

[美]H. 李·威利斯 H. Lee Willis 著
兰德尔·R. 斯克里博 Randall R. Schrieber
张根周 毕鹏翔 高恭娴 等 译

供电系统设施管理 技术、方法及应用 (第二版)

Aging Power Delivery Infrastructures
(Second Edition)

 **CRC Press**
Taylor & Francis Group



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Aging Power Delivery Infrastructures
(Second Edition)

供电系统设施管理 技术、方法及应用 (第二版)

[美]H. 李. 威利斯 H. Lee Willis 著
[美]兰德尔. R. 斯克里博 Randall R. Schrieber 译
张根周 毕鹏翔 等



 **CRC Press**
Taylor & Francis Group

 **中国电力出版社**
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书全面论述了供电系统设施管理技术、方法及其应用,包括五个部分:第一部分由第1章和第17章组成,介绍了供电系统设施老化问题及其主要影响,给出了可持续点方法,并对其应用情况进行总结;第二部分由第2~6章组成,给出了了解供电系统设施老化及其解决方案所需的背景材料;第三部分由第7~10章组成,讨论了老化设备各个方面的劣化及其影响;第四部分由第11~14章组成,主要讨论为有效管理设备老化及其影响,在实施测量、研究、计划、建模和决策中所需的方法和技术;第五部分由第15章和第16章组成,给出了输配电设备管理的策略及其应用。本书最后给出的两个附录,介绍了可持续点模型及其应用。

本书不拘泥于具体的模型和算法,主要关注输配电系统设施管理的理念及其实际应用,为有效管理输配电系统设施提供了丰富的资料,对我国输配电系统设施管理人员具有很高的参考和借鉴价值。本书可以作为科研人员 and 高等院校教师、研究生的参考教材,也可以作为输配电系统运行和管理人员的培训教材。

Aging Power Delivery Infrastructures

(Second Edition) / by H.Lee Willis, Randall R. Schrieber / ISBN: 978-1-4398-0403-2

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究

China Electric Power Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由中国电力出版社独家出版并仅限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

供电系统设施管理技术、方法及应用:第二版/(美)H.李·威利斯(H. Lee Willis), (美)兰德·R. 斯科里博(Randall R. Schrieber)著;张根周等译. —北京:中国电力出版社,2017.9

书名原文: Aging Power Delivery Infrastructures (Second Edition)

ISBN 978-7-5198-0472-5

I. ①供… II. ①H… ②兰… ③张… III. ①供电系统—设备管理 IV. ①TU852

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 045974 号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2013-6412

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:陈丽 陈倩(010-63412348)

责任校对:闫秀英

装帧设计:郝晓燕 左 铭

责任印制:邹树群

印 刷:三河市万龙印装有限公司

版 次:2017年9月第一版

印 次:2017年9月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:30

字 数:813千字

印 数:0001—2000册

定 价:85.00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

译者序

本书是美国 Taylor&Francis Group 所属的 CRC 出版公司出版的《电力工程丛书》的第 12 分册。该书作者 H.Lee Willis 是国际上输配电系统领域的权威专家，曾经长期在 ABB 公司供职，参与指导了世界各国 250 项输配电系统管理项目的实施，发表了 300 多篇科技论文，出版了多部专著，2013 年 2 月中国电力出版社出版了 H.Lee Willis 等的专著《配电系统规划参考手册（第二版）》。

美国电网主要经过 20 世纪 70 年代之前的大规模建设和改造而成，其电网中的大部分设备已经运行了 40 年以上，《供电系统设施管理技术、方法及应用》一书就是美国管理电网设施的经验总结和最新的研究成果。为了借鉴美国电网发展经验、电网设施管理的技术和方法，我们从 2008 年开始就着手《供电系统设施管理技术、方法及应用（第一版）》的翻译工作；2012 年 12 月 CRC 出版公司出版了该书第二版，全书的篇幅由 548 页增加到了 821 页，不仅改写了大部分内容，还提出了用于设备管理的可持续点方法。于是从 2013 年开始我们着手第二版的翻译工作。先后有 9 人参与了本书第一、二版的翻译工作。在本书第一版初稿翻译阶段，国网陕西省电力公司张根周、毕鹏翔、薛军负责第 1、2、3、4、5、6、7 章初稿翻译工作；南京信息职业技术学院高恭娴负责第 10、12 章初稿翻译工作；国网陕西省电力公司培训中心李依凡、眭肖钰、谢芳、王丽负责翻译第 8、9、13、14、15、16 章初稿翻译工作。在本书第二版初稿翻译阶段，国网陕西省电力公司张根周、毕鹏翔、薛军负责第 1、2、3、4、5、6、7、11、13、14、15、16、17 章初稿翻译工作；国网陕西省电力公司毕鹏翔负责第 8、9 章初稿翻译工作；南京信息职业技术学院高恭娴负责第 10、12 章初稿翻译工作；云南大学滇池学院外语系毕蔚然负责翻译附录 A 和附录 B。初稿完成后张根周、毕鹏翔、高恭娴对各章的术语和内容进行了统一。毕蔚然参加了全书的校核和定稿工作。

