



CCIE 职业发展系列
CCIE Professional Development

ciscopress.com

CCIE



TCP/IP 路由技术

(第一卷)

Routing TCP/IP

Volume I

A detailed examination of interior routing protocols

[美] Jeff Doyle, CCIE #1919 著
葛建立 吴剑章 译

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

内容提要

本书是第一本详细而又完整地介绍互联网络内部网关路由选择协议（IGRP）的专业书籍，堪称有关 IGRP 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，对 TCP/IP 和静态、动态路由选择技术作了一个整体的回顾。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网关路由选择协议，如静态路由、RIP、RIPv2、IGRP、EIGRP、OSPF、ISIS 等，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一个清晰的理解外，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。第三部分介绍了如缺省路由、路由过滤等多种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工作。

本书不仅适合那些需要准备通过 CCIE 考试的考生，而且也适合任何需要完整理解 TCP/IP 内部路由选择协议的网络设计和工程人员阅读。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获益匪浅。

中文版序

自从《TCP/IP 路由技术》第一卷和第二卷出版以来，我有了很多机会可以来到中国。这些书在其他国家都没有像在中国这样受到大家的热情关注。因此，我很高兴人民邮电出版社能够在中国出版本书第一卷的中文版本。

在中国，Internet 基础设施正在迅猛发展与普及，而且也提供了诸如移动 IP 和在线游戏之类的服务。在未来的几年，我预计中国将成为 IPv6 商业化部署的世界领导者。在 PC 机的拥有量上，中国已经超过了日本，并且在不远的将来，中国会拥有世界上最大的移动网络。所有这些巨大的发展都意味着在将来的 10 年里，中国对 IP 网络专家的需求量将会有很大的增长。Cisco 认证互联网络专家（CCIE）计划可以为企业管理者提供一个渠道，以便识别出最优秀的互联网络工程师；同时，它也为专业技能的证明提供了确实的依据。因此，CCIE 计划在中国互联网络产业的发展中将扮演日益重要的角色。我非常期待读者在获取令人羡慕的认证准备过程中，能从本书获益。

最诚挚的问候

Jeff Doyle



原书序

在当今的网络互联领域，担当关键业务的网络正在被设计用来为数据、语音和视频等业务提供服务。由于通信流量的模式和每种业务信息所要求的服务质量（Qos）各不相同，因此拥有丰富可靠的实践经验，对这些网络的管理、设计和故障诊断是很有必要的。

获取熟练的实践经验可以转化成对现代网络的原理、扩展性能和部署问题的深入理解。一些经验也可以形成分析流量模式的专门技术和何时、何处以及怎样应用协议和带宽的特性去增强性能。

为了进一步提高你的实践经验，Cisco Press 正在出版一系列关于 CCIE 专业开发的书籍。这个系列的书籍将有效地帮助你理解网络协议的概念，而且书内提供了大量现实生活中的实例和案例研究用来加强对理论概念的检验。我力荐读者把这些书作为手头的学习工具，并在 Cisco 公司的产品上实现书中的实例和案例研究。你甚至可以进一步修改一些配置参数，使用 Cisco 产品提供的强大的调试工具来观察网络发生了哪些变化。

本书是“CCIE 职业发展”系列图书的第一本书，在本书中，Jeff Doyle 出色地完成了从 IP 地址分类到协议度量分析等 TCP/IP 原理的讲解。每一章都包含实例、标注 IP 地址的网络拓扑、数据包的分析 and Cisco 调试（debug 命令）工具的输出信息。依我看来，书中最有价值的部分是案例研究，Jeff 通过增加或减少一些相似的网络拓扑来比较网络协议的不同特性，使读者对协议的概念和特性有深刻的理解。

我建议所有准备参加网络互联认证的同行能阅读本书，同时，我也相信本书将会成为一本优秀的大学网络课程教材。

CCIE 项目经理
Imran Qureshi

作者简介

Jeff Doyle 是位于科罗拉多州丹佛地区的国际网络服务 (INS) 的高级网络系统顾问。他是 Cisco 认证的互联网络专家 (CCIE#1919)，而且是 Cisco 认证的系统进师。他已经开发和讲述了多种网络和互联网络方面的课程。读者可以通过电子信箱 [Jeff Doyle@ins.com](mailto:Jeff.Doyle@ins.com) 和 Jeff 取得联系。

