

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102185546 A

(43) 申请公布日 2011.09.14

(21) 申请号 201110142319.4

(22) 申请日 2011.05.30

(71) 申请人 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所

地址 210042 江苏省南京市板仓街 188 号

(72) 发明人 张振超 宋晓莉 汪达兴 王地

(74) 专利代理机构 江苏致邦律师事务所 32230
代理人 栗仲平

(51) Int. Cl.

H02P 6/08 (2006.01)

H02P 21/04 (2006.01)

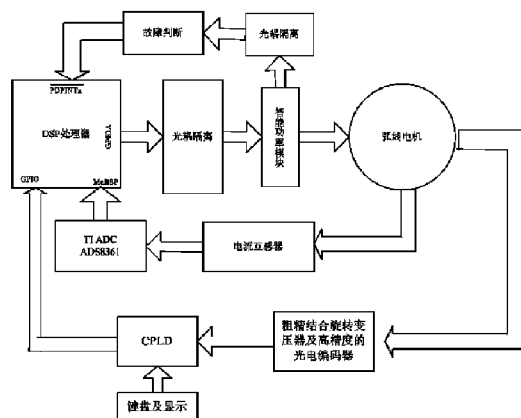
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 3 页

(54) 发明名称

大口径望远镜弧线电机驱动控制方法及其系统

(57) 摘要

大口径望远镜弧线电机的驱动控制方法及其系统：DSP 事件管理器输出六路驱动信号，经光耦隔离后输出到智能功率模块；后者输出近似圆形磁场的 UVW 三路电压信号加到弧线电机上；电流互感器测出每路电流，经 A/D 转换后输入到 DSP 缓冲串口处理；CPLD 用于处理编码器产生的增量位置信号并完成键盘显示等接口；粗、精结合的旋转变压器经数字转换器后输出弧线电机的绝对位置信号，该信号和 CPLD 处理的增量位置信号结合确定弧线电机的精确机械位置，经 DSP 处理后实现电机换相。本发明能够满足大型射电望远镜对超低速弧线电机的需要，能够实现大口径毫米波 / 亚毫米望远镜长时间、超低速、宽调速、高精度跟踪天体，并在低速时无爬行现象。



1. 一种大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制方法, 其特征在于, 步骤如下:

(1). DSP 的事件管理器输出六路驱动信号, 经光耦隔离后输出到智能功率模块;

(2). 智能功率模块输出圆形磁场或近似圆形磁场的 UVW 三路电压信号;

(3). 该 UVW 三路电压信号加到弧线电机上;

(4). 用电流互感器测出每路电流, 经高精度的 A/D 转换后输入到 DSP 的缓冲串口进行处理;

(5). 所述的 CPLD 用于处理编码器产生的增量位置信号, 并完成键盘显示等电路的接口;

(6). 粗、精结合的旋转变压器测出的电机的机械角度经数字转换器输出到 DSP 处理后, 实现弧线电机定子三相电流的换相, 并且不需要测出电机的零位置信号。

2. 根据权利要求 1 所述的大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制方法, 其特征在于, 增加有以下步骤:

(7). 故障发生时, 智能功率模块的故障端输出故障信号经光耦隔离后由 DSP 的故障中断封锁事件管理器输出的驱动信号。

3. 根据权利要求 1 所述的大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制方法, 其特征在于, 所述的旋转变压器粗机和精机的速比是 1:64, 粗通道采用 10 位数字转换器进行转换, 精通道用 16 位转换器进行转换, 用粗通道的前 6 位和精通道的 16 位实现 22 位的数字转换。

4. 根据权利要求 1 或 2 或 3 所述的大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制方法, 其特征在于, 所述的 TMS320F2812 的事件管理器的输出采用空间矢量算法, 在相对低速时对定子施加一定电压进行补偿形成圆形磁场; 在处理 ADS8361 采用后的信号后在 TMS320F2812 中实现 3s/2s 坐标变换, 结合所述的粗、精旋转变压器数字转换器输出的角度信号及高精度的增量式编码器通过 EPM7256S 计算出转子的精确位置, 从而实现 2s/2r 坐标变换, 最后采用自适应控制方法实现电流环、速度环和位置环控制器的设计。

