第 30 卷 第 2 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 30 No. 2
2017 年 6 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Jun. 2017

轨道精调后动静态轨道质量指数的相关性研究

邱俊兴[1]， 许玉德[1]， 沈坚锋[1]， 毛晓君[2]

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室，上海 201804；2. 上海铁路局 科研所，上海 200071)

摘要：轨道精调达到静态峰值验收标准后，进入动态联调联试调整阶段，联调联试时间紧任务重，为减少调整工作量，希望实现静态 TQI 预测动态 TQI。引入动静比研究精调后动静态 TQI 之间的关系，分析动检速度和线形对动静关系的影响，通过分析动静比的置信区间，实现静态 TQI 预测动态 TQI。结果表明：动态 TQI 比静态 TQI 大 1.0～1.5 倍，同一线路中，TQI 动静比与动检速度正相关，与线形不相关；从杭长高铁情况来看，对于设计时速 300～350 km/h 的高速铁路，将全线静态 TQI 控制在 2.65 mm 以下，可保证动态验收合格，从宁安高铁情况来看，对于设计时速 200～250 km/h 的高速铁路，将静态 TQI 控制在 4.60 mm 以下，可保证动态验收合格，可靠度均达 95%以上。

关键词：无砟轨道；轨道质量指数；置信区间；动静态相关性

中图分类号：U238 文献标志码：A 文章编号：2095-0373(2017)02-0083-06

0 引言

轨道精调可以分为静态和动态两个阶段，无缝线路铺设完成，长钢轨应力放散、线路锁定后，便开始轨道静态调整阶段，静态调整是在联调联试前根据 0 级轨道检查仪的测量数据对轨道进行全面调整，静态调整达到静态峰值验收标准后，线路开始联调联试，此时进入轨道动态调整阶段，高速综合检测车对轨道状态进行检测，根据动态检测情况对轨道局部缺陷进行修复，进一步提高轨道状态，使轨道几何状态达到动态验收标准[1-2]。

联调联试是高速铁路投入运营前的最后一个阶段，采用高速综合检测车对轨道、接触网状态进行检测，并根据检测结果，对轨道、接触网状态进行调整，同时还要进行信号系统联调联试、全线拉通试验和防灾系统联调联试。联调联试时间紧、任务重，希望利用轨道静态阶段的数据分析动态阶段的轨道状态趋势，减少联调联试期间的轨道动态调整工作量，高质量的实现铁路开通运营[3-4]。因此有必要研究轨道精调后动静态 TQI 之间的关系，实现静态 TQI 预测动态 TQI，确定使动态 TQI 满足验收标准时，静态几何状态需调整的量。而关于这方面的研究很少，结合杭长、宁安高速铁路无砟轨道精调实践，引入动静比(动态值比静态值)研究精调后动静态 TQI 之间的关系，通过计算置信区间动静比的分布情况，建立 TQI 及各几何形位动静比均值的大小关系，同时对比不同动检速度下的动静比、直线区段与曲线区段的动静比，分析动检速度与线形对动静关系的影响，最后通过分析动静比的置信区间，实现静态 TQI 预测动态 TQI。

1 置信区间

设 θ 是总体 X 的一个未知参数，若存在随机区间$[\theta_1,\theta_2]$，对于给定的 $0<\alpha<1$，若满足概率

$$P\{\theta_1 \leqslant \theta \leqslant \theta_2\} = 1-\alpha \tag{1}$$

则称区间$[\theta_1,\theta_2]$是 θ 的置信水平为 $1-\alpha$ 的置信区间，θ_1 和 θ_2 分别称为置信下限和置信上限，$1-\alpha$ 为置信度，α 为显著水平[5-6]。

收稿日期：2016-05-01 责任编辑：车轩玉 DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2017.02.15

基金项目：国家自然科学基金(50908179)；上海市自然科学基金(11ZR1439200)

作者简介：邱俊兴(1993-)，男，硕士研究生，主要从事铁道工程的研究。E-mail：1366281872@qq.com

邱俊兴，许玉德，沈坚锋，等. 轨道精调后动静态轨道质量指数的相关性研究[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2017，30(2)：83-88.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 动静关系分析

