

基于 MCU 硬件的音乐节奏提取系统

杨鹏¹, 唐莉萍², 臧珠萍¹, 曾培峰¹

(1. 东华大学 计算机科学与技术学院, 上海 201620; 2. 东华大学 信息学院, 上海 201620)

摘要:提出了一种基于微控制器(MCU)的实时音乐节奏提取系统。该系统能够准确地提取节奏感较强的乐曲节奏,并按照设定的增益要求控制音频放大系统的增益。经处理得到的输出音乐节奏和音频能量作为控制信号调节音乐喷泉的花型变换节奏以及水柱高度。

关键词:节奏提取; V/F 转换; 测频; 半波整流; 微处理器

中图分类号: TP311

文献标识码: A

Realization of MCU-based music rhythm extraction system

YANG Peng¹, TANG Li Ping², ZANG Zhu Ping¹, ZENG Pei Feng¹

(1. College of Computer Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. College of Information Science, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In this paper, an MCU-based real-time music rhythm extraction system is proposed. The proposed system extracts rhythms of music with clear beat correctly. The rhythms output of the proposed system can be used as control signal for music fountain and lightening for synchronization.

Key words: rhythm extraction; V/F conversion; frequency measurement; half-wave rectification; MCU

近年来,随着计算机技术的发展,作为一种最贴近于人类思维的音乐领域,受到越来越多的计算机研究者的关注。世界各地的不少科研院所和大学成立了专门的研究计算机音乐的机构,研究方向包括节奏提取、音调检索、音色识别、风格划分和情感提取等。每一个研究方向都有其独特的应用,节奏提取技术用于音乐驱动运动的实践;音调检索和音色识别用于基于内容的对媒体数据库的建立和检索;风格划分和情感提取对用计算机创作音乐曲目算法具有指导意义。

节奏在通常意义上指音乐中交替出现的、有规律的强弱现象。基于节奏在音乐表达中的重要地位和多媒体应用中的广泛性,节奏提取成为计算机音乐分析中一个重要的热点。Jarno Seppanen^[1]根据系统处理对象的不同,将节奏提取系统分为以表征信号为输入(例如 MIDI)的系统^[2-3]和以声学信号(例如 WAV)为输入的系统^[5-11]。在第一类系统中,使用 MIDI 信号作为输入, MIDI 是音乐信号在电子乐器之间传输的标准,包括硬件接口标准以及电子音乐信号在不同硬件之间的异步串行传输协议。由于 MIDI 格式的音乐文件记录了音乐的全部乐谱和演奏的全过程,很多音乐的基本特征可以直接提取出来,所以这类系统对于单音和多音的乐曲检测精度都很

《微型机与应用》2010年第4期

高。第二类系统使用真实的声学信号作为输入,因为 WAVE 格式是对实时播放的音乐信号进行采样和数字编码,因此记录了实际的演奏效果,接近于人类真实听觉过程。这类系统需要借助较多的电子设备对信号进行频谱分析和能量分析,再综合音乐知识推断音乐的节奏点或节奏值。

目前,节奏提取主要有如下几种方法: Dixon 在检测到信号激励的基础上,进行聚类分析和多代理检测^[6-7]; Masataka Goto 针对复杂的带鼓音乐,进行多路径并行跟踪^[8-9]; Eric D. Scheirer 对音乐信号分频处理,通过滤波器组提取每个频带包络能量并相加,结果中的最大值作为节拍输出^[10]; William A. Sethares 利用 4 种低音特征,通过贝叶斯决策算法和梯度战略算法^[11]分别进行节奏提取。

以上算法都基于个人计算机或大型计算机,这些机器具有丰富的硬件资源,具备处理大量数据复杂运算的能力,检测精度较高。但是,在小型的音乐控制系统中,用户希望通过 MCU 系统实现音乐节奏提取和能量输出,以较低的成本获取较理想的控制效果。大规模,高成本的计算机控制系统就无法满足这样的需求。

