Project Cerberus：Attestation Specification

作者：

- Christopher Weimer，微软首席固件工程师
- Akram Hamdy，微软高级固件工程师

修订记录

- v1.00 (2022-07-01)
    - 初始版本。

概括

Cerberus Challenge Protocol 的目标是确保系统中的所有组件上只运行经过身份验证和兼容的固件. 这是通过直接测量受保护的固件和远程设备的测量挑战来实现的。Cerberus Challenge Protocol提供了确保平台的完整性和真实性所必需的原语，但没有提供有关如何实现这一点的许多细节。本规范提供了这些细节。

Device Measurements - 设备测量

任何证明流程的基础是维护和报告设备加载的固件和配置的测量值的能力。在 Cerberus 设备中，测量通过平台测量寄存器 (PMR) 报告，其具有与 TPM PCR 相似的行为和属性。

每个 PMR 代表一个单独的测量，由多个单独的组件扩展。扩展操作遵循与 TPM PCR 相同的公式，因此 PMR 值表示为`PMRnew = HASH (PMRold || Data)`。每个 Cerberus 设备之间用于生成 PMR 和初始 PMR 值（即执行任何扩展操作之前的 PMR 值）的哈希算法可能不同。

Platform Measurement Register(PMR) - 平台测量寄存器

Cerberus Challenge Protocol 允许 5 个 PMR 值（PMR0 - 4），每个值都可以根据具体实现来衡量不同类型和数量的数据。不要求设备支持所有 5 个 PMR，但每个设备都必须至少支持 PMR0。除此之外，它们的使用方式有很大的灵活性。此处记录的内容被认为是不同类别 Cerberus 设备的“最佳实践”。

PMR0

作为唯一需要的 PMR，每个设备都必须生成此测量以供证明，并且期望包含此测量中的元素的最小集合。根据特定实现的要求，可以有其他条目，但 PMR0 必须至少包含以下测量列表。

- 已加载的所有可变固件层。遵循 TCG DICE 引导模型，需要测量所有层 0 到 N，其中层 N 是正在运行的应用程序固件。
- 安全启动密钥。这包括硬件支持的根密钥和用于加载后续引导阶段的密钥清单。
- 当前的反回滚计数器。

仅证明其自身固件状态的简单 RoT 设备可能没有 PMR0 以外的任何 PMR。

外部 RoT

外部信任根是一种将插入处理器的非易失性固件存储（例如 SPI 闪存）并代表处理器验证和证明固件状态的设备。由于外部 RoT 证明的不仅仅是它自己的状态，它需要使用更多可用的 PMR。

对于这些设备，PMR0 应该包含 RoT 设备本身的固件测量值。它不应包括任何清单或应用于设备的其他配置的测量。这为证明 RoT 状态提供了一致的测量。

PMR1 和 PMR2 应包含任何可配置状态的测量值。这将包括设备用于验证处理器固件的任何 PFM 以及验证结果。在这两个 PMR 中实际如何组织测量并不重要。例如，在 RoT 保护两个处理器的情况下，设备同样可以将所有测量值放在单个 PMR 中，或者将一个处理器放在 PMR1 中，另一个放在 PMR2 中。

提供 PMR3 和 PMR4 以提供与 TPM 类似的功能。处理器可以将自己的数据扩展到 Cerberus 管理的 PMR 中。然后可以将这些 PMR 的状态用作证明声明的一部分。

平台 RoT

PA-RoT（平台主动信任根）负责证明系统内所有组件的健康状况。它可能也可能不是外部 RoT，但它对 PMR 的使用有类似的期望。

PMR0 将是 PA-RoT 设备的固件测量值，PMR1 和 PMR2 将用于报告系统组件的配置和认证状态。这包括用于证明组件和证明结果的任何 PCD 或 CFM。

PMR3 和 PMR4 在此配置中可能是必需的，也可能不是必需的。根据实现方式，可能仍然希望系统中的处理器能够进行测量以进行扩展。

内部 RoT

内部信任根是 SoC 同一封装内的片上设备，但与主应用程序处理器分开。内部RoT 强制执行安全启动和对加载到应用处理器中的所有固件进行测量，并且可以选择性地提供对来自应用处理器运行时的额外测量的管理。由于内部RoT嵌入在设备中，因此它可能不会像外部 RoT 那样使用 PFM。

PMR0 将仅包含内部 RoT 固件的测量值。其他 PMR (1-4) 可以任意组合使用，以报告应用处理器的固件和安全状态的测量结果。为 PMR0 中的 RoT 测量的相同类型的信息应该为应用处理器测量。如果 RoT 公开可由应用程序处理器扩展的测量，它将为此目的使用 PMR3 或 PMR4。

如果内部 RoT 也被用作 PA-RoT 或证明系统内的其他组件，则需要分配至少一个 PMR 来测量 PCD、CFM 和证明结果。

Attesting Measurements 证明测量

Cerberus Challenge Protocol提供有状态（`Challenge`/`Get PMR`）和无状态（`Message Unseal`）机制来证明设备测量。在证明命令中，每个设备只需要挑战，因为这可能是证明简单 AC-RoT 所需的唯一命令，该简单 AC-RoT 仅包含 PMR0 中的测量值。强烈建议支持额外 PMR 的设备实施 `Get PMR`。鼓励 PA-RoT 设备实施 `Message Unseal`，为分布式证明工作流程提供灵活性。

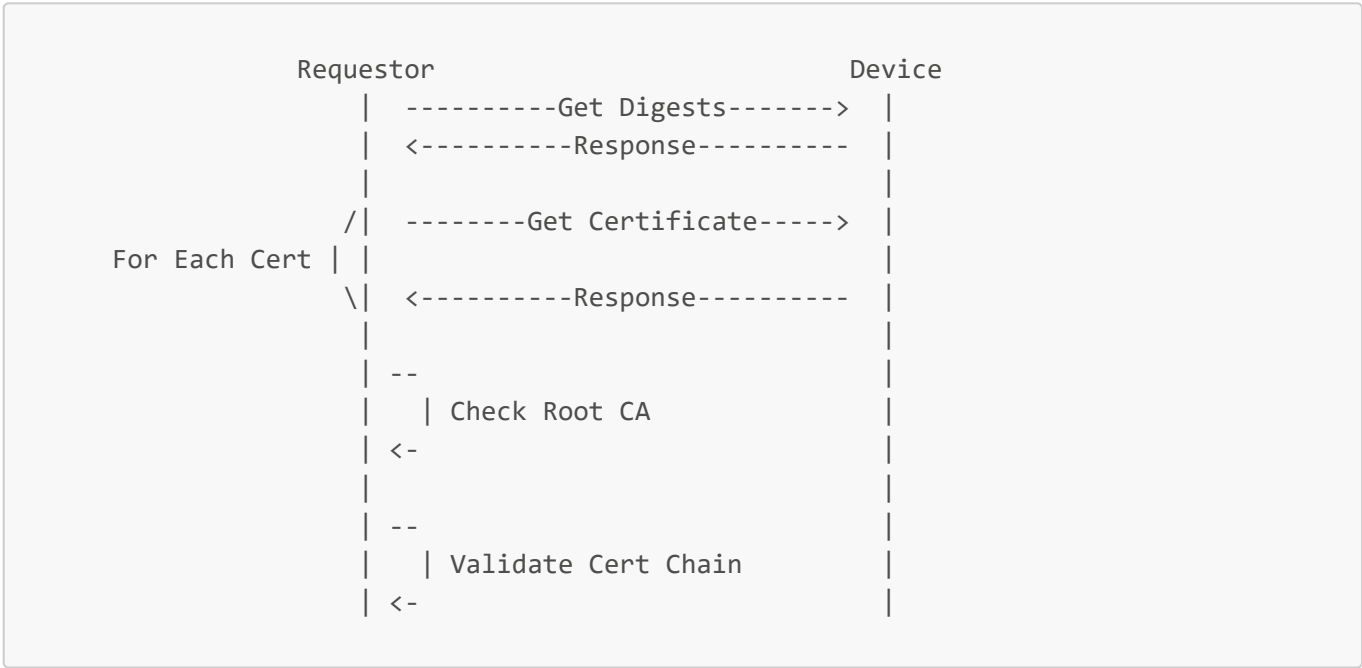
本节仅描述安全证明测量的机制。它没有说明如何知道报告的测量值是否正确。在系统中，这由 CFM 处理，稍后将详细描述。

Device Certificate 设备证书

所有证明工作流程都使用由设备的 DICE 身份证书认可的设备唯一密钥。使用哪个设备密钥取决于正在执行的特定证明流程和设备实现细节，但检索和验证此密钥的过程是相同的。Cerberus 最多支持 8 个不同的证书链（插槽），但只需要设备支持单个证书链即可支持证明。

获取和验证设备的证书链涉及执行`Get Digests`请求，然后按以下顺序执行多个`Get Certificate`请求。

1. 为目标证书链发出`Get Digests`。这提供了链中每个证书的哈希值，可用于两个目的。 首先，它告诉请求者这个链中到底有多少证书。其次，它为请求者提供了一种方法来缓存来自先前会话的信息并检测证书是否已更改。缓存证书信息时，请求者可以缓存完整证书、每个证书的摘要或整个链的摘要，并能够验证报告的证书链是否与先前验证的相匹配。
2. 为链中的每个证书颁发`Get Certificate`。最后一个证书将是用于证明请求的密钥的最终实体证书。如果存在与当前摘要匹配的有效缓存，则可以跳过任意数量的这些请求。
3. 验证根 CA 是否可信。这种信任如何建立取决于请求者。另一个 Cerberus 设备将使用 CFM 中的信息来确定根 CA 是否可信。
4. 一旦知道根 CA 是好的，X.509 路径验证将在整个证书链上执行，证明认证证书已被根 CA 认可。
5. 如果证书链验证失败，则设备不可信。此设备不需要进一步证明。



一旦获得受信任的设备证书，它就可以用作安全交换的一部分来证明设备状态。

Challenge / Get PMR 挑战/获得PMR

使用`Challenge`或`Get PMR`命令证明 Cerberus 设备是检查 PMR 值的最简单机制。这两个命令的响应仅返回 PMR 的原始值。在`Challenge`的情况下，返回的 PMR 是 PMR0。使用 `Get PMR`，可以查询设备支持的任何 PMR。请求中的新鲜度随机数和使用先前获取的证明密钥的签名提供与特定设备的绑定和抗重放。

Message Unseal 消息解封

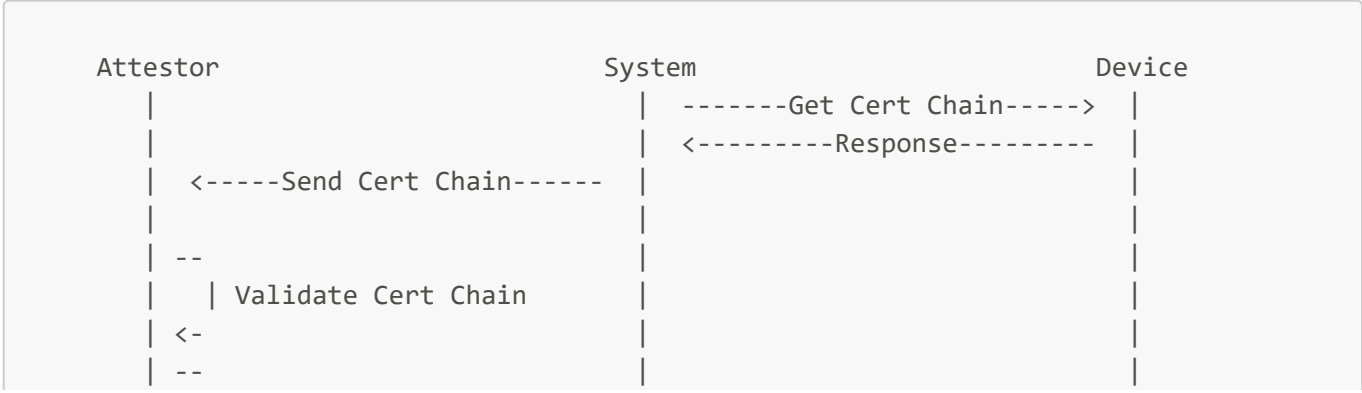
`Message Unseal` 也可以证明设备 PMR 的状态，但不一定直接从设备获取 PMR 值。如果证明者拥有系统正常运行所需的一些秘密或其他工件，则此流程有效。外部证明者可以使用设备证书的知识和预期的 PMR 值来将此系统秘密密封到预期的 PMR 值。如果具有匹配身份证书链的设备具有预期的 PMR 值，目标系统将只能解封此秘密。使用以下顺序。

