



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480013629.4

[45] 授权公告日 2009年2月4日

[11] 授权公告号 CN 100458335C

[22] 申请日 2004.3.16

[21] 申请号 200480013629.4

[30] 优先权

[32] 2003.3.18 [33] US [31] 10/391,390

[32] 2004.2.19 [33] US [31] 10/780,613

[86] 国际申请 PCT/IB2004/000908 2004.3.16

[87] 国际公布 WO2004/083752 英 2004.9.30

[85] 进入国家阶段日期 2005.11.18

[73] 专利权人 气体产品与化学公司

地址 美国宾夕法尼亚州

[72] 发明人 M·J·罗伯特斯

[56] 参考文献

US4057972A 1977.11.15

US4112700A 1978.9.12

US4334902A 1982.6.15

审查员 郝荣荣

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 韦欣华 邹雪梅

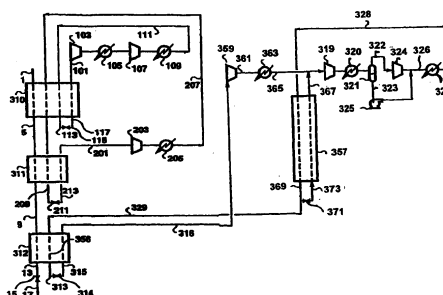
权利要求书 5 页 说明书 15 页 附图 5 页

## [54] 发明名称

用于气体液化的一体化多回路制冷方法

## [57] 摘要

液化一种气体(1)是通过由汽化相应的制冷剂(117, 213 与 315)而先后经至少两个温度范围的冷却和额外的制冷来完成的, 其中所述额外的制冷是通过在高于极冷热交换区(312)中最高温度的温度下汽化(357; 379)源自汽化于所述区域(312)中的制冷剂(315)的助制冷剂(373, 377)而提供的。助制冷剂可以和汽化于极冷热交换区中的制冷剂具有相同的组成但汽化于不同的压力下或是具有不同的组成。



1. 一种用于液化气体(1)的方法,其包含在各自的第一、第二和第三温度范围内经由三个热交换区(310, 311与312)连续地冷却进料气体物流以提供液化产品(13),其中用于在第一温度范围内冷却该进料气体物流的制冷是由第一汽化制冷剂(117)提供的,用于在第二温度范围内冷却物流的制冷是由第二汽化制冷剂(213)提供的,用于在第三温度范围内冷却物流的制冷是由第三汽化制冷剂(315)提供的,所述第一、第二和第三汽化制冷剂彼此具有不同的组成,其特征在于额外的制冷是由源自汽化在极冷热交换区(312)中的所述第三汽化制冷剂(315)的助制冷剂(373, 377)在高于第二热交换区(311)的最低温度的温度下的汽化(357; 379)提供的,其中所述极冷热交换区是第三热交换区。

2. 根据权利要求1所述的用于液化气体的方法,其中助制冷剂(373)与汽化在所述极冷热交换区(312)的制冷剂(315)具有相同的组成但在不同压力下汽化(357)。

3. 根据权利要求2所述的用于液化气体的方法,其中用于所述极冷热交换区(312)的制冷剂(315)由(1)-(4)提供:

(1)压缩(359)和冷却(363)汽化的制冷剂(316)以提供中间压缩的制冷剂(365);

(2)将中间压缩的制冷剂(363)与汽化的助制冷剂(367)结合以提供结合的中间制冷剂;

(3)压缩(319)并冷却(320)该结合的中间制冷剂以提供冷却压缩的制冷剂(328); 和

(4)进一步地通过与汽化助制冷剂(373)间接热交换来冷却和冷凝(357)该冷却压缩的制冷剂(328)以提供结合的制冷剂(369),其中一部分(329)提供用于所述极冷热交换区(312)的制冷剂(315)而其另一部分提供助制冷剂(373)。

4. 根据权利要求1所述的用于液化气体的方法,其中助制冷剂(377)的组成不同于在所述极冷热交换区(312)中汽化的制冷剂(315)。

5. 根据权利要求4所述的用于液化气体的方法,其中助制冷剂(377)是由(1)-(7)提供的:

(1)部分或完全地在所述极冷热交换区(312)汽化制冷剂(315)以提供部分或完全地汽化加温的制冷剂(316); 和

(2)使加温的制冷剂(316)与冷却降压(375)的制冷剂结合以提供助制冷剂(377);

并且其中冷却减压的制冷剂是由(3)-(7)提供的:

(3)汽化(379)助制冷剂(377)以产出汽化的助制冷剂(381);

(4)压缩(319)并且冷却(320)汽化的助制冷剂以提供冷却压缩的部分冷凝的助制冷剂(328);

(5)分离(330)该冷却压缩的部分冷凝的助制冷剂(328)成液体馏分(383)及蒸汽馏分(385);

(6)进一步地通过与汽化助制冷剂(377)间接热交换而冷却该液体馏分(383)以提供冷却的液体制冷剂(389); 和

(7)使冷却的液体制冷剂(389)压力降低(375)以提供冷却降压的(375)制冷剂。

6. 一种用于液化气体(1)的方法, 其包含在各自的第一和第二温度范围内经由两个热交换区(311 与 312)连续地冷却进料气体物流以提供液化产品(13), 其中用于在第一温度范围内冷却该进料气体物流的制冷是由第一汽化制冷剂(213)提供的, 用于在第二温度范围内冷却物流的制冷是由第二汽化制冷剂(315)提供的, 额外的制冷是通过在高于第一热交换区(311)中最低温度的温度下汽化(357; 379)源自汽化于所述极冷热交换区(312)中的所述第二汽化制冷剂(315)的助制冷剂(373, 377)而提供的, 其中所述极冷热交换区是第二热交换区, 其特征在于所述助制冷剂(373)和汽化于极冷热交换区(312)中的制冷剂(315)具有相同的组成但汽化(357)于不同的压力下。

7. 根据权利要求 6 所述的用于液化气体的方法, 其中用于所述极冷热交换区(312)的制冷剂(315)由(1)-(4)提供:

(1)压缩(359)和冷却(363)汽化的制冷剂(316)以提供中间压缩的制冷剂(365);

(2)将中间压缩的制冷剂(363)与汽化的助制冷剂(367)结合以提供结合的中间制冷剂;

(3)压缩(319)并冷却(320)该结合的中间制冷剂以提供冷却压缩的制冷剂(328); 和

(4)进一步地通过与汽化助制冷剂(373)间接热交换来冷却和冷凝(357)该冷却压缩的制冷剂(328)以提供结合的制冷剂(369),其中一部分(329)提供用于所述极冷热交换区(312)的制冷剂(315)而其另一部分提供助制冷剂(373)。

8. 根据权利要求1所述的用于液化气体的方法,其中进料气体物流(1)是天然气。

9. 根据权利要求6所述的用于液化气体的方法,其中进料气体物流(1)是天然气。

10. 根据权利要求1所述的用于液化气体的方法,其中,第一制冷剂是单组分或多组分的制冷剂,并且第二和第三制冷剂分别是多组分的制冷剂。

11. 根据权利要求6、8或9所述的用于液化气体的方法,其中,第一制冷剂是单组分或多组分的制冷剂,并且第二制冷剂是多组分的制冷剂。

12. 根据权利要求1或8所述的用于液化气体的方法,其中,第一制冷系统、第二制冷系统和第三制冷系统是分离的闭环系统。

13. 根据权利要求6或9所述的用于液化气体的方法,其中,第一制冷系统和第二制冷系统是分离的闭环系统。

14. 根据权利要求1所述的用于液化气体的方法,其中所述第一热交换区(310)将进料气流冷却到 $-35^{\circ}\text{C}$ 至 $-55^{\circ}\text{C}$ ,并且所述第二热交换区(311)将进料气流冷却到 $-40^{\circ}\text{C}$ 至 $-100^{\circ}\text{C}$ ,并且所述第三热交换区(312)将进料气流冷却到 $-85^{\circ}\text{C}$ 至 $-160^{\circ}\text{C}$ 。

15. 根据权利要求6、8或9所述的用于液化气体的方法,其中所述第一热交换区(310)将进料气流冷却到 $-35^{\circ}\text{C}$ 至 $-55^{\circ}\text{C}$ ,并且所述第二热交换区(311)将进料气流冷却到 $-40^{\circ}\text{C}$ 至 $-100^{\circ}\text{C}$ 。

