

民用航空涡扇发动机增压级后可调放气阀控制规律设计

唐鸿羽*, 阙建锋, 邱建

中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241

摘要: 现代民用航空发动机一般为大涵道比涡扇发动机, 由于增压级无可调静子叶片, 某些工况会造成低转速区域增压级流量与高压压气机不匹配, 增压级共同工作线被迫抬高, 从而造成增压级喘振甚至发动机超温。为了保证增压级的稳定工作, 增压级下游通常装有可调放气阀 (VBV) 系统。本文从 VBV 放气控制方案设计流程出发, 针对 VBV 放气量与阀门有效面积的关系及涡扇发动机在各运行状态 VBV 放气规律展开研究, 定义了一种以低压相对换算转速 $\bar{N}_{lr}$ 为主控参数, 以及放气面积与高压相对换算转速差比值 $A_{24}/\Delta\bar{N}_{2r}$ 为修正系数的 VBV 控制规律设计方法, 为民用航空涡扇发动机 VBV 控制规律设计提供了具体思路。

关键词: 涡扇发动机; 增压级后可调放气阀; 控制规律; 增压级; 修正系数

中图分类号: V231.3 文献标识码: A DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2018.05.025

发动机在使用过程中经常会遇到压缩部件 (风扇、增压级和压气机) 气动不稳定的问题, 其中, 喘振因其流动的复杂性和危害的严重性, 成为制约高性能发动机研发的主要问题之一。发动机发生喘振, 轻则造成发动机性能急剧下降, 重则导致燃烧室熄火甚至叶片断裂而使整台发动机遭受严重破坏。因此, 拓宽压缩部件的稳定工作范围, 防止喘振的发生, 成为发动机设计者研究的关键问题之一。

当风扇增压级的转速下降到设计点以下时, 气流的轴向速度也随着降低, 这会导致压气机进口流动情况恶化。为了调整进入高压压气机的流量从而改善风扇/增压级和高压压气机的匹配, 需要开启可调放气阀 (Variable Bleed Valves, VBV), 从风扇增压级出口的气体流道放出一定量的空气。由于这些压缩空气的释放会导致发动机能量损失, 因此, 仅仅在必要的情况下 VBV 才开启, 允许一部分气体离开主流道。图 1 展示了中间位置的 VBV。在其操作过程中, VBV 会随着风扇增压级转速的降低而增大出口面积。

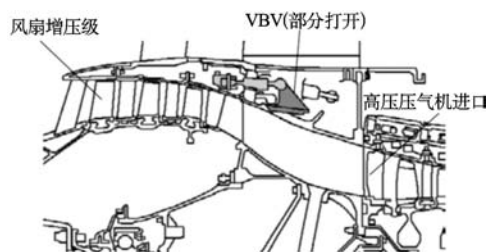


图 1 VBV 在发动机中的位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of VBV position for engine

目前, 国内对于现役发动机 (如遑达系列、CFM56 系列) VBV 系统的研究主要集中于系统的组成、控制原理、对发动机性能的影响和故障分析^[1-3]等, 而针对 VBV 控制规律的研究主要基于对现役发动机 QAR 数据的分析^[4-7], 鲜有对其控制规律的设计原理及方法的研究报道。因此, 本文针对 VBV 放气量与阀门有效面积的关系及发动机在各运行状态 VBV 放气规律展开研究, 提出稳态与非稳态 VBV 控制规律制定的方法, 以及对控制规律的修正方法。

首先, 通过对两种常见的 VBV 控制方法的研究对比, 确定本文所采用的 VBV 控制方法。其次, 通过性能仿真软

收稿日期: 2018-01-25; 退修日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-04-20

基金项目: 工信部民用飞机预研项目 (MJ-2014-D-20); 上海市科技人才计划项目 (15PJ1432800)

* 通信作者. Tel.: 021-33367082 E-mail: icyfirethy@126.com

引用格式: Tang Hongyu, Que Jianfeng, Qiu Jian. Civil aviation turbofan engine variable bleed valves control schedule design [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(05): 25-31. 唐鸿羽, 阙建锋, 邱建. 民用航空涡扇发动机增压级后可调放气阀控制规律设计 [J]. 航空科学技术, 2018, 29(05): 25-31.

