

文章编号:1671-1637(2013)05-0067-09

铁路技术站到发车流的时空不均衡三维度量方法

薛 锋^{1,2}, 陈崇双^{2,3}, 杨运贵⁴

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 3. 西南交通大学 数学学院, 四川 成都 610031; 4. 中国民航飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:为了测定铁路技术站到发车流时空上的不均衡性,分析了到发车流时间、列车到发数量、技术站衔接方向的特点,提出了到发车流不均衡性的计算方法。通过分析技术站到发车流的时空不均衡性对技术站的影响,考虑了不同衔接方向的车流结构、转化范围与到达间隔时间,设定了线路方向、列车数量等相关参数。应用最大方差比值法,计算了到发车流时间与不同衔接方向到发车流数量的不均衡程度,基于基尼系数,计算了不同时间段车流到发数量的不均衡程度。从空间、时间、数量3个角度将到发车流的三维不均衡特性进行分解,描述了到发列车数量与时间、空间转换的关系,建立了铁路技术站到发车流的不均衡三维度量方法,并以贵阳南站为例进行了实例验证。研究表明:当接车数量为67列、计算时间为12 h、接车数水平设置为4时,不同衔接方向到发车流数量的不均衡程度为0.21,到发车流时间的不均衡程度为0.03,不同时间段车流到发车流数量的不均衡程度为0.13。车流总体比较均衡,符合贵阳南站的实际情况。

关键词:铁路运输;技术站;到发车流;时空不均衡;度量方法;三维模型;不均衡控制;最大方差比值法;基尼系数

中图分类号:U292.12 **文献标志码:**A

3D measure method of space-time unbalance for arrival and departure wagon flows at railway technical station

XUE Feng^{1,2}, CHEN Chong-shuang^{2,3}, YANG Yun-gui⁴

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Mathematics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: In order to measure the space-time unbalance of arrival and departure wagon flows at railway technical station, the characteristics of arrival and departure wagon flows times, the arrival and departure amounts of trains and the connecting directions of technical station were analyzed, and the calculation method of arrival and departure wagon flow unbalance was provided. Through analyzing the influence of space-time unbalance for arrival and departure wagon flows on technical station, the wagon flow structures of different connecting directions, transformation range and arrival time interval were considered, and relevant parameters such as line direction and train amount were designed. By using maximum variance ratio method, the

收稿日期:2013-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(61203175,61104175);轨道交通控制与安全国家重点实验室开放基金项目(RCS2011K012);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682013CX068)

作者简介:薛 锋(1981-),男,山东邹城人,西南交通大学副教授,工学博士,从事运输组织理论与系统优化研究。

time unbalance degree of arrival and departure wagon flows and the amount unbalance degree of arrival and departure wagon flows from different connecting directions were calculated, the unbalance degree of arrival and departure wagon flow amounts at different periods was calculated by using Gini coefficient. The 3D unbalance characteristic of arrival and departure wagon flows was divided from space, time and amount, the relations among train amount, time change and space transformation were described, the 3D measure method of space-time unbalance for arrival and departure wagon flows at railway technical station was set up, and an example of Guiyang Nan Railway Station was given to prove the measure method. Research result shows that when the amount of arrival trains is 67, calculation time is 12 h and receiving train level is 4, the unbalance degree of arrival and departure wagon flow amounts from different connecting directions is 0.21, the unbalance degree of arrival and departure wagon flow times is 0.03, and the unbalance degree of arrival and departure wagon flow amounts at different periods is 0.13. The wagon flows are comparatively balanced, which accord with the actual situation of Guiyang Nan Railway Station. 4 tabs, 3 figs, 22 refs.

Key words: railway transportation; technical station; arrival and departure wagon flows; space-time unbalance; measure method; 3D model; unbalance control; maximum variance ratio method; Gini coefficient

Author resume: XUE Feng(1981-), male, associate professor, PhD, +86-28-86466546, xuefeng.7@163.com.

0 引 言

技术站是铁路运输网上车流集散、缓冲和调节的重要节点,主要办理货物列车和车辆的技术作业,具体细分为编组站和区段站 2 大类。随着中国铁路大面积提速和快速客运网络的不断建成,旅客运输产品日渐丰富,而且旅客列车也逐步朝高速、正点目标迈进,但在一些既有线路上,客货混跑方式依然存在。由于旅客列车开行密度增大、部分时段密集到发以及货物列车客车化等因素的影响,铁路技术站车流到发不均衡非常普遍,又尤以衔接主要干线的编组站更为严重。车流到发的不均衡性,不仅造成了车站设备能力虚糜和浪费并存,还增大各项作业计划的兑现难度,是影响车站作业效率甚至路网列车运行秩序的关键因素之一。

铁路货物运输是将车流以车列形式进行组织,因而对于铁路不均衡运输的研究主要集中在列车到发车流的不均衡性。技术站车流到发的不均衡主要表现在时间和空间 2 方面,在时间上主要体现为全年每天以及一天不同时段内在某个衔接方向或者车站总的到发列车数量的不均等;在空间上主要体现为车站各衔接方向在同一时段内列车到发数量的不均等。显然,这种不均衡性在时间和空间 2 个维度上同时存在且相互关联。对于车站到发车流的不均衡现象,一些专家学者采用统计表格、不均衡系数、

