

引用格式：张军, 袁媛, 陈明. 高精度时统系统中固有时延温度影响及其应对措施分析[J]. 时间频率学报, 2021, 44(3): 172-182.

高精度时统系统中固有时延温度影响 及其应对措施分析

张军¹, 袁媛², 陈明¹

(1. 北京一朴时频科技有限公司, 北京 100086 ;
2. 北京无线电计量测试研究所, 北京 100854)

摘要: 固有时延零值标校作为高精度时统系统建设和维护中一个关键技术环节, 其校准准确性和后续变化将直接影响时统系统精度。在长期高精度时统系统建设和维护实践中, 发现温度对固有时延变化影响达到百皮秒甚至纳秒量级。本文以典型原子钟组时间频率系统为例, 剖析时统系统中固有时延组成; 以信号线缆温度相位稳定性数据和设备温度相位稳定性相关实验测试为依据, 定量分析温度固有时延变化对时统系统造成的精度影响; 提出高精度时统系统固有时延温度系数指标和分解的总体应对措施建议。

关键词: 时统系统; 固有时延; 固有时延温度系数; 皮秒

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-03-0172-11

Analysis and countermeasures temperature effect of fixed time delay in high precision time system

ZHANG Jun¹, YUAN Yuan², CHEN Ming¹

(1. Beijing Yipu Time Frequency Technology Company Limited, Beijing 100086, China;
2. Beijing Institute of Radio Metrology, Beijing 100854, China)

Absrtact: As a key technology in the construction and maintenance of the high-precision time integration system, the calibration accuracy and subsequent changes of the fixed time delay zero scale will directly affect the accuracy of the time system. In the long-term practice of construction and maintenance of the high-precision time integration system, it is found that the influence of the temperature on the fixed time delay can reach an order of 100 picoseconds or even nanoseconds. Taking the typical atomic clock group and its distribution system as an example, this paper analyzes the composition of fixed time delay in the time system; quantitatively analyzes the influence of the temperature fixed time delay upon the accuracy of the time system based on the temperature phase stability data of various signal cables and the experimental test of the temperature phase stability of the equipment; puts forward the relevant suggestions for the index of the fixed time delay temperature coefficient, the index decomposition and the calculation method for the high-precision time system.

Key words: time system; fixed delay; fixed delay temperature coefficient; picosecond

0 引言

高质量时空系统作为国防和国民经济重要基础设施，其作用越来越凸显。当前，国内正在建设的各种高质量时空系统对时统系统的精度需求日益提高。北斗导航系统地面原子钟钟组系统频率稳定度要求达到 $n \times 10^{-15}/d^{[1-2]}$ ，原子钟钟组至每个天线机房时间传递要求达到百皮秒量级精度；国家重大科技基础设施“高精度地基授时系统”，利用通信光纤网建设覆盖主要城市和重要用户的超高精度光纤时频传递骨干网，时统传递精度要求达到百皮秒内^[3-4]。在这些高精度时统系统建设和维护过程中，固有时延零值标校是一个重要技术环节。工程建设中需对时统信号流经部件和测量部件进行固有时延零值标校，维护过程中需维持这些固有时延不变。目前工程建设和维护以假设固有时延具有长期不变特性，采用开通前一次性固有时延零值标校措施或更换部件时对应部件固有时延零值重新标校。但在高精度时统建设和维护中，发现系统中各种固有时延受温度的直接影响较大。在工程建设和维护过程中均发生过空调故障机房温度变化较大情况下系统内固有时延发生纳秒级变化，严重影响时统系统运行性能。为定量分析温度固有时延变化影响程度，本文深入研究了信号传输线缆的温度相位稳定性性能，对设备固有时延温度变化进行了高低温箱测试与建模；以此为基础，结合工程中实际温度环境、设备级联层数和线缆级联长度，给出温度对时统系统造成固有时延变化总量的定量分析；分析表明环境温度固有时延变化是决定时统系统高精度的重要因素，本文着眼于技术体制角度，给出温度固有时延变化在高质量时统系统中的系统指标要求、指标分解和相关建议。

1 时统系统固有时延分类

固有时延类型分为时统信号线缆传输时延、时统信号流经设备输入输出时延和时频测量设备测量固有时延三类。以图1中原子钟组时间频率系统为例，时统信号线缆传输时延为所有细线标记线缆；时统信号流经设备包括原子钟、脉冲信号分配器、频率信号分配器、信号选择器、微跃计、时码发生器、时频传递设备；时频测量设备包括时间间隔测量仪/卡板、频标比对仪/卡板和时频测量仪/卡板。

