

# 单/双级跨临界二氧化碳地源热泵性能分析

王彦杰,刘雄,欧竞赛

(西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院,陕西 西安 710055)

**摘要:**针对运行能耗较高的恒温恒湿空气处理机组,提出了用于驱动其运行的二氧化碳单/双级地源热泵两种系统,通过建立热力学计算模型,对两种系统在冬季运行时的稳态工况进行了理论计算,研究了室外新风温度、新风比、埋地管进口水温等因素对系统性能的影响。结果表明:单/双级系统的性能系数均随新风温度的升高而下降;而双级系统相对单级系统的性能提升率在新风需要预热的情况下近似保持不变,在新风不需要预热时,随新风温度的升高呈近似直线下降趋势;此外,性能提升率随新风比的增加呈近似直线上升趋势,却随埋地管进口水温的增加呈近似直线下降趋势;三个因素中,埋地管进口水温对两个系统的性能差距影响最大、新风比次之、新风温度最小。

**关键词:**地源热泵;恒温恒湿;性能系数;跨临界;二氧化碳

中图分类号:TU83 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2020.03.027

[引用本文格式]王彦杰,刘雄,欧竞赛.单/双级跨临界二氧化碳地源热泵性能分析[J].热能动力工程,2020,35(3):187-192.  
WANG Yan-jie, LIU Xiong, OU Jing-sai. Study on the performance comparison between single-stage and double-stage transcritical CO<sub>2</sub> ground source heat pump systems[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 187-192.

## Study on the Performance Comparison between Single-stage and Double-stage Transcritical CO<sub>2</sub> Ground Source Heat Pump Systems

WANG Yan-jie, LIU Xiong, OU Jing-sai

(School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China, Post Code: 710055)

**Abstract:** Two new types of single-stage and double-stage transcritical carbon dioxide ground source heat pump systems driven by constant temperature and humidity air handling units with high energy consumption were proposed. Then, by establishing thermodynamic calculation models, the COP of the steady-state operating conditions of the two systems in winter were calculated theoretically. And the influences of the factors such as the temperature of outdoor fresh air, fresh air ratio, and water temperature at the entrance of buried pipes on the performance of the two systems were studied. The results show that the COP of both single and double stage system decrease with the increase of fresh air temperature. While the performance improvement rate of double-stage over single-stage system remains almost unchanged when the fresh air needs to be preheated, but it decreases approximately linearly when the fresh air does not need to be preheated. In addition, it increases approximately linearly with the increase of fresh air ratio, but decreases approximately linearly with the increase of water temperature at the entrance of buried pipe. Among the three conditions, the water temperature at the entrance of buried pipes has the greatest impact on the performance difference between the two systems, followed by the fresh air ratio, and then the fresh air temperature having the least impact.

**Key words:** ground source heat pump, constant temperature and humidity, coefficient of performance,

transcritical, carbon dioxide

## 引 言

自 1989 年 G. Lorentzen 设计出跨临界二氧化碳热泵循环系统以来,二氧化碳制冷/热泵装置的研究与应用已经成为了全球范围内受重视的热点,目前已经在汽车空调、热泵热水器和复叠式制冷系统中获得了大量应用<sup>[1]</sup>,但二氧化碳制冷/热泵技术已取得的成果,与空调制冷行业对于二氧化碳的期待仍有很大差距,因此,行业内的研究人员一直在开发新的二氧化碳制冷/热泵系统和提升已有系统的性能<sup>[2-11]</sup>,期望进一步扩大二氧化碳制冷/热泵技术的应用范围。

在工业和民用建筑中,恒温恒湿空气处理机组获得了广泛的使用,此种空气处理机组在处理空气的过程中,由于要同时控制空气的湿度和温度,因此同时有冷量和热量的需求;常规的做法是:依靠冷水机组提供冷量,而依靠燃油燃气锅炉或电提供热量;这种做法不仅初投资高,而且也不节能。

近年由于对建筑节能的要求越来越高,不少研究人员力图使用热泵作为冷热源同时为恒温恒湿空气处理机组提供冷量和热量<sup>[12-15]</sup>,但在这些研究中,无一例外地都是使用氟利昂作为热泵工质。