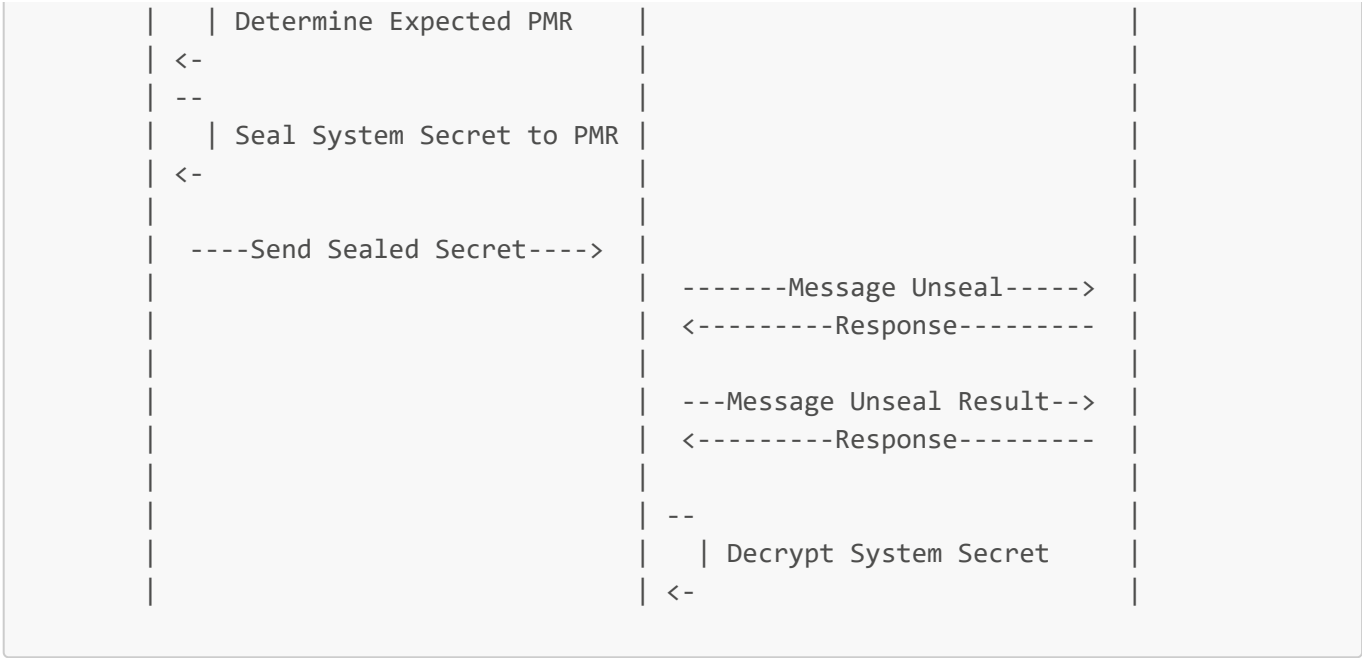
1. 接收并验证设备证书链。

2. 确定设备的一组预期 PMR 值。
3. 生成随机种子。
    - 如果 Seal/Unseal 将使用 ECDH，则此种子是使用随机 ECC 密钥对和 Cerberus ECC 公钥的 ECDH 共享秘密。
    - 如果 Seal/Unseal 将使用 RSA，则此种子是一个随机数，然后使用 Cerberus RSA 公钥对其进行加密。
4. 从种子中，使用 NIST800-108 计数器模式派生一个 256 位 HMAC 签名密钥。
    - Ki = seed
    - Label="signing key"
    - No Context
    - r = 32
    - `key = HMAC（种子，0x00000001 || 签名密钥 || 0x00 || 0x00000100）`
5. 从种子中，使用 NIST800-108 计数器模式导出 256 位对称加密密钥。
    - Ki = seed
    - Label = "encryption key"
    - No Context
    - r = 32
    - `key = HMAC(seed, 0x00000001 || encryption key || 0x00 || 0x00000100)`
6. 使用加密密钥对系统机密进行加密。加密方式和算法可由平台自行定义。如果需要不同的密钥长度，可以通过额外的 KDF 进一步变形 256 位加密密钥以派生最终加密密钥。
7. 生成密封策略。这是一个包含五个 64 字节值的数组，每个值对应一个 PMR。由于测量未使用完整的 64 字节分配而导致的未使用字节应设置为 0。未使用的 PMR，无论是因为设备不支持它还是因为 PMR 的值无关紧要，应设置为 0。此数组映射直接到 `Message Unseal` 请求结构中的`PMRx Sealing`值。
8. 计算密封负载的 HMAC 签名，使得 `sig = HMAC (signing key, ciphertext || sealing policy)`
9. 将加密的系统秘密、密封策略、HMAC 签名和种子发送到目标系统。
    - 如果使用 ECDH 密封，则种子是证明者生成的随机 ECC 公钥。
    - 如果使用 RSA 密封，则种子是 RSA 加密的随机数。
10. 一旦目标系统收到完整的数据包，它必须执行 `Message Unseal` 请求，将这四个数据提供给 Cerberus 设备。
11. Cerberus 设备将使用提供的种子重新生成相同的签名和加密密钥，并在有效负载上验证 HMAC 签名。如果 HMAC 签名有效且 PMR 值与密封策略中指定的值匹配，则将加密密钥返回给请求者。
12. 然后目标系统可以使用加密密钥来解密系统秘密或执行任何其他需要该密钥的必要操作。

注意：此流程生成的加密密钥可以从设备以明文形式发送。该设备还将基于相同的种子重新生成相同的加密密钥，只要 PMR 值保持不变，而无需了解谁在发送请求或此有效负载已被解封多少次。

由于这些原因，加密密钥必须被认为是一次性使用的密钥，并且用密钥密封的系统秘密也需要是一次性使用的。如果其中任何一个被违反，系统就会通过重放受到损害。





`Message Unseal` 流程的一个重要方面是证明者必须知道设备的 PMR 值。此外，它必须确切地知道这些值是什么，而不仅仅是可接受值的范围。Cerberus Challenge Protocol提供了多种机制来确定 PMR 状态。或者，可以向证明者提供足够的离线知识以了解这些值应该是什么。

- **Get PMR**
  获取设备 PMR 值的第一个也是最明显的方法是发出`Get PMR`请求。

- **证明日志**
  Cerberus 设备可以选择提供为每个 PMR 记录的所有测量的证明日志。使用`Get Log`请求，可以为设备检索证明日志并将其与证书链一起发送给证明者。证明日志不仅包含每个 PMR 的最终值，还包含促成该值的每个测量值。这为证明者提供了更多粒度来验证 PMR 状态。

  如果证明日志本身不足以验证 PMR 状态，则可以检索证明日志中每次测量的实际数据。如果设备支持`Get Attestation Data`请求，则可以针对证明日志中的每个条目发出此请求，并发送给证明者。

- **TCG 日志**
  如果 Cerberus 设备支持，`Get Log`请求可用于检索符合 TCG 标准的测量日志，该日志可发送给证明者。此日志将包含与 Cerberus 证明日志和`Get Attestation Data`的组合相同的信息。

Manifests 清单

Cerberus 清单是应用于设备以驱动固件的身份验证和证明的配置文件。不同的清单类型适用于不同的场景，但基于相同的基本结构。

清单的设计预期它们将存储在设备外部的闪存中，并且设备中没有足够的内存来在任何时候将整个清单存储在 RAM 中。将整个清单放在 RAM 中显然是可行的，但可能有更有效的方法来构建此用例所需的数据。

General Manifest Structure 一般清单结构

每个清单至少包含三个主要部分：清单标题、目录和签名。每个清单都以固定长度的标头开头，以签名结尾，签名的长度在标头中指定。

仅使用标题信息，就可以验证完整的清单。目录紧跟在清单标题之后，描述了清单中包含的所有信息。

清单本身由数量可变的元素组成，其类型和顺序在目录中指定。目录是一个可变长度的结构，包含一个标题、清单中每个元素的一个条目、元素的可选哈希列表以及可用于独立验证表数据的整体表哈希。

清单中的保留字段应设置为 0，但解析器不会验证此值。清单的未来版本可能会对某些数据使用保留字段，并且为了保持向后兼容性，解析器不得拒绝这些字段中具有非零值的清单。这同样适用于指定字段内的保留位。

所有大于一个字节的字段都存储在小端。这还包括不落在字节边界上的字段。为了简化解析，不是偶数倍字节的字段被分解以与内存字节边界对齐。例如：

- 一个 12 位字段 [11:0]，从内存字节边界开始存储为
  `byte0[7:0] = data[7:0]`
  `byte1[7:4] = data[11:8]`
- 一个 12 位字段 [11:0]，从一个字节的中间开始存储为
  `byte0[3:0] = [3:0]`
  `byte1[7:0] = [11:4]`

一个例外是字节数组的字段，尤其是摘要。除非另有说明，否则所有摘要和其他字节数组都存储在大端。

所有长度都以字节表示。

Manifest Header 清单头

`bitfield Manifest.Header`

Type	Name	Description
16	total_length	清单中所有数据的总长度，包括签名。
16	manifest_type	指示清单类型的标识符。
32	version_id	清单的版本标识符。版本 ID 是一个单调递增的值，防止回滚到早期的清单版本。
16	signature_length	附加到清单数据末尾的签名长度。
PublicKeyType	public_key_type	用于生成清单签名的公钥类型。
KeyStrength	key_strength	用于生成清单签名的密钥强度。
HashType	hash_type	用于生成清单签名的哈希算法。
0x00	_	保留的。

`enum Manifest.PublicKeyType`

Value	Name	Description
00b	rsa	公钥是 RSA。
01b	ecc	公钥是ECC。

`enum Manifest.KeyStrength`

Value	Name	Description

Value	Name	Description
000b	rsa_2k_ecc_256	密钥是 2048 位 RSA 或 256 位 ECC。
001b	rsa_3k_ecc_384	密钥是 3072 位 RSA 或 384 位 ECC。
010b	rsa_4k_ecc_521	密钥是 4096 位 RSA 或 521 位 ECC。

enum Manifest.HashType

Value	Name	Description
000b	sha2_256	哈希是使用 SHA2-256 计算的。
001b	sha2_384	哈希是使用 SHA2-384 计算的。
010b	sha2_512	哈希是使用 SHA2-512 计算的。

Manifest Table of Contents 清单目录

bitfield Manifest.TOC.Header

Type	Name	Description
8	entry_count	表中的条目数。
8	hash_count	表中具有关联哈希的条目数。不需要所有条目都具有哈希。
00000b	_	填充未使用的 HashType 位。这必须是 0。
HashType	hash_type	指定为表验证添加的哈希类型。这也是用于生成单个元素哈希的哈希类型。
0x00	_	保留的。

清单中的每个元素都必须在目录中有一个条目。

条目必须根据清单中的位置排序。

bitfield Manifest.TOC.Entry

Type	Name	Description
8	type_id	指示Element Type的标识符。
8	parent	表示此元素的父级的类型 ID。此元素之前具有匹配类型 ID 的第一个元素是父元素。如果元素没有父元素，这将被设置为0xff。
8	format	元素中包含的数据的Format版本。新Format版本必须向后兼容旧版本。字段不能移动或重新排序。
8	hash_id	标识符指定此元素在哈希表中的索引。元素哈希是可选的。哈希 ID 等于或大于表中哈希的总数表示该元素没有哈希。为此，建议使用哈希 ID0xff。
16	offset	元素数据所在的清单开头的偏移量。
16	length	元素数据的长度。

在元素条目之后，有一个用于元素验证的哈希表。该表是一个大小相等的哈希数组，其长度由目录标题中指定的哈希算法确定。必须使用相同的算法计算所有哈希值。具有哈希的元素必须在使用数据之前验证哈希，即使内存中只需要一部分元素数据。哈希是在目录条目中指定的整个长度上计算的。

目录可以通过几种不同的方式使用，具体取决于性能要求和内存容量。

1. 为了优化内存消耗，在清单验证期间将缓存目录标头和哈希。目录的其余部分和清单元素保留在外部闪存中。读取的每个元素都需要一系列操作。

    - 从闪存中读取每个元素条目以找到所需的条目。
    - 读取所需条目的哈希条目（如果可用）。
    - 确保闪存上的所有目录数据作为这些读取的一部分进行哈希处理。
    - 将计算的目录哈希与缓存的哈希进行比较以确保有效性。
    - 读取并哈希元素数据。与目录中的哈希条目进行比较以确保有效性。

    此流程的性能较低，但只需要少量数据存储即可处理任何清单。

2. 如果设备内存充足，清单验证时可以完整读取目录并缓存，以便以后的元素访问更快。元素访问不需要重新验证目录，只需要验证元素数据。

    这种方法可能不适用于内存受限的设备，因为使用 SHA2-512 的具有 255 个条目和 255 个哈希值的目录需要大约 18k 内存的缓存。

Manifest Elements 清单元素

虽然在大多数情况下元素的顺序和数量是可变的，但元素可以限制在特定的上下文中。某些元素可能只是Top-Level结构的一部分（即，它不会有任何父元素），而其他元素则需要特定类型的父元素。错误上下文中的元素将被解析器忽略。此外，元素可以定义为Singleton。

