

关于《地源热泵系统工程技术规范》 地层热阻计算式的商榷及应用分析

武汉市建筑设计院 雷建平[☆] 於仲义

摘要 剖析了该规范中地埋管换热器地层热阻计算公式的不足之处,在综合了国内外地层热阻数学模型的基础上,给出了一套简化的、适应性强并可应用于工程的地层热阻计算公式。

关键词 地层热阻 孔群 计算公式 指数积分

Discussion and analysis of the calculation formula for stratum thermal resistance in the *Technical code for ground-source heat pump system*

By Lei Jianping[★] and Yu Zhongyi

Abstract Analyses some deficiencies of the calculation formula in the code. Puts forward a set of convenient, high adaptability and applicable calculation formula for stratum thermal resistance combined with mathematic models of stratum thermal resistance at home and abroad.

Keywords stratum thermal resistance, multiple borehole, calculation formula, exponential integral

① ★ Wuhan Architectural Design Institute, Wuhan, China



雷建平

主要设计业绩

- ▶ 武汉国际广场
- ▶ 湖北省图书馆新馆
- ▶ 宜昌均瑶国际广场
- ▶ 武汉国际证券大厦
- ▶ 武汉大学中南医院内科病房综合楼

0 引言

目前,地埋管地源热泵系统地埋管换热器的设计计算主要有采用单位井深换热量、专业软件和依据《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366—2005)^[1](以下简称《规范》)附录 B 进行计算三种方式。由于单位长度换热量是通过热响应试验取得数据后经计算整理、修正而来,其精确度受测试仪器、测试条件及数据处理方式的影响较大,而且这方面的工作也没有统一的规范和标准,因此一般不适宜用于较大项目的地埋管换热器设计计算;专业软件模拟能较为全面地还原地源热泵系统实际运行工况,能计算出在多年的运行时段内循环液温度及土壤温度的变化趋势^[2],从而有效地指导地源

热泵系统设计,但由于软件模拟过程相对复杂,专业软件的成本及可能所需的计算机硬件成本使其应用范围也受到了一定的限制。

《规范》作为目前指导地源热泵工程设计和施工最重要的规范,在其第 4.3.5 条中明确指出“竖直地埋管换热器的设计也可按规范附录 B 的方法进行计算”。笔者于 2008 年进行某大型工程地埋管换热器设计时,按照“附录 B”所给出的方法进行了地埋管换热器的反复计算,同时参照相关文献对地层热阻计算模型的描述^[3-4],发现“附录 B”中对地层热阻 R_s 及由短期连续脉冲负荷引起的附加热阻 R_{sp} 的计算公式的表述存在一定的歧义,也不完整,在实际应用中会产生较大的误差甚至错误。

1 存在的问题

通用指数积分式 $E(z)$ 的定义如下^[5]:

①☆ 雷建平,男,1971 年 2 月生,大学,工学学士,高级工程师,高级程序员

430014 武汉市汉口四唯路 8 号武汉市建筑设计院设备所
(027) 82739215

E-mail:HVAC@163.com

收稿日期:2008-03-24

修回日期:2009-05-07

$$E(z) = \int_z^{\infty} \frac{e^{-s}}{s} ds \quad (1)$$

式中 z 为积分下限, $z > 0$; s 为积分变量。

地层热阻为从钻孔壁到无穷远处的热阻, 对单个钻孔的地层热阻, 《规范》附录 B 给出的算式如下:

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} I\left(\frac{r_b}{2\sqrt{a\tau}}\right) \quad (2)$$

$$I(u) = \frac{1}{2} \int_u^{\infty} \frac{e^{-s}}{s} ds \quad (3)$$

式(2)、(3)中 R_s 为地层热阻, $m \cdot K/W$; λ_s 为岩土体的平均导热系数, $W/(m \cdot K)$; r_b 为钻孔半径, m ; a 为岩土体的热扩散率, m^2/s ; τ 为运行时间, s 。依据《规范》的上下文, 积分下限 u 为 $r_b/(2\sqrt{a\tau})$, 则《规范》所采用的地层热阻计算式为

$$R_s = \frac{1}{4\pi\lambda_s} \int_{\frac{r_b}{2\sqrt{a\tau}}}^{\infty} \frac{e^{-s}}{s} ds = \frac{1}{4\pi\lambda_s} E\left(\frac{r_b}{2\sqrt{a\tau}}\right) \quad (4)$$