16. 一种通过权利要求1的方法液化气体物流(1)的设备,该设备包含三个先后经由第一、第二和第三各自的温度范围冷却该气体物流(1)以提供液化产品(13)的热交换区(310, 311与312)和将彼此具有不同组成的相应第一、第二和第三制冷剂(117, 213与315)提供到所述热交换区(310, 311与312)的相应制冷系统,其特征在于存在进一步地热交换区(357; 379)以在高于第二热交换区(312)的最低温度的温度下汽化源自极冷热交换区(312)中所汽化的所述第三制冷剂(315)的

助制冷剂(373, 377), 其中所述极冷热交换区是第三热交换区。

17. 根据权利要求 16 所述的液化气体物流的设备, 其中助制冷剂(373)与汽化在所述极冷热交换区(312)的制冷剂(315)具有相同的组成但在不同压力下在所述进一步地热交换区(357)中汽化。

18. 根据权利要求 16 或 17 所述的液化气体物流的设备, 其包含压缩(359)和冷却(363)汽化的制冷剂(316)以提供中间压缩的制冷剂(365)的装置;

使中间压缩的制冷剂(363)与汽化的助制冷剂(367)结合以提供结合的中间制冷剂的装置; 和

压缩(319)和冷却(320)结合的中间制冷剂以提供冷却压缩的制冷剂(328)的装置;

并且其中所述进一步地热交换装置(357)进一步地通过与汽化助制冷剂(373)间接热交换而冷却和冷凝该冷却压缩的制冷剂(328)以提供结合的制冷剂(369), 其中一部分(329)为所述极冷热交换区(312)提供制冷剂(315)而其另一部分提供助制冷剂(373)。

19. 根据权利要求 16 所述的液化气体物流的设备, 其中在所述进一步地热交换器中汽化助制冷剂(377)以产出汽化的助制冷剂(381)并且该设备包含:

用于使来自极冷热交换区(312)的部分或完全地汽化加温的制冷剂(316)与冷却降压(375)的制冷剂结合以提供助制冷剂(377)的装置;

用于压缩(319)和冷却(320)汽化的助制冷剂以提供冷却压缩的部分冷凝的助制冷剂(328)的装置;

用于使冷却压缩的部分冷凝的助制冷剂(328)分离(330)成液体馏分(383)和蒸汽馏分(385)的装置;

用于进一步地通过与汽化助制冷剂(377)间接热交换(379)冷却液体馏分(383)而提供冷却的液体制冷剂(389)的装置; 和

为降低冷却的液体制冷剂(389)的压力以提供冷却降压(375)的制冷剂的装置(375)。

20. 一种通过权利要求 6 的方法液化气体物流(1)的设备, 该设备包含两个先后经由各自的第一和第二温度范围冷却该气体物流(1)以提供液化产品(13)的热交换区(311 与 312), 将相应制冷剂(213 与 315)提供到热交换区(311 与 312)的相应第一和第二制冷系统, 和进一步地

用于在高于第一热交换区(311)中的最低温度的温度下汽化源自极冷热交换区(312)中所汽化的制冷剂(315)的助制冷剂(373, 377)的热交换区(357; 359); 其特征在于助制冷剂(373)与汽化在所述极冷热交换区(312)的制冷剂(315)具有相同的组成但在不同压力下在所述进一步地热交换区(357)中汽化; 其中所述极冷热交换区是所述第二热交换区。

21. 根据权利要求 20 所述的液化气体物流的设备, 其包含

压缩(359)和冷却(363)汽化的制冷剂(316)以提供中间压缩的制冷剂(365)的装置;

使中间压缩的制冷剂(363)与汽化的助制冷剂(367)结合以提供结合的中间制冷剂的装置; 和

压缩(319)和冷却(320)结合的中间制冷剂以提供冷却压缩的制冷剂(328)的装置;

并且其中所述进一步地热交换装置(357)进一步地通过与汽化助制冷剂(373)间接热交换而冷却和冷凝该冷却压缩的制冷剂(328)以提供结合的制冷剂(369), 其中一部分(329)为所述极冷热交换区(312)提供制冷剂(315)而其另一部分提供助制冷剂(373)。

## 用于气体液化的一体化多回路制冷方法

### 发明背景

多回路的制冷系统广泛地应用于低温下的气体液化。在天然气液化中，例如，可将两个或三个闭环制冷系统一体化以在连续较低温度范围内提供制冷来冷却和液化进料气体。典型地，至少一个这些闭环制冷系统使用多组分的或混合的制冷剂，其由液体混合制冷剂通过间接换热来汽化并冷却该进气而在选定温度范围内提供制冷。使用两个混合制冷剂系统的系统是众所周知的；在一些应用中，使用纯组分制冷剂诸如丙烷的第三制冷剂系统提供进料气体的预冷。此第三制冷剂系统也可在压缩后用来提供一部分冷却来冷凝混合制冷剂中的一个或全部两个。在最低温度范围内的制冷可由气体膨胀机回路提供，所述气体膨胀机回路整合了在较高温度范围内运行的混合制冷剂回路。

在典型用于液化天然气的多回路混合制冷剂方法中，低级或极冷制冷回路通过在约-30℃至约-165℃的温度范围内的汽化提供制冷来提供最终液化和任选的冷却过的进料气体的过冷。该制冷剂在极冷温度范围内完全汽化并且可能直接返回制冷剂压缩机，例如，如有代表性的美国专利 6,119,479 和 6,253,574 B1 中所述。或者，该完全汽化的制冷剂在压缩前可加温以提供该进气的预冷却，如美国专利 4,274,849 和 4,755,200 所述，或用于制冷剂物流的冷却，如澳大利亚专利 AU-A-43943/85 所述。这些典型液化方法的共同特征是在最低温度范围内提供制冷时，在低级或极冷制冷回路中的制冷剂是被完全汽化的。在压缩前任何由制冷剂提供的其他制冷因而受到从汽化的制冷剂到其他工艺物流传递显热的影响。

在已知的使用三个一体化闭环制冷系统的液化工艺中，在该第三或最低温度制冷系统中的该工艺设备的尺寸可能较之两个较温的制冷系统更小。因为工艺液化能力的提高，在两个较温系统中压缩和换热设备的尺寸将达到得自设备供应商的最大尺寸，而在该最低温度制冷系统中的相应设备的尺寸可能小于该最大尺寸。为进一步提高该液化工艺的生产能力，由于在两个较温制冷系统中压缩和/或热交换器尺寸的限制，可能需要平行设备组。可能需要在现有压缩机和热交换器

尺寸的限制下提高此液化方法的极限生产能力，因此要使用更大的单个设备组的液化方法。

#### 发明内容

本发明的实施方案满足了此类需要，其涉及一体化制冷系统，所述制冷系统具有增加的生产能力而不需要用于较温制冷系统的相同的平行设备。本发明的实施方案提供了一种用于液化气体的方法，其包含使进气物流连续地通过第一和第二温度范围而冷却以提供液化产物，其中用于在第一温度范围内冷却该进气物流的制冷是由第一汽化制冷剂提供的并且用于在第二温度范围内冷却物流的制冷是由第二汽化制冷剂提供的，并且更进一步地其中源自第二汽化制冷剂的助制冷剂通过在高于第一温度范围内的最低温度的温度下的汽化来提供额外的制冷。

另一个实施方案涉及一种用于液化气体的方法，其包含使进气物流连续地通过第一、第二和第三温度范围而冷却以提供液化产物，其中用于在第一温度范围内冷却该进气物流的制冷是由第一汽化制冷剂提供的，用于在第二温度范围内冷却物流的制冷是由第二汽化制冷剂提供的，并且用于在第三温度范围内冷却物流的制冷是由第三汽化制冷剂提供的，并且更进一步地其中源自第三汽化制冷剂的助制冷剂通过在高于第二温度范围内的最低温度的温度下的汽化来提供额外的制冷。

本发明的实施方案包括一种用于液化气体的方法，其包含使进气物流连续地通过第一和第二温度范围而冷却以提供液化产物，其通过下述(a)-(c)实现：

- (a)在第一温度范围内通过汽化第一制冷剂提供使物流冷却的制冷；
- (b)在第二温度范围内通过在第一压力下汽化第一部分的第二制冷剂提供使物流冷却的制冷；和
- (c)在高于第一温度范围内的最低温度的温度下通过在第二压力下汽化第二部分的第二制冷剂提供额外的制冷。第一压力可能低于第二压力。

