

## 基于实验的插板式进气畸变稳态压力场估计

江 勇, 张发启, 张百灵, 孔卫东

(空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038)

摘 要: 扰流插板引起的进气畸变流量随插板高度升高具有收敛到某一点的趋势。截面平均总压和周向低压区内平均总压与进气流量成线性关系。据此, 可以预估周向畸变指数。低压区周向角只与插板高度成线性关系。截面稳态畸变压力分布可以分成高压区、掺混区、低压区, 且分布各有特点, 边界明显。

关键词: 扰流插板; 稳态进气畸变; 压力分布; 发动机

中图分类号: V23 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2007)02-0001-03

采用带可移动扰流插板方式进行发动机气动稳定性检验, 可以在发动机进口产生稳态压力畸变流场和表现为频率和振幅随机变化的“紊流”畸变流场<sup>[1-4]</sup>。这两种畸变共同影响发动机工作的稳定性, 当畸变达到一定强度后, 发动机就会失稳。由于该实验方法简洁, 可操作性较强, 最近已被列入相关规范中<sup>[5]</sup>。近年来国内已有一些关于进口畸变流场的实验研究成果, 对畸变压力场分布有所认识, 但对插板形成的发动机进口畸变流场的更一般的分布规律以及畸变压力场的预估, 或更进一步仅仅通过有针对性的验证性实验便可获知该型发动机进口畸变流场的分布规律方面, 尚处于初步探索阶段或尚未开始<sup>[6-7]</sup>。

## 1 实验及设备

在发动机前部安装了扰流插板式畸变发生器和6只按等环面分布的“水”字形稳态、动态总压测耙。每只测耙上沿径向按等环面布置了5个稳态压力测点和原位安装了5只动态压力测量传感器<sup>[2]</sup>。

研制了动态压力畸变高速数据采集与实时存储处理系统、发动机退失速系统。扰流插板式畸变发生器的扰流插板由电机驱动, 从正下方插入或退出进气道, 在发动机进口处产生“稳态+紊流”的畸变流场。扰流板距发动机进口截面的距离为3.5倍直径。

发动机进口形成的压力畸变在考核发动机稳定性时, 以综合畸变指数“ $W$ ”衡量。 $W$ 由周向畸变指数 $\Delta\sigma_0$ 和面平均紊流度 $\varepsilon$ 组合而成<sup>[5]</sup>。发动机在 $\bar{n}_{1,cor} = 80\%、85\%、90\%、95\%$ 状态点, 插板高度 $\bar{H}$ 由20%开始升高, 畸变逐渐增大, 记录截面参数与发动机参数, 直至发动机失稳。

## 2 稳态畸变压力平均参数分布

随 $\bar{H}$ 的增大, 在不同的 $\bar{n}_{1,cor}$ 下, 换算进气流量 $G_{cor}$ 的变化并不平行, 转速越高, 流量下降的越快, 并且逐渐向某一点收敛, 见图1。若将各转速下的流量进行拟合, 则曲线大体在 $G_{cor} = 63 \text{ kg/s}$ ,  $\bar{H} = 52.5\%$ 收敛到一点。其物理意义是: 当插板高度达到52.5%时, 该发动机在任意转速( $\bar{n}_{1,cor}$ 在80%至95%范围内)下的进气流量为63 kg/s。出现这种现象是在扰流插板截面的局部气流达到了音速, 造成堵塞所致。此时大多数情况

收稿日期: 2006-01-19

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 江 勇(1956-), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要从事航空发动机稳定性评定方法研究。

下,发动机已进入喘振而实际上不可能收敛到该点。据此,可以推断,在 $\bar{n}_{1cor} = 80\% - 95\%$ 附近的其它转速,在 $\bar{H}$ 变化下也应具有以上规律。在该曲线之间采用线性划分(沿 $G_{cor}$ 方向),曲率光滑过渡(沿 $\bar{H}$ 方向),收敛终点不变的方式,见图2。其中 $\bar{n}_{1cor}$ ,按1%间隔划分, $\bar{H}$ 为18% - 50%。

为求得各个转速下的 $\Delta\bar{\sigma}_0$ ,必须确定发动机进气截面平均总压 $P_{sav}$ 和周向低压区平均总压 $P_{dsav}$ 。根据实验, $P_{sav}$ 、 $P_{dsav}$ 与 $G_{cor}$ 在几个不同的 $\bar{n}_{1cor}$ 下具有基本线性的关系,见图3(a)、(b)。因此,采用同样的处理方法,在图4(a)、(b)示出了 $\bar{n}_{1cor}$ 按1%间隔划分的, $G_{cor}$ 与 $P_{sav}$ 、 $P_{dsav}$ 的关系曲线。

