

# FLA (Fall 2023) — Project

---

Designed for course: [Formal Languages and Automata \(Fall 2023\)](#), Nanjing University

May The Force Be With You!

---

- [FLA \(Fall 2023\) — Project](#)
  - [1. 背景](#)
  - [2. 实验描述](#)
  - [3. 任务介绍](#)
    - [一：解析器](#)
    - [二：模拟器](#)
      - [普通模式](#)
      - [verbose 模式](#)
    - [三：多带图灵机程序](#)
  - [4. 验收测试](#)
  - [5. 实验提交](#)
    - [提交格式](#)
    - [提交方法](#)
    - [截止日期](#)
  - [附录 图灵机程序语法](#)
    - [示例](#)

## 1. 背景

---

在 [FLA](#) 课程中，我们已经学习了图灵机以及它的各种变体。你想(da)必(gai)已经了解了图灵机的形式化定义，甚至也能自己设计一些小图灵机了。但给定一个图灵机和一个输入串，当我们把这个串丢给图灵机之后，图灵机到底都捣腾了啥？它是怎么一步步迈向停机的？

那我们在纸上画个状态机呗，看它是怎么在状态之间跳转的不就行了？

不！这太不优雅了！作为程序猿，我们当然要用 coding 的方式来展现自己的实力啦！那么在接下来的这个实验里，就让我们带着你的 code，一起来愉快地探索图灵机内部的运行机制吧！

## 2. 实验描述

---

在本次实验中，你要通过 coding，实现一个**多带 (确定性、多条无限纸带) 图灵机**的模拟器，并且能够在上面正确模拟运行符合[特定语法](#)的图灵机程序。我们要求你的实现满足：

编程语言：C++；

运行环境：Linux 命令行；

功能：模拟运行图灵机程序；

具体使用方法：在命令行中运行 `turing`，传入图灵机程序的文件名和输入字符串作为参数，并输出一行运行结果，显示该图灵机程序是否接受该字符串，以及该图灵机停机时首条纸带上的内容。

运行效果示例：

```
1 $ turing --help
2 usage: turing [-v|--verbose] [-h|--help] <tm> <input>
3 $ turing palindrome_detector.tm 100010001
4 (ACCEPTED) true
5 $ turing palindrome_detector.tm 10001000
6 (UNACCEPTED) false
7 $ turing palindrome_detector.tm 100A1A001
8 illegal input string
9 $ turing palindrome_detector.tm 10x101
10 illegal input string
```

我们希望你编写一个**用户友好的命令行工具**：

1. **遵循命令行工具的基本规范。**例如，你的命令行工具可能被其他脚本调用，因此请不要在标准输出中打印额外的信息(如日志)，确保 `stdout` 仅输出一行运行结果。出错时，请将错误信息输出到标准错误输出(`stderr`)并返回错误 `exit code`。一个更好的 practice 是提供 `-v` 或 `--verbose` 选项，在 `verbose` 模式下打印更多的信息，这也可以帮助你调试。
2. **不要在当前目录产生多余的临时文件。**Linux 系统提供了 `mktmp` 系列函数，每个主流编程语言都有相应的 API。
3. **做好错误处理。**确保你程序的鲁棒性，出现异常时最好别玩崩溃。

## 3. 任务介绍

为了达到实验目标，具体来说，你需要完成以下三个任务。

### 一：解析器

参考附录中给出的[图灵机程序语法](#)，实现一个**多带图灵机程序解析器**。

要求：

1. 该解析器能够正确解析读入的图灵机程序(即命令行参数中的 `<tm>`)。

**错误处理：**若输入的图灵机程序不符合语法，在 `stderr` 中输出一行 `syntax error`，并返回错误 `exit code`。

**选做部分：**在指定了 `-v|--verbose` 参数时，给出不符合语法的图灵机程序片段及相关提示，这也可以帮助你调试图灵机程序。

2. 图灵机程序解析完成后，得到与之对应的一个**多带图灵机模拟器**(见任务二)。

当参数个数或者格式不太对劲的时候，咱们该做点啥？(提示：再看看实验描述)

