

# 地源热泵路面融雪化冰可靠性设计及应用分析

屠艳平<sup>1,2,3</sup>,管昌生<sup>1</sup>,李元松<sup>1</sup>

(1. 武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074;

2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070;

3. 武汉工程大学交通研究中心,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**分析了地源热泵路面融雪化冰系统的随机性,基于可靠度理论,提出了路面融雪化冰的可靠性设计方法及设计步骤,推导出了可靠度计算公式.考虑主要因素的随机特征,结合工程实例进行设计计算.结果表明,降雪量的变异性及系统的可靠度对融雪化冰耗热量的影响较大.与确定性计算方法相比,路面融雪化冰可靠性理论对研究系统的安全、稳定性具有重要意义,为系统的优化设计奠定了基础.

**关键词:**地源热泵;路面融雪化冰;可靠性设计;随机性;耗热量

**中图分类号:**TU 528

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2011.06.013

## 0 引 言

截至 2010 年,我国公路里程达 398.4 万 km,其中高速公路达 7.4 万 km.我国“十二五”发展规划提出推进国家运输通道建设,基本建成高速公路网,加强省际通道和国省干线公路建设,建立一个通畅的、高效的、安全的、绿色的现代交通运输体系.“十二五”期间,我国准备投入万亿元用于公路建设.虽说国家非常重视公路的建设,但是冰雪天气影响道路交通通畅,甚至导致交通事故,特别是大范围的雨雪天气,会导致大范围的交通瘫痪,造成巨大的经济损失.京港澳(原京珠)高速公路粤北段从 2010 年 12 月 15 日下午 3 点开始结冰,气温达到 $-5^{\circ}\text{C}$ ,滞留车龙 20 km,8 000 人被困车上,南北交通大动脉受阻.因此路面的融雪化冰技术是一项关系到改善我国交通状况,促进各地区经济持续稳定快速发展的技术.

采用融雪剂进行融雪化冰会缩短高速公路的使用寿命、严重威胁道路两旁植物的生长,更为严重的是污染土壤和水资源<sup>[1]</sup>.因此很有必要进行融雪化冰新技术的研发.目前国内外道路融雪化冰新技术是采用热力学法,包括导电混凝土、发热电缆及地源热泵.美国、日本、北欧等国家已经有一批典型的地源热泵道路、桥梁融雪示范工程<sup>[2]</sup>,在国内已有学者开展了相关研究,王华军<sup>[3]</sup>对地热能道路融雪化冰过程进行了实验研究,高青<sup>[4,5]</sup>

进行了循环热流体路面融雪化冰过程的传热研究及基本性能模拟研究,胡文举<sup>[6]</sup>进行了桥面热力融雪模型研究与分析,但目前还没有对路面融雪化冰的可靠性研究.本文进行路面融雪化冰的随机性分析,首次考虑影响因素的随机性,提出了路面融雪化冰的可靠性设计方法及设计步骤,并结合实例验证该方法的可行性.

## 1 路面融雪化冰系统随机性分析

地源热泵融雪化冰系统主要由地下换热器、热泵机组、循环泵、路面热流管网等组成<sup>[4]</sup>.融雪化冰过程是一个复杂的传质传热和能量动态传输过程.其原理是流体由地下换热器提取地源热量,经热泵升温,再经过循环泵流入路面热流管网加热路面,路面升温,冰雪融化.

融雪化冰这一过程是随机非稳态的,融雪所需的热量受降雪量、环境空气温度、环境风速、环境相对湿度及冰、雪、水的物理性能影响.有些因素是随机的,因此很难确定,所以耗热量是一个变量,不能看作常数.水平热流管路下传热也取决于很多因素,如路面材料、厚度,热流管材料、直径、间距和埋深,系统流量,热流体热物性,流体供应的温度等.这些因素都具有随机性,并且热传导边界条件是变化的,所以水平埋管热传递是随机和不稳定的.在地源热泵垂直地埋管地下换热的过程中,热阻是影响换热效率的主要因素<sup>[7]</sup>.埋管周

围岩土热阻相对较大,对总热阻起到决定性的作用,岩土热阻与地埋管周围岩土的热物性密切相关.岩土热物性基本参数包括密度、含水率、孔隙比、定压比热容及导热系数,这些因素之间相互影响,具有不确定性,导致埋管周围岩土热阻具有随机性,因此地下换热也是随机的.

