

编号: 0158

内部

62

科学技术成果报告

X105系列柴油机燃烧系统
改进的试验研究

K42
hKQ

科学技术文献出版社

刊登国内、外广告启事

我社出版的科技刊物，学科较全，专业较广。为给国内、外各厂矿、企业、科研单位、大专院校等刊登广告提供方便，决定从即日起开辟广告栏，欢迎选用。

有关刊登广告的具体手续、价目及刊物，详见我社的“承办国内广告业务暂行办法”及“承办国外广告业务暂行办法”。此项业务请直接与我社广告组联系，统一办理。

(社址：北京和平街北口 电话：46局4504)

科学技术文献出版社

一九八〇年四月十日

科学技术成果报告

X 105系列柴油机燃烧系统

改进的试验研究

(内部发行)

编辑者：中国科学技术情报研究所

出版者：科学技术文献出版社

印刷者：中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 。印张：3.25 字数：84.8千字

1980年7月北京第一版第一次印刷

印数：1—3,400册

科技新书目：164—38

统一书号：15176·471 定价：0.50元

目 录

前言.....	(1)
一、良好混合气的形成.....	(1)
二、燃油供给系统的改进.....	(2)
(一) 油泵凸轮与柱塞的选择.....	(3)
(二) 限制 ZS4S1 针阀升程	(22)
(三) 提高高转速性能的措施.....	(24)
三、配气系统的改进.....	(25)
(一) 低次方配气凸轮的应用.....	(25)
(二) 脉动能量进气管与引射排气管的应用.....	(31)
(三) 进气道芯盒的定型.....	(34)
四、其它有关方面改进.....	(38)
(一) 活塞碰气门问题的解决.....	(38)
(二) 活塞碰缸盖问题的解决.....	(38)
(三) “进气道敏感”问题的解决.....	(41)
五、主要技术参数测量.....	(44)
(一) 活塞温度分布.....	(44)
(二) 燃油供给系统有关测量.....	(45)
(三) 示功图.....	(50)
(四) 废气成份测定.....	(51)
参考文献.....	(52)

X105系列柴油机燃烧系统改进的试验研究

天津内燃机研究所，王泰、严传道、刘锦池

前 言

X105系列柴油机已从研制阶段过渡到批量生产。在生产中逐步暴露出一些问题。归纳在性能方面有下面几点：

- (一) 燃油消耗率及排温偏高、冒烟大。
- (二) “两碰”即气门碰活塞顶；活塞顶碰缸盖。
- (三) 进气道“敏感性”问题。
- (四) 燃烧系统不适应高转速。

几年来，我们所与有关兄弟单位从改进X105系列柴油机的燃烧系统，提高批产整机性能方面进行了试验研究。有些研究成果已运用于生产中。

下面仅对复合式燃烧系统重要环节，从设计与技术方面谈几点粗浅的看法，供参考。

(一) 燃油供给系统：对I号泵主要零件研究中，提出“采用全部降速供油、低平均供油速率油泵凸轮”。并对柱塞直径、出油阀直径、出油阀减压容积、出油阀紧座孔径、油管长度等结构参数进行了选择与试验。

对供油工作段、提前角、喷射压力、ZS4S1轴针式喷油嘴针阀升程等调整参数进行单项与综合性试验。确定整机性能良好的调整参数范围。使供油规律适应复合式燃烧系统的要求。

(二) 配气系统：研制了性能良好的低次方配气凸轮，推荐性能良好的28°进气道芯盒，为批产与科研提出了“X105系列进气道评价方法”。并为采用进气道热定型提供了“陶瓷型浇铸金属进气道芯盒”的试制手段。

(三) 燃烧室部分：在批产中保证燃烧室有关尺寸与容积，减少不必要的容积，确定合理的压缩余隙范围。从燃烧室部分的初步试验表明，尚有潜力可挖。

根据几年来的大量试验研究与批量生产的实际情况。我们认为：为稳定与提高X105系列柴油机批产整机性能与改进高转速性能，从上述三个方面比较来看。燃油供给系统的影响是占第一位的。

改进措施不仅要符合“三化”要求，使整机性能在批产中有所改善，更重要的是要有较强的适应性，不敏感，还应有较大的技术储备，能满足更广泛的用途。

一、良好混合气的形成

由于柴油机结构强度与使用寿命的要求，最高爆发压力及最大压力升高率受到限制条件下，以中间高峰三角形放热分布的效率是最高的⁽¹⁾。

为了使放热规律接近上述理想过程,通过燃油供给系统、配气系统与燃烧室的有机配合组织形成良好混合气,来控制放热过程的三个阶段。(以下未注明之处均按1500转/分额定工况给出有关参数。)

①使上止点之前第一阶段的放热不致过于剧烈,在着火前虽然已射入缸内有一半以上的油量,但由于供油速率低、低喷嘴压力、油束贯穿距离较短。靠高速旋转的充量,力求使燃烧室上部分布较多的燃油,并以扩展面积较大的油膜贮备,并均匀分布。这样可以控制初期始燃量和着火提前角。获得较低的压力升高率。

②增强刚过上止点主燃烧阶段的放热速率。燃烧室布油炽热壁面在 $300^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$ 范围内,有高速旋转的涡流。这样可减少燃油的裂化并有最快的蒸发速度。随着火焰的扩展,热交换的剧烈进行。这部分燃料已完成物理与化学准备过程,投入到主燃烧阶段中迅速放热,使大部分燃料在该阶段中放热。控制最佳着火角度,使最高爆发压力出现在上止点之后 $\alpha=6^{\circ}\sim 8^{\circ}$ (曲轴转角)。这样可获得较高的热效率,而最高爆发压力值仅为68公斤/厘米²。

③尽量减少第三阶段的后燃放热,通过消除燃烧室底部过浓混合气来达到。由于燃烧室底部空间容积小,充量切向旋转速度又低,空气利用率低,而且油嘴喷射方向对准底部,容易造成燃料的局部堆积。因此,为使燃烧室上部分布较多而均匀的燃油,要利用强涡流,把供油速率较低,贯穿距离较短的油束吹布开。并使火焰扩散有利于气流的运动,进一步消除过浓混合区,使燃烧持续期拖延不致过长。这对提高热效率、降低排温、减小冒烟产生直接的影响。

另外一些试验结果表明:通过“低流阻”进气道与相应的油泵凸轮相配合,同样也能形成良好混合气,并获得良好的经济、动力指标和高转速性能。

总之,当掌握了“复合式”燃烧系统形成良好混合气的内在规律,并在批产中得到控制。就能够实现在最高爆发压力 P_z 、最大压力升高率 $\left(\frac{dp}{d\alpha}\right)_{\max}$ 都不高的情况下,获得较高的指示效率 η_i ,良好的净化指标与高转速性能。