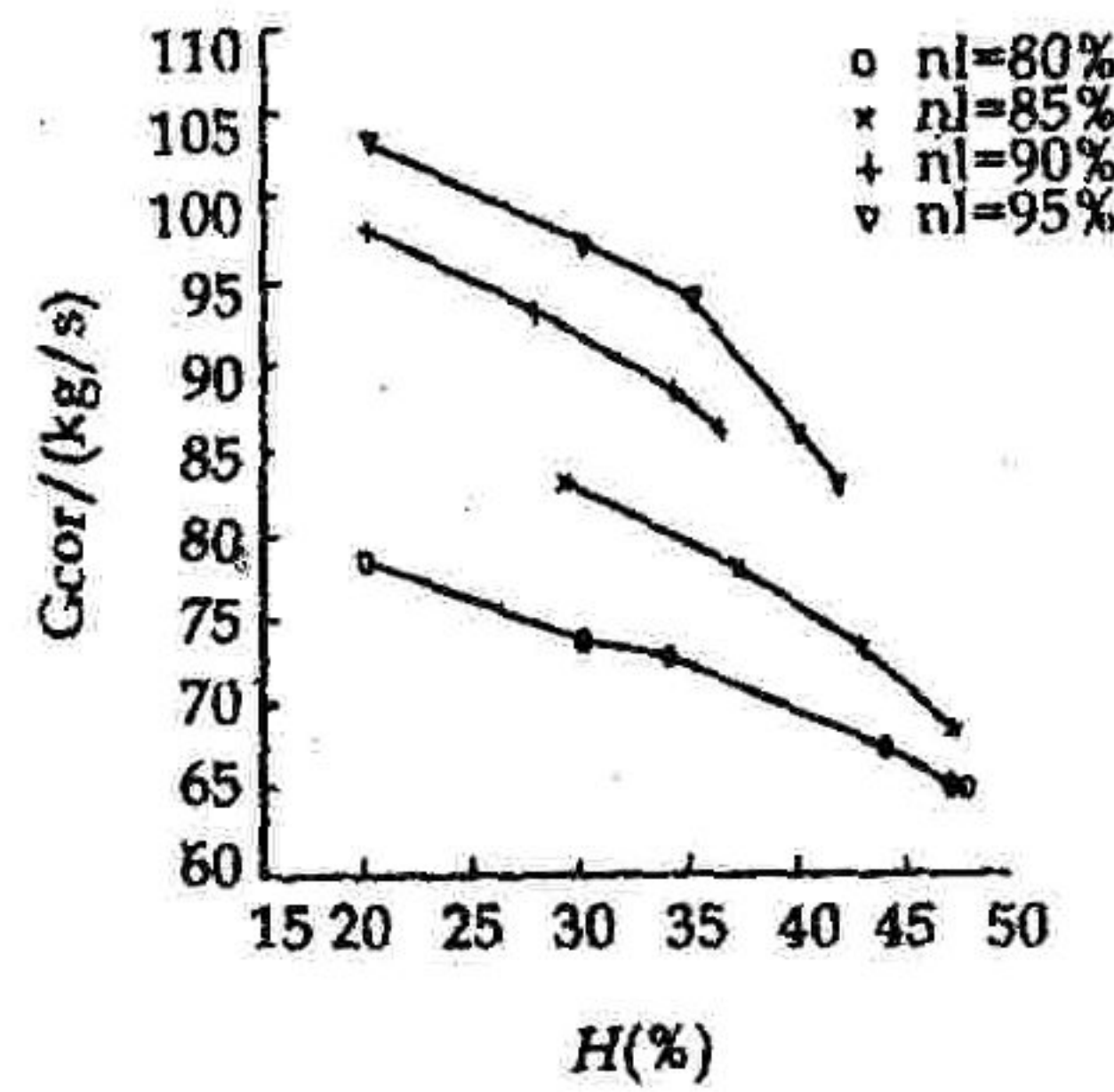


图1 不同 $\bar{n}_{1cor}$ 下 $G_{cor}$ 与 $\bar{H}$ 的关系

