

**Musicode**

**——基于C的音乐编程语言**

**何逸宸 ZY2106342**

**梁世俊 ZY2106323**

# 目录

[目录 2](#_Toc90402280)

[1 语言设计驱动 4](#_Toc90402281)

[1.1 编程和音乐创作的类比 4](#_Toc90402282)

[1.2 Musicode的设计动机 4](#_Toc90402283)

[1.3 Musicode的语言特点 5](#_Toc90402284)

[1.3.1 特定语义的字符串 5](#_Toc90402285)

[1.3.2 乐器类型 5](#_Toc90402286)

[1.3.3 常用和弦 6](#_Toc90402287)

[1.4 Musicode的基本数据类型 8](#_Toc90402288)

[1.4.1 Note 8](#_Toc90402289)

[1.4.2 Chord 9](#_Toc90402290)

[1.4.3 Setting 9](#_Toc90402291)

[2 语言特性 10](#_Toc90402292)

[2.1 文法 10](#_Toc90402293)

[2.2 保留字及运算符 11](#_Toc90402294)

[2.2.1 保留字 11](#_Toc90402295)

[2.2.2 运算符 11](#_Toc90402296)

[2.3 中间代码 12](#_Toc90402297)

[2.4 目标代码 12](#_Toc90402298)

[3 指称语义 13](#_Toc90402299)

[3.1 本语言使用到的域 13](#_Toc90402300)

[3.1.1 基本域 13](#_Toc90402301)

[3.1.2 笛卡尔积域 13](#_Toc90402302)

[3.1.3 联合域 13](#_Toc90402303)

[3.1.4 序列域 13](#_Toc90402304)

[3.1.5 存储域 14](#_Toc90402305)

[3.1.6 环境域 14](#_Toc90402306)

[3.2 语义域，语义函数及辅助函数：（S ∈ Statement，E ∈ Expression，D ∈ Declaration） 14](#_Toc90402307)

[3.2.1 语句执行的语义函数 14](#_Toc90402308)

[3.2.2 表达式求值的语义函数是 14](#_Toc90402309)

[3.2.3 声明确立的语义函数 15](#_Toc90402310)

[3.2.4 辅助函数 15](#_Toc90402311)

[3.3 各语法短语的语义 16](#_Toc90402312)

[3.3.1 数和标识符的语义等式 16](#_Toc90402313)

[3.3.2 语句短语语义等式 17](#_Toc90402314)

[3.3.3 表达式语义等式 18](#_Toc90402315)

[4 作曲过程 21](#_Toc90402316)

[4.1 Musicode源代码 21](#_Toc90402317)

[4.2 语法树 23](#_Toc90402318)

[4.3 中间代码 26](#_Toc90402319)

[4.4 目标代码 26](#_Toc90402320)

# 1 语言设计驱动

## 1.1 编程和音乐创作的类比

对于一种编译语言来说，通常的操作是将源代码通过词法分析、语法分析、中间代码生成、中间代码优化和生成目标代码五个基本步骤，生成可在目标机器上运行的目标代码。而对于音乐创作来说，各式各样的乐器甚至人的嗓音相当于硬件，而引导这些“硬件”演奏出优美旋律的，就是“机器码”——乐谱。通过Musicode编程语言，可以将类似C语言的源代码，先通过前端生成“音名&间隔”中间代码，然后通过后端生成用于描述音乐的midi文件以及五线谱。

## 1.2 Musicode的设计动机

比起工程文件和midi文件单纯存储音符，力度，速度等单位化的信息，我们希望创建一个从乐理上的角度来表示一段音乐从作曲上的角度是如何实现的语言。只要不是现代主义无调性音乐，大部分的音乐都是极其具有乐理上的规律性的，这些规律抽象成乐理逻辑语句可以大大地精简化。

在人工智能高速发展的时代，我们希望作曲AI能在真正理解乐理的情况下进行乐曲创作，而不是使用深度学习，用大量的现成曲目进行训练，这个语言可以作为AI理解音乐的接口。

我们希望设计一个类似于C语言文法的音乐编程语言Musicode，使得熟悉C语言的人可以快速上手，使用它进行自己的音乐创作。Musicode是一种静态语言，可以在编译时确定变量类型以及进行错误检查。Musicode可以用非常简洁的语法来表达一段音乐的音符，和弦，旋律，节奏，力度等信息，可以通过乐理逻辑来生成曲子，并且进行高级的乐理操作。Musicode除了用来创作音乐之外，还可以从乐理层面上来创作音乐和分析音乐，并且可以在Musicode的基础上设计乐理算法来探索音乐的可能性。

## 1.3 Musicode的语言特点

### 1.3.1 特定语义的字符串

设计了一些可识别的字符串来表示常见和弦，方便使用：

|  |  |
| --- | --- |
| NAME\_OF\_INTERVAL = {  'perfect unison': 0,  'minor second': 1,  'major second': 2,  'minor third': 3,  'major third': 4,  'perfect fourth': 5,  'diminished fifth': 6,  'perfect fifth': 7,  'minor sixth': 8,  'major sixth': 9,  'minor seventh': 10,  'major seventh': 11,  'perfect octave': 12,  'minor ninth': 13,  'major ninth': 14,  'perfect eleventh': 17,  'minor thirteenth': 20,  'major thirteenth': 21  } | standard = {  'C': 0,  'C#': 1,  'D': 2,  'D#': 3,  'E': 4,  'F': 5,  'F#': 6,  'G': 7,  'G#': 8,  'A': 9,  'A#': 10,  'B': 11,  'Bb': 10,  'Eb': 3,  'Ab': 8,  'Db': 1,  'Gb': 6  } |

