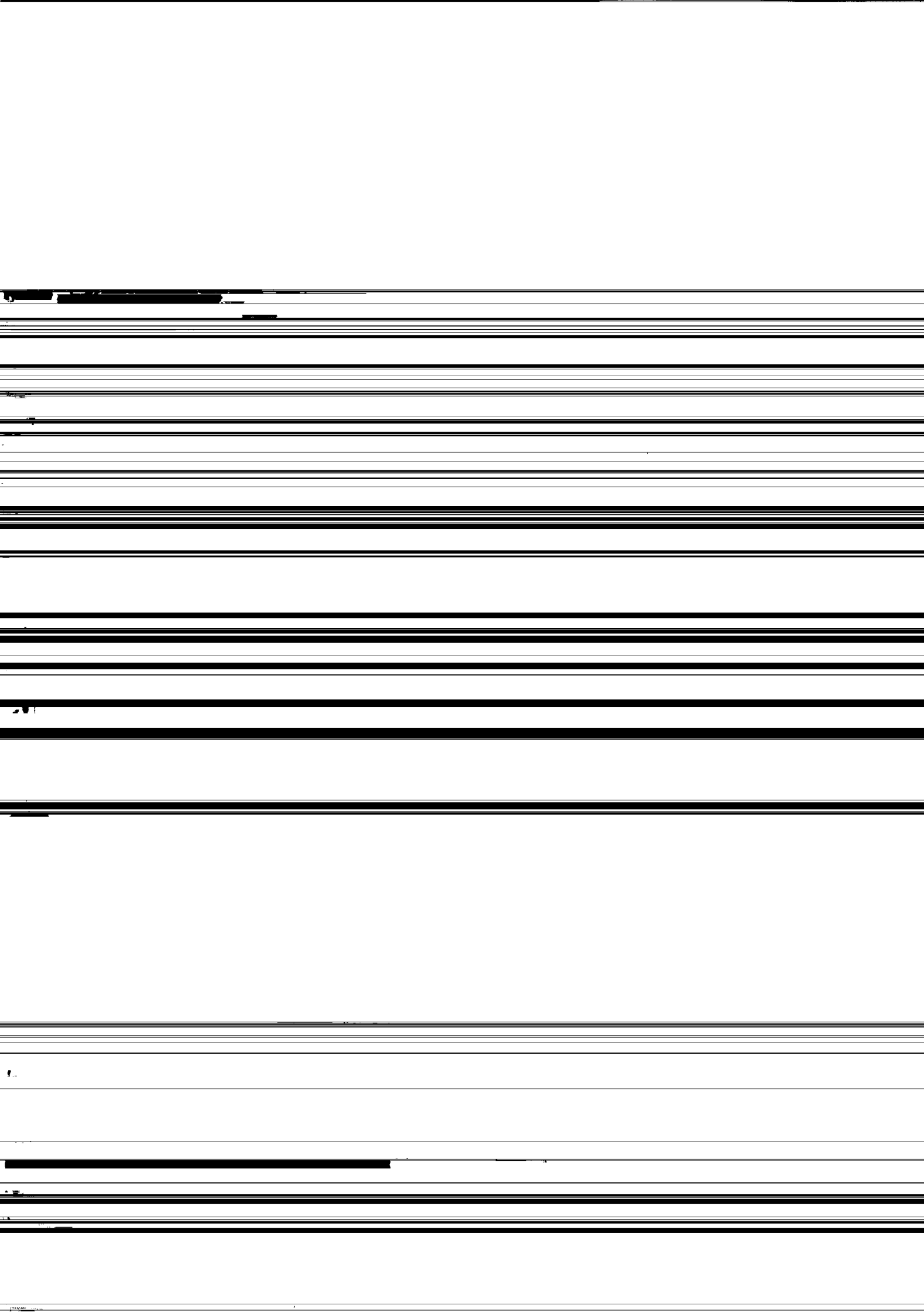




高等学校教学参考书

铁路轨道基本理论

兰州铁道学院 许实儒 童本浩 编著
西南交通大学 万复光 审

中 国 铁 道 出 版 社

1997年·北京

(京)新登字 063 号

图书在版编目(CIP)数据

铁路轨道基本理论/许实儒编著. —北京:中国铁道出版社,1996
高等学校教学参考书
ISBN 7-113-02495-5

I. 铁… II. 许… III. 轨道(铁路)-结构-基础理论-高等学校-
教学参考资料 IV. U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 19804 号

高等学校教学参考书

铁路轨道基本理论

兰州铁道学院 许实儒 童本浩 编著

*

中国铁道出版社出版发行

(北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑 刘桂华 封面设计 马 利

中国铁道出版社印刷厂印刷

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:7.5 字数:195 千

1997 年 4 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—1600 册

ISBN7-113-02495-5/U·693 定价:9.80 元

内 容 简 介

本书主要介绍轨道几何形位、轨道结构、轮轨关系及轨道力学等方面的基本理论,并总结了近年来国内外铁路轨道,尤其是轨道力学方面的最新成果及在该学科学术上的新见解,以及多年来讲授《铁路轨道》课的丰富教学经验。为配合我国高速、重载铁路的发展,书中还介绍了钢轨弯扭复合应力、轨道冲击荷载、无缝线路稳定、无缝道岔、桥上无缝线路钢轨挠曲附加力、锁定轨温测定、小半径曲线外轨磨耗和转向架稳态曲线通过等专题的科研成果。具体讲述了轨道结构静力计算和动力计算、钢轨截面几何特性的计算;在曲线钢轨磨耗与轨道几何形位的关系中,讲述了摩擦中心法、蠕滑中心法、单自由度法等。

本书可作为高等院校铁道工程专业本科、硕士研究生的教学参考书,亦可供博士研究生和工程界科技人员参考使用。

前 言

