

基于DEA的轨道交通与常规公交 换乘效率测评模型^{*}

钟异莹^{1a}, 陈坚^{1a,1b}, 邵毅明^{1a,1b}, 徐志祥²

(1. 重庆交通大学 a. 交通运输学院; b. 山地城市交通系统与安全 重庆市重点实验室, 重庆 400074; 2. 江西赣粤高速公路股份有限公司, 南昌 330000)

摘要: 为解决轨道交通与常规公交换乘效率缺少定量评估的问题,在分析从轨道交通出站至站旁公交站点的换乘路径及主要影响因素的基础上,确定换乘效率评价指标,运用数据包络分析方法构建轨道交通与常规公交换乘效率非均一测评模型,对模型的变换及优化进行推导。以重庆市轨道交通与常规公交为例,计算站点换乘效率指数,结果显示其中四个站点的换乘效率指数达到1,实现DEA有效即换乘效率最大化。对于未达最优性换乘的其他车站,结合指标在有效前沿面上的投影计算,提出各指标优化目标取值,为轨道交通与常规公交换乘设施改进及客流组织管理提供定量化决策建议。

关键词: 轨道交通; 常规公交; 换乘站; 数据包络分析; 换乘效率指数

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2018)05-1446-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.036

Evaluation model of transfer efficiency between urban rail transit and bus transit based on DEA

Zhong Yiying^{1a}, Chen Jian^{1a,1b}, Shao Yiming^{1a,1b}, Xu Zhixiang²

(1. a. School of Traffic & Transportation, b. Chongqing Key Laboratory of Traffic System & Safety in Mountain Cities, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Jiangxi Ganyue Expressway Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: In order to solve the problems that the transfer efficiency is the lack of quantitative assessment between rail transit and bus transit, this paper confirmed the transfer efficiency evaluation index in the station based on the analyses of transfer path from rail transit station to bus transit station and main influencing factors, and constructed non-uniform evaluation model of transfer efficiency between rail transit and bus transit by data envelopment analysis, then deduced the transformation and optimization of model. The result in Chongqing case shows that there are 4 stations' transfer efficiency indexes reached 1, which means that they achieve DEA effective transfer efficiency maximization. For other stations did not up to optimality of transfer, they should extract the optimal value of each index based on the projection calculation of index on effective frontier, to provide quantitative decision suggestions for transfer facilities improvement and passenger traffic organization management between rail transit and bus transit.

Key words: rail transit; bus transit; transfer station; data envelopment analysis; transfer efficiency index

0 引言

随着经济的飞速发展和城市现代化进程的加快,原有的城市地面道路交通无法满足居民日益增长的出行需求,因此公共交通被认为是未来交通发展的主要形式,而公共交通出行中的换乘服务质量近年来尤其受到关注,是影响公共交通服务水平以及公共交通的吸引力的关键要素^[1]。研究公共交通系统中的轨道交通与常规公交换乘效率具有迫切的现实需求。

国外研究大多应用非集计模型和定义换乘效用函数等数学方法来计算换乘枢纽的换乘效率,偏重于对换乘阻抗的测算。Iseki 等人^[2]分析票价、等待时间、换乘次数、乘坐时间等影响换乘效率的因素,建立了轨道交通与常规公交换乘广义成

本的计算模型。Alger 等人^[3]认为等待时间、换乘次数、换乘后是否有座位等因素,会影响居民在轨道交通、铁路和常规地面公交等交通方式之间进行换乘时产生的阻抗,从而影响乘客的换乘行为。Wardman 等人^[4]选取站内走行时间、车内走行时间、换乘等待时间、换乘基础设施、换乘金钱成本等因素,分析轨道交通与常规公交、小汽车等交通方式之间换乘时产生的阻抗。

国内对轨道与公交换乘的研究集中在候车时间、行走距离、发车间隔、票价成本等直接影响乘客选择及换乘效果的因素上,郭淑霞等人^[5]建立基于轨道换乘常规公交客流分类的换乘客流晚高峰平均候车时间模型,用于估计晚高峰换乘乘客的平均候车时间。孙凡松等人^[6]结合客流换乘规律建立了叉口处轨道交通与常规公交的换乘模型,模型求解可得出走行距

收稿日期: 2017-01-18; 修回日期: 2017-02-28 基金项目: 重庆市研究生科研创新资助项目(CYB17128)