5. 一种权利要求 1 所述的大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制方法所使用的设备: 大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制系统, 本系统包括上位计算机系统和下位计算机系统, 上位计算机系统实现弧线运动控制系统的在线集中监控、综合管理、性能检测和安全保护功能; 下位计算机系统包括 DSP 模块, 执行电机, 信号采集与比较模块, 位置数据处理单片机; 所述执行电机为弧线电机, 该弧线电机是大转矩、60 对极的单元组合交流永磁同步伺服电机;

其特征在于, 在下位计算机系统中: 设有 DSP 事件管理器、CPLD 芯片和高精度的增量式编码器;

所述的 DSP 事件管理器经光耦隔离后输出到智能功率模块; 该智能功率模块输出的 UVW 三路电压信号加到所述的弧线电机上; 该弧线电机上设有测量每路电流的电流互感器, 各电流互感器经高精度的 A/D 转换后输入到 DSP 的缓冲串口进行处理;

所述的 CPLD 用于处理编码器产生的增量位置信号, 并完成键盘显示等电路的接口;

粗、精结合的旋转变压器测出的电机的机械角度经数字转换器输出到 DSP 处理后, 实现弧线电机定子三相电流的换相, 并且不需要测出电机的零位置信号;

所述的增量式编码在电机旋转后与旋转变压器的绝对位置相结合,精确的检测出转子的位置,在 DSP 内部与转换后的电流信号经自适应电流控制器处理,然后再输出到 DSP 的事件管理器产生驱动信号。

6. 根据权利要求 5 所述的大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制系统,其特征在于:

所述的 DSP 采用 TMS320F2812,由事件管理器 A 或 B 产生智能功率模块所需的驱动信号;

所述的 CPLD 采用 EPM7256S,用于处理编码器产生的增量位置信号,并完成键盘显示等电路的接口;

所述的智能功率模块采用 PM25RLA120,承受的电压高并有故障输出端;

所述的高精度的 A/D 转换采用 ADS8361,是 16 位的四通道串行 A/D 转换器件;

所述的电流传感器采用 TBC15DS3.3,与 ADS8361 的工作电压及 DSP 的工作电压互相兼容;

所述的旋转变压器数字转换器采用 22ZSZ3413,粗、精结合构成 22 位的绝对位置信号;

所述的高精度的增量编码器采用海德汉的 ERA780C。

7. 根据权利要求 5 或 6 所述的大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制系统,其特征在于:所述的旋转变压器粗机和精机的速比是 1:64,粗通道采用 10 位数字转换器进行转换,精通道用 16 位转换器进行转换,用粗通道的前 6 位和精通道的 16 位实现 22 位的数字转换。

大口径望远镜弧线电机驱动控制方法及其系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种电机的驱动控制方法及装置,具体涉及一种用于大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜方位轴和高度轴弧线电机的直接驱动控制方法,以及使用该方法驱动大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜的方位轴和高度轴的直接驱动控制装置。本发明为国家重点基金,批准号为 10833004。

背景技术

[0002] 天文望远镜望远镜主要是收集来自天体的暗弱辐射,并且将其收集的 80% 的光能集中在主镜的某个角度范围内,因此这对望远镜的运动方式及望远镜的跟踪精度提出了极高的要求。在望远镜的各种运动方式中,跟踪运动是要求最高也是最重要的运动,因为指向和跟踪精度的高低直接影响到望远镜观测图像的质量和跟踪天体的精确度,因此望远镜的方位轴和高度轴的驱动在望远镜跟踪运动中起着至关重要的作用。大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜对驱动控制部分的持续工作提出的要求更高。

[0003] 目前世界上大口径的光学望远镜 VLT、SUBURA 及 GTC 等大口径望远镜都已经成功应用了直接驱动技术。在建或拟建的大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜有美国、欧洲、日本共建的 66x12 (或 7) 米毫米波望远镜射电干涉阵 ALMA,美国、墨西哥共建的 50 米毫米波望远镜 LMT,日本的 6x10 米亚毫米波 Nobeyama,英国、荷兰、加拿大共建的 15 米亚毫米波 JCMT,美国的 25 米亚毫米波望远镜 CCAT 以及英国的 30 米亚毫米波望远镜 LST 等望远镜。这些射电望远镜采用驱动技术大都是摩擦驱动或齿轮传动,只有 ALMA 射电干涉阵采用了直接驱动技术,该技术是借鉴 VLT 的直接驱动方法。

