

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.12.021

考虑信息化重要度的公交信息化项目 建设时序研究

崔紫薇^{1,2}, 蔡 铭^{1,2}, 肖 尧^{*1,2}, 林少锋³, 郭 震³

(1. 中山大学 智能工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510006;
3. 佛山市公共交通运输有限公司, 广东 佛山 528100)

摘要:合理规划各项目的建设时序是信息化建设中的关键问题,然而现有定量研究忽略了项目业务需求和数据需求的影响,且项目分批推进模式下的调度问题有待进一步研究。针对上述不足,考虑信息化重要度,提出了一种基于0-1规划模型的公交信息化项目建设时序研究方法。首先,引入有向图概念提出定量描述业务关系的“项目业务入度”和“项目业务出度”指标,并从数据影响方面构建了“数据可用性”和“数据支撑性”指标。其次,采用CRITIC方法确定各指标的权重。接下来,使用线性加权和法集成4个指标,得到各项目的信息化重要度。然后,以全局信息化重要度最大为目标建立0-1规划模型。最后,利用贪心算法求解模型,得到各项目所属建设批次。以佛山市的10个公交信息化建设项目为例,研究其建设时序。同时,构建信息化建设效率作为评价指标,其综合了项目资金使用情况、信息化贡献程度和建设工期。结果表明:信息化重要度指标是合理的,且可大范围推广应用;所提方法的信息化建设效率为59.98%,高于建设成本排序方法和逼近理想解排序方法,可以有效指引公交信息化项目的建设,具有实际应用价值。

关键词:智能交通;建设时序调度;0-1规划模型;公共交通信息化项目;业务需求关系量化;信息化重要度

中图分类号:U491

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2023)12-0181-08

Study on Construction Sequence of Public Transportation Informatization Projects Considering Informatization Importance

CUI Zi-wei^{1,2}, CAI Ming^{1,2}, XIAO Yao^{*1,2}, LIN Shao-feng³, GUO Zhen³

(1. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510006, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory for Intelligent Transportation System, Guangzhou Guangdong 510006, China;
3. Foshan Public Transport Management Co., Ltd., Foshan Guangdong 528100, China)

Abstract: It is a key problem to plan the construction sequence of each project reasonably in the informatization construction, but the existing quantitative research neglects the influence of the project business requirement and the data requirement, moreover, the scheduling problem under the batching mode needs further study. To tackle these problems, a method based on the 0-1 programming model with the informatization importance is presented. In view of the above-mentioned shortcomings, considering the importance of informationization, a method based on 0-1 programming model is put forward to study the construction sequence of public transportation informationization project. First, the concept of directed graph is introduced and the indicators of “in-degree of project business” and “out-degree of project business” are put forward to describe

收稿日期:2022-05-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB1600400);广东省科技计划项目(2023B1212060029);中山大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(22qntd1710)

作者简介:崔紫薇(1995-),女,河南永城人,博士研究生。(cuizw3@mail2.sysu.edu.cn)

*通讯作者:肖尧(1990-),男,湖南娄底人,博士。(xiaoyao9@mail.sysu.edu.cn)

the business relationship quantitatively, and from the data impact aspect, the indicators of “data availability” and “data support” are constructed. Second, the weight evaluation of each indicator is determined by CRITIC method. Next, 4 indicators are integrated by using linear weighted sum method to get the informatization importance degree of each item. Then, 0-1 programming model is established with the goal of maximizing the importance of global informatization. Finally, the greedy algorithm is used to solve the model and the construction batch to which each project belongs are got. Taking 10 public transport informatization projects in Foshan for examples to study the construction sequence. At the same time, the efficiency of informatization construction is constructed as an evaluation indicator, which synthesizes the use of project funds, the contribution of informatization and the construction period. The result shows that (1) the importance indicator of informationization is reasonable and can be widely used; (2) the informatization efficiency of the proposed method is 59.98%, which is higher than those of the construction cost ranking method and approximate ideal solution ranking method. That can effectively guide the construction of public transport informatization projects with practical application value.

