

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200710062756.9

G05B 11/32 (2006.01)  
G05B 19/042 (2006.01)  
G05B 19/418 (2006.01)  
H02P 6/00 (2006.01)  
G05B 9/03 (2006.01)

[45] 授权公告日 2008 年 12 月 3 日

[11] 授权公告号 CN 100440079C

[22] 申请日 2007. 1. 16

[21] 申请号 200710062756.9

[73] 专利权人 北京航空航天大学

地址 100083 北京市海淀区学院路 37 号  
北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院

[72] 发明人 郭宏 蔚永强 邢伟 王巍  
张秦岭

[56] 参考文献

US5463545A 1995. 10. 31

JP2004 - 194490A 2004. 7. 8

US2003/0052638A1 2003. 3. 20

CN1426920A 2003. 7. 2

DSP 在无刷直流电动机伺服系统中的应用.  
任海鹏等. 微电机, 第 33 卷第 2 期. 2000

高可靠三余度数字式作动器控制器设计与实现. 靳红涛等. 北京航空航天大学学报, 第 32 卷第 5 期. 2006

航空发动机双余度智能位置控制器设计. 崔勇等. 推进技术, 第 26 卷第 6 期. 2005

基于 DSP 的双余度永磁无刷直流电动机控制系统. 顾福深等. 电气传动, 第 36 卷第 6 期. 2006

双余度无刷直流电机控制系统. 刘卫国等. 电气技术, 第 7 期. 2006

审查员 曲丹

[74] 专利代理机构 北京慧泉知识产权代理有限公司

代理人 王顺荣 唐爱华

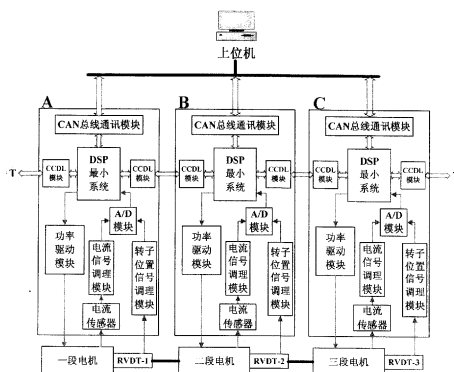
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 7 页

[54] 发明名称

直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器

[57] 摘要

本发明一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器, 在余度结构上采用同构型三通道形式; 控制结构上采用三余度线性差动式旋转变压器及电流传感器为传感器, 实现系统的位置环和电流环的双闭环控制; 各通道均由数字信号处理器 (DSP) 最小系统、控制器区域网总线通讯模块、交叉通道数据链模块、电流信号调理模块、转子位置调理模块、A/D 模块、功率驱动模块等组成, 三通道间由交叉通道数据链模块连接进行数据通讯; DSP 最小系统模块接收上位机的控制角度指令, 对采集到的传感器信号进行分析、运算处理, 然后发送相应的控制信号, 驱动电动机工作, 并向上位机传递信息, 同时对整个电动机驱动控制器进行余度管理。



1、一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：它在余度结构上采用同构型三通道型式，控制结构上采用三余度线性差动式旋转变压器及电流传感器实现系统的位置环和电流环的双闭环控制；各通道均由数字信号处理器最小系统、控制器区域网总线通讯模块、交叉通道数据链模块、电流信号调理模块、转子位置信号调理模块、A/D 模块、功率驱动模块组成，三通道间由交叉通道数据链模块连接进行数据通讯；数字信号处理器最小系统模块接收上位机的控制角度指令，对采集到的电动机绕组电流和转子位置进行分析、运算处理，然后发送相应的控制信号，使电动机按要求指令工作，以及向上位机传递信息，同时还要对整个电动机驱动控制器进行余度管理；控制器区域网总线通讯模块是上位机与电动机驱动控制器之间信息传递的通道，交叉通道数据链模块是用来实现三余度电动机驱动控制器内部三通道之间的数据传递；电流信号调理模块对电动机绕组的电流信号进行调理，转子位置信号调理模块提供线性差动式旋转变压器所要求的频率和幅值交流激磁电压，并将线性差动式旋转变压器输出的交流电压调理成直流电压信号；A/D 模块接收调理后的模拟信号转化为数字信号传送给数字信号处理器最小系统进行处理；功率驱动模块对数字信号处理器最小系统的控制信号进行功率放大以驱动电动机，它接收数字信号处理器最小系统的脉宽调制信号，并通过光耦隔离以及驱动放大后转换为三相功率桥的栅极驱动信号，由三相功率桥驱动电动机运行。

2、根据权利要求1所述的一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：该余度结构特征为：采用同构型通道，即构成直接驱动式三余度无刷直流力矩电动机有限转角驱动控制器的三个冗余单元结构完全相同，每个通道都具有独立工作，完成同样指令的功能，三通道间采用主动并列运行方式。

3、根据权利要求1所述的一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：该控制结构特征为：采用由位置环和电流环构成的双闭环控制结构，无需转速传感器，能够实现电动机在有限转角范围内的直接驱动控制。

4、根据权利要求1所述的一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：该数字信号处理器最小系统特征为：

(1) 数字信号处理器最小系统主要包括数字信号处理器芯片 TMS320LF2407A、扩展的 64K 程序存储器、64K 数据存储器 and 仿真接口等；

(2) 为外接的多路高速 A/D 转换器实现控制逻辑的接口时序；

(3) 通过解算电动机绕组电流、转子位置和采用控制算法调整脉宽调制信号的宽度来控制

制功率管的开关时间；

(4) 分析和表决所接收交叉通道数据链模块的数据，以判别是否出现故障，并采取相应处理解决方法；

(5) 利用自带的控制器区域网控制器模块，并外接控制器区域网收发器，以实现与上位机的通讯。

5、根据权利要求 1 所述的一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：该 A/D 模块特征为：选用 AD7891-1 作为外接 A/D 转换器，它是 8 通道 12 位具有 454.5kSPS 采样速率的高速数据采集系统，各通道输入测量电压范围为-10V~+10V。

