



Research
Novel Methodologies in Air Transportation—Article

城市按需空中交通的综合网络设计与需求预测

吴志强, 张瑜*

Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa, FL 33620, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 July 2020

Revised 24 August 2020

Accepted 26 November 2020

Available online 19 March 2021

关键词

先进空中交通

楼顶停机坪

交通方式的选择

低空空域

无人驾驶系统

摘要

城市空中交通 (UAM) 是近年来提出的使用电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 的新兴概念。UAM 通过利用低空空域有望为城市地区的乘客和货物运输提供另一种选择, 显著提高机动性。除了其他基本要素外, 还需要垂直起降机场等地面基础设施来实现 UAM 从概念到运行的跨越。本研究探讨了 UAM 按需服务的网络设计, 在考虑垂直起降机场的位置和潜在的 UAM 需求之间相互作用的同时, 重点强调使用整数规划和求解算法来确定垂直起降机场的最佳位置、用户分配以及进出模式的选择。一个基于美国佛罗里达州坦帕湾地区模拟分解交通需求数据的案例研究验证了该模型的有效性。通过分析基于佛罗里达州的激光雷达数据和 eVTOL 运行的自身约束和监管约束下开发出的 3D 地理信息系统 (GIS) 地图, 我们获得了备选垂直起降机场的位置。垂直起降机场最佳位置的选择以总成本最小为目标, 但同时该模型结构允许每个用户根据广义费用在地面运输和 UAM 之间选择更好的模式。案例研究的结果显示, 虽然从地面模式切换到多式联运的行程比重很小, 但选择 UAM 服务的用户明显节省了时间。此外, 本文从供应方面探讨了不同参数设置对 UAM 服务需求的影响, 并测试了不同的定价策略对 UAM 的需求和利润之间的影响。同时分析了垂直起降机场数量与定价策略的综合效应。研究结果为城市决策者和 UAM 运营商提供了深入的规划和管理意见。本文的结论部分讨论了该研究的注意事项、作者正在进行的工作以及 UAM 的未来研究方向。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

交通拥堵是影响全球交通可持续发展的首要问题。INRIX 公司发布的一份报告显示, 2018 年, 美国人平均堵车 97 h, 耗费近 870 亿美元, 平均每个司机耗费 1348 美元 [1]。与此同时, 传统道路的容量扩大带来的积极效应已经被人口和车辆的增长以及城市扩张导致的车辆行驶里程 (VMT) 的增加所抵消。最近的研究集中在运用新兴技术和概念, 通过更有效地使用现有的道路系统来缓解拥堵。例如, 自动驾驶和联网车辆有望缓解交

通拥堵、减少车辆行驶时间以及扩大现有道路系统的容量。交通运输网络公司 (TNC) 的共享交通及合并功能鼓励客户共享交通。包括共享自行车、电动摩托车和电动自行车在内的可以使用人行道与自行车道的微型交通已经得到了应用, 这有望减少 VMT。政府机构和研究团体意识到了开发利用低空空域的必要性和可能性, 低空空域是目前尚未得到充分利用的宝贵资源。2017 年, 美国国家航空航天局 (NASA) 提出了城市空中交通 (UAM) 的概念, 并呼吁对这种交通方式进行市场研究。从那时起, 包括政府机构、制造商和研究团队在内的不

* Corresponding author.

E-mail address: yuzhang@usf.edu (Y. Zhang).

同单位都在这一交通方式上投入了大量精力。UAM概念可以追溯到20世纪60年代,当时有几家公司在美国的洛杉矶、旧金山、纽约和芝加哥等大都市地区用飞机提供点对点的通勤服务[2]。由于这些通勤服务的社区接纳程度低、伤亡事故高发和财务问题严重等原因,这些运输公司最终被迫大幅减少或终止运营这些通勤服务[3],上述原因直到今天仍然限制着UAM的大规模发展。近年来提出的UAM概念是以新型的垂直起降电动飞行器(eVTOL)为基础的。这种新型飞机目前处于成熟阶段,集成了先进的自主和分布式电力推进技术,可以在低空空间提供更安全、更安静、更高效的空中运输服务。一些工业公司对此的预测相对乐观,他们认为其服务价格可以通过规模经济得到控制[4,5],并且潜在的接纳度很高。一些研究声称,考虑到不同的限制因素[6],空中出租车和机场班车服务的年度营业额接近25亿美元,而且只要有足够的市场渗透[4],其服务成本将与UberX不相上下。然而,公众认知、基础设施的可用性和可达性、服务质量和成本,以及许多其他因素,都可能对UAM的潜在需求产生极大的不确定性。因此,研究人员对UAM采用率的态度不那么乐观,他们认为从目前的地面模式切换到UAM服务的行程占比是有限的,因为UAM的维持需要高成本,另外基于站点的运营需要使用地面交通方式进出,而且当天气条件恶劣时,其可靠性较低。尽管各种不确定因素会影响UAM的普及率,但是政府当局和学术界已达成共识,即UAM将克服地面交通模式的地理限制,为旅客提供一种机动性得到极大改善的交通方式[2]。例如,Antcliff等[7]以硅谷地区为例,证实了UAM服务能将旅客每日长途的“门到门”(DiD)的交通时间缩短至地面交通的三分之一。

人们已经投入许多努力来促进新型UAM服务的发展。NASA和联邦航空管理局(FAA)领导了市场可行性研究和UAM的推广[6]。全球超过70家制造商,包括波音、空客和贝尔直升机,一直致力于设计更好的eVTOL飞机,截至2018年9月,已投资超过10亿美元[8]。美国、中国、阿拉伯联合酋长国、新加坡等地进行了各类飞机的试飞[9-11]。此外,世界各地还组织了一些备受瞩目的活动,讨论UAM应用的问题和解决方案,如Uber Elevate峰会和洛杉矶市市长会议[8]。UAM的潜在市场包括但不限于救护车服务、空中出租车服务、机场接送服务、旅游、调查检验以及货物运输等[8]。

最近在UAM概念定义、潜在市场分析和应用约束识别方面取得了重大进展[4,7,8,12,13]。UAM按需服务

面临的巨大挑战之一是需要建立一个分布良好的地面基础设施,以支持eVTOL飞机的运营[4,12]。为了满足UAM乘客的需求,主要的地面基础设施是eVTOL飞机用来起降、上下客和缴费的垂直起降机场(或直升机机场)。城市地区的密集土地利用、飞机运营需求和社区接纳度等因素严重限制了垂直起降机场的数量,使得只通过纯航空运输提供门到门的服务难以实现[8]。因此,UAM的网络设计需要整合多种运输方式:垂直起降机场进出的地面交通以及垂直起降机场之间的空中交通。这种多模态特性增加了UAM网络设计的复杂性。此外,垂直起降场的数目和位置也会吸引不同级别的用户。在UAM网络设计中需要明确考虑供需的相互作用。本文主要研究UAM按需服务的网络设计。本研究在考虑垂直起降机场位置和潜在的UAM交通需求之间的相互作用的同时,使用整数规划和一种求解算法来确定垂直起降机场的最佳位置、用户分配以及进出模式的选择。我们还从供应方面分析了UAM潜在需求的关键促进因素,以及UAM运营商的不同定价策略。一个基于美国佛罗里达州坦帕湾地区模拟分解交通需求数据的案例研究验证了该模型的有效性。

本文的其余部分组织如下:第2部分总结了关于垂直起降机场位置识别和影响用户使用UAM服务的因素;第3部分中讨论本研究的关键假设和建模框架;第4部分给出了坦帕湾地区的数值研究;第5部分总结了研究成果,并对未来的研究方向进行了探讨。

2. 文献综述

2.1. UAM的认知、接纳和采用

从车辆认证和运营监管到潜在市场识别过程,公众的认知、接纳和采用是UAM服务成功的最关键因素之一。NASA和FAA已经通过各种示范项目,如美国交通部(DOT)集成试点计划(IPP),以了解eVTOL运行对社区的干扰[14]。各行业多次提及且强调了社区参与对于UAM服务成功的重要性[15]。在学术领域,研究人员在近期的研究中使用了调查工具和计量经济学建模预测UAM的需求,研究人员还研究了与传统地面交通竞争下的短期UAM市场规模,以及与地面自动驾驶汽车和传统交通竞争下的长期UAM市场规模。这些调查分布在美国的五个主要城市,重点关注有一定收入和通勤时间的群体[16-19]。意向调查也用于了解公众对美国UAM服务的认知、担忧和所期望的运营模式[20]。

作者发现,大多数受访者认为UAM优点在于节省时间,而他们最主要的担忧是UAM的安全问题。Eker等[21]采用双变量有序probit模型来识别人口特征和以往的出行行为会如何影响公众对使用UAM服务的优点和担忧的认知。年龄、性别、收入水平、教育背景和日常驾驶习惯等诸多因素都与其有显著的相关性。Al Haddad等[22]利用因子分析和离散选择模型估计了影响公众采用UAM服务的时间范围。一般而言,大部分受访者对在五年内采用这项服务持积极态度,只有3.17%的受访者表示不会使用这项服务,21.27%的受访者表示不确定。在影响采用UAM服务的因素中,安全是最重要的,其次是成本、行程时间、准时性和运行特性。

Fu等[23]研究了在与私家车、公共交通和自动驾驶出租车服务等模式的竞争下,公众采用UAM服务的可能性[23]。他们通过对几个基于市场细分的多项logit模型分析发现,安全性、出行时间和出行成本是影响公众选择UAM的最关键的因素。与选择其他地面交通方式的用户相比,UAM用户可以节省最多的时间。另一项研究对1980—2017年的52项研究中的城市模式选择因素进行了综合分析,以确定UAM的需求和接受驱动因素[24]。作者根据不同用户群体的需求,提出了服务成本、舒适性和灵活性三种不同的UAM运行理念。

最后,一系列研究总结了为达到如下目的所做的努力,即通过扩展现有的多代理交通仿真(MATSim)框架,整合UAM服务到现存的交通体系中,以开发一个仿真工具[25–28]。虽然扩展的仿真框架的出行方式选择行为是通过应用离散选择模型实现的,但仿真工具能够识别不同的车辆设计场景(即速度和容量)及运行配置如何影响UAM服务的需求。该仿真工具被用于测试美国南达科他州苏福尔斯和瑞士苏黎世的案例研究。在模拟过程中,每个城市的UAM运行网络(即垂直起降机场的位置)被设定为给定的输入。

2.2. UAM 网络设计

设计良好的地面基础设施系统是UAM运行的基础。为了建立这样一个系统,必须确定垂直起降机场建设的最佳位置,以满足用户的潜在需求,并支持eVTOL飞机的运营。设置垂直起降机场应首先考虑到附近土地使用的自然限制和eVTOL飞机的操作要求。Antcliff等[7]以加利福尼亚州硅谷为例,通过分析现有基础设施和飞机运行规律的特点来说明如何实现这些目标。Vascik和

