



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117076830 B

(45) 授权公告日 2024.03.12

(21) 申请号 202311323376.1

(22) 申请日 2023.10.13

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 117076830 A

(43) 申请公布日 2023.11.17

(73) 专利权人 中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所
地址 621000 四川省绵阳市涪城区二环路南段6号

(72) 发明人 牟斌 王建涛 蒋浩 郭永恒 张露 马率 张健 王子维 刘钊 李明

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227
专利代理师 张珊珊

(51) Int. Cl.
G06F 17/11 (2006.01)
G06F 17/18 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 101029788 A, 2007.09.05
CN 101196349 A, 2008.06.11
JP 2000356158 A, 2000.12.26
WO 2023173624 A1, 2023.09.21

CN 102481824 A, 2012.05.30

CN 111832189 A, 2020.10.27

CN 112960978 A, 2021.06.15

CN 113137774 A, 2021.07.20

CN 115288819 A, 2022.11.04

CN 1190727 A, 1998.08.19

DE 102013101028 B3, 2014.04.10

WO 2008115101 A1, 2008.09.25

WO 2013057314 A2, 2013.04.25

牟斌等. 低温增压真实气体效应下轴流压缩机功率计算.《第九届全国流体力学学术会议论文摘要集》.2016, 335.

秦艳平等. 真实气体效应对高压涡轮理论绝热功的影响.《中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集》.2019, 527-532.

牟斌等. 低温增压真实气体效应下轴流压缩机功率计算.《第九届全国流体力学学术会议论文摘要集》.2016, 335.

江雄等. 考虑低温增压真实气体效应的运输机气动特性数值模拟研究.《空气动力学报》.2016, 第34卷(第5期), 652-658. (续)

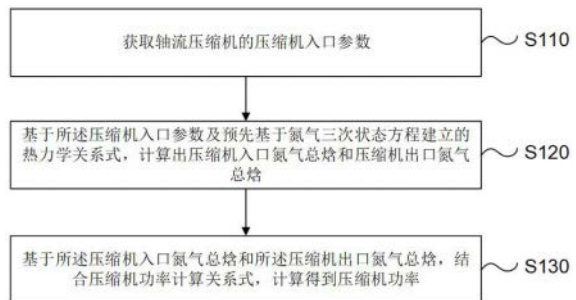
审查员 蔡震震

权利要求书3页 说明书10页 附图7页

(54) 发明名称
氮气轴流压缩机功率确定方法、装置、电子设备及介质

(57) 摘要
本发明公开了一种氮气轴流压缩机功率确定方法、装置、电子设备及介质,应用于轴流压缩机技术领域。该方法包括:获取轴流压缩机的压缩机入口参数;基于压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓;基于压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,结合压缩机功率计算关系式,计算得到压缩机功率;本发明中提供的方法基于真实氮气情况来计

算压缩机功率,能够提高计算精确度,并且计算过程简单易行,能够提高计算效率。



CN 117076830 B

[接上页]

(56) 对比文件

肖中云等. 低速非定常流动的预处理计算方法.《计算流体力学研究进展——第十二届全国计算流体力学会议论文集》.2004,104-109.

Yueming yang等. Influence of different

equations of state on simulation results of supercritical CO₂ centrifugal compressor.《Mechanical engineering science》.2021,第3卷(第2期),25-33.

1. 一种氮气轴流压缩机功率确定方法,其特征在于,包括:

获取轴流压缩机的压缩机入口参数;

基于所述压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓;

基于所述压缩机入口氮气总焓和所述压缩机出口氮气总焓,结合压缩机功率计算关系式,计算得到压缩机功率;其中:

所述预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,包括:

基于氮气三次状态方程结合热力学第一定律,得到熵关系式和焓关系式;

所述压缩机入口参数包括压缩机入口氮气压强、压缩机入口氮气温度和压缩机等熵压缩率;

所述基于所述压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,包括:

基于所述压缩机入口氮气压强和所述压缩机入口氮气温度,结合所述氮气三次状态方程,计算得到压缩机入口氮气比容;

基于所述压缩机入口氮气压强、所述压缩机入口氮气温度和所述压缩机入口氮气比容,结合所述焓关系式计算得到压缩机入口氮气总焓;

基于所述压缩机入口氮气比容和所述压缩机入口氮气温度,结合所述熵关系式,计算得到压缩机入口氮气熵;

基于所述压缩机入口氮气熵,得到压缩机出口氮气熵;

基于所述压缩机入口氮气压强及等熵膨胀压比,得到压缩机出口氮气压强;

基于所述压缩机出口氮气压强、所述压缩机出口氮气熵,结合所述氮气三次状态方程及所述熵关系式,得到压缩机出口氮气温度和压缩机出口氮气比容;

基于所述压缩机出口氮气压强、所述压缩机出口氮气温度和所述压缩机出口氮气比容,结合所述焓关系式计算得到压缩机出口氮气总焓;

所述压缩机功率计算关系式为:

$$P_i = \dot{m} \cdot \int_1^2 v dp = \dot{m} \cdot (h_{t2} - h_{t1}), P_i \text{ 表示第 } i \text{ 个压缩机的压缩机功率, } \dot{m} \text{ 表示质量流}$$

量, h_{t1} 表示压缩机入口氮气总焓, h_{t2} 表示压缩机出口氮气总焓, v 表示氮气比容, p 表示氮气压强。

2. 根据权利要求1所述的氮气轴流压缩机功率确定方法,其特征在于,所述氮气三次状态方程为:

$$p = \frac{RT}{(v - b_0 + c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v + b_0)}, \text{ 其中, } p \text{ 表示氮气压强, } T \text{ 表示氮气温度, } v \text{ 表示氮气比}$$

容, b_0 为第一氮气气体常数、 c_0 为第二氮气气体常数、 R 为第三氮气气体常数, $\alpha(T)$ 表示氮气温度函数, $\alpha(T) = \alpha_0 (T_c/T)^n$, α_0 表示第四氮气气体常数, T_c 表示氮气临界温度, n 表示指数常数。

3. 根据权利要求2所述的氮气轴流压缩机功率确定方法,其特征在于,所述熵关系式为:

$$s(T, v) = R \ln \left(\frac{v - b_0 - c_0}{T} \right) + \frac{1}{b_0} \frac{d\alpha(T)}{dT} \ln \left(\frac{v + b_0}{v} \right) + \int_{T_0}^T \frac{c_p^0}{T} dT, \text{ 其中, } T_0 \text{ 表示参考温度, } c_p^0 \text{ 表示完}$$

全气体的定压比热系数, $s(T, v)$ 表示气体熵;

焓关系式为:

$$h(T, v) = \int_{T_0}^T c_p^0 dT + pv - RT - \frac{(n+1)\alpha(T)}{b_0} \ln \left(\frac{v + b_0}{v} \right), \text{ 其中, } h(T, v) \text{ 表示气体焓。}$$

4. 一种氮气轴流压缩机功率确定装置,其特征在于,包括:

获取模块,用于获取轴流压缩机的压缩机入口参数;

第一计算模块,用于基于所述压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓;

第二计算模块,用于基于所述压缩机入口氮气总焓和所述压缩机出口氮气总焓,结合压缩机功率计算关系式,计算得到压缩机功率;其中:

所述预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,包括:

基于氮气三次状态方程结合热力学第一定律,得到熵关系式和焓关系式;

所述压缩机入口参数包括压缩机入口氮气压强、压缩机入口氮气温度和压缩机等熵压缩率;

所述基于所述压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,包括:

基于所述压缩机入口氮气压强和所述压缩机入口氮气温度的,结合所述氮气三次状态方程,计算得到压缩机入口氮气比容;

基于所述压缩机入口氮气压强、所述压缩机入口氮气温度和所述压缩机入口氮气比容,结合所述焓关系式计算得到压缩机入口氮气总焓;

基于所述压缩机入口氮气比容和所述压缩机入口氮气温度,结合所述熵关系式,计算得到压缩机入口氮气熵;

基于所述压缩机入口氮气熵,得到压缩机出口氮气熵;

