

DOI: 10.3901/JME.2010.10.139

两级单螺杆膨胀机空气动力系统性能研究*

何 为^{1,2} 吴玉庭^{1,2} 马重芳^{1,2} 马国远^{1,2}

- (1. 北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室 北京 100124;
2. 北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室 北京 100124)

摘要: 为了克服单螺杆气动汽车发动机单级动力系统能量利用率低的缺陷,应用热力学理论对压缩空气两级动力系统性能进行研究,采用变尺度数学优化算法建立数学模型,对两级系统的级间分配进行优化,并通过编程计算,对其获得的级间膨胀比优化结果进行验证,分析系统总效率和加热温度等因素对系统动力性能参数——总输出功和能耗率的影响。理论研究结果表明,储气压力 30 MPa,储气容积 300 L 的两级系统,当各级入口温度相同时,其最优膨胀比组合为 10:7,此外,9:7 和 9:8 也可作为优化膨胀比;系统效率和加热温度越高,系统的总输出功也越大,能耗率与之相反。证明采用两级系统并结合级间加热方式时可以大大改善系统的性能。

关键词: 气动汽车发动机 单螺杆 压缩空气

中图分类号: U469.76 TK05 U461.1

Research of Air Powered Engine System Using Two-stage Single Screw Expander

HE Wei^{1,2} WU Yuting^{1,2} MA Chongfang^{1,2} MA Guoyuan^{1,2}

- (1. The Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124;
2. The Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Municipality, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: A new compressed air engine system based on two-stage single screw expander is proposed to increase the energy utilization rate of compressed air. The distribution of expansion ratios between stages is optimized by building mathematical optimal arithmetic model with variable metric method and is checked by programming calculation. The influence of total efficiency and heating temperature on the power performance parameters including total output work and air consumption rate is analyzed. Research results indicate the best match of expansion ratio is ten to seven (nine to seven and nine to eight are also good) for the same inlet temperature system with air tank of 30 MPa pressure and 300 L volume. Results also show that heating up inlet air or increasing the system efficiency can improve the total output work and reduce the air consumption rate. It is concluded that the compressed air engine system combined two-stage single screw expander with heating is better than single-stage system.

Key words: Air powered engine Single screw Compressed air

0 前言

压缩空气动力汽车是一种新能源汽车,它采用压缩空气作为汽车的动力源,利用压缩空气在发动机中膨胀做功来产生动力。由于压缩空气动力汽车

无须烧油,排放的是比环境空气更清洁的低温空气,具有巨大的环保效益,正逐渐兴起成为新能源汽车研发的焦点^[1]。目前,法国、美国、荷兰、韩国、奥地利和中国等多个国家均对其展开了相关的研究,其中以法国 MDI 公司取得的成就最大,研制成功了多种型号气动汽车样本,并获得了一定的市场应用。中国对气动汽车的研究主要集中在浙江大学和合肥工业大学,并在理论和试验上均已取得了较

* 国家自然科学基金资助项目(50976004)。20090929 收到初稿,20100127 收到修改稿

大的成绩,但仍处于初步的探索阶段。气动汽车发动机动力系统的研发是该新能源汽车科技攻关的关键突破点,目前的研究以活塞往复式发动机系统最多,但结构很复杂^[2-3],针对于此研究现状,北京工业大学提出了采用单螺杆膨胀机作为气动发动机的创新思路,从原理结构上分析,该新型发动机系统克服了往复式发动机固有的缺陷,是目前看来较适于作为压缩空气动力汽车的发动机型式,因此对该新型动力系统的动力性能进行全面的研究和评估是极为必要的^[4]。

通过对单螺杆膨胀机压缩空气单级动力系统的研究,可以看出系统的总输出功与膨胀机的膨胀比息息相关,在一定限度内提高膨胀机的膨胀比可以增加系统总输出功,而对于目前的单螺杆膨胀机技术水平,单级系统的最大膨胀比为 10,限制了系统的动力输出,能量未能得到充分利用。因此,为了充分利用能源并获得系统的最大动力输出,本文将主要针对单螺杆压缩空气两级动力系统进行初步的研究。

