非标准时间源下医疗设备NTP统一同步方法

管升辉

（浙江大学医学院附属第一医院，杭州 311100）

摘　要：在封闭内网或外部标准授时源不可达时，医疗设备容易出现时间偏差累积和同步稳定性下降的问题。文章基于本地服务器、数据库和终端实时时钟（Real-Time Clock，RTC）等时间信息，通过时间源筛选、加权融合、滑动平均滤波和偏差补偿形成统一时间基准，并利用内网网络时间协议（Network Time Protocol，NTP）服务完成设备校时。实验结果表明，多源融合与补偿机制可将平均同步误差由1.8 ms降至0.4 ms，标准差由1.2 ms降至0.2 ms，收敛时间由120 s缩短至60 s，稳定阶段时间偏差保持在0.3~0.5 ms。该方法可提高非标准时间源条件下医疗设备的时间一致性与同步稳定性。

关键词：非标准时间源；NTP同步；时间融合；偏差补偿；医疗设备

中图分类号：TP393　　**文献标识码：**A

Unified NTP synchronization method for medical device under non-standard time source

GUAN Shenghui

（The First Affiliated Hospital，Zhejiang University School of Medicine，Hangzhou 311100，China）

Abstract：In closed intranets or when external standard time sources are inaccessible，medical devices are prone to accumulated time deviations and reduced synchronization stability. This Research uses time information from local servers，databases，and terminal Real-Time Clock（RTC），and establishes a unified time reference through time source screening，weighted fusion，moving average filtering，and offset compensation. Device time synchronization is then performed through an intranet Network Time Protocol（NTP）service. Experimental results show that the multi-source fusion and compensation mechanism reduces the average synchronization error from 1.8 ms to 0.4 ms，decreases the standard deviation from 1.2 ms to 0.2 ms，and shortens the convergence time from 120 s to 60 s，while maintaining the time deviation within 0.3 ms to 0.5 ms during the stable stage. The method improves the time consistency and synchronization stability of medical devices under non-standard time source conditions.

Key words：non-standard time source，NTP synchronization，time fusion，offset compensation，medical device

1　引言

医疗设备运行对时间一致性、事件可追溯性及跨系统协同具有较高要求，尤其在日志记录、流程调度、设备联动及数据追踪等场景中，统一稳定的时间基准是保障系统可靠运行的重要条件。然而，在内网隔离或外部授时源不可达的条件下，传统NTP同步方式难以维持较高的同步精度与稳定性。针对非标准时间源环境下的时间同步需求，本文基于本地服务器、数据库和终端RTC等时间信息，构建了多源时间采集与融合框架，并结合偏差补偿与滤波处理方法，实现了内网环境下的统一授时。通过系统设计与实验验证，分析不同同步策略对同步精度、稳定性及收敛性能的影响，旨在为医疗设备时间一致性保障提供技术参考。

2　标准NTP授时的局限性

在医疗专网、封闭局域网或物理隔离环境中，标准NTP通常依赖公网标准时间源或上级授时节点获取时间信息，其可达性和持续服务能力易受网络边界限制。当设备无法进行周期性校时后，本地时钟会随运行时间增加而逐渐产生偏移，从而影响多设备之间的时间一致性。尤其在长期离线运行或跨网段隔离部署场景下，本地晶振频率误差引起的时钟漂移会不断累积，导致设备间时间偏差扩大[1]。

同时，网络传输过程中的时延不确定性会影响NTP同步精度。交换延迟、排队抖动及报文丢失等因素会造成往返时延不对称，使时间偏移估计产生误差，降低同步结果的准确性。在安全方面，外部时间源若缺少有效

认证和完整性保护机制，可能受伪造授时、重放攻击等因素影响，从而降低日志记录和事件追踪的可信性。此外，单一上游时间源架构的容错能力有限，当上游节点异常或连接中断时，系统缺少稳定替代源，难以保障授时服务的连续性与可靠性[2]。因此，在缺少外部标准时间源的应用环境中，需要结合本地可获取时间信息构建替代时间基准，并通过时间融合与误差修正方法提高同步精度和稳定性。

3　非标准时间源下的NTP同步方法

3.1　非标准时间源特性分析

针对非标准时间源环境下的时间同步需求，选取本地服务器系统时间、数据库时间和具备RTC模块的终端设备时间作为可用时间源。其中，本地服务器时间用于提供基础时间参考，数据库时间通过业务系统定时获取，终端RTC时间用于提供设备侧时间信息。由于时间源获取方式和运行环境存在差异，3类时间源在同步精度和稳定性方面表现不同：服务器时间受系统负载影响较小，数据库时间受查询过程影响存在一定延迟，RTC时间则易因温度变化而出现时钟漂移问题。

