

T/CEC

中国电力企业联合会标准

T / CEC 112—2016

饱和铁心型高温超导限流电抗器 预防性试验规程

Preventive test code for high temperature superconducting
current-limiting reactor with saturated iron core

2016-10-21 发布

2017-01-01 实施

中国电力企业联合会 发 布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 概述.....	2
5 试验项目及技术要求	3

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会高电压试验技术分技术委员会归口。

本标准起草单位：云南电网有限责任公司电力科学研究院、中国电力科学研究院、国网冀北电力有限公司电力科学研究院、国网山西省电力公司电力科学研究院、国网山东省电力公司电力科学研究院、华中科技大学、清华大学、国网浙江省电力公司电力科学研究院、中国科学研究院、上海超导科技股份有限公司、特变电工衡阳变压器有限公司。

本标准主要起草人：徐肖伟、王斯琪、胡南南、任丽、蔡巍、谭向宇、王志鹏、朱孟兆、顾晨、何文林、潘皖江、洪智勇、谭黎军。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

饱和铁心型高温超导限流电抗器预防性试验规程

1 范围

本标准规定了饱和铁心型高温超导限流电抗器（以下简称超导限流器）预防性试验的项目、周期、方法及判据。

本标准适用于超导限流器的预防性试验。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 1094.3 电力变压器 第3部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙

GB/T 1094.6—2011 电力变压器 第6部分：电抗器

GB/T 13811—2003 电工术语 超导电性

DL/T 474.1—2006 现场绝缘试验实施导则 第1部分：绝缘电阻、吸收比和极化指数试验

DL/T 596 电力设备预防性试验规程

JB/T 7632—2006 串联电抗器试验导则

JJF 1094 测量仪器特性评定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

高温超导体 high temperature superconductor; HTS

超导临界温度一般高于 25K 的一类超导体。

[GB/T 13811—2003, 定义 815-02-11]

3.2

饱和铁心型高温超导限流电抗器 HTS current limiting reactor with saturated iron-core

用于限制短路电流、含低温冷媒冷却的高温超导绕组励磁电抗器，其阻抗值的大小是通过超导绕组的励磁改变铁心磁饱和度来实现的。

3.3

交流限流绕组 AC current limiting winding

串接于交流线路中，正常运行时流过系统交流电流且呈现低阻抗状态的绕组，当系统发生短路时，超导励磁电流降低，铁心磁饱和度也降低，阻抗增大，从而限制短路电流的绕组。以下简称交流绕组。

3.4

超导直流励磁绕组 superconducting DC magnetization winding

在低温环境中处于超导状态，通过直流励磁电流的变化来控制铁心饱和度，进而控制交流绕组阻抗大小的绕组。以下简称直流绕组。

3.5

超导直流系统 superconducting DC system

超导限流器的直流绕组、直流控制系统和数据采集及失超保护系统的统称（在本标准中简称为直

流系统)。直流系统的动作特性直接决定了限流器的限流效果。

3.6

低温系统 cryogenic system

低温冷却系统，以保证直流励磁绕组能处于超导状态。

3.7

额定连续阻抗 rated continuous impedance

额定频率和额定持续电流下的每相阻抗。

3.8

去磁时间 demagnetization time

当线路发生短路时，直流绕组的直流励磁电流从额定值降为零所用时间。

3.9

重励磁时间 remagnetization time

当线路短路电流消失时，直流绕组的直流励磁电流从零升到额定值的时间。

3.10

检修状态 maintenance state

交流限流绕组两侧的隔离开关和断路器均处于断开状态、两侧接地开关处于合上状态，为保证直流绕组处于超导状态而低温系统正常运行的状态。

4 概述

三相超导限流器的结构和电气示意图见图 1。三相超导限流器由 6 个交流绕组和 1 个直流绕组组成，6 个交流绕组分别套装于 6 个“口”形铁心的一侧铁心柱，6 个“口”形铁心的另一侧铁心柱则由直流绕组集中套裹。6 个交流绕组分成 3 组，分别构成 A、B、C 三相，每相由两个绕组串联构成，整体串接在交流电网中。其单相的结构和电气示意图见图 2，单相的结构示意图见图 3。

