

某型涡扇发动机加速过程低压转速 N1 下掉问题分析

李文涛

(中国航发沈阳发动机研究所 沈阳 110015)

(联系电话 13940387136 E-mail 315590130@qq.com)

摘要: 本文研究了某型航空发动机加速过程中低压转速 N1 下掉的问题。首先,对发动机及执行机构响应数据的一致性进行对比分析,然后提取了该台发动机的响应特性,最后通过与另外一台无 N1 下掉问题的发动机对比,分析了两台发动机的开环和闭环特性,原因定位在不同发动机间的主燃油对 N1 响应特性存在一定分散度。提取的发动机试车数据中发动机特性调整控制参数可以解决 N1 下掉的问题。仿真试验验证了调整 N1 回路控制参数的方法有效,可以提高发动机多回路控制鲁棒性。

关键词: 涡扇发动机;加速控制;低压转速控制;响应特性

1 引言

由于发动机的工作环境瞬息万变,为保证不超温、不超转,不超出贫、富油极限,同时保证在工作过程中的气动稳定性,发动机的稳定工作很大程度上取决于其良好的控制规律。一个稳定的控制系统应该满足以下几方面的要求:在给定的工作状态下保证发动机的推力特性和耗油率要求;使发动机过渡控制的时间尽可能地短,保证发动机工作安全、可靠,机械和热负荷不超载^[1,2,3,4]。

燃油控制是航空发动机的诸多控制规律中最重要的组成之一,自动调节供入发动机主燃烧室所需的燃油量^[5]。通过对发动机主燃油的自动控制实现发动机慢车及以上正常工作状态下的闭环控制功能和发动机状态限制功能,分为偏差计算、PI 控制器及加减速限制、小闭环控制三个子模块,如图 1 所示。

偏差计算子模块以高压转子转速为主控参数,其设定值随油门杆角度和环境状态变化;该模块同时完成低压转子转速、排气温度、高压压气机出口压力的状态限制,其限制值随环境状态变化。将限制参数换算到主控参数,低选得到等效偏差提供给主燃油 PI 控制器,PI 控制器得出所需的主燃油流量值 $WfDem$,与 N2, T1, P31 通过减速供油线得到的减速时主燃油值 $WfDec$ 和主燃油流量的最小限制值 $WfMin$ 一起通过高选得到所需的主燃油流量值 $WfDem$;利用供油特性 $Lmd=f(Wf)$ 得到所需的主燃油计量活门位移值 $LmDem$,此 $LmDem$ 值进入主燃油小闭环 PID 控制。 Lm 传感器将主燃油计量活门的油针位移值采回来通过 Lm 信号处理电路处理后反馈回去,形成一个小闭环。模块 3 中 N1/N2/T6/P31 传感器及处理电路把发动机的状态参数值采集处理后反馈回模块 1 中参与调节计划,形成一个大闭环。

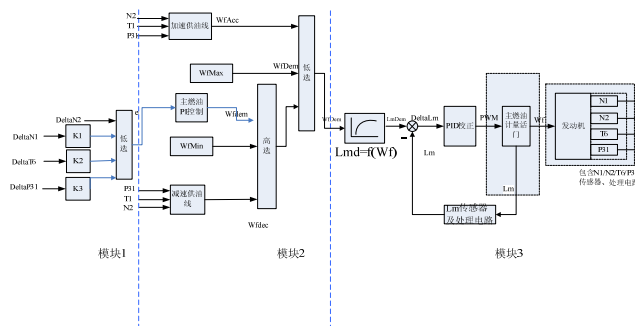


图 1 主燃油控制原理图

2 问题描述

某涡扇发动机在地面试车台试车过程中，从慢车状态到中间状态的加速过程和从慢车状态到最大状态加速过程中，当燃油给定脱开加速线后，低压转速 N1 存在下掉超标情况，慢车到中间状态下掉量约为 3.7%到 3.9%，慢车到最大状态下掉量约为 3.9%到 4.4%左右。

3 原因分析

为分析低压转速下掉的原因，需要统计该台发动机本次上台不同开车次相同控制通道、相同开车次不同控制通道的加速过程 N1 下掉数据。

首先以某次开车中 A 通道与 B 通道的加速过程数据对比统计，图 2 可见双通道之间 N1 下掉、切油线型、D8 作动速度以及发动机的特性(Wfm 到 N1 的传递关系)等几乎一致；主要的差异体现在双通道加速过程按照 WfmAcc 供油时 P31 差异或 WfmDem 与 Wfm 标定差异或 Wfm 伺服跟随差异，但整体差异不大。