本文提出了一种单/双级跨临界二氧化碳地源热泵系统<sup>[16]</sup>,可同时提供冷量和热量,作为直接膨胀式空调设备,用于驱动恒温恒湿空气处理机组,通过建立热力学模型计算了两种系统的制热效率,并对比分析室外新风温度、新风比以及地埋管进口水温等三个外部因素对系统性能的影响。

## 1 系统介绍

用于驱动恒温恒湿空气处理机组的单、双级跨临界二氧化碳地源热泵系统如图 1~图 2 所示,其冬季运行过程按箭头方向进行。

## 2 计算模型

压缩机模型:

$$w_{c,s} = h_{o,s} - h_i \quad (1)$$

$$w_{o,l} = h_{o,l} - h_i \quad (2)$$

$$\eta = 1.003 - 0.121 \times P_o/P_i \quad (3)$$

式中:  $w_{c,s}$ 、 $w_{o,l}$ —压缩机实际和理论轴功率, kW;  $h_{o,s}$ 、 $h_{o,l}$ —压缩机实际和理论出口焓值, kJ/kg;  $h_i$ —压缩机进口焓值, kJ/kg;  $\eta$ —压缩机等熵压缩效率;  $P_i$ 、 $P_o$ —压缩机进口和出口压力, kPa。

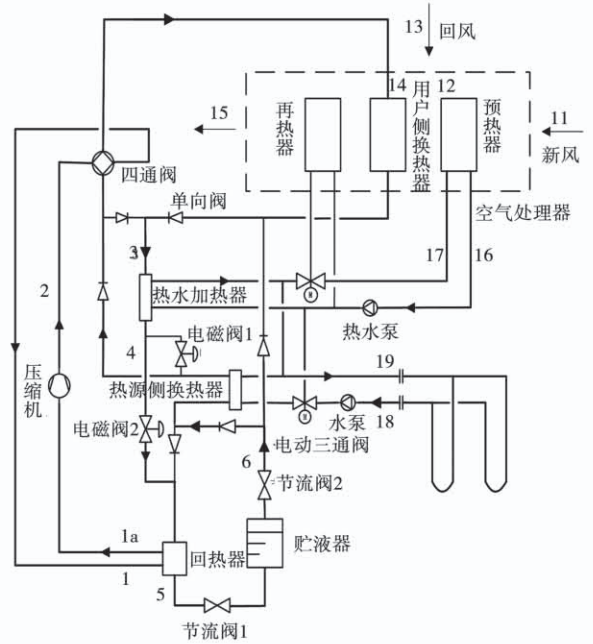


图 1 用于驱动恒温恒湿空气处理机组的单级跨临界二氧化碳地源热泵系统

Fig. 1 Diagram of single-stage transcritical CO<sub>2</sub> ground source heat pump for driving constant temperature and humidity air handling unit

换热器模型:

$$m_1 \times |h_{1,o} - h_{1,i}| = m_2 \times |h_{2,o} - h_{2,i}| \quad (4)$$

式中:  $m_1$ 、 $m_2$ —换热器中高温和低温介质的质量流量, kg/s;  $h_{1,o}$ 、 $h_{1,i}$ —换热器中高温介质的出口和进口焓值, kJ/kg;  $h_{2,o}$ 、 $h_{2,i}$ —换热器中低温介质的出口和进口焓值, kJ/kg。

节流阀模型:

$$h_o = h_i \quad (5)$$

式中:  $h_o$ 、 $h_i$ —节流阀的出口和进口焓值, kJ/kg。

贮液器模型:

$$m_{1,i} = m_{2,o} + m_{3,o} \quad (6)$$



$$m_{1,i} \times h_{1,i} = m_{2,o} \times h_{2,o} + m_{3,o} \times h_{3,o} \quad (7)$$

式中:  $m_{1,i}$ —贮液器的进口质量流量, kg/s;  $m_{2,o}$ 、 $m_{3,o}$ —贮液器出口饱和蒸气和液体的质量流量, kg/s;  $h_{1,i}$ —贮液器的进口焓值, kJ/kg;  $h_{2,o}$ 、 $h_{3,o}$ —贮液器的出口饱和蒸气和液体的焓值; 对于图1所示单级系统,  $h_{2,o} = 0$  kJ/kg。