Key words: ITS; construction sequence scheduling; 0-1 programming model; public transportation informatization project; quantification of business demand relationship; informatization importance

0 引言

公共交通信息化通过信息技术整合并利用内、外部信息资源,加强多方参与者的交流与沟通,从而提升公交管理和服务水平。公共交通信息化框架中,通常涉及多个具有差异的交通系统,即为交通信息化项目^[1-2]。换言之,多类型交通信息化项目耦合形成了公共交通信息化整体。在实际信息化项目建设中,常因建设资金等限制条件,无法同时开始全部项目的建设。此时,合理规划项目建设时序将有利于提升施工效率、减少资源浪费。因此,公交信息化项目建设时序调度方法的研究至关重要。

目前,公交信息化项目建设时序调度方法的研究可归纳为2类:基于经验决策和基于定量研究。前者具有较强的主观性,缺少客观依据,并逐渐被后者替代。在定量研究方法中,伍速锋等^[3]基于层次分析法,从成本、效益、技术成熟度和政策符合度构建指标层,建立了项目实施序列优化模型;姜雨等^[4]基于决策试验和评价试验法对项目实施的需求程度排序,采用层次分析法对项目实施的影响程度和效益进行单排序,并采用线性分配方法进行综合排序;陆远迅^[5]基于技术性能、安全效益等6个方面构建指标,采用层次分析法确定相对权重,并基于逼近理想解法确定项目建设时序。综上,已有研究在考虑项目对应业务之间关系和数据对项目建设影响方面存在不足。同时,随着技术的发展,可以实现并行建设多个满足资金条件的信息化项目^[4]。此时,信息化项目可以采用分批推进模式,即为将项目分为若干批次,且同一批

次的项目同时开始建设。然而,这种模式下的项目建设时序调度方法有待进一步研究。

同时,公交信息化项目建设时序调度问题是项目调度问题在公交信息化领域的拓展,因此本研究问题的解决可借鉴已有项目调度问题的研究。不同公共交通信息化项目的建设工期及建设成本区别较大,因此公交信息化项目建设时序调度问题属于多模式资源受限项目调度问题(Multi-mode Resource Constrained Project Scheduling Problem, MRCPSP)。已有学者对于MRCPSP进行了研究。Khalili-Damghani等^[6]提出了最小化时间和成本、最大化质量的多目标优化模型,同时使用动态自适应多目标粒子群算法等方法进行模型求解;Maghsoudlou等^[7]以最小化完工时间和人工成本、最大化质量为目标构建模型,并提出了一种多目标野草入侵优化算法进行模型求解;Zoraghi等^[8]在考虑惩罚机制的情况下,建立了以总成本最小为目标的优化模型,并使用3种混合元启发式算法求解模型来获得近似最优解,内部搜索时使用遗传算法,外部搜索时分别使用粒子群优化算法、遗传算法和模拟退火算法;Tirkolaee等^[9]以最大净现值与最小完工时间为目标建立双目标混合整数非线性规划模型,并使用 ε 约束法、NSGA-II和多目标模拟退火算法进行模型的求解。综上,关于MRCPSP的研究,针对不同优化目标建立模型并求解是一种重要的方法,为公交信息化项目建设时序调度研究提供了理论参考。

本研究针对分批推进模式下的公交信息化项目建设时序进行研究,综合考虑公交信息化项目的业

务关系和数据影响, 构建信息化重要度指标, 并基于此建立 0-1 规划模型, 给出模型求解算法, 最后通过实例分析进行验证。

1 问题描述及假设

随着科学技术的发展, 市场信息化项目软硬件供应商的增加, 在投入资金充足的情况下, 全部公交信息化项目可同时开始建设。实际上, 单个信息化项目的建设成本较高, 较少公交信息化项目采购方 (如公交公司或政府单位) 可一次性支付全部的建设费用, 多数采购方分批投入资金用于建设。由于政策等多种因素的影响, 各批次投入建设的资金金额存在区别。同时, 考虑到各信息化项目建设成本不同, 各批次投入资金金额将直接影响该批次建设项目的选择。

在此, 明确本研究的研究问题为: 对于计划建设的公共交通信息化项目, 在已知各项目的建设成本、计划建设批次及各批次投入金额的条件下, 确定各项目所属的建设批次。

为了简化问题的研究, 本研究提出 3 个假设: (1) 任一公共交通信息化项目软硬件供应商数量充足; (2) 每个批次的建设资金投入后, 可立即开始该批次公共交通信息化项目的建设; (3) 同一批次的公共交通信息化项目同时开展建设。

2 方法

2.1 信息化重要度确立

2.1.1 指标选取

公交信息化系统主要面向系统的使用者, 致力于提升公交相关从业人员办事效率, 因此系统的建设时序调度需要将公交业务流程考虑在内。同时, 由于信息化的发展历程就是“业务数据化”的过程, 因此在确定建设时序时还应考虑数据方面的影响。为定量评价各项目信息化重要度, 本研究从业务方面和数据方面选取评价指标。

(1) 业务方面

公共交通的业务流程通常涉及多个先后步骤, 因此本研究引入有向图的理论, 提出面向业务的定量指标: “业务入度”和“业务出度”, 并基于此构建面向项目的“项目业务入度”和“项目业务出度”指标。

