《源码探秘 CPython》66. 生成器的实现原理（下）

原创 古明地觉 古明地觉的编程教室 2022-04-12 08:30

楔子

上一篇文章我们考察了生成器的运行时行为，发现了它神秘的一面。生成器可以通过yield关键字暂停执行，并且还可以通过__next__方法从上一次暂停的位置重新恢复执行。

```
def gen():
    print("生成器开始执行了")

    name = "古明地觉"
    print("创建了一个局部变量name")
    yield name

    age = 16
    print("创建了一个局部变量age")
    yield age

    gender = "female"
    print("创建了一个局部变量gender")
    yield gender

# 生成器函数也是一个函数
print(gen)  # <function gen at 0x000001DABAD951F0>
print(type(gen))  # <class 'function'>

# 调用生成器函数并不会立刻执行，而是会返回一个生成器对象
g = gen()
print(g)  # <generator object gen at 0x000001D89E9D7270>
print(g.__class__)  # <class 'generator'>
```

基于这个特性，我们还可以实现协程。

那么本次就来看看生成器底层是怎么实现的？

生成器函数的创建

关于普通函数和生成器函数，我们举一个非常生动的例子。

普通函数可以想象成一匹马，只要调用了，那么不把里面的代码执行完毕誓不罢休。而函数内部的 return xxx，就是调用之后的返回值。

生成器函数则好比一头驴，调用的时候并没有动，只是返回一个生成器对象，然后需要每次拿鞭子抽一下（调用一次__next__），才往前走一步。通过不断地驱动生成器，最终将里面的代码执行完毕，然后将设置了返回值的 StopIteration 抛出来。

另外我们也可以把生成器看成是可以暂停的函数，其中的 yield 就类似于 return，只不过可以有多个 yield。当执行到一个 yield 时，将值返回、同时暂停在此处。然后当调用 __next__

驱动时，从暂停的地方继续执行，直到找到下一个 yield。如果找不到下一个 yield，就会抛出 StopIteration 异常。

然后我们来看看生成器函数是如何构建的？

```
s = """
def gen():
    yield
"""

if __name__ == '__main__':
    import dis
    dis.dis(compile(s, "<file>", "exec"))
"""
 0 LOAD_CONST               0 (<code object gen at 0x0......>)
 2 LOAD_CONST               1 ('gen')
 4 MAKE_FUNCTION            0
 6 STORE_NAME               0 (gen)
 8 LOAD_CONST               2 (None)
 10 RETURN_VALUE

Disassembly of <code object gen at 0x0......>:

 0 LOAD_CONST               0 (None)
 2 YIELD_VALUE
 4 POP_TOP
 6 LOAD_CONST               0 (None)
 8 RETURN_VALUE
"""
```


字节码指令依旧分为两部分，这里我们只看模块对应的字节码指令。可以发现，构建生成器函数时的指令和构建普通函数是一模一样的。原因也很好解释，因为生成器函数也是函数。

当然啦，还有协程函数、异步生成器函数，它们在构建时的字节码指令都是一样的，因为它们都是函数，类型都是 <class 'function'>。

然后调用生成器函数，返回生成器对象；调用协程函数，返回协程对象；调用异步生成器函数，返回异步生成器对象；调用普通函数，会立刻执行内部代码，返回的就是函数的返回值。

那么问题来了，既然它们都是函数，那虚拟机在调用时是如何区分彼此的呢？毕竟返回的对象不同。还记得 PyCodeObject 的 co_flags 吗？它除了可以判断一个函数是否定义了 *args、**kwargs，更重要的是它还可以判断函数的类型。

