

PW4000 涡轮风扇发动机

李清红 编

南京航空航天大学

一九九九年二月

前 言

PW4000 系列发动机是美国普惠公司(Pratt & Whitney, 简称 PW 公司)生产的世界上最先进的民用涡扇发动机之一。

一九七四年以来,普惠公司为改进 JT9D 发动机的性能,对 JT9D 发动机各部件进行了全面的审定,基本上完全重新设计了整台发动机,并引进了先进的技术,根据这些改进生产了一种全新的发动机——PW4000 系列发动机。与 JT9D 发动机相比,PW4000 发动机零件数基本减少了一半。重新设计的风扇叶片为 38 片,后部为带有凸肩的宽弦叶片,每秒可产生 1705 英磅(774.07kg)的气流,增压比为 1.7,函道比降为 4.85。燃烧室为铸环经车削加工而成,第一级涡轮叶片采用单晶叶片。引进了间隙主动控制技术和全权数字控制系统(FADEC)等先进技术。首台 PW4000 发动机于 1984 年 4 月试车成功。

为满足市场需要,普惠公司在不改变核心机设计技术的基础上推出了四种推力水平的 PW4000 发动机。它们是风扇直径为 93.6 英寸(237.74cm)、推力约 52000 英磅(231594.48N)的 PW4052(安装于波音飞机上)和 PW4152(安装于空中客车 A310 飞机上)发动机;风扇直径为 97 英寸(246.38cm)、推力为 60000 英磅(267224.4N)的 PW4460(安装于麦道 MD-11 飞机上)发动机;风扇直径为 99.8 英寸(253.49cm)、推力为 68000 英磅(302854.32N)的 PW4168(安装于空中客车 A330 飞机上)发动机;以及全新的空心钛合金无凸肩宽弦风扇叶片,直径为 112 英寸(284.48cm)、推力为 84000 英磅(374114.16N)的 PW4084(安装于波音 777 飞机上)发动机(如图 A 所示)。

PW4084 发动机将与通用电气公司的 GE90 发动机和英国罗·罗公司的遛达 800 发动机共同竞争 80000 磅(356299.2N)到 100000 磅(445314N)推力发动机市场。PW4084 发动机与 PW4000 原型发动机的对比如图 A 所示。与原型机相比,PW4084 发动机增加了三级涡轮以足够的动力驱动较大的风扇和低压压气机。

PW4000 系列发动机各个衍生型发动机将分享 50000 磅(222687N)到 100000 磅(445374N)发动机市场。各型发动机零部件大约有 60-70%是相同的,这样将节省大量的发动机研制费用,缩短发动机的研制周期,从 1984 年至 100000 磅(445374N)发动机市场,各型发动机零部件大约有 60-70%是相同的,这样将节省大量的发动机研制费用,缩短发动机的研制周期,从 1984 至 1995 年十一年间已有四种推力的发动机投入使用。

东方航空公司有一九九一年开始引进装有 PW4460 发动机的 MD-11 飞机,到今共运行约 170000 小时/50000 循环,领先发动机运行约 10000 小时/3000 循环。目前国内有中国东方航空公司、中国国际航空公司、中国北方航空公司和上海航空公司四家航空公司使用 PW4000 发动机。

本教材是以普惠公司 90 年版 PW4000 发动机培训教材为蓝本,为民航机务专业学生而编写的专业教材,也可供机务维修人员作为参考。由于篇幅有限,机型仅限 MD-11 飞机。