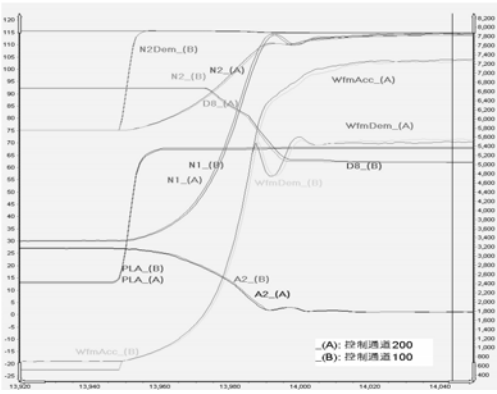


图 2 相同开车次不同控制通道响应一致性对比

然后控制通道为 A 通道维持不变，对比不同两次开车加速过程中 N1 下掉数据，如图 3 所示。两次均为训练状态，控制计划相同，唯一区别在于进口问题 T1 差 6K。不同开车次的进口总温 T1 不同，控制的给定值存在差异，但均采用 A 通道控制情况下，供油规律几乎一致。可见 N1 下掉的规律、切油线型、D8 作动速度以及发动机的特性(Wfm 到 N1 的传递关系)等几乎一致，主要差异是 eN2 及 eN1 不同，相同控制参数下，使得切油深度成比例。

最后，控制通道为 B 通道维持不变，对比不同两次开车加速过程中 N1 下掉数据，结论与 A 通道一致。

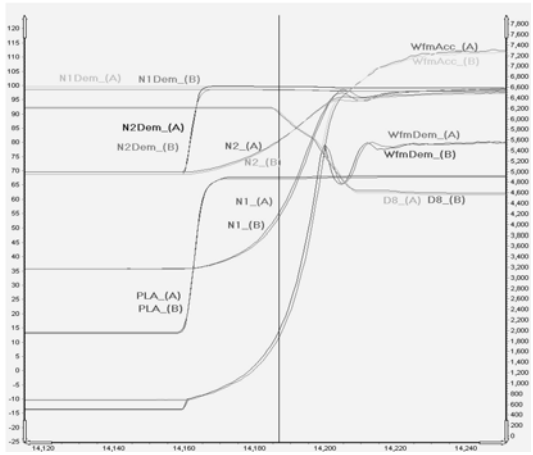


图 3 不同开车次 A 通道控制响应一致性对比

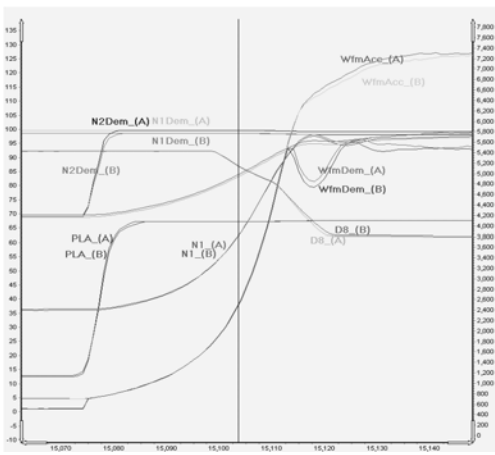


图 4 不同开车次 B 通道控制响应一致性对比

下面对该台发动机进行关键特性提取，结合问题次试车数据以及主燃油控制算法分析 N1 回路的控制性能。

主燃油 Wfm 对 N1 以及 Wfm 对 N2 的关系可以通过 0.1s 的数据近似推算，而且数据需要选择 N1 主控开车次，该台发动机本次装配后 Wfm 对 N1 以及 Wfm 对 N2 的关系一致性较好。图 5 中我们对比了该台发动机实际关系以及该台发动机 eN1 到 eN2 控制参数，发现存在较大差异。

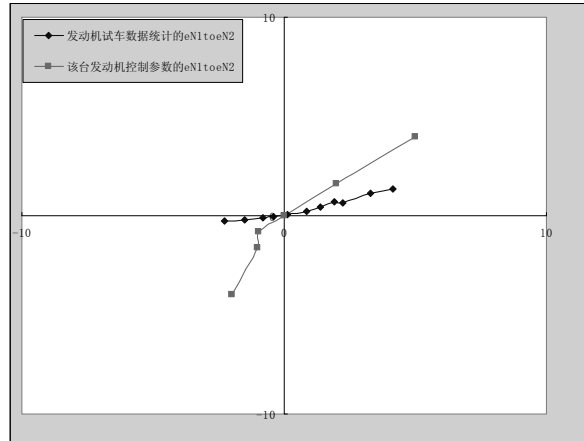


图 5 eN1toeN2 实际关系与控制参数对比

通过上面的分析，故障原因初步定位为控制参数与该台发动机特性不匹配。为了验证我们的分析结论，下面我们将该台发动机试车数据与另一台发动机数据进行开环和闭环对比。

首先进行开环对比，假设发动机转子特性可以简化为：

$$\Delta N1 = \Delta wfm \cdot \frac{Ke_{N1}}{Te_{N1} \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

