ICS ***
CCS ***

团 体 标 准

T/CABEE 0XX-20XX

智慧建筑控制系统数据通信技术要求

Technical requirements for data communication in smart building control system

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布　　XXXX-XX-XX 实施

中 国 建 筑 节 能 协 会　　发 布

目　　次

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由 XXXX 提出并归口 。

本文件起草单位：复旦大学 。

本文件主要起草人：

智慧建筑控制系统数据通信技术要求

1. 范围

本文件规定了智慧建筑控制系统中数据通信的技术要求，包括通信协议架构，包括应用层、网络层、数据链路层和物理层；支持的通信协议，如BACnet/MQ、BACnet/IP、BACnet/MSTP、MQTT和AMQP；数据传输服务、远程设备管理服务及虚拟终端服务；网络拓扑与路由设计，涵盖Mesh网络、多跳通信、自组织能力及路由机制；通信安全机制，包括加密算法、访问控制列表（ACL）和消息完整性保护。

本文件适用于智慧建筑控制系统中的设备间数据通信设计及实现，包括从末端节点到中心节点的通信，以及跨网段和跨协议的互联互通。

2. 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 28847.5 建筑自动化和控制系统 第5部分：数据通信协议

GB/T 28847.6 建筑自动化和控制系统 第6部分：数据通信协议一致性测试

GM/T 0002-2012 SM4分组密码算法

GM/T 0004-2012 SM3密码杂凑算法

ISO/IEC 8802-3 信息技术 局域网 第3部分：载波侦听多路访问冲突检测（CSMA/CD）访问方法和物理层规范

ISO/IEC 7498 信息技术 开放系统互连 基本参考模型（所有部分）

ISO/IEC 8824 信息技术 开放系统互连 抽象语法表示法1（ASN.1）：基本表示法规范

ISO/IEC 8825 信息技术 开放系统互连 抽象语法表示法1（ASN.1）：基本编码规则规范

3. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

BACnet设备 BACnet device

支持通过BACnet协议进行数据通信的物理或虚拟设备。

3.2

应用协议数据单元 APDU, application protocol data unit

BACnet应用层协议中定义的数据单元，包含控制信息和应用数据。

3.3

数据完整性 data integrity

数据在传输过程中保持一致性和未被篡改的特性。

3.4

消息队列 message queue

用于消息存储和传递的中间件，支持消息的异步处理、持久化及路由。

3.5

UUID 通用唯一标识符 universally unique identifier
基于设备MAC地址、时间戳及随机数生成的唯一标识符，用于标识通信网络中的设备或节点。

3.6

路由表 routing table
存储网络节点之间路径信息的结构，用于指导消息从源节点到达目标节点的传输路径。

3.7

Mesh网络 mesh network
由多个节点自组织构成的网状拓扑网络，支持多跳通信和动态路由，具备高可靠性和自修复能力。

3.8

访问控制列表 acl, access control list
定义网络中节点间访问权限的规则集，用于限制流量、过滤非法数据包及增强网络安全。

3.9

TLS 传输层安全协议 transport layer security
一种广泛使用的加密通信协议，用于保护数据传输的机密性、完整性和身份验证。

4. 缩略语与符号

4.1 缩略语

下列缩略语适用于本文件。
ACL：访问控制列表（Access Control List）
AMQP：高级消息队列协议（Advanced Message Queuing Protocol）
APDU：应用层协议数据单元（Application Protocol Data Unit）
BAC：建筑自动化与控制（Building Automation and Control）
BACnet：楼宇自动化与控制网络（Building Automation and Control Network）
BVLC：BACnet虚拟链路控制（BACnet Virtual Link Control）
COV：值的改变（Change of Value）
DML：分布式机器学习（Distributed Machine Learning）
IP：互联网协议（Internet Protocol）
MAC：介质访问控制（Media Access Control）
Mesh：网状网络（Mesh Network）
MQTT：消息队列遥测传输协议（Message Queuing Telemetry Transport）
MS/TP：主从/令牌传递（Master-Slave/Token-Passing）
NPDU：网络协议数据单元（Network Protocol Data Unit）
OSI：开放系统互连（Open System Interconnection）
PTP：点对点（Point-to-Point）
SM3：密码杂凑算法（Chinese SM3 Cryptographic Hash Algorithm）
SM4：分组密码算法（Chinese SM4 Block Cipher Algorithm）
TLS：传输层安全协议（Transport Layer Security）
UUID：通用唯一标识符（Universally Unique Identifier）

4.2 符号

以下符号适用于本文件。

src：消息源地址（Source Address）

dst：消息目标地址（Destination Address）

MAC_addr：MAC地址，用于唯一标识网络设备

IP_addr：IP地址，用于标识设备的网络位置

TTL：生存时间（Time to Live），表示消息在网络中存活的跳数限制

H：消息头部（Header），包含控制信息

P：消息载荷（Payload），包含实际传输的数据

QoS：消息传输服务质量等级（Quality of Service Level）

t_stamp：时间戳（Timestamp），表示消息发送或接收的时间

RREQ：路由请求（Route Request）

RREP：路由回复（Route Reply）

5. BACnet/MQ基本网络模型与协议架构

5.1 OSI参考模型

OSI模型分为以下七层：物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层和应用层（如图1所示）。每一层均提供特定功能，并通过定义的接口向其上下层提供服务。

OSI的基本参考模型实现了对远程通信的精细化分层管理，并是定义不同计算机通信协议标准的核心基础。该模型应符合ISO 7498的要求，将复杂的通信问题分解为七层，以便管理和实现。每个层处理独立于其他层的特定通信功能，并被称为协议构架中的一层。精确的模型结构如图1所示，应符合以下要求：