Hansman [13]建议将垂直起降机场与不同类型的现有基础设施并存,以提高垂直起降机场的可用性,并减少UAM的最初或最后1 mile距离。为了确定垂直起降机场地点,需要考虑需求分布因素。Lim和Hwang [29]使用k-means聚类算法确定了韩国首尔的垂直起降机场的位置。每个确定的集群都包含相互共存的出行需求,集群的中心被认为是垂直起降机场的合理位置。Fadhil [30]通过考虑影响研究区域内通勤需求的因素和现有的基础设施,采用了一种基于地理信息系统(GIS)的方法给垂直起降机场选址。在该研究中,研究人员根据专家判断为各因素分配了不同的权重,并确定了不同位置被选择为垂直起降机场的概率。人们可以从提供垂直起降机场的最佳选址和分析UAM的运行特性角度进行模型优化,为UAM网络设计提供更多的见解。Daskilewicz等[31]在考虑研究区域内出行需求的情况下,提出了以最小化系统出行时间为目标的整数规划。但是,其发表的论文中没有给出数学模型的公式,而且作者无法找到最优解。Rath和Chow [32]提出了另一个模型,他们将传统枢纽选址问题的建模结构应用于从纽约市中心到纽约和新泽西地区三个机场的垂直起降机场选址,而这原本是使用出租车服务的[32]。他们模型的一个缺点是只应用了经典的建模结构,而没有结合UAM服务的运行特性。一些研究调查了UAM用户的付费意愿。如参考文献[33]所述,根据一项调查,UAM服务用户愿意支付美国和德国出租车价格的2~2.5倍,以换取减少50%的出行时间。其他的研究中也表明用户愿意为UAM服务支付更多的费用以节省出行时间[4,23]。

针对现有文献的不足,我们提出将模式竞争纳入建模结构,明确地解决UAM网络设计问题。具体来说,考虑一个地区的不同旅行需求,同时考虑UAM服务吸引的需求与垂直起降机场地点之间的相互作用,我们将按需分配的UAM网络设计问题转化为具有特定约束的 p 中值轴辐式网络问题,以反映个体在地面运输和多式联运服务之间的选择。我们还提出了一种减少决策变量可行域的预处理方法,大大减少了计算时间,使问题易于处理并使UAM网络设计具有可扩展性。此外,本文还进行了敏感性分析,以证明关键因素,如UAM的进出时间以及UAM服务的定价对网络设计结果的影响。研究结果为城市决策者和UAM运营商提供了深入的规划和管理建议。

3. 问题公式化

对于eVTOL按需分配服务，考虑到城市区域的出行需求，该研究确定了垂直起降机场的位置、从地面交通转向UAM的出行需求、各个垂直起降机场的旅客分配以及垂直起降机场进出地面模式的选择。在网络设计的数学模型中，目标是使全体旅客的广义出行成本最小化，其中包括那些选择使用多式联运服务的旅客和那些继续使用现有地面交通网络的旅客。但是，该模型允许每个出行者选择广义成本最低的最佳出行方式。

3.1. 假设

此项研究针对UAM网络设计做出了以下假设：

(1) 相比于纯地面交通，如果城市空中交通节省的旅行时间少于多式联运，那么旅客将在纯地面运输和多式联运之间进行选择，而不会选择城市空中交通。

(2) 在此项研究中，纯地面交通仅包括驾驶私人车辆、使用公共交通以及使用TNC或出租车公司提供的出租车服务。可用于进出垂直升降机场的出行方式包括驾驶私家车、乘坐公共汽车、步行、乘坐出租车、使用共享单车和电动车等。

(3) 这项研究没有考虑乘客在垂直升降机场的转运问题，也就是说，一次旅行仅通过两个垂直升降机场，一个靠近旅客的始发地，而另一个接近目的地。

(4) 对于多式联运的情况，此项研究不考虑交通拥堵问题，并且假定步行、骑自行车、骑电动车、乘坐公共汽车和飞机的速度恒定，驾驶私人车辆或乘坐出租车的速度与相应地面旅行的平均速度相同。

(5) 航空交通的费用由基本固定成本和可变成本组成，可变成本与航线距离呈线性关系。地面运输的成本取决于所选的出行方式（有关每种出行方式的成本构成和相应的参数设置，请参见表1）。

(6) 此项研究没有考虑到由于垂直升降机场的容量限制或电动垂直起降机的短缺而给旅客带来的额外等待时间。

(7) 此项研究也没有考虑旅客乘坐私人电动垂直起降机或者公共电动垂直起降机时不同的票价。

对于假设（1），如文献[23]所述，节省的旅行时间和额外的旅行成本是影响旅客选择城市空中交通决定的最重要因素。在假设（2）中，只有使用三种主要交通方式的旅客才被视为是潜在的城市空中交通旅客，因为步行、自行车和电动车主要用于短途旅行。实际上，可用于垂直升降机场进出的选择是中短途的出行方式。假设（3）的提出是因为转运将增加更多的等待时间，给旅客的出行带来不便，从而会降低多式联运对城市旅行的吸引力。但是，如果考虑区域空中交通，转运就是可行的。在假设（4）中，步行、骑自行车、骑电动车和乘坐飞机的平均行驶速度是恒定的这一假设是合理的，因为这些出行方式通常不会遇到拥堵问题，并且它们的速度取决于车辆配置或现有的服务数据[4,34,35]。如果在未来的研究中考虑到行驶时间的不确定性，则可以减少关于拥堵对地面车辆行驶的影响的假设。TNC目前的定价方案由基本固定成本加上可变成本组成[36]，该方案在假设（5）中用于城市空中交通。参考文献[4]中所做的预测表明基本成本和可变成本与UberBlack服务的行程相匹配[4]。如果在实际中结合了许多其他因素（如一天中的时间、旅行时间和预订费），就可以放宽此定价策略，并且可以遵循与TNC类似的收费算法，该算法将在后续进行研究。对于地面旅行，公交服务的成本取决于用户是否持有公共交通通行证。UberX的定价方案简化了租用服务的成本[36]。对于共享自行车和电动车，其服务成本的定价方案来自坦帕湾的现有运营商[37,38]。驾驶私人车辆的成本包括汽油成本和停车成本。单位汽油成本可以视为确定值，但停车成本视情况而定。如表

表1 不同运输方式的定价方式

Travel Mode	Pricing Scheme	Values (USD)
EVTOL	Base cost + unit distance cost × trip distance	Base cost: 30, unit distance cost: 2
Bus transit	With transit pass	1
	Without transit pass	2
Personal vehicle	Gasoline cost per mile × trip distance + parking cost	Gasoline cost per mile: 0.11
For-hire service	Base cost + unit time cost × trip time + unit distance cost × trip distance	Base cost: 2.3, unit time cost: 0.28 per minute; unit distance cost: 0.8
Bike-sharing service	Base cost + unit time cost × trip time	Base cost: 1, unit time cost: 0.25
E-scooter	Unit time cost × trip time	Unit time cost: 0.29

2所示, 本研究假设停车成本取决于出行目的、人口密度和停车类型[39]。应当指出的是, 私人车辆的拥有成本并未包括在内, 因为当旅客为特定行程做出模式选择决定时, 他们并未考虑该成本。垂直升降机场的容量限制了可以降落和起飞的电动垂直起降机的数量。如果容量有限, 乘客可能需要等待。另外, 如果运营商无法提供足够的电动垂直起降机, 则会延误乘客的行程。假设(6)表明, 我们仅假设在垂直升降机场间的航行时间恒定, 而没有考虑这些不确定性。假设(7)表明, 在这项研究中, 我们没有区分每位旅客空中交通的票价, 该票价在实际情况中由于电动垂直起降机的使用率不同而有所不同, 类似于Uber和Uber Pool。参照近期的情况, 如果要求飞行员操作电动垂直起降机, 则将有相当大的固定成本, 而且票价变动会受到限制。最后, 我们将努力为新兴的城市空中交通开发一个规划及评估工具, 其可以用于计算基于不同使用率的不同票价, 并可以分析其对交通网络设计的影响。

3.2. 建模方法

城市空中交通按需服务的建模过程如图1所示。建模结构中初始输入项有三个主要的来源。第一个来源包括研究区域的激光雷达数据和土地使用信息以及管制政策。具体来说, 在开发三维(3D)地图时, 激光雷达数据可用于提取研究区域的海拔信息, 土地使用信息是识别垂直建筑可用地面区域的基础, 而管制政策指出了飞机的运行限制。GIS用于整合上述输入以识别垂直升降机场的位置(有关GIS工具的详细信息请参见第3.3节)。坦帕湾区域规划模型(TBRPM)的模拟输出是输入的另一主要来源, 它可以提供旅客旅行需求数据,

如出发地和目的地(OD)、旅行时间和地面交通方式(关于TBRPM及其输出的说明请参见第4节)。最后输入的是旅客的社会人口统计信息, 该信息表示了旅客时空分布。垂直升降机场的位置、旅行需求和时空分布一起作为网络设计模型的输入。在使用商业求解器解决优化问题之前, 本研究使用了预处理技术来减少网络设计模型的可行区域。最后, 本研究得到了垂直升降机场的最佳位置、对城市空中交通服务的需求量、到达垂直升降机场乘坐城市空中交通的旅客数量以及旅客进出垂直升降机场的模式选择信息。

本研究没有考虑TBRPM和网络设计模型之间的任何交互作用。在一个工作日对TBRPM进行一次模拟, 以获取研究区域的出行数据, 并假设旅客对于地面交通和航空交通之间的选择行为不会影响TBRPM的输出, 因为预计转移到城市空中交通的需求仅占总需求的极小一部分。本研究在第5节中讨论了由新兴城市空中交通引起的需求, 并提出了未来的研究方向。

3.3. 使用GIS工具确定垂直升降机场

在将提出的模型应用于特定的城市空中交通网络设计之前, 必须确定垂直升降机场位置, 这些位置受到各种自然和法规的限制。我们获取了佛罗里达州的激光雷达数据, 并将坦帕湾地区的数据处理为该地区的3D地图。然后, 我们根据现有的土地使用限制和飞机运行要求, 应用GIS工具来确定候选位置。根据土地使用限制, 本研究仅考虑那些被认为适合作为垂直升降机场的区域, 如商业区和工业区、空地和公共场所。住宅区(包括市区的住宅建筑)和保护区被排除在外, 以减轻垂直升降机场对社区的影响。考虑到直升机的运行特性,

表2 不同情况下的停车费用

Trip purpose	Population density	Parking type	Value (USD)
Shopping, medical, and home	—	—	None
Work	High	Off-street parking	13.00
	Median		10.00
	Low		6.75
School	—	Off-street parking	1.00
Recreational	—	—	5.00
Social	High	2 h off-street parking	9.00
	Medium		5.5
	Low		3.00
Meal	High	1 h on-street parking	1.25
	Medium		1.00
	Low		0.75

