

起动闭环供油系统原理验证

杨奔¹ 崔利丰¹ 冯力¹ 徐鑫² 王日平¹

(1.中国航发沈阳发动机研究所 沈阳 110015)

(2.中国航发控制系统研究所 无锡 214063)

(联系电话 13236606676 E-mail dlutbuaa@126.com)

摘要：针对某型发动机机械液压式控制系统在起动过程中暴露的高低温不兼容，高、低海拔不兼容问题提出了基于转速上升率的起动闭环控制方式，本文对此种控制方式进行了试车验证，总结分析试车数据后，根据试验过程中暴露的问题，提出了改进设计建议，为后续的优化设计提供思路和理论依据。

关键词：机械液压式控制系统；闭环起动；转速上升率

1 引言

某型发动机采用机械液压式控制系统，起动控制考虑了对大气温度、海拔高度的修正，但由于主燃油泵调节器起动供油精度较低，导致非标准大气温度下主燃油泵调节器起动供油与发动机工作特性不匹配，不能兼容高、低温起动；不能兼容高、低海拔起动。为了解决上述起动问题，借鉴某型发动机全权限数字电子控制系统的研制经验，提出在基于机械液压式控制系统的发动机起动过程中采用基于转速上升率的起动闭环控制。

本文对基于机械液压式控制系统的起动闭环控制进行了试车验证，根据试验过程中暴露的问题，提出了改进设计建议，为后续的优化设计提供思路和理论依据。

2 改进方案原理

2.1 某型发动机数控系统的闭环起动

某型发动机采用基于转速上升率的起动闭环控制，以转子转速上升率（ \dot{N} ）作为被控制变量，实现对主燃油流量的控制，以此来获得期望的转速速率变化，使得发动机在起动包线内的任意一点都有良好的动态特性。

为消除静差或跟踪误差，满足转速速率控制精度，在 \dot{N} 控制回路中采用纯积分控制，通过对主燃油回路的小闭环的快速控制（即通过调整占空比实现对计量活门控制）来实现大闭环状态下发动机转速变化率 \dot{N} 的精确、快速控制，同时数字式电子控制器中 PI 的参数应根据变化的发动机状态可调，见图 1。

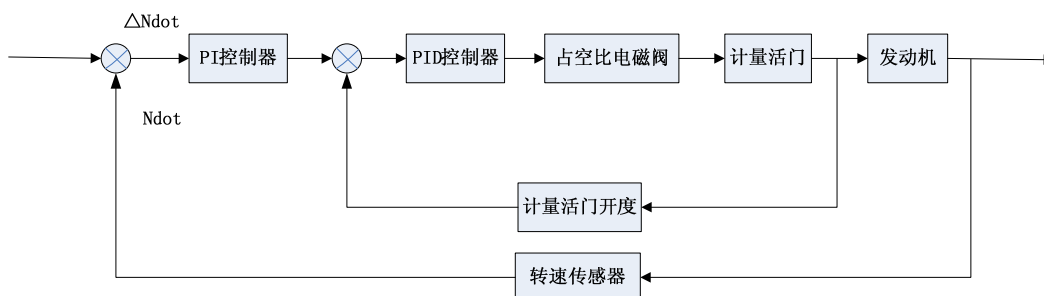


图 1 转速上升率控制器设计图

2.2 某型发动机机械液压式控制系统的闭环起动改进

由于某型发动机为机械液压式控制系统，与某型发动机数控系统的主燃油流量控制方式有所不同。受现有机械液压式发动机控制系统主泵结构限制，无法完全按照数控系统的思路进行闭环起动。

结合机械液压式发动机控制系统现有状态，在不改变机械液压式控制系统主泵现有结构的前提下，增加一个产品：补油装置，目的是对主燃油流量进行修正。

2.3 补油装置的工作原理

起动补油装置由补油油嘴、层板节流器、起动计量控制阀、断电放油阀、定压活门等组成，作用是在起动供油时将齿轮泵的泵后油引入起动装置补油装置，采用起动计量控制阀（占空比阀）对油量进行控制，从而对计量开关流量进行修正，起动计量控制阀设置的占空比可调范围为 20%~80%（理论值），补油流量范围为-50kg/h~+50kg/h（理论值），该装置原理图如图 2 所示。起动计量控制阀（占空比阀）的控制依据控制器的数学模型，当 n_2 转速达到 40%（试验修正后）时，至高压换算转速 n_{2r} 到 75%（暂定，试验修正后）之间进入起动闭环控制，HM12（补油装置断电放油阀）、S14（补油装置起动计量控制阀）于投入工作（S14 初始值=50%，HM12=28VDC），整个控制过程为转速上升速率闭环控制。

