

冰雪条件下城市路网容量可靠性

冷军强^{1,2}, 张亚平², 韩丽飞², 张 伟²

(1. 哈尔滨工业大学 汽车工程学院, 山东 威海 264209, lengjunq@tom.com;

2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为研究冰雪条件下城市路网容量可靠性, 采用路段行程时间可靠性及容量为约束条件进行研究. 定义了冰雪条件下的路网容量可靠性概念, 以 BPR (Bureau of Public Roads) 函数为基础, 通过引入自由行程时间及通行能力修正函数, 建立了适用于冰雪条件的 ISB-BPR (Ice and Snowfall Based-Bureau of Public Roads) 函数, 并以路段容量和遵循 ISB-BPR 函数的行程时间可靠性作为约束条件构建了上层规划, 以符合冰雪条件出行特征的弹性需求分配模型作为下层规划, 提出了适用于冰雪条件的双层规划模型. 根据模型反映的路径选择行为特点, 设计了灵敏度分析法求解交通量分配模型, 以 Monte Carlo 仿真算法求解路网容量可靠性. 并给出 1 简单算例, 计算结果表明: 冰雪强度及交通供需对冰雪条件下路网容量可靠性有很大影响. 该模型能够用于评估冰雪条件下的路网性能, 并为路网规划、设计、维护提供依据.

关键词: 城市路网; 容量可靠性; 双层规划模型; 行程时间可靠性; 弹性需求用户平衡; 冰雪条件

中图分类号: U491.1+3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0592-05

Urban road network capacity reliability under ice and snowfall conditions

LENG Jun-qiang^{1,2}, ZHANG Ya-ping², HAN Li-fei², ZHANG Wei²

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China, lengjunq@tom.com;

2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To develop an approach to evaluate the capacity reliability of road network based on ice and snowfall conditions, the capacity reliability was studied on the basis of travel time reliability and capacity of links. The concept of network capacity reliability was proposed. Through the introduction of free travel time and capacity correction functions for Bureau of Public Roads (BPR) model, an Ice and Snowfall Based-Bureau of Public Roads (ISB-BPR) function was proposed. Then the bi-level programming model of road network capacity reliability was developed. The travel time reliability and link capacity as restrictions were proposed in the upper programming model. To follow the characteristics of route choice under ice and snowfall conditions, the elastic demand user equilibrium (EDUE) was set up in the lower programming model. An assessment methodology integrating sensitivity analysis of EDUE and Monte Carlo simulation was proposed to evaluate the capacity reliability. A numerical case was also given to demonstrate the practicality of the given model. The results show that the ice and snowfall intensity, traffic supply and demand all have great influence on the capacity reliability. The methodology is useful and applicable. It may provide a basis for network planning, design and maintenance.

Key words: urban road network; capacity reliability; bi-level programming model; travel time reliability; EDUE; ice and snowfall conditions

收稿日期: 2009-08-27.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目 (E200940);
山东省科技发展计划资助项目 (2009GG20008020);
威海市科技发展计划资助项目 (2009-3-93).

作者简介: 冷军强 (1974—), 男, 讲师, 博士研究生;
张亚平 (1966—), 男, 教授, 博士生导师.

路网可靠性是衡量随机环境下路网性能的重要指标, 过去路网可靠性研究主要局限于连通可靠性与行程时间可靠性^[1-3]. 这两个指标主要从单个用户角度出发评价路网服务质量的稳定性. CHEN 等^[4-5]从系统管理者角度出发提出了路网

容量可靠性概念,建立了计算容量可靠性的双层规划模型,并采用基于灵敏度分析和 Monte Carlo 技术求解. LO 等^[6]从路段角度定义了容量可靠性,使用概率约束模型计算容量可靠性,由于避免了系统模拟技术,计算相对简单. 刘海旭等^[7]提出了基于行程时间可靠性约束的路网容量可靠性评价方法,其上层规划模型中仅考虑了路段行程时间可靠性的约束,并没有考虑路段容量约束,因此不够全面. WILLIAM 等^[8]针对雨水天气下供需不确定性对路网的可靠性进行了研究. 以上研究除了文献[8]外都是针对正常天气下的日常交通拥堵,并没涉及到冰雪条件下的路网可靠性研究.

