分布式系统授时要求白皮书

随着数据存储迁移到网络边缘以限制延迟，同时应用向分布式系统转型以提高能力和速度，明确的同步要求已成为数据中心设计中不可或缺的一部分。大型分布式数据库现已达到拍字节和艾字节规模，每秒事务数（Transactions Per Second，TPS）多达数千个[1]，并且必须在全球多个位置保存多个数据副本。为了管理各副本之间的数据一致性，需要在数据中心内的各个服务器之间以及在可能相隔数千英里的数据中心之间实现同步。特定分布式系统、应用或数据库所需的授时精度水平取决于规划授时架构时必须考虑的几个因素。本白皮书探讨了其中一些因素，引入了每秒时间包络数的概念以量化时钟要求，并讨论了使用分布式外部同步时钟的各种解决方案。

数据一致性和精确时间要求

固定时间点的记录需要确保数据一致性，这样才能使数据库或应用的所有副本中的值保持相同。数据一致性有许多存在各种细微差别的替代术语（因果一致性、局部一致性、全局一致性、强一致性、最终一致性）[2]，但它们都采用相同的基本原则：在某个时间点，整个数据库中的值保持一致——尽管这只是通过执行后协调算法更改某些副本中的值来实现的。

如果整个数据库或系统存储在一台机器上的某个非副本实例中，则可以轻松实现这一点。对于具有多个副本的全球分布式系统，在没有通信延迟的情况下，如果每个服务器都能够访问确定性的绝对时间，则仍可以轻松实现这一点。但是，如果有通信延迟，则不存在确定性的绝对时间。物理距离、通信路径技术、不对称性和每个位置的时钟不确定性等问题都会带来必须应对的挑战。

通过在网络边缘进行数据库和应用的全球分布，可最大限度地降低用户与数据库之间的通信延迟。假设某个数据库的所有副本都位于弗吉尼亚州阿斯伯恩的数据中心，加利福尼亚州圣何塞的用户需要与服务器通信。受光速限制，这两个站点之间最快的理论信息传输速度为12.7 ms。诸如从数据库中读取值之类的简单事件需要往返报文，这意味着延迟约为25 ms。即使在两个设施之间使用专用光纤链路，包括光纤折射率、实际光纤链路和系统中其他延迟在内的因素也会进一步将性能限制在每次往返大约75 ms到100 ms。

为了改善延迟问题，可以在圣何塞的服务器上创建数据库的副本。但是，这样会导致一致性的管理变得复杂。如果在类似的时间内更新这两个位置的相同或相关记录，则需要通过一种方法来协调并确定实际上哪一项更新先发生。仅仅应用记录锁定并不能解决该问题，因为如果阿斯伯恩识别到需要锁定记录，则至少12.7 ms之后，圣何塞才能获知该记录已锁定。为了最大限度地减少一致性问题，如果两个数据中心都同步到外部时钟，则可以基于该时钟为事务（注1）添加时间戳，并且任何不一致都可以通过执行后协调算法来解决。

算法可以绝对确定性地对事务进行排序的理论最佳时间粒度限制为两个位置处时钟不确定性（Clock Uncertainty，CU）水平的两倍。如果系统可以使用CU为±100 ms的时间戳，则系统只能绝对确定时间戳差为200 ms或以上的两个事件的正确顺序。

在本文中，该时间戳差称为时间包络。在图1的第一张图中，包络不重叠，因此可以确定事件的实际顺序；但在第二张图中，发生了无法解决的不一致问题，并且由于包络重叠，因此无法绝对确定哪个事务先发生。其他系统问题可能会增加包络的大小，但随着技术的进步，时钟不确定性将始终确定可用于确定事件顺序的最佳情况下的最小时间包络，也称为线性化。

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司

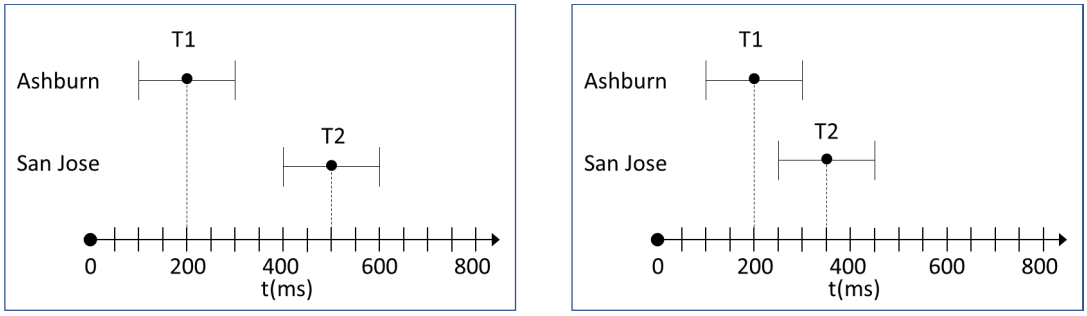

图1： *第一张图是可解决一致性问题的示例，事务的时间戳差为300 ms，大于200 ms的时间包络。第二张图是无法解决不一致性问题的示例，事务的时间戳差为150 ms，小于200 ms的时间包络。*

将每组相关或因果记录以惟一的颜色进行显示。不同颜色的包络可能会重叠，但相同颜色的包络不会重叠。如果时间包络发生重叠的两个事务分别位于不同且无关的两个记录中，则即使无法解析真正的时间顺序，二者也不会出现不一致问题。图2对此进行了说明，其中只有R4和R5上的事务有问题。但是随着包络持续时间的延长，一个时间包络中两个相同或相关记录受到影响的概率会增加，这反过来又会在事务回滚时降低系统性能。共识方法、概率分析或为某些副本分配优先级只能用于回滚其中一个事务，但每次回滚都会造成系统效率低下，而且回滚次数可能达到不可管理的程度，最终导致损坏。必须进行成本权衡。

