南开大学

Nankai University

南　　开　　大　　学

计 算 机 学 院

计算机系统设计作业报告

PA **实验一报告**

朱浩泽 1911530

年级：2019 级

专业：计算机科学与技术

指导教师：卢冶

2022 年 3 月 16 日

目录

一、 概述

(一) 实验目的

熟悉基础设施的各种工具和手段；熟悉寄存器间的存储关系；学习实现简易调试器补充指令；学习表达式求值，监视点的实现方法

(二) 实验内容

- **阶段一**
  - 实现正确的寄存器结构体
  - 实现解析命令
  - 实现单步执行
  - 实现打印寄存器
  - 实现内存扫描
- **阶段二**
  - 实现词法分析
  - 实现递归求值
  - 实现调试中的表达式求值
- **阶段三**
  - 实现断点
  - 实现监视点

二、 阶段一

(一) 实现正确的寄存器结构体

- 为了实现 32 位、16 位、8 位寄存器各 8 个和一个程序计数器 eip，我们利用匿名 Union 各个变量互斥并共享同一内存首地址这一特点，来实现这一结构体
- 修改 nemu/include/cpu/reg.h 中的代码如下

```
typedef struct {
  union{
    /* data */
    union {
      uint32_t _32;
      uint16_t _16;
      uint8_t _8[2];
    } gpr[8];
    struct
    {
      rtlreg_t eax, ecx, edx, ebx, esp, ebp, esi, edi;
    };
  };
  vaddr_t eip;
} CPU_state;
```

- 在上面的代码中，grp 中的的 _32 代表的是 eax 中的 32 位，_16 代表的是 ax 中的 16 位，_8[2] 分别代表的是 ah 中的 8 到 16 位和 al 中的 0 到 8 位

(二) 实现解析命令

- 在 nemu/src/monitor/debug/ui.c 中实现命令表，其代码如下

```
static struct {
  char *name;
  char *description;
  int (*handler) (char *);
} cmd_table [] = {
  { "help", "Display informations about all supported commands", cmd_help },
  { "c", "Continue the execution of the program", cmd_c },
  { "q", "Exit NEMU", cmd_q },

  /* TODO: Add more commands */

  { "si", "args:[N]; exectue [N] instructions step by step", cmd_si}, //让程序单步执行 N 条指令后暂停执行，当N没有给出时，缺省为1
  { "info", "args:r/w;print information about register or watch point ", cmd_info }, //打印寄存器状态
  { "x", "x [N] [EXPR];sacn the memory", cmd_x }, //内存扫描
  { "p", "expr", cmd_p}, //表达式
  { "w", "set the watchpoint", cmd_w}, //添加监视点
  { "d", "delete the watchpoint", cmd_d} //删除监视点
};
```

- 其执行效果如下图所示

```
(nemu) help
help - Display informations about all supported commands
c - Continue the execution of the program
q - Exit NEMU
si - args:[N]; exectue [N] instructions step by step
info - args:r/w;print information about register or watch point
x - x [N] [EXPR];sacn the memory
p - expr
w - set the watchpoint
d - delete the watchpoint
```

(三) 实现单步执行

- 在 nemu/src/monitor/debug/ui.c 添加 cmd_si 函数，其代码如下

```
static int cmd_si(char *args) {
  uint64_t N = 0;
  if(args == NULL) {
    N = 1;
  }
  else {
    int temp = sscanf(args, "%lu", &N);
    if(temp <= 0) {
      printf("args error in cmd_si\n");
      return 0;
    }
  }
```

```
  cpu_exec(N);
  return 0;
}
```

