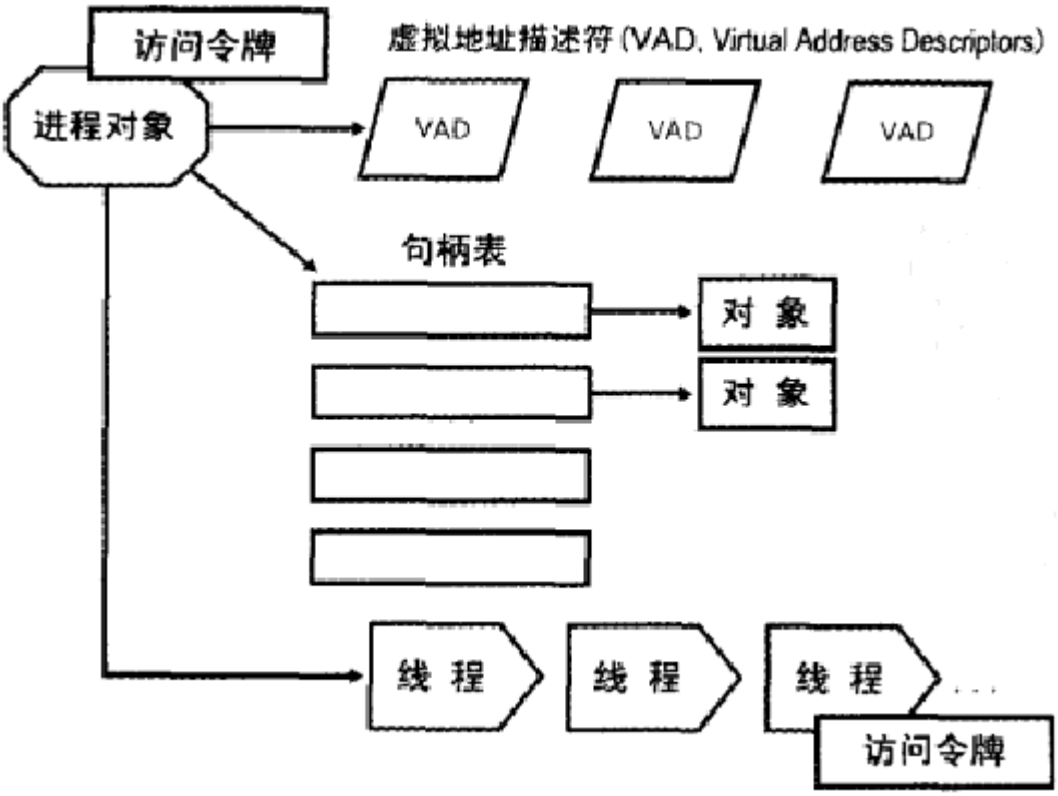
内核句柄表算法分析— 进程创建句柄与分配算法

（bboyiori）

我们编写 Windows 程序中经常使用到内核对象，特别是句柄这个概念，通过句柄可以对内核对象进行访问，那句柄到底是什么?本文将会从内核来说明这个概念。

Windows 采取了面向对象设计,内核中有一个的模块来管理内核对象,有很多资料都是说是“对象管理器”，本文也采用这个概念。对象管理器用来管理内核对象信息和记录内核对象的使用情况，包括引用计数。