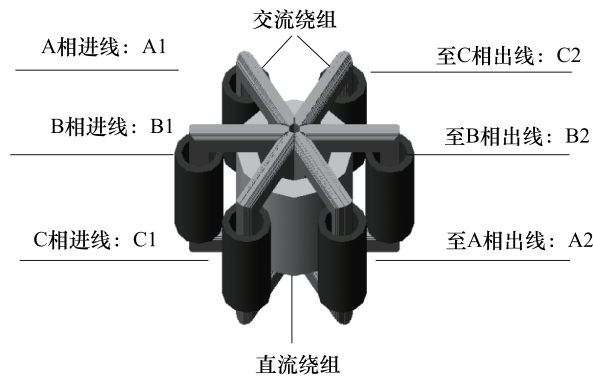


图 1 三相超导限流器的结构和电气示意图

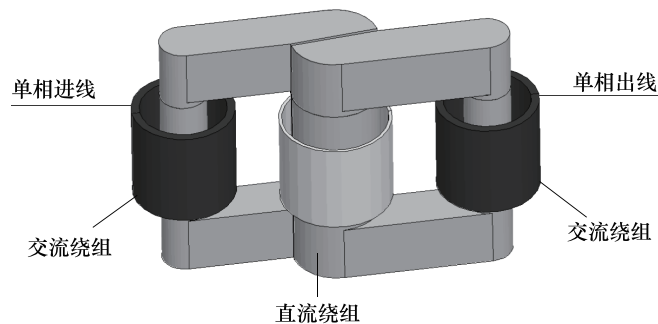
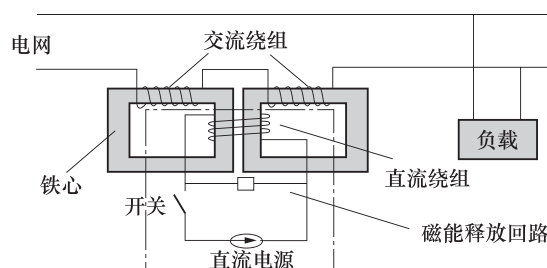


图 2 单相超导限流器的结构示意图



说明：直流电源——用于向直流绕组提供励磁电流使铁心达到磁饱和的电流源。

图 3 单相超导限流器的电气示意图

5 试验项目和技术要求

5.1 一般要求

超导限流器的试验项目及要求见表 1。

表 1 超导限流器的试验项目及要求

序号	项 目	周 期	标 准
1	直流电阻试验	1) 110kV 及以下：6 年；110kV 以上：3 年； 2) 必要时	5.2.4
2	绝缘电阻试验	1) 110kV 及以下：6 年；110kV 以上：3 年； 2) 必要时	5.3.4
3	额定连续阻抗试验	1) 110kV 及以下：6 年；110kV 以上：3 年； 2) 必要时	5.4.4
4	交、直流绕组的耐压试验	1) 大修后； 2) 必要时	5.5.4
5	直流系统动作特性试验	1) 110kV 及以下：6 年；110kV 以上：3 年； 2) 必要时	5.6.4
6	流量计、容器压力表、温度计、杜瓦真空度计校准	1) 110kV 及以下：6 年；110kV 以上：3 年； 2) 必要时	按 JJF 1094 的规定进行符合性评定
7	失超保护系统试验	1) 110kV 及以下：6 年；110kV 以上：3 年； 2) 必要时	5.8.4

5.2 直流电阻试验

5.2.1 试验设备

可测量微欧级的直流电阻测试仪，测量误差不超过 $\pm 0.5\%$ ，可输出电流推荐值不小于 50A。

5.2.2 试验工况

超导限流器处于检修状态，其中测试直流绕组的直流电阻时应在低温系统正常运行并确保直流绕组处于超导状态。

5.2.3 试验方法

按 JB/T 7632—2006 中 4.2 的规定执行，即电压降法（直流）。测试交流绕组时推荐施加电流不小于 20A，测试直流绕组时推荐施加电流不小于 50A。

