

常规工质双转子膨胀机的分析与试验介绍

马一太 赵丽

(天津大学热能研究所, 天津, 300072)

(Email: ytma@tju.edu.cn)

摘 要 本文针对常规工质制冷与热泵系统中采用膨胀机代替节流阀效率提高的程度进行了分析、同时对膨胀机的测试方法进行了介绍, 作为常规工质膨胀机设计与开发的准备工作。根据计算结果, 常规制冷剂在一般工况下, 当膨胀机效率达到 70% 时, 理论上可回收的膨胀功占压缩功的 2-15%, 并增加 10-20% 的制冷量, 这样对 COP 或 EER 的贡献可达 3.6%-20%。在大中型系统中, 其回收功的数量比较可观。若能推广应用, 其节能潜力是巨大的, 完全可以作为分布式能源系统的分散能源资源利用起来。另外由于在大中型系统中进行膨胀机试验不太容易实现, 本文提出三角循环模式作为试验膨胀机的方法。

关键词 常规工质膨胀机, 分布式能源系统, 三角循环

The Analyzing and Testing Introducing of A Two-rolling Piston Expander with Conventional Refrigerant

Ma Yitai, Zhao Li

(Thermal Institute of Tianjin University; Tianjin, 300072)

Abstract In this paper, aiming at the conventional refrigeration and heat pump system of which replacing throttle by expander, the degree of its efficiency will be increased has been analysed and the testing schemes of the expander has been introduced, as the preparing of research and development of conventional refrigerant expander. According to the calculation, conventional refrigerants in general condition, the recoverable expansion work account for 5-12% of the compression work in theory, at the same time, cooling capacity of the system increase 10-20%, which result in the COP or EER of the system up by about 15%. In the medium or large systems, the number of its recovery will be more objective. Its energy saving potential is enormous when expander be promoted use, and can completely be utilized as distributed energy resources. Moreover, this paper proposed triangle cycle model to test expander instead of testing in the large or medium system.

Keywords Conventional refrigerant expander, Distributed energy system, Triangle cycle

1 引言

随着人类社会经济的发展与技术水平的提高, 制冷空调行业在最近的一个多世纪里取得了长足的发展。如何降低系统损失, 如何提高系统性能系数, 如何高效用能一直是研究能源的学者们积极追

求与探索的方向。随着国家能源矛盾的约束, 节能减排进一步成为举国上下为之奋斗的目标。

综合来看, 提高制冷与热泵系统效率 (即 COP 或 EER) 的措施无非两种: 一般性措施和结构性措施。一般性措施包括压缩机、换热器的优化与匹配减少不可逆损失等。而结构性措施有如增设经济器、用压差供油代替油泵供油、用膨胀机代替节流

国家自然科学基金资助项目 (批准号: 51076111)

作者简介: 马一太, (1945-), 男, 教授

阀等。近年来，人们大多在循环原理、高效压缩机（螺杆式、离心式）节流机构和换热器的设计上做了很多文章，也获得了很多成绩，使得技术得到很大进步，系统更加高效与完善。如大中型压缩机的研究，等熵效率已经超过 80%。蒸发器、冷凝器的传热温差可以控制在 2~3 。系统的控制也接近完善^[1~5]。唯独膨胀机构还是薄弱环节。

然而我们知道，节流是高度不可逆的过程，而且节流损失是双倍损失。膨胀机代替节流阀在理论上是可行的，但在实际设计制造以及用实验证明的过程中有一定的难度。而且膨胀机应用于常规制冷循环的实践中也有可能不合理的因素。其一，常规制冷剂制冷循环中可回收的膨胀功占压缩功的比例较小。其二，膨胀机工作过程中存在两相流膨胀的特殊问题：流体中的液滴和气泡对部件的液击和气蚀。其三，常规工质有相当大的膨胀比，一般达 20-40。传统的结构，如活塞式、转子式、螺杆式膨胀机，设计成这样大的膨胀比有一定难度，研发出高效膨胀机也比较困难^[6]。也因此，在常规制冷循环中利用膨胀机代替节流阀以减少不可逆损失的研究相对较少。国际上英国 CITY 大学、美国开利公司对常规工质膨胀机的研究已进行多年。但在国内外真正研发出高效常规工质膨胀机的却鲜有报道。但是随着科学技术的发展，上述难点也将逐渐慢慢解决。

