

[电力采集系统]

电力采集系统软件通信协议配置模型构建与验证

文/袁怀才 高意 杨朋飞
威胜信息技术股份有限公司

聚焦于电力采集系统软件通信协议配置模型的构建与验证。详细探讨DL/T698.41、DL/T698.42、DL/T698.45、DL/T645、Modbus等多种电力系统常用通信协议的特点和应用场景。深入分析通信协议配置过程中的关键问题和技术难点，构建一套全面且灵活的软件通信协议配置模型。通过多种测试手段和实际案例验证该模型在提高开发和测试效率、保障数据准确性以及增强系统兼容性等方面的显著效果。此研究为电力系统的稳定运行和智能化发展提供有力的技术支持。

电力采集系统通信协议是系统主站与设备之间、设备与设备之间进行数据交换而建立的规则、标准或约定的集合。在电力系统的建设和运行过程中，各类设备之间需要进行大量的信息交互，而通信协议则是实现通信双方可靠数据传输的关键^[1]。随着能源互联网技术和业务的快速发展，电力采集系统规模不断扩大，智能化程度也在不断提高。通信协议的升级及优化也越来越频繁，为此，涌现出了大量的协议，如国内的采集系统主站与采集终端交互的DL/T698.41^[2]、DL/T698.42^[3]和DL/T698.45协议^[4]；适用于多功能电能表数据交换的DL/T645协议^[5]；国际高级计量基础设施（AMI，Advanced Metering Infrastructure）系统广泛采用的DLMS协议^[6]，国际工业控制通用的Modbus协议^[7]。这些协议各自具有独特的功能和适用范围，在不同的电力设备和系统中广泛应用。

然而，在实际应用中，多种协议的同时存在也带来诸多问题。例如协议不同版本之间、不同协议之间的兼容性难题，通信配置的复杂性，数据传输准确性问题等。这些问题使协议的实现面临诸多挑战，传统的协议处理方式往往只适用于单一协议扩

展或同系列协议的配置和实现。为解决这些问题，构建一个通用、灵活且高效的通信协议配置模型显得尤为重要。因此，构建一个通用的软件通信协议配置模型具有重要的现实意义。

本文针对电力采集系统软件的协议开发，构建通用且高效的配置模型。验证分析表明，相较于传统的通信协议的实现方法，协议配置模型减少协议开发实现的成本，提升兼容性和准确性，有助于加快推进电力采集系统深化应用建设，保证系统的高效稳定运行，对国家新型电力系统的建设和新能源接入与消纳都有着重要意义。

电力系统常用通信协议概述

电力采集系统是用于实时采集、传输、存储和分析电力系统运行数据（如电能、电压、电流和设备状态等）的综合性系统，其核心功能包括电能数据采集、通信传输、数据处理和控制交互等^[8]。国内电力采集系统包括国家电网公司的用电信息采集系统和南方电网公司的计量自动化系统等，国际通常称为AMI系统。通信协议是实现电力采集系统数据交互的标准规范，可分为行业标准和企业标准。

DL/T698.41 协议是电能信息采集与管理系统第4-1部分：通信协议-主站与电能信息采集终端通信，主要规定了电力系统主站与采集终端之间的通信方式和技术要求。它支持多种通信拓扑结构，如串口、以太网等，为数据的可靠传输提供基础保障。其核心功能在于确保主站能够与采集终端进行稳定的通信，采集和传输电能相关信息，如电能表的计量数据、设备的状态信息等。

DL/T698.42 协议是电能信息采集与管理系统第4-2部分：“通信协议-通信协议-集中器下行通信”。侧重于接口规范，详细定义了电能信息采集与管理系统中集中器与各类模块接口的技术要求和功能特性。这些接口包括物理层面、数据链路层面以及应用层面的接口，通过明确接口规范，使得不同厂商的设备能够更好地兼容和互联，促进电力系统中各种设备的高效协作。

DL/T645协议全称是多功能电能表通信协议，是我国广泛应用于电能表与外部设备之间的通信协议。它采用一套简单而有效的数据传输格式，包括帧结构、控制码数据域等部分。帧结构规定数据的组织形式；控制码用于指示不同的操作类型，如读取电能数据、写入配置参数等；数据域则包含实际传输的数据内容。DL/T645 协议以其良好的兼容性和实用性，在国内市场得到广泛应用，为电能表的数据采集和管理提供便利。