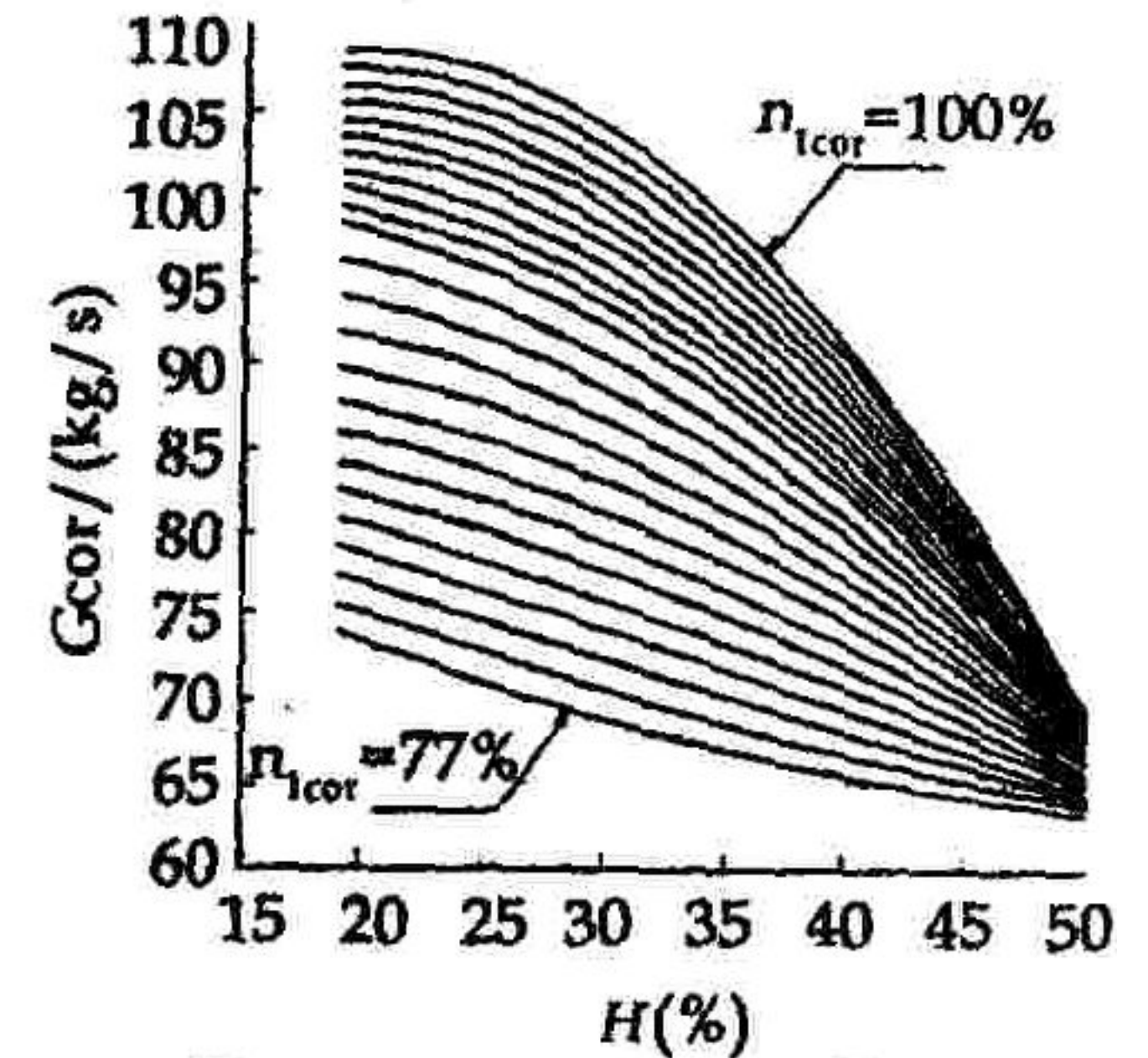
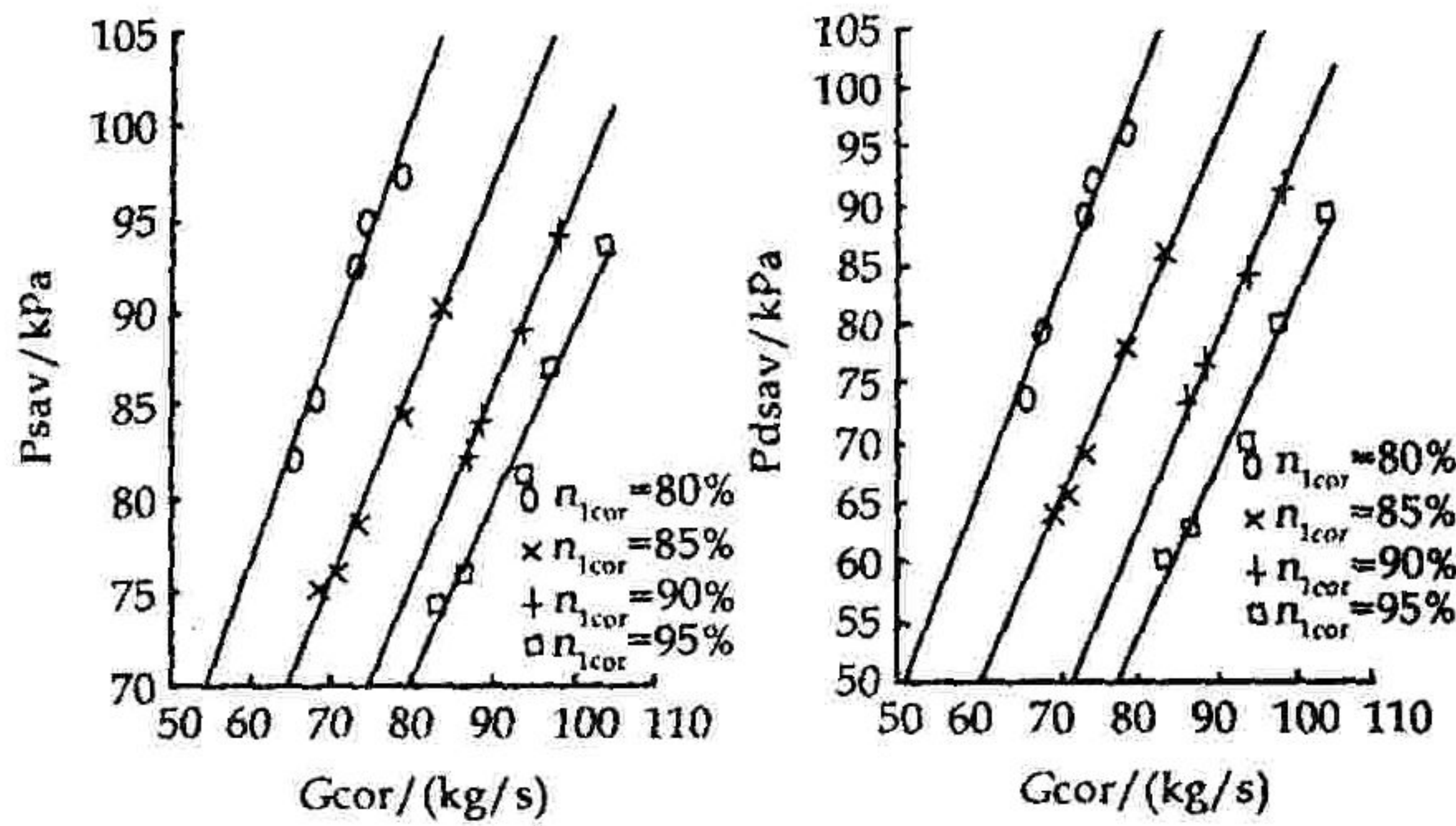


