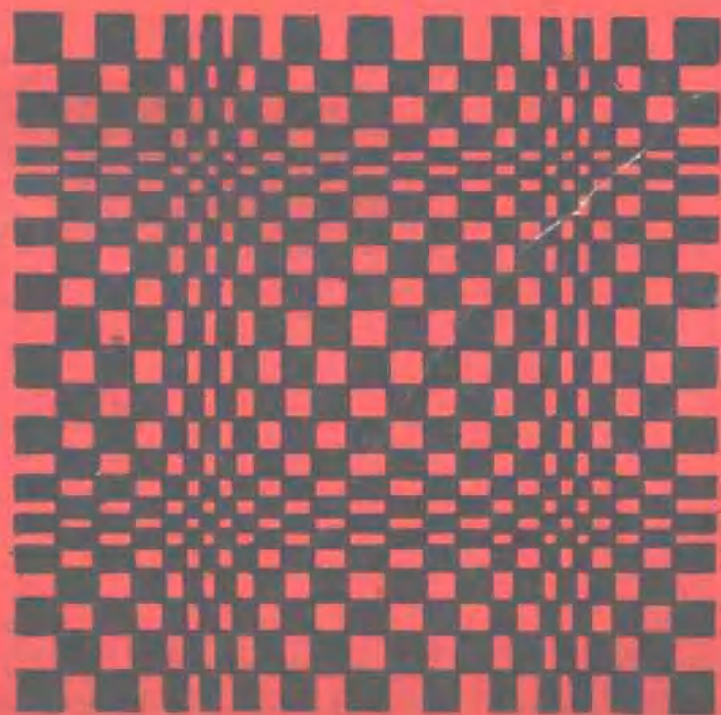


086221/2-2

第二次城市公共交通
系统工程学术讨论会

论文集



湖南省系统工程学会
长沙市公共交通系统工程优化总指挥部

一九八四年八月



第二次城市公共交通 系统工程学术讨论会论文评审小组成员

组 长：张启人 教 授（湖南省科委 副主任）

副组长：贝效良 副 教 授（长沙交通学院 院 长）

组 员：成从修 高级工程师（湖南省交通厅 顾 问）

朱长仁 副 教 授（北京工业大学）

刁惠文 副 教 授（太原机械学院 系主任）

王汉新 副 教 授（东北林学院）

王 翼 副 教 授（南开大学 系副主任）

冯桂炎 副 教 授（湖南大学）

目 录

序.....	张启人(1)
--------	--------

一、领导同志谈公交系统工程

湖南省科委顾问毛泽普发言摘要.....	(3)
长沙国防科技大学政委汪浩书面发言摘要.....	(3)
湖南省科协副主席卢英佐发言摘要.....	(3)
长沙市委第一书记邹乃山发言摘要.....	(4)
长沙市委副书记刘景泉发言摘要.....	(4)
长沙市人大常委会副主任潘基硕发言摘要.....	(4)
长沙市公安局副局长明声发言摘要.....	(5)
长沙市公汽公司经理邵作贵发言摘要.....	(5)

二、论 文 选 登

城市公共交通系统最优化.....	达庆利(6)
城市公共交通系统的仿真.....	苏寿源、盛昭翰(15)
• 城市公共交通线路的优化设计.....	夏伟民、黄 斌、陈绍仲(20)
二次规划及其改进算法在交通网络流理论中的应用.....	王毓基、黄大展(26)
• 均衡 TA 模型在公交优化中的应用.....	陈恢宏、黄大展、龚英甫(35)
城市公共交通线路静态调度.....	蒋光震、何显慈(39)
汽车综合节能刍议.....	张启人(48)
城市公共交通的环境污染与优化控制.....	向元望(56)
商业网点分布与公交优化.....	余 前、向元望(62)
大型交通网络优化综合模型计算程序设计实践.....	黄大展、陈恢宏、龚英甫(71)
长沙市单位职工上下班车的经济效益和发展趋势的探讨.....	刘 力、向元望(75)
$GPSS$ 模拟语言对解决城市公共交通问题的探讨.....	毕 立、隗志才(81)
城市交通计算机在线控制.....	徐吉万、孙鸣苏、刘锐锋(94)
交叉口信号配时的优化设计.....	冯桂炎(106)
天津市交通管理和控制的设想与实施.....	贺国光、徐德民、赵景云(116)
绍兴市中心大街交通量预测的方法.....	陈森法、盛昭翰、达庆利(123)
关于交通安全度评价方法的探讨.....	赵 文、李 江(129)
城市公共交通与经济发展的关系.....	王 琪(138)

城市公共交通系统中移动通讯调度的优化·····	寻纯阳、罗文钦、郑善贤、胡卫平(141)
交通事故预测及成因分析·····	聂 伟、林国悌(145)

三、论 文 摘 要

特殊路段时空交通分流管制法浅析·····	邵长宽、周炎固(153)
采用一元线性回归法预测城市道路近远期交通量·····	唐淑梅(153)
试论建立以城市为中心的客、货运输综合管理体制·····	夏雅平(154)
公共交通与城市美学·····	熊广忠(154)
城市道路交通容量评价标准探讨与分析·····	王 宇(154)
探讨行为心理学在交通管理中的应用·····	张惠贻(155)
上海市第一条快速轨道建成时承载客流量的预测·····	孙 渊(155)
浅谈长沙市城市交通的几个问题·····	祝金莲(155)
城市道路客运能力计算方法初探·····	蔡竹平、崔兆有(156)
城市道路交通管理的三大学科及其应用漫谈·····	李作敏(156)
长沙市太平街人行天桥设计小结·····	阙家卓(156)

序

一九八二年十二月，在长沙召开过第一次城市公共交通系统工程讨论会，当时参加讨论会的人大半来自省内。一九八三年四月，长沙市公共交通系统工程优化总指挥部会同湖南省系统工程学会在长沙市举办了第一期城市交通系统工程讲习班。当时胜友如云，跟来自全国各地的100名学员结下了深厚友谊。一九八四年四月，在交流公共交通系统工程科研心得的基础上，又在长沙市召开了第二次城市公共交通系统工程学术讨论会。这次讨论会的范围比前次大大扩大了，有来自全国各地的专家、省市有关领导近100人。在会上交流经验、讨论问题、宣读论文、畅谈感想，气氛既活跃、热烈，又融洽和谐，体现了国内学术界对发展这门学科的浓厚兴趣，反映了城市锐意改革者的迫切心情。为了集思广益，继往开来，经会议论文评审小组反复评议后，决定编成是集出版，以飨读者，并借以推动学科向纵深发展。