a) 每一特定层基于下层提供的服务，通过定义的接口和协议向其上层提供相应的服务；

b) 每一层均独立实现特定功能，并通过明确定义的接口向相邻层提供服务或接收服务；

c) 应用进程可通过OSI模型的应用层接口连接至远程通信方的应用进程，从而实现端到端的通信；

d) 每一层基于下层提供的通信服务，通过定义的协议规范，与另一系统的同层实现逻辑对等通信；

e) 物理层负责提供底层的物理信号传输和连接，作为实际数据通信的基础。

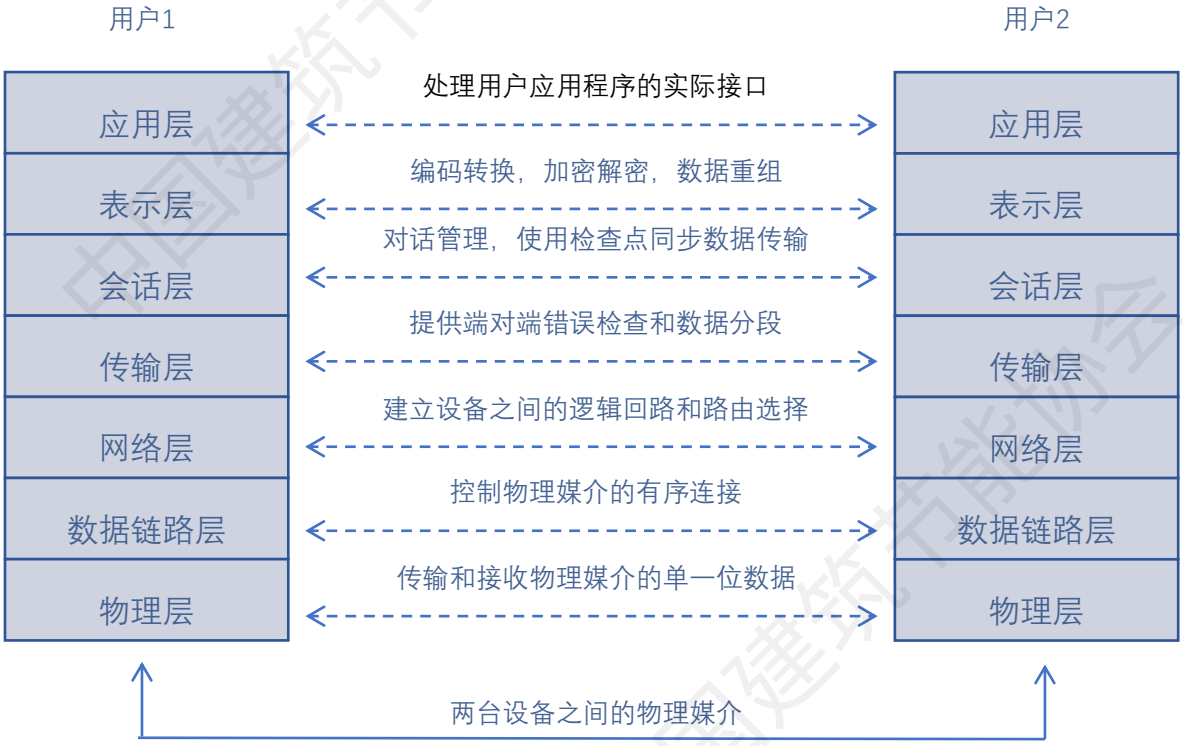

图1 OSI七层参考模型

OSI模型从通用角度处理计算机之间的通信，旨在解决处于大型且复杂网络中计算机之间的通信问题。在该现实应用场景中，远距离通信的计算机之间，报文需要通过中间中介点进行传输。这些中介点需实现路由选择功能、解析功能、复杂同步功能和错误恢复机制，以确保报文的正确性和可靠性。

在特定场景中，如运用于楼层自动化协议，可选择OSI模型中需要的层次，将七层架构进行简化。该简化架构只包含OSI模型中被选的层次，其他层次保持为空，从而减少报文长度，降低通信处理费用。该简化体系计划服务于楼层自动控制工业，利用低成本、大批量生产的处理器，以及为过程控制和办公自动化工业开发的局域网技术。

充分利用现有的易用、应用普遍的技术，如以太网、ARCNET和LonTalk，能有效降低数据通信成本，提高系统性能，为楼层自动化系统完成互联与数据交换推动新的解决方案。

5.2 BACnet/MQ参考网络模型

BACnet/MQ基于BACnet的网络架构，建立了四层简化架构模型，该四层相对于OSI模型中的物理层、数据链接层、网络层和应用层，如图2所示。BACnet/MQ标准定义了应用层和简单的网络层，对于数据链接层和物理层，在BACnet的基础上，结合了物联网方面的技术，即消息队列技术。选用MQ替代物理层与部分数据链接层功能，同时继续提供BACnet/IP类型的BVLL信息，保障能够路由到从属总线设备。

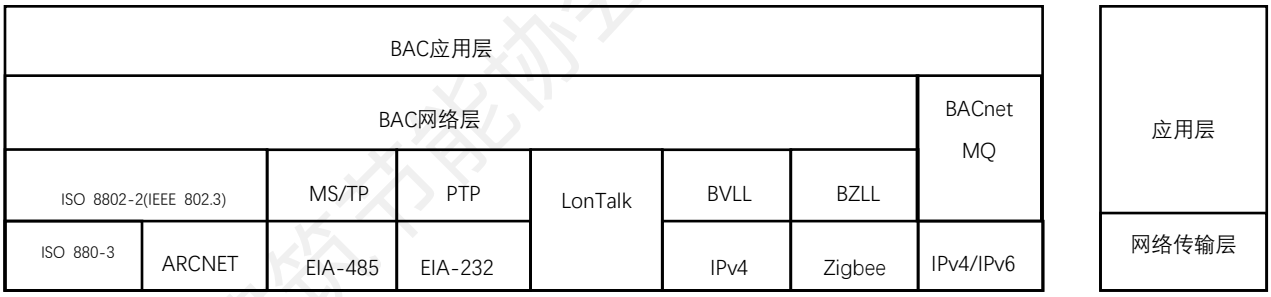

图 2 BACnet/MQ 简化架构模型

BACnet/MQ协议将原有的BACnet/IP架构中的应用层、网络层和链接层的信息封装到MQ/AMQP协议的应用层数据包中。通过虚拟交换机构成的虚拟化网络，重构BACnet应用层、网络层和链接层，从而解决了基于UDP的BACnet/IP协议在跨网段、可靠性和最大字长等方面的缺陷。根据这些特点，确保了楼层自动化系统中设备之间高效、可靠的通信和数据交换，为系统集成和移动设备结合提供优化解决方案。

5.3 BACnet/MQ 传输层/网络层

网络层应负责数据包的路由选择、转发以及拥塞控制等功能。在BACnet/MQ虚拟化网络中，网络层应负责将数据包从一个BACnet/MQ设备的发布队列转发到另一个BACnet/MQ设备的订阅消息队列。

5.4 BACnet/MQ 应用层

应用层定义了通信协议的规则和数据格式。它包括了对象模型、通信服务和网络管理等方面的内容。

5.5 通信逻辑和操作原则

本节描述通信原理和实现过程，以确保BACnet和MQTT/AMQP协议的高效交互和数据传输。

5.5.1 MQTT/AMQP节点唯一标识

每个节点具备唯一的UUID，用于区分和标识节点，以确保通信过程的错误与重复避免。

5.5.2 Mesh网络结构和自组网自修复能力

基于MQTT/AMQP节点实现自组网和自修复的mesh网络架构，提高网络的可靠性和应急能力。

5.5.3 Mesh节点路由表维护

在AMQP节点中建立和维护mesh路由表，实施节点之间的最优路由策略，确保数据包的高效传输。

5.5.4 BACnet数据封装和发布

将BACnet数据结构封装为符合MQTT/AMQP协议格式的消息，并通过定义的消息并发上传到指定的交换机/消息队列。

5.5.5 消息转发和路由管理

Mesh网络根据路由表中定义的转发规则，将消息并发到目标节点的接收消息队列，确保数据包在网络中的高效和最优通迁。

5.5.6 数据解析和还原

节点分析接收的消息，并将BACnet数据结构还原为原始格式，便于后续处理。

5.5.7 BACnet设备接收数据和操作执行

节点将还原后的BACnet数据传递给相关BACnet设备，实现接收数据后的监测和操作执行功能。

5.5.8 BACnet/MQ 设计要求

该架构应允许使用MQTT/AMQP作为传输协议，通过构建虚拟化mesh网络，将BACnet数据结构转换为应用层消息，并在订阅端进行解析和还原，完成BACnet和MQTT/AMQP之间的数据交互和传输。进一步实现时，应根据硬件资源和网络资源选择适合的MQTT/AMQP协议作为通信基础。

6. 网络传输与安全

6.1 AMQP与MQTT

AMQP协议设计适用于对可靠性、安全性和互操作性要求较高的企业级应用场景，例如金融交易和库存管理。其技术架构支持消息事务处理、队列管理和错误处理功能，并提供多种消息路由方式，以确保消息传输的完整性与准确性。

MQTT协议以轻量级、高效、低延迟的特性广泛应用于物联网（IoT）领域，尤其适用于资源受限的设备和低带宽环境。MQTT协议的简洁设计优化了网络中的数据流量，能够在带宽有限的场景中实现高效传输。同时，MQTT提供三种服务质量等级（QoS），以满足不同场景下对数据传输可靠性与带宽效率的需求，相关特性见表1：

表1 AMQP与MQTT协议特性对比

	AMQP	MQTT
架构	EBQ（交换机-绑定-队列）	基于主题的发布/订阅
核心概念	交换机，队列，绑定，路由键	主题，订阅
点对点	√（存储转发队列）	部分支持
发布/订阅	√	√
扇出	√	√ 支持高扩展性
请求/响应	√	√在 5.0 版本中支持
TCP	√	√
TLS/SSL	√	√

WebSocket	X	√适用于浏览器和轻量级客户端
QUIC	X	√
帧结构	帧分为3个不同的区域：固定长度的帧头部，可变长度的扩展头部，可变长度的帧体。	MQTT 控制报文由最多3部分组成：固定头部，可变头部，有效载荷。
最大有效载荷大小	2GB 适用于大数据负载	256MB 更适用于资源受限设备
安全性	SSL/TLS	SSL/TLS

