

主燃油控制装置出口压力波动仿真研究

答宇晗 杨帅 王涛

(中国航发西安动力控制科技有限公司 陕西 西安 710077)

摘要: 文章针对主燃油控制装置在航空发动机地面台架试车中出现的出口压力波动问题,经理论分析计算,借助 AMESim 仿真软件的频率响应绘制伯德图,得到地面试验工况条件下的带宽频率。通过控制变量法,探究压差执行活门衬套型孔、微动活门衬套型孔、喷嘴大小和微动活门弹簧等因素对燃油调节器带宽频率的影响,并与压力波动工况时的带宽进行比对,据此对主燃油控制装置进行改进优化设计。研究表明:通过增加微动活门型孔尺寸、改变压差执行活门型孔结构,可以解决出口压力波动问题。研究成果可为同类产品的设计、改进和工程排故提供参考。

关键词: 航空发动机; 主燃油控制装置; 压力波动; AMESim 仿真; 带宽频率

0 引言

某型主燃油控制装置是某型涡扇发动机的燃油子系统附件,其功能是根据电子控制器信号调节通往主燃油总管的燃油流量及返回油箱的热回油流量,并实现泵选择及备份、伺服泵后压力控制、定压供油、停车消喘和停车放油等功能。该型主燃油控制装置在发动机地面试验中出现了燃油出口压力波动的问题。针对燃油系统压力波动问题,系统地分析了引起压力波动的因素,通过理论计算,借助 AMESim 仿真软件开展仿真分析,最终找出了关键影响因素,并据此对该型主燃油控制装置进行了优化设计^[1]。

1 主燃油控制装置问题描述与工作原理

1.1 故障描述

某型主燃油控制装置随发动机进行台架试验时,发动机出现转速下降,燃油给定流量上升,主燃油总管、伺服泵离心级进出口、齿轮级出口压力波动范围异常增大等现象,具体情况如下:

在转速为 96.9%,主燃油计量流量给定在 5957.8kg/h 时,稳定工作一段时间后,发动机转速轻微下降,流量给定相应增加约 100kg/h,该过程中燃油系统压力波动范围异常变大,并在之后一直维持异常波动。在转速拉回约 88% 转速时,异常波动消失。后续将增大喷嘴尺寸,更换微动活门弹簧,调整微动活门调整钉伸出高度,再次验证波动点,主燃油计量流量给定在 7214kg/h 时,出现燃油系统压力异常波动,波动幅值下降的现象。

1.2 工作原理

对上述波动现象进行分析判断,压力波动范围异常增大的原因是主燃油控制装置与发动机在特定工况下产

生谐振,导致压力波动^[2]。

根据主燃油控制装置工作原理,压差调节方式为节流式,压差调节功能由微动活门和压差执行活门组成的压差调节机构实现,共同保证计量压差为定值。

微动活门左腔感受计量前压力,右腔感受计量后压力和弹簧力。当计量前后压差大于要求值时,微动活门向右移动,计量前燃油通往压差执行活门控制腔的型孔开度增大,压差执行活门控制腔压力升高,压差执行活门向左移动,减小压差执行活门燃油流道面积,计量后压力升高,使得计量前后压差减小。当计量前后压差小于要求值时,微动活门向左移动,计量前燃油通往压差执行活门控制腔的型孔开度减小,压差执行活门控制腔压力降低,压差执行活门向右移动,增加压差执行活门燃油流道面积,计量后压力降低,使得计量前后压差增大。微动活门弹簧端设有温度补偿片,保证当温度变化时计量燃油质量流量变化符合规定的要求。

2 主燃油控制装置问题分析

主燃油控制装置在随发动机进行台架试验时,在主燃油计量流量 5957.8kg/h 时出现压力波动现象,后续越过该流量点试验时未出现波动。在半物理试验台试验时波动不复现。对主燃油控制装置进行部分调整后,压力波动流量点移动至 7214kg/h。