6、根据权利要求 1 所述的一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：该电流信号调理模块特征为：利用运放 OP27 对闭环霍尔电流传感器的输出进行调理。

7、根据权利要求 1 所述的一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：该转子位置信号调理模块特征为：利用线性差动式旋转变压器实现对电动机转子位置的测量；通过利用 AD698 电路产生线性差动式旋转变压器的激磁交流电压并对线性差动式旋转变压器输出进行调理。

8、根据权利要求 1 所述的一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：该交叉通道数据链模块特征为：

(1) 采用独立控制器区域网总线控制器 SJA1000 来实现电动机驱动控制器内部三通道间的通讯，通过扩展两路控制器区域网总线通讯模块以实现交叉通道数据链；

(2) 利用逻辑门阵列来生成满足控制器区域网总线控制器时序要求的信号，再通过双向总线驱动器以解决总线不兼容；

(3) 利用高速控制器区域网总线收发器解决接口问题，并在控制器区域网总线控制器与收发器之间采用高速光耦，以实现电气隔离，增强数据通信的抗干扰性和可靠性。

9、根据权利要求 1 所述的一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其特征在于：该功率驱动模块特征为：

(1) 对于数字信号处理器最小系统输出的 PWM 信号，采用 HCPL-2531 高速双光耦隔离；

(2) 隔离后的脉宽调制信号经过驱动电路以及三相功率桥电路驱动电动机。

## 直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器

### 一、技术领域

本发明涉及一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，属于电动机自动控制技术领域。

### 二、背景技术

由于无刷直流电动机具有体积小、重量轻、控制性能好、无火花干扰、效率高等优点，使其在航空航天、医疗器械、工业自动化等众多领域的具有更广泛的应用前景。而无刷直流电动机不通过减速机构直接驱动负载的控制模式以及余度管理技术的应用，是一个重要的发展方向，尤其是在航空航天等对动态性能、精度和可靠性要求较高的领域。

现有的无刷直流电动机位置伺服驱动控制器普遍采用三环结构，即位置环、速度环、电流环。电流环和速度环的作用是提高系统的刚度来抑制系统的非线性及外部扰动，位置环来保证控制系统的精度。但是这种三环系统也有明显的缺点，即对控制作用的响应较慢。这将极大的影响有限转角下电动机的控制性能。

现有的无刷直流电动机驱动控制器普遍采用模拟信号进行数据传递，这样导致系统的抗干扰能力不强，还增加了额外的 A/D、D/A 环节。

现有的无刷直流电动机驱动控制器普遍无余度结构及余度管理技术的应用，极大的影响了系统的安全性和可靠性。

### 三、发明内容

本发明一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器，其目的在于：克服现有无刷直流电动机驱动控制器的不足，提供一种动态性能好、精度高、抗扰能力强、可靠性高的直接驱动式三余度无刷直流力矩电动机有限转角驱动控制器。

本发明的工作原理是：采用三余度结构和双闭环控制，以 DSP 最小系统为核心，通过 CAN 总线通讯模块接收上位机的控制指令，对采集到的电动机绕组电流和转子位置进行分析，并根据一定的控制算法进行运算处理，然后发送相应的 PWM 控制信号，经过功率驱动模块驱动电动机在有限转角范围内工作，同时利用 CCDL 模块对整个电动机驱动控制器进行余度管理。

本发明的技术解决方案是：直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器在余度结构上采用同构型三通道型式；控制结构上采用三余度线性差动式旋转变压器 (RVDT) 及电流传感器实现系统的位置环和电流环的双闭环控制；各通道均由数字信号处理器 (DSP) 最小系统、控制器区域网 (CAN) 总线通讯模块、交叉通道数据链 (CCDL) 模块、电流信号调理模块、转子位置调理模块、A/D 模块、功率驱动模块等组成，三通道间由 CCDL 模块连接进行数据通讯；DSP 最小系统模块接收上位机的控制角度指令，对采集到的电动机绕组电流和转子位置进行分析、运算处理，然后发送相应的控制信号，使电动机按要求指令工作，以及向上位机传递信息，同时还要对整个电动机驱动控制器进行余度管理；CAN 总线通讯模块是上位机与电动机驱动控制器之间信息传递的通道，CCDL 模块是用来实现三余度电动机驱动控制器内部三通道之间的数据传递；电流信号调理模块对电动机绕组的电流信号进行调理，转子位置信号调理模块提供 RVDT 传感器所要求的频率和幅值交流激磁电压，并将 RVDT 输出的交流电压调理成直流电压信号；A/D 模块接收调理后的模拟信号转化为数字信号传送给 DSP 最小系统进行处理；功率驱动模块对 DSP 最小系统的控制信号进行功率放大以驱动电动机，它接收 DSP 最小系统的脉宽调制 (PWM) 信号，并通过光耦隔离以及驱动放大后转换为三相功率桥的栅极驱动信号，由三相功率桥驱动电动机运行。

其中，该余度结构特征为：

采用同构型通道，即构成直接驱动式三余度无刷直流力矩电动机有限转角驱动控制器的三个冗余单元结构完全相同，每个通道都具有独立工作，完成同样指令的功能。三通道间采用主动并列运行方式。

其中，该控制结构特征为：

采用由位置环和电流环构成的双闭环控制结构，无需转速传感器，能够实现电动机在有限转角范围内的直接驱动控制。

其中，该 DSP 最小系统特征为：

(1) DSP 最小系统主要包括 DSP 芯片 TMS320LF2407A、扩展的 64K 程序存储器、64K 数据存储器 and 仿真接口等。

(2) 为外接的多路高速 A/D 转换器实现控制逻辑的接口时序。

(3) 通过解算电动机绕组电流、转子位置和采用控制算法调整 PWM 信号的宽度来控制功率管的开关时间。

(4) 分析和表决所接收 CCDL 模块的数据，以判别是否出现故障，并采取相应处理解决方法。

(5) 利用自带的 CAN 控制器模块，并外接 CAN 收发器，以实现与上位机的通讯。

其中，A/D 模块及电流、转子位置信号调理模块特征为：

(1) 选用 AD7891-1 作为外接 A/D 转换器, 它是 8 通道 12 位具有 454.5kSPS 采样速率的高速数据采集系统, 各通道输入测量电压范围为-10V~+10V。