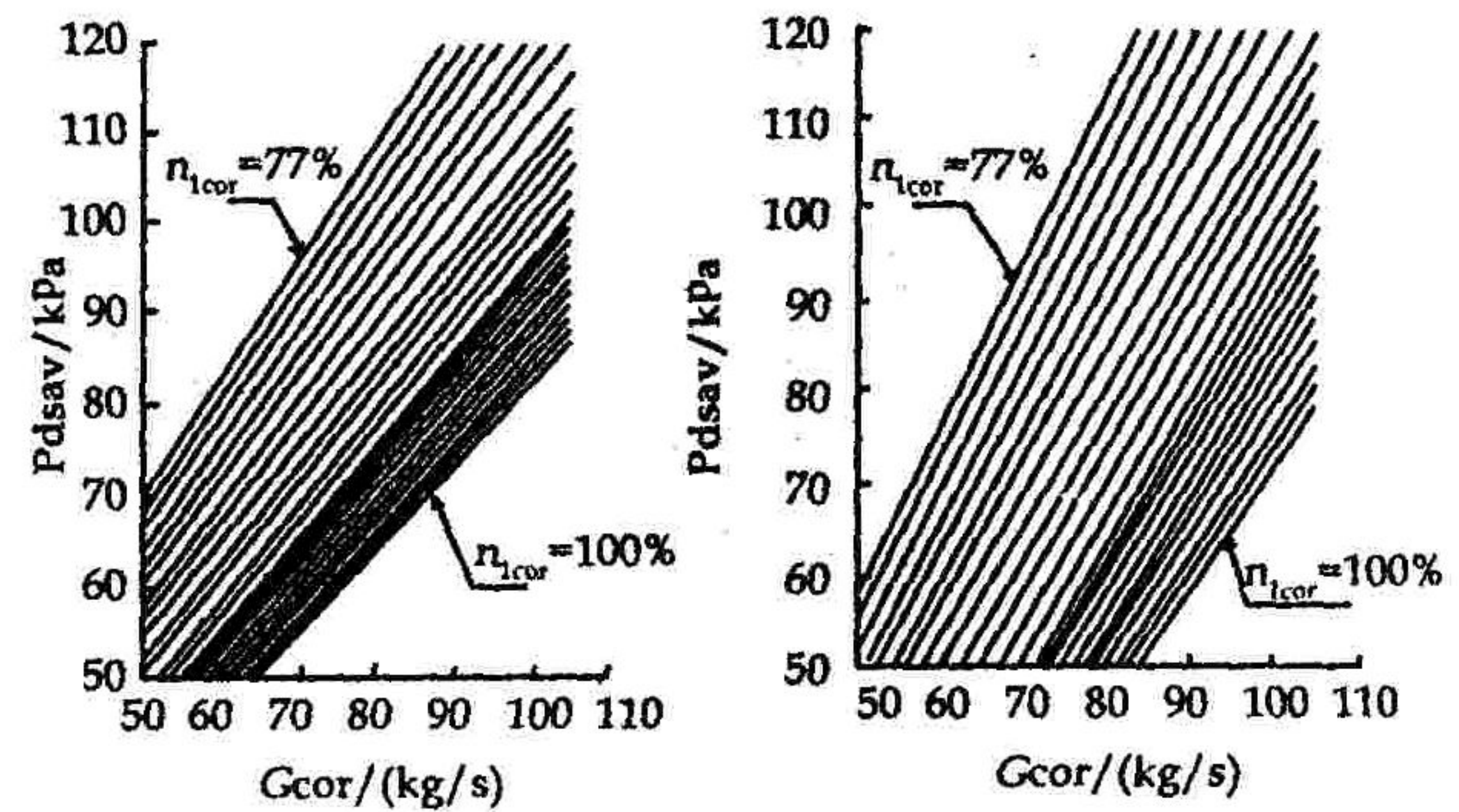
图2  $\bar{n}_{1cor}$ 等间隔下 $G_{cor}$ 与 $\bar{H}$ 的关系