为描述不同时间源相对于参考时间的偏差，引入如下模型：

$$\Delta T_i = T_i - T_r \tag{1}$$

其中，ΔT_i 表示第 i 个时间源相对于参考时间的偏差；T_i 为第 i 个时间源的当前时间值；T_r 为实验设定的参考时间（由初始人工校准获得）。通过周期采集各时间源时间信息，并与参考时间进行比较，可获得不同时间源对应的偏差序列[3]。

根据连续采样结果，对各时间源的偏差均值和波动范围进行统计分析。结果显示，服务器时间整体偏差较小且变化较平稳；数据库时间存在由查询延迟引起的轻微波动；RTC时间则表现出随运行时间增加而逐渐累积的漂移特征。上述差异为后续时间源筛选和权重分配提供了依据。

3.2　时间源筛选与加权融合

为减弱异常时间信息对同步结果的影响，在时间融合前依据时间源的可用性、偏差水平和波动情况进行筛选。对本地服务器时间、数据库时间和终端RTC时间进行周期采样后，去除瞬时偏差较大或响应异常的数据，仅保留连续性较好、稳定性较高的时间源参与融合计算[4]。

基于筛选结果，采用加权平均方法生成统一时间：

$$T_s = \sum_{i=1}^{n} w_i T_i \tag{2}$$

其中，T_s 表示融合后的同步时间；n 表示参与融合的时间源数量；w_i 表示第 i 个时间源的权重；T_i 表示第 i 个时间源的当前采样时间；$\sum$ 表示对参与融合的时间源进行累加运算。此外，权重根据各时间源的偏差均值、方差及短时稳定性综合确定：对于偏差较小、波动较弱的时间源赋予较高权重，对于受延迟扰动或漂移影响较大的时间源则降低权重。

本实验将服务器时间作为主要参考源，数据库时间作为辅助修正源，RTC时间用于增强时间连续性和容错能力。该融合方式能够降低单一时间源误差对同步结果的影响，为后续滤波处理提供稳定时间输入[5]。

3.3　偏差补偿与同步滤波

经过时间源筛选和加权融合后，统一时间结果仍会受网络传输时延、系统调度延迟以及终端时钟漂移等因素影响，因此需对融合结果进行进一步平滑处理，以减轻短时波动对同步精度的影响。结合周期采样特点，采用滑动平均滤波模型：

$$T_f(k) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} T_s(k-j) \tag{3}$$

其中，$T_f(k)$ 表示第 k 次输出的滤波后时间；m 表示滑动窗口内参与平均的采样点个数；$\sum$ 表示累加运算；j 表示窗口内第 j 个历史采样序号；$T_s(k-j)$ 表示第 $k-j$ 次采集得到的融合时间；k 表示当前采样序号。实验设置滑动窗口长度为5个采样点，对融合后的连续输出结果进行平滑处理。该方法能够削弱数据库查询延迟和RTC短时波动造成的局部偏移，使输出时间变化更加平稳。

基于上述处理方法，对滤波前后的时间偏差序列进行对比分析。图1展示了原始融合时间、未滤波结果及滤波后时间偏差的变化情况。

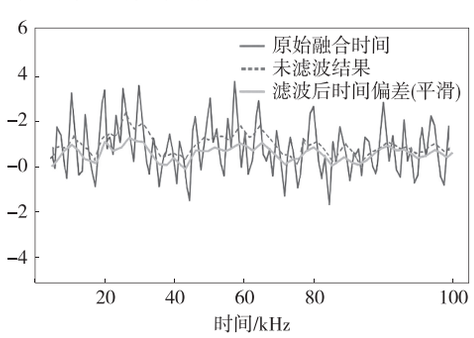

图1　滤波前后时间偏差变化

3.4　统一同步流程

结合时间源筛选、加权融合和滤波处理结果，构建了面向实验环境的统一时间同步流程（见图2）。该流程将本地服务器作为统一时间处理节点，周期性地获取数据库和终端RTC中的时间信息，经异常值剔除、权重计算及多源融合后生成统一时间，再通过内网NTP服务向各测试设备发布时间信息，从而实现多节点一致性校时[6-7]。