有向图可从全局角度对多种网络结构进行描述及建模^[10]。当有向图的一个顶点表示一个业务时, 根据业务流程图, 可确定相应的业务有向图, 如图 1 所示。在业务有向图中, 各业务顶点的出边条数即为该顶点的“业务出度”, 入边条数即为该顶点的

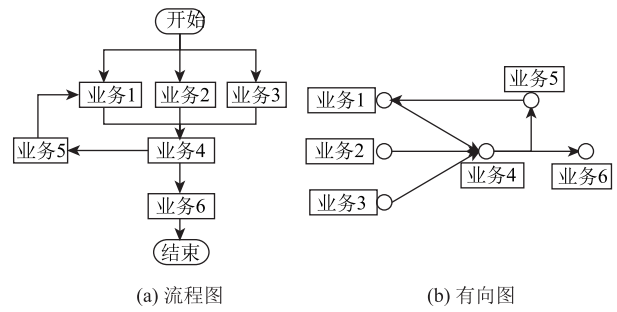


图 1 业务流程图和相应的业务有向图

Fig. 1 Business flow chart and corresponding business directed graph

“业务入度”。一项业务需要其他业务提供的信息越多, 该业务顶点的“业务入度”越大。同理, 一项业务需要输出给其他业务的信息越多, 则该业务顶点的“业务出度”越大。本研究所提业务有向图与 AOV (Active on Vertices) 网络^[11]、网络计划图^[12-13]不同, 业务有向图中可以出现回路, 公共交通业务数据在闭环中流转, 促进业务的迭代优化。AOV 网络与网络计划图中均不能出现回路, 否则回路中的工作永远不能完成。

一个公交信息化项目通常可以实现多项业务, 因此定义“项目业务入度”为项目对应全部业务的“业务入度”之和, 定义“项目业务出度”为项目对应全部业务的“业务出度”之和。此时, “项目业务入度”数值越小, “项目业务出度”数值越大, 项目越优先建设。如表 1 所示, 信息化项目 C 的“项目业务入度”最大, 信息化项目 A, B, C 的“项目业务出度”一样, 因此信息化项目 C 应最后开始建设。

表 1 “项目业务入度”和“项目业务出度”取值

Tab. 1 Values of “in-degree of project business” and “out-degree of project business”

信息化项目	对应业务	业务入度	业务出度	项目业务入度	项目业务出度
A	1	1	1	1	2
	2	0	1		
B	3	0	1	1	2
	5	1	1		
C	4	3	2	4	2
	6	1	0		

(2) 数据方面

在数据方面, 本研究提出 2 个指标: “数据可用性”和“数据支撑性”。对于一个信息化项目, 定义“数据可用性”为项目数据需求的满足程度, 内容包括判断为项目提供数据的采集设备是否已安装并使用, 其中的设备指监控摄像机、GPS 终端等。“数据支撑性”

为二分变量,其数值为1表示该项目可以解决数据流转问题,例如数据中心,其取值为0则表示不可以。

综上所述,共有4个量化指标用于评价公交信息化项目的信息化重要度,如表2所示。

表2 项目信息化重要度的评价指标

Tab. 2 Evaluation indicators for determining informatization

importance of projects		
指标	量化	指标类型
项目业务入度	对应所有业务顶点的入边条数之和	逆向指标
项目业务出度	对应所有业务顶点的出边条数之和	正向指标
数据可用性	=1, 满足项目数据需求; =0.5 部分满足数据需求; =0, 完全不满足项目数据需求	正向指标
数据支撑性	=1, 可以解决数据流转问题; =0, 不可以解决数据流转问题	正向指标

2.1.2 权重赋值

为减少主观因素的影响,采用客观赋权法确定各个指标的权重。常见的客观赋权法为熵权法、标准离差法、CRITIC (Criteria Importance though Intercriteria Correlation) 法^[14]等。熵权法和标准离差法的基本思路相同,根据指标变异性的确定权重。CRITIC 法不仅考虑了指标变异大小对于权重的影响,还考虑了各指标之间的冲突性,比前2种方法考虑得更加全面。因此,本研究选用 CRITIC 法进行指标权重的确定,步骤如下^[15-16]。

步骤1:指标预处理。设共有 I 个信息化项目有待确定建设时序,且共有 J 个评价指。当第 $i(1, 2, \dots, I)$ 个项目第 $j(1, 2, \dots, J)$ 项决策指标的对应值为 x_{ij} ,初始决策矩阵 X 为:

$$X = (x_{ij})_{I \times J} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{I1} & \cdots & x_{IJ} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