5.2.4 试验结果判定

交流绕组的直流电阻判定应符合 DL/T 596 的规定，即相间差别一般不大于三相平均值的 4%，并且每相与前一次测量值相差不应超过 2%。

在同等温度条件下，直流绕组在超导态下的直流电阻与前一次测量值偏差不应超过 10%，或与产品

技术规范相适应。

5.3 绝缘电阻试验

5.3.1 试验设备

采用 2500V 或 5000V 绝缘电阻表，测量误差不超过±10%。

5.3.2 试验工况

超导限流器处于检修状态，低温系统正常运行，直流绕组处于超导状态。

试验环境应符合 DL/T 474.1—2006 中 6.1 和 6.4 的规定，即一般应在空气相对湿度不高于 80%的条件下进行试验；试品温度一般应为 10℃~40℃。

5.3.3 试验方法

绝缘电阻试验内容主要包括对交流绕组、直流绕组以及铁心的绝缘电阻测试，应逐相进行。其试验方法见表 2。

表 2 绝缘电阻试验方法

测量部位	接地部位	试验电压	试验结果
交流绕组	交流绕组非被试相、直流绕组、铁心、夹件	2500V	应读取 R_{60s} 和 R_{15s} ，计算吸收比，吸收比偏低时可测量极化指数
直流绕组	交流绕组、铁心、夹件	2500V	应读取 R_{60s} 和 R_{15s} 计算吸收比，吸收比偏低时可测量极化指数
铁心	交流绕组、直流绕组、夹件	2500V	应读取 R_{60s} 和 R_{15s}

5.3.4 试验结果判定

试验结果判定方法如下：

- a) 绝缘电阻换算至同一温度下，与前次试验结果相比应无显著变化，一般不低于前次试验值的 70%；
- b) 吸收比在常温下不低于 1.3，吸收比偏低时可测量极化指数，不应低于 1.5；
- c) 绝缘电阻大于 10000MΩ 时，吸收比不低于 1.1，或极化指数不低于 1.3。

5.4 额定连续阻抗试验

5.4.1 试验设备

电压互感器、电流互感器、电压表、电流表、大电流发生器或调压器，其中测量仪器的误差要求不超过±0.5%。

5.4.2 试验工况

试验工况有以下两种：

- a) 超导限流器处于运行状态。
- b) 如受条件限制可将超导限流器交流绕组处于检修状态，低温系统正常运行，直流绕组处于超导状态，直流励磁电流为额定值，使用外施加试验电流进行测量。

5.4.3 试验方法

在额定频率、额定运行电流下且直流励磁电流为额定值时测量阻抗，其阻抗为三个相电抗的平均值，试验可在以下两种工况下进行：

- a) 工况 a：先将超导限流器转为检修状态，将全绝缘电压互感器接在交流绕组 A1 和 A2、B1 和 B2、C1 和 C2 的对应端子上，如图 4 所示，然后将超导限流器转为运行状态，读取电压互感器所测量的交流绕组两端的电压值，同时通过电流互感器读出运行电流值，通过公式 $Z=U/I$ ，计算出每相阻抗值。
- b) 工况 b：如受试验条件限制，也可通过对交流绕组外施电流法，如图 5 所示，所施加工频电流尽可能接近其运行值，测量交流绕组两端的电压及流过交流绕组的电流，通过公式 $Z=U/I$ ，