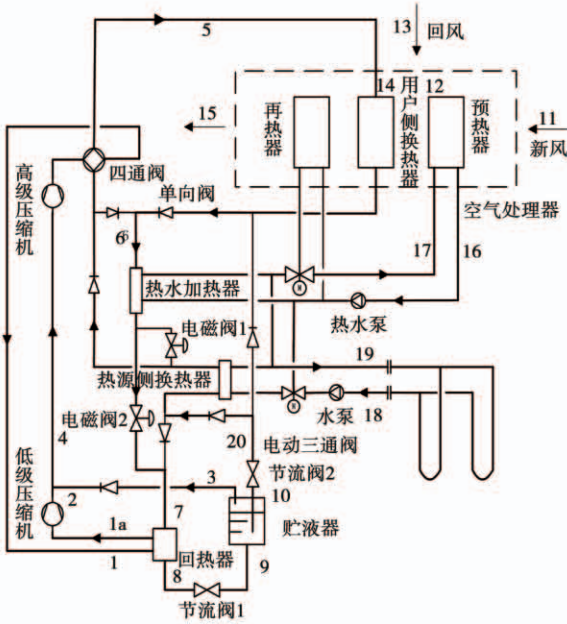


图2 用于驱动恒温恒湿空气处理机组的双级跨临界二氧化碳地源热泵系统

Fig. 2 Diagram of double-stage transcritical CO<sub>2</sub> ground source heat pump for driving constant temperature and humidity air handling unit

系统性能系数 COP:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (8)$$

式中:  $Q$ —用户侧换热器和预热器中的换热量之和, kW;  $W$ —系统内所有的压缩机轴功率之和, kW。

双级系统相对单级系统的性能提升率  $\delta$ :

$$\delta = \frac{COP_d - COP_s}{COP_s} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $COP_d$ 、 $COP_s$ —双级系统和单级系统的性能系数。

### 3 计算结果及分析

计算系统性能系数时,首先要对系统作出假设:

(1) 系统各管道内无压降;(2) 压缩机内为绝热非

等熵过程;(3) 冷凝压力取 9 MPa, 中间压力为 5 MPa;(4) 制冷剂与空气、水和空气之间的换热温差最小为 10 °C;(5) 制冷剂和水之间的换热温差最小为 5 °C;(6) 新风量为 10 000 m<sup>3</sup>/h, 送风温度为 40 °C。

基于上述计算条件,根据已建立的计算参数以及系统热力学理论计算模型,对两种系统制热性能在不同室外新风温度、新风比和地理管进口水温等条件下进行计算与对比分析。

#### 3.1 新风温度的影响

在地理管进口水温为 0 °C、新风比为 10% 时,单、双级系统的制热性能随室外新风温度的变化情况如图3所示。从图中可以看出,两个系统的制热性能均随室外新风温度的升高而降低,且双级系统性能一直优于单级系统。在室外新风温度等于 6 °C 时,性能下降趋势变缓,这是由于此时系统中的热水加热器和预热器不工作,导致系统单位制热量有所下降, COP 下降趋势变缓。

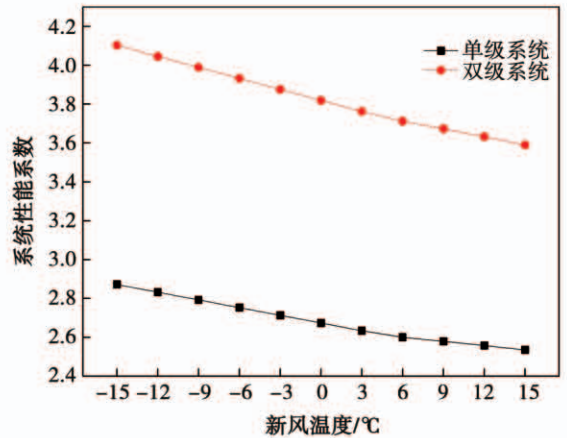


图3 不同新风温度下,单/双级系统的性能变化  
Fig. 3 COP of single-stage / double-stage system under different fresh air temperatures

在此工况下,双级系统相对单级系统的性能提升率的变化趋势如图4所示,当新风温度小于 6 °C 时(一般情况下,当冬季室外新风温度小于 5 °C 时,需要对其进行预热<sup>[17]</sup>),双级系统相对单级系统的性能提升率几乎维持在 42.83% 不变;当新风需要预热时,性能提升率呈近似直线下降趋势,但其下降幅值仅 1%。

