(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 112197931 B
(45)授权公告日 2021.06.18

(21)申请号 202011168981.2
(22)申请日 2020.10.28
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112197931 A
(43)申请公布日 2021.01.08
(73)专利权人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号
(72)发明人 高占彪 顾洪斌 黄河激 孟东东 岳连捷
(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所(普通合伙) 11390
代理人 焦海峰
(51)Int.Cl.
G01M 9/04(2006.01)

(56)对比文件
CN 108007666 A,2018.05.08
CN 101476973 A,2009.07.08
CN 102121870 A,2011.07.13
CN 108801583 A,2018.11.13
CN 101393071 A,2009.03.25
CN 104458199 A,2015.03.25
RU 2345345 C1,2009.01.27
FR 1104097 A,1955.11.16
姜宗林.高超声速高焓风洞试验技术研究进展.《空气动力学学报》.2019,
Gang Zhou等.Dust removal effect of negatively-pressured spraying collector for advancing support in fully mechanized coal mining face: Numerical simulation and engineering application.《Tunnelling and Underground Space Technology》.2019,

审查员 冯玮

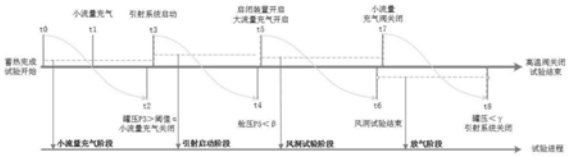
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

一种纯净气体射流风洞的控制方法

(57)摘要

本发明属于风洞试验技术领域，为了能在实验室环境下开展飞行器或发动机相关试验，本发明提供了一种纯净气体射流风洞的控制方法，该方法包括：试验就绪阶段，小流量充气阶段、引射启动阶段、风洞试验阶段、放气阶段等步骤。首先对蓄热罐内进行小流量蓄热罐增压，待压力到达预设值后，启动引射系统后通过大流量充气路实现总压稳压控制，进而进行风洞试验，试验结束后排掉罐内余气。本发明实现了蓄热罐增压、引射系统启动、总压稳压控制、进而实现纯净气体风洞安全自动运行控制。适用于基于蓄热加热方式的纯净气体自由射流试验设备。



CN 112197931 B

1.一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，用于蓄热式的纯净气体射流风洞，自蓄热完成试验开始到高温阀关闭试验结束分别以t0、t1、t2、t3、t4、t5、t6、t7、t8表示各个时间节点，该方法包括以下步骤：

(1)试验就绪阶段t0：蓄热罐温度梯度分布达到预期即蓄热完成，风洞试验准备就绪；

(2)小流量充气阶段t1～t2：由小流量充气路向蓄热罐内以定流量的方式压入纯净气体，此时与蓄热罐相连接的包括高温启闭装置和其他全部阀门处于关闭状态，待蓄热罐压值高于预设阈值α时，小流量充气阶段完成；

(3)引射启动阶段t3～t4：引射系统分为两级引射器，二级引射系统先启动，待二级引射系统运行成功后，一级引射系统启动，当舱压低于阈值β后，引射器系统启动完成；

(4)风洞试验阶段t5～t6：启闭装置开启，同时大流量充气路启动，进行风洞吹风试验；

(5)放气阶段t7～t8：风洞吹风试验完成后，首先关闭大流量充气路，引射系统继续工作，当罐压低于阈值γ时，两级引射器依次关闭；

(6)试验结束：关闭启闭装置，本次试验结束，进入下一车次试验准备周期或停车冷却。

2.根据权利要求1所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，所述的纯净气体射流风洞包括依次连接高压纯净气体充气路、蓄热罐、高温输气管、高温启闭装置、喷管、实验舱、引射系统，其中，所述高压纯净气体充气路包括大流量充气路、小流量充气路，大流量充气路与小流量充气路汇合后连接质量流量计，质量流量计后通过承压高温软管与蓄热罐底端连接；蓄热罐的上端通过高温输气管和高温启闭装置连接，所述的高温输气管与水平轴线相垂直的方向上安装有急排阀；高温启闭装置通过喷管和实验舱连接，所述的喷管前端分别安装有测量总压的压力传感器P4和测量总温的温度传感器T2；实验舱和引射系统连接，所述的引射系统由两级引射器组成，引射总路临近设备分为两路引射供气路，两路引射供气路分别连接两级引射器。

3.根据权利要求1或2所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，所述的高压纯净气体充气路设置为大流量充气路、小流量充气路，大流量充气路和小流量充气路的上游配设测量气源压力的气源压力传感器P1，大流量充气路和小流量充气路自前向后分别设置有一道电控截止阀、自动调压阀及二道电控截止阀，其中，小流量充气路中二道电控截止阀下游设有测量音速流量计前室压力的压力传感器P2。

