

DOI:10.13203/j.whugis20160111



文章编号:1671-8860(2018)06-0893-08

高铁无砟轨道钢轨精调优化算法

李阳腾龙^{1,2,3} 岑敏仪^{2,3}

1 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都, 610059

2 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都, 611756

3 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都, 611756

摘要:长钢轨应力放散锁定后的轨道精调是确保客运专线无砟轨道几何形位高平顺性的必要阶段。精调作业常通过轨道几何状态测量仪采集轨道三维数据,利用配套精调软件包手动模拟得出调整方案,指导轨道精调。模拟精调中常常反复调整才能使基准轨平顺性达标,自动化程度低。基准轨平顺性满足要求后,仅依靠轨距、轨距变化率、水平和扭曲等参数控制非基准轨,会降低其平顺性。为此,提出利用 L_1 范数最优原则进行双轨精调的优化算法(optimization algorithm of double-rails track fine adjustment, OADTFA),建立顾及基准弦端点偏差的平顺性约束,增加非基准轨轨向、高低约束,采用逐点移动基准弦分组调整策略,由单纯形法求解优化调整量。实测数据测试结果表明,OADTFA 可实现钢轨自动化精调,确保双轨任意处几何形位高平顺性,自动给出最优左右轨调整量。

关键词:轨道精调;分段规划;双轨精调优化算法(OADTFA);调整量优化

中图分类号:P258

文献标志码:A

长钢轨应力放散锁定后的无砟轨道精调为客运专线列车的行车安全和舒适性提供重要保障。依靠精密测量手段获取轨道静态几何状态的轨道测量仪被广泛应用于高速铁路施工建设和运营维护^[1-2]。轨道几何状态测量仪采集轨道点绝对位置,结合线路设计参数计算轨道外部几何参数;通过轨距、超高传感器等获取轨道内部几何参数^[3];根据内外参数对轨道状态进行评价,模拟精调出方案,指导轨道精调^[4]。

坐标测量模式的轨道几何状态测量仪都配备有相应的轨道模拟调整软件,如德国 Sinning GE-DO CN 轨道测量系统长轨精调平顺性评价系统(LRA)^[5];AMBERG GRP1000 系统中的 DTS 轨道精调软件^[6-7];江西日月明无砟轨道几何形位精调软件^[8];成都普罗米新 SGJ-I-CDP-3 系统轨道检测数据分析管理软件;长沙悦诚长钢轨调整软件;中铁咨询集团 SGJ-T-CEC-I 型 CECGJS 精调模块^[9]等。然而,轨道精调软件均需人工参与、人工识别和手动调整,调整原则是在满足基准轨 30 m 和 300 m 弦等轨向和高低要求后,再根据轨

距、轨距变化率、水平以及扭曲指标调整非基准轨,此所谓先轨向后轨距、先高低后水平的轨道精调流程^[4, 10, 11]。受软件操作人员技术水平和主观因素影响,调整方案经常会有漏点、整体调整量过大或者调整完成后局部扣件可测量超限等问题,导致反复多次对钢轨进行模拟调整才能使基准轨轨向和高低,以及非基准轨轨距、轨距变化率、水平和扭曲等平顺性参数满足要求。而且,依靠基准轨轨向和高低,以及轨距、轨距变化率、水平和扭曲来约束非基准轨,非基准轨的轨向和高低平顺性精度显然要比基准轨低。

为此,本文提出采用 L_1 范数最优原则的双轨精调算法(optimization algorithm of double-rails track fine adjustment, OADTFA),以期解决自动化程度低、受人为因素影响等问题,使左右轨任意处同时满足轨道平顺性要求。OADTFA 考虑基准弦端点偏差的严密平顺性公式做轨向、高低不平顺计算模型,针对长距离轨道偏差对应巨大约束方程难以优化求解的困难,提出分段规划调整策略,即采用基准弦逐点移动的方式选取

收稿日期:2016-07-07

项目资助:长江学者和创新团队发展计划资助(IRT13092)。

第一作者:李阳腾龙,博士,讲师,主要研究方向为铁道精密工程测量。yangtenglongli@163.com

通讯作者:岑敏仪,博士,教授。swcmym@home.swjtu.edu.cn

基本规划单元逐一优化调整,且将轨向和高低约束加入到非基准轨平顺性控制中,可实现左右钢轨任意处轨道的平顺性控制。

1 双轨精调模型及模型求解

1.1 双轨精调模型

设 t 根轨枕的横向或垂向偏差(简称偏差)为 $P_i (i=1, 2 \dots t)$, 拟调整量为 $d_i \in R$, 其中基准轨与非基准轨偏差分别为 $P_{1,i}$ 和 $P_{2,i}$, 拟调整量分别为 $d_{1,i}$ 和 $d_{2,i}$ 。对 t 根轨枕按照最长基准弦 S 分组。 S 包含 n 根轨枕 ($n \in t$), 其起终点 M 、 N 偏差分别为 P_M 、 P_N , 且 $N=M+n-1$ 。

