:直向为 100 km/h 或 120 km/h,侧向为 35 km/h;<br>②60AT1 弹性可弯尖轨,采用分动外锁闭装置,尖轨设 2 个牵引点;<br>③高锰钢整铸辙叉,H 型或槽型可调护轨;<br>④II 型或 DI 弹条弹性分开式可调扣件,轨下及铁垫板下设置橡胶垫板;<br>⑤轨下基础为短轨枕、桁架式长岔枕或预应力长岔枕 | 60 kg/m 钢轨碎石及<br>整体道床线路 |

除上述典型道岔,地铁工程建设中还推广应用一系列的岔配配套结构和技术。

3.1.1 单点牵引弹性可弯尖轨结构

早期地铁车辆段采用单点牵引活接头式尖轨 7 号道岔,道岔尖轨跟端病害多、稳定性差、振动和冲击较大,为此研制推广应用单点牵引弹性可弯尖轨结构,如图 2 所示,消除尖轨跟端病害,提高道岔稳定性,为道岔无缝化及减振降噪需要奠定基础。



图 2 单点牵引弹性可弯尖轨结构

Figure 2 Single-point traction elastic bendable point rail structure

3.1.2 小号码可动心轨辙叉结构

为消除固定型辙叉有害空间,减少轮轨冲击和振动对地铁周边环境的影响,研究推广应用 9 号及 7 号可动心轨辙叉,满足工程建设需要。

3.1.3 其他结构及技术应用

针对地铁车辆定距和固定轴距较小的特点,将轨距加宽由 1 450 mm 缩小至 1 445 mm、1 440 mm,以提高车辆通过道岔的平顺性,延长钢轨的更换周期。同时在道岔减振降噪区段采用减振扣件、减振垫浮置板或钢弹簧浮置板等减振措施,为降低尖轨转换阻力,滑床台板采用减磨涂层和辊轮结构等。

3.2 道岔技术发展趋势

当前的地铁道岔技术已较为成熟,未来发展趋势主要有以下几方面。

1) 在通过速度高或减振降噪需求大的地段采用可动心轨辙叉道岔。地铁线路设计时速逐渐提高,既有固定型道岔速度冗余小,已不能完全满足工程建设需要,需采用通过速度高的可动心轨辙叉道岔代替。同

时,早期工程建设环评预测时,没有考虑道岔有害空间、轮轨过渡区域等的影响,因此,岔区减振降噪水平要低于区间线路,采用可动心轨辙叉道岔能满足直向高通过速度和减振降噪的需求。

2) 提高道岔的铺设精度。早期道岔铺设精度不高,导致道岔范围出现滑床板空吊、密贴及几何形位不良等病害问题。铺设精度不高的主要原因是:整体道床用道岔的岔枕以短轨枕为主,运营中普遍存在短轨枕歪斜;碎石道床地段用道岔的岔枕采用木岔枕,随着运营时间的增长,木岔枕腐蚀后导致轨距保持能力有较大下降;施工过程中因抢工期导致道岔精调不到位。因此,从方案优化设计、施工工艺及工装改进等多方面采取措施,以提高道岔铺设精度,减少道岔区病害,降低养护维修工作量,逐步成为行业内共识。

3) 研制方便维修更换的道岔零部件,减少养护维修工作量。比较典型的问题是道岔滑床板的台板脱焊、压舌断裂、尼龙套管频繁失效等问题。滑床板及尼龙套管拆装困难,更换效率低、更换代价大,通过研制方便维修或使用寿命长的道岔零部件(如整铸滑床板<sup>[3-4]</sup>等)以减少养护维修工作量,是道岔技术发展的主要趋势。

#### 4 整体道床技术

为适应地铁限界紧张、维护时间短等要求,我国地铁道床一直以整体道床为主,碎石道床为辅。最早建设的北京地铁1号线进行了非岔区短枕式无砟道床技术研究,但道岔区沿用了国铁的“木枕碎石道床”。随后,通过技术攻关,于1970年道岔区成功铺设无枕式整体道床,1979年道岔区成功铺设短枕式整体道床。

