

# 考虑投入产出的常规公交调度绩效回溯性动态评价

吴娇蓉<sup>1,2</sup>, 田子立<sup>1</sup>, 刘安娜<sup>3</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 城市交通研究院, 上海 201804;

3. 湖南省邵阳市邵阳县黄荆乡人民政府, 湖南 邵阳 422118)

**摘要:** 实时调度因其灵活性在公交运营组织中发挥着重要决策作用。现行调度(员)绩效评价虽然能够考核行车计划执行情况, 却忽略了在乘客体验和企业投入产出层面对调度效果考查, 也不支持回溯过往调度实施效果。为使调度员能够精准提升调度技能和绩效、解决调度决策滞后造成的运营浪费等问题并提高乘客满意度, 从投入产出及回溯性动态评价 2 个维度提出基于三阶段 Super-SBM (super-efficiency slack-based measurement) 模型的常规公交调度绩效评价方法, 考虑路况及客流对调度效果的影响, 在现行指标基础上从乘客角度增加运营速度、候车时间变化率及满载率标准差 3 项产出指标, 构建评价体系。对 2 条上海公交线路的实际调度进行回溯性评价, 验证了本文评价方法能准确区分调度效果差异。结果表明, 高峰时段灵活的调度策略比在平峰能产生更明显的效益, 且调度策略在不同时空场景呈现差异化适用性。通过回溯分析历史调度记录的绩效, 一方面可以针对各场景为调度员提供调度决策支持, 另一方面可为基于机器学习的公交实时调度策略生成技术挑选合适的学习样本, 从而提升常规公交运营组织效率。

**关键词:** 交通工程; 公交调度; 回溯性动态评价; 投入产出; 三阶段 Super-SBM 模型

中图分类号: U491

文献标志码: A

## Retrospective Dynamic Evaluation of Bus Scheduling Performance Considering Input-Output Relationship

WU Jiaorong<sup>1,2</sup>, TIAN Zili<sup>1</sup>, LIU Anna<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Urban Mobility Institute, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 3. People's Government of Huangjing Township, Shaoyang County, Shaoyang 422118, China)

**Abstract:** Real-time scheduling plays an important decision-making role in public transport operation

organization because of its flexibility. Although the current scheduling (or dispatcher) performance evaluation can assess the implementation of the bus schedule, it ignores the passenger experience and enterprise input-output evaluation of the scheduling performance. It also does not support backtracking the implementation performance of the scheduling in the past. In order to enable dispatchers to accurately improve their dispatching skills and performance, solve problems such as wasted capacity caused by lagging dispatching decisions and increase passenger satisfaction, from the two dimensions of input-output and retrospective dynamic evaluation, this paper proposes a performance evaluation method for bus scheduling based on the three-stage Super-SBM (super-efficiency slack-based measurement) model. Considering the impact of road conditions and passenger flow on the scheduling performance, and based on the existing indicators, three output indicators, i. e., travel speed, waiting time change rate, and standard deviation of load factor, are added from the perspective of passengers to build an evaluation system. The retrospective evaluation of the actual scheduling of two bus routes in Shanghai verifies that the evaluation method proposed in this paper can more accurately distinguish the difference in scheduling performances. The results show that the flexible scheduling strategy in peak periods can produce more obvious benefits than that in off-peak periods, and the scheduling strategy shows different applicability in different space-time scenarios. The retrospective analysis of the performance of historical scheduling records, on the one hand, can provide scheduling decision support for dispatchers in different scenarios, and on the other hand, can select appropriate learning samples for the real-time bus scheduling strategy generation technology based on machine learning, to

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 上海市科委科研计划(19DZ1208900); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 吴娇蓉, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为移动性规划。

E-mail: wjrshjtj@163.com

通信作者: 田子立, 硕士生, 主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: zltian@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

improve the efficiency of bus operation and organization.

**Keywords:** traffic engineering; bus scheduling; retrospective dynamic evaluation; input-output; three-stage super-efficiency slack-based measurement model

常规公交的运营组织是用于保障公交线路有序高效运行而采取的组织措施,可以分为静态运营组织即行车作业计划的编制,以及动态运营组织即实时调度。实时调度是现场调度人员依据行车组织方案,在营运路线的行车现场结合客流变化和车辆运行状况直接对行车人员下达行车调度指令的工作,且必须兼顾乘客满意度和公交企业运营效益。

调度员的工作经验、调度水平及应变能力对调度效果好与差有较大影响,直接影响公交运营水平,因此调度员绩效考核的关键部分即为“调度效果评价”。公交公司现阶段实行的调度绩效评价主要采用多指标的综合评价法,其中调度水平主要通过发车准点率、班次执行率、大间隔发生率3项指标进行考察,并重点关注早晚高峰的行车计划执行情况。然而现行方法却忽略了不同调度策略对公交服务和企业投入产出效益提升的作用,无法评估调度员实时快速、灵活处理各类运营问题的能力,也不能够支持调度员回溯过往采取的调度方式在不同时空场景的效果表现,难以精准提高调度技能和绩效,导致调度滞后于客流和路况变化、运能浪费等情况长期存在,乘客对公交运营组织的满意度较低。因此,亟需对调度绩效的评价指标体系和方法进行改进。

有关调度评价的研究常从乘客满意度、快捷性、可靠性、经济效益等角度选取指标,根据评价对象的不同而有所侧重:评价线网级别的调度效果<sup>[1-3]</sup>则会选用有效时间利用率、运能匹配度和运营利润等;而换乘率、周转时间、满载率等被用于比较调度方案优劣<sup>[4-6]</sup>。此外,最大、最小车头时距<sup>[7]</sup>可用于评估大间隔和串车现象的严重性,满载率适宜度<sup>[8]</sup>能反映调度对企业效益和乘客舒适度的兼顾情况。相比现行的9项评价指标,相关研究选取的指标能够更好衡量调度产生的综合效益,但难以说明效益提升是否与调度存在关联。为使调度绩效评价能够准确回溯调度的技术水平,应从计划执行和调度效果两方面选取更具针对性的指标,并注重效率的衡量和评价公平。

