



Text-to-Speech

语音合成：从入门到放弃

作者：冬色

组织：<https://github.com/cnlinxi>

时间：March 20, 2022

版本：1.0

开源协议：Apache License 2.0

一花独放不是春，百花齐放春满园。——《古今贤文》

前言

想写这个总结已经很久了，上海疫情导致各个区几乎停摆，不间断的核酸检测，小区也封闭很久了，现在算是一个好时机，就赶快整理出来吧。大多数内容来自平日的博客和毕业论文，所以还不算特别辛苦。

最近自愿半自愿地迷恋上烹饪，比较自豪，零基础至少学会了 20+ 道菜，炒炸爆煎焖炖煮，几乎顿顿不重样，自我感觉良好。

最近刷了《雍正王朝》，感慨颇多，是一部好剧。

感谢我的夫人，由于上海严重的疫情，她居家办公，但一直在家划水，不然我应该能够多写一点，所以我希望知道友商领导的联系方式，我要举报她/doge。

模板来自 [ElegantBook](#)，感谢开源社区的贡献。

冬色

2022 年春分于上海

目录

1 语音合成概述	1
1.1 背景和概述	1
1.1.1 背景介绍	1
1.1.2 语音合成概述	1
1.1.3 语音合成的历史	1
1.1.4 当代语音合成框架	3
1.2 Awesome List	4
1.3 参考书籍	4
1.4 语音相关的会议、期刊、比赛和公司	4
1.4.1 会议	4
1.4.2 期刊	5
1.4.3 最新论文	5
1.4.4 比赛	5
1.4.5 公司	5
1.4.6 微信公众号	5
1.5 开源资料	6
1.5.1 中文数据集	6
1.5.2 英文数据集	6
1.5.3 情感数据集	7
1.5.4 其它数据集	7
1.5.5 开源工具	7
1.5.6 开源项目	7
1.6 语音合成评价指标	8
1.7 平均意见得分的测评要求与方法	9
1.7.1 实验要求	9
1.7.2 实验方法	9
1.7.3 实验步骤	9
1.7.4 实验设计	9
1.7.5 实验数据处理	10
2 语音信号基础	11
2.1 参考资料	11
2.2 语音基本概念	11
2.2.1 能量	11
2.2.2 短时能量	11
2.2.3 声强和声强级	11
2.2.4 响度	11
2.2.5 过零率	12
2.2.6 共振峰	12
2.2.7 基频和基音周期	12
2.2.8 音高	13
2.2.9 MFCC 和语谱图	13

2.3	语言学	14
2.3.1	国际音标简介	15
2.3.2	IPA 的字母和发音	15
2.3.3	音系学	17
2.3.4	参考资料	17
2.4	音频格式	18
2.5	数字信号处理	18
2.5.1	模数转换	18
2.5.2	频谱泄露	18
2.5.3	频率分辨率	18
2.6	其它概念	18
3	语音特征提取	20
3.1	预处理	20
3.1.1	预加重	20
3.1.2	分帧	20
3.1.3	加窗	20
3.2	短时傅里叶变换	21
3.3	听觉特性	22
3.3.1	梅尔滤波	22
3.3.2	Bark 滤波	23
3.4	倒谱分析	23
3.5	常见的声学特征	24
3.5.1	FBank	24
3.5.2	MFCC	25
3.6	具体操作	25
3.6.1	利用 librosa 读取音频	25
3.6.2	提取梅尔频谱	26
3.6.3	提取 MFCC	27
4	音库制作和文本前端	29
4.1	音库制作	29
4.1.1	音库制作概述	29
4.1.2	发音人选型	29
4.1.3	录音文本收集	29
4.1.4	音频录制	29
4.1.5	语料整理	30
4.1.6	标注	30
4.2	文本前端	31
4.2.1	文本前端在语音合成中扮演的角色	31
4.2.2	文本前端的主要组成	31
4.2.3	Unicode 调研和文本预处理	31
4.2.4	文本规范化	32
4.2.5	分词	32
4.2.6	文本转音素	33

4.2.7 韵律分析	33
4.2.8 文本前端的工程实现	33
4.3 总结	34
5 声学模型	35
5.1 Tacotron	35
5.1.1 Tacotron-2 简介	35
5.1.2 声学特征建模网络	36
5.1.3 损失函数	37
5.2 FastSpeech	37
5.2.1 模型结构	37
5.2.2 损失函数	42
5.2.3 小结	42
5.3 VITS	42
5.3.1 模型整体结构	43
5.3.2 变分推断	43
5.3.3 对齐估计	44
5.3.4 对抗训练	44
5.3.5 总体损失	45
5.3.6 总结	45
6 声码器	46
6.1 Griffin-Lim 声码器	46
6.1.1 算法原理	46
6.1.2 代码实现	47
6.2 STRAIGHT 声码器	47
6.2.1 概述	47
6.2.2 特征提取	48
6.2.3 语音合成	48
6.3 WORLD 声码器	48
6.3.1 声学特征	48
6.3.2 WORLD 的分析功能	48
6.3.3 DIO 算法提取基频 F0	49
6.3.4 CheapTrick 算法提取频谱包络 SP	50
6.3.5 PLANTINUM 提取非周期信号	50
6.3.6 WORLD 的合成算法	51
6.3.7 使用示例	51
6.4 Neural Homomorphic Vocoder (NHV)	52
6.4.1 源滤波器合成原理	52
6.4.2 共振峰合成方法	53
6.4.3 NHV 概述	53
6.4.4 整体结构	53
6.4.5 脉冲串生成器	54
6.4.6 神经网络滤波估计器 (Neural Network Filter Estimator)	54
6.4.7 线性时变 (LTV) 滤波器和可训练的有限冲激响应 (FIRs)	55

6.4.8 神经网络的训练	56
6.4.9 小结	56
6.5 HiFiGAN	56
6.5.1 HiFiGAN 概述	56
6.5.2 HiFiGAN 生成器简介	56
6.5.3 上采样结构	57
6.5.4 多感受野融合	58
6.5.5 HiFiGAN 判别器简介	60
6.5.6 多尺度判别器	60
6.5.7 多周期判别器	62
6.5.8 损失函数简介	63
6.5.9 生成对抗损失	63
6.5.10 梅尔频谱损失	64
6.5.11 特征匹配损失	65
6.5.12 整体损失	65
7 语音合成知识结构	67
7.1 基本组成	67
7.2 声音转换	68
7.3 多语种语音合成	68
7.4 进阶	68
7.4.1 高表现力语音合成	69
7.4.2 个性化语音合成	69
7.4.3 方言迁移	69
7.4.4 歌唱合成	69
7.4.5 语音合成的稳定性	70
7.4.6 语音合成的效率优化	70

第1章 语音合成概述

1.1 背景和概述

语音合成（Speech Synthesis），大部分情况下与文语转换（Text-to-Speech，TTS）同义，是一种将文本转换为语音的技术，是人工智能的子领域之一，赋予机器像人一样自如说话能力的技术，是人机语音交互中重要的一环。语音合成的研究历史可追溯至18至19世纪，从早期的基于规则的机械式、电子式语音合成器，到基于波形拼接、统计参数的语音合成。近年来，基于深度学习（Deep Learning）和神经网络（Neural Network）的建模方法在机器学习领域各个任务上都取得了快速的发展，语音合成技术也在此基础上得到了显著的提升。随着信息技术及人工智能技术的发展，各种应用场景对语音合成的效果有了越来越高的要求。

1.1.1 背景介绍

语音是最方便最自然的人机交互方式之一，随着近年来智能手机等智能终端的迅速发展，人机语音交互收到了越来越多的关注。人机语音交互是基于语音识别、自然语言理解及语音合成的人机语音对话技术，作为人机交互的核心技术之一，语音合成就是赋予计算机及各种终端设备像人一样自如说话的能力。语音合成是一门交叉学科，它涉及到语言学、语音学、自然语言处理、信号处理、统计学习、模式识别等众多学科的理论与技术。

随着信息技术和人工智能技术的发展，以及对语音信号和统计建模技术本身不断的深入理解，语音合成系统的效果逐渐提高，被广泛应用于各个场景，包括语音对话系统；智能语音助手，如Siri，讯飞语点；电话信息查询系统；车载导航，有声电子书等辅助应用；语言学习；机场，车站等实时信息广播系统；视力或语音障碍者的信息获取与交流等。同时，不同应用场景对于合成语音的各项指标，包括自然度、可懂度、音质、情感风格、控制力也都提出了更高的要求。

1.1.2 语音合成概述

语音信号的产生分为两个阶段，信息编码和生理控制。首先在大脑中出现某种想要表达的想法，然后由大脑将其编码为具体的语言文字序列，及语音中可能存在的强调、重读等韵律信息。经过语言的组织，大脑通过控制发音器官肌肉的运动，产生出相应的语音信号。其中第一阶段主要涉及人脑语言处理方面，第二阶段涉及语音信号产生的生理机制。

从滤波的角度，人体涉及发音的器官可以分为两部分：激励系统和声道系统，如图1.1所示。激励系统中，储存于肺部的空气源，经过胸腔的压缩排出，经过气管进入声带，根据发音单元决定是否产生振动，形成准周期的脉冲空气激励流或噪声空气激励流。这些空气流作为激励，进入声道系统，被频率整形，形成不同的声音。声道系统包括咽喉、口腔（舌、唇、颌和口）组成，可能还包括鼻道。不同周期的脉冲空气流或者噪声空气流，以及不同声道器官的位置决定了产生的声音。因此，语音合成中通常将语音的建模分解为激励建模和声道建模。

1.1.3 语音合成的历史

语音合成系统分为两部分，分别称为文本前端和后端，如下图所示。

文本前端主要负责在语言层、语法层、语义层对输入文本进行文本分析；后端主要是从信号处理、模式识别、机器学习等角度，在语音层面上进行韵律特征建模，声学特征建模，然后进行声学预测或者在音库中进行单元挑选，最终经过合成器或者波形拼接等方法合成语音。

根据语音合成研究的历史，如图1.3所示，语音合成研究方法可以分为：机械式语音合成器、电子式语音合成器、共振峰参数合成器、基于波形拼接的语音合成、统计参数语音合成、以及神经网络语音合成。

语音合成的早期工作主要是通过源-滤波器模型对语音产生的过程进行模拟。最开始的机械式语音合成器，使用风箱模拟人的肺部运动，产生激励空气流，采用振动弹簧片和皮革模拟声道系统，通过手动协调各部分运

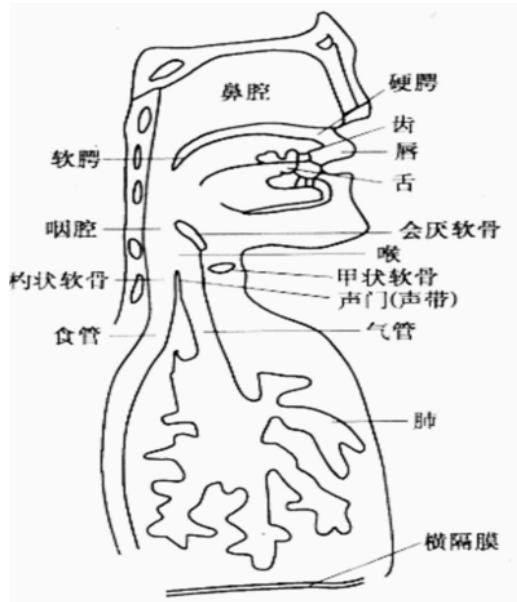


图 1.1: 人类发声机理

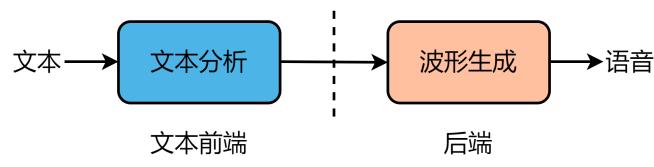


图 1.2: 语音合成系统框图

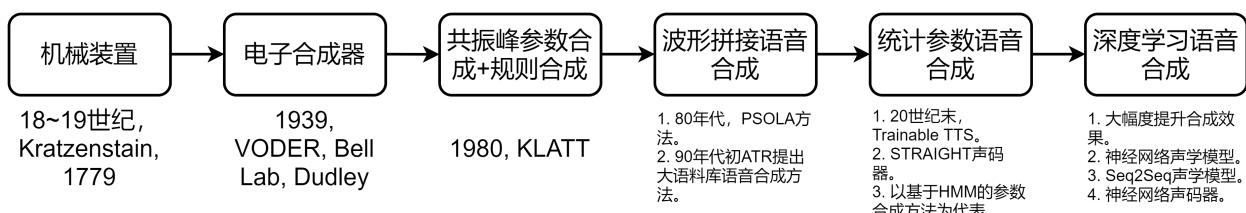


图 1.3: 语音合成发展历史

动，能够合成出五个长元音。机械式的语音合成器难以实用，随着时代的发展，贝尔实验室提出了电子式的语音合成器。不再模拟具体的生理器官，电子式语音合成器通过脉冲发射器和噪声发射器来分别产生模拟浊音和清音的激励系统，通过操作人员手动控制多个带通滤波器来模拟声道系统，最后通过放大器输出语音信号。由于电子式语音合成器使用有限个带通滤波器模拟声道系统，对自然语音的频谱特征的刻画精度有限。为了更好地刻画声道系统，共振峰参数合成器被提出。共振峰参数合成器将声道系统看成一个谐振腔，利用共振峰频率和宽度等声道的谐振特性，构建声道滤波器，以更好地刻画语音的声音特性。然而由于共振峰参数合成器结构复杂，需要大量人工分析调整参数，难以实用。

早期的语音合成方法由于模型简单，系统复杂等原因，难以在实际场景应用。随着计算机技术的发展，基于波形拼接的语音合成被提出。基于波形拼接的基本原理是首先构建一个音库，在合成阶段，通过对合成本文的分析，按照一定的准则，从音库中挑选出与待合成语音相似的声学单元，对这些声学单元进行少量调整，拼接得到合成的语音。早期的波形拼接系统受限于音库大小、挑选算法、拼接调整的限制，合成语音质量较低。1990年，基于同步叠加的时域波形修改算法被提出，解决了声学单元拼接处的局部不连续问题。更进一步，基于大语料库的波形拼接语音合成方法被提出，采用更精细的挑选策略，将语音音库极大地拓展，大幅提升了合成语音的自然度。由于直接使用发音人的原始语音，基于波形拼接的语音合成方法合成语音的音质接近自然语音，被广泛应用。但其缺点也较为明显，包括音库制作时间长、需要保存整个音库、拓展性差、合成语音自然度受音库和挑选算法影响，鲁棒性不高等。

随着统计建模理论的完善，以及对语音信号理解的深入，基于统计参数的语音合成方法被提出。其基本原理是使用统计模型，对语音的参数化表征进行建模。在合成阶段，给定待合成本文，使用统计模型预测出对应的声学参数，经过声码器合成语音波形。统计参数语音合成方法是目前的主流语音合成方法之一。统计参数语音合成方法的优点很多，包括只需要较少的人工干预，能够快速地自动构建系统，同时具有较强的灵活性，能够适应不同发音人，不同发音风格，多语种的语音合成，具有较强的鲁棒性等。由于语音参数化表示以及统计建模的平均效应，统计参数语音合成方法生成的语音自然度相比自然语音通常会有一定的差距。基于隐马尔科夫的统计参数语音合成方法是发展最为完善的一种。基于HMM的统计参数语音合成系统能够同时对语音的基频、频谱和时长进行建模，生成出连续流畅且可懂度高的语音，被广泛应用，但其合成音质较差。

1.1.4 当代语音合成框架

和统计参数语音合成系统类似，深度学习语音合成系统也可大致分为两个部分：文本前端和声学后端。文本前端的主要作用是文本预处理，如：为文本添加韵律信息，并将文本词面转化为语言学特征序列（Linguistic Feature Sequence）；声学后端又可以分为声学特征生成网络和声码器，其中声学特征生成网络根据文本前端输出的信息产生声学特征，如：将语言学特征序列映射到梅尔频谱或线性谱；声码器利用频谱等声学特征，生成语音样本点并重建时域波形，如：将梅尔频谱恢复为对应的语音。近年来，也出现了完全端到端的语音合成系统，将声学特征生成网络和声码器和合并起来，声学后端成为一个整体，直接将语言学特征序列，甚至文本词面端到端转换为语音波形。

1. 文本前端

文本前端的作用是从文本中提取发音和语言学信息，其任务至少包括以下四点。

(a). 文本正则化

在语音合成中，用于合成的文本存在特殊符号、阿拉伯数字等，需要把符号转换为文本。如“1.5 元”需要转换成“一点五元”，方便后续的语言学分析。

(b). 韵律预测

该模块的主要作用是添加句子中韵律停顿或起伏。如“在抗击新型冠状病毒的战役中，党和人民群众经受了一次次的考验”，如果停顿信息不准确就会出现：“在/抗击/新型冠状病毒/的/战役中，党/和/人民群众/经受了/一次/次/的/考验”。“一次次”的地方存在一个错误停顿，这将会导致合成语音不自然，如果严重些甚至会影响语义信息的传达。

(c). 字形转音素

将文字转化为发音信息。比如“中国”是汉字表示，需要先将其转化为拼音“zhong1 guo2”，以帮助后续的声学模型更加准确地获知每个汉字的发音情况。

(d). 多音字和变调

许多语言中都有多音字的现象，比如“模型”和“模样”，这里“模”字的发音就存在差异。另外，汉字中又存在变调现象，如“一个”和“看一看”中的“一”发音音调不同。所以在输入一个句子的时候，文本前端就需要准确判断出文字中的特殊发音情况，否则可能会导致后续的声学模型合成错误的声学特征，进而生成不正确的语音。

2. 声学特征生成网络

声学特征生成网络根据文本前端的发音信息，产生声学特征，如梅尔频谱或线性谱。近年来，基于深度学习的生成网络甚至可以去除文本前端，直接由英文等文本生成对应的频谱。但是一般来说，因为中文字形和读音关联寥寥，因此中文语音合成系统大多无法抛弃文本前端，换言之，直接将中文文本输入到声学特征生成网络中是不可行的。基于深度学习的声学特征生成网络发展迅速，比较有代表性的模型有 Tacotron 系列，FastSpeech 系列等。近年来，也涌现出类似于 VITS 的语音合成模型，将声学特征生成网络和声码器融合在一起，直接将文本映射为语音波形。

3. 声码器

通过声学特征产生语音波形的系统被称作声码器，声码器是决定语音质量的一个重要因素。一般而言，声码器可以分为以下 4 类：纯信号处理，如 Griffin-Lim、STRAIGHT 和 WORLD；自回归深度网络模型，如 WaveNet 和 WaveRNN；非自回归模型，如 Parallel WaveNet、ClariNet 和 WaveGlow；基于生成对抗网络（Generative Adversarial Network，GAN）的模型，如 MelGAN、Parallel WaveGAN 和 HiFiGAN。

1.2 Awesome List

1. <https://github.com/faroit/awesome-python-scientific-audio>
2. <https://github.com/wenet-e2e/speech-synthesis-paper>
3. <https://github.com/dllBoJack/Speech-Resources>
4. <https://github.com/sindresorhus/awesome>

1.3 参考书籍

1. 神经网络与深度学习
2. Tan X, Qin T, Soong F, et al. A survey on neural speech synthesis[J]. arXiv preprint arXiv:2106.15561, 2021.
3. Sisman B, Yamagishi J, King S, et al. An overview of voice conversion and its challenges: From statistical modeling to deep learning[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2020, 29: 132-157.

1.4 语音相关的会议、期刊、比赛和公司

1.4.1 会议

1. INTERSPEECH (Conference of the International Speech Communication Association)
2. ICASSP (IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing)
3. ASRU (IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop)
4. ISCSLP (International Symposium on Chinese Spoken Language Processing)
5. ACL (Association of Computational Linguistics)

1.4.2 期刊

1. Computer Speech and Language

1.4.3 最新论文

1. 低调奋进 TTS 最新论文集
2. <https://arxiv.org/list/eess.AS/recent>
3. <https://arxiv.org/list/cs.SD/recent>
4. <https://arxiv.org/list/cs.CL/recent>
5. <https://arxiv.org/list/cs.MM/recent>

1.4.4 比赛

1. Blizzard Challenge
2. Zero Resource Speech Challenge
3. ICASSP2021 M2VoC
4. Voice Conversion Challenge
5. CHiME: Computational Hearing in Multisource Environment
6. NIST

1.4.5 公司

1. 微软
2. 谷歌云
3. 捷通华声
4. Nuance
5. Amazon polly
6. 百度（翻译）
7. 搜狗开发平台
8. 搜狗（翻译）
9. 有道开放平台
10. 有道（翻译）
11. 微软（翻译）
12. Google 翻译

1.4.6 微信公众号

1. 阿里语音 AI
2. CCF 语音对话与听觉专委会
3. CSMT
4. 声学挖掘机
5. 谈谈语音技术
6. THUsatlab
7. WeNet 步行街
8. 音频语音与语言处理研究组
9. 雨石记

10. 语音算法组
11. 语音杂谈
12. 语音之家

1.5 开源资料

1.5.1 中文数据集

1. 标贝中文标准女声音库: 中文单说话人语音合成数据集, 质量高。
2. THCHS-30: 中文多说话人数据集, 原为语音识别练手级别的数据集, 也可用于多说话人中文语音合成。
3. Free ST Chinese Mandarin Corpus: 855 个说话人, 每个说话人 120 句话, 有对应人工核对的文本, 共 102600 句话。
4. zhvoice: zhvoice 语料由 8 个开源数据集, 经过降噪和去除静音处理而成, 说话人约 3200 个, 音频约 900 小时, 文本约 113 万条, 共有约 1300 万字。
5. 滴滴 800+ 小时 DiDiSpeech 语音数据集: DiDi 开源数据集, 800 小时, 48kHz, 6000 说话人, 存在对应文本, 背景噪音干净, 适用于音色转换、多说话人语音合成和语音识别, 参见: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/268425880>。
6. SpiCE-Corpus: SpiCE 是粤语和英语会话双语语料库。
7. HKUST: 10 小时, 单说话人, 采样率 8kHz。
8. AISHELL-1: 170 小时, 400 个说话人, 采样率 16kHz。
9. AISHELL-2: 1000 小时, 1991 个说话人, 采样率 44.1kHz。希尔贝壳开源了不少中文语音数据集, AISHELL-2 是最近开源的一个 1000 小时的语音数据库, 禁止商用。官网上还有其它领域, 比如用于语音识别的 4 个开源数据集。
10. AISHELL-3: 85 小时, 218 个说话人, 采样率 44.1kHz。

1.5.2 英文数据集

1. LJSpeech: 英文单说话人语音合成数据集, 质量较高, 25 小时, 22.05 小时。
2. VCTK: 英文多说话人语音数据集, 44 小时, 109 个说话人, 每人 400 句话, 采样率 48kHz, 位深 16bits。
3. TIMIT: 630 个说话人, 8 个美式英语口音, 每人 10 句话, 采样率 16kHz, 位深 16bits。这里是具体下载地址, 下载方法: 首先下载种子, 然后执行:

```
1 ctorrent *.torrent
```

4. CMU ARCTIC: 7 小时, 7 个说话人, 采样率 16kHz。语音质量较高, 可以用于英文多说话人的训练。
5. Blizzard-2011: 16.6 小时, 单说话人, 采样率 16kHz。可以从 The Blizzard Challenge 查找该比赛的相关数据, 从 SynSIG 查找该比赛的相关信息。
6. Blizzard-2013: 319 小时, 单说话人, 采样率 44.1kHz。
7. LibriSpeech: 982 小时, 2484 个说话人, 采样率 16kHz。OpenSLR 搜集了语音合成和识别常用的语料。
8. LibriTTS: 586 小时, 2456 个说话人, 采样率 24kHz。
9. VCC 2018: 1 小时, 12 个说话人, 采样率 22.05kHz。类似的, 可以从 The Voice Conversion Challenge 2016 获取 2016 年的 VC 数据。
10. HiFi-TTS: 300 小时, 11 个说话人, 采样率 44.1kHz。
11. TED-LIUM: 118 小时, 666 个说话人。
12. CALLHOME: 60 小时, 120 个说话人, 采样率 8kHz。
13. RyanSpeech: 10 小时, 单说话人, 采样率 44.1kHz。交互式语音合成语料。

1.5.3 情感数据集

1. **ESD**: 用于语音合成和语音转换的情感数据集。
2. **情感数据和实验总结**: 实际是情感语音合成的实验总结，包含了一些情感数据集的总结。

1.5.4 其它数据集

1. **Opencpop**: 高质量歌唱合成数据集。
2. **好未来开源数据集**: 目前主要开源了 3 个大的语音数据集，分别是语音识别数据集，语音情感数据集和中英文混合语音数据集，都是多说话人教师授课音频。
3. **JSUT**: 日语，10 小时，单说话人，采样率 48kHz。
4. **KazakhTTS**: 哈萨克语，93 小时，2 个说话人，采样率 44.1/48kHz。
5. **Ruslan**: 俄语，31 小时，单说话人，采样率 44.1kHz。
6. **HUI-Audio-Corpus**: 德语，326 小时，122 个说话人，采样率 44.1kHz。
7. **M-AILABS**: 多语种，1000 小时，采样率 16kHz。
8. **India Corpus**: 多语种，39 小时，253 个说话人，采样率 48kHz。
9. **MLS**: 多语种，5.1 万小时，6 千个说话人，采样率 16kHz。
10. **CommonVoice**: 多语种，2500 小时，5 万个说话人，采样率 48kHz。
11. **CSS10**: 十个语种的单说话人语音数据的集合，140 小时，采样率 22.05kHz。
12. **OpenSLR**: OpenSLR 是一个专门托管语音和语言资源的网站，例如语音识别训练语料库和与语音识别相关的软件。迄今为止，已经有 100+ 语音相关的语料。
13. **Speech in Microsoft Research Open Data**: 微软开源数据搜索引擎中关于语音的相关数据集。
14. **voice datasets**: Github 上较为全面的开源语音和音乐数据集列表，包括语音合成、语音识别、情感语音数据集、语音分离、歌唱等语料，找不到语料可以到这里看看。
15. **Open Speech Corpora**: 开放式语音数据库列表，特点是包含多个语种的语料。
16. **EMIME**: 包含一些 TTS 和 ASR 模型，以及一个中文/英语，法语/英语，德语/英语双语数据集。
17. **Celebrity Audio Extraction**: 中国名人数据集，包含中国名人语音和图像数据。

1.5.5 开源工具

1. **sonic**: 语音升降速工具。
2. **MFA**: 从语音识别工具 Kaldi 中提取出来的音素-音频对齐工具，可以利用 MFA 获取每一个音素的时长，供预标注或时长模型使用。
3. 宾西法尼亚大学强制对齐标注软件（P2FA）：这里有相关的介绍，对于噪音数据鲁棒性差。
4. **ABXpy**: 语音等测评 ABX 测试网页。
5. **SpeechSubjectiveTest**: 主观测评工具，包括用于语音合成和转换的 MOS、PK（倾向性测听）、说话人相似度测试和 ABX 测试。
6. **Matools**: 机器学习环境配置工具库
7. **MyTinySTL**: 基于 C++11 的迷你 STL。
8. **CppPrimerPractice**: 《C++ Primer 中文版（第 5 版）》学习仓库。
9. **git-tips**: Git 的奇技淫巧。