补油装置不工作时，断电放油阀保持接通，起动计量控制阀保持断开，通过层板及油嘴设计，使补油油嘴的流量全部通过放油油嘴和层板进行回油，此时有关系式：层板流量+放油油嘴流量=补油油嘴流量。计量后油量不变。

补油装置工作时，断电放油阀保持断开，补油油嘴的流量通过起动计量控制阀和层板进行回油。当占空比为 50%时，此时有关系式：层板流量+50%占空比下流量=补油油嘴流量；当占空比小于 50%时，补油装置处于补油状态，增加计量燃油的流量，此时有关系式：补油油嘴流量-层板流量-该占空比下流量=补油流量；当占空比大于 50%时，补油装置处于放油状态，减少计量燃油的流量，此时有关系式：补油油嘴流量-层板流量-该占空比下流量=放油流量。

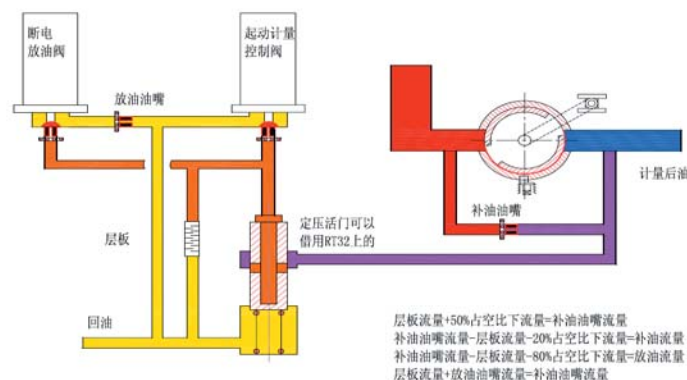


图 2 补油装置工作原理图

3 验证试验

为了验证补油装置闭环起动控制功能，在试验台上针对补油装置闭环起动的控制效果进行了试车验证，共进行验证试车 108 次。通过调整 P44 或 P30 增加或减少起动供油，对比验证补油装置对起动段供油的修正作用。试验主要包括：

- 断开补油装置后发动机起动；
- 电磁阀断电，占空比阀输入 0%（此状态理论为不增不减油）发动机起动；
- 电磁阀通电，占空比阀输入 50%（此状态理论为不增不减油）发动机起动；
- 电磁阀通电，占空比阀输入 0%（补油装置最大补油状态）发动机起动；

- e) 电磁阀通电，占空比阀输入 100%（补油装置最大放油状态）发动机起动；
- f) 起动闭环控制（调整 P44、P30、控制器控制参数等）。

通过上述试验项目，可得出以下结论：

3.1 补油装置的零点存在漂移现象

从图 3 可知，补油装置存在零点漂移现象（接上补油装置后，燃油总管油压升高），零点漂移现象会对发动机状态造成影响。解决此现象需要现场调节节流嘴或者层板与发动机进行匹配或者摸索控制器的实际平衡占空比（即在此占空比下，补油装置既不增油也不减油）。

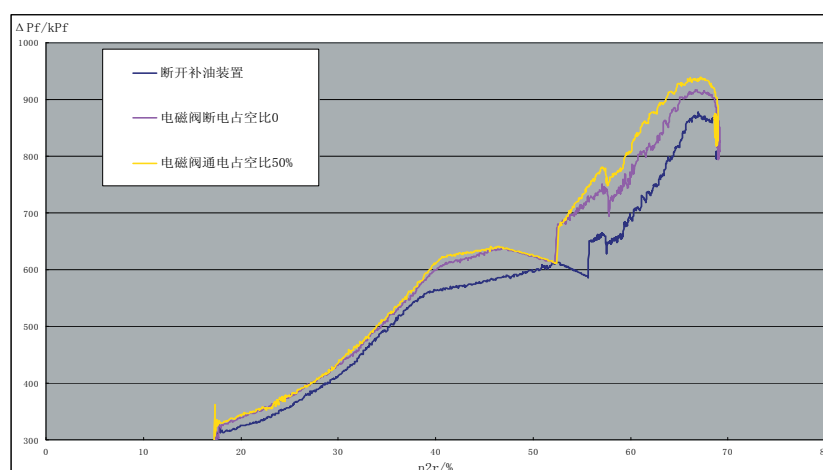


图 3 理论不增不减油状态与不连接补油装置的 ΔP_f 对比

注：N2r=50%左右时， ΔP_f 曲线的凹陷是采集系统采集异常造成的，后续的曲线也存在相同问题。

根据图 3 的试验结果，在下一试验前，将补油装置的定压活门垫片减少 1.6mm，进油油嘴由 1.0 改为 0.8 后，再次进行对比。从图 4 可知，调整后的补油装置供油曲线平移效果明显，但仍然存在零点漂移现象（接上补油装置后，燃油总管油压降低）。

