新技术小丛书

差动极值調节系统

〔苏联〕B. И. 瓦西里耶夫著

国防工业出版社

出版者的話

差动极值調节系統是极值控制系統的一种。它的优点是避免了一般极值控制系統中所不可避免的对极值进行搜索的过程。于是这就消除了系統在极值附近的自振蕩，从而提高了系統的动态品质和稳定性。

本书除了对一般极值調节系統作了簡单介紹之外，着重介紹了两种差动极值調节系統，使极值特性变形原則的系統和带有調节对象模型的系統。对于这两种系統，本书比較詳細地讲解了后面一种。这种系統在調节对象容易模拟的任何場合均可适用，例如在很多种化工生产过程中均可采用这种差动极值調节系統。

书末还比較詳細地举出了两个差动极值調节系統应用的实例：一个是在热电站的水化学淨化中用带模型的差动极值調节系統来保持补給水具有最佳的成分；另一个是利用差动极值調节器以相关的方法测量热軋鋼带的速度。

本书可供从事于生产过程自动化的工程技术人員参考。

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
〔苏联〕 В. И. Васильев
ИЗДАТЕЛЬСТВО АН УССР 1963

*

差动极值調节系統
周永刚譯

*

国防工业出版社 出版
北京市书刊出版业营业許可证出字第074号
新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售
国防工业出版社印刷厂印装

*

$737\times1092\ ^1/_{32}$ 印張 $2\ ^1/_8$ 44千字
1965年8月第一版 1965年8月第一次印刷 印数：0,001—2,800册
統一书号：15034·949 定价：（科六）0.30元

差动极值調节系統

〔苏联〕В. И. 瓦西里耶夫 著

周承剛 譯

国防工业出版社

1965

目　录

第一章
現有极値系統的簡单綜述

§1 极値調节系統的分类

在本节中沒有提出对現有极値調节系統作詳細研究的任务，因此我們只簡略地研究一下某些这类系統的作用原理。

极値調节系統的任务是在影响系統工作条件的不同扰动作用連續变化时，将过程的一个或几个指标保持在实际容許的最高或最低水平上。

判定应用极値系統是否合理的基本条件之一是系統最佳方式的連續变化，这种連續变化是由于外界扰动的变化或系統內部状态的特征所引起的。

虽然极値調节系統仅在調节对象的特性具有极値时才是有效的，但是，尽管調节对象具有带极値的特性且存在有連續变化的外界扰动，在某些情况下应用极値調节并不恰当。

如果对象特性的极値永远对应于控制作用的同一个数値（图 1 *a*），采用极値調节器就沒有意义。在这种情况下，应用一般的鎮定系統就可以滿足要求。仅当調节对象特性的极値在 $\varphi-\mu$ 平面上沿水平方向移动时（图 1 *б*），应用极値調节才是适宜的。

极値調节系統和所有一般的調节系統一样，可以按两个主要原則来实現：（1）按扰动（具有预先給定复合特性的开环系統）；（2）按被調节量的偏差（閉环系統）。

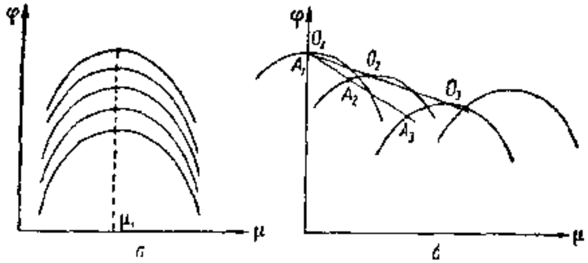


图 1　典型极值特性(φ—极値指标；μ—控制作用)；
а—不宜于采用极値調节器的情况；б　需要采用极値調节器的情况。

某些极值調节系統同时应用两个原則（复合系統）。下面在几乎所有的情况下我們将只研究閉环系統（具有反饋的系統）。

按照决定极値位置方法的不同，現有的极値調节系統可以分为带有外部搜索振蕩发生器的和不带外部搜索振蕩发生器的两种。

导求极値的数学特征是被調节量对調节作用的一阶导数 $\frac{d\varphi}{d\mu}$ 等于零。为了决定导数 $\frac{d\varphi}{d\mu}$ 的符号，必須知道执行元件运动的方向，即 sign $\frac{d\mu}{dt}$。

