

LNG 动力船冷能综合利用系统设计说明书

作品内容简介

本作品是基于“温差发电技术”和“自适应智能梯级利用技术”，设计的冷能综合利用系统（见图 1，图 2，图 3，图 4）。本作品可减少 LNG 动力船供气系统的冷能损失,解决目前 LNG 动力船对海洋生态环境造成的冷污染,提高 LNG 动力船的综合经济效益。其基本思路是：根据母型船正常工况下的 LNG 以及船舶主机耗气量和废气的流量及温度分别确定冷源和热源所具备的冷量和热量，据此设计温差发电装置。并将部分冷能先后通过主换热器，主冷媒循环系统，主流量控制阀，辅换热器，辅冷媒循环系统，辅流量控制阀到达各个耗冷装置。其中，主流量控制阀来控制管路中冷媒的总体流量，辅流量控制阀控制各个辅冷媒循环系统中的冷媒流量，各个耗冷装置都装有传感器分别反馈至各个耗冷装置主管的辅流量控制阀调节流量来达到预设温度。

关键词：温差发电 梯级利用 LNG 动力船的冷能利用 自适应智能系统

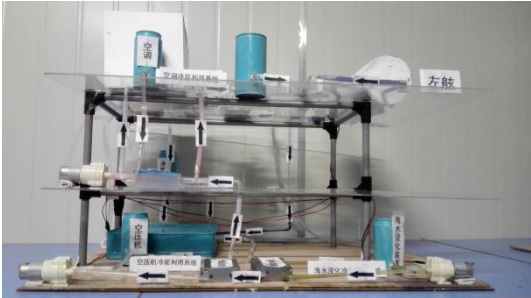


图 1 模型正视图



图 2 模型侧二视图



图 3 模型第一层视图

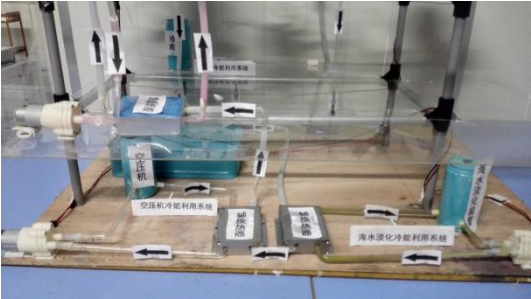


图 2 模型第二、三层视图

1 研制背景及意义

现阶段，能源结构、环境问题已经日益成为制约世界经济可持续发展的一个因素，而且船舶燃料油价格较高，且其燃烧排放物中有害气体的含量难以满足国际公约有关规定。为了优化能源结构与保护环境，世界发达国家都在积极开发清洁能源。在航运业，液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)作为一种清洁、经济高效的能源越来越受到青睐，再加上各国的能源政策使得 21 世纪被称为“天然气世纪”。近年来，内河方面出现了非常多的小型 LNG 动力船，远洋方面也出现了大型 LNG 动力船(如：北欧有许多大型近海 LNG 动力船，美国 TOTE 公司订造的大型 LNG 动力集装箱船即将下水)。随着 LNG 在船舶应用方面的发展，LNG 船舶逐渐增加，然而 LNG 船舶在使用 LNG 燃料时，存在大量的冷能损失的问题，从环保节能的角度上来看，如果能够充分利用这部分的高品质能量，对于提高 LNG 船舶的燃气效率来说是极其重要的。大型 LNG 动力船消耗的 LNG 的量比较大，这些 LNG 需要在气化后送到船舶主机和锅炉燃烧，气化到常温气体的过程中会释放出 $830\sim 860\text{kJ/kg}$ 的冷能。目前，LNG 船上 LNG 的气化主要靠柴油机的缸套冷却水或锅炉蒸汽，不仅会浪费大量热源，而且还会浪费 LNG 的冷能。

但由于空调等冷能利用装置远高于所能承受的最低温度。因此不能直接利用 LNG 中的冷能；以及 LNG 管路与各种用冷设备分别位于船舶上的不同位置，且用冷时间不同。对于 LNG 冷能的利用国内与国际上还处于技术空白。