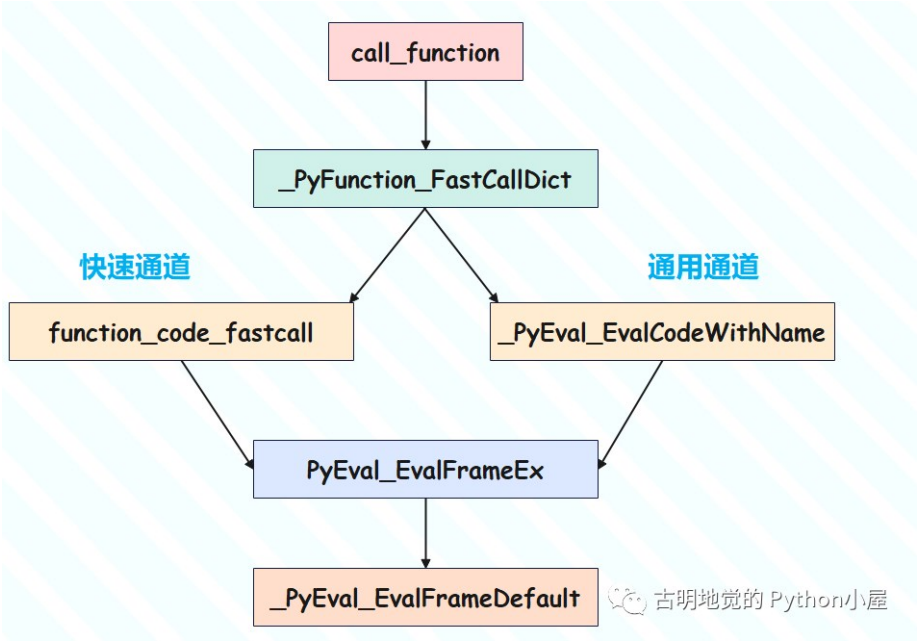
```
def gen():
    yield

# 生成器函数，co_flags & 0x20 为真
# 调用会得到生成器，而生成器的类型是 <class 'generator'>
print(gen.__code__.co_flags & 0x20)  # 32


async def coro():
    return

# 协程函数，co_flags & 0x80 为真
# 调用会得到协程，而协程的类型是 <class 'coroutine'>
print(coro.__code__.co_flags & 0x80)  # 128


async def async_gen():
    yield

# 异步生成器函数，co_flags & 0x200 为真
# 调用会得到异步生成器，而异步生成器的类型是 <class 'async_generator'>
print(async_gen.__code__.co_flags & 0x200)  # 512
```

这些都是在语法解析的时候确定的，当编译器看到一个函数里面出现了 yield，那么它就知道这是生成器函数。于是创建 PyCodeObject 的时候，会设置 co_flags，让它 & 0x20 为真。

```
//Include/code.h
#define CO_OPTIMIZED    0x0001
#define CO_NEWLOCALS    0x0002
#define CO_VARARGS      0x0004
#define CO_VARKEYWORDS  0x0008
#define CO_NESTED       0x0010
#define CO_GENERATOR    0x0020
```

我们看到 CO_GENERATOR 的值为0x20，如果我们想判断一个函数是否是生成器函数，那么就可以通过 co_flags & 0x20 是否为真来判断。

当生成器函数创建完毕之后该干啥了？显然是进行调用，来创建一个生成器。还记得函数的调用流程吗？



由于这是一个生成器函数，因此调用时不会进入快速通道，而是会进入通用通道。

```
PyObject *
_PyEval_EvalCodeWithName(PyObject *_co, PyObject *globals, PyObject *loc
als,
           PyObject *const *args, Py_ssize_t argcount,
           PyObject *const *kwnames, PyObject *const *kwargs,
           Py_ssize_t kwcount, int kwstep,
           PyObject *const *defs, Py_ssize_t defcount,
           PyObject *kwdefs, PyObject *closure,
           PyObject *name, PyObject *qualname)
{
    //......
    //根据 co_flags 检测函数的种类
    //如果是生成器函数、协程函数、异步生成器函数三者之一
    if (co->co_flags & (CO_GENERATOR | CO_COROUTINE | CO_ASYNC_GENERATOR
)) {
        PyObject *gen;
        int is_coro = co->co_flags & CO_COROUTINE;
        Py_CLEAR(f->f_back);
        if (is_coro) {
            //如果是协程函数，创建协程
            gen = PyCoro_New(f, name, qualname);
        } else if (co->co_flags & CO_ASYNC_GENERATOR) {
            //如果是异步生成器函数，创建异步生成器
            gen = PyAsyncGen_New(f, name, qualname);
```

```
        } else {
            //否则说明是生成器函数，那么创建生成器
            gen = PyGen_NewWithQualName(f, name, qualname);
        }
        if (gen == NULL) {
            return NULL;
        }
        //被 GC 跟踪
        _PyObject_GC_TRACK(f);
        //返回
        return gen;
    }
    //......
    //......
}
```

在编译时将函数种类体现在 co_flags 中，调用时再根据 co_flags 创建不同的对象。

通过源码我们得知，生成器对象是通过调用PyGen_NewWithQualName创建的，显然它就是生成器创建过程的第一现场。不过在看这个函数之前，我们先看一下生成器的底层结构，位于 Include/genobject.h 中。