(2) 利用运放 OP27 对闭环霍尔电流传感器的输出进行调理。

(3) 利用 RVDT 实现对电动机转子位置的测量。通过利用 AD698 电路产生 RVDT 的激磁交流电压并对 RVDT 输出进行调理。

其中, 该 CCDL 模块特征为:

(1) 采用独立 CAN 总线控制器 SJA1000 来实现电动机驱动控制器内部三通道间的通讯, 通过扩展两路 CAN 总线模块以实现 CCDL。

(2) 利用 GAL 来生成满足 CAN 总线控制器时序要求的信号, 再通过双向总线驱动器以解决总线不兼容。

(3) 利用高速 CAN 总线收发器解决接口问题, 并在 CAN 总线控制器与收发器之间采用高速光耦, 以实现电气隔离, 增强数据通信的抗干扰性和可靠性。

其中, 该功率驱动模块特征为:

(1) 对于 DSP 输出的 PWM 信号, 采用 HCPL-2531 高速双光耦隔离。

(2) 隔离后的 PWM 信号经过驱动电路以及三相功率桥电路驱动电动机。

本发明一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电动机有限转角驱动控制器, 其优点在于:

(1) 实现了三余度结构及余度管理技术的应用, 极大的提高了系统的可靠性。(2) 采用双闭环控制结构实现电动机在有限转角范围内的直接驱动控制, 无需转速传感器, 并提高了系统的动态性能。(3) 采用 CAN 总线通讯方式简化了电路, 提高了抗干扰能力。(4) 采用 DSP 芯片 TMS320LF2407A 可以快速实现比较复杂的控制算法, 满足系统实时性要求, 而且调试灵活方便。

#### 四、附图说明

图 1 为本发明的整体结构框图;

图 2A 与图 2B 为本发明的单通道的 CCDL 模块电路;

图 3A 与图 3B 为本发明的单通道的转子位置信号调理模块电路;

图 4 为本发明的单通道的电流信号调理模块电路;

图 5 为本发明的单通道的 A/D 模块电路;

图 6 为本发明的单通道的功率驱动模块电路。

#### 五、具体实施方式

下面结合附图对本发明作进一步说明。

如图 1 所示, 本发明一种直接驱动式三余度无刷直流力矩电机有限转角驱动控制器, 是由三个完全相同的通道构成; 各通道均由 DSP 最小系统、CAN 总线通讯模块、CCDL 模块、电流信号调理模块、转子位置信号调理模块、A/D 模块、功率驱动模块等组成; 三通道间由 CCDL 模块连接进行数据通讯; 各通道与上位机之间通过 CAN 总线通讯模块进行数据通讯; 各通道通过功率驱动模块与各段电动机的三相绕组连接; 利用 RVDT 及电流传感器实现系统的位置环和电流环的双闭环控制。

如图 2A 和图 2B 所示, D7-D0 为 DSP 最小系统的低 8 位数据总线; A0、A12、A14、A15 为 DSP 最小系统的 16 位地址总线的其中 4 位; IS、WE、RD、R/W、STRB 为 DSP 最小系统的时序控制信号; INT1、INT2 为 CAN 总线通讯模块中的 CAN 总线控制器 SJA1000 传送给 DSP 最小系统的中断指令信号; CANHB 与 CANLB、CANHC 与 CANLC 为两路 CAN 总线通讯接口, 分别与另外两个通道的 CCDL 模块相连。单通道的 CCDL 模块由扩展的两路 CAN 总线模块构成; 每个 CAN 总线模块都是以 CAN 总线控制器 SJA1000 为核心, 由 CAN 总线收发器 PCA82C250 连接到 CAN 总线; CAN 总线控制器与 CAN 总线收发器之间采用高速光耦 6N137 实现电气隔离, 增强数据通信的抗干扰性和可靠性; 利用 GAL16V8 来生成满足 CAN 总线控制器时序要求的控制信号, 再通过双向总线驱动器 SN74LVCC4245A 以实现 DSP 最小系统与 CAN 总线控制器之间信号电平的转换。

如图 3A 所示, EXC2、EXC1 为 RVDT 的交流激磁电压信号; AIN+、AIN- 为 RVDT 的副边交流电压输出信号; ANGLE 为经过解调后的转子位置信号。AD698 芯片产生交流激磁电压 EXC1、EXC2 通过管脚 2、3 输出, 与 RVDT 的原边相连。RVDT 的副边交流电压输出 AIN+、AIN- 通过管脚 16、15 连接到 AD698, 通过 AD698 将该交流信号调理为-10V~+10V 的直流信号, 以匹配 A/D 输入量程; 并利用运放 OP27 跟随输出以提高信噪比, 见图 3B。

如图 4 所示, CRT\_HALL 为电流传感器 (见图 6B) 的输出信号; CRT 为调理后的电流信号。芯片 U8 为运放 OP27, 用来跟随外部标准电压源产生的 2.5V 标准电平。芯片 U7 也是运放 OP27, 用来对信号 CRT\_HALL 进行电平转换、信号放大以及滤波处理, 从而生成输出信号 CRT。

如图 5 所示, ANGLE、CRT 分别为调理后的转子位置、电流信号; AD\_WR、AD\_RD、AD\_CS、AD\_CONVST 为 A/D 转换器 AD7891-1 的时序控制信号; D11-D0 为 A/D 转换器与 DSP 最小系统之间的 12 位数据总线。A/D 转换器 AD7891-1 是 8 通道、12 位、具有 454.5kSPS 采样速率的高速 A/D 转换芯片, 各输入通道电压测量范围为-10V~+10V。利用 DSP 芯片 TMS320LF2407A 的 I/O 口实现对 AD7891-1 的访问控制; SN74LVCC4245A 为总线驱动器, 以实现 DSP 芯片与 AD7891-1 之间的信号电平转换。