## 二：模拟器

图灵机程序经过你的解析器解析后，我们将得到一个对应的**多带图灵机模拟器**。模拟器读入一个字符串（即命令行参数中的 `<input>`）作为图灵机的输入。

为了帮助你实现一个用户友好的命令行工具，我们为模拟器设计了两种运行模式：普通模式和 `verbose` 模式。在普通模式下，你只要简单地单行输出运行结果即可；而在 `verbose` 模式下，你需要展示模拟器中图灵机的具体行为。

要求：

### 普通模式

1. 判断输入串的合法性（也即判断所有字符是否均属于**输入符号集**，输入符号集的定义参见[语法描述](#)）。  
**错误处理**：若输入串不合法，在 `stderr` 中输出一行 `illegal input string`，并返回错误 `exit code`。
2. 模拟运行合法输入串。运行结束后，输出图灵机是否接受（`ACCEPTED/UNACCEPTED`）输入串（经过终结状态），以及第一条纸带上的内容（首尾分别为纸带上最左和最右非空格符号）。两者由单个空格分开，在 `stdout` 输出一行。以下为一个示例：

```
1 $ turing palindrome_detector.tm 1001001
2 (ACCEPTED) true
```

### `verbose` 模式

**注意**：查看程序在 `verbose` 模式下的输出时，建议采用[等宽字体](#)，保证对齐效果正确显示。

1. 判断输入串的合法性（也即判断所有字符是否均属于**输入符号集**，输入符号集的定义参见[语法描述](#)）。  
**错误处理**：若输入串不合法，在 `stderr` 中按以下格式报告输入错误（只需要报告输入串从左往右第一个非法字符即可），并返回错误 `exit code`。

```
1 Input: 100A1A001
2 ===== ERR =====
3 error: Symbol "A" in input is not defined in the set of input symbols
4 Input: 100A1A001
5           ^
6 ===== END =====
```

若输入串合法，按以下格式输出提示信息，并转 2：

```
1 Input: 1001001
2 ===== RUN =====
```

2. 模拟运行合法输入串。对于图灵机上的每一次转移，在 `stdout` 中按以下格式给出图灵机的一个瞬时描述：

```
1 Step   : 0
2 State  : 0
3 Acc    : No
4 Index0 : 0 1 2 3 4 5 6
```

```

5  Tape0  : 1 0 0 1 0 0 1
6  Head0  : ^
7  Index1 : 0
8  Tape1  : _
9  Head1  : ^
10 -----
11 Step   : 1
12 State  : cp
13 Acc    : No
14 Index0 : 0 1 2 3 4 5 6
15 Tape0  : 1 0 0 1 0 0 1
16 Head0  : ^
17 Index1 : 0
18 Tape1  : _
19 Head1  : ^
20 -----
21 .....
22 .....
23 .....
24 -----
25 Step   : 29
26 State  : halt_accept
27 Acc    : Yes
28 Index0 : 7 8 9 10
29 Tape0  : t r u e
30 Head0  :      ^
31 Index1 : 1
32 Tape1  : _
33 Head1  : ^
34 -----

```

注1: Index0, Tape0, Head0 中的 0 表示纸带的编号; Acc 表示是否可以在该步判定图灵机接受输入串 (Yes / No), 即模拟运行到该步时是否已经通过终结状态。

注2: “:” 对齐, 位置为冒号左侧最长单词后加1个空格;

注3: Step 0 中 Index0 后的第一个索引 (如上述示例中的 0) 表示初始时纸带上包含输入的最左单元位置的索引;

注4: 初始只有第一条纸带有输入, 其他纸带均为空; 第一条纸带读写头初始位置为包含输入的最左单元位置, 其他纸带的初始位置均为索引 0;

注5: 一般情况下, 两端非空格符号外侧的空格符号和对应索引都不需要打印, 只需打印纸带上最左非空格符号到最右非空格符号之间的符号及对应索引;