二、燃油供给系统的改进

为了稳定与提高1500~2000转/分批产整机性能,应注重燃油供给系统主要零件结构参数与调整参数的选择。应控制实际平均供油速率在 $\left(\frac{dV}{d\varphi}\right)_{\text{cm}}=4.12\sim 4.97$ 毫米³/循环·度(凸轮转角)范围内。实际供油速率波峰最大值 $\left(\frac{dV}{d\varphi}\right)_{\max}\leq 6.8$ 毫米³/循环·度,实际供油延续角 $\varphi=10.5^{\circ}\sim 13.5^{\circ}$ (凸轮转角)范围内。上述供油规律参数是靠“全部降速段供油、低几何平均供油速率油泵凸轮”与 $\phi 8$ 柱塞相配合,运转时形成低喷嘴压力峰值175~185公斤/厘米²、“低矮”梯形的供油规律与贯穿距离较短的油束。这样为形成良好的混合气准备了必要的条件。同时采用低喷嘴压力可减少燃油供给系统故障,提高该系统的使用寿命。

当喷嘴压力峰值高于230公斤/厘米²,供油速率峰值 $\left(\frac{dV}{d\varphi}\right)_{\max}\geq 7.5$ 毫米³/循环·度,

供油延续角 $\leq 9.5^\circ$ ，油束贯穿距离长。高速旋转的充量来不及把油束涂布开，造成燃烧室底部过浓混合区，使后燃严重。并导致油耗高、排温高及烟度大。

(一) 油泵凸轮与柱塞的选择

1. R1.8切线油泵凸轮

目前X105系列柴油机配用I号系列泵，就是R1.8切线油泵凸轮。配 $\phi 8.5$ 柱塞、 $\phi 5$ 出油阀、 $\phi 3$ 出油阀紧座。柱塞关闭油孔行程 $h_0=3$ 毫米。见图(1)所示。

这种油泵凸轮，主要在升速段供油，其几何平均供油速度偏高，柱塞直径大。因此嘴端压力偏高为319公斤/厘米²，实际供油延续角偏小。ZS4S1轴针式喷嘴流通截面过大，针阀升程形成“M”波。油束贯穿距离过长。实际供油速率偏高。见图(2)所示。高速旋转的充量来不及把油束涂布开，造成在燃烧室底部混合气局部过浓。“短而急”的供油规律不能形成良好的混合气，燃烧过程进行的不够完善，后燃严重。油耗与排温偏高、冒烟大。批产整机性能难过关。

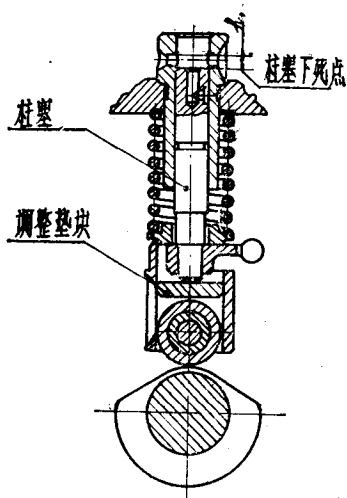


图 (1)

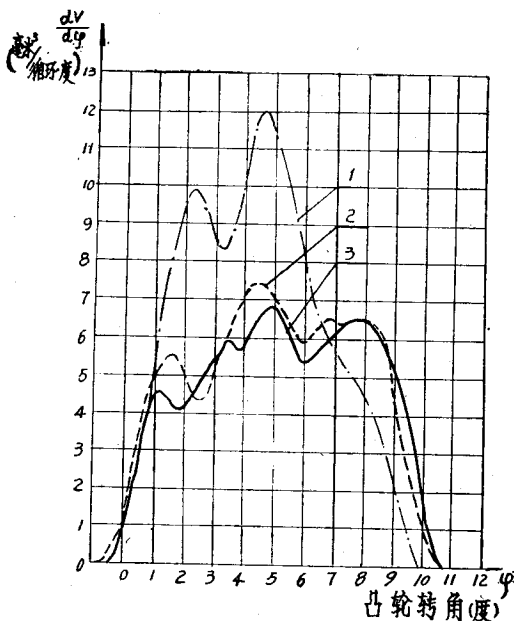


图 (2) 三种油泵凸轮供油规律

- 1—R1.8切线凸轮， $V=67.5$ 毫米³/循环
- 2—双切线， $V=53.7$ 毫米³/循环
- 3—降速15°(3)， $V=53.2$ 毫米³/循环

通过调整柱塞关闭油孔行程 $h_0=4.85\sim 5.10$ 毫米，采用降速供油工作段，平均几何供油速率降至0.787米/秒（油泵转速按750转/分）。嘴端压力降到230公斤/厘米²左右，供油速率有所下降。实际供油延续角有所增加。能形成较好的混合气。批产整机性能会得到改善，整机性能指标能够达到规定标准要求。

这项措施还存在一定问题。柱塞有效工作行程仅有2.0毫米。用户反映马力下降快，起油量偏小，起动困难，在R1.8鼻角半径上供油时接触应力大、易磨损。在主机厂加垫又造

成人力、物力浪费，所以只能是过渡措施。

2. 双切线油泵凸轮

双切线油泵凸轮配 $\phi 8.5$ 柱塞、 $\phi 6$ 出油阀、 $\phi 1.5$ 毫米小孔出油阀紧座。柱塞关闭油孔行程对2缸机不敏感可选择 $h_0=3.0$ 毫米。对4缸、6缸机，需选择 $h_0=4.0$ 毫米。

X2105型柴油机采用双切线油泵凸轮、 $\phi 8.5$ 柱塞、更换出油阀与紧座试验见表(1)所示。由试验结果可以看出双切线油泵凸轮不能采用I号系列系的 $\phi 5$ 出油阀与 $\phi 3$ 出油阀紧座。

表 (1)

出油阀 与出油阀 紧座	转 速 马 力 参 数	1500 (转/分)						2000 (转/分)					
		24			27			30			33		
		g_e	t_r	S_z	g_e	t_r	S_z	g_e	t_r	S_z	g_e	t_r	S_z
		克/马 力·小时	℃	BO- SCH	克/马 力·小时	℃	BO- SCH	克/马 力·小时	℃	BOSCH	克/马 力·小时	℃	BOSCH
$\phi 5$ 出油阀 $\phi 3$ 出 油阀紧座		184	415	2.95	186.8	455	3.9	190	515	2.0	191	565	2.3
$\phi 6$ 出油阀 $\phi 1.5$ 出油阀紧座		176.7	395	1.70	182.5	450	3.1	181.5	475	0.9	181.5	535	1.4

按表(1)后一种参数调整的油泵，整机性能与冒烟情况比R1.8切线油泵凸轮加垫的情况要好一些，平均几何供油速度比R1.8切线油泵凸轮有所降低。由于采用小孔紧座进行供油节流，使嘴端压力降至216公斤/厘米²。当 $h_0=4.0$ 毫米时，嘴端压力降至186公斤/厘米²，实际供油延续角适宜，供油规律曲线已呈现为“低矮”的梯形。见图(2)所示。在供油规律方面较能适应复合式燃烧系统的要求。能形成较好的混合气，批产整机性能燃油耗、排温与烟度均获下降。从性能上看是解决批产性能的措施之一。