- 执行效果如下图所示，输入 si 和要执行的步骤 N，进行打印

```
lighthouse@VM-24-4-ubuntu:~/main/PA/ics2017/nemu$ make run
./build/nemu -l ./build/nemu-log.txt
[src/monitor/monitor.c,47,load_default_img] No image is given. Use the default build-in image.
Welcome to NEMU!
[src/monitor/monitor.c,30,welcome] Build time: 10:56:22, Mar 16 2022
For help, type "help"
(nemu) si 5
  100000:   b8 34 12 00 00                      movl $0x1234,%eax
  100005:   b9 27 00 10 00                      movl $0x100027,%ecx
  10000a:   89 01                               movl %eax,(%ecx)
  10000c:   66 c7 41 04 01 00                   movw $0x1,0x4(%ecx)
  100012:   bb 02 00 00 00                      movl $0x2,%ebx
(nemu)
```

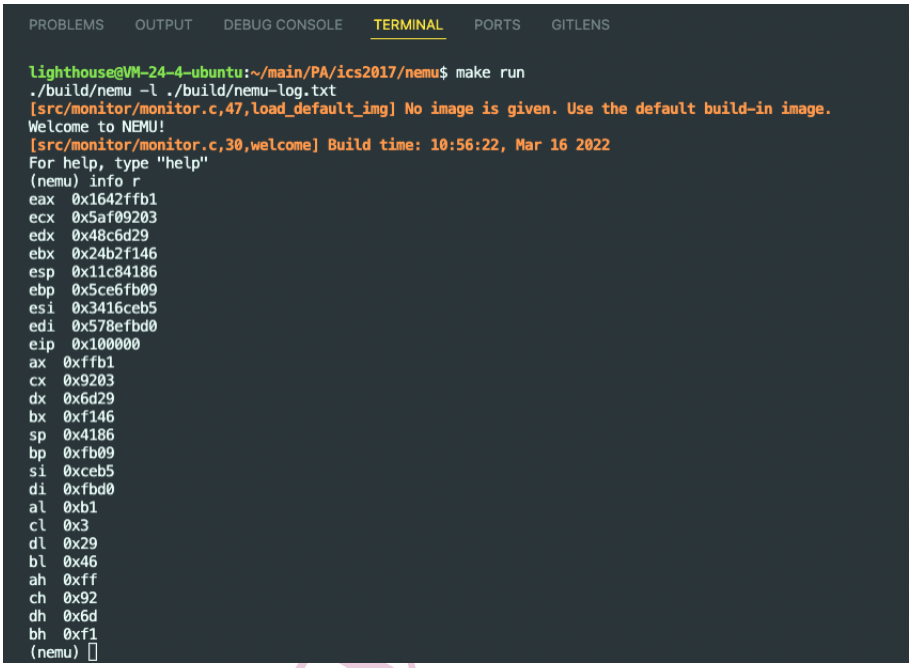
（四） 实现打印寄存器

- 在 nemu/src/monitor/debug/ui.c 添加 cmd_info 函数，其代码如下，输入参数 r 对寄存器直接进行打印，输入参数 w 对监视点进行打印

```
static int cmd_info(char *args) {
  char s;
  if(args == NULL) {
    printf("args error in cmd_info (miss args)\n");
    return 0;
  }
  int temp = sscanf(args, "%c", &s);
  if(temp <= 0) {
    //解析失败
    printf("args error in cmd_info\n");
    return 0;
  }
  if(s == 'w') {
    //打印监视点信息
    print_wp();;
    return 0;
  }
  if(s == 'r') {
    //打印寄存器
    //32bit
    for(int i = 0; i < 8; i++) {
      printf("%s  0x%x\n", regsl[i], reg_l(i));
    }
    printf("eip  0x%x\n", cpu.eip);
    //16bit
    for(int i = 0; i < 8; i++) {
      printf("%s  0x%x\n", regsw[i], reg_w(i));
    }
    //8bit
    for(int i = 0; i < 8; i++)
    {
      printf("%s  0x%x\n", regsb[i], reg_b(i));
    }
    return 0;
```

```
  }
  //如果产生错误
  printf("args error in cmd_info\n");
  return 0;
}
```