注6: 当读写头指向非空格符号外侧的空格符号时, 需要打印必要的空格符号及其索引, 空格符号以 ‘\_’ 表示。示例:

```

1  Step   : 8
2  State  : cp
3  Acc    : No
4  Index0 : 0 1 2 3 4 5 6 7
5  Tape0  : 1 0 0 1 0 0 1 _
6  Head0  :                      ^
7  Index1 : 0 1 2 3 4 5 6 7
8  Tape1  : 1 0 0 1 0 0 1 _
9  Head1  :                      ^

```

```
10 -----
11 Step   : 24
12 State  : cmp
13 Acc    : No
14 Index0 : 7
15 Tape0  : _
16 Head0  : ^
17 Index1 : 1
18 Tape1  : _
19 Head1  : ^
20 -----
```

注 7: `Index` 中相邻两项之间以一个空格为间隔, `Tape` 上的符号与 `Index` 中对应的索引靠左对齐。示例:

```
1 Step   : 19
2 State  : s3
3 Acc    : No
4 Index0 : 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
5 Tape0  : 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0
6 Head0  :           ^
7 Index1 : 6 7 8 9 10 11 12 13
8 Tape1  : 1 1 1 1 0 0 0 1
9 Head1  :           ^
10 -----
```

注 8: 若需要向 0 索引左边的纸带单元中读写字符, 请在 `Index` 中按照 "... 3 2 1 0 1 2 3 ..." 的格式 (即省略 -3 -2 -1 等负索引的负号) 对索引进行描述。

- 3. 模拟运行结束后, 输出一行信息表示图灵机是否接受输入串 (ACCEPTED/UNACCEPTED); 并将第一条纸带上的内容 (首尾分别为纸带上最左和最右非空格符号) 作为最后的输出, 对于上述格式描述中的示例, 最后纸带上的内容为 `true`。按以下格式输出信息:

```
1 ACCEPTED
2 Result: true
3 ===== END =====
```

### 三：多带图灵机程序

使用附录中描述的[图灵机程序语法](#), 实现以下两个图灵机程序。

- 1. 实现一进制数的乘法操作。图灵机的输入为 $a^i b^j$  ( $i, j > 0$ ) 的形式, 要求在图灵机停机时第一条纸带上的内容为 $c^{i \times j}$ 。若输入形式不符合要求, 请输出 `Illegal_Input`。当且仅当图灵机的输入为 $a^i b^j$  ( $i, j > 0$ ) 的形式时, 图灵机接受输入串。请确保停机时第一条纸带上除了计算结果外没有其他内容。示例输入输出如下:

```

1  $ ./turing case1.tm ab
2  (ACCEPTED) c
3  $ ./turing case1.tm aabb
4  (ACCEPTED) cccc
5  $ ./turing case1.tm aaabb
6  (ACCEPTED) cccccc
7  $ ./turing case1.tm aaaabbbb
8  (ACCEPTED) cccccccccccc
9  $ ./turing case1.tm abbba
10 (UNACCEPTED) illegal_input

```

请将该图灵机的编码文件命名为 `case1.tm`，文件位置见[实验提交](#)部分。

2. 实现一个图灵机，判定如下语言：

$$L = \{w \in \{a, b, c\}^* \mid \exists u \in \{a, b\}^*, w = ucu\}$$

若输入字符串在该语言中，则在第一条纸带上打印 `true` 后停机，否则打印 `false` 后停机。当且仅当图灵机的输入在该语言中时，图灵机接受输入串。**请确保停机时第一条纸带上除了判定结果外没有其他内容。**示例输入输出如下：

```

1  $ ./turing case2.tm c
2  (ACCEPTED) true
3  $ ./turing case2.tm abc
4  (UNACCEPTED) false
5  $ ./turing case2.tm abaab
6  (UNACCEPTED) false
7  $ ./turing case2.tm abcba
8  (UNACCEPTED) false
9  $ ./turing case2.tm abbbacabbba
10 (ACCEPTED) true

