



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102588113 B

(45) 授权公告日 2016. 05. 11

(21) 申请号 201210070670. 1

审查员 周红叶

(22) 申请日 2012. 01. 13

(30) 优先权数据

12/973976 2011. 01. 13 US

(73) 专利权人 通用电气公司

地址 美国纽约州

(72) 发明人 S·D·德拉珀

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

司 72001

代理人 李强 谭祐祥

(51) Int. Cl.

F02C 3/34(2006. 01)

F02C 9/00(2006. 01)

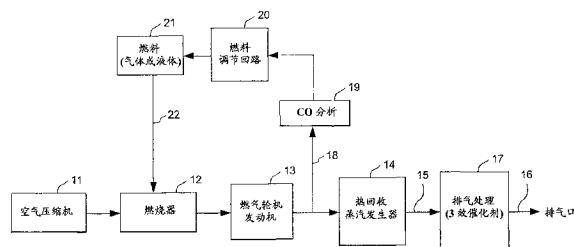
权利要求书2页 说明书9页 附图6页

(54) 发明名称

燃气轮机发动机及其燃料控制系统以及分析和控制燃气轮机发动机的排气的组分的方法

(57) 摘要

本发明涉及化学计量式排气再循环和相关燃烧控制。一种用于燃气轮机发动机的燃料控制系统,其包括:主燃料回路;燃料调节回路;连接到燃料调节回路的多个燃烧器;排气流中的氧气传感器和二氧化碳传感器;以及操作性地连接到燃料调节回路且连接到氧气和一氧化碳传感器的反馈控制环路,氧气和一氧化碳传感器用来控制供给到发动机中的该多个燃烧器中的各个的燃料和空气的精确量。燃料调节回路中的平行的控制阀阵列连接到燃气轮机发动机中的该多个燃烧器中的对应的燃烧器。燃料控制系统由此利用通过反馈控制环路提供的、关于排气中所检测到的氧气和一氧化碳浓度的数据来“细调”供给到各个燃烧器的燃料和空气的量。



1. 一种用于燃气轮机发动机的燃料控制系统,包括:  
主燃料回路;  
燃料调节回路;  
操作性地连接到所述燃料调节回路的多个燃烧器;  
在所述燃气轮机发动机的排气流中的氧气传感器;  
在所述燃气轮机发动机的所述排气流中的一氧化碳传感器;以及  
反馈控制回路,其操作性地连接到所述燃料调节回路且连接到所述氧气传感器和一氧化碳传感器;

所述反馈控制回路配置用于利用所述氧气传感器和一氧化碳传感器分别监测排气流中的氧气含量和一氧化碳含量,并且使所述燃料调节回路单独地调节提供至每个燃烧器的燃料和/或空气,以使得所述燃气轮机发动机运行在初始启动后的富燃水平并且配置用于确保排气流中的含氧量以促进催化剂去除 NO<sub>x</sub>。

2. 根据权利要求1所述的燃料控制系统,其特征在于,所述燃料调节回路进一步包括多个可调整的控制阀,以实现化学计量式排气再循环。

3. 根据权利要求2所述的燃料控制系统,其特征在于,所述多个可调整的控制阀中的各个连接到所述多个燃烧器中的对应的一个。

4. 根据权利要求3所述的燃料控制系统,其特征在于,所述多个可调整的控制阀中的各个独立地被调整,以控制通往所述多个燃烧器中的对应的一个的燃料流。

5. 根据权利要求1所述的燃料控制系统,其特征在于,所述燃料控制系统进一步包括用于从所述燃气轮机发动机的所述排气流中去除氧气和一氧化碳的催化剂。

6. 根据权利要求2所述的燃料控制系统,其特征在于,所述燃料调节回路中的各个所述控制阀以规定顺序操作,以控制通往所述多个燃烧器中的各个的燃料流。

7. 一种用于分析和控制来自燃气轮机发动机的排气的组分的方法,包括如下步骤:  
将受控的量的燃料和空气供给到所述燃气轮机发动机的燃烧器;  
分析所述燃烧器下游的所述排气的氧气含量;  
分析所述燃烧器下游的所述排气的一氧化碳含量;  
基于所述分析所述氧气和所述一氧化碳的步骤来将燃料控制信号提供给燃料调节回路;

使用所述燃料调节回路单独地调节提供至每个燃烧器的燃料和/或空气,以使得所述燃气轮机发动机运行在初始启动后的富燃水平并且配置用于确保排气流中的含氧量以促进催化剂去除 NO<sub>x</sub>;以及

控制供给到所述每个燃烧器的燃料和空气的量。

8. 根据权利要求7所述的方法,其特征在于,所述方法进一步包括如下步骤,即:在所述分析所述氧气含量和所述一氧化碳含量的步骤之前,基本去除所有残留于所述排气流中的所述氧气和一氧化碳。

9. 根据权利要求7所述的方法,其特征在于,所述将受控的量的燃料和空气供给到所述燃烧器的步骤包括顺次地将反馈控制数据发送给各个所述燃烧器,以控制供给到各个燃烧器的燃料的量。

10. 根据权利要求7所述的方法,其特征在于,所述将受控的量的燃料和空气供给到所

述燃烧器的步骤基于所述排气中检测到的 CO 的量而顺次地调整供给到所选定的燃烧器中的燃料的量。

11. 一种燃气轮机发动机, 包括:

多个燃烧器;

气体压缩机;

涡轮;

主燃料回路;

用于所述多个燃烧器的燃料调节回路, 所述燃料调节回路包括多个可调的控制阀以获得近化学计量式排气再循环, 以便促进去除排气流中的 NO<sub>x</sub>, 其中每个控制阀连接至对应的每个燃烧器, 所述燃料调节回路操作以顺次地控制从每个控制阀至对应燃烧器的燃料流;

在所述燃烧器的排气流中的氧气传感器;

在所述燃烧器的所述排气流中的一氧化碳传感器;

位于所述燃烧器下游的 NO<sub>x</sub> 催化剂; 以及

操作性地连接到所述燃料调节回路且操作性地连接到所述氧气传感器和一氧化碳传感器的反馈控制回路;

所述反馈控制回路配置用于利用所述氧气传感器和一氧化碳传感器分别监测排气流中的氧气含量和一氧化碳含量, 并且使所述燃料调节回路单独地调节提供至每个燃烧器的燃料和 / 或空气, 以使得所述燃气轮机发动机运行在初始启动后的富燃水平并且配置用于确保排气流中的含氧量以促进催化剂去除 NO<sub>x</sub>。

12. 根据权利要求 11 所述的燃气轮机发动机, 其特征在于, 所述燃气轮机发动机进一步包括用于从所述排气流中去除一氧化碳的催化剂床。

13. 根据权利要求 11 所述的燃气轮机发动机, 其特征在于, 所述燃气轮机发动机进一步包括用于使所述排气流回到所述燃气轮机压缩机的再循环环路。

## 燃气轮机发动机及其燃料控制系统以及分析和控制燃气轮机发动机的排气的组分的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及燃气轮机发动机系统和相关控制,并且更具体地,涉及具有多个燃烧器的燃气轮机发动机,该多个燃烧器中的各个可利用反馈控制环路分开来控制,以基于排气中检测到的氧气和一氧化碳的量来调整燃料-空气比率,同时确保能够利用催化剂从排气中去除有害的  $\text{NO}_x$  排放。本发明提供了本文中所称的“化学计量式 (stoichiometrical) 排气再循环 (SEGR)”。