双轨精调模型以最长基准弦 S 为基本规划

单元逐点移动调整。基本单元中,基准轨采用高低(轨向)约束;非基准轨按照水平(轨距)、扭曲(轨距变化率)约束,并增加高低(轨向)约束。双轨精调模型示意图见图1。图中, q 、 r 、 f 、 g 为基准弦 S' 上的端点。

根据钢轨调整量最小的原则,最长基准弦 S 对应的各轨枕建立如下目标函数:

$$g_1(i) = \min \sum_{i=M}^N |d_{1,i}| \tag{1}$$

$$g_2(i) = \min \sum_{i=M}^N |d_{2,i}| \tag{2}$$

式(1)、式(2)分别为基准轨与非基准轨调整量目标函数。

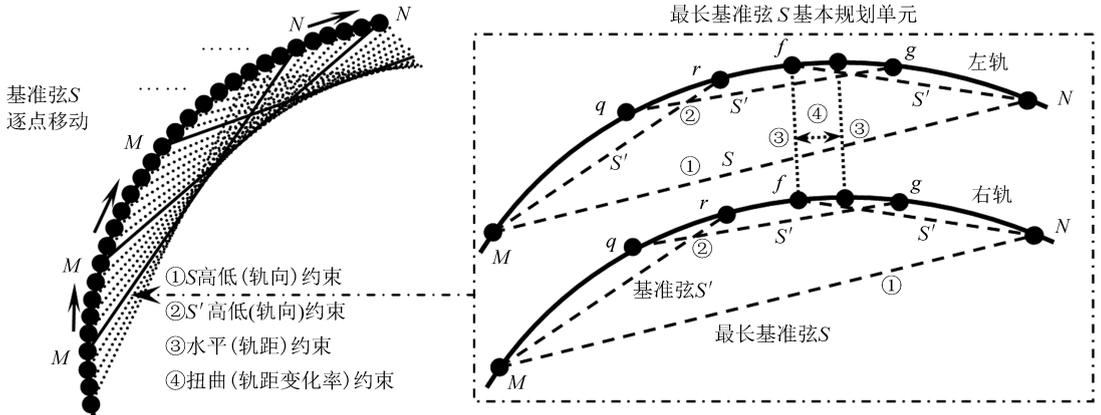


图1 双轨精调模型示意图

Fig.1 Model of Double-rails Track Fine Adjustment

设 P' 为调整后剩余偏差, 则:

$$P'_i = P_i + d_i \tag{3}$$

式中, $i=M, M+1 \dots N$, 共 n 根轨枕。

根据轨道静态平顺性指标^[4, 12], 对高低、轨向、水平、轨距、扭曲、轨距变化率分别建立约束方程。

1) 高低和轨向约束

$$|R(i)| = |P'_i - P'_j + u^{-1}(P'_N - P'_M)| \leq \varrho \tag{4}$$

式中, $i \in [M+1, N-w]$; $j = i+w-1$, w 为检测波中轨枕数; $u = \frac{N-M}{j-i}$; ϱ 为允许值^[4]。

若最长基准弦中还包含有其他较短基准弦 S' (S' 含 n' 根轨枕, 对应检测波长含 w' 根轨枕), 其高低和轨向约束与式(4)相同, 则最长基准弦对应 $(n-w-1) + k(n'-w'-1)$ 个高低或轨向约束 (k 为 S 包含完整 S' 的个数)。

轨道 10 m 弦正矢约束可由式(4)计算:

$$|R(i)| =$$

$$\left| P'_i - \frac{(N_{10} - i)P'_{M_{10}} - (M_{10} - i)P'_{N_{10}}}{N_{10} - M_{10}} \right| \leq \varphi \tag{5}$$

