

高温燃油对航空发动机控制系统的影响分析

张东辉

(中航工业动力控制系统研究所, 江苏无锡 214063)



张东辉(1973), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航空发动机数控系统和燃油系统的设计工作。

收稿日期: 2012-06-26

摘要: 随着新一代飞机性能的提高, 燃油成为飞机的主要热沉, 承担巨大的散热压力, 导致发动机进口燃油温度大幅提高。为了保证发动机控制系统在高温燃油环境下的控制品质和工作可靠性, 针对高温燃油的特性变化对发动机控制性能的影响进行了分析, 同时分析了高温燃油对液压机械装置、电气元件和发动机滑油系统的影响, 给出了燃油温度限制的参考值。研究结果表明, 必须对燃油温度进行限制才能保证发动机控制系统在高温燃油环境下正常工作。

关键词: 燃油特性; 高温; 控制品质; 散热能力; 控制系统; 航空发动机

Influence of High Fuel Temperature on Aeroengine Control System

ZHANG Dong - hui

AVIC Aviation Motor Control System Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China

Abstract: With the performance enhancing of new generation aircraft, the fuel undertakes tremendous heat exchange task, which is becoming the primary heat sink of aircraft. It results in substantial increase of temperature in engine fuel entry. To ensure the control quality and operational reliability of engine control system in the high fuel temperature circumstance, the effect of the characteristic variation of high fuel temperature on the engine control performance was analyzed, and its influence on the hydraulic machinery device, electric elements and engine oil system was also investigated. The reference value of temperature limitation was obtained. The results show that the fuel temperature of aeroengine should be limited to ensure the control system of engine operating properly.

Key words: fuel characters; high temperature; control quality; heat exchange capacity; control system; aeroengine

0 引言

随着现代军事技术的飞速发展, 机载电子设备不断增多, 发热量不断增大, 如在第 3 代战斗机中, Su-27 和 F-18 战斗机的电子舱热载荷分别为 18、19 kW, 而作为第 4 代战斗机代表的 F-22 有 2 个电子舱, 总设计热载荷达到 55kW。随着热载荷的增大, 传统的空气循环制冷系统 ACS(AirCycleSystem)很难冷却这些电子设备。另外, 随着飞机战斗性能的提高, 飞机的载油量也大大增加。某型飞机 1 次载油量可达数吨, 利用燃油作为冷源的优点(如燃油在所有飞行状态下温度较稳定、不影响飞机的隐身性能、代偿损失小等)日益引起重视。特别是当飞机在大马赫数下飞行时, 以燃油作为冷源将会大大减小对飞机气动外形的影响, 提高飞机的隐身性能。因此, 在高性能战斗机

中, 燃油凭借其在飞行初始阶段高储存量及其高比热的优点, 被用作主要的储能和热沉媒质。然而, 在吸收飞机各系统热量后, 随着燃油温度的升高, 发动机控制系统的功能和性能必将受到较大影响。

本文从几方面分析高温燃油对发动机控制系统的影响, 以初步确定发动机控制系统对燃油温度的限制值。

1 温度升高对燃油特性的影响分析

随着温度的升高, 燃油本身的特性发生改变, 与发动机控制系统相关的变化参数有密度、运动黏度、饱和蒸汽压、橡胶相容性和热安定性。

1.1 密度

燃油密度随温度的变化情况见表 1。

分析表 1 中数据可知, 随着燃油温度的升高, 燃油的密度减小, 供给发动机的质量流量发生变化, 发

动机控制系统只能通过温度补偿的方式对燃油流量进行修正,当燃油温度变化范围较大时,会给发动机控制系统的温度补偿带来较大困难,如果补偿不充分会造成在发动机开环控制阶段(如在启动和加减速过程)易出现贫油和富油的情况。在某型发动机使用过程中,曾经由于温度补偿无法兼顾低温状态而发生冷天发动机启动悬挂的故障。

表 1 不同温度下的燃油密度					
温度 /	密度 / (kg/m³)				
	新疆 RP-1	胜利 RP-1	大庆 RP-2	大庆 RP-3	大庆 RP-4
-40	826.0	832.4	822.8	824.2	814.0
-30	818.5	824.9	815.4	816.8	806.5
-20	811.0	817.4	808.0	809.4	799.0
-10	803.5	809.9	800.6	802.0	791.5
0	796.1	802.3	793.2	794.6	783.8
10	788.5	794.7	785.7	787.1	776.2
20	780.9	787.1	778.2	779.6	768.2
30	773.3	779.5	770.7	772.1	761.3
40	765.7	771.8	763.1	764.6	754.0
50	757.9	764.1	755.5	757.0	746.5
60	750.3	756.4	747.9	749.4	739.0
70	742.7	748.7	740.3	741.8	—
80	735.0	740.9	732.6	734.2	—
90	727.3	733.1	724.9	726.5	—
100	719.6	725.3	717.2	718.8	—
110	711.8	717.4	709.5	711.1	—
120	704.0	709.5	701.8	703.4	—