采用极小极大值变换法进行指标的无量纲化和同趋势化处理。若第 j 个指标是正向指标(数值越大越好),则处理公式为式(2),若为逆向指标(数值越小越好),则处理公式为式(3)。逆向指标经过极小极大值法变化后转变为正向指标。

$$a_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}, \quad (2)$$

$$a_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}. \quad (3)$$

初始决策矩阵 X 经过极小极大值变化后得到决策矩阵 A 为:

$$A = (a_{ij})_{I \times J} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I1} & \cdots & a_{IJ} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

步骤2:确定指标变异性。第 j 个指标标准差 S_j 的计算公式为:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (a_{ij} - \bar{a}_j)^2}{I-1}}, \quad \bar{a}_j = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I a_{ij}. \quad (5)$$

步骤3:确定指标冲突性。第 j 个指标与其他指标冲突性的量化指标 R_j 计算公式为:

$$R_j = \sum_{k=1}^J (1 - r_{jk}), \quad (6)$$

式中 r_{jk} 是第 j 个指标和第 k 个指标之间的相关系数。

步骤4:确定各指标包含的信息量。第 j 个评价指标包含的信息量 D_j 计算公式为:

$$D_j = S_j R_j, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (7)$$

步骤5:确定各指标的客观权重。第 j 个指标的权重 w_j 计算公式为:

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^J D_j}, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (8)$$

2.1.3 信息化重要度

采用线性加权和法,将4个评价指标集成为1个综合指标,即为信息化重要度。此时,第 i 个项目的信息化重要度 U_i 计算公式为:

$$U_i = \sum_{j=1}^J w_j a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (9)$$

2.2 建设时序确定

2.2.1 模型建立

公交信息化项目建设时序调度过程中,应优先建设信息化重要度 U_i 取值较大的项目。为此,定义全局信息化重要度指标 U 为各项目信息化重要度的加权求和,其中权重为该项目所属建设批次的倒数。对于一个信息化项目建设时序方案, U 越大越好。以全局信息化重要度 U 最大为目标建立0-1规划模型,设置0-1决策变量 $k_{i,g}$ 为:

$$k_{i,g} = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 个项目不在第 } g \text{ 批次中建设} \\ 1, & \text{第 } i \text{ 个项目在第 } g \text{ 批次中建设} \end{cases}. \quad (10)$$

建立模型如下所示:

$$\max U = \sum_{g=1}^G \left[\frac{1}{g} \left(\sum_{i=1}^I k_{i,g} U_i \right) \right], \quad (11)$$

式中, U_i 为第 i 个项目的信息化重要度; G 为建设批次; $k_{i,g}$ 为0-1决策变量,表示第 i 个项目是否在

第 $g(1, 2, \dots, G)$ 个建设批次中。式 (11) 表示以全局信息化重要度 U 最大为目标。

$$\text{s. t. } \sum_{g=1}^G r_g = \sum_{i=1}^I C_i, \quad (12)$$

式中, r_g 为第 $g(1, 2, \dots, G)$ 个建设批次的投入资金; C_i 为第 i 个项目的建设成本。式 (12) 表示全部批次投入的总资金应等于全部信息化项目的总成本。

$$R_g = r_g + l_g, \quad (13)$$

式中, l_g 为第 $g-1$ 个批次的结余资金; R_g 为第 g 个批次的可用资金。式 (13) 表示第 g 个批次可用资金 R_g 应由该批次投入资金 r_g 和前一个批次结余资金 l_g 确定。

$$\sum_{i=1}^I k_{i,g} C_i \leq R_g, \quad g = 1, 2, \dots, G. \quad (14)$$

式 (14) 表示第 g 个批次的项目建设总成本应不大于该批次的可用资金 R_g 。

$$\sum_{g=1}^G k_{i,g} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (15)$$

式 (15) 表示第 i 个项目仅属于一个建设批次。

$$k_{i,g} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad g = 1, 2, \dots, G. \quad (16)$$

式 (16) 表示各变量的取值范围。

2.2.2 模型求解

贪心算法是一种求解单目标最优化模型的算法, 其在求解问题时, 每一步都做出当前最佳的选择, 因此贪心策略的选择是关键^[17-19]。本研究采用贪心算法进行求解, 具体流程如图 2 所示, 使用的贪心策略为: (1) 每一步都选择最优先建设的批次确定其包含项目; (2) 每一步都选择信息化重要度最大的项目判断是否加入该建设批次。

