

BIANDIANZHAN SHEBEI
JI ZIDONGHUA JISHU

变电站设备 及自动化技术

林志超 编



继电保护

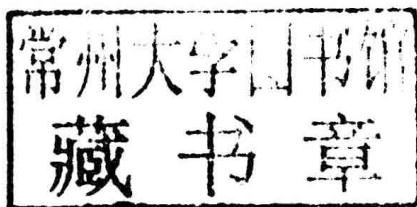


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

BIANDIANZHAN SHEBEI
JI ZIDONGHUA JISHU

变电站设备 及自动化技术

林志超 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书立足基层供电企业新入职员工应用需求,同时兼顾变电各专业人员了解相关知识的需要。本书共分为8章,第1章为电力系统及变电站基础知识,第2章为变电站主变压器技术综述,第3章为高压断路器技术综述,第4章为变电站其他设备技术综述,第5章为电力系统过电压及绝缘防护,第6章为继电保护技术综述,第7章为安全稳定装置与电网大停电事件,第8章为变电站自动化技术综述。

本书适用于基层供电企业新入职员工,也可作为从事变电站相关工作人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

变电站设备及自动化技术 / 林志超编. —北京: 中国电力出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-5198-0772-6

I. ①变… II. ①林… III. ①变电所—电气设备—自动化技术 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 259015 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 岳 璐 (010-63412339)

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 张俊霞 左 铭

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京大学印刷厂

版 次: 2017 年 11 月第一版

印 次: 2017 年 11 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米 × 980 毫米 16 开本

印 张: 9.5

字 数: 146 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 45.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前言

变电站是电力系统的核心物理节点，变电站设备及其自动化技术也是电网的核心技术。进入 21 世纪以来，电网及变电站规模随着我国经济的增长同步快速发展。变电站的一、二次设备也更新换代频繁，新增、改造与存量的各类电气设备都在运行使用，致使电网企业新入职的一线班组员工对多类型、多型号的设备维护工作感到无从下手，迫切需要适合自身使用的简明变电技术培训教材。

作者结合多年从事变电生产技术管理工作的经验，依托自己多年对电力生产技术文献的收集、梳理，立足基层供电企业新入职员工应用需求，同时兼顾变电各专业人员了解相关知识的需要，编写出一本简明变电技术培训教材。

本书分三部分。第一部分（第 1 章）简明介绍电力系统及变电站基础知识，对变电站的生产管理进行概括介绍；第二部分（第 2 章～第 5 章）是变电站主要的一次设备的技术综述，分别对电力变压器、高压断路器、互感器、GIS 等设备与高压试验的工作原理、运行与维护进行阐述；第三部分（第 6 章～第 8 章）是变电站主要的二次设备的技术综述，介绍了继电保护、安全自动装置、自动化等设备的原理与应用，还对中外电网大停电的原因、智能变电站的新技术进行要点说明。在附录中回顾了中国电网及技术发展沿革。

本书有三个特点，一是“全”，内容系统、全面，既涵盖了变电站各类型主要一、二次设备，也对设备技术发展进行必要回顾；二是“精”，本书文字简明精要，在有限篇幅内将变电站设备与技术讲述清楚，厘清电力生产中一些应用技术的概念；三是“易”，本书通俗易懂，强调对设备技术概念的理解与应用，不着重进行理论分析与数学推演。