### 1.3.2 乐器类型

提供了海量可供选择的乐器类型，方便生成各种音色的乐曲：

instruments = {

'Acoustic Grand Piano': 1,

'Bright Acoustic Piano': 2,

'Electric Grand Piano': 3,

'Honky-tonk Piano': 4,

'Electric Piano 1': 5,

'Electric Piano 2': 6,

'Harpsichord': 7,

'Clavi': 8,

'Celesta': 9,

'Glockenspiel': 10,

'Music Box': 11,

'Vibraphone': 12,

'Marimba': 13,

'Xylophone': 14,

'Tubular Bells': 15,

'Dulcimer': 16,

'Drawbar Organ': 17,

'Percussive Organ': 18,

'Rock Organ': 19,

'Church Organ': 20,

'Reed Organ': 21,

'Accordion': 22,

'Harmonica': 23,

'Tango Accordion': 24,

'Acoustic Guitar (nylon)': 25,

'Acoustic Guitar (steel)': 26,

'Electric Guitar (jazz)': 27,

'Electric Guitar (clean)': 28,

'Electric Guitar (muted)': 29,

'Overdriven Guitar': 30,

'Distortion Guitar': 31,

'Guitar harmonics': 32,

'Acoustic Bass': 33,

'Electric Bass (finger)': 34,

'Electric Bass (pick)': 35,

'Fretless Bass': 36,

'Slap Bass 1': 37,

'Slap Bass 2': 38,

'Synth Bass 1': 39,

'Synth Bass 2': 40,

'Violin': 41,

'Viola': 42,

'Cello': 43,

'Contrabass': 44,

'Tremolo Strings': 45,

'Pizzicato Strings': 46,

'Orchestral Harp': 47,

'Timpani': 48,

'String Ensemble 1': 49,

'String Ensemble 2': 50,

'SynthStrings 1': 51,

'SynthStrings 2': 52,

'Choir Aahs': 53,

'Voice Oohs': 54,

'Synth Voice': 55,

'Orchestra Hit': 56,

'Trumpet': 57,

'Trombone': 58,

'Tuba': 59,

'Muted Trumpet': 60,

'French Horn': 61,

'Brass Section': 62,

'SynthBrass 1': 63,

'SynthBrass 2': 64,

'Soprano Sax': 65,

'Alto Sax': 66,

'Tenor Sax': 67,

'Baritone Sax': 68,

'Oboe': 69,

'English Horn': 70,

'Bassoon': 71,

'Clarinet': 72,

'Piccolo': 73,

'Flute': 74,

'Recorder': 75,

'Pan Flute': 76,

'Blown Bottle': 77,

'Shakuhachi': 78,

'Whistle': 79,

'Ocarina': 80,

'Lead 1 (square)': 81,

'Lead 2 (sawtooth)': 82,

'Lead 3 (calliope)': 83,

'Lead 4 (chiff)': 84,

'Lead 5 (charang)': 85,

'Lead 6 (voice)': 86,

'Lead 7 (fifths)': 87,

'Lead 8 (bass + lead)': 88,

'Pad 1 (new age)': 89,

'Pad 2 (warm)': 90,

'Pad 3 (polysynth)': 91,

'Pad 4 (choir)': 92,

'Pad 5 (bowed)': 93,

'Pad 6 (metallic)': 94,

'Pad 7 (halo)': 95,

'Pad 8 (sweep)': 96,

'FX 1 (rain)': 97,

'FX 2 (soundtrack)': 98,

'FX 3 (crystal)': 99,

'FX 4 (atmosphere)': 100,

'FX 5 (brightness)': 101,

'FX 6 (goblins)': 102,

'FX 7 (echoes)': 103,

'FX 8 (sci-fi)': 104,

'Sitar': 105,

'Banjo': 106,

'Shamisen': 107,

'Koto': 108,

'Kalimba': 109,

'Bag pipe': 110,

'Fiddle': 111,

'Shanai': 112,

'Tinkle Bell': 113,

'Agogo': 114,

'Steel Drums': 115,

'Woodblock': 116,

'Taiko Drum': 117,

'Melodic Tom': 118,

'Synth Drum': 119,

'Reverse Cymbal': 120,

'Guitar Fret Noise': 121,

'Breath Noise': 122,

'Seashore': 123,

'Bird Tweet': 124,

'Telephone Ring': 125,

'Helicopter': 126,

'Applause': 127,

'Gunshot': 128

}

### 1.3.3 常用和弦

定义了一些人们常用的和弦的俗称与其配置的对应关系，增强了代码的可读性。

|  |
| --- |
