

文章编号：1005-8451（2013）11-0050-04

城市轨道交通列车运行调整目标的研究

徐 航

（西南交通大学 信息科学与技术学院，成都 610031）

摘要：列车运行调整是一个多目标优化的问题，其中一些目标在很多情况下是相互制约的关系，多数情况下不能让所有目标同时达到最优。本文介绍北京地铁运营单位的运营指标统计方法，分析城市轨道交通中列车运行调整各项性能指标，并结合现场经验，对各项性能指标的评价函数进行优化，使之更符合实际需求，为研究列车运行调整奠定了基础。

关键词：城市轨道交通；列车运行调整；目标函数

中图分类号：U292.41 : TP39 **文献标识码：**A

Study on target of train diagram regulation to Urban Transit

XU Hang

(School of Information and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Train diagram regulation was a problem of multi-objective optimization, in many cases some of the targets were mutual restriction relations, most of the time, it was impossible to let all the objectives to be optimized at the same time. This article introduced the statistical method of operating indicators for Beijing subway operation unit, analyzed the various performance indicators of train diagram regulation on the Urban Transit, and combining with the experience in site investigation and field research experience, the evaluation function to various performance indicators was optimized to be more in line with the actual demand. It was laid a good foundation for the study on train diagram regulation.

Key words: Urban Transit; train diagram regulation; target function

列车运行调整是指在列车在运行过程中因各种因素和突发事件的干扰，无法按预定的运行图运行时，通过重新合理的确定和优化列车运行图，使得列车能够快速恢复有序的运行状态。列车运行自动调整是一个非常复杂的问题，其2大难点在于模型建立和算法研究上，建立模型是为了算法研究服务的，建立的模型需要能符合现场实际情况的需求。一般来说，建立模型2个核心的部分是确定约束条件和定义目标函数。约束条件规定了列车运行计划必须满足的一系列的约束条件，代表调整计划的可执行性，是由信号基础条件和运营要求所规定的。而目标函数则是评价调整结果的质量，并以此来寻求最优解。所以目标函数的优劣直接决定了列车运行调整结果的好坏^[3]。

目前学术界对该问题的研究主要偏重于求解算法的研究，而在确认调整目标的问题上，存在着诸多问题，比如目标单一，适应性不强，与现场实际情况有出入等。这在一定程度上直接影响

该项研究在实际中应用的可行性。

1 列车运行调整的评价指标分析

列车运行调整以维护运行图的严肃性为原则，遵循调度规则，使晚点列车恢复正点或减少影响，保证旅客候车和乘坐的舒适度，提高运输效益。在城市轨道交通中是以一个调度日为单位来考核当日运输任务的完成情况和工作质量。运营单位设置了多种指标来考核每日的实际列车运行图，这是研究列车运行调整目标的依据。下面以北京地铁为例，它的评价目标主要是正点率和兑现率。

1.1 正点率

列车运行调整的首要目的是实现“按图行车”，提高列车正点率，减少晚点列车。列车正点率是最常用的评价列车运行实际情况的一个指标，统计列车正点率，是指统计该天内所有实际开行列车中的正点列车率，一般来说包括列车始发正点率和到达正点率。

列车始发正点率指的是始发正点列车数与实

收稿日期：2013-03-20

作者简介：徐 航，在读硕士研究生。

际开行列车的比值。一趟列车从起始站出发时刻与计划运行图规定时刻相比大于等于某一阀值，那么这列车为始发晚点。列车始发正点率的计算公式如下：

$$\text{列车始发正点率} = \frac{\text{实际开行列数} - \text{始发晚点列数}}{\text{实际开行列数}} \cdot 100\%$$

列车到达正点率指的是到达正点列车数与实际开行列车的比值。一趟列车到达终点站的时刻与计划运行图规定时刻相比大于等于某一阀值，那么这列车为到达晚点。但是如果一列车始发晚点，但其全程运行时间未超过计划运行图规定的全程运行时分的晚点列车，为假正点列车，不统计到达晚点。列车到达正点率的计算公式如下：

$$\text{列车到达正点率} = \frac{\text{实际开行列数} - \text{到达晚点列数}}{\text{实际开行列数}} \cdot 100\%$$

