

城市机动式辅助客运方式时间效用改进

沈 犁¹, 杨京帅², 王周全¹, 于海淞¹

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为增强机动式辅助客运系统(MAST)的实用性,以在尽量保持其运营特性的基础上提高系统的服务能力,基于对 MAST 乘客的时间效用分析,提出了在机动化服务区域内,除控制站点外进一步设置对应主要需求源点的集散点的服务改进模式,并针对有无设置集散点的情况分别建立了基于不同起讫点服务模式的乘客总体时间效用的函数评价模型,最后利用仿真算例结合定性与定量分析验证了改进模式的有效性。研究表明:在矩形区域中设置集散点能有效提高 MAST 的系统效用;“集散点起-全区域讫”的服务模式在常态需求发生概率下对于矩形服务区域具有最大的总体效用,具有高度可行性与适用性;该模式虽然在某种程度上降低了乘客乘车便利性,但会节约大量无效的绕行与停车时间,也能避免需求点详细定位以及某些需求点不适宜停留的问题,同时仍可保持乘客目的地的分散性,以保留其直达优势性。

关键词:交通工程;城市交通;机动式辅助客运系统;5 种服务模式;时间效用评价模型;集散点设置;最小时间效用损失

中图分类号:U419.17

文献标志码:A

Improvement on service time utility of urban mobility allowance shuttle transit (MAST)

SHEN Li¹, YANG Jing-shuai², WANG Zhou-quan¹, YU Hai-song¹

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To improve the practicability of mobility allowance shuttle transit and its systematical service capacity on the basis of trying to keep the characteristics of its operation mode, based on time utility analysis of MAST passenger, a model to improve service of aggregation points was proposed by further setting corresponding main demand of mechanization service area checkpoints except in control point. Evaluation models of passengers' time utility based on aggregation points was set. Finally, the validity of the improved model was verified by simulation example combining quantitative and qualitative method. The results show that setting up aggregation points in rectangle zones can improve efficiency systematic utility of MAST. The "limitative origins & region-wide destination" service mode has the biggest overall utility in rectangle service area under normal possibility of demand occurrence, showing high feasibility and applicability. Although the mode lowers the convenience of transport for passengers to some extent, it cuts down time for making much invalid spot stop and detour and avoids problems of detail location of

demand spots and inadequate stop in some demand sport, meanwhile maintaining the dispersiveness of passengers' destinations to retain its advantage of arriving directly. 2 tabs, 2 figs, 20 refs.

Key words: traffic engineering; urban traffic; mobility allowance shuttle transit (MAST); five service modes; time-cost-effectiveness evaluation model; aggregation point set-up; minimum time utility loss

0 引言

机动式辅助客运系统(mobility allowance shuttle transit, MAST)是一种融合了固定线路公交系统低运行成本以及需求响应公交系统机动性的辅助式客运系统,属于“柔性公交”的研究范畴:①服务区域,MAST 系统的服务区域通常为确定的矩形或环形区域范围,在此区域内部 MAST 系统的运行线路是根据乘客需求的动态变化进行实时调整,但不能驶离此区域;②基准线路,MAST 系统需根据服务区域设定基本的公交车辆行驶线路,作为在某段服务区域内无离散乘客需求时的固定运行线路,通常为服务区域的中心线,服务区域两侧边界与基线的最大间距即为最大可偏离距离;③控制站,MAST 系统会在基准线路上布设特定的控制站点,运行在两控制站间服务区段内的公交车辆必须在规定的时间内从首端控制站出发,且在规定的时间内到达末端控制站,以最大限度地保证行车计划的准点率与可靠性;④弹性时间,MAST 系统要求必须根据实时需求设定适当的供车辆偏离基准线路行驶的时间。MAST 系统的运营过程可表述为:公交车辆在限定的服务区域内围绕基准线路运行,并可在弹性时间内根据乘客需求的实时变化偏离基准线路行驶以实现区域接送,同时在运行过程中不能违反各控制站的时间约束^[1-7]。在 MAST 系统中,乘客可以在全日公交服务时段内通过电话、网络预定或者直接使用站点处设置的乘客终端设备提出出行需求,说明其所需上下车的具体期望位置与期望时间,然后由系统安排公交车辆在不违反时空约束的情况下最大限度地满足乘客需求,因此其通常具有较高的系统服务水平。但由于 MAST 系统服务能力较为有限,当乘客需求量超出系统一次区域运行所允许的弹性时间内能提供的服务时,则会令乘客流失,造成总体效用损失。

自 Cortés 等提出柔性公交理念以来^[1-2],Quadri-foglio 等逐步对 MAST 系统的能力设计进行了完善^[3-16],如以插入式启发算法为 MAST 系统配时^[3]、以连续逼近方法计算 MAST 系统车辆的径向速度区间^[4]、在不同服务区形状条件下进行系统性能灵敏度分析^[5,12]、评估不同运营情景下的必要车

辆数配置以及分析在限定服务水平条件下其服务区域范围与周期时间的关系^[6,13,15]等,同时还对比分析了传统的固定型服务系统(fixed route transit, FRT)与柔性公交系统两者在时间、费用等效益方面的优劣^[8-10,16]。但上述研究均为在现有系统服务方式与水平的基础上寻求更加优化的调度算法,极少从改进系统服务模式方面进行考虑。为此,本文从满足尽可能多的有效乘客需求出发,基于 MAST 系统的时间效用进行服务模式的改进研究,并建立相应时间效用评价模型,以探讨在适当降低系统服务水平的同时有效增强系统服务能力的可行性。

