电力系统稳定器PSS2B参数整定软件的开发与应用

随着电力系统的发展，电力系统的稳定性受到低频振荡的威胁。电力系统稳定器（Power System Stabilizer，PSS）是抑制振荡，增强电力系统稳定性的重要措施。目前国内多采用PSS2B型PSS。PSS2B参数多，在投入运行时难以快速整定其所有的参数。运用最小二乘法进行曲线拟合的方法，在Matlab中编写程序可整定PSS2B的部分参数，从而实现快速准确地整定PSS2B的所有参数。将此软件在某机组的PSS参数整定中进行了验证，表明使用此整定软件能大大提高整定计算的效率和准确性，可广泛运用到实际工作中。

刘玉方／南京工程学院电力仿真与控制工程中心
徐　珂／国网江苏省电力公司电力科学研究院

刘玉方／讲师

关键词／Keywords
PSS2B·
软件·
低频振荡·
曲线拟合·

0　引言

随着电力系统的发展，由于发电机控制系统的参数调整不当、负荷的波动等原因，电力系统会产生低频振荡。电力系统的安全性和稳定性受到了低频振荡的威胁。电力系统稳定器（Power System Stabilizer，PSS）广泛用于抑制电力系统的低频振荡。PSS输出信号作为电压调节器的一个输入信号，通过励磁系统改变发电机的输出电压，从而实现对低频振荡的抑制。

大型机组在投入运行时，多需要安装PSS。在现场投入PSS装置时，需要整定其所有的参数。PSS的参数众多，有的参数可以快速确定，但有的参数在现场整定时计算复杂，难以快速准确得到。过去局限于通过现场试验或仪器测试的方法反复尝试整定PSS参数，现在多是基于实测相频特性，采用不同的算法编写软件对PSS进行参数整定[1-3]。但这些算法多比较复杂，不利于现场的整定调试，且得到的PSS参数不能很好地实现相位补偿，抑制低频振荡。本文以双输入电力系统稳定器PSS2B为例，在Matlab中编写一种使用最小二乘法进行曲线拟合的软件，可根据现场测量的数据，计算出PSS的待定参数。此软件采用的算法简单，使用此软件整定PSS的参数后，对PSS进行各种试验，证明可抑制本机的低频振荡，说明此整定方法快速准确，可广泛使用。

1　PSS2B数学模型

PSS的输入变量可以是机端电压频率f、发电机轴转速ω、发电机的输出电功率P_e和过剩功率ΔP_a中的一种或两种信号的组合。PSS自20世纪70年代发展起来后，经过不断的完善，现在PSS主要分为四种类型，分别是PSS1A（单输入Single-input PSS）、PSS2A以及PSS2B（双输入Dual-input PSS）、PSS3B（双输入Dual-input PSS）和PSS4B（多频段Multi-band PSS），这也反映了PSS的发展过程。现在国内多采用PSS2B，其数学模型如图1所示。

图1中，两个输入量V_{S1}为发电机轴的转速ω；V_{S2}为电气功率P_e。P_e和ω在经过隔直环节后，稳态信号被滤除，利用发电机轴转速ω和发电机电气功率P_e计算得到发电机的机械功率ΔP_m和电磁功率ΔP_e，二者相减得到发电机的加速功率ΔP_a，再经过三阶的超前滞后环节进行相位校正，得到超前于机组电气功率相位

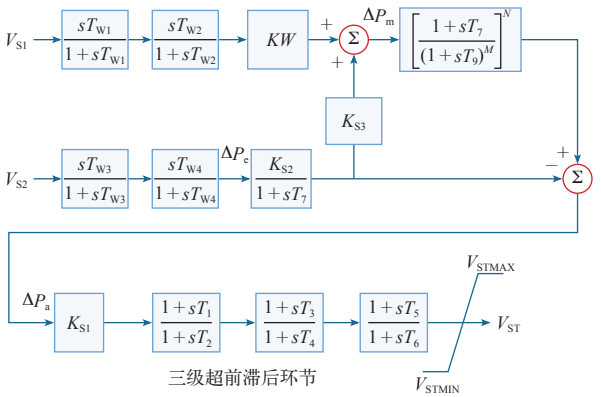


图1　PSS2B 数学模型

的励磁附加控制信号，经过限幅环节后叠加到电压调节器的输入端。控制信号通过励磁系统作用于发电机磁场产生附加转矩，抑制电气功率在低频振荡范围内的波动。这样当机组单方向增减负荷时，加速功率等于零，PSS不会产生无功反调。只有当机组有功增减变化即振动时，PSS才发挥作用抑制低频振荡[4-5]。