本发明的另一实施方案包括一种用于液化气体的方法，其包含使进气物流连续地通过第一、第二和第三温度范围而冷却以提供液化产

物，其通过下述(a)-(d)实现：

(a)在第一温度范围内通过汽化第一制冷剂提供使物流冷却的制冷；

(b)在第二温度范围内通过汽化第二制冷剂提供使物流冷却的制冷；

(c)在第三温度范围内通过在第一压力下汽化第一部分的第三制冷剂提供使物流冷却的制冷；和

(d)在高于第二温度范围内的最低温度的温度下通过在第二压力下汽化第二部分的第三制冷剂提供额外的制冷。

第一压力可能低于第二压力。第一制冷剂可能是单一组分制冷剂；第二和第三制冷剂可能是多组分的制冷剂。第一温度范围可能是约35℃至约-70℃，第二温度范围可能是约0℃至约-140℃，并且第三温度范围可能是约-90℃至约-165℃。进气物流可能是天然气。

第三制冷剂可能由以下(1)-(4)提供：

(1)压缩并冷却汽化过的制冷剂以提供中间压缩制冷剂；

(2)使中间压缩制冷剂与额外的汽化过的制冷剂结合以提供结合的中间制冷剂；

(3)压缩并冷却该结合的中间制冷剂以提供冷却压缩的制冷剂；和

(4)更进一步地冷却并冷凝该冷却压缩的制冷剂以提供第三制冷剂，其中用于该冷却和冷凝的制冷是通过在第二压力下汽化第二部分的第三制冷剂提供的。

冷却第一压缩的蒸汽可产出两相物流，并且该方法可更进一步地包含分离该两相物流成蒸汽物流和液体物流，压缩该蒸汽物流以产出更进一步地压缩的蒸汽，泵送该液体物流以提供加压液体，使该更进一步地压缩的蒸汽和该加压液体结合以产出结合的制冷剂物流，并且冷却该结合的制冷剂物流以提供冷却压缩的制冷剂。

本发明的另一个主要的实施方案涉及一种用于液化气体的方法，其包含使进气物流连续地通过第一和第二温度范围而冷却以提供液化产物，其是通过以下(a)-(c)实现：

(a)在第一温度范围内通过汽化第一制冷剂提供使物流冷却的制冷；

(b)在第二温度范围内通过汽化第二制冷剂提供使物流冷却的制

冷；和

(c)在高于第一温度范围内的最低温度的温度下通过汽化源自第二制冷剂的助制冷剂提供额外制冷。

本发明的另一个实施方案涉及一种用于液化气体的方法，其包含使进气物流连续地通过第一、第二和第三温度范围而冷却以提供液化产物，其是通过以下(a)-(d)实现：

(a)在第一温度范围内通过汽化第一制冷剂提供使物流冷却的制冷；

(b)在第二温度范围内通过汽化第二制冷剂提供使物流冷却的制冷；

(c)在第三温度范围内通过部分地或完全地汽化第三制冷剂提供使物流冷却的制冷；和

(d)在高于第二温度范围内的最低温度的温度下通过汽化源自第三制冷剂的助制冷剂提供额外制冷。

第一制冷剂可能是单一组分制冷剂。第二和第三制冷剂可能是多组分的制冷剂。第一温度范围可能是约35℃至约-70℃，第二温度范围可能是约0℃至约-140℃，并且第三温度范围可能是约-90℃至约-165℃。进气物流可能是天然气。

该助制冷剂可由以下提供：

(1)部分地或完全地汽化第三制冷剂以提供部分地或完全地汽化加温的制冷剂；和

(2)使该加温的制冷剂与冷却减压制冷剂结合以提供助制冷剂；其中该冷却减压制冷剂由以下(3)-(7)提供；

(3)汽化该助制冷剂以产出汽化的助制冷剂；

(4)压缩并冷却该汽化的助制冷剂以提供冷却压缩的部分冷凝的助制冷剂；

(5)分离该冷却压缩的部分冷凝的助制冷剂为液体馏分和蒸汽馏分；

(6)更进一步地通过与该汽化助制冷剂间接热交换冷却该液体馏分以提供冷却的液体制冷剂；和

(7)降低该冷却的液体制冷剂的压力以提供冷却的减压制冷剂。

冷却第一压缩的蒸汽可产出两相物流，并且该方法可更进一步地

包含分离该两相物流成蒸汽物流和液体物流，压缩该蒸汽物流以产出进一步地压缩的蒸汽，泵送该液体物流以提供加压液体，使该进一步地压缩的蒸汽和该加压液体结合以产出结合的制冷剂物流，并且冷却该结合的制冷剂物流以提供冷却压缩的、部分地冷凝的助制冷剂。

#### 附图说明

以下仅通过实例并参考附图描述本发明目前的优选实施方案。

图 1 是按照现有技术的气体液化和制冷系统的示意流程图；

图 2 是按照本发明的示范实施方案的气体液化和制冷系统的示意流程图，其利用两个压力级汽化极冷制冷剂；

图 3 是按照本发明的另一个示范实施方案的气体液化和制冷系统的示意流程图，其利用在极冷温度范围内所用的制冷剂的相分离；

图 4 是按照本发明的又一个示范实施方案的气体液化和制冷系统的示意流程图；和

图 5 是按照本发明的再一个示范实施方案的气体液化和制冷系统的示意流程图。

#### 具体实施方案

这里所述的本发明的实施方案涉及用于气体液化的改进的制冷方法，使用了在连续降温下使进料物流通过三个温度范围而冷却的三个闭环制冷系统。这些实施方案致力于改善在最低的这些温度范围内提供制冷的制冷系统，其中在最低温度范围内所用制冷系统中的压缩机和换热设备的尺寸比用于较高温度范围内的制冷系统中的压缩机和换热设备的尺寸要大。这里所用术语制冷是指在低于环境温度下，由液体物流向制冷剂的间接传热。制冷剂是纯或混合流体，其通过与另一物流的间接热交换吸收来自该物流的热。

一种典型现有技术液化方法的示意流程图在图 1 中给出。管路 1 中的进气，例如天然气已经经过预处理除去水及其他易冷凝的杂质，通过与第一热交换器 3 中的第一汽化制冷剂的间接热交换经第一温度范围冷却。该制冷剂可是纯组分制冷剂诸如丙烷或者可是多组分的制冷剂，其包含两个或更多选自乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、丁烷和异丁烷的轻烃。

管路 5 中的冷却的进料进一步地通过与第二热交换器 7 中的第二汽化制冷剂的间接热交换经第二温度范围冷却。管路 9 中的该进一步

冷却的进料通过在第三热交换器 11 中与第三汽化制冷剂的间接热交换经第三温度范围更进一步冷却和液化。该制冷剂典型地是一种多组分的制冷剂，其包含两个或更多选自甲烷、乙烷、乙烯、丙烷和丙烯的制冷剂组分。管路 13 中的最终液化产物可以通过膨胀阀 15 降压以在管路 17 中产出最终液体产物。

用于此方法的制冷典型地是由三个嵌套的或串联的制冷系统提供。第一制冷系统通过将管路 101 中的蒸汽制冷剂供给到第一压缩机级 103 而运行，其中气体压缩到 2-4bara(这里所述的所有压力是绝对压力)，在后冷却器 105 中冷却，在第二压缩机 107 中进一步地压缩到 6-10bara，在后冷却器 109 中冷却以在管路 111 中提供环境温度下的压缩的制冷剂。该压缩的制冷剂进一步地冷却并且至少部分地在第一热交换器 3 中的热交换通道内冷凝。部分地或完全地在管路 113 中冷凝的制冷剂通过节流阀 115 降压以在管路 117 中提供降压的制冷剂，并且此制冷剂在独立的热交换通道中汽化以在第一热交换器 3 中提供制冷。如上所述，压缩管路 101 中的汽化的制冷剂。

第二制冷系统通过将管路 201 中的蒸汽制冷剂供给到压缩机 203 而运行，其中气体压缩到 10-20bara 并且在后冷却器 205 中冷却到大约环境温度。管路 207 中的压缩的制冷剂进一步地冷却并且至少部分地在第一热交换器 3 和第二热交换器 7 中的热交换通道内冷凝。部分地或完全地在管路 209 中冷凝的制冷剂通过节流阀 211 降压以在管路 213 中提供降压的制冷剂，并且此制冷剂在独立的热交换通道中汽化以在第二热交换器 7 中提供制冷。如上所述，压缩管路 201 中的汽化的制冷剂。

