南開大學

数据安全 课程实验报告

零知识证明实践

学院　网络空间安全学院

专业　信息安全

姓名　齐明杰

学号　2113997

2024 年 3 月 30 日

目　　录

图表

1 实验目的

参考教材实验 3.1，假设 Alice 希望证明自己知道如下方程的解$x^3 + x + 5 = \text{out}$，其中 out 是大家都知道的一个数，这里假设 out 为 35 而$x = 3$就是方程的解，请实现代码完成证明生成和证明的验证。

2 实验原理

在零知识证明中，将待证明的命题表达为 R1CS（Rank 1 Constraint System，一阶约束系统）是一种常见的方法。R1CS 是一种用于表示算术关系的系统，它可以转化为算术电路来验证计算的正确性，这些方程构成了我们的 R1CS。

R1CS（Rank 1 Constraint System，一阶约束系统）

R1CS（Rank 1 Constraint System，一阶约束系统）是一种用来表示和验证计算的数学框架，特别是在零知识证明领域中常用来表示计算问题。R1CS 使得可以有效地证明某些计算是正确的，而不需要揭示计算本身的细节或输入数据。 R1CS 是由一组线性方程组成的，它们描述了一个或多个多项式方程的约束。每个线性方程可以看作是对输入变量、中间变量和输出变量之间关系的描述。R1CS 的核心在于将复杂的算术表达式分解为一系列简单的线性方程。 R1CS 主要包含三个部分：

变量：这些变量包括输入变量、输出变量和中间变量。输入变量是外部提供给系统的值，输出变量是计算结果，而中间变量用于电路内部计算。

约束：这些是形式为 a * b = c 的方程，其中 a、b 和 c 是变量或常数。每个约束描述了变量之间的一个特定关系，通常代表电路中的一个门（加法或乘法门）。

目标：定义了一个或多个输出，这些输出是满足所有约束的计算结果。

R1CS 为表示和验证计算提供了一种灵活且高效的方法，特别适合于需要保护隐私和安全的场景。

算数电路的构建

首先，我们需要将方程转换为算术电路的形式。算术电路由输入变量、加法门、乘法门和输出组成。我们的目标是构建一个电路，该电路的输出是方程的左侧和右侧之差，即 $x^3 + x + 5 - 35$。

为此我们可以定义如下变量:

```cpp
pb_variable<FieldT> x;
pb_variable<FieldT> sym_1;
pb_variable<FieldT> y;
pb_variable<FieldT> sym_2;
pb_variable<FieldT> out;
```

输入：变量 x。

操作:

1. $x * x = \text{sym\_1}$。
2. $\text{sym\_1} * x = y$。
3. $y + x = \text{sym\_2}$。
4. $\text{sym\_2} + 5 = \text{out}$。

3 实验过程

3.1 libsnark 环境搭建

Libsnark 安装相对麻烦，它的多个子模块也需要编译安装。

1) 创建名为 Libsnark 的文件夹

2) 打开 https://github.com/sec-bit/libsnark_abc，点击“Code”、“Download ZIP”，下载后解压到 Libsnark 文件夹，得到 /Libsnark/libsnark_abc-master

3) 打开 https://github.com/scipr-lab/libsnark，点击“Code”、“Download ZIP”，下载解压后，将其中文件复制到 / Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark 文件夹内

4) 打开 https://github.com/scipr-lab/libsnark，点击“depends”，可以看到六个子模块的链接地址，分别下载 ZIP。

5) 分别点击这六个链接并下载解压，得到如下六个文件夹，为方便下文表述，分别将这六个文件夹命名为 Libfqfft、Libff、Gtest、Xbyak、Ate-pairing、Libsnark-supercop。选择对应的 Linux 系统，执行以下命令:

```cmd
sudo apt install build-essential cmake git libgmp3-dev libprocps-dev
python3-markdown libboost-program-options-dev libssl-dev python3 pkg-
config
```

结果如下图:

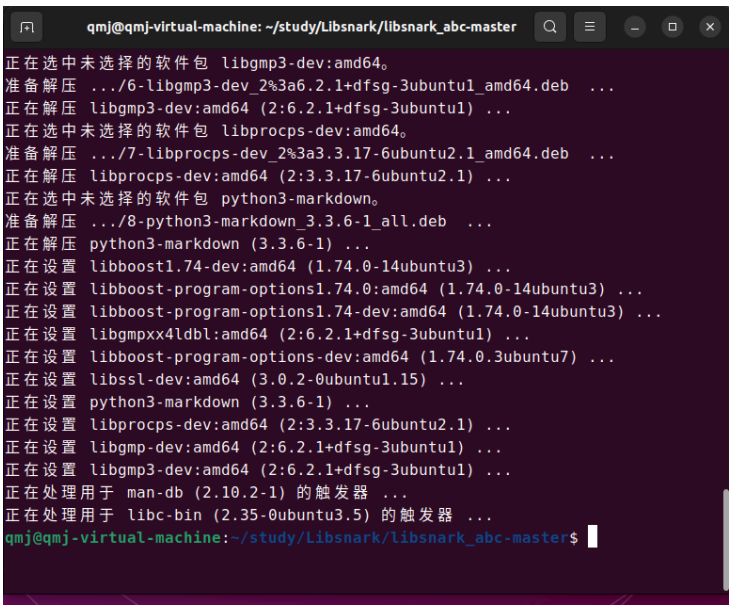


图 3.1.1: 安装结果

接下来，分别安装各个子模块，各命令如下：

编译安装各个模块

安装各个子模块方法:

安装子模块 xbyak

将下载得到的文件夹 Xbyak 内的文件复制到 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark/depends/xbyak，并在该目录下打开终端，执行以下命令

```
1 sudo make install
```
cmd

安装子模块 ate-pairing

将下载得到的文件夹 Xbyak 内的文件复制到 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark/depends/xbyak，并在该目录下打开终端，执行以下命令

```
1 make -j
2 test/bn
```
cmd

安装子模块 libsnark-supercop

将下载得到的文件夹 Libsnark-supercop 内的文件复制到 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark/depends/libsnark-supercop，并在该目录下打开终端，执行以下命令

```
1 ./do
```
cmd

安装子模块 gtest

将下载得到的文件夹 Gtest 内的文件复制到 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark/depends/gtest

安装子模块 libff

将下载得到的文件夹 Libff 内的文件复制到 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark/depends/libff。点击 libff->depends，可以看到一个 ate-pairing 文件夹和一个 xbyak 文件夹，这是 libff 需要的依赖项。打开这两个文件夹，会发现它们是空的，这时候需要将下载得到的 Ate-pairing 和 Xbyak 内的文件复制到这两个文件夹下。 在 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark/depends/libff 下打开终端，执行命令:

```
1 mkdir build
2 cd build
3 cmake ..
4 make
5 sudo make install
```
cmd

安装完之后检测是否安装成功，执行以下命令

```
1 make check
```
cmd

安装子模块 libfqfft

将下载得到的文件夹 Libfqfft 内的文件复制到 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark/depends/libfqfft。点击 libfqfft->depends，可以看到 libfqfft 有四个依赖项，分别是 ate-pairing、gtest、libff、xbyak，点开来依然是空的。和上一步一样，将下载得到的文件夹内文件复制到对应文件夹下。注意 libff 里还有 depends 文件夹，里面的 ate-pairing 和 xbyaky 也是空的，需要将下载得到的 airing 和 Xbyak 文件夹内的文件复制进去。在 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark/depends/libfqfft 下打开终端，执行命令:

```
1 mkdir build
2 cd build
3 cmake ..
4 make
5 sudo make install
```
cmd

安装完之后检测是否安装成功，执行以下命令

```
1 make check
```
cmd

libsnark 编译安装

在 /Libsnark/libsnark_abc-master/depends/libsnark 下打开终端，执行以下命令:

```
1 mkdir build
2 cd build
3 cmake ..
4 make
5 make check
```
cmd

