

交互式多目标优化方法在城镇路面养护规划中的应用

邓宁¹, 华龙²

(1. 广西交通职业技术学院, 广西南宁 530023; 2. 长沙理工大学)

摘要:考虑到路面养护多目标优化问题可能存在大量的可行解,为此引入了一种基于决策偏好模型的“交互式多目标优化优势粗糙集法”(IMO-DRSA),利用优势粗糙集法对决策者在决策过程中所提供的偏好信息进行处理,得到一种“若……那么……”的决策规则,从而帮助决策者根据预先确定的目标对养护方案实施分类及资金分配决策。

关键词:多目标优化;路面养护;IMO-DRSA;偏好决策

养护对维持路面使用性能及满足相关利益期望至关重要,但预算往往不足以满足所有路段的养护需求。这就要求通过决策来确定不同养护方案的优先级,以便通过优化使有限预算实现相关利益者的多个预期目标。而应用多目标优化最大的困难在于存在大量的可行解,这将导致决策者难以抉择。为支持决策者确定路面养护方案的最佳组合,该文提出一种结合偏好规则的交互式多目标优势粗糙集法,将“交互式多目标优化”框架(IMO)同“优势粗糙集”法(DRSA)结合起来,并基于约束 Pareto 最优前沿可行解集思想,以此实现路面养护之最佳规划。

1 概述

许多研究讨论了优化技术在处理道路养护决策问题中的应用。在多目标优化的背景下,困难在于最优化的定义,因为在大多数情况下并不存在一个解能够使所有目标同时最优,因而引入了 Pareto 最优的概念,即在不损害某一目标利益的前提下尽可能优化其他目标。单从数学角度来看,Pareto 最优反映了资源在各目标间的最佳权衡乃是一种极好的解。可对于决策者来说,理想结果是依据自身经验或偏好来从众多 Pareto 最优解中仅选择一小部分解。因此,需要借助添加偏好规则来辅助决策者从中做出选择。

根据决策者所提供偏好规则的方式可将偏好方法分为3种:先验偏好法、后验偏好法和交互式偏好法。其中先验法需要大量先验知识、后验法则存在算法冗余搜索效率差等缺陷,交互式方法将偏好信息同 Pare-

to 最优解集进化而进化的思路,既减少了先验知识的输入,又使决策结果变得易于接受和理解,因而被该文应用于求解路面养护规划问题。但传统的交互式偏好方法多以随机生成方式来产生偏好信息集,而随机生成方式具有极大的不确定性,无法保证每次随机生成过程都能获得有效的偏好集,从而导致算法搜索效率急剧下降、计算时间不断延长,因此必须应用一种新的偏好集设置方法。

由于不存在一个客观最优解决方案,因此探索的目的并非是寻找客观最优方案。作为一个决策辅助过程,其作用在于寻找最佳折中方案(Pareto 最优解)的前提下探索可能的解决方案空间。通常这种探索具有明显的偏好性,决策者通过选择当前 Pareto 最优前沿上的某个代表性子集,并应用最符合其当前意图的偏好规则,将算法搜索区域集中在 Pareto 最优前沿上某一令其感兴趣的范围内。而应用向决策者请求“示范性决策”来产生偏好集的方式,则可以完美贴合交互式偏好方法搜索一决策这一迭代过程,可以通过一步步的试错法来使示范性决策逐渐逼近于决策者的实际偏好。这不仅能够弥补随机生成方法效率过低的缺陷,还符合“人们更倾向于做出示范性决策,而不要总是利用具体和隐晦的参数来解释问题”的实践规律。因此,从决策者提供的示范性决策中推断偏好规则的想法非常具有可行性和吸引力。但应用示范性决策能否可行最大的前提是:示范性决策中的偏好信息可以被准确识别出来。为此,该文提出了应用 DRSA 理论的求解思路,利用 DRSA 所产生的“若……那么……”的决策规则来作为规划问题的新增约束条件,通过搜索与决