2　PSS参数整定软件设计

由PSS2B的数学模型可知其需整定参数众多，其中T_{w1}、T_{w2}、T_{w3}和T_{w4}为隔直环节时间常数，$T_1 \sim T_6$为超前滞后环节时间常数。$T_1 \sim T_6$为整定的关键，其余参数可由经验值、试验值和简单计算快速得到。可运用最小二乘法进行曲线拟合的方法整定$T_1 \sim T_6$共6个参数值。

2.1　最小二乘法和曲线拟合原理

最小二乘法（又称最小平方法）是一种数学优化技术。通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。利用最小二乘法可以简便地求得未知的数据，并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小。最小二乘法可以用于曲线拟合。

对给定数据点$\{(X_i,Y_i)\}$（$i=0,1,\cdots,m$），在取定的函数类Φ，使误差的平方和E^2最小，$E^2=\Sigma[P(X_i)-Y_i]^2$。从几何意义上讲，就是寻求与给定点$\{(X_i,Y_i)\}$（$i=0,1,\cdots,m$）距离平方和为最小的曲线$y=P(x)$称为拟合函数或最小二乘解，求拟合函数$P(x)$的方法称为曲线拟合的最小二乘解。

设m次多项式为

$$f(x)=y(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_mx^m=\sum_{j=0}^{m}a_jx^j \quad (1)$$

用这个多项式拟合n个观测数据点（x_i,y_i）。其中，$i=1,2,\cdots,n$；n远大于m。那么观测数据点与拟合曲线的偏差为

$$y(x_i)-y_i=a_0+a_1x_i+a_2x_i^2+\cdots+a_mx_i^m-y_i \quad (2)$$

所有的偏差平方和

$$F(a_0,a_1,\cdots,a_m)=\sum_{i=1}^{n}[y(x_i)-y_i]^2 \quad (3)$$

由最小二乘法原理，应取合适的$a_0,a_1,\cdots,a_m$使$F(a_0,a_1,\cdots,a_m)$的值最小，那么应该满足以下条件

$$\frac{\partial F}{\partial a_j}=2\sum_{i=1}^{n}[y(x_i)-y_i]x_i^j=0 \quad (4)$$

其中$j=1,2,3,\cdots,m$。即

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{n}[a_0+a_1x_i+\cdots+a_mx_i^m-y_i]x_i^j\\&=\sum_{i=1}^{n}[a_0x_i^j+a_1x_i^{j+1}+\cdots+a_mx_i^{j+m}-y_ix_i^j]\\&=a_0\sum_{i=1}^{n}x_i^j+a_1\sum_{i=1}^{n}x_i^{j+1}+\cdots+a_m\sum_{i=1}^{n}x_i^{j+m}-\sum_{i=1}^{n}y_ix_i^j\\&=0\end{aligned} \quad (5)$$

由上式可解得系数$a_0,a_1,\cdots,a_m$满足方程组

$$\sum_{i=1}^{n}y_ix_i^j=a_0\sum_{i=1}^{n}x_i^j+a_1\sum_{i=1}^{n}x_i^{j+1}+\cdots+a_m\sum_{i=1}^{n}x_i^{j+m} \quad (6)$$

设系数矩阵

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1&x_1&\cdots&x_1^m\\1&x_2&\cdots&x_2^m\\\vdots&\vdots&&\vdots\\1&x_n&\cdots&x_n^m\end{pmatrix} \quad (7)$$

$\boldsymbol{A}$为正定矩阵，根据已知的离散数据x_i，y_i（$i=0,1,2,\cdots,n$），作出的m次拟合曲线$a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_mx^m=\sum_{j=0}^{m}a_jx^j$可通过解下列方程组实现

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\begin{pmatrix}a_0\\a_1\\\vdots\\a_m\end{pmatrix}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\begin{pmatrix}y_1\\y_2\\\vdots\\y_n\end{pmatrix} \quad (8)$$