基于所述压缩机入口氮气压强及等熵膨胀压比,得到压缩机出口氮气压强;

基于所述压缩机出口氮气压强、所述压缩机出口氮气熵,结合所述氮气三次状态方程及所述熵关系式,得到压缩机出口氮气温度和压缩机出口氮气比容;

基于所述压缩机出口氮气压强、所述压缩机出口氮气温度和所述压缩机出口氮气比容,结合所述焓关系式计算得到压缩机出口氮气总焓;

所述压缩机功率计算关系式为:

$$P_i = \dot{m} \cdot \int_1^2 v dp = \dot{m} \cdot (h_{t2} - h_{t1}), P_i \text{ 表示第 } i \text{ 个压缩机的压缩机功率, } \dot{m} \text{ 表示质量}$$

流量, h_{t1} 表示压缩机入口氮气总焓, h_{t2} 表示压缩机出口氮气总焓, v 表示氮气比容, P 表示氮气压强。

5. 一种电子设备,其特征在于,包括:
存储器,用于存储计算机程序;
处理器,用于执行所述计算机程序时实现如权利要求1至3任一项所述氮气轴流压缩机功率确定方法的步骤。

6. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至3任一项所述氮气轴流压缩机功率确定方法的步骤。

氮气轴流压缩机功率确定方法、装置、电子设备及介质

技术领域

[0001] 本发明涉及轴流压缩机技术领域,特别是涉及一种氮气轴流压缩机功率确定方法、装置、电子设备及介质。

背景技术

[0002] 低温风洞是用降低工作介质温度的方法来提高实验雷诺数的风洞,低温风洞以氮气为运行介质,通过低温、增压方式提高雷诺数。总压范围 $(1.15\sim 4.50) \times 10^5\text{Pa}$,总温范围 $110\sim 313\text{K}$,马赫数范围 $0.15\sim 1.30$ 。在低温风洞设计中,轴流压缩机驱动功率的大小关系到驱动电机和变频器的选型及风洞运行包络线范围和效率,是重要的设计参数。当氮气工作于低温增压状态,完全气体假设与真实误差较大,压缩机功率计算必须考虑真实气体效应。目前计算轴流压缩机功率有两种方法,一种是按照理想气体算,最后乘以压缩因子,这种方法在低温高压工况误差较大;另一种是完全按照真实气体算,需要按照维里公式查表计算,计算过程繁琐。

[0003] 鉴于此,如何提供一种计算效率高、精确度高的氮气轴流压缩机功率确定方法、装置、系统及计算机可读存储介质成为本领域技术人员需要解决的问题。

发明内容

[0004] 本发明实施例的目的是提供一种氮气轴流压缩机功率确定方法、装置、电子设备及计算机可读存储介质,在使用过程中能够提高计算精确度和计算效率。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明实施例提供了一种氮气轴流压缩机功率确定方法,包括:

[0006] 获取轴流压缩机的压缩机入口参数;

[0007] 基于压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓;

[0008] 基于压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,结合压缩机功率计算关系式,计算得到压缩机功率。

[0009] 可选的,预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,包括:

[0010] 基于氮气三次状态方程结合热力学第一定律,得到熵关系式和焓关系式。

[0011] 可选的,压缩机入口参数包括压缩机入口氮气压强、压缩机入口氮气温度和压缩机等熵压缩率。

[0012] 可选的,基于压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,包括:

[0013] 基于压缩机入口氮气压强和压缩机入口氮气温度,结合氮气三次状态方程,计算得到压缩机入口氮气比容;

[0014] 基于压缩机入口氮气压强、压缩机入口氮气温度和压缩机入口氮气比容,结合焓关系式计算得到压缩机入口氮气总焓;

[0015] 基于压缩机入口氮气比容和压缩机入口氮气温度,结合熵关系式,计算得到压缩机入口氮气熵;

[0016] 基于压缩机入口氮气熵,得到压缩机出口氮气熵;

[0017] 基于压缩机入口氮气压强及等熵膨胀压比,得到压缩机出口氮气压强;

[0018] 基于压缩机出口氮气压强、压缩机出口氮气熵,结合氮气三次状态方程及熵关系式,得到压缩机出口氮气温度和压缩机出口氮气比容;

[0019] 基于压缩机出口氮气压强、压缩机出口氮气温度和压缩机出口氮气比容,结合焓关系式计算得到压缩机出口氮气总焓。

[0020] 可选的,氮气三次状态方程为:

[0021]
$$p = \frac{RT}{(v-b_0+c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v+b_0)}$$
,其中, p 表示氮气压强, T 表示氮气温度, v 表示氮气比容, b_0 为第一氮气气体常数、 c_0 为第二氮气气体常数、 R 为第三氮气气体常数, $\alpha(T)$ 表示氮气温度函数, $\alpha(T)=\alpha_0(T_c/T)^n$, α_0 表示第四氮气气体常数, T_c 表示氮气临界温度, n 表示指数常数。

[0022] 可选的,熵关系式为:

[0023]
$$s(T,v) = R \ln \left(\frac{v-b_0-c_0}{T} \right) + \frac{1}{b_0} \frac{d\alpha(T)}{dT} \ln \left(\frac{v+b_0}{v} \right) + \int_{T_0}^T \frac{c_p^0}{T} dT$$
,其中, T_0 表示参考温度,

c_p^0 表示完全气体的定压比热系数, $s(T,v)$ 表示气体熵;

[0024] 焓关系式为:

[0025]
$$h(T,v) = \int_{T_0}^T c_p^0 dT + pv - RT - \frac{(n+1)\alpha(T)}{b_0} \ln \left(\frac{v+b_0}{v} \right)$$
,其中, $h(T,v)$ 表示气体焓。

[0026] 可选的,压缩机功率计算关系式为:

[0027]
$$P_i = \dot{m} \cdot \int_1^2 v dp = \dot{m} \cdot (h_{t2} - h_{t1})$$
, P_i 表示第*i*个压缩机的压缩机功率, \dot{m} 表示质量流量, h_{t1} 表示压缩机入口氮气总焓, h_{t2} 表示压缩机出口氮气总焓。

[0028] 本发明实施例还提供了一种氮气轴流压缩机功率确定装置,包括:

[0029] 获取模块,用于获取轴流压缩机的压缩机入口参数;

[0030] 第一计算模块,用于基于压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓;

[0031] 第二计算模块,用于基于压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,结合压缩机功率计算关系式,计算得到压缩机功率。

[0032] 本发明实施例还提供了一种电子设备,包括:

[0033] 存储器,用于存储计算机程序;

[0034] 处理器,用于执行计算机程序时实现如上述氮气轴流压缩机功率确定方法的步骤。

[0035] 本发明实施例还提供了一种计算机可读存储介质,计算机可读存储介质上存储有计算机程序,计算机程序被处理器执行时实现如上述氮气轴流压缩机功率确定方法的步骤。

[0036] 本发明实施例提供了一种氮气轴流压缩机功率确定方法、装置、电子设备及计算机可读存储介质,该方法包括:获取轴流压缩机的压缩机入口参数;基于压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓;基于压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,结合压缩机功率计算关系式,计算得到压缩机功率。

[0037] 可见,本发明实施例中预先根据氮气三次状态方程建立的热力学关系式,然后在计算压缩机功率时,根据轴流压缩机的压缩机入口参数结合氮气三次状态方程及所建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,再结合压缩机功率计算关系式进一步计算出压缩机功率,本发明中提供的方法基于真实氮气情况来计算压缩机功率,能够提高计算精确度,并且计算过程简单易行,能够提高计算效率。

附图说明

[0038] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对现有技术和实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0039] 图1为本发明实施例提供的一种氮气轴流压缩机功率确定方法的流程示意图;

[0040] 图2为本发明实施例提供的一种积分路径曲线示意图;

[0041] 图3为本发明实施例提供的一种熵、焓随压强和温度变化曲线示意图;

[0042] 图4为本发明实施例提供的另一种熵、焓随压强和温度变化曲线示意图;

