

# 客货共线铁路相邻坡段坡度差优化研究

李书强<sup>1</sup> 高国琛<sup>1</sup> 时瑾<sup>2</sup>

1 中国铁路设计集团有限公司 2 北京交通大学

DOI:10.12238/btr.v8i1.4607

**[摘要]** 从经济上考虑,坡度差对纵断面工程量有很大影响。规范中坡度代数差选取主要依据车钩纵向力不超限情况确定,但在铁路运营实践中坡度差对车钩力影响有限,且如今我国车辆装备水平也有了显著提升,故坡度差的研究具有较强的现实意义。为此,文章采用纵向动力学原理,从工程建设成本和列车运行之间综合考虑,设计最不利工况,计算不同车型坡度差与纵向冲动之间关系,为坡度差放宽提供依据。研究表明:相邻坡段的连接坡度差可以放宽,但不得超过重车方向限制坡度的两倍,到发线有效长度1050m、850m、750m、650m、550m及以下对应坡度差其最大不应大于15‰、18‰、20‰、25‰、30‰。

**[关键词]** 坡度差; 最不利工况; 纵向动力学

**中图分类号:** U213.1+3 **文献标识码:** A

## Study on slope difference optimization of adjacent slope section of passenger and cargo common line railway

Shuqiang Li<sup>1</sup> Guochen Gao<sup>1</sup> Jin Shi<sup>2</sup>

1 China Railway Design Group Corporation Limited

2 Beijing Jiaotong University

**[Abstract]** From the economic consideration, the slope difference has a great impact on the engineering quantity of the longitudinal section. In the course of regulation, the slope algebra difference is mainly determined based on the fact that the longitudinal force of the hook does not exceed the limit. However, in the practice of railway operation, the slope difference has an impact on the hook force is limited, and the level of vehicle equipment in China has been significantly improved, so the study of the slope difference has strong practical significance. To this end, the paper adopts the principle of longitudinal dynamics, considers the engineering construction cost and train operation, designs the most unfavorable working condition, calculates the relationship between slope difference and longitudinal impulse of different models, so as to provide a basis for the relaxation of slope difference. The results show that the connection slope difference of the adjacent slope can be relaxed, but not exceed twice the limit slope of the heavy vehicle direction, the effective length of 1050 m, 850m, 750 m, 750 m, 650 m, 550 m and below the corresponding slope difference should not be greater than 15 ‰, 18 ‰, 20 ‰, 25 ‰ and 30 ‰.

**[Key words]** poor slope; the most unfavorable working condition; longitudinal dynamics

### 引言

相邻坡段的坡度代数差是线路纵断面设计的重要参数之一,对铁路线路设计建造,乃至后期运营维护管理影响至关重要。过大的坡度代数差可能给后期运营安全带来隐患;而过小的坡度代数差则可能导致工程投资的大幅增加。因此,随着铁路建设工作逐渐向中西部开展,相邻坡段的坡度代数差的研究已经成为制约建设工作正常进行的关键问题之一,为此众多学者结合工程实际展开了研究。

从目前已有研究可以看出,列车纵向冲动分析主要集中于单一坡道上动力学行为,对于坡段连接处造成的坡度代数差引起的车钩断裂问题研究还相对较少,且随着我国装备车钩性能提高,车钩力容许范围变大,坡度差的研究具有较强的现实意义。为此,文章采用纵向动力学原理,设计最不利工况,计算不同车型坡度代数差与纵向冲动之间关系,为坡度代数差放宽提供理论依据。

### 1 相邻坡段最大坡度差设计现状

根据理论分析与长期运营经验,相邻坡段之间的坡度差,主要是为了确保列车在行驶过程中不会因为过大的纵向力而断钩,这主要取决于车钩及其连接部件(如前后从板座)所能承受的强度极限。在同时承载客车与货车的混合线路上,货车由于其特性往往成为决定相邻坡段最大坡度差的关键因素。此外,由于列车的牵引质量直接影响到所需到发线的有效长度,因此,在现行规范中,为了规划合理的坡度差,会采用远期规划中的到发线有效长度作为重要的参考参数,如表1、表2所示。

《铁路线路设计规范》(TB10098—2017)