策过程的有限次迭代来实现对多目标优化问题的偏好求解。

2 建立模型

2.1 基本概念

在养护规划中,需要从一系列方案中确定能满足多个目标和约束条件的养护计划,而方案 s ($s \in S$, S 指所有方案的解集)被定义为在分析范围的周期 t ($t \in D$, D 指整个规划期)内所计划的一系列必要养护活动,并依赖于路面性能状况及其他情况来确定。Pareto 最优在养护规划问题中描述为:若存在向量 $x \in X$,使得在不损害其他目标利益的前提下使得至少一个目标函数 $F_i(x)$ ($i=1, \dots, k$) 最优,则称向量 $x \in X$ 为该问题的 Pareto 最优。养护规划问题的数学定义如下:

$$F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)]^T \quad (1)$$

$$s. t \ g_i(x) \leq 0, h_l(x) = 0 \quad (2)$$

式中: $F_i(x)$ 为目标函数; $g_i(x)$ 为不等式约束; $h_l(x)$ 为等式约束。

2.2 目标函数

目标为单一性能指标所产生的综合指数,这些综合指数与道路使用者和运营商有关,涉及路面状况、用户舒适性和安全性。路面状况由路面损坏指数 PCI 根据在路面上观察到的破坏来评价;用户舒适度为路面平整度、裂缝、车辙深度等各单项指标综合而成的表示路面使用质量的耐用指数;安全性改进是通过路面摩擦水平表征为安全事故数量的增减。具体数学定义如下。

路面状况目标:

$$F_1(x_{i,u}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^s \sum_{y=1}^t (\overline{PCI}_{i,u,y} \cdot l_i \cdot x_{i,u})}{L} \quad (3)$$

用户舒适度:

$$F_2(x_{i,u}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^s \sum_{y=1}^t (\overline{PSI}_{i,u,y} \cdot TI_i \cdot l_i \cdot x_{i,u})}{L} \quad (4)$$

平均安全性改进:

$$F_3(x_{i,u}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^s \left[\sum_{y=1}^t \left(\left| \frac{\overline{AC}_i - \overline{AC}_{i,u,y}}{\overline{AC}_i} \right| \right) \cdot x_{i,u} \cdot l_i \right]}{L} \quad (5)$$

$$x_{i,u} = \{0, 1\} \quad (6)$$

上述式中: $\overline{PCI}_{i,u,y}$ 、 $\overline{PSI}_{i,u,y}$ 分别为在路段 i 实施方案 u 后 y 年内的路面状况指数均值、路面耐用指数均值; \overline{AC}_i 为路段 i 未实施养护的预期事故数量,考虑缺乏使用经验贝叶斯方法所需的适当数据,以及该文的主题并非安全性分析,故假设路面安全性能在无外力作用下短期几乎不变,并以实施养护前 3 年内的事故数量作为 \overline{AC}_i ; $x_{i,u}$ 为逻辑变量,若方案被选取则为 1,否则为 0; l_i 为路段 i 的里程(km); L 为路网总长度(km); TI 为交通影响系数(若 $AADT \leq 10\ 000$ pcu/d, $TI=1$; 若 $10\ 000 < AADT \leq 20\ 000$ pcu/d, $TI=2$; 若 $AADT > 20\ 000$ pcu/d, $TI=3$); $\overline{AC}_{i,u,y}$ 为路段 i 实施方案 u 后 y 年内的交通事故次数年均值。

2.3 基于优势粗糙集法的交互式多目标优化

应用 IMO-DRSA 法探索多目标优化问题主要分为两个阶段:搜索阶段与决策阶段。在搜索阶段需要利用数学算法求解出规划问题的 Pareto 最优解集;而在决策阶段则致力于应用 DRSA 方法从“示范性决策”中提取偏好规则,并将之作为规划问题的新增约束条件。重复搜索与决策过程,直至决策者能够从某一代 Pareto 最优解集中选择出符合其偏好的解决方案。具体步骤如下:

(1) 利用经典线性规划算法得到一组 Pareto 最优解集并解释它们,询问决策者能否作出决策,若决策者对设置的某个解决方案满意,那么交互程序停止,否则继续。

(2) 要求决策者作出示范性决策,即在 Pareto 最优解集中指定“好”的解决方案子集(“好”表示决策者认为当前方案比解集中的其他解决方案更符合其意图)。

(3) 将 DRSA 理论应用于当前排序为“好”和“其他”的解集中,从而得到决策规则集:若 $F_i(x) \geq a_i$,则方案为“好”。

(4) 将获得的规则集提交给决策者,并要求决策者选择其中更符合其意图的决策规则。

(5) 将步骤(4)中所选定的决策规则添加到现有优化问题的约束集合中,从而得到具有决策者偏好信息的可行解值域。

(6) 重复第(1)步,直至决策者能够选择最优解。

在步骤(1)中,可以应用任何能够确定 Pareto 最优解集的多目标优化方法或工具;第(4)步所列举的规则语法仅对应于函数最大化问题,对于函数最小化问题其规则应调整为 $F_i(x) < a_i$,其中 a_i 依赖于优势粗