作者简介: 钟异莹(1992-),女,广西柳州人,博士研究生,主要研究方向为轨道交通规划与管理(364611709@qq.com);陈坚(1985-),男,江西赣州人,副教授,博士,主要研究方向为交通行为理论与实证、交通运输系统分析与决策;邵毅明(1955-),男,四川资阳人,教授,博士,主要研究方向为车辆节能与道路交通安全;徐志祥(1992-),男,江西丰城人,硕士研究生,主要研究方向为道路交通安全。

离最短的方案。许旺土等人^[7]建立以最大系统总收益值为目标函数、轨道客运量份额为主要约束条件的非线性规划模型,算例结果表明乘客对票价增减的敏感性比对发车间隔增减的敏感性更强。

目前国内外对轨道交通与常规公交换乘效率的单因素及多因素影响研究已有较多成果,但对于换乘效率没有统一的量化衡量标准。已有大量研究均针对轨道车站为评价对象,本文将轨道车站与公交站点作为整体系统进行测评,通过选取多元化测评指标,建立定量、有效、解释性强的轨道交通与常规公交换乘效率测评模型,为改善轨道和公交协同管理及设施布局提供参考借鉴。

1 换乘效率测评指标选取

轨道交通与常规公交衔接的首要条件是:在客运高峰时段,常规公交应保证在短时间内将乘客接送出车站^[8]。快速便捷地从轨道交通车站转移至站旁常规公交,保证两种交通系统衔接换乘的协调,是换乘枢纽规划的重要目标。评价指标的选取是否合理将直接影响到评价结果的准确性及可靠性,本文遵循实用性、整体完备性、客观性、引导性、可比性、针对性及易操作性等原则,考虑换乘过程的连续性、客运设备的适应性以及客流过程的通畅性条件,从轨道交通与常规公交换乘效率直接影响显著的角度,选取换乘效果、客流组织、站点功能三个维度指标进行测评,其中换乘效果和客流组织指标为输出指标,站点功能指标为输入指标。

1.1 站点功能指标

a) 公交线路数 B_1 。轨道车站旁常规公交站点停靠班线数量,该指标体现了公交站点运能大小。

b) 首末班线路数 B_2 。轨道车站旁常规公交站点发班班线数量,该指标直接反映了公交站点的建设规模和运营水平。

c) 公交站台车位数 P 。轨道车站旁常规公交站点站台车位数,该指标直接反映了公交站点的建设规模和运营水平。

d) 空间距离 D 。在不考虑车站建筑结构和周边地形的情况下,轨道车站与站旁公交站点之间的直线距离,该指标间接反映了轨道车站及公交站点的布局设计情况。

e) 换乘距离 L 。乘客从轨道交通车站出口转移至站旁常规公交站点过程的步行距离,是影响换乘效率的重要因素。

$$L = \alpha \times D \quad (1)$$

其中: α 为空间系数,随车站建筑结构和周边地形而异。

1.2 换乘效果指标

a) 换乘时间 T 。乘客从轨道交通车站到站旁公交站点完成换乘的平均时间,包括乘客的步行时间和候车时间。

$$T = \beta \times L' + t \quad (2)$$

其中: β 和 γ 为相关系数; t 为排队候车时间,单位为min,根据各站点实际调查时间平均取值。

b) 换乘综合满意度 S 。乘客在换乘体验中,对便捷性、舒适性、经济性、安全性四个方面的综合评分。

$$S = f_1 \times x_1 + f_2 \times x_2 + f_3 \times x_3 + f_4 \times x_4 \quad (3)$$

其中: f_1, f_2, f_3, f_4 分别为乘客换乘便捷性、舒适性、经济性、安全性的评分; x_1, x_2, x_3, x_4 分别为乘客换乘便捷性、舒适性、经济性、安全性在综合评价中的对应权重。