1.2 运动黏度

燃油运动黏度随温度的变化见表 2。

在流体动力润滑过程中,1 层由液体润滑剂构成的膜分开了相对运动的固体表面,使其免于相互接触。黏度较大的液体比黏度较小的液体更容易形成液膜,因此流体动力润滑性更好^[4]。分析表 2 中的数据可知,随着燃油温度的升高,燃油的运动黏度减小,使发动机控制系统执行机构的流体动力润滑性变差,并导致燃油的泄漏量增加,降低了控制系统的可靠性。

1.3 饱和蒸汽压

燃油的饱和蒸汽压随温度的变化见表 3。

分析表 3 中的数据可知,随着温度的升高,燃油的饱和蒸汽压随之增大,当燃油系统内压力低于燃油饱和蒸汽压时,由于燃油汽化而导致燃油流量减小或

中断,造成气塞。

表 2 不同温度下的燃油运动黏度								
温度 /	运动黏度 / (mm²/s)							
	新疆 RP-1	胜利 RP-1	大庆 RP-2	大庆 RP-3	大庆 RP-4	任丘 RP-5	混输 RP-5	孤岛 RP-6
-40	5.52	4.70	5.69	5.84	4.31	11.30	—	26.10
-30	3.97	3.52	4.23	—	—	—	—	—
-20	3.12	2.74	3.16	3.27	—	—	5.38	—
-10	2.46	2.21	2.62	—	—	—	—	—
0	2.01	1.84	2.03	2.14	—	—	—	—
10	1.68	1.54	1.74	—	—	—	—	—
20	1.42	1.32	1.45	1.48	1.27	2.02	—	3.10
30	1.23	—	1.27	—	—	—	—	—
40	1.08	1.01	1.11	—	—	—	—	—
50	0.96	—	1.00	—	—	—	—	—
60	0.86	0.81	0.88	0.89	—	—	—	—
70	0.79	—	0.80	—	—	—	—	—
80	0.71	0.68	0.74	—	—	—	—	—
100	0.60	0.59	0.62	—	—	—	—	—
120	0.52	0.51	0.52	0.53	—	—	—	—

表 3 不同温度下的燃油饱和蒸汽压				
温度 /	饱和蒸汽压 / kPa			
	新疆 RP-1	胜利 RP-1	大庆 RP-2	大庆 RP-3
30	5.25	4.97	5.20	4.25
40	6.21	5.93	5.96	6.00
50	7.46	7.17	6.92	8.00
60	9.14	8.80	8.20	10.40
70	11.45	10.98	9.92	13.60
80	14.73	13.96	12.33	17.00
90	19.52	18.12	15.94	21.60
100	25.25	23.66	20.54	26.66
110	32.55	30.69	26.39	32.79
120	41.82	39.56	33.89	39.99
130	53.52	50.68	43.46	47.99
140	68.28	64.53	55.49	—
150	86.78	81.67	70.82	—

1.4 橡胶相容性

橡胶相容性指燃油与橡胶长期接触而使橡胶质量发生变化的情况。随着燃油温度的升高,橡胶件的耐油系数减小,见表 4^[3]。燃油与橡胶不相容将导致橡胶硬化,失去弹性、变形,在机械力的作用下出现裂纹,引起密封件漏油,使发动机控制系统不能正常工作。

表 4 不同温度下的燃油橡胶相容性

燃料牌号	耐油系数	
	120	150
新疆 RP-1	—	0.63
胜利 RP-1	0.89	0.48
盘锦 RP-1	0.90	0.53
大港 RP-1	—	0.42
大庆 RP-1(加氢裂解)	—	0.32
潜江 RP-1(加氢精制)	0.93	0.65
大庆 RP-2	0.91	0.76
南阳 RP-2	0.95	0.59
玉门 RP-2	0.88	0.71
长庆 RP-2	0.90	0.70
大庆 RP-3	0.93	0.65
大港 RP-3	0.86	0.41
胜利 RP-3(加氢精制)	0.94	0.69
孤岛 RP-6	—	0.32