$$\Delta N2 = \Delta wfm \cdot \frac{Ke_{N2}}{Te_{N2} \cdot s + 1} \quad (3.2)$$

其中，Ke 表示燃油对发动机低压转速的增益，Te 表示燃油对发动机低压转速的时间常数。

在进口相似(T1 差大约 1.3K)情况下，对比关键项 N1 和 N2 相对 Wfm 的幅值特性，开环对比是采用两次试车供油规律调成一致为准则：

在 Wfm_PI 与 WfmAcc 分离前，两台发动机在几乎相同的 ΔWfm 触发下， $\Delta N1$ 与 $\Delta N2$ 几乎相同，此时 D8 可看作 $\Delta Wfm \Rightarrow \Delta N1$ 的干扰项；在 Wfm_PI 与 WfmAcc 分离后，两台发动机在不同的 ΔWfm 输入下出现了不同的响应结果 $\Delta N1$ ，详见图 6 中的 Wfm 分离后的上升段，由于 N1 下掉发动机喷嘴喉道面积 D8 收的慢，该状态下发动机 $\Delta Wfm \Rightarrow \Delta N1$ 的幅值增益较大是与 D8 关联的。

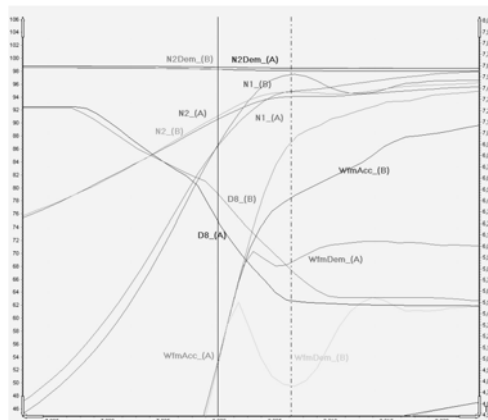


图 6 与另外一台发动机开环对比

下面开展闭环控制比对，我们假设发动机转速特性可以简化为

$$\frac{N1Dem}{N1} = f(PI) \cdot \frac{Ke_{N1}}{Te_{N1} \cdot s + 1} \quad (3.3)$$

可得到

$$\frac{N1Dem}{N1} = \frac{1}{Tm_{N1} \cdot s + 1} \quad (3.4)$$

$$\frac{N2Dem}{N2} = \frac{1}{Tm_{N2} \cdot s + 1} \quad (3.5)$$

其中， Tm 是发动机低压转速回路闭环时间常数。

在进口相似($T1$ 差大约 1.3K)，对比关键项 $N1$ 和 $N2$ 相对 $N1Dem$ 和 $N2Dem$ 的幅值特性，闭环对比是采用两次试车 $N2Dem$ 规律调成一致为准则：

整体看加速时间以及加速过程，发动机的气动特性或伺服特性均有可能存在差异；结合下图的 Lm 跟随特性看，伺服的差异可忽略， Wfm 反馈相对 $WfmAcc$ 的贴合度极为相似，体现出的差异主要来自发动机层面；结合关键特性提取的分析结论，两台发动机的 Ke_{N1} 差异较大，但控制上 $f(PI)$ 仍采用相同的 $dN1todN2$ 控制参数，控制参数与被控对象不匹配才体现出分离加速线后 $N1$ 抢占控制权后的超调+下掉现象。

4 措施及验证

利用 SIMULINK 平台构建一个仿真环境，如图 7，利用试车数据中的给定值以及反馈值以及控制参数，本质上属于控制器根据反馈的开环计算部分，对加速线分离之前的 $WfmDem_PI$ 的计算值有效，我们可以根据 PI 供油的调整可以设计与加速线的分离点。

结合 2 台的发动机特性分析，根据加速过程 $N1$ 转速下掉发动机的 $N1$ 回路特性，调整图 1 中模块 1 的 $N1$ 向 $N2$ 的转换系数 $K1$ 。仿真结果如图 8 显示，调整参数后的趋势会因为 $N1$ 上升高而提前切油，一定程度上实现抑制 $N1$ 的超调和下掉问题。