交通系统工程学和**交通工程学**是对同一问题的两个不同的研究侧面。虽然二者在研究若干静态的微观的交通问题上确实有着许多类似的地方，但必须承认，它们之间毕竟存在着某些明显的原则区别。这些区别跟系统工程学与一般工程学之间的、尽人皆知的区别基本上是对应的。它们的区别主要表现在：

1. **交通系统工程学**是用系统的观点和方法来研究交通工程的。所谓系统工程观点，归纳起来即全局（整体）观点、层次（渐进）观点、动态（变化）观点、信息（反馈）观点、价值（数量）观点、策略（灵活）观点。所谓系统工程方法，包括系统分析法、系统建模法、系统仿真法、系统综合法和系统控制法。这些是传统**交通工程学**较少触及的。

2. **交通工程学**至今并未上升到方法论的高度，其基础属于土木工程技术范畴，限制了**交通工程学**成为一门有雄厚理论作基础的科学分支的可能性，说到底它是一门工程技术。**交通系统工程学**则否。这是因为，发展十分迅速的**系统工程学**已经升华为**系统科学**，成为独立的科学领域。系统科学包括**系统方法论**（如一般系统论、控制论）、**系统理论**（如系统测辨理论、非平衡态系统的热力学理论、网络理论、最优控制理论、自适应控制理论、过滤和平滑理论、动态预测理论、仿真实论、决策和对策理论、信息论、组织理论和运筹学、大系统理论等）、系统实践或即系统工程。系统工程紧密地跟现代数学、自动控制和检测理论、计算机技术以及**交通工程学**作为工程技术分支所包含的一切内容联系在一起。这就是说，**交通系统工程学**无论在理论上，还是在实践上，均较**交通工程学**丰富，对国民经济的影响也较**交通工程学**来得广阔、深刻。

3. 从学科方向来看，**交通工程学**偏重于静态的、微观的、硬科学范畴的研究；**交通系统工程学**则侧重动态的、宏观的、软科学范畴的研究。前者更多地适应外延；后者更多地适应内涵，着重调整和优化系统的内部结构及其摄动。国际上属于**交通工程学**方面的论文，一般习惯于在土木工程师学会学报、交通运输工程师学会学报上发表，而属于**交通系统工程学**方面的论文，大都在标有系统科学、控制论、网络理论等名称的学报上发表。在国际学术会议上，有关后者的论文主要在以《*Systems & Cybernetics*》、《*Road & Traffic Systems Engineering*》、《*Modelling & Simulation*》等为名的场合宣读。这些正说明它们之间显而易见的轩輊之处早已为国际学术界所公认，仅仅是没有人作过这种区分罢了。

举一个实际例子来说明二者应用的广度和深度，看来绝对有必要。我们在城市公共交通控制中碰到红绿灯变换控制的问题。目前在大多数城市中已逐步用统计基础的定时控制代替了交警的主观控制。这是**交通工程学**的研究成果，而且也无疑是一大进步。进一步，象沈

阳、上海等地已经研究成功和长沙正在研究的单一交叉路口计算机控制红绿灯的课题，明显地存在着两个学科间的重叠。采用系统工程显然能为实现最合理、最有效和最优化的单机控制提供理论依据，这是过去的**交通工程学**范围之外的内容，因为其中牵涉数学模型的建立，计算技术的应用和考虑人、车、路、系统边界、环境和动态发展的系统工程、大系统观点。如果更进一步，象目前自动化领域内开发的柔性生产系统(FMS)一样，把整个城市的若干交叉路口的红绿灯控制不但通过网络变成实时联机控制，而且让它作为子系统，跟包括管理信息系统、公共交通调度系统和监测系统等等子系统在内的城市公交大系统结成一个整体，这就自然而然地成了**交通系统工程学**责无旁贷的历史任务，因为它不但需要采用系统工程的一整套理论方法，而且还得求助于与计算机科学和网络理论中若干尚在发展的理论问题，象可计算性理论、计算复杂性理论、网络流优化理论等。

当前我们正面临着世界新技术革命的挑战；要求我们不失时机地用新技术改造传统工业、传统农业；用新技术提高整个社会的信息财富；用新技术加强和改造农业、科学技术和教育、交通运输和能源等四化建设的战略重点。系统工程是新技术革命的“助产婆”，是新技术与传统技术的“鹊桥”，是学科综合化、边缘化的“红娘”。在这个意义上讲，**交通系统工程学**正好是系统工程把**交通工程学**跟新技术革命种种带头科学实现杂交后的“良种”，因而有明显的“杂交优势”。

曾经有人议论过，以为在两个学科间甚至能画上等号。他们的根据是：有些文章似乎放到**交通工程学**论文集里也未尝不可，或者只需要稍加修改就行了。持这种观点的同志不无道理，因为所提出的事实在很大程度上是客观存在的。不过，这些同志显然忘记了如下的事实：系统工程不但难度大得多、需要掌握的知识领域广得多，而且由于在我国刚刚起步，究竟年轻一些，不是每一个谙熟**交通工程学**的同志都能在短期内全面掌握，难免有一个不断提高的过程；加之，目前我国还无法在财力和物力上更多地支持**交通系统工程建设**，只能局部地以少量资金作**交通工程学**范畴内的开发应用，从而势必限制了前者的论文来源。

也还有极个别的同志对**交通系统工程**抱着怀疑的态度，认为**交通工程学**研究的东西看得见、摸得着，而**交通系统工程学**研究的内容（如计算机处理、网络优化、管理信息系统、宏观系统分析等）好象在马路上看不见，因此是“瞎忙乎”，是“不于具体事”，是“纸上谈兵”。这种论调确能迷惑一些对系统工程缺乏了解的同志。其实，这是恰恰忘了信息在社会发展和人类进步中的价值作用，是对智力、知识、思维甚至新技术革命的地位缺乏认识。归根结底，是对当前信息化的总趋势估计不足，是对更能发挥宏观效益的软科学的一种误解。