1 动力系统结构模型

单螺杆膨胀机是一种回转容积式动力机,结构简单、体积小且无气阀组件,其结构原理图如图 1 所示。

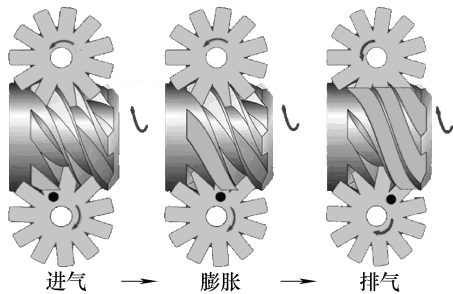


图 1 单螺杆膨胀机工作原理图

由于两个星轮在螺杆两侧对称配置,单螺杆机还具有以下几个优点:结构合理,具有理想的力平衡性;单机容量大,无余隙容积;噪声低、振动小^[5-6]。因此,将单螺杆膨胀机作为气动汽车的发动机具有很大的优越性。

两级单螺杆膨胀机仅进行单纯地串联时,能够提高膨胀比,突破单级系统膨胀比的限制,增加总输出功,根据热力学知识,若在进行串联的同时又采用中间加热的方式时,总输出功则可进一步大大增加,如图 2 所示^[7]。图 2 中 p_1 - a - e - b - p_2 - p_1 所围成的面积即为不采用中间加热时的总输出功,而图 2 中 p_1 - a - e - f - d - b - p_2 - p_1 所围成的面积即为两级系统采

用中间加热时的总输出功,图 2 中 e - f - d - b - e 所围成的面积即为采用两级膨胀中间加热后所增加的输出功。因此,采用两级系统中间加热的方式将比单螺杆膨胀机单级动力系统输出更多的功。

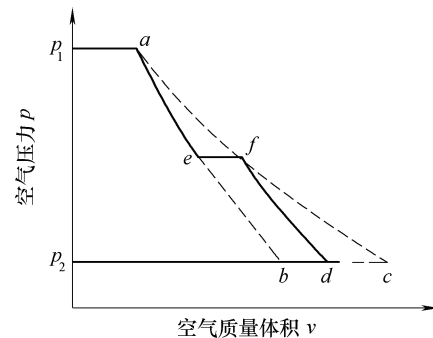


图 2 两级膨胀热力过程 p - v 图

本文将对采用加热的单螺杆膨胀机两级动力系统进行分析,其系统结构图如图 3 所示。单螺杆气动发动机由两级单螺杆膨胀机组成,工作流程为:压缩空气通过控制阀(用于调节工作压力和流量)后先经过加热器 1 进行加热,再通过单螺杆膨胀机 1 进行膨胀做功,由膨胀机 1 排出的压缩空气再进入加热器 2 进行加热,然后通过单螺杆膨胀机 2 进一步实现膨胀做功,膨胀终了产生的低温空气排向大气环境。单螺杆膨胀机 1 和 2 进行串联联接并实现同轴输出,在工作过程中采用“可断联接”的控制,即两个膨胀机之间能够根据实际工况实现级间的即时断开。因此,当气瓶内剩余空气压力较低,不足以带动两级膨胀机同时工作时,可以通过级间断开的操作继而保证单级膨胀做功,这样可以充分利用压缩空气的压力能,进一步提高能量利用率。

