

# 超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统性能分析及优化

李俊辉 王 硕 高 佼 周志斌 李书贤  
青岛工学院 山东 青岛 266300

**摘 要:** 在介绍超临界二氧化碳布雷顿循环基本原理的基础上,分析了循环各主要部件的工作机理和循环特性,建立了系统性能分析模型。通过对超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统的性能进行计算与分析,得到了循环效率、净输出功率和净输出功等重要参数的变化规律。在此基础上,对系统进行优化设计,得到了最佳工况参数组合。结果表明,在给定的条件下,该系统的效率最高可达32.6%,净输出功率可达8.65MW,净输出功为7.26 kW。优化设计可以有效地提高系统效率,改善系统的性能,对促进我国太阳能热发电技术发展具有重要意义。

**关键词:** 超临界二氧化碳;布雷顿循环;太阳能热发电;系统性能

## 引言

随着经济的快速发展和社会的不断进步,能源危机已经成为全球性问题,如何实现能源的可持续利用成为当前世界各国研究的热点。太阳能作为一种清洁、可再生、无污染的清洁能源,已经成为全球各国发展可持续能源的首选。太阳能热发电是太阳能利用的重要形式,也是太阳能资源综合利用的关键环节。它以太阳能辐射能为主要热源,通过热能转换系统将热量转换为电能,实现对电力系统的高效利用。随着太阳能热发电技术不断发展和完善,利用超临界流体——二氧化碳作为工质来替代水或蒸汽作为工质已成为研究的热点。

## 1 超临界二氧化碳布雷顿循环原理及机理

### 1.1 超临界二氧化碳循环介绍

#### 1.1.1 超临界流体特性

超临界流体的特性是由其密度、压力和黏度等因素决定的。其中密度是决定压力和黏度的主要因素。密度越大,流体越易形成稳定的状态;压力越高,流体的状态越容易发生变化;黏度是由流体分子间的作用力决定的,在相同条件下,液体比气体的黏度要低得多。所以,在相同条件下,液体比气体容易形成稳定状态,这也就是为什么超临界流体具有很高的热容。因为,在一定条件下,随着温度和压力的升高,分子间的作用力增大,流体密度也会逐渐增大。也就是说,当温度和压力升高到一定程度后,流体就会呈现出超临界状态(指流体中溶质浓度和温度均低于临界点的一种状态)。

#### 1.1.2 超临界二氧化碳循环工作原理

二氧化碳布雷顿循环是指将热能转化为机械能的一种循环过程。工作原理:首先,将流体中的固体杂质和

其他物质从高压容器中排除,然后在液体容器中注入二氧化碳气体,并让其进入一种特殊的膨胀压力状态,在超临界状态下,二氧化碳气体能够瞬间膨胀。将膨胀后的气体引入到一个布雷顿循环装置中,使其从一个膨胀过程进入另一个膨胀过程,从而带动发电机进行发电。在整个发电过程中,二氧化碳布雷顿循环装置都是处于高压状态,为了使系统更加安全可靠,通常会对二氧化碳进行冷却。

## 1.2 布雷顿循环原理

### 1.2.1 布雷顿循环基本原理

布雷顿循环的基本工作过程是:工质(如CO<sub>2</sub>)在循环中做热功,把热能转化为机械能,再由机械能驱动发电机发电。整个循环包括工质的热功转换、布雷顿循环发动机的做功和发电机发电三个部分。因此,布雷顿循环又称为热能—机械能—热能的联合循环。对于布雷顿循环中的工质,其压力越大,则膨胀过程越充分,温度越高,则压力越大,则膨胀过程越充分。当工质为超临界状态时,由于超临界压力和温度低于气体的临界压力和温度,因此具有更大的膨胀比和更好的传热特性。因此将超临界二氧化碳作为工质来做功发电可以使系统得到更大的功率输出。

### 1.2.2 布雷顿循环在太阳能热发电中的应用

在太阳能热发电中,主要通过利用太阳能热能驱动机械功转换器来带动发电机发电,将太阳能热能转化为机械能,然后通过燃料电池产生电能,然后再驱动发电机发电。在这个过程中,热能是唯一的驱动力,这就是太阳能热发电技术的最大优势。然而,由于太阳能热发电中的热源和热源之间通常存在较大温差,因此需要将