但采用 $\phi 6$ 出油阀、还需加1毫米垫片存在工艺问题。小孔 $\phi 1.5$ 出油阀紧座节流有若干缺点：要求柱塞直径比正常大，作用在柱塞上的喷射压力比正常高，使滚轮、凸轮和凸轮轴承的负荷增加。详见文献〔2〕。目前X105系列柴油机采用的I号泵是 $\phi 5$ 出油阀， $\phi 3$ 出油阀紧座，油泵上下体之间不加垫。因此双切线油泵凸轮不易于推广使用。

3. 降速15[#]油泵凸轮

降速15[#]油泵凸轮采用全部降速段供油，经试验研究选择了较佳的几何平均速度、降速斜率和供油工作段。其供油规律与油束贯穿距离能够适应复合式燃烧系统的要求，使X105系列柴油机的油耗、排温与烟度都有明显降低。通过许多厂的配套试验表明：只要柴油机主要零件的关键尺寸合格，装配参数符合“X105系列柴油机技术条件”，进气道品质因数K〔详见四(三)〕接近28[#]进气道，性能指标均能达到合格品要求。即在标定工况1500转/分下， $g_e \leq 185$ 克/马力·小时，有的能达到一等品；在标定工况2000转/分下， $g_e \leq 195$ 克/马力·小时，多数能达到一等品，有的达到优等品水平。

降速15*油泵凸轮的另一突出优点是对1号泵结构无影响。因为多种因素对供油规律与整机性能的影响已通过研制新型的供油工作段型线的途径获得解决。仅更换一根凸轮轴,油泵上下体之间不需加垫(柱塞关闭油孔行程 $h_0=3\text{mm}$)。采用 $\phi 8$ 柱塞, $\phi 5$ 出油阀, $\phi 3$ 紧座与全国1号系列泵产品一致,(与95系列通用),这样不仅有利于油泵生产及配件供应,还有利于广大用户使用维修。

①降速油泵凸轮计算:降速油泵凸轮是由四段方程组成。第一段为“切线升速段”;第二段为“等速段”;第三段为“降速供油工作段”;第四段为“降速结束段”。计算时,已知条件需给出八个参数。求解降速油泵凸轮滚轮中心的行程与速度。在计算程序的编制中,各段方程之间的转换是根据给出的边界条件进行的。

A. 已知条件

‘ h_2 ’:等速段终了滚轮中心参考行程(毫米)

‘ v_2 ’:等速段滚轮中心参考速度(米/秒)

K_3 :降速供油工作段工作角度(凸轮转角)(度)

V_4 :降速供油工作段终止时滚轮中心速度(米/秒)

h_4 :滚轮中心的总行程(毫米)

R :基圆半径(毫米)

$n_{\text{凸轮}}$:凸轮轴转速(转/分)(在计算中,均按 $n_{\text{凸轮}}=750$ 转/分)

R_1 :滚轮半径(毫米)

注:计算公式中的 h_2 , v_2 是计算值。当计算角度间隔愈小, h_2 与 v_2 中的一项与‘ h_2 ’或‘ v_2 ’愈接近。

B. 计算公式:

A) 第一段(“切线升速段”):

滚轮中心在第一段按升速运动,油泵凸轮外仍为切线。

$$y_1 = (R + R_1) \cdot \left(\frac{1}{\cos x_1} - 1 \right) \quad (\text{毫米}) \quad (1)$$

$$y'_1 = (R + R_1) \cdot \frac{\tan x_1}{\cos x_1} \cdot \omega_K \cdot 10^{-3} \quad (\text{米/秒}) \quad (2)$$

$$\omega_K = \frac{\pi n_{\text{凸轮}}}{30} \quad (\text{弧度/秒}) \quad (3)$$

控制计算循环用两个“计算已知条件”‘ h_2 ’与‘ v_2 ’构成两个不等式。当这两个不等式同时满足时:

$$y_1 < 'h_2' \quad (4)$$

$$y'_1 < 'v_2' \quad (5)$$

令 $x_1 + \alpha$ (α 为计算角度间隔凸轮角,度)

进行 y_1 与 y'_1 计算。

否则 $x_1 = K_1$, $y_1 = h_1$, $y'_1 = v_2$ 。

B) 第二段(“等速段”):

滚轮中心以等速运动,油泵凸轮外型为变曲率。该段存在的目的是以最简单的方法把需要的速度 v_2 引过去,以满足在一定柱塞关闭油孔行程时的速度值。

$$y_2 = h_1 + \frac{2 \cdot V_2 \cdot x_2}{9} \quad (\text{毫米}) \quad (6)$$

$$y_2' = v_2 \quad (\text{米/秒}) \quad (7)$$

$$'k_2' = \frac{h_2' - h_1}{V_2} \quad (\text{等速段工作角度参考值, 度、凸轮转角})$$

控制计算循环用以下条件:

$0 \leq x_2 < 'k_2'$ 时, 令 $x_2 + \alpha$ 进行 y_2 与 y_2' 计算,

否则 $x_2 = k_2$, $y_2 = h_2$, $y_2' = V_2$ 。

C) 第三段 (“降速供油工作段”):

滚轮中心按降速运动, 油泵凸轮外型为变曲率。实际供油工作段就为本段。几何平均供油速度, 降速斜率, 总工作延续角均可同时选择。设计自由度较大。

$$y_3 = h_2 + \frac{2}{9} V_2 \cdot x_3 - \frac{V_2 - V_4}{9k_3} x_3^2 \quad (\text{毫米}) \quad (8)$$

$$y_3' = V_2 - \frac{V_2 - V_4}{k_3} \cdot x_3 \quad (\text{米/秒}) \quad (9)$$

控制计算循环用以下条件:

$0 \leq x_3 \leq (k_3 - \alpha)$,

令 $x_3 + \alpha$ 进行 y_3 与 y_3' 计算。

否则 $x_3 = k_3$, $y_3 = h_3$, $y_3' = V_4$ 。

D) 第四段 (“降速结束段”):

滚轮中心按降速运动, 油泵凸轮外型为变曲率。自动满足 h_4 滚轮中心总行程。 k_4 不能过小, 否则曲率半径小。应重新调整 k_3 与 V_4 。

$$y_4 = h_3 + \frac{2 \cdot V_4 \cdot x_4}{9} - \frac{V_4 \cdot x_4^2}{9k_4} \quad (\text{毫米}) \quad (10)$$

$$y_4' = V_4 - \frac{V_4}{k_4} \cdot x_4 \quad (\text{米/秒}) \quad (11)$$

$$k_4 = \frac{3(h_4 - h_3)}{4} \quad (\text{度}) \quad (12)$$

控制计算循环用以下条件:

$0 \leq x_4 \leq (k_4 - \alpha)$, 令 $(x_4 + \alpha)$ 进行 y_4 与 y_4' 计算,

否则 $x_4 = k_4$, $y_4 = h_4$, $y_4' = 0$ 。

降速15*(3)油泵凸轮、滚轮中心升程与速度见表(2)及图3所示。

(2) 采用线切割加工母桃座坐标系的换算: 一般滚轮中心的升程与速度值是按极坐标给出的。而在进行线切割加工标准母桃时需给出钼丝中心直角坐标X与Y的增量, 即 ΔX , ΔY 。凸轮与滚轮的实际接触点A就是线切割的切割点。

要求出切割钼丝 O_2 点的直角坐标增量 ΔX , ΔY 。见图(4)所示。

A. 已知条件:

R_1 : 滚轮半径 (毫米)

R_3 : 钼丝半径 + 放电间隙量 (毫米)

y, y' : 滚轮中心在 OO_3 线上升程与速度 (毫米)(米/秒)

表(2) 转速15₍₃₎油泵凸轮升程与速度

φ	h	V	φ	h	V	φ	h	V	φ	h	V
度分	毫 米	米/秒	度分	毫 米	米/秒	度分	毫 米	米/秒	度分	毫 米	米/秒
20°	0.	0.	15'	0.3325	0.2959	30'	1.3860	0.6427	45'	3.2327	0.8321
15'	0.0002	0.0070	30'	0.3491	0.3035	45'	1.4220	0.6523	51°	3.2788	0.8269
30'	0.0008	0.0141	45'	0.3662	0.3111	41°	1.4585	0.6620	15'	3.3246	0.8218
45'	0.0018	0.0211	31°	0.3837	0.3188	15'	1.4955	0.6718	30'	3.3701	0.8167
21°	0.0031	0.0281	15'	0.4016	0.3265	30'	1.5331	0.6817	45'	3.4153	0.8116
15'	0.0049	0.0351	30'	0.4200	0.3343	45'	1.5713	0.6916	52°	3.4603	0.8065
30'	0.0070	0.0422	45'	0.4388	0.3421	42°	1.6100	0.7016	15'	3.5049	0.8014
45'	0.0096	0.0492	32°	0.4580	0.3499	15'	1.6492	0.7117	30'	3.5493	0.7962
22°	0.0125	0.0563	15'	0.4776	0.3577	30'	1.6890	0.7219	45'	3.5934	0.7911
15'	0.0158	0.0633	30'	0.4977	0.3656	45'	1.7294	0.7321	53°	3.6372	0.7860
30'	0.0195	0.0704	45'	0.5183	0.3735	43°	1.7704	0.7425	15'	3.6807	0.7809
45'	0.0236	0.0774	33°	0.5392	0.3815	15'	1.8120	0.7529	30'	3.7240	0.7758
23°	0.0281	0.0845	15'	0.5607	0.3895	30'	1.8540	0.7634	45'	3.7669	0.7707
15'	0.0330	0.0916	30'	0.5825	0.3975	45'	1.8967	0.7740	54°	3.8096	0.7655
30'	0.0383	0.0987	45'	0.6048	0.4056	44°	1.9400	0.7847	15'	3.8520	0.7604
45'	0.0440	0.1058	34°	0.6276	0.4137	15'	1.9839	0.7955	30'	3.8941	0.7553
24°	0.0501	0.1129	15'	0.6508	0.4219	30'	2.0284	0.8064	45'	3.9359	0.7502
15'	0.0565	0.1200	30'	0.6745	0.4301	45'	2.0735	0.8173	55°	3.9775	0.7451
30'	0.0634	0.1271	45'	0.6986	0.4385	45°	2.1192	0.8284	15'	4.0187	0.7310
45'	0.0706	0.1342	35°	0.7232	0.4466	15'	2.1656	0.8396	30'	4.0600	0.7348
25°	0.0783	0.1414	15'	0.7482	0.4550	30'	2.2125	0.8508	45'	4.1004	0.7297
15'	0.0864	0.1486	30'	0.7737	0.4634	45'	2.2601	0.8622	56°	4.1408	0.7246
30'	0.0948	0.1557	45'	0.7997	0.4718	46°	2.3083	0.8737	15'	4.1809	0.7195
45'	0.1037	0.1629	36°	0.8261	0.4803	15'	2.3572	0.8829	30'	4.2207	0.7144
26°	0.1129	0.1702	15'	0.8531	0.4888	30'	2.4067	0.8970	45'	4.2602	0.7093
15'	0.1226	0.1774	30'	0.8805	0.4974	45'	2.4569	0.9088	57°	4.2995	0.7041
30'	0.1326	0.1846	45'	0.9083	0.5060	47°	2.5074	0.9088	15'	4.3385	0.6990
45'	0.1431	0.1919	37°	0.9367	0.5147	15'	2.5577	0.9037	30'	4.3772	0.6939
27°	0.1540	0.1992	15'	0.9655	0.5235	30'	2.6078	0.8986	45'	4.4156	0.6888
15'	0.1652	0.2065	30'	0.9948	0.5323	45'	2.6575	0.8935	58°	4.4537	0.6837
30'	0.1769	0.2138	45'	1.0247	0.5411	48°	2.7070	0.8883	15'	4.4915	0.6786
45'	0.1890	0.2211	38°	1.0550	0.5501	15'	2.7562	0.8832	30'	4.5291	0.6734
28°	0.2015	0.2285	15'	1.0858	0.5590	30'	2.8052	0.8781	45'	4.5664	0.6683
15'	0.2144	0.2359	30'	1.1171	0.5681	45'	2.8538	0.8730	59°	4.6034	0.6632
30'	0.2277	0.2433	45'	1.1489	0.5772	49°	2.9022	0.8679	15'	4.6401	0.6581
45'	0.2414	0.2507	39°	1.1812	0.5863	15'	2.9502	0.8628	30'	4.6765	0.6530
29°	0.2555	0.2582	15'	1.2141	0.5956	30'	2.9980	0.8576	45'	4.7126	0.6479
15'	0.2701	0.2657	30'	1.2474	0.6048	45'	3.0455	0.8525	60°	4.7485	0.6427
30'	0.2851	0.2732	45'	1.2813	0.6142	50°	3.0928	0.8474	15'	4.7840	0.6376
45'	0.3004	0.2807	40°	1.3156	0.6236	15'	3.1397	0.8423	30'	4.8193	0.6325
30°	0.3162	0.2883	15'	1.3506	0.6331	30'	3.1863	0.8372	45'	4.8543	0.6274

续表 (2)

