

文章编号:1671-1637(2012)02-0119-08

高速铁路列车运行冲突机理

文超,彭其渊,陈芋宏

(西南交通大学 交通运输与物流学院,四川 成都 610031)

摘要:分析了高速铁路列车运行过程中随机干扰的分布规律和累积过程,采用运行计划的状态偏离图,描述了高速铁路列车运行延误的变化机理。分析了高速铁路列车运行过程中冗余时间的分布规律与利用过程,采用运行计划的状态恢复图,描述了冗余时间对延误时间的吸收过程。根据运行干扰作用过程与冗余时间利用过程,研究了高速铁路列车运行冲突的产生机理,建立了随机干扰和冗余时间共同作用下高速铁路列车运行状态的递推过程。运用易语言开发了运行干扰-冗余时间-冲突仿真程序,当干扰概率分别为50%和30%,冗余时间比例分别为15%和10%时,仿真了4种工况下高速铁路列车运行冲突的产生机理。仿真结果表明:随机干扰会导致运行冲突的产生,冗余时间可以吸收延误时间并减小运行冲突个数;随机干扰越小,运行冲突个数越少,当随机干扰概率减小20%时,冲突个数减小17.3%;延误时间越大,可利用的冗余时间越大,当冗余时间比例增大5%时,冲突吸收系数增大6.5%;冗余时间对小干扰概率与小干扰总量下的运行冲突吸收作用更明显。

关键词:高速铁路列车;运行冲突;运行干扰;冗余时间;状态转移;递推过程;冲突吸收

中图分类号:U292.4 **文献标志码:**A

Running conflict mechanism of high-speed railway train

WEN Chao, PENG Qi-yuan, CHEN Yu-hong

(School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: During the running process of high-speed railway train, the distribution regularity and cumulative process of random interference were analyzed. The status deviation map of running plan was used, and the change mechanism of running delay for high-speed railway train was described. During the running process of high-speed railway train, the distribution regularity and utilization process of redundancy time were analyzed. The status recovery map of running plan was used, and the process that redundancy time assimilated delay time was described. Based on the interacting process of running interference and utilization process of redundancy time, the generation mechanism of running conflict for high-speed railway train was studied, and the recurrent process of running status for high-speed railway train under the interaction of random interference and redundancy time was set up. The simulation system of running interference, redundancy time and conflict was developed by Yi language. While interference probabilities were 50% and 30% respectively and redundancy time proportions were 15% and 10% respectively, the generation mechanisms of running conflict for high-speed railway train under 4 conditions were simulated. Simulation result indicates that random interference can lead to the generation of

收稿日期:2011-11-23

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG12A10);国家自然科学基金项目(60776827);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090184110011)

作者简介:文超(1984-),男,江西宜春人,西南交通大学讲师,工学博士,从事铁路运输组织优化研究。

running conflict, and redundancy time can absorb delay and reduce conflict numbers. The smaller random interference is, the fewer running conflict is. When interference probability reduces by 20%, the running conflict number reduces by 17.3%. The bigger delay is, the larger available redundancy time is. When the proportion of redundancy time increases by 5%, the coefficient of conflict absorption increases by 6.5%. The redundancy time plays more obvious role on absorbing running conflict when there are little interference probability and small total interference. 3 tabs, 9 figs, 23 refs.

Key words: high-speed railway train; running conflict; running interference; redundancy time; status transition; recurrent process; conflict absorption

Author resume: WEN Chao (1984-), male, lecturer, PhD, +86-28-87600757, wenchao0601@126.com.

0 引 言

在列车运行过程中,调度员除了监督列车运行外,还需根据列车当前的运行状态,检查是否会发生列车运行冲突,如果将要或已经发生冲突,则需根据列车当前的运行状态调整列车运行计划。列车运行冲突问题的研究是高速铁路运输组织优化的关键问题之一,是行车指挥的主要内容,是实现智能调度的重要前提,是高速铁路行车安全的重要保障。

国内外对列车运行冲突问题的研究已有 40 年的历史,研究内容主要包括列车运行冲突的基本概念、冲突检测与基于列车冲突的运行图编制优化问题 3 个方面。Makkinga 等将列车与技术设备利用的冲突分为静态冲突与动态冲突 2 类^[1];Goverde 等研究了在列车晚点、运行图编制过程中列车运行冲突的检测与消解^[2-4];Alexander 等将列车运行与旅客出行衔接冲突、区间与车站设备利用与列车运行的冲突、列车运行晚点对列车运行冲突的影响、列车会让和越行次数、行车密度和列车种类差异等因素归结为列车运行冲突产生的原因,认为列车运行冲突是由于资源竞用产生的^[5-7];Mozzarella 等在研究铁路行车指挥优化方法时,指出了行车密度越大越容易造成列车运行冲突^[8];Tsang 等采用遗传算法与分枝定界算法研究了基于列车运行冲突消解的行车优化方法,分析了在行车过程中避免列车运行冲突的策略^[9-12];聂磊等提出了移线法、最早冲突优化等方法进行高速铁路列车冲突消解和运行调整^[13-14];文超等对国内外高速铁路列车运行冲突技术的研究历程与研究现状进行了综述,认为高速铁路运输资源的竞争性是高速铁路列车运行冲突产生的根本原因,高速铁路列车运行干扰是列车运行冲突产生的直接原因,并提出了高速铁路列车运行冲

