



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114382563 B

(45) 授权公告日 2022. 10. 25

(21) 申请号 202210033943.9

F01K 13/00 (2006.01)

(22) 申请日 2022.01.12

F01K 7/00 (2006.01)

F01D 15/10 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114382563 A

(43) 申请公布日 2022.04.22

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路28号

(56) 对比文件

CN 113644864 A, 2021.11.12

CN 110206599 A, 2019.09.06

EP 2157317 A2, 2010.02.24

审查员 靳文强

(72) 发明人 赵攀 许文盼 刘艾杰 吴汶泽

王江峰

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

专利代理师 贺小婷

(51) Int. Cl.

F01K 25/10 (2006.01)

F01K 21/00 (2006.01)

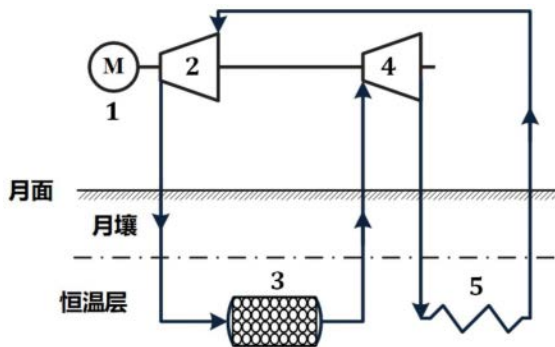
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统及方法,本发明利用二氧化碳工质及其跨临界循环在效率高、结构紧凑轻小一体化而降低地月发射重量方面的优势,结合月球原位资源的月壤与深层月壤恒温层,可高效实现电能的储存与释放。另外,该月基储能系统属机械储能领域,具备高循环次数、高使用寿命和易维护等优势。本发明技术对于推动空间能源技术的发展、加快月球基地的建设等方面具有重要的科学意义。



1. 基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统,其特征在於,包括电动机(1)、二氧化碳压缩机(2)、月壤蓄热器(3)、换热器(5)、二氧化碳膨胀机(4)、二氧化碳透平(6)、回热器(7)、二氧化碳增压泵(8)和发电机(9);

所述二氧化碳压缩机(2)通过电动机(1)驱动,所述二氧化碳压缩机(2)的出口端连接至月壤蓄热器(3)的第一入口端,所述月壤蓄热器(3)的第一出口端连接至二氧化碳膨胀机(4)的入口端,所述二氧化碳膨胀机(4)的出口端连接至换热器(5)的第一入口端,换热器(5)的第一出口端连接至二氧化碳压缩机(2)的入口端,所述二氧化碳膨胀机(4)与二氧化碳压缩机(2)相连,用于将膨胀功补充给二氧化碳压缩机(2);

所述月壤蓄热器(3)的第二出口端连接至二氧化碳透平(6)的入口端,二氧化碳透平(6)的出口端连接至回热器(7)的第一入口端,回热器(7)的第一出口端连接至换热器(5)的第二入口端,换热器(5)的第二出口端通过二氧化碳增压泵(8)连接至回热器(7)的第二入口端,回热器(7)的第二出口端连接至月壤蓄热器(3)的第二入口端,所述二氧化碳透平(6)用于驱动发电机(9)和二氧化碳增压泵(8);

所述月壤蓄热器(3)和换热器(5)均设置在月壤的恒温层中;

当处于储能模式时,所述换热器(5)为蒸发器,当处于释能模式时,所述换热器(5)为冷凝器;

所述月壤蓄热器(3)采用固体填充床式蓄热装置,所述固体填充床式蓄热装置的外壳采用登月舱下降级推进系统燃料罐,所述固体填充床式蓄热装置的填充物采用月壤压制球体,所述月壤压制球体的密度为 $2500\sim 3000\text{kg/m}^3$,导热系数为 $1.5\sim 2.1\text{W/mK}$;