在本书第 1 章，作者指出 “The authors have deliberately used the term ‘Power Delivery’ rather than ‘T&D’ throughout this book in order to make a point that is both crucial to success in dealing with aging infrastructures, but very often overlooked. The infrastructure involved in the issues being discussed here includes a good deal of the T&D system, but not all of it.”。另外，在本书第 15 章中还介绍了炼油厂等企业的电力系统，因此我们将 “Power Delivery” 翻译为 “供电系统”。在本书第 16 章和附录 A 中，作者指出 “‘Age’ is the period time a pole or group of poles has been in service.”。明确设备运行时间为 “年龄”，并且书中用设备年龄、设备等效年龄来表征设备状态，为方便讨论我们设备年龄单位统一为 “岁”。

本书从第一版初稿的翻译到第二版定稿历时 9 年，值此译稿完成之际，衷心感谢各方面给予的大力支持和帮助。国网陕西省电力公司电力科学研究院刘健教授、国网陕西省电力公司张平康博士、朱跃高级工程师、倪建立高级工程师、中国电力出版社编辑陈丽、陈倩、中国水利水电西北勘测设计研究院高级工程师王晖等对译稿初稿的修改提出了很好的建议，对本书的出版给予了很多帮助，在此一并表示感谢！

尽管很多人为本书的翻译付出了宝贵的心血，但由于本书翻译校核工作量巨大，一定还存在一些错误，望读者见谅。读者如发现任何翻译不足之处，烦将相关情况发给我们 (763752252@qq.com)，以便我们予以纠正。

译 者

2016 年 3 月于西安

原版前言

和第一版一样，《供电系统设施管理技术、方法及应用（第二版）》可以作为有关供电系统设施老化及其引起的问题和用于管理老化供电系统的技术和管理方法的参考手册和培训指南。电力是重要公共产品中唯一的其产品的质量与可靠性完全由传输系统的特性而不是由产品的生产过程确定的产品。美国输电系统的老化意味着电能质量差，频繁和长时间的停电，使长期依赖这些系统的电力客户，电力公司和大型重工业企业的业主和员工面临令人沮丧的挑战。

在 2001 年出版的《供电系统设施管理技术、方法及应用（第一版）》中包含了我们当时能够得到的与供电系统老化有关的所有材料。仅在 12 年后，这个领域的研究取得了巨大进步，因而本书第二版大部分为新内容。早在 1994 年，我们第一次清楚地意识到全美供电系统的老化日益成为威胁整个电力行业的重要问题。尽管在那个时期由于供电系统设施老化带来的频繁和长时间的停电、系统维护维修费用的增加等症结才刚刚出现，但设备年龄、系统性能及供电企业的财务状况等预测结果清晰地表明这些问题将持续发展。系统事件表明这个判断是正确的。在 20 世纪的最后 5 年，全美电力系统的老化开始出现导致快速降低客户服务水平和公众对电力公司信任水平的系统运行问题。

从 1994 年到 1999 年，本书作者致力于供电系统老化及其可行的解决方案的研究和探索，进行了原创性研究和试验。作者从世界各地收集了大量创新的已经过验证以及某些未经过验证的技术，对这些技术进行仔细的研究和审查，并对这些技术组合并验证其有效性直至能够把握这些技术。在 2001 年出版的《供电系统设施管理技术、方法及应用（第一版）》中，汇集了作者在此过程中获得的知识和经验。