A.Г.依瓦赫年柯的著作 [8] 十分明确地指出了决定 $\operatorname{sign}(p\mu)\left(p=\frac{d}{dt}\right)$的必要性。于是，为了实現一般的极値調节系統，必須具备决定 $\frac{d\varphi}{d\mu}$ 和 $\operatorname{sign}(p\mu)$ 的装置。

根据决定导数方法的不同，极値系統可以分为五种类型：（1）自振蕩系統；（2）記忆极値系統；（3）强制轉换系統；（4）調制作用系統；（5）步进系統。

下面对这五种系統更詳細地加以說明。

自振蕩系統

自振蕩系統的結构綫路图示于图2。因为我們不能直接测量导数$\frac{d\varphi}{d\mu}$，所以在綫路中应用了两个微分器（2和3），在它們的輸出端上可以得到对時間的导数$\frac{d\varphi}{dt}$和$\frac{d\mu}{dt}$；可以应用测速发电机，微分变压器，RC回路等作为微分器。将导数$\frac{d\varphi}{dt}$和$\frac{d\mu}{dt}$加到除法器的輸入端上，在其輸出端上就可以得到我們所需要的、已考慮了$\frac{d\mu}{dt}$符号的导数$\frac{d\varphi}{d\mu}$。

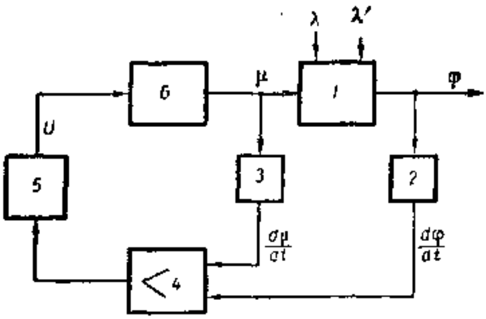


图2　自振蕩极值系統的結构綫路图：
1—調节对象；2和3—微分器；4—除法器；5—反向元件；6—执行元件；λ和λ′—作用在对象上的扰动。

这种系統的調节規律具有下列形式：

$$\begin{aligned}
&\text{当}\quad \frac{d}{dt}\left(\frac{d\varphi}{d\mu}\right)>0\ \text{时}\qquad U=\mathrm{sign}\left(\frac{d\varphi}{d\mu}-\Delta\right);\\
&\text{当}\quad \frac{d}{dt}\left(\frac{d\varphi}{d\mu}\right)<0\ \text{时}\qquad U=\mathrm{sign}\left(\frac{d\varphi}{d\mu}+\Delta\right),
\end{aligned}\tag{1}$$

式中　Δ——反向元件时滞迴綫寬度的一半。

自振蕩系統常常能够滿足下列調节規律：

$$U = a_0 \operatorname{sign}\left(\frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{d\mu}{dt}\right)。$$

調节規律的这种差別对綫路的工作并不引起原則性的差异。

自振蕩系統不能精确地保持 $\varphi = \varphi_{max}$，因为它在极值附近連續地振蕩。所以如此，是因为这种系統中的执行元件是連續接通的，利用反向元件（例如 PП-4 型两位极化继电器）仅能使其运动方向改变。增加系統的放大系数可以减小振蕩的振幅。

