

文章编号:1674-8190(2017)04-438-06

某航空活塞发动机机械增压器旁通阀门 启闭特性分析

潘钟键¹, 邹湘伏^{1,2}, 周志东¹

(1. 山河智能装备股份有限公司 国家级企业技术中心, 长沙 410100)

(2. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

摘要: 机械增压器现已在汽车发动机上得到了广泛应用, 但其在航空活塞发动机上的应用和研究较少。分析机械增压器的工作过程, 在簧片阀模型的基础上, 考虑旁通阀门启闭压力与涡轮增压器压比之间的线性关系并对其建模; 搭建某型航空活塞发动机 GT-POWER 数值仿真模型并进行实验验证, 在整机模型的基础上, 研究不同转速下通过旁通阀门的质量流率以及不同高度下旁通阀门的通流面积。结果表明: 巡航工况下, 海拔 2 680 m 时阀门关闭; 起飞工况下, 海拔 3 000 m 阀门关闭, 该结果可为发动机实际高空飞行提供理论支持。

关键词: 航空活塞发动机; 机械增压器; 旁通阀门; 质量流率; 通流面积

中图分类号: V234

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.04.011

Analysis of Bypass Valve Opening and Closing Characteristics for Supercharge in Aviation Piston Engine

Pan Zhongjian¹, Zou Xiangfu^{1,2}, Zhou Zhidong¹

(1. National Certified Enterprise's Technical Center, Sunward Intelligent

Equipment Co., Ltd., Changsha 410100, China)

(2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Supercharger is widely used in vehicle engines because of its good response characteristics while the application in aircraft piston engines is still very rare. The working process of the supercharger is analyzed, and considering the linear relationship between the opening and closing pressure of the bypass valve and the turbo-charger pressure ratio, the supercharger is modeled on the basis of the reed valve model. The GT-POWER numerical simulation model of a certain type of air piston engine is established and verified. Based on the whole model, the mass flow rate of the bypass valve and the flow area of the bypass valve at different heights are studied. The results show that under the cruise condition, the valve is closed at 2 680 m above sea level, and the valve is closed at 3 000 m above sea level under taking off condition, which provides the theoretical basis for the actual high altitude flight of the engine.

Key words: air piston engine; supercharger; bypass valve; mass flow rate; flow area

0 引言

航空活塞发动机是轻型飞机、长航时无人机的动力单元。随着飞行高度的不断增加, 涡轮增压技术也在飞机发动机上得到了越来越多的应用^[1]。而机械增压器由于其动态响应好, 在低速下也可获得增压效果, 现已在汽车及船舶发动机上得到了较

收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-09-06

基金项目: 湖南省科技厅重点研发计划国际与区域科技
合作项目(2016WK2032)

通信作者: 邹湘伏, xzfou32@126.com

多应用并逐渐推广^[2-3],但关于将机械增压器应用于航空活塞发动机的研究仍较少。刘厚根等^[4]、K. Ilie 等^[5]和尹紫恒^[6]分别研究了罗茨机械增压器的响应特性并对其加工工艺进行了改进,对旁通阀门开启与油耗的关系进行了研究;潘钟键等^[7-8]对复合增压技术在航空活塞发动机上的应用进行了理论分析,研究了机械增压器对发动机性能的影响;A. Romagnoli 等^[9]、A. P. Carlucci 等^[10]和 P. Mahendra 等^[11]分别对机械增压器的进气系统和增压特性开展研究,并进行了实验验证。

随着通航市场的逐步开放,增大了对航空活塞发动机的需求。由于人们对升限的不断追求,机械增压器在航空活塞发动机上的应用也得到了越来越多的关注,但目前大多数活塞发动机均采用一级涡轮增压,并未采用复合增压技术来提高升限。因此,本文首先建立某型航空发动机的数值仿真模型,通过实验验证模型的准确性,并以该模型为基础,研究某复合增压发动机机械增压器旁通阀门的启闭特性,以期为提高航空活塞发动机升限、进行后续的增压分析提供参考和借鉴。