1 机动式辅助客运系统效用改进

根据起讫点与时间点约束,MAST 乘客需求可以划分为 PD(控制站起讫)、PND(控制站起-全区域讫)、NPD(全区域起-控制站讫)、NPND(全区域起讫)4 种形式^[3,17]。根据以上 4 种形式的需求划分,本文在 Daganzo^[18]所做分析的基础上提出在服务区域内控制站间的主要需求集聚片区进一步设置集散点,以适度集中乘客需求,乘客仍可在全日公交服务时段内通过电话、网络预定系统或者直接使用集散点及控制站处设置的乘客终端设备来向中心系统提出出行需求,中心系统在确定需求的时间(起讫)可行性与空间(起讫)有效性后进行行程安排并给予乘客信息反馈,而在未收到某集散点需求信息时运行车辆可不经行此集散点;对于集散点的设置,本文建议首先对服务区域按道路分界进行片区划分,依据各片区区位局部效应对各片区进行集聚强度评价,在主要考虑片区集聚性以及集散点影响半径的基础上设立集散点,并根据基准线路走向以及可偏离距离长度标定其优先序列。

本文基于集散点的设立,考虑 5 种模式的 MAST 服务:第 1 种为全区域起讫模式(即为标准 MAST),要求满足以上 4 种形式的有效乘客需求,不设置集散点且在服务区域内任何地点均可上下乘客;第 2 种为集散点起讫模式,要求满足 PD 形式的有效乘客需求,仅在控制站或集散点停留以上下乘客;第 3 种为全区域起-集散点讫模式,要求满足 PD、NPD 形式的有效乘客需求;第 4 种为集散点起-

全区域乞模式,要求满足 PD、PND 形式的有效乘客需求;第 5 种为设置有集散点的全区域起讫模式。

当实行第 3 种模式时,乘客在约定的时段与出发点上车后,在离其目的地最近的集散点(包括控制站)下车,然后步行或采用其他方式抵达最终目的地;实行第 4 种模式时,乘客先步行或采用其他方式抵达离其出发点最近的集散点(包括控制站),再在约定时段内上车,然后由公交直接送达其目的地下车。前者与本次出行相关联的非在乘行为发生在公交服务之后,而后者相关非在乘行为则发生在公交服务之前;两者相较而言,后者保持了按目的地送达服务的分散性,更为符合需求响应的区域内直达特性,同时避免了出发点精确定位、乘客有效辨识以及出发点停车适宜性与干扰性等问题。同时,相比第 1 种标准 MAST 模式,这 2 种模式均增加了服务区域内的“盲区”,排除了部分可行有效需求,并可能导致一定程度的效用损失。

1.1 效用模型建立

本文从定量的角度分析建立 5 种不同 MAST 服务模式下的时间效用评价模型,主要考虑在具有 2 个控制站的矩形服务区域中 5 种不同系统服务模式单车单次无回驶运行时的总体时间效用。由于在确定的服务区域内已限定单次运行时间间隔,因此不考虑多次折返运营的时间演变情况,同时借鉴了 Quadrifoglio 等提出的插入式启发算法来建立系统总效用模型^[3,5-6]。

1.1.1 区域运行概况表述

设两端控制站分别为 G_1, G_2, L 为两控制站间基线长度, W 为服务区域半径(即最大可偏离距离), H 为单位时间单位面积有效乘客需求发生强度, g 为单位面积集散点密度, t 为两控制站间的约束时间间隔, v 为车辆平均运行速度, w_i 为平均离返距离(包含起点或讫点可能的偏离及回返基线距离,假设极端情况下每次偏离基线后均按原路径回返以便于对比), $w_i/2 < W$ 且 w_i 与 W 正相关,其中 i 为第 i 种系统运行模式, $i=1, 2, \dots, 5$ 。由于最大弹性时间限制了区域可行需求数,因此设 k_i 为第 i 种模式单位时间单位面积有效乘客需求的可行服务强度,同时假设各模式下总可行服务需求数均不会超过车辆最大可载人数,则区域面积 A 为

$$A = 2LW \quad (1)$$

有效乘客需求发生数 n 为

$$n = AtH \quad (2)$$

1.1.2 区域需求形势表述

设 PD、PND、NPD、NPND 这 4 种形式需求发

生概率为 p_{ij} , 则

$$\sum_{j=1}^4 p_{ij} = 1, j = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

4 种需求发生强度为 np_{ij} , 虽然 p_{i2} 与 p_{i3} 有效分布概率应相等,但两者可行概率不一致,当 $k_i \geq H$ 时一般均为可行有效需求;如果 $k_i < H$ 则必然存在不可行有效需求,因此引入虚拟变量 D_i

$$D_i = \begin{cases} 1, & m_i < n \\ 0, & m_i \geq n \end{cases} \quad (4)$$

此处可行需求数 m_i 为

$$m_i = Atk_i^D H^{(1-D_i)} \quad (5)$$

不可行需求数 \bar{m} 为

$$\bar{m} = D_i(n - m_i) = D_i At(H - k_i) \quad (6)$$

1.1.3 乘客时间效用损失计算方式分析

对于 MAST 系统的总体乘客时间效用来说,主要存在 2 类效用损失:第 1 类为系统可行服务需求效用损失;第 2 类为系统不可行服务需求效用损失。而每个可行乘客时间效用的缺失皆受到两部分影响,第 1 部分为与预期时间(包含等待与车载时间)不一致的实际运行时间延误影响;第 2 部分为由于在弹性时间约束内增加可行服务所引致的偏离各乘客自身最优线路的时间延误影响。在引入集散点策略后,由于部分需求不能实现完全的点到点服务,从而增加了步行时间所致的效用损失,因此对于总时间效用评价,设立乘客总体时间效用为预期总时间效用减去可行需求效用损失和不可行需求效用损失,而可行需求效用损失为最优运营时间延误(即在理想系统状态下的必要延误时间)、需求干扰总时间延误与步行时间效用损失之和,因此设 t_{PW_i}, t_{PR_i} 为乘客预期的平均等待时间与车载时间,乘客预期总时间 T_{P_i} 为