突管理的内涵^[15-16];田钊等基于列车运行图编制优化与铁路行车指挥系统研究了高速铁路列车冲突问题,认为可以通过消解列车运行冲突来提高列车运行图编制水平和列车运行质量^[17-23]。

高速铁路列车运行冲突机理是研究高速铁路列车运行冲突消解与列车运行调整方法的重要基础,对实现高度铁路调度指挥智能化具有重要的现实意义。上述研究在高速铁路列车运行冲突检测和消解方面已取得了一定研究成果,但缺乏对高速铁路列车运行冲突产生原因与形成机理的系统研究。本文在已有研究的基础上,分析了高速铁路列车运行过程中随机干扰的分布规律与累积效应、冗余时间的分布规律以及对列车运行冲突吸收作用的机理,分别得到了列车运行干扰条件下偏离运行计划的状态转移图和冗余时间作用下的列车运行计划恢复状态转移图,分别构建了列车偏离运行计划的递推过程与列车运行计划状态恢复的递推过程,并应用运行干扰-冗余时间-冲突仿真程序对高速铁路列车运行冲突产生机理进行仿真验证。

1 列车运行干扰作用机理

列车运行干扰是指由于设备故障、自然条件恶劣与人为失误等各种不确定因素对列车正常运行产生的影响和扰动,如线路临时限速,列车制动特性变坏,上下车旅客过多而超过计划停车时间等。本文定义的高速铁路列车运行干扰是指影响高速铁路列车正常运行并导致列车运行延误的所有因素。

在一定的干扰原因下,产生的所有干扰事件记为列车运行干扰情景 k ,所有干扰情景的集合记为 K 。对于有 n 个车站和 $n-1$ 个区间的列车运行线路,车站序号依次为 $1, 2, \dots, j, \dots, n$,区间序号依次为 $1, 2, \dots, j', \dots, n-1$,当列车到达区段终点站 n

时,列车运行过程结束,故不考虑列车在车站 n 受到的干扰。在第 k 种干扰情景下,列车 i 运行干扰延误总时间 $T_{i,k}$ 为在 $n-1$ 个车站和 $n-1$ 个区间所受干扰时间的累加和,即

$$T_{i,k} = \sum_{k \in K} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{j'=1}^{n-1} (\delta s_{j,k} + \beta q_{j',k}) \quad (1)$$

式中: $s_{j,k}$ 为列车在车站 j 受到第 k 种干扰情景的延误时间,是列车实际车站停车时间与图定车站停车时间的差值; $q_{j',k}$ 为列车在区间 j' 受到第 k 种干扰情景的延误时间; δ, β 均为决策变量,取值均为 1 或 0,取 1 时分别表示列车在车站与区间受到第 k 种干扰情景的影响,取 0 时表示不受影响。

列车运行干扰具有累积效应,列车在运行过程中由于受到随机干扰的影响,将导致产生延误时间,且随着受到干扰的增多,列车的延误时间也将增大。列车运行干扰的累积将使列车到达车站或进入区间的时间晚点,导致列车群之间的安全间隔不满足行车作业标准,旅客在车站错过换乘其他列车时间,列车的区间运行时间落入天窗维修时间,动车组接续时间不足,车站没有适合于该列车到发条件的到发线等,这些均可视为潜在的列车运行冲突。

当列车受到干扰后,延误时间可通过各干扰情景下干扰发生的概率与各干扰情景下车站、区间干扰延误时间乘积的累加来求得,即

$$T_{i,j} = \sum_{k \in K} P_{i,k} T_{i,k} = \sum_{k \in K} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{j'=1}^{n-1} P_{i,k} (s_{j,k} + q_{j',k}) \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} P_{i,k} = 1 \quad (3)$$

式中: $T_{i,j}$ 为列车 i 运行至车站 j 时的总干扰延误时间; $P_{i,k}$ 为列车 i 在运行径路上受到第 k 种列车干扰情景的概率,其值等于列车 i 在运行径路上受到的第 k 种运行干扰频次占列车 i 在运行径路上受到的所有运行干扰频次的比值。

列车 i 在运行径路上各站受到运行干扰频次记为 $\lambda_{i,j}$,列车 i 在运行径路上各区间受到的运行干扰频次记为 $\lambda_{i,j'}$,则列车 i 在其运行径路上受到的运行干扰频次 λ_i 为

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{i,j} + \sum_{j'=1}^{n-1} \lambda_{i,j'} \quad (4)$$

