

## 第24章 TCP：传输控制协议

### 24.1 引言

传输控制协议，即 TCP，是一种面向连接的传输协议，为两端的应用程序提供可靠的端到端的数据流传输服务。它完全不同于无连接的、提供不可靠的数据报传输服务的 UDP 协议。

我们在第 23 章中详细讨论了 UDP 的实现，有 9 个函数、约 800 行 C 代码。我们将要讨论的 TCP 实现包括 28 个函数、约 4500 行 C 代码，因此，我们将 TCP 的实现分成 7 章来讨论。

这几章中不包括对 TCP 概念的介绍，假定读者已阅读过卷 1 的第 17 章~第 24 章，熟悉 TCP 的操作。

### 24.2 代码介绍

TCP 实现代码包括 7 个头文件，其中定义了大量的 TCP 结构和常量和 6 个 C 文件，包含 TCP 函数的具体实现代码。文件如图 24-1 所示。

文 件	描 述
netinet/tcp.h	tcphdr 结构定义
netinet/tcp_debug.h	tcp_debug 结构定义
netinet/tcp_fsm.h	TCP 有限状态机定义
netinet/tcp_seg.h	实现 TCP 序号比较的宏定义
netinet/tcp_timer.h	TCP 定时器定义
netinet/tcp_var.h	tcpcb(控制块)和tcpstat(统计)结构定义
netinet/tcpip.h	TCP+IP 首部定义
netinet/tcp_debug.c	支持 SO_DEBUG 协议端口号调试(第 27.10 节)
netinet/tcp_input.c	tcp_input 及其辅助函数(第 28 和第 29 章)
netinet/tcp_output.c	tcp_output 及其辅助函数(第 26 章)
netinet/tcp_subr.c	各种 TCP 子函数(第 27 章)
netinet/tcp_timer.c	TCP 定时器处理(第 25 章)
netinet/tcp_usrreq.c	PRU_xxx 请求处理(第 30 章)

图24-1 TCP各章中将讨论的文件

图24-2描述了各 TCP 函数与其他内核函数之间的关系。带阴影的椭圆分别表示我们将要讨论的 9 个主要的 TCP 函数，其中 8 个出现在 protosw 结构中(图24-8)，第 9 个是 tcp\_output。

#### 24.2.1 全局变量

图24-3列出了 TCP 函数中用到的全局变量。

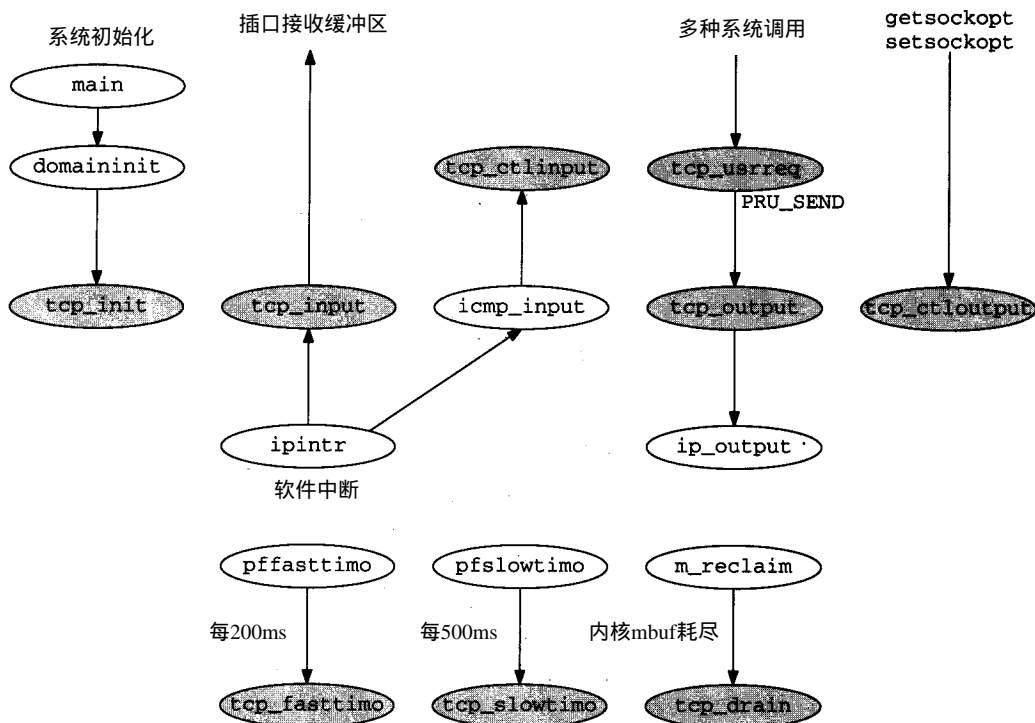


图24-2 TCP函数与其他内核函数间的关系

变 量	数据类型	描 述
tcb	struct inpcb	TCP Internet Pcb表头
tcp_last_inpcb	struct inpcb *	指向最后收到报文段的PCB的指针：“后面一个”高速缓存
tcpstat	struct tcpstat	TCP统计数据(图24-4)
tcp_outflags	u_char	输出标志数组，索引为连接状态(图24-16)
tcp_recvspace	u_long	端口接收缓存大小默认值(8192字节)
tcp_sendspace	u_long	端口发送缓存大小默认值(8192字节)
tcp_iss	tcp_seq	TCP发送初始序号(ISS)
tcprexmtthresh	int	ACK重复次数的门限值(3)，触发快速重传
tcp_mssdflt	int	默认MSS值(512字节)
tcp_rttdeflt	int	没有数据时RTT的默认值(3秒)
tcp_do_rfrfc1323	int	如果为真(默认值)，请求窗口大小和时间戳选项
tcp_now	u_long	用于RFC 1323时间戳实现的500 ms计数器
tcp_keepidle	int	保活：第一次探测前的空闲时间(2小时)
tcp_keepintvl	int	保活：无响应时两次探测的间隔时间(75秒)
tcp_maxidle	int	保活：探测之后、放弃之前的时间(10分钟)

