

路面融雪化冰可靠性分析

屠艳平^{1,2}, 朱志刚^{1,3*}, 李 鹏⁴, 李元松¹

(1. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉工程大学交通研究中心, 湖北 武汉 430074; 3. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 4. 河北省安装工程公司, 河北 石家庄 050011)

摘 要:为研究多个随机因素对地源热泵路面融雪化冰可靠性的影响,在分析融雪化冰原理的基础上,以可靠性理论为工具,建立了考虑多个参数随机性的可靠性方程.介绍了中心点法和验算点法,利用中心点法直接推导出可靠指标和失效概率计算公式,用验算点法结合迭代法求出可靠指标及验算点设计值.结合工程实例考虑不同环境条件及可靠度条件下融雪化冰的耗热量,结果表明降雪量的变异性、室外温度的变异性对耗热量有较大影响.与只考虑降雪量一个随机因素的变化相比,考虑降雪量、室外温度多因素影响的耗热量虽说会增加,但更能保证系统的安全、稳定,同时降雪量的变化对耗热量的影响比室外温度变化对耗热量的影响显著.中心点法和验算点法对比表明,两者的结论是一致的,采用验算点法的计算量比中心点法大,但验算点法计算精度较高.

关键词:融雪化冰;可靠指标;中心点法;验算点法;耗热量

中图分类号: TU 528

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.05.005

0 引言

冬季冰雪天气会对道路交通造成严重威胁,甚至造成交通事故,给经济造成损失,给人民生命财产造成损害.2010年1~6月全国恶劣气候条件下道路交通事故增多,31.2%的道路交通事故发生在阴雨雪雾天气条件下,同比上升11.7%.现在通常使用的除冰方法主要分为被动抑制路面积雪结冰技术和主动融雪技术两大类.被动式方法目前常采用融雪剂,但氯盐类融雪剂会严重腐蚀桥梁、道路、建筑物、地下管道,会使它们的耐久性降低及使用寿命缩短,更为致命的缺点是对土壤和水资源造成污染^[1].目前国内外道路融雪化冰新技术是采用主动式热融法,国外根据研究成果,已经建立了多个典型的地源热泵融雪化冰工程^[2].国内已有天津大学、吉林大学、武汉理工大学开展了路桥融雪化冰的传热机理研究、实验研究及数值模拟^[3-5],武汉工程大学对路面融雪化冰的可靠性进行了分析^[6],但目前还没有对考虑多个随机因素的路面融雪化冰的可靠性研究.本文首次考虑多个影响因素的随机性,并以武汉地区实际天气条件为依

据进行数值分析计算,为系统设计提供必要的依据,说明了可靠性研究的可行性及必要性.

1 地源热泵融雪化冰工作原理

地源热泵融雪化冰系统如图1.地源热泵路面融雪化冰过程主要包括三部分传热过程:路面融雪管道传热、地下换热器换热和路面融雪化冰传热.其中,路面融雪化冰包含复杂的传热传质、多态转换过程和能量动态传输过程.

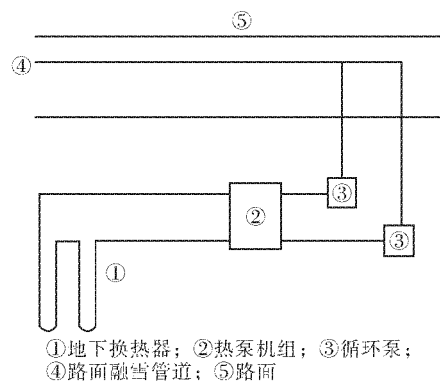


图1 地源热泵融雪化冰系统图

Fig.1 System diagram of ground source heat pump snowmelting

收稿日期:2012-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078160)

作者简介:屠艳平(1977-),女,湖北孝感人,讲师,博士.研究方向:路面融雪化冰.

* 通讯联系人:朱志刚,男,讲师,博士研究生.研究方向:工程项目管理.

