

基于参数动态解析的热量表通讯方法研究

李 锋,张俊亮,周秉直,韩婉婷

(陕西省计量科学研究院,陕西 西安 710100)

摘要:针对不同企业热量表通讯协议不一致等问题,提出了一套基于参数动态解析的不同企业不同规则热量表通讯方法。通过对不同企业热量表通讯协议的拆解,建立通讯动态解析知识库,创建参数解析公式,可同时动态解析不同通讯规则热量表,解决了不同企业不同规则的热量表同时通讯不兼容的难题,提高了检定检测工作效率。

关键词:动态解析;数据传输;热量表;通讯协议

中图分类号:TH71

文章编号:1000-0682(2024)04-0086-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.017

Research on the communication method of heat meters based on parameter dynamic analysis

LI Feng, ZHANG Junliang, ZHOU Bingzhi, HAN Wanting

(Shaanxi Institute of Metrology Science, Shaanxi Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the inconsistency of communication protocols of heat meters from different enterprises, a set of communication methods of heat meters with different rules in different enterprises based on dynamic parameter analysis is proposed. By disassembling the communication protocols of heat meters of different enterprises, establishing a knowledge base for dynamic analysis of communication, and creating parameter analysis formulas, different communication rules of heat meters can be dynamically analyzed simultaneously, which solves the problem of incompatible communication of heat meters with different rules in different enterprises, and improves the verification and detection efficiency.

Keywords: dynamic analysis; data transmission; heat meter; communication protocol

0 引言

供热分户计量是供热体制改革的重要关注点,用热量表计量收费代替按面积计量收费越来越得到社会认可,如洛阳市积极推行按用热量分户计量收费方法,2022 至 2023 采暖季,实现了节能 20% 以上,675 个小区用户节省热费支出 4945 万元,实现减排二氧化碳 17 万吨,做到了高效节能降碳。其中热量表的量值准确可靠是分户计量的重要基础,为实现分户计量、智慧计量,热量表通讯是其重要一环。

目前,市场上热量表种类繁多,国内各热量表串口通讯协议大致按照建设部 CJ/T 188—2018《户用

计量仪表数据传输技术条件》^[1] 标准和国家标准 GB/T 32224—2020《热量表》^[2]、GB/T 26831.3—2012《社区能源计量抄收系统规范 第 3 部分:专用应用层》^[3] 进行编写,标准规定了热量表等仪表数据传输的基本原则、接口形式及物理性能、数据链路、数据标识及数据安全性和数据表达格式的要求。但实际中不同的仪表生产厂家根据自身因素考虑,在使用这些标准时,存在自身理解,导致标准符合性参差不齐,生产的热量表所使用的通讯协议返回码解析往往在细节方面有所出入,这导致工程人员在使用过程中需要根据不同的热量表量身打造适合自己的串口通讯解析程序,往往造成不同厂家的通讯规则互不兼容,浪费大量的人力物力用于更换通讯程序,也使检定单位无法采用自动检定的方法,效率低下;也使供热部门无法集成统一不同厂家的热量表,造成管理难度大大增加,因此,如何实现多种通讯协议热量表与工控机之间的通讯是一个亟需解决的问题。

收稿日期:2024-03-26

第一作者:李锋(1967—),男,陕西西安人,学士,高级工程师,主要从事流量、热能计量研究。

通信作者:周秉直(1965—),男,陕西西安人,学士,主要从事流量、热能计量研究。

很多工程技术人员对串口通讯进行了深入的研究,也解决了诸多实际问题。刘彪^[4]等人针对惯性导航系统、卫星接收机等数据通讯协议不同问题,提出采用 XML(可扩展性标记语言)作为串口通讯协议解析器的协议描述文件,利用 XML 文件的可扩展性、异构性和标签之间的父子层级关系,实现串口协议解析器的通用性。何敬上^[5]等人针对多类型核辐射数据采集系统中串行数据传输能力不能满足环境实时监测需求的现状,设计了多串口转以太网辐射数据传输系统。周秉直^[6]等设计了一套基于 M-BUS 总线、GPRS 和数据采集卡的远程自动监控系统,讨论了热量表的远程通讯及数据的抄读测量。以上学者大多在如何实现串口通讯上做了很深入的思考,而对热量表等计量仪表多协议串口通讯过程中的数据解析技术并没有更多的探索。