第三制冷系统通过将管路 301 中的蒸汽制冷剂供给到压缩机 302 而运行，其中气体压缩到约 35-约 60bara 并且在后冷却器 303 中冷却到大约环境温度。管路 304 中的该压缩的制冷剂进一步地冷却并且至少在第一热交换器 3、第二热交换器 7 和第三热交换器 11 中的热交换通道内部分冷凝。在管路 305 中部分或完全地冷凝的制冷剂通过节流阀 307 降压以在管路 309 中提供降压的制冷剂，并且此制冷剂在独立的热交换通道中汽化以在第三热交换器 11 中提供制冷。如上所述，压缩管路 301 中的汽化的制冷剂。使用包括热交换器 11 和压缩机 302 的第三制冷回路提供了一部分总的制冷负荷，其是液化进料气体并且降

低第一及第二制冷系统的制冷负荷和尺寸所需要的。

使用图 1 三个制冷回路的对现有技术方法已知的修改或选择是可行的。例如第一制冷回路可利用串联制冷，其中制冷剂在三个不同压力下汽化，而汽化的制冷剂回到多级压缩机中的不同的级。第二制冷回路可在两个不同压力下使制冷剂通过热交换器 7 中的两套独立的热交换通道汽化并且使各汽化的制冷剂物流返回到两独立的压缩机级。

在另一个修改方案中，第三制冷回路可在两个不同压力下使制冷剂通过热交换器 11 中的两套独立的热交换通道汽化并且使各汽化的制冷剂物流返回到两个独立的压缩机级。在压缩机 302 前的管路 301 中的汽化的制冷剂可用于独立的热交换器以提供用于一部分第二制冷剂物流 215 的冷却和用于一部分管路 304 中的压缩的制冷剂的冷却。

在另一个已知的具有三个制冷回路的方法中，在第一制冷回路中的汽化制冷剂用于预冷进料气体；第一制冷回路压缩机排放物由一部分来自第二制冷回路的汽化制冷剂冷却和冷凝。在压缩前来自第三热交换器的第三制冷回路中的汽化的制冷剂用来进一步地预冷该进料气体。此进一步地预冷过的进料气体然后在第三热交换器中冷却和冷凝。第二制冷回路冷却和冷凝压缩的第三制冷剂。

这些已知的液化方法的共同特征是在最低温度范围内提供制冷时，在第三制冷回路(即低级或极冷制冷回路)中的该制冷剂是被完全汽化的。在压缩前任何由该制冷剂提供的其他制冷仅仅受到从汽化的制冷剂到其他工艺物流传递的显热的影响。

参考图 2 中所示的本发明的第一示范的实施方案，管路 1 中的进料气体，例如，已经过预先处理以除去水及其他可冷凝的杂质的天然气，由与第一热交换器 310 中的第一汽化制冷剂间接换热而通过第一温度范围被冷却。该制冷剂可能是多组分的制冷剂，其包含，例如，两个或更多选自乙烷、乙烯、丙烷、丁烷、正戊烷和异戊烷(即 2-甲基丁烷)的轻烃。或者，该制冷剂可能是单一组分诸如丙烷。第一温度范围的较高温度可能是环境温度，第一温度范围内的较低温度可能是约-35℃至约-55℃。可以选择具体的制冷剂组成以实现所需的第一温度范围内的较低温度。

管路 5 中的冷却的进料由与第二热交换器 311 中的第二汽化制冷剂间接换热而通过第二温度范围被冷却到约-40℃至约-100℃的温度。

该制冷剂典型地是多组分的制冷剂并且可包含例如，两个或更多选自甲烷、乙烷、乙烯和丙烷的组分。可选择具体的制冷剂组成以实现所需的第二温度范围内的较低温度。

管路9中的进一步地冷却的进料由与第三热交换器312中的第三汽化制冷剂间接换热而更进一步通过第三温度范围被冷却和液化，到达约-85℃至约-160℃的较低温度。该制冷剂是多组分的制冷剂并可包含，例如，两个或更多选自甲烷、乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、一种或多种具有四个碳原子的烃、正戊烷、异戊烷(即2-甲基丁烷)和氮的组分。在此制冷剂中，异戊烷是优选的(但不是必需的)组分。可选择具体的制冷剂组成以实现所需的第三温度范围内的较低温度。在管路13中的最终液化产物可以通过膨胀阀15降压以在管路17中产出最终液体产物。

第一温度范围可由第一温度和第二温度规定，并且第一温度可以是环境温度。第二温度范围可由第二温度和第三温度规定，并且第三温度范围可由第三温度和第四温度规定。第一温度范围是最高的或极暖温度范围并且第三温度范围是最低的或极冷温度范围。第一温度是最高的温度并且第四温度是最低的温度。

用于此方法的制冷可由三个嵌套的或串联的制冷系统提供。第一制冷系统可类似于如上所述参考图1的第一制冷系统，并且可通过将管路101中的蒸汽制冷剂供给到第一压缩机级103而运行，其中气体压缩到2-4bara，在后冷却器105中冷却，在第二压缩机107中进一步地压缩到6-10bara，在后冷却器109中冷却以在管路111中提供环境温度下的压缩的制冷剂。该压缩的制冷剂进一步地冷却并且至少部分在第一热交换器310中的热交换通道内冷凝。在管路113中部分或完全地冷凝的制冷剂通过节流阀115降压以在管路117中提供降压的制冷剂，并且此制冷剂在独立的热交换通道中汽化以在第一热交换器3中提供制冷。管路101中的汽化的制冷剂如上所述被压缩。

第二制冷系统可类似于如上所述参考图1的第一制冷系统，并且可通过将管路201中的蒸汽制冷剂供给到压缩机203而运行，其中气体压缩到10-20bara，并且在后冷却器205中冷却到大约环境温度。在管路207中该压缩的制冷剂进一步地冷却并且至少在第一热交换器310和第二热交换器311中的热交换通道内部分冷凝。在管路209中部分

或完全地冷凝的制冷剂通过节流阀 211 降压以在管路 213 中提供降压的制冷剂，并且此制冷剂在独立的热交换通道中汽化以在第二热交换器 311 中提供制冷。管路 201 中的汽化的制冷剂如上所述被压缩。

此实施方案的第三制冷系统脱离了前述的现有技术第三制冷系统并且其独立于第一和第二制冷系统运行。在此第三制冷系统中，管路 313 中的冷凝的制冷剂通过节流阀 314 降压并且来自管路 315 的降压的冷凝的制冷剂在第三热交换器 312 中汽化以在那里提供制冷。

冷热交换器 312 的制冷是完全汽化的并且在低于环境温度下压缩。一部分压缩的制冷剂的冷却是在高于第三热交换器 312 的最高温度和高于热交换器 311 中进料物流的最低温度的温度下由热交换器 357 中的自动制冷提供。热交换器 357 中汽化制冷剂的的压力高于冷热交换器 312 中的汽化制冷剂的的压力。

管路 316 中的汽化的制冷剂在第一压缩机 359 中压缩到 3-25bara 的压力范围内，并且管路 361 中的压缩的物流在冷却器 363 中冷却到近环境温度以在管路 365 中提供中间压缩的气体。该中间压缩的气体与汽化的助制冷剂物流在管路 367 中结合(如下所述)并且该结合的制冷剂物流，典型地在近环境温度和压力 20-50bara 下进一步地在第二压缩机 319 中压缩，在中间冷却器 320 中冷却和部分冷凝，并且在分离器 321 中分离以在管路 322 中提供蒸汽物流并在管路 323 中提供液体物流。

管路 322 中的蒸汽物流进一步地在压缩机 324 中压缩到压力 30-70bara，来自分离器 321 的液体物流 323 由机泵 325 加压到相同的压力，该两个加压过的物流合并以提供两相制冷剂物流 326，其进一步地由空气或冷却水在后冷却器 327 中冷却。

管路 328 中的部分或完全地冷凝的制冷剂进一步地在热交换器 357 中冷却以在管路 369 中提供冷却的制冷剂并且此制冷剂物流被分成第一和第二部分。第一部分通过节流阀 371 降压并且该降压的制冷剂，其可划定为助制冷剂，流经管路 373 到热交换器 357，在此它被加温并且汽化以提供该处的制冷并且在管路 367 中产出汽化的助制冷剂物流。该冷却的制冷剂第二部分流经管路 329 并且进一步地在热交换器 312 的流道 356 中冷却以产出如上所述的制冷剂 313。因而管路 367 和 373 中的助制冷剂源自于管路 315 中的制冷剂并且此实施方案中该助制