所述月壤蓄热器(3)设置有1个或多个,当设置多个时,多个月壤蓄热器(3)串联或并联设置。

2. 根据权利要求1所述的基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统,其特征在於,所述电动机(1)、二氧化碳压缩机(2)和二氧化碳膨胀机(4)同轴设置。

3. 根据权利要求1所述的基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统,其特征在於,所述发电机(9)、二氧化碳透平(6)和二氧化碳增压泵(8)同轴设置。

4. 根据权利要求1所述的基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统,其特征在於,所述二氧化碳压缩机(2)采用容积式压缩机或透平式压缩机。

5. 根据权利要求1所述的基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统,其特征在於,所述二氧化碳透平(6)采用轴流式透平或向心式透平。

6. 基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能方法,采用权利要求1-5任一项所述的基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统,其特征在於,包括储能模式和释能模式;

当运行于储能模式时,多余电能驱动电动机(1)使二氧化碳压缩机(2)运行,对过热态的低温低压二氧化碳工质进行压缩,获得超临界态的高温高压气体;随后进入月壤蓄热器(3)进行放热,获得超临界态的中温高压气体,同时将压缩热存储于月壤蓄热介质中;进而气体流入二氧化碳膨胀机(4)进行膨胀降压,产生具有一定干度的低温低压二氧化碳气液两相流体,同时膨胀功补充给二氧化碳压缩机(2);最后,低温低压二氧化碳气液两相流体进入蒸发器中,吸收恒温层月壤的热量进行定压蒸发并过热,生成过热态的低温低压二氧化碳,以此重复循环完成储能过程;

当运行于释能模式时,低温低压的液态二氧化碳经二氧化碳增压泵(8)增压,生成低温高压的液态二氧化碳;随后进入回热器(7)吸收二氧化碳透平(6)排气工质的热量升温,生成中温高压的超临界态二氧化碳;进而,中温高压的超临界态二氧化碳进入月壤蓄热器(3)中继续吸收月壤蓄热介质中的储存热量升温,变为高压高温的超临界态二氧化碳;随后,高压高温的超临界态二氧化碳工质流入二氧化碳透平(6)膨胀做功,驱动发电机(9)发电,并同时驱动二氧化碳增压泵(8),二氧化碳透平(6)的排气为中温低压的超临界态二氧化碳;之后,中温低压的超临界态二氧化碳进入回热器(7)中放热给经二氧化碳增压泵(8)增压后的冷态工质后降温,变为过热态的低温低压二氧化碳工质;随后,过热态的低温低压二氧化碳工质进入冷凝器,放热给作为冷源的恒温层月壤后冷凝,变为液态的低温低压二氧化碳,以此重复循环完成释能过程。

基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统及方法

技术领域

[0001] 本发明属于空间能源技术领域,特别涉及一种基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统及方法。

背景技术

[0002] 月球作为深空探测的首要目标,已引起世界各航天强国的重点关注。月球基地是未来人类进行深度月球探测的基础设施,其能源持续稳定供应至关重要。现阶段,基于月球原生资源情况,适用于月球基地的主流能源系统设计有太阳能光伏发电系统、太阳能光热发电系统和空间核反应堆发电系统等形式。

[0003] 然而,月球自转周期为一个恒星月,约为28个地球日,其中月昼14日,月夜14日,月夜持续时间长;同时,月表温度在月昼期间可高达130℃,而月夜期间可降至-150℃,昼夜温差变化极大。这种特殊月球表面环境对于月球基地能源系统的稳定运行影响极大。对于以太阳能利用为基础的太阳能光伏发电系统和太阳能光热发电系统来说,漫长的月夜期间没有太阳辐射,使得该系统无法正常不间断稳定供能;对于空间核反应堆发电系统来说,因月球表面温度的大范围变化使得月球基地热控负荷改变以及科学考察任务安排,使得负荷存在峰谷值,对于特定设计功率的系统而言,也无法正常按需不间断供能。因此,需要月基储能系统与这些能源系统进行耦合,实现时间上的能量转移,以达到稳定持续供能的目的。