1.5 热安定性

当燃油处于高温时会趋向于氧化并形成胶质和颗粒物,燃油吸收的热量加速了胶质的生成和颗粒物的化学反应,对发动机产生以下影响:

(1)沉积在燃油过滤器上,增加过滤器压降,减少燃油流动;

(2)沉积在燃油喷嘴上,导致喷嘴结焦堵塞,影响供油和喷雾质量;

(3)沉积在液压机械装置的活门间隙中,严重时会使卡死调节活门并中断供油;

(4)沉积在燃油散热器上,降低热交换效率,使发动机滑油温度提高。

温度对燃油沉淀量的影响如图 1 所示^[9]。加入热安定型添加剂可以提高燃油的热安定性。

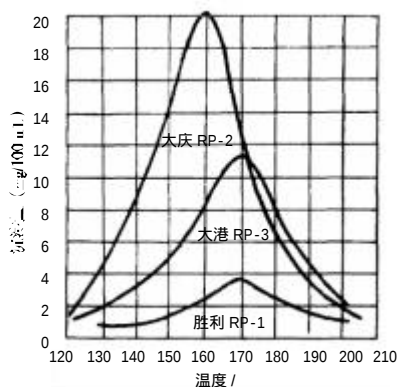


图 1 温度对燃油沉淀量的影响

2 高温燃油对液压机械装置的影响分析

高温燃油对液压机械装置的影响主要体现在对燃油泵特性的影响和对液压机械装置可靠性的影响。

2.1 对低压离心泵气蚀特性的影响

航空燃油中都含有一定的溶解空气,当油液压力降低到某一值时,空气就从油液中分离出来形成气泡,若压力继续降低到相应温度的饱和蒸汽压时,油液将沸腾汽化产生大量气泡,这 2 种产生气泡的现象均称为气穴。液压系统发生气穴,气泡随油液流至高压区后,在高压作用下迅速破裂,产生局部液压冲击,使压力和温度急剧升高,同时油液中逸出的气体具有较强的酸化作用,长时间作用下可使零件表面发生腐蚀,这种因气穴造成的腐蚀称为汽蚀。

随着温度的升高,燃油的饱和蒸汽压随之变大,当燃油的饱和蒸汽压高于燃油系统进口最低压力时,低压离心泵进口燃油发生汽化,使低压离心泵发生气蚀。

为确保燃油不发生沸腾或燃油系统在温度升高时不形成汽塞,通常限制发动机进口燃油温度不高于 93℃。

2.2 对高压齿轮泵效率的影响

随着燃油温度提高,燃油黏度和润滑性大大减小,使高压齿轮泵内部的泄漏量变大,导致泵的容积效率降低,对某型高压齿轮泵试验数据统计表明,燃油温度每提高 30℃,齿轮泵效率约降低 10%。

2.3 对液压机械装置可靠性的影响

燃油温度提高对液压机械可靠性的影响体现在以下几方面:

(1)引起热膨胀系数不同的运动副之间间隙变化,变小时会造成元件“卡死”,失去工作能力,变大会造成泄漏增加;

(2)使油液形成胶状物质,并在物体局部过热的表面上形成沉积物(残渣),堵塞元件小孔和缝隙,使之不能正常工作;

(3)铝合金壳体长期处于 120℃ 时,其抗拉强度较常温 20℃ 时的降低 13% 左右,从而降低了产品的抗压力冲击能力;

(4)加速密封圈、密封胶料、密封剂等非金属材料的老化,使可靠性和寿命大大降低。

根据美国海军水面作战中心 2006 年发行的《机械设备可靠性预计程序手册》,在典型的液压机械装

置式活门衬套的失效率统计数据中,工作介质温度变化时对失效率系数 C_v 的影响见表 5。

表 5 温度对活门衬套失效率系数 C_v 的影响					
介质	温度/益				
	-45	-18	10	38	65
空气	554.0	503.4	462.9	430.1	402.6
氧气	504.6	457.8	420.6	390.2	365.9
氮气	580.0	528.0	486.5	452.6	424.3
二氧化碳	—	—	0.7	0.8	0.9
水	—	—	6.31	12.15	19.43
10# 滑油	—	—	0.06	0.25	0.75
20# 滑油	—	—	0.031	0.167	0.492
30# 滑油	—	—	0.0297	0.1129	0.3519
40# 滑油	—	—	0.0122	0.0534	0.2462
50# 滑油	—	—	0.0037	0.0326	0.1251
90# 滑油	—	—	0.0012	0.0189	0.0973
燃油	0.1617	0.7492	2.0890	3.8470	6.2280
MIL-H-83282	0.0031	0.0432	0.2137	0.6643	1.4210
MIL-H-5606	0.0188	0.0951	0.2829	0.6228	1.1080

