三相四线制系统负载平衡化补偿及仿真分析

在三相四线制系统中，提出了一种中性点有效接地三相不对称负载平衡化补偿的方法。把三相不对称负载等效转换为两部分：一个三相对称负载和两个单相负载。补偿网络的设计可从三相对称负载功率因数补偿，单相负载平衡化补偿两方面进行。基于不平衡电流无功补偿的基本原理，可以得到中性点有效接地三相不对称负载平衡化补偿的补偿网络。最后通过算例仿真验证了理论的正确性。

赵远鑫　田铭兴　陈　敏　王江彬／兰州交通大学自动化与电气工程学院

赵远鑫／硕士研究生

关键词／Keywords

三相四线制·
不对称负载·
等效转换·
平衡化补偿·

随着经济的快速发展，现代电力系统的规模在逐渐扩大，这也导致电力系统的三相负载不对称现象日益突出。特别是380/220 V配电系统因是电网末端用户电压等级，三相负载不对称最为严重。三相负载不对称会引起以负序分量为检测对象的继电保护装置误动作，引起旋转电动机的附加发热，增加线路损耗[1]等，这对系统安全稳定运行影响很大[2]。目前，对三相不对称负载进行无功功率和电流平衡化综合补偿逐渐引起人们的注意。根据Steinmetz理论可以得到理想补偿网络[3-5]，但补偿网络中参数是用不易测量的负载导纳表示的。所以根据对称分量法推导出了用线电流和电压表示的补偿电纳表达式[5-6]。但是，这些研究都是针对三相三线制系统进行的，这对于中性点有效接地三相四线制系统不适用[7]。文献[8]提到了三相四线制系统中零序电流的补偿方法；文献[9]虽然给出了三相四线制系统不对称负载理想导纳补偿网络，不过是通过列方程组求解的方式得到的，并没有明确综合补偿的原理。

本文提出一种三相四线制系统不对称负载平衡化补偿的方法。首先，推导出当单相接纯阻性负载时的补偿网络；然后，将实际负载等效转换为三相对称负载和单相负载两部分，分别对两部分进行平衡化补偿。最后，根据等效转换条件算出对称负载和单相负载参数，进而得出补偿网络参数。

不平衡电流无功补偿的基本原理

1. 不平衡电流补偿方法的理论基础

该理论是由万思电力技术研究所王家强总工程师提出，内容包括以下几方面。

1）在两相间跨接电感或电容可以在两相间转移有功。证明如下：若a、b相间跨接电容C，如图1所示。从a相看流过电容C的电流I_a超前$\boldsymbol{U}_{ab}$90°。I_a可分解为两部分，一部分为超前$\boldsymbol{U}_a$90°的容性无功电流I_{aC}；另一部分为与$\boldsymbol{U}_a$方向相反的有功电流I_{aR}，这表明a相有功电流减小。从b相看流过电容C的电流I_b超前$\boldsymbol{U}_{ba}$90°。I_b可分解为两部分，一部分为超前$\boldsymbol{U}_b$90°的容性无功电流I_{bC}；另一部分为与$\boldsymbol{U}_b$方向相同的有功电流I_{bR}，这表明b相有功电流增加。分析其他相间的情况可以得到类似的结论。