1.5.6 开源项目

1. **coqui-ai TTS**: 采用最新研究成果构建的语音合成分后端工具集。
2. **ESPNet**: 语音合成和识别工具集，主要集成声学模型、声码器等后端模型。
3. **fairseq**: 序列到序列建模工具，包含语音识别、合成、机器翻译等模型。

4. **eSpeak NG Text-to-Speech**: 共振峰生成的语音合成模型，集成超过 100 个语种和口音的语音合成系统，特别地，可借鉴该项目中的多语种文本前端。
5. **Epitran**: 将文本转换为 IPA 的工具，支持众多语种。
6. **Tacotron-2**: Tensorflow 版本的 Tacotron-2。
7. **Transformer TTS**: TensorFlow 2 实现的 FastSpeech 系列语音合成。
8. **Text-to-speech in (partially) C++ using Tacotron model + Tensorflow**: 采用 TensorFlow C++ API 运行 Tacotron 模型。
9. **muzic**: 微软 AI 音乐的开源项目，包括乐曲理解、音乐生成等多种工作。
10. **merlin**: CSTR 开发的统计参数语音合成工具包，需要与文本前端（比如 Festival）和声码器（比如 STRAIGHT 或 WORLD）搭配使用。

1.6 语音合成评价指标

对合成语音的质量评价，主要可以分为主观和客观评价。主观评价是通过人类对语音进行打分，比如平均意见得分（Mean Opinion Score, MOS）、众包平均意见得分（CrowdMOS, CMOS）和 ABX 测试。客观评价是通过计算机自动给出语音音质的评估，在语音合成领域研究的比较少，论文中常常通过展示频谱细节，计算梅尔倒谱失真（Mel Cepstral Distortion, MCD）等方法作为客观评价。客观评价还可以分为有参考和无参考质量评估，这两者的主要判别依据在于该方法是否需要标准信号。有参考评估方法除了待评测信号，还需要一个音质优异的，可以认为没有损伤的参考信号。常见的有参考质量评估主要有 ITU-T P.861 (MNB)、ITU-T P.862 (PESQ)、ITU-T P.863 (POLQA)、STOI 和 BSSEval。无参考评估方法则不需要参考信号，直接根据待评估信号，给出质量评分，无参考评估方法还可以分为基于信号、基于参数以及基于深度学习的质量评估方法。常见的基于信号的无参考质量评估包括 ITU-T P.563 和 ANIQUE+，基于参数的方法有 ITU-T G.107(E-Model)。近年来，深度学习也逐步应用到无参考质量评估中，如：AutoMOS、QualityNet、NISQA 和 MOSNet。

主观评价中的 MOS 评测是一种较为宽泛的说法，由于给出评测分数的主体是人类，因此可以灵活测试语音的不同方面。比如在语音合成领域，主要有自然度 MOS (MOS of Naturalness) 和相似度 MOS (MOS of Similarity)。但是人类给出的评分结果受到的干扰因素较多，谷歌对合成语音的主观评估方法进行了比较，在评估较长语音中的单个句子时，音频样本的呈现形式会显著影响参与人员给出的结果。比如仅提供单个句子而不提供上下文，与相同句子给出语境相比，被测人员给出的评分差异显著。国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 将 MOS 评测规范化为 ITU-T P.800，其中绝对等级评分 (Absolute Category Rating, ACR) 应用最为广泛，ACR 的详细评估标准如下表所示。

表 1.1: 主观意见得分的评估标准

音频级别	平均意见得分	评价标准
优	5.0	很好，听得清楚；延迟小，交流流畅
良	4.0	稍差，听得清楚；延迟小，交流欠流畅，有点杂音
中	3.0	还可以，听不太清；有一定延迟，可以交流
差	2.0	勉强，听不太清；延迟较大，交流需要重复多遍
劣	1.0	极差，听不懂；延迟大，交流不流畅

在使用 ACR 方法对语音质量进行评价时，参与评测的人员（简称被试）对语音整体质量进行打分，分值范围为 1~5 分，分数越大表示语音质量越好。MOS 大于 4 时，可以认为该音质受到大部分被试的认可，音质较好；若 MOS 低于 3，则该语音有比较大的缺陷，大部分被试并不满意该音质。

1.7 平均意见得分的测评要求与方法

语音合成的最终目标是，合成功能应尽可能接近真实发音，以至于人类无法区分合成和真实语音。因此让人类对合成功能进行评价打分是最为直观的评价方法，评分经处理之后即可获得平均意见得分。平均意见得分是语音合成系统最重要的性能指标之一，能够直接反映合成功能的自然度、清晰度以及可懂度。

1.7.1 实验要求

获取多样化且数量足够大的音频样本，以确保结果在统计上的显著，测评在具有特定声学特性的设备上进行，控制每个被试遵循同样的评估标准，并且确保每个被试的实验环境保持一致。

1.7.2 实验方法

为了达到实验要求，可以通过两种方法获得足够精确的测评结果。第一种是实验室方式，该方式让被试在实验室环境中进行测评，在试听过程中环境噪音必须低于 35dB，测试语音数量至少保持 30 个以上，且覆盖该语种所有音素和音素组合，参与评测的被试应尽可能熟练掌握待测合成功能的语种，最好以合成功能的语种为母语。该方法的优点是测试要素容易控制，能够稳定保证实验环境达到测评要求；缺点则主要是需要被试在固定场所完成试听，人力成本高。第二种是众包，也就是将任务发布到网络上，让有条件的被试在任何地方进行测评。该方法主要优点是易于获得较为有效的评估结果；而缺点则体现在无法确保试听条件。

1.7.3 实验步骤

1. 收集合成功能和录制的真实语音；
2. 确保文本和语音一一对应，去除发音明显错误的音频样本；
3. 生成问卷，将合成功能和真实语音交叉打乱，确保打乱的顺序没有规律，合成功能和真实语音不可让被试提前探知到；
4. 开始任务前，被试试听示例语音，并告知其对应的大致得分；
5. 被试开始对给定音频打分，前三条语音可以作为被试进入平稳打分状态的铺垫，不计入最终结果；
6. 回收问卷，舍弃有明显偏差的评价数据，统计最终得分。

1.7.4 实验设计

1. 准备测试语音数据。(1) 从各领域和语音合成系统实际应用场景中，摘选常规文本作为测试语料，选取的语句一般尽可能排除生僻字；(2) 用于测试的句子一般是未出现在训练集中的；(3) 被试必须使用耳机试听语音，以便于判断更为细微的差别；(4) 为了避免被试的疲惫，待测评系统和语料数量不可太多，需要控制测评时间；(5) 一个句子需要由多个被试打分。
2. 设置实验参数。在准备测试语音时，需要提前设置好训练语料、待测系统、参与测试的句子数量、每个句子被试听的次数等。以中文语音合成系统的语音评估为例，测评设置如下表所示。

表 1.2：语音测评设置

训练集	待测系统	句子数量	每个句子被测次数
内部数据集	真实语音	40	12
内部数据集	Tacotron-2	40	12
内部数据集	FastSpeech-2	40	12

3. 准备 HTML 文档等展示材料，向被试介绍该测试。该 HTML 文档至少包括：(1) 测试注意事项，如被试应该使用何种设备，在何种环境下试听，试听时应该排除的干扰因素等；(2) 测试任务，向被试介绍本次试听

的测试目标，应关注的侧重点，如：可懂度、相似度、清晰度等方面；(3)参考音频，可以放置一些示例音频，如 MOS=5 的优质语音，MOS=1 的低劣音频，以便被试更好地对音频打分；(4)测试音频，根据不同任务，放置合理的测试音频，真实和合成音频应提前打乱，并且不可告知被试打乱的顺序。

1.7.5 实验数据处理

1. 数据筛选。由于被试有可能没有受到监督，因此需要对收集到的评分进行事后检查，如删除使用扬声器试听的评分。另外，为了控制个体因素对整体结果的影响，减少偏离整体数据的异常值，需要计算每个人的评分与总体得分序列的相关性，相关性的度量使用相关系数来实现，如果相关系数 r 大于 0.25，则保留；否则拒绝该被试的所有评分。相关系数 r 的计算方法如下：

$$r = \frac{cov(\mu_{1n}, \dots, \mu_{Mn}; \mu_1, \dots, \mu_M)}{\sqrt{var(\mu_{1n}, \dots, \mu_{Mn})} \cdot \sqrt{var(\mu_1, \dots, \mu_M)}} \quad (1.1)$$

其中， M 为句子数量， N 为被试数量， μ_{mn} 为被试 n 对句子 m 给出的评分， $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$ ， $\mu_m = 1/N \sum_{n=1}^N \mu_{mn}$ 为句子 m 的总体平均分， cov 为协方差， var 为方差。

第2章 语音信号基础

2.1 参考资料

1. 武汉大学-数字信号处理
2. 台湾大学李琳山-数位语音处理
3. An Introduction to Signal Processing for Speech
4. 爱丁堡大学课件

2.2 语音基本概念

声波通过空气传播，被麦克风接收，通过采样、量化、编码转换为离散的数字信号，即波形文件。音量、音高和音色是声音的基本属性。

2.2.1 能量

音频的能量通常指的是时域上每帧的能量，幅度的平方。在简单的语音活动检测（Voice Activity Detection, VAD）中，直接利用能量特征：能量大的音频片段是语音，能量小的音频片段是非语音（包括噪音、静音段等）。这种 VAD 的局限性比较大，正确率也不高，对噪音非常敏感。

2.2.2 短时能量

短时能量体现的是信号在不同时刻的强弱程度。设第 n 帧语音信号的短时能量用 E_n 表示，则其计算公式为：

$$E_n = \sum_{m=0}^{M-1} x_n^2(m) \quad (2.1)$$

上式中， M 为帧长， $x_n(m)$ 为该帧中的样本点。

2.2.3 声强和声强级

单位时间内通过垂直于声波传播方向的单位面积的平均声能，称作声强，声强用 I 表示，单位为“瓦/平米”。实验研究表明，人对声音的强弱感觉并不是与声强成正比，而是与其对数成正比，所以一般声强用声强级来表示：

$$L = 10\log\left(\frac{I}{I'}\right) \quad (2.2)$$

其中， I 为声强， $I' = 10e^{-12}W/m^2$ 称为基本声强，声强级的常用单位是分贝 (dB)。

2.2.4 响度

响度是一种主观心理量，是人类主观感觉到的声音强弱程度，又称音量。响度与声强和频率有关。一般来说，声音频率一定时，声强越强，响度也越大。相同的声强，频率不同时，响度也可能不同。响度若用对数值表示，即为响度级，响度级的单位定义为方，符号为 phon。根据国际协议规定，0dB 声强级的 1000Hz 纯音的响度级定义为 0 phon，n dB 声强级的 1000Hz 纯音的响度级就是 n phon。其它频率的声强级与响度级的对应关系要从如图2.1等响度曲线查出。

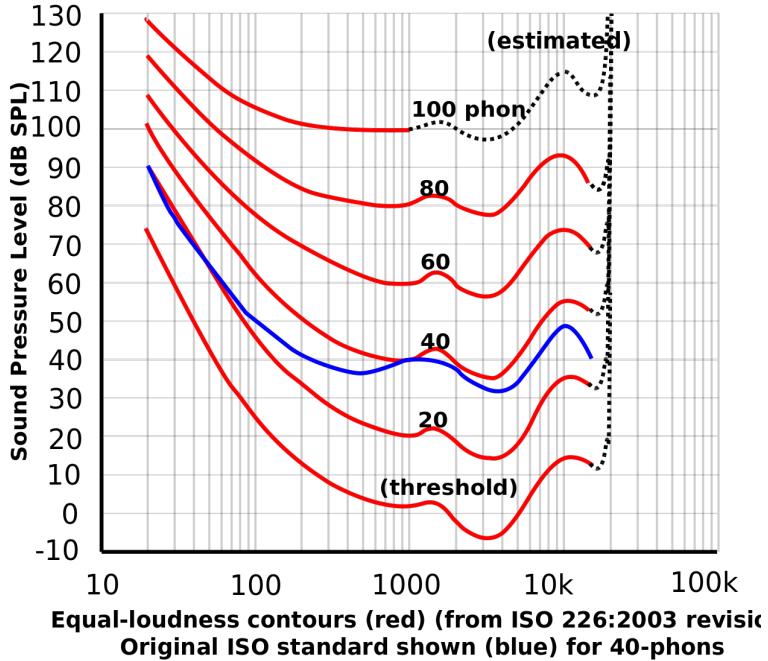


图 2.1: 等响曲线

2.2.5 过零率

过零率体现的是信号过零点的次数，体现的是频率特性。

$$Z_n = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} |\operatorname{sgn}(x_n(m)) - \operatorname{sgn}(x_n(m-1))| \quad (2.3)$$

其中， N 表示帧数， M 表示每一帧中的样本点个数， sgn 为符号函数，即

$$\operatorname{sgn} = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2.6 共振峰

声门处的准周期激励进入声道时会引起共振特性，产生一组共振频率，这一组共振频率称为共振峰频率或简称共振峰。共振峰包含在语音的频谱包络中，频谱极大值就是共振峰。频率最低的共振峰称为第一共振峰，对应的频率也称作基频，决定语音的 F0，其它的共振峰统称为谐波，如图2.2所示，蓝色箭头指向频谱的第一共振峰，也就是基频的位置，决定音高；而绿框则是其它共振峰，统称为谐波。谐波是基频对应的整数次频率成分，由声带发声带动空气共振形成的，对应着声音三要素的音色。谐波的位置，相邻的距离共同形成了音色特征。谐波之间距离近听起来则偏厚粗，之间距离远听起来偏清澈。在男声变女声的时候，除了基频的移动，还需要调整谐波间的包络，距离等，否则将会丢失音色信息。

2.2.7 基频和基音周期

基音周期反映了声门相邻两次开闭之间的时间间隔，基频（fundamental frequency, F0）则是基音周期的倒数，对应着声带振动的频率，代表声音的音高，声带振动越快，基频越高。它是语音激励源的一个重要特征，比如可以通过基频区分性别。一般来说，成年男性基频在 100-250Hz 左右，成年女性基频在 150-350Hz 左右，女声的音高一般比男声稍高。

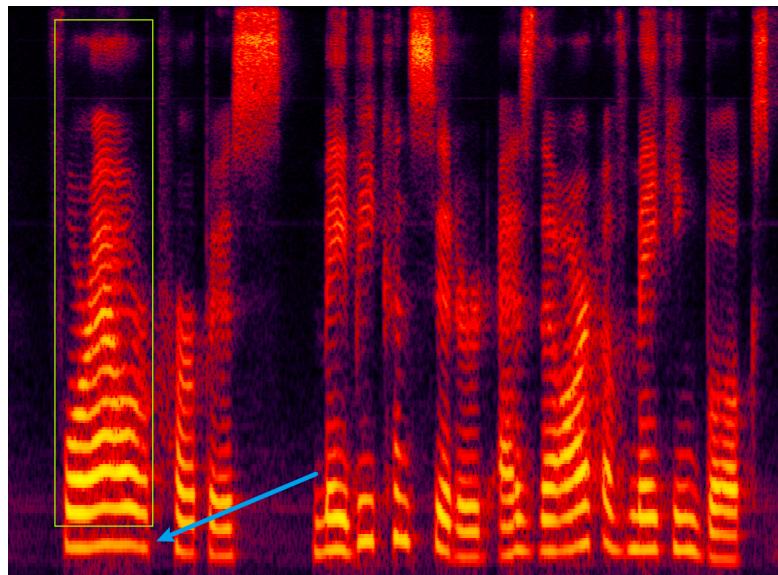


图 2.2: 共振峰

人类可感知声音的频率大致在 20-20000Hz 之间，人类对于基频的感知遵循对数律，也就是说，人们会感觉 100Hz 到 200Hz 的差距，与 200Hz 到 400Hz 的差距相同。因此，音高常常用基频的对数来表示。在音乐上，把相差一倍的两个基频的差距称为一个八度 (octave)；把一个八度 12 等分，每一份称为一个半音 (semitone)；把一个半音再 100 等分，每一份称为一个音分 (cent)。

基频是语音的重要特征，在包括语音合成的语音处理中有着广泛的应用，比如语音转换 (Voice Conversion, VC) 和语音合成中基频是一个强特征。基频的提取可以分为时域法和频域法。时域法以波形为输入，基本原理是寻找波形的最小正周期；频域法则会先对信号进行傅里叶变换，得到频谱，频谱在基频的整倍数处有尖峰，频域法的基本原理就是求出这些尖峰频率的最大公约数。但是考虑到基频并非每一帧都有，因此在提取基频前后，都需要判断有无基频，称之为清浊音判断 (Unvoiced/Voiced Decision, U/V Decision)。语音的基频往往随着时间变化，在提取基频之前往往要进行分帧，逐帧提取的基频常常含有错误，其中常见的错误就是倍频错误和半频错误，也就是提取出来的基频是真实基频的两倍或者一半，因此基频提取后要进行平滑操作。常见的基频提取算法有基于信号处理时域法的 YIN¹，基于信号处理频域法的 SWIPE²，基于机器学习时域法的 CREPE³和基于机器学习频域法的 SPICE⁴。常用的基频提取工具有pyWORLD, Parselmouth, CREPE, YIN等。参见[基频提取算法综述](#)。

2.2.8 音高

音高 (pitch) 是由声音的基频决定的，音高和基频常常混用。可以这样认为，音高 (pitch) 是稀疏离散化的基频 (F0)。由规律振动产生的声音一般都会有基频，比如语音中的元音和浊辅音；也有些声音没有基频，比如人类通过口腔挤压气流的清辅音。在汉语中，元音有 a/e/i/o/u，浊辅音有 y/w/v，其余音素比如 b/p/q/x 等均为清辅音，在发音时，可以通过触摸喉咙感受和判断发音所属音素的种类。

2.2.9 MFCC 和语谱图

对语音进行分析和处理时，部分信息在时域上难以分析，因此往往会提取频谱特征。在语音合成中，通常将频谱作为中间声学特征：首先将文本转换为频谱，再将频谱转换为波形；在语音识别中，则将频谱或者 MFCC

¹A. de Cheveigné and H. Kawahara, "YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music", Journal of the Acoustical Society of America, 2002.

²A. Camacho and J. G. Harris, "A sawtooth waveform inspired pitch estimator for speech and music", Journal of the Acoustical Society of America, 2008.

³J. W. Kim, et al., "CREPE: A convolutional representation for pitch estimation", ICASSP, 2018.

⁴B. Gfeller, et al., "SPICE: Self-supervised pitch estimation", IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2020.

作为中间声学特征。语音通过预加重、分帧、加窗、傅里叶变换之后，取功率谱的幅度平方，进行梅尔滤波取对数之后，就得到了梅尔频谱（或称 FilterBank/FBank），如果再进行离散余弦变换，就能够获得 MFCC，下一章将进行详述。语音通常是一个短时平稳信号，在进行傅里叶变换之前，一般要进行分帧，取音频的一个小片段进行短时傅里叶变换（STFT）。STFT 的结果是一个复数，包括幅度和相位信息，将该复数中的频率作为横轴，幅度作为纵轴，如图2.3所示，就组成了频谱图，将频谱图中的尖峰点连接起来，就形成了频谱包络。注意到，频谱图反映一个语音帧的频域情况，没有时间信息。因此，将每个帧对应的频谱图连接起来，以时间作为横轴，频率作为纵轴，颜色深浅表示幅度，如图2.4下面红图所示，就组成了语谱图。语谱图实际上是一个三维图，横轴时间，纵轴频率，颜色深浅表示幅度大小，一般来说，颜色越深，表示幅度值越大。

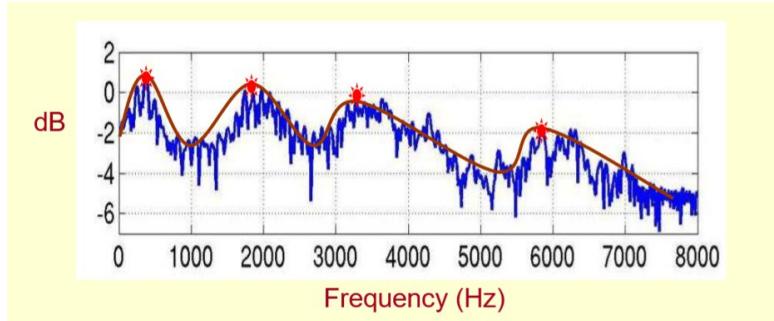


图 2.3: 频谱图

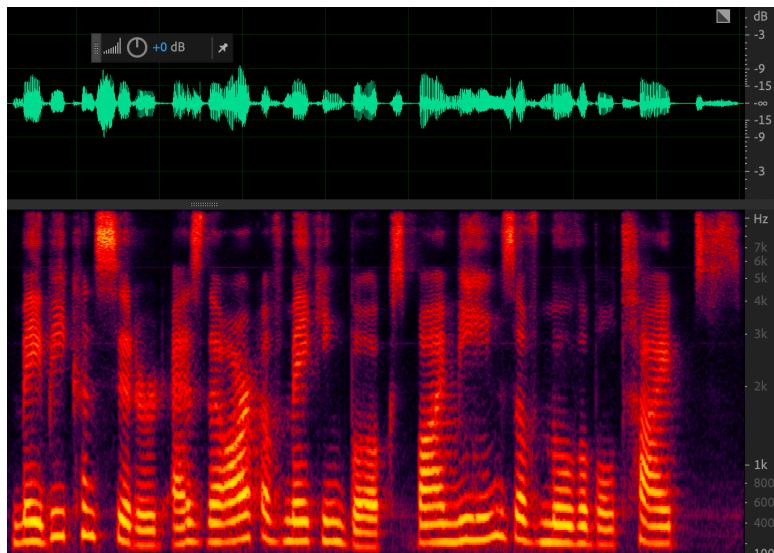


图 2.4: 波形和对应的语谱图

2.3 语言学

语言学研究人类的语言，计算语言学则是一门跨学科的研究领域，试图找出自然语言的规律，建立运算模型，语音合成其实就是计算语言学的子领域之一。在语音合成中，一般需要将文本转换为对应的音素，然后再将音素输入到后端模型中，因此需要为每个语种甚至方言构建恰当合理的音素体系。相关概念如下。

1. 音素 (phoneme): 也称音位，是能够区别意义的最小语音单位，同一音素由不同人/环境阅读，可以形成不同的发音。
2. 字素 (grapheme): 音素对应的文本。具体的区别参见：[Phonemes, Graphemes, and Morphemes!](#)
3. 发音 (phone): 某个音素的具体发音。实际上，phoneme 和 phone 都是指的是音素，音素可具化为实际的音，该过程称为音素的语音体现。一个音素可能包含着几个不同音值的音，因而可以体现为一个音、两个

音或更多的同位音。但是在一些论述中，phoneme 倾向于表示发音的符号，phone 更倾向于符号对应的实际发音，因此 phoneme 可对应无数个 phone。

4. 音节 (syllable): 音节由音素组成。在汉语中，除儿化音外，一个汉字就是一个音节。如 wo3 (我) 是一个音节，zhong1 (中) 也是一个音节。

2.3.1 国际音标简介

国际音标 (International Phonetic Alphabet, IPA) 是一种通用的注音系统，一套注音体系可以标注多种语言。对于汉语来说，使用国际音标和使用拼音标注发音效果是相同的；但是如果希望实现多语言的注音，就必须采用统一的注音，IPA 就是这样一种比较好的发音标注形式。

因为人类语音差异很大，有限的拉丁字母远不够用，于是就需要改变字形和借用其它语言的字母来补充。也就是说，IPA 以拉丁字母（罗马字母）的小写印刷体为主，如：a、b、c、d、f、g、h、i、j、k、p 等。在不够用时，使用以下几种方法来补充，包括：

1. 使用拉丁字母大写印刷体或书写体（草体）；
2. 颠倒或者改变拉丁字母的字形，如：倒置 e，卷尾 c，右弯尾 d，长右腿 n 等；
3. 借用其它语言字母；
4. 新制字母；
5. 在字母上加符号。

2.3.2 IPA 的字母和发音

读音上，为照顾习惯，大多数符号仍读拉丁语或其它语言的原音。IPA 追求一个字符表示一个发音，不会出现在一些语言中，如英语用“th”、“sh”表示一个发音的情况。IPA 字母的发音，有些和原始的希腊字母发音相同，但有些又和英语等语言发音相同，其大致的规则包括：

1. 元音字母：如 [a]、[o]、[i] 等发音和意大利语、西班牙语无较大差别；
2. 辅音字母：如 [m]、[n]、[z]、[p]、[b] 的发音则接近于英语；
3. 其他字母：如 [y] 和德语或芬兰语中的 y 类似，而 [j] 与英语的 y 发音接近。

IPA 的字母构成会随着规范的修改而变动，2018 年发布的标准中，IPA 的字母有 107 个，包括了 59 个肺部气流辅音，10 个非肺部气流辅音，28 个元音和 10 个其他字母，如下表 2.5-2.8 所示：

CONSONANTS (PULMONIC)											
	Bilabial	Labiodental	Dental	Alveolar	Postalveolar	Retroflex	Palatal	Velar	Uvular	Pharyngeal	Glottal
Plosive	p b		t d		t̪ d̪	c j	k g	q ɣ		ʔ	
Nasal	m	n̪	n		n̪	j̪	n̪	N			
Trill	B		r					R			
Tap or Flap	v̪	f̪	t̪		t̪						
Fricative	ɸ β	f v	θ ð	s z	ʃ ʒ	s z	ç j	x ɣ	χ ʁ	h ʕ	
Lateral fricative			ɬ	ɬ							
Approximant	v		ɹ		ɹ	j	w				
Lateral approximant			l		l	ɫ	ɫ				

Symbols to the right in a cell are voiced, to the left are voiceless. Shaded areas denote articulations judged impossible.

© 2018 IPA. Typefaces: Doulos SIL (modified), Doulos SIL, IPA Kuf, IPA LS Uni (symbols)

图 2.5: 肺部气流辅音 (59 个)

在国际音标表中，同一列、或同一行的音标，在发音方法上有相同之处，因此也就具有相似的性质，这为语音的研究提供了较大的便利。“国际音标表”是语音学的基础，就如同“元素周期表”是化学的基础。一些开源工具，比如 eSpeak NG Text-to-Speech、Epitrans 实现了各语种的字素转国际音标。但是，这些国际音标开源工具并没有提供对方言的支持，比如上海话、闽南语的字素转音素；国际音标本身识记较为复杂，学习成本比较高，并且为了照顾世界所有语种，音素的划分上较为精细，因此国际音标是语音合成中音素体系的重要参考方案，但非最佳方案。

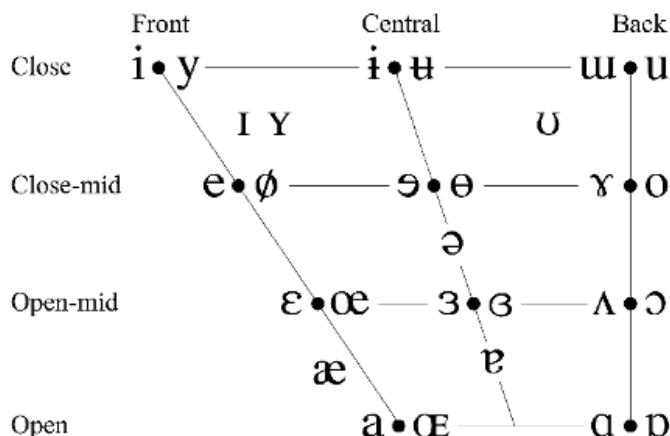
CONSONANTS (NON-PULMONIC)

Clicks	Voiced implosives	Ejectives
ʘ Bilabial	b Bilabial	' Examples:
Dental	d Dental/alveolar	p' Bilabial
! (Post)alveolar	f Palatal	t' Dental/alveolar
ǂ Palatoalveolar	g Velar	k' Velar
Alveolar lateral	g' Uvular	s' Alveolar fricative

© 2018 IPA Typefaces: Doulos SIL (metatext); Doulos SIL, IPA Kiel, IPA LS Uni (symbols)

图 2.6: 非肺部气流辅音 (10 个)

VOWELS



Where symbols appear in pairs, the one to the right represents a rounded vowel.