件 Cycle Deck 对 VBV 修正规律的具体计算,得到一套较为完整的可用于稳态及非稳态工况的 VBV 控制规律设计方法。

1 VBV 控制方法的确定

通常,VBV 开度 L_{VBV} 只是转速的函数,并通过其他一些参数进行修正,常用的 VBV 控制有 N_1 和 N_2 两种控制方式。

PW4000 和 V2500 采用了 N_1 控制方式,如图 2 所示。过渡态过程中 VBV 控制方式与稳态过程的 VBV 控制方式有所不同,在发动机加速和减速过程中,需要加入 N_2 转速修正,以修正过渡态过程中高低压转子转差变化以及共同工作线变化对 VBV 放气量造成的影响,如当 N_2 转速升高时,高压压气机抽吸能力增强,在相同 N_1 转速下需要 VBV 放气量减小,如图 2 中虚线所示。另外,还需要加入飞行马赫数、飞行高度、发动机进口总温(极端天气)对 VBV 放气量的影响修正。

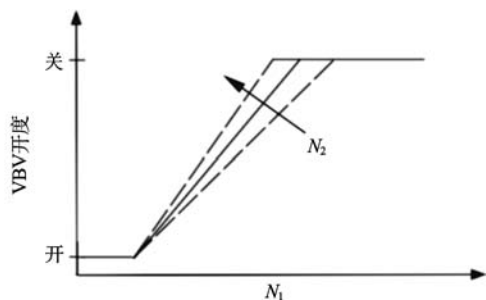


图2 N_1 控制方式 VBV 控制规律示意图
Fig.2 N_1 mode control schedule of VBV

CFM56-7B 则采用了 N_2 控制方式,如图 3 所示。与 N_1 控制方式类似, N_2 控制方式需要加入 N_1 转速修正,以修正过渡态过程中高低压转子转差变化以及共同工作线变化对 VBV 放气量造成的影响,如当 N_1 转速升高时,在相同 N_2 转速下增压级后气流堵塞现象变得严重,需要的 VBV 放气量就增大,如图 3 中虚线所示。同样, N_2 控制方式也需要加入飞行马赫数、飞行高度、发动机进口总温对 VBV 放气量的影响修正。

鉴于 VBV 用于调节风扇和增压级等低压部件进入核心机的空气流量,而风扇/增压级的空气流量与低压换算转速 N_{1R} 关系更为直接,本文以下研究基于采用 N_1 控制方式。

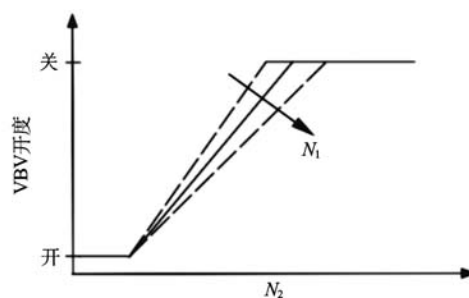


图3 N_2 控制方式 VBV 控制规律示意图
Fig.3 N_2 mode control schedule of VBV

2 VBV 控制规律设计流程

VBV 控制方案设计流程如图 4 所示,该流程中的设计输入由以下发动机及飞机的输入参数计算定义:低压轴转速 N_1 ; 低压轴换算转速 N_{1R} ; 高压轴换算转速 N_{2R} ; 大气环境压力 p_0 ; 风扇进口总温 T_2 和增压级进口总温 T_{25} ; VSV 位置; 油门杆角度。

这些输入通过以下几个逻辑块定义 VBV 控制逻辑:首先确定发动机运行状态,计算 VBV 基准控制规律;其次根据转差变化、VSV 角度变化、转子加速率等影响因素计算得到各 VBV 修正规律,并将修正规律与基准规律进行合成,再加入反推修正、恶劣天气修正,VBV 作动阀变化率限制,并根据需要添加起动冷运转试验模式,最终 VBV 指令被送入作动部件的控制系统中。