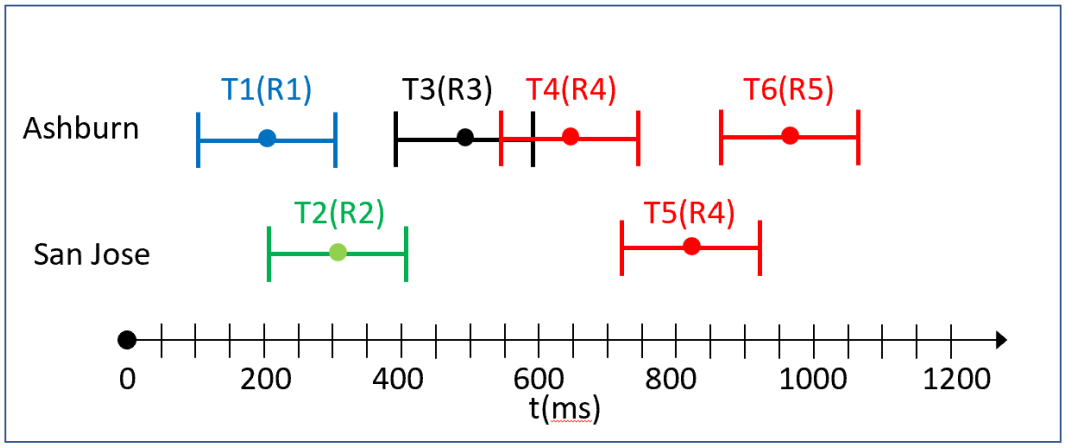

图2： *如果R1、R2、R3和R4是完全独立的记录且永远不会彼此交互，则排序就不重要，并且允许包络发生重叠，风险很小甚至零风险。对于R4上的操作，650 ms时在阿斯伯恩与825 ms时在圣何塞是对同一记录的副本进行的，并且由于时间包络发生重叠，因此这会导致出现问题。如果R5是记录R4的函数（例如，R5=2R4+6），则812 ms和975 ms时的两个事务将存在问题，因为它们是发生重叠的因果记录。*

时间戳和时间包络仅允许软件在事后协调不一致问题。如果系统的CU=±2 ms、站点间延迟为12.7 ms，将只能通过执行后算法来实现一致性。为了最大限度地减轻执行后同步的总负担，有时会将数据库的一部分存储在本地化分片中，并且仅复制在多个位置的需求概率都较高的记录。

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司

系统要求与设备规范之间的关系

系统架构师通常会指定TPS。时钟供应商指定CU。从上述讨论中可以得出确保一致的简单公式。对于上述±100 ms的系统，最多可以创建五个不重叠的时间包络，如图3所示。

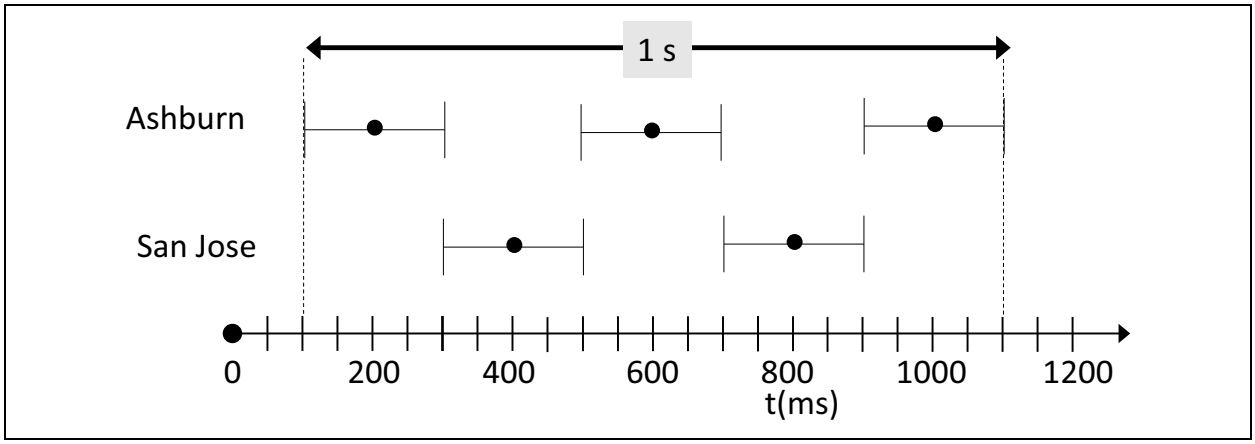

图3： *对于不确定性为±100 ms的时钟，每个分辨率明确的时间包络为200 ms。这种情况下，一秒内最多有五个时间包络。*

因此，得到了公式1中的不等式，它将TPS的要求量化为CU的函数，确保没有无法解决的不一致问题。

公式1：

$$TPS < \frac{1}{2CU}$$

公式1是确定系统正确时钟的基本原理。但是，TPS和CU需要根据实际应用进行修改，以避免未充分指定时钟要求（导致系统降级）或过度指定时钟（导致不必要的系统成本）。

TPS注意事项

1. **平均与峰值TPS。**一些数据库以恒定速率执行写命令。恒定速率系统的一个示例是以指定时间间隔记录生产线传感器值的工业过程控制数据库。另外一些其他应用具有峰值事务速率。金融交易应用可能在开市后和收市前有活动高峰期。在此期间，TPS可能高达平均TPS的一百倍。在许多系统规范中，平均TPS由每日事务数除以86400秒得出。但是，CU需要围绕峰值速率进行设计，而不是日均速率。
2. **无法解决的不一致问题的严重程度。**对于许多应用，不一致问题可能对用户几乎没有影响，但有一个因素令人困扰。迫使少数关键字或标签回滚的几个不一致问题很可能不会显著影响包含照片元数据的云端摄影应用。但是，对于某些应用，可能会产生巨大的财务或法律成本，同时带来严苛的监管要求[3,4]，如果应用可能影响紧急服务或军事决策，甚至会对人类生活产生影响。
3. **在不同位置对同一时间包络中的两个因果记录进行操作的概率。**如果分布式数据库包含客户地址，并且每个区域在本地化分片中维护其自己的客户地址，则东京的某个人与纽约的某个人同时更新伦敦的客户地址的概率为零。相反，军事应用可能是多个集成雷达图像的叠加。每个有雷达的位置都会参与形成整体的空中图像。如果多个雷达跟踪同一个快速移动的目标，则系统基本上可能同时报告数据，并且应使包络大小减至最小，以降低同时写入快速移动目标的概率。对于每个注意事项，公式1都可以使用比例因数进行修改。

公式2：

$$S_{pk} \times S_c \times S_{pr} \times TPS < \frac{1}{2CU}$$

其中：
S_{pk} = 峰值与平均值的比例因数。该值可以通过峰值TPS除以平均TPS直接确定。
S_c = 不一致问题严重程度的比例因数。基于应用的主观风险值——不能容忍不一致问题的系统可能会选择大于1的S_c，这将需要更小的CU。可以容忍不一致问题且影响很小的系统可能会选择S_c值0.01，这将放宽CU要求。
S_{pr} = 写入同一包络中相同或因果记录的概率的比例因数。对于数据通常是区域隔离的某些应用（如上面列出的客户数据库），该比例因数可能非常低，这意味着可以使用低至0.001的比例，而当发生概率较大时，应将该比例因数设置为1。