表1 相邻坡段最大坡度差(‰)

远期到发线有效长度/m		1050m及以上	850	750	650
工程条件	一般	8	10	12	15
	困难	10	12	15	18

《III、IV级铁路线路设计规范》(GB50012—2012)

表2 相邻坡段的最大坡度差(‰)

铁路等级	远期到发线有效长度/m					
	1050	850	750	650	550	450
一般情况下						
III	10	12	15	18	20	25
IV			18	20	25	25
困难条件下						
III	12	15	18	20	25	30
IV			20	25	30	30

## 2 坡度差对列车纵向动力学影响研究

### 2.1 列车纵向动力学模型

列车纵向动力学的研究可以简化为分析一个多刚体系统的行为,其中,机车和车辆被看作是可变形的刚体,并通过车钩缓冲系统相互连接。如图1所示。

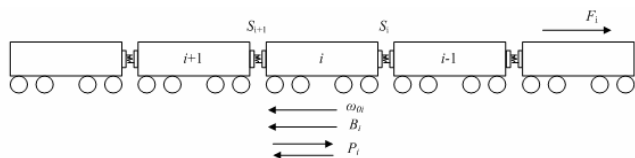


图1 列车离散质量系统模型

其中,货车缓冲器的计算模型是列车动力学模型中的关键部分,缓冲器计算模型的正确与否将对列车的运行安全性和运行品质产生较大的影响。目前,列车普遍使用的缓冲器为MT-2型,它是一种全钢缓冲器,装有模块型摩擦副和钢弹簧。文章中

采用17号连锁式固定车钩、MT-2型缓冲器。

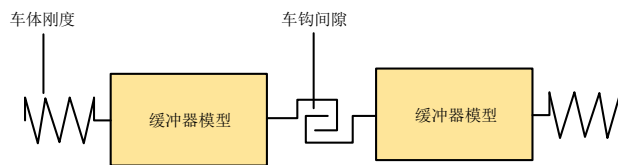


图2 车辆连接简化模型示意图

图2表示列车间连接系统—钩缓系统模型示意简图,如上图所示,在一维列车钩缓系统模型中,车钩间隙被用作描述车钩之间纵向状态的参数,这一状态可以直接反映在缓冲器的磁滞特性曲线上。为了模拟缓冲器的行为,通常会采用弹簧和阻尼的组合来进行近似。然而,缓冲器的弹簧刚度并不是一个简单的定值或可以通过简单函数关系来描述的参数。为了更准确地描述这一特性,文章采用了非线性磁滞曲线来表征缓冲器的刚度变化,从而更贴近实际运行中的缓冲器性能。

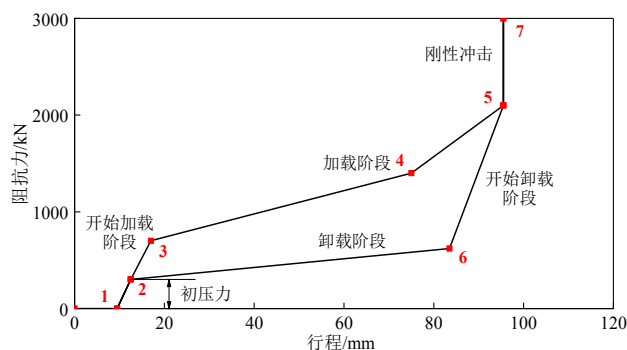


图3 MT-2型缓冲器磁滞特性曲线

缓冲器的磁滞特性曲线,是依据落锤与冲击试验结果绘制而成。在图3中,我们观察到车钩缓冲系统在受到外力作用时,其阻抗力的动态变化过程。这一过程被划分为六个关键阶段:首先是预加载阶段,为缓冲器正常工作奠定初始条件;接着是初始加载阶段,标志着缓冲器开始响应外部冲击;随后进入加载至最大阶段,此时缓冲器的阻抗力随着外部冲击力的增强而持续上升;紧接着是在最大阻抗力下若遭遇持续增大的外部冲击力,缓冲器将进入刚性冲击阶段,此时车体会直接承受来自外部的冲击及其他相关外力作用。然后5-6是卸载准备阶段,为缓冲器从加载状态向卸载状态的过渡做好铺垫;最后,6-2卸载阶段,缓冲器逐渐释放存储的能量,阻抗力随之降低;表3为缓冲器相关参数,图4为相应参数示意图。