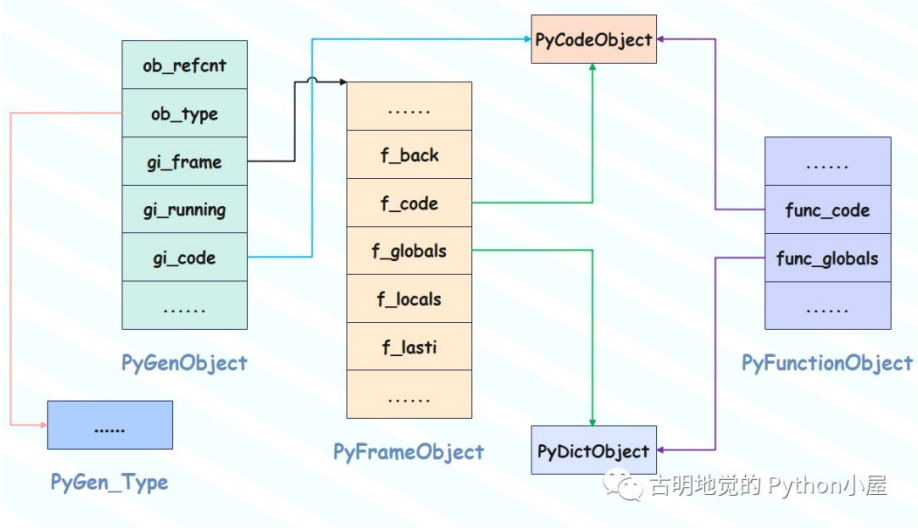
```
#define _PyGenObject_HEAD(prefix)
    PyObject_HEAD
    struct _frame *prefix##_frame;
    char prefix##_running;
    PyObject *prefix##_code;
    PyObject *prefix##_weakreflist;
    PyObject *prefix##_name;
    PyObject *prefix##_qualname;
    _PyErr_StackItem prefix##_exc_state;

typedef struct {
    _PyGenObject_HEAD(gi)
} PyGenObject;
```


如果我们将其整理一下，等价于如下：

```
typedef struct {
    //头部信息
    PyObject_HEAD
    //生成器执行时对应的栈帧对象
    //用于保存执行上下文信息
    struct _frame *gi_frame;
    //标识生成器是否在运行当中
    char gi_running;
    //生成器函数的 PyCodeObject 对象
    PyObject *gi_code;
    //弱引用相关，不深入讨论
    PyObject *gi_weakreflist;
    //生成器的名字
    PyObject *gi_name;
    //生成器的全限定名
```

```
    PyObject *gi_qualname;
    //生成器执行出现异常时的异常栈
    //更准确的说，其实是异常栈的一个 entry
    //里面包含了 exc_type、exc_value、exc_traceback
    //以及通过 previous_item 指针指向上一个 entry
    _PyErr_StackItem *gi_exc_state;
} PyGenObject;

//所以生成器在底层对应 PyGenObject，它的类型是 PyGen_Type。
```

至此，生成器的结构就非常清晰了，我们来画一张图：



和普通函数一样，当生成器函数被调用时，虚拟机将为其创建栈帧对象，用于维护函数的执行上下文。PyCodeObject对象、全局名字空间、局部名字空间、以及运行时栈都在里面。

但和普通函数不同的是，生成器函数的PyCodeObject对象带有生成器标识，在调用的时候，虚拟机不会立刻执行里面的字节码，栈帧对象也不会被接入到调用链中，所以f_back字段此时是空的。相反，虚拟机创建了一个生成器对象，并将栈帧交由 gi_frame 成员保存，然后将生成器作为函数的调用结果返回。

我们可以从Python层面来验证得到的结论。

```
def gen():
    yield

# 在内部会创建栈帧，但是和普通函数不同
# 虚拟机不会立即执行字节码，而是又创建一个生成器
# 然后让 "生成器 -> gi_frame = 栈帧"
g = gen()

# 通过 gi_frame 即可拿到栈帧
print(g.gi_frame)  # <frame at 0x000.....

# 由于生成器还没有运行，所以栈帧的 f_back 是 None
# 如果是普通函数的栈帧，那么它的 f_back 应该是模块对应的栈帧
# 因为对于普通函数而言，能拿到它的栈帧，说明一定执行了
# 而生成器则不同，它还没有运行，所以 f_back 是 None
print(g.gi_frame.f_back)  # None

# f_lasti 表示上一条已执行完毕的字节码指令的偏移量
# -1 表示尚未执行
print(g.gi_frame.f_lasti)  # -1

# 所以 gi_running 也是 False
print(g.gi_running)  # False

# 还可以获取 PyCodeObject，有三种方式
```

```
print(
    g.gi_code is g.gi_frame.f_code is gen.__code__
)  # True
```

所以生成器相当于对栈帧进行了一个封装，当我们驱动它执行时，会将内部的栈帧插入到栈帧链中执行。一旦遇到 yield，停止运行，将栈帧从栈帧链中移除。

然后再次驱动执行，那么再将内部的栈帧插入到栈帧链中执行字节码指令，由于 f_lasti 记录了上一条已执行完毕的指令的偏移量，所以是从上次中断的位置开始执行的。如果又遇到了 yield，那么依旧停止运行，将栈帧从栈帧链中移除。