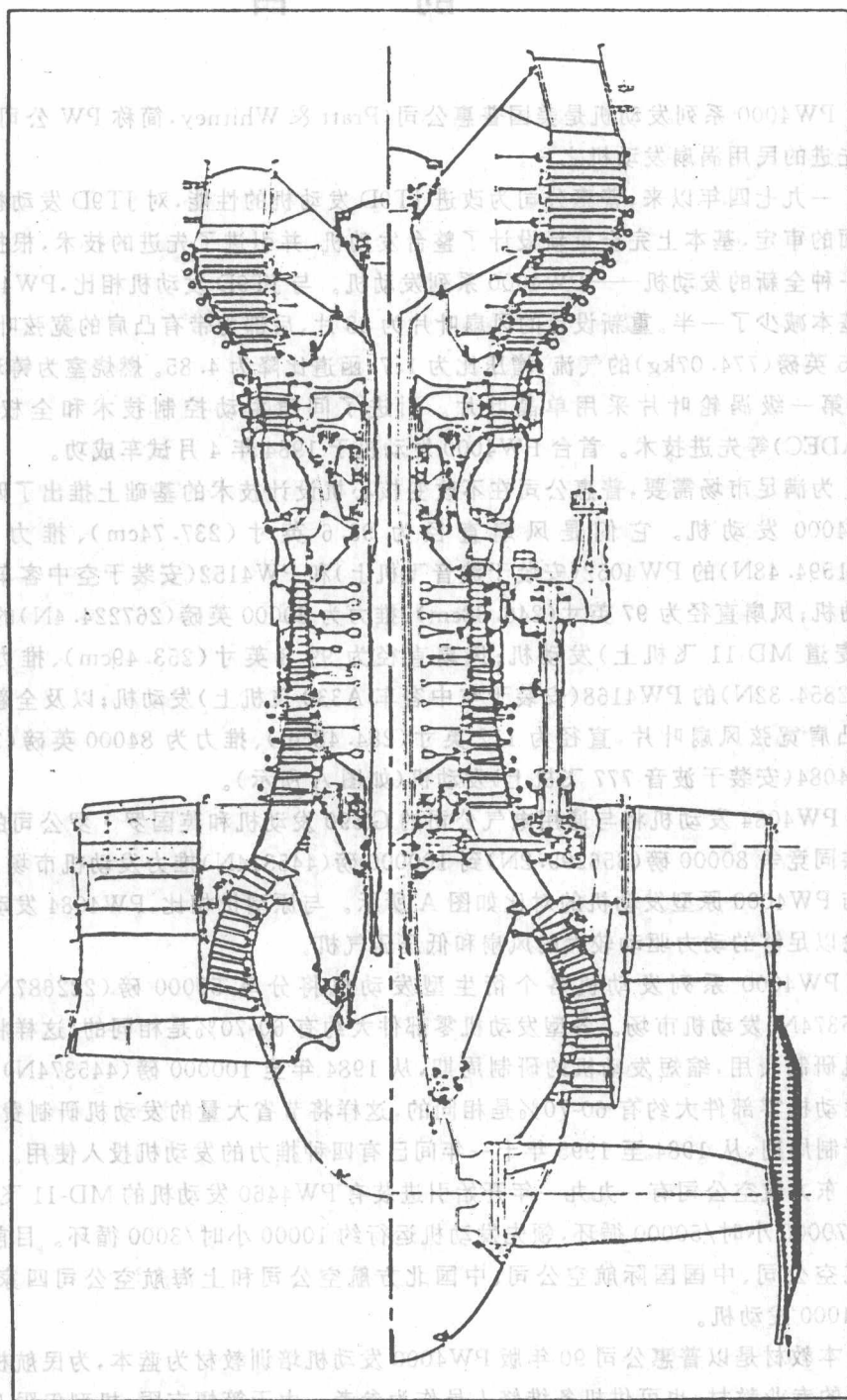


图 A PW4000(上部)与PW4084(下部)发动机剖面图

缩写、专用术语和符号

—A—

abbr	abbreviation(s)	缩写
abs	absolute	绝对
AC	Alternating Current	交流电
ACARS	ARINC Communications Addressing and Reporting System	航空无线电集成通讯地址和报告系统
acel	acceleration	加速
ADC	Air Data Computer	飞行数据计算机
AGB	Angle Gearbox	角齿轮箱
amb	ambient (external temperature and pressure at current altitude)	环境(目前高度外部温度和压力)
AOX	Air/Oil Heat Exchanger	空气/滑油热交换器
AP	Access Port	接近工作口
APU	Auxiliary Power Unit	辅助动力装置
ARINC	Aeronautical Radio Incorporated	航空无线电集成
ASC	Aircraft System Controller	飞机系统控制器
ATA	Air Transport Association	航空运输协会
ATRCCS	Automatic Turbine Rotor Clearance Control System	涡轮转子间隙自动控制系统
auto	automatic	自动的
AVM	Airborne Vibration Monitor	机载振动监测器

—B—

bal	balance	平衡
BFE	Buyer Furnished Equipment	用户安装设备
BNR	Binary: The Base 2 number system used for computations by the FADEC	二进制