但是事情通常就是这样，就在本书第一版出版之后我们很快就取得了重大突破：可持续点方法。原本我们只是将可持续点分析当作一个有趣和功能强大的数学技术，可以从历史数据中挖掘出有用的信息从而构建更为精确和有用的规划和决策支持模型。但我们逐渐意识到将这一分析方法用作管理方法更为有效。部分原因是这种方法很简单：失效设备被更换的一组设备最终都会发展到可持续点年龄、可靠性、性能和成本，在此之后，设备每年的状态基本保持不变，而不是继续劣化。设施再也不会劣化了。只要将失效的设备更换为新设备或修复好设备，系统最终将发展到一个稳定的可持续点，新更换的设备正好与失效的老设备平衡，从而使整个系统的状态基本保持不变。几乎每个供电系统的可持续点都在未来（因此系统的状态每年都会变差一点）以及处于可持续点的系统不能让人接受的高成本和低可靠性的事实

并不影响这种方法的价值。

这个概念非常有实用价值，因为有许多可能的可持续点，每种运行策略对应一个可持续点。公司的设备策略可能是安装最牢固的设备，那么在整个寿命周期内就不用考虑设备的维护，只有当设备失效时才需支付更换设备的费用。而对于大部分设备，这种策略最终会导致很高的失效率从而需要更换大量设备。另一方面，“无论是否需要”，公司也可以选择从一开始就进行大量的检查、维护，主动进行精心的维修和翻新。这样，设备使用时间可能会更长，设备失效也不会太频繁。但总体成本可能更高，至少在最初，当大多数系统是新的时候是如此。

从长远来看，介于“故意忽视”和“强烈关注”之间计划将接近最优。电力系统管理的要点是可以选择，通过选择设备运行和管理策略来移动可持续点，通过选择最优的设备运行和管理策略来改变设备的年龄和状态。供电企业可以根据不同的设备运行、维修和载荷策略，选择不同的可持续点。对新系统最优的策略对老系统未必最优。在一家供电企业运行良好的策略也可以应用于另外一家供电企业，但效果未必最好。

这个概念的一个价值是它清楚地表明，“基础设施老化”这一术语不能仅仅包括了所有设备，它还必须包括供电企业采用的载荷标准，设备操作指南，检查、维修和翻新策略。这些标准和指南等也会逐步“劣化”，结果与当前的需要相比就过时了。电力行业面临的基础设施老化问题包括设备磨损、设计过时、变电站用地与输电走廊受限、工程设计标准和运行规程过时等。良好的老化基础设施管理包括优化设备的选择及其翻新，并使之与设备运行和管理策略的变化相融合，以实现电力企业期望的经营目标。

本书由五个部分组成。第一部分由第 1 章和第 17 章组成，对设施老化问题及其主要影响，可持续点方法和可行解决方案在实际应用中的不足及其影响等进行总结。第二部分由第 2~6 章组成，给出了一系列详细了解基础设施老化及其解决方案所需的背景材料。第三部分由第 7~10 章组成，讨论了老化设备状态劣化的各个方面及其系统影响，以及所有这一切与电力系统诸多性能和供电公司或工业电力系统用户业务需求之间的关系。第 11~14 章主要讨论为有效管理设备老化及其影响，在实施测量、研究、计划、建模和决策中所需的方法和技术。

第 15 章和第 16 章为案例研究。第 15 章总结了设备老化及其影响和 6 家依赖电力系统开展业务活动的公司应对设备老化的方法。给出了应对设备老化的技术和方法的应用范围，根据企业的观点和需求的不同，“最优策略”之间可以存在很大差异。第 16 章详细给出了一家大型供电企业设施老化管理的项目，目前该项目作为一项新的优化流程已经成为了供电企业正常开展的业务。在本书后面补充了两个附录。

附录 A 讨论了一种基于电子表格的可持续点模型及其应用。附录 B 讨论了可持续点概念及算法，并利用实例说明了其要点。

H. Lee Willis
Randall R. Schrieber

目 录

译者序
原版前言

1	老化的供电基础设施	1
1.1	概述	1
1.2	老化供电基础设施管理	3
1.3	供电设备	3
1.4	老化基础设施的特征	4
1.5	供电系统	5
1.6	商业环境	7
1.7	影响基础设施老化的五个因素	8
1.8	状态、危险度和影响	20
1.9	结论	22
	参考文献	28
2	供电系统	29
2.1	概述	29
2.2	输配电系统的任务	29
2.3	输配电系统遵循的基本规律	30
2.4	输配电系统的不同层级	33
2.5	公用配电设备	38
2.6	输配电系统的费用	41
2.7	配电系统的设计形式	48
2.8	智能电网	54
2.9	结论	55
	参考文献	57
3	用户对电量及供电可靠性的需求	58
3.1	供电质量和数量	58
3.2	用户对电量的需求	58
3.3	电力用户对供电质量的需求	64
3.4	双Q分析	73
3.5	总结	74
	参考文献	75
4	电力系统可靠性与供电可靠性	76
4.1	概述	76