在开发利用温差能源方面，自 1821 年 Seebeck 发现塞贝克效应以来，国外对温差发电进行了大量的研究，早在 20 世纪 60 年代末，美国开发的 RTG 输出功率为 $2.7\sim 300\text{W}$ ，最长工作时间已超 30 年。温差发电技术早已投入各行各业的实际生产领域，已经具备在 LNG 船舶领域的使用能力。

基于此，本文对 LNG 的冷能进行充分开发与利用，将其应用于船舶冷库、空压机冷缺、空调以及海水淡化装置，这样不仅可以低品级的冷能转化为高品质的电能，而且能节约冷库、空调的电能以及降低海水对海水淡化装置、空压机的腐蚀，同时提高冷能的综合利用效率。

2 主要功能

此方案将冷能利用分为两类。第一种为间接利用，即利用冷能带来的附带效果，同时利用船舶主机排放的高温废气进行温差发电。第二类直接利用，将 LNG 冷能采用自适应智能反馈系统和冷能梯级利用设计对于空调、冷库制冷，海水淡化及空压机冷却水等耗冷装置进行热交换。从而达到 LNG 动力船的冷能综合系统的设计。

3 设计方案

主要由温差发电装置，主冷媒循环系统和辅冷媒循环系统三大部分组成（见图 5）。温差发电装置以 LNG 为冷源，废气锅炉排出的废气为热源，将两者的温差转化为电能，同时使 LNG 的温度升高，实现冷能的一级利用。气化的 LNG 在主换热器中与主冷媒进行换热，将冷能传递给主冷媒。然后主冷媒分别通过四个辅换热器与海水淡化装置、空压机、空调和冷库进行换热，将冷能传递给以上四个装置，从而实现冷能二级利用，同时提高了空压机的工作效率，减少海水淡化装置的用电量。

