



射流技术在航空中的应用

(第二集)

国防工业出版社

77

52

内 容 简 介

本书是射流技术在航空发动机控制上的应用专集，共包括七篇译文，主要内容为射流技术在喷气发动机控制上应用的各种装置和应用情况、射流式恒温气源装置、射流脉冲控制、射流温度传感器等。

本书可供从事射流技术生产、研究方面的广大工人、科技人员参考。

射流技术在航空中的应用

(第二集)

《射流技术》编译组

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京第二新华印刷厂印装

*

787×1092 $1/32$ 印张 $3\frac{1}{4}$ 67千字

1970年9月第一版 1970年9月第一次印刷

统一书号：15034·1216 定价：0.36元

52.77

10

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

外国有的，我們要有，外国没有的，我們也要有。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

对于外国文化，排外主义的方针是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方针也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

目 录

射流技术在喷气发动机控制上的应用具有	
广阔的前途.....	3
燃气涡轮发动机专用的射流式恒温气源装置.....	17
射流脉冲控制.....	25
恒频射流-机械振荡器	57
迅速、轻便、价廉的喷气发动机控制装置.....	72
射流系统将是控制燃气涡轮发动机工作的	
最好方法.....	82
对压力不敏感的射流式温度传感器.....	88

前 言

伟大领袖毛主席教导我们：“我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国”。为了帮助我国广大工人、技术人员了解国外有关射流技术在航空和飞行器方面的应用情况，我们编译出版了这本《射流技术在航空中的应用》（第二集），以供参考。

射流技术是六十年代发展起来的一项新技术。由于射流控制装置具有可靠性高、使用寿命长、易于制造、成本较低和适应性强（如耐高温、抗辐射、防爆和防腐）等优点，所以目前它不仅一般在一般工业的各个部门，而且在航空和飞行器方面得到了广泛地应用，具有广阔的发展前途。

遵照毛主席关于“应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化”的教导，我们从国外有关期刊杂志中选译了七篇文章，并对原文中为资本家和厂商吹捧，宣扬腐朽的资本主义国家的科学技术以及贬低劳动人民的创造和智慧等部分进行了删改，希望同志们在参考时继续批判。

由于我们活学活用毛主席著作很不够，业务水平有限，所以书中错误和不妥之处一定不少，请同志们提出宝贵意见，以便再版时改正。

编译者

1970.6.

目 录

射流技术在喷气发动机控制上的应用具有	
广阔的前途.....	3
燃气涡轮发动机专用的射流式恒温气源装置.....	17
射流脉冲控制.....	25
恒频射流-机械振荡器	57
迅速、轻便、价廉的喷气发动机控制装置.....	72
射流系统将是控制燃气涡轮发动机工作的	
最好方法.....	82
对压力不敏感的射流式温度传感器.....	88

射流技术在喷气发动机控制上的应用具有广阔的前途

提 要

射流技术不久就会在喷气发动机控制上占取优势。对喷口形状可调的喷气发动机的控制，有三种方案，即改进了的液压机械式、微电子式和射流式。过去评价射流技术是有一些困难的，因为任何实际的东西还都不存在。只是当近年来设计出射流控制系统元件后，才发现其在这方面的应用比其他技术优越，并且它是现在改进涡轮喷气推力系统的液压放大控制技术的继续发展。本文将对这三种技术进行比较，并叙述射流迴路的发展。

通道几何形状可调的喷气发动机，在性能和工作适应性上提供了重大改进的潜在可能性。因此，控制系统设计者就面临着一个任务：即设计出比普通发动机所需要的更加复杂的系统，使其能承受更加严重的空间运转环境，而不致重量减少或降低可靠性。这就使选择最佳控制方法复杂化，而且必须避免由此所产生的控制系统间动态干扰。近年来，在发动机控制系统、控制方法和结构化的研究工作中，集中于三种结构方案的探讨：即改进的液压机械式、微电子式和射流式。

实际上一些重要的基础资料已经可以对前两者的理论设计作出可靠的分析鉴定,但对于射流式的评价,还需在对三种结构技术的综合研究前,首先研究射流迴路执行关键性的控制机能。这些射流迴路的发展,本文将在后面加以讨论。

