

# 补燃循环发动机起动过程涡轮功率控制

徐浩海, 刘站国

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 分析了采用富氧燃气发生器的补燃循环发动机起动过程中涡轮功率的控制方法, 指出起动过程中涡轮功率的主要控制参数为发生器温度和涡轮压比。起动过程中发生器温度的控制依靠选择合适的流量调节器起动流量、转级时间和转级速率来实现。起动过程中涡轮压比的控制需要控制推力室的建压时间和建压幅度, 这需要选择合适的推力室燃料主阀打开时间、燃料节流阀转大流量的时间。通过数值仿真, 分析了上述控制方法对发动机起动过程的影响机理。

**关键词:** 液体火箭发动机; 补燃循环; 起动; 功率控制

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2006)04-0010-05

## Turbine power control of staged combustion cycle engine during start-up

Xu Haohai, Liu Zhanguo

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The approach to control the turbine power during engine start-up for staged combustion cycle engine using an oxidant rich gas generator is described in this paper. The primary parameters which control turbine power are GG temperature and turbine pressure ratio. The GG temperature control can be realized by regulating the flow regulator start-up flow rate, the start time from start-up to main stage and the regulator operating condition transfer rate. By choosing the main fuel valve opening time and the mixture ratio control valve (MRV) conversion time to larger mass flow, the combustion chamber ignition time and the peak value of chamber pressure are controlled. By this method, the turbine pressure ratio can be controlled during engine start-up process. The influence of the above methods on start-up characteristic is analyzed by numerical simulation.

**Key words:** liquid rocket engine; staged combustion cycle engine; start-up; power control

收稿日期: 2006-04-03; 修回日期: 2006-05-25。

作者简介: 徐浩海 (1971—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机系统分析。

## 1 引言

液体火箭发动机的起动是十分重要而复杂的工况之一,在这一阶段发动机所有参数如流量、温度、压力及转速都必须在短暂的时间内从初始状态过渡到主级工作状态。

对于补燃循环火箭发动机,通常可以采用自身起动方式(如RD-120、RD-170)或强迫起动方式(如RD-8, NK-33)<sup>[1,2]</sup>。采用自身起动方式的发动机,其起动过程并不依赖于外能源,起动过程中对能量的匹配要求非常严格,起动的可靠性由一系列紧密相关相互影响的条件来严格控制。不利的起动参数组合,将导致起动能量的不合理分配,引起发生器温度过高、室压过高、参数出现振荡甚至起动失败。这就要求合理编排起动程序,控制起动过程中发生器和推力室的推进剂供应,保证涡轮功率能够在起动过程中平稳迅速的增长。

## 2 自身起动过程中涡轮功率的控制参数

对于自身起动的发动机,其起动过程不依赖于火药起动器等外能源,发生器点火时推进剂的供应由贮箱和液柱压力来保证,起动过程中需要尽可能地保证涡轮功率大于泵消耗的功率,避免出现较大的参数波动导致产品损坏或起动失败。

根据动量矩守恒,涡轮泵转速可以表示为下式

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_t - \sum P_p \quad (1)$$

$$P_t = q_{mt} L \eta_t \quad (2)$$

$$q_{mt} = \frac{\mu A \Gamma(k) q(\lambda) p_{it}}{\sqrt{RT_{gg}}} \quad (3)$$

$$L = \frac{k}{k+1} RT_{it} \lambda^2 \quad (4)$$

式(1)~(4)中 $\omega$ 为涡轮泵转速; $J$ 为主涡轮泵转动惯量; $P_t$ 为涡轮发出的功率; $P_p$ 为泵消

耗的功率; $q_{mt}$ 为涡轮流量; $L$ 为涡轮绝热功; $\eta_t$ 为涡轮效率; $p_{it}$ 为涡轮入口压力; $T_{gg}$ 为发生器温度; $\lambda$ 为气体的等熵速度。

从上式中可以看出,为了保证起动过程中涡轮泵转速平稳迅速的增长,涡轮泵必须维持一定的剩余功率(涡轮发出的功率与泵消耗的功率之差)。剩余功率过小或剩余功率为负时转速会出现“徘徊”或下降,而剩余功率过大可能导致转子飞转。

显然,涡轮泵剩余功率与涡轮发出的功率和同一时刻泵消耗的功率有关,因此剩余功率的控制也应从这两方面考虑。对泵功率的控制通常需要进行较大程度的节流,这样常常影响其它组件的工作,在起动过程中很难实施人为控制。因此涡轮泵的剩余功率通常通过调节涡轮发出的功率来加以控制。

