doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2021.06.10

CAN 总线载波侦听点位测量方法研究

肖彬

（航空工业北京长城计量测试技术研究所，北京 100095）

摘　要：恶劣电磁环境中，CAN 总线“载波侦听采样点”的位置设定不规范有可能对网络数据传输可靠性产生影响。为测量采样点的准确位置，研究了一种利用错误注入手段测量采样点位置的方法，该方法以 CAN 总线协议中的错误检测机制及原理为基础，以航空、汽车等领域行业规范中采样点位的建议范围及建议值为依据，分析了测试区域选取原则、研制了专用测试装置，同时对该装置进行了验证试验。借助该装置对某型 CAN 总线设备进行采样点位测试，并对特征负载条件下的测试结果进行分析。该方法实现了 CAN 总线载波侦听采样点位的高精度测量，为提高 CAN 总线组网可靠性提供计量保障，同时为降低网络中采样点位容差提供数据基础。

关键词：计量；CAN；载波侦听；采样点；错误注入

中图分类号：TB98　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674－5795(2021)06－0059－07

Research on Measurement Method of CAN Bus Carrier Listening Point

XIAO Bin

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: If the location of CAN bus “carrier listening sampling point” is not set properly, it may affect the reliability of network data transmission in harsh electromagnetic environment. To measure the exact location of the sampling point, an error injection method is studied. This method is based on the error detection mechanism and the principles of CAN bus protocol, and the recommended range and value of sampling points in aviation and automobile industry standards. With this method, the principles of selecting test area has been analyzed, a special test device has been developed and a verification test has been carried out. The device is used to test the sampling points of a certain type of CAN bus equipment, and the test results are analyzed under characteristic load conditions. This method realizes the high precision measurement of the location of CAN bus carrier listening sampling point, provides measurement support for improving the reliability of CAN bus network, and provides data base for reducing the tolerance of sampling points in the network.

Key words: metrology; CAN; CSMA; sampling points; fault injection

0　引言

CAN 数据总线是国际上应用最广泛的现场总线之一，得益于其高可靠性、高容错性以及强实时性等优势，在要求严苛的航空、航天、汽车与工业现场等领域已得到大量应用[1－3]。该总线具备空闲侦听、冲突检测与逐位仲裁等核心功能，可以实现多主节点组网，并大幅度提升传输效率及容错性，同时也使高优先级消息无延时占用总线传输[4－7]。

目前，CAN 总线的上述核心功能均以“载波侦听”技术为基础，该技术的可靠性会直接影响各节点对总线信号的判断与处理，从而关系到整个网络系统的可靠性。载波侦听采样点(以下简称“采样点”)的位置由不同供应商根据不同的应用场景进行设定[8]，在高可靠性要求的应用领域中，采样点的位置设置不当可能导致节点对总线信号误判，造成通讯实时性降低或节点失效，甚至使整个网络系统瘫痪[9－10]。各领域规范中，对采样点位提出了要求或建议，并指出网络中各

收稿日期：2021－10－25；**修回日期**：2021－11－25

基金项目：工信部民用飞机专项科研项目(MJ－2018－J－69)

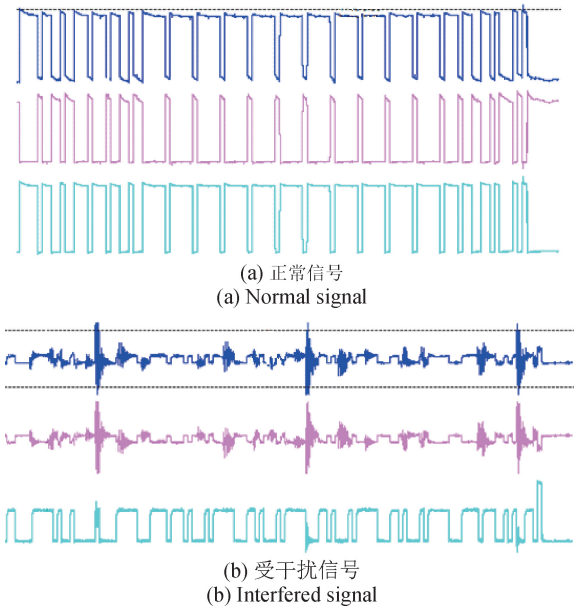
引用格式：肖彬. CAN 总线载波侦听点位测量方法研究[J]. 计测技术，2021，41(6)：59－65.