表3 MT-2型缓冲器性能参数表

初压力/kN	最大阻抗/kN	行程/mm	能量吸收/%	车体刚度/N·M
300	2100	≤ 83	≥ 80	2*10

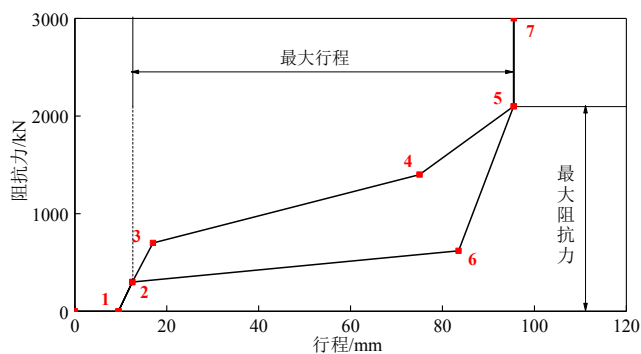


图4 缓冲器磁滞特性曲线参数示意图

2. 2车钩力评定标准

(1) 列车纵向力:

列车正常运行工况:

最大车钩拉力 $\leq 1125\text{KN}$

最大车钩压力 $\leq 1400\text{KN}$

列车紧急制动工况:

最大车钩压力 $\leq 2250\text{KN}$

列车常用制动缓解工况:

最大车钩拉力 $\leq 2250\text{KN}$ .

(2) 列车纵向加速度:

列车纵向加速度 $\leq 1g$ .

2. 3最不利工况选取

在货运列车的运行过程中,当列车从牵引或惰行状态转变为制动状态时,一个显著的现象是制动波会沿着列车长度方向,由前端向后端依次传递。这一过程中,制动缸的动作并不是瞬间同步完成的,而是呈现出一种顺序性——前端车辆首先响应制动指令,随后是列车中部的车辆,最后是尾部车辆。

由于这种制动动作的非同步性,列车会经历一个由前端向后端逐渐受压的过程。车钩,作为连接各车辆的关键部件,也会随着这一压力传递的顺序而依次受到压缩。特别地,当列车尾部的车辆也开始制动时,整个列车上的车钩所受压力将达到一个相对均匀且较高的水平,此时列车内部产生的车钩压力达到最大值。

值得注意的是,在这个压力达到峰值的时刻,列车会因为车钩的强烈压缩作用而向车头和车尾两侧产生反弹效应。此时,车钩力主要表现为拉力,列车整体呈现出一种受拉状态。在列车受压的初期阶段,由于车钩缓冲器的存在,它能够吸收掉列车纵向冲动的大部分能量,从而有效减缓了车钩的受压程度。尽管如此,列车的最大车钩压力仍然会显著大于最大车钩拉力。因此,在紧急制动工况下,对于列车来说,最为不利的线路条件往往是下凹断面。在这种地形条件下,我们需要特别关注车钩的受压状况,以确保列车的安全运行。

与制动工况相反,当列车从常用制动状态转变为缓解状态时,缓解波同样会沿着列车长度方向由前向后传递。此时,前方车辆首先开始缓解动作,而后方车辆由于尚未接收到缓解指令,

会继续减速行驶。这一过程中,列车会经历一个由前端向后端逐渐受拉的过程。与制动工况类似,车钩也会随着这一拉力传递的顺序而依次受到拉伸。当列车尾部的车辆也开始缓解时,整个列车上的车钩所受拉力将达到最大值。同样值得注意的是,在这个拉力达到峰值的时刻,列车会因为车钩的强烈拉伸作用而产生反弹效应,此时列车整体由受拉状态转变为受压状态。与制动工况类似,在列车受拉的初期阶段,缓冲器同样能够吸收掉大部分能量,从而有效减缓了车钩的受拉程度。尽管如此,列车的最大车钩拉力仍然会显著大于在缓解过程中出现的车钩压力。因此,在常用制动缓解工况下,对于列车来说,最为不利的线路条件往往是上凸断面。在这种地形条件下,我们需要特别关注车钩的受拉状况,以确保列车在缓解过程中的安全运行。