糙集确定,即根据决策者所提供的示范性决策并应用DRSA理论计算出其隐含的偏好信息,从而对决策者的示范性决策作出数据解释,并产生“若…那么…”的决策规则。而受限于篇幅及考虑该文旨在探索IMO—DRSA方法在路面养护规划中的应用,因此其算法原理不再细述(参见文献[4—6])。在步骤(6)中,新增约束条件须体现在最新迭代过程中,从而得到一个新的Pareto最优解集。IMO—DRSA方法的框架如图1所示。

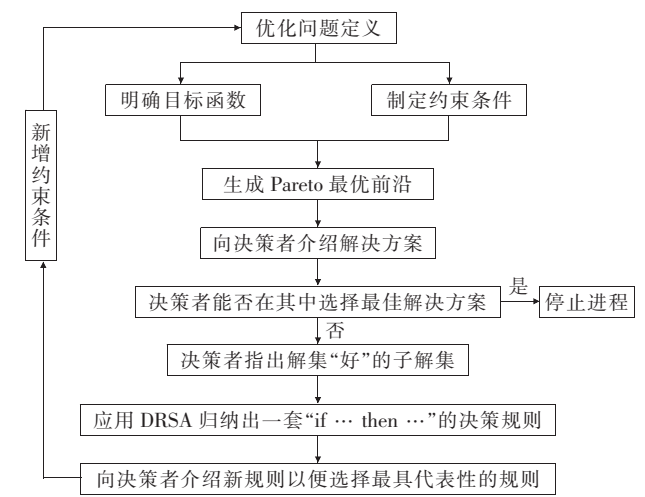


图1 IMO—DRSA方法框架流程图

为确保养护资金C既不超过可用总预算也不超过年度预算,该文引入规划期间预算限制,约束定义如下。

$$C=\begin{cases} \sum_{i=1}^n\sum_{u=1}^s\sum_{y=1}^tC_{i,u,y}\cdot x_{i,u}\leqslant C_z \\ \sum_{i=1}^n\sum_{u=1}^sC_{i,u,y}\cdot x_{i,u}\leqslant C_a \end{cases}\quad (7)$$

式中: C_a 为年度预算(万元); C_z 为总预算(万元); $C_{i,u,y}$ 为路段*i*实施方案*u*的*y*年内的养护费用(万元)。

3 案例研究

为验证IMO—DRSA法求解多目标优化问题的可行性,该文演示了一个小型道路网络系统在该方法中的应用示例。案例数据来自S市主要城镇路网的一部分,共由10个路段组成,总长128.2 km,每一路段均可使用3种互斥的养护措施,即方案1小修(坑槽修补、裂缝灌浆)、方案2中修(罩面)、方案3大修、重建(刨铣重铺),而决策者必须在分析期(5年)内选择在每一路段实施哪一种措施,年度预算为900万元,总预算为2 500万元。示例路段路面养护预期费用及效果数据见表1。

表1 路面养护预期费用及效果数据

路段	方案	长度/ km	$C_{i,u,1}$	$C_{i,u,2}$	$C_{i,u,3}$	$C_{i,u,4}$	$C_{i,u,5}$	C_z	TI	$\frac{\overline{AC_i}-\overline{AC_{i,u,y}}}{\overline{AC_i}}$	$\overline{PCI}_{i,u,y}$	$\overline{PSI}_{i,u,y}$
1	1	16.5	15	19	16	20	29	99		0.38	79.73	72.59
	2		—	58	—	43	86	187	2.00	0.07	74.51	74.98
	3		240	—	—	—	—	240		0.07	76.44	68.17
2	1	8.2	—	40	21	—	62	123		0.15	78.25	81.19
	2		43	86	—	153	—	282	2.00	0.35	69.27	68.32
	3		140	—	—	—	120	260		0.38	82.44	82.04
3	1	9.4	46	29	53	32	71	231		0.35	80.53	72.98
	2		23	51	32	25	35	166	2.00	0.36	77.46	65.70
	3		76	—	80	—	106	262		0.03	73.10	84.84
4	1	6.7	21	32	40	45	23	161		0.23	76.19	73.38
	2		96	—	—	103	—	199	1.00	0.22	66.86	80.07
	3		—	—	—	262	—	262		0.40	70.54	73.04
5	1	5.8	12	15	45	62	42	176		0.33	75.15	69.14
	2		91	86	—	—	73	250	1.00	0.03	79.27	80.26
	3		—	—	263	—	—	263		0.39	67.08	71.05