2 融雪化冰可靠性设计

2.1 融雪化冰可靠性设计步骤

- a. 确定随机参数.影响系统耗热量的因素是随机的,这些随机因素有降雪量、环境空气温度、环境风速、环境相对湿度.
- b. 计算各随机参数的数字特征或确定概率分布.通常对某一地区近 10 年的气象数据进行统计分析,确定参数的数字特征或概率分布.
- c. 建立融雪化冰系统的可靠性指标体系.可靠性指标首先选用系统的耗热量,还可采用能效比、水平埋管的使用寿命、地下换热器地埋管使用寿命等指标.
- d. 建立极限状态方程.根据系统的随机参数、可靠性指标体系,建立系统的极限状态方程.
- e. 计算系统可靠度.根据随机参数的数字特征或概率分布及功能函数,计算出系统的可靠度.

2.2 融雪化冰可靠性分析

路面融雪化冰系统设计、安装与维护的目的是为了保证在降雪时能迅速地除雪,防止路面结冰,保证交通畅通无阻,也就是确保系统在设计寿命内安全可靠稳定地运行.系统的可靠性指标体系为系统的耗热量,将融雪化冰系统设计的耗热量作为“抗力”,应为随机变量,可记为  $R$ .而系统实际真正所需的耗热量作为系统的“效应”,同样也是随机的,随着环境的变化而变化,受到多种因素的影响,可以记为  $S$ .反映融雪化冰安全稳定可靠的情况,可以用“抗力”和“效应”之间的某种关系来确定.因此定义融雪化冰系统可靠性如下:融雪化冰系统在规定的条件下、规定的时间内,满足规定要求的概率.

用公式表示如式(1).

$$P_s=P(S \text{ 满足 } R) \tag{1}$$

式(1)中  $P$  为事件的概率,  $P_s$  为融雪化冰系统的可靠度.融雪化冰系统的失效概率  $P_f$  为

$$P_f=1-P_s \tag{2}$$

设融雪化冰的热负荷为  $q_0$ ,设计的耗热量为  $q$ ,则  $q$  应满足如下要求:

$$q \geq q_0 \tag{3}$$

式(3)中  $q_0$  为考虑随机性的路面融雪化冰热分析获得的耗热量; $q$  为设计获得的耗热量,在系统的运行过程中为随机变量.

$$q_0=q_s+q_m+A_r(q_c+q_r+q_e)-q_l \tag{4}$$

功能函数为

$$Z=g(S,R)=R-S=q-q_0 \tag{5}$$

3 工程实例

3.1 工程概况及设计计算

湖北武汉 2010 年 1 月 5 日降雪量为 1.6 mm/h;气温  $-3^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$ ;偏北风 3~4 级;相对湿度 60%~95%.常规设计中,按照降雪量为 1.6 mm/h,气温为  $-3^{\circ}\text{C}$ ,风速 4 m/s,相对湿度 60%计算的最大耗热量为 169.34 W/m<sup>2</sup>.