[0004] VLT、GTC 及 ALMA 望远镜都采用的是意大利知名电机公司 Phase 公司生产的,Phase 公司根据这些望远镜的要求,生产的大力矩组合式的永磁同步直线电机,这些望远镜使用的大力矩组合式的永磁同步直线电机并没有统一的标准,因此其驱动也没有通用的驱动器,是 Phase 公司根据电机自主研发的驱动器,而 SUBARU 望远镜是日本三菱电机生产的。

[0005] 现代大口径望远镜的跟踪运动在理想情况下应该是弧线运动,而机电一体化的弧线电机直接驱动望远镜可以使望远镜的动态性能、控制精度等大大提高,并简化了望远镜的机械结构。与其他传动形式相比,直接驱动不像蜗轮蜗杆传动、齿轮传动和摩擦传动那样在啮合点有很高的局部压力和局部变形,因而提高了系统的刚度。对于 VLT 等直接驱动的组合单元直线电机而言,予以电机的电磁力矩的冗余,当有个别单元电机需要维修时,其余组合的单元电机可以正常工作而不影响望远镜的正常运行。

[0006] 对于大型天文望远镜而言,目前直接驱动的最大缺点是需要专门定制,研制费用高,研制的周期也就相应加长。低速运行的天文望远镜的力矩波动和由齿槽效应引起的非线性问题会影响直接驱动的精度,这些都有待于进一步提高并修正。而采用机电一体化弧线电机以后,望远镜的结构和运动方式都发生了根本性的改变,其驱动控制系统也需要采用一种全新的控制技术和控制装置,这些技术指标对控制系统的要求也是非常高的。为实现上述弧线电机的驱动,对多对极的组合交流永磁同步弧线电机也需要根据该电机的特点

研制一种驱动控制系统。

发明内容

[0007] 本发明将提供一种大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制方法及其装置,本发明的控制方法及其装置能够满足大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜长时间、超低速、宽调速、高精度跟踪天体,并在低速时无爬行现象。

[0008] 实现本发明的技术方案是:一种大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制方法,其特征在于,步骤如下:

- (1). DSP 的事件管理器输出六路驱动信号,经光耦隔离后输出到智能功率模块;
- (2). 智能功率模块输出圆形磁场或近似圆形磁场的 UVW 三路电压信号;
- (3). 该 UVW 三路电压信号加到弧线电机上;
- (4). 用电流互感器测出每路电流,经高精度的 A/D 转换后输入到 DSP 的缓冲串口进行处理;
- (5). 所述的 CPLD 用于处理编码器产生的增量位置信号,并完成键盘显示等电路的接口;
- (6). 粗、精结合的旋转变压器测出的电机的机械角度经数字转换器输出到 DSP 处理后,实现弧线电机定子三相电流的换相,并且不需要测出电机的零位置信号。

[0009] 高精度的增量式编码器在电机旋转后与旋转变压器的绝对位置相结合,可以精确的检测出转子的位置,在 DSP 内部与转换后的电流信号经自适应电流控制器处理,然后再输出到 DSP 的事件管理器产生驱动信号。

[0010] 以上方法的优化方案增加有以下步骤:

- (7). 故障发生时,智能功率模块的故障端输出故障信号经光耦隔离后由 DSP 的故障中断封锁事件管理器输出的驱动信号。

[0011] 完成本申请第 2 个发明任务的方案是:上述大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制方法所使用的设备:一种大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机的驱动控制系统,本系统包括上位计算机系统和下位计算机系统,上位计算机系统实现弧线运动控制系统的在线集中监控、综合管理、性能检测和安全保护功能;下位计算机系统包括 DSP 模块,执行电机,信号采集与比较模块,位置数据处理单片机;所述执行电机为弧线电机,该弧线电机是大转矩、60 对极的单元组合交流永磁同步伺服电机;其特征在于,在下位计算机系统中:设有 DSP 事件管理器、CPLD 芯片和高精度的增量式编码器;

所述的 DSP 事件管理器经光耦隔离后输出到智能功率模块;该智能功率模块输出的 UVW 三路电压信号加到所述的弧线电机上;该弧线电机上设有测量每路电流的电流互感器,各电流互感器经高精度的 A/D 转换后输入到 DSP 的缓冲串口进行处理;

所述的 CPLD 用于处理编码器产生的增量位置信号,并完成键盘显示等电路的接口;