XIAO B. Research on measurement method of CAN bus carrier listening point[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 59－65.

节点的采样点位容差越小，网络的最大可能长度越长，网络传输越稳定。

汽车及飞机机载系统中电磁环境非常恶劣，网络系统会受到高强辐射场(HIRF)、单粒子效应以及逆变器、电动机、充电机等大功率设备的电磁辐射[9-10]，网络信号质量会受到不同程度的影响。

如图 1 所示，由逆变器干扰测试数据可以看出，失真或畸变的差分信号在电平跳变时刻的信号干扰最为严重，随着电平的状态保持而趋于稳定。在干扰信号传输中，如果采样点位靠近跳变边沿，则很可能采集到失真波形，造成对传输信号的错误判断，导致数据传输失败。



(a) 正常信号
(a) Normal signal

(b) 受干扰信号
(b) Interfered signal

图 1　逆变器对 CAN 数据总线信号的干扰

Fig. 1　Interference of inverter to CAN bus signal

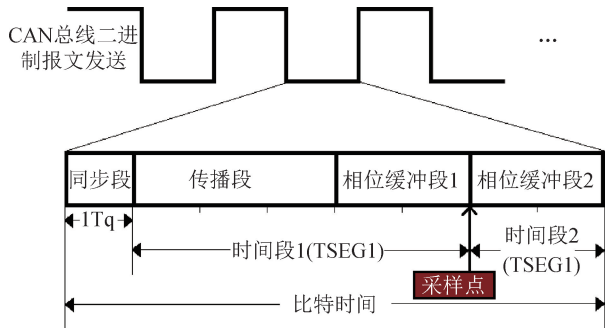
因此，在节点接入总线网络前，有必要对其采样点位进行测试，利用测试数据对其采样点位进行修正，修正后的节点接入总线网络可大幅度提高网络系统可靠性与安全性。

1　测量原理

1.1　载波侦听采样点

CAN 节点控制器在发送数据过程中为每比特时间设立一个载波侦听采样点，如图 2 所示，对传输网络物理层信号进行采样确认，如果采集帧听状态与自身输出状态不一致，表示该节点与总线上其他节点的传输发生冲突，该节点将执行相应处理措施[11]。

CAN 协议定义一个“比特时间”分为同步段、传播段、相位缓冲段 1 和相位缓冲段 2，采样点位于相位缓冲段 1 末端，各段以不同数量的 Tq 构成[11]。由于各段位包含的 Tq 数量可按协议规定范围调整，因此载波侦听采样点位置也会随之变化。



注：比特时间为 1 比特数据波形时间，Tq 为最小时间单位。

图 2　比特时间组成及采样点定义

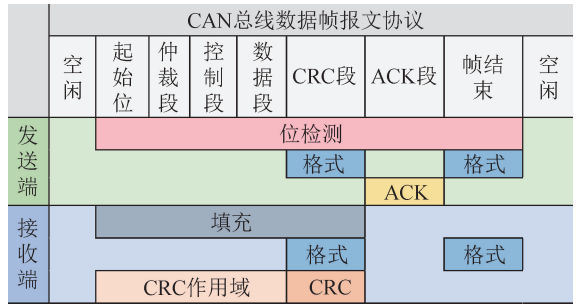
Fig. 2　Bit time composition and sampling point definition