因此，可以说在两相之间跨接电容不但使两相上出现容性无功电流，而且可以将一部分有功电流从其中一相转移到另一相。

相间跨接电感L时分析方法与上述相同，其结果是在两相上出现感性无功电

国家自然科学基金项目资助（51367010，51167009），甘肃省科技计划项目资助（1304WCGA181）。

中国知网 https://www.cnki.net

流，并且可以将一部分有功电流从其中一相转移到另一相。

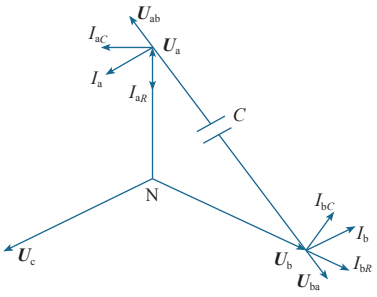


图1　a、b相间跨接电容矢量分析图

2）在三相四线制系统中，恰当选择两个元件（电阻、电容和电感或其组合），并将这两个元件接在不同相线与零线之间，可以抵消零线电流。证明如下：无论负载怎样连接，零线上电流是0°～360°之间的一个矢量。要抵消零线电流就需要一个与其大小相等方向相反的矢量。以选择两个电阻为例，设三相电压平衡，即$\boldsymbol{U}_a=U$，$\boldsymbol{U}_b=U\mathrm{e}^{\mathrm{j}240^\circ}$，$\boldsymbol{U}_c=U\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}$。如果将电阻1接到a相与零线之间，电阻2接到b相与零线之间，那么流过电阻1的电流方向是0°，流过电阻2的电流方向是240°，通过调节两电阻的大小可以合成240°～0°范围内的任何电流矢量，用来抵消60°～180°方向范围内的零线电流。同样的分析方法可以分析不同元件接到不同相与零线之间抵消零线电流的方向范围。

2. 单相纯阻性负载电流平衡化补偿

假设在a相接纯阻性负载G_a，这是一种典型的不对称负载。首先利用上文中2）的思想对零线电流进行补偿。补偿方法是在b相和c相上分别接电感L_2和电容C_2，使其在零线上产生的电流矢量和抵消a相负载在零线上产生的电流。矢量分析图如图2所示。

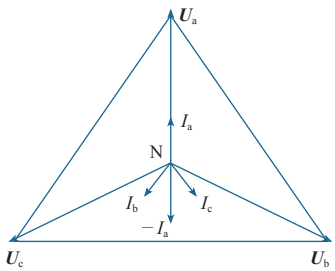


图2　零线电流补偿矢量分析图

此时只是补偿了零线电流。根据上文中1）的理论，在a、c相间接入一个适当的电感L_1不但可以将a相有功电流的1/3转移到c相，而且L_1在c相上产生的感性无功电流可以抵消C_2在c相上产生的容性无功电流；在a、b相间接入一个适当的电容C_1不但可以将a相有功电流的1/3转移到b相，而且C_1在b相上产生的容性无功电流可以抵消L_2在b相上产生的感性无功电流；同时电感L_1和电容C_1在a相上产生的无功电流可以相互抵消。这样总的无功电流为零，三相有功电流平衡。补偿元件连接示意图如图3所示。

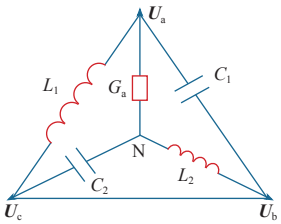


图3　a相接纯阻性负载补偿元件连接示意图

通过对图3进行矢量分析和计算可以得到a相接纯阻性负载G_a时补偿元件参数

$$\begin{cases} B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ab}}=\dfrac{2}{3\sqrt{3}}G_{\mathrm{a}}, \quad B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ca}}=-\dfrac{2}{3\sqrt{3}}G_{\mathrm{a}} \\ B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{b}}=-\dfrac{\sqrt{3}}{3}G_{\mathrm{a}}, \quad B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{c}}=\dfrac{\sqrt{3}}{3}G_{\mathrm{a}} \end{cases} \tag{1}$$

同理，b相接纯阻性负载G_b时的补偿元件参数为

$$\begin{cases} B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ab}}=-\dfrac{2}{3\sqrt{3}}G_{\mathrm{b}}, \quad B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{bc}}=\dfrac{2}{3\sqrt{3}}G_{\mathrm{b}} \\ B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{a}}=\dfrac{\sqrt{3}}{3}G_{\mathrm{b}}, \quad B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{c}}=-\dfrac{\sqrt{3}}{3}G_{\mathrm{b}} \end{cases} \tag{2}$$

c相接纯阻性负载G_c时的补偿元件参数为

$$\begin{cases} B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{bc}}=-\dfrac{2}{3\sqrt{3}}G_{\mathrm{c}}, \quad B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{ca}}=\dfrac{2}{3\sqrt{3}}G_{\mathrm{c}} \\ B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{a}}=-\dfrac{\sqrt{3}}{3}G_{\mathrm{c}}, \quad B_{\mathrm{r}}^{\mathrm{b}}=\dfrac{\sqrt{3}}{3}G_{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{3}$$