常规制冷剂回收的膨胀功虽然占压缩功比例较小，对于一般的小系统而言其回收功量可能不能引起人们注意，但是对于大中型冷水（热泵）机组而言，其回收功量是可观的。尤其在全国冷水（热泵）机组大量采用及相关能效标准即将出台的新形势下^[1]，应用膨胀机更是必要。本文针对正在着手研究的常规制冷剂双转子膨胀机，分析其带来系统效率增加的程度，以及大中型热泵系统及冷水机组中用膨胀机取代节流阀可实现的试验方法分析。

2 常规工质膨胀机的理论分析

2.1 循环原理

膨胀机代替节流阀对系统效率带来的提高在制冷与热泵系统的 T-S 图中一目了然，如上面图 1 常规制冷剂制冷原理图中所示。图中，1-2-3-4'-1 是带节流阀的制冷循环过程，3-4' 为节流过程（可近似为等焓过程）；1-2-3-4''-1 是理想的制冷循环过程，其中 3-4'' 是理想膨胀机工作过程（即等熵过程）；而图中的 1-2-3-4-1 为带膨胀机的实际制冷循环，3-4 为膨胀机实际工作过程，实际过程中膨胀机自身也

有一定的不可逆损失，效率不可能达到百分之百。其中，1-2 是考虑了压缩机效率的工作过程。相比之下，带膨胀机的系统较带节流阀的系统带来了单位制冷剂冷量的增加，而且回收了部分膨胀功。

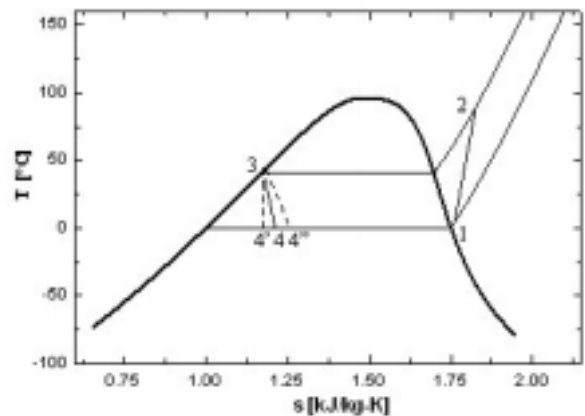


图 1 常规制冷剂制冷原理图

2.2 效率计算方法

根据图 1，循环中压缩机单位制冷剂功耗为：

$$w = h_2 - h_1 \quad (1)$$

式中，功率及各焓值 (h) 的单位均为 kJ/kg，下同。

单位制冷剂制冷量：

$$q_0 = h_1 - h_4 \quad (2)$$

则系统效率为：

$$\text{cop} = w/q_0 \quad (3)$$

膨胀机单位制冷剂回收功量：

$$w_{\text{exp}} = h_3 - h_4 \quad (4)$$

回收比（即单位制冷剂膨胀机回收功量与压缩机功耗之比）为：

$$r = w_{\text{exp}} / w \quad (5)$$

2.3 模拟计算结果

2.3.1 同一工况下不同工质比较

下面对几种常规制冷剂在某一固定制冷工况下进行了模拟计算，即系统蒸发温度与冷凝温度分别取 0 、40 。其中考虑制冷剂 5 过热 5 过冷，并且假设系统中压缩机效率为 0.75。膨胀机效率从 0.3 到 1 变化。计算内容包括系统效率 COP，膨胀功回收比。涉及工质为 R22、R134a 及 R407C。

图 2 给出了几种常规制冷剂带膨胀机系统的制冷 COP 随膨胀机效率的变化规律以及与带节流阀系统制冷 COP 的比较。根据上面计算结果可以发现：随着膨胀机效率的提高，不同工质系统的 COP 都逐渐增大；对于同种制冷剂而言，带膨胀机系统