影响耗热量的因素是十分复杂的,如果将每个随机因素都考虑,会使系统可靠度的计算十分复杂.降雪量为影响路面融雪化冰耗热量的最主要因素<sup>[8]</sup>,因此本文忽略其它因素的随机性,只考虑降雪量的随机变化对系统可靠度的影响.在此基础上,建立可靠性方程为:

$$Z=q-q_0=q-(q_s+q_m+q_c+q_r+q_e-q_l) \tag{6}$$

$q_m$  为随机变量,  $q_m=85h^{[8]}$ ,式中  $h$  为降雪量 (mm/h),为随机变量;  $q_s$ 、 $q_c$ 、 $q_r$ 、 $q_e$ 、 $q_l$  为确定值;  $q$  为随机变量.假定  $h$  与  $q$  相互独立,令  $A=q_s+q_c+q_r+q_e-q_l$

$$\mu_z=\mu_q-85\mu_h-A \tag{7}$$

$$\sigma_z=\sqrt{\sigma_q^2+85^2\sigma_h^2} \tag{8}$$

系统失效概率为

$$P_f=1-\Phi(\mu_z/\sigma_z)=$$

$$1-\Phi((\mu_q-85\mu_h-A)/\sqrt{\sigma_q^2+85^2\sigma_h^2}) \tag{9}$$

令  $\beta=(\mu_q-85\mu_h-A)/\sqrt{\sigma_q^2+85^2\sigma_h^2}$ ,则

$$P_f=1-\Phi(\mu_z/\sigma_z)=1-\Phi(\beta) \tag{10}$$

式(10)中  $\beta$  为可靠度指标.

根据可靠性计算,由已知条件知  $h=1.6$  mm/h,  $\mu_h=1.6$  mm/h,  $A=35.52$  W/m<sup>2</sup>,  $\mu_{q_0}=169.34$  W/m<sup>2</sup>.由式(9)、(10)讨论计算不同  $P_f$ 、 $\delta_q$ 、 $\delta_h$  下  $q$  的取值,如表 1~4.

表 1  $\delta_h=0.01$  时,  $q$  随  $P_f$ 、 $\delta_q$  的变化取值

Table 1 Calculated value of  $q(\text{W/m}^2)$  when  $\delta_h=0.01$

$P_f$	$\delta_q$			
	0.01	0.05	0.1	0.2
0.01	174.49	191.95	220.92	317.21
0.05	172.96	184.64	202.65	252.05
0.10	172.33	181.06	194.28	227.68
0.15	171.62	178.73	189.04	213.80

表 2  $\delta_h=0.05$  时,  $q$  随  $P_f, \delta_q$  的变化取值

Table 2 Calculated value of  $q(\text{W}/\text{m}^2)$  when  $\delta_h=0.05$

$P_f$	$\delta_q$			
	0.01	0.05	0.1	0.2
0.01	185.76	197.27	223.86	318.72
0.05	180.93	188.36	204.71	253.11
0.10	178.41	184.00	195.90	228.51
0.15	176.65	180.13	190.35	214.48

表 3  $\delta_h=0.1$  时,  $q$  随  $P_f, \delta_q$  的变化取值

Table 3 Calculated value of  $q(\text{W}/\text{m}^2)$  when  $\delta_h=0.10$

$P_f$	$\delta_q$			
	0.01	0.05	0.1	0.2
0.01	201.37	209.34	232.00	323.32
0.05	191.89	196.85	210.43	256.33
0.10	186.96	192.99	200.35	231.02
0.15	183.61	186.48	193.96	216.51

表 4  $\delta_h=0.2$  时,  $q$  随  $P_f, \delta_q$  的变化取值

Table 4 Calculated value of  $q(\text{W}/\text{m}^2)$  when  $\delta_h=0.02$

$P_f$	$\delta_q$			
	0.01	0.05	0.1	0.2
0.01	232.95	238.56	256.45	340.00
0.05	214.02	217.29	227.43	267.84
0.10	204.29	206.6	213.63	240.00
0.15	197.68	199.45	204.72	223.76

