

基于温差电池的温室地埋供热金属管道阴极保护改进

王立舒, 李欣然, 苏继恒, 张旭, 孙士达

(东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 北方温室为种植反季节植物以及南方植物, 普遍采用地埋供热金属管道供热。阴极保护技术可以有效控制土壤对管道的电化学腐蚀, 但常规的外接电流阴极保护方式成本高、占地大, 牺牲阳极方式的保护寿命过短。为了给温室地埋供热金属管道提供可靠的阴极保护, 该文利用地埋供热金属管道表面余热, 基于温差电池, 对地埋供热金属管道提供外接电流方式的阴极保护。通过现场试验发现, 该装置温差电池正常工作时冷热两端温差为 33.2 °C, 当该装置提供的保护电位为 -1 100 mV 时, 管道保护度达到了 92.79%。该研究为温室地埋供热金属管道的保护提供了一种较为可行的方案, 同时也对外接电流方式的短距离管道保护技术进行了初步探索。

关键词: 温度; 发电; 温差; 能量转换; 阴极保护

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.025

中图分类号: TM913

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-19-0195-07

王立舒, 李欣然, 苏继恒, 张旭, 孙士达. 基于温差电池的温室地埋供热金属管道阴极保护改进[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 195—201. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.025 http://www.tcsae.org

Wang Lishu, Li Xinran, Su Jiheng, Zhang Xu, Sun Shida. Improvement of cathodic protection of greenhouse buried heat-supply metal pipeline based on thermoelectric cell[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 195—201. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.025 http://www.tcsae.org

0 引言

以运输石油、热水、天然气为主的管道运输已经成为国民经济的命脉^[1-2], 但在运输过程中管道会发生腐蚀导致泄漏, 造成经济损失以及环境污染。当前的管道腐蚀影响因素众多, 如温度因素、土壤环境变化因素等。地埋金属管道的主要防护措施之一就是阴极保护, 能够保障管道运输的可靠性^[3]。为了缓解管道腐蚀速度, 在地埋金属管道布置期间, 普遍采取管道外防腐绝缘层与阴极保护联合使用的方式^[4-5], 这是经济性最好、最为合理的防腐蚀措施。阴极保护能够让金属不必遭受环境介质(如土壤)的腐蚀, 也就是使用牺牲阳极材料或者辅助阳极材料的腐蚀来对被保护部分的腐蚀进行替代^[6-8], 进一步延长被保护管道的使用寿命, 使安全性与经济性得以提高。

阴极保护的方法主要有 2 种: 一是比较常规的牺牲阳极的阴极保护^[9], 但是阳极在土壤中逐渐会被钝化层包裹, 失去牺牲阳极的保护效果, 且阳极材料本身也会不断消耗, 需要经常更换^[10-11]; 二是外接电流的阴极保护, 中国曾经在西气东输工程中使用以天然气为燃料的温差电池作为输气管道阴极保护电源^[12], 但目前的外接电流保护方式只适用于长距离管道, 需要较高的驱动电压, 占地面积大, 设备昂贵^[11]。如苗圃实验室的地埋供热金属管道, 温室蔬菜大棚的地埋供热金属管道等需要保护的管道过短, 无法使用常规的外接电流阴极保护方式。

因此本文提出了一种基于温差电池, 以地埋供热金

属管道表面热量作为热源, 以土壤自然冷却作为冷端散热方式的阴极保护系统, 对地埋供热金属管道进行外接电流方式的阴极保护。最后通过试验, 对装置提供的保护度进行测试研究。

1 阴极保护原理及温差发电装置设计

1.1 阴极保护原理

环境介质会使金属发生反应, 从原子变为离子, 也就是不断的失去电子, 这一过程称为腐蚀。如果给金属补充大量电子, 使被保护的金属电子过剩, 金属不易变成离子, 这就是阴极保护技术^[11]。温室使用的地埋供热金属管道过短, 如果选择外接电流方式的阴极保护, 需要的电能很微弱, 电能的大量消耗会导致管道析氢断裂^[11], 所以使用温差电池作为外接电源是一个理想的选择。

1.2 温差阴极保护系统组成

温差电池以半导体材料的塞贝克效应为基础, 能够实现热能向电能的转换^[13-14]。温差电池的电学性能与直流电源相同, 内阻不会随着两端温差变化而明显变化^[15], 在阴极保护系统中温差电池具有很好的稳定性^[15-16]。

温差阴极保护系统由温差能量收集器、最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)电路、稳压电路和阴极保护部分组成, 系统结构见图 1。