粗、精结合的旋转变压器测出的电机的机械角度经数字转换器输出到 DSP 处理后,实现弧线电机定子三相电流的换相,并且不需要测出电机的零位置信号。

[0012] 所述的增量式编码在电机旋转后与旋转变压器的绝对位置相结合,精确的检测出转子的位置,在 DSP 内部与转换后的电流信号经自适应电流控制器处理,然后再输出到 DSP 的事件管理器产生驱动信号。

[0013] 换言之,本发明的该控制系统是 DSP 和 CPLD 结合,由数字化智能功率模块以及粗、精结合的旋转变压器及其数字转换器、高精度的增量式编码器组成;

所述的弧线电机是大转矩、现采用的是 60 对极的单元组合交流永磁同步伺服电机,电机的采用减小转矩波动的设计方法,若驱动更大口径的毫米波望远镜可以在此实验基础上增加电机的极对数并可组成更多小电机以提高输出转矩跟踪精度;

所述的 DSP 的事件管理器输出六路驱动信号,经光耦隔离后输出到智能功率模块,使智能功率模块输出近似圆形磁场的 UVW 三路电压信号;该电压信号加到弧线电机上,用电流互感器测出每路电流,经高精度的 A/D 转换后输入到 DSP 的缓冲串口进行处理;

所述的 CPLD 用于处理编码器产生的增量位置信号,并完成键盘显示等电路的接口;

粗、精结合的旋转变压的输出信号经 DSP 处理后转换为弧线电机的绝对位置信号,实现弧线电机定子三相电流的换相,并且不需要测出电机的零位置信号。;

高精度的增量式编码器在电机旋转后与旋转变压器的绝对位置相结合,可以精确的检测出转子的位置,在 DSP 内部与转换后的电流信号经自适应电流控制器处理,然后再输出到 DSP 的事件管理器产生驱动信号;

故障发生时,智能功率模块的故障端输出故障信号经光耦隔离后由 DSP 的故障中断封锁事件管理器输出的驱动信号,图 1 是本发明的驱动控制系统硬件实现框图。

[0014] 驱动控制系统的组成及主要功能

1. 变频逆变

变频逆变部分用智能功率模块 PM25RLA120,承受的高电压可达 1200V,并有故障输出端;TMS320F2812 的事件管理器 A 或 B 根据控制器的调节算法,利用空间电压矢量算法,在定时器的作用下中断产生智能功率模块所需的六路驱动信号,并在定子上施加电压补偿低压时电压空间矢量算法,使逆变器输出近似圆形磁场的 UVW 三路信号施加给弧线电机。

[0015] 2. 电流检测

电流检测采用电流传感 TBC15DS3.3,与 ADS8361 的工作电压及 DSP 的工作电压 3.3V 互相兼容,检测电路用单电源供电的运放组成,图 2 是电流传感器的检测调理电路;模拟电流到数字信号的转换是用 16 位 A/D 转换器 ADS8361,是一个四通道串行输出的 500k 的 A/D 转换器件,该器件可与 TMS320F2812 的缓冲串口进行通信。电流采样滤波采用扩展的卡尔曼滤波方法估算实时电流最优化,以提高瞬间电流测试的精度,以获得正弦特性的旋转磁场,使永磁同步电机在超低速运行时更平稳。图 3 是 ADS8361 与 TMS320F2812 经缓冲串口的连接电路。

[0016] 3. 位置和速度检测

所述的粗、精结合的旋转变压器的速比是 1:64,即由粗机确定轴角的粗略位置,由精机来得到轴角的精确位置;粗通道的旋转变压器旋转一周,精通道的旋转变压器旋转 64 周(5.625°);该旋转变压的粗通道用 10 位数字转换器进行转换,精通道用 16 位转换器进行转换,由于旋转变压器的速比是 1:64,粗通道后 4 位所表示的数据的精度远远低于精通道表示的精度,因此用粗通道的前 6 位和精通道的 16 位可实现 22 位的数字转换;

粗、精结合的转换器的纠错采用软件处理,简化了系统电路,并且转换器的输出直接与 DSP 连接,通过数学计算可以直接计算出转子的机械角度,并根据条件判断是否需要纠错,如果需要纠错直接加或减一个精通道对应的机械角度即可,用于实现弧线电机三相信号的