© 2018 IPA Typefaces: Doulos SIL (metatext); Doulos SIL, IPA Kiel, IPA LS Uni (symbols)

图 2.7: (元音)

OTHER SYMBOLS

ʍ Voiceless labial-velar fricative	ç ʐ Alveolo-palatal fricatives
w Voiced labial-velar approximant	j Voiced alveolar lateral flap
ɥ Voiced labial-palatal approximant	ʃ Simultaneous ʃ and X
h Voiceless epiglottal fricative	Affricates and double articulations can be represented by two symbols joined by a tie bar if necessary.
ʕ Voiced epiglottal fricative	ts ʈʂ kp
ʢ Epiglottal plosive	

© 2018 IPA Typefaces: Doulos SIL (metatext); Doulos SIL, IPA Kiel, IPA LS Uni (symbols)

图 2.8: (其它字母)

2.3.3 音系学

对于语音合成来说，需要了解语言学的分支之一：音系学，以便更好地制定适用于一个语种语音合成系统的音素体系。这里需要探讨三个问题：音位数量，这里的音位和音素概念区别不大，音素不针对一个语种，是一个最小的语音单位，音位是针对一个特定语言的，具有区别意义的最小语音单位，参见[音素和音位的区别与联系是什么？](#)；语音配列，也就是语音符号的组合规律，哪些音段的组合是不被允许的，音段出现的位置有哪些限制；音系交替，音与音同时出现时，彼此受影响会导致哪些形式的变化，这涉及到音系过程。音系过程可以理解为一个音段受所处语音环境或语法环境的影响而产生变化的过程，音系过程的种类有很多，比如同化和异化两种过程。

音位数量的确定牵扯到对比分布和互补分布两个概念。如果 A 和 B 处于对比分布时，那么甲和乙处于同样的语言环境中时，就会引起意义的不同。比如英语中的 [p] 和 [b] 就处于对比分布，当它们处于相同的语言环境中时，比如 pin[pin] 和 bin[bin]，但是两个单词的意义完全不同，因此 [p] 和 [b] 就分属两个不同的音位。而假如 A 和 B 处于互补分布时，那么甲和乙不可能出现在同样的语音环境中，例如英语中的 [p] 处于重读音节首时 pig[pig]，往往表现为送气的 [p^h]，而在 [s] 后面时 spit[spit]，往往表现为不送气的 [p]，送气的 [p^h] 和不送气的 [p] 不会出现在同一语音环境中，可以说，它们是同一个音位在不同语音环境中的音位变体。因此，音位处于对比分布，而音位变体处于互补分布。确立音位的做法便是寻找最小对比对，也就是说寻找音位时要满足：1. 在相同的语音环境；2. 单词的意思不同。最直接的做法就是找两个意义不同的单词，并且只有在一个位置上有不同的音段，在其它位置上的音段都相同，这一对单词就是最小对比对。比如 ban[ban] 和 man[_man] 这对最小对比对中，除了 [b] 和 [m] 之外，其它音段都相同，正因为 [b] 和 [m]，这两个单词的意义也不同。因此归纳音位的原则有：对立互补原则和语音相似原则。

语音配列是一个语种中，对于一个单词、语素或音节中可能出现的元音和辅音序列制约条件的集合。比如英语单词“wtist”是不可能存在的，因为 [w] 是滑音（glide），而 [t] 则是塞擦音（plosive），在英语中如果滑音和塞擦音同时出现在词首，则塞擦音一定在滑音的前面，比如 twin，因此“wtist”一定是非法英语单词。

同化是指一个音段变得和另一个音段相似的音系学过程，根据同化的方向，这一过程又可以分为顺同化和逆同化。顺同化又称遗留同化，是指后面的音段被前面的音段同化了，比如英语中的复数和动词的过去式。英语单词“cup”词缀辅音和前面词干尾的辅音在清浊上是一致的，音系学上认为复数形式本来的形式是 [z]，是一个浊音，但当词干尾的辅音是清音比如 [t]、[k]、[p]，这个浊辅音就会被前面的清音同化为清辅音 [s]，因此“cup”的复数形式“cups”读音就是 [kaps] 而不是 [kapz]。顺同化是从左到右的同化，逆同化就是从右到左的同化。逆同化又称为先行同化，是前面的音段被后面音段同化的过程。比如汉语普通话中，当两个第三声的字放在一起，第一个就会变成第二声，如永（yong3）、远（yuan3），组成单词“永远”时，读音为“yong2 yuan3”。

对于目前类似于 Tacotron 这样的端到端声学模型来说，给定的音素体系一般只需确定音位，对于各种协同发音导致的音位变体，则可以不加区分。例如对于法语这样存在同一个音素在不同单词中发音不同的语种，文本前端的音素体系可以只关注音位，音位变体由后端模型自行学习。为了模型增强可控性，也可以尝试结合词面信息，根据上下文给出音位不同的符号表示。比如 s[s] 这个字母，在不同语境中可能存在不同的音位变体，后面结合字母 a 是一个音位变体，因此将此时字母 s 的音位变体标记为 [sa]；后面结合字母 b 可能又是一个音位变体，这时则将该 s 的音位变体标记为 [sb]。

2.3.4 参考资料

1. 十分语言学（视频扫盲课程）
2. 语言学概论
3. 《语音模式》笔记（上）：肺部气流辅音
4. 《语音模式》笔记（下）：非肺部辅音、元音、一些杂谈
5. 语林寒舍-Huisje in het Taalbos

2.4 音频格式

1. *.wav: 波形无损压缩格式，是语音合成中音频语料的常用格式，主要的三个参数：采样率，量化位数和通道数。一般来说，合成语音的采样率采用 16kHz、22050Hz、24kHz，对于歌唱合成等高质量合成场景采样率可达到 48kHz；量化位数采用 16bit；通道数采用 1。
2. *.flac: Free Lossless Audio Codec，无损音频压缩编码。
3. *.mp3: Moving Picture Experts Group Audio Player III，有损压缩。
4. *.wma: Window Media Audio，有损压缩。
5. *.avi: Audio Video Interleaved，avi 文件将音频和视频包含在一个文件容器中，允许音视频同步播放。

2.5 数字信号处理

2.5.1 模数转换

模拟信号到数字信号的转换（Analog to Digital Converter，ADC）称为模数转换。

奈奎斯特采样定理：要从抽样信号中无失真地恢复原信号，抽样频率应大于 2 倍信号最高频率。抽样频率小于 2 倍频谱最高频率时，信号的频谱有混叠。抽样频率大于 2 倍频谱最高频率时，信号的频谱无混叠。如果对语音模拟信号进行采样率为 16000Hz 的采样，得到的离散信号中包含的最大频率为 8000Hz。

2.5.2 频谱泄露

音频处理中，经常需要利用傅里叶变换将时域信号转换到频域，而一次快速傅里叶变换（FFT）只能处理有限长的时域信号，但语音信号通常是长的，所以需要将原始语音截断成一帧一帧长度的数据块。这个过程叫信号截断，也叫分帧。分完帧后再对每帧做 FFT，得到对应的频域信号。FFT 是离散傅里叶变换（DFT）的快速计算方式，而做 DFT 有一个先验条件：分帧得到的数据块必须是整数周期的信号，也即是每次截断得到的信号要求是周期主值序列。

但做分帧时，很难满足周期截断，因此就会导致频谱泄露。要解决非周期截断导致的频谱泄露是比较困难的，可以通过加窗尽可能减少频谱泄露带来的影响。窗类型可以分为汉宁窗、汉明窗、平顶窗等。虽然加窗能够减少频谱泄露，但加窗衰减了每帧信号的能量，特别是边界处的能量，这时加一个合成窗，且 overlap-add，便可以补回能量。参见：[频谱泄露和加窗](#)。

2.5.3 频率分辨率

频率分辨率是指将两个相邻谱峰分开的能力，在实际应用中是指分辨两个不同频率信号的最小间隔。

2.6 其它概念

1. 波形（waveform）：声音是由声源振动产生的波。
2. 信道：通信的通道 Channel，是信号传输的媒介。
3. 声道：声音在录制和播放时，在不同空间位置采集或回放相互独立的音频信号，因此声道数也就是声音录制时的音源数量或回放时相应的扬声器数量。
4. 采样率：单位时间内从连续信号中提取并组成离散信号的采样个数，音频常用单位 kHz。
5. 采样位数/采样深度：数字信号的二进制位数，与每次采样的可能值个数有关，音频常用单位 bit。常见的音频格式：16kHz，16bit 中 16kHz 指的是采样率，16bit 表示采样位深。
6. 信噪比（SNR）：和声压级类似，单位仍采用分贝，数值越高，表示声音越干净，噪音比例越小。

7. **LPC**。线性预测系数。LPC 的基本思想是，当前时刻的信号可以用若干历史时刻信号的线性组合来估计，通过使实际语音的采样值和线性预测的采样值之间达到均方差最小，即可得到一组线性预测系数。求解 LPC 系数可以采用自相关法、协方差法、格型法等快速算法。

② **笔记** 语音信号的数字表示可以分为两类：波形表示和参数表示，波形表示仅通过采样和量化保存模拟信号的波形；而参数表示将语音信号表示为某种语音产生模型的输出，是对数字化语音进行分析和处理之后得到的。

③ **笔记** 利用同态处理方法，对语音信号求离散傅里叶变换之后取对数，再求反变换就可以得到倒谱系数。其中，LPC 倒谱（LPCCEP）是建立在 LPC 谱上的，而梅尔倒谱系数（Mel Frequency Cepstrum Coefficient, MFCC）则是基于梅尔频谱的。

8. **LPCC**。LPCC 特征假定信号存在一种线性预测的结构，这对于周期特性的浊音描述比较准确，而对于辅音则相当于强加了一种错误的结构。MFCC 相邻帧特征近乎独立，所以能够比较好地描述辅音，但忽略了信号可能的内在结构，如相邻帧之间的关联，经验表明 MFCC 更好用，并且经常会加入差分特征以减弱其独立性。

④ **笔记** 线性预测倒谱系数（LPCC）是根据声管模型建立的特征参数，是对声道响应的特征表征。梅尔频谱倒谱系数（MFCC）是基于人类听觉机理提取出的特征参数，是对人耳听觉的特征表征。

对于一段 1 秒的波形，假设采样率 16kHz，采样位深 16bit，则包含样本点 $1 \times 16000 = 16000$ 个，所占容量 $1 \times 16000 \times 16/8 = 32000$ 字节（B）。

第3章 语音特征提取

原始信号是不定长的时序信号，不适合作为机器学习的输入。因此一般需要将原始波形转换为特定的特征向量表示，该过程称为语音特征提取。

3.1 预处理

包括预加重、分帧和加窗。

3.1.1 预加重

语音经过说话人的口唇辐射发出，受到唇端辐射抑制，高频能量明显降低。一般来说，当语音信号的频率提高两倍时，其功率谱的幅度下降约 6dB，即语音信号的高频部分受到的抑制影响较大。在进行语音信号的分析和处理时，可采用预加重（pre-emphasis）的方法补偿语音信号高频部分的振幅，在傅里叶变换操作中避免数值问题，本质是施加高通滤波器。假设输入信号第 n 个采样点为 $x[n]$ ，则预加重公式如下：

$$x'[n] = x[n] - a \times x[n - 1] \quad (3.1)$$

其中， a 是预加重系数，一般取 $a = 0.97$ 或 $a = 0.95$ 。

3.1.2 分帧

语音信号是非平稳信号，考虑到发浊音时声带有规律振动，即基音频率在短时范围内时相对固定的，因此可以认为语音信号具有短时平稳特性，一般认为 10ms~50ms 的语音信号片段是一个准稳态过程。短时分析采用分帧方式，一般每帧帧长为 20ms 或 50ms。假设语音采样率为 16kHz，帧长为 20ms，则一帧有 $16000 \times 0.02 = 320$ 个样本点。

相邻两帧之间的基音有可能发生变化，如两个音节之间，或者声母向韵母过渡。为确保声学特征参数的平滑性，一般采用重叠取帧的方式，即相邻帧之间存在重叠部分。一般来说，帧长和帧移的比例为 1:4 或 1:5。

3.1.3 加窗

分帧相当于对语音信号加矩形窗，矩形窗在时域上对信号进行截断，在边界处存在多个旁瓣，会发生频谱泄露。为了减少频谱泄露，通常对分帧之后的信号进行其它形式的加窗操作。常用的窗函数有：汉明（Hamming）窗、汉宁（Hanning）窗和布莱克曼（Blackman）窗等。

汉明窗的窗函数为：

$$W_{ham}[n] = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N} - 1\right) \quad (3.2)$$

其中， $0 \leq n \leq N - 1$ ， N 是窗的长度。

汉宁窗的窗函数为：

$$W_{han}[n] = 0.5[1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N} - 1\right)] \quad (3.3)$$

其中， $0 \leq n \leq N - 1$ ， N 是窗的长度。

3.2 短时傅里叶变换

人类听觉系统与频谱分析紧密相关，对语音信号进行频谱分析，是认识和处理语音信号的重要方法。声音从频率上可以分为纯音和复合音，纯音只包含一种频率的声音（基音），而没有倍音。复合音是除了基音之外，还包含多种倍音的声音。大部分语音都是复合音，涉及多个频率段，可以通过傅里叶变换进行频谱分析。

每个频率的信号可以用正弦波表示，采用正弦函数建模。基于欧拉公式，可以将正弦函数对应到统一的指数形式：

$$e^{j\omega n} = \cos(\omega n) + j \sin(\omega n) \quad (3.4)$$

正弦函数具有正交性，即任意两个不同频率的正弦波乘积，在两者的公共周期内积分等于零。正交性用复指数运算表示如下：

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\alpha t} e^{-j\beta t} dt = 0, \quad \text{if } \alpha \neq \beta \quad (3.5)$$

基于正弦函数的正交性，通过相关处理可以从语音信号分离出对应不同频率的正弦信号。对于离散采样的语音信号，可以采用离散傅里叶变换（DFT）。DFT 的第 k 个点计算如下：

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{j2\pi kn}{K}}, \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (3.6)$$

其中， $x[n]$ 是时域波形第 n 个采样点值， $X[k]$ 是第 k 个傅里叶频谱值， N 是采样点序列的点数， K 是频谱系数的点数，且 $K \geq N$ 。利用 DFT 获得的频谱值通常是复数形式，这是因为上式中，

$$e^{-\frac{j2\pi kn}{K}} = \cos\left(\frac{2\pi kn}{K}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi kn}{K}\right) \quad (3.7)$$

则

$$X[k] = X_{real}[k] - j X_{imag}[k] \quad (3.8)$$

其中，

$$X_{real}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cos\left(\frac{2\pi kn}{K}\right) \quad (3.9)$$

$$X_{imag}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \sin\left(\frac{2\pi kn}{K}\right) \quad (3.10)$$

N 个采样点序列组成的时域信号经过 DFT 之后，对应 K 个频率点。经 DFT 变换得到信号的频谱表示，其频谱幅值和相位随着频率变化而变化。

在语音信号处理中主要关注信号的频谱幅值，也称为振幅频谱/振幅谱：

$$X_{magnitude}[k] = \sqrt{X_{real}[k]^2 + X_{imag}[k]^2} \quad (3.11)$$

能量频谱/能量谱是振幅频谱的平方：

$$X_{power}[k] = X_{real}[k]^2 + X_{imag}[k]^2 \quad (3.12)$$

各种声源发出的声音大多由许多不同强度、不同频率的声音组成复合音，在复合音中，不同频率成分与能

量分布的关系称为声音的频谱，利用频谱图表示各频率成分与能量分布之间的关系，频谱图横轴是频率（Hz），纵轴是幅度（dB）。

通过对频域信号进行逆傅里叶变换（IDFT），可以恢复时域信号：

$$x[n] = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} X[k] e^{\frac{j2\pi kn}{N}}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.13)$$

离散傅里叶变换（DFT）的计算复杂度为 $O(N^2)$ ，可以采用快速傅里叶变换（FFT），简化计算复杂度，在 $O(N \log_2 N)$ 的时间内计算出 DFT。在实际应用中，对语音信号进行分帧加窗处理，将其分割成一帧帧的离散序列，可视为短时傅里叶变换（STFT）：

$$X[k, l] = \sum_{n=0}^{N-1} x_l[n] e^{-\frac{j2\pi nk}{K}} = \sum_{n=0}^{N-1} w[n] x[n + lL] e^{-\frac{j2\pi nk}{K}} \quad (3.14)$$

其中， K 是 DFT 后的频率点个数， k 是频率索引， $0 \leq k < K$ 。 $X[k, l]$ 建立起索引为 lL 的时域信号，与索引为 k 的频域信号之间的关系。

3.3 听觉特性

3.3.1 梅尔滤波

人类对不同频率的语音有不同的感知能力：

1. 1kHz 以下，人耳感知与频率成线性关系。
2. 1kHz 以上，人耳感知与频率成对数关系。

因此，人耳对低频信号比高频信号更为敏感。因此根据人耳的特性提出了一种 mel 刻度，即定义 1 个 mel 刻度相当于人对 1kHz 音频感知程度的千分之一，mel 刻度表达的是，从线性频率到“感知频率”的转换关系：

$$mel(f) = 2595 \lg(1 + \frac{f}{700}) \quad (3.15)$$

```

1  from matplotlib import pyplot as plt
2  import numpy as np
3
4  x = np.linspace(0, 5000, 50000)
5  y = 2595 * np.log10(1+x/700)
6  x0 = 1000
7  y0 = 2595 * np.log10(1+x0/700)
8  plt.plot(x, y)
9  plt.scatter(x0, y0)
10 plt.plot([x0, x0], [0, y0], 'k--')
11 plt.plot([0, x0], [x0, y0], 'k--')
12 plt.xlabel('f (Hz)')
13 plt.ylabel('Mel(f)')
14 plt.title('relationship between linear and mel scale')
15 plt.xlim(0, x[-1])
16 plt.ylim(0, y[-1])
17 plt.savefig('mel_vs_f.png')
18 plt.show()

```

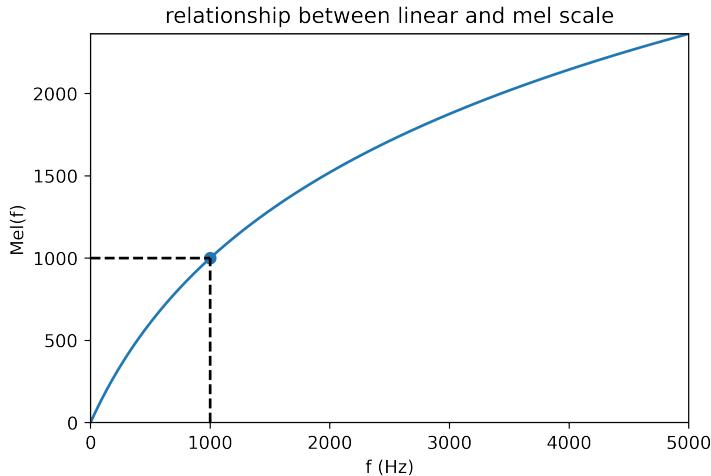


图 3.1: mel 刻度和频率之间的关系

人们根据一系列心理声学实验得到了类似耳蜗作用的滤波器组，用于模拟人耳不同频段声音的感知能力，也就是多个三角滤波器组成的 mel 频率滤波器组。每个滤波器带宽不等，线性频率小于 1000Hz 的部分为线性间隔，而线性频率大于 1000Hz 的部分为对数间隔。同样地，将梅尔频率转换到线性频率的公式为：

$$f_{mel}^{-1} = 700 \cdot (10^{\frac{f_{mel}}{2595}} - 1) \quad (3.16)$$

3.3.2 Bark 滤波

声音的响度，反映人对不同频率成分声强/声音强弱的主观感受。响度与声强、频率的关系可以用等响度轮廓曲线表示。

人耳对响度的感知有一个范围，当声音低于某个响度时，人耳是无法感知到的，这个响度值称为听觉阈值，或称听阈。在实际环境中，但一个较强信号（掩蔽音）存在时，听阈就不等于安静时的阈值，而是有所提高。这意味着，邻近频率的两个声音信号，弱响度的声音信号会被强响度的声音信号所掩蔽（Mask），这就是频域掩蔽。

根据听觉频域分辨率和频域掩蔽的特点，定义能够引起听觉主观变化的频率带宽为一个临界频带。一个临界频带的宽度被称为一个 Bark，Bark 频率 $Z(f)$ 和线性频率 f 的对应关系定义如下：

$$Z(f) = 6 \ln\left(\frac{f}{600} + \left(\left(\frac{f}{600}\right)^2 + 1\right)^{\frac{1}{2}}\right) \quad (3.17)$$

其中，线性频率 f 的单位为 Hz，临界频带 $Z(f)$ 的单位为 Bark。

3.4 倒谱分析

语音信号的产生模型包括发生源（Source）和滤波器（Filter）。人在发声时，肺部空气受到挤压形成气流，气流通过声门（声带）振动产生声门源激励 $e[n]$ 。对于浊音，激励 $e[n]$ 是以基音周期重复的单位冲激；对于清音， $e[n]$ 是平稳白噪声。该激励信号 $e[n]$ 经过咽喉、口腔形成声道的共振和调制，特别是舌头能够改变声道的容积，从而改变发音，形成不同频率的声音。气流、声门可以等效为一个激励源，声道等效为一个时变滤波器，语音信号 $x[n]$ 可以被看成激励信号 $e[n]$ 与时变滤波器的单位响应 $v[n]$ 的卷积：

$$x[n] = e[n] * v[n] \quad (3.18)$$

已知语音信号 $x[n]$ ，待求出上式中参与卷积的各个信号分量，也就是解卷积处理。除了线性预测方法外，还

可以采用倒谱分析实现解卷积处理。倒谱分析，又称为同态滤波，采用时频变换，得到对数功率谱，再进行逆变换，分析出倒谱域的倒谱系数。

同态滤波的处理过程如下：

1. 傅里叶变换。将时域的卷积信号转换为频域的乘积信号：

$$\text{DFT}(x[n]) = X[z] = E[z]V[z] \quad (3.19)$$

2. 对数运算。将乘积信号转换为加性信号：

$$\log X[z] = \log E[z] + \log V[z] = \hat{E}[z] + \hat{V}[z] = \hat{X}[z] \quad (3.20)$$

3. 傅里叶反变换。得到时域的语音信号倒谱。

$$Z^{-1}(\hat{X}[z]) = Z^{-1}(\hat{E}[z] + \hat{V}[z]) = \hat{e}[n] + \hat{v}[z] \approx \hat{x}[n] \quad (3.21)$$

在实际应用中，考虑到离散余弦变换（DCT）具有最优的去相关性能，能够将信号能量集中到极少数的变换系数上，特别是能够将大多数的自然信号（包括声音和图像）的能量都集中在离散余弦变换后的低频部分。一般采用 DCT 反变换代替傅里叶反变换，上式可以改写成：

$$\hat{c}[m] = \sum_{k=1}^N \log X[k] \cos\left(\frac{\pi(k-0.5)m}{N}\right), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3.22)$$

其中， $X[k]$ 是 DFT 变换系数， N 是 DFT 系数的个数， M 是 DCT 变换的个数。

此时， $\hat{x}[n]$ 是复倒谱信号，可采用逆运算，恢复出语音信号，但 DCT 不可逆，从倒谱信号 $\hat{c}[m]$ 不可还原出语音 $x[n]$ 。

3.5 常见的声学特征

在语音合成中，常用的声学特征有梅尔频谱（Mel-Spectrogram）/滤波器组（Filter-bank, Fbank），梅尔频率倒谱系数（Mel-Frequency Cepstral Coefficient, MFCC）等。

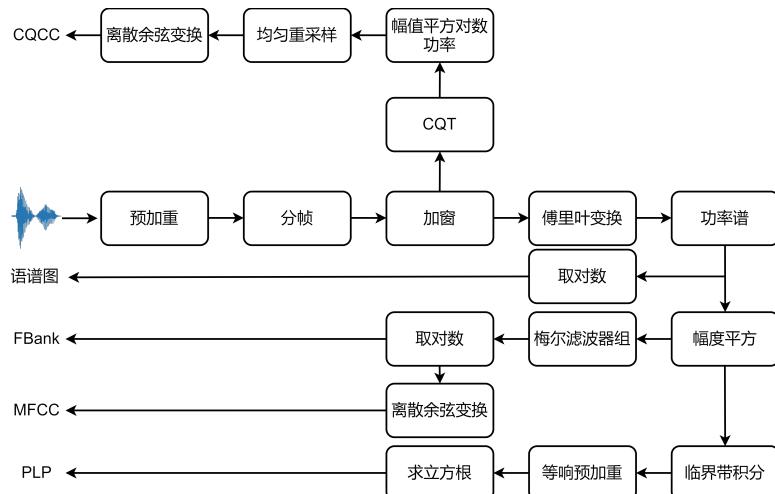


图 3.2: 常用的声学特征

接下来重点介绍 FBank 和 MFCC 的计算过程。

3.5.1 FBank

FBank 的特征提取过程如下：

1. 将信号进行预加重、分帧、加窗，然后进行短时傅里叶变换（STFT）获得对应的频谱。

2. 求频谱的平方，即能量谱。进行梅尔滤波，即将每个滤波频带内的能量进行叠加，第 k 个滤波器输出功率谱为 $X[k]$ 。
3. 将每个滤波器的输出取对数，得到相应频带的对数功率谱。

$$Y_{\text{FBank}}[k] = \log X[k] \quad (3.23)$$

FBank 特征本质上是对数功率谱，包括低频和高频信息。相比于语谱图，FBank 经过了梅尔滤波，依据人耳听觉特性进行了压缩，抑制了一部分人耳无法感知的冗余信息。

3.5.2 MFCC

MFCC 和 FBank 唯一的不同就在于，获得 FBank 特征之后，再经过反离散余弦变换，就得到 L 个 MFCC 系数。在实际操作中，得到的 L 个 MFCC 特征值可以作为静态特征，再对这些静态特征做一阶和二阶差分，得到相应的静态特征。

3.6 具体操作

3.6.1 利用 librosa 读取音频

```

1 from matplotlib import pyplot as plt
2 import numpy as np
3 import librosa
4
5 # 利用 librosa 读取音频
6 input_wav_path = r'test.wav'
7 y, sr = librosa.load(input_wav_path)
8 y_num = np.arange(len(y))
9
10 # 截取前 0.3s 的音频
11 sample_signal = y[0:int(sr*0.3)]
12 sample_num = np.arange(len(sample_signal))
13
14 plt.figure(figsize=(11, 7), dpi=500)
15 plt.subplot(211)
16 plt.plot(y_num/sr, y, color='black')
17 plt.plot(sample_num/sr, sample_signal, color='blue')
18 plt.xlabel('Time (sec)')
19 plt.ylabel('Amplitude')
20 plt.title('Waveform')
21
22 plt.subplot(212)
23 plt.plot(sample_num/sr, sample_signal, color='blue')
24 plt.xlabel('Time (sec)')
25 plt.ylabel('Amplitude')
26 plt.title('0~0.3s waveform')
27 plt.tight_layout()
28 plt.savefig('waveform.png', dpi=500)
29 plt.show()
```