参与拟合的离散数据越多，得到的拟合曲线和参数就越准确。

对于给定的预测点x_i、y_i（$i=0,1,2,\cdots,n$），在一定的置信度（$1-\alpha$）下，可以求出对应的预测值，再求出预测值的置信区间，并指明预测的标准偏差[6]。

2.2 软件设计

自并励发电机系统中，PSS通过两级超前滞后环节即可实现对励磁系统的补偿，类似PSS2A，设$T_5=T_6=0$。他励的发电机系统则需要整定$T_1\sim T_6$的数值。本软件在Matlab下编写[7]，针对自励和他励大型机组设计，可整定$T_1\sim T_6$的数值。

在得到PSS2B中其他相关参数的数值后，通过实测获得无补偿时发电机和励磁系统的相频特性并形成数据文件，其数据包含关注频率范围内的多个频率值、此频率下整个励磁系统相位的实轴数值和虚轴数值。

根据以海佛容－飞利蒲斯（Heffron-Philips）模型为基础的相位补偿法可知，发电机励磁系统经PSS补偿后整个发电机系统的相位为－90°时最稳定，即$\varphi_p+\varphi_x=-90°$，其中φ_p为稳定器的相角，φ_x为励磁系统的相角。合适的补偿可满足要求的相角为$-90°\pm30°$[8]。可将补偿后整个发电机系统的相频特性目标值设为－90°，输入实测的励磁系统无补偿相频特性的数据文件，运用最小二乘法对PSS2B传递函数的相位进行曲线拟合，进而计算出$T_1\sim T_6$的数值。软件的界面如图2所示。先点击打开文件按钮将励磁系统的相频特性数据文件输入到软件中，点击计算按钮进行计算，就能得到$T_1\sim T_6$的数值。然后点击图像显示按钮，就能绘出有或无PSS补偿时励磁系统的相频特性图如图3所示，可直接看出补偿后相频特性中的角度是否满足电力系统安全运行的要求。若曲线不是十分理想，可手动在对话框中输入适当的$T_1\sim T_6$以及T_7、T_{w1}、T_{w2}和T_{w3}的值，点击重新计算按钮再次计算，可把数值整定得更加理想。

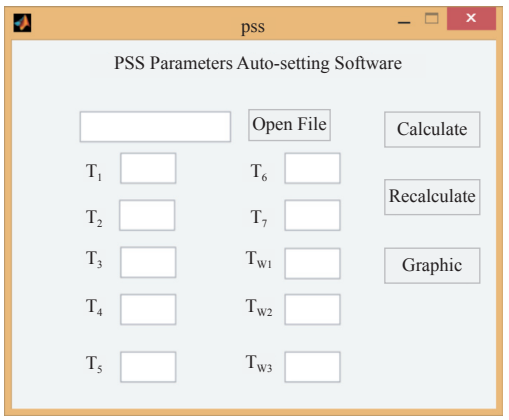
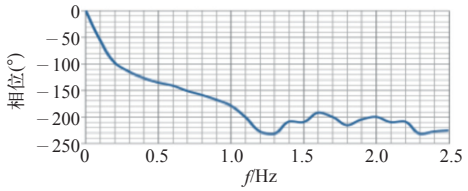
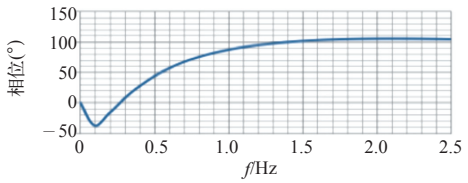