续表 1

路段	方案	长度/ km	$C_{i,u,1}$	$C_{i,u,2}$	$C_{i,u,3}$	$C_{i,u,4}$	$C_{i,u,5}$	C_z	TI	$\frac{\overline{AC_i}-\overline{AC_{i,u,y}}}{\overline{AC_i}}$	$\overline{PCI_{i,u,y}}$	$\overline{PSI_{i,u,y}}$
6	1	9.5	10.3	8.6	12.6	11.2	16.5	59.2	3.00	0.17	65.79	65.20
	2		165	—	—	—	89	254		0.05	80.33	78.38
	3		—	—	261	—	—	261		0.24	84.19	68.86
7	1	12.6	4.5	7.9	6.8	5.9	7.6	32.7	2.00	0.40	75.14	67.31
	2		—	93	—	74	51	218		0.42	71.29	72.77
	3		—	—	—	—	326	326		0.06	73.12	73.08
8	1	21	16	36	25	20	31	128	1.00	0.29	71.80	70.15
	2		109	—	142	—	102	353		0.41	73.74	83.34
	3		462	—	—	—	—	462		0.10	81.11	84.92
9	1	17.3	26	12	15	17	20	90	2.00	0.43	80.86	66.27
	2		95	—	84	—	—	179		0.48	68.66	83.73
	3		315	—	—	—	125	440		0.33	80.24	65.71
10	1	15.8	26	23	30	21	25	125	3.00	0.23	82.92	83.65
	2		98	—	122	—	156	376		0.18	67.71	78.49
	3		—	—	—	510	—	510		0.46	69.10	80.80

注:表内“—”表示当年该路段不投入资金。

综合上述内容确定路面养护规划问题的规划模型为:

$$\begin{aligned} F_1(x_{i,u}) &= \frac{\sum_{i=1}^{10} \sum_{u=1}^3 \sum_{y=1}^5 (\overline{PCI_{i,u,y}} \cdot l_i \cdot x_{i,u})}{L} \\ F &= \begin{cases} F_2(x_{i,u}) = \frac{\sum_{i=1}^{10} \sum_{u=1}^3 \sum_{y=1}^5 (\overline{PSI_{i,u,y}} \cdot TI_i \cdot l_i \cdot x_{i,u})}{L} \\ F_3(x_{i,u}) = \frac{\sum_{i=1}^{10} \sum_{u=1}^3 \left[\sum_{y=1}^5 \left(\left| \frac{\overline{AC_i} - \overline{AC_{i,u,y}}}{\overline{AC_i}} \right| \right) \cdot x_{i,u} \cdot l_i \right]}{L} \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } x_{i,u} = \{0,1\} \quad (9)$$

$$C = \begin{cases} \sum_{i=1}^{10} \sum_{u=1}^3 \sum_{y=1}^5 C_{i,u,y} \cdot x_{i,u} \leqslant 2\,500 \\ \sum_{i=1}^{10} \sum_{u=1}^3 C_{i,u,y} \cdot x_{i,u} \leqslant 900 \end{cases} \quad (10)$$

如式(8)~(10)所示,该养护规划问题是一个经典的多目标线性规划问题,因此该文利用 Matlab R2016a 软件的 Optimization Tool—Gamultiob 工具箱的线性规划求解器得到了一组 Pareto 最优解。如表 2 所述,其中的每一个解决方案都对应某部分路段实施的具体对策组合。但是,从这些对策中决策者无

法直接选择可实施的最佳解决方案。

为改进决策模型对满意解集的搜索能力,利用 JMAF 工具来实现 DRSA 算法,并将其引入决策过程中。为达到此目的,要求决策者从表 2 所列的 Pareto 最优解集中指出相对“好”的方案。在这种情况下,决策者选择了解决方案 S₁、S₂、S₃、S₇ 和 S₉ 为“好”,将这一部分方案纳入“好”的子集中,而将其他解归入“其他”的子集中,从而得到决策排序为“好”和“其他”的两个子集。依据 DRSA 算法程序对决策者所作出的示范性决策进行属性约简,由此产生“若……那么……”的决策规则,从而得到以下 3 条偏好决策规则。

