



ciscopress.com



TCP/IP路由技术

(第1卷) (第2版) 英文版

Routing TCP/IP

Volume I
Second Edition

[美] **Jeff Doyle, CCIE #1919**
Jennifer Carroll, CCIE #1402 著

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



ciscopress.com

TCP/IP路由技术

(第1卷) (第2版) 英文版

Routing TCP/IP

Volume I
Second Edition

[美] **Jeff Doyle, CCIE #1919** 著
Jennifer Carroll, CCIE #1402

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

TCP/IP路由技术 : 第2版. 第1卷 : 英文 / (美) 杰夫·多伊尔 (Jeff Doyle), (美) 珍妮弗·卡罗尔 (Jennifer Carroll) 著. -- 2版. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2017.5

ISBN 978-7-115-44402-8

I. ①T… II. ①杰… ②珍… III. ①计算机网络—通信协议—路由选择—英文 IV. ①TN915.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第321472号

版权声明

Authorized reprint from the English language edition, entitled ROUTING TCP/IP, VOLUME 1, 2nd Edition, ISBN: 1587052024 by DOYLE, JEFF; CARROLL, JENNIFER DEHAVEN, published by Pearson Education, Inc, Copyright © 2006 Cisco Systems, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

ENGLISH language edition published by POSTS AND TELECOMMUNICATIONS PRESS, Copyright © 2017.

本书英文版由美国 Pearson Education 授权人民邮电出版社出版。未经出版者书面许可,对本书任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,侵权必究。

-
- ◆ 著 [美] Jeff Doyle Jennifer Carroll
责任编辑 傅道坤
责任印制 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京天宇星印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 800×1000 1/16
印张: 58.75
字数: 1944 千字 2017 年 5 月第 2 版
印数: 3 001 - 5 000 册 2017 年 5 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2015-6627 号

定价: 148.00 元

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广字第 8052 号

内容提要

本书是第一本详细而又完整地介绍互连网络内部路由选择协议（IGP 协议）的专业书籍，堪称有关 IGP 协议方面不可多得的经典之作。本书共分三个部分。第一部分主要介绍了网络和路由选择的基本知识，其中包括 IPv4 协议、IPv6 协议和路由选择技术。第二部分是本书的精华，这一部分详细、深入地讲述了各种常用的内部路由选择协议，如 RIP、RIPv2、RIPng、无类别路由选择、EIGRP、OSPFv2、OSPFv3、ISIS 等协议，每一章除了对该协议的实现机制和参数详尽阐述，使读者对协议的实现原理有清晰的理解外，还通过在实际网络环境中的实例，详细地论述了该协议在 Cisco 路由器上的配置和故障处理方法，使读者获取大量解决实际问题的专业技能。第三部分介绍了路由重新分配、缺省路由/按需路由选择、路由过滤、路由映射等多种重要而有效的路由控制工具，用来创建和管理多个 IP 路由选择协议的协调和互操作。附录部分讲述了二进制转换、十六进制转换、访问列表、CCIE 提示等内容。

相对于第 1 版，本书内容有以下更新：在第 1 版详细讲述 IPv4 协议中 IGP 协议的基础上，大量增加了相应协议在 IPv6 协议中的实现和配置，用单独一章来讲述 IPv6 中应用的 OSPFv3 协议，这是本书新版最大的精华所在，也是最新讲解在 IPv6 协议环境下应用 IGP 协议的最为全面的教材；同时本书根据因特网和思科路由器 IOS 系统的最新发展，适当地删减了如网桥、IGRP 等过时的内容，并增加了许多新的 IOS 增强特性的讲解。

本书的读者不仅包括准备 CCIE 考试的考生，也包括任何需要完整理解 IPv4，特别是 IPv6 下 TCP/IP 内部路由协议实现的网络设计和工程人员。本书中对协议细节的讲解和对网络实例的探讨相信会让读者受益匪浅。

关于作者

主要内容

Jeff Doyle (CCIE #1919) 是专注于研究 IP 路由选择协议、MPLS 和 IPv6 的专家。他设计或协助设计了遍及北美、欧洲、中国、韩国以及日本等很多地区的大型 IP 服务提供商的网络。Jeff 经常在为数众多的研究团体和会议上出现，并在 NANOG、JANOG、APRICOT 以及 IPv6 论坛会议上发言。Jeff 拥有孟菲斯州立大学的学士学位，并在新墨西哥大学的电气工程专业学习过。Jeff 目前生活在科罗拉多州的丹佛市。

Jennifer Carroll (CCIE #1402) 是华盛顿州雷蒙德地区的独立网络顾问专家。在过去的 15 年中，她设计、实施和优化了许多 TCP/IP 网络，并开发和讲授了多种有关路由选择协议和 Cisco 公司路由器方面的网络组网和网间互连课程。读者可以通过电子邮件 jennifer.carroll@iccc.org 与 Jennifer 联系。

关于技术审稿人

Frank Knox 是 Skyline Computer 公司的 CTO，已经供职 6 年多。他有两个 CCIE 资格证书（CCIE #3698: SNA/IP 和路由选择/交换），同时也是一位 CCSI 讲师。除了其 CTO 职责外，Frank 教授过几门与 Cisco 有关的高级课程，其中包括为期一周的 CCIE 实验室备考专题培训等。他在大型主机与路由器连接方面是技术权威，也是网络集成领域的技术专家（例如，SNA/IP 和语音/数据）。他在 IBM 公司、GTE（Verizon）Directories 公司以及 Skyline Computer 公司积累了超过 37 年的网络组网经验。这些经验包括现场服务、现场技术支持、产品规划、管理以及网络互连教育的各个方面。另外，Frank 还为达拉斯大学电信 MBA 项目开发和讲授了一些课程。他在佩斯大学获得了电信方面的硕士学位（GPA 为 4.0）。

Steven Edward Moore 在 Cisco 公司工作的 6 年半的时间里，作为一名工程师担任了不同的角色，目前转到了 IP 路由选择协议扩展团队（IP Routing Protocol Scalability Team）。在这个团队，他主要是围绕对网络与协议的可扩展性进行扩展的各个方面进行工作：考虑协议架构的新特性和优化，设计对当前协议的可扩展性的测试和评估，帮助客户一起实现对客户网络的功能扩展，以及参加像 Networkers 会议这样的活动，来指导其他人怎样从路由选择的角度来增强他们的网络性能和可扩展性。

Rena Yang 是 Cisco 公司的一位软件工程师。她具有 6 年多的 Cisco IOS 软件编码经验。她目前从事 IS-IS 协议方面的工作。在这之前，她主要从事 IPv4、UDP、访问列表、策略路由和路由选择基础架构方面的工作。Rena 在 MIT 获得了理学学士和计算机科学与工程硕士学位。

献辞

我愿将本书献给我的妻子 Sara 和我的孩子们：Anna、Carol、James 和 Katherine。

——Jeff

我愿将本书献给我的丈夫 Mike 和我的儿子：Mitchell 和 Jonathan。他们的耐心和支持帮助我得以完成本书。

——Jennifer

致谢

感谢 Brett Bartow、Chris Cleveland、Andrew Cupp、San Dee Phillips，以及 Cisco Press 的所有工作人员，是他们的工作与努力使本书得以完成。

我们需要感谢本书的技术审稿人 Steven Moore、Rena Yang 和 Frank Knox，感谢他们认真细致的审校工作以及对本书提出的非常重要的忠告和建议。

我们还要感谢 Frank Knox、Carl Pike、Chris Tonini 和 Skylabs 网络的其他工作人员。Skylabs 为我们提供了设备安装和访问方便的实验室，使我们可以完成本书中所有配置和案例研究的工作。

本书使用的图标

					
通信服务器	PC	装有软件的PC	Sun 工作站	Macintosh	分支机构
					
总部	终端	文件 服务器	Web 服务器	Cisco Works 工作站	普通住宅
					
打印机	笔记本电脑	IBM 大型机	标签交换 路由器	集群控制器	
					
网关	路由器	网桥	集线器	ATM 路由器	Cisco MDS 9500
					
Catalyst 交换机	多层交换机	ATM 交换机	路由/交换 处理器	LAN到LAN 交换机	
					
Cisco MDS 9500	光服务 路由器	企业光纤 通道磁盘	光纤通道 JBOD	ONS 15540	
					
网络云	以太网线路	串行线路	交换式串行线路		

命令语法约定

本手册的用途

本书在介绍命令语法时使用的约定与《IOS 命令参考手册》相同，这些约定如下：

- **粗体字**表示实际需要键入的命令和关键字，在实际的配置示例和输出信息（不是一般的命令语法）中，粗体字表示用户手工输入的命令（例如 **show** 命令）；
- *斜体字*表示需要用实际数值替换的参数；
- 竖线 (|) 表示在几个选项中选择一项，并且这些项是互相排斥的；
- 方括号 [] 表示可选的参数；
- 大括号 {} 表示一个必需的选项；
- 方括号内嵌大括号 [{}] 表示在一个可选项中的必选项。

序

1976年，当我在数字设备公司（DEC）第一次看到 Arpanet IMP 的时候，今天我们熟知的网络当时还处于发展初期。SNA、XNS 和 DECnet 等网络处于早期发展阶段，当时有关分组交换和电路交换的讨论还是热点话题。我们这些从事交换和路由选择算法设计的人处理的是具有 64KB 内存的路由器（虽然我们那时不这样称呼它们），56kbit/s 的数据链路被认为是非常快的，具有 256 个节点的网络就已经足够大了。假如你是卖出了那 256 台计算机的销售人员，你将会拥有可观的财富并可以退休了。

30 年是很长的一段时间，如今，组成 Internet 的单个网络就包含了数以千计或数以万计的节点，整个 Internet 包含了数以亿计的计算机。在我们这一代的网络发展过程中，最显著的一点是基于 TCP/IP 协议簇的 Internet 基础并没有大的变化；虽然在这期间，计算机体系结构经历了四代或更多代，操作系统技术经历了整整 3 代，而传输速度也提高了 5 个数量级。

但是，我们仍然把分组交换网络中的路由选择看作一种“魔法”，为什么呢？

首先，设计强壮的、可扩展的分布式算法是困难的。虽然我们非常希望网络尽可能得简单，但是不可避免地要遇到一些特别的实际案例、网络优化、特殊的拓扑结构，以及链路技术等各种情况，因此网络的复杂性也在一点一点增加。由于整个网络铲车式升级（fork lift upgrade）是几乎不可行的，因此，目前同时存在多种技术版本，我们必须维护一个向后兼容的、无缝连接的网络来提供网络服务。当控制数据包路由选择的策略变得越来越复杂的时候，我们设计的用来自动发现和配置网络的能力就会受到限制，我们又不得不退回到依赖于手工配置和调整性能的技术。最后，当这些网络运行的环境已经从相互之间默认为信任关系的环境发展为会受到内外部攻击的环境时，设计和部署更加安全可靠的路由选择系统就变成一种迫切需要解决的优先问题。

本书完全解开了这个“魔法”之谜。本书涵盖了 TCP/IP 网络所有必不可少的基础知识，并给出了理解在 Internet 的某个单一管理区域内如何完成路由选择所需要的所有工具。首先，在开始的有关地址和静态路由的章节中介绍了分组交换网络中路由技术的基本概念，然后深入地讨论了目前最流行的 IGP——RIP、EIGRP、OSPF 以及 IS-IS 协议。最后讲述了路由重新分配、路由过滤和策略路由选择等方面的高级课题。

本书也增加了有关 IPv6 方面的基本内容，并针对最新的 Cisco IOS 软件提供了全新的示例和配置。

对于希望全面了解路由选择在 TCP/IP 网络中是如何工作的读者来说，本书很有帮助：从路由选择算法的设计原则、地址规划的发展到设计和配置大型自治系统网络路由选择的实践等。

David Oran
Cisco Fellow

前言

路由技术即使在最小的数据通信网络中也是基本的要素。在某种程度上，路由技术和路由器的配置是相当简单的。但是，当网络的规模越来越大，并且越来越复杂的时候，路由选择问题就变得比较突出和难以控制了。或许，有点不恰当地说，作为一名网络系统顾问，我应该感谢当前出现的大规模路由技术难题，这些问题给了我谋生的手段。假设没有它们，“你何以为生？”这句习语可能就会不幸地成为我每天生活词汇的一部分了。

Cisco 认证互联网专家（CCIE）在大型网络的设计、故障排除和管理能力方面得到广泛的认同。这种广泛的认同来自于这样一个事实：一名网络工作人员仅仅依赖参加一些课程的培训，并反复依赖记忆一些书面测试的内容是不可能成为一名 CCIE 的。一名 CCIE 必须通过一个众所周知、难度非常大的并且需要亲自动手操作的实验室考试，他或者她的专业技能才能得到提高。

本书的目标

本书是专门讨论 TCP/IP 路由问题的两卷书中的第一本。在早期撰写本书的第 1 版时，Cisco 公司的前 CCIE 项目经理 Kim Lew 说过：“我们的目标是使人们成为 CCIE，而不是使人们通过 CCIE 实验室考试。”作者完全赞同这种观点，并且把它作为一种指导原则贯穿到本书的写作当中。虽然本书包括了很多案例研究和练习可以帮助读者准备 CCIE 实验室考试，但是作者的主要目的还是提高读者对 IP 路由技术的理解——能有一个普通的水平并能够在 Cisco 的路由器上进行实现。

读者对象

本书的读者可以是需要完整理解 TCP/IP 内部路由选择协议的任何网络设计人员、管理人员或者工程人员。虽然本书的具体实践方面针对 Cisco IOS，但是本书的内容也可以应用于任何路由选择平台。

本书不仅仅是写给那些计划成为 CCIE 的读者阅读的，也是写给任何希望提高自己的 TCP/IP 路由技能的读者的。这些读者可以划分为以下三类：

- “初学者”——具有基本的网络知识，并且希望开始深入学习网络互连的读者；

- 中级水平的网络专业人员——具有一定的路由器（Cisco 或其他厂商的产品）操作经验，并且计划提高自己的技能达到专家水平的读者；
- 经验丰富的网络专家——这些读者具有丰富和广泛的 Cisco 路由器的实践经验和专业技能，并且准备参加 CCIE 实验室考试。但是，这类读者需要自己制定一个复习表和一系列检验与确认自己技能的练习。

本书主要面向具有中级水平的网络专业人员。同时，对于初学者，本书提供了网络基本知识的概要。对于网络方面的专家而言，本书也提供了一些磨炼他们的专业技能所需要的挑战性内容。

对第 1 版所做的改动

第 2 版所进行的改动受到几个因素的影响。第一个因素是 CCIE 本身。当作者撰写本书的第 1 版的时候，CCIE——现在称为路由选择与交换方向的 CCIE——还是 Cisco 公司提供的唯一的认证考试。目前，已经形成了将 CCIE 作为塔尖的认证途径的一系列认证。此外，标准的网络互连专业人员也要比 1997 年具备更多的知识。考虑到这一点，我们删除了原书的第 1 章，其中包括网桥、路由器和网络地址的最基本的概念（读者在网络中看到网桥设备的最后时间是什么时候？）。

影响本书第 2 版所做变化的第二个因素是 Cisco 公司 IOS 软件的变化。在撰写本书第 1 版的时候，IGRP 协议还经常使用，而现在它已经是一个过时的协议，存在的主要意义就是作为 EIGRP 协议的前身。因此，在第 2 版中删除了有关 IGRP 协议的章节，并在讲述 EIGRP 协议的章节中将 IGRP 协议作为历史回顾的一部分来讲述。IOS 软件的命令集本身也进行了扩展，以便适应新的功能和选项；我们也增加了在 20 世纪 90 年代后期还不存在的协议扩展和命令。

最后，IPv6 协议在 1997 年还主要是建议草案，现在却已经处于全球部署的早期阶段了。读者需要了解有关这个协议更为细节的知识，以及在不远的将来支持 IPv6 的 IP 路由选择协议扩展方面所需要的知识；如果读者还没有准备好，那么本书深入地探讨了 IPv6 的路由选择技术。

这个版本的其他一些变化是语法和语义方面的。例如，在第 1 版中，作者对作为数据链路的“网络”和作为由路由器连接的网络集的“互连网络”进行了区分。虽然这些术语的确很精确，但也有些呆板，现在已经很少使用“互连网络”这样的术语了。相反，“网络”经常用来表示从本地链路到像 Level 3、NTT 和 Sprint 这样的全球自主系统的网络。我们尝试在这个新的版本中带给读者比较现代和通用的术语描述。

本书的内容组织

本书共有 14 章，分为 3 个部分。

第一部分“路由选择的基本知识”介绍了 IPv4 协议和 IPv6 协议的基本知识，以及路由技术的基本概念。虽然一些水平较高的读者可能希望跳过第 1 章，但是我建议这些读者至少应该浏览一下第 3 章“静态路由”和第 4 章“动态路由选择协议”的内容。当然，如果读者还不熟悉 IPv6 协议的话，也必须阅读第 2 章“IPv6 介绍”。

第二部分“内部路由选择协议”包括了 IP 路由选择的各种内部网关协议。针对具体协议的每一章都是从该协议的基本原理、实现机制以及参数讲解开始的，并在读者对该协议有了一个总体的了解后，接着通过多个不同的网络拓扑环境中的案例研究，详细地讲述了该协议在 Cisco 路由器上的配置和故障诊断方法。

外部网关协议、BGP 协议，还有组播路由选择、服务质量保证、路由器的安全与管理以及网络地址转换等一些主题，将在本书第 2 卷中介绍。

第三部分“路由控制和互操作性”介绍了多种有效的工具，用来创建和管理多个 IP 路由选择协议的互操作性，例如缺省路由、路由过滤等。同样，最后部分的这些章节对创建复杂的路由选择策略所需的必要工具做了一个初步介绍，这些策略将会在本书第 2 卷中详细介绍。这些章节和第二部分的章节一样，也是先从概念开始讲解，并以案例研究作为结束。

本书的风格

大多数章节在结束时都配有一组复习题、配置练习和故障诊断练习。复习题主要侧重于每章主题的基本理论方面，而配置和故障诊断练习主要侧重于每章主题在 Cisco 设备上的实际实现。

在每章末尾还列出了一张命令总结表，简要介绍了在这一章中使用到的 Cisco IOS 中的所有重要命令。这些命令使用的惯例和 Cisco IOS 命令参考中使用的惯例是一样的。

目录

Part I Routing Basics	3
第一部分 路由选择的基本知识	
Chapter 1 TCP/IP Review	5
第1章 TCP/IP 回顾	
TCP/IP Protocol Layers / TCP/IP 协议层	5
IP Packet Header / IP 包头	7
IPv4 Address / IPv4 地址	16
First Octet Rule / 首个八位组字节规则	8
Address Masks / 地址掩码	20
Subnets and Subnet Masks / 子网和子网掩码	22
Designing Subnets / 子网规划	24
Breaking the Octet Boundary / 打破八位组界线	25
Troubleshooting a Subnet Mask / 子网掩码的故障诊断	29
Address Resolution Protocol (ARP) / 地址解析协议 (ARP)	30
Proxy ARP / 代理 ARP	35
Gratuitous ARP / 无故 ARP	36
Reverse ARP / 反向 ARP	36
Internet Control Message Protocol / ICMP	37
Host-to-Host Layer / 主机到主机层	41
TCP / TCP	41
UDP / UDP	41
Looking Ahead / 展望	45
Summary Table / 总结表: 第1章命令总结	45
Recommended Reading / 推荐读物	46
Review Questions / 复习题	46

Configuration Exercises / 配置练习	47
Troubleshooting Exercises / 故障诊断练习	47
Chapter 2 IPv6 Overview	49
第2章 IPv6 概述	
IPv6 Address / IPv6 地址	50
Address Representation / 地址表示法	50
IPv6 Address Types / IPv6 的地址类型	52
Global Unicast Address / 全局单播地址	53
Identifying IPv6 Address Types / 识别 IPv6 地址类型	54
Local Unicast Addresses / 本地单播地址	55
Anycast Addresses / 任播地址	55
Multicast Addresses / 组播地址	56
Embedded IPv4 Addresses / 嵌入式 IPv4 地址	58
IPv6 Packet Header Format / IPv6 包头格式	58
Extension Headers / IPv6 扩展报头	60
ICMPv6 / ICMPv6	63
Neighbor Discovery Protocol / 邻居发现协议 (NDP)	64
NDP Messages / NDP 消息	65
Router Discovery / 路由器发现 (Router Discovery)	70
Address Autoconfiguration / 地址自动配置	71
Duplicate Address Detection / 地址冲突检测	73
Neighbor Address Resolution / 邻居地址解析	74
Privacy Addresses / 私有地址	75
Neighbor Unreachability Detection / 邻居不可到达性的检测	76
Looking Ahead / 展望	77
Review Questions / 复习题	77
Chapter 3 Static Routing	81
第3章 静态路由	
Routing Table / 路由表	81

Configuring Static Routes / 配置静态路由	84
Case Study: Simple IPv4 Static Routes / 案例研究: 简单 IPv4 静态路由	85
Case Study: Simple IPv6 Static Routes / 案例研究: 简单 IPv6 静态路由	90
Case Study: Summary Routes / 案例研究: 汇总路由	94
Case Study: Alternative Routes / 案例研究: 选择路由	96
Case Study: Floating Static Routes / 案例研究: 浮动静态路由	97
Case Study: IPv6 Floating Static Routes / 案例研究: IPv6 浮动静态路由	100
Case Study: Load Sharing / 案例研究: 均分负载	102
Load Sharing and Cisco Express Forwarding / 均分负载和 Cisco 快速转发	103
Per Destination Load Sharing and Fast Switching / 每目的地均分负载和快速交换	105
Per Packet Load Sharing and Process Switching / 每数据包均分负载和进程交换	105
Which Switching Method Will Be Used? / 应该使用哪种交换方法?	106
Case Study: Recursive Table Lookups / 案例研究: 递归表查询	107
Troubleshooting Static Routes / 静态路由故障诊断	109
Case Study: Tracing a Failed Route / 案例研究: 追踪故障路由	109
Case Study: A Protocol Conflict / 案例研究: 协议冲突	112
Case Study: A Replaced Router / 案例研究: 被取代的路由器	116
Case Study: Tracing An IPv6 Failed Route / 案例研究: 追踪 IPv6 故障路由	120
Looking Ahead / 展望	122
Summary Table: Chapter 3 Command Review / 总结表: 第 3 章命令总结	123
Review Questions / 复习题	124
Configuration Exercise / 配置练习	124
Troubleshooting Exercises / 故障诊断练习	124
Chapter 4 Dynamic Routing Protocols	131
第 4 章 动态路由选择协议	
Routing Protocol Basics / 路由选择协议基础	131
Path Determination / 路径决策	132

Metrics / 度量	133
Hop Count / 跳数	134
Bandwidth / 带宽	134
Load / 负载	135
Delay / 时延	135
Reliability / 可靠性	135
Cost / 代价	135
Convergence / 收敛	135
Loading Balancing / 负载均衡	137
Distance Vector Routing Protocols / 距离矢量路由选择协议	136
Common Characteristics / 通用属性	138
Periodic Updates / 定期更新	138
Neighbors / 邻居	138
Broadcast Updates / 广播更新	138
Full Routing Table Updates / 全路由选择表更新	138
Routing by Rumor / 依照传闻进行路由选择	139
Route Invalidation Timers / 路由失效计时器	140
Split Horizon / 水平分隔	141
Counting to Infinity / 计数到无穷大	143
Triggered Updates / 触发更新	144
Holddown Timers / 抑制计时器	144
Asynchronous Updates / 异步更新	145
Link State Routing Protocols / 链路状态路由选择协议	146
Neighbors / 邻居	147
Link State Flooding / 链路状态泛洪扩散	147
Sequence Numbers / 序列号	148
Aging / 老化	153
Link State Database / 链路状态数据库	154
SPF Algorithm / SPF 算法	156
Areas / 区域	160