1 机械增压器结构与工作原理

某型航空活塞发动机采用复合增压方式(涡轮增压和机械增压),其罗茨式机械增压器结构如图 1 所示,在进气口处有旁通阀门,增压器内部有一对转子,由曲轴带动皮带轮驱动转子进行增压,在增压器底部有增压后的空气出气口,最右端是皮带轮,由发动机驱动直接转动,机械增压器的工作原理如图 2 所示。

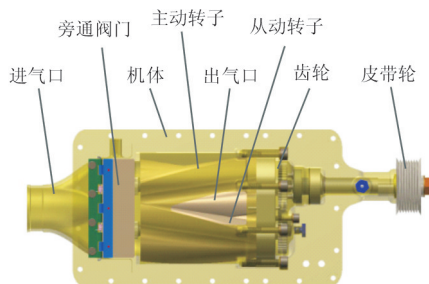


图 1 机械增压器结构

Fig. 1 Structure of supercharger

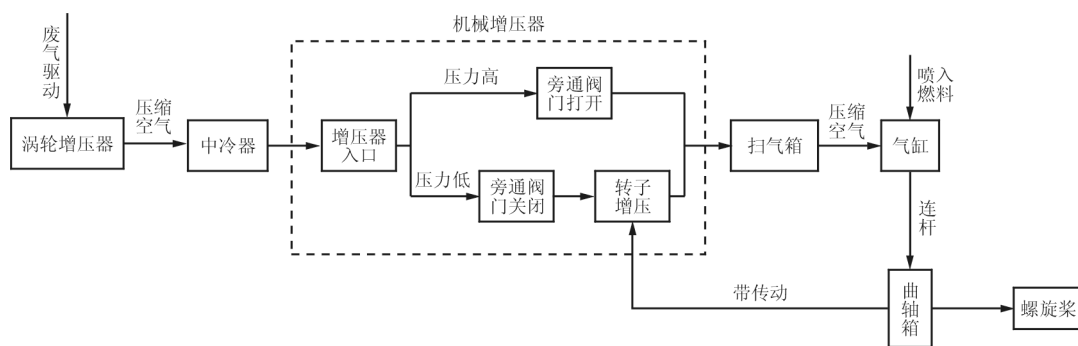


图 2 机械增压器工作原理

Fig. 2 Working principle of supercharger

当飞机起飞或者高速巡航时,前端涡轮增压器产生的进气压力较高,高压气体直接将旁通阀门打开,此时旁通阀门开启,空气直接进入扫气箱,曲轴带动机械增压器空转,机械增压器内部的转子不做功;当发动机转速低或者飞机处于高海拔飞行时,涡轮增压器产生的进气压力较低,压缩空气不足以打开旁通阀门,此时旁通阀门关闭,机械增压器内部的转子对进入的空气进行二次增压,以增加进入气缸的燃烧工质。

2 发动机数学模型的建立

某型发动机是一款 V 型布局的压燃式航空活塞发动机,其结构紧凑,和同功率发动机相比,重量较轻、功重比高;和同级别发动机相比,具有较低的燃油消耗率,涡轮增压与机械增压串联,高空性能优异,在 5 000 m 高空仍可维持最大起飞功率。该型发动机的相关参数如表 1 所示。

表 1 发动机参数
Table 1 Engine parameters

参 数	数 值
缸径/mm	102
冲程/mm	101
连杆长度/mm	202
喷油孔个数/个	9
燃油喷射压力/MPa	138
每缸排量/L	0.83
起飞功率/kW	123
起飞转速/(r·min ⁻¹)	2 700
起飞功率燃油消耗/(L·h ⁻¹)	33
巡航转速/(r·min ⁻¹)	2 400
最大连续功率/kW	105
巡航时燃油消耗/(L·h ⁻¹)	24.5
曲轴转角(排气门打开)	114(ATDC)
曲轴转角(排气门关闭)	246(ATDC)
曲轴转角(进气门打开)	129(ATDC)
曲轴转角(进气门关闭)	231(ATDC)
上止点间隙/mm	0.1