本书是在作者 1983 年为铁道工程专业本科学生所编讲义《铁路轨道的基本理论问题》的基础上扩编而成。该讲义的主要目的是试图将基础理论与其专业应用紧密结合起来,以更好地提高学生应用基础理论分析和解决实际工程问题的能力。本书与该讲义相比有了很大的改进和扩充,内容主要包括轨道基本理论与专题两个方面。基本理论部分反映了作者近 20 年来在轨道教学改革方面的主要经验,不追求系统、全面,但求言之有物,有新意;对于本科教材中讲述过的轨道几何形位中的轨距问题、轨道力学方面的轮轨接触应力问题等,虽很重要,限于篇幅,本书不再赘述。专题部分集中地介绍了作者为配合我国高速、重载铁路的发展,在钢轨弯扭复合应力、轨道冲击荷载、无缝线路稳定、无缝道岔、桥上无缝线路钢轨挠曲附加力、锁定轨温测定、小半径曲线外轨磨耗和转向架稳态曲线通过等方面的内容,其中有些是首次公开发表。

本书第一、二章和第四章的第一、二、四、六节及第三节的一部分内容由童本浩编写;第三、五章和第四章的第五节,第三节的部分内容由许实儒编写。全书由万复光审阅。本书中无缝线路部分有些内容是与郑州局工务处协作,与广钟岩高工合作共同完成的;在其它研究方面还受到曾树谷和卢耀荣研究员等的帮助;此外,本书还引用了段固敏及许康副教授的论文成果;在此一并表示衷心感谢。书中如有不当或错误之处,欢迎读者批评指正。

作 者

1995 年 10 月于兰州

目 录

第一章 轨道几何形位

- 第一节 曲线外轨超高..... 1
- 第二节 缓和曲线 12

第二章 轨道强度计算

- 第一节 轨道结构的静力计算 31
- 第二节 轨道结构的动力计算——准静态计算的基本概念
..... 46
- 第三节 钢轨弯扭复合应力分析及截面几何特性计算
..... 48

第三章 轨道垂向动力附加荷载

- 第一节 概述 59
- 第二节 轨道动荷载的频率分带性及其产生机理 63
- 第三节 钢轨接头处轮轨冲击力 P_1 及中频力 P_2 的计算
..... 65

第四章 无缝线路

- 第一节 概述 79
- 第二节 基本原理 82
- 第三节 无缝线路稳定性分析..... 109
- 第四节 无缝道岔的温度力分布及变形分析..... 134
- 第五节 桥上无缝线路“回弹”问题的
弹塑性动态模拟分析..... 144