如图 6A 所示, PWM11、PWM22、PWM33、PWM44、PWM55、PWM66 为 DSP 最小系统输出的

六路 PWM 控制信号，通过三片光耦 HCPL-2531 隔离后分别成为信号 HIN1、LIN1、HIN2、LIN2、HIN3、LIN3，这六个信号作为 MOSFET 驱动芯片 IR2136 的输入，经 IR2136 功率放大和插入死区形成三相功率桥的驱动信号 H01、L01、H02、L02、H03、L03。如图 6B 所示，三相功率桥的六个驱动信号 H01、L01、H02、L02、H03、L03 分别驱动三相功率桥的六个 MOSFET Q1~Q6，MOSFET 采用美国 IR 公司的 IRF540N。电流传感器 LTS6-NP 串在三相功率桥的直流母线上，用来实时测量母线电流，CRT\_HALL 为电流传感器的输出信号，电流传感器采用 LEM 公司的闭环霍尔电流传感器 LTS6-NP；三相功率桥的 A、B、C 端分别与电动机的三相接线端子相连。



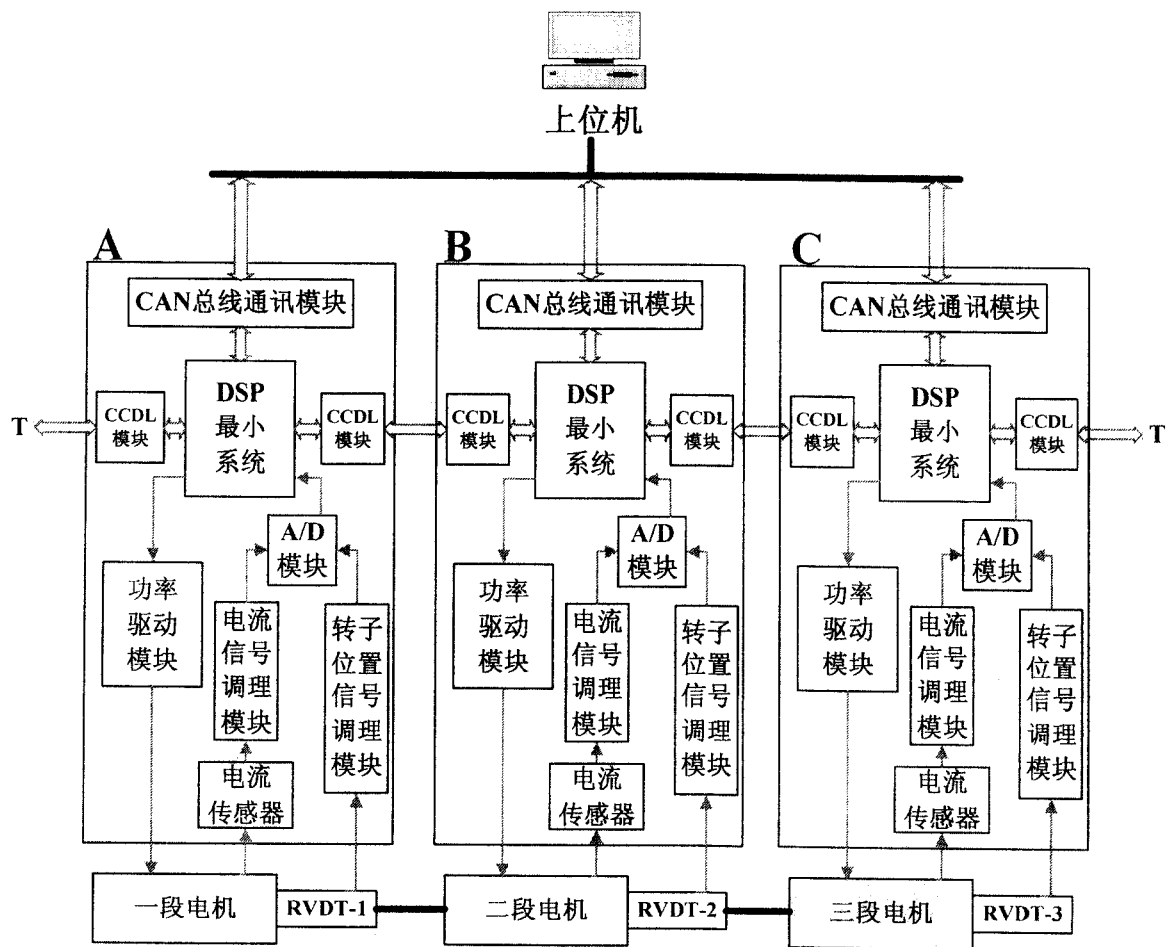


图 1

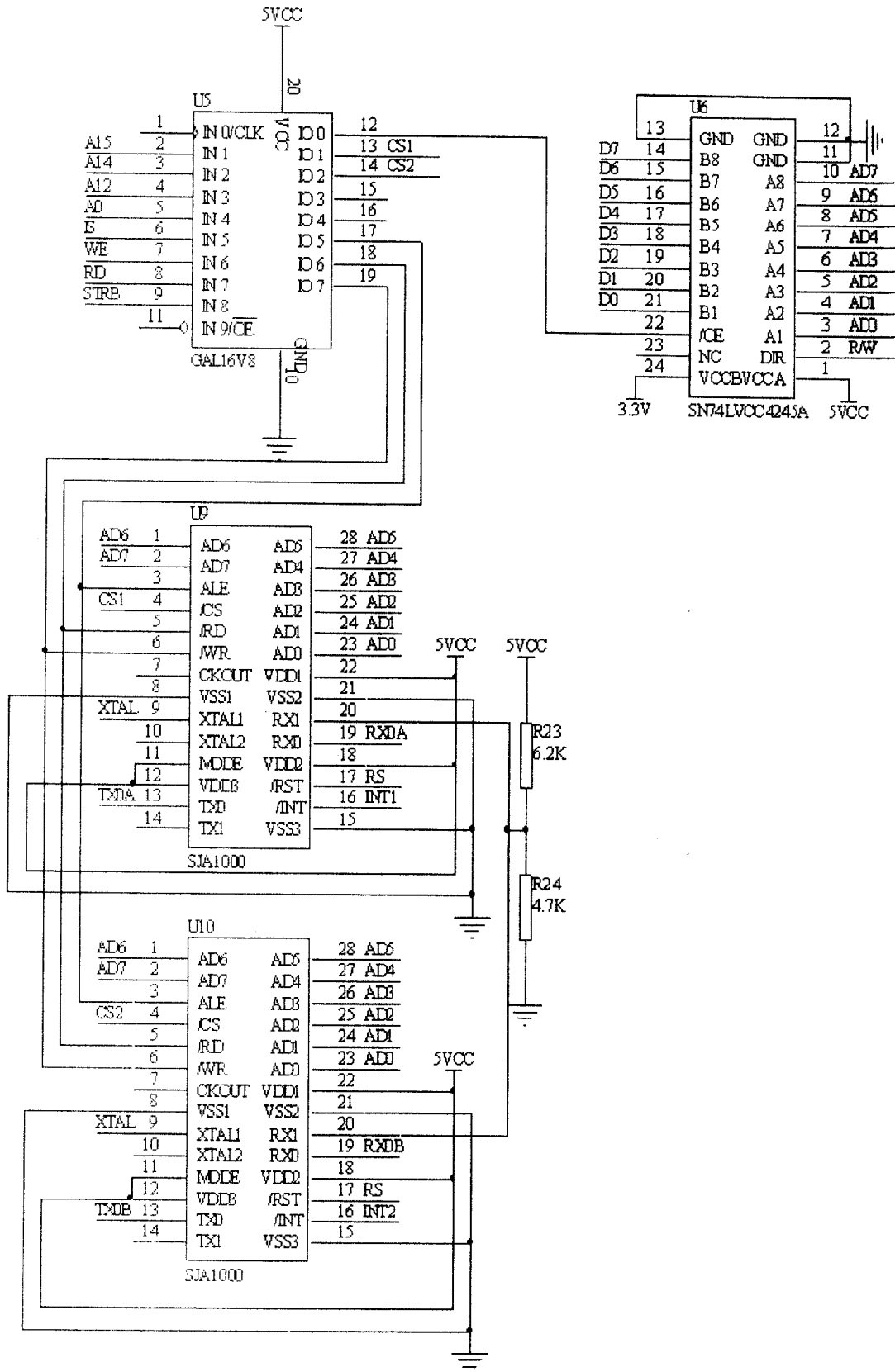