三相不对称负载平衡化补偿

1. 负载的等效转换

三相四线制系统中三相不对称负载连接方式如图4所示。负载参数为Y_1^{a}，Y_1^{b}和Y_1^{c}且互不相等。

中国知网　https://www.cnki.net

忽略不平衡负荷对负荷电压的影响，设补偿前后，系统负荷的三相电压完全对称，即令电源各相与零线之间的电压为：$\boldsymbol{U}_a=U$，$\boldsymbol{U}_b=U\mathrm{e}^{\mathrm{j}240^\circ}$，$\boldsymbol{U}_c=U\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}$；三相及中性线上电流分别为：$\boldsymbol{I}_a$，$\boldsymbol{I}_b$，$\boldsymbol{I}_c$，$\boldsymbol{I}_n$。

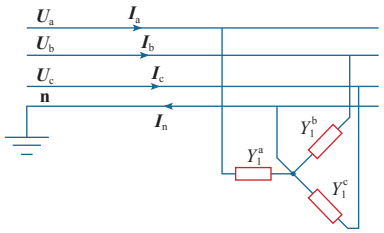


图4　负载连接方式及电流流向示意图

根据基尔霍夫定律（KCL）可知

$$\boldsymbol{I}_a+\boldsymbol{I}_b+\boldsymbol{I}_c=\boldsymbol{I}_n \tag{4}$$

以a相线电流（$\boldsymbol{I}_a=I_a$）作为基准量，逆时针旋转240°得到电流$\boldsymbol{I}_b^a=\boldsymbol{I}_a\mathrm{e}^{\mathrm{j}240^\circ}$，逆时针旋转120°得到电流$\boldsymbol{I}_c^a=\boldsymbol{I}_a\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}$，即$\boldsymbol{I}_a+\boldsymbol{I}_b^a+\boldsymbol{I}_c^a=0$。如果分别从线电流$\boldsymbol{I}_b$、$\boldsymbol{I}_c$上取出$\boldsymbol{I}_b^a$和$\boldsymbol{I}_c^a$，则相当于从图4实际连接负载中等效出一个三相对称负载，如图5所示。令等效对称负载导纳为$Y=G+\mathrm{j}B$。

同时，式（4）可以写为

$$\boldsymbol{I}_a+(\boldsymbol{I}_b-\boldsymbol{I}_b^a)+\boldsymbol{I}_b^a+(\boldsymbol{I}_c-\boldsymbol{I}_c^a)+\boldsymbol{I}_c^a=\boldsymbol{I}_n \tag{5}$$

化简得

$$(\boldsymbol{I}_b-\boldsymbol{I}_b^a)+(\boldsymbol{I}_c-\boldsymbol{I}_c^a)=\boldsymbol{I}_n \tag{6}$$

由式（6）可知，对$\boldsymbol{I}_b$和$\boldsymbol{I}_c$分解出$\boldsymbol{I}_b^a$和$\boldsymbol{I}_c^a$后的线电流（$\boldsymbol{I}_b-\boldsymbol{I}_b^a$）和（$\boldsymbol{I}_c-\boldsymbol{I}_c^a$）都流向零线。这相当于在b相与零线之间接有一个负载$Y^b=G^b+\mathrm{j}B^b$；在c相与零线之间接有一个负载$Y^c=G^c+\mathrm{j}B^c$，如图5所示。

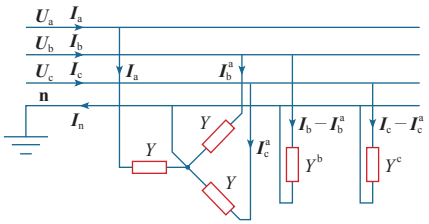


图5　等效负载连接示意图

综上分析，在三相四线制系统中星形连接不对称负载可以等效转换为一个三相对称负载与两个单相负载之和。

负载等效转换后，可根据实际不对称负载情况下测量的各相线电流和线电压求出等效三相对称负载和等效单相负载的参数。以a相线电流作为基准，则有

$$Y=G+\mathrm{j}B=\frac{\boldsymbol{I}_a}{\boldsymbol{U}_a}=\frac{I_a}{U} \tag{7}$$