关于技术审稿人

Jennifer DeHaven Carroll 是 International Network Services 的首席顾问，她也是 CCIE——CCIE # 1402。Jennifer 在过去的 10 年中，利用 RIPv2、IGRP、EIGRP、OSPF 和 BGP 协议，规划、设计并实施了许多 IP 网络。她也开发和教授过所有 IP 路由选择协议的理论知识和 Cisco 的实际应用课程。

Michael Tibodeau 是 Cisco 系统公司的系统工程师，在过去的两年里，Michael 专门为他的客户和网络听众提供网络安全技术指导。他也关注于电子商务和服务质量保证（QoS）方面的研究。Michael 拥有弗吉尼亚大学系统工程专业的学士学位和系统工程与电信管理方面的硕士学位。

致 谢

如果没有许多对本书作出贡献的人们，没有他们的一致努力，本书是不可能完成的。请允许我在此对下面的各位以及他们对本书所作出的贡献表示真诚的谢意：

首先，我要感谢本书的开发编辑 Laurie McGuire，他不仅提高了本书的质量，而且也提高了我的写作水平。

感谢本书的技术编辑 Jenny DeHaven Carroll 和 Mike Tibodeau，感谢他们精心细致的编辑工作。

我也要感谢 Howard Berkowitz、Dave Katz、Burjiz Pithawala、Mikel Ravizza、Russ White 和 Man-Kit Yueng，他们给我提供了技术上的建议或审阅了本书中的一些章节。

感谢 Macmillan Technical Publishing 的 Tracy Hughes 和 Lynette Quinn，他们是本书的项目管理人员，还有执行编辑 Julie Fairweather。他们除了可以完全胜任自己的工作外，而且非常易于相处，任何人都会希望与他们一起工作。另外，要感谢助理出版人 Jim LeValley，他是第一个和我商洽写作本书的人。

当然，我还要感谢 Wandel & Golterman 公司和 Gary Archuleta 先生，Gary Archuleta 是 W&G 公司丹佛地区的销售经理，他积极安排使用他们优秀的协议分析仪提供的信息丰富了本书的内容。

最后，我想感谢我的妻子 Sara 和我的孩子们：Anna、Carol、James 和 Katherine。他们的耐心、鼓励和支持对于本书的完成是十分重要的。

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。但是当互联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 认证互联网络专家 (CCIE) 在大型互联网络的设计、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：一个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，从而使他或者她的专业技能得到提高。

本书的目标

本书是一系列设计用来帮助读者成为 Cisco 认证互联网络专家的丛书的第一本，也是专门讨论 TCP/IP 路由选择问题的两卷书中的第一本。在这个项目的早期，Cisco 公司的程序经理 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。虽然这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

本书的读者可以是任何需要完整理解 TCP/IP 内部路由选择协议的网络设计人员、管理人员或者工程人员。虽然本书的实践方面针对 Cisco IOS, 但是本书的资料也可以应用于任何路由选择平台。

这本书不仅仅是写给那些计划成为 Cisco 认证互联网络专家的读者阅读的, 而且是写给任何希望提高自己的 TCP/IP 路由选择技能的读者。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互联网络的读者;
- 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, 本书提供了一个网络基本知识的概要。而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。

本书的内容组织

本书共有 14 章, 分为 3 个部分。

第一部分回顾了网络和路由技术的基本知识。虽然一些水平较高的读者希望跳过开始的两个章节, 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。

第二部分包括了 TCP/IP 路由选择的各种内部网关协议。讲解具体协议的每一章都是从该协议的实现机制和参数开始的, 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实例, 详细地讲述了该协议在 Cisco 路由器上的配置和故障排除方法。

外部网关协议, 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 IPv6 路由选择等一些主题, 将在第二卷中介绍。

第三部分介绍了多种有效的工具, 用来创建和管理多个 IP 路由选择协议的协调工作, 例如缺省路由、路由过滤等。这些章节和第二部分的每章一样, 也是先从概念开始讲解, 并随后给出多个不同的实例。