由(2)~(4)式可以看出,涡轮功率与涡轮流量、涡轮入口温度和涡轮压比等三个参数有关,因此对涡轮功率的控制可以通过改变起动过程中的涡轮流量、温度和压比来实现。对采用富氧发生器的补燃循环发动机,起动过程中所有的氧化剂和一小部分燃料进入发生器燃烧后驱动涡轮。对于这种发生器,由于氧化剂流量很大,很难通过调节装置对发生器的流量实施主动影响,因此主要通过流量调节器控制起动过程中进入发生器的燃料流量,改变发生器的组元比和温度,从而影响发生器的功率,这种发生器称为温度控制型发生器。

通过上述分析,对采用温度控制型发生器的系统,无法通过调节涡轮流量对涡轮功率施加主动影响。这样涡轮功率的控制参数归结为发生器温度和涡轮压比。

## 3 自身起动过程中涡轮功率的控制方法

起动过程中涡轮功率的主要控制参数为发生器温度和涡轮压比,因此涡轮功率的控制方法也表现为如何控制起动过程中发生器温度和涡轮压比。

### 3.1 发生器温度的控制

采用自身起动的发动机起动时推进剂的供应依赖于贮箱和液柱压力。由于起动时推进剂的源压力很低,为了保证发生器点火平稳,防止由于发生器点火后压力骤然升高导致氧化剂出现断流或倒流,需要通过流量调节器对起动过程中进入发生器的燃料流量进行主动控制。在发生器点火时首先控制流量调节器的流量为小流量(起动流量),保证发生器点火柔和,压力上升平稳。随着发动机工况的爬升,通过电动或液动的方法促使流量调节器转级,进入发生器的燃料流量平稳增加,从而保证起动过程中发生器温度不断增加,涡轮功率随之增长。因此,起动过程中发生器温度的控制实际上就是合理选择流量调节器的起动流量、开始转级的时间和转级速率(从转级开始到进入额定流量的流量变化速率)。

#### 3.1.1 流量调节器的起动流量

合适的起动流量首先应满足发生器点火的要求,因为此时发生器氧化剂的供应依赖于贮箱和液柱压力,起动流量过大会导致发生器点火温度峰过高或者出现氧化剂的断流或倒流。其次起动流量也不能过小,这样不能保证起动过程中的涡轮功率,导致起动过程中发动机工况爬升缓慢。在这种情况下,发动机开始起动正常,但在推力室建压后由于功率不足,发动机转速、室压急剧下降,导致起动失败。

图 1 所示为不同的起动流量对发动机起动特性的影响。当起动流量减少时,发生器点火温度峰降低,主涡轮转速随起动流量的减少爬升速率趋于缓慢。

注意到当调节器起动流量降低到 19%主级流量时,发生器温度在 1.75~1.85s 之间出现大于 500℃ 的温度峰,而转速也出现大幅度的波动。起动过程中出现这种情况对采用富氧发生器的发动机是致命的,因为高温富氧燃气具有极强的氧化性,很快会引起产品的烧蚀和损坏。对上述现象的解释是在起动流量减少时,发生器温度随之同步下降,导致涡轮功率减小。当推力室建压后,涡轮功率因压比和流量减少进一步降低,导致涡轮泵剩余功率不足,发动机参数出现大范围波动,引起起动失败。

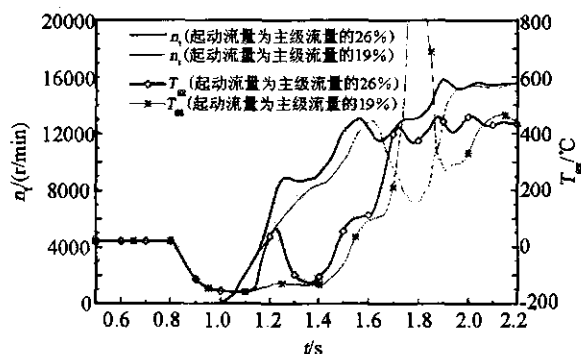


图 1 不同起动流量对发动机起动过程的影响

Fig.1 Start-up characteristic at variable flow rates

#### 3.1.2 流量调节器开始转级的时间

发生器点火后,涡轮泵转速快速上升。此时,由于流量调节器处于起动流量,发生器组元比较高,温度较低。为了最大程度的保证起动过程中的涡轮功率,需要流量调节器进行转级,增大进入发生器的燃料流量,促使发生器温度上升。

为了最大限度的避免推力室建压对涡轮功率的影响,必须在此之前迅速提高发生器的温度。因此对流量调节器的转级起始时间也提出了要求,即转级起始时间应提前于推力室开始建压的时间,保证发生器温度开始上升的时间早于推力室点火的时间。