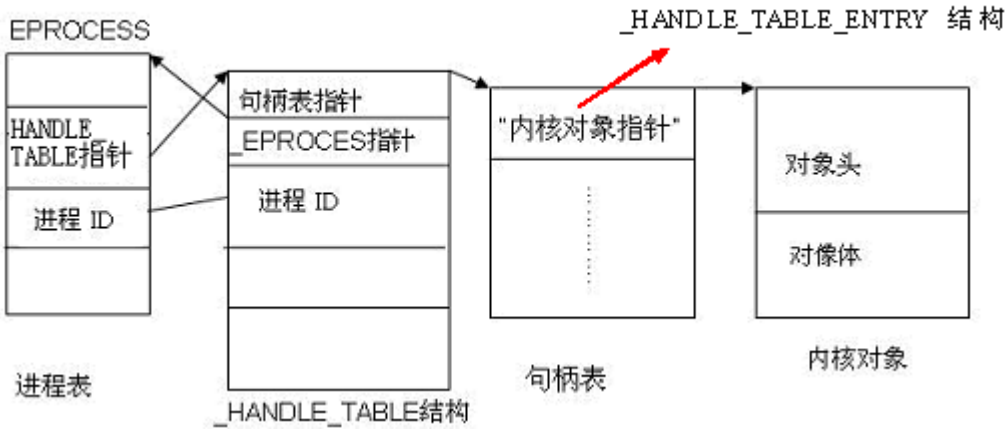
每个进程都要创建一个句柄列表,这些句柄指向各种系统资源,比如信号量,线程，和文件等，进程中的所有线程都可以访问这些资源性)，如下图所示，进程和资源：



1.进程与句柄表数据关系

在用户模式下如果调用 CloseHanele( )表示不再使用这个对象，在内核中进程便会删除句柄(释放对象引用)；对象管理器也会将内核对象的引用计数也会减一,当对象的句柄引用为 0 时,对象管理器便会释放这个对象。

句柄表最基本作用就是句柄与目标对象之间的映射表,下图是进程与句柄的简化模型图(有些数据域要经过处理):



_HANDLE_TABLE 是句柄表的信息的结构体,在内核中句柄是句柄表中表项的索引,在这里可以简单的理解,由索引(句柄)在句柄表中查找到进程引用的内核对象.

在 Windbg 中查看_HANDLE_TABLE(这里例出部分有意义的项)

```
kd> dt _HANDLE_TABLE
nt!_HANDLE_TABLE
    +0x000 TableCode          : Uint4B        //指向第一层局部表,并记录层数
    +0x004 QuotaProcess       : Ptr32 _EPROCESS   //指向进程_EPROCESS 块
    +0x008 UniqueProcessId    : Ptr32 Void        //进程 ID
    +0x03c HandleCount        : Int4B         //句柄计数,当前使用句柄个数
kd> dt _EPROCESS       //进程_EPROCESS 块信息
nt!_EPROCESS
+0x084 UniqueProcessId    : Ptr32 Void        //进程 ID
+0x0c4 ObjectTable : Ptr32 _HANDLE_TABLE    //指向_HANDLE_TABLE 结构
```

2.句柄的数据结构

内核与 SDK 中定义句柄都为: typedef void *HANDLE; 表明句柄是一个无符号整数,实际上有效句柄的值时有范围的,大家想想如果采用数组来存储句柄需要耗费很大的内存,Windows 句柄表使用了稀疏数组.

2.1XP/2003 句柄表项:

先看下句柄表中存放的是什么?句柄表主要是存放的是对象的地址与属性信息,当然还要存放句柄表相关一些信息（审计，空闲项），每个句柄表项是由 _HANDLE_TABLE_ENTRY 描述的，_HANDLE_TABLE_ENTRY 占 8 字节，定义如下：

```
kd> dt _HANDLE_TABLE_ENTRY
nt!_HANDLE_TABLE_ENTRY
    +0x000 Object             : Ptr32 Void    //对象指针
    +0x000 ObAttributes       : Uint4B
    +0x000 InfoTable          : Ptr32 _HANDLE_TABLE_ENTRY_INFO
    +0x000 Value              : Uint4B
```

+0x004 GrantedAccess : Uint4B
+0x004 GrantedAccessIndex : Uint2B
+0x006 CreatorBackTraceIndex : Uint2B
+0x004 NextFreeTableEntry : Int4B