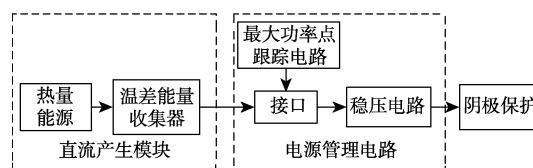


图1 温差阴极保护系统框图

Fig.1 Block diagram of cathodic protection system based on thermoelectric generation

收稿日期: 2018-03-26 修订日期: 2018-08-12

基金项目: 黑龙江省教育厅科技课题(12521038)

作者简介: 王立舒, 教授, 博士, 博导。研究方向为农业电气化与自动化; 电力新能源开发与利用。Email: wanglishu@neau.edu.cn

实际应用中需要根据应用场所的大小以及所需电量来决定系统使用的温差电池数量。该系统将温差电池采集到的能量通过 MPPT 电路进行高效管理,再经过稳压电路输出,对温室内的地埋供热金属管道进行外接电流方式的阴极保护。

1.3 温差电池供电试验与分析

为了验证通过地埋供热金属管道与周围土壤间的温差转换出的电能供给管道进行阴极保护的可行性,于 2018 年 1 月 28 日进行了实地试验,试验场所为黑龙江省齐齐哈尔市泰来县宏程村明欣蔬菜合作社 (N46°40', E123°46')。

该合作社共有 5 座温室,每座温室间隔 10 m,各座温室之间的土壤下埋有供热金属管道以及回水管道,管道埋于地下 1.5 m 深处。该温室的地埋供热金属管道热水来自于附近的生物质能发电厂,一年四季都持续稳定供应。温室地埋供热金属管道具体参数如表 1 所示。

表 1 温室地埋供热金属管道参数

Table 1 Parameters of greenhouse buried heat-supply metal pipeline

参数 Parameter	数值 Value
材质 Material	Q235 钢
内径 Inside diameter/mm	107
外径 External diameter/mm	127
地埋深度 Depth of burial/m	1.5
水温 Water temperature/℃	57~68

注:数据来源于工程参数。

Note: Data is derived from engineering parameters.

根据塞贝克效应,当半导体组件两端存在温差时,组件即可产生持续的直流电能,并且组件两端的温差越大,所产生的直流电能越大^[17-19]。本文选择的温差电池型号为 SP1848-27145,该温差电池由碲化铋材料制成,是目前应用较普遍的类型。

本文首先对温差电池两端的温度进行测量,该试验在温室外进行,试验时间为当天的 12:00。试验中将一段底边长度为 900 mm 的 Q235 钢弯管横穿过装满温室土壤的塑料桶,在管道上包裹一层保温层,将采用的 SP1848-27145 型号温差电池嵌入于保温层内,热端与金属管道直接接触。温差电池热端与金属管之间缝隙填入导热硅胶,之后将包裹住温差电池四周的保温层进行密封处理。温差电池冷端通过导热硅胶与铝制散热片贴合^[20-21],散热片与土壤充分接触,对温差电池冷端进行散热。将温度计的金属探头埋于保温层内,实时测量钢管的表面温度,另一温度计金属探头插入散热片贴近温差电池冷端的位置,实时测量温差电池冷端温度。同时为了测量温差电池的实际输出,在两片温差电池串联后,通过导线连接万用表,测量温差电池的开路电压以及内阻。试验装置如图 2a 所示。

试验时用土壤将钢管充分掩埋后,从钢管向上弯曲的一端开始持续灌入 68 ℃ 的热水,钢管出水口安装有出水阀门,可以控制钢管出水量。钢管注入的水温,以及钢管出水口的水温定时通过温度计检测,保证钢管中的水温至少达到 57 ℃。测量试验如图 2b 所示。



a. 测量装置

a. Measurement device



b. 测量试验

b. Measurement test

图 2 温差测量装置与试验

Fig.2 Measurement device and test of temperature difference

试验中分别在注水 0、1、5、10、15、20、25 和 30 min 时测出温差电池工作时的两端温度。测量结果如表 2 所示。

表 2 温差电池两端温度

Table 2 Temperature at both ends of thermoelectric cell

时间 Time/min	冷端 Cold end/℃	热端 Hot end/℃
0	-9.4	-5.4
1	-8.7	9.2
5	-6.2	31.9
10	-3.9	34.9
15	2.0	35.1
20	2.1	35.3
25	2.3	35.1
30	2.3	35.4