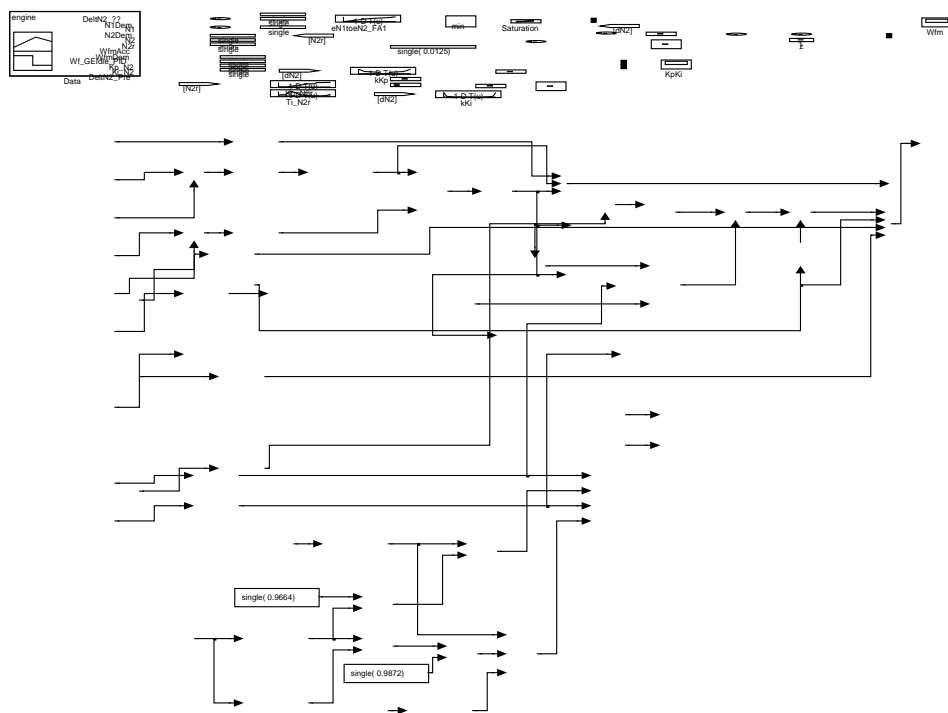


图 7 SIMULINK 仿真平台

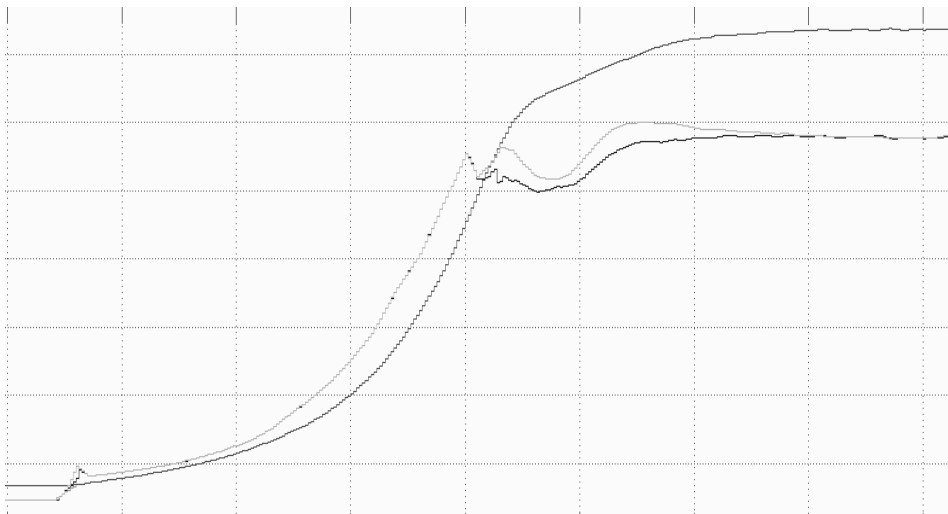


图 8 仿真结果

5 结论

根据研究结果得到，其它型号和台份发动机也存在不同程度的 N1 下降，该类问题不是个体问题，而是共性问题。与另一台发动机开环和闭环分析发现本次装配后发动机供给的主燃油对 N1 响应更敏感，所以加速过程 N1 转速下掉故障的原因是发动机自身特性与控制参数不匹配。通过理论分析调整 N1 回路控制参数可以实现减小 N1 的第一次冲高比例，通过仿真验证，该方法有效改善了 N1 下掉问题。

参考文献

- [1] 樊思齐，航空发动机控制（下册）[M]. 西北工业大学出版社，2008.
- [2] 胡寿宋，自动控制原理[M]. 国防工业出版社，1984 .
- [3] 廉筱纯，吴虎. 航空发动机原理[M]. 西北工业大学出版社，2005.
- [4] 曹惠玲，贾超. 基于 QAR 的民航发动机燃油流量控制规律研究[J].科学技术与工程.2013，13（13），3814-3817.
- [5] 王强，付强. 航空发动机主燃油控制系统稳态过程分析[J]. 科学技术与工程, 2007，7(12)，3028-3030.