$$T_{P_i} = n(t_{PW_i} + t_{PR_i}) \quad (7)$$

设 T_{W_i}, T_{R_i} 分别为可行乘客的等待总时间与车载总时间, t_{W_i}, t_{R_i} 分别为理想系统无延误最优服务(即各模式下每名乘客均不会受到其他乘客造成延误影响的理想情况)下各模式的可行乘客需求平均等待时间与车载时间,理想服务下所有可行乘客需求的总时间成本为

$$T_{W_i} + T_{R_i} = m_i(t_{W_i} + t_{R_i}) \quad (8)$$

设 U_i 为第 i 种模式下的乘客总体时间效用, β 为系统评判相应时间成本的效用转换系数(根据区域实际居民调查进行分析,本文主要依据 2010 年成都居民出行调查(成都综合交通规划,编制单位:西南交通大学)与 2011 年成都市地铁 1 号线沿线出行调查(客流预测单位:西南交通大学)分析标定,设

$\beta_P, \beta_R, \beta_W, \beta_D, \beta_L, \beta_Z$ 分别为乘客预期时间、在乘时间、等待时间、延误时间、损失时间、步行时间的效用转换系数, T_{PW_i}, T_{PR_i} 分别为乘客预期总等待时间与总车载时间, T_{D_i} 为可行需求干扰情况下的总延误时间, T_{L_i} 为不可行有效需求的损失时间, T_{Dsi}, T_{Dxi} 分别为上下车过程总延误(即通过理想状况的假设消除上下车过程的交错性, 将之明确划分为两阶段过程), T_{Z_i} 为可行乘客的步行总时间, t_{DR_i} 与 t_{DW_i} 分别为 1 次离返对单名乘客车载与等待时间的延误时间, 并忽略延误等待时间与车载时间的差异性, 即 $t_{DR_i} = t_{DW_i} = w_i/v$ 。最终得到各模式乘客时间效用损失评价模型

$$U_i = \beta_P T_{P_i} - \beta_W (T_{W_i} - T_{PW_i}) - \beta_R (T_{R_i} - T_{PR_i}) - \beta_D T_{D_i} - \beta_L T_{L_i} - \beta_Z T_{Z_i} \quad (9)$$

1.1.4 区域集散点布局影响分析

当引入集散点策略后, 由于每个集散点依据其所处片区的区位重要性以及客流集聚效应的强度均存在吸引系数, 假定理想状况下集散点在此区域内均匀分布, 上下车集散点数相等且集散点与控制站具有各自相同的集散系数 μ_i (与影响范围相关), 不考虑可能的同点位需求时间不一致性影响。区域集散点数为 Ag 个且各模式下布局一致, 由于 1 次需求对应 1 对起讫点, 因此有效需求点位共 $2n$ 个(不考虑点位重合可能), 实际可列点位为 $(2 + np_{i2} + np_{i3} + 2np_{i4})$ 个, 集散点有序点位为 $G_1, 1, k, Ag/2, k, Ag, G_2$, 共 $(2 + Ag)$ 个, 同时 w_i 为集散点偏离基线的平均离返距离, t_{Z_i} 为集散点覆盖域内的平均步行时间, k 为累加量。

1.2 各模式模型建立

1.2.1 第 1 种模式: 无集散点的全区域起讫模式

第 1 种模式下实际可列点位不变, 对于理想状况下(即所有上车点位均在下车点位之前, 当存在下车点位处于上车点位之前的情况时, 已上车乘客不受影响, 下车乘客等待延误时间减短, 而未上车乘客的等待时间延误会增长, 同时车载时间延误会相应减短, 主要受 β 的差异化影响。由于采用均值假设, 本文仅考虑理想状况下的极端情况)的上车点位的排列, 每增加 1 个上车点位, 会造成 2 类干扰时间延误, 第 1 类是对于已上车乘客的车载时间延误, 第 2 类是对于未上车乘客的等待时间延误; 而下车点位的增加仅会造成未下车乘客的车载时间延误。对于 ND、NP 型需求, 虽然 PND 需求以控制站为起点而难以在实际运营中拒绝为其服务, 但在模型建立时不考虑此类情况。设 PND、NPD 与 NPND 需求的可行概率分别为 θ_{11}, θ_{12} 与 θ_{13} , 可得

$$m_1 = np_{11} + np_{12}\theta_{11} + np_{13}\theta_{12} + np_{14}\theta_{13} \quad (10)$$

此模式下有

$$T_{Ds1} = t_{DR1}(np_{11} + np_{12}\theta_{11})(np_{13}\theta_{12} + np_{14}\theta_{13} + \sum_{k=1}^{x_1} k(t_{DW1} + t_{DR1})) \quad (11)$$

$$T_{Dx1} = t_{DR1}(np_{12}\theta_{11} + np_{14}\theta_{13})(np_{11} + np_{13}\theta_{12}) + \sum_{k=1}^{x_2} kt_{DR1} \quad (12)$$

$$U_1 = \beta_P n(t_{PW1} + t_{PR1}) - \beta_W m_1(t_{W1} - t_{PW1}) - \beta_R m_1(t_{R1} - t_{PR1}) - \beta_D (T_{Ds1} + T_{Dx1}) - \beta_L D_1(n - m_1)(t_{PW1} + t_{PR1}) \quad (13)$$

式中: $x_1 = np_{13}\theta_{12} + np_{14}\theta_{13} - 1$; $x_2 = np_{12}\theta_{11} + np_{14}\theta_{13} - 1$ 。