依据热传导理论的计算公式^[5]并参考相关文献中对地层热阻的表述^[3-4], 当采用式(4)的形式进行地层热阻计算时, 积分下限值应为 $r_b^2/(4a\tau)$, 则单个竖直钻孔地层热阻的正确计算式应为

$$R_s = \frac{1}{4\pi\lambda_s} \int_{\frac{r_b^2}{4a\tau}}^{\infty} \frac{e^{-s}}{s} ds = \frac{1}{4\pi\lambda_s} E\left(\frac{r_b^2}{4a\tau}\right) \quad (5)$$

在工程应用中, 对单孔地层热阻进行计算时, 钻孔半径 r_b 为 $0.055 \sim 0.075$ m; 岩土体的热扩散率 a 为 $0.49 \times 10^{-6} \sim 1.62 \times 10^{-6} m^2/s$; 由于《规范》主要参考了 IGSHPA(International Ground-Source Heat

$$E(z) = -\ln z - 0.577\,215\,66 + 0.999\,991\,93z - 0.249\,910\,55z^2 + 0.055\,199\,68z^3 - 0.009\,760\,04z^4 + 0.001\,078\,57z^5$$

当 $1 < z < \infty$ 时

$$\left. \begin{aligned} E(z) &= \frac{A}{2Bze^z} \\ A &= z^4 + 8.573\,328\,7z^3 + 18.059\,017z^2 + 8.637\,609z + 0.267\,773\,7 \\ B &= z^4 + 9.573\,322\,3z^3 + 25.632\,956\,1z^2 + 21.099\,653z + 3.968\,496\,9 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(7)、(8)也是目前数值计算中常用的计算式。

3 常用传热模型中对地层热阻的定义

IGSHPA 模型中将竖直单个钻孔换热器周围土壤的热阻 R_s 定义为^[3-4]

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} I(X) \quad (9)$$

Pump Association)模型来确定地埋管换热器的埋管长度, 该方法是以 Kelvin 线热源理论为基础, 以年最冷月和最热月负荷计算为依据来确定地埋管换热器尺寸的, 因此其计算运行的时间为一个月(最冷月或最热月)至一个制冷季(供暖季), 即 τ 为 $2\,592\,000 \sim 7\,776\,000$ s, 由此可知, $r_b/(2\sqrt{a\tau})$ 的值为 $7\,747.90 \times 10^{-6} \sim 33\,275.76 \times 10^{-6}$, 而 $r_b^2/(4a\tau)$ 的值为 $60.03 \times 10^{-6} \sim 1\,107.21 \times 10^{-6}$ 。表 1 为采用 MATLAB6.5 中指数积分函数计算得到的积分值。

表 1 积分值

$Z_1 = r_b/(2\sqrt{a\tau})/10^{-6}$	积分值 $E(Z_1)$	$Z_2 = r_b^2/(4a\tau)/10^{-6}$	积分值 $E(Z_2)$
7 747.90	4.291	60.03	9.144
20 511.83	3.330	420.74	7.123
33 275.76	2.859	1 107.21	6.230

由表 1 可见, 采用不同的积分下限值时, 积分值相差约一倍多, 因此有必要对《规范》中的算式进行更正, 明确其算法。

2 指数积分的计算

由于应用《规范》附录 B 要反复用到指数积分, 但《规范》中并没有给出指数积分的计算式, 根据相关数学公式, 当积分下限值 z 较小时, 指数积分 $E(z)$ 可按式(6)进行计算。

$$E(z) = \int_z^{\infty} \frac{e^{-s}}{s} ds = -\gamma - \ln z - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-z)^k}{k \times k!} \quad (6)$$

式中 γ 为欧拉常数, $\gamma = 0.577\,215\,66$ 。

MATLAB6.5 版中所用指数积分函数的计算表达式如下:

当 $0 < z \leq 1$ 时

$$X = \frac{r_b}{2\sqrt{a\tau}} \quad (10)$$

$$I(X) = \int_X^{\infty} \frac{e^{-s^2}}{s} ds \quad (11)$$

在式(11)中如果令 $s^2 = t$, 则 $I(X) = \int_{X^2}^{\infty} \left(\frac{e^{-t}}{\sqrt{t}}\right) d\sqrt{t} =$

$\int_{x^2}^{\infty} \left(\frac{e^{-t}}{\sqrt{t}} \frac{1}{2\sqrt{t}} \right) dt = \frac{1}{2} \int_{x^2}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt = \frac{1}{2} E\left(\frac{r_b^2}{4a\tau}\right)$, 因此 IGSHA 模型中单个钻孔的地层热阻公式与式(5)是完全相同的。

Ingersoll 模型^[3]中对竖直单个钻孔换热器周围土壤热阻的定义与 IGSHA 模型中的定义基本一样,如式(9),(10)所示,所不同的是,它没有给出 $I(X)$ 的定义,但给出了 $I(X)$ 的直接计算式,该式被国内多个文献引用^[6-7],具体可参阅相关资料。经简单变换可知,Ingersoll 模型中的直接计算式是基于式(7),(8),将 $z = X^2 = r_b^2/(4a\tau)$ 作为积分下限计算而来的,这也表明 Ingersoll 模型地层热阻的算法与式(4)是一样的。

需要指出的是,虽然《规范》中对 R_s 算式的定义有误,但如果将《规范》附录 B 中的算式与 Ingersoll 模型中所谓“指数积分” $I(X)$ 的直接计算式配套应用时,其计算结果也是正确的;建议《规范》中应给出 R_s 算式的正确定义,并给出 R_s 的直接计算式,否则,当工程应用中采用数学公式的定义,并按《规范》进行计算时,其误差就相当大了。

对于具有同样算法结构的多孔地层热阻及由短期连续脉冲负荷引起的附加热阻的计算式,也应作同样的修正,以满足工程设计的要求。

修正后的多个钻孔的地层热阻计算式为

$$R_s = \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left[E\left(\frac{r_b^2}{4a\tau}\right) + \sum_{i=2}^N E\left(\frac{x_i^2}{4a\tau}\right) \right] \quad (12)$$

式中 x_i 为第 i 个钻孔与所计算钻孔之间的距离, m。

短期连续脉冲负荷引起的附加热阻的计算式为

$$R_{sp} = \frac{1}{4\pi\lambda_s} E\left(\frac{r_b^2}{4a\tau_p}\right) \quad (13)$$

式中 τ_p 为短期连续脉冲负荷连续运行时间, s。

4 工程简化算式及应用分析

4.1 单个竖直钻孔的地层热阻 R_s 及由短期连续脉冲负荷引起的附加热阻 R_{sp}

如前所述,对于单个钻孔, $r_b^2/(4a\tau)$ 的值远小于 1,而 $r_b^2/(4a\tau_p)$ 的值也远小于 1, R_s 及 R_{sp} 的算式可进一步简化为

$$R = \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left(-\ln z - 0.577\,22 + z - \frac{z^2}{4} \right) \quad (14)$$

式中 $z = r_b^2/(4a\tau)$ 或 $r_b^2/(4a\tau_p)$ 。经程序反复验

证,采用式(14)计算 R_s 及 R_{sp} 时,其误差均不超过万分之一,因此完全可应用于工程计算。表 2 和表 3 给出了钻孔半径为 0.065 m 时不同计算条件下的 R_s 及 R_{sp} 值。

表 2 单个钻孔的地层热阻

导热系数 λ_s / (W/(m·K))	热扩散率 a / (10 ⁻⁶ m ² /s)	运行时间 τ /月	R_s / (m·K/W)	
			式(14)	式(4),(7),(8)
0.7	0.65	1	0.772 820	0.772 821
1.4	1.10	1	0.416 299	0.416 300
2.3	1.62	1	0.266 789	0.266 789
0.7	0.65	3	0.897 665	0.897 666
1.4	1.10	3	0.478 732	0.478 732
2.3	1.62	3	0.304 794	0.304 794

