

基于飞参数据的双轴涡轮发动机不稳定工作判读方法

罗云鹤, 曾晓洁

(中航贵州飞机有限责任公司, 贵州安顺 561018)

摘要: 为了通过飞参数据研判发动机工作情况,对双轴涡轮发动机工作特性进行分析,并提出一种基于飞参数据的双轴涡轮发动机不稳定工作的判读方法。在双轴涡轮发动机正常工作时,高、低压转子换算转速差和低压转子换算转速之间存在确定的对应关系,通过多次飞参数据分析得以验证。在发动机气动失稳后这种对应关系会改变,可以通过分析换算转速差和换算转速之间的关系来研究发动机不稳定工作状态。将该判读方法应用于某次空中停车故障分析,结果表明:该方法简单易行,使用数据为常用飞参数据,计算工作量小,可以很好地描述发动机不稳定工作的发展历程,与直接判读数据相比,可提前约 20s 发现发动机工作偏离,较为准确地确定诱发原因,并可应用于发动机故障分析及预测。

关键词: 双轴涡轮发动机; 飞参数据; 换算转速差; 换算转速

中图分类号: V231

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.05.001

Instability Detecting Method of a Twin-spool Gas Turbine Engine based on Flight Data

LUO Yun-he, ZENG Xiao-jie

(AVIC Guizhou Aircraft Corporation LTD, Anshun Guizhou 561018, China)

Abstract: In order to detect the working condition of the engine through the flight data, the analysis of the working characteristics of the twin-spool gas turbine engine was carried out, and a method for detecting the instability of the twin-spool gas turbine engine was proposed based on the flight data. There was a definite corresponding relationship between the non-dimensional rotational speed difference of high-pressure and low-pressure rotor and the non-dimensional rotational speed of low-pressure rotor when the twin-spool gas turbine engine worked normally. It was also verified through the analysis of multiple flight data that this corresponding relationship would change after the aerodynamic instability of the engine. The instability of the engine could be studied by analyzing the relationship between the non-dimensional rotational speed difference and the non-dimensional rotational speed. The detecting method was applied in analyzing an engine shut-down in flight. The results show that this method is simple and easy, the data used are common flight data, and the calculation workload is small. It can well describe the development process of engine instability. Compared with the direct detect data, the method can find the moment of departing from steady state 20 s earlier, and the cause can be determined more accurately, which can be applied to engine fault analysis and prediction.

Key words: twin-spool gas turbine engine; flight data; non-dimensional rotational speed difference; non-dimensional rotational speed

0 引言

航空发动机空中停车严重危及飞行安全,对发动机空中停车分析和预防的关键在于对发动机不稳定工作诱因和发展条件的分析和判断^[1]。发动机故障数据多通过地面试验、实验室或仿真获得,使很多研究成果难以对飞行中的发动机故障进行诊断^[2]。飞参数据能够直接反映飞行中发动机工作状态,使用飞参数据可更加真实地研究发动机工作及进行故障预

测。飞参记录数据包括发动机工作参数和飞机的飞行参数,是分析工作的基础,可以实现对发动机工作过程的有效监控^[3],然而目前广泛使用的飞参记录中的发动机工作相关参数少,通常只有油门位置、转速、排气温度及滑油压力等。直接使用飞参数据分析非机械故障发动机空停存在很大困难,尤其发动机工作在慢车等较小状态时,不稳定工作较长时间后才能在转速、排气温度等参数上得到反映,会误导对发动机异常工作诱发原因的判断,不稳定工作发展条件的分

收稿日期:2020-01-09 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:罗云鹤(1972),男,硕士,自然科学研究员,主要从事飞机机电系统、动力装置设计工作;E-mail:1319289140@qq.com。

引用格式:罗云鹤,曾晓洁.基于飞参数据的双轴涡轮发动机不稳定工作判读方法[J].航空发动机,2021,47(5):1-5.LUO Yunhe, ZENG Xiaojie. Instability detecting method of a twin-spool gas turbine engine based on flight data [J]. Aeroengine, 2021, 47(5): 1-5.