$$Y^b=G^b+\mathrm{j}B^b=\frac{\boldsymbol{I}_b-\boldsymbol{I}_b^a}{\boldsymbol{U}_b}=\frac{\boldsymbol{I}_b-\boldsymbol{I}_a\mathrm{e}^{\mathrm{j}240^\circ}}{U\mathrm{e}^{\mathrm{j}240^\circ}} \tag{8}$$

$$Y^c=G^c+\mathrm{j}B^c=\frac{\boldsymbol{I}_c-\boldsymbol{I}_c^a}{\boldsymbol{U}_c}=\frac{\boldsymbol{I}_c-\boldsymbol{I}_a\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}}{U\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}} \tag{9}$$

其中，$\boldsymbol{I}_a$、$\boldsymbol{I}_b$和$\boldsymbol{I}_c$为各相线电流。

2. 补偿网络的设计和参数计算

实际三相不对称负载等效转换后补偿可分为两部分。

1）对三相对称负载进行功率因数补偿。在每一相负载导纳上并联一个等于负载电纳负值的补偿电纳，使其变为三相对称纯阻性负载。

2）对单相负载进行平衡化补偿。首先是功率因数补偿，在负载导纳上并联一个等于负载电纳负值的补偿电纳；然后是电流平衡化补偿，依据上文中的原理分别在不同相间和相对零线间加相应的容性或感性电纳。

通过补偿，可以得到以a相线电流作为基准量任何星形连接不对称负载等效转换后再进行补偿的补偿电纳为

$$\begin{cases}B_a=-B+G^b/\sqrt{3}-G^c/\sqrt{3}\\B_b=-B-B^b+G^c/\sqrt{3}\\B_c=-B-B^c-G^b/\sqrt{3}\\B_\Delta^{ab}=-2G^b/3\sqrt{3}\\B_\Delta^{bc}=2G^b/3\sqrt{3}-2G^c/3\sqrt{3}\\B_\Delta^{ca}=2G^c/3\sqrt{3}\end{cases} \tag{10}$$

式中，$B_n(n=\mathrm{a,b,c})$为相与零线之间补偿电纳值；$B_\Delta^n(n=\mathrm{ab,bc,ca})$为相间补偿电纳值。

以a相线电流作为基准量，不对称负载等效转换后的补偿网络如图6所示。

仿真研究

本文采用Matlab软件进行仿真。设三相不对称负载分别为：$Z_a=(5+\mathrm{j}5\pi)\ \Omega$，$Z_b=(2+\mathrm{j}2\pi)\ \Omega$，$Z_c=(1+\mathrm{j}\pi)\ \Omega$；设补偿前后，系统负载的三相电压完

中国知网 https://www.cnki.net

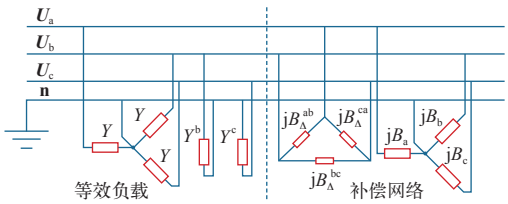
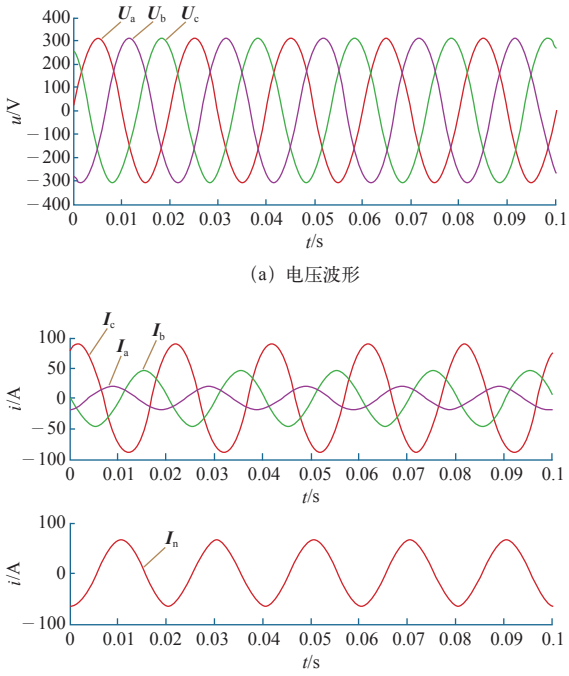