表 3 短期连续脉冲负荷引起的附加热阻

导热系数 λ_s / (W/(m·K))	热扩散率 a / (10 ⁻⁶ m ² /s)	运行时间 τ_p /h	R_{sp} / (m·K/W)	
			式(14)	式(4),(7),(8)
0.7	0.65	8	0.498 397	0.498 398
1.4	1.10	8	0.278 938	0.278 939
2.3	1.62	8	0.111 871	0.111 871
0.7	0.65	15	0.569 485	0.569 486
1.4	1.10	15	0.314 559	0.314 559
2.3	1.62	15	0.204 839	0.204 840

4.2 地层热阻的计算分析

《规范》给出的竖直埋管换热器热阻由 5 部分构成,分别为传热介质与 U 形管内壁的对流换热热阻 R_l 、U 形管的管壁热阻 R_{pe} 、钻孔灌浆回填材料的热阻 R_b 、地层热阻 R_s 及由短期连续脉冲负荷引起的附加热阻 R_{sp} 。其中地层热阻的计算相当复杂,要求计算孔群内每个钻孔受其他钻孔影响时的地层热阻,而每个钻孔的地层热阻由两部分构成,其中一部分由钻孔本身的热扰产生,可按式(4)进行计算,记为 R_{s1} ,这也是按正常 4~5 m 的间距进行埋管时地层热阻的主要部分;另一部分为孔群内其他钻孔的综合热扰而产生的热阻,记为 R_{s2} ,按式(15)计算。

$$R_{s2} = \frac{1}{4\pi\lambda_s} \sum_{i=2}^N E\left(\frac{x_i^2}{4a\tau}\right) \quad (15)$$

表 4 为借助自编计算机程序在一定计算条件下得到的不同规模孔群的各项热阻值及分布情况,计算条件为:竖直埋管为双 U 形、PE 管规格 De25×2.3,管材导热系数 0.42 W/(m·K),管内水的流速 0.48 m/s,钻孔半径 0.075 m,孔距 4.5 m,短期脉冲负荷的运行时间 8 h,回填材料的平均导热系数 $\lambda_b = 2.1$ W/(m·K),岩土的平均导热系数 $\lambda_s = 1.4$ W/(m·K),热扩散率 1.1×10^{-6} m²/s,运行份额 F 取 0.25(运行时间为 1 个月时)和 0.2(运行时间为 3 个

月时)。表中“最大值”是指受孔群干扰最大钻孔的 R_{s2} 值,该孔位于孔群的中心处;“最小值”是指受孔群干扰最小钻孔的 R_{s2} 值,该孔位于孔群矩阵的四个角落,而“平均值”是孔群中所有钻孔 R_{s2} 值的算术平

均值,用来计算整个孔群的平均热阻。表 5 列出了在不同的钻孔间距下, R_{s2} 值的变化趋势及在不同计算条件下所占地埋管换热器总热阻的比例。分析表 4、5 的数据,可以得出以下基本结论:

表 4 竖直埋管换热器分项热阻计算分析

孔群矩阵(M×N)		5×5	15×15	30×30	5×5	15×15	30×30
运行时间 τ		1 个月	1 个月	1 个月	3 个月	3 个月	3 个月
		(F=0.25)	(F=0.25)	(F=0.25)	(F=0.2)	(F=0.2)	(F=0.2)
水与管壁 R_f	热阻/(m·K/W)	0.006 7	0.006 7	0.006 7	0.006 7	0.006 7	0.006 7
	份额/%	1.96	1.95	1.95	1.83	1.79	1.78
U 形管管壁 R_{pc}	热阻/(m·K/W)	0.036 6	0.036 6	0.036 6	0.036 6	0.036 6	0.036 6
	份额/%	10.69	10.65	10.64	9.97	9.78	9.73
灌浆回填 R_b	热阻/(m·K/W)	0.083 3	0.083 3	0.083 3	0.083 3	0.083 3	0.083 3
	份额/%	24.32	24.24	24.22	22.70	22.26	22.15
地层 R_{s1}	$R_{s1} \times F$ 热阻/(m·K/W)	0.100 0	0.100 0	0.100 0	0.092 5	0.092 5	0.092 5
	份额/%	29.20	29.10	29.08	25.20	24.72	24.60
地层 R_{s2}	$R_{s1}/(m \cdot K/W)$	0.400 0	0.400 0	0.400 0	0.462 5	0.462 5	0.462 5
	$R_{s2} \times F$ 热阻/(m·K/W)	0.005 9	0.007 0	0.007 3	0.030 5	0.037 7	0.039 5
	份额/%	1.72	2.04	2.12	8.31	10.07	10.51
	平均/(m·K/W)	0.023 5	0.027 9	0.029 0	0.152 7	0.188 3	0.197 6
	最大/(m·K/W)	0.030 1	0.030 1	0.030 1	0.206 8	0.207 0	0.207 0
	最小/(m·K/W)	0.014 1	0.014 1	0.014 1	0.087 6	0.087 6	0.087 6
脉冲 R_{sp}	$R_{sp} \times (1-F)$ 热阻/(m·K/W)	0.110 0	0.110 0	0.110 0	0.117 4	0.117 4	0.117 4
	份额/%	32.11	32.02	31.99	31.99	31.38	31.23
	$R_{sp}/(m \cdot K/W)$	0.146 7	0.146 7	0.146 7	0.146 7	0.146 7	0.146 7
热阻总计	热阻/(m·K/W)	0.342 5	0.343 6	0.343 9	0.367 0	0.374 2	0.376 0
	份额/%	100	100	100	100	100	100

表 5 不同埋管间距下 $R_{s2} \times F$ (R_{s2} 为平均值)所占总热阻的份额

运行时间 τ 矩阵内孔距/m		孔群矩阵(M×N)					
		5×5		15×15		30×30	
		$R_{s2} \times F/(m \cdot K/W)$	份额/%	$R_{s2} \times F/(m \cdot K/W)$	份额/%	$R_{s2} \times F/(m \cdot K/W)$	份额/%
1 个月 (F=0.25)	2	0.058 2	14.74	0.074 6	18.14	0.078 9	18.99
	3	0.018 3	5.16	0.022 1	6.16	0.023 2	6.45
	4	0.005 9	1.72	0.007 0	2.04	0.007 3	2.12
	5	0.001 8	0.53	0.002 1	0.62	0.002 2	0.65
	6	0.000 5	0.15	0.000 6	0.18	0.000 6	0.18
	7	0.000 1	0.03	0.000 1	0.03	0.000 1	0.03
3 个月 (F=0.20)	2	0.146 6	30.35	0.217 3	39.24	0.237 2	41.35
	3	0.065 3	16.25	0.086 1	20.37	0.091 6	21.40
	4	0.032 1	8.71	0.040 2	10.67	0.042 3	11.17
	5	0.016 6	4.70	0.020 2	5.66	0.021 1	5.90
	6	0.008 7	2.52	0.010 4	3.00	0.010 8	3.11
	7	0.004 5	1.32	0.005 3	1.55	0.005 6	1.64

1) U 形管的管壁热阻、钻孔灌浆回填材料的热阻、地层热阻中单孔自扰热阻和由短期连续脉冲负荷引起的附加热阻为构成换热器热阻的主要部分,这 4 项约占总热阻的 90%。

2) 当钻孔间距恰当时,孔群内钻孔之间互扰的作用有限,且热扰叠加作用的距离在 25 m 以内;在工程计算中可仅考虑 25 m 范围内钻孔之间的相互干扰。

3) 在工程应用中,当钻孔孔距超过 5 m 时,可忽略孔群热扰叠加的影响。

4) 当采用可靠的热平衡措施时,钻孔之间的距离不宜大于 5 m,以节省土地资源;当钻孔总数少于 25 时,钻孔间距可取《规范》推荐值的下限,即 3 m,一般情况下,钻孔间距不应小于 4 m。

5 结语

(下转第 21 页)

调季节利用水源热泵机组供冷的同时供应生活热水,既提高了地源热泵系统综合运行效率,又降低了排至地下的地下水的温度。根据工程特点及实际的生活热水需求,也可选用部分热回收或全部热回收的水源热泵机组,既满足工程的实际需要,又能够提高地源热泵系统的运行效率。如图 2 所示,当同时使用空调冷水和生活用热水时,V3,V4,V7,V8 阀关闭,V1,V2,V5,V6 阀开启,机组同时提供生活用热水(65℃)和空调用冷水(7℃)。根据其他需要可开启机组和相应的阀门,提供冷水或热水。