本表对比了AMQP与MQTT协议在架构、核心概念、支持能力及安全性等方面的技术特点，为智慧建筑控制系统中选择合适的协议提供依据。

6.2 BACnet/MQ 网络拓扑

BACnet/MQ 的实现架构应基于 AMQP 节点构建 Mesh 网状结构，取代传统 BACnet/IP 的树状结构和 BACnet MSTP 的链状结构，通过 Mesh 网络的灵活互联特性，使端到端之间能够建立多个逻辑信道，从而提升系统的扩展性、可靠性和通信效率，满足现代物联网应用的高性能需求。

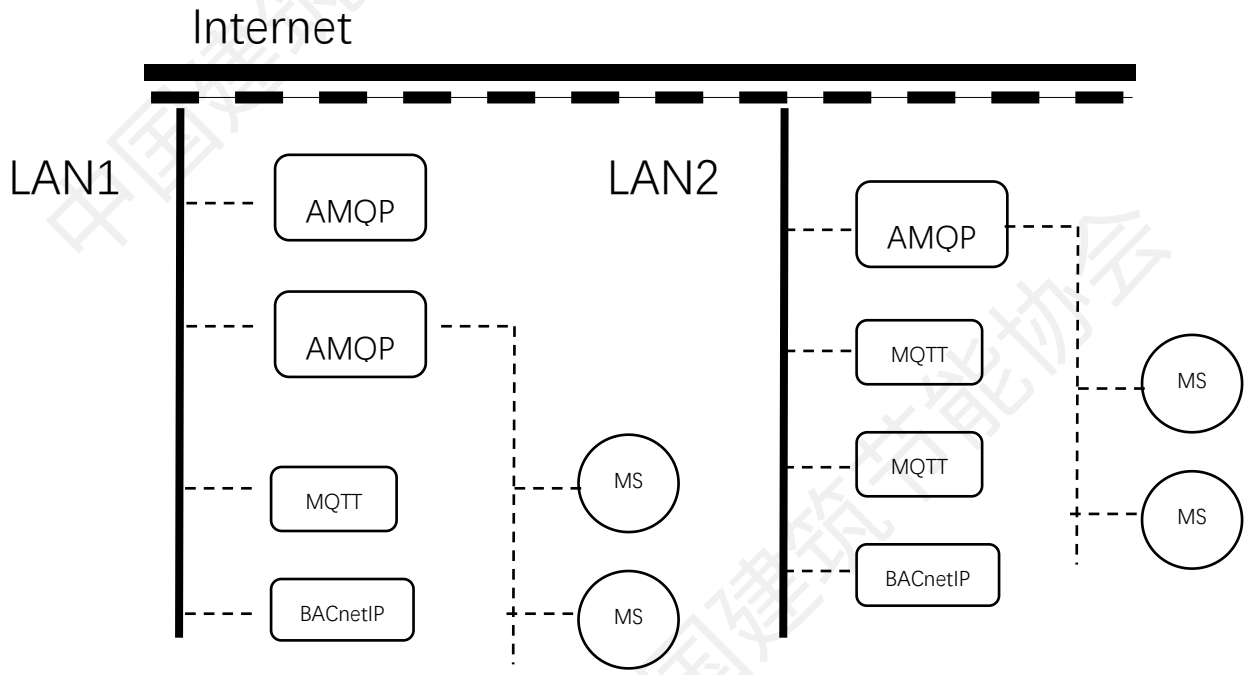

图4 基于MQ/AMQP协议的网络拓扑

如图3所示，BACnet/MQ 的网络拓扑采用基于 AMQP 的 Mesh 网状结构设计，以满足智慧建筑控制系统的复杂数据通信需求。该拓扑充分利用 AMQP 协议的灵活性，支持端到端的多信道通信，实现动态路径选择和高效数据传输，具备极高的扩展性与容错能力。

6.2.1 中心节点

中心节点作为通信的中枢，一方面与其它中心节点链接构成一个虚拟通信网，另一方面为区域的普通MQTT节点提供虚拟通信网的接入服务

a）同时支持AMQP与MQTT协议

系统支持同时使用AMQP协议与MQTT协议，以满足不同设备和网络需求的通信要求。

b）MQTT协议的应用

使用MQTT协议接入末端低算力设备或传感器，设备通过MQTT发布消息至中心节点的AMQP消息路由网络，实现消息的高效转发与处理。

c）AMQP协议的应用

使用AMQP协议与对等的中心节点建立通信信道，在基于虚拟化的消息路由网络中实现数据交互、消息转发及局部广播功能。

d）兼容BACnet通信模式

系统兼容BACnet/IP及BACnet/MSTP通信模式，通过协议转换与封装技术实现与传统BACnet设备的无缝通信。

6.2.2 末端节点

末端节点承担设备数据的接入与双向通信功能，支持以下特性：

a）支持MQTT协议

末端节点通过MQTT协议接入网络，发布设备数据并订阅控制指令，实现轻量级通信需求。

b）兼容BACnet/IP和BACnet/MSTP通信模式

末端节点通过协议转换与数据封装技术，实现BACnet设备与MQTT协议之间的互联互通，可无缝适配传统BACnet/IP和BACnet/MSTP通信模式。

c）双向通信机制

末端节点将BACnet消息封装为符合MQTT协议格式的消息，发布至指定的服务端TOPIC（公共消息队列）。同时，节点基于自身UUID订阅唯一标识的TOPIC频道，用于接收控制指令或数据更新。该机制确保BACnet数据包的可靠双向通信。

6.2.3 节点关键参数

末端节点需配置以下关键参数以保证通信的稳定性和一致性。

a）唯一标识UUID

每个节点必须配置唯一标识符（UUID），支持中文汉字、英文字母、数字和下划线（_）。UUID长度应不超过30个字符，用于标识节点的身份，确保在通信网络中的唯一性。