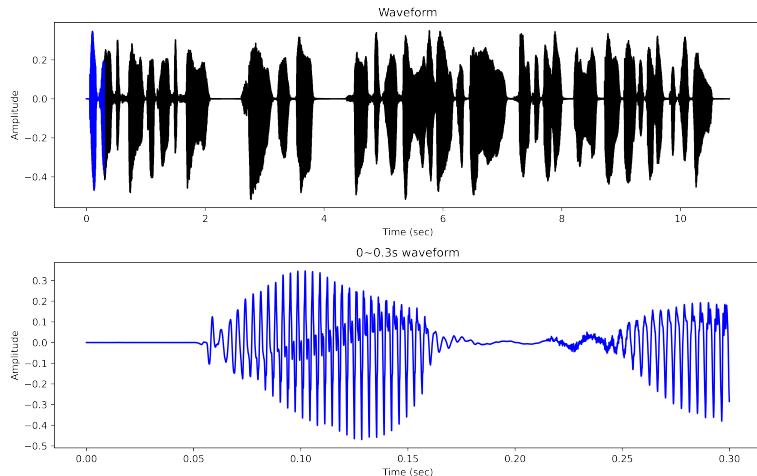


图 3.3: 波形图

音频有不同的编码类型，librosa 默认采取浮点格式读取，即读取的样本点均是 $[-1, -1]$ 之间的浮点值。更详细的文档参见 SoX 的 Input & Output File Format Options 部分。

表 3.1: SoX 音频个数

选项	描述	常见可选项
b	每个编码样本所占的数据位数（位深）	8/16/32
c	音频文件包含的通道数	1/2
e	音频文件的编码类型	signed-integer/unsigned-integer/floating-point
r	音频文件的采样率	16k/16000/22050
t	音频文件的文件类型	raw/mp3

3.6.2 提取梅尔频谱

```

1 sample_rate = 16000
2 preemphasis = 0.97
3 n_fft = 1024
4 frame_length = 0.05 # ms
5 frame_shift = 0.01 # ms
6 fmin = 0
7 fmax = sample_rate/2
8 eps = 1e-10
9 n_mel = 80
10 win_length = int(sample_rate*frame_length)
11 hop_length = int(sample_rate*frame_shift)
12 mel_basis = librosa.filters.mel(
13     sample_rate, n_fft, n_mel, fmin=fmin, fmax=fmax)
14
15
16 def get_spectrogram(input_wav_path):
17     y, sr = librosa.load(input_wav_path)
18     y = np.append(y[0], y[1:]-preemphasis*y[:-1])
19     linear = librosa.stft(
20         y=y, n_fft=n_fft, hop_length=hop_length, win_length=win_length)
21     mag = np.abs(linear)

```

```

22     mel = np.dot(mel_basis, mag)
23     mel = np.log10(np.maximum(eps, mel))
24     mel = mel.T.astype(np.float32) # (T, n_mels)
25     return mel
26
27 # plt.switch_backend('agg')
28
29
30 def plot_spectrogram(spectrogram, file_path):
31     spectrogram = spectrogram.T
32     fig = plt.figure(figsize=(16, 9))
33     plt.imshow(spectrogram, aspect='auto', origin='lower')
34     plt.colorbar()
35     plt.xlabel('frames')
36     plt.tight_layout()
37     plt.savefig(file_path, dpi=500)
38     plt.show()
39
40
41 mel_spec = get_spectrogram(input_wav_path)
42 plot_spectrogram(mel_spec, 'mel_spectrogram.png')

```

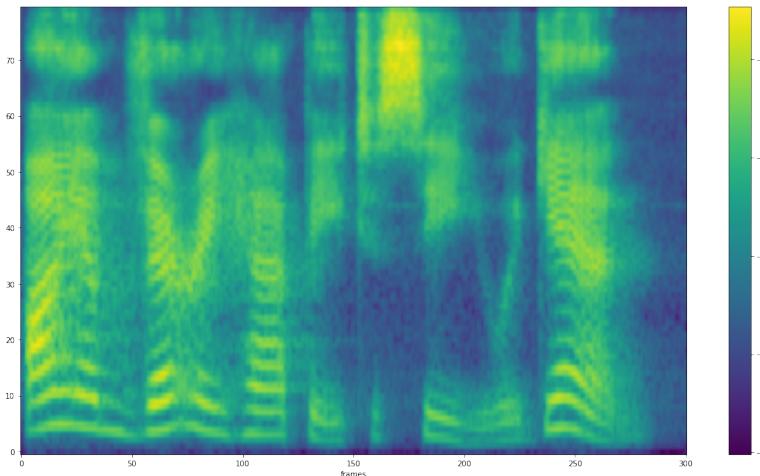


图 3.4: 梅尔频谱

3.6.3 提取 MFCC

```

1 from scipy.fftpack import dct
2
3 num_ceps = 12 # MFCC阶数，可选值2~13
4 mfcc = dct(mel_spec, type=2, axis=1, norm='ortho')[:, 1 : (num_ceps + 1)]
5 plot_spectrogram(mfcc, 'mfcc.png')
6 # 将正弦同态滤波 (sinusoidal liftering) 应用于MFCC以去强调更高的MFCC，其已被证明可以
   改善噪声信号中的语音识别。
7 # reference: https://haythamfayek.com/2016/04/21/speech-processing-for-machine-
   learning.html

```

```

8 (nframes, ncoeff) = mfcc.shape
9 cep_lifter = 22
10 n = np.arange(ncoeff)
11 lift = 1 + (cep_lifter / 2) * np.sin(np.pi * n / cep_lifter)
12 mfcc *= lift
13 plot_spectrogram(mfcc, 'mfcc_lift.png')

```

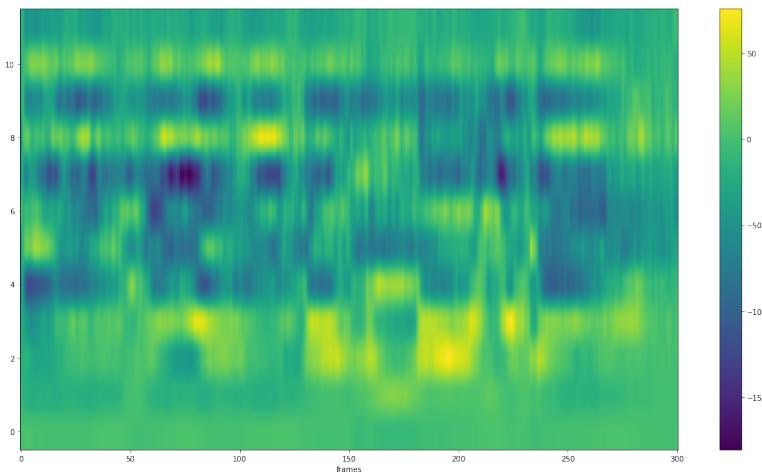


图 3.5: MFCC

在语音合成中，类似于深度学习其它领域，输入数据要进行均值方差归一化，使得数据量纲一致并遵循一定分布，避免模型梯度爆炸，降低学习难度。

```

1 frame_num = mel_spec.shape[0]
2 cep_sum = np.sum(mel_spec, axis=0)
3 cep_squ_sum = np.sum(np.square(mel_spec), axis=0)
4 cep_mean = cep_sum/frame_num
5 cep_std = cep_squ_sum/frame_num-np.square(cep_mean)

```

第4章 音库制作和文本前端

4.1 音库制作

4.1.1 音库制作概述

音库的制作一般包括发音人选型、录音文本收集、音频录制、语料整理和标注 5 个步骤。音库的制作对整个语音合成系统的建设较为重要，音库如果建设较差，比如发音人风格难以接受、标注和实际音频不符，之后的努力只会事倍功半。

4.1.2 发音人选型

发音人选型，顾名思义，就是根据应用场景选择录音风格、发音人等。首先，语音合成系统在不同场景下，对训练语料的要求有所不同。比如新闻播报场景下，要求发音人播报风；有声书合成场景下，要求发音人抑扬顿挫，富有感情；在车载等领域，则要求交互风；在情感语音合成则要求录制不同情感的语音；甚至在一些特定场景下，比如二次元领域，则要求可爱风等等。其次，不同的发音人对最终的合成语音自然度也有影响，部分发音人发音苍老、低沉，即使同样的文本、声学模型和声码器，最优的超参数，母语者也倾向于给予较低的自然度打分。因此，在音库录音之初，就可以发布有关于录音样品种的平均意见得分评测，让母语者或者需求方选择合适的发音人和录音风格。虽然目前后端模型有一些迁移风格、说话人的能力，但最好从源头就做好。

4.1.3 录音文本收集

在一个语种的语音合成建设之初，就可以同步收集该语种对应的大文本。大文本不仅仅可以筛选录音文本，还可以从中提取词条、统计词频、制作词典、标注韵律、构建测试集等等。录音文本的选择一般遵循以下几个原则：

1. 音素覆盖。这就要求在录音开始之前，就需要构建起来一套基础的文本前端，最起码要有简单的文本转音素（G2P）系统。大部分语种的字符或者字符组合会有较为固定的发音，比如英语中的 h 总是会发 [h] 的音，o 总是会发 [ə] 的音，如果找不到公开、即时可用的文本转音素系统，可以根据规则构建。用于录音的文本要保持多样性，音素或者音素组合要尽可能覆盖全，可以统计音素序列中的 N-Gram，确保某些音素或者音素组合出现频次过高，而某些音素或音素组合又鲜少出现。
2. 场景定制。如果是通用语音合成，需要确保百科、新闻、对话、高频词、基数词和序数词等数字串、包含常用外来词（如包含英语单词）的句子要有所覆盖；如果是特定场景，比如车载领域，则可以收集车载播报的常用话术、专业术语（比如油量、胎压等）、音乐名或歌手名、地名和新闻播报，在特定场景下，需要对业务有一定的理解，并且在一开始就要和需求方紧密沟通。
3. 文本正确性。录音文本确保拼写无误，内容正确，比如需要删除脏话、不符合宗教信仰或政治不正确的语句等。

4.1.4 音频录制

音频的录制对合成语音的表现较为重要，较差的语音甚至会导致端到端声学模型无法正常收敛。用于训练的录音至少要保证录音环境和设备始终保持一致，无混响、背景噪音；原始录音不可截幅；如果希望合成出来的语音干净，则要删除含口水音、呼吸音、杂音、模糊等，但对于目前的端到端合成模型，有时会学习到在合适的位置合成呼吸音、口水音，反而会增加语音自然度。录音尽可能不要事先处理，语速的调节尚可，但调节音效等有时会造成奇怪的问题，甚至导致声学模型无法收敛。音频的录制可以参考录音公司的标准，购买专业麦克

风，并保持录音环境安静即可。在音库录制过程中，可尽早提前尝试声学模型，比如音库录制 2 个小时语音后，就可尝试训练基线语音合成系统，以防止录音不符合最终的需求。

4.1.5 语料整理

检查文本和录制的语音是否一一对应，录制的音频本身一句话是否能量渐弱，参与训练的语音前后静音段要保持一致，能量要进行规范化。可使用预训练的语音活动检测（Voice Activity Detection, VAD）工具，或者直接根据语音起止的电平值确定前后静音段。可以使用一些开源的工具，比如[pyloudnorm](#)统一所有语音的整体能量，这将有助于声学模型的收敛。当然，在声学模型模型训练时，首先就要对所有语料计算均值方差，进行统一的规范化，但是这里最好实现统一能量水平，防止一句话前后能量不一致。能量规整的示例代码如下。

```
1 def normalize_wav(wav_path, sample_rate, target_loudness=-24.0)
2     y, sr = librosa.load(YOUR_WAV_PATH, sr=SAMPLE_RATE)
3     meter = pyln.Meter(sr) # create BS.1770 meter
4     loudness = meter.integrated_loudness(y)
5     y = pyln.normalize.loudness(y, loudness, target_loudness)
6     peak = np.abs(y).max()
7     if peak >= 1:
8         y = y / peak * 0.999
9     return y
```

4.1.6 标注

标注是所有模型都会遇到的问题，但语音合成中所有语料，特别是音素、音素时长让人类一一标注是不现实的，一般是利用文本前端产生一个基线的音素序列和音素时长，然后让人类参与检查。语音合成中的标注要检查以下几点：

1. 音素层级。检查语音和音素的一致性；检查重音或音调标注；调整音素边界。
 2. 单词层级。检查单词的弱化读音情形，比如 car[r] 某些发音人完全弱读 [r]，根据录音删除该音素 [r]，或者给予一个新的音素；外来词和缩略词的发音情况，不同音库可能有不同的处理方法；调整单词边界。
 3. 句子层级。增删停顿，确保和实际录音一致。

标注人员可以采用Praat进行可视化标注和检查，如图4.1所示为利用 Praat 标注语料的示例。

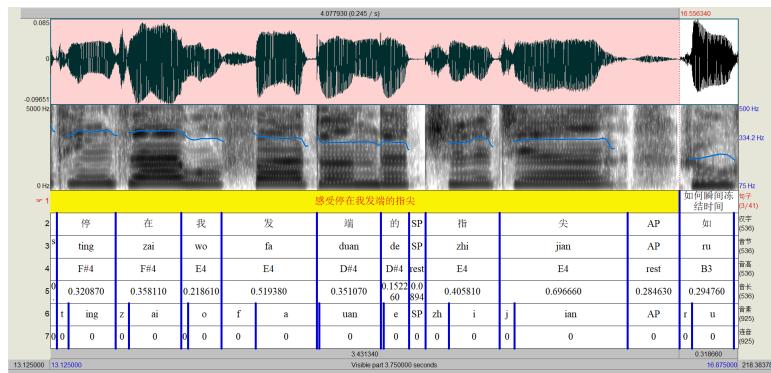


图 4.1: 利用 Praat 标注歌唱合成的语料

总而言之，录音完成后，音素序列跟着录音走，语音如何发音，音素序列就严格按照语音标注，实在不行就发回重录。在语音合成中，同样的音频，不同场景的标注有可能是有细微变化的。比如在新闻播报场景下，发音风格比较平淡，某些细微的停顿和韵律变化可以不用在意，标注上也可以不体现；但是在交互或者小说领域，

发音风格的变化较为丰富，对韵律和情感控制要求较高，因此标注可能更为精细，甚至会增加额外的标注信息，停顿、韵律等信息的标注可能和播报风有所不同。

常见的语音合成专业数据提供商有海天瑞声、标贝科技、希尔贝壳等。

4.2 文本前端

4.2.1 文本前端在语音合成中扮演的角色

语音合成，顾名思义，是一项将文本转化为语音的技术。以 Google 的 Tacotron 系列为代表的端到端语音合成技术大大降低了语音合成的技术门槛。对于表音语言比如英法西德意等语种，甚至可以直接输入文本，让模型自行学习如何将文本转化到语音。但是在实际的生产环境中，直接文本到语音会带来较大的不可控风险，比如“love”/lʌv/读成了/lv/，如何快速纠正类似的发音错误；“2kg”如何指定模型读成“两千克”，而非“二 kg”等。因此在实际的语音合成系统中，通常会为语音合成系统添加文本前端，主要作用是将文本转换为音素，甚至会添加一些韵律标识构成语言学特征（linguistic feature），以便声学模型更好地建立文本到语音的映射。

4.2.2 文本前端的主要组成

文本前端一般遵循文本，到规范化文本，到音素这 3 个基本步骤，同时会从文本和规范化文本中预测韵律。音素和韵律标识统称为语言学特征（linguistic feature）。文本前端的输出作为下游声学模型和声码器的输入，如果发生发音错误等问题，大部分情况下直接修正音素序列即可，大大降低了问题解决的难度。一般来说，文本前端可分为以下五个部分：

1. 文本预处理：主要是解决文本中书写错误、一些语种中同形异码等问题。
2. 文本归一化：主要解决文本中的特殊符号读法，比如“2kg”转换为“两千克”，另外还要处理一些语种比如波兰语、俄语中的性数格变化。
3. 分词：一些语种比如中文、藏语、日语、泰语、越南语、维吾尔语、朝鲜语等并非以空格作为词边界，通常需要分词以便后续的处理，但世界上大部分语种都以空格为词边界，该步骤可省略。
4. 文本转音素（G2P）：将文本转换为注音，比如“中国”转化为“zhong1 guo2”。
5. 韵律分析：语音中每个音素的发音时长不同，停顿也不同。将文本转换为音素之后，通常会加入一定的韵律信息，以帮助声学模型提升合成语音的自然度，加入的韵律信息可以分为音素（L0）、单词（L1）、breath break（L3）和句子（L4）四个韵律层级。

4.2.3 Unicode 调研和文本预处理

开展一个新语种的文本前端的开发，首要是调研该语种文字的字形、读音等，了解世界各语种的好去处无疑是 [Unicode 官网](#) 和维基百科。Unicode 将世界上所有的字符均分配唯一数字标识，同时为了兼容和节省空间，常常采用“统一码转换格式-8”（UTF-8）、“统一码转换格式-16”（UTF-16）等具体实现该编码。具体来说，可以进入 [Unicode Code Charts](#) 查询各个语种的编码。以最广泛使用的拉丁字符为例，[Basic Latin \(ASCII\)](#) 文档中，首先是一页版权声明，之后展示了该类字符的 Unicode 码，最后是各个字符的简短介绍，帮助快速了解该语种。在介绍时，对于每一个字符，比如“！”，首先给出它的 Unicode 编码“0021”（\u0021），然后是该字符的字形如“！”，接下来一般是该字符的简介比如“EXCLAMATION MARK”，之后会给出一些补充信息，比如“=”表示该字符的其它含义，→ 表示该字符的相关字符，≡ 表示该字符的同形异码。同形异码在多语种的文本前端中尤其需要注意，例如 [Latin Extended-A](#) 中，\u0100 的同形异码为 \u0041\u0304，这种同形异码的字符需要统一处理为一种字符，用户的输入看起来相同，但在计算机中的表示是完全不同的。

文本前端中的文本预处理模块主要是处理非法输入、同形异码的替换等。文本前端收到输入之后，可以限制一些边界条件，比如防止用户将音视频输入文本前端，限制输入的字符串长度和种类等；之后就进入包括同形异码替换的文本清理模块。首先是确定输入文本的语种（可要求用户提供或者限制本语音合成系统的主要输

入语种)；之后是通用处理规则，比如删除“\u200B”、“\u200C”等不可见字符，统一标点符号，全角转半角，一些特殊数字如 \u00BD 替换为“1/2”等等；然后是本语系的处理规则，此时主要对同形异码进行替换；然后是本语种的处理规则，主要是处理本语种的外来字符，比如在意大利语中，将奇形怪状的外来字符“Á”、“Ã”、“Ä”、“Å”统一替换为“A”，连接词“Æ”替换为“AE”；最后是针对不同语种定制的后处理规则。逐级处理的好处是代码、层次清晰，当然为了方便，可以统一进行处理和替换。

相关的参考资料：

1. [Unicdoe 搜索](#)
2. [Unicode 官网](#)
3. [Unicode 术语表（中英互译）](#)
4. [Unicode 实用工具](#)

4.2.4 文本规范化

归一化目前是文本前端中的难点，学术界和工业界最普遍和精确的方法还是靠人肉堆规则，当然也逐渐出现了规则和模型混合的归一化系统，比如[A Hybrid Text Normalization System Using Multi-Head Self-Attention For Mandarin、Cold-Start and Interpretability: Turning Regular Expressions into Trainable Recurrent Neural Networks](#)。

一个基础的归一化模块至少应覆盖以下几类规则：物理量、货币、缩略语、常用机构名或专有名词、数字（分数/百分数/科学计数法/小数点/基数词/序数词/数字串）、算术表达式、标点符号、日期（月份/星期）的各种表示、时间、比分、网络用语或外来词等。

相关的参考资料：

1. [ICASSP 2020 中的语言合成](#)
2. [A Hybrid Text Normalization System Using Multi-Head Self-Attention For Mandarin](#)
3. [Cold-Start and Interpretability: Turning Regular Expressions into Trainable Recurrent Neural Networks](#)

4.2.5 分词

对于世界上大部分的语种来说，空格是天然的单词边界，因此分词并非一个常见任务，仅有中日韩、泰语、越南语等语种需要分词。“最大最长匹配”是简单且常见的分词算法，该算法需要准备一个词典，在对文本进行切分时，根据切分方向的不同，还可分为前向、后向、前后向最长匹配算法。以“前向最长匹配算法”为例，该方法首先设定一个词的最大长度，将待切分文本开始到词最大长度内的字符作为“候选词”，每次扫描时，将该“候选词”和词典中的词进行匹配，如果没有找到，就缩短“候选词”的长度继续寻找，直到匹配到字典中的词或者“候选词”成为单字，然后继续切分剩余文本。为了降低“候选词”和词典匹配的算法复杂度，可以先将词典构建为 Trie（称前缀树或字典树），对文本从前到后切分时，每次尝试加入待切分文本的一个字符，并查询当前节点的所有子节点，如果待加入字符存在于子节点中，则沿着该节点继续查询，否则退出该字符，并将之前节点的字符作为切分后的单词，以该字符为起始点作为剩余待切分文本。

为了提高分词的准确率，条件随机场、神经网络等方法也应用到了分词领域并取得了不错的效果。可参考：

1. [NLP 分词算法深度综述](#)
2. [中文分词算法简介](#)
3. [五款中文分词工具在线 PK: Jieba, SnowNLP, PkuSeg, THULAC, HanLP](#)

对于日语来说，也有一些流行的开源词典，比如[UniDic](#)、[mecab-ipadic-neologd](#)，同时也有一些开源分词器比如[MeCab](#)、[Kuromoji](#)、[jumanpp](#)、[Sudachi](#)等。参见：[日语分词器的介绍和比较](#)。

对于泰语来说，音节、单词和句子都需要切分。[ssg](#)使用条件随机场对泰语文本切分音节，[CRF-Cut](#)同样利用条件随机场对文本进行分句。泰语的分词算法同样也有很多，可参见[AttaCut-Benchmark](#)了解常用泰语分词算法的评测。

4.2.6 文本转音素

文本转音素（G2P/LTS）是将文本转换为注音表示的过程。最简单直白的文本转音素方法无疑是查词典，经过预处理和分词模块之后，文本被切分为一个个单词，利用词典查询单词对应的发音序列。但是对于带有缩略词、外来词的文本来说，情况略微复杂，因为查询缩略词、本语种和外来词词典的优先级不同，输出的音素序列有时也会有所不同。一个较好的处理逻辑是，最特殊、最有可能的单词优先处理。首先处理缩略词的发音，如果存在于缩略词词典中或者单词全大写时，则认为是缩略词，如果缩略词词典中有该词，直接输出音素序列，否则按照规则，比如按照每个字母的发音逐个给出发音；之后处理本土词的发音，如果存在于本土词词典中，则认为是本土词，直接从词典中给出音素序列；接下来处理英语单词，如果是英语收录词，则可以直接从词典中取出该英语词的音素序列，获得英语词的音素序列之后，注意要将英语音素转换为本土音素。当然，词典很难覆盖所有词，特别是语种构建的初期，大部分词都是集外词，需要利用一些规则或模型给出单词的发音。构建文本转音素规则的一般步骤是：1. 调研公开资料，了解该语种是否有重音和声调，并制定字符到音素的转换规则，注意音素要抓对立而非音变，比如 cat[k] 和 fat[f] 中的 [k/f] 就是一组对立，不同发音会导致意思发生改变，而 tell[l] 和 telling[l] 中的 [l] 虽然发音也不同，但是属于音变，发音不同并不会改变单词含义；2. 迭代，文本转音素规则，乃至音素体系都是一个迭代的过程，需要结合给定音素与实际模型合成的发音情况，不断完善音素规则。

利用一个基础的词典，可以训练出一个 G2P 模型，给出任意一个单词的发音序列。同样有一些开源的 G2P 模型比如

1. [MfaTrainG2p](#), MfaG2p 甚至给出了一些预训练模型。
2. [cmusphinx: g2p-seq2seq](#), 基于 TensorFlow 的 Tensor2Tensor 库，准确率较高。

当然，可以直接使用一些序列建模方法或者上面的工具，比如[Fairseq](#)，类似机器翻译，构建一个 G2P 模型，以便在语种构建初期，迅速扩充词典。相关的参考资料如下：

1. [The Festvox Indic Frontend for Grapheme-to-Phoneme Conversion](#)
2. [A study on rule based approach for Grapheme to Phoneme conversion of Assamese letters in Festival framework](#)

在产生音素序列之后，有时候还需要按照规则切分音节，并且给重音。特别是多个连续辅音（Consonant）的情形，不同的语种在切分音节时有不同的规则，比如三辅音情形下，如何分配这些辅音所属音节。重音情形也类似，需要根据语种确定重音规则。这些多个连续辅音分配音节，根据规则给定重音实际都需要配合后端模型进行实验，特别是目前端到端声学模型流行的情形下，一些音节的划分、重音的给定位置也许对声学模型并没有影响，而一些语种就有一定的优劣之分。

4.2.7 韵律分析

韵律分析同样是文本前端的难点之一，一个好的韵律信息可大大提升最终合成语音的自然度。一个简单的韵律规则是，加入单词边界作为 L1，句子中标点处作为 L3，句末作为 L4，但这种规则通常并不是最优的。韵律分析中 L3 的预测尤为重要，可借助一些简单模型，比如决策树、CRF 等，构造 L3 或者韵律相关的特征，如：前一个单词（L1）内的 L0 个数、前一个单词（L1）的词性、前前 L1 内的字符个数、前 L1 内的字符个数、后 L1 内的字符个数、后后 L1 内的字符个数、本字符的 ID 和前一个空格离本字符的字符距离等。当然也可以使用更为复杂的模型比如 LSTM 甚至 BERT 参与韵律分析，将问题转换为对每个字符的二分类（加或不加 L3）或者多分类任务（L0/L1/L3）。

4.2.8 文本前端的工程实现

由于文本前端较为依赖资源，比如文本预处理规则文件、文本归一化规则文件、分词和文本转音素常用到的词典、用于韵律分析的模型等，特别是文本前端常常需要没有代码经验的语种专家参与进来，因此要将资源和代码分离开来，便于工程实现和维护。使用正则表达式作为文本归一化规则的具体实现，在大型的文本前端中缺陷凸现明显：难以阅读和维护，并且规则冲突严重。一个折中的做法是自定义规则文件，将一条条规则以优先级、匹配条件和输出的形式呈现。

4.3 总结

本章主要介绍语音合成中音库构建和文本前端。需要说明的是，文本前端甚至整个语音合成系统的构建都不是一蹴而就的，通常需要反复评测迭代。构建一个音素覆盖全、合理的测试集，之后母语者或者学习者进行评测和分析问题，确保评测标准合理。而上线时，就要确保线上线下一致性，文本前端、声学模型、声码器一个模块一个模块对齐一致，才能最终呈现出一个性能良好的语音合成系统。

第 5 章 声学模型

现代工业级神经网络语音合成系统主要包括三个部分：文本前端、声学模型和声码器，文本输入到文本前端中，将文本转换为音素、韵律边界等文本特征。文本特征输入到声学模型，转换为对应的声学特征。声学特征输入到声码器，重建为原始波形。



图 5.1：神经网络 TTS 的三个主要部件

主要采用的声学模型包括 Tacotron 系列、FastSpeech 系列等，目前同样出现了一些完全端到端的语音合成模型，也即是直接由字符/音素映射为波形。

5.1 Tacotron

5.1.1 Tacotron-2 简介

以最常使用的 Tacotron-2 声学模型为例。原始论文参见：

1. Tacotron: Towards End-to-End Speech Synthesis
2. Natural TTS Synthesis by Conditioning WaveNet on Mel Spectrogram Predictions

此外，谷歌在语音合成领域，特别是端到端语音合成领域做出了开创性的共享，该组会将最新的论文汇总在 Tacotron (/täkträn/): An end-to-end speech synthesis system by Google.