本文着力于冰雪条件下的路网容量可靠性研究,首先定义在冰雪条件下的路网容量可靠性概念,在此基础上构建基于冰雪条件下的容量可靠性模型,使之满足一定的路段行程时间可靠性和容量约束,确定冰雪条件下的路径选择行为模型,最后通过算例对所建模型及计算方法进行验证.

1 路网容量可靠性概念

容量可靠性是从通行能力角度研究路网的可靠性能,目前,还没有统一的路网容量可靠性概念. 其中比较经典的是 CHEN 等^[4]于 1999 年提出的:道路交通网络能够容纳一定交通量的概率. 此概念是在储备通行能力的基础上提出的. 因为路段通行能力是随机变化的,故储备通行能力是随机变量,用交通量最大乘子 μ 表示,如果用 μ_r 表示实际的交通量水平,容量可靠性可表示为

$$R(\mu_r) = P(\mu_r \leq \mu). \quad (1)$$

上述模型为定量描述路网的容量可靠性提供了较为合理的方法,但考虑到实际路网中所要求的服务水平不同,将导致路网可靠性的度量基准有所不同,该模型不能反映这种差别. 于是,基于储备通行能力的思想,定义路网容量可靠性为实际的交通量水平 \leq 最大乘子 ε 倍的概率. 表达式为

$$R(\mu_r) = P(\mu_r \leq \varepsilon\mu). \quad (2)$$

式中, ε 反映了对路网或路段的不同服务水平要求, $0 < \varepsilon \leq 1$, 该值越小,对服务水平要求越高,可靠性就越低;反之,该值越大,对服务水平要求越低,可靠性就越高. ε 的含义与路段饱和度相似,对于不同服务水平要求下的取值,可参照饱和度与服务水平的对应关系.

2 模型建立

2.1 基于冰雪条件的路段行程时间

由于在冰雪条件下,道路能见度和路面附着

系数大大降低,驾驶员的驾驶行为也远远不同于正常天气条件下. 因此,基于正常条件下的路段行程时间 BPR 函数也就不能很好地应用于冰雪条件. 为此,在 BPR 函数的基础上,构建了基于冰雪条件下的路段行程时间函数,命名为 ISB-BPR,具体形式如下

$$T_a(I) = g_i(I)t_a \left[1 + \beta \left(\frac{x_a}{g_c(I)c_a} \right)^n \right]. \quad (3)$$

式中: I 为冰雪强度; $T_a(I)$ 为路段 a 在冰雪影响下的行程时间; $g_i(I)$ 为冰雪条件对自由行程时间的影响函数; $g_c(I)$ 为冰雪条件对路段通行能力的影响函数; t_a 为正常条件下路段 a 的自由行程时间,为一定值; x_a 为路段 a 的交通流量; c_a 为路段 a 的通行能力; β, n 为 BPR 函数的参数.

式(3)中,当 $I = 0$ 时,即正常条件下 $g_i(I) = 1, g_c(I) = 1$, 路段行程时间 ISB-BPR 函数变为 BPR 函数, BPR 函数行程时间均值可表示为

$$E_0(T_{0a}) = t_a + \beta t_a x_a^n E\left(\frac{1}{c_a^n}\right). \quad (4)$$

其中假定路段通行能力服从均匀分布, θ_a 为正常条件下路段通行能力使用率的下限值,则有:

$$E\left(\frac{1}{c_a^n}\right) = \begin{cases} \frac{1 - \theta_a^{1-n}}{\bar{c}_a^n(1 - \theta_a)(1 - n)}, & n \neq 1; \\ \frac{\ln \theta_a^{-1}}{\bar{c}_a(1 - \theta_a)}, & n = 1. \end{cases} \quad (5)$$

式中 \bar{c}_a 表示路段 a 的设计通行能力. 将式(5)代入式(4),正常条件下路段行程时间的均值为

$$E_0(T_{0a}) = \begin{cases} t_a + \beta t_a x_a^n \cdot \frac{1 - \theta_a^{1-n}}{\bar{c}_a^n(1 - \theta_a)(1 - n)}, & n \neq 1; \\ t_a + \beta t_a x_a \cdot \frac{\ln \theta_a^{-1}}{\bar{c}_a(1 - \theta_a)}, & n = 1. \end{cases}$$

