

补燃发动机半系统试验装置静特性仿真

徐浩海，刘站国

中国航天科技集团公司第六研究院十一所

**摘 要：**以液氧／煤油补燃发动机半系统试验装置为研究对象，建立了试验装置的静态模型，所建模型考虑了推进剂在输送过程中温升对调整计算的影响。推进剂的温升导致发生器实际温度比对应组元比下的热力计算温度要高，计算表明因推进剂温升导致发生器温度升高 47.7K。文中采用牛顿法对所建立的试验装置静态模型进行了非线性数值求解，分析了试验装置的静特性。分析表明为了保证试验装置在低工况下参数协调匹配，应采用降低流量调节器流量、减小工艺喷管喉部面积两项措施来降低试验装置工况。

**关键词：**半系统试验；调整计算；静态模型  
**中图分类号：**V434      **文献标识码：**A      **文章编号：**(2004)02-0012-07

符号说明

$p$	_____	压力	$\xi$	_____	流阻系数
$T$	_____	温度	$A$	_____	面积
$\eta$	_____	效率	$R$	_____	气体常数、组元比
$\rho$	_____	密度	$\theta$	_____	涡轮反力度
$c$	_____	速度	$n$	_____	转速
$C$	_____	比热	$\mu$	_____	流量系数
$H$	_____	焓	$k$	_____	绝热指数
$q$	_____	流量	$P$	_____	功率

下标

$e$	_____	出口	$t$	_____	涡轮
$i$	_____	入口	$af$	_____	均流板
$p$	_____	泵	$lg$	_____	燃气导管
$gg$	_____	发生器	$to$	_____	脱开式密封
$f$	_____	燃料	$tpo$	_____	氧预压涡轮
$m$	_____	质量	$bt$	_____	动静叶间
$b$	_____	轴承	$ppo$	_____	氧预压泵
$sm$	_____	伺服机构	$tpf$	_____	燃料预压涡轮
$cl$	_____	煤油回流管路	$ppf$	_____	燃料预压泵
$o$	_____	氧化剂	$co$	_____	节流圈
$c$	_____	工艺喷管	$l$	_____	管路

收稿日期：2003-08-25；修回日期：2003-09-15。  
作者简介：徐浩海（1971—），男，硕士，研究领域为液体火箭发动机系统设计。

1 引言

液氧 / 煤油发动机是我国正在研制的百吨级高压补燃发动机。在发动机研制过程中，为考验涡轮泵、发生器及相关阀门的方案可行性及工作协调性，需进行发动机的半系统试验。半系统试验实质就是除发动机推力室外其余各组件参与的发动机热试车，与开式循环发动机的涡轮泵联试有很大区别。开式循环发动机的涡轮泵联试由于发生器压力低、流量小，一般采用挤压供应的方式。闭式循环发动机的发生器压力高、流量大，因此半系统试验无法采用挤压供应的方式。考虑到闭式循环发动机自身的特点，半系统试验装置由氧泵及煤油泵向发生器供应液氧及煤油，发生器燃烧产生的富氧燃气和一级燃料泵后引出的高压煤油分别驱动氧化剂预压涡轮及燃料预压涡轮。与发动机热试类似，半系统试验也存在着试验工况的调整问题。

本文以液氧 / 煤油发动机半系统试验装置为研究对象，建立了描述试验装置静特性的模型。对试验装置的静特性仿真表明可以通过设置流量调节器流量和工艺喷管喉部面积来调节试验装置的工况。

2 建模考虑的几个问题及简化处理

2.1 推进剂温升

推进剂经过预压泵、主泵及管路、阀门后，由于磨擦作用导致推进剂温度升高。同时，在氧系统中由于高温富氧燃气驱动氧预压涡轮后进入液氧，也导致液氧温度升高。

推进剂经过泵引起的温升，按下式考虑

$$\Delta T = \frac{P_{ep} - P_{ip}}{\rho} \left[ \frac{1 - \eta}{\eta} - \frac{T}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} \right] \frac{1}{C_p} \tag{1}$$

推进剂经过管路引起的温升很小，在计算中予以忽略。燃气进入液氧引起的温升需考虑燃气的汽化潜热和溶解热的影响，具体计算方法在文献[1]中有详述。

根据上述计算公式，参考三次涡轮泵联试的实测值，计算出的推进剂温升见表 1。

表 1 半系统试验装置推进剂温升

燃料 预压泵	一级 燃料泵	二级 燃料泵	氧预压泵	氧主泵
3K	12.5K	16K	8.7K	14.4K

实际上，推进剂温升与半系统试验的工况有关。工况发生变化，推进剂温升也相应发生变化。但是，由于半系统试验工况与前三次联试比较接近，因此，半系统试验的温升计算参考了联试的试验结果。同时为了简化模型，认为其温升为一常量。