为了解决此问题,提出了一套基于参数动态解析的不同企业不同规则热量表通讯方法,该方法将协议规则拆解,建立通讯动态解析知识库(读规则库、解析规则库、通讯规则库和通讯结果库),创建参数解析公式,使读取返回数据标准化,解决了不同厂家不同规则的热量表同时通讯不兼容的难题,提高了串口通讯读表的通用性,提高了检定检测工作效率,为热量表的智慧计量奠定了技术基础。

1 热量表通讯的参数动态解析方法

1.1 仪表数据传输

通信方式采用 CJ/T 188 协议^[1],即户用计量仪表数据传输技术条件。该标准协议规定了户用计量仪表,包括热量表、水表等仪表数据传输的基本原则、接口形式、数据标识、数据安全性和数据表达格式等的要求。仪表通信接口可为 M-BUS 物理接口、RS-485 接口、无线收发接口或光电收发接口,协议采用主从结构的半双工通信方式。在数据传输技术中通讯协议是关键和难点,各厂家定制的协议格式有不同,因此,其参数设置、读取、解析等具有差别,这使得同类的热量表可能有多种通讯协议。

热量表通讯流程如图 1 所示。首先配置通信信息,包括设置串口参数,然后由工控机向热量表发送

单(多)字节命令字符进行通讯测试,测试通过,说明已有该企业热量表的通讯动态解析知识库;测试不通过,则需要新建该企业热量表的通讯动态解析知识库,创建参数解析公式,再次进入测试流程;接着工控机向热量表发送指令,热量表则向工控机返回多字节数据,随后判断当前热量表通讯是否结束,该热量表通信结束后对返回数据用解析公式和解析规则数据库进行动态解析,工控机自动在数据结果库存入热量表的具体信息;随后返回或结束。

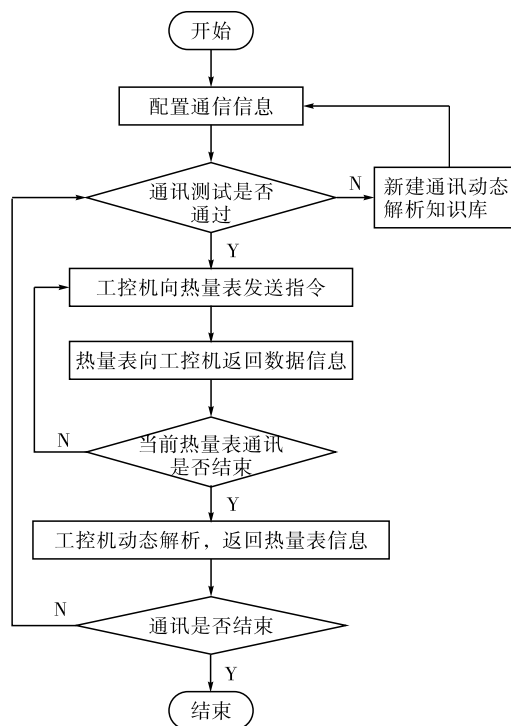


图 1 串口通讯流程图

1.1.1 发送数据

根据通讯协议,主站发出的信息帧来控制与仪表通讯。发送帧格式如表 1 所示。每帧由前导字节、帧起始符、仪表类型、从站地址域、控制码、数据长度、数据域、校验码及帧结束符等命令域组成。字节格式为每字节含 8 位二进制码,传输时加上一个起始位,一个偶校验位,和一个停止位,共 11 位。同一字节先传低位再传高位,多字节数据先传低字节再传高字节。