2.2 双层规划模型建立

由于冰雪条件下,出行需求会受到一定程度影响,出行者有可能会改变出行方式,甚至取消出行计划. 基于以上考虑,以弹性需求平衡分配模型作为双层规划的下层. 在确定路网最大容量时考虑两方面约束:一是路段容量的约束;二是必须满足一定的行程时间可靠性约束. 例如行程时间可靠性不低于 γ_a , 可表示为

$$R_a = P[T_a \leq (1 + \delta)E_0(T_{0a})] \geq \gamma_a. \quad (6)$$

式中: δ 为反映不同冰雪强度下出行者对行程时间增量的容忍度; $E_0(T_{0a})$ 为正常天气下,路段行程时间的均值; γ_a 为可接受的行程时间可靠性的下限值,该值随路段的不同而不同,因为人们对不同路段交通拥堵的容忍程度不同, γ_a 可以通过调

查统计等方法确定.

将式(3)代入式(6),可靠性约束变型为

$$P\left\{c_a \geq \frac{x_a}{g_c(I)} \left(\frac{g_t(I)t_a\beta}{(1+\delta)E_0(T_{0a}) - g_t(I)t_a} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} \geq \gamma_a,$$

$$\frac{x_a}{g_c(I)} \left(\frac{g_t(I)t_a\beta}{(1+\delta)E_0(T_{0a}) - g_t(I)t_a} \right)^{\frac{1}{n}} \geq F^{-1}(\gamma_a).$$

式中 $F^{-1}(\cdot)$ 为 c_a 分布函数的反函数.

基于冰雪条件下的路段行程时间可靠性约束,并考虑路径选择行为符合弹性需求模型^[9],建立路网容量可靠性双层规划模型如下:上层规划

$$\max \mu$$

$$\text{s. t. } \frac{x_a(\mu)}{g_c(I)} \left(\frac{g_t(I)t_a\beta}{(1+\delta)E_0(T_{0a}) - g_t(I)t_a} \right)^{\frac{1}{n}} \geq F^{-1}(\gamma_a).$$

$$x_a(\mu) \leq g_c(I)c_a, \forall a \in A.$$

下层规划

$$q_{st} = D_{st}(u_{st}).$$

$$\min z(x, q) = \sum_a \int_0^{x_a(\mu)} t_a(w) dw - \sum_{st} \int_0^{q_{st}} D_{st}^{-1}(w) dw.$$

$$\text{s. t. } \sum_a f_k^s = q_{st} \forall s, t$$

$$f_k^s \geq 0 \forall k, s, t$$

$$q_{st} \geq 0 \forall s, t$$

$$x_a(\mu) = \sum_s \sum_t \sum_k f_k^s \delta_{a,k}^{st}.$$

式中: q_{st} 为 OD 对 st 间的交通量; $D_{st}(\cdot)$ 为 OD 对 st 间的需求函数; u_{st} 为 st 间最短行程时间; $D_{st}^{-1}(\cdot)$ 为需求函数的反函数; f_k^s 为 OD 对 st 间路径 k 上的交通流量; $\delta_{a,k}^{st}$ 为 0-1 变量,若路段 a 在 OD 对 st 间路径 k 上,则 $\delta_{a,k}^{st} = 1$,否则 $\delta_{a,k}^{st} = 0$; 其它参数意义同上.

3 模型求解

采用灵敏度分析与 Monte Carlo 仿真相结合求解. 其中双层规划模型采用灵敏度分析求解^[10],容量可靠性模型用 Monte Carlo 仿真求解.