冷剂具有与管路 315 中的制冷剂相同的组成。

任选地，不使用分离器 321、机泵 325、压缩机 324 和冷却器 327，并且管路 328 中的部分或完全地冷凝的制冷剂由冷却器 320 直接地提供。

典型地，管路 315 中的低压制冷剂物流可能在热交换器 312 中在压力范围约 2-10bara 下汽化，而管路 373 中的中压制冷剂物流可能在热交换器 357 中在较高的压力范围约 5-20bara 下汽化。

当上述实施方案用于天然气液化时，比甲烷重的烃可通过包括洗涤柱或其他的部分冷凝和 / 或蒸馏法在内的已知方法在最终甲烷液化前被冷凝且除去。这些冷凝的天然气液体(NGLs)可分馏以在制冷系统中提供用于制冷剂的所选组分。对此实施方案的改变可包括提供在第三较高压力下汽化一部分管路 369 中的制冷剂以提供比由较低压力汽化管路 315 和 373 中的制冷剂物流所提供的制冷更暖的制冷。

用于第三制冷剂系统的混合制冷剂包含使得制冷剂在宽的温度范围内汽化的所选的组分和组成。选择这些组分和该制冷剂汽化所在的温度范围的标准不同于典型用于本领域已知的三回路液化系统的第三或低级制冷回路的混合制冷剂的选择标准。本发明第三回路中的混合制冷剂应能够在第三温度范围内(即在第三热交换器 312)并且在高于第二温度范围内最低温度的温度下(即高于第二热交换器 311 的最低温度)汽化。取决于制冷剂组成和压力，汽化在高于第二温度范围内最高温度的温度下进行可以是可行且称心的。

用于第三回路的制冷剂的典型组成(以摩尔%计)可以包括 5-15% 氮气、30-60% 甲烷、10-30% 乙烷、0-10% 丙烷和 0-15% 异戊烷。一种或多种具有四个碳原子的烃可以存在于该制冷剂中，但优选该一种或多种具有四个碳原子的烃的总浓度低于异戊烷的浓度。根据汽化压力，在制冷剂中的异戊烷和一种或多种具有四个碳原子的烃的摩尔比典型地是大于 1 并且可能大于 1.5。正戊烷(n-戊烷)也可以存在于该制冷剂中，优选其浓度低于异戊烷。

用于第三制冷回路的制冷组分可以由比甲烷重的、由天然气进料预冷冷凝得到的烃类液体提供。这些冷凝的天然气液体(NGLs)可以由已知的方法回收并分馏以获得用于优选的混合制冷剂的独立组分。当天然气进料包含正戊烷和异戊烷时，例如，当这些组分由蒸馏从 NGLs

回收供第三制冷回路中的制冷剂之用时，制冷剂中的异戊烷和正戊烷的摩尔比可大于进料气体中的异戊烷和正戊烷的摩尔比。优选地，制冷剂中的异戊烷和正戊烷的摩尔比大于进料气体中的异戊烷和正戊烷的摩尔比两倍。异戊烷比正戊烷优选用于此制冷剂，这是因为异戊烷比正戊烷具有更低的冰点，其使得制冷剂在更低的温度下使用。

当天然气进料包含异戊烷和一种或多种具有四个碳原子的烃时，并且当这些组分由蒸馏从 NGLs 回收供第三制冷回路中的制冷剂之用时，制冷剂中的异戊烷和该一种或多种具有四个碳原子的烃的摩尔比可大于进料气体中的异戊烷和该一种或多种具有四个碳原子的烃的摩尔比。

在此实施方案中的第三制冷回路是自制冷的并且不依赖第一和第二制冷回路。和图 1 的方法形成对比，图 2 的在第三制冷回路中的压缩的制冷剂不在第一和第二热交换区内通过第一和第二制冷回路冷却。这使第一和第二制冷回路减载，并与图 1 的方法相比因而降低第一和第二热交换区以及第一和第二制冷回路中的压缩设备的尺寸。当图 2 的方法用于一种设计用于很大产品处理量的液化系统时，这尤其是有益的。当第一和第二制冷回路中的压缩和换热设备的尺寸到达设备供应商可接受的最大尺寸时，同用图 1 的方法相比，用图 2 的方法可能得到更高的生产率。

图 2 方法的实施方案的变化是可能的。例如，根据需要可使用单级或超过两级的压缩，其将构成与蒸汽压缩级泵连的多股液体物流。在另一个变化中，制冷剂组成和压缩系统中的压力使得级间的冷凝不发生并且不需要蒸汽/液体分离。

在图 2 方法的另一个实施方案中，不需要第二制冷系统，并且不使用热交换器 311、阀 211、压缩机 203、冷却器 205 和相关的管路。在此方案中，热交换器 310 不包括经管路 207 所提供的冷却制冷剂的通道。在此实施方案中的方法因此包含连续地经由第一和第二温度范围冷却管路 1 中的进料气体以在管路 13 中提供一种液化的产品，其中用于冷却气体物流的制冷是由管路 117 中的第一制冷剂在第一温度范围内汽化和管路 315 中的第二制冷剂在第二温度范围内汽化并进一步地在高于第一温度范围内的最低温度的温度下汽化而提供的。因而，第一和第二制冷剂汽化所处的温度范围重叠。在此另一个实施方案

中，第一制冷剂可以是丙烷并且第二制冷剂可以是多组分的制冷剂。在此实施方案的另一个版本中，两个制冷剂可是所选的多组分制冷剂。

现在参考图 3 的示范的实施方案，改变对冷热交换器 312 提供制冷的第三制冷回路以由内部辅助液体制冷剂提供自动制冷作用，其中内部辅助液体制冷剂源自相分离得到的第三制冷剂。在图 3 的实施方案中，正在经液化的管路 9 中的进料物流在此冷热交换器中冷却到其最终最低温度，并且降压以在管路 13 中提供液体产物，其可降压以在管路 17 中提供降压的产品。用于此最终冷却的制冷是通过下述途径提供的：冷却管路 329 中的制冷剂以在管路 313 中提供冷却的液体制冷剂，降压通过节流阀 314 以在管路 315 中产出降压的制冷剂，和部分或完全地汽化此制冷剂以在热交换器 312 中提供制冷。

管路 316 中的该部分或完全地汽化的制冷剂与由通过节流阀 375 降压所提供的降压的制冷剂(如下所述)一起以在管路 377 中产出结合的制冷剂物流。此结合的制冷剂物流，其可被称作助制冷剂物流，在热交换器 379 中加温并汽化以在那里提供制冷并且在管路 381 中产生汽化的助制冷剂。此汽化的助制冷剂在压缩机 319 中压缩，在中间冷却器 320 中冷却并且部分冷凝，并且在分离器 321 中分离以在管路 322 中提供蒸汽物流并且在管路 323 中提供液体物流。

管路 322 中的蒸汽物流进一步地在压缩机 324 中压缩到压力 30-70bara，来自分离器 321 的液体物流由机泵 325 加压到相同的压力，该两个加压过的物流合并以提供两相制冷剂物流 326，其进一步地由空气或冷却水在后冷却器 327 中冷却以在管路 328 中提供部分冷凝的助制冷剂。

任选地，不使用分离器 321、机泵 325、压缩机 324 和冷却器 327，并且管路 328 中的部分冷凝的助制冷剂由冷却器 320 直接地提供。

此部分冷凝的助制冷剂经由管路 328 流到分离器 330，在此它被分离以在管路 385 中产出蒸汽制冷剂馏分和管路 383 中产生液体制冷剂馏分。管路 383 中的液体制冷剂馏分在热交换器 379 中冷却以在管路 389 中产出冷却的制冷剂，其通过节流阀 375 降压并且与管路 316 中的部分或完全地汽化的制冷剂相结合以在管路 377 中产出助制冷剂物流。

因而管路 383、389、377 和 381 中的制冷剂是源自管路 315 中的制冷剂的助制冷剂。在此实施方案中，此助制冷剂包含相同的组分但具有不同于管路 315 中的制冷剂的组成。不同的组成是管路 328 中的部分冷凝的制冷剂相分离以产出管路 387 中的液体制冷剂和管路 385 中的蒸汽制冷剂的结果。

在图 2 和 3 所述的两个实施方案不同于现有技术之处在于，来自提供制冷的最低温度的第三冷却回路的制冷剂被汽化以在高于和低于进料的最低温度的温度范围内提供制冷，其中所述进料是在热交换器 311 中由第二冷却回路冷却的。因而高于热交换器 311 中的进料的最低温度的制冷是在热交换器 357(图 2)或 379(图 3)中通过汽化助制冷剂提供的，所述助制冷剂源自管路 315 中的制冷剂，其在极冷热交换器 312 中提供制冷。低于热交换器 311 中所冷却进料的最低温度的制冷是在热交换器 312 中提供的。因而在此两个温度范围，即高于和低于热交换器 311 中的最低温度的制冷是由第三冷却回路提供的。