开卷有益，希望本书能使读者在短时间对变电站技术有全面的了解。受时间与水平限制，本书难免存在诸多不足，欢迎专家及读者多提宝贵意见。

林志超

于广东电网惠州供电局

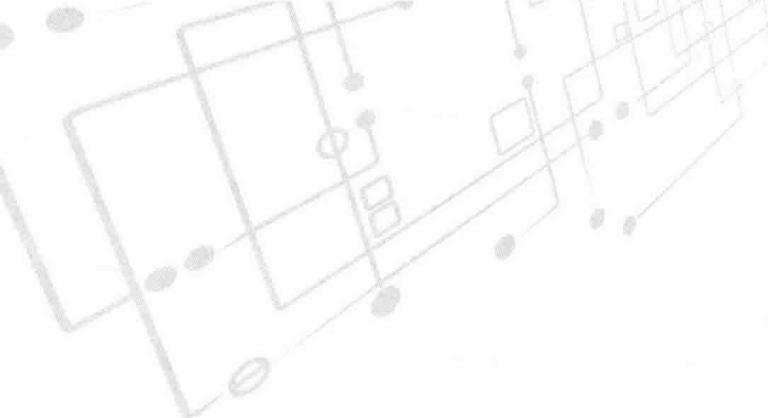
目 录

前言

第 1 章	电力系统及变电站基础知识	1
1.1	现代电力系统的特点	1
1.2	变电站主要电气设备与实操变电站	5
1.3	变电站的生产管理	7
第 2 章	变电站主变压器技术综述	11
2.1	变压器的工作原理、铭牌与结构	11
2.2	变压器运行的技术要点	15
2.3	变压器事故与障碍缺陷统计分析	21
2.4	变压器的发展沿革与非油浸式变压器的技术特点	24
第 3 章	高压断路器技术综述	32
3.1	高压断路器的基本结构、工作原理及主要技术参数	32
3.2	高压断路器的分类	36
3.3	SF ₆ 断路器与真空断路器	38
3.4	高压断路器故障分析和防范措施	41
3.5	国内高压开关设备发展现状与发展趋势	44
第 4 章	变电站其他设备技术综述	47
4.1	隔离开关	47
4.2	电磁式电流互感器与光学电流互感器	51
4.3	SF ₆ 全封闭组合电器 (GIS)	56

4.4	电气设备导体和变电站母线	60
4.5	变电站绝缘子	63
4.6	变电站中性点接地设备	66
4.7	高压开关柜	68
4.8	电容器	70
第 5 章	电力系统过电压及绝缘防护	73
5.1	雷电过电压及防雷保护	73
5.2	接地装置与地网	77
5.3	电力系统内部过电压与防护	80
5.4	绝缘配合与电气设备的高压试验	84
第 6 章	继电保护技术综述	88
6.1	继电保护的基本原理	89
6.2	继电保护装置发展沿革	91
6.3	高压线路继电保护装置“四统一”	94
6.4	高压线路微机保护	97
6.5	电网主要继电保护装置的配置原则	99
6.6	变电站蓄电池的基本工作原理	102
第 7 章	安全稳定装置与电网大停电事件	105
7.1	电网安全自动装置发展沿革	105
7.2	安全稳定控制系统基本功能配置	107
7.3	电网安全稳定策略的中国特色——“三道防线”	108
7.4	美加 8·14 大面积停电事件及教训启示	109
7.5	粤东电网 5·25 电网稳定破坏事故分析	112
第 8 章	变电站自动化技术综述	116
8.1	变电站“三遥”功能与传统 RTU 自动化	116
8.2	变电站综合自动化系统的构成、分类及基本功能	119
8.3	变电站综合自动化系统的通信规约和传输网络	122

8.4	103 规约与 IEC 61850 标准的分析和比较	128
8.5	数字化变电站与智能变电站的基本概念及应用	133
附录	中国电网及技术发展沿革	138
参考文献		143



第 1 章

电力系统及变电站基础知识

20 世纪出现的电力系统,是人类工程科学史上重要的成就之一。电能的广泛应用,推动了社会生产各个领域的发展,开创了电气化时代,引领了近代史上的第二次技术革命。电力系统的大发展使动力资源得到更充分的开发,工业布局也更为合理,电能的应用不仅深刻地影响着社会物质生产的各个层面,也越来越广地渗透到人类日常生活的各个层面。电力系统的发展程度和技术水平已成为各国经济发展水平的标志之一。

1.1 现代电力系统的特点

1.1.1 电力系统的组成与要素

1. 电力系统的组成

人们大量使用的电能由发电机发出,通过变压器升压,再经电力线路传输、变压器降压等过程,最后到达用户。这个发、输、用的统一体就称为电力系统。电力系统是由生产、输送、分配和消耗电能的所有电气设备所组成的统一整体。它的主要设备是生产电能的发电机、输送和分配电能的变压器和电力线路、消耗电能的各种用电设备(如电动机等)。此类设备的组成称为一次系统。电力系统还包括继电保护装置、安全自动装置、通信设备和调度自动化等辅助系统,称为二次系统。电力网是电力系统中除发电机和用户之外,由变压器和电力线路所组成的输送、分配电能的网络。