比较方法

只有在设计满足同类的性能和功用的条件下,才能对各种控制机构的特性(尺寸、重量、可靠性)作出有意义的比较。这意味着稳定性、灵敏度和对周围温度的适应能力,虽然不是直接比较项目,但是所有控制系统设计的基本要求。为满足一些特殊需要构成一个结构所遇到的难和易,是由从属于比较的其他参数(重量、体积、可靠性)引起的。例如,液压放大计算机能够在规定的 1000°F 环境中工作,不需冷却;而电子计算机在 1000°F 环境中也能工作,但需要有附加的专门冷却装置,这样就使电子控制系统的体积和重量增加,降低了可靠性。

下面对三种元件设计进行分析,这些元件设计的研究涉及到该发动机原始系统的计算、逻辑和感受机能。原始系统由转子转速系统、压力比系统和涡轮温度系统组成。通过对元件的研究表明,三种方法的每一种都能满足基本控制要求。

将随动分解程序控制的方法应用在所有结构上,可达到规定的稳定性和瞬态灵敏度。此外,三种结构经过计算机的模拟计算,证实了在稳定性和灵敏度方面仅有轻微的差别。但是当考虑到指定环境下的作用能力时,所有机构的控制性能都不是满意的。对这种环境能力的比较,要限定和估计到基本元件上的附加元件。可靠性是用相对比较法进行的,其步骤

是：破损形式鉴定、破损结果鉴定、破损等级鉴定，最后一项的鉴定最困难，可应用下述方法：

1. 将被鉴定零件同已知破损等级和环境应力的类似零件进行比较，以制定该零件的破损等级；
2. 使用通用化的资料，制定典型的破损等级；
3. 使用概率法对机械零件在零件强度分布与假定的或测定的负荷分布一致的基础上，作破损概率计算。

液压机械式和电子式的破损分析没有多大问题，而射流式附件的破损分析则有很多问题，因为目前试验方法和通用化资料都很少。分析所使用的方法实质上是考虑每个结构要素，如喷嘴、管、腔、喷口、孔口流动缝隙等。这些零件的破损方法是已知的，并对破损程度能以合理的精度加以确定。从表1中可看出，射流放大器结构似乎比其他两种有更高的可靠性。其它与液压机械式系统比较，最主要的优越性是消除了由于有运动零件的装置而出现的像粘着和滞塞这一类破损形式。另外，装备射流系统仅需少量元件，这同微电子装置比较，也是一个重要的优点。

根据每种单独控制设备所引起的整个推力系统的各个尺寸的增加可作出重量和体积的比较。这些尺寸涉及到整个控制器的附加尺寸，它包括基本控制器的重量和体积，加上考虑到不同设备特性所需附加装置的重量和体积。对射流控制系统来说，这些附加装置作为一个补充气源，相当于发动机增加的重量和体积，以及由于发动机压气机供给射流控制系统气源而补充燃料的重量和体积。对于三种结构的每一种，这些附加装置都是需要考虑的，因为后者基本上都是供给控制功率所需的附件。在分析这个功率源附件的可靠性时，也

要考虑在内。表 1 中的比较是以液压机械式结构为标准作出的。

表 1 三种结构形式的比较

结构型式	基本计算装置, 逻辑回路和传感器		附加装置		可调装置		破 损 程 度
	重 量	体 积	重 量	体 积	重 量	体 积	
液压机械式	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
电子式	76%	175%	79%	96%	78%	155%	115%
射流式	45%	64%	133%	193%	56%	98%	42%

射流式结构的控制系统

现在以实际的附件方案来校验所提出的射流控制方法的现实可能性。在进行研究控制方法之前, 需先研究转速控制、温度控制和压力比控制系统; 其次, 对每一个系统关键性的射流部分进行研制和试验, 用来鉴定改进喷气发动机使用的潜在可能性。

射流放大系统设计者首先要解决的问题, 就是力求提供一个不带运动零件的整个系统。但是, 更进一步的研究证明, 实际设计是需要使用有运动零件的元件的。压力比系统要求保持压气机的增压比 (它是导流装置位置和压气机进口温度的函数)。在发动机上改变其空气流通断面积, 即可达到这个要求。

所需要的增压比对导流装置位置和压气机进口温度的函数关系是极其复杂的。曾经认真地考虑过用气动的方法产生这个函数的静态技术, 但发现用气动无源回路时, 情况极端复杂, 而用空气喷射比例偏差时, 精度又很低。最后选用一

个参考（或要求的）压力比信号的机械立体凸轮来控制敏感元件的位置，这是对产生两个输入变量的复杂函数的最简单、最精确和可靠的技术。在发动机的研制过程中，不可避免地需要改变预定的计划，而这种技术是容易适应的，改变凸轮型面即可改变调节。机械立体凸轮也被用于转速和温度系统。