DL/T698.45协议是电能信息采集与管理系统第4-5部分：通信协议-面向对象的数据交换协议。是主要针对电力用户用电信息交互业务，规范数据传输、交换和处理的规则。该协议是DL/T698.41协议和DL/T645协议的升级版本，在电力用户与电力部门之间建立高效的信息传递通道，支持实时获取用户的用电数据、停电信息和负荷控制等功能的实现，为电力部门优化电力供应和管理提供有力的支持。

Modbus协议是一种公开的、开放的工业通信协议，具有广泛的适用性和兼容性。它支持串口和以太网等多种通信方式，定义了主站与从站之间的数据通信规范。在实际应用中，主站可以通过Modbus 协议向各个从站发送读取数据或写入数据的请求，从站则根据请求进行相应的操作并返回结果。Modbus 协议的通用性使得它成为许多工业自

动化系统和电力系统中不可或缺的组成部分。

本文从上述电力系统常用的通信协议规范着手，分析协议基本特征，从协议帧结构、传输方向和用户数据定义等多方面提取协议关键要素，构建协议通用配置模型；采用可自定义的标记语言，结合自描述语言特性设计协议的封装和解析配置方法，从而实现协议的高效开发。该模型不仅能应用在电力采集系统的主站软件开发，也可应用在采集设备、传感设备以及相应的测试系统开发过程，不仅提高协议的开发效率和测试效率，同时还能保证协议实现（Implementation Under Test, IUT）的兼容性^[9]。

通信协议配置模型的构建

1. 配置模型的关键技术与方法

(1) 协议特征提取

为构建实现对不同通信协议统一管理的配置模型，需要提取协议的关键特征。通过对 DL/T698.41、DL/T698.42、DL/T698.45、DL/T645 和 Modbus 等协议的深入研究，定义一套通用的特征提取规则。对于通信协议的帧结构，提取出帧起始符、长度域、地址域、功能码、数据域、帧校验和帧结束符等特征；对数据传输方式，识别出大端序还是小端序等特征。通过对这些特征的分析 and 识别，实现了对不同协议的快速解析和分类，见表1。

表1 协议特征

协议类型	帧校验	数据传输方式	用户数据
DL/T698.41	中	小端序	结构化
DL/T698.42	中	小端序	结构化
DL/T698.45	强	大端序	自描述
DL/T645	中	小端序	结构化
Modbus	弱	大端序	结构化

表1中根据对帧结构的识别得出Modbus协议并没有帧起始符和长度域，只有末尾的帧校验，属于弱校验帧结构，DL/T698.45协议采用帧头和整帧双重校验，属于强校验，其他协议校验强度介于两者之间。对于数据传输方式，Modbus协议和DL/T698.45协议均采用大端序，而其他协议采用小端序。DL/T698.45的用户数据采用自描述方式，其他协议的数据均为结构化数据。

(2) 配置参数映射方法

由于不同协议的配置参数在形式和含义上存在差异，需要建立配置参数映射机制。该方法通过对各类协议配置参数的功能和作用进行分解、分析，找出协议最小的配置单位，定义为协议数据元。如一个整型数据、一段ASCII码字符串。将协议数据元映射到一个统一的语义空间，虽然在不同协议中的表示方式和默认值可能不同，但在配置模型中，将其统一为一个语义明确的概念，见表2。通过这种映射方法，实现对不同协议配置参数的统一管理，方便用户进行参数调整和优化。

表2 协议数据元

数据元字段	标识	取值	描述
数据类型	type	int	整型
		uint	无符号整型
		string	字符串
		float	浮点型
		enum	枚举
		DateTime	时间
编码类型	codetype	...	...
		BIN	BIN码
		BCD	BCD码
		HEX	HEX码
		ASCII	ASCII码
数据长度	codelength	...	...
		int	整型
		...	...
		string	字符串
		按类型	按类型
名称	name	string	字符串
值	value	按类型	按类型
...	...	...	...