在即将结束这篇序言的时刻，必须特别强调、特别声明，我在上面丝毫也没有贬低或否定**交通工程学**的意思。事实上，近些年来**交通工程学**有了许多新的突破。在我国，**交通工程学**虽然也很年轻，但在国内学术界的辛勤劳动下已经取得许多有利于四化建设、有利于改善城市交通的进展。相形之下，**交通系统工程学**则远不如**交通工程学**应用得那么广泛和取得了那么多成果。我只是想通过这篇序阐明两者的区别，以利于各自的、并行不悖的发展，利于了解互相重叠的边沿地带，利于互相促进，协同前进。前者没有后者，就会变成空洞理论；后者离开前者，就会减弱新技术支持。对于充分地、有效地利用人类创造的信息财富，都会造成损害。

让我们团结起来，为发展具有中国特色的**公共交通工程学**和**公共交通系统工程学**而共同努力！

张 启 人

1984年9月10日 于湖南省科委

一、领导同志谈公交系统工程

编者按 1984年4月在长沙召开第二次城市公共交通系统工程学术讨论会的同时，湖南省科委、科协主持召开了“长沙市公共交通系统工程第一期工程阶段评议会”。会上，省市领导同志及有关企业负责人，根据长沙市一年来公交优化实践，从不同角度谈及了对公共交通系统工程的认识，并进行了评价，也对此项目的进一步研究提出了希望和要求。这些讲话，既肯定了成绩，也指出了研究的方向。对从事公交优化的同志来讲，既是一种鼓励，也能从中受到一些启发。故摘其要点，刊载于此。

毛泽普（湖南省科委顾问、评委会主任委员）

城市公共交通系统工程这一课题的研究之所以能取得这样大的成果，而且见效快，有下面几方面的原因。

1. 领导重视，特别是市委领导给我们带了头，作出了好的榜样。“智力与权力的结合”是取得成果的根本保证。

2. 能调动各个方面的人来从事这一课题的研究，参加的人多，能集思广益，发挥各专业人员的特长，因而受益的面大，影响也大。这也是今后从事系统工程课题研究值得借鉴的。

汪浩（国防科技大学政委、评委会副主任委员、教授）

经过大量的周密系统的调查，获得了长沙市公共交通有关的第一手材料——《长沙市公共交通系统工程资料集》。《资料集》收集的数据，项目全面，数据量大，精确度高。这对系统分析提供了坚实的基础，是极其宝贵的。工程的组织计划（如课题边界划定，确定评价指标集，工程阶段划分，PERT流程图，以及对总指挥部人力智力结构分析等），第一阶段工程的系统分析（如采用分层比估值法对系统的历史、现状、环境进行调查，通过数量反映系统的定性特征；建立了长沙市公共交通的总体模型CUPTSOM，它包含了一系列的子模型群，其中有的模型是有创见的；还拟采用GPSS语言模拟交通动态等），以及对长沙市公共交通的预测和展望——所有这一切，是符合系统工程原理的，具有一定的普遍意义，可以推广；在一个城市中进行这样大规模的研究工作，并取得阶段性重要成果，这在我国还是首创的。

卢英佐（湖南省科协副主席、评委会副主任委员、高级工程师）

现在，最新的管理理论是系统工程理论，各级领导、各方面的管理人员都是非掌握不可的。可喜的是，市里的领导，特别是市委书记邹乃山同志，在学习和掌握系统工程理论知识上带了头，作出了很好的榜样。城市公共交通这一课题的研究，除了它本身的价值外，还给

我们提供了科学领导、领导科学方面的经验，这也是值得很好地总结的。今天的工作起了继往开来，承先启后的作用，以后的工作任重而道远。但是，已经有了好的开头，一定能在此基础上取得更大成绩。

邹乃山（中共长沙市委书记、评委会副主任委员）

解放三十多年来，长沙这个城市有很大的发展，道路、车辆增加了好几倍，但人口增长也快，乘车难是我市的突出问题，故八二年就提出了要解决公共交通的问题。公共交通系统工程课题的研究与开展，我市是受益者，我们尝到了甜头。

每项改革既要考虑社会效益，又要考虑经济效益。要解决公共交通问题，在近期内采取许多‘硬’措施是困难的，主要是靠采取‘软’措施。长沙市公共交通系统工程第一期工程主要是采取‘软’措施来解决我市公共交通的问题。把科学管理运用到公共交通这样复杂的大系统上，是一个了不起的尝试。

经验管理还是我国的主要管理方式，长期以来人们已习惯于经验管理，但不要留恋那些传统的管理方式，应当逐步过渡到科学管理。对第一期工程的成果进行估价固然是重要的，但还应通过这一工作很好地总结科学管理的经验，这对各个方面的领导也是一个启发。

我对从事于这项工作的科研人员表示感谢和祝贺，希望能在已经取得的成绩的基础上继续前进。通过这项工作，不仅要出成果，还要出人才。希望广大科技工作者能把系统工程的理论和方法运用到其他领域中去，解决其他领域的问题，促进我市经济的发展。

刘景泉（长沙市委副书记、评委会委员）

公共交通系统工程第一期工程成果的估计，不仅是经济上的效益，社会效益更为重要。公共交通系统工程的理论和方法在我市运用于实践以后，公共交通有很大的改善。

解放时长沙是一个破烂不堪的城市，解放后虽有发展，但道路条件和车辆状况仍然是很差的。就是在这样的条件下开始了公共交通系统工程的研究和应用。一年来效果是显著的，反映在经济上，从公汽公司来看，减亏增收了，事故减少了，效率提高了，能耗和成本降低了。更重要的是反映在社会效益上。去年以前市委常委差不多每月要研究一次公共交通问题，人民来信中百分之七十五是批评。现在的人民来信中批评仅占百分之五，百分之九十五是表扬。精神面貌发生了很大的变化，涌现了大批的先进机组和先进个人。这些成绩的取得，与系统工程的研究与运用是分不开的。因此，我们是尝到了系统工程的甜头，系统工程在我市的应用效果是好的。希望广大科学工作者能继续研究下去，取得更大成绩。

潘基顺（长沙市人大常委会副主任、评委会委员、高级工程师）

“乘车难”的问题过去虽进行过多次治理，但收效甚微，其原因就在于没有运用系统工程观点，进行综合治理。公共交通优化总指挥部采取各种措施，“软、硬”兼施，收到了良好的效果。

城市是个综合体，其中弊端很多，“硬”措施的制约，在于国家的财力，“软”措施的制约在于城市体制的不合理。例如，国家每年要给城市自行车津贴400万元，刺激自行车发展的结果，影响了城市公共交通的发展，因为都要抢路面行驶，导致了恶性循环。如果城市管理体制不变更，将会影响“软”“硬”措施的实施，而影响城市公共交通的发展。所以要