式中, M_{10} 、 N_{10} 分别为 10 m 弦起终点轨枕编号; i 为弦中点编号; φ 为允许值。

2) 水平和轨距约束

$$|D(i)| = |P'_{2,i} - P'_{1,i}| \leq \zeta \tag{6}$$

式中, $i \in [M, N]$; $P'_{1,i}$ 、 $P'_{2,i}$ 分别为左右轨调整后的剩余偏差; ζ 为允许偏差^[13]。

3) 扭曲和轨距变化率约束

$$|L(i)| = |r^{-1}(D(i+n_l) - D(i))| \leq \tau \tag{7}$$

式中, $i \in [M, N-n_l]$; n_l 为作用距离所含轨枕数, 无砟轨道静态铺设要求规定扭曲作用距离 3 m, 轨距变化率作用距离 0.625 m; $r=1$ 或 $r=625$ 分别表示扭曲或轨距变化率的计算系数; τ 为各自对应的允许偏差^[12-13]。

1.2 模型求解

采用单纯形法对钢轨精调模型求解。由于单纯形法要求变量均为非负数, 因此, 对拟调整量

$$a = [1 \quad -1 \quad -1 \quad 1];$$

$$v = [V_i^- \quad V_i^+ \quad V_{i+n_l}^- \quad V_{i+n_l}^+]^T;$$

$$l_1 = r\tau + H_i - H_{i+n_l};$$

$$l_2 = r\tau - H_i + H_{i+n_l}.$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & -1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 2 & & & 2n_l+1 & 2n_l+2 & & & & \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 \\ 3 & 4 & & & 2n_l+3 & 2n_l+4 & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 & \cdots & -1 & 1 \\ & & & & 2k'-1 & 2k' & & & 2(k'+n_l)-1 & 2(k'+n_l) \end{bmatrix};$$

$$L_1 = [r\tau + H_M - H_{M+n_l} \quad \cdots \quad r\tau + H_{N-n_l} - H_N]^T;$$

$$L_2 = [r\tau - H_M + H_{M+n_l} \quad \cdots \quad r\tau - H_{N-n_l} + H_N]^T.$$

对不等式引入松弛变量,将松约束(\leq)改为紧约束($=$)。根据单纯形法求解非负向量 V ,并由式(8)得优化后的扣件拟调整量。

2 精调算法流程

OADTFA 采用平顺性评价指标中最长基准弦作基本单元。通过高低和轨向约束调整基准弦,再根据水平、扭曲、轨距、轨距变化率及高低和轨向约束调整非基准弦。

基本单元中包含 1 根长波基准弦 S 和若干根中波和短波基准弦 S' 和 S'' ,且 S' 、 S'' 各自对应检测波长中相同检测波无重复方式进行高低、轨向约束。当基本单元包含的所有钢轨扣件优化调整完成后,采取逐点移动最长基准弦 S 的方法,选取新的基本单元,并对内部扣件进行优化调整,如此逐一调整完所有扣件。具体算法流程如图 2 所示。

3 轨道精调实测数据分析

一段约 1.2 km 轨道,轨枕设计间隔 0.625 m,轨枕数 1 959 根。根据实测数据进行左右轨调整量优化。由式(9)~(13)约束矩阵可知,轨道平面、竖向平顺性均可通过轨道点横、垂向偏差调整转换为钢轨扣件调整来控制。当获取轨道点偏差数据后,即可对轨道调整量实施优化。受篇幅所限,本文仅以钢轨高程调整量优化为例进行算法验证。

3.1 基准轨实验

令调整后轨道竖向几何平顺性要求为:①150 m/300 m 弦高低限差 $-5.0 \sim 5.0$ mm;②5 m/30 m 弦高低限差 $-1.0 \sim 1.0$ mm;③10 m 弦高低限差 $-1.0 \sim 1.0$ mm;④水平限差 $-1.0 \sim 1.0$ mm;

写成联合式为:

$$\begin{bmatrix} A & -A \end{bmatrix}_{k' \times 2n}^T \cdot V_{2n \times 1} \leq \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \end{bmatrix}_{k' \times 1}^T \quad (13)$$

式中, k' 为 S 中包含完整 n_l 的个数;