另外，在相分离后为冷却管路 383 和 385 中的高压制冷剂的全部或大部分制冷是由第三冷却回路中的自动制冷作用提供，并且第三冷却回路中的压缩的制冷剂的冷却是独立于两个较暖冷却回路进行的。此特征有益之处在于，它大大地减轻了两个较暖冷却回路的制冷要求，因此当在该两个较暖冷却回路中压缩机到达市售可得规模极限时，使得天然气液化厂拥有更大的产品生产能力。

图 2 和 3 的示范的方法的其它实施方案各自在图 4 和 5 中举例说明。在这些方案中，第一制冷回路(压缩机 103 和 107、冷却器 105 和 109 及节流阀 115)被单一组件串联制冷系统所替代。丙烷可能用作第一制冷回路中的单一制冷剂。第二及第三制冷回路同图 2 和 3 的实施方案相比没有变化。

多级压缩机 119 和后冷却器 121 的运行是为在管路 123 中在近环境温度 and 压力范围 10-15bara 下提供压缩的制冷剂。管路 123 中的压缩的制冷剂通过节流阀 125 降压并且该管路 127 中的降压的制冷剂在热交换器 129 中部分汽化以在那里提供制冷并在管路 131 中产出两相制冷剂。此两相制冷剂在分离器 133 中分离以提供管路 135 中的蒸汽和管路 137 中的液体，其中所述蒸汽回到压缩机 119 的低压级吸入口。此液体通过节流阀 139 降压并且在热交换器 129 中部分汽化以在那里提

供制冷。管路 141 中的两相制冷剂在分离器 143 中分离以产出管路 145 中的蒸汽和管路 147 中的液体，其中所述蒸汽回到压缩机 119 的中间级吸入口。此液体通过节流阀 149 降压并且在热交换器 129 中该降压的制冷剂汽化以在那里提供额外的制冷。管路 151 中的蒸汽回到压缩机 119 的进口。

任何图 2-5 的实施方案可作为改型被安置到现有两回路双混合制冷剂液化工厂或两回路丙烷-混合制冷剂的天然气液化工厂。

### 实施例

通过以下非限制性的实施例举例说明图 3 的方法，其中管路 1 中的 100 千克摩尔/小时的天然气进料气体物流被液化以在管路 17 中提供液化天然气(LNG)产品。管路 1 中的进料气体，其已预先提纯(未显示)以除去水和酸性气体杂质，在温度 27℃ 和压力 60bara 下提供。管路 1 中的进料气体和管路 207 中的混合制冷剂蒸汽通过汽化混合制冷剂在第一热交换器 130 中冷却到 -39℃ 的温度，其中所述混合制冷剂摩尔组成为 2% 甲烷、62% 乙烷和 34% 异丁烷加丁烷。为了实现此冷却，在压力 5bara 下在供给到压缩机 103 前，使混合制冷剂物流 113 汽化并在热交换器 310 中加温。压缩机 103 的排出压力 19.5bara。混合制冷剂冷却到 36.5℃ 的温度并且使用环境温度冷却介质例如冷却水或空气在后冷却器 105 中冷凝。所得的物流在压缩机 107 中进一步地压缩到压力 34bar，并且使用环境温度冷却介质例如冷却水或空气在后冷却器 109 中冷却到 36.5℃。管路 113 中的总混合制冷剂流速是 124 千克摩尔/小时。

管路 5 中的冷却的进料和管路 208 中的第二混合制冷剂在第二热交换器 311 中冷却到 -119℃ 以在管路 9 中产出进一步冷却的进料和在管路 209 中产出进一步冷却的第二混合制冷剂。管路 209 中的混合制冷剂通过阀 211 节流到压力 4.2bara 以在管路 213 中产出降压的混合制冷剂。管路 213 中的混合制冷剂在热交换器 311 中汽化以在那里提供制冷。用于此第二冷却回路的混合制冷剂的流速为 87 千克摩尔/小时，组成为 27 摩尔% 甲烷、63 摩尔% 乙烷和 10 摩尔% 丙烷。管路 201 中的汽化的第二混合制冷剂物流在三级中间冷却的压缩机 203 中压缩到压力 57bara。该压缩的混合制冷剂使用冷却水在后冷却器 205 中冷却到 36.5℃ 以在管路 207 中提供冷却压缩的混合制冷剂。

管路 9 中的进料和管路 329 中的第三混合制冷剂在第三热交换器 312 中冷却到最终温度 $-156^{\circ}\text{C}$ 以各自地产出管路 17 中的 LNG 产品和管路 313 中的冷凝的第三混合制冷剂。管路 313 中的混合制冷剂通过阀 314 节流到压力 3.7bara 以在管路 315 中产出降压的第三混合制冷剂。此降压的第三混合制冷剂在第三热交换器 312 中部分汽化以在那里提供制冷和管路 316 中的部分汽化的制冷剂，其蒸汽馏分为 95%、温度为 $-123^{\circ}\text{C}$ 。管路 329 中的用于此第三冷却回路的混合制冷剂的流速为 59 千克摩尔/小时，组成(以摩尔%计)为 12%氮气、52%甲烷、18%乙烷、6%丙烷和 12%异戊烷。

管路 389 中的混合制冷剂在 375 中节流到压力为约 3.6bara 并与物流 316 相结合以构成物流 377，其在第四热交换器 379 中完全汽化并加热到 $26^{\circ}\text{C}$ 以在那里提供制冷。管路 381 中的汽化的制冷剂在第一级压缩机 319 中压缩到 17.7bara，冷却到 $36.5^{\circ}\text{C}$ 并在环境空气或水冷的中间冷却器 320 中部分液化。在分离器 321 中两相制冷剂分离以产出管路 322 中的制冷剂蒸汽和管路 323 中的制冷剂液体。该制冷剂液体在机泵 325 中加压到 47bara。管路 322 中的制冷剂蒸汽在压缩机 324 中压缩到压力 47bara，与来自机泵 325 的加压的制冷剂相结合，并且管路 326 中的该结合的物流在水冷的后冷却器 327 中冷却到 $36.5^{\circ}\text{C}$ 以在管路 328 中产出冷却的混合制冷剂。在分离器 330 中两相制冷剂分离以产出管路 385 中的混合制冷剂蒸汽和管路 383 中的混合制冷剂液体。该混合制冷剂液体在第四热交换器 379 中冷却以在管路 389 中提供冷却的混合制冷剂。该混合制冷剂蒸汽在第四热交换器 379 中冷却并液化以在管路 329 中提供冷却的混合制冷剂，其如前所述进一步在第三热交换器 312 中冷却。

上述图 1-5 的描述中，管路的参考数(即工艺物流流经的管路)也可指流于那些管路中的工艺物流。在下面的方法权利要求中，参考数表示流于那些管路中的工艺物流。在下面的系统权利要求中，参考数表示管路，而不是流于那些管路中的工艺物流。图 2-5 的参考数归于下列权利要求中是为其清楚，而不是意味以任何方式限制权利要求的范围。