| chordTypes = match({  ('major', 'M', 'maj', 'majorthird'): ((4, 7), ),  ('minor', 'm', 'minorthird', 'min', '-'): ((3, 7), ),  ('maj7', 'M7', 'major7th', 'majorseventh'): ((4, 7, 11), ),  ('m7', 'min7', 'minor7th', 'minorseventh', '-7'): ((3, 7, 10), ),  ('7', 'seven', 'seventh', 'dominant seventh', 'dom7', 'dominant7', 'germansixth'):  ((4, 7, 10), ),  ('minormajor7', 'minor major 7', 'mM7'): ((3, 7, 11), ),  ('dim', 'o'): ((3, 6), ),  ('dim7', 'o7'): ((3, 6, 9), ),  ('half-diminished7', 'ø7', 'ø', 'half-diminished', 'half-dim', 'm7b5'):  ((3, 6, 10), ),  ('aug', 'augmented', '+', 'aug3', '+3'): ((4, 8), ),  ('aug7', 'augmented7', '+7'): ((4, 8, 10), ),  ('augmaj7', 'augmented-major7', '+maj7', 'augM7'): ((4, 8, 11), ),  ('aug6', 'augmented6', '+6', 'italian-sixth'): ((4, 10), ),  ('frenchsixth', ): ((4, 6, 10), ),  ('aug9', '+9'): ((4, 8, 10, 14), ),  ('sus', 'sus4'): ((5, 7), ),  ('sus2', ): ((2, 7), ),  ('9', 'dominant9', 'dominant-ninth', 'ninth'): ((4, 7, 10, 14), ),  ('maj9', 'major-ninth', 'major9th', 'M9'): ((4, 7, 11, 14), ),  ('m9', 'minor9', 'minor9th', '-9'): ((3, 7, 10, 14), ),  ('augmaj9', '+maj9', '+M9', 'augM9'): ((4, 8, 11, 14), ),  ('add6', '6', 'sixth'): ((4, 7, 9), ),  ('m6', 'minorsixth'): ((3, 7, 9), ),  ('add2', '+2'): ((2, 4, 7), ),  ('add9', ): ((4, 7, 14), ),  ('madd2', 'm+2'): ((2, 3, 7), ),  ('madd9', ): ((3, 7, 14), ),  ('7sus4', '7sus'): ((5, 7, 10), ),  ('7sus2', ): ((2, 7, 10), ),  ('maj7sus4', 'maj7sus', 'M7sus4'): ((5, 7, 11), ),  ('maj7sus2', 'M7sus2'): ((2, 7, 11), ),  ('9sus4', '9sus'): ((5, 7, 10, 14), ),  ('9sus2', ): ((2, 7, 10, 14), ),  ('maj9sus4', 'maj9sus', 'M9sus', 'M9sus4'): ((5, 7, 11, 14), ),  ('13sus4', '13sus'): ((5, 7, 10, 14, 21), (7, 10, 14, 17, 21)),  ('13sus2', ): ((2, 7, 10, 17, 21), ),  ('maj13sus4', 'maj13sus', 'M13sus', 'M13sus4'):  ((5, 7, 11, 14, 21), (7, 11, 14, 17, 21)),  ('maj13sus2', 'M13sus2'): ((2, 7, 11, 17, 21), ),  ('add4', '+4'): ((4, 5, 7), ),  ('madd4', 'm+4'): ((3, 5, 7), ),  ('maj7b5', 'M7b5'): ((4, 6, 11), ),  ('maj7#11', 'M7#11'): ((4, 7, 11, 18), ),  ('maj9#11', 'M9#11'): ((4, 7, 11, 14, 18), ),  ('69', '6/9', 'add69'): ((4, 7, 9, 14), ),  ('m69', 'madd69'): ((3, 7, 9, 14), ),  ('6sus4', '6sus'): ((5, 7, 9), ),  ('6sus2', ): ((2, 7, 9), ),  ('5', 'power chord'): ((7, ), ),  ('5(+octave)', 'power chord(with octave)'): ((7, 12), ),  ('maj11', 'M11', 'eleventh', 'major 11', 'major eleventh'):  ((4, 7, 11, 14, 17), ),  ('m11', 'minor eleventh', 'minor 11'): ((3, 7, 10, 14, 17), ),  ('11', 'dominant11', 'dominant 11'): ((4, 7, 10, 14, 17), ),  ('13', 'dominant13', 'dominant 13'): ((4, 7, 10, 14, 17, 21), ),  ('maj13', 'major 13', 'M13'): ((4, 7, 11, 14, 17, 21), ),  ('m13', 'minor 13'): ((3, 7, 10, 14, 17, 21), ),  ('maj13#11', 'M13#11'): ((4, 7, 11, 14, 18, 21), ),  ('13#11', ): ((4, 7, 10, 14, 18, 21), ),  ('fifth\_9th', ): ((7, 14), ),  ('minormajor9', 'minor major 9', 'mM9'): ((3, 7, 11, 14), ),  ('dim(Maj7)', ): ((3, 6, 11), )  }) |

## 1.4 Musicode的基本数据类型

除了常见的数据类型外，根据中间代码和目标代码的特征，Musicode还新增了note、chord和setting三种数据类型。

### 1.4.1 Note

Note表示一个音符，其中包含了音名 (C, E, Gb, ... 一个表示音名的字符串) ，八度数(和音名一起确定一个音的音高)，时长(音符长度，单位为小节) 和音量(音符的力度，范围为0-127) 等信息。可以通过1.3.1节中的特定语义的字符串对音符进行初始化，也可以用setting对音符进行初始化，还可直接使用音高数进行初始化。

|  |
| --- |
| note a5 = “A5”;  note a5 = {"A", 5, 1};  note a5 = “A5”; |

### 1.4.2 Chord

Chord被定义为一组音符的集合，这个定义或许比乐理里面的和弦定义更为广义化，因为按照这个定义，一首完整的乐曲也可以完全装进和弦类里面。Chord包含了音符(音符列表，为一个记载着这个和弦所有音符的列表)，时长(和弦的每个音符各自的音符长度)和间隔(每两个连续音符之间的间隔，单位为小节)。

|  |
| --- |
| chord Cmaj = "Cmaj";  chord bar1\_melody1 = {"E4", "G4", "C5", "D5",  "D5", "E5", "G4", "G4"}; |