由于_HANDLE_TABLE_ENTRY 有些联合体,不好理解,源码定义如下:

```
typedef struct _HANDLE_TABLE_ENTRY {
        union {
            PVOID Object;                   //对象指针
            ULONG ObAttributes;         //对象属性
            PHANDLE_TABLE_ENTRY_INFO InfoTable;
            ULONG_PTR Value;            //值
            };
       union {
           union {
               ACCESS_MASK GrantedAccess;    //访问掩码
                  struct {
                        USHORT GrantedAccessIndex;
                        USHORT CreatorBackTraceIndex;
                        };
                  };
              LONG NextFreeTableEntry;//下一个空闲的句柄表项,空闲链表索引
          };
} HANDLE_TABLE_ENTRY, *PHANDLE_TABLE_ENTRY;
```

表示的意义:

1. 对象指针 Object 有效则第二个域为访问掩码 GrantedAccess
2. 第一个域为 0,第二个域可能是 NextFreeTableEntry,也可能为审计,后面会有相关算法用到这个域,要根据上下文来判断。

这里的 Object 并不是“真正”的对象指针，而是包括了对象的指针域对象的属性域，由于在内核中对象总是 8 字节对齐的，那么指向对象的指针最低 3 位总是 0，微软把这 3 位也利用上，Object 的最低 3 位做为对象的属性，看下面的一组宏定义：

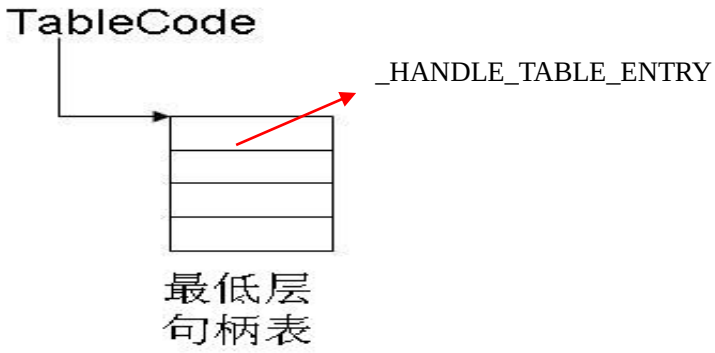
```
#define OBJ_HANDLE_ATTRIBUTES (OBJ_PROTECT_CLOSE | OBJ_INHERIT | OBJ_AUDIT_OBJECT_CLOSE)
```

第 0 位 OBJ_PROTECT_CLOSE:句柄表项是否被锁定,1 锁定，0 未锁定
第 1 位 OBJ_INHERIT:指向该进程所创建的子进程是否可以继承该句柄,既是否将该句柄项 拷贝到它的句柄表中
第 2 位 OBJ_AUDIT_OBJECT_CLOSE:关闭该对象时是否产生一个审计事件

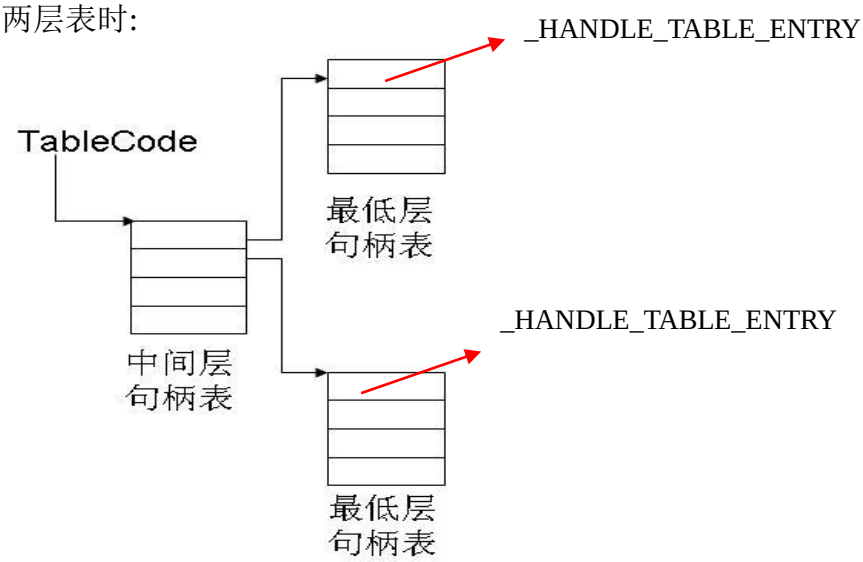
2.2XP/2003 句柄表项:

Windows 为了节省空间采用动态扩展结构,类似于页表结构,最大可扩展 3 层表._HANDLE_TABLE.TableCode 存放了第一层局部表的基址指针和层数,微软在这里设计很精妙,由于效率 32 位地址都以 4 对齐,最低 2 位为 0，微软把 _HANDLE_TABLE. TableCode 的最低两位作为句柄表层数的纪录,即 00 一层表,01 二层表 10 三层表.句柄表的结构图如下:

一层表:

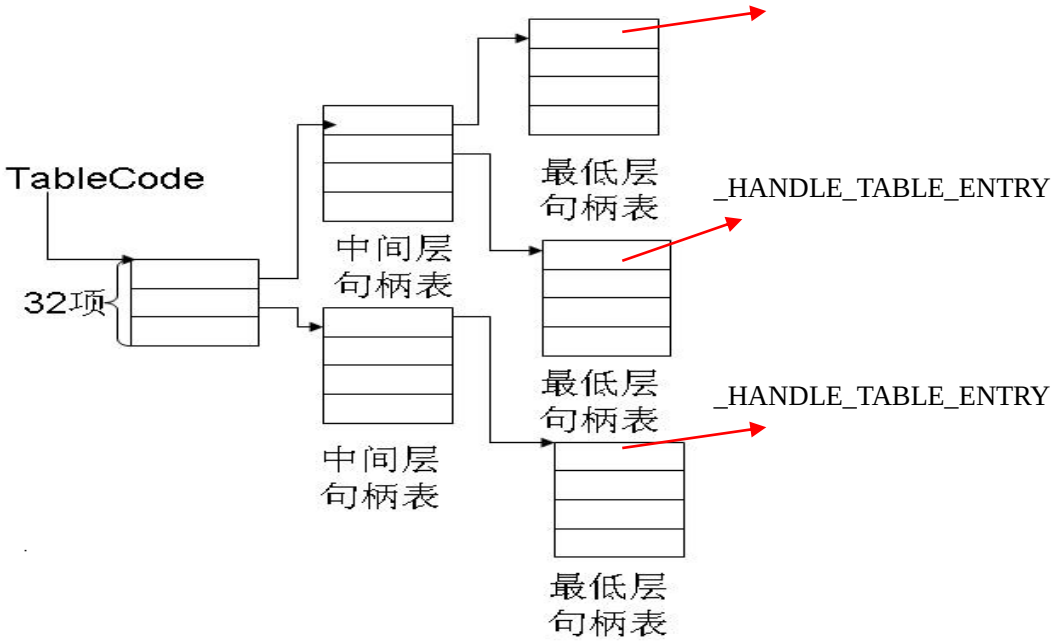


两层表时:



三层表时:

_HANDLE_TABLE_ENTRY



有上图所示,最低层局部表都是是存放着_HANDLE_TABLE_ENTTY 结构,中间层和最高层都是存放着页表指针,当句柄增加时,便会判断是否需要扩展。

2.3XP/2003 句柄表表项计数：

句柄表是动态扩展，当引用资源足够多时，句柄的数目也在增加，当到一定数目时，句柄表便会扩展，扩展的标准是什么？下面一系列宏给出了定义

(1) 最低层存放句柄表项数：

每个最底层页表存放的是_HANDLE_TABLE_ENTRY 结构, 即 4096/8 = 512,其中第一项做审计用,最多有 511 个有效项

```
#define LOWLEVEL_COUNT (TABLE_PAGE_SIZE / sizeof(HANDLE_TABLE_ENTRY))
```

