

焦柳线石门段 U71Mn 50 kg/m 钢轨核伤扩展寿命的估计

周小林, 向延念

(中南大学 土木建筑学院, 湖南长沙, 410075)

摘要: 根据焦柳线石门段 U71Mn 50 kg/m 钢轨的运营状况, 在室内利用三点弯曲试验测定了该钢轨的裂纹扩展速率曲线即 $a-N$ 曲线, 经过回归分析, 得出了该钢轨疲劳裂纹扩展速率的材料系数 $C = 3.8771 \times 10^{-12}$, $m = 3.6343$; 根据 Paris 公式对该钢轨在产生可探测的核伤(核伤直径不小于 10 mm)后由核伤扩展控制(核伤面积占轨头面积的 30%)的使用寿命进行估计, 确定该钢轨在 2002a 的运营条件下的使用寿命为所通过的总运量不超过 46.8 Mt, 营运时间不超过 421 d, 为管理部门对线路的养护、维修提供了依据。

关键词: 钢轨伤损; 核伤; 使用寿命; 裂纹扩展速率

中图分类号: U213.42

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2004)03-0495-05

The evaluation of corewound expanding lifespan of U71Mn 50 kg/m rails on the Shimen district in Jiaoliu line

ZHOU Xiao-lin, XIANG Yan-nian

(College of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: According to the transport conditions of U71Mn 50 kg/m rails on Shimen district in Jiaoliu line, the $a-N$ curve of the rails is determined by three-point experiment in laboratory. The material coefficients of fatigue crack propagation speed ratio of the rails is obtained by the regression analysis, that is $C = 3.8771 \times 10^{-12}$ and $m = 3.6343$. According to the Paris formula, the lifespan controlled by core wound expanding is evaluated after the detective corewound occurs in the rails, under the transport conditions in 2002. The results show that the total transport volume is not more than 46.8 Mt and the transport time is not more than 421 d, which provides the base for the maintenance of the railway line in the worksite.

Key words: rails wound; core wound; using lifespan; crackle expanding speed

焦柳线石门段线路现为单线普通线路, 钢轨是规格为 50 kg/m 或 60 kg/m, 节长为 25 m 的普通碳素钢钢轨。在 K841+762 至 K870+500 线路地段, 线路上部结构钢轨规格为 50 kg/m, 轨枕为 II 型混凝土轨枕, 每千米有 1760 根。其中 K841+762 至 K843+500 地段(I 段)钢轨上道时间为 1993-09~

1993-10, K843+500 至 K870+500 地段(II 段)钢轨上道时间为 1992-07~1992-12。该钢轨计划通过运量为 600 Mt, 自 1992-07 上道后, 已经通过运量约 350 Mt, 虽然远未至其使用寿命, 但该地段钢轨已出现大量伤损。该地段伤损形式主要表现在如下几种形式: 钢轨顶面龟裂; 钢轨顶面剥离掉块; 钢轨

收稿日期: 2003-08-06

作者简介: 周小林(1965-), 男, 湖北麻城人, 中南大学讲师, 博士研究生, 从事道路与铁道工程研究

论文联系人: 周小林, 男, 讲师; 电话: 0731-5579917(H), 0731-2655325(O), 13907481875(手机); E-mail: h504zh@163.com

顶面压溃;螺栓孔周围裂纹;钢轨纵横向裂纹;曲线外轨侧磨。根据现场探伤检测,每年有许多钢轨因以上伤损对行车构成严重安全隐患而不得不提前下道,其中因核伤发展引起的裂纹或断裂尤为显著,该数量随车速度的提高和运量及轴重的增加呈上升趋势。近年来,焦柳线的行车速度提高较大,运量也较快增加,行车密度亦大幅度增加。该路段存在较大钢轨伤损,既增加了养护维修工作量和费用,又严重干扰了行车的正常运营,对行车安全构成威胁。影响钢轨使用寿命的因素很多^[1],但大多数因素与核伤的产生与发展有直接或间接的关系。目前,探伤设备一般可探出垂直高度大于 10 mm 的核伤(核伤面积约占轨头面积的 5%),当核伤面积达到轨头面积的 30% 时,核伤直径达 31.2 mm,钢轨常发生断裂。核伤隐藏在钢轨内部,只能通过探伤仪来探测,在此,作者根据核伤的发展来估计在用钢轨的使用寿命。