1.2　错误检测机制

在 CAN 总线协议中，数据帧传输过程伴有五种错误检测机制，包括：位错误、ACK 错误、填充错误、CRC 错误与格式错误[11]，如表 1 所示。

表 1　CAN 协议数据帧错误检测机制及作用范围

Tab. 1　Error detection mechanism and scope of CAN protocol data frame



在节点发送端或接收端检测到错误后，各节点会以发送“错误帧(连续 6 比特相同信号状态)”的方式通知总线上其他节点，并且发送端在错误界定结束后将重新发送数据帧。

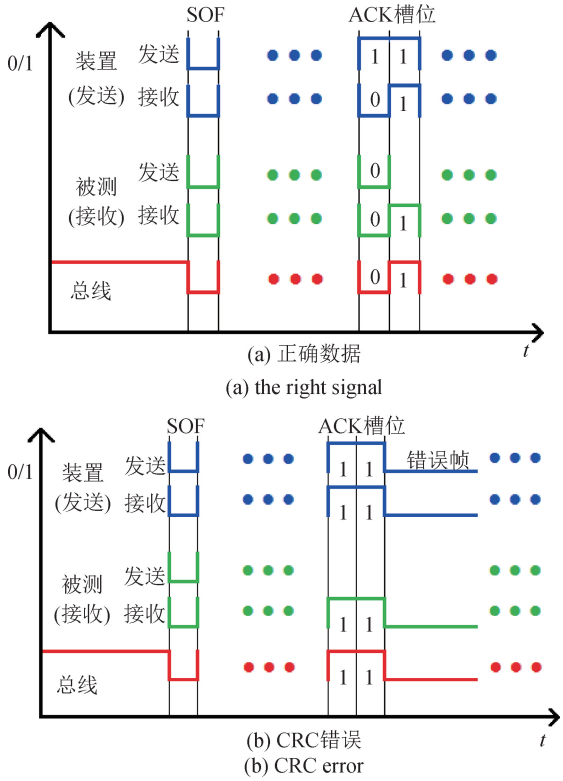
1.3　错误注入

采样点位的测试方法将以错误注入的形式进行，在 CAN 总线错误注入类型选取时，对错误处理判断的复杂程度以及被测设备配置的难易度进行综合考虑[11-14]，最终选择利用 CRC 校验错误及相关处理机制对采样点位进行测试试验。

在 CAN 总线物理层协议特性中，逻辑状态“0”优先级高于逻辑“1”，因此在总线网络中，如果有任何节

点将总线电平转变为逻辑“0”时，其他节点将无法改变总线状态[11]。

图 3(a)是一个正确数据的传输过程，节点 1 和节点 2 在同一个网络中，节点 1 发送一帧正确数据，并且在 ACK 槽位保留逻辑“1”电平(如蓝色发送信号)，节点 2 监测到总线网络中到来的数据信号，判断数据帧正确后，在该数据的 ACK 槽位向总线网络中发送一个逻辑“0”的反馈信号(如绿色发送信号与红色总线网络信号)，同时节点 1 从总线网络中帧听到 ACK 槽位的反馈信号(如蓝色接收信号)，则节点 1 认为数据发送成功。如图 3(b)所示，如果节点 1 发送含有 CRC 错误的数据帧，节点 2 在 ACK 槽位将不会做出反馈。



注：SOF 为起始位；ACK 为应答位。

图 3　CAN 数据帧 ACK 槽位信号交互示意图

Fig. 3　CAN frame ACK slot signal interaction diagram

利用以上特性及处理机制，如图 4 所示，向被测节点连续发送同一数据帧，并在此数据帧中注入错误信号，该错误信号物理波形在该比特时间的占空比每帧递增 0.1%，直至完全填充该位，并且在数据帧 CRC 校验段保持不变的正确数据帧 CRC 校验值。

连续发送比特时间占空比逐帧递增的错误信号，

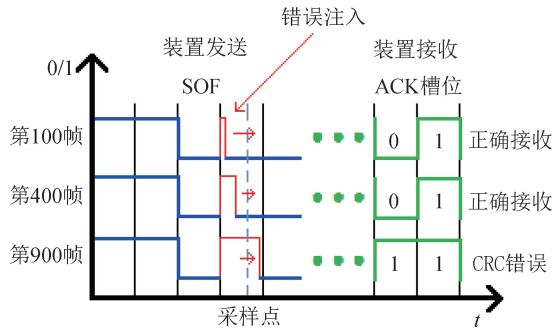


图 4　比特时间占空比错误注入示意图

Fig. 4　Schematic of bit time duty cycle error injection

在注入的错误信号未触及被测端采样点位置时，被测端依然采集到正确的信号电平并给予反馈信号，当错误信号波形触及采样点位置时，被测端采样点采集到错误电平并记录错误的逻辑数据。错误数据处于 CRC 作用域中，计算得到的 CRC 校验值将与数据帧内正确的 CRC 校验值不符，造成 CRC 校验错误，从而导致 ACK 槽位无反馈消息发出。利用对 ACK 槽位电平状态的判断，可以确定被测端是否接收到正确数据，并通过正确发送的数据帧数量得到采样点在比特时间中的位置占比。