因此,文章用于计算的列车初始位置设置如下:

- 位置1: 列车头部恰好处于变坡点;
- 位置2: 列车头部过1/5列车长度处;
- 位置3: 列车头部过1/4列车长度处;
- 位置4: 列车头部过1/3列车长度处;
- 位置5: 列车头部过1/2列车长度处;
- 位置6: 列车头部过2/3列车长度处;
- 位置7: 列车头部过3/4列车长度处。

2. 4坡度差检算分析

文章采用单机牵引模式,GK型制动缸,分别选取了牵引质量6500t、5500t、4500t、3500t、2500t编组模式进行检算分析。

可以看出,牵引质量6500t、坡度代数差为18‰时,下凹断面最大车钩压力为2123.65kN,纵向加速度为5.34m/s<sup>2</sup>;上凸断面最大车钩拉力为2084.06kN,纵向加速度为5.79m/s<sup>2</sup>。车钩力与纵向加速度均不超过限值。

当牵引质量5500t、坡度代数差为30‰时,下凹断面最大车钩压力为1835.38kN,纵向加速度为5.24m/s<sup>2</sup>;上凸断面最大车钩拉力为1777.67kN,纵向加速度为4.34m/s<sup>2</sup>。车钩力与纵向加速度均不超过限值。

当牵引质量4500t、坡度代数差为30‰时,下凹断面最大车钩压力为1370.79kN,纵向加速度为5.44m/s<sup>2</sup>;上凸断面最大车钩拉力为1247.68kN,纵向加速度为3.69m/s<sup>2</sup>。车钩力与纵向加速度均不超过限值。

当牵引质量3500t、坡度代数差为30‰时,下凹断面最大车钩压力为1075.26kN,纵向加速度为2.11m/s<sup>2</sup>;上凸断面最大车钩拉力为899.6kN,纵向加速度为3.59m/s<sup>2</sup>。车钩力与纵向加速度均不超过限值。

当牵引质量2500t、坡度代数差为30‰时,下凹断面最大车钩压力为852.41kN,纵向加速度为5.43m/s<sup>2</sup>;上凸断面最大车钩拉力为596.48kN,纵向加速度为1.74m/s<sup>2</sup>。车钩力与纵向加速度均不超过限值。

综合来看,牵引质量6500t编组模式下,最大坡度差可达18‰;牵引质量5500t、4500t、3500t、2500t编组模式下,最大坡度差均可达30‰,坡度差对列车纵向冲动的的影响较小。进一步分析单

一工况横向比较下,坡度差与车钩力之间,坡度差与紧急制动情况下压力和常用制动缓解车钩拉力基本成线性关系。

### 3 研究结论

文章在梳理总结以往规范研究工作的基础上,分析了坡度差设计现状及其影响因素,并在此基础上建立了列车纵向动力学分析模型,探讨了在不利工况下满足车钩不断裂标准的坡度差取值,所得主要结论如下。

(1)线路纵断面的坡度差对列车纵向冲动的影晌基本是线性的,随着坡度差的增加列车的纵向冲动基本成正比例增加,坡度差与紧急制动情况下压力和常用制动缓解车钩拉力基本成线性关系。

(2)相邻坡段的连接坡度差可以适当放宽,到发线有效长度1050m、850m、750m、650m、550m及以下对应坡度差其最大不应大于15%、18%、20%、25%、30%。

论文由中国铁路设计集团有限公司科技开发计划项目——“普速铁路线路关键参数优化研究”(编号:2023A0223805)提供资金支持。

### [参考文献]

[1]牛国新,王自力.货运列车通过变坡点时纵向性能研究[J].铁道机车车辆,2010,30(05):47-48+60.

[2]龙许友,时瑾,王英杰.重载铁路线路平纵断面关键参数研究[J].铁道工程学报,2016,33(01):30-35.

[3]马大炜,王成国,张波.2万t级重载列车的技术对策及其纵向力研究[J].铁道机车车辆,2008,28(S1):212-216.

### 作者简介:

李书强(1999--),男,汉族,山东枣庄人,硕士,研究方向:铁路设计。