调度绩效往往需要从多个维度综合衡量,除现行调度绩效评价采用加权综合评价法以外,既有研

究常用层次分析法<sup>[1]</sup>、离散 Hopfield 神经网络<sup>[9]</sup>、灰关联分析<sup>[8]</sup>等模型评价调度效益。然而上述方法只评价调度工作的产出成效,忽略了公交企业非常关心的运营投入成本对单位调度效益的影响,需要同时考虑代表调度投入和产出的指标,用投入产出比衡量调度绩效。多投入、多产出系统最常采用随机前沿分析(Stochastic Frontier Approach, SFA)和数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA) 2类方法<sup>[10]</sup>,测算评价对象之间的相对效率。本文采用二者结合的三阶段 Super-SBM (super-efficiency slack-based measurement)模型<sup>[11]</sup>,其中一、三阶段采用改进 DEA 方法——Super-SBM 模型<sup>[12]</sup>,二阶段采用 SFA 方法,该模型能够排除运营环境变化对效率评价的干扰,从而更真实地反映实际调度绩效。

综上,针对现行调度绩效评价方法和现有研究的不足,提出一种考虑投入产出的调度(员)绩效回溯性动态评价方法。以班次执行率为投入指标,发车准点率、大间隔发生率、运营速度、候车时间变化率、满载率标准差为产出指标,路段速度、客流强度为环境变量,构建基于三阶段 Super-SBM 的公交调度评价模型,对调度记录进行动态评价,并回溯调度方式在不同时空场景实施的效果表现,一方面可以针对各种场景为调度员提供调度决策支持,提高常规公交运营组织效率,另一方面该评价方法也可应用于基于机器学习的公交线路实时调度策略生成技术,为机器学习挑选合适的调度策略学习样本以及决策参考变量。

## 1 调度绩效评价改进机理

实时调度是公交运营组织中最具灵活性的重要一环。由于行车作业计划依据历史数据呈现的一般性客流特征和运营经验制定,在面对实时变化的客流、道路等因素及突发事件时,仅依靠行车计划发车难以维持公交系统稳定运行,因此实时调度要求现场调度人员遵循3条原则:①落实行车作业计划;②明确公共交通同时具备公益性、服务性的双重性,兼顾乘客满意度和运营成本及收益;③机动灵活地处理运营中出现的各种问题。

表1为现行常用的调度(员)绩效评价方法,由9项指标组成,根据达标情况分别赋分并求和计算绩效。其中准点率又细分为首末班车准点率和起讫站发车准点率等;执行率分为班次执行率、高峰班次执行率、高峰出车执行率,旨在考查班次完成情况。这

种方法主要考核调度员对行车计划的落实情况,即考核原则①,但难以考核原则②和③。而追求投入产出效益、灵活处理运营问题是公交运营实时调度不可回避的目标,因此,原则②和③的考核也应纳入

调度绩效评价体系中。

对此,本文在保留部分现行评价指标的同时,从投入产出衡量和回溯性动态评价2个维度提出调度绩效评价改进方法。

表1 现行调度(员)绩效评价方法

Tab. 1 Current scheduling/dispatcher performance evaluation method

名称	标准分	达标标准/%	评分标准
调度员值勤准点率	10		迟到或早退,发生一次扣1分
首末班车准点率	10	100	首班或末班不准点,发生一次扣一分
起讫站发车准点率	15	83	下降1个百分点,扣1分
路牌准点加入率	10	96	下降1个百分点,扣1分
电子路单违规操作率	10		发生1次扣1分
全天班次执行率	10	95	下降1个百分点,扣1分
高峰班次执行率	10	98	下降1个百分点,扣1分
高峰出车执行率	15	98	下降1个百分点,扣1分
大间隔发生率	10	3	上升1个百分点,扣1分

### 1.1 投入产出衡量

现行调度绩效评价方法是将9项指标得分相加得到综合绩效,难以衡量调度带来的投入产出比的合理性,例如“班次执行率”等执行率指标的达标标准仅设置下限,意味着为适应客流强度降低而减少班次可能会扣分;相反如果班次执行率超过100%,增加了运营成本但没带来额外效益,甚至存在运能浪费,按照现行方法却不会扣分。经统计,现有公交线路中班次执行率超过100%的线路占比约20%,因此有必要增加投入和产出的评价视角,不应鼓励过多无额外效益产生、只为完成班次数量的无效投入。

另一方面,原则②要求实时调度应在控制运营成本的基础上提高服务水平,从而提高乘客满意度。在衡量投入产出时,公交调度的产出不仅是提高准点率、减少大间隔的发生,同时也应该是在合理投入下,提高乘客的服务满意度。因此,增加3个反映乘客切身体验的产出指标:运营速度、候车时间变化率、满载率标准差。运营速度和候车时间变化率分别考察调度对乘客车上时间和候车时间的影响,鼓励通过实时调度缩短乘客出行时间;满载率标准差反映运能与客流的匹配程度,低满载率能保证乘车舒适度,但过低的满载率代表运能的浪费,而满载率标准差则可以反映供需平衡情况。

衡量投入产出需要将评价指标分为投入和产出指标,实时调度通过增减班次改变公交运营成本,因此将班次执行率作为投入指标;产出分为2类,一类考察行车计划的执行情况,使线路上车辆保持运行的有序和稳定,包括发车准点率、大间隔发生率;一类为考察乘客满意度的指标。5个产出指标中的正

向指标作为期望产出,负向指标作为非期望产出。相应地,由于现行的综合评价法无法衡量投入—产出系统的绩效,因此本文采用三阶段 Super-SBM 模型描述投入产出关系并评价公交调度绩效,该模型将在维度二进一步介绍。

### 1.2 回溯性动态评价

回溯性动态评价是指通过对前一周期评价得到相对绩效值,筛选高绩效调度策略作为下一周期调度员或智能调度的学习参照。评价周期根据实际要求而定,例如一周、一月、一季度等。调度记录随评价周期动态更新,调度绩效高低的标准随之调整,因此调度绩效能够更客观公正地反映调度的有效性,并与调度工作的优化形成互馈机制。