[0004] 现阶段,月球基地潜在的可选择储能技术应为航天领域已经应用或计划应用的储能技术,主要有蓄电池、燃料电池和热储能等方式。蓄电池虽然是航天领域的成熟应用技术,但能量密度低,需要较大的重量资源才能满足月球基地长时间大功率存储的需求,同时其循环次数有限,在月球环境下无法处理蓄电池废料,且在月夜的低温环境下其性能会显著下降,使得其不能作为月球基地的主储能设备,仅可作为月面科考活动设备的储供能技术。燃料电池系统存在因充放电效率低而导致自身损耗大的缺点,另外燃料电池也需要地月发射过程中输送大量的氢氧或水等物质,以适应月球基地大功率、长时间的储能需求,增大了发射质量。月球基地配套的热储能技术需要配置大容量蓄热装置及蓄热工质,重量高不利于运送至月球,且热机的热电转换过程部件多,降低了其运行可靠性。

[0005] 综上所述,随着航天事业的飞速发展,月球基地的建设迫在眉睫,稳定可靠的能源系统是月球基地建设的重要保障,使得储能系统必不可少。一般,月球基地潜在可选择的储能技术应为在现阶段航天领域已经使用或计划使用的技术,但更应适应月球基地大容量、长时间和高使用寿命的储能需求。蓄电池技术虽然在多数航天器中成功使用,但是受限于低能量密度和有限的循环次数,无法满足空间基地大功率存储的要求;燃料电池系统以氢为储能载体,存在效率低,自身耗电量大的缺点,且需要大量的氢氧或水等物质,增加了地月发射重量;热储能技术需要大容量蓄热装置及蓄热工质,增大了发射重量,且热机转换过程部件多,运行可靠性低。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统及方法,以克服当前月球基地的能量高效存储问题,本发明能够实现月球基地能量的持续稳定供给,提高月球基地能源供给的可靠性与安全性。

[0007] 为达到上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0008] 基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能系统,包括电动机、二氧化碳压缩机、月壤蓄热器、换热器、二氧化碳膨胀机、二氧化碳透平、回热器、二氧化碳增压泵和发电机;

[0009] 所述二氧化碳压缩机通过电动机驱动,所述二氧化碳压缩机的出口端连接至月壤蓄热器的第一入口端,所述月壤蓄热器的第一出口端连接至二氧化碳膨胀机的入口端,所述二氧化碳膨胀机的出口端连接至换热器的第一入口端,换热器的第一出口端连接至二氧化碳压缩机的入口端,所述二氧化碳膨胀机与二氧化碳压缩机相连,用于将膨胀功补充给二氧化碳压缩机;

[0010] 所述月壤蓄热器的第二出口端连接至二氧化碳透平的入口端,二氧化碳透平的出口端连接至回热器的第一入口端,回热器的第一出口端连接至换热器的第二入口端,换热器的第二出口端通过二氧化碳增压泵连接至回热器的第二入口端,回热器的第二出口端连接至月壤蓄热器的第二入口端,所述二氧化碳透平用于驱动发电机和二氧化碳增压泵;

[0011] 所述月壤蓄热器和换热器均设置在月壤的恒温层中;

[0012] 当处于储能模式时,所述换热器为蒸发器,当处于释能模式时,所述换热器为冷凝器。

[0013] 进一步地,所述月壤蓄热器采用固体填充床式蓄热装置,所述固体填充床式蓄热装置的外壳采用登月舱下降级推进系统燃料罐,所述固体填充床式蓄热装置的填充物采用月壤压制球体,所述月壤压制球体的密度为 $2500\sim 3000\text{kg/m}^3$,导热系数为 $1.5\sim 2.1\text{W/mK}$ 。

