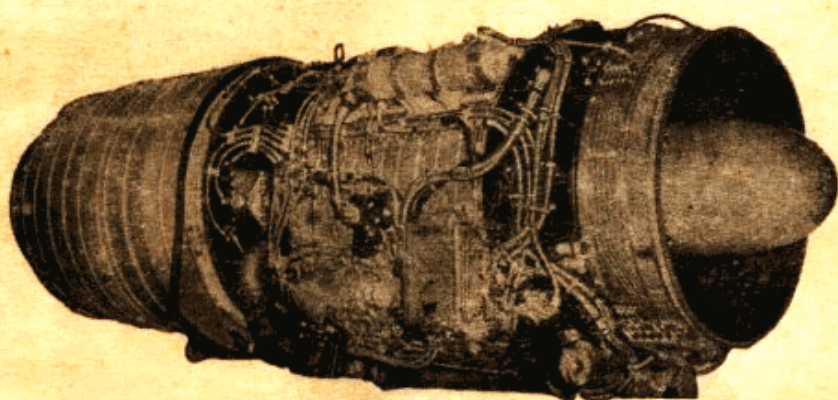


航空发动机 設計參考資料

薩普菲尔 (Sapphire) A. S. Sa. 7 型
渦輪噴氣发动机

北京航空学院发动机資料編輯室編



國防工業出版社

內容簡介

薩普菲爾 (Sapphire) A. S. Sa. 7型發動機是英國早期大推力發動機機種之一。自1946年，薩普菲爾 Sa. 1型開始製造以來，經過十年多的改進，在英國航空發動機中，該機曾獲得優秀機種的稱號。

該機結構設計特點較多，例如：進氣口處有完善之防冰系統，13級軸向壓縮機配有可變面積之進氣道，因而改善了發動機之加速性與操縱性，採用了燕窩式環形燃燒室，提高了燃燒的完全係數，並有效的縮短了發動機長度，渦輪部件的分段鼓輪軸設計，提高了轉子的臨界轉速，採用能迅速起動的火藥渦輪式起動機特點等。

本書對發動機性能、結構，作了較全面的介紹與分析。書末附有模擬等比例的縱、橫剖面圖。對發動機設計工作有實用價值，亦可供航空院、校師生及生產人員學習參考。本書為航空噴氣發動機設計參考資料中方案設計之第三卷。

北京航空學院發動機資料編輯室編

國防工業出版社

北京市書刊出版業營業許可証出字第074號
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

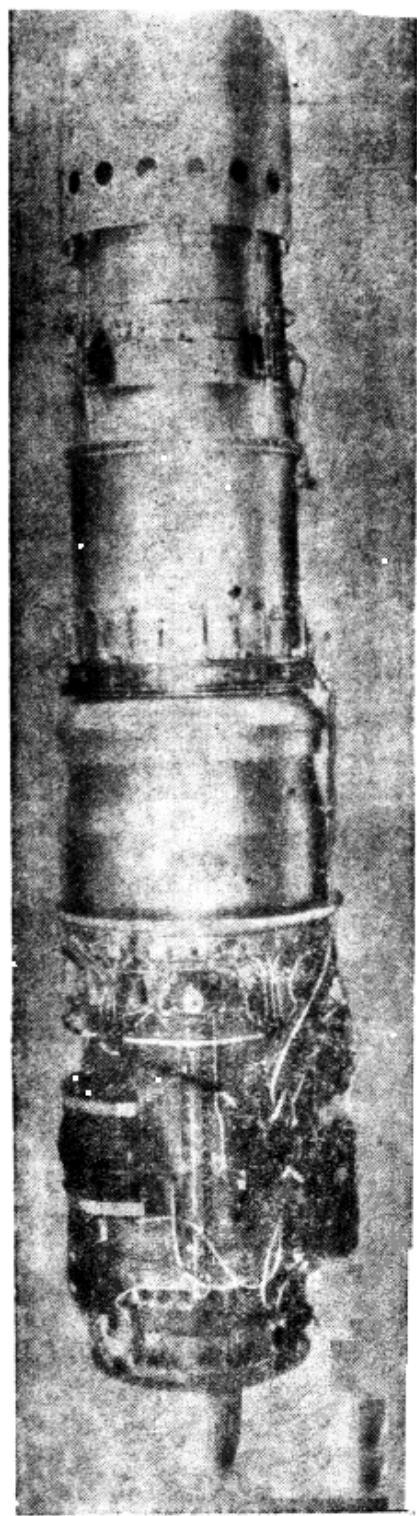
850×1168^{1/32} 印張1^{14/16} 插頁1 30千字

1959年6月第一版

1959年6月第一次印刷

印數：0,001—2,350冊 定價：(11) 0.33元

NO. 2942 統一書號：15034·381



薩普菲爾號最新型別中的代表——美國制的“Wright J65-W-6，帶有加力燃燒室”