在实际测量中发现,10 min 时,温差电池热端温度已经开始趋于稳定。20 min 时,冷热两端温差基本保持不变,两端温差为 33.2 ℃。通过对温室室内裸露供热金属管道表皮温度以及管道周围温室土壤温度进行测量,管道表皮温度为 53.4 ℃,温室内土壤温度为 20.1 ℃,二者温差为 33.3 ℃。该数据证明供热金属管道与周围土壤之间能够达到 33.2 ℃ 的温差,所以取试验 20 min 时的测量数据较为可靠,可以作为温差电池正常工作时的两端温差。

通过万用表测量出串联的两片温差电池在正常工作时的开路电压与内阻, 算出平均值, 得出单片温差电池在实际工作时的数值。在 20 min 时, 单片温差电池开路电压为 1.248 V, 内阻为 2.12 Ω 。使用该组数据作为电路设计时的仿真参数。

1.4 温差电池性能参数

温差电池的性能主要指在冷热两端之间具有温度差以及连接有负载情况下的电输出性能^[22]。开路电压、伏安特性、输出功率、热电转换效率等参数是描述温差电池性能的主要参数^[23]。而输出功率与热电转换效率则是众多参数中评述温差电池性能的最重要的 2 个参数。因为本文装置设计是为了给阴极保护提供足够直流电能, 所以主要对输出功率进行研究, 对温差电池进行一维分析就足够满足设计需求^[23]。

1.4.1 伏安特性

根据塞贝克效应, 温差电池的开路电压, 即为回路中的塞贝克电动势。

$$E = n[\alpha(T_h - T_c)] \cdot \mu \quad (1)$$

式中 E 为塞贝克电动势, V; n 表示温差电偶对的串联个数; α 为塞贝克系数, V/K; T_h 为温差电池热端温度, K; T_c 为温差电池冷端温度, K。

因为本装置在实际应用中, 温差电池与钢管间隙使用导热硅脂填充, 会有一定的损耗, 所以存在导热效率 μ , μ 在 0~1 区间取值。

当温差电池串联外接负载电阻 R_L 时, 温差电池内阻 r 和外接负载电阻 R_L 串联支路两端就会外加塞贝克电动势 E , 负载电阻 R_L 两端的电压即为实际的输出电压 U 。

$$U = n \cdot \alpha(T_h - T_c) \frac{R_L}{R_L + r} \cdot \mu \quad (2)$$

式中 R_L 为负载电阻, Ω ; r 为温差电池内阻, Ω 。

回路中的输出电流 I 表达式见式 (3)。

$$I = \frac{E}{R_L + r} = n \cdot \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R_L + r} \cdot \mu \quad (3)$$

1.4.2 输出功率

温差电池串联外接负载电阻 R_L 后, 根据式 (1) 和式 (2) 得出输出功率 P_{out} 的表达式见式 (4)。

$$P_{out} = U \cdot I = I^2 R_L$$

$$P_{out} = n^2 \cdot \frac{\alpha^2 (T_h - T_c)^2 R_L}{(R_L + r)^2} \cdot \mu^2 \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 当温差电池内阻 r 与负载电阻 R_L 数值相等时, 输出功率为最大值。温差电池提供给负载的最大输出功率 $P_{out(max)}$ 见式 (5)。

$$P_{out(max)} = n^2 \cdot \frac{\alpha^2 (T_h - T_c)^2 \mu^2}{4R_L} \quad (5)$$

2 阴极保护电路设计方案

2.1 温差电池管理电路设计

基于温差电池的温室地埋供热金属管道阴极保护系

统的能量采集和管理电路主要是由芯片 BQ25504、LM317 以及它们相应的外围电路构成。能量采集芯片 BQ25504 和降压稳压芯片 LM317 一起实现了能量的高效利用和管理使用的多重功能。

在本文中, BQ25504 芯片能够以超低功耗从温差电池中提取能量, 通过电阻比例分压法实现 MPPT 功能, 对能量进行高效管理。LM317 芯片仅需两个外接电阻来设置输出电压, 使用简单, 负载调整率较好。

温差电池的输出电压与两端温差成正比关系, 但由于热电材料自身的限制, 产生的电动势很小^[24]。因此为获得本试验使用的 BQ25504 芯片所需输入电压(限制 5V 以下), 将 3 片型号为 SP1848-27145 的温差电池串联为一组, 这种连接方式在外界温度波动时, 会留有一定裕度。同时为了提高发电量再将两组并联, 共 6 片温差电池为后端提供直流电能, 进行阴极保护。