与带节流阀系统相比，带膨胀机系统的 COP 均有较大幅度提高，并且随着膨胀机效率的增大各 COP 增大幅度也在增大。当膨胀机效率为 0.7 时，应用膨胀机可使各系统 COP 提高的比例分别为：R22 系统为 8.67%；R134a 系统为 8.63%；R407C 系统为 12.8%。

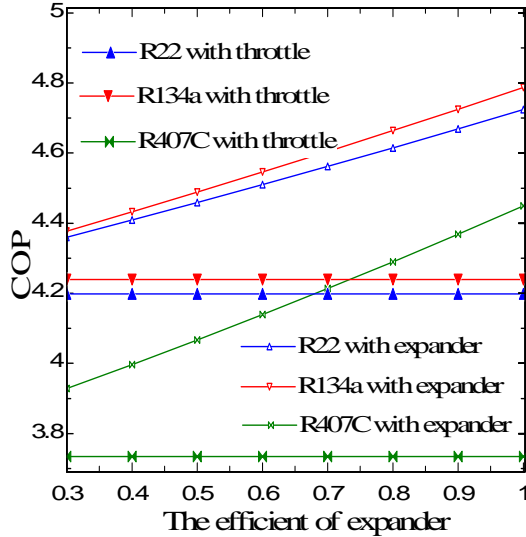


图 2 系统 COP 随膨胀机效率的变化曲线

图 3 给出的是几种常规制冷剂带膨胀机系统中膨胀功回收比随膨胀机效率的变化曲线。随着膨胀机效率的提高，各系统膨胀功的回收比也在逐渐增大，其中尤以 R407C 的膨胀功回收比为最大。当膨胀机效率为 0.7 时，R22 带膨胀机系统可回收压缩机功耗的 6.19%，R134a 系统回收比可达 6.88%，R407C 系统回收比可达 9.20%。

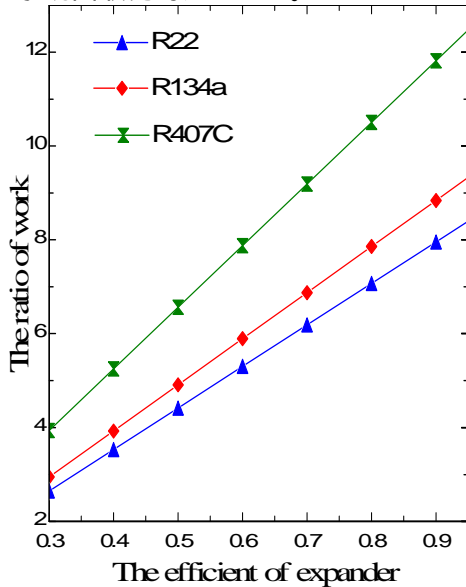


图 3 膨胀功回收比随膨胀机效率的变化曲线

2.3.2 不同工况下膨胀机回收比情况

下面分别在几种不同工况下进行了模拟计算：

系统蒸发温度为 5 时，系统 COP 及膨胀机回收比随冷凝温度的变化情况；以及系统冷凝温度为 45 时，系统 COP 及膨胀机回收比随蒸发温度的变化情况。其中还考虑了制冷剂 5 过热 5 过冷，并且假设系统中压缩机效率为 0.75。膨胀机效率从 0.3 至 1 变化。考虑到不同变化情况类似，现仅以 R22 为例进行计算与说明。