根据 MCU 系统实现音乐节奏提取和能量输出的需求,本文构建了一个基于 MCU 硬件的音乐节奏提取系

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 17

硬件纵横

Hardware Technique

统,给出音乐信号的硬件提取电路以及信号预处理的策略,提出基于MCU硬件的音乐节奏提取、干扰消除、输出能量控制算法。将本文的算法应用于不同节奏音乐信号的提取实验,实验结果表明系统能实现节奏点的输出和信号的输入同步。所设计的系统需要的硬件资源少、模块精简、具有实用性。

1 系统总体设计

本文研究的节奏提取控制系统具有音乐信号采集、输出音频能量控制和音乐节奏信号输出功能。通过对音乐信号处理,根据音频能量信号的强弱、音乐节奏的快慢输出调整命令。系统总体结构如图1所示,微控制器(MCU)作为核心部分对整个系统进行控制并执行相关算法。系统由信号放大、模数转换、音频能量控制、节奏提取算法、参数控制设定以及通信模块组成。

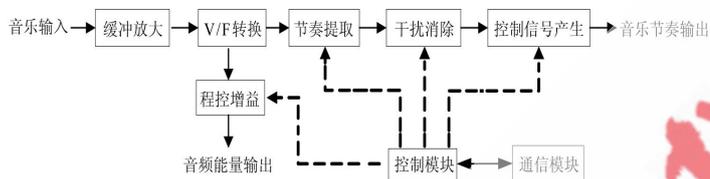


图1 系统总体结构框图

系统输入的音乐信号通过缓冲放大后进行电压-频率(V/F)转换,得到对应的数字信号。V/F转换的结果经过程控增益处理后,作为音频能量输出;同时,MCU对该信号进行节奏提取,得到音乐节奏输出。

不同风格的音乐,音频能量所处的水平不同,为了满足外界控制,需要人为地调整能量输出到适中的程度。通过对程控增益模块参数的修改,能够对能量输出进行有效的控制。节奏提取模块对经过预处理的音乐信号算法进行分析,实时地确定音乐节奏点的位置,并把节奏送到干扰消除模块,干扰消除模块根据节奏变化的快慢消除某些不合理的节奏点。

为了满足不同的应用要求,需要对执行机构的动作参数(诸如音频能量的大小、音乐节奏的间隔)进行个性化调整。用户通过控制模块进行参数设定以调整输出控制信号,实现在线参数修改。

通过RS485通信模块可以实现多计算机系统,构成音乐控制监控系统,实现远程实时监控。此外,通过该模块能够直接对控制系统进行软件升级;进一步提高了系统的可扩展性,使其既可以作为独立的系统使用,又可以通过总线并入集散控制系统,成为集散控制系统中的子控制系统。

2 系统硬件设计

硬件系统主要是为软件算法的实现提供硬件平台和实现信号的预处理,由缓冲放大模块、数模转换模块和MCU控制模块组成。

2.1 缓冲放大模块

缓冲放大电路采用二级阻容耦合方式:第一级输入

缓冲用射极跟随电路,利用电路的高输入阻抗能有效提取信号;低输出电阻,能很好地匹配第二级的输入电阻。第二级采用共射极放大电路,通过合理调整其工作状态,综合实现信号放大、去噪以及整流功能。

本系统设计的缓冲放大电路通过对第一级射极跟随器的静态工作点的设定,保证放大电路能够得到最大不失真输出信号;对第二级放大电路的静态工作点设定,使三极管工作在饱和状态。