1 疲劳裂纹扩展速率测试

1.1 试件取样

U71Mn 50 kg/m 钢轨的力学性能如表 1 所示^[2]。其中: K_{IC} 和 K_{Id} 为钢轨轨头的静态和动态断裂韧性; $K_{IC} = 1.35K_{Id}$, $K_{Id} = 101.7 + 0.265x$; x 为试件跨度。

表 1 U71Mn 50 kg/m 钢轨的力学性能

Table 1 The mechanics property of U71Mn 50 kg/m rail

σ_b /MPa	σ_s /MPa	E /MPa	δ_5 /%	K_{IC} /(MN·m ^{-3/2})
883	456	2.1×10^5	8	47.06

注: K_{IC} 针对静态轨头而言, σ_b 和 σ_s 分别为钢轨的抗拉强度和屈服强度; E 为弹性模量。

根据疲劳裂纹扩展速率试验方法 ASTM-E399—73 规范的要求^[3], 试件在在用钢轨顶面沿轴向取样, 即采用 L-T 形式取样, 试件高 $W = 40$ mm, 宽 $B = 20$ mm, 长 $s = 4W = 160$ mm, 基本满足规范 ASTM-E339—73 中 $B \geq 2.5(\frac{K_{IC}}{\sigma_s})^2$ 的要求。

1.2 测试方案及结果

在试件中预制裂纹(本试验采用电火花加工切口), 然后在疲劳试验机上预制疲劳裂纹, 该裂纹总长为 $a_0 = 8$ mm, 满足 $a_0/W = 0.25$ 的要求。将试件放置于电磁共振式高频疲劳试验机上进行三点弯曲试验, 试验加载状况如图 1 所示, 使裂纹扩展至 20 mm, 每 0.2 mm 取 1 个点, 记录相应循环次数 N , 从 $a_0 = 8$ mm 到 $a = 20$ mm, 总共可得 60 组 $a-N$ 数

据, 如表 2 所示。试验时, 采用最大荷载 $P_{max} = 31.25$ kN, 最小荷载 $P_{min} = 6.25$ kN, 荷载比 $R = 0.2$ 。

