

# 宽带稀疏圆柱阵指向性研究

耿成德

(七一五研究所)

1988年11月11日收到

宽带稀疏圆柱阵的测试结果与理论计算值的相当吻合,证明了圆柱阵的设计在理论上的正确性和在工程上的实用性。文中特别指出了,只要选用适当的幅度加权因子,就能够对宽带稀疏圆柱阵中出现的大旁瓣(栅瓣)进行有效地抑制。

## 一、引言

对于主动声呐中使用的发射基阵,通常希望在一个小的区域内尽可能发射较大的功率,以便增大作用距离。为此,除了采用低频大基阵外,在布阵上往往采用密排结构;对于被动声呐接收基阵,通常希望在某搜索方向有较大响应,而在其余方向不出现大的响应(或称大的旁瓣),以便降低最小可检测信号的电平和增加基阵输出信噪比。对此,一般也是采用满足连续条件(阵元间隔不大于工作频段的最小波长的一半)的密排布阵方式,如早期的苏联产品 Слика-2 和 Фенекс 声呐接收阵就是遵从这个“半波长基元间隔”原则布阵的。

近年来,人们对稀疏基阵的研究发生广泛的兴趣。70年代的联邦德国产品阿特拉斯(ATLAS) CSU-3 小型多功能潜用声呐系统和70年代末80年代初法国研制的 Eledone ‘刺鲑’潜用声呐设备中的被动声呐圆柱基阵,都采用了条形水听器在水平圆周稀疏、在垂直平面内错开排列的稀疏布阵方案。这种方案的优点是可以在保证基阵性能的前提下,减少电子线路的复杂性和降低水下分机的成本。

许多研究者对带声障板的稀疏圆柱阵也进行了理论探讨。哈船院老师们提出了“分离聚氨酯障板振动的宽带散射理论模型”,他们对一块矩型障板在刚性圆柱体上的振动模式进行了

理论和实验探讨,认为只有按一定条件制作的4点简支的分离障板才能在较宽的频带内产生均匀的宽带强散射波。文献[1]对以空气腔为反声障板的稀疏圆柱阵的水平指向性进行了研究,指出由于障板的反射作用,每个阵元除有通常由位置程差引起的相移外,还有一个附加相移。我们的湖上试验表明,即使对由于声障板散射作用所带来的附加相移进行“完全补偿”,测试结果也没有明显改善。这是因为测试设备的系统误差远大于附加相移,掩盖了文献[1]中所述的“完全补偿”的好处。

几年前我们对宽带稀疏圆柱阵也开展了一些理论和试验研究工作。由于用有限元法计算圆柱阵近场特性的程序设计相当复杂,因此,为便于计算机模拟计算,也为工程实现的可能性,我们提出了适用于工程设计计算的理论模型<sup>[2]</sup>。它是基于通常的非透声曲面阵设计,使用了根据克希霍夫(Кирхгоф)近似而得出的实衍射波因子<sup>[3]</sup>,以代替由于声障板宽带散射引入的与频率有关的复衍射波因子,并考虑了在圆柱阵垂直平面内水听器条的错开排列。试验表明,当频率升高,布阵变稀,障板散射增强,用实衍射波因子代替基元因子的近似需作修正了。我们认为,对圆柱阵的一个局部来说,可以把置于圆柱障板前的一个点源水听器视为它被置于一个无限大的平面障板前。无疑,对较大的圆柱阵这种近似是可行的。这样,我们就可按平面障板前的虚元法或镜面反射原理来近

似确定圆柱障板前的阵元指向性了。为了验证所建立的理论模型的可靠性，最近我们又进行了一次湖上试验。本文从试验结果出发，扼要阐述了声障板的散射作用、布阵的疏密对指向性的影响，稀疏阵的特点以及宽带平滑作用。

## 二、试验用理论公式

文献[2]曾给出过归一化空间指向性函数，为了完整性，这里再简略列出。频率为  $f$  的空间指向性函数为

$$V_f(\theta, \phi) = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin(Nu_1/2)}{\sin(u_1/2)} \right| \cdot \left[ \frac{(G_1 + G_2)^2 + (H_1 + H_2)^2 \right]^{1/2} \left| \sum_{m=1}^{2M} W_m \sin(kH \cos \phi_m) \right| \quad (1)$$