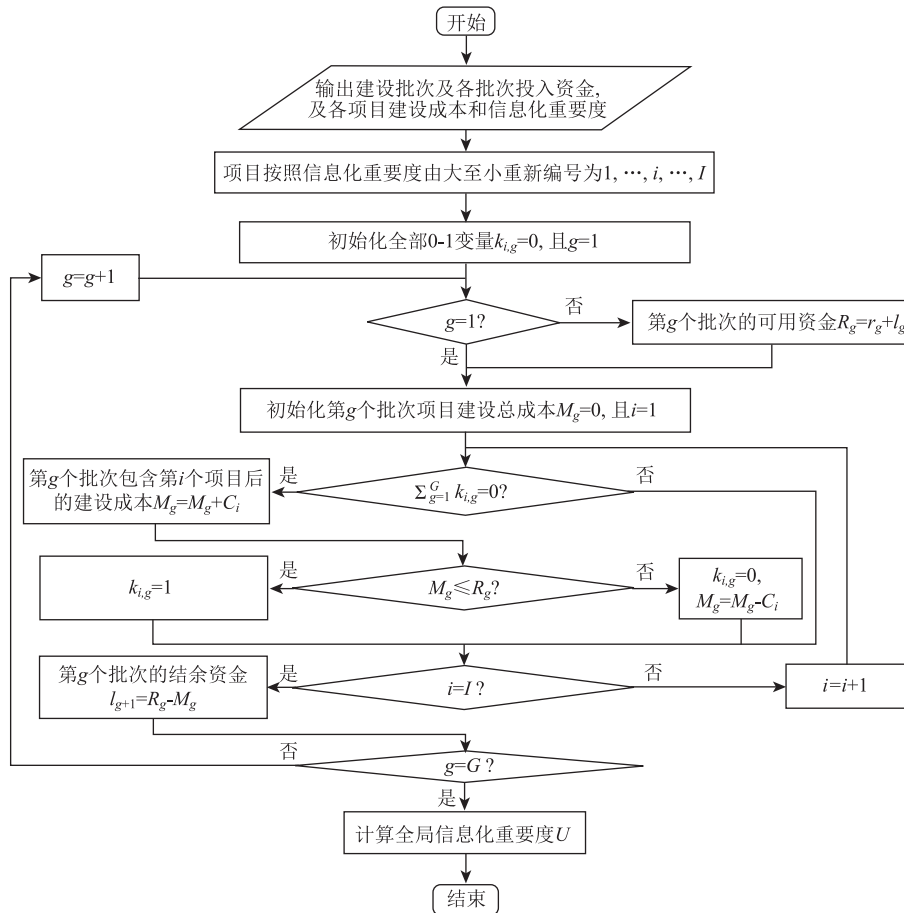


图 2 基于贪心算法的模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart of model solving based on greedy algorithm

3 实例分析

3.1 数据介绍

以广东佛山市的 10 个公交信息化项目为例, 对

于已规划完成的 9 个业务系统和 1 个数据中心, 确定各项目所属建设批次。在调研公交公司内部和市场软件供应商之后, 确定各项项目的建设成本等内容 (见表 3), 并明确各项目的主要业务有向图 (见图

表 3 佛山市 10 个公交信息化项目的主要内容
Tab. 3 Contents of 10 public transportation informatization projects in Foshan

编号	项目名称	是否满足	是否解决	建设成本/万元	建设工期/月
		项目数据需求	数据流转问题		
1	公交服务考核系统	否	否	80	7
2	智能调度系统	是	否	30	3
3	行业运营监管系统	否	否	80	6
4	运营财务管理系统	是	否	60	4
5	行业审批系统	是	否	50	3
6	辅助决策支持系统	否	否	180	14
7	安全监察系统	否	否	160	11
8	应急响应系统	否	否	60	3
9	乘客信息服务系统	否	否	70	5
10	数据中心	部分满足	是	245	13.5

3)。同时，已知建设资金分为 3 个批次投入，从第 1 至第 3 个批次投入的金额分别为 300，400，315 万元，且相邻批次资金投入的间隔为 12 个月。

3.2 评价指标

考虑资金使用情况、信息化贡献程度和节省建设工期 3 个方面的影响，提出信息化建设效率 η 作为评价指标，其数值越大越好。信息化建设效率 η 的计算公式为：

$$\eta = \frac{\sum_{g=1}^G \frac{\alpha_g}{g} + \sum_{g=1}^G \frac{\beta_g}{g} + (1 - \gamma)}{3}, \quad (17)$$