Singleton元素的重复条目将被忽略。所有标识符字符串都限制在 255 个字节以内，并且没有任何终止符存储在清单中。

定义了一组基本元素，这些元素在所有清单类型中都是通用的。特定清单可以定义其他类型。

Type ID	Element Type	Format	Top-Level	Singleton	Description
0x00	Platform ID	1	X	X	使用此清单的平台的标识符。
0x01 - 0x0f	Reserved				保留以供将来使用。
0xe0 - 0xfe	Vendor Extensions				为供应商特定的Element Type保留。
0xff	Unavailable				不能用作Element Type，因为它用作父/子关系的一部分。

平台 ID 元素

Platform ID 元素用于将特定清单关联到特定类型的平台。它还可以作为识别特定清单的辅助方法。由于清单 ID 只是整数，并且可能在不同类型和不同系统的清单之间重叠，因此清单 ID 和平台 ID 的组合提供了一种唯一标识特定清单的方法。此外，在清单验证期间使用平台 ID 以确保仅使用同一平台的清单来替换现有清单。

虽然清单结构不需要任何特定元素的存在，但如果清单不包含平台 ID 元素，清单解析器可能会拒绝该清单作为无效清单。

`bitfield Manifest.PlatformID`

Type	Name	Description
`8`	`plat_id_length`	平台 ID 字符串的长度。
`0x000000`	`_`	保留的。
`plat_id_length`	`plat_id_string`	平台 ID 字符串。这是一个非空终止的 ASCII 字符串。
`ALIGN (32)`	`_`	填充零。

Platform Firmware Manifest 平台固件清单

外部 RoT 设备使用平台固件清单 (PFM) 来验证处理器固件存储的内容。PFM 结构是为 SPI 闪存设备量身定制的，尽管相同的结构可能适用于其他存储类型。

PFM 包含可由处理器加载的允许固件版本列表，并提供验证映像所需的信息。该结构很灵活，可以考虑 Flash 的许多不同内容和布局。在简单的情况下，一个连续的闪存块中包含一个固件映像，但在某些情况下，一个闪存设备可能有多个固件组件，每个组件都由处理器独立加载。所有这些场景都可以在 PFM 中描述。

PFM 将在清单标头中报告 `0x706d` 的 `manifest_type`。PFM 定义了以下额外的清单Element Type。

Type ID	Element Type	Format	Top-Level	Singleton	Description
`0x10`	`Flash Device`	0	X	X	定义与整个闪存设备相关的全局信息。
`0x11`	`Firmware`	1	X		定义闪存上存在的单个固件。这仅在清单中有 Flash Device 元素时才有效。
`0x12`	`Firmware Version`	1			单一版本固件的说明。这将仅用作固件元素的子元素。

Flash Device Element 闪存设备元素

每个 PFM 旨在描述单个闪存设备的内容。Flash Device 元素向 RoT 提供关于物理闪存的整体信息，这可能是内容验证所必需的。

注意：在为单个处理器使用两个冗余闪存的配置中，两个闪存设备将有一个 PFM。预计 RoT 会在任何时间点管理对一个闪存或另一个闪存的访问。任一设备的布局和验证应该相同。

`bitfield PFM.FlashDevice`

Type	Name	Description

Type	Name	Description
8	blank_byte	表示闪存未使用字节的值。在验证期间，将根据此值检查所有未使用的闪存区域，以确保没有存储意外数据。
8	fw_count	闪存中存储的固件组件数。
0x0000	_	保留的。

Firmware Element 固件元素

Firmware 元素描述闪存设备的逻辑分区，代表单个可更新的部分。大多数处理器只需要一个固件元素，因为只有一个映像从闪存加载。然而，一些更复杂的 SoC 可能有多个独立的内核，每个内核都加载固件。在这种情况下，可以对闪存进行分区，以便单独验证每个组件。

`bitfield PFM.Firmware`

Type	Name	Description
8	version_count	此固件组件允许的版本数。
8	fw_id_length	固件组件标识符的长度。
0000000b	_	保留的。
UpdateApplied	run_time_update	指示是否可以在不重新启动的情况下应用更新的标志。
0x00	_	保留的。
fw_id_length	fw_id_string	固件组件的 ASCII 字符串标识符。这不是空终止的。
ALIGN(32)	_	填充零。

`enum PFM.Firmware.UpdateApplied`

Value	Name	Description
0b	reboot	更新仅在处理器重启时应用。
1b	run_time	可以在不通知 RoT 重启的情况下应用更新。

Firmware Version Element - 固件版本元素

固件版本元素描述了验证单个固件版本所需的所有信息。每个固件组件都可以在一个 PFM 中支持多个版本。如果闪存上的固件与固件版本元素中包含的信息不匹配，则认为它是不受信任的。

`bitfield PFM.FirmwareVersion`

Type	Name	Description
8	img_count	此版本中包含的签名映像数。
8	rw_count	此版本使用的 R/W 数据区域数。
8	version_length	版本标识符字符串的长度。

Type	Name	Description
0x00	_	保留的。
32	version_addr	闪存上存储版本字符串的地址。这必须在每次都经过验证的签名映像中。
version_length	version_string	版本的 ASCII 字符串标识符。这不是空终止的。
ALIGN(32)	_	零填充。
RWRegion(rw_count)	rw_regions	包含 R/W 数据因此无法静态验证的闪存区域列表。
SignedImage(img_count)	images	必须用于验证闪存内容的哈希列表。

bitfield PFM.FirmwareVersion.RWRegion

Type	Name	Description
000000b	_	保留的。
RWOperation	auth_fail_op	当更新验证失败时，RoT 应该对该 R/W 区域执行的操作。
24	_	保留的。
Region	region	包含 R/W 数据的闪存区域。

bitfield PFM.FirmwareVersion.SignedImage

Type	Name	Description
00000b	_	填充未使用的 HashType 位。这必须是 0。
Manifest.HashType	hash_type	指定用于映像身份验证的哈希类型。
8	region_count	要为此映像哈希的闪存区域数。
0000000b	_	保留的。
MustValidate	validate	指示是否应在每次启动时验证映像的标志。
0x00	_	保留的。
hash_type	img_hash	映像数据的预期哈希值。
Region(region_count)	_	应哈希的闪存区域列表。

bitfield PFM.FirmwareVersion.Region

Type	Name	Description
32	start_addr	定义区域内的第一个有效地址。
32	end_addr	定义区域内的最后一个有效地址。

enum PFM.FirmwareVersion.MustValidate

Value	Name	Description
0b	updates	固件映像是从启动时验证的映像链式加载的，因此只有在有更新时才验证它。
1b	each_boot	在每次系统启动时验证固件映像。

enum PFM.FirmwareVersion.RWOperation

Value	Name	Description
00b	nothing	不对 R/W 区域执行任何操作。
01b	restore	如果可能，从备份中恢复区域。
10b	erase	擦除整个 R/W 区域。
11b	_	保留（什么也不做）。

XML Representation for PFM Generation - PFM 生成的 XML 表示

每个固件组件的每个版本都需要创建一个可用于生成 PFM 的元数据文件。这是一个使用 XML 存储元数据的示例，生成脚本可以使用这些元数据来创建二进制Format。

```
<Firmware type= “Identifier” version="Identifier" platform=”Identifier”>
    <VersionAddr>0x00000000</VersionAddr>
    <UnusedByte>0xff</UnusedByte>
    <RuntimeUpdate>false</RuntimeUpdate>
    <ReadWrite>
        <Region>
            <StartAddr>0x00000000</StartAddr>
            <EndAddr>0x00000000</EndAddr>
            <OperationOnFailure>Nothing</OperationOnFailure>
        </Region>
        <Region>
            <StartAddr>0x00000000</StartAddr>
            <EndAddr>0x00000000</EndAddr>
            <OperationOnFailure>Restore</OperationOnFailure>
        </Region>
    </ReadWrite>
    <SignedImage>
        <Hash>
            0x000102030405060708090a0b0c0d0e0f101112131415161718191a1b1c1d1e1f
        </Hash>
        <HashType>SHA256</HashType>
        <Region>
            <StartAddr>0x00000000</StartAddr>
            <EndAddr>0x00000000</EndAddr>
        </Region>
        <Region>
            <StartAddr>0x00000000</StartAddr>
            <EndAddr>0x00000000</EndAddr>
        </Region>
        <ValidateOnBoot>true</ValidateOnBoot>
```

```
    </SignedImage>
    <SignedImage>
        <Hash>

0x000102030405060708090a0b0c0d0e0f101112131415161718191a1b1c1d1e1f2021222324252627
28292a2b2c2d2e2f
        </Hash>
        <HashType>SHA384</HashType>
        <Region>
            <StartAddr>0x00000000</StartAddr>
            <EndAddr>0x00000000</EndAddr>
        </Region>
        <Region>
            <StartAddr>0x00000000</StartAddr>
            <EndAddr>0x00000000</EndAddr>
        </Region>
        <ValidateOnBoot>false</ValidateOnBoot>
    </SignedImage>
</Firmware>
```

Field	Description
type	固件组件字符串标识符。
version	固件版本字符串标识符。
platform	平台字符串标识符。
VersionAddr	版本字符串标识符的闪存地址。
UnusedByte	在未使用的闪存区域中检查的字节。
RuntimeUpdate	指示固件是否可以在运行时更新的标志。
ReadWrite	定义单个 R/W 数据区域。
Region	定义连续闪光区域。
StartAddr	区域内的第一个有效地址。
EndAddr	该区域内的最后一个有效地址。
OperationOnFailure	验证失败后对 R/W 数据区域执行的操作。
SignedImage	定义需要身份验证的单个映像。
Hash	映像的预期哈希值。
HashType	使用的哈希类型。

XML 枚举的允许值

具有默认值的枚举表示该标记是可选的。如果它不存在于 XML 中，将使用默认值。

OperationOnFailure

- Nothing (default)
- Restore
- Erase

HashType

- SHA256 (default)
- SHA384
- SHA512

Platform Configuration Data - 平台配置数据

平台配置数据 (PCD) 清单用于自定义 Cerberus 设备并指定策略信息。此外，PCD 用于通知 RoT 它所在的平台以及如何联系其他组件以在平台上进行证明。此清单对于每个平台都是唯一的，并且独立于 PFM 和 CFM 应用。

PCD 将在清单标头中报告 `0x1029` 的 `manifest_type`。PCD 定义了以下额外的清单Element Type。

Type ID	Element Type	Format	Top-Level	Singleton	Description
`0x40`	`RoT`	2	X	X	提供设备的一般配置。
`0x41`	`SPI Flash Port`	1			SPI 闪存上的单个受保护固件存储。这是 RoT 元素的子元素。
`0x42`	`I2C Power Management Controller`	1	X		定义 RoT 使用的电源管理设备。
`0x43`	`Component with Direct I2C Connection`	1	X		定义通过 I2C 直接连接到设备的 AC-RoT。
`0x44`	`Component with MCTP Bridge Connection`	1	X		定义通过 MCTP 网桥连接的 AC-RoT。

RoT Element - 根元素

RoT 元素包含 Cerberus 设备的配置选项及其直接保护的固件。RoT 通过 I2C 与 BMC 和其他设备通信。

`bitfield PCD.RoT`

Type	Name	Description
`0000000b`	`_`	保留的。
`RoTType`	`rot_type`	指示证明层次结构中 RoT 的类型。
`8`	`port_count`	直接受外部 RoT 保护的外部处理器的数量。
`8`	`components_count`	RoT 必须证明的远程组件的数量。
`8`	`rot_address`	RoT 设备的物理总线地址。