试验前可以根据 $\bar{n}_{1cor}$ 、 $\bar{H}$ ,由图2确定 $G_{cor}$ ,再由图3、4确定该型发动机在各种转速下 $\Delta\bar{\sigma}_0$ 随 $\bar{H}$ 变化的数值。经与实验数值对比, $\Delta\bar{\sigma}_0$ 实验与计算结果的平均均方根相对偏差为0.158%。最大偏差为7.34%。可以满足试验的要求。



(a)  $G_{cor}$  VS  $P_{sav}$  (b)  $G_{cor}$  VS  $P_{dsav}$

图3 实验数据及线性拟合



(a)  $G_{cor}$  VS  $P_{sav}$  (b)  $G_{cor}$  VS  $P_{dsav}$

图4  $P_{sav}$ 、 $P_{dsav}$ 随 $G_{cor}$ 的变化

### 3 稳态畸变压力截面参数分布

为建立较为准确的发动机气动稳定性响应模型,掌握进口稳态畸变压力的分布特点是必需的。图5示出了由实验得到的按文献[1]中定义的周向低压区范围 $\theta^-$ 随插板高度的变化关系。 $\bar{H}$ 与 $\theta^-$ 基本上成线性正比关系, $\theta^-$ 的分布带宽最大约为 $10^\circ$ ,且与 $\bar{n}_{1cor}$ 发动机转速关系不明显,表明 $\theta^-$ 主要取决于扰流板的位置。因此,当我们已知 $\bar{H}$ ,则由图5, $\theta^-$ 可以基本确定。

稳态畸变压力的分布大致可以分成3个区域。图6(a)、(b)示出了在 $\bar{n}_{1cor} = 85\%$ 、 $\bar{H} = 36.57\%$ 、 $P_{sav} = 85.35$  kPa截面压力分布的稳态畸变压力在截面上的压力等高线图和三维视图,可以明显地看出3个区域的不同特征及其清楚的边界。上部高压区压力变化平缓并呈线性。中间是压力变化率最大,且基本线性的掺混区。下部是一个比较平缓的低压区,沿垂直方向其压力分布则是两边略高中间较低。在不同的状态下,掺混区内的压力分布 $< 4$  kPa,在不同的 $\bar{n}_{1cor}$ 和 $\bar{H}$ 下所占的宽度变化很小,约等于截面半径,其位置随 $\bar{H}$ 变化略有变化。高压区和低压区面积在插板位置变化时,比例也随之略有变化。而稳态畸变的主要变化则反映在掺混区的压力变化斜率上。此外,在高压区分布的主要区域两侧有像“鸟翼”似的低压分布。显然这是由于插板上沿靠近壁面处与附近的壁面共同作用的结果。

如能在给定 $\bar{n}_{1cor}$ 、 $\bar{H}$ 时,获得更具确定性的稳态畸变压力分布,还需根据实验数据建立数据库,将已有的各实验状态下截面 $N$ 点数据按 $\bar{n}_{1cor}$ 和 $\bar{H}$ 确定的平面排列,形成 $N$ 张网格,当我们需要某一由 $\bar{n}_{1cor}$ 和 $\bar{H}$ 确定