1.4　测试点选取

由于 CAN 协议中每一数据帧起始(SOF)时，都将进行信号的“硬同步”，即所有 CAN 节点都将在此时统一各自的信号起始时基[15]，在数据帧的随后位中，每当数据波形由逻辑“1”向逻辑“0”跳变，并且该跳变落在同步段之外，就会引起一次“重同步”[16]。如图 2 所示，CAN 节点会通过延长“TSEG1”或缩短“TESG2”使后续的位数据获得同步[17-18]，而相位缓冲段的改变，会使采样点位也随之改变。如果测试时选择的数据位经过“重同步”处理，测试结果将不是采样点的实际设置值。因此通过向起始位(SOF)后一位注入错误帧的方式进行测试，可以有效避免 CAN 协议中“重同步”带来的影响。

2　测量方法

2.1　依据及指标

CAN 总线在航空领域遵循[12]，其中明确指出采样点位不应小于比特时间的 75%。汽车工业[13-14]也对采样点位提出建议(建议其尽量接近比特时间的 87.5%且不超过 90%)，并且相关标准注明“网络中各节点的采样点位容差越小，网络的最大可能长度越长，网络传输越稳定”[11-14]。相关规范中采样点位范围及建议

值如表 2 所示。

表 2　采样点位范围及建议值

Tab. 2　Sampling point range and recommended value

传输速率/(kb·s^{-1})	采样点位	
	范围/%	建议值/%
1000	75 ~ 90	87. 5
800	75 ~ 90	87. 5
500	85 ~ 90	87. 5
250	85 ~ 90	87. 5
125	85 ~ 90	87. 5
50	85 ~ 90	87. 5

2. 2　测试总体方案

研制的 CAN 总线载波侦听采样点位专用测试装置(以下简称“装置”)如图 5 所示，其通过上位机进行 CAN 总线数据帧的设定，随后发送至装置，装置内 FPGA 生成正确的 CAN 协议信号波形，并在该正确波形的基础上进行错误注入。而后通过 CAN 协议电平转换模块将 TTL 电平信号转换为 CAN 协议差分信号输出，并监测发出信号 ACK 槽位的反馈信号，在测试结束后将结果返回至上位机显示并记录。

CAN 协议中规定，在总线网络中，除发送节点外，任何节点在接收到正确数据帧时，都将向总线网络发出反馈信号。利用这一特性，被测节点无需发送任何数据，只需启动后配置相应的传输速率即可完成测试试验。该方法可大幅度减少测试人员的工作量，提高测试的效率。

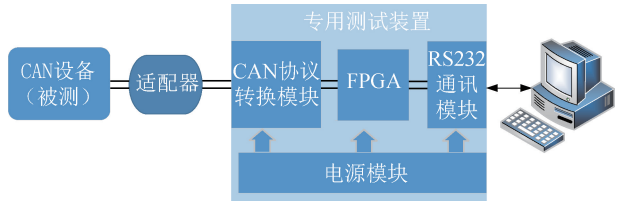
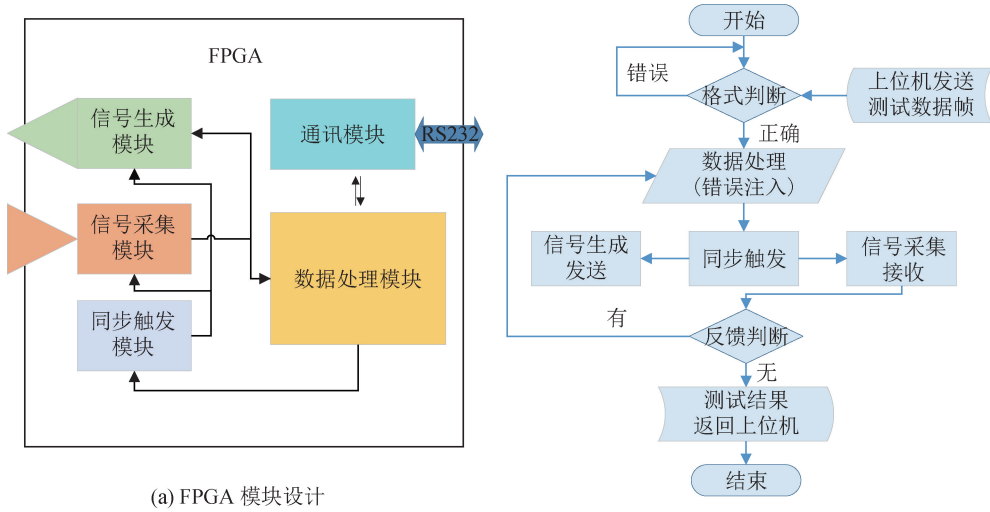