2.2 最大功率点跟踪功能电路设计

MPPT 是一种对发电装置所产生的电能最大化利用的技术^[25-26]。通过对电气模块的调节, 改变温差电池的输出电压与开路电压的比值, 从而实现最大化的功率输出。根据式 (5) 可以得知, 当温差电池输出的电压为开路电压的一半时, 温差电池输出了最大功率。DC/DC 转换器开关频率的动态改变可以实现对温差电池最大功率的提取, 因此本文采用了 BQ25504 芯片^[27], 通过该芯片设置温差电池输出电压为开路电压的 50%, 就能实现温差电池的最大功率输出。

图 3 为温差阴极保护系统的整体电路图, 在电压输入引脚 VIN_DC 和采样引脚 VOC_SAMP 处分别连接分压电阻 R_1 、 R_2 。VIN_DC 引脚通过 R_1 接 VOC_SAMP 引脚, VOC_SAMP 引脚通过 R_2 接地^[27]。温差电池的电压输出端为 VIN_DC 引脚, 通过 R_1 和 R_2 分压, 实现了 MPPT 功能, VOC_SAMP 引脚电压见式 (6)。

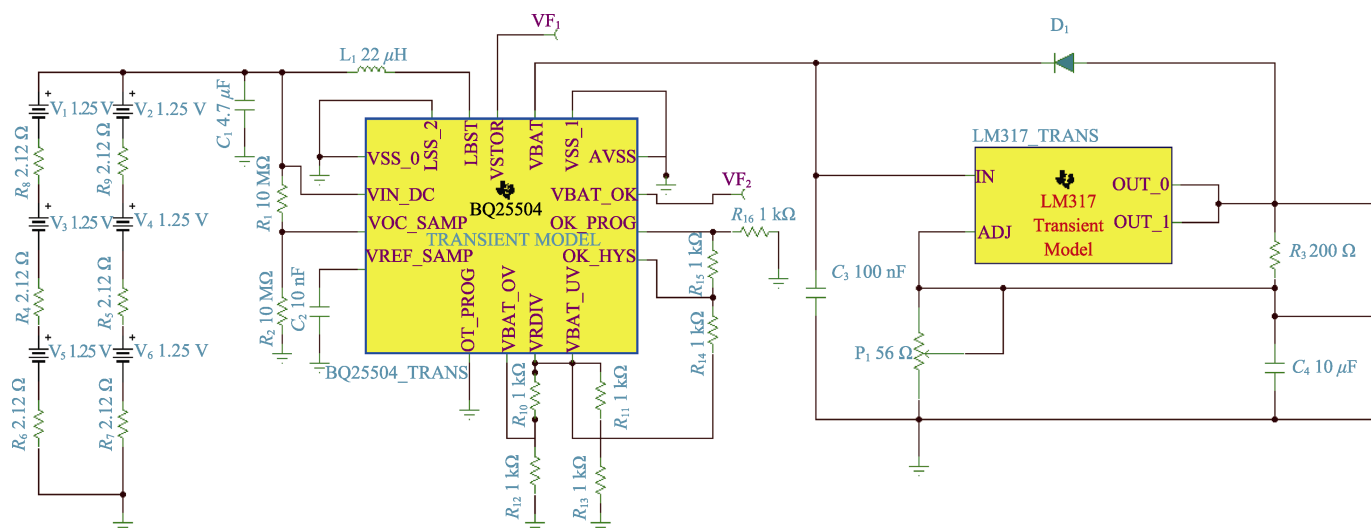
$$V_{VOC_SAMP} = V_{IN} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (6)$$

式中 V_{VOC_SAMP} 为 MPPT 采样电压, V; V_{IN} 为输入电压, V。

由式 (5) 和式 (6) 可知, 当输入电压为开路电压一半时, 此时实现了温差电池的最大功率点跟踪。所以根据 BQ25504 的芯片手册, R_1 和 R_2 的阻值选择 10 M Ω 。

本设计中所采用的 BQ25504 芯片每 16 s 采样 1 次 VOC_SAMP 的电压值^[27], 芯片能够将温差电池的输出电压控制在采样值附近, 保证在温差电池的输出功率变化的情况下, 可以短时间内对温差电池输出的最大功率点进行准确跟踪, 实现电能的高效采集。BQ25504 的其他引脚是用来设置外接电容的低压和过压阈值, 本设计中使用 BQ25504 只是为了它的 MPPT 功能, 通过 VBAT 端对后续电路进行直接供电, 所以其他引脚只是外接电阻之后接地。