变异系数等方法进行了定量描述。郝立光等从评价列车流均衡性的传统作法和工作实际入手,指出了原有方法的不足,通过建立列车流模型提出了新的指标^[1];梁明珠等利用统计分析、计算机模拟方法,引入了 2 个参数从不同的角度描述车流的不均衡程度^[2];王万平等在分析既有技术站能力计算体系及相关因素的基础上,引入了阶段不均衡系数,提出了一套基于非均衡运输条件下的技术站能力计算体系^[3];李海鹰等根据编组站到发车流的特征,把编组站的工作时间分为忙、闲和普通 3 个阶段,提出了用编组站通过能力、编组站车流结构条件通过能力和驼峰小时解体能力 3 个概念来计算编组站的能力^[4-5];王焱对不均衡运输产生的原因进行了细致的分析,并应用随机过程理论,由密集时间段推导出阶段不均衡系数,以改进传统编组站的能力计算式^[6];熊坚等以株洲北站为例分析了不均衡车流产生的原因,提出以加强设备能力、开行重载列车、反接列车等具体措施来弱化车流不均衡对编组站的影响^[7]。

上述研究从理论角度提出了一些车流不均衡的评价方法或针对不均衡条件下的车站能力给出了具体的计算方法,这些研究在实际应用中亦取得了较好的效果。此外,另有一些学者基于一定的车站作业不均衡性研究了铁路车站能力计算与利用问题。Morlok 等综合考虑了运输系统内各个要素对车站能力的影响,提出了运输系统能力的概念,并对运输

系统能力及其不均衡特性进行了研究^[8];Yuan等提出了一种分析列车在站延误传播的随机模型,以此提高路网能力的利用率及作业的可靠性^[9];D'ariano等采用分支定界法、图论、禁忌搜索算法等解决路网列车时刻安排、作业延迟与恢复以及能力的运用优化问题^[10-12];曲思源等通过界定时段性和计算区段概念,提出了既有繁忙干线时段性通过能力的规划模型和计算方法^[13];汤波等以基于概率论多除少补原理的一元多次多项式方程标定关键参数,以平行进路关联图为基础的完全子图搜索算法确定方程系数,最后以东莞站广州方向咽喉为例进行了计算分析^[14];刘敏等通过分析车站通过能力的影响因素,提出了不同层次车站通过能力的计算方法,以评估给定车站作业计划和列车路径排列方案条件下的车站通过能力利用率和可用能力^[15];田亚明通过设计编组站解编能力和调车线能力扩充决策变量,构建了编组站改编能力配置优化模型,并提出了模型的改进策略^[16]。

到发作业作为车站特别是技术站重要的技术作业之一,其各项运输组织工作的协调配合要求在较大的时空范围内配置各项设备资源。本文在上述研究的基础上,系统分析到发车流的时空不均衡性表现,从到发车流不均衡性的时间和空间属性入手,考虑不同方向到发列车的车流结构、去向转化范围以及间隔时间与到发列车数量的变化等,建立三维模型度量技术站到发车流的时空不均衡性,以期能更加直观形象、更为准确地描述车流的时序及空间转换特征,为铁路技术站的调度指挥决策及车站资源的优化配置提供可靠依据。

1 到发车流的时空不均衡性

1.1 到发车流的时空不均衡性表现

铁路客货运输总体表现出各个时段的不均衡与全年季节性波动等客观特征,使货物列车的到发规律也发生了新的变化,其到发不均衡性在主要干线编组站上表现尤为明显。到发车流的不均衡性在路网与车站层面主要表现为以下几点。

1.1.1 重空车失衡

旅客列车的群到群发使得货物列车的到发时段可选择范围缩小,因而货物列车集中到发现象比较普遍,这造成某些线路上一些站点甚至多站点在一定时段出现车流积压,引起线路堵塞。与此同时,到发车流的不均衡使得空车调整难度加大,排空车和配空车更加难以平衡。重空车的失衡也使得一些路

局各阶段运用车保有量差异较大。

1.1.2 区域内车流分布不平衡

由于受到旅客列车在运行图中挤占的影响,货物列车不但集中到发,而且从上下行方向来看,双向方向的货物列车集中时段很多并不一致,直接影响车流的双方向对流,使得车流在一些区域路网的分布不平衡。区间上下行货物列车集中时段的不匹配也直接影响着机车交路,造成货物列车运行图容易丢线,某些季节临客的开行也使得货车机车交路更加不均衡。

1.1.3 区域路网分界口接入重车流波动大

由于区域路网车流不均衡性的传播效应,使得分界口接入的车流产生较大波动,表现为单一方向连续大运量冲击或接入量呈现跳跃性^[17]。

1.1.4 编组站阶段性能力紧张

列车在车流结构(某方向车流偏大而另一方向车流偏小)、时间段、到发数量上存在的不均衡,使得车站阶段性能力紧张,造成运输组织工作忙闲不均。在繁忙时段,列车通常密集到发,车站作业高度紧张,有时甚至不得不突击作业,简化作业环节,压缩作业时间以保证运输任务的完成,由此也埋下了安全隐患;在空闲时段,列车稀疏到发,各项设备能力不能得到充分利用,亦形成闲置和浪费。货车的集中到达也使得货运站待卸货物阶段性积压,技术站调机能力不足,取送车困难。