压力比系统

考虑使用射流技术感受压气机的增压比（压气机排气绝对压力与进气绝对压力之比），这包括对涡流装置、流束偏转装置以及对最简单的收敛-扩散喷管的探讨。如图1所示，从压气机排出的空气（压力 P_3 ），送进收敛-扩散型喷管，再排出到外界压力。如果沿喷管中心线的某一点是处于喷管处正激波的上游，则该点的静压力就是引到喷管内的进气压力的预定的一部分。在正确的设计中，喷管中激波的复杂效应是可以避免的。

敏感元件使用了一个小的静止测头，它能沿着喷管中心线利用立体凸轮作轴向定位。这样，测头的每个轴向位置，将产生一个摄取压力，其为压气机排气绝对压力给定的一部分。

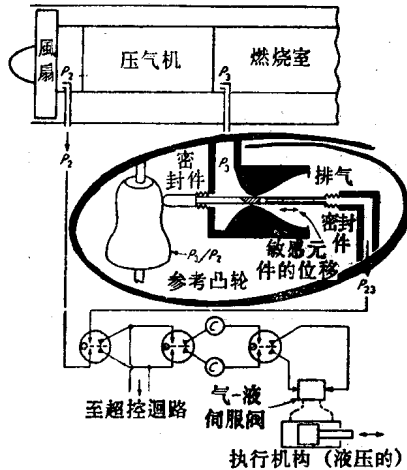


图1 使用收敛-扩散喷管的压力比系统简图

分。接着利用射流式比例放大器将这个摄取压力同实际的压气机进口压力 (P_2) 作比较。该放大器的推-挽输出信号即代表压力比的误差,并由下一级射流放大器将信号达到足够高的水平,以驱动气-液伺服阀。而这个伺服阀即在发动机上控制液压执行机构,以调节控制压气机增压比的可调断面面积。

为了更好地理解系统的工作过程,先假设增压比的规定值是 3:1。在海平面静止状态下,压气机进气压力是 14.7 磅/时²,而在增压比为 3:1 的情况下,压气机的排气压力是 44.1 磅/时²。假定压气机稍微在给定点上工作,并产生 45 磅/时²的排气压力,而此时摄取压力是 15 磅/时²,高出压气机进气压力 0.3 磅/时²。这就指出压气机的增压比太高,将使 0.3 磅/时²的误差在射流放大器中被放大,产生一个信号到气-液伺服阀,并打开喷气发动机的可调断面,直到达到给

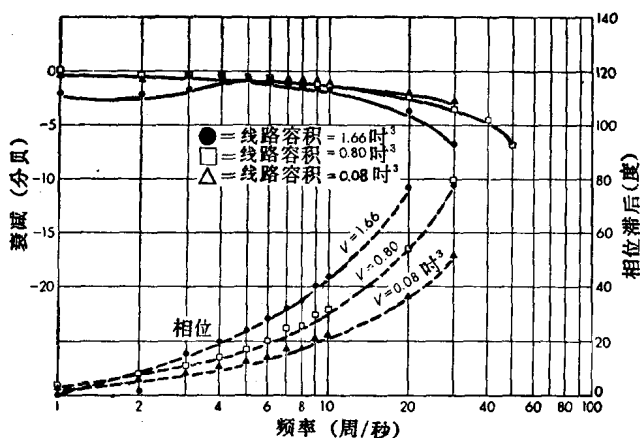


图2 通过使用级间气容,降低压力比系统灵敏度

定的增压比为止。

气-液伺服阀前（不包括伺服阀）的感受系统的压力比部分，可在超出所需的增压比范围内满意地工作。在这个系统中，它要求有一个缓和的动态反应，以防止发动机上其他系统的干扰。初步分析表明，频带宽度已超过几百赫，并确定需要级间的气容，以减小反应。图2表示出不同的气容尺寸对传感-放大器测量反应的影响。