編者的話

自我国社会主义建設大跃进以来,随着工、农业的空前發展,科学技术各个领域飞跃前进,在我国航空科学方面,在党的领导下,各有关部門間开展了共产主义大协作,且作出了一定的成績。

为了有助于航空发动机的設計与教学工作,我室师生着手彙編一套有关发动机設計的参考資料。目前只选择一些資本主义国家的航空发动机,作了分析研究,并依据資料繪出等比例的縱、橫剖面圖,由于資料不足,水平有限,某些結構又屬揣測而得,圖中尺寸亦多出于估計,故仅供作参考,書中某些問題分析叙述亦有不够透澈或錯誤之处,請讀者指正。

書中所述各机种的基本資料均选自英、美等国杂志,因而其技术性能和构造形式的介紹定有虛夸与失实之处,其設計主导思想亦多由最大限度地追求利潤及侵略戰爭出發,与我們社会主义国家設計思想根本不同。在編写过程中,我們虽尽力用批判态度,选其精华,去其糟粕,仍希讀者在参考本書时,注意批判接受。

参加本書資料搜集、研究和整理工作的有本院有关教研室教师及58年畢業生。

在本書編輯中,蒙国际航空杂志編輯部提供了許多資料,国防工业出版社对本書出版給予大力支持,我們謹致以衷心感謝。

北京航空学院发动机資料編輯室

一九五九年一月

目 录

第一章 总论	5
§ 1 薩普菲尔号机演变概况	5
§ 2 Sa 7 型机概述	10
第二章 发动机轉子支承及承力系統	13
§ 1 发动机轉子支点及轴承	13
§ 2 承力系統	14
第三章 各部件的构造分析	16
§ 1 压缩机	16
(一) 可变面积的进气道	16
(二) 气流通路	16
(三) 工作叶片及其固定	17
(四) 盘与轴的联接	20
(五) 压缩机机匣与导流窗	23
(六) 防冰装置	26
§ 2 燃烧室	27
(一) 环形蒸发式燃烧室的主要组成部分及工作过程	27
(二) 环形蒸发式燃烧室的构造	28
(三) 环形蒸发式燃烧室的某些特点	30
§ 3 涡轮	32
(一) 涡轮通道、导向器及涡轮机匣	32
(二) 涡轮轉子	34
§ 4 尾喷筒	35
§ 5 发动机的冷却系統	35
第四章 附件系統	37
§ 1 附件傳动	37
§ 2 起动机系統	38
§ 3 发动机的潤滑系統及燃油系統	40

第一章 总 論

§ 1. 薩普菲尔号机演变概况

薩普菲尔 (Sapphire 简称 Sa.) 发动机是英国早期优秀的太推力发动机之一。自 1946 年开始生产以来，经过十年多的改进，发动机在性能和结构方面都获得显著进步，据说该机种已由 Sa. 1 型发展到 Sa. 12 型，但目前使用最广的型号还是 Sa. 1 型及 Sa. 7 型。薩普菲尔号发动机发展的经历，可概括说明如下：

薩普菲尔号机的原始机种叫“福莱达” (Freda)。缘于 1940 年，英国“Metropolitan-Vickers” (简称 M. V.) 公司设计并试制成功一种九级轴向压缩机涡轮喷气发动机，即“福莱达” F. 1 型，后经一系列改进，型号由 F. 2/4, F. 3 和 F. 5 发展至 F. 9 型。F. 9 型机系于 1946 年设计，试制，翌年 (1947 年) 新品试车合格，被命名为“薩普菲尔”号，简称 Sa.。

M. V. 公司所设计的供研究用 Sa. 1 型机，推力不到 7000 磅 (3180 公斤)。为了使该机获得实际应用，该公司对某些构造部分进行重新设计，推力随之增高到 7380 磅 (3340 公斤)，该机称为 M. V. Sa. 2 型。

1947 年阿姆斯特朗·西特莱 (Armstrong Siddeley 简称 A. S.) 公司接替了“薩普菲尔”号的改进和制造工作，此后该号机种就属于 A. S. 公司的专利产品并被简称为 A. S. Sa. 号机。1948 年该公司对接收的 Sa. 1 型重新进行试车及正式验收试车，1950 年又进行了飞行试验。