2 多个随机因素融雪化冰可靠性分析

2.1 可靠性方程

以系统的耗热量作为可靠指标,功能函数为

$$Z=g(S,R)=R-S=q-q_0 \quad (1)$$

降雪量和室外温度对路面融雪化冰耗热量的大小影响最为重要^[7],本文只考虑降雪量和室外温度的随机特征对系统可靠性的影响,则功能函数为

$$Z(t)=q(t)-[q_s+q_m(t)+q_c(t)+q_r+q_e-q_l] \quad (2)$$

$q_m(t)$ 为随机变量, $q_m(t)=85h(t)$ ^[8],式(2)中 h 为降雪量(mm/h), $q_c(t)$ 也为随机变量, $q_c(t)=-h_cT_a(t)$; q_s 、 q_r 、 q_e 、 q_l 为确定值; $q(t)$ 为随机变量。

2.2 中心点法

$$\mu_z=\mu_q-(\mu_{q_s}+\mu_{q_m}+\mu_{q_c}+\mu_{q_r}+\mu_{q_e}-\mu_{q_l}) \quad (3)$$

$$\sigma_z=\sqrt{\sigma_{q_s}^2+\sigma_{q_m}^2+\sigma_{q_c}^2+\sigma_{q_r}^2+\sigma_{q_e}^2+\sigma_{q_l}^2} \quad (4)$$

$$\beta=\mu_z/\sigma_z \quad (5)$$

假定 h 与 T_a 相互独立,令 $A=q_s+q_r+q_e-q_l$

$$\mu_z=\mu_a-85\mu_h+h_a\mu_{T_a}-A \quad (6)$$

$$\sigma_z=\sqrt{85^2\sigma_h^2+h_c^2\sigma_{T_a}^2} \quad (7)$$

系统失效概率为

$$P_f=1-\Phi(\mu_z/\sigma_z)=1-\Phi((\mu_q-85\mu_h+h_a\mu_{T_a}-A)/\sqrt{85^2\sigma_h^2+h_c^2\sigma_{T_a}^2}) \quad (8)$$

令 $\beta=(\mu_q-85\mu_h+h_a\mu_{T_a}-A)/\sqrt{85^2\sigma_h^2+h_c^2\sigma_{T_a}^2}$,则

$$P_f=1-\Phi(\mu_z/\sigma_z)=1-\Phi(\beta) \quad (9)$$

2.3 验算点法(JC 法)

极限状态方程为

$$Z=g(q,h,T_a)=q-85h+h_cT_a-A=0 \quad (10)$$

$$\cos \theta_{X_i}=\frac{(-\partial g/\partial X_i)_{p^*}\sigma_{X_i}}{\{\sum_{i=1}^n[(\partial g/\partial X_i)_{p^*}\sigma_{X_i}]^2\}^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

$$X_i^*=\mu_{X_i}+\beta\sigma_{X_i}\cos \theta_{X_i} \quad (12)$$

$$g(x_1^*,x_2^*,\dots,x_n^*)=0 \quad (13)$$

X 分别为 q 、 h 及 T_a 。

3 融雪化冰可靠性实例

3.1 工程概况

2010年12月15日湖北武汉天气条件:气温 $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度 $60\%\sim 90\%$;偏北风 $3\sim 4$ 级;小雪;降雪量为 2.0 mm/h 。按常规设计,根据最不利气象条件计算的最大耗热量为 280.29 W/m^2 。

由已知条件知 $h=2\text{ mm/h}$, $\mu_h=2\text{ mm/h}$, $T_a=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\mu_{T_a}=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_c=23.37\text{ W}/(\text{m}^2\cdot$

$\text{K})$, $q_s=5.2\text{ W/m}^2$, $q_r=27.46\text{ W/m}^2$, $q_e=40.3\text{ W/m}^2$, $q_l=85.56\text{ W/m}^2$, $A=-12.6\text{ W/m}^2$, $\mu_{q_0}=280.29\text{ W/m}^2$ 。

3.2 中心点法计算及结果分析

根据中心点法,由式(8)、(9)计算不同 P_f 、 δ_h 、 δ_{T_a} 下 q 的取值,如表1~3。

表1 $\mu_h=2\text{ mm/h}$, $P_f=0.01$ 时,

q 随 δ_h 、 δ_{T_a} 的变化取值

Table 1 Calculated value of q when $\mu_h=2\text{ mm/h}$

δ_{T_a}	$P_f=0.01$				
	W/m^2				
	δ_h				
	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3
0.01	285.1	300.3	312.0	359.6	399.2
0.05	294.5	304.3	322.2	360.7	399.9
0.10	307.9	314.0	328.4	364.1	402.2
0.20	334.9	338.3	347.7	376.5	410.8
0.30	362.1	364.4	371.1	394.1	427.7