Type	Name	Description
8	rot_default_eid	RoT 应使用的默认 MCTP EID。外部 MCTP 网桥可以在运行时分配不同的 EID。
8	bridge_address	连接的 MCTP 桥的物理总线地址。
8	bridge_eid	MCTP 网桥的 EID。
0x00	_	保留的。
32	attestation_success_retry	设备成功证明后等待重新证明的持续时间（以毫秒为单位）。
32	attestation_fail_retry	设备认证失败后等待重新认证的持续时间（以毫秒为单位）。
32	discovery_fail_retry	设备发现步骤失败后等待重试的持续时间（以毫秒为单位）。
32	mctp_ctrl_timeout	MCTP 控制协议响应超时时间（以毫秒为单位）。
32	mctp_bridge_get_table_wait	如果 MCTP 网桥不支持动态 EID 分配，RoT 启动后在向 MCTP 网桥发送 MCTP 获取路由表请求之前等待的持续时间（以毫秒为单位）。如果设置为 0，RoT 将只等待 EID 分配。
32	mctp_bridge_additional_timeout	除了 MCTP 桥接导致的设备超时时间外，还要等待的时间（以毫秒为单位）。
32	attestation_rsp_not_ready_max_duration	当 SPDM 设备响应 ResponseNotReady 错误时，这是 RoT 在重试请求之前允许等待的最长持续时间（以毫秒为单位）。
8	attestation_rsp_not_ready_max_retry	每个请求允许的 SPDM ResponseNotReady 重试的最大次数。如果超出此范围，RoT 将无法通过设备认证。
0x000000	_	保留的。

enum PCD.RoT.RoTType

Value	Name	Description
0b	PA-RoT	平台主动信任根。
1b	AC-RoT	主动组件信任根。

SPI Flash Port Element - SPI 闪存端口元素

SPI 闪存端口元素表示直接受 RoT 保护的单个外部处理器。该处理器的固件存储在 SPI 闪存上。

bitfield PCD.SPIFlashPort

Type	Name	Description
8	port_id	端口标识符。这映射到协议消息中的端口 ID 参数。
0b	_	保留的。
HostResetAction	host_reset_action	RoT 在主机重置时采取的操作。
WatchdogMonitoring	watchdog_monitoring	指示端口是否支持看门狗监控以触发恢复流。
RuntimeVerification	runtime_verification	指示端口是否支持固件更新的运行时验证。
FlashMode	flash_mode	包含固件的闪存设备的配置。
ResetControl	reset_control	应与外部处理器一起使用的复位控制行为。
0000000b	_	保留的。
Policy	policy	身份验证失败时应采取的操作。
8	pulse_interval	如果端口使用脉冲复位控制，复位信号的脉冲宽度。该值是 10 毫秒的倍数。
32	spi_frequency_hz	用于闪存通信的 SPI 时钟频率。该值以赫兹表示。

enum PCD.SPIFlashPort.HostResetAction

Value	Name	Description
0b	none	在主机重置时，RoT 不会采取任何其他操作。仍将执行正常的复位处理。
1b	reset_flash	在主机重置时，始终重置主机闪存。这是对任何正常重置处理的补充，意味着 RoT 将参与每个主机重置。

enum PCD.SPIFlashPort.WatchdogMonitoring

Value	Name	Description
0b	disabled	不支持看门狗监控。
1b	enabled	支持看门狗监控。

enum PCD.SPIFlashPort.RuntimeVerification

Value	Name	Description
0b	disabled	不支持运行时验证。
1b	enabled	支持运行时验证。

enum PCD.SPIFlashPort.FlashMode

Value	Name	Description

Value	Name	Description
00b	dual	SPI 总线连接到两个用于存储固件的闪存设备。
01b	single	处理器固件只有一个闪存设备。
10b	dual_filtered_bypass	用于固件的双闪存芯片。在这种模式下，RoT 保护永远无法完全禁用。即使在旁路模式下，插入的 RoT 也会阻止一些不需要的命令。
11b	single_filtered_bypass	与dual_filtered_bypass相同，但固件只有一个闪存设备。

enum PCD.SPIFlashPort.ResetControl

Value	Name	Description
00b	notify	复位控制信号不直接引起处理器的复位。相反，它通知处理器将在下一次重置时进行的待处理固件身份验证。在主机复位期间，释放复位控制信号以指示身份验证何时完成。
01b	reset	复位控制信号直接引起处理器的复位。处理器在验证期间保持复位状态。
10b	pulse	复位控制信号直接引起处理器的复位。在验证期间，处理器在没有闪存访问的情况下保持运行，并且在验证后以脉冲方式进行复位。
11b	_	保留的。

enum PCD.Policy

Value	Name	Description
0b	passive	指示 RoT 测量中的证明失败，但允许失败的设备继续启动。
1b	active	防止认证失败的设备启动。

I2C Power Management Controller Element - I2C 电源管理控制器元素

电源管理控制器元素包含有关系统电源管理设备的信息，RoT 使用该设备为未通过认证的设备提供电源。如果不存在电源管理控制器元素，则组件电源控制不可用。

元素中的 I2C mux 信息以直接连接到 RoT 的 mux 开始，以直接连接到电源管理设备的 mux 结束。如果与电源管理控制器的通信不使用 MCTP，则 EID 字段可以设置为0x00。

bitfield PCD.I2CPowerManagementController

Type	Name	Description
I2CDevice	device	电源管理控制器的通信信息。

bitfield PCD.I2CDevice

Type	Name	Description
4	mux_count	RoT 和设备之间的 I2C 路径中的 mux 数量。
000b	_	保留的。

Type	Name	Description
I2CMode	i2c_mode	设备的 I2C 操作模式。 mux 始终是主从。
8	bus	连接到设备的 I2C 总线的标识符。
8	address	目标设备的 I2C 地址。
8	eid	设备 MCTP EID。如果设备不使用 MCTP，请将其设置为0x00。
I2CMux(mux_count)	mux	I2C mux 列表。

bitfield PCD.I2CMux

Type	Name	Description
8	mux_address	mux 的 I2C 地址。
8	mux_channel	设备连接到的 Mux 通道。
0x0000	_	保留的。

enum PCD.I2CMode

Value	Name	Description
0b	multi_master	多主机 I2C 通信。
1b	master_slave	主从 I2C 通信。

Component Elements - 组件元素

PCD 中的每个组件元素代表系统中必须证明的远程 RoT。不同的 AC-RoT 设备将具有不同的连接属性，因此有不同的Element Type来说明证明者将使用不同的方法与 AC-RoT 进行通信。组件类型标识符将匹配 CFM 中指定的类型。

bitfield PCD.Component

Type	Name	Description
Policy	policy	身份验证失败时应采取的操作。仅当存在电源控制器时才可能使用主动策略。
8	power_ctrl_reg	在管理该组件的电源控制器中注册地址。
8	power_ctrl_mask	一个位掩码，指示用于控制此组件电源的位。
0x00	_	保留的。
32	component_id	组件类型的标识符。此 ID 将用于匹配 CFM 中的证明策略。如果 PCD 中有多个具有相同组件 ID 的组件，它们将在 CFM 中使用相同的策略。

Component with Direct I2C Connection Element - 具有直接 I2C 连接元件的组件

该元素包含有关通过 I2C 直接连接到 RoT 的 AC-RoT 的信息。即使 I2C 路径中有 I2C mux，AC-RoT 也被视为直接连接。

元素中的 mux 信息以直接连接到证明者的 mux 开始，以直接连接到 AC-RoT 的 mux 结束。

`bitfield PCD.ComponentWithDirectI2CConnection`

Type	Name	Description
`Component`	`component`	AC-RoT 证明配置。
`I2CDevice`	`device`	AC-RoT 的 I2C 通信细节。

Component with MCTP Bridge Connection Element - 具有 MCTP 桥接元件的组件

此元素包含有关连接到设备的 AC-RoT 的信息，该设备将根据目标 EID 路由 MCTP 请求。在服务器中，这通常是 BMC。RoT 应该直接连接到这座桥，并了解如何与之通信。如果系统中有多个相同的设备并且可以从桥接设备动态发现 EID，则可以使用单个元素条目来标识多个设备以进行证明。

`bitfield PCD.ComponentWithMCTPBridgeConnection`

Type	Name	Description
`Component`	`component`	AC-RoT 证明配置。
`16`	`device_id`	用于在证明的发现阶段识别此设备的设备标识符。
`16`	`vendor_id`	供应商标识符用于在证明的发现阶段识别此设备。
`16`	`subsystem_device_id`	用于在证明的发现阶段识别此设备的子系统设备标识符。
`16`	`subsystem_vendor_id`	用于在证明的发现阶段识别此设备的子系统供应商标识符。
`8`	`components_count`	此元素描述的相同组件的数量。
`8`	`eid`	如果无法从 MCTP 网桥动态发现 EID，则使用默认 EID。
`0x0000`	`_`	保留的。

PCD 生成的 XML 表示

每个 RoT 都应该有 PCD 来定义与该特定配置相关的行为和组件。这对于在多个不同平台中使用的通用 RoT 设备尤其重要。这是一个使用 XML 存储平台配置的示例，生成脚本可以使用这些平台配置来创建二进制 Format。

```
<PCD sku="Identifier" version="Hex integer">
    <RoT type="PA-RoT" mctp_ctrl_timeout="Decimal Integer"
        mctp_bridge_get_table_wait="Decimal Integer">
        <Ports>
            <Port id="Decimal integer">
                <SPIFreq>Decimal integer</SPIFreq>
                <ResetCtrl>Reset</ResetCtrl>
                <FlashMode>Dual</FlashMode>
                <Policy>Passive</Policy>
```

```
                <PulseInterval>0</PulseInterval>
                <RuntimeVerification>Enabled</RuntimeVerification>
                <WatchdogMonitoring>Enabled</WatchdogMonitoring>
            </Port>
            <Port id="Decimal integer">
                <SPIFreq>Decimal integer</SPIFreq>
                <ResetCtrl>Notify</ResetCtrl>
                <FlashMode>Single</FlashMode>
                <Policy>Active</Policy>
                <PulseInterval>0</PulseInterval>
                <RuntimeVerification>Disabled</RuntimeVerification>
                <WatchdogMonitoring>Disabled</WatchdogMonitoring>
            </Port>
        </Ports>
        <Interface type="I2C">
            <Address>Hex integer</Address>
            <RoTEID>Hex integer</RoTEID>
            <BridgeEID>Hex integer</BridgeEID>
            <BridgeAddress>Hex integer</BridgeAddress>
        </Interface>
    </RoT>
    <PowerController>
        <Interface type="I2C">
            <Bus>Decimal integer</Bus>
            <EID>Hex integer</EID>
            <Address>Hex integer</Address>
            <I2CMode>MultiMaster</I2CMode>
            <Muxes>
                <Mux level="Decimal integer">
                    <Address>Hex integer</Address>
                    <Channel>Decimal integer</Channel>
                </Mux>
            </Muxes>
        </Interface>
    </PowerController>
    <Components>
        <Component type="Identifier" connection="Direct"
            attestation_success_retry="Decimal Integer"
            attestation_fail_retry="Decimal Integer"
            attestation_rsp_not_ready_max_retry="Decimal Integer"
            attestation_rsp_not_ready_max_duration="Decimal Integer">
            <Policy>Passive</Policy>
            <Interface type="I2C">
                <Bus>Decimal integer</Bus>
                <Address>Hex integer</Address>
                <I2CMode>MultiMaster</I2CMode>
                <EID>Hex integer</EID>
                <Muxes>
                    <Mux level="Decimal integer">
                        <Address>Hex integer</Address>
                        <Channel>Decimal integer</Channel>
                    </Mux>
                </Muxes>
            </Interface>
```

```
            <PwrCtrl>
                <Register>Hex integer</Register>
                <Mask>Hex integer</Mask>
            </PwrCtrl>
        </Component>
        <Component type="Identifier" connection="MCTPBridge"
            count="Decimal integer"
            attestation_success_retry="Decimal Integer"
            attestation_fail_retry="Decimal Integer"
            discovery_fail_retry="Decimal Integer"
            mctp_bridge_additional_timeout="Decimal Integer"
            attestation_rsp_not_ready_max_retry="Decimal Integer"
            attestation_rsp_not_ready_max_duration="Decimal Integer">
            <Policy>Passive</Policy>
            <DeviceID>Hex integer</DeviceID>
            <VendorID>Hex integer</VendorID>
            <SubsystemDeviceID>Hex integer</SubsystemDeviceID>
            <SubsystemVendorID>Hex integer</SubsystemVendorID>
            <EID>Hex Integer</EID>
            <PwrCtrl>
                <Register>Hex Integer</Register>
                <Mask>Hex integer</Mask>
            </PwrCtrl>
        </Component>
    </Components>
</PCD>
```

Field	Description
sku	此平台配置的字符串标识符。这成为平台 ID。
version	PCD 的版本。这成为清单 ID。
RoT	RoT 配置的容器。
type	RoT 类型标识符。
mctp_ctrl_timeout	MCTP 控制协议响应超时时间（以毫秒为单位）。
mctp_bridge_get_table_wait	如果 MCTP 网桥不支持动态 EID 分配，RoT 启动后在向 MCTP 网桥发送 MCTP 获取路由表请求之前等待的持续时间（以毫秒为单位）。如果设置为 0，RoT 将只等待 EID 分配。
Ports	外部 RoT 保护的端口集合。
Port	单个受保护端口。
id	端口的整数标识符。
SPIFreq	SPI 闪烁频率，以 Hz 为单位。
ResetCtrl	验证时重置控制设置。
FlashMode	受保护设备的闪存配置。