在一组具有相同运行径路的紧密追踪列车群中,列车运行顺序依次编号为 1、2、 \dots 、 i 、 \dots 、 l ,则列车 l 将受到其前行所有列车运行干扰的横向传播,受到的干扰频次 λ 为其自身所受干扰与所有前行列车所受干扰的总和,即

$$\lambda = \lambda_l + \sum_{i=1}^{l-1} \lambda_i = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{i,j} + \sum_{i=1}^l \sum_{j'=1}^{n-1} \lambda_{i,j'} \quad (5)$$

式中: λ_l 为列车 l 自身受到的干扰。

列车 l 运行延误时间 T_l 等于前 $l-1$ 列车累加运行延误时间与列车 l 自身干扰引起的延误时间 $T_{l,j}$ 之和,即

$$T_l = T_{l,j} + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^{l-1} T_{i,j} = \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n-1} P_{i,k} s_{j,k} + \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^l \sum_{j'=1}^{n-1} P_{i,k} q_{j',k} \quad (6)$$

在列车运行过程中,列车的到站、离站称为列车运行状态转换点,是区分列车停站作业和区间运行的标记点。为方便起见,将列车运行干扰过程视为在列车运行状态转换的瞬间发生的,体现为列车运行干扰延误时间。在有 n 个车站与 $n-1$ 个区间的路段上,在运行干扰条件下,列车 i 偏离运行计划的状态转移见图 1。

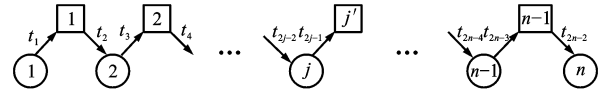


图1 偏离状态

Fig. 1 Status deviation

在图 1 中,圆圈内数字为车站序号,方框内数字为区间序号, $t_1, t_3, \dots, t_{2j-1}, \dots, t_{2n-3}$ 分别为列车 i 离开车站进入各区间时的总延误时间, $t_2, t_4, \dots, t_{2j}, \dots, t_{2n-2}$ 分别为列车 i 到达各车站时的总延误时间。

$$\begin{cases} t_1 = \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^l P_{i,k} s_{1,k} \\ t_2 = t_1 + \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^l P_{i,k} q_{1,k} \\ t_{2j-1} = t_{2j-2} + \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^l P_{i,k} s_{j,k} \\ t_{2j} = t_{2j-1} + \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^l P_{i,k} q_{j',k} \\ t_{2n-3} = t_{2n-4} + \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^l P_{i,k} s_{n-1,k} \\ t_{2n-2} = t_{2n-3} + \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^l P_{i,k} q_{n-1,k} \end{cases} \quad (7)$$

2 列车运行冗余时间作用机理

本文将高速铁路列车运行线间冗余时间、缓冲时间、运行线间的空费时间统称为高速铁路列车运行冗余时间(简称冗余时间)。由于空费时间一般小而分散,对改善列车运行质量的作用不明显,因此,本文仅考虑运行线间冗余时间和缓冲时间。冗余时

间分布可用冗余时间车站分布序列和冗余时间区间分布序列表示。

列车 i 在车站 j 的冗余时间记为 $\mu_{i,j}$, 在区间 j' 的冗余时间记为 $\mu_{i,j'}$ 。列车 i 在全部车站的冗余时间之和记为 μ_1 , 区间冗余时间之和记为 μ_2 , 即

$$\mu_1 = \sum_{j=1}^{n-1} \mu_{i,j} \quad (8)$$

$$\mu_2 = \sum_{j'=1}^{n-1} \mu_{i,j'} \quad (9)$$

冗余时间具有固定性和不完全累加性, 固定性表现在一旦设定了区间和车站的冗余时间分布方案, 则在实施过程中不能改变; 不完全累加性是指冗余时间仅限于在给定的车站和区间使用, 表现为仅当列车受到干扰偏离运行计划并需要进行列车运行调整时才利用冗余时间, 在实施列车运行调整之前, 区间和车站的冗余时间不能储存, 当前区间和车站未被完全利用的冗余时间也不能累加列车运行前方车站和区间的冗余时间。

在列车群中, 各个列车利用其冗余时间是相互独立的, 前行列车的运行延误状态仅决定后行列车是否完全利用区间和车站的冗余时间, 列车群中所有列车的偏离运行计划恢复过程都是一致的, 只是冗余时间的利用值存在差异。与列车运行干扰类似, 为了方便起见, 将列车运行冗余时间缓冲过程视为在列车运行状态转换的瞬时发生的。列车冗余时间对列车偏离运行计划的恢复过程见图 2。