图24-3 后续章节中将介绍的全局变量

### 24.2.2 统计量

全局结构变量tcpstat中保存了各种TCP统计量，图24-4描述了各统计量的具体含义。在接下来的代码分析过程中，读者会了解到这些计数器数值的变化过程。

tcpstat成员	描 述	SNMP使用
tcps_accepts	被动打开的连接数	•
tcps_closed	关闭的连接数 (包括意外丢失的连接)	
tcps_connattempt	试图建立连接的次数 (调用connect)	•
tcps_conndrops	在连接建立阶段失败的连接次数 (SYN收到之前)	•
tcps_connects	主动打开的连接次数 (调用connect成功)	
tcps_delack	延迟发送的ACK数	
tcps_drops	意外丢失的连接数 (收到SYN之后)	•
tcps_keepprops	在保活阶段丢失的连接数 (已建立或正等待SYN)	
tcps_keepprobe	保活探测指针发送次数	
tcps_keeptimeo	保活定时器或连接建立定时器超时次数	
tcps_pawdrop	由于PSWS而丢失的报文段数	
tcps_pcbcachemiss	PCB高速缓存匹配失败次数	
tcps_persisttimeo	持续定时器超时次数	
tcps_predack	对ACK报文首部预测的正确次数	
tcps_preddat	对数据报文首部预测的正确次数	
tcps_rcvackbyte	由收到的ACK报文确认的发送字节数	
tcps_rcvackpack	收到的ACK报文数	
tcps_rcvacktoomuch	收到的对未发送数据进行确认的ACK报文数	
tcps_rcvafterclose	连接关闭后收到的报文数	
tcps_rcvbadoff	收到的首部长度无效的报文数	•
tcps_rcvbadsum	收到的检验和错误的报文数	•
tcps_rcvbyte	连续收到的字节数	
tcps_rcvbyteafterwin	在滑动窗口已满时收到的字节数	
tcps_rcvdupack	收到的重复ACK报文的次数	
tcps_rcvdupbyte	在完全重复报文中收到的字节数	
tcps_rcvduppack	内容完全一致的报文数	
tcps_rcvoobbyte	收到失序的字节数	
tcps_rcvoopack	收到失序的报文数	
tcps_rcvpack	顺序接收的报文数	
tcps_rcvpackafterwin	携带数据超出滑动窗口通告值的报文数	
tcps_rcvpartdupbyte	部分内容重复的报文中的重复字节数	
tcps_rcvpartduppack	部分数据重复的报文数	
tcps_rcvshort	长度过短的报文数	•
tcps_rcvtotal	收到的报文总数	•
tcps_rcvwinprobe	收到的窗口探测报文数	
tcps_rcvwinupd	收到的窗口更新报文数	
tcps_rexmttimeo	重传超时次数	
tcps_rttupdated	RTT估算值更新次数	
tcps_segstimed	可用于RTT测算的报文数	
tcps_sndacks	发送的纯ACK报文数 (数据长度=0)	
tcps_sndbyte	发送的字节数	
tcps_sndctrl	发送的控制 (SYN、FIN、RST) 报文数 (数据长度=0)	
tcps_sndpack	发送的数据报文数 (数据长度>0)	
tcps_sndprobe	发送的窗口探测次数 (等待定时器强行加入1字节数据)	
tcps_sndrexmitbyte	重传的数据字节数	•
tcps_sndrexmitpack	重传的报文数	•
tcps_sndtotal	发送的报文总数	•
tcps_sndurg	只携带URG标志的报文数 (数据长度=0)	
tcps_sndwinup	只携带窗口更新信息的报文数 (数据长度=0)	
tcps_timeoutdrop	由于重传超时而丢失的连接数	

图24-4 tcpstat 结构变量中保存的TCP统计量

在命令行输入`netstat -s`，系统将输出当前TCP的统计值。图24-5的例子显示了主机连续运行30天后，各统计计数器的值。由于某些统计量互相关联——一个保存数据分组数目，另一个保存相应的字节数——图中做了一些简化。例如，表中第二行`tcps_snd(pack,byte)`实际表示了两个统计量，`tcps_sndpack`和`tcps_sndbyte`。

`tcps_sndbyte`值应为3 722 884 824字节，而不是-22 194 928字节，平均每个数据分组有450字节。类似的，`tcps_rcvackbyte`值应为3 738 811 552字节，而不是-21 264 360字节(平均每个数据分组565字节)。这些数据之所以被错误地显示，是因为`netstat`程序中调用`printf`语句时使用了`%d`(符号整型)，而非`%lu`(无符号长整型)。所有统计量均定义为无符号长整型，上面两个统计量的值已接近无符号 32位长整型的上限( $2^{32}-1=4\,294\,967\,295$ )。

netstat -s 输出	tcpstat 成员
10,655,999 packets sent 9,177,823 data packets (-22,194,928 bytes) 257,295 data packets (81,075,086 bytes) retransmitted 862,900 ack-only packets (531,285 delayed) 229 URG-only packets 3,453 window probe packets 74,925 window update packets 279,387 control packets	<code>tcps_sndtotal</code> <code>tcps_snd(pack,byte)</code> <code>tcps_sndrexmit(pack,byte)</code> <code>tcps_sndacks,tcps_delack</code> <code>tcps_sndurg</code> <code>tcps_sndprobe</code> <code>tcps_sndwinup</code> <code>tcps_sndctrl</code>
8,801,953 packets received 6,617,079 acks (for -21,264,360 bytes) 235,311 duplicate acks 0 acks for unsent data 4,670,615 packets (324,965,351 bytes) rcvd in-sequence 46,953 completely duplicate packets (1,549,785 bytes) 22 old duplicate packets 3,442 packets with some dup. data (54,483 bytes duped) 77,114 out-of-order packets (13,938,456 bytes) 1,892 packets (1,755 bytes) of data after window 1,755 window probes 175,476 window update packets 1,017 packets received after close 60,370 discarded for bad checksums 279 discarded for bad header offset fields 0 discarded because packet too short	<code>tcps_rcvtotal</code> <code>tcps_rcvack(pack,byte)</code> <code>tcps_rcvdupack</code> <code>tcps_rcvacktoomuch</code> <code>tcps_rcv(pack,byte)</code> <code>tcps_rcvdup(pack,byte)</code> <code>tcps_pawdrop</code> <code>tcps_rcvpartdup(pack,byte)</code> <code>tcps_rcvoo(pack,byte)</code> <code>tcps_rcv(pack,byte)afterwin</code> <code>tcps_rcvwinprobe</code> <code>tcps_rcvwindup</code> <code>tcps_rcvafterclose</code> <code>tcps_rcvbadsum</code> <code>tcps_rcvbadoff</code> <code>tcps_rcvshort</code>
144,020 connection requests 92,595 connection accepts 126,820 connections established (including accepts) 237,743 connections closed (including 1,061 drops) 110,016 embryonic connections dropped	<code>tcps_connattempt</code> <code>tcps_accepts</code> <code>tcps_connects</code> <code>tcps_closed,tcps_drops</code> <code>tcps_conndrops</code>
6,363,546 segments updated rtt (of 6,444,667 attempts) 114,797 retransmit timeouts 86 connection dropped by rexmit timeout 1,173 persist timeouts 16,419 keepalive timeouts 6,899 keepalive probes sent 3,219 connections dropped by keepalive	<code>tcps_{rttupdated,segstimed}</code> <code>tcps_rexmttimeo</code> <code>tcps_timeoutdrop</code> <code>tcps_persisttimeo</code> <code>tcps_keeptimeo</code> <code>tcps_keepprobe</code> <code>tcps_keepprops</code>
733,130 correct ACK header predictions 1,266,889 correct data packet header predictions 1,851,557 cache misses	<code>tcps_predack</code> <code>tcps_preddat</code> <code>tcps_pcbcachemiss</code>

图24-5 TCP统计量样本

## 24.2.3 SNMP变量

图24-6列出了SNMP TCP组中定义的14个SNMP简单变量，以及与它们相对应的tcpstat结构中的统计量。前四项的常量值在Net/3中定义，计数器tcpCurrEstab用于保存TCP PCB表中Internet PCB的数目。