2. 配置模型的设计

(1) 模块化设计

将配置模型划分为多个配置功能模块，包括协议适配模块、数据配置模块、自定义配置模块，如图1所示。

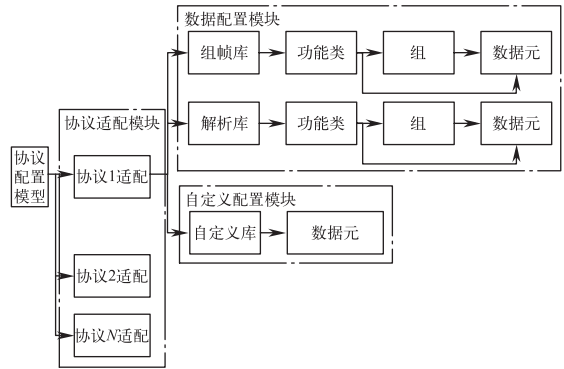


图1 协议配置模型结构

协议适配模块负责识别不同类型的通信协议，并将其转化为统一的内部格式，以便后续处理。数据配置模块负责处理协议中复杂的用户数据部分，分为组帧和解析两个子模块，对不同通信协议的各项参数、数据进行配置。自定义配置模块为可选配置模块，负责处理协议中公共的数据，供其他模块调用。

(2) 基于标准接口设计

采用通用的标准和接口规范，可确保各个模块之间能够良好地进行交互和数据交换。基于这一设计原则，模型使用XML（Extensible Markup Language）语言描述协议的各个配置模块，作为数据交换的载体，通过细分的数据元映射，定义统一的接口规范，从而使各个模块可以方便地传递和同步数据，实现协议配置信息的集中管理和共享。

3. 配置模型的具体实现

根据配置模型设计，针对不同通信协议的特征，配置协议适配文件。协议适配文件包括协议名称、协议帧结构和协议特征值。根据通信协议将用户数据按照功能类型分解为数据组、将数据组分解成数据段；针对数据段进行数据类型的限定得到数据元；数据元与通信协议进行匹配，依据匹配后的数据形成XML配置文件并标注；根据用户数据标识，加载XML配置文件，遍历数据段得到匹配结果。同理，可将协议中使用频次很高的数据元组合抽象成自定义数据，采用相同的方法配置标记为自定义配置模块。详细的协议配置流程如图2所示。

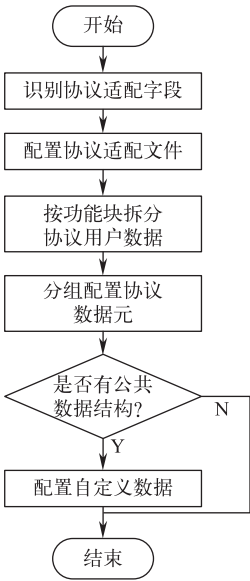


图2 协议配置流程

主站等不同的协议实现主体根据需要开发适配的通信协议，开发协议转换引导程序、协议处理程序和协议数据元处理程序。调用协议转换引导程序加载通信协议的协议适配文件、用户数据配置文件及自定义配置文件，得到XML文件与数据段的匹配模型。当需要解析协议报文时，调用协议处理程序循环拆分协议数据，直至最小的协议数据元，然后调用数据元处理程序进行解析，赋值数据实体，从而得到协议解析的目标数据。相反地，对协议组帧，是调用协议处理程序一一取出数据实体，利用数据元处理程序转换成二进制流，完成通信协议的转换。

通信协议配置模型的验证

1. 验证方法

(1) 实验室测试

基于协议配置模型，开发并在实验室环境中搭建模拟的电力系统主站，同时开发和配置不同类型的通信协议设备和模型。通过发送和接收各种类型的模拟数据，测试通信协议配置模型在不同协议、不同网络环境下的数据一致性；然后将通信协议配置模型与多种不同厂商、不同型号的电力设备进行连接和通信测试，检查模型是否能够与各种设备实现良好的兼容性，数据是否能够准确无误地在不同设备之间传输和交互，如图3所示。

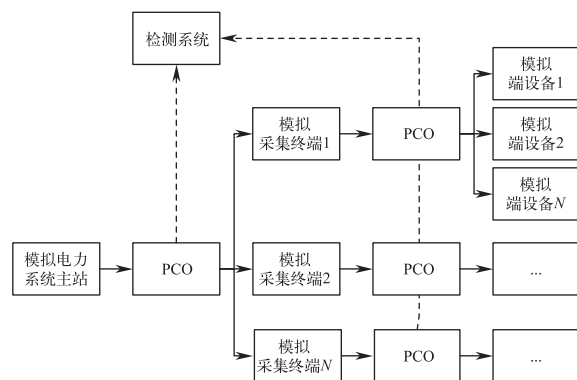


图3 协议测试系统框架图

图3中，检测系统主要完成测试控制调度、测试用例执行、检测结果输出等功能。控制观测点（Points of Control and Observation, PCO）是检测系统和IUT之间的通信点。检测系统通过PCO对IUT进行控制和观察，实现协议一致性和兼容性测试