惯例和风格

大多数章节在结束时都配有一组复习题、配置练习和故障排除练习。复习题主要侧重于每章主题的概念理论方面, 而配置和故障排除练习主要侧重于该协议在 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。命令参考中约定的这些惯例如下:

- 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[{}]表示在一个可选项里面的必需选项；
- **粗体字**表示实际需要键入的命令和关键字；
- *斜体字*表示需要用实际数值替换的参数；

在图 I-1 中，显示了本书的图示中所用到的惯例表示。

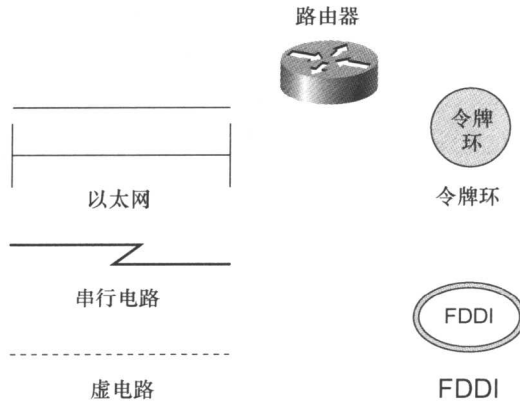


图 I-1 本书用到的惯例图示

本书显示的所有的协议分析仪信息都是使用 Wandel&Goltermann DA-320 DominoLAN 互
联网络分析仪。

Forward for Chinese–Language Edition

Since the publication of *Routing TCP/IP* Volumes I and II, I have had many opportunities to visit the People's Republic of China. In no other country have I received as many warm compliments on these books as I have in China. I am therefore delighted that PT Press is now offering a version of Volume I in Mandarin.

China is aggressively expanding its Internet infrastructure, and along with it services such as mobile IP and online gaming. In the next few years, I predict that China will become the world's leader in the commercial implementation of IPv6. Already China exceeds Japan in the number of PCs, and it will soon have the world's largest mobile network. All of this expansion means that over the coming decade, there will be an enormous increase in the demand for IP networking experts. The Cisco Certified Internet Expert program provides the opportunity for potential employers to discern the best networking engineers, and it provides those holding the certification a testament to their expertise. Therefore the CCIE program plays an increasingly important role in the growing Chinese networking industry. I hope that you, the reader, will find this book useful in your preparation to earn this coveted certification.

Best Regards,
Jeff Doyle



目 录

第一部分 路由技术基础知识

第 1 章 基本概念：互连网络、路由器和地址	5
1.1 带马达的自行车	6
1.2 数据链路地址	6
1.3 中继器和网桥	9
1.4 路由器	12
1.5 网络地址	14
1.6 展望	15
1.7 参考读物	16
1.8 复习题	16
第 2 章 TCP/IP 回顾	19
2.1 TCP/IP 协议层	19
2.2 IP 报文头	21
2.3 IP 地址	28
2.3.1 首个 8bit 字节规则	29
2.3.2 地址掩码 (Address Mask)	30
2.3.3 子网和子网掩码	32
2.3.4 子网规划	34
2.3.5 打破 8bit 字节界线	35
2.3.6 子网掩码的故障排除	37
2.4 ARP	38
2.4.1 代理 ARP	42
2.4.2 无故 ARP	43
2.4.3 反向 ARP	43
2.5 ICMP	44
2.6 主机到主机层	47
2.6.1 TCP	47
2.6.2 UDP	49
2.7 展望	50

2.8	总结表: 第 2 章命令回顾	50
2.9	推荐读物	51
2.10	复习题	51
2.11	配置练习	52
2.12	故障排除练习	52
第 3 章	静态路由	55
3.1	路由选择表	56
3.2	配置静态路由	58
3.2.1	案例研究: 简单静态路由	58
3.2.2	案例研究: 汇总路由	61
3.2.3	案例研究: 选择路由	61
3.2.4	案例研究: 浮动静态路由 (Floating Static Route)	63
3.2.5	案例研究: 均分负载	65
3.2.6	案例研究: 递归表查询	67
3.3	静态路由故障排除	69
3.3.1	案例研究: 追踪故障路由	69
3.3.2	案例研究: 协议冲突	72
3.4	展望	75
3.5	总结表: 第 3 章命令回顾	76
3.6	复习题	76
3.7	配置练习	76
3.8	故障排除练习	77
第 4 章	动态路由选择协议	83
4.1	路由选择协议基础	84
4.1.1	路径决策	84
4.1.2	度量	85
4.1.3	收敛	87
4.1.4	负载均衡	88
4.2	距离矢量路由选择协议	88
4.3	链路状态路由选择协议	95
4.3.1	邻居	95
4.3.2	链路状态泛洪扩散	96
4.3.3	SPF 算法	102
4.3.4	区域	105
4.4	内部和外部网关协议	106
4.5	静态或动态路由	107
4.6	展望	108
4.7	推荐读物	108