图 5　测试系统组成示意图

Fig. 5　Schematic diagram of test system composition

2. 3　专用测试装置设计

如图 6 所示，专用测试装置基于 FPGA 硬件进行设计研制，采用模块化设计，由信号生成、信号采集、同步触发、数据处理以及通讯接口等模块组成。专用测试装置的工作流程为：通过上位机设置 CAN 数据帧，并通过串行接口下发至 FPGA；利用数据处理模块将数据帧转换为高速输出端口数据队列，并向队列中的每个数据帧注入错误信号，信号生成模块根据数据队列内容发送信号；同时由同步信号触发采集模块进行采集，根据数据帧 ACK 槽位采集到的反馈信号判断是否发送成功，若成功则继续提高注入错误的占空比并再次发送，若失败则证明已测试到被测 CAN 设备采样点；完成测试后上传测试数据至上位机并结束测试。



(a) FPGA 模块设计

(a) FPGA module design

(b) 流程图

(b) flow chart

图 6　FPGA 模块设计及流程图

Fig. 6　FPGA module design and flow chart

由于在 CAN 数据总线传输速率为 1 Mb/s 时，比特时间占空比分辨力达到 0. 1%，需要控制准确度优于

1 ns，因此需要选用 IO 控制频率优于 1 GHz 的主控器件。如图 7 所示，装置核心部件采用 XILINX Spartan-6 系列核心板及扩展板进行设计研制，使用高达 1050 Mb/s 输出频率的高速差分端口，可满足控制准确度设计需求。使用扩展板进行外围电路的设计研制，包括 RS232 电平转换模块、CAN 协议电平转换模块以及电源模块等。

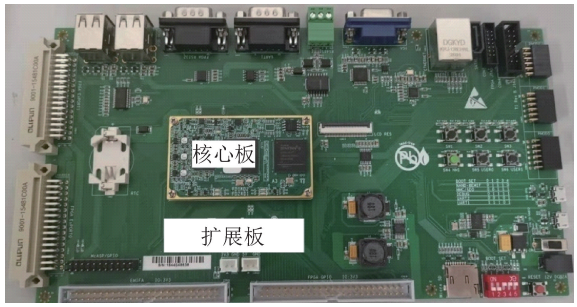


图 7　装置核心板及扩展板实物图

Fig. 7　Core board and expansion board of the device

2.4　装置验证试验

装置的验证试验原理如图 8 所示，其利用经过校准的标准数字存储示波器，通过标准表法对装置进行验证测试。

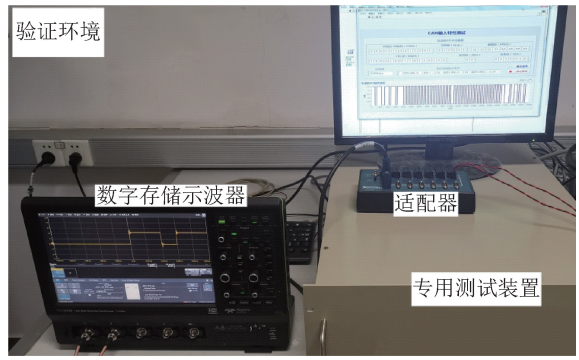
图 8　测试装置验证原理图

Fig. 8　Test device validation schematic

验证装置的指标包括输出控制分辨力及输出脉宽准确度。对装置分辨力的要求参考了规范中提出的建议值(即比特时间的 87.5%)。因为建议值达到千分位，所以装置控制分辨力应达到 0.1%。CAN 总线最高传输速率为 1 Mb/s 时，比特时间为 1 μs，协议中规定每比特时间的最大 Tq 数量为 25 个，因此 Tq 时间最小为 40 ns。因为采样点位于某两个 Tq 之间，要测量采样点的位置，需要装置输出准确度相对于最小 Tq 时间满足 1/4 量传关系，所以要求装置输出准确度优于 ±5 ns。