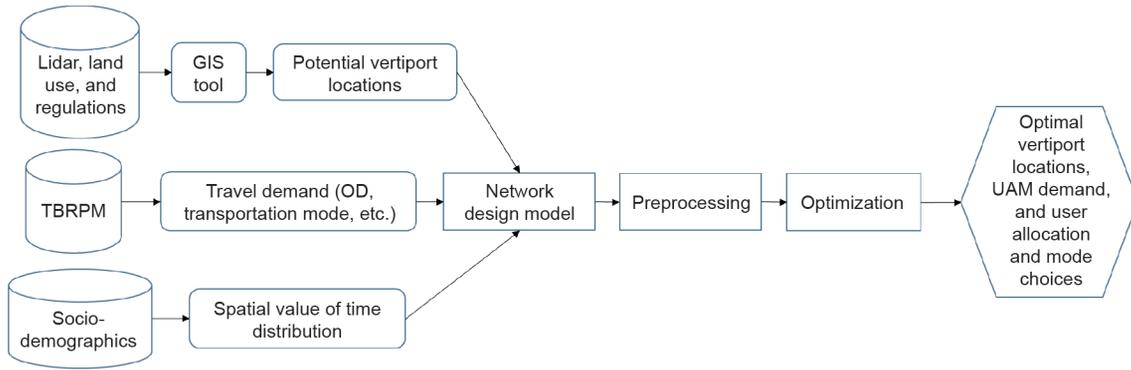


图1. 按需城市空中交通网络设计模型。TBRPM: 坦帕湾区域规划模型; OD: 起点和终点。

飞机的运行要求主要是针对直升机停机坪设计的FAA法规。确定候选垂直升降机场位置的具体步骤如下。

(1) 收集激光雷达数据并绘制研究区域的3D地图。激光雷达数据可从参考文献资料[40]获取。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供了美国沿海地区的海拔数据。

(2) 将研究区域的地图作为基础地图导入到GIS工具中, 地图的基本组成元素是土地。

(3) 将研究区域的土地图层添加到基础地图中, 过滤出符合条件的土地利用区域, 然后将其与地块级别的基础地图进行合并。

(4) 然后添加另一层, 从一侧到另一侧将研究区域划分为500 ft (1 ft = 0.3048 m) 的六边形。六边形的尺寸根据FAA法规进行选择 (FAA法规为直升机停机坪的设计提供了说明)。其假定每个六边形可为一个电动垂直起降机提供足够的区域面积。如果FAA制定了有关电动垂直起降机的新法规, 则应根据新法规进行规划。

(5) 将六边形图层与土地利用区域图层组合在一起。如果在符合土地使用区域的地块中未包含六边形, 则会将其删除, 并且不会用做垂直升降机场的候选位置。

(6) 确定屋顶空间足够大的市区高层建筑。对于没有高层建筑的郊区, 会解析出最大高度为20 ft的六边形。如果最大高度小于或等于20 ft, 则认为不存在可以安置垂直升降机场的建筑物或其他结构。

(7) 将相邻的合格六边形合并为一个垂直升降机场, 以避免产生过多的候选对象。

3.4. 城市空中交通轴辐式网络设计

对于多式联运, N 为代表城市或郊区旅客出行的起点(O)和终点(D)的一组节点。 P 表示一组OD对, M 表示一组垂直升降机场的候选位置, F 表示一组可用

于垂直升降机场出入的出行模式。对于任何的OD对, 旅客都可以通过纯地面运输或垂直升降机场的多式联运直接往返, 而垂直升降机场就是交通枢纽。图2说明了城市空中交通的运输网络。

这样的网络类似于航空研究领域广泛研究的轴辐式网络, 在该网络中, 任何两个机场之间的流量都不是为所有成对节点提供直接传输, 而是通过称为“转运点”的指定转运节点进行传输[41,42]。因此, 我们借用了 p 中值轴辐式网络问题的建模结构。城市空中交通网络设计问题的决策变量为 $y_k, z^p, x_{kd}^p, g_{ak}^p, h_{ed}^p, \forall k, d \in M, \forall p \in P, \forall a, e \in F$, 以上变量都为二进制。如果选择位置 $k (k \in M)$ 作为垂直升降机场, 则 y_k 的值为1; 如果行程 p 是通过纯地面运输, 则 z^p 的值为1; 如果行程 p 是通过多式联运进行的, 则 x_{kd}^p 的值为1, 乘客从 k 至 d 通过两个垂直升降机场 k 和 d ; 如果行程 p 使用模式 a 到达垂直升降机场 k , 则 g_{ak}^p 的值为1; 如果行程 p 使用模式 e 从垂直升降机场离开, 则 h_{ed}^p 的值为1。注意, 每个行程 p 包含一对OD节点 $(i, j), \forall i, j \in N$ 。

如前所述, 由于各种限制, 规划建立的垂直升降机场的数量将受到限制。 u 为计划的垂直升降机场数量, 可得:

$$\sum_{k \in M} y_k = u, \forall k \in M \quad (1)$$

为了到达目的地, 每个旅客都必须在纯地面交通和多式联运之间做出选择。所以:

$$z^p + \sum_k \sum_{d \neq k} x_{kd}^p = 1, \forall p \in P \quad (2)$$

除非选择 k 作为垂直升降机场, 否则站点 k 不能位于路线 $i \rightarrow k \rightarrow d \rightarrow j$ 中。因此:

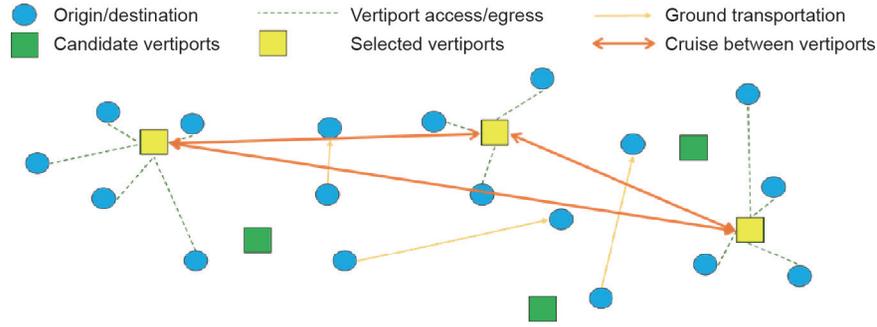


图2. 城市空中交通轴辐式网络。

$$\sum_{k \in M, d \neq k} x_{kd}^p + \sum_{d \in M, d \neq k} x_{dk}^p \leq y_k, \forall k \in M, \forall p \in P \quad (3)$$

通常，将单一分配的轴辐式网络问题的需求假定为一个恒定值（确定性编程）或一组具有概率的变量（随机编程）。在这项研究中，基于个人出行的总数量，我们考虑了地面运输模式与多式联运模式之间的竞争，该竞争受垂直升降机场位置、垂直升降机场的数量以及旅客进出垂直升降机场的模式选择的影响。在以下部分中，将介绍不同模式之间的竞争关系。

3.5. 城市空中交通的操作概念和模式选择

许多研究已经定义了多式联运的操作概念 [7,12,43]，可以将其绘制为图3所示的过程。在每个垂直升降机场，都有旅客乘坐地面交通可到达的进出站点、候机区、供乘客上下飞机的登机区和离场区以及飞机的着陆区和起飞区。如果要求旅客在垂直升降机场登机或下机，则不需要特定的登机和离场区。多式联运服务流程是，旅客将首先使用地面交通工具到达指定的垂直升降机场。到达后，旅客将前往等候区，在等候区等待一段时间后才能登上相应的登机口。飞机从垂直升降机场起飞，并在到达一定高度后航行至另一个垂直升降机场。飞机降落在目的地所在的垂直升降机场平台之后，旅客便会经历类似的过程，然后再通过地面交通工具到达目的地。

多式联运的旅行时间不仅取决于航行过程和飞行时间，还取决于进出时间。因此，本研究还对旅客对垂直升降机场进出模式的选择进行了建模。本研究假设旅客仅选择一种交通方式进出垂直升降机场。等式 (4) 和 (5) 表明，如果一次旅行涉及多式联运，则必须选择地面交通模式以便捷地进入始发垂直升降机场和离开垂直升降机场。

$$\sum_k \sum_{d \neq k} x_{kd}^p = \sum_a \sum_k g_{ak}^p, \forall p \in P \quad (4)$$

$$\sum_k \sum_{d \neq k} x_{kd}^p = \sum_e \sum_d h_{ed}^p, \forall p \in P \quad (5)$$

需要确保旅客进出方式的选择将适用于所选航空旅行的两个垂直升降机场，这可以通过方程式 (6) 进行限制。

$$2x_{kd}^p \leq \sum_a g_{ak}^p + \sum_e g_{ed}^p, \forall k, d \neq k \in M, \forall p \in P \quad (6)$$

基于上述关系，我们可以计算出多式联运的旅行时间和旅行费用。令 c_{air}^p 和 t_{air}^p 表示行程 p 的航空旅行总服务成本和服务时间； c_{kd} 和 t_{kd} 分别代表旅客通过电动垂直起降机场往来两个垂直升降机场之间的旅行成本和旅行时间； c_{ak}^p 和 t_{ak}^p 表示旅客通过地面运输 a 出入行程 p 的垂直升降机场 k 所需要的旅行成本和旅行时间。 t_{tw} 代表旅客在转移、在机场等待以及登机下机的时间； t_{tl} 是电动垂直起降机场起飞和降落所需的时间。等式 (7) 和 (8) 用于计算城市空中交通的总旅行时间和总旅行成本。

$$c_{air}^p = \sum_k \sum_{d \neq k} c_{kd}^p \cdot x_{kd}^p + \sum_a \sum_k g_{ak}^p c_{ak}^p + \sum_e \sum_d h_{ed}^p c_{ed}^p \quad (7)$$

$$t_{air}^p = \sum_k \sum_{d \neq k} (t_{kd} + t_{tw} + t_{tl}) \cdot x_{kd}^p + \sum_a \sum_k g_{ak}^p t_{ak}^p + \sum_e \sum_d h_{ed}^p t_{ed}^p + t_{tw} + t_{tl} \quad (8)$$

可以根据3.1节中讨论的成本计算公式和行进速度假设获取进出垂直升降机场的旅行时间和旅行成本。最后，本研究定义了纯地面交通和空中交通之间的模式选择标准。美国交通运输部计划通过减少旅行花费的时间确定有利于旅客的新措施，节省的旅行时间是用于成本