逐相计算出阻抗值。

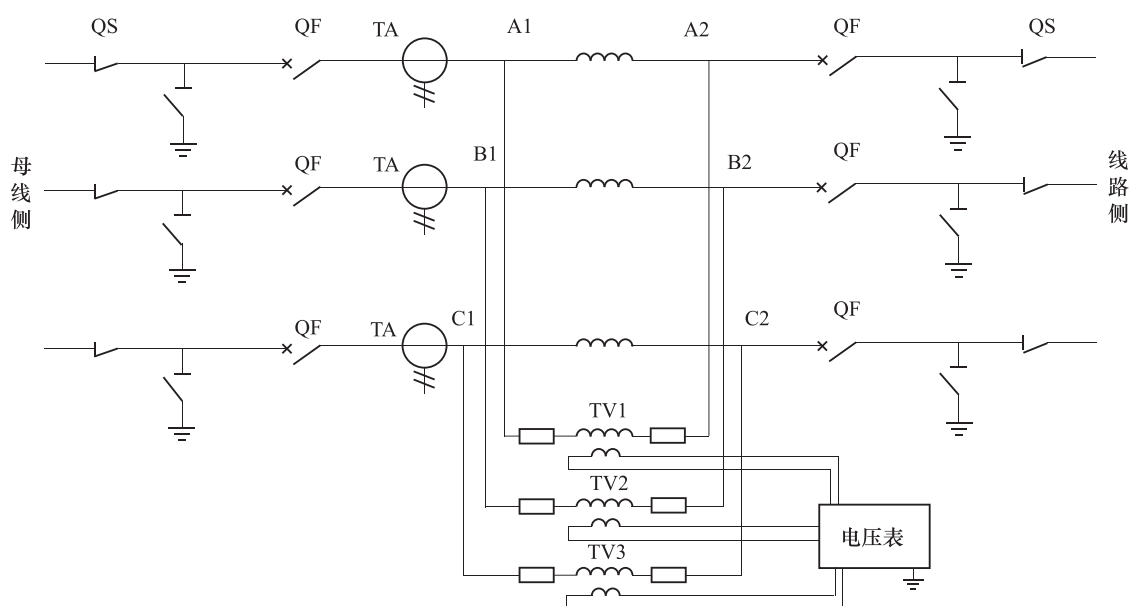


图4 额定连续阻抗试验运行状态下的接线图

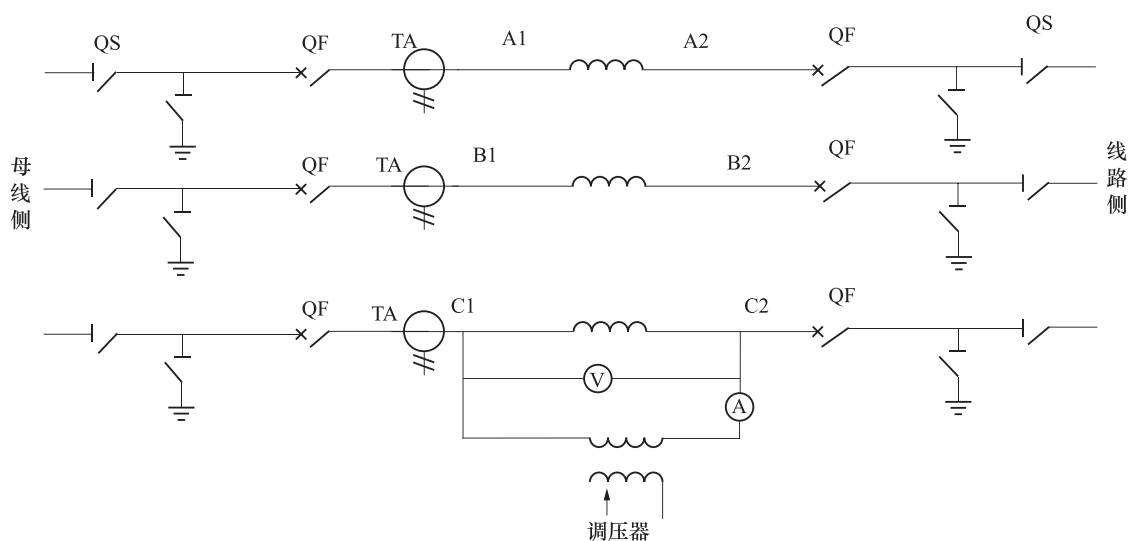


图5 额定连续阻抗低电压大电流法

5.4.4 试验结果判定

额定连续阻抗试验值与出厂试验值相差应在 $\pm 5\%$ 以内，与三相平均值相差应在 $\pm 2\%$ 以内。

5.5 交直流绕组的耐压试验

5.5.1 试验设备

串级试验变压器、直流高压发生器、匝间耐压试验装置，其中电压测量装置的测量最大允许误差不大于 $\pm 3\%$ 。

5.5.2 试验工况

超导限流器处于检修状态，直流励磁系统退出运行，低温系统正常运行。

5.5.3 试验方法

交流绕组工频耐压：按照 GB 1094.3 的规定进行。A、B、C 三相依次进行，非被试的所有绕组端子、铁心、夹件、箱壳、直流绕组应连在一起接地，交流绕组工频耐压接线图如图 6 所示。