1.2.2 第 2 种模式: 集散点起讫模式

设每个集散点的步行(时间)影响范围半径均为 r , 控制站的影响范围半径为 $u(u > r)$, 总可行服务需求为

$$m_2 = Ag\pi r^2 t_{\mu_i} h/2 + \pi u^2 t_{\mu_i} h \quad (14)$$

式中: $m_2 < n$, 同时假设 Ag 为偶数。

此模式下干扰时间延误是由于车辆偏离基线往返集散点造成的, 由于此模式仅服务 PD 形式的乘客需求, 会有部分 PND、NPD 与 NPND 转变为此模式下可行的 PD 需求, 假设其转化率分别为 σ_{21}, σ_{22} 与 σ_{23} , 可得

$$m_2 = np_{21} + np_{22}\sigma_{21} + np_{23}\sigma_{22} + np_{24}\sigma_{23} \quad (15)$$

同时假设理想状态下 $(np_{23}\sigma_{22} + np_{24}\sigma_{23})$ 与 $(np_{22}\sigma_{21} + np_{24}\sigma_{23})$ 分别平均分布在 $Ag/2$ 个集散点上, 则有

$$T_{Ds2} = 2(np_{23}\sigma_{22} + np_{24}\sigma_{23}) \sum_{k=1}^{x_3} k(t_{DR2} + t_{DW2})/Ag + t_{DR2} Ag(np_{21} + np_{22}\sigma_{21})/2 \quad (16)$$

$$T_{Dx2} = 2(np_{22}\sigma_{21} + np_{24}\sigma_{23}) \sum_{k=1}^{x_2} kt_{DR2}/Ag + (np_{21} + np_{23}\sigma_{22})t_{DR2} Ag/2 \quad (17)$$

$$U_2 = \beta_P n(t_{PW2} + t_{PR2}) - \beta_W m_2(t_{W2} - t_{PW2}) - \beta_D T_{D2} - \beta_R m_2(t_{R2} - t_{PR2}) - \beta_L D_2(n - m_2)(t_{PW2} + t_{PR2}) - \beta_Z t_{Z2} n(p_{22}\sigma_{21} + p_{23}\sigma_{22} + 2p_{24}\sigma_{23}) \quad (18)$$

式中: $x_3 = Ag/2 - 1$ 。

1.2.3 第 3 种模式: 全区域起-集散点讫模式

第 3 种为全区域起-集散点讫模式, 要求满足 PD、NPD(虽然存在转化为 PD 形式的可能性, 但为利于各模式的模型对比, 本文皆不考虑此类情况)形式的有效乘客需求, np_{31}, np_{33} 均为可行服务, 而根据集散点的集聚效应, 会有部分 np_{32} 与 np_{34} 转变为

此模式下的可行需求,其中 np_{32} 由 PND 转化为 PD, np_{34} 由 NPND 转化为 PD 与 NPD,假设其转化率分别为 σ_{31} 、 σ_{32} 与 σ_{33} ,且 $\sigma_{32} + \sigma_{33} < 1$, np_{33} 与 $np_{34}\sigma_{33}$ 的可行概率为 θ_{31} 与 θ_{32} ,第3种模式下 L/v 为确定的基线运行时间, Agw'_3/v 为访问所有集散点的耗费时间, $(t-L/v-Agw'_3/v)$ 为可消耗总弹性时间,则可行的 NPD 需求数为

$$m'_3 = \lfloor (t-L/v-Agw'_3/v)/(w_3/v) \rfloor \quad (19)$$

式中: $m'_3 < np_{33} + np_{34}$; $\lfloor \rfloor$ 为向下取整运算。

则

$$m'_3 = np_{33}\theta_{31} + np_{34}\sigma_{33}\theta_{32} \quad (20)$$

$$m_3 = np_{31} + np_{32}\sigma_{31} + np_{34}\sigma_{32} + m'_3 \quad (21)$$

$$t'_{DR3} = t'_{DW3} = w'_3/v \quad (22)$$

假设理想状态下 $np_{34}\sigma_{32}$ 与 $(np_{32}\sigma_{31} + np_{34}\sigma_{32} + np_{34}\sigma_{33}\theta_{32})$ 分别平均分布在 $Ag/2$ 个集散点上,且 NPD 需求上车点均分布在上车集散点之前,此模式下有

$$\begin{aligned} T_{Ds3} = & \lfloor t'_{DR3}Ag/2 + t_{DR3}(np_{33}\theta_{31} + \\ & np_{34}\sigma_{33}\theta_{32}) \rfloor (np_{31} + np_{32}\sigma_{31}) + \sum_{k=1}^{x_4} k(t_{DR3} + \\ & t_{DW3}) + t'_{DR3}Ag[np_{33}\theta_{31} + np_{34}\sigma_{33}\theta_{32}]/2 + \\ & t_{DW3}np_{34}\sigma_{32}(np_{33}\theta_{31} + np_{34}\sigma_{33}\theta_{32}) + \\ & 2np_{34}\sigma_{32} \sum_{k=1}^{x_3} k(t'_{DW3} + t'_{DR3})/Ag \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} T_{Dx3} = & 2(np_{32}\sigma_{31} + np_{34}\sigma_{32} + \\ & np_{34}\sigma_{33}\theta_{32})Ag \sum_{k=1}^{x_3} kt'_{DR3} + t'_{DR3}Ag(np_{31} + \\ & np_{33}\theta_{31})/2 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} U_3 = & \beta_p n(t_{PW3} + t_{PR3}) - \beta_D T_{D3} - n[\beta_W(t_{W3} - \\ & t_{PW3}) + \beta_R(t_{R3} - t_{PR3})](p_{31} + p_{32}\sigma_{31} + \\ & p_{33}\theta_{31} + p_{34}\sigma_{33}\theta_{32} + p_{34}\sigma_{32}) - \\ & \beta_Z t_{Z3} n(p_{32}\sigma_{31} + p_{34}\sigma_{33}\theta_{32} + 2p_{34}\sigma_{32}) - \\ & \beta_L D_3(n - m_3)(t_{PW3} + t_{PR3}) \end{aligned} \quad (25)$$