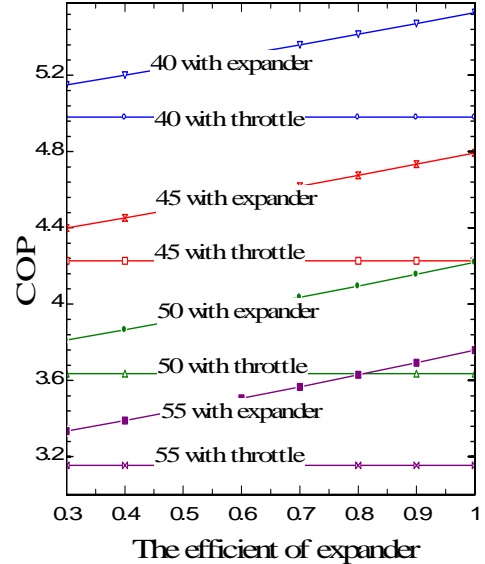


图 4 不同蒸发温度下系统 COP 随膨胀机效率的变化曲线

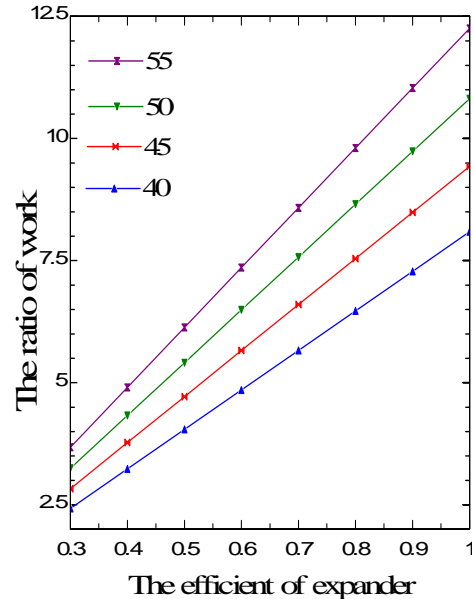


图 5 不同蒸发温度下膨胀功回收比随膨胀机效率的变化曲线

图 4 与图 5 为系统蒸发温度为 5 时，系统 COP 及膨胀机回收比随冷凝温度（主要取 40、45、50、55）的变化情况。左图是 COP 的变化情况，右图是膨胀功回收比的变化情况。可以发现，COP 在各不同冷凝温度下随膨胀机效率的变化趋势一致，增大的幅度也近似一致，即随冷凝温度升高系统 COP 降低，随膨胀机效率增大 COP 升高。

而膨胀功回收比的变化趋势刚好相反，随冷凝温度的升高在增加，随膨胀机效率增大也在增加。这主要是由于随压缩机压比的增大，膨胀机回收的功率也增加。在冷凝温度变化时，带膨胀机系统与相同状况下带节流阀系统相比，系统 COP 最大增幅为 19.1%，最小增幅为 3.39%；膨胀机回收功率最大为单位流量制冷剂回收 5.5kW。

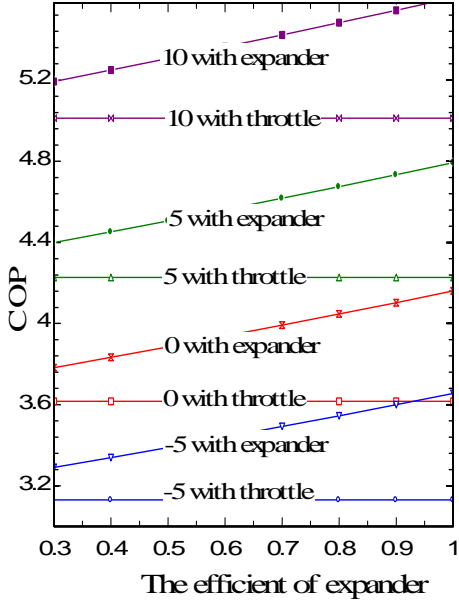


图 6 不同冷凝温度下系统 COP 随膨胀机效率的变化曲线

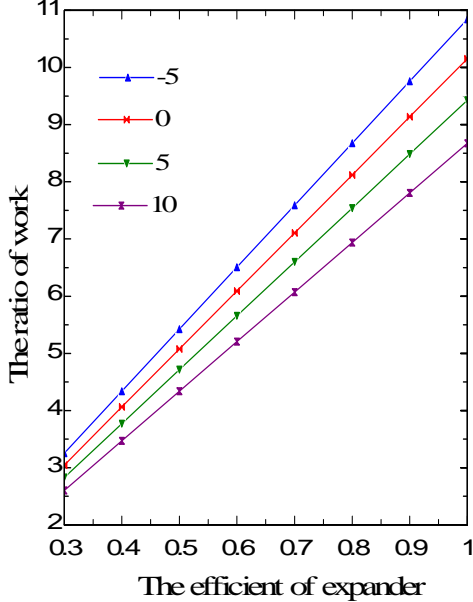


图 7 不同冷凝温度下膨胀功回收比随膨胀机效率的变化曲线

图 6 与图 7 为系统冷凝温度为 45 时，系统 COP 及膨胀机回收比随蒸发温度(主要取 -5、0、5、10)的变化情况。左图是 COP 的变化情况，右图是膨胀功回收比的变化情况。