温差阴极保护系统的电路仿真过程中选用了 TINA-TI 软件。将实际测量出的 33.2 $^{\circ}\text{C}$ 温差下的温差电池开路电压与内阻参数输入仿真软件中, 得到 BQ25504 空载输出的仿真结果, 进行仿真后得到的 BQ25504 芯片的空载输出电压为 3.69 V, 如图 4 所示。



注: $R_1 \sim R_{16}$ 为电阻, Ω ; L_1 为电感, μH ; $C_1 \sim C_4$ 为电容, μF ; D_1 为二极管; V_{F1} 、 V_{F2} 为正向电压, V; P_1 为滑动变阻器, Ω 。
Note: $R_1 \sim R_{16}$ is resistance, Ω ; L_1 is inductance, μH ; $C_1 \sim C_4$ is capacitance, μF ; D_1 is diode; V_{F1} and V_{F2} are forward voltage, V; P_1 is slide rheostat, Ω .

图 3 整体电路图
Fig.3 Whole circuit diagram



图 4 BQ25504 仿真输出
Fig.4 Simulation output of BQ25504



图 5 LM317 仿真输出
Fig.5 Simulation output of LM317

2.3 稳压电路设计

根据塞贝克原理可知,温差电池的电压输出会受到冷热两端温度变化的影响^[13]。实际应用中,冷热两端温度难以保证恒定不变,所以在温差供电系统中需要使用稳压电路。本文采用 LM317 作为可调稳压器。

LM317 可以为低电压电路提供稳压电源,该芯片的输出电压准确度较高,而且输出电压的纹波较低,输出范围为 1.25~37 V。仿真得到的 BQ25504 芯片的空载输出电压为 3.69 V,根据 LM317 的特性,输出比输入电压至少小 2 V。同时也是根据管道阴极保护方面专家的实际经验,在内蒙古采用过 1.6 V 的恒定电位输出进行远距离管道阴极保护,其效果良好。所以本装置降压电压输出设置为 1.6 V。根据芯片手册查找,LM317 芯片的输出电压表达式见式 (7)。

$$V_{\text{out}} = V_{\text{FB}} \cdot \left(1 + \frac{R_p}{R_3} \right) \quad (7)$$

式中 V_{FB} 为基准电压, V; R_p 为滑动变阻器阻值, Ω 。

根据芯片手册, LM317 的基准电压为 1.25 V, 因此取 R_p 为 56 Ω , R_3 为 200 Ω 。最终装置的空载输出电压为 1.59 V, 如图 5 所示。

3 阴极保护实地试验

本装置采用温差电池将热能转换为电能,电能通过 BQ25504 的 MPPT 接口实现电功率的最大化利用,再经过降压稳压芯片 LM317 进行稳压,最后输出端通过导线外接地埋供热金属管道以及地埋金属构建的阳极床,对管道实现阴极保护^[11]。

为了验证该装置在实际中的应用情况,本试验使用装有热水的烧杯作为热源,对一段 700 mm 长的 Q235 材质的温室地埋供热金属管道提供阴极保护。

温差电池热端与烧杯之间涂有导热硅脂,温差电池冷端则是与涂满导热硅脂的散热片相连。将两片温差电池串联作为电源,为本文设计的温差阴极保护装置进行供电。通过实际测量与计算得出,当水温为 87 $^{\circ}\text{C}$ 时,两片温差电池的输出功率为 0.46 W,能够等效 33.2 $^{\circ}\text{C}$ 温差下工作的 6 片温差电池输出。因此,实际检验中使用热水作为热源。

在阴极保护试验中将一段长 700 mm 的 Q235 供热金属管道埋入温室土壤中。在被保护管道的水平距离 0.1 m 处埋入一根长度相同的废钢条作为阴极保护中的阳极床。保护装置的负极通过导线与需要保护的管道相连接,

正极导线与阳极床相连接。阴极保护中, 金属是否得到保护需要通过饱和硫酸铜参比电极进行测量, 在硫酸铜电极内注入清水, 摇晃均匀, 保持有晶体析出的饱和状态, 电极底端木质透气塞用清水浸湿, 埋入被保护金属附近的土壤当中。饱和硫酸铜参比电极所带线夹夹住万用表黑线一端, 万用表红线一端放在被保护金属体上, 进行电位测量。