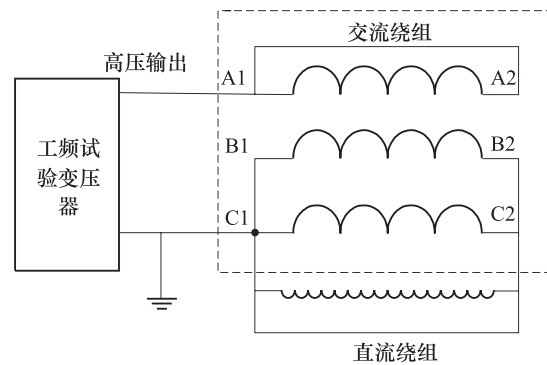


图 6 交流绕组工频耐压接线图

直流绕组直流耐压：直流绕组首尾短接，直流电压加至直流绕组一端，非被试的所有绕组端子、铁心、夹件、箱壳应连在一起接地，耐压时间 1min。

交流绕组匝间耐压试验：按照 GB/T 1094.6—2011 附录 G 规定的方法进行。

耐压试验电压值均为出厂试验电压的 80%。

5.5.4 试验结果判定

交流绕组的工频耐压和直流绕组的直流耐压：施加规定的试验电压和持续时间内，试品无异响、无闪络放电、电压稳定，则可认为试品通过耐压试验。如耐压过程中出现异常使试验中断，在查明原因、恢复电源后，应重新进行全时间的持续耐压试验，不可仅进行“补足时间”的试验。

交流绕组匝间耐压：按照 GB/T 1094.6—2011 附录 G 规定的图形法和观察法判断。

5.6 直流系统动作特性试验

5.6.1 试验设备

示波器（采样率不低于 100MS/s，带宽不低于 10MHz）、隔离变压器、继电保护测试仪。

5.6.2 试验工况

超导限流器处于检修状态。

5.6.3 试验方法

该试验采用继电保护测试仪在二次回路中输入模拟短路电流信号的方法，测量直流系统的去磁时间以及重励磁时间，即直流绕组电流的下降时间和上升时间。

注：下降时间是指直流绕组电流从额定值下降到零所用时间，如图 7 所示；上升时间则相反，是指直流绕组电流从零升至额定值所用时间。

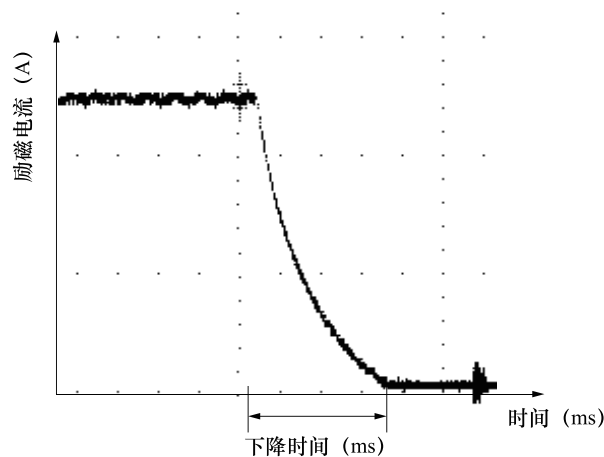


图 7 直流绕组去磁时间示意图

试验步骤为：先将直流绕组电流调整为额定值，然后在超导限流器交流绕组 TA 二次侧采样单元输入模拟短路故障电流信号，模拟短路故障的电流值至少要大于保护整定值且持续时间 50ms~100ms。用电流探头测量直流绕组的电流，通过示波器记录直流绕组的励磁电流的波形，读取直流绕组电流的下降时间和上升时间。直流系统试验接线图如图 8 所示。