1.2 到发车流的不均衡对技术站的影响

到发车流的不均衡性通常会使技术站在一段时间内处于繁忙状态,进而超出车站作业设备的能力,出现等待现象,并随着车站衔接方向的增加,此种现象还会加剧。到发车流的不均衡性逐渐成为直接影响技术站作业效率的关键因素,其影响主要包括以下几点。

1.2.1 对车站作业设备的影响

技术站对货物列车的加工是一个流水性的排队系统,到发车流的不均衡会使到发场、调车线、驼峰、牵出线等设备处于忙闲不均的交替状态,车流密集到发时,各种设备都超负荷运转,作业人员也超负荷工作,直接导致了设备有效能力的降低。车站设备和人员的超负荷工作都将危及车站作业的安全性。

1.2.2 对车站作业指标的影响

中停时是反映技术站作业效率的重要指标,到发车流的不均衡使得车站的待解、待编、待发、待取等非生产性时间增加,进而使得整个车站的中停时指标上升。整体而言,车流的不均衡到发还会使车

站的一些设备较长时间内无法利用,进而导致空费时间、变异系数、空费系数等车站能力评估参数值增大,使得车站的真实能力难以准确测定,进而影响车站运输调度指挥的决策。

1.2.3 对车站作业计划的影响

受到发车流不均衡影响,技术站各作业子系统负荷阶段性不均,计划编制难度增大,在设备高负荷时间段,作业计划也难以执行。加之车站各衔接方向车流结构的不均衡,导致整个车站车流接续困难,大车流方向机车一旦供应不足,将引起连锁反应,致使解编作业中断,直接降低作业计划的兑现率,甚至在紧张阶段作业计划根本无法实施。

2 到发车流的时空不均衡度量模型

技术站到发车流的时空不均衡性主要涉及 3 个要素,即到发时间(包含到发时间间隔)、列车的到发数量、车站衔接的方向。到发车流的不均衡三维度量,一是考虑不同方向到发列车车流结构及去向转化范围,二是考虑间隔时间与到发数量的变化。

2.1 参数设定

设技术站某一作业系统的到达场衔接 L_D 个线路方向,出发场衔接 L_F 个线路方向。将一昼夜视为一个时间段(0~24 h)。到达场一昼夜到达的列车数为 n_D ,其中第 i ($1 \leq i \leq n_D$) 列车的到达时刻为 t_{Di} ,则构成时间序列 $\{t_{D1}, t_{D2}, \dots, t_{Dn_D}\}$, $t_{Di} \leq t_{D(i+1)}$, $i=1, 2, \dots, n_D-1$ 。出发场一昼夜出发的列车数为 n_F ,其中第 j ($1 \leq j \leq n_F$) 列车的出发时刻为 t_{Fj} ,则构成时间序列 $\{t_{F1}, t_{F2}, \dots, t_{Fn_F}\}$, $t_{Fj} \leq t_{F(j+1)}$, $j=1, 2, \dots, n_F-1$ 。

为了描述到达场(或出发场)列车来自(或去往)的衔接方向,引入 2 个参数

$$\delta(i, l_D) = \begin{cases} 1 & \text{到达列车 } i \text{ 来自衔接方向 } l_D \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\delta(j, l_F) = \begin{cases} 1 & \text{出发列车 } j \text{ 去往衔接方向 } l_F \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: L_D 与 L_F 分别为 l_D 与 l_F 的上限值; $1 \leq l_D \leq L_D$; $1 \leq l_F \leq L_F$ 。

到达场衔接方向 l_D 的到达列车数量 n_{l_D} 为

$$n_{l_D} = \sum_{i=1}^{n_D} \delta(i, l_D) \quad 1 \leq l_D \leq L_D \quad (1)$$

出发场衔接方向 l_F 出发列车数量 n_{l_F} 为

$$n_{l_F} = \sum_{j=1}^{n_F} \delta(j, l_F) \quad 1 \leq l_F \leq L_F \quad (2)$$

由于 $\sum_{l_D=1}^{L_D} \delta(i, l_D) = 1$, 对任意到达列车 i 恒成立,其物理意义为任意到达列车只来自一个衔接方向,故有 $n_D = \sum_{l_D=1}^{L_D} n_{l_D}$, 即到达场总的到达列车数量为各个衔接方向到达列车数量之和。类似地,有任意出发列车只发往一个衔接方向,且有 $n_F = \sum_{l_F=1}^{L_F} n_{l_F}$ 。

2.2 不同衔接方向到发车流数量的不均衡性

在铁路技术站中,很多车站尤其是编组站通常都衔接多个方向,由于各方向到发车流强度的不同,在同一时间段内车站各衔接方向上到发的列车数量往往不均衡,当车站有 2 个或以上衔接方向共用一条接发车进路时,各方向的到达车流有时会相互干扰,进一步加剧车站作业的不均衡程度。

在一昼夜到达场和出发场平均每个衔接方向的接发列车数量 \bar{n}_D 、 \bar{n}_F 分别为

$$\bar{n}_D = \frac{n_D}{L_D} \quad (3)$$

$$\bar{n}_F = \frac{n_F}{L_F} \quad (4)$$

到达场和出发场衔接方向接发列车的方差 S_{n_D} 、 S_{n_F} 分别为

$$S_{n_D} = \frac{1}{L_D - 1} \sum_{l_D=1}^{L_D} (n_{l_D} - \bar{n}_D)^2 \quad (5)$$

$$S_{n_F} = \frac{1}{L_F - 1} \sum_{l_F=1}^{L_F} (n_{l_F} - \bar{n}_F)^2 \quad (6)$$