2 传输线缆固有时延温度变化模型

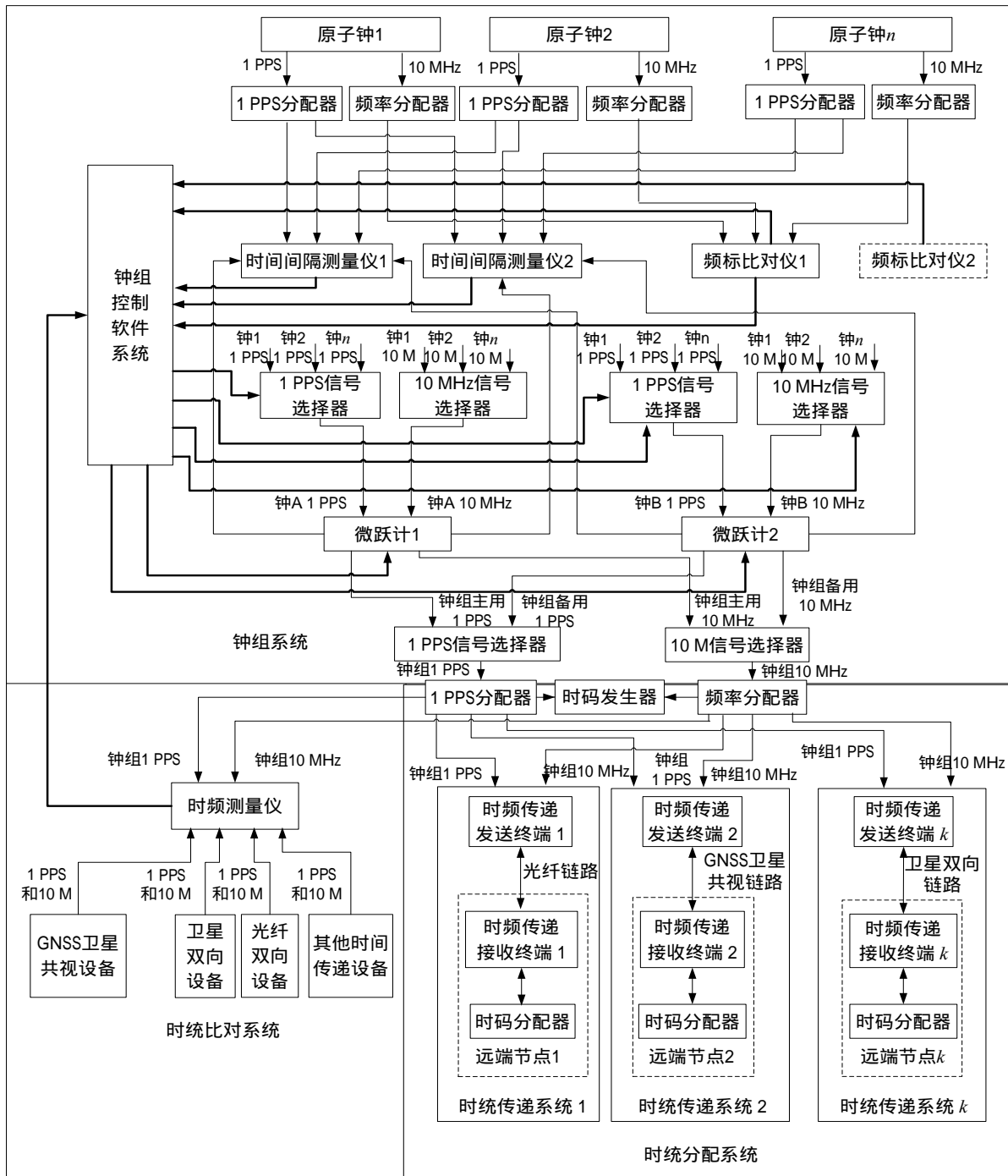
信号线缆作为简单两端口器件，传输时延有成熟理论模型。

同轴线缆

同轴线缆传输时延等于线缆电长度乘以信号传输速度，其中线缆电长度和信号传输速度均与温度密切相关，业界将同轴线缆传输时延与温度相关性定义为同轴线缆温度相位稳定性，以 PPM/ 为单位，表征温度每变化 1 线缆总时延相对变化 $10^{-6[5-7]}$ 。

普通非稳相同轴线缆采用聚四氟乙烯（poly tetra fluoroethylene，PTFE）介质，在图2的非稳相同轴线缆温度相位关系图上表现出一条很陡的斜率曲线，尤其在室温区间内更为陡峭。在 15 ~25 的室温区间内其相位温度斜率大概是 -130 PPM/ ，低于室温时的电缆长度温度系数是 -30 PPM/ 。在机房环境下，本文将普通非稳相线缆温度相位性能取定为 -100 PPM/ 。稳相同轴线缆一般采用 TF4（Teflon™ 氟聚合物）介质，见图3所示稳相同轴线缆温度相位关系，其温度相位稳定性可以做到绝对值小于 10 PPM/ ；国产莱尔微波公司 PL 系列高精密稳幅稳相测试电缆组件可实现 -4.3 PPM/ 温度相位稳定性。在机房环

境下，本文将高性能稳相线缆温度相位性能取定为 -5 PPM/。



注：图中空间小的地方以 10 M 代替 10 MHz

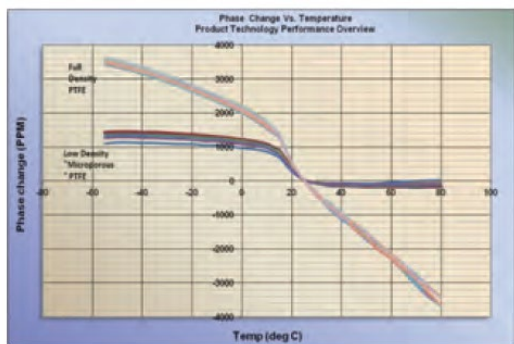
图 1 原子钟组时间频率系统概要组成框图

同轴线缆每米传输时延约为 4.0 ns，-100 PPM/ 温度相位稳定性普通同轴线缆对应固有时延变化为 $4.0 \text{ ns} \times (-100 \text{ PPM}) = -0.4 \text{ ps}/(\cdot \text{ m})$ ，-5 PPM/ 温度相位稳定性稳相同轴线缆对应着固有时延变化 $4.0 \text{ ns} \times (-5 \text{ PPM}) = -20 \text{ fs}/(\cdot \text{ m})$ 。