φ	h	V	φ	h	V	φ	h	V	φ	h	V
度分	毫 米	米/秒	度分	毫 米	米/秒	度分	毫 米	米/秒	度分	毫 米	米/秒
61°	4.8890	0.6223	45'	5.8241	0.4638	30'	6.4872	0.3063	15'	6.8790	0.1488
15'	4.9234	0.6172	69°	5.8497	0.4587	45'	6.5041	0.3012	30'	6.8871	0.1437
30'	4.9576	0.6120	15'	5.8751	0.4536	77°	6.5207	0.2961	45'	6.8950	0.1386
45'	4.9915	0.6070	30'	5.9001	0.4485	15'	6.5370	0.2910	85°	6.9025	0.1335
62°	5.0250	0.6018	45'	5.9249	0.4434	30'	6.5530	0.2859	15'	6.9098	0.1284
15'	5.0583	0.5967	70°	5.9494	0.4384	45'	6.5687	0.2809	30'	6.9168	0.1234
30'	5.0913	0.5916	15'	5.9736	0.4333	78°	6.5842	0.2758	45'	6.9235	0.1183
45'	5.1240	0.5865	30'	5.9976	0.4282	15'	6.5994	0.2707	86°	6.9299	0.1132
63°	5.1565	0.5813	45'	6.0212	0.4231	30'	6.6143	0.2656	15'	6.9361	0.1081
15'	5.1886	0.5762	71°	6.0446	0.4180	45'	6.6289	0.2605	30'	6.9420	0.1030
30'	5.2205	0.5711	15'	6.0677	0.4130	79°	6.6432	0.2555	45'	6.9475	0.0980
45'	5.2521	0.5660	30'	6.0905	0.4079	15'	6.6573	0.2504	87°	6.9528	0.0929
64°	5.2834	0.5609	45'	6.1130	0.4028	30'	6.6710	0.2453	15'	6.9579	0.0878
15'	5.3144	0.5558	72°	6.1352	0.3977	45'	6.6845	0.2402	30'	6.9626	0.0827
30'	5.3451	0.5506	15'	6.1572	0.3926	80°	6.6977	0.2351	45'	6.9671	0.0776
45'	5.3756	0.5455	30'	6.1788	0.3875	15'	6.7107	0.2300	88°	6.9712	0.0725
65°	5.4058	0.5404	45'	6.2002	0.3825	30'	6.7233	0.2250	15'	6.9751	0.0675
15'	5.4356	0.5353	73°	6.2213	0.3774	45'	6.7357	0.2199	30'	6.9787	0.0624
30'	5.4652	0.5302	15'	6.2422	0.3723	81°	6.7477	0.2148	45'	6.9820	0.0573
45'	5.4945	0.5251	30'	6.2627	0.3672	15'	6.7595	0.2097	89°	6.9851	0.0522
66°	5.5236	0.5199	45'	6.2830	0.3621	30'	6.7710	0.2046	15'	6.9878	0.0471
15'	5.5523	0.5148	74°	6.3029	0.3571	45'	6.7823	0.1996	30'	6.9903	0.0421
30'	5.5808	0.5097	15'	6.3226	0.3520	82°	6.7932	0.1945	45'	6.9925	0.0370
45'	5.6090	0.5046	30'	6.3420	0.3469	15'	6.8039	0.1894	90°	6.9944	0.0319
67°	5.6368	0.4995	45'	6.3612	0.3418	30'	6.8142	0.1843	15'	6.9961	0.0268
15'	5.6644	0.4944	75°	6.3800	0.3367	45'	6.8243	0.1792	30'	6.9974	0.0217
30'	5.6918	0.4892	15'	6.3986	0.3317	83°	6.8342	0.1742	45'	6.9985	0.0167
45'	5.7188	0.4841	30'	6.4169	0.3266	15'	6.8437	0.1691	91°	6.9993	0.0116
68°	5.7456	0.4790	45'	6.4349	0.3215	30'	6.8529	0.1640	15'	6.9998	0.0065
15'	5.7720	0.4739	76°	6.4526	0.3164	45'	6.8619	0.1589	30'	6.9999	0.0014
30'	5.7982	0.4688	15'	6.4700	0.3113	84°	6.8706	0.1538	34'20"	7.0000	0.0000

w_k : 凸轮转动角速度, $w_k = \frac{\pi \cdot n_{\text{凸轮}}}{30}$ (弧度/秒)

B. 计算 O_2 点直角坐标公式:

根据瞬心法, 可导出 O_2 点的直角坐标 X_{G03} , Y_{G02} 。

用后一点坐标减去前一点坐标即为 ΔX , ΔY 增量。因此加工出来的标准母桃为“多折线凸轮”。随着计算间隔减小, “多折线凸轮”可愈接近计算出的标准母桃桃型。为了保证精度, 减小误差, 应在电子计算机上进行。

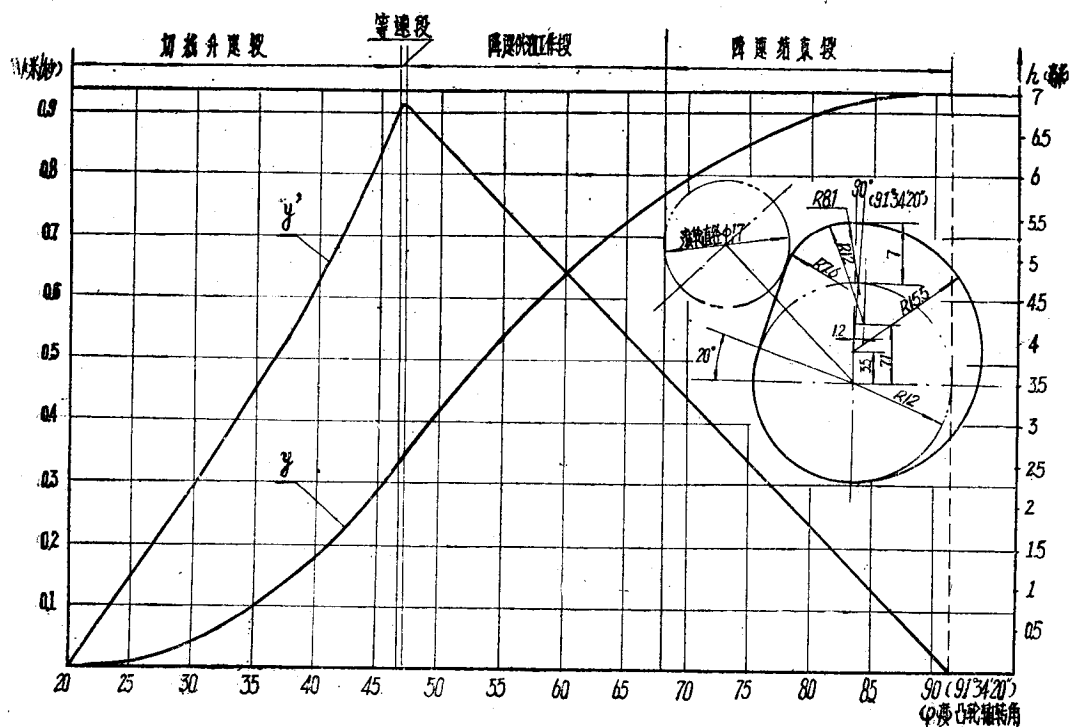


图 (3) 降速15₍₃₎油泵凸轮柱塞行程与速度曲线

$$\gamma_1 = \arcsin \frac{y' \times 10^3}{R_1 \cdot \omega_k} \quad (13)$$

$$X_{G03} = (R_1 + R + y) \cdot \cos(\alpha_1 + \Sigma x) - (R_1 - R_3) \cdot \sin(\gamma_1 + 90^\circ - \alpha_1 - \Sigma x) \quad (14)$$

$$Y_{G02} = (R_1 + R + y) \cdot \sin(\alpha_1 + \Sigma x) - (R_1 - R_3) \cos(\gamma_1 + 90^\circ - \alpha_1 - \Sigma x) \quad (15)$$