GT-POWER 是符合发动机工业标准的模拟仿真软件, 现已被世界上多数发动机和汽车生产厂家及供应商应用, 涵盖了发动机本体、驱动系统、冷却系统、燃油供给系统、曲轴机构、配气机构等六方面。GT-POWER 软件具有强大的辅助建模前处理工具, 自带丰富的燃烧模型和优化设计功能, 可直接优化发动机主要系统, 是发动机仿真分析的重要工具。

旁通阀门采用机械弹簧结构来实现启闭, 由进气压力的大小控制阀门的开合。建模过程中, 在软件自带的簧片阀模型基础上, 通过改变开启力和流通面积的对应关系, 模拟旁通阀门的启闭。开启力由前级涡轮增压器提供, 阀门两侧的压力差与阀门面积之间通过计算可以转化成阀门表面上的作用力, 因此需要充分考虑前级涡轮增压压比与阀门开启之间的线性关系。在简易实验台上进行实验, 用弹簧秤勾住阀门, 记录弹簧秤读数、旁通阀门的开启程度以及流通面积, 实验数据如表 2 所示。虽然阀门的开启作用力较小, 但在实际工作过程中, 需要涡轮增压器提供足够的进气压力才能形成一定的压差以打开阀门。

表 2 阀门开启实验数据
Table 2 Valve opening experimental data

阀门表面作用力/N	阀门开启角度/(°)	通流面积/(10 ⁻² m ²)
0	0(全闭)	0
0.8	10	0.05
1.2	20	0.09
...
12.0	90(全开)	0.46

将旁通阀门实验的多组数据、发动机其他实测数据和厂商提供的设计参数, 输入到发动机模型中, 对部分参数进行调试校核, 建立该发动机的 GT-POWER 一维仿真物理模型, 如图 3 所示。

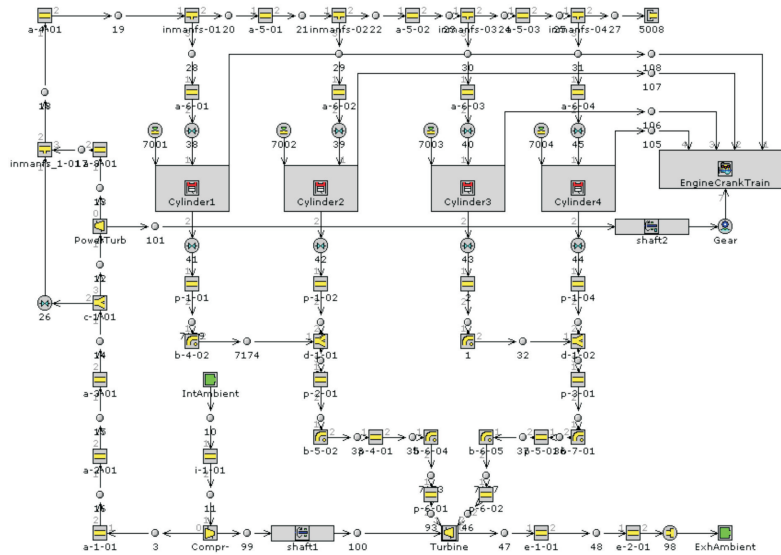


图 3 某型航空活塞发动机 GT-POWER 模型

Fig. 3 GT-POWER model for one type of piston aero engine

在发动机实验台架上对本文所建立的发动机模型进行测试,绘制其万有特性曲线,记录不同转速下的发动机扭矩,实验值与模拟值的对比如图 4 所示,可以看出:最大误差在 5% 以内,表明所建立的模型具有一定的准确性,可在该模型的基础上进行后续研究。