列车正点率为列车始发正点率和列车到达正点率的平均值，公式如下：

$$\text{列车正点率} = \frac{\text{实际开行列数} \times 2 - \text{始发到达晚点列数之和}}{\text{实际开行列数} \times 2} \cdot 100\%$$

另外在统计列车晚点时，还将晚点的阀值分成3个等级：1 min, 2 min和5min。在不同的晚点阀值统计下，会得到不同的正点率。

1.2 兑现率

在城市轨道交通运营中，如果发生比较大的干扰事件，可能会导致计划中有部分列车未能完成运营任务。兑现率就是来评价当日运输任务完成情况的，计算公式如下：

$$\text{运行图兑现率} = \frac{\text{实际开行列数}}{\text{计划开行列数}} \cdot 100\%$$

综上所述，正点率主要是运营单位来评价当日列车晚点的情况，兑现率是运营单位来评价当日运输量完成的情况。这2个指标主要是从宏观角度评价了当日行车运输的质量，为建立列车运行调整的目标提供了依据和方向，但并不完善，比如列车在车站和区间的运行情况，这些会影响到运输效率和旅客满意度，而晚点率和兑现率并没能有效反应这些因素。

2 列车运行调整的性能指标分析

列车运行调整时，不仅要解决当前对列车运行已经造成的干扰，还应具有一定的前瞻性和冗

余性。结合北京地铁8号线二期工程列车自动监控(ATS)系统研发和开通前的调试工作，通过对常用调整目标的优化，建立了改善后的列车运行调整性能目标体系。

列车运行的参数有：

上行和下行列车总数：m

车站上行和下行站台总数：n

车次为i的列车在站台j的实际到站时刻：

$d_{i,j}$, $f_{i,j}$

车次为i的列车在站台j的计划到站时刻：

$d'_{i,j}$, $f'_{i,j}$

2.1 总晚点时间

在列车运行调整的研究中，总晚点时间是最常用到的一个指标。总晚点时间指的是，所有列车在每个车站到达和出发晚点时间之和，也有只采用总到达时间的^[3~4]。评估总晚点时间的目标函数为：

$$Z_1 = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{F_1(d_{i,j} - d'_{i,j}) + F_1(f_{i,j} - f'_{i,j})\} \right) \quad (1)$$

$$F_1(A) = \begin{cases} 0 & A \leq 0 \\ A & A > 0 \end{cases}$$

目标是使总晚点时间 Z_1 尽可能小。但是普通统计总晚点时间，只是所有晚点时间的算术和，就评估效果而言，它没有反应不同晚点时间带来的不同影响，比如10列列车在10个车站晚点10 s，和1列列车在10个车站晚点100 s，2种情况下的总晚点时间是相等的，但是第2种情况对行车造成的干扰要大得多。另外从调度经验来说相对于正点，更希望列车在到达和离开车站时相对于原计划能够稍微提前一点儿，以留有一定的余量。若需要让总晚点时间的目标函数达到此目的，计算总晚点 Z_1 的公式不变，只需对 F_1 函数进行重新设计，对不同的晚点进行加权，使大晚点的加权系数更大，另外如果以提前30 s为最佳，修改后的 F_1 函数可以设计如下：

$$F_1(A) = \begin{cases} 0 & A + 30 \leq 0 \\ \frac{A + 30}{60} \cdot (A + 30) & A + 30 > 0 \end{cases}$$