加权TPS（Weighted TPS，WTPS）可用于将三个比例因数与TPS合并为一个变量。

表1列出了几个假设的系统要求以及评估WTPS的过程。

表1：　　应用和WTPS要求

用例	无法解决的不一致问题的严重程度	短时间内相关记录在不同位置更新的概率	平均TPS	S_{pk}	S_c	S_{pr}	WTPS
军事行动数据库	**高：**报告的数据有误可能导致死亡。	**高：**综合战场行动从多个来源更新。	10,000	10	10	1	1,000,000
金融贸易公司	**高：**亏损的交易可能会产生重大的财务影响。	**高：**一天中特定时间的大量交易请求和股票信息创建了单独的目标。	1,000	10	10	1	100,000
跨国银行数据库	**高：**交易丢失可能导致监管和法律问题。	**中等：**需要在不同位置访问账户。	1,000	1	10	0.1	1,000
医学数据库	**高：**报告的数据有误可能导致死亡。	**低：**个别患者数据很少同时在不同位置进行处理。	1,000	1	10	0.01	100
工业过程控制	**中等：**可能对一些缺失的数据点求平均值。	**低：**定期从特定位置获取来自传感器的数据。	10,000	1	1	0.01	100
社交媒体摄影应用	**低：**影响客户体验，但可以通过重新输入来解决。	**低：**大多数照片元数据仅由帐户持有人更新。	10,000	10	0.01	0.01	10
销售联系人数据库	**低：**最坏的情况是，用户必须重新输入数据。	**低：**更新可能在不同的站点发生，但不太可能在接近的时间内发生。	100	1	0.1	0.01	0.1

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司

CU注意事项

公式1的右侧部分1/2CU表示基于时钟不确定性的可用时间包络数。将此数量与TPS进行比较的更直观方法是使用术语每秒包络数（Envelopes Per Second，EPS）。将TPS替换为WTPS值并使用EPS，公式1可以改写为公式3：

公式3：

$$WTPS < EPS$$

该公式更便于查看要求。

为了使多个站点的EPS保持一致，必须与外部时钟同步。UTC通常用作外部时钟源，在到达发生事务的设备之前会通过各种不同的方法进行分配。图4给出了向数据中心设备提供时间的两种最常见的途径。

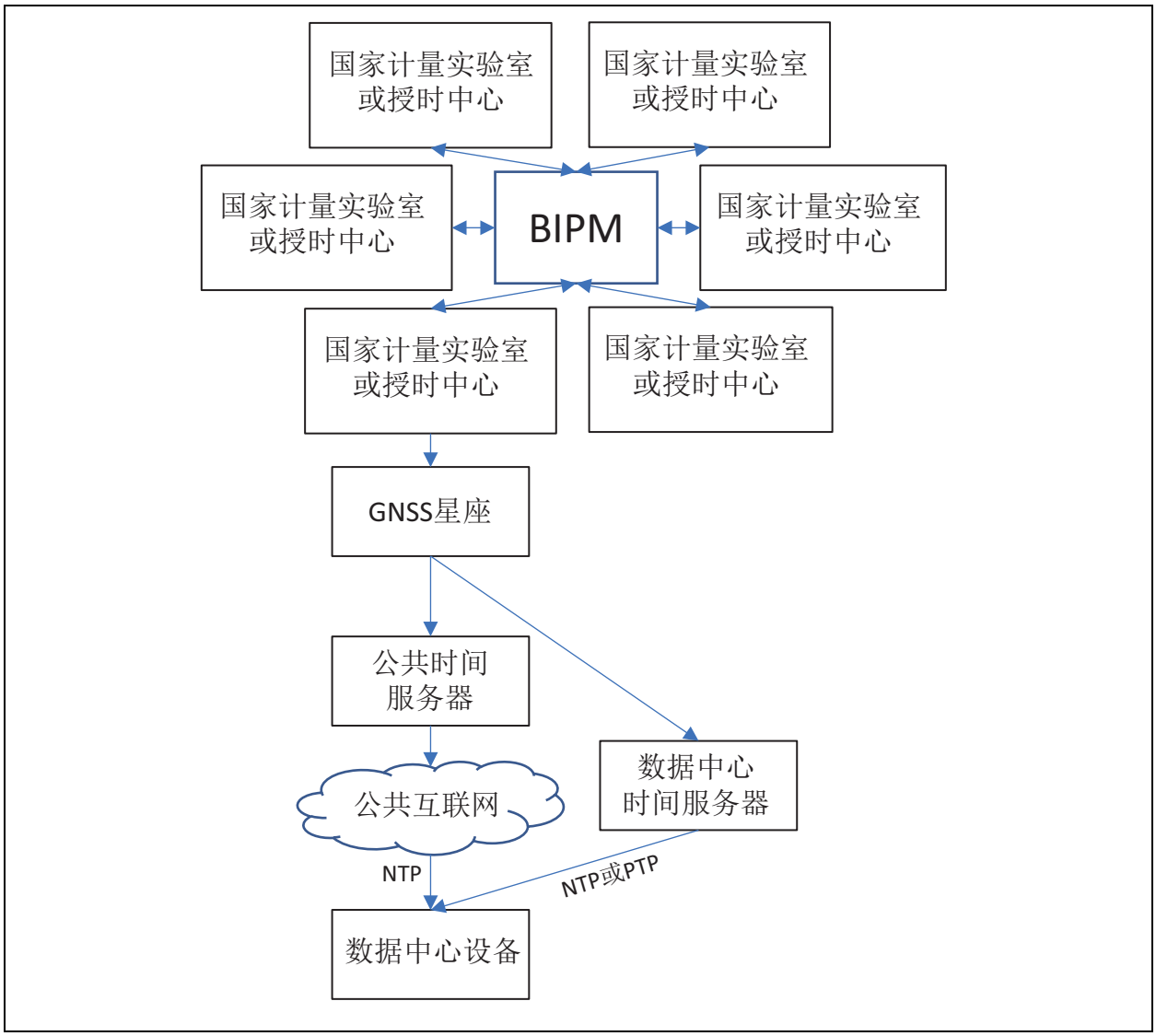

图4： *数据中心授时的典型路径。在这两条路径中，时间均来自BIPM发布的UTC，并传输到GNSS星座。随后，公共或私有时间服务器通过公共互联网或局域网将时间分配给数据中心设备。*

图4中的两条路径都使用GNSS网络与UTC同步。左侧的路径将公共网络时间服务器用于GNSS网络与数据中心之间的过渡。公共网络时间协议（Network Time Protocol，NTP）服务器在互联网上通过基于数据包的报文免费向公共网络分配UTC时间。不同服务器发布的CU为100 μs到10 ms不等。这对于同步分布式系统所用的外部时钟而言是可接受的，此类系统对EPS要求不高（<50），安全问题并不重要，同时对精度的监管要求相对宽松甚至没有要求，并且由异常时间戳引起的无法解决的不一致问题在可接受的风险范围内。但是，使用公共NTP服务器时存在以下重大风险：