4.2	停运导致停电	76
4.3	可靠性指数	80
4.4	可靠性和事故规划准则	82
4.5	成本是关键因素	86
4.6	双 Q 分析	87
4.7	总结	88
	参考文献	89
5	成本和经济评估	91
5.1	概述	91
5.2	成本	91
5.3	资金的时间价值	93
5.4	决策依据和成本效益评估	102
5.5	受预算约束的规划编制：边际效益成本分析	103
5.6	资产管理及帕累托分析	111
5.7	总结	113
	参考文献	114
6	设备的检查、测试和诊断	115
6.1	概述	115
6.2	检查、测试和诊断	115
6.3	设备的测试和诊断方法	120
6.4	绝缘油的测试和诊断	125
6.5	在线与实时监测及试验	130
6.6	总结	132
	参考文献	132
7	老化设备及其影响	133
7.1	概述	133
7.2	设备老化	133
7.3	设备失效率随“年龄”增加	141
7.4	失效率上升的影响	144
7.5	总结	147
	参考文献	148
8	过时的系统结构	149
8.1	概述	149
8.2	系统布置陈旧	149
8.3	对高压配电系统和变电站运行特性的影响	153
8.4	对馈线系统的影响	157
8.5	改进过时的系统结构	164
8.6	总结	165
	参考文献	166
9	传统可靠性设计方法及其局限	167
9.1	概述	167

9.2	基于预想事故的规划方法	168
9.3	$N-1$ 方法的局限性	171
9.4	系统规划需关注的其他方面	179
9.5	总结与结论	184
	参考文献	186
10	中压配电系统规划和设计的关联性	187
10.1	概述	187
10.2	配电系统规划与配电系统功能	187
10.3	馈线层规划的灵活性和有效性	193
10.4	智能配电系统	200
10.5	总结	202
	参考文献	203
11	设备状态评估	204
11.1	概述	204
11.2	状态	204
11.3	分析、建模和预测	208
11.4	电力变压器	212
11.5	开关设备和断路器	216
11.6	地下设备和电缆	217
11.7	架空线路及设备	220
11.8	供电变压器和供电线路	224
11.9	设备状态评估和排序	224
11.10	状态跟踪	230
11.11	总结与评议	231
	参考文献	232
12	优化	233
12.1	概述	233
12.2	检查、维修和维护的优化	234
12.3	以可靠性为中心的维护	236
12.4	以可靠性为中心的优化	238
12.5	维护方案的优先排序	248
12.6	实际应用方面	255
12.7	将以可靠性为中心的排序方法应用于其他操作项目	260
12.8	优化	264
12.9	总结与建议	265
	参考文献	267
13	老化输配电系统的规划方法	268
13.1	概述	268
13.2	规划: 寻找最佳方案	269
13.3	短期规划和长期规划	275
13.4	输配电规划过程	280

13.5	系统规划法	291
13.6	老化输配电设施规划总结	293
	参考文献	294
14	老化系统的可靠性规划	295
14.1	概述	295
14.2	可靠性工程设计	296
14.3	配电系统可靠性评估方法	299
14.4	用于可靠性详细评估的解析仿真法的应用	301
14.5	混合解析仿真法的应用	305
14.6	总结和要点	309
	参考文献	310
15	输配电设备管理策略	312
15.1	概述	312
15.2	四种管理策略	313
15.3	四种设备管理策略的比较	327
15.4	组织文化	329
15.5	六家公司的六种不同管理策略	333
15.6	总结和结论	346
16	木头电线杆管理案例研究	348
16.1	概述	348
16.2	不祥的开始	348
16.3	方法概述	351
16.4	数据溯源	352
16.5	构建电线杆运行的历史模型	356
16.6	构建预测模型	365
16.7	模型对未来的建议	371
16.8	预测与电线杆有关的成本和性能	375
16.9	从电线杆群中找出失效电线杆	382
16.10	更换电线杆的价值及其经济学	388
16.11	选择电线杆更换项目	395
16.12	城市照明与电力公司处理老化配电系统木杆的计划	401
17	准则及建议	408
17.1	概述	408
17.2	五个相关因素	408
17.3	结果导向管理	410
17.4	减轻基础设施老化影响的措施	411
17.5	老化基础设施管理程序	417
	参考文献	423
附录 A	基于电子表格的老化趋势模型	425
A.1	概述	425
A.2	概念：“年龄”分布的递增	426