[0043] 图5为本发明实施例提供的一种压缩机功率随压强变化曲线示意图;

[0044] 图6为本发明实施例提供的另一种压缩机功率随压强变化曲线示意图;

[0045] 图7为本发明实施例提供的再一种压缩机功率随压强变化曲线示意图;

[0046] 图8为本发明实施例提供的一种氮气轴流压缩机功率确定装置的结构示意图;

[0047] 图9为本发明实施例提供的一种电子设备的结构示意图;

[0048] 图10为本发明实施例提供的一种计算机可读存储介质的结构示意图。

具体实施方式

[0049] 本发明实施例提供了一种氮气轴流压缩机功率确定方法、装置、电子设备及计算机可读存储介质,在使用过程中能够提高计算精确度和计算效率。

[0050] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0051] 请参照图1,图1为本发明实施例提供的一种氮气轴流压缩机功率确定方法的流程示意图。该方法,包括:

[0052] S110:获取轴流压缩机的压缩机入口参数;

[0053] 需要说明的是,本发明实施例中预先基于氮气三次状态方程建立热力学关系式,并建立压缩机功率计算关系式,对氮气三次状态方程及所建立的各个关系式进行预先存储。在需要对氮气轴流压缩机的功率进行计算时,可以获取轴流压缩机的压缩机入口参数,其中,轴流压缩机的压缩机入口参数可以包括压缩机入口氮气压强、压缩机入口氮气温度和压缩机等熵压缩率,当然在实际应用中不仅限于这几种参数,还可以包括其他的参数。

[0054] S120:基于压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓;

[0055] 在获取到轴流压缩机的压缩机入口参数后,根据压缩机入口参数结合基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,进行计算就可以得到压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓。

[0056] 需要说明的是,由于本发明实施例中根据氮气三次状态方程建立热力学关系式,基于氮气真实气体的相关参数能够准确的计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓。

[0057] S130:基于压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,结合压缩机功率计算关系式,计算得到压缩机功率。

[0058] 具体的,在得到压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓后,调用预先存储的压缩机功率计算关系式,进一步计算得到氮气轴流压缩机的压缩机功率。

[0059] 需要说明的是,轴流压缩机主要特征是其工作介质为氮气,工况为大多数情况下温度在90K左右,压力可以为1-10个大气压范围。通过轴流压缩机,对低温氮气进行等熵压缩,使得输出为高压气体。在实际应用中,可以选取三次状态方程中的Aungier-Redlich-Kwongz方程,也即本发明实施例中的氮气三次状态方程可以为ARK状态方程,用该来ARK状态方程描述低温氮气状态变化。

[0060] 具体的,本发明实施例中的氮气三次状态方程(也即ARK状态方程)为

$$p = \frac{RT}{(v - b_0 + c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v + b_0)}, \text{ 其中, } p \text{ 表示氮气压强, } T \text{ 表示氮气温度, } v \text{ 表示氮气比容,}$$

b_0 为第一氮气气体常数、 c_0 为第二氮气气体常数、 R 为第三氮气气体常数, $\alpha(T)$ 表示氮气温度函数, $\alpha(T) = \alpha_0 (T_c/T)^n$, α_0 表示第四氮气气体常数, T_c 表示氮气临界温度, n 表示指数常数。

[0061] 通常情况下, $\alpha_0 = 0.42747 R^2 T_c^2 / p_c$, $n = 0.4986 + 1.1735\omega + 0.475\omega^2$, $\omega = 0.03772$,

$$b_0 = 0.08664 RT_c / p_c, \quad c_0 = \frac{RT_c}{p_c + \frac{\alpha_0}{v_c(v_c + b_0)}} + b_0 - v_c, \quad v_c = 1/\rho_c, \quad T_c = 126.2K,$$

$p_c = 3.39 \times 10^6 Pa$, $\rho_c = 314.03 kg/m^3$, 其中, T_c 表示氮气临界温度, α_0 表示第四氮气气体常数, p_c 表示氮气临界压力, ω 表示离心因子, n 表示指数常数, v_c 表示氮气临界比容,

ρ_c 表示氮气临界密度。

[0062] 根据ARK状态方程应用等熵及热力学第一定律,即可得到声速表达式:

$$[0063] \quad a^2 = \frac{\rho h_T}{\rho h_T \rho_p + \rho_T (1 - \rho h_p)}, \text{其中, } a \text{ 表示声速, } h_T \text{ 表示焓对温度的偏导数, } \rho_p \text{ 表}$$

示气体密度对压强的偏导数, ρ 表示气体密度, ρ_T 表示气体密度对温度的偏导数, h_p 表示焓对压强的偏导数。

[0064] 进一步的,本发明实施例中预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,可以包括:

[0065] 基于氮气三次状态方程结合热力学第一定律,得到熵关系式和焓关系式。

[0066] 具体的,本发明实施例中的熵关系式为:

$$[0067] \quad s(T, v) = R \ln \left(\frac{v - b_0 - c_0}{T} \right) + \frac{1}{b_0} \frac{d\alpha(T)}{dT} \ln \left(\frac{v + b_0}{v} \right) + \int_{T_0}^T \frac{c_p^0}{T} dT, \text{其中, } T_0 \text{ 表示参考温度, } c_p^0$$

表示完全气体的定压比热系数, $s(T, v)$ 表示气体熵;

[0068] 焓关系式为:

$$[0069] \quad h(T, v) = \int_{T_0}^T c_p^0 dT + pv - RT - \frac{(n+1)\alpha(T)}{b_0} \ln \left(\frac{v + b_0}{v} \right), \text{其中, } h(T, v) \text{ 表示气体焓。}$$

[0070] 具体的,本发明实施例中的压缩机功率计算关系式为:

$$[0071] \quad P_i = \dot{m} \cdot \int_1^2 v dp = \dot{m} \cdot (h_{t2} - h_{t1}), P_i \text{ 表示第 } i \text{ 个压缩机的压缩机功率, } \dot{m} \text{ 表示}$$

质量流量, h_{t1} 表示压缩机入口氮气总焓, h_{t2} 表示压缩机出口氮气总焓。

[0072] 具体的,根据可逆过程的热力学第一定律,将内能看做比容和温度的函数,微分后经过简单推导,得到熵、内能的微分表达式为:

$$[0073] \quad ds = c_v \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv, \text{其中, } s \text{ 为熵, } c_v \text{ 为定容比热, } u \text{ 为内能, } \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$$

$$du = c_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

表示压强对温度定容偏导数。

[0074] 具体的可以选定积分路线可参照图2,其中, P_{ref} 、 T_{ref} 、 V_{ref} 分别表示任意选定一个参考点的压强、温度和比容,积分路径从A点出发经B、C到达D点,AB段为等温过程,B点比容无穷大,可看作完全气体,BC段为等容过程,此段可应用完全气体状态方程,CD段为等温过程,AB、CD段利用ARK方程积分,也即基于ARK状态方程求得各偏导数,并进行积分可得内能关系式、熵关系式,并进一步得到焓关系式,具体公式如下:

$$[0075] \quad \text{熵关系式为: } s(T, v) = R \ln \left(\frac{v - b_0 - c_0}{T} \right) + \frac{1}{b_0} \frac{d\alpha(T)}{dT} \ln \left(\frac{v + b_0}{v} \right) + \int_{T_0}^T \frac{c_p^0}{T} dT;$$

[0076] 内能关系式: $u(T, v) = \int_{T_0}^T c_p^0 dT - RT - \frac{(n+1)\alpha(T)}{b_0} \ln\left(\frac{v+b_0}{v}\right)$;

[0077] 焓关系式: $h(T, v) = \int_{T_0}^T c_p^0 dT + pv - RT - \frac{(n+1)\alpha(T)}{b_0} \ln\left(\frac{v+b_0}{v}\right)$ 。

[0078] 通过上述过程即可得到低温氮气在指定温度和比容下的熵、焓和内能的表达式。

[0079] 需要说明的是,在需要计算氮气轴流压缩机的压缩机功率时,可以获取压缩机入口参数,包括压缩机入口氮气压强、压缩机入口氮气温度和压缩机等熵压缩率。

[0080] 进一步的上述基于压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓的过程,具体可以包括:

[0081] 基于压缩机入口氮气压强和压缩机入口氮气温度,结合氮气三次状态方程,计算得到压缩机入口氮气比容;

[0082] 也即,已知压缩机入口氮气压强和压缩机入口氮气温度,则结合ARK状态方向

$$p = \frac{RT}{(v-b_0+c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v+b_0)}, \text{即可得到压缩机入口氮气比容。}$$

[0083] 基于压缩机入口氮气压强、压缩机入口氮气温度和压缩机入口氮气比容,结合焓关系式计算得到压缩机入口氮气总焓;

[0084] 在得到压缩机入口氮气压强、压缩机入口氮气温度和压缩机入口氮气比容后,根据焓关系式,

[0085] $h(T, v) = \int_{T_0}^T c_p^0 dT + pv - RT - \frac{(n+1)\alpha(T)}{b_0} \ln\left(\frac{v+b_0}{v}\right)$ 即可得到压缩机入口氮气总焓。

[0086] 基于压缩机入口氮气比容和压缩机入口氮气温度,结合熵关系式,计算得到压缩机入口氮气熵;

[0087] 具体的,在得到压缩机入口氮气比容后,结合压缩机入口氮气温度,基于熵关系式

$$s(T, v) = R \ln\left(\frac{v-b_0-c_0}{T}\right) + \frac{1}{b_0} \frac{d\alpha(T)}{dT} \ln\left(\frac{v+b_0}{v}\right) + \int_{T_0}^T \frac{c_p^0}{T} dT$$
 可以进一步得到压缩机入口氮气熵。

[0088] 基于压缩机入口氮气熵,得到压缩机出口氮气熵;

[0089] 具体的,由于轴流压缩机是等熵压缩,因此压缩机出口氮气熵等于压缩机入口氮气熵,故,在计算得到压缩机入口氮气熵后,就可以得到压缩机出口氮气熵。

[0090] 基于压缩机入口氮气压强及等熵膨胀压比,得到压缩机出口氮气压强;

[0091] 需要说明的是,基于压缩机本身的参数可以得到压缩机的等熵膨胀压比,压缩机的出口总压是由等熵膨胀压比和入口总压确定的,因此可以根据压缩机入口氮气压强和等熵膨胀压比计算得到压缩机出口氮气压强。

[0092] 基于压缩机出口氮气压强、压缩机出口氮气熵,结合氮气三次状态方程及熵关系式,得到压缩机出口氮气温度和压缩机出口氮气比容;

[0093] 具体的,在上述得到压缩机出口氮气压强、压缩机出口氮气熵,联合氮气三次状态

方程 $p = \frac{RT}{(v-b_0+c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v+b_0)}$ 及熵关系式,

$s(T,v) = R \ln\left(\frac{v-b_0-c_0}{T}\right) + \frac{1}{b_0} \frac{d\alpha(T)}{dT} \ln\left(\frac{v+b_0}{v}\right) + \int_{T_0}^T \frac{c_p^0}{T} dT$, 即可得到压缩机出口氮气温度的, 然

后再得到压缩机出口氮气温度的, 结合压缩机出口氮气温度的、压缩机出口氮气压强的, 利用氮气三次状态方程 $p = \frac{RT}{(v-b_0+c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v+b_0)}$, 即可进一步计算得到压缩机出口氮气比

容。

[0094] 基于压缩机出口氮气压强、压缩机出口氮气温度和压缩机出口氮气比容, 结合焓关系式计算得到压缩机出口氮气总焓。

[0095] 具体的, 通过上述过程得到压缩机出口氮气压强、压缩机出口氮气温度和压缩机出口氮气比容, 利用焓关系式, $h(T,v) = \int_{T_0}^T c_p^0 dT + pv - RT - \frac{(n+1)\alpha(T)}{b_0} \ln\left(\frac{v+b_0}{v}\right)$ 即可得到压缩机

出口氮气总焓。

[0096] 考虑到工作介质压缩过程中动能、位能变化较小, 因此可以基于压缩机功率计算关系式 $P_i = \dot{m} \cdot \int_1^2 v dp = \dot{m} \cdot (h_{i2} - h_{i1})$, 计算得到压缩机功率 P_i , 其中, \dot{m} 为试验值。

[0097] 可见, 本发明实施例中预先根据氮气三次状态方程建立的热力学关系式, 然后在计算压缩机功率时, 根据轴流压缩机的压缩机入口参数结合氮气三次状态方程及所建立的热力学关系式, 计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓, 再结合压缩机功率计算关系式进一步计算出压缩机功率, 本发明中提供的方法基于真实氮气情况来计算压缩机功率, 能够提高计算精确度, 并且计算过程简单易行, 能够提高计算效率。

[0098] 还需要说明的是, 本发明实施例中为了进一步验证了上述计算方法的准确性, 具体如下:

[0099] 选取了温度110K, 压强1bar~10bar的氮气进行计算。具体的, 可以将氮气压强按照1bar间隔分为10等份, 已知压强 p 、温度 T , 利用ARK状态方程 $p = \frac{RT}{(v-b_0+c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v+b_0)}$ 计

算氮气比容, 利用牛顿切线法求解非线性方程 $p = \frac{RT}{(v-b_0+c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v+b_0)}$, 求得比容 v (具

体可以迭代多次后求得比容); 依据熵关系式和焓关系式即可得到指定压力下的气体熵、焓。通过与标准库的数据进行比较可以验证本文公式及算法的准确性。

[0100] 具体的, 根据本发明实施例所提供的方法计算得到的熵、焓随压力、温度变化曲线均与NIST(National Institute of Standards and Technology美国国家标准与技术数据库)数据曲线比较, 如图3至4所示。由图3至4可见, 在不同的压力、温度条件下, 熵、焓变化曲线与NIST数据曲线吻合。

[0101] 另外, 可以参照ETW(European Transonic Wind Tunnel, 欧洲跨声速)风洞的运行

参数,选择了450kpa,总温110K状态进行验证计算,压缩机效率取0.85。已知压缩机入口氮气压力、温度,压缩机压等熵缩率,可以通过以下过程求出压缩机出口、入口的焓差。具体的:

[0102] 已知压缩机入口氮气压强、温度,利用ARK状态方程 $p = \frac{RT}{(v-b_0+c_0)} - \frac{\alpha(T)}{v(v+b_0)}$ 计

算出压缩机入口氮气比容;进一步依据压缩机入口温度、比容,利用上述熵关系式求压缩机出入口熵,再根据压缩机出口氮气压强由等熵膨胀压比乘以压缩机入口氮气压强确定,压缩机出口氮气熵等于入口氮气熵,联立ARK状态方程和熵关系式,应用迭代牛顿迭代法计算压缩机出口氮气温度,得到压缩机出口氮气温度后,将压缩机出口氮气温度、压缩机出口氮气压强数据代入ARK状态方程迭代得到压缩机出口氮气比容,最后将压缩机入口/出口氮气的温度、压强、比容等数据代入焓关系式计算入口及出口的总焓,代入已知流量按照

$P_i = \dot{m} \cdot \int_1^2 v dp = \dot{m} \cdot (h_{i2} - h_{i1})$ 式计算即得到压缩功率,以便更好地进行驱动电机和变频器的

的选型及确定风洞运行包络线范围和效率。

[0103] 经验证,采用本发明方法得到的计算结果如图5至7所示,本方法计算结果与,基于近似算法得到的计算结果进行比较,可见该结果和近似曲线趋势一致。

[0104] 由此可知,本发明通过引入ARK状态方程描述氮气在低温高压下等熵过程,将基于ARK状态方程下氮气的熵、焓、内能的表达式,应用到氮气低温高压下的轴流压缩机计算中进行压缩机功率的计算,计算简单方便、计算精度高。

[0105] 在上述实施例的基础上,本发明实施例还提供了一种氮气轴流压缩机功率确定装置,具体请参照图8,该装置包括:

[0106] 获取模块11,用于获取轴流压缩机的压缩机入口参数;

[0107] 第一计算模块12,用于基于压缩机入口参数及预先基于氮气三次状态方程建立的热力学关系式,计算出压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓;

[0108] 第二计算模块13,用于基于压缩机入口氮气总焓和压缩机出口氮气总焓,结合压缩机功率计算关系式,计算得到压缩机功率。

[0109] 需要说明的是,本发明实施例中所提供的氮气轴流压缩机功率确定装置,具有与上述实施例提供的氮气轴流压缩机功率确定方法相同的有益效果,对于本发明实施例中所涉及到的氮气轴流压缩机功率确定方法的具体介绍请参照上述实施例,本发明在此不再赘述。

[0110] 图9为本发明实施例提供的一种电子设备的结构图,如图9所示,电子设备包括:存储器20,用于存储计算机程序;

[0111] 处理器21,用于执行计算机程序时实现如上述实施例氮气轴流压缩机功率确定方法的步骤。

[0112] 本实施例提供的电子设备可以包括但不限于智能手机、平板电脑、笔记本电脑或台式电脑等。

[0113] 其中,处理器21可以包括一个或多个处理核心,比如4核心处理器、8核心处理器等。处理器21可以采用DSP(Digital Signal Processing,数字信号处理)、FPGA(Field-

Programmable Gate Array,现场可编程门阵列)、PLA(Programmable Logic Array,可编程逻辑阵列)中的至少一种硬件形式来实现。处理器21也可以包括主处理器和协处理器,主处理器是用于对在唤醒状态下的数据进行处理的处理单元,也称CPU(Central Processing Unit,中央处理器);协处理器是用于对在待机状态下的数据进行处理的低功耗处理单元。在一些实施例中,处理器21可以在集成有GPU(Graphics Processing Unit,图像处理器),GPU用于负责显示屏所需要显示的内容的渲染和绘制。一些实施例中,处理器21还可以包括AI(Artificial Intelligence,人工智能)处理单元,该AI处理单元用于处理有关机器学习的计算操作。

[0114] 存储器20可以包括一个或多个计算机可读存储介质,该计算机可读存储介质可以是非暂态的。存储器20还可包括高速随机存取存储器,以及非易失性存储器,比如一个或多个磁盘存储设备、闪存存储设备。本实施例中,存储器20至少用于存储以下计算机程序201,其中,该计算机程序被处理器21加载并执行之后,能够实现前述任一实施例公开的氮气轴流压缩机功率确定方法的相关步骤。另外,存储器20所存储的资源还可以包括操作系统202和数据203等,存储方式可以是短暂存储或者永久存储。其中,操作系统202可以包括Windows、Unix、Linux等。数据203可以包括但不限于设定的偏移量等。

[0115] 在一些实施例中,电子设备还可包括有显示屏22、输入输出接口23、通信接口24、电源25以及通信总线26。

[0116] 本领域技术人员可以理解,图9中示出的结构并不构成对电子设备的限定,可以包括比图示更多或更少的组件。

[0117] 可以理解的是,如果上述实施例中的氮气轴流压缩机功率确定方法以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读存储介质中。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,执行本发明各个实施例方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(Read-Only Memory,ROM)、随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)、电可擦除可编程ROM、寄存器、硬盘、可移动磁盘、CD-ROM、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0118] 基于此,如图10所示,本发明实施例还提供了一种计算机可读存储介质,计算机可读存储介质30上存储有计算机程序31,计算机程序31被处理器执行时实现如上述氮气轴流压缩机功率确定方法的步骤。

[0119] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的装置而言,由于其与实施例公开的方法相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。

[0120] 还需要说明的是,在本说明书中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者

设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0121] 专业人员还可以进一步意识到,结合本文中所公开的实施例描述的各示例的单元及算法步骤,能够以电子硬件、计算机软件或者二者的结合来实现,为了清楚地说明硬件和软件的可互换性,在上述说明中已经按照功能一般性地描述了各示例的组成及步骤。这些功能究竟以硬件还是软件方式来执行,取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。专业技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能,但是这种实现不应认为超出本发明的范围。

[0122] 结合本文中所公开的实施例描述的方法或算法的步骤可以直接用硬件、处理器执行的软件模块,或者二者的结合来实施。软件模块可以置于随机存储器(RAM)、内存、只读存储器(ROM)、电可编程ROM、电可擦除可编程ROM、寄存器、硬盘、可移动磁盘、CD-ROM、或技术领域内所公知的任意其他形式的存储介质中。

[0123] 对所公开的实施例的上述说明,使本领域专业技术人员能够实现或使用本发明。对这些实施例的多种修改对本领域的专业技术人员来说将是显而易见的,本文中所定义的一般原理可以在不脱离本发明的精神或范围的情况下,在其他实施例中实现。因此,本发明将不会被限制于本文所示的这些实施例,而是要符合与本文所公开的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