③参数选择:

A. 几何平均供油速度的选择:

实际供油速率 (mm³/循环·度) 受柱塞直径、油泵凸轮型线, 轴针式喷油嘴高压腔容积与流通特性、油管长度、供油节流、油泵凸轮转速、出油阀减压容积等结构参数的影响, 同时还受调整参数、运转工况与燃油供给系统内各种波动过程的综合影响。

油泵凸轮在供油工作段的几何平均供油速度、降速斜率、供油工作段速度曲线形状直接影响喷嘴压力与实际供油速率和油束贯穿距离, 并对整机性能产生影响。

对已研制过的十五种油泵凸轮, 在选定的油泵凸轮与油泵主要零件参数情况下, 根

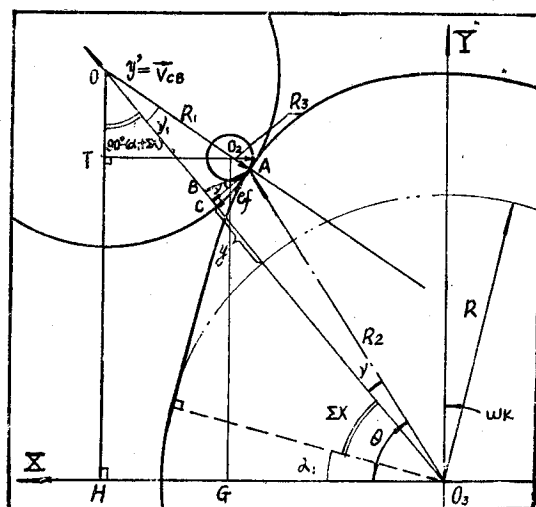


图 (4) 线切割示意图

表 (3)

序 号	油泵凸轮 名 称	柱塞关闭 油孔行程	几何供油 始止速度	几何供油 终止速度	几 何 平 均 供 油 速 度	供油延续 角参考值	相对降速 斜 率 $\frac{V-V_0}{\varphi}$	备 注
		h_0 (毫米)	V_0 (米/秒)	V (米/秒)	V_m (米/秒)	φ° (凸轮 转角)	(米/秒·度)	
1	R1.8	3 4.85~5.1	1.04 1.091	1.16 0.484	采用跨速供油 $V_{\max}=1.3126$ 0.787	7.2° 9°	— -0.0675	整机性能差 整机性能稍 好
2	R6 R6凹面	3 4~4.1	1.03 0.91	0.78 0.625	0.905 0.7675	9°23' 9°30'	-0.0267 -0.0300	整机性能较 好
3	R6.45 (双切线)	3 3.75~4	0.9767 0.8815	0.7261 0.6154	0.8514 0.7485	10° 10°	-0.02506 -0.02661	整机性能良 好
4	R6.5 R6.5凹面	3	0.99	0.74	0.865	10°	-0.025	
5	R7.4	3	0.91	0.69	0.80	10°39'	-0.02065	
6	R7.5 R7.5凹面	3	0.96	0.68	0.82	10°30'	-0.02665	
7	R7.7	3	0.88	0.67	0.775	10°57'	-0.01917	整机性能良 好
8	R8	3	0.86	0.65	0.76	11°15'	-0.01865	
9	R9	3 2.25~2.5	0.77 0.85	0.55 0.64	0.66 0.745	12°12' 10°30'	-0.01803 -0.01907	整机性能良 好
10	降速15°(1)	3	0.8123	0.6927	0.7503	10°	-0.01186	整机性能良 好
11	降速15°(2)	3	0.8361	0.6722	0.7542	10°	-0.01637	整机性能良 好
12	降速15°(3)	3	0.8576	0.6530	0.755	10°	-0.02049	(采用 $\phi 8$ 柱 塞, $\phi 5$ 出油 阀大孔紧 座) 整机性能好
注: 以上数据仅供设计参考。								

据大量试验的统计值, 找出切线油泵凸轮鼻角半径与最佳整机性能情况下的柱塞关闭油孔行程 h_0 , 见图(5)所示。

当鼻角半径 $r < 7.5$ 毫米时, 只有通过增加柱塞关闭油孔行程 h_0 , 才能使平均几何供油速度接近0.75米/秒。R1.8切线凸轮, 曲率半径过小, 降速斜率绝对值偏大。供油终了前柱塞速度过低, 油束雾化质量差。因此, 最佳几何平均供油速度稍大于0.75米/秒为0.787米/秒。见表(3)所示。

当鼻角半径 $r > 8$ 毫米时, 只有通过减小柱塞, 关闭油孔行程 h_0 , 使几何平均供油速度向0.75米/秒提升。见表(3)所示。

当鼻角半径 r 在7.5~8毫米之间时, 柱塞关闭油孔行程 $h_0 = 3$ 毫米, 平均几何供油速度接近0.75米/秒。

图(5)所示鼻角半径与最佳柱塞关闭油孔行程的关系曲线, 实质上是反映了X105系列复合式燃烧系统对燃油供给系统提出了一个平均几何速度的要求。整机性能良好的平均几何速度处在0.74~0.78米/秒。

在平均几何供油速度的概念中, 包含有供油延续角 φ 的大小。在油泵凸轮设计中, 为了简化, 取 $\varphi = 10^\circ$ (凸轮转角)。实际在额定工况的供油延续角要比 10° (凸轮转角)稍大。

在设计中, 我们选取低平均几何供油速度, 为形成低平均供油速率:

$$V_m = 0.7503 \sim 0.755 \text{ 米/秒}$$

$$\varphi = 10^\circ \text{ (凸轮转角)}$$

B. 降速斜率的选择:

根据大量整机性能试验结果来看: 在燃油供给系统中, 通过降低柱塞平均几何供油速度 V_m , 使供油速率峰值限制在6.8毫米³/循环·度以内, 选择油泵凸轮在全部降速段供油与相对降速斜率 $\left| \frac{V-V_0}{\varphi} \right|$ (V 几何供油终止速度, V_0 几何供油始点速度, φ 供油延续角)的大小。