- 准确性风险：
  - 无法保证互联网时间服务器上的时间是正确的。
  - 许多互联网时间服务器的时钟源未公开或发生更改。
  - 在局域网中，非对称延迟通过防火墙到达公共时间服务器。
- 可靠性风险：
  - 发生故障时，互联网时间服务器不会发送SNMP陷阱或报警。
  - 互联网时间服务器上的请求数量可能会有很大差异，在通信量较大时会导致准确性进一步降低。
  - 无法保证来自互联网时间服务器的持续响应。
- 安全风险：
  - 需要针对双向通信打开防火墙端口123。
  - 控制公共时间服务器时间源。
  - 互联网时间服务器缺乏身份验证方法，这使得中间人可以操纵时间戳。

图4中右侧的路径绕过了公共NTP和互联网。这不仅消除了上面列出的所有风险，而且提高了EPS值。私有时间服务器直接从GNSS星座获取时间，并通过LAN作为私有NTP服务器或精密时间协议（Precision Time Protocol，PTP）最高级时钟在数据中心内分配时间。Microchip提供了几种不同形式的解决方案来满足这些需求。Microchip SyncServer® S600高性能NTP时间服务器[5]和TimeProvider® TP4100 PTP最高级时钟[6]这两种解决方案都可以提供准确时间并将此时间分配给安全局域网，而且二者均为1U机架式解决方案。这些功能丰富的解决方案包括嵌入式72通道全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）接收器，该接收器从GPS、Galileo、GLONASS和北斗等可用星座获取时间。

***图5：** Microchip TimeProvider TP4100 PTP最高级时钟和SyncServer S600高性能NTP时间服务器*

这两种产品都提供本地时间源，并在网络上通过基于数据包的报文分配此时间。但是，本地时间源只是影响实际设备上时间戳最终精度的其中一个因素。影响时间戳精度的其他因素包括时间服务器与时间客户端之间的路由器和交换机的数量，以及用于添加时间戳的软硬件。当考虑到所有因素时，系统最终会将来自时间源的时间戳精度降低20 ns到5 μs。如果考虑系统误差，公式3的右侧可以改写为公式4。

公式4：

$$EPS = \frac{1}{2(CU_C + CU_N)}$$

其中：
CU_C = 专用时钟参考的时钟不确定性。
CU_N = 网络设备和其他硬件的时钟不确定性。

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司

许多系统力求实现亚微秒级的最终时间戳精度，从而确保在弗吉尼亚州阿什顿、加利福尼亚州圣何塞或澳大利亚悉尼的服务器以及分布式应用的所有设备中生成的时间戳精度都达到亚微秒级，而且这不仅仅是相对于UTC，相对于彼此也同样如此。

S600和TP4100都旨在支持ITU主参考时钟（Primary Reference Time Clock，PRTC）要求。ITU规范是最大值，而不是典型值或RMS值。表2对比了S600、TP4100和用于最先进（State-of-the-art，SOTA）局域时间网络的公共NTP，其中所有其他误差来源导致时间客户端的最终时间戳精度为100 ns。该表还提供了相关的EPS。

表2：　各种外部时钟解决方案的性能对比

参考时钟类型	使能技术	相对于UTC的时间源精度	SOTA时间网络的时间戳精度	SOTA EPS	S600	TP4100
公共NTP	公共互联网上基于数据包的时间	2.00E+06 ns	2.00E+06 ns	250	—	—
PRTC-A	单频段GNSS接收器	100 ns	200 ns	2.50E+06	X	X
PRTC-B	单频段GNSS接收器	40 ns	140 ns	3.57E+06	—	X
ePRTC	多频段GNSS接收器和铯原子钟	30 ns	130 ns	3.85E+06	—	X

当数据手册中列出的时间源精度<15 ns RMS时，会出现规范解释的常见问题。这是等效于一个标准差的RMS值，而不是表2所示的最大值或ITU规范中列出的最大值。

除了机架式解决方案，Microchip还提供小尺寸解决方案，包括Tekron品牌的TTM 01-G DIN导轨式紧凑型GNSS时钟[7]，该时钟通过32通道GPS和GLONASS接收器提供NTP和PTP功能。该产品虽然不完全支持PRTCA，但可以提供小于100 ns的典型值。

图6：　Microchip Tekron TTM 01-G DIN导轨式紧凑型GNSS时钟

公式3的左侧（WTPS）表示系统要求。公式3的右侧（EPS）表示设备能力，每个包络最多只能包含一个加权事务。图7对比了表1中列出的各种应用的WTPS以及表2中列出的设备EPS值。在设计系统时，表示特定应用的红条（WTPS）必须小于表示系统能力的黑条（EPS）。该图说明公共NTP无法为军事、金融和贸易应用提供足够高的EPS。对于其他四种应用，公共NTP可提供足够高的EPS。但是，出于安全或其他原因，这可能不是合适的选择。