光缆

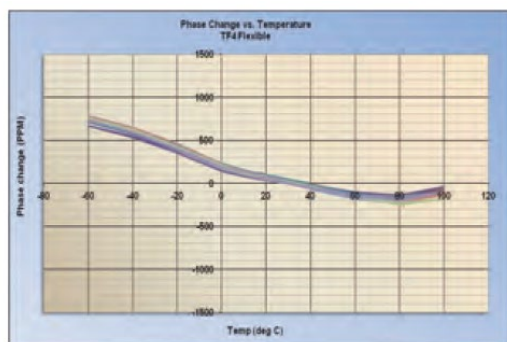
光缆作为时统信号传输媒介，依据相关理论模型和实测数据，其温度相位稳定性与稳相同轴线缆性能相当。1 550 nm 单模光纤传输时延温度系数为 $38 \text{ ps}/(\cdot \text{ km}) = 38 \text{ fs}/(\cdot \text{ m})$ [8-11]；普通单模光纤

温度系数 7.5 PPM/℃，光纤每米时延约为 4.5 ns，7.5 PPM/℃ 相位温度稳定性对应固有时延变化 $4.5 \text{ ns} \times 7.5 \text{ PPM} = 33.8 \text{ fs}/(\text{m})$ 。本文以单模光纤温度固有时延变化为 $35 \text{ fs}/(\text{m})$ 进行后续计算。



注：横轴单位 $^{\circ}\text{C}$ ，20 /格，纵轴单位 PPM，1 000 PPM/格

图 2 非稳相同轴线缆温度相位关系



注：横轴单位 $^{\circ}\text{C}$ ，20 /格，纵轴单位 PPM，5 000 PPM/格

图 3 稳相同轴线缆温度相位关系

3 设备固有时延温度变化测试和建模

设备固有时延由两部分组成：信号走线时延和电路时延。信号走线时延温度系数与同轴线缆类似，可确定为 $0.1 \text{ ps}/(\text{m})$ ；设备内部走线长度一般有限（小于 0.5 m），因此设备内部信号走线总体时延温度系数应 $0.05 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ 。电路时延是信号经过所有逻辑电路总时延；二极管和三极管时延与温度密切相关，现在电路中二极管和三极管数量巨大，设备电路时延温度性能取决于整机电路设计中固有时延温度系数的设计、元器件选择和具体电路实现。不同设备间固有时延温度系数存在巨大差异，只能通过实际测试来研究和分析^[12-14]。

工程实践表明，时统系统中各种设备温度相位稳定性在 $0.5 \text{ ps}/^{\circ}\text{C} \sim 150 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ 间。本文按照温度相位稳定性高低将设备分类为高温相位稳定性设备（ $1 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ 左右）、普通相位稳定性设备（ $10 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ 左右）和差温度相位稳定性设备（ $100 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ 左右）。时统工程中常见高温相位稳定性设备有德国 TIMETECH 公司 MTIC 10409 设备（ $2 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ ）和北京一朴时频科技有限公司 TIC712C_OEM 卡板（ $1 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ ），普通温度相位稳定性有 SR620 通用计数器（ $8 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ ）和基于德国 ACAM 公司 TDC 芯片做时间间隔计数器（ $12 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ ），差温度相位稳定性有某型号脉冲信号分配器（ $120 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ ）。

3.1 设备温度相位稳定性的高低温箱测试和建模

2018 年 9 月，在某高精度时统系统研制过程中，对若干脉冲信号分配器和脉冲信号分配卡板进行了温度相位稳定性测试。高低温箱温度设置为 $-20 \sim +60$ 区间周期变化，4 台设备同时进行测试。设备内部温度变化趋势与高低温箱参数设置一致，设备内部温度与高低温箱环境温度有一个固定温差为 $+10 \sim +25$ 间。

1) 整体拟合分析

在 $-20 \sim +60$ 区间，将设备固有时延变化与设备内部温度变化进行整体拟合分析。拟合方法是设备时延变化平移后除以 $n \times (\text{ps}/^{\circ}\text{C})$ 后与设备内部温度曲线变化的差值最小化。拟合分析表明：

设备固有时延变化与温度曲线见图 4 所示：在 $-20 \sim +60$ 多次周期温度变化，4 台设备固有时延变化与温度变化为准线性关系；固有时延变化曲线峰值点比温度曲线峰值点时刻滞后了 300 s；

4 台设备固有时延变化与温度变化线性关系最佳拟合曲线对应固有时延温度系数分别为 $+65$ 、 $+38$ 、 $+34$ 和 $+25 \text{ ps}/^{\circ}\text{C}$ 。

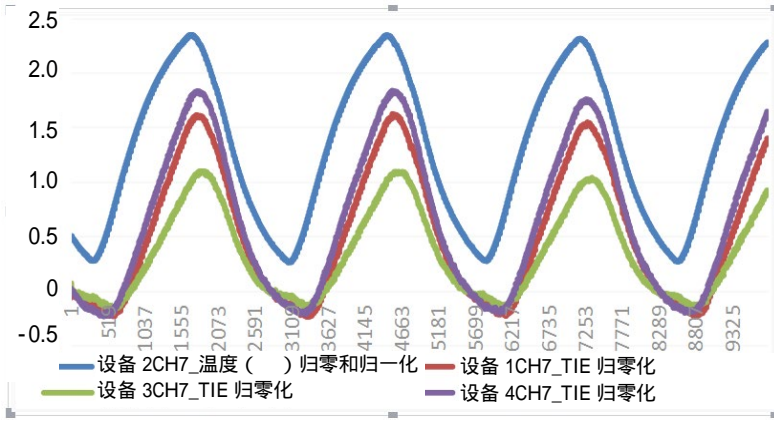
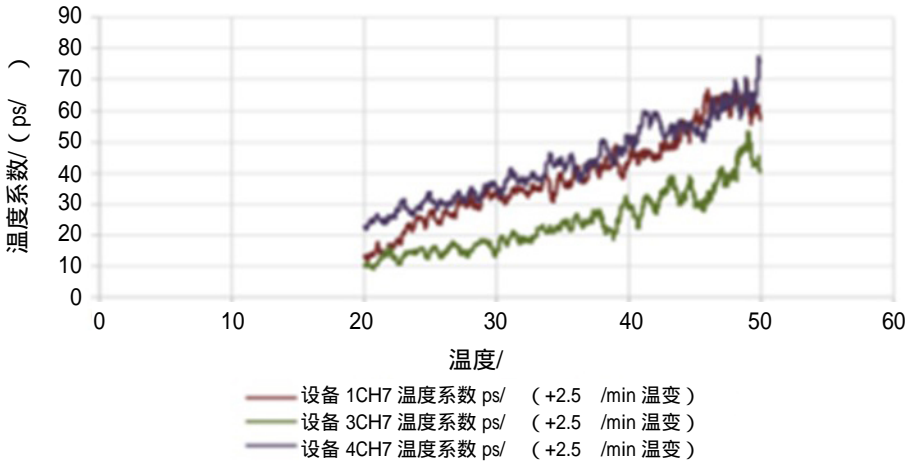