根据中华人民共和国现行的《SY-T 0036-2016_埋地钢制管道强制电流阴极保护设计规范》, 新建管道阴极保护电位应在 $-0.85 \sim -1.25$ V 之间。如图 6 所示, 阴极保护装置已经生效, 保护电位低于 -0.85 V, 金属管道处于阴极保护状态^[11]。



图 6 阴极保护试验

Fig.6 Cathodic protection test

为了检验该装置提供保护电位为多少时才能对管道提供最高的保护度, 试验中将供热钢管切割成 9 份 20 mm 长的半圆钢环, 通过砂纸对试样打磨除锈, 在当前功率下, 通过调整阳极床埋置的水平距离, 改变接地阻抗, 分别在无保护、 -900 、 -950 、 $-1\ 000$ 、 $-1\ 050$ 、 $-1\ 100$ 、 $-1\ 150$ 、 $-1\ 200$ 和 $-1\ 250$ mV 保护电位条件下, 埋在土壤中自然腐蚀 90 d, 最终阴极保护试样结果如图 7 所示。



注: 从左到右顺次为无保护、 -900 、 -950 、 $-1\ 000$ 、 $-1\ 050$ 、 $-1\ 100$ 、 $-1\ 150$ 、 $-1\ 200$ 和 $-1\ 250$ mV 保护电位下的试样腐蚀结果。

Note: From left to right is the sample corrosion results of unprotected, -900 , -950 , $-1\ 000$, $-1\ 050$, $-1\ 100$, $-1\ 150$, $-1\ 200$ and $-1\ 250$ mV protection potentials.

图 7 阴极保护试样结果

Fig.7 Sample results of cathodic protection test

自然腐蚀 90 d 后的试样经过水洗, 清理试样腐蚀产物, 干燥后测量质量损失, 最后通过试样腐蚀速率的计算^[28], 得出具体的保护度^[29]。由表 3 可见, 装置在提供的保护电位为 $-1\ 100$ mV 时能取得最好的保护效果。当保

护电位达到 $-1\ 150$ mV 时, 因为电压过高, 试样出现析氢现象^[30], 破坏试样表面, 并且随着电压的继续升高, 保护度逐渐降低。

表 3 不同保护电位试验结果

Table 3 Test results of different protective potentials

阳极床水平距离 Horizontal distance of anode bed / m	保护电位 Protection potential/mV	平均腐蚀速率 Average corrosion rate/(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	保护度 Protective property/%
无	无	0.0583	0.00
0.08	-900	0.0173	70.32
0.45	-950	0.0146	74.95
0.73	$-1\ 000$	0.0079	86.44
1.02	$-1\ 050$	0.0051	91.25
1.69	$-1\ 100$	0.0042	92.79
2.14	$-1\ 150$	0.0075	87.13
2.71	$-1\ 200$	0.0090	84.56
3.43	$-1\ 250$	0.0122	79.07

4 结 论

本文提供了一种基于温差电池的埋地供热金属管道阴极保护系统, 通过对温差电池的性能参数分析, 选用了电阻比例分压法作为最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)的控制方法。通过选择 BQ25504 以及 LM317 芯片, 设计相关外围电路, 构建了一个完整的温差自供电系统。并且通过试验, 证明了埋地供热金属管道作为热源提供能量的可行性, 测量出了该保护系统的实际工作温差, 并且通过仿真得出了输出数据, 最后通过实际试验验证, 得出以下结论:

1) 本文提出了使用温差发电原理改进温室埋地供热金属管道阴极保护的思想, 以 BQ25504 为核心的电路, 提供较为稳定的保护电位, 使系统具备启动电压低及最大功率点输出的优点。通过管道的温差测量试验证明了温差电池作为短距离管道的阴极保护电源的可行性。

2) 对温差阴极保护系统进行了不同电位下的阴极保护试验。在水平埋置的阳极床与保护管道水平距离为 1.69 m 时, 装置提供的保护电位为 $-1\ 100$ mV, 对管道的保护度达到了 92.79%, 该保护度已经满足了实际应用中的阴极保护标准要求。

[参 考 文 献]

- [1] 杨理践, 耿浩, 高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1736—1746.
Yang Lijian, Geng Hao, Gao Songwei. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736—1746. (in Chinese with English abstract)
- [2] 严琳, 赵云峰, 孙鹏, 等. 全球油气管道分布现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2017, 36(5): 481—486.
Yan Lin, Zhao Yunfeng, Sun Peng, et al. The distribution status and development trend of global oil&gas pipelines[J].

- Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(5): 481—486. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李健, 陈世利, 黄新敬, 等. 长输油气管道泄漏监测与准实时检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1747—1760.
Li Jian, Chen Shili, Huang Xinjing, et al. Review of leakage monitoring and quasi real-time detection technologies for long gas&oil pipelines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1747—1760. (in Chinese with English abstract)
- [4] 薛致远, 毕武喜, 陈振华, 等. 油气管道阴极保护技术现状与展望[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 938—944.
Xue Zhiyuan, Bi Wuxi, Chen Zhenhua, et al. Situation and outlook for cathodic protection technology of oil & gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(9): 938—944. (in Chinese with English abstract)
- [5] Tsynaeva A A. Cathode protection systems of cross-country pipelines[J]. Procedia Engineering, 2015, 111: 777—782.
- [6] Mahdavi F, Forsyth M, Tan M Y J. Understanding the effects of applied cathodic protection potential and environmental conditions on the rate of cathodic disbondment of coatings by means of local electrochemical measurements on a multi-electrode array[J]. Progress in Organic Coatings, 2017, 103: 83—92.
- [7] Cui G, Li Z, Yang C, et al. Study on the interference corrosion of cathodic protection system[J]. Corrosion Reviews, 2015, 33(5): 233—247.
- [8] Oh J S, Kim J D. A new protection strategy of impressed current cathodic protection for ship[J]. Ksme International Journal, 2004, 18(4): 592—596.
- [9] 穆鑫, 魏洁, 董俊华, 等. 牺牲阳极保护对 Q235B 钢在模拟海洋潮差区间腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(11): 1294—1304.
Mu Xin, Wei Jie, Dong Junhua, et al. The effect of sacrificial anode on corrosion protection of Q235B steel in simulated tidal zone[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(11): 1294—1304. (in Chinese with English abstract)
- [10] Al-Sultani K F, Nabat J N. Effects of tin on aluminum-zinc alloy as sacrificial anode to protect underground oil pipeline in Al-Mahawil regional[J]. Advanced Materials Research, 2012, 468—471(2): 1585—1594.
- [11] 吴荫顺, 曹备. 阴极保护和阳极保护[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [12] 陈允成. 半导体温差发电器应用的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
Chen Yuncheng. Research of Semiconductor Thermoelectric Generator Application[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [13] 喻红涛, 张志丰, 邱清泉, 等. 基于 ANSYS 的温差发电器性能[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 253—260.
Yu Hongtao, Zhang Zhifeng, Qiu Qingquan, et al. Performance of thermoelectric generator with ANSYS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 253—260. (in Chinese with English abstract)
- [14] Date Ashwin, Date Abhijit, Dixon C, et al. Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 33(1): 371—381.
- [15] 姚武, 夏强, 左俊卿. 基于温差发电的混凝土模拟液中钢筋阴极保护[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 76—81.
Yao Wu, Xia Qiang, Zuo Junqing. Cathodic protection of reinforcing steel in simulated concrete pore solution based on thermoelectric generation[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 76—81. (in Chinese with English abstract)
- [16] Jiang C, Fan X, Feng B, et al. Thermal stability of p-type polycrystalline Bi₂Te₃-based bulks for the application on thermoelectric power generation[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 692: 885—891.
- [17] 王长宏, 林涛, 曾志环. 半导体温差发电过程的模型分析与数值仿真[J]. 物理学报, 2014, 63(19): 303—308.
Wang Changhong, Lin Tao, Zeng Zhihuan. Analysis and simulation of semiconductor thermoelectric power generation process[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(19): 303—308. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王立舒, 梁秋艳, 李琳, 等. 聚光太阳能温差发电装置性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 64—71.
Wang Lishu, Liang Qiuyan, Li Lin, et al. Performance analysis and test on concentration solar thermoelectric generation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(24): 64—71. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李保德, 隆瑞, 刘伟, 等. 废热温差发电器驱动的电化学制冷系统研究[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(12): 2515—2521.
Li Baode, Long Rui, Liu Wei, et al. Performance analysis of a thermoelectric generators powered thermally regenerative electrochemical refrigeration[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(12): 2515—2521. (in Chinese with English abstract)
- [20] 程富强, 洪延姬, 祝超. 碲化铋温差发电模块构型优化设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1599—1604.
Cheng Fuqiang, Hong Yanji, Zhu Chao. Structure optimization of a BiTe-based thermoelectric module[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1599—1604. (in Chinese with English abstract)
- [21] Wei J, Xiong L, Wang H. The study of thermoelectric power generation in the cooling of fin and vibration heat pipe[J]. Energy Procedia, 2012, 17(1): 1570—1577.
- [22] 李勇. 小型温差发电系统研究与实现[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Li Yong. Research and Implementation of Small-Scale Thermoelectric Power Generation System[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [23] 褚泽. 废热半导体温差发电技术的研究与开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
Chu Ze. Research and Development of Waste Heat Semiconductor Thermoelectric Generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese with English abstract)