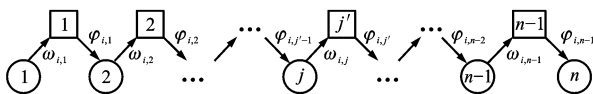


图 2 状态恢复

Fig. 2 Status recovery

在图 2 中, $\omega_{i,j}$ 和 $\varphi_{i,j'}$ 分别为列车 i 在车站 j 和区间 j' 的实际利用的冗余时间, 且有 $0 \leq \omega_{i,j} \leq \mu_{i,j}$ 和 $0 \leq \varphi_{i,j'} \leq \mu_{i,j'}$ 。

3 列车运行冲突产生机理与仿真

3.1 列车运行冲突的产生机理

在列车运行过程中, 列车若产生运行延误, 调度员便会立即运用区间与车站的冗余时间进行调整, 列车在各状态转换点的偏离时间等于列车运行干扰延误时间与冗余时间利用值之差, 若列车运行干扰延误时间大于可利用的冗余时间, 则列车运行干扰纵向传播和横向传播积累。列车运行冲突是在冗余时间没有完全吸收列车运行干扰延误的情况下, 干

扰延误时间超过了列车运行的相关技术作业要求, 导致列车竞争使用相关技术设备或相关作业组织过程不符合列车的作业要求而产生的。

令列车 i 在随机干扰和冗余时间共同作用下到达车站 j 的延误时间(列车运行冲突潜在时间)为 $\Delta t_{i,j}$, 到达区间 j' 的延误时间记为 $\Delta T_{i,j'}$, 则有

$$\begin{cases} \Delta T_{i,1} = t_1 - \sum_{i=1}^l \omega_{i,1} \\ \Delta t_{i,2} = t_2 - \sum_{i=1}^l \varphi_{i,1} \\ \Delta T_{i,j'-1} = t_{2j-3} - \sum_{i=1}^l \omega_{i,j'-1} \\ \Delta t_{i,j} = t_{2j-2} - \sum_{i=1}^l \varphi_{i,j'-1} \\ \Delta T_{i,n-1} = t_{2n-3} - \sum_{i=1}^l \omega_{i,n-1} \\ \Delta t_{i,n} = t_{2n-2} - \sum_{i=1}^l \varphi_{i,n-1} \end{cases} \quad (10)$$

以最为常见的车站追踪间隔时间冲突为例, 列车 i 为列车 $i+1$ 的前行列车, $\bar{a}_{i,j}$ 和 $\bar{a}_{i+1,j}$ 分别为列车 i 、 $i+1$ 计划到达车站 j 的时间, $\bar{d}_{i,j}$ 和 $\bar{d}_{i+1,j}$ 分别为列车 i 、 $i+1$ 计划离开车站 j 的时间, 列车 i 和列车 $i+1$ 到达车站 j 的计划间隔时间 \bar{I} 为

$$\bar{I} = \bar{a}_{i+1,j} - \bar{a}_{i,j}$$

列车 i 和列车 $i+1$ 到达车站 j 的实际时间分别为 $a_{i,j}$ 和 $a_{i+1,j}$, 离开车站 j 的实际时间分别为 $d_{i,j}$ 和 $d_{i+1,j}$, 则列车 i 和列车 $i+1$ 的实际追踪间隔时间为

$$I = a_{i+1,j} - a_{i,j} = \bar{I} - (\Delta t_{i+1,j} - \Delta t_{i,j})$$

如果 I 小于已知的列车间的最小追踪间隔时间 I_{\min} , 则列车 i 和列车 $i+1$ 存在车站间隔时间冲突。

由高速铁路列车运行干扰导致列车运行冲突见图 3, 水平线表示车站, 1~8 为车站序号, 竖直线为时间, 粗实线均为列车延误时间($d_1 \sim d_6$)。列车 i 受到干扰在车站 2 产生延误时间 d_1 后, 列车 $i+1$ 若按计划时间发车将与列车 i 产生出发间隔时间冲突, 为了避免冲突, 列车 $i+1$ 在车站 3 产生了延误时间 d_2 ; 同理, 列车 $i+2$ 在车站 3 产生延误时间 d_3 。由于列车运行干扰累积, 导致列车 $i+1$ 和列车 $i+2$ 到达车站 5 的延误时间分别为 d_4 和 d_5 。

从图 3 可知, 车站 5 至车站 7 区段在 01:15~03:45 之间开设 150 min 的综合维修天窗, 记天窗开始时间为 T_b 。在正常情况下, 列车 i 能在天窗开始前通过车站 6 至车站 7 的区间, 但列车运行干扰

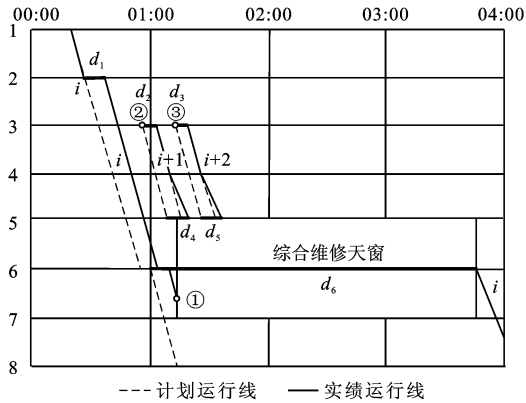


图3 运行干扰作用过程

Fig. 3 Interacting process of running interference

使列车 i 在车站 6 至车站 7 区间内落入天窗时段, 从而产生列车运行与综合维修天窗开设时间的冲突。在车站 6 处, 列车 i 不能通过联络线转至其他平行线路运行的情况下, 列车 i 只能在车站 6 等待天窗时间结束, 并进而产生延误时间 d_6 。