自振蕩系統的主要缺点是它的抗干扰能力低。微分器显著地提高了高頻干扰的作用。为了消除干扰，只好容許被調节量与极值之間具有很大的偏差（大的自振蕩振幅）。

記忆最大値（最小値）的极値系統

这种系統的結构綫路图示于图 3 。这种系統的主要特殊元件是最大値記忆裝置 2 。

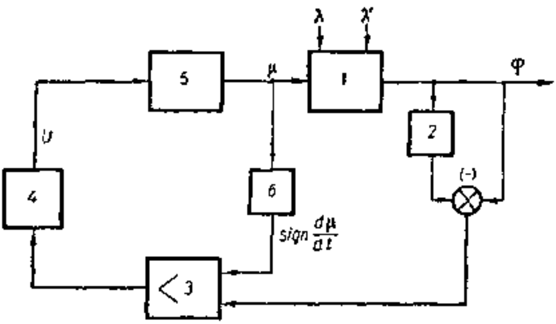


图 3　記忆极値的极値系統結构綫路图：
1- 对象；2- 記忆裝置；3 -- 邏輯元件；4-- 反向元件；
5---执行元件。

在記忆最大值的系統中，和在自振蕩系統中一样，执行元件是全部时間都接通的。我們假定系統的工作点向极值接近。在系統到达极值以后，被調节量开始減小，但是在被調节量的即时值与最大値之間的差值达到反向元件的动作閾限以前，最大值記忆裝置将一直記住被調节量的最大值。在差值达到反向元件动作閾限的时刻，最大值記忆裝置中的記忆消失，同时系統开始重新向极值运动。为了使系統能正确地工作，必須考虑导数 $p\mu$ 的符号。利用邏輯元件就可以作到这一点[6]。

这种系統的調节規律具有下列形式：

$$U=a_0\operatorname{sign}\left\{\frac{1}{2}-\operatorname{sign}[(\varphi_{max}-\varphi)-\Delta]\right\}\frac{d\mu}{dt}, \qquad (2)$$

式中 φ——被調节量的即时值；φ_{max}——所記忆的被調节量的最大值。如果系統向着极值运动，但还沒有达到极值，则此时 $\varphi_{max}=\varphi$；Δ——反向元件的不灵敏区。

总地来讲，記忆最大值的系統实現了在极値附近的連續自振蕩。系統的放大系数愈高，这种振蕩的振幅就愈小。

記忆最大值系統的抗干扰能力較自振蕩系統为高。

强制轉換系統

由 B.B. 卡札克維奇于 1944 年所提出的强制轉換系統的原则性特点，是它具有能使执行元件周期地实現反向的轉換器。

这种調节器的結构綫路示于图 4 *a*。在这个綫路中，反向元件按两个原则动作：或者按信号继电器（Сигнум-реле）所发出的指令，或者按强制轉換器发出的指令。信号继电器在$\left(\frac{d\varphi}{dt}-\Delta\right)<0$时动作。此时反向是在沒有由轉換器发出

的指令的情况下自由地进行的。只有在$\left(\frac{d\varphi}{dt}-\Delta\right)$的符号長期保持为正号的情况下，轉換器才发出反向的指令（Δ——信号继电器的不灵敏区）。

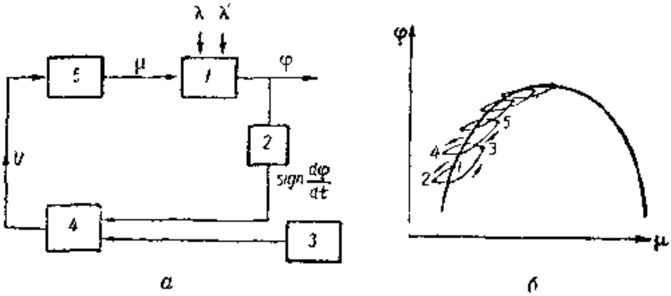


图 4　强制轉換极值系統的結构綫路图（a）和对于这种系統搜索极值原則的解釋（$б$）：
1—对象；2　信号继电器；3—轉換器；4—反向元件；
5—执行元件。

我們来更詳細地研究，在这种情况下如何对极值进行搜索。設点 1（图 4$б$）相应于調节器接入瞬間系統的原始位置，且此时被調节量正在減小。在增量达到超过信号继电器不灵敏区的数值的瞬間，在反向元件上出現一个反向的指令(在图上这一瞬間由点 2 标明)。然后，增量 Δφ 将为正值。此时信号继电器不动作。只有在轉換器发出指令时（点 3）才发生下一个反向。在某一时刻內被調节量由于慣性将要增大，但是 Δφ 最終将取負值，当它的数值剛剛超过信号继电器的动作閾限时，信号继电器便开始动作，同时引起下一个反向（点 4），如此继續。信号继电器和轉換器应当互相联系起来。信号继电器的动作瞬間应当是轉換器工作的起点。