Sa. 2 型，在 1949 年验收时推力为 7380 磅 (3340 公斤)，后来提高到 7500 磅 (3400 公斤)。1951 年 Sa. 2 型机装在“流星式”飞机上创造了当时起飞爬高的速度记录 (起飞后升高 12000 公尺，

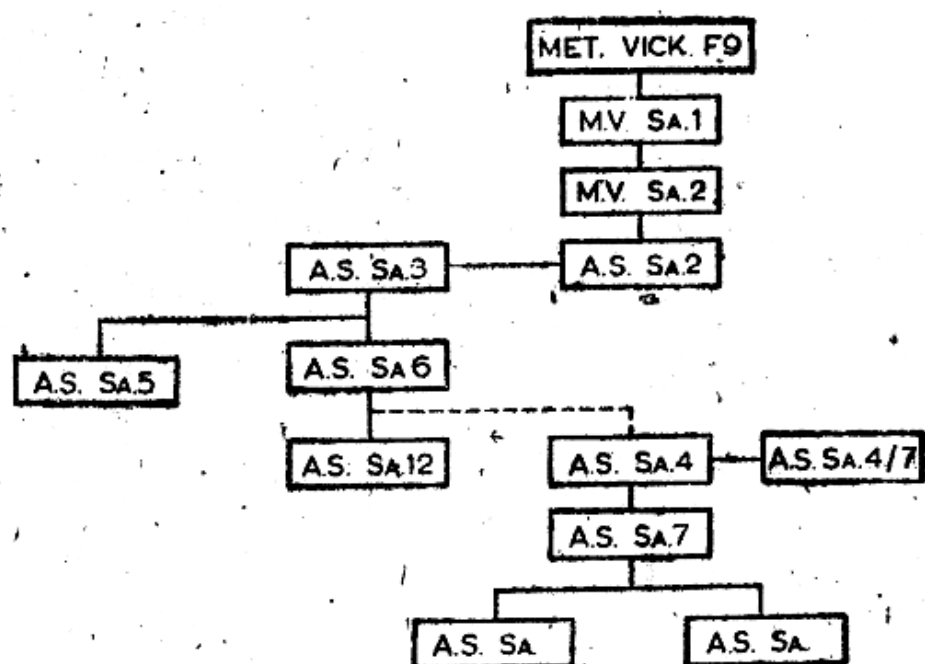


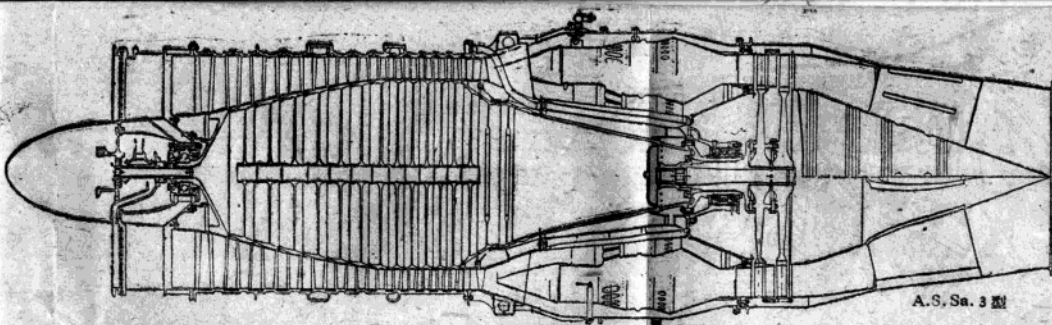
圖1 薩普菲爾號發動機型號演變圖解。

历时3分零7秒)。

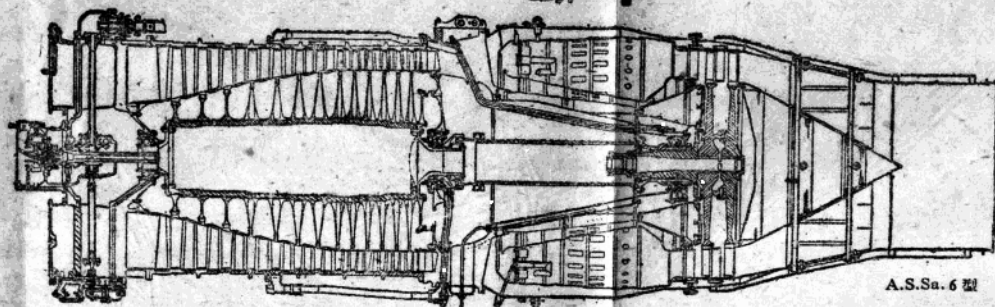
与此同时 A. S. 公司澈底地研究了“薩普菲爾”号机，对某些部分进行了重新設計，制造成 Sa. 3 型。Sa. 3 型保留了 M. V. 公司的高压压缩机及优秀的渦輪气动力設計，但在构造方面进行了很大的改进，主要有以下几方面：