式中

$$G_1 = \sum_{m=1,3}^{2M-1} E(\theta_m) W_m \cos u_2 \quad (2)$$

$$G_2 = \sum_{m=2,4}^{2M} E(\theta_m) W_m \cos(u_2 - u_1/2) \quad (3)$$

$$H_1 = \sum_{m=1,3}^{2M-1} E(\theta_m) W_m \sin u_2 \quad (4)$$

$$H_2 = \sum_{m=2,4}^{2M} E(\theta_m) W_m \sin(u_2 - u_1/2) \quad (5)$$

$$u_1 = kD \sin \theta \quad (6)$$

$$u_2 = kR [\cos \theta_m - \cos \phi_m] \quad (7)$$

$$E(\theta_m) = |\sin(kH \cos \theta_m)| \quad (8)$$

而  $\cos \theta_m = \cos \theta \cos(\phi - \phi_m) \quad (9)$

$$\phi_m = \left[ m - \left( M + \frac{1}{2} \right) \right] \phi_0, \quad m = 1, 2, \dots, 2M \quad (10)$$

$2M$  为圆柱阵工作扇面内的水听器条数， $N$  为每条水听器的基元数， $D$  为水听器条中基元间隔， $k$  为水中圆波数， $R$  为圆柱半径， $W_m$  为幅度加权因子， $\phi_m$  为水听器条的中心坐标角， $\theta_m$  为圆柱阵上基元的法线方向与声波入射方向的夹角， $E(\theta_m)$  为基阵的声障板散射引起的屏蔽因子。由(8)式和(9)式可见， $E(\theta_m)$  表示了对不同的基元 ( $\phi_m$  不同) 同时在  $\theta, \phi$  方向声障

板的散射作用，它是一个空间函数。象文献<sup>[1]</sup>那样，我们还必须注意到声障板对反方向声波的遮蔽作用，这时，我们只要对(8)式作如下限制：

$$E(\theta_m) = \begin{cases} |\sin(kH \cos \theta_m)| & \text{当 } |\theta| \leq 90^\circ, |\phi| \leq 90^\circ \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

即可。

宽带指向性函数  $V_{\Delta f}(\theta, \phi)$  可表示成如下形式：

$$V_{\Delta f}(\theta, \phi) = \left( \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} V_f^2(\theta, \phi) df \right)^{1/2} \quad (11)$$

式中  $f_1$  和  $f_2$  分别为宽频的下限频率和上限频率。指向性指数则用下式表示

$$DI = 10 \log \frac{\pi}{\int_0^\pi d\phi \int_0^{\pi/2} V_{\Delta f}^2(\theta, \phi) \cos \theta d\theta} \quad (12)$$

我们对具有耐压反声障板的实际基阵 (real array) 测量了单个阵元的指向性，结果在高频段 ( $f \geq 5.66 \text{kHz}$ ) 与(8)式相当吻合；低频时用实衍射波因子  $\frac{1}{2} (1 + \cos \theta_m)$  来代替  $E(\theta_m)$  较合适。

## 三、试验概述

### 1. 试验方法简述

具有加聚氨酯包复的耐压泡沫塑料反声障板用螺栓支撑在圆柱阵圆周表面的四点上；为了充分发挥障板的散射特性，带前置放大器的水听器工作面朝向声障板，相邻垂直水听器

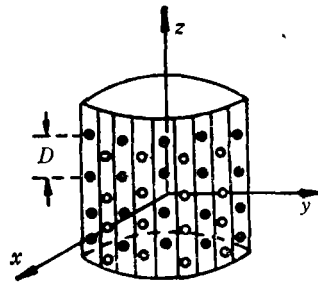


图1 稀疏布阵示意图

条中的基元交错排列,构成稀疏布阵,如图1所示。

用噪音法和连续波法分别测量基阵的宽带指向性和单频指向性;测试方框图略。

## 2. 试验结果及讨论

### (1) 稀疏布阵的特点

为了比较,我们同时测量了密排布阵的结果。在试验圆柱阵中我们沿准线把在大约 $150^\circ$ 扇面中密布28条水听器称为密排布阵;而把相间抽去一条,由14条组成工作扇面称为稀疏布阵。水平指向性 $V_1(\alpha)$ 的测试结果示于图2。图中实线为密排布阵的指向性图,虚线为稀疏布阵的指向性图。由图可见,稀疏布阵的主瓣比密排时的稍窄,第一副瓣较低,这可能就是反声障板的宽带散射作用所致。密排时,