图24-7列出了tcpTable，即TCP监听表(listener table)。

SNMP变量	tcpstat成员或常量	描 述
tcpRtoAlgorithm	4	用于计算重传定时限的算法： 1=其他； 2=RTO为固定值； 3=MIL-STD-1778附录B； 4=Van Jacobson的算法；
tcpRtoMin	1000	最小重传定时限，以毫秒为单位
tcpRtoMax	64000	最大重传定时限，以毫秒为单位
tcpMaxConn	-1	可支持的最大TCP连接数(-1表示动态设置)
tcpActiveOpens	tcps_connattempt	从CLOSED转换到SYN_SENT的次数
tcpPassiveOpens	tcps_accepts	从LISTEN转换到SYN_RCVD的次数
tcpAttemptFails	tcps_conndrops	从SYN_SENT或SYN_RCVD转换到CLOSED的次数+从SYN_RCVD转换到LISTEN的次数
tcpEstabResets	tcps_drops	从ESTABLISHED或CLOSE_WAIT转换到CLOSED的次数
tcpCurrEstab	(见正文)	当前位于ESTABLISHED或CLOSE_WAIT状态的连接数
tcpInSegs	tcps_rcvtotal	收到的报文总数
tcpOutSegs	tcps_sndtotal - tcps_sndrexmitpack	发送的报文总数，减去重传报文数
tcpRetransSegs	tcps_sndrexmitpack	重传的报文总数
tcpInErrs	tcps_rcvbadsum + tcps_rcvbadoff + tcps_rcvshort	收到的出错报文总数
tcpOutRsts	(未实现)	RST标志置位的发送报文数

图24-6 tcp 组中的简单SNMP变量

index = <tcpConnLocalAddress>.<tcpConnLocalPort>.<tcpConnRemAddress>.<tcpConnRemPort>		
SNMP变量	PCB变量	描 述
tcpConnState	t_state	连接状态：1 = CLOSED, 2=LISTEN, 3 = SYN_SENT, 4 = SYN_RCVD, 5 = ESTABLISHED, 6 = FIN_WAIT, 7 = FIN_WAIT_2, 8 = CLOSE_WAIT, 9 = LAST_ACK, 10 = CLOSING, 11 = TIME_WAIT, 12 = 删除TCP控制块
tcpConnLocalAddress	inp_laddr	本地IP地址
tcpConnLocalPort	inp_lport	本地端口号
tcpConnRemAddress	inp_faddr	远端IP地址
tcpConnRemPort	inp_fport	远端端口号

图24-7 TCP监听表：tcpTable 中的变量

第一个PCB变量(`t_state`)来自TCP控制块(图24-13)，其他四个变量来自 Internet PCB (图22-4)。

### 24.3 TCP 的protosw结构

图24-8列出了TCP `protosw`结构的成员变量，它定义了 TCP协议与系统内其他协议间的交互接口。

成员变量	inetsw[2]	描 述
<code>pr_type</code>	<code>SOCK_STREAM</code>	TCP提供字节流传输服务
<code>pr_domain</code>	<code>&amp;inetdomain</code>	TCP属于Internet协议族
<code>pr_ptotocol</code>	<code>IPPROTO_TCP(6)</code>	填充IP首部的 <code>ip_p</code> 字段
<code>pr_flags</code>	<code>PR_CONNREQUIRED/PR_WANTRCVD</code>	插口层标志，协议处理中忽略
<code>pr_input</code>	<code>tcp_input</code>	从IP层接收消息
<code>pr_output</code>	<code>0</code>	TCP协议忽略该成员变量
<code>pr_ctlinput</code>	<code>tcp_ctlinput</code>	处理ICMP错误的控制输入函数
<code>pr_ctloutput</code>	<code>tcp_ctloutput</code>	在进程中响应管理请求
<code>pr_usrreq</code>	<code>tcp_usrreq</code>	在进程中响应通信请求
<code>pr_init</code>	<code>tcp_init</code>	TCP初始化
<code>pr_fasttimo</code>	<code>tcp_fasttimo</code>	快超时函数，每200 ms调用一次
<code>pr_slowtimo</code>	<code>tcp_slowtimo</code>	慢超时函数，每500 ms调用一次
<code>pr_drain</code>	<code>tcp_drain</code>	内核mbuf耗尽时调用
<code>pr_sysctl</code>	<code>0</code>	TCP协议忽略该成员变量

图24-8 TCP `protosw` 结构

### 24.4 TCP的首部

`tcphdr`结构定义了TCP首部。图24-9给出了`tcphdr`结构的定义，图24-10描述了TCP首部。

```

40 struct tcphdr {
41     u_short th_sport;           /* source port */
42     u_short th_dport;           /* destination port */
43     tcp_seq th_seq;             /* sequence number */
44     tcp_seq th_ack;             /* acknowledgement number */
45 #if BYTE_ORDER == LITTLE_ENDIAN
46     u_char  th_x2:4;             /* (unused) */
47     th_off:4;                    /* data offset */
48 #endif
49 #if BYTE_ORDER == BIG_ENDIAN
50     u_char  th_off:4;            /* data offset */
51     th_x2:4;                    /* (unused) */
52 #endif
53     u_char  th_flags;            /* ACK, FIN, PUSH, RST, SYN, URG */
54     u_short th_win;              /* advertised window */
55     u_short th_sum;              /* checksum */
56     u_short th_urp;              /* urgent offset */
57 };