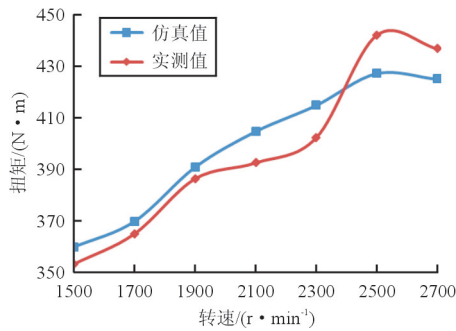


图 4 发动机扭矩实测值和模拟值对比
Fig. 4 Comparison of engine torque between experiment and simulation values

3 旁通阀门启闭特性分析

应用上文建立的发动机模型,研究旁通阀门开启特性与转速、爬升高度之间的关系。通过对机械增压器工作原理的分析可知,旁通阀门的开启与否直接影响发动机是否需要二次增压。在发动机整机 GT-POWER 建模中,采用簧片阀单元对旁通阀门建模,输入开启力与通流面积的对应参数。通过数值模拟,得到不同转速下旁通阀门质量流量率曲线,如图 5 所示。

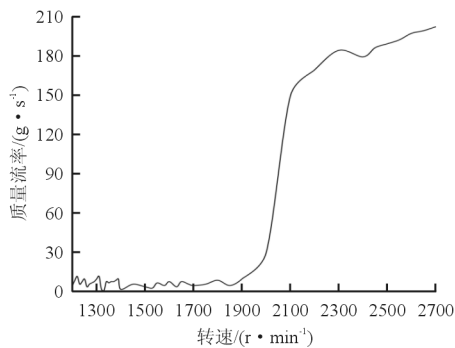


图 5 不同转速下旁通阀门质量流量率
Fig. 5 Bypass valve mass flow rate at different rotate speed

从图 5 可以看出:阀门的开启时刻与发动机转速、飞行高度等参数有关,发动机转速低时,涡轮增

压器的效果不能充分体现,旁通阀门两侧的压差不足以打开阀门,此时流经阀门的空气质量流率几乎为 0,而模拟所得的数据在低速时有少量空气流通,原因是发动机振动以及某一时刻的压力波动导致阀门轻微开启;当发动机转速在 1 200~1 900 r/min 时,空气质量流率以 5 g/s 左右的速度流经阀门,可以认为阀门没有开启,即当发动机转速为 1 900 r/min 及以下时,流经阀门的空气质量流率很小,表明此时阀门没有打开;而当发动机转速升至 2 000 r/min 及以上时,流经阀门的空气质量流率逐渐增大,且随着转速的增加,阀门开启量突变,当转速为 2 200 r/min 时,阀门几乎全部打开,表明此时机械增压器不起增压效果,空气经涡轮增压器增压后直接流经旁通阀门进入扫气箱,而后进入汽缸。

不同转速对应不同的飞行工况。通常,发动机最大转速对应起飞工况;空中巡航时,根据油耗、飞行速度等多种指标确定发动机转速,该转速值可以作为一个区间,本文所指巡航工况以飞行速度为指标,定义 2 400 r/min 为飞机的巡航工况。对不同转速下旁通阀门的开启特性进行仿真,研究飞行高度与旁通阀门流通面积的关系,如图 6 所示。选择发动机转速为 2 300 r/min 开始进行模拟,确保在该转速下,地面工况条件旁通阀门正常开启。

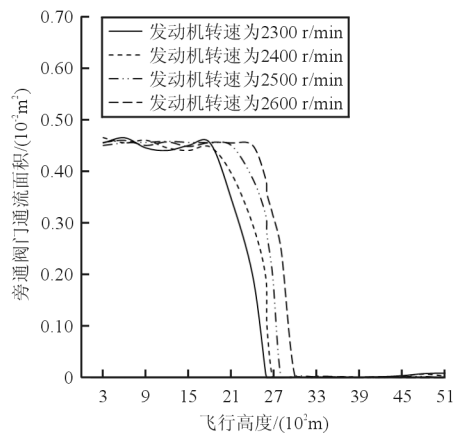


图 6 飞行高度与旁通阀门通流面积曲线
Fig. 6 Curves between flight altitude and bypass valve flow area

