

# 齿轨铁路轨道系统技术研究

王正邦<sup>1,2</sup>

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//高级工程师)

**摘要** 齿轨铁路作为一种新型城市轨道交通制式,正在国内大力推广,但尚无运营案例。结合国外齿轨铁路建设和运营经验,对齿轨铁路轨道结构关键技术,如齿轨尺寸及加工、齿轨与轨枕连接方式、轨道锚固、轮轨-齿轨过渡和道岔等进行了研究与归纳,并提出无缝齿条和有砟固化等理念。

**关键词** 齿轨铁路; 轨道系统; 轮轨啮合; 过渡段; 轨道锚固; 齿轨道岔

**中图分类号** U234.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.01.033

## Research on Rack Railway Track System Technology

WANG Zhengbang

**Abstract** As a new type of urban rail transit format, rack railway is promoted domestically, while no operating case is available yet. Key technologies of rack railway track structure such as rack size and machining, rack and sleeper connection, track anchoring, wheel rail-rack rail transition and turnouts are studied and summarized referring to the construction and operation experience of rack railway abroad. The idea of seamless rack and ballast solidification are put forward.

**Key words** rack railway; track system; rack-rail engagement; transition section; track anchoring; rack turnout

**Author's address** Track and Transportation Department, China Railway No.1 Survey and Design Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

齿轨铁路靠齿轮与齿轨啮合为列车提供爬坡驱动力,其最大爬坡坡度可达 480‰<sup>[1]</sup>,因此最早作为矿区和景区等的运输线路使用<sup>[2]</sup>。德国于 1884 年在斯图加特将齿轨铁路用作城市轨道交通。该线路在斯图加特市中心,轮轨及齿轨均低于路面,并设有专用车道,线路最大坡度 200‰;法国于 1891 年开通了里昂地铁 C 线,1974 年由于线路改造形成 175‰的大坡道,轨道结构形式也随之改造为齿轨铁路,采用电力齿轨车辆并配备接触网供电。

目前国内的都江堰和张家界等地正在积极筹划建设齿轨铁路,并颁布了相应的配套地方标准<sup>[5-6]</sup>,但尚无齿轨铁路设计与运营经验。齿轨铁路制式不同于轮轨蠕滑,其受力复杂,对轨道部件要求高,因此需要对其关键技术进行专门研究。

本文基于 Strub 制式对齿轨尺寸及加工、齿轨固定方式、轨道锚固、道岔与交叉等齿轨关键技术进行了系统研究与归纳。

## 1 齿轨几何尺寸

齿轨是齿条-齿轮啮合系统的动力基础。Strub 型式齿轨制式的侧壁形式为简单的平面几何形状,相对于垂直基准线具有 1:4 (14.05°) 的倾角。齿轨在与齿轮啮合过程中,存在不同程度的磨损,为保证齿轨侧壁形状不随磨损而产生较大变化而影响啮合形态,每节齿在接触侧面都留有一定的磨损储备,同时考虑齿根部位应力集中。

Strub 型式齿轨构造如图 1 所示。齿宽  $d$  和齿槽宽度  $l$  均根据车轮齿数、齿距和压力角计算规定。

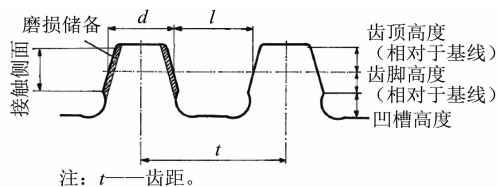


图 1 Strub 型式齿轨构造图

Fig. 1 Diagram of Strub type rack rail structure

随着生产工艺和加工水平的提升,目前齿轨生产采用整体轮廓激光切割进行粗加工,然后对齿顶和齿槽采用数控铣削方法加工,以达到精度要求。

## 2 齿轨连接及固定

受限于加工、制造和运输等环节,齿轨通常定尺长度为 3~5 m,分节成段布置,并通过接头部件连接,

接头处需预留轨缝。而预留轨缝将不可避免地引起齿节距误差,增大后期的养护维修工作量。为此可以将齿轨单元进行现场焊接,尽可能减少轨缝数量。

齿轨需要牢固稳定地固定于轨枕上,目前采用较多的方式为紧固件固定,某些特殊构造的齿轨也可使用扣件对其进行固定。当使用 L 型紧固件时,将紧固件一侧通过螺栓与齿轨螺栓孔连接,另一侧则通过螺栓固定于轨枕螺栓孔上,如图 2 所示。因此,不同于国内普通有缝线路铁路采用相对悬空式固定,齿轨接头需采用相对承接式固定。