改善公共交通，除技术措施外，还应在体制、政策上研究和采取一些措施。

明 声（长沙市公安局副局长、评委会委员）

一年来，公共交通系统工程课题的研究，工作量大，成绩显著，给交通管理工作提供了科学依据，也使我们认识到，科学管理交通的重要性。

专家们通过一年多的劳动，取得了大量资料和数据，这为我市今后的交通管理提供了分析和决策的依据。

有广大科技人员支持和帮助我们的工作，要改变我市的交通状况，振兴长沙是大有希望的，而且步伐会越来越快。

在第二期工程中，我们建议在如何利用现有道路、发挥现有道路潜力方面运用系统工程理论进行研究。在今后的工作中，需要我们交通管理部门支持和配合的，我们一定尽最大的努力。

邵作贵（长沙市公汽公司经理、评委会委员）

对公交优化总指挥部成立以来所进行的工作，我谈几点感受：

一、长沙市公共交通系统工程优化总指挥部的成立是党的三中全会以后，开展公交工作新局面的起点，使公汽公司出现了“三个从来没有”。

1. 从来没有这么多专家、学者关心公交企业的困难和发展；
2. 从来没有这样对公交干部进行科普教育；
3. 从来没有象现在这样得到各级领导的关怀和各行各业的支持。

二、优化总指挥部的成立使企业的经济效益和社会效益迈出了可喜的一步。从优质服务看，八三年29城市优质服务竞赛中进入了全国先进行列，八四年全国67城市公交系统优质服务竞赛中又取得了较好成绩。在经济效益方面，由于实行了经济责任制，去年，实现了减亏60万元，是经济效益最好的一年。在安全行车方面，百公里安全费用由八二年的1.03元降到八三年的0.35元，今年一季度又降到0.27元，是文化大革命以来从没有出现过的好形势。从原材料和油耗来看，仅今年一季度就节油73吨。

三、公共交通系统工程优化总指挥部的成立使企业管理逐步由经验管理转向科学管理。通过O-D调查与计算机仿真提出了四个优化方案，使线路布局有了科学依据，今后还要建立管理信息系统和运用无线电调度。

通过公交系统工程，使我们看到了公交发展的新曙光，公汽公司的前途是光明乐观的。不过目前还存在不少困难，从公汽公司的角度来说，希望能对公交企业放宽政策，增加投资，解决资金短缺问题。这些问题希望专家、学者、社会各界帮我们呼吁一下。这些问题解决得好，就能把我们企业领导人从事务中摆脱出来。

二、论 文 选 登

城市公共交通系统最优化

南京工学院 达庆利

提 要

本文研究了城市公共交通系统最优化问题。通过分层研究,可以将系统最优问题转化为三个子最优问题:1)选择最优公交路网,2)在最优公交路网上配置一组最优公交线路,3)确定每条线路上的最优频率。文中介绍了求解各子问题的近似方法。

如何利用现有的人力和物力更好地组织城市公共交通系统,以便给城市居民出行提供尽可能好的服务水平,即城市公共交通系统最优化问题,已经引起了有关部门的普遍兴趣。许多城市对于该问题的研究相继投入了一定的人力和物力。这里我想参考国外一些研究成果,结合我国具体情况和个人的看法,来介绍研究问题的一种方法。

一、公交系统最优化问题的提法

根据城市道路网将所研究的城市分成均匀的小区,适当确定每个小区的范围,使得乘客能以合理的步行时间到达本小区的形心。只要有可能,这些小区的形心应该和现有的车站相符。假定小区居民乘车出行(以下简称出行)均集中在各自形心。我们规定结点集合 N 为形心集合和主要交叉路口集合的并集。用 a_{ij} 和 l_{ij} 分别表示结点 i, j 间的主要街道和它的长度,而 $\bar{A}$ 为所有这些主要街道的集合,即 $a_{ij} \in \bar{A}$ 。我们称 $G = (N, \bar{A})$ 为最大网络。

通过居民出行调查、月票调查以及对乘客的路旁抽样调查等方法,可以获得居民的出行需求。我们将一天的出行归结为不同时期的出行需求矩阵:

$$D^k = [D^k_{ij}], (i, j) \in N^2, k = 1, 2, \dots, T$$

式中, T 为所分成的时间区间数。例如,我们可以将一天划分为早高峰,上午,中午,下午,晚高峰,晚上和夜间等时期。每个时期内出行可以认为是均匀的。通常,周日和星期日出行需求情况是不同的,必要时可以分别处理。星期日出行的时期划分也可以参照上述原

则来进行。

除了上述出行需求数据外, 尚需收集下列数据:

小区 i 的人口 P_i , 就业人数 E_i 和人均收入 I_i , $i \in N$;

调整公交路网结构所允许的最大费用 C_i ;

可供调度的最多车辆数 B_i ;

车辆在连接 a_{ij} 上的平均速度 v_{ij} , $a_{ij} \in \bar{A}$ 。它们取决于街道通常的拥挤情况以及经过交叉口的数目等因素, 可以通过抽样调查来决定;

在公交路网中加上连接 a_{ij} 所需的费用 C_{ij} , $a_{ij} \in \bar{A}$;

掌握了上述数据, 我们便可开展城市公共交通系统的优化工作。

进而, 用 A , L 和 E 分别表示组成公交路网的所有街道集合、公交线路集合和各条线路上平均车头时距集合, 而 λ_i 和 e_i 分别表示 L 和 E 的元素, 便可将公交系统最优化问题描述如下:

在满足约束条件 $A \subseteq \bar{A}$, $\sum_{a_{ij} \in A} C_{ij} \leq C_i$ 和 $\sum_i B_i \leq B_i$ 的前提下, 适当地选取决策变量 A , L 和 E , 使得全体居民在一天的各个时期内出行时间的加权和为最小, 即:

$$\min_{A, L, E} J = \min_{A, L, E} \sum_{(i, j) \in N^2} \sum_{k=1}^T W^k D_{ij}^k t_{ij} \quad (1-1)$$

式中, B_i 为线路 λ_i 上的车辆数; W^k 为时期 k 的权系数, 它表示公交系统应该满足时期 k 出行的优先程度; t_{ij} 为由结点 i 到 j 的出行时间(它等于沿途的乘车、候车和步行时间之和)。