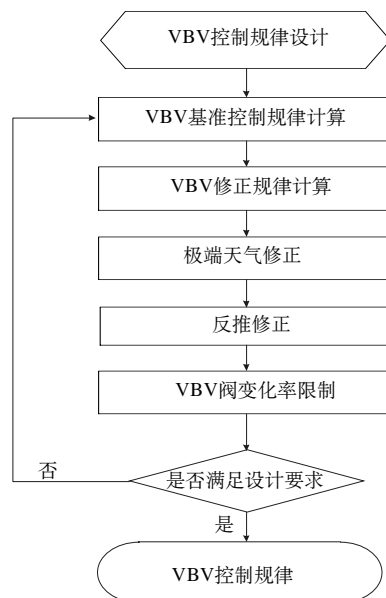


图4 VBV 设计流程示意图
Fig.4 Schematic diagram of VBV design procedure

3 VBV 控制规律设计计算

3.1 VBV 基准控制规律设计

计算 VBV 基准控制规律,首先要确定增压级喘振裕度要求。民用发动机设计应考虑到其适航性设计,在《航空发动机适航规定》^[8]CCAR 33.65 条款中对喘振与失速特性做出了相关规定,其对应的咨询通告 (AC33.65-1)^[9] 中规定“喘振裕度通常采用压比裕度。如果可以清晰地给出定义,也可以采用其他的定义方式。”欧美某些发动机适航取证报告中均采用压比裕度。另外在气动稳定性相关资料^[10]中也指出,采用压比裕度更有利于进行稳定性评估工作。

本文采用压比裕度进行 VBV 控制规律设计,压比裕度要求假设定为发动机飞行包线范围内不低于 8%。

基于上述分析,进行 VBV 基准规律计算。对各工况下增压级喘振裕度随转速、大气条件变化的参数研究分析,以保证喘振裕度为目标,确定各工况下所需的放气量,再根据放气量与 VBV 开度的关系得到 VBV 开度与测量参数的关系,即 VBV 基准控制规律。

3.2 VBV 修正规律设计

3.2.1 VBV 转差修正规律设计

马赫数对 VBV 放气规律的影响可认为是对转差特性的影响,因此,这个修正规律可以简化为 VBV 开度 A_{24} 的变化与高压转子转差 $\Delta \bar{N}_{2R}$ 的关系。该规律的原理是通过 VBV 基准规律得到基准放气面积以及对应的基准高压相对换算转速。然后计算不同马赫数下的 VBV 放气面积和高压相对换算转速,与基准规律相比较,可得到不同 $\Delta \bar{N}_{2R}$ 转差下的放气面积变化量 ΔA_{24} ,则不同马赫数下的 VBV 实际面积 A_{24_DN} 可以由式 (1) 和式 (2) 计算得到:

$$A_{24_DN}(\bar{N}_{1R}) = A_{24_baseline}(\bar{N}_{1R}) - \Delta \bar{N}_{2R}(\bar{N}_{1R}) \cdot (DA_{24QDN2R_DN}(\bar{N}_{1R})) \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\Delta \bar{N}_{2R}(\bar{N}_{1R}) = \bar{N}_{2R_baseline}(\bar{N}_{1R}) - \bar{N}_{2R}(\bar{N}_{1R}) \quad (2)$$

式中: $A_{24_baseline}$ 为基准 VBV 放气面积; $\bar{N}_{2R_baseline}$ 为基准相对高压换算转速; $\bar{N}_{2R}$ 为当前相对高压换算转速; $DA_{24QDN2R_DN}$ 为不同转差下 VBV 面积的变化量与高压换算转速转差的关系。

3.2.2 VSV 位置修正规律设计

以某发动机为例,使 VSV 分别在 -5° 、 0° 、 $+5^\circ$ 条件下计算 VBV 放气规律,得到 VSV 位置对 VBV 放气的修正规律。

以 VSV 导叶角度 0° 作为基准,得到基准放气规律与转差关系。在此基础上,分别计算 -5° 、 $+5^\circ$ (可根据需要增加不同角度) 情况下的 $A_{24}/\Delta \bar{N}_{2R}$ 关系 ($DA_{24QDN2R_VSV}$),即可得到 VSV 角度位置对 VBV 放气的修正规律。对于