2.2 发生器实际温度

发生器理论温度为发生器组元比的函数，热力计算时取的推进剂温度液氧为 91K，煤油 288K。由于推进剂温升及推进剂入口温度的变化，导致发生器温度与理论值不符，对发生器温度的修正按下式考虑：

$$\Delta T_{gg} = \frac{\Delta H_{gg}}{C_{pgg}} \tag{2}$$

$$\Delta H_{gg} = \frac{C_{pf} \Delta T_f + R_{m gg} \cdot \overline{C_{po}} \cdot \Delta T_o}{1 + R_{m gg}} \tag{3}$$

上式中： $\overline{C_{pf}}$ 、 $\overline{C_{po}}$  —— 燃料与氧化剂的平均比热

$\Delta T_o$ 、 $\Delta T_f$  —— 推进剂温升  
 $\Delta T_{gg}$  —— 考虑推进剂温升时对发生器温度的修正。

将有关参数代入解得  $\Delta T_{gg}=47.7K$ 。  
在建立静态模型时基于与 2.1 节同样的理由，认为该项为常量。对发生器实际温度的修正还应考虑到推进剂入口温度的变化。由于影响发生器温度的主要因素为氧化剂焓值，根据文献[2]的计算，近似为氧化剂温度每升高 1K，发生器温度升高 1.7K。因此，发生器实际温度可表示为：

$$T_{gg} = T_{gg}' + 1.7(T_{io} - 91) + 47.7 \tag{4}$$

上式中： $T_{gg}'$  —— 发生器理论温度；  
 $T_{gg}$  —— 发生器实际温度；  
 $T_{io}$  —— 氧化剂入口温度。

3 半系统试验装置静态模型

### 3.1 系统简介

半系统试验装置原理图见图 1。由二级燃料泵供应的煤油和氧泵供应的液氧进入发生器，燃烧产生的富氧燃气驱动主涡轮后经工艺喷管排出。为了保证一级燃料泵正常工作，在泵出口设置三级节流孔板将压力降低。一级泵流出的煤油经燃料主阀，节流阀、孔板后流入煤油收集箱。由涡轮后引出的富氧燃气驱动氧预压涡轮，由一级燃料泵引出的高压煤油驱动燃料预压涡轮。进入发生器的燃料流量由燃料二级泵后的流量调节器保证，调节器可以在前后压差波动时维持流量不变。