```

请将该图灵机的编码文件命名为 `case2.tm`，文件位置见[实验提交](#)部分。

## 4. 验收测试

1. **任务一 & 任务二。**我们会使用另外准备的图灵机程序以及对应的一组输入来对你实现的图灵机解析器和模拟器的正确性进行测试。
2. **任务三** 测试方案：
  - 测试使用的命令格式见 [实验描述](#)。
  - 我们会使用各种规模的输入对你的图灵机程序的运行结果正确性进行测试。
  - 我们也会在小规模的输入上对你的图灵机程序的运行行为正确性进行验证 (`verbose` 模式)。
3. 为方便我们进行测试，请确认以下事项：
  - 你的项目能够在 ubuntu-20.04 x64 上使用 g++ 9.3.0 编译。
  - 你的项目编译生成的可执行文件命名为 `turing`。

## 5. 实验提交

**重要声明：为维护学术诚信，请各位同学务必独立完成本项目！若发现任何形式的抄袭行为，抄袭者和被抄袭者取消本次实验成绩。**

### 提交格式

将以下内容打成压缩包 (学号-姓名.zip) 上传：

- 1. 源代码目录 `turing-project/`。仅包含源代码。请确保你源代码只依赖于 C++ 标准库；请不要将二进制文件等能够被源码生成的文件打在压缩包中。
- 2. 简短的编译说明 `README.md`。
- 3. 图灵机程序目录 `programs/`。目录内包含两个图灵机编码文件，分别为 `case1.tm` 及 `case2.tm`。
- 4. 实验报告 `学号-姓名.pdf` (可选)。报告内容包括：分析与设计思路、实验完成度、实验中遇到的问题及解决方案、总结感想，对课程和实验的意见与建议，以及其他任何想写的内容。
- 5. 用于指导编译工具 `cmake` 进行编译的 `CMakeLists.txt`。本次实验我们将在测试脚本中使用 `cmake` 进行编译。文件夹 `framework` 为一个样例工程框架，**请仔细阅读其中的要求。**

应提交的文档结构示例如下：

```
1  |- 211220xxx-张三.zip (502023xxxx-李四.zip)
2  |- 211220xxx-张三.pdf (502023xxxx-李四.pdf) (Optional)
3  |- programs
4      |- case1.tm
5      |- case2.tm
6  |- README.md
7  |- turing-project
8      |- XX.cpp
9      |- .....
10  |- CMakeLists.txt
```

### 提交方法

本次实验使用邮箱进行提交（附件仅限单zip文件），发送至[fla23course@163.com](mailto:fla23course@163.com)，邮件主题务必为“形式语言与自动机 实验1 学号 姓名”，否则助教使用脚本收取文件时可能会出现遗漏。

### 截止日期

2024-1-3 23:59:59

## 附录1 图灵机程序语法

图灵机的形式化描述如下：

$$M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, B, F)$$

下面定义的图灵机程序语法完整地刻画了上述七部分内容。

1. **状态集 Q**: 以 `#Q` 开头。占据 (且仅占据) 图灵机程序的一行 (即不包括回车换行); `'#'` 为该行的第一个字符 (以下2-7同); 各状态之间以英文逗号 `,` 分隔。状态用一个或多个**非空白字符** (字母 `a-z, A-Z`、数字 `0-9` 和下划线 `_`) 表示, 称为该状态的**标签**, 如 `"10"`、`"a"`、`"state1"` 等。语法格式为 `#Q = {q1,q2,...,qi}`。 `'='` 两边各有一个空格 `' '` (以下2-7同)。

示例:

```
1 | #Q =  
    {0,cp,cmp,mh,accept,accept2,accept3,accept4,halt_accept,reject,reject2,reject3,reject4,reject5,halt_reject}
```

2. **输入符号集 S**: 以 `#S` 开头。各符号之间以英文逗号 `,` 分隔。输入符号的可取值范围为除 `' '` (space)、`'.'`、`';'`、`'{'`、`'}'`、`'*'`、`'_'` 外的所有 **ASCII 可显示字符** (定义参见 [维基百科](#))。语法格式为 `#S = {s1,s2,...,sj}`。

示例:

```
1 | #S = {0,1}
```

3. **纸带符号集 G**: 以 `#G` 开头。各符号之间以英文逗号 `,` 分隔。纸带符号的可取值范围为除 `' '` (space)、`'.'`、`';'`、`'{'`、`'}'`、`'*'` 外的所有 **ASCII 可显示字符**, 规定用 `'_'` 表示空格符号。语法格式为 `#G = {s1,s2,...,sk}`。