第一章 轨道几何形位

第一节 曲线外轨超高

一、设置外轨超高的目的和基本计算公式

车辆沿曲线轨道运行时,如果外轨不抬高一些如图 1—1—1a 所示,则车辆的转向将完全依靠外轨对车轮的引导及侧向约束作用,或说外轨将迫使轮对或转向架产生一个向心加速度,这时,车体或旅客的质心相对于转向架将产生一个离心加速度,使旅客受到一种向外甩的离心力作用而感到不适;对轨道来说则产生一个偏载作用,使得外轨承受较大的垂向荷载作用,同时外轨还受到很大的侧向力作用。如果,这个离心加速度过大,甚至有可能造成列车倾覆。为此,在曲线上必须设置外轨超高,如图 1—1—1b 所示,从而造成一个重力的向心分力以平衡这个离心惯性力 J 。

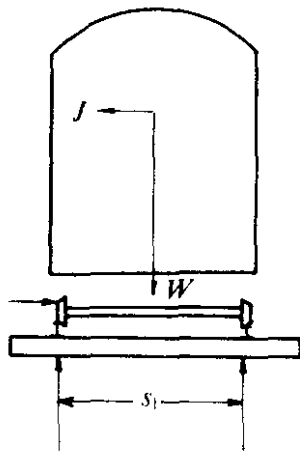


图 1—1—1a

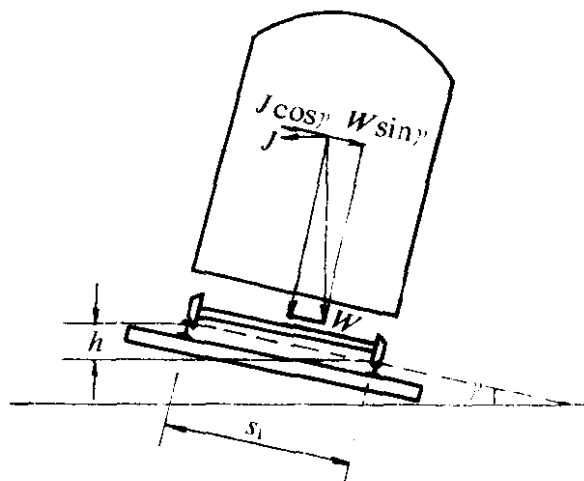


图 1—1—1b

近似地将车体的平衡作为一个平面问题来处理。离心惯性力 J 。作用于水平方向,其量值等于:

$$J = \frac{mv^2}{R} \quad (\text{N})$$

式中 m ——车辆的质量(kg);

v ——行车速度(m/s),但习惯上用 km/h 作为速度计量单位,以 V 表示, $V(\text{km/h}) = 3.6v(\text{m/s})$;即每秒 1m 的速度相当于每小时 3.6km;

R ——曲线半径(m)。

因此有,

$$J = \frac{mV^2}{12.96R}$$

为了平衡此离心力,可将外轨抬高 h (外轨超高),以使轨顶连线与水平线有一个夹角 γ 。现将离心力 J 和重力 W 均分解成两个相互垂直的分力:一个垂直于两轨顶连线,并穿过轨距中点 O ($S_1/2$ 点, S_1 为两股钢轨轨头中心线间的距离),该力为钢轨反力所平衡;另一个分力平行于轨顶连线。由图 1—1—1b 可见,要使向心力能够平衡离心力,则 γ 角必需满足下式:

$$J\cos\gamma = W\sin\gamma$$

或说应有

$$\tan\gamma = J/W$$

(亦可对 O 点取矩,由 $\Sigma M = 0$,可得 $J \times H\cos\gamma = W \times H\sin\gamma$, H 为车体重心至轨顶面的高度。)

由图可知 $\sin\gamma = h/S_1$,因 γ 角很小,可认为 $\tan\gamma \approx \sin\gamma$,从而可得计算外轨超高的基本公式:

$$\begin{aligned} h &= \frac{S_1 J}{W} = \frac{S_1}{mg} \times \frac{mV^2}{12.96R} = \frac{153}{12.96} \times \frac{V^2}{R} \\ &= 11.8 \frac{V^2}{R} (\text{mm}) \end{aligned} \quad (1-1-1)$$