图6　等效负载补偿网络示意图

全对称：$\boldsymbol{U}_a=311\angle 0°$ V，$\boldsymbol{U}_b=311\angle 240°$ V，$\boldsymbol{U}_c=311\angle 120°$ V。

补偿前三相不对称负载电压和电流波形如图7所示。



（a）电压波形

（b）电流波形

图7　不对称负载补偿前电压和电流波形

补偿前可测得三相线电流以及零线上电流为：$\boldsymbol{I}_a=18.59\angle -71.6°$ A，$\boldsymbol{I}_b=45.95\angle 170.9°$ A，$\boldsymbol{I}_c=89.06\angle 54.5°$ A，$\boldsymbol{I}_n=63.34\angle 258.8°$ A。可见，三相线电流严重不平衡，中性线上电流较大。

根据上文中方法以$\boldsymbol{I}_a$作为基准量，对$\boldsymbol{I}_b$和$\boldsymbol{I}_c$进行平衡分解，则三相平衡电流为：$\boldsymbol{I}_a=18.59\angle -71.6°$ A，$\boldsymbol{I}_b^a=18.59\angle 168.4°$ A，$\boldsymbol{I}_c^a=18.59\angle 48.4°$ A。

根据式（7）可算出等效三相对称负载导纳值为

$$Y=G+\mathrm{j}B=(0.018\,868-\mathrm{j}0.056\,719)\,\mathrm{S} \quad (11)$$

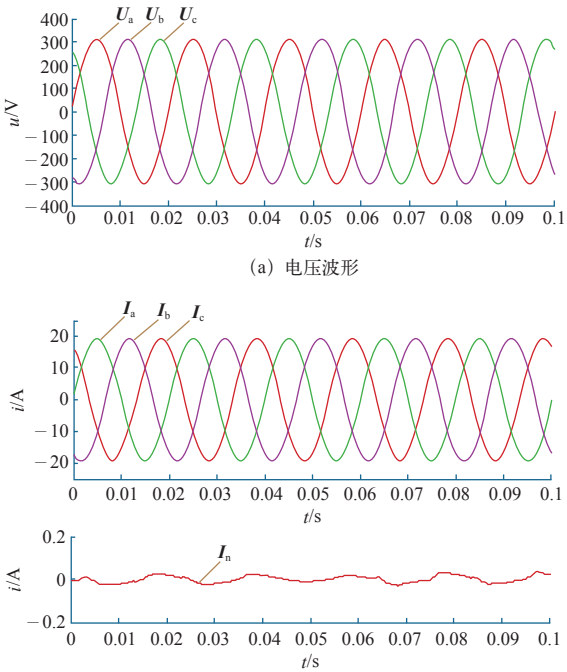
根据式（8）和式（9）可算出等效单相负载导纳值为

$$Y^b=G^b+\mathrm{j}B^b=(0.033\,845-\mathrm{j}0.081\,308)\,\mathrm{S} \quad (12)$$

$$Y^c=G^c+\mathrm{j}B^c=(0.099\,874-\mathrm{j}0.203\,869)\,\mathrm{S} \quad (13)$$

将式（11）～式（13）带入到式（10）中，可求出补偿网络中各元件参数值。

补偿后电压和电流波形如图8所示。



（a）电压波形

（b）电流波形

图8　不对称负载补偿后电压和电流波形

补偿后测得三相线电流以及零线上电流为：$\boldsymbol{I}_a=19.13\angle -0.3°$ A，$\boldsymbol{I}_b=19.09\angle 239.7°$ A，$\boldsymbol{I}_c=19.09\angle 119.8°$ A，$\boldsymbol{I}_n=0.020\,66\angle 115.18°$ A。由仿真结果可以看出三相电流平衡，零线上电流基本为零，验证了理论的正确性。

结束语

在三相四线制系统中，任何三相不对称负载都可以等效转换为一个三相对称负载和两个单相负载。对三相不对称负载平衡化补偿可分为对等效三相对称负载功率因数补偿和对单相负载平衡化补偿两部分。在电源电压对称的条件下本文推导出了补偿网络中各元件参数表达式。最后，通过仿真验证了理论的正确性。此方法对研究三相四线制系统负载平衡化补偿具有一定的参考价值。

（下转第44页）

中国知网　https://www.cnki.net

(3)：12-15.