1.3 客流组织指标

换乘客流比 R 。轨道交通车站至站旁公交站点换乘客流

量与该公交站点客流量的比值,该指标一定程度反映了乘客于该站点的换乘意向选择。

$$R = V_1 / V_2 \quad (4)$$

其中: V_1 为轨道交通车站至站旁公交站点换乘客流量,单位为人次/h; V_2 为轨道交通车站旁公交站点客流量,单位为人次/h。

2 换乘效率测评模型

轨道交通与常规公交换乘效率测评指标间存在着因果关系,如果单纯地将各指标并列进行数学运算得出评估结果,将无法真实反映各指标间的关系,测评结果的解释性也不全面。数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法为评价效率最有效的非参数统计估计方法。本文在DEA方法基础上,将影响轨道交通与常规公交换乘效率的可修改指标作为测评模型的输入项,以换乘效果和客流组织指标为输出项,建立换乘效率测评数学规划模型以进行综合评价。利用DEA“相对有效性”的概念测评其相对换乘效率的大小,同时为分析客流组织方案对换乘效率的影响提供量化依据^[9]。

2.1 模型构建

假设有 n 个城市轨道交通与常规公交换乘车站,以公交线路数 B_1 、首末班线路数 B_2 、公交站台车位数 P 、空间距离 L 、换乘距离 L 为输入指标(共五个),换乘时间 T 、换乘综合满意度 S 、换乘客流比 R 为输出指标(共三个),用 x_{ik} 表示第 k 个车站的第 i 个输入指标, y_{rk} 表示第 k 个车站的第 r 个输出指标($i = 1, 2, 3, 4, 5; k = 1, 2, \dots, n; r = 1, 2, 3, 4$)。

以轨道交通车站内部换乘效率值最大为目标函数,建立优化模型如式(5)~(8)所示。

$$\max h_{k_0} = \frac{\sum_{r=1}^3 u_r y_{rk_0}}{\sum_{i=1}^5 v_i x_{ik_0}} \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \frac{\sum_{r=1}^3 u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^5 v_i x_{ik}} \leq 1 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$u_r \geq 0 \quad r = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

$$v_i \geq 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

其中: v_i 为轨道交通与常规公交换乘效率第 i 个输入指标的权重系数; u_r 为第 r 个输出指标的权重系数,两者皆为该规划模型的决策变量; h_k 为轨道交通与常规公交换乘效率值。该规划的最优解有利于第 k_0 个车站换乘效率指标的权重分配,同时第 k_0 个车站的换乘效率评价指数由其最优值决定。

2.2 模型推导

通过引入Charnes-Cooper变换,可得与上述规划等价模型如下:

$$\max u^T y_0 = V_p \quad (9)$$

$$\text{s. t. } w^T x_k - w^T y_k \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$w^T x_0 = 1 \quad w \geq 0, u \geq 0 \quad (11)$$

其中: $x_k = (x_{1k}, x_{2k}, x_{3k})^T$; $y_k = (y_{1k}, y_{2k}, y_{3k})^T$; $w = (w_1, w_2, w_3)^T$; $u = (u_1, u_2, u_3)^T$ 。

上述模型的对偶规划为

$$\min \theta = V_D \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^n x_{ik} \lambda_k + S^- = \theta x_0 \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^n y_{ik} \lambda_k - S^+ = y_0 \quad (14)$$

$$\lambda_k \geq 0 \quad k=1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$S^- = (S_1^-, S_2^-, S_3^-, S_4^-) \geq 0 \quad (16)$$

$$S^+ = (S_1^+, S_2^+) \geq 0 \quad (17)$$

其中: θ 为第 k_0 个车站换乘效率评价指标; λ_k 为相对于第 k_0 重新构造的一个有效车站组合中第 k 个车站的比例系数; S^- 为输入指标的松弛变量; S^+ 为输出指标的松弛变量。

2.3 结果讨论

假设式(9)的最优解 w_0, u^0 满足 $V_p = u^{0T} \times y_0 = 1$, 第 k_0 个车站为弱 DEA 有效; 在上述条件下, 且 $w^0 > 0, u^0 > 0$, 则第 k_0 个车站为 DEA 有效。对于式(12), 最优值 $V_D = 1$ 时, 第 k_0 个车站为弱 DEA 有效; 在上述条件下, 每个最优解均有 $S^- = 0, S^+ = 0$, 则第 k_0 个车站为 DEA 有效。