1. 改进了中間軸的設計，并考虑到原有的大直徑圓錐形主軸对于战斗机在飞行中所承的負荷的問題；
2. 将笨重的焊接式压缩机鼓輪改为輪鼓軸和輪盤組零件；
3. 采用了环形蒸發式燃燒室。

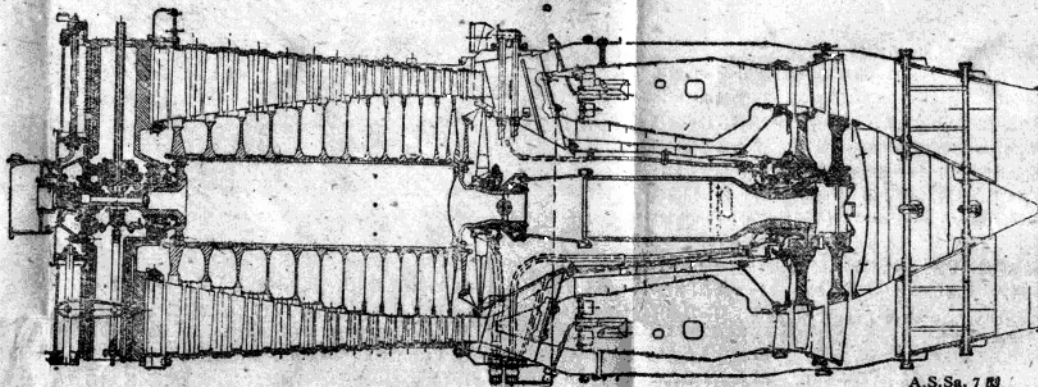
Sa. 3 型在 1950 年驗收时推力为 7220 磅 (3270 公斤)，燃料消耗率为 0.916 公斤/公斤·小时。1951 年 1 月，Sa. 3 型又通过了推力 7590 磅 (3400 公斤)、燃料消耗率 0.91 公斤/公斤·小时的定型試車。同年上半年 Sa. 3 型在試車台試車，轉速提高了 300 轉/分，达到 8600 轉/分。还由于减小了压缩机进口导向叶片的安装角，增大空气流