4.8 复习题	108
---------	-----

第二部分 内部路由选择协议

第 5 章 路由选择信息协议 (RIP)	113
5.1 RIP 的操作	114
5.1.1 RIP 的计时器和稳定性	114
5.1.2 RIP 消息格式 (RIP Message Format)	116
5.1.3 请求消息类型 (Request Message Type)	118
5.1.4 有类别路由选择(Classful Routing)	118
5.2 配置 RIP	122
5.2.1 案例研究 1: 一个基本的 RIP 配置	122
5.2.2 案例研究 2: 被动接口 (Passive Interface)	124
5.2.3 案例研究 3: 配置单播更新(Unicast update)	125
5.2.4 案例研究 4: 不连续的子网	127
5.2.5 案例研究 5: 掌握 RIP 的度量	129
5.3 RIP 故障排除	132
5.4 展望	132
5.5 总结表: 第 5 章命令总结	132
5.6 推荐读物	133
5.7 复习题	133
5.8 配置练习	133
5.9 故障排除练习	134
第 6 章 内部网关路由选择协议 (IGRP)	141
6.1 IGRP 的操作	142
6.1.1 IGRP 的计时器和稳定性	144
6.1.2 IGRP 的度量	145
6.1.3 IGRP 的报文格式	150
6.2 配置 IGRP	153
6.2.1 案例研究 1: 一个基本的 IGRP 配置	153
6.2.2 案例研究 2: 非等价负载均衡 (一)	154
6.2.3 案例研究 3: 设置最大的路径数	157
6.2.4 案例研究 4: 多个 IGRP 进程	158
6.3 IGRP 故障排除	160
6.3.1 案例研究 5: 非等价负载均衡 (二)	160
6.3.2 案例研究 6: 被分段的网络 (Segmented Network)	162
6.4 展望	164
6.5 总结表: 第 6 章命令总结	164
6.6 推荐读物	164

6.7	复习题	165
6.8	配置练习	165
6.9	故障排除练习	168
第 7 章	路由选择信息协议——第 2 版 (RIPv2)	175
7.1	RIPv2 的操作	176
7.1.1	RIPv2 的消息格式	176
7.1.2	与 RIPv1 的兼容性	178
7.1.3	无类别路由查找	179
7.1.4	无类别路由选择协议	179
7.1.5	可变长子网掩码 (VLSM)	180
7.1.6	认证	182
7.2	配置 RIPv2	184
7.2.1	案例研究 1: 一个基本的 RIPv2 配置	185
7.2.2	案例研究 2: 与 RIPv1 的兼容性	185
7.2.3	案例研究 3: 使用 VLSM	187
7.2.4	案例研究 4: 不连续的子网和无类别路由选择	189
7.2.5	案例研究 5: 认证	191
7.3	RIPv2 故障排除	193
7.4	展望	198
7.5	总结表: 第 7 章命令总结	198
7.6	推荐读物	199
7.7	复习题	199
7.8	配置练习	199
7.9	故障排除练习	200
第 8 章	增强型内部网关路由选择协议 (EIGRP)	205
8.1	EIGRP 的操作	207
8.1.1	依赖于协议的模块 (Protocol-Dependent Modules)	207
8.1.2	可靠传输协议 (RTP)	208
8.1.3	邻居的发现和恢复	209
8.1.4	扩散更新算法 (Diffusing Update Algorithm)	210
8.1.5	EIGRP 的报文格式	227
8.1.6	地址聚合	232
8.2	配置 EIGRP	235
8.2.1	案例研究 1: 一个基本的 EIGRP 配置	235
8.2.2	案例研究 2: 和 IGRP 的重新分配	237
8.2.3	案例研究 3: 关闭自动路由汇总	239
8.2.4	案例研究 4: 地址聚合 (Address Aggregation)	240
8.2.5	案例研究 5: 认证	242