经分析，补油装置的零点漂移是由于定压活门起作用所需的工作压力较高，而起动时燃油总管压力 P_f 偏低，造成定压活门的流量与设计值有偏差。如何有效的消除补油装置的零点漂移现象，是后续补油装置改进的一个重点。

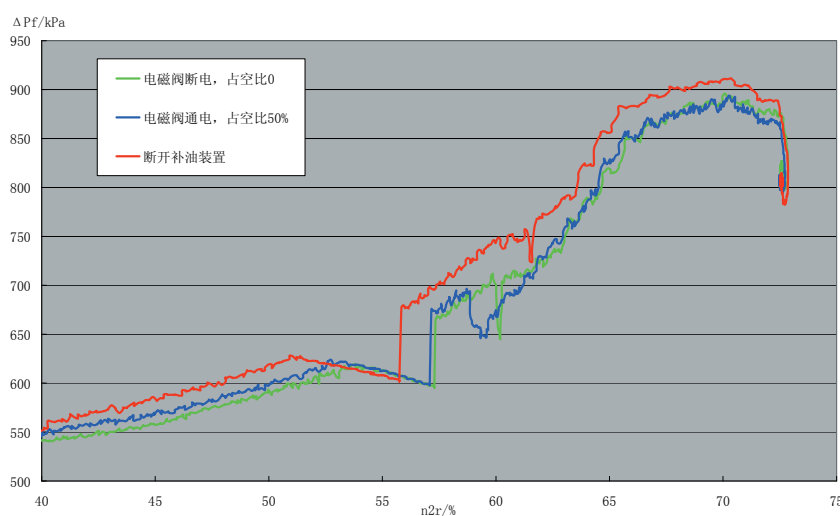


图 4 理论不增不减油状态与不连接补油装置的 ΔP_f 对比

3.2 补油装置的起动闭环控制具有油量修正作用

分别进行 P44 调整试验和 P30 调整试验，试验结果如图 5、图 6 所示。从图 5、图 6 可知，补油装置可按照设定的控制线对起动油量进行修正。当开环起动发动机失速（悬挂）时，闭环控制起动后，补油装置通过控制器闭环控制来提高（减小）占空比进行减油（加油），使起动供油线向控制线靠拢。