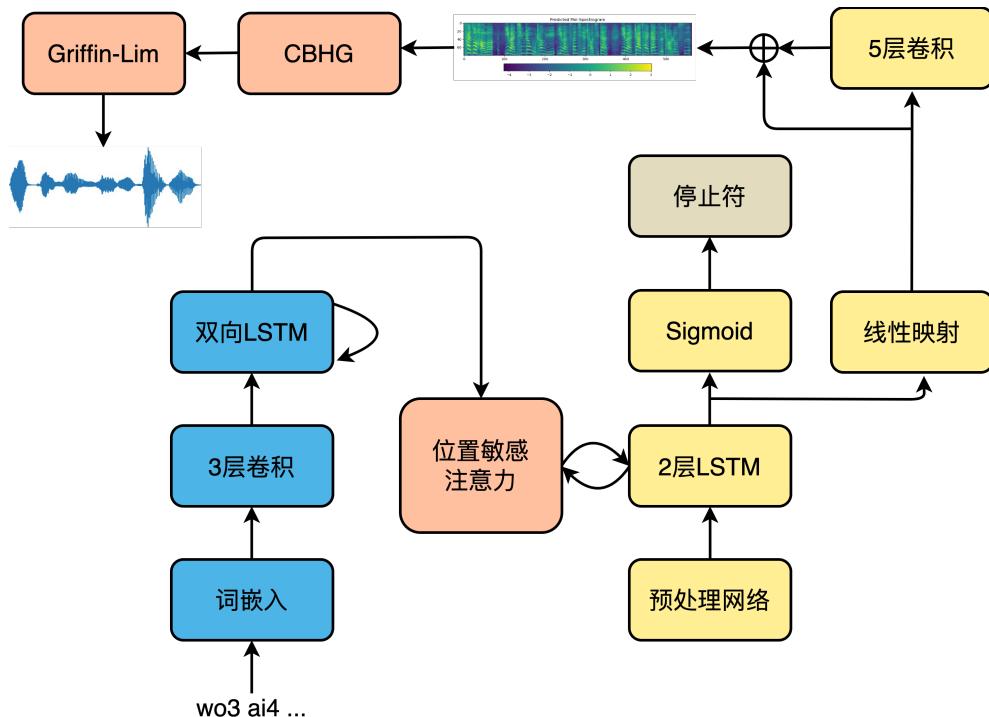


图 5.2：Tacotron-2 模型结构

5.1.2 声学特征建模网络

Tacotron-2 的声学模型部分采用典型的序列到序列结构。编码器是 3 个卷积层和一个双向 LSTM 层组成的模块，卷积层给予了模型类似于 N-gram 感知上下文的能力，并且对不发音字符更加鲁棒。经词嵌入的注音序列首先进入卷积层提取上下文信息，然后送入双向 LSTM 生成编码器隐状态。编码器隐状态生成后，就会被送入注意力机制，以生成编码向量。我们利用了一种被称为位置敏感注意力（Location Sensitive Attention, LSA），该注意力机制的对齐函数为：

$$score(s_{i-1}, h_j) = v_a^T \tanh(Ws_{i-1} + Vh_j + Uf_{i,j} + b) \quad (5.1)$$

其中， v_a, W, V, U 为待训练参数， b 是偏置值， s_{i-1} 为上一时间步 $i-1$ 的解码器隐状态， h_j 为当前时间步 j 的编码器隐状态， $f_{i,j}$ 为上一个解码步的注意力权重 α_{i-1} 经卷积获得的位置特征，如下式：

$$f_{i,j} = F * \alpha_{i-1} \quad (5.2)$$

其中， α_{i-1} 是经过 softmax 的注意力权重的累加和。位置敏感注意力机制不但综合了内容方面的信息，而且关注了位置特征。解码过程从输入上一解码步或者真实音频的频谱进入解码器预处理网络开始，到线性映射输出该时间步上的频谱帧结束，模型的解码过程如下图所示。

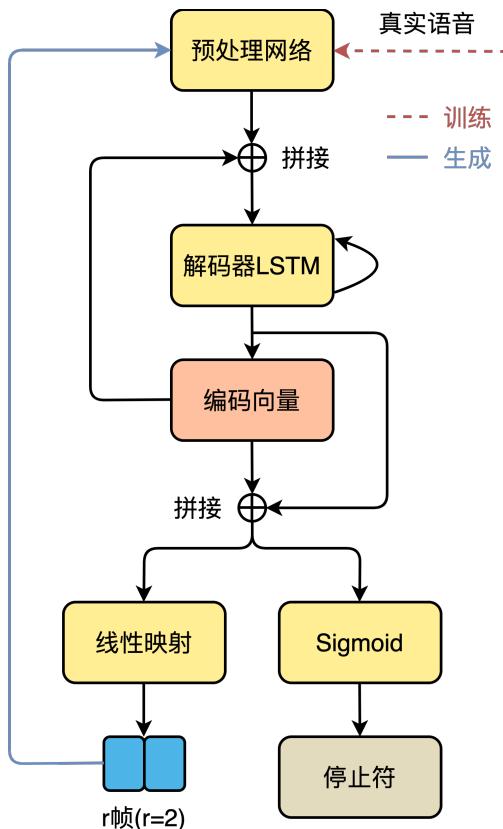


图 5.3: Tacotron2 解码过程

频谱生成网络的解码器将预处理网络的输出和注意力机制的编码向量做拼接，然后整体送入 LSTM 中，LSTM 的输出用来计算新的编码向量，最后新计算出来的编码向量与 LSTM 输出做拼接，送入映射层以计算输出。输出有两种形式，一种是频谱帧，另一种是停止符的概率，后者是一个简单二分类问题，决定解码过程是否结束。为了能够有效加速计算，减小内存占用，引入缩减因子 r (Reduction Factor)，即每一个时间步允许解码器预测 r 个频谱帧进行输出。解码完成后，送入后处理网络处理以生成最终的梅尔频谱，如下式所示。

$$s_{final} = s_i + s'_i \quad (5.3)$$

其中， s_i 是解码器输出， s_{final} 表示最终输出的梅尔频谱， s'_i 是后处理网络的输出，解码器的输出经过后处理网络之后获得 s'_i 。

在 Tacotron-2 原始论文中，直接将梅尔频谱送入声码器 WaveNet 生成最终的时域波形。但是 WaveNet 计算复杂度过高，几乎无法实际使用，因此可以使用其它声码器，比如 Griffin-Lim、HiFiGAN 等。

5.1.3 损失函数

Tacotron2 的损失函数主要包括以下 4 个方面：

1. 进入后处理网络前后的平方损失。

$$\text{MelLoss} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{real,i}^{mel} - y_{before,i}^{mel})^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{real,i}^{mel} - y_{after,i}^{mel})^2 \quad (5.4)$$

其中， $y_{real,i}^{mel}$ 表示从音频中提取的真实频谱， $y_{before,i}^{mel}, y_{after,i}^{mel}$ 分别为进入后处理网络前、后的解码器输出， n 为每批的样本数。

2. 从 CBHG 模块中输出线性谱的平方损失。

$$\text{LinearLoss} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{real,i}^{linear} - y_i^{linear})^2 \quad (5.5)$$

其中， $y_{real,i}^{linear}$ 是从真实语音中计算获得的线性谱， y_i^{linear} 是从 CBHG 模块输出的线性谱。

3. 停止符交叉熵

$$\text{StopTokenLoss} = -[y \cdot \log(p) + (1 - y) \cdot \log(1 - p)] \quad (5.6)$$

其中， y 为停止符真实概率分布， p 是解码器线性映射输出的预测分布。

4. L2 正则化

$$\text{RegulationLoss} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w_k^2 \quad (5.7)$$

其中， K 为参数总数， w_k 为模型中的参数，这里排除偏置值、RNN 以及线性映射中的参数。最终的损失函数为上述 4 个部分的损失之和，如下式：

$$\text{Loss} = \text{MelLoss} + \text{LinearLoss} + \text{StopTokenLoss} + \text{RegulationLoss} \quad (5.8)$$

5.2 FastSpeech

FastSpeech 是基于 Transformer 显式时长建模的声学模型，由微软和浙大提出。原始论文参见：

1. [FastSpeech: Fast, Robust and Controllable Text to Speech](#)
2. [FastSpeech 2: Fast and High-Quality End-to-End Text to Speech](#)

相对应地，微软在语音合成领域的论文常常发布在 [Microsoft-Speech Research](#)。

5.2.1 模型结构

FastSpeech 2 和上代 FastSpeech 的编解码器均是采用 FFT (feed-forward Transformer, 前馈 Transformer) 块。编解码器的输入首先进行位置编码，之后进入 FFT 块。FFT 块主要包括多头注意力模块和位置前馈网络，位置前馈网络可以由若干层 Conv1d、LayerNorm 和 Dropout 组成。

论文中提到语音合成是典型的一对多问题，同样的文本可以合成无数种语音。上一代 FastSpeech 主要通过目标侧使用教师模型的合成频谱而非真实频谱，以简化数据偏差，减少语音中的多样性，从而降低训练难度；向模型提供额外的时长信息两个途径解决一对多的问题。在语音中，音素时长自不必说，直接影响发音长度和整

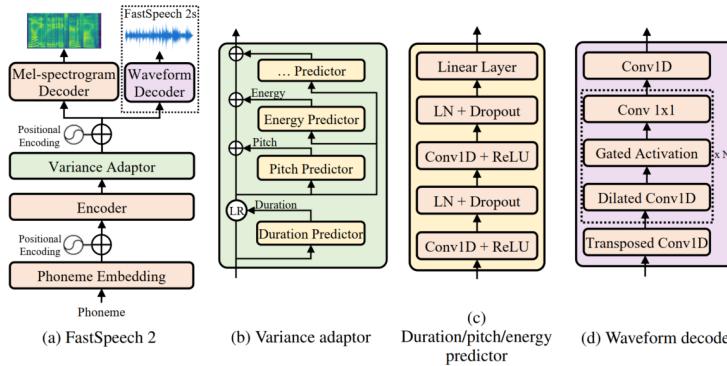


Figure 1: The overall architecture for FastSpeech 2 and 2s. LR in subfigure (b) denotes the length regulator proposed in FastSpeech. LN in subfigure (c) denotes layer normalization.

图 5.4: FastSpeech 2 整体结构

体韵律；音调则是影响情感和韵律的另一个特征；能量则影响频谱的幅度，直接影响音频的音量。在 FastSpeech 2 中对这三个最重要的语音属性单独建模，从而缓解一对多带来的模型学习目标不确定的问题。

在对时长、基频和能量单独建模时，所使用的网络结构实际是相似的，在论文中称这种语音属性建模网络为变量适配器（Variance Adaptor）。时长预测的输出也作为基频和能量预测的输入。最后，基频预测和能量预测的输出，以及依靠时长信息展开的编码器输入元素加起来，作为下游网络的输入。变量适配器主要是由 2 层卷积和 1 层线性映射层组成，每层卷积后加 ReLU 激活、LayerNorm 和 Dropout。代码摘抄自 [FastSpeech2](#)，添加了一些注释。

```

1 class VariancePredictor(nn.Module):
2     """ Duration, Pitch and Energy Predictor """
3     def __init__(self):
4         super(VariancePredictor, self).__init__()
5
6         self.input_size = hp.encoder_hidden
7         self.filter_size = hp.variance_predictor_filter_size
8         self.kernel = hp.variance_predictor_kernel_size
9         self.conv_output_size = hp.variance_predictor_filter_size
10        self.dropout = hp.variance_predictor_dropout
11
12        self.conv_layer = nn.Sequential(OrderedDict([
13            ("conv1d_1", Conv(self.input_size,
14                               self.filter_size,
15                               kernel_size=self.kernel,
16                               padding=(self.kernel-1)//2)),
17            ("relu_1", nn.ReLU()),
18            ("layer_norm_1", nn.LayerNorm(self.filter_size)),
19            ("dropout_1", nn.Dropout(self.dropout)),
20            ("conv1d_2", Conv(self.filter_size,
21                               self.filter_size,
22                               kernel_size=self.kernel,
23                               padding=1)),
24            ("relu_2", nn.ReLU()),
25            ("layer_norm_2", nn.LayerNorm(self.filter_size)),
26            ("dropout_2", nn.Dropout(self.dropout))
27        ]))

```

```
28
29     self.linear_layer = nn.Linear(self.conv_output_size, 1)
30
31 def forward(self, encoder_output, mask):
32     ...
33
34     :param encoder_output: Output of encoder. [batch_size, seq_len, encoder_hidden]
35     :param mask: Mask for encoder. [batch_size, seq_len]
36     ...
37
38     out = self.conv_layer(encoder_output)
39     out = self.linear_layer(out)
40     out = out.squeeze(-1)
41
42
43     if mask is not None:
44         out = out.masked_fill(mask, 0.)
45
46
47     return out
```

利用该变量适配器对时长、基频和能量进行建模。

```
1 class VarianceAdaptor(nn.Module):
2     """ Variance Adaptor """
3
4     def __init__(self):
5         super(VarianceAdaptor, self).__init__()
6         self.duration_predictor = VariancePredictor()
7         self.length_regulator = LengthRegulator()
8         self.pitch_predictor = VariancePredictor()
9         self.energy_predictor = VariancePredictor()
10
11        self.pitch_bins = nn.Parameter(torch.exp(torch.linspace(
12            np.log(hp.f0_min), np.log(hp.f0_max), hp.n_bins-1)), requires_grad=False)
13        self.energy_bins = nn.Parameter(torch.linspace(
14            hp.energy_min, hp.energy_max, hp.n_bins-1), requires_grad=False)
15        self.pitch_embedding = nn.Embedding(hp.n_bins, hp.encoder_hidden)
16        self.energy_embedding = nn.Embedding(hp.n_bins, hp.encoder_hidden)
17
18    def forward(self, x, src_mask, mel_mask=None, duration_target=None, pitch_target=
19        None, energy_target=None, max_len=None, d_control=1.0, p_control=1.0, e_control
20        =1.0):
21        ...
22        :param x: Output of encoder. [batch_size, seq_len, encoder_hidden]
23        :param src_mask: Mask of encoder, can get src_mask from input_lengths. [
24            batch_size, seq_len]
25        :param duration_target, pitch_target, energy_target: Ground-truth when training
26        , None when synthesis. [batch_size, seq_len]
27        ...
28
29        log_duration_prediction = self.duration_predictor(x, src_mask)
30        if duration_target is not None:
31            x, mel_len = self.length_regulator(x, duration_target, max_len)
32        else:
```

```

28     duration_rounded = torch.clamp(
29         (torch.round(torch.exp(log_duration_prediction)-hp.log_offset)*
30          d_control), min=0)
30     x, mel_len = self.length_regulator(x, duration_rounded, max_len)
31     mel_mask = utils.get_mask_from_lengths(mel_len)
32
33     pitch_prediction = self.pitch_predictor(x, mel_mask)
34     if pitch_target is not None:
35         pitch_embedding = self.pitch_embedding(
36             torch.bucketize(pitch_target, self.pitch_bins))
37     else:
38         pitch_prediction = pitch_prediction*p_control
39         pitch_embedding = self.pitch_embedding(
40             torch.bucketize(pitch_prediction, self.pitch_bins))
41
42     energy_prediction = self.energy_predictor(x, mel_mask)
43     if energy_target is not None:
44         energy_embedding = self.energy_embedding(
45             torch.bucketize(energy_target, self.energy_bins))
46     else:
47         energy_prediction = energy_prediction*e_control
48         energy_embedding = self.energy_embedding(
49             torch.bucketize(energy_prediction, self.energy_bins))
50
51     x = x + pitch_embedding + energy_embedding
52
53     return x, log_duration_prediction, pitch_prediction, energy_prediction, mel_len
      , mel_mask

```

同样是通过长度调节器 (Length Regulator)，利用时长信息将编码器输出长度扩展到频谱长度。具体实现就是根据 duration 的具体值，直接上采样。一个音素时长为 2，就将编码器输出复制 2 份，给 3 就直接复制 3 份，拼接之后作为最终的输出。实现代码：

```

1 class LengthRegulator(nn.Module):
2     """ Length Regulator """
3
4     def __init__(self):
5         super(LengthRegulator, self).__init__()
6
7     def LR(self, x, duration, max_len):
8         '''
9             :param x: Output of encoder. [batch_size, phoneme_seq_len, encoder_hidden]
10            :param duration: Duration for phonemes. [batch_size, phoneme_seq_len]
11            :param max_len: Max length for mel-frames. scaler
12
13        Return:
14            output: Expanded output of encoder. [batch_size, mel_len, encoder_hidden]
15            ,
16            output = list()
17            mel_len = list()

```

```

18     for batch, expand_target in zip(x, duration):
19         # batch: [seq_len, encoder_hidden]
20         # expand_target: [seq_len]
21         expanded = self.expand(batch, expand_target)
22         output.append(expanded)
23         mel_len.append(expanded.shape[0])
24
25     if max_len is not None:
26         output = utils.pad(output, max_len)
27     else:
28         output = utils.pad(output)
29
30     return output, torch.LongTensor(mel_len).to(device)
31
32 def expand(self, batch, predicted):
33     out = list()
34
35     for i, vec in enumerate(batch):
36         # expand_size: scalar
37         expand_size = predicted[i].item()
38         # Passing -1 as the size for a dimension means not changing the size of
39         # that dimension.
40         out.append(vec.expand(int(expand_size), -1))
41     out = torch.cat(out, 0)
42
43     return out
44
45 def forward(self, x, duration, max_len):
46     output, mel_len = self.LR(x, duration, max_len)
47     return output, mel_len

```

对于音高和能量的预测，模块的主干网络相似，但使用方法有所不同。以音高为例，能量的使用方式相似。首先对预测出的实数域音高值进行分桶，映射为一定范围内的自然数集，然后做嵌入。

```

1 pitch_prediction = self.pitch_predictor(x, mel_mask)
2 if pitch_target is not None:
3     pitch_embedding = self.pitch_embedding(
4         torch.bucketize(pitch_target, self.pitch_bins))
5 else:
6     pitch_prediction = pitch_prediction*p_control
7     pitch_embedding = self.pitch_embedding(
8         torch.bucketize(pitch_prediction, self.pitch_bins))

```

这里用到了 Pytorch 中一个不是特别常见的函数`torch.bucketize`。这是 Pytorch 中的分桶函数，boundaries 确定了各个桶的边界，是一个单调递增向量，用于划分 input，并返回 input 所属桶的索引，桶索引从 0 开始。

能量嵌入向量的计算方法与之类似。至此，获得了展开之后的编码器输出 x，基频嵌入向量`pitch_embedding`和能量嵌入向量`energy_embedding`之后，元素加获得最终编解码器的输入。

5.2.2 损失函数

FastSpeech 2 的目标函数由 PostNet 前后的频谱均方差，时长、音高和能量的均方差组成。时长映射到指数域（时长预测器输出的数值 x 作为指数，最终的预测时长为 e^x ），音高映射到对数域（音高预测器输出的数值 x 做对数，作为最终的音高 $\log x$ ），而能量直接采用能量预测器的输出值。整体的损失函数为：

$$\text{Loss} = \text{Loss}_{mel} + \text{Loss}_{mel}^{post} + \text{Loss}_{duration} + \text{Loss}_{pitch} + \text{Loss}_{energy} \quad (5.9)$$

频谱的损失函数形式采用均方差（MSE），时长、基频和能量采用平均绝对误差（MAE），具体的实现如下：

```

1 log_d_target.requires_grad = False
2 p_target.requires_grad = False
3 e_target.requires_grad = False
4 mel_target.requires_grad = False
5
6 log_d_predicted = log_d_predicted.masked_select(src_mask)
7 log_d_target = log_d_target.masked_select(src_mask)
8 p_predicted = p_predicted.masked_select(mel_mask)
9 p_target = p_target.masked_select(mel_mask)
10 e_predicted = e_predicted.masked_select(mel_mask)
11 e_target = e_target.masked_select(mel_mask)
12
13 mel = mel.masked_select(mel_mask.unsqueeze(-1))
14 mel_postnet = mel_postnet.masked_select(mel_mask.unsqueeze(-1))
15 mel_target = mel_target.masked_select(mel_mask.unsqueeze(-1))
16
17 mel_loss = self.mse_loss(mel, mel_target)
18 mel_postnet_loss = self.mse_loss(mel_postnet, mel_target)
19
20 d_loss = self.mae_loss(log_d_predicted, log_d_target)
21 p_loss = self.mae_loss(p_predicted, p_target)
22 e_loss = self.mae_loss(e_predicted, e_target)
23
24 total_loss = mel_loss + mel_postnet_loss + d_loss + p_loss + e_loss

```

5.2.3 小结

FastSpeech 系列的声学模型将 Transformer 引入语音合成领域，并且显式建模语音中的重要特征，比如时长、音高和能量等。实际上，微软首次在 [Neural Speech Synthesis with Transformer Network](#) 将 Transformer 作为主干网络，实现语音合成的声学模型，这一思想同样被 [FastPitch: Parallel Text-to-speech with Pitch Prediction](#) 采用，相关的开源代码：[as-ideas/TransformerTTS](#)。

5.3 VITS

VITS (Variational Inference with adversarial learning for end-to-end Text-to-Speech) 是一种结合变分推理 (variational inference)、标准化流 (normalizing flows) 和对抗训练的高表现力语音合成模型。和 Tacotron 和 FastSpeech 不同，Tacotron / FastSpeech 实际是将字符或音素映射为中间声学表征，比如梅尔频谱，然后通过声码器将梅尔频谱还原为波形，而 VITS 则直接将字符或音素映射为波形，不需要额外的声码器重建波形，真正的端到端语音

合成模型。VITS 通过隐变量而非之前的频谱串联语音合成中的声学模型和声码器，在隐变量上进行建模并利用随机时长预测器，提高了合成语音的多样性，输入同样的文本，能够合成不同声调和韵律的语音。VITS 合成音质较高，并且可以借鉴之前的 FastSpeech，单独对音高等特征进行建模，以进一步提升合成语音的质量，是一种非常有潜力的语音合成模型。

5.3.1 模型整体结构

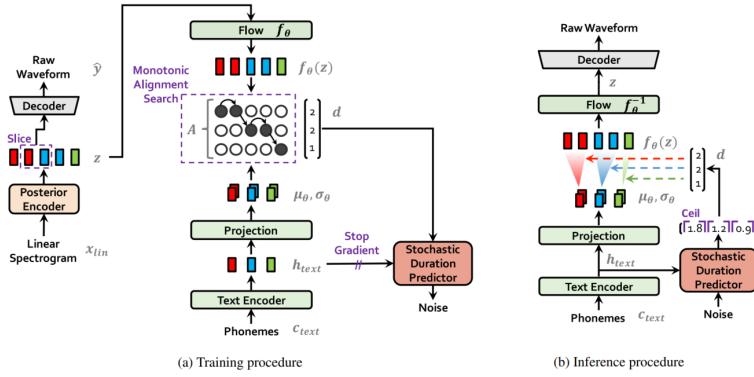


Figure 1. System diagram depicting (a) training procedure and (b) inference procedure. The proposed model can be viewed as a conditional VAE; a posterior encoder, decoder, and conditional prior (green blocks: a normalizing flow, linear projection layer, and text encoder) with a flow-based stochastic duration predictor.