本文利用放大电路中三极管不同工作区对信号放大作用不同的原理实现信号半波整流。输入、输出波形如图2所示。

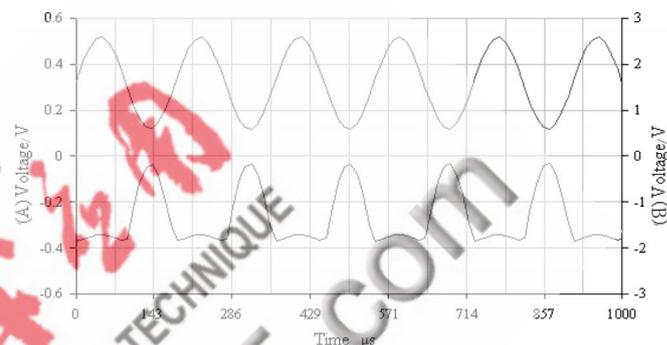


图2 输入、输出波形

在图2所示元件参数条件下,放大电路工作在深度负反馈状态下。当输入信号有效值为100mV时,经缓冲放大电路第二级三极管放大10倍,能够输出峰值约为1.4V的半波电压,经积分电路送后续V/F转换电路,进行模数转换。合理控制该三极管基极电压 U_{BQ} ,即设置硬件阈值 V_T ,能够有效地消除噪声干扰。

综上所述,该三极管在放大信号的同时,完成对信号的半波整流和消除噪声的干扰。电路采用最基本的放大电路完成对信号的综合处理,很好地控制了电路的规模。

2.2 模数转换模块选择策略

系统采用MCU对音乐信号进行节拍和能量提取,为方便微控制器处理信号和提取节奏,需要对经过缓冲放大的音频信号进行模数转换,将该模拟信号各个固定时段内平均能量用数字量表示。根据系统对信号的需求,本文的模数转换采用V/F转换电路。

在提取音乐节拍信号时,必须综合考虑音乐节拍的特征以及工频干扰的去除。由于音乐节拍在1s内出现的次数为1~2个节拍,对节拍信号的处理速度要求不高,因此系统把1s划为5个等时分点,分别对每200ms的时段求信号的平均能量,从5个采样点中找出极大值作为节奏点输出。这样不仅能有效提取信号的节拍,对于50Hz工频信号,其信号周期为20ms,由于采样时间200ms是工频信号周期的整数倍,因此在200ms的周期内工频信号的积分始终为零,不会对正常的测频产生干扰,实现了信号节拍的正常提取和消除工频

《微型机与应用》2010年第4期

干扰的功能。

V/F 转换模块输出频率的考虑, 兼顾了系统的稳定性。通常 V/F 转换器的输出频率比较高, 由于输出信号在跳边沿发生电平的突跳, 会对电源产生干扰和毛刺信号, 电源端的毛刺噪声会反馈到前级放大电路输入端。如果输出频率过高, 放大电路的耦合电容对于高频噪声相当于短路, 干扰信号被耦合到后级放大电路, 使输出信号上叠加了干扰信号成份, 影响了音频信号的正常提取。采用低频输出, 由于电容在低频呈现出很大的容抗, 阻断了干扰信号的后向传输, 可以有效克服电源的毛刺信号对音频分量的干扰。所以, 本系统设计时调整 V/F 模块外围电路参数, 将输出频率控制在 30 Hz 范围内。对于较低的信号频率, 可以采用测信号周期的方法间接求出信号频率。

3 软件算法

基于 MCU 硬件的软件算法, 主要功能是对经过硬件处理得到的音频信号进行音乐元素的识别和提取, 并把提取的结果作为控制信号输出。该软件算法包括信号测频、节奏提取、干扰消除和程控增益四部分。

3.1 信号频率测量

硬件电路对音频信号的 V/F 转换采用低频输出策略, 为了精确测量 V/F 的输出信号频率, 采用测量周期的方法间接转换为信号频率。利用 MCU 系统内部自带的时钟脉冲和高速计数器, 通过高速计数器对时钟脉冲的计数实现系统定时功能。本文采用累计的方法测量信号周期, 即记录 200 ms 内脉冲的个数以及第一个和最后一个脉冲的到来时间, 计算出该段时间内信号的平均周期。采用这种方法, 每次发生硬件中断, MCU 只要计数脉冲数, 每隔 200 ms 才处理一次周期计算, 减轻了 MCU 的负担。信号周期可通过式(1)计算。

$$\bar{T} = k \times \frac{C_T - P_T}{N - 1} \quad (1)$$

其中, k 为时间系数; P_T 和 C_T 分别为第一个脉冲和最后一个脉冲到来时计数器的计数值; N 为 200 ms 内脉冲的个数。测周期算法流程如下:

- (1) 脉冲个数初始化, 令 $N=0$;
- (2) 记录第一个脉冲到来时计数器的计数值, 记为 P_T , 同时令 $N=1$;
- (3) 记录下一个脉冲到来时计数器的计数值, 记为 C_T , 同时令 $N=N+1$;
- (4) 计算时间差值 $k \times (C_T - P_T)$, 若结果 < 200 ms 则返回步骤(3), 直到满足 $k \times (C_T - P_T) \geq 200$ ms, 停止计数, 通过式(1)计算周期。

测量得到的周期经转换得到对应的信号频率。测频算法性能如图 3 所示, 用相对误差表示。相对误差计算公式为:

$$\Delta T = \left| \frac{1}{f} - T \right| \quad (2)$$

《微型机与应用》2010 年第 4 期

其中, f 为理论频率值, T 为实验测得周期。

由图可知, 该测频算法相对误差最大为 2%, 即 1 ms, 对于测量范围在 12~30 Hz 的低频信号, 误差可以忽略。

3.2 节奏提取

通常音乐信号的节奏点时刻即为出现能量极大值的时刻。基于上述特点, 本文节奏提取算法原理为: 在一段时间内, 比较出采样点频率的极大值, 作为节奏的可能点, 然后通过可能对可能节奏点之间时间间隔的分析, 去除干扰节奏点。根据音乐节奏一秒钟左右出现一个节奏点的特点, 将 1 s 内检测出的一个极大值作为节奏点输出。

本文提出两种节奏提取方法: 前二后一比较法和前

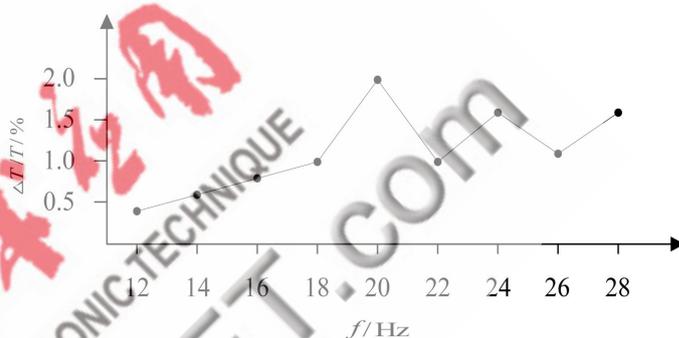


图 3 测频性能

三法。前二后一比较法是将某一时刻采样的频率值和它前面的 2 个采样点及后面 1 个采样点的频率值相比较, 得到的极大值点作为节奏点。这种算法提取的节奏有大于 200 ms 的输出延时, 音乐节奏的实时性较差。节奏感强烈的音乐, 节奏点到来的时刻, 能量幅度变化剧烈, 能量波形曲线近乎呈垂直上升。基于这种特征, 提出另一种算法: 前三法, 即在某一时刻, 比较它前面 3 个采样点的频率值, 如果不小于前 3 个采样点的频率值就认为是节奏点。否则, 推迟到下一时刻再进行比较。由于采样点值是 200 ms 内信号的平均频率, 利用前三法从采样点得到的极大值点与信号实际的频率最大值的误差最大不超过 200 ms, 延时较小, 提高了实时性。

在音乐节奏缓慢的时段, 前三法可能在 1 s 内提取出多于 2 个连续的节奏点, 其中一个为节奏点, 其他为干扰点。消除干扰点原理是: 若某个抽样点满足前三法, 确认为节奏点, 其后设置 800 ms 时间, 停止执行节奏提取算法, 保证 1 s 内至多输出一个节奏点。

根据奈奎斯特采样定理, 为有效实现音乐节奏提取, 当节奏频率在 1~2 Hz 时, 采样频率最少为 2~4 Hz, 本算法设定采样频率为 5 Hz, 满足奈奎斯特采样定理。当节奏频率变动较大时, 本算法提取误差较大, 可以调整采样周期以适应采样要求。