当到达场到达列车全部都来自一个衔接方向,或者出发场出发的列车也都去往一个衔接方向时,列车到发最不均衡。在这 2 种情形下,到达场和出发场衔接方向接发列车的方差 S_{mn_D} 、 S_{mn_F} 分别都达到最大,即

$$S_{mn_D} = \frac{1}{L_D - 1} [(n_D - \bar{n}_D)^2 + (L_D - 1)\bar{n}_D^2] \quad (7)$$

$$S_{mn_F} = \frac{1}{L_F - 1} [(n_F - \bar{n}_F)^2 + (L_F - 1)\bar{n}_F^2] \quad (8)$$

到达场和出发场是车站的 2 个子系统,就车站整体而言,到达车流和出发车流在列车数量上也有不同,技术站作业的链式结构,使得车流依次按照到达→解体→集结→编组→出发的顺序进行有向传递,列车在此过程中也重新进行分散组合。车站到达场和出发场不同衔接方向列车到发车注流数量的不均衡程度 G_1 为

$$G_1 = \frac{n_D}{n_D + n_F} \frac{S_{n_D}}{S_{mn_D}} + \frac{n_F}{n_D + n_F} \frac{S_{n_F}}{S_{mn_F}} \quad (9)$$

若以 θ 表示出发场出发列车数量与到达场到达列车数量之比,则式(9)可以整理为

$$G_1 = \frac{1}{1+\theta} \frac{S_{n_D}}{S_{mn_D}} + \frac{\theta}{1+\theta} \frac{S_{n_F}}{S_{mn_F}} \quad (10)$$

显然,该指标值在 $[0,1]$ 之间,且数值越大表示列车到发车流在车站各个衔接方向之间越不均衡。特别地,如果单独考察到达场或出发场,则 G_1 退化为 S_{n_D}/S_{mn_D} 或 S_{n_F}/S_{mn_F} 。

2.3 车流到发时间的不均衡性

根据列车的到发时间序列,可以确定列车到发间隔时间。记第 i 列到达列车与第 $i+1$ 列到达列车的到达间隔时间为 p_{Di} ,第 j 列出发列车与第 $j+1$ 列出发列车的出发间隔时间为 p_{Fj} , T 为到发车流最大间隔时间,即有

$$p_{Di} = \begin{cases} t_{D(i+1)} - t_{Di} & \text{其他} \\ (t_{D1} + T - t_{Dn_D}) | T | & i = n_D \end{cases} \quad (11)$$

$$p_{Fj} = \begin{cases} t_{F(j+1)} - t_{Fj} & \text{其他} \\ (t_{F1} + T - t_{Fn_F}) | T | & j = n_F \end{cases} \quad (12)$$

由于到发车流时间的不均衡性不仅与间隔时间的数值大小有关,而且还与其排列相关。为了反映这一排列的密集程度,使之既能反映间隔数值的大小,又能反映数值排列顺序的影响,根据文献[1]的研究,可用时间差指标 U 来统一考察。由此对到发车流分别建立时间差指标集合为

$$U_D = \{u_{D1}, u_{D2}, \dots, u_{Dn_D}\}$$

$$U_F = \{u_{F1}, u_{F2}, \dots, u_{Fn_F}\}$$

$$\begin{cases} u_{Di} = \frac{p_{D(i-1)} + p_{Di} + p_{D(i+1)}}{3} \\ u_{D1} = \frac{p_{Dn_D} + p_{D1} + p_{D2}}{3} \\ u_{Dn_D} = \frac{p_{D(n_D-1)} + p_{Dn_D} + p_{D1}}{3} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} u_{Fj} = \frac{p_{F(j-1)} + p_{Fj} + p_{F(j+1)}}{3} \\ u_{F1} = \frac{p_{Fn_F} + p_{F1} + p_{F2}}{3} \\ u_{Fn_F} = \frac{p_{F(n_F-1)} + p_{Fn_F} + p_{F1}}{3} \end{cases} \quad (14)$$

按照上述方法对到发车流时刻进行处理既能反映统计意义上的差异程度,亦能在一定程度上反映到发车流时序特点,本质上消除或减弱到发车流序列局部小范围的偏差,进而突出整体大范围的偏差。

进一步计算 U_D 和 U_F 的数学期望 E_{t_D} 、 E_{t_F} 和方差 S_{t_D} 、 S_{t_F} ,分别为

$$E_{t_D} = \frac{1}{n_D} \sum_{i=1}^{n_D} u_{Di} \quad (15)$$

$$E_{t_F} = \frac{1}{n_F} \sum_{j=1}^{n_F} u_{Fj} \quad (16)$$

$$S_{t_D} = \frac{1}{n_D - 1} \sum_{i=1}^{n_D} (u_{Di} - E_{t_D})^2 \quad (17)$$

$$S_{t_F} = \frac{1}{n_F - 1} \sum_{j=1}^{n_F} (u_{Fj} - E_{t_F})^2 \quad (18)$$

当技术站的全部到发车流都在同一个时刻点到达或出发时,到发车流在时间上最不平衡,此时其到发车流的最大间隔时间为 T 。在这种情形下,到发车流的间隔时间方差达到最大,分别为

$$S_{m_D} = \frac{1}{n_D - 1} \left[\left(T - \frac{T}{n_D} \right)^2 + (n_D - 1) \left(\frac{T}{n_D} \right)^2 \right] \quad (19)$$

$$S_{m_F} = \frac{1}{n_F - 1} \left[\left(T - \frac{T}{n_F} \right)^2 + (n_F - 1) \left(\frac{T}{n_F} \right)^2 \right] \quad (20)$$