VBV 开度的控制, VSV 角度和 $\bar{N}_{1R}$ 为主控输入参数, $\Delta \bar{N}_{2R}$ 为修正输入参数。计算公式如下:

$$A_{24_VSV}(\bar{N}_{1R}) = A_{24_baseline}(\bar{N}_{1R}) - \Delta \bar{N}_{2R}(\bar{N}_{1R}) \cdot (DA_{24QDN2R_VSV}(\bar{N}_{1R})) \cdot 100\% \quad (3)$$

式中: $DA_{24QDN2R_VSV}$ 为不同 VSV 角度下 VBV 面积的变化量与高压换算转速转差的关系。

3.2.3 转子加速率修正规律设计

计算表明,不同的转子加速度对 VBV 放气规律有不同的影响。当发动机进行加速时,增压级加速工作线远离喘振边界;当发动机减速时,增压级减速工作线靠近喘振边界。由于加速与减速对增压级的影响不同,所以需要分别计算加速率与减速率对 VBV 放气规律的影响。

本文针对不同加速率限制下的 VBV 有效放气面积计算得到加速率修正规律。计算公式如下:

$$A_{24_NDOT} = A_{24_baseline} - DA_{24_DNDOT} \quad (4)$$

式中: DA_{24_DNDOT} 为不同 VSV 角度下 VBV 面积的变化量与高压换算转速转差的关系。

3.2.4 其他修正因素的考虑

对于反推修正和极端天气修正,一般的做法是针对这些情况增加特定的控制逻辑,如当发动机控制系统收到反推打开信号或雨雹信号后,VBV 完全打开或接近全开,可通过放气将吸入增压级的异物排出,保护核心机。

4 VBV 控制规律合成

通过 3.1 节和 3.2 节计算确定基准规律及修正规律以后将其合成,得到最终的 VBV 控制规律如式 (5) 所示。

$$A_{24X} = A_{24_baseline}(\bar{N}_{1R}) - \Delta \bar{N}_{2R}(\bar{N}_{1R}) \cdot (DA_{24QDN2R_DN}(\bar{N}_{1R}) - \Delta \bar{N}_{2R}(\bar{N}_{1R}) \cdot (DA_{24QDN2R_VSV}(\bar{N}_{1R})) - DA_{24_DNDOT} \quad (5)$$

A_{24X} 是通过各修正关系计算出来的 VBV 放气面积,这个值还受到放气装置面积上限和下限的约束。在计算最终面积 A_{24} 时通过设置上下限确保放气面积不会超出该区间, A_{24} 的上限为 $(A_{24_baseline} + \delta)$ 和最大放气面积 A_{24_MAX} 取小;下限为 $(A_{24_baseline} - \delta)$ 和 0 取大。 δ 为当前转速下通过敏感性计算得到的最大可能修正面积。

$$A_{24} = \text{AMAX}\{0, (A_{24_baseline}(\bar{N}_{1R}) - \delta), \text{AMIN}[(A_{24_baseline}(\bar{N}_{1R}) + \delta), A_{24X}, A_{24_MAX}]\} \quad (6)$$

5 计算结果与分析

5.1 VBV 基准控制规律

根据 VBV 控制规律设计流程框图,首先需要确定

VBV 基准规律。该基准规律主控参数为低压转子相对换算转速 $\bar{N}_{1R}$, 以某型号发动机为例, 计算得到 VBV 基准规律如图 5、图 6 所示。