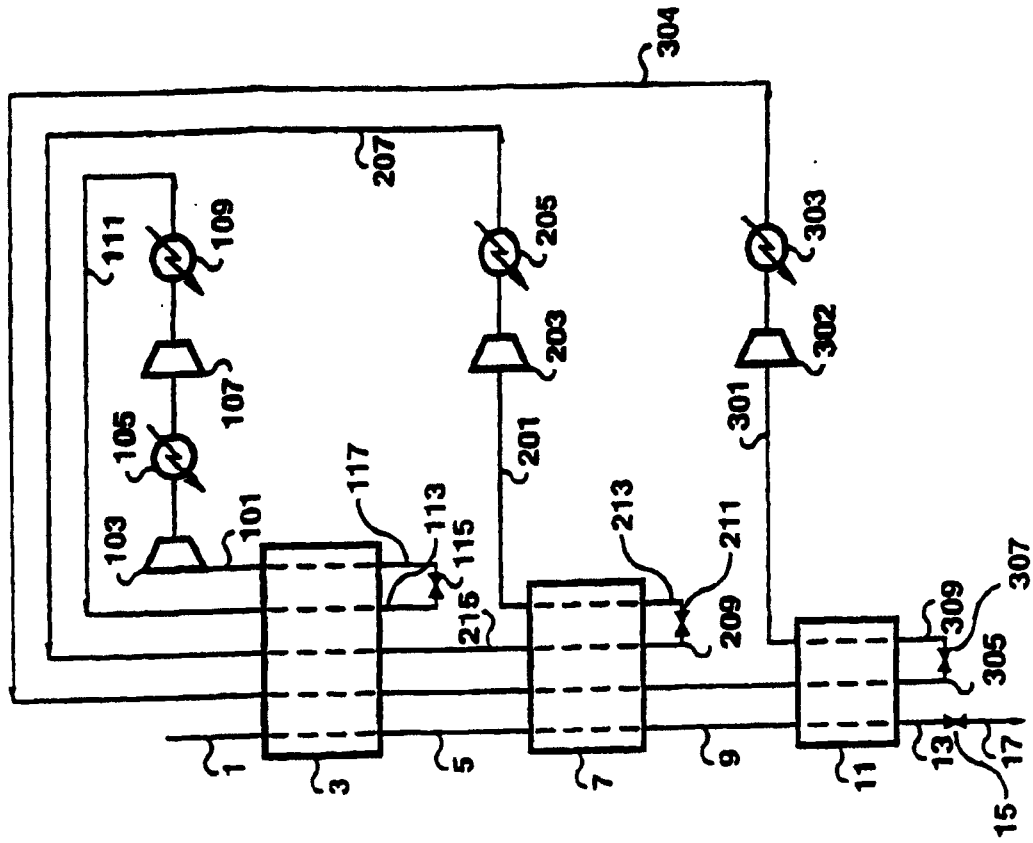


图 1  
(现有技术)