BPR	Bypass Ratio (ratio of secondary air to primary air, by weight; also, ratio of secondary gaspath area to primary gaspath area at fan exit plane)	函道比
BAV	Bleed Valve Acuator	放气阀作动筒
cc/hr	cubic centimeters per hour	厘米 ³ /小时
CFDIU	Central Fault display Interface Unit	接口组件
cm	centimeters	厘米
cont	continuous	续
CPR	Compressor Pressure Ration (ratio of high-pressure-compressor-compressor discharge pressure to inlet pressure)	压气机压比(高压压气机出口压力与进口压力之比)
CRT	Cathode Ray Tube	阴极射线管
—D—		
C	Degrees Celsius	摄氏度
F	Degrees Fahrenheit	华氏度
DAC	Douglas Aircraft Company	道格拉斯飞机公司
DC	Direct Current	直流电
decel	deceleration	减速
DEP	Data Entry Plug	数据输入插头
DEU	Display Electronic Unit	电子显示器
DFDAU	Digital Flight Data Acquisition Unit	数字式飞行数据探测器
DFDR	Digital flight Data Recorder	数字式飞行数据记录器
disc	discrete	离散
DMU	Data Management Unit	数据管理器
DOT	Differential Oil Temperature	滑油温差
—E—		
EAD	Engine and Alert Display	发动机和报警显示器
EBU	Engine Buildup Unit (components which configure an engine for an aircraft installation; usually supplied by other than P&W)	发动机装配件(通常不是由普惠公司提供)

EEC	Electronic Engine Control (Some as FADEC) Note: "FADEC" is the correct name for the electronic control on the PW4460 engine on the MD-11. but "EEC" appears on some pages in this training guide because those page are also used in some other PW4000 training guides where "EEC" is the correct name.	发动机电子控制
EEROM	Electrically Erasable Read-Only Memory	可抹只读电子存储器
EGT	Exhaust Gas Temperature (temperature at the low turbine discharge; also referred to as $T_{14.95}$ or T_{15})	排气温 ($T_{14.95}$ 或 T_{15})
EIS	Electronic Instrument System	电子仪表系统
eng	engine	发动机
EPR	Engine Pressure Ratio (ratio of turbine discharge total pressure to compressor inlet total pressure; also $P_{14.45}/P_{12}$)	发动机压比 (涡轮排气总压与压气机进口总压之比; 即 $P_{14.95}/P_{12}$)
EPR ACT	Actual EPR	发动机实际压比
EPR COM	Commanded EPR	发动机指令压比
EPR MAX	Maximum EPR	发动机最大压比
ESC	Environmental System controller	环境系统控制器
ETTS	Engine Thrust Trim System	发动机推力调整系统
—F—		
F	Thrust ("F" refers to thrust "force")	推力 ("F" 表示推力的 "力")
FADEC	Full Authority Digital Electronic control (correct name for the EEC on the PW4460 on the MD-11)	全权数字式电子控制
FCC	Flight Control Computer	飞行控制计算机
FD	Fuel Drain	燃油排放口
FLT	Flight	飞行
FLX TO TEMP	Flexible Takeoff Temperature	灵活起飞温度
FMS	Flight Management System	飞行管理系统
FMU	Fuel Metering Unit	燃油计量器

F_n	Net thrust	净推力
F_{nf}	Net thrust of the fan	风扇净推力
F_{np}	Primary net thrust; net thrust of the engine core	主净推力; 核心发动机净推力
F_{nt}	Total net thrust; equal to $F_{np} + F_{nf}$	总净推力 = $F_{np} + F_{nf}$

FOX Fuel/Oil Heat Exchanger 燃油/滑油热交换器

FP Fuel Pump 燃油泵

ft foot or feet 英尺

—G—

gal gallon 加仑

GCU Ground Control Unit 地面控制器

gnd gorund (also abbreviated as "grd") 地面

GTP Ground Test Power 地面试验动力

—H—

Hg Mercury (standard chemical symbol) 水银柱

HPC High-Pressure Compressor; also referred to as rear compressor 高压压气机; 也指后压气机

HPT High-Pressure Turbine; also referred to as front turbine or rear compressor drive-turbine 高压涡轮