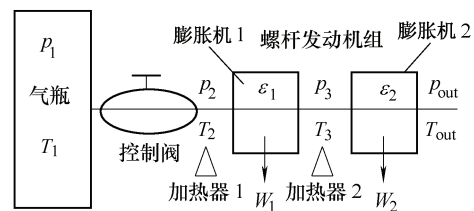


图 3 单螺杆膨胀机两级动力系统流程简图

2 动力系统热力计算

本计算分析中假设压缩空气通过单螺杆膨胀机进行绝热膨胀做功,且膨胀机的总效率相同,压缩空气气瓶为绝热放气,忽略管路摩擦阻力的影响。

设气瓶储气压力为 p_1 ,储气容积为 V_1 ,储气温度为 T_1 ,单螺杆膨胀机 1 和 2 的膨胀比分别为 ϵ_1 、 ϵ_2 ,效率为 η ,其空气入口温度分别为 T_2 、 T_3 ,膨胀

机终端排气压力为大气压力 p_0 。由于采用“可断联接”方式，工作过程分为二个阶段，在第一阶段中，两个膨胀机同步做功工作，当气瓶内剩余压力为 p_{s1} 时该阶段结束；在第二个阶段中，膨胀机 2 被断开，只有膨胀机 1 继续做功工作，当气瓶内剩余压力为 p_{s2} 时工作结束。系统的热力计算分析中所采用的主要计算公式如下。

2.1 第一个阶段

根据理想气体状态方程，气瓶内储气总质量

$$m_z = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1} \quad (1)$$

式中 R_g 为空气的气体常数。

单位质量空气通过膨胀机 1 时绝热膨胀理想做功

$$W_{11} = \frac{k}{k-1} R_g T_2 (1 - \varepsilon_1^{(1-k)/k}) \quad (2)$$

式中 k 为空气的比热比。

单位质量空气通过膨胀机 2 时绝热膨胀理想做功

$$W_{12} = \frac{k}{k-1} R_g T_3 (1 - \varepsilon_2^{(1-k)/k}) \quad (3)$$

单位质量空气通过两级膨胀机理想绝热膨胀所做的总功

$$W_1 = W_{11} + W_{12} \quad (4)$$

过程结束时气瓶内剩余空气的压力

$$p_{s1} = p_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (5)$$

过程结束时气瓶内剩余空气质量^[8]

$$m_{s1} = m_z \left(\frac{p_{s1}}{p_1} \right)^{1/k} \quad (6)$$

过程中所利用的空气总质量

$$m_{y1} = m_z - m_{s1} \quad (7)$$

2.2 第二个阶段

单位质量空气通过膨胀机 1 绝热膨胀过程理想做功

$$W_2 = \frac{k}{k-1} R_g T_2 (1 - \varepsilon_1^{(1-k)/k}) \quad (8)$$

过程结束时气瓶内剩余空气的压力

$$p_{s2} = p_0 \varepsilon_1 \quad (9)$$

过程结束时气瓶内剩余空气的质量

$$m_{s2} = m_z \left(\frac{p_{s2}}{p_1} \right)^{1/k} \quad (10)$$

过程中所利用的空气总质量

$$m_{y2} = m_{s1} - m_{s2} \quad (11)$$

2.3 综合全过程

全工作过程利用空气的总有效质量

$$m_y = m_{y1} + m_{y2} \quad (12)$$

全工作过程对外输出总功

$$W_z = (W_1 m_{y1} + W_2 m_{y2}) \eta \quad (13)$$

全工作过程平均气耗率

$$d_p = \frac{m_y}{W_z} \quad (14)$$

3 系统级间分配优化

对于两级系统，优化选择各级膨胀机间的膨胀比组合是一个关键。经分析，膨胀比的优化选择与气瓶储气参数及每级发动机前的空气入口温度有关，这里选用储气压力 30 MPa，储气容积 300 L 的压缩空气动力源进行分析^[9]。

首先，利用变尺度算法建立数学模型，对膨胀比组合作优化分析^[10]。数学模型中以总输出功最大为目标，两级系统的每级膨胀比为变量，由前述基本计算式，可整理得关于膨胀比和总功的关系式 $W_z = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ ，基于目前单螺杆膨胀机技术，常见的单螺杆机型的膨胀比一般不超过 10，因此每个变量的取值范围为 [2, 10]，综上所述，建立数学模型如下

$$\max f(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \quad \varepsilon_i \in [2, 10] \quad i=1, 2$$