式(19)、(20)可以简化为

$$\begin{cases} S_{m_D} = \frac{T^2}{n_D} \\ S_{m_F} = \frac{T^2}{n_F} \end{cases} \quad (21)$$

车站到达场和出发场到发车流时间的不均衡程度 G_2 为

$$G_2 = \frac{1}{1+\theta} \frac{S_{t_D}}{S_{m_D}} + \frac{\theta}{1+\theta} \frac{S_{t_F}}{S_{m_F}} \quad (22)$$

2.4 不同时间段列车到发数量的不均衡性

令 S_{q_D} 和 S_{q_F} 分别为到达和出发列车数的不均衡程度,用于描述车站到达场和出发场接发列车在全天各时段分布特点; N_{Dk} 和 N_{Fk} 为该时段的接发列车频数。根据技术站全天每个时段(如 1 h)列车到发数量的大小按一定的取值区间进行划分,作为该时段的列车水平。在此基础上,借鉴基尼系数的概念,用各时段的列车频数替代洛伦兹曲线中的人口数量,用每个时段的列车水平替代洛伦兹曲线中的收入水平,分别计算到达场和出发场的列车到发数量的不均衡程度。

由于到达场和出发场到达和出发列车数量不均衡程度度的计算原理相同,仅以到达场为例进行说明,出发场计算完全类似。设到达场可以区分的接车水平为 K_D (对应洛伦兹曲线中的 K_D 个点),其接车频数累计百分比为 h_k ($1 \leq k \leq K_D$),接车水平累加百分比为 m_k 。特别地, $h_0 = m_0 = 0$, $h_{K_D} = m_{K_D} = 1$ 。

根据文献[18-22],到达场到达列车数量的不均

衡程度 S_{q_D} 的近似计算式为

$$S_{q_D} = 1 - \sum_{k=0}^{K_D-1} (m_k + m_{k+1})(h_{k+1} - h_k) \quad (23)$$

综合到达场和出发场列车到发的情况,技术站不同时间段车流到发数量的不均衡程度 G_3 为

$$G_3 = \frac{1}{1+\theta} S_{q_D} + \frac{\theta}{1+\theta} S_{q_F} \quad (24)$$

2.5 到发车流的不均衡三维度量

技术站到发车流的不均衡具有如下三维特性:空间,描述车流到发不均衡性的空间范围,车站的到发场衔接方向;时间,主要是指到发时刻(包含间隔时间),从一列车到发至下一列车到发的时间;数量,描述到发列车数量的多少,从稀疏到密集,或从密集到稀疏,或保持某一种状态。

技术站到发车流的不均衡三维特性可分解为二维的时间不均衡性和空间不均衡性,进而综合成一维的不均衡状态,不均衡性的层次结构见图 1。可以从空间和数量角度描述车流到发不均衡的状态(S_{n_D} 和 S_{n_F} 反映了不同方向接发列车数量的不均衡性, G_1 反映了技术站发到车流的总离散程度),或者从时间和数量角度描述车流到发不均衡的状态(G_3 反映了技术站列车到发数量的总不均衡程度),也可以从单一的时间角度描述车流到发不均衡的状态(G_2 反映了列车到发时间间隔的不均衡程度),此外还可以从其他单一或组合角度研究到发车流的不均衡性,亦可以采用其他的量化方法。

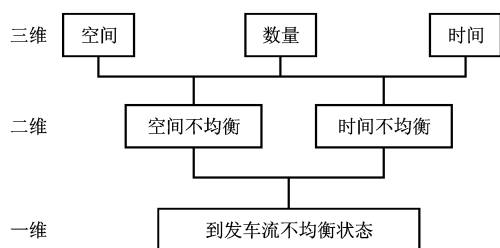


图 1 层次结构

Fig. 1 Hierarchical structure

技术站时空不均衡性的三维度量可借助于图表详细地描述到发的列车数量与时间变化、空间转换的关系。

若将技术站的到发场视作测度对象,其内不同的衔接方向则为测度主体,可将到发车流的三维物理空间转换为三维不均衡性测度空间。对任一测度对象而言,其时空不均衡指标体系由反映不同衔接方向到发车流数量的不均衡程度的指标 G_1 、反映到发车流时间的不均衡程度指标 G_2 及反映不同时段到发列车数量不均衡程度指标 G_3 所决定,可将上

述 3 个指标组成技术站到发车流不均衡性的三维空间变量,用 \mathbf{G} 表示

$$\mathbf{G} = (G_1, G_2, G_3) \quad (25)$$

若将技术站到发车流的不均衡性看作一个三维空间,则任何一种不均衡性均为三维空间中的一个点。为了便于统一计算,将一昼夜时间划分为 t 个时间段,同时将 n_D 和 n_F 视为某一时段到发列车数量的数量,取多时段累加平均值。