试^[10]。在系统中，将采集终端和端设备部分替换成分别来自不同厂商的设备进行激励，即可验证模型与实际设备之间的兼容性。IUT在接收到激励后，通常有两种处理：一是直接响应；二是会产生外部输出到下一级IUT，测试系统通过逐级的PCO观察IUT与IUT的交互判断是否满足协议互操作要求。

(2) 实际案例测试

选择智能台区云平台等几个实际电力系统项目，将通信协议配置模型应用到实际的电力设备中进行测试。收集实际运行的数据，与传统配置方式下的数据进行对比分析，验证模型在实际应用中的性能提升效果。

2. 验证结果与分析

在实验室测试和实际案例测试中，采用通信协议配置模型极大地提高了协议开发和测试效率、保证系统的快速接入能力和质量。

首先，在开发和测试效率上，在部门多年开发与测试工作实践的基础上，针对协议开发和测试实现过程，对本文采用协议配置模型的方式与传统方法，做了对比分析，统计了相关数据，见表3。相较于传统的开发方法，本文提出的方法明显地提升了开发和测试效率。

表3 开发效率分析

阶段	传统方法效率	本方法效率	效率提升 (%)
协议初次开发	3FP/天	5FP/天	66.7
协议升级开发	4FP/天	8FP/天	100
测试用例开发	10个/天	20个/天	100

在实验室和实际案例测试过程中，对于DLT/698.41、DL/T698.42、DL/T698.45、DL/T645和Modbus等协议的数据传输，传输成功率均达到了99.9%以上。在兼容性表现上，经过实验室和实际应用中广泛的兼容性测试，通信协议配置模型能够与超过10种不同厂商、不同型号的电力设备实现无缝兼容。在与实际电力设备连接和通信过程中，未出现因协议不兼容导致的通信故障，充分证明模型的通用性和灵活性，为电力系统中多种设备的快速接入和协同工作提供有力保障。

结束语

本文成功构建一套电力系统软件通信协议配置模型，并进行全面的验证和实际应用测试。研究表

明,该模型能够有效解决电力系统中多种通信协议配置和管理的问题,提高协议开发和测试效率,保障数据传输的准确性和系统的兼容性。通过在智能台区云平台项目中的应用,验证模型在实际电力系统中的实用价值和显著效果,为电力系统的智能化管理和高效运行提供重要的技术支撑。

尽管本文的研究取得一定的成果,但仍存在一些可以进一步改进和拓展的方向。未来的研究可以聚焦于以下几个方面。

1) 协议标准的进一步融合。随着电力技术的不断发展,新的通信协议不断涌现。可以加强对不同协议标准的融合研究,扩大模型的适用范围,使其能够适应更多类型的通信协议。

2) 人工智能技术的深度应用。引入更先进的人工智能算法,如深度学习、强化学习等,优化配置模型中的智能化配置策略,进一步提高模型对复杂电力系统的适应性和自能力。

电力系统软件通信协议配置模型的研究对于推动电力系统的智能化发展具有深远意义。相信在未来的研究中,该模型将不断完善和优化,为电力领域的创新发展做出更大的贡献。EA

(收稿日期:2025-03-20)

参考文献

[1] 蒋湘涛,贺建飏,李楠.电力信息采集的通用

型通信规约解析系统研究与设计[J].电力系统保护与控制,2012,40(9),118-122.

[2] 电能信息采集与管理系统 第4-1部分:通信协议-主站与电能信息采集终端通信:DL/T 698.41—2010[S].

[3] 电能信息采集与管理系统 第4-2部分:通信协议-集中器下行通信:DL/T 698.41—2013[S].

[4] 电能信息采集与管理系统 第4-1部分:通信协议-面向对象的数据交换协议:DL/T 698.45-2017[S].

[5] 多功能电能表通信协议:DL/T 645—2007[S].

[6] Electricity metering – Data exchange for meter reading, Tariff and Load Control-Part 53: COSEM application layer: IEC 62056-53[S].

[7] 基于Modbus协议的工业自动化网络规范:GB/T 19582.1—2008[S].

[8] 电能信息采集与管理系统 第1部分:总则:DL/T 698.1—2009[S].

[9] 林华辉.协议互操作性测试理论与方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2007.

[10] 李峻,李鹏飞,周云波,等.能量测数据交换协议测试系统设计与实现[J].电子技术与软件工程,2022(12):250-254.

