文章编号：1002-0268（2004）12-0103-04

畅通可靠度在公路网建设投资优化中的应用

梁 颖[1]，陈艳艳[1]，刘劲夫[2]，荣 建[1]
（1. 北京工业大学交通研究中心，北京 100022；2. 天津市公路管理局津南分局施工处，天津 300350）

摘要：在单元可靠性分析的基础上，以路网综合效益最大作为优化目标，并考虑道路建设的投资约束，建立公路网建设投资优化模型。利用该方法确定的规划公路网建设项目，不仅实现了建设资金的有效利用，而且满足了路网系统和道路单元的交通需求的不断增长。实例表明，该方法具有较强的实用性及可行性。

关键词：公路网规划；建设投资优化；畅通可靠度；单元重要度
中图分类号：U491.1 文献标识码：A

The Application of Reliability in the Construction Investment Optimization of Road Network

LIANG Ying[1], *CHEN Yan-yan*[1], *LIU Jin-fu*[2], *RONG Jian*[1]
（1. Transportation Research Center, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;
2 Jinnan Branch, Tianjin Highway Bureau, Tianjin 300350, China）

Abstract: Depending on the reliability theory, the investment optimum model of road network is built, taking the integrated benefit of the road system as optimization objective and letting the investment of road construction as restriction condition. The construction project identified by this method are not only to realize the utilization of construction capital effectively but also to meet continual increasing traffic demand. In the end of the paper, an example is given to illustrate the practicability and feasibility of the method.

Key words: Road network planning; The construction investment optimization; Unblocked reliability; The component importance

0 引言

公路网规划的根本目的，就是从总体优化的角度，对区域公路建设在时间和空间上进行宏观控制。公路网建设项目投资巨大，建设项目设施的使用期限长，如何把有限的资金投入公路建设，使之在较长的时期内充分发挥作用，促进区域经济建设的持续发展，不断提高运输的直接经济效益，是公路网规划宏观决策的核心问题之一。

本文借鉴网络可靠性分析的方法，以路网综合效益最大作为优化目标，并考虑道路建设的投资约束，建立了公路网建设投资优化模型。利用该模型可确定路网规划期的合理建设项目，不仅实现了建设效益的最大功效，而且满足了规划路网交通需求，有效改善了整个路网的运营效率。

1 公路网络畅通可靠度分析

保证公路网畅通可靠是进行路网规划或改扩建的主要目标。所谓畅通，广义来讲，其涵义为车辆能在畅通的服务水平下行驶。由于交通流状态具有很强的随机性，绝对畅通可靠的路网是没有的。借鉴可靠度理论，本文将畅通可靠度定义为：在规定时段内，路网在正常使用条件下，道路交通运行状态能满足畅通状态的概率。

收稿日期：2003-11-06
基金项目：北京市科技新星资助项目（H013680080112）；北京市自然科学基金重点项目（8031002）
作者简介：梁颖（1975—），女，山东青州人，博士研究生，主要研究方向为交通规划和交通评价.（lying15@hotmail.com）

通常用道路服务水平[1] 来反映道路运行状态；为简单起见，在进行路网畅通可靠度评价时，本文假设单元运营状态只有畅通与不畅通两个状态。一般情况下，当路段达到 C 级或 C 级以上服务水平以上时可假定为该路段畅通。当然，针对不同的道路等级，畅通标准可有所不同。

1.1　道路单元畅通可靠度

路网实际通行能力 C 和交通需求 V 的随机性是路网服务水平不确定的主要原因。但由于道路通行能力和交通需求的分布曲线难以得到，无疑加大了利用相关的解析方法[2] 求解道路单元畅通可靠度的难度。经数据统计发现，畅通可靠度 ϕ_i 与道路饱和度（V/C）成反比关系，即，道路单元的饱和度 V/C 越小该单元越畅通可靠，反之不可靠。因此，为便于畅通可靠度的应用，对于现有路网，可利用路网实际流量与相应的道路实际通行能力，求得道路单元的饱和度；而对于未来规划路网，建议通过四阶段法对未来规划路网进行交通分配，得到各道路单元的饱和度。继而，各道路单元畅通可靠度可根据畅通可靠度与道路饱和度之间的关系（见公式 1）进行简化求解。

$$\phi_i=\begin{cases}1 & V_i/C_i=0\\ 1-f(V_i/C_i) & 0<V_i/C_i<1\\ 0 & V_i/C_i\geqslant 1\end{cases}\qquad(1)$$