2.6 到发车流的不均衡控制分析

技术站到发车流的完美均衡为车流在时空上的最佳分布。一方面,由于车站能力、设备条件限制及偶发因素影响,绝对的均衡是不存在的;另一方面,在技术站的实际工作中不均衡三维空间应该是一个有限的空间,即存在一个合理边界,边界内的点应该都是在车站可控范围内的,一旦超越此边界,将导致技术站崩溃,引发局部甚至全局堵塞。

2.6.1 不均衡三维空间的边界分析

时空不均衡性都存在理论上的边界。其中,衔接方向的不均衡性为衔接方向和车流的耦合;到发间隔时间和到发数量 2 个方面的不均衡性与衔接方向无直接关系,主要受实际到发车流的影响。根据本文的建模方法,3 种不均衡性的度量结果都介于 0 与 1 之间,且数值越大意味着越不均衡,但 3 种不均衡性所刻画的对象有所不同,其值分布的范围也将有所不同。时空不均衡性都存在实际的边界,由于 3 种不均衡性都受到车流结构的影响,即使是同一个车站,不同的车流到发结构也对应不同的均衡状态。尽管如此,只要车流结构变化不大,其不均衡性的度量结果也是比较接近的。

对于不同的技术站,其不均衡性并非完全不同。根据本文的建模思路,不均衡性度量本质上只与车站的配置(衔接方向、接发车能力等)和车流结构有关,因而只要技术站在这 2 方面相差不大,其不均衡性边界也应相似;否则边界将有较大差异,需根据具体的车站配置及车流情况进行分析。

2.6.2 不均衡状态的控制分析

对于边界点的控制,可以从硬件和软件 2 方面进行。在硬件方面,通过车站设施改造,增加调机设备,可以增大车站的能力,改善车站作业条件,增强车站在大车流集中到发时的吸收转化能力。在软件方面,可以通过作业组织手段,优化作业方法,扩大不均衡边界点的区间范围,从而减小车流集中到发时技术站作业崩溃的可能性。

同时,在不均衡性三维空间内,当到发车流从不

均衡的一种状态向另一种状态过渡时,要受到车站设备能力及区间线路使用的约束。在 3 种不均衡状态 G_1 、 G_2 、 G_3 中, G_1 主要受区间线路使用的约束,但 3 种不均衡状态都同时与车站设备能力直接相关,而车站能力也是有限度的,均衡性的恢复一般可以通过增大间隔时间或者减少到发数量来实现。在实际作业中,对于不均衡状态的控制,从全局来讲,应主要从路网(至少是区域路网)层面,根据不同技术站的车流吸收转化能力,合理安排不同方向车流的到发间隔,减少车流的集中到发,为技术站作业计划的执行创造良好的外部环境;从局部来讲,车站应熟知本站的车流到发统计规律,当与车站紧密相关的

货源货流发生较大变化时,应对可能的车流变化做出预警,并在现有设备条件下有预见地安排作业组织,且留有余地。一旦外部车流条件发生实际变化,需及时调整作业组织,加强防范,应对可能的不均衡车流冲击。

3 计算结果分析

贵阳南编组站站型为双向纵列式三级七场,衔接柳州、株洲、重庆、昆明 4 个方向。以 2012 年 5 月下行到达场(衔接柳州、株洲方向)一个班的车流数据为例,说明到达车流的三维不均衡情况。在 12 h 内,柳州方向到达列车 18 列,株洲方向到达 49 列,分别见表 1、2。

表 1 柳州方向到达车流分布
Tab. 1 Distribution of arrival wagon flow from Liuzhou direction

方向	车次	到达时间	车次	到达时间	车次	到达时间	车次	到达时间	车次	到达时间
柳州	45094	18:25	24017	21:36	45098	23:32	24027	3:27	24033	5:31
	40117	19:00	24019	22:38	24023	2:05	45201	3:56	24035	5:52
	24013	20:15	45096	22:56	40113	2:26	24031	4:02		
	24015	21:00	24021	23:10	24025	2:28	24029	4:24		

表 2 株洲方向到达车流分布
Tab. 2 Distribution of arrival wagon flow from Zhuzhou direction

方向	车次	到达时间	车次	到达时间	车次	到达时间	车次	到达时间	车次	到达时间
株洲	81107	18:02	10793	20:06	86093	0:35	87101	2:47	10811	4:12
	10823	18:05	10791	20:34	10799	0:50	10941	3:01	47051	4:15
	10789	18:09	27061	21:58	10801	1:02	86095	3:05	27051	4:22
	27057	18:13	47055	22:46	86091	1:03	81031	3:11	47063	4:34
	47112	18:16	30049	23:07	48103	1:13	30041	3:16	30091	4:36
	27059	18:33	10795	23:22	10803	1:15	48105	3:32	10813	4:49
	10949	19:15	41065	23:52	10805	1:33	10809	3:37	10943	5:08
	47057	19:23	10797	0:11	10807	2:08	81029	3:44	10815	5:36
	10871	19:35	30051	0:10	41079	2:19	81021	3:52	X265	5:43
	47061	19:38	10939	0:28	81029	2:34	86097	3:54		

经计算,柳州和株洲 2 个方向平均到达列数为 33.5,方差为 480.5。由式(7)可知最大方差为 2 244.5,故该站下行到达场不同衔接方向列车到达数量的不均衡程度为 0.21。