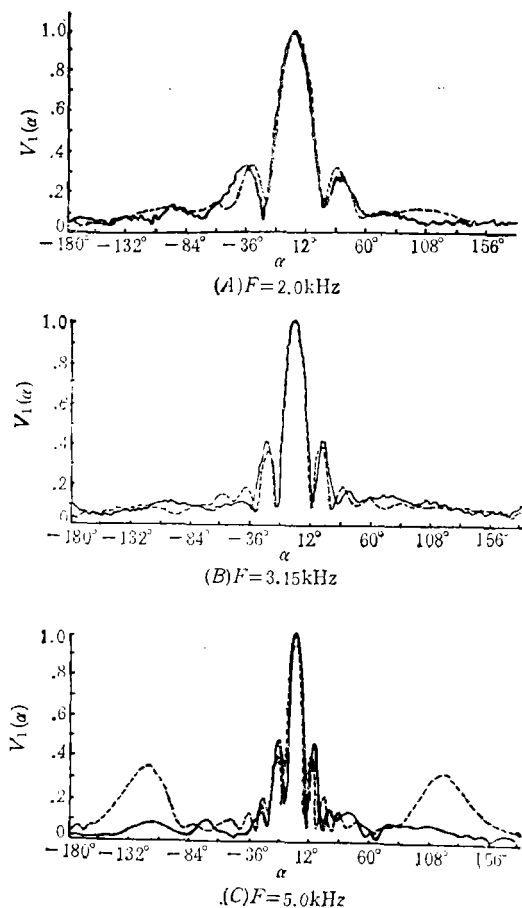


图2 密排布阵和稀疏布阵的指向性图

——密排布阵; - - -稀疏布阵

应用声学

声障板更多地被固定水听器条的金属构架所遮盖,因而其散射作用受到了阻碍。当 $f \geq 3.7$  kHz时,由于 $H/\lambda > 1/4$ ,使得在水听器的工作面上不能同相迭加<sup>[1]</sup>,导致第一副瓣明显增大;当 $f \geq 5.0$  kHz时,由于稀疏布阵不再满足连续条件;使得在 $\pm 110^\circ$ 方位附近出现大的旁瓣(类似于线列阵中的栅瓣),而对于密排布阵,因满足连续布阵条件,这个‘栅瓣’自然就被抑制了。

### (2) 幅度加权对‘栅瓣’的抑制

如上所述,在稀疏布阵中,当频率高于某一值时,会在基阵指向性图主瓣两侧大约 $100^\circ$ 方位附近出现两个对称的大旁瓣(栅瓣)(参看图2(c))。徐俊华、兰军称这个大旁瓣为副极大,对它的特点进行了阐述<sup>[1]</sup>。但对稀疏阵出现大旁瓣的原因尚无明确的解释。可以认为,圆柱基阵工作扇面中几条边缘水听器具有近似相等的相位差,因而它们对 $100^\circ$ 方位附近的人射波近似是等幅度、等相位迭加。显然,稀疏阵的大旁瓣就是这种迭加的结果。于是我们选择适当的、工程上能实现的余弦平方台束控因子进行加权,以达到破坏工作扇面中几条边缘水听器的近似同相迭加效应。试验中,选择在中间频率(5.66 kHz)上进行幅度加权调整。对高频段(单频和宽带)的测试结果示于图3。图中实线为均匀加权的指向性图,虚线为幅度加权的指向性图。为明瞭起见,表1列出了加权前后的大旁瓣归一化幅值 $\psi$ 。

表1 大旁瓣在加权前后的归一化幅值 $\psi$

$f$ (kHz)		$\psi$	
		加权前	加权后
5.66	左	0.23	0.14
	右	0.31	0.14
8.0	左	0.56	0.45
	右	0.49	0.43
(4-8)	左	0.32	0.19
	右	0.24	0.18