就这样不断重复，直到执行完毕。而生成器一旦执行完毕了（return 之后），那么会将栈帧设置为 None。

```
def gen():
    yield

g = gen()

print(g.gi_frame is None)  # False

for _ in g:
    pass

print(g.gi_frame is None)  # True
```

所以生成器只能顺序遍历一次，从这里我们也可以看出原因，因为遍历完之后栈帧都没了。

```
g = (x for x in [1, 2, 3])

print(tuple(g))  # (1, 2, 3)
print(tuple(g))  # ()
```

还是很好理解的。

然后再看看生成器的创建过程，我们上面提到了，生成器是在通用通道里面调用PyGen_NewWithQualName创建的，来看看这个函数长什么样子，

```
// Objects/genobject.c
PyObject *
PyGen_NewWithQualName(PyFrameObject *f, PyObject *name, PyObject *qualnam
e)
{
    return gen_new_with_qualname(&PyGen_Type, f, name, qualname);
}
```

该函数接收三个参数，分别是栈帧对象、__name__、__qualname__。注意这个栈帧对象，它是在通用通道里面创建好的，然后将其作为参数传递到PyGen_NewWithQualName里面进行调用。

而该函数又调用了gen_new_with_qualname，所以具体逻辑藏身于这个函数里面，来看一下。

```
static PyObject *
gen_new_with_qualname(PyTypeObject *type, PyFrameObject *f,
                      PyObject *name, PyObject *qualname)
```

```c
{
    //为生成器对象申请内存
    //这里是PyObject_GC_New，因为生成器对象要参与 GC
    //所以还要为PyGC_Head 申请内存
    PyGenObject *gen = PyObject_GC_New(PyGenObject, type);
    //等于NULL，表示申请失败
    if (gen == NULL) {
        Py_DECREF(f);
        return NULL;
    }
    //将通用通道里面的栈帧交给 gi_frame 保存
    //所以普通函数和生成器函数调用时都会创建栈帧
    //但普通函数调用时，会在栈帧里面将字节码全部执行完毕
    //而生成器函数调用时，会返回生成器对象，并将栈帧保存在里面
    gen->gi_frame = f;
    //注意这里，又让栈帧的 f_gen 成员保存生成器对象
    //如果是普通函数，那么 f_gen 显然为空
    f->f_gen = (PyObject *) gen;
    Py_INCREF(f->f_code);
    //让生成器的 gi_code 也保存 PyCodeObject
    gen->gi_code = (PyObject *)(f->f_code);
    //初始时，gi_running 为 0
    gen->gi_running = 0;
    //弱引用列表为空
    gen->gi_weakreflist = NULL;
    //gi_exc_state和异常栈相关
    //内部成员初始为 NULL
    gen->gi_exc_state.exc_type = NULL;
    gen->gi_exc_state.exc_value = NULL;
    gen->gi_exc_state.exc_traceback = NULL;
    gen->gi_exc_state.previous_item = NULL;
    //设置 gi_name
    if (name != NULL)
        gen->gi_name = name;
    else
        gen->gi_name = ((PyCodeObject *)gen->gi_code)->co_name;
    Py_INCREF(gen->gi_name);
    //设置gi_qualname
    if (qualname != NULL)
        gen->gi_qualname = qualname;
    else
        gen->gi_qualname = gen->gi_name;
    Py_INCREF(gen->gi_qualname);
    //让生成器对象被 GC 跟踪
    _PyObject_GC_TRACK(gen);
    //返回
    return (PyObject *)gen;
}
```

所以生成器就是对栈帧进行了一个封装，通过 yield 和 __next__、send，我们可以操控栈帧的执行。但普通函数没有给我们这个机会，它在创建完栈帧之后，不将字节码全执行完是不会罢休的。

生成器的执行

当执行g = gen()之后，会返回生成器对象并交给变量g指向，这个时候还没有开始执行，f_lasti 为 -1。

但我们可以调用 __next__、send 方法驱动它执行，因此这意味着，生成器执行的秘密可以通过这两个方法找到。

那么这两个方法在什么地方呢？我们说类型对象决定实例对象的行为，实例对象相关操作函数的指针都保存在类型对象中。而生成器作为 Python 对象的一员，当然也遵守这一法则。

> __next__ 在底层对应类型对象的 tp_iternext。

```
    0,                                      /* tp_richcompare */
    offsetof(PyGenObject, gi_weakreflist),  /* tp_weaklistoffset */
    PyObject_SelfIter,                      /* tp_iter */
    (iternextfunc)gen_iternext,             /* tp_iternext */
    gen_methods,                            /* tp_methods */
    gen_memberlist,                         /* tp_members */
    gen_getsetlist,                         /* tp_getset */
    0,                                      /* tp_base */
```