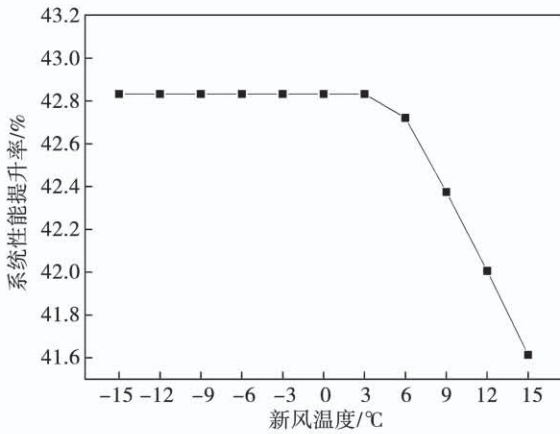


图 4 不同新风温度下,双级相对单级系统性能提升率的变化趋势

Fig. 4 Performance improvement rate of double-stage over single-stage system under different fresh air temperatures

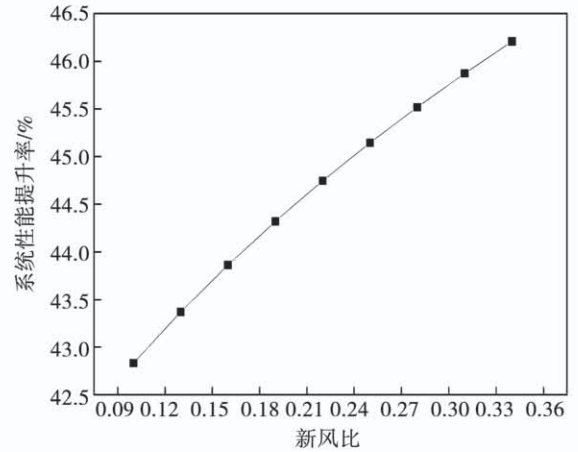


图 6 不同新风比下,双级相对单级系统性能提升率的变化

Fig. 6 Performance improvement rate of double-stage over single-stage system under different fresh air ratio

### 3.2 新风比的影响

在新风温度为 -15 °C、地埋管进口水温为 0 °C 时,单、双级系统的制热性能随新风比的变化情况如图 5 所示。从图中可以看出,两个系统的制热性能均随新风比的升高呈近似直线上升趋势,且双级系统性能一直优于单级系统。

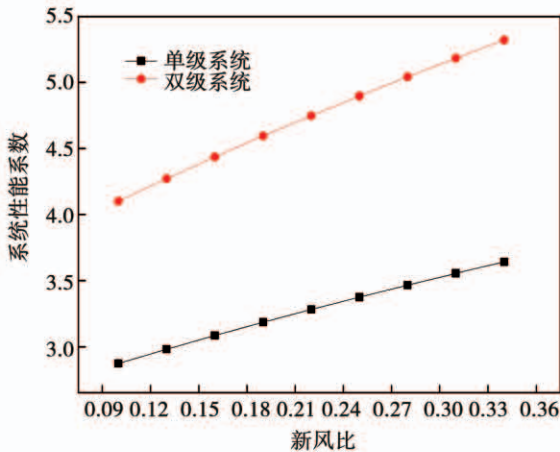


图 5 不同新风比下,单/双级系统的性能变化

Fig. 5 COP of single-stage / double-stage system under different fresh air ratio

在此工况下,双级系统相对单级系统的性能提升率的变化趋势如图 6 所示,性能提升率随新风比的增大而增大,但其增长幅度不大,在 42.83% ~ 46.21% 之间。

### 3.3 地埋管进口水温的影响

在新风温度为 -15 °C、新风比为 10% 时,单、双级系统的制热性能随新风比的变化情况如图 7 所示。从图中可以看出,两个系统的制热性能均随地埋管进口水温的升高呈上升趋势;双级系统性能一直优于单级系统,且两者逐渐接近。