3.2 对比分析

将计算结果进行分析,如图 1~4. 从图中可以看出  $q$  随  $\delta_q, \delta_h$  的增大而增大,  $q$  同时也受失效概率的影响,  $P_f$  越小,  $q$  受的影响就越大. 在  $P_f$  为 0.1 不变的情况下,  $\delta_q$  取 0.1,  $\delta_h$  取 0.2 时耗热量为 213.63  $\text{W}/\text{m}^2$ ; 而  $\delta_q$  取 0.2,  $\delta_h$  取 0.1 时耗热量为 231.02  $\text{W}/\text{m}^2$  可见  $\delta_q$  的影响比  $\delta_h$  显著. 在  $P_f$  接近 0.01 时,  $q$  与确定性方法计算结果相比增加很多, 特别  $\delta_q$  或  $\delta_h$  取值很大时, 耗热量增加约 80%~95%; 在  $P_f$  大于 0.1 时,  $\delta_q, \delta_h$  取值不太大的情况下,  $q$  与确定性方法计算结果相比增加较少.

根据理论分析计算出的耗热量为 169.34  $\text{W}/\text{m}^2$ , 为定值计算, 没有考虑环境因素的随机性及

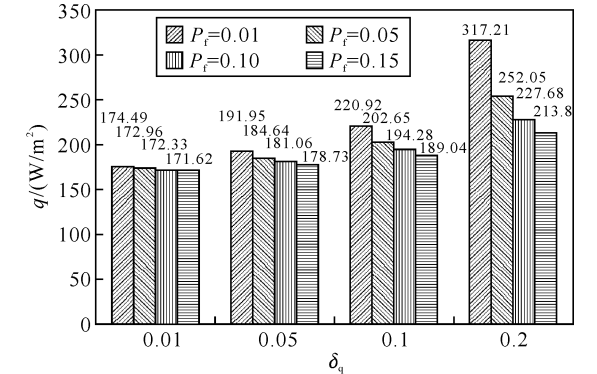


图 1  $\delta_h=0.01$  时  $q$  随  $\delta_h, P_f$  的变化

Fig. 1 Value of  $q$  along with variance of  $h$ ,  $P_f$  when  $\delta_h=0.01$

变异性, 对系统的有效运行缺乏可靠性保证. 利用可靠性设计分析, 允许环境因素在一定范围内变化, 如表 1 中,  $\delta_h, \delta_q$  均取 0.01, 计算的耗热量为 174.49  $\text{W}/\text{m}^2$ , 与常规设计虽增加 3%, 但允许  $h$  及  $q$  有 1% 的变化范围, 系统的可靠性也可达 0.99.

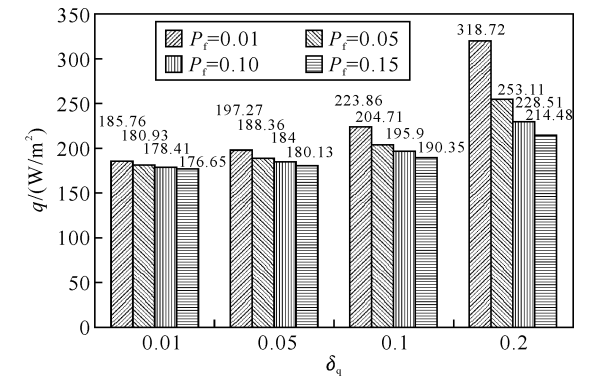


图 2  $\delta_h=0.05$  时  $q$  随  $\delta_h, P_f$  的变化

Fig. 2 Value of  $q$  along with variance of  $h$ ,  $P_f$  when  $\delta_h=0.01$