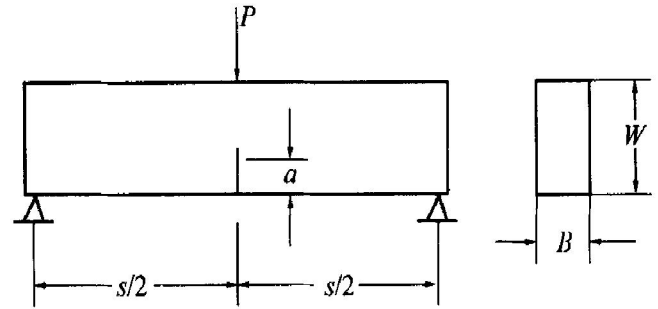


图 1 三点弯曲试验加载情况
Fig. 1 Loading state of three points crooked experiment

表 2 a-N 曲线的离散数据

Table 2 The dispersed data of a-N curve

点号	a/mm	N/10 ⁵	点号	a/mm	N/10 ⁵
0	8.0	0	32	14.2	16.729 6
1	8.2	4.427 0	33	14.4	16.868 4
2	8.4	7.299 6	34	14.6	17.001 6
3	8.6	8.850 3	35	14.8	17.129 4
4	8.8	9.811 2	36	15.0	17.252 1
5	9.0	10.501 5	37	15.2	17.369 8
6	9.2	11.040 7	38	15.4	17.482 8
7	9.4	11.483 1	39	15.6	17.591 3
8	9.6	11.862 5	40	15.8	17.695 3
9	9.8	12.203 1	41	16.0	17.795 1
10	10.0	12.517 9	42	16.2	17.890 8
11	10.2	12.815 0	43	16.4	17.892 3
12	10.4	13.100 0	44	16.6	18.070 0
13	10.6	13.375 5	45	16.8	18.153 8
14	10.8	13.637 7	46	17.0	18.233 8
16	11.0	13.882 5	47	17.2	18.310 1
17	11.2	14.107 6	48	17.4	18.382 7
18	11.4	14.310 5	49	17.6	18.451 7
19	11.6	14.509 8	50	17.8	18.517 2
20	11.8	14.696 2	51	18.0	18.579 2
21	12.0	14.877 4	52	18.2	18.637 8
22	12.2	15.056 3	53	18.4	18.692 9
23	12.4	15.235 5	54	18.6	18.744 7
24	12.6	15.415 1	55	18.8	18.793 1
25	12.8	15.593 5	56	19.0	18.838 2
26	13.0	15.770 5	57	19.2	18.880 0
27	13.2	15.943 8	58	19.4	18.918 5
28	13.4	16.112 8	59	19.6	18.953 9
29	13.6	16.276 5	60	19.8	18.986 3
30	13.8	16.434 0	61	20.0	19.015 9
31	14.0	16.584 9			

根据表 1 中的离散数据, 采用中值法可求得各点的 $\frac{da}{dN}$ 值, 即

$$\left[\frac{da}{dN} \right]_i = \left[\frac{\Delta a}{\Delta N} \right]_i = \frac{a_i'' - a_i'}{N_i'' - N_i'} \quad (1)$$

1.3 裂纹扩展速率表达式

对于三点弯曲试样,可用边界配置法求应力场强度因子的表达式,目前其通用的形式为^[4-6]:

$$K_I = \frac{SP}{BW\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2)$$

其中: $f\left(\frac{a}{W}\right) = 2.9\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 4.6\left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 21.8\left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 37.6\left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} + 38.7\left(\frac{a}{W}\right)^{9/2}$ 。

裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 和裂纹前沿应力强度因子幅度 ΔK (即 $K_{\max} - K_{\min}$) 的关系用 Paris 公式描述为^[7]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C}{1-R} (\Delta K)^m \quad (3)$$

其中: C 和 m 为与材料有关的常数。

根据测试所得 $a-N$ 曲线的离散数据,对式(3)取对数进行回归分析^[8,9],可得钢轨的疲劳裂纹扩展速率表达式为:

$$\frac{da}{dN} = \frac{3.8771 \times 10^{-12}}{1-R} (\Delta K)^{3.6343} \quad (4)$$

经过相关性检验, $C = 3.8771 \times 10^{-12}$, $m = 3.6343$, 相关系数 $r = 0.9911$ 。

1.4 试件容许循环次数

对式(3)积分,当裂纹长度 a 由 $2b_1$ 扩展至 $2b_2$ 时,试件的荷载循环次数 N 为^[7]:

$$N = \frac{(1-R)\pi^{m/2}}{2^m(\Delta\sigma)^m C \left(\frac{m}{2} - 1\right)} (b_1^{1-m/2} - b_2^{1-m/2}) \quad (5)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为在荷载作用下裂纹前沿计算点的应力强度幅度。

2 现场动力测试

2.1 现场测试方案

为了测定轨道实际工作状况,在 K857~K858 中间的直线地段选取 1 节钢轨作为测试对象,在其左、右两股钢轨的接头鱼尾板端部和轨节中间分别选取测点,测试钢轨在实际运营条件下所受的垂直荷载^[10]。

钢轨垂直荷载测试方法按部标 TB/T2489—94《轻轨水平力、垂直力地面测试方法》中的方法实施。

2.2 轮轨垂直荷载的测试结果

在实验中,测试了钢轨接头和轨节中间 4 个测点共 8 趟车的动轮载,并对机车和车辆垂直荷载的平均值进行统计。客车通过该地段时,速度一般超

过 90 km/h,货车速度超过 75 km/h,客车机车平均动轮载在接头位置为 123.7 kN,在轨节中间为 153.3 kN,货车机车平均动轮载在接头位置为 156 kN,在轨节中间位置为 157 kN。客车在接头位置时, $P_0 = 92$ kN;在轨节中间位置, $P_0 = 82$ kN。货车在接头时, $P_0 = 121.4$ kN;在轨节中间位置, $P_0 = 105.4$ kN。由于测试车辆动轮载时没有区分 60 t 和 50 t 车辆的测定值,故计算时均按 60 t 车辆来计算, P_0 取值为:对于客车, $P_0 = 82$ kN;对于货车, $P_0 = 105.4$ kN。