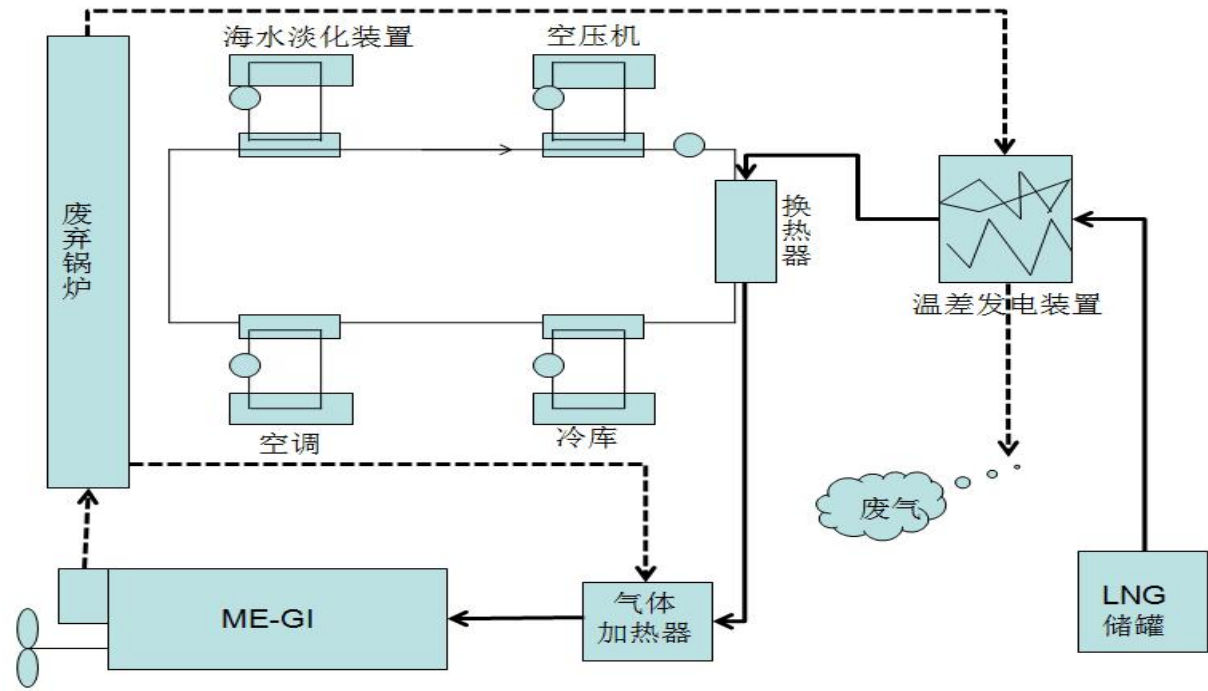


图 5 方案流程图

3.1 温差发电技术

3.1.1 温差发电片的选取

若将 LNG 和废气用于温差发电，冷面温度为 -162°C ，热面温度为 250°C ，温差会在温差发电片上产生巨大的热应力，减少温差发电片的使用寿命。目前，温差发电片主要应用于高温环境。TEP1-142T300 型的温差发电片可以在 -40°C -300°C 的环境下工作，不能直接应用于本研究所处的环境。型温差发电片能在低温环境下工作，正常工作的温度范围为 -70°C - 150°C 。将两种温差发电片相结合即能基本满足要求。

3.1.2 温差发电片的布置

为了使温差发电片能够在 -70°C - 250°C 的环境下工作，采用了两种温差发电片叠加的形式。高温温差发电片的冷面与低温温差发电片的热面接触。热源、高温温差发电片、低温温差发电片及冷源之间的温差呈梯度分布。假设高温温差发电片冷面的温度为 100°C ，则两种温差发电片冷热面的温差分别为 170°C 和 150°C 。两种温差发电片的输出电压、电流及功率大约为 5V 、 0.5A 、 2.5W ； 4V 、 0.4A 、 1.6W 。考虑到实际使用时，温差发电片的输出电压会小于理论值，一组高温温差发电片与低温温差发电片组成的串联输出单元的输出电压、电流及功率近似为 7V 、 0.7A 、 4.9W 。若要将温差发电装置用于蓄电池充电，需要将两组串联输出单元组成一个串-并联输出单元，再将各输出单元并联。若要将温差发电装置产生的电能并入电网，则需要 55 个串联输出单元并联。若温差发电片的数量不足，可通过升压模块来调节电压。

3.2 自适应梯级利用技术

3.2.1 自适应智能反馈系统设计

该系统的控制电路采用温度传感器作为传感器构成的反馈控制系统，辅流量控制阀作为执行机构（见图 6）。当接通负载电路时，实际目标环境温度高于预设理想温度，此时经信号处理，将信号传达到辅流量控制阀，同时辅流量控制阀增大流量。当实际目标环境温度接近预设理想，辅流量控制阀停止操作，若实际目标环境温度低于预设温度，辅流量控制阀减小流量。简单来说，就是当耗电装置的实际环境温度高于所需的温度，相应的辅冷媒循环系统就加大流量，增加供冷；当耗电装置的实际环境温度已经足够接近于所需温度时流量不变，供冷等于耗冷；当环境温度低于所需温度时，流量会减小。