可以发现，COP 在各不同蒸发温度下随膨胀机效率的变化趋势一致，增大的幅度也近似一致，即

随蒸发温度升高系统 COP 升高，随膨胀机效率增大 COP 升高。而膨胀功回收比的变化趋势刚好相反，随蒸发温度的升高在降低，随膨胀机效率增大而增加。这主要是由于随蒸发温度的升高，膨胀机回收的功率减少的缘故。在蒸发温度变化时，带膨胀机系统与相同状况下带节流阀系统相比，系统 COP 最大增幅为 16.8%，最小增幅为 3.63%；膨胀机回收功率最大为单位流量制冷剂回收 5.3kW。

综上所述，常规制冷剂在一般工况下，理论上可回收的膨胀功占压缩功的 2%~15%，随膨胀机效率的增大而增大；另外采用膨胀机可使系统增加一定制冷量，在上面条件下对制冷量的贡献可达 10~20%。这样对系统效率的贡献可达 3.6%~20%。尽管回收的膨胀功占压缩机耗功的比例有限，但是对于大中型系统而言，单台机组可回收的功量也是可观的。例如对于 500kW 的机组而言，当膨胀机效率为 0.5 时，理论可回收的膨胀功可达 30kW；当膨胀机效率为 0.7 时，理论可回收的膨胀功达 40kW 左右。对于现在倡导的分布式能源系统而言，未尝不是一个可以利用的分散的能源资源，对于我国的节能减排工作也未尝不是一种支持与贡献。

3 三角循环试验系统

3.1 三角循环的由来

针对广泛使用的大中型冷水机组或水源热泵，我们正在开发与研究的膨胀机是针对制冷量为 250kW 的中型机组，系统体积庞大，电、水消耗甚大。在膨胀机测试期间，将膨胀机应用于这样的大系统中有一定的困难与不便，而且也不一定必要。为此，我们特别设计三角循环试验装置以测试进行膨胀机测试。

3.2 三角循环的原理

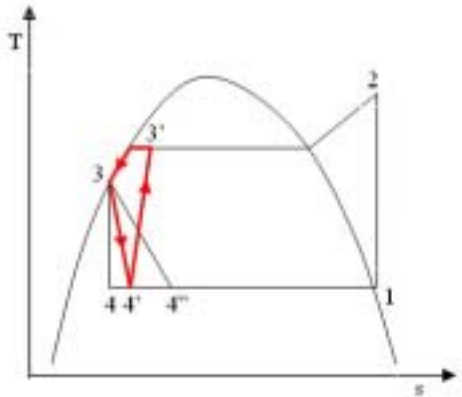


图 8 三角循环原理图

如循环原理图 8 所示，为避免用图中的

1-2-3-4'-1 蒸汽压缩制冷循环 摆脱设备过于庞大的制约，拟采用图中红线所示 4'-3'-3-4' 的三角循环。即将膨胀机出口工质由 4' 状态采用液压泵增压至 3'，经过冷凝至 3 进入膨胀机，在膨胀机出口为 4'，到此完成一个循环。但是，如果将 4' 点的两相工质采用两相流增压泵实现 4'-3' 过程，看起来似乎系统可以简化，但可能会遇到两相流的比例难于控制的问题。

3.3 三角循环的方案与实验台介绍

根据直接实现三角循环的困难，选择将气、液两相分别增压，如图 9 所示。即在膨胀机出口将两相状态工质进行汽液分离，液态工质直接经工质泵加压，气态工质进压缩机进行蒸汽压缩制冷循环。在膨胀机入口处，两处循环的过冷液工质以任意比例混合。这样一来，系统将变得复杂一些，但是各过程相对容易实现与控制。而且各零部件的尺寸也不至于太大。

