

# Condition Monitoring and Predictive Maintenance of the VBV System for CFM56-5B Engines

Hongtao Wang

School of Aircraft Maintenance Engineering Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou Guangdong, 510470, China

## Abstract

This paper analyzes abnormal incidents caused by faults in the Variable Bleed Valve (VBV) system of CFM56-5B engines over the past decade. By examining the operating principles of the VBV system and identifying associated defects, the study conducts a comprehensive analysis and summarization of the fault causes. Typical parameters reflecting the operational status of the VBV system are extracted to establish a fault monitoring model based on Quick Access Recorder (QAR) data. The rationality and threshold values of the developed model are rigorously tested and validated through repeated iterations using artificial intelligence software. Subsequently, the model is deployed for operational use, enabling real-time monitoring and predictive analysis of the VBV system's health condition. Practical case verification demonstrates that this approach offers significant reference value and guidance for airlines in monitoring VBV system faults and managing associated costs.

## Keywords

CFM56-5B engine; VBV system; Variable Bleed Valve; EGT Margin; Predictive Maintenance

# CFM56-5B 发动机 VBV 系统状态监控及预测维修

王洪涛

广州民航职业技术学院飞机维修工程学院, 中国·广东广州 510470

## 摘要

文章通过统计近10年CFM56-5B发动机VBV(可调放气活门)系统故障导致的不正常事件分析,通过分析VBV工作原理及涉及缺陷,并对故障原因进行分析总结,调取能反映VBV系统工作状态的典型参数,建立QAR(飞机快速存取记录器)数据的故障监控模型。通过人工智能软件对所建立模型合理性和阈值进行反复测试验证,并上线运行,实现对VBV系统的健康状况进行监控及预测。通过实例验证,能对航空公司VBV系统故障监控及成本管控有一定参考价值和指导意义。

## 关键词

CFM56-5B发动机; VBV系统; 可调放气活门(VBV); EGT裕度; 预防维修

## 1 引言

CFM56-5B 发动机是 A320 NEO 系列飞机可选装型号之一,由于其可靠性高、经济性能好、维修方便以及良好的安全运行记录,受到了国内外众多客户的青睐,截至 2025 年 5 月底全球有 3720 架 A320 飞机安装了 CFM56-5B 发动机。CFM56-5 系列发动机由 CFM56-3 发动机改进和发展而来,CFM56-3 发动机的使用数据证明其 VBV(可调放气活门)系统可靠性非常高,因此在设计 CFM56-5 系列发动机时直接使用了同样的 VBV 系统。随着 CFM56-5 系列发动机的使用时间积累,发现其 VBV 系统的可靠性非常低,经常出现 VBV 系统故障,典型表现为软轴磨损、断裂及活门卡阻等。据厂家不完全统计,VBV 系统的故障是 CFM56-5

系列发动机的 10 大故障之一,仅 2024 年全球机队就发生了 22 起由 VBV 系统故障导致的返航或中断起飞事件。因此在 CFM56-7 系列及后来的 LEAP 系列发动机设计中均取消了 VBV 软轴,采取了可靠性更高的作动环控制方式。

## 2 背景

2023 年 6 月 18 日,一架 A320 飞机在爬升阶段,机组监控到右发出现警告信息“ENG 2 COMPRESSOR VANE”,并伴随“VBV ACT, HMU ENG 2A”警告信息,机组操纵飞机返航。地面打开发动机后检查发现 9 点钟(从后往前)位置 VBV 软轴断裂,拆下 VBV 活门检查有较大阻力。更换整套 VBV 软轴和 VBV 作动筒后,地面执行 FADEC(全功能数字式发动机控制器)测试和发动机试车均恢复正常。

2024 年 3 月 8 日,机械员在执行某架 A320 左发航后工作中,检查发现左发 10 点钟(从后往前)位置 VBV 软轴断裂。询问机组,得到反馈:在上一航班中机组没有观察

【作者简介】王洪涛(1970-),男,中国河南洛阳人,副教授,从事飞机机电维修方向教学和研究。

到任何发动机故障信息，观察到左发 EGT(发动机排气温度)和 FF(燃油流量)指示较右发有略微偏高。后续译码发现在爬升阶段左发 EGT 和右发 EGT 差值最大为 81℃，左发 FF 相应也有 300-400KG/FH 的上升。