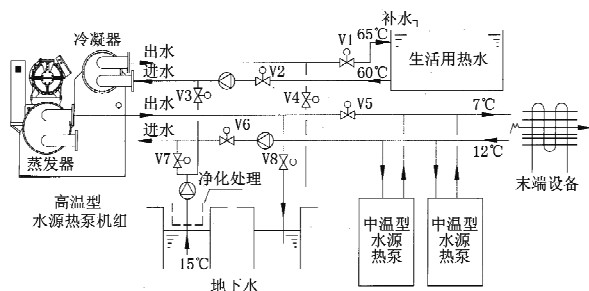


图 2 地源热泵供冷供热组合系统示意图

使用 R22 工质的水源热泵机组,冬季供热时出水温度一般能接近 50℃,这在空间高度不大的办公、住宅等建筑中使用是能够满足室内供热温度要求的,但在高大空间的会议、博览、体育、车站、机场建筑中使用,就很难达到供热舒适性要求。此时,就应该选择采用 R134a 或 R407C 工质的中高温型水源热泵机组,机组供热时的出水温度可达到

(上接第 30 页)

5.1 出于希望《规范》中的定义严密、完整和具备可操作性的目的,依据《规范》,并参考了国内外相关理论、模型的研究,对《规范》所提出的计算式进行了更正,并给出了适用于工程计算的算式。

5.2 《规范》给出的地埋管换热器热阻计算方法与 IGSHA 模型及相关文献中的计算方法有较大的不同,尤其是增加了“短期连续脉冲负荷引起的附加热阻”这一项,由前面的分析计算可知,这项热阻所占的比例很大,超过了 30%。而根据相关资料,流行于北美地区基于 IGSHA 模型计算的埋管长度可能会比实际需要偏大 10%~30%,而《规范》增加了这一较大的附加热阻后,可能会使地埋管换热器的长度变得更大,对地埋管的经济性和初投资会产生不利影响,因此《规范》在修编时应有更为详

60℃或更高。但随着机组出水温度的升高,机组的冷凝压力会相应升高,机组的能效比会大幅下降,因此应因工程而异,选择合适的机组出水温度,不应盲目地将机组出水温度提得太高。

模块式水源热泵机组因其使用方便、安装灵活得到了一定程度的应用,但各地地下水水质的差异会对其板式换热器造成不同程度的腐蚀和损害,因此,建议实际工程中尽量慎重采用,或对地下水进行有效处理,原则上大容量的机组最好还是选择螺杆式或离心式水源热泵机组。

水源热泵机组应有性能优异、动作可靠的自动控制 and 能量调节系统,既提高系统运行的自动化水平,又能进行较好的负荷跟踪和能量调节。另外,机组的减振设计和防腐设计也不可忽略,否则长期运行性能和外观形象会大打折扣。

5 结语

地下水地源热泵系统充分利用地下水储热量大、换热效果好的特点,在对特定工程地下水水文地质资料进行详细勘察和水文试验的前提下,做好热源井群及地下水地源热泵空调系统的设计,既能够满足建筑物空调舒适性要求,又能充分提高地下水地源热泵系统运行的经济性和可靠性,带来极大的社会效益和经济效益。在对地下水地源热泵工程实际运行经验总结的基础上,条件许可时应大力推广其实际工程应用,为我国可再生能源利用和节能减排事业作出其独特的积极贡献。

细的说明。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005
- [2] 徐伟. 中国地源热泵发展研究报告(2008)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008
- [3] 余延顺. 土壤耦合热泵系统地下埋管换热器传热模型的研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 26-31
- [4] Signhild E A, Gehlin G H. Comparison of four models for thermal response test evaluation[G] // ASHRAE Trans, 2003, 109(1): 131-142
- [5] 张洪济. 热传导[M]. 北京:高等教育出版社, 1992: 305-306
- [6] 刁乃仁. 地埋管地源热泵技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 15-17
- [7] 马最良. 地源热泵系统设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 136-138