通过优化计算得到结果如下：当两级系统中各级入口温度相同时，其最优膨胀比组合为 9.76 : 7.04，可取整为 10 : 7。

为了验证这一理论分析的可靠性，这里还采用了编程计算对其结论进行了相应检验，当膨胀比取为 0.5，每级膨胀机的入口温度均为 500 K 时，计算两级膨胀机在不同的膨胀比组合下的总输出功情况，对比结果如下表如示，由表中可以看出，当 $\varepsilon_1=10$ ， $\varepsilon_2=7$ 时总输出功最大，与优化算法中得到的结论一致，验证了其方法的正确性。但由表中还可以得到，当第一级与第二级膨胀机的膨胀比分别为 9 : 7 和 9 : 8 时，其总输出功只略低于 10 : 7 的组合，也可作为此两级动力系统级间分配的优化膨胀比组合。

表 系统总输出功对比表

$W_z/(kW \cdot h)$

膨胀比	膨胀比								
	$\varepsilon_1=2$	$\varepsilon_1=3$	$\varepsilon_1=4$	$\varepsilon_1=5$	$\varepsilon_1=6$	$\varepsilon_1=7$	$\varepsilon_1=8$	$\varepsilon_1=9$	$\varepsilon_1=10$
$\varepsilon_2=2$	1.514	1.873	2.092	2.243	2.353	2.436	2.502	2.554	2.596
$\varepsilon_2=3$	1.871	2.217	2.426	2.566	2.666	2.741	2.797	2.841	2.874
$\varepsilon_2=4$	2.087	2.422	2.620	2.750	2.841	2.906	2.954	2.989	3.015
$\varepsilon_2=5$	2.235	2.558	2.745	2.865	2.947	3.004	3.043	3.070	3.087
$\varepsilon_2=6$	2.341	2.653	2.830	2.941	3.013	3.061	3.092	3.111	3.121
$\varepsilon_2=7$	2.421	2.721	2.888	2.990	3.053	3.093	3.116	3.127	3.129
$\varepsilon_2=8$	2.482	2.772	2.929	3.021	3.076	3.107	3.122	3.126	3.121
$\varepsilon_2=9$	2.530	2.809	2.956	3.040	3.086	3.109	3.116	3.112	3.100
$\varepsilon_2=10$	2.568	2.836	2.947	3.049	3.087	3.102	3.101	3.090	3.070

4 系统性能分析

评价该单螺杆膨胀机两级动力系统的性能指标有很多，本文将主要针对两个性能指标——总输出功和气耗率进行分析，总输出功即指系统整个工作过程中总的动力输出，是评价系统动力性能的主要参数，而气耗率即指单位输出功所消耗的压缩空气的质量，是评价系统经济性能的主要参数。这里采用编程计算的方法，选择压缩空气动力源参数为： $p_1=30\text{ MPa}$ ， $V_1=300\text{ L}$ ， $T_1=300\text{ K}$ ，根据前面对级间分配的优化分析，选取其最优膨胀比组合 10：7。

由于单螺杆膨胀机是一种新型的动力机设备，相关性能试验尚不完备，还不能确定其精确的效率值，而系统效率的高低直接关系到动力输出的多少，是决定系统可行与否的关键，因此对不同系统效率下的相关性能进行分析是十分必要的。当压缩空气进入每级膨胀机前的入口温度相同，分别为 300 K、400 K、500 K 时，整理得到系统的气耗率和总输出功随系统总效率的变化关系如图 4 和图 5 所示。定性上分析，由图 4 可以看出，气耗率与系统的效率成反比例变化，系统加热温度越高气耗率则越低；由图 5 可以看出，系统总输出功随效率的提高而线性增加，系统加热温度越高线性增加的幅度越大。当确定了系统的实际效率后，还可以根据图 5 获得具体的动力输出特性，对系统进行定量上的可行性评估。