4.根据权利要求3所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，所述小流量充气阶段t1～t2，依次自动打开一道电控截止阀和二道电控截止阀，自动调压阀进行实时压力调节，直到压力传感器P2测量值满足预设值的范围。

5.根据权利要求2所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，所述的蓄热罐侧部安装有测量蓄热罐上下压差的压差传感器P_a，蓄热罐的顶端设置有测量罐压的压力传感器P3，蓄热罐的出口处设置有测量出口气流温度的温度传感器T1，通过实时监测压力传感器P3的罐压是否到达阈值，同时监测压差传感器P_a的压差是否超过设置值，当罐压大于阈值时，小流量充气路关闭，充气阶段结束。

6.根据权利要求2所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，所述的实验舱内安装有测量舱压的压力传感器P5，所述的引射系统包括一级引射系统、二级引射系统，引射总路临近设备分为一路引射供气路和二路引射供气路，一路引射供气路和二路引射供气路分别连接一级引射器、二级引射器，一路引射供气路设置有一级电控截止阀和一级自动

调压阀，二路引射供气路设置有二级电控截止阀和二级自动调压阀，一路引射供气路的下游安装有测量一级引射器压力的压力传感器P6，二路引射供气路的下游安装有测量二级引射器压力的压力传感器P7，其中，一路引射供气路和二路引射供气路的流量设置不同。

7.根据权利要求1或6所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，所述引射启动阶段t3～t4，依次打开一级电控截止阀和二级电控截止阀，二级自动调压阀先行开启并进行实时压力调节直至压力传感器P7测量值满足预设值后，一级自动调压阀开启进行实时压力调节，直到压力传感器P6测量值满足预设值，当压力传感器P5检测到舱压达到阈值时，引射启动成功。

8.根据权利要求1或5所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，所述风洞试验阶段t5～t6，打开高温启闭装置，风洞试验开始，同时依次打开大流量充气路中的一道电控截止阀和二道电控截止阀，自动调压阀以设置罐压为目标值进行实时自动压力调节，控制检测罐压的压力传感器P3测量值稳定在预设值范围内。

9.根据权利要求1或6所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，所述放气阶段t7～t8，依次关闭大流量充气路中的自动调压阀、一道电控截止阀和二道电控截止阀，控制蓄热罐罐内压力逐步排出，当蓄热罐的罐压低于阈值γ时，依次关闭引射系统中的一级自动调压阀、二级自动调压阀、一级电控截止阀和二级自动调压阀，放气阶段结束。

10.根据权利要求1-6任意一项所述一种纯净气体射流风洞的控制方法，其特征在于，还设置有由中控主机、采集模块、控制模块组成的控制系统，所述中控主机设置在控制室内，采集模块和控制模块设置在试验设备附近，中控主机通过控制模块驱动设备运行，通过采集模块采集设备的信号传输中控主机。

一种纯净气体射流风洞的控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于风洞试验技术领域，具体地涉及一种纯净气体风洞的控制方法，特别涉及一种蓄热式纯净气体自由射流风洞的自动控制方法，适用于地面可产生高温高压高速纯净气体的地面试验设备。

背景技术

[0002] 为了能在实验室环境下开展吸气式高超音速推进试验，必须建造能模拟真实飞行状态下总温、总压、马赫数和气体组分等的风洞设备，从而在接近实际飞行条件的气流中开展试验。目前最常用的连续式能量添加方式主要有电弧加热、燃烧加热、电阻加热、蓄热加热。电弧加热通过高压直流电弧的能量添加来产生高温气流，加热能力可在3000K以上，但存在Nox、电极污染和流动不均匀性等问题；燃烧加热器将空气、氧气和燃料的高温燃烧产物作为风洞试验气体，最高可以提供马赫数8.0左右的模拟能力，但伴随产生的水蒸汽、CO2及一些非平衡污染组分；电阻加热通过大功率电阻元件的发热来加热气流，可以产生纯净试验空气，但常规材料难以模拟马赫数5以上的条件；蓄热加热通过与高温蓄热材料单元的对流换热来加热气流，原理上没有引人污染组分、杂质，理论上可以供应完全满足物理化学特性的高温空气。因此，蓄热式纯净气体射流风洞成为了国内外超燃冲压发动机地面试验的发展趋势，有着广阔的应用前景。