图 5.5: VITS 整体结构

VITS 包括三个部分：

1. 后验编码器。如上图（a）的左下部分所示，在训练时输入线性谱，输出隐变量 z ，推断时隐变量 z 则由 f_θ 产生。VITS 的后验编码器采用 WaveGlow 和 Glow-TTS 中的非因果 WaveNet 残差模块。应用于多人模型时，将说话人嵌入向量添加进残差模块，仅用于训练。这里的隐变量 z 可以理解为 Tacotron / FastSpeech 中的梅尔频谱。
2. 解码器。如上图（a）左上部分所示，解码器从提取的隐变量 z 中生成语音波形，这个解码器实际就是声码器 HiFi-GAN V1 的生成器。应用于多人模型时，在说话人嵌入向量之后添加一个线性层，拼接到 f_θ 的输出隐变量 z 。
3. 先验编码器。如上图（a）右侧部分所示，先验编码器结构比较复杂，作用类似于 Tacotron / FastSpeech 的声学模型，只不过 VITS 是将音素映射为中间表示 z ，而不是将音素映射为频谱。包括文本编码器和提升先验分布复杂度的标准化流 f_θ 。应用于多人模型时，向标准化流的残差模块中添加说话人嵌入向量。
4. 随机时长预测器。如上图（a）右侧中间橙色部分。从条件输入 h_{text} 估算音素时长的分布。应用于多人模型时，在说话人嵌入向量之后添加一个线性层，并将其拼接到文本编码器的输出 h_{text} 。
5. 判别器。实际就是 HiFi-GAN 的多周期判别器，在上图中未画出，仅用于训练。目前看来，对于任意语音合成模型，加入判别器辅助都可以显著提升表现。

5.3.2 变分推断

VITS 可以看作是一个最大化变分下界，也即 ELBO (Evidence Lower Bound) 的条件 VAE。

1. 重建损失

VITS 在训练时实际还是会生成梅尔频谱以指导模型的训练，重建损失中的目标使用的是梅尔频谱而非原始波形：

$$L_{recon} = ||x_{mel} - \hat{x}_{mel}||_1 \quad (5.10)$$

但在推断时并不需要生成梅尔频谱。在实现上，不上采样整个隐变量 z ，而只是使用部分序列作为解码器的输入。

2. KL 散度

先验编码器 c 的输入包括从文本生成的音素 c_{text} , 和音素、隐变量之间的对齐 A 。所谓的对齐就是 $|c_{text}| \times |z|$ 大小的严格单调注意力矩阵，表示每一个音素的发音时长。因此 KL 散度是：

$$L_{kl} = \log q_\phi(z|x_{lin}) - \log p_\theta(z|c_{text}, A) \quad (5.11)$$

其中， $q_\phi(z|x_{lin})$ 表示给定输入 x 的后验分布， $p_\theta(z|c)$ 表示给定条件 c 的隐变量 z 的先验分布。其中隐变量 z 为：

$$z \sim q_\phi(z|x_{lin}) = \mathbb{N}(z; \mu_\phi(x_{lin}), \sigma_\phi(x_{lin})) \quad (5.12)$$

为了给后验编码器提供更高分辨率的信息，使用线性谱而非梅尔频谱作为后验编码器 ϕ_θ 的输入。同时，为了生成更加逼真的样本，提高先验分布的表达能力比较重要，因此引入标准化流，在文本编码器产生的简单分布和复杂分布间进行可逆变换。也就是说，在经过上采样的编码器输出之后，加入一系列可逆变换：

$$p_\theta(z|c) = \mathbb{N}(f_\theta(z); \mu_\theta(c), \sigma_\theta(c)) |\det \frac{\partial f_\theta(z)}{\partial z}| \quad (5.13)$$

其中，上式中的 c 就是上采样的编码器输出：

$$c = [c_{text}, A] \quad (5.14)$$

5.3.3 对齐估计

由于在训练时没有对齐的真实标签，因此在训练的每一次迭代时都需要估计对齐。

1. 单调对齐搜索

为了估计文本和语音之间的对齐 A , VITS 采用了类似于 Glow-TTS 中的单调对齐搜索 (Monotonic Alignment Search, MAS) 方法，该方法寻找一个最优的对齐路径以最大化利用标准化流 f 参数化数据的对数似然：

$$\hat{A} = \underset{\hat{A}}{\operatorname{argmax}} \log p_\theta(x|c_{text}, \hat{A}) = \underset{\hat{A}}{\operatorname{argmax}} \log \mathbb{N}(f(x); \mu(c_{text}, \hat{A}), \sigma(c_{text}, \hat{A})) \quad (5.15)$$

MAS 约束获得的最优对齐必须是单调且无跳过的。但是无法直接将 MAS 直接应用到 VITS，因为 VITS 优化目标是 ELBO 而非确定的隐变量 z 的对数似然，因此稍微改变了一下 MAS，寻找最优的对齐路径以最大化 ELBO：

$$\underset{\hat{A}}{\operatorname{argmax}} \log p_\theta(x_{mel}|z) - \log \frac{q_\theta(z|x_{lin})}{p_\theta(z|c_{text}, \hat{A})} \quad (5.16)$$

2. 随机时长预测器

随机时长预测器是一个基于流的生成模型，训练目标为音素时长对数似然的变分下界：

$$\log p_\theta(d|c_{text}) \geq \mathbb{E}_{q_\theta(u, v|d, c_{text})} [\log \frac{p_\theta(d-u, v|c_{text})}{q_\phi(u, v|d, c_{text})}] \quad (5.17)$$

在训练时，断开随机时长预测器的梯度反传，以防止该部分的梯度影响到其它模块。音素时长通过随机时长预测器的可逆变换从随机噪音中采样获得，之后转换为整型值。

5.3.4 对抗训练

引入判别器 D 判断输出是解码器 G 的输出，还是真实的波形 y 。VITS 用于对抗训练的损失函数包括两个部分，第一部分是用于对抗训练的最小二乘损失函数 (least-squares loss function) :

$$L_{adv}(D) = \mathbb{E}_{(y, z)} [(D(y) - 1)^2 + (D(G(z)))^2] \quad (5.18)$$

$$L_{adv}(G) = \mathbb{E}_z [(D(G(z)))^2] \quad (5.19)$$

第二部分是仅作用于生成器的特征匹配损失 (feature-matching loss) :

$$\mathcal{L}_{fm}(G) = \mathbb{E}_{(y,c)} \left[\sum_{l=1}^T \frac{1}{N_l} \|D^l(y) - D^l(G(z))\|_1 \right] \quad (5.20)$$

其中， T 表示判别器的层数， D^l 表示第 l 层判别器的特征图（feature map）， N_l 表示特征图的数量。特征匹配损失可以看作是重建损失，用于约束判别器中间层的输出。

5.3.5 总体损失

VITS 可以看作是 VAE 和 GAN 的联合训练，因此总体损失为：

$$\mathcal{L}_{vae} = \mathcal{L}_{recon} + \mathcal{L}_{kl} + \mathcal{L}_{dur} + \mathcal{L}_{adv} + \mathcal{L}_{fm}(G) \quad (5.21)$$

5.3.6 总结

VITS 是一种由字符或音素直接映射为波形的端到端语音合成模型，该语音合成模型采用对抗训练的模式，生成器多个模块基于标准化流。模型较大，合成质量优异。VITS 的想法相当有启发，但是理解起来确实比较难，特别是标准化流，可参考：[Awesome Normalizing Flows](#)。

第6章 声码器

声码器（Vocoder），又称语音信号分析合成系统，负责对声音进行分析和合成，主要用于合成人类的语音。声码器主要由以下功能：

1. 分析 Analysis
2. 操纵 Manipulation
3. 合成 Synthesis

分析过程主要是从一段原始声音波形中提取声学特征，比如线性谱、MFCC；操纵过程是指对提取的原始声学特征进行压缩等降维处理，使其表征能力进一步提升；合成过程是指将此声学特征恢复至原始波形。人类发声机理可以用经典的源-滤波器模型建模，也就是输入的激励部分通过线性时不变进行操作，输出的声音谐振部分作为合成语音。输入部分被称为激励部分（Source Excitation Part），激励部分对应肺部气流与声带共同作用形成的激励，输出结果被称为声道谐振部分（Vocal Tract Resonance Part），对应人类发音结构，而声道谐振部分对应于声道的调音部分，对声音进行调制。

声码器的发展可以分为两个阶段，包括用于统计参数语音合成（Statistical Parameteric Speech Synthesis, SPSS）基于信号处理的声码器，和基于神经网络的声码器。常用基于信号处理的声码器包括 Griffin-Lim¹, STRAIGHT² 和 WORLD³。早期神经声码器包括 WaveNet、WaveRNN 等，近年来神经声码器发展迅速，涌现出包括 MelGAN、HiFiGAN、LPCNet、NHV 等优秀的工作。

6.1 Griffin-Lim 声码器

在早期的很多 Tacotron 开源语音合成模型中均采用 Griffin-Lim 声码器，同时也有一些专门的开源实现，比如 GriffinLim。

6.1.1 算法原理

原始的音频很难提取特征，需要进行傅里叶变换将时域信号转换到频域进行分析。音频进行傅里叶变换后，结果为复数，复数的绝对值就是幅度谱，而复数的实部与虚部之间形成的角度就是相位谱。经过傅里叶变换之后获得的幅度谱特征明显，可以清楚看到基频和对应的谐波。基频一般是声带的频率，而谐波则是声音经过声道、口腔、鼻腔等器官后产生的共振频率，且频率是基频的整数倍。

Griffin-Lim 将幅度谱恢复为原始波形，但是相比原始波形，幅度谱缺失了原始相位谱信息。音频一般采用的是短时傅里叶变化，因此需要将音频分割成帧（每帧 20ms 50ms），再进行傅里叶变换，帧与帧之间是有重叠的。Griffin-Lim 算法利用两帧之间有重叠部分的这个约束重构信号，因此如果使用 Griffin-Lim 算法还原音频信号，就需要尽量保证两帧之间重叠越多越好，一般帧移为每一帧长度的 25% 左右，也就是帧之间重叠 75% 为宜。

Griffin-Lim 在已知幅度谱，不知道相位谱的情况下重建语音，算法的实现较为简单，整体是一种迭代算法，迭代过程如下：

1. 随机初始化一个相位谱；
2. 用相位谱和已知的幅度谱经过逆短时傅里叶变换（ISTFT）合成新语音；
3. 对合成的语音做短时傅里叶变换，得到新的幅度谱和相位谱；
4. 丢弃新的幅度谱，用相位谱和已知的幅度谱合成语音，如此重复，直至达到设定的迭代轮数。

¹Griffin D. and Lim J. (1984). "Signal Estimation from Modified Short-Time Fourier Transform". IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. 32 (2): 236–243. doi:10.1109/TASSP.1984.1164317

²Kawahara H. Speech representation and transformation using adaptive interpolation of weighted spectrum: vocoder revisited[C]. 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE, 1997, 2: 1303-1306.

³Morise M, Yokomori F, Ozawa K. World: a vocoder-based high-quality speech synthesis system for real-time applications[J]. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 2016, 99(7): 1877-1884.

在迭代过程中，预测序列与真实序列幅度谱之间的距离在不断缩小，类似于 EM 算法。推导过程参见：[Griffin Lim 算法的过程和证明](#)和[Griffin Lim 声码器介绍](#)。

6.1.2 代码实现

摘抄自[Build End-To-End TTS Tacotron: Griffin Lim 信号估计算法](#)。

```

1 def griffin_lim(stftm_matrix, shape, min_iter=20, max_iter=50, delta=20):
2     y = np.random.random(shape)
3     y_iter = []
4
5     for i in range(max_iter):
6         if i >= min_iter and (i - min_iter) % delta == 0:
7             y_iter.append((y, i))
8             stft_matrix = librosa.core.stft(y)
9             stft_matrix = stftm_matrix * stft_matrix / np.abs(stft_matrix)
10            y = librosa.core.istft(stft_matrix)
11            y_iter.append((y, max_iter))
12
13    return y_iter

```

具体使用：

```

1 # assume 1 channel wav file
2 sr, data = scipy.io.wavfile.read(input_wav_path)
3
4 # 由 STFT -> STFT magnitude
5 stftm_matrix = np.abs(librosa.core.stft(data))
6 # + random 模拟 modification
7 stftm_matrix_modified = stftm_matrix + np.random.random(stftm_matrix.shape)
8
9 # Griffin-Lim 估计音频信号
10 y_iters = griffin_lim(stftm_matrix_modified, data.shape)

```

6.2 STRAIGHT 声码器

6.2.1 概述

STRAIGHT (Speech Transformation and Representation using Adaptive Interpolation of weiGHTed spectrum)，即利用自适应加权谱内插进行语音转换和表征。STRAIGHT 将语音信号解析成相互独立的频谱参数（谱包络）和基频参数（激励部分），能够对语音信号的基频、时长、增益、语速等参数进行灵活的调整，该模型在分析阶段仅针对语音基音、平滑功率谱和非周期成分 3 个声学参数进行分析提取，在合成阶段利用上述 3 个声学参数进行语音重构。

STRAIGHT 采用源-滤波器表征语音信号，可将语音信号看作激励信号通过时变线性滤波器的结果。

 **笔记** 对于能量信号和周期信号，其傅里叶变换收敛，因此可以用频谱 (Spectrum) 来描述；对于随机信号，傅里叶变换不收敛，因此不能用频谱进行描述，而应当使用功率谱 (PSD)，不严谨地说，功率谱可以看作是随机信号的频谱，参见[功率谱密度 \(PSD\)](#)。

6.2.2 特征提取

1. 平滑功率谱的提取，包括低频带补偿和清音帧处理等过程。STRAIGHT 分析阶段的一个关键步骤是进行自适应频谱分析，获取无干扰且平滑的功率谱。自适应加权谱的提取关键在于对提取出来的功率谱进行一系列的平滑和补偿。对输入信号进行：语音信号预处理-> 功率谱提取-> 低频噪声补偿-> 过平滑补偿-> 静音帧谱图的处理，最后得到自适应功率谱。
2. 非周期成分提取。
3. 通过小波时频分析的方式，提取基频轨迹。首先通过对语音信号中的基频信息进行解析，然后计算出相应的瞬时基频值，最后在频域进行谐波解析，并在频率轴进行平滑处理，获得语音信号的各个基频参数。

6.2.3 语音合成

STARIGHT 采用 PSOLA 技术和最小相位脉冲响应相结合的方式，在合成语音时输入待合成语音的基音频率轨迹和去除了周期性的二维短时谱包络。

开源的 STRAIGHT 声码器大多是 MATLAB 实现，比如Legacy STRAIGHT, StraightRepo。在开源语音合成系统merlin中存在可用的 STRAIGHT 工具，参见StraightCopySynthesis。

6.3 WORLD 声码器

6.3.1 声学特征

WORLD 通过获取三个声学特征合成原始语音，这三个声学特征分别是：基频 (fundamental frequency, F0)，频谱包络 (Spectrum Envelop, 也称频谱参数 Spectrum Parameter, SP) 和非周期信号参数 (Aperiodic Parameter, AP)。

1. 基频 F0

基频 F0 决定浊音，对应激励部分的周期脉冲序列，如果将声学信号分为周期和非周期信号，基频 F0 部分包含了语音的韵律信息和结构信息。对于一个由振动而发出的声音信号，这个信号可以看作是若干组频率不同的正弦波叠加而成，其中频率最低的正弦波即为基频，其它则为泛音。

WORLD 提取基频的流程：首先，利用低通滤波器对原始信号进行滤波；之后，对滤波之后的信号进行评估，由于滤波之后的信号应该恰好是一个正弦波，每个波段的长度应该恰好都是一个周期长度，因此通过计算这四个周期的标准差，可以评估此正弦波正确与否；最后选取标准差最小周期的倒数作为最终的基频。

2. 频谱包络 SP

频谱包络 SP 决定音色，对应声道谐振部分时不变系统的冲激响应，可以看作通过此线性时不变系统之后，声码器会对激励与系统响应进行卷积。将不同频率的振幅最高点通过平滑的曲线连接起来，就是频谱包络，求解方法有多种，在求解梅尔倒谱系数时，使用的是倒谱法。

 **笔记** 倒频谱 (Cepstrum) 也称为倒谱、二次谱和对数功率谱等，倒频谱的工程定义为：信号功率谱对数值进行傅里叶逆变换的结果，也就是：信号-> 求功率谱-> 求对数-> 求傅里叶逆变换。参见信号频域分析方法的理解（频谱、能量谱、功率谱、倒频谱、小波分析）。

3. 非周期信号参数 AP

非周期信号参数 AP 决定清音，对应混合激励部分的非周期脉冲序列，一般的语音都是由周期和非周期信号组成，因此除了上述的周期信号的声学参数，还需要非周期信号参数，才能够恢复出原始信号。混合激励可以通过 AP 来控制浊音段中周期激励和噪音（非周期）成分的相对比重。

6.3.2 WORLD 的分析功能

WORLD 包含 3 个语音分析模块，语音分析模型包括 DIO 模块、CheapTrick 模块、PLATINUM 模块。

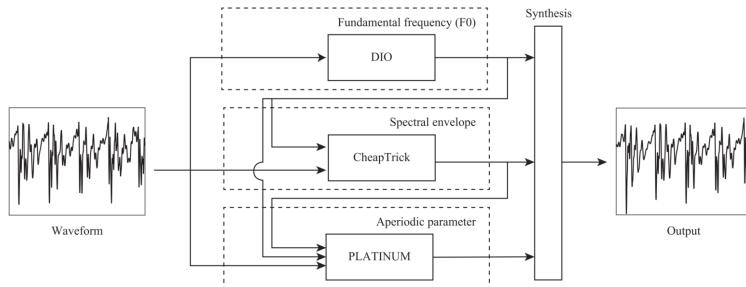


Fig.1 Overview of the developed system. WORLD consists of three analysis algorithms for determining the F0, spectral envelope, and aperiodic parameters and a synthesis algorithm incorporating these parameters.

图 6.1: WORLD 声码器整体结构

WORLD 可以提取原始波形中的基频 F0，基频包络 SP 和非周期信号 AP，这三种声学特征对应三种提取算法：DIO 输入波形提取基频，CheapTrick 输入基频、波形提取频谱包络，D4C 输入基频、频谱包络和波形提取非周期信号。最终，通过这三种声学特征通过最小相位谱与激励信号卷积后，输出恢复的原始波形。

6.3.3 DIO 算法提取基频 F0

F0 是周期信号最长持续时间的倒数，反过来，周期是基频的整数分之一。基频会产生二次谐波、三次谐波等，最长的周期理论上对应着频率最低的部分，也就是在语谱图上对应最下面的亮线，能量最高的部分。

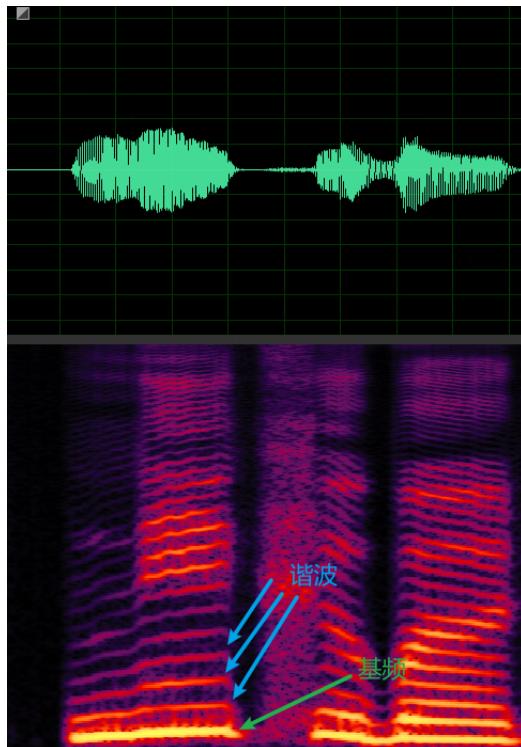


图 6.2: 基频和谐波

有很多的算法估计基频 F0，可以分为两类：一个是利用时域特征，比如自相关；一个利用频谱特征，比如倒谱 cepstrum。WORLD 使用 DIO 估计基频 F0，比 YIN、SWIPE 要快，性能依然较好，DIO 分为以下三步。

1. 低通滤波器对原始信号进行滤波。使用不同频带的低通滤波器：因为不知道基频的位置，因此这一步包含不同周期的 sin 低通滤波器。
2. 取 4 个周期计算置信度。计算获得的各个可能基频 F0 的置信度，因为由基频分量组成的 sin 信号包含 4 个间隔（2 个顶点、2 个过零点）。如果滤波器得到的间隔长度一致，则说明是一个基波，如图6.3。

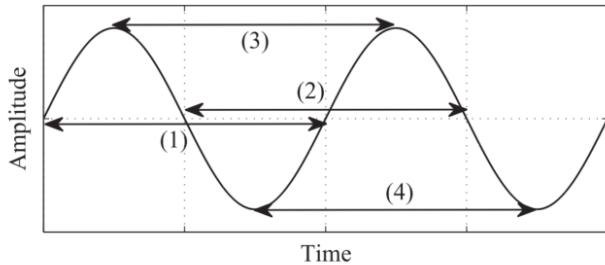


Fig. 2 四个间隔用于计算 F0 候选及其置信度。如果滤波信号仅由基频成分组成，则四个间隔具有相同值。

图 6.3: 取四个间隔计算候选 F0 及其置信度

3. 从某个时间点的正弦波中提取出四个周期信号，并计算置信度，也就是标准差。然后选择标准差最低，也就是置信度最高的基波。

6.3.4 CheapTrick 算法提取频谱包络 SP

声音包含不同频率的信号，覆盖 0 到 18000Hz，每个频率都有其振幅，定义每种频率中波的振幅最高点连线形成的图形为包络。频谱包络是个重要的参数，在频率-振幅图中，用平滑的曲线将所有共振峰连接起来，这个平滑的曲线就是频谱包络。

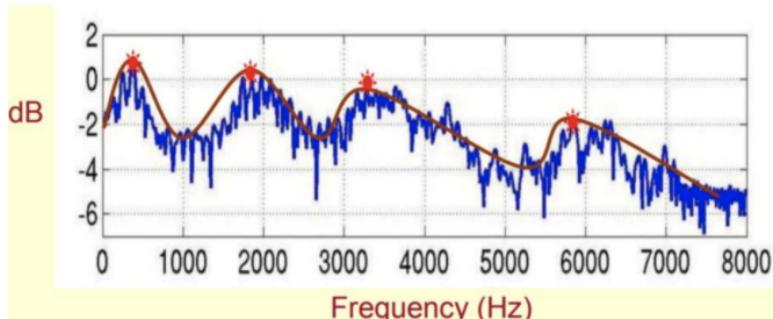


图 6.4: 取四个间隔计算候选 F0 及其置信度

提取频谱包络 SP 的典型算法有线性预测编码（Linear Predictive Coding, LPC）和 Cepstrum。线性预测编码 LPC 的原理是用若干个历史语音采样点的加权线性求和去不断逼近当前的语音采样点；Cepstrum 则是基于复数倒谱拥有频谱幅度与相位信息的原理，通过对一个信号进行快速傅里叶变换 FFT-> 取绝对值-> 取对数-> 相位展开-> 逆快速傅里叶变换 IFFT 的变换处理，从而得到对应的倒谱图。

WORLD 采用 CheapTrick 做谱分析，思想来自于音高同步分析（pitch synchronous analysis），其过程是：先将不同基频进行自适应加窗操作，以及功率谱平滑操作，随后将信号在频域上进行同态滤波。

6.3.5 PLANTINUM 提取非周期信号

混合激励和非周期信号参数 AP 经常应用到合成中，在 Legacy-STRAIGHT 和 TANDEM-STRAIGHT 算法中，aperiodicity 被用于合成周期和非周期的信号。WORLD 直接通过 PLANTINUM 从波形、F0 和谱包络中得到混合激励的非周期信号。

6.3.6 WORLD 的合成算法

TANDEM-STRAIGHT 直接使用周期响应计算声带的振动，而 Legacy-STRAIGHT 则操纵组延迟（group delay）以避免嗡嗡声。在 WORLD 中，利用最小相位响应和激励信号的卷积来计算声带的振动，从下图6.5，可以看到，WORLD 的卷积比 STAIGHT 要少，因此计算量更少。

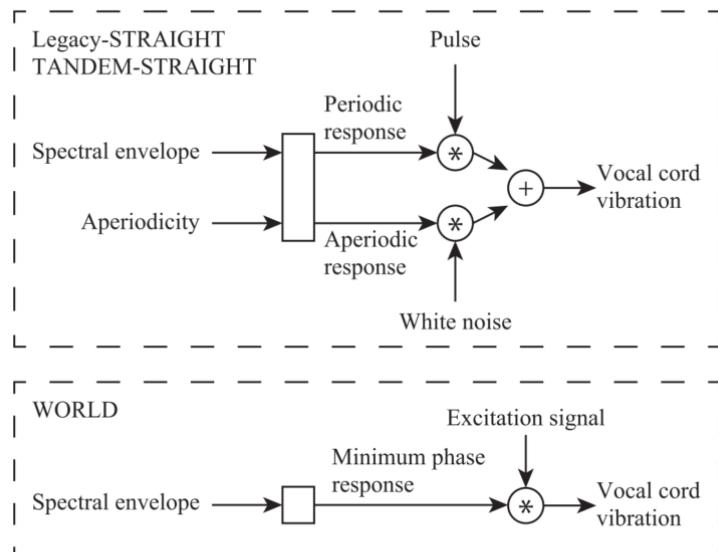


Fig.3 Architecture for synthesizing a vocal cord vibration. The symbol * represents convolution. Legacy-STRAIGHT uses group delay manipulation for periodic response synthesis.

图 6.5: WORLD 合成算法

6.3.7 使用示例

WORLD 声码器有较为成熟的开源实现，并且有对应的 Python 封装：[PyWORLD: A Python wrapper of WORLD Vocoder](#)，另有[官方实现](#)。以下示例包括了通过 PyWorld 提取声学参数，合成原始音频，修改部分声学参数，编辑原始音频。

```

1 import pyworld as pw
2 from scipy.io import wavfile
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5 import os
6 import soundfile as sf
7
8 # 提取语音特征
9 x, fs = sf.read(WAV_FILE_PATH)
10
11 # f0 : ndarray
12 #     F0 contour. 基频等高线
13 # sp : ndarray
14 #     Spectral envelope. 频谱包络
15 # ap : ndarray
16 #     Aperiodicity. 非周期性

```

```

17 f0, sp, ap = pw.wav2world(x, fs)      # use default options
18
19 # 分别提取声学参数
20 # 使用DIO算法计算音频的基频F0
21 _f0, t = pw.dio(x, fs, f0_floor= 50.0, f0_ceil= 600.0, channels_in_octave= 2,
22   frame_period=pw.default_frame_period)
23
24 # 使用CheapTrick算法计算音频的频谱包络
25 _sp = pw.cheaptrick(x, _f0, t, fs)
26
27 # 计算aperiodic参数
28 _ap = pw.d4c(x, _f0, t, fs)
29
30 # 基于以上参数合成原始音频
31 _y = pw.synthesize(_f0, _sp, _ap, fs, pw.default_frame_period)
32
33 # 1. 变高频-更类似女性
34 high_freq = pw.synthesize(f0*2.0, sp, ap, fs)
35
36 # 2. 直接修改基频，变为机器人发声
37 robot_like_f0 = np.ones_like(f0)*100
38 robot_like = pw.synthesize(robot_like_f0, sp, ap, fs)
39
40 # 3. 提高基频，同时频谱包络后移 -> 更温柔的女性?
41 female_like_sp = np.zeros_like(sp)
42 for f in range(female_like_sp.shape[1]):
43   female_like_sp[:, f] = sp[:, int(f/1.2)]
44 female_like = pw.synthesize(f0*2, female_like_sp, ap, fs)
45
46 # 4. 转换基频（不能直接转换）
47 x2, fs2 = sf.read(WAV_FILE_PATH2)
48 f02, sp2, ap2 = pw.wav2world(x2, fs2)
49 f02 = f02[:len(f0)]
50 print(len(f0), len(f02))
51 other_like = pw.synthesize(f02, sp, ap, fs)

```

6.4 Neural Homomorphic Vocoder (NHV)

6.4.1 源滤波器合成原理

如图6.6所示，基于源-滤波器的参数合成中，合成器的工作流程主要可分为三步。

1. 根据待合成音节的声调特性构造相应的声门波激励源。
2. 再根据协同发音、速度变换（时长参数）等音变信息在原始声道的基础上构造出新的声道参数模型。
3. 最后将声门波激励源送入新的声道模型中，输出就是结合给定韵律特性的合成语音。

共振峰合成和LPC（线性预测分析）合成是上述源-滤波器结构的参数合成中最常用的方法，实现原理类似，只是使用的声道模型不同。同时针对声道模型的特性，在源的选取上也略有区别。

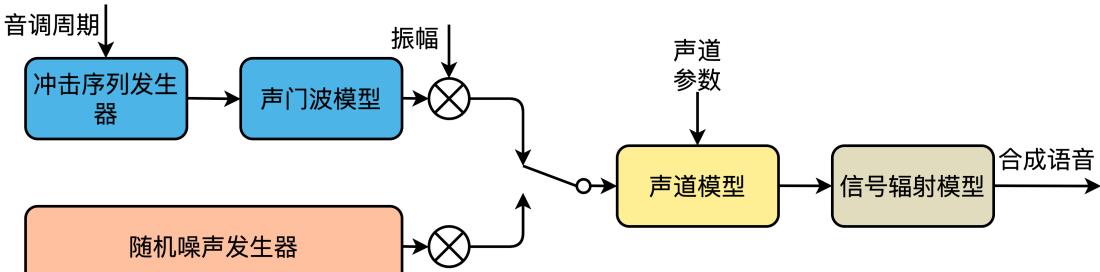


图 6.6: 源-滤波器合成结构框图

6.4.2 共振峰合成方法

与线性预测方法类似，共振峰合成方法也是对声源-声道模型的模拟，但它更侧重于对声道谐振特性的模拟。它把人的声道看作一个谐振腔，腔体的谐振特性决定所发出语音信号的频谱特性，也即共振峰特性。音色各异的语音有不同的共振峰模式，用每个共振峰以及其带宽作为参数可以构成一个共振峰滤波器，将多个共振峰滤波器组合起来模拟声道的传输特性，根据这个特性对声源发生器产生的激励信号进行调制，经过辐射模型后，就可以得到合成语音。

语音学的研究结果表明，决定语音感知的声学特征主要是语音的共振峰，因此如果合成器的结构和参数设置正确，则这种方法能够合成高音质、高可懂度的语音。

1. 激励源模型

一般共振峰合成器的激励源有三种类型：合成浊音时用周期激励序列；合成清音时用伪随机噪音；合成浊擦音时用周期激励调制的噪音。发浊音时，声带不断地张开和关闭，产生间隙的脉冲波，开始时声门闭合幅度为零，接着声门逐渐打开，幅度缓慢上升，然后快速下降，当再次降低到零之后，有一个导数不连续点，相当于声门突然关闭。因此浊音时激励函数形式有三角波、多项式波和滤波器激励响应激励函数。

2. 共振峰声道模型

对于声道模型，声学理论表明，语音信号谱中的谐振特性（对应声道传递函数中的极点）完全由声道的形状决定，与激励源的位置无关。

6.4.3 NHV 概述

许多神经声码器旨在提升源-滤波器（source-filter）模型中对源（source）的建模能力，包括LPCNet、GELP和GlotGAN——通过神经网络仅建模源（比如建模线性预测的残差信号），而通过时变滤波器直接生成语音。不同于仅对源进行建模，神经源滤波器（Neural Source-Filter, NSF）框架将经典框架中的线性滤波器替换为卷积神经网络，其中DDSP⁴通过神经网络控制谐波加性噪声（Harmonic plus Noise）生成音频。

NHV论文地址：<https://speechlab.sjtu.edu.cn/papers/2020/zjl00-liu-is2020.pdf>。神经同态声码器（Neural Homomorphic Vocoder, NHV）通过线性时变滤波器对脉冲串和噪音进行滤波后生成语音。给定声学特征，神经网络通过估计时变脉冲响应的复数谱控制线性时变（Linear Time-Varying, LTV）滤波器，并利用多尺度STFT和对抗损失函数进行训练。

6.4.4 整体结构

源-滤波器示意图如图6.7所示， $e[n]$ 表示源（source）， $h[n]$ 为滤波器， $s[n]$ 则是重建的样本点。在N HV中，神经网络负责建模源-滤波器模型中的线性时变（Linear Time-Varying, LTV）滤波器。类似于谐波噪音加性模型（Harmonic plus Noise model），N HV分别生成谐波和噪音成分。谐波部分，主要是通过线性时变脉冲串（LTV filtered impulse trains）建模发音部分的周期性振动；噪音部分，包括背景噪音、不发音成分、以及发音部分中的

⁴J. Engel, L. H. Hantrakul, C. Gu, and A. Roberts, "DDSP: Differentiable digital signal processing," in Proc. ICLR, 2020.