b）心跳（Keep Alive）

节点需设置心跳时间以保持与MQTT代理的连接活跃。推荐保活时间为300秒以上，在网络条件不稳定的环境下，可适当延长心跳时间以提高连接可靠性。

c）下发Topic/监听Topic

节点需指定用于消息发布和订阅的MQTT主题（Topic）。支持使用通配符（如 # 和 +）实现批量操作功能，以满足复杂主题过滤需求。

6.2.4 BACnet/MQ节点架构

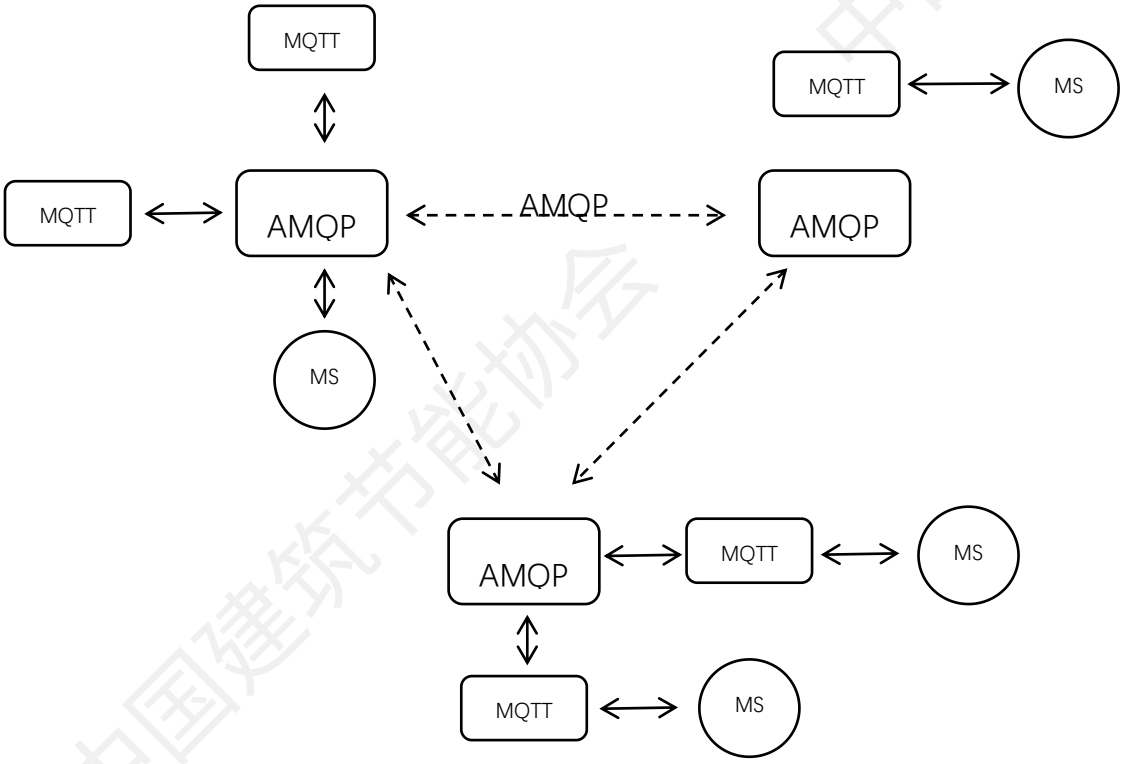

图5 基于MQ/AMQP协议的节点逻辑拓扑架构

图5描述了基于MQ/AMQP协议的BACnet节点逻辑拓扑架构，展示了MQTT、AMQP、BACnet/IP、MSTP协议之间的交互关系及其适用场景。图中采用虚线和实线区分了不同协议之间的连接方式。实线表示末端设备（MQTT或MSTP）与AMQP中心节点的直接连接。虚线表示中心节点间的AMQP信道，支持数据转发与同步。BACnet/MQ节点架构结合了传统的BACnet协议（如BACnet/IP和BACnet MSTP）与现代消息队列协议（MQTT和AMQP），实现了楼宇控制系统中的多协议互联互通。该架构利用AMQP的高可靠性与MQTT的轻量级特点，支持复杂的网络拓扑和高效的数据交互。

AMQP协议用于实现中心节点之间的高可靠性通信。节点间通过AMQP建立信道，可支持消息的路由、转发和局部广播。

MQTT协议用于连接低算力设备（如传感器）和末端节点。末端设备通过MQTT将消息上传至中心节点的AMQP网络，并从中心节点订阅控制指令。

兼容BACnet传统协议，支持BACnet/IP协议的数据直接封装并路由至AMQP消息网络。

通过协议转换技术，实现BACnet MSTP设备的接入，保证传统设备与现代消息网络的无缝连接。

该拓扑适用于楼宇自动化系统中的设备集成和多网络场景。

6.2.5 设备唯一标识UUID

基于MQ/AMQP 的BACnet网络架构突破了传统BACnet/IP的容量限制，通过虚拟化技术实现了设备在大规模网络中的高效通信。该架构消除了网段和IP地址对BACnet 协议的限制，无需依赖BBMD（BACnet/IP 广播管理设备）机制即可实现跨网段的点对点通信，支持海量设备在同一网络下的共存和高效管理。

为确保在MQ虚拟化网络中对设备的唯一标识性，规范要求基于设备的MAC地址生成唯一标识符（UUID）。UUID的生成能够满足全球范围内的唯一性要求，同时具备灵活性和可扩展性。

a）UUID 版本及生成算法

UUID（通用唯一标识符）提供了五种主要版本的生成算法，根据应用场景的不同特点选择适用的版本：

1）UUID 1（基于时间戳）

通过当前时间戳、设备 MAC 地址和随机数生成。全球范围内唯一，适用于对时间敏感的场景。

2）UUID 2（基于分布式计算环境 DCE）

算法类似于 UUID 1，将时间戳的前 4 位替换为 POSIX UID（用户标识符）。适用于分布式计算环境的特定应用场景。

3）UUID 3（基于名字的 MD5 散列值）

通过对命名空间和名字进行 MD5 散列计算生成。保证同一命名空间内名字的唯一性，以及跨命名空间的唯一性。常用于需要结合命名空间的应用。

4）UUID 4（基于随机数）

使用伪随机数生成 UUID，无需依赖设备信息或时间戳。重复概率极低，可满足大多数通用应用场景。

5）UUID 5（基于名字的 SHA-1 散列值）

与 UUID 3 类似，但使用更安全的 SHA-1 散列算法。在安全性和唯一性要求更高的场景中适用。

- **规范要求**

在 MQ/AMQP 架构下，为确保设备在网络中的唯一性标识，约定使用 UUID（基于 MAC 地址）。具体生成方式采用 UUID 1 算法，通过结合设备的 MAC 地址、时间戳和随机数生成唯一标识符，满足以下需求：

唯一性：在全球范围内唯一，适合大规模分布式系统。

可追溯性：通过结合设备 MAC 地址，实现标识与物理设备的绑定。

兼容性：与现有网络协议和设备命名体系兼容，便于扩展。

6.3 Mesh网络

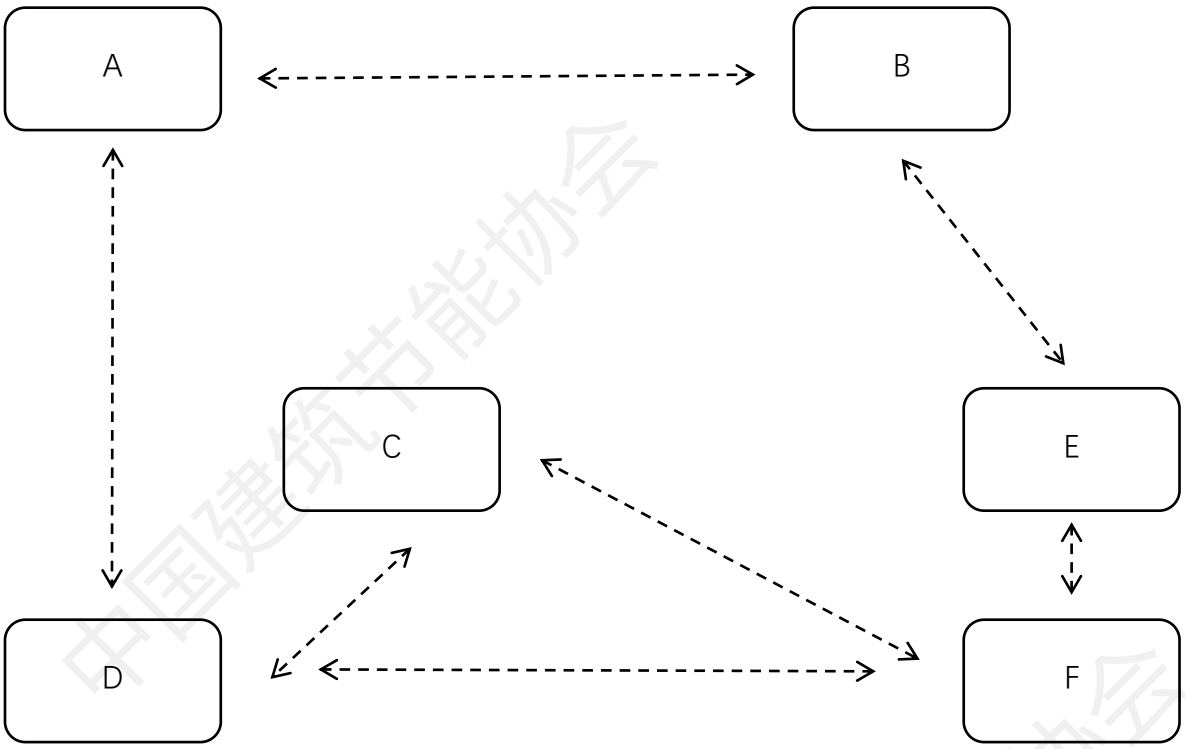

图6 基于虚拟交换机组成的mesh网络

a）定义与架构说明

基于中心节点互联机制，Mesh 数据网络通过自组织方式形成动态、灵活的网状拓扑结构，如图 6 所示。该结构支持节点间的多路径通信，从节点 A 到节点 F 的数据传输路径包括 A→B→E→F、A→C→F 和 A→D→F 等。多路径设计显著提高了网络的 可用性 和 稳定性。

