

基于 ISP1362 的 USB 系统错误分析

廖俊卿, 杨晓非

(华中科技大学电子系, 武汉 430074)

摘要: 以基于 ISP1362 的嵌入式 USB 主控系统为研究对象, 从主机端的角度对 USB 系统的错误进行了初步的分析和探讨, 并针对总结出的 2 类错误提出了一些解决方法: 传输级纠错设计包括控制传输的纠错和批量传输的纠错; 类协议纠错设计包括 Recovery 纠错、Sense Code 处理和电器规则重启。

关键词: ISP1362; 海量存储类; 有效数据; 传输事务

Error Analysis of USB System Based on ISP1362

LIAO Junqing, YANG Xiaofei

(Electronic Department, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

【Abstract】 This paper takes the embedded USB host system based on ISP1362 as the research object. It analyses two kinds of USB system's errors in the view of USB host and proposes some solutions. The design of transmission-level error correction includes control transmission and batch transmission, and class protocol error correction includes Recovery processing, Sense Code processing and USB transmission reset.

【Key words】 ISP1362; Mass storage class; Available data; Transmission transaction

USB 系统的可靠性来自于硬件设计和数据传输协议 2 个方面。在硬件上, USB 驱动器、接收器和电缆的硬件规范消除了大多数可能引起数据错误的噪声。此外, USB 协议使用了数据错误检测来保证传输的可靠性。但是, 偶然的错误仍无法避免, 且大部分的错误仅靠硬件无法纠正。因此, 在 USB 系统的开发过程中, 对错误的处理尤为重要, 这需要设计者了解错误的来源及种类, 对症下药才能解决问题。

我们设计了一个基于 ISP1362 的嵌入式 USB 主控系统, 通过控制 1362 来实现对海量存储类设备的数据操作。在开发过程中, 对 USB 系统中的错误进行了分析和归类, 并针对这些错误提出了可行的解决方法。

1 错误类型分析

为保证 USB 数据传输的准确性, USB 总线上的数据被封装成各种形式的包 (Packet)。用户可以处理的数据被称为有效数据, 它包括标准请求、类协议命令以及用户自定义数据等。有效数据封装在数据包中。为了能够正确地收发有效数据, USB 添加了额外的开销来进行传输工作, 这些额外的开销称为信息包, 它包括令牌包 (Token)、握手包 (Handshake)、数据包 (Data)、特殊包 (Special) 等。因此, USB 系统的错误可分为 2 类: USB 传输级错误和 USB 类协议错误, 它们之间的区别如图 1 所示。

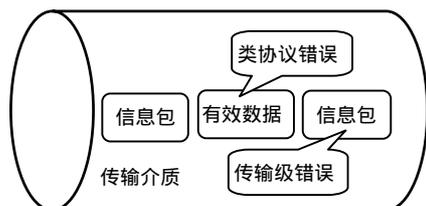


图 1 USB 系统错误分类示意图

1.1 传输级错误

USB 传输级错误与信息包有关。错误的检测靠 USB 硬件

来完成, 纠错则由软硬件共同实现。USB 硬件所支持的错误检测主要包括:

(1) 信息包错误检测

USB 硬件检测 3 种类型的包错误, 分别是: PID 错, 循环冗余校验 (CRC) 错, 位填充 (Bit Stuffing) 错。当错误发生时, 接收方忽略该信息包, 并且不会对它作出任何响应。具体的处理方法则与事务类型以及信息包类型有关。

(2) 数据切换检测

数据切换是一种机制, 用来确保数据传输的收发双方保持同步。数据传输时, 2 种数据包类型 (DATA0 和 DATA1) 被交替传送, 包的接收方把它和数据切换位 (Toggle) 作比较, 以确定接收的包是否正确。发送方使用的数据包类型则和它当前的切换位保持一致。如果数据包类型与切换位不一致, 或者发送方没有接收到 ACK 握手包, 都会产生数据切换错误。

(3) 总线超时

在一个传输事务的处理中, 收发双方必须知道要等待多久来获得响应, 如果在指定的总线周期内没有得到响应, 则判定为总线超时。对于全速和低速的事务处理而言, 发送方在 16 个位时间内得到响应不会超时, 在 18 个位时间之后则一定超时。

USB 硬件对错误的处理包括汇报错误和重新传输。重新传输由 USB 主机控制器启动, 最多可进行 3 次, 若错误依然存在, 则对客户软件报错, 由客户软件来处理。值得注意的是, 有效数据对于 USB 的硬件检测机制而言是透明的。

1.2 类协议错误

USB 类协议错误与有效数据有关, 检测和纠错均由软件

作者简介: 廖俊卿(1981 -), 男, 硕士生, 主研方向: 多媒体技术与现代通信; 杨晓非, 教授、博导

收稿日期: 2006-06-10 **E-mail:** 0assassin0@163.com

来实现。USB IF 将 USB 设备分成了 11 大类，不同种类的设备所使用的传输方式和指令协议不同，错误类型也不一样。海量存储类使用 Bulk Only (BO) 和 Control/Bulk/Interrupt (CBI) 2 种传输方式以及 SCSI 等指令协议。数据的传输由指令启动，每一条指令的执行状态通过场景代码 ASC (Additional Sense Code) 和 ASCQ (Additional Sense Code Qualifier) 来表征。当错误发生时，读取它们的值就可以获得错误信息，以便进行相应的错误处理。

2 错误处理方法

由于 USB 的大部分错误都是偶然发生的，因此，纠错的设计主要围绕数据的重新传输来进行。这种方法简单而且有效，只是针对不同的系统层次，一次重新传输的单位有所区别。为了便于说明，给出该系统的软件结构与 USB 错误的对应关系，如图 2 所示。

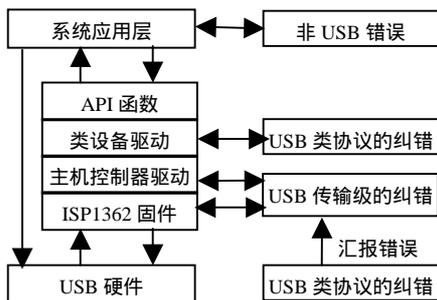


图 2 主机端软件结构与 USB 错误的对应关系

从图 2 中可以看出，传输级的纠错集中在主控驱动层和 ISP1362 固件层，一次重新传输的最小单位是一个传输事务，或者是由几个传输事务组成的控制传输；USB 类协议的纠错则集中在类设备驱动层，对于海量存储类设备来说，一次重新传输的最小单位是一个 SCSI 命令所包含的信息量。因此，系统的纠错越靠近硬件越好。

2.1 传输级的纠错设计

传输级的纠错针对 USB 基本传输来设计，由下至上，软件控制的关键是：传输事务的纠错 -> 基本传输的纠错。

USB 有 4 种基本传输方式：控制传输，批量传输，中断传输和实时传输。传输事务(Transaction)则是组成这 4 种传输的基本单位，除了实时传输与控制传输所建立的事务(Setup)外，USB 系统对每一个承载了有效数据的传输事务都会用握手信号来报告传输成功与否。这些握手信号分别是 ACK、NAK 和 STALL。

(1)ACK：表示数据包没有位填充错和 CRC 错，并且数据 PID 被正确收到。当数据切换位匹配且接收方能接收数据，或者当切换位失配，但发送方和接收方之间必须再同步 (Resynchronize) 的时候，ACK 被发出。对于输入事务，ACK 由主机返回；对于输出事务，ACK 由设备返回。

(2)NAK：表示设备暂时不能发送或接收数据，但最终还是能够在无需主机干涉的情况下收发数据。NAK 握手信号仅能由设备返回。

(3)STALL：表示设备不能收发数据，或者不支持控制管道的请求。它由设备返回，在任何条件下都不允许主机返回 STALL。

ISP1362 采用一种称之为 Philips Transfer Descriptor(PTD)的结构来产生 USB 的传输事务，PTD 的 Completing Code 字段负责汇报错误，ISP1362 对与传输事务相关的错误处理如表 1 所示。

表 1 ISP1362 错误响应

致命错误	错误代码	IN 事务	OUT 事务
CRC	01	No ACK	Not applicable
Bit Stuffing	02	No ACK	Not applicable
DATA Toggle Mismatch	03	ACK send	Not applicable
Stall	04	No ACK	Host received Stall from device
Device Not Responding	05	No ACK	Host not received a handshake reply within 18-bit time, or a bad SYNC plus
PID Check Failure	06	No ACK	Not applicable
Unexpected PID	07	No ACK	Corrupt NAK, ACK, or Stall
Data Overrun	08	No ACK	Not applicable
下面是唯一的非致命错误，不会导致传输事务中断，只是在 PTD 中给出警告			
Data Underrun	09	ACK send	Not applicable

在 IN 事务中，ISP1362 要送出握手包，表项内容是 ISP1362 检测到错误后，硬件上的握手包自动处理。OUT 事务的表项内容是 ISP1362 接收到的握手包。传输事务的纠错比较简单，大部分的错误通过直接重传就可以纠正，但仍有几个错误需要另行处理：

(1)DATA Toggle Mismatch(03)硬件检测到数据包的切换位(Toggle)与期望值不匹配，处理的方法是找出正确的 Toggle，然后重新上次传输。

(2)Stall(04)端点挂起的情况分为 2 种，如果是协议 Stall(针对控制传输而言)，等待 1ms，重新上次传输。如是功能 Stall，清除端点的 stall 状态，重新传输。

(3)Device Not Responding(05)设备无响应是指设备对 IN 事务无响应或者对 OUT 事务不返回握手信息。解决的方法是，等待一段时间，重新发送命令。如果多次重试失败，则重新枚举设备。

USB 基本传输的纠错建立在传输事务纠错的基础之上，由于该系统中主要使用控制传输和批量传输，因此纠错针对这 2 种传输方式来设计。

2.1.1 控制传输的纠错

控制传输由 2 或 3 个传输事务组成。由 USB 规范可知，在数据事务和状态事务的处理过程中，为了不受干扰，不管出错与否，它会 Stall 该通道，只有收到一个设置事务的 PID，Stall 才会终止。所以在数据阶段和状态阶段是不可能纠错的，纠错只能从一开始的 SETUP 阶段开始。

而不论 SETUP 包是否合理，只要是一个设置阶段的 PID，系统就必须接收，所以设置阶段是不报错，报错只能在后面 2 个阶段进行。

由于控制传输中的每个阶段 toggle 都指定了初始值，因此发生错误后，toggle 不会出错。直接重新发送一次控制传输就可以完成纠错处理。

2.1.2 批量传输的纠错

批量传输由若干个 IN 或者 OUT 数据事务组成。一个 PTD 可以产生多个传输事务。比如，PTD 可以设定 ISP1362 传输 512B 的数据，而批量包的大小一般是 64B，这就可以产生 8 个传输事务。如果出错，可能是其中任何一个事务的问题，所以批量传输的纠错必须重新发送该次批量传输，而不是仅仅重新发送一个传输事务。

数据事务的初始 toggle 由软件指定，传输过程中的 toggle 由硬件自动更新；出错后，toggle 可以是任意值。ISP1362 硬

件上对数据切换的同步已经做了相应的处理，设计者只需要从 PTD 中读出正确的 toggle 值就可以了。

2.2 类协议的纠错设计

ISP1362 传输级纠错的目的是保证 PTD 参数与数据传输的一致性，主要是防止意外错误后，USB 传输中的 toggle 不匹配。而类协议的纠错则是为了确保在规定的传输方式下，有效数据传输的完整性和可靠性。对于海量存储类而言，命令的发出、数据的响应、系统状态报告都是在海量存储规范中规定的，所以通过命令重来进行系统的纠错应该集中在 USB 海量存储类协议层。

在本系统中，处理错误的方法由下到上主要为：Recovery 处理、Sense Code 处理以及 USB 传输重启。

2.2.1 Recovery 纠错

CBI 和 BO 这 2 种传输规范中都规定了该传输的类 Reset 命令，主要作用是让 USB 设备停止现在的传输，放弃当前的命令，清除异常报警状态。类 Reset 处理后，紧接着发送标准请求 Clear Feature 命令，清除批量终端的挂起状态，并让设备的 toggle 置 0，这一过程在规范中称为 Recovery 处理。BO 传输方式的 Reset 命令如表 2 所示。

表 2 Reset 命令格式

bmRequestType	bRequest	wValue	wIndex	wLength	Data
21h	FFh	0000h	Interface	0000h	None

这是一个类定义的控制传输命令。而 CBI 控制传输的数据阶段一般是 SCSI 命令，也可能是类的 Reset 命令。CBI 类的 Reset 命令为“1Dh 04h FFh FFh FFh FFh”。

当设备接收到一个错误的 SCSI 命令后，无论是批量 IN 还是批量 OUT，都无法主动地向 Host 报错。它的处理办法是挂起批量终端，阻止数据传输的进行。如果 Host 发现与批量终端进行通信的时候，总是返回一个 STALL，就需要进行 Recovery 处理。

一个 Recovery（类 Reset + Clear Feature）操作，可以强制多种移动存储设备软件系统中的纠错功能，并且让系统的

（上接第 278 页）

$$C = \begin{pmatrix} 5 & 8 & 9 & 1.80 & 1.92 & 2.05 & 2 & 3 & 8 \\ 6 & 7 & 9 & 1.90 & 1.85 & 2.20 & 3 & 3 & 7 \\ 9 & 8 & 8 & 1.98 & 1.89 & 2.02 & 5 & 3 & 5 \\ 7 & 9 & 7 & 2.00 & 1.90 & 2.10 & 3 & 4 & 4 \end{pmatrix}$$

第 4 步：对评估矩阵进行归一化处理，得到统一的矩阵：

$$\begin{pmatrix} 0.362 & 0.498 & 0.543 & 0.468 & 0.508 & 0.490 & 0.292 & 0.457 & 0.535 \\ 0.434 & 0.434 & 0.543 & 0.494 & 0.489 & 0.525 & 0.438 & 0.457 & 0.624 \\ 0.651 & 0.498 & 0.482 & 0.515 & 0.50 & 0.482 & 0.729 & 0.457 & 0.445 \\ 0.507 & 0.560 & 0.422 & 0.520 & 0.503 & 0.502 & 0.438 & 0.610 & 0.356 \end{pmatrix}$$

第 5 步：利用欧式距离法求取各个方案的能力值，得出的各个型号方案的火力能力值是：

$$\begin{pmatrix} 0.041 & 0.056 & 0.029 & 0.049 & 0.053 & 0.028 & 0.059 & 0.079 & 0.044 \\ 0.049 & 0.049 & 0.029 & 0.051 & 0.051 & 0.030 & 0.088 & 0.079 & 0.052 \\ 0.073 & 0.056 & 0.026 & 0.053 & 0.052 & 0.028 & 0.147 & 0.079 & 0.037 \\ 0.057 & 0.063 & 0.023 & 0.054 & 0.052 & 0.029 & 0.088 & 0.105 & 0.030 \end{pmatrix}$$

最后得到 4 个评估方案的作战能力评估值分别为

$$0.4937, 0.4989, 0.5063, 0.5000$$

从各方案火力能力看，第 3 方案相对最好，其次是第 4 方案，相对最不理想的是第 1 个型号方案。与此同时，查看各个实验方案调整的因素，方案 3 因提高了首发命中率，而提高火力能力。根据这个结论可指导型号因素的设计与改良。

toggle 重置，是条件非常强的纠错命令。

2.2.2 Sense Code 处理

利用 SCSI 协议中的 Request Sense 命令可以获得设备的 ASC 和 ASCQ 代码，通过查表可以获得设备的具体状态和错误的具体原因，然后调用相应的 Mode Sense、Select Sense 等 Sense 处理命令处理错误。ASCQ 和 ASC 大小都是 1B，二者联合可以报出 65 536 种错误，但是一套协议中只规定了大约 40 多种错误。

可以看出，这套报错、纠错系统非常复杂，主要用于对稳定性要求比较高的设备中。因为移动存储设备只是偶尔使用 Request Sense 命令来启动设备和简单的报告状态，所以 Sense Code 纠错主要是一个辅助作用。使用前面的 Recovery 纠错，就可以纠正大部分错误了。

2.2.3 电气规则重启

如果上述方法都无法纠正错误，可以尝试 USB 传输重启。向 ISP1362 的 HcReset 寄存器写入 0x00F6，实现 USB 电气规则上的重启操作。接着重新列举设备，继续上次的传输。这是软件纠错的最后防线，如果仍无法纠错，就只能在硬件上进行系统重启。

3 结束语

本文对嵌入式 USB 系统的错误进行了初步的分析和探讨，所提出的错误处理方法是我们在设计过程中的体会和经验总结，经验证，这些方法能够纠正系统中的大部分错误，尤其是对传输级错误的讨论，具有 USB 系统共性的特点。

参考文献

- 1 Axelson J. USB 大全[M]. 陈逸, 译. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- 2 Anderson D. USB 系统体系[M]. 精英科技, 译. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- 3 ISP1362 Data Sheet. Reversion 02[Z]. 2003.
- 4 Kolokowsky S. Design Considerations for USB Mass Storage[EB/OL]. 2002. <http://www.cypress.com/portal/server.pt>.

这些是对火力能力的评估，同理，按照 TAS 方法，再分别求得 4 个方案的机动能力、防护能力、通信能力的评估值，进而可知道调整因素与对应的作战能力关系。

3 结论

本文针对仿真非战果数据相关的作战能力，集成层次分析法及仿真方法和 TOPSIS 法，完成对装备作战能力的评估。通过装甲装备作战能力的评估实例应用与分析，发现某项能力相对优的方案，通过回溯到方案层可知道其相关因素的加强。结果表明，该方法具有很好的合理性与适用性。

参考文献

- 1 李明, 刘澎. 武器装备发展系统论证方法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- 2 马亚龙, 王精业. 基于正负理想点的仿真结果评估方法研究[J]. 计算机工程, 2002, 28(2): 21-22.
- 3 魏世孝, 周献中. 多属性决策理论方法及其在 C3I 系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- 4 程钦文, 沈云春, 唐纯洁. 潜射鱼雷作战能力综合评价模型[J]. 火力与指挥控制, 2004, 20(1).
- 5 黄炎焱, 杨峰, 王维平, 等. 基于效用聚合的装甲装备作战效能评估方法研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(10).