换相并得出增量式编码器的绝对角度。图 4 是旋转变压器的数字转换器与 DSP 的连接框图。

[0017] 所述的高精度的增量式编码器是海德汉的 ERA780C, 根据权利要求 3 中计算出的电机转子绝对位置的基础上, 利用 ERA780C 经细分后送入 EPM7256S 处理可以精确的检测出转子实际位置。对弧线电机控制时, 旋转变压器数字转换器直接得出绝对位置信号, 与编码器输出的高精度的增量角度结合输出转子的机械角度 $Mech\Theta$, 结合极对数求出每 24° (一个单元电机, 其中的 1 对极对应的机械角度为 6°) 对应的电流电角度 $Elec\Theta$, 于是有:

$$Elec\Theta = 60 * Mech\Theta - 360^\circ * [Mech\Theta / 6^\circ]_{\text{整数部分}}$$

实际处理的时候为提高系统的精度, 全部采用标么值处理。

[0018] 与传统的光电编码器相比, 本发明位置环电路简单, 抗干扰能力强, 可实施性强, 对跟踪运动要求高的望远镜来说是可行的。

[0019] 4. 控制器

所述的 TMS320F2812 的事件管理器的输出采用空间矢量算法, 在相对低速时对定子施加一定电压进行补偿形成圆形磁场; 在处理 ADS8361 采用后的信号后在 TMS320F2812 中实现 $3s/2s$ 坐标变换, 结合所述的粗、精旋转变压器数字转换器输出的角度信号及高精度的增量式编码器通过 EMP7256S 计算出转子的精确位置, 从而实现 $2s/2r$ 坐标变换, 最后采用自适应控制方法实现电流环、速度环和位置环控制器的设计。

[0020] 5. 保护电路

故障发生时, 智能功率模块的故障端输出的故障信号经光耦隔离后由 TMS320F2812 的故障中断封锁事件管理器输出的驱动信号。

[0021] 图 5 是上述弧线电机的驱动控制软件实现框图。ADS8361 采样后的电流处理、 $3s/2s$ 、 $2s/2r$ 、 $2r/2$ 坐标变换、自适应控制器及电压空间矢量算法都在控制器里用软件实现。

[0022] 本发明的大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机驱动控制方法及其系统, 能够满足大型射电望远镜对超低速弧线电机的需要, 能够大实现口径毫米波 / 亚毫米望远镜长时间、超低速、宽调速、高精度跟踪天体, 并在低速时无爬行现象。

[0023] 附图说明

图 1 是本发明图驱动控制硬件实现框图;

图 2 是电流传感器的检测电路;

图 3 是 ADS8361 与 TMS320F2812 经缓冲串口的连接电路;

图 4 是旋转变压器的数字转换器与 DSP 的连接框图;

图 5 是本发明的驱动控制软件实现框图。

具体实施方式

[0024] 实施例 1, 大口径毫米波 / 亚毫米波望远镜弧线电机驱动控制系统, 弧线电机是自主研发的多对极交流永磁同步弧线电机, 是单元组合式的, 本发明是设计该弧线电机的驱动控制系统, 要求能实现宽调速、超低速、并在低速时无爬行现象。该驱动控制系统是 DSP 处理器和数字化智能功率模块组成, 主要由以下部分组成。

[0025] 1. 变频逆变

变频逆变部分用智能功率模块是 PMS25RLA120, 承受的高电压可达 1200V, 并有故障输出端; TMS320F2812 的事件管理器 A 或 B 根据控制器的调节算法, 利用空间电压矢量算法, 在 TMS320F2812 事件管理器的定时器的作用下中断产生智能功率模块所需的六路驱动信号, 使逆变器输出近似圆形磁场的 UVW 三路信号施加给弧线电机。该算法不仅顾及了变频逆变部分的三相输出电压接近正弦信号, 也顾及了三相输出电流的正弦性, 从而产生了恒定的电磁转矩, 使变频逆变器与弧线交流永磁同步电机一体化, 简化了控制策略。

[0026] 2. 电流检测

电流检测采用电流传感 TBC15DS3. 3, 与 ADS8361 的工作电压及 DSP 的工作电压 3.3V 互相兼容, 检测电路用单电源供电的运放组成, 图 2 是电流传感器的检测调理电路; 模拟电流到数字信号的转换是用 16 位 A/D 转换器 ADS8361, 是一个四通道串行输出的 500k 的 A/D 转换器件, 该器件可与 TMS320F2812 的缓冲串口进行通信。电流采样滤波采用扩展的卡尔曼滤波方法估算实时电流最优化, 以提高瞬间电流测试的精度, 以获得正弦特性的旋转磁场, 使永磁同步电机在超低速运行时更平稳。图 3 是 ADS8361 与 TMS320F2812 经缓冲串口的连接电路。