现行评价采用9项指标加权的综合评价法,每项指标高于或低于某一阈值时扣分,最终求和计算总分。现行评价采用统一达标标准、权重,评价过程相互独立,未考虑路况、客流等运营环境变化对调度效果的综合影响,不同时间、线路的调度绩效难以横向比较。利用皮尔逊相关系数分析历史调度数据与环境变量的相关性相关系数如式(1):

$$C_{\text{orr}}(Y_e, O_e) = \frac{\sum_{e=1}^n (Y_e - \bar{Y})(O_e - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{e=1}^n (Y_e - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{e=1}^n (O_e - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

式中:  $Y_e, O_e$  分别为第  $e$  日的产出指标和环境变量;  $\bar{Y}, \bar{O}$  分别为产出指标和环境变量的均值。  $C_{\text{orr}}(Y_e, O_e)$  取值范围  $[-1, 1]$ , 正负表示正相关或负相关, 绝对值越大则线性相关程度越强。同时采用双侧 T 检验判断显著性, 结果如表2。现路段速度与发车准点率、大间隔发生率、候车时间变化率在 0.01



水平下显著相关,而客流强度与运营速度、满载率标准差等在0.01水平下显著相关,说明调度效果变差可能是由外部环境因素,而并非调度员自身调度不当引起。所以现行方法不支持回溯哪些时段的哪种调度方式对客流波动、关键站点发车大间隔调整最为有效,导致调度员缺少不同时空场景持续更新的优秀调度学习样本参照。

表2 环境变量与产出指标的相关性

Tab. 2 Correlation between environmental variables and output indicators

皮尔逊相关系数	产出指标				
	发车准点率	大间隔发生率	运营车速	候车时间变化率	满载率标准差
路段速度	0.467**	-0.374**	-0.033	-0.305**	-0.013
客流强度	0.009	0.163**	-0.476**	0.232**	0.280**

注:\*\* $p < 0.01$ 。

对此,提出基于三阶段 Super-SBM 模型的调度绩效回溯性动态评价方法,原理如图1所示。某一时段的调度记录为一个评价对象即决策单元(Decision Making Units, DMU),将评价周期内所有DMU的投入、产出指标同时输入模型中。第1、第2阶段的作用是消除环境因素对产出的影响:首先运用 Super-SBM 模型测算不考虑环境时各DMU的绩效值和各产出指标的松弛变量(即产出不足);然后将松弛变量作为被解释变量、环境变量(即线路运营环境,用路段速度和客流强度表示)作为解释变量,建立 SFA 模型,根据回归结果修正产出指标,从而使各决策单元的产出值具有可比性。

第3阶段输入各DMU的投入指标、修正后的产出指标,用 Super-SBM 模型计算最终绩效。Super-SBM 模型在评价某一DMU绩效时,其他DMU作为一个集合,该集合中的部分DMU会构成一个以现有的投入获得最大的产出的边界(即生产前沿面)。要评价的DMU的绩效高低取决于其与生产前沿面的关系,且随着投入和产出松弛程度的变化而严格单调递减:DMU位于生产前沿面上时为弱DEA有效,其绩效为1,此时不存在投入冗余和产出不足;DMU位于生产前沿面内时为DEA无效,绩效小于1,相比前沿面上的有效DMU,该DMU存在投入冗余或产出不足;DMU位于生产前沿面外时为强DEA有效,绩效大于1,说明该DMU比其他任何DMU的投入产出效率更高。

因此,三阶段 Super-SBM 模型不仅能从投入产

出角度合理衡量调度绩效,还能通过排除环境因素对调度产出的影响、随评价周期滚动更新调度评价结果,实现对调度绩效的回溯性动态评价,并且具有量纲一化、无需确定指标权重等优点。该模型针对不同时空场景(例如平峰、高峰等不同时段,上行、下行不同行车方向)分开评价,也可根据班次加权平均计算全天绩效,方便回溯适应多场景的优秀调度。

综上,调度绩效评价的改进机理如图1所示。

## 2 公交调度绩效评价指标

调度绩效评价指标体系由投入指标、产出指标和环境变量指标构成,如图1所示。其中产出指标选取分别从企业和乘客利益出发,又可根据正负方向分为期望产出和非期望产出;发车准点率、班次执行率、大间隔发生率为现行方法使用的指标,由于评价对象不再以天为单位统计,因此取消了全天、高峰的指标区分。

### 2.1 投入指标

投入指标即班次执行率 $\Delta G$ ,定义为评价时段内实际执行班次与计划班次数之比,即

$$\Delta G = \frac{G_r}{G_p} \quad (2)$$

式中: $G_r$ 为评价时段内实际执行班次数量; $G_p$ 为评价时段内计划班次数量。

班次执行率体现了调度员对运营成本的控制和投入产出之间的权衡。班次执行率小于1,实际运营成本小于计划运营成本,同时意味着发车频率降低;班次执行率大于1,表明在执行计划班次的基础上加开了加班车,提升运能的同时增加了运营成本。

### 2.2 产出指标

#### 2.2.1 企业角度

(1) 发车准点率 $A$ 。公交企业制定计划时刻表,并以此为依据开展运营服务。发车时刻直接受调度员控制,因此发车准点是企业对调度员的基本考核要求之一。“快一慢三”规则常被用于判断是否准点,即实际发车时间比计划时间早1min以内、晚3min以内均为准点。

$$A = \frac{\sum_a s_a}{G_r} \quad (3)$$

$$s_a = \begin{cases} 1 & -3 \leq t_{a,1} - t'_{a,1} < 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $s_a$ 为班次 $a$ 发车是否准点,准点则取1,否则取