示例:

```
1 | #G = {0,1,_,t,r,u,e,f,a,l,s}
```

4. **初始状态 q0**: 以 `#q0` 开头。语法格式为 `#q0 = q`。

示例:

```
1 | #q0 = 0
```

5. **空格符号 B**: 以 `#B` 开头。语法格式为 `#B = b`。在本实验中, **空格符号规定为 `'_'`**。

示例:

```
1 | #B = _
```

6. **终结状态集 F**: 以 `#F` 开头。各状态之间以英文逗号 `,` 分隔。语法格式为 `#F = {f1,f2,...,fn}`。

示例:

```
1 | #F = {halt_accept}
```

7. **纸带数 N**: 以 `#N` 开头。语法格式为 `#N = n`。

示例:

```
1 | #N = 2
```



8. **转移函数 delta**: 每个转移函数占用 (且仅占用) 图灵机程序的一行, 行内容为一个五元组。五元组格式为: "<旧状态> <旧符号组> <新符号组> <方向组> <新状态>", 元组各部分之间以一个空格分隔。

- **(新、旧) 状态** 定义见 **状态集**。
- **(新、旧) 符号组** 均由 **n** 个 **纸带符号** 组成的字符串表示。**需要注意的是**, 除纸带符号集中的符号外, **新、旧符号组中均可能出现 '\*'**, 该符号用于匹配**除空格符号 '\_' 外的任意符号**。相应的, 纸带符号集 (和输入符号集) 中都不应出现 '\*'。(新、旧) 符号组中可以出现多于一个的 '\*', 但使用时有一定限制。本次实验中, '\*' 的使用包含以下两种情况:
  - 旧符号组中某个符号为 '\*', 新符号组中对应位置上的符号不为 '\*': 无论对应纸带读写头下的符号是什么, 都按照新符号组的要求将其改写;
  - 旧符号组中某个符号为 '\*', 新符号组中对应位置上的符号也为 '\*': 无论对应纸带读写头下的符号是什么, 都保留这个字符不变

若出现不符合以上两种情况的转移函数定义, 你可以自行选择是否报错, 测试样例不会考查。两种情况的具体示例请看下文。

- **方向组** 由 **n** 个以下三个符号之一组成的字符串表示: 'l'、'r' 或者 '\*', 分别表示向左移动、向右移动和不移动。

示例:

```
1  #G = {_,0,1}          ; 纸带符号集
2  ; .....
3  cmp 01 _ r1 reject ; 当前处于状态 cmp
4                        ; 两个带头下符号分别为 '0' 和 '1'
5                        ;
6                        ; 下一步第一个带头向右移动, 第二个带头向左移动
7                        ; 下一个状态为 reject
8
9  idle ** ** ** idle ; 当前处于状态idle
10                       ; 两个带头下符号可以是 '0' 或 '1' 中的任意一个
11                       ; 将要写入的新符号和原符号保持一致
12                       ; 下一步两个带头均不移动
13                       ; 下一个状态为idle
14
15 copy 0* 00 l1 copy ; 当前处于状态copy
16                       ; 第一条纸带的带头下符号为 '0' , 第二条纸带的带头下符号为'0'
   或 '1' 中的任意一个
17                       ; 将要写入的新符号为 '0' 和 '0'
18                       ; 下一步两个带头均向左移动
19                       ; 下一个状态为copy
```

9. **注释和空行**: 你只需要处理行注释, 行注释以英文分号 ';' 开头。在解析程序时应当忽略注释和空行。

示例:

```
1  ; State cmp: compare two strings
2
3  0 _ _ ** accept ; empty input
```

## 示例

完整的图灵机程序示例参见 `examples/palindrome_detector_2tapes.tm`。其 `verbose` 模式下对输入串 `1001001` 的输出参见 `examples/palindrome_detector_2tapes_verbose.txt`。