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 19

4 实验结果分析

用本文提出的两种提取算法对快三、中三和慢三三种音乐进行节奏提取测试。实验结果如图4所示。

对实验结果进行分析,可以发现:

(1)对比图4中能量包络和实际节奏点可以看出,节奏点时刻出现信号能量极大值的突变,这是本文节奏提取算法的理论依据;

(2)在节奏提取的频率采样阶段,由于采样频率低,1 s内5个采样点,实际节奏点已经不能很好匹配到5个采样点其中的一个,误差在100 ms之内,记为误差A。在此基础上进行节奏提取,采样误差将进入提取结果中;

(3)理论上前二后一法得到的极大值更准确,但从三种音乐的(e)图看到,由于需要知道下一个采样点的值,比较出的极大值点要在下一个采样点时刻才能被提取,输出延时200 ms,记为误差B。

(4)慢三音乐中出现连续的2个极大值,后一个作为干扰需要消除,如图中虚线表示。综合考虑到误差A和误差B的影响,本文采样前三法作为节奏提取算法。

本文提出的音乐节奏提取方案,以音响系统的LINE IN信号作为输入,经过缓冲放大和模数转换进入微处理器,输出的音频能量和音乐节奏可以作为外设的控制信号。为有效控制系统规模,缓冲放大电路的设计不仅实现了信号放大,同时实现了信号的平均能量处理,消除了噪声的干扰;模数转换使用接口较少、易控制的V/F模块;V/F低频输出策略有效维护了系统的稳定性。从奈奎斯特采样定理和消除工频干扰综合考虑,系统采用200ms的测频周期。相对计算机节奏提取系统,本系统更适用于小型音乐控制系统,具有灵活,低成本的优势。例如在音乐喷泉系统,可以通过节奏输出接口和音量输出接口实时控制喷泉的花形高度变化。