为分析压力波动问题,建立 AMESim 模型,见图 1,利用 AMESim 中频率响应功能绘制伯德图,当幅频特性下降到频率为零的分贝值以下 3 分贝时,此时对应的频率即为带宽频率^[3]。通过仿真可探究系统压力波动工况下的带宽频率。

根据燃油喷嘴特性要求及波动点工况,在 AMESim 模型中分别绘制 15 项工况下,更换后带宽频率曲线对

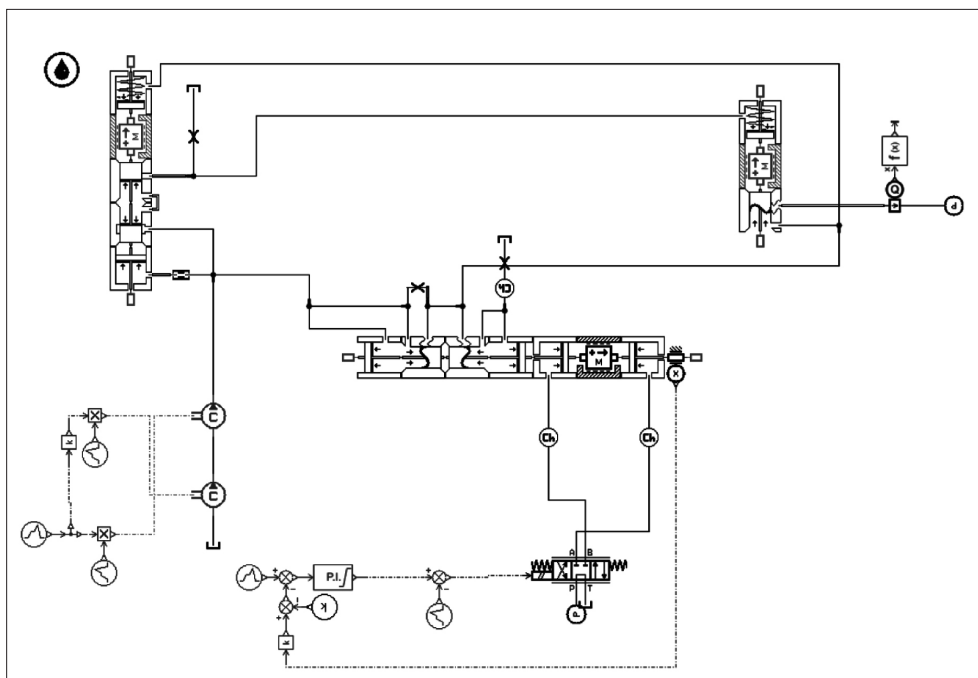


图 1 压差调节机构 AMESim 模型

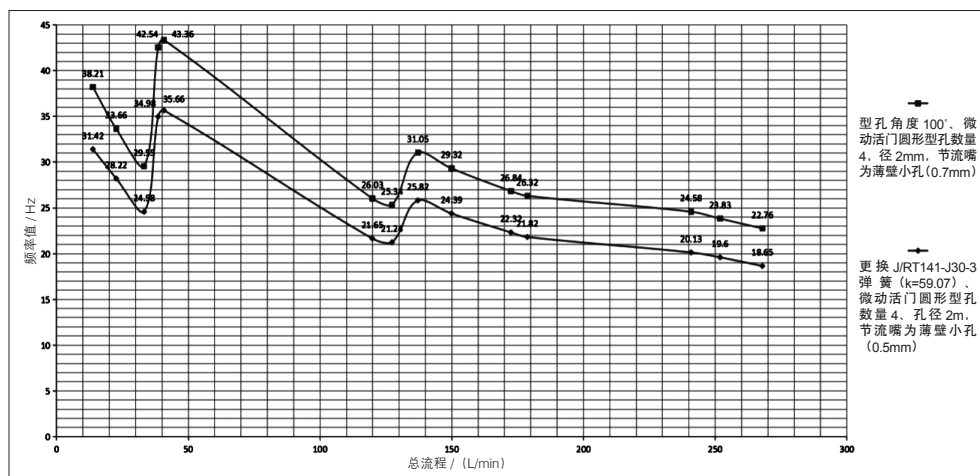


图 2 更换后带宽频率曲线对比

比如图 2 所示。更换喷嘴及微动活门弹簧后，压差调节机构的频率在各个工况下均降低，带宽频率曲线整体趋势无明显变化。喷嘴及微动活门弹簧更换前，试验波动点燃油流量为 5957.8kg/h；喷嘴及微动活门弹簧更换后，试验波动点燃油流量为 7214kg/h，两次波动时带宽频率相近。