图 2A

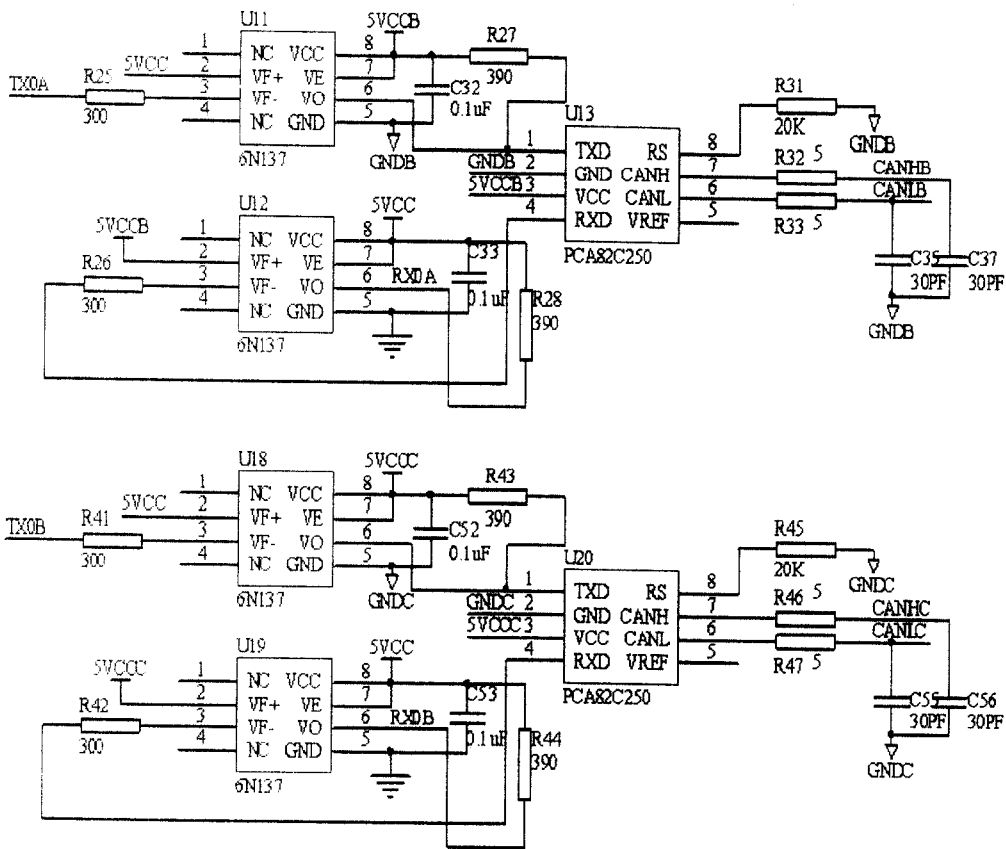


图 2B

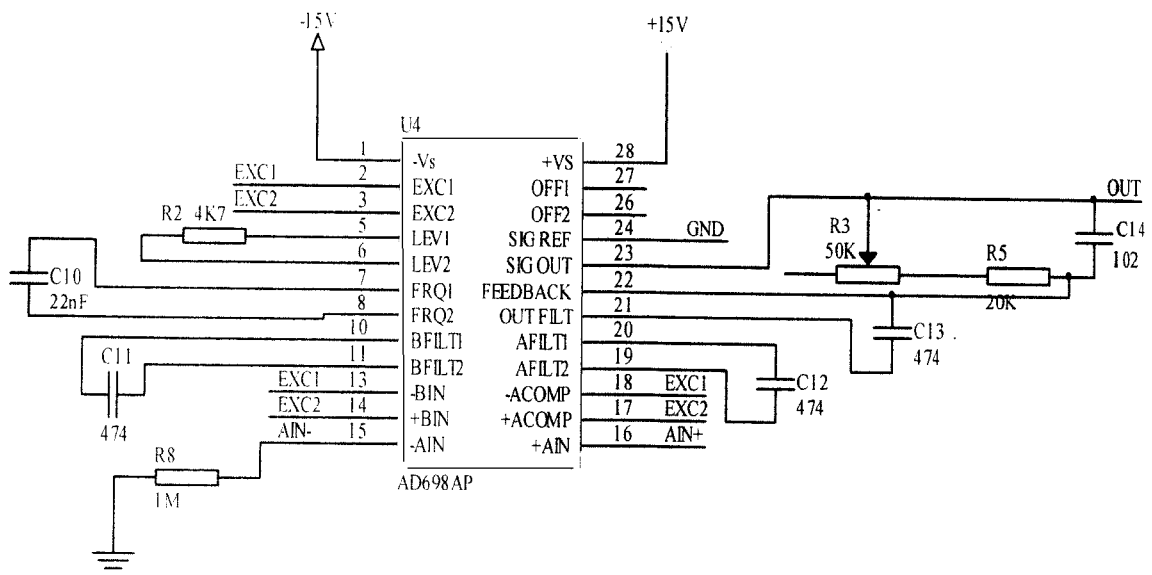


图 3A

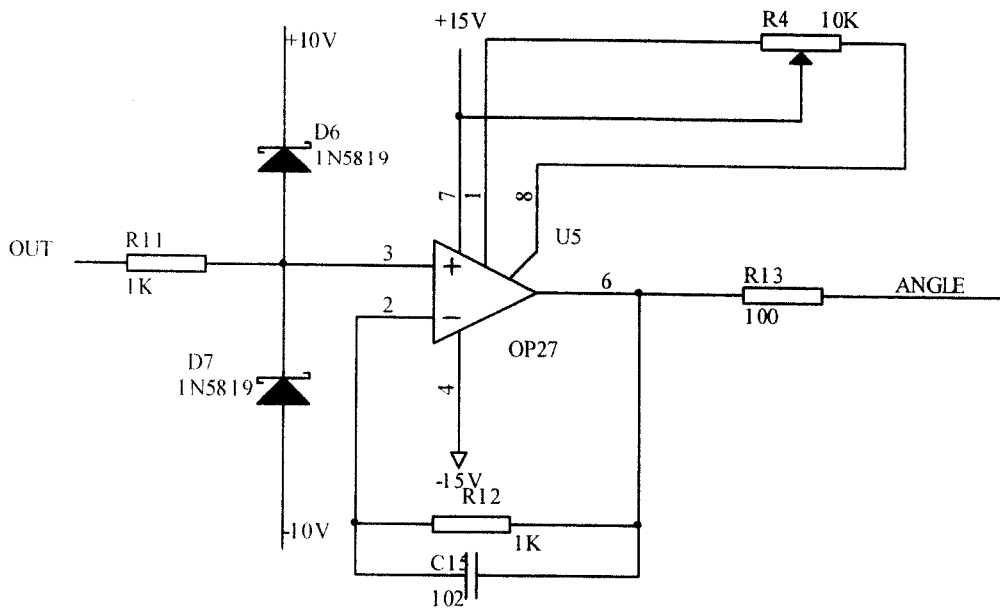


图 3B