### 1.4.3 Setting

Setting表示一个数，一个列表，或者列表的列表，用于%和@操作符对note或chord做出更改。

|  |
| --- |
| setting s1 = {1/8, 1/8, 1/8, 1/8,  1/8+1/16, 3/16, 1/16, 1/16};  s1 = {s1, s1, 80};  bar1\_melody1 = bar1\_melody1 % s1;  Cmaj = Cmaj  @ {1, 2, 3, 1.1, 2.1, 3, 1.1, 2.1}  % {1/8, 1/8}; |

# 2 语言特性

## 2.1 文法

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| <乐段> | → | {(<表达式> | <播放语句> | <声明语句>) ‘;’} |
| <标识符> | → | <字母> | <标识符><字母> | <标识符><数字> |
| <乐曲声明> | → | ‘piece’ <标识符> [ ‘=’ <配置>] |
| <配置列表> | → | <表达式> | ‘{’ <表达式> {‘,’ <表达式>} ‘}’ |
| <配置> | → | <配置列表> | ‘{’ <配置列表> {‘,’ <配置列表>} ‘}’ |
| <配置声明> | → | ‘setting’ <标识符> [ ‘=’ <配置>] |
| <音符声明> | → | ‘note’ <标识符> [ ‘=’ (<数> | <字符串>)] |
| <音符列表> | → | ‘{’ (<字符串> | <标识符>) {‘,’ (<字符串> | <标识符>)} ‘}’ |
| <和弦声明> | → | ‘chord’ <标识符> [ ‘=’ (<字符串> | <音符列表>)] |
| <声明语句> | → | <乐曲声明> | <配置声明> | <音符声明> | <和弦声明> |
| <表达式> | → | <拼接表达式> | <一元表达式> <赋值运算符> <表达式> |
| <赋值运算符> | → | ‘=’ | ‘/=’ | ‘\*=’ | ‘%=’ | ‘+=’ | ‘-=’ | ‘&=’ | ‘|=’ |
| <拼接表达式> | → | <加法表达式>|<拼接表达式><拼接运算符><加法表达式> |
| <拼接运算符> | → | ‘**|**’ | ‘&’ |
| <增减表达式> | → | <修改表达式>|<增减表达式><增减运算符><修改表达式> |
| <增减运算符> | → | ‘**+**’ | ‘**-**’ |
| <修改表达式> | → | <一元表达式>|<修改表达式><修改运算符><一元表达式> |
| <修改运算符> | → | ‘/’ | ‘**\***’ | ‘**%**’ | ‘**@**’ |
| <一元表达式> | → | <后缀表达式> | {‘+’ | ‘-’} [‘~’] <一元表达式> {‘+’ | ‘-’} |
| <后缀表达式> | → | <基本表达式> | <后缀表达式> ‘[’ <表达式> ‘]’ |
| <基本表达式> | → | <标识符> | <配置> | <数> | <字符串> | ‘(’ <表达式> ‘)’ |
| <播放语句> | → | ‘play’ ‘(’ <标识符> ‘)’ | ‘score’ ‘(’ <标识符> ‘)’ |
| <数> | → | <数字> {<数字>} [ ‘.’ <数字> {<数字>}] |
| <字母> | → | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z | a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k | l | m | n | o | p | q | r | s | t | u | v | w | x | y | z |
| <数字> | → | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

## 2.2 保留字及运算符

### 2.2.1 保留字

Musicode语言共有7个保留字，分别为：

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| note | chord | play | piece |
| setting | score | while |  |

### 2.2.2 运算符

Musicode语言的运算符及优先级如下表(从高到低排列)：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 优先级 | 运算符 | 名称或含义 | 结合方向 | 说明 |
| 1 | [] | 数组下标 | 左到右 |  |
| () | 圆括号 |  |
| 2 | - | 负号运算符(音高减少半音) | 右到左 | 单目运算符 |
| + | 正号运算符(音高增加半音) | 单目运算符 |
| ~ | 和弦倒序 | 单目运算符 |
| 3 | / | 除(分数)；和弦转位 | 左到右 | 双目运算符 |
| \* | 和弦重复 | 双目运算符 |
| % | 对每个音进行修改 | 双目运算符 |
| @ | 取和弦的音进行配置 | 双目运算符 |
| 4 | + | 增加音高；和弦内增加音符 | 左到右 | 双目运算符 |
| - | 降低音高；和弦内减少音符 | 双目运算符 |
| 5 | & | 和弦对齐拼接 | 左到右 | 双目运算符 |
| | | 和弦间隔拼接 | 双目运算符 |
| 6 | = | 赋值运算符 | 右到左 | 赋值运算符 |
| /= | 除(分数)；和弦转位后赋值 | 赋值运算符 |
| \*= | 和弦重复后赋值 | 赋值运算符 |
| %= | 对每个音进行修改后赋值 | 赋值运算符 |
| += | 增加音高、音符后赋值 | 赋值运算符 |
| -= | 减少音高、音符后赋值 | 赋值运算符 |
| &= | 和弦对齐拼接后赋值 | 赋值运算符 |
| |= | 和弦间隔拼接后赋值 | 赋值运算符 |
| 7 | , | 逗号运算符 | 左到右 |  |