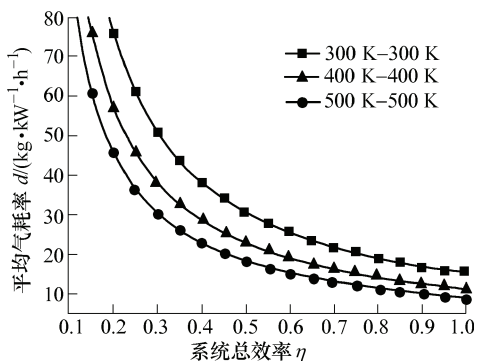


图 4 气耗率随系统总效率的变化

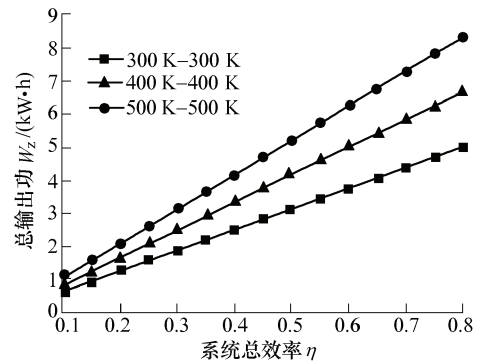


图 5 总输出功随系统总效率的变化

由热力学分析可以知道，当两级动力系统采用级间加热时，其经济性能和动力性能都会有很大的改善，这里主要研究当总效率为 0.5 时，系统加热程度对气耗率和总输出功的影响。通过计算整理，得到系统采用加热前后气耗率和总输出功随空气加热温度的变化，如图 6、7 所示，其中虚线部分表示未采用加热时的性能参数值，实线部分表示采用加热时的不同加热温度下系统性能参数值。对于未采用加热的计算中，假定进入第一级膨胀机的空气入口温度为环境温度(选定为 300 K)，且第二级前不加热；而对于采用加热的计算中，选定空气进入每一级膨胀机前的加热温度相同，即 $T_2=T_3$ 。

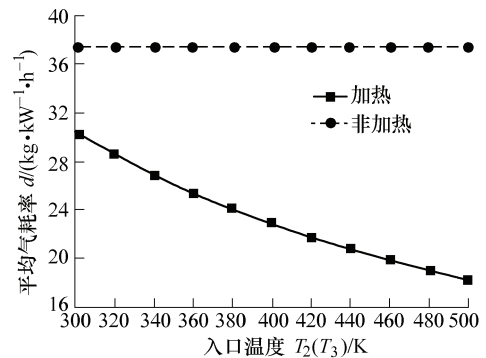


图 6 气耗率随系统加热温度的变化

由图 6 可以看出，采用加热后，系统气耗率较之未加热时有很大的降低，且随加热温度的升高气耗率几乎成线性下降，当加热温度为 500 K 时，气

耗率可下降约 52%; 由图 7 可以看出, 采用加热后, 系统总输出功率较之未加热时有很大的增加, 且随加热温度的升高总输出功率线性增加, 当加热温度为 500 K 时, 总输出功率可增加约 50%。

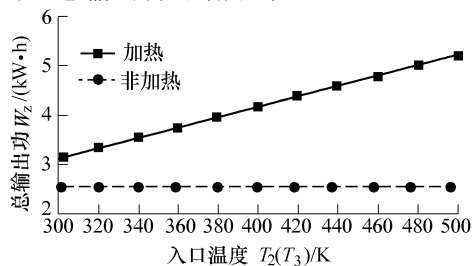


图 7 总输出功率随系统加热温度的变化

5 结论

(1) 采用两级系统能够突破单级系统膨胀比的限制, 提高总膨胀比, 增加系统总输出功率。

(2) 两级系统膨胀比的优化选择与气瓶储气参数及每级发动机前的空气入口温度有关, 对于储气压力 30 MPa, 储气容积 300 L 的压缩空气动力源, 当两级系统中各级入口温度相同时, 其最优膨胀比组合为 10:7, 此外, 9:7 和 9:8 也可作为优选膨胀比组合。