2. 电力系统的要素

电力系统的要素包括电厂、输电线路、变电站、开关站、配电网络、发电

机、变压器、开关、断路器、架空线、电缆、测量仪器、保护设备、控制系统。

1.1.2 电能生命周期的特殊性

电能是由一次能源转换而成的，电能以其方便性、传输的快速性、无污染性成为无可替代的二次能源。用电能代替其他能源，可以提高能源利用率。一般商品大多在经历了引入期、成长期、成熟期和衰退期四个阶段后自行消亡，然而，电能却是与众不同的商品。

1885 年实现变压器制造技术，开始了单相交流输电。1891 年又实现了三相变压器和三相异步电动机的制造技术，开始了三相交流输电。同年 8 月，世界博览会在德国法兰克福（Frankfurt）召开，会议组织者为了展示交流电的输送和应用，在 175km 外的德国劳芬（Lauffen）的波特兰（Portland）水泥厂内装设了一套三相水轮发电机组（210kVA，150r/min，40Hz，相电压 55V），向博览会上的 1000 盏电灯和一台 100 马力（1 马力 = 735.5 瓦特）的三相感应电动机供电。这被视为现代电力系统的开端。

自此以后，电力工业经历着一代又一代的技术革命而不断焕发着青春，其生命周期似乎是无限扩展、永无止境的。可以设想一下，有什么商品能够取代电力，像电力这样如此便于能量转换、输送快捷、使用方便呢？电能商品的这种特殊性决定着人们只能不断地去进行电力技术的革命和电力管理体制的改革，以适应它的生命周期的无限扩展性。

电力工程是 20 世纪对人类影响最大的工程之一。有学者认为，电力系统是迄今为止最为复杂的人造系统，人类对其还无法全部掌握与控制。

1.1.3 现代电力系统发展的特点

1. 大电网

大电网的优越性可概括为：有利于稳定周波频率，有利于事故支援，能减少负荷备用；有利于开发边远地区的水煤资源；有利于降低发电成本（可安装大机组）；有利于错开地区时差，实现经济调度，减少负荷备用；有利于改善电能的质量。电网规模越大，其容纳高次谐波和负序电流的能力就越强。

2. 大机组

大机组可节能降耗，降低单位建设成本。

3. 超高压

超高压可提高线路输送功率，节约输电线路走廊。

4. 高度自动化

集测量、控制、信号、保护于一体，向小型化、集中化、自适应和自调节方向发展。

1.1.4 现行电压等级与电力线路输送功率

(1) 我国早期曾规定 1000V 以上电压的额定电压标准为 3、6、10、35、(60)、110、(154)、220、330、500kV (其中 60kV 和 154kV 为历史遗留而被限制发展的电压等级，现已不再发展)。随着技术的引进与进步，我国现行交流电力系统的电压等级分 5 类 12 级，见表 1-1。

表 1-1

交流电力系统电压等级的分类

(单位: kV)

电压等级	低压	中压	高压	超高压	特高压
电压值	0.4	1、6、10、20、35	110、220	330、500	750、1000

(2) 商品化直流输电系统电压等级: 160/242、±500、800、1000 (筹建中) kV。

(3) 电力线路输送功率。交流电力线路输送功率决定于线路长短、无功损耗及导线发热条件，可通过电容器或电抗器补偿作适当调整。

① 在 220kV 及以上大电网，电力线路输送有功功率为

$$P = \frac{U_N^2}{X} \sin \delta$$

式中 P ——线路输送的有功功率 (MW)；

U_N ——线路额定电压 (kV)；

X ——线路电抗 (Ω)；

δ ——送、受电端的电压相角差。

② 330kV~750kV 超高压输电线路的输送容量以大致接近于自然功率为宜，即

$$P \approx P_{\lambda} = \frac{U_N^2}{Z_{\lambda}}$$

式中 P ——线路输送的有功功率 (MW);