在图 3 中, ①、②、③分别为 3 个列车运行冲突点, ①为列车 i 所受干扰纵向传播产生的, 是行车作业与维修作业的冲突; ②和③则是由列车 i 所受干扰横向传播造成的, 是车站间隔时间冲突。随着列车运行干扰的增大, 大量干扰延误时间将导致计划运行线与实绩运行线之间的大量冲突, 因此, 高速铁路列车运行冲突是由于列车在运行过程中所受到的大量干扰累积和传播导致的。

若列车 i 利用车站 2 至车站 6 区间与车站 6 的冗余时间赶点运行, 并能在天窗时间开始前通过车站 6 至车站 7 区间, 从而消除了冲突点①, 则视为列车利用冗余时间吸收运行冲突, 见图 4。对于列车 $i+1$ 而言, 列车 i 在车站 2 至车站 6 区间内利用区间冗余时间 $\varphi_{i,2}$ 赶点运行, 但由于 $\varphi_{i,2} < d_2$, 冲突点②仍然存在, 但列车 $i+1$ 在车站 3 受到列车 i 干

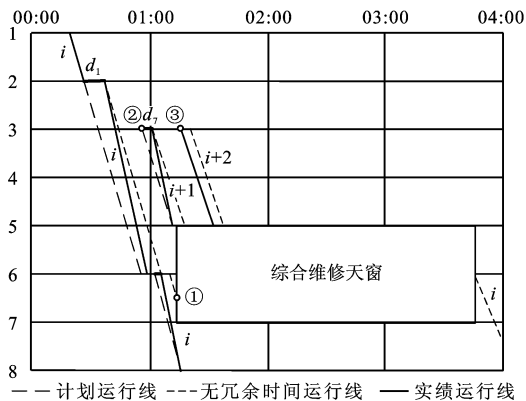


图4 冗余时间利用过程

Fig. 4 Utilization process of redundancy time

扰横向传播的影响, 延误时间减小为 d_7 ($d_7 = d_2 - \varphi_{i,2}$), 列车 $i+1$ 在车站 3 至车站 5 区间内利用冗余时间加速运行, 可以正点到达终到站。而对于列车 $i+2$ 而言, 其与列车 $i+1$ 之间存在线间冗余时间 $\omega_{i+2,3}$, 且有 $\omega_{i+2,3} = d_3$, 则延误时间 d_3 的干扰全部被吸收, 冲突点③被消除, 列车 $i+2$ 仍按计划运行线运行。

从上述分析可以看出, 列车运行干扰是列车运行冲突产生与发展的直接驱动力, 列车运行冲突是列车运行干扰发展到一定程度的产物, 冗余时间可以在一定程度上减少或消除列车运行延误, 从而减少或消除列车运行冲突。如果列车按计划运行线路运行, 冗余时间不被利用, 一旦发生列车运行延误或列车运行冲突, 则需要尽可能地利用冗余时间。

为了体现冗余时间对列车运行冲突的吸收作用, 本文引入列车运行冲突吸收系数。在列车运行随机干扰条件下, 当利用冗余时间后, 列车运行冲突减少的个数与仅在随机干扰条件下列车运行冲突个数的比值为列车运行冲突吸收系数, 即

$$\gamma = \frac{N - N_R}{N} \quad (11)$$

式中: γ 为列车运行冲突吸收系数; N 为仅在随机列车运行干扰条件下产生的冲突个数; N_R 为利用冗余时间后列车运行冲突产生的个数。

3.2 仿真程序

由于目前中国高速铁路尚在运营初期, 缺乏列车运行干扰的长期统计数据, 难以得到各列车运行干扰发生的概率与干扰延误时间, 本文的模拟仿真不细分列车运行干扰的类型, 遵循列车在车站受到的干扰概率大于在区间运行受到的干扰概率与列车计划停站时间越长受到干扰概率越大的原则。通过调研已经运营的高速铁路运营情况后, 本文得到区间随机干扰时间服从均值为 120 s 的均匀分布, 本文区间随机干扰时间最大时长有 3 min 和 5 min 2 种情景。区间随机干扰概率的取值遵循小值干扰概率大的原则, 例如当随机干扰概率为 50%, 区间随机干扰时间(min)的取值范围为 $[0, 3]$ 时, 取 0~1 min 干扰时间的概率为 25%, 取 1~2 min 干扰时间的概率为 15%, 取 2~3 min 干扰时间的概率为 10%。由于高速铁路列车在车站停车时间都很短, 本文仿真将车站随机干扰时间最大时长取为 1 min, 因此, 区间随机干扰时间(min)的取值范围可以为 $[0, 5]$ 和 $[0, 3]$ 2 种, 车站随机干扰时间的取值范围