因此我们很容易找到 gen_iternext 函数。

当然了，send 方法也可以驱动生成器的执行，它在底层对应 _PyGen_Send 函数。

```
static PyMethodDef coro_methods[] = {
    {"send",(PyCFunction)_PyGen_Send, METH_O, coro_send_doc},
    {"throw",(PyCFunction)gen_throw, METH_VARARGS, coro_throw_doc},
    {"close",(PyCFunction)gen_close, METH_NOARGS, coro_close_doc},
    {NULL, NULL}        /* Sentinel */
};
```


我们来看一下这两个函数，位于 genobject.c 中：

```c
static PyObject *
gen_iternext(PyGenObject *gen)
{
    return gen_send_ex(gen, NULL, 0, 0);
}

PyObject *
_PyGen_Send(PyGenObject *gen, PyObject *arg)
{
    return gen_send_ex(gen, arg, 0, 0);
}
```

我们看到这两者都是调用 gen_send_ex 函数完成工作的，只是__next__ 不接收参数，因此 gen_iternext 在调用时传递了一个空；而 send 接收一个参数，因此_PyGen_Send 在调用时传递一个 arg。

核心逻辑显然在 gen_send_ex 函数里面，并且这个函数很长，但核心代码为以下几行：

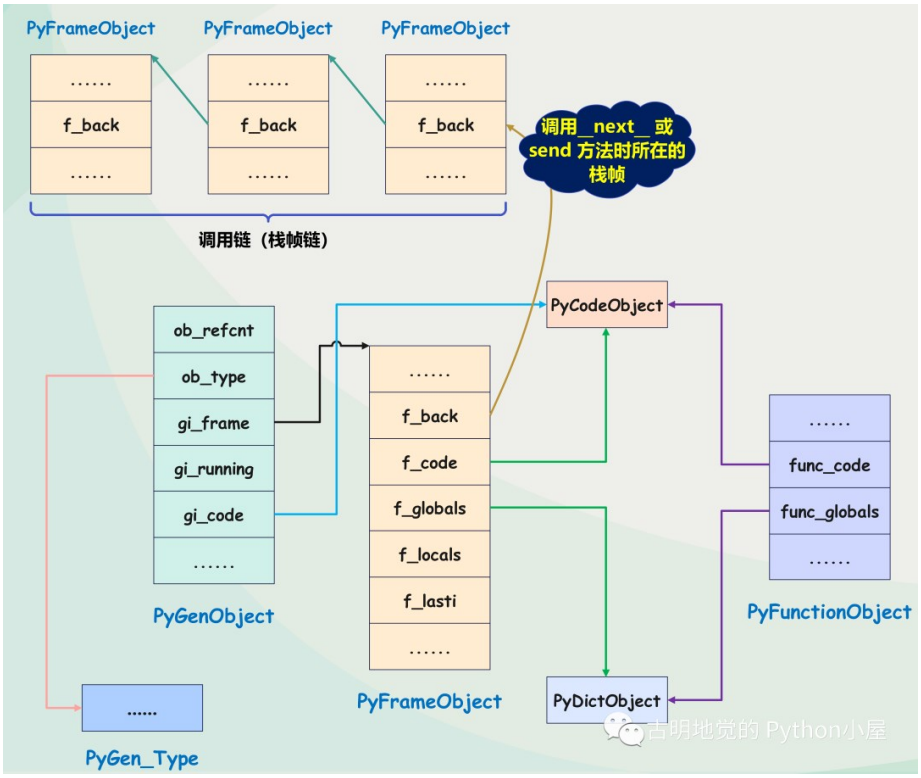
```c
static PyObject *
gen_send_ex(PyGenObject *gen, PyObject *arg, int exc, int closing)
{
    //获取线程状态对象
    PyThreadState *tstate = _PyThreadState_GET();
    //拿到生成器内部保存的栈帧对象
    PyFrameObject *f = gen->gi_frame;
    PyObject *result;  // 返回值
    // ......
    //重点来了，f->f_back 表示生成器内部的栈帧的上一级栈帧
    //而tstate->frame表示当前栈帧，也就是调用__next__或者send时所在的栈帧
    //那么下面这行代码执行完之后，生成器内部的栈帧就变成了当前栈帧
    //而tstate->frame则变成生成器内部栈帧的上一级栈帧
    //所以这不是就将生成器内部的栈帧插入到栈帧链当中了呢？
    f->f_back = tstate->frame;
    // ......
    //而插入到栈帧链之后要干啥？显然是执行栈帧内的字节码
    //栈帧对象保存着生成器的执行上下文
```

```
19      //f_lasti 字段则跟踪生成器内部代码的执行进度
20      //当遇到 yield 之后，将后面的值返回给 result
21      result = PyEval_EvalFrameEx(f, exc);
22      // ......
23  }
```

