

第十一章 Web 安全学习笔记 (精简重构版)

一、Web 安全体系概述

Web 安全防护构建在网络协议栈的不同层次上，各层分工明确：

层次	协议/技术	核心功能
网络层	IPSec	透明传输：为 IP 数据包提供加密和认证，对上层透明。
传输层	SSL/TLS	安全管道：在 TCP 之上建立端到端安全通道，保障机密性与完整性（如 HTTPS）。
应用层	SET	特定业务：针对特定应用（如信用卡支付）的安全协议，处理特殊业务逻辑。

二、SSL/TLS 协议详解

SSL/TLS (Secure Sockets Layer / Transport Layer Security) 是位于 TCP 之上、应用层之下的安全协议，为 HTTP 等应用提供端到端的安全通道。

2.1 体系结构与核心概念

SSL/TLS 包含两个核心子协议：

- SSL 握手协议 (Handshake Protocol)**：（上层/控制面）负责在通信开始前验证身份、协商加密算法并生成共享密钥。
- SSL 记录协议 (Record Protocol)**：（底层/数据面）负责使用握手产生的密钥，对应用层数据进行封装、加密和完整性校验。

连接 (Connection) vs. 会话 (Session)

- 会话 (Session)**：长期、握手建立。定义了一组安全参数（主密钥、加密套件）。建立成本高。
- 连接 (Connection)**：短期、数据传输。通过复用“会话”来避免频繁的握手，提高效率。

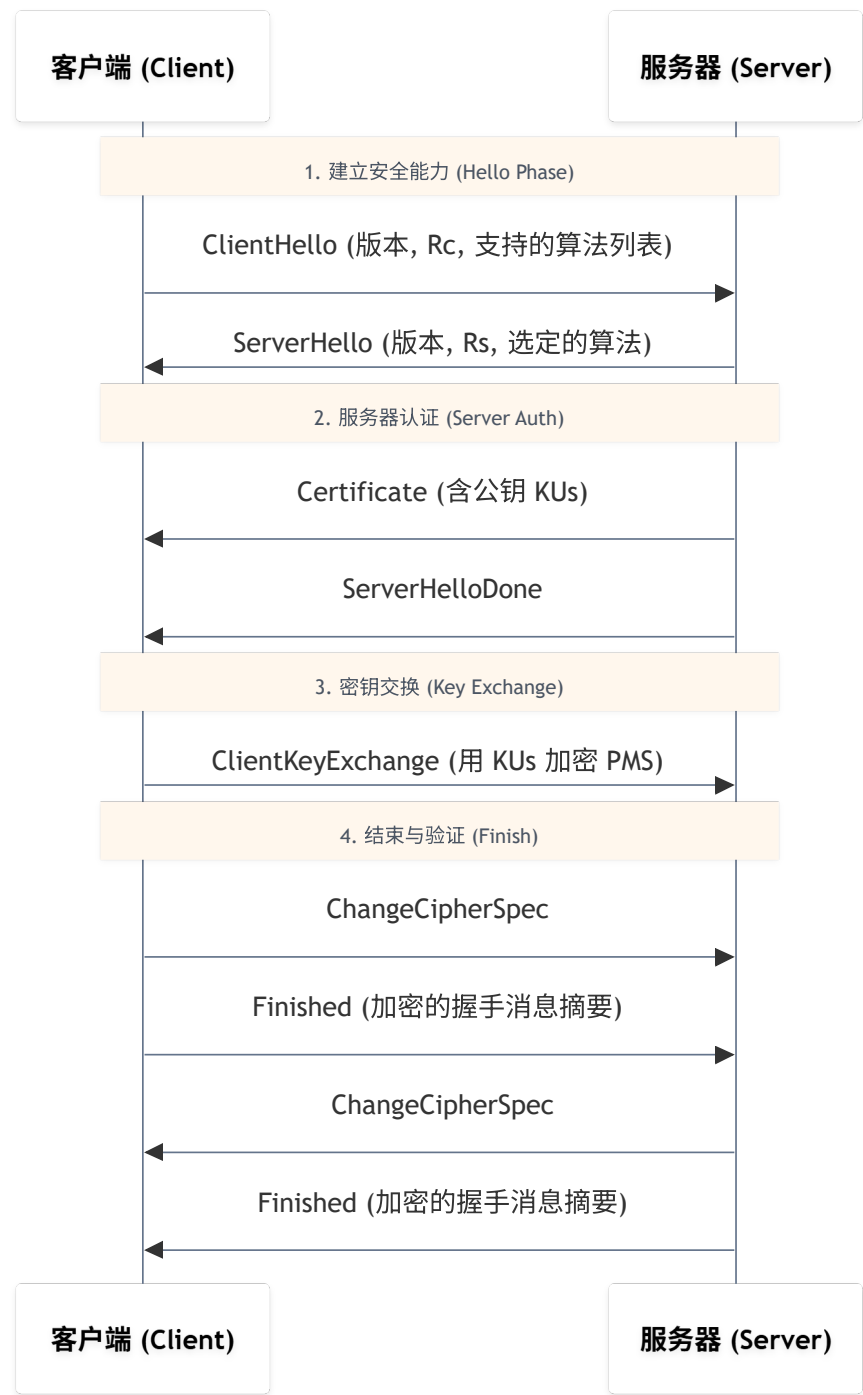
2.2 SSL 握手协议 (Handshake Protocol)