A.3	更实用的多工作表结构模型	429
A.4	模型的拟合和校准	431
A.5	利用实际数据求解	435
A.6	应用实例评价	438
	参考文献	439
附录 B	可持续点分析	440
B.1	概述	440
B.2	老化基础设施分析元素	441
B.3	定量分析的例子	443
B.4	测量老化基础设施指标	453
B.5	不同失效率曲线形状的影响	458
B.6	年龄分布分析	460
B.7	应用经济性分析	464
B.8	总结要点	466
	参考文献	468

老化的供电基础设施

1.1 概 述

本章介绍供电基础设施的老化，基础设施老化的特征，基础设施老化带来的问题、挑战以及电力行业用于应对这些挑战的方法和流程。本章共分九个部分，从更高、更广的视角论述了老化供电基础设施的各个方面。本书其余章节对这些内容进行了补充和细化。本章和第 17 章综合起来构成项目执行摘要。

美国的电力系统正在老化。美国许多城镇的电力系统中，绝大部分在运设备和设施是在二战后的经济繁荣时期或 20 世纪五六十年代可持续增长期投入运行的，至今已运行了 50~70 年。

所有设备最终会劣化并且失效率显著增加，这是存在于老化电力基础设施中的第一个基本事实。虽然电力设备非常耐用，但随着时间的流逝，所有设备都会损坏。大部分供电企业电力基础设施存在的第二个基本事实是：如果不给予充分关注，大部分老旧设备正在接近不能可靠供电的年限。

一部分在 50~60 年前安装的设备已在投运以来的几十年间损坏了。暴风雨、洪水和其他自然灾害对这些设备造成了极大的危害。如电线杆被车撞坏或地下电缆被施工队挖破等外力破坏事故时有发生。有时并没有明显的原因，设备却损坏了。无论如何，所有损坏的设备都需要更换。因此，即使在系统最古老的区域，也是新旧设备在混合使用。

系统以老旧设备为主。甚至在二战后建成的系统中，在系统运行的几十年间很少有超过 25% 的设备被更换。尽管已经运行了 50 多年，系统中超过 70%（常常是超过 85%）的设备仍为原装设备。这就给供电企业带来了一个实际的问题，有些设备是新的，而大部分设备尽管已经运行了数十年，仍能够良好运行十年甚至更长时间，但其中有一小部分设备已经严重劣化，尽管还没有达到能够看到发生失效的潜在迹象，但这部分设备已经不能够可靠工作。这类设备失效将影响系统的整体性能。

这个问题其实并不容易解决。只要要求供电企业持续查找并更换在未来几年内失效的设备。事实上，这是很不容易的。首先，失效设备的“坏”的水平非常低。电力系统依赖输电线路、变电站、变压器、断路器、馈线线路、自动开关、分段隔离开关、熔断器、跌落式熔断器、配电变压器和下户线构成的长链路，只有所有设备正常才能够为客户可靠供电。如果在供电链路中有设备失效，则一些客户就要停电直到恢复供电。

因此，只要每年设备失效率达 0.5% 都将是灾难性的。这意味由此产生的停电率是客户、监管机构 and 股东完全不能接受的，并且现场抢修工作量超过了供电企业现场工作人员完成抢修工作的能力。正常情况下，设备处于良好状态下的年失效率不到 2‰。因此，寻找未来电力系统中

的“坏设备”是一大挑战，如同大海捞针一般。如果一家有 8000 座钢结构输电塔的供电企业每年有超过 4 座输电塔出现严重问题，那么这对供电公司来讲是非常糟糕的一年。

发现有缺陷的设备并不容易。在许多情况下，严重劣化的设备不会出现明显的不可靠的迹象。通过设备测试可以完善供电企业对设备状态的认识，但这需要大量熟练技术人员和昂贵的专用设备，而熟练技术人员经常短缺。并且许多测试需要深入到用户的供电系统中：供电企业技术人员需要进入到用户的场所，在工厂的供电设备上搭建测试环境进行测试。在城市中心区，技术人员在街道沟道中的设备室工作时需要隔离主街道的通道。