至于剩下的逻辑我们显然再清楚不过了，PyEval_EvalFrameEx 函数最终会调用 _PyEval_EvalFrameDefault 函数执行栈帧对象中 f_code 指向的字节码。

而这个函数我们在介绍虚拟机的时候见过，对它并不陌生。虽然它体量巨大，好几千行代码，但逻辑却非常单纯。就是把自己模拟成一颗 CPU，内部通过一个无限 for 循环逐条遍历字节码指令，然后交给内部的一个巨型 switch case 语句，根据不同的指令在栈上执行不同的case分支。

每执行完一条指令就自增 f_lasti 字段、next_instr 字段，直到字节码全部执行完毕、或者中间出现异常时结束循环。当然啦，遇到 yield 也会结束循环。



生成器的暂停

先看看生成器内部的字节码长什么样子？

```
1  def gen():
2      name = "古明地觉"
3      yield name
4
5      age = 16
6      xxx = yield age
7
8      gender = "female"
9      yield gender
```

字节码如下：

```
1    # 加载字符串常量 "古明地觉"
2    0 LOAD_CONST               1 ('古明地觉')
```

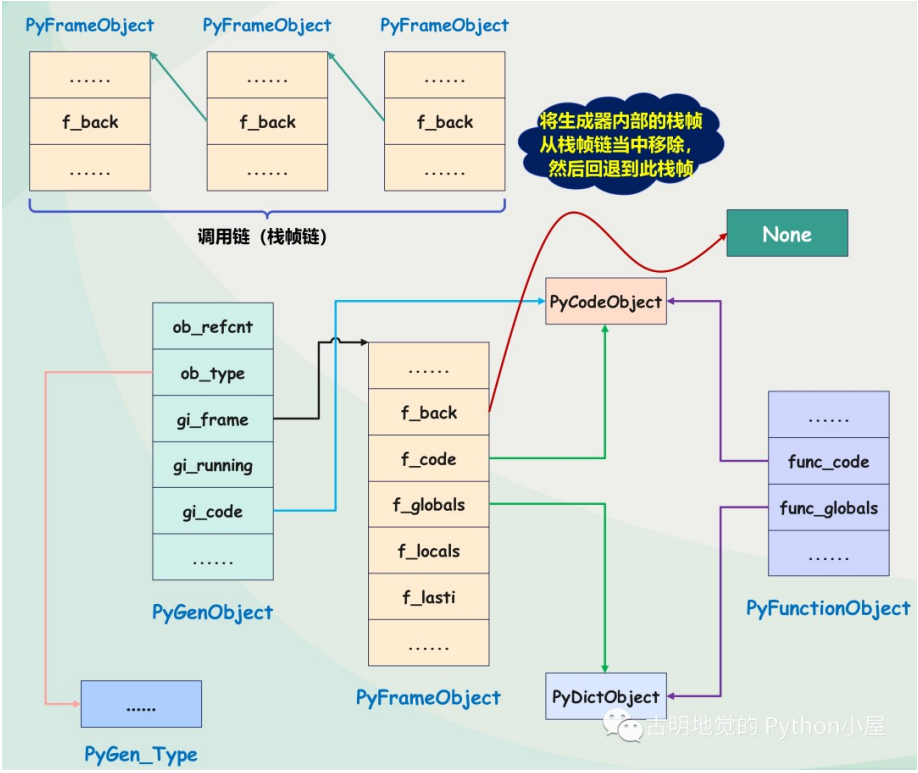
```
  # 使用局部变量 name 保存
  2 STORE_FAST               0 (name)
  # 对应 yield name
  # 加载局部变量 name，然后将值 yield 出去
  # 注意：执行完 YIELD_VALUE 之后，生成器会暂停
  4 LOAD_FAST                0 (name)
  6 YIELD_VALUE
  # 这里为啥会出现 POP_TOP 呢？
  # 因为驱动生成器执行时，我们是可以传值的
  # 但是 yield name 左边没有变量接收，所以是 POP_TOP
  8 POP_TOP

  # 加载整数常量 16
 10 LOAD_CONST               2 (16)
  # 使用局部变量 age 保存
 12 STORE_FAST               1 (age)
  # 加载局部变量 age，然后将值 yield 出去
 14 LOAD_FAST                1 (age)
 16 YIELD_VALUE
  # 但这里需要注意，因为是 xxx = yield age
  # 所以这里是 STORE_FAST，会将调用方传递的值使用 xxx 变量保存
 18 STORE_FAST               2 (xxx)

  # 加载字符串常量 "female"
 20 LOAD_CONST               3 ('female')
  # 使用局部变量 gender 保存
 22 STORE_FAST               3 (gender)
  # 加载局部变量 gender，然后将值 yield 出去
 24 LOAD_FAST                3 (gender)
 26 YIELD_VALUE
  # 弹出调用方传递的值
 28 POP_TOP

  # return None
 30 LOAD_CONST               0 (None)
 32 RETURN_VALUE
```