[0014] 进一步地,所述月壤蓄热器设置有1个或多个,当设置多个时,多个月壤蓄热器串联或并联设置。

[0015] 进一步地,所述电动机、二氧化碳压缩机和二氧化碳膨胀机同轴设置。

[0016] 进一步地,所述发电机、二氧化碳透平和二氧化碳增压泵同轴设置。

[0017] 进一步地,所述二氧化碳压缩机采用容积式压缩机或透平式压缩机。

[0018] 进一步地,所述二氧化碳透平采用轴流式透平或离心式透平。

[0019] 基于月球原位资源的月基跨临界二氧化碳储能方法,包括储能模式和释能模式;

[0020] 当运行于储能模式时,多余电能驱动电动机使二氧化碳压缩机运行,对过热态的低温低压二氧化碳工质进行压缩,获得超临界态的高温高压气体;随后进入月壤蓄热器进行放热,获得超临界态的中温高压气体,同时将压缩热存储于月壤蓄热介质中;进而气体流入二氧化碳膨胀机进行膨胀降压,产生具有一定干度的低温低压二氧化碳气液两相流体,同时膨胀功补充给二氧化碳压缩机;最后,低温低压二氧化碳气液两相流体进入蒸发器中,吸收恒温层月壤的热量进行定压蒸发并过热,生成过热态的低温低压二氧化碳,以此重复循环完成储能过程;

[0021] 当运行于释能模式时,低温低压的液态二氧化碳经二氧化碳增压泵增压,生成低温高压的液态二氧化碳;随后进入回热器吸收二氧化碳透平排气工质的热量升温,生成中

温高压的超临界态二氧化碳；进而，中温高压的超临界态二氧化碳进入月壤蓄热器中继续吸收月壤蓄热介质中的储存热量升温，变为高压高温的超临界态二氧化碳；随后，高压高温的超临界态二氧化碳工质流入二氧化碳透平膨胀做功，驱动发电机发电，并同时驱动二氧化碳增压泵，二氧化碳透平的排气为中温低压的超临界态二氧化碳；之后，中温低压的超临界态二氧化碳进入回热器中放热给经二氧化碳增压泵增压后的冷态工质后降温，变为过热态的低温低压二氧化碳工质；随后，过热态的低温低压二氧化碳工质进入冷凝器，放热给作为冷源的恒温层月壤后冷凝，变为液态的低温低压二氧化碳，以此重复循环完成释能过程。

[0022] 与现有技术相比，本发明具有以下有益的技术效果：

[0023] 本发明系统以二氧化碳作为循环工质，将电能转换为热能储存于月壤蓄热器中，分别采用跨临界二氧化碳热泵循环与跨临界二氧化碳动力循环作为储能回路与释能回路，利用二氧化碳工质及其循环的高效率及结构紧凑、轻小一体化优势带来的低地月发射重量；利用月球原位资源可就地提供蓄热介质和实现储/释能循环的热源/冷源条件，该月基储能技术对于推动空间能源技术的发展、加快月球基地的建设等方面具有重要的科学意义。

[0024] 进一步地，该系统优势在于：首先，鉴于二氧化碳工质具备密度大、黏度小，且运行于跨临界循环，不仅使得系统效率高，而且使得相关部件尺寸小、重量轻，结构紧凑，可有效降低地月发射重量。其次，储能系统利用月球原位资源，月壤蓄热器利用导热系数和密度增大的加工月壤压制球体作为蓄能介质，利用导热系数极低的原生月壤实现月壤蓄热器的保温；利用深层月壤中的恒温层作为储能回路的恒温热源和释能回路的恒温冷源。最后，该技术属机械储能领域，具备高循环次数、高使用寿命和易维护等优势。

附图说明

[0025] 说明书附图用来提供对本发明的进一步理解，构成本发明的一部分，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，并不构成对本发明的不当限定。