为 $[0,1]$ 。

在本文仿真中,冗余时间等于相应区间纯运行时间或车站作业时间乘以一定的系数比例。当冗余时间大于当前列车偏离运行计划的时间时,冗余时间利用值等于列车偏离运行计划的时间;当冗余时间小于列车的当前偏离运行计划的时间时,冗余时间利用值为可利用的最大冗余时间。仿真过程分为 2 步:第 1 步,不加载冗余时间,在列车运行干扰作用下,列车运行后的冲突数;第 2 步,当加载冗余时间后,在列车运行干扰和冗余时间共同作用下,列车运行后的冲突个数。为了减小仿真的复杂度,仿真过程不涉及进路及信号排列问题,车站进路排列和信号作业时间纳入车站作业时间计算。高速铁路列车运行冲突机理仿真流程见图 5。

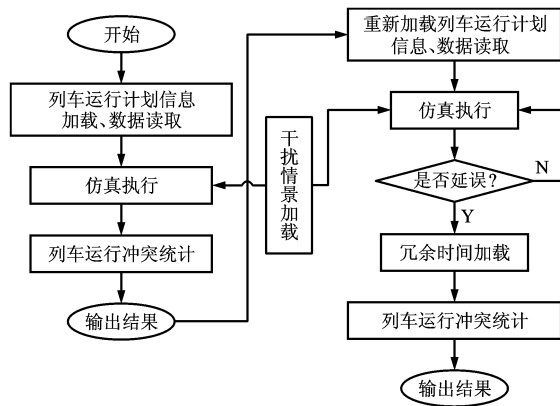


图 5 仿真流程
Fig. 5 Simulation flow

本文仿真采用易语言开发工具编程,开发了列车运行干扰-冗余时间-冲突仿真程序,通过输入随机干扰概率、随机干扰时间、冗余时间比例等参数与各列车的计划运行时刻表,每次能够实现对 4 个车站和 3 个区间内的 5 列高速列车区间干扰时间、可利用的区间冗余时间、列车运行冲突个数等 3 个指标的统计,从而可以分析列车运行干扰、冗余时间与冲突个数之间的关系。

4 计算结果分析

本文设置了 4 种仿真工况,各工况仿真参数与列车运行计划分别见表 1、2,列车 1~5 分别在第 10、15、27、35、43 min 发车,列车的起车附加时间和停车附加时间均取为 1 min。

本文分别对每个工况进行 10 次仿真,每次仿真得到了同一工况下 4 个指标的 10 个仿真结果(每次仿真工况进行 10 个循环),分别取其平均值,区间干扰延误时间见图 6,区间冗余时间利用值见图 7,随

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

仿真 工况	仿真参数		
	随机干扰概率/%	干扰时间区间/min	冗余时间比例/%
1	50	$[0,3]$	10
2	50	$[0,5]$	10
3	50	$[0,5]$	15
4	30	$[0,3]$	10

表 2 运行计划

Tab. 2 Running plans

列车序号	1	2	3	4	5
区间 1 运行时间	25	24	24	24	25
车站 1 停站时间	1	1	2	1	0
区间 2 运行时间	18	17	18	17	18
车站 2 停站时间	1	1	2	1	1
区间 3 运行时间	38	39	39	39	38

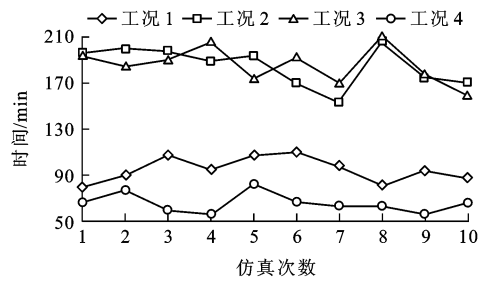


图 6 区间干扰延误时间
Fig. 6 Interval interference delays

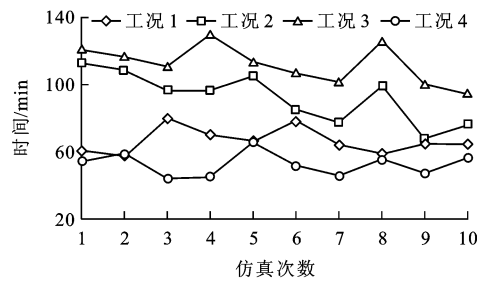


图 7 区间冗余时间利用值
Fig. 7 Utilization values of interval redundancy times

机干扰条件下冲突个数见图 8,随机干扰与冗余时间共同作用下冲突个数见图 9,各指标的平均值见表 3。

由图 6~9、表 3 可以得出以下结论。

(1)在图 6 中,工况 2、3 的区间干扰延误时间在整体趋势上要远大于工况 1。在相同的干扰概率下,当区间随机干扰时间取值区间增大 66.7%时,列车所受区间随机干扰延误时间增大近 95%。