测试结果并不完全可靠。测试准确度达到 95% 听起来好像是一个很好的测试结果，它可能是目前最好的测试结果，但如果不是有条件的应用，测试结果就可能产生问题。假定一家供电企业系统中共有 10000 根老旧电线杆，其中有 500 根^①是真正劣化到有可能在未来 10 年内失效的电线杆。如果测试准确度为 95%，则可以找出其中 475 根电线杆，将其余 25 根“坏的”电线杆继续留在系统中。这本身是一个问题，但主要不是担心这个测试。真正令人担忧的是，如果假阳性率也为 5%，那么测试结果会认为 9500 根状态良好电线杆中的 475 根是“坏的”，因此将共有 950 根电线杆被更换。如果供电企业遵循这些测试结果，则更换的电线杆数将是实际需要更换数的两倍——因而更换电线杆成本也将是实际需要成本的两倍。这个测试结果可能是现有条件下的最优测试结果，但这并不能让所有利益相关方满意。

更换在运设备的成本非常高。当然，有一大块成本与设备首次安装有关——通常被称为“现场”工作。购买 1 根电线杆、1 台变压器或 1 段电缆都需要资金，并且从设计到建设等各个方面都需要熟练的劳动力。但多年以后更换设备的成本还要大得多。首先，在安装新设备前必须拆除并回收旧设备等。然后将新设备安装到位，并重新与系统的其他部分相连。其次，通常要求在系统的其余部分在运行的条件下完成这些工作，即要求系统其余部分带电以确保不会停止对客户供电。这意味着供电企业工作人员必须在现场电气设备带电环境中开展工作。要在这样的环境中安全工作，工作的速度就慢多了，而且成本比首次在停电环境下完成同类工作的成本高多了。按照经验粗略估算，更换设备成本比首次安装成本贵 2~3 倍。

因此，即使只更换老化系统的一小部分对供电企业来说也是巨大的财务负担。回到上文讨论的 10000 根老旧电线杆的问题，按照测试结果，为了确保未来 10 年内木头电线杆失效率仅略高于全新木头电线杆失效率，供电企业每年必须更换近 1000 根电线杆。这听起来好像很划算。但是，更换一根电线杆的成本为最初安装一根新电线杆成本的 3 倍，另外，即使测试结果的准确度达到 95%，为了减少一根电线杆失效必须多更换 2 根电线杆。这些测试本身也需要一定的成本，如供电企业为了确保一年 8760h 不间断供电所进行的主动更换管理及对测试结果的修正等。总之，为了确保在未来 10 年内电线杆失效数及其影响可控，供电企业大约需要为这 10000 根电线杆花费整条线路建设成本的 5%（已考虑通货膨胀等因素等）：或每年电线杆失效率约为 0.5%。

随着客户数和销售电量的增加，供电企业每年要将其总成本支出的 0.5% 用于系统扩展增加 1% 的新设备。传统上，供电企业每年从客户收取的电费、每年支出的总费用、现场人员类型及其数量、拥有的材料和设备等基础设施，以及管理带宽等都要适应这一水平资本支出及电力建设。这些额外的主动处理老化设备工作在传统的新增设备的成本之上又增加了 0.5% 的成本。那些只有个位数利润率的公司很难雇佣到熟练的现场工作人员和管理人员，这似乎是一个无法承受的挑战。

然而，随着系统持续老化，不可否认的事实是在可预见的未来维修、恢复和更换失效设备等

① 占全部老旧电线杆的 5%，原文误为 0.5 个百分点。——译者注

的运行维护成本已经并将持续增加，如果供电企业能够实施老化设施管理，那么最终会减少运行维护成本。除了采用新的测试、跟踪、评估、分析、规划和管理方法以控制其基础设施的老化，供电企业别无选择。

从实际意义上讲，基础设施老化对供电行业是一个新问题。在 20 世纪最后 50 年内，北美、欧洲和全球其他地方发展和构建了非常有效地用于运营供电系统的制度化方法和流程，能够以监管机构认可的尽可能低的成本提供高可靠水平（99.98%）的供电服务。然而，那些运行了 20~40 年就开始出现问题的设施，现在已经运行 60 多年了，但仍运行良好。

由于当时基础设施老化问题还不是关注的重点，供电企业和电力行业也没有想到要解决这个问题。这个问题也不是设备制造商和为供电企业提供支撑服务的服务商关注的重点：他们只关注市场的需求。甚至就是在 20 年前，供电企业高级管理人员、最有经验的工程师和运行人员，在其前半职业生涯中，也认为这个问题没有严重到值得重点关注。这个行业目前所面临的挑战就是要改变这种情况，以便在由此造成的问题严重之前及时有效控制设施老化及其影响。