[0026] 图1为本发明的基于月球原位资源利用的月基跨临界二氧化碳储能系统在储能模式下的工作示意图。

[0027] 图2为本发明的基于月球原位资源利用的月基跨临界二氧化碳储能系统在释能模式下的工作示意图。

[0028] 其中，1、电动机；2、二氧化碳压缩机；3、月壤蓄热器；4、二氧化碳膨胀机；5、换热器；6、二氧化碳透平；7、回热器；8、二氧化碳增压泵；9、发电机。

具体实施方式

[0029] 下面结合附图对本发明实施例做详细描述：

[0030] 针对当前建设月球基地储能系统时潜在可选择的航天领域现有技术或计划使用技术无法满足月球基地大容量、长时间和高循环次数的要求，以及相关技术在建设时存在较高的地月发射重量问题，本发明公开了一种基于月球原位资源利用的月基跨临界二氧化碳储能系统，包括二氧化碳压缩机2、二氧化碳膨胀机4、二氧化碳透平6、二氧化碳增压泵8、月壤蓄热器3、换热器5、回热器7、电动机1和发电机9等部件。

[0031] 该系统采用二氧化碳作为循环工质，并利用跨临界二氧化碳循环的形式进行能量

储释,鉴于二氧化碳工质密度大,黏度小的特点,不仅使得系统具备高效率,而且还可使透平、压缩机及换热器等设备结构紧凑,尺寸小,重量轻,可有效减少地月发射重量,满足月球基地建设的要求。

[0032] 在储能阶段,参见图1,由电动机1、二氧化碳压缩机2、二氧化碳膨胀机4、月壤蓄热器3和换热器5(此时换热器做为蒸发器)等部件组成储能循环回路,按跨临界二氧化碳热泵循环进行电能储存以实现储能,电能转换为热能储存于月壤蓄热器3中;在释能阶段,参见图2,由发电机1、二氧化碳透平6、二氧化碳增压泵8、回热器7、月壤蓄热器3和换热器5(此时换热器做为冷凝器)等部件组成释能循环回路,按跨临界二氧化碳动力循环进行电能生产以实现释能,月壤蓄热器3中存储的热能转换为电能。

[0033] 其中,月壤蓄热器3为固体填充床式蓄热装置,是系统进行能量储存的核心设备,其外壳采用保温性能良好的登月舱下降级推进系统燃料罐,填充物采用经过加工的月壤压制球体,相比原生月壤,月壤压制球体密度和导热系数有较大提升,蓄热能力强,本发明采用的月壤压制球体的密度为 $2500\sim 3000\text{kg/m}^3$,导热系数为 $1.5\sim 2.1\text{W/mK}$ 。同时,该月壤蓄热器3可采用多罐体并联结构或串联结构,并布置于深度月壤的恒温层中,外部附着物为大量未被加工且导热率极低的原生月壤,可保证月壤蓄热器的保温效果。

[0034] 储能循环回路的电动机1、二氧化碳压缩机2和二氧化碳膨胀机4采用同轴布置结构,释能循环回路的发电机9、二氧化碳透平6和二氧化碳增压泵8也采用同轴布置结构。二氧化碳压缩机2可采用容积式压缩机(如活塞压缩机、螺杆压缩机、涡旋压缩机及隔膜压缩机)或透平式压缩机(离心压缩机)等形式,二氧化碳透平6可采用轴流式透平或向心式透平等形式。

[0035] 本发明系统的换热器5布置在深度月壤的恒温层中。月壤恒温层不仅作为储能阶段跨临界二氧化碳热泵循环的恒温热源,而且也作为释能阶段跨临界二氧化碳动力循环的恒温冷源。

[0036] 本发明储能系统可与多种月球基地能源系统相耦合。若采用太阳能光伏发电系统或太阳能光热发电系统,因漫长的月夜期间无太阳辐射,该系统则在月昼期间储能,在月夜、日食或太阳辐射不足时释能;若采用空间核反应堆发电系统,该系统则在低负荷谷期时段进行储能,而在高负荷峰期时段进行释能。