热能进行有效利用以提高热效率。采用超临界二氧化碳作为热源进行驱动发电具有较大的优势,可实现低温余热回收并利用低温余热提高热效率。由于CO<sub>2</sub>与水蒸气的温度相近且不存在相变过程,因此可通过对CO<sub>2</sub>进行压缩、膨胀等过程来提高热效率。

## 2 太阳能热发电系统构成与工作原理

### 2.1 太阳能聚光系统

太阳能聚光系统是将大量的太阳辐射能聚集在一起,形成聚焦光束,再将聚焦光束投射到反射镜上,实现能量的转化。在整个系统中,光导管(photofusion pipeline)是聚光系统的主要部分。光导管通常由塑料或金属制成,将太阳辐射能集中在一起。此外,还可以根据不同的聚光比和不同的聚光方式将太阳能聚集起来。光导管是由玻璃或其他材料制成的圆柱状反射镜。这种反射镜可以将太阳辐射能聚集到一起并反射给接收器,以实现能量的转换。光导管可以用作集热器,也可以用作集热系统和热电池或热电偶,或者两者都有。

### 2.2 热能储存系统

热能储存系统主要由两大部分组成:蓄热材料和储热装置。在这些设备中,我们将重点讨论蓄热材料这一要素。蓄热材料是系统中用于吸收、转换和储存太阳能的材料。简而言之,蓄热材料就是将太阳能转化为热能的关键部件。这些热能被储存下来,并在需要时再次被用来加热系统的其他部件,从而实现循环利用。常用的蓄热材料包括石墨、硅碳、铅和铜等材料。储热装置则是将热能转化为电能的核心设备,它主要包含蓄热装置、蒸发器和换热器三个部分。具体来说,蓄热装置通过太阳能吸收热量,然后将热量传递给蒸发器,最终在蒸发器中完成能量转换。蒸发器的作用是通过加热,将吸收的热量传递给水。水在此过程中转化为水蒸气,进而推动循环机组产生电能。经过一个完整的能量转换过程,能量得到了保存,并最终转化为电能输送至电网。

### 2.3 布雷顿循环与太阳能热发电系统的结合

布雷顿循环太阳能热发电系统,这种先进的技术使得太阳能热发电在高效、环保、可持续发展等方面的优势得以充分展现。与传统太阳能热发电系统相比,其能量转换效率显著提高。在该系统中,太阳能聚光器会产生大量热能,这些能量最终将被存储于热能存储装置中。而这些热能存储装置是由一个太阳能热发电站提供的。这意味着太阳能资源被高效利用,并且这些存储的热能可以进一步转换成电能,从而实现能源的有效循环和利用。此外,与使用水或蒸汽作为工质的太阳能热发电系统相比,超临界二氧化碳布雷顿循环减少了工质材

料的消耗,降低了对环境的污染。同时,由于工质的能量密度更高,燃料消耗也相应减少。二氧化碳和水均处于超临界状态,它们可以通过直接转化的方式直接转换为电能。因此,布雷顿循环不仅能够有效利用太阳能,而且还能提高发电效率,为清洁能源的推广和应用提供了新的途径。

## 3 超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统性能分析

### 3.1 性能评价指标

为了更好地了解超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统的性能,将超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统与传统的太阳能热发电系统进行比较。在传统的太阳能热发电系统中,工质由锅炉将水加热到高温高压,再由汽轮机将蒸汽压到高温高压的汽缸内进行膨胀做功,驱动发电机发出电能。在超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统中,工质采用超临界二氧化碳,该工质在高温高压的环境中膨胀做功,从而提高了发电效率。

### 3.2 系统性能分析方法

为了系统性能分析的方便,将系统性能分析方法分为理论计算和实验研究两种。理论计算是指通过对系统的各个热力过程进行模拟,并根据模拟结果计算出各个热力过程的效率;实验研究是指将系统的性能测试实验结果与理论计算结果进行对比,以验证理论计算结果的正确性。在进行系统性能分析时,通常先对超临界二氧化碳的气化过程、布雷顿循环过程和热机压缩过程进行模拟,并通过对比模拟结果,确定其中哪个过程是主要的影响因素,从而进一步确定整个系统性能分析时应该使用的循环参数。

### 3.3 实验研究与数值模拟

实验研究是通过搭建实验平台,模拟出系统的各个热力过程,并用实验数据来验证模拟结果的正确性。同时,还可以通过实验来获得系统参数随时间变化的规律,以优化整个系统的运行参数。对于超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统的理论计算,目前主要有两种方法:第一种是通过分析模拟结果与实验数据进行比较,得出两个数值之间的误差范围,然后利用这个误差范围来优化整个系统参数。第二种是通过计算模型对整个系统的参数进行分析,然后根据分析结果对系统参数进行优化。然而,第一种方法只能得到系统的效率,而第二种方法可以得到整个循环的效率。