为描述设备校时过程中的时间修正关系，建立如下模型：

$$T_c = T_l + \delta \tag{4}$$

其中，T_c 表示校正后的设备时间；T_l 表示设备当前本地时

间;δ表示时间修正量,用于补偿设备本地时间与统一时间之间的偏差;“+”表示将修正量叠加至本地时间完成校时。

根据上述模型计算得到时间修正量,设备按照固定周期向服务器请求时间,并采用渐进式调整方式完成校时,以避免时间突变对业务程序、日志顺序及设备控制过程产生影响。该同步流程适用于现有内网环境,并为后续同步性能评估提供统一时间基准。

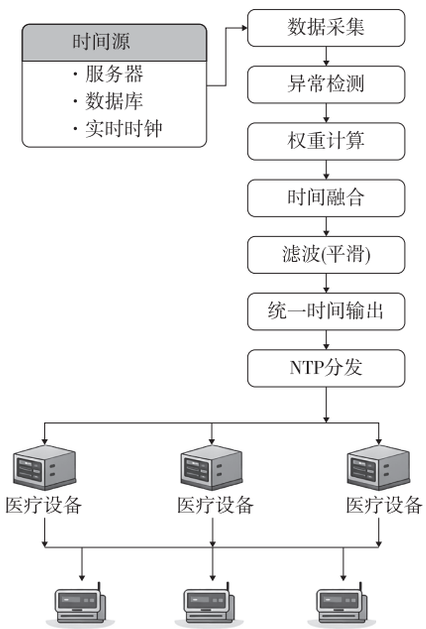

图2 基于多源融合的时间同步流程

4 实验设计与结果分析

4.1 实验环境与参数设置

为验证本文方法在非标准时间源条件下的同步性能,在封闭内网环境中搭建了时间同步实验系统。该系统由1台时间服务器和多台客户端设备组成,其中服务器基于Linux操作系统(Ubuntu 20.04)部署NTP服务(ntpd),客户端包括2台应用服务器和3台终端设备,并通过千兆交换机接入统一网络,网络时延控制在1 ms以内[8]。

选取本地服务器系统时间、数据库时间(MySQL查询“SELECT NOW()”)和终端RTC时间作为时间源,各时间源按照5 s周期进行采集,并在服务器端完成时间戳对齐、异常值剔除和融合处理。其中,异常值剔除阈值设置为±5 ms,多源融合权重分别设置为0.5,0.3和0.2,融合结果采用窗口长度为5的滑动平均滤波进行平滑处理。统一时间通过NTP服务向客户端发布,客户端同步周期设置为30 s,并采用slew方式完成渐进式时间调整。实验过程中持续记录各节点时间偏差数据,并根据不同同步策略计算平均误差、最大偏差、标准差及收敛时间等指标,用于评价同步性能。

4.2 同步性能对比

为分析不同同步策略对时间同步性能的影响,设置单一服务器时间、“服务器+数据库”、多源融合(未滤波)、多源融合(滤波后)以及“多源融合+补偿机制”5种同步方式开展对比实验。每组实验持续10 min,共采集120组有效数据,选取系统进入稳定阶段后的数据进行统计分析[9]。采用平均误差、最大偏差、标准差和收敛时间4个指标对不同策略的同步性能进行评价,统计结果如表1所列。

表1 不同同步策略下性能指标统计

同步策略	平均误差/ms	最大偏差/ms	标准差/ms	收敛时间/s
单一服务器时间	1.8	4.6	1.2	120
服务器+数据库	1.3	3.9	0.9	95
多源融合(未滤波)	0.9	3.2	0.7	80
多源融合(滤波后)	0.5	2.1	0.3	65
多源融合+补偿机制	0.4	1.8	0.2	60

由表1可知,不同同步策略在同步精度和稳定性方面存在明显差异。其中,单一服务器时间同步方式的平均误差为1.8 ms,标准差为1.2 ms,说明单一时间源存在较明显波动;引入数据库时间后,平均误差降低至1.3 ms,收敛时间缩短至95 s;采用多源融合后,平均误差进一步降低至0.9 ms;在此基础上结合滤波与偏差补偿机制,平均误差降低至0.4 ms,标准差降至0.2 ms,最大偏差控制在1.8 ms以内,收敛时间缩短至60 s。

4.3 稳定阶段结果分析

为分析不同同步策略在稳定运行阶段的时间偏差变化特征,对系统进入稳定状态后的连续采样数据进行统计[10]。实验分别从5种同步策略中选取10组连续采样点,对短时间尺度下的偏差变化情况进行比较,结果如表2所列。

表2 各同步策略稳定阶段时间偏差采样数据(ms)