8.3 EIGRP 故障排除	242
8.3.1 案例研究 6: 邻居丢失 (A Missing Neighbor)	243
8.3.2 “卡”在活动状态的邻居 (Stuck-in-Active Neighbors)	248
8.4 展望	250
8.5 总结表: 第 8 章命令总结	250
8.6 复习题	251
8.7 配置练习	252
8.8 故障排除练习	254
第 9 章 开放最短路径优先协议 (OSPF)	257
9.1 OSPF 的操作	258
9.1.1 邻居和邻接关系	259
9.1.2 区域 (Area)	285
9.1.3 链路状态数据库	291
9.1.4 路由选择表	303
9.1.5 认证	307
9.1.6 按需电路上的 OSPF	307
9.1.7 OSPF 的报文格式	308
9.1.8 OSPF 的 LSA 格式	315
9.1.9 可选项字段	321
9.2 配置 OSPF	322
9.2.1 案例研究 1: 一个基本的 OSPF 配置	322
9.2.2 案例研究 2: 使用 Loopback 接口设置路由器的 ID	325
9.2.3 案例研究 3: 域名服务查询	327
9.2.4 案例研究 4: OSPF 和辅助地址	328
9.2.5 案例研究 5: 末梢区域	333
9.2.6 案例研究 6: 完全末梢区域	335
9.2.7 案例研究 7: NSSA 区域	336
9.2.8 案例研究 8: 地址汇总	342
9.2.9 案例研究 9: 认证	344
9.2.10 案例研究 10: 虚链路	346
9.2.11 案例研究 11: 运行在 NBMA 网络上的 OSPF	348
9.2.12 案例研究 12: 运行在按需电路上的 OSPF	355
9.3 OSPF 故障排除	356
9.3.1 案例研究 13: 孤立的区域	359
9.3.2 案例研究 14: 路由汇总配置错误	362
9.4 展望	364
9.5 总结表: 第 9 章命令总结	365
9.6 推荐读物	366
9.7 复习题	366

9.8	配置练习	367
9.9	故障排除练习	368
第 10 章	集成 IS-IS 协议	373
10.1	集成 IS-IS 协议的操作	375
10.1.1	IS-IS 区域	376
10.1.2	网络实体标题	378
10.1.3	IS-IS 的功能结构	379
10.1.4	IS-IS 的 PDU 格式	389
10.2	配置集成 IS-IS 协议	407
10.2.1	案例研究 1: 一个基本的集成 IS-IS 配置	408
10.2.2	案例研究 2: 更改路由器的类型	412
10.2.3	案例研究 3: 区域的迁移	415
10.2.4	案例研究 4: 路由汇总	418
10.2.5	案例研究 5: 认证	420
10.3	集成 IS-IS 协议的故障排除	422
10.3.1	IS-IS 邻接关系的故障排除	423
10.3.2	IS-IS 链路状态数据库的故障排除	424
10.3.3	案例研究 6: 运行于 NBMA 网络上的集成 IS-IS	427
10.4	展望	431
10.5	总结表: 第 10 章命令总结	431
10.6	复习题	432
10.7	配置练习	433
10.8	故障排除练习	434

第三部分 路由控制和互操作性

第 11 章	路由重新分配	439
11.1	重新分配的原则	441
11.1.1	度量	441
11.1.2	管理距离	442
11.1.3	从无类别协议向有类别协议重新分配	446
11.2	配置重新分配	449
11.2.1	案例研究: 重新分配 IGRP 和 RIP	451
11.2.2	案例研究: 重新分配 EIGRP 和 OSPF	452
11.2.3	案例研究: 重新分配和路由汇总	457
11.2.4	案例研究: 重新分配 IS-IS 和 RIP	461
11.2.5	案例研究: 重新分配静态路由	464
11.3	展望	466
11.4	总结表: 第 11 章命令回顾	466