A.S. Sa. 3 型



A.S. Sa. 6 型



A.S. Sa. 7 型

图2 A. S. Sa. 3, 6 及 7 型发动机结构改进示意图。

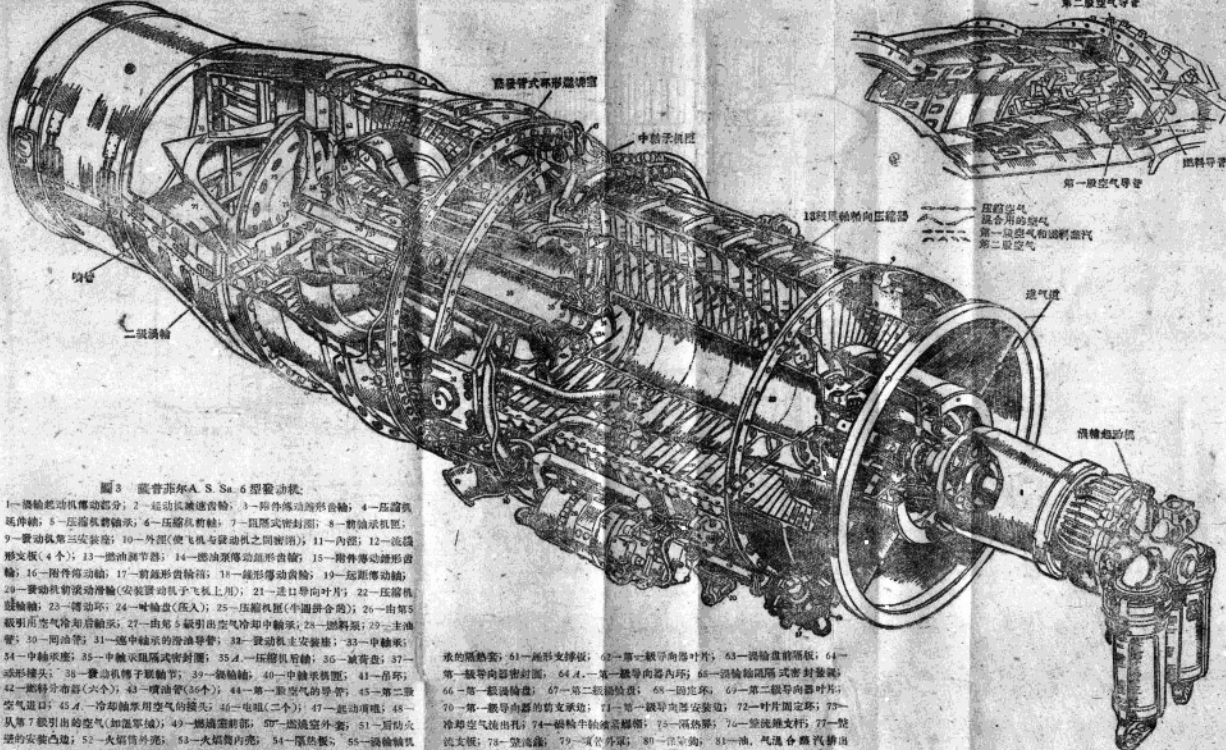


圖3 威普尔A.S. 6型發動機

1—渦輪壓氣機轉動部分；2—運動機減速齒輪；3—附件傳動齒輪；4—壓縮機
延伸軸；5—壓縮機齒輪；6—壓縮機齒輪；7—阻壓式密封圈；8—齒輪承座；
9—發動機第三安裝座；10—外環（使飛機與發動機之間密封）；11—內環；12—流道
形支板（4個）；13—燃油調節器；14—燃油泵傳動齒輪；15—附件傳動齒輪；
16—附件傳動齒輪；17—前座形齒輪；18—後座形齒輪；19—前座傳動齒輪；
20—發動機前座傳動齒輪（安裝在飛機上）；21—進口導向叶片；22—壓縮機
齒輪；23—傳動環；24—軸齒輪（壓入）；25—壓縮機（半圓形齒輪）；26—由第5
級引出空氣冷卻齒輪；27—由第5級引出空氣冷卻齒輪；28—燃料泵；29—主油
管；30—燃油管；31—由中軸系傳動的齒輪；32—發動機主安裝座；33—齒輪承
座；34—中軸系座；35—中軸系阻壓式密封圈；35A—壓縮機齒輪；36—減齒座；37—
減齒座；38—發動機傳動齒輪；39—齒輪；40—中軸系齒輪；41—齒座；
42—燃料分布器（6個）；43—燃油管（36個）；44—第一級空氣的導管；45—第二級
空氣進口；45A—冷卻齒輪用空氣的齒輪；46—電磁（2個）；47—燃油噴嘴；48—
風扇7級引出的空氣（加溫空氣）；49—燃油噴嘴；50—燃油噴嘴；51—后防火
壁的安裝齒輪；52—火鉗齒輪；53—火鉗齒輪；54—燃油管；55—齒輪承座；
56—齒輪承座的延伸部分；57—齒輪承座；58—后齒輪；59—后齒輪座；60—后齒

承的齒輪座；61—齒形支撐座；62—第一級導向叶片；63—齒輪齒座；64—
第一級導向齒輪座；64A—第一級導向齒輪座；65—齒輪齒座；66—齒輪齒座；
66A—齒輪齒座；67—第二級齒輪座；68—齒輪座；69—第二級導向叶片；
70—第一級導向齒輪的齒輪座；71—第一級導向齒輪座；72—叶片齒座；73—
冷卻空氣進口；74—齒輪齒座；75—齒輪座；76—齒輪座；77—齒
輪座；78—齒輪座；79—齒輪座；80—齒輪座；81—油、氣混合齒輪出口；
82—齒輪座；83—出口齒輪座。

量，终于在3月通过了推力为8000磅（3620公斤）的定型试车。

Sa. 6型是由Sa. 3型改进而来，其性能有了提高。1952年3月，Sa. 6型通过定型试车，推力达8300磅（3760公斤），燃料消耗率为0.90公斤/公斤·小时。以Sa. 6型的额定推力8000磅（3620公斤）为基础又继续制造了MK100, 101, 102, 103。

当时，为了满足飞机性能设计对“萨普菲尔”提出的增高推力的要求，A. S. 公司想尽办法提高发动机的单位迎面推力，设计了和原来重量，原来尺寸相同的新型发动机。最初设计了Sa. 4型，此发动机于1952年7月通过了9700磅（4400公斤）的验收试车。若将Sa. 6型和Sa. 4型进气面积的变化情况加以比较，可以看出，推力之所以能显著地增大，主要是由于空气流量的增加。当然，不可否认，由于在设计中注意了前几型发动机的试验特性和经验，也给性能的改善带来了很大的助益。