式中，ϕ_i 表示第 i 个道路单元的畅通可靠度；函数 $f(V_i/C_i)$ 的表达式可参见文献 [3] 。

1.2　OD 对畅通可靠度和路网畅通可靠度

道路网络运输功能主要根据对各起讫对间出行者的服务体现的。路网中各起讫对间所有可通行道路都可能构成用户的选择路径；但对于公路网，鉴于用户往往选择路径距离最短的道路出行，因此起讫对间畅通可靠度可定义为，在正常条件下在畅通的行驶状态下沿最短路从起点抵达讫点的概率。即

$$\Psi_k^S=P\qquad(2)$$

其中，Ψ_k^S 为路网第 k 个起讫对的畅通可靠度，规定时段内车辆在第 k 个起讫对间最短路畅通。

起讫对间的最短路 L_k 可简化为由距离最短路上的路段单元构成的串联系统，从而规定时间起讫对间畅通可靠度可由下式进行计算

$$\Psi_k^S=\prod_{i=1}^{I_k}\phi_i\qquad(3)$$

式中，i 为起讫对间距离最短路 L_k 上路段单元编号；I_k 为第 k 个起讫对距离最短路上路段单元总数。

交通系统为多起点多终点的网络，通过对各起讫对的畅通可靠度评估，利用下式便可得到整个公路网的畅通可靠度 Ψ_S

$$\Psi_S=\sum_{k=1}^{K}\zeta_k\Psi_k^S\qquad(4)$$

式中，K 为路网中起讫对的个数；ζ_k 为第 k 个起讫对在系统 S 中的重要性系数；$\sum_{k=1}^{K}\zeta_k=1$ 可由各节点对城市政治经济影响评估得出，即

$$\zeta_k=\frac{Z_o^kZ_d^k}{\sum_{k=1}^{K}Z_o^kZ_d^k}\qquad(5)$$

式中，Z_o^k，Z_d^k 分别为系统 S 的第 k 个起讫对起点 O 和终点 D 的社会经济综合重要度；对路网任一起讫点 i，其社会经济综合重要度 Z_i[4] 可由该节点的人口数、工业总产值和社会物资产耗总量或商品零售总额，及区域内各节点相应指标的均值确定。

2　公路网建设投资优化模型

公路网建设投资优化，是指在原有路网的基础上，以公路网的整体最优化为目标，根据可能的投资条件，决策新建和改建路段。

通常建立的公路网建设投资优化模型，主要是以整个路网上的总运行时间（或费用）最小作为目标，以交通流分配和投资作为边界约束[4]。但公路网规划体系不仅仅涉及技术方面（比如，畅通）的问题，还包括经济、环境等问题；而且，路网内单元众多，可选投资方案也众多，这就给基于方案比选的路网投资优化造成很大的困难。所以本文通过路网单元重要性分析，缩减路网投资的备选方案，在此基础上，考虑路网规划或调整的投资约束，建立以路网综合效益最大为目标的建设投资优化模型。

2.1　单元重要度分析

系统中每个单元对系统可靠度的贡献是不同的，改变某些单元的可靠度对系统可靠性会产生较大影响，而改变另外一些单元的可靠度可能不会造成系统可靠度较大的波动。一般可用单元重要度[5] 来衡量单元对系统可靠度的影响程度。本文则根据路段单元畅通重要度和修正畅通重要度评价，寻找对系统畅通可靠度影响较大的单元，从而指导公路网建设投资优化决策的实施。