hr hour or hors 小时

HSC Hydraulic System Controller 液压系统控制器

HX Heat Exchanger 热交换器

—I—

ID Inside Diameter 内径

IDG Integrated Drive Generator 综合驱动发电机

I_{gn} Ignition 点火

IGV Inlet Guide Vane 进口导向叶片

in inch or inches 英寸

—J—

J-box Junction box 接线盒

—K—

K Symbol used to indicate a constant value 用于表示常数的符号

kg kilogram or kilograms 公斤

kg/hr kilograms per hour 公斤/小时

—L—

L left (can appear in flight deck display) 左(能够出现在驾驶舱显示器上)

lb pound or pounds; can be written as "lb." 磅

lb/hr pounds per hour 磅/小时

LPC Low-Pressure Compressor; also referred to as front compressor 低压压气机

LPT Low-Pressure Turbine; also referred to as rear turbine or front-compressor drive-turbine 低压涡轮

LRU Line Replaceable Unit 航线可换线

LVDT Linear Variable Differential Transformer 线性可变差动传感器

—M—

M Mach number (speed, expressed as a multiple of the speed of sound, which is Mach 1); also abbreviated as Mn 马赫数

MAX Maximum 最大

Mb Millibars (a unit of measure for fluid pressure) 毫巴(流体压力测量单位)

MCDU Multifunction control Display Unit 多功能控制显示器

MGB Main Gearbox 主齿轮箱

mils Thousandth of an inch 英里

Mn Mach number; also abbreviated as M 马赫数

MSC Miscellaneous Systems Controller 综合系统控制器

MSG Message 信息

—N—

N	Rotational speed in rpm or percent rpm	每分钟转速
N_1	Rotational speed of the low-pressure rotor (front compressor, rear turbine, and connecting (inner) shaft)	低压转子每分钟转速
N_2	Rotational speed of the high-pressure rotor (rear compressor and front turbine; in rpm or percent rpm)	高压转子每分钟转速
N_{2C2}	Corrected high-pressure rotor speed (derived from T_{12})	校准的高压转子转速 (从 T_{12} 得到)
N_{2C25}	Corrected high-pressure rotor speed (derived from $T_{12.5}$)	校准的高压转子转速 (从 $T_{12.5}$ 得到)

ND	Navigation display	导航显示
No.	Number	号、数

—O—

OD	Outer Diameter	外径
----	----------------	----

—P—

P	Pressure	压力
P_{amb}	Ambient Pressure	环境压力
P_b	Burner Pressure (static pressure in diffuser case)	燃烧室压力 (扩散机匣处静压)
P_{br}	Breather Pressure	通气压力
P_f	Pressurised fuel sent to hydraulic actuators; fine filtered supply pressure	供给液压作动筒的压力燃油
PFD	Primary Flight display	主飞行显示器
P_{fr}	Pressurised fuel returning from hydraulic actuators to fuel pump interstage	从液压作筒返回到燃油泵中间级的压力燃油
PLA	Power Lever Angle	油门杆角度
PMA	Permanent Magnet Alternator; should referred to as FADEC alternator	永磁交流发电机, 也叫 FADEC 交流发电机

PNAC	Nacelle Pressure (positive pressure inside of nacelle doors)	短舱压力
P _{NEU}	Pneumatic	空气、气动
P ₀	Pressure at sea level on International standard Day	国际标准海平面压力
pph	pounds per hour; also abbreviated as lb/hr	磅/小时
pps	pounds per second; also abbreviated as lb/sec	磅/秒
PRI	Primary	主(要)
proy plug	EEC programming plug	发动机电子控制程序插头
P _s	Pressure, static; also referred to as static pressure	静压
P _{S3}	static pressure at station 3 (high-pressure compressor discharge)	3号站位静压
psi	pounds per square inch	磅/英寸 ²
psia	pounds per square inch, absolute pressure	磅/英寸 ² , 绝对压力
psid	pounds per square inch, differential pressure	磅/英寸 ² , 压差
psig	pounds per square inch, gage pressure	磅/英寸 ² , 表压
P _t	Pressure, total; also referred to as total pressure	总压
P _{t2}	Total pressure at station 2 (compressor inlet)	2号站位总压(压气机进口)
P _{t2.5}	Total pressure at station 2.5 (exit of low-pressure compressor); also referred to as inter-compressor pressure	(2.5号站位总压(低压压气机出口); 也叫压气机中间压力)
P _{t4.95}	Total pressure at station 4.95 (exhaust); also referred to as exhaust gas pressure or P _{t4.9} or P _{t5}	4.95号站位总压(排气); 也称为排气压力, 或 P _{t4.9} 或 P _{t5}
P&W	Pratt & Whitney	普惠公司