2.1 动静比分析

依据检测时的速度和轴重,轨道检测可以分为有轮载的动态检测和无轮载的静态检测。静态检测采用0级轨道检查仪,能够精确检测轨距、水平、三角坑、轨距变化率、轨向、高低等轨道平顺性参数,高低、轨向检测原理为弦测法;动态检测采用高速综合检测车,高低、轨向的检测采用惯性基准法原理[7]。

以杭长、宁安高铁无砟轨道精调后TQI动静态检测数据为基础,分析动静态检测数据之间的关系。杭长高铁设计时速300～350 km/h,CRTSⅡ型板式无砟轨道,WJ-8型扣件;宁安高铁设计时速200～250 km/h,CRTSⅠ型板式无砟轨道,WJ-7型扣件。统计杭长高铁k370+000～k429+000里程段综合检测车速度350 km/h时的动态TQI及静态TQI,绘制杭长高铁动静态TQI概率分布图如图1所示,统计宁安高铁k165+000～k215+000里程段综合检测车速度250 km/h时的动态TQI及静态TQI,绘制宁安高铁动静态TQI概率分布图如图2所示。

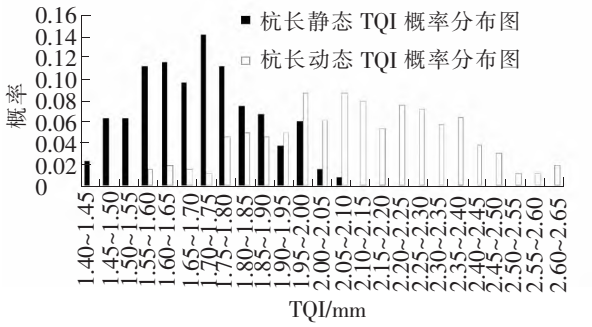

图1 杭长高铁动静态TQI概率分布图

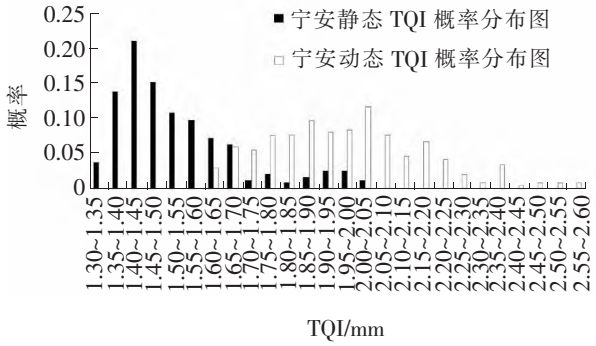

图2 宁安高铁动静TQI概率分布图

可以看出,动态TQI整体大于静态TQI,且相对于静态TQI,动态TQI分布更加离散。

为定量分析动静态TQI的关系,建立静态TQI与动态TQI的一一对应,示例如表1所示,动静态TQI里程存在细微差别,但与TQI200 m的单元长度相比可以忽略不计。定义参数动静比W,即动态值除以静态值。将杭长高铁综合检测车速度350 km/h时,宁安线综合检测车速度250 km/h时的每一TQI动态值除以对应的TQI静态值,计算出动静比,绘制全线动静比概率分布图和累积密度分布如图3、图4所示。

表1 动静态TQI对应示例

静态		动态		TQI动静比
里程/km	TQI/mm	里程/km	TQI/mm	
190 611.090～190 811.090	1.61	190.6	2.15	1.34
190 811.090～191 011.090	1.84	190.8	1.85	1.01
191 011.090～191 211.090	1.76	191.0	2.09	1.19