Field	Description
Policy	鉴证政策。
PulseInterval	如果端口使用脉冲复位，则复位脉冲宽度。
RuntimeVerification	端口运行时验证设置。
WatchdogMonitoring	端口看门狗监控设置。
Interface	RoT 的通信接口。
type	通信接口类型或组件类型标识符字符串。
Address	7 位 I2C 地址。
RoTEID	信任根的默认 MCTP EID。
BridgeEID	MCTP 网桥 EID。
BridgeAddress	MCTP 桥 7 位 I2C 地址。
Bus	设备所在的 I2C 总线的标识符。
EID	设备 MCTP EID。
I2CMode	I2C 通信模式。
Muxes	连接到设备的一系列 I2C Mux。
Mux	单个 I2C mux 。
level	I2C 路径中的 mux 级别。如果0是第一个mux，1就是第二个，依此类推。
Address	Mux 的 7 位 I2C 地址。
Channel	要在 mux 上激活的通道。
Components	要证明的组件集合。
Component	单个组件的证明信息。
connection	组件连接类型。
attestation_success_retry	设备成功证明后等待重新证明的持续时间（以毫秒为单位）。
attestation_fail_retry	设备认证失败后等待重新认证的持续时间（以毫秒为单位）。
attestation_rsp_not_ready_max_retry	设备允许的 SPDM ResponseNotReady 重试的最大次数。
attestation_rsp_not_ready_max_duration	收到 SPDM ResponseNotReady 错误后重试之间的最长等待时间。
PwrCtrl	组件功率控制信息。

Field	Description
Register	电源控制寄存器地址。
Mask	电源控制位掩码。
count	此元素描述的相同组件的数量。
discovery_fail_retry	设备发现步骤失败后等待重试的持续时间（以毫秒为单位）。
mctp_bridge_additional_timeout	除了 MCTP 桥接导致的设备超时时间外，还要等待的时间（以毫秒为单位）。
DeviceID	设备ID。请参阅设备发现说明。
VendorID	供应商 ID。请参阅设备发现说明。
SubsystemDeviceID	子系统设备 ID。请参阅设备发现说明。
SubsystemVendorID	子系统供应商 ID。请参阅设备发现说明。

XML 枚举的允许值

具有默认值的枚举表示该标记是可选的。如果它不存在于 XML 中，将使用默认值。

RoT/type

- PA-RoT
- AC-RoT

Port/ResetCtrl

- Notify
- Reset
- Pulse

Port/FlashMode

- Single
- Dual
- SingleFilteredBypass
- DualFilteredBypass

Policy/RuntimeVerification

- Enabled
- Disabled

Policy/WatchdogMonitoring

- Enabled
- Disabled

Interface/type

- I2C

Interface/I2CMode

- MultiMaster
- MasterSlave

Component/connection

- Direct
- MCTPBridge

Policy/FailureAction

- Passive
- Active

Component Firmware Manifest - 组件固件清单

组件固件清单 (CFM) 描述了系统中每个组件的允许测量或策略列表。这类似于 PFM，但目的是证明远程 AC-RoT 设备。只有证明其他 AC-RoT 的 Cerberus 设备才会消耗 CFM。CFM 中的元素描述了如何使用 Cerberus Challenge Protocol或 DMTF SPDM 协议来证明设备。CFM 中的每个组件必须在 PCD 中至少有一个对应的条目。同一类型组件设备的多个 PCD 条目将映射到 CFM 中的单个组件。

CFM 将在清单标头中报告 `0xa592` 的 `manifest_type`。CFM 定义了以下额外的清单Element Type。

Type ID	Element Type	Format	Top-Level	Singleton	Description
`0x70`	`Component Device`	0	X		定义单一类型的 AC-RoT 来证明。
`0x71`	`PMR`	0			提供重新生成 PMR 时所需的信息。这是 Component Device 元素的子元素。
`0x72`	`PMR Digest`	0			单个 PMR 的允许值列表。这是 Component Device 元素的子元素。
`0x73`	`Measurement`	0			测量摘要的允许值列表。这是 Component Device 元素的子元素。
`0x74`	`Measurement Data`	0			提供有关原始测量数据检查的信息。这是 Component Device 元素的子元素。
`0x75`	`Allowable Data`	0			提供有关对原始测量数据进行单次检查的信息。这是测量数据元素的子元素。
`0x76`	`Allowable PFM`	0			单个端口允许的 PFM ID 列表。这是 Component Device 元素的子元素。
`0x77`	`Allowable CFM`	0			允许的 CFM ID 列表。这是 Component Device 元素的子元素。

Type ID	Element Type	Format	Top-Level	Singleton	Description
0x78	Allowable PCD	0			允许的 PCD ID 列表。这是 Component Device 元素的子元素。
0x79	Allowable ID	0			提供有关单次检查清单 ID 的信息。这是允许的 PFM、CFM 或 PCD 元素的子元素。
0x7A	Root CAs	0			可用于证书链身份验证的根 CA。这是 Component Device元素的子元素。

Component Device Element - 组件设备元素

组件设备元素是用于证明单一类型 AC-RoT 所需的所有信息的Top-Level容器。组件设备的子元素指定必须采取哪些证明操作和检查。为了使 AC-RoT 的认证成功，所有认证检查都必须通过。PCD 中描述的每个 AC-RoT 都使用type属性与组件设备元素匹配。每个 Component Device 元素需要至少有一个子元素。

bitfield CFM.ComponentDevice

Type	Name	Description
8	cert_slot	用于证明挑战的证书链的槽号。
AttestationProtocol	attestation_protocol	用于向组件发出证明请求的协议。
Manifest.HashType	transcript_hash_type	用于 SPDM 脚本哈希的哈希类型。
Manifest.HashType	measurement_hash_type	用于生成测量、PMR 和根 CA 摘要的哈希类型。
00b	_	填充未使用的 HashType 位。这必须是 0。
0x00	_	保留的。
32	component_id	将被证明的组件类型的标识符。这必须是 CFM 中的唯一标识符。

enum CFM.AttestationProtocol

Value	Name	Description
0x00	cerberus_protocol	The Cerberus challenge protocol.
0x01	dmtf_spdm	DMTF SPDM 协议。

bitfield CFM.ComponentDevice.Check

Type	Name	Description
CheckType	check	要执行的比较类型。
0000b	_	未使用的位。这必须是 0。
1	endianness	多字节数据值的字节顺序。如果数据以 little endian 表示，则为 0；如果数据为 big endian，则为 1。如果数据只是单个字节，则此值无关紧要。

`enum CFM.ComponentDevice.CheckType`

Value	Name	Description
000b	equal	确保报告的数据等于指定值。
001b	not_equal	确保报告的数据不等于指定值。
010b	less_than	确保报告的数据小于指定值。
011b	less_or_equal	确保报告的数据小于或等于指定值。
100b	greater_than	确保报告的数据大于指定值。
101b	greater_or_equal	确保报告的数据大于或等于指定值。

PMR Element - PMR元素

PMR 元素包含重新生成 PMR 摘要所需的信息。如果 PMR ID 不存在此元素，则零的初始值将用于计算 PMR 所需的任何流。

`bitfield CFM.ComponentDevice.PMR`

Type	Name	Description
measurement_hash_type	InitialValue	生成 PMR 时使用的初始值。

PMR Digest Element - PMR 摘要元素

PMR 摘要元素包含单个 PMR 的所有允许摘要的列表。这些摘要代表 PMR 报告的最终测量，如`Challenge`或`Get PMR`请求所报告的那样。

`bitfield CFM.ComponentDevice.PMRDigest`

Type	Name	Description
8	pmr_id	PMR 要证明的标识符。Cerberus Challenge Protocol允许它介于 0 和 4 之间。
8	digest_count	此 PMR 允许的摘要数。
0x0000	_	保留的。
measurement_hash_type(digest_count)	pmr_digest	PMR 允许的摘要列表。

Measurement Element - 测量元素

Measurement 元素包含单个测量的允许摘要列表。对于 Cerberus PMR，这将是在提供证明或 TCG 日志时由`Get Log`请求报告的特定 PMR 中的条目。

在 SPDM 中，这将是单个测量块的摘要，并且可以在由`SPDM Challenge`请求报告或由`SPDM Get Measurement`请求单独报告时与所有其他测量块聚合。

bitfield CFM.ComponentDevice.Measurement

Type	Name	Description
8	pmr_id	包含要证明的条目的 PMR 的标识符。Cerberus Challenge Protocol 允许它介于 0 和 4 之间。对于使用 SPDM 的设备，这将为零，因为 SPDM 不提供与 PMR 等效的功能。
8	measurement_id	PMR 中特定条目的索引，以证明是否使用 Cerberus Challenge Protocol。如果使用 SPDM，这是测量块索引。
8	allowable_digest_count	此测量的允许摘要数。
0x00	_	保留的。
AllowableDigest(allowable_digest_count)	digests_list	所有预期固件版本的允许摘要列表。

bitfield CFM.ComponentDevice.Measurement.AllowableDigest

Type	Name	Description
16	version_set	与设备上相同版本的固件关联的一组测量的标识符。如果同一组测量适用于所有版本的固件，则这将为 0。
8	digest_count	此版本集允许的摘要数。
0x00	_	保留的。
measurement_hash_type(digest_count)	digest	此版本集的预期测量摘要列表。

在证明单个测量时，有必要确保设备报告的测量代表所有测量的预期状态。单独证明单个测量并不能确保这一点，因为每个测量都将独立于其他检查进行检查。这将允许设备报告来自固件 A 的一个测量值和来自固件 B 的另一个测量值被视为健康，即使要求这两个测量值仅代表固件 A 或 B 的状态。version_set 标识符提供了一种方法来确保可以在更广泛的证明上下文中检查报告的测量，从而提供单独测量检查之间的耦合。

Measurement Data Element - 测量数据元素

测量数据元素包含一系列检查，以针对单个测量块测量的原始数据执行。对于 Cerberus PMR，这将是Get Attestation Data请求报告的特定 PMR 中的一个条目。在 SPDM 中，这将是单个测量块的原始形式，可以通过SPDM 获取测量请求单独报告。这允许比简单地比较摘要更复杂的策略检查，并且有可能更有效地使用 CFM 中的空间。对这些数据执行的检查与允许的子数据元素一样多，并且所有检查都需要成功才能成功证明。

在测量数据元素的单独检查中使用 version_set 与测量元素相同。此外，由于 version_set 而存在的 Measurement 元素之间的耦合也扩展到 Measurement Data 元素。这意味着所有 Measurement 和 Measurement Data 检查都必须在相同的version_set中进行证明才能通过证明。

bitfield CFM.ComponentDevice.MeasurementData

Type	Name	Description
8	pmr_id	包含要证明的条目的 PMR 的标识符。Cerberus Challenge Protocol 允许它介于 0 和 4 之间。对于支持 SPDM 的设备，这将为零。
8	measurement_id	PMR 中特定条目的索引，以证明是否使用 Cerberus Challenge Protocol。如果使用 SPDM，这是测量块索引。
0x0000	_	保留的。

Allowable Data Element - 允许的数据元素

允许数据元素包含单个测量数据检查的允许值列表。对于等于和不等于检查，在单个允许数据元素中可以有尽可能多的具有相同version_set标识符的数据条目，以涵盖所有允许或不允许的值。对于任何其他类型的检查，每个 version_set 标识符的允许数据元素中应该只有一个数据条目。在所有情况下，允许具有不同version_set标识符的任意数量的数据条目。

要组合多个测量数据检查（例如 not equal 和 greater than），必须使用多个允许数据元素，每个检查一个。

bitfield CFM.ComponentDevice.MeasurementData.AllowableData

Type	Name	Description
Check	check	对数据执行的比较类型。
8	num_data	将检查的值的总数。
16	bitmask_length	在应用任何检查之前应用于测量数据的位掩码的长度。如果为 0，则不应用位掩码并检查原始数据。
bitmask_length	data_bitmask	应用于接收到的数据的位掩码。这允许比较在必要时忽略某些位或字节。必须创建此位掩码以说明数据的字节顺序。相同的位掩码适用于所有数据条目。如果位掩码比测量数据长，则忽略未使用的掩码位。
ALIGN(32)	_	零填充。
Data(num_data)	data_list	支持的数据列表。

bitfield CFM.ComponentDevice.MeasurementData.AllowableData.Data

Type	Name	Description
16	version_set	与设备上相同版本的固件关联的一组测量的标识符。如果相同的测量数据检查适用于所有版本的固件，则这将为 0。

Type	Name	Description
16	data_length	用于比较的数据长度。
data_length	data	用于比较的数据。这必须以 Check.endianness 标志指示的Format存储。
ALIGN(32)	_	零填充。