[0003] 国际上，各航天大国对蓄热式纯净气体试验设备的研究和发展给予极大的关注和重视，已经建成一批极具代表性的设备并投入了运行，如美国NASA格林研究中心高超音速风洞设备(HTF)、日本宇航院FJTF风洞、法国空间局(ONERA)S4风洞等，为高超音速推进技术发展起到了重要的推动作用。国内，部分科研院所和高校对蓄热式纯净气体风洞相关技术做了大量的研究，但目前尚无能够模拟飞行马赫数5以上的蓄热式纯净气体射流风洞建成，中科院力学所正在调试并即将投入使用的的纯净空气风洞有望能够填补这一空白，为开展纯净的来流试验、“污染效应”评估、发动机天地性能对比研究提供地面基准试验条件。

[0004] 但面对全新模式的风洞，如何让其平稳、可靠、有效的运行是蓄热式风洞的研制众多难点之一。关于蓄热式风洞运行控制方法公开的资料相对较少，笔者通过大量相关文献调研和对力学所纯净空气风洞调试过程中的亲身经历总结出现有风洞控制方法面对蓄热式风洞运行控制时的问题：

[0005] 1、原有射流风洞控制方法多采用多路并行的控制思想，难以应对递推式的蓄热风洞运行过程；

[0006] 2、大流量高压气流进入蓄热罐时，会使蓄热体存在浮起的危险，从而对蓄热体造成不可逆损坏；如果高压气流流量过小，导致充气时间长，在高温高压富氧环境下会造成相关设备严重烧蚀或损坏；

[0007] 3、风洞试验阶段，如何实现总压稳定是保证流场品质的关键；

[0008] 4、试验结束阶段，既要及时排空蓄热罐内高温高压残余气体，又不能使蓄热罐形成负压环境，以免造成蓄热体的损坏。

发明内容

[0009] 针对现有技术中存在的问题，本发明的目的在于提供一种纯净气体射流风洞的自动控制方法克服上述问题，实现了蓄热罐增压、引射系统启动、总压稳压控制、进而实现纯净气体风洞安全、稳定的运行。本发明的目的通过以下技术方案来实现：

[0010] 本发明采取的技术方案为：

[0011] 一种纯净气体射流风洞的控制方法，用于蓄热式的纯净气体射流风洞，自蓄热完成试验开始到高温阀关闭试验结束分别以t0、t1、t2、t3、t4、t5、t6、t7、t8表示各个时间节点，该方法包括以下步骤：

[0012] (1)试验就绪阶段t0：蓄热罐温度梯度分布达到预期即蓄热完成，风洞试验准备就绪；本步骤是蓄热过程结束进入风洞试验的标志，合理的进行递推式步骤设计是成功进行风洞试验的关键。

[0013] (2)小流量充气阶段t1～t2：由小流量充气路向蓄热罐内以定流量的方式压入纯净气体，此时与蓄热罐相连接的包括高温启闭装置和其他全部阀门处于关闭状态，待蓄热罐压值高于预设阈值α时，小流量充气阶段完成；本步骤将充气过程分为小流量充气和大流量压力跟随两步，小流量充气的流量设置是根据蓄热体浮起的罐内上下最大压差计算而来，充气过程中实时监测压差P_a。这样做的好处在于：既保证充气时，流量不会过大避免造成蓄热体浮起，又能在上述条件下以最快的速度充气、避免启闭装置和喷管等相关设备长时间暴露在高压高温富氧环境中。

[0014] (3)引射启动阶段t3～t4：引射系统分为两级引射器，二级引射系统先启动，待二级引射系统运行成功后，一级引射系统启动，当舱压低于阈值β后，引射器系统启动完成；本步骤的作用在于提前实现实验舱的高空环境，有利于喷管的启动。本步骤的关键点是在于阈值α的设置值要略低于实际要求总压值，这样做的好处是试验过程可以提早进入到t3～t4阶段，在不缩短风洞有效运行时间的前提下压缩了总运行时间，节约资源保护设备。本步骤也可以将t3的开启时间早于t2的结束时间。

[0015] (4)风洞试验阶段t5～t6：启闭装置开启，同时大流量充气路启动，进行风洞吹风试验；本步骤是风洞运行的关键。此时，罐内压力达到α，蓄热体已经没有浮起的危险。大流量充气路和启闭装置同步开启并以罐压预设值作为压力跟随的目标值，目的就是为了保证总压稳定。

[0016] (5)放气阶段t7～t8：风洞吹风试验完成后，首先关闭大流量充气路，引射系统继续工作，当罐压低于阈值γ时，两级引射器依次关闭；本步骤中大流量充气路关闭后引射系统继续工作是为了尽快排到蓄热罐内残余高温高压气体。阈值γ的设置好处在于，既能及时排除罐内余气又不至于引射工作时间过长造成罐内负压损坏蓄热体。