- [24] 徐亚东, 徐桂英, 葛昌纯. 新型热电材料的研究动态[J]. 材料导报, 2007, 21(11): 1—3.
Xu Yadong, Xu Guiying, Ge Changchun. Development trends of advanced thermoelectric materials[J]. Materials Review, 2007, 21(11): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [25] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1145—1154.
Zhou Lin, Wu Jian, Li Qiuhua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques photovoltaic array[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1145—1154. (in Chinese with English abstract)
- [26] Haque A. Maximum power point tracking (MPPT) scheme for solar photovoltaic system[J]. Energy Technology & Policy, 2014, 1(1): 115—122.
- [27] 赵耀. 基于微型能量采集的无线传感器网络自供电与传输系统[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Zhao Yao. Self-powered and Transmission System of Wireless Sensor System Based on Tiny Energy Harvesting[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [28] 黄永昌, 张建旗. 现代材料腐蚀与防护[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
- [29] 王强. 电化学保护简明手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [30] 徐兴龙, 周好斌, 袁森. 脉冲电流与直流电流的阴极保护效果比较研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 133—135.
Xu Xinglong, Zhou Haobin, Yuan Sen. Comparative study on the cathodic protection effect of pulse current and direct current[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 133—135. (in Chinese with English abstract)

Improvement of cathodic protection of greenhouse buried heat-supply metal pipeline based on thermoelectric cell

Wang Lishu, Li Xinran, Su Jiheng, Zhang Xu, Sun Shida

(Institute of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: With the development of the global economy and the improvement of people's living standards, the demand for traditional energy is increasing, which has led to serious energy shortage, and increasingly serious environmental pollution. More and more attention has been paid to thermoelectric power generation technology which takes the industrial and automobile waste heat as heat source. In order to plant out-of-season plants and southern plants, the northern greenhouses generally use heating pipeline for heating. Cathodic protection, as the main protective measure for buried pipelines, plays an important role in pipeline protection. In order to alleviate the corrosion rate of heating pipelines, the method of joint use of external anti-corrosion insulation layer and cathodic protection is generally adopted during the deployment of metal pipelines. This is also the most economical and reasonable anti-corrosion measure. Cathodic protection protects the metal from being corroded by the environmental media (such as soil), protect pipeline or equipment by corrosion with auxiliary anode or sacrificial anode materials, thereby achieving the purpose of prolonging the service life of the protected pipeline and improving its safety and economy. However, the cost for conventional external-current cathodic protection method is high with large footprint, and the protection life of the sacrificial anode method is too short. Therefore, in order to provide reliable external-current cathodic protection for greenhouse heating pipelines, this article uses the waste heat from the surface of the underground heating pipelines, through direct conversion of thermal energy into electrical energy by a thermoelectric power plant, to provide the cathodic protection of the external current mode for the buried heating pipeline. The technology has the advantages of green, environmental protection, simple structure, safety and reliability. This article focuses on the research of thermoelectric power generation systems, introduces the basic theory of thermoelectric power generation and derives the relationship of characteristic parameters of the thermoelectric cell. Based on the output characteristics of the thermoelectric cell, this article designs a self-powered system based on BQ25504 chip. The system collects the thermoelectric energy and continuously supplies it in the maximum power point tracking mode during operation. The thermoelectric conversion energy is collected by the BQ25504 chip produced by TI, and then supplied by the step-down regulator chip LM317 to cathodically protect the buried heating pipeline. The design uses the temperature of the pipeline as a heat source, and it has the advantages of almost no land occupation, long-term use, flexible protection and energy saving. Through field tests, the temperature difference between the cold and the hot ends of the device was found to be 33.2 °C, which proved that the greenhouse heating pipeline was a heat source worthy of utilization. Finally, through the natural corrosion test, it was found that when the horizontal distance of the anode bed was 1.69 m and the protective potential provided by the device was -1 100 mV, the degree of protection to the pipeline could reach 92.79%. This study provides a more feasible solution for the protection of greenhouse heating pipelines, and at the same time, the short-distance pipeline protection technology of external current mode is also explored.

Keywords: temperature; power; temperature difference; energy conversion; cathodic protection