介质	温度/益			
	93	121	149	176
空气	379.4	359.5	—	—
氧气	343.6	325.3	—	—
氮气	400.0	379.6	—	—
二氧化碳	0.9	—	—	—
水	27.30	—	—	—
10# 滑油	1.69	2.65	—	—
20# 滑油	1.183	2.213	2.861	5.204
30# 滑油	0.8511	1.7680	2.8610	4.3090
40# 滑油	0.6718	1.3250	2.2210	3.3870
50# 滑油	0.3986	0.8509	1.6570	2.6540
90# 滑油	0.3322	0.7855	1.5150	2.5910
燃油	9.1690	12.7800	16.3100	—
MIL-H-83282	2.5850	4.0630	6.1140	7.7660
MIL-H-5606	1.7830	2.7190	3.6280	4.8800

3 高温燃油对电气元件的影响分析

随着燃油温度的升高,发动机控制系统中与燃油接触的电气元件(如电液伺服阀、电磁阀、LVDT)的特性随之变化,从而对发动控制系统造成不利影响。

3.1 电液伺服阀

作为发动机控制系统的电液转换装置,电液伺服阀的性能直接影响发动机控制系统的控制精度,随着

燃油温度的升高,电液伺服阀的性能变差。对某型发动机控制系统使用的电液伺服阀进行温度试验得到的结果见表 6。从试验结果看,随着燃油温度的升高,电液伺服阀的零位漂移、额定流量、分辨率、滞环、内漏、频率特性、滑阀剪切力各项性能均有不同程度的下降,从而导致发动机控制系统的控制精度变差。

表 6 燃油温度对电液伺服阀特性的影响

参数	25	130
零位漂移 /%	±4	±8.5 ~ ±12
额定流量 /%	±10	±28
分辨率 /%	1	2
滞环 /%	2	6
内漏 /(L/min)	0.6	1.4
频响特性 /Hz	40	30
滑阀剪切力 /N	8.23	7.82

3.2 电磁阀

发动机控制系统中的电磁阀通常用于实现主备份通道切换、消喘、停车等功能,随着燃油温度的升高,电磁阀的线圈电阻增大,导致电磁阀的最低工作电压升高,对某型发动机控制系统使用的电磁阀进行温度试验得到的结果见表 7。从试验结果看,随着燃油温度的升高,电磁阀的最低工作电压升高,使电磁阀存在无法正常工作的隐患,降低了发动机控制系统的可靠性。

表 7 燃油温度对电磁阀特性的影响

参数	20	100	145
电阻值 /Ω	50	66	75
最低工作电压 /V	18	22	25

3.3 LVDT

发动机控制系统中的 LVDT 用于测量计量活门、伺服动作筒等重要控制变量的位置,与电子控制器、电液伺服阀共同构成闭环控制回路。随着燃油温度的升高,LVDT 的温漂使其精度变差,选取同批次的 2 台 LVDT 产品进行温度试验,其试验结果如图 2、3 所示。从试验结果看,随着温度的升高,LVDT 的精度变差,且同批次产品具有一定的差异性,很难进行精确的温度补偿。

4 高温燃油对发动机滑油系统的影响分析

航空发动机的滑油系统通常采用燃油对滑油进行冷却,随着燃油温度的升高,对滑油的冷却效果变差,使滑油的温度随之升高。

航空发动机常用 4106 合成航空润滑油或 4050 高温合成航空润滑油,其使用工作温度为 -40 ~ 200 ,短期可达 220 ,通过发动机燃油滑油散热器用燃油

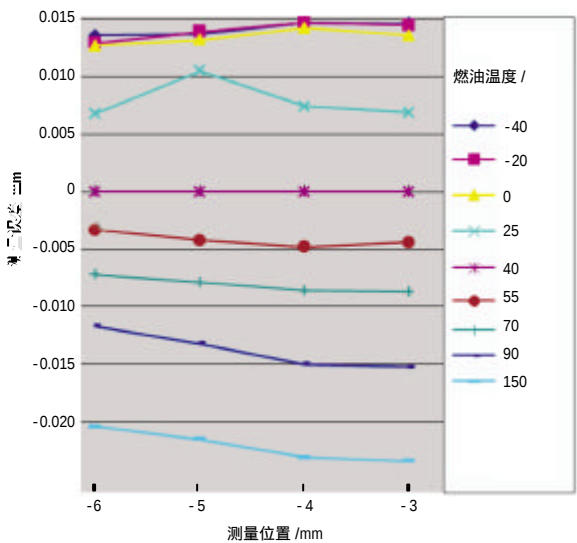


图 2 不同燃油温度下的 LVDT 测量精度(产品 a)