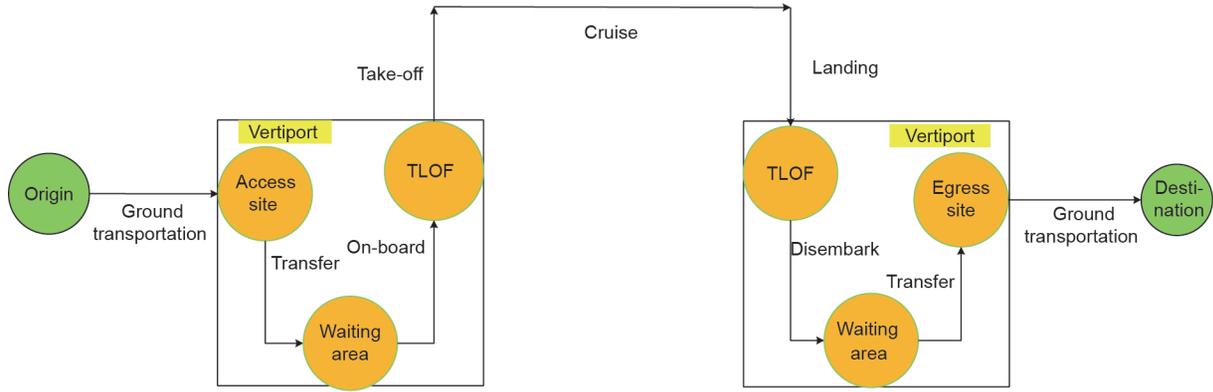


图3. 城市空中交通操作概念。TLOF: 着陆区和起飞区。

效益分析的主要标准[43]。时间价值与旅行成本之间的比较是旅客从不同模式中进行选择的基本判断标准。用节省的时间乘以旅客的时间价值可以计算出节省的时间价值。用 c_{ground}^p 和 t_{ground}^p 分别表示纯地面运输的旅行成本和旅行时间； γ^p 代表旅行 p 中旅客的时间价值。如方程式 (9) 所示，当节省的旅行时间的价值少于额外费用时，用户将不会选择城市空中交通。

$$c_{\text{air}}^p - c_{\text{ground}}^p \leq \gamma^p \cdot (t_{\text{ground}}^p - t_{\text{air}}^p), \forall k, d \in M, \forall p \in P \quad (9)$$

3.6. 城市空中交通服务网络设计的数学模型

整数项目的目标是最大限度地降低旅客的一般旅行费用，包括纯地面交通和多式联运的费用。广义旅行费用是货币化的旅行时间和旅行费用的总和。基于以上讨论，用于城市空中交通网络设计的整数编程 (IP) 的完整公式如下 (P1)：

$$\min \sum_{p \in P} \left\{ (t^p \cdot \gamma^p + c^p) \cdot z^p + \sum_k \sum_{d \neq k} [c_{kd} + (t_{kd} + t_{tw} + t_{tl}) \cdot \gamma^p] \cdot x_{kd}^p + \sum_a \sum_k g_{ak}^p (t_{ak}^p \cdot \gamma^p + c_{ak}^p) + \sum_e \sum_d h_{ed}^p (t_{ed}^p \cdot \gamma^p + c_{ed}^p) \right\}$$

s.t.

$$\sum_k y_k = u, \forall k \in M$$

$$z^p + \sum_k \sum_{d \neq k} x_{kd}^p = 1, \forall p \in P$$

$$\sum_{d \in M, d \neq k} x_{kd}^p + \sum_{d \in M, d \neq k} x_{dk}^p \leq y_k, \forall k \in M, \forall p \in P$$

$$\sum_k \sum_d x_{kd}^p = \sum_a \sum_k g_{ak}^p, \forall (p, k, d) \in W$$

$$\sum_k \sum_d x_{kd}^p = \sum_e \sum_d h_{ed}^p, \forall (p, k, d, a, e) \in W$$

$$2x_{kd}^p \leq \sum_a g_{ak}^p + \sum_e g_{ed}^p, \forall k, d \neq k \in M, \forall p \in P$$

$$\left[t^p - \sum_k \sum_{d \neq k} (t_{kd} + t_{tw} + t_{tl}) \cdot x_{kd}^p - \sum_a \sum_k g_{ak}^p t_{ak}^p - \sum_e \sum_d h_{ed}^p t_{ed}^p \right] \cdot \gamma^p \geq \sum_k \sum_d c_{kd}^p \cdot x_{kd}^p + \sum_a \sum_k g_{ak}^p c_{ak}^p + \sum_e \sum_d h_{ed}^p c_{ed}^p - c^p, \forall p \in P$$

$$z^p \in \{0, 1\}, y_k \in \{0, 1\}, x_{kd}^p \in \{0, 1\}, g_{ak}^p \in \{0, 1\}, h_{ed}^p \in \{0, 1\} \quad (10)$$

3.7. 大型网络问题的预处理程序

在许多参考文献中，传统的轴辐式问题已被证明是非确定性多项式 (NP) [41,42,44–46]，这说明该问题无法用多项式解决。结合传统的轴辐式问题的建模结构和单个旅客的模式选择建模来创建所提出的数学模型 P1，这会使得解决 IP 问题更难。然而，通过分析网络设计问题的性质和城市空中交通的特性，我们提出了一个附加条件，并与等式 (9) 中的条件一起进行了预处理，这大大减少了 IP 问题的可行域。因此，尽管本研究的建模结构仍然比传统的轴辐式网络复杂，但是可以显著减少所提出的城市空中交通网络设计的问题，从而有可能解决大型城市空中交通网络设计的问题。预处理过程描述如下。

P1 中提出的数学模型的目的是通过城市空中交通将系统的总成本降至最低。我们给出了使用纯地面交通工具进行候选旅程的旅行时间和旅行成本，而且尝试了可

能会转变为通过空中交通进行的候选行程，P1的目标函数（即使所有行程的广义总成本最小化）等效于最大化节省广义成本，如下所示：

$$\begin{aligned} \max \sum_{p \in P} \left\{ \sum_k \sum_{d \neq k} [C_{kd} + (t_{kd} + t_{tw} + t_{tl}) \cdot \gamma^p \right. \\ \left. - t^p \cdot \gamma^p - c^p] \cdot x_{kd}^p + \sum_a \sum_k g_{ak}^p (t_{ak}^p \cdot \gamma^p + c_{ak}^p) \right. \\ \left. + \sum_e \sum_d h_{ed}^p (t_{ed}^p \cdot \gamma^p + c_{ed}^p) \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

从等式(9)我们可以得知，如果节省的时间价值少于附加费用（即 $\sum_k \sum_{d \neq k} x_{kd}^p = 0$ ），旅客将不会适用空中交通。那么，我们可以排除 x_{kd}^p 为0的旅行。我们可以定义 W_1 ：

$$\begin{aligned} W_1 = \{(p, k, d, a, e) \mid [t^p - (t_{kd} + t_{tw} + t_{tl}) - t_{ak}^p - t_{ed}^p] \cdot \gamma^p \\ \geq c_{kd}^p + c_{ak}^p + c_{ed}^p - c^p, \forall p \in P, \forall k, d \in M\} \quad (12) \end{aligned}$$

式中， p 分别代表候选旅行； k 代表起点垂直升降机场； d 代表终点垂直升降机场； a, e 代表垂直升降机场进出模式； x_{kd}^p 的取值可以为1。

另外，可以通过观察城市空中交通过程来提出另一个限制条件。在保证一般性的情况下，任何通过给定的垂直升降机场 k 到 d ，即从起点 i 到终点 j 的空中交通都可以通过图4(a)、(b)表示。

给定任意两个垂直升降机场(k, d)，不管选择哪个作为出发机场，空中旅行的距离都是恒定的。因此，对于任何给定的垂直升降机场（本研究为 $i \rightarrow k \rightarrow d \rightarrow j$ ），旅客总会选择行程距离较短的行程路线，而行程距离较长的行程（本研究为 $i \rightarrow d \rightarrow k \rightarrow j$ ）是不可行的。否则，进出垂直升降机场的直线距离甚至会比起点和终点之间的直线距离更长。这种关系可以通过等式(13)来表达。

$$d_{kd}^p \geq d_{dk}^p \cdot x_{kd}^p, (p, k, d) \in W_1 \quad (13)$$

式中， d_{kd}^p 表示通过垂直升降机场 $k \rightarrow d$ 的旅行 p 的旅行距离。然后，我们可以定义 W ：

$$W = \{(p, k, d, a, e) \mid d_{kd}^p \leq d_{dk}^p, (p, k, d) \in W_1\} \quad (14)$$

我们可以进一步缩小原始模型P1的可行区域，并且可以用以下数学模型(P2)代替P1：

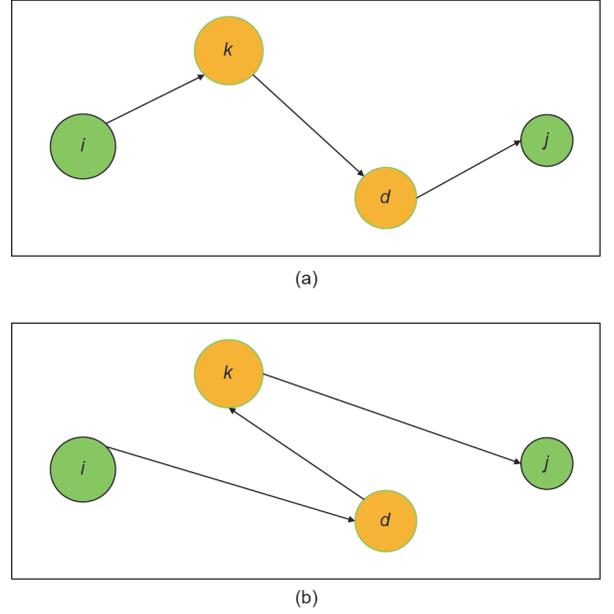


图4. 起点和终点与两个候选垂直升降机场的相对位置。

$$\begin{aligned} \max \sum_{p \in P} \left\{ \sum_k \sum_{d \neq k} [C_{kd} + (t_{kd} + t_{tw} + t_{tl}) \cdot \gamma^p \right. \\ \left. - t^p \cdot \gamma^p - c^p] \cdot x_{kd}^p + \sum_a \sum_k g_{ak}^p (t_{ak}^p \cdot \gamma^p + c_{ak}^p) \right. \\ \left. + \sum_e \sum_d h_{ed}^p (t_{ed}^p \cdot \gamma^p + c_{ed}^p) \right\} \end{aligned}$$

s.t.

$$\sum_k y_k = u, \forall k \in M$$

$$\sum_k \sum_{d \neq k} x_{kd}^p \leq 1, \forall (p, k, d) \in W$$

$$\sum_{d \in M, d \neq k} x_{kd}^p + \sum_{d \in M, d \neq k} x_{dk}^p \leq y_k, \forall (p, k, d) \in W$$

$$\sum_k \sum_d x_{kd}^p = \sum_a \sum_k g_{ak}^p, \forall (p, k, d) \in W$$

$$\sum_k \sum_d x_{kd}^p = \sum_e \sum_d h_{ed}^p, \forall (p, k, d, a, e) \in W$$

$$2x_{kd}^p \leq \sum_a g_{ak}^p + \sum_e h_{ed}^p, \forall (p, k, d, a, e) \in W$$

$$\begin{aligned} z^p \in \{0, 1\}, y_k \in \{0, 1\}, x_{kd}^p \in \{0, 1\}, g_{ak}^p \in \{0, 1\}, \\ h_{ed}^p \in \{0, 1\}, (p, k, d, a, e) \in W \quad (15) \end{aligned}$$