```

tcp.h

tcp.h

图24-9 `tcphdr` 结构

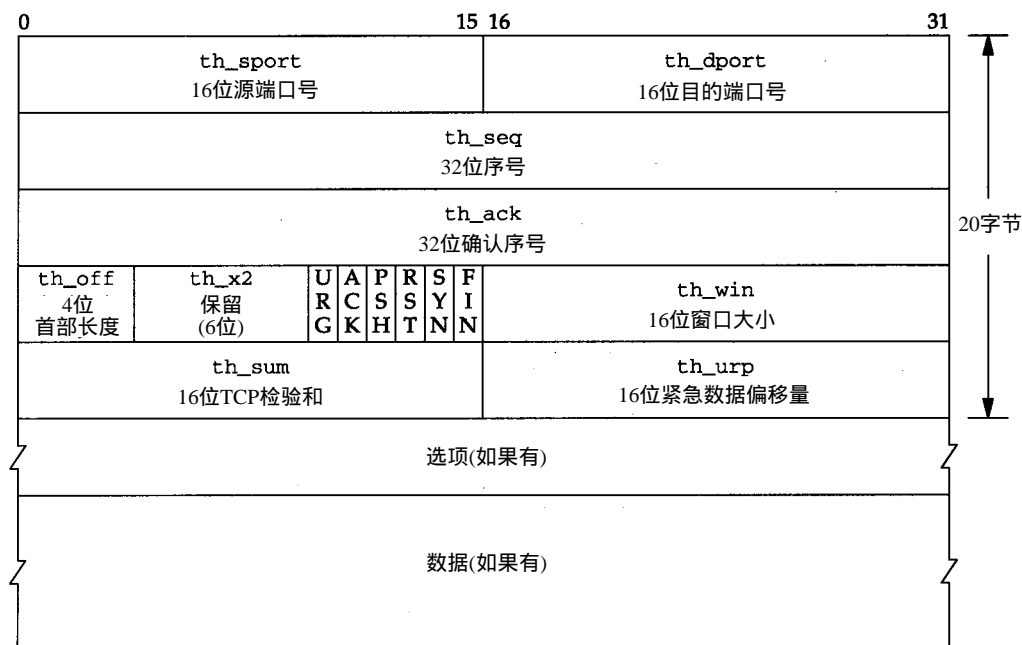


图24-10 TCP首部及可选数据

大多数RFC文档，相关书籍（包括卷1）和接下来要讨论的TCP实现代码，都把th\_urp称为“紧急指针（urgent pointer）”。更准确的名称应该是“紧急数据偏移量（urgent offset）”，因为这个字段给出的16 bit无符号整数值，与th\_seq序号字段相加后，得到发送的紧急数据最后一个八位组的32 bit序号（关于该序号应该是紧急数据最后一个字节的序号，或者是紧急数据结束后的第一个字节的序号，一直存在着争议。但就我们目前的讨论而言，这一点无关紧要）。图24-13中，TCP代码把保存紧急数据最后一个八位组的32 bit序号的snd\_up正确地称为“紧急数据发送指针”。如果将TCP首部的16 bit偏移量也称为“指针”，容易引起误解。在练习26.6中，我们重申了“紧急指针”和“紧急数据偏移量”间的区别。

TCP首部中4 bit的首部长度、接着的6 bit的保留字段和6 bit的码元标志，在C结构中定义为两个4 bit的比特字段，和紧跟的一个8 bit字节。为了处理两个比特字段在8 bit字节中的存放次序，C代码根据不同的主机字节存储顺序使用了#ifdef语句。

还请注意，TCP中称4 bit的th\_off为“首部长度”，而C代码中称之为“数据偏移量”。两种名称都正确，因为它表示TCP首部的长度，包括可选项，以32 bit为单位，也就是指向用户数据第一个字节的偏移量。

th\_flags成员变量包括6个码元标志比特，通过图24-11中定义的名称读写。

Net/3中，TCP首部通常意味着“IP首部 + TCP首部”。tcp\_input处理收到的IP数据报和tcp\_output构造待发送的IP数据报时都采用了这一思想。图24-12中给出了tcpihdr结构的定义，形式化地描述了组合的IP/TCP首部。

38-58 图23-19给出的ipovly结构定义了20字节长度的IP首部。通过前面章节的讨论可知，尽管长度相同（20字节），但这个结构并不是一个真正的IP首部。



th_flags	描 述
TH_ACK	确认序号(th_ack)有效
TH_FIN	发送方字节流结束
TH_PUSH	接收方应该立即将数据提交给应用程序
TH_RST	连接复位
TH_SYN	序号同步(建立连接)
TH_URG	紧急数据偏移量(th_urp)有效

图24-11 th\_flags 值

```

38 struct tcphdr {
39     struct ipovly ti_i;          /* overlaid ip structure */
40     struct tcphdr ti_t;          /* tcp header */
41 };

42 #define ti_next      ti_i.ih_next
43 #define ti_prev      ti_i.ih_prev
44 #define ti_x1        ti_i.ih_x1
45 #define ti_pr        ti_i.ih_pr
46 #define ti_len        ti_i.ih_len
47 #define ti_src        ti_i.ih_src
48 #define ti_dst        ti_i.ih_dst
49 #define ti_sport      ti_t.th_sport
50 #define ti_dport      ti_t.th_dport
51 #define ti_seq        ti_t.th_seq
52 #define ti_ack        ti_t.th_ack
53 #define ti_x2        ti_t.th_x2
54 #define ti_off        ti_t.th_off
55 #define ti_flags      ti_t.th_flags
56 #define ti_win        ti_t.th_win
57 #define ti_sum        ti_t.th_sum
58 #define ti_urp        ti_t.th_urp

```

tcpip.h

图24-12 tcphdr 结构定义：组合的IP/TCP首部

## 24.5 TCP的控制块

在图22-1中我们看到，除了标准的 Internet PCB 外，TCP还有自己专用的控制块，tcpcb 结构，而UDP则不需要专用控制块，它的全部控制信息都已包含在 Internet PCB 中。

TCP控制块较大，需占用 140 字节。从图 22-1 中可看到，Internet PCB 与 TCP 控制块彼此对应，都带有指向对方的指针。图 24-13 给出了 TCP 控制块的定义。

```

41 struct tcpcb {
42     struct tcphdr *seg_next; /* reassembly queue of received segments */
43     struct tcphdr *seg_prev; /* reassembly queue of received segments */
44     short t_state;           /* connection state (Figure 24.16) */
45     short t_timer[TCPT_NTIMERS]; /* tcp timers (Chapter 25) */
46     short t_rxtshift;        /* log(2) of rexmt exp. backoff */
47     short t_rxtcur;          /* current retransmission timeout (#ticks) */
48     short t_dupacks;         /* #consecutive duplicate ACKs received */
49     u_short t_maxseg;        /* maximum segment size to send */
50     char t_force;            /* 1 if forcing out a byte (persist/OOB) */
51     u_short t_flags;         /* (Figure 24.14) */

```

tcp\_var.h

图24-13 tcpcb 结构：TCP控制块



```

52     struct tcpiphdr *t_template;    /* skeletal packet for transmit */
53     struct inpcb *t_inpcb;         /* back pointer to internet PCB */
54 /*
55  * The following fields are used as in the protocol specification.
56  * See RFC783, Dec. 1981, page 21.
57  */
58 /* send sequence variables */
59     tcp_seq snd_una;                /* send unacknowledged */
60     tcp_seq snd_nxt;                /* send next */
61     tcp_seq snd_up;                 /* send urgent pointer */
62     tcp_seq snd_wll;                /* window update seg seq number */
63     tcp_seq snd_wl2;                /* window update seg ack number */
64     tcp_seq iss;                    /* initial send sequence number */
65     u_long  snd_wnd;                /* send window */
66 /* receive sequence variables */
67     u_long  rcv_wnd;                /* receive window */
68     tcp_seq rcv_nxt;                /* receive next */
69     tcp_seq rcv_up;                 /* receive urgent pointer */
70     tcp_seq irs;                    /* initial receive sequence number */
71 /*
72  * Additional variables for this implementation.
73  */
74 /* receive variables */
75     tcp_seq rcv_adv;                /* advertised window by other end */
76 /* retransmit variables */
77     tcp_seq snd_max;                /* highest sequence number sent;
78                                     * used to recognize retransmits */
79 /* congestion control (slow start, source quench, retransmit after loss) */
80     u_long  snd_cwnd;                /* congestion-controlled window */
81     u_long  snd_ssthresh;            /* snd_cwnd size threshold for slow start
82                                     * exponential to linear switch */
83 /*
84  * transmit timing stuff. See below for scale of srtt and rttvar.
85  * "Variance" is actually smoothed difference.
86  */
87     short   t_idle;                 /* inactivity time */
88     short   t_rtt;                  /* round-trip time */
89     tcp_seq t_rttseq;                /* sequence number being timed */
90     short   t_srtt;                  /* smoothed round-trip time */
91     short   t_rttvar;                /* variance in round-trip time */
92     u_short t_rttmin;                /* minimum rtt allowed */
93     u_long  max_sndwnd;              /* largest window peer has offered */
94 /* out-of-band data */
95     char    t_oobflags;              /* TCPOOB_HAVEDATA, TCPOOB_HADDATA */
96     char    t_iobc;                 /* input character, if not SO_OOINLINE */
97     short   t_softerror;             /* possible error not yet reported */
98 /* RFC 1323 variables */
99     u_char  snd_scale;                /* scaling for send window (0-14) */
100    u_char  rcv_scale;                /* scaling for receive window (0-14) */
101    u_char  request_r_scale;          /* our pending window scale */
102    u_char  requested_s_scale;        /* peer's pending window scale */
103    u_long  ts_recent;                /* timestamp echo data */
104    u_long  ts_recent_age;            /* when last updated */
105    tcp_seq last_ack_sent;            /* sequence number of last ack field */
106 };
107 #define intotcpb(ip) ((struct tcpb *) (ip)->inp_ppcb)
108 #define sototcpb(so) (intotcpb(sotoinpcb(so)))