图 2 齿轨轨缝

Fig. 2 Gap of rack rail

Strub 型式齿轨对外形和固定方式进行改进之后,可采用如图 3 所示的钢轨扣件形式进行固定,并可经过焊接形成无缝齿条。

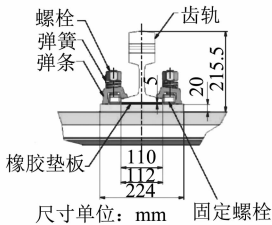


图 3 采用扣件的齿轨固定方式

Fig. 3 Fixing method of rack rail with fastener

### 3 轨道锚固

对于有砟线路,列车牵引力、制动力或温度荷载等纵向力如果不能被道砟间咬合力所平衡,则需要通过锚固件固定轨道框架。尤其在齿轨道岔区域,需防止过大的齿轨位移造成道岔部件的卡阻。

锚固方式通常采用钢钎或型钢深入下部基础中,如图 4 所示。根据轨道坡度和下部基础形式等线路状态,按每 50~200 m 间隔设置锚固点。

对齿轨铁路的锚固形式还有缆索式或拉杆式,即将缆索或拉杆的一端固定于轨枕两侧,另一端固定于线路两侧岩石或隧道壁上,也可固定在专门建立的锚锭上。缆索配有张拉设备,可精确调节锚固位置与锚固力。

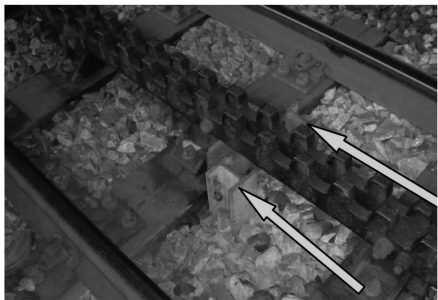


图 4 齿轨地锚固定方式

Fig. 4 Fixing method of rack rail with ground anchor

除将锚固端固定于轨枕两侧之外,还可将拉杆直接固定于齿轨,拉杆借助夹板与齿轨相连接,如图 5 所示。这种方式在新建的 Strub 齿轨线路中得到了较为广泛的应用。

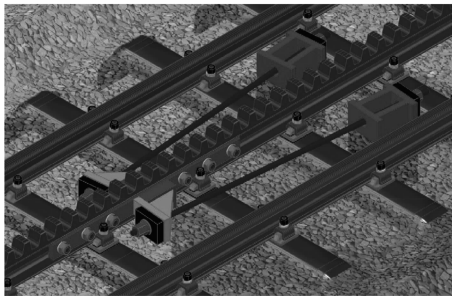


图 5 齿轨拉锚固定方式

Fig. 5 Fixing method of rack rail with pull anchor

国外应用经验表明,需对轨道坡度大于 160‰ 的地段采取锚固措施,且在道岔区前后,必须布置锚固点。在坡度 250‰ 的坡道上,每 50 m 左右设置一个锚点,大于此坡度的轨道需要相应增加锚固点数量。在许多坡度小于 160‰ 的线路上,已开始将最初铺设的地锚拆除。拆除地锚之后的轨道结构没有出现轨道爬行等病害。

除通过锚固手段增大轨道纵向阻力外,齿轨牢固的连接或焊接、采用质量优良且级配均衡的道砟、铺设质量较大且坚固的轨枕、路基上略有潮湿且摩擦力等都可有效保证轨道几何形位。对于锚固设置困难地段,可采用道砟胶将碎石道床固化,以增大道床整体稳定性。