式中 S_1 ——两轨头中心线间的距离,等于 1500mm。

g ——重力加速度 9.81m/s^2

$$S_1/g = 1500/9.81 = 153$$

注:对离心惯性力的分析

当车辆在曲线上作曲线运动时,由于钢轨的约束作用,各轮对必然都有一个向心加速度 v^2/R 。以轮对的外轮与外轨的接触点 O' 作为参考点,随着车体的向前运动,该接

触点 O' 有一个向心加速度,从而形成一个非惯性系。质心 O 相对于地面这个惯性系来说并没有离心加速度,但相对于轮对这个非惯性系而言就有一个离心方向的加速度。因此,该车体或旅客的质量就受到一定的惯性力作用,该惯性力亦称牵连惯性力。虽然这个离心惯性力对作为惯性系的地面来说是不存在的;但对以 O' 为原点的非惯性系而言,这个离心惯性力是真实存在的。因而当这个离心加速度较大时,旅客会感到不适,甚至会造成车辆颠覆。

二、外轨超高值的确定

(一)按内外轨所受垂直负荷相等的条件计算外轨超高

上述的超高基本计算公式是按一定的通过速度 V ,使向心力和离心力相等的条件而推导出来的。实际上,我国的铁路是客货混运的,通过曲线的各种列车,速度是很不相同的,单线铁路上下行的速度也有不少差异。而曲线外轨超高值是固定的,不能轻易改变。因此,超高只能按某一平均速度 V_0 设置。

由基本公式可知超高与速度的平方成正比,同时考虑到各次列车的重量也是不等的,故《铁路线路维修规则》规定,按加权的均方根速度 V_0 计算外轨超高,即:

$$h = 11.8 \frac{V_0^2}{R} \quad (\text{mm}) \quad (1-1-2)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{\sum NP V^2}{\sum NP}} \quad (1-1-3)$$

式中 V_0 ——加权均方根速度(km/h);在日常工作中常简称“平均速度”;

Σ ——表示对每昼夜通过的列车数求和;

P ——列车重量(kN);

V ——列车速度(km/h);

N ——具有相同列车重量和速度的列车次数。

我们知道,当超高不足时,外轨所受垂向荷载较大,反之,则内轨所受垂向荷载偏大。按加权均方根速度设置超高相当于使内外轨所受累计垂直负荷相等。现予以推证:

现令每昼夜各次列车的离心力和向心力的累计在数量上相

等,即

$$\Sigma J = \Sigma W \frac{h}{S_1}$$

$$h = S_1 \frac{\Sigma J}{\Sigma W}$$

由于 $J = mV^2/12.96R$, $W = mg$, 故得

$$h^* = \frac{11.8}{R} \cdot \frac{\Sigma mV^2}{\Sigma m} = \frac{11.8}{R} \frac{\Sigma NP V^2}{\Sigma NP} = 11.8 \frac{V_0^2}{R}$$

在工务方面的技术文献中,常把上述由平均速度 V_0 所确定的超高称为均衡超高。

(二)按旅客舒适条件进行检算

如果外轨超高 h 是按平均速度 V_0 计算并设置的,则其所提供的向心加速度 gh/S_1 即为固定的。但各趟列车的实际通过速度并不等于平均速度,因而不可避免地会产生未被平衡的离心或向心加速度。由于旅客列车的速度一般均大于平均速度,所以在通过曲线时,旅客将感受到未被平衡的离心加速度 α :

$$\alpha = \frac{v^2}{R} - \frac{gh}{S_1} \quad (1-1-4)$$

以 $v = V/3.6$ 代入上式,并以 S_1/g 乘之,得:

$$\frac{S_1}{g} \alpha = \frac{S_1}{g} \frac{V^2}{12.96R} - h$$

或说

$$153\alpha = 11.8 \frac{1}{R} (V^2 - V_0^2) = \Delta h$$

式中 Δh 称为未被平衡超高,并等于 153α 。

未被平衡离心加速度 α 应当受到一定限制,否则将会影响列

* 注:上述的累计只起一个统计作用,即内外轨所受的累计垂直负荷相等。有的书上说“使曲线轨道上内外两股钢轨的垂直压力相等”,这个提法在力学概念上是不确切的。因为由不同列车在不同时间所作用的力是不能够相加的。而如果假设钢轨的垂直磨损或损伤是与所受的垂直力成正比的,这时,各不同垂直力对钢轨所造成的磨损或损伤等后果则是可以进行线性累计的。