4. 数值研究

为了证明所提出的方法有效，我们在TBRPM模拟

的出行需求数据的基础上进行了数值研究, 该数据已被佛罗里达州交通运输局 (FDOT) 第七区 (D7) 和城市规划组织 (MPO) 用于预测未来的出行需求。如图5 (a) 所示, TBRPM的研究区域与FDOTD7管辖区域相对应, 包括Hillsborough、Pinellas、Pasco、Hernando和Citrus。

4.1. 数据描述

来自TBRPM的旅行需求数据是区域分配水平的, 其聚焦于每个旅行者的旅途, 这是TBRPM在一个工作日运行24 h模拟的结果。数据提供了研究区域中所有预测旅行的OD坐标及其相应的网络旅行时间和旅行距离。它还提供其他信息, 如家庭收入、家庭工作者人数、出行方式、出行目的和过境通行证持有人。对以上行程进行过滤, 选择出行距离超过10 mile、出行时间超过30 min的行程 (因为假设了在短于该阈值的行程中, 人们不会选择eVTOL出行方式)。结果仍有266 734次旅行作为潜在的UAM旅行。表3列出了这些行程的统计数据。如表所示, 这些行程的出行时间和出行距离分布不均匀, 并且时间较长 (≥ 41.74 min) 或行程较长

(≥ 29.46 mile)。

利用GIS工具, 总共选择了100个候选的垂直起降机场地点。根据TBRPM输入数据中的家庭收入和每个家庭的工作者人数, 得到了每个出行者的年平均工资, 对应的分布如图6 (a) 所示。这种分布非常接近整个Florida的分布[47], 每个出行者的时间价值可以通过除以一年的一般工作时间 (2080 h) 来计算, 据此得到如图6 (b) 所示的分布图。表4列出了用于数值研究中模型评估的其他参数。

4.2. 结果分析

在64位Windows 10操作环境下, 使用Python和Gurobi v9.0求解器在3.60 GHz、16 GB RAM的Dell计算机上求解该整数程序。预处理耗时2小时34分钟, 数学模型耗时245 s (约4 min) 得到最优值。30个垂直起降机场的位置和相应的UAM行程如图5 (b) 所示。预处理结果表明1124名旅行者将成为UAM服务的用户, 优化结果表明, 最终用户数量为532人, 约为266 734次旅行的0.20%, 总体成本节省了9783美元。表5总结了每

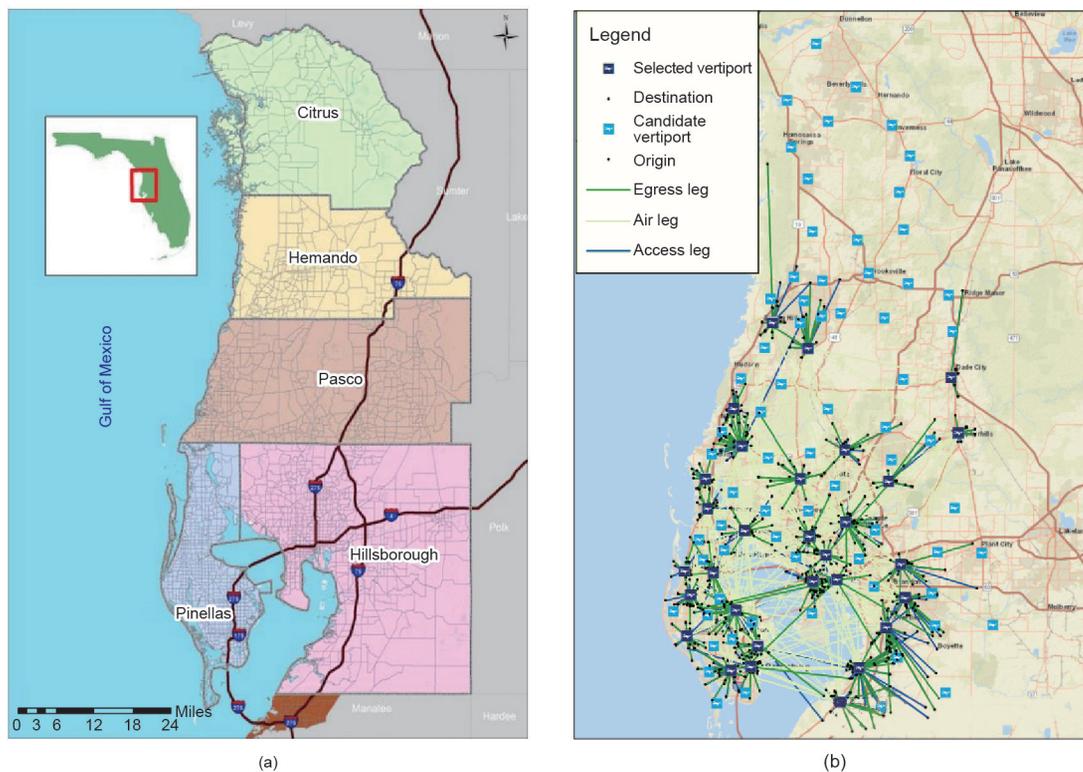


图5. TBRPM研究区域 (a) 和选定的垂直升降机场位置 (b) 以及UAM行程分布的优化结果。资料来源: Esri、Here、Delorme、USGS、Intermap、INCREMENT P、NRCan、Esri Japan、METI、Esri China (Hong Kong)、Esri Korea、Esri (Thailand)、MapmyIndia、NGCC、©OpenStreetMap 贡献者, 以及GIS用户社区。

表3 潜在旅行的统计信息

Statistics	Travel time (min)	Travel distance (mile)
Mean	38.48	25.95
Standard deviation	8.79	7.41
Minimum value	30.00	10.00
25th percentile	32.40	20.52
50th percentile	35.80	24.44
75th percentile	41.74	29.46
Maximum value	179.85	103.10

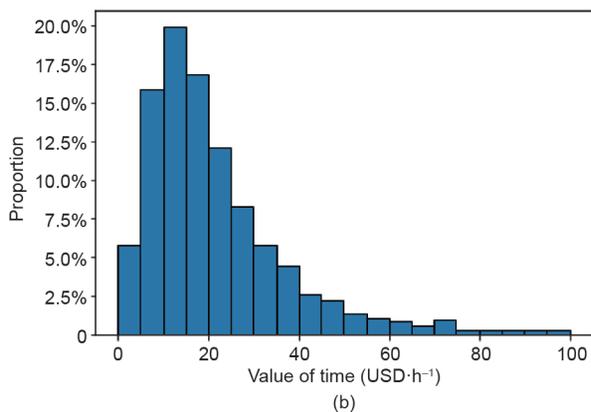
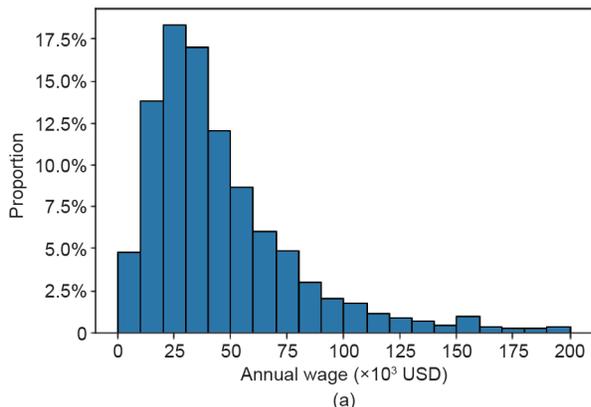


图6. 研究区域旅行者的平均工资分布 (a) 和时间分布值 (b)。

表4 数值研究中参数的取值

Parameters	Value
Average bus speed (mi·L ⁻¹)	12.10
Average e-scooter speed (mi·L ⁻¹)	6.00
Average biking speed (mi·L ⁻¹)	5.09
Average walking speed (mi·L ⁻¹)	3.13
Cruise speed of eVTOL aircraft (mi·L ⁻¹)	150.00
Number of vertiports to be built	30
Transfer time at vertiport (min)	5.0
Aircraft operation at vertiport (min)	2.5
Coefficient to transfer straight line to driving distance	1.4
Coefficient to transfer straight line distance to walking/ biking/e-scooter distance	1.1

个选定的垂直起降机场的需求, 表6总结了垂直起降机场进出模式的选择。如表所示, 垂直起降机场的需求分布不均匀, 在当前参数设置下, 最高的需求量为65, 最低的需求量为13。对UAM服务的需求主要集中在沿海地区。在进出机场的交通方式选择上, 驾驶个人车辆是进入垂直起降机场的主要选择, 驾驶个人车辆和使用出租服务是离开垂直机场的主要选择。如果UAM用户继续使用地面运输, 则需检测他们的旅行时间和距离分布, 以验证所设定的UAM服务 (30 min和10 mile) 的阈值是否合理。如图7和图8所示, UAM用户的平均出行距离在约为30 mile, UAM用户的平均出行时间约为50 min, 这说明阈值的选择是合理的。

本研究分析了多模式UAM行程的特征, 结果如图9至图12所示。如图9所示, UAM的行程大部分在10~40 mile, 最长约60 mile。从图10可以看出, 大多数用户使用UAM服务可以节省8~40 min, 最长节省时间超

表5 通过每个选定垂直升降机场的旅行次数

Vertiport index	Demand	Vertiport index	Demand
1	52	16	20
2	64	17	34
3	39	18	26
4	45	19	33
5	21	20	42
6	25	21	26
7	35	22	36
8	39	23	54
9	64	24	25
10	48	25	21
11	31	26	25
12	43	27	32
13	27	28	13
14	30	29	65
15	41	30	27

表6 进出机场的交通方式选择

Item	Transportation mode	Value
Vertiport access	Personal vehicle	495
	For-hire service	10
	Bicycle	1
	E-scooter	10
	Bus transit	16
Vertiport egress	Personal vehicle	161
	For-hire service	329
	Bus transit	42