[0037] 本发明储能系统可有效利用月球原位资源,首先,蓄热介质采用进行加工的月壤压制球体,增大了其密度与导热系数,且月壤蓄热器3布置于导热系数极低的大量原生月壤中,可实现有效保温;其次,利用深层月壤的恒温层作为储能循环的恒温热源和释能循环的恒温冷源。

[0038] 本发明储能系统属机械储能领域,具备高充放电循环次数、高使用寿命且易维护等优势,鉴于该月基跨临界二氧化碳储能系统以月壤蓄热形式进行能量储存,具备为月球基地供应热能的能力,以协助建设月球基地的热控系统。

[0039] 本发明储能系统的工作模式可分为储能和释能两种情况:在月昼时或低负荷谷期时段,月球基地的能源系统存在多余电能,该月基跨临界二氧化碳储能系统运行于储能模式,系统执行跨临界二氧化碳热泵循环。在月夜、日食或太阳辐射不足时段,以及高负荷峰期时段,月球基地能源系统的输出电能不足以满足其负荷需求,该月基跨临界二氧化碳储能系统运行于释能模式,系统执行跨临界二氧化碳动力循环。

[0040] 实施例

[0041] 参照图1和图2,基于月球原位资源利用的月基跨临界二氧化碳储能系统的储能过程和释能过程示意图来详细描述其工作原理。该系统包括二氧化碳压缩机2、二氧化碳透平6、二氧化碳膨胀机4、二氧化碳增压泵8、月壤蓄热器3、电动机1、发电机9和换热器5等部件。其中,月壤蓄热器3外壳采用保温性能良好的登月舱下降级推进系统燃料罐,填充物采用加工的月壤压制球体;另外,月壤蓄热器3和换热器5(储能阶段做为蒸发器,释能阶段做为冷凝器)均布置在深度月壤的恒温层中,该恒温层可在储能阶段作为蒸发器的恒温热源,而在释能阶段作为冷凝器的恒温冷源,同时,月壤蓄热器3外部因存在大量未被加工且导热率极低的原生月壤,有利于月壤蓄热器3的保温。

[0042] 基于月球原位资源利用的月基跨临界二氧化碳储能系统不仅可适用于太阳能光伏发电系统与太阳能光热发电系统,实现月昼储能与月夜释能;还能适用于空间核反应堆发电系统,实现低负荷谷期储能与高负荷峰期释能。

[0043] 系统的主要工作原理描述如下:

[0044] 在月昼时或低负荷谷期时段,月球基地发电系统的输出电能满足其负荷需求后,还存在多余电能,基于月球原位资源利用的月基跨临界二氧化碳储能系统运行于储能模式,此时换热器5作为蒸发器工作,如图1所示。多余电能驱动电动机1来使得二氧化碳压缩机2运行,对过热态的低温低压二氧化碳工质进行压缩,获得超临界态的高温高压气体;随后进入月壤蓄热器3进行放热,获得超临界态的中温高压气体,同时将压缩热存储于月壤蓄热介质中;进而气体流入二氧化碳膨胀机4进行膨胀降压,产生具有一定干度的低温低压二氧化碳气液两相流体,同时膨胀功补充给二氧化碳压缩机2;最后,低温低压的气液共存态二氧化碳工质进入蒸发器中,吸收月壤恒温层的热量进行定压蒸发并过热,生成过热态的低温低压二氧化碳。以此重复循环完成储能过程。