3 钢轨使用寿命的估计

钢轨是在交变应力下工作的,通常不以核伤的亚临界扩展寿命来限定和控制其使用,而是考虑到核伤临界面积的随机性并保证一定可靠度,以核伤发展到占轨头面积的 30% 来计算其疲劳寿命,控制钢轨的使用。

3.1 计算实例

3.1.1 线路情况

U71Mn 50 kg/m 钢轨, II 型砟枕, 1760 根/km, $a = 575$ mm, 普通线路, 温度应力 $\alpha = 60$ MPa, 钢轨支座弹性系数 $D = 300$ kN/cm。

3.1.2 运营条件

该路段牵引机车为 DF4, 2002a 通过的总质量为 40.98 Mt, 车辆组成如表 3 所示。

表 3 焦柳线石门路 U71Mn 50 kg/m 车辆组成

Table 3 Train types in U71Mn 50 kg/m rails on the Shimen District in Jiaoliu Line

车种	每天通过的 车辆数	每列列车 的节数	车辆类型	m 列车/t
货车	20	40	60t 36 节 50t 4 节	3 148.6
客车	7	17	13t	1 003.0

3.1.3 转向架

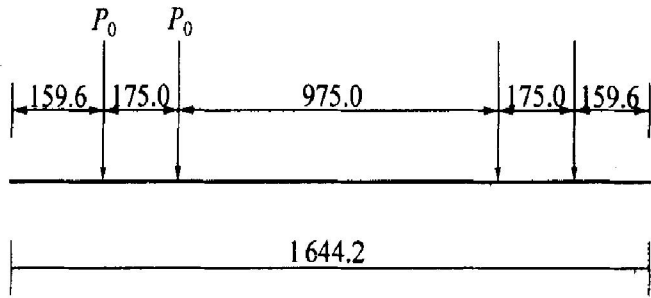
货车和客车转向架结构示意图分别如图 2 和图 3 所示^[11]。其中: P_0 为车辆的动轮载,在此采用现场动力测试中实测的车辆轮载平均值。

3.2 轨头内计算点处平均动弯应力的计算

3.2.1 受力分析

在车辆共同作用下,钢轨顶面受力状况如图 4 所示。在以下位置产生最大负弯矩和最大拉压力: P_1 与 P_2 及 P_3 与 P_4 之间中点截面 B, 挂钩下即 P_1 与 P_4 之中点截面 C, P_2 与 P_3 之间相距 P_2 和 P_3 均

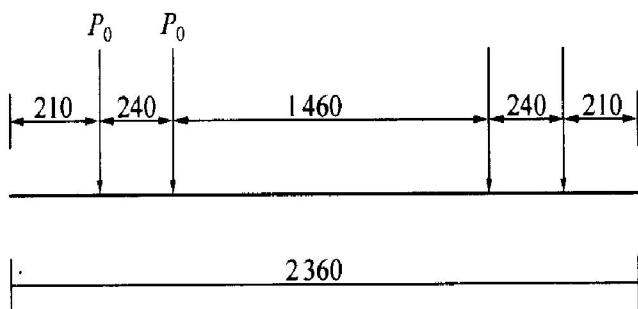
为 $x = \pi/(2\beta)$ 的截面 A_1 和 A_2 ; 而在各车轮下产生最大压应力。经分析, 每节车在钢轨任一截面产生 A 型负弯矩 2 次, B 型负弯矩 2 次, C 型负弯矩 1 次, 压力弯矩 4 次。