(2)从图 7 可以看出,当冗余时间设置比例较

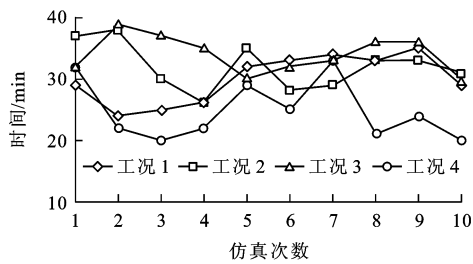


图 8 随机干扰下冲突个数

Fig. 8 Conflict numbers under random interferences

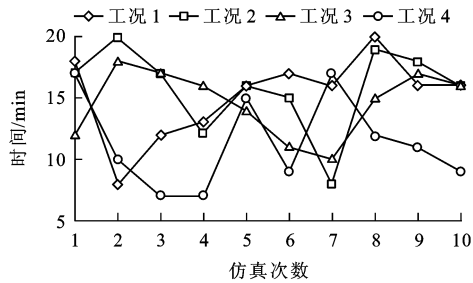


图 9 随机干扰和冗余时间共同作用下冲突个数
Fig. 9 Conflict numbers under interactions of random interferences and redundancy times

表 3 指标平均值

Tab. 3 Average values of indexes

指标	仿真工况			
	1	2	3	4
区间干扰延误时间/min	95.1	185.5	185.9	65.8
区间冗余时间利用值/min	66.5	92.6	112.1	52.6
随机干扰下的冲突个数	30.0	32.0	34.0	24.8
随机干扰和冗余时间共同作用下的冲突个数	15.2	15.8	14.6	11.4

大时,在列车受到随机干扰后,区间冗余时间利用值要大,如工况 3 的区间冗余时间利用值为 112.1 min,大于工况 2 的区间冗余时间利用值(92.6 min);当列车受到的随机干扰时间较大时,冗余时间利用值也大,在列车受随机干扰后,工况 2 区间冗余时间利用值为 92.6 min,大于工况 1 区间冗余时间利用值(66.5 min)。

(3)从图 8、9 可以看出,列车受到的随机干扰越大,产生的运行冲突个数越多。工况 4 的干扰概率比工况 1 的减小 20%,工况 4 的冲突个数比工况 1 的冲突个数减小 17.3%。

(4)由以上分析可计算得到 4 种工况下的列车运行冲突吸收系数,工况 1 的为 49.3%,工况 2 的为 50.6%,工况 3 的为 57.1%,工况 4 的为 54.0%。工况 3 的冗余时间设置比例比工况 2 的增大 5%,冲突吸收系数增大 6.5%。由于冗余时间吸收了部

分随机干扰延误时间,使列车运行冲突个数减小。

(5)冗余时间的比例越大,即总冗余时间越多,其吸收随机干扰、消除列车运行冲突的能力越强,如工况 3 的列车运行冲突吸收系数比工况 2 的要大;相同冗余时间设置比例情况下,即当总冗余时间一定时,冗余时间对小干扰概率与干扰总量下的列车运行冲突吸收作用更明显,如工况 4 的列车运行冲突吸收系数比工况 1 的要大。

5 结 语

(1)列车运行干扰是导致列车运行延误和列车运行冲突的直接驱动力,冗余时间对列车运行冲突具有很强的吸收性,列车运行冲突吸收系数可用于量化冗余时间利用值对列车运行冲突的吸收作用。

(2)通过对冗余时间对列车运行冲突吸收作用的仿真,可对冗余时间的布局方案进行评估与方案优化。在一定的冗余时间总量与随机干扰情况下,不同的冗余时间布局方案对冗余时间的利用程度不同,对列车运行冲突吸收的程度也不同。

(3)通过研究高速铁路列车运行冲突的形成机理,为列车运行冲突的预测和消解提供理论基础,对于提高高速铁路行车指挥水平具有重要的现实意义。

参 考 文 献 :

References :

[1] MAKKINGA F, METSELAAR S. Automatic conflict detection and decision support for optimal usage of railway infrastructure[C]//ALLAN J, HILL R J, BREBBIA C A, et al. Seventh International Conference on Computers in Railways VII. Southampton: WIT Press, 2000: 1057-1064.

[2] GOVERDE R M P, HANSEN I A. TNV-prepare: analysis of dutch railway operations based on train detection data[C]//ALLAN J, HILL R J, BREBBIA C A, et al. Seventh International Conference on Computers in Railways VII. Southampton: WIT Press, 2000: 779-788.

[3] YUAN Jian-xin, HANSEN I A. Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(2): 202-217.