的稳态压力分布时,将  $N$  点压力值,在  $N$  张网格中插值求出,根据其在截面上的坐标排列,构建截面压力分布。

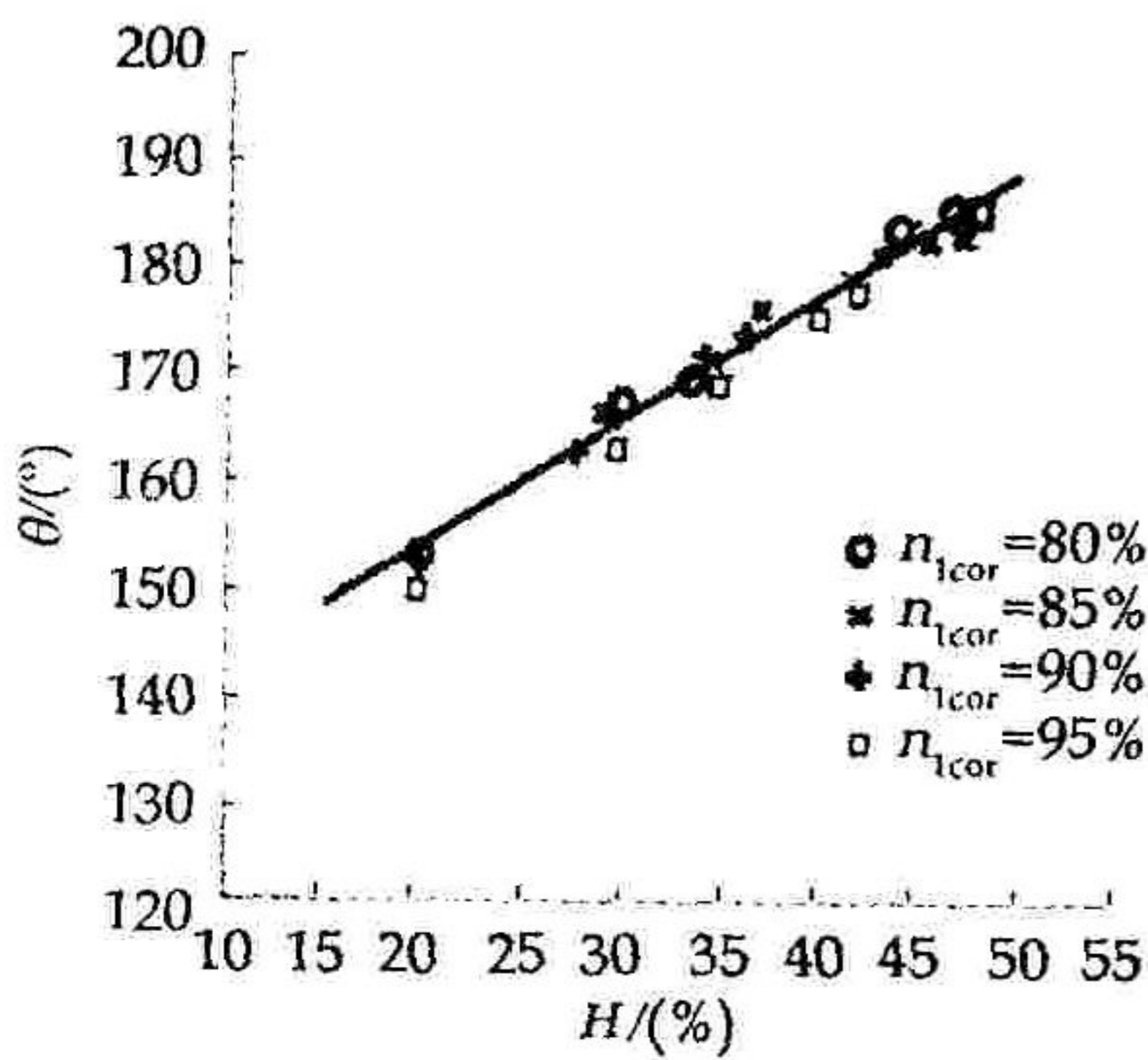