式中，资金利用率 α_g 为第 g 个批次建设成本占全部项目建设成本的比例，数值越大越好；信息化贡献率 β_g 为第 g 个批次项目信息化重要度占全部项目信息化重要度的比例，数值越大越好；时间占用率 γ 为方案建设工期占最长建设工期的比例，其中最长建设工期为全部项目建设工期数值求和， γ 数值越小越好。

3.3 试验结果

3.3.1 信息化重要度

由图 3 和表 3 构造初始决策矩阵 X 为：

$$X = \begin{bmatrix} 3.0 & 3.0 & 0.0 & 0.0 \\ 2.0 & 3.0 & 1.0 & 0.0 \\ 1.0 & 2.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 2.0 & 0.0 & 0.0 \\ 2.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 13.0 & 13.0 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

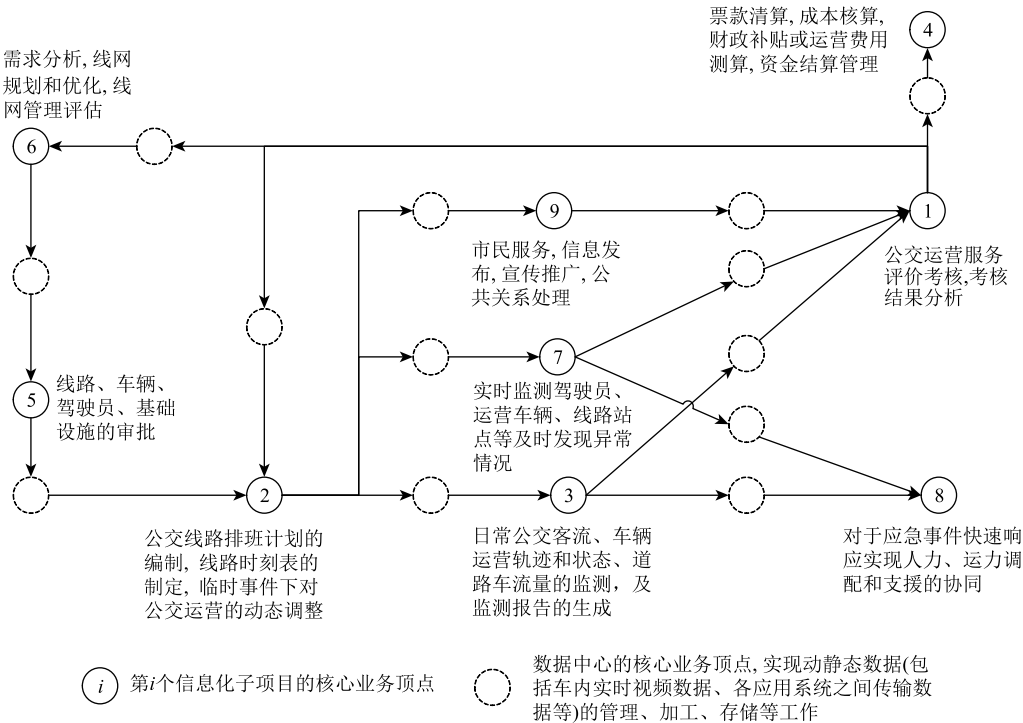


图 3 佛山市 10 个公交信息化项目的主要业务有向图

Fig. 3 Business directed graph of 10 public transportation informatization projects in Foshan

初始决策矩阵 X 经过极小极大值变化后得到决策矩阵，随后采用 CRITIC 法确定各指标的权重，如表 4 所示。

表 4 基于 CRITIC 法的指标权重赋值结果

Tab. 4 Weight evaluation of indicators based on CRITIC method

指标	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重
项目业务入度	0.310	5.040	1.561	0.332
项目业务出度	0.293	2.923	0.856	0.182
数据可用性	0.474	2.891	1.371	0.291
数据支撑性	0.316	2.912	0.921	0.195

根据决策矩阵和各指标权重, 计算各信息化项目的信息化重要度, 如图 4 所示。

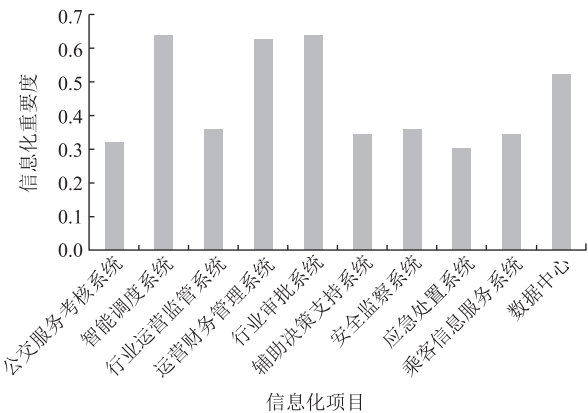


图 4 各项目的信息化重要度

Fig. 4 Informatization importance of each project

3.3.2 建设时序确定

根据各个项目的信息化重要度, 求解 0-1 规划模型, 得到全局信息化重要度 $U=3.368$ 。根据 3.1 节

表 5 不同方法的结果 (单位: %)