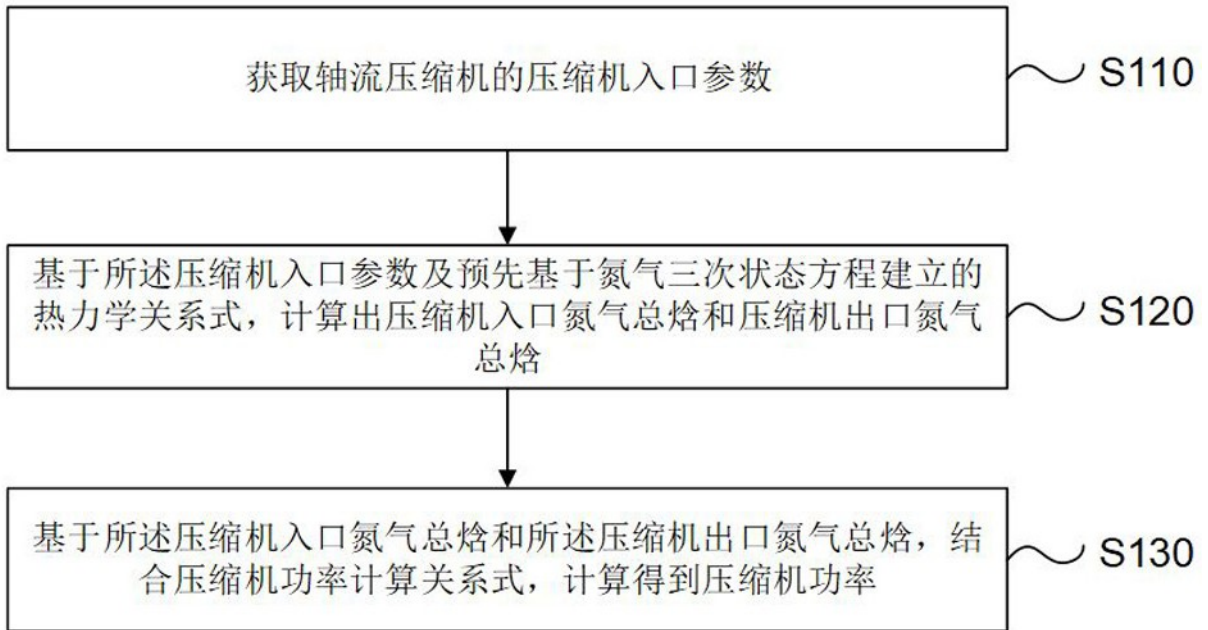


图 1

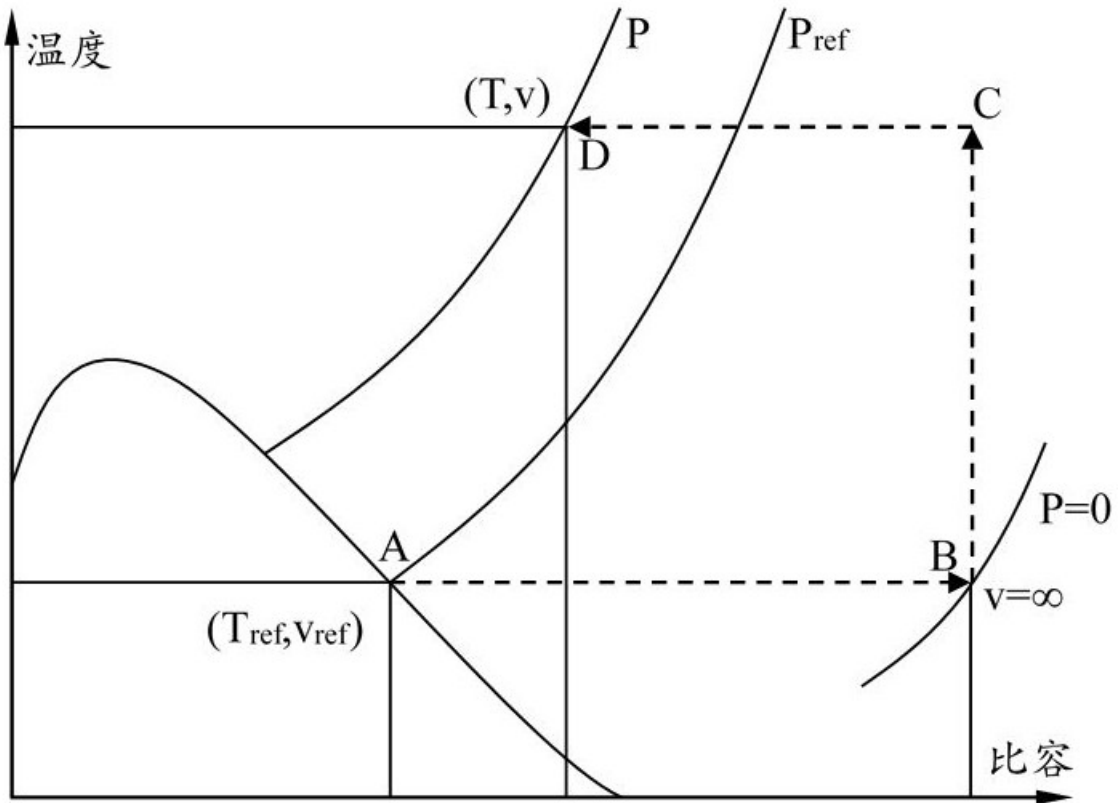


图 2

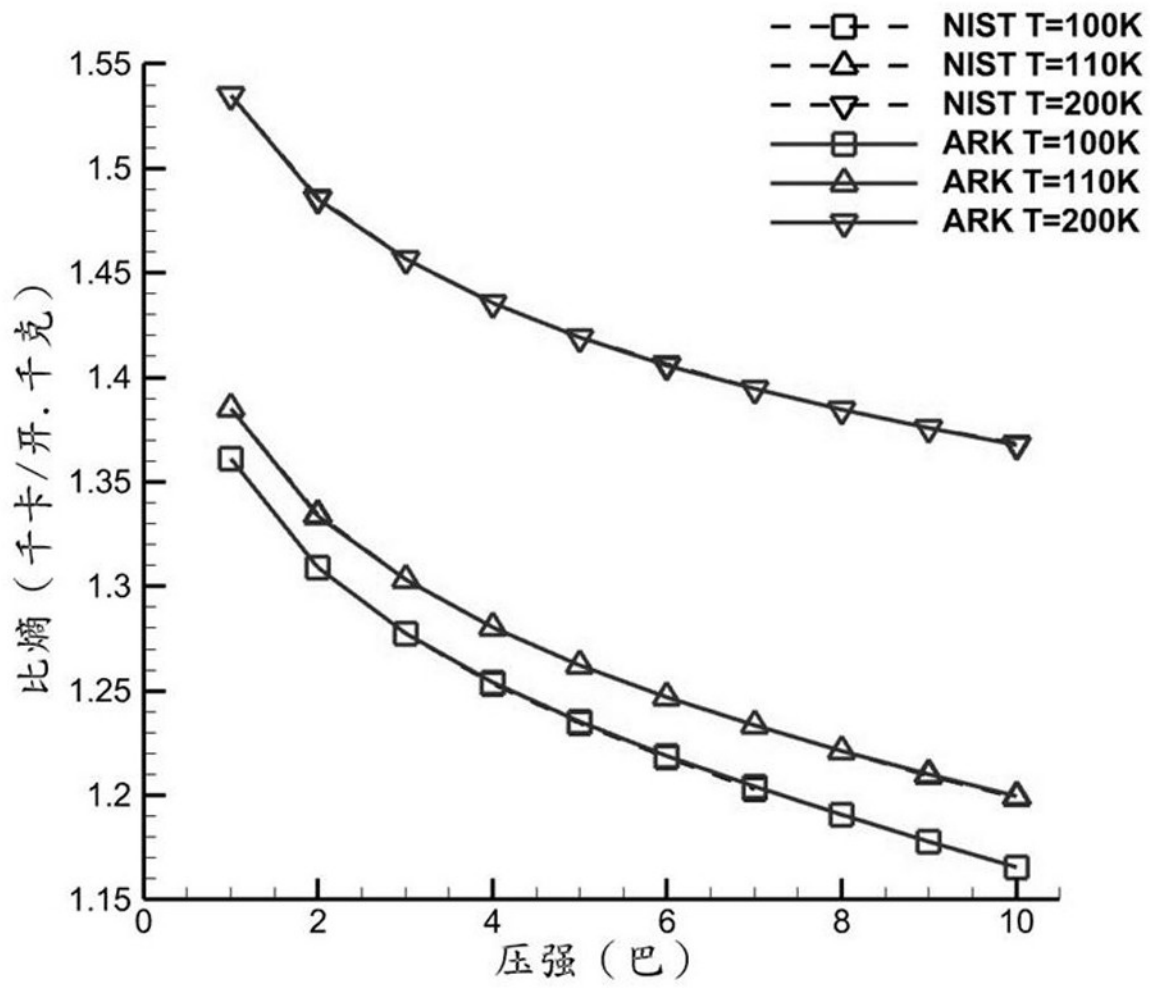


图 3