由图3和表1可以看出,只要加权因子选

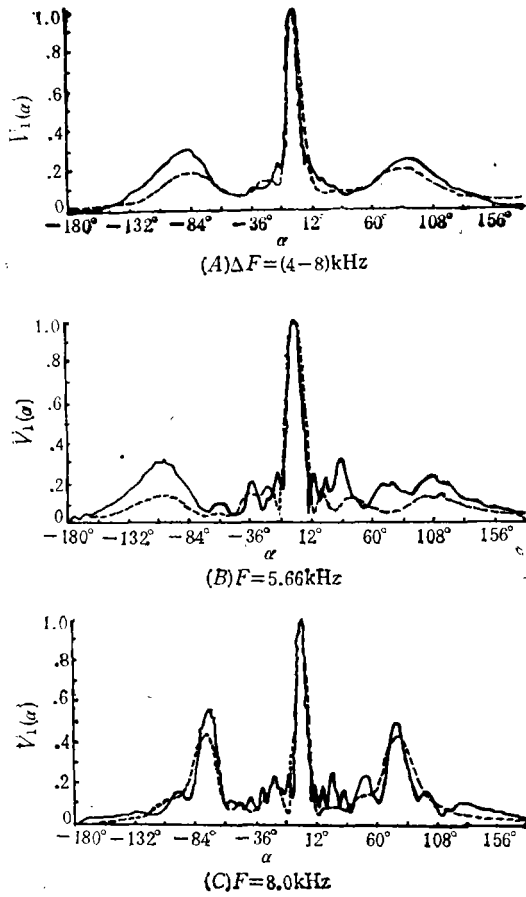


图3 幅度加权对指向图大旁瓣的抑制  
——均匀加权； ——幅度加权

择适当,用幅度加权的办法,不仅可以抑制第一副瓣,而且能够对稀疏布阵在高频段由于不满足基元间隔的连续性条件而出现的两个远离主瓣的大旁瓣产生抑制作用(最大可抑制41%左右)。试验还发现,如要较好地抑制较高频段的大旁瓣,则应在此频段进行幅度加权调试,而此权系数值,对低频段的旁瓣仍有抑制作用。

(3) 指向性的实测值与理论计算值的比较  
为便于比较,下面除给出指向性的实测值和按前节理论公式计算的理论值外,还列出了法国 Eledone 声呐技术说明书(DASM 82/06/739 JLC)给出的指向性技术参数值(本试验基阵的参数同于 Eledone)。而且既给出宽带信号的结果,也给出3个典型单频值,但指向性图只给出宽带的。

(a) 水平指向性  $V_1(\alpha)$  的比较

表2列出1—4kHz和4—8kHz的宽带信号及其相应几何中心频率2kHz和5.66kHz以及8.0kHz的水平指向性特性的理论值与测试值。表中 $\Theta$ 为指向性函数图的半功率点夹角(度); $\psi_1$ 为第一旁瓣的归一化幅值。相应的宽带信号的指向性曲线示于图4,图中实线为理论值,虚线为测试值。

表2 水平指向性的比较

$f$ (kHz)		测试值			理论值		Eledone
		$\Theta$	$\psi_1$		$\Theta$	$\psi_1$	
			左	右			
宽带	1—4	21.8	0.21	0.21	19.0		18.0
	4—8	7.6	0.32	0.27	8.2	0.22	7.5
单频	2.0	24.0	0.33	0.31	23.0	0.25	
	5.66	8.6	0.31	0.31	8.4	0.22	
	8.0	6.0	0.25	0.19	5.8	0.26	