这是 SSL/TLS 最关键的阶段，目标是在不安全的信道上协商出一份双方共享的“会话密钥”。

2.2.1 核心参数定义

符号	全称	说明
R_c	Client Random	客户端随机数，明文传输，用于后续生成密钥的“盐”。
R_s	Server Random	服务器随机数，明文传输，用于后续生成密钥的“盐”。
PMS	Pre-Master Secret	预主密钥，由客户端生成的 46 字节随机数，密钥生成的种子。
MS	Master Secret	主密钥，由 R_c, R_s, PMS 共同计算得出。
KU_s	Server Public Key	服务器公钥（从证书中获取）。

2.2.2 握手流程图示



2.2.3 详细阶段解析

第一阶段：建立安全能力 (Phase 1: Hello)

协商协议版本、加密套件，并交换随机数。

$C \rightarrow S : \text{ClientHello}$

$S \rightarrow C : \text{ServerHello}$

- 流程叙述：
 - 客户端首先发送支持的算法列表和随机数 R_c 。
 - 服务器从中选定一种算法，并发回服务器随机数 R_s 。
 - 注：这两个随机数将作为后续生成密钥的干扰项 (Salt)，防止重放攻击。

第二阶段：服务器认证与密钥交换 (Phase 2: Server Auth)

服务器证明身份，并根据需要请求客户端认证。

$S \rightarrow C : \text{Certificate}$

$S \rightarrow C : \text{ServerKeyExchange (Optional)}$

$S \rightarrow C : \text{CertificateRequest (Optional)}$

$S \rightarrow C : \text{ServerHelloDone}$

- 流程叙述：
 - **Certificate**: 服务器发送数字证书（含公钥 KU_s ）。客户端收到后需向 CA 验证其合法性。
 - **ServerKeyExchange**（图中有）：若证书公钥不足以进行密钥交换（如使用 DHE 算法），服务器需额外发送密钥参数。
 - **CertificateRequest**（图中有）：若服务器配置了需要验证客户端身份（如网银 U 盾场景），会在此发出请求。
 - **ServerHelloDone**: 发出信号，告知客户端“我的信息发送完毕，该你了”。

第三阶段：客户端认证与密钥交换 (Phase 3: Client Auth & Key Exchange)

客户端回应认证请求，并生成传输密钥种子。

$C \rightarrow S : \text{Certificate (Optional)}$

$C \rightarrow S : \text{ClientKeyExchange}$

$C \rightarrow S : \text{CertificateVerify (Optional)}$

- 流程叙述：
 - **Certificate**（图中有）：若 Phase 2 收到了请求，客户端需在此发送自己的证书。
 - **ClientKeyExchange**: 核心步骤。客户端生成预主密钥 (PMS)，用服务器公钥加密发送。此时，双方均拥有 R_c, R_s, PMS 。
 - **CertificateVerify**（图中有）：若发送了客户端证书，客户端还需用私钥对之前的握手消息签名，证明自己确实是证书的持有者。

第四阶段：结束与验证 (Phase 4: Finish)

切换加密模式，并验证握手完整性。

1. 密钥计算（内部动作）：

- 双方利用 R_c, R_s, PMS 独立计算出主密钥 (MS) 和 会话密钥块。

2. 握手验证（消息交互）：

$$C \rightarrow S : \text{ChangeCipherSpec}$$
$$C \rightarrow S : \text{Finished}$$
$$S \rightarrow C : \text{ChangeCipherSpec}$$
$$S \rightarrow C : \text{Finished}$$