图 4 设备固有时延变化与温度曲线

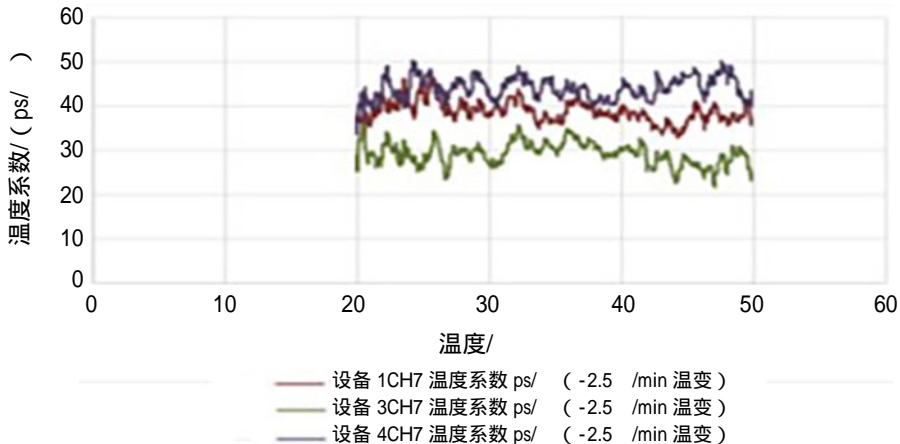
2) 建模分析

在高低温箱下测试设备固有时延变化和温度变化数据基础上,生成设备在每个温度点上固有时延温度系数曲线。选取卡板温度线性上升段或下降段数据,针对每个温度点 T ,分析在该温度点左右单位温度 k 变化下固有时延变化量 Φ ,计算出该温度 T 下的温度系数 $kn = \Phi / k$,记录为点 (T, kn) ;以温度 T 为横轴,以温度系数 kn 为纵轴,画出温度与设备固有时延温度系数的曲线(简称温度-固有时延温度系数曲线)。

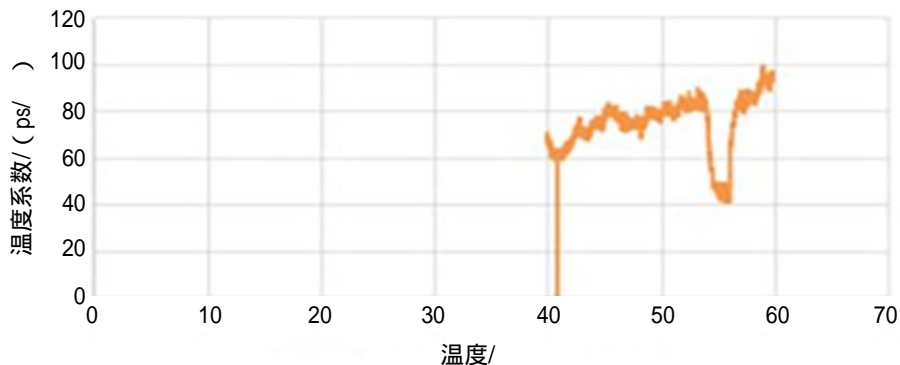
某脉冲信号分配器设备固有时延温度系数和温度关系曲线见图 5 所示。



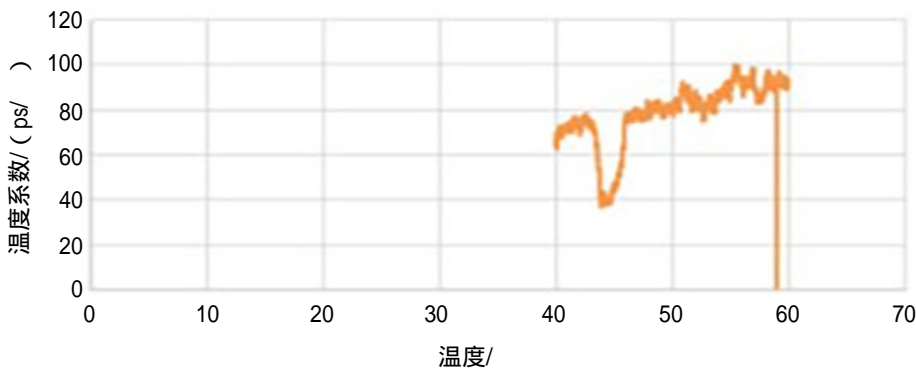
(a) +2.5 /min 温度-温度系数曲线



(b) -2.5 /min 温度-温度系数曲线



— 设备 1 PPS 外参考输入温度系数
(c) $+0.125$ /min 温度-温度系数曲线



— 设备 1 PPS 外参考输入温度系数
(d) -0.125 /min 温度-温度系数曲线

图 5 某脉冲信号分配器设备固有时延温度系数和温度关系曲线

该脉冲信号分配器为差温度相位稳定性设备，其温度固有时延系数在 30 ($\text{ps}/^\circ\text{C}$) ~ 120 ($\text{ps}/^\circ\text{C}$) 间。工程中希望对该型号脉冲信号分配器固有时延温度系数与温度间关系建模后，以温度补偿方式降低其影响程度。建模结论为：同一台设备相同温度变化条件下固有时延温度系数和温度具有固定关系；但是不同设备间、不同温度变化率下和正反向温变间的设备固有时延温度系数与温度关系差别巨大，该型号设备不能统一建模，该型号设备每台设备也难以独立建模。