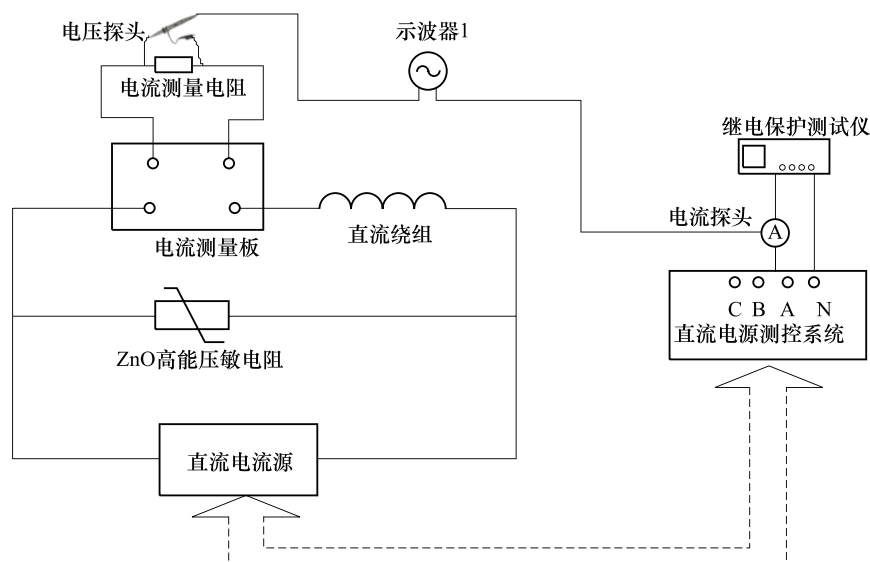


图 8 直流系统试验接线图

5.6.4 试验结果判定

直流系统在模拟短路故障时的去磁时间应小于 5ms、重励磁时间应小于 600ms；或与出厂技术条件要求无明显偏差。

5.7 低温系统检测

低温系统检测主要涉及冷媒的流量计、容器压力表、温度计、杜瓦真空度计的校准。此类表计的校准可结合限流电抗器的预试周期进行，校准的结果应按 JJF 1094 的规定进行符合性评定。

5.8 失超保护系统试验

5.8.1 试验设备

直流信号发生器、示波器（采样率不低于 100MS/s，带宽不低于 10MHz）。

5.8.2 试验工况

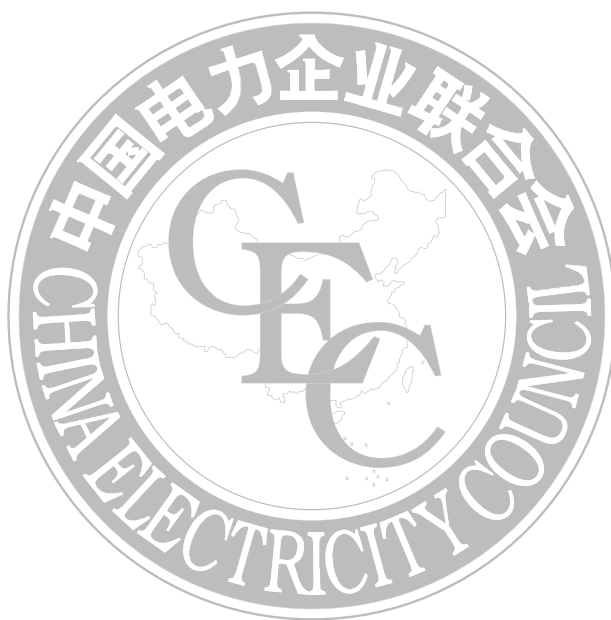
超导限流器处于检修状态。

5.8.3 试验方法

使用直流信号发生器对直流绕组失超保护系统的电压检测端口施加模拟信号，当模拟信号达到失超保护的整定值时，用示波器观察测量波形和失超保护动作情况。

5.8.4 试验结果判定

失超保护动作情况应符合保护整定的要求。



中国电力企业联合会标准
饱和铁心型高温超导限流电抗器
预防性试验规程

T / CEC 112—2016

*

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京传奇佳彩印刷有限公司印刷

*

2016年10月第一版 2016年10月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 16开本 0.75印张 16千字

*

统一书号 155123·3383 定价 9.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

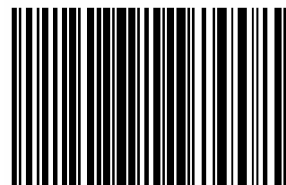
版权专有 翻印必究



中电联微信公众号



中国电力出版社官方微信



155123.3383