单位: cm

图 2 货车转向架结构

Fig. 2 Structure of freight train bogie



单位: cm

图 3 客车转向架结构

Fig. 3 Structure of passenger train bogie

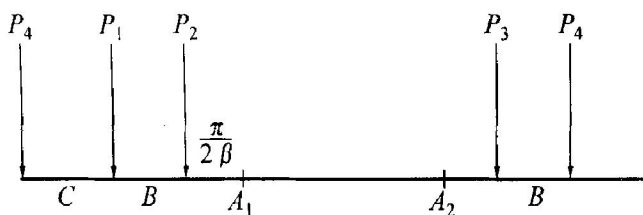


图 4 钢轨受力图

Fig. 4 The diagram loaded on rail

3.2.2 动弯应力的计算

适当考虑轨头垂直磨耗(3 mm), $V_{上} = 242 \text{ cm}^3$, $V_{下} = 283 \text{ cm}^3$, $I = 1946 \text{ cm}^4$, 轨下基础的弹性系数为^[12, 13]:

$$k = \frac{D}{a} = \frac{300}{57.5} = 5.22 \text{ (kN/cm}^2\text{)}。$$

轨道的刚比系数为:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} = 0.0133678 \text{ cm}^{-1}。$$

$$\text{动弯矩为: } M_d = \frac{P_0}{4\beta} \sum u_i。$$

$$\text{动弯应力为: } \sigma = \frac{M_d}{W_{上}}。$$

其中: $u_i = e^{-\beta x_i} (\cos \beta x_i - \sin \beta x_i)$; x_i 为轮载作用点至计算截面的距离。

根据以上计算, 在 1 列列车作用下轨顶的动弯应力如表 4 所示, 其在轨头顶面产生的平均动弯应力如表 5 所示。

3.3 U71Mn 50 kg/m 钢轨的容许应力循环次数

通常核伤是以纵向疲劳裂纹为一个边向轨头深处发展的, 纵向裂纹距轨顶 5.0 mm, 当核伤面积占轨头面积的 30% 时, 核伤直径达 31.2 mm, 核伤前沿至轨顶面 36.2 mm, 核伤计算点至轨顶面距离为 25.6 mm, 将轨头顶面的动弯应力换算成计算点的动弯应力, 其结果如表 5 所示。因此, 客货列车在计算点的平均动弯应力为:

$$\sigma_{拉} = \sqrt{\frac{15.79^2 \times 20 + 12.87^2 \times 7}{20 + 7}} = 15.09 \text{ (MPa)};$$

$$\sigma_{压} = \sqrt{\frac{48.15^2 \times 20 + 41.57^2 \times 7}{20 + 7}} = 46.53 \text{ (MPa)}。$$

根据钢轨内残余应力的分布^[7], 在该处残余应力取 67 MPa, 在计算点应力之和为:

表 4 1 列列车在轨顶的动弯应力计算

Table 5 The dynamic crooked stress results of a train on rail

列车类型	货车		客车	
	拉应力	压应力	拉应力	压应力
动轮载/kN	105.4	105.4	82	82
动弯矩/(N·cm)	- 410 789(A 型)		- 305 174(A 型)	
	- 649 298(B 型)	1 709 582	- 637 031(B 型)	1 476 028
	- 622 885(C 型)		- 234 631(C 型)	
轨顶应力/MPa	16.970(A 型)		12.610(A 型)	
	26.830(B 型)	70.74	26.320(B 型)	60.990
	25.740(C 型)		9.700(C 型)	

注: 1 列货车(含机车)在钢轨顶面行驶引起拉应力次数: A 型 82 次, B 型 82 次, C 型 42 次, 最大压应力次数 164 次。

1 列客车在钢轨顶面行驶引起拉应力次数为: A 型 34 次, B 型 34 次, C 型 18 次, 最大压应力次数 68 次。

表5 平均动弯应力

Table 5 Average dynamic crooked stress

	轨头顶面		核伤计算点	
	拉应力/MPa	压应力/MPa	拉应力/MPa	压应力/MPa
货车	23.16	70.64	15.79	48.15
客车	18.88	60.99	12.87	41.57

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{拉}} + \sigma_{\text{残}} + \sigma_{\text{t}} = 142.09 \text{ MPa};$$

$$\sigma_{\min} = -39.53 \text{ MPa}。$$

考虑到压应力对裂纹的闭合效应,取 $R = 0$, $\sigma_{\max} = 142.09 \text{ MPa}$, 根据式(5), 当核伤直径由 $2b_1 = 10 \text{ mm}$ 发展到 $2b_2 = 31.2 \text{ mm}$ 时, 钢轨容许荷载循环次数 N 为 1.989×10^6 次。