整机性能可以获得改善。

进入高压油管的燃油速度愈高, 由于惯性和压缩率, 导致燃油的堆积将愈大, 结果从该点传递波的压力将愈高^[2]。可导出以下公式。

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \sqrt{\frac{K\rho}{g}} \quad (16)$$

式中:

ΔP —压力增量

ΔV —燃油速度增量

K —燃油弹性模数

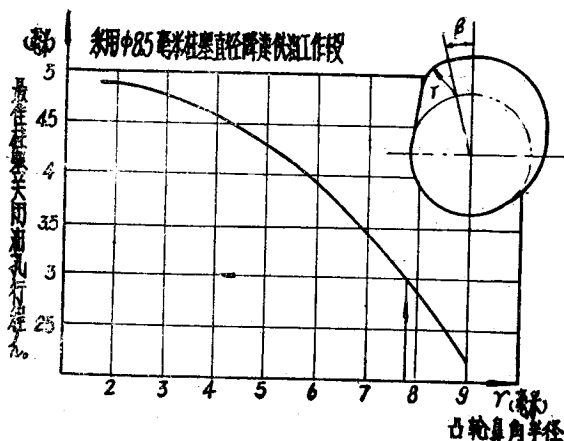
g —重力加速度

ρ —燃油密度

取压力与速度对 φ (凸轮转角, 度) 的偏微分。

$$\frac{\partial P}{\partial \varphi} = \frac{\partial V}{\partial \varphi} \sqrt{\frac{K\rho}{g}} \quad (17)$$

由于在降速段供油 $\frac{\partial V}{\partial \varphi}$ 值为负值, 因此 $\frac{\partial P}{\partial \varphi}$ 也为负值。嘴端压力波为传递波与反射波的



图(5) 1号泵切线凸轮鼻角半径 r 与 h_0 关系

叠加值。具有相同几何平均速度 $V_m = \frac{V_0 + V}{2}$ 降速油泵凸轮将比升速油泵凸轮有低的嘴端压力峰值。

由上述公式(16)在不考虑摩擦阻力情况下可导出高压油管中产生的初压力 P ：

$$P = V_P \left(\frac{D_{柱}}{d} \right)^2 \sqrt{\frac{K\rho}{g}} \quad (18)$$

V_P ——柱塞速度

$D_{柱}$ ——柱塞直径

d ——油管孔径

由公式(18)可以看出减小压力波幅值的方法减小柱塞速度 V_P 与减小 $D_{柱}$ 柱塞直径。一般油管孔径定为 2 毫米。

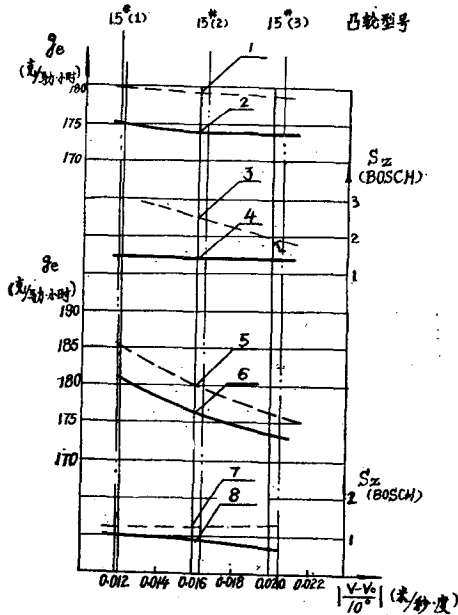
选择柱塞直径 $\phi 8$, $V_m = 0.7503 \sim 0.755$ 米/秒, 相对降速斜率 $\frac{V - V_0}{\varphi} = -0.02049 \sim -0.01186$ 米/秒·度的几种油泵凸轮进行整机性能试验。

当相对降速斜率 $\left| \frac{V - V_0}{\varphi} \right|$ 趋向 0.02 时, 整机性能将全面得到改善, 见图(6)所示。

$\left| \frac{V - V_0}{\varphi} \right|$ 偏大时, 低负荷情况良好, 标定工况、尤其是超负荷性能恶化。这是因为供油终止速度 V 太低, 油束雾化质量差。

$\left| \frac{V - V_0}{\varphi} \right|$ 偏小时, 低负荷与高转速性能恶化。

其中以 $V_m = 0.755$ 米/秒、 $\frac{V - V_0}{\varphi} = -0.02049$ 米/秒·度的降速 15[#](3) 凸轮获得了良好的动力经济指标。



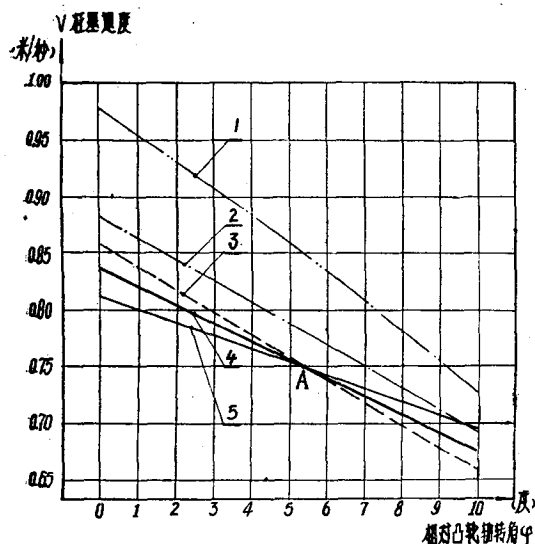
图(6) 相对降速斜率 $\left| \frac{V - V_0}{10^\circ} \right|$ 对性能指标 g_e 、 S_z 的影响

(X2105 型柴油机, $\phi 8$ 柱塞, $\phi 5$ 出油阀, 大孔紧座, $h_0 = 3.0$ 毫米。)

- 1—1500 转/分, 26.4 马力, g_e 。
- 2—1500 转/分, 24 马力, g_e 。
- 3—1500 转/分, 26.4 马力, S_z 。
- 4—1500 转/分, 24 马力, S_z 。
- 5—2000 转/分, 33 马力, g_e 。
- 6—2000 转/分, 30 马力, g_e 。
- 7—2000 转/分, 33 马力, S_z 。
- 8—2000 转/分, 30 马力, S_z 。

2000转/分与2000转/分以上的整机性能获得改善。例如：X4105，在2300转/分 $N_e=71.3$ 马力， $g_e=175.5$ 克/马力·小时， t_r （总管）=550℃。

五种油泵凸轮供油工作段见图（7）所示。



图（7）五种油泵凸轮供油工作段速度
1—双切线。2—R7.7。3—15°(3)。4—15°(2)。5—15°(1)。

C. 降速供油工作段速度曲线形状的选择：

根据多种油泵凸轮的试验分析来看，适当提高供油终止速度 V ，而保持平均几何供油速度 $V_m=0.75$ 米/秒左右，1500转/分～2000转/分超负荷性能可以获得改善。适当维持供油始点速度 V_0 ，而使 $V_m=0.75$ 米/秒左右时，低负荷性能会有所改善。从分析上看，降速供油工作段的速度曲线稍有凹形为好。