析也会存在较大误差,直接影响到空中停车的机理分析和预防措施的准确性。

目前使用飞参数据进行发动机故障诊断研究主要采用基于数据、模型、知识以及相互融合的方法^[4-6]。于建立^[7]制定飞参判据,通过计算机判断常规发动机故障;赵鹏等^[8]利用专家系统人工智能技术开发了飞机发动机故障诊断专家系统,通过发动机状态参数智能诊断实现故障定位。由于发动机工作状态复杂,故障模式多,智能故障诊断具有局限性。李万泉等^[9]采用数字滤波技术对飞参数据进行预处理;高峰等^[10]基于历史飞参数据及飞参数据之间的关系,对发动机转子及传动系统、燃油及操纵系统、滑油系统进行故障预报;李映颖等^[11]应用RBF神经网络基于历史飞行数据建立发动机性能模型,对发动机健康状态进行诊断和预测。以上方法要求发动机模型精确性较高、计算量大、测量的参数较多、飞行环境的一致性较好,实际应用效果不理想。

如何使用较少的飞参记录的参数且能较为准确地分析发动机不稳定工作发展历程是目前迫切需要解决的问题。本文基于双轴涡轮发动机工作特性提出一种适用于该发动机不稳定工作的判读方法,通过对飞参记录的发动机高、低压转子转速处理,并与正常发动机数据进行比较、分析,以期准确地反映发动机不稳定发展历程。

1 双轴涡轮发动机转速差变化特点

现代压气机设计增压比一般较高。低压压气机由低压涡轮驱动形成低压转子,高压压气机由高压涡轮驱动形成高压转子。与单轴涡轮发动机相比,双轴涡轮发动机可以减缓发动机状态改变时压气机前后级之间的不协调。

高、低压2个转子之间虽然没有机械联系,但是在给定调节规律下,2个转子的参数之间存在对应的单值关系,这是由二者之间存在确定的气动联系决定的^[12]。

流过高、低压压气机的空气流量相等,即

$$\frac{q(\lambda_{1.5})A_{1.5}P_{1.5}^*}{\sqrt{T_{1.5}^*}} = \frac{q(\lambda_1)A_1P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} \quad (1)$$

$$q(\lambda_{1.5}) = \frac{q(\lambda_1)A_1}{\pi_{k1}^*A_{1.5}} \sqrt{1 + \frac{\pi_{k1}^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{k1}^*}} \quad (2)$$

对于等熵压缩,式(2)可以简化为

$$q(\lambda_{1.5}) = \pi_{k1}^{*\frac{k+1}{2k}} = \frac{q(\lambda_1)A_1}{A_{1.5}} \quad (3)$$

式中:截面1为低压压气机入口截面;截面1.5为高压压气机入口截面; $q(\lambda)$ 为截面的流量函数; A 为截面积; P^* 为截面总压; T^* 为截面总温; π_{k1}^* 为低压压气机增压比; η_{k1}^* 为低压压气机效率。

从式(2)、(3)中可见,高、低压压气机流通能力相互制约。在确定进口条件下,高、低压压气机 $q(\lambda)$ 与其转速成正比,当低压转速 n_L 确定,其气动函数 $q(\lambda_1)$ 和增压比 π_{k1}^* 也能够确定,所以高压压气机的气动函数 $q(\lambda_{1.5})$ 也唯一确定,高压压气机转速 n_H 也与之——对应。因此对应确定的低压转子转速 n_L 、高压转子转速 n_H 单值确定。

在实际应用中,常用转速差 $\Delta n = n_H - n_L$ 来描述高、低压转速之间的关系。转速差随着发动机状态改变而变化。当低压转速 n_L 降低,其增压比 π_{k1}^* 也随之降低, $q(\lambda_1)$ 相较 $q(\lambda_{1.5})$ 减小更快,对应的低压转速 n_L 也相较高压转速 n_H 降低更快,转速差增加,如图1所示。