整体编译安装

在 /Libsnark/libsnark_abc-master 下打开终端，执行以下命令:

```
1 mkdir build
2 cd build
3 cmake ..
4 make
5 ./src/test
```
cmd

安装结果如下各图展示：

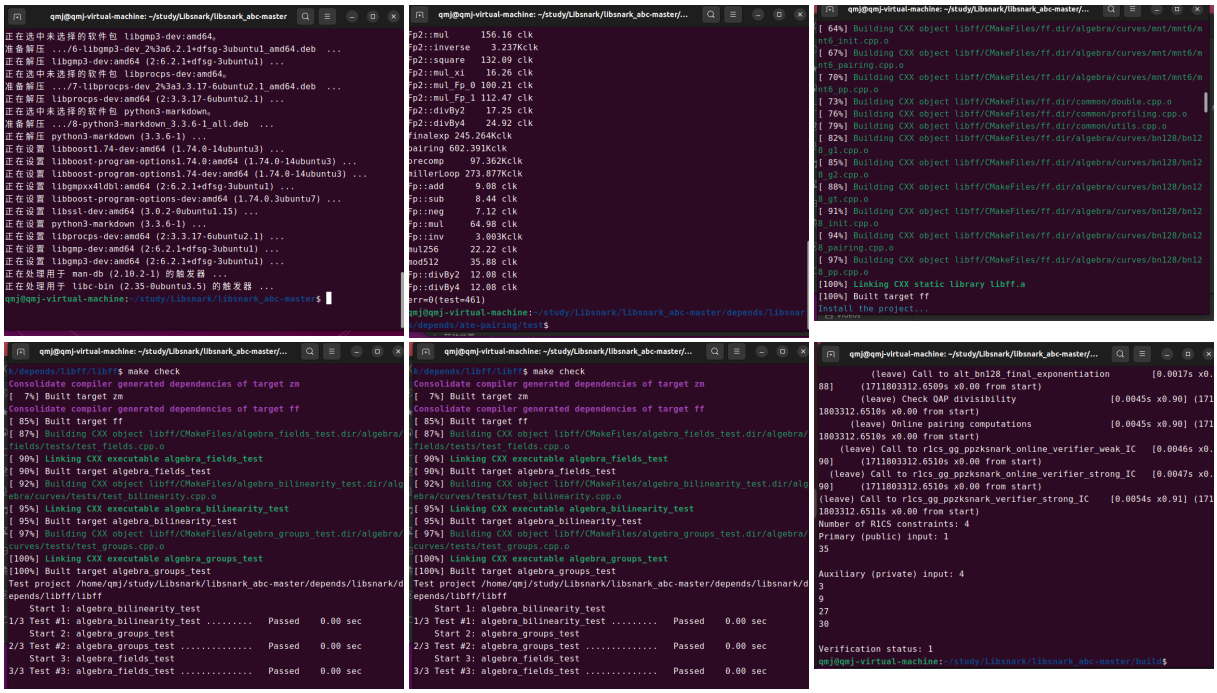
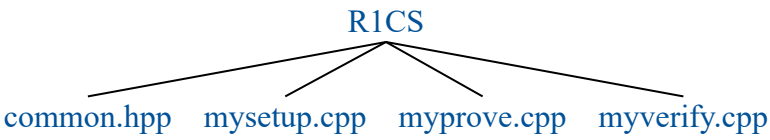