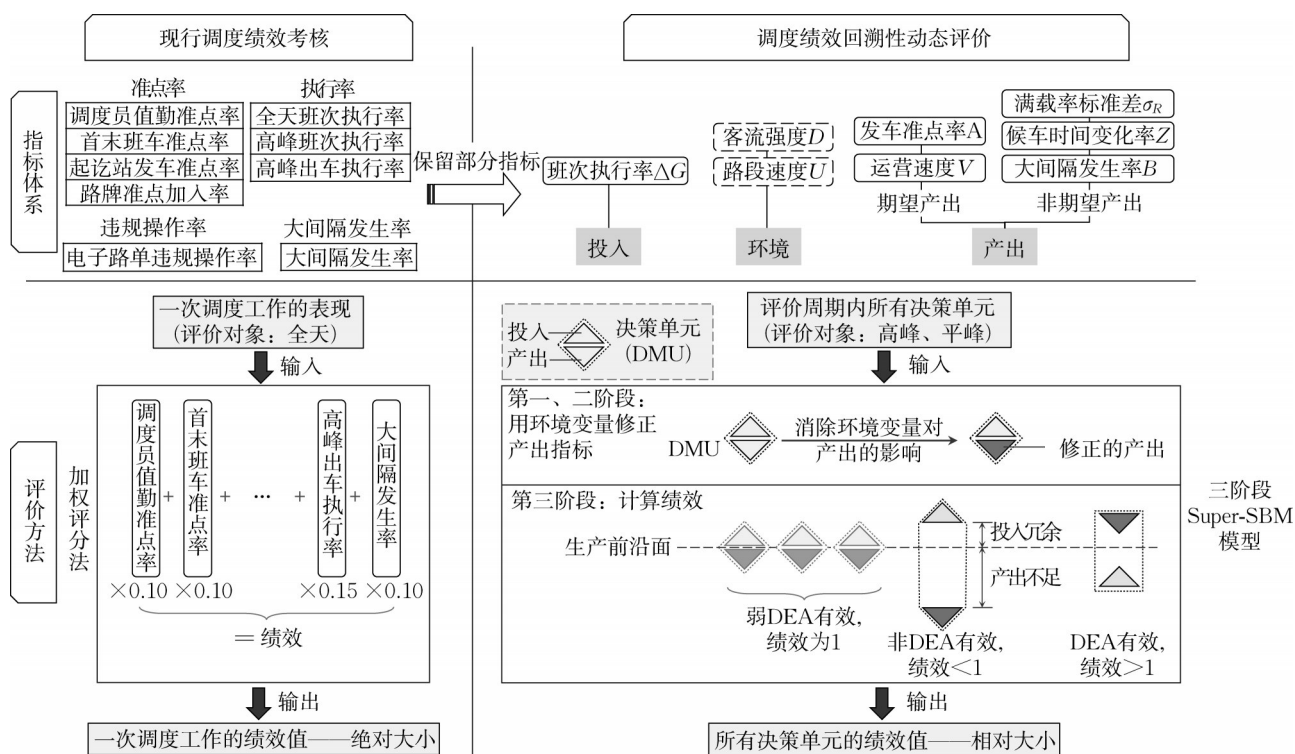


图1 公交调度绩效评价改进机理

Fig. 1 Improvement mechanism of bus scheduling performance evaluation

0;  $t_{a,1}$  为班次  $a$  实际发车时间;  $t'_{a,1}$  为班次  $a$  计划发车时间。计算发车准点率时不考虑加班车。若某计划班次未执行, 则按不准点处理。

(2) 大间隔发生率  $B$ 。企业希望保证运行的稳定性, 通过调度使前后车辆到达站点的时间间隔尽可能与发车间隔保持一致, 尤其不能发生“大间隔”和“串车”现象。“大间隔”和“串车”往往伴随产生, 因此用大间隔发生率描述稳定性, 大间隔发生率越小说明公交运行越稳定。

大间隔定义为前后车到达末站的实际时间间隔超过计划发车间隔的 1.5 倍。对于班次  $G_r$  产生的  $G_r - 1$  组前后车到达末站的实际时间间隔, 据式(5)分别判定是否为大间隔, 据式(6)计算大间隔发生率。

$$\theta_a = \begin{cases} 1 & t_{a+1,N} - t_{a,N} > 1.5(t'_{a+1,N} - t'_{a,N}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$B = \frac{\sum_{a=1}^{G_r-1} \theta_a}{G_r - 1} \quad (6)$$

式中:  $\theta_a$  为班次  $a$  与班次  $a+1$  是否产生大间隔, 产生大间隔则取 1, 否则取 0;  $N$  为总站点数;  $t_{a,N}$  为班次  $a$  到达末站时间。

### 2.2.2 乘客角度

公交调度的实际效果最终反映在乘客的乘坐体

验方面, 快速、可靠且舒适的服务才能提高乘客满意度。而调度工作可以通过增加班次等手段缩短乘客的候车时间和车上时间, 也可以通过调整发车时间、区间调度等方式应对大客流、客流不均衡等情况, 使供需关系更加匹配。

(1) 运营速度  $V$ 。指车辆从首站至末站的平均速度,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。运营速度越快, 乘客的车上时间越短。

$$V = \frac{60l}{t_{a,N} - t_{a,1}} \quad (7)$$

式中:  $l$  为线路长度,  $\text{km}$ 。

(2) 候车时间变化率  $Z$ 。假设乘客候车时间是车辆到站时间间隔的 0.5 倍, 结合刷卡的上车数据可以计算乘客平均候车时间, 如式(8):

$$W = 0.5 \times \frac{\sum_{a=1}^{G_r-1} \sum_{b=1}^N I_{a,b} O_{a,b}}{\sum_{a=1}^{G_r-1} \sum_{b=1}^N O_{a,b}} \quad (8)$$

式中:  $W$  为平均乘客候车时间;  $I_{a,b}$  为评价时段内班次  $a$  与  $a+1$  在第  $b$  站的到站时间间隔;  $O_{a,b}$  为在第  $b$  站上车乘坐班次  $a$  的乘客数。为了使不同发车间隔的线路可以横向比较, 计算候车时间变化率, 为

$$Z = \frac{2W}{\bar{I}} \quad (9)$$

式中:  $\bar{I}$  为评价时段内平均发车间隔,  $\text{min}$ 。

假设前后车辆的到站时间间隔始终等于发车间隔,则 $0.5\bar{I}$ 是乘客预期的平均候车时间。 $Z>1$ ,乘客候车时间比预期长; $Z<1$ ,乘客候车时间比预期短; $Z=1$ ,乘客候车时间与预期一致。该指标用于评估班次的增减对发车间隔的影响程度,并以每班次站点客流大小为权重综合评估调度员对大客流的响应能力,体现调度在缩短乘客候车时间方面的效果。