《地下铁道设计规范》颁布实施后,混凝土短枕式

整体道床、长枕埋入式整体道床在地下线全面推广,如上海地铁1号线确立了长枕埋入式整体道床在上海的“样板”地位,并迅速被后续建设的地下线沿用。北京、上海、广州等城市地铁通过不断优化道床配筋、防水、道床面疏散功能等设计,形成了混凝土短枕式整体道床、长枕埋入式整体道床标准化设计与施工工艺。

《地铁设计规范》(GB50157—2013)明确要求“无砟轨道主体结构及混凝土轨枕的设计使用年限不应低于100年”,体现了轨道结构混凝土部件的重要性。该规范颁布以来,结合不同应用场景需求及城市轨道交通高质量发展要求,整体道床技术发展方面呈现出以下主要特点。

1) 长枕埋入式整体道床在施工速度、精度保持方面的优势逐步在行业内形成共识。老线的“短枕+中心水沟”道床逐步被摒弃,统一为“长枕+双侧水沟”道床,仅在局部地段(如排水过渡地段)采用短枕式道床。

2) 一些特殊需求区段设计了新型道床。如可调框架板整体道床用于大调高量适配联络通道段、穿地裂缝设防段等易沉降变形区段;土建施工风险高的地下区间集水区域采用内置式泵房,配套设计内置式泵房地段道床结构。

3) 在当前我国大力提倡装配化、绿色建造技术背景下,轨道结构的装配化建造技术引领了轨道结构技术新的发展方向<sup>[5-9]</sup>,在一些城市进行了规模化应用,如图3所示。装配式轨道建造技术以逆作工艺与智能测控为核心理念,采用覆盖运输、铺设、精调、灌筑、运维等关键施工环节的专用装备,解决传统建造模式存在的施工工序多、作业效率低、劳动强度大等突出问题。

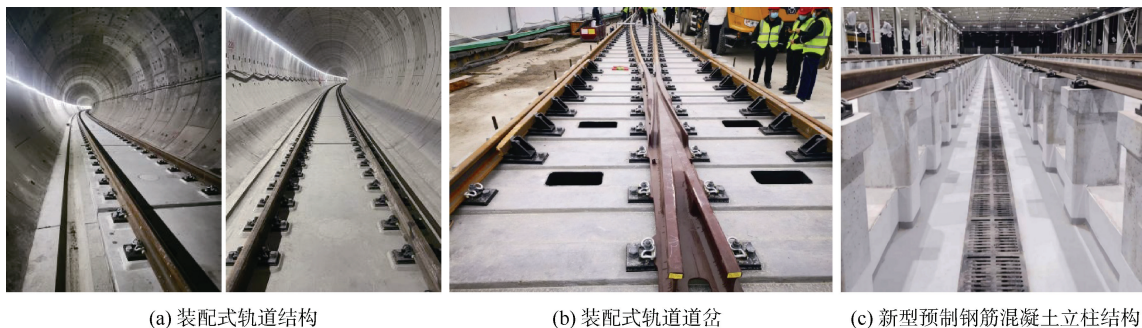


图3 装配式轨道成套结构

Figure 3 Prefabricated track complete structure

当前,我国地铁已建立不同应用场景(地下线、高架线、地面线、车场线)的整体道床选型方式,各类整

体道床型式技术成熟可靠,设计、制造、铺设、养护各环节标准体系完备。整体道床作为地铁下部基础的

“重要骨架”，以其稳定、可靠、低维护的特点，成为确保地铁列车高密度安全运行的基石。

## 5 减振轨道设备

地铁列车运行产生的振动及二次辐射噪声会对周围环境造成不利影响。采用减振轨道结构是当前减小振动及二次辐射噪声最为有效、技术经济性最佳的方式。当前地铁的振动及二次辐射噪声控制方面，以轨道结构为主来采取针对性措施。减振材料(如橡胶、聚氨酯材料等)作为减振轨道结构的核心部件，如何在地铁复杂应用场景(如高动载、低温及高湿度环境等)下保持其减振性能是重点需解决的问题。减振轨道结构按采取减振措施的部件可分为扣件类减振、轨枕类减振、道床类减振 3 大类。