整个系统设有初级工况和主级工况，通过电磁阀和液压继电器对调节器实施转级来实现。

整个系统设有初级工况和主级工况，通过电磁阀和液压继电器对调节器实施转级来实现。

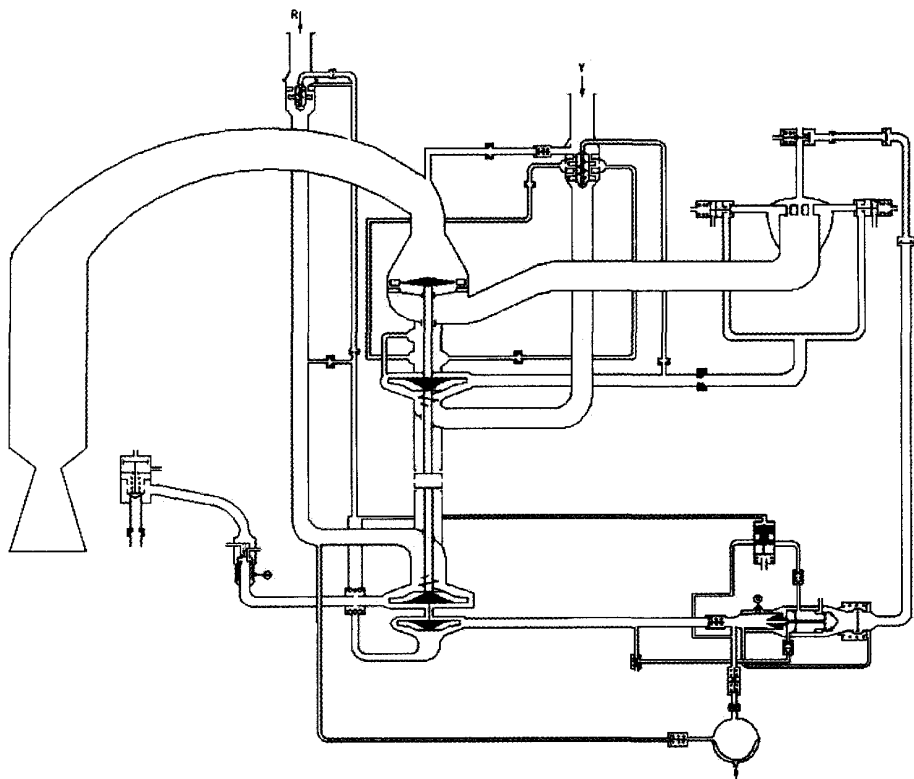


图 1 半系统试验装置系统原理图

### 3.2 系统静态模型

$$q_{mc} = \mu_c p_c A_c \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{1}{R_{gg} T_{et}}} \quad (5)$$

$$p_{caf} = p_c \quad (6)$$

$$p_{iaf}^2 - p_{caf}^2 = \xi_{af} R_{gg} T_{et} q_{mc}^2 \quad (7)$$

$$p_{et}^2 - p_{iaf}^2 = \xi_{lg} R_{gg} T_{et} q_{mc}^2 \quad (8)$$

$$\theta = a_1 + a_2 \left( \frac{n}{c} \right) + a_3 \left( \frac{n}{c} \right)^2 + a_4 \left( \frac{n}{c} \right)^3 \quad (9)$$

$$c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_{gg} T_{gg} \left[ 1 - \left( \frac{p_{et}}{p_{it}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (10)$$

$$\eta_t = b_1 \left( \frac{n}{c} \right)^2 + b_2 \left( \frac{n}{c} \right) \quad (11)$$

$$P_t = \frac{k}{k-1} R_{gg} T_{gg} q_{mt} \eta_t \left[ 1 - \left( \frac{p_{et}}{p_{it}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (12)$$

$$q_{mc} = q_{mt} + q_{mto} - q_{mtpo} \quad (13)$$

$$T_{et} = T_{gg} - T_{gg} \eta_t \left[ 1 - \left( \frac{p_{et}}{p_{it}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (14)$$

$$p_{bt} = p_{it} \left[ \theta + (1-\theta) \left( \frac{p_{et}}{p_{it}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (15)$$

$$\text{当 } \frac{p_{bt}}{p_{it}} > \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ 时:}$$

$$q_{mt} = p_{it} \cdot \mu_t A_t \cdot \frac{1}{\sqrt{R_{gg} T_{gg}}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_{bt}}{p_{it}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{bt}}{p_{it}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (16a)$$

$$\text{当 } \frac{p_{bt}}{p_{it}} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ 时:}$$

$$q_{mt} = p_{it} \mu_t A_t \frac{1}{\sqrt{R_{gg} T_{gg}}} \sqrt{k \cdot \left( \frac{2}{1+k} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (16b)$$

$$p_{gg}^2 - p_{it}^2 = \xi_{lg} R_{gg} T_{gg} q_{mt}^2 \quad (17)$$

$$R_{mgg} = q_{mogg} / q_{mfgg} \quad (18)$$

$$q_{mt} = q_{mfgg} + q_{mogg} \quad (19)$$

$$p_{epo} - p_{gg} = \xi_{ggpo} q_{mogg}^2 / 2\rho_{epo} \quad (20)$$

$$T_{gg} = T_{gg} (R_{mgg}) + 1.7(T_{io} - 91) + 47.7 \quad (21)$$

$$k = k(R_{mgg}) \quad (22)$$

$$R_{gg} = R_{gg}(R_{mgg}) \quad (23)$$

$$p_{epo} - p_{ipo} = A_{po} n^2 \rho_{ipo} + B_{po} q_{mpo} n + C_{po} q_{mpo}^2 / \rho_{ipo} \quad (24)$$

$$P_{po} = A_{npo} n^3 \rho_{ipo} + B_{npo} n^2 q_{mpo} + C_{npo} q_{mpo}^2 n / \rho_{ipo} \quad (25)$$