Tab. 5 Results with different methods (unit: %)

内容	建设成本排序方法			逼近理想解排序方法			本研究方法		
	资金利用率	信息化贡献率	时间占用率	资金利用率	信息化贡献率	时间占用率	资金利用率	信息化贡献率	时间占用率
第 1 批次	26.60	57.17		13.79	42.58		28.57	58.43	
第 2 批次	31.53	23.32	54.68	54.68	35.67	54.68	39.90	19.82	54.68
第 3 批次	41.87	19.51		31.53	21.75		31.53	21.75	
信息化建设效率 η		58.99			54.88			59.98	

3.4 结果分析

(1) 分析图 3 和表 3 可知, 本研究从业务和数据方面提出的 4 个评价指标, 其定量数值较易获取, 可为综合评价指标的计算提供支撑。在指标权重确定方面, 处理方法简单, 操作难度较低。因此, 公交信息化重要度指标是合理的, 并且可被大范围推广使用。

(2) 分析图 3 和表 4 可知, “数据可用性” 的变异性最大, 说明该指标数据波动较大, 但其冲突性较小, 说明该指标与其他指标的相似性较大, 因此基于 CRITIC 法确定的权重小于“项目业务入度”指标。对于“项目业务入度”, 尽管其变异性较小, 但

所述, 相邻批次投入资金时间间隔为 12 个月, 得到 10 个信息化项目的甘特图 (见图 5)。此时, 基于本方案建设完成全部项目共需 38 个月。

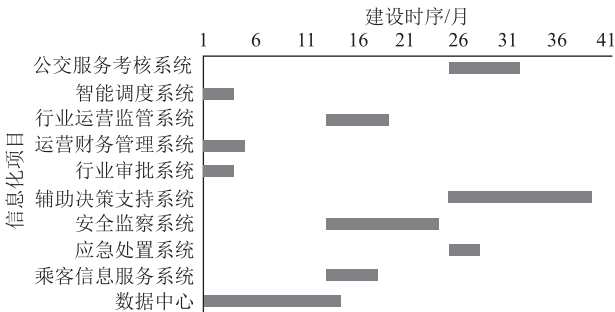


图 5 所提方法确定的各项目建设甘特图

Fig. 5 Gantt chart of each project determined by proposed method

本研究选择建设成本排序方法和逼近理想解排序方法作为对比。前者基于各项目建设成本升序排列, 依次选择成本最小的项目加入第 1 个批次, 直至不满足第 1 个批次的建设资金约束, 并以此类推第 2 个和第 3 个批次。后者采用逼近理想解排序方法确定各项目的相对接近度, 依次选择数值最大的项目加入第 1 个批次, 直至不满足第 1 个批次的建设资金约束, 并以此类推第 2 个和第 3 个批次。为了更好地控制变量, 逼近理想解排序方法中采用与本研究方法一致的指标及权重。因此, 得到 2 种对比方法与本研究方法的结果比较, 如表 5 所示。

其冲突性远大于其他 3 个指标, 因此该指标权重最大, 对确定各项目信息化重要度的贡献最大。

(3) 分析表 5 可知, 本研究方法的信息化建设效率为 59.98%, 比建设成本排序方法和逼近理想解排序方法的结果分别高 0.99% 和 5.10%, 说明所提方法是有效的。同时, 在第 1 个建设批次中, 所提方法的资金利用率和信息化贡献率均高于 2 种对比方法, 说明本研究方法可充分利用有限资源进行信息化建设。

4 结论

本研究考虑信息化重要度的影响, 提出一种基于

0-1 规划模型的公交信息化项目建设时序确定方法。从信息化项目业务和数据方面定义信息化重要度,建立以全局信息化重要度最大为目标的 0-1 规划模型并求解。实例结果表明,本研究所提方法的信息化建设效率为 59.98%,高于建设成本排序方法 (58.99%) 和逼近理想解排序方法 (54.88%),可以有效支撑公交信息化项目建设时序确定,驱动公共交通的信息化进程。