表 1 发送帧数据格式

名称	帧起始符	仪表类型	地址域	控制码	数据长度域	数据域	校验码	结束符
主站请求	68H	T	$A_0 \dots A_6$	C	L	$DI_0 \quad DI_1 \quad SER$	CS	16H
从站应答	68H	T	$A_0 \dots A_6$	C	L	$DI_0 \quad DI_1 \quad SER \quad N_1 \dots N_m$	CS	16H

操作对象为热量表,若计热量,仪表类型 T 为

20H;若计冷量,仪表类型 T 为 21H;有的厂家还规定

了更具体的仪表类型: T 为 25H, 代表超声波式热量表; T 为 26H, 代表超声波式冷量表; T 为 27H, 代表超声波式冷热量表。地址域(A)中 $A_0 \sim A_4$ 为通信地址, A_5 和 A_6 为厂商代码。控制码(C)规定了传送方向和具体功能, 01H 为读数据, 04H 为写数据, 03H 为读地址, 15H 写地址。校验码(CS)为一个字节, 从帧起始符开始到校验码之前的所有各字节进行二进制算术累加, 不计超过 FFH 的溢出值。

1.1.2 返回数据

工控机将读数据命令定时发送给热量表, 热量

表根据发送的命令返回相应的数据代码。以某热量表为例返回码格式如表 2 所示, 不同种类的热量表的参数返回格式和单位代码及单位均有所差别(例如有的厂家的瞬时流量固定为 32H 代表 L/h, 有的厂家的瞬时流量固定为 35H, 代表 m^3/h), 不同厂家的读表参数也有所差别(如有的厂家只有供水温度和回水温度, 有的厂家还更具体读到供回水温差; 有的厂家还设置并读取冷量信息等), 这给通讯读表的通用性带来了困难。

表 2 某型热量表返回数据信息

读表参数	数据格式	单位代码	单位	数据长度
仪表编号	XX XX XX	-	-	8
热功率	XX XX XX.XX	17H; 14H; 1AH	kW; W; MW	10
瞬时流量	XX XX.XX XX	32H; 35H; ...	L/h; m^3/h ; ...	10
累积热量	XX XX XX.XX	05H; 02H; ...	kWh; Wh; ...	10
累积流量	XX XX XX.XX	29H; 2CH; ...	L; m^3 ; ...	10
供水温度	XX XX.XX	-	$^{\circ}\text{C}$	6
回水温度	XX XX.XX	-	$^{\circ}\text{C}$	6
累计工作时间	XX XX XX	-	h	6

1.2 参数动态解析

1.2.1 建立知识库模型

为了更好地对热量表通讯动态解析知识库进行管理, 把知识库分为读表规则库、解析规则库、通讯规则库和通讯结果库。读表规则库包含规则名称和读表指令。解析规则库包含解析规则名称和规则代码与通讯协议之间的特定关系描述。通讯规则库包含读表规则名称和解析规则名称, 经过相应的解析计算最后获得通讯结果库, 结果库包含所有解析物理量结果。

1.2.2 通讯动态解析

通过 M-BUS 仪表总线、无线收发接口或光电收发接口方案来自动采集被测仪表, 需上位机发送相应正确的读表命令代码, 通讯成功后由被测仪表应答并返回代码至上位机, 上位机按照串口通讯协议通过相应规则进行结果解析。针对不同通讯协议的热量表返回代码难以同时自动解析读取的问题, 提出了一套基于参数动态解析的热量表通讯方法, 通过建立通讯动态解析知识库, 创建参数解析公式, 试验时能够正确匹配规则库指令, 按照要求解析指令, 最后实现读表功能。因此, 该方法能够适用于多种不同通讯协议的热量表, 通用程度高, 配置简单方便, 读表更自由。

参数动态解析方法包括以下步骤:

(1) 获得热量表的串口通讯协议, 包含读取指令、返回指令和解析方式。

(2) 创建热量表通讯读表规则库。新建读规则, 新建读表指令的名称和发送字符串指令。

(3) 创建热量表通讯解析规则库。

①规则名称: 即各物理量解析规则的参数名称;

②对应返回码的单位长度: 对应返回码的字符串单位长度, 常用的字符串单位长度一栏确定为“2”;

③字符串的长度: 从该物理量返回码的起始位开始, 到返回码结束, 即该物理量字符串的长度;

④数据位排列顺序: 读取数据的格式, 如累积热量的返回值小段代码 78 56 34 12 05, 以 2 个字符为单位将其标记为 1 2 3 4 5, 第 5 个字符“05”代表单位不解析, 解析后其数据格式为 123456.78, 即排列顺序 432.1;

⑤数据的格式: 如果为 10 进制, 写“10”。并将新建的解析规则存入数据库中。

(4) 创建通讯规则库, 以便根据仪表所需读取的参数选择对应的仪表个性化读规则和解析规则。

(5) 按照所选择的读和解析规则进行串口通讯, 通过相关计算得出解析结果存入结果库。首先根据选中的读取规则名称, 工控机将其对应的规则指令发送给仪表, 仪表返回对应指令值, 根据选中的解析规则读取数据。

2 实例分析

在被测仪表串口配置主界面,如图 2,根据热量表厂家名称,输入读表规则,读表规则为该厂家对应厂家代码,点击“刷新规则匹配”按钮,进行解析规则轮询匹配,若无法匹配,则表示该厂家是新试验用表厂家,必须在厂家代码数据库新建厂家代码,此时,热量表解析规则库和读取规则库中没有此型号热量表的通讯协议规则,这时需要对新的被测仪表创建读规则和解析规则。通过点击界面中的“创建读规则”按钮(如标注 1 所示)和“创建解析规则”按钮(如标注 2 所示)就可以弹出相应的界面,分别如图 3 和图 4 所示。

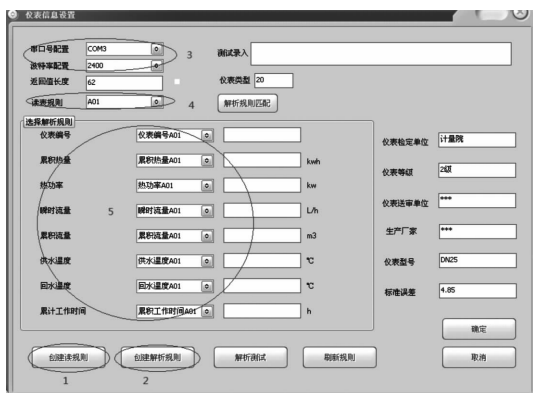


图 2 热量表通讯信息配置

2.1 创建读规则库

以某厂家热量表为例对其进行说明,首先创建读规则,如图 3 所示。根据 CJ/T 188—2018《户用计量仪表数据传输技术条件》和表 1,进行读表指令配置时的输入包括两部分:输入热量表的厂家代码作为指令的名称,如图 3 中标注 1 所示的 A01(厂家代码数据库,每个厂家对应一个编号);输入热量表的仪表编号,如标注 2 所示;输入该厂家热量表通讯规则中的固定代码,如图中的 00111101031F90129,如标注 3 所示,不同类型的热量表的通讯协议具有其独特的固定代码;图 3 标注 4 所示,为代码的数据部分校验码 CS,程序自动计算。在此基础上,系统会自动生成读表指令并将其存入数据库,方便热量表通讯信息配置时的调用。