鉴于从Sa. 3型到Sa. 6型产品中，各型推力的提高主要是把Sa. 3型的转速略为提高了一些，所以A. S. 公司决定再改进Sa. 4型，逐步发展至Sa. 7型。新型的Sa. 7型于1952年8月发出推力10400磅（4720公斤）。1954年10月通过了10200磅（4620公斤）的定型试车，后来于1955年3月又通过了10500磅（4760公斤）的定型试车，最后推力竟达到11000磅（5000公斤）。Sa. 7型的单位迎面推力为1379磅/呎²（6720公斤/公尺²），这是资本主义国家已公布的涡轮喷气式发动机中最高数值，其推力数值也是通过定型试车的、单轴涡轮喷气式发动机中最大的一个，而其燃油消耗率降为0.85公斤/公斤·小时。

据说Sa. 9型使用在格洛斯特“标枪式”和汉莱·培基“胜利者”等飞机上。

关于使用加力燃烧室的问题，在“康培拉”飞机上做了飞行试验。据说使用的型别是Sa. 5型，但未正式公布。Sa. 9型与Sa. 6型比较起来压缩机增加了1级，燃料蒸发管由36个减至24个，推力12700磅（5760公斤），燃油消耗率0.82公斤/公斤·小时。Sa. 10

型据說是 14000 磅 (6350 公斤)。此外还知道有 Sa. 8 型和 Sa. 12 型, 但詳情不明。

§ 2 Sa. 7 型机概述

基本数据:

地面靜推力:	4760 公斤 (10500 磅)
燃油消耗率:	0.85 公斤/公斤·小时
压 縮 比:	7.2:1
直 徑:	95 公分
長 度:	335.3 公分
淨 重:	1385 公斤

以后又經過某些改进, 据說因为流量与压力比的某些增加, 使得推力也增加了一些, 改进后发动机的基本数据为:

地面靜推力:	4990 公斤 (11000 磅)
燃油消耗率:	0.89 公斤/公斤·推力·小时
压 縮 比:	——
直 徑:	95 公分
長 度:	335.3 公分
淨 重:	1385 公斤

普菲尔 Sa. 7 型带有防冰装置。从第 13 級压缩机后引出的热空气 (用来对进气部分加温。由于起动机功率較以前增大, 但为了减小起动机輪廓尺寸, 只得将它的轉速提高。因此在起动机与发动机轉子之間增装有減速器装置。Sa. 7 型的軸向式压缩机共有 13 級, 正如一般英国带有軸向压缩机的噴气发动机一样, 它的級数很多, 但是压力比并不大 (估計 7.2:1)。在設計带有軸向压缩机噴气发动机时, 可以發現其外廓直徑往往被燃燒室或渦輪所决定, 因此在 Sa. 7 型上, 为了尽可能縮小外廓直徑, 故采用了环形蒸發式燃燒室。燃油首先噴入蒸發管中蒸發并与空气混合进入燃燒区燃燒。該燃燒室火焰筒与燃气收集器无明显界綫, Sa. 7 型

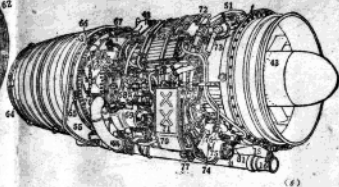
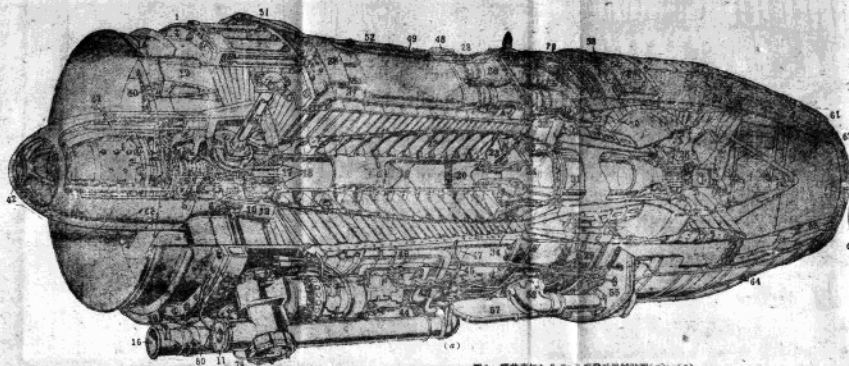