1.2 老化供电基础设施管理

大多数情况下，将 70 年前首次安装的整个系统完全更换是没有意义的，因为即使是最古老的设备，其大多数仍处于良好的状态，能够继续提供多年良好的供电服务。供电企业最好逐年找出系统中状态最差及有问题的设备，然后更换这些设备，其结果是系统虽然在逐年老化但其中设备的状态得到有效管理实现了供电可靠性与成本之间的平衡。系统的状态虽然在逐年老化，但其状态仍将是“足够好”。

除此之外，这意味着系统中仍然存在老化的基础设施。任何供电系统都将老化，直到它发展到某一个足够“老”的点，到这个“点”时，系统中已经有足够多的劣化严重的设备足以引起供电企业关注与此相关的失效、故障、可靠性及成本等问题。只要开始有效管理老化设备的状态，供电企业就会更换或翻新其状态不令人满意的设备，而仍然保留其状态令人满意的所有老旧设备。系统中将继续包含大量老旧设备，未来这些更老旧的设备状态总是要变差的。

此外，在运设备将继续老化。老化基础设施状态管理工作不会逆转老化的方向，仅能将设备状态控制到某些点（希望经济最优）。系统设备将不再是全新，但也不会是全部严重劣化。

为此，供电企业需要坚持连续的测试、跟踪，减少设备持续的劣化，并积极更换和翻新劣化的设备。这样的管理工作能够将设备状态控制在一个“最佳”水平，即一个稳定的可持续点，在此“可持续点”，在运设备继续老化、劣化设备继续被更换，供电企业以总成本最小为目标继续节俭地开展设备测试、维护和设备更换工作。

目前还没有用于培育这类供电企业需要的设备状态管理工作能力的流程和预算。这些新的流程将要融入到已经在供电企业运转数十年的传统的规划、建设、运营管理流程和职能中。状态管理将成为供电企业主要的管理业务：很有可能到 2035 年，北美很大一批供电企业（也许多达 40%）每年用于更换老化、劣化设备的成本支出会略多于由于负荷增长扩展系统需要的成本支出。

1.3 供电设备

即使是仅为几千户客户供电的电力系统也是由成千上万的设备组成的，如电线杆、管道、

变压器、断路器、电压调节器、监测和控制系统、表计、输电杆塔和导体（线路）。对许多人来说，这种无所不包的设备群就是基础设施。为了详细描述老化问题及其最优解决方案，在此还需给出对电力系统性能有较大影响的系统运行规范。例如，供电系统运行的三个规范是：

（1）载荷规范。这是供电企业为某一设备设定允许承载的电气或机械负荷的指南，这将决定设备磨损、预期承载的负荷及设备失效对供电可靠性的影响。

（2）系统运行指南。系统运行程序和优先级与失效对成本、客户服务、公共安全及供电企业业务绩效的影响有很大的关系。

（3）检查、检修和维护指南。每家供电企业都有这样一份与应用流程相配套的指南。

一些不属于这些指南，而是据此建立的制度化习惯，本身就很“老”——与现代需求相比已经严重“劣化”了。修订载负和运行指南可以减轻对老旧设备的压力从而减少设备失效的可能性。修订系统运行指南及检查、检修和维护指南有助于在引发问题之前发现劣化问题。即使不能够避免预期失效，也有办法为突发事件进行精心准备和组织，以减少客户的不便和供电企业的成本支出。如果供电企业将设备测试、设备状态跟踪及积极的翻新和更换设备作为持续的状态管理工作的组成部分，则这些工作应与传统的设备维修和设备运行工作融合，以便最有效地管理这些工作。最后，供电公司控制系统的设计及技术也属于基础设施的组成部分。不同控制方案可以减少一些老化失效对可靠性和成本的影响。将新技术改进后可以用于检测潜伏性失效，自动响应失效或进一步降低对可靠性和成本的影响。

许多情况下，对规范、运行指南、运行程序、系统结构和设计等的改进对减少可靠性问题和供电企业成本方面的作用比直接进行设备翻新和更换更为有效。更多的情况下，也许在大多数情况下，这些改进可以提高设备测试、延长设备寿命及更换设备等工作的效率和质量，因此，也属于“基础设施”至关重要的组成部分，因而应给予管理。因此，老化基础设施包括电力系统所有设备和设施以及用于设计、运行、维护、维修、恢复供电及管理资源和系统性能的所有流程、方法、指南及控制系统。

1.4 老化基础设施的特征

情况虽然各不相同，但大多数存在基础设施老化问题的区域都有以下这些共同的特征：

（1）老化设施区域依然是最初建立的状态，或者是经历过 20 世纪 70 年代之前进行的大规模电网改造。电力系统的大多数现有建筑物，如变电站、线路通道等，仍然是以前建造的。

（2）老化设施区域内的大部分设备已经运行了 40 年以上。

（3）电力系统的规划和设计良好，各项指标完全符合供电企业的最低设计标准。

（4）老化设施区域正在经历稳定但也许是缓慢的用电负荷增长，而且，可能正在或将要进行大规模的系统改造。

（5）老化设施区域的设备故障率超过了平均水平，经常需要加班加点进行大量的非计划检修和恢复供电工作。

（6）可靠性指标“系统平均停电次数”（system average interruption frequency index, SAIFI）先于指标“系统平均停电时间”（system average interruption duration index, SAIDI）劣化若干年，而且，停电次数越来越多、停电时间越来越长。典型状态是 SAIDI 大幅增加前 5~8 年 SAIFI 开始增加。

（7）重大事件的发生，如大面积停电，往往是由一系列异常事件引起的，它们会造成继电保

护装置或断路器的损坏，但这种破坏通常只会带来轻微的影响，除非它发生在没有备用支持的短暂事故切换状态。此时，为了支持系统运行，系统处于非标准配置。

(8) 各方面情况变得很糟糕。

上面第(7)条给出的这些特征应给予特别关注。与状态令人满意的系统相比，在严重劣化系统中，故障和小问题以及彻底失效发生的频率都已经增加。这本身会导致许多系统运行问题。但也意味着发生同步问题概率大幅增加：系统中任何继电器不按预期动作的可能性增加到2倍，两个继电器不能够同时动作的可能性增加到了4倍。

在严重劣化的系统中，由于存在状态劣化的设备，造成设备损坏以及客户停电的故障与设备失效事件开始更加频繁的发生，而且故障与设备失效事件组合及其方式常常出人意料，难以预测，乍一看，就好像是“一生一次”而且“永远不可能再次发生”的事件。

供电企业的主管及管理人员要认识到这种描述对具体情况是正确的，但对整体情况就未必正确：那种奇怪的组合很有可能永远也不会再发生。但其他未能预测的和奇异的事件将会同样发生，而且将会随着系统状态的不断劣化更频繁地发生。这个模式肯定是基础设施老化和严重劣化的信号。

1.5 供电系统

作者在本书中特别使用了“供电(power delivery)”而不是“输配电(transmission and distribution, T&D)”这个词，就是为了明确一点，即正确区分两者对有效解决设施老化问题至关重要，但这一点又经常被人忽视。这里讨论的供电设施涵盖了输配电系统中的大部分，但又不是全部，为了充分理解并以尽可能低的成本有效解决这个问题，必须从功能，即设备起什么作用这个角度，审视供电设施老化问题及其解决方案。

根据放松管制条件下电力系统各部分的不同功能，现代电力输配电系统可分为两个部分或是两个层级，即批发层和零售层。作为影响供电服务可靠性的设施老化问题，本章和本书的重点基本上仅限于零售层面。

但这并不是说，电力输送这个“批发”层面不重要，可以肯定地说，它同样很重要，该层面的问题会引起供电服务的中断，但最重要的是它关系到系统安全，即维持系统持续“运行”的能力。这与联邦能源监管委员会(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)和北美电力可靠性委员会(North American Electric Reliability Corporation, NERC)要求很好处理的可靠性指标略有不同。本书主要涉及符合这些要求的，由相同的测试、跟踪监测、评估分析和规划技术构成的项目和方法。不过，“批发”层面的重点问题由监管机构和区域电网公司考虑。在此不处理这些内容。

作者认为，消费者并不关心他家的灯是因为输电网不能够提供整个区域的电力需求而停电还是由于本地供电网故障而停电，消费者只关心停电的事实。而本书的内容是有关理解和解决供电基础设施老化引发的问题，消除供电基础设施老化给客户供电服务质量、地区供电企业运营带来的问题。在这种背景下，“批发”电网和“零售”电网的区别影响很大。记录表明，从整个电力行业看，绝大多数的客户供电服务质量问题是在本地的供电网产生的，这些问题也只能在本地的供电网解决。输电网的问题主要是发电容量短缺以及输电网阻塞。这些都是输电网中非常严重的问题，但与供电网中的问题完全不同，在此没有涉及。

图 1.1 显示了一个从发电厂到客户家(瓦特太太家)的典型电力系统。本周瓦特太太家用于取暖的电力可能来自批发电网中任意几家发电厂而且不一定总是来自相同的几家发电厂。但这些