### 5.1 扣件类减振轨道设备

借鉴国外同类产品技术，1986 年研制成功的国产化轨道减振器扣件填补了减振技术的空白。该产品首次在上海地铁 1 号线地下线铺设。轨道减振器扣件主要利用橡胶的剪切变形，横向刚度偏低。

国内研制的首个压缩型减振扣件即 II 型减振扣件(见图 4)用于天津地铁 1 号线高架段。后续以双层非线性压缩型减振扣件(见图 5)为代表的多种压缩性减振扣件陆续进行了规模化应用，逐步取代了剪切型的轨道

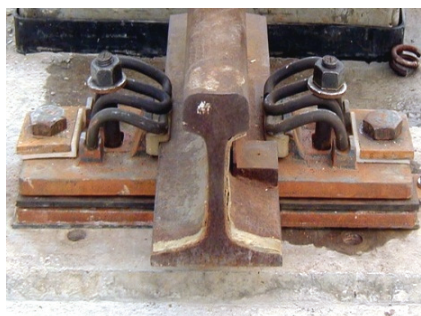


图 4 II 型减振扣件

Figure 4 Type II vibration damping fastener



图 5 双层非线性压缩型减振扣件

Figure 5 Double-layer nonlinear compression type vibration damping fastener

减振器扣件。压缩性减振扣件的技术理念是通过构造设计尽可能降低扣件安装完成后弹性垫板的弹性损失，发挥垫板的弹性。

2013 年以后，陆续研究出稳定性更强、减振效果更好的减振扣件，代表性的有嵌套式高弹性减振扣件<sup>[10]</sup>、防松脱高扭抗减振扣件、ZK-1B 型减振扣件<sup>[11]</sup>等。嵌套式高弹性减振扣件(见图 6)的技术优势为组装高度低，与普通扣件可实现原位互换，不改变轨面高程。ZK-1B 型减振扣件的技术优势为横向刚度大，轨头横向位移与普通扣件的相当。防松脱高扭抗减振扣件在国外引进的先锋扣件、国产谐振式浮轨扣件基础上发展，解决了前两代产品存在的轨距保持能力差、安装不方便、维护工作量大等问题。



图 6 嵌套式高弹性减振扣件

Figure 6 Nested high elasticity vibration damping fastener

### 5.2 轨枕类减振轨道设备

轨道类减振轨道设备主要有弹性短枕、弹性长枕和梯形轨枕 3 类。

1976 年在北京地铁 2 号线东四十条站，国内首次试铺成功弹性短枕式整体道床，通过在包裹短轨枕的套靴内设置弹性垫板的方式进行减振。2008 年在首都机场线中等减振地段，国内首次采用弹性长枕式整体道床，枕下弹性垫层采用高弹性微孔发泡垫板，且更换容易。弹性短轨枕及弹性长枕式整体道床均属于中等减振方案，因施工难度大，且轨枕和套靴非集成供货，缺乏有效的产品组装质量管控、施工配合及质量验收等方面的原因，运营线反馈施工质量问题的较多，且病害整治困难，目前已很少采用。梯形轨枕减振轨道结构由日本技术引进，国内首次在北京地铁 5 号线试铺。梯形轨枕由 2 根预应力混凝土纵梁+横向联结钢管组成“梯子”状框架，属高等减振方案，是目前应用较为广泛的减振轨道结构类型之一。

### 5.3 道床类减振轨道设备

道床类减振轨道结构因参振质量大、固有频率低、

减振效果好,其技术发展经历了从“国外引进”到“自主研发”,从“现场人工作业”到“预制装配”的过程<sup>[12]</sup>。

北京地铁13号线西直门段(穿楼段)引入了德国的钢弹簧浮置板轨道技术。钢弹簧浮置板技术作为减振效果最好的减振轨道结构,北京市科委于2007年设立“钢弹簧浮置道床研究开发”课题,先后进行系统性的理论仿真分析、关键部件研发、室内试制试验,并于2009年在北京地铁4号线完成试验段试铺施工、现场测试,减振效果能满足特殊减振的需要,成本比德国技术降低造价30%以上。2010年后,钢弹簧浮置板施工工艺革新,采用“地面预制钢筋笼,隧道内整体吊装浇筑”的工艺,施工速度由不足10 m/d/工作面提升至约30 m/d/工作面。