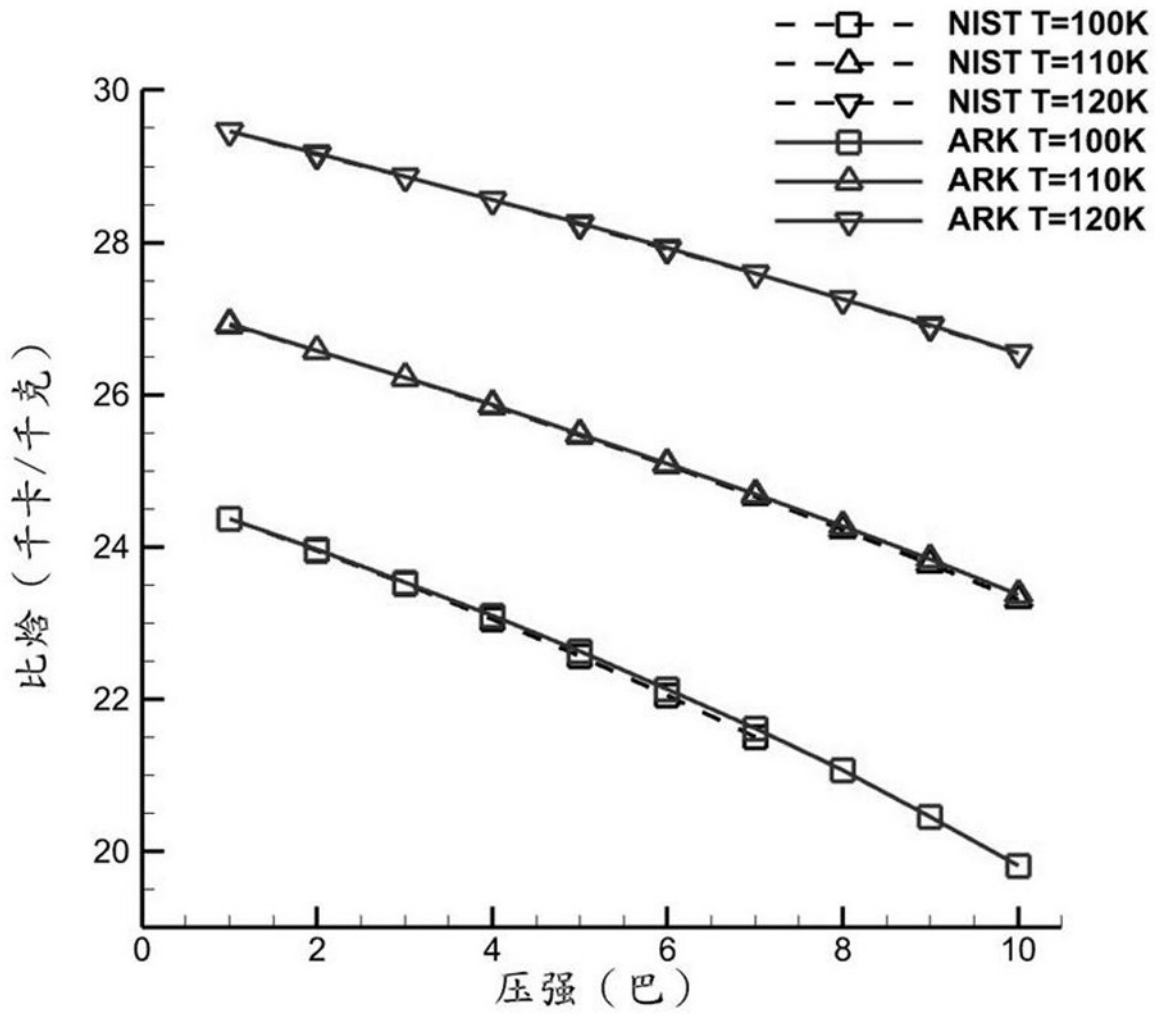


图 4

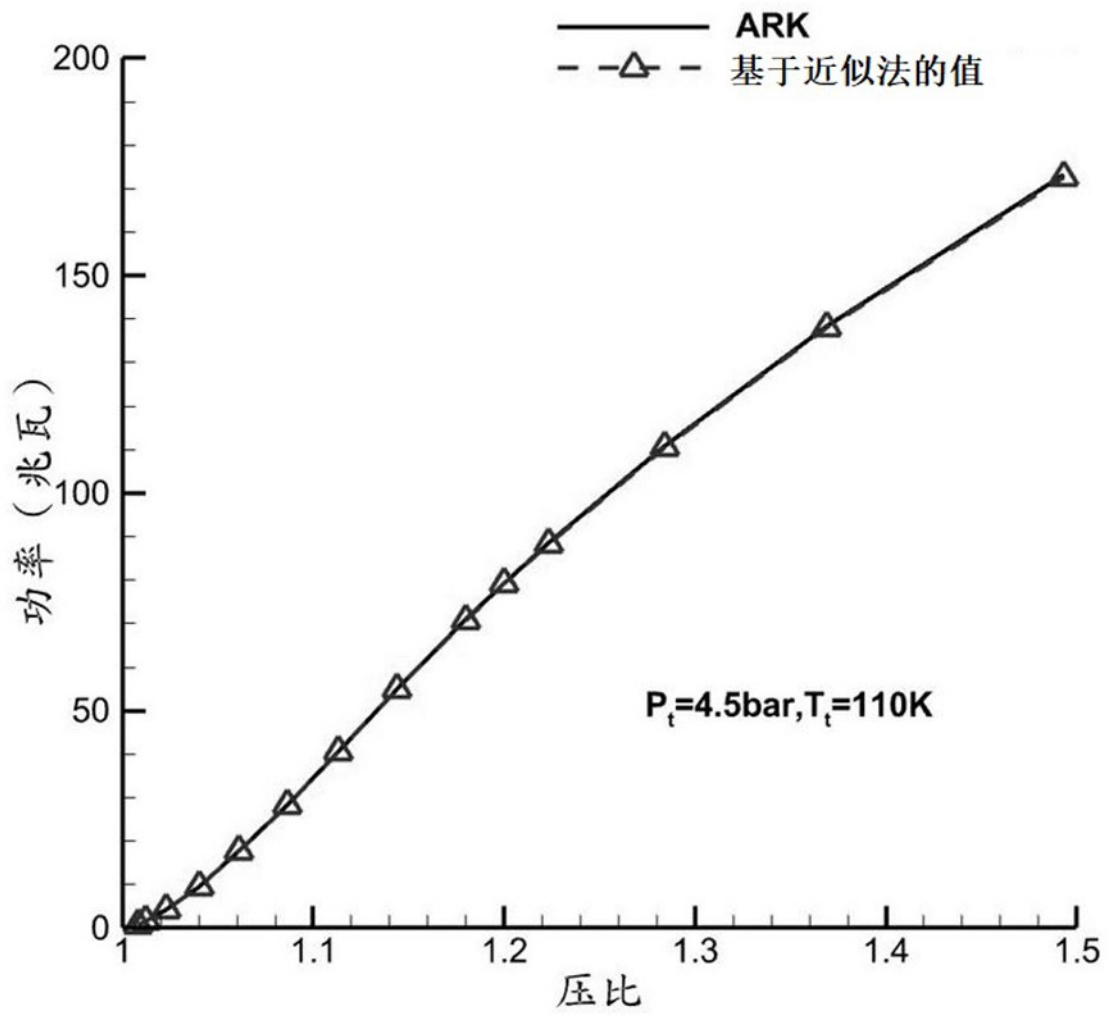


图 5

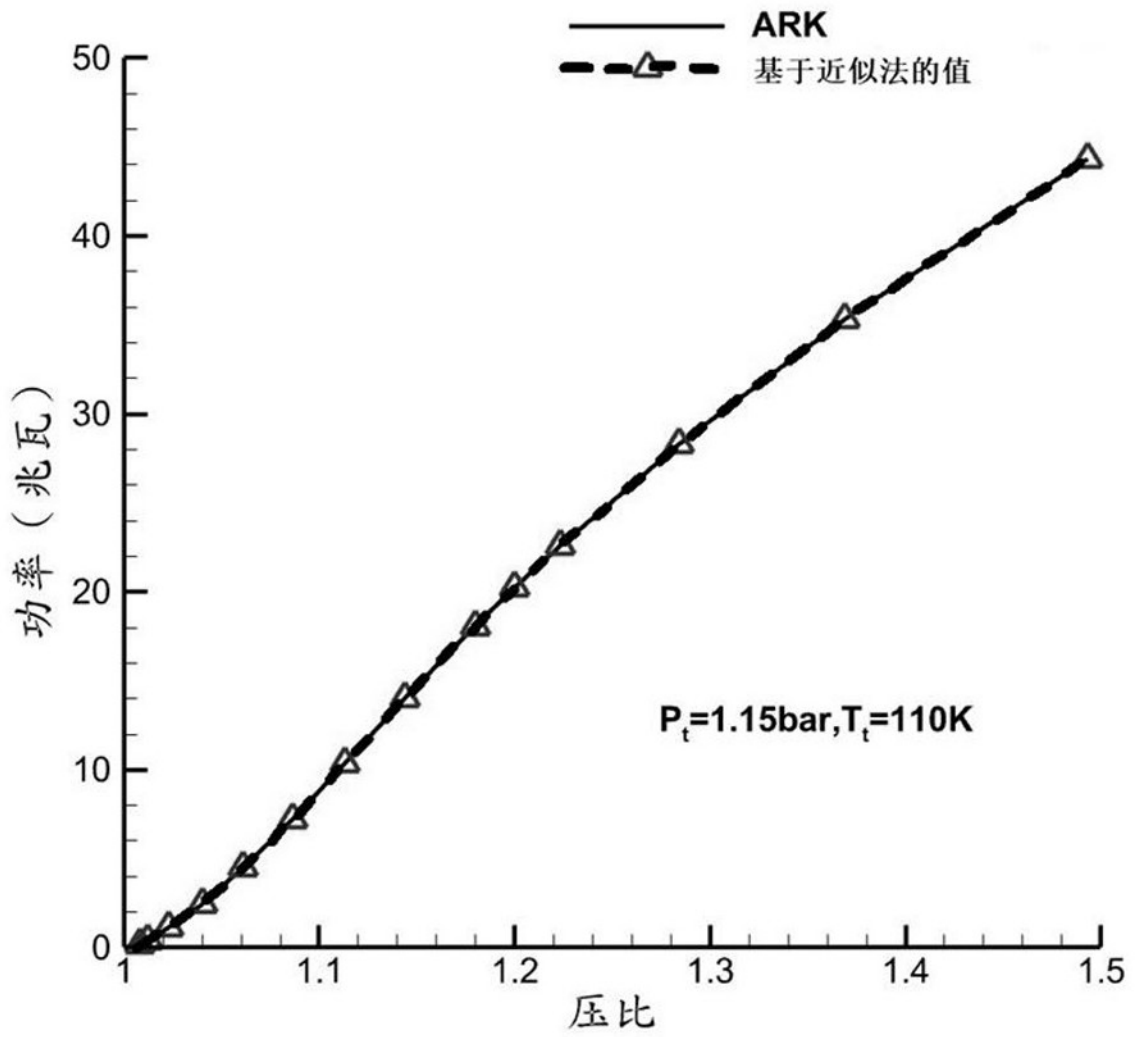


图 6