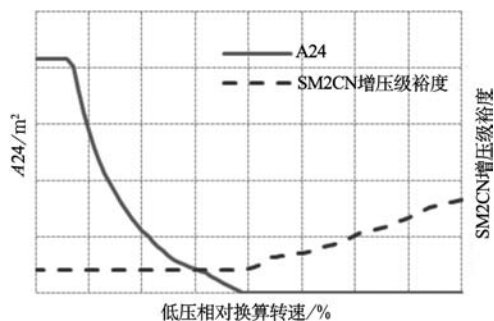


图 5 VBV 基准规律

Fig.5 VBV basic control schedule

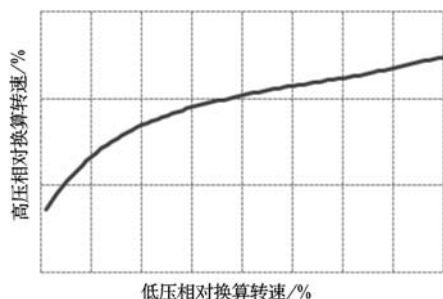


图 6 VBV 基准转差关系

Fig.6 VBV basic speed difference relationship

5.2 VBV 转差修正规律

图 7 计算结果显示, VBV 阀门打开的换算转速随马赫数 Ma 的增大而增大。因为当马赫数增大时, 冲压作用加剧, 增压级共同工作线离喘振边界更近, 更容易发生喘振, 所以 VBV 阀门会更早地打开以保证喘振裕度满足运行要求。

在进行修正规律拟合时, 选取最低的一条线, 此时的规律是最保守的, 代价是在低马赫数工况下牺牲了一定的裕度。在低速区间 VBV 已经到达阀门打开极限, 所以取该变化率在 $\bar{N}_{1R}$ 较低处接近于 0; 而在高转速区间 VBV 关闭, 所以取 0。

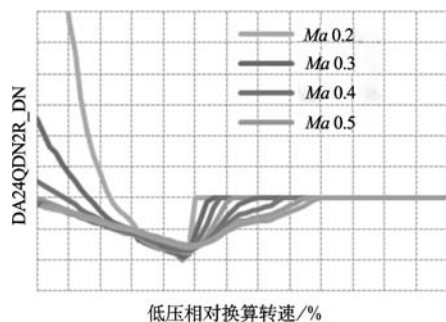


图 7 VBV 转差修正规律

Fig.7 VBV control schedule of speed difference modification

5.3 VSV 位置修正规律

在低转速下, 压气机前几级转子叶片的迎角会增加。为了保持迎角在高压压气机所有运行转速下都处于最佳状态, 进口导叶和前面的三到四级静子会设计成可调静子叶片 (VSV)。VSV 各级以优化的方式联动, 其调节计划随压气机换算转速变化。这样就形成了一个复合的压气机特性图, 每条等转速线对应唯一的几何开度设置。所以 VSV 会改变压气机特性, 从而影响增压级与压气机的匹配关系, 进而影响 VBV 控制规律。所以, VBV 控制规律需要在各转速下匹配 VSV 调节规律, 进行相应修正。

本文以 VSV 分别在 -5° 、 0° 、 $+5^\circ$ 条件下计算 VBV 放气规律, 得到 VSV 位置对 VBV 放气的修正规律。以 VSV 导叶角度 0° 作为基准, 得到基准放气规律与转差关系, 如图 8 所示。在此基础上, 分别计算 -5° 、 $+5^\circ$ 情况下的 $A24/\Delta\bar{N}_{2R}$ 关系 (DA24QDN2R_VSV), 即可得到 VSV 角度位置对 VBV 放气的修正规律, 如图 9 所示。对于 VBV 开度的控制, VSV 角度和 $\bar{N}_{1R}$ 为主控输入参数, $\Delta\bar{N}_{2R}$ 为修正输入参数。