[4] Ajjarapu V，Lau P L，Battula S．An optimal reactive power planning strategy against voltage collapse [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1994，9 (2)：906-917.

[5] Chebbo A M，Irving M R，Sterling M J H．Reactive power dispatch incorporating voltage stability [J]．IEE Proceedings-Generation，Transnussion and Distribution，1992，139 (3)：253-260.

[6] 余健明，杜刚，姚李孝．结合灵敏度分析的遗传算法应用于配电网络无功补偿优化规划 [J]．电网技术，2002，26 (7)：46-49.

[7] 熊曼丽．提高电压稳定的多目标优化模型及其神经网络算法 [J]．电力系统自动化，1996，20 (1)：27-31.

[8] 王邵，周鑫．应用层次聚类法和蚁群算法的配电网无功优化 [J]．电网技术，2011，35 (8)：161-167.

[9] 李宏仲，金义雄，程浩忠，等．基于改进粒子群优化算法并计及静态电压稳定性的电力系统无功规划 [J]．电网技术，2005，29 (22)：50-55.

[10] 周双喜，郑智，鲁宗相，等．基于多种群遗传算法的无功规划 [J]．电力系统及其自动化学报，2007，19 (6)：66-71.

[11] 林广明，欧阳森，曾江，等．改进灾变遗传算法在无功优化规划中的应用 [J]．电网技术，2010 (4)：128-133.

[12] 曲绍杰，王绍然，刘明波，等．基于互补内点法的多目标静态电压稳定约束无功规划 [J]．电力系统保护与控制，2010 (23)：49-54，86.

[13] Manjure D P，Makra E B．Steady state stability assessment using the bus impedance matrix [C]．2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering．LESCOPE'01，2001：153-157.

[14] Sun J，Feng B，Xu W B．Particle swarm optimization with particles having quantum behavior [C]．Proceedings of 2004 Congress on Evolutionary Computation，2004：325-331.

[15] 陈道君，龚庆武，金朝意，等．基于自适应扰动量子粒子群算法参数优化的支持向量回归机短期风电功率预测 [J]．电网技术，2013 (4)：974-980.

（收稿日期：2015－01－20）EA

(上接第31页)

参考文献

[1] 张五一，张言滨，刘华伟．配电网三相负荷不对称的线损分析 [J]．电力科学与工程，2007，32 (1)：16-18.

[2] 林海雪．电力系统的三相不平衡 [M]．北京：中国电力出版社，1998.

[3] 张永军，孟文博，赵积春，等．三相不平衡与无功功率综合补偿系统研究 [J]．电工技术杂志，2004 (12)：63-65.

[4] 张明江，纪延超，顾强．三相不平衡与无功功率的综合补偿方法 [J]．电网技术，2008，32 (1)：20-23.

[5] 李心广，赖声礼，秦华标，等．电网的无功及三相不平衡综合补偿研究 [J]．电网技术，2001，25 (10)：30-33.

[6] 彭辉，黄亦农，王茂海．配电网中三相不平衡负荷补偿 [J]．电力自动化设备，2002，22 (1)：32-34.

[7] Lee S-Y．Reactive power compensation and load balancing for unbalanced three-phase four-wire system by a combined system of an SVC and a series active filter [J]．IEEE Proc．-Electr．Power Appl.，2000，147 (6)：563-571.

[8] 吴杰．中性点有效接地系统不平衡负载的平衡化补偿理论研究 [J]．电工技术杂志，2003 (9)：73-75.

[9] 单铁铭，杨仁刚．不平衡电流无功补偿方法研究 [J]．电力自动化设备，2004，24 (12)：26-29.

（收稿日期：2015－03－16）EA

中国知网 https://www.cnki.net