道路单元畅通重要度 $I_{prob,j}$ 不仅依赖于公路网的布局结构，而且还依赖各单元畅通可靠度和系统畅通可靠度。它可由式（6）得出

$$I_{prob,j}=\frac{\partial\Psi_S\ (\phi_1,\ \ldots\phi_j\ldots\phi_J)}{\partial\phi_j}\qquad(6)$$

式中，Ψ_S，ϕ_j 意义同前。可以看出，单元 j 的畅通重要度就是路网畅通可靠度对单元畅通可靠度的变化率。单元畅通重要度越大，表明此单元对路网畅通可靠的影响越大。

由系统可靠度的求解公式，（6）式也可写为

$$I_{prob,j}=\frac{\partial\left(\sum_{k=1}^{K}\left(\zeta_k\prod_{i=1}^{I_k}\phi_i\right)\right)}{\partial\phi_j}=\sum_{k=1}^{K}\frac{\partial\left(\zeta_k\prod_{i=1}^{I_k}\phi_i\right)}{\partial\phi_j} \tag{7}$$

其中，

$$\frac{\partial\left(\zeta_k\prod_{i=1}^{I_k}\phi_i\right)}{\partial\phi_j}=\begin{cases}\zeta_k\phi_1\cdots\phi_{j-1}\phi_{j+1}\cdots\phi_{I_k} & j\in L_k\\ 0 & j\notin L_k\end{cases} \tag{8}$$

式中，L_k 为第 k 个起讫对间的距离最短路。$j\in L_k$ 表示单元 j 在第 k 个起讫对间的距离最短路上，$j\notin L_k$ 表示单元 j 不在第 k 个起讫对间的距离最短路上。

路网计算中，有些单元虽有很大的畅通重要度，但其现有的畅通可靠度也很大，进一步提高其可靠度的余地及意义不大。采用修正畅通重要度 $I'_{prob,j}$ 则更能体现单元自身畅通可靠度的提高对系统畅通可靠度的影响程度，即

$$I'_{prob,j}=(1-\phi_j)\ I_{prob,j} \tag{9}$$

从上式可看出，当单元 j 的畅通重要度 $I_{prob,j}$ 较大，畅通可靠度 ϕ_j 较小时，相应的修正畅通重要度 $I'_{prob,j}$ 才会大，路网投资时应优先考虑建设类似的单元。而路段升至何种等级，一是决定于畅通可靠度的大小，二是取决于路段剩余交通量的水平。

通过对路网进行单元重要性分析，可以得到路网改扩建的备选方案集合 $\{x_1,\ x_2,\ \cdots,\ x_n\}$；这些方案不仅是急需对其运营现状进行改善的道路单元，而且还是对整个路网运行状况影响较大的单元；对它们进行投资建设，可以从宏观上解决现状路网存在的问题，确保路网满足不断增长的交通需求。

2.2　公路网建设投资优化模型

在单元重要度分析的前提下，考虑路网规划或调整的投资约束，建立的以路网综合效益最大为目标的建设投资优化模型如下

$$F(x_1,x_2,\cdots,x_n)\rightarrow\max \tag{10}$$

$$\text{s.t.}\quad C(x_1,x_2,\cdots,x_n)\leqslant C_0(x_1,x_2,\cdots,x_n)$$

式中，F 为考虑经济、技术、环境等因素的路网综合效益指标，它是每一个道路单元改扩建方案的函数。C 为投资费用，它是各个道路单元改扩建费用之和。

公路建设的综合效益涉及了经济、技术和环境诸多方面的复杂问题，综合效益指标是在以多个单因素为指标，从不同方面对公路网的性能和价值作出定量或定性分析判断的基础上，谋求的规划系统整体功能最优的指标；其中，技术方面的因素本文主要从路网畅通可靠度的角度分析。为将不同方面指标的评价结果置于同一评价标准下，并以定量化的形式表现出来，可采用相应的综合评价方法来确定路网建设综合效益择优问题。