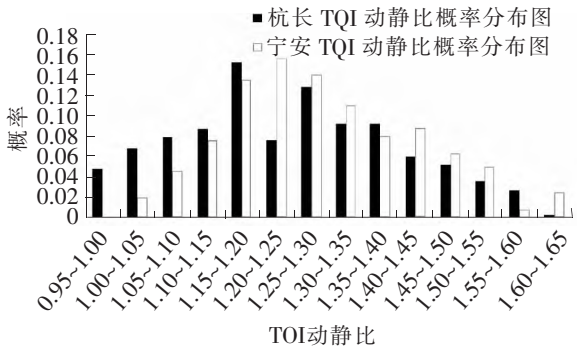

图3 TQI动静比概率分布图

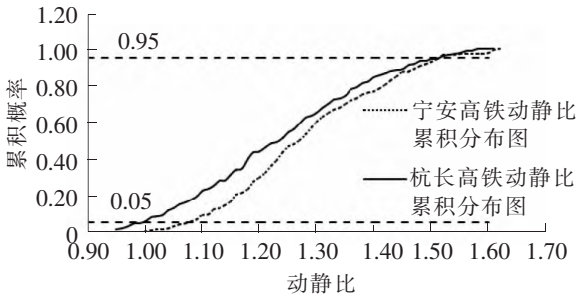

图4 动静比累积分布图

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可以看到，不论杭长高铁还是宁安高铁，绝大部分动静比均大于 1，即绝大部分动态 TQI 均大于静态 TQI。

用置信区间统计动静比的主体分布情况，高速铁路动态验收标准规定：TQI 出现 I 级偏差的累计单元长度不应大于 5%，同时每个单元不应出现 II 级偏差。为与“不应大于 5%”对应，方便后面分析静态 TQI 预测动态验收，以 $P(W\geqslant W_1)=95\%$ 时的 W_1 值作为 TQI 动静比的置信下限，以 $P(W\leqslant W_2)=95\%$ 时的 W_2 值作 TQI 动静比的置信上限，统计动静比置信度 90% 的置信区间。图 3 中各累积分布曲线与 $y=0.05$ 交点所对应的动静比即为置信下限，与 $y=0.95$ 交点所对应的动静比即为置信上限。则杭长高铁综合检测车速度 350 km/h 时 TQI 动静比置信度 90% 的置信区间为：[1.00，1.52]，宁安高铁综合检测车速度 250 km/h 时 TQI 动静比置信度 90% 的置信区间为[1.08，1.51]。

同理，计算杭长高铁综合检测车 160 km/h、350 km/h 及宁安高铁综合检测车 230 km/h、250 km/h 时各几何形位的动静比置信度 90% 的置信区间，统计如表 2 所示。

表 2　TQI 及各几何形位动静比置信度 90% 的置信区间统计表

速度等级	左轨向	右轨向	左高低	右高低	水平	轨距	三角坑	TQI
杭长 160 km/h	[0.77，1.41]	[0.74，1.30]	[0.92，1.81]	[0.83，1.56]	[0.75，1.38]	[1.03，1.66]	[0.98，1.80]	[1.00，1.35]
杭长 350 km/h	[0.85，1.50]	[0.43，1.34]	[0.82，1.72]	[0.89，1.59]	[0.84，2.00]	[1.22，2.00]	[1.01，2.01]	[1.02，1.52]
宁安 230 km/h	[0.95，1.42]	[0.68，1.12]	[1.00，2.04]	[0.91，1.56]	[0.83，1.95]	[1.25，1.75]	[1.00，1.56]	[1.05，1.47]
宁安 250 km/h	[0.90，1.37]	[0.63，1.00]	[1.05，2.34]	[0.90，2.00]	[0.96，1.68]	[1.29，1.86]	[1.06，1.94]	[1.08，1.51]

可以看到，杭长、宁安高铁中，TQI、轨距的动静比置信下限大于 1，三角坑的动静比置信下限非常接近于 1，即 95% 以上的动态值大于静态值，可以认为 TQI、轨距、三角坑的动态值普遍大于静态值，从表中数据来看，动态 TQI 比静态 TQI 大 1.0～1.5 倍，动态轨距比静态轨距大 1.0～2.0 倍，动态三角坑比静态三角坑大 1.0～2.0 倍。其余各项动静比置信下限小于 1，置信上限大于 1，即部分动态值小于静态值，部分大于静态值，右轨向动静比置信下限甚至在 0.43～0.74 之间，置信上限在 1.00～1.34 之间，说明右轨向有很大一部分动态值小于静态值，与其它不平顺相比差别较大，这可能与动静态检测方法有关，涉及到动静检测原理的差异性，这里不作详细分析。

2.2　轨检速度对动静关系的影响

联调联试期间，综合检测车从低速至高速逐步试验，不同的动检速度可能存在不同的动静关系，为分析动检速度对动静关系的影响，分别计算杭长高铁综合检测车运行速度 160 km/h，350 km/h，宁安高铁综合检测车运行速度 230 km/h，250 km/h 时的 TQI 动静比的均值，统计如表 3 所示。