图 3.1.2: 安装过程

3.2 实验代码

我们需要完成 4 份代码：



3.2.1 common.hpp

因为在初始设置、证明、验证三个阶段都需要构造面包板，所以这里将下面的代码放在一个公用的文件 common.hpp 中供三个阶段使用。

```
1  // 代码开头引用了三个头文件：第一个头文件是为了引入 default_r1cs_gg_ppzksnark_pp 类型；第二个则为了引入证明相关的各个接口；pb_variable 则是用来定义电路相关的变量。
2  #include <libsnark/common/default_types/r1cs_gg_ppzksnark_pp.hpp>
3  #include <libsnark/zk_proof_systems/ppzksnark/r1cs_gg_ppzksnark/r1cs_gg_ppzksnark.hpp>
4  #include <libsnark/gadgetlib1/pb_variable.hpp>
5  using namespace libsnark;
6  using namespace std;
7  constexpr auto primary_input = 35;
8  // 定义使用的有限域
9  typedef libff::Fr<default_r1cs_gg_ppzksnark_pp> FieldT;
10 // 定义创建面包板的函数
```

```
protoboard<FieldT> build_protoboard(int *secret)
{
    // 初始化曲线参数
    default_r1cs_gg_ppzksnark_pp::init_public_params();
    // 创建面包板
    protoboard<FieldT> pb;
    // 定义所有需要外部输入的变量以及中间变量
    pb_variable<FieldT> x;
    pb_variable<FieldT> sym_1;
    pb_variable<FieldT> y;
    pb_variable<FieldT> sym_2;
    pb_variable<FieldT> out;
        // 下面将各个变量与 protoboard 连接，相当于把各个元器件插到“面包板”上。allocate() 函数的第二个 string 类型变量仅是用来方便 DEBUG 时的注释，方便 DEBUG 时查看日志。
    out.allocate(pb, "out");
    x.allocate(pb, "x");
    sym_1.allocate(pb, "sym_1");
    y.allocate(pb, "y");
    sym_2.allocate(pb, "sym_2");
    // 定义公有的变量的数量，set_input_sizes(n)用来声明与 protoboard 连接的 public 变量的个数 n。在这里 n = 1，表明与 pb 连接的前 n = 1 个变量是 public 的，其余都是 private 的。因此，要将 public 的变量先与 pb 连接（前面 out 是公开的）。
    pb.set_input_sizes(1);
    // 为公有变量赋值
    pb.val(out) = primary_input;
    // 至此，所有变量都已经顺利与 protoboard 相连，下面需要确定的是这些变量间的约束关系。

    // Add R1CS constraints to protoboard

    // x*x = sym_1
    pb.add_r1cs_constraint(r1cs_constraint<FieldT>(x, x, sym_1));

    // sym_1 * x = y
    pb.add_r1cs_constraint(r1cs_constraint<FieldT>(sym_1, x, y));

    // y + x = sym_2
    pb.add_r1cs_constraint(r1cs_constraint<FieldT>(y + x, 1, sym_2));

    // sym_2 + 5 = ~out
    pb.add_r1cs_constraint(r1cs_constraint<FieldT>(sym_2 + 5, 1, out));

```

```
49      // 证明者在生成证明阶段传入私密输入，为私密变量赋值，其他阶段为 NULL
50      if (secret != NULL)
51      {
52      pb.val(out) = secret[0];
53
54      pb.val(x) = secret[1];
55      pb.val(sym_1) = secret[2];
56      pb.val(y) = secret[3];
57      pb.val(sym_2) = secret[4];
58      }
59      return pb;
60  }
```

解析

这里定义了五个变量，分别是 x、sym_1、y、sym_2 和 out，它们的型是 pb_variable，其中 FieldT 是有限域类型。这些变量是用来描述一个电路的输入、输出和中间变量的。在这个示例中，x、sym_1、y 和 sym_2 是电路的中间变量，out 是电路的输出。这些变量的值可以在 程序运行时被赋值，也可以在生成证明时被赋值。

然后我们使用 R1CS 描述电路。根据上述四个等式，我们可以得到四个约束：

```cpp
1  // x*x = sym_1
2  pb.add_r1cs_constraint(r1cs_constraint<FieldT>(x, x, sym_1));
3  // sym_1 * x = y
4  pb.add_r1cs_constraint(r1cs_constraint<FieldT>(sym_1, x, y));
5  // y + x = sym_2
6  pb.add_r1cs_constraint(r1cs_constraint<FieldT>(y + x, 1, sym_2));
7  // sym_2 + 5 = ~out
8  pb.add_r1cs_constraint(r1cs_constraint<FieldT>(sym_2 + 5, 1, out));
```