在达到极值范圍时，系統开始实現在极値附近的自振

蕩，这种自振蕩既是由信号继电器的动作也是由轉換器的动作所引起的。

于是，从一方面看，这种系統可以认为是記忆极值系統，即沒有外部搜索振蕩发生器的系統，而从另一方面看，也可以认为是具有外部搜索振蕩发生器的强制轉換系統。

調节規律可以写为下列形式：

$$U=a_0\,\mathrm{sign}\,\frac{d\mu}{dt}\ \text{当}\ \Delta\varphi>0\ \text{和}\ T_2>t>T\ \text{时};$$

$$U=a_0\,\mathrm{sign}\left\{\frac{1}{2}-\mathrm{sign}\left[(\varphi_{max}-\varphi)-\Delta\right]\right\}\frac{d\mu}{dt}\ \text{当}\ \Delta\varphi<0\ \text{时}, \tag{3}$$

式中 T_1——轉換器工作开始的瞬間；T_2——轉換器工作結束的瞬間；a_0——常数；φ_{max}——所記忆的被調节量的最大值；φ——被調节量的即时值。

上面已經談到，系統不停留在极值上而在极値附近連續地自振蕩，这个振蕩的大小旣与系統的整定，即轉換器工作时間的长短有关，也与信号继电器的灵敏度有关。系統在极值附近自振蕩的振幅与前面所研究的各种系統一样，与調节对象的极值特性形状有关。在极值范圍内导数$\frac{d\varphi}{d\mu}$愈小，系統自振蕩的振幅就愈大。

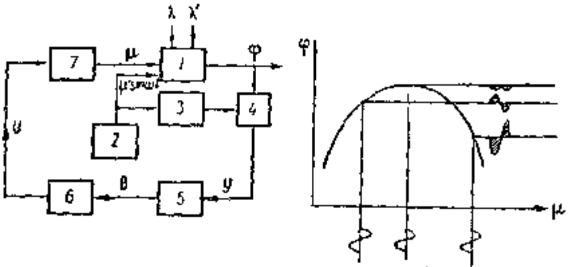
調制作用极值系統

具有調制作用的系統是各种不同形式极值調节系統中的一种，其結构綫路示于图5*a*。

这类系統的特点是，在調节对象的輸入端上具有由外部振蕩发生器所产生的（振幅不大的）連續振蕩。

我們来研究判别系統偏在极值那个方面的原理。在图5*б*中給出了表示在φ—μ座标系中的調节对象的极值特性。

如上所述，在調节对象的輸入端上加有一定頻率和相位的連續振蕩。換言之，調节作用为变化的分量所調制。被調节量在調节作用变化分量的作用下也将产生振蕩，但是被調节量振蕩的相位取决于系統工作点偏在极值的哪个方面，并且，在通过极值时被調节量振蕩的初始相位改变一个角度 π。



a *б*

图 5　調制作用极值系統的結构綫路（*a*）和对这种系統作用原理的解釋（*б*）：

1—調节对象；2—外部振蕩发生器；3—移相器；4—同步檢測器（相位判别器）；5—低頻濾波器；6—放大器；7—执行元件。

将調节作用和被調节量的振蕩加到同步檢測器（相位判别器）上。在将調节作用的振蕩加到相位判别器上时先通过一个移相器。移相器正好在調节对象綫性慣性部分使这两个振蕩发生相移的时候移动它們的相位。

相位判别器将被調节量振蕩的相位与取自移相回路的振蕩的相位加以比較。在用来敉平相位判别器脉动的低頻濾波器輸出端上将获得一个电压，这个电压的符号取决于被調节量振蕩的相位，亦即取决于系統工作点偏离极值的位置。然后将此电压放大幷加到执行元件上。

具有調制作用的极值系統的調节規律可以写作下列

形式:

$$U=\alpha\Theta。\tag{.4}$$

此处 $\Theta=-a\mu'(\mu+\lambda)+k_1\lambda'+k_2\sin(n\omega t)$,

式中 Θ—— 低频滤波器的輸出; μ——調节作用; μ'——調制振蕩的振幅; λ——使对象的极值特性在水平方向移动的扰动; k_2——考虑滤波非理想性的系数; λ'——使极值特性在垂直方向移动的扰动; α——放大器的放大系数; n 和 k_1——比例系数 ($k_1\ll 1$)。調制作用系統的优点之一, 是在系統中可以容易地获得比例控制, 即工作点偏离极值愈远, 执行元件加到調节对象輸入端上的調节作用的变化量就愈大。