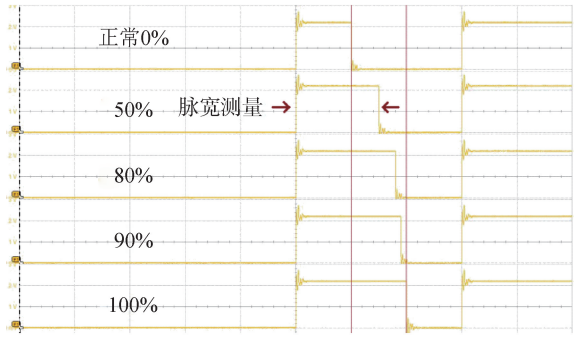
验证环境及测试波形如图 9 所示，测试装置以最高传输速率(1 Mb/s)输出特定数据帧，测试起始位(SOF)与错误注入波形间的脉冲宽度，通过计算得出错误注入波形在该位的占空比。

将装置与被测设备设置为相同传输速率，将被测设备设置为接收状态(不发送数据)，并开始采样点位测试，通过示波器测量装置输出信号脉宽，按式(1)进



(a) 验证环境

(a) Verification environment



(b) 实测波形

(b) Measured waveform

图 9　验证环境与实测波形

Fig. 9　Verification environment and measured waveform

行占空比换算，得到测试结果如表 3 所示。

$$D_i = \frac{(T_i - T_0)}{(T_{100} - T_0)} \times 100\% \quad (1)$$

式中：D_i为设置值 $i\%$ 时的占空比测量值；T_i(μs)为设置值 $i\%$ 时的脉宽测量值；T_0(μs)为设置值 0% 时的脉宽测量值；T_{100}(μs)为设置值 100% 时的脉宽测量值。

表 3　验证测试数据结果

Tab. 3　Verification test data results

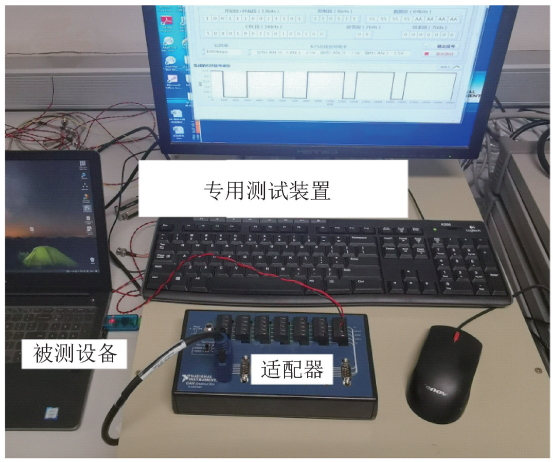
设置值/%	脉宽测量值/μs	不确定度 $U(k=2)$/μs	换算值	
			占空比/%	不确定度 $U(k=2)$/%
0.0	1.0002	0.0005	0.00	0.05
0.1	1.0011		0.09	
50.0	1.4999		49.98	
80.0	1.8001		80.00	
90.0	1.8998		89.98	
100.0	2.0000		100.00	

注：不确定度分量已考虑重复性、标准器、协议电平转换模块以及适配电路等因素，综合评估仅代表本次测试结果的不确定度。

装置输出准确度要求优于 ± 5 ns，在传输速率为 1 Mb/s时，可按占空比换算为 ± 0. 5%，测试结果表明，实际测试值的最大误差为 ± 0. 02%，满足输出准确度要求。并且从前两项数据可以看出，装置满足 0. 1% 的控制分辨力要求，证明专用测试装置的指标均满足测试要求。

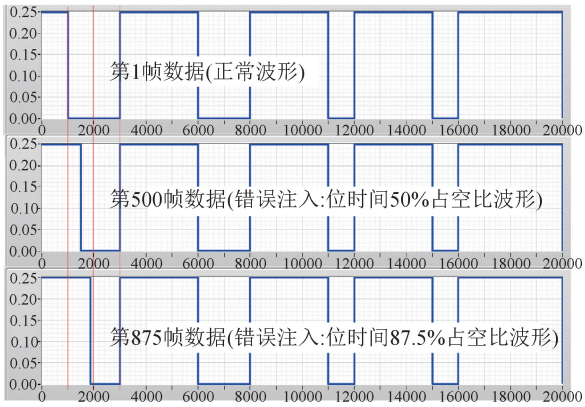
2. 5 测试试验

利用装置对被测 CAN 节点设备在特征负载条件下进行采样点位测试，网络负载条件选取为典型状态条件下的负载取值，开展包括网络开路状态、单节点负载(120 Ω)与实际组网应用中多节点网络负载(60 Ω)条件下的测试试验[4]。将装置与被测设备设置为相同的传输速率，并开始采样点位测试，测试原理如图 5 所示，测试环境及错误注入信号如图 10 所示，测试结果如表 4 所示。