同期,减振垫浮置板作为高等减振措施在国内地铁推广应用<sup>[13]</sup>,其核心弹性材料橡胶垫或聚氨酯垫实现国产化,满铺于浮置板下,减振效果满足高等减振要求。

广州地铁1号线建设时引进了橡胶弹簧浮置板技术,采用下置式橡胶支座。2015年,深圳地铁11号线首次采用内置式橡胶弹簧隔振器浮置板,实现了橡胶弹簧隔振器从道床板面安装,成功解决了橡胶部件不易更换的难题,经现场测试,减振效果满足特殊减振要求。

2018年后,钢弹簧浮置板、橡胶弹簧浮置板和减振垫浮置板由现浇道床发展到预制化阶段。道床板在工厂预制成3~6 m的短板,现场直接吊装、调整、顶升,施工速度大幅提高,且精度高、耐久性好。

## 6 技术发展前景

### 6.1 数字化设计技术

数字化设计是未来地铁轨道结构技术发展的主要方向之一,将改变传统“二维设计、经验驱动”的模式,实现轨道结构全生命周期的数字化、参数化、智能化设计。

1) 推广BIM正向设计技术。建立地铁轨道系统全专业、全要素的三维参数化模型,建立标准化、模块化轨道构件库,实现钢轨、扣件、道岔、道床、减振部件的协同建模。

2) 构建多工况数字化仿真模拟平台。对轨道结构在列车荷载、温度荷载、基础沉降等复杂工况下的受力状态、变形规律、减振效果等进行系统仿真,优化结构设计参数,提升设计的科学性。

3) 构建“设计输入—仿真优化—智能选型—数据

追溯”的全流程数字化设计体系。将数字化设计与大数据、人工智能技术融合,利用历史工程数据、运维数据优化设计方案,提高设计效率及设计质量。

### 6.2 高精度、高效率、高质量的施工技术

轨道施工技术水平的提高是提升轨道结构服役性能的关键路径。通过轨道平顺性管控、轨道结构的机械化、智能化施工为主要技术发展方向,以实现轨道结构的高精度、高效率、高质量施工。

铺轨施工依托轨道精密测量、轨距精调、钢轨预打磨及开通动态检测等成套精细化工艺,可系统性优化轨道几何平顺状态,从施工源头改善轮轨接触条件、抑制非正常轮轨磨耗。受地铁线路小半径曲线密集布设、沿线环境振动管控指标严苛等特有工况的制约,减振构造设置与轨道平顺控制存在客观矛盾,统筹减振效果与线路平顺性能、建立适配地铁运营特征的平顺性控制标准,是后续精细化施工领域需进一步研究的关键问题。

装配化施工技术理念是实现轨道结构的高精度、高效率铺设,为轨道施工技术的重要方向。如:采用工厂化预制、现场智能装配模式,通过标准化生产与3D智能检测,保障预制板精度与质量稳定性;依托CPIII精密测控网与数智精调装备,实现轨道的毫米级快速精调。通过相关技术的研究及应用,相比传统施工工艺,在简化施工工序、减少用工数量、提高施工效率、提升施工质量、减少振动噪声等方面将起到促进作用。

### 6.3 线路巡检与运维智能化

面对地铁线网规模不断扩大、运维需求不断提升的现状,传统运维模式已难以满足高效、精准、安全的运维要求,巡检与运维智能化将成为必然趋势。

1) 应用智能化巡检技术,整合激光雷达、无人机、轨道机器人等多种技术,构建“空—地—轨”一体化巡检体系。轨道巡检机器人、无人机等可实现隧道、高架、地面线路的快速巡检,精准识别钢轨磨耗、扣件松动、道床开裂等显性病害;激光雷达与机器视觉结合,可实现钢轨伤损、道岔平顺性、道床沉降等隐蔽性病害检测。

2) 构建“监测—分析—预警—处置”的智能监测体系。在钢轨、扣件、道岔、道床等关键部位安装振动、应变、温度、湿度等传感器,实现轨道结构状态的实时监测、数据实时传输与分析。比如,列车振动实时监测和预警系统,对列车和轨道进行长期实时监