### 背景技术

[0002] 燃气轮机发动机典型地包括压缩机区段、燃烧器区段和旋转以便产生电功率的至少一个涡轮。压缩机排出物直接供给到烃燃料在其中被喷射、混合并且燃烧的燃烧器区段中。燃烧气体然后被引导进入并通过涡轮的一个级或多个级,涡轮从燃烧气体中抽取旋转能。为了实现最大运行效率,燃气轮机燃烧系统在各种各样的不同燃料组分、压力、温度和燃料/空气比率条件下运行,优选地具有利用或者液体燃料或者气体燃料或者两者的组合(被称为“混合燃烧”系统)的能力。然而,用于燃气轮机燃烧器中的许多候选烃燃料包含有害的污染物和/或其它工艺的副产品,它们倾向于抑制燃烧和/或降低系统的能力和效率。

[0003] 近年来,由于联邦政府实施的严格的排放限制和环境污染控制法令,排放(尤其是  $\text{NO}_x$ ) 的减少,在美国也已经得到更多的重视。在烃燃料的燃烧中,氮氧化物由于空气中氮的高温氧化,以及由于基于烃的燃料中的氮化合物(例如吡啶)的氧化而产生。

[0004] 由于“污染效应”,已经在使用排气再循环系统来减少燃气轮机发动机中的  $\text{NO}_x$  排放方面取得一些进展,与无再循环的系统相比,这导致燃烧器入口氧气浓度降低,并且  $\text{CO}_2$  浓度和含水量增加。因为  $\text{NO}_x$  的形成率强烈地取决于峰值火焰温度,因此火焰温度的小的降低往往降低  $\text{NO}_x$  排放。一种已知技术涉及使排气再循环到燃气轮机发动机,这导致形成额外的  $\text{CO}_2$ ,但仅仅伴随  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}$  浓度有增量式的降低。可惜的是,残留在使用排气再循环的排气中的氧气的量总是保持处于或高于大约 2%,并且众所周知,过量的氧气能够不利地影响大多数  $\text{NO}_x$  去除催化剂的效率。因此,先前的利用再循环来减少和/或消除排气流中的  $\text{NO}_x$  的工作的成功仅仅是有限的。

[0005] 将排气再循环应用到固定的燃气轮机发动机的另一个顾虑涉及如下需求,即在入口流与再循环组合时,降低排气温度且避免增加燃烧器入口温度或者压缩机负荷。共有的美国专利 No. 4, 313, 300 教导了,如果动力装置包括联合燃气轮机蒸汽轮机系统(其中,再循环气体被引入将空气供应到燃气轮机燃烧器的单个空气压缩机),那么可基本克服过热的问题。然而, No. 4, 313, 300 专利没有教导或者建议利用关于存在于排气中的一氧化碳的数据来调整供给到燃烧器的燃料的量,其中燃烧器单独运行或者与其它燃烧器一前一后地运行。

[0006] 至此,还没有使用通过监测一氧化碳排放来控制燃气轮机发动机中的单独的选定

燃烧器的燃料-空气比率,特别是通过使用反馈控制或者调节回路,例如本文中描述的那些。已知的现有技术燃气轮机系统也不提供可接受的方法来基于单独的不同的燃烧器而细调燃料-空气比率,以便减少存在于排气中的 CO 和氧气的量。已知的现有技术燃气轮机系统的实例包括授予 Kataoka 等人的美国专利 No. 6, 598, 402, 其公开了将排气的一部分再循环到压缩机的进口的排气再循环型燃气轮机和用于调整返回的气体的量以对应于燃气轮机负荷的改变的再循环控制单元。该 No. 6, 598, 402 专利不依赖于排气流中检测到的一氧化碳的量作为调整通往选定的燃烧单元的燃料-空气供给的手段。该专利也没有教导如何提供化学计量式排气再循环控制。

[0007] 授予 Utamura 等人的美国专利 No. 6, 202, 400 和 No. 5, 794, 431 描述 了两种不同但是相关的方法,其用于改进燃气轮机和蒸汽轮机组合的热效率,由此燃气轮机排气的一部分被再循环到压缩机,以便帮助维持较均匀且恒定的压缩机供给温度且改进系统的整体热效率。这两个专利没有教导基于在排气流中检测到的一氧化碳的量,利用燃料调节回路或者反馈控制来有效地减少排气的 CO 或氧气含量。另外,仅仅检测 CO 不能解决对化学计量式排气再循环控制的需求。

[0008] 序列号为 No. W099/30079 的 PCT 申请描述了用于包括空气污染控制组件的燃气轮机发动机的排气的热回收蒸汽发生器,该空气污染控制组件包括选择性催化还原催化剂,用于降低排气排放(包括 NO<sub>x</sub>和 CO) 的量。再次,No. W099/30079 申请没有教导或者建议使用在排气中检测到的 CO 的量作为用于控制通往燃烧器的选定燃料输入的手段,或者没有教导如何提供化学计量式排气再循环。

## 发明内容

[0009] 本发明提供了一种用于燃气轮机发动机的新的燃料控制回路,其包括:主燃料回路;燃料调节回路;连接到燃料调节回路的多个燃烧器;在燃气轮机排气流中的氧气和二氧化碳传感器;以及操作性地连接到燃料调节回路的反馈控制环路。氧气和一氧化碳传感器用来利用控制阀来控制供给到该多个燃烧器中的各个的燃料量,以此限定燃料调节回路,各个阀对应于多燃烧器燃气轮机发动机中的单个燃烧器(“燃烧室”)。根据本发明的示例性系统包括用于从排气流中去除任何残余氧气和一氧化碳的催化剂。燃料控制系统利用通过反馈控制环路提供的、关于在排气中检测到的氧气和一氧化碳浓度的数据来“细调”供给到各个燃烧器的燃料量。

[0010] 本发明还包括一种用于利用本文描述的新的反馈控制装置来分析和控制来自燃气轮机发动机的排气的组分的方法,以及一种包括多个燃烧器、对应的反馈控制环路和燃料调节回路的燃气轮机发动机。

## 附图说明

[0011] 图 1 描绘了本发明的示例性实施例的工艺流程图,该实施例具有燃气轮机发动机和用于监测燃气轮机排气且利用反馈控制环路来控制单独的燃烧室的燃料-空气比率以实现最大热效率和 CO 的去除的燃料控制系统;

[0012] 图 2 是流程框图,其描绘了根据本发明的用于实现化学计量式排气再循环(“SEGR”)和燃烧控制以由此减小传统燃气轮机发动机设计中固有的性能损失的主要工艺

步骤；

[0013] 图 3 是比较存在于示例性燃气轮机排气流中的氧气和一氧化碳的相对量与供给到多燃烧器燃气轮机发动机的一个或者多个燃烧器的多种燃料 / 空气混合物的曲线图；

[0014] 图 4 是根据本发明的第一实施例的用于利用化学计量式再循环控制通往燃气轮机发动机的单独的燃烧器的燃料 - 空气供给的示例性工序的示意图（描绘了装备和控制系统的主要部件）；

[0015] 图 5 是特别参照示例性 NO<sub>x</sub> 催化剂的效力水平的、存在于利用根据本发明的化学计量式控制装置的排气流中的氧气的相对量的曲线图；