式中: $x_4 = np_{33}\theta_{31} + np_{34}\sigma_{33}\theta_{32} - 1$ 。

1.2.4 第4种模式:集散点起-全区域论模式

第4种为集散点起-全区域论模式,要求满足 PD、PND 形式的有效乘客需求, np_{41} 、 np_{42} 均为可行服务,而根据集散点的集聚效应,会有部分 np_{43} 与 np_{44} 转变为此模式下的可行需求,其中 np_{43} 由 NPD 转化为 PD, np_{44} 由 NPND 转化为 PD 与 PND,其转化率分别为 σ_{41} 、 σ_{42} 与 σ_{43} ,且 $\sigma_{42} + \sigma_{43} < 1$, np_{42} 与 $np_{44}\sigma_{43}$ 的可行概率为 θ_{41} 与 θ_{42} ,可行的 PND 需求数为

$$m'_4 = \lfloor (t-L/v-Agw'_4/v)/(w_4/v) \rfloor \quad (26)$$

式中: $m'_4 < np_{42} + np_{44}$ 。

则

$$m'_4 = np_{42}\theta_{41} + np_{44}\sigma_{43}\theta_{42} \quad (27)$$

$$m_4 = np_{41} + np_{43}\sigma_{41} + np_{44}\sigma_{42} + m'_4 \quad (28)$$

$$t'_{DR4} = t'_{DW4} = w'_4/v \quad (29)$$

假设理想状态下 $np_{44}\sigma_{42}$ 与 $(np_{43}\sigma_{41} + np_{44}\sigma_{42} + np_{44}\sigma_{43}\theta_{42})$ 分别平均分布在 $Ag/2$ 个集散点上,且 PND 需求下车点均分布在下车集散点之前,此模式下有

$$\begin{aligned} T_{Ds4} = & 2(np_{43}\sigma_{41} + np_{44}\sigma_{42} + \\ & np_{44}\sigma_{43}\theta_{42}) \sum_{k=1}^{x_3} k(t'_{DR4} + t'_{DW4})/Ag + \\ & (t'_{DR4}Ag/2)(np_{41} + np_{42}\theta_{41}) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} T_{Dx4} = & t_{DR4}np_{44}\sigma_{42}(np_{42}\theta_{41} + np_{44}\sigma_{43}\theta_{42}) + \\ & \sum_{k=1}^{x_5} kt_{DR4} + \sum_{k=1}^{x_3} kt'_{DR4}2np_{44}\sigma_{42}/Ag + \\ & (np_{41} + np_{43}\sigma_{41})[t_{DR4}(np_{42}\theta_{41} + \\ & np_{44}\sigma_{43}\theta_{42}) + t'_{DR4}Ag/2] \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} U_4 = & \beta_p n(t_{PW4} + t_{PR4}) - n[\beta_W(t_{W4} - t_{PW4}) + \\ & \beta_R(t_{R4} - t_{PR4})](p_{41} + p_{42}\theta_{41} + p_{43}\sigma_{41} + \\ & p_{44}\sigma_{42} + p_{44}\sigma_{43}\theta_{42}) - \beta_D T_{D4} - \beta_L D_4(n - \\ & m_4)(t_{PW4} + t_{PR4}) - \beta_Z t_{Z4} n(p_{43}\sigma_{41} + \\ & p_{44}\sigma_{43}\theta_{42} + 2p_{44}\sigma_{42}) \end{aligned} \quad (32)$$

式中: $x_5 = np_{42}\theta_{41} + np_{44}\sigma_{43}\theta_{42} - 1$ 。

1.2.5 第5种模式:设置集散点的全区域起讫模式

第5种为设置有集散点的全区域起讫模式,同样要求满足4种形式的有效乘客需求,但与第1种模式不同的是会有部分 PND 与 NPND 转化为 PD 类需求,而部分 NPND 需求也将转化为另外3种需求,对于 np_{52} 与 np_{53} ,其转化率分别为 $\sigma_{51} = \sigma_{31}$ 与 $\sigma_{52} = \sigma_{41}$, np_{54} 对于 PND、NPD、PD 的转化率分别为 $\sigma_{53} = \sigma_{43}$ 、 $\sigma_{54} = \sigma_{33}$ 与 $\sigma_{55} = \sigma_{32} = \sigma_{42}$,且 $\sigma_{53} + \sigma_{54} + \sigma_{55} < 1$ 。 $np_{52}(1 - \sigma_{51}) + np_{54}\sigma_{53}$ 、 $np_{53}(1 - \sigma_{52}) + np_{54}\sigma_{54}$ 与 $mp_{54}(1 - \sigma_{53} - \sigma_{54} - \sigma_{55})$ 的可行概率分别为 θ_{51} 、 θ_{52} 、 θ_{53} ,则 $t'_{DR5} = t'_{DW5} = w'_5/v$,假设理想状态下 $(np_{53}\sigma_{52} + np_{54}\sigma_{55} + np_{54}\sigma_{53}\theta_{51})$ 与 $(np_{52}\sigma_{51} + np_{54}\sigma_{55} + np_{54}\sigma_{54}\theta_{52})$ 分别平均分布在 $Ag/2$ 个集散点上,且 NP 需求上车点均分布在上车集散点之前,ND 需求下车点均分布在下车集散点之前,此模式下有