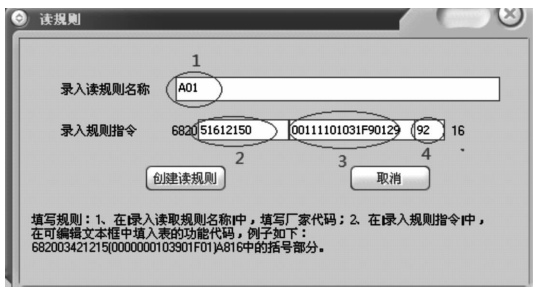


图 3 热量表读规则创建

2.2 创建解析规则库

如图 4 所示为热量表的解析规则创建界面。热量表在收到读表指令之后,会返回一串 16 进制字符串,系统无法直接从中获得测量信息,需要按照通讯协议规则对其进行解析,进而获得热量表的供回水温度、流量、热量等信息。以参与试验的某块热量表为例对其进行说明,图中所示为热量表的表号解析规则创建,解析规则名称为“仪表编号 A01”(如标注 1 所示),依次录入数据长度、数据起始位和数据终止位(即对其在返回值字符串中的位置,热量表表号代码在返回值字符串中的起始位置为 4,且其长度为 10 如标注 2 所示)、数据位排列序列(变量的解析顺序配置,如标注 3 所示,每 2 个字符为一组,顺序为 4321,如有小数点,须注明小数点位置)、数据单位代表字符及对应单位(参考表 5 或者 CJ/T 188—2018 表 20)、数据进制(10 进制填写 10,16 进制填写 16,2 进制填写 2)。确认之后,系统会自动生成相应的解析规则并将其存入数据库,方便热量表通讯信息配置时的调用。按照该方法,依次对累计热量、热功率、瞬时流量、累计流量、供水温度、回水温度、累计工作时间等信息进行规则配置。

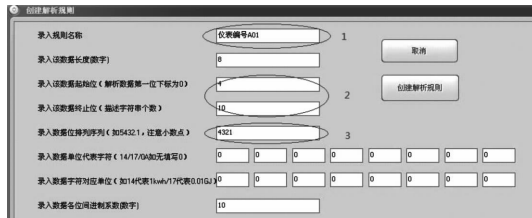


图 4 热量表解析规则创建

解析规则,根据不同厂家定义不同,须单独设置。例如,某家热量表,接收返回数据后还要进行额外处理(如表号返回码分别先进行数值计算后,再进行排序排列,方可得到正确解析值)。

2.3 创建通讯规则库

2.3.1 仪表信息配置

在被测仪表串口配置主界面,如图 2,根据热量表厂家名称,输入读规则,点击“刷新规则匹配”按钮,进行解析规则轮询匹配,如果可以匹配查询,即被测仪表的串口通讯协议读规则和解析规则在规则库中有保存,则相应的解析规则直接呈现图 2 中标注 5 所示的数据框内,此时可设置被测仪表串口号以及基本信息即可完成信息配置。另外为了检验被测仪表解析规则是否设置正确,可以点击此界面的解析测试按钮进行测试。

以某厂家热量表为例,对热量表通讯信息的配

置进行说明,主要配置信息如下,如图 2 所示:串口号为 COM3、波特率为 2400 bps(如标注 3 所示)、读规则为 A01(厂家代码即为规则名称,如标注 4 所示)、解析选择以该厂家代码为后缀的规则(如标注 5 所示,仪表编号 A01、累计热量 A01 等)。

2.3.2 返回数据整理

如当热量表地址为 01H 时,读表参数控制码为 01H,其读数据命令代码如下(以下黑色字体数据为

16 进制数据):68 20 01 00 00 00 00 00 01 03 90 1F 01 3D 16。

工控机将代码发送给热量表后,热量表返回至工控机代码(代码为 16 进制)如下:

FEFE FE FE 68 20 51 61 21 50 00 55 AA 81 2E
1F 90 01 00 00 00 00 00 78 43 32 03 05 89 08 00 00
17 12 56 05 00 35 90 78 61 00 2C 65 50 00 75 30 00
28 01 02 11 30 11 13 10 23 20 00 00 CS 16