(3) 满载率标准差 $\sigma_R$ 。

$$R_a = \max \{r_{a,b} | a=1, 2, \dots, G_r, b=1, 2, \dots, N-1\} \quad (10)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_a^{G_r-1} (R_a - \bar{R})^2}{2G_r - 1}} \quad (11)$$

式中: $r_{a,b}$ 为班次 $a$ 在第 $b$ 站与第 $b+1$ 站间的断面满载率; $R_a$ 为班次 $a$ 的最大满载率; $\bar{R}$ 为最大满载率的均值。

满载率标准差一方面从满载率波动反映运能与客流的匹配度,另一方面由于其仍具有量纲,其大小与平均满载率水平也相关。因此满载率波动越小或平均满载率越低, $\sigma_R$ 都会越低,说明调度越能够通过有限的班次为乘客提供宽松舒适的乘车环境。

产出指标中发车准点率、运营速度为正向指标,作为期望产出;大间隔发生率、候车时间变化率、满载率标准差为负向指标,需要进行控制,作为非期望产出。

### 2.3 环境变量

调度评价模型能够排除外部环境差异对调度效果的影响。选取路段速度和客流强度作为环境指标。

(1) 路段速度 $U$ 。路段速度是指小汽车在特定时段按公交线路走向行驶的行程速度,用以反映公交行驶路段的拥堵情况。车辆运行的稳定性受路况影响,道路拥堵容易造成公交“串车”现象,使车辆到站时间不稳定、乘客候车时间增长,给调度带来不小挑战。路段速度按线路、上下行、星期、时段分情况从百度地图API获取。

(2) 客流强度 $D$ 。客流强度为评价时段内平均每小时上客量,人次 $\cdot h^{-1}$ 。

$$D = \frac{60U_T}{T} \quad (12)$$

式中: $U_T$ 为评价时段内总上客量; $T$ 为评价时段总时长。

如果客流强度大,客流波动的可能性更高,因此大客流会增加调度工作难度,导致大间隔发生率等

产出指标比客流平稳条件时表现更差,需予以修正。

## 3 调度绩效回溯性动态评价方法

回溯一段时间内每条线路的调度记录,根据运营特征的相似性划分时段,每个时段的调度记录作为一个评价对象(即DMU)。将所有决策单元的投入、期望产出、非期望产出和环境变量输入三阶段Super-SBM模型,可得到每个决策单元的相对绩效值。随着评价周变化,作为调度有效标准的前沿面动态更新,可实现调度绩效的动态评价。三阶段Super-SBM模型的第1、第3阶段为Super-SBM模型。

### 3.1 Super-SBM 模型

Super-SBM模型用于测算DMU的调度绩效值,具有较好的区分度。输入 $n$ 个DMU的3类指标: $m$ 个投入指标、 $c_1$ 个期望产出指标和 $c_2$ 个非期望产出指标,所有输入指标均为正数,向量形式分别表示为 $x \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^{c_1}, z \in \mathbb{R}^{c_2}$ ;矩阵形式为 $[x_1, \dots, x_n] \in \mathbb{R}^{m \times n}, [y_1, \dots, y_n] \in \mathbb{R}^{c_1 \times n}, [z_1, \dots, z_n] \in \mathbb{R}^{c_2 \times n}$ 。

首先用传统SBM模型计算效率 $\rho_{1k}$ ,再用Super-SBM模型计算效率 $\rho_{2k}$ ,则第 $k$ 个DMU的绩效 $\rho_k = \rho_{1k} \rho_{2k}$ 。假设规模报酬可变(VRS),则传统SBM模型为

$$\min \rho_{1k} = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{w_{x,i,k}}{x_{i,k}}}{\frac{1}{c_1 + c_2} \left( \sum_{h=1}^{c_1} \frac{w_{y,h,k}}{y_{h,k}} + \sum_{q=1}^{c_2} \frac{w_{z,q,k}}{z_{q,k}} \right)} \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_{i,k} = \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + w_{x,i,k} & i=1, \dots, m \\ y_{h,k} = \sum_{j=1}^n y_{hj} \lambda_j - w_{y,h,k} & h=1, \dots, c_1 \\ z_{q,k} = \sum_{j=1}^n z_{qj} \lambda_j + w_{z,q,k} & q=1, \dots, c_2 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ w_{x,i,k} \geq 0; w_{y,h,k} \geq 0; w_{z,q,k} \geq 0; \lambda_j > 0, \forall i, j, h, q \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中 $w_{x,i,k}$ 、 $w_{y,h,k}$ 和 $w_{z,q,k}$ 均为松弛变量,实际含义分别为第 $k$ 个DMU第 $i$ 项投入的冗余值、第 $h$ 项期望产出的不足值和第 $q$ 项非期望产出的冗余值。 $\rho_{1k} = 1$ 表示DMU是DEA有效,此时松弛变量均为零; $\rho_{1k} < 1$ 表示DMU是DEA无效的,该DMU表示



的调度过程相比有效DMU仍存在调度绩效提升的空间,根据松弛变量是否为零判断是否需要缩减运能投入或提高运营效益。

Super-SBM模型可进一步区分有效DEA的绩效值,表示为

$$\min \rho_{2k} = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}}{x_{i,k}}}{\frac{1}{c_1 + c_2} \left( \sum_{h=1}^{c_1} \frac{\bar{y}}{y_{h,k}} + \sum_{q=1}^{c_2} \frac{\bar{z}}{z_{q,k}} \right)} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{i,j} \lambda_j & i=1, \dots, m \\ \bar{y} \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{h,j} \lambda_j & h=1, \dots, c_1 \\ \bar{z} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n z_{q,j} \lambda_j & q=1, \dots, c_2 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \bar{x} \geq x_{i,k}; \bar{y} \leq y_{h,k}; \bar{z} \geq z_{q,k}; \lambda_j > 0, \forall i, j, h, q \end{cases} \quad (16)$$