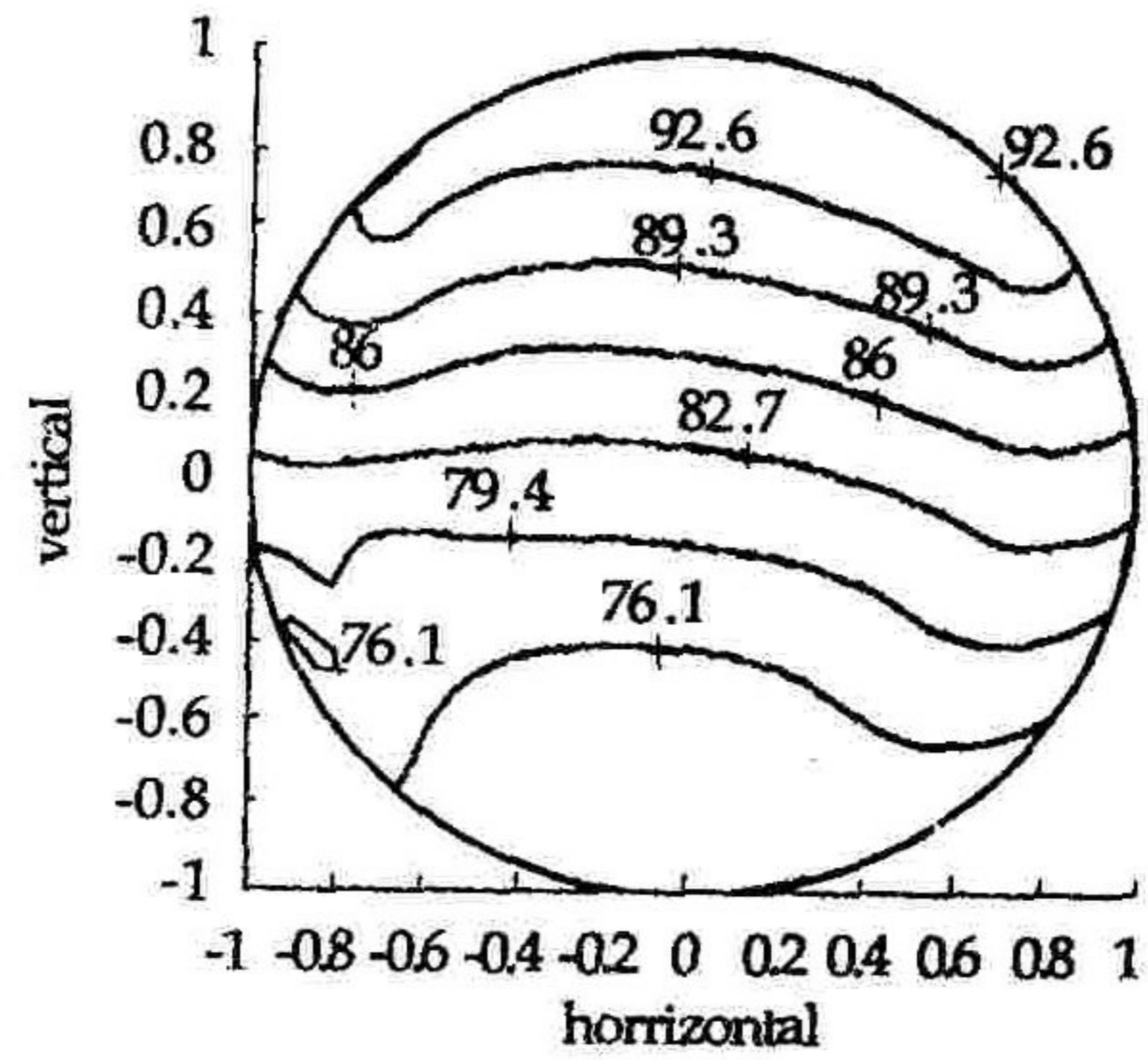
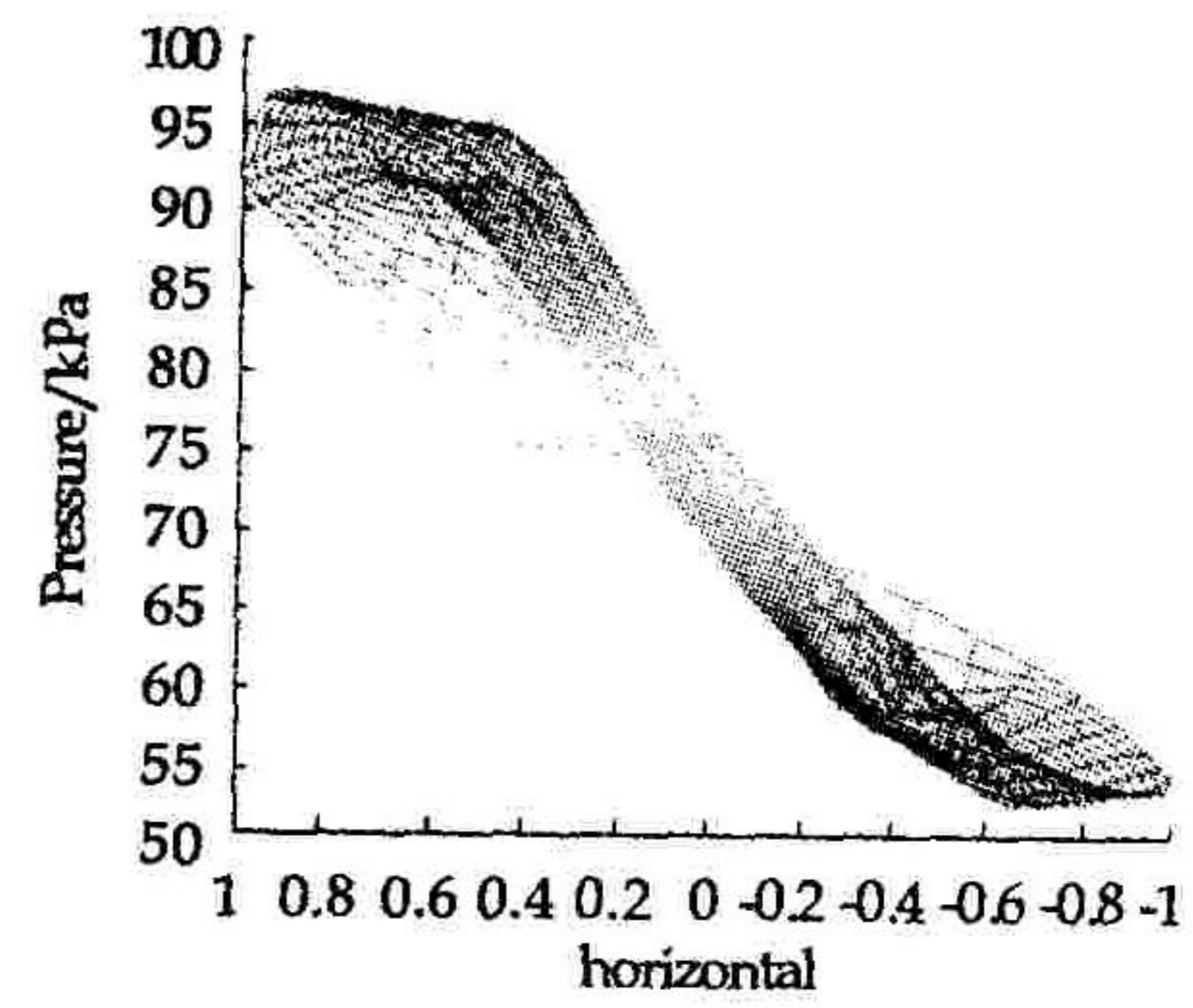