车运行的平稳,使旅客感到不适。我国通过实测得到的未被平衡离心加速度与旅客舒适度的关系如表 1—1—1 所列〔6〕:

表 1 1—1

$a(m/s^2)$	多数旅客的舒适程度
0.40	基本感觉不出来,意识不到在曲线上运行
0.50	有感觉,但能适应
0.60	感觉有横向力,但尚能克服
0.73	明显感觉有横向力,但尚能克服
0.87	感觉有较大横向力,需有意识保持平衡,走路难
1.00	感觉有很大横向力,站立不稳,不能行走

我国《铁路线路维修规则》规定,允许的未被平衡的欠超高 $[\Delta h]$,在一般的情况下为 75mm(相应的未被平衡的离心加速度 $a_0 = 0.5m/s^2$),特殊情况下为 90mm($a_0 = 0.59 \approx 0.6m/s^2$)。为此,必须对由式(1—1—2)用平均速度所求得的超高 h 进行检算。要求当该曲线通过实测最高速度 V_{max} 的列车时,欠超高不超过允许值,亦即应满足下式:

$$11.8 \frac{V_{max}^2}{R} - h \leq [\Delta h] \tag{1—1—5}$$

式中 V_{max} 为该段线路列车最高运行速度。如不能满足此式要求,则超高 h 应按下式确定:

$$h = 11.8 \frac{V_{max}^2}{R} - [\Delta h] \tag{1—1—6}$$

注:上述分析是在未考虑车辆弹簧装置的条件下进行的。实际上,当存在着未被平衡的离心加速度时,车体外侧弹簧压缩,使未被平衡的离心加速度增大;而当存在有未被平衡的向心加速度时,车体内侧弹簧压缩,相当于增大了未被平衡的向心加速度。所以实际的未被平衡的加速度 α_k 应为:

$$\alpha_k = (1+k)\alpha$$

式中 k ——弹簧附加系数,据实验,一般取 $k = 0.2$ 左右。

(三)外轨超高值的最后确定

总结以上可知,外轨超高应首先按加权均方根速度进行计算,这样可大致使内外轨所受垂直负荷相等。但这样求得的所谓的均

衡超高仅对大半径曲线较为合适,而对于中小半径曲线,其钢轨磨耗要严重的多,而且主要是外轨头侧磨和内轨头压溃。为此,《铁路线路维修规则》允许对由平均速度计算所得的超高,根据曲线钢轨磨耗的实际情况做一些调整;例如,不少工务段根据经验,认为将计算所得的均衡超高减小 15%,有利于减少曲线钢轨磨耗,也有少数工务段认为超高取得稍微偏大一点较好。总之,外轨超高对小半径曲线外轨侧磨的影响,还是一个正在研究的课题(参考第五章)。在现阶段,主要还是要根据实际情况确定。

铁路是为运输服务的。尤其是现代旅客运输业,对乘客旅行舒适条件要求越来越高,必须予以保证。因此,对拟采用的超高必须用式(1—1—5)进行检算,如不满足,则最后应按式(1—1—6)的旅客舒适条件确定超高,并取整为 5mm 的倍数。

三、按倾覆稳定性条件确定外轨超高的最大允许值

(一)稳定系数

列车的行驶速度与外轨超高不相适应时,就会出现欠超高或余超高。设置超高时,不仅要保证旅客舒适,更要保证行车的稳定性。车辆在曲线上运行时,受到重力、离心力和风力等的共同作用,如图 1—1—2a 所示。以 e 表示上述各力的合力偏离轨道中心 O 的距离,或称偏心距 e 。现定义稳定系数 n 为:

$$n = \frac{S_1/2}{e} = \frac{S_1}{2e} \quad (1-1-7)$$

从而可知,当 $e=0$ 时, $n=\infty$, 车辆处于绝对稳定状态;

当 $e=S_1/2$ 时, $n=1$, 车辆处于临界稳定状态;

当 $e>S_1/2$ 时, $n<1$, 车辆处于不稳定状态;