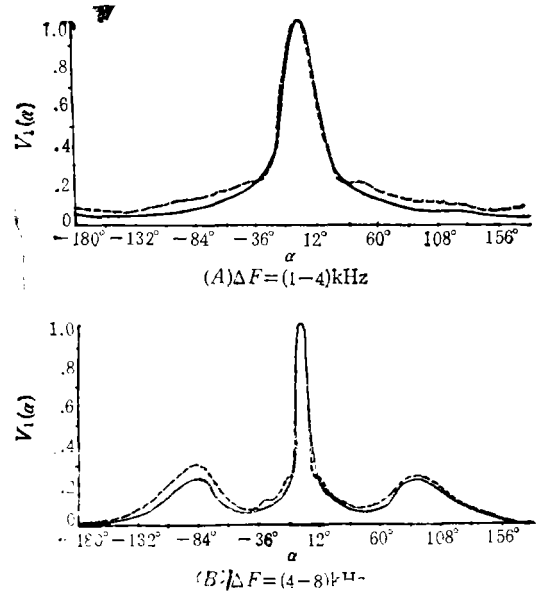


图4 宽带稀疏圆柱阵水平指向性的理论曲线与测试曲线  
——理论曲线; ——测试曲线

(b) 垂直指向性  $V_2(\alpha)$  比较

表3列出了圆柱阵垂直指向性的测量值及其理论值,图5为宽带的指向性曲线。

表 3 垂直指向性的比较

f (kHz)		测试值			理论值		Eledone
		$\Theta$	$\psi_1$		$\Theta$	$\psi_1$	
			左	右			
宽带	1-4	51.8	0.08	0.07	49.0		48.0
	4-8	20.2	0.18	0.23	20.8		21.0
单频	2.0	61.8	0.07	0.05	60.0		
	5.66	22.2	0.19	0.25	22.0	0.14	
	8.0	17.2	0.42	0.38	16.2	0.19	

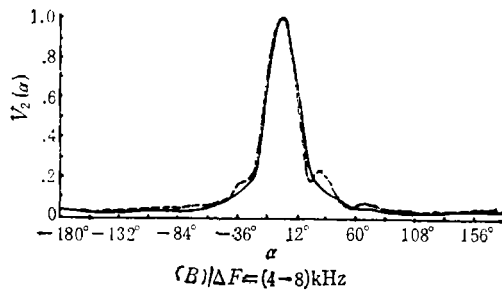
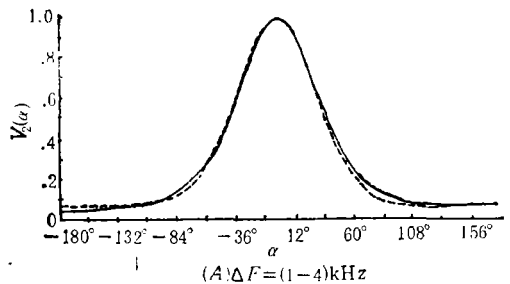


图 5 宽带稀疏圆柱阵垂直指向性的理论曲线与测试曲线  
——理论曲线； - - - 测试曲线

从表 2、表 3 和图 4、图 5 可以看出：无论是对低频还是对高频，也不管是对单频还是对宽频带，稀疏圆柱阵水平指向性与垂直指向性的测试图形与理论图形的主瓣宽度非常一致；水平指向性图中大旁瓣出现的方位和达到的高度也相当吻合。测试图形中旁瓣幅度比理论值高，这是水听器条的不一致性(幅度与相位的起伏)所致。

(4) 指向性指数 (DI) 的比较

对宽带稀疏圆柱阵指向性指数 (DI) 的测量计算, 这里近似采用了 Bobber. R. J 提出的方法<sup>[4]</sup>。现将此法得到的 DI 测试值与按 (10)

应用声学

表 4 指向性指数的比较

f (kHz)	DI (dB)			ΔDI (dB)
	测试值	理论值	Eledone	
1-4	14.12	13.96	14.5	0.16
4-8	22.79	21.25	21.0	1.54
2.0	12.94	14.29	14.6	1.35
5.66	21.84	21.16	20.8	0.68
8.0	24.52	22.41	22.4	2.11

式计算得到的理论值一并列于表 4, 表中同时列出了 Eledone 值 |ΔDI| 表示测试值与理论值的偏差。

由表 4 可以看出：无论是对单频还是对宽频带, 均有 |ΔDI| < 2dB。据文献<sup>[4]</sup>的分析, 用文献中提供的公式估算指向性因数  $R_\theta$  的综合误差约为 ± 1.0dB。由此可见, DI 的实测值与理论值已相当吻合了。还可看出, 测试值或理论计算值与 Eledone 值也吻合得很好, 其误差也多在 2dB 以内。

由于图 4 和图 5 中 4-8 kHz 的指向性测试图形与理论图形的旁瓣有明显差别, 从而导致了 4-8 kHz 的 DI 值产生较大的偏差 (|ΔDI| = 1.54dB), 显然这个偏差在误差范围之内。