$\rho_{2k}$ 的取值范围为不小于1。最终的绩效值 $\rho_k$ 存在3种情况, $\rho_k > 1$ 为DEA强有效, $\rho_k = 1$ 为DEA弱有效, $\rho_k < 1$ 为DEA无效,该值越大说明绩效越高。

### 3.2 三阶段Super-SBM模型

三阶段模型的核心是在第2阶段使用随机前沿分析对投入或产出的松弛变量与环境变量回归,根据回归结果对投入产出进行调整。对于公交运营,路况、客流等环境变量往往影响产出指标,而不直接影响公交运营投入,因此第二阶段只对产出指标进行修正。

(1)第1阶段:Super-SBM模型。将评价周期内所有DMU的班次执行率、发车准点率等投入产出指标输入Super-SBM,得到未考虑环境影响时各DMU的绩效值及产出的松弛变量。

(2)第2阶段:随机前沿分析。第1阶段得出的绩效值并不能体现出真实的效率水平,因此构建随机前沿模型,以消除环境因素和随机误差因素对绩效值产生的影响。模型设定为

$$w_{i,j} = f(Z_j; \beta_i) + v_{i,j} - u_{i,j} \quad (17)$$

$$v_{i,j} \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (18)$$

$$u_{i,j} \sim N^+(0, \sigma_u^2) \quad (19)$$

式中: $w_{i,j}$ 为第 $j$ 个决策单元在第 $i$ 种产出上的松弛量; $Z_j$ 为由客流强度、路段速度2项环境变量组成的

向量; $\beta_i$ 为待估参数; $v_{i,j}$ 为随机因素造成的干扰, $u_{i,j}$ 为管理无效率项,二者相互独立,与 $Z_j$ 不相关。式(18)表示 $v_{i,j}$ 符合正态分布,而式(19)表示 $u_{i,j}$ 符合半正态分布。定义 $\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$ , $\gamma$ 为管理无效率占总决策单元无效率的比重。采用极大似然估计对待估参数和 $\gamma$ 进行估计后,便可以将投入和产出中环境因素和随机因素的干扰剔除掉。仅考虑环境因素的影响,调整公式如式(20)所示:

$$Y_{i,j}^* = Y_{i,j} + \left[ \max_j \left\{ Z_j \beta_i \right\} - Z_j \beta_i \right] \quad (20)$$

式中: $Y_{i,j}$ ,  $Y_{i,j}^*$ 分别为调整前后的产出数据; $\left[ \max_j \left\{ Z_j \beta_i \right\} - Z_j \beta_i \right]$ 为剔除环境因素的影响的修正项。

(3)第3阶段。将投入指标和调整后的产出指标代入Super-SBM模型,得到具有可比性的考虑运营环境差异的调度绩效值。

## 4 调度绩效评价实例分析

### 4.1 常规公交调度案例

以上海59路和538路公交车线路作为研究案例(图2)。上下行方向各由一名调度员负责调度,且换班时间为14:00。为确保指标计算合理及评价针对性,依据运营时段和调度员换班时间对各线路方向划分评价单元,按发车时间将班次分为4类:7:00—9:00出发为早高峰班次;16:30—18:30出发为晚高峰班次;14:00前发车的其他班次为早平峰班次;14:00后发车的其他班次为晚平峰班次。因此可将一天内各线路、方向的调度记录划分为4个评价单元,对2020年12月至2021年5月的2条线路运营数据处理后,共得到1216个评价单元。

将投入变量、期望产出变量和非期望产出变量代入Super-SBM模型,得到第1阶段的绩效值和各变量的松弛变量。第2阶段利用FRONTIER 4.1软件对期望产出和非期望产出的松弛变量做随机前沿分析,修正产出变量。第3阶段将投入变量、调整的产出变量再代入Super-SBM模型,得到最终的绩效值。

如图3所示,在1216个调度单元中,评价指数最高为1.44,最小为0.48。超效率模型使得绩效值



图2 59路与538路公交线路图

Fig. 2 Map of bus route 59 and 538

可以大于1,占总数的3.5%。大部分评价指数处于0.6~0.8区间,占总数的79.7%。为与现行评价分值统一,下文将三阶段Super-SBM模型的绩效值扩

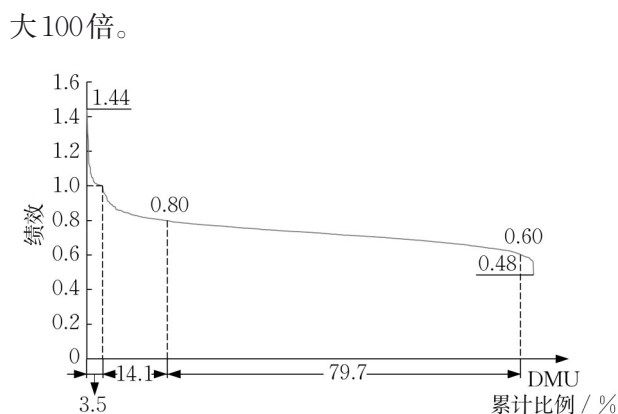


图3 调度绩效值分布

Fig. 3 Distribution of scheduling performance value

#### 4.2 与现行评价方法对比

为了验证本文的三阶段 Super-SBM 模型优于现行评价方法(表 1),设计了 4 个调度评价样本,其中一个作为参照、3 个作为对照,对比三阶段 Super-SBM 模型与现行评价方法的评价结果差异。4 个样本的属性如表 3。

表3 样本属性  
Tab. 3 Properties of samples

样本	时段	班次		$\Delta G$	期望产出		非期望产出			环境变量	
		计划	实际		$A$	$V$	$B$	$\sigma_R$	$Z$	$U$	$D$
参照组	平峰	38	38	1.00	0.92	13	0.16	0.4	1.00	21	150
	高峰	14	14	1.00	0.79	11	0.50	0.3	1.00	15	600
	全时段	52	52	1.00	0.88		0.25				
对照1	平峰	38	42	1.11	0.93	13	0.17	0.4	1.00	21	150
	高峰	14	14	1.00	0.79	11	0.50	0.3	1.00	15	600
	全时段	52	56	1.08	0.89		0.25				
对照2	平峰	38	34	0.89	0.91	13	0.21	0.4	1.12	21	150
	高峰	14	18	1.29	0.83	11	0.11	0.1	0.78	15	600
	全时段	52	52	1.00	0.88		0.17				
对照3	平峰	38	38	1.00	0.82	13	0.16	0.4	1.00	17	150
	高峰	14	14	1.00	0.71	11	0.71	0.3	1.00	11	600
	全时段	52	52	1.00	0.79		0.31				