表2 $\mu_h=2\text{ mm/h}$, $P_f=0.05$ 时,

q 随 δ_h 、 δ_{T_a} 的变化取值

Table 2 Calculated value of q when $\mu_h=2\text{ mm/h}$

δ_{T_a}	$P_f=0.05$				
	W/m^2				
	δ_h				
	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3
0.01	283.8	294.4	308.3	336.1	364.0
0.05	290.3	297.2	309.8	336.9	364.5
0.10	299.7	304.0	314.1	339.3	366.1
0.20	318.7	321.1	327.7	348.0	372.3
0.30	337.9	339.5	344.2	360.4	380.8

表3 $\mu_h=2\text{ mm/h}$, $P_f=0.10$ 时,

q 随 δ_h 、 δ_{T_a} 的变化取值

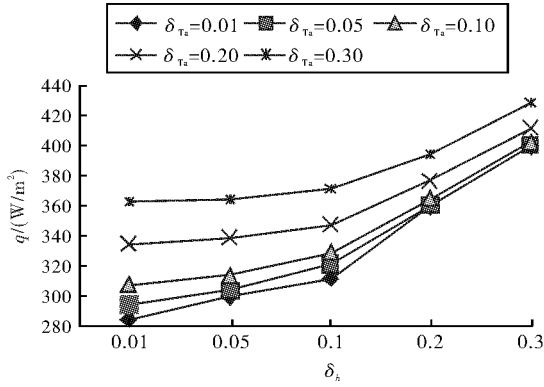
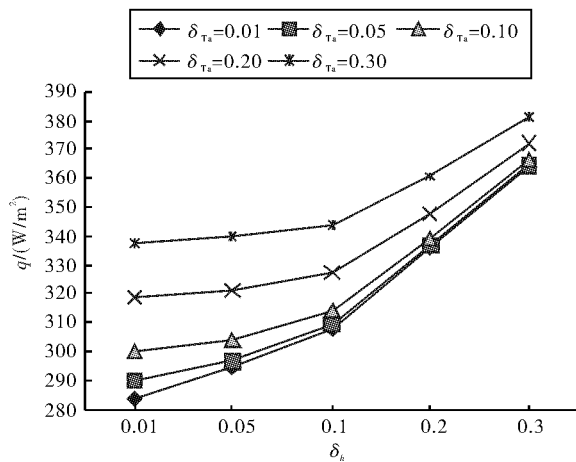
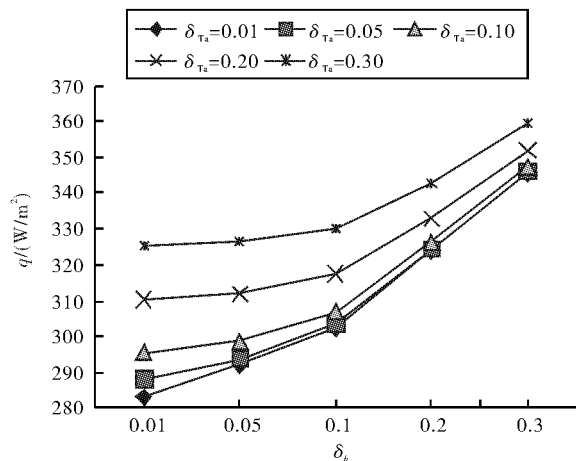
Table 3 Calculated value of q when $\mu_h=2\text{ mm/h}$

δ_{T_a}	$P_f=0.10$				
	W/m^2				
	δ_h				
	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3
0.01	283.0	292.1	302.1	323.9	345.6
0.05	288.1	293.5	303.3	324.5	346.0
0.10	295.44	298.8	306.7	326.3	347.3
0.20	310.3	312.1	317.4	333.1	352.1
0.30	325.3	326.5	330.2	342.9	359.6

将计算结果进行分析,如图2~4。

a. 在失效概率不变的条件下,也就是可靠度不变的情况下 q 随 δ_h 、 δ_{T_a} 的增大而增大。

b. q 同时也受失效概率的影响, δ_h 、 δ_{T_a} 不变的条件下, P_f 越小,也就是可靠度越高, q 受的影响

图 2 $P_f=0.01$ 时 q 随 δ_h 、 δ_{T_a} 的变化Fig. 2 Value of q along with variance of δ_h 、 δ_{T_a} when $P_f=0.01$ 图 3 $P_f=0.05$ 时 q 随 δ_h 、 δ_{T_a} 的变化Fig. 3 Value of q along with variance of δ_h 、 δ_{T_a} when $P_f=0.05$ 图 4 $P_f=0.10$ 时 q 随 δ_h 、 δ_{T_a} 的变化Fig. 4 Value of q along with variance of δ_h 、 δ_{T_a} when $P_f=0.10$