3.1 灵敏度分析

灵敏度分析法是目前求解这类双层规划模型比较有效的算法^[6-7],具体步骤如下:

- (1) 设定一个 OD 出行矩阵乘子的初始值 $\mu(n)$,令 $n = 0$;
- (2) 对于给定的 $\mu(n)$,求解下层路网平衡问题,得到平衡路段流量 $x(\mu)$;
- (3) 利用路网平衡问题的灵敏度分析法计算平衡路段流量 $x(\mu)$ 对 OD 出行矩阵乘子 $\mu(n)$ 的导数;
- (4) 利用导数信息得到上层可靠性约束式的

局部线性近似,将上层问题转变为线性规划问题,求解该线性规划问题,得到一个新的 OD 出行矩阵乘子 $\mu(n+1)$;

(5) 如果 $|\mu(n+1) - \mu(n)| \leq \varepsilon$,则迭代停止,其中 ε 为预定误差;否则,令 $n = n+1$,回到第(2)步.

3.2 Monte Carlo 仿真

路网可靠性计算需要大量基础数据,但实际中由于缺乏详细的数据及大规模调查的困难. 一般采用 Monte Carlo 仿真结合交通规划模型,通过“试验”的方法求解. 具体流程如下:

- (1) 确定 c_a, q_{st} 的分布形式;
- (2) 定义仿真样本数 M 、BPR 函数及 ISB-BPR 函数中各参数数值,令计数单元 $m = 0, i = 0$;
- (3) 利用随机变量发生器(Random Variable Generation, RVG)产生 c_a, q_{st} 相应分布的随机数,每产生一组 c_a, q_{st} 随机数,计数 $i = i+1$;
- (4) 调用双层规划模型,计算储备通行能力 μ ;
- (5) 调用 EDUE 模型,计算路段流量 $x_a(\mu)$ 及路网容量水平 μ_r ;
- (6) 判断 $\mu_r \leq \varepsilon\mu$?若满足,计数 $m = m+1$;
- (7) 判断 $i \leq M$ 若满足,返回步骤(3),否则计算可靠性 $R = m/M$.

4 算例分析

4.1 仿真条件设置

如图 1 所示的虚设测试路网^[5],OD 对之间基础交通量分别为 $q_{14} = 20$ 辆/min, $q_{15} = 25$ 辆/min. BPR 函数中参数 $\beta = 0.15, n = 4$,式(5)中 $\theta_a = 0.75$,行程时间增量容忍系数 $\delta = 0.2$,需求函数定义为: $q_{st} = q_{st}^0 \cdot \left(\frac{u_{st}^0}{u_{st}} \right)$,式中 q_{st}^0 为基础交通需求; u_{st}^0 为基础交通需求下 st 间的最短行程时间. 各路段自由行程时间、设计通行能力及冰雪条件下 $g_t(I), g_c(I)$ 如表 1 所示,降雪强度 I 以相

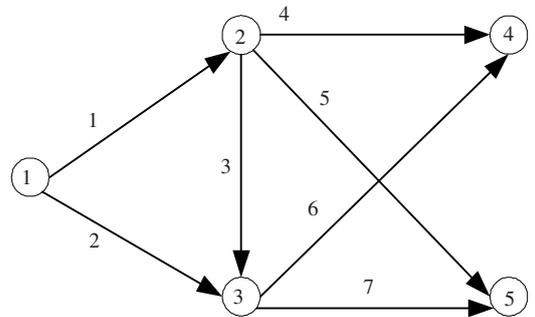


图 1 测试路网

应的降雪量表示,假定随机变量 q_{st} 、 c_a 分别服从正态分布(方差为5)、均匀分布. 仿真过程采用 Matlab 7.0 编程处理,通过 5000 次 Monte

Carlo 仿真, q_{st} 、 C_a 的估计值与理论值非常接近,各分布均值的误差均小于 0.4%,仿真次数满足精度要求.

表 1 各路段基本属性

路段编号	1	2	3	4	5	6	7
自由行程时间 t_a /min	4.0	5.2	1.0	5.0	5.0	4.0	4.0
通行能力 c_a / (veh · min ⁻¹)	[28,32]	[28,32]	[18,22]	[18,22]	[18,22]	[18,22]	[18,22]
自由行程时间修正 $g_t(I)$	$\exp(0.09I)$						
通行能力修正 $g_c(I)$	$\exp(-0.05I)$						

4.2 仿真结果分析

为研究冰雪强度对容量可靠性的影响,以 OD 对(1,5)为例,假定了 4 种不同情形: $I = 2.4, I = 4.9, I = 9.9, I = 15$. 仿真结果如图 2 所示.