### 3 系统介绍

CFM56-5B 发动机为了提高压气机稳定工作范围和预防喘振，设计了压气机可变几何构型装置，包括 VBVB 和 VSV(可调静子叶片)。VBVB 系统由 ECU(发动机电子控制组件)控制，由 HMU(发动机控制系统中的液压机械组件)提供伺服燃油作动，VBVB 马达与限动机构共同驱动 VBVB 活门完成作动。承担着提高压气机工作性能、防止喘振的重要作用。

VBVB 系统的主要部件包括：12 个放气活门(11 个从动活门，1 个主动活门)、燃油齿轮马达、限动机构、位置传感器、柔性传动轴。

VBVB 系统让一部分低压压气机出口空气流入外涵道，在发动机快速加速过程中，可以防止压气机失速、喘振；在发动机低转速时和在反推力装置操作过程中，可以把空气中的杂质(例如水分、砂石等)排斥到高压压气机之外，从而防止损坏发动机和提高发动机稳定性。

VBVB 系统工作方式如下：HMU 接收 ECU 的指令提供高压伺服燃油给驱动马达，驱动马达通过传动轴驱动主活门作动，另外 11 个普通活门通过柔性传动轴实现与主活门同步作动。VBVB 的限动机构内部丝杠滑块可以限制 VBVB 活门开关行程。

CFM56-5B 发动机 VBVB 的开度计算是通过基于压气机特性图和喘振裕度控制策略，采用查表法 + PID 控制的方式调整。

首先，FADEC 存储了 VBVB 开度调度表(Schedule Table)，根据发动机高压转子转速(N<sub>2</sub>)和压力比(P<sub>3</sub>/P<sub>2.5</sub>)查表得到基准开度(VBVB<sub>Base</sub>)：

$$VBVB_{Base} = f(N_2, P_3/P_{2.5}) \quad (1)$$

其中：N<sub>2</sub> 反映发动机负载；P<sub>3</sub>/P<sub>2.5</sub> 反映压气机的工作状态(接近喘振边界时，VBVB 开度增大)。

其次，计算出修正 VBVB 开度(VBVB<sub>Correction</sub>)，FADEC 实时计算喘振裕度(Surge Margin, SM)，并动态调整 VBVB 开度：

$$VBVB_{Correction} = K_p \cdot (SM_{Target} - SM_{Actual}) \quad (2)$$

其中：SM<sub>Target</sub> 是目标喘振裕度(由发动机模型计算)；SM<sub>Actual</sub> 是实际喘振裕度(由 FADEC 探测得到)；K<sub>p</sub> 是比例增益，防止过度调节。

最后，FADEC 通过基准 VBVB 开度和修正 VBVB 开度相加得到一个指令 VBVB 开度(VBVB<sub>Position</sub>)，用于最终的控制。

$$VBVB_{Position} = VBVB_{Base} + VBVB_{Correction} \quad (3)$$

VBVB 系统作动筒故障代码“VBVB ACT, HMU”的触发逻辑为：在 N<sub>2</sub> 大于 14.5% 情况下，VBVB 的反馈位置与指令位置超过 2.5°，且持续时间超过 4s。

### 4 故障原因分析

CFM56-5 系列发动机 VBVB 系统出现故障的根本原因是：相比于 CFM56-3 发动机的监控型发动机控制，采用了 FADEC 控制后，CFM56-5 发动机对 VBVB 系统的控制精度大大提高。发动机运行的整个过程中，ECU 一直在让 VBVB 指令位置和实际位置(即反馈位置)做闭环控制，不断地对 VBVB 位置进行微调，因此发动机的经济性有了明显提升。但是 CFM56-5 发动机的 VBVB 软轴相对于 CFM56-3 发动机的设计强度没有明显的变化，因此无法承受高强度的工作负荷。通过故障软轴的断面分析可以发现软轴的钢丝结构处有多处微裂纹(如图一所示)，导致传动效率大大降低。VBVB 作动筒长时间高频工作后也会导致内部轴承、丝杠及齿轮等部件磨损，导致作动阻力增大，进一步增加软轴的工作负荷。这两种原因互相叠加，会进一步加剧 VBVB 系统工作环境的恶化。

### 5 监控模型

通过对上述故障的分析可以得知：VBVB 系统出现故障一般都是 VBVB 软轴传动效率降低，导致 VBVB 不能完全关闭，这样就会造压气机的部分压缩空气流入外涵，导致发动机推力下降。为了维持指令推力，FADEC 需要通过增大燃油流量来提高涡轮前温度，从而提高发动机功率。因此，发生 VBVB 系统故障的发动机会出现 N<sub>1</sub>(风扇转速)、EGT 及 FF 上升现象。

表一反映了右发出现了 VBVB 故障后，VBVB 指令位置(VBVB\_DEMAND\_POS)和 VBVB 实际位置(VBVB\_SEL\_POS)的关系。当 VBVB 指令为零(全关位)时而 VBVB 不能完全关闭，最大相差 1.75°，同时右发燃油流量和转速也有相应上升。

表二反映了发生故障时燃油流量和排气温度差值的关系。可以发现相同的推力要求下，故障发动机的 FF 要高出 300-400KG，EGT 也有 50-80℃ 的差值。

通过对故障发动机的相关数据进行筛选并与正常参数进行对比分析，同时结合 VBVB 系统工作原理，可设置以下监控模型。

模型 1，VBVB 不能完全关闭监控模型：选取 VBVB 指令位置和实际位置的 QAR(飞机快速存取记录器)参数；筛选出 VBVB 指令位置为零的参数以及对应 VBVB 实际位置的参数；计算出 VBVB 指令位置与实际位置的差值。

模型 2，EGT 差值偏大监控模型：选取双发 EGT，FF 及 N<sub>2</sub> 的 QAR 参数，并调取 EGT 裕度参数；计算出左右发 EGT 原始差值，FF、N<sub>2</sub> 的差值；通过 EGT 裕度的差值对 EGT 原始差值进行修正。

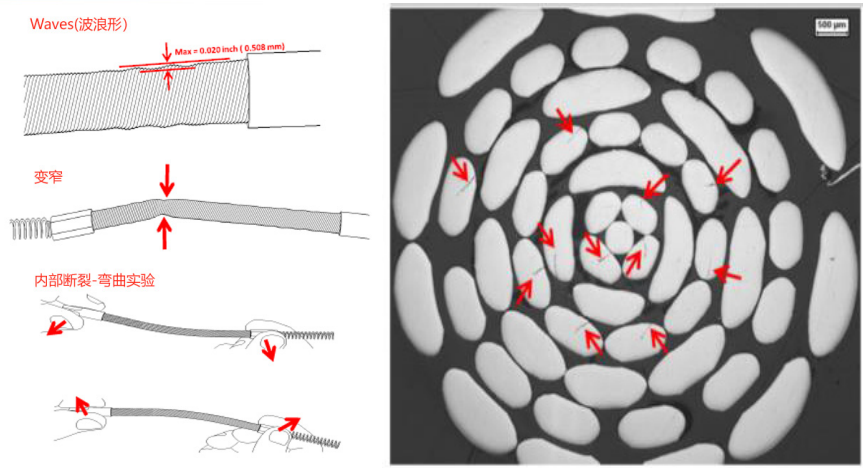


图 1 VBV 软轴的典型损伤和切面微观分析

表 1 故障阶段 VBV 指令位置和 VBV 实际位置的关系

N1_1	N1_2	VBV1_SEI	VBV2_SEI	VBV_DEM	VBV_DEM	FF_1	FF_2	VSV1_SEI	VSV2_SEI	VSV_FDBH	VSV_FDBH	VSV_ISO	VSV_ISO	VSV_POS
83.8	84.7	0.13	1.13	0	0	3144	3340	3340	4.38	0	0	0	0	0
83.5	84.6	0.13	1.13	0	0	3092	3260	4.38	0.88	0	0	0	0	0
83.9	84.5	0	1.13	0	0	3160	3322	4.4	0.29	0	0	0	0	0
84.2	84.9	0	0.13	0	0	3200	3428	3.88	0.25	0	0	0	0	0
84.6	85.3	0	0	0	0	3288	3448	3.88	0.25	0	0	0	0	0
84.6	85.6	0	1.75	0	0	3284	3436	4.4	0.63	0	0	0	0	0
84.3	85.5	0	1.75	0	0	3220	3364	4.25	0.88	0	0	0	0	0
84	85.1	0.13	1.75	0	0	3152	3320	4.38	1	0	0	0	0	0
83.9	84.9	0	1.13	0	0	3200	3308	4.25	0.63	0	0	0	0	0
84.1	85	0	0.13	0	0	3220	3388	4.13	0.5	0	0	0	0	0
84.6	85.4	0	0	0	0	3248	3460	3.75	0.13	0	0	0	0	0
85	85.8	63.88	1.75	0	0	3344	3520	3.63	0.13	0	0	0	0	0
85.1	86.1	63.88	1.75	0	0	3376	3540	3.63	0.13	0	0	0	0	0
85.2	86.2	63.88	1.75	0	0	3368	3536	4.13	0.88	0	0	0	0	0
84.3	85.5	0.13	1.75	0	0	3145	3308	4.5	1.13	0	0	0	0	0
84.2	85.1	0	0	0	0	3140	3312	4.25	0.75	0	0	0	0	0
83.9	85.3	2.13	0	0	0	3060	3220	5	1.75	0	0	0	0	0
83.1	84.2	1.75	0	0	0	2996	3180	4.63	1.38	0	0	0	0	0
83.5	84.3	0.13	0	0	0	3132	3272	4.38	0.88	0	0	0	0	0
83.8	84.7	1.38	0	0	0	3092	3316	5.12	1.75	0	0	0	0	0
83.1	84.5	3.13	0	0	0	2860	3016	5.5	2.5	0	0	0	0	0
81.3	82.7	2.63	0	0	0	2800	2912	5.5	2.5	0	0	0	0	0
81.3	82.3	1.88	0	0	0	2812	2948	5.25	2.13	0	0	0	0	0
81.4	82.3	1.88	0	0	0	2872	3000	5.88	2.13	0	0	0	0	0
81.4	82.4	9.38	0	0	0	2796	2908	6.13	2.88	0	0	0	0	0
79	81.1	6.38	1.13	0	0	2568	2658	4.88	3.5	0	0	0	0	0
78.8	80.1	5.75	1.13	0	0	2658	2640	4.75	3.38	0	0	0	0	0
78.7	79.7	5.13	0.13	0	0	2588	2648	4.75	3.25	0	0	0	0	0
78.8	79.6	4.63	0.13	0	0	2596	2700	5.13	3.25	0	0	0	0	0
78.5	79.7	4.63	0	0	0	2568	2672	5.5	3.38	0	0	0	0	0
78.3	79.4	6.5	1.75	0	0	2536	2628	5.75	3.63	0	0	0	0	0
77.9	79.2	4.63	0.13	0	0	2512	2612	5.25	3.63	0	0	0	0	0
77.9	78.9	5.5	1.75	0	0	2560	2620	5.13	3.5	0	0	0	0	0
78.1	79.1	5.5	1	0	0	2564	2616	5.13	3.38	0	0	0	0	0

表 2 故障阶段左右发燃油流量和 EGT 的变化

N1 Eng 2	N2 eng1	N2 eng2	Fuel flow E	Fuel flow Eng 2	EGT Eng 1	EGT Eng 2 (T 495)
N1_2	N2_1	N2_2	FF_1	FF_2	EGT_1	EGT_2
%	%	%	PPH	PPH	PPH	PPH
84.2	95.19	95.88	7240	7564	324	678
84.3	95.06	95.81	7164	7536	372	683
84.3	95	95.69	7120	7448	328	685
84.4	94.88	95.69	7020	7364	344	685
83.8	94.5	95.25	6860	7180	320	685
83.6	94.44	95.19	6752	7080	328	680
83.7	94.31	95.19	6648	6972	324	679
83.7	94.25	95.13	6558	6896	326	678
83.6	94.25	95.19	6504	6828	324	677
83.7	94.25	95.19	6456	6784	328	675
83.7	94.38	95.25	6412	6736	324	675
83.7	94.31	95.25	6404	6672	268	675
83.8	94.44	95.31	6388	6676	288	676
84.8	94.81	95.88	6544	6884	340	680
85.8	95.13	96.38	6784	7104	320	685
86.5	95.56	96.75	6924	7308	384	690
86.6	95.56	96.81	6908	7296	388	692
86.7	95.63	96.81	6880	7280	400	693
86.8	95.75	96.94	6888	7260	372	695
86.9	95.81	97	6900	7300	400	696
87.1	95.88	97.06	6864	7232	368	697
87.1	96	97.19	6812	7164	352	697
87.3	95.94	97.19	6748	7156	408	700