[0016] 图 6 是在不同运行条件下的化学计量式排气再循环排放的曲线图，其用以示出利用根据本发明的燃料调节回路和反馈控制系统的潜在益处；以及

[0017] 图 7 是进一步详细描绘了根据本发明的用于控制单独的燃烧器的燃料 - 空气比率的主燃料回路、燃料调节回路和反馈控制装置的流程框图。

[0018] 部件列表

|        |         |                  |
|--------|---------|------------------|
| [0019] | 70      | 示例性工艺流程图         |
| [0020] | 71      | 空气               |
| [0021] | 72      | 主要空气压缩机（“MAC”）   |
| [0022] | 76      | 空气管道             |
| [0023] | 77      | 低压热回收蒸汽发生器（HRSG） |
| [0024] | 78      | 再循环环路            |
| [0025] | 74      | 燃气轮机压缩机          |
| [0026] | 84      | 燃气轮机排气           |
| [0027] | 79      | 催化剂床             |
| [0028] | 82      | 高压热回收蒸汽发生器       |
| [0029] | 83      | 高压无氧排气           |
| [0030] | 11      | 空气压缩机            |
| [0031] | 12      | 燃料燃烧器            |
| [0032] | 13      | 燃气轮机             |
| [0033] | 21      | 主要燃料源            |
| [0034] | 19      | CO 分析站           |
| [0035] | 22      | 通往燃烧器的经调整的燃料流    |
| [0036] | 14      | HRSG             |
| [0037] | 15      | 排气流              |
| [0038] | 17      | 排气处理阶段           |
| [0039] | 16      | 排气口              |
| [0040] | 43      | 氧气供给             |
| [0041] | 44      | 一氧化碳             |
| [0042] | 42      | 燃料 - 空气比率        |
| [0043] | 35 和 36 | 燃烧器              |
| [0044] | 37 和 38 | 排气流              |

|        |           |               |
|--------|-----------|---------------|
| [0045] | 26        | 一氧化碳测量站       |
| [0046] | 27 和 28   | 反馈控制信号        |
| [0047] | 29 和 30   | 燃料回路调节控制装置    |
| [0048] | 31 和 34   | 燃料回路调节控制装置的输出 |
| [0049] | 32 和 33   | 单独的燃烧室        |
| [0050] | 63        | 效率图           |
| [0051] | 62        | X 轴           |
| [0052] | 61        | Y 轴           |
| [0053] | 95        | 中心轴线          |
| [0054] | 91 和 92   | 曲线            |
| [0055] | 93        | 氧气水平          |
| [0056] | 94 和 96   | 曲线            |
| [0057] | 98 和 99   | 竖线            |
| [0058] | 97        | 竖线            |
| [0059] | 97        | “效率损失”        |
| [0060] | 98        | “闭环”系统        |
| [0061] | 200       | 反馈控制          |
| [0062] | 201       | 主燃料回路         |
| [0063] | 240       | 主要燃料供给        |
| [0064] | 250       | 燃料调节回路        |
| [0065] | 202 至 208 | 控制阀           |
| [0066] | 211 至 217 | 燃烧室           |
| [0067] | 220       | 组合排气          |
| [0068] | 221       | 催化剂床          |
| [0069] | 223       | 氧气传感器         |
| [0070] | 225       | CO 传感器        |
| [0071] | 226       | 数据线路          |
| [0072] | 230       | 排气流           |

### 具体实施方式

[0073] 根据本发明的化学计量式排气再循环 (SEGR) 燃气轮机发动机旨在提供零氧气含量排气, 该排气能够利用  $\text{NO}_x$  还原催化剂较有效地处理, 以提供无  $\text{NO}_x$  污染物的排气流。当应用于增强的油回收用途时, 本发明对于碳捕捉和储存工艺是理想的, 并且在需要无氧稀释剂的任何工艺中都是有用的。

[0074] 如上所提到, 在传统的 SEGR 燃气轮机系统中, 燃烧产物总是包含过量氧气, 这是由于标称燃烧温度下的化学平衡, 燃烧的一些  $\text{CO}_2$  产物离解成 CO 和  $\text{O}_2$ 。另外, 不能实现燃料和空气的充分混合, 从而导致存在于供给中的一些氧气没有与烃燃料反应。因此, 所得到的主要由  $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  组成的排气流将仍然包含少量的 CO 和  $\text{O}_2$ 。典型地, 燃烧产物通过燃气轮机发动机的涡轮区段, 并且进入包括氧化催化剂的热回收蒸汽发生器 (HRSG), 该氧化催化

剂在 HRSG 中的较低温度下改变 CO 和  $O_2$  与  $CO_2$  之间的平衡,从而促使微量的 CO 和  $O_2$  转化成  $CO_2$  并产生具有较低氧气含量的排气流。

[0075] 为了让 CO 催化剂接近零氧气含量,必须存在足够的 CO 来消耗排气中的所有  $O_2$ 。燃气轮机运行的实践需要有一定量的过量燃料用于燃烧系统中,以确保过量的 CO 的存在。但是,排气中过多的 CO 能够对整个燃气轮机运行具有负面作用,因为过量的 CO 的内能将不被燃气轮机捕捉,从而导致系统的效率损失。因为这些原因,最大程度地减少且小心地控制排气流中过量的 CO 的量是重要的。

[0076] 燃烧过程中的两个已知实践也推动对控制排气中过量 CO 的量的需求。首先,整个燃气轮机的燃料-空气比率有控制极限。也就是说,仅存在有限的能力来控制供给到燃气轮机的燃料的量。第二,燃气轮机燃烧系统通常由多个燃烧室组成,它们中的各个利用稍微不同的燃料-空气比率运行,从而导致排放基于不同的燃烧室而有所差异。这两个影响导致需要利用过量的燃料来运行燃气轮机,以产生恰当量的过量 CO 而确保所有氧气在排气中被消耗掉。在本文中通过参照设计目标值描述且依靠图 6 中的实例示出该目标的实现。

[0077] 根据本发明,通过使用闭环排放控制和监测排气中来自燃气轮机的排放,燃气轮机燃烧器的整体燃料-空气比率能够被较精确地控制,从而减小过量 CO 的需求,再次如图 6 所示。燃料-空气比率的在不同 的燃烧室之间的差异通过这种途径仍然未消除。但是,通过为各个燃烧室增设燃料调节回路,各个燃烧室中的燃料-空气比率能够被控制到在燃气轮机运行中先前未利用或甚至未预想的精确水平。能够对各个燃烧室调节燃料,并且能够在排气中测量到反馈,而排气中总体 CO 浓度由于 CO 产物的受精确控制的性质而接近近化学计量式运行。参见以下更详细讨论的图 3。

[0078] 利用 SEGR 的改进的燃气轮机发动机设计导致从燃烧器排出的最终排气流有效地没有未使用的氧气且被独特地定位,以用于利用三效 (three way) 催化剂或类似催化剂进行处理,以将流中的一氧化碳和  $NO_x$  排放减少到可接受的水平,优选地接近零。如上所提到,近来实现低  $NO_x$  和一氧化碳排放的困难变得愈加复杂,因为大多数燃气轮机发动机系统采用多个燃烧器,而燃烧器通常具有不同的燃料/空气比率和对应的供给到单个一氧化碳测量和处理系统中的不同的排气组分。虽然用于排气的单个反馈控制环路能够用于取决于在最终排气中检测到的一氧化碳的量而调整燃烧器上游的主要燃料/空气混合物,但是这种系统不能实现残留在排气(或再循环)中的氧气的最高使用潜力。因此,由于监测和控制不同燃烧室中的不同的且波动的燃料/空气比率的难以预测性,在这种系统中实现有效的零  $NO_x$  和 CO 排放即使不是几乎不可能的,也是困难的。

[0079] 本发明因此通过高度精确地监测和控制通往选定的几个燃烧器的单独的燃料/空气供给来提供改进的燃烧器运行。基于探测到的存在于排气流中的一氧化碳和氧气,能够长时间维持产生的改进的发动机性能。另外,通过不同燃烧室产生的 CO 的指数关系可以被运用成直接对应于单独的燃烧器燃料/空气比率,其中最终结果是相比于现有技术燃气轮机设计,燃烧排气中的  $NO_x$  量的充分降低。由于  $NO_x$  和 CO 成分的固有的降低,新设计还便于在涡轮排气的下游处理中的  $CO_2$  捕捉。

[0080] 在示例性实施例中,单独的燃烧器(燃烧室)各自连同能够以非常小的变量提升或降低燃料/空气比率的流量控制器件操作性地连接到燃料调节回路,其中最终目的是使得主要燃料/空气回路尽可能地接近化学计量式理想,即,使得存在于再循环中的所有氧