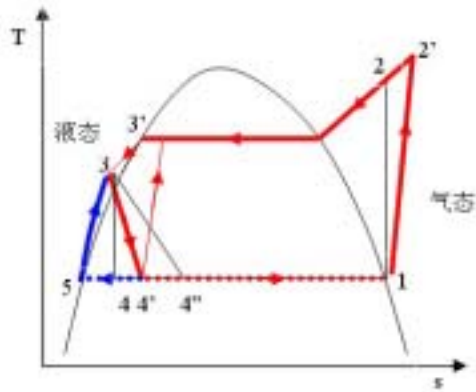


图 9 三角循环试验系统结构原理图

整个系统的结构原理如图 10 所示。膨胀结束时，工质进入气液分离器，然后气液两相工质分别升压，液态工质由工质泵升压经过程 5-3，气态工质经 U 型管吸入少量液态工质（混有少量润滑油）后进入过热器，由压缩机 1-2 加压后进入冷凝器 2'-3。气液两相工质在 3-3' 之间任意点混合。系统设有高低压贮液器，中间有恒温（压）的控制系统，保障系统的稳定运行。另外系统在调试阶段还可设有节流阀系统，用于研究其它节流系统，例如做喷射器节流或孔板节流的相关试验。搭建的试验台如图 11 所示。

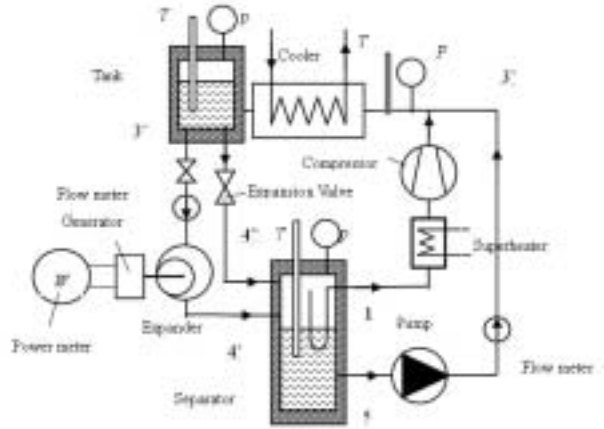


图 10 三角循环原理图



图 11 三角循环试验台

4 结论

本文就常规工质膨胀机进行了模拟计算与试验系统的方案介绍。

通过上面的模拟计算，可以发现：采用膨胀机的常规制冷系统理论上可回收的膨胀功占压缩功的 2%~15%，而且随膨胀机效率的增大回收比逐渐增大；采用膨胀机对系统效率的贡献可达 3.6%~20%。也就是说，常规工质膨胀机存在一定的节能潜力，而且对于大中型机组而言，回收的膨胀功完全可以作为分布式能源系统的分散能源资源利用起来。

然而，开发与研究出高效常规制冷剂膨胀机是实现常规制冷剂膨胀机节能功能重要的一环。在膨胀机开发过程当中，其试验系统也是很重要的。为此，我们设计三角循环系统作为膨胀机的试验系统。

参考文献

- [1] N. Stosic,I. K. Smith,A. Kovacevic. Optimisation of screw compressors. Applied Thermal Engineering. 2003,23 (10) :1177-1195
- [2] DORIN,DANFOSS,BITZER.. 压缩机产品目录
- [3] 马一太等. 我国制冷空调能效标准的现状和发展. 制冷与空调. 2008,8 (3) :5-11
- [4] 李安军, 邢桂菊, 周丽雯. 换热器强化传热技术的研究进展. 冶金能源. 2008,27 (1) :50-54
- [5] Craig Cordell. ASHRAE Presentation -Modern Refrigeration Controls. ASHRAE SEMINAR of 2003, Chicago
- [6] 彦启森, 石文星, 田长青. 空气调节用制冷技术. 北京: 中国建筑工业出版社. 2004.13-15