- **规范要求**

a） **拓扑设计：**Mesh 网络应采用动态路由机制，支持多跳互连和自适应路径选择，以适应复杂物理环境和拓扑动态变化的需求。

b） **设备特性：**加入 Mesh 网络的设备应具备自动发现和自组织能力，并能够兼容网络的动态路由和自动修复机制。

c） **可靠性目标：**网络设计需满足高可靠性要求，确保在链路故障或节点失效情况下，网络仍能维持通信功能，恢复时间不超过预定限值。

6.4 消息队列和订阅

6.4.1 中心节点与末端节点通信

在智慧建筑控制系统中，中心节点与末端节点的通信采用基于消息队列的双向通信机制，以满足末端节点资源有限的设备或网络环境的需求。具体通信流程和机制如下：

a）中心节点消息队列

所有消息队列部署于中心节点，末端节点通过访问中心节点的消息队列完成消息的发送与订阅。中心节点为每个设备分配以其 UUID 命名的消息队列，用于统一接收发送给该设备的消息。图7显示了中心节点与末端节点间的消息队列交互模型。

b）末端节点消息处理

末端节点通过访问中心节点中以自身 UUID 为 ID 的消息队列，完成消息的订阅与消费，适配低功耗、低计算能力的设备场景。

c）消息缓存与订阅服务

中心节点维护以末端节点 UUID 为 ID 的消息队列，用于辅助消息的缓存与订阅服务。

末端节点仅需订阅与自身相关的消息队列，无需额外资源开销，从而简化通信逻辑并提升效率。

规范要求

a）消息队列部署：所有消息队列应统一部署在中心节点，并以 UUID 为唯一标识，以支持分布式设备的高效通信。

b）末端节点访问：末端节点仅需通过 HTTP、AMQP 等协议访问中心节点的消息队列，实现对消息的发送与订阅。

c）容错与可靠性：中心节点需具备消息缓存与重传能力，确保在网络延迟或故障时，消息不会丢失。

- **适用场景**

该消息队列与订阅机制适用于智慧建筑中高密度设备接入和复杂控制需求的通信场景，尤其在资源受限的末端节点中表现优异。

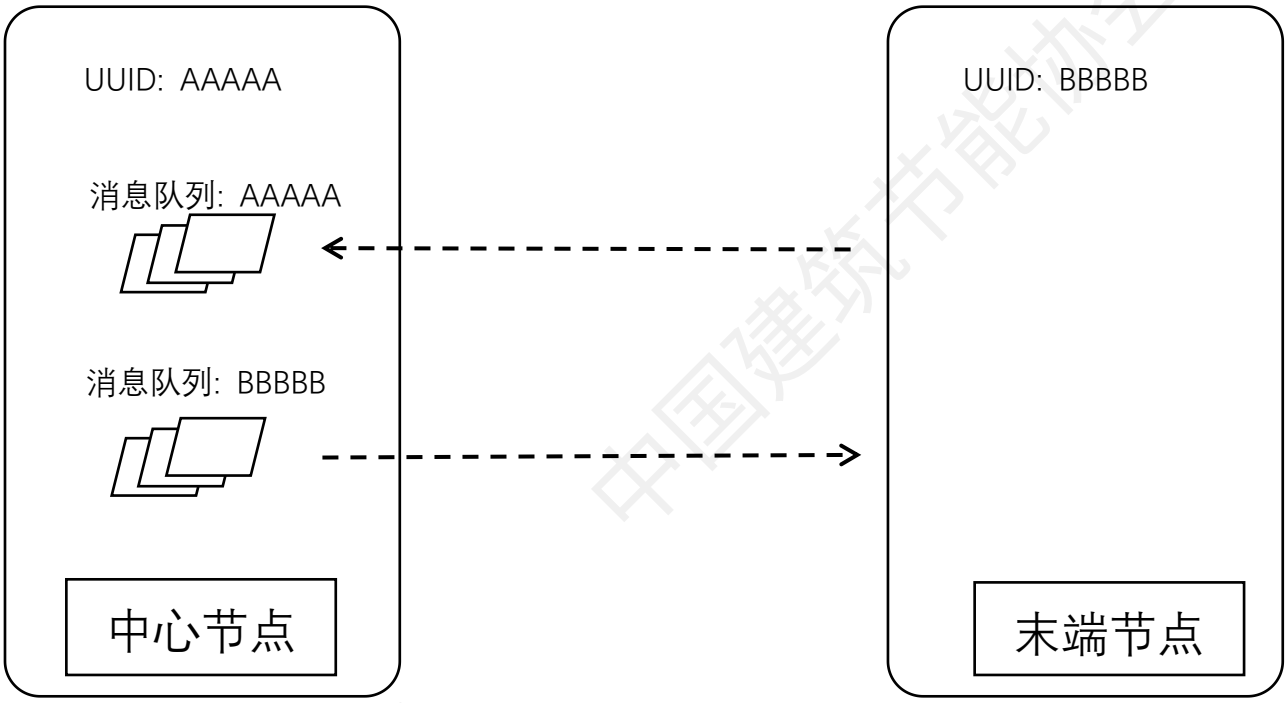

图 7 中心节点与末端节点的消息队列交互

6.4.2 中心节点与中心节点通信

在智慧建筑控制系统中，当多个中心节点之间需要进行双向通信时，采用基于消息队列的机制实现高效、可靠的交互。

a）消息队列声明

每个中心节点声明一个以自身 UUID 为唯一标识的消息队列，用于接收发往本节点的消息。

各中心节点通过订阅自己的消息队列，实现对消息的接收与消费。如图 7 所示，中心节点与中心节点之间的消息队列交互设计。

b）消息发布与双向通信

在双向通信过程中，中心节点将消息发布到对方的 UUID 消息队列中。

每个中心节点在消费自己的队列时，即可获取来自其他节点的消息，从而完成双向通信。

c）通信流程

节点 A 向节点 B 通信时，节点 A 将消息发布到以节点 B UUID 命名的消息队列中。节点 B 订阅并消费该队列中的消息。同理，节点 B 向节点 A 通信时，将消息发布到节点 A 的消息队列中，节点 A 消费队列完成接收。

通过这种设计，任意两个中心节点之间都可以实现点对点通信，无需额外的中间代理或复杂的路由逻辑。

- **规范要求**

a）唯一标识：所有中心节点的消息队列必须以节点的 UUID 命名，确保队列的唯一性与可追溯性。

b）队列交互机制：中心节点需支持将消息发布到目标节点的队列中，同时订阅和消费自身队列中的消息，以实现高效的双向通信。

C）可靠性保障：消息队列需具备持久化和重传机制，以应对通信中的网络波动或节点故障。

- **应用场景**

该中心节点与中心节点的通信机制适用于智慧建筑中需要跨区域、跨子系统的控制与协调场景，例如多楼层间的设备协调控制、分布式系统间的状态同步与指令下发、高可靠性场景中的冗余中心节点通信等。