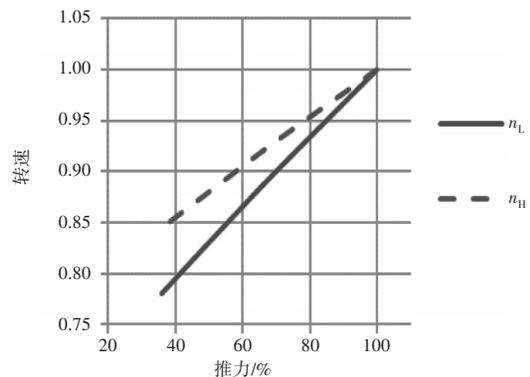


图1 双轴涡轮发动机高、低压转子变化

所以在确定的进口条件下,转速差可与低压转速单值对应,且成反比关系

$$\Delta n = f(n_L) \quad (4)$$

以上分析是在发动机固定几何条件下。当喷口面积改变时,涡轮落压比发生变化,高、低压转子变化关系也将发生改变^[13],如图2所示。

对应于相同的低压转速,在大喷口状态下高压转速低,在小喷口状态下高压转速高,但是对于确定喷口状态,转速差与低压转速仍保持单值对应。

$$\text{最大喷口状态 } \Delta n = f_1(n_L) \quad (5)$$

$$\text{最小喷口状态 } \Delta n = f_2(n_L) \quad (6)$$

$$\text{其他喷口状态 } \Delta n = f_x(n_L) \quad (7)$$

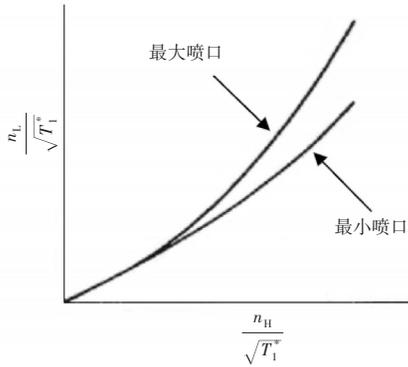


图2 不同喷口状态发动机高、低压转子变化

从以上讨论可知,在确定进口条件下,发动机几何条件相同,双轴涡轮发动机稳定工作转速差与其低压转速单值对应,且成反比关系。

在发动机实际工作过程中,当其转速差-低压转速曲线与相同条件下的正常曲线偏离时,意味着发动机开始偏离稳定工作状态。当高、低压转子转速差减小,意味着高压转子换算转速降低,导致高压压气机进气攻角减小,在低转速、小状态下,攻角减小和转速降低都会导致高压压气机功减小,即高压压气机抽吸能力降低,双转子防喘能力降低,发动机稳定工作裕度降低。偏离在一定范围内,高、低压转子可以根据各自负荷自动调整其转速,使转速差恢复;当转速差偏离较大时,高压压气机抽吸能力降低无法维持发动机正常工作,最终发动机将进入不稳定工作状态。

对于低压转速的确定,随着发动机转速差减小,发动机稳定工作裕度降低。王华青等^[4]研究了转差线上下界限对发动机的稳定性、可靠性和性能的影响。在发动机较小工作状态下或外界扰动较小时,发动机进入不稳定工作通常不是瞬时的,往往要经过一段时间发展才能在发动机工作参数(转速、排气温度等)上有所体现,因此通过分析发动机转速差与低压转速对应关系,可以清晰描述发动机进入气动不稳定工作发展历程,更为准确地确定诱发因素。对于发动机快速进入不稳定工作的情况,如失速机动飞行,飞机姿态变化剧烈,进气畸变严重,由于时间历程较短,诱发因素较为清晰,使用发动机转速差与低压转速对应关系分析的优势则不明显。

2 发动机进口条件修正

在实际飞行中,由于飞行条件的变化,压气机进口条件也将发生改变,影响发动机转速差与低压转速

之间关系,在相同发动机工作状态下,进口条件差异导致对应的转速差不同,给使用转速差判断带来不便。

根据压气机相似准则,当压气机几何、流场和动力相似时,其工作特性将适用于任何进口条件。对于不同飞行条件,如大气温度、飞行高度和飞行速度差异,都可以归结为进气条件 P_1^* 和 T_1^* 的差异,因此使用相似参数描述的发动机高、低压转速差变化特性可以适用于不同飞行条件。

对于同一台压气机或压气机几何尺寸完全相同时,换算到海平面标准大气条件下的参数换算转速 n_{hs} 和换算流量 W_{abs} 可以作为压气机相似准则

$$n_{hs} = n \sqrt{\frac{288.15}{T_1^*}} \quad (8)$$

$$W_{abs} = W_a \frac{101325}{P_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{288.15}} \quad (9)$$