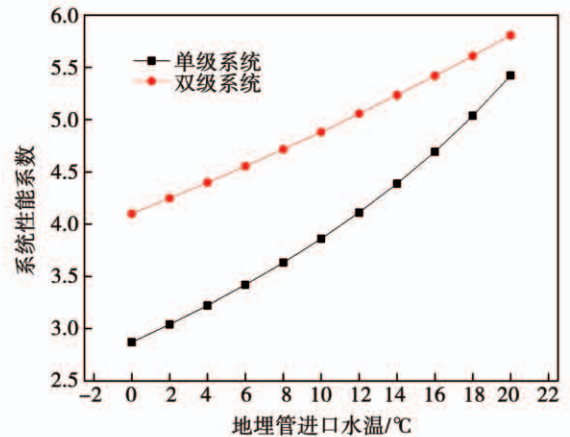


图 7 不同地埋管进口水温下,单/双级系统的性能变化

Fig. 7 COP of single-stage / double-stage system under different water temperature at the entrance of buried pipes

在此工况下,双级系统相对单级系统的性能提升率的变化趋势如图 8 所示,双级系统相对单级系统的性能提升率随地埋管进口水温的升高而降低,



且其变化幅度较大,在7.11%~42.83%之间。

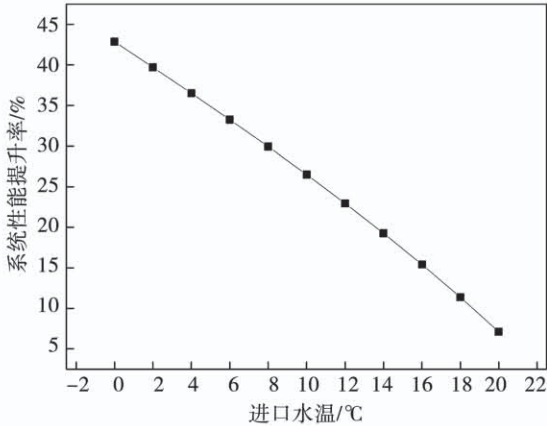


图8 不同埋地管进口水温下,双级相对单级系统性能提升率的变化趋势

Fig. 8 Performance improvement rate of double-stage over single-stage system under different water temperature at the entrance of buried pipes

## 4 结论

(1) 在新风温度、新风比和埋地管进口水温三种因素变化条件下,由于双级系统中高、低压两个压缩机所耗的总功量之和小于单级系统中一个压缩机的耗功量,故在相同的情况下,双级系统的性能一直优于单级系统。

(2) 在相同计算条件下,单/双级系统性能系数均随室外新风温度的升高呈下降趋势,且其下降的缓慢程度与新风是否需要预热有关;均随新风比的升高呈近似直线上升趋势;均随埋地管进口水温的升高而增大。

(3) 比较三种因素,埋地管进口水温的变化对单/双级系统之间的性能差距影响较大、新风比次之、室外新风温度影响较小。

## 参考文献:

[1] 丁国良,黄冬平. 二氧化碳制冷技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.  
DING Guo-liang, HUANG Dong-ping. CO<sub>2</sub> refrigeration technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

[2] 廖胜明. 跨临界二氧化碳制冷循环参数优化[J]. 长沙铁道学院学报,1997,15(4):41-45.

LIAO Sheng-ming. Parameters optimization for transcritical carbon dioxide refrigerating cycles[J]. Journal of Changsha Railway University, 1997, 15(4): 41-45.