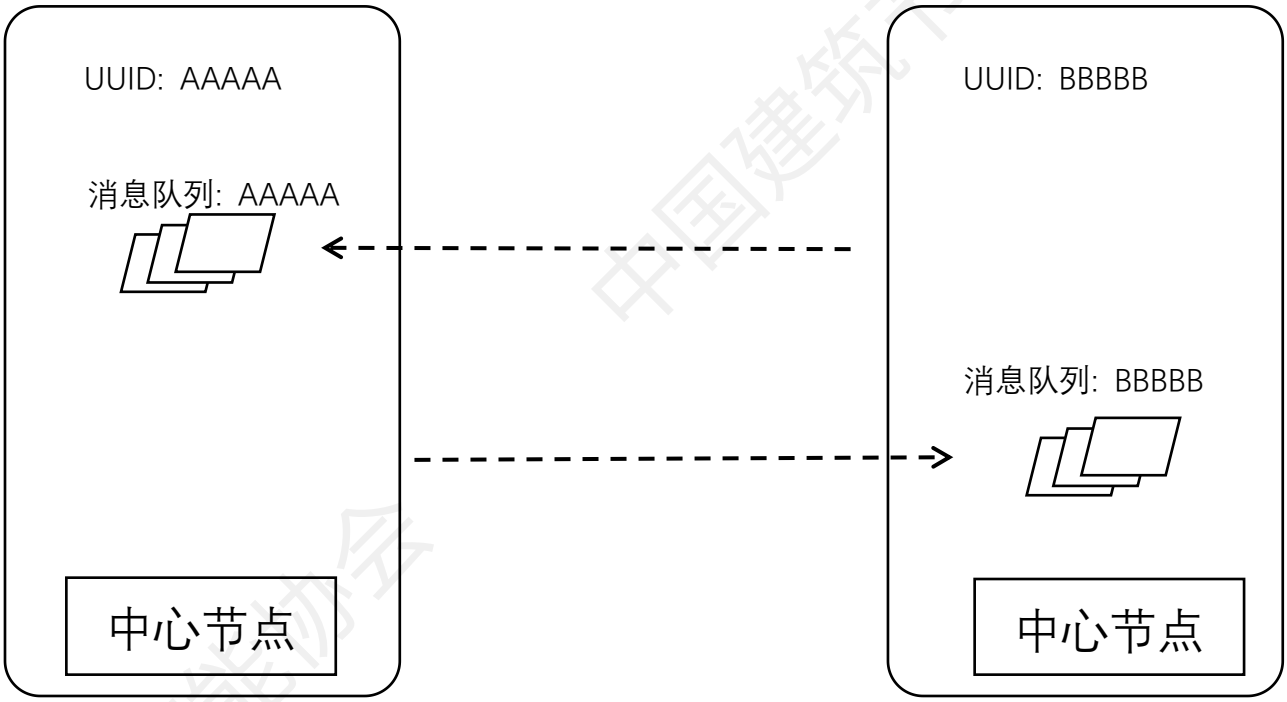

图8 中心节点与中心节点的消息队列交互

6.4.3 备用交换机（Alternate Exchange）

备用交换机是用于处理无法路由到当前交换机任何队列的消息的机制。当消息在当前交换机中无法找到匹配的路由时，这些消息会被重新路由到备用交换机。通过配置备用交换机的路由逻辑，可以灵活地对未路由消息进行管理，例如将消息重定向到一个特殊的 死信队列（Dead-Letter Queue）。

6.4.4 死信队列（Dead-Letter Queue）

死信队列是一种特殊的队列，用于存储由于以下原因无法被正常处理的消息。

a) **消息过期：**消息超过设定的生存时间；

b) **队列已满：**目标队列达到容量限制，无法接收新的消息；

c) **消息被拒绝：**消费者拒绝消息并设置 requeue=false 时，消息将不会重新排入队列。

6.4.5 消息处理策略

在 BACnet/MQ 网络中，当出现无法路由的消息时，系统需根据节点策略采取以下处理方式之一：

a) **引导进入备用交换机：**将消息发送至备用交换机，由备用交换机执行指定的路由逻辑，例如重定向到其他队列或特定的处理模块；

b) **直接进入死信队列：**将消息存储到死信队列中，由专门的主机或服务进行后续处理；

c) **直接放弃：**丢弃消息，不做进一步处理。

备用交换机和死信队列中的消息可由专用主机接受，并依据系统需求执行进一步的逻辑处理，如状态维护、问题排查等。

6.4.6 广播包特殊处理

为避免重复消息处理，相同时间戳的广播包若第二次进入同一中心节点的消息队列，应直接丢弃，不再进入死信队列或备用交换机。

- **规范要求**

a) **备用交换机配置：**系统应根据应用场景合理配置备用交换机，并明确其路由逻辑和目标队列；

b) **死信队列机制：**所有关键队列应具备死信处理能力，以确保消息处理的完整性和可靠性；

c) **广播消息丢弃规则：**广播包需包含唯一标识（如时间戳）。重复广播包应直接丢弃，避免对系统资源的浪费。

6.5 Mesh网络的路由机制

6.5.1 路由机制概述

在 Mesh 网络中，路由机制需要支持多个中心节点的协作，动态维护路由表，并根据实时信息和预定义规则高效地转发消息。每个中心节点负责实时维护一个动态路由表，以指导消息的转发路径，确保消息能够准确到达目标节点。通过这种动态路由机制，Mesh 网络能够提供高效、可靠和可扩展的通信能力。

6.5.2 路由定义

路由是指指导消息从源地址发送到目标地址的路径信息，也可以理解为数据包从源节点传递到目标节点的过程。路由机制的核心包括以下功能：

a) **路径选择：**根据实时网络状态选择最优路径。

b) **动态调整：**在网络拓扑变化或节点状态改变时，路由表能够自动更新。

c) **目标传递：**确保数据准确无误地到达目标节点。

6.5.3 路由机制的关键特性

a) 路由表构建与维护

每个中心节点实时维护一张动态路由表，用于记录从源节点到目标节点的最佳路径。

路由表的更新依据实时网络状态和预定义的规则，确保消息转发的准确性和高效性。

b) 隔离广播与访问规则

广播隔离：为避免广播消息的泛滥，Mesh 网络需设计机制阻止广播消息的无控制扩散。

访问控制：通过设置访问控制列表（ACL）对流量进行精细化管理，确保合法通信并阻止未授权的消息流。

c) 自修复能力

在设备连接断开或节点损坏的情况下，Mesh 网络能够自动更新路由表并重新计算通信路径，确保网络的连通性和稳定性。自修复机制通过动态调整路由表，显著提高网络的可靠性和容错能力。

d) 负载均衡

Mesh 网络支持多路径传输，能够在多个节点之间均匀分配网络负载。

负载均衡机制通过避免单一节点过载，提升了整体网络的稳定性和可靠性。

■ 规范要求

a) 动态路由表：中心节点需支持动态路由表的创建和维护，路由表内容包括目标节点、下一跳节点和路径权重等信息。

b) 广播隔离：路由机制需阻止广播消息的无序扩散，同时支持细粒度的访问控制策略。

c) 自修复能力：网络中断时，路由机制需在规定时间内自动修复，并恢复通信链路。

d) 负载均衡：路由机制需具备均衡分配负载的能力，避免个别节点过载导致通信中断。

6.6 路由表的建立与维护

6.6.1 路由信息的结构

路由信息应包含以下关键字段，以确保路由表的完整性和实用性：

a) **目标节点ID：**唯一标识目标节点，用于确定消息的接收者。

b) **连接信息：**包含目标节点的IP地址、端口号，以及其他必要的连接参数。

c) **状态：**指示目标节点的当前状态，例如在线、离线、故障等。

d) **最后更新时间：**记录路由信息的最新更新时间，用于判断信息的时效性并触发必要的更新操作。

6.6.2 路由表的创建和维护过程

a) 初始化路由表

在系统启动时，每个中心节点初始化一个空的路由表。

路由表用于存储其他节点的标识（ID）及其对应的连接信息。

b) 节点发现与注册

当一个新节点加入系统时，它需向已存在的中心节点注册自己的唯一标识（UUID）及连接信息。已注册的节点会将新的节点信息广播至路由表中的其他节点，确保全网节点信息一致。

c）动态更新机制

路由表应能够动态反映节点的状态变化。例如：

上线：新增节点后，其他节点更新路由表以添加新的连接信息。

下线：节点主动退出或断开连接时，其他节点应在路由表中标记其为不可用或移除。

故障：检测到节点异常后，路由表更新其状态为“故障”。

d）心跳检测与故障恢复

心跳检测：通过定期发送心跳包监测连接节点的状态。如果检测到节点长时间未响应，则将其状态更新为“离线”或“故障”。

故障恢复：当故障节点恢复连接时，允许其重新注册，恢复路由信息并同步到其他节点。

6.7 路由算法

Mesh 网络中路由算法的选择直接影响网络通信的效率、可靠性和扩展性。根据智慧建筑控制系统的需求，常用的路由算法包括距离向量路由算法和链路状态路由算法，具体描述如下：