P_{λ} ——线路输送的自然功率 (MW), 自然功率又称为波阻抗负荷, 是指线路阻抗为波阻抗时, 线路消耗和产生的无功正好平衡, 即“无损耗”传输时线路所输送的有功功率;

U_N ——线路额定电压 (kV);

Z_{λ} ——线路波阻抗。

(4) 线路波阻抗 Z_{λ} 。对于长线路或分布参数的线路, 由于 $R \ll X$ (线路电阻远小于线路电抗), 可假设线路上没有有功功率损耗。而对于这种“无损耗”线路, 其特性阻抗呈纯电抗性, 称为波阻抗 Z_{λ} 。

$$Z_{\lambda} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

当线路输送的有功负荷为 P_{λ} 时, 由于线路的无功损耗正好等于其充电功率, 因此完全补偿, 从而使全线路各点电压及电流大小一致, 线路任一点的功率因数都一样, 实现无损耗传输。要提高线路输送容量, 可采用分裂导线的措施降低波阻抗 Z_{λ} 。

电力线路的波阻抗变动幅值不大, 单导线架空线路为 $385 \sim 415 \Omega$, 二分裂导线为 $285 \sim 305 \Omega$, 四分裂导线为 $255 \sim 265 \Omega$ 。现 220 kV 线路多采用二分裂导线, 波阻抗为 300Ω , 输送功率约为 160 MW ; 500 kV 线路多采用四分裂导线, 波阻抗为 260Ω , 输送功率约为 1000 MW 。

1.1.5 电力系统运行的基本要求

1. 供电可靠性

由于电力系统的事故难以绝对避免, 电力负荷的瞬变性随时存在, 要长期保证所有电力用户绝对可靠供电是相当困难的。为此, 可按供电可靠性的要求将电力负荷进行分级管理和调度。在我国, 通常按民用建筑电力负荷与工业电力负荷而分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。

2. 电能质量三要素

电能质量包含频率质量、波形质量和电压质量。

(1) 频率质量。我国的工频为 50Hz。频率调节一般由省级电力调度中心负责控制实施，电网企业创优指标都要求允许频率偏移在 0.1Hz 以内。

(2) 波形质量。在我国，波形质量是以正弦波畸变率是否超过给定值来衡量的。所谓正弦波畸变率是指各次谐波有效值平方和的方根值与正弦波有效值的百分比。为保证波形质量，必须限制或消除各种非线性谐波源，如限制或滤除电气化线路、换流装置、电热电炉等非线性负荷向系统注入的谐波电流。

(3) 电压质量。能使电力设备正常工作的电压称为额定电压 (U_N)。各种电力设备在额定电压下运行时，其技术经济性能指标能够达到最优。

由于用电设备的允许电压偏移为 $\pm 5\%$ ，电力网的电压损失不得大于 10% ，这就要求线路始端电压为额定值的 105% ，以使其末端电压不低于额定值的 95% 。变压器的一次侧接电源，相当于用电设备；二次侧向负荷供电，又相当于发电机。因此，变压器一次侧额定电压应等于用电设备额定电压，二次侧额定电压应比线路额定电压高 5% 。由于变压器二次侧电压规定为空载时的电压，而额定负荷下变压器内部的电压降约为 5% ，为保证正常运行，变压器二次侧额定电压应比线路额定电压高 10% 。

1.2 变电站主要电气设备与实操变电站

1.2.1 变电站主要电气设备

变电站作为电力网的核心组成部分，是电力系统中变换电压、接收和分配电能、控制电力的流向和调整电压的电力设施及场所。变电站是电网物理核心节点，在电网中所占位置比较突出。它通过其变压器将各级电压的电网联系起来。变电站的主要任务是分配电能，根据运行方式的变化对电路进行切换，监视主要设备的运行状态，定期维护和检修设备；当发生故障时，能及时地对故障部分进行隔离；当有威胁系统正常运行的情况（如过电压）发生时，能有效地进行防护。

变电站用于转换、传输电能的设备为电气一次设备，包括变压器、断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器、母线等。对一次设备的运行状态进