$$q_{mpo} = q_{mto} + q_{mogg} + q_{mbppo} \quad (26)$$

$$p_{epo} = p_{et} + \xi_{to} q_{mto}^2 / 2\rho_{epo} \quad (27)$$

$$p_{epo} = p_{io} + \xi_{bppo} q_{mbppo}^2 / 2\rho_{epo} \quad (28)$$

$$q_{mppo} = q_{mo} + q_{mbppo} \quad (29)$$

$$q_{mpo} = q_{mppo} + q_{mtpo} \quad (30)$$

$$p_{eppo} = p_{ipo} + \xi_{lpo} q_{mpo}^2 / 2\rho_{eppo} \quad (31)$$

$$p_{et}^2 - p_{itpo}^2 = \xi_{hpo} R_{gg} T_{et} q_{mtpo}^2 \quad (32)$$

$$T_{itpo} = T_{et} \quad (33)$$

$$c_{tpo} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_{gg} T_{itpo} \left[ 1 - \left( \frac{p_{itpo}}{p_{eppo}} \right)^{\frac{1-k}{k}} \right]} \quad (34)$$

$$\eta_{tpo} = A_{tpo} \left( \frac{n_{ppo}}{c_{tpo}} \right)^2 + B_{tpo} \left( \frac{n_{ppo}}{c_{tpo}} \right) \quad (35)$$

$$\text{当 } \frac{p_{eppo}}{p_{itpo}} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ 时:}$$

$$q_{mtpo} = p_{itpo} \mu_{tpo} A_{tpo} \frac{1}{\sqrt{R_{gg} T_{itpo}}} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (36a)$$

$$\text{当 } \frac{p_{eppo}}{p_{itpo}} > \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ 时:}$$

$$q_{mtpo} = p_{itpo} \mu_{tpo} A_{tpo} \frac{1}{\sqrt{R_{gg} T_{itpo}}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_{eppo}}{p_{itpo}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{eppo}}{p_{itpo}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (36b)$$

$$P_{tpo} = \frac{k}{k-1} R_{gg} T_{itpo} q_{mtpo} \eta_{tpo} \left[ 1 - \left( \frac{p_{eppo}}{p_{itpo}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (37)$$

$$p_{eppo} - p_{io} = A_{ppo} n_{ppo}^2 \rho_{io} + B_{ppo} n_{ppo} q_{mpo} + C_{ppo} q_{mpo}^2 / \rho_{io} \quad (38)$$

$$P_{ppo} = A_{ppo} n_{ppo}^3 \rho_{io} + B_{ppo} n_{ppo}^2 q_{mpo} + C_{ppo} q_{mpo}^2 n_{ppo} / \rho_{io} \quad (39)$$

$$P_{ppo} = P_{tpo} \quad (40)$$

$$q_{mpf2} = q_{mf2g} \quad (41)$$

$$q_{mpf1} = q_{mpf2} + q_{mcl} + q_{mbppf} + q_{msm} + q_{mtpf} \quad (42)$$

$$q_{mppf} = q_{mf} + q_{mbppf} \quad (43)$$

$$q_{mpf1} = q_{mppf} + q_{msm} + q_{mtpf} \quad (44)$$

$$p_{epf1} = p_{eco} + \xi_{co} (q_{mtpf} + q_{mbppf})^2 / 2\rho_{epf1} \quad (45)$$

$$p_{eco} = p_{epf} + \xi_{bcppf} q_{mbppf}^2 / 2\rho_{epf1} \quad (46)$$

$$p_{eco} = p_{itpf} + \xi_{tpf} q_{mtpf}^2 / 2\rho_{epf1} \quad (47)$$

$$p_{epf1} = p_{epf} + \xi_{sm} q_{msm}^2 / 2\rho_{epf1} \quad (48)$$

$$p_{epf} = p_{ipf1} + \xi_{if} q_{mpf1}^2 / 2\rho_{epf} \quad (49)$$

$$c_{tpf} = \sqrt{2(p_{itpf} - p_{epf})} / \rho_{epf1} \quad (50)$$

$$\eta_{tpf} = A_{tpf} \left( \frac{n_{ppf}}{c_{tpf}} \right)^2 + B_{tpf} \left( \frac{n_{ppf}}{c_{tpf}} \right) \quad (51)$$

$$P_{tpf} = \frac{(p_{itpf} - p_{epf}) q_{mtpf}}{\rho_{epf1}} \eta_{tpf} \quad (52)$$

$$p_{epf} - p_{if} = A_{ppf} n_{ppf}^2 \rho_{if} + B_{ppf} n_{ppf} q_{mppf} + C_{ppf} q_{mppf}^2 / \rho_{if} \quad (53)$$