表 3 工控机代码

代码内容	解释	备注
FEFE FE FE	前导数据	2 字节~4 字节 FEH
68	起始符	固定值
20	表类型	T = 20H,代表热量表(计热量)
51 61 21 50	表编号	出厂编号,厂家定义
55 AA	厂家代码	厂家定义
81	控制码	传送方向和具体功能
2E	长度	数据长度
1F 90	数据标识	随控制码变化
00 00 00 00 00	版本标识	厂家定义
78 43 32 03 05	累积热量	单位 kWh,数据结构为 5 字节 BCD 码
89 08 00 00 17	热功率	单位 kW,数据结构为 5 字节 BCD 码
12 56 05 00 35	瞬时流量	单位 m ³ /h,数据结构为 5 字节 BCD 码
90 78 61 00 2C	累积流量	单位 m,数据结构为 5 字节 BCD 码
65 50 00	供水温度	单位℃,数据结构为 3 字节 BCD 码
75 30 00	回水温度	单位℃,数据结构为 3 字节 BCD 码
28 01 02	工作时间	数据结构为 3 字节 BCD 码
11 30 11 13 10 23 20	当前时间	时间戳是 YYMMDDhhmmss 的 BCD 码
00 00	状态	仪表阀门、电池电压、传感器等状态
CS	校验和	从帧起始符开始到校验码之前的所有各字节进行二进制算术累加,不计超过 FFH 的溢出值
16	结束码	固定值

将上述热量表返回值分成小段,每个小段分别为待解析的读表物理量,在读表参数一栏,将返回值分为仪表编号、热功率、瞬时流量、累积热量、累积流量、供水温度、回水温度和工作时间等用户需要读取的物理量,并将返回代码分成小段,与物理量对应起来。

除了必须读取的物理量之外,其他根据需求读取解析。

当前时间一栏,表示读取数据的时间节点,从后往前为年、月、日、时、分、秒。

状态一栏中,前面字节为状态字节低字节,表示电池是否正常或者欠压,00 表示正常,04 表示欠压;后面字节为状态字节高字节,表示流量传感器、回水温度传感器、进水温度传感器和积分仪是否正常,具体可见表 4。

表 4 某厂家状态字节高字节

BIT4 ~ BIT7		BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
0	保留	流量传感器正常	回水温度传感器正常	进水温度传感器正常	积分仪正常
1		流量传感器故障	回水温度传感器故障	进水温度传感器故障	积分仪故障

2.3.3 数据解析分析

参考表 2 中的数据格式,对返回数据进行初步解析处理分析。

以累积热量数据解析为例。创建累计热量规则,单位长度用 L_0 表示,字符单位长度指的是返回码字符串的单位长度;字符串长度用 n 表示,指的是

返回码某个物理量字符串的长度,解析时以 2 个字符为 1 位进行解析计算;数据位排列顺序(读取数据的格式)用 RK 表示,解析数字顺序表明了各物理量返回代码与最终解析值的关系;数据各位间的进制,用 SN 表示,数据进位表示了各物理量返回代码与最终解析值的进位关系。以某家热量表为例,例如累积热量返回值小段为 78 43 32 03 05,最后一位 05 为单位代码,不参与数据计算;以 2 个字符长度为单位将其标记为 1 2 3 4 5,因此,其字符单位长度 $L_0 = 2$, $RK = 432.1$, $SN = 10$ 。

计算步骤:

(1) 获得 RK 字符串长度 $n = 5$;

(2) 找到 RK 字符串小数点的位置,小数点位数 $n_{\text{spot}} = 3$;

(3) 获得返回代码中对应的累积热量的字符串返回码,78 43 32 03 05;

(4) 获得返回代码中对应的累积热量代表单位的字符串返回码,单位代码如表 5 所示;