压力比系统和迴路的实际问题，是现在研制一般的模拟式射流迴路所必须考虑的。首先是信号噪音比和阻抗匹配问题。很早就觉得要注意到压力比传感器敏感元件的阻抗与射流放大器输入阻抗的匹配。不适当的匹配会造成射流放大器得到的信号太小，结果输出噪音很高，严重地损害了装置的精度和效能。另外，当在单独设置的迴路供压工作时，迴路在极限值 P_3 情况下，表现出很坏的特性。在最后改进的设计中，射流放大迴路有一个随压气机排气压力变动的压力源，使工作特性不受被感受压力的广泛变动的影响。另外，射流放大器控制口通过反压使得敏感元件测头的感受迴路内产生一个轻微的回流，从而可以得到很好的阻抗匹配。同时，射流放大器（不是在压力比传感器上的收敛-扩散管）使用滤过的空气工作，这就保证了在整个时间内，对敏感元件测头有一个轻微的确定的增压，从而防止灰尘被吸到敏感元件小孔内，同时这也巧妙地解决了阻抗匹配问题。

转速系统

在研制转速系统的结构时，决定脱离普通的模拟式和数字式射流方法，而使用射流载波技术，这有利于得到简单的、更高精度的发动机转速控制器。

在射流载波系统中, 控制信号是按正弦变动的压力和流量 (不是“直流”压力) 变化。使用射流载波回路有一系列优点, 包括容易产生轴的转速信号和具有简单且容易调整的参考频率, 这种载波方法也更能容许改变单个放大器的性能, 在敏感线路上的较小的泄漏也不致引起有害的影响。最后这一点, 在比例模拟回路工作中则是特别麻烦的。

图3表示准备用在发动机上的转速系统的结构方块图。已经制造和鉴定了伺服阀前 (不包括伺服阀) 的转速系统部分。在图4的一般方块图表示的回路中, 包括驱动放大器、移相回路和相位检波器, 而移相回路包括射流谐振器。调节移相回路谐振器的体积大小, 即可对回路进行调整。

在工作时, 可用远距离装在发动机轴上的凸轮或者摇动的平板形敏感元件, 来

产生频率与轴转速成比例的正弦压力信号, 凸轮和摇动平板的作用类似喷嘴挡板阀的挡板。这样, 推-挽信号 B_1-B_2 即在驱动放大器中产生放大的信号 $B'_1-B'_2$ 。信号 B'_2 直接传给射流相位检波器, 而信号 B'_1 则通过移相回路传递, 并表现为推-挽信号 $C-C'$ 进到相位检波器, 在检波器中其相位与信号 B'_2 的相位作比较。

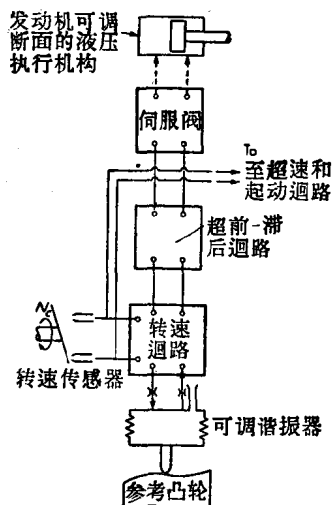


图3 精确控制发动机转速
的系统方块图

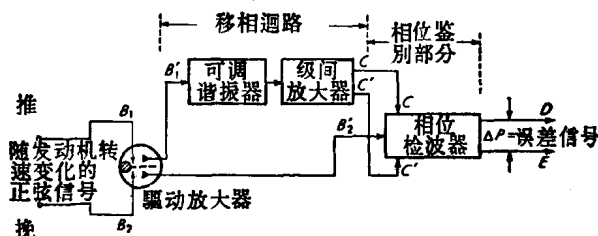


图4 使用射流载波技术的转速系统（转速回路部分）

转速回路的工作原理是根据谐振器的相位偏移特性确定的。这里所使用的改装的亥姆赫茨谐振器，包括容积（气容）和管子（气感）。当信号 B_1' 的频率同谐振器的固有频率一致时，包括谐振器和后边的放大级在内的整个移相回路即产生 90° 的相位滞后。当频率低于谐振器固有频率时，相位滞后减少（极限时接近于 0 ）；在频率高于谐振器固有频率时，相位滞后增加。相位滞后角与频率相比的曲线斜率是谐振器有效“ Q ”值的函数，该值可用射流式阻尼器加以调整。