(2) 中间层可以存放的项数

中间层存放的页表指针,最多有 4028 / 4 =1024

```
#define MIDLEVEL_COUNT (PAGE_SIZE / sizeof(PHANDLE_TABLE_ENTRY))
```

(3)可分配的最大句柄值,不是我们想象的无符号整数最大值

```
#define MAX_HANDLES (1<<24)  //2^24
```

(4)最高层最大项数:

```
#define HIGHLEVEL_COUNT MAX_HANDLES / (LOWLEVEL_COUNT * MIDLEVEL_COUNT)
```

即 $2^{24}/(1024*512) = 2^5$ =32,在句柄表结构图已经说明 3 层表第一层表最大有 32 项

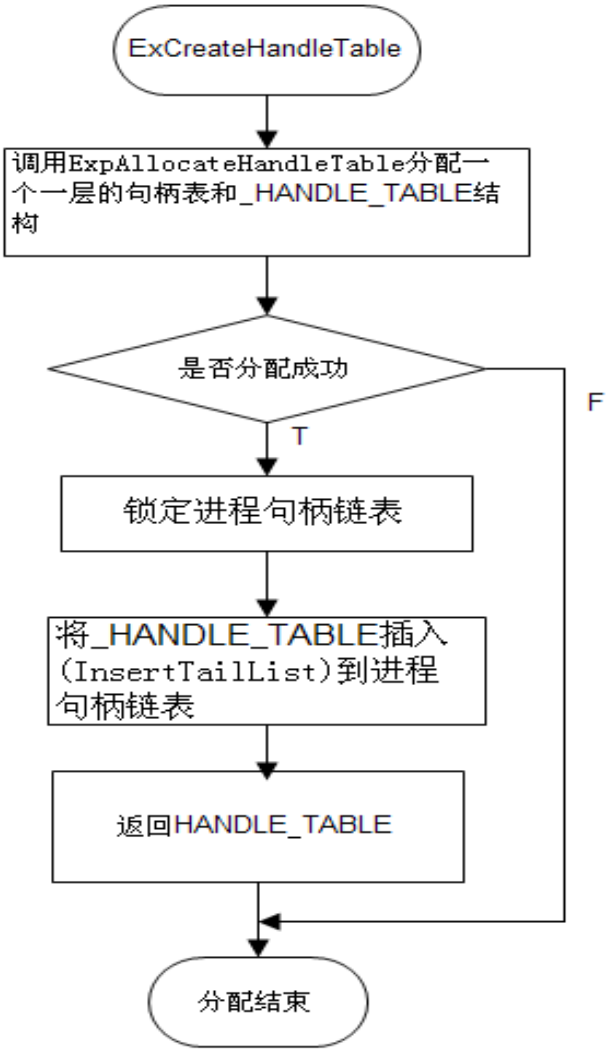
通过上面计算:二级表最大可以存放 511 * 1024 = 523264 个对象引用,没有特殊情况一般来说已经够了,所以我们一般只能观察到一层,两层句柄表

3. nt!PspCreateProcess 中创建进程句柄表

3.1 在创建进程时初始化进程对象并创建进程句柄表

创建进程时先创建进程对象，再创建进程句柄表，即

nt!PspCreateProcess->nt!ObInitProcess->nt!ExCreateHandleTable,创建句柄表的核心流程图如下:



分配进程句柄表例程步骤:

1. 调用 ExpAllocateHandleTable 分配句柄表及_HANDLE_TABLE 结构
2. 插入到进程句柄表链表

函数描述:

; Routine Description:
; This function allocate and initialize a new new handle table
; 这个例程分配并初始化一个新的句柄表(_HANDLE_TABLE)
; Arguments:
; Process - Supplies an optional pointer to the process against which quota
; will be charged.
; 提供一个将要记录相关信息(对象)的进程的指针
; Return Value:
; If a handle table is successfully created, then the address of the
; handle table is returned as the function value. Otherwise, a value
; NULL is returned.
; 如果成功函数返回 handle table 的地址,负责返回 0