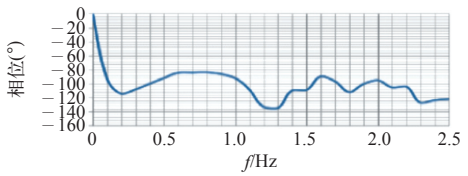
图2 PSS参数整定软件界面



（a）励磁系统无补偿滞后特性曲线



（b） PSS相频特性



（c） 励磁系统有补偿特性

图3 相频特性

3 PSS2B的参数整定

PSS2B的全部参数整定步骤如下。

1）首先通过计算或经验值整定T_7、T_8、T_9、M、N、T_{w1}、T_{w2}、T_{w3}和T_{w4}的数值。

2）整定超前滞后时间常数$T_1\sim T_6$。先实测励磁控制系统无PSS补偿时的相频特性，多采用低频正弦信号发生器和波形记录分析仪测量的方法，先将试验信号输出接到电压调节器的PSS嵌入点，可在0～4.5 Hz范围内选取多个频率点，在每个频率点都是逐步增大试验信号输出直到发电机机端电压有微小的摆动，波形稳定后用波形分析记录仪记录下波形。然后计算出励磁控制系统的无补偿相频特性[9]。将励磁系统的无补偿相频特性文件输入到整定软件中，可得到$T_1\sim T_6$的数值。然后实测励磁控制系统有补偿时的相频特性，检验实际

情况是否满足相位补偿要求。

3）运用临界增益法测得K_{S1}，PSS运行增益一般取临界增益的1/3～1/5，以留有足够的增益裕度。$K_{S2}=T_7/T_J$，T_J为机组惯性时间，K_{S3}设为1。

根据以上三个步骤，可整定PSS2B的所有参数。

4　PSS参数整定软件算例分析

现以江苏某电厂机组7#机为例进行分析说明。发电机为上海汽轮厂生产的630 MW汽轮发电机组，励磁系统形式为自并励，励磁调节器为南瑞继保公司生产的PCS－9410数字型励磁调节器，PSS采用合成加速功率型PSS2B，输入采用发电机电功率和发电机转速信号。

4.1　PSS参数整定

进行PSS试验时，要求被试机组尽可能带满负荷运行，功率因数尽量接近1。本机试验时：P=591 MW，Q=16 Mvar。先实测得到无补偿时励磁系统的相频特性文件。

设置参数$T_{w1}=T_{w2}=T_{w3}=6$，$T_{w4}=0$，$K_{S2}=0.479$，$K_{S3}=1$，$T_7=6$，$T_5=1$，$T_6=1$。点击整定软件的打开文件按钮输入无补偿时励磁系统的相频特性文件，点击计算按钮开始计算，得到移相参数为：$T_1=0.22$，$T_2=0.02$，$T_3=0.22$，$T_4=0.02$，再点击图形显示按钮得到PSS相频特性见图3。由图3看出：在0.2～2 Hz的频率范围内，除去本机振荡模式频率点附近之外，有补偿相频特性在－83.9°～－134.6°之间，由PSS产生的电磁力矩的阻尼分量为正，PSS相位补偿满足整定要求。

4.2　PSS临界增益的测试

通过临界增益测试试验得K_{S1}的临界增益为21，设$K_{S1}=5$。

4.3　PSS阻尼效果校核试验

试验方法：在PSS投入和退出两种工况下进行负载阶跃响应试验，比较有功功率的振荡情况，检验PSS阻尼功率振荡的作用。

试验结果：图4和图5分别为励磁调节器两个通道在无PSS以及有PSS时2%阶跃响应试验录波图。可以看出在PSS投入后振荡次数和振荡幅值都有所减少，阻尼比明显提高，PSS对于本机振荡有抑制作用。