- [3] AGRAWAL N, BHATTACHARYYA S, SARKAR J. Optimization of two-stage transcritical carbon dioxide heat pump cycles[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(2): 180-187.
- [4] AGRAWAL N. Studies on a two-stage transcritical carbon dioxide heat pump cycle with flash intercooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2): 299-305.
- [5] 高原原. 二氧化碳热泵供热系统的理论分析及实验研究[D]. 天津:天津大学,2012.  
GAO Yuan-yuan. Theoretical analysis and experimental research of carbon dioxide heat pump heating system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [6] ZHANG Z, TIAN L, CHEN Y, et al. Effect of an internal heat exchanger on performance of the transcritical carbon dioxide refrigeration cycle with an expander [J]. Entropy, 2014, 16(11): 5919-5934.
- [7] MONTAGNER G P, MELO C. A study on carbon dioxide cycle architectures for light-commercial refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2014(42): 90-96.
- [8] BAHETA A T, HASSAN S, REDUAN A R B, et al. Performance investigation of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle[J]. Procedia CIRP, 2015(26): 482-485.
- [9] 孙志利,马一太. 单级跨临界二氧化碳带膨胀机循环与四种双级循环的热力学分析[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 53-59.  
SUN Zhi-li, MA Yi-tai. Thermodynamic analysis of one kind of single-stage with expander and four kinds of two-stage transcritical carbon dioxide refrigeration cycle [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 53-59.
- [10] 冯凯,蔡觉先. CO<sub>2</sub> 制冷技术的研究发展[J]. 节能, 2017(12): 8-14.  
FENG Kai, CAI Jue-xian. The research and development of CO<sub>2</sub> refrigeration technology [J]. Energy Conservation, 2017(12): 8-14.
- [11] BOCCARDI G, PIEVE M, SARACENO L, et al. CO<sub>2</sub> transcritical refrigeration cycles: Potential for exploiting waste heat recovery with variable operating conditions [C]. XXXIV Heat Transfer Conference, 2017.
- [12] 刘乾,姜钦青,蒋绿林,陈孚江. 冷凝热回收型地源热泵恒温恒湿空调系统的节能研究[J]. 流体机械, 2015, 43(4): 70-74.  
LIU Qian, JIANG Qin-qing, JIANG Lyu-lin, et al. Energy saving

research of constant temperature and humidity air-conditioning system driven by ground source heat pump with condensing heat recovery[J]. Fluid Machinery,2015,43(4): 70 - 74.

[13] XU Xiang-guo,ZHONG Zi-wen,DENG Shi-ming,ZHANG Xiao-bo. A review on temperature and humidity control methods focusing on air-conditioning equipment and control algorithms applied in small-to-medium-sized buildings[J]. Energy and Buildings, 2018(162):163 - 176.

[14] YU X,WANG R Z,ZHAI X Q. Year round experimental study on a constant temperature and humidity air-conditioning system driven by ground source heat pump [J]. Energy, 2011, 36 ( 2 ): 1309 - 1318.

[15] 可翔宇. 恒温恒湿中央空调建模与优化方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学,2014.

KE Xiang-yu. Optimization method and modeling for constant temperature and humidity air-conditioning system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,2014.

[16] 刘 雄. 空调制冷设备[P]. 中国:201410414401. 1,2014 - 08 - 14.

LIU Xiong. Air conditioner and cooler[P]. China:201410414401. 1, 2014 - 08 - 14.

[17] 苏建锋. 恒温恒湿空调不同工况下的自动控制[J]. 科技资讯,2011(26): 57.

SU Jian-feng. Automatic control of constant temperature and humidity air conditioning under different conditions[J]. Science & Technology Information,2011(26): 57.

(丛 敏 编 辑)

(上接第 97 页)

[4] 明玉周. 多级轴流压气机加级设计技术及气动性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.

MING Yu-zhou. Design technology and aerodynamics research of zero-staging a multistage axial flow compressor[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2011.

[5] 朱清芳. 多级轴流压气机前加级设计及优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.

ZHU Qing-fang. Design and optimization of adding a stage for the multistage axial compressor[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2018.

[6] WADIAR, WOLF D P, HAASER F G. Aerodynamic design and testing of an axial flow compressor with pressure ratio of 23.3 for

the LM2500<sup>+</sup> Gas Turbine[J]. Journal of Turbomachinery,2002, 4(15):331 - 340.

[7] 刘科辉,单 鹏,李 娜,等. 弹用涡喷发动机加零级压气机设计方法研究[J]. 航空动力学报, 2006,21(6):1098 - 1102.

LIU Ke-hui,SHAN Peng,LI Na, et al. Study of design method for the zero-stage compressor in an expendable gas turbine engine[J]. Journal of Aerospace Power,2006,21(6): 1098 - 1102.

[8] 李景银,石雪松. 高压轴流压缩机的加减级设计及模化设计[J]. 风机技术,2004(5):1 - 4.

LI Jing-yin,SHI Xue-song. Design of increasing and decreasing stages and modeling for axial compressor with high pressure[J]. Compressor, Blower & Fan Technology,2004(5):1 - 4.

(丛 敏 编 辑)