就越大。在失效概率接近 0.01 时,耗热量与不考虑参数随机特征的确定性方法计算结果相比增加很多,特别降雪量或室外温度的变异性很大时, q 约增加 30%~55%;可见系统合理的可靠性设计

对节能影响很显著。

c. 在 P_f 不变的情况下,降雪量的变异性 δ_h 比室外温度的变异性 δ_{T_a} 对耗热量的影响要大。如图 2 中 δ_h 取 0.2, δ_{T_a} 取 0.01 时耗热量达到 359.6 W/m²,而 δ_h 取 0.01, δ_{T_a} 取 0.2 时耗热量为 334.9 W/m²,减少了 23.7 W/m²,可见降雪量的变化对耗热量的影响比室外温度变化的影响显著。

d. 不考虑环境因素的随机特征分析计算出的耗热量为 280.29 W/m²,不能保证系统的可靠运行。考虑可靠性设计,允许环境因素在一定范围内变化,如表 2 中允许降雪量和室外温度有 10% 的变化范围,计算的耗热量为 314.1 W/m²,与定值计算虽增加 12%,但系统的失效概率为 5.0×10^{-2} ,即系统在此状态可靠性比较高。

3.3 JC 法计算及结果分析

本工程极限状态方程为

$$Z = g(q, h, T_a) = q - 85h + 23.37T_a + 12.6 = 0$$

随机变量 q 、 h 及 T_a 均服从正态分布,如果已知 μ_q 、 δ_q 、 μ_h 、 δ_h 及 μ_{T_a} 、 δ_{T_a} ,则

$$\sigma_q = \mu_q \delta_q, \sigma_h = \mu_h \delta_h, \sigma_{T_a} = \mu_{T_a} \delta_{T_a}$$

$$(-\partial g / \partial q)_p \sigma_q = -\sigma_q, (-\partial g / \partial h)_p \sigma_h = 85\sigma_h$$

$$(-\partial g / \partial T_a)_p \sigma_{T_a} = -23.37\sigma_{T_a}$$

$$\cos \theta_q = \frac{-\sigma_q}{\sqrt{(\sigma_q)^2 + (85\sigma_h)^2 + (23.37\sigma_{T_a})^2}}$$

$$\cos \theta_h = \frac{85\sigma_h}{\sqrt{(\sigma_q)^2 + (85\sigma_h)^2 + (23.37\sigma_{T_a})^2}}$$

$$\cos \theta_{T_a} = \frac{-23.37\sigma_{T_a}}{\sqrt{(\sigma_q)^2 + (85\sigma_h)^2 + (23.37\sigma_{T_a})^2}}$$

$$q^* = \mu_q + \beta \sigma_q \cos \theta_q, h^* = \mu_h + \beta \sigma_h \cos \theta_h$$

$$T_a^* = \mu_{T_a} + \beta \sigma_{T_a} \cos \theta_{T_a}$$

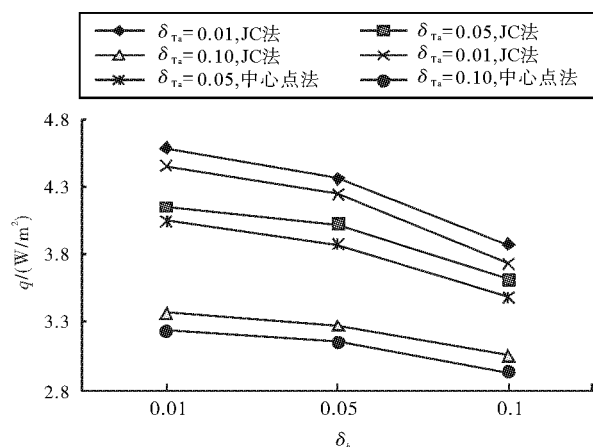
$$Z = g(q^*, h^*, T_a^*) =$$

$$q^* - 85h^* + 23.37T_a^* + 12.6 = 0$$

可假定 $q^* = \mu_q$, $h^* = \mu_h$, $T_a^* = \mu_{T_a}$,用迭代法求解可靠指标。

已知 $\mu_q = 353.8$ W/m², $\mu_h = 2$ mm/h, $\mu_{T_a} = -5$ °C, $\delta_q = 0.05$ 时可靠指标具体结果见图 5。

从图 5 中可知,在系统提供的热量一定的情况下,降雪量变异性的影响对可靠指标的影响比室外环境温度变异性的影响要大,同时和中心点法的结论是一致的。采用 JC 法的计算量虽然比中心点法大,但具有可以根据要求进行足够精度的近似计算的优点,同时计算的可靠指标比中心点法的要大,也就是在可靠指标一定的情况下,采用 JC 系统所需提供的热量就可少些,可以减少能源消耗,达到节能目的。