$$P_{ppf} = A_{ppf} n_{ppf}^3 \rho_{if} + B_{ppf} n_{ppf}^2 q_{mppf} + C_{ppf} q_{mppf}^2 n_{ppf} / \rho_{if} \quad (54)$$

$$P_{tpf} = P_{ppf} \quad (55)$$

$$p_{epf1} - p_{ipf1} = A_{pf1} n^2 \rho_{ipf1} + B_{pf1} n q_{mpf1} + C_{pf1} q_{mpf1}^2 / \rho_{ipf1} \quad (56)$$

$$P_{pf1} = A_{npf1} n^3 \rho_{ipf1} + B_{npf1} n^2 q_{mpf1} + C_{npf1} q_{mpf1}^2 n / \rho_{ipf1} \quad (57)$$

$$p_{ipf2} = p_{epf1} \quad (58)$$

$$p_{epf2} - p_{ipf2} = A_{pf2} n^2 \rho_{ipf2} + B_{pf2} n q_{mpf2} + C_{pf2} q_{mpf2}^2 / \rho_{ipf2} \quad (59)$$

$$P_{pf2} = A_{npf2} n^3 \rho_{ipf2} + B_{npf2} n^2 q_{mpf2} + C_{npf2} q_{mpf2}^2 n / \rho_{ipf2} \quad (60)$$

$$P_t = P_{pf1} + P_{pf2} + P_{po} \quad (61)$$

$$p_{epf1} = p_a + \xi_{cl} q_{mcl}^2 / 2\rho_{epf1} \quad (62)$$

$$p_{itpf} = p_{epf} + \xi_{mtpf} q_{mtpf}^2 / 2\rho_{epf1} \quad (63)$$

### 3.3 解法

上述方程组可表示为:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_{59}) = 0$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_{59}) = 0$$

.....

$$f_{59}(x_1, x_2, \dots, x_{59}) = 0$$

对方程组求解, 即可确定半系统试验装置的稳态系统参数。牛顿法为求解非线性方程组的基本方法, 具有二阶收敛速度。虽然牛顿法对迭代初值有较高要求, 但由于系统物理过程清楚, 只要输入设计任务书中各组件的额定参数, 一般均能获得满意的结果。

对于给定的一组初值  $(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{59}^k)$ , 将上述方程组台劳展开并略去二阶无穷小量, 得:

$$f_1(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{59}^k) + \sum_{j=1}^{59} \frac{\partial f_1(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{59}^k)}{\partial x_j} \Delta x_j^k = 0$$

$$f_2(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{59}^k) + \sum_{j=1}^{59} \frac{\partial f_2(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{59}^k)}{\partial x_j} \Delta x_j^k = 0$$

.....

$$f_{59}(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{59}^k) + \sum_{j=1}^{59} \frac{\partial f_{59}(x_1^k, x_2^k, \dots, x_{59}^k)}{\partial x_j} \Delta x_j^k = 0$$

上式为一线性方程组。采用全主元高斯法求

解, 得新解:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \Delta x_i^k \alpha (i = 1, 59)$$

式中  $\alpha$  为松弛因子, 一般取 0.01~0.005。重复以上步骤, 即可对非线性方程组求解。

## 4 半系统试验调整计算

### 4.1 组件的地面试验

试验装置调整计算的准确性依赖于计算所使用的组件静特性的准确性。为了获得组件的静特性, 需要对相关的组件如涡轮、泵、管路和阀门等进行地面试验。

#### 4.1.1 泵水力试验

装配前对氧主泵、燃料一级泵、燃料二级泵、氧预压泵, 燃料预压泵进行水力试验, 试验数据按几何相似, 运动相似等原则进行换算, 得出上述组件的扬程方程, 功率方程。由于受试验台电机功率的限制, 氧泵和燃料泵的水试转速无法达到热试转速, 因此需要将低转速下的特性换算至高转速。为了验证换算方法, 采用某型发动机的泵作了验证性试验: 50%额定转速与额定转速相比, 扬程偏低约 2%, 效率偏低约 3%, 对调整计算不会有太大的影响。

#### 4.1.2 涡轮吹风试验

对主涡轮进行吹风试验。涡轮吹风试验的介质为空气与酒精的燃烧产物, 试验工况根据相似准则换算得出, 通过水力耗功装置达到试验功率平衡。调节水力耗功装置的进、出水量, 磨擦轮盘数量及空气—酒精发生器工况实现不同的试验工况。通过吹风得出涡轮效率方程, 反力度方程及流量方程。