气在燃烧期间消耗掉,从而导致整体  $\text{NO}_x$  和 CO 产量的显著降低。

[0081] 在启动运行期间,CO 排气测量在所有燃烧室在贫燃条件和低一氧化碳产量下运行时进行。一个接一个地,控制着系统中所有燃烧室的单独运行的燃料调节回路将命令发送给各个燃烧室,以增加燃料供给。在排气流中监测到的 CO 含量将几乎立刻开始增加。最终检测到的 CO 量导致控制信号经由闭环反馈控制环路发送到并行连接的燃料回路。然后根据所探测的 CO 量而修改供给到各个燃烧室的燃料比率。当实现燃料调节回路并且对各个连续燃烧室增量式地调整燃料时,对应的一氧化碳水平快速增加,从而导致来自控制环路的信号停止增加通往那个特定燃烧室的燃料。在各个燃烧室接连地被监测且调整时该过程被重复,直到对于整个系统获得最优期望燃料 / 空气比率。如果在正常发动机运行期间需要的话,能够周期性地使用相同调节 / 反馈控制操作,以确保在长时间连续运行中有最优 SEGR 性能。

[0082] 另外,相比于使用 SEGR 技术的传统燃烧器控制系统,在涡轮排气中能够获得更低水平的 CO 和氧气。因为各个燃烧室能够被连续地且独立地“细调”以获得近化学计量式运行,所以该系统提供优于对需要“富燃”运行以保证存在过量 CO 的传统多燃烧器控制设计的显著优势。如上所提到,如果根据标准实践来设计燃烧器,由于不同的燃料 - 空气比率和不同的燃料划分,单独的燃烧器的动态特性会彼此不同。虽然燃料 - 空气比率的不同可对燃气轮机的整体性能具有很小的影响,但是排气中的氧气的量也将必定在不同的燃烧室之间有所不同,从而当氧气水平保持很高时导致不能接受的结果。较高的氧气水平导致催化剂的效力水平降低,相比于在氧气水平接近零时 99% 的效力,通常使得催化剂仅仅 50% 有效。因此,本发明通过使最终排气中的氧气水平保持接近理论上为零来确保  $\text{NO}_x$  催化剂将维持高的效力水平。

[0083] 参见附图,图 1 描绘了用于系统 (大体显示为 70) 的示例性工艺流程图,该系统利用 SEGR 燃气轮机发动机和热回收蒸汽发生器 (“HRSG”),具有从本发明的反馈控制系统受益的潜力。图 1 描绘了已知系统,其能够按照上文所述进行修改,以使用反馈控制环路来监测燃气轮机排气且控制单独的燃烧室的燃料 - 空气比率,以获得最大热效率和 CO 的去除。图 1 还示出了在燃烧步骤期间燃烧器不能消耗所有氧气和一氧化碳时将不可避免地遇到的潜在性能损失。必须总是采用一氧化碳催化剂以便形成二氧化碳并且消耗排气中仍然存在的氧气 (这具有产生热用于高压热回收蒸汽发生器的附加益处)。

[0084] 如图 1 所示,空气 71 供给到主空气压缩机 (“MAC”) 72 并在升高的压力下通过空气管道 76 直接进入燃气轮机燃烧器。来自燃气轮机燃烧器的排气通过较低压力的热回收蒸汽发生器 77 和再循环环路 78,作为供给再循环回到燃气轮机压缩机 74。该系统确保燃气轮机内的所有流 (包括涡轮冷却空气和泄漏空气) 都不含有氧气。

[0085] 图 1 还示出了与传统系统关联的固有性能损失,其中燃气轮机排气必须经过处理以去除尽可能多的残余 CO 和氧气。也就是说,燃烧运行不完美,从而需要分开来处理残余的未燃烧的氧气和 CO。此处,在 84 处的燃气轮机排气通过 CO 催化剂床 79,CO 催化剂床 79 去除 CO 并且消耗存在于排气中的未燃烧的氧气。最终的 CO 和氧气在放热反应中结合而形成二氧化碳。高压 HRSG 通过经由蒸汽轮机抽取能量而使用热来产生额外蒸汽。理论上,将在不牺牲整体效率的情况下尽可能低地减小系统中的残余一氧化碳的量。在通过催化剂处理后,经处理的排气流通过 CO 传感器并进入利用通过催化剂处理产生的额外的高压

热回收蒸汽发生器 82。高压无氧排气（在线 83 处示出）然后在释放到环境中之前经过最后处理。

[0086] 图 2 是流程框图，其描绘了根据本发明的、用于利用反馈控制来获得化学计量式排气再循环和燃烧控制的主要工艺步骤。示例性系统包括将压缩空气供给到多个燃料燃烧器 12 的空气压缩机 11，燃烧器 12 又将膨胀的高温排气供给到燃气轮机 13 中。在运行期间，空气压缩机 11 将压缩空气供给到燃烧器 12 的后部，而主要燃料源（气体烃或液体烃）21 将主燃料流提供给燃烧器。空气和燃料混合并且燃烧，其中热的燃烧气体直接从燃烧器 12 流入燃气轮机 13，在燃气轮机 13 中从燃烧气体中抽取能量来做功。

[0087] 根据本发明的第一实施例，离开燃气轮机 13 的排气在 CO 分析站 19 中被分析以确定存在于排气中二氧化碳的量，其中分析结果被馈送到作为反馈环路的一部分的燃料调节回路，以便周期性地监测且调整供给到系统的空气和燃料（气体或液体）的量，如 21 处所示。供给到各个燃烧器的燃料和空气的量可以取决于在排气流中检测到的氧气和一氧化碳的量而改变，其中目标是细调供给到各个燃烧器的燃料-空气比率，同时降低排气流中的  $\text{NO}_x$  浓度。通往燃烧器的经调整的燃料流大体在 22 处示出。单独的燃烧器中的各个能够基于被持续地收集和评估的数据而使用反馈环路来监测和调整。也就是说，各个燃烧室能够随着时间的推移以各自为基础进行周期性地检查并且调整，直到它达到如以下更详细描述的最优稳定状态条件。

[0088] 图 2 还描绘了结合燃气轮机 13 来使用传统的热回收蒸汽发生器（“HRSG”）14 以便增加整个系统的热效率。在通过排气口 16 释放到大气之前，具有减小的热值的最终排气流 15 典型地在排气处理阶段 17 中利用例如三效催化剂进行处理，以去除残余  $\text{NO}_x$  化合物和其它不环保的污染物和燃烧副产品。

[0089] 图 3 是曲线图（大体以 40 示出），其将存在于示例性燃气轮机排气流中的氧气 43 和一氧化碳 44 的相对量与供给到燃气轮机发动机的一个或多个燃烧器的各种燃料/空气混合相比较。图 3 画出了燃料-空气比率（“F/A”42）对燃烧器排气中检测到的氧气和一氧化碳的浓度（的关系）。随着燃料-空气比率增加，氧气水平变低而 CO 含量增加。在示例性实施例中，供给到单独的燃烧室的燃料和空气将一次调整一个，以便减小氧气含量，但是不能太低以至于一氧化碳的量超过下游催化剂的能力。利用用于燃料-空气比率的反馈控制环路连续地监测和控制氧气和 CO 的量，以便优化氧气/CO 比率并且确保通过下游催化剂有最大 CO 去除效率。理论上，离开催化剂的残余 CO 的量将在最大系统效率下接近于零。

[0090] 图 4 是根据本发明的第一实施例的、用于利用化学计量式再循环和反馈控制来控制燃气轮机发动机的燃烧器的供给的工艺示意图（还描绘了装备和控制系统的主要部件）。如图 4 所示，示出为 35 和 36 的单独的燃烧器各自具有对应的排气流 37 和 38，它们直接供给到能够为各个燃烧室确定 CO 水平的一氧化碳测量站 26。一氧化碳测量站 26 产生多个不同的反馈控制信号 27 和 28，它们然后传输到大体描绘为 29 和 30 的对应的燃料回路调节控制装置。燃料回路调节控制装置的输出 31 和 34 导致对应于单独的燃烧室的燃料回路（如通过 32 和 33 处的实例所示）有增量式小调整。