$$\begin{aligned} T_{DR5} = & \{t_{DR5}[(np_{53}(1 - \sigma_{52}) + np_{54}\sigma_{54})\theta_{52} + \\ & np_{54}\sigma_{53}(1 - \sigma_{53} - \sigma_{54} - \sigma_{55})] + \\ & t'_{DR5}Ag/2)[np_{51} + np_{52}\sigma_{51} + np_{52}\theta_{51}(1 - \\ & \sigma_{51})] + \sum_{k=1}^{x_6} k(t_{DR5} + t_{DW5}) + \\ & t'_{DR5}Ag[(np_{53}(1 - \sigma_{52}) + np_{54}\sigma_{54})\theta_{52} + \end{aligned}$$

$$np_{54}\theta_{53}(1-\sigma_{53}-\sigma_{54}-\sigma_{55}))/2 + t_{DW5}(np_{53}\sigma_{52} + np_{54}\sigma_{55} + np_{54}\sigma_{53}\theta_{51}) \cdot [(np_{53}(1-\sigma_{52}) + np_{54}\sigma_{54})\theta_{52} + np_{54}\theta_{53}(1-\sigma_{53}-\sigma_{54}-\sigma_{55})] + 2 \sum_{k=1}^{x_3} k(t'_{DR5} + t'_{DW5}) \cdot (np_{53}\sigma_{52} + np_{54}\sigma_{55} + np_{54}\sigma_{53}\theta_{51})/Ag \quad (33)$$

$$T_{Dx5} = \sum_{k=1}^{x_6} kt_{DR5} + t_{DR5}(np_{52}\sigma_{51} + np_{54}\sigma_{55} + np_{54}\sigma_{54}\theta_{52})[(np_{52}(1-\sigma_{51}) + np_{54}\sigma_{53})\theta_{51} + np_{54}\theta_{53}(1-\sigma_{53}-\sigma_{54}-\sigma_{55})] + 2 \sum_{k=1}^{x_3} kt'_{DR5}(np_{52}\sigma_{51} + np_{54}\sigma_{55} + np_{54}\sigma_{54}\theta_{52})/Ag + (np_{51} + np_{53}\sigma_{52} + np_{53} \cdot (1-\sigma_{52})\theta_{52})[t_{DR5}(np_{52}(1-\sigma_{51}) + np_{54}\sigma_{53})\theta_{51} + np_{54}\theta_{53}(1-\sigma_{53}-\sigma_{54}-\sigma_{55}) + t'_{DR5}Ag/2] \quad (34)$$

$$U_5 = \beta_P n(t_{PW5} + t_{PR5}) - n[\beta_W(t_{W5} - t_{PW5} + \beta_R(t_{R5} - t_{PR5}))][p_{51} + p_{52}\sigma_{51} + p_{52}(1-\sigma_{51})\theta_{51} + p_{53}\sigma_{52} + p_{54}\sigma_{55} + p_{54}\sigma_{53}\theta_{51} + (p_{53}(1-\sigma_{52}) + p_{54}\sigma_{54})\theta_{52} + p_{54}\theta_{53}(1-\sigma_{53}-\sigma_{54}-\sigma_{55})] - \beta_D T_{D5} - \beta_L D_5 n(t_{PW5} + t_{PR5})[p_{52}(1-\sigma_{51} + p_{54}\sigma_{53})(1-\theta_{51}) + (p_{53}(1-\sigma_{52}) + p_{54}\sigma_{54})(1-\theta_{52}) + p_{54}(1-\sigma_{53}-\sigma_{54}-\sigma_{55})(1-\theta_{53})] - \beta_Z t_{Z5} n(p_{52}\sigma_{51} + p_{53}\sigma_{52} + p_{54}\sigma_{53}\theta_{51} + p_{54}\sigma_{54}\theta_{52} + 2p_{54}\sigma_{55}) \quad (35)$$

式中: $x_6 = [(np_{53}(1-\sigma_{52}) + np_{54}\sigma_{54})\sigma_{52} + np_{54}\sigma_{53}(1-\sigma_{53}-\sigma_{54}-\sigma_{55}) - 1]$ 。

通过建立上述 5 种模式的时间效用评价模型, 可以针对不同的区域需求状况对各种 MAST 方式进行效用评析, 从而选用最适宜的服务模式^[19]。

2 仿真算例分析

本文对上述 5 种模式 MAST 系统的总体乘客时间效用评价进行算例分析。假设一狭长矩形服务区域中的路径均具有相同的道路情况(包括道路非直线系数、拥堵程度、交叉口信号影响等), 因此车辆在各路段保持均衡速度运行, 且不考虑停车所致的加、减速延误。假设具有两端控制站 G_1 与 G_2 的矩形服务区域, 两控制站间的基准线长 $L=5$ km, 服务区域半径 $W=1$ km, 面积 $A=10$ km², 总时间约束 $t=1$ h, 车辆平均运行速度 $v=25$ km/h; 同时设有效需求发生强度 $H=10$ p/(km²·h)(鉴于此需求响应式系统实际服务能力有限, 主要作为公交多元化发展的一种供给方式, 具有特定的功能适用范

围^[20], 因此设定其面向客流的需求强度为一适中值), 区域有效乘客需求发生数 $n=100$; 设各模式下 $p_1=15\%$ 、 $p_2=35\%$ 、 $p_3=35\%$ 、 $p_4=15\%$ (此发生概率为依据 Quadrifoglio^[3] 普适性研究的设立值), 因此 PD、PND、NPD、NPND 这 4 种形式的有效需求数分别为 15、35、35、15; 设定乘客平均步行速度为 6 km/h, 集散点有效步行影响范围半径 $r=300$ m, 根据此区域乘客需求的集散情况共设置 3 个集散点。假设上述样本共 100 个非控制站上下车点在服务区域内呈随机分布, 采用 MATLAB 7.0 对随机点的分布状况进行模拟仿真, 其散点分布如图 1 所示。