[0027] 3. 位置和速度检测

所述的粗、精结合的旋转变压器的速比是 1:64, 即由粗机确定轴角的粗略位置, 由精机来得到轴角的精确位置; 粗通道的旋转变压器旋转一周, 精通道的旋转变压器旋转 64 周 (5.625°); 该旋转变压的粗通道用 10 位数字转换器进行转换, 精通道用 16 位转换器进行转换, 由于旋转变压器的速比是 1:64, 粗通道后 4 位所表示的数据的精度远远低于精通道表示的精度, 因此用粗通道的前 6 位和精通道的 16 位可实现 22 位的数字转换;

粗、精结合的转换器的纠错采用软件处理, 简化了系统电路, 并且转换器的输出直接与 DSP 连接, 通过数学计算可以直接计算出转子的机械角度, 并根据条件判断是否需要纠错, 如果需要纠错直接加或减一个精通道对应的机械角度即可, 用于实现永磁伺服同步电机三相信号的换相并得出增量式编码器的绝对角度。图 4 是旋转变压器的数字转换器与 DSP 的连接框图。

[0028] 所述的高精度的增量式编码器是海德汉的 ERA780C, 根据权利要求 3 中计算出的电机转子绝对位置的基础上, 利用 ERA780C 经细分后送入 EPM7256S 处理可以精确的检测出转子实际位置。对弧线电机控制时, 旋转变压器数字转换器直接得出绝对位置信号, 与编码器输出的高精度的增量角度结合输出转子的机械角度 $Mech\Theta$, 结合极对数求出每 24° (一个单元电机, 其中的 1 对极对应的机械角度为 6°) 对应的电流电角度 $Elec\Theta$, 于是有:

$$Elec\Theta = 60 * Mech\Theta - 360^\circ * [Mech\Theta / 6^\circ]_{\text{整数部分}}$$

实际处理的时候为进一步提高系统的精度, 全部采用标么值处理。

[0029] 4. 控制器

所述的 TMS320F2812 的事件管理器的输出采用空间矢量算法, 在相对低速时对定子施加一定电压进行补偿形成圆形磁场; 在处理 ADS8361 采用后的信号后在 TMS320F2812 中实现 3s/2s 坐标变换, 结合所述的粗、精旋转变压器数字转换器输出的角度信号及高精度的增量式编码器通过 EPM7256S 计算出转子的精确位置, 从而实现 2s/2r 坐标变换, 最后采用

自适应控制方法实现电流环、速度环和位置环控制器的设计。

[0030] 5. 保护电路

故障发生时,智能功率模块的故障端输出的故障信号经光耦隔离后由 DSP 封锁事件管理器输出的驱动信号。图 5 是上述弧线电机的驱动控制软件实现框图,ADS8361 采样后扩展卡尔曼滤波、 $3s/2s$ 、 $2s/2r$ 、 $2r/2s$ 坐标变换、自适应控制器及电压空间矢量算法都在控制器里用软件实现。

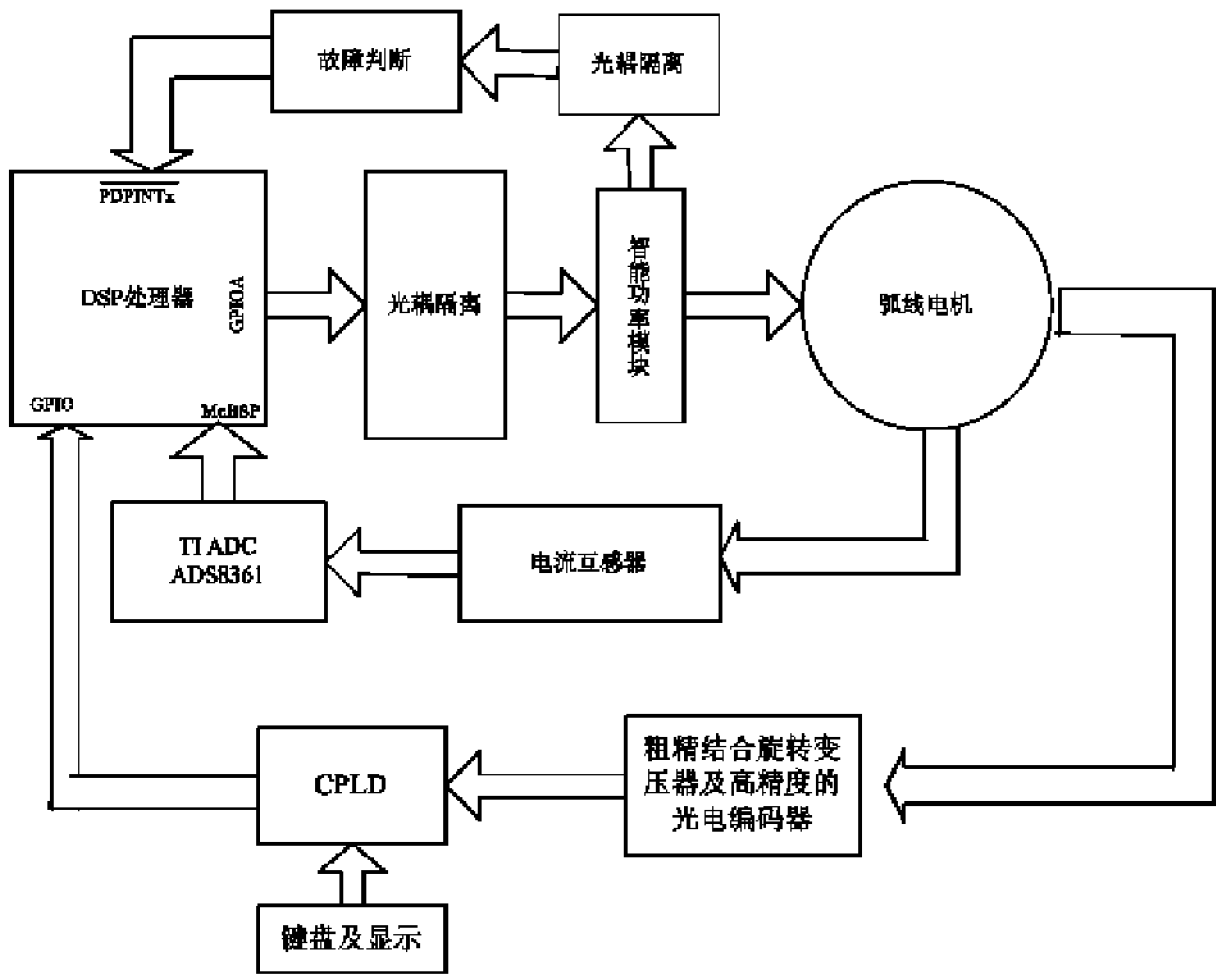


图 1

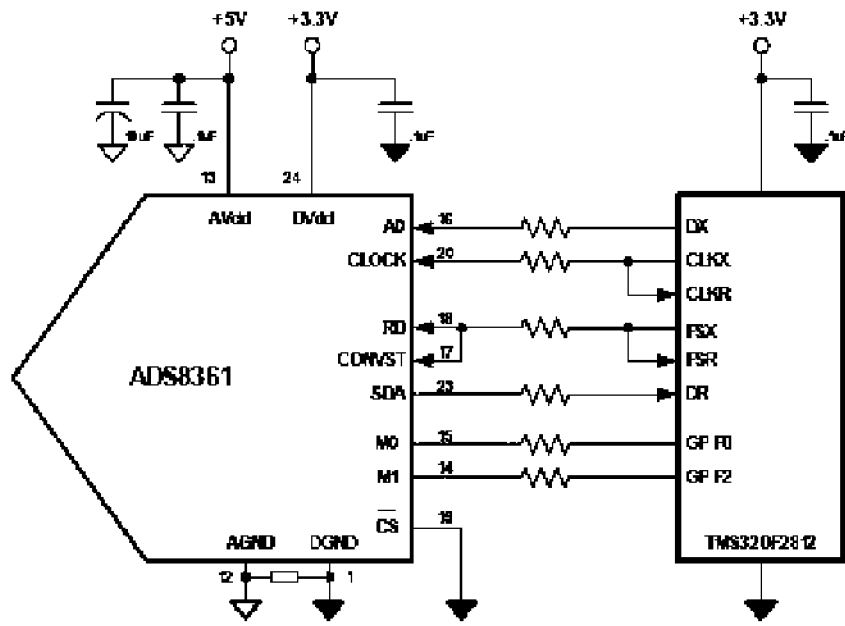


图 2