- 执行效果如下图所示

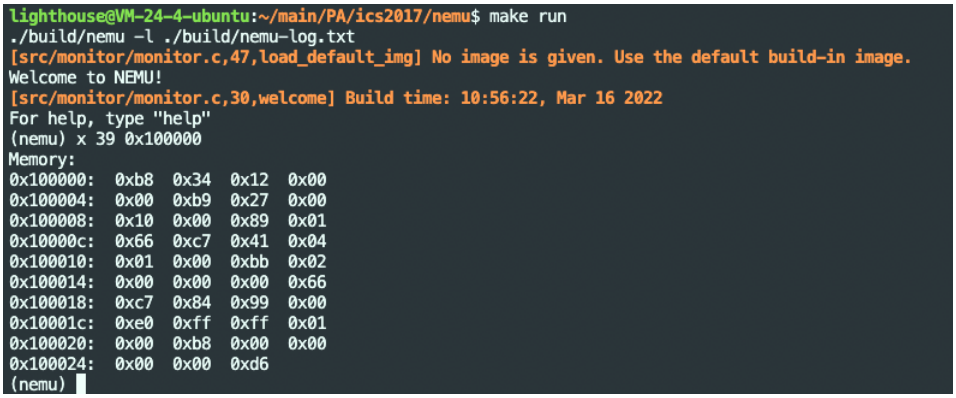


（五） 实现内存扫描

- 在 nemu/src/monitor/debug/ui.c 添加 cmd_x 函数，其代码如下

```
static int cmd_x(char *args) {
  int nLen = 0;
  vaddr_t addr;
  int temp = sscanf(args, "%d 0x%x", &nLen, &addr);
  if(temp <= 0) {
    //解析失败
    printf("args error in cmd_si\n");
    return 0;
  }
  printf("Memory:");
  for(int i = 0; i < nLen; i++) {
    if(i % 4 == 0) {
      printf("\n0x%x:  0x%02x", addr + i, vaddr_read(addr + i, 1));
    }
    else {
      printf("  0x%02x", vaddr_read(addr + i, 1));
    }
  }
  printf("\n");
  return 0;
}
```

- 该函数主要是调用了 nemu/src/memory/memory.c 中的 vaddr_read 函数进行内存扫描
- 执行效果如下图所示



三、 阶段二

在本次实验中，要求实现包括 + - * / == != >= <= > < && || ！指针和正负运算等多种运算，以及十进制数、八进制数、十六进制数等运算。

在有了编译原理课程的基础后，我们可以知道，表达式求值的过程是先将整个句子切分为各个 token，然后对各个 token 按照赋予的优先级进行分割后求返回值，最终通过这种递归运算求出整个表达式的值。

在这个求值过程中，我们需要注意寄存器的值是可以当作操作数进行运算的，且对于括号的操作跟编译原理中直接利用 lex 工具，本次实验中需要手写函数进行动态判定，这本质上是一个脱括号的过程，需要判断脱括号后其匹配是否合法。

本节实验主要代码在 nemu/src/monitor/debug/exp.c 文件中实现

(一) 词法分析

- 首先我们定义 tokens 类型和正则表达式来识别 tokens，其代码如下

```
enum {
  TK_NOTYPE = 256,
  TK_NUMBER,
  TK_HEX,
  TK_REG,
  TK_EQ,
  TK_NEQ,
  TK_AND,
  TK_OR,
  TK_NEGATIVE,
  TK_DEREF,
};

static struct rule {
  char *regex;
  int token_type;
} rules[] = {

  /* TODO: Add more rules.
   * Pay attention to the precedence level of different rules.
```

```
  */

  {" +", TK_NOTYPE}, // spaces
  {"0x[0-9A-Fa-f][0-9A-Fa-f]*", TK_HEX},
  {"0|[1-9][0-9]*", TK_NUMBER}, //数字
  {"\\$(eax|ecx|edx|ebx|esp|ebp|esi|edi|eip|ax|cx|dx|bx|sp|bp|si|di|al|cl|dl|bl|ah
      |ch|dh|bh)", TK_REG},
  {"==", TK_EQ},
  {"!=", TK_NEQ},
  {"&&", TK_AND},
  {"\\|\\|", TK_OR},
  {"!", '!'},
  {"\\+", '+'},
  {"-", '-'},
  {"\\*", '*'},
  {"\\/", '/'},
  {"\\(", '('},
  {"\\)", ')'},
};
```