圖5 圖中KA-5.5a.7 發動機結構圖(a)。(b)。

1—電機；2—減速器；3—齒輪；4—齒輪；5—齒輪；6—齒輪；7—齒輪；8—齒輪；9—齒輪；10—齒輪；11—齒輪；12—齒輪；13—齒輪；14—齒輪；15—齒輪；16—齒輪；17—齒輪；18—齒輪；19—齒輪；20—齒輪；21—齒輪；22—齒輪；23—齒輪；24—齒輪；25—齒輪；26—齒輪；27—齒輪；28—齒輪；29—齒輪；30—齒輪；31—齒輪；32—齒輪；33—齒輪；34—齒輪；35—齒輪；36—齒輪；37—齒輪；38—齒輪；39—齒輪；40—齒輪；41—齒輪；42—齒輪；43—齒輪；44—齒輪；45—齒輪；46—齒輪；47—齒輪；48—齒輪；49—齒輪；50—齒輪；51—齒輪；52—齒輪；53—齒輪；54—齒輪；55—齒輪；56—齒輪；57—齒輪；58—齒輪。

31—齒輪；32—齒輪；33—齒輪；34—齒輪；35—齒輪；36—齒輪；37—齒輪；38—齒輪；39—齒輪；40—齒輪；41—齒輪；42—齒輪；43—齒輪；44—齒輪；45—齒輪；46—齒輪；47—齒輪；48—齒輪；49—齒輪；50—齒輪；51—齒輪；52—齒輪；53—齒輪；54—齒輪；55—齒輪；56—齒輪；57—齒輪；58—齒輪。

59—齒輪；60—齒輪；61—齒輪；62—齒輪；63—齒輪；64—齒輪；65—齒輪；66—齒輪；67—齒輪；68—齒輪；69—齒輪；70—齒輪；71—齒輪；72—齒輪；73—齒輪；74—齒輪；75—齒輪；76—齒輪；77—齒輪；78—齒輪；79—齒輪；80—齒輪；81—齒輪；82—齒輪；83—齒輪；84—齒輪；85—齒輪；86—齒輪；87—齒輪；88—齒輪；89—齒輪；90—齒輪；91—齒輪；92—齒輪；93—齒輪；94—齒輪；95—齒輪；96—齒輪；97—齒輪；98—齒輪；99—齒輪；100—齒輪。

的渦輪是單軸雙級渦輪。渦輪機匣以懸臂梁式構造支承渦輪在渦輪軸承上。导向器外环与渦輪外环被包圍在燃燒室外套之內。該發動機的尾噴筒比較短，因此其尾錐體的錐角較大。

从Sa. 6型到Sa. 7型的演变过程中可以發現，制造公司很注意采用鋁料代替鑄造機匣。在燃燒部分，除渦輪軸承座以外，各機匣的主要零件几乎全采用了鋁料。

Sa. 7型壓縮機沒有可旋轉进口导向叶片及分气活門裝置，尽管如此，發動機的结构仍显得相当笨重。

第二章 發動機轉子支承及承力系統

§ 1 發動機轉子支点及軸承

Sa. 7型發動機共有三个支点。渦輪軸与壓縮機軸之間有球形联轴节及傳扭的齒套。前軸承为止推軸承。对一般燃气渦輪發動機來說，在三支点的發動機轉子上，止推軸承放在最前面还是很少見的。

把止推軸承放在壓縮機前面有很大的缺点，因为轉子部件与機匣部分（包括壓縮機機匣，燃燒室外套及渦輪外环等）在受热后的膨脹不一致，严重影响了渦輪轉子与导向器叶片間的相对位置，影响了它們之間的軸向間隙及气道的密封（如PD-45發動機上的阻隔槽封气）。如渦輪区气流通道是向外擴張的，渦輪轉子与渦輪外环的相对位移还会影响叶片的徑向間隙，因而一般三支点式的發動機上，止推軸承以放在中間較好。

Sa. 7型止推軸承放在前面的主要原因如下：

从Sa. 7型的前身——M. V. 公司設計的“福萊达”F. 1型开始，到A. S. 公司的Sa. 3型止，發動機轉子部件仅有两个支点。当然，为了裝配方便，止推軸承放在最前面是合理的，而且軸承在前面的工作条件也比較好。

在Sa. 3型上，發動機轉子與機匣體的热膨脹不一致，同樣也會影响渦輪部分的間隙。但从構造上来看，Sa. 3型的渦輪盤沒有像PD-45型發動機上的迴繞式阻隔槽封氣裝置（圖6），同時它的渦輪區氣流通道又呈圓柱形，沒有扩散角，所以当轉子對機匣有某些相對位移時，不會引起严重的後果。另从積極改進的方面來考慮，轉子與機匣的热膨脹量可以預先計算或測定，將發動機轉子對於機匣的相對位移量，在裝配時予以調整，因此止推軸承安裝在前面的設計還不能算是完全不合適的。