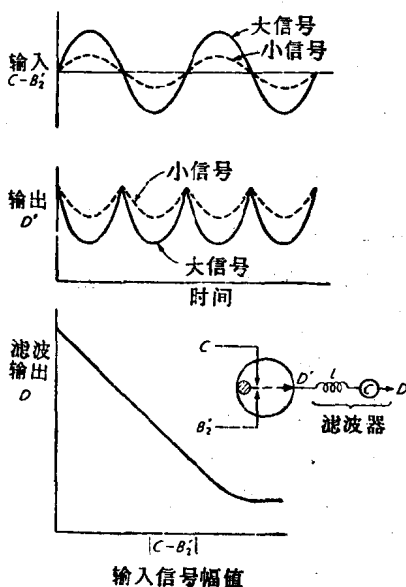


图5 射流整流器的工作特性

相位信息转换成模拟信号在相位检波器中完成。这个迴

路信息转换成模拟信号在相位检波器中完成。这个迴

路使用了两个射流“整流器”(实际是绝对值放大器)。具有正弦输入信号的射流“整流器”的工作表示在图5。当 B'_2 和 C 相等时,主喷射流集中,接收腔中的恢复值为最大;当 B'_2 大于 C 或相反时,主喷射流即偏离接收腔,而且恢复值成比例的下降。图5表明,对正弦形输入信号来说,不同的输入信号的振幅越大,则输出的“直流”部分越低。利用 $L-R-C$ (气感-气阻-气容)滤波器,将射流输出信号 D' 平滑地变成信号 D ,这个信号实质上就是 D' 的“直流”部分。

当信号 B'_2 的频率同谐振器的固有频率一致时,整个相位检波器的的工作特性表示在图6上。在这种情况下, B'_2 同 C 的相位差及 B'_2 同 C' 的相位差是相同的,并且产生相等幅值的信号 B'_2-C 和 B'_2-C' ,使输出压力 D 和 E 值相等,结果 $\Delta P=0$ 。图7表示了另一种频率低于谐振器固有频率的情况,此时 B'_2 与 C 同

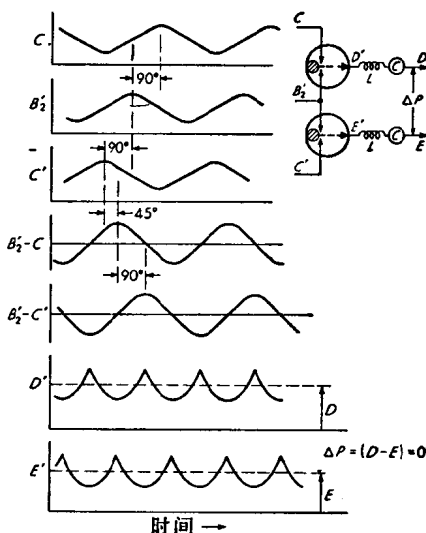


图6 当信号 B'_2 的频率与谐振器的频率一致时,相位检波器的的工作特性

相位,不产生相位差,结果是 D 增加到其最大值,而信号 E 即信号 E' 的“直流”部分减小。当转速高于谐振器相应的固有频率时,相反的效应出现,即 E 变为大于 D 。

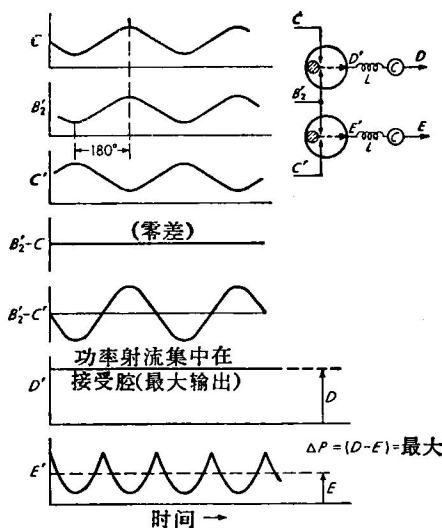


图7 当信号 B_2 的频率低于谐振器频率时, 相位检波器的工作特性

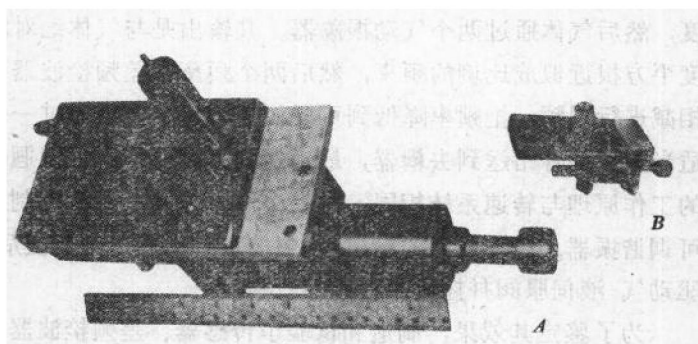


图8 射流式转速回路的设计实例
A—早期设计的回路; B—在较高频率下工作和在综合研究中使用的小型化改型设计。