表 3　TQI 及各几何形位动静比均值统计表

速度等级	动静比均值							
	左轨向	右轨向	左高低	右高低	水平	轨距	三角坑	TQI
杭长 160 km/h	1.06	1.01	1.30	1.15	1.06	1.34	1.32	1.19
杭长 350 km/h	1.16	0.84	1.22	1.12	1.34	1.63	1.50	1.25
宁安 230 km/h	1.15	0.92	1.48	1.25	1.26	1.54	1.23	1.25
宁安 250 km/h	1.13	0.82	1.53	1.43	1.33	1.58	1.46	1.29

可以看到，不论杭长高铁还是宁安高铁，综合检测车速度越快，TQI 动静比越大，即 TQI 的动静比均与动检速度正相关；各几何形位中，水平、轨距、三角坑的动静比也与动检速度正相关。显然，联调联试期间，综合检测车从低速至高速逐步试验时，若较高时速动态检测达到动态验收标准，较低时速的动态检测也能达到动态验收标准。

从动静比均值来看，各几何形位中，轨距的动静比均值最大，即轨距的动静差异最大，其次是三角坑，最小的是轨向，尤其是右轨向，动静比均值甚至小于 1。

2.3　线形对动静关系的影响

高速铁路有直线区段和曲线区段，为分析线形对动静关系的影响，取杭长高铁 k403＋000～k418＋586 里程段和宁安高铁 k29＋001～k40＋795 里程段进行分析，杭长高铁 k403＋000～k418＋586 里程段

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

包含K403+799～K406+354,K407+354～K412+390,K415+186～K415+986,K416+986～K418+586 4段曲线,宁安高铁k29+001～k40+795里程段包含K31+043～K33+043,K35+597～K36+997,K37+997～K39+995,K40+795～K41+995 4段曲线。将两里程段依线形划分为8个区段,将8个区段信息统计如表4所示。

表4 线形信息统计表

区段	杭长高铁				宁安高铁			
	起点里程	终点里程	线形	曲线半径/m	起点里程	终点里程	线形	曲线半径/m
1	K403+000	K403+799	直线1	7 692	K29+001	K31+043	直线1	5 263
2	K403+799	K406+354	曲线1	7 692	K31+043	K33+043	曲线1	5 263
3	K406+354	K407+354	直线2	8 333	K33+043	K35+597	直线2	4 166
4	K407+354	K412+390	曲线2	8 333	K35+597	K36+997	曲线2	4 166
5	K412+390	K415+186	直线3	11 111	K36+997	K37+997	直线3	4 166
6	K415+186	K415+986	曲线3	11 111	K37+997	K39+995	曲线3	4 166
7	K415+986	K416+986	直线4	7 692	K39+995	K40+795	直线4	4 762
8	K416+986	K418+586	曲线4	7 692	K40+795	K41+995	曲线4	4 762

计算各区段的TQI动静比均值,对比相邻曲线区段与直线区段的TQI动静比,分析线形对TQI动静比关系的影响,绘制TQI动静比均值折线图如图5所示。

从图5中可以看出,杭长高铁和宁安高铁中,曲线区段TQI动静比均值时而大于相邻直线区段,时而小于相邻直线区段,表现出较大的随机性,可以认为,TQI动静比与线形不相关。

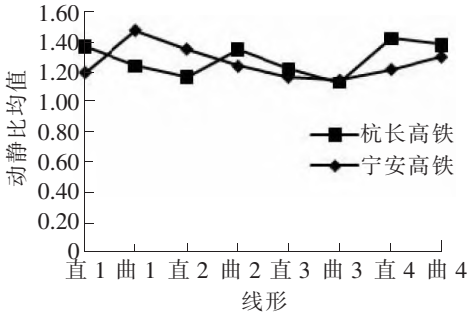

图5 TQI动静比变化折线图

3 静态TQI预测动态TQI

3.1 预测动态TQI置信区间

轨道几何状态静态峰值验收后,根据前述动静比置信区间,可以预测动态TQI的置信区间。杭长高铁综合检测车速度350 km/h时TQI动静比置信度90%的置信区间为[1.00,1.51],宁安高铁综合检测车速度250 km/h时TQI动静比置信度90%的置信区间为[1.08,1.52]。根据前述定义,杭长高铁当综合检测车速度350 km/h时,$P(1.00\leqslant\frac{TQI_{动态}}{TQI_{静态}}\leqslant1.51)=90\%$,即$P(1.00\times TQI_{静态}\leqslant TQI_{动态}\leqslant1.51\times TQI_{静态})=90\%$。