某时间间隔测量仪设备固有时延温度系数和温度关系曲线见图 6 所示，该时间间隔测量仪为高温相位稳定性设备，其温度固有时延系数在 0.3 ($\text{ps}/^\circ\text{C}$) ~ 1.5 ($\text{ps}/^\circ\text{C}$) 间。建模结论为：同一台设备相同温度变化条件下固有时延温度系数和温度具有固定关系；但是不同设备间、不同温度变化率下设备固有时延温度系数与温度关系有些差别，该型号设备不能统一建模；该型号设备每台设备可独立建模，建模后采用温度补偿方式可以在 20 温度变化范围内实现 0.5 $\text{ps}/^\circ\text{C}$ 内温度固有时延系数。

3.2 冷启动方法测试时间间隔测量设备温度相位稳定性

设备温度相位稳定性与温度间建模困难，考虑工程实际情况，为节省测试时间和成本，我们使用冷启动方法测量每个设备固有时延温度系数。方法为在室温环境下设备冷启动加电 30 min，在外参考信号和被测信号间为同源和被测信号间同相情况下测量每个通道时间间隔变化与设备内部温度变化的比值。该方法利用冷启动情况设备内部温度自然升温 $10 \sim 20$ 现象，等效测量设备在该环境温度点温度固有时延系数；与高低温箱测试方法测量结果具备基本一致性。

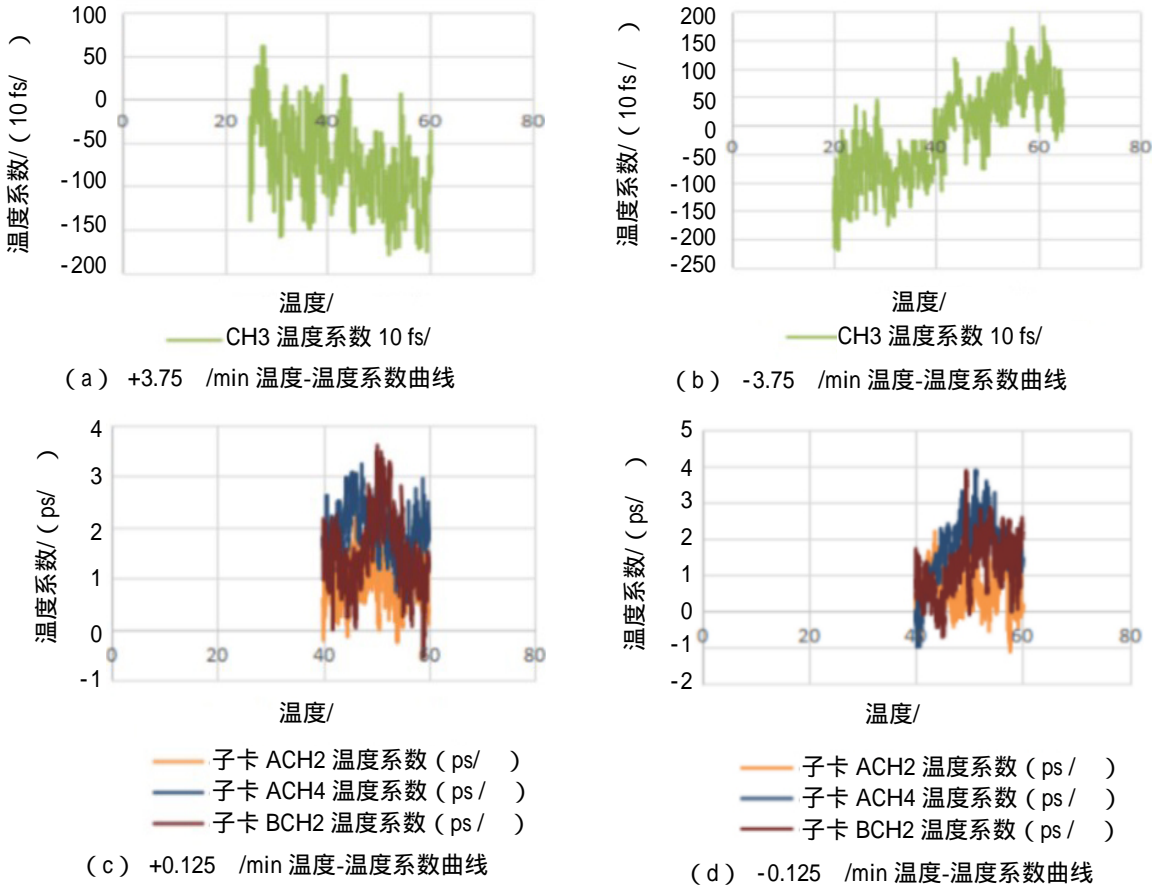


图 6 某时间间隔测量仪设备固有时延温度系数和温度关系曲线

2019 年 4 月，在某高精度时统系统工程高精度时间间隔测量仪现场验收测量中，对 1 台 MTIM_712 时间间隔测量仪、1 台 SR620 通用计数器和 1 台该单位自研时间间隔测量仪(使用德国 ACAM 公司 TDC-GP21 芯片构建，简称 TDC_GP21 时间间隔测量仪)同时测量^[15]。测试中使用设备冷启动方法测量了设备固有时延温度系数性能，测试结果见表 1。