```

tcp\_var.h

图24-13 (续)

现在暂不讨论上述成员变量的具体含义，在后续代码中遇到时再详细分析。

图24-14列出了`t_flags`变量的可选值。

<code>t_flags</code>	描 述
<code>TF_ACKNOW</code>	立即发送ACK
<code>TF_DELACK</code>	延迟发送ACK
<code>TF_NODELAY</code>	立即发送用户数据，不等待形成最大报文段（禁止Nagle算法）
<code>TF_NOOPT</code>	不使用TCP选项（永不填充TCP选项字段）
<code>TF_SENTFIN</code>	FIN已发送
<code>TF_RCVD_SCALE</code>	对端在SYN报文中发送窗口变化选项时置位
<code>TF_RCVD_TSTMP</code>	对端在SYN报文中发送时间戳选项时置位
<code>TF_REQ_SCALE</code>	已经/将要在SYN报文中请求窗口变化选项
<code>TF_REQ_TSTMP</code>	已以/将要在SYN中请求时间戳选项

图24-14 `t_flags` 取值

## 24.6 TCP的状态变迁图

TCP协议根据连接上到达报文的不同类型，采取相应动作，协议规程可抽象为图 24-15所示的有限状态变迁图。读者在本书的扉页前也可找到这张图，以便在阅读有关TCP的章节时参考。

图中的各种状态变迁组成了 TCP有限状态机。尽管 TCP协议允许从LISTEN状态直接变迁到SYN\_SENT状态，但使用SOCKET API编程时这种变迁不可实现（调用`listen`后不可以调用`connect`）。

TCP控制块的成员变量`t_state`保存一个连接的当前状态，可选值如图 24-16所示。

图中还定义了`tcp_outflags`数组，保存了处于对应连接状态时`tcp_output`将使用的输出标志。

图24-16还列出了与符号常量相对应的数值，因为在代码中将利用它们之间的数值关系。例如，有下面两个宏定义：

```
#define TCPS_HAVERCVDSYN(s) ((s)>=TCPS_SYN_RECEIVED)
#define TCPS_HAVERCVDFIN(s) ((s)>=TCPS_TIME_WAIT)
```

类似地，连接未建立时，即`t_state`小于`TCPS_ESTABLISHED`时，`tcp_notify`处理ICMP差错的方式也不同。

`TCPS_HAVERCVDSYN`的命名是正确的，但`TCPS_HAVERCVDFIN`则可能引起误解，因为在`CLOSE_WAIT`、`CLOSING`和`LAST_ACK`状态也会收到FIN。我们将在第29章中遇到该宏。

### 半关闭

当进程调用`shutdown`且第二个参数设为1时，称为“半关闭”。TCP发送FIN，但允许进程在同一端口上继续接收数据（卷1的18.5节中举例介绍了TCP的半关闭）。

例如，尽管图 24-15中只在ESTABLISHED状态标注了“数据传输”，但如果进程执行了“半关闭”，则连接变迁到FIN\_WAIT\_1状态和其后的FIN\_WAIT\_2状态，在这两个特定状态中，进程仍然可以接收数据。