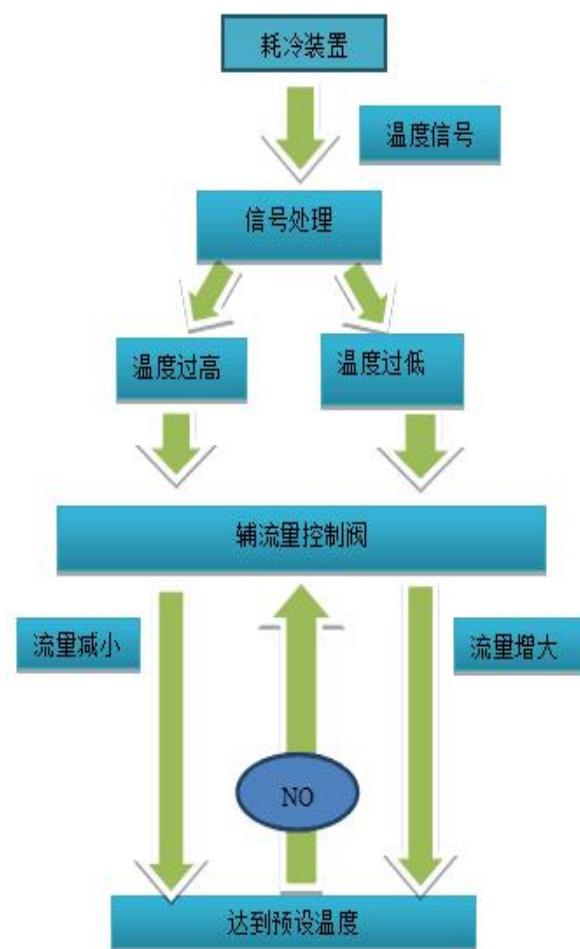


图 6 流程图

3.2.2 冷媒的选取

本系统与 LNG 换热冷媒需具备以下几点要求：

- 1) 因与 LNG 直接换热，冷媒的凝固点不应高于 LNG 温度（-162℃）太多，否则容易凝固而阻塞管路。
- 2) 应尽量不要有爆炸和燃烧的危险，且无毒。
- 3) 尽量选常用的传热介质，容易在市场上购买和制取，且价格相对低廉。
- 4) 由于多个低温热源要求不一样，且控制目标温度是通过自适应智能反馈系统调节的，因此冷媒在传热过程中不要发生相变过程，否则循环系统，尤其以及节流开度较难控制。

3.2.2.1 主冷媒循环系统

表 1 列出了几种常用冷媒的物理性质，从中可以看出，烷烃类冷媒是易燃易爆的工质，尽量不要选用；凝固点较高的冷媒（如丙二醇和乙二醇）尽量不选

用，否则容易堵塞管道；标压沸点尽可能地高于低温热源和高温热源的卡诺循环，这样可避免冷媒在低压下发生相变因此主冷媒可选用 R600。

3.2.2.2 辅冷媒循环系统

冷库的温度不容易精确控制，因此表中的前 7 种冷媒不合适，这样，确定 R30 和 R11 为冷库系统循环的合适冷媒。考虑到希望凝固点尽可能地低以免发生凝固，最终选择 R11。

在现代船舶中，空调制冷循环多采用蒸汽压缩制冷循环。空调制冷循环除了满足上述要求外，还需要冷媒在 T-s 图上的上下界限线要陡峭，以便冷凝过程更加接近定温放热过程。下界限陡峭表明液态 c_p 小，这样可以减少绝热节流引起的制冷能力的下降。因此空调冷媒在表 2 内可以选择 R11，表 1 之外也可以用 407c 等冷媒。

名称	标压沸点/℃	凝固点/℃
R290	-42.05	-187.7
R600	-42.17	-187.1
R134a	-29.26	-96.6
R407C	-43.56	-115.0
n butane	-0.60	-135.0
I butane	-11.70	-159.6
R22	-29.80	-155.0
R30	40.70	-96.7
R11	23.70	-111.0
丙二醇	188.00	-59.0
乙二醇	197.30	-12.6

表 1 几种常用的冷媒

4 理论设计计算

4.1 冷能的供需对口原则

为了充分利用 LNG 中的冷能，根据供需对口的原则，首先要确定 LNG 中所含冷能的量、各冷能利用装置的需冷量以及废气锅炉排出废气的热量，才能根据实

际情况来调整系统设计。

4.2 LNG 提供的冷能

本系统以中远集团科技应用计划项目“船用 LNG 燃料储运技术研究”中设计的基于超大型油船（ Very Large Crude Carrier，VLCC ） LNG 动力船为母型船，船舶主要参数及其他相关参数见表 2。

主要参数	数值	
船长/m	330	
型宽/m	60	
载重吨/t	296 600	
设计吃水/m	21.5	
运营航速/kn	15.6	
主机功率/k W	25 480	ME-GI
LNG 储罐舱容 / m3	2 257.48	2 个
LNG 储罐数量 / 个	2	
LNG 日消耗量 /(t / d)	63	
LNG 气化潜热 /(k J / kg)	510.25	
LNG 临界温度 / °C	－82.59	
LNG 沸点 / °C	－163	