[0091] 图 5 是曲线图，其表示当与示例性  $\text{NO}_x$  催化剂的效力水平相比时，存在于根据本发明的、利用化学计量式控制装置的排气流中的氧气的相对量。如图 4 所示，本发明尽力平

衡存在于来自燃烧器的排气中的氧气和一氧化碳的量,而同时确保用于处理最终排气流的 $\text{NO}_x$ 催化剂的高效率。图5中的曲线63示出 $\text{NO}_x$ 催化剂的效力(X轴62)倾向于随着存在于排气中的氧气的量(Y轴61)的降低而增加。

[0092] 图6是不同运行条件下的化学计量式排气再循环排放的曲线图(大体示出为90),并且示出了根据本发明利用燃料调节回路和反馈控制的潜在益处。图6将残留在燃气轮机发动机排气中的氧气和一氧化碳的量(参见左侧轴,标记为“排放 $\text{O}_2$ 、CO”)与在利用各种候选排气处理系统(包括现有技术的系统和本发明)的后续催化剂处理系统中一氧化碳和氧气的反应产生的预期效率(参见右侧轴,标记为“ $\text{CO}/\text{O}_2$ 效率”)相比较。

[0093] 如上所提到,利用单独的燃烧器的反馈控制和细调的示例性系统将减小未反应的一氧化碳的量,同时确保足够量的氧气残留在燃烧器排气中,以在下游催化剂操作中按化学计量的方式将所有CO转化成二氧化碳。因此,相比于从系统中去除CO和氧气的对应的效率水平,对于不同的CO和氧气排放水平,图6中提及的“Phi”指示高于和低于1.0的预期值。1.0的目标Phi值标示在中心轴95处并且将被视为理论“期望运行w/o偏差”。

[0094] 为了说明的目的,与根据本发明的反馈控制环路关联的调节阀的相对位置在线100处指定,在这种情况下,线100位于 $\text{Phi} = 1.0$ 的稍微右侧。具有稍大于1.0的Phi值意味着燃气轮机发动机将略微“富燃”运行,但是利用反馈控制有一氧化碳和氧气的最大的去除。在系统中具有太多残余氧气倾向于降低 $\text{NO}_x$ 催化剂的效力,并且因此作为实际问题,燃气轮机应当以1.0的右侧的Phi值以稍微富燃的方式运行。

[0095] 图6中的曲线91表示在高于和低于Phi值1.0的点处的系统中的一氧化碳和氧气的量的比率;曲线92描绘了一氧化碳的量;线93表示氧气水平;曲线94示出从燃烧排气中去除一氧化碳的预期效率的水平;曲线96反映出示例性设计目标Phi值(在1.0的右侧示出,指示稍微过量的氧气,以便去除所有可用的CO);竖线98示出没有使用本发明的调节阀和反馈控制特征的传统闭环排放控制系统(“CLEC”)的Phi的位置;竖线99反映出使用“开环”设计、也没有出现调节阀的现有技术设计;并且竖线97反映出由残留在排气中的不同量的一氧化碳和氧气导致的相关“效率损失”,其中一氧化碳和氧气的量没有如以上关于本发明所述的那样以化学计量的方式平衡。如图6所示,理想设计可具有如所指示的1.0的Phi值。然而,再次作为实际问题,稍高于1.0的某些值将确保充足的氧气来去除最低预期量的CO,而不会不利地影响 $\text{NO}_x$ 去除催化剂的下游性能。

[0096] 图6中标示的效率损失97反映了以下事实,即在催化剂处理步骤期间,每个氧分子需要两个CO分子以形成二氧化碳。图6中 $\text{Phi} = 1.0$ 的竖线右侧的CO数据表示由于在燃烧后在系统中依然存在CO而产生的效率损失的幅度。这个残余CO然后必须利用下游催化剂操作来处理,并且在催化剂处理期间确保需要一定量的过量氧气来消耗尽可能多的排气CO。

[0097] 在示例性实施例中,已经发现Phi的目标值应该如图所示并且标示为“设计目标Phi”的那样为大约1.025。使用如上文所述的用于单独的燃烧器的反馈控制环路设计导致竖直控制线向左侧移动,即,回到接近1.0的值。作为比较,用于传统燃气轮机发动机系统的运行状况和Phi值在图6中示出为效率低很多并标记为“开环设计”,其典型地仅仅依赖于排气温度读数,并没有基于一个或多个单独的燃烧室的任何持续排气流分析或者任何反馈控制环路。开环设计在对燃料/空气比率做出大致“调节”改变之前必须仅仅依赖于整

个排气流的间歇性实验室测试。

[0098] 图 6 中的“闭环”系统 98 也在有限的程度上依赖于通过持续地但不以不同的燃烧室为基础来对排气进行有限的分析的反馈控制,而没有本发明采用的特定反馈控制调节标准。另外,与传统系统不同,使用在系统中检测到的氧气和 CO 的量的反馈控制环路独立并且精确地控制燃烧器中的各个以便改进整体性能。也就是说,与传统“开环”设计相比较,已发现通往各个燃烧室的燃料流的非常小的增量式变化(大约 3% (重量)或更少)造成整体性能水平上的显著不同。因此,图 6 示出打开调节阀将使效率损失线移动到右侧,而关闭调节阀则使效率损失线移动到左侧(更接近于期望的  $\Phi$  值 1.0)。

[0099] 图 6 还示出了燃料调节回路如何操作。打开调节阀倾向于使效率损失线移动到右侧;关闭调节阀使效率损失线移动到左侧,即,更接近于期望  $\phi$  值 1.0。如果在运行期间所检测到的  $\phi$  值降到 1.0 以下,系统将被视为“富氧”。因此,在启动运行期间,燃气轮机发动机可初始以低于 1.0 的  $\phi$  值在“贫燃”状态下运行。其后,用于各个燃烧器的各个调节阀将顺次地调整以增加燃料量,同时持续地监测氧气和 CO 水平并且经由反馈控制环路将控制信号发送回燃烧器。氧气水平将随着 CO 增加而下降,并且因此各个调节阀被调整以获得尽可能接近 1.0 的  $\phi$  值。在这个过程期间,各个燃烧器持续地被检查并且调整,使得在排气中的 CO 和氧气的量接近下游  $\text{NO}_x$  催化剂的最大效率值。

[0100] 图 7 是更加详细地描绘了根据本发明的、用于控制单独的燃烧器的燃料-空气比率的主燃料回路、燃料调节回路和反馈控制装置的另一流程框图。反馈控制系统 200 包括将主要燃料供给 240 提供给燃烧器的燃料回路 201,以及包含标示为 202 至 208 并且并联连接的多个分开的控制阀的燃料调节回路 250。因而,流到对应燃烧室(在图 7 中标示为 211 至 217)中的各个的燃料的量能够取决于在燃烧器下游所检测到的排气状况被分开且单独地控制。典型地,随着系统启动,燃烧器中的各个的燃料-空气比率将顺次地分开来调整,直到获得具有在下游检测到的可能的最低氧气和 CO 比率的稳定状态条件。图 7 指出来自燃烧器组的组合排气 220 传送进入催化剂床 221 并且然后通过氧气传感器 223 和 CO 传感器 225,它们经由数据线路 226 将数据提供给反馈控制器,反馈控制器又经由反馈控制回路 228 向燃料调节回路发送单独的控制信号,以调整(或者不调整)供给到单独的燃烧器的燃料的量。在 230 处示出来自系统的最终排气流,其应当含有更少量的氧气和 CO。