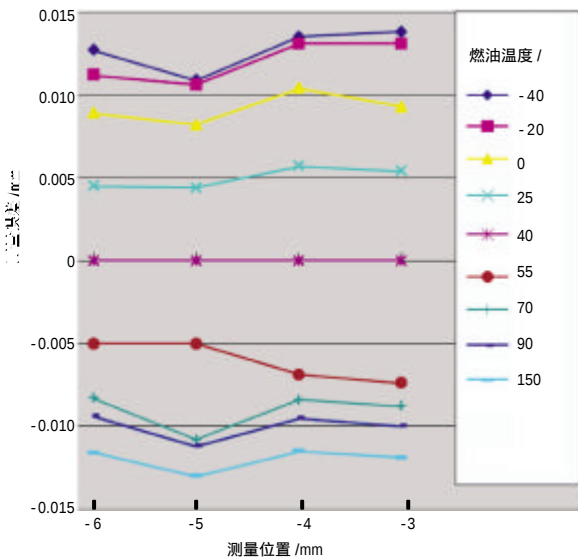


图 3 不同燃油温度下的 LVDT 测量精度(产品 b)

对滑油进行冷却。为了使发动机各轴承腔燃油温度特别是滑油后腔回油温度不超过 220 的限制值,通常控制燃滑油散热器出口的滑油供油温度不超过 150,因此应限制燃滑油散热器出口的燃油温度不超过 150,否则燃油无法对滑油进行有效散热。

5 对燃油温度的限制要求

根据以上分析结果,对发动机燃油温度的限制应包括对发动机进口和燃烧室喷嘴前的燃油温度限制,其目的分别为防止低压增压泵出现气蚀和防止燃油喷嘴结焦。

对发动机进口燃油温度的限制应根据飞机向发动机供给燃油的最低压力和低压增压泵的最小流量确定,若发动机控制系统不具备向飞机油箱旁路回油

的功能,则发动机进口燃油温度一般不超过 93。对带有旁路回油的发动机控制系统,由于旁路油路增加了低压增压泵的燃油流量,发动机进口燃油温度限制值可适当提高,但最高不能超过 110。

对发动机燃烧室喷嘴前燃油温度的限制应根据所选燃油的氧化沉积结焦温度确定,文献[5]中规定:燃烧室燃油喷嘴处的最大燃油温度不得超过 177,否则将发生喷嘴焦化。而在 JSSG-2007B《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机联合使用规范指南》中指明:当燃油温度达到 149~177 时将会出现稳定性问题,引起沉淀和喷嘴性能迅速恶化。

6 结论

随着发动机燃油温度的升高,燃油本身的特性发生变化,使发动机控制系统的控制精度和可靠性降低,且燃油对滑油系统的冷却效率大大降低。为了保证发动机控制系统的控制性能,并能给发动机滑油系统有效散热,应对发动机燃油系统的燃油温度进行限制,通常应限制发动机燃油的最高温度不超过 150,以保证发动机在可靠工作的同时以最大能力承担飞机的散热任务。

参考文献:

- [1] 高峰,袁修干.高性能战斗机燃油热管理系统[J].北京航空航天大学学报,2009,35(11):1353-1355.
GAOFeng,YUANXiugan.Fuel thermalmanagementsystem of high performance fighter aircraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2009,35 (11): 1353-1355.(in Chinese)
- [2] 徐志英,庄达民.飞机燃油系统热管理研究[J].航空动力学报,2007,22(11):1833-1836.
XU Zhiying, ZHUANG Damin. Research of heat management for aircraft fuelsystem[J].Journal of Aerospace Power,2007,22 (11):1833-1836. (inChinese)
- [3] 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册(第6卷)橡胶、密封剂、燃料及润滑材料[M].北京:中国标准出版社,1989:369-406.
Chinese Aeronautical Materials Handbook Commitment. Chinese Aeronautical Materials Handbook 6, rubber, sealant, fuel, lube [M]. Beijing: Standards press of china, 1989: 369-406. (in Chinese)
- [4] 付伟,李明,陶志平编.世界航空燃料规格及进展[M].北京:中国石化出版社,2011:12-34.
FU Wei,LIMing,TAOZhiping.Worldaero (下转第 29 页)