最后，我们生成证明时为私密变量赋值。如果 secret 不为 NULL，说明当前处于生成证明 的阶段，此时需要为私密变量赋值。具体地，通过 pb.val(x) = secret[0] 的方式为变量 x 赋值，pb.val(sym_1) = secret[1] 的方式为变量 sym_1 赋值，以此类推。如果 secret 为 NULL，则说 明当前处于验证证明的阶段，此时不需要为私密变量赋值，直接返回 protoboard 即可。

3.2.2 mysetup.cpp

```cpp
#include <libsnark/common/default_types/r1cs_gg_ppzksnark_pp.hpp>
#include <libsnark/zk_proof_systems/ppzksnark/r1cs_gg_ppzksnark/r1cs_gg_ppzksnark.hpp>
#include <fstream>
#include "common.hpp"
using namespace libsnark;
using namespace std;
int main()
{
    // 构造面包板
    protoboard<FieldT> pb = build_protoboard(NULL);
    const r1cs_constraint_system<FieldT> constraint_system = pb.get_constraint_system();
    // 生成证明密钥和验证密钥
   const r1cs_gg_ppzksnark_keypair<default_r1cs_gg_ppzksnark_pp> keypair =
     r1cs_gg_ppzksnark_generator<default_r1cs_gg_ppzksnark_pp>(constraint_
    // 保存证明密钥到文件 pk.raw
    fstream pk("pk.raw", ios_base::out);
    pk << keypair.pk;
    pk.close();
    // 保存验证密钥到文件 vk.raw
    fstream vk("vk.raw", ios_base::out);
    vk << keypair.vk;
    vk.close();
    return 0;
}

```

解析

以上是生成公钥的初始设置阶段（Trusted Setup）。在这个阶段，我们把生成的证明密钥和验证密钥输出到对应文件中保存。其中，证明密钥供证明者使用，验证密钥供验证者使用。这里的代码不需要改动。

3.2.3 myprove.cpp

```cpp
#include <libsnark/common/default_types/r1cs_gg_ppzksnark_pp.hpp>
#include <libsnark/zk_proof_systems/ppzksnark/r1cs_gg_ppzksnark/r1cs_gg_ppzksnark.hpp>
#include <fstream>
```

```
#include <cmath>
#include "common.hpp"
using namespace libsnark;
using namespace std;
int main()
{
    // 为私密输入提供具体数值
    double t = (5-primary_input)/2.;
    double delta = sqrt(t*t+1/27.);
    double res = pow(-t+delta,1/3.)-pow(t+delta,1/3.);
    int x = round(res);
    int secret[5];
    secret[0] = primary_input;
    secret[1] = x;
    secret[2] = x*x;
    secret[3] = x*x*x;
    secret[4] = x*x*x+x;
    // 构造面包板
    protoboard<FieldT> pb = build_protoboard(secret);
            const   r1cs_constraint_system<FieldT>   constraint_system   =
pb.get_constraint_system();
    cout << "公有输入: " << pb.primary_input() << endl;
    cout << "私密输入: " << pb.auxiliary_input() << endl;
    // 加载证明密钥
    fstream f_pk("pk.raw", ios_base::in);
    r1cs_gg_ppzksnark_proving_key<libff::default_ec_pp> pk;
    f_pk >> pk;
    f_pk.close();
    // 生成证明
    const r1cs_gg_ppzksnark_proof<default_r1cs_gg_ppzksnark_pp> proof =
        r1cs_gg_ppzksnark_prover<default_r1cs_gg_ppzksnark_pp>(
            pk, pb.primary_input(), pb.auxiliary_input());
    // 将生成的证明保存到 proof.raw 文件
    fstream pr("proof.raw", ios_base::out);
    pr << proof;
    pr.close();
    cout << pb.primary_input() << endl;
    cout << pb.auxiliary_input() << endl;
    return 0;
}
```