表 1 多台设备固有时延温度系数冷启动法测量结果表 单位：ps/

设备名称	固有时延温度系数
TDC_GP21 测量仪	3.6
MTIM-712 测量仪	0.6
SR620 测量仪	5.0

4 固有时延温度变化对时统系统精度的影响分析

本文以图 1 原子钟组时间频率系统为例，详细分析温度固有时延变化对时统系统精度的定量影响。

时统系统所用设备和部件(含线缆)一般不在一个机房内，首先需要将设备和部件按照温度环境分成三类：室外环境(-20 ~+40, 60 温度变化)、普通机房环境(+23 ±5)和恒温机房环境(+23 ±1)；参见《电子计算机机房设计规范》GB50174-93。恒温机房环境放置时统系统全局性关键设备和部件，例如钟组系统中原子钟、信号分配器、时间频率测量设备、微跃计、信号选择器及其信号线缆等放置在恒温机房环境；普通机房环境放置非全局性关键设备和部件，例如远端时统分配系统和时统比

对系统设备；室外环境放置必不可免的室外设备和部件，例如天线、天馈线和远端时统分配系统中收发设备间光缆等。

恒温机房温度范围为 $+23 \pm 1$ ，但因设备内热环境微小变化，内部电路温度存在 ± 1 范围非受控变化；因此确定恒温机房设备内部不可控温度变化为 ± 2 。以原子钟组时统系统为例，恒温机房设备包括原子钟、信号分配器、时频测量设备、信号选择器、微跃计和时码发生器，设备级联为 4~6 级，按照 5 级设备级联进行计算；设备级联间线缆长度按照 200 m 考虑。普通机房温度控制在 $+23 \pm 5$ 间，因设备内部热环境变化，内部电路温度存在 ± 1 范围非受控变化。确定高质量恒温机房内设备内部长期工作不可控温度变化为 ± 6 。以原子钟组时统系统为例，在普通恒温机房设备内包括远端时频分配系统设备和时统比对系统设备，级联设备为 2~3 级，按照 2 级进行计算；级联设备间线缆长度按照 30 m 考虑。固有时延温度性能对时统系统精度影响的详细计算见图 7。

	线缆时延变化（温度变化 2 °C）		设备时延变化（温度变化 4 °C）		
	普通同轴线缆	稳相同轴线缆	高温相位稳定性设备	普通温度相位稳定性设备	差温度相位稳定性设备
温度相位稳定性	0.4 ps/(× m)	20 fs/(× m)	1 ps/	10 ps/	100 ps/
级联长度或设备级联层级	200 m	200 m	5 级	5 级	5 级
总体温度相位稳定性	80 ps/	4 ps/	5 ps/	50 ps/	500 ps/
固定时延总体变化	160 ps	8 ps	20 ps	200 ps	2 000 ps
普通同轴线缆与差温度相位稳定性设备组合的总体时延变化					2 160 ps
普通同轴线缆与普通温度相位稳定性设备组合的总体时延变化					360 ps
普通同轴线缆与高温相位稳定性设备组合的总体时延变化					180 ps
稳相同轴线缆与普通温度相位稳定性设备组合的总体时延变化					208 ps
稳相同轴线缆与高温相位稳定性设备组合的总体时延变化					28 ps

(a) 普通机房（ 23 ± 1 °C）固定时延温度性能对时统系统精度影响分析

	线缆时延变化（温度变化 10 °C）		设备时延变化（温度变化 12 °C）		
	普通同轴线缆	稳相同轴线缆	高温相位稳定性设备	普通温度相位稳定性设备	差温度相位稳定性设备
温度相位稳定性	0.4 ps/(× m)	20 fs/(× m)	1 ps/	10 ps/	100 ps/
级联长度或设备级联层级	30 m	30 m	2 级	2 级	2 级
总体温度相位稳定性	12 ps/	0.6 ps/	2 ps/	20 ps/	200 ps/
固定时延总体变化	120 ps	6 ps	24 ps	240 ps	2 400 ps
普通同轴线缆与差温度相位稳定性设备组合的总体时延变化					2 520 ps
普通同轴线缆与普通温度相位稳定性设备组合的总体时延变化					360 ps
普通同轴线缆与高温相位稳定性设备组合的总体时延变化					144 ps
稳相同轴线缆与普通温度相位稳定性设备组合的总体时延变化					246 ps
稳相同轴线缆与高温相位稳定性设备组合的总体时延变化					30 ps

(b) 普通机房（ 23 ± 5 °C）固定时延温度性能对时统系统精度影响分析

图 7 机房环境固有时延温度性能对时统系统精度影响

以图 1 原子钟组时间频率系统为例，原子钟组系统放置在恒温机房。目前时统工程中大部分尚未采取相关温度相位性能控制措施，采用线缆为普通同轴线缆，设备大部分为普通温度相位稳定性设备；原子钟组系统中因温度造成总体时延变化为 360 ps，这对原子钟性能测量和整个钟组输出造成 $4.2 \times 10^{-15}/d$

频率稳定度影响；附加考虑原子钟房独立建设，原子钟至钟组控制系统机房间信号传输线缆并不完全在恒温机房环境下，该部分线缆环境温度远不止 ± 1 变化，温度造成钟组系统频率稳定度影响将会更大。若钟组系统采用稳相同轴线缆与高温相位稳定性设备，温度造成总体时延变化将大幅缩小为 28 ps(原来 1/13)，对原子钟性能测量和整个钟组输出稳定度影响降为 $3.2 \times 10^{-16}/d$ 。同时从图 7 中可分析出，若钟组系统中存在差温度相位稳定性设备，钟组系统温度时延变化影响大幅恶化至 360 ps 的 6 倍。