系統的缺点是需要有移相器, 用来补偿調节对象由于其本身慣性所引起的相位移动。系統也可以在沒有移相回路的情况下工作, 但是此时必須保持下列条件:

$$\frac{T}{2}\geqslant\tau,$$

式中 T——調制振蕩的周期; τ——調节对象的时間常数。

随着差值 $\left(\frac{T}{2}-\tau\right)$ 的減小, 調节器的灵敏度也減小, 而在 $\frac{T}{2}<\tau<T$ 的情况下, 系統就完全不能工作[2]。

这种系統和所有一般非差动极值系統相較的另外一个重要缺点是, 在調节对象的輸入端上存在有連續振蕩, 而这对于許多对象是不容許的。

步进极值調节系統

前面所研究的几种极值調节系統, 仅在調节对象具有小慣性时才可以滿意地工作。这些系統在对象具有較大慣性时, 其工作使調节品质严重变坏, 使极值附近自振蕩的振幅

显著增加，使搜索誤差增大，而当对象的慣性很大时，这些系統就完全不能工作。

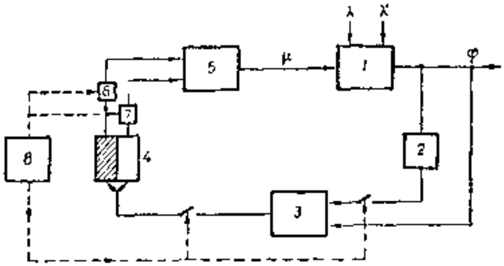


图 6　步进系統的結构綫路图：

1—調节对象；2—記忆装置；3—比較装置；4—触发器；5—执行元件；6 和 7 —"与"型符合电路装置；8—脉冲发生器。

步进（脉冲）式极值調节器提供了改善調节系統动态品质的广闊可能性。以一定的方式选定調节的周期和脉冲的填充系数以后，就可以在調节对象的慣性相当大时使系統自振蕩的振幅减到最小。在步进极值調节系統中实現比例控制也沒有特殊的困难。

最簡单的步进調节器的結构綫路图示于图 6。步进系統的特点是具有外部脉冲发生器，它在确定的时刻周期地接入执行元件的控制回路，比較装置 3 在每一个脉冲的时刻内比較两个量：φ_n 和 φ_{n-1}〔被調节量在相应于第 n 和（$n-1$）个調节周期开始时刻的数值〕。調节周期等于两个相邻脉冲之間的时間間隔。

仅当$[\Delta+(\varphi_n-\varphi_{n-1})]<0$ 时触发器才改变其本身的稳定位置，此处 Δ 是触发器的动作閾限。因此，在这种系統中，触发器起着判别控制作用前一个数值符号的邏輯装置的作用。执行元件在脉冲发生器动作的瞬間受触发器控制，此时

执行元件运动的方向与触发器的状态有关。

考虑到调节器具有不可避免的非灵敏区，这种系統的調节規律可以写为下列形式：

$$\left.\begin{array}{l} U_n=a_0\mathrm{sign}(\varphi_n-\varphi_{n-1})U_{n-1} \\ \quad \text{当 } nT\leqslant t\leqslant(n+\gamma)T \text{ 时} \\ U_n=0 \text{ 当 }(n+\gamma)T\leqslant t\leqslant(n+1)T \text{ 时} \end{array}\right\} \text{如果} |\varphi_n-\varphi_{n-1}|>\Delta;$$

$$\left.\begin{array}{l} U_n=U_{n-1} \text{ 当 } nT\leqslant t\leqslant(n+\gamma)T \text{ 时} \\ U_n=0 \text{ 当 }(n+\gamma)T\leqslant t\leqslant(n+1)T \text{ 时} \end{array}\right\} \text{如果} |\varphi_n-\varphi_{n-1}|<\Delta。 \tag{5}$$

此处 γ = 常数——脉冲的塡充系数；T——調节周期；φ_n 和 φ_{n-1}——被調节量在第 n 个和（$n-1$）个周期开始时的数值；U——加到执行元件上的电压。