表4中,①参照组:班次执行率为1。②对照1:平峰增加4班次,产出指标与参照组基本一致。③对照2:平峰减少4班次、高峰增加4班次,全时段班次执行率仍为1,但大间隔发生率由0.25降至0.17,高峰满载率标准差由0.3降至0.1,候车时间在平峰略有增加、高峰有所缩短,整体调度效果优于参照组。④对照3:班次不变,但路段速度由21、15km·h<sup>-1</sup>降至17、11 km·h<sup>-1</sup>,班次准点率由0.88下降至0.79,大间隔发生率由0.25上升至0.31。

现行评价体系的绩效根据全时段数据计算,假设调度员值勤准点率、首末班车准点率、电子路单违规操作率均不扣分,其他指标按照评价标准计算得

分。而三阶段 Super-SBM 模型考虑到运营特征的时间差异,分别计算平峰和高峰的绩效分数,需要加权得到具有可比性的全时段绩效。由于高峰时段公交调度的受益乘客更广,权重应更大,因此用高峰与平峰的客流强度比例作为高峰与平峰的权重,加权计算全时段绩效。4 个样本的评价分数如表 4 所示。

由表4可见,三阶段 Super-SBM 模型结果对投入、产出及环境变化更敏感。对照1增加了班次,但运营和服务水平没有提升,意味着对照1比参照样本增加了无效的投入,因此三阶段 Super-SBM 模型给出比参照组绩效 76.4 更低的评估结果 74.5,而表1现行评价方法给出的对照1与参照组评分相同,无



表4 样本评价结果对比

Tab. 4 Comparison of evaluation results of samples

样本	情景	现行评价分数	三阶段 Super-SBM 分数
参照组	班次执行率为1	90.0	76.4
对照1	增加班次,效果相同	90.0	74.5
对照2	班次不变,效果更好	90.0	79.5
对照3	班次不变,路况更差,效果更差	87.7	73.9

法从投入产出角度评估调度绩效。对照2总班次不变,但将部分平峰班次转移至高峰时段以匹配不均衡的客流,降低了大间隔发生率和高峰满载率标准差,因此三阶段 Super-SBM 模型给出比参照样本更高的绩效79.5;而现行方法给出了与参照样本相同的90.0分,这是由于按照现行标准大间隔发生率的10分扣满为止,而实际超过90%的样本均扣10分,导致大间隔发生率的改善难以评估。对照3路况更差,调度效果受到影响,三阶段 Super-SBM 模型修正了环境因素的影响,比不修正的评价模型分数下降幅度更小,能更公平地评价调度员的调度绩效。

#### 4.3 调度绩效差异

分线路进行对比,2条线路的平均调度评价指数接近,说明2条线路的调度员水平相当,但均呈现上行小于下行的特点,59路上行和下行的平均绩效分数为72.0、75.5,538路上行和下行的平均绩效分数为73.2、75.6,并且上行绩效分数变化波动均比下行更大。

分星期和时段对比,图4中每日的时段从左到右依次为早平峰、早高峰、晚高峰和晚平峰。一周中评价指数最高的是星期日早高峰,平均81.5;最低的是星期五早平峰,平均69.6。在一周中星期三平均调度评价指数最高,为75.8;星期五平均调度评价指数最低,为72.1;这可能说明星期三的客流规律性较强,调度员易于掌握合适的调度方式,而星期五作为工作日最后一天则相反。一天中各时段的评价指数差异更为明显,高峰时段高于平峰时段,其中早高峰77.7,晚高峰74.5,早平峰71.6,晚平峰72.4,说明调度工作在高峰时期能带来更明显运营效率提升。

#### 4.4 调度方式效果回溯性分析

本文研究的59路及538路调度方式主要分为空放、放站和区间三大类型。空放指中途不停站载客,主要用于完成班次执行率,同时加快另一终点站的车辆周转;放站指从指定中途站点载客到终点站;区间指从某站点载客到某非终点站并调头的调度方式,如图5所示。

同一调度方式在不同时空场景实施能产生不同

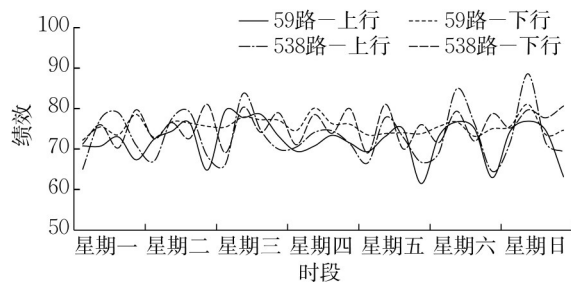


图4 各时段调度绩效分数

Fig. 4 Scheduling performance score of each period

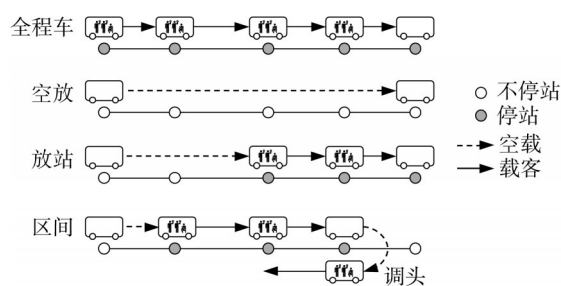


图5 公交调度方式示意

Fig. 5 Schematic diagram of bus scheduling mode

的效果,回溯性分析可以筛选出适用于早晚高峰或平峰、不同运行区间的最优调度策略。筛选半年内使用次数超过3次的调度方式共10种,其使用频次和平均的绩效如图6所示。

59路一般采取区间调度方式,但存在不同的区间段。绩效最好的是上行区间调度即“在晚高峰载客至五角场(翔殷路)调头”,分数79.8,但该方式在早高峰及平峰效果不佳,绩效均低于70;而上行区间调度“载客至五角场(邯郸路)调头”在早高峰实施效果最好,分数78.2,在晚平峰实施效果最差,2种调度方式区别在于是否过关键交叉口——五角场交叉口调头,并且在不同时段绩效差距较大,因此调度员应根据不同时段适应不同的路况及客流规律采取差异化的调度方式。