行监视、测量、保护、控制的设备为电气二次设备。变电站二次设备包括继电保护装置、变电站自动化装置、站用直流系统。

1.2.2 龙源实操变电站

广东省惠州市龙源电力培训基地是广东电网四大培训基地之一，基地内的实操变电站按通用变电设备的典型应用配置，设备种类齐全，现已成为惠州供电局乃至广东电网公司对变电各专业人员进行技能培训、技术研究的平台，变电站全景见图 1-1。



图 1-1 龙源电力培训基地全景照

龙源实操变电站建在惠州龙源培训基地内，站址位于惠州市仲恺高新区和畅四路东侧，110kV 中星变电站南面。龙源实操变电站的全站建设按一次部分不带电、110kV 设备二次配套设备带电运行。

全站主要分为 220kV 设备区、110kV 设备区、10kV 设备区，并配有 10kV 高压室、主控室及蓄电池室。

实操变电站电力一次设备设置如下：全站设主变压器一台，主变压器容量为 40 000kVA；220kV 部分采用双母接线，仅设一个典型出线间隔；110kV 部分采用单母接线，设主变压器变高间隔、110kV 出线间隔、110kV 母线 TV 间隔及 110kV I 段管型母线；10kV 部分采用单母接线，设变压器低进线开关柜 1 面、馈线柜 1 面、电容器开关柜 1 面与 10kV 电容器成套装置一组、接地变压器开关柜 1 面与接地变压器一组、母线 TV 柜 1 面。

实操变电站电力二次设备分三个专业，分别设置如下：①继电保护设备，有 110kV 线路保护屏、主变压器保护屏、故障录波器屏、直流接地监测装置；

②自动化设备，有操作员工作站、远动通信屏、公用屏、GPS 对时系统；③站用电源系统，有交流屏、蓄电池组与蓄电池监测装置、充电机屏、负荷屏、监控系统逆变器电源屏。

1.3 变电站的生产管理

1.3.1 变电运行与维护专业班组设置

变电专业是电网企业的核心专业之一，类别较多，技术复杂。变电站众多设备都需供电企业班组进行运行与维护。近年来，随着电网新设备和新技术的大量应用，供电企业专业化的组织管理模式发生了显著变化。以广东电网公司为例，已统一规范直属供电企业班组建制。变电运行与维护专业班组分为两大类：一是变电运行类班组，二是变电修试类班组。

(1) 现阶段 500kV 变电站还是有人值守，220kV 变电站一般已实现无人值守，相应变电运行类班组就分为 500kV 变电站与运维中心站两种。

变电运行类班组主要从事变电站设备定期巡视、电气操作、设备维护工作，按电力安全生产规定办理“操作票、工作票”两票；负责参与变电站设备的检修、试验验收工作和新建、改建、扩建工程的竣工验收工作；配合完成设备隐患及缺陷处理工作。两种变电运行班组不同之处在于 500kV 变电站还需负责 500kV 变电站设备的监控、巡视、表计记录、倒闸操作、事故处理工作。而运维中心站由于变电站是无人值守，其设备监控等工作由在调度端的监控中心班组负责。

(2) 变电修试类班组负责变电站设备的维护，分为变电检修班、继保自动化班、试验专业班组三种。

变电检修班负责变电一次设备及相关一次回路的检修及设备消缺工作，负责一次设备大修技改项目的实施。

继保自动化班负责变电二次设备及相关二次回路的检修及设备消缺工作，包括继电保护设备与站端自动化设备、站用直流电源三个二次专业设备的日常维护和二次设备大修技改的实施工作。

试验专业班组包括高压试验班、电测仪表班、化学试验班，高压试验班规模相对较大，电测仪表班与化学试验班规模较小。高压试验班负责变电站内一

次变电设备的高压试验、验收工作；电测仪表班负责变电站电测、热工计量装置设备的竣工验收试验、定期校验和维护工作；化学试验班负责变电站内一次设备的绝缘油、SF₆气体的交接、预防性试验工作，参与事故调查分析检验工作。