以图 1 原子钟组时间频率系统为例，时统传递系统放置在普通机房。目前时统工程大部分尚未采取相关温度相位性能控制措施，线缆为普通同轴线缆，设备大部分为普通温度相位稳定性设备；各普通机房内时统传递系统因温度造成总体时延变化为 360 ps，对于 100 ps 量级时统传递精度要求是严重性能影响。若普通机房内采用稳相同轴线缆与高温相位稳定性设备，温度造成时统传递系统总体时延变化会大幅缩小为 30 ps(原来的 1/12)。同时从图 7 中可分析出，差温度相位稳定性设备的存在，会造成时统传递系统温度时延变化影响大幅恶化至 360 ps 的 7 倍。

对于图 1 所示原子钟组时间频率系统，室外环境包括钟组子系统、时频分配子系统和时统比对子系统 中的天线和天馈线。依据表 2，室外 10 m 普通同轴天馈线将造成 240 ps 温度固有时延变化；百米普通同轴天馈线将造成 2.4 ns 温度固有时延变化。240 ps~2.4 ns 时延变化影响对于高性能 GNSS(global navigation satellite system) 共视时间传递接收设备是不可忽略的。卫星双向时频传递设备虽然采用了双向时间比对技术，但是因普通同轴天馈线温度相位稳定性差别很大，非同厂家同型号同批次线缆抵消后残余误差依然会较大；这个影响对于高性能卫星双向时频传递系统是不可忽略的。若采用稳相同轴天馈线该性能影响可降到原来 1/20，百米天馈线温度固有时延变化 120 ps 内。

表 2 室外环境固有时延温度性能对时统系统精度的影响

	10 m 线缆时延变化		100 m 线缆时延变化		1 km 光缆时延变化	10 km 光缆时延变化
	普通同轴线缆	稳相同轴线缆	普通同轴线缆	稳相同轴线缆	光缆	光缆
温度相位稳定性	0.4 ps/(\times m)	20 fs/(\times m)	0.4 ps/(\times m)	20 fs/(\times m)	35 fs/(\times m)	35 fs/(\times m)
总体温度相位稳定性	4 ps/	0.2 ps/	40 ps/	2.0 ps/	35 ps/	350 ps/
温度变化 60 的固定时延总体变化	240 ps	12 ps	2 400 ps	120 ps	2.1 ns	21 ns

对于图 1 所示原子钟组时间频率系统，室外环境下还有时频传递系统收发设备间光缆。光缆温度相位稳定性具备高度一致性，光缆在室外环境下单向固有时延温度变化约为 2.1 ns/km；百皮秒量级时频传递系统收发设备室外线缆长度大于 100 m 时，采用双向时间比对方法进行时统传递，其机理包含了对室外光缆单向固有时延变化的实时测量和校正^[16]。

5 时统系统的温度固有时延变化总体指标和指标分解

根据第 4 节分析， $4 \times 10^{-15}/d$ 内频率稳定度要求钟组系统和百皮秒量级时统传递系统需考虑环境温度对固有时延变化影响，应在时统系统设计时进行温度固有时延变化指标设计和指标分解。

频率稳定度和绝对时刻传递误差是时统系统整体性能的两个关键指标。鉴于环境温度天变化规律，将时统系统天频率稳定度指标按照一定比例(如 30%)作为时统系统温度固有时延变化总体指标；鉴于环境温度年变化规律，将时统系统绝对时刻传递误差按照一定比例(如 30%)作为时统系统温度固有时延变化总体指标。具体指标分配是时统系统总体方案设计的基础任务，需依据工程可行性和性价比进行综合权衡；本文为后续计算，设定如下：时统系统的天频率稳定度和绝对时刻传递误差的 30%作为系统

温度固有时延变化总体指标、系统温度固有时延变化 50%为线缆温度固有时延变化总体指标、系统温度固有时延变化 50%为设备温度固有时延变化总体指标。

具体思路为：以时统系统天频率稳定性和绝对时刻传递误差两个关键指标为基础，将其按照一定比例分解为该时统系统温度固有时延变化总体指标；落实每个部件（包括线缆及其长度）温度环境后，将温度固有时延变化总体指标在恒温机房、普通机房和室外三部分进行分解，分解为恒温机房温度固有时延变化指标、普通机房温度固有时延变化指标和室外温度固有时延变化指标；每部分温度固有时延变化指标进一步分解为线缆温度固有时延变化指标和设备温度固有时延变化指标；线缆温度固有时延变化指标依据线缆级联长度和所处温度环境落实为线缆温度相位稳定性技术要求，设备温度固有时延变化指标依据设备级联级数和所处温度环境落实为设备温度相位稳定性技术要求。

时统系统中每个设备安装环境属于系统总体方案设计指标分解的工作环节，需依据工程可行性和性价比进行综合权衡，本文为了后续定量计算分析，设定原子钟组时间频率系统的钟组系统所有部件在恒温机房环境和时统传递系统所有部件在普通机房环境。

以图 1 中原子钟组系统为例，设定钟组系统要求频率稳定度 $3 \times 10^{-15}/d$ ，对应天相位漂移 259 ps；设计时考虑将 $259 \text{ ps} \times 30\% = 78 \text{ ps}$ 作为原子钟组系统的温度固有时延变化总体指标。原子钟组系统所有部件在恒温机房环境下，具体指标分解见表 3 和 4。