解析

在定义面包板时，我们已为 public input 提供具体数值，在构造证明阶段，证明者只需为 private input 提供具体数值。再把 public input 以及 private input 的数值传给 prover 函数生成证明。生成的证明保存到 proof.raw 文件中供验证者使用。

这里针对我们的命题，**重点编写了以下部分**：

```cpp
// 为私密输入提供具体数值
double t = (5-primary_input)/2.;
double delta = sqrt(t*t+1/27.);
double res = pow(-t+delta,1/3.)-pow(t+delta,1/3.);
int x = round(res);
int secret[5];
secret[0] = primary_input;
secret[1] = x;
secret[2] = x*x;
secret[3] = x*x*x;
secret[4] = x*x*x+x;
```

这与前面在 common.hpp 之中的生成证明的部分：

```cpp
pb.val(out) = secret[0];
pb.val(x) = secret[1];
pb.val(sym_1) = secret[2];
pb.val(y) = secret[3];
pb.val(sym_2) = secret[4];
```

是一一对应的。

3.2.4 myverify.cpp

```cpp
#include <libsnark/common/default_types/r1cs_gg_ppzksnark_pp.hpp>
#include <libsnark/zk_proof_systems/ppzksnark/r1cs_gg_ppzksnark/r1cs_gg_ppzksnark.hpp>
#include <fstream>
#include "common.hpp"
using namespace libsnark;
using namespace std;
int main()
{
    // 构造面包板
    protoboard<FieldT> pb = build_protoboard(NULL);
    const r1cs_constraint_system<FieldT> constraint_system = pb.get_constraint_system();
```

```
    // 加载验证密钥
    fstream f_vk("vk.raw", ios_base::in);
    r1cs_gg_ppzksnark_verification_key<libff::default_ec_pp> vk;
    f_vk >> vk;
    f_vk.close();
    // 加载银行生成的证明
    fstream f_proof("proof.raw", ios_base::in);
    r1cs_gg_ppzksnark_proof<libff::default_ec_pp> proof;
    f_proof >> proof;
    f_proof.close();
    // 进行验证
                                        bool          verified          =
r1cs_gg_ppzksnark_verifier_strong_IC<default_r1cs_gg_ppzksnark_pp>(vk,
pb.primary_input(), proof);
    cout << "验证结果:" << verified << endl;
    return 0;
}
```

解析

最后我们使用 verifier 函数校验证明。如果 verified = 1 则说明证明验证成功。编写代码如下，将这段代码放在 myverify.cpp 中。

3.3 运行结果

为了编译运行代码，我们先编写一个 CmakeLists.txt 文件，内容如下：

```cmake
include_directories(.)
add_executable(
  main
  main.cpp
)
target_link_libraries(
  main
  snark
)
target_include_directories(
  main
  PUBLIC
  ${DEPENDS_DIR}/libsnark
        ${DEPENDS_DIR}/libsnark/depends/libfqfft
)
add_executable(
  test
  test.cpp
)
target_link_libraries(
  test
  snark
)
target_include_directories(
  test
  PUBLIC
  ${DEPENDS_DIR}/libsnark
        ${DEPENDS_DIR}/libsnark/depends/libfqfft
)
add_executable(
```

```
31    range
32    range.cpp
33  )
34  target_link_libraries(
35    range
36    snark
37  )
38  target_include_directories(
39    range
40    PUBLIC
41    ${DEPENDS_DIR}/libsnark
42          ${DEPENDS_DIR}/libsnark/
depends/libfqfft
43  )
44  add_executable(
45   mysetup
46   mysetup.cpp
47  )
48  target_link_libraries(
49   mysetup
50   snark
51  )
52  target_include_directories(
53   mysetup
54   PUBLIC
55   ${DEPENDS_DIR}/libsnark
56          ${DEPENDS_DIR}/libsnark/
depends/libfqfft
57  )
58  add_executable(
59   myprove
60   myprove.cpp
61  )
62  target_link_libraries(
63   myprove
64   snark
65  )
66  target_include_directories(
67   myprove
68   PUBLIC
69   ${DEPENDS_DIR}/libsnark
70          ${DEPENDS_DIR}/libsnark/
depends/libfqfft
```

```
71  )
72  add_executable(
73   myverify
74   myverify.cpp
75  )
76  target_link_libraries(
77   myverify
78   snark
79  )
80  target_include_directories(
81   myverify
82   PUBLIC
83   ${DEPENDS_DIR}/libsnark
84          ${DEPENDS_DIR}/libsnark/
depends/libfqfft
85  )
86
```