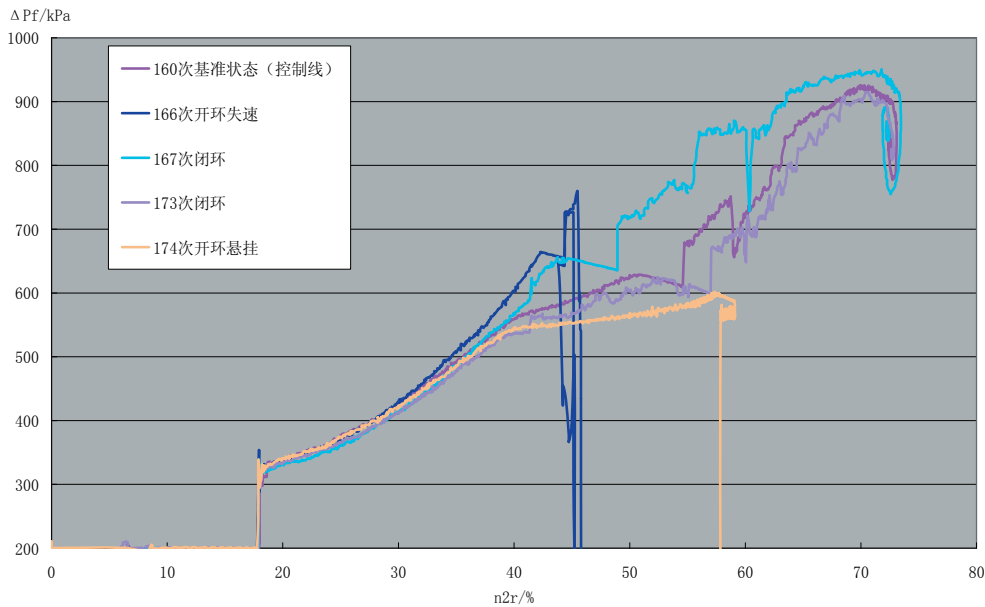


图 5 P44 调整试验对比曲线

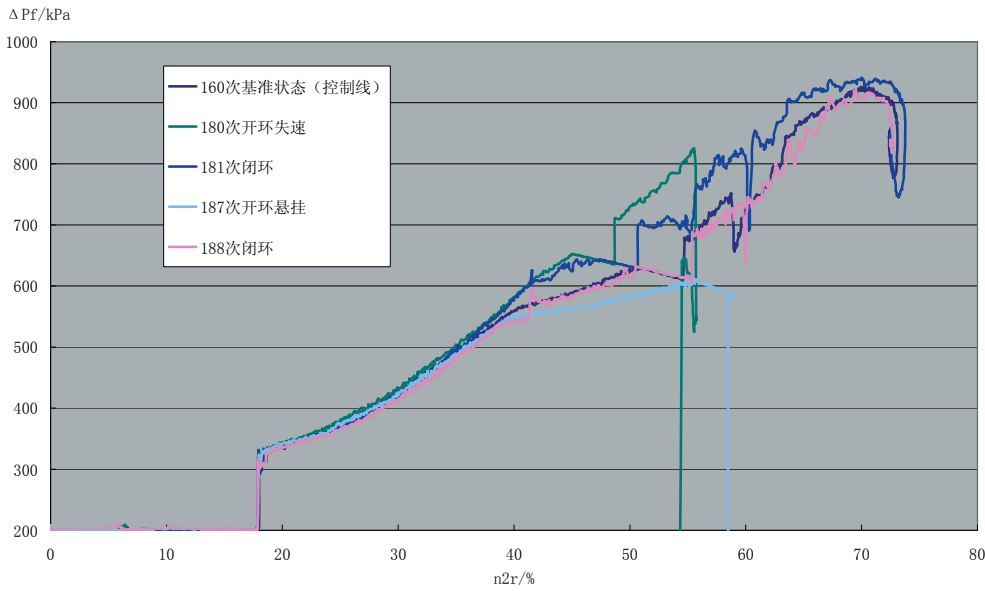


图 6 P30 调整试验对比曲线

3.3 控制参数调整对比

3.3.1 补油装置闭环控制初始点的凹坑修正

按原有控制规律，在 $n_2=39\% \sim 40\%$ 时供油曲线会出现凹坑。这是由于控制规律设置为占空比阀 S14 于 $n_2=39\%$ 时开始保持 50% 的占空比输出，计量后油会通过占空比阀放油，而此时 ИМ12 仍保持接通，计量后油仍通过放油油嘴进行放油，待 n_2 转速为 40% 时，ИМ12 的放油油路断开，故形成该凹坑。为

避免该现象发生,对控制器的控制逻辑进行了修正,令ИМ12、S14(补油装置起动计量控制阀)于 $n_2=40\%$ 时投入工作(S14初始值=50%,ИМ12=28VDC)。控制规律修改前后的对比曲线如图7所示。试验表明,将ИМ12、S14投入工作的转速点修改一致后,可有效的避免凹坑的形成。

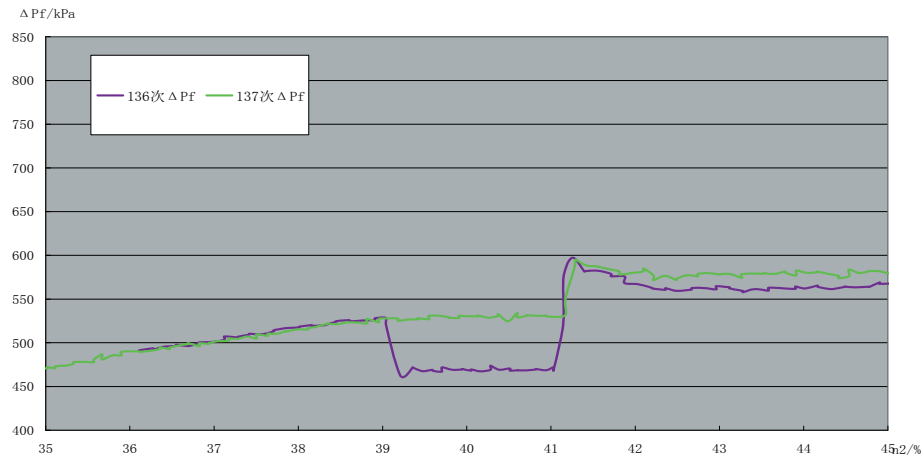


图7 控制规律修改前后的对比曲线

3.3.2 起动转速闭环控制结束点的评估

现有控制规律,进入起动转速闭环控制后,占空比阀S14的控制信号在 $n_2 \geq 40\%$ 且 $n_{2r} < 68$ 时根据控制律计算输出值;断电放油阀ИМ12的控制信号在 $n_2 \geq 40\%$ 且 $n_{2r} < 68\%$ 时输出28VDC,其他转速下输出0VDC。