显然, 影响系统整体最优化的因素繁多, 而且各因素彼此之间又互相联系, 整体求解是极其困难的。为了便于求解起见我们将系统最优化问题通过分层解耦为如下三个子最优问题:

1. 选择最优公交路网;
2. 在最优公交路网上配置一组最优公交线路;
3. 在公交线路确定的前提下, 选择每条线路上的最优频率。

依次求解上述三个子问题, 再进行协调, 就为整个系统的优化问题提供了一条可行的解决途径。

二、公交路网的最优选择

选择最优公交道路网络的问题, 即最优网络问题, 是整个公交系统优化的第一步工作。正确地解决这个问题, 就可以为合理地使用修筑道路经费提供正确的决策依据。

我们定义向量 $X^T = [x_{ij}]_{1 \times M}$ (2-1)

式中, M 为 $\bar{A}$ 中的元素个数;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & a_{ij} \in A \\ 0 & a_{ij} \in \bar{A} - A \end{cases}$$

而 $A \subseteq \bar{A}$, 这样, 我们就将选择 A 的问题转化为求解向量 X 的问题

最优网络问题可以表述为:

$$\min_A J_1(A) = \min_X \sum_{(i, j) \in N^2} \sum_{k=1}^T D_{ij}^k t'_{ij}(X) \quad (2-2)$$

满足投资约束:

$$\sum_{a_{ij} \in A} c_{ij} x_{ij} \leq C_i \quad (2-3)$$

式中, $t'_{ij}(X)$ 为居民利用 X 所表示的公交路网 A , 沿着结点 i 到 j 的最短路径 S'_{ij} 的出行时间 (候车时间略去不计), 即,

$$t'_{ij}(X) = \sum_{a_{rs} \in S'_{ij}} \left(\frac{l_{rs}}{v_{rs}} x_{rs} + \frac{l_{rs}}{a} \bar{x}_{rs} \right) \quad (2-4)$$

式中, $\bar{x}_{rs} = 1 - x_{rs}$; a 为平均步行速度。

该问题属于 NP -完全问题, 当结点数超过 10 时所有寻找严格最优化解的方法均难于奏效。这里, 我们重点介绍三种近似解法。

这三种近似方法, 其中两种是逐步去除连接的方法, 另一种是逐步增加连接的方法。去除 (增加) 连接方法的主要特征可以概述如下: 在该方法的每一步中, 搜索工作是在上一步选定的 A 所包含 (未包含) 的连接中进行的。轮流去除 (增加) 一条连接, 并计算相应的性能指标 J_1 以决定去除 (增加) 哪一条连接会在使性能指标最小的意义上提供一个最好的网络。然后检验解的可行性 (不可行性), 若满足则程序终止, 否则进行下一步。

这三种方法之间的不同之处在于每步计算中去除或增加连接的方法不同:

方法 1 (去除连接): 设第 $K-1$ 步所选择的网络为 $A(K-1)$ 。在第 K 步, 精确地计算性能指标 $J_1(A(K-1) - a_{ij})$, $\forall a_{ij} \in A(K-1)$ 的最小值。这意味着必须找出相应于每个 $A(K-1) - a_{ij}$ 的最短路 (时间最少)。该算法计算时间为 $O(n^3)$ (n 为 N 中元素个数)。

方法 2 (去除连接): 对于每个 $A(K-1) - a_{ij}$, $\forall a_{ij} \in A(K-1)$ 计算 $J_1(A(K-1) - a_{ij})$ 的上限 $B(a_{ij})$ 而不必重新寻找最短路。每个被去除连接 a_{ij} 上的流量 F_{ij} 则被安排在相应于 a_{ij} 的第二条最短路 α'_{ij} 上。设 α'_{ij} 上的出行时间为 t''_{ij} , 我们有:

$$B(a_{ij}) = J_1(A(K-1)) + F_{ij}(K-1)(t''_{ij} - t'_{ij}) \quad (2-5)$$

式中, $t'_{ij} = l_{ij}/v_{ij}$

$$t''_{ij} = \min_{\substack{a_{kl} \in A(K-1) \\ k \neq i, j}} [(t'_{ik} + t'_{kj}), l_{ij}/a]$$

方法 3 (增加连接): 首先形成一个初始公交网络 $A(0)$, 或者直接从 $A(0) = \phi$ (ϕ 表示空集) 开始计算。增加连接的方式是与方法 1 中去除连接的方式完全对称地进行。然而, 这里不需要对于每个 $A(K-1) + a_{ij}$, $\forall a_{ij} \in A(K-1)$ 来计算所有最短路, 而只要寻找 $A(K-1)$ 中跨过连接 a_{ij} 的回路 α_{ij} 并用 t'_{ij} 来代替 t''_{ij} 即可。该方法计算时间为 $O(n^2)$ 。

以上三种近似计算方法的实质在于, 根据每条连接在整个网络中

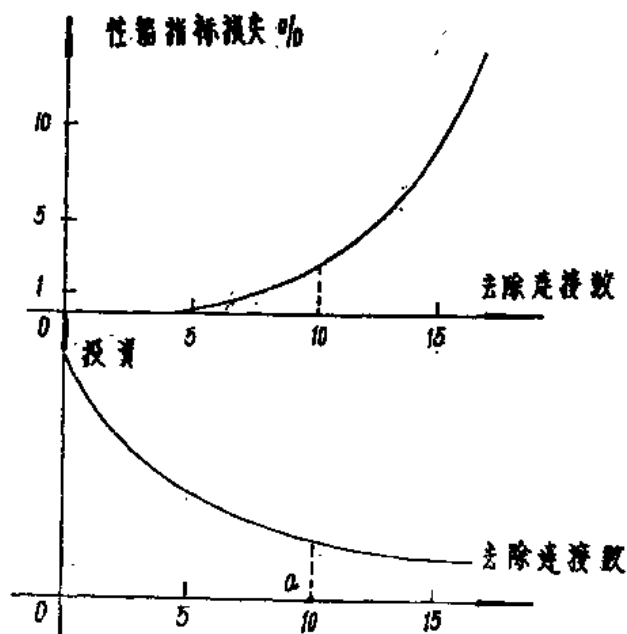


图 1 性能指标损失和路网投资与去除连接数的典型关系

对于减小性能指标贡献的大小,来依次去除或增添它们,以此保证满足投资约束。

性能指标损失和路网投资与去除连接数的典型关系如图 1 所示。图中,性能指标损失的定义为 $\frac{J_1(A)}{J_1(\bar{A})} - 1$ 。可见公交线路网的最优选择实际上是在性能指标损失和投资之间进行折中。