_HANDLE_TABLE *__stdcall ExCreateHandleTable(_EPROCESS *pProcess)

核心算法分析:

由于进程句柄表是一个双向链表结构,是系统很重要的数据结构,所以必须考虑同步问题,只有在加锁的情况下才能修改

通过 ExpAllocateHandleTable 分配进程句柄表:

```
push 1 ; DoInit
push [ebp+pProcess] ; pProcess
call _ExpAllocateHandleTable@8 ; 创建句柄表例程
mov ebx, eax
test ebx, ebx ; 判断 ExpAllocateHandleTable 是否成功
jz   short ALLOC_HANDLE_TABLE_UNSUCCESS
```

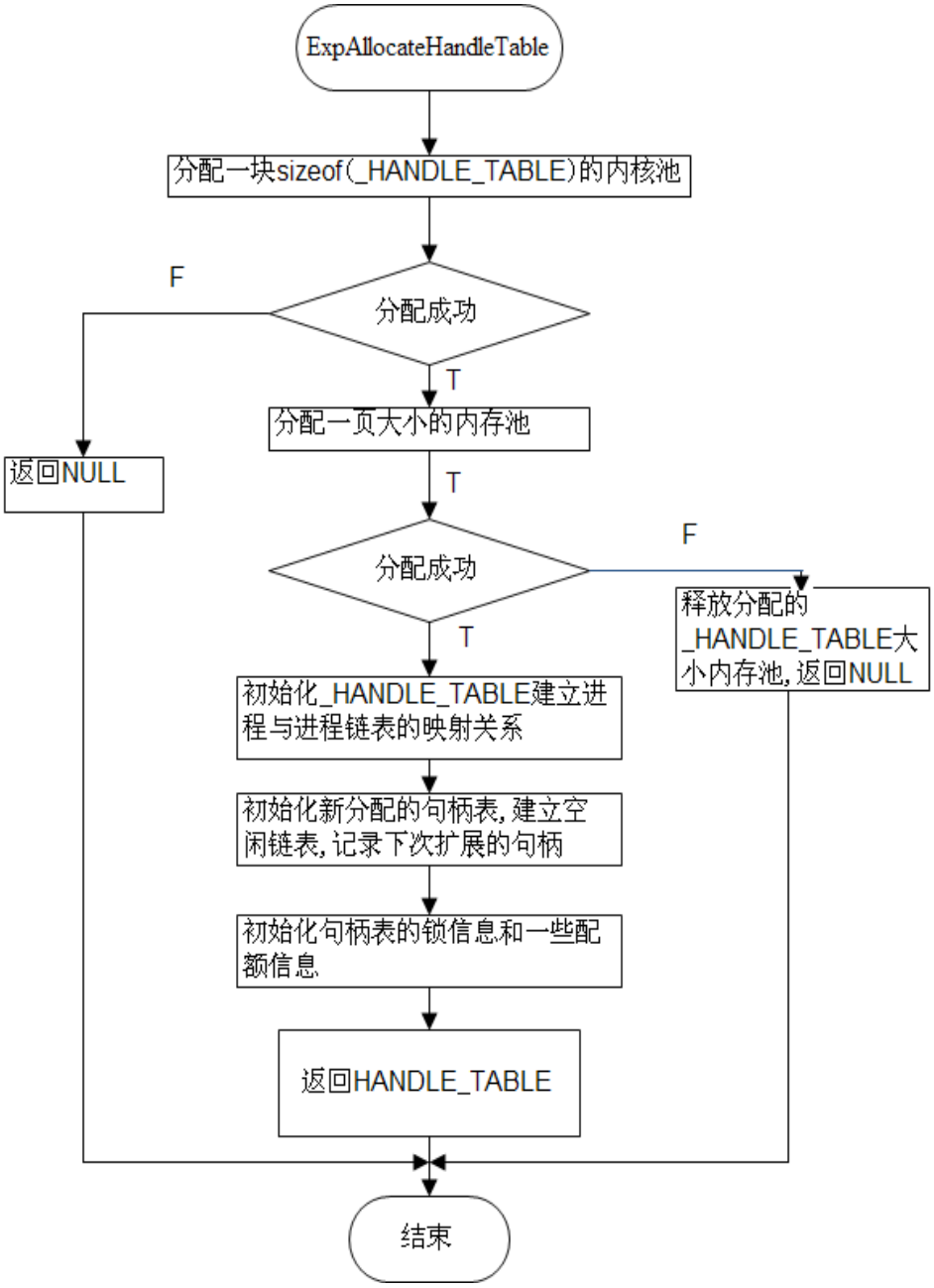
句柄表是进程句柄链表是内核重要结构,有同步问题存在,这里给句柄表上锁

```
mov eax, 0
; 系统句柄链表的改变必须要实现同步操作,所以要使用锁
mov ecx, offset _HandleTableListLock
lock bts [ecx], eax ; 加锁
```