## 2.3 中间代码

中间代码中每个单元的格式为 “音高[时长，间隔，音量]”，详见4.3节。

## 2.4 目标代码

目标代码的格式为音乐描述文件midi。midi文件是一种用于记录音乐的二进制文件，与波形文件不同，midi文件不对音乐进行抽样，而是对音乐的每个音符记录为一个数字，所以与波形文件相比文件要小得多，可以满足长时间音乐的需要。MIDI标准规定了各种音调的混合及发音，通过输出装置可以将这些数字重新合成为音乐。

五线谱，是世界上通用的一种记谱法，通过在五根等距离的平行横线上标以不同时值的音符及其他记号来记载音乐。在本语言中可以通过中间代码生成五线谱文件，详见4.4节。

# 3 指称语义

## 3.1 本语言使用到的域

### 3.1.1 基本域

Number：域元素为实数

Character：域元素取自某字符集

Pitch-Name(音名) = C，C#(Db)，D，D#(Eb)，E，F，F#(Gb)，G，G#(Ab)，A，A#(Bb)，B

Register(音区) = 1，2，3，4，5，6，7，8

### 3.1.2 笛卡尔积域

Pitch(音高) = Pitch-Name × Register

Note(音符) = Pitch × Number(时长)

### 3.1.3 联合域

Tone(音)：Note(Pitch × Number) + Interval(Number)

Setting\_List(配置列表) = Tone × … × Tone

Setting(配置) = Setting\_List × … × Setting\_List

### 3.1.4 序列域

Chord(和弦)中的元素是选自域Tone中的元素的有限序列，即同构序列元素。或为nil元素，或为x • s，其中元素x ∈ Tone，序列s ∈ Chord。

String(字符串)中的元素是选自域Character中的元素的有限序列。

### 3.1.5 存储域

Store：所有存储状态的集合，元素为sto

Location：存储单元，元素为loci

Storable：可储值域，元素为stble

### 3.1.6 环境域

Environ：变量的作用域，本语言中只有全局作用域，元素为env

Bindable：标识符束定的值，元素为bdble

Identifier：标识符，元素为I

## 3.2 语义域，语义函数及辅助函数：（S ∈ Statement，E ∈ Expression，D ∈ Declaration）

Value = note Note + chord Chord + string String + number Number + setting Setting

Storable = Value

Bindable = value Value + variable Location (值和变量是可束定体)

### 3.2.1 语句执行的语义函数

execute：Statement → (Environ → Store → Store)

语句的执行是将Statement域中的元素(一条命令S)映射为程序状态的改变，即某一环境env下的sto映射为另一sto'。

execute〖S〗env sto = sto’

### 3.2.2 表达式求值的语义函数是

evaluate：Expression → (Environ → Store → Value)

每个表达式的求值是将Expression域中的元素E映射为从环境中取出改变了状态值，即在某一环境env的sto下求值value。

evaluate〖E〗 env sto= …

### 3.2.3 声明确立的语义函数

elaborate: Declaration→ (Environ → Store → Environ × store)

每个声明的确立是将Declaration域中的元素D映射为将环境env下sto变为有了新束定的环境env' × sto'。

elaborate〖D〗 env sto = (env’, sto’)

### 3.2.4 辅助函数

Store = Location → ( stored Storable + undefined(未定义) + unused(未使用))

empty\_store：Store (所有元素都映射为unused的Store元素)

*empty\_store = λloc.unused*

allocate：Store → Store × Location (将sto映射为sto’，其中某些loc从未使用变为未定义)

*allocate sto =*

***let*** *loc = any\_unused\_location (sto)* ***in***

*(sto [loc→ undefined]，loc)*

deallocate：Store × Location → Store (将sto映射为sto’，其中某些loc变为未使用)

*deallocate (sto，loc) = sto [loc → unused]*

update：Store × Location × Storable → Store (将sto映射为sto’，sto中的loc单元更新为stble值)

*update (sto，loc，stble) = sto [loc→stored stble]*

fetch：Store × Location → Storable (从sto的loc单元上取出stble值)

*fetch (sto，loc) =*

***let*** *stored\_value (stored stble) = stble*

*stored\_value (undefined) = fail*

*stored\_value (unused) = fail*

***in***

*stored\_value (sto(loc))*

Environ = Identifier → (bound Bindable + unbound)

empty\_environ：Environ (所有标识符均处于未束定状态的空环境)

*enpty\_environ = λI. unbound*

bind：Identifier × Bindable → Environ (只要有标识符束定于可束定体，环境就改变了)

*bind(I,bdble) = λI'.* ***if*** *I'=I* ***then*** *bound bdble* ***else*** *unbound*

overlay：Environ × Environ → Environ (两束定环境组成新环境evn + evn'，若某标识符在两环境中均有束定，则新环境中以后束定复盖先束定)

*overlay (env'，env) =*

*λI.* ***if*** *env'(I) /=unbound* ***then*** *env’(I)* ***else*** *env(I)*

find：Environ × Identifier → Bindable (在环境env中找出标识符I所对应的可束定体bdble)