### 4 轮轨-齿轨过渡区

#### 4.1 轮轨-齿轨过渡区作用

当列车从轮轨蠕滑进入啮合地段时,齿轮上齿与齿轨上齿的相对位置是任意的,这样有可能造成齿轮与齿轨接触时啮合形态不相匹配,极端情况下

会出现“顶齿”的不利情况。因此需设计轮轨-齿轨过渡区来确保齿轮能够正确地与齿轨啮合,过渡区如图 6 所示。

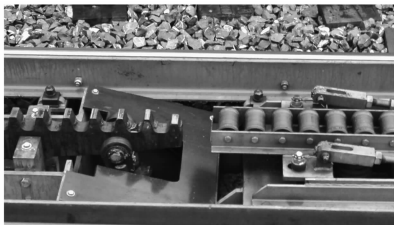


图 6 轮轨-齿轨过渡装置

Fig. 6 Transition equipment of wheel rail-rack rail

## 4.2 轮轨-齿轨过渡区形式

基于液压弹簧和杠杆系统,在导入段设置一个弹簧滑动齿轨,如图 7 所示。当列车行驶至导入段时,如果存在不匹配的啮合关系造成齿轮碾压齿轨顶面,则齿轨受向下的作用力后高度降低,并同时纵向位移,使齿轮能够正确地进入齿槽。车辆通行过后,在杠杆机构的作用下,强大的弹簧回复力将齿轨恢复到初始位置。

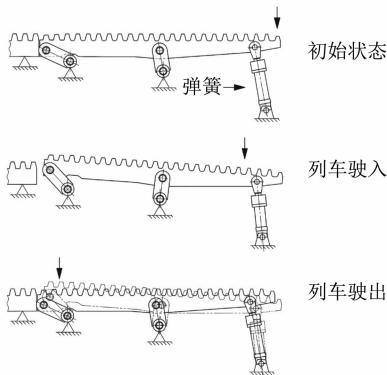


图 7 杠杆机构过渡装置工作原理

Fig. 7 Working principle of lever mechanism transition device

气压可垂向放置于前端连杆的套筒之中,此时弹簧主要以施加垂向反弹力为主;也可将弹簧横向至于齿轨杠杆支点的位置,如图 8 所示,此时弹簧主要以施加纵向反弹力为主。

为实现齿轮和齿轨尽早处于良好的啮合状态,减小对齿轨前端的冲击和磨损,在过渡设备前可增设同步滚轮,其工作原理如图 9 a) 所示。同步滚轮设置于导入段的前方,由横向放置的橡胶辊构成,如图 9 b) 所示,这些橡胶辊形成了一个弹性齿轨。当齿轮碾压橡胶辊时,处于悬挂状态的同步滚轮装置将被压下,从而改变下一滚轮的空间纵向位置,使得齿轮的下一个啮合位置得到纠正,同步滚轮被

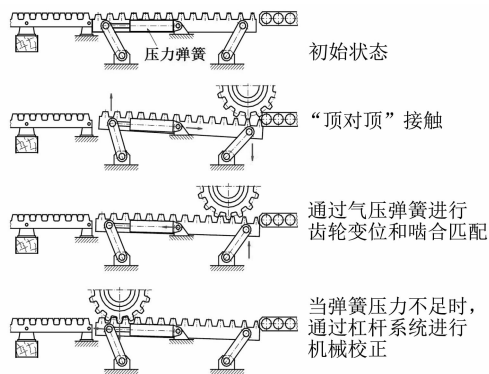


图 8 气压弹簧系统过渡装置工作原理

Fig. 8 Working principle of transition device based on pneumatic spring system



a) 同步滚轮过渡区



b) 橡胶滚轮

图 9 同步滚轮过渡装置

Fig. 9 Synchronous roller transition device

其下方的弹簧弹回到初始状态。同步滚轮的设置可以使齿轮在进入齿轨前就实现良好啮合,且光滑的齿轮与弹性橡胶之间的磨损量也相对较小,能够大幅提高列车进入过渡区的速度。

同步滚轮装置必须具有较好的弹性和一定的硬度,国外普遍使用橡胶合成材料以保证橡胶辊的良好性能,橡胶辊大多采用 PUR 材料,也可使用其他合成橡胶材料。

## 4.3 布置位置

为防止列车通过过渡区时对导入装置造成过大的冲击或因啮合不良增大脱齿风险,需要在过渡区降低列车牵引力及运行速度,并应将过渡区设计在小坡度地段,且不宜设置于曲线上,在过渡区之后应存在一定距离的直线区段。

## 5 道岔

如今仍在服役的第一批齿轨铁路通过转盘变换股道,当列车进入转盘后,通过转盘旋转实现股道变换。

1876年至1878年,第一台Klose道岔在Rorschach-Heiden铁路投入使用,应用于Riggenbach形式齿轨,如图10所示,具备了如今齿轨道岔的所有特性。