指令很好理解，显然重点是在 YIELD_VALUE 上面，我们看一下这个指令：

```
case TARGET(YIELD_VALUE): {
    //执行 yield value 时
    //会先将 value 压入运行时栈
    //然后这里再将 value 从栈里面弹出
    retval = POP();
    //异步生成器逻辑，当前不用关注
    if (co->co_flags & CO_ASYNC_GENERATOR) {
        PyObject *w = _PyAsyncGenValueWrapperNew(retval);
        Py_DECREF(retval);
        if (w == NULL) {
            retval = NULL;
            goto error;
        }
        retval = w;
    }
    //stack_pointer指向运行时栈的栈顶
    //所以要赋值给f->f_stacktop，因为要跳出循环了
    f->f_stacktop = stack_pointer;
    //直接通过goto语句跳出for循环
    //来到 exit_yielding 标签
    goto exit_yielding;
}
```

紧接着，_PyEval_EvalFrameDefault 会将当前栈帧(也就是生成器内部的栈帧)从栈帧链中移除。至于移除方式也很简单，只需要将它的 f_back 设置为 None 即可，然后回退到上一级

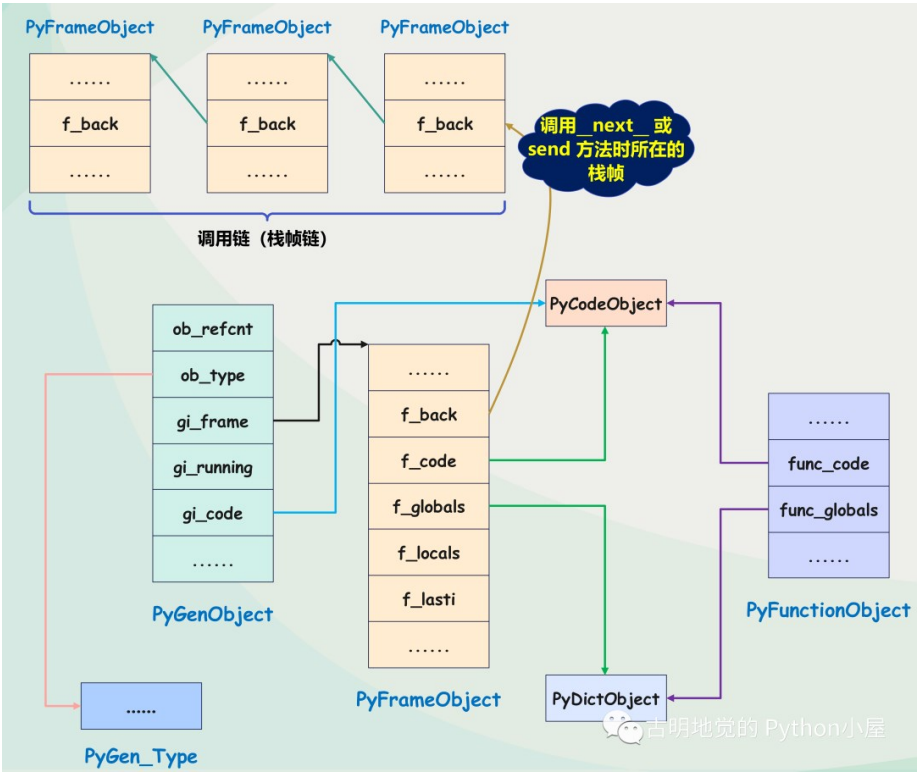
栈帧。



而 _PyEval_EvalFrameDefault 函数会将 yield 后面的值返回，并最终被 __next__ 或 send 方法返回给调用者。

生成器的恢复

当再次调用 __next__ 或者 send 方法时，生成器将恢复执行，底层会调用 gen_send_ex 函数。然后虚拟机会把生成器的栈帧对象挂到栈帧链中，并最终调用 PyEval_EvalFrameEx 函数逐条执行字节码。