表 2 船舶主要参数及其他相关参数

LNG 的储存温度低至-162℃，转化成气体的过程中释放的气化潜热和显热之和高达 830KJ/Kg

LNG 的冷能根据表 2 中每天消耗的 LNG 燃料求出。

$$Q_{LNG}=m \cdot \Delta H_v (1)$$

式(1)中: Q_{LNG} 为每天 LNG 气化产生的冷能; m 为每天 LNG 的消耗量; Δ H_v 为 LNG 的气化潜热。得出

Q_{LNG} 为 3.213×107k J。（液化天然气转化为天然气放出的冷能）

4.3 耗冷装置的耗冷需求

4.3.1 空调与冷库的耗冷量

通过查阅船舶实际数据，根据经验估算，船舶冷库压缩机的平均运行负荷为 10 k W(相当于连续运行的负荷) ，船舶空调压缩机的实际运行功率为 40 k W，可求出每天的总耗冷量为：

$$Q=24\times 3600\left(P_{\text{冷库}}+P_{\text{空调}}\right)\mu$$

Q 总为每天空调和冷库的总耗冷量；μ 为制冷系数，通常为 3~4，取最大值；P 冷库为冷库平均功率；P 空调为空调的运行功率。 得出 Q 总为 1.736 8×107k J

通常情况下，船舶高温库一般在 0~5℃，,低温库在-20~-18℃，换热器的传热温差控制在 5~6℃。

4.3.2 海水淡化装置耗冷量

通过查阅相关资料进行比对，选用间接冷冻法来进行海水淡化（示意图见图 7）。其基本过程为：原料海水首先经过预冷器，与温度较低的浓海水和淡水进行预冷，温度降到 2℃左右，然后进入结晶器与二次冷媒进行间接换热，使温度降到-3℃左右，从而得到浓海水和冰晶。随后进行对冰晶的洗涤与海水的冷量回收，最后得到淡化水。

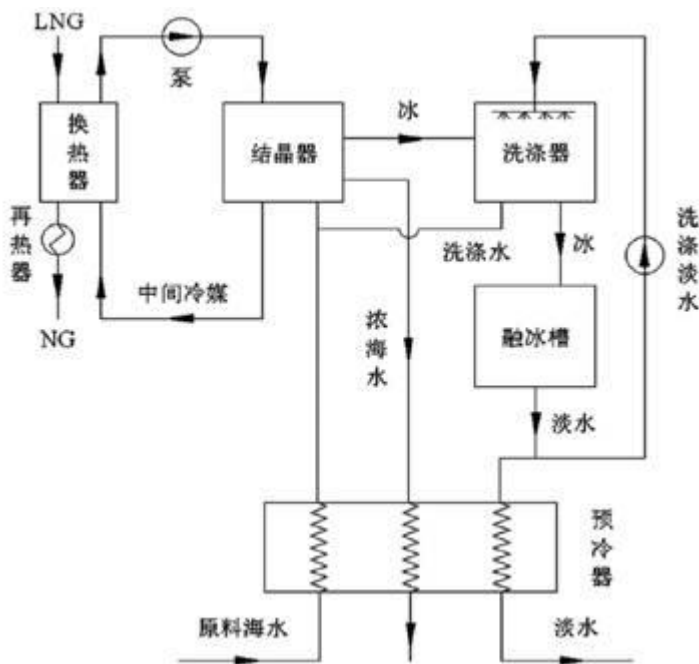


图 7 间接冷冻法海水淡化示意图

假设换热器传递效率为 1，且过程中无任何热量损失，则海水淡化装置淡化

每吨海水的耗冷量为:

$$Q = C \times M_{\text{海水}} \times \nabla T = 4.096 \text{ KJ}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}) \times 1000 \text{ Kg} \times 5^\circ\text{C} = 2.048 \times 10^4 \text{ KJ}$$

4.3.3 船用空压机的耗冷量

船用空压机排除压力较高,一般在 2.5 至 3.0MPa 之间,因此一般采用多级压缩,但每一级压缩比不应大于 6,为提高空压机经济性与输气量,通常采用级间中间冷却。冷却水耗冷量计算公式为 $Q = C_{\text{空}} \times m \times (T_2 - T_2')$,又因为我们按照双级多变过程可以得

$$T_2' = T_1, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad p_2 = \sqrt{p_1 p_3}, m = \rho v$$

其中, $C_{\text{空}} = 1.41 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, $v = 60 \text{ m}^3/\text{h}$, $\rho = 30 \text{ Kg}/\text{m}^3$, $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, $p_2 = 3 \text{ MPa}$, $T_1 = 17^\circ\text{C}$, $n = 1.2$