结合实际工况分析，主燃油控制装置与发动机的带宽频率随工况变化而变化；在特定状态下，主燃油控制装置与发动机产生谐振，导致压力波动。以上仿真均在进口压力为 13.218MPa 条件下完成。

3 影响分析

依据试验及仿真结果，分析压差执行活门衬套型孔、微动活门衬套型孔、喷嘴及微动活门弹簧等对压差执行

机构带宽频率的影响，使大流量下带宽频率避开谐振区域，可避免压力波动问题。

3.1 压差执行活门衬套型孔对带宽频率的影响

为探究压差执行活门衬套型孔对压差调节机构频率的影响，在 AMESim 模型中将衬套型孔分别更改为 80°、100°、110°。根据主燃油喷嘴特性要求及波动点工况，分别绘制 15 项工况下的伯德图。

在仿真模型中将压差执行活门衬套型孔更换为宽度为 6mm 的方形孔，将其在不同流量时的带宽频率与现有型孔进行对比。方型孔的带宽随流量增大呈规律的单调下降趋势，说明现有型孔对应带宽频率随流量变化的曲线的凸起或下凹与型孔形状有关。

由仿真数据分析可知：

(1) 压差执行活门衬套型孔角度对带宽频率变化有影响；

(2) 压差执行活门衬套型孔角度越小，对应的压差执行活门开度越大，减小衬套型孔角度会减小活门增益；

(3) 现有型孔对应带宽频率随流量变化的曲线的凸起或下凹与型孔形状有关，通过

改变型孔形状可以使带宽频率随流量变化曲线呈单调变化。

3.2 微动活门衬套型孔对带宽频率的影响

为探究微动活门衬套型孔对压差调节机构带宽频率的影响，保持压差执行活门衬套型孔 100° 的条件下，在 AMESim 模型中设置不同尺寸、不同形状的微动活门衬套型孔，根据主燃油喷嘴特性要求及波动点工况，分别绘制 15 项工况下的伯德图。后续设定燃油流量为 5957.8kg/h、执行活门后压差 3.7MPa、主燃油进口压差 13.218MPa，微动活门衬套型孔分别为宽 2mm 的矩形孔与 $\phi 2\text{mm}$ 的圆孔，改变微动活门衬套型孔数量，统计不同型孔数量条件下的波动点带宽频率。

在上述工况下，控制微动活门衬套型孔数量为 4 个，仅改变微动活门衬套型孔尺寸，统计不同型孔尺寸条件

下的波动点带宽频率值,仿真数据显示方型孔频率值大于圆型孔。

由仿真数据分析可知:

(1) 微动活门衬套型孔数量越多,型孔尺寸越大,对应的压差执行活门开度越小,但相同尺寸的圆孔型孔与方形型孔,对应的压差执行活门开度差异较小;

(2) 微动活门衬套型孔数量越多,型孔尺寸越大,对应的带宽频率越高,因矩形孔的起始开度大于圆孔,因此相同尺寸的矩形孔大于圆孔的带宽频率值;

(3) 无论微动活门衬套型孔形式为圆孔或矩形孔,随着微动活门衬套型孔尺寸、数量增加,对应的波动点带宽频率均逐渐增大;

(4) 进口压力升高后,微动活门型孔开度增大,在型孔宽度不变时,需要更大的调节范围才能达到调节目的。

3.3 喷嘴对带宽频率的影响

为探究微动活门下方喷嘴对压差调节机构带宽频率的影响,保持压差执行衬套型孔 100° 条件下,在AMESim模型中设置喷嘴尺寸为0.5mm、0.7mm、1mm的薄壁小孔及细长孔形式的6组不同喷嘴,根据主燃油喷嘴特性要求及波动点工况,分别绘制15项工况下的伯德图。