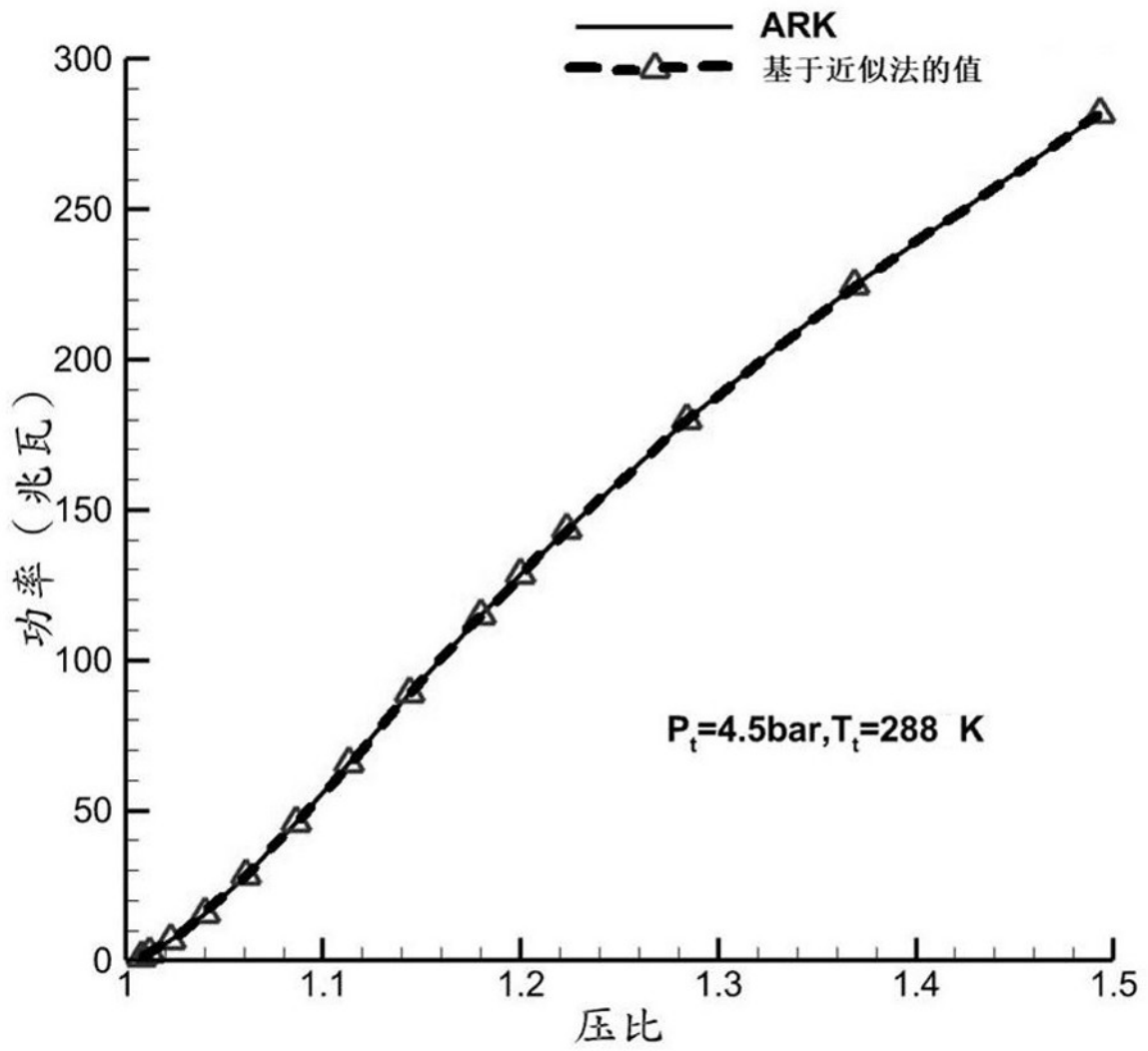


图 7

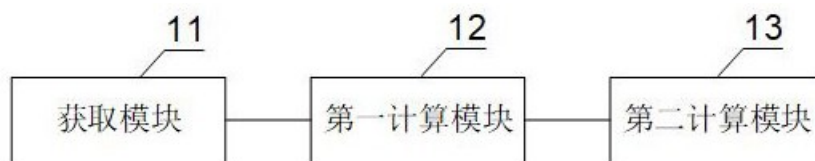


图 8

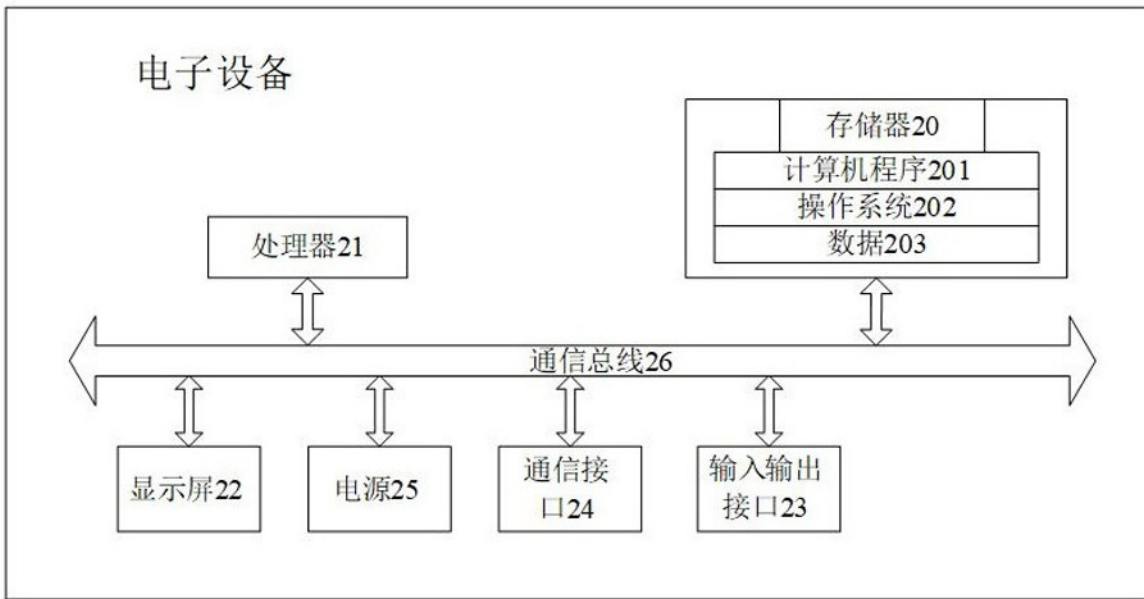


图 9



图 10