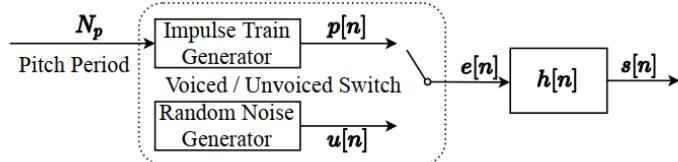


Figure 1: A simplified source-filter model in discrete time. $e[n]$ is source signal. $s[n]$ is speech.

图 6.7: 源-滤波器示意图

随机成分，通过线性时变滤波噪音建模。将原始的语音信号 x 和重建信号 s 切分为若干个帧长 L 的不重叠帧， m 为帧索引， n 为样本点索引， c 为特征索引，因此总帧数和总样本点数满足：

$$N = M \times L \quad (6.1)$$

上式中， N 表示样本点总数， M 表示不重叠帧帧数， L 表示每个帧中的样本点个数。

脉冲响应 h 是因果的，谐波脉冲响应 h_h 和噪音脉冲响应 h_n 无限长， $n \in \mathbb{Z}$ 。

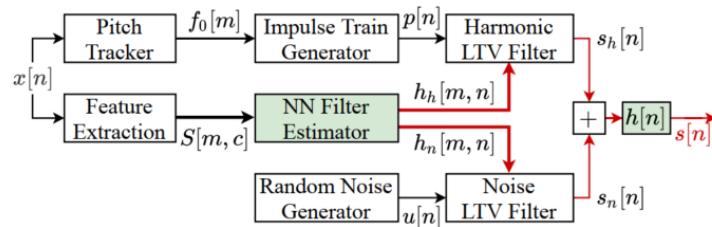


Figure 2: Illustration of NHV during inference. Gradients are propagated backward along red lines. Green boxes contain trainable parameters.

图 6.8: NHV 的语音合成过程

NHV 的语音生成过程如上图6.8所示，首先通过帧级别基频 $f_0[m]$ 生成脉冲串 $p[n]$ ，从高斯分布中采样得到噪音信号 $u[n]$ ；接着神经网络利用对数域梅尔谱 $S[m, c]$ 估计出每一帧的谐波脉冲响应 $h_h[m, n]$ 和噪音脉冲响应 $h_n[m, n]$ ；接着脉冲串 $p[n]$ 和噪音信号 $u[n]$ 通过 LTV 线性时变滤波器获得谐波成分 $s_h[n]$ 和噪音成分 $s_n[n]$ ；最后， $s_h[n]$ 和 $s_n[n]$ 加起来，并通过可训练的因果有限冲激响应滤波器 $h[n]$ 滤波，获得最终的语音样本点 $s[n]$ 。

6.4.5 脉冲串生成器

利用低通正弦波的和生成脉冲串：

$$p(t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{2k_f(t) < f_s} \cos(\int_0^t 2\pi k f_0(\tau) d\tau), & \text{if } f_0(t) > 0 \\ 0, & \text{if } f_0(t) = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

其中，通过 zero-order hold 或者线性插值从 $f_0[m]$ 中重建 $f_0(t)$ ，且 $p[n] = p(n/f_s)$ ， f_s 为采样率。

由于加性生成时，根据采样率和帧移需要加和 200 个正弦函数，计算量较大，因此可以采用近似算法：将基频周期四舍五入到采样周期的倍数，此时离散脉冲序列是稀疏的，然后可以按顺序生成，一次生成一个音高。

6.4.6 神经网络滤波估计器 (Neural Network Filter Estimator)

使用复数谱 \hat{h}_h 和 \hat{h}_n 作为冲激响应 h_h 和 h_n 的中间表示，复数谱同时描述了幅度响应和滤波器的组延迟 (group delay)，滤波器的组延迟会影响语音的音色。不同于使用线性相位或最小相位滤波器，NHV 使用符合相

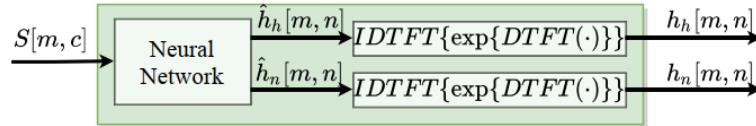


Figure 4: NN output is defined to be complex cepstrums.

图 6.9: NHV 的语音合成过程

位滤波器，从数据中学习相位特性。限制复倒谱的长度相当于限制幅度和相位响应的分辨率，这提供了控制滤波器复杂性的简单方法——神经网络只预测低频带系数，高频带谱系数设置为零。实验中，每帧预测两个 10ms 复数谱。实现上，无限冲激响应 IIR，比如 $h_h[m, n]$ 和 $h_n[m, n]$ 通过有限冲激响应 FIR 近似，离散傅里叶变换的窗长必须足够大，以避免混叠现象，实验中窗长设置为 $N = 1024$ 。

6.4.7 线性时变 (LTV) 滤波器和可训练的有限冲激响应 (FIRs)

FIR (有限冲激响应) 常用于音频信号处理，FIR 和 IIR (无限冲激响应) 最直观的区别就体现在结构形式上，IIR 的方程中，当前的输出 $y(n)$ 是由当前输入 $x(n)$ ，过去输入 $x(n-1), x(n-2)$ 和过去输出 $y(n-2), y(n-1)$ 这三类值决定。而在 FIR 方程中，则没有过去输出这项。IIR 的差分方程如下：

$$y(n) = \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (6.3)$$

而 FIR 的差分方程为：

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (6.4)$$

由于 IIR 的当前输出受到以前输出值的影响，因此它是有反馈的，或者说输出值是递归的；而 FIR 就是无反馈，非递归的。

谐波部分的线性时变滤波器定义如下式所示：

$$s_h[n] = \sum_{m=0}^M (w_L[n - mL] \cdot p[n]) * h_h[m, n] \quad (6.5)$$

卷积可以在时域和频域上应用，可训练的 FIR 滤波器 $h[n]$ 可以应用到语音生成的最后一步，谐波部分的卷积过程如下图所示。

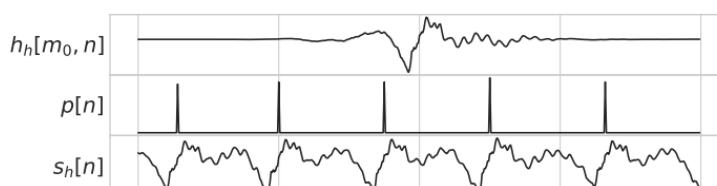
Figure 5: Signals sampled from a trained NHV model around frame m_0 . The figure shows 512 sampling points, or 4 frames. Only one impulse response $h_h[m_0, n]$ from frame m_0 is plotted.

图 6.10: 谐波部分的卷积过程

6.4.8 神经网络的训练

1. 多尺度 STFT 损失

因为要求原始信号 x 和重建信号 s 的声门激励（Glottal Closure Instants, GCIs）完全对齐，因此在重建信号 $x[n]$ 和原始信号 $s[n]$ 之间无法施加点级损失，而多尺度 STFT 计算损失时允许信号间相位错位。类似于多子带 MelGAN⁵，多尺度 STFT 损失定义为不同参数下原始和重建幅度谱之间的 L1 距离之和：

$$L_R = \frac{1}{C} \sum_{i=0}^{C-1} \frac{1}{K_i} (||X_i - S_i||_1 + ||\log X_i - \log S_i||_1) \quad (6.6)$$

上式中， X_i 和 S_i 分别为原始信号 x 和重建信号 s 在参数 i 设置下计算获得的幅度谱，每个幅度谱包括 K_i 个值，共 C 组 STFT 参数配置，组数越多，重建信号的混叠问题一般越少。

2. 对抗损失函数

NHV 采取合页损失函数形式：

$$L_D = \mathbb{E}_{x,S} [\max(0, 1 - D(x, S))] + \mathbb{E}_{f_0,S} [\max(0, 1 + D(G(f_0, S), S))] \quad (6.7)$$

$$G = \mathbb{E}_{f_0,S} [-D(G(f_0, S), S)] \quad (6.8)$$

上式中， $D(x, S)$ 表示判别器网络， D 输入原始信号 x 或重建信号 s ，以及真实 \log 域梅尔频谱 S ， f_0 表示基频，生成器 $G(f_0, S)$ 输出重建信号 s 。

6.4.9 小结

NHV 是基于源-滤波器的神经声码器，通过神经网络建模线性时变滤波器（LTV），对脉冲串和噪音进行滤波后生成语音，并结合多尺度 STFT 和对抗损失进行训练。

6.5 HiFiGAN

6.5.1 HiFiGAN 概述

HiFiGAN 是近年来在学术界和工业界都较为常用的声码器，能够将声学模型产生的频谱转换为高质量的音频，这种声码器采用生成对抗网络（Generative Adversarial Networks, GAN）作为基础生成模型，相比于之前相近的 MelGAN，改进点在于：

1. 引入了多周期判别器（Multi-Period Discriminator, MPD）。HiFiGAN 同时拥有多尺度判别器（Multi-Scale Discriminator, MSD）和多周期判别器，尽可能增强 GAN 判别器甄别合成或真实音频的能力，从而提升合成音质。
2. 生成器中提出了多感受野融合模块。WaveNet 为了增大感受野，叠加带洞卷积，音质虽然很好，但是也使得模型较大，推理速度较慢。HiFiGAN 则提出了一种残差结构，交替使用带洞卷积和普通卷积增大感受野，保证合成音质的同时，提高推理速度。

6.5.2 HiFiGAN 生成器简介

HiFiGAN 的生成器主要有两块，一个是上采样结构，具体由一维转置卷积组成；二是所谓的多感受野融合（Multi-Receptive Field Fusion, MRF）模块，主要负责对上采样获得的采样点进行优化，具体由残差网络组成。

⁵Yang G, Yang S, Liu K, et al. Multi-band MelGAN: Faster waveform generation for high-quality text-to-speech[C]. 2021 IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT). IEEE, 2021: 492-498.

6.5.3 上采样结构

作为声码器的生成器，不但需要负责将频谱从频域转换到时域，而且要进行上采样（upsampling）。以 80 维梅尔频谱合成 16kHz 的语音为例，假设帧移为 10ms，则每个帧移内有 160 个语音样本点，需要通过 80 个梅尔频谱值获得，因此，需要利用卷积网络不断增加输出“长度”，降低输出“通道数”，直到上采样倍数达到 160，通道数降低为 1 即可。

对于上采样操作，可以使用插值算法进行处理，比如最近邻插值（Nearest neighbor interpolation）、双线性插值（Bi-Linear interpolation）、双立方插值（Bi-Cubic interpolation）等，但是这些插值算法说到底是人工规则，而神经网络可以自动学习合适的变换，**转置卷积（ConvTranspose）**，也称反卷积 Deconvolution、微步卷积 Fractionally-strided Convolution，则是合适的上采样结构。一般的卷积中，每次卷积操作都是对输入张量和卷积核的每个元素进行相乘再加和，卷积的输入和输出是多对一的映射关系，而转置卷积则反过来，是一对多的映射关系。从计算机的内部实现来看，定义：

1. X 为输入张量，大小为 $X_{width} \times X_{height}$
2. Y 为输出张量，大小为 $Y_{width} \times Y_{height}$
3. C 为卷积核，大小为 $C_{width} \times C_{height}$

经过普通的卷积运算之后，将大张量 X “下采样”到小张量 Y 。具体来说，首先将输入张量展平为向量，也即是 $[X_{width} \times X_{height}, 1]$ ，同时也将卷积核展平成向量到输入张量 X 的大小：由于卷积核小于输入张量，在行和列上都用 0 填充至输入张量大小，然后展平，则卷积核向量大小为 $[1, X_{width} \times X_{height}]$ ；同时按照步长，左侧填充 0 偏移该卷积核向量，最终，卷积核向量的个数为输出张量元素个数，则构成的卷积核张量大小为 $[Y_{width} \times Y_{height}, X_{width} \times X_{height}]$ ，卷积核张量和输入张量矩阵乘，获得输出张量 $[Y_{width} \times Y_{height}, 1]$ ，重塑大小为 C_{width}, C_{height} 。

此时，如果使用卷积核张量的转置 $[X_{width} \times X_{height}, Y_{width} \times Y_{height}]$ 矩阵乘展平的 $[Y_{width} \times Y_{height}, 1]$ ，得到的结果就是 $[X_{width} \times X_{height}, 1]$ ，和刚刚的输入张量大小相同，这就完成了一次转置卷积。但实际上，上述操作并非可逆关系，卷积将输入张量“下采样”到输出张量，本质是有损压缩的过程，由于在卷积中使用的卷积核张量并非可逆矩阵，转置卷积操作之后并不能恢复到原始的数值，仅仅是恢复到原始的形状。这其实也就是线性谱与梅尔频谱关系，加权求和得到梅尔频谱之后就回不来了，顶多求梅尔滤波器组的伪逆，近似恢复到线性谱。

此外，在使用转置卷积时需要注意棋盘效应（Checkboard artifacts）。棋盘效应主要是由于转置卷积的“不均匀重叠”（Uneven overlap）造成的，输出中每个像素接受的信息量与相邻像素不同，在输出上找不到连续且均匀重叠的区域，表现是图像中一些色块的颜色比周围色块要深，像棋盘上的方格，参见**Deconvolution and Checkerboard Artifacts**。避免棋盘效应的方法主要有：`kernel_size` 的大小尽可能被 `stride` 整除，尽可能使用 `stride=1` 的转置卷积；堆叠转置卷积减轻重叠；网络末尾使用 1×1 的转置卷积等。

通过上述的原理部分，可以看出卷积和转置卷积是对偶运算，输入变输出，输出变输入，卷积的输入输出大小关系为：

$$L_{out} = \frac{L_{in} + 2 \times padding - kernel_size}{stride} + 1 \quad (6.9)$$

那么转置卷积的输入输出大小则为：

$$L_{out} = (L_{in} - 1) \times stride + kernel_size - 2 \times padding \quad (6.10)$$

当然，加入 `dilation` 之后，大小计算稍复杂些，参见**Pytorch-ConvTranspose1d**, **Pytorch-Conv1d**。

该部分参考文献：

1. [怎样通俗易懂地解释反卷积？](#)
2. [一文搞懂反卷积，转置卷积](#)
3. [Deconvolution and Checkerboard Artifacts](#)
4. [如何去除生成图片产生的棋盘伪影？](#)

5. A guide to convolution arithmetic for deep learning

6. Pytorch-ConvTranspose1d

7. Pytorch-Conv1d

转置卷积实现的上采样层定义为：

```

1 self.ups = nn.ModuleList()
2 for i, (u, k) in enumerate(zip(h.upsample_rates, h.upsample_kernel_sizes)):
3     self.ups.append(weight_norm(ConvTranspose1d(h.upsample_initial_channel//(2**i),
4                                         h.upsample_initial_channel//(2**(i+1)), kernel_size=k,
5                                         stride=u, padding=(k-u)//2)))

```

对于 hop_size=256 来说，h.upsample_rates 和 h.upsample_kernel_sizes 分别为：

1. "upsample_rates": [8,8,2,2],
2. "upsample_kernel_sizes": [16,16,4,4],

根据转置卷积的输入输出大小关系：

$$L_{out} = (L_{in} - 1) \times stride - 2 \times padding + dilation \times (kernel_size - 1) + output_padding + 1 \quad (6.11)$$

用于上采样的转置卷积，通过设置合适的 padding，配合卷积核大小 (kernel_size) 和步进 (stride)，就可以实现输出与输入大小呈“步进倍数”的关系，在这里，卷积核 (upsample_kernel_sizes) 设置为步进 (upsample_rates) 的 2 倍。设置参数时，必须保持帧移点数，是各个卷积层步进（或者代码中所谓的上采样率 update_rates）的乘积，在上例中，也就是：

$$hop_length = 256 = 8 \times 8 \times 2 \times 2 \quad (6.12)$$

6.5.4 多感受野融合

转置卷积的上采样容易导致棋盘效应，因此每次转置卷积上采样之后，都会跟着一个多感受野融合 (MRF) 的残差网络，以进一步提升样本点的生成质量。多感受野融合模块是一种利用带洞卷积和普通卷积提高生成器感受野的结构，带洞卷积的扩张倍数逐步递增，如 dilation=1,3,5，每个带洞卷积之后，跟着卷积核大于 1 的普通卷积，从而实现带洞卷积和普通卷积的交替使用。带洞卷积和普通卷积的输入输出大小保持不变，在一轮带洞和普通卷积完成之后，原始输入跳连到卷积的结果，从而实现一轮“多感受野融合”。多感受野融合的具体实现上，论文中提出了两种参数量不同的残差网络。一种是参数量较多，多组带洞卷积 (dilation=1,3,5) 和普通卷积交替使用，HiFiGAN v1 (config_v1.json) 和 HiFiGAN v2 (config_v2.json) 均使用该种多感受野融合 (MRF) 模块。：

```

1 class ResBlock1(torch.nn.Module):
2     def __init__(self, h, channels, kernel_size=3, dilation=(1, 3, 5)):
3         super(ResBlock1, self).__init__()
4         self.h = h
5         self.convs1 = nn.ModuleList([
6             weight_norm(Conv1d(channels, channels, kernel_size, 1,
7                                 dilation=dilation[0], padding=get_padding(kernel_size, dilation[0]))),
8             weight_norm(Conv1d(channels, channels, kernel_size, 1,
9                                 dilation=dilation[1], padding=get_padding(kernel_size, dilation[1]))),
10            weight_norm(Conv1d(channels, channels, kernel_size, 1,
11                           dilation=dilation[2], padding=get_padding(kernel_size, dilation[2]))),
12        ])
13        self.convs1.apply(init_weights)
14

```

```

15     self.convs2 = nn.ModuleList([
16         weight_norm(Conv1d(channels, channels, kernel_size, 1, dilation=1,
17                            padding=get_padding(kernel_size, 1))),
18         weight_norm(Conv1d(channels, channels, kernel_size, 1, dilation=1,
19                            padding=get_padding(kernel_size, 1))),
20         weight_norm(Conv1d(channels, channels, kernel_size, 1, dilation=1,
21                            padding=get_padding(kernel_size, 1)))
22     ])
23     self.convs2.apply(init_weights)
24
25     def forward(self, x):
26         for c1, c2 in zip(self.convs1, self.convs2):
27             xt = F.leaky_relu(x, LRELU_SLOPE)
28             xt = c1(xt)
29             xt = F.leaky_relu(xt, LRELU_SLOPE)
30             xt = c2(xt)
31             x = xt + x
32
33     return x
34
35     def remove_weight_norm(self):
36         for l in self.convs1:
37             remove_weight_norm(l)
38         for l in self.convs2:
39             remove_weight_norm(l)

```

另外一种 MRF 大大减少了参数量，仅由两层带洞卷积 (dilation=1,3) 组成，但依然保持了跳跃连接的结构：

```

1 class ResBlock2(torch.nn.Module):
2     def __init__(self, h, channels, kernel_size=3, dilation=(1, 3)):
3         super(ResBlock2, self).__init__()
4         self.h = h
5         self.convs = nn.ModuleList([
6             weight_norm(Conv1d(channels, channels, kernel_size, 1,
7                               dilation=dilation[0], padding=get_padding(kernel_size, dilation[0]))),
8             weight_norm(Conv1d(channels, channels, kernel_size, 1,
9                               dilation=dilation[1], padding=get_padding(kernel_size, dilation[1])))
10        ])
11        self.convs.apply(init_weights)
12
13    def forward(self, x):
14        for c in self.convs:
15            xt = F.leaky_relu(x, LRELU_SLOPE)
16            xt = c(xt)
17            x = xt + x
18
19    return x
20
21    def remove_weight_norm(self):
22        for l in self.convs:
23            remove_weight_norm(l)

```

注意到两种 MRF 都使用了 weight_norm 对神经网络的权重进行规范化，相比于 batch_norm，weight_norm 不依赖 mini-batch 的数据，对噪音数据更为鲁棒；并且，可以应用于 RNN 等时序网络上；此外，weight_norm 直接对神经网络的权重值进行规范化，前向和后向计算时，带来的额外计算和存储开销都较小。weight_norm 本质是利用方向 v 和幅度张量 g 替代权重张量 w ：

$$w = g \frac{v}{\|v\|} \quad (6.13)$$

方向张量 v 和 w 大小相同，幅度张量 g 比 w 少一维，使得 w 能够比较容易地整体缩放。不直接优化 w ，而是训练 v 和 g 。

同时注意到，在推理时需要 remove_weight_norm，这是因为训练时需要计算权重矩阵的方向和幅度张量，而在推理时，参数已经优化完成，要恢复回去，所以在推理时就直接移除 weight_norm 机制。

每个卷积核的 0 填充个数都调用了 get_padding 函数，利用填充保证输入输出的长宽大小一致，该填充大小的计算方法：

$$padding = (kernel_size - 1) * padding // 2 \quad (6.14)$$

6.5.5 HiFiGAN 判别器简介

HiFiGAN 的判别器有两个，分别是多尺度和多周期判别器，从两个不同角度分别鉴定语音。多尺度判别器源自 MelGAN 声码器的做法，不断平均池化语音序列，逐次将语音序列的长度减半，然后在语音的不同尺度上施加若干层卷积，最后展平，作为多尺度判别器的输出。多周期判别器则是以不同的序列长度将一维的音频序列折叠为二维平面，在二维平面上施加二维卷积。

6.5.6 多尺度判别器

多尺度判别器的核心是多次平均池化，缩短序列长度，每次序列长度池化至原来的一半，然后进行卷积。具体来说，多尺度判别器首先对原样本点进行一次“原尺寸判别”，其中“原尺寸判别”模块中一维卷积的参数规范化方法为谱归一化（spectral_norm）；接着对样本点序列进行平均池化，依次将序列长度减半，然后对“下采样”的样本点序列进行判别，该模块中一维卷积的参数规范化方法为权重归一化（weight_norm）。在每一个特定尺度的子判别器中，首先进行若干层分组卷积，并对卷积的参数进行规范化；接着利用 leaky_relu 进行激活；在经过多个卷积层之后，最后利用输出通道为 1 的卷积层进行后处理，展平后作为输出。

```

1 class MultiScaleDiscriminator(torch.nn.Module):
2     def __init__(self):
3         super(MultiScaleDiscriminator, self).__init__()
4         self.discriminators = nn.ModuleList([
5             DiscriminatorS(use_spectral_norm=True),
6             DiscriminatorS(),
7             DiscriminatorS(),
8         ])
9         self.meanpools = nn.ModuleList([
10            AvgPool1d(4, 2, padding=2),
11            AvgPool1d(4, 2, padding=2)
12        ])
13
14     def forward(self, y, y_hat):
15         y_d_rs = []
16         y_d_gs = []

```

```

17     fmap_rs = []
18     fmap_gs = []
19     for i, d in enumerate(self.discriminators):
20         if i != 0:
21             y = self.meanpools[i-1](y)
22             y_hat = self.meanpools[i-1](y_hat)
23             y_d_r, fmap_r = d(y)
24             y_d_g, fmap_g = d(y_hat)
25             y_d_rs.append(y_d_r)
26             fmap_rs.append(fmap_r)
27             y_d_gs.append(y_d_g)
28             fmap_gs.append(fmap_g)
29
30     return y_d_rs, y_d_gs, fmap_rs, fmap_gs

```

上述代码中 `y_d_rs` 和 `y_d_gs` 分别是真实和生成样本的多尺度判别器展平后的整体输出，`fmap_rs` 和 `y_d_gs` 分别是真实和生成样本经过每一层卷积的特征图（feature map）。子判别器 `DiscriminatorS` 由若干层卷积组成，最后一层输出通道为 1，之后对输出进行展平。注意到，与 MelGAN 不同，多尺度判别器的第一个子判别器 `DiscriminatorS` 使用谱归一化 `spectral_norm`，之后两个子判别器则是正常使用权重归一化 `weight_norm` 规整可训练参数。谱归一化实际是在每次更新完可训练参数 `W` 之后，都除以 `W` 的奇异值，以保证整个网络满足利普希茨连续性，使得 GAN 的训练更稳定。参见[GAN 的谱归一化 \(Spectral Norm\)](#) 和 [矩阵的奇异值分解 \(Singular Value Decomposition\)](#)。`DiscriminatorS` 的具体实现如下：

```

1 class DiscriminatorS(torch.nn.Module):
2     def __init__(self, use_spectral_norm=False):
3         super(DiscriminatorS, self).__init__()
4         norm_f = weight_norm if use_spectral_norm == False else spectral_norm
5         self.convs = nn.ModuleList([
6             norm_f(Conv1d(1, 128, 15, 1, padding=7)),
7             norm_f(Conv1d(128, 128, 41, 2, groups=4, padding=20)),
8             norm_f(Conv1d(128, 256, 41, 2, groups=16, padding=20)),
9             norm_f(Conv1d(256, 512, 41, 4, groups=16, padding=20)),
10            norm_f(Conv1d(512, 1024, 41, 4, groups=16, padding=20)),
11            norm_f(Conv1d(1024, 1024, 41, 1, groups=16, padding=20)),
12            norm_f(Conv1d(1024, 1024, 5, 1, padding=2)),
13        ])
14        self.conv_post = norm_f(Conv1d(1024, 1, 3, 1, padding=1))
15
16    def forward(self, x):
17        fmap = []
18        for l in self.convs:
19            x = l(x)
20            x = F.leaky_relu(x, LRELU_SLOPE)
21            fmap.append(x)
22        x = self.conv_post(x)
23        fmap.append(x)
24        x = torch.flatten(x, 1, -1)
25
26        return x, fmap