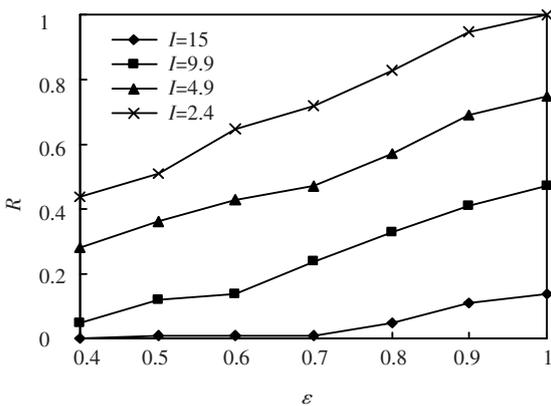


图 2 冰雪强度 I 对容量可靠性的影响

为研究交通供需变化对容量可靠性的影响,以 OD 对(1,4)为例,假定冰雪强度 $I = 4.9$,分别进行如下研究:在不同服务水平 ϵ 下交通需求波动对容量可靠性的影响,结果如图 3 所示;在不同服务水平 ϵ 下路段通行能力波动对容量可靠性的影响,结果如图 4 所示.

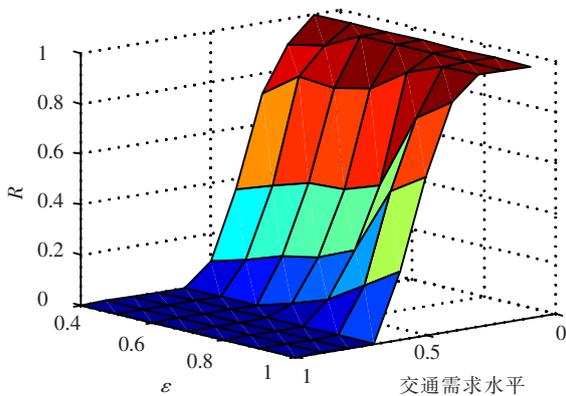


图 3 各服务水平下容量可靠性随交通需求波动的情况

通过以上结果分析,冰雪强度对容量可靠性影响很大.例如,当 $\epsilon = 0.7, I = 2.4$ 时,容量可靠性大约为 0.7,而 $I = 15$ 时,容量可靠性迅速下降

并趋近于 0;冰雪下的路网对交通需求变化非常敏感、脆弱,例如当交通需求达到正常条件下的 0.7 左右时,路网容量可靠性基本上接近于 0;服务水平要求对路网可靠性数值影响很大,例如:当通行能力利用率为 0.6,服务水平要求 ϵ 为 1 时,其可靠性接近于 0.6,而服务水平要求提高为 $\epsilon = 0.4$ 时,其可靠性迅速下降为不足 0.1. 另外在求解上层线性规划模型过程中,通过记录上层规划中各路段不满足容量约束的先后顺序,可以找出路网中容量敏感路段(瓶颈路段).本算例中路段 6、7 首先不满足路段容量约束,故这两个路段为该路网的容量瓶颈路段.在对路网优化改造时,应该优先考虑提高容量敏感路段的性能,从而可以提高整个路网性能.

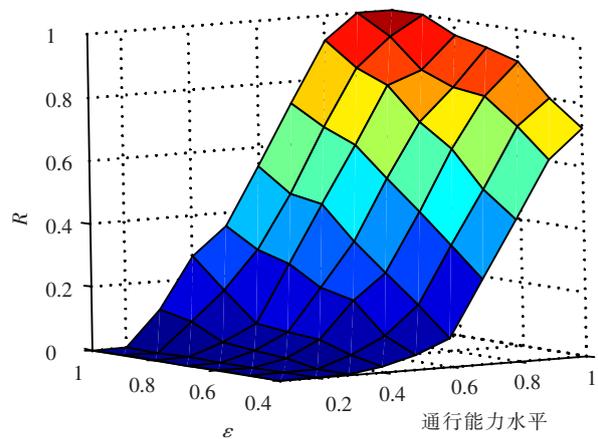


图 4 各服务水平下容量可靠性随通行能力波动的情况

5 结语

从管理者的角度出发研究了冰雪条件下的路网容量可靠性,以构建的 ISB-BPR 模型为基础提出了双层规划模型,并设计了有效的求解方法.虽然仅在一个特定小型路网上进行了测试,但其结果仍具有重要的启发与指导意义.为使该方法能够更准确地应用于实际路网,必须对实际路网中的 ISB-BPR 进行标定,由于受数据采集的限制,在此没做进一步的研究.