按照此控制规律,在加速油过少的极端情况下,会在转速闭环控制结束后($n_{2r} > 68\%$)出现发动机悬挂在 $n_{2r} > 68\%$ 到慢车状态($n_{2r} = 72\% \pm 2\%$)之间的某一转速点上。

可以通过将转速闭环控制结束点设置为 $n_{2r} = 75\%$,即占空比阀S14的控制信号在 $n_2 \geq 40\%$ 且 $n_{2r} < 75\%$ 时根据控制律计算输出值;断电放油阀ИМ12的控制信号在 $n_2 \geq 40\%$ 且 $n_{2r} < 75\%$ 时输出28VDC,其他转速下输出0VDC。避免在加速油过少的极端情况下发动机悬挂在 $n_{2r} > 68\%$ 到慢车状态($n_{2r} = 72\% \pm 2\%$)之间的某一转速点上,实现转速闭环控制能够涵盖整个起动过程,

转速闭环控制结束点调整前后的对比曲线如图8所示。调整后,可将调整前悬挂状态的发动机起动至慢车状态。

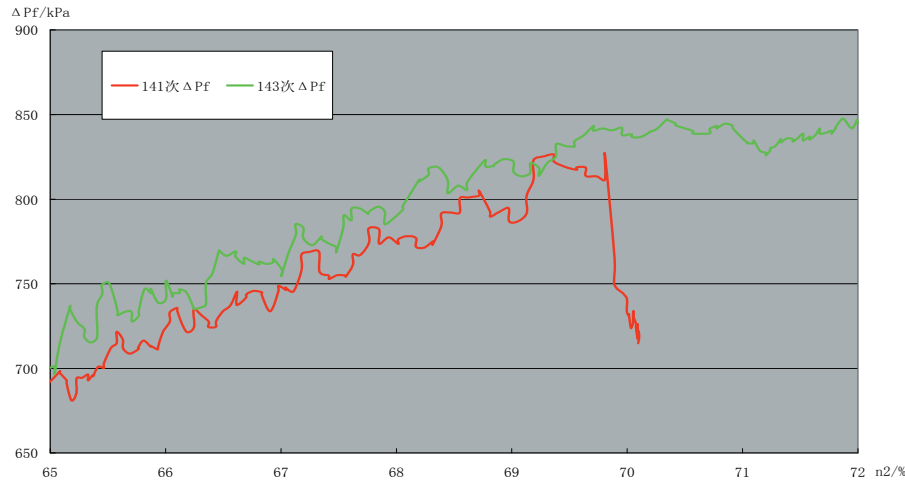


图8 转速闭环控制结束点调整前后的对比曲线

但是如果将转速闭环控制结束点设置为 $n_{2r}=75\%$ ，会使发动机在极端缺少加速油的情况下起动成功，掩盖发动机油气比极端不匹配的事实。在起动成功后，有可能在后续使用中出现因加速油过少而导致的转速不跟随、掉转等问题。为了避免掩盖发动机油气比极端不匹配的情况，决定维持现有控制规律，将转速闭环控制结束点设置为 $n_{2r}=68\%$ 。

4 结论

- a)补油装置的起动闭环控制具有油量修正作用，但是补油装置存在零点漂移现象；
- b)将ИМ12、S14 投入工作的转速点修改一致后，可有效的避免凹坑的形成；
- c)将转速闭环控制结束点设置为 $n_{2r}=75\%$ ，可保证转速闭环控制能够涵盖整个起动过程，但是会掩盖发动机油气比极端不匹配的情况，因此决定维持现有控制规律，将转速闭环控制结束点设置为 $n_{2r}=68\%$ 。

5 建议

针对补油装置的零点漂移问题，建议提高占空比阀 S14 的流量，降低定压活门的工作压力，以适应起动过程中较低的泵后油压力，减小补油装置的零点漂移。

参考文献

- [1] 周宗才.苏 27 飞机推进系统控制[M].西安:空军工程学院, 1997.
- [2] 胡寿松.自动控制原理(第五版)[M].北京:科学出版社, 2007.
- [3] АЛ-31Ф发动机技术说明书(补充和修订版)[M].沈阳:第六零六研究所, 1993.