2.2 总晚点列车数（按不同晚点情况）

和总晚点时间一样，总晚点列车数也是比较

常用的一个指标，总晚点时间描述了晚点时间的多少，而总晚点列车数则是描述了晚点情况波及的范围。一般评估总晚点列车数的目标函数的公式如下：

$$Z_2 = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{F_2(d_{i,j} - d'_{i,j}) + F_2(f_{i,j} - f'_{i,j})\} \right) \quad (2)$$

$$F_2(A) = \begin{cases} 0 & A \leq 0 \\ 1 & A > 0 \end{cases}$$

调整的目标是使总晚点列车数 Z_2 尽可能小。但是这种简单的统计在所有车站到达和出发晚点列车的数量，并没有考虑到列车的不同晚点情况，所以在统计晚点列车数量时，根据晚点的严重情况进行加权，同样也只需要修改 F_2 函数：

$$F_2(A) = \begin{cases} 0 & A \leq 0 \\ 1 & 0 < A < 60 \\ 2 & 60 < A < 120 \\ 3 & 120 < A < 300 \\ 4 & A > 300 \end{cases}$$

2.3 总周转时间

周转时间，指的是列车从一个交路的起始站出发，到完成整个交路任务到达下一个交路的起始站为止的时间。总晚点时间和总晚点列车数，是统计列车在每一个站的晚点情况，而周转时间则是以整个交路为单位来统计列车运营情况，目标是使所有列车在一个交路的运行时间尽量不要超过计划周转时间。

总周转时间，目前在研究中作为列车运行调整的目标还比较少，引入该性能指标是为了更宏观地评估列车运行调整的效果，计算公式如下：

$$Z_3 = \sum_{i=1}^m \{F_3[(f_{i,n} - f_{i,1}) - (f'_{i,n} - f'_{i,1})]\} \quad (3)$$

$$F_3(A) = \begin{cases} 0 & A \leq 0 \\ A & A > 0 \end{cases}$$

目标是使 Z_3 值尽可能小。

2.4 平均等待时间

旅客的平均等待时间，指的是旅客在某个车站等待列车的平均时间，主要受列车在该车站的发站间隔影响，是影响旅客舒适度的一个较为重要的指标。这个指标的目的是让列车的间距较为

均衡，使相邻列车之间的间隔在一定范围内，不过大也不过小，过大会导致旅客等待时间过长，如果是高峰期的话还可能会导致积聚的旅客过多造成列车的拥堵；而过小的行车间隔会使列车吸纳的旅客量减少。

若假定乘客是随机到达站点的，可以认为平均等待时间是上一列车离开该站台与下一列车到达该站台时间间隔的一半（如果列车在该车站跳停，那么在计算平均等待时间时应不计算该列车）。用在某车站实际等待时间和计划等待时间的差来衡量该指标，计算公式如下：

$$Z_4 = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^n \{|(d_{i+1,j} - f_{i,j}) - (d'_{i,j} - f'_{i+1,j})|\} \quad (4)$$

该指标函数评价了旅客对在车站候车时间的满意度，调整的目标应使 Z_4 的值尽可能小。大多数列车运行调整研究的目标主要集中在如何保证列车正点上，而基于这样的目标得出来的求解算法，在当某列车或列车群出现较大晚点时，在大范围大幅度的调整运行图后，列车间隔会出现部分区域过大和部分区域过小的情况，对旅客候车和乘车舒适度以及运输效率造成较大的影响。由于在很多情况下，保证旅客平均等待时间与减少晚点是互相制约的，所以在研究列车运行调整的问题时，需要权衡这 2 个因素，得到一个适中的调整方案。

2.5 车站停站时间

列车在车站的停站时间，是衡量旅客舒适度的一个较为重要的指标，同样也是要求尽可能恒定。停站时间过大会影响行车效率和旅客舒适度，停站时间过小会给旅客上车造成不便。如果以原计划的停站时间为最佳，那么评价车站停站时间的性能指标函数计算公式如下：

$$Z_5 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{|(d_{i,j} - f_{i,j}) - (d'_{i,j} - f'_{i,j})|\} \quad (5)$$

目的是使 Z_5 值尽可能小。当列车出现晚点之后进行调整时，保证列车停站时间恒定和尽快恢复正常也是矛盾的，所以也是需要权衡的。不过由于在约束条件里会限制每个车站的最大停站时间和最小停站时间，列车的停站时间实际上是被限制在了一定范围内，所以车站停站时分指标可