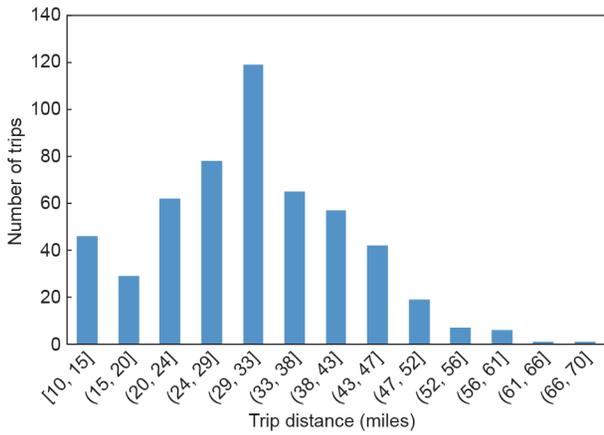


图7. 使用纯地面运输时, UAM用户的行程距离分布。

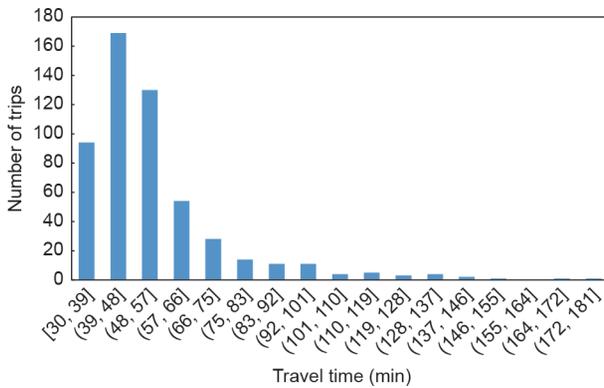


图8. 使用纯地面运输时, UAM用户的行程时间分布。

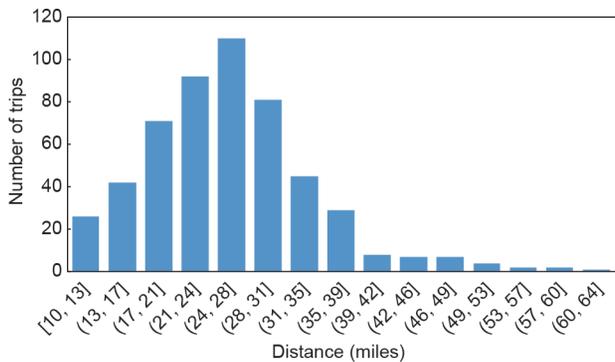


图9. 多模式UAM行程距离分布。

过120 min, 这说明UAM服务具有显著的时间节约效益。我们计算了多模式UAM行程各部分的时间消耗与总服务时间的比值, 其分布如图11所示。图中, 飞行行程时间平均占自动升降机服务总时间的30%, 这表明通过扩大垂直起降机场的位置以改善垂直起降机场的可达性, 可以进一步提高自动升降机的服务效率。在出行目的方面, 从图12中可以看出, 使用UAM服务的主要出行目的以家庭出行和工作出行为主。

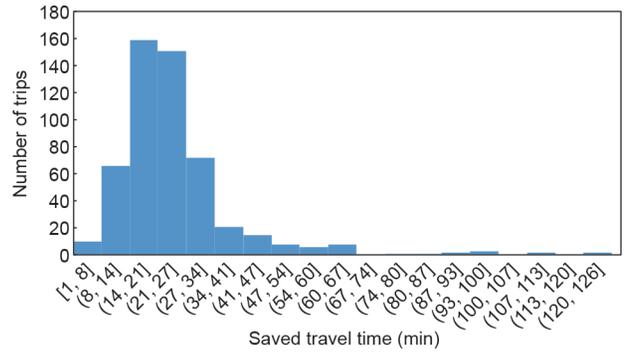


图10. UAM节省时间的分布。

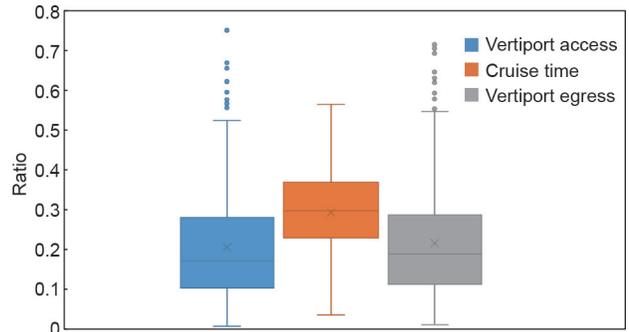


图11. UAM运行各部分服务时间占总服务时间的比例。

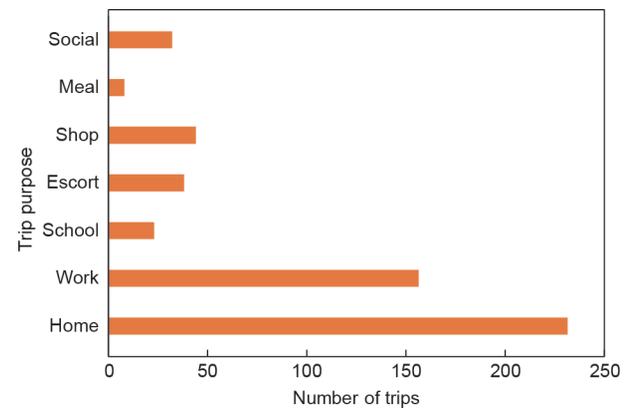


图12. 使用UAM服务的出行目的统计图。

4.3. 灵敏度分析

为了了解一些关键参数的变化如何影响出行者出行方式的选择和UAM服务的性能, 本研究进行了敏感性分析。每一次敏感性分析中, 只有一个参数取值不同, 如表4所示, 其他参数取值保持不变。第一个变化的参数是垂直升降机场的数量, 结果如图13至图17所示。垂直升降机场的数量会显著影响用户对垂直升降机场的可达性, 进而影响用户对UAM服务的使用, 如图14所示, 即使总是存在一些“异常”旅行, 随着可用的垂直起降机场数量的增加, 垂直起降机场进出时间占

UAM服务总时间的比例下降，这表明用户对垂直起降机场的可达性增加。因此，我们可以预测，改进的可达性将提高UAM的使用率，如图13所示。随着垂直起降机场数目由10个增加至100个，UAM的用户增加约900人，约占总行程的0.34%；当垂直起降机场数量超过80

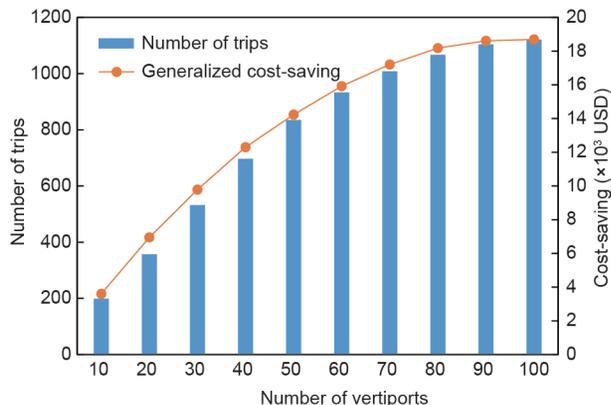


图13. 不同数量的垂直起降机场下的广义节约成本和UAM飞行次数。

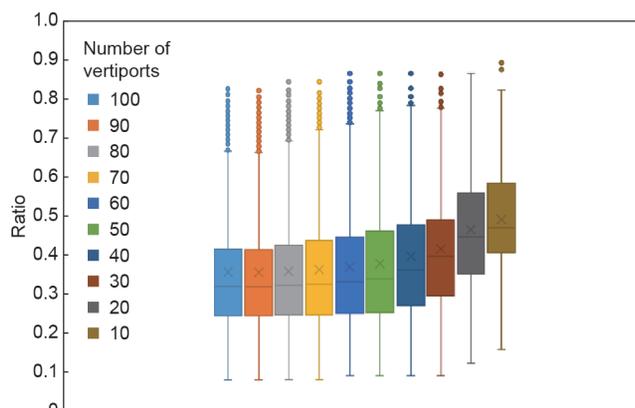


图14. 不同数量的垂直起降机场下的垂直起降机场的进出时间。

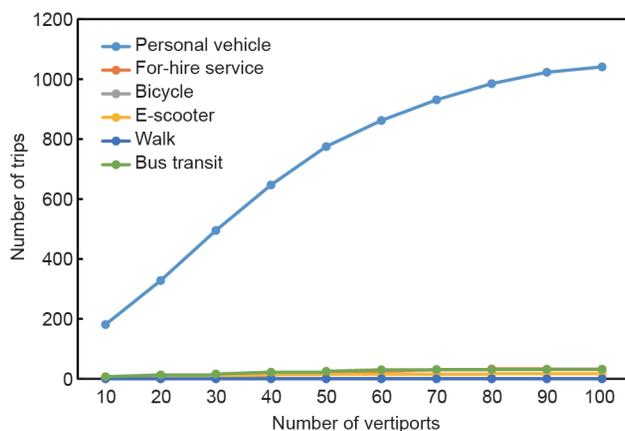


图15. 不同数量的垂直起降机场下进入垂直起降机场的方式选择。

个时，这种效应就会减缓，这表明UAM的采用也受到其他因素的限制。UAM用户数量的增加也表明系统广义节约成本的增加。此外，垂直起降机场的可用性增加导致大多数垂直起降机场的需求下降，而少数垂直起降机场的需求总是极高或极低（图17）；当垂直起降机场数量为60个时，需求分布最均匀。如图15和图16所示，增加垂直起降机场的可达性并不利于增加非机动车出行方式（如滑板车、自行车和步行）的采用。个人车辆始终是进入机场通道的首选，在离开垂直起降机场的方式选择中，用户最喜欢租车服务，其次是开私家车。此外，有大量用户选择乘坐巴士离开垂直起降机场。测试的第二个参数是在垂直起降机场的乘客转移时间（图18至图20）。中转时间代表了垂直起降机场运营管理的效率，而中转时间的增加抵消了UAM航空旅行节省时间的优势。所选行程的总体UAM服务时间随着换乘时间的增加而增加（图19），纯地面行程所替代的行程时间分布更不均匀，长行程所占比例更高（图20）。这表明，在较短的旅行时间中，较长的换乘时间使UAM服务的效率和竞争力低于纯地面运输。对于采用UAM，图18显