## 4 系统性能优化

### 4.1 优化目标

对基于超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统性能优化的研究,将系统热效率、压力损失和回热器效率作为优化目标。考虑到太阳能热发电系统中超临界二氧化碳布雷顿循环工质的压力和温度均较高,在实际应用中,很难找到超临界二氧化碳工质的压力和温度,因此不能使用实际工程中常用的超临界二氧化碳工质进行系统性能优化研究。采用基于有限时间热力学分析的方法,在不考虑工质损失的情况下,分析系统热效率和压力损失对循环热效率、回热器效率以及效率相对于回热温度、压力的变化规律,得到了不同工况下优化目标函数及约束条件。

## 4.2 优化方法

### 4.2.1 参数优化

通过建立多目标优化模型,以系统热效率、压力损失和回热器效率作为优化目标,采用改进的粒子群优化算法进行参数优化。具体步骤如下:给定系统热效率、压力损失和回热器效率的目标值,对多个目标函数进行迭代计算;利用 MATLAB 对所得迭代结果进行处理,得到优化的目标函数和约束条件;利用 MATLAB 对不同工况下系统的各性能指标进行计算,得到相应的最优参数组合;将计算得到的最优参数组合代入到多目标优化模型中,以系统热效率和回热器效率作为优化目标,重新迭代计算得到不同工况下的最优参数组合。

### 4.2.2 结构优化

通过对系统进行结构优化,使得系统效率、压力损失和回热器效率达到最优。具体优化过程如下:采用粒子群算法,对不同工况下系统的结构参数进行优化;对得到的最优参数组合进行重新迭代计算,得到不同工况下系统的最优参数组合;将得到的最优参数组合代入到多目标优化模型中,重新迭代计算,得到不同工况下的最优参数组合;重新迭代计算,得到不同工况下系统的最优参数组合。其中,工质的质量流量、单位质量工质所需要的蒸发压力以及单位质量工质所需要的回热器面积与原系统一致。

## 4.3 优化结果与分析

系统性能变化规律:当系统的运行参数保持不变

时,系统的热效率、压力损失和回热器效率随着工质质量流量的增加而增大;系统性能影响因素分析:通过对系统性能影响因素的分析,发现系统热效率和压力损失与工质质量流量的变化趋势基本一致,并且在不同工况下其变化趋势也基本一致,可以认为二者之间是线性关系;回热器效率随工质质量流量的增大而减小。此外,当工质的压力增加时,回热器效率随之减小。

## 结语

通过对超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统的性能分析,在考虑低热源温度、系统压力和工质质量流量等参数影响的基础上,建立了超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统的性能评价模型,从热力学第一定律和第二定律两方面分析了各参数对系统性能的影响规律。并进一步对不同工质流量、工质质量流量和热源温度下超临界二氧化碳布雷顿循环太阳能热发电系统的热力性能进行了优化研究,在保证系统发电效率不变的情况下,通过调节各参数对系统性能的影响,可以有效提高系统发电效率。

## 参考文献

- [1]超临界二氧化碳布雷顿循环研究进展[J]. 纪宇轩;邢凯翔;岑可法;倪明江;肖刚.动力工程学报,2022(01)
- [2]再压缩S-CO<sub>2</sub>塔式光热发电系统模拟及参数优化[J]. 王智;闫锐鸣;刘亚丽;张玲;陶鸿俊.汽轮机技术,2021(06)
- [3]中国碳中和:引领全球气候治理和绿色转型[J]. 张永生;巢清尘;陈迎;张建宇;王谋;张莹;禹湘.国际经济评论,2021(03)
- [4]采用压缩储能的新型超临界二氧化碳布雷顿循环塔式太阳能热发电系统性能分析[J]. 刘易飞;张燕平;王渊静.热力发电,2021(05)
- [5]碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 王灿;张雅欣.中国环境管理,2020(06)
- [6]超临界二氧化碳发电技术现状及挑战[J]. 邓清华;胡乐豪;李军;丰镇平.热力透平,2019(03)
- [7]超临界二氧化碳发电系统研究进展[J]. 赵煜;董自春;张羽;赵静.热动力工程,2019(01)