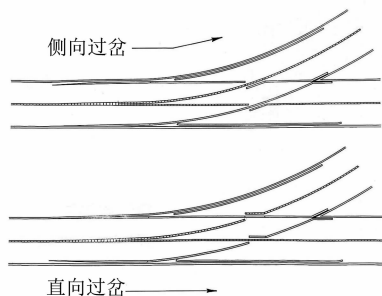


图10 Riggenbach形式齿轨道岔

Fig. 10 Rack turnout of Riggenbach form

在瑞士少女峰齿轨铁路建设过程中,引入了Strub新型道岔,如图11所示。这种新型道岔与早期道岔的不同之处在于,在钢轨与齿轨交叉处,仅将齿轨转换,而钢轨保持连续。由于钢轨顶面低于齿轨,在列车过岔过程中,钢轨并没有妨碍齿轮齿轨的啮合,由此实现了岔区钢轨的连续性。

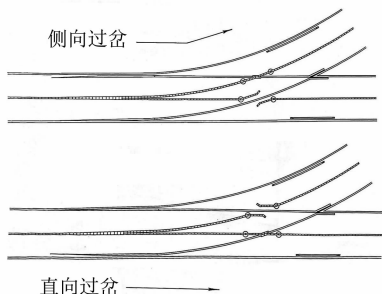


图11 少女峰Strub齿轨道岔

Fig. 11 Rack turnout of Strub from Jungfrau

此外还可采用柔性框架进行股道转换,其工作原理如图12所示。将道岔区域轨道设计为弹性可弯结构,在车辆通过道岔时,利用转辙机构将轨道整体偏移,来实现股道的转换。

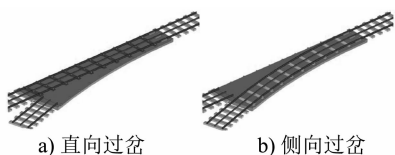


图12 齿轨柔性道岔原理图

Fig. 12 Schematic diagram of flexible rack turnout

## 6 结语

国内齿轨铁路尚无设计与运营经验。特别是其轨道系统的啮合不同于轮轨蠕滑,其受力复杂,对轨道要求高,因此需要对其关键技术进行专门研究。本文基于Strub制式对轨道系统的齿轨尺寸及加工、齿轨固定方式、轨道锚固和道岔等齿轨关键技术进行了系统研究与归纳,并提出无缝齿条和有砟固化等理念。

## 参考文献

- [1] 尚勤,李廉枫,涂旭. 国外齿轨铁路技术的发展及运用[J]. 机车电传动,2019(2):9.  
SHANG Qin, LI Lianfeng, TU Xu. Development and application of foreign cog railways and rack vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(2):9.
- [2] 王争鸣. 复杂山区铁路选线思路及理念[J]. 铁道工程学报, 2016(10):5.  
WANG Zhengming. Methods and ideas of railway route selection in complicated mountainous areas[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016(10):5.
- [3] 牛悦丞,李芾,丁军君,等. 齿轨铁路发展及应用现状综述[J]. 铁道标准设计,2019(12):37.  
NIU Yuecheng, LI Fu, DING Junjun, et al. Overview of mountain rack railway development and application[J]. Railway Standard Design, 2019(12):37.
- [4] 蔡向辉,张乾,贺天龙. 张家界七星山齿轨铁路轨道技术研究[J]. 铁道标准设计,2020(7):76.  
CAI Xianghui, ZHANG Qian, HE Tianlong. Research on track technology of Qixing Mountain rack railway in Zhangjiajie[J]. Railway Standard Design, 2020(7):76.
- [5] 余浩伟,徐银光,林世金. 《山地(齿轨)轨道交通技术规范》主要内容解析[J]. 铁道标准设计,2020(7):76.  
YU Haowei, XU Yinguang, LIN Shijin. Analysis of the main contents of Technical Code of Mountain (Rack) Rail Transit[J]. Railway Standard Design, 2020(7):76.
- [6] 刘宗峰. 齿轨铁路设计规范编制中桥梁荷载取值研究[J]. 铁道标准设计,2019(12):102.  
LIU Zongfeng. Study on bridge load value in compiling design code for rack rail[J]. Railway Standard Design, 2019(12):102.

(收稿日期:2021-05-20)