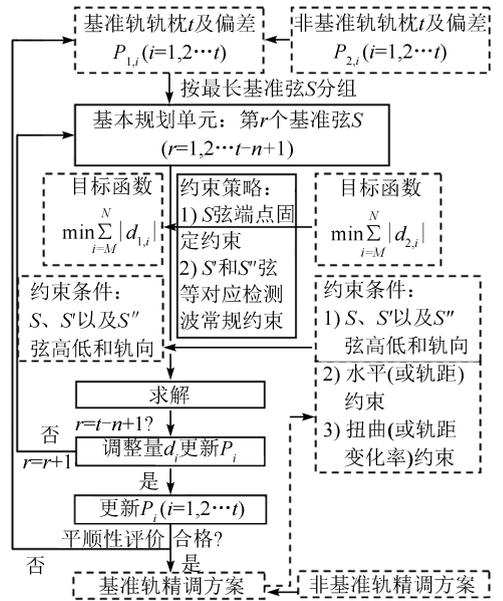


图2 OADTFA 流程图

Fig.2 Flow Chart of OADTFA

⑤扭曲(3 m)限差 $-1.0 \sim 1.0$ mm。基准轨实测平顺性及超限情况见表 1,表中黑体数字为未达到预期目标的指标值。为方便论述,文中如无特殊说明,均采用逐点移动基准弦方式评价轨道任意处的平顺性。表 1 中,150 m 检测波共 351 303 根,5 m 检测波共 74 529 根,10 m 弦共 1 943 根。

表 1 基准轨竖向几何平顺性/mm

项目	150 m/300 m 弦	5 m/30 m 弦	10 m 弦
max	9.4	3.9	2.6
min	-9.3	-4.3	-3.0
超限数/根	19 598	16 813	246
超限率/%	5.6	22.6	12.7

表 1 中,基准轨竖向几何平顺性未达到要求。现对基准轨采用长波 150 m/300 m 弦、中波 10 m 弦和 5 m/30 m 弦约束。为探讨不同调整策略下竖向平顺性调整效果,设计如下方案:

方案 1 长波 300 m 基准弦起终点无固定约束,且相同 150 m 检测波无重复。基本规划单元中,30 m 弦相同 5 m 检测波无重复,相邻 10 m 弦重叠 5 m;

方案 2 长波 300 m 弦起终点无固定约束,且逐点移动得基本规划单元。其余与方案 1 相同;

方案 3 长波 300 m 弦起终点固定约束,且逐点移动得基本规划单元。其余与方案 1 相同。

依据不同的调整方案,得到调整后的基准轨几何平顺性,见表 2,黑体数字为未达到预期目标的指标值。

表 2 不同策略调整后基准轨竖向几何平顺性/mm
Tab.2 Vertical Regularities of Reference Rail Adjusted by Different Strategies/mm

方案	项目	150 m/ 300 m 弦	5m/ 30 m 弦	10 m 弦
		方案 1	max 8.4 min -7.2	3.9 -2.4
方案 2	max min	5.0 -5.0	1.1 -1.0	0.9 -0.9
方案 3 (OADTFA)	max min	5.0 -5.0	1.0 -1.0	0.9 -0.8

为进一步对比不同调整方案的效果,根据扣件最小调整量为 0.5 mm 的要求,将扣件调整量绝对值范围划分为 4 个区间,分别为 $[0, 0.3)$ mm、 $[0.3, 0.7)$ mm、 $[0.7, 1.2)$ mm 以及 $[1.2, +\infty)$ 。整体调整量以及不同调整量绝对值分段区间中扣件数的百分比统计结果见表 3。因表 2 中方案 1 调整后平顺性指标均未达到要求,故表 3 中不再对方案 1 作统计。

表 3 方案 2 和方案 3 整体高程调整量和不同调整量分段区间扣件数百分比

Tab.3 Total Vertically Adjusted Values and the Percentage of the Number of Sleepers in Different Adjustment Ranges of Scheme 2 and Scheme 3

项目	区间/mm	方案 2	方案 3 (OADTFA)
整体调整量/mm		1 054.70	650.70
	$[0, 0.3)$	57.89	65.44
不同调整区间	$[0.3, 0.7)$	19.75	17.87
扣件数占比	$[0.7, 1.2)$	9.55	9.95
/%	$[1.2, +\infty)$	12.81	6.74

方案 1 通过迭代优化,其调整后的平顺性(见表 2)仍然无法达到预定目标①~③。若方案 1 调整后按照德国矢距差法评价平顺性,则 150 m 检测波长仅有 1 660 根其高低为 $-5.0 \sim 5.0$ mm,满足要求①;但是以基准弦逐点移动评价时,150 m 检测波长 351 303 根无法全部满足①的要求。