前面曾經指出，建立具有比例控制的步进极値調节器是不困难的。实現这一点的最簡单方法是利用一种能保証脉冲宽度与数量 $|\varphi_n-\varphi_{n-1}|$ 为直綫关系的特殊装置。此时，加到反向元件上的电压脉冲的极性取决于上述公式（1）～（5），而脉冲的寛度（塡充系数）为

$$\gamma=\gamma_0+a|\varphi_n-\varphi_{n-1}|,$$

式中 γ_0 = 常数。

脉冲寛度不能减小到小于某一确定値（γ_0），因为在这种情况下，当极值緩慢漂移时系統将不再追迹极値。

步进极値系統的主要缺点是在极値附近有連續的振蕩，且振蕩的振幅还与对象的极值特性形状和調节器的灵敏度有关。

§2 各种系統的調节規律的比較

前面我們曾經指出，这些极值系統的共同缺点是它們不能将系統精确地保持在极值上。在这些系統中，从理論上讲不可能避免在极值附近的振蕩。

所有現有的极值系統的另外一些不甚主要的缺点，是它們具有比較低的抗干扰能力。問題在于这些系統动作的控制信号不仅与誤差，即系統偏离极值的远近成比例，而且还与干扰成比例。当出現高水平的外部干扰时，在所研究的系統中的大多数将使极点附近振蕩的振幅显著增大，有时甚至使系統不能工作。为了証明这一点，我們研究上述各种系統的調节規律。

下面，我們把使調节对象的极值特性在垂直方向移动的扰动λ'认为是干扰。如所周知，能在静态情况下将系統精确地保持在极值上的理想极值系統对扰动λ'的变化不应有所反应，即在系統的調节規律中不应当包含与扰动λ'成比例的数值。我們还假定，調节对象的特性可以足够精确地以抛物綫来近似，其形式如下：

$$\varphi=-a(\mu+\lambda)^2+\lambda',$$

式中　φ——被調节量或极值指标；μ——調节作用；λ——使对象的极值特性在平面φ—μ内沿水平方向移动的扰动；λ'——使对象的极值特性在平面φ—μ内沿垂直方向移动的扰动；a——調节对象特性的斜率。

現在我們直接研究上述五种极值系統的調节規律。

1. 自振蕩系統：

$$U=\operatorname{sign}\left(\frac{d\varphi}{d\mu}\pm\Delta\right)。$$

在这种系統中必須計算导数 $\frac{d\varphi}{dt}$ 和 $\frac{d\mu}{dt}$，然后第一个导数被第二个导数除。

我們确定这两个导数：

$$\frac{d\varphi}{dt}=-2a\mu\dot{\mu}-2a\dot{\mu}\lambda-2a\mu\dot{\lambda}-2a\lambda\dot{\lambda}+\dot{\lambda}';$$

$$\frac{d\mu}{dt}=\dot{\mu}。$$

它們相除的結果为

$$\frac{d\varphi}{dt}:\frac{d\mu}{dt}=-\frac{2a\varepsilon(\dot{\mu}+\dot{\lambda})}{\dot{\mu}}+\frac{\dot{\lambda}'}{\dot{\mu}},$$

式中　$\varepsilon=(\mu+\lambda)$——系統的誤差（当 $\varepsilon=0$ 时系統精确地位于极值上）。

于是，控制作用的符号不仅与誤差和 $\dot{\mu}$ 的符号有关，而且还与因子（$\dot{\mu}+\dot{\lambda}$）和干扰 $\dot{\lambda}'$ 有关。

自然，此时系統工作的品质严重地变坏。不仅在 $|\dot{\lambda}|>|\dot{\mu}|$ 时，而且在 $\dot{\lambda}'>2a\varepsilon(\dot{\mu}+\dot{\lambda})$ 时这种系統就不能工作。

2．記忆极值系統：

$$U=a_0\,\text{sign}\left\{\frac{1}{2}-\text{sign}\left[(\varphi_{max}-\varphi)-\Delta\right]\right\}\dot{\mu}。$$

由系統所記忆的被調节量的极值与等式 $\varepsilon=\mu+\lambda=0$ 相对应。此时得到

$$\varphi_{max}=\dot{\lambda}';$$

$$\varphi=-a(\mu+\lambda)^2+\lambda_1',$$

式中　λ_1'——干扰的即时值。

由此

$$\varphi_{max}-\varphi=a\varepsilon^2+(\lambda'-\lambda_1')。$$

在这种系統中和在自振蕩系統中一样，由（$\varphi_{max}-\varphi$）的