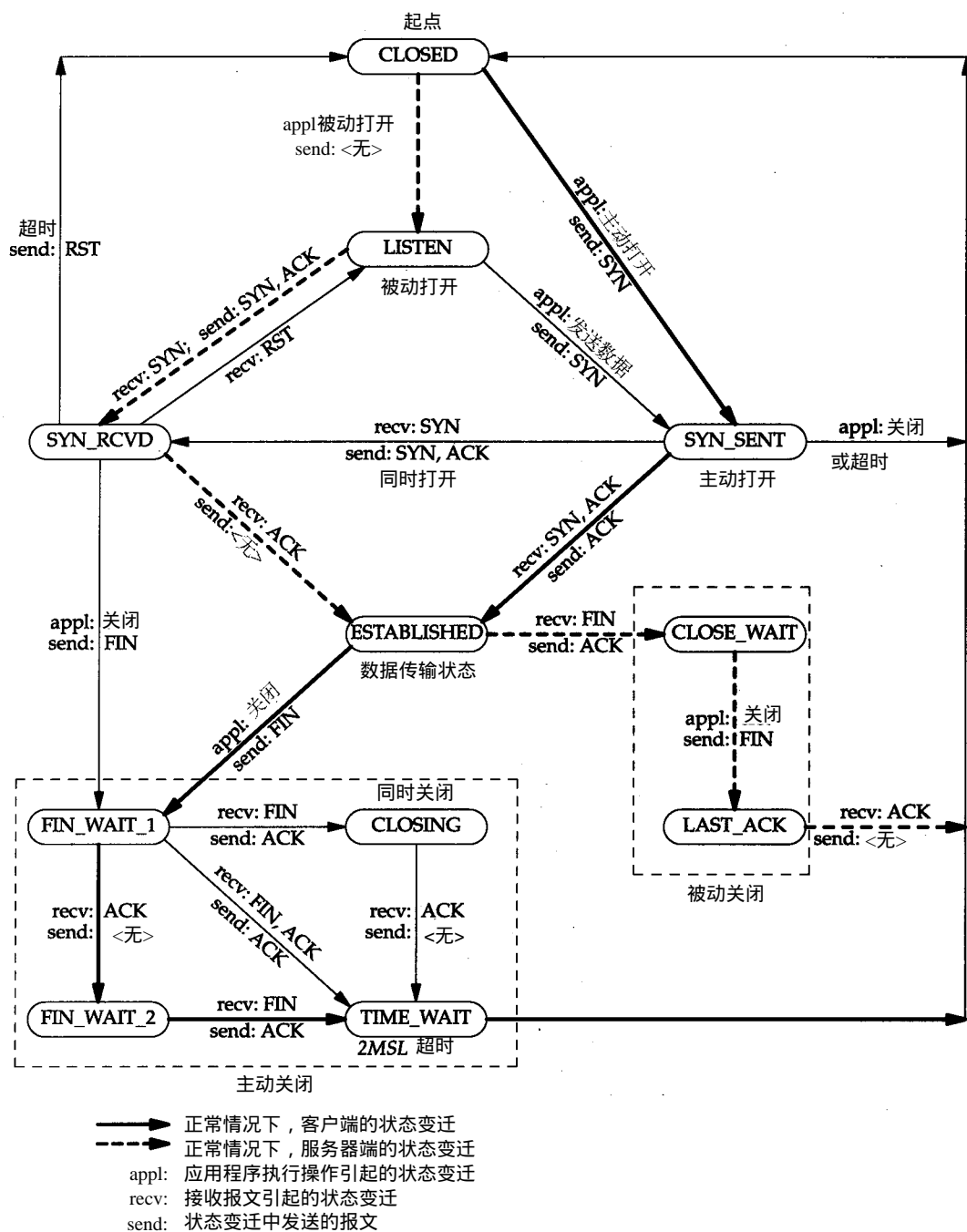


图24-15 TCP状态变迁图

## 24.7 TCP的序号

TCP连接上传输的每个数据字节, 以及 SYN、FIN 等控制报文都被赋予一个 32 bit 的序号。TCP 首部的序号字段 (图24-10) 填充了报文段第一个数据字节的 32 bit 的序号, 确认号字段填充

了发送方希望接收的下一序号，确认已正确接收了所有序号小于等于确认号减 1 的数据字节。换言之，确认号是 ACK 发送方等待接收的下一序号。只有当报文首部的 ACK 标志置位时，确认序号才有效。读者将看到，除了在主动打开首次发送 SYN 时(SYN\_SENT 状态，参见图 24-16 中的 tcp\_outflags[2])或在某些 RST 报文段中，ACK 标志总是被置位的。

t_state	值	描 述	tcp_outflags[]
TCPS_CLOSED	0	关闭	TH_RST   TH_ACK
TCPS_LISTEN	1	监听连接请求(被动打开)	0
TCPS_SYN_SENT	2	已发送 SYN(主动打开)	TH_SYN
TCPS_SYN_RECEIVED	3	已发送并接收 SYN；等待 ACK	TH_SYN   TH_ACK
TCPS_ESTABLISHED	4	连接建立(数据传输)	TH_ACK
TCPS_CLOSE_WAIT	5	已收到 FIN，等待应用程序关闭	TH_ACK
TCPS_FIN_WAIT_1	6	已关闭，发送 FIN；等待 ACK 和 FIN	TH_FIN   TH_ACK
TCPS_CLOSING	7	同时关闭；等待 ACK	TH_FIN   TH_ACK
TCPS_LAST_ACK	8	收到的 FIN 已关闭；等待 ACK	TH_FIN   TH_ACK
TCPS_FIN_WAIT_2	9	已关闭，等待 FIN	TH_ACK
TCPS_TIME_WAIT	10	主动关闭后 2MSL 等待状态	TH_ACK

图24-16 t\_state 取值

由于 TCP 连接是全双工的，每一端都必须为两个方向上的数据流维护序号。TCP 控制块中(图24-13)有13个序号：8个用于数据发送(发送序号空间)，5个用于数据接收(接收序号空间)。

图24-17给出了发送序号空间中 4 个变量间的关系：snd\_wnd、snd\_una、snd\_nxt 和 snd\_max。这个例子列出了数据流的第 1~第 11 字节。

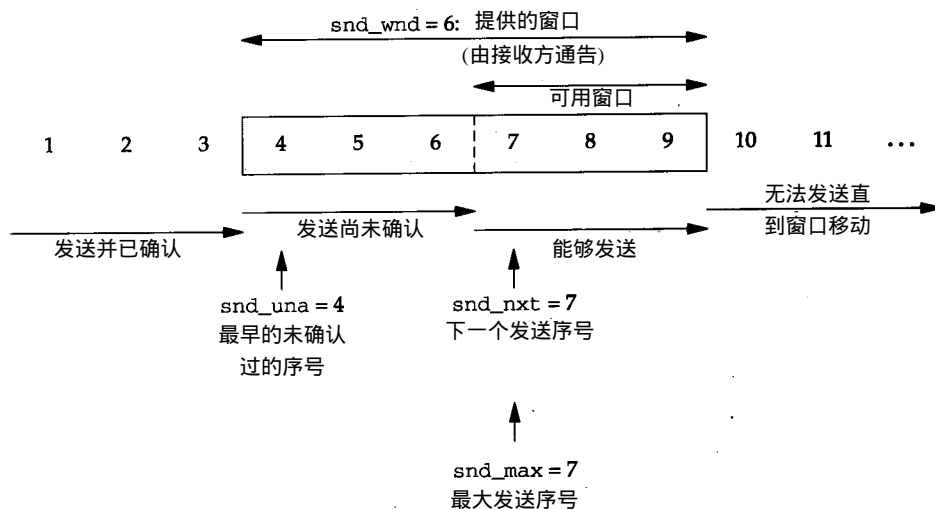


图24-17 发送序号空间举例

一个有效的ACK序号必须满足：

$$\text{snd\_una} < \text{确认序号} \leq \text{snd\_max}$$

图24-17的例子中，一个有效 ACK 的确认号必须是 5、6 或 7。如果确认号小于或等于 snd\_una，则是一个重复的 ACK。它确认了已确认过的八位组，否则 snd\_una 不会递增超过那些序号。

tcp\_output中有多处用到下面的测试，如果正发送的是重传数据，则表达式为真：

```
snd_nxt < snd_max
```

图24-18给出了图24-17中连接的另一端：接收序号空间，图中假定还未收到序号为4、5、6的报文，标出了三个变量rcv\_nxt、rcv\_wnd和rcv\_adv。