需指出的是,本研究在已知计划建设批次及各批次投入金额等条件下,对于公交信息化项目建设时序进行研究。然而在实际中,项目采购方具有不同的规章制度,因此存在与本研究不同的已知条件,例如建设批次未知,此时对项目建设时序的确定有待进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] YAN J, LIU J, TSENG F. An Evaluation System Based on the Self-organizing System Framework of Smart Cities: A Case Study of Smart Transportation Systems in China [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 153: 119371.
- [2] SUMALEE A, HO H W. Smarter and More Connected: Future Intelligent Transportation System [J]. *IATSS Research*, 2018, 42 (2): 67-71.
- [3] 伍速锋, 杨晓光, 陈幼林. ITS 项目建设次序的定量优化方法研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2005, 5 (2): 26-30.
WU Su-feng, YANG Xiao-guang, CHEN You-lin. A Quantitative Optimization Method for Sort Order of ITS Projects [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2005, 5 (2): 26-30.
- [4] 姜雨, 陆键, 项乔君. 区域 ITS 项目实施的综合排序方法研究 [J]. *公路交通科技*, 2007, 24 (11): 130-135, 142.
JIANG Yu, LU Jian, XIANG Qiao-jun. Research on Integrated Taxis Method of Regional ITS Deployment [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24 (11): 130-135, 142.
- [5] 陆远迅. 重庆市智能交通系统规划研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
LU Yuan-xun. Study on the Intelligent Transportation Systems Planning of Chongqing Municipal [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [6] KHALILI-DAMGHANI K, TAVANA M, ABTAHI A, et al. Solving Multi-mode Time-cost-quality Trade-off Problems under Generalized Precedence Relations [J]. *Optimization Methods and Software*, 2015, 30 (5): 965-1001.
- [7] MAGHSOUDLOU H, AFSHAR-NADJAFI B, NIAKI S T A. A Multi-objective Invasive Weeds Optimization Algorithm for Solving Multi-skill Multi-mode Resource Constrained Project Scheduling Problem [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2016, 88: 157-169.
- [8] ZORAGHI N, SHAHSAVAR A, ABBASI B, et al. Multi-mode Resource-constrained Project Scheduling Problem with Material Ordering under Bonus-penalty Policies [J]. *Top*, 2017, 25: 49-79.
- [9] TIRKOLAEI E B, GOLIL A, HEMATIAN M, et al. Multi-objective Multi-mode Resource Constrained Project Scheduling Problem Using Pareto-based Algorithms [J]. *Computing*, 2019, 101 (6): 547-570.
- [10] 余绪金, 许俊. 一种基于有向图的高速公路多义性路径贝叶斯识别方法 [J]. *公路交通科技*, 2018, 35 (11): 110-115.
YU Xu-Jin, XU Jun. A Bayesian Recognition Method for Expressway Ambiguity Path Identification Based on Digraph [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35 (11): 110-115.
- [11] TONG Z, SU X, DING X, et al. Optimizing Software Development Requirements Based on Dependency Relations [J]. *Optimizing Software Development Requirements Based on Dependency Relations*, 2018, 4 (9): 1014-1030.
- [12] ZAREEI S. Project Scheduling for Constructing Biogas Plant Using Critical Path Method [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 756-759.
- [13] KUSUMADARMA I A, PRATAMI D, YASA I P, et al. Developing Project Schedule in Telecommunication Projects Using Critical Path Method (CPM) [J]. *International Journal of Integrated Engineering*, 2020, 12 (3): 60-67.
- [14] ODU G O. Weighting Methods for Multi-criteria Decision Making Technique [J]. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2019, 23 (8): 1449-1457.
- [15] MOHAMADGHASEMI A, HADI V A, HOSSEINZADEH L F. The Multiobjective Stochastic CRITIC-TOPSIS Approach for Solving the Shipboard Crane Selection Problem [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2020, 35 (10): 1570-1598.
- [16] PAN B, LIU S, XIE Z, et al. Evaluating Operational Features of Three Unconventional Intersections under Heavy Traffic Based on CRITIC Method [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (8): 4098.
- [17] SAMPURNO G I, SUGIHARTI E, ALAMSYAH A. Comparison of Dynamic Programming Algorithm and Greedy Algorithm on Integer Knapsack Problem in Freight Transportation [J]. *Scientific Journal of Informatics*, 2018, 5 (1): 49.
- [18] JING X, PAN Q, GAO L, et al. An Effective Iterated Greedy Algorithm for the Distributed Permutation Flowshop Scheduling with Due Windows [J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 96: 106629.
- [19] SHAO W, SHAO Z, PI D. Modeling and Multi-neighborhood Iterated Greedy Algorithm for Distributed Hybrid Flow Shop Scheduling Problem [J]. *Knowledge-based Systems*, 2020, 194: 105527.