由此可知,OADTFA 能够对钢轨任意处轨道平顺进行控制,提供更为丰富的检测信息。

方案 2 基本满足平顺性①~③的要求,方案 3 完全满足要求。从表 3 可知,方案 2 调整量是方案 3 调整量的 1.62 倍。随着调整量绝对值分段区间数值的不断增大,方案 3 中对应调整的扣件数百分比逐渐减少。调整量大小在 0.3 mm 以内,方案 3 扣件百分比比方案 2 多 7.55%;调整量大小分布在 $[0.7, 1.2)$ mm 范围时,方案 3 与方案 2 扣件百分比基本一致,相差不超过 0.5%;调整量大小分布在 $[0.3, 0.7)$ mm 与 $[1.2, +\infty)$ mm 范围时,方案 3 扣件百分比相对于方案 2 明显减少,减少量为 7.96%。对比表 3 数据,说明方案 3 中最长基准弦端点固定的调整策略相对于方案 2,能够进一步优化扣件调整量。分析方案 3 中所有基本规划单元可以发现,在整个调整过程中,30 m 弦和 10 m 弦本质上也实现了逐点移动约束调整的策略效果,并且 OADTFA 单一规划单元中 30 m 和 10 m 弦采用现有检测方法^[1]可以减少约束方程对应的系数矩阵,减少运算量,提高优化效率。

表 2 和表 3 说明,以最长基准弦为基本规划单元,且最长基准弦起终点固定约束,并逐点移动基准弦规划调整的 OADTFA,能够实现自动化钢轨精调,给出最优精调量,确保基准轨任意处几何形位的高平顺性。

方案 2 和方案 3 调整后剩余垂向偏差如图 3 所示。从图 3 发现,原始垂向偏差线形中“峰谷”均有效削减。I 和 II 中,方案 2 和方案 3 的调整效果基本一致。III 和 IV 中,方案 2 和方案 3 的调整效果差异较大,特别在里程 68.03~68.05 km、68.18~68.25 km、68.33~68.40 km、68.41~68.54 km 以及 68.56~68.58 km 等区间,分别见图 3 中虚线区域 1~5 所示。虚线区域 1~3 中,方案 3 调整较大;区域 4 和区域 5 中,方案 2 调整较大。

进一步分析可知,虚线区 1~3 对应关系如图 4 所示,调整范围分别为 27 m、70 m 和 70 m,各区域相距 150 m。区域 1 内轨枕为 150 m 检测波的测量点,对应检核点均落在区域 2 中。调整效果在区域 1 中表现为“填谷”,区域 2 中表现为“削峰”。统计对应 150 m/300 m 弦高低为 $-2.4 \sim 4.0$ mm。区域 2 中 150 m 检测波测量点的对应检核点为区域 3,区域 3 表现为“填谷”。统计对应 150 m/300 m 弦高低为 $0.1 \sim 5.0$ mm。由于方案 3 中 300 m 弦端点固定约束,所以为保证对应

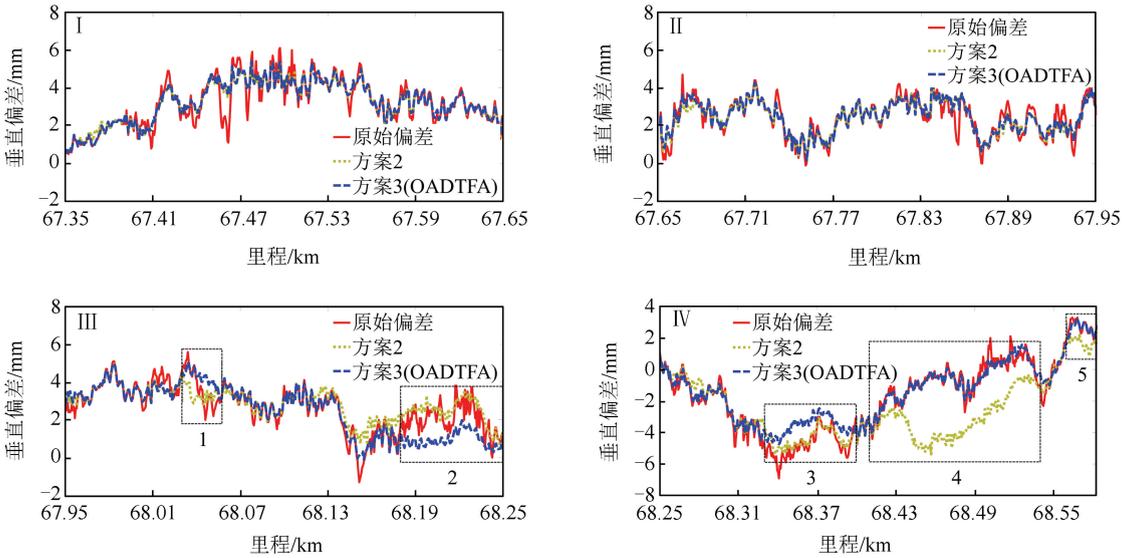


图3 方案2和方案3调整前后对比

Fig.3 Vertical Deviations Adjusted by Nothing, Scheme 2 and Scheme 3 (OADTFA)