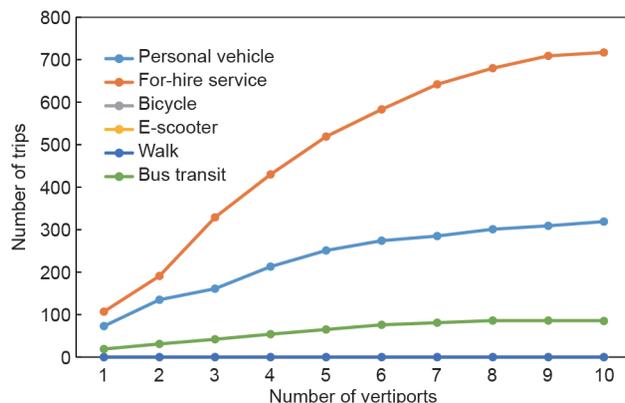


图16. 不同数量垂直起降机场下离开垂直起降机场的方式选择。

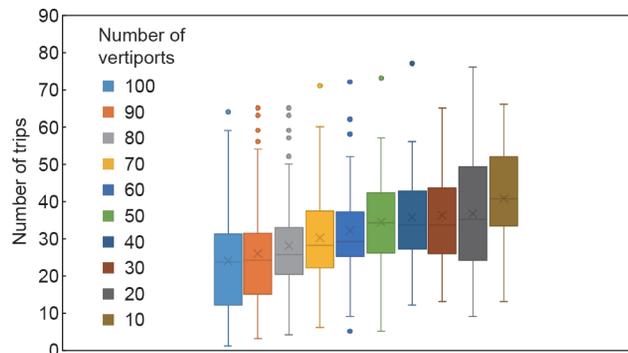


图17. 不同数量垂直起降机场下的垂直起降机场需求分布变化。

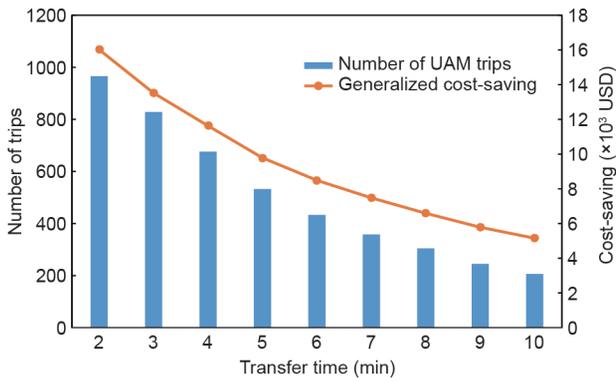


图18. 不同行程时间的系统行程时间和UAM的使用变化。

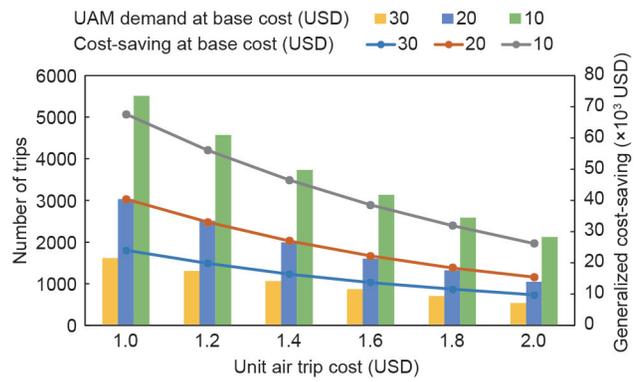


图21. 不同定价方案的广义节约成本和UAM的需求变化。

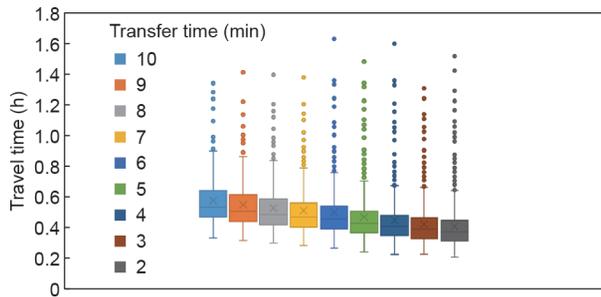


图19. UAM行程时间分布变化。

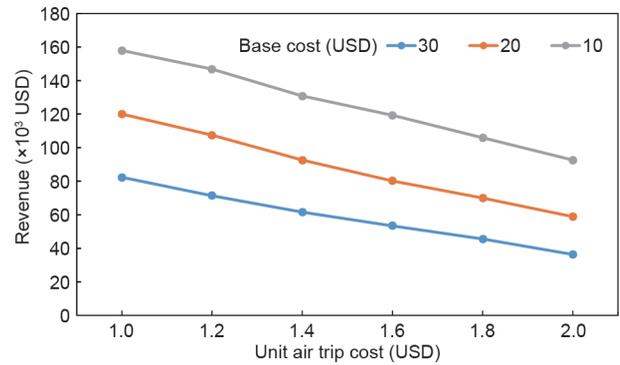


图22. 不同定价策略下的UAM运营商的总收入变化。

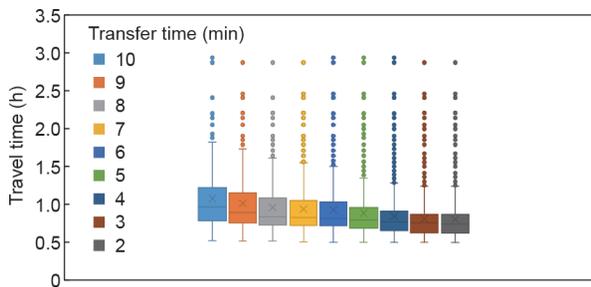


图20. UAM用户继续使用地面交通方式行程时间的分布变化情况。

示, 当换乘时间从2 min增加到10 min时, 超过600名旅客转而使用纯地面交通, 超过了总需求的0.2%, 广义节约成本增加了约900美元。

本研究对UAM定价方案如何影响用户对UAM的需求和UAM的系统性能, 以及UAM运营商的创收进行了测试。我们在垂直起降机场数量不变的情况下, 测试不同的UAM航空旅行价格对其产生的影响。其敏感度分析结果见图21和图22。

如图21所示, 当垂直起降机场数量固定时, UAM的需求量对航空旅行价格极为敏感。当基本成本为10美元, 单位空中旅行的成本为1美元时, 需求量高达5000, 但当基本成本为30美元, 单位空中旅行成本为2美元时,

需求量降至600以下。采用具有较低基本成本时, UAM需求量对单位空中旅行成本的增加更为敏感。例如, 当单位空中旅行成本从1美元增加到2美元时, 采用基本成本为10美元的UAM服务时, UAM的需求量从5500减少到2100; 对于基本成本为30美元的情况, 该变化从大约2000减少到600以下。广义节约成本的变化趋势与上述类似。

另一个重要的因素是UAM运营商的创收。如图22所示, 当垂直起降机场数量固定时, UAM运营商的总收入将随着单位成本或基本成本的增加而下降。这说明增加的单位航空旅行成本会减少用户对UAM的需求, 而损失的收入无法通过向客户收取高额费用进行补偿。当服务需求提高时, 会产生与车队规模需求、运营和管理相关的额外运营成本, 从而抵消收入。未来仍需要收集更多信息并进行分析以了解这些参数对UAM运营商利润的影响, 即收入和成本之间的差异。

最后, 本文还探讨了基础设施供应和定价策略的长期综合效应。图23至图25对系统旅行时间、航空旅行总收入和UAM的需求差异进行了分析 (基本成本为30

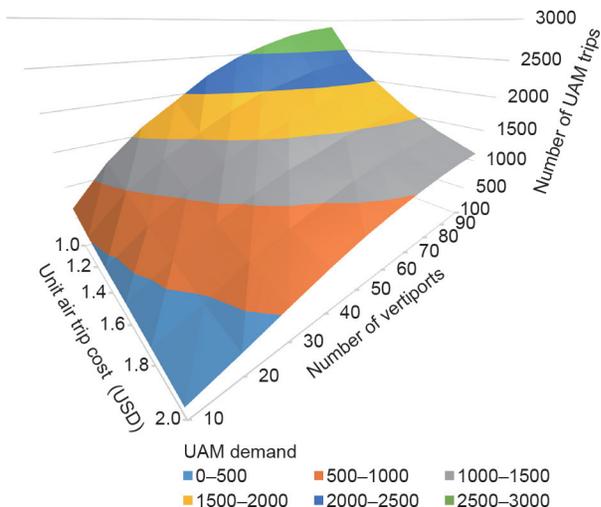


图23. 不同单位飞行成本和垂直起降机场数量下UAM的需求数量。

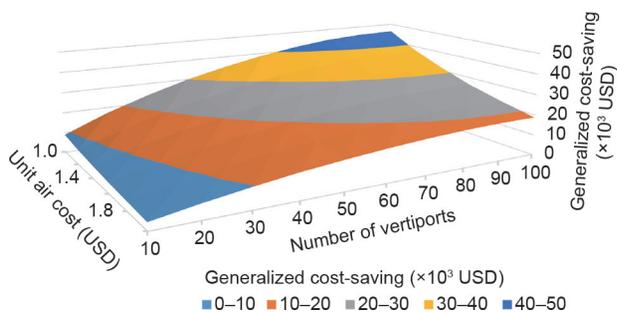


图24. 不同单位飞行成本和垂直起降机场数量下的广义节约成本。

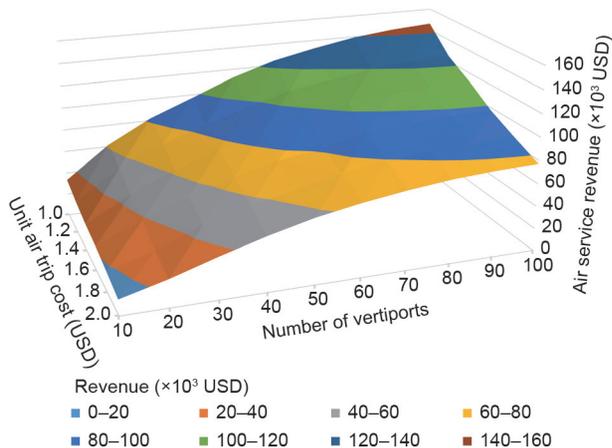


图25. 不同单位飞行成本和垂直起降机场数量下的总收入情况。

美元不变，改变不同的垂直机场数量和不同的单位空中旅行成本）变化情况总体而言，相对于垂直起降机场的数量，UAM的需求、总体节约成本和总收入的变化对单位空中旅行成本更为敏感。边际效益随着垂直起降机场数量的增加和单位飞行成本的增加而减小。

5. 结论

本研究探讨按需UAM服务的网络设计。本文结合传统的轴辐问题的建模结构和个人出行方式选择模型，建立了确定性IP模型。通过分析网络设计问题的本质和UAM行程特性，本文提出了一个附加约束，并与其他约束一起进行了预处理，以大大减少IP问题的可行域。优化结果表明，由于引入了UAM服务和不同垂直起降机场需求的不均匀分布，人们可以节省大量时间。本文进行了敏感性分析，以研究与UAM需求量和UAM服务性能的供应方面有关的关键因素的影响。据分析，虽然增加垂直起降机场的数量可以提高垂直起降机场的可达性，从而提高UAM的需求量，但案例研究表明，当垂直起降机场的数量超过80时，边际效益变得不显著。此外，地面模式到UAM之间转换时间的增加极大地阻止了旅客从地面交通转换到UAM并降低了UAM的服务性能。此外，研究还测试了不同的定价方案，并分析了其对UAM需求量和创收的重大影响。对垂直起落架数量和定价策略影响的综合分析表明，从系统性能到创收，价格的影响比任何其他因素都大。本文所提出的建模方式和敏感性分析可以让城市管理者 and UAM运营商更好地了解新兴的按需UAM，并可以在基础设施要求和定价策略方面为未来的UAM服务提供指导。

本研究侧重于未来UAM服务的基础设施需求。为了将这种新模式整合到现有的交通系统中，许多研究问题仍有待解决。由于引入UAM会使系统性能提高，因此导致的诱导需求包括缓解交通拥堵而引起的地面交通需求和改进的机动性引起的UAM服务需求。本研究未考虑上述诱导需求，因为垂直起降机场的位置不受诱导需求的影响。对于第一类诱导需求，由于案例研究中由其他出行方式转换到UAM服务的次数非常有限，缓解拥堵的作用很小，诱导需求可以忽略不计。对于第二种类型，如果诱导需求遵循研究中使用的每日行程的相同地理分布，则起降机场的最佳位置相同。在未来的研究中，随着UAM市场渗透率的提高，应考虑诱导需求的因素。处理这一问题的一种方法是修改框架以实现TBRPM模型和网络设计模型之间的交互。根据网络设计模型得到的网络配置，可以将UAM服务作为一种新的运输模式编码到TBRPM中。整个模型将以TBRPM的需求输出作为网络设计模型的输入迭代运行，直到UAM需求和网络配置保持相对稳定。然后，

通过与没有相互作用的模型结果进行比较，可以得到诱导需求。

本研究可以在以下几个方面进行改进和扩展。在本研究中，在计算使用地面运输的垂直起降机场进出时间时，没有考虑交通拥堵的因素。未来需考虑随机性的影响，因此未来的研究方向是提出更可靠的UAM网络设计。此外，在本次研究中我们假设有足够的eVTOL来满足每个垂直起降机场的乘客需求，并没有研究车队的规划。此外，由于没有区分在不同的情况下的票价，例如，若乘客选择单独旅行，则会支付更高的票价；如果乘客愿意与其他乘客合乘，则票价会更低。一项正在进行的研究正在解决UAM服务的运营管理问题，并从规划和战术操作的角度解决重新定位eVTOL车辆的需求。在该研究中，eVTOL以不同的占有率建模，乘客根据他们的行程距离和eVTOL占有率支付服务费用。该研究也在探索eVTOL的充电调度，以确保UAM的持续服务。通过这一持续的努力，最终的目的是为新兴的UAM开发一个计划和评估工具，并利用该工具获取UAM服务的特点和性能方案分析，从而为利益相关者提供指导。

Disclaimer

The contents of this report reflect the views of the authors, who are responsible for the facts and the accuracy of the information presented herein. This document is disseminated in the interest of information exchange. The report is funded, partially or entirely, by a grant from the US DOT's University Transportation Centers Program. However, the US Government assumes no liability for the contents or use thereof.