[0017] (6)试验结束：关闭启闭装置，本次试验结束，进入下一车次试验准备周期或停车冷却。

[0018] 上述各个阶段，均是由试验人员在中控主机上完成包括小流量调压值、阈值α、β、γ及总温、总压、风洞运行时间等参数设置后，由中控主机通过采集模块和控制模块驱动作动机构自动全过程运行。

[0019] 进一步的，所述的纯净气体射流风洞包括依次连接高压纯净气体充气路、蓄热罐、高温输气管、高温启闭装置、喷管、实验舱、引射系统，其中，所述高压纯净气体充气路包括

大流量充气路、小流量充气路，大流量充气路与小流量充气路汇合后连接质量流量计，质量流量计后通过承压高温软管与蓄热罐底端连接；蓄热罐的上端通过高温输气管和高温启闭装置连接，所述的高温输气管与水平轴线相垂直的方向上安装有急排阀；高温启闭装置通过喷管和实验舱连接，所述的喷管前端分别安装有测量总压的压力传感器P4和测量总温的温度传感器T2；实验舱和引射系统连接，所述的引射系统由两级引射器组成，引射总路临近设备分为两路引射供气路，两路引射供气路分别连接两级引射器。

[0020] 纯净气体射流风洞分为小、大流量设计可有效防止充气时蓄热体浮起；急排阀的连接在高温输气管道上启闭装置前，在试验过程中如有意外发生，可迅速打开急排阀排到余气，急排阀距蓄热罐有一定距离避免了其开启时高速气流在对罐出口蓄热体的扰动，又可以及时关闭启闭装置，保护实验舱内的发动机模型。

[0021] 进一步的，所述的高压纯净气体充气路设置为大流量充气路、小流量充气路，大流量充气路和小流量充气路的上游配设测量气源压力的气源压力传感器P1，大流量充气路和小流量充气路自前向后分别设置有一道电控截止阀、自动调压阀及二道电控截止阀，其中，小流量充气路中二道电控截止阀下游设有测量音速流量计前室压力的压力传感器P2。管路中两道电控截止阀的设计好处在于，防止阀门失效增加安全冗余。

[0022] 进一步的，所述小流量充气阶段t1～t2，依次自动打开一道电控截止阀和二道电控截止阀，自动调压阀进行实时压力调节，直到压力传感器P2测量值满足预设值的范围。

[0023] 进一步的，所述的蓄热罐侧部安装有测量蓄热罐上下压差的压差传感器P_a，蓄热罐的顶端设置有测量罐压的压力传感器P3，蓄热罐的出口处设置有测量出口气流温度的温度传感器T1，通过实时监测压力传感器P3的罐压是否到达阈值，同时监测压差传感器P_a的压差是否超过设置值，当罐压大于阈值时，小流量充气路关闭，充气阶段结束。

[0024] 进一步的，所述的实验舱内安装有测量舱压的压力传感器P5，所述的引射系统包括一级引射系统、二级引射系统，引射总路临近设备分为一路引射供气路和二路引射供气路，一路引射供气路和二路引射供气路分别连接一级引射器、二级引射器，一路引射供气路设置有一级电控截止阀和一级自动调压阀，二路引射供气路设置有二级电控截止阀和二级自动调压阀，一路引射供气路的下游安装有测量一级引射器压力的压力传感器P6，二路引射供气路的下游安装有测量二级引射器压力的压力传感器P7，其中，一路引射供气路和二路引射供气路的流量设置不同。

[0025] 进一步的，所述引射启动阶段t3～t4，依次打开一级电控截止阀和二级电控截止阀，二级自动调压阀先行开启，二级自动调压阀进行实时压力调节直至压力传感器P7测量值满足预设值后，一级自动调压阀开启，进行实时压力调节，直到压力传感器P6测量值满足预设值，当压力传感器P5检测到舱压达到阈值时，引射启动成功。

[0026] 进一步的，所述风洞试验阶段t5～t6，打开高温启闭装置，风洞试验开始，同时依次打开大流量充气路中的一道电控截止阀和二道电控截止阀，自动调压阀以设置罐压为目标值进行实时自动压力调节，控制检测罐压的压力传感器P3测量值稳定在预设值范围内。进一步的，所述放气阶段t7～t8，依次关闭大流量充气路中的自动调压阀、一道电控截止阀和二道电控截止阀，控制蓄热罐罐内压力逐步排出，当蓄热罐的罐压低于阈值γ时，依次关闭引射系统中的一级自动调压阀、二级自动调压阀、一级电控截止阀和二级自动调压阀，放气阶段结束。