#### 3.1.3 流量调节器的转级速率

流量调节器的转级速率决定了起动过程中发生器温度的上升速率,当转级速率加快时,发生器温度的上升速率加快,起动过程中涡轮功率的增长也随之加快。

图 2 为对应不同流量调节器转级速率下发动机起动过程仿真结果。当转级速率降低时,发生器温度的上升速率趋于缓慢,参数的波动加剧。在流量调节器转级时间 0.9s 时,发生器温度波动很大,1.72s 出现 660℃ 的温度峰,相应的室压也有较大的波动。

为了说明上述现象,应注意正常情况下推力室的建压过程,如图 2 中转级时间 0.6s 的情况。推力室的建压过程表现为两段斜率不同的曲线,第一段斜率很陡,室压在 0.2s 之内迅速爬升至 10MPa 左右。此时室压的变化主要取决于推力室内剧烈的燃烧过程,建压的速率和幅值不服从于流量调节器流量的变化。对于这一阶段,称之为

起动不受控。在推力室建压的第二阶段,其斜率较为平缓,此时推力室压力的变化服从于流量调节器流量的变化。也就是说流量调节器流量增长的快,推力室的压力增长的也快,反之亦然。对于这一阶段,称之为起动受控,即发动机的起动过程受流量调节器流量变化规律的控制。

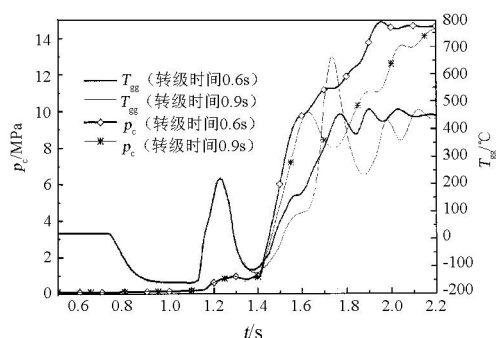


图2 流量调节器不同转级速率对发动机起动过程的影响

Fig.2 Start-up characteristic at variable regulator operating condition transfer rates

发动机起动受控以前,室压的变化不服从于流量调节器流量的变化,延缓流量调节器的转级速率基本上无法使建压速率放慢。这样,当转级速率变慢时,因推力室建压促使涡轮功率减小的影响基本不变,而流量调节器流量增加促使涡轮功率增加的影响减弱,这样在推力室建压后由于涡轮泵剩余功率不足,发动机参数出现剧烈波动。

由上述分析可以看出,在起动受控以前,为防止发动机起动参数波动,流量调节器转级速率应快一些。在起动受控以后,流量调节器转级速率已经控制住了推力室的建压速率,可以放慢流量调节器的转级速率,使推力室的建压较为平缓。对于采用单一转级速率的流量调节器,转级速率下限至少应满足发动机起动不受控段的要求。

### 3.2 涡轮压比的控制

对补燃循环发动机,推力室的建压是起动过程中参数变化最剧烈的一个环节。由于推力室的燃烧过程异常迅猛,使起动不受控段推力室压力迅速升高,涡轮出口反压增大、压比减小、涡轮功率减小。因此,对涡轮压比的控制归结为控制推力室的建压时间和起动不受控段的建压幅度。

#### 3.2.1 推力室建压时间的控制

推力室燃料主阀打开后,煤油首先充填主阀后的腔道。在燃料进入燃烧室开始燃烧后,推力室压力迅速增加。显然,推力室的建压时间取决于燃料主阀的打开时间。

建压过早的情况下,由于推力室压力急增,涡轮压比下降,涡轮流量减少,使得涡轮作功能力降低。另一方面,由于此时发生器温度低,发动机的工况未爬升到足够幅度。两方面的因素导致涡轮泵剩余功率不足,起动参数出现波动。换言之,在起动不受控的情况下,推力室的建压过程不受流量调节器的控制,总要达到一个较高的幅度,如果此时流量调节器的流量过小,发动机工况低时,整个系统无法平衡如此高的室压,从而导致起动参数出现大的波动。

当推迟燃料主阀的打开时间时,由于发生器处于高工况,燃烧室处于相对较低的工况,涡轮的压比很大,此时涡轮泵剩余功率很大,会出现涡轮泵飞转现象。因此,为了避免起动参数出现大的波动或者涡轮泵出现飞转,应合理选择推力室的建压时间。

#### 3.2.2 推力室建压幅度的控制

在起动不受控阶段,推力室的建压过程异常迅猛。为了控制这一阶段推力室建压的幅度,尽量减小对涡轮压比的影响,需要通过燃料节流阀调节起动过程中进入推力室的燃料流量。在推力室燃料主阀打开后,燃料节流阀首先处于一个大流阻的状态,控制进入推力室的燃料流量为小流量,这样可以保证建压过程较为平缓,有利于涡轮功率的增长。在起动受控以后,燃料节流阀再转为额定流阻,进入推力室的燃料流量转为大流量。