[0101] 虽然本发明已经结合当前视为最实用并且优选的实施例进行了描述,但是应当理解本发明不受限于公开的实施例,而是相反,本发明意图覆盖包括在所附权利要求的精神和范围内的各种修改和等价布置。

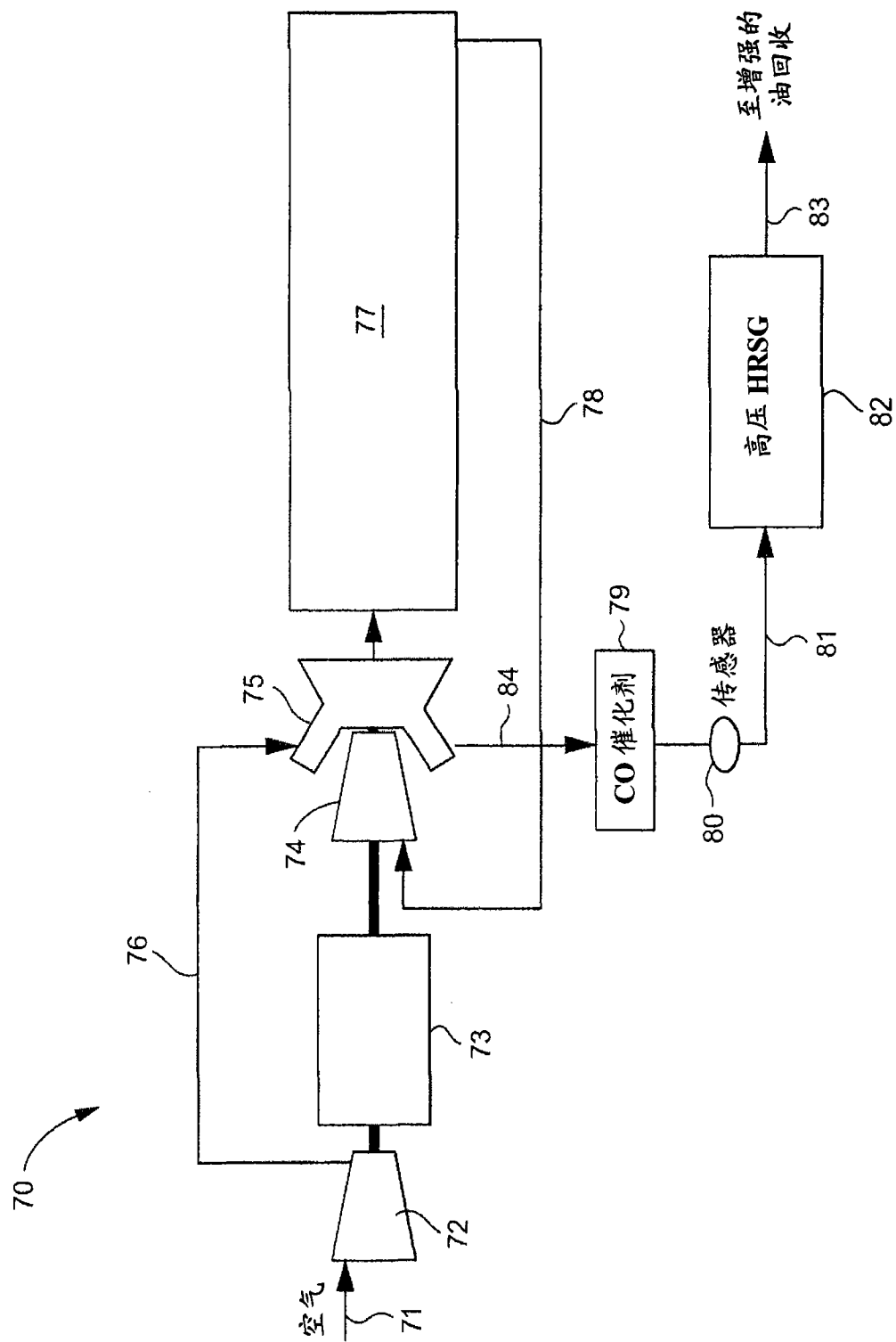


图 1