如图 1 所示,我们可以选择 a 点。

三、公交线路的最优配置

给定公交路网 A , 如何配置一组最优的公交线路呢? 普遍认为, 一组良好的公交线路应该具有以下性能:

1. 如果可能, 大多数出行必须是直通的;
2. 线路数目不能太多;
3. 线路必须相当直, 不能与相应的最短路有太多偏离;
4. 每条线路上必须有足够数量的乘客;
5. 所需车辆数目必须尽可能少;
6. 每个乘客换乘次数不能太多;
7. 每条公交线路的起讫点还必须有可供停车调头的场地。

显然, 这是一个多目标优化问题。为了便于处理起见, 我们将主要目标取作性能指标, 而较次要的目标放在约束条件中来考虑。

考虑到目前公交系统的运载能力不足, 尤其在高峰小时群众普遍反映乘车难, 绝大多数人宁可乘在车上绕点弯路而不愿途中换乘, 因为换乘不仅不方便而且换乘时间又无法保证。另外, 减少换乘人次就减少了上下车乘客数, 这样可以提高车辆平均运行速度, 特别在高峰小时, 减少换乘人次对于提高车辆平均运行速度的效果就更加明显。所以, 在配置公交线路时, 我们以换乘人次为性能指标。

设 Z_{ij} 表示结点 i, j 之间出行所需换乘次数; $t'_{ij}(L)$ 表示公交线路为 L 时结点 i 到 j 所需出行时间; M_L 表示最多允许的公交线路数; Q 为允许的停车场位置和调头位置的集合; M_i^j 为位于结点 i 的停车场容量; M_i^j 为端点位于结点 i 的公交线路数; Q_i 为公交线路端点位置的集合; Z_m 为一次出行所允许的最大换乘次数。则公交线路最优化问题可以表述如下:

$$\min_L J_2 = \min_L \sum_{(i,j) \in N^2} \sum_k W^k D_{ij}^k Z_{ij}(L) \quad (3-1)$$

满足约束条件:

$$1) \text{ 车队规模约束 } \max_k \{ \sum_i B_i^k, k = 1, 2, \dots, T \} \leq B,$$

2) 最短路约束:

$$\left(\frac{J_1(L)}{J_1(A)} - 1 \right) \leq \eta$$

$$\text{且 } \max \left(\frac{t'_{ij}(L)}{t'_{ij}(A)} - 1 \right) \leq \eta_m \quad (3-2)$$

3) 线路数约束: $m \leq M_L$

4) 最大换乘次数约束: $Z_{ij} \leq Z_m, (i, j) \in N^2$

5) 停车场约束: $Q_i \subseteq Q$ (位置约束) $M_i^j \leq M_i^j, \forall i \in Q$ (容量约束)

式中, η 和 η_m 均为给定常数, 它们表示允许公交线路与相应最短路的相对偏离程度。这里, 为了简化起见, 与路网最优问题一样, 也不考虑线路上的频率, 即计算出行时间不计入候车时间。

鉴于问题的复杂性, 精确地求解同样是不可能的。下面我们以文字的形式来介绍一种计算机搜索过程:

1. 准备工作: 首先找出 A 所关联的结点集合 N' , 显然 $N' \subseteq N$ 。将端点不属于 N' 的出行归结到 N' 中距其最近的结点, 这样就将出行矩阵缩小为 $n' \times n'$ 维公交出行矩阵 D_i^k (n' 为 N' 的元素个数), 再将 D_i^k ($k = 1, 2, \dots, T$) 汇总为加权公交出行矩阵 D_w :

$$D_w = \sum_k W^k D_i^k.$$

2. 寻找候选线路集合: 设 S' 为 N' 中结点对间最短路集合而 S'_i 和 S'_j 为 S' 中的任意两元素, 寻找 S' 中那些 $S'_i \subset S'_j$ 且 $S'_j \not\subset S'_i$ 的所有元素, 它们组成了集合 S 。对于 $\forall S_i \in S$, 寻找与 S_i 有相同端点且满足最短路约束的所有通路, 用 $\bar{S}$ 来表示所有这些通路的集合。计算 $S^* = S - \bar{S}$, 并将 S^* 中的元素 S^* 按照各自吸引乘客数的多少 (计算一条线路吸引乘客数时不考虑其它线路的影响) 自多到少排序。则 $S^* \cup \bar{S}$ 就构成了候选线路集合。

3. 形成初始公交线路集合 L^0 : 第一步, 我们选择 $L^0(1) = S_1^*$, 以后每一步选入一条线路。设经过第 i 步选择后形成的初始公交线路为 $L^0(i)$, $L^0(i)$ 吸引的直通出行人数用 $M^0(i)$ 来表示, 那么, 第 $(i+1)$ 步我们选择一条线路使得 $M^0(i+1) - M^0(i)$ 为最大。重复上述过程直到复盖整个 A 为止。我们用 L^0 表示所形成的初始公交线路集合, 而它所吸引的直通出行则用矩阵 D_L 来表示。

4. L^0 的优化: 我们用上标 j 来表示第 j 步优化后的结果。第 $j+1$ 步, 通过计算 $D_w - D_L^j$ 找出主要换乘结点, 并以此为依据选入一条线路, 得到 L^{j+1} 。新选入的线路应该使 $\Delta J_2^{j+1} = J_2^j - J_2^{j+1}$ 为最大。重复上述过程直到 ΔJ_2 足够小为止。

5. 辅助变动: 以不引起 J_2 有太大增加为原则对线路进行必要的调整直到满足各种约束条件为止。如果不能得到满意的结果要返回到步骤 3。

这里假定乘客总是选择满足 (3—2) 式的最小换乘次数路线。而有关计算 B_i^j 和 Z_{ij} 的方法将在下一节中详细介绍。

四、各线路最优频率的确定

线路配置好后, 确定最优频率的问题可以概述为: 在满足车队规模、运载能力、运行成本和最低服务水平等约束的条件下, 合理地确定各条线路车辆到达频率 (以下简称频率) 使得总出行时间为最小。即:

$$\min_F J_s(F) = \min_F \sum_{(i,j) \in N^2} D_{ij} t_{ij}(F) \quad (4-1)$$

满足: 1. 车队规模约束: $\sum_p B_p \leq B_i$

2. 运载能力约束: $d_p/f_p \leq C$

3. 运行成本约束: $d_p/f_p \geq \xi \cdot C$

4. 最低服务水平约束: $f_p \geq f_{min}$

$p = 1, 2, \dots, m$

式中, $F = [f_1, f_2, \dots, f_m]^T$, 其中 f_p 为线路 λ_p 上的频率; $t_{ij}(F)$ 表示频率为 F 时, 从结点 i 到 j 的出行时间 (其中包括沿途的乘车, 候车和步行时间); $J_3(F)$ 表示频率为 F 时的总出行时间; d_p 为选用线路 λ_p 乘客的最大通过强度; C 为每辆车容量; ξ 为规定的最拥挤路线上车辆的最低满载率; f_{min} 为规定的最低服务频率。 C , ξ 和 f_{min} 均为预先确定的常数。