式(9)的最优值 V_p 或式(12)的最优值 V_D 为第 k_0 个车站的综合评价指标, 通过求解 n 个线性规划求 n 个车站的换乘效率评价指标, 从而按照大小来排出不同车站间的换乘服务效率优劣。如果第 k_0 个车站综合评价指数为 1, 则说明它在几个评价指标标准上都有效, 否则就要计算其在有效前沿面上的投影:

$$\bar{X}_p = \theta^0 X_{k_0} - S^- = \sum_{k=1}^n X_k \lambda_k^0 \quad (18)$$

$$\bar{Y}_{k_0} = Y_{k_0} - S^+ = \sum_{k=1}^n Y_k \lambda_k^0 \quad (19)$$

其中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 为 n 个车站的输入和输出矩阵; θ 为第 k_0 个车站换乘效率评价指标; λ_k 为相对于第 k_0 重新构造一个有效车站组合中第 k 个车站的组合比例; S^- 为输入指标的松弛变量; S^+ 为输出指标的松弛变量。

根据式(18)(19)提供了第 k_0 个车站在评价指标体系中存在的差距, 可以利用这个差距来调整与改进城市轨道交通与常规公交站点间的客流组织、公交站点的建设规模与运营模式, 使其各项指标均达到 DEA 有效, 实现轨道交通系统与常规公交系统的良好衔接, 进一步推动城市公共交通出行的发展。

2.4 求解方法

软件 DEAP 2.1 可进行 DEA 效率分析运算, 求解步骤如下:

a) 选择部分测评指标预处理。

由于软件 DEAP 2.1 中设定 OUTPUT(输出)值高为优, INPUT(输入)值低为优, 分别对输出指标和输入指标进行判别, 对于输出指标值低为优和输入指标值高为优的测评指标初始值, 取倒数代入软件计算。相应地, 对其运算所得目标值取倒数进行对比。

b) 设置参数、变量及选定所用模型, 其中包括:

DMU 个数, 即总体样本个数;

OUTPUT 个数, 即输出指标个数;

INPUT 个数, 即输入指标个数;

NUMBER OF TIME PERIODS, 为面板数据中的年限(横截面数据设置为 1);

INPUT AND OUTPUT OR IENTATED 选择, 即输入主导型和输出主导型模型。

c) 运行结果分析。

EFFICIENCY SUMMARY: crste 为综合效率即各站点综合

评价指数;

SUMMARY OF PEERS 表示非 DEA 有效指标根据相应的 DEA 有效指标进行投影即可以实现相对有效, 有相应的权重 SUMMARY OF PEER WEIGHTS;

SUMMARY OF OUTPUT TARGETS 和 SUMMARY OF INPUT TARGETS 分别为各输出和输入指标的目标值, 即达到有效的值, 如果是 DEA 有效指标则是原始值。

3 实例分析

重庆轨道交通 3 号线是重庆轨道交通线网中最繁忙的路线, 全长达 55.5 km, 公设车站 39 座。以 3 号线嘉州路—四公里段(嘉州路—红旗河沟—观音桥—华新街—牛角沱—两路口—铜元局—工贸—南坪—四公里)为调查样本, 对该路段 10 座车站及其站旁常规公交站点进行调查, 经过数据统计和计算, 得到各个车站的换乘效率测评指标初始值如表 1 所示。

表 1 各站点换乘效率测评指标初始值

指标	站点									
	嘉州路	红旗河沟	观音桥	华新街	牛角沱	两路口	铜元局	工贸	南坪	四公里
公交线路数 B_1	18	7	22	6	12	23	2	11	22	4
首末班线路数 B_2	0	0	0	0	0	2	0	0	21	4
公交站台车位数 P	4	6	2	1	1	7	2	3	16	4
空间距离 D/m	30	20	173	65	45	42	182	21	59	63
换乘距离 L/m	56	23	252	83	202	49	334	166	241	214
换乘时间 T/min	3.5	5.7	7.3	9.8	11.2	3.6	13.5	11.6	9.5	12.5
换乘综合满意度 S	4.2	4.6	2.2	3.4	4.2	4.8	1.9	4.1	3.7	2.1
换乘客流比 R	0.71	0.34	0.17	0.13	0.45	0.32	0.01	0.14	0.25	0.02

本次计算对公交线路数 B_1 、首末班线路数 B_2 、公交站台车位数 P 三个指标分别取倒数代入, 其他指标取原值代入 DEAP 2.1 运算, 其中 DMU 设置为 10, OUTPUT 设置为 3, INPUT 设置为 5, NUMBER OF TIME PERIODS 设置为 1, 选择 INPUT ORIENTATED, 测算结果如表 2 所示。