图5  $\theta^-$ 、 $\bar{H}$  线性拟合



(a)  $P_s$  contour



(b)  $P_s$  distributing

图6 发动机进口截面稳态压力畸变分布

## 4 结论

①随  $\bar{H}$  的增大,  $G_{cor}$  对应不同的转速,有收敛到一点的趋势,这一变化趋势使我们可以根据稳态压力畸变的设定参数  $\bar{n}_{1cor}$ 、 $\bar{H}$  求得  $G_{cor}$ 。② $G_{cor}$  与  $P_{sav}$  和  $P_{dsav}$  的试验统计关系是线性的,因此,可以以一簇直线来求得不同  $\bar{n}_{1cor}$  下参数  $P_{sav}$  和  $P_{dsav}$ ,估算出稳态压力畸变的周向畸变指数  $\Delta\sigma_0$ 。③周向低压区范围  $\theta^-$  受插板高度  $\bar{H}$  的影响最大。且基本上成线性正比关系。④稳态畸变压力在整个截面上可分为各具特点的高压区、掺混区和低压区,互相间有明显分界。

### 参考文献:

- [1] 刘大响,叶培梁. 航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术[M]. 北京:航空工业出版社,2004.
- [2] 佚名. 涡扇/涡喷发动机进气压力畸变及稳定性试验研究试验技术总结报告[R]. 西安:空军工程大学工程学院,2001.
- [3] 陶增元. 航空燃气涡轮发动机畸变试验研究[R]. 西安:空军工程大学工程学院,2005.
- [4] 江 勇. 航空发动机插板式进气畸变实验技术研究[D]. 西安:空军工程大学工程学院,2005.
- [5] CJB/Z224 - 2005. 航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定方法[S].
- [6] 黄顺洲. 压力温度组合畸变对发动机稳定性影响的数值研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2002,15(1):28 - 32.
- [7] 赵全春. 压气机“挡板”畸变试验方法[A]. 中国航空学会第四届试验与测试学术会论文集[C]. 1999.

(编辑:姚树峰)

The Inserted Board Air Inlet Flow Steady Pressure Distortion Field

Estimate Based on Experiment

JIANG Yong, ZHANG Fa -qi, ZHANG Bai- ling, KONG Wei -dong

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China)

Abstract:By an inserted board airflow inlet distortion test, the flow will be reduced to a point with raising the inserted board. The section average total pressure and the average total pressure in the circumferential low -pressure areas are in linear relationship with the air inlet flow. Then, the circumferential distortion exponent can be estimated. The circumferential angle in the low - pressure area just is in linear relationship to the inserted board height. The section steady distortion pressure distribution can be divided into high pressure area, mixing pressure area and low pressure area, each has its own characteristic in distortion and their boundaries are obvious.

Key words:disturbed inserted board; steady air inlet flow distortion; pressure distribution; engine