图5 β 随 $\delta_a, \delta_{\tau_a}$ 的变化取值Fig. 5 Calculated value of β

4 结 语

a. 系统的可靠度及降雪量、室外温度的随机性对耗热量有较大影响,用常规方法设计可能不能保障融雪化冰的效果,不能保证及时地除去路面积雪。

b. 用JC法和中心点法进行了可靠指标的计算,在系统提供的热量一定的情况下,降雪量变异性的影响对可靠指标的影响比室外环境温度变异性的影响要大。

致谢

本文的理论分析得到博士生导师管昌生教授的指导,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 洪乃丰. 氯盐类融雪剂的腐蚀危害与试验方法的讨论[J]. 工业建筑, 2006, 36(10): 61-64.
Hong Naifen. Corrosion of chlorine deicers and discussion on test methods[J]. Industrial Construction, 2006, 36(10): 61-64. (in Chinese)
- [2] Rees S J, Spitler J D, Xiao X. Transient Analysis of Snow Melting System Performance [J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(2): 406-423.
- [3] 王华军. 流体加热道路融雪传热传质特性研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2007.
Huajun Wang. Study of heat and mass transfer of hydronic snow melting process for pavement[D].

TianJin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2007. (in Chinese)

- [4] 张磊. 道路融雪化冰实验研究及其数值模拟[D]. 吉林: 吉林大学汽车工程学院, 2009.
Zhang Lei. Experimental Study and Numerical Simulation on the Characteristics of Road Ice-Snow Melting [D]. Jilin: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [5] 王虹, 吴少鹏, 陈明宇, 等. 传导沥青混凝土的融雪化冰实验研究及数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 90-93.
WANG Hong, WU Shao-peng, CHEN Ming-yu, et al. Experimental Research and Simulating Analysis of Conductive Asphalt Concrete Used to Melting Ice and Snow[J]. JOURNAL OF WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2010, 32(7): 90-93. (in Chinese)
- [6] 屠艳平, 管昌生, 李元松. 地源热泵路面融雪化冰可靠性设计及应用分析[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(6): 61-64.
TU Yan-ping, GUAN Chang-sheng, LI Yuan-song. Reliability Design and Application Analysis on Pavement Snow Melting of Ground Source Heat Pump[J]. JOURNAL OF WUHAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2011, 33(6): 61-64. (in Chinese)
- [7] 屠艳平, 李杰, 胡国祥, 等. 沥青混凝土路面融雪热流密度分析[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(9): 31-34.
Tu Yan-ping, Li-jie, Hu Guo-xiang, et al. Heat Flux Analysis of Asphalt Concrete Pavement Based on Snow Melting [J]. JOURNAL OF WUHAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2010, 32(9): 31-34. (in Chinese)
- [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.
TU Huan, CHEN Hui, WU Shao-peng, et al. Calculating Method for Heat Output Power Based on Removing Snow and Ice of Conductive Asphalt Concrete [J]. JOURNAL OF WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2009, 31(13): 37-40. (in Chinese)

Reliability analysis of pavement snow melting based on multi-factor

TU Yan-ping^{1,2}, ZHU Zhi-gang^{1,3}, LI Peng⁴, LI Yuan-song¹

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Transportation Research Center, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

4. Hebei installation engineering company, Shijiazhuang 050011, China);

Abstract: To investigate the effects of multiple random factors on ground-source heat pump reliability, the reliability equation were established based on the analysis of the principle of deicing and snow melting and the random character of snow melting system which concerns the stochastic characters of multiple factors. The centre point method and checking point method were introduced. Reliability index and failure probability calculation formulas can directly deduced by using the centre point method. Reliability index and design value of checking point can be determined by the checking point method combined with the iterative method. Combined with engineering example, heat load of deicing and snow melting were calculated given different environment conditions and reliability conditions. The heat load will increased based on snowfall and outdoor temperature randomness compared with only concerning the snowfall randomness, but that can guarantee the stability and safety of the system. At the same time, compared to outdoor temperature, snowfall has the most significant impact on heat load. Compared to the center point method and the checking point method, their conclusions are consistent. The calculation amount of the checking point method is bigger than central point method's, but the calculation accuracy of checking point method is higher.

Key words: deicing and snow melting; reliability index; centre point method; checking point method; heat load

本文编辑: 龚晓宁