*find(env,I) =*

***let*** *bound\_value(bound bdble) = bdble*

*bound\_value(unbound) = ⊥*

***in***

*bound\_value(env(I))*

coerce：Store × Bindable → Value (获取已束定变量的值)

*coerce(sto，find(env，I)) = fetch(sto，loc)*

## 3.3 各语法短语的语义

### 3.3.1 数和标识符的语义等式

evaluate〖N〗env sto = double(valuation N)

evaluete〖I〗env sto = coerce(sto，find(env，I))

### 3.3.2 语句短语语义等式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| <语句> | → | <赋值语句>  | <声明语句> |

**执行赋值语句。**在env sto中对E求值，并放入临时变元val中; 再在env找出I束定的单元放于临时变元loc中; 最后以sto，loc，val作参数调用辅助函数update，loc中的值被修改，I因而得赋值。

execute〖I = E〗env sto =

**let** val = evaluate E env sto **in**

**let** variable loc = find(env，I) **in**

update(sto，loc，val)

**执行声明语句。**在env sto中确立声明D。由于确立D既改变了env又改变了sto, 则将它们作为序偶取出，覆盖原有环境env 和存储sto。

execute〖D〗 env sto =

**let** (env', sto') = elaborate D env sto **in**

env', sto'

**连续执行多条语句。**连续执行两命令的语义是：第一命令S1在env sto下执行，不会改变束定的环境，只改变存储。S2在S1改变了的存储(括号内执行结果)中执行。

execute〖S1; S2〗env sto =

execute S2 env(execute S1 env sto)

### 3.3.3 表达式语义等式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| <表达式> | → | <表达式> | <表达式>  | <表达式> & <表达式>  | <表达式> @ <表达式>  | <表达式> % <表达式>  | <表达式> \* <表达式>  | <表达式> / <表达式>  | <表达式> + <表达式>  | <表达式> - <表达式>  | + <表达式>  | - <表达式> |

**和弦的拼接“|”。**得到音乐片段B追加到音乐片段A之后的新的音乐片段concatenate(A, B)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 | E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** chord c2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(concatenate ( c1，c2 )) |

**和弦的合并“&”。**得到音乐片段B和音乐片段A合并之后的新的音乐片段merge(A, B)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 & E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** chord c2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(merge ( c1，c2 )) |

**和弦添加音符“+”。**得到音乐片段A添加音符b后的音乐片段add(A, b)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 + E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** note c2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(add ( c1，c2 )) |

**和弦去除音符“-”。**得到音乐片段A去除音符b后的音乐片段minus(A, b)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 - E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** note c2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(minus ( c1，c2 )) |

**和弦重复“\*”。**得到音乐片段A重复n次后的音乐片段repeat(A, n)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 \* E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** number c2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(repeat ( c1，c2 )) |

**和弦转位“/”。**得到音乐片段A中音符转n位的音乐片段reverse(A, n)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 / E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** number c2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(reverse ( c1，c2 )) |

**和弦修改“%”。**得到音乐片段A根据配置s修改后的音乐片段modify(A, s)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 % E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** setting s2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(modify ( c1，s2 )) |

**和弦配置“@”。**得到音乐片段A根据配置s配置后的音乐片段setting(A, s)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 @ E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** setting s2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(setting ( c1，s2 )) |

**双目音符升调“+”。**得到音符a升n个半音后的音符rise(a, n)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 + E2〗env sto =  **let** note c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** number c2 = evaluate E2 env sto **in**  note(rise ( c1，c2 )) |

**单目音符升调“+”。**得到音符a升1个半音后的音符rise(a)。

|  |
| --- |
| evaluate〖+ E1〗env sto =  **let** note c1 = evaluate E1 env sto **i**  note(rise ( c1 )) |

**双目音符降调“-”。**得到音符a降n个半音后的音符fall(a, n)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 - E2〗env sto =  **let** note c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** number c2 = evaluate E2 env sto **in**  note(fall ( c1，c2 )) |

**单目音符降调“-”。**得到音符a降1个半音后的音符fall(a)。

|  |
| --- |
| evaluate〖- E1〗env sto =  **let** note c1 = evaluate E1 env sto **i**  note(fall ( c1 )) |

**双目和弦升调“+”。**得到音乐片段A中音符升n个半音后的音乐片段rise(A,n)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 + E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** number c2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(rise ( c1，c2 )) |

**单目和弦升调“+”。**得到音乐片段A中音符升1个半音后的音乐片段rise(A)。

|  |
| --- |
| evaluate〖+ E1〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  chord(rise ( c1 )) |

**双目和弦降调“-”。**得到音乐片段A中音符降n个半音后的音乐片段fall(A,n)。

|  |
| --- |
| evaluate〖E1 - E2〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  **let** number c2 = evaluate E2 env sto **in**  chord(fall ( c1，c2 )) |

**单目和弦降调“-”。**得到音乐片段A中音符降1个半音后的音乐片段fall (A)。

|  |
| --- |
| evaluate〖- E1〗env sto =  **let** chord c1 = evaluate E1 env sto **in**  chord(fall ( c1 )) |

**将和弦看成数组时，数组变量的语义描述。**

component：Number × Chord → Note (和弦索引)