6.7.1 距离向量路由算法

距离向量路由算法通过周期性地广播路由请求和更新路由表来实现动态路由发现。典型的实现是AODV（Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing） 算法，其工作流程如下：

a）路由请求（RREQ）：当源节点需要与目的节点通信时，会向网络广播路由请求，包含源节点地址、目的节点地址以及序列号等信息。

b）路由回复（RREP）：中间节点或目的节点接收到路由请求后，如果能够提供到目的节点的有效路径信息，会返回路由回复消息。

c）路径建立：一旦找到到达目的节点的路径，路由回复消息将沿路径返回到源节点，从而建立起通信链路。

距离向量路由算法适用于动态拓扑环境，避免了不必要的全局信息维护，能有效减少网络资源消耗。

6.7.2 链路状态路由算法

链路状态路由算法依赖于每个节点维护的网络拓扑和链路状态信息来选择路由。其工作流程如下：

a）链路状态更新：每个节点定期向网络广播链路状态信息，包含当前节点的邻居信息和连接状态。

b）全局视图构建：所有节点通过链路状态信息交换构建整个网络的拓扑视图。

c）最短路径计算：节点使用全局视图运行最短路径算法（如 Dijkstra 算法），计算到达其他节点的最佳路径。

链路状态路由算法适用于网络拓扑相对稳定的环境，能够提供全局最优的路径选择，但需要更多的计算和存储资源。

- **规范要求**

a）**路由选择：**应根据网络环境特点选择合适的路由算法。对于动态变化的网络环境，优先采用 AODV 算法；对于稳定的网络环境，建议采用链路状态路由算法。

b）资源优化

路由算法的设计需兼顾网络资源消耗与计算效率，避免过度的广播导致网络拥塞或节点负载过高。

c）故障处理

路由算法需具备故障检测和修复能力，确保链路中断时能够快速重新建立路由。

d）扩展性

路由算法应支持网络节点的大规模动态加入与退出，确保在高密度设备接入的情况下保持网络性能稳定。

- **应用场景**

a）**AODV 路由算法**：适用于频繁变化的动态网络拓扑，如移动设备间的通信或短期临时网络。

b）**链路状态路由算法**：适用于智慧建筑中较为稳定的核心控制网络，要求高效、全局优化的路由决策场景。

6.8 访问控制ACL

访问控制列表（Access Control List，ACL）是 Mesh 网络中用于实现流量管理和安全控制的重要机制。通过在网络中设置 ACL，可以限制广播频率、识别并丢弃重复数据包，以及阻止潜在的恶意或无效数据传输，确保网络的高效性和安全性。以下为 ACL 应具备的规则与规范要求：

- **ACL 应具备的规则**

a）广播频率限制

每个节点在特定时间窗口（例如 1 分钟）内的广播次数需受到严格限制，以防止广播风暴影响网络性能。

默认情况下，限制每个节点每分钟的广播次数上限。

当广播频率超出预设阈值时，ACL 应自动阻止多余的广播流量。

b）重复数据包识别与丢弃

所有数据包需添加标记（例如时间戳、序列号等），以便 ACL 规则检测和处理重复数据包。

对环路转发或重复的数据包，ACL 应设置机制进行快速识别并丢弃。

时间戳和序列号应为每个数据包的必备字段，用于判定数据包的新鲜度和唯一性。

对检测到重复或环路转发的数据包，ACL 应立即丢弃并记录异常行为。

c）基于来源、目的地和内容的流量过滤

ACL 应支持基于以下条件的精细化规则配置，以过滤潜在的恶意或无效数据包：

数据包的来源地址：阻止来自未经授权节点的数据传输。

数据包的目的地址：限制特定节点或区域的访问权限。

数据包的内容特征：识别并阻止可能包含恶意指令或不符合协议规范的数据包。

- **规范要求：**

ACL 应动态更新规则以适应网络安全需求。

应提供日志记录机制，详细记录被阻止数据包的相关信息，便于后续分析。

6.9 网络安全机制

6.9.1 通信协议安全机制

智慧建筑常用的通信协议（如 MQTT 和 AMQP）应基于 TLS（Transport Layer Security） 安全机制运行，TLS 为通信提供以下保护功能：

加密：通过对数据进行加密保护传输内容的机密性，防止信息被窃取。

身份验证：在通信握手过程中，通过验证证书确保通信双方的真实性。

完整性：通过消息校验机制确保数据在传输过程中未被篡改。

6.9.2 密码算法的适配性

在网络安全机制中，密码算法的选择需符合国家及行业的相关标准，并根据系统部署的场景需求进行配置。支持以下安全机制的密码算法：

密钥交换和身份验证：确保通信双方能够通过密钥协商建立安全连接。

消息认证和完整性校验：用于检测数据是否被篡改。

数据加密：用于保护传输数据的机密性。

6.9.3 国密算法在网络安全中的应用（可选实现）

在涉及智慧建筑控制系统的网络安全中，可以根据场景需求选择使用国密算法（SM2、SM3、SM4）作为加密和身份验证机制，以满足国家对信息安全的相关要求。

a）SM2 在 TLS 中的应用

SM2 用于密钥交换和身份验证。在 TLS 握手过程中，服务器可以使用 SM2 算法发送其公钥证书，客户端验证该证书后，可以使用 SM2 算法与服务器进行密钥协商。

应用场景：适合需要高安全性和本地化加密支持的系统。

b）SM3 在 TLS 中的应用

SM3 用于消息认证和完整性校验。在 TLS 握手过程中，客户端和服务器会计算并交换哈希值，以确保消息在传输过程中没有被篡改。

应用场景：适合需要高效校验和防篡改保护的网络场景。

c）SM4 在 TLS 中的应用

SM4 可作为一种加密算法，用于加密在 TLS 连接上传输的数据。在 TLS 握手过程中，客户端和服务器协商使用 SM4 算法来保护后续的数据传输。

应用场景：适合需要高性能对称加密的通信环境。

- **规范要求**

通信安全协议

通信协议必须支持 TLS 1.2 或更高版本，确保加密、认证和完整性保护功能满足行业要求。

系统应开放密码算法的配置选项，以支持满足不同场景需求的加密算法。

密码算法兼容性

密码算法的选择应符合国家标准和行业规范要求，确保与智慧建筑行业内的常用设备和系统兼容。

对于涉及国内特殊应用场景的系统，可根据需求支持国密算法或其他行业标准的密码算法。

开放性和适配性

系统设计需支持密码算法的灵活适配，便于在未来算法标准更新或特殊场景需求下进行快速调整。

- **应用场景**

该安全机制适用于智慧建筑控制系统中的以下场景：

数据加密传输：对重要控制指令、敏感信息等进行加密保护。

身份验证：确保各通信节点的可信性，防止未经授权的设备接入系统。

数据完整性：用于检测通信数据是否被篡改，保障系统运行的安全性。

7 综合互联

7.1 兼容路由BACnet/IP

为了确保 BACnet/MQ 网络能够路由和处理本地 BACnet/IP 消息，需实现 BACnet/IP 与 BACnet/MQ 之间的协议转换。具体实现要求如下：

a）消息格式转换

BACnet/IP 消息需在 BACnet/MQ 节点中被转换为 MQTT 消息格式,同时保留 BACnet/IP 的相关地址信息和路由信息（如源地址 src 和目标地址 dst），以确保通信的准确性和可追溯性。