[0045] 在月夜、日食或太阳辐射不足时段,以及高负荷峰期时段,月球基地能源系统的输出电能不足以满足其负荷需求,基于月球原位资源利用的月基跨临界二氧化碳储能系统运行于释能模式,此时换热器5作为冷凝器工作,如图2所示。低温低压的液态二氧化碳经二氧化碳增压泵8增压,生成低温高压的液态二氧化碳;随后进入回热器7吸收二氧化碳透平6排气工质的热量升温,生成中温高压的超临界态二氧化碳;进而,中温高压的超临界态二氧化碳进入月壤蓄热器3中继续吸收月壤蓄热介质中的储存热量升温,变为高压高温的超临界态二氧化碳;随后,高压高温的超临界态二氧化碳工质流入二氧化碳透平6膨胀做功,驱动发电机9发电,并同时驱动二氧化碳增压泵8,二氧化碳透平6的排气为中温低压的超临界态二氧化碳;之后,工质进入回热器7中放热给经二氧化碳增压泵8增压后的冷态工质后降温,变为过热态的低温低压二氧化碳工质;随后,工质进入冷凝器,放热给作为冷源的月壤恒温层后冷凝,变为液态的低温低压二氧化碳。以此重复循环完成释能过程。

[0046] 以上内容仅为说明本发明的技术思想,不能以此限定本发明的保护范围,凡是按照本发明提出的技术思想,在技术方案基础上所做的任何改动,均落入本发明权利要求书的保护范围之内。

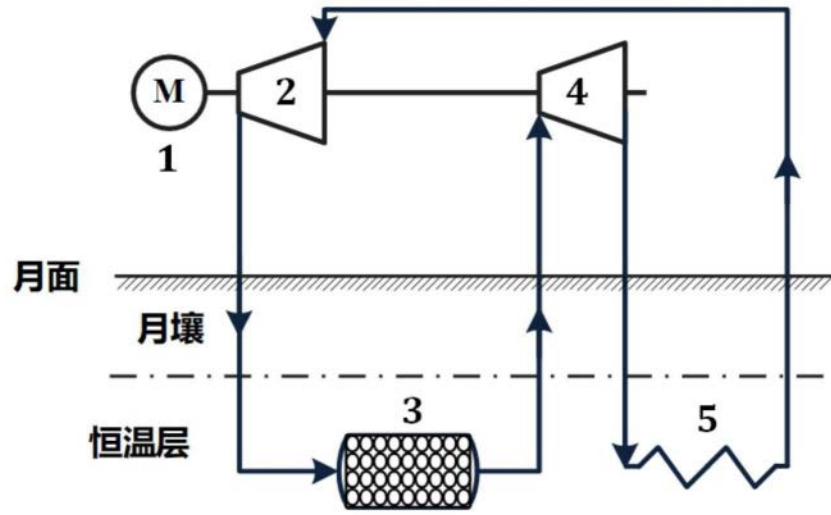


图1

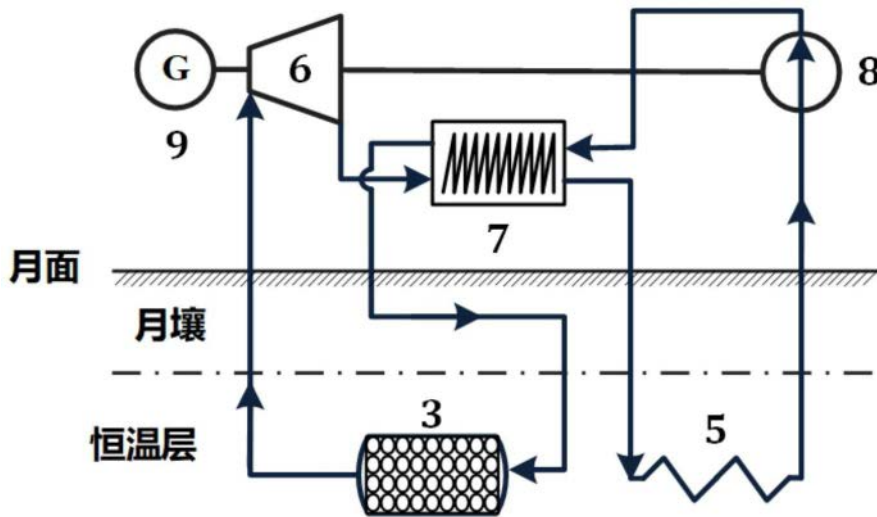


图2