3.4 容许通过总质量及使用寿命的计算

每天通过列车引起轨头拉力峰次数为:

$$n_0 = 20 \times 206 + 7 \times 86 = 4722 \text{ (次)};$$

每天通过的总质量为:

$$M_0 = \frac{40.98 \times 10^6}{365} \approx 11.23 \times 10^4 \text{ (t)};$$

则通过 1 Mt 需要的时间为:

$$t_0 = \frac{100}{11.23} \approx 9 \text{ (d)}。$$

容许通过的总质量为:

$$M = \frac{1.989 \times 10^6}{9 \times 4722} \approx 46.80 \text{ (Mt)};$$

运营天数为: $t = 9 \times 46.80 \approx 421 \text{ (d)}。$

4 结 语

a. 根据钢轨的室内裂纹扩展速率试验, 焦柳线石门段所使用的 U71Mn 50 kg/m 钢轨的疲劳裂纹扩展材料常数 $C = 3.8771 \times 10^{-12}$, $m = 3.6343$ 。

b. 按 2002a 该地段通过的总质量, 当探伤查明该地段在用轨有核伤(高度为 10 mm)后, 由核伤控制的钢轨容许寿命最多不超过 46.80 Mt, 营运时间为 421 d。

c. 钢轨使用寿命还与磨耗、轨腰轨底裂纹及螺栓孔裂纹等因素密切相关。

d. 根据核伤估计钢轨的使用寿命时, 应注意该地段的运量、速度和轴重等运营条件的变化, 及时对核伤发展进行预报, 以消除安全隐患。

参考文献:

- [1] 铁道部. 铁路线路维修规则[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
Chinese Railway Ministry. Railway line maintain rule [M]. Beijing: China Railway Press, 1997.
- [2] 铁道部工务局. 铁路工务技术手册——轨道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
Engineering Service Bureau of Railway Ministry. The technology manual for railway engineering service: Railway [M]. Beijing: Press of China Railway, 1993.
- [3] 褚武扬. 断裂韧性测试[M]. 北京: 科学技术出版社, 1979.
CHU Wuyang. The test of cracking toughness [M]. Beijing: Press of Science and Technology, 1979.
- [4] 王 铎. 断裂力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
WANG Duo. Crack mechanics [M]. Haerbin: Haerbin Industry University Press, 1989.
- [5] 刘庆潭. 50CrMoA 钢界限应力强度因子 ΔK_{th} 的测定[J]. 铁道学报, 1999, 21(4): 80-83.
LIU Qir-tan. The test about stress factor ΔK_{th} at bounds in 50CrMoA steel [J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(4): 80-83.
- [6] 徐 灏. 疲劳强度[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
XU Hao. Fatigue strength [M]. Beijing: Higher Education Press, 1988.
- [7] 颜秉善, 王其昌. 钢轨力学与钢轨伤损[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1989.
YAN Bing-shan, WANG Qi-chang. Rail mechanics and rail wounds [M]. Chengdu: Southwest Traffic University Press, 1989.
- [8] 浙江大学数学系高数组. 概率论与数理统计[M]. 北京: 人民教育出版社, 1990.
High Mathematics Group, Mathematics Department of Zhejiang University. Probability and mathematical statistics [M]. Beijing: People Education Press, 1990.
- [9] 中国科学院数学研究所. 回归分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Mathematical Research Institute of China Academy of Sciences. The methods of regression analysis [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [10] 曾树谷. 铁路轨道动力测试技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
ZENG Shu-gu. The dynamical test technology of railway [M]. Beijing: China Railway Press, 1988.
- [11] 严隽耄. 车辆工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.
YAN Juar-mao. Vehicle engineering [M]. Beijing: China Railway Press, 1992.
- [12] 郝 瀛. 铁道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
HAO Ying. Railway engineering [M]. Beijing: China Railway Press, 2000.
- [13] 王午生. 铁道线路工程[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
WANG Wu-sheng. Railway line engineering [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1998.