- 修改代码框架中的 make_token 函数，对各种类型的输入进行处理，其中八进制数和十六进制数将会被提前处理，而寄存器则将会跳过开头的美元符号，其代码如下

```
static bool make_token(char *e) {
int position = 0;
int i;
regmatch_t pmatch;

nr_token = 0;

while (e[position] != '\0') {
  /* Try all rules one by one. */
  for (i = 0; i < NR_REGEX; i ++) {
    if (regexec(&re[i], e + position, 1, &pmatch, 0) == 0 && pmatch.rm_so == 0) {
      char *substr_start = e + position;
      int substr_len = pmatch.rm_eo;

      Log("match rules[%d] = \"%s\" at position %d with len %d: %.*s",
          i, rules[i].regex, position, substr_len, substr_len, substr_start);
      position += substr_len;

      /* TODO: Now a new token is recognized with rules[i]. Add codes
        * to record the token in the array `tokens'. For certain types
        * of tokens, some extra actions should be performed.
        */
      if(substr_len > 32) {
        assert(0);
      }
      if(rules[i].token_type == TK_NOTYPE) {
        break;
      }
      else {
        tokens[nr_token].type = rules[i].token_type;
        switch (rules[i].token_type) {
        case TK_NUMBER:
```

```
        strncpy(tokens[nr_token].str, substr_start, substr_len);
        *(tokens[nr_token].str + substr_len) = '\0';
        break;
      case TK_HEX:
        strncpy(tokens[nr_token].str, substr_start + 2, substr_len - 2); //跳过开头的0x
        *(tokens[nr_token].str + substr_len - 2) = '\0';
        break;
      case TK_REG:
        strncpy(tokens[nr_token].str, substr_start + 1, substr_len - 1); //跳过开头的$
        *(tokens[nr_token].str + substr_len - 1) = '\0';
      }
      printf("Success record : nr_token = %d, dtype = %d, str = %s\n", nr_token, tokens[nr_token].type, tokens[nr_token].str);
      nr_token += 1;
      break;
    }
   }
   if (i == NR_REGEX) {
    return false;
   }
  }

  return true;
}
```

(二) 递归求值

- 首先我们要进行的工作是检查括号匹配，其主要想法是利用一个计数器来计算匹配的数目，如果最终计数器的值不为 0 则说明括号不匹配，则表达式出错。其代码如下

```
//判断括号的匹配
bool check_parentheses(int p, int q) {
  if(p >= q) {
    //右括号少于左括号
    printf("error:p>=q in check_parntheses\n");
    return false;
  }
  if(tokens[p].type != '(' || tokens[q].type != ')'){
    //括号不匹配
    return false;
  }
  int cnt = 0; //记录当前未匹配的左括号的数目
  for(int curr = p + 1; curr < q; curr++) {
    if(tokens[curr].type == '(') {
      cnt++;
    }
    if(tokens[curr].type == ')') {
      if(cnt != 0) {
        cnt--;
      }
      else {
        //左右括号不匹配
        return false;
```

```
    }
   }
  }
  if(cnt == 0) {
   return true;
  }
  else {
   return false;
  }
}
```

- 利用一个函数来计算表达式优先级最低的运算符的位置，如果有同为最低优先级的预算符，返回最后被结合的运算符的索引位置，其代码如下

```
int findDominantOp(int p, int q) {
  int level=0;
  int pos[5]={-1, -1, -1, -1, -1};
  for(int i = p; i < q; i++){
   if(level == 0) {
    if(tokens[i].type == TK_AND || tokens[i].type == TK_OR) {
     pos[0] = i;
    }
    if(tokens[i].type == TK_EQ || tokens[i].type == TK_NEQ) {
     pos[1] = i;
    }
    if(tokens[i].type == '+' || tokens[i].type == '-') {
     pos[2] = i;
    }
    if(tokens[i].type == '*' || tokens[i].type == '/') {
     pos[3] = i;
    }
    if(tokens[i].type == TK_NEGATIVE || tokens[i].type == TK_DEREF || tokens[i].
        type == '!') {
     pos[4] = i;
    }
   }
   if(tokens[i].type=='(') {
    level++;
   }
   if(tokens[i].type==')') {
    level--;
   }
  }
  for(int i = 0; i < 5; i++) {
   if(pos[i] != -1) {
    return pos[i];
   }
  }
  printf("error in findDominantOp\n");
  printf("[p=%d,q=%d]\n",p,q);
  assert(0);
}
```