图3为燃料节流阀不同的转大流量时间对起动过程的影响。在1.5s转大流量时,起动尚未受控。过早的转大流量使得推力室建压幅度升高,引起涡轮功率下降,转速因剩余功率不足出现较大的波动。在1.6s转大流量时起动已经基本受控,此时起动过程受流量调节器控制,参数波动较小。

由以上分析,推力室建压幅度的控制通过设置燃料节流阀大流阻状态来实现。为了防止起动出现波动,燃料节流阀转大流量的时间应在发动机起动受控以后。

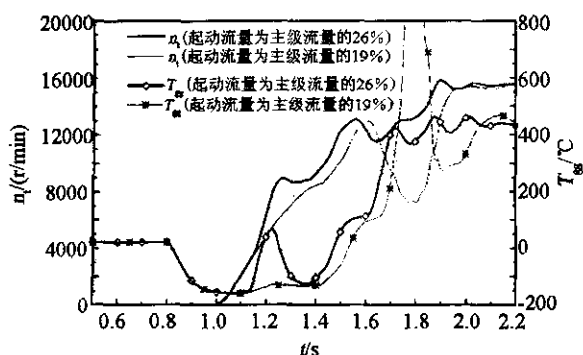


图3 燃料节流阀转大流量时间对起动过程的影响

Fig.3 Start-up characteristic at variable MRV conversion time

## 4 试车结果

作为一个例子,图4所示为起动过程中涡轮功率控制不合理时的试车结果和仿真计算结果(室压)。注意到室压的计算值与实测值吻合的较好。由于仿真建模时未考虑涡轮的损伤模型,在实际试车中由于涡轮烧蚀、效率下降,发动机室压表现为振荡下行,而仿真计算中最终室压爬到调整值。

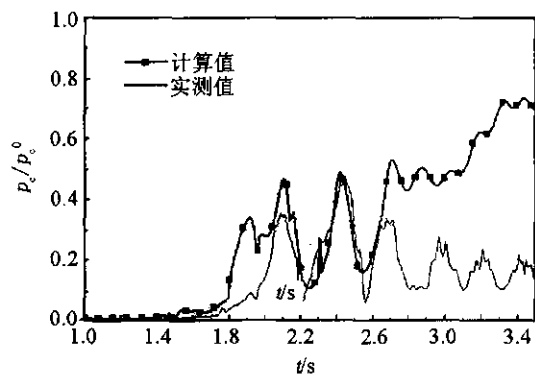


图4 涡轮功率控制不合理时的室压

Fig.4 Chamber pressure at unsuitable turbine power control

在这次试车中,推力室建压后转速、压力等出现大幅度波动,发动机起动失败。仿真结果显示<sup>[3]</sup>,由于流量调节器设置了过低的起动流量,并且转级开始时间过晚,几乎与推力室建压时间同步,导致建压时发生器温度很低,建压后涡轮压比减小,涡轮功率急剧降低,引起转速、发生器

温度、室压等参数异常波动,最终发生器温度的波动导致产品烧蚀,起动失败。对于上述试车故障,可行的解决措施包括:提高流量调节器起动流量,提前流量调节器的转级起始时间。

## 5 结论

自身起动过程中涡轮功率的控制是决定发动机起动成败的一个关键。通过对发动机起动过程的分析表明:采用温度控制型发生器的发动机,对涡轮功率的控制主要依靠控制发生器温度和涡轮压比来实现。

起动过程中发生器温度的控制依靠选择合适的流量调节器起动流量、转级时间和转级速率。其中起动流量应维持合适的水平,不能过低。转级时间至少要保证发生器温度开始上升的时间早于推力室点火的时间。流量调节器转级速率在起动受控以前应快一些,在起动受控以后可以放慢。

起动过程中涡轮压比的控制依靠选择合适的建压时间、控制建压幅度来实现。推力室建压时间应保证此前发动机工况已经上升到较高水平,尽量减小建压对涡轮功率的影响,同时应避免建压过晚引起转子飞转。建压幅度的控制通过燃料节流阀的大流阻状态和转大流量时间来实现,燃料节流阀转大流量时间应在起动受控以后。

## 参考文献:

- [1] Boris I K, Vladimir K C, Felix J C. Oxidizer-rich staged combustion rocket engines use and development in Russia[R]. AIAA 95-3607.
- [2] Lacefield T C, Sprow W J. High performance Russian NK-33 LOX/Kerosene liquid rocket engine[R]. AIAA 94-3397.
- [3] 徐浩海. 某型补燃发动机起动过程研究[D]. 西安: 航天六院十一所, 2003.
- [4] 杨永强, 刘站国, 徐浩海. 液氧/煤油发动机低温组元两相充填过程研究[J]. 火箭推进, 2006, 32 (2).

(编辑: 陈红霞)