CmakeLists.txt 文件的主要功能是配置项目结构。首先，它使用 include_directories 添加当前目录到头文件搜索路径。接着，通过 add_executable 增加了五个可执行文件：main、test、range、mysetup 和 myprove。每个文件都通过 target_link_libraries 与 snark 库关联。为了确保库文件的正确包含，target_include_directories 被用来添加 libsnark 和 libfqfft 库的路径。最后，对每个可执行文件，都按照相同的模式设置了链接和包含路径，以确保编译时的兼容性。

接下来依次运行命令：

```cmd
cmake ..
make
cd src
./mysetup
./myprove
2
./myverify
```

实验结果

结果如下图,证明我们的代码正确，验证成功：

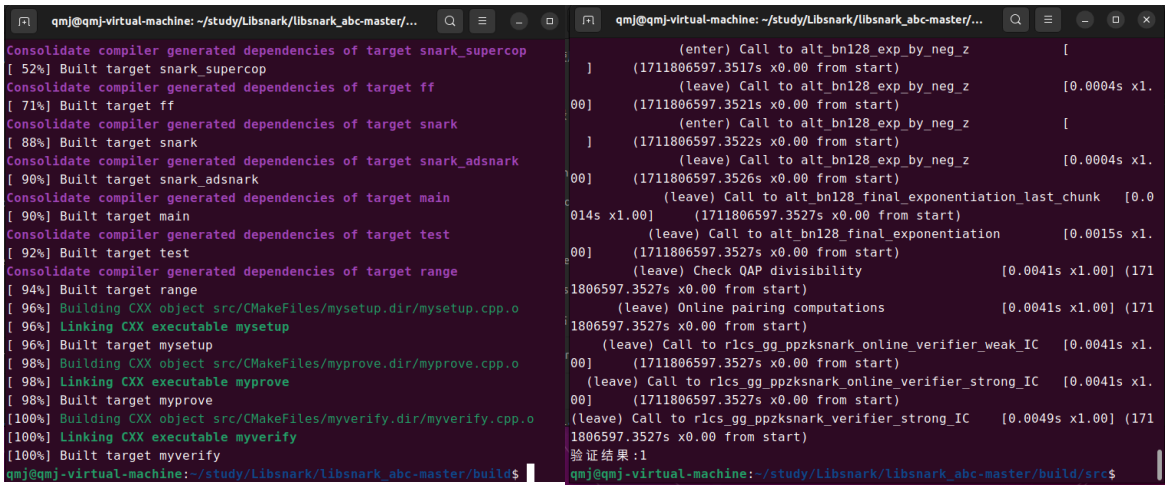


图 3.3.3: 实验结果

验证结果为 1，表示通过验证

4 实验心得

通过这次实验，我深入了解了零知识证明和 R1CS 的核心概念及其应用。实现方程 $x^3 + x + 5 = 35$ 的零知识证明过程，让我实际体验了如何将复杂的多项式方程转换为 R1CS，并通过构建算术电路来形成一套约束系统。这个过程不仅加深了我对算术电路和零知识证明技术的理解，也让我认识到这些技术在保护隐私和数据安全方面的巨大潜

力。此外，实践中遇到的挑战和问题解决经历，增强了我的问题分析和解决能力，对我的学术和职业生涯都是宝贵的财富。