以被放在较为次要的位置，不过还是应该尽量避免出现极大和极小的停站时分。一种修正后的车站停站时间的性能指标函数计算公式为：

$$Z'_s = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{F_s[(d_{i,j} - f_{i,j}), (d'_{i,j} - f'_{i,j})]\} \quad (6)$$

$$F_s(A, B) = \begin{cases} 0 & m \cdot B \leq A \leq n \cdot B \\ |A - B| & \text{otherwise} \end{cases}$$

列车运行调整还有一些其他的评价指标，如平均旅行时间，追求最小的列车旅行速度^[4]；如区间运行时分等，这些指标对城市轨道交通实际的运营效果和旅客满意度影响较小，不再赘述。

3 结束语

本文结合现场实际经验和前人的研究，提出了较为全面评估列车运行调整效果的几大性能指标，并对目标函数进行了优化，使之更加贴近实际情况和满足行车调度的需求，希望能对列车运行调整的研究起到一定的参考作用。

在进一步的研究中，可结合满意优化理论，对这些性能指标进行综合评价，得到综合满意优化目标函数，再结合人工智能等研究方法进行算

(上接 P49)

个值得重视的问题。形式化规范说明不仅能消除由于自然语言的二义性造成的软件缺陷，而且为设计具有更强揭错能力测试案例提供了便利条件。计算机联锁软件的安全需求非常复杂，本文结合具体的站场实例，基于 Event-B 方法，利用 Rodin 平台对信号开放、道岔控制、进路解锁等联锁系统关键安全规范进行了形式化模型描述和验证分析，给出了严格的分析结果，确保了系统的安全一致性，避免了系统设计过程中的缺陷和错误，为现阶段我国铁路信号安全关键软件的开发提供了借鉴。另外，计算机联锁规范本身还有一些安全漏洞，限于篇幅原因，本文并未做深入探索，若根据当前联锁系统中的故障逆向分析，再结合本文提供的形式化方法进行验证，相信会取得更好的成果。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国铁道部. 计算机联锁技术条件 [S]. 北京:

法分析和求解^[7~8]。

参考文献：

- [1] 胡海峰. 列车运行自动调整研究回顾与展望 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2011, 8 (6): 54-57.
- [2] 徐瑞华, 江志彬, 等. 城市轨道交通列车运行延误及其传播特点的仿真研究 [J]. 铁道学报, 2006, 28 (2): 7-10.
- [3] 章优仕, 金炜东. 单线列车运行调整目标体系与算法模型的研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009 (39): 248-254.
- [4] 彭其渊, 杨明伦, 聂勋煌. 单线区段实用货物列车运行图的优化模型及算法 [J]. 铁道学报, 1995, 17 (3): 15-20.
- [5] 张亦南. 基于 GA 的列车自动调整算法在 CBTC 系统中的应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [6] 肖 鹏. 城市轨道交通列车自动调整模型算法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [7] 陈彦如, 蒲 云, 蒋阳生. 复线列车运行调整的满意优化模型体系及算法 [J]. 科技通报, 2002, 18 (6): 463-469.
- [8] 陈彦如, 彭其渊, 蒋阳生. 复线列车运行调整的满意优化模型研究 [J]. 铁道学报, 2003, 25 (3): 8-12.

责任编辑 方 圆

中华人民共和国铁道行业标准, 2002.

- [2] Abrial, J-R. The B-book: Assigning Programs to Meanings[M]. Cambridge University Press,Cambridge. 1996.
- [3] Abrial, J-R. Modeling in Event-B: System and Software Engineering [M]. Cambridge University Press,Cambridge. 2010.
- [4] P.Behm, et al. Météor: A Successful Application of B in a Large Project[J].FM' 99-Formal Methods.1999: 712-722.
- [5] ZafarN.A. Formal specification and validation of railway network components using Z notation. Software[J]. IET, 2009, 3(4):312-320.
- [6] Hansen K.M. Modelling railway interlocking systems[EB/OL].1998. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary. doi=10.1.1.57.1120>.
- [7] Bowen J.Stavridou V.Safety-critical systems, formal methods and standards[J].Software Engineering Journal, 1993, 8(4): 189-209.

责任编辑 方 圆