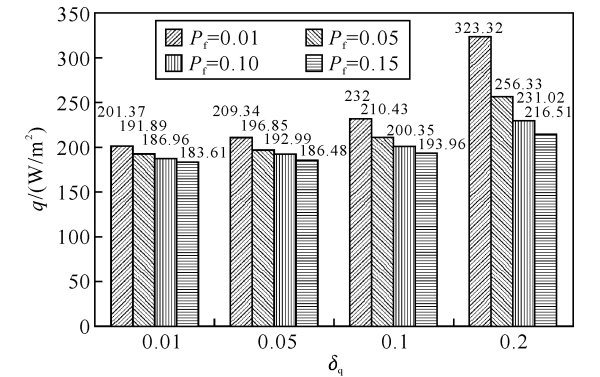


图 3  $\delta_h=0.1$  时  $q$  随  $\delta_h, P_f$  的变化

Fig. 3 Value of  $q$  along with variance of  $h$ ,  $P_f$  when  $\delta_h=0.1$

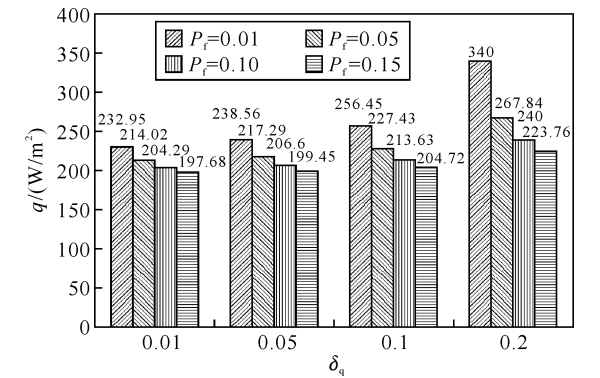


图 4  $\delta_h=0.2$  时  $q$  随  $\delta_h, P_f$  的变化

Fig. 4 Value of  $q$  along with variance of  $h$ ,  $P_f$  when  $\delta_h=0.2$

4 结 语

a. 地源热泵融雪化冰高效、环保, 在国外已经有应用, 而在我国还处于起步阶段. 通过对路面融

雪化冰系统的随机性分析,提出了路面融雪化冰的可靠性设计方法及步骤.

b. 考虑降雪量的随机变化,对融雪化冰耗热量的计算进行了推导,并与常规设计做了对比分析,结果表明随机参数的变异性及设计的可靠度对耗热量影响很大.

c. 本文的研究为地源热泵融雪化冰系统的优化设计奠定了基础. 不足之处在只考虑了降雪量单个参数的随机性,没有考虑多个变量的随机性.

参考文献:

[1] 蒲济生,魏瑾. 寒冷地区高速公路融雪剂的环境危害及对策[J]. 黑龙江农业科学, 2010(3):46 - 48.  
[2] 高青,于鸣,刘小兵. 基于蓄能的道路融雪化冰技术及其分析[J]. 公路, 2007(5):170 - 175.

[3] 王华军,赵军. 地热能道路融雪化冰过程实验研究[J]. 太阳能学报, 2009,30(2):177 - 181.  
[4] 高青,黄勇,刘研,等. 循环流体路面融雪化冰过程传热及其应用分析[J]. 热科学与技术, 2009,8(2):124 - 130.  
[5] 高青,刘研,林密. 道路融雪地能利用热循环基本性能模拟分析[J]. 公路, 2009(7):350 - 355.  
[6] 胡文举,益强,姚杨,等. 桥面热力融雪模型研究与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007,39(12):1895 - 1899.  
[7] 管昌生,刘卓栋,陈绪义. 地源热泵埋管随机热阻及可靠性分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(3):70 - 72.  
[8] 涂曦,陈辉,吴少鹏,等. 导电沥青混凝土融雪化冰热输出功率计算方法[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(13):37 - 40.

Reliability design and application analysis on pavement snow melting of ground source heat pump

*TU Yan - ping<sup>1,2,3</sup>, GUAN Chang - sheng<sup>2</sup>, LI Yuan - song<sup>1</sup>*

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;  
2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
3. Transportation Research Center, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this paper the random character of snow melting system is analyzed based on reliability theory. A reliability design method and steps of snow melting is proposed. A formula of reliability calculation is concluded. The stochastic characters of the main factors are considered with engineering examples. The results show that the reliability of system and variability of snowfall have considerable influence on the heat load. Reliability theory of snow melting system is important to study security, stability of the system, and is the foundation for system's optimization design.

**Key words:** ground-source heat pump; deicing and snow melting; reliability design; stochastic; heat load

本文编辑:龚晓宁