根据工程实际，公路网布局方案是离散的，则上述优化模型可转化为离散优化模型。本文通过路网单元重要性分析，路网备选布局方案数已大大减少，故可通过穷举法等组合优化方法确定最终方案，当通过初步筛选备选方案仍然较多时，也可采用正交枚举法[5] 或遗传算法[6] 等近似寻优方法提高搜索效率。

3　算例

预投资 8 亿对某市公路网进行公路网建设投资优化。在分析原有路网运营状态的基础上，根据未来路网的交通需求，初步确定路网布局拓扑形式如图 1。

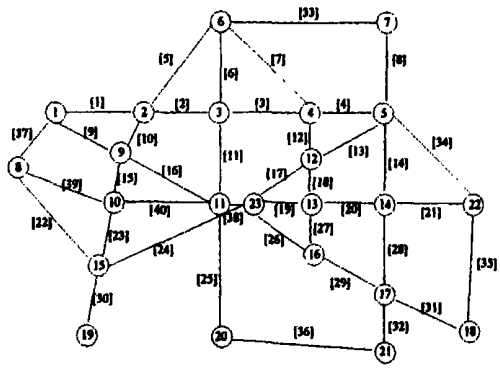

图 1　路网布局初步设计拓扑形式

（1）单元重要度分析

对规划路网进行单元重要度分析，得到各单元的改善重要度和修正改善重要度（见表 1），最终确定单元 30、25、29、38、31、20、34、17、28、21、35 为考虑改扩建的备选路段。

（2）投资优化决策

建立路网建设投资优化模型。其中，公路建设投资为各单元投资之和，路网综合效益则包括经济、技术和环境诸多方面的因素。经济效益评价指标主要包括：公路的建设、维修、养护和管理费用，路网建设和改善所带来的效益；路网技术评价指标主要包括：路网及道路单元的畅通可靠度、道路基本属性、路网密度、铺面率等；交通评价指标主要包括：路网平均车速、拥挤度、服务水平等；环境评价指标主要包括：车辆排放的 SO_2、CO_2、NO_2、降尘量与总悬浮颗

粒及交通噪声强度等。本例采用层次分析法来确定路网建设综合效益最优问题，具体计算过程略。

表 **1**　道路单元改善重要度和单元修正改善重要度

单元	畅通可靠度	单元改善重要度	单元修正改善重要度	单元	畅通可靠度	单元改善重要度	单元修正改善重要度	单元	畅通可靠度	单元改善重要度	单元修正改善重要度
[1]	0.7496	0.0176	0.0044	[15]	0.7185	0.0316	0.0089	[28]	0.5839	0.0321	0.0133
[2]	0.7395	0.0253	0.0066	[16]	0.9598	0.0359	0.0014	[29]	0.5429	0.0447	0.0204
[3]	0.5873	0.0230	0.0095	[17]	0.8061	0.0698	0.0135	[30]	0.5592	0.0763	0.0336
[4]	0.8365	0.0410	0.0067	[18]	0.6970	0.0328	0.0099	[31]	0.5467	0.0341	0.0154
[5]	0.6163	0.0230	0.0088	[19]	0.7422	0.0321	0.0083	[32]	0.7674	0.0518	0.0120
[6]	0.5797	0.0173	0.0073	[20]	0.7152	0.0533	0.0152	[33]	0.7855	0.0362	0.0078
[7]	0.9183	0.0623	0.0051	[21]	0.5793	0.0308	0.0129	[34]	0.7853	0.0701	0.0151
[8]	0.5434	0.0268	0.0122	[22]	0.6987	0.0256	0.0077	[35]	0.7159	0.0446	0.0127
[9]	0.8019	0.0253	0.0050	[23]	0.8922	0.0454	0.0049	[36]	0.7825	0.0510	0.0111
[10]	0.8010	0.0290	0.0058	[24]	0.9827	0.0866	0.0015	[37]	0.5630	0.0149	0.0065
[11]	0.5812	0.0191	0.0080	[25]	0.7849	0.0978	0.0210	[38]	0.7458	0.0688	0.0175
[12]	0.9542	0.0784	0.0036	[26]	0.8311	0.0400	0.0068	[39]	0.6589	0.0185	0.0063
[13]	0.6781	0.0217	0.0070	[27]	0.7676	0.0281	0.0065	[40]	0.7416	0.0088	0.0023
[14]	0.5208	0.0118	0.0056								