(a) 实测环境

(a) Measurement environment



(b) 生成的825信号波形

(b) Generated 825 signal waveform

图 10 实测环境及信号波形生成

Fig. 10 Measurement environment and signal waveform generation

测试结果显示，被测设备采样点位仅在传输速率为 1000 kbps 与 800 kbps 时满足要求，其他测试结果不符合建议范围要求。

表 4 采样点位测试结果

Tab. 4 Sampling point test results

通讯速率/(kb · s^{-1})	测试值/%			范围/%	测试结果
	总线负载 60 Ω	总线负载 120 Ω	总线负载 开路		
1000	83. 3	83. 1	83. 3	75 ~ 90	符合
800	86. 6	86. 7	86. 2	75 ~ 90	符合
500	83. 4	83. 3	82. 9	85 ~ 90	不符合
250	83. 3	83. 4	83. 1	85 ~ 90	不符合
125	83. 3	83. 4	83. 4	85 ~ 90	不符合
50	83. 3	83. 3	83. 4	85 ~ 90	不符合

2. 6 负载条件

如图 11 所示，利用示波器对不同网络负载条件的数据波形进行分析，匹配负载较小时，数据波形传输抖动较大，会导致被测 CAN 设备在“硬同步”时出现随机偏差，装置与被测设备出现较大的时钟同步误差，因此在实际测试试验中应当匹配的网络负载为 60 Ω，这样测试数据的可靠性较高。

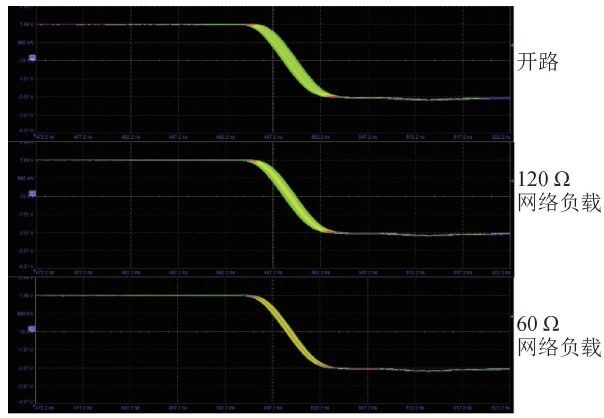


图 11 信号波形边沿余晖对比

Fig. 11 Comparision of signal waveform edge afterglow

3 结论

通过分析测试试验的结果得出，并非所有 CAN 总线设备都是按照规范建议值设计研制的，当应用于可靠性需求较高的复杂系统组网时，较大差别的采样点位必然会缩短网络最大理论长度，从而降低整个系统的传输可靠性。随着电子通讯技术的发展，通讯系统

网络的复杂程度日益提高，传输可靠性应从各层面不断完善，而首先应在底层建立良好的基础。通过在系统组网前进行采样点位测试，利用测试值调整和统一系统各节点的采样点位，可以使总线物理链路层一致性得到充分保障，也可以使整个系统传输的可靠性更上一个台阶。

参 考 文 献

[1] 冯源，豆海利．CAN 总线在航空领域应用的探讨[J]．航空工程进展，2011，2(2)：231－235.
FENG Y，DOU H L. Applicability of CAN bus in the aviation field[J]. Advances in aeronautical science and engineering，2011，2(2)：231－235.(in Chinese)

[2] 黄勇．CAN 总线在航天领域的应用[J]．电讯技术，2005(5)：172－174.
HUANG Y. Application of CAN bus in aerospace field[J]. Telecommunication engineering，2005(5)：172－174.(in Chinese)

[3] 季丽华．CAN 总线技术在汽车电控系统中的应用及检测分析[J]．电子世界，2021(18)：178－179.
JI L H. Application and detection analysis of CAN bus technology in automotive electronic control system[J]. Electronics world，2021(18)：178－179.(in Chinese)