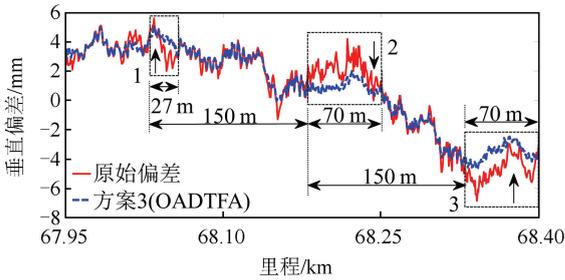


图4 区域1~3关系示意图

Fig.4 Relationship Among Regions 1, 2 and 3

150 m 检测波的平顺性,检测波首尾端会自动“削峰”“填谷”或者“填谷”“削峰”。

方案2采用300 m弦端点无固定约束策略,统计第1次迭代调整中300 m弦端点的调整情况,以便分析区域4和区域5现象产生的原因。各轨枕调整量大于0.1 mm即认为调整,统计结果见表4。

表4 方案2中300 m弦端点调整情况

Tab.4 Adjustment of Endpoints of 300 m Chord Processed by Scheme 2

项目	均无调整	仅起点调整	仅终点调整	均调整	300 m弦
轨枕数/根	1 158	29	48	246	1 481
调整占比/%	78.19	1.96	3.24	16.61	100.00

表4反映出方案2在第1次迭代调整中,端点发生调整的基准弦(表中仅起点、仅终点和均调整栏的总和)有21.81%,说明300 m基准弦发生了较大的变动。方案3采用300 m弦端点固定约束,所以调整中不会改变原有垂向偏差的线形走

向,它通过内部150 m检测波等对原始线形中不平顺处进行修正,目的是保证线形内部平顺。方案2采用300 m弦端点无固定约束,若端点偏差调整过大,则会改变线形走向,最终导致调整量过大,扣件更换率过高。

根据基准弦逐点移动调整策略,300 m弦终点的调整将引导偏差线形走向。统计方案2第1次迭代调整中300 m弦终点的调整情况,并根据式(3)计算终点的剩余垂向偏差,绘制终点偏差的轨迹图,见图5。

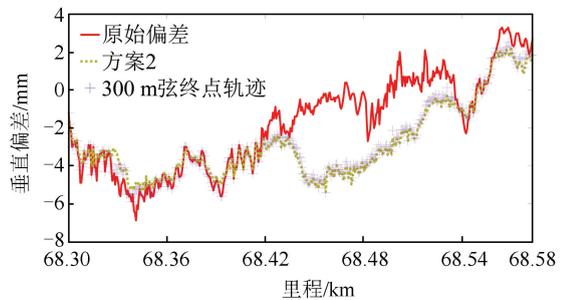


图5 300 m弦终点轨迹图

Fig.5 Trajectory of Endpoints of 300 m Chord

从图5可看出,方案2第1次迭代调整后300 m弦终点偏差轨迹与方案2最终调整的偏差线形基本吻合。若不固定最长基准弦端点,为达到基本规划单元的目标函数式(1)或式(2)要求,通过调整弦端点偏差可以很大程度地优化该基本单元的平顺性,减少内部点调整量。原始偏差线形一旦存在较大变化,300 m弦终点将会发生较大调整,以保证最少调整量满足本规划单元的平顺性要求。随着基本规划单元进行逐点移动调

整,上述缺陷最终会导致整体剩余偏差发生巨大变化,而出现图 3 中区域 4 和区域 5 的现象。

由此可知,方案 3(OADTFA)以原始偏差为准,通过“削峰”或“填谷”自动修正基本规划单元内部偏差的不平顺,以最优调整量保证钢轨任意处几何形位的高平顺性。

3.2 非基准轨实验

完成了基准轨调整后,根据方案 3 剩余垂向偏差,可以计算轨道水平和扭曲,再对非基准轨进行调整量优化。调整方案如下:

方案 4 水平和扭曲(3 m)约束;

方案 5 在方案 3 的基础上增加水平和扭曲约束。

非基准轨原始平顺性以及方案 4、方案 5 调整后平顺性见表 5。表中黑体数字为未达到预期目标的指标值。

表 5 非基准轨竖向几何平顺性/mm

Tab.5 Vertical Regularities of Non-reference Rail/mm

项目	150 m	5 m	10 m	水平	扭曲 (3 m)	
	/300 m	/30 m				
调整前	max	9.6	3.7	2.7	0.6	
	min	-10.3	-4.5	-3.1	-1.8	-1.2
方案 4	max	7.3	2.6	1.9	1.0	
	min	-7.3	-2.5	-1.8	-1.0	-1.0
方案 5 (OADTFA)	max	4.7	1.0	0.8	1.0	1.0
	min	-4.6	-1.0	-0.8	-1.0	-1.0