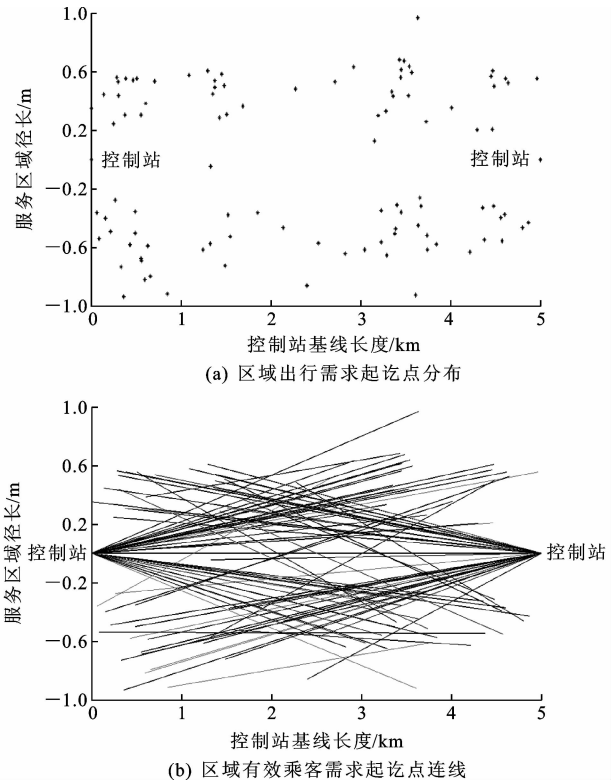


图 1 理想状态下原始 MAST 系统某时段的区域需求
Fig. 1 Regional demand of original MAST mode in a period under ideal condition

下页图 2 为理想状态下改进 MAST 系统某时段的需求。经测算, 得到算例各模式的可行需求如下页表 1 所示。

假设各模式下乘客预期平均等待时间与车载时间分别为 $t_{PW_i}=3$ min, $t_{PR_i}=17$ min, 分别给出各模式的时间效用模型测算均值结果

$$U_1 = 1\ 800\beta_P + 65.81\beta_W + 164.66\beta_R - 1\ 152.73\beta_D - 1\ 188\beta_L$$

$$U_2 = 1\ 800\beta_P + 105.24\beta_W + 173.16\beta_R - 178.08\beta_D - 1\ 026\beta_L - 61.39\beta_Z$$

$$U_3 = 1\ 800\beta_P + 74.48\beta_W + 271.73\beta_R - 2\ 344.89\beta_D - 738\beta_L - 64.25\beta_Z$$

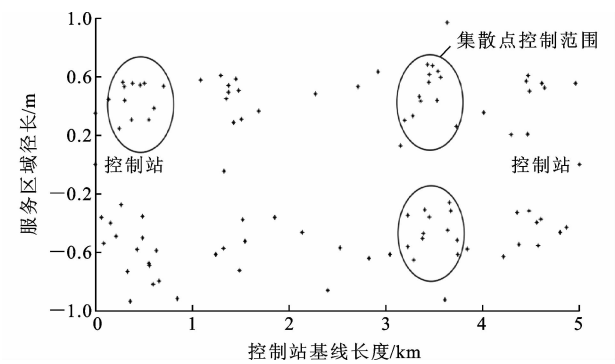


图 2 理想状态下改进 MAST 系统某时段的区域需求
Fig.2 Regional demand of improved MAST mode in a period under ideal condition

表 1 算例多模式服务需求结果

Tab.1 Demand results of example under multiple service modes

模 式	第 1 种模式	第 2 种模式	第 3 种模式 (模型)	第 3 种模式 (算例)	第 4 种模式 (模型)	第 4 种模式 (算例)	第 5 种模式
PD 数	15	15	15	15	15	15	15
PND 转 PD 数		17	17	17		17	17
NPD 转 PD 数		8		8	8	8	8
NPND 转 PD 数		3	3	3	3	3	3
可服务 PND 数	12				18	17	10
可服务 NPND 转 PND 数					0	0	0
可服务 NPD 数	6		15	15			4
可服务 NPND 转 NPD 数			1	1			1
可服务 NPND 数	1						1
总可行服务 m	34	43	51	59	44	60	59

表 2 算例多模式时间效用分析结果

Tab.2 Time utility analysis results of example under multiple service modes

种类	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
基础值	-1 803.65	-192.22	-2 266.65	-1 082.85	-1 550.09
$\beta_L=3$	-3 123.65	-1 332.22	-3 086.65	-1 882.85	-2 370.09
$\beta_P=2$	-1 123.65	667.78	-1 086.65	117.15	-370.09
$\beta_L=3$					

此 2 种公共交通方式。同时针对中国特有的“小区型”住宅开发特点,当集聚点与各小区关联性较强、集聚系数较大时,系统效用损失还会进一步减少^[20]。此外,由于第 2 种模式类似于区间摆渡,若区域内的集散点较少,其与常规公交的差异性较小,因此,本文认为第 4 种模式是一种更优的 MAST 改进模式,在此类矩形区域中具有较高的可行性与适用性。

3 结 语

(1)从 MAST 的时间效用改进方面出发,提出在机动化的服务区域内除控制站外进一步设置对应

$$U_4=1\,800\beta_P+156.24\beta_W+259.59\beta_R-1\,535.24\beta_D-720\beta_L-61.39\beta_Z$$
$$U_5=1\,800\beta_P+122.98\beta_W+258.92\beta_R-1\,827.61\beta_D-738\beta_L-64.25\beta_Z$$