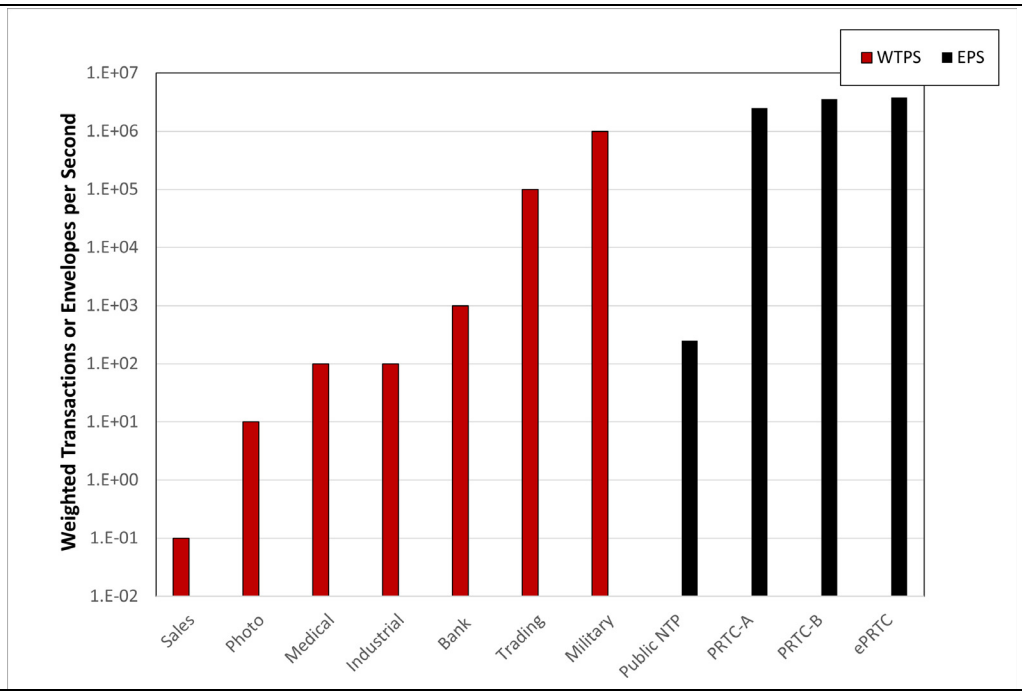

图7：　　应用WTPS要求与设备EPS能力

外部精确时间安全解决方案

上面提到的所有时钟都依赖GNSS接收器来提供相对于UTC的时间可追溯性。GNSS信号的功率非常低，因此很容易受到干扰，接收器由于来自其他信号的能量而无法读取GNSS信号就属于这种情况。干扰信号既可能是人为恶意造成的，也可能是类似频率范围内的信号无意造成的。此外，GNSS信号还可能由于人为恶意传输模拟的GNSS信号而遭到欺骗。美国网络安全和基础设施安全局（Cybersecurity and Infrastructure Security Agency，CISA）将GNSS欺骗和干扰判定为对关键基础设施的主要威胁。第13905号行政命令[8]于2020年发布，要求美国联邦机构和关键基础设施运营商采取行动来降低与欺骗和干扰相关的风险。随着这两种技术的广泛应用，干扰和欺骗事件发生的频率越来越高。在这些事件（也称为GNSS拒绝）期间，NTP服务器或PTP最高级时钟将偏离UTC，这会增加时钟不确定性。

如果始终未发现欺骗，则会对网络安全造成更大的风险，因为第三方可能会故意操纵数据中心位置的时间，从而允许未经授权访问数据，并可能对数据进行重新排序。

Microchip的Bluesky™ GNSS防火墙[9]硬件解决方案可检测欺骗和干扰，并在这些事件中断期间提供模拟的GPS信号，或在时间传输到网络之前抑制来自接收器的信号。该解决方案还可以配置为在这些事件期间传递备用时间源。

图8：　　Microchip的Bluesky™ GNSS防火墙

除了硬件解决方案之外，TP4100和S600都提供类似的抗干扰、抗欺骗软件，包括最近发布的“Bluesky Inside”软件。

外部精确时间弹性解决方案

当外部精确时间源安全地分布到数据中心时，EPS取决于外部时间源的精度。但是，一旦外部时间源丢失，该数据中心就必须依赖内部时钟或备用外部时间源。导致外部时钟丢失的原因有很多：公共NTP的互联网中断、基于GNSS的时间的太阳耀斑或者一些简单的原因，例如未正确接地的天线发射的信号无意中干扰了附近天线的GPS信号。一旦发生中断，当地时间将偏离外部时间源，导致不确定性增加和EPS下降。这会迅速增加无法解决的不一致问题的可能性，并且

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司

会因为站点不再同步而迅速危及整个全球数据库。漂移量取决于可用的本地时钟源的稳定性。Microchip为S600和TP4100提供多种基于石英和铷的嵌入式时钟选项，并提供外部铯原子标准时钟，包括可用作时间源备用时间参考的5071A [10]和时间铯4310B [11]。

图9： *Microchip 5071A和4310B铯参考*

图10给出了锁定到GNSS时具有不同时钟类型的几种Microchip解决方案的EPS，以及GNSS拒绝24小时后和GNSS拒绝一周后的EPS降级，对于SOTA时间网络，时间戳误差增加了100 ns（注2）。带有备份本地晶振的精度为2 ms的公共NTP也已添加到图表中以供参考。该图表显示，虽然锁定到GNSS，但与公共NTP相比，所有Microchip解决方案都提供三个数量级的EPS改进。不同本地时钟对EPS的影响也很明显，本地TCXO在未锁定时会迅速降至公共NTP性能水平，而铯参考在整整一周内几乎不会降低EPS。数据中心架构师必须确定降低EPS的影响，并在适当的参考中进行设计。与此同时，许多架构师可能选择在GNSS拒绝期间仍然使用公共NTP或其他备份外部时间源。

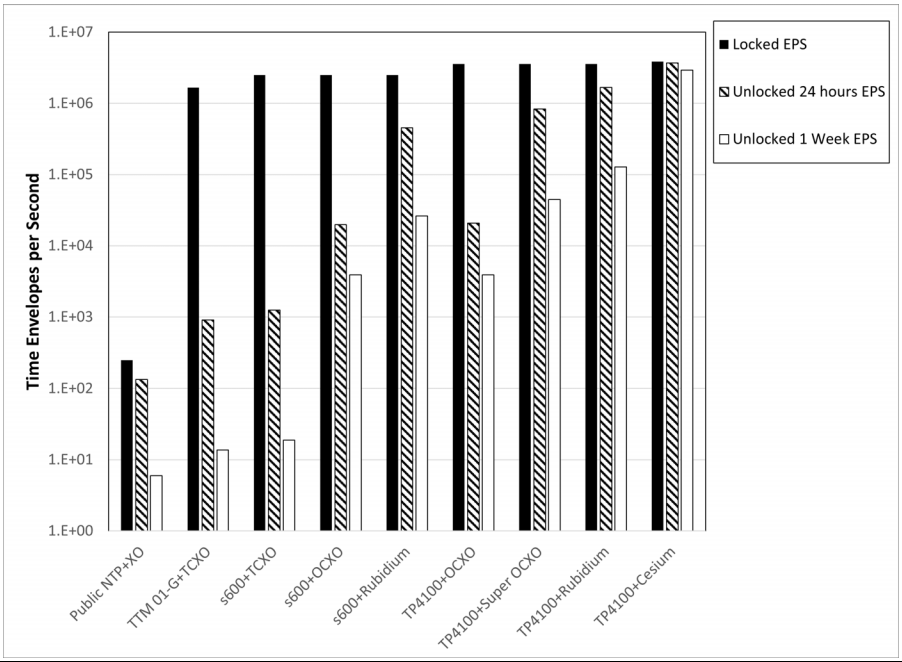

图10： *GNSS训练和GNSS拒绝期间各种不同外部时钟选项的EPS*

图11和图12对比了应用WTPS与24小时和一周解锁（GNSS拒绝）操作期间的EPS。两张图都表明，在解锁时，本地振荡器的选择对于确保满足应用WTPS要求至关重要。仅在GNSS丢失一天后，银行应用将需要至少一个OCXO，而贸易和军事应用则需要一个铷钟。一周后，大多数应用都需要一个原子钟。