表 5 显示,虽然水平和扭曲约束改善了轨道几何平顺状态,但是仅依靠水平和扭曲的调整方案 4 是无法保证调整后的轨道长中波平顺性满足要求。对非基准轨施加与基准轨相同的约束条件,并增加水平和扭曲约束(方案 5),通过优化求解,保证了非基准轨的轨道平顺性均达到预期要求。由此可见,必须对左、右钢轨施以同等约束,并增加水平、轨距、扭曲和轨距变化率约束,方能实现自动、准确的钢轨精调,得到最优精调量,且保证左右轨任意处几何形位的高平顺。

4 结 语

针对轨道模拟精调自动化程度低,整体调整量大以及仅依靠水平、轨距、扭曲、轨距变化率无法控制非基准轨平顺等问题,本文提出双轨精调优化算法 OADTFA,以最长基准弦为基本规划单元,以考虑基准弦端点偏差的严密平顺性公式做模型,且把轨向、高低等约束纳入到非基准轨平顺控制中,采用分段规划、基准弦端点固定的逐点移动调整策略。通过多个无砟轨道工程实测数据

的验算,结果表明:

1)能以最优调整量保证高平顺轨道。

2)最长基准弦对待调整轨枕进行分组优化,解决长距离轨道偏差对应巨大约束方程难以优化求解的困难,实现钢轨的自动化精调。

3)采用最长基准弦端点固定的策略,避免了优化原则导致基准弦端点调整量过大而引起的整体调整量过大;同时保证调整以原始偏差为准,“削峰”或“填谷”自动修正基本规划单元的不平顺。

4)采用基准弦逐点移动调整策略,确保钢轨任意处几何形位的平顺性。

5)增加非基准轨的高低和轨向约束,既能确保两股钢轨同时满足平顺性的要求,又提高了非基准轨平顺性。

经过多条新建铁路实践检验,新算法可在无砟轨道施工和运营维护中发挥作用,若能推广,将会使轨道精调更加科学、快捷、高效。

参 考 文 献

- [1] Bureau of Science & Technology of MOR. Temporary Technical Conditions of Inspecting Instrument for Static Geometry Parameters of Track of Passenger-dedicated Line[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008 (铁道部科学技术司. 客运专线轨道几何状态测量仪暂行技术条件 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008)
- [2] Glaus R. Kinematic Track Surveying by Means of a Multi-sensor Platform[D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Zürich, 2006
- [3] Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB/T 3147-2012 Inspecting Instrument for Railway Track [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012 (中华人民共和国铁道部. TB/T 3147-2012 铁路轨道检查仪[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2012)
- [4] Ministry of Railways of the People's Republic of China. Guideline for Precise Adjustment in Construction Engineering of High Speed Railway with Ballastless Track [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009 (中华人民共和国铁道部. 高速铁路无砟轨道工程施工精调作业指南[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009)
- [5] Wang Xiaoming. Measurement and Evaluation System for Long Rail [OL]. <http://www.hrts.cn/productInfo-182.html>, 2010 (王晓明. 长轨测量评价系统 [OL]. <http://www.hrts.cn/productInfo-182.html>, 2010)
- [6] Hu Qingfeng. Operational Method for Checking Ballastless Track with GRP1000 Track Checking