[4] GOVERDE R M P. Railway timetable stability analysis using max-plus system theory[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(2): 179-201.

[5] ALEXANDER F. A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13(6): 719-729.

[6] OH S M, HONG S H, CHOI I C. Railway conflict detection and resolution in the Korean railway system[C]//ALLAN J, HILL R J, BREBBIA C A, et al. Seventh International Con-

- ference on Computers in Railways IX. Southampton: WIT Press, 2004: 675-684.
- [7] JOHANNA T. Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: a review of models and algorithms[C]//KROON L G, ROLF H M. The 5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways. Wadern: Leibniz Center for Informatics, 2006: 1-23.
- [8] MOZZARELLA M, OTTAVIANI E. A traffic management system for real-time traffic optimization in railways [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(2): 246-274.
- [9] TSANG C W, HO T K. The conflict resolution at connected railway junctions[C]//IU V P, LAMAS L N, LI Y P, et al. Proceedings of the 9th International Conference EPMESC IX. New York: Taylor and Francis, 2003: 987-993.
- [10] D'ARIANO A, PRANZO M, HANSEN I A. Conflict resolution and train speed coordination for solving real-time timetable perturbations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2007, 8(2): 208-222.
- [11] ALBRECHT T. The Influence of anticipating train driving on the dispatching process in railway conflict situations [J]. Networks and Spatial Economics, 2009, 9(1): 85-101.
- [12] CHENG Y H, YANG Li-an. A fuzzy petri nets approach for railway traffic control in case of abnormality: evidence from Taiwan railway system[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 8040-8048.
- [13] 聂磊, 张星臣, 赵鹏, 等. 高速铁路列车运行计划调整策略的研究[J]. 铁道学报, 2001, 23(4): 1-6.
NIE Lei, ZHANG Xing-chen, ZHAO Peng, et al. Study on the strategy of train operation adjustment on high speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(4): 1-6. (in Chinese)
- [14] 史峰, 黎新华, 秦进, 等. 单线列车运行调整的最早冲突优化方法[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(1): 106-113.
SHI Feng, LI Xin-hua, QIN Jin, et al. The earliest conflict optimal method for train operation adjustment on single track railway[J]. China Railway Science, 2005, 26(1): 106-113. (in Chinese)
- [15] 文超, 彭其渊, 文欢. 高速铁路列车运行冲突管理研究现状综述[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(5): 140-150.
WEN Chao, PENG Qi-yuan, WEN Huan. Review on conflict management of train operation on high-speed railway [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(5): 140-150. (in Chinese)
- [16] 文超, 彭其渊, 陈芋宏. 高速铁路列车运行冲突管理总论[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 8-12.
WEN Chao, PENG Qi-yuan, CHEN Yu-hong. Pandect on the operation conflict management of high-speed train [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(10): 8-12. (in Chinese)
- [17] 田钊. 基于一类混合 Petri 网的列车运行系统中冲突因素的分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
TIAN Zhao. Conflict analysis of train operation system based on a class of hybrid Petri nets [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011. (in Chinese)
- [18] 陈荣武, 刘莉, 郭进. 基于遗传算法的列车运行能耗优化算法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 108-114.
CHEN Rong-wu, LIU Li, GUO Jin. Optimization algorithm of train operation energy consumption based on genetic algorithm [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 108-114. (in Chinese)
- [19] 周文梁, 史峰, 陈彦, 等. 客运专线网络列车开行方案与运行图综合优化方法[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 1-7.
ZHOU Wen-liang, SHI Feng, CHEN Yan, et al. Method of integrated optimization of train operation plan and diagram for network of dedicated passenger lines [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 1-7. (in Chinese)
- [20] 贾晓秋, 关晓宇. 列车运行图布线方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(4): 81-84.
JIA Xiao-qi, GUAN Xiao-yu. Research on routing method of train operation diagram [J]. Railway Transport and Economy, 2011, 33(4): 81-84. (in Chinese)
- [21] 周伟, 秦世引, 万百五. 列车运行调整问题研究现状及发展趋势[J]. 系统工程, 1997, 15(2): 17-22.
ZHOU Wei, QIN Shi-yin, WAN Bai-wu. The train operation adjustment: current status and prospects [J]. Systems Engineering, 1997, 15(2): 17-22. (in Chinese)
- [22] 金福才, 胡思继, 刘智丽. 列车运行调整方案实时安全诊断算法研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(1): 53-56.
JIN Fu-cai, HU Si-ji, LIU Zhi-li. Real-time safety diagnosis algorithm of train operation adjustment plan [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(1): 53-56. (in Chinese)
- [23] 周学松, 朱钰, 胡思继. 基于列车运行状态推导图的列车运行调整算法[J]. 铁道学报, 1999, 21(6): 1-5.
ZHOU Xue-song, ZHU Yu, HU Si-ji. Research on the algorithm for train regulation based on train running state derivation graph [J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(6): 1-5. (in Chinese)