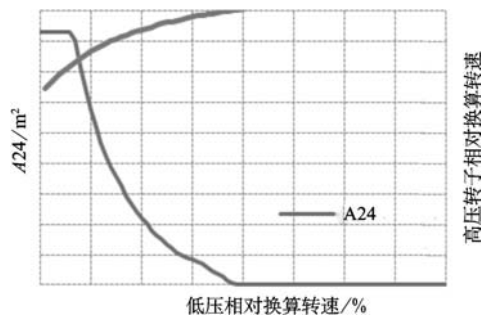


图 8 VSV 基准位置 (0°) VBV 放气规律

Fig.8 VBV control schedule of VSV basic position (0°) modification

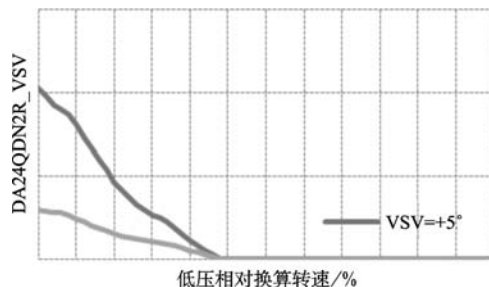


图 9 VSV 位置修正 VBV 放气规律

Fig.9 VBV control schedule of VSV position modification

5.4 转子加速率修正规律

计算表明, 发动机在进行减速时, 分别使用不同的减速率 $N_2\dot{P}_{25}$ 限制进行计算, 发现不同减速率限制下的转差

基本不发生变化,这说明减速率对 VBV 放气规律的影响不是通过转差来体现,如图 10、图 11 所示。

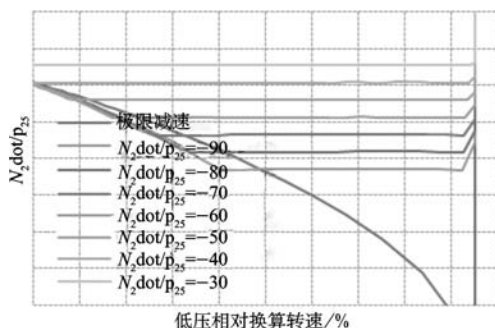


图 10 不同减速率限制下的减速过程

Fig.10 Decel process on different deceleration rate limit

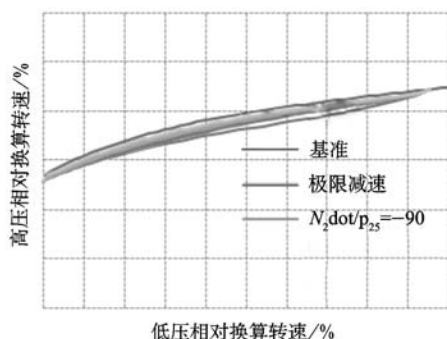


图 11 不同减速率下的减速过程转差关系

Fig.11 Speed relationship on different deceleration rate limit

根据上述计算结果,可使用减速率 $N_2 \dot{p}_{25}$ 作为参变量,得到减速率对 VBV 放气规律的修正关系。首先得到不同减速率下的放气规律,如图 12 所示,然后计算某一低压相对换算转速下的放气面积变化量 ΔA_{24} (DA24_DNOT)。