为了将一组数据分组到单个允许数据元素中，每个数据检查必须使用相同的位掩码。每个唯一的位掩码必须是一个单独的允许数据元素。由于原始数据在不同版本的固件之间可能具有不同的长度，因此不要求数据长度相同。但是，将位掩码与不同长度的数据一起使用会带来一些挑战，因此必须满足以下属性才能有效地对检查进行分组。

1. bitmask_length 必须至少等于所有支持数据中最大的 data_length。
2. 如果对于任何给定的 data，bitmask_length 大于 data_length，则比较将忽略任何超过 data_length 的 data_bitmask 字节。
3. data_bitmask 始终从数据的最低有效字节开始应用。如果数据和位掩码长度不匹配，位掩码的最高有效字节将被忽略。Check.endianness 标志表示数据和位掩码是如何存储的以及它们需要按什么顺序处理。

Allowable PFM Element - 允许的 PFM 元素

允许的 PFM 元素提供了一种机制来证明基于活动 PFM 配置的 AC-RoT。每个允许的 PFM 元素将与单个端口的活动 PFM 进行比较。比较的数据将由 Get Configuration IDs 请求报告。Child Allowable ID 元素将提供针对 PFM ID 运行的检查。

bitfield CFM.ComponentDevice.AllowablePFM

Type	Name	Description
8	port_id	应检查的返回 PFM ID 列表中的索引。这与端口 ID 相同。
AllowableManifest	allowed	为 PFM ID 执行的证明。

bitfield CFM.ComponentDevice.AllowableManifest

Type	Name	Description
8	plat_id_length	预期平台 ID 的长度。
plat_id_length	plat_id_string	平台 ID 字符串。这是一个非空终止的 ASCII 字符串。
ALIGN(32)	_	零填充。

Allowable ID Element - 允许的 ID 元素

Allowable ID 元素包含用于单个清单检查的允许 ID 列表。该元素可以是 Allowable PFM、CFM 或 PCD 元素的子元素。

对于 equal 和not equal检查，单个允许 ID 元素中可以有尽可能多的数据条目，以覆盖所有允许或不允许的值。对于任何其他类型的检查，允许 ID 元素中应该只有一个数据条目。

要组合多个清单 ID 检查（例如not equal和greater than），必须使用多个允许 ID 元素，每个检查一个。

bitfield CFM.ComponentDevice.AllowableID

Type	Name	Description
Check	check	要执行的比较类型。
8	num_id	将检查的 ID 总数。
16	_	保留的。
32 (num_data)	ids	用于比较的清单标识符。

Allowable CFMs Element - 允许的 CFM 元素

允许的 CFM 元素提供了一种机制来证明基于活动 CFM 配置的 AC-RoT。每个允许的 CFM 元素将与单个 CFM 进行比较。比较的数据将由 Get Configuration IDs 请求报告。Child Allowable ID 元素将提供针对 PFM ID 运行的检查。

bitfield CFM.ComponentDevice.AllowableCFM

Type	Name	Description
8	cfm_index	应检查的返回 CFM ID 列表中的索引。
AllowableManifest	allowed	为 CFM ID 执行的证明。

Allowable PCDs Element - 允许的 PCD 元素

允许的 PCD 元素提供了一种机制来证明基于活动 PCD 配置的 AC-RoT。比较的数据将由 Get Configuration Ids 请求报告。Child Allowable ID 元素将提供针对 PFM ID 运行的检查。

bitfield CFM.ComponentDevice.AllowablePCD

Type	Name	Description
0x00	_	保留的。
AllowableManifest	allowed	为 PCD ID 执行的证明。

Root CAs Element - 根 CA 元素

Root CAs 元素包含可用于验证 AC-RoT 的证明证书链的受信任根证书列表。如果组件不包含 Root CAs 元素，则 AC-RoT 的证书链必须与请求者共享一个根 CA。

bitfield CFM.ComponentDevice.RootCAs

Type	Name	Description
8	ca_count	允许的根 CA 摘要数。
0x000000	_	保留的。

Type	Name	Description
measurement_hash_type(ca_count)	root_ca	受信任的根证书的哈希列表。这表示整个证书的哈希，包括签名。

CFM 生成的 XML 表示

每个必须证明 AC-RoT 设备的 RoT 需要至少有一个 CFM，其中包含有关要证明的组件的信息。与仅处理一个闪存设备的 PFM 不同，CFM 旨在保存多个组件的认证信息。

带有 CFMComponent 元素的 XML 文件用于定义可证明的组件。单个 CFM XML 文件用于选择要包含在 CFM 二进制文件中的可证明组件。

每个组件的每个固件版本都有一个 XML，生成的 CFM 二进制文件将使用version_set 字段区分属于不同固件版本的测量值。每个组件 XML 应至少有一个 Measurement 或 MeasurementData 元素，该元素对于每个固件版本都是唯一的。此唯一条目必须是 XML 中 CFMComponent 的第一个 Measurement 或 MeasurementData 子元素。

如果该条目是 MeasurementData 元素，则它必须有一个 AllowableData 子元素。生成的 CFM 二进制文件不能包含此条目的版本设置为 0 的任何子元素。如果此 MeasurementData 需要多个 AllowableData 元素，则必须将它们分成两个不同的 MeasurementData 元素。第一个仅包含唯一信息的单个 AllowableData，第二个包含剩余的检查。

这是可由生成脚本使用以创建二进制Format的两种 XML Format的示例。

```
<CFM sku="identifier">
    <Component>
        "Component type string"
    </Component>
    <Component>
        "Component type string"
    </Component>
</CFM>

<CFMComponent type="identifier" attestation_protocol="Cerberus"
    slot_num="Decimal integer" transcript_hash_type="SHA256"
    measurement_hash_type="SHA384">
    <RootCADigest>
        <!-- Digest type is determined by measurement_hash_type. -->
        <Digest>
            Root CA Digest
        </Digest>
        <Digest>
            Root CA Digest
        </Digest>
    </RooTCADigest>
    <PMR pmr_id="Decimal integer">
        <SingleEntry>True</SingleEntry>
        <!-- InitialValue type is determined by measurement_hash_type. -->
        <InitialValue>
            Initial value digest
```

```
        </InitialValue>
    </PMR>
    <PMRDigest pmr_id="Decimal integer">
        <!-- Digest type is determined by measurement_hash_type. -->
        <Digest>
            PMR Digest
        </Digest>
        <Digest>
            PMR Digest
        </Digest>
    </PMRDigest>
    <Measurement pmr_id = "Decimal integer" measurement_id="Decimal integer">
        <!-- Digest type is determined by measurement_hash_type. -->
        <Digest>
            Measurement Digest
        </Digest>
        <Digest>
            Measurement Digest
        </Digest>
    </Measurement>
    <MeasurementData pmr_id="Decimal integer" measurement_id="Decimal integer">
        <AllowableData>
            <Endianness>BigEndian</Endianness>
            <Check>Equal</Check>
            <Data>
                Allowable Data 1
            </Data>
            <Data>
                Allowable Data 2
            </Data>
            <Bitmask>
                Measurement Data Bitmask
            </Bitmask>
        </AllowableData>
        <AllowableData>
            <Endianness>LittleEndian</Endianness>
            <Check>GreaterOrEqual</Check>
            <Data>
                Allowable Data
            </Data>
        </AllowableData>
    </MeasurementData>
    <MeasurementData pmr_id="Decimal integer" measurement_id="Decimal integer">
        <AllowableData>
            <Endianness>LittleEndian</Endianness>
            <Check>Equal</Check>
            <Data>
                "String"
            </Data>
            <Bitmask>
                Measurement Data Bitmask
            </Bitmask>
        </AllowableData>
    </MeasurementData>
```

```
    <AllowablePFM port="Decimal integer" platform="Identifier">
        <ManifestID>
            <Check>Equal</Check>
            <ID>Hex Integer</ID>
            <ID>Hex Integer</ID>
        </ManifestID>
        <ManifestID>
            <Check>GreaterThan</Check>
            <ID>Hex Integer</ID>
        </ManifestID>
    </AllowablePFM>
    <AllowableCFM index="Decimal integer" platform="Identifier">
        <ManifestID>
            <Check>Equal</Check>
            <ID>Hex Integer</ID>
        </ManifestID>
    </AllowableCFM>
    <AllowablePCD platform="Identifier">
        <ManifestID>
            <Check>Equal</Check>
            <ID>Hex Integer</ID>
        </ManifestID>
    </AllowablePCD>
</CFMComponent>
```

Field	Description
sku	平台配置的字符串标识符。这成为平台 ID。
Component	定义要包含在 CFM 中的单个组件设备。这里使用组件的 ID。
CFMComponent	定义单个组件设备。
type	组件类型字符串标识符。
attestation_protocol	AC-RoT 用于证明的协议。
slot_num	用于组件认证的证书链槽号。
transcript_hash_type	用于成绩单哈希的哈希算法。
measurement_hash_type	用于计算 PMR、测量和根 CA 摘要的哈希算法。
RootCADigest	定义用于证书链验证的可信根 CA。这是一个可选标签。
Digest	预期的摘要。
PMR	定义重新生成 PMR 所需的信息。这是一个可选标签。
SingleEntry	指示 PMR 是否具有单项测量值的布尔值。
InitialValue	生成 PMR 时要使用的初始值。
PMRDigest	为单个 PMR 定义允许的摘要。
pmr_id	PMR 的标识符。

Field	Description
Measurement	定义一组允许的测量值。
measurement_id	测量 ID。
MeasurementData	定义一组允许的测量数据。
AllowableData	定义单个测量数据检查的允许值。
Endianness	数据的多字节Format。
Check	对数据执行的比较类型。
Data	测量数据条目的预期数据。
Bitmask	比较期间应用于数据的位掩码。
AllowablePFM	定义要对 PFM ID 执行的证明。证明 SPDM 设备不支持此标记。
port	端口 PFM 适用于。
platform	预期的清单平台 ID。
ManifestID	单个清单 ID 比较。
ID	要比较的清单 ID。
AllowableCFM	定义要对 CFM ID 执行的证明。证明 SPDM 设备不支持此标记。
index	目标 CFM 的索引。
AllowablePCD	定义要对 PCD ID 执行的证明。证明 SPDM 设备不支持此标记。

Allowed Values for XML Enums - XML 枚举的允许值

具有默认值的枚举表示该标记是可选的。如果它不存在于 XML 中，将使用默认值。

Check

- Equal
- NotEqual
- LessThan
- LessOrEqual
- GreaterThan
- GreaterOrEqual

Component/attestation_protocol

- Cerberus
- SPDM

Endianness

- LittleEndian
- BigEndian

Attestation Flows - 证明流程

根据设备配置，证明工作流程涉及 Flash 内容的身份验证、挑战远程设备或两者兼而有之。

Authentication of Flash Contents - Flash 内容的认证

闪存认证通常由连接到 SPI 闪存的外部 RoT 设备使用。PCD 用作此流程的一部分，以提供 SPI 时钟频率的配置，以便在访问闪存设备时使用以及与外部处理器交互相关的其他参数。其余的身份验证流程只需要一个 PFM。

Authentication of Firmware Updates - 固件更新认证

每当对 SPI 闪存设备执行固件更新时，RoT 将需要先验证内容，然后才能证明其有效。

验证采用以下流程：

1. 读取 PFM 以确定闪存上存在多少固件组件。
2. 对于每个固件组件
    - 读取闪存设备以匹配 PFM 中的版本字符串。这将确定应该使用哪个版本条目进行身份验证。
    - 对于匹配版本中定义的每个签名映像，计算并比较闪存内容的哈希值。
3. 验证每个组件后，寻找未使用的闪存区域。 未使用的区域既不是 R/W 区域，也不是任何固件组件中的签名映像。这些未使用的区域必须用闪存设备 PFM 元素中定义的静态值填充。
4. 如果任何步骤产生意外结果，则映像验证失败。

Authentication on System Boot Without Updates - 在没有更新的情况下在系统启动时进行身份验证

如果闪存上的固件尚未更新，RoT 仍将验证闪存设备上的所有必要映像，但会对流程进行一些修改。

1. flash 未使用的区域不做空白检查。
2. 任何未声明`PFM.FirmwareVersion.MustValidate`标志的签名映像都将被跳过。

Attestation of Remote Devices - 远程设备认证

AC-RoT 的证明遵循以下一般流程：

1. 确定被证明的设备类型。
2. 检索设备证书链，对其进行验证，并确定设备是可信的。
3. 从表示当前状态的设备获取测量报告。
4. 将测量值与 CFM 中的证明策略进行比较。
5. 将认证结果存储在请求RoT 的认证日志中。

Cerberus 设备可以使用 Cerberus Challenge Protocol和/或 DMTF SPDM 证明协议支持证明。虽然协议之间的执行细节有所不同，但总体流程是相同的。