## 附录2 FAQ

### .tm 文件格式相关

- Q: 图灵机定义中的“终结状态”是指走到这些状态就停机吗?
  - 并不是，而是经过这些状态就接受。本次实验中，图灵机**当且仅当**找不到可用转移时停机。
- Q: 是否可以认为 `.tm` 文件中对图灵机各个成员的定义顺序和[附录1](#)中描述的顺序一致?
  - 是的。
- Q: `.tm` 文件中是否会出现行尾注释?
  - 是的。
- Q: 是否可以认为测试样例的 `.tm` 文件中，除转移函数以外的图灵机成员的定义只占一行?
  - 是的。
- Q: 测试样例中会出现何种程度的语法错误?
  - 对于较为明显的语法错误，如在必须的位置缺少 `'{'`、`'}'`、`','`、`'#'` 等情况，你的程序应当能够直接报出 `syntax error`。对于一些“软性”的问题，如逗号前后有无空格（测试样例中均不会有）、等号两边有无空格（测试样例中等号两侧均有且仅有一个），你可以自行选择是否报错。
- Q: 是否会出现两条转移方程拥有相同的旧状态和旧符号组、输入符号集不在纸带符号集中、转移方程涉及符号不在纸带符号集中.....等各种定义不自洽的情况?
  - 测试样例中不会考察类似情况。但鼓励有余力的同学实现这些报错功能，这对于你自己编写 `.tm` 文件的过程有不小帮助。
- Q: 转移函数中是否可能会出现这种情况？

```
1 state1 * * r state1
2 state1 a a r state1
```

- 测试样例中不会考察这种情况，你可以自行选择是否报错。如果将 `'*'` 定义为“若有其他更为具体的转移就走其他转移，否则走这条转移”，在多纸带的情况下可能会引入一些极为复杂的实现要求，因此本次实验不做考察。

### 程序输入相关

- Q: 是否能认为输入的 `-h` 等参数一定在 `<filename>` 等参数的前面?
  - 是的。
- Q: 会出现未定义的输入参数吗?
  - 不会。
- Q: 输入的 `<filename>` 字段是否为完整相对路径？是否需要自行增加 `../programs/` 等前缀?
  - 是完整相对路径，无需在实现中自行增加任何前缀。

- Q: 输入中可能包含空串吗? 如何输入?
  - 可能。如果在测试样例中出现了需要输入空串的情况, 我们会利用linux系统shell对双引号的特殊处理进行传参。linux系统的shell会将双引号括起来的内容视为字符串。如果打一对双引号, 里面什么都不加, shell依然会将引号中的内容(即空串)作为参数交给程序。处理这种输入方式完全不需要做额外的逻辑, 如果已经实现了缺省参数视为空串的逻辑也无需修改, 能兼容这种传参方式就可以。例如对[任务三第二题](#)的程序按以下方式传参, 应当得到的结果为:

```
1 | $ ./turing case2.tm ""
2 | (UNACCEPTED) false
```

## 程序输出相关

- Q: 能否在模拟完毕后, 若途经了终结状态就直接让simulator在上层输出true?
  - 不可以, 停机后simulator应当忠实地打印第一条纸带上的内容。也不可以让simulator在第一条纸带上写入true后再打印, 写入纸带的工作必须在tm的层面上完成。为了避免类似的面向tm实现simulator的行为, 我们会使用一个对tm行为绝对忠实的golden version去测试你们在[任务三](#)中实现的图灵机程序。
- Q: 若图灵机运行完毕后第一条纸带内容为空, 此时simulator如何输出?
  - 在原本输出纸袋内容和换行符的位置, 直接输出换行符即可。
- Q: 纸带是否可能会出现两个非空符号之间夹着空符号的情况? 如果有可能, 该如何处理?
  - 仅忽视纸带上最左非空符号左侧的空符号, 以及最右非空符号右侧的空符号。
- Q: 处理verbose模式下的输出太难了, 能不能不保证位宽增长了之后的对齐?
  - 至少对于纸带下标为两位数的情况, 需要能够支持正确的对齐。用到100格纸带很难, 但10格还是非常可能的。