切线油泵凸轮在定鼻角半径上供油时，降速速度曲线稍有凸形，在保证低负荷与标定工况的整机性能情况下，高转速与超负荷的性能就难于同时兼顾。

在油泵凸轮试验研究中，使 V_m 与

$$\left| \frac{V-V_0}{\varphi} \right| \text{ 相近，对降速供油工作段曲线形}$$

状进行选择，以直线型较优于稍有凸形、正弦形的形状。降速15°油泵凸轮采用直线型的降速供油工作段。见图（7）所示。

④降速油泵凸轮计算公式的特点：

降速油泵凸轮的计算方法，是采用“四段组合方程式”。这种计算方法具有一定的优点：

A. 有较大的设计自由度：在设计新型油泵凸轮型线时，一般考虑以下五项：几何平均供油速度、降速斜率、供油工作段速度型线、柱塞关闭油孔始点升程 $h_0=3$ （毫米）、滚轮中心最大升程 $h_4=7$ （毫米）。

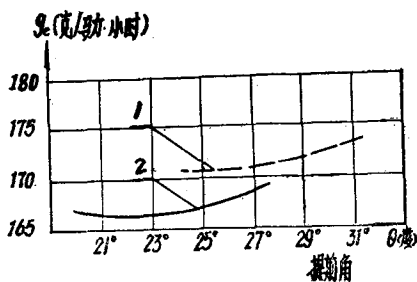
切线油泵凸轮与双切线油泵凸轮只能同时满足三项，而降速油泵凸轮可以同时满足五项，因此，在设计上有较大的自由度。

B. 可寻找最佳供油工作段型线，在实际供油时主要是“第三段”（降速供油工作段），根据供油规律，整机性能与内部参数的研究，可以改变“第三段”方程式，为某种函数形式。例如：为抛物线、半波余弦……等型线。可寻找最佳供油工作段型线。目前我们采用直线型降速供油工作段，今后还应进行降速凹型供油工作段的研究，以求改进整机的性能指标。

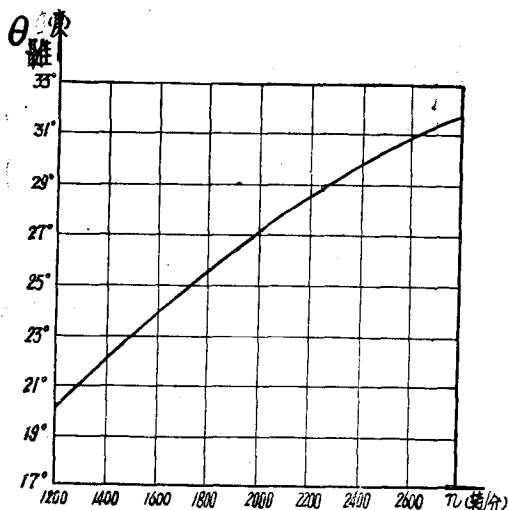
C. 该种计算方法，不仅可以进行降速供油段计算。只要改变已知参数就可进行升速、等速、跨速供油工作段的凸轮计算。

⑤性能试验：

A. 最佳供油提前角调整特性试验：降速15°（3）油泵凸轮在1500～2000转/分，12小时功率的提前角特性见图（8）所示。油耗 g_e 曲线相当平坦。供油提前角 θ 在 $\pm 4^\circ$ （曲轴转



图(8) 1500、2000转/分提前角特性
(X4105, 15°(3) 油泵凸轮,
φ8柱塞, φ5出油阀, 大孔紧座。)
1—2000转/分, 60马力。
2—1500转/分, 48马力。



图(9) 1200~2600转/分最佳供油提前角
(X4105, 15°(3) 油泵凸轮, φ8柱5塞, φ5
出油阀, φ3大孔紧座。)

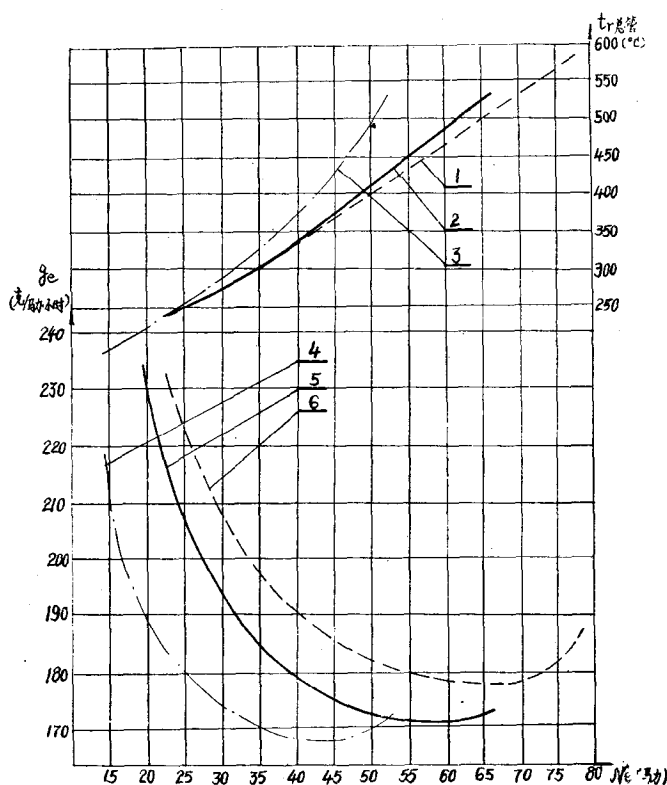


图 10

1—2300转/分 2—2000转/分 3—1500转/分
4—1500转/分 5—2000转/分 6—2300转/分

角) 范围内变化, 油耗仅相差 $\Delta g_e \leq 2.8$ 克/马力·小时。燃油耗对提前角不敏感。这有利于批产装配工艺与使用、维修。是该种油泵凸轮配φ8柱塞的优点之一。

在X4105型柴油机上, 测取1200~2600转/分, 12小时功率的最佳提前角特性见图(9)所示。

B. 负荷特性试验:

降速15°(3) 油泵凸轮在1500、2000、2300转/分负荷特性(X4105)见图(10)所示。

由1500转/分负荷性油耗曲线看, 油耗低的范围宽广。烟度小、排温较低。在35~50马力内, $g_e \leq 170$ 克/马力·小时。烟度值仅为 $S_z = 0.8$ (BOSCH), 总管排温 $t_r = 470^\circ\text{C}$ 。马力潜在力大。

从2000转/分负荷特性曲线中, 更明显地看出该种油泵凸轮配φ8柱塞的优点。不仅油耗曲线