表 2 各站点综合评价指数

指标	站点									
	嘉州路	红旗河沟	观音桥	华新街	牛角沱	两路口	铜元局	工贸	南坪	四公里
综合效率	1.000	1.000	0.484	0.297	0.641	1.000	0.090	0.944	1.000	0.256
排序	1	1	7	8	6	1	10	5	1	9
规模效应	不变	不变	递减	递减	递减	不变	递减	递增	不变	递减

如表 2 所示, 嘉州路、红旗河沟、两路口、南坪四个轨道交通与常规公交换乘站点综合评价指数为 1, 在 10 个站点样本中换乘效率最高, 达到 DEA 有效, 实现换乘效率最大化。其余 6 个站点(观音桥、华新街、牛角沱、铜元局、工贸、四公里)未达到 DEA 有效, 且观音桥、华新街、牛角沱、铜元局、四公里 5 个站规模效应递减, 即继续增加设施投入所得产出有限; 工贸站规模效应递增, 即继续增加设施投入所得产出增加。以综合评价指数为 1 的 4 个站点确定有效前沿面, 分别计算其余 6 个站点(观音桥、华新街、牛角沱、铜元局、工贸、四公里)在有效前沿面上的投影, 得到换乘效果最优时各指标应达到的目标取值, 与表 1 初始值进行对比, 详见表 3。

根据综合效率测算结果, 综合评价指数为 1 的四个轨道交通与常规公交换乘站点(嘉州路、红旗河沟、两路口、南坪)指标目标值均为计算指标初始数值, 不作修改, 在表 3 中未列出。对于未达到 DEA 有效的 6 个站点(观音桥、华新街、牛角沱、铜

元局、工贸、四公里),当 INPUT(输入)值修改至目标值时,OUTPUT(输出)值可达到目标值。目标值与初始值对比结果显示,各换乘站点的首末班线路数均未改变,表明该项 INPUT(输入)指标对换乘效率最大化的贡献率较低,无须对该项指标进行调整。而各换乘站点公交线路数与站台车位数普遍偏少,其中华新街、铜元局、四公里站亟待增加运营公交线路与站台车位,提高公交运能,接驳从轨道车站至公交站点换乘的大量乘客,从而提高换乘客流比。观音桥、牛角沱、铜元局站换乘距离过长,在具备一定的条件基础上,可考虑建设轨道公交换乘一体化设施,缩短乘客步行距离,协调不同方向客流组织,避免客流交织及减少冲突点,以实现缩短换乘时间,提高乘客满意度和忠诚度的最终目的。

表3 各站点指标目标值与初始值对比

指标	站点					
	观音桥	华新街	牛角沱	铜元局	工贸	四公里
公交线路数 B_1	--	+17.000	+8.040	+21.000	+3.000	+18.895
首末班线路数 B_2	--	--	--	--	--	--
公交站台车位数 P	+4.400	+6.000	+4.224	+5.000	+2.000	+3.947
空间距离 D/m	-134.538	-23.333	-10.517	-140.000	--	-19.522
换乘距离 L/m	-202.000	-33.000	-149.368	-284.000	-66.000	-161.368
换乘时间 T/min	-3.720	-6.200	-7.659	-9.900	-4.953	-8.279
换乘综合满意度 S	+2.473	+1.408	+0.225	+2.908	+0.189	+2.551
换乘客流比 R	+0.189	+0.190	+0.024	+0.310	+0.262	+0.291

备注: + 表示目标值对应原始值增加数, - 表示目标值对应初始值减少数, -- 表示目标值与原始值相等。

4 结束语

近年来,城市轨道交通发展速度加快,如何与原有常规公交系统实现高效的协调换乘,提高城市交通运转效率和资源利用率,进而提升旅客运输服务质量是运输行业内值得探讨的重要课题。本文在综合分析轨道交通与常规公交换乘效率影响