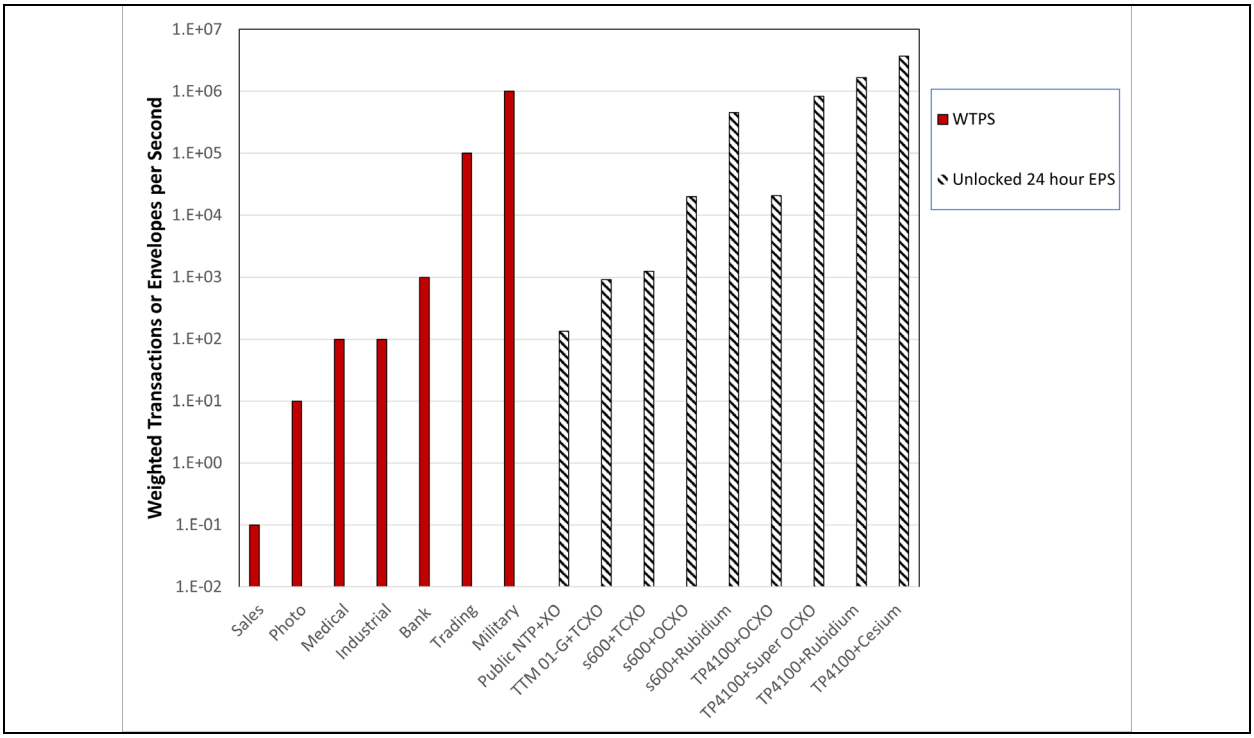

图11： *应用WTPS要求与24小时解锁设备EPS能力*

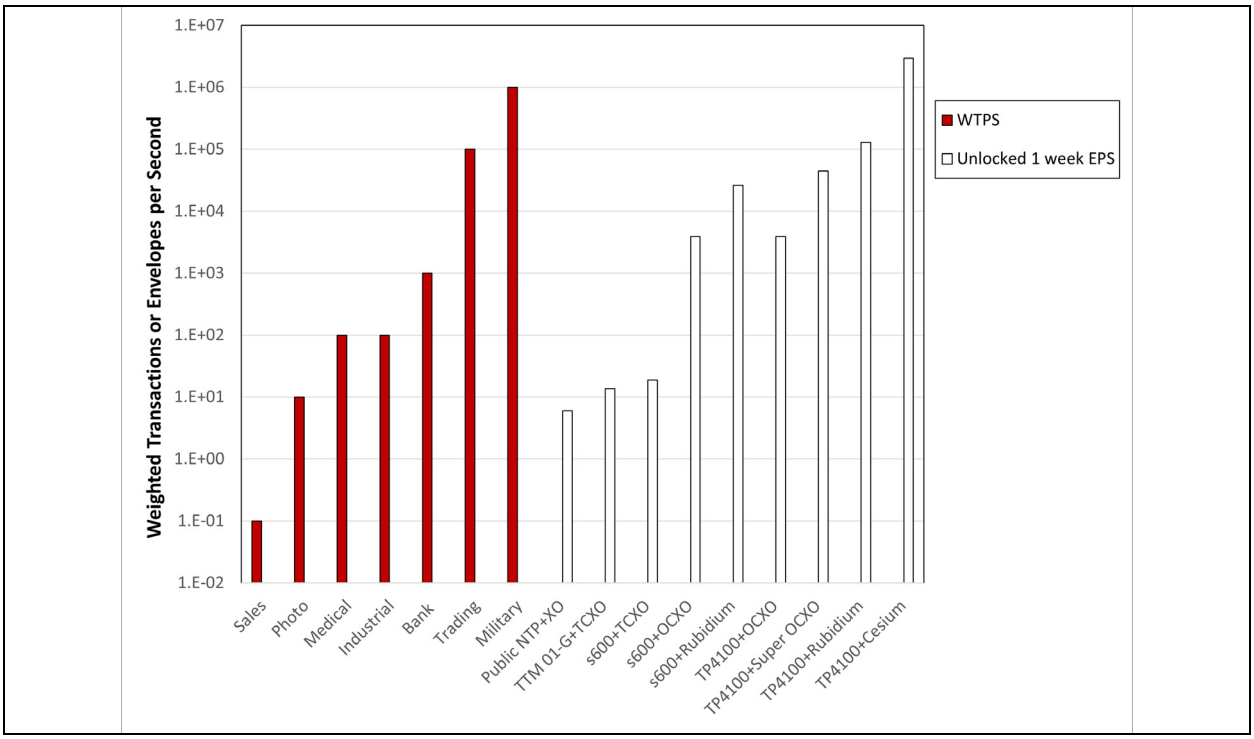

图12： *应用WTPS要求与1周解锁设备EPS能力*

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司

虚拟主参考时钟

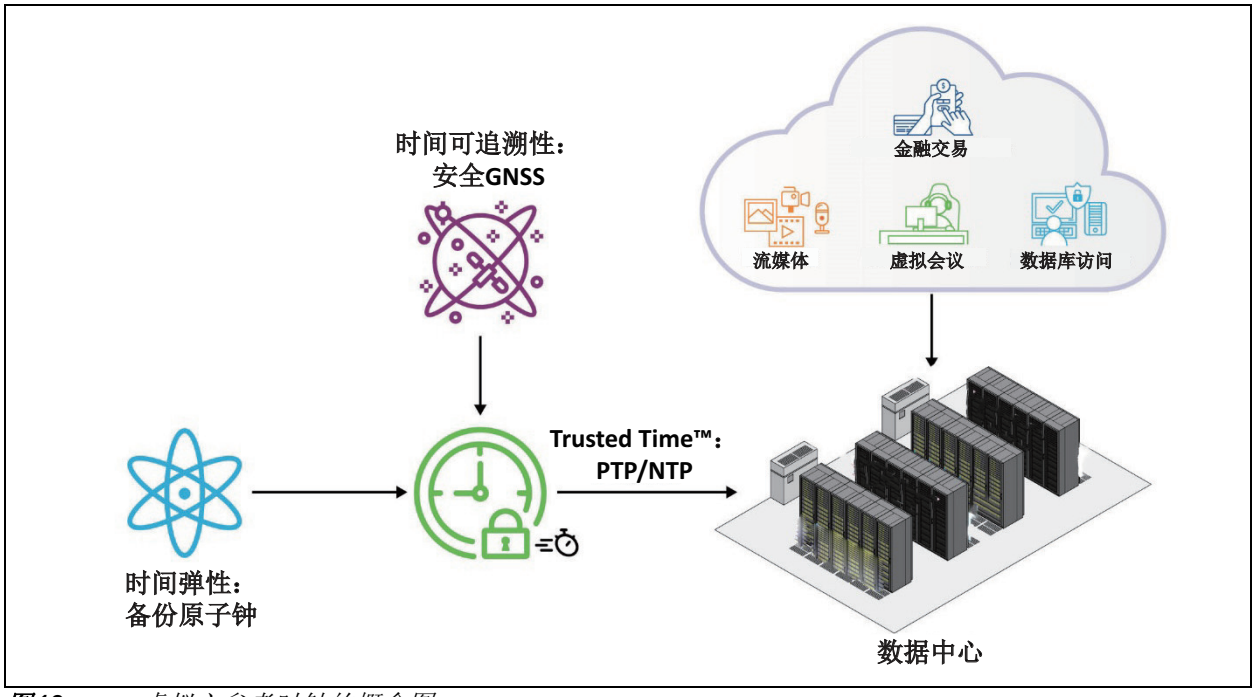

图13： *虚拟主参考时钟的概念图*

为了满足分布式系统模型对于更高能力和速度的需求，Microchip开发了“虚拟主参考时钟”以在成套的解决方案中分配精确、安全和弹性的时间[12]。通过将S600或TP4100时间服务器与嵌入式铷钟或外部铯钟配对，并使用Bluesky防火墙软硬件对其进行保护，可以在每个数据中心定位高精度时间源以提高其整体EPS，从而实现数百万TPS，这样即使外部时间源丢失一天甚至几周，也不会出现重大的一致性风险。

结论

确定支持全球分布式数据的正确授时架构取决于多种因素，其中包括每秒事务数、副本中无法解决的数据不一致问题的严重程度，以及短时间内在多个位置更新记录或相关记录的概率。一旦分析了这些因素，就可以确定WTPS，然后可以指定正确的设备，以确保达到所需的数据一致性水平。

注

注 **1：** 本文假定事务仅涉及一项操作。尽管大部分数据库事务涉及多项操作，但本文中的原则仍然适用，只是需要根据事务中的操作数量对值进行缩放。

2: 对于时钟精度，假定温度恒定。数值的来源包括发布的数值、经验数据或基于模型的预测值。对于解锁值，假定时钟已稳定一段时间并符合数据手册中规定的UTC规范。

参考资料

1. https://storage.googleapis.com/pub-tools-public-publication-data/pdf/65b514eda12d025585183a641b5a9e096a3c4be5.pdf
2. https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/spr11/cos461/docs/lec24-strong.pdf
3. https://www.esma.europa.eu/document/guidelines-transaction-reporting-order-record-keeping-and-clock-synchronisation-under-mifid
4. https://www.nyse.com/publicdocs/nyse/markets/nyse/rule-interpretations/2017/NYSE%20Number%2017-02%203.8.pdf
5. https://www.microsemi.com/product-directory/enterprise-network-time-servers/4117-syncserver-s600
6. https://www.microsemi.com/product-directory/carrier-grade-ntp-ptp-ieee-1588-grand-masters/4422-timeprovider-4100
7. https://tekron.com/products/compact-gnss-clock-ttm01g/
8. https://www.federalregister.gov/documents/2020/02/18/2020-03337/strengthening-national-resilience-through-responsible-use-of-positioning-navigation-and-timing
9. https://www.microsemi.com/product-directory/gps-instruments/4398-bluesky-gps-firewall
10. https://www.microsemi.com/product-directory/cesium-frequency-references/4115-5071a-cesium-primary-frequency-standard
11. https://www.microsemi.com/product-directory/cesium-frequency-references/4114-csiii-model-4310b
12. https://www.microchip.com/en-us/products/synchronization-and-timing-systems/virtual-primary-reference-time-clock

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信：在正常使用且符合工作规范的情况下， Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 注重并积极保护其知识产权。严禁任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为，这种行为可能会违反《数字千年版权法案》（Digital Millennium Copyright Act）。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是 “牢不可破” 的。代码保护功能处于持续发展中。 Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物及其提供的信息仅适用于Microchip产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他任何方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，将来可能会发生更新。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 https://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-supportservices。

Microchip “按原样”提供这些信息。 Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销， Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔， Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额 （如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和 / 或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中或以其他方式转让任何许可证。