表 **2**　路网布局优化设计所对应的正交表

试验号	因子											建设投资/亿	综合效益排序
	[30]	[25]	[29]	[38]	[31]	[20]	[34]	[17]	[28]	[21]	[35]		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7.452	6
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	8.354	4
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	8.012	3
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	7.799	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	7.622	10
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	7.555	8
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	8.654	4
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	8.024	9
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	7.320	5
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	7.982	11
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	8.663	7
12	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	8.102	1

策。本例拟对各备选单元均提供两个建设方案（分别用 1、2 来区分），通过单元重要度分析确定的该路网改扩建单元共 11 个，所以此次投资优化设计属于 11 个因子两个水平的决策问题，则可选用正交表 $L_{12}(2^{11})$。具体计算结果见表 2。从表 2 可以看出，对路网的 12 种方案进行比较后，综合效益排序最大的方案为方案 12，但此方案的建设投资不满足预定的投资约束，对所有方案中满足投资约束且综合效益排序最优的为方案 4，所以最终将方案 4 确定为此次公路网规划的最优建设投资方案，相应的路网总投资为 7.799 亿。具体的路网建设方案见表 3。

4　结论

为改变公路运输能力不能满足需求的现状，各省市在交通部的协助下相继制定了一系列公路网的建设规划方案。方案的实现，意味着大量公路网项目的实施和资金的投入。公路建设项目投资大，建设项目设考虑投资约束，对备选方案进行路网投资优化决

表 **3**　公路网改扩建方案

单元	原有等级	提升后等级	投资/万	单元	原有等级	提升后等级	投资/万
[30]	二级路四车道	二级路六车道	5800	[34]	二级路二车道	二级路六车道	5700
[25]	二级路二车道	二级路六车道	4200	[17]	二级路二车道	二级路六车道	7350
[29]	二级路二车道	二级路四车道	6590	[28]	二级路四车道	二级路六车道	6580
[38]	二级路四车道	一级路	10100	[21]	二级路四车道	二级路六车道	8050
[31]	二级路二车道	二级路六车道	7500	[35]	二级路二车道	二级路六车道	9820
[20]	二级路二车道	二级路四车道	6300				

（下转第 117 页）

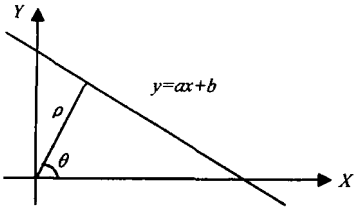

图 **5**　直线的参数空间(ρ, θ)表示

x 轴的夹角, 如图 5 所示。于是, 坐标平面 *o-xy* 中的一条直线和坐标平面 *o-*ρθ 中的点一一对应, *o-xy* 坐标平面中的一点和 *o-*ρθ 中的一条曲线一一对应, 并且 *o-xy* 中的共线点所对应的 *o-*ρθ 中的曲线交于一点, 如图 6 所示。Hough 变换的运算量较大, 但由于只应用于一个小区域, 能很快找到共线点。