由仿真数据分析可知:

(1) 喷嘴尺寸越大,对应的带宽频率越高;

(2) 不同喷嘴对应的执行活门开度近似,几乎无差异;

(3) 更换细长孔喷嘴后对应的带宽频率显著降低。

依据仿真结果,细长孔喷嘴可以使单独的主燃油控制装置工作。但此时带宽频率过低,对发动机控制可能存在不利影响,因此不建议将细长孔喷嘴作为改进方向。

3.4 微动活门弹簧对频率的影响

为探究微动活门弹簧对压差调节机构频率的影响,保持压差执行衬套型孔 100° 条件下,选择弹簧 k 值分别为59.1N/mm、40.6N/mm、31.2N/mm、48.7N/mm的微动活门弹簧,在AMESim模型中改变弹簧特性,根据主燃油喷嘴特性要求及波动点工况,分别绘制15项工况下的伯德图。由仿真数据分析可知微动活门弹簧对压差调节机构频率影响较小。

4 改进设计

随着主燃油计量流量升高,主燃油控制装置带宽频率逐渐接近与发动机的谐振频率,导致压力波动。若降低整体带宽频率至谐振频率以下,随着发动机转速升高,发动机频率随之升高,无法避免在某特定工况下与主燃油控制装置产生谐振,导致压力波动的问题;增加现有的带宽频率,可使改进后的压差调节机构带宽频率尽可

能避开与发动机谐振频率区域,避免压力波动。依据压差调节机构对压力波动的影响分析结果,对压差执行机构进行改进设计。

4.1 调整微动活门型孔

通过数据分析可知,增加微动活门衬套型孔尺寸及个数、选择较大直径的薄壁小孔喷嘴可提高现有压差调节机构的带宽频率。根据产品现有试验经验,增大薄壁小孔喷嘴直径,会使稳态流量波动加大,因此不将喷嘴作为改进方向。将目前微动活门衬套 $\phi 2\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的型孔改进为 $\phi 2\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。原波动点的频率由25.34Hz上升至31.66Hz,最小频率状态在最大使用后期,数值为28.54Hz,可避免大流量工况下主燃油控制装置带宽频率与发动机谐振频率接近。

4.2 调整压差执行活门型孔

通过数据分析可知,改变型孔形状可以使带宽频率随流量变化曲线变化。以此作为改进设计依据,设计压差执行活门衬套型孔改进的方案。

选用微动活门衬套 $\phi 2\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的型孔,微动活门下方喷嘴选择0.7mm的薄壁小孔喷嘴,代入仿真模型进行分析。改进后可避开大流量工况下主燃油控制装置与发动机带宽频率相近频率。

5 结语

综上所述,通过增加微动活门衬套型孔尺寸及数量、更换新形式型孔的压差活门衬套,可使改进后的压差调节机构带宽频率避开与发动机谐振频率区域,避免压力波动。在产品的设计时,应考虑主燃油控制装置与发动机的带宽频率是否重叠,充分考虑工程可行性,避免与发动机谐振造成的出口压力波动。

参考文献:

- [1] 崔颖,周振华,吴忠敏.航空发动机加力燃油调节器出口压力波动研究[J].燃气涡轮试验与研究,2019,32(02):56-62.
- [2] 杨俊,郑涛,张澄宇.某型发动机喘振故障及预防措施[C]//北京:中国航空学会第八届航空发动机可靠性学术交流会论文集,2015:709-713.
- [3] 胡寿松.自动控制原理:第六版[M].北京:科学出版社,2013:214-218.

作者简介: 咎宇晗(1994-),男,回族,陕西西安人,本科,工程师,研究方向:机械液压传动系统;杨帅(1993-),男,汉族,陕西延安人,本科,工程师,研究方向:机械液压传动系统;王涛(1997-),男,汉族,陕西咸阳人,本科,工程师,研究方向:机械液压传动系统。