Cerberus Challenge Protocol规范中描述了证明流程中使用的所有 Cerberus Protocol命令。MCTP 和 SPDM 命令在这些各自的规范中进行了描述。

Cerberus to AC-RoT Communication - Cerberus 到 AC-RoT 通信

作为 AC-RoT 组件认证的先决条件，需要启用与 AC-RoT 的通信。Cerberus 和 AC-RoT 组件设备都将充当 MCTP 端点，并且将直接连接在同一物理总线上或通过 MCTP 桥进行通信。需要证明其他 AC-RoT 的 Cerberus 实例需要了解寻址细节和整个平台配置。平台配置数据清单向 Cerberus RoT 提供这些详细信息。

AC-RoT Discovery with an MCTP Bridge - 使用 MCTP 桥发现 AC-RoT

要通过 MCTP 网桥与 AC-RoT 通信，Cerberus 首先需要通过向 MCTP 网桥发送`Get Routing Table Entries` MCTP 控制请求来获取目标设备的 EID。然后 Cerberus 将向接收到的路由表中的每个 EID 发出 `Get Message Type Support` MCTP 控制请求，以发现 AC-RoT 支持的证明协议。

AC-RoT Discovery using Cerberus Challenge Protocol - 使用 Cerberus Challenge Protocol的 AC-RoT 发现

当以下两个条件都为真时，确定对 Cerberus Challenge Protocol的支持：

1. AC-RoT 支持供应商定义的消息类型。
2. 支持 Microsoft PCI 供应商 ID (0x1414) 是为了响应 `Get Vendor Defined Message Support` MCTP 控制请求而公布的。

一旦确定 AC-RoT 支持 Cerberus Challenge Protocol，就会通过发送 Cerberus Protocol `Device ID` 请求来识别设备类型。对该请求的响应用于在 PCD 中搜索组件条目以进行匹配。

AC-RoT Discovery using SPDM - 使用 SPDM 的 AC-RoT 发现

由于 SPDM 在 MCTP 中定义了消息类型，因此通过简单地查找对该消息类型的支持来确定对 SPDM 的支持。一旦确定 AC-RoT 支持 SPDM，就需要将该设备与 PCD 中的组件条目进行匹配，就像使用 Cerberus Challenge Protocol 时一样。然而，从 SPDM 1.2 开始，没有协议定义的方法来实现这一点。在没有任何标准化 SPDM 工作流程的情况下，Cerberus 将使用以下内容，它必须由任何需要证明的基于 SPDM 的 AC-RoT 实施。如果 SPDM 规范的更新版本更新为包含确定此信息的方法，则该方法将用于支持它的 AC-RoT。

为了为设备提供一种符合 SPDM 的方式来识别自己以进行证明，Cerberus Protocol `Device ID` 命令报告的相同 PCD ID 将在 SPDM 测量块中报告。对于支持 SPDM 1.1.x 的 AC-RoT，此信息将在设备支持的最后一个测量块索引中报告。对于其他 AC-RoT，此信息将位于`0xef`的固定测量索引处。

测量块的检索是通过以下 SPDM 命令序列实现的：

1. `Get Version` 获取版本
2. `Get Capabilities` 获取能力
3. `Negotiate Algorithms` 协商算法
4. 如果 AC-RoT 支持 SPDM 1.1.x，Cerberus 将使用 `Get Measurements` 获取设备支持的测量块总数，无需签名请求并将测量操作设置为 `0` 。Cerberus 紧随其后的是 `Get Measurements` 请求，没有为最后一个测量索引请求签名。
5. 如果 AC-RoT 支持 SPDM 1.2.x 或更高版本，Cerberus 将发送一个 `Get Measurements` 请求，不为测量索引 `0xef` 处的原始比特流请求签名。

在所有情况下，响应都应包含测量块的原始比特流。此测量块的Format基于 DMTF DSP0267 1.1.0，用于固件更新的 PLDM 中的 `QueryDeviceIdentifiers` 命令。

`bitfield DeviceIds`

Type	Name	Description

Type	Name	Description
8	completion_code	PLDM_BASE_CODES 完成代码。
32	descriptor_length	提供的所有描述符的总长度。
8	descriptor_count	描述符总数。
Descriptor(descriptor_count)	descriptors	设备描述符列表。

bitfield Descriptor

Type	Name	Description
16	type	描述符的类型标识符。
16	length	描述符数据的长度。
length	data	原始描述符数据。这代表什么取决于描述符的类型。

虽然响应中包含的描述符可能不仅包含 PCI ID，但至少必须包含PCI Vendor ID、PCI Device ID、PCI Subsystem Vendor ID和PCI Subsystem ID的描述符。此处包含一个快速参考值，用于为该信息分配给 Descriptor 字段的值。

type	length	data
0x0000	2	PCI Vendor ID.
0x0100	2	PCI Device ID.
0x0101	2	PCI Subsystem Vendor ID.
0x0102	2	PCI Subsystem ID

有关描述符类型和Format的更多详细信息，请参阅 DSP0267 1.1.0 中的表 8。

AC-RoT Discovery Without an MCTP Bridge - 没有 MCTP 桥的 AC-RoT 发现

当系统不使用 MCTP 网桥时，Cerberus 设备将直接连接所需的 AC-RoT。在这种情况下，发现过程与 MCTP 网桥遵循的过程相同。唯一的区别是没有发送 Get Routing Table Entries 命令。相反，AC-RoT 信息是根据 PCD 组件条目确定的。

AC-RoT Attestation - AC-RoT 认证

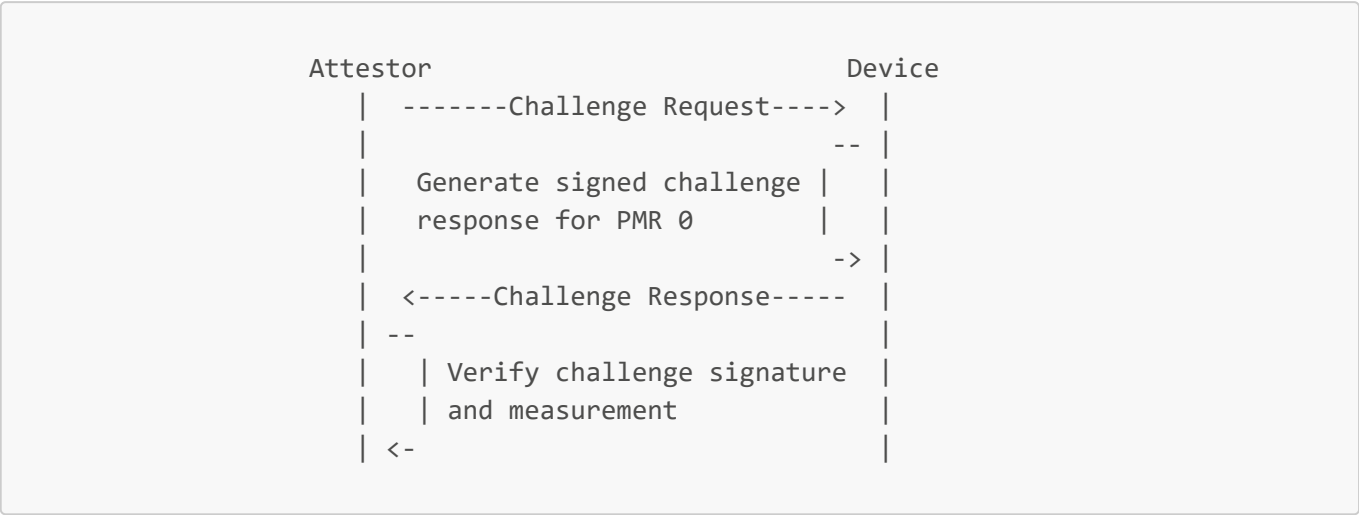
为了执行 AC-RoT 的证明，远程 Cerberus 实例将闪存测量或策略信息发送回执行挑战的 Cerberus 设备。然后，执行质询的 Cerberus 设备会将接收到的信息与目标设备的组件固件清单中相应条目中包含的允许值进行比较。

Cerberus 设备可以支持 Cerberus Challenge Protocol、DMTF SPDM 协议或这两种协议来执行 AC-RoT 的证明。预计 PA-RoT 设备将支持这两种协议，以允许它证明任何类型的组件。

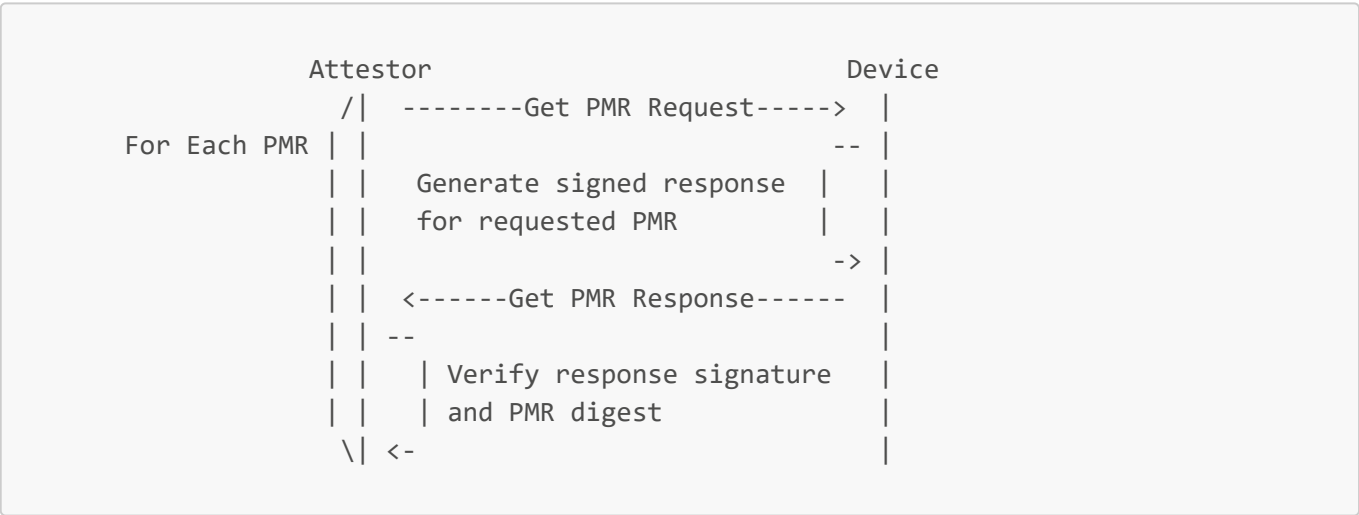
Attestation Procedure using Cerberus Protocol - 使用 Cerberus Protocol的证明流程

在成功接收和验证 Alias 证书链后，证明者将确保 CFM 条目中列出的所有摘要和测量数据与组件设备返回的值相匹配。

如果 CFM 仅包含寄存器 0 的平台测量寄存器 (PMR) 摘要，则只会发出`Challenge`请求。来自响应的 PMR0 摘要值将与 CFM 元素内容进行比较。这个过程如下图所示：



如果 CFM 包含多个 PMR 摘要元素，则将为所需的每个 PMR 向设备发出 `Get Platform Measurement Register` 请求。所有列出的摘要将与 CFM 元素内容进行比较，如果其中任何一个不匹配，则证明将失败。此流程如下所示：