加入进程句柄表链表

```
mov ecx, _HandleTableListHead.Blink
lea eax, [ebx+_HANDLE_TABLE.HandleTableList.Flink
                              ;取_Handle_TABLE.HandleTableList 的 Flink 指针
mov [eax+_LIST_ENTRY.Flink], ecx
;_HANDLE_TABLE.HandleTableList.Flink= HADLETABLELIST.BLINK
mov dword ptr [eax], offset _HandleTableListHead.Flink HandleTalbeListHead
; 取得句柄表链表头节点的头指针地址
mov [ecx], eax
mov _HandleTableListHead.Blink, eax
;设置,HandleTableListHead.BLink =_HANDLE_TABLE.HandleTableList.Flink
```

nt!ExpAllocateHandleTable 的核心流程:



ExpAllocateHandleTable 例程:

1. 分配_HANDLE_TABLE 内存池与分配一页内存池作为第一层句柄表
2. 初始化句柄表
3. 建立进程与句柄表的映射关系

函数描述:

; Routine Description:
;
; This worker routine will allocate and initialize a new handle table
; structure. The new structure consists of the basic handle table
; struct plus the first allocation needed to store handles. This is
; really one page divided up into the top level node, the first mid
; level node, and one bottom level node.
; 例程分配并初始化一个新的句柄表结构,加入一些存储句柄的必要的基本

结构信息
;　　到新分配的句柄表结构中.这里准备一个页内存分割给高层节点,第一个中间层节点和一个
;　　低层节点
; Arguments:
;　　Process - Optionally supplies the process to charge quota for the
;　　handle table
;　　提供审计配额信息的进程(并不是指当前进程)的指针
;　　DoInit - If FALSE then we are being called by duplicate and we don't need
;　　the free list built for the caller
;　　如果 FALSE(copy)时同样会被调用,并且调用者不需要释放创建建的表
; Return Value:
;　　A pointer to the new handle table or NULL if unsuccessful at getting
;　　pool.
;　　一个指向句柄表(HANDLE_TABLE)的指针,如果 NULL 表示获取内核内存池失败
; _HANDLE_TABLE *__stdcall ExpAllocateHandleTable(_EPROCESS *pProcess,
char DoInit)

核心算法分析:

分配_HANDLE_TABLE 结构内存池:

```
push    6274624Fh      ; Tag
push    44h            ; sizeof(_HANDLE_TABLE)
push    1              ; PoolType
call    _ExAllocatePoolWithTag@12 ;分配一个大小为 sizeof(HANDLE_TABLE)的内核内存
                                  ;池
mov     esi, eax
xor     ebx, ebx
cmp     esi, ebx       ; 判断内存池是否分配成功
jz      short AllOC_POOL_UNSUCCESS
```