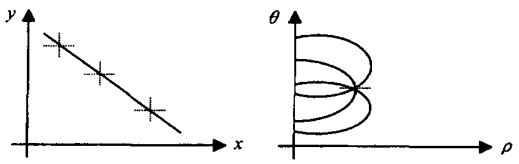

图 **6**　共线点对应的曲线相交于一点

3.3　障碍相对于车道的位置估计

对找到的道路边缘点采用最小二乘拟合直线

$$y = a_k x + b_k \tag{21}$$

设雷达探测到的前方障碍的位置在图像平面的投影位置为(x_k, y_k), 则我们很容易可以判断出障碍车辆离车道边界的距离。将 y_k 代入(21)式, 得

$$x'_k = \frac{y_k - b_k}{a_k} \tag{22}$$

则显然$|x_k - x'_k|$即为图像平面内障碍距离车道的水平距离。同样利用三维世界与图像平面的映射, 可得障碍与车道的实际距离为

$$|X_k - X'_k| = \frac{Z\cos\theta - Y\sin\theta}{f} \cdot |x_k - x'_k| \tag{23}$$

4　总结

目前的车道识别系统大多采用基于视觉技术的方法, 本文提出的基于卡尔曼滤波的车道融合跟踪法, 以图像传感器为主传感器, 毫米波雷达为辅助传感器, 利用毫米波雷达探测到的前方车辆准确的距离信息, 建立车道跟踪视觉窗口, 能有效地识别前方车道, 判断障碍相对于车道的位置; 同时, 由于开设的窗口小, 可大大降低图像的处理时间, 也在一定程度上增强了基于边界的车道识别系统在车道发生污染等情况下系统识别的鲁棒性。

参考文献:

[1] C Kreucher; S Lakshmanan LANA: A Lane Extraction Algorithm that Uses Frequency Domain Features [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15 (2): 343－350.

[2] K Kluge. Extracting Road Curvature and Orientation from Image Edge Points without Perceptual Grouping Into Features [C]. Proceedings Intelligent Vehicle Symposium, 1994: 109－114.

[3] D Pomerleau, T Jochem. Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering [J]. IEEE Expert [see also IEEE Intelligent Systems], 1996, 11 (2): 19－27.

[4] S Lakshmanan, K Kluge. LOIS: A Real-time Lane Detection Algorithm [C]. Proceedings of the 30th Annual Conference on Information Sciences and Systems, 1996: 1007－1012.

[5] 向敬成, 张明友. 雷达系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.

[6] 丰丽军. 公路汽车视觉导航中的运动目标检测与跟踪 [D]. 北京工业大学硕士学位论文, 2001.

[7] 孙兆林. MATLAB 6.x 图像处理 [M]. 清华大学出版社, 2002.

[8] A Suzuki, N Yasui, N Nakano, M Kaneko. Lane Recognition System for Guiding of Autonomous Vehicle [C]. Intelligent Vehicles '92 Symposium, 1992: 196－201.

[9] S Shetty, A T Alouani. A Multisensor Tracking System with an Image-based Maneuver Detector [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1996, 32 (1): 167－181.

(上接第 106 页)

施的使用期限长, 如何在公路网的建设中, 讲求经济效益, 把有限的资金用在最急需的建设项目上, 以较少的投资, 求得最大的经济效益, 具有重大意义。

本文在对路网进行单元重要度分析的基础上, 以路网综合效益最大为优化目标, 并考虑道路建设的投资约束, 建立了公路网建设投资优化模型, 确定出路网规划期的合理建设项目。利用该方法确定的建设项目投资方案, 不仅满足了决策者的实际需要, 而且满足了规划路网交通需求, 并确保了资金的有效利用。实例表明, 该方法具有较强的实用性及可行性。

参考文献:

[1] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual 2000 [M]. Washington: National Research Council, 2000.

[2] 陈艳艳, 梁颖, 杜华兵. 可靠度在路网运营状态评价中的应用 [J]. 土木工程学报, 2003.

[3] 朱顺应, 王炜, 邓卫, 等. 交通网络可靠度及其通路算法研究 [J]. 中国公路学报, 2000.

[4] 杨涛. 公路网规划 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.

[5] 王光远, 顾平, 王东炜, 等. 工程结构与系统抗震优化设计的实用方法 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[6] 陈艳艳, 杜华兵, 梁颖. 城市路网畅通可靠度优化遗传算法 [J]. 北京工业大学学报, 2003.