- 根据实验指导书编写 eval 函数，用于值的计算，其中的参数 p 和 q 分别代表这个子表达式的开始位置和结束为止，其代码如下

```
uint32_t eval(int p, int q) {
  if(p > q) {
    printf("error:p>q in eval, p = %d, q = %d\n", p, q);
    assert(0);
  }
  if(p == q) {
    int num;
    switch (tokens[p].type){
      case TK_NUMBER:
        sscanf(tokens[p].str, "%d", &num);
        return num;
      case TK_HEX:
        sscanf(tokens[p].str, "%x", &num);
        return num;
      case TK_REG:
        for(int i = 0; i < 8; i++) {
          if(strcmp(tokens[p].str, regsl[i]) == 0) {
            return reg_l(i);
          }
          if(strcmp(tokens[p].str, regsw[i]) == 0) {
            return reg_w(i);
          }
          if(strcmp(tokens[p].str, regsb[i]) == 0) {
            return reg_b(i);
          }
        }
        if(strcmp(tokens[p].str, "eip") == 0) {
          return cpu.eip;
        }
        else {
          printf("error in TK_REG in eval()\n");
          assert(0);
        }
    }
  }
  if(check_parentheses(p, q) == true) {
    return eval(p + 1, q - 1);
  }
  else {
    int op = findDominantOp(p, q);
    vaddr_t addr;
    int result;
    switch (tokens[op].type) {
      case TK_NEGATIVE: //负号
        return -eval(p + 1, q);
      case TK_DEREF: //指针求值
        addr = eval(p + 1, q);
        result = vaddr_read(addr, 4);
        printf("adddr=%u(0x%x)---->value=%d(0x%08x)\n", addr, addr, result, result)
            ;
        return result;
      case '!':
        result = eval(p + 1, q);
        if(result != 0) {
          return 0;
```

```
      }
      else {
        return 1;
      }
    }
    uint32_t val1 = eval(p, op - 1);
    uint32_t val2 = eval(op + 1, q);
    switch(tokens[op].type) {
      case '+':
        return val1 + val2;
      case '-':
        return val1 - val2;
      case '/':
        return val1 / val2;
      case '*':
        return val1 * val2;
      case TK_EQ:
        return val1 == val2;
      case TK_NEQ:
        return val1 != val2;
      case TK_AND:
        return val1 && val2;
      case TK_OR:
        return val1 || val2;
      default:
        assert(0);
    }
  }
  return 1;
}
```