538路应用的调度形式类型更多,上行在早高峰放站到五角场或控江新村的绩效最高,分别为84.9和83.8,但在平峰“放站到五角场”的绩效仅64.5,说明该线路早高峰期间客流在前后两区间不均衡,可采用区间调度,但不适用于平峰;538路全程空放的效果一般,全程空放是一种没有直接收益的投入,采用该调度方式时应谨慎;“在五角场调头载客”在早高峰和晚高峰实施的效果均不佳,绩效低于70。虽然538路在不同时段的实施同一调度方式的效果相近,但调度方式之间存在明显差异,因此对于538路需要慎重选择合适的调度方式。

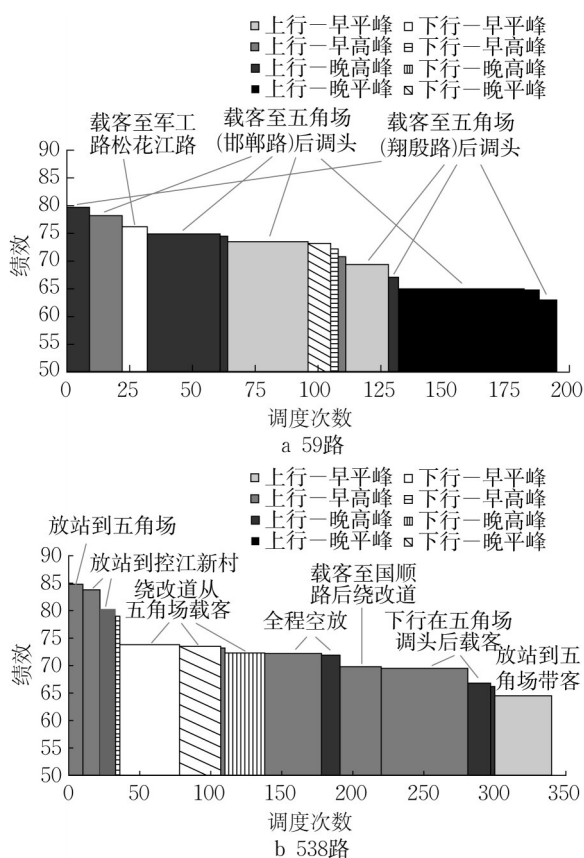


图6 不同公交调度方式的绩效

Fig. 6 Performance of different bus scheduling modes

## 5 结论

针对现状公交调度评价的问题,从投入产出视角及回溯性动态评价2个维度提出改进方法,建立基于三阶段Super-SBM模型的公交调度绩效评价模型。从乘客角度增加运营速度、候车时间变化率及满载率标准差3项产出指标,能够考察调度员面对客流不均衡响应大客流的能力以及对乘客满意度的提升的能力;Super-SBM模型作为一类数据包络分析模型,能基于投入产出关系评价生产效率,能够改进现行综合评价法权重及临界标准不合理问题,鼓励调度员兼顾运营成本和效益;考虑路况等客观环境对调度效果的影响,采用三阶段模型抵消环境变量对调度产出的影响,更真实反映调度员的调度水平。该评价模型能作为回溯调度策略实施是否有效的依据,为多场景下的公交实时调度策略优化提供导向价值。

以上海59路与538路公交线路作为调度绩效评价案例,通过设计4种典型调度场景,对比现行评价方法及本文评价方法的评价结果,验证了本文提出

的三阶段Super-SBM模型能更真实地反映调度水平和效益,绩效评价更具区分度。

本文仅采用了2条公交线路调度数据作为评价模型样例,在后续研究中建议采用线路更多、时间和空间跨度更大的数据,进一步讨论该评价模型的适用性。另外,本文未考虑客流、路况之外的其他环境对调度效果的影响,例如天气,建议考虑更多环境变量对绩效评分加以修正,提高评价方法的准确性。

### 作者贡献声明:

吴娇蓉:论点提出,论文构思,论文撰写,论文修改与校订。

田子立:方法论提出,模型实现与结果分析,论文撰写。

刘安娜:文献梳理,数据处理。

### 参考文献:

- [1] 林福成,靳文舟,符韦韦,等. 公交运营调度优化的评价指标模型研究[J]. 科学技术与工程. 2010, 10(1): 324.  
LIN Fucheng, JIN Wenzhou, FU Weiwei, et al. The study of evaluation index model about the optimization of bus scheduling [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(1): 324.
- [2] LIU Z Q. The bus line network efficiency evaluation algorithm based on the theory of fuzzy and hierarchical analysis [C]// Proceedings of the 2012 2nd International Conference on Computer and Information Application. Paris: Atlantis, 2012: 1086-1088.
- [3] 卢蝶,靳文舟. 基于累积前景理论的公交调度优化灰关联评价方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(3): 608.  
LU Die, JIN Wenzhou. Grey correlation evaluation method of public traffic vehicles scheduling optimization based on cumulative prospect theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2013, 37(3): 608.
- [4] 禹伟,冯勇. 公交调度方案评价的灰色聚类分析方法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2016, 14(1): 49.  
YU Wei, FENG Yong. Gray clustering analysis for bus scheduling scheme evaluation [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2016, 14(1): 49.
- [5] 毛霖. 公交智能化运营调度评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
MAO Lin. Research on the evaluation method of intelligent public transport scheduling [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [6] 马晓磊,沈宣良,张钊,等. 基于拉格朗日松弛算法的自动驾驶公交调度优化研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 10.  
MA Xiaolei, SHEN Xuanliang, ZHANG Zhao, et al. Optimization of autonomous bus scheduling based on lagrangian

(下转第821页)