当 $e<S_1/2$ 时, $n>1$, 车辆处于稳定状态。

稳定系数应大于 1。美国铁路要求 $n\geq 3$; 日本要求 $n\geq 4$; 我国取 $n\geq 3$ 。

偏心距 e 与未被平衡超高 h_u 存在着一定的关系,如图 1—1—2b 所示。

(二) 外轨超高最大允许值 $h_{\max}$

当列车在曲线上停车时,其外轨超高即等于余超高;在这种情况下,仍应保证稳定系数 $n \geq 3$,按此条件即可确定最大的允许超高:

$$\begin{aligned} h_{\max} &= \frac{S_1^2}{2Hn} \\ &= \frac{(1500)^2}{2 \times 2220 \times 3} = 169\text{mm} \quad (1-1-9) \end{aligned}$$

我国铁路规定,单向行车的线路(复线)上,最大外轨超高为 150mm。考虑到内外轨维修水平差,余超高可达 154mm,此种情况下的稳定系数为:

$$\begin{aligned} n &= \frac{S_1^2}{2H\Delta h} \\ &= \frac{(1500)^2}{2 \times 2220 \times 154} = 3.3 \end{aligned}$$

可保证有足够的稳定性。

复线和单线行车条件不同,最大超高的限制亦不同。《铁路线路维修规则》规定,实际设置最大超高,在单线上不得大于 125mm,在双线上不得大于 150mm。

(三) 偏载系数 β

当重力与离心力的合力 R 作用有偏心 e 时,内、外轨所受压力不等。设外轨垂直反力为 p_1 , R 的垂直分力即为重力 W 。对内轨顶面 A 点取矩 $\Sigma M_A = 0$,则有:

$$p_1 \times S_1 - W \times \left(\frac{S_1}{2} + e \right) = 0$$

所以

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{W}{2} \left(1 + \frac{2e}{S_1} \right) \\ &= \frac{W}{2} (1 + \beta) \end{aligned}$$

式中,

$$\beta = \frac{2e}{S_1}$$

$$= \frac{2H\Delta h}{S_1^2} \quad (1-1-10)$$

β 称为偏载系数,对比式(1-1-7),可知偏载系数与稳定系数互为倒数,即

$$\beta = \frac{1}{n}$$

四、曲线上的最大允许通过速度

如某曲线的实设超高为 h , 允许未被平衡超高为 $[\Delta h]$, 则该曲线的允许通过速度本应为:

$$h + [\Delta h] = 11.8 \frac{V^2}{R}$$

$$V = \sqrt{\frac{h + [\Delta h]}{11.8} R}$$

但铁路曲线的最高允许行车速度并不是按实设超高 h 计算确定的。运输及行车部门是根据《铁路线路设计规范》,按最大允许超高 $h_{\max}$ 和最大允许未被平衡超高 $[\Delta h]$ 确定曲线上允许最高行车速度的,即:

在复线上,最大超高为 150mm;对于不同半径 R 的曲线,允许最高速度 $V_{\max}$ 为:

$$[\Delta h] = 75\text{mm 时}, V_{\max} \leq 4.37 \sqrt{R}$$

$$[\Delta h] = 90\text{mm 时}, V_{\max} \leq 4.51 \sqrt{R}$$

在单线上,最大超高为 125mm;允许最高行车速度 $V_{\max}$ 与曲线半径的关系为:

$$[\Delta h] = 75\text{mm 时}, V_{\max} \leq 4.11 \sqrt{R}$$

$$[\Delta h] = 90\text{mm 时}, V_{\max} \leq 4.26 \sqrt{R}$$

这就出现了矛盾:由于实设超高 h 均是按较客车速度为低的平均速度 V_0 确定的;而曲线上的允许最高行车速度 $V_{\max}$ 则是按允许的最大超高 $h_{\max}$ 确定的。因此,当曲线上通过速度为 $V_{\max}$ 的列车时,未被平衡的欠超高必然要超过允许值。对于这种情况,《铁路线

路维修规则》规定：“允许未被平衡超高最大可允许达到 130mm。如因曲线线路允许速度偏高，实际行车速度偏低，设置超高有困难时，可适当降低该曲线的线路允许速度”。

现对此规定的意义略加分析：由于 $V_{\max}$ 是按 $h_{\max} + [\Delta h] = 150 + 75 = 225\text{mm}$ 确定的；如现在实设超高为 h ，当列车以 $V_{\max}$ 通过时，为保证未被平衡超高不超过 130mm，则实设超高 h 应不小于 $225 - 130 = 95\text{mm}$ ，即，