[4] 刘士宝，何烈炎，孙小雨，等．CANFD 通信信号质量分析和测试方法的研究[J]．汽车实用技术，2021，46(10)：99－102，169.
LIU S B，HE L Y，SUN X Y，et al. Research on CANFD communication signal quality analysis and test method[J]. Automobile applied technology，2021，46(10)：99－102，169.(in Chinese)

[5] 黄金山，梁亚丽，刘敏，等．汽车 CAN 总线通信超时故障监测方法研究[J]．汽车电器，2021(7)：67－68.
HUANG J S，LIANG Y L，LIU M，et al. Research on automobile CAN bus communication timeout fault monitoring method[J]. Auto electric parts，2021(7)：67－68.(in Chinese)

[6] 肖彬，王文健，王德玲，等．ARINC825 总线校准方法研究[J]．计测技术，2016，36(3)：48－50，70.
XIAO B，WANG W J，WANG D L，et al. Research on ARINC825 bus calibration method[J]. Metrology and measurement technology，2016，36(03)：48－50，70.(in Chinese)

[7] 张海春，姜荣帅，鲁赵骏，等．车内 CAN 总线安全评估机制研究[J/OL]．华中科技大学学报(自然科学版)：1－7[2021－11－02].
ZHANG H C，JIANG R S，LU Z J，et al. Research on security evaluation mechanism of IN-car CAN bus[J/OL]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)：1－7[2021－11－02].(in Chinese)

[8] 刘鹏．基于 STM32F407 的双 CAN 总线设计与实现[J]．科技视界，2016(13)：130－132.
LIU P. Design and implementation of dual CAN bus based on STM32F407[J]. Science & technology vision，2016(13)：130－132.(in Chinese)

[9] 梁建辉，吴超峰．CAN 总线通信故障 2 例[J]．汽车维护与修理，2021(15)：42－44.
LIANG J J，WU C F. Two cases of CAN bus communication failure[J]. Auto maintenance & repair，2021(15)：42－44.(in Chinese)

[10] 雷勇利．对电梯安全评估中两个 CAN 总线通信失效案例的分析[J]．中国电梯，2021，32(9)：51－54.
LEI Y L. Analysis of two CAN bus communication failure cases in elevator safety evaluation[J]. China elevator，2021，32(9)：51－54.(in Chinese)

[11] International Organization for Standardization. ISO 11898-2 high-speed medium access unit[S]. Geneva：ISO copyright office，2003.

[12] The AEEC. ARINC825 general standardization of CAN bus protocol for airborne use[S]. Maryland：Aeronautical Radio，INC. 2007.

[13] CiA. CANopen application layer and communication profile[S]. Nuremberg：CAN in Automation (CiA) e. V.，2011.

[14] SAE. Physical layer，250 Kbps，twisted shielded pair[S]. Warrendale：SAE International，2016.

[15] 曹海燕，戴旭东．汽车 CAN 总线系统技术及故障诊断[J]．汽车实用技术，2021，46(18)：167－169.
CAO H Y，DAI X D. Automobile CAN bus system technology and fault diagnosis[J]. Automobile applied technology，2021，46(18)：167－169.(in Chinese)

[16] 王勇，李亚菲，陈雪鸿，等．电动汽车 CAN 协议的重放攻击与防御方法[J]．上海电力大学学报，2021，37(4)：395－401，406.
WANG Y，LI Y F，CHEN X H，et al. Replay attack and defense method of CAN protocol for electric vehicle charging[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power，2021，37(4)：395－401，406.(in Chinese)

[17] 余勇徐，鸿宇陶，玉恒．汽车 CAN 总线故障诊断方法与案例分析[J]．南方农机，2021，52(10)：113－114，129.
SHE Y X，HONG Y T，YU H. Automobile CAN bus fault diagnosis method and case analysis[J]. China southern agricultural machinery，2021，52(10)：113－114，129.(in Chinese)

[18] 李文祥，周小军，亢超，等．基于增强型海明码的 CAN 总线实时性研究[J]．仪表技术与传感器，2021(7)：44－47，53.
LI W X，ZHOU X J，KANG C，et al. Research on real-time performance of CAN bus based on enhanced hamming code[J]. Instrument technique and sensor，2021(7)：44－47，53.(in Chinese)