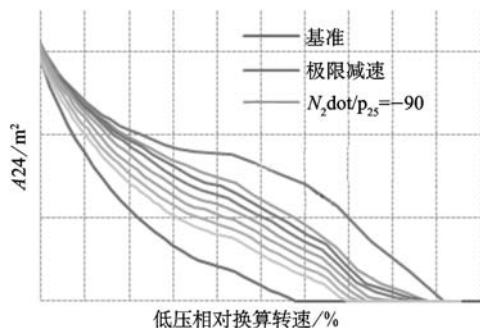


图 12 不同减速率下的 VBV 放气规律

Fig.12 VBV control schedule of different deceleration rate limit

在加速过程中,同样发现不同加速率限制下的转差基本不发生变化,如图 13 和图 14 所示。

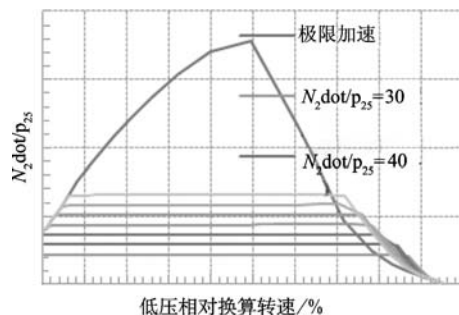


图 13 不同加速率限制下的加速过程

Fig.13 Accel process on different acceleration rate limit

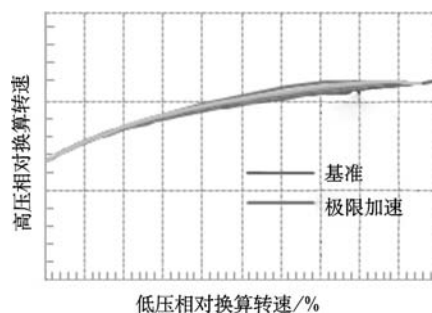


图 14 不同加速率下的加速过程转差关系

Fig.14 Speed relationship on different acceleration rate limit

计算表明,在加速过程中不同加速率对 VBV 放气规律的影响较小且有交叉,无法通过加速率限制进行 VBV 放气规律修正,需要选择一条较为保守的修正规律作为最终加速的 VBV 放气修正规律,如图 15 所示。

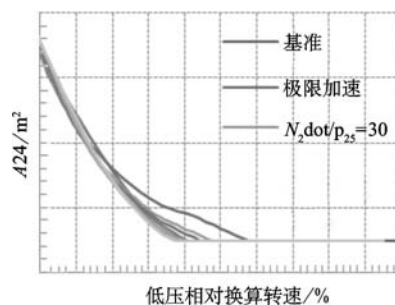


图 15 不同加速率下的 VBV 放气规律

Fig.15 VBV control schedule of different acceleration rate limit

6 支撑验证

以转子加速率修正为例,计算得到的 VBV 转子加速率修正规律放入性能仿真软件 Cycle Deck 中进行验证,验证工况选取:稳态 ($H=0$, Ma_0 , ISA),极限减速,极限加速,验证结果如图 16 与图 17 所示。

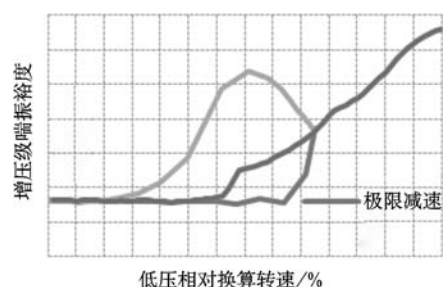


图 16 VBV 放气规律验证(增压级裕度曲线)

Fig.16 VBV control schedule verification(booster surge margin curve)

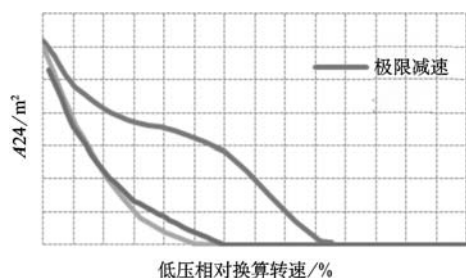


图 17 VBV 放气规律验证(放气面积)

Fig.17 VBV control schedule verification(bleed area)

计算结果显示,VBV 放气控制规律经转子加速率修正后基本满足增压级的喘振裕度目标设计值(增压级压比裕度 $\geq 8\%$)。其他修正规律验证原理相同,不再详细叙述。

7 结束语

首先,本文从 VBV 控制方式以及 VBV 控制规律设计流程入手,对 VBV 控制规律设计方法进行了研究。VBV 的控制方式主要分为 N_1 转速和 N_2 转速两种方式。VBV 控制规律设计流程主要包含了基准控制规律制定和一系列修正规律制定的设计框图。

其次,本文通过对基准放气规律、转差修正规律、VSV 位置修正规律、转子加速率修正规律分别进行了研究计算,并进行规律合成,形成完整的 VBV 控制规律设计方法,最后对计算结果进行了简单分析评估,评估结果表明,应用该方法得到的控制规律满足设计要求。

本文论述的 VBV 设计方法,可用于各类涡扇发动机 VBV 控制规律的设计与研究。

AST

参考文献

[1] 郭利明,王坤. CFM56-5B 发动机 VBV 故障引起的 EGT 超温故障分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2007, 18 (5): 38-39.
Guo Liming, Wang Kun. EGT overtemperature fault analysis

arise from CFM56-5B engine VBV system[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2007, 18 (5): 38-39. (in Chinese)

[2] 夏存江. CFM56-3 发动机可变几何控制系统对发动机性能的影响[J]. 航空发动机, 2008, 34 (3): 42-45.