*component(number, nil) = ⊥*

*component(number, var · arrvar) =*

***if*** *number = 0* ***then*** *var*

***else*** *component(prodecessor(number, arrvar))*

fetch\_chord：Store × Identifier → Chord

*fetch\_chord (sto，nil) = nil*

*fetch\_chord (sto，var · arrvar) =*

*fetch(sto，var) · fetch\_array (sto，arrvar)*

update\_chord：Store × Identifier × Chord → Store

*update\_chord (sto，nil，nil) = sto*

*update\_chord (sto，var·arrvar，val·arrval) =*

***let*** *sto'= update (sto，var，val)* ***in***

*update\_chord (sto'，arrvar，arrval)*

# 4 作曲过程

## 4.1 Musicode源代码

Calendar

Description automatically generated

选取北航校歌的一个乐句作为例子，该乐句有两个声部(melody1和melody2)，每个声部四个小节(s1, s2, s3和s4)，并添加一个伴奏(accompany)，得到如下的源代码：

|  |
| --- |
| setting s1 = {1/8, 1/8, 1/8, 1/8, 1/8+1/16, 3/16, 1/16, 1/16};  s1 = {s1, s1, 80};  chord bar1\_melody1 = {"E4", "G4", "C5", "D5", "D5", "E5", "G4", "G4"};  bar1\_melody1 = bar1\_melody1 % s1;  chord bar1\_melody2 = {"E3", "G3", "G3", "G3", "G3", "C4", "E3", "E3"};  bar1\_melody2 = bar1\_melody2 % s1;  setting s2 = {1/8, 1/8, 1/8, 1/16, 1/16, 1/8+1/16, 5/16};  s2 = {s2, s2, 80};  chord bar2\_melody1 = {"A4", "A4", "A4", "C5", "C5", "D5", "D5"};  bar2\_melody1 = bar2\_melody1 % s2;  chord bar2\_melody2 = {"F3", "F3", "F3", "F3", "A3", "B3", "B3"};  bar2\_melody2 = bar2\_melody2 % s2;  setting s3 = {1/4, 1/8, 1/16, 1/16, 1/8, 1/8+1/16, 1/16, 1/16, 1/16};  s3 = {s3, s3, 80};  chord bar3\_melody1 = {"C5", "C5", "A4", "G4", "E4", "G4", "E4", "E4", "G4"};  bar3\_melody1 = bar3\_melody1 % s3;  chord bar3\_melody2 = {"A3", "A3", "E3", "E3", "C3", "E3", "C3", "C3", "E3"};  bar3\_melody2 = bar3\_melody2 % s3;  setting s4 = {1/4, 1/8+1/16, 1/16, 1/8, 3/8};  s4 = {s4, s4, 80};  chord bar4\_melody1 = {"A4", "G4", "E4", "G4", "D4"};  bar4\_melody1 = bar4\_melody1 % s4;  chord bar4\_melody2 = {"F3", "E3", "C3", "D3", "B2"};  bar4\_melody2 = bar4\_melody2 % s4;  chord melody1 = bar1\_melody1 | bar2\_melody1 | bar3\_melody1 | bar4\_melody1;  chord melody2 = bar1\_melody2 | bar2\_melody2 | bar3\_melody2 | bar4\_melody2;  chord Cmaj = "Cmaj";  Cmaj = Cmaj @ {1, 2, 3, 1.1, 2.1, 3, 1.1, 2.1} % {1/8, 1/8};  chord Fmaj = "Fmaj";  Fmaj = Fmaj @ {1, 2, 3, 1.1} % {1/8, 1/8};  chord Gmaj1 = "Gmaj";  Gmaj1 = Gmaj1 @ {1, 2, 3, 1.1} % {1/8, 1/8};  chord Amin = "Amin";  Amin = Amin @ {1, 2, 3, 1.1, 2.1, 3, 1.1, 2.1} % {1/8, 1/8};  chord Gmaj2 = "Gmaj";  Gmaj2 = Gmaj2 @ {1, 2, 3, 1.1, 2.1, 3, 1.1, 2.1} % {1/8, 1/8};  chord accompany = Cmaj - 12 | Fmaj - 24 | Gmaj1 - 24 | Amin - 24 | Gmaj2 - 12;  piece c;  c = {{melody1, melody2, accompany}, {74, 69, 1}, 60};  play(c); |