即在杭长高铁无砟轨道,综合检测车速度350 km/h的动态TQI置信度90%的置信区间为[$1.00\times TQI_{静态}$,$1.51\times TQI_{静态}$]。同理,在宁安高速铁路无砟轨道,综合检测车速度250 km/h时的动态TQI置信度90%的置信区间为[$1.08\times TQI_{静态}$,$1.52\times TQI_{静态}$]。在实际工作中,可据轨道静态TQI预测动态TQI,若发现预测的动态TQI偏大,可以及时调整轨道静态几何状态。

3.2 预测动态验收是否合格

根据《高速铁路工程动态验收技术规范》(TB 10761—2013),区段质量评价参数为轨道质量指数(TQI),计算单元长度取200 m。TQI出现Ⅰ级偏差的累计单元长度不应大于5%,同时每个单元不应出现Ⅱ级偏差。TQI允许偏差管理值见表5。

表5 轨道不平顺质量指数(TQI)允许偏差管理值 mm

速度等级	项目		TQI(Ⅰ级)	TQI(Ⅱ级)
200～250 km/h	波长范围	1.5～42 m	7.0	8.0
250(不含)～350 km/h	波长范围	1.5～42 m	4.0	5.0

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动态验收需满足两个要求，即 TQI 出现 Ⅰ 级偏差的累计单元长度不应大于 5%和每个单元不应出现 Ⅱ 级偏差，那么动态验收合格的概率：$P_{动态验收合格}=P_{Ⅰ级偏差长度\leqslant 5\%}\times P_{不出现Ⅱ级偏差}$。

杭长高铁设计时速 300～350 km/h，Ⅰ 级偏差管理值为 4 mm，Ⅱ 级偏差管理值为 5 mm。

对单个 TQI 样本来说，$P\left(\frac{TQI_{动态}}{TQI_{静态}}\leqslant 1.51\right)=95\%$，即 $P(TQI_{动态}\leqslant 1.51\times TQI_{静态})=95\%$。

若 $1.51\times TQI_{静态}\leqslant 4$ mm，即 $TQI_{静态}\leqslant 2.65$ mm，则 $P(TQI_{动态}\leqslant 4\ mm)=95\%$。

对于全线而言，若全线静态 TQI 均小于 2.65 mm，则 P(全线动态 TQI≤4 mm)＝95%，即出现 Ⅰ 级偏差的累计单元长度不大于 5%，此时 $P_{Ⅰ级偏差长度\leqslant 5\%}=1$。$P$(全线动态 TQI≤4 mm)＝95%，则 P(全线动态 TQI≤5 mm)＞95%，即 $P_{不出现Ⅱ级偏差}>95\%$。此时 $P_{动态验收合格}=P_{Ⅰ级偏差长度\leqslant 5\%}\times P_{不出现Ⅱ级偏差}>95\%$。

因此，在杭长高铁中，若全线静态 TQI 均小于 2.65 mm，动态验收合格的概率超过 95%。

宁安高铁设计时速 200～250 km/h，Ⅰ 级偏差管理值为 7 mm，2 级偏差管理值为 8 mm，与杭长高铁分析步骤类似，则若宁安高铁全线静态 TQI 满足 $1.52\times TQI_{静态}\leqslant 7$ mm，$TQI_{静态}\leqslant 4.6$ mm，即全线静态 TQI 均小于 4.60 mm，动态验收合格的概率超过 95%。

在其它高铁线路的实际工作中，工务部门可以以杭长、宁安高铁的情况作为参考，对于设计时速 300～350 km/h 的高速铁路，将全线静态 TQI 控制在 2.65 mm 以下，对设计时速 200～250 km/h 的高速铁路，将静态 TQI 控制在 4.60 mm 以下，使动态验收合格的几率最大化。