Xia Cunjiang. Effect of CFM56-3 engine variable geometry control system on aero engine performance[J]. Aero Engine, 2008, 34 (3): 42-45. (in Chinese)

[3] 吴鑫睿. CFM56-5B 发动机 VBV 系统工作原理及故障分析[J]. 科技资讯, 2012 (16): 118.

Wu Xinrui. CFM56-5B engine VBV system operating principle and fault analysis[J]. Science & Technology Information, 2012 (16): 118. (in Chinese)

[4] 曹惠玲,宋强. 基于 QAR 的 PW4077D 发动机放气阀与 N_1 的关系[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28 (5): 38-41.

Cao Huiling, Song Qiang. Relationship between bleed valve PW4077D and N_1 based on QAR data[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2010, 28 (5): 38-41. (in Chinese)

[5] 曹惠玲,宋强,罗立霄. 基于 QAR 的 PW4077D 放气阀稳态调节模型[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31 (1): 51-54.

Cao Huiling, Song Qiang, Luo Lixiao. Model of bleed valve steady-changing control law in PW4077D aero engine based on QAR data[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31 (1): 51-54. (in Chinese)

[6] 吴征,李震. 波音 777 飞机装载的 PW4077D 发动机喘振故障分析[J]. 航空维修与工程, 2012(1): 48-49.

Wu Zheng, Li Zhen. PW4077D engine surge fault analysis on Boeing 777 aircraft[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2012(1): 48-49. (in Chinese)

[7] 王新. 航空发动机 VBV 调节规律及防喘监控研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.

Wang Xin. Research on the regulation law of VBV and anti-surge monitoring in aeroengine[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)

[8] 中国民用航空局. CCAR-33R2 航空发动机适航规定[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2011.

Civil Aviation Administration of China. CCAR-33R2 Airworthiness standards: aircraft engines [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2011. (in Chinese)

[9] 中国民用航空局. AC33.65-1 喘振和失速[S]. 北京: 中华人

民共和国交通运输部, 2011.

Civil Aviation Administration of China. AC33.65-1 Surge and stall[S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2011. (in Chinese)

[10] 刘大响, 叶培梁, 胡骏. 航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.

Liu Daxiang, Ye Peiliang, Hu Jun. Stability design and evaluation technology of aero gas turbine engine [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004. (in Chinese)

作者简介

唐鸿羽 (1985—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 航空发动机总体性能、发动机控制技术。

Tel: 021-33367082

E-mail: icyfirethy@126.com

阙建锋 (1990—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 航空发动机总体性能。

邱建 (1984—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 航空发动机总体性能。

Civil Aviation Turbofan Engine Variable Bleed Valves Control Schedule Design

Tang Hongyu*, Que Jianfeng, Qiu Jian

AECC Commercial Aircraft Engine Co., LTD., Shanghai 200241, China

Abstract: Civil aero engine is often designed to a high bypass ratio turbofan engine. And the booster operating line would be raised without variable stator vane at some condition because of the mismatching between the compressor and the booster flow. In order to ensure that the booster can work steadily, the Variable Bleed Valves (VBV) system is often set up at the booster export. Based on the design process, this paper studied the relationship between air discharge flow and effective air discharge area, and it defined a VBV control schedule design method that $\bar{N}_{1R}$ as the main control parameter, $A_{24}/\Delta\bar{N}_{2R}$ as the correction parameter. The paper provided specific ideas about VBV control schedule design.

Key Words: turbofan engine; variable bleed valves; control schedule; booster; correction parameter

Received: 2018-01-25; Revised: 2018-03-28; Accepted: 2018-04-20

Foundation item: Civil Aircraft Pre-research Project of Ministry of Industry and Information Technology (MJ-2014-D-20); Shanghai Science and Technology Talent Project (15PJ1432800)

*Corresponding author. Tel.: 021-33367082 E-mail: icyfirethy@126.com