表 3 原子钟组系统温度固有时延变化总体指标和指标分解表（举例）

钟组关键指标设计要求	设备温度固定时延变化指标分解	线缆温度固定时延变化指标分解
频率稳定度 $3 \times 10^{-15}/d$ ， 对应天相位漂移 259 ps	39 ps (78 ps 的 50%)	39 ps (78 ps 的 50%)
钟组温度固定时延变化总体指标	设计中设备级联级数	设计中线缆级联长度
259 ps 的 30%为 78 ps	5	200 m
钟组部件温度环境	设备固定时延温度系数要求	线缆温度相位稳定性要求
在恒温机房， 23 ± 1 ；对应线缆 温度变化 2、设备内部温度变化 4	1.95 ps/，等于设备温度固定时延 变化指标/（设备级联级数乘以 4）	49 fs/ $\times m$ ，等于线缆温度固定时延 变化指标/（线缆级联长度乘以 2）

以图 1 中时统传递系统为例，设定钟组时频传递系统要求 $\pm 100 \text{ ps}$ ，设计时考虑将其 $200 \text{ ps} \times 30\% = 60 \text{ ps}$ 作为钟组时频传递系统温度固有时延变化总体指标。钟组时频传递系统部件在普通机房环境下，具体指标分解见表 4。

表 4 时频传递系统温度固有时延变化总体指标和指标分解表（举例）

时频传递关键指标设计要求	设备温度固定时延变化指标分解	线缆温度固定时延变化指标分解
时刻误差： $\pm 100 \text{ ps}$	30 ps (60 ps 的 50%)	30 ps (60 ps 的 50%)
时频传递系统温度固定 时延变化总体指标	设计中设备级联级数	设计中线缆级联长度
200 ps 的 30%为 60 ps	2	30 m
时频传递系统部件温度环境	设备固定时延温度系数要求	线缆温度相位稳定性要求
在普通机房， 23 ± 5 ；对应线缆 温度变化 10、设备内部温度变化 12	1.25 ps/，等于设备温度固定时延变 化指标/（设备级联级数乘以 12）	100 fs/ $\times m$ ，等于线缆温度固定时延 变化指标/（线缆级联长度乘以 10）

对于已建时统系统温度相位性能逐步改善,建议措施如下: 鉴于线缆在工程成本中比例很小,新增或更换同轴线缆时应采用稳相同轴线缆; 鉴于差温度相位稳定性设备对系统温度固有时延变化的大幅恶化影响,建议进行设备温度相位稳定性筛查,找出系统中差温度相位稳定性设备(30 ps/),合适时进行替换。

6 结语

综上所述:目前时统工程中大多数尚未采取相关温度相位性能控制措施,采用非稳相同轴线缆和普通温度相位稳定性设备,恒温机房原子钟组系统温度固有时延变化会造成 $4 \times 10^{-15}/d$ 以上频率稳定度影响,普通机房时统传递系统温度固有时延变化会造成几百皮秒时刻同步影响,50 m 室外天馈线温度固有时延变化会造成 GNSS 共视时间传递系统和卫星双向时间传递系统近纳秒时刻同步影响。建立时统系统温度固有时延变化指标,进行指标分解,落实为设备和线缆温度相位稳定性要求,将成为高质量时统系统建设、优化完善和维护的必要措施。

致谢:本文是相关单位和技术人员长期高精度时统系统建设和维护实践中的集体智慧结晶。感谢国防科技大学电子科学学院导航与时空技术工程研究中心龚航在设备固有时延温度变化测试和建模上的具体贡献,感谢北京卫星导航中心蔡志武、中国科学院国家授时中心时间频率基准实验室袁海波、时间频率测量与控制研究室刘娅和量子频标研究室刘涛、中国电子科技集团公司第五十四研究所导航专业部刘铁强对文章的指导和高价值意见反馈。

参考文献:

- [1] 宋会杰,董绍武,王正明,等. NTSC 守时氢钟性能分析[J]. 天文学报, 2015, 56(6): 628-636.
- [2] 刘峰宇,王宇谱,李锡瑞. 国产 SOHM-4 型氢钟长期性能分析[J]. 导航定位学报, 2020, 8(5): 102-106+116.
- [3] 王灵东,吴龟灵,沈建国. 基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 71-77.
- [4] 王正勇,王崇阳,魏海涛,等. 基于光纤链路的 180 km 高精度时间同步系统[J]. 无线电工程, 2019, 49(5): 404-407.
- [5] 王祥兴. 稳相同轴线缆及其新进展[J]. 光纤与线缆及其应用技术, 1993, (1): 5-9.
- [6] 李庆和. 同轴线缆的温度相位稳定性及其影响因素分析[J]. 电线电缆, 2007(2): 25-27.
- [7] 戈弋,黄华,袁欢. 温度和机械弯曲引起的同轴线缆相位变化特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019(4): 621-626.
- [8] 王崇阳,蔚保国,王正勇. 远距离高精度光纤双向时间比对方法研究[J]. 无线电工程, 2017, 47(3): 47-50.
- [9] 王灵东,吴龟灵,沈建国,等. 基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 72-77.
- [10] 张杰,周栋明. 单波长单光纤时间双向传递的研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(10): 1968-1976.
- [11] 沈建国,吴龟灵,洪泽华,等. 温度对光纤频率传输系统稳定性的影响及其补偿[J]. 光电子·激光, 2011, 22(3): 377-381.
- [12] 王礼亮,王淑芳. 影响卫星导航定位系统设备时延的主要因素[J]. 无线电工程, 2005, 35(8): 6-8.
- [13] 马红皎,李梦,吴华兵,等. 双向测距与时间同步系统中设备时延标定的研究[J]. 时间频率学报, 2015, 38(1): 30-37.
- [14] 魏海涛,蔚保国,李刚,等. 卫星导航设备时延精密标定方法与测试技术研究[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2010, 40(5): 623-627.
- [15] 潘峰,张军,霍海强,等. 国产皮秒级多通道时间间隔测量仪在工程中的应用[J]. 时间频率学报, 2019, 42(4): 301-309.
- [16] 黄璜,吴龟灵,胡亮,等. 温度对双向时分复用光纤时间传递精度的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 105-111.