参考文献:

- [1] VAN LINT J W C, VAN ZUYLEN H J, TU H. Travel time unreliability on freeways; Why measures based on variance tell only half the story [J]. *Transportation Research Part A*, 2008, 42(1): 258 - 277.
- [2] DEEK A H, EMAM E B. New methodology for estimating reliability in transportation networks with degraded link capacities [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning and Operations*, 2006, 10(3): 117 - 129.
- [3] SUMALEE A, WATLING D, NAKAYAMA S. Reliable network design problem; Case with stochastic demand and total travel time reliability [J]. *Transportation Research Record*, 2006, 28: 81 - 90.
- [4] CHEN A, YANG H, LO H K, *et al.* A capacity related reliability for transportation networks [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1999, 33(2): 183 - 200.
- [5] CHEN A, YANG H, LO H K, *et al.* Capacity reliability of a road network; an assessment methodology and numerical results [J]. *Transportation Research*, 2002, 36B: 225 - 252.
- [6] LO H K, TUNG Y K. Network with degradable links: capacity analysis and design [J]. *Transportation Research Part B*, 2003, 37: 345 - 363.
- [7] 刘海旭, 蒲云. 基于路段走行时间可靠性的路网容量可靠性[J]. *西南交通大学学报*, 2004, 39(5): 573 - 576.
- [8] WILLIAM H K L, HU Shao, AGACHAI S. Modeling impacts of adverse weather conditions on a road network with uncertainties in demand and supply [J]. *Transportation Research Part B*, 2008, 42: 890 - 910.
- [9] 邵春福. *交通规划原理* [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 198 - 208.
- [10] 陈晓明, 邵春福, 熊志华. 混合交通信号交叉口的通行能力可靠度 [J]. *中国公路学报*, 2008, 21(4): 99 - 104.

(编辑 赵丽莹)

(上接第 575 页)

- toassisted Fenton degradation of nonbiodegradable Azo Dye (Orange II) in Fe - free solutions mediated by cation transfer membranes [J]. *Langmuir*, 1999, 15: 185 - 192.
- [2] KIWI J, DENISOV N, GAK Y, *et al.* Catalytic Fe³⁺ clusters and complexes in Nafion active in photo - Fenton processes. High - resolution electron microscopy and femtosecond studies [J]. *Langmuir*, 2002, 18: 9054 - 9066.
- [3] PARRA S, NADTOTECHENKO V, ALBERS P, *et al.* Discoloration of Azo - Dyes at biocompatible pH - values through an Fe - Histidine complex immobilized on Nafion via Fenton - like processes [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108: 4439 - 4448.
- [4] PARRA S, HENAO L, MIELCZARSKI E, *et al.* Synthesis, testing, and characterization of a novel Nafion membrane with superior performance in photoassisted immobilized Fenton catalysis [J]. *Langmuir*, 2004, 20: 5621 - 5629.
- [5] CHENG M, MA W, LI J, *et al.* Visible light assisted degradation of dye pollutants over Fe(III) - loaded resin in the presence of H₂O₂ at neutral pH values [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38: 1569 - 1575.
- [6] LV X, XU Y, LV K, *et al.* Photo - assisted degradation of anionic and cationic dyes over iron(III) - loaded resin in the presence of hydrogen peroxide [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2005, 173: 121 - 127.
- [7] 张瑛洁, 马军, 张亮, 等. 钛盐分光光度法测定酸性染料体系中的过氧化氢 [J]. *工业水处理*, 2008, 28(11): 72 - 74.
- [8] ENSING B, BUDA F, BAERENDS E J. Fenton - like chemistry in water: Oxidation catalysis by Fe (III) and H₂O₂ [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2003, 107: 5722 - 5731.

(编辑 刘 彤)