(5) 以 L_0 个字符为单位将返回码存入数组 $P_0[i]$, i 为整数, $i \in [0, n]$, $P_0 = \{78, 43, 32, 03\}$;

(6) 将小数点前的 RK 字符串存入数组 $P_1[i]$ 中, $i \in [0, n_{\text{spot}}]$, $P_1 = \{4, 3, 2\}$, 将 P_1 存入 $\text{num}[i]$, $i \in [0, n_{\text{spot}}]$;将小数点后的 RK 字符串存入数组 $P_2[i]$ 中, $i \in (n_{\text{spot}}, n)$, $P_2 = \{1\}$, 将 P_2 存入 $\text{num}[i-1]$,

$i \in (n_{\text{spot}}, n)$;故 $\text{num} = \{4, 3, 2, 1\}$;

(7) 记 a 为 $P_0[i]$ 求和时的幂次方数,则:

$$a = (\text{num}[i] - \text{num}[n_{\text{spot}} - 1]) \times L_0, i \in [0, n - 1]$$

(8) 记 sum 为字符串求和结果,则累积热量解析计算公式为:

$$\text{sum} = \sum_{i=0}^{n-2} P_0[n-i] \times SN^a, i \in [0, n-1]$$

代入数据,则可得累积热量为 33 243.78,再代入 05H 代表的单位 kWh,最后累积热量读取数据为 33 243.78 kWh。以此为例,依次对仪表编号、热功率、瞬时流量、累积流量、供水温度、回水温度和工作时间等物理量进行解析分析。

表 5 部分单位代码表

单位	代码	单位	代码
Wh	02H	GJ × 100	13H
kWh	05H	W	14H
MWh	08H	kW	17H
MWh × 100	0AH	MW	1AH
J	01H	L	29H
kJ	0BH	m ³	2CH
MJ	0EH	L/h	32H
GJ	11H	m ³ /h	35H

2.4 创建通讯结果库

对返回数据解析结果如表 6 所示。

表 6 某厂家返回值分段解析信息

读表参数	返回数据	单位代码	协议解析值(含格式)	L_0	RK	n	SN
仪表编号	51 61 21 50	无	50216151	2	4321	4	10
热功率	89 08 00 00	17(kW)	8.89	2	432.1	5	10
瞬时流量	12 56 05 00	35(m ³ /h)	5.5612	2	43.21	5	10
累积热量	78 43 32 03	05(kWh)	33243.78	2	432.1	5	10
累积流量	90 78 61 00	2C(m ³)	6178.90	2	432.1	5	10
供水温度	65 50 00	无(℃)	50.65	2	32.1	3	10
回水温度	75 30 00	无(℃)	30.75	2	32.1	3	10
累计工作时间	28 01 02	无(h)	20128	2	321	3	10

综上所述,此次的返回的数据可读为:编号为 50216151 的热量表(计热量),热功率为 8.89 kW,瞬时流量为 5.561 2 m³/h,累计流量为 6178.90 m³,累计热量 33 243.78 kWh,供水温度 50.65 ℃,回水温度 30.75 ℃,累计工作时间 20 128 h,当前时间为 2023 年 10 月 13 日 11 时 30 分 11 秒,热量表状态为电池电压正常、流量传感器正常、回水温度传感器正常、进水温度传感器正常、积分仪正常。

3 总结

该文提出了基于参数动态解析的不同企业不同规则热量表通讯方法,经测试,基于 CJ/T 188 协议的热量表,可自由添加并配置热量表通讯动态解析知识库,提高了串口通讯读表的兼容性,通过不断扩展通讯动态解析知识库,收录各种热量表通讯规则,可满足更多不同通讯协议的热量表读表需求,为计量技术机构和供热部门的计量通讯统一性和兼容性奠定了技术基础。

(下转第 97 页)