(3) 气耗率与系统的效率成反比例变化, 系统加热温度越高气耗率则越低, 系统总输出功率随效率的提高而线性增加, 系统加热温度越高线性增加的幅度越大。

(4) 两级系统采用加热后的动力输出较之未采用加热前有很大的提高, 且加热温度越高, 提高的幅度越大, 当加热温度 500 K 时, 总输出功率可增加约 50%。

单螺杆膨胀机两级动力系统具有较大的优势, 今后还需要进一步对单螺杆膨胀机多级动力系统进行探索和研究, 以获得最优化的压缩空气单螺杆膨胀机动力系统方案。

参 考 文 献

- [1] 陈鹰, 许宏, 陶国良, 等. 压缩空气动力汽车的研究与发展[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 7-11.
CHEN Ying, XU Hong, TAO Guoliang, et al. Research and progress of the compressed air power vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(11): 7-11.
- [2] 何仁, 吴海啸. 压缩空气动力汽车的可行性分析[J]. 机电产品开发与创新, 2006, 19(6): 31-33.
HE Ren, WU Haixiao. The feasibility analysis of

compressed-air powered vehicle[J]. Development & Innovation & Electrical Products, 2006, 19(6): 31-33.

- [3] 丁卫华, 刘昊, 陈鹰, 等. 气动汽车动力系统能效分析[J]. 机床与液压, 2005(8): 50-53.
DING Weihua, LIU Hao, CHEN Ying, et al. Research on energy system of air powered vehicle[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(8): 50-53.
- [4] 王伟, 吴玉庭, 马重芳, 等. 单螺杆膨胀机的初步试验研究[J]. 太阳能, 2009(3): 30-32.
WANG Wei, WU Yuting, MA Chongfang, et al. Primary experimental research on the single screw expander[J]. Solar Energy, 2009(3): 30-32.
- [5] 吉成辉, 于克营. 大容量单螺杆压缩机的发展[J]. 压缩机技术, 2004(5): 43-44.
JI Chenghui, YU Keying. Development on large capacity single screw compressor[J]. Compressor Technology, 2004(5): 43-44.
- [6] 查世梁. 节能长寿单螺杆压缩机技术新进展[J]. 通用机械, 2006(1): 34-36.
ZHA Shiliang. New progress of technologies of energy-saving and long-life single screw compressor[J]. General Machine, 2006(1): 34-36.
- [7] 俞小莉, 元广杰, 沈瑜铭, 等. 气动汽车发动机工作循环的理论分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 118-122.
YU Xiaoli, YUAN Guangjie, SHEN Yuming, et al. Theoretical analysis of air powered engine work cycle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(9): 118-122.
- [8] 吴沛宜, 马元. 变质量系统热力学及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
WU Peiyi, MA Yuan. Thermodynamics and application of the variable mass system[M]. Beijing: Higher Education Press, 1983.
- [9] 许宏. 压缩空气动力汽车[J]. 汽车技术, 2002(7): 5-7.
XU Hong. Compressed air driven vehicle[J]. Automobile Technology, 2002(7): 5-7.
- [10] 董云达. 数值优化引论[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
DONG Yunda. Numerical optimizing introduction[M]. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Press, 2007.

作者简介: 何为, 女, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为气动汽车动力系统优化。

E-mail: hw_bjut@emails.bjut.edu.cn

吴玉庭(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为单螺杆机性能改进及太阳能热发电等。

E-mail: wuyuting@bjut.edu.cn