Compliance with ethics guidelines

Zhiqiang Wu and Yu Zhang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Reed T, Kidd T. Global traffic scorecard. Technical Report. Altrincham: INRIX Research; 2019.
- [2] Concepts studies for future intracity air transportation systems. Report. Cambridge: Flight Transportation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology; 1970. Report No.: R70-2.
- [3] Vascik PD. Systems-level analysis of on demand mobility for aviation [dissertation]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology; 2017.
- [4] Holden J, Goel N. Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation [Internet]. San Francisco: Uber Elevate; 2016 Oct 27 [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://www.uber.com/elevate.pdf>.
- [5] Xu E. The future of transportation: white paper on urban air mobility systems [Internet]. Guangzhou: Ehang; 2020 Jan 15 [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://www.ehang.com/app/en/EHang%20White%20Paper%20on%20Urban%20Air%20Mobility%20Systems.pdf>.
- [6] Gipson L. NASA embraces urban air mobility, calls for market study [Internet]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 2017 Nov 8 [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://www.nasa.gov/aero/nasaembraces-urban-air-mobility>.
- [7] Antcliff KR, Moore MD, Goodrich KH. Silicon Valley as an early adopter for on-demand civil VTOL operations. In: 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference; 2016 Jun 13–17; Washington, DC, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2016.
- [8] Urban air mobility (UAM) market study [Internet]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 2018 Nov [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://escholarship.org/uc/item/0fz0x1s2>.
- [9] Zee aero z-p2 [Internet]. Alexandria: Electric VTOL News; 2018 Mar 12 [cited 2020 Jul 12]. Available from: <http://evtol.news/aircraft/zee-aero/>.
- [10] Ehang 184 [Internet]. Alexandria: Electric VTOL News; 2020 Aug [cited 2020 Jul 12]. Available from: <http://evtol.news/aircraft/ehang/>.
- [11] Vahana, the self-piloted, eVTOL aircraft from A3 by airbus, successfully completes first full-scale test flight [Internet]. Toulouse: Airbus; 2018 Feb 2 [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://www.airbus.com/newsroom/pressreleases/en/2018/02/vahana-the-self-piloted-evtol-aircraft-from-airbus-succ.html>.
- [12] Vascik PD, Hansman RJ. Constraint identification in on-demand mobility for aviation through an exploratory case study of Los Angeles. In: 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference; 2017 Jun 5–9; Denver, CO, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2017.
- [13] Vascik PD, Hansman RJ. Evaluation of key operational constraints affecting on-demand mobility for aviation in the Los Angeles Basin: ground infrastructure, air traffic control and noise. In: 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference; 2017 Jun 5–9; Denver, CO, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2017.
- [14] Hasan S. Urban air mobility (UAM) market study. Report. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 2018 Jun. Report No.: HQ-EDAA-TN70296. Contract No.: 80HQTR17F.
- [15] Garrett-Glaser B. Uber's aerial rideshare project 'entering the next phase' [Internet]. Rockville: Access Intelligence LLC; 2020 Jan 22 [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://www.aviationtoday.com/2020/01/22/ubers-aerialrideshare-project-entering-next-phase/>.
- [16] Binder R, Garrow LA, German B, Mokhtarian P, Daskilewicz M, Douthat TH. If you fly it, will commuters come? A survey to model demand for eVTOL urban air trips. In: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference; 2018 Jun 25–29; Atlanta, GA, USA; 2018.
- [17] Garrow LA, German B, Ilbeigi M. Conceptual models of demand for electric propulsion aircraft in intra-urban and thin-haul markets. In: Proceedings of the 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board; 2018 Jan 7–11; Washington, DC, USA; 2018.
- [18] Garrow LA, German B, Mokhtarian P, Glodek J. A survey to model demand for eVTOL urban air trips and competition with autonomous ground vehicles. In: AIAA Aviation Forum; 2019 Jun 17–21; Dallas, TX, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2019.
- [19] Garrow LA, Ilbeigi M, Chen Z. Forecasting demand for on demand mobility. In: 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference; 2017 Jun 5–9; Denver, CO, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2017.
- [20] Sivak M, Schoettle B. A survey of public opinion about flying cars. Report. Ann Arbor: University of Michigan; 2017 Apr. Report No.: SWT-2017-8.
- [21] Eker U, Fountas G, Anastasopoulos PC, Still SE. An exploratory investigation of public perceptions towards key benefits and concerns from the future use of flying cars. *Travel Behav Soc* 2020;19:54–66.
- [22] Al Haddad C, Chaniotakis E, Straubinger A, Plötner K, Antoniou C. Factors affecting the adoption and use of urban air mobility. *Transp Res Part A Policy Pract* 2020;132:696–712.
- [23] Fu M, Rothfeld R, Antoniou C. Exploring preferences for transportation modes in an urban air mobility environment: Munich case study. *Transp Res Rec* 2019;2673(10):427–42.
- [24] Straubinger A, Kluge U, Fu M, Al Haddad C, Ploetner KO, Antoniou C. Identifying demand and acceptance drivers for user friendly urban air mobility introduction. In: Müller B, Meyer G, editors. *Towards user-centric transport in Europe 2*. Cham: Springer; 2020. p. 117–34.
- [25] Balac M, Rothfeld RL, Hörl S. The prospects of on-demand urban air mobility in Zurich, Switzerland. In: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC); 2019 Oct 27–30; Auckland, New Zealand; 2019.

- [26] Balac M, Vetrella AR, Rothfeld R, Schmid B. Demand estimation for aerial vehicles in urban settings. *IEEE Intell Transp Syst Mag* 2019;11(3):105–16.
- [27] Rothfeld R, Balac M, Plötner KO, Antoniou C. Agent-based simulation of urban air mobility. In: 2018 Modeling and simulation technologies conference; 2018 Jun 26–29; Atlanta, GA, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2018.
- [28] Rothfeld R, Balac M, Plötner KO, Antoniou C. Initial analysis of urban air mobility's transport performance in Sioux Falls. In: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference; 2018 Jun 25–29; Atlanta, GA, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2018.
- [29] Lim E, Hwang H. The selection of vertiport location for on-demand mobility and its application to Seoul Metro Area. *Int J Aeronaut Space Sci* 2019;20(1):260–72.
- [30] Fadhil DN. A GIS-based analysis for selecting ground infrastructure locations for urban air mobility [dissertation]. Munich: Technical University of Munich; 2018.
- [31] Daskilewicz M, German B, Warren M, Garrow LA, Boddupalli SS, Douthat TH. Progress in vertiport placement and estimating aircraft range requirements for eVTOL daily commuting. In: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference; 2018 Jun 25–29; Atlanta, GA, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2018.
- [32] Rath S, Chow JY. Air taxi skyport location problem for airport access. 2019. arXiv:1904.01497.
- [33] Thompson M. Panel: perspectives on prospective markets. In: Proceedings of the 5th Annual AHS Transformative VTOL Workshop; 2018 Jan 18–19; San Francisco, CA, USA; 2018.
- [34] Coast data [Internet]. Washington, DC: National Oceanic and Atmospheric Administration; [cited 2020 Jul 12]. Available from: <http://coastbikeshare.com/data/>.
- [35] Populus [Internet]. San Francisco: Populus; [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://www.populus.ai/>.
- [36] Helling B. How much does Uber cost? A comprehensive guide [Internet]. Omaha: Ridester; 2019 Nov 5 [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://www.ridester.com/uber-rates-cost/>.
- [37] Hopr [Internet]. Chicago: CycleHop LLC dba HOPR; [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://gohopr.com/tampabay-2/>.
- [38] Shared electric scooter pilot program [Internet]. Tampa: City of Tampa; [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://www.tampagov.net/tss-transportation/programs/shared-electric-scooter-pilot-program>.
- [39] Auchincloss AH, Weinberger R, Aytur S, Namba A, Ricchezza A. Public parking fees and fines: a survey of U.S. cities. *Public Works Manag Policy* 2015;20(1):49–59.
- [40] Data access viewer [Internet]. Charleston: National Oceanic and Atmospheric Administration; [cited 2020 Jul 12]. Available from: <https://coast.noaa.gov/dataviewer/>.
- [41] Alumur S, Kara BY. Network hub location problems: the state of the art. *Eur J Oper Res* 2008;190(1):1–21.
- [42] Farahani RZ, Hekmatfar M, Arabani AB, Nikbaksh E. Hub location problems: a review of models, classification, solution techniques, and applications. *Comput Ind Eng* 2013;64(4):1096–109.
- [43] Vascik PD, Hansman RJ. Development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors. In: *AIAA Scitech 2019 Forum*; 2019 Jan 7–11; San Diego, CA, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2019.
- [44] Ernst AT, Hamacher H, Jiang H, Krishnamoorthy M, Woeginger G. Uncapacitated single and multiple allocation p-hub center problems. *Comput Oper Res* 2009;36(7):2230–41.
- [45] Kara BY. Modeling and analysis of issues in hub location problems [dissertation]. Ankara: Bilkent University; 1999.
- [46] An Y, Zhang Y, Zeng B. The reliable hub-and-spoke design problem: models and algorithms. *Transp Res Part B Methodol* 2015;77:103–22.
- [47] Data USA: Hillsborough County, FL [Internet]. Cambridge: Data USA; [cited 2020 Sep 6]. Available from: https://datausa.io/profile/geo/hillsboroughcounty-fl#income_gender.