测,识别环境振动状态,对轮轨系统的维修节点和部位进行准确预判分析,确保地铁周边环境达标。

3) 建设线网级智能运维平台。整合巡检数据、监测数据、运维数据、环境数据,建立轨道病害识别、趋势预测、寿命评估的智能算法模型,实现病害的精准预警、分级处置,推动运维模式从“定期修”向“状态修”“预测修”转型,降低运维成本、提升运维效率。

4) 数字孪生技术在轨道运维中的应用。建立轨道结构数字孪生模型,实现物理轨道与数字轨道的实时映射,模拟轨道结构老化过程、病害发展趋势,为运维决策提供科学支撑,提升运维的智能化、精准化水平。

#### 6.4 运营线的快速改造及性能提升技术

随着我国地铁运营年限的不断增长,运营线轨道结构快速改造与性能提升方面的技术将成为未来轨道结构技术的重要方向,如以下方面的相关技术。

1) 延长钢轨服役寿命的技术。提高钢轨纯净度,研究等离子等钢轨表面强化新技术,减少钢轨伤损;推广钢轨打磨、焊补、局部换轨等修复技术;无缝线路采用先进的焊接工艺等延长线路钢轨使用寿命。

2) 道床病害整治技术。当前改造难度较大的是道床类相关的改造。需针对既有道床开裂、沉降、破损等问题,研发微创整治技术,在尽可能不影响线路正常运营的前提下,实现道床加固、裂缝修补、沉降控制等方面的改造需求<sup>[14]</sup>,如图7所示。



图7 道床沉降整治

Figure 7 Remediation of roadbed settlement

3) 减振性能提升改造技术。通过对减振效果不达标的线路,采取加强平顺性控制、及时打磨钢轨波磨、加装钢轨谐振器、普通扣件换装减振扣件、道床改造为浮置板道床等措施,提升减振降噪效果。

4) 老化评估体系。建立既有线轨道结构老化评估体系,精准判断轨道部件老化程度、病害等级,制定差异化改造方案,实现“按需改造、精准升级”。

#### 6.5 标准体系国际化及技术输出

我国地铁线路运营规模已是世界第一,建设管理、设计、施工、运维等环节都属世界先进水平。推动标准体系国际化、实现技术输出成为未来发展的重要方向。

1) 加强与国际轨道标准的衔接,积极参与国际轨道标准的制定,推动我国地铁轨道标准走向世界,打破国际标准壁垒。

2) 推动地铁轨道结构成套技术对外输出。依托“一带一路”等国际合作平台,向沿线国家输出我国地铁轨道设计、制造、施工、运维的成套技术与产品,提升我国轨道交通行业的国际影响力;建立技术输出服务体系,提供技术咨询、人员培训、运维服务等全方位支持,推动我国地铁轨道技术与产业协同“走出去”。

3) 加强国际技术交流与合作,引进国际先进技术与经验,推动我国地铁轨道结构技术持续迭代升级,实现“自主创新—标准引领—技术输出”的良性循环。

### 7 结束语

我国地铁经过近60年的发展,轨道结构技术实现了从无到有、从引进仿制到自主创新、从标准化推广到世界先进的跨越式发展,形成了全产业链自主可控的完整体系,为我国地铁建设与运营提供了坚实的技术支撑。

随着我国地铁设备实施更新改造需求的日益增大、海外地铁项目的逐步增多,以及当今世界数字化、智能化技术的飞速发展,轨道结构技术将迎来新的机遇和挑战。轨道结构技术必将持续迭代升级,向着“更平顺、更安全、更环保、更智能”的目标迈进,为我国城市轨道交通高质量发展做出更大贡献。

#### 参考文献

- [1] 马晓华,钟依琳,王立川,等.城市轨道交通有挡肩承轨台优化设计[J].铁道建筑,2023,63(11):57-61.  
Ma Xiaohua, Zhong Yilin, Wang Lichuan, et al. Optimization design of shoulder rail bearing platform in urban rail transit[J]. Railway Engineering, 2023, 63(11): 57-61.
- [2] 段玉振,陈鹏,孙大新,等.新型有砟轨道预埋套管式扣件研制[J].都市快轨交通,2025,38(5):124-128.  
Duan Yuzhen, Chen Peng, Sun Daxin, et al. Development of a new embedded-sleeve rail fastening system for ballasted track[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(5): 124-128.
- [3] 吕文昊,陈鹏,段玉振,等.城市轨道交通道岔滑床板