前 61 列列车到达时刻间隔时间见图 2。取 $T=720\text{ min}$,经计算, E_{t_D} 为 12.21 min, S_{t_D} 为 75.56 min^2 , $S_{m_{t_D}}$ 为 $2\,500.95\text{ min}^2$ 。该站下行到达场车流到达时间的不均衡程度为 0.03。

将一个班(18:00~6:00)12 h 划分为 12 段,分别统计每个时间段的到达列车数量,见表 3。根据表 3 的结果,按照统计学原理,设置接车数水平为 4,每个水平下的统计结果见表 4。

表 3 时间段与列车数量
Tab. 3 Time sections and train amounts

时间段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
列车数量	7	5	3	3	3	5	5	5	7	11	8	5

将表 4 的计算结果代入式(23),计算到达列车数量的不均衡度 S_{q_D} 为 0.13。

由计算出的数值在不均衡三维测度空间中绘制贵阳南站下行到达场接车不均衡坐标,见图 3。

从图 3 可以看出,贵阳南站下行到达场车流总体比较均衡,但在空间、时间、数量方面有不同程度的差异。首先,贵阳南站下行到达场车流到达时间的不均衡数值较小,说明该班时段内车流的到达间

表 4 统计结果

Tab. 4 Statistical result

序号	小时列车水平	列车频数	列车频数比例	列车频数累计比例	列车水平个数	列车水平比例	列车水平累计比例
1	(1,3]	9	0.13	0.13	3	0.25	0.25
2	(3,6]	25	0.37	0.50	5	0.42	0.67
3	(6,9]	22	0.33	0.83	3	0.25	0.92
4	(9,12]	11	0.17	1.00	1	0.08	1.00
合计		67	1.00		12	1.00	

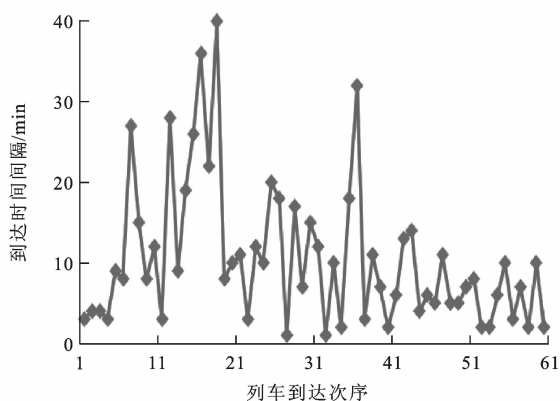


图 2 到达时间间隔

Fig. 2 Arrival time interval

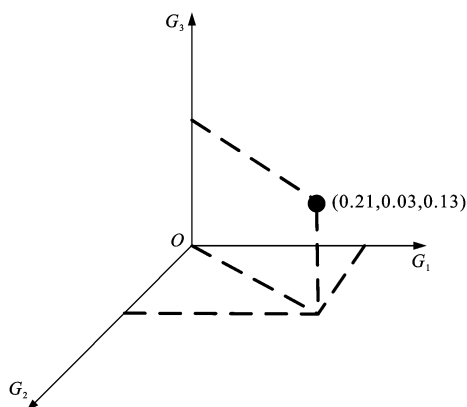


图 3 不平衡性的三维坐标

Fig. 3 3D coordinate of unbalance

隔时间分布比较均匀,有利于车站按车流的时序特征顺序作业;其次,贵阳南站衔接的柳州和株洲 2 个方向的到达车流不平衡数值较大(从表 1、2 也可以直观看出),这主要是由贵阳南站的客流结构造成的,同周边地区的货源货流分布有关,同时由于贵阳南站下行到达场柳州和株洲方向存在共用同一条进路接车的情况,因而这 2 个方向的到达车流会有一定干扰;最后,贵阳南站下行到达场不同时段到达列车的数量不平衡度居中,从表 3 也可以看出,在小时列车水平为(3,6],[6,9]时,列车的频数值较大,这说明该班时间内贵阳南站到达场作业忙闲比较均衡,没有突发性的大车流到达冲击,这有利于平衡车

站的作业负荷,避免作业的长时间迟滞或车流堵塞。

4 结 语

铁路技术站的作业过程呈流水特征,到发车流的不均衡性直接影响车站内部的作业组织,货物列车的密集和分散到达会造成设备使用忙闲不均,忙时设备负荷大,经常突击或简化作业,形成安全隐患,闲时设备能力则得不到充分发挥。对于车站作业在不同时间段和车流到发方向上存在的不均衡现象,可从时间维和空间维对其程度进行度量,并在此基础上采取恢复均衡性的针对性措施。技术站到发车流的时空不均衡性度量基础数据来自车站不同接发方向的列车到发信息,只要能采集到该信息,就能计算出均衡性的三维度量指标,该方法对不同的技术站具有通用性。当技术站的到发车流在初始选取的时间段内变化比较显著时,可适当缩小时间段,从而提高计算精度。技术站到发车流的不均衡性在三维空间内存在合理边界,如何确定一个合理的边界,并对空间不均衡程度进行层级划分还有待进一步深入研究。

参考文献:

References:

- [1] 郝立光,张星臣. 列车流到发车站的均衡性评价方法研究[J]. 铁道学报, 2000, 22(5): 13-16.
HAO Li-guang, ZHANG Xing-chen. Study on equilibrium evaluation of train flow arrived at and departure from a station[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(5): 13-16. (in Chinese)
- [2] 梁明珠,赵 华. 路网、区域性编组站现状评价及对策研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(3): 21-26.
LIANG Ming-zhu, ZHAO Hua. Study on railway network and regional marshalling yard assessment and counter-measure[J]. China Railway Science, 2001, 22(3): 21-26. (in Chinese)
- [3] 王万平,谢海红. 非均衡运输条件下技术站能力计算方法的初步探讨[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(1): 98-102.
WANG Wan-ping, XIE Hai-hong. Primary study on calculation methods of technological station capacity under unbalanced

- transportation conditions[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2002, 26(1): 98-102. (in Chinese)
- [4] 李海鹰,杨肇夏. 基于不均衡运输的编组站能力计算方法探讨[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(6): 9-12.
LI Hai-ying, YANG Zhao-xia. Computation of capacity at marshalling yard based on imbalanced transport circumstances[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(6): 9-12. (in Chinese)
- [5] 李海鹰,张 超. 编组站到解系统通过能力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 120-125.
LI Hai-ying, ZHANG Chao. Calculation method for the carrying capacity of the arriving and breaking up system in marshalling yard[J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 120-125. (in Chinese)
- [6] 王 焱. 提速后不均衡运输对大型编组站能力的影响分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
WANG Yan. Analysis of influence of unbalanced transport on the capacity of large marshalling yard after speeding-up[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [7] 熊 坚,漆 昕,刘正喜. 车流不均衡条件下编组站作业组织研究[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(8): 5-9.
XIONG Jian, QI Xin, LIU Zheng-xi. Operation organization of marshalling yard under unbalanced traffic flow[J]. Railway Transport and Economy, 2011, 33(8): 5-9. (in Chinese)
- [8] MORLOK E K, CHANG D J. Measuring capacity flexibility of a transportation system[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2004, 38(6): 405-420.
- [9] YUAN Jia-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.
- [10] D'ARIANO A, PACCIARELLI D, PRANZO M. A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(2): 643-657.
- [11] D'ARIANO A, CORMAN F, PACCIARELLI D, et al. Reordering and local rerouting strategies to manage train traffic in real-time[J]. Transportation Science, 2008, 42(4): 405-419.
- [12] CORMAN F, D'ARIANO A, PACCIARELLI D, et al. A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(1): 175-192.
- [13] 曲思源,徐行方. 既有繁忙干线时段性通过能力规划模型及算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 77-81.
QU Si-yuan, XU Xing-fang. Planning model and calculating method of period carrying capacity on busy existed railway main-lines[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 77-81. (in Chinese)
- [14] 汤 波,雷定猷,张英贵,等. 铁路车站咽喉通过能力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6): 69-74.
TANG Bo, LEI Ding-you, ZHANG Ying-gui, et al. Calculating method of carrying capacity for railway station bottleneck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 69-74. (in Chinese)
- [15] 刘 敏,韩宝明,李得伟. 高速铁路车站通过能力计算和评估[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 9-15.
LIU Min, HAN Bao-ming, LI De-wei. Calculation and evaluation of carrying capacities at high-speed railway stations[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 9-15. (in Chinese)
- [16] 田亚明. 铁路网编组站改变能力配置优化模型[J]. 铁道学报, 2013, 35(6): 6-12.
TIAN Ya-ming. Railway marshalling yards reclassification capacity configuration optimization model[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(6): 6-12. (in Chinese)
- [17] 曲思源. 不均衡运输条件下车流调整的优化[J]. 铁道运输与经济, 2007, 29(2): 41-43, 52.
QU Si-yuan. Optimization for wagon-flow adjustment under unbalanced transportation conditions[J]. Railway Transport and Economy, 2007, 29(2): 41-43, 52. (in Chinese)
- [18] 杨运贵. 铁路车站能力的计算方法与查定技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
YANG Yun-gui. Study on calculating methods and investigating-determining technologies of railway station capacity [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [19] 孟令云,杨肇夏,李海鹰. 单线铁路区间能力失效条件下列车运行调整模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(4): 885-894.
MENG Ling-yun, YANG Zhao-xia, LI Hai-ying. Train dispatching models under field capacity breakdowns on single-track railway lines [J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2012, 32(4): 885-894. (in Chinese)
- [20] 郑建东. 成都北站组号数量对驼峰解体能力的影响分析[J]. 铁道运输与经济, 2013, 35(6): 43-45, 70.
ZHENG Jian-dong. Analysis on influence of group indication number in Chengdu North Station on hump uncoupling capacity[J]. Railway Transport and Economy, 2013, 35(6): 43-45, 70. (in Chinese)
- [21] 端嘉盈,何世伟,申永生. 客运专线建成后既有繁忙干线铁路新增货运通过能力研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2012, 36(2): 378-381.
DUAN Jia-ying, HE Shi-wei, SHEN Yong-sheng. Study on the railway increasing freight carrying capacity of the existing busy main-line after the completion of passenger-only line[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2012, 36(2): 378-381. (in Chinese)
- [22] LUKASZEWICZ P. Energy consumption and running time for trains: modelling of running resistance and driver behavior based on full scale testing [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2001.