b）分段协议路由

在混合网络中，根据节点所在网段的协议特性，采用分段路由策略，实现跨协议的无缝通信。

节点 A 与节点 B 通信（同一网段）：A 和 B 直接使用 BACnet/IP 协议进行通信，避免额外的协议转换。

节点 B 与节点 C 通信（跨网段）：B 和 C 使用 BACnet/MQ 协议进行通信，确保跨网段通信的效率和可靠性。

节点 C 与节点 A 通信（跨网段与协议转换）：消息需通过节点 B 路由，B 负责将 BACnet/IP 协议消息与 BACnet/MQ 协议消息相互转换。

路由过程示例

节点 A → 节点 C：

① 节点 A 发送 BACnet/IP 消息至节点 B。

② 节点 B 将 BACnet/IP 消息转换为 MQTT 消息格式并发送至节点 C。

③ 节点 C 接收并解析 MQTT 格式的消息，完成跨网段通信。

节点 C → 节点 A：

④ 节点 C 将 MQTT 消息发送至节点 B。

⑤ 节点 B 将 MQTT 消息转换为 BACnet/IP 消息格式并发送至节点 A。

⑥ 节点 A 接收并解析 BACnet/IP 消息，完成双向通信。

- **规范要求**

协议转换支持

BACnet/MQ 节点需支持 BACnet/IP 消息的接收、转换和转发能力。

转换过程中需保留原始地址信息（src/dst）和路由信息，确保通信链路的完整性。

分段通信策略

在同一网段中，节点之间优先使用原生 BACnet/IP 协议通信。

跨网段通信时，需使用 BACnet/MQ 协议，并通过边界节点（如节点 B）实现协议转换。

路由效率

BACnet/MQ 节点应具备高效的路由能力，确保协议转换过程不会显著增加网络延迟。

路由机制应支持动态更新，适应网络拓扑变化。

兼容性

BACnet/MQ 节点需兼容现有 BACnet/IP 设备，确保新旧系统的互联互通。

在协议转换过程中，需保持 BACnet/IP 的功能特性不受影响。

7.2 兼容路由BACnet/MSTP

为了实现 BACnet/MQ 网络对本地 BACnet/MSTP 消息的路由，需将 BACnet/MSTP 的通信数据转换为 MQTT 消息格式，并保留 BACnet/MSTP 相关的 BVLC 地址信息与路由信息。在无 IP 转发需求的情况下，可在消息的 src/dst 区段中填充本地 IP 或其他特征码进行标识。

具体的兼容路由要求如下：

a）路由场景描述

节点 A 与节点 B 通信（同一总线）：

节点 A 和节点 B 位于同一 BACnet/MSTP 总线，直接使用 BACnet/MSTP 协议通信。

节点 B 与节点 C 通信（跨网段）：

节点 B 和节点 C 位于不同网段，节点 B 将 BACnet/MSTP 消息转换为 MQTT 消息格式，使用 BACnet/MQ 协议与节点 C 通信。

节点 C 与节点 A 通信（跨网段与协议转换）：

在节点 C 与节点 A 通信时，消息需通过节点 B 路由，节点 B 负责在 BACnet/MSTP 协议和 BACnet/MQ 协议之间进行转换。

b）路由过程示例

节点 A → 节点 C：

① 节点 A 将 BACnet/MSTP 消息发送至节点 B。

② 节点 B 将 BACnet/MSTP 消息转换为 MQTT 消息格式，并将消息发送至节点 C。

③ 节点 C 接收并解析 MQTT 格式消息，完成跨网段通信。

节点 C → 节点 A：

① 节点 C 将 MQTT 消息发送至节点 B。

② 节点 B 将 MQTT 消息转换为 BACnet/MSTP 消息格式，并将消息发送至节点 A。

③ 节点 A 接收并解析 BACnet/MSTP 消息，完成双向通信。

- **规范要求**

协议转换支持

BACnet/MQ 节点需支持 BACnet/MSTP 消息的接收、转换和转发能力。

转换过程中需保留原始 BVLC 地址信息和路由信息，确保消息的完整性和可追溯性。

src/dst 填充规则

在无 IP 转发需求时，src/dst 字段需填充本地 IP 或唯一特征码，用于标识消息的路由来源和目标。

分段通信策略

BACnet/MSTP 节点在同一总线内直接使用 BACnet/MSTP 协议通信。

跨网段通信需通过兼容 BACnet/MSTP 的 BACnet/MQ 节点完成协议转换。

路由效率

BACnet/MQ 节点的路由机制需确保协议转换高效完成，避免增加网络延迟。

路由表需动态更新，以适应网络拓扑变化。

兼容性

BACnet/MQ 节点需与现有 BACnet/MSTP 设备兼容，确保系统升级或扩展时无缝集成。

7.3 BACnet数据的封装

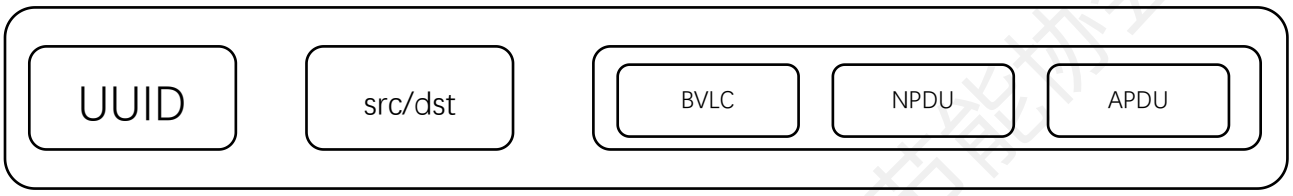

图8 BACnet数据包在BACnet/MQ网络上的消息封装

BACnet 数据在 BACnet/MQ 网络上的消息封装

如图 7 所示，BACnet 数据在 BACnet/MQ 网络中的封装格式由多个关键字段组成，涵盖了通信节点标识、网络层地址信息及应用层协议单元。各字段有对应的作用和定义。

7.3.1 UUID

描述：表示 BACnet/IP 接入的 BACnet/MQ 节点的唯一标识符。

作用：用于在 BACnet/MQ 网络中唯一标识消息的发送或接收节点，确保网络中不同节点的识别与追溯。

7.3.2 src/dst IP+Port

描述：消息发起方和接收方的 IP 地址与端口号。

作用：记录消息的源地址（src）和目标地址（dst），便于消息的路由与定位。若无 IP 转发需求，此

字段可填充本地 IP 或特征码以标识。

7.3.2 BVLC（BACnet Virtual Link Control）

描述：BACnet 虚拟链路控制字段，延用 BACnet/IP 的 BVLC 格式。
作用：提供虚拟链路层控制功能，支持消息的广播和路由等操作。

7.3.3 NPDU（Network Protocol Data Unit）

描述：网络协议数据单元，用于承载网络层的信息，延用 BACnet/IP 的 NPDU 格式。
作用：包含网络层的目标信息、路由信息和控制标志，为数据的跨网络传输提供支持。

7.3.3 APDU（Application Protocol Data Unit）

描述：应用协议数据单元，用于包含 BACnet 应用层的信息，延用 BACnet/IP 的 APDU 格式。
作用：承载应用层数据，支持 BACnet 应用协议功能，如读取属性、控制设备等。

- **规范要求**

封装结构标准化

BACnet/MQ 节点需按照上述封装格式处理数据包，确保数据的可互操作性。
UUID、src/dst 地址字段需清晰定义，保证消息的追溯性和路由准确性。

兼容性支持

BVLC、NPDU 和 APDU 的格式需完全兼容 BACnet/IP 的既有规范，确保与现有 BACnet/IP 系统的无缝集成。

消息完整性与安全性

数据封装需支持消息完整性校验，确保在传输过程中数据不会被篡改。
适配网络安全机制（如 TLS），对封装的消息进行加密和保护。

灵活性与扩展性

结构设计需支持 BACnet/MQ 的扩展功能（如新字段或自定义应用），同时兼容标准化字段的核心功能