- 结构优化及应用研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3): 79-83.
- Lyu Wenhao, Chen Peng, Duan Yuzhen, et al. Optimization and application of slide plate structure for urban rail transit turnouts[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(3): 79-83.
- [4] 陈鹏, 王朋松, 辛涛, 等. 地铁道岔滑床板失效仿真及结构优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2361-2369.
- Chen Peng, Wang Pengsong, Xin Tao, et al. Failure simulation and structure optimization of slide plate in metro turnout[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(6): 2361-2369.
- [5] 杨秀仁, 陈鹏, 高亮, 等. 城市轨道交通智能装配式减振轨道系统成套技术[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(6): 51-55.
- Yang Xiuren, Chen Peng, Gao Liang, et al. Technology for intelligently assembled precast vibration damping track structure in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(6): 51-55.
- [6] 段海滨, 段玉振, 陈鹏. 城市轨道交通预制轨道板尺寸与线路线型适应性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 181-186.
- Duan Haibin, Duan Yuzhen, Chen Peng. Adaptability of prefabricated track slab dimensions to track alignments in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 181-186.
- [7] 刘观, 鲁彬, 张光明, 等. 城市轨道交通装配式道岔道床设计与实践[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(6): 29-33.
- Liu Guan, Lu Bin, Zhang Guangming, et al. Design and practice of prefabricated turnout bed for urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(6): 29-33.
- [8] 焦雷, 戴传青, 郑晓练, 等. 装配式轨道应用于地铁道岔区的动力特性[J]. 铁道建筑, 2025, 65(12): 64-70.
- Jiao Lei, Dai Chuanqing, Zheng Xiaolian, et al. Dynamic performance of prefabricated slab track applied in metro turnout areas[J]. Railway Engineering, 2025, 65(12): 64-70.
- [9] 刘观, 赵海, 翟贝贝, 等. 城市轨道交通列检库新型预制牛腿键槽空心立柱式检查坑道床[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(4): 254-259.
- Liu Guan, Zhao Hai, Zhai Beibei, et al. Prefabricated corbel keyway hollow column inspection pit for urban rail transit inspection depot[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(4): 254-259.
- [10] 孙大新, 李现博, 刘铁旭. 减振垫浮置道床加嵌套式减振扣件的组合减振应用研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 224-227.
- Sun Daxin, Li Xianbo, Liu Tiexu. Application of combination of nested damping fastener and rubber floating slab track[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 224-227.
- [11] 段玉振, 段海滨, 刘鹏辉, 等. 地铁振动噪声扰民投诉问题原因分析及整治技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(1): 84-89.
- Duan Yuzhen, Duan Haibin, Liu Penghui, et al. Research on the causes of metro vibration and noise complaints and its treatment technologies[J]. Modern Urban Transit, 2023(1): 84-89.
- [12] 陈鹏, 戴传青, 刘观, 等. 地铁道岔区装配式轨道的安全性能及减振效果[J]. 西南交通大学学报, 2026, 61(2): 392-402.
- Chen Peng, Dai Chuanqing, Liu Guan, et al. Safety performance and vibration reduction effects of prefabricated slab track in metro turnout areas[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2026, 61(2): 392-402.
- [13] 王朋松, 辛涛, 陈鹏, 等. 层间约束对板-垫复合装配式轨道减振性能影响研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(5): 2099-2107.
- Wang Pengsong, Xin Tao, Chen Peng, et al. Effect of inter-layer constraint on vibration reduction performance of assembly track with slab-mat composite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, 56(5): 2099-2107.
- [14] 刘世武, 段玉振, 尹继光, 等. 地铁隧道道床沉降整治研究[J]. 低温建筑技术, 2024, 46(1): 145-149.
- Liu Shiwu, Duan Yuzhen, Yin Jiguang, et al. Research on treatment of the track bed settlement of subway tunnels[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2024, 46(1): 145-149.

(编辑: 傅依萱)