1.3.2 业务指导书与作业指导书概述

根据国家企业三大标准体系，南方电网结合实际，将公司企业标准主要分为管理制度、技术标准、工作标准三类，其中工作标准又细分为作业标准、岗位标准、其他标准。

作业标准主要包含业务指导书和作业指导书两种类型。

(1) 业务指导书是对涉及管理业务的人员进行规范管理和开展业务提供正确指导的一种作业标准。

(2) 作业指导书是对涉及操作业务的作业人员进行标准作业提供正确指导的一种作业标准，主要使用对象为从事电网运行、客户服务、现场作业、物资仓储配送等业务的班组一线员工。

业务指导书采用统一模板，按文字说明或“流程图+流程说明”的形式展开。作业指导书分专业各自制定统一模板，按必要的“作业步骤+数据记录”的形式展开。

1.3.3 作业指导书说明

作业指导书通过细化现场作业管理要求，明确现场作业的人员职责、风险控制要求、关键工艺控制要求、关键作业输出以及相关工具和方法。作业指导书分为典型作业指导书和本地化作业指导书。

针对每一份作业指导书编制本地化范围说明本地化的权限，细化到指导书中的每一个单元格。作业指导书框架、作业指导书中与信息系统关联的数据项等内容原则上不允许本地化。

作业指导书应包括作业基本信息、作业前准备、作业过程、作业终结、本地化范围说明五部分。以下分别按这五个要素对作业指导书的编制要求进行详细说明。

1. 作业基本信息

作业基本信息应包括作业班组、作业开始时间、作业结束时间、作业任务

名称、作业负责人、作业人员、作业地点等内容。检修类、预试类作业应包含设备名称、型号、投运年限等信息，并与设备台账关联。

2. 作业前准备

原则上作业前准备信息主要包括出发前准备、进场前准备、工作和安全技术交底、现场风险评估及交底等内容。各专业可根据实际情况对作业指导书中需体现的内容进行增减。

(1) 出发前准备。按作业需要，明确作业人员资质要求，明确仪器工具、技术资料、防护用品、物资材料及车辆的需求的类型和数量，并由作业人员进行确认。

(2) 进场前准备。确认工作许可手续、安措实施、防护用品佩戴等信息，明确行为规范要求，由作业人员进行确认。

(3) 工作和安全技术交底。明确作业应急事项要求，并由作业人员进行确认。

(4) 现场风险评估及交底。作业指导书中的作业风险评估内容应与年度作业风险评估结果保持一致，明确危害名称、可能导致的风险后果、风险等级、涉及作业步骤、风险控制措施等内容，并由作业人员进行确认。原则上评估结果为中、高级等级的风险必须在指导书中体现，低风险由专业专家确认是否在指导书中体现，可接受等级的风险不在指导书中体现。

作业指导书中应预留字段项，由班组人员填写现场作业风险评估结果及临时应对措施内容，并由作业人员进行确认。

3. 作业过程

作业过程按作业分项目分别明确作业步骤、作业标准、作业记录三部分内容，对于较复杂作业应明确每个作业步骤的安全注意事项。原则上一次完整作业的作业分项目可按照作业对象进行划分。

(1) 作业步骤。按照作业工艺标准将作业拆解为若干步骤，用于为现场作业人员提示作业内容和作业顺序，避免作业遗漏。

(2) 作业标准。对作业关键进度点、关键质量点进行简要描述，确保作业质量。原则上颗粒度要满足经上岗培训并考试合格、具备一定工作技能的作业

人员现场作业需求，生产班组人员应知应会内容不应在作业指导书中体现。

(3) 作业记录。作业记录内容包括作业结果记录和关键步骤确认。作业结果记录应在作业指导书中明确记录项目、记录格式规范等要求，记录项目、格式可根据信息系统要求调整，实现与信息系统关联。关键步骤确认可根据作业步骤复杂程度采用逐一确认方式或若干步骤合并确认方式。

4. 作业终结

作业终结包括对恢复现场、清理现场、工作终结、作业后记录、发现问题及处理意见、风险变化情况等内容进行确认，并由工作负责人对作业结果进行评价。

5. 本地化范围说明

针对每一份作业指导书编制本地化范围说明，明确基层单位进行本地化的权限，细化到指导书中的每一个单元格。作业指导书框架、作业指导书中与信息系统关联的数据项等内容原则上不允许本地化。