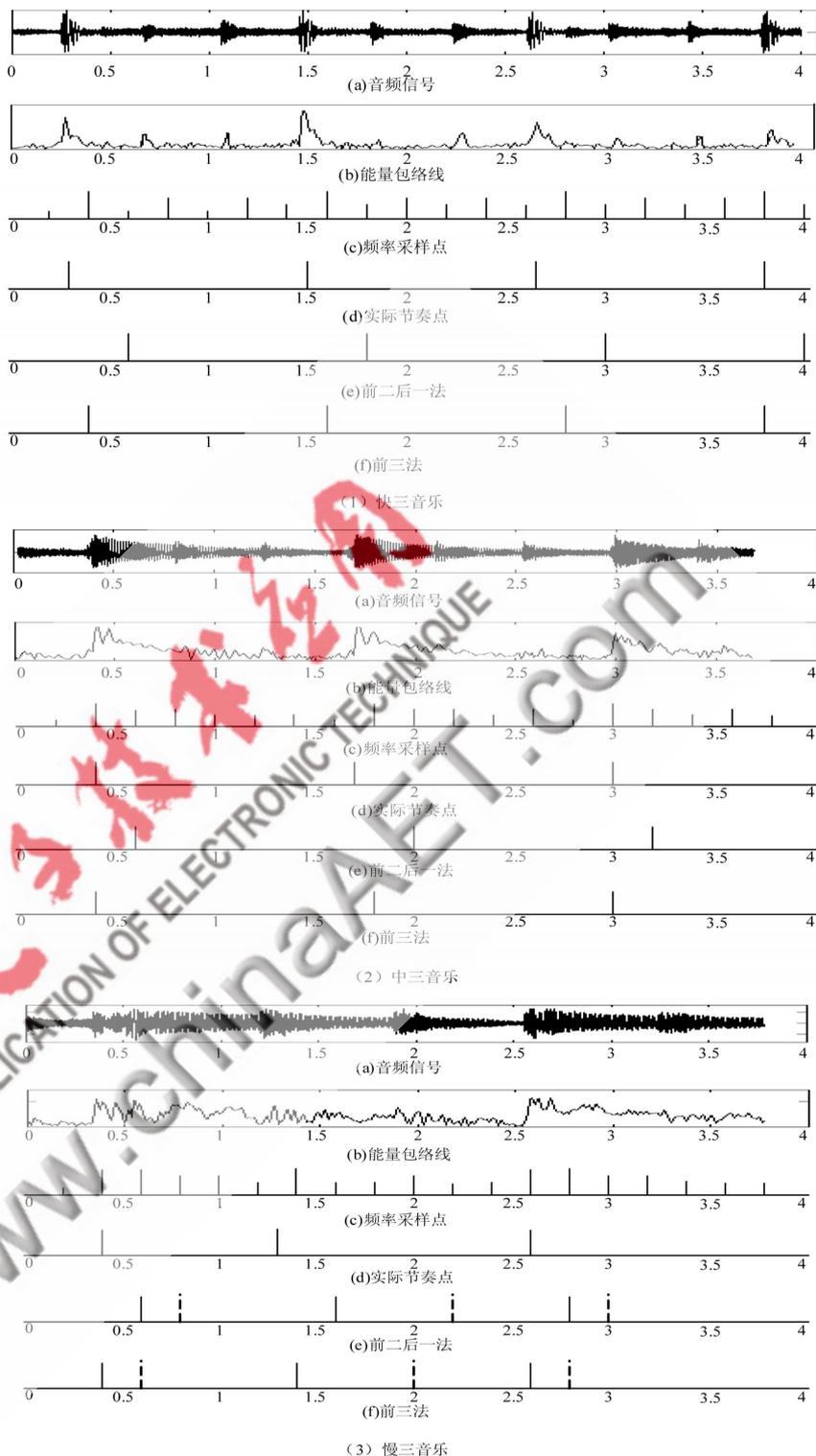


图4 两种节奏提取算法实验结果比较

参考文献

- [1] SEPPANEN J. Computational Models of musical meter recognition [D]. Finland: Tampere University of Technology, 2001.
- [2] BROWN J C. Determination of the meter of musical scores by

(下转第24页)

《微型机与应用》2010年第4期

- autocorrelation [J]. Acoustical Society of America, 1993, 94(4): 1953-1957.
- [3] MEUDIC B. A causal algorithm for beat-tracking [C]. Proceedings of the 2nd Conference on Understanding and Creating Music, Italy, 2002.
- [4] CEMIL A T, KAPPEN B. Monte carlo methods for tempo tracking and rhythm quantization[J]. Artificial Intelligence Research, 2003, 18(1):45-81.
- [5] DIXON S. Beat tracking with musical knowledge[C]. Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence. 2000:626-630.
- [6] DIXON S. A beat tracking system for audio signals [C]. Proceedings of the Conference on Mathematical and Computational Methods in Music. 1999:101-110.
- [7] DIXON S. MIREX 2006 audio beat tracking evaluation. beat-Root[C]. Proceedings of the 2nd Music Information Retrieval Evaluation eXchange. 2006.
- [8] GOTO M, MURAOKA Y. A beat tracking system for acoustic signals of music [C]. Proceedings of the Second ACM International Conference on Multimedia, 1994:365-372.
- [9] GOTO M. An audio-based real-time beat tracking system for music with or without drum-sounds [J]. Journal of New Music Research, 2001, 30(2):159-171.
- [10] ScHEIRER E D. Tempo and beat analysis of acoustic musical signals [J]. Acoustical Society of America, 1998, 103 (1):588-601.
- [11] SETHARES W A, MORRIS R D, SETHARES J C. Beat tracking of musical performances using low-level audio features[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2005, 13 (2):275-285.

(收稿日期:2009-10-21)

作者简介

杨鹏,男,1982年生,硕士,主要研究方向:基本 MCU 硬件的音乐情感分析;

唐莉萍,女,1957年生,副教授、硕导,主要研究方向:图形与图像处理、模式识别、嵌入式系统;

臧珠萍,女,1957年生,主要研究方向:模式识别,数字信号处理。

《微型机与应用》2010年第4期