```

x 是子判别器展平后的整体输出，大小为 $[B, l]$ ； $fmap$ 是经过卷积后的特征图（feature map），类型为 list，元素个数为卷积层数，上述代码中有 8 个卷积层，则 $fmap$ 元素个数为 8，每个元素均是大小为 $[B, C, l']$ 的张量。

6.5.7 多周期判别器

多周期判别器的重点是将一维样本点序列以一定周期折叠为二维平面，例如一维样本点序列 $[1,2,3,4,5,6]$ ，如果以 3 为周期，折叠成二维平面则是 $[[1,2,3],[4,5,6]]$ ，然后对这个二维平面施加二维卷积。具体来说，每个特定周期的子判别器首先进行填充，保证样本点数是周期的整倍数，以方便“折叠”为二维平面；接下来进入多个卷积层，输出通道数分别为 $[32, 128, 512, 1024]$ ，卷积之后利用 leaky_relu 激活，卷积层参数规范化方法均为权重归一化（weight_norm）；然后经过多个卷积层之后，利用一个输入通道数为 1024，输出通道为 1 的卷积层进行后处理；最后展平，作为多周期判别器的最终输出。多周期判别器包含多个周期不同的子判别器，在论文代码中周期数分别设置为 $[2, 3, 5, 7, 11]$ 。

```

1 class MultiPeriodDiscriminator(torch.nn.Module):
2     def __init__(self):
3         super(MultiPeriodDiscriminator, self).__init__()
4         self.discriminators = nn.ModuleList([
5             DiscriminatorP(2),
6             DiscriminatorP(3),
7             DiscriminatorP(5),
8             DiscriminatorP(7),
9             DiscriminatorP(11),
10        ])
11
12     def forward(self, y, y_hat):
13         y_d_rs = []
14         y_d_gs = []
15         fmap_rs = []
16         fmap_gs = []
17         for i, d in enumerate(self.discriminators):
18             y_d_r, fmap_r = d(y)
19             y_d_g, fmap_g = d(y_hat)
20             y_d_rs.append(y_d_r)
21             fmap_rs.append(fmap_r)
22             y_d_gs.append(y_d_g)
23             fmap_gs.append(fmap_g)
24
25         return y_d_rs, y_d_gs, fmap_rs, fmap_gs

```

上述代码中 y_d_{rs} 和 y_d_{gs} 分别是真实和生成样本的多周期判别器输出， $fmap_{rs}$ 和 $fmap_{gs}$ 分别是真实和生成样本经过每一层卷积后输出的特征图（feature map）。子判别器 $DiscriminatorP$ 由若干层二维卷积组成：

```

1 class DiscriminatorP(torch.nn.Module):
2     def __init__(self, period, kernel_size=5, stride=3, use_spectral_norm=False):
3         super(DiscriminatorP, self).__init__()
4         self.period = period
5         norm_f = weight_norm if use_spectral_norm == False else spectral_norm
6         self.convs = nn.ModuleList([
7             norm_f(Conv2d(1, 32, (kernel_size, 1), (stride, 1), padding=(get_padding(
8                 5, 1), 0))),
9
10            norm_f(Conv2d(32, 64, (kernel_size, 1), (1, 1), padding=(0, 0))),
11            norm_f(Conv2d(64, 128, (kernel_size, 1), (1, 1), padding=(0, 0))),
12            norm_f(Conv2d(128, 256, (kernel_size, 1), (1, 1), padding=(0, 0))),
13            norm_f(Conv2d(256, 512, (kernel_size, 1), (1, 1), padding=(0, 0))),
14            norm_f(Conv2d(512, 1024, (kernel_size, 1), (1, 1), padding=(0, 0))),
15            norm_f(Conv2d(1024, 1024, (kernel_size, 1), (1, 1), padding=(0, 0))),
16            norm_f(Conv2d(1024, 1, (kernel_size, 1), (1, 1), padding=(0, 0)))
17        ])
18
19    def forward(self, x):
20        if x.size(2) > self.period:
21            x = F.interpolate(x, size=(x.size(2) // 2, x.size(3) // 2))
22
23        r, g = [], []
24
25        for conv in self.convs:
26            x = conv(x)
27            if x.size(2) < self.period:
28                break
29            r.append(x)
30            g.append(x)
31
32        r = torch.cat(r, dim=1)
33        g = torch.cat(g, dim=1)
34
35        return r, g

```

```

8     norm_f(Conv2d(32, 128, (kernel_size, 1), (stride, 1), padding=(
9         get_padding(5, 1), 0))),
10    norm_f(Conv2d(128, 512, (kernel_size, 1), (stride, 1), padding=(
11        get_padding(5, 1), 0))),
12    norm_f(Conv2d(512, 1024, (kernel_size, 1), (stride, 1), padding=(
13        get_padding(5, 1), 0))),
14    norm_f(Conv2d(1024, 1024, (kernel_size, 1), 1, padding=(2, 0))),
15  ])
16  self.conv_post = norm_f(Conv2d(1024, 1, (3, 1), 1, padding=(1, 0)))
17
18  def forward(self, x):
19      fmap = []
20
21      # 1d to 2d
22      b, c, t = x.shape
23      if t % self.period != 0: # pad first
24          n_pad = self.period - (t % self.period)
25          x = F.pad(x, (0, n_pad), "reflect")
26          t = t + n_pad
27      x = x.view(b, c, t // self.period, self.period)
28
29      for l in self.convs:
30          x = l(x)
31          x = F.leaky_relu(x, LRELU_SLOPE)
32          fmap.append(x)
33      x = self.conv_post(x)
34      fmap.append(x)
35      x = torch.flatten(x, 1, -1)

36
37      return x, fmap

```

x 是子判别器展平后的整体输出，大小为 $[B, l]$ ； $fmap$ 是经过每一层卷积后的特征图（feature map），类型为 list，元素个数为卷积层数，上述代码中有 6 个卷积层，则 $fmap$ 元素个数为 6，每个元素是大小为 $[B, C, l', \text{period}]$ 的张量。

6.5.8 损失函数简介

HiFiGAN 的损失函数主要包括三块，一个是 GAN 原始的生成对抗损失（GAN Loss）；第二是梅尔频谱损失（Mel-Spectrogram Loss），将生成音频转换回梅尔频谱之后，计算真实和生成音频对应梅尔频谱之间的 L1 距离；第三是特征匹配损失（Feature Match Loss），主要是对比真实和合成音频在中间卷积层上的差异。

6.5.9 生成对抗损失

HiFiGAN 仍然是一个生成对抗网络，判别器计算输入是真实样本的概率，生成器生成以假乱真的样本，最终达到生成器合成接近真实的样本，以致于判别器无法区分真实和生成样本。HiFiGAN 使用最小二乘 GAN (LS-GAN)，将原始 GAN 中的二元交叉熵替换为最小二乘损失函数。判别器的生成对抗损失定义为：

$$L_{Adv}(D; G) = \mathbb{E}_{(x,s)}[(D(x) - 1)^2 + (D(G(s)))^2] \quad (6.15)$$

对应的代码实现:

```

1 def discriminator_loss(disc_real_outputs, disc_generated_outputs):
2     loss = 0
3     r_losses = []
4     g_losses = []
5     for dr, dg in zip(disc_real_outputs, disc_generated_outputs):
6         r_loss = torch.mean((dr-1)**2)
7         g_loss = torch.mean(dg**2)
8         loss += (r_loss + g_loss)
9         r_losses.append(r_loss.item())
10        g_losses.append(g_loss.item())
11
12    return loss, r_losses, g_losses

```

生成器的生成对抗损失定义为:

$$L_{Adv}(G; D) = \mathbb{E}_s[(D(G(s)) - 1)^2] \quad (6.16)$$

其中, x 表示真实音频, s 表示梅尔频谱。

对应的生成器代码实现:

```

1 def generator_loss(disc_outputs):
2     loss = 0
3     gen_losses = []
4     for dg in disc_outputs:
5         l = torch.mean((dg-1)**2)
6         gen_losses.append(l)
7         loss += l
8
9    return loss, gen_losses

```

更详尽关于 GAN 的理论参见: [GAN 万字长文综述](#)

6.5.10 梅尔频谱损失

借鉴 Parallel WaveGAN 等前人工作, 向 GAN 中引入重建损失和梅尔频谱损失可以提高模型训练初期的稳定性、生成器的训练效率和合成语音的自然度。具体来说, 梅尔频谱损失就是计算合成和真实语音对应频谱之间的 L1 距离:

$$L_{Mel}(G) = E_{(x,s)}[||\phi(x) - \phi(G(s))||_1] \quad (6.17)$$

其中, ϕ 表示将语音转换为梅尔频谱的映射函数。

对应的损失函数实现:

```

1 loss_mel = F.l1_loss(y_mel, y_g_hat_mel)

```

上述代码中, y_mel 表示真实语音对应的梅尔频谱, $y_g_hat_mel$ 表示梅尔频谱合成语音之后, 合成语音又转换回来得到的梅尔频谱。

6.5.11 特征匹配损失

特征匹配损失是用来度量神经网络从真实和合成语音中提取的特征差异，具体来说，就是计算真实和合成语音经过特征提取层之后输出之间的 L1 距离：

$$L_{FM}(G; D) = \mathbb{E}_{x,s} \left[\sum_{i=1}^T \frac{1}{N_i} \|D^i(x) - D^i(G(s))\|_1 \right] \quad (6.18)$$

其中， T 表示判别器中特征提取层的层数， D^i 表示提取的特征， N_i 表示第 i 层判别器网络提取的特征数量。对应的代码为：

```

1 def feature_loss(fmap_r, fmap_g):
2     loss = 0
3     for dr, dg in zip(fmap_r, fmap_g):
4         for rl, gl in zip(dr, dg):
5             loss += torch.mean(torch.abs(rl - gl))
6
7     return loss

```

6.5.12 整体损失

1. 生成器的整体损失为：

$$L_G = L_{Adv}(G; D) + \lambda_{fm} L_{FM}(G; D) + \lambda_{mel} L_{Mel}(G) \quad (6.19)$$

其中， λ_{fm} 和 λ_{mel} 分别为特征匹配和梅尔频谱损失的加权系数，实验中 $\lambda_{fm} = 2, \lambda_{mel} = 45$ 。

因为 HiFiGAN 的判别器是由多尺度判别器和多周期判别器组成，因此生成器的总体损失又可以写作：

$$L_G = \sum_{k=1}^K [L_{Adv}(G; D_k) + \lambda_{fm} L_{FM}(G; D_k)] + \lambda_{mel} L_{Mel}(G) \quad (6.20)$$

其中， K 为多尺度判别器和多周期判别器的个数， D_k 表示第 k 个 MPD 和 MSD 的子判别器。

对应的代码为：

```

1 # L1 Mel-Spectrogram Loss
2 loss_mel = F.l1_loss(y_mel, y_g_hat_mel) * 45
3
4 y_df_hat_r, y_df_hat_g, fmap_f_r, fmap_f_g = mpd(y, y_g_hat)
5 y_ds_hat_r, y_ds_hat_g, fmap_s_r, fmap_s_g = msd(y, y_g_hat)
6 loss_fm_f = feature_loss(fmap_f_r, fmap_f_g)
7 loss_fm_s = feature_loss(fmap_s_r, fmap_s_g)
8 loss_gen_f, losses_gen_f = generator_loss(y_df_hat_g)
9 loss_gen_s, losses_gen_s = generator_loss(y_ds_hat_g)
10 loss_gen_all = loss_gen_s + loss_gen_f + loss_fm_s + loss_fm_f + loss_mel

```

2. 判别器的整体损失为：

$$L_D = L_{Adv}(D; G) \quad (6.21)$$

类似于生成器，由于 HiFiGAN 拥有多个判别器，因此判别器的整体损失可以写作：

$$\mathbf{L}_D = \sum_{k=1}^K \mathbf{L}_{Adv}(D_k; G) \quad (6.22)$$

其中， K 为多尺度判别器和多周期判别器的个数， D_k 表示第 k 个 MPD 和 MSD 的子判别器。

对应的代码为：

```

1 # MPD
2 y_df_hat_r, y_df_hat_g, _, _ = mpd(y, y_g_hat.detach())
3 losses_disc_f, losses_disc_f_r, losses_disc_f_g = discriminator_loss(y_df_hat_r,
4   y_df_hat_g)
5
6 # MSD
7 y_ds_hat_r, y_ds_hat_g, _, _ = msd(y, y_g_hat.detach())
8 losses_disc_s, losses_disc_s_r, losses_disc_s_g = discriminator_loss(y_ds_hat_r,
9   y_ds_hat_g)
loss_disc_all = loss_disc_s + loss_disc_f

```

第7章 语音合成知识结构

语音合成知识结构如下。

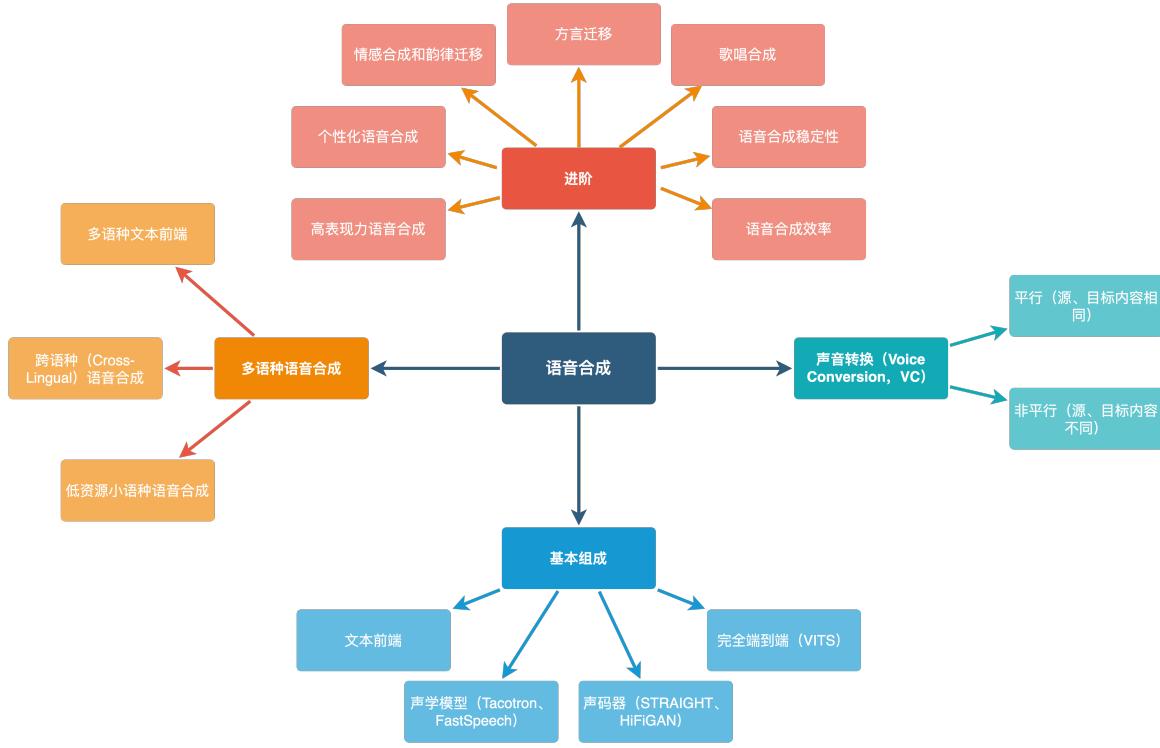


图 7.1：语音合成知识结构

7.1 基本组成

语音合成（Speech Synthesis）将文本转换为可听的声音信息，它赋予了像人一样说话的能力，是人机交互的重要接口。一般来说，语音合成的概念比文语转换（Text-to-Speech, TTS）的涵盖范围更广，语音合成包括 TTS、歌唱合成等领域，但大多数情况下可以混用。[awesome-tts-samples](#)提供了一些端到端语音合成模型的样例，可以简单感受下目前语音合成的发展。

人类可以通过一套发音器官合成功能，具体来说，肺相当于动力源，喉相当于调制器，声道相当于滤波器，口唇相当于扩音器。研究人员提出了以源-滤波器（source-filter）模型为代表的多种模型建模该过程，语音中存在清音和浊音，分别由声带周期性振动对应的周期声源和声带不振动时紊乱气流对应的非周期声源产生。

当代工业界主流语音合成系统包括文本前端和声学后端两个部分。文本前端将输入文本转换为层次化的语言学表征，主要包括文本规范化、韵律分析和文本转音素等模块。声学后端基于文本前端给出的层次化语言学表征（linguistics feature）来生成语音，主要技术路线包括单元挑选波形拼接、统计参数和端到端语音合成方法，当代主要采用端到端声学后端。端到端声学后端一般包括声学模型和声码器两部分，同时也出现了直接从音素映射为波形的完全端到端语音合成系统。声学模型负责将语言学特征转换为中间声学特征，比如梅尔频谱，直接决定合成语音的韵律；声码器将中间声学特征转换为语音波形，直接决定合成语音的音质。

语音合成与语音识别、机器翻译等问题类似，本质是序列到序列的建模问题，另一方面，语音合成是生成类问题，因此自回归生成、VAE、GAN、Flow、扩散模型等生成模型在语音合成上均有应用。

7.2 声音转换

狭义上说，将一个说话人（source speaker）的语音转换到另一个目标说话人（target speaker）的语音，这种语音处理技术称之为声音转换（Voice Conversion, VC）。声音转换包括平行和非平行两种，平行语音转换指的是源、目标语音的内容相同，相对应地，非平行语音转换只改变语音的音色，而对语音内容没有要求。声音转换可以借鉴图像中风格转换的成果，比如 StarGAN-VC 等模型。更有效的方法是利用语音识别模型提取说话人无关的中间表征，将该中间表征和说话人信息输入生成模型中，生成具有目标说话人音色的语音，可以借鉴 TTS 的研究成果，将 VITS 等作为高质量合成模型。在声音转换中，基频是一个重要特征。参见：[An Overview of Voice Conversion and its Challenges: From Statistical Modeling to Deep Learning](#)

7.3 多语种语音合成

多语种语音合成的难点主要有五点：

1. 音库制作和构建。
2. 文本前端的构建。需要制定适用于一个语种语音合成的音素体系，构建该语种的文本规范化规则等，特别地，比如俄语、波斯语、阿拉伯语等语种有性数格的变化，提高了文本前端的复杂性。不同语种间文本前端模块也会有所不同，比如中泰越日等语种需要添加分词模块。
3. 语种中特殊发音现象。西班牙语、俄语等语种的升降调对合成语音自然度影响显著，具体来说，在标点处发音会产生较为明显的上扬、下降、先升后降、先降后升和平调现象。因此文本前端最好给出该升降调信息，声学后端需要将该升降调信息作为重要特征，输入到模型的多个模块中，以协助模型产生准确自然的升降调语音。与此同时，由于升降调是一个语块整体的表现，而非仅仅一个字母或者单词的发音变化，比如西班牙语可以将升降调信息标注到整个 L3 块上，而俄语更适合于仅仅标注到中心词上。
4. 跨语种语音合成。当代语种混杂的语言现象愈发明显，比如中文中夹杂英语单词，这就需要实现语种切换（code-switch）和跨语种（cross-lingual）语音合成。如果语料中存在单说话人跨语种语料，一般来说，直接训练就可以产生跨语种合成效果。实践中，如果跨语种语料较少，比如仅有 200 句跨语种语料，多个语种混训时共享语种间的音素能够获得更好的合成效果；如果跨语种语料较多，可以仅采用主要语种和跨语种语料进行训练，加入其它语种进行混训相反可能会产生较差的效果。如果没有跨语种语料，可以尝试数据增强方法伪造跨语种语料，比如对单语种语料进行拼接，构造跨语种语料；利用跨语种语音合成大模型伪造训练语料，训练跨语种语音合成模型。
5. 低资源语音合成。语料数量的增加可显著提升合成语音的效果¹，但世界上的语种数量较多，大部分语种并不存在大量高质量语音合成语料。主要的解决方案有跨语种迁移、跨说话人迁移、语音识别和合成对偶学习，以及无监督训练。参见[论文速览：低资源语音合成](#)。

7.4 进阶

语音合成存在比较多的扩展应用，比如：

1. 高表现力语音合成。
2. 个性化语音合成。
3. 情感合成和韵律迁移。
4. 方言迁移。
5. 歌唱合成。
6. 有声人脸合成（talking face synthesis）。

¹Latorre J, Bailleul C, Morrill T, et al. Combining Speakers of Multiple Languages to Improve Quality of Neural Voices[J]. arXiv preprint arXiv:2108.07737, 2021.

7. 语音合成的稳定性。

8. 语音合成的效率优化。

本部分可参考相关论文和[A Survey on Neural Speech Synthesis](#)了解具体技术方案。

7.4.1 高表现力语音合成

在交互、小说阅读等应用场景中，对合成语音的表现力要求较高，而表现力由内容、说话人音色、韵律、情感和风格等多个因素决定，因此高表现力语音合成实际涵盖了内容、音色、韵律、情感和风格的建模、分离和控制。

语音中包含的信息可以分为如下四类：

1. 字符或音素，也就是语音的内容。可以通过预训练词嵌入增强合成语音的表现力和质量，或者加入一些额外的信息，比如升降调信息、采用 fulllab 能够增强模型表现力和稳定性。fulllab 及传统语音合成采用的文本、声学特征参见：[jsut lab](#)、[HTS Data README](#)。
2. 说话人或音色。多说话人语音合成模型可以通过说话人嵌入向量或单独的说话人编码器（speaker encoder）对音色特征进行建模。
3. 韵律、风格和情感。这些特征表示“如何说出文本”，表征语音中的语调、重音和说话节奏，韵律、风格和情感是高表现力语音合成的建模重点。
4. 录音设备和环境噪音。这些倒是与语音内容、韵律无关，但会显著影响语音质量，因此可以尝试对语音中的噪音等进行控制和分离。对训练语料本身可以提前进行去噪处理，在模型中可以标识带噪语料，以便在合成语音中去除噪音部分。

利用模型建模这些信息的方法很多，有语种、说话人、风格嵌入向量以及音高、时长、能量编码器等显式建模方法，也有 reference encoder、VAE、GAN/Flow/Diffusion、文本预训练等隐式建模方法。

7.4.2 个性化语音合成

个性化语音合成是语音合成中较为热门的方向，主要应用于定制化场景中，利用任意用户的音色合成语音，又称为语音自适应（Voice Adaptation）、语音克隆（Voice Cloning）、定制化语音（Custom Voice）等，通常要求利用 1 分钟以内甚至几秒钟的语料，就可以实现合成目标说话人的任意语音。目前个性化语音合成的难点如下：

1. 相似度。仅利用少量语料，很难覆盖完全目标说话人一个语种的所有音素发音，因此要求模型需要拥有一定的泛化能力。实践中，利用目标语料微调整个模型或者声学模型的解码器往往能够大幅提升合成语音的相似度，也有一些工作尝试不进行微调，但相似度一般较低。
2. 稳定性。个性化语音合成在推断时，目标音色一般不在训练集中，因此会让原本脆弱的端到端后端模型合成失败，如果采用微调方案，则尤甚。因此一些带有先验的注意力机制，或者直接利用时长模型替代注意力机制的模型，在这种场景下具有一定优势。
3. 微调效率。如上所述，整体或解码器微调往往能够提升相似度，但模型微调会带来一定的模型训练时间。

7.4.3 方言迁移

方言迁移一般是指跨方言迁移目标说话人的音色，比如利用普通话发音人说上海话、四川话或粤语，与说话人迁移有些类似，但任务难度比跨语种说话人迁移要简单一些。可以采用“多方言编码器 + 说话人梯度反转 + 共享解码器 + VAE+ 多方言混训”的方案解决，也可以尝试类似声音转换的方案：利用语音识别声学模型提取说话人无关的发音内容，然后利用语音合成模型输入该说话人无关的发音内容特征，并加入目标音色，从而实现方言迁移。

7.4.4 歌唱合成

音乐是一个复杂的学科，而音乐合成几乎是另一个领域。

旋律、和声、节奏是音乐的三要素。旋律是音乐的主线，它决定了音乐的调性、曲式和进程，是音乐的灵魂。但如果只有主旋律的话，音乐就显得单调。和声用来烘托主旋律，丰富乐曲的“厚度”，节奏强化风格。音乐的创作过程包括：作词作曲（Lyric/Melody），伴奏/谱曲，歌唱合成/乐音合成，混音四个基本步骤，而歌唱合成仅仅探讨第三步，利用已有的乐谱合成人声的声音。

1. 歌唱合成的任务定义：

- (a). 输入：歌词、音高（基频）、节拍（时长）
- (b). 输出：歌唱声音

2. 和 TTS 相比：

- (a). 增加了额外的输入：音高、节拍（时长），输出更广范围的声调，更多变化的音素
- (b). 更加侧重于感情和表达，而非语音本身的内容

3. 困难点：

- (a). 数据

- I. 数据量少
- II. 质量要求高（歌唱与指定音高、时长的符合程度要求高），标注困难
- III. 难以全面覆盖所有的音高，歌手的声音范围有限，无法覆盖所有的音高

- (b). 容错率低

- I. 音调准确率要求高，简谱基本决定了基频，先验比较强，“跑调”容易听出来
- II. 卡拍子

- (c). 歌唱额外的特点：比如颤音，转调等

歌唱合成实际和语音合成十分类似，只是文本输入信息更为丰富，因此可以引入单独的模块建模音高和时长，实际上语音合成中 FastSpeech 2 这些显式建模语音中音高、时长特征的声学模型，可以直接拿来作为歌唱合成的基线，当然也出现了更好的歌唱合成技术方案，参见歌唱合成：数据集的构建，以 OpenPop 为例、歌唱合成：基于 VITS 的歌唱合成声学模型 ViSinger、歌唱合成：高品质歌唱合成声码器 SingGAN、muzic 等。

7.4.5 语音合成的稳定性

端到端语音合成自然度优势明显，但容易出现合成无法停止、调字、重复等合成缺陷，这在生产上是致命的。可以尝试从如下三个方面入手：

1. 训练数据。训练语料中的音频尽量降低背景噪音；控制前后静音段和句中静音，每个句子的前后静音段尽可能一致，句中 L1/L3 的停顿时长尽可能裁剪统一；确保文本标注和实际音频一一对应。
2. 模型。合成语音的正确性是语音合成的基本要求，因此语音合成的稳定性有较多的研究工作。主要思路有：
 - (a). 增强注意力机制。由于语音合成任务具有单调性的特点，也就是输入音素一定是从左到右合成，因此可以利用该特点加入先验知识进行合成。
 - (b). 利用时长模型取代注意力机制。
 - (c). 增强自回归过程。比如减少训练、推断时的不匹配，知识蒸馏，教师强制等方法。
 - (d). 采用非自回归合成方法。输入序列进来之后一把出，防止自回归生成带来的累积误差。
3. 后处理。比如统计音库中平均音素时长，合成时统计输入音素个数，计算该句子“平均时长”，合成语音的时长超过“平均时长”的 30% 则认为合成没有正常停止，裁剪该合成语音。

7.4.6 语音合成的效率优化

语音合成在投入使用时，除了纯工程的优化之外，模型侧也可以进行效率优化。主要的思路有：

1. 并行生成。该方法对于利用 GPU 推断的云端模型效果较好，但是对于 CPU 推断的端侧模型效果一般。
2. 轻量化模型。删除模型中不必要的模块，缩减网络节点数，进行模型裁剪、量化和剪枝。
3. 引入领域知识。利用沉淀已久的信号处理方法加速语音合成过程，比如线性预测、多子带建模、多帧并行预测、小尺度预测（subscale prediction）。