依据 2010 年成都居民出行调查与 2011 年成都市地铁 1 号线沿线出行调查,设定 $\beta_P=1$ 、 $\beta_W=1.2$ 、 $\beta_R=1.1$ 、 $\beta_D=1.3$ 、 $\beta_L=2$ 、 $\beta_Z=1.5$,同时对 β_P 与 β_L 做敏感性分析,其结果如表 2 所示。

从算例分析结果中可看出,设置集散点能有效减少区域内乘客需求总时间效用的损失,其中 U_2 与 U_4 这 2 种模式的效用损失最小,可见对于此类矩形服务区域在常态需求发生概率情况下适宜选用

主要需求源点的集散点,并对基于矩形服务区域内集散点设置的 5 种服务模式下乘客的总体时间效用进行了效用评价模型的建立与分析。

(2)利用仿真算例结合定性与定量分析证明了设置集散点能有效提高系统效用,同时进一步分析证实了第 4 种改进模式在常态需求发生概率下对于矩形服务区域为总体时间效用最优。

(3)改进模式虽然在某种程度上增加了步行时间与服务区域内的“盲区”,降低了乘客乘车便利性,导致了额外效用缺失,但从总体效用分析角度来看节约了大量无效的绕行与停车时间,具有比标准 MAST 系统更少的总体效用损失,也能避免需求点详细定位以及在某些需求点停留的不适宜问题,同时仍可保持乘客目的地的分散性,以保留其直达优势性,具有较强的可行性与适用性。

(4)本文没有对结合集散点改进后的 MAST 系统在非矩形服务区域的适用性进行建模评估,同时也没有提出集散点的具体设置原则与方法,尚待进一步加强研究。

参考文献:

References:

- [1] CORTÉS C E, JAYAKRISHNAN R. Design and operational concepts of a high coverage point-to-point transit system[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1783: 178-187.
- [2] HORN M E T. Multi-modal and demand responsive passenger transport systems; a modeling framework with embedded control systems [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2002, 36(2): 167-188.
- [3] QUADRIFOGLIO L, DESSOUKY M M, PALMER K. An insertion heuristic for scheduling mobility allowance shuttle transit (MAST) services[J]. Journal of Scheduling, 2007, 10(1): 25-40.
- [4] QUADRIFOGLIO L, HALL R W, DESSOUKY M M. Performance and design of mobility allowance shuttle transit services; bounds on the maximum longitudinal velocity[J]. Transportation Science, 2006, 40(3): 351-363.
- [5] QUADRIFOGLIO L, DESSOUKY M M. Sensitivity analyses over the service area for mobility allowance shuttle transit (MAST) services[J]. Computer-aided System in Public Transport: Lecture Notes in Economic and Mathematical System, 2007, 600: 419-432.
- [6] ZHAO J, DESSOUKY M M. Service capacity design problems for mobility allowance shuttle transit systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(2): 135-146.
- [7] QUADRIFOGLIO L, DESSOUKY M M, ORDÓÑEZ F. Mobility allowance shuttle transit (MAST) services; MIP formulation and strengthening with logic constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(2): 481-494.
- [8] QUADRIFOGLIO L, LI X G. A methodology to derive the critical demand density for designing and operating feeder transit services[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2009, 43(10): 922-935.
- [9] LI X G, QUADRIFOGLIO L. Feeder transit services; choosing between fixed and demand responsive policy [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(5): 770-780.
- [10] ALSHALALFAH B, SHALABY A. Development of important relationships for the planning of flex-route transit services[C]//TRB. Transportation Research Board 89th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2010: 3701-3721.
- [11] KHATTAK A J, YIM Y. Traveler response to innovative personalized demand-responsive transit in the San Francisco bay area[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2004, 130(1): 42-55.
- [12] LI X G, QUADRIFOGLIO L. Optimal zone design for feeder transit services [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2009(2111): 100-108.
- [13] ALSHALALFAH B, SHALABY A. Feasibility of flex-route as a feeder transit service to rail stations in the suburbs; case study in Toronto[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2011, 138(1): 90-100.
- [14] DIANA M, DESSOUKY M M, XIA N. A model for the fleet sizing of demand responsive transportation services with time windows[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(8): 651-666.
- [15] QUADRIFOGLIO L, DESSOUKY M M, ORDÓÑEZ F. A simulation study of demand responsive transit system design[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2008, 42(4): 718-737.
- [16] NOURBAKHSH S M, OUYANG Y F. A Structured flexible transit system for low demand areas [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(1): 204-216.
- [17] 云 亮, 蒋阳升, 宋雪梅. 机动式辅助客运系统 (MAST) 及其研究进展综述[J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 7(4): 79-83, 123.
YUN Liang, JIANG Yang-sheng, SONG Xue-mei. Introduction of mobility allowance shuttle transit system (MAST) and the summary of its research progress[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2009, 7(4): 79-83, 123. (in Chinese)
- [18] DAGANZO C F. Checkpoint dial-a-ride systems[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1984, 18(4/5): 315-327.
- [19] 王 颖. 需求响应型公共交通系统框架设计及适应性评价关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
WANG Ying. Demand responsive transit system framework design and adaptability analysis key technical research[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [20] 潘述亮, 俞 洁, 卢小林, 等. 灵活型公交服务系统及其研究进展综述[J]. 城市交通, 2014, 12(2): 62-68.
PAN Shu-liang, YU Jie, LU Xiao-lin, et al. A review of flexible transit service[J]. Urban Traffic of China, 2014, 12(2): 62-68. (in Chinese)