(三) 实现调试中的表达式求值

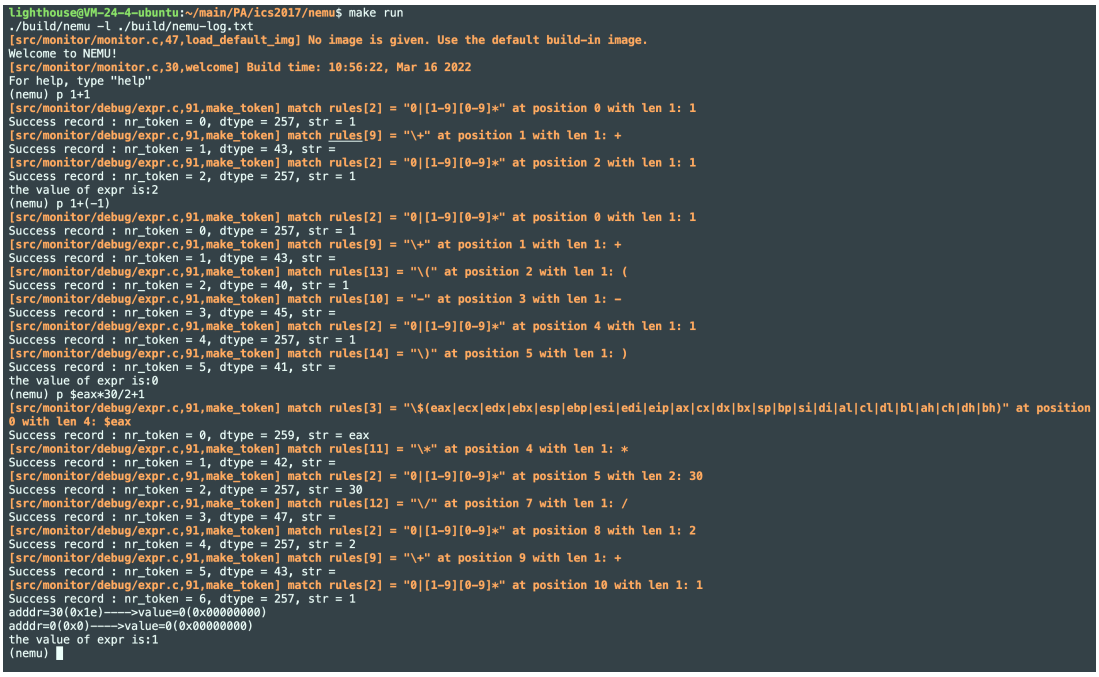
- 修改框架代码中的 expr 函数进行表达式求值的工作,其中主要分为两步:先调用 make_token 进行词法分析，再调用 eval 函数进行求值操作。为了实现这一功能，我们要对 token 进行有选择保存信息：对于寄存器和数字，我们保存其类型，并利用字符串保存寄存器的名字和数值；对于一般运算符保存 token 类型；对于加减法需要区分是单目运算符还是双目运算符，其代码如下

```
uint32_t expr(char *e, bool *success) {
  if (!make_token(e)) {
    *success = false;
    return 0;
  }
  /* TODO: Insert codes to evaluate the expression. */
  // TODO();

  // return 0;
  if(tokens[0].type == '-') {
    tokens[0].type = TK_NEGATIVE;
  }
  if(tokens[0].type == '*') {
    tokens[0].type = TK_DEREF;
  }
```

```
  for(int i = 1; i < nr_token; i++) {
    if(tokens[i].type == '-') {
      if(tokens[i - 1].type != TK_NUMBER && tokens[i - 1].type != ')') {
        tokens[i].type = TK_NEGATIVE;
      }
    }
    if(tokens[i].type == '*') {
      if(tokens[i - 1].type != TK_NUMBER && tokens[i - 1].type != ')') {
        tokens[i].type = TK_DEREF;
      }
    }
  }
  *success = true;
  return eval(0, nr_token - 1);
}
```

- 实验效果如下图所示



四、 阶段三

监视点和断点

这一部分的主要工作是通过实现两个链表（free 和 head）进行维护的，其代表空闲的和占用的监视点。主要工作和代码在 nemu/include/ monitor/watchpoint.h 和 nemu/src/monitor/debug/watchpoint.c 文件中实现。

首先是关于实现方式的，如果删除某个监视点，其余监视点不会递补该监视点的编号（这操作实际上减少了部分工作量），新增加的监视点则会在最大的监视点编号上继续增加。监视点结构及其初始化的代码如下：

```
typedef struct watchpoint {
  int NO;
```

```
  struct watchpoint *next;

  /* TODO: Add more members if necessary */
  int old; //旧的值
  char e[32]; //表达式
  int hitNum; //记录触发次数

} WP;

//结构初始化
void init_wp_pool() {
  int i;
  for (i = 0; i < NR_WP; i ++) {
    wp_pool[i].NO = i;
    wp_pool[i].next = &wp_pool[i + 1];
    wp_pool[i].old = 0;
    wp_pool[i].hitNum = 0;
  }
  wp_pool[NR_WP - 1].next = NULL;

  head = NULL;
  free_ = wp_pool;
  used_next = 0;
}
```