因素的基础上,选取了八个内部换乘效率的测评指标,并根据指标内容能否调整划分为输入指标和输出指标,基于 DEA 方法构建了城市轨道交通与常规公交换乘效率的综合测评模型。对重庆市城市轨道交通 3 号线嘉州路—四公里段 10 个轨道车站及站旁公交站点的相对效率进行测评计算,得到其换乘效率评价指数和在有效前沿面上的投影,从而实现量化辨识公交站点设施投入与轨道车站接驳是否匹配的问题,为轨道及公交衔接组织研究提供了理论依据。但模型在各车站的适用性及测评指标选取的客观性还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈旭梅,林国鑫,于雷. 常规公共交通与轨道交通运营调度协调模型[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(10):165-173.
- [2] Iseki H, Taylor B D. Not all transfers are created equal: toward a framework relating transfer connectivity to travel behavior[J]. *Transport Reviews*, 2009, 29(6): 777-800.
- [3] Algers S, Hansen S, Tegner G. Role of waiting time, comfort, and convenience in modal choice for work trip [J]. *Transportation Research Record*, 1975, 534: 38-51.
- [4] Wardman M, Hine J, Stradling S. Interchange and travel choice-volumes 1 and 2[J]. *Transport Research*, 2001.
- [5] 郭淑霞,陈旭梅,于雷,等. 轨道交通换乘常规公交平均候车时间模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2010,10(2):143-147.
- [6] 孙凡松,张开冉,王若成. 交叉口处轨道交通与常规公交的换乘模型研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2015,13(3):76-80.
- [7] 许旺土,何世伟,宋瑞. 轨道交通接运公交发车间隔及票价优化模型[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(6):1469-1474.
- [8] 覃煜,晏克非. 轨道交通与常规公交衔接系统分析[J]. 城市轨道交通研究,2000,3(2):44-48.
- [9] 陈坚,钟异莹,陈林,等. 城市轨道交通车站内部换乘效率测评模型[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(3):577-582.

(上接第 1425 页)

c) 安全性问题。

安全性问题是互联网、移动互联网中常见的问题。在为用户带来计算迁移便捷性的同时,如何保证计算过程中数据的传输、用户隐私的隔离与保护以及如何保证在提供统一化的服务中,服务端是否会因为某些恶意代码的部署而产生拒绝服务的情况都是本文进一步努力的方向。

参考文献:

- [1] CNNIC. 第 37 次中国互联网络发展状况[EB/OL]. (2016-01-22) [2017-07-08]. <http://www.cnnic.net.cn/gywm/xwzx/rdxw/2016/201601/W020160122639198410766.pdf>.
- [2] Othman M, Hailes S. Power conservation strategy for mobile computers using load sharing [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 1998, 2(1): 44-51.
- [3] 张文丽,郭兵,沈艳,等. 智能移动终端计算迁移研究[J]. 计算机学报,2016,39(5):1021-1038.
- [4] Cuervo E, Balasubramanian A, Cho D, et al. MAUI: making smartphones last longer with code offload[C]//Proc of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM Press, 2010: 49-62.
- [5] Satyanarayanan M, Bahl P, Caceres R, et al. The case for VM-based Cloudlets in mobile computing[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2009, 8(4): 14-23.
- [6] Verbelen T, Simoens P, De Turck F, et al. Cloudlets: bringing the cloud to the mobile user[C]//Proc of the 3rd ACM Workshop on Mobile Cloud Computing and Services. New York: ACM Press, 2012: 29-36.
- [7] Verbelen T, Simoens P, De Turck F, et al. Adaptive application configuration and distribution in mobile cloudlet middleware[C]//Proc of International Conference on Mobile Wireless Middleware, Operating Systems, and Applications. Berlin: Springer, 2012: 178-191.
- [8] Verbelen T, Simoens P, De Turck F, et al. Adaptive deployment and configuration for mobile augmented reality in the Cloudlet[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 41(5): 206-216.
- [9] Lewis G A, Echeverría S, Simanta S, et al. Cloudlet-based cyber-forging for mobile systems in resource-constrained edge environments[C]//Proc of the 36th International Conference on Software Engineering. New York: ACM Press, 2014: 412-415.
- [10] Shivarudrappa D, Chen Minglung, Bharadwaj S. COFA: automatic and dynamic code offload for Android[R]. Boulder: University of Colorado, 2011.
- [11] CPU-bound [EB/OL]. (2016-11-20) [2017-07-08]. <https://en.wikipedia.org/wiki/CPU-bound>.
- [12] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Morphological image processing[C]//Digital Image Processing. 2008: 627-688.
- [13] Artificial intelligence [EB/OL]. (2016-12-19) [2017-07-08]. https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_intelligence.