#### 4.1.3 液流试验

对发生器进行整体液流试验, 得出氧喷注器与燃料喷注器流阻。对燃料节流阀和流量调节器进行液流试验, 获得其特性方程。国内已有型号的液流试验, 一般按压降相等的原则确定水试流量, 而对于半系统试验, 由于流量较大, 地面试

验能力无法满足要求, 故按雷诺数相等的原则确定水试流量并对上述原则进行了验证性试验, 证明了其工程上的可行性。

### 4.2 结果及讨论

在半系统试验装置中, 工艺喷管代替发动机推力室, 主要起憋压作用。煤油不进入工艺喷管参与燃烧。当试验装置要模拟发动机额定工况下的转速和流量时, 可以设计出一种工艺喷管, 使得由涡轮流出的富氧燃气在工艺喷管中所建压力与发动机额定工况下的室压相当。显然, 此时工艺喷管的喉部尺寸要远远小于发动机推力室喉部尺寸。

为了试验安全, 需要调低试验工况。通过流量调节器减小发生器燃料流量, 可以降低发生器温度, 从而达到降低试验装置工况的目的, 这与发动机降工况的原理是类似的。但是, 由于半系统试验装置的工艺喷管只是单纯起憋压作用, 在低工况下工艺喷管的压力很低 (与对应发动机推力室压力相比), 导致试验装置的参数出现不匹配。

图 2 为 80%额定转速下试验装置的主要参数。试验装置采用模拟额定工况的工艺喷管, 通过降低流量调节器燃料流量的方法实现降工况。在转速降为 80%时, 工艺喷管压力降为额定值的 63%。这意味着半系统试验装置的涡轮负载与发动机在对应转速下的涡轮负载相比要轻, 因此半系统试验的发生器燃料流量只需达到额定流量的 52%, 系统即可平衡在 80%额定转速 (对应发动机上则为额定流量的 70%)。在半系统试验装置转速降为 80%时, 发生器组元比升至额定值的 157%, 这已经超出发生器能够正常工作的范围。

因此, 单纯通过降低发生器燃料流量来降低半系统试验装置的工况会出现系统参数不匹配的问题。为避免上述现象, 当试验装置在低工况下试验时, 应更换工艺喷管, 减小工艺喷管喉部的尺寸。这样可以提高工艺喷管的压力, 达到降低发生器组元比的目的。

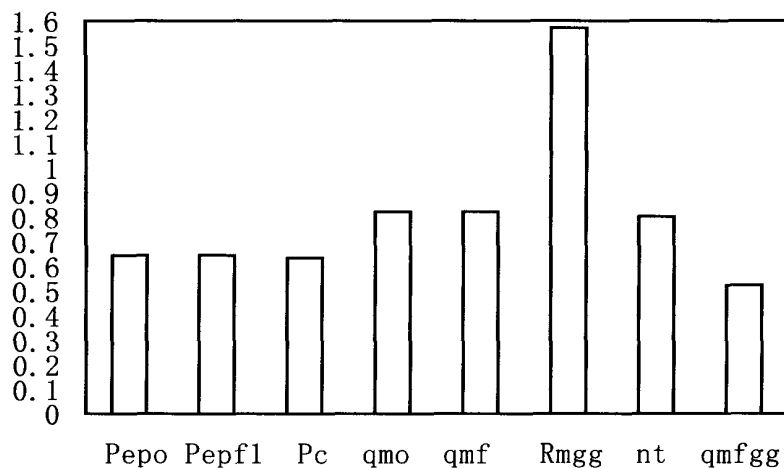


图 2 转速下调至 80% 额定转速下试验装置的主要参数

## 5 结论

为了分析液氧 / 煤油发动机半系统试验装置的静特性, 建立了半系统试验装置的静态模型。所建模型考虑了推进剂温升的影响, 计算表明因推进剂温升导致发生器温度比对应组元比下的热力计算温度高 47.7K。

采用牛顿法对试验装置的静态模型进行了非线性数值求解, 分析了试验装置的静特性。分析

表明: 单纯通过减小发生器燃料流量来降低试验装置的工况将导致试验参数出现不匹配。降低试验装置的工况需要通过调节流量调节器流量和减小工艺喷管喉部面积来共同实现。

## 参考文献:

- [1] 李庆扬. 非线性方程组的数值解法. 科学出版社, 1999