—Q—

QAD	Quick Assembly/Disassembly	快速组装/分解
QAR	Quick Access Recorder	快速接近记录器
QEC	Quick Engine Change (some as EBU)	快速换发装置(非普惠公司提供件)
qt	quart or auarts	夸脱
qty	quantity	量

—R—

R	Right (can appear in flight deck displays)	右(能出现在驾驶舱显示器上)
REF	Reference	参考
REV	Reverse	反向
rpm	revolutions per minute	转/分钟
RVDT or RVT	Rotary Variable Differential Transformer	旋转可变差动传感器

—S—

SB	Service Bulletin	服务通告
SCU	Supplement Control Unit	备用控制器
SD	Seal Drain	封严排出口
SCP	System Control Panel	系统控制板
SEC	Secondary	次级、副
SFC	Secondary Flow control; also referred to as Thernatic Rotor Control	次级流控制
SOL	Solenoid	线圈
SVA	Stator Vane Actuator	静子叶片作动筒
SW	switch	开关

—T—

T _{amb}	Ambient Temperature	环境温度
TAT	Total Air Temperaute	气体总温
TBD	To Be Determined	要被确定的
TBS	To Be Supplied	将被提供

TBV	Thrust Balance Vent	推力平衡通气口
TCC	Turbine Case Cooling	涡轮机匣冷却
TEC	Turbine Exhaust Case	涡轮排气机匣
TNGV	Turbine Nozzle Guide Vane	涡轮喷嘴导向叶片
Toil	Temperature of engine oil	发动机滑油温度
T/R	thrust Reverser	推力反向器
TRA	Thrust lever Resolver Angle or Throttle Resolver Angle	油门杆求解仪角度
TRC	Thematic Rotor control; also referred to as Secondary Flow control	热转子控制或次级流控制
TSFC	Thrust Specific Fuel Consumption (lb. of fuel per hour. per lb. of thrust)	耗油率(磅燃油/小时·磅推力)
T_t	Temperature, total; also referred to as total temperature	总温
T_{t2}	Total temperature of the air at station 2 (compressor inlet)	2号站位总温(压气机进口)
$T_{t2.5}$	Total temperature of the air at station 2.5 (exit of low pressure compressor)	2.5号站位总温(低压压气机出口)
T_{t3}	Total temperature of the air at station 3 (exit of high pressure compressor)	3号站位总温(高压压气机出口)
$T_{t4.95}$	Total temperature at 4.95 station (exhaust); also referred to as exhaust gas total temperature or $T_{t4.9}$ or t_{t5}	4.95号站位总温(排气);
TVBCA	Turbine Vane and Blade Cooling Air	涡轮导向叶片及工作叶片冷却空气
—U—		
U.S.	United states	美国
—V—		
VAC	Volts, Alternating Current	伏, 交流电
VDC	Volts, Direct Current	伏, 直流电
VIB	Vibration	振动
vs	versus	…对…, 与…比较

—W—

W	Rate of fluid flow; weight of fluid per unit time (lb/sec. kg/hr etc)	流体流量(比);单位时间流体重量
W_a	Rate of airflow; also referred to as air flow rate	空气流量(比)
W_{af}	Rate of fan airflow	风扇空气流量(比)
W_{ap}	Rate of primary airflow	主气流流量(比)
W_{at}	Rate of total airflow; equal to $W_{ap} + W_{af}$	总空气流量(比);等于 $W_{ap} + W_{af}$
W_f	Rate of fuel flow; also referred to as fuel flow rate	燃油流量(比)

—X—

XFER	Transfer	转移
------	----------	----

—SYMBOLS—

符 号

%	Percent	百分数
Δ	Delta; differential or difference between two values	二值之差
δ	Delta; Relative pressure ratio	有关压力比
θ	Theta; Relative temperature ratio	有关温度比
=	Equal to, equivalent to	等于
$\approx$	Approximately to	约等于
:	Proportional to	比,与...之比
::	Equality of ratio in a proportion statement	等比
<	Less than	小于
>	Greater than	大于
$\leq$	Less than or equal to	小于等于
$\geq$	Greater than or equal to	大于等于
$\uparrow$	Above or higher than	高于或在...之上
$\downarrow$	Below or lower than	低于或在...之下
$\rightarrow$	No change in	在...无变化