[0027] 进一步的，还设置有由中控主机、采集模块、控制模块组成的控制系统，所述中控主机设置在控制室内，采集模块和控制模块设置在试验设备附近，中控主机通过控制模块驱动设备运行，通过采集模块采集设备的信号传输中控主机。

[0028] 本发明的有益效果为：

[0029] 1)本发明提供了提供了一种自动控制方法，可以在参数设置完成后，没有人工干预的情况下自动完成纯净气体风洞试验的全过程。

[0030] 2)本发明提供的递推式的控制方法，合理进行步骤设计和阈值设置，极大保证了试验进程平稳进行，有效的提高了试验效率，节约了能源。

[0031] 3)本发明提供的可自动切换的小、大流量充气控制方法，既可实现充气伊始，蓄热罐内压力低，小流量充气保护了蓄热罐内蓄热体，又可以满足风洞试验时对大流量来流和稳定总压的要求。

[0032] 4)本发明提供的风洞的引射系统控制方法，两级引射依次启动避免了引射全功率打开对全系统的振动；选择罐压阈值作为引射系统关闭的条件，保证了试验结束后罐内无压的安全状态，又避免了引射系统工作过长造成的负压状态对罐内蓄热体结构的损坏。

附图说明

[0033] 图1为本发明中一种纯净气体射流风洞的控制方法流程图。

[0034] 图2为本发明中的纯净气体风洞结构示意图。

[0035] 其中，1、大流量充气路；2、小流量充气路；3、蓄热罐；4、急排阀；5、高温输气管；6、高温启闭装置；7、喷管；8、实验舱；9、一级引射系统；10、二级引射系统；11、控制主机；12、采集模块；13、控制模块。

具体实施方式

[0036] 下文中将结合附图对本发明的实施例进行详细说明。

[0037] 实施例1

[0038] 如图1所示，一种纯净气体射流风洞的自动控制方法，用于蓄热式的纯净气体射流风洞，自蓄热完成试验开始到高温阀关闭试验结束分别以t0、t1、t2、t3、t4、t5、t6、t7、t8表示各个时间节点，该方法包括以下步骤：

[0039] (1)试验就绪阶段t0：蓄热罐温度梯度分布达到预期即蓄热完成，风洞试验准备就绪；

[0040] (2)小流量充气阶段t1～t2：由小流量充气路向蓄热罐内以定流量的方式压入纯净气体，此时与蓄热罐相连接的包括高温启闭装置和其他全部阀门处于关闭状态，待蓄热罐压值高于预设阈值α时，小流量充气阶段完成；

[0041] (3)引射启动阶段t3～t4：引射系统分为两级引射器，二级引射系统先启动，待二级引射系统运行成功后，一级引射系统启动，当舱压低于阈值β后，引射器系统启动完成；

[0042] (4)风洞试验阶段t5～t6：启闭装置开启，同时大流量充气路启动，进行风洞吹风试验；

[0043] (5)放气阶段t7～t8：风洞吹风试验完成后，首先关闭大流量充气路，引射系统继续工作，当罐压低于阈值γ时，两级引射器依次关闭；

[0044] (6)试验结束:关闭启闭装置,本次试验结束,进入下一车次试验准备周期或停车冷却。

[0045] 上述各个阶段,均是由试验人员在中控主机上完成包括小流量调压值、阈值α、β、γ及总温、总压、风洞运行时间等参数设置后,由中控主机通过采集模块和控制模块驱动作动机构自动全过程运行。

[0046] 如图2所示,所述的纯净气体射流风洞包括依次连接高压纯净气体充气路、蓄热罐、高温输气管、高温启闭装置、喷管、实验舱、引射系统,其中,所述高压纯净气体充气路包括大流量充气路、小流量充气路,大流量充气路与小流量充气路汇合后连接质量流量计,质量流量计后通过承压高温软管与蓄热罐底端连接;蓄热罐的上端通过高温输气管和高温启闭装置连接,所述的高温输气管与水平轴线相垂直的方向上安装有急排阀;高温启闭装置通过喷管和实验舱连接,所述的喷管前端分别安装有测量总压的压力传感器P4和测量总温的温度传感器T2;实验舱和引射系统连接,所述的引射系统由两级引射器组成,引射总路临近设备分为两路引射供气路,两路引射供气路分别连接两级引射器。