接下来，我们创建 new_up 函数和 free_up 函数来创建和删除监视点。主要思路是在添加监视点时，首先查找是否有足够的位置，如果有的话从链表中返回一个空闲的监视点结构，并更新 head 链表，将新添加的监视点添加到其尾部；在删除监视点的时候，先遍历 head 链表找到要被删除的监视点进行释放，然后更新 free 链表对空闲的监视点进行更新。其主要代码如下：

```
bool new_wp(char *args) {
  //从free链表中返回一个空闲监视点结构
  if(free_ == NULL) {
    assert(0);
  }
  WP* result = free_;
  free_ = free_ -> next;

  result -> NO = used_next;
  used_next++;
  result -> next = NULL;
  strcpy(result -> e, args);
  result -> hitNum = 0;
  bool is_success;
  result -> old = expr(result -> e, &is_success); //计算旧的值
  if(is_success == false) {
    printf("error in new_wp; expression fault!\n");
    return false;
  }

  wptemp = head;
  if(wptemp == NULL) {
    head = result;
  }
  else {
```

```
    while (wptemp -> next != NULL)
    {
      wptemp = wptemp -> next;
    }
    wptemp -> next = result;
  }
  printf("Success: set watchpoint %d, oldvalue = %d\n", result -> NO, result -> old);
  return true;
}

//删除监视点
bool free_wp(int num) {
  WP *chosen = NULL;
  if(head == NULL) {
    printf("no watch point now\n");
    return false;
  }
  if(head -> NO == num) {
    chosen = head;
    head = head -> next;
  }
  else {
    wptemp = head;
    while (wptemp != NULL && wptemp -> next != NULL)
    {
      /* code */
      if(wptemp -> next -> NO == num) {
        chosen = wptemp -> next;
        wptemp -> next = wptemp -> next -> next;
        break;
      }
      wptemp = wptemp -> next;
    }
  }
  if(chosen != NULL) {
    chosen -> next = free_;
    free_ = chosen;
    return true;
  }
  return false;
}
```

同时,我们还对监视点进行实时监测,其主要调用了 nemu/include/cpu/exe.c 中的 cpu_exec() 函数。通过在 cpu 每执行一次命令是都检查一下所有的监视点的表达式的值是否发生了变化，如果发生了则打印变化信息来实现。其主要代码如下

```
void print_wp() {
  if(head == NULL) {
    printf("no watchpoint now\n");
    return;
  }
  printf("watchpoint:\n");
  printf("NO.  expr    hitTimes\n");
  wptemp = head;
  while (wptemp != NULL)
  {
```

```
    printf("%d  %s    %d\n", wptemp -> NO, wptemp -> e, wptemp -> hitNum);
    wptemp = wptemp ->next;
  }
}

bool watch_wp() {
  bool is_success;
  int result;
  if(head == NULL) {
    return true;
  }
  wptemp = head;
  while (wptemp != NULL)
  {
    /* code */
    result = expr(wptemp -> e, &is_success);
    if(result != wptemp -> old)
    {
      wptemp -> hitNum += 1;
      printf("Hardware watchpoint %d:%s\n", wptemp -> NO, wptemp -> e);
      printf("Old value:%d\nNew valus:%d\n\n", wptemp -> old, result);
      wptemp -> old = result;
      return false;
    }
    wptemp = wptemp -> next;
  }
  return true;
}
```

