

一种 ARINC825 总线通信接口可靠性设计方法研究

张 鹏, 吴晓东, 崔海青

(中国民航大学, 天津 300300)

摘要: 随着航空电子技术的进步, 民航客机电子系统逐渐向着数字化、复杂化的方向发展, 对设备间通信的可靠性有着更高要求; 在分析 ARINC825 总线协议标准后, 提出使用 STM32F207 单片机和商用 CAN 控制器, 设计了一套低成本双链路冗余的 ARINC825 通信接口, 使用“时间触发总线调度”技术对通信接口可靠性进行分析; 实验表明, 设计的 ARINC825 协议通信接口方案具有较高的可靠性, 能够满足飞机驾驶舱控制通信要求。

关键词: ARINC825 总线; 时间触发总线调度; 双冗余通信接口

Research on Reliability Design Method of ARINC825 Bus Communication Interface

Zhang Peng, Wu Xiaodong, Cui Haiqing

(China Civil Aviation University, Tianjin 300300, China)

Abstract: With the development of avionics technology, the avionics system of civil aviation airliner is developing towards digitization and complication, so the reliability of communication between equipments is required to be higher. After analyzing the standard of ARINC825 bus protocol, designing a low-cost dual-link redundancy ARINC825 communication interface with STM32F207 single chip computer and commercial CAN controller. The reliability of the communication interface is analyzed by using time-triggered bus scheduling technology. The experimental results show that the ARINC825 protocol communication interface scheme has high reliability and can satisfy the communication requirements of airplane cockpit control.

Keywords: ARINC825 protocol; time-triggered bus scheduling; dual-link redundant communication interface

0 引言

近年来, 飞机驾驶舱电子系统正逐步由模拟控制阶段向全数字控制阶段转变, 功能也有了进一步的扩展, 航空电子设备间有着更高的数据通信和传输可靠性的要求^[1]。为此, 航空电子工程委员会(AEEC)于2007年编制出版了ARINC 825规范。ARINC 825规范基于CAN总线, 规定了子系统间的通信行为, 包括寻址机制、通信机制、服务结构以及概要描述, 定义了使用CAN的机载系统的通信标准, 被视为当前和未来飞机的重要数据传输方式^[2]。目前空客公司和波音公司生产的新一代民航客机已经将ARINC825总线作为辅助子系统总线, 应用于发动机控制、飞行控制和驾驶舱控制面板等子系统网络中^[3]。

本文以驾驶舱控制面板为例, 分析了ARINC825总线的主要特点, 结合驾驶舱控制面板通信要求, 使用双电源供电机制, 设计了一套具有较高可靠性的双链路冗余的ARINC825通信接口设备。并通过“时间触发总线调度”

技术对通信接口可靠性进行分析。

1 系统分析

1.1 驾驶舱控制面板通信分析

现代飞机驾驶舱控制面板承担着飞行员与飞机系统间的交互功能。控制面板的控制装置种类繁多, 既包括传统的开关、电位器、键盘和光标定位器等, 又包括现代的触摸液晶屏和语音控制设备等。它们控制EFIS、PFD、ND等显示系统的切换、信息输入和其他的交互操作^[4]。ARINC825总线具有可靠性高、抗干扰能力强、实时响应好、体积小、重量轻、通讯速率高及易扩展的优点^[5], 能够满足驾驶舱内控制面板的通信要求。控制面板产生的交互数据经通信接口设备转换为ARINC825数据, 发送到通信总线上; 同时要将从ARINC825总线上传输过来的数据解码发给控制面板。驾驶舱控制面板通信接口功能架构如图1所示。

1.2 ARINC825协议分析

ARINC825协议是基于CAN总线高层协议的进一步改进而成, 其电气特性、传输速率等符合ISO-11898标准, 通信链路由节点互连的120 Ω 屏蔽双绞线电缆组成。

为了在飞行器上使用CAN总线, ARINC825对CAN2.0B协议做了进一步修改, ARINC825在CAN总线的物理层和数据链路层的基础上, 在网络层增加了路由、数据包和流量控制等功能; 在传输层增加了逻辑通道, 数

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-03-16。

基金项目: 中央高校基本科研业务费(3122016A006)。

作者简介: 张 鹏(1963-), 男, 北京人, 硕士研究生导师, 教授, 主要从事民用航空器机载系统故障诊断、民用航空器导航方向的研究。

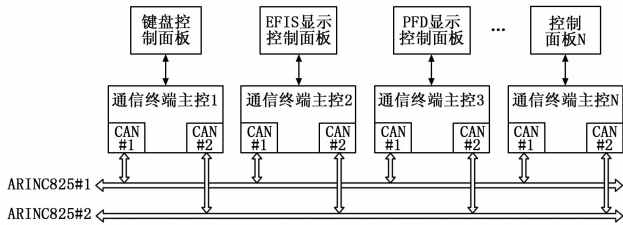


图 1 通信接口功能架构图

据重传等功能；在表示层中增加了数据表示和数据标准化等功能。与原来的 CAN 总线相比，ARINC825 网络没有传统网络上的主从节点之分，所有的节点具有相同权限。通过对 29 位识别符扩展帧进行重新编码实现逻辑通信信道（LCC），函数标识符（FID），数据对象代码（DOC）等的划分，用于实现节点寻址和数据流控制等功能。还拥有紧急故障检测机制，受影响的节点能自动检测到故障^[6]。

ARINC825 协议除了具有 CAN 总线传统的 ATM（Anyone-to-Many）传输模式，还具有 PTP（Peer-to-Peer）传输模式。ATM 通信的优势在于能够与网络中所有的节点建立持续的数据链接，但是 ATM 需要处理非自身的数据包，增加了接收节点的工作量。PTP 通信允许网络中的一个节点向另一个节点发送数据，实现类似服务器/客户端类型的交互。在网络中同时实现 ATM 和 PTP 两种通信模式，需要网络层具有标识和隔离数据的能力，ARINC825 使用 CAN 的识别符扩展帧的高 3 位作为逻辑通信通道标识，ARINC825 的 PTP 传输模式和 ATM 传输模式的通信数据结构如图 2 所示^[7]。

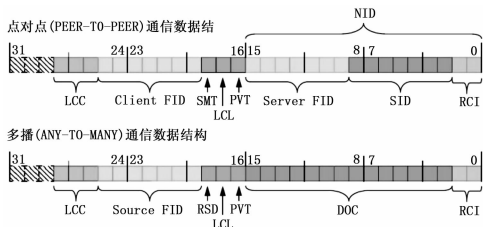


图 2 ARINC825 的通信数据结构

2 系统设计

ARINC825 总线使用冗余信道标识（RCI）标记冗余链路或节点，最多支持四冗余结构。本文设计的通信接口使用并列式双冗余总线架构。主控芯片选择 STM32F207 单片机，内部包含两个 CAN 通信模块，实现 CAN 网络底层的通信功能。应用层的处理控制算法通过软件编程实现。通信接口的硬件原理如图 3 所示。通信接口通过串口与控制面板进行数据通信，将接收到的数据封装为 ARINC825 格式的数据包，发送到双冗余的链路上；ARINC825 总线上传输过来的数据经过解码发给控制面板。通信接口以 10 ms 为周期，进行周期性数据发送，通信速率为 250 kbit/s，用于驾驶舱内部电子系统间的数据通信，通信距离小于 20 m。

2.1 通信接口设计

CAN 通信芯片选择 TJA1050，TJA1050 是一种标准的



图 3 通信接口的硬件原理图

高速 CAN 收发器，可以为总线提供差动发送功能，为 CAN 控制器提供差动接收功能。TJA1050 完全兼容 ISO-11898 标准，最高通信速度 1Mbps，能够满足 ARINC825 通信标准需要。同时，TJA1050 采用 SOI 技术降低电磁干扰，有电源短路保护功能^[8]。

在实际应用中，有可能发生输入端电源不稳定或总线浪涌脉冲，会导致电路中存在高频瞬时干扰，这将会对电路造成很大破坏，如果不加以适当防护就会损坏通信接口，甚至损坏后级电路。对于这种瞬时干扰可以采用隔离的方法加以防护。其次，远程数据通讯通常存在很大的地电位差，该电位差到了发送器的输出上就变成了共模噪声。如果这种噪声过大，就有可能超过接收器的输入共模噪声容限，从而对器件造成损坏。电源隔离模块采用 BS0505，BS0505 是常用的电源隔离模块，具有效率高、体积小、可靠性高、隔离特性好的特点。使用 ADuM1201 双通道数字隔离器，将 CAN 通信芯片和单片机进行隔离，这样即保证没有回路电流，同时也保证电路的安全性，满足航电系统的可靠性要求。CAN 通信接口原理图如图 4 所示。

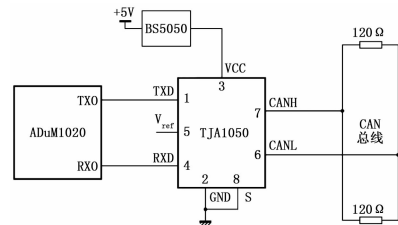


图 4 CAN 通信接口原理图

2.2 冗余电源系统设计

通信接口的电源为了满足航电系统的可靠性要求，保证电源供电的有效可靠，设计使用双电源供电。航电系统一般采用 28 V 直流供电，单片机系统使用 5 V 供电，使用 MP1584 降压型转换器进行电压转换。MP1584 输出 5 V 时，有效的电压输入是 8~28 V。供电电路上串联一个 47 Ω 的限流电阻 R 保证时电流不会过载。考虑到在电源切换时要保证单片机的正常运行，需要保证断电时供电时间需要大于 200 ms，使用电容储能的方式，保证在电源切换时单片机正常工作，初始时刻，电容两端的电压为 28 V，t 时刻后，电容两端电压 U_t 为：

$$U_t = U_{max} \times e^{(-\frac{t}{\tau})} \quad (1)$$

需要保证 $t > 200 \text{ ms}$ ， $U_t > 8 \text{ V}$ ，可以得出电容 C 应大于 339 μF。为保证断电时供电要求，选择 1 000 μF 电容能够完全满足要求。

电源切换电路使用光耦继电器，光耦继电器能够快速

完成电源切换,几乎不产生干扰。光耦继电器最大通过电流为 100 mA。通信接口的工作电流最大不会超过 150 mA,选用双光耦继电器作为电源切换器件,保证系统的正常工作。电源切换电路原理图如图 5 所示。

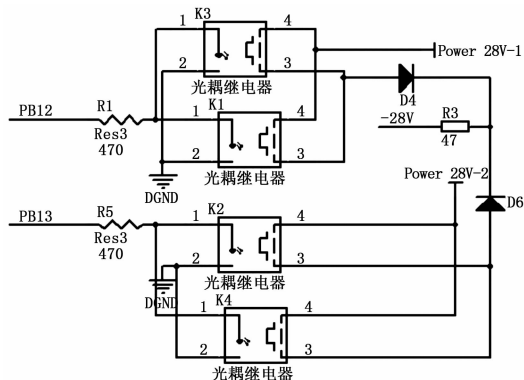


图 5 电源切换电路原理图

使用单片机 STM32F207 内部集成的 AD 转换接口,对直流电源进行分压采样,用于电源电压监控。系统上电后默认使用电源 1,当电源 1 不能满足电源质量 18~30 V 的要求时,单片机控制光耦继电器使能引脚,电源切换到备用电源 2 上。

2.3 通信接口的软件实现

本文使用模块编程来编写通信接口软件程序,包括了输入输出模块、数模转换模块、故障处理模块、通信数据模块、CAN 通信模块。输入输出模块用于控制和显示通信接口的功能状态;数模转换模块主要对电源和主板状态进行监控;故障处理模块完成故障判断和处理功能;通信数据模块功能是对传输的数据进行预处理和对 CAN 通信协议的高层进行修改,使其满足 ARINC825 协议。

在系统工作之前的主要进行功能初始化,对使用的端口进行寄存器配置并使能,需要完成的配置有 GPIO 离散量定义、ADC 数模转换定义、UART 串口通信初始化、ARINC825 通信协议设定、CAN 通信初始化、系统时钟初始化和中断配置。完成系统初始化后,对主、副电源进行检测,如果主电源不满足 18~30V 的电压要求,系统自动切换到备用电源。

2.3.1 ARINC825 信息的冗余发送

控制面板的控制器对面板上的操作进行处理,通过串口将数据传输到通信接口,通信接口对这些数据进行处理后,发送到 ARINC825 总线上。

进行串口数据转为 ARINC825 总线数据时,需要定义一个状态机用于接收处理字符串数据。如图 6 所示,状态机默认状态是 Finished,当接收到起始标志“*”,状态机状态变为 GetHeader,当处在 GetHeader 状态时,如果接收到结束标志“#”就会进入 SAVE_WORKING 状态;SAVE_WORKING 状态会将缓存内的数据存到数组变量中当,处理完成后,状态机状态变为 Finished。数组变量中的数据即是待发送的数据包。通信数据模块为待发送数据

包进行 SN 序列号填充,填充组装完成的数据帧会在两条相互冗余的链路上同时进行发送。数据帧的 SN 序列号由 0 递增至 255,之后再从 0 开始计数。接收端再接收到数据帧时,会检测 SN 序列号,对相同 SN 序列号的数据帧会进行去冗余操作,同时也能够检测出传输过程中丢帧错误。

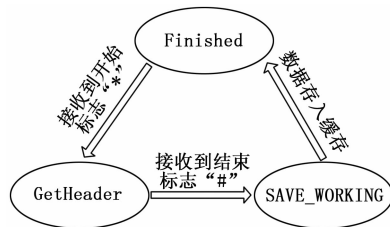


图 6 串口数据接收状态机

2.3.2 ARINC825 信息的冗余接收

ARINC825 总线在接收数据时,需要对并联双冗余通信链路上接收到的数据帧进行 SN 序列号的检查,对出现错误的数据包进行过滤。主控芯片的任意一个 CAN 模块在接收完一帧数据后,会触发通信处理中断。通信时,当一路 CAN 总线通信中断被触发,中断处理程序开始读取数据包,首先会对数据进行完整性校验,如果数据完整,通过 SN 序列号判断是否在冗余通道上收到过此数据,如果不存在,则说明是有效帧,将 SN 序列号记录到内存当中。如果存在,说明此数据帧是冗余数据,对有效载荷内的数据做一致性检测,不通过,则丢弃当前帧。数据接收的程序框图如图 7 所示。

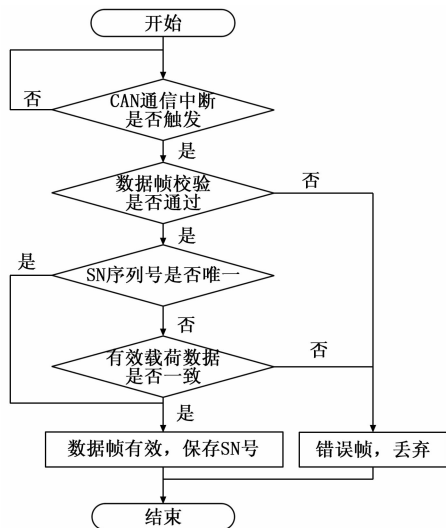


图 7 ARINC825 数据接收程序框图

3 负载分析和测试

3.1 总线负载分析

为了对总线节点进行传输控制,ARINC825 使用“时间触发总线调度”技术。时间触发总线控制基于两个概念,即主时间帧(Major Time Frame)和次时间帧(Minor Time Frame)。主时间帧为总线中所有的周期性消息至少传输一次的时间长度,次时间帧(Minor Time Frame)为总线中

传输频率最大的帧的周期。同一时间帧内的数据帧采用多主竞争发送。只要控制总线中各个节点在次时间帧中的数据发送, 就可以保证总线节点间通信的确定性^[9]。计算总线负载时, 需要选取一个时间片段进行分析, 使用时间间隔最小的次时间帧作 TransmissionInterval 进行计算分析, 能够得出最大的总线负载。ARINC 825 基于 CAN2.0B 通信协议, 使用了 29 位标识符扩展帧, 数据帧长度与有效载荷有关, 计算公式如下:

$$MessageLength[bits] = Overhead[bits] + Payload[bits] + Stuff[bits] + IFS[bits]$$

(2)

在计算数据帧长度时需要考虑填充位, 其计算公式如下:

$$Stuff[bits] = \frac{54 + 8 \times DLC - 1}{4} - 2$$

(3)

有效载荷与数据帧长度的计算结果如表 1 所示。

总线负载计算公式如下:

$$BusLoad = \left\{ \frac{\sum (MessageLength \times NumMessage)}{TransmissionInterval \times DataRate} \right\} \times 100\%$$

(4)

表 1 数据帧长度计算值

有效载荷(Bytes)	数据帧长度(bits)
0	79
1	89
2	99
3	109
4	119
5	128
6	139
7	149
8	158

NumMessages 指此时间段内的消息帧传输次数。TransmissionInterval 指所选时间段的时间长度。DataRate 指总线传输速率, 单位 bit/s。总线负载计算公式仅用于周期性消息帧的负载计算, 非周期性消息帧的负载计算需要先将其等效转换为周期性消息, 再进行计算^[10]。

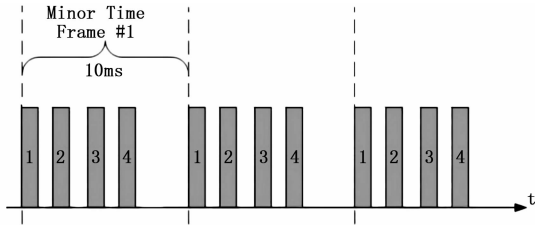


图 8 时间触发总线调度机制的时序原理图

如图 8 所示, 本文设计的通信接口需要每 10 ms 进行一次数据帧的传输, 设计的通信速率为 250kbit/s。总线上同时会有 4 个 ARINC825 节点进行数据通信, 采用短帧结构, 有效载荷为 8 bit。总线负载使用公式 (4) 进行计算得:

$$\left\{ \frac{158bits \times 4}{0.01s \times 250kbits/s} \right\} \times 100\% = \frac{632}{2500} \times 100\% = 25.28\%$$

ARINC825 协议的最大带宽利用率在理想的情况下可

以达到 80% 以上, 考虑到事件消息和错误帧可能需要额外的总线带宽, 设计时应预留一部分总线带宽, 建议的总线负载不超过 50%^[11]。本文设计的总线接口速率完全能够满足通信要求, 如果需要扩展节点数量, 此设计下最大的节点数量不应该超过 8 个。如果有更多的节点需求, 就需选择更高的总线通信速率或者进行节点分网。

3.2 通信接口的验证

选用 4 个通信接口设备组成 4 节点 ARINC825 通信网络组成验证平台, 将测试用控制面板接入通信接口模块上, 使用 28 V 直流电源为系统供电。使用 CAN 网络分析仪接收 ARINC825 网络的数据包, 通过 USB 连接到计算机的上位机, 监视通信数据。测试用的控制面板为按键键盘, 按下相应的按键, 会触发控制面板的按键中断, 通过串口将按下的键位发送给通信接口模块, 通信接口将位置编码到 ARINC825 数据包的有效载荷内, 通过计算机上位机观察是否接收到相应的指令, 验证 ARINC825 通信接口是否正常工作。实验结果如图 9 所示。

序号	传输方向	时间标识	帧类型	帧格式	帧ID	数据长度	数据
2267	接受	10:54:14:923	数据帧	扩展帧	08330045	8	18 1E 00 00 00 00 00
2268	接受	10:54:14:927	数据帧	扩展帧	08330045	8	19 1E 00 00 00 00 00
2269	接受	10:54:14:939	数据帧	扩展帧	08330045	8	1a 1E 00 00 00 00 00
2270	接受	10:54:14:955	数据帧	扩展帧	08330045	8	1b 1E 00 00 00 00 00
2271	接受	10:54:14:959	数据帧	扩展帧	08330045	8	1c 1E 00 00 00 00 00
2272	接受	10:54:14:971	数据帧	扩展帧	08330045	8	1d 1E 00 00 00 00 00
2273	接受	10:54:14:974	数据帧	扩展帧	08330045	8	1e 1E 00 01 00 00 00
2274	接受	10:54:14:987	数据帧	扩展帧	08330045	8	1F 1E 00 00 00 00 00
2275	接受	10:54:15:006	数据帧	扩展帧	08330045	8	20 1E 00 00 00 00 00
2276	接受	10:54:15:010	数据帧	扩展帧	08330045	8	21 1E 00 00 00 00 00
2277	接受	10:54:15:019	数据帧	扩展帧	08330045	8	22 1E 00 00 00 00 00
2278	接受	10:54:15:035	数据帧	扩展帧	08330045	8	23 1E 00 00 00 00 00
2279	接受	10:54:15:039	数据帧	扩展帧	08330045	8	24 1E 00 00 00 00 00
2280	接受	10:54:15:051	数据帧	扩展帧	08330045	8	25 1E 00 00 00 00 00
2281	接受	10:54:15:057	数据帧	扩展帧	08330045	8	26 1E 00 00 00 00 00
2282	接受	10:54:15:067	数据帧	扩展帧	08330045	8	27 1E 00 00 00 00 00

图 9 测试接收数据

实验选取其中帧 ID 为 0833045 数据帧进行分析, 上位机软件能够定时接收到此设备发送过来的数据帧, 在按下测试用控制面板的相应按键后, 上位机软件立即接收到相应的数据帧。通过比较每个数据帧之前 SN 序列号, 依次为连续递增, 表示数据没有发生丢失。

导出捕获的 ARINC825 网络数据包, 统计时间标识, 计算每个数据帧的时间间隔, 如表 2 所示。

表 2 时间标识与时间间隔

序号	时间标识	时间间隔(ms)
1	10:53:52:490	
2	10:53:52:498	8
3	10:53:52:507	9
4	10:53:52:518	11
5	10:53:52:527	9
6	10:53:52:539	12
7	10:53:52:545	6
8	10:53:52:555	10
...

通过统计计算 1000 个数据帧的时间间隔, 得出平均时间间隔为 9.6 ms, 数据帧的时间间隔波动是由于 ARINC825 总线存在多个发送节点, 节点间存在总线竞争, 当总线被其他节点占用时, 此设备会自动竞争下一个总线

使用权限,通过“时间触发总线调度”机制可以保证 10 ms 的周期发送要求。

4 结束语

本文基于 ARINC825 协议设计一套双冗余的通信接口设备,使用冗余供电,数据冗余收发保证设备的可靠性。通过“时间触发总线调度”技术进行传输控制,保证总线负载不超过设计值。通过实验表明设计的通信接口设备能够满足驾驶舱控制面板通信。对于 ARINC825 总线技术应用用于驾驶舱控制面板间的数据通信具有实际意义。

参考文献:

- [1] 吴建民,吴铭望,李国经.大型客机航空电子系统研发关键技术分析及建议[J].航空制造技术,2008(16):46-49.
- [2] Ralph Knueppel. Standardization of CAN networks for airborne use [A]. ARINC825iCC Conference [C]. 2012.
- [3] 张鹏宇.基于 ARINC825 的飞机数字化驾舱容错控制系统[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

~~~~~

(上接第 194 页)

用 3D 打印技术的优势<sup>[10]</sup>,可以进行加工制作,这样就能得到更高的场强。

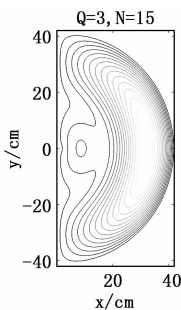


图 6 梯度线圈绕线分布

根据实验结果,综合考虑线圈储能和线圈能耗的因素,当线圈匝数为 13 匝,基函数分量个数为 3 时,通过仿真数据后处理计算得线圈电阻为  $0.159\ 4\ \Omega$ ,电感为  $0.066\ 27\ \text{mH}$ ,磁场梯度为  $26\ \text{mT/m}$ 。

#### 4 结论

对于本文采用目标场方法设计的梯度线圈,由于将电流密度函数展开为三角函数,并且采用流函数方法进行线圈离散化得到绕线分布,其电流密度基函数分量个数和线圈匝数以及线圈储能和线圈功率,都会对梯度线圈的性能产生影响,需要通过前期仿真实验综合考虑多种因素来确定设计参数的最优值,满足实际需求。

通过以上的仿真分析结果可知,所设计的梯度线圈产生的磁感应强度在 DSV 内具有良好的线性和均匀性,可满足实际设计要求,对梯度线圈的设计优化具有较好的理论和实践指导意义。通过适当修改相关参数,可以得到适应不同应用要求的梯度线圈模型,为梯度线圈的应用提供依据。结合 3D 打印技术,进行梯度线圈的制作。

- [4] 范天慈. 机载综合显示系统 [M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [5] 胥清华,李强. CAN 总线发展与其他总线的比较 [J]. 电气技术,2011(7):46-49.
- [6] AEEC. ARINC 825-2 General standardization of CAN (Controller Area Network) bus protocol for airborne use [S]. Maryland: Aeronautical Radio INC 2014.
- [7] ARINC specification 825-1 [S]. The AEEC Executive Committee, 2010.
- [8] 黄辉,范雪月,张明. CAN 总线接口设计与应用 [J]. 轻工科技,2013,29(1):61-62.
- [9] Leen G, Heffernan D. TTCAN: a new time-triggered controller area network [J]. Microprocessors & Microsystems, 2002, 26(2):77-94.
- [10] 冯源,窦海丽. CAN 总线在航空领域应用的探讨 [J]. 航空工程进展,2011,2(2):232-234.
- [11] 林琦,金惠华,尚利宏. CANaerospace 协议实时性分析与研究 [J]. 航空电子技术,2007(4):16-22.

涡流问题对成像质量也有较大的影响,本文采用增加抗涡流板的无缘屏蔽方式,可在一定程度上减小涡流。但是抗涡流板不能完全将线圈和主磁体阻隔,仍然会对成像带来影响。另一种解决方式是有缘屏蔽,采用自屏蔽梯度线圈,即在梯度线圈的外面添加一组电流方向与其相反的线圈,使得屏蔽区域以外的磁场强度为零。这种设计方式将在接下来的研究中进行实验,从而设计出更好的梯度线圈系统。

#### 参考文献:

- [1] Robert W. Brown, Yu-Chung N. Cheng, E. Mark Haacke. Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design [M]. Wiley-Liss, 2014.
- [2] 倪光正. 工程电磁场原理 [M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [3] Turner R. A target field approach to optimal coil design [J]. IEEE Trans. on Applied Physics, 1986, 19(8):147-151.
- [4] Yoda K. Analytical design of self-shielded planar coils [J]. Journal of Applied Physics, 1990, 67(9):4349-4353.
- [5] 平学伟. 一种横向梯度线圈及其制作方法 [P]. 中国专利:201410393779. 8, 2014-12-10.
- [6] 岳振华,王超,彭卫平等. 梯度线圈及其部件的制作方法 [P]. 中国专利:201510041240. 0, 2015-01-27.
- [7] 赵延文,郭绍伟,臧春艳等. 基于 Comsol 的变压器绕组短路力分布研究 [J]. 华北电力技术,2017(1):40-44.
- [8] Zhang R, Xu J, Fu Y, et al. An optimized target-field method for MRI transverse biplanar gradient coil design [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(12):1863-1868.
- [9] 王刚,安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真 [M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [10] 朱建明,窦建辉,陈一炜. 一种平板式梯度线圈 [P]. 中国专利:201720373458, 2017-10-27.