对于所划分的每一时期分别求解上述频率优化问题, 便可得到不同时期的结果。因此, 有关变量均应该取相应时期之值。这里, 为了简化起见, 我们略去了表示时期的上标。

根据上述规定, 有:

$$d_p = \max\{d_{ij}^p, d_{ji}^p, \forall \alpha_{ij} \in \lambda_p\} \quad (4-2)$$

式中, d_{ij}^p 表示 λ_p 上 $i \rightarrow j$ 路段乘客的通过强度。且

$$d_{ij}^p = \frac{1}{T_k} \sum_{k=r_1}^i \sum_{q=j}^{r_2} D_{kq}^p \quad (4-3)$$

式中, r_1 和 r_2 分别表示 λ_p 沿 $i \rightarrow j$ 方向的起讫点; D_{kq}^p 表示使用线路 λ_p 从结点 k 到 q 的人数; T_k 为所研究时期的时间长度。

车辆在 λ_p 上运行一个循环需要的时间为:

$$2 \left(\sum_{\alpha_{ij} \in \lambda_p} \frac{l_{ij}}{v_{ij}} + b_p \right)$$

式中, b_p 为 λ_p 上车辆的起始站休息时间。进而, 设 e_p 为 λ_p 上车头时距, 则该线路需要车辆数为:

$$B_p = \frac{2}{e_p} \left(\sum_{\alpha_{ij} \in \lambda_p} \frac{l_{ij}}{v_{ij}} + b_p \right) \quad (4-4)$$

再用 $E = [e_1, e_2, \dots, e_m]^T$ 代替 F 作为决策变量, 则 (4-1) 式可化为:

$$\min_E J_3(E) = \min_E \sum_{(i,j) \in N_2} D_{ij} t_{ij}(E) \quad (4-1)'$$

满足约束条件:

$$\sum_p \frac{1}{e_p} \left(\sum_{\alpha_{ij} \in \lambda_p} \frac{l_{ij}}{v_{ij}} + b_p \right) \leq B_t / 2$$

$$\frac{\xi C}{d_p} \leq e_p \leq C/d_p$$

$$e_p \leq 1/f_{min} \quad p = 1, 2, \dots, m。$$

为了完成频率最优选择问题的数学描述工作, 我们还必须建立估算总出行时间 $J_3(E)$ 的模型。

在该模型中我们假定:

1. 居民总是按照最短路 (时间上) 准则来选择自己出行路线和出行方式 (乘车, 步行或混合出行)。不过, 这里出行时间是按照最长时间而不是平均时间来计算的。也就是说, 出行时间中候车时间一项应取最大值而不是平均值。

2. 居民出行发生时间独立于车辆到达时间。

3. 同一条线路车辆的车头时距保持不变, 不同线路车辆到达互相独立。

在只有一条线路 λ_i 通过的结点, 乘客平均候车时间 $W_i = \frac{1}{2}e_i$, 最长候车时间 $\bar{W}_i = e_i$ 。

一般地说, 当有 n 条互相竞争的线路时, 我们对这 n 条线路重新编号为 $\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^n$, 并用 $e^1, e^2, \dots, e^n$ 分别表示这些线路各自车辆的车头时距, 且设

$$e' = \min\{e^1, e^2, \dots, e^n\}$$

则乘客候车时间为 t 的概率密度函数为:

$$\phi_n(t) = \sum_{r=1}^n r(-t)^{r-1} \sum_{i_1=1}^{n-r+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{n-r+2} \dots \sum_{i_r=i_{r-1}+1}^n \frac{1}{e^{i_1}e^{i_2}\dots e^{i_r}} \quad (0 \leq t \leq e')$$

乘客平均候车时间为:

$$W^n = e' \left[\frac{1}{2} + \sum_{r=1}^{n-1} \frac{(-t)^r (e')^r}{(r+1)(r+2)} \sum_{i_1=2}^{n-r+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{n-r+2} \dots \sum_{i_r=i_{r-1}+1}^n \frac{1}{e^{i_1}e^{i_2}\dots e^{i_r}} \right] \quad (4-5)$$

最长候车时间:

$$\bar{W}^n = e' \quad (4-6)$$

使用线路 i 乘客的比例为:

$$P^i = \frac{e^i}{e'} - \frac{1}{e^i} \sum_{r=1}^{n-1} \frac{(-e')^{r+1}}{r+1} \sum_{i_1=i}^{n-r+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{n-r+2} \dots \sum_{i_r=i_{r-1}+1}^n \frac{1}{e^{i_1}e^{i_2}\dots e^{i_r}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4-7)$$

我们规定不需中转的乘车出行和步行为基本出行, 则任何出行均可表示为基本出行的不同形式组合。用 $t_1(g)$ 和 $t_2(g)$ 来分别表示沿路线 g 的乘车基本出行和步行基本出行时间, 则沿路线 g 由 R 次基本出行(其中乘车为 I 次)组成的一次出行所需的最长时间 $\bar{t}(g)$ 和平均时间 $t(g)$ 为:

$$\bar{t}(g) = \sum_{i=1}^I \bar{t}_1(g_i) + \sum_{j=I+1}^R t_2(g_j) \quad (4-8)$$

$$t(g) = \sum_{i=1}^I t_1(g_i) + \sum_{j=I+1}^R t_2(g_j) \quad (4-9)$$

$$\forall g_i \in g$$

式中, $\bar{t}_1(g_i) = \tau_v(g_i) + \bar{\tau}_W(g_i)$

$$t_1(g_i) = \tau_v(g_i) + \tau_W(g_i)$$

$\tau_v(g_i)$, $\bar{\tau}_W(g_i)$ 和 $\tau_W(g_i)$ 分别表示沿路线 g_i 的乘车时间、最长候车时间和平均候车时间。我们利用(4-8)式来选择出行路线和方式, 当路线和方式确定后再用(4-9)式来计算出行时间。