从图 6 可以看出:①当飞行高度在 1 800 m 以下时,发动机机械增压器旁通阀门通流面积约为 $0.46 \times 10^{-2} \text{ m}^2$,表明涡轮增压器提供的进气压力足以打开机械增压器的旁通阀门;继续提升飞行高

度,旁通阀门的通流面积急剧下降,在 2 600 m 时通流面积接近于 0,表明此时旁通阀门已经关闭,机械增压器内部转子开始工作,对进气进行二次增压。②当发动机转速分别为 2 400 和 2 500 r/min 时,旁通阀门的关闭时间随飞行高度的增加而有所延迟,转速为 2 400 r/min 时,飞行高度为 2 680 m 时旁通阀门关闭,转速为 2 500 r/min 时,飞行高度为 2 850 m 左右时旁通阀门关闭;③当发动机转速为 2 600 r/min 时,在飞行高度为 3 000 m 时旁通阀门关闭,表明在较高转速下,机械增压器起到二次增压效果,在高海拔环境下,能够提供足够的进气压力。综上所述,随着发动机转速的升高,旁通阀门的开启时间有所延迟。

对不同飞行高度下的功率进行记录分析,如图 7 所示。

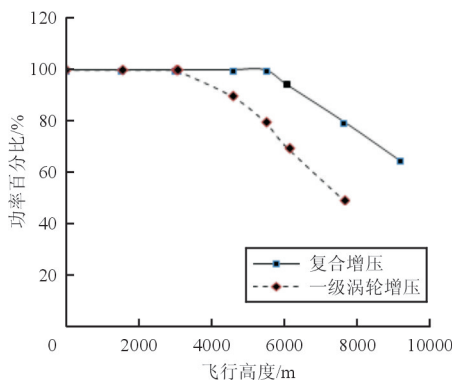


图 7 不同增压条件下发动机高空性能

Fig. 7 Engine altitude performance at different turbocharge conditions

从图 7 可以看出:涡轮增压能够满足一定高海拔条件下的飞行,仅涡轮增压在海拔 3 300 m 左右仍能保证 100% 的功率,而复合增压能在海拔 5 000 m 左右维持发动机最大功率,表明复合增压技术在高海拔条件下能够很好地提升发动机性能,机械增压器旁通阀门对发动机的高空功率恢复起到了良好效果。

4 结 论

本文分析了某型航空发动机机械增压器旁通阀门的开启过程,在此基础上搭建了其数值仿真模型,通过实验台架验证了模型的准确性;在该模型的基础上研究旁通阀门的开启特性。

巡航工况下,飞行高度为 2 680 m 时,机械增

压器旁通阀门关闭,机械增压器二次增压。起飞工况下,飞行高度为 3 000 m 时,机械增压器起到二次增压效果。旁通阀门的启闭对高空状况下飞机发动机的功率恢复具有较大影响。