(1) 规则 1:若用户舒适度 $F_2 \geqslant 138$,安全性改进 $F_3 \geqslant 0.25$,那么解决方案“好”。

表2 第一次搜索得出的 Pareto 最优解集

方法	F_1	F_2	F_3
S_1	72	138	0.255
S_2	66	116	0.265
S_3	74	139	0.220
S_4	72	133	0.250
S_5	65	124	0.238
S_6	72	144	0.267
S_7	68	118	0.226
S_8	74	145	0.258
S_9	64	118	0.263
S_{10}	61	122	0.205

(2) 规则 2:若用户舒适度 $F_2 \geq 139$,路面状况 $F_1 \geq 72$,那么解决方案“好”。

(3) 规则 3:若路面状况 $F_1 \geq 72$,安全性改进 $F_3 \geq 0.258$,那么解决方案“好”。

这些规则提交给决策者,要求他根据自身偏好选择最具代表性的规则。决策者选择规则 3 定义以下约束,以此来减少解集值域:

路面状况 $F_1 \geq 72$,安全性改进 $F_3 \geq 0.258$ 。

将得到的决策规则纳入决策考虑因素范围,从而更新基于决策者偏好信息的 Pareto 最优解集。通过加入新的约束条件,从而进一步削减有效最优解范围,基于此得到两种解决方案,如表 3 所示。

表3 第二次搜索得出的 Pareto 最优解集

方法	F_1	F_2	F_3
S_1'	72	144	0.267
S_2'	74	145	0.258

从如此受限的 Pareto 最优解中,决策者可以更容易选择出最符合其偏好的解。然后再次询问决策者是否可以做出选择,一般而言会有两种结果:① 满意当前 Pareto 最优解,并做出决策选择;② 不满意当前 Pareto 最优解,在这种情况下,需要重新启动交互程序,直至决策者对所列方案满意并做出选择为止。在该案例中,决策者对方案 S_2' 感到满意,交互程序终止。依据方案 S_2' 所实施的养护方案如表 4 所述,养护年度最佳费用为 $C_1 = 877.3$ 万元、 $C_2 = 250.6$ 万元、 $C_3 = 332.6$ 万元、 $C_4 = 455.2$ 万元、 $C_5 = 365.5$ 万元,合计 2 281.2 万元,资金使用率为 91.3%。

4 结语

采用决策规则偏好模型(IMO—DRSA)的优化方

表4 方案 S_2' 对应的具体养护措施

路段	措施	路段	措施
S_1	1	S_6	1
S_2	2	S_7	2
S_3	1	S_8	3
S_4	2	S_9	2
S_5	1	S_{10}	2

法来支持路面养护规划的交互决策。研究表明,IMO—DRSA 法是实现多目标优化问题偏好求解的一种有效工具,可辅助决策者在大量可行解中选择出最符合其意图的解决方案。IMO—DRSA 法通过向决策者请求“示范性决策”来设置偏好集的方式较之传统随机生成方法显得更为合理,可以在不损耗偏好信息精度的前提下大幅度提高优化算法的计算效率。

参考文献:

[1] 张会珍. 高速公路沥青路面预防性养护措施效果评价研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文,2015.

[2] 毛新华. 高速公路路面养护决策模型改进研究[D]. 长安大学博士学位论文,2015.

[3] 李红梅. 基于物元模型的网级高速公路沥青路面养护决策研究[D]. 东南大学博士学位论文,2017.

[4] PGreco, Matarazzo, Slowinski. Rough Sets Theory for Multicriteria Decision Analysis[J]. Eur J Oper Res,2001, 129:1—47.

[5] Greco, Matarazzo, Slowinski. Decision Rule Approach. Multiple Criteria Decision Analysis: State of The Art Surveys[M]. Springer, New York,2005:507—555.

[6] Branke, Deb, Miettinen, et al. Multi—Objective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches[J]. Springer Science & Business Media,2008,2(3):5 252.

[7] 毛新华. 高速公路路面养护项目选择的经济模型[J]. 技术经济,2014(12).

[8] 张艳红,申爱琴,侯芸. 资金—目标双优化法在路面养护决策中的应用[J]. 公路交通科技,2018(9).

[9] Marler, Arora. Survey of Multi—Objective Optimizatiemethods for Engineering [J]. Struct Multidiscip Optim, 2004,26(6):369—395.

[10] 孙孝文. 公路投资项目多目标决策研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2007(4).

[11] Jorge, Ferreira. Road Network Pavement Maintenance Optimisation Using the HDM—4 Pavement Performance Prediction Models [J]. International Journal of Pavement Engineering,2012,13(1):39—51.

[12] JTG 5210—2018 公路技术状况评定标准[S].