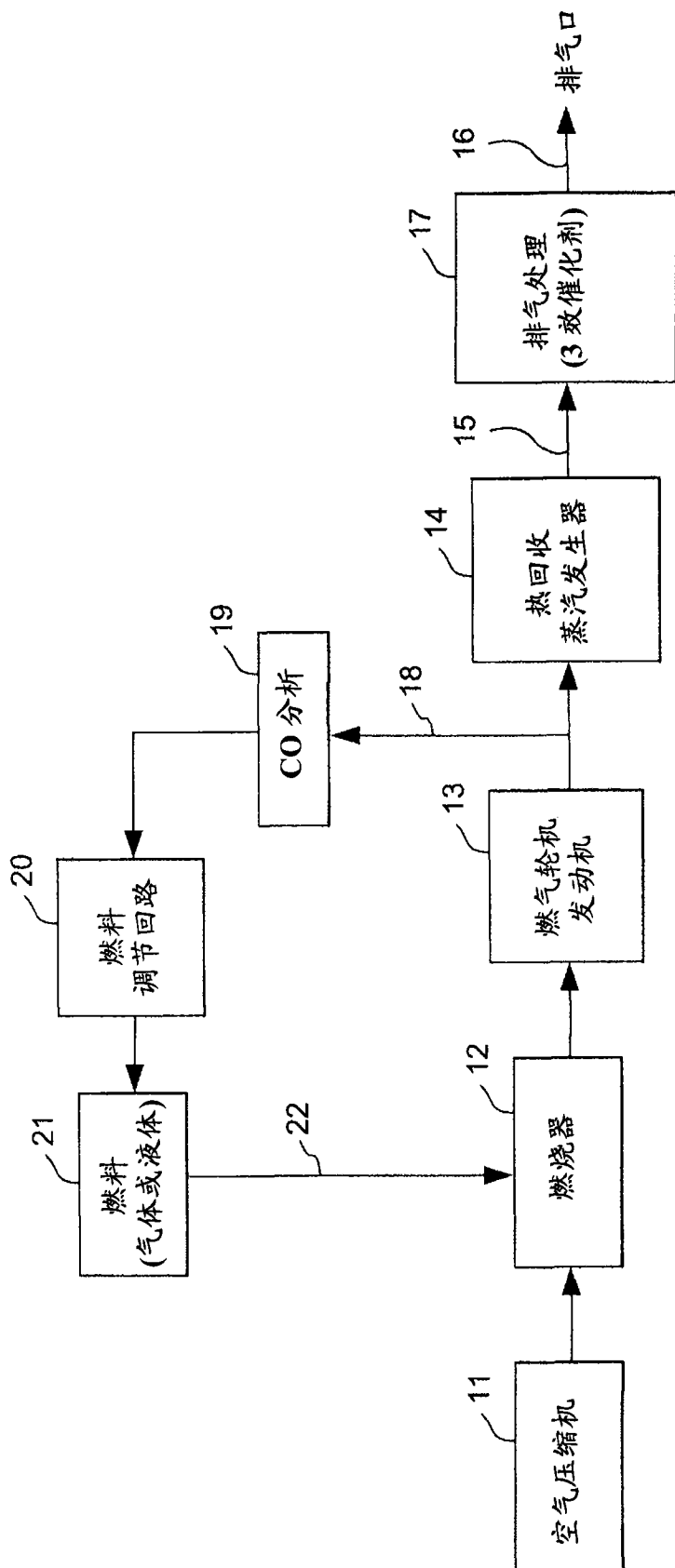


图 2

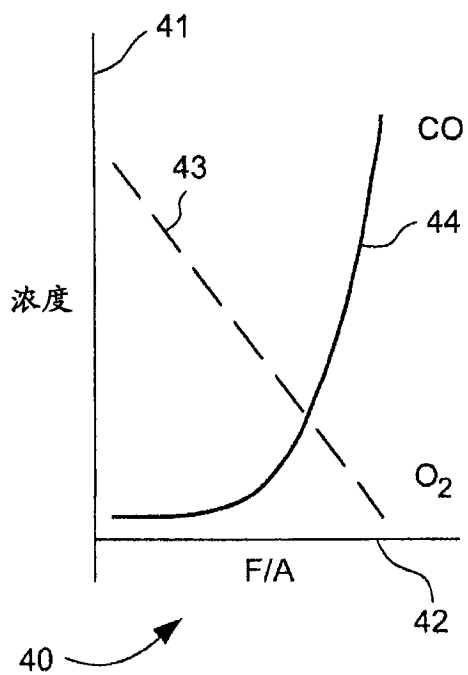


图 3

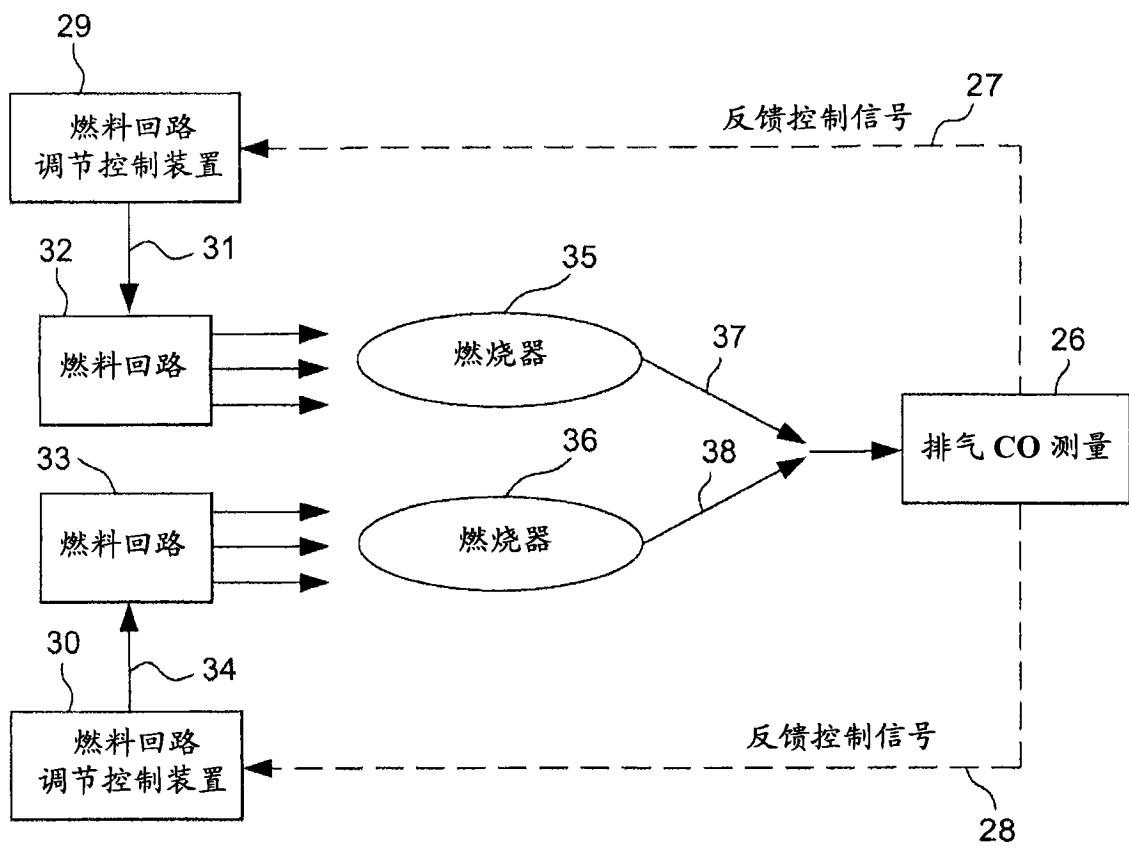


图 4