对于双轴涡轮发动机,将低压转速和转速差换算到海平面标准大气条件后,其对应关系就可以适用于发动机几何条件不发生变化时的各种飞行状态,不同几何条件分别适用于不同函数关系

$$\text{换算转速差} \quad \Delta n_{hs} = \Delta n \sqrt{\frac{288.15}{T_1^*}} \quad (10)$$

$$\text{换算低压转速} \quad \Delta n_{Lhs} = n_L \sqrt{\frac{288.15}{T_1^*}} \quad (11)$$

$$\Delta n_{hs} = f_x(n_{Lhs}) \quad (12)$$

从以上讨论中可知,对于仅喷口可调的发动机而言,在喷口状态确定的情况下,双轴发动机稳定工作时 Δn_{hs} 与 n_{Lhs} 之间存在确定的单值对应关系。通过对某型飞机约70架次飞参数据统计分析也可以得出这一结论。对于同一台发动机不同架次飞行,其 Δn_{hs} - Δn_{Lhs} 关系曲线重合性较好,而不同发动机之间的 Δn_{hs} - n_{Lhs} 关系曲线存在一定偏差。

发动机由于非机械原因进入不稳定工作状态,通常会改变 Δn_{hs} 与 n_{Lhs} 之间对应关系,因此通过比较发动机异常工作和正常工作时的 Δn_{hs} 与 n_{Lhs} 关系,能够较好地描述发动机不稳定工作的发展历程。

因此,当双轴发动机发生空中停车后,可以利用飞参记录发动机高、低压转速和大气总温,绘出发动机实际工作过程中 Δn_{hs} 与 n_{Lhs} 关系曲线,并与该发动机稳定工作时 Δn_{hs} 与 n_{Lhs} 关系曲线进行比较、分析,通过换算转速差的偏离可以较好地观察到发动机气动失稳的发展历程。

3 应用与验证

某型飞机配装1台双轴发动机,在高空油门收至慢车位置并保持,此时飞机攻角和侧滑角均较小,逐渐降低高度,飞行马赫数变化较小。根据飞参记录,油门收至慢车20 s后,发动机出现低压转速掉转、高压转速悬挂、排气温度升高等现象,可以判断发动机已进入不稳定工作状态,直至发生空中停车。采用常规的飞参曲线直观分析法^[15]记录的发动机参数变化情况如图3所示。

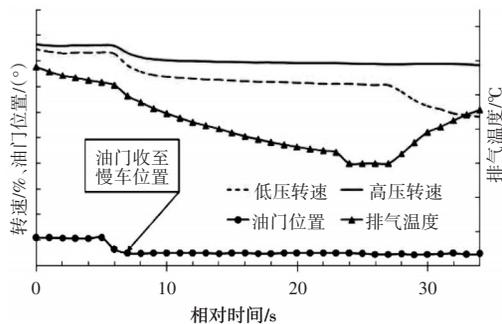


图3 发动机参数变化

根据飞参记录中的发动机工作参数、飞行姿态、马赫数、高度等参数,只能判断出发动机在油门杆收慢车位置20 s后进入不稳定工作状态,但无法判断其诱发原因及发展。

根据飞参记录数据计算高、低压转子换算转速差和低压换算转速,绘出该架次 $\Delta n_{hs}-n_{Lhs}$ 关系曲线;读取该机其他正常飞行架次飞参记录数据,选择发动机喷口状态相同的记录数据计算得到该机其他架次 $\Delta n_{hs}-n_{Lhs}$ 关系曲线,与空停架次关系曲线进行对比,如图4所示。从图中可见,以正常飞行架次 Δn_{hs} 与 n_{Lhs} 关系曲线为基准,在空停架次油门杆收至慢车位置后, Δn_{hs} 已经开始偏离其他架次的基准曲线,且偏离趋势逐渐增大。至20 s后, Δn_{hs} 变化出现明显折