分配一页内存池作为第一层句柄表

```
push    edi
push    11h
pop     ecx
push    1000h          ; 一个页表大小
push    [ebp+pProcess] ; _ERPOCESS 指针
xor     eax, eax
mov     edi, esi
rep stosd              ; 分配一页内存
call    _ExpAllocateTablePagedPoolNoZero@8 ; 分配一页内存池,作为第一级句柄表
cmp     eax, ebx       ; 判断是否分配成功
jnz     short AllOC_PAGE_SUCCESS ; 判断 DoInit 参数是否为 FALSE
push    ebx            ; TagToFree
push    esi            ; P
call    _ExFreePoolWithTag@8 ; 释放内存分配的内存池
```

```
cmp     [ebp+DoInit], bl ; 判断 DoInit 参数是否为 FALSE
mov     [esi+_HANDLE_TABLE.TableCode], eax ; 将分配的页表基地址赋值给
                                ;HANDLT_TABLE 第一项 TableCode,建立一级表的映射关系
```

初始句柄表,设置空闲句柄链表:

```
mov     dword ptr [eax+_HANDLE_TABLE_ENTRY.NextFreeTableEntry], 0FFFFFFFEh
                                ; 句柄页表的第一个句柄项作为审计用,
                        ; NextFreeTableEntry 设置为 EX_ADDITIONAL_INFO_SIGNATURE 标志
mov     [eax+_HANDLE_TABLE_ENTRY.___u0.Value], ebx ; 设置第一项 Value 为 0
mov     edx, 800h
jz      short DOINIT_FALSE
push    8
pop     ecx             ; ecx = 8
push    4
add     eax, 8          ; 指向第二项 HANDLE_TABLE_ENTRY 指针
pop     edi             ; 记录空闲项链表,当前为第二项 HANDLE_TABLE_ENTRY 值为 4

END_LOOP:
; 设置当前项的下一个空闲句柄索引
mov             [eax+_HANDLE_TABLE_ENTRY.___u1.NextFreeTableEntry],    ecx
mov     [eax+_HANDLE_TABLE_ENTRY.___u0.Value], ebx ; 设置句柄值为 0
add     ecx, edi        ; sizeof(HANDLE_TABLE_ENTRY) = 8,步长为 8
add     eax, 8          ; 指向下个 HANDLE_TABLE_ENTRY 项
cmp     ecx, edx        ; 判断是否到页表倒数第二项
jb      short END_LOOP ; 设置当前项的下一个空闲句柄索引
mov     [eax], ebx
; 页表的最后一项 NextFreeTableEntry 设置为 0，即无下一个空闲句柄
mov             [eax+_HANDLE_TABLE_ENTRY.___u1.NextFreeTableEntry],    ebx
mov     [esi+_HANDLE_TABLE.FirstFree], edi      ;设置当前项的下一个空闲项
```

建立进程与句柄表的映射关系

```
DOINIT_FALSE:
mov     eax, [ebp+pProcess]
;初始化 HANDLE_TABLE 的 QuotaProcess 为传入的 EPROCESS 指针
mov     [esi+_HANDLE_TABLE.QuotaProcess], eax
mov     eax, large fs:124h      ; 获取当前线程指针
;设置 NextHandleNeedingPool 句柄表扩展的起始页句柄索,
; NextHandleNeedingPool 记录的是以页为单位
mov [esi+_HANDLE_TABLE.NextHandleNeedingPool],edx
;获取到当前进程 EPROCESS 指针
mov     eax, [eax+_KTHREAD.___u6.ApcState.Process]
mov     eax, [eax+_EPROCESS.UniqueProcessId] ; 获取进程 ID
mov     [esi+_HANDLE_TABLE.UniqueProcessId], eax ; 填充 HADLE_TABLE
                                                ;的 UniqueProcessId 域
xor     eax, eax
mov     [esi+_HANDLE_TABLE.___u12.Flags], ebx ; 设置标记为 0
```

下图反映初始化的句柄表示意图: