

# 过程控制系统中 Modbus 网络的性能分析

孙强, 刘鑫

(北京康拓科技开发总公司 生化部, 北京 100080)

**摘要:** 通过基于 Modbus 总线的通讯实验, 给出了 Modbus 网络的特性参数, 并通过 Matlab 仿真工具将其应用于一个典型的二阶闭环控制系统的仿真中; 指出了网络时延对控制系统稳定性的影响, 并给出了解决方法。

**关键词:** Modbus 过程控制系统 现场总线 根轨迹

Modbus 作为一种现场总线网络协议, 由于其具有结构简单、易于操作和实现, 以及协议本身完全公开等特点, 在我国的工业领域被广泛应用。其中很多应用都是基于传统的 RS-485 串行网络实现的, 通讯速率大多数都在 38.4kbps 以下, 如 9600bps, 因而很多过程控制的应用受到了限制。本文以 Modbus 网络的时延为核心, 通过实验获取 Modbus 网络在不同波特率下的时延数据, 通过仿真讨论 Modbus 网络时延对控制系统稳定性的影响。

## 1 Modbus 协议简介

Modbus 是 MODICON 公司于 1979 年开发的一种通讯协议。此协议支持传统的 RS-232、RS-422、RS-485 总线和以太网设备。通过 Modbus 协议可以很容易地将带串行通讯口的设备集成在一起, 从其功能上看, 可以认为是一种现场总线网络协议。

Modbus 协议为主从问答式通讯协议, 主站发出查询指令, 从站给出应答, 协议中规定了通讯帧的公共格式。Modbus 有 ASCII 和 RTU 两种传输方式, 而对于一个 Modbus 网络来讲, 只能选择一种传输方式<sup>[3-4]</sup>。本文中所涉及的 Modbus 网络采用 RTU 传输方式。

RTU 传输方式中, 消息发送至少要以 3.5 个字符时钟间隔标定开始或结束(如表 1 中 T1-T2-T3-T4 所示), 数据帧以二进制形式传输, 采用 CRC 校验。该方式的优点是在同样的波特率下可比 ASCII 方式传送更多的数据, 适用于传输距离远、通讯量大的系统。

表 1 RTU 消息帧

起始位	设备地址	功能代码	数据	CRC 校验	结束符
T1-T2-T3-T4	8bit	8bit	n 个 8bit	16bit	T1-T2-T3-T4

## 2 Modbus 网络参数测量

计算机控制系统是一个离散控制系统, 数据传输的时延对系统有着重要的影响。而影响数据时延的主要因素是波特率和吞吐量。因此本文首先通过实验得出 Modbus 网络在不同波特率下的吞吐量, 并计算出网络

时延。

参数的定义如下:

吞吐量: 每秒传送的最大数据包数, 用  $S$  表示。

时延: 一个数据帧中的有效数据传输实际时间  $T_v$  与理论时间  $T_i$  的差, 用  $T_d$  表示。

$$T_d = T_v - T_i \quad (1)$$

$T_v$  是吞吐量的倒数,  $T_i$  可通过波特率求得。

$$T_i = \frac{8 \times 8}{\text{Bode}} \times 1000(\text{ms}) \quad (2)$$

Bode 为波特率, 设每帧含 8 字节有效数据。

实验采用计算机串口通过 RS-232 转换成 RS-485 进行通讯, 传输距离为 20m, 传输协议为 Modbus-RTU, 每帧采用 8 字节有效数据。通过实验测得  $T_v$ , 并根据公式(1)、(2)得到结果, 如表 2 所示。关于 Modbus 协议及编程参考文献[3]、[4]。

表 2 实验数据

Bode	吞吐量 $S$	$T_i(\text{ms})$	$T_v(\text{ms})$	$T_d(\text{ms})$	比率 $T_d/T_i$
115 200	833	0.5 556	1.2	0.64	1.152
57 600	478	1.1 111	2.09	0.98	0.882
38 400	319	1.6 667	3.13	1.46	0.876
19 200	161	3.3 333	6.21	2.88	0.864
9 600	80	6.6 667	12.41	5.74	0.861

由表 2 中的实验数据可以看出, 随着波特率的增加, 网络的吞吐量也随之增加, 数据包的时延  $T_d$  随之减小, 但是  $T_d$  所占理论传输时间  $T_i$  的比例随之增加。这些数据将用于本文的仿真中。产生  $T_d$  的原因是多方面的, 在本文中不做主要论述。

## 3 系统模型与仿真

控制系统设计流程通常是先建立被控对象的数学模型, 根据其模型特点选择合适的控制方法, 通过仿真确定控制参数, 得出系统的性能指标, 最后进行工程应用。因此, 仿真是构建一个控制系统的重要环节, 也是评价一个控制系统的有效手段。本章以 Modbus 网络构

建一个典型的二阶系统,并将表 2 中获得的数据运用到该系统的仿真中,通过绘制系统的根轨迹和阶跃响应曲线分析时延对系统稳定性的影响。

### 3.1 系统模型

典型闭环控制系统由控制对象、控制器、执行机构、传感器等单元组成。其中传感器将采样数据传递给控制器,控制器将控制信号传递给执行机构,这两个过程通过 Modbus 网络完成,存在网络时延。假设控制器选用最简单的比例控制,网络环节可以将之看成数字滤波器( $D_z$ )与时延(DELAY)<sup>[1]</sup>。二阶系统传递函数设为:

$$G_s = \frac{1}{s(s+10)} \quad (3)$$

根据控制系统结构图可以构建出控制模型框图,如图 1 所示。

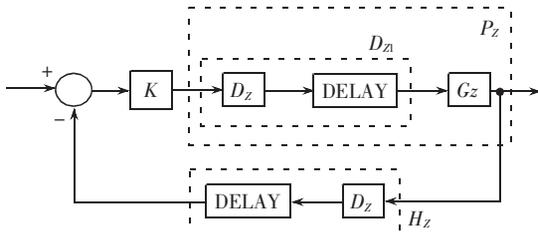


图 1 控制模型框图

仿真用到的参数如下:

$T_s$ : 采样时间

$K$ : 比例控制系数

$D_z$ : 理想化数字滤波器  $D_z = (2z-1)/z$  (4)

$z^{-n1}$ : 控制器与执行器之间的时延  $n1 = [Td1/Ts]$

$z^{-n2}$ : 控制器与传感器之间的时延  $n2 = [Td2/Ts]$

$H_z$ : 反馈回路传递函数

$G_z$ : 二阶系统离散化传递函数

$P_z$ : 整体前向传递函数

采样时间  $T_s \geq T_i$ , 即理想情况下(不计时延的情况)仿真采样周期的最小值为  $T_i$ 。然而实际传输中无法避免时延的存在,  $T_s$  取  $T_i$  的整数倍。仿真中假设控制器与执行器之间、传感器与控制器之间的时延相同,即  $n1 = n2$ , 并且当时延与采样周期的比值小于 1% 时, 可以忽略时延造成的影响。

### 3.2 根轨迹仿真分析

为分析时延对系统稳定性的影响,分别在不考虑时延和考虑时延两种情况下,采用离散系统根轨迹分析的方法对系统进行仿真分析<sup>[2]</sup>。

选择 9600 波特率进行仿真,根据表 2 数据有:

$$T_s = 0.00667s。$$

不考虑时延的情况下,

$$G_z = \frac{2.176e^{-5}z + 2.128e^{-5}}{z^2 - 1.935z + 0.9355} \quad (5)$$

$$P_z \times H_z = \frac{8.703e^{-5}z^3 - 1.914e^{-6}z^2 - 6.336e^{-5}z + 2.128e^{-5}}{z^4 - 1.935z^3 + 0.9355z^2} \quad (6)$$

根轨迹图如图 2 所示。

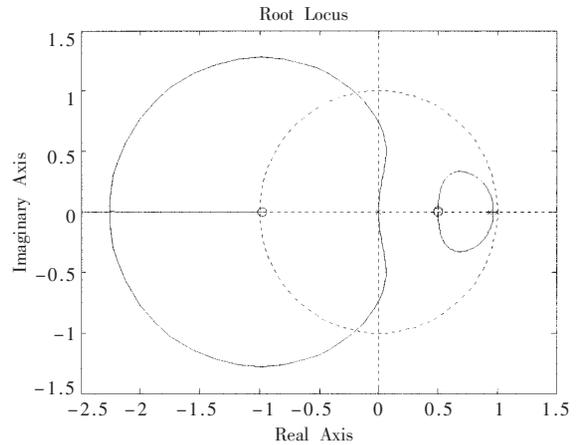


图 2 9600bps 无时延根轨迹图

考虑时延的情况下,由于  $T_d/T_s = 86.05\%$ , 所以取  $n1 = n2 = 1$ ,

$$\text{则: } H_z = \frac{2z-1}{z^2} \quad (7)$$

$$P_z \times H_z = \frac{8.703e^{-5}z^3 - 1.914e^{-6}z^2 - 6.336e^{-5}z + 2.128e^{-5}}{z^6 - 1.935z^5 + 0.9355z^4} \quad (8)$$

所得根轨迹如图 3 所示。

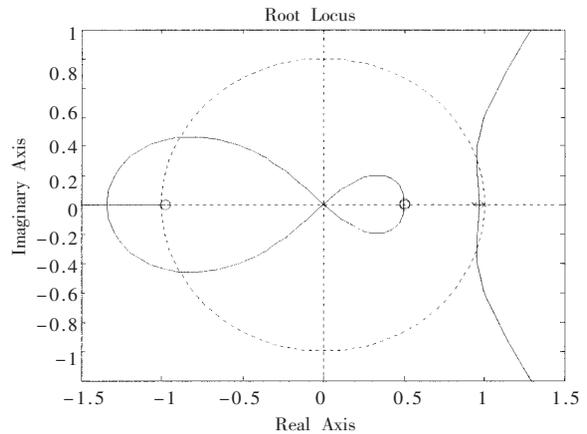


图 3 9600bps 有时延根轨迹图

不考虑时延,根据图 2,系统的主导极点在单位圆周附近,且其根轨迹在单位圆内,系统是稳定的。引入时延后根轨迹如图 3 所示,系统主导极点附近根轨迹冲出单位圆,系统在不同的  $K$  值下稳定性有可能被破坏。由根轨迹可以得到临界发散点的  $K$  值为  $1.88e+003$ 。

### 3.3 阶跃响应分析

在 9600bps 波特率下进行阶跃响应仿真,绘制阶跃响应图。

选取  $k = 20.44, 517.38, 1.88e+003$ , 分别得到图 4(a)、4(b)、4(c) 所示的阶跃响应曲线。

如图 4(a) 所示,  $K$  值较小,忽略时延与考虑时延两种情况下的阶跃响应图像基本重合,此时系统根轨迹处于主导极点附近实轴上。如图 4(b) 所示,  $K$  值增大,系统的阶跃响应经振荡后趋于稳定,但此时两种情况下阶跃

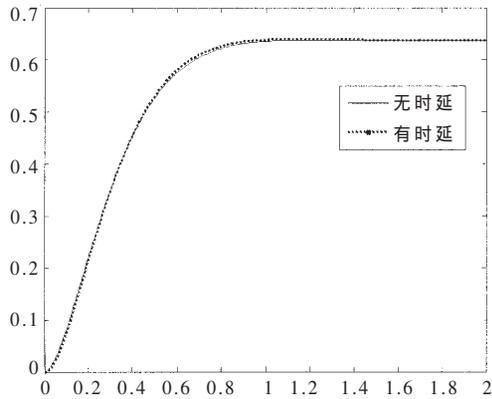


图 4(a) 阶跃响应对比图

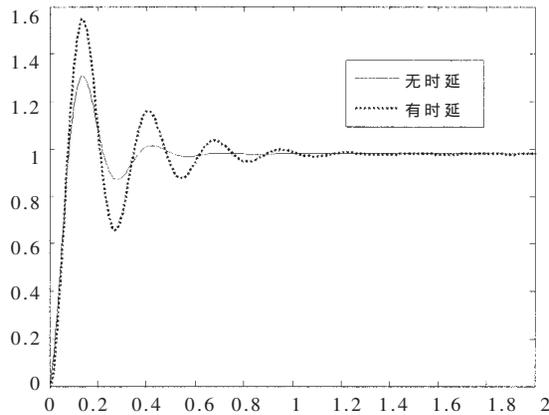


图 4(b) 阶跃响应对比图

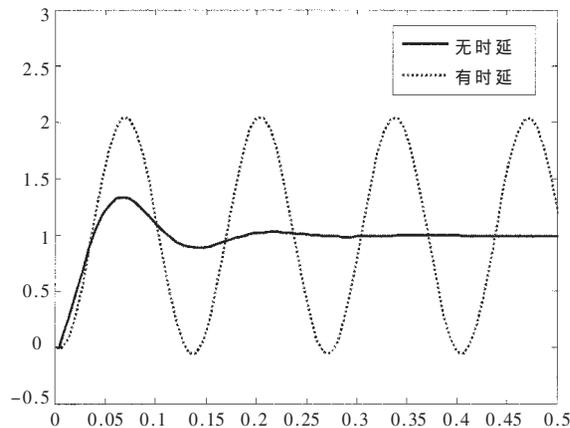


图 4(c) 阶跃响应对比图

响应曲线已经有明显偏差。如图 4(c) 所示,  $K$  值增大到临界值, 不考虑时延的阶跃响应经振荡后迅速趋于稳定, 但包含时延的系统却产生较大振荡并趋于发散。

究其原因: 当时延相对于采样周期不可忽略时, 由于系统的最小时间单元为采样周期  $T_s$ , 所以控制器会将时延  $T_d$  扩大为  $T_s$  的整数倍, 并在下一个采样周期进行处理, 从而产生若干拍滞后。

### 3.4 解决方法

解决这个问题一个方法是考虑增加采样周期  $T_s$ 。当  $T_s$  增加使得  $T_d$  相对于  $T_s$  可以忽略 ( $T_d/T_s < 1\%$ ) 时, 利用忽略  $T_d$  的系统模型进行仿真, 仿真结果与实际情

况偏差不大。

令  $T_s = 100T_i = 0.667s$ 。此时  $T_d/T_s = 0.86\% < 1\%$ , 可以忽略不计, 得到如图 5 所示的根轨迹图像, 由此可知系统是稳定的。工程应用中, 通常在被测量的一个振荡周期内需要采样 8 次。设过程时间常数为  $T_0$ , 则:

$$T_0 = 8 \times T_s = 5.336(s)$$

可见, 此时控制系统只能针对过程时间常数大于 5.336s 的被控对象进行有效控制, 限制了控制系统的应用范围。

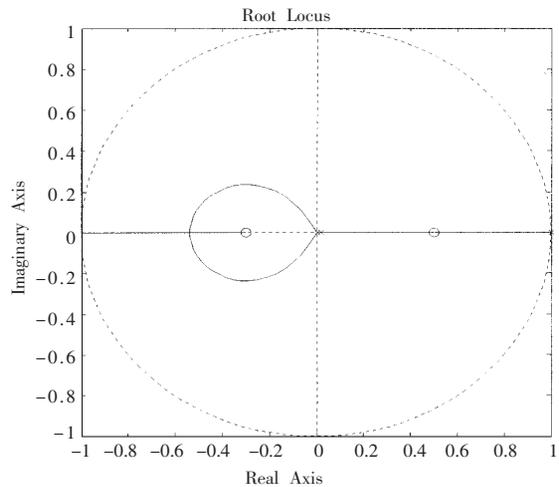


图 5 根轨迹图像

根据以上仿真分析方法, 在 19 200bps、38 400bps、57 600bps、115 200bps 等波特率下, 根据表 2 数据进行仿真分析, 并将数据汇总, 得到表 3 所示结果。

表 3 数据结果

波特率	9 600	19 200	38 400	57 600	115 200
$T_i$ (ms)	6.667	3.333	1.667	1.111	0.555 6
$T_d$ (ms)	5.74	2.88	1.46	0.98	0.64
$T_s$ (ms)	667	333.3	166.7	111.1	66.7
$T_d/T_s$ (%)	0.86	0.86	0.88	0.88	0.96
$T_0 = 8T_s$ (s)	5.336	2.664	1.334	0.888	0.534

由于网络时延的存在, 忽略时延的仿真结果与实际差别很大, 是不可取的, 而实际应用中又很难针对网络的各种情况对时延做出有效的测量。一种解决方法是扩大实际系统的  $T_s$ , 使得  $T_d/T_s < 1\%$ , 此时忽略时延的仿真与实际运行情况差别不大。这种方法的优点是工作量比较小, 但是采样周期  $T_s$  的扩大必然会导致过程时间常数  $T_0$  变大。所以, 这种方法适用于时间常数较大、被控对象变化缓慢的控制系统, 如: 温度、流量、气压、浓度等。

由表 3 可以看出, 选择较高的波特率, 系统的吞吐量较大, 系统采样周期减小, 可以对变化更快的被控对象进行控制, 同时网络中的信息量加大也意味着更多的测控点数, 因此应尽可能选择较高的波特率。然而就

(下转第 87 页)

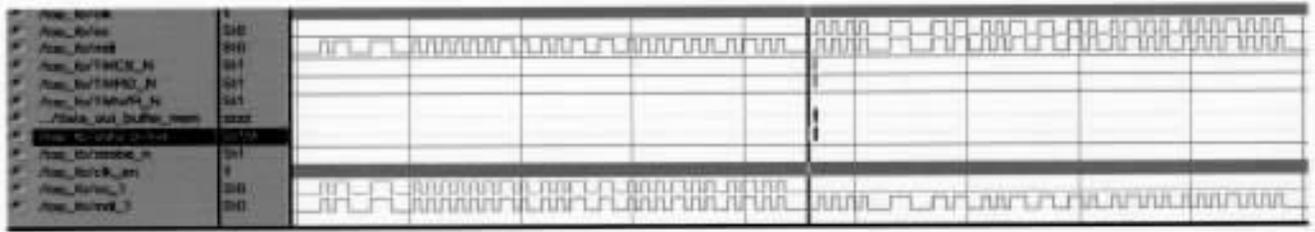


图 8 访问 MVB1 类设备源端口



图 9 访问 MVB1 类设备宿端口及 MVB1 类设备控制器同步机制

部TM 中提取一个字长的数据到数据总线上经发送模块 2 发送。由仿真图可以看出 TMCS\_N 及 TMRD\_N 有效。

发送模块 1 发送主帧 0c5f 后再发送 16 位从帧数据。由图 9 可知控制器检测到发送模块 1 发送的主帧后,又收到 16 位的从帧数据,并通过总线 data\_in\_buffer\_mem 把数据送到 TM 中。由于是对端口 15 的操作,由图中可以看出 TMCS\_N、TMWR\_N 及同步信号 strobe\_n 有效。

本文在研究 MVB 的基础上,用 FPGA 实现了 MVB1 类设备控制器的设计,具体描述了 1 类设备控制器各个模块的功能及设计方法。经过仿真验证,该 1 类设备控制器能够成功收发帧数据,对报文进行分析,并且由于该 1 类设备控制器采用了自顶向下的设计原则,设计的各个子模块功能相互独立,因此易于扩展。当设计 MVB2、3、4 或 5 类设备控制器时,可以在本设计的基础上采用模块(发送模块、接收模块)复用的方法,从而有效地节省资源。经过实践证明使用该设计比购买专用处理芯片 MVB 控制器大大节省了成本。

参考文献

[1] ADTRANZ. Multifunction vehicle bus controller data sheet (Revision)[Z]. Switzerland: Adtranz. 1997.

[2] IEC61357-1 Part 1. Train communication network[S],1999.  
 [3] 蔡颖.MVB 网络接口单元的 SOC 解决方案.沿海企业与科技,2005,(4): 139-140.  
 [4] JIMENEZ J, JOSE M. Comparison of two designs for the multifunction vehicle bus IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems: accepted for future publication. Volume PP, Issue 99, 2005:1-1.  
 [5] 王锋.基于 FPGA 的 MVB1 类设备网卡的设计[J]. 机车电传动,2004,(6): 21-23.  
 [6] BONSEN, G A. The multifunction vehicle bus (MVB) factory communication systems. 1995.WFCS '95, Proceedings., 1995 IEEE International Workshop on 4-6 Oct. 1995 Page(s):27-34.  
 [7] JIMENEZ J, MARTIN J L, CUADRADO C et al. A top-down design for the train communication network industrial technology.2003 IEEE International Conference on Volume 2,10-12 Dec. 2003 Page(s):1000-1005.  
 [8] International electrotechnical commission, IEC 61375-3, Clause 3: Multifunction Vehicle Bus, 1999.

(收稿日期:2006-09-28)

(上接第 83 页)

RS-485 总线而言,网络节点数、传输距离、波特率都会影响网络的误码率,实际应用中波特率的选择还要在吞吐量与误码率中做出权衡。

本文通过 Modbus 通讯实验对其性能进行测试并将测试结果运用于仿真分析,指出了网络时延对系统稳定性造成的影响,给出了一种解决方法。根据本文给出的时间常数  $T_0$  可以看出 Modbus 尤其适用于温度、压力、流量等时间常数较大的缓变过程控制行业,如发酵控制、水处理等。

参考文献

[1] CHARLES L, PHILLIPS, HENTRY T, Nagle: Digital

control system analysis and design. 2<sup>nd</sup> ed,Printice-Hall, Inc., 1990, chapter 3,4,5.  
 [2] GHAFAR H F, MAGIED M F, FIKRI M et al. Performance analysis of fieldbus in process control systems. Proceedings of the American Control Conference Denver, Colorado June 4-6,2003.  
 [3] Modicon modbus protocol reference guide. Industrial automation systems. Modicon,Inc., June 1996.  
 [4] 封亚斌.采用串口通信技术实现 Modbus 数据通信[J]. 自动化仪表,2004,(10).

(收稿日期:2006-09-20)