有关 Microchip 质量管理体系的更多信息，请访问 www.microchip.com/quality。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、 dsPIC、 flexPWR、 HELDO、 IGLOO、 JukeBlox、 KeeLoq、 Kleer、 LANCheck、 LinkMD、 maXStylus、 maXTouch、 MediaLB、 megaAVR、 Microsemi、 Microsemi 徽标、 MOST、 MOST 徽标、 MPLAB、 OptoLyzer、 PIC、 picoPower、 PICSTART、 PIC32 徽标、 PolarFire、 Prochip Designer、 QTouch、 SAM-BA、 SenGenuity、 SpyNIC、 SST、 SST 徽标、 SuperFlash、 Symmetricom、 SyncServer、 Tachyon、 TimeSource、 tinyAVR、 UNI/O、 Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AgileSwitch、 APT、 ClockWorks、 The Embedded Control Solutions Company、 EtherSynch、 Flashtec、 Hyper Speed Control、 HyperLight Load、 Libero、 motorBench、 mTouch、 Powermite 3、 Precision Edge、 ProASIC、 ProASIC Plus、 ProASIC Plus 徽标、 Quiet-Wire、 SmartFusion、 SyncWorld、 Temux、 TimeCesium、 TimeHub、 TimePictra、 TimeProvider、 TrueTime和ZL均为Microchip Technology Incorporated在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、 AKS、 Analog-for-the-Digital Age、 Any Capacitor、 AnyIn、 AnyOut、 Augmented Switching、 BlueSky、 BodyCom、 Clockstudio、 CodeGuard、 CryptoAuthentication、 CryptoAutomotive、 CryptoCompanion、 CryptoController、 dsPICDEM、 dsPICDEM.net、 Dynamic Average Matching、 DAM、 ECAN、 Espresso T1S、 EtherGREEN、 GridTime、 IdealBridge、 In-Circuit Serial Programming、 ICSP、 INICnet、 Intelligent Paralleling、 IntelliMOS、 Inter-Chip Connectivity、 JitterBlocker、 Knob-on-Display、 KoD、 maxCrypto、 maxView、 memBrain、 Mindi、 MiWi、 MPASM、 MPF、 MPLAB Certified 徽标、 MPLIB、 MPLINK、 MultiTRAK、 NetDetach、 Omniscient Code Generation、 PICDEM、 PICDEM.net、 PICkit、 PICtail、 PowerSmart、 PureSilicon、 QMatrix、 REAL ICE、 Ripple Blocker、 RTAX、 RTG4、 SAM-ICE、 Serial Quad I/O、 simpleMAP、 SimpliPHY、 SmartBuffer、 SmartHLS、 SMART-I.S.、 storClad、 SQI、 SuperSwitcher、 SuperSwitcher II、 Switchtec、 SynchroPHY、 Total Endurance、 Trusted Time、 TSHARC、 USBCheck、 VariSense、 VectorBlox、 VeriPHY、 ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、 Frequency on Demand、 Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 Microchip Technology Inc. 的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2022, Microchip Technology Incorporated及其子公司版权所有。

ISBN：978-1-6683-1320-6

全球销售及服务网点

美洲

公司总部 Corporate Office
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1-480-792-7200
Fax: 1-480-792-7277
技术支持：
http://www.microchip.com/support
网址：www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta
Duluth, GA
Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

奥斯汀 Austin, TX
Tel: 1-512-257-3370

波士顿 Boston
Westborough, MA
Tel: 1-774-760-0087
Fax: 1-774-760-0088

芝加哥 Chicago
Itasca, IL
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

达拉斯 Dallas
Addison, TX
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 Detroit
Novi, MI
Tel: 1-248-848-4000

休斯敦 Houston, TX
Tel: 1-281-894-5983

印第安纳波利斯 Indianapolis
Noblesville, IN
Tel: 1-317-773-8323
Fax: 1-317-773-5453
Tel: 1-317-536-2380

洛杉矶 Los Angeles
Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608
Tel: 1-951-273-7800

罗利 Raleigh, NC
Tel: 1-919-844-7510

纽约 New York, NY
Tel: 1-631-435-6000

圣何塞 San Jose, CA
Tel: 1-408-735-9110
Tel: 1-408-436-4270

加拿大多伦多 Toronto
Tel: 1-905-695-1980
Fax: 1-905-695-2078

亚太地区

中国 - 北京
Tel: 86-10-8569-7000

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511

中国 - 重庆
Tel: 86-23-8980-9588

中国 - 东莞
Tel: 86-769-8702-9880

中国 - 广州
Tel: 86-20-8755-8029

中国 - 杭州
Tel: 86-571-8792-8115

中国 - 南京
Tel: 86-25-8473-2460

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355

中国 - 上海
Tel: 86-21-3326-8000

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8864-2200

中国 - 苏州
Tel: 86-186-6233-1526

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7252

中国 - 厦门
Tel: 86-592-238-8138

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2943-5100

中国 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7830

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2508-8600

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-577-8366

亚太地区

澳大利亚 Australia - Sydney
Tel: 61-2-9868-6733

印度 India - Bangalore
Tel: 91-80-3090-4444

印度 India - New Delhi
Tel: 91-11-4160-8631

印度 India - Pune
Tel: 91-20-4121-0141

日本 Japan - Osaka
Tel: 81-6-6152-7160

日本 Japan - Tokyo
Tel: 81-3-6880-3770

韩国 Korea - Daegu
Tel: 82-53-744-4301

韩国 Korea - Seoul
Tel: 82-2-554-7200

马来西亚 Malaysia - Kuala Lumpur
Tel: 60-3-7651-7906

马来西亚 Malaysia - Penang
Tel: 60-4-227-8870

菲律宾 Philippines - Manila
Tel: 63-2-634-9065

新加坡 Singapore
Tel: 65-6334-8870

泰国 Thailand - Bangkok
Tel: 66-2-694-1351

越南 Vietnam - Ho Chi Minh
Tel: 84-28-5448-2100

欧洲

奥地利 Austria - Wels
Tel: 43-7242-2244-39
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦 Denmark - Copenhagen
Tel: 45-4485-5910
Fax: 45-4485-2829

芬兰 Finland - Espoo
Tel: 358-9-4520-820

法国 France - Paris
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 Germany - Garching
Tel: 49-8931-9700

德国 Germany - Haan
Tel: 49-2129-3766400

德国 Germany - Heilbronn
Tel: 49-7131-72400

德国 Germany - Karlsruhe
Tel: 49-721-625370

德国 Germany - Munich
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

德国 Germany - Rosenheim
Tel: 49-8031-354-560

以色列 Israel - Ra'anana
Tel: 972-9-744-7705

意大利 Italy - Milan
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

意大利 Italy - Padova
Tel: 39-049-7625286

荷兰 Netherlands - Drunen
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

挪威 Norway - Trondheim
Tel: 47-7288-4388

波兰 Poland - Warsaw
Tel: 48-22-3325737

罗马尼亚 Romania - Bucharest
Tel: 40-21-407-87-50

西班牙 Spain - Madrid
Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

瑞典 Sweden - Gothenberg
Tel: 46-31-704-60-40

瑞典 Sweden - Stockholm
Tel: 46-8-5090-4654

英国 UK - Wokingham
Tel: 44-118-921-5800
Fax: 44-118-921-5820

© 2022 Microchip Technology Inc.
及其子公司