于是求得耗冷量 $Q = 7614 \text{ KJ/h}$

5 经济性分析

5.1 温差发电装置

温差发电片每片安装尺寸 40 mm×40 mm, 每平米可以安装 500 块, 冷媒温度 -70°C , 废气温度 250°C , 一平方米发电功率为 2.45 kW, 船舶年工作 6 500 h 时, 年发电量为 52000 kWh。现有某型船用发电机油耗为 170 g/kWh, 每年可节约发电用燃油 8.84t, 按照 3000 元每吨的油价计算, 一年节约燃油成本 26520 元。该设计中的船舶冷能-余热综合利用设备每平方米成本约为 30000 元, 经计算, 1 年多即可收回投资成本。

5.2 冷库和空调

由于 LNG 冷能利用制冷模式、船舶冷库与空调采用压缩机组制冷模式都需要循环泵, 因此节约的功率主要是机组运行时压缩机原动机的功。冷库和空调压缩机平均功率分别为 10kW 和 40kW, 每年减少机组运行时间分别为 300 天和 200 天, 分别节约 72000 kW·h 和 192000 kW·h 的电, 按照 1.5 元每 kW·h 的电价计算, 采用冷能利用装置后每年可节约电费约 39.6 万元。

5.3 海水淡化装置

目前主流的海水淡化技术主要是反渗透、多级闪蒸和低温多效，其中反渗透运行成本最低，一般吨水耗电 4 度左右，再加上化学品费用约 0.5 元/吨淡水左右，如电费按 0.6 元/度计，则吨水直接运行成本为 2.9 元/吨淡水左右。再考虑人工、维修、反渗透膜更换等费用，运行成本（不计折旧）一般在 3-4 元/吨淡水。而一艘远洋集装箱货船从国内出发到美洲大概有 5400 海里，按照集装箱高速 30 海里/小时，大概需要 180 小时，即 7.5 天，往返需要 15 天，但是实际上中途可能遇到极端天气，需要船舶避航，绕航，另外需要中途挂靠港口，进行补给，所以往返美洲至少需要 25 天左右。假设每天淡化 18~20 吨，则往返一次海水淡化成本需要 1350~2000 元。而 LNG 与海水的混合过程几乎不耗费能量，因此，LNG 冷冻法淡化海水可以节约巨大的经济成本。

6 创新点及应用

◇1.在冷能发电方面，相比于等其他冷能发电形式，温差发电设备具有结构简单，冷能利用效率高、坚固耐用、无运动部件、无噪声、易于维护、使用寿命长等优点。

◇2.在冷能综合利用上，本系统将冷能应用于海水淡化和冷却空压机，一方面能提高冷能利用率，另一方面能减小空压机电能的消耗，同时采用自适应智能反馈系统，实现冷能利用的智能化，便于操作。

在环境问题与能源危机日益加剧的今天，LNG 动力船以及混合动力船舶以清洁度高，热值大，经济性好在船舶市场疲软的情况下可谓一枝独秀。根据可探明的石油储量，世界石油资源可消耗的时间只剩下不到 20 年。随着地球石油资源的日益疲乏和随之带来的油价上涨，对于 LNG 动力船的需求已经越来越强。但目前 LNG 动力船的冷能浪费引起的环境冷污染问题以及能源浪费问题却是各个企业务须解决的当务之急。本作品恰好为各船舶企业提供了 LNG 动力船的冷能综合利用系统设计，填补了当前国内的技术空白，提高了企业的经济效益。

参考文献

- [1] 周靖.基于温差发电的船舶余热利用系统节能设计[J].装备制造技术,2014,(12)

[2] 熊永强,华贲.基于 LNG 冷能利用的低温冷库与冷能发电系统的集成[J].华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(9)

[3] 田堃,徐文东,张乐亨等.LNG 燃料船冷能利用技术开发与工程化研究[J].广东化工,2014,41(21)

[4] 黄美斌,林文胜,顾安忠等.LNG 冷能用于冷媒直接接触法海水淡化[J].化工学报,2008,59(z2)

[5] 贾磊.LNG 冷能利用与低温半导体温差发电研究[D].2006.

[6] 李博洋,张运秋,邱力强等.LNG 动力船燃料冷能的综合开发与利用[J].中国航海,2015,38(3)

[7] 白洁玮.液化天然气(LNG)汽车冷能和尾气余热的温差发电系统研究[D].2015.