- Car Made by Amberg Technology AG [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2008(3): 17-20 (胡庆丰. 安博格 GRP1000 轨检小车进行无碴轨道检测的作业方法[J]. 铁道勘察, 2008(3): 17-20)
- [7] Hao Yadong, Zhao Jie, Fan Tingchun. Study of Non-ballasted Track Fine-tuning Measurement Based on GRP1000 [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(4): 52-55 (郝亚东, 赵杰, 樊延春. 基于 GRP1000 的无碴轨道精调测量研究 [J]. 测绘通报, 2012(4): 52-55)
- [8] Quan Shunxi. Study on Dynamic Analysis and Control Methods of the Geometric Irregularity in High-speed Turnout [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012 (全顺喜. 高速道岔几何不平顺动力分析及其控制方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012)
- [9] China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd. Operation Instruction for SGJ-T-CEC-I Inspecting Instrument for Static Geometry Parameter of Track [OL]. <http://wenku.baidu.com/view/e5ab4d8d84868762caaed5dd.html?from=search>, 2012 (中铁工程设计咨询集团有限公司. SGJ-T-CEC-I 型轨道几何状态测量仪使用说明书 [OL]. <http://wenku.baidu.com/view/e5ab4d8d84868762caaed5dd.html?from=search>, 2012)
- [10] Bai Yangjun. Research on Precise Adjustment Techniques on Line with Elastic Split Fastenings [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2013(11): 45-50 (白杨军. 弹性分开式扣件线路精调施工技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2013(11): 45-50)
- [11] Wu Mengchang. Fine Adjustment Technology for High-speed Railway Track [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2012(3): 4-8 (武孟尝. 高速铁路轨道精调作业技术 [J]. 铁道勘察, 2012(3): 4-8)
- [12] Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB 10601-2009 Code for Engineering Survey of High Speed Railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009 (中华人民共和国铁道部. TB 10601-2009 高速铁路工程测量规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009)
- [13] Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB 10621-2009 Code for Design of High Speed Railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009 (中华人民共和国铁道部. TB 10621-2009 高速铁路设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2009)

A Novel Optimization Algorithm of Track Fine Adjustment for High-speed Railways

LI Yangtenglong^{1,2,3} CEN Minyi^{2,3}

1 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

3 State-province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: Track fine adjustment of the rails can control the regularity of ballastless track of passenger lines, which is essential for ensuring the high track regularity. Using the three-dimensional coordinates measured by track surveying trolleys, the analogue adjustment of fasteners can be achieved by a piece of special software. However, the method used in the software for analogue adjustment is manually operated. In order to make the track regularity of the reference rail fit the requirements, the low degree of automation of track analogue adjustment needs repeated manual adjustment. The gauge, change rate of the gauge, cant, and twist cannot control lateral and vertical profiles of non-reference rails. Therefore, this paper proposes a novel adjustment algorithm called optimization algorithm of double track fine adjustment (OADTFA), based on L_1 norm optimal principle. In OADTFA, the deviations of endpoints of reference chords participate as constraints for the lateral and vertical profiles, which control not only irregularities of the reference rail but also irregularities of non-referencerails. The strategy of choosing reference chord (e.g. 3 0 0 m) for sectional optimization adjustment is point

(下转第 921 页)

Analysis and Application of the Multi-scale Characteristics of Vegetation Temperature Condition Index

WANG Pengxin^{1,2} FENG Mingyue^{1,2} MEI Shuli^{1,2} LI Li^{1,2} ZHANG Shuyu³ JING Yigang³

1 College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China

3 Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China

Abstract: Based on the collected wheat yields in the years of 2008—2013 in the Guanzhong Plain, China and the drought monitoring results of vegetation temperature condition index(VTCD), the Morlet, Mexican Hat and Paul($m=4$) were used to study droughts. Wavelet power spectra of the three non-orthogonal wavelet functions were applied to analyze the multi-time scale characteristics and the cross-correlation degrees of the wheat yields and the VTCDs at the main growth stages of winter wheat. Linear regression models between the yields and the weighted VTCDs at the main growth stages were compared for selecting a better wavelet function for assessing drought impact. The results show that the oscillation energy of the VTCDs using the same wavelet function is different. There are differences of the main oscillation periods determined by three wavelet functions at the same growth stage of wheat, and further there are differences in the wavelet cross-correlation coefficients. The time series VTCDs at the four growth stages of wheat all have a 6-year main oscillation period. The Paul($m=4$) wavelet is most applicable to analyze the multi-scale correlation between the VTCDs and wheat yields, and assess the multi-scale drought impact.

Key words: vegetation temperature condition index; impact assessment of drought; wavelet power spectrum; main oscillation period; wavelet cross-correlation degree

First author: WANG Pengxin, professor, PhD supervisor, specializes in the study of quantitative remote sensing and its application in agriculture. E-mail: wangpx@cau.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41371390.

(上接第 900 页)

by point. The optimally adjusted value of each fastener can be calculated by simplex method. An analogue adjustment experiment shows that OADTFA can automatically complete analogue adjustment, ensuring the high regularity of double rails anywhere, and give the optimally adjusted values of double rails.

Key words: precise adjustment of tracks; sectional mathematical programming; OADTFA; optimally adjusted values

First author: LI Yangtenglong, PhD, lecturer, specializes in precise engineering survey in railway. E-mail: yangtenglongli@163.com

Corresponding author: CEN Minyi, PhD, professor. E-mail: swcmy@home.swjtu.edu.cn

Foundation support: Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University, No. IRT13092.