采样序号	单一服务器时间	服务器+数据库	多源融合(未滤波)	多源融合(滤波后)	多源融合+补偿机制
1	1.7	1.3	0.9	0.5	0.4
2	2.1	1.5	1.0	0.6	0.4
3	1.5	1.2	0.8	0.4	0.3
4	2.3	1.6	1.1	0.6	0.5
5	1.9	1.4	0.9	0.5	0.4
6	1.6	1.2	0.8	0.4	0.3
7	2.0	1.5	1.0	0.6	0.4
8	1.8	1.3	0.9	0.5	0.3
9	2.2	1.6	1.1	0.6	0.5
10	1.7	1.3	0.9	0.5	0.4

由表2可知,不同同步策略在稳定阶段表现出明显差

异。单一服务器时间策略的偏差范围为1.5~2.3 ms,波动较大;随着数据库时间、多源融合、滤波及补偿机制的逐步引入,时间偏差逐渐降低,最终稳定在0.3~0.5 ms范围内,表明融合与补偿方法能够有效改善同步一致性。

为进一步观察不同策略的偏差变化趋势,对稳定阶段采样数据进行可视化分析。由图3可知,单一服务器时间曲线波动较明显;引入多源融合、滤波和补偿机制后,曲线逐渐趋于平稳,验证了本文方法在降低时间偏差波动方面的有效性。

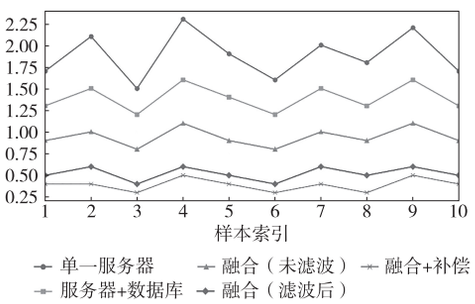

图3　时间偏差对比折线

5　结束语

围绕非标准时间源条件下医疗设备时间同步问题,本文构建了多源时间采集、加权融合、滤波平滑与偏差补偿相结合的统一同步方法,并在封闭内网实验环境中完成了系统实现与性能验证。实验结果表明,多源融合与平滑处理能够有效降低同步误差、抑制时间波动并提升系统稳定性,为复杂网络条件下的可靠授时提供了可行技术路径。后续可进一步结合动态权重自适应机制与更高精度本地时钟源,并引入时间源可信认证、异常检测与鲁棒控制策略,以持续提升系统在大规模医疗网络环境中的稳定性、安全性与工程适应能力。

参考文献:

[1] 刘会敏.电梯机电设备运行故障信号突变智能感知方法[J].计算机应用文摘,2026(3):48-50.
[2] 宋雅婷.基于云计算的医疗检验数据管理系统设计与实现[J].计算机应用文摘,2026(3):95-97.
[3] 邓彧.人工智能助力医疗设备管理[C]//2025中国医学装备大会论文集,2025:338-340.
[4] 余益新.医疗设备质量控制和计量管理[J].中国医疗器械信息,2025,31(13):160-162.
[5] 彭博彩.大型医疗设备CT经济效益分析——以某市三甲专科医院为例[J].河北企业,2025(2):119-122.
[6] 郭晓斌,孔德泳,古富强,等.大型医疗设备效益分析方法探讨[J].中国设备工程,2025(3):61-62.
[7] 赵瑞康,王素珍,苗其军,等.基于STM32的硬件协议NTP网络时钟系统实现[J].电子器件,2024,47(3):641-648.
[8] MILLS D L.Internet time synchronization:the Network Time Protocol[J].IEEE Transactions on Communications,1991,39(10):1482-1493.
[9] JOHANNESSEN S. Time synchronization in a local area network[J].IEEE Control Systems Magazine,2004,24(2):61-69.
[10] 赵瑞康.基于两种不同器件的NTP网络时钟系统实现研究[D].青岛:青岛大学,2024.

作者简介:

管升辉(1995—),本科,助理工程师,研究方向:终端管控、终端管理、硬件维护。

(上接第123页)

信息含量[J].计量经济学报,2024,4(6):1441-1466.
[3] 孔傲,李昊骅,李心丹,等.私有信息、个人投资者行为与股价异常波动[J].管理科学学报,2024,27(2):120-135.
[4] 于孝建,刘国鹏,刘建林,等.基于LSTM网络和文本情感分析的股票指数预测[J].中国管理科学,2024,32(8):25-35.
[5] 郭杨莉,马锋.基于马尔科夫和混频数据模型的黄金期货市场波动率预测研究[J].中国管理科学,2024,32(1):13-22.

作者简介:

蒋锐权(1969—),博士,副教授,研究方向:金融科技、人工智能。