[0047] 进一步的,所述的高压纯净气体充气路设置为大流量充气路、小流量充气路,大流量充气路和小流量充气路的上游配设测量气源压力的气源压力传感器P1,大流量充气路和小流量充气路自前向后分别设置有一道电控截止阀、自动调压阀及二道电控截止阀,其中,小流量充气路中二道电控截止阀下游设有测量音速流量计前室压力的压力传感器P2。

[0048] 进一步的,所述小流量充气阶段t1～t2,依次自动打开一道电控截止阀和二道电控截止阀,自动调压阀进行实时压力调节,直到压力传感器P2测量值满足预设值的范围。

[0049] 进一步的,所述的蓄热罐侧部安装有测量蓄热罐上下压差的压差传感器P_a,蓄热罐的顶端设置有测量罐压的压力传感器P3,蓄热罐的出口处设置有测量出口气流温度的温度传感器T1,通过实时监测压力传感器P3的罐压是否到达阈值,同时监测压差传感器P_a的压差是否超过设置值,当罐压大于阈值时,小流量充气路关闭,充气阶段结束。

[0050] 进一步的,所述的实验舱内安装有测量舱压的压力传感器P5,所述的引射系统包括一级引射系统、二级引射系统,引射总路临近设备分为一路引射供气路和二路引射供气路,一路引射供气路和二路引射供气路分别连接一级引射器、二级引射器,一路引射供气路设置有一级电控截止阀和一级自动调压阀,二路引射供气路设置有二级电控截止阀和二级自动调压阀,一路引射供气路的下游安装有测量一级引射器压力的压力传感器P6,二路引射供气路的下游安装有测量二级引射器压力的压力传感器P7,其中,一路引射供气路和二路引射供气路的流量设置不同。

[0051] 进一步的,所述引射启动阶段t3～t4,依次打开一级电控截止阀和二级电控截止阀,二级自动调压阀先行开启,二级自动调压阀进行实时压力调节直至压力传感器P7测量值满足预设值后,一级自动调压阀开启,进行实时压力调节,直到压力传感器P6测量值满足预设值,当压力传感器P5检测到舱压达到阈值时,引射启动成功。

[0052] 进一步的,所述风洞试验阶段t5～t6,打开高温启闭装置,风洞试验开始,同时依次打开大流量充气路中的一道电控截止阀和二道电控截止阀,自动调压阀以设置罐压为目标值进行实时自动压力调节,控制检测罐压的压力传感器P3测量值稳定在预设值范围内。

[0053] 进一步的,所述放气阶段t7～t8,依次关闭大流量充气路中的自动调压阀、一道电控截止阀和二道电控截止阀,控制蓄热罐罐内压力逐步排出,当蓄热罐的罐压低于阈值γ

时，依次关闭引射系统中的一级自动调压阀、二级自动调压阀、一级电控截止阀和二级自动调压阀，放气阶段结束。

[0054] 进一步的，还设置有由中控主机、采集模块、控制模块组成的控制系统，所述中控主机设置在控制室内，采集模块和控制模块设置在试验设备附近，中控主机通过控制模块驱动设备运行，通过采集模块采集设备的信号传输中控主机。

[0055] 首先对蓄热罐内进行小流量蓄热罐增压，待压力到达预设值后，启动引射系统后通过大流量充气路实现总压稳压控制，进而进行风洞试验，试验结束后排掉罐内余气。整个试验过程均是由试验人员在完成参数设置后，由中控系统驱动作动机构实现纯净气体风洞全试验过程自动运行控制。本发明适用于基于蓄热加热方式的纯净气体自由射流试验设备，为该类试验设备提供了一种自动控制方法。

[0056] 本发明涉及的蓄热加热式纯净气体自由射流风洞是指通过蓄热加热方式产生高温纯净试验气体的风洞设备，能够最为真实的模拟高空高速的飞行环境，为准确评估发动机性能提供基础数据，为其他污染空气地面试验实施提供参考对比数据。纯净气体风洞设备不仅复杂而且涉及高温、高压，危险很大又要求控制精度极高，本发明提出的自动控制方法是为了使纯净气体风洞能够安全可靠的平稳运行，并能保障风洞流场品质，提高试验效率，节约能源。

[0057] 实施例2

[0058] 在实施例1的基础上，不同于实施例1，如图1所示，一种纯净气体射流风洞的自动控制方法，用于蓄热式的纯净气体自由射流风洞，根据多次调试结果，该方法包括以下步骤：