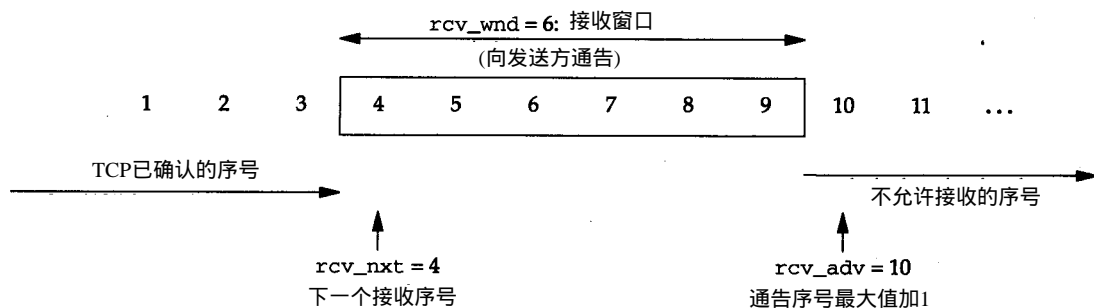


图24-18 接收序号空间举例

如果接收报文段中携带的数据落在接收窗口内，则该报文段是一个有效报文段。换言之，下面两个不等式中至少要有一个为真。

$$rcv\_nxt \leq \text{报文段起始序号} < rcv\_nxt + rcv\_wnd$$

$$rcv\_nxt \leq \text{报文段终止序号} < rcv\_nxt + rcv\_wnd$$

报文段起始序号就是TCP首部的序号字段，ti\_seq。终止序号是序号字段加上TCP数据长度后减1。

例如，图24-19中的TCP报文段，携带了图24-17中发送的三个字节，序号分别是4、5和6。

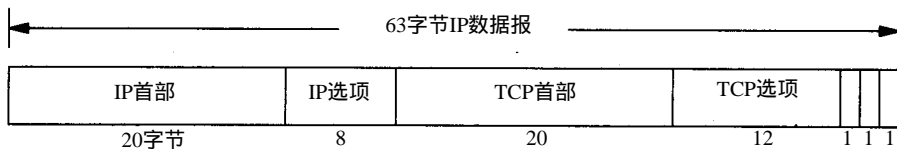


图24-19 TCP报文段在IP数据报中传输

假定IP数据报中有8字节的IP任选项和12字节的TCP任选项。图12-20列出了各有关变量的取值。

变 量	值	描 述
ip_hl	7	IP首部+IP任选项长度，以32 bit为单位(=28字节)
ip_len	63	IP数据报长度，以字节为单位(20+8+20+12+3)
ti_off	8	TCP首部+TCP任选项长度，以32 bit为单位(=32字节)
ti_seq	4	用户数据第一个字节的序号
ti_len	3	TCP数据的字节数： $ip\_len - (ip\_hl \times 4) - (ti\_off \times 4)$
	6	用户数据最后一个字节的序号： $ti\_seq + ti\_len - 1$

图24-20 图24-19中各变量的取值

ti\_len并非TCP首部的字段，而是在对接收到的首部计算检验和及完成验证之后，根据图24-20中的算式得到的结果，存储到外加的IP结构中(图24-12)。图中最后一个值并不存储到变量中，而是在需要时直接从其他值中通过计算得到。

### 1. 序号取模运算

TCP必须处理的一个问题是序号来自有限的 32 位取值空间：0~4 294 967 295。如果某个 TCP 连接传输的数据量超过  $2^{32}$  字节，序号从 4 294 967 295 回绕到 0，将出现重复序号。

即使传输数据量小于  $2^{32}$  字节，仍可能遇到同样的问题，因为连接的初始序号并不一定从 0 开始。各数据流方向上的初始序号可以是 0~4 294 967 295 之间的任何值。这个问题使序号复杂化。例如，序号 1 可能大于序号 4 294 967 295。

在 tcp.h 中，TCP 序号定义为 unsigned long

```
typedef u_long tcp_seq;
```

图24-21定义了4个用于序号比较的宏。

```

40 #define SEQ_LT(a,b)      ((int)((a)-(b)) < 0)
41 #define SEQ_LEQ(a,b)     ((int)((a)-(b)) <= 0)
42 #define SEQ_GT(a,b)      ((int)((a)-(b)) > 0)
43 #define SEQ_GEQ(a,b)     ((int)((a)-(b)) >= 0)

```

tcp\_seq.h

tcp\_seq.h

图24-21 TCP序号比较宏

### 2. 举例——序号比较

下面这个例子说明了 TCP 序号的操作方式。假定序号只有 3 bit，0~7。图24-22列出了全部 8 个序号和相应的二进制补码（为求二进制补码，将二进制码中的所有 0 变为 1，所有 1 变为 0，最后再加 1）。给出补码形式，是因为  $a - b = a + (b \text{ 的补码})$ 。

x	二进制码	二进制补码	0-x	1-x	2-x
0	000	000	000	001	010
1	001	111	111	000	001
2	010	110	110	111	000
3	011	101	101	110	111
4	100	100	100	101	110
5	101	011	011	100	101
6	110	010	010	011	100
7	111	001	001	010	011

图24-22 3 bit序号举例

表中最后三栏分别是 0-x、1-x 和 2-x。在这三栏中，如果定义计算结果是带符号整数（注意图 24-21 中的四个宏，计算结果全部强制转换为 int），那么最高位为 1 表示值小于 0（SEQ\_LT 宏），最高位为 0 且值不为 0 表示大于 0（SEQ\_GT 宏）。最后三栏中以横线分隔开四个负值和四个非负值。

请注意图 24-22 中的第四栏（标注“0-x”），可看出 0 小于 1、2、3 和 4（最高位比特为 1），而 0 大于 5、6 和 7（最高位比特为 0 且结果非 0）。图 24-23 显示了这种关系。

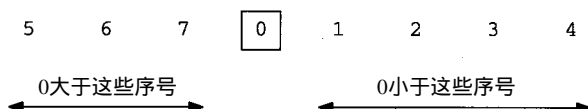


图24-23 3 bit的TCP序号的比较

图24-22中的第五栏(1-x)也存在类似的关系,如图24-24所示。

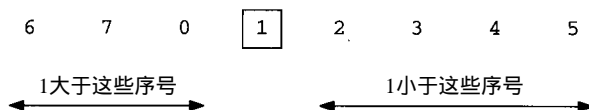


图24-24 3 bit的TCP序号的比较

图24-25是上面两图的另一种表示形式,使用圆环强调了序号的回绕现象。



图24-25 图24-23和图24-24的另一种表示形式

就TCP而言,通过序号比较来确定给定序号是新序号或重传序号。例如,在图24-24的例子中,如果TCP正等待的序号为1,但到达序号为6,通过前面介绍的计算可知6小于1,从而判定这是重传的数据,可予以丢弃。但如果到达序号为5,因为5大于1,TCP判定这是新数据,予以保存,并继续等待序号为2、3和4的八位组(假定序号为5的数据字节落在接收窗口内)。

图24-26扩展了图24-25中左边的圆环,用TCP 32 bit的序号替代了3 bit的序号。

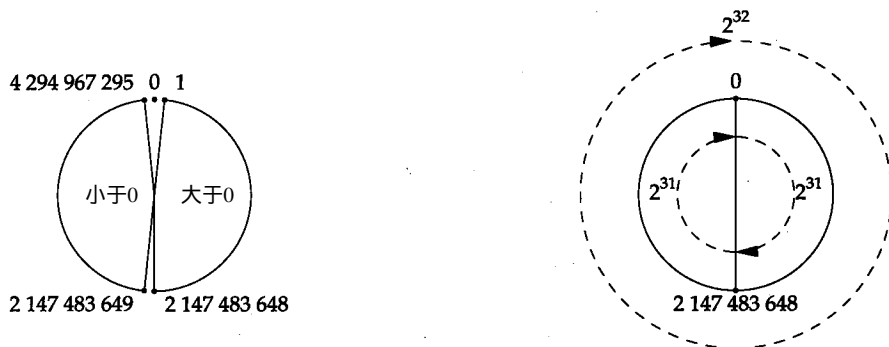


图24-26 与序号0比较：采用32 bit序号

图24-26右边的圆环强调了32 bit序号空间的一半有 $2^{31}$ 个可用数字。

## 24.8 tcp\_init函数

系统初始化时, domaininit函数调用TCP的初始化函数: tcp\_init (图24-27)。

### 1. 设定初始发送序号

初始发送序号(ISS), tcp\_iss, 被初始化为1。请注意, 代码注释指出, 这是错误的。后面讨论TCP的“平静时间(quiet time)”时, 将简单介绍这一选择的原因。请读者自行与图7-23中IP标识符的初始化做比较, 后者使用了当天的时钟。



```
43 void                                     tcp_subr.c
44 tcp_init()
45 {
46     tcp_iss = 1;                          /* wrong */
47     tcb.inp_next = tcb.inp_prev = &tcb;
48     if (max_protohdr < sizeof(struct tcpiphdr))
49         max_protohdr = sizeof(struct tcpiphdr);
50     if (max_linkhdr + sizeof(struct tcpiphdr) > MHLEN)
51         panic("tcp_init");
52 }
```