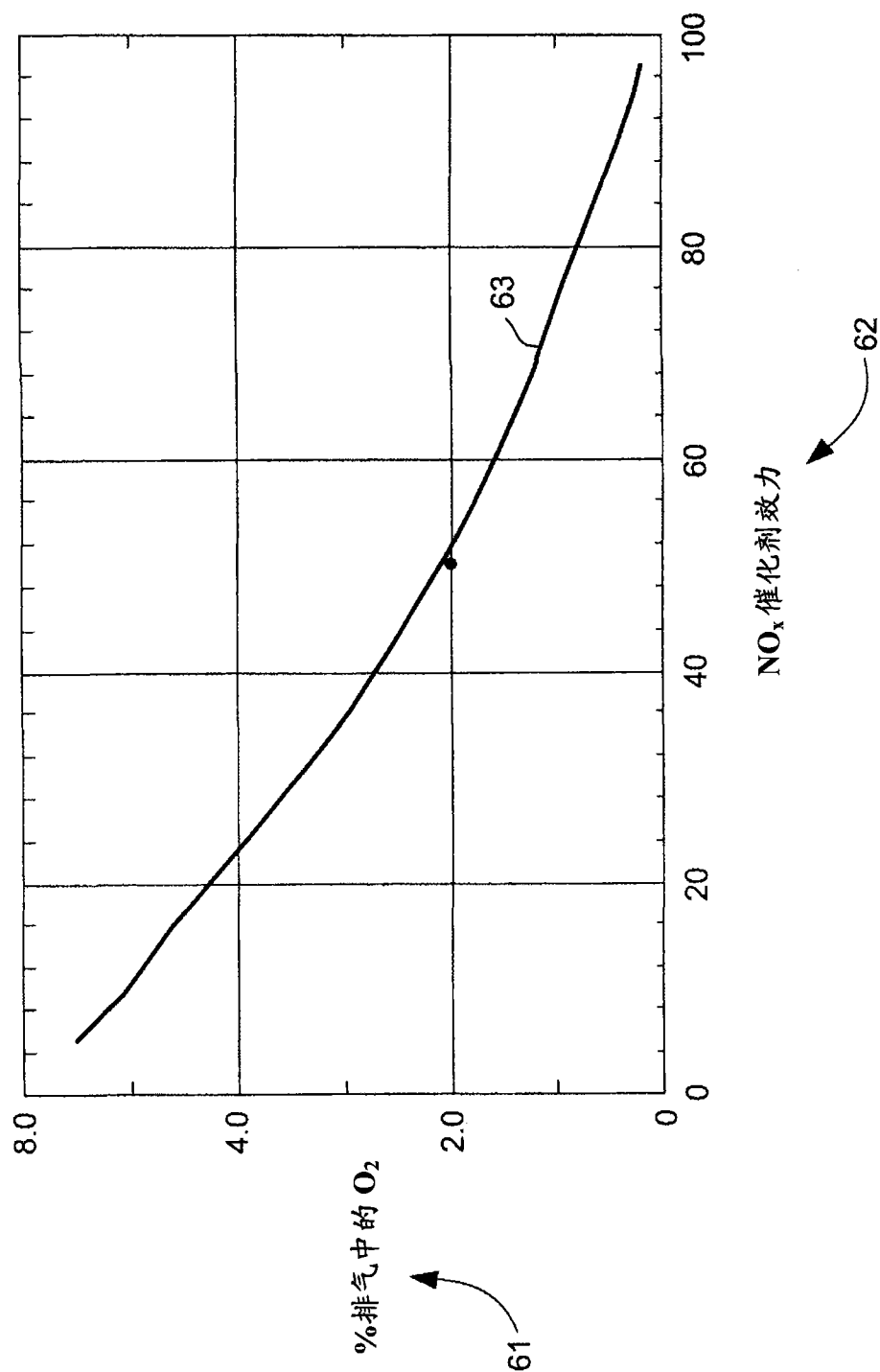


图 5

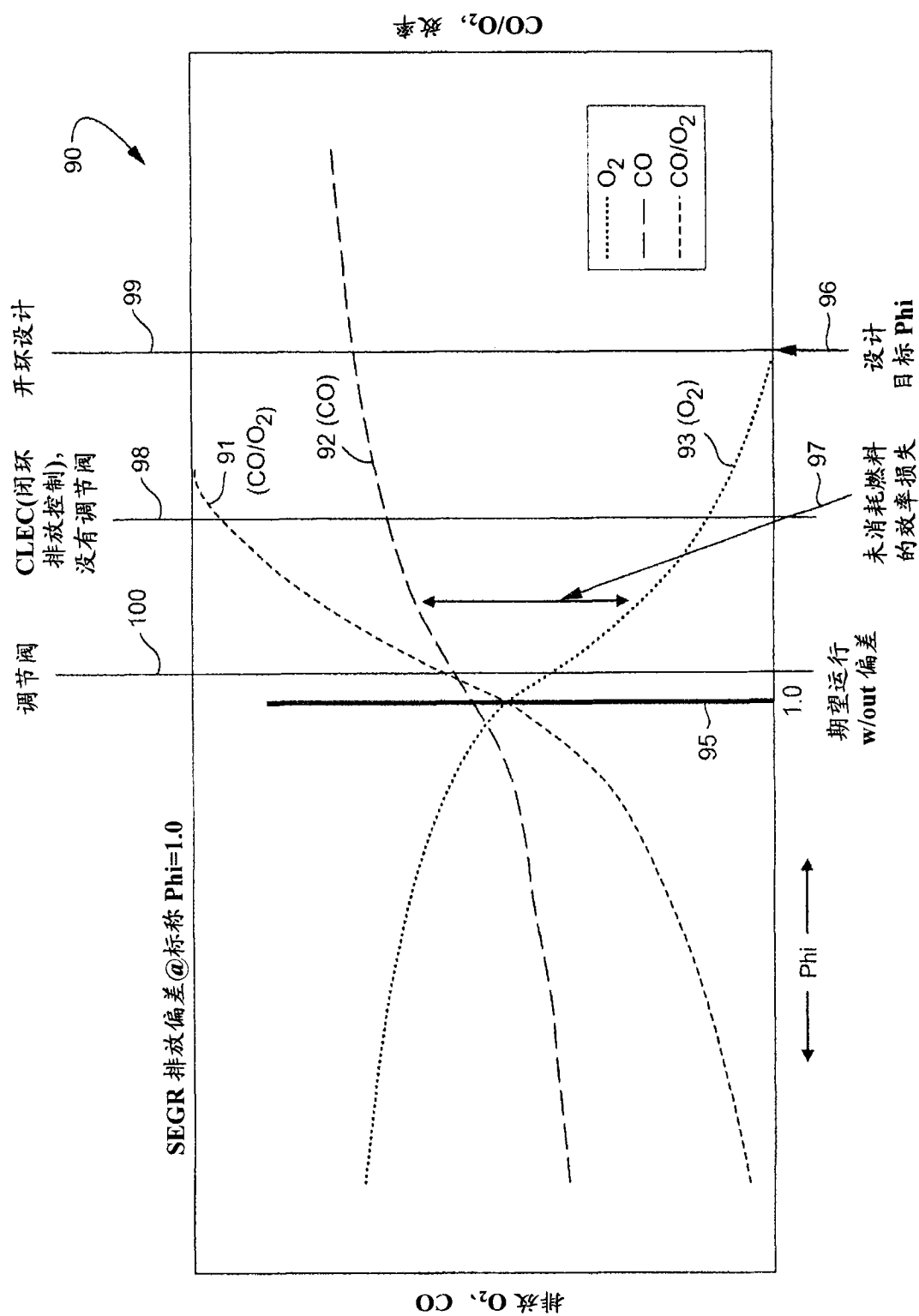


图 6

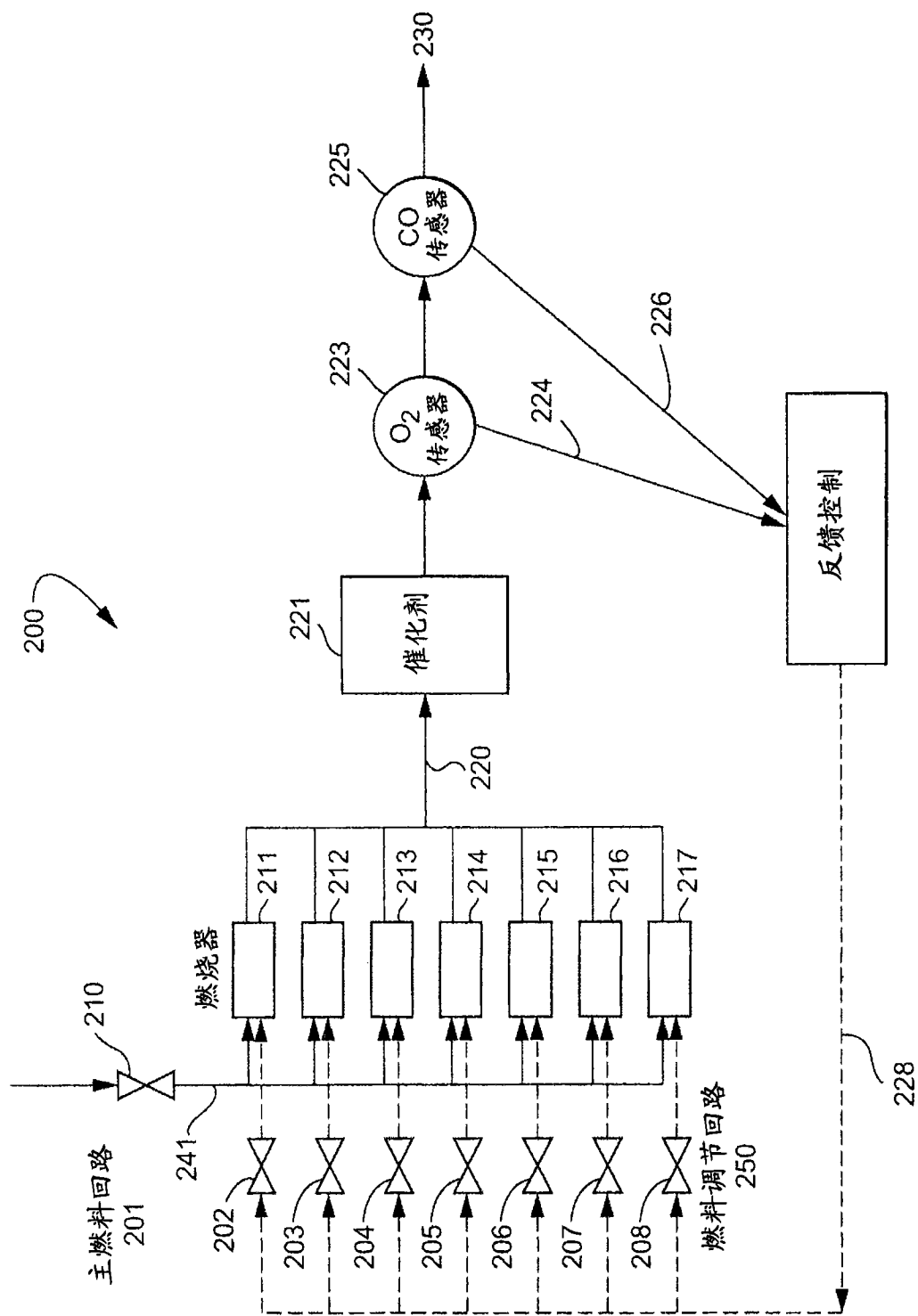


图 7