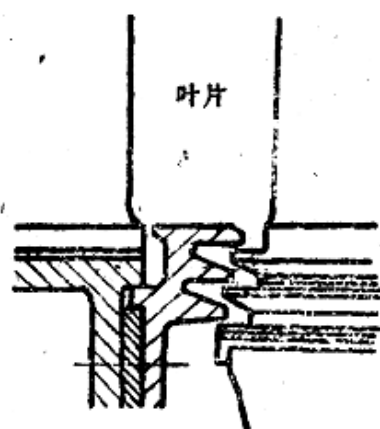


圖6 PD-45型發動機渦輪盤阻隔槽密封裝置。

二支點式的發動機轉子有很大缺點。如轉子的重量大，軸承負荷過重；支點間隔很遠，轉子部分的剛性減弱（為保證轉子部分具有一定剛性，必須加大軸的直徑，因而重量增加）。因此在Sa. 6型上改成三支點式結構，但仍接受了二支點式的經驗，把止推軸承放在前支點處，這種傳統式的結構，同樣也反映在Sa. 7型上。

由于中軸承是徑向軸承，它只承受徑向力，不承受軸向力，所以中軸承座機匣隔板的負荷也較輕，對隔板剛性的要求也相應降低，這可以算為該種構造型式的優點。除此之外，將止推軸承放在前支點並沒有帶來很多好處。

由圖7可見，前支點上有兩個并列的軸向止推軸承。由于發動機推力的增加，軸承上軸向力也隨着增加，一個滾珠軸承顯得力不勝任；但雙排并列軸承在裝配過程中，必須注意適當選配軸承，以便將軸向力均勻分配在兩個軸承上。

§ 2 承力系統

發動機轉子的全部軸向力通過前軸承（兩個滾珠軸承），軸承

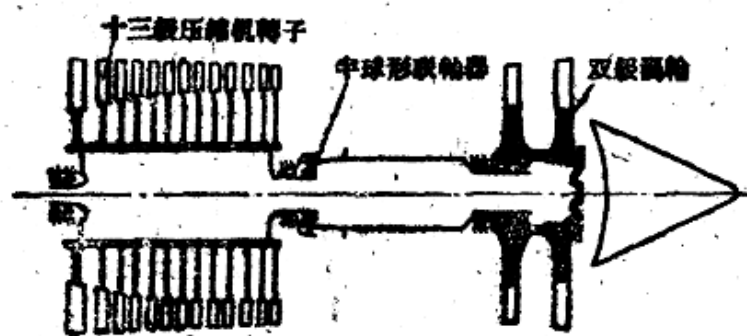


圖7 發動機轉子支承及承力系統。

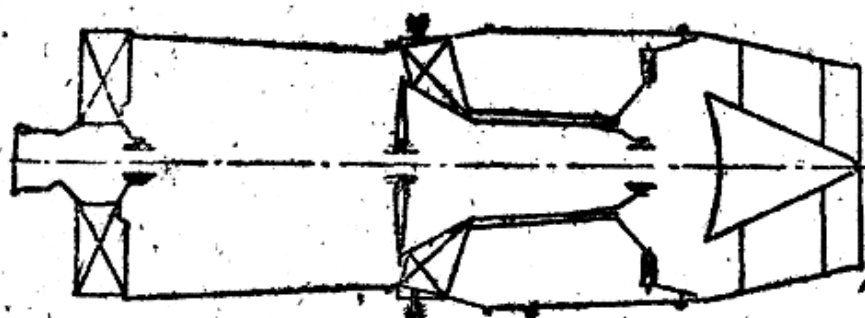


圖8 A. S. Sa. 7 型發動機承力系統。

座，經附件機匣上的四個整流支柱，傳至壓縮機匣後的安裝節上。由於附件機匣結構尺寸很大，又是鑄造件，剛性好，可以充分保證力的傳遞。

中軸承只承受徑向力。該力系通過三角形支架，擴壓器機匣上的十個徑向支柱傳向安裝節。這種傳力結構剛性好，傳力可靠。現代的軸向式壓縮機噴氣發動機上常常採用這種結構形式。在 Sa. 7 型的機種上，由於中軸承負荷較小所以對機匣的剛性要求也可降低。

後軸承所承受之徑向力，通過渦輪機匣，經擴壓機匣之十個支柱傳出。此外，渦輪機匣還要承受渦輪導向器葉片之部分扭矩。由於渦輪機匣尺寸受燃燒室內殼的限制，所以剛性不易保證，但是它的剛性好、壞，却影響到渦輪葉片與機匣的徑向間隙。為了增強此處剛性，Sa. 7 型採用了雙層承力壁結構，但缺點仍難全部避免。現有很多種發動機採用內、外混合式傳力結構，即部分