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{130+h}{11.8}R} = \sqrt{\frac{150+75}{11.8}R} = 4.37 \sqrt{R}$$

应有 $h \geq 95\text{mm}$ 。

如 h 是由平均速度 V_0 确定的，则 V_0 应不小于，

$$V_0 \geq \sqrt{95/11.8} \times \sqrt{R} = 3.80 \sqrt{R}$$

或如果实测平均速度低于 $3.80 \sqrt{R}$ ，则计算所得超高将小于 95mm，这时如列车以 $V_{\max} = 4.37 \sqrt{R}$ 的速度通过，未被平衡超高将会超过 130mm，这时应适当限制行车速度。

五、高速铁路最小曲线半径的确定〔5〕

控制曲线最小半径的主要因素是允许的最大外轨超高和欠、余超高。由前式(1—1—8)可知

$$h_{\max} = \frac{S_1^2}{2H_n} = \frac{375}{H} (\text{mm})$$

式中 H ——车体重心高度(m)。

由上式可以看出，在保证车体稳定的条件下若要增加外轨超高，必需降低车体重心的高度。国外高速铁路车体重心都比较低，其允许的最大超高值达 180~200mm。例如，德国的铁路高速列车，车体重心高度只有 1.73m，即使最大超高 $h_{\max}$ 用到 200mm，其稳定系数仍达：

$$n = \frac{(1500)^2}{2 \times 1750 \times 200} = 3.21$$

因此，高速铁路是一项综合开发技术，机车车辆的改进可给土建工程带来重大的效益。允许欠超高是影响高速铁路曲线半径的另一

重要因素。确定允许欠超高的关键因素是旅客的舒适度。国外在这方面做的工作较多。德国的试验表明,当未被平衡的离心加速度 $\alpha=0.65\text{m/s}^2$ 时,旅客无不舒适感觉; $\alpha=0.85\text{m/s}^2$ 时,有 9.7% 坐着的乘客稍感不适; $\alpha=0.98\text{m/s}^2$ 时,感到不适的人数增加到 11.2%。所以德国采用的 $[\alpha]=0.85\text{m/s}^2$, 相当于 $[\Delta h]=130\text{mm}$ 。1995 年开通的科隆-莱因线最高时速达 300km/h。按上述标准计算其最小曲线半径应为:

$$\begin{aligned} R_{\min} &\geq 11.8 \frac{V^2}{h_{\max} + [\Delta h]} \\ &= \frac{11.8 \times (300)^2}{180 + 130} = 3425\text{m} \quad (1-1-11) \end{aligned}$$

实际采用 3500m。

在客货混运的线路上,要兼顾高速客车与低速货车的不同需要。根据国外的研究成果,客货车所需超高的差值一般不大于 80mm,困难地段也不超过 110mm。从欠、余超高的角度看,曲线最小半径可按下式计算:

$$R_{\min} \geq \frac{11.8(V_{\max}^2 - V_{\min}^2)}{[\Delta h]_{\text{欠}} + [\Delta h]_{\text{余}}} \quad (1-1-12)$$

例如,如采用 $[\Delta h]_{\text{欠}} + [\Delta h]_{\text{余}} = 110\text{mm}$ 。当 $V_{\max}$ 为 300km/h, $V_{\min} = 160\text{km/h}$ 时,则由上式可得 $R_{\min} = 6908\text{m}$ 。因此,对于相同的 $V_{\max}$,高速客货混运线要比高速客运线要求的曲线半径大得多。因此,为了解决既有客货混运线路的高速化问题,英国、意大利等国铁路一直在开发一种自动倾斜式车厢,在半径 $R=300\text{m}$ 的曲线上,最高速度可达到 200km/h,虽然这种车体现在还不尽完善,但仍不失为一个重要的发展方向。

六、曲线超高的设置方法

曲线超高的设置方法习惯上都是采用以内轨为基准,将外轨抬高,即提高外轨设置曲线超高。由于这种设置超高的方法比较简单,所以获得长期广泛的采用。

在高速铁路上,由于行车速度高,若采用习惯上设置曲线超高