图24-27 tcp\_init 函数

## 2. TCP Internet PCB链表初始化

PCB首部(tcb)的previous指针和next指针都指向自己，这是一个空的双向链表。tcb PCB的其余成员均初始化为0(所有未明确初始化的全局变量均设为0)。事实上，除链表外，在该PCB首部中只用了一个字段inp\_lport：下一个分配的TCP临时端口号。TCP使用的第一个临时端口号应为1024，练习22.4的解答中给出了原因。

## 3. 计算最大协议首部长度

到目前为止，讨论过的协议首部的长度最大不超过40字节，max\_protohdr设为40(组合的IP/TCP首部长度，不带任何可选项)。图7-17定义了该变量。如果max\_linkhdr(通常为16)加40后大于放入单个mbuf中带首部的数据报的数据长度(100字节，图2-7中的MHLEN)，内核将告警。

## MSL和冷静时间的概念

TCP协议要求如果主机崩溃，且没能保存打开TCP连接上最后使用的序号，则重启后在一个MSL(2分钟，冷静时间)内，不能发送任何TCP报文段。目前，基本没有TCP实现能够在系统崩溃或操作员关机时保存这些信息。

MSL是最大报文段生存时间(maximum segment lifetime)，指任何报文段被丢弃前在网络中能够存在的最大时间。不同的实现可选择不同的MSL。连接主动关闭后，将在CLOSE\_WAIT状态等待2个MSL时间(图24-15)。

RFC 793(Postel 1981c)建议MSL设定为2分钟，但Net/3实现中MSL设为30秒(图25-3中定义的常量TCPTV\_MSL)。

如果报文段在网络中出现延迟，协议会出现问题(RFC 793称之为漫游重复(wandering duplicate))。假定Net/3系统启动时tcp\_iss置为1(图24-27)，经过一段时间，在序号刚刚回绕时系统崩溃。后面25.5节中将介绍，tcp\_iss每秒增加128 000，即重启后需经过9.3小时序号才会回绕。此外，每发送一个connect，tcp\_iss将增加64 000，因此序号回绕时间必然早于9.3小时。下面的例子说明了老的报文段怎样被错误地发送到现在的连接上。

1) 一个客户和服务器建立了一个连接。客户的端口号是1024，发送了一个序号为2的报文段。该报文段在传送途中陷入路径循环，未能到达服务器。这个报文段成为“漫游重复”报文段。

2) 客户重发该报文段，序号依旧为 2。重发报文段到达服务器。

3) 客户关闭连接。

4) 客户主机崩溃。

5) 客户主机在崩溃后 40 秒重启，TCP 初始化 `tcp_iss` 为 1。

6) 同一客户和同一服务器之间立即建立了一条新的连接，使用了同样的端口号：客户端口号为 1024，服务器方依然是其预知的端口号。客户发送的 SYN 中初始序号置为 1。这条新的使用同样端口对的连接称为原有连接的化身 (incarnation)。

7) 步骤 1 中的漫游重复报文段最终到达服务器，并被认为是新建连接中的合法报文段，尽管它实际上属于原有连接。

图 24-28 列出了上述步骤发生的时间顺序。

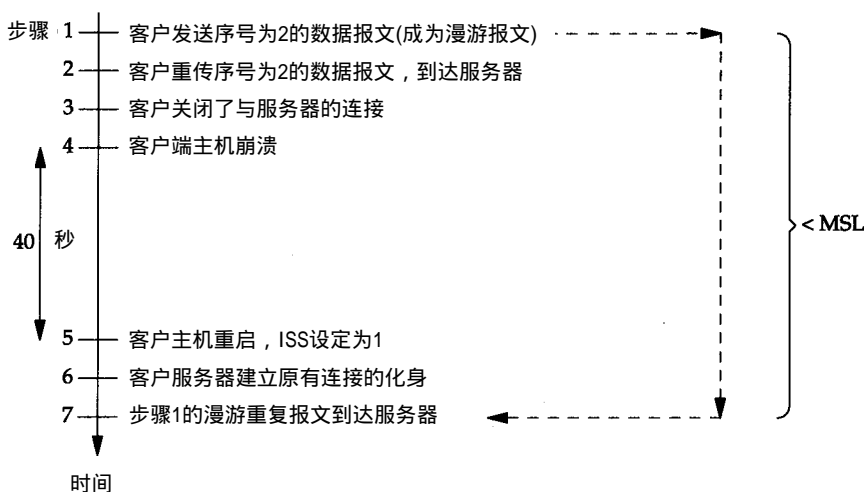


图 24-28 示例：旧报文段到达原有连接的化身

即使系统重启后，TCP 通过当前时钟计算 ISS，问题同样存在。无论原有连接的 ISS 设为多少，由于序号会回绕，完全有可能重启后新建连接的 ISS 接近等于重启前原有连接最后使用的序号。

除了保存重启前所有已建连接的序号，解决这个问题的唯一方法就是重启后 TCP 在 MSL 内保持平静(不发送任何报文段)。尽管问题有可能出现，但绝大多数 TCP 中并未实现相应的解决方法，因为多数主机仅重启时间就要长于 MSL。

## 24.9 小结

本章概要介绍了接下来的 6 章中将要讨论的 TCP 源代码。TCP 为每条连接建立自己的控制块，保存该连接的所有变量和状态信息。

定义了 TCP 的状态变迁图，TCP 在哪些条件下从一个状态变迁到另一个状态，每次变迁过程中发送和接收了哪些报文段。状态变迁图还显示了连接建立和终止的过程。在后续 TCP 讨论中会经常引用该图。

TCP 连接上传输的每个数据字节都有相应的序号，TCP 在连接控制块中维护多个序号：有些用于发送，有些用于接收 (TCP 工作于全双工方式)。由于序号来自有限的 32 bit 空间，会从

最大值回绕到0。本章解释了如何使用小于和大于测试来比较序号，在后续的 TCP代码中将不断遇到序号的比较。

最后介绍了最简单的 TCP函数，`tcp_init`，完成对Internet PCB的TCP链表的初始化。此外，还讨论了初始发送序号的选取问题。

## 习题

- 24.1 研究图24-5中的统计数据，计算每条连接上发送和接收的平均字节数。
- 24.2 在`tcp_init`中，内核告警是否合理？
- 24.3 执行`netstat -a` 了解你的系统当前有多少个活跃的 TCP端点。