而在这个过程中，调用方发送的数据会被放在生成器内部栈帧的运行时栈的栈顶，所以

YIELD_VALUE 的下一条指令是 POP_TOP 或者 STORE_FAST，当然也有可能是 STORE_GLOBAL。

总之 yield xxx 的左侧如果没有变量接收，那么就将调用方发送的值从栈顶弹出并丢弃，否则就保存下来。

我们再看一下上面的代码：

```
def gen():
    name = "古明地觉"
    yield name

    age = 16
    xxx = yield age

    gender = "female"
    yield gender
```

观察它的字节码指令，我们看到里面有三个 YIELD_VALUE，偏移量分别是 6、16、26。

```
g = gen()

# 生成器尚未执行，f_lasti 初始为 -1
print(g.gi_frame.f_lasti)  # -1

# yield name 对应三条指令
# 分别是：LOAD_FAST、YIELD_VALUE、POP_TOP
# 我们说它会在 yield 处暂停，这是站在 Python 的角度
# 如果从虚拟机的角度，应该是在YIELD_VALUE的结束位置暂停
g.__next__()
# f_lasti 表示上一条已执行的指令的偏移量
# 而上一条执行的指令是 YIELD_VALUE，因此是 6
print(g.gi_frame.f_lasti)
print(g.gi_frame.f_locals)
"""
6
{'name': '古明地觉'}
"""

# 第二个 YIELD_VALUE 的偏移量是 16
g.__next__()
print(g.gi_frame.f_lasti)
print(g.gi_frame.f_locals)
"""
16
{'name': '古明地觉', 'age': 16}
"""

# 第三个 YIELD_VALUE 的偏移量是 26
g.__next__()
print(g.gi_frame.f_lasti)
print(g.gi_frame.f_locals)
"""
26
{'name': '古明地觉', 'age': 16, 'xxx': None, 'gender': 'female'}
"""

# 再次调用 g.__next__()
# 生成器执行完毕
try:
    g.__next__()
except StopIteration:
    pass

```

```
# 一旦执行完毕，gi_frame 会设置为 None
# 因此生成器只能顺序遍历一次
print(g.gi_frame)  # None
```

遇见 yield 产生中断，调用 __next__、send 恢复执行，并且在这个过程中，f_lasti 也在不断变化，始终维护着生成器的执行进度。而基于 f_lasti，生成器就可以记住自己的中断位置，并在下一次被驱动的时候，能够从中断的位置恢复执行。

而以上也正是协程能够实现的理论基础，虽然 Python 在 3.5 提供了基于 async def 的原生协程，但它底层依旧是使用了生成器。

小结

到此，生成器执行、暂停、恢复的全部秘密都已被揭开，归纳一下：

- 生成器函数编译后的 PyCodeObject带有 CO_GENERATOR标识，这个标识让虚拟机在调用时能够分辨出是普通函数、还是生成器函数；
- 和普通函数一样，生成器函数在调用时，也会由虚拟机创建栈帧，作为执行上下文。
- 但和普通函数不同的是，调用生成器函数时创建的栈帧不会立即进入 PyEval_EvalFrameEx 执行字节码。而是以栈帧为参数，创建生成器对象；
- 可以调用 __next__、send驱动生成器执行，然后虚拟机将生成器的栈帧插入栈帧链，也就是将它的 f_back 设置为调用 __next__、send 时所在的栈帧。然后生成器的栈帧就变成了当前栈帧，于是开始执行字节码；
- 执行到 yield 语句时，说明生成器该暂停了。于是修改 f_stacktop，通过一个 goto 语句跳出执行指令的 for 循环，退回到上一级栈帧，然后将 yield 右边的值压入运行时栈的栈顶，供调用方使用。并且还会将生成器内部栈帧的 f_back 设置为空，以及设置 f_lasti 等成员；
- yield 后面的值最终作为 __next__或者 send方法的返回值，被调用者取得；
- 当再次调用 __next__或者 send方法时，虚拟机仍会修改 f_back，将生成器的栈帧重新插入到栈帧链中，然后继续执行生成器内部的字节码。但是从什么地方开始执行呢？显然是上一次中断的位置，那么上一次中断的位置虚拟机如何得知呢？没错，显然是通过f_lasti，直接从偏移量为 f_lasti + 2 的指令开始执行即可；
- 所以执行时，会从上一个YIELD_VALUE的下一条指令开始执行。因为要获取调用者传递的值，所以 YIELD_VALUE 的下一条指令一般是 POP_TOP 或者 STORE_FAST；
- 代码执行权就这样在调用者和生成器之间来回切换，然后一直周而复始，直至生成器执行完毕；
- 而生成器执行完毕之后，gi_frame 会被设置为 None，因此生成器只能顺序遍历一次；

收录于合集 #CPython 97

‹ 上一篇
《源码探秘 CPython》67. 回顾 Python 的对象模型

下一篇 ›
《源码探秘 CPython》65. 生成器的实现原理（上）