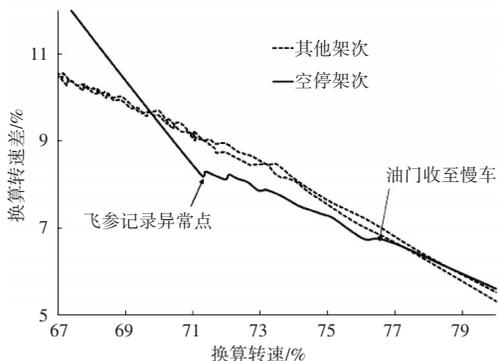


图4 空停与正常飞机架次 $\Delta n_{hs}-n_{Lhs}$ 关系对比

点,与飞参记录的低压转速掉转、高压转速悬挂、排气温度升高时刻相对应。

图4中 $\Delta n_{hs}-n_{Lhs}$ 关系曲线较好地描述了本次发动机不稳定工作的发展历程。油门杆收至慢车、发动机节流是导致换算转速差开始偏离的重要因素,收油门后的工作状态为换算转速差进一步偏离创造了条件,到飞参记录异常点偏离量达到最大,曲线出现明显折点,不再满足发动机气动稳定条件,此时发动机工作参数出现异常,最终导致空中停车。不同发动机包容 Δn_{hs} 偏离量也不相同。

根据以上分析,改变油门杆收慢车时的工作条件或收慢车后的工作条件,可以避免发动机进入气动不稳定工作状态,避免空停发生。飞行马赫数是影响发动机节流和节流后稳定工作的重要因素,为了进一步验证,其他条件保持不变,降低油门杆收慢车时的飞行马赫数,其 $\Delta n_{hs}-n_{Lhs}$ 关系曲线如图5所示。

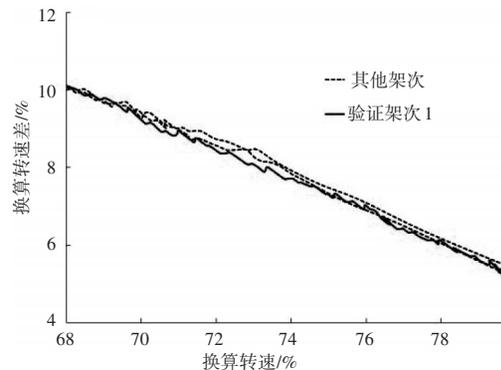


图5 第1次验证架次 $\Delta n_{hs}-n_{Lhs}$ 关系曲线

由于破坏了转速差偏离条件,可见换算转速差未发生偏离,飞参记录参数无异常,发动机工作稳定。

第2次验证飞行,其他条件不变,也未改变油门杆收慢车时工作条件,但是油门杆收至慢车后马赫数较快降低,与空停架次油门收至慢车后马赫数变化情况明显不同,其 $\Delta n_{hs}-n_{Lhs}$ 关系曲线如图6所示。

由于破坏了转速差继续偏离的发展条件,可见 Δn_{hs} 偏离达到空停架次最大偏移量约60%后,逐渐回归,曲线没有出现转折点,飞参记录参数没有反映出异常,发动机工作稳定。

通过以上分析和验证可知,降低收慢车时飞行马赫数或收慢车后飞行马赫数较快降低,均可以避免该机空中停车的发生。

根据以上应用和验证,采用换算转速差-换算转

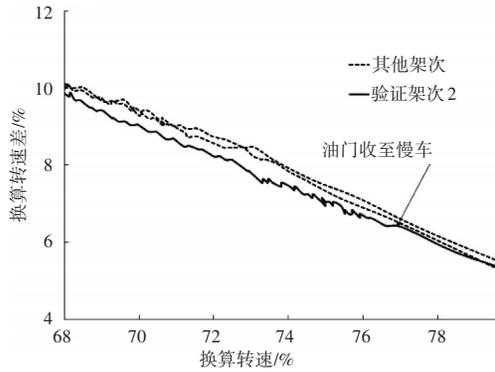


图6 第2次验证架次 $\Delta n_{hs} - n_{Lhs}$ 关系曲线

速比较分析法,能够更加准确地描述出发动机异常工作及其发展历程,特别能够较为准确地找到不稳定工作起始点,较直接使用飞参记录参数分析具有明显优势。通过对发展历程的精确描述,也便于精准、有效地采取防范措施。

4 结束语

本文通过对双轴涡轮发动机工作特性进行分析,提出了换算转速差-换算转速比较分析法,通过对飞参数据的计算分析,较好地描述了非机械故障发动机不稳定工作发展历程,更早地发现发动机工作偏离,可以为空中停车的分析提供依据。该方法简单易行,还可以应用于发动机故障预测,通过机电计算机对测量参数实时比较、分析、告警,可以有效减少空停事故发生。