[0059] (1)试验就绪阶段，蓄热罐温度梯度分布达到蓄热罐上端1700K，下端800K，成梯度分布，风洞试验准备就绪。

[0060] (2)小流量充气阶段，为保证蓄热罐内蓄热砖不产生浮动，设置测量蓄热罐上下压差的压差传感器P_a不能超过20KPa，根据流量计算小流量充气路采用4mm音速流量计，上游压力设置为8MPa向蓄热罐内以定流量的方式压入纯净气体，t1～t2约为1min，此时与蓄热罐相连接的包括高温启闭装置和其他全部阀门处于关闭状态，罐压阈值高于预设值α(5MPa)时，小流量充气阶段完成。

[0061] (3)引射启动阶段，引射系统分为两级引射器，均为常温压缩空气驱动，二级引射系统先启动，待二级引射系统运行成功(测量二级引射器压力的压力传感器P7压力达到2.5MPa)后，一级引射系统启动(测量一级引射器压力的压力传感器P6压力达到1.5MPa)，当舱压低于阈值β(3KPa)后，引射器系统启动完成，t3～t4约为10s。

[0062] (4)风洞试验阶段，开启过程控制在30s，同时大流量充气路启动，按照试验设计正式风洞时间t5～t6为15s，进行风洞吹风试验。

[0063] (5)放气阶段，风洞吹风试验完成后，首先关闭大流量充气路，引射系统继续工作，当罐压低于阈值γ(0.5MPa)时，两级引射器依次关闭，t7～t8约持续30s。

[0064] (6)试验结束，关闭启闭装置，本次试验结束。进入下一车次试验准备周期或停车冷却。

[0065] 上述各个阶段，均是由试验人员在中控主机上完成小流量调压值、阈值α、β、γ及总温、总压、风洞运行时间等参数设置后，由中控主机通过采集模块和控制模块驱动作动机

构自动全过程运行。

[0066] 优选的，如图2所示所述的纯净气体射流风洞由高压纯净气体充气路、蓄热罐、高温输气管、高温启闭装置、喷管、实验舱、引射系统依次连接构成，以及主要由中控主机、采集模块、控制模块组成的控制系统等。

[0067] 优选的，所述的高压纯净气体充气路分为大流量充气路、小流量充气路，大流量充气路最大流量为8kg/s，小流量充气路最大流量为4kg/s。上游配有测量气源压力的气源压力传感器P1的量程为30MPa，下游的测量音速流量计前室压力的压力传感器P2的量程为10MPa，两路充气路下游管路汇合后连接质量流量计的量程为15kg/s。

[0068] 优选的，所述的蓄热罐上安装有用于测量蓄热罐上下压差的压差传感器P_a的量程100KPa，测量测量罐压的压力传感器P3和测量总压的压力传感器P4的压力传感器量程为10MPa，测量罐出口气流温度的温度传感器T1和测量总温的温度传感器T2为B型热电偶。所述的实验舱内安装有用于测量舱压的压力传感器P5的绝压传感器量程为0.2MPa。

[0069] 优选的，所述的引射系统由两级引射器组成。一级引射器最大流量为40kg/s，二级引射器最大流量80kg/s。测量一级引射器压力的压力传感器P6和测量二级引射器压力的压力传感器P7的量程为10MPa。

[0070] 优选的，所述的位于控制室的中控主机CPU为PLC s7-1500，位于试验设备附近的采集模块为DI 16x24启闭装置DC BA和AI 8xU/I HS以及控制模块AQ 8xU/I HS和DQ 16x24VDC/0.5A BA，采集模块将设备的温度、压力等现场信号反馈给控制主机，控制主机通过控制模块驱动电控截止阀、启闭装置等作动机构。

[0071] 优选的，小流量充气阶段，控制系统依次自动打开一道电控截止阀和二道电控截止阀，自动调压阀与下游的测量音速流量计前室压力的压力传感器P2构成闭环控制，预设值为5MPa，进行实时压力调节，闭环控制自动调整扫描时间为100ms。

[0072] 优选的，引射启动阶段，控制系统自动依次打开一级电控截止阀和二级电控截止阀，二级自动调压阀先行开启，二级自动调压阀与压力传感器P7构成闭环控制，一级自动调压阀与压力传感器P6形成闭环控制，闭环控制自动调整扫描时间为200ms。

[0073] 优选的，风洞试验阶段，大流量充气路的自动调压阀与检测罐压的压力传感器P3构成闭环控制，使得罐压稳定在预设值范围内，闭环控制自动调整扫描时间为10ms。

[0074] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已，并不用于限制本发明，对于本领域的技术人员来说，本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