实验效果如下图所示

```
lighthouse@VM-24-4-ubuntu:~/main/PA/ics2017/nemu$ make run
./build/nemu -l ./build/nemu-log.txt
[src/monitor/monitor.c,47,load_default_img] No image is given. Use the default build-in image.
Welcome to NEMU!
[src/monitor/monitor.c,30,welcome] Build time: 10:56:22, Mar 16 2022
For help, type "help"
(nemu) w $ecx
[src/monitor/debug/expr.c,91,make_token] match rules[3] = "\$(eax|ecx|edx|ebx|esp|ebp|esi|edi|eip|ax|cx|dx|bx|sp|bp|si|di|al|cl|dl|bl|ah|ch|dh|
bh)" at position 0 with len 4: $ecx
Success record : nr_token = 0, dtype = 259, str = ecx
Success: set watchpoint 0, oldvalue = 1944013018
(nemu) si 4
  100000:   b8 34 12 00 00                  movl $0x1234,%eax
[src/monitor/debug/expr.c,91,make_token] match rules[3] = "\$(eax|ecx|edx|ebx|esp|ebp|esi|edi|eip|ax|cx|dx|bx|sp|bp|si|di|al|cl|dl|bl|ah|ch|dh|
bh)" at position 0 with len 4: $ecx
Success record : nr_token = 0, dtype = 259, str = ecx
  100005:   b9 27 00 10 00                  movl $0x100027,%ecx
[src/monitor/debug/expr.c,91,make_token] match rules[3] = "\$(eax|ecx|edx|ebx|esp|ebp|esi|edi|eip|ax|cx|dx|bx|sp|bp|si|di|al|cl|dl|bl|ah|ch|dh|
bh)" at position 0 with len 4: $ecx
Success record : nr_token = 0, dtype = 259, str = ecx
Hardware watchpoint 0:$ecx
Old value:1944013018
New valus:1048615

(nemu) info w
watchpoint:
NO.  expr    hitTimes
0  $ecx    1
(nemu) delete wacthpoint 0
Unknown command 'delete'
(nemu) d 0
Success delete watchpoint 0
(nemu) info w
no watchpoint now
(nemu) c
nemu: HIT GOOD TRAP at eip = 0x00100026

(nemu)
```

五、 必答题

(一) 查阅 i386 手册回答问题

1. EFLAGS 寄存器中的 CF 位是什么意思?

CF 是 Carry Flag 的缩写，位于 EFLAGS 的第 0 位，是标志进位的意思。用来允许一条指令的结果影响后面的指令，即一些指令用于设置高位进位或借位，否则清 0。该结果是位于 i386-2.3Register(P33) 和 i386-附录 C(P419)

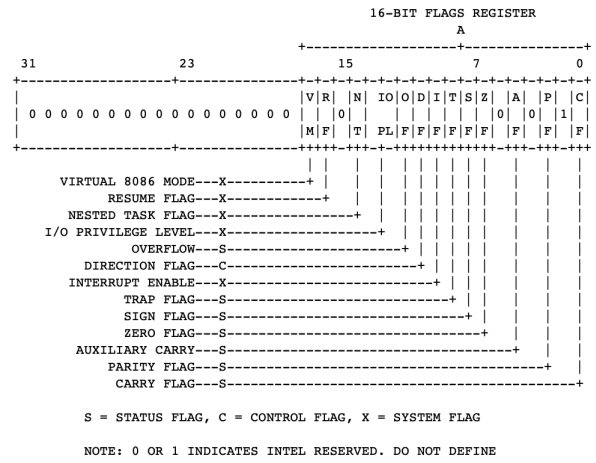
2.3.4 Flags Register

The flags register is a 32-bit register named EFLAGS. Figure 2-8 defines the bits within this register. The flags control certain operations and indicate the status of the 80386.

The low-order 16 bits of EFLAGS is named FLAGS and can be treated as a unit. This feature is useful when executing 8086 and 80286 code, because this part of EFLAGS is identical to the FLAGS register of the 8086 and the 80286.

The flags may be considered in three groups: the status flags, the control flags, and the systems flags. Discussion of the systems flags is delayed until Part II.

Figure 2-8. EFLAGS Register



2. ModR/M 字节是什么?

ModR/M 是 opcode(操作码) 后面的一个字节，用来表示操作数是在内存中还是在寄存器。

3. mov 指令的具体格式是怎么样的?

maaas