- 流程叙述：
 - **ChangeCipherSpec**：告知对方“接下来的消息将使用刚计算出的会话密钥加密”。
 - **Finished**：这是第一条被加密的消息，包含之前所有握手消息的摘要（Hash）。
 - 验证：双方解密并校验摘要。如果一致，说明握手过程中没有被中间人篡改（如降级攻击），安全通道建立成功。

2.3 SSL 记录协议 (Record Protocol)

握手成功后，记录协议使用协商好的会话密钥来保护应用层数据的传输。

处理流程公式：

$$\text{App_Data} \xrightarrow{\text{分片}} \text{Blocks} \xrightarrow{\text{压缩}} \text{Comp} \xrightarrow{\text{加MAC}} \text{Auth} \xrightarrow{\text{加密}} \text{Encrypted} \xrightarrow{\text{加头}} \text{SSL_Record}$$

步骤解析：

1. 分片 (**Fragment**)：将数据切分为 $\leq 16\text{KB}$ 的块。
2. 压缩 (**Compress**)：可选（通常为无损压缩）。
3. 计算 **MAC**：使用协商的 MAC 密钥计算完整性校验码。
 - $M = \text{MAC}(Key_{MAC}, \text{SeqNum} + \text{Data})$
4. 加密 (**Encrypt**)：使用协商的对称加密密钥加密“数据 + MAC”。
 - $E = \text{Encrypt}(Key_{Enc}, \text{Data} + M)$
5. 封装：添加 SSL 记录头（含类型、版本、长度），通过 TCP 发送。

三、安全电子交易 (SET) 协议

SET (Secure Electronic Transaction): 用于互联网信用卡支付的开放标准，重点在于多方信任与隐私隔离。

3.1 参与方

- 持卡人 (Cardholder)
- 商家 (Merchant)
- 支付网关 (Gateway): 连接 Internet 与银行专用网的接口。
- 发卡行 (Issuer) & 收单行 (Acquirer)
- CA 中心: 为所有参与方颁发 X.509 v3 证书。

3.2 核心技术: 双重签名 (Dual Signature)

目标: 解决隐私隔离问题。

- 商家只能看到订单信息 (OI), 看不到支付信息 (PI)。
- 银行只能看到支付信息 (PI), 看不到订单信息 (OI)。
- 两者必须关联, 防止替换攻击。

构造流程 (由持卡人完成)

1. 摘要计算:

$$PIMD = H(PI)$$

$$OIMD = H(OI)$$

2. 合并摘要:

$$POMD = H(PIMD || OIMD)$$

3. 签名:

$$DS = E_{K_{Rc}}(POMD)$$

验证与隔离流程

接收方	接收到的数据	验证公式 (验证 DS 是否匹配)	隐私保护效果
商家	$OI, PIMD, DS$	$\$D_{\{KU_c\}}(DS) \stackrel{?}{=} H(PIMD \setminus$	
银行	$PI, OIMD, DS$	$\$D_{\{KU_c\}}(DS) \stackrel{?}{=} H(H(PI) \setminus$	

3.3 SET 交易流程

1. 购买请求 (Purchase Request)

- 持卡人操作：
 - i. 验证商家与网关证书。
 - ii. 生成 OI 和 PI 。
 - iii. 生成一次性对称密钥 K_s 。
 - iv. 打包发送给商家：
 - 给商家看： $OI, DS, PIMD$ 。
 - 给银行看（通过商家转发）：数字信封 $\{E_{KU_{gateway}}(K_s), E_{K_s}(PI, DS, OIMD)\}$ 。

2. 支付认证 (Payment Authorization)

- 商家操作：
 - i. 验证 DS 确认订单 OI 无误。
 - ii. 将“给银行看”的数据包转发给支付网关。
- 支付网关操作：
 - i. 解开数字信封获取 K_s ，解密得到 PI 。
 - ii. 验证 DS 确认支付指令有效。
 - iii. 向发卡行申请额度认证。
 - iv. 返回认证结果（批准/拒绝）给商家。

3. 资金获取 (Payment Capture)

- 商家发货后，向网关发送请求，网关通过银行网络完成转账清算。

3.4 SET 关键特性实现

- 1. 机密性：使用 数字信封 (Digital Envelope) (对称密钥加密数据 + 公钥加密对称密钥)。

2. 完整性：使用 哈希 + 数字签名。
3. 身份认证：基于 **X.509** 数字证书 的信任链。
4. 隐私保护：通过 双重签名 实现信息的按需披露。