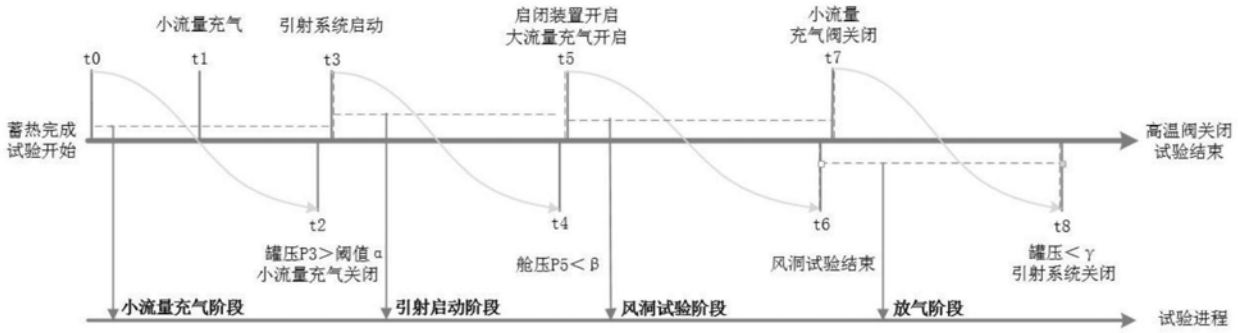

小流量充气
引射系统启动
启闭装置开启
大流量充气开启
小流量
充气阀关闭
t0
t1
t3
t5
t7
蓄热完成
试验开始
高温阀关闭
试验结束
t2
t4
t6
t8
罐压P3＞阀值α
小流量充气关闭
舱压P5＜β
风洞试验结束
罐压＜γ
引射系统关闭
小流量充气阶段
引射启动阶段
风洞试验阶段
放气阶段
试验进程

图1

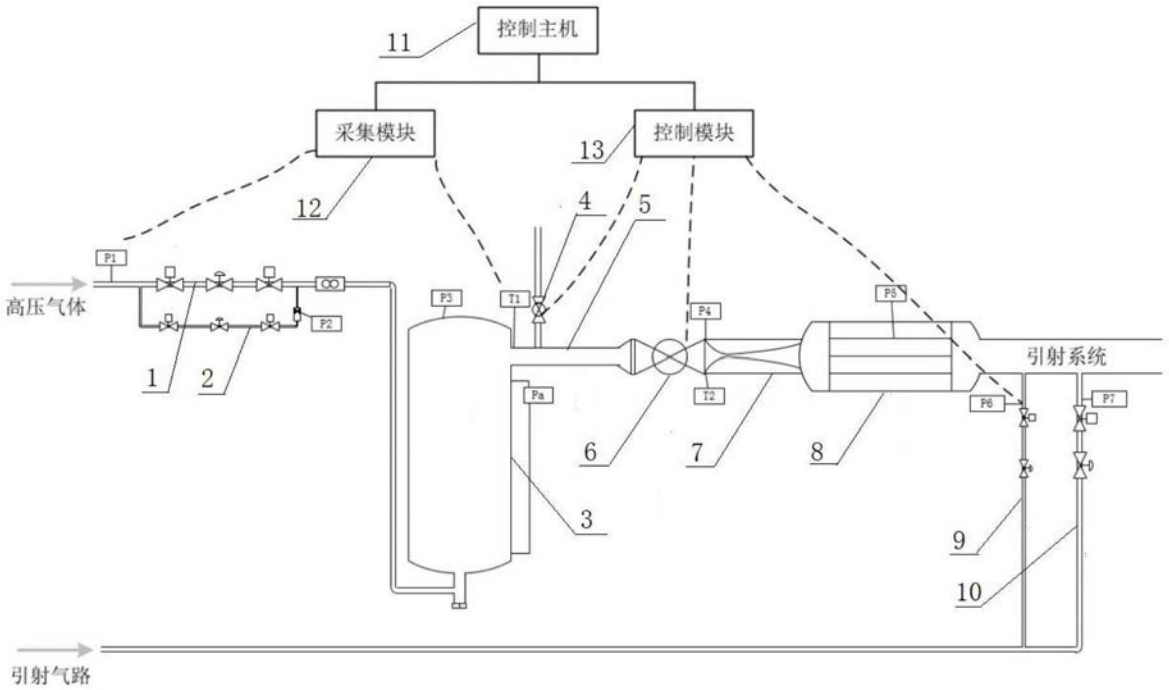

控制主机
11
采集模块
控制模块
12
13
4
5
P1
P2
P3
T1
P4
T2
P5
P6
P7
Pa
高压气体
引射系统
引射气路
1
2
3
6
7
8
9
10

图2