参考文献:

- [1] 葛忠汉. 飞机发动机空停事件及预防[J]. 航空维修与工程, 2009(1):46-48.
GE Zhonghan. In flight shut-down event and the preventive measure of aircraft engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2009(1):46-48. (in Chinese)
- [2] 李映颖. 基于飞参数据的航空发动机故障诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
LI Yingying. Research of the aeroengine's fault diagnosis based on flight data[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] 蒋支运, 刘杰锋, 文演, 等. 飞机发动机飞行过程监控系统研究与设计[J]. 飞机设计, 2010, 30(4):41-48.
JIANG Zhiyun, LIU Jiefeng, WEN Yan, et al. Research and design on control system of aeroengine in flight course[J]. Aircraft Design, 2010, 30(4):41-48. (in Chinese)
- [4] Tahan M, Tsoutsanis E, Muhammad M, et al. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: a review[J]. Applied Energy, 2017, 198(14):122-144.
- [5] Dimogianopoulos D, Hios J, Fassois S. Aircraft engine health management via stochastic modelling of flight data interrelations[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 16(1):70-81.
- [6] 李业波, 李秋红, 黄向华, 等. 航空发动机气路部件故障融合诊断方法研究[J]. 航空学报, 2014, 35(6):1612-1622.
LI Yebo, LI Qiuhong, HUANG Xianghua, et al. Research on gas fault fusion diagnosis of aero-engine component[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6):1612-1622. (in Chinese)
- [7] 于建立. 航空发动机飞参判据研究[J]. 价值工程, 2012(22):37-38.
YU Jianli. Research of aero-engine flight data criterion[J]. Value Engineering, 2012(22):37-38. (in Chinese)
- [8] 赵鹏, 蔡忠春, 李晓明, 等. 某型飞机发动机故障诊断专家系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12):3850-3852.
ZHAO Peng, CAI Zhongchun, LI Xiaoming, et al. Design of a certain type aero-engine fault diagnosis expert system[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(12):3850-3852. (in Chinese)
- [9] 李万泉, 唐昌盛, 曲建岭, 等. 基于滤波技术的飞参数据预处理[J]. 计测技术, 2008, 28(2):6-8.
LI Wanquan, TANG Changsheng, QU Jianling, et al. Pretreatment of flight data based on digital filtering[J]. Metrology & Measurement Technology, 2008, 28(2):6-8. (in Chinese)
- [10] 高峰, 周胜明, 曲建岭. 基于飞参数据的航空发动机故障预报研究[J]. 测控技术, 2011, 30(5):115-117.
GAO Feng, ZHOU Shengming, QU Jianling. Research on fault forecast of aeroengines based on flight data[J]. Measurement & Control Technology, 2011, 30(5):115-117. (in Chinese)
- [11] 李映颖, 谭光宇, 陈友龙. 基于飞行数据的航空发动机健康状况分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(5):43-46.
LI Yingying, TAN Guangyu, CHEN Youlong. Research on the analysis of physical condition of aero-engines with flight data[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(5):43-46. (in Chinese)
- [12] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005:205-213.
LIAN Xiaochun, WU Hu. Aeroengine principle[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005:205-213. (in Chinese)
- [13] Saravanamuttoo H I H, Rogers G F C, Cohen H, et al. Gas turbine theory[M]. Harlow, UK: Pearson Education Ltd, 2009:502.
- [14] 王华青, 陈懋章. 双轴式涡喷发动机的转差线图确定方法的研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(2):173-177.
WANG Huaqing, CHEN Maozhang. Study on the method establishing the revolution difference map for a two-spool-turbojet engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(2):173-177. (in Chinese)
- [15] 郭朝翔, 袁宏峰. 基于飞参数据的航空发动机状态监控与故障排查[J]. 江苏科技信息, 2019, 16(6):44-46.
GUO Zhaoxiang, YUAN Hongfeng. Condition monitoring and fault diagnosis of aviation engine based on flight parameters data[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2019, 16(6):44-46. (in Chinese)

(编辑:刘 亮)