由图5可知，PSS装置能够很好地削减有功功率振荡的幅值，减少振荡次数，阻尼比有较大提高。比较结果如下表所示。

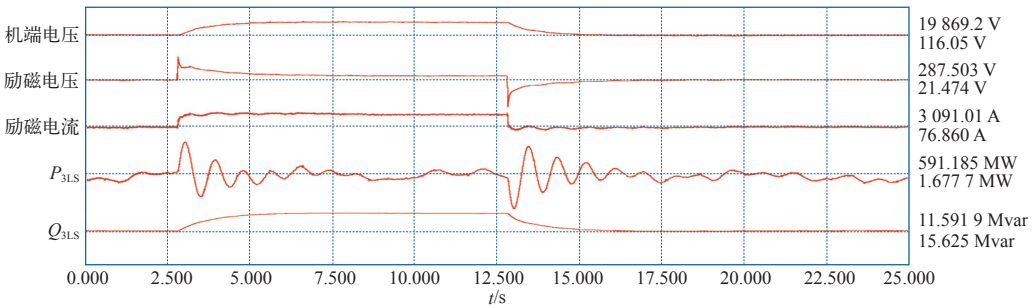


图4　不投PSS时±2%阶跃响应－通道1

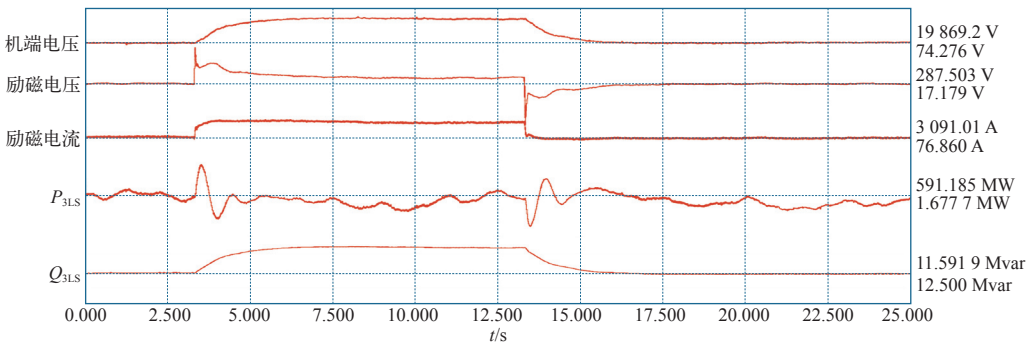


图5　投PSS，K_{S1}=5，±2%阶跃响应－通道1

表 投入PSS对系统振荡阻尼的改善

PSS投入情况	振荡次数	振荡频率/Hz	阻尼比
不投PSS	5	1.5	0.122
投入PSS	1.5	1.18	0.227

4.4 反调试验

采用单一发电机电功率为输入信号的PSS，在原动机功率以较快速度增加（或减少）时，发电机的无功会发生较大的、有时甚至是不能容许的减少（或增加），这就是所谓的“反调”现象。投入PSS，按机组正常操作时最快的有功功率变化速度调节机组出力变化为10%，在增、减负荷过程未见对励磁产生显著影响，说明反调的影响在正常范围内。试验录波如图6所示。

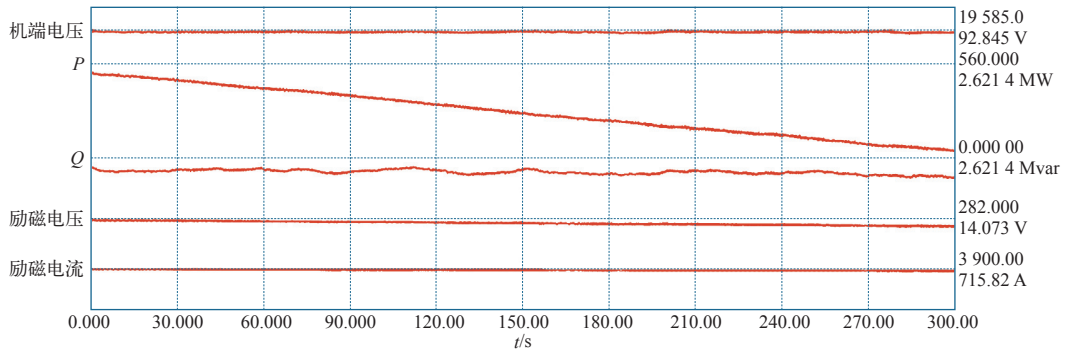


图6 有功下降反调试验

4.5 试验结论

发电机励磁系统PSS投运试验中，完成了频率响应特性测试试验及仿真计算、临界增益试验、阶跃干扰试验和反调试验，可得出如下结论。

1）根据PSS环节相频特性计算结果和无补偿相频特性结果得到有补偿相频特性。在0.1～2.0 Hz频率范围内，有补偿相频特性在－83.9°～－134.6°说明由PSS产生的电磁力矩的阻尼分量为正，PSS相位补偿满足要求。

2）电压阶跃试验表明，PSS对本机振荡的阻尼作用比较明显。

3）机组正常运行时增减负荷，无功反调现象不明显。

PSS具备投运条件，接到调度令后，可投入运行。

5 结束语

现在国内多采用PSS2B型电力系统稳定器。针对PSS2B参数多、难于整定、现有整定软件复杂及实用效果差等问题，提出了采用最小二乘法进行曲线拟合的方法在Matlab中编写软件，运用此软件可快速准确整定PSS2B的参数。通过现场实例验证，PSS用此软件进行参数整定后，能在较宽的频率范围内良好地抑制低频振荡，可在工程中广泛使用。