四、结 束 语

对给定的频率, 或当基元间隔与波长比不是很大时, 选用适当的幅度加权因子加上宽带平滑, 可对宽带稀疏圆柱阵中出现的大旁瓣(栅瓣)产生明显抑制作用。

指向性特性(指向性参数和 DI 值)的测试结果与理论值相当吻合, 说明在宽带稀疏圆柱阵设计中所采用的理论计算方法作为工程估算是适用的。

测试工作得到了试验小组全体同志的协助, 在此特表示深切感谢。

参 考 文 献

[1] 徐俊华、兰军, 声学学报 10-3(1985), 149-160.  
 [2] 耿成德, 舰船科学技术, 8(1985), 17-24.  
 [3] М. Д. Смаришев, Направленность гидроаку-

# 航空发动机试车台噪声的治理

丁洪志

(中国人民解放军空军第一研究所)

1988年4月27日收到

试车台的噪声比一般民用噪声源的噪声大得多。在试车台室内中高频噪声大，在室外环境低频噪声大。根据上述特点，在室内采用了墙壁吸声层、吸声尖劈、顶棚悬挂空间吸声体、进气活动消声装置等；在排气系统中采用了隔声室、扩张消声室、吸声导流板、迷宫消声室、吸声顶棚、墙面吸声砖、排气塔等技术。综合治理后，达到了《工业企业噪声卫生标准》和《城市区域环境噪声标准》的规定。

## 一、引言

我所试车台有两个台架，分别试验涡喷六型和涡喷七型飞机发动机，试车台是发动机使用和维修工作中不可缺少的试验设备（见图1）。试车台经过长期使用，原有的消声设施损坏，消声效果变差，试车时二号台操作间噪声高达104dB(A)；距试车台350m处宿舍区一号楼前噪声达79dB(A)，大大超过了《工业企业噪声卫生标准》和《城市区域环境噪声标准》的规定值，严重地干扰了人们的正常生活、学习和工作。

试车台的噪声经过综合治理后，取得了显著的降噪效果，达到了以上两个标准的要求。

## 二、试车台的原有噪声污染

试车台的噪声是由发动机试车时产生的，噪声通过试车台的进排气系统向外传播；也通过试车台的基础、墙壁、门窗和地面向外传播。

### 1. 试车台室内噪声实测值

发动机试车时在试车间内产生强大的噪声，由于二号台试验的发动机推力比一号台的大，所以二号台的噪声比一号台的大，这里只谈

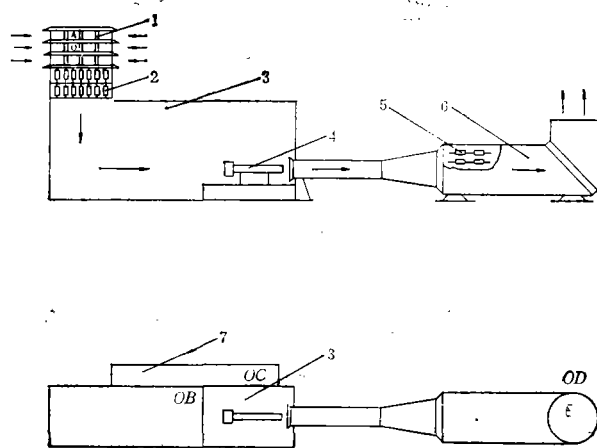


图1 二号试车台简图(噪声治理前)

1. 进气塔, 2. 圆筒消声器, 3. 试车间, 4. 涡喷七型发动机, 5. 圆筒消声器, 6. 排气消声筒, 7. 操作间, A B C D 噪声测点。

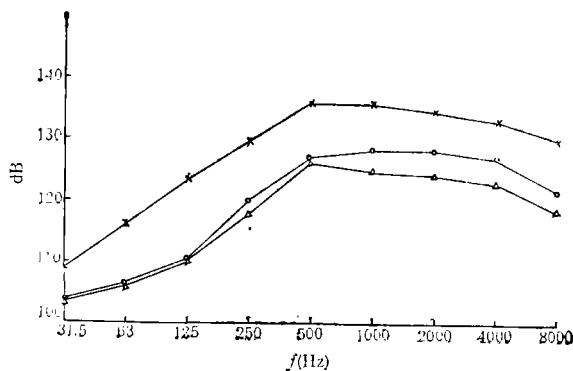


图2 试车间倍频程噪声频谱(测点B)

\*—\*—\*—加力状态, ○—○—最大状态, △—△—额定状态。