于灵敏度矩阵降维的 EMT 图像重建算法。此算法首先利用 KPCA 对灵敏度矩阵做降维处理,然后通过 SVD 求广义逆的方法算出图像重建结果。最后,将该算法应用于平面 EMT 金属探伤,对多种缺陷的成像效果进行了仿真和实验。仿真和实验的结果表明,在成像质量方面,该文提出的算法与传统的 Landweber 迭代法相近,可以对缺陷有效成像。在成像速度方面,该文提出的算法比 Landweber 迭代法快速很多,其算法耗时仅为 Landweber 迭代法的 20% 左右。

参考文献:

- [1] XIANG J X, DONG Y G, YANG Y J. Multi-frequency electromagnetic tomography for acute stroke detection using frequency-constrained sparse bayesian learning [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2020, 39 (12): 4102-4112.
- [2] 胡亚峰. 面向气液固三相流检测的快速电/磁层析成像系统设计[D]. 天津:天津大学,2022.
- [3] Semenov S. Electromagnetic tomographic cerebral angiography [J]. Scientific reports, 2024, 14(1): 1792-1792.
- [4] 王成飞. 高速列车空心轴电磁层析成像缺陷检测技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [5] 霍继伟,刘泽,王亚东,等. 平面电磁层析成像钢轨探伤[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (15): 5351-5361.
- [6] 刘泽,肖君,刘向龙,等. 一种电磁层析图像快速重建算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44 (08): 1569-1576.
- [7] 王亚东,刘泽,霍继伟,等. 基于 SOA 优化的电磁层析成像图像重建研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (12): 207-212.
- [8] GUO R, HUANG T Y, LI M K, et al. Physics-Embedded Machine Learning for Electromagnetic Data Imaging: Examining three types of data-driven imaging methods [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2023, 40 (2): 18-31.
- [9] LIU X, LIU Z, LI Y, et al. Research on direct 3D electromagnetic tomography technique [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(9): 4758-4767.
- [10] 霍继伟. 高速电磁层析成像关键技术研究及应用[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [11] 冯旭刚,文作银,章家岩,等. 基于 KPCA-AGRU 神经网络的火电机组 NO_x 排放预测[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(06): 18-24.
- [12] 王艳,颜华,王伊凡,等. 基于降维处理的 Tikhonov 正则化 ECT 图像重建[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (24): 9118-9126.

(上接第 85 页)

参考文献:

- [1] 李春辉,王池. 音速喷嘴扩张段对流出系数的影响[J]. 计量学报, 2008, 29(5): 423-426.
- [2] 王超,王刚,丁红兵. 音速喷嘴内水蒸气自发凝结流动自激励振荡和分歧现象[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 46(11): 1113-1120.
- [3] 全国流量容量计量技术委员会. 临界流文丘里喷嘴: JJG 620—2008[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局, 2008.
- [4] Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles: ISO 9300:2005[S]. Switzerland: British Standard Institution, 2022.
- [5] Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles: ISO 9300:2022[S]. Switzerland: British Standard Institution, 2022.
- [6] BMickan, R Kramer. Experiences with sonic nozzles used for different gases and wide range of pressure and temperature conditions [C]//Proceedings of 7th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Anchorage, Alaska, 2009.

(上接第 91 页)

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部信息技术应用标准化技术委员会. 户用计量仪表数据传输技术条件: CJ/T 188—2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- [2] 全国城镇供热标准化技术委员会. 热量表: GB/T 32224—2020[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
- [3] 全国电工仪器仪表标准化技术委员会. 社区能源计量抄收系统规范 第 3 部分: 专用应用层: GB/T 26831.3—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [4] 刘彪,张进智,张巧,等. 通用串口数据协议解析与显控系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2023, 33(07): 80-84.
- [5] 何敬上,何剑锋,袁兆林,等. 多串口网络化异构辐射数据采集与实时传输系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(05): 84-87.
- [6] 周秉直,王慧元,李锋,等. 基于 M-BUS 和 GPRS 的热量表耐久性远程监控系统的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017(05): 30-32+70.