此软件采用Matlab编写，Matlab运行环境复杂，速度较慢，可考虑将此软件封装，做好与其他软件如数据采集、频谱分析及办公软件等的接口，使其脱离Matlab的运行环境，让软件运行更简便快捷。

参考文献

[1] 侯玉强，马覃峰，李威，等．PSS2型电力系统稳定器的数字仿真整定 [J]．南方电网技术，2012，6 (2)：89-93．

[2] 毛晓明，蔡永智，赵勇．基于机组实测相频特性的PSS整定 [J]．电力自动化设备，2011，31 (10)：56-58．

[3] 李洋，祁晓笑，于永军，等．基于现场试验的PSS参数整定 [J]．新疆电力技术，2012 (1)：56-59．

[4] Kamwa I，Grondin R，Trudel G．IEEE PSS2B

(下转第72页)

续期，应用加速热老化的方法可以有效地缩短试验时间，同时也可保证得到同样的试验目的和结果。

依据本文的式（5），其中Φ/K的取值与平均热寿命方程中Φ/K的取值相同。查得LOCA试验后期的温度值T_a和持续时间值t_a，然后选取合适的加速热老化温度值T_b，便可求得对应的加速热老化持续时间值t_b（即LOCA试验后期的持续时间值）。也可选取合适的加速热老化持续时间值t_b，反过来求得加速热老化温度值T_b。

例如，对于某设备，LOCA试验后期的温度值$T_a=(273.15+110)$ K$=383.15$ K，持续时间为$t_a=360$ h。此时，可初步选定加速热老化的温度值为$T_b=(273.15+130)$ K$=403.15$ K，将T_a、t_a和T_b代入式（5），可求得对应的加速热老化持续时间值t_b。如果感觉试验时间压缩得不够，仍可适当提高试验温度，再计算出合适的加速热老化持续时间值t_b。

4 结束语

本文介绍了核电站1E级设备热老化寿命的确立原则，依据IEEE 317—2003，描述如何建立特定材料与特定设备的阿伦纽斯热老化模型。通过数理统计方法——LS（回归分析）确定平均热寿命曲线及其方程。进而根据设备在其最高正常运行温度下的热寿命，求得该设备的热老化曲线，也同时得到了加速热老化试验的依据。最后将热老化寿命方程应用于LOCA事故后，采用等效加速热老化的方式，在满足考核指标的同时，大大缩短了LOCA试验的时间。

参考文献

[1] 马明俊，周永辉，张建，等．核电厂老化和寿命管理现状与进展 [J]．核安全，2011 (2)：40-46．

[2] 顾申杰．核电厂1E级电气设备鉴定要素研究 [J]．核电工程与技术，2006 (2)：20-29．

[3] IEEE Standards Association．IEEE Std 317™—2013 IEEE standard for electric penetration assemblies in containment structures for nuclear power generating stations [S]．USA：Nuclear Power Engineering Committee of the IEEE Power and Energy Society，2013．

[4] 王桂增，叶昊．主元分析与偏最小二乘法 [M]．北京：清华大学出版社，2012．

（收稿日期：2016－08－14）EA

(上接第20页)

versus PSS4B：the limits of performance of modern power system stabalizers [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2005，20 (2)：903-915．

[5] Larson E V，Swan D A．Applying power system stabilizer [J]．IEEE Transactions on PAS，1981，100 (6)．

[6] 吴书清，吉望西，刘达伦，等．绝对重力仪数值计算及不确定度评定方法 [J]．计量学报，2009，30 (3)：212-215．

[7] 李艳，基于最优化方法的结构可靠度及Matlab程序实现 [D]．武汉：武汉工业学院，2012．

[8] 刘取．电力系统稳定性及发电机励磁控制 [M]．北京：中国电力出版社，2007：67-70．

[9] Q/GDW 143—2012 电力系统稳定器整定试验导则 [S]．

（收稿日期：2016－04－26）EA