## 4.2 语法树

根据源代码可生成语法树(由于语法树过大，此处只保留第一小节)：

/-setting s1 =

|

| /-1

| |

| /-|--/

| | |

| | \-8

| |

| | /-1

| | |

| |--|--/

| | |

| | \-8

| |

/-| | /-1

| | | |

| | |--|--/

| | | |

| | | \-8

| | |

| | | /-1

| | | |

| | |--|--/

| | | |

| | | \-8

| | |

| | | /-1

| | | |

| | | /-|--/

| \-| | |

| | | \-8

| | |

| |--|--+

| | |

| | | /-1

| | | |

| | \-|--/

| | |

| | \-16

| |

| | /-3

| | |

| |--|--/

| | |

| | \-16

| |

| | /-1

| | |

| |--|--/

| | |

| | \-16

| |

| | /-1

| | |

| \-|--/

| |

| \-16

|

| /-s1

| |

| |--=

|--|

| | /-s1

| | |

| \-|--s1

| |

| \-80

|

| /-chord bar1\_melody1 =

| |

| | /-E4

| | |

|--| |--G4

| | |

| | |--C5

| | |

| | |--D5

| \-|

| |--D5

| |

| |--E5

| |

| |--G4

| |

| \-G4

|

| /-bar1\_melody1

| |

| |--=

|--|

| | /-bar1\_melody1

| | |

| \-|--%

| |

| \-s1

|

| /-chord bar1\_melody2 =

| |

| | /-E3

| | |

|--| |--G3

| | |

| | |--G3

| | |

| | |--G3

| \-|

| |--G3

| |

| |--C4

| |

| |--E3

| |

| \-E3

|

| /-bar1\_melody2

| |

--| |--=

|--|

| | /-bar1\_melody2

| | |

| \-|--%

| |

| \-s1

|

| /-chord melody1 =

|--|

| \-bar1\_melody1

|

| /-chord melody2 =

|--|

| \-bar1\_melody2

|

| /-chord Cmaj =

|--|

| \-Cmaj

|

| /-Cmaj

| |

| |--=

| |

| | /-Cmaj

| | |

| | |--@

| | |

| | | /-1

| | | |

| | | |--2

| | | |

| | | |--3

| | /-| |

| | | | | /-1

|--| | | | |

| | | | |--|--.

| | | | | |

| | | | | \-1

| | | | |

| | | | | /-2

| | | | | |

| | | \-|--|--.

| | | | |

| | | | \-1

| | | |

| | | |--3

| | | |

| | | | /-1

| | | | |

| \-| |--|--.

| | | |

| | | \-1

| | |

| | | /-2

| | | |

| | \-|--.

| | |

| | \-1

| |

| |--%

| |

| | /-1

| | |

| | /-|--/

| | | |

| | | \-8

| \-|

| | /-1

| | |

| \-|--/

| |

| \-8

|

| /-chord accompany =

| |

|--| /-Cmaj

| | |

| \-|---

| |

| \-12

|

|--piece c

|

| /-c

| |

| |--=

| |

| | /-melody1

|--| |

| | /-|--melody2

| | | |

| | | \-accompany

| | |

| | | /-74

| \-| |

| |--|--69

| | |

| | \-1

| |

| \-60

|

\-play - c

## 4.3 中间代码

中间代码中每个单元的格式为 “音高[时长，间隔，音量]”，如下：

|  |
| --- |
| 音轨1: E4[1/8;1/8;80], G4[1/8;1/8;80], C5[1/8;1/8;80], D5[1/8;1/8;80], D5[3/16;3/16;80], E5[3/16;3/16;80], G4[1/16;1/16;80], G4[1/16;1/16;80], A4[1/8;1/8;80], A4[1/8;1/8;80], A4[1/8;1/8;80], C5[1/16;1/16;80], C5[1/16;1/16;80], D5[3/16;3/16;80], D5[5/16;5/16;80], C5[1/4;1/4;80], C5[1/8;1/8;80], A4[1/16;1/16;80], G4[1/16;1/16;80], E4[1/8;1/8;80], G4[3/16;3/16;80], E4[1/16;1/16;80], E4[1/16;1/16;80], G4[1/16;1/16;80], A4[1/4;1/4;80], G4[3/16;3/16;80], E4[1/16;1/16;80], G4[1/8;1/8;80], D4[3/8;3/8;80] |
| 音轨2: E3[1/8;1/8;80], G3[1/8;1/8;80], G3[1/8;1/8;80], G3[1/8;1/8;80], G3[3/16;3/16;80], C4[3/16;3/16;80], E3[1/16;1/16;80], E3[1/16;1/16;80], F3[1/8;1/8;80], F3[1/8;1/8;80], F3[1/8;1/8;80], F3[1/16;1/16;80], A3[1/16;1/16;80], B3[3/16;3/16;80], B3[5/16;5/16;80], A3[1/4;1/4;80], A3[1/8;1/8;80], E3[1/16;1/16;80], E3[1/16;1/16;80], C3[1/8;1/8;80], E3[3/16;3/16;80], C3[1/16;1/16;80], C3[1/16;1/16;80], E3[1/16;1/16;80], F3[1/4;1/4;80], E3[3/16;3/16;80], C3[1/16;1/16;80], D3[1/8;1/8;80], B2[3/8;3/8;80] |
| 音轨3: C3[1/8;1/8;100], E3[1/8;1/8;100], G3[1/8;1/8;100], C4[1/8;1/8;100], E4[1/8;1/8;100], G3[1/8;1/8;100], C4[1/8;1/8;100], E4[1/8;1/8;100], F2[1/8;1/8;100], A2[1/8;1/8;100], C3[1/8;1/8;100], F3[1/8;1/8;100], G2[1/8;1/8;100], B2[1/8;1/8;100], D3[1/8;1/8;100], G3[1/8;1/8;100], A2[1/8;1/8;100], C3[1/8;1/8;100], E3[1/8;1/8;100], A3[1/8;1/8;100], C4[1/8;1/8;100], E3[1/8;1/8;100], A3[1/8;1/8;100], C4[1/8;1/8;100], G3[1/8;1/8;100], B3[1/8;1/8;100], D4[1/8;1/8;100], G4[1/8;1/8;100], B4[1/8;1/8;100], D4[1/8;1/8;100], G4[1/8;1/8;100], B4[1/8;1/8;100] |

## 4.4 目标代码

目标代码为相应的midi文件：temp.mid，以及五线谱。