平均出行时间对于 e^k 的梯度为:

$$\frac{\partial t(g)}{\partial e^k} = \sum_{i=1}^I \frac{\partial \tau_W(g_i)}{\partial e^k} \quad (4-10)$$

$$\text{式中, } \frac{\partial \tau_W(g_i)}{\partial e^1} = \frac{1}{2} + \sum_{r=1}^{n-1} \frac{(-1)^r (e^1)^r}{(r+2)} \sum_{j=2}^{n-r+1} \sum_{j_2=j+1}^{n-r+2} \dots \sum_{j_r=j_{r-1}+1}^n \frac{1}{e^{j_1}e^{j_2}\dots e^{j_r}}$$

$$\frac{\partial \tau_W(g_i)}{\partial e^2} = \sum_{r=1}^{n-1} \frac{(-1)^{r+1} (e^1)^r}{(r+1)(r+2)} \sum_{j=3}^{n-r+2} \sum_{j_2=j+1}^{n-r+3} \dots \sum_{j_r=j_{r-1}+1}^n \frac{1}{(e^2)^2 e^{j_1}e^{j_3}\dots e^{j_r}}$$

注意, 当 $k > 2$ 时表达式的形式和 $k = 2$ 时完全对称, 这里不再另行给出。为简化起见, 只要

对 $e^i (i = 2, 3, \dots, n)$, 重新编号, 对哪个变量求梯度只要将该变量换成 e^2 即可。

到此为止, 我们已经完成了频率优化问题的数学描述。下面我们以框图形式来说明求解过程, 其过程如图 2 所示。

图 2 中, 基本出行时间矩阵 $T^0 = [t^0_{ij}] (i, j) \in N^2$ 如下规定:

$$t^0_{ij} = \begin{cases} \min\{\bar{t}_1(i, j), t_2^*(i, j)\} & \text{结点 } i, j \text{ 间有直通公交线路} \\ t_2^*(i, j) & \text{结点 } i, j \text{ 间无直通公交线路} \end{cases}$$

式中, i 和 j 分别表示出行的起讫点, 而上标 $*$ 表示沿最短路的出行时间。

需要指出的是, 模型中每个人均按同一准则来选择路线和出行方式的假定是比较粗糙的。必要时, 我们可以按照乘客的个人特征(如职业, 年龄等)和出行目的(工作, 购物, 娱乐)来区分出行需求矩阵, 并且对于各类乘客的不同目的出行分别规定其选择路线和出行方式的准则, 如: 时间最省, 转车次数最少, 票价最低, 步行时间最短等。进而, 将各类出行需求按选择路线和出行方式的准则进行归总, 再按上述方法分别处理, 便可使模型得到进一步完善。当然这也就提高了对于数据收集工作的要求。

五、几个值得注意的问题

现在, 我想着重强调几个问题:

1. 上面三个子问题分别最优了, 并不能肯定使整个系统最优。这是因为子问题中的决策变量以及许多约束条件之间是互相联系的, 此外单个子问题的某些约束条件的选取也有一定的任意性。我们必须根据在满足人力和物力这个总约束条件下使系统为最优的原则来对它们进行协调平衡。考虑到公交系统的复杂性, 而且我们在建立数学模型时总是作了一定程度的简化, 不可能考虑全部影响因素, 在某种意义上说, 具有丰富实际经验的公交系统决策管理部门的意见常常是相当重要的。因此, 在协调平衡时我们不主张采用纯粹的数学方法, 而是根据决策管理部门所提供的各个可行方案进行计算。将各个方案的结果及其能达到的性能一起交给决策者, 作为他们决策的依据。例如要回答如下问题: 现有资金是用于扩大路网, 修建停车场开辟新线路, 还是用于添置车辆? 新添的车辆是分配在现有线路

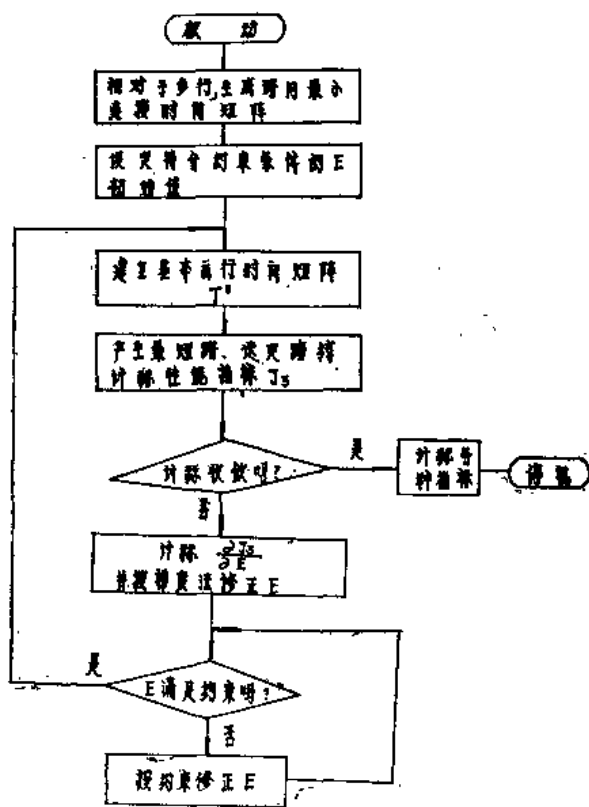


图 2 确定最优频率的流程图

策略变量以及许多约束条件之间是互相联系的, 此外单个子问题的某些约束条件的选取也有一定的任意性。我们必须根据在满足人力和物力这个总约束条件下使系统为最优的原则来对它们进行协调平衡。考虑到公交系统的复杂性, 而且我们在建立数学模型时总是作了一定程度的简化, 不可能考虑全部影响因素, 在某种意义上说, 具有丰富实际经验的公交系统决策管理部门的意见常常是相当重要的。因此, 在协调平衡时我们不主张采用纯粹的数学方法, 而是根据决策管理部门所提供的各个可行方案进行计算。将各个方案的结果及其能达到的性能一起交给决策者, 作为他们决策的依据。例如要回答如下问题: 现有资金是用于扩大路网, 修建停车场开辟新线路, 还是用于添置车辆? 新添的车辆是分配在现有线路