参考文献

- [1] 徐斌,谭龙兴,杨世春,等. 航空活塞发动机使用升限分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12): 1568-1572.
Xu Bin, Tan Longxing, Yang Shichun, et al. Analysis of service ceiling on piston aero-engine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12): 1568-1572. (in Chinese)
- [2] Sakellariadis N F, Raptotasio S I, Antonopoulos A K, et al. Development and validation of a new turbocharger simulation methodology for marine two stroke diesel engine modelling and diagnostic applications[J]. Energy, 2015, 91: 952-966.
- [3] 刘厚根. 机械增压器的研究现状与开发建议[J]. 车用发动机, 2004(5): 1-3.
Liu Hougen. Study status and development suggestion of supercharger[J]. Vehicle Engine, 2004(5): 1-3. (in Chinese)
- [4] 刘厚根,秦贞国,吴元兴. 基于 CFD 的机械增压器进、排气口的结构优化[J]. 机械设计, 2016, 33(7): 49-53.
Liu Hougen, Qin Zhenguo, Wu Yuanxing. Structure optimization of inlet/outlet of supercharger based on CFD[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(7): 49-53. (in Chinese)
- [5] Ilie K, Subic A. Parametric modelling of helical rotors for efficient design of twin-screw superchargers[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2007, 221(2): 267-272.
- [6] 尹紫恒. 机械增压器旁通阀控制方式与油耗及试验研究[J]. 内燃机与配件, 2014(5): 1-5.
Yin Ziheng. Research and the fuel consumption and the test valve to control the mechanical supercharger bypass[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2014(5): 1-5. (in Chinese)
- [7] 潘钟键,何清华,张祥剑. 活塞航空发动机复合增压技术仿真分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(12): 1543-1547.
Pan Zhongjian, He Qinghua, Zhang Xiangjian. Simulation analysis of composite supercharging technology of aircraft piston engines[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(12): 1543-1547. (in Chinese)
- [8] Pan Zhongjian, He Qinghua, Zhang Xiangjian, et al. Numerical simulation of 2-stroke diesel engine for light aircraft[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015, 30(3): 4-10.
- [9] Romagnoli A, Vorraro G, Rajoo S, et al. Characterization

of a supercharger as boosting & turbo-expansion device in sequential multi-stage systems[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 136(3): 127-141.

- [10] Carlucci A P, Ficarella A, Laforgia D, et al. Multiobjective optimization of the breathing system of an aircraft two stroke supercharged diesel engine[J]. Energy Procedia, 2015, 82(5): 31-37.
- [11] Mahendra P, Olsen M G. Unsteady velocity field measurements at the outlet of an automotive supercharger using particle image velocimetry(PIV)[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(3): 405-423.

作者简介:

潘钟键(1983—),男,博士,工程师。主要研究方向:航空活塞发动机性能模拟。

邹湘伏(1975—),男,博士,讲师。主要研究方向:轻型航空器气动分析。

周志东(1989—)男,工程师。主要研究方向:航空活塞发动机性能分析。

(编辑:马文静)

(上接第 422 页)

- [14] 刘亚龙. 新支线飞机机翼下壁板损伤容限方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.

Liu Yalong. Study on the damage tolerance methodology for the wing panel of new regional jet[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)

- [15] 吴中怀. 基于 Abaqus 的薄壁板裂纹扩展仿真研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.

Wu Zhonghui. Simulation study of crack propagation in the panel based on Abaqus[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)

- [16] 秦远珍. 系列飞机疲劳载荷谱编制数据选取[C]. 井冈山:中国机械工程学会, 中国力学学会, 中国航空学会等, 2008.

Qin Yuanzhen. The data selection of fatigue load spectrum preparation for series of planes[C]. Jinggangshan: Chinese Mechanical Engineering Society, Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, Chinese Society of Aeronautics and astronautics, et al, 2008. (in Chinese)

- [17] 马相明, 孙霞, 于华, 等. 载荷谱数据分析软件设计与应用

[J]. 机械工程师, 2015(8): 28-30.

Ma Xiangming, Sun Xia, Yu Hua, et al. Design and application of load spectrum data analysis software[J]. Mechanical Engineer, 2015(8): 28-30. (in Chinese)

- [18] 邵伯兴, 郭俊. 应力谱软件编制及其在数据分析中的应用[J]. 现代交通技术, 2011, 8(3): 48-50.

Shao Boxing, Guo Jun. Stress spectrum software and its application in data analyses[J]. Modern Transportation Technology, 2011, 8(3): 48-50. (in Chinese)

作者简介:

毛森鑫(1985—),男,工程师。主要研究方向:飞机结构疲劳与断裂。

韩豹(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空工程。

沈亚强(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空工程。

(编辑:赵毓梅)