4　结论

通过分析杭长高速铁路和宁安高速铁路动静态检测数据，可以得出以下结论：

(1)动态 TQI 比静态 TQI 大 1.0～1.5 倍，各几何形位中，轨距、三角坑的动态值普遍大于静态值，动态轨距比静态轨距大 1.0～2.0 倍，动态三角坑比静态三角坑大 1.0～2.0 倍，其它各项的动态值部分小于静态值，部分大于静态值，右轨向甚至绝大部分动态值小于静态值。

(2)同一高铁线路中，TQI 动静比与动检速度正相关，与线形不相关；各几何形位中，水平、轨距、三角坑的动静比与动检速度正相关。

(3)从杭长高铁情况来看，对于设计时速 300～350 km/h 的高速铁路，将全线静态 TQI 控制在 2.65 mm 以下，可保证动态验收合格；从宁安高铁情况来看，对设计时速 200～250 km/h 的高速铁路，将静态 TQI 控制在 4.60 mm 以下，可保证动态验收合格，可靠度均达 95%。在实际工作中，工务部门可以以此为参考，通过控制静态 TQI 使动态验收合格的几率最大化。

参　考　文　献

[1]范伟. 石武客专 P60-1/18 板式无砟高速道岔安装与精调技术[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2012，25(2)：59-62.

[2]伍林. CRTS Ⅰ 型双块式无砟轨道精调技术研究[J]. 铁道标准设计，2010(1)：74-79.

[3]王峰. 基于铁路局层面的高速铁路联调联试集成管理和关键技术[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2012，25(1)：1-6＋33.

[4]王澜. 高速铁路联调联试方法论[J]. 中国铁道科学，2011(2)：104-109.

[5]Statistical damage detection method for frame structures using a confidence interval[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2010，901：133-140.

[6]Semi-empirical Likelihood Confidence Intervals for the Differences of Quantiles with Missing Data[J]. Acta Mathematica Sinica：English Series，2009，2505：845-854.

[7]魏晖. 高速铁路轨道平顺性静态检测理论与精调技术研究[D]. 南昌：南昌大学，2014.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Research of the Correlation Between Dynamic and Static Track Quality Index After Fine Adjustment

Qiu Junxing[1], **Xu Yude**[1], **Shen Jianfeng**[1], **Mao Xiaojun**[2]

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Scientific Research Institute of Shanghai Railway Bureau, Shanghai 200071, China)

Abstract: After the track achieves the static acceptance standard, it's the stage of dynamic combined test, which has heavy tasks and time is limited. To reduce the workload, it is desirable to predict dynamic TQI through static TQI. By introducing the ratio of dynamic TQI and static TQI analyzing the relation between them analyzing whether dynamic detection speed and line type have influence to the ratio, dynamic TQI is predicted base on the confidence interval of the ratio. The result shows that, dynamic TQI is 1.0～1.5 times larger than static TQI, and the ratio between dynamic TQI and static TQI has positive correlation with dynamic detection speed, but has no correlation with line type. The data of Hangzhou-Changsha high speed railway shows that, for railway designed speed of 300～350 km/h, it is needed to control static TQI of whole line under 2.65 mm to ensure dynamic acceptance up to standard, and the reliability up to 95%. The data of Nanjing-Anqing high speed railway shows that, for railway designed speed of 200～250 km/h, it is needed to control static TQI of whole line under 4.60 mm to ensure dynamic acceptance up to standard, and the reliability up to 95%.

Key words: ballastless track; track quality index; confidence interval; correlation

(上接第82页)

Research on Impedance Frequency Characteristics and Harmonic Current Amplification of AT Power Supply System

Zhang Pei, **Huang Yanquan**, **Lu Siwei**

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: For the study of the harmonic resonance problems of electrical matching between harmonic current injection of high-speed train and the AT power supply system, the theories of multi-conductor transmission line and classical Carson are used to establish the multi-conductor equivalent model of traction power network. Based on a simulation model is built in Matlab/Simulink, the impedance-frequency characteristics and harmonic current amplification under four conditions are analyzed in this paper, which include different locomotive positions, different lengths of traction lines and different short circuit capacity of external power supply. The correlation between the impedance frequency characteristic and harmonic current amplification are discussed, and the regularity of harmonic resonance of AT Power supply system is revealed, which provides reference for the study of harmonic resonance in the AT Power supply system.

Key words: AT Power supply system; harmonic resonance; impedance-frequency characteristics; harmonic current amplification

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net