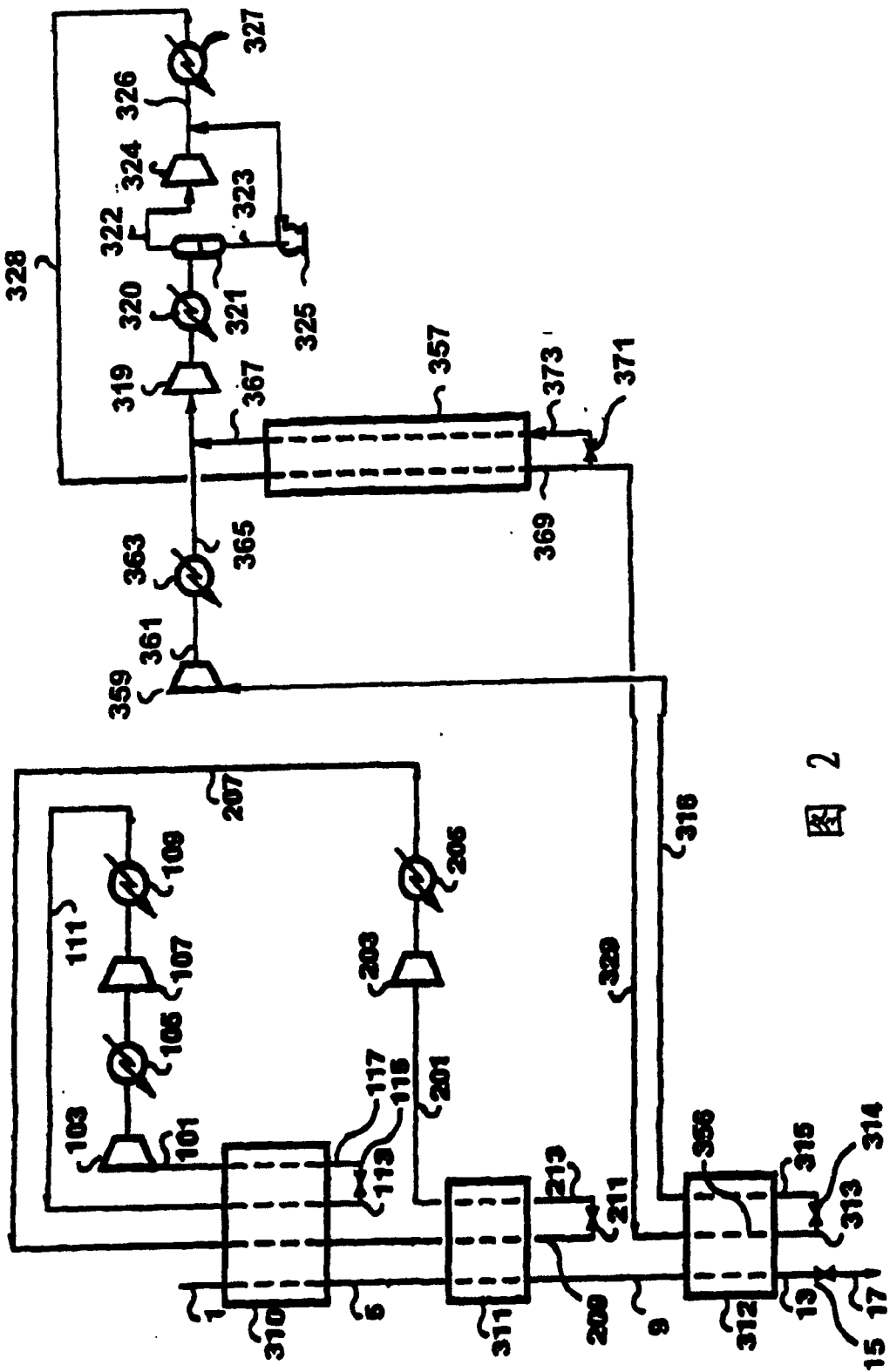


图 2

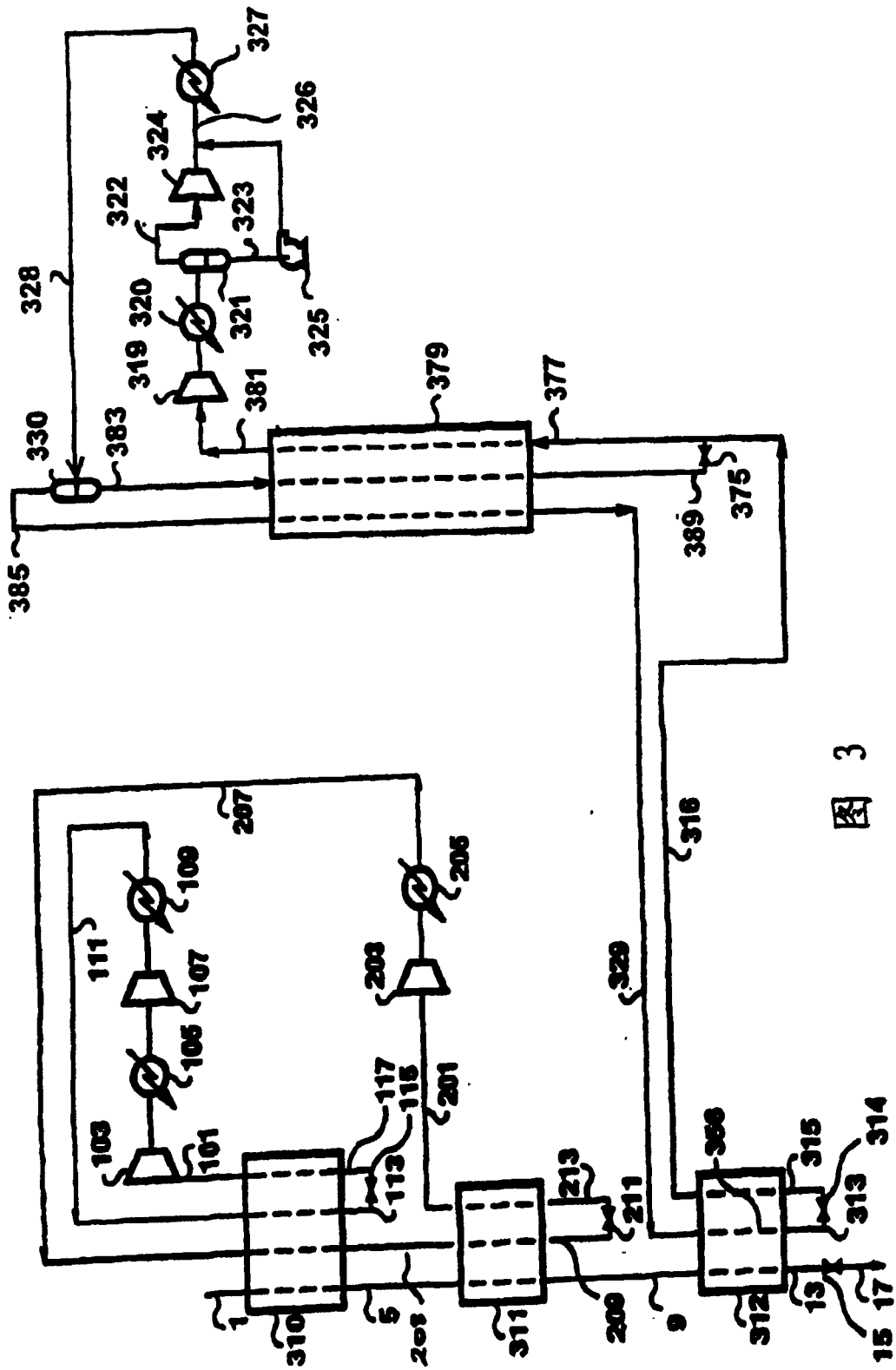


图 3

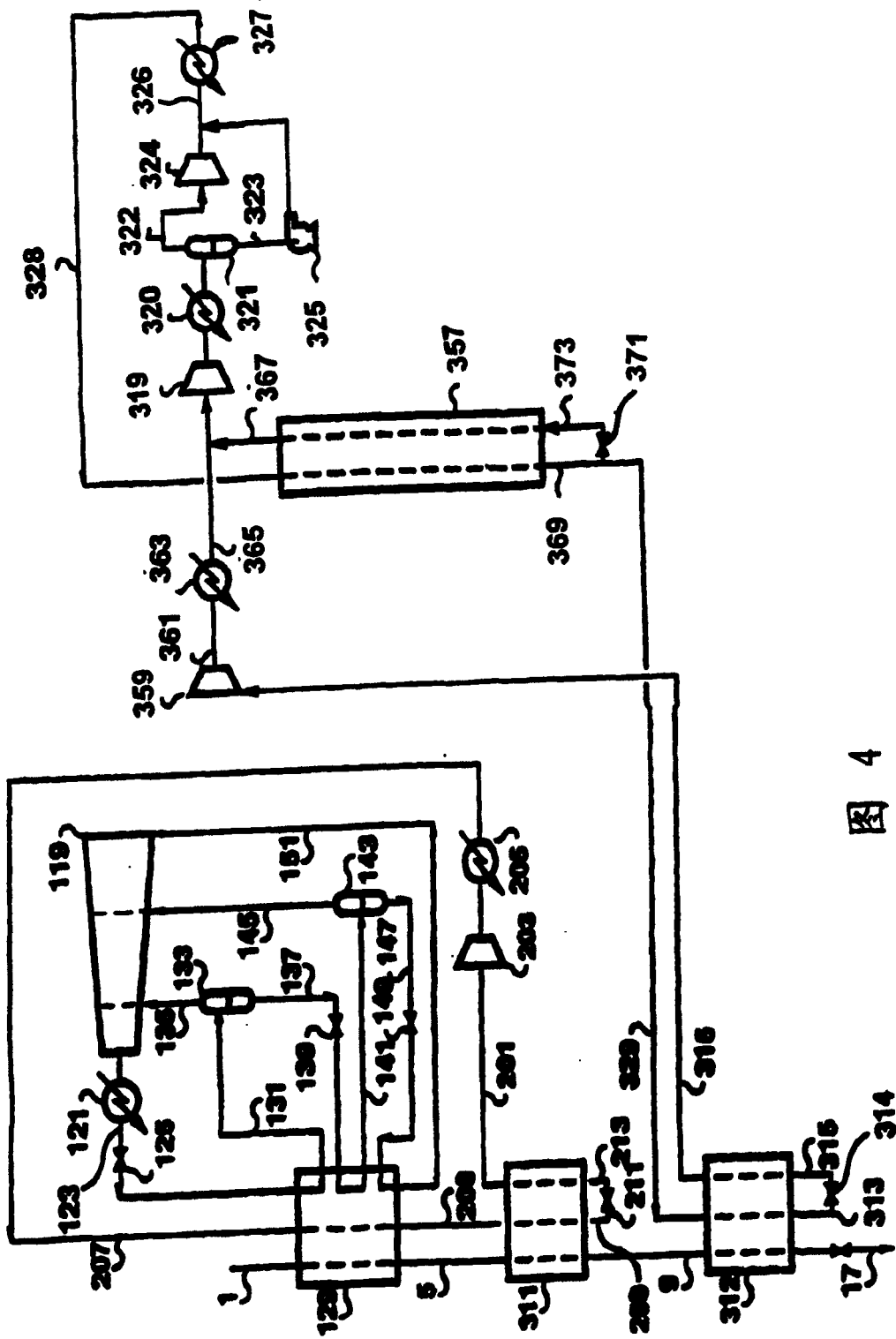


图 4

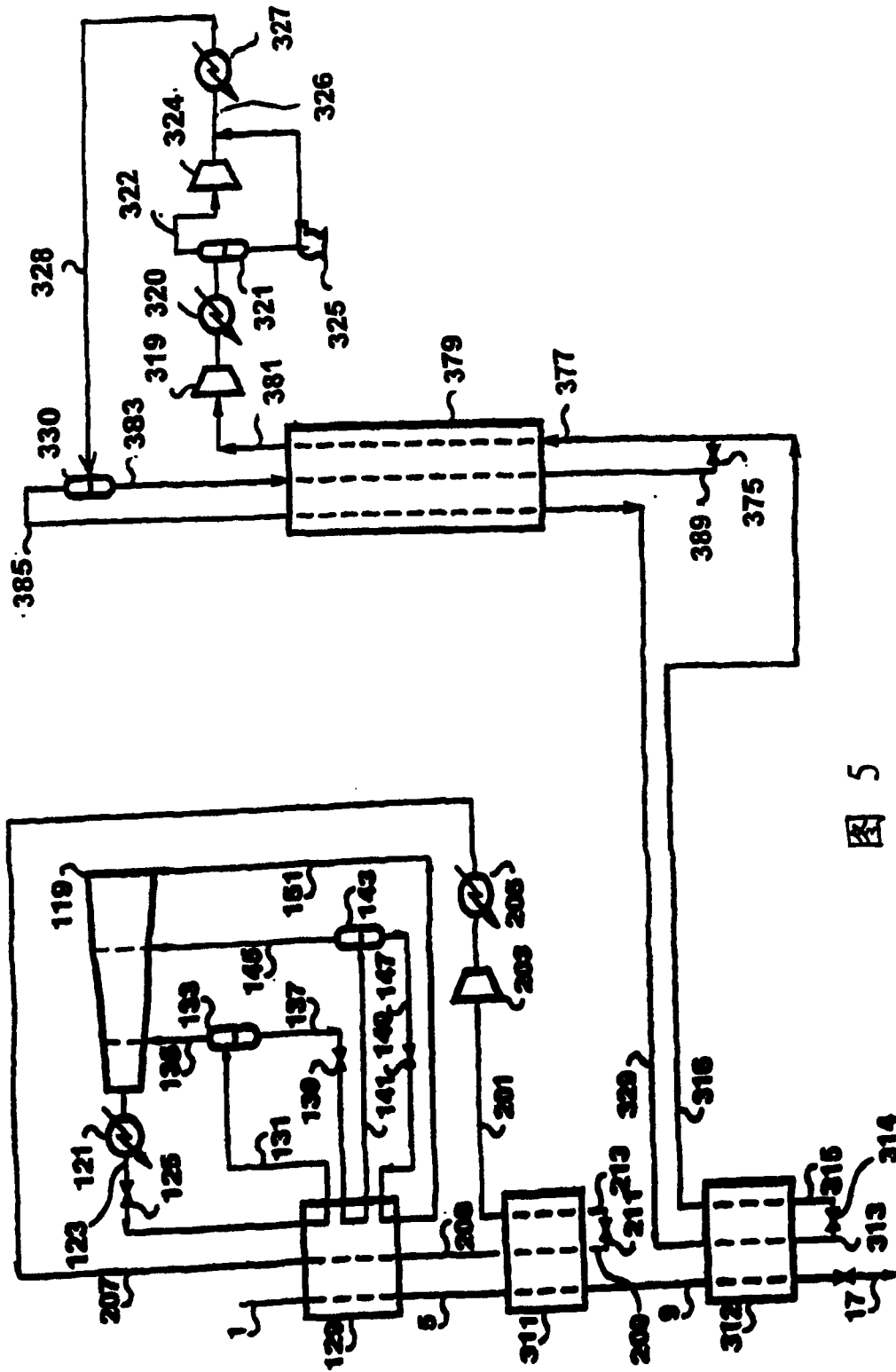


图 5