235.13/1004



2008047684

V235.13
1004-1

目 录

801	前言	1-02
111	缩写、专用术语和符号	1-03
第一章 发动机结构		
481	§ 1-1 概述	1
881	§ 1-2 冷端部件	4
241	§ 1-3 热端部件	10
821	§ 1-4 齿轮箱	15
021	§ 1-5 发动机维护	16
821	§ 1-6 孔探仪检查	18
第二章 燃油控制系统		
131	§ 2-1 FADEC 系统	23
001	§ 2-2 燃油分配系统	40
第三章 空气流量控制冷却系统		
	§ 3-1 压气机气流控制系统	56
	§ 3-2 涡轮转子间隙自动控制系统	66
	§ 3-3 涡轮导向叶片和转子叶片冷却空气系统	71
	§ 3-4 高压压气机二次流控制系统	76
第四章 滑油系统		
	§ 4-1 滑油系统	81
	§ 4-2 综合驱动发电机滑油冷却系统	95
第五章 点火系统		
	§ 5-1 点火系统	103
	§ 5-2 点火系统部件	104
	§ 5-3 航线维护任务	106



2008047684

第六章 反推力系统

§ 6-1 反推力门	108
§ 6-2 排气口及排气锥	114
§ 6-3 反推力作动系统	114

第七章 发动机装配

§ 7-1 机翼和尾部发动机	124
§ 7-2 机翼发动机	138
§ 7-3 尾部发动机	145
§ 7-4 动力装置	153
§ 7-5 进气罩	156
§ 7-6 风扇罩门	158

第八章 与飞机相关的系统

§ 8-1 指示系统	161
§ 8-2 其它相关系统	166

第一章 发动机结构

§ 1-1 概述

发动机性能:发动机的气流分为两部分,风扇气流产生 78%的推力,主气流产生 22%的推力。发动机进口直径 246.38cm,长 391.16cm,起飞时长度增加 1.9cm。无快速换发装置时标准自重 4175kg,有快速换发装置时标准总重为 5445kg。

PW4460 发动机起飞时性能数据:发动机推力为 60000 磅(267224.4N),燃油消耗率为 0.35 磅/小时/磅(0.156daN/hr/daN),涵道比为 5:1,压气机压比为 30:1。

内部气流通道由五级低压压气机,其中一级为风扇,其余四级为低压压气机;十一级高压压气机,其中有四级可变导流叶片和静子叶片;扩散器和燃烧室;燃烧室具有衬垫的环形火焰筒;二级高压涡轮;四级低压涡轮及涡轮排气机匣等组成。

发动机的主轴承有五个,1 号轴承是低压压气机的推力轴承,它是单列滚珠轴承,由中间机匣支承。1.5 号轴承给低压压气机传动轴前端提供径向支承及附加支承。2 号轴承是高压压气机的推力轴承,它是单列滚珠轴承,并由中间机匣支承,具有油膜阻尼器。3 号轴承给高压压气机和高压涡轮提供径向支承,它是单列滚柱轴承,由扩散机匣支承。4 号轴承给低压压气机传动轴后端及低压涡轮提供径向支承,它是单列滚柱轴承,由涡轮排气机匣支承,并具有油膜阻尼器。发动机主轴承及气流通道构成如图 1-1 所示。