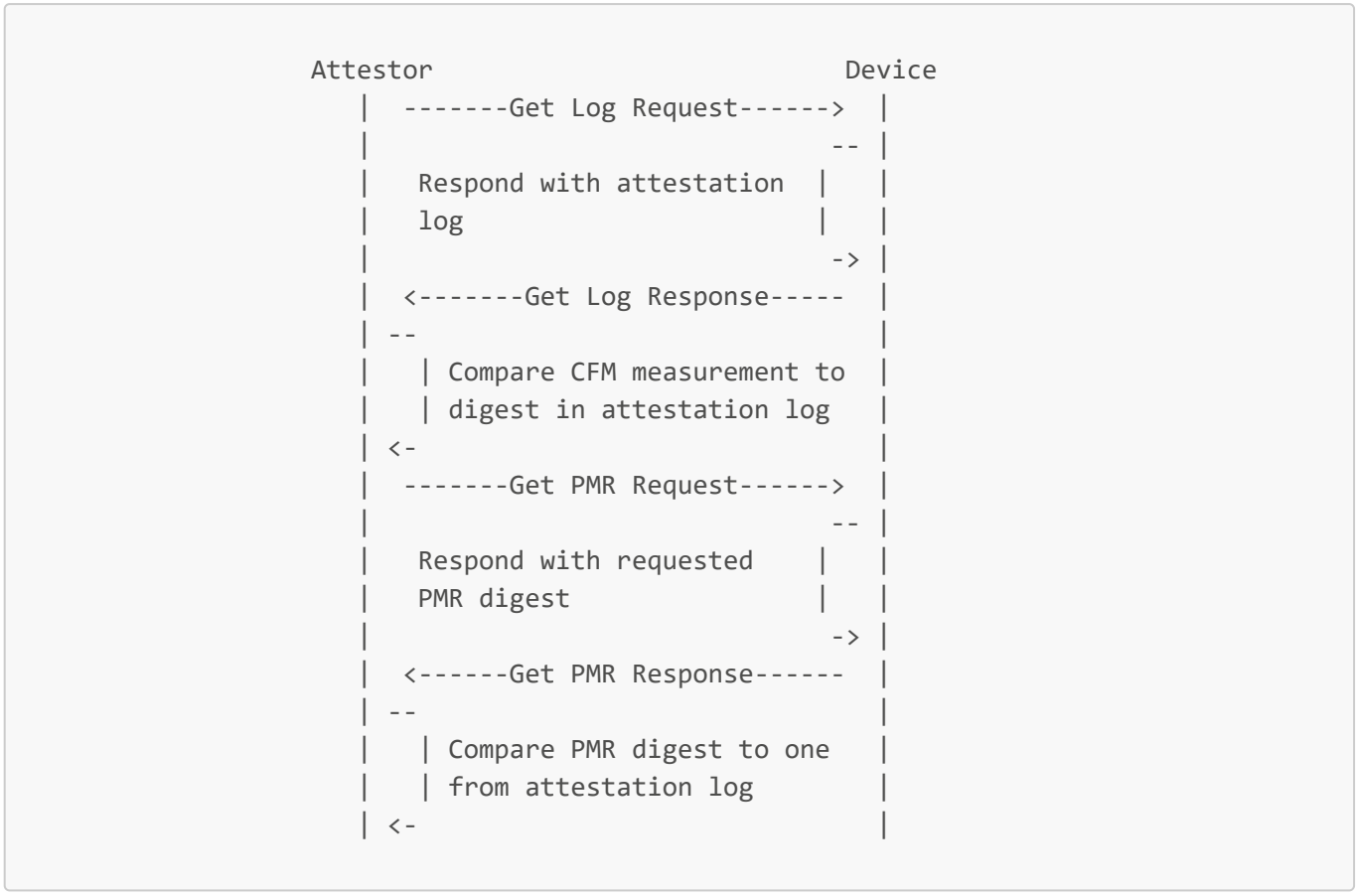
如果 CFM 包含测量元素，证明者将检查证明日志以将预期的测量条目与日志中的条目进行比较。

所有列出的摘要将与 CFM 元素内容进行比较，如果其中任何一个不匹配，则证明将失败。然后，证明者将为所有具有 CFM 测量条目的 PMR ID 发出 `Get Platform Measurement Register` 请求。返回的 PMR 值将与证明日志中的值进行比较。此过程采用以下流程。

1. 认证者发出 `Get Log` 请求从设备中获取认证日志。
2. 证明日志中报告的摘要与 CFM 元素进行比较。
3. 证明者发出 `Get Platform Measurement Register` 请求以获取包含此条目的 PMR 值。
4. 预期的 PMR 值是从检索到的证明日志中计算出来的，并与设备报告的值进行比较。

如果任何比较失败，则该过程终止并且设备证明失败。如果证明者在单个 PMR 中有多个条目要验证，则可以优化流程以首先获取并检查所有测量值，然后继续向上验证层到 PMR 值。

这个过程如下图所示：

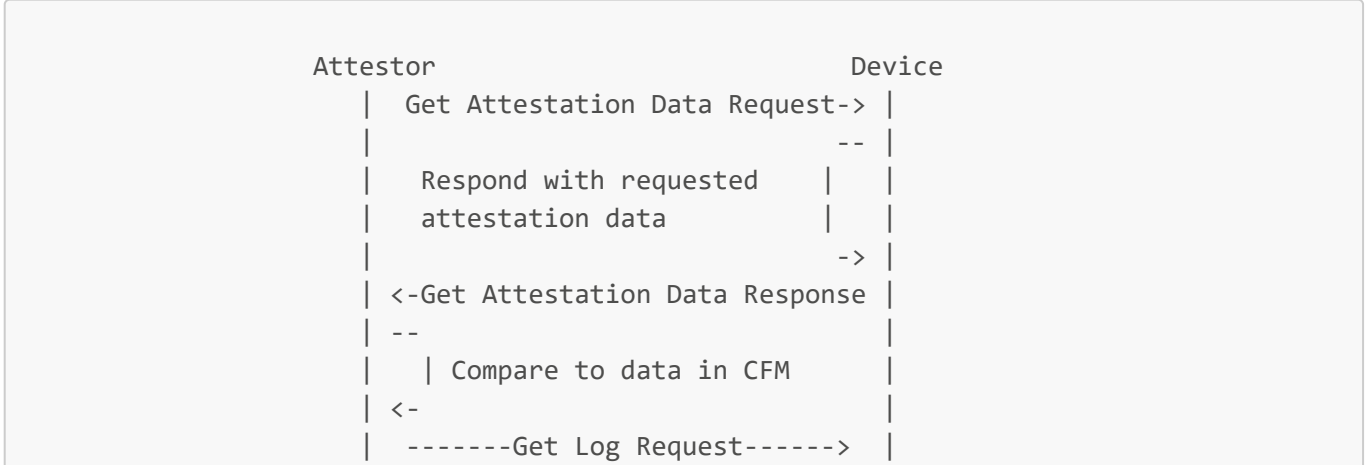


如果 CFM 包含测量数据元素，则要求证明者检查实际测量数据以确定设备是否在允许的配置下运行。此过程采用以下流程。

1. 证明者发出`Get Attestation Data`请求，从设备中获取测量数据。
2. 将返回的数据与 CFM 元素中的预期数据进行比较。
3. 证明者发出`Get Log`请求从设备中获取证明日志。
4. 较早收到的测量数据被哈希并与证明日志中报告的摘要进行比较。
5. 证明者发出`Get Platform Measurement Register`请求以获取包含此条目的 PMR 值。
6. 预期的 PMR 值是根据检索到的证明日志计算的，并与设备报告的值进行比较。

如果任何比较失败，则该过程终止并且设备证明失败。如果证明者在单个 PMR 中有多个条目要验证，则可以优化流程以首先获取并检查所有数据，然后继续向上验证层到 PMR 值。

这个过程如下图所示：



```
|                                 -- |
|   Respond with attestation  |    |
|   log                       |    |
|                                 -> |
|  <-------Get Log Response-----    |
| --                                 |
|   | Compare digest of              |
|   | measurement data to digest     |
|   | in attestation log             |
| <-                                 |
|  -------Get PMR Request------>    |
|                                 -- |
|   Respond with requested    |    |
|   PMR digest                |    |
|                                 -> |
|  <------Get PMR Response------    |
| --                                 |
|   | Compare PMR digest to one      |
|   | from attestation log           |
| <-                                 |
```

如果 CFM 包含 PFM、CFM 或 PCD 元素，则 `Get Configuration IDs` 命令用于从设备获取活动清单 ID。证明者会将收到的 ID 与 CFM 中包含的值进行比较。这个过程如下图所示：

```
Attestor                            Device
   |  ---Get Config IDs Request--->  |
   |                                 -- |
   |   Respond with IDs for all  |    |
   |   manifests                 |    |
   |                                 -> |
   |  <---Get Config IDs Response--  |
   | --                                 |
   |   | Compare all IDs to CFM         |
   |   | element                        |
   | <-                                 |
```

Attestation Procedure using SPDM Attestation Protocol - 使用 SPDM 认证协议的认证程序

版本和功能协商成功后，然后接收和验证 Alias 证书链，如果设备支持该命令，证明者将向设备发出 `Challenge` 请求。无论 CFM 是否包含 PMR 摘要元素，都将始终执行此操作。在 SPDM 中，只有 PMR 0 被认为是有效的，如果 CFM 包含寄存器 0 的 PMR 摘要元素，则 `Challenge` 响应返回的值将与 CFM 元素内容进行比较。如果不是，`Challenge` 仍然按照 SPDM 规范的建议执行，并确保先前交易的真实性。这个过程如下图所示：

```
Attestor                            Device
   |  -------Challenge Request---->  |
   |                                 -- |
   |   Generate signed challenge |    |
```

```
                    |   response for PMR 0        |    |
                    |                              -> |
                    |  <-----Challenge Response-----   |
                    | --                               |
                    |    | Verify challenge signature  |
                    |    | and measurement             |
                    | <-                               |
```

如果设备支持 SPDM 1.2 或更高版本，并且不支持 `Challenge` 命令，则使用 `Get Measurements` 命令（如果适用）。如果 CFM 包含 PMR 摘要元素但设备不支持 `Challenge` 命令，则使用 `Get Measurements` 命令并请求所有测量块。然后，证明者将所有测量块组合成一个摘要，并将其与 PMR0 摘要 CFM 元素进行比较。此过程采用以下流程：

```
                Attestor                          Device
                    |  ---Get Measurement Request-->  |
                    |                              -- |
                    |   Generate measurement      |    |
                    |   response with hashes of   |    |
                    |   all measurement blocks    |    |
                    |                              -> |
                    |  <--Get Measurement Response--  |
                    | --                               |
                    |    | Aggregate all measurement   |
                    |    | block hashes and compare    |
                    |    | result to CFM PMR digest    |
                    |    | element                     |
                    | <-                               |
```

如果 CFM 包含测量元素，并且设备支持 SPDM 1.2+，则证明者将使用将 RawBitStreamRequested 请求属性设置为 0 的 `Get Measurement` 命令从设备请求特定测量块，如测量 ID 所示作为摘要。流程采用以下流程：

```
                Attestor                          Device
                    |  ---Get Measurement Request-->  |
                    |                              -- |
                    |   Generate measurement      |    |
                    |   response with hash of     |    |
                    |   requested measurement     |    |
                    |   block                     |    |
                    |                              -> |
                    |  <--Get Measurement Response--  |
                    | --                               |
                    |    | Compare response content    |
                    |    | to CFM measurement element  |
                    | <-                               |
```

如果 CFM 包含测量数据元素，则证明者将使用 `Get Measurements` 命令从设备请求特定测量块，如测量 ID 所示。

此过程采用以下流程：

```
                Attestor                          Device
                   |  ---Get Measurement Request-->  |
                   |                                 -- |
                   |   Generate measurement      |   |
                   |   response with requested   |   |
                   |   measurement block         |   |
                   |                                 -> |
                   |  <--Get Measurement Response--  |
                   | --                                |
                   |   | Compare response content    |
                   |   | to CFM measurement data     |
                   |   | element                     |
                   | <-                                |
```

SPDM 协议不明确支持配置 ID 的验证。

为了验证设备的配置ID，可以生成以配置ID为预期内容的测量块，并且可以利用上述用于测量或测量数据证明的流程。

Handling Measurement Version Sets - 处理测量版本集

无论是使用 Cerberus Challenge Protocol还是 SPDM 来证明 AC-RoT，证明者都必须确保所有测量都代表相同版本的固件，正如 CFM 所要求的那样。在这些场景中，在证明 Measumement 和 Measurement Data 元素时会进行额外的检查。

CFM 中的第一个 Measurement 或 Measurement Data 元素必须对应于一个 measumerent，该 measumerent 具有针对所有支持的固件版本的条目并且在每个版本之间是唯一的。例如，可以在此处使用版本号或字符串的测量值。一旦第一次测量成功证明，证明者必须确定在 CFM 中为匹配条目指定的版本集标识符。所有后续的测量和测量数据元素都将使用这些附加条件进行证明，使用从第一次检查中选择的版本集标识符。

1. 如果元素包含版本集标识符等于 0 的条目，则此检查必须始终成功，而不管任何选定的版本集标识符。
2. 如果该元素包含与所选版本集标识符匹配的条目，则设备状态的证明必须仅与该元素条目匹配。
3. 如果该元素不包含所选版本集标识符的条目并且不包含版本集标识符为 0 的条目，则该元素作为当前证明的一部分被忽略。

参考

1. Cerberus Challenge Protocol: https://github.com/opencomputeproject/Security/blob/master/RoT/Protocol/Challenge_Protocol.md
2. TCG DICE: https://trustedcomputinggroup.org/work-groups/dice-architectures/
3. TCG TPM: https://trustedcomputinggroup.org/work-groups/trusted-platform-module/
4. 安全协议和数据模型规范: https://www.dmtf.org/sites/default/files/standards/documents/DSP0274_1.2.0.pdf
5. 平台级数据模型 (PLDM) 基本规范: https://www.dmtf.org/sites/default/files/standards/documents/DSP0267_1.1.0.pdf

6. 管理组件传输协议 (MCTP) 基本规范:
https://www.dmtf.org/sites/default/files/standards/documents/DSP0236_1.1.0.pdf