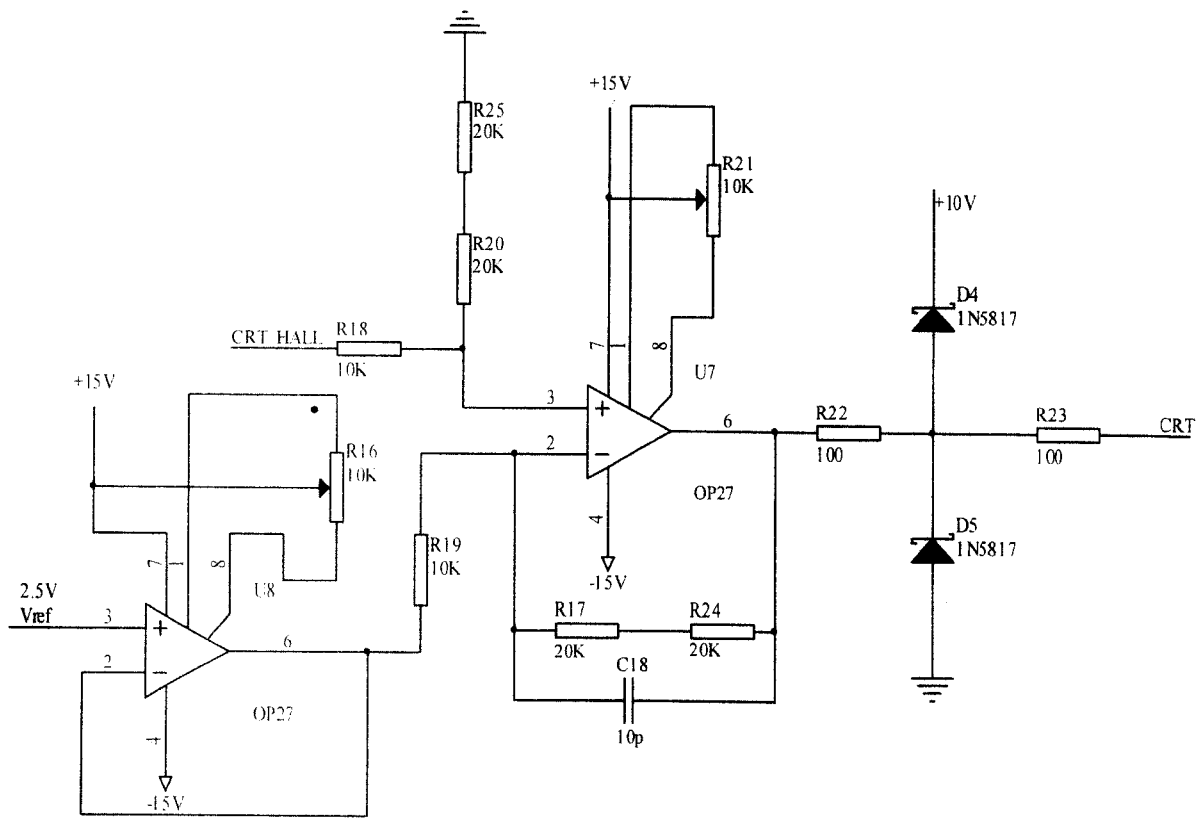


图 4

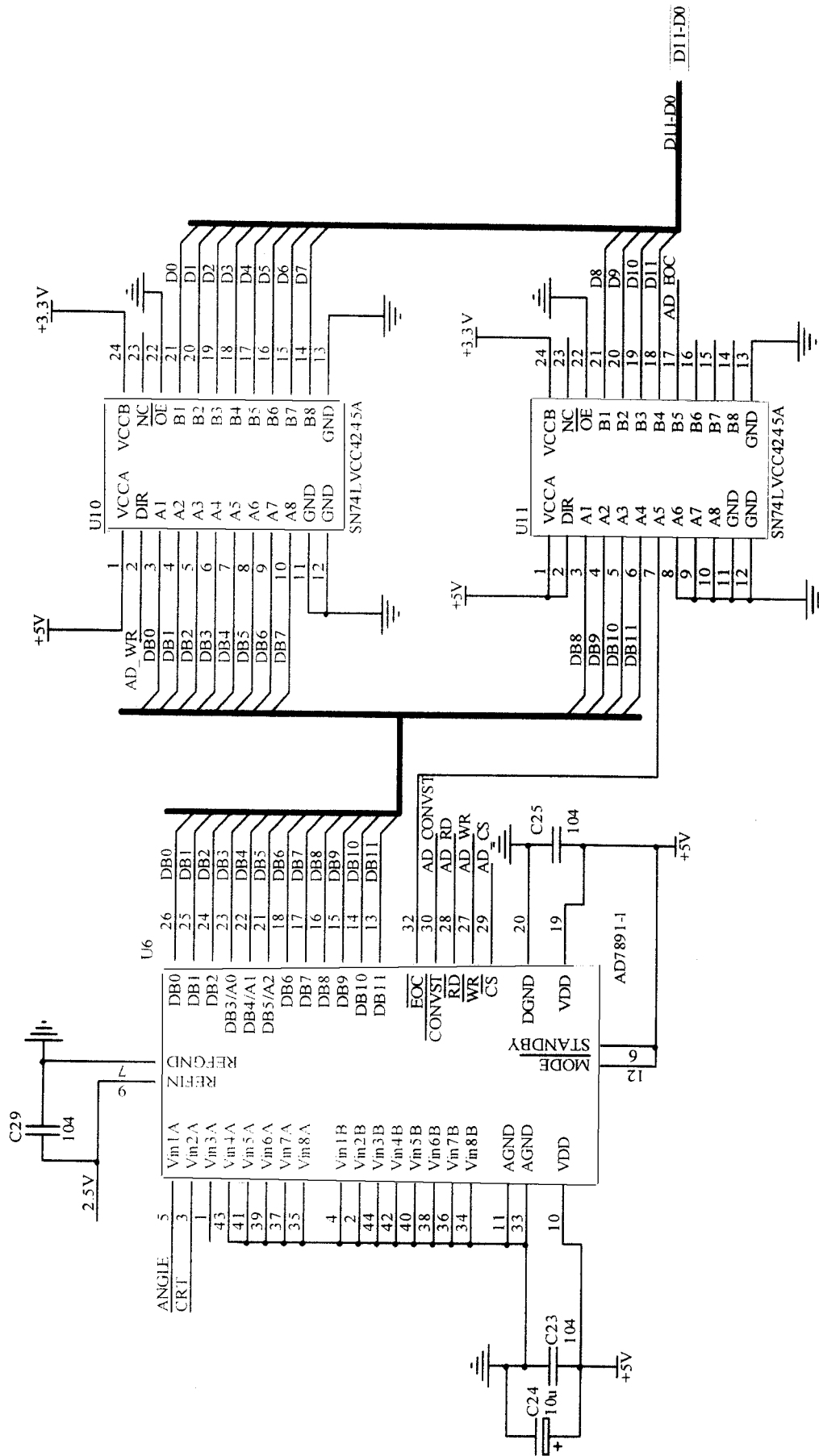


图 5

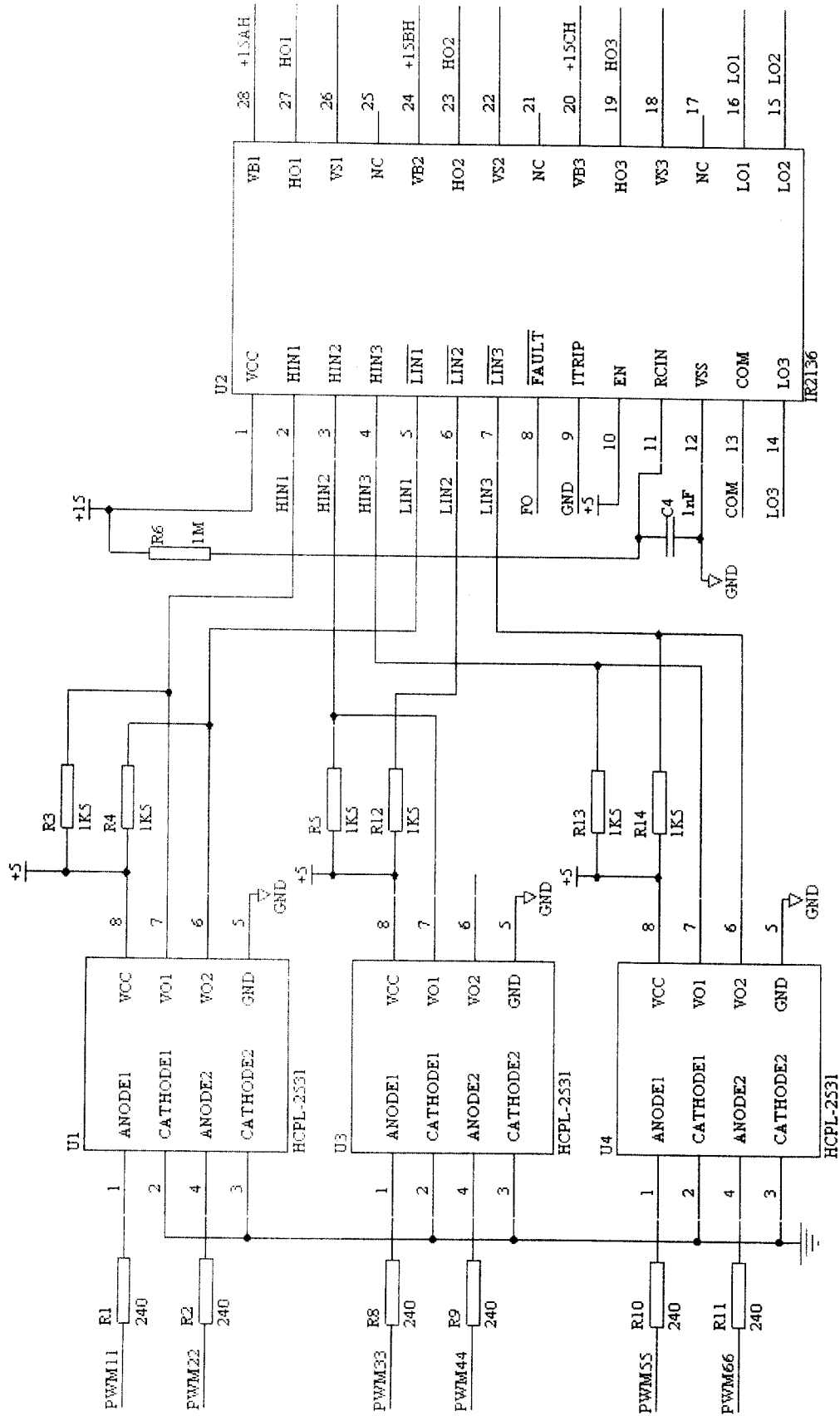


图 6A

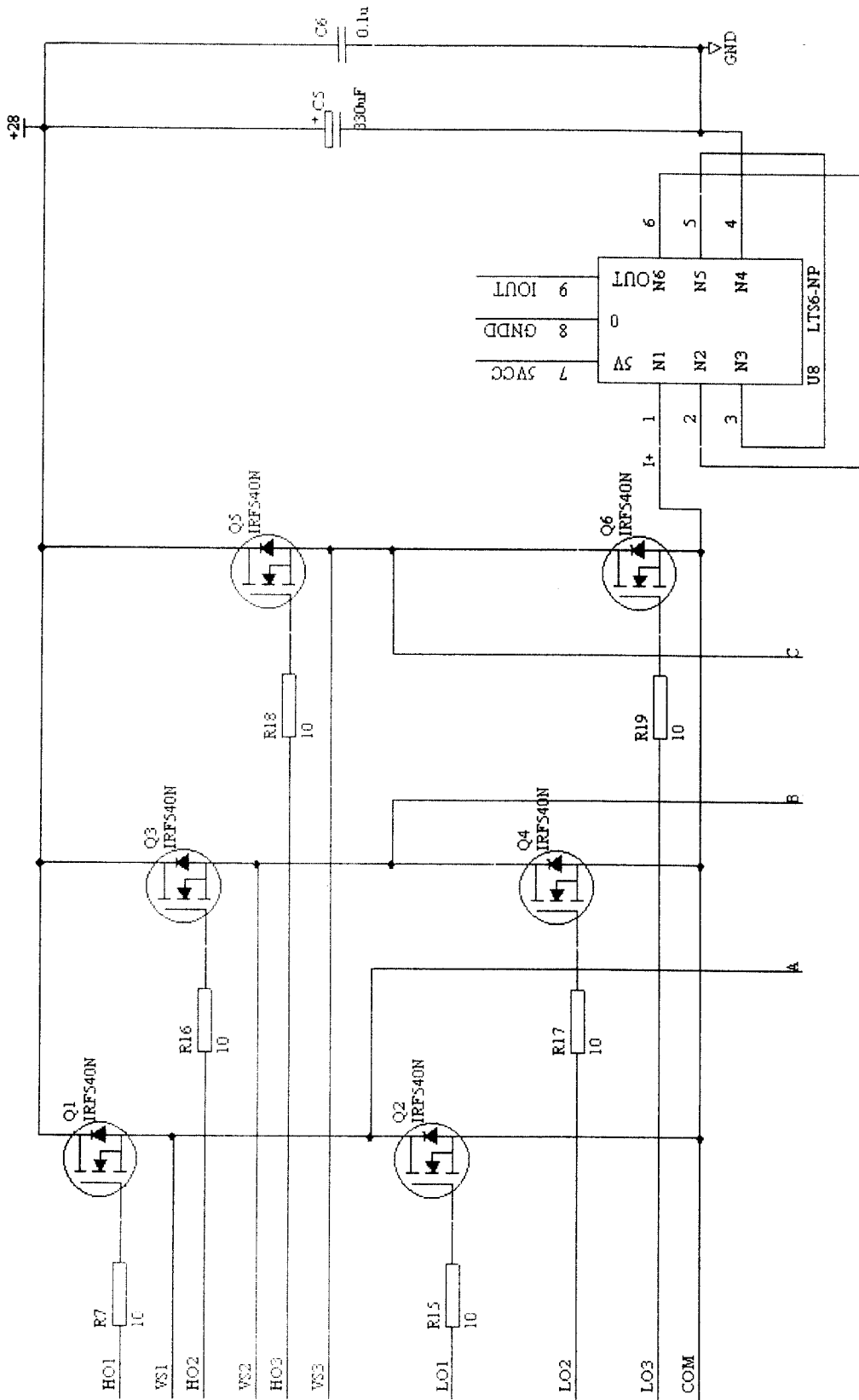


图 6B