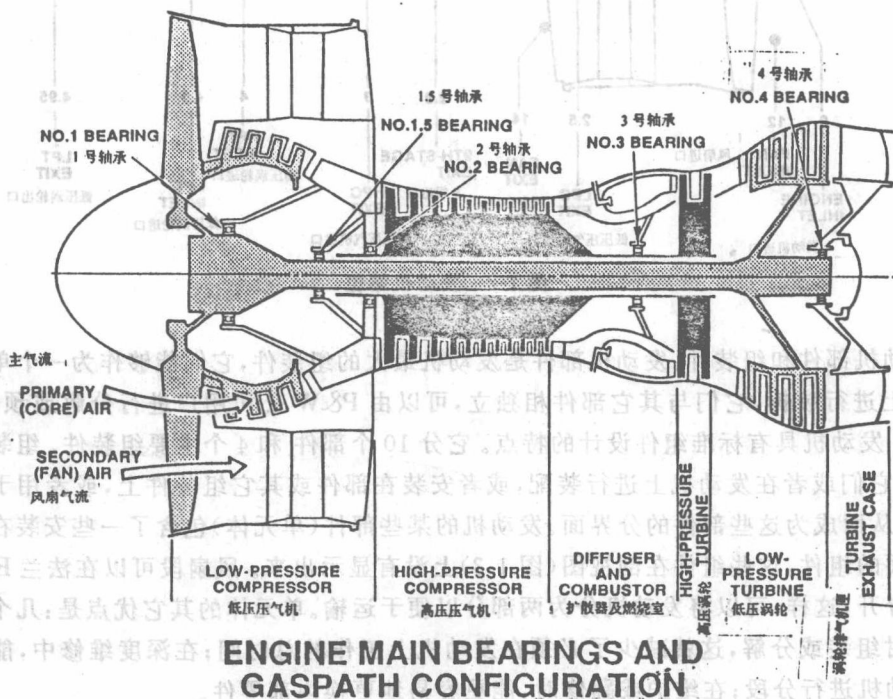


图 1-1 PW4000 发动机主轴承及气流通道构成

发动机站位:在发动机气流通道中有些位置称为站位,每个站位由数码区分。这些数码称为发动机的站号,发动机的站号写在表示压力的缩写字母后面,用来表示这些站位的压力。用同样的方法,可以表示温度。例如: $P_{12.5}$ 表示站位 2.5 的总压,即低压压气机出口总压。 $T_{4.95}$ 表示 4.95 站位的总温。站号定义如下:

2 发动机进口

12 风扇进口

2.5 低压压气机出口

14 风扇出口

2.9 高压压气机第 9 级出口

3 高压压气机出口

4 高压涡轮进口

4.5 低压涡轮进口

4.95 低压涡轮出口

注:4.95 号站也称为 5 号站或 5 号。

发动机站位图如图 1-2 所示

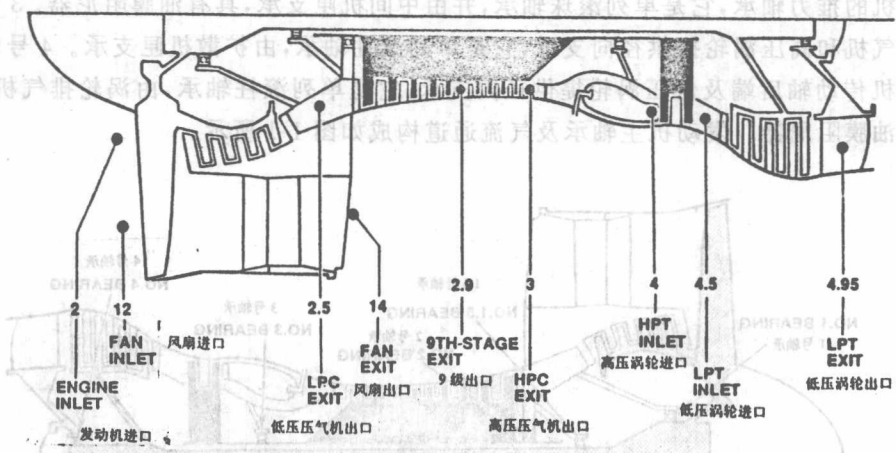


图 1-2 发动机站位

发动机部件和组装件:发动机部件是发动机最大的组装件,它们能够作为一个单元体在发动机上进行装拆,它们与其它部件相独立,可以由 P&W 公司用户进行分解或预先组装。PW4000 发动机具有标准组件设计的特点。它分 10 个部件和 4 个主要组装件。组装件不同于部件,它们或者在发动机上进行装配,或者安装在部件或其它组装件上,或者用于连接一些部件,从而成为这些部件的分界面。发动机的某些部件(单元体)包含了一些安装在发动机外部表面的组件,这些组件在剖视图(图 1-3)上没有显示出来。风扇段可以在法兰 E 处与低压压气分开,这样,可以将发动机分为两部分以便于运输。单元体的其它优点是:几个单元体可以同时组装或分解,这就减少了必须在发动机上工作的总时间;在深度维修中,能更灵活地对发动机进行分段;在维护或翻修时,能更容易地更换内部零件。

组装件的识别字母:剖视图上显示了每个单元体都具有所在段的字母,如中间机匣单元体就是 G 段。每个单元体的零件编号都包含了单元体所在段的字母。例如,中间机匣单元体