设置两个模型的阈值，并进行验证：通过对故障数据的分析可以设置出一个判断故障的阈值，但是该阈值能否在其它发动机能够报警以及报警的提前量是否合理，对工程管理人员是个巨大的挑战。随着人工智能技术（AI）的兴起及成熟度的提高，可以把上述模型数据输入到人工智能软件中，让机器调取海量历史 QAR 数据，通过机器不断的重复学习，并进行统计分析，得出一个科学的阈值，提高监控模型的合理性和报警的精准度。通过机器学习与验证，得出如下结论：当 VBV 实际值与指令值相差大于等于 0.6° 时，可断定 VBV 软轴已经产生缺陷导致 VBV 作动筒不能完全关闭；如果 EGT 差值大于等于 60℃，则证明 VBV 系统已

存在严重问题，即 VBV 软轴存在严重问题或 VBV 活门没有完全关闭。

对于单纯的 VBV 开度差值偏大的报警归纳为预测性报警，可以计划性安排在航后执行排故；对于 EGT 差值偏大或同时伴有 VBV 开度差值偏大的报警归纳为实时类报警，应立即安排排故。

## 6 上线验证

该系统在某航空公司上线后，通过近半年的运行，发现多起 VBV 实际位置与指令位置不一致的报警。通过下发并执行排故指令，扑捉到多起 VBV 系统的潜在故障，具体统计如表三所示。

表 3 监控软件运行后捕捉到的部分 VBV 系统故障

监控情况描述	发动机号	故障情况描述	日期	故障点	部件使用时间
VBV 指令与实际位置为 0.8°	ESN645XXX	检查发现 9#、10# 位置软轴有断丝	2023 年 12 月 X 日	软轴	TSN/CSN:11526/5698
左右 EGT 差值为 86°C	ESN573XXX	检查发现 9# 位置软轴松散	2024 年 4 月 X 日	软轴	TSN/CSN:9328/4653
VBV 指令与实际位置为 0.7°	ESN643XXX	检查发现主轴、8#、9# 和 10# 位置软轴磨损	2024 年 11 月 X 日	软轴	TSN/CSN:10382/5512
VBV 指令与实际位置为 0.6°	ESN729XXX	检查发现 2#、3#、4#VBV 放气活门反向驱动力测试不通过	2025 年 2 月 X 日	VBV 放气活门 润滑不良	TSN/CSN:20384/10991, TSO/CSO:8546/4112

## 7 结语

通过对发动机 VBV 系统出现的故障进行收集、归纳，并总结出该系统发生故障的根本原因，从 QAR 数据中找出影响系统工作的关键参数，建立监控模型。后期通过人工智能技术对监控模型进行优化并计算出合理阈值，最终上线运行，通过状态监控和预防维修，解决 VBV 系统的设计缺陷所带来的大量故障。后期需要结合运行数据对监控模型进行

修正和优化，使得预警更为精确、预防维修更为有效。该研究成果适用于所有 CFM56-5 发动机，可推广到其他航空公司，为促进中国民航智慧化维修做出贡献。

## 参考文献

- [1] A319/A320 NEO Aircraft Maintenance Manual. AIRBUS. 2023.
- [2] 王起龙, 基于QAR数据在CFM56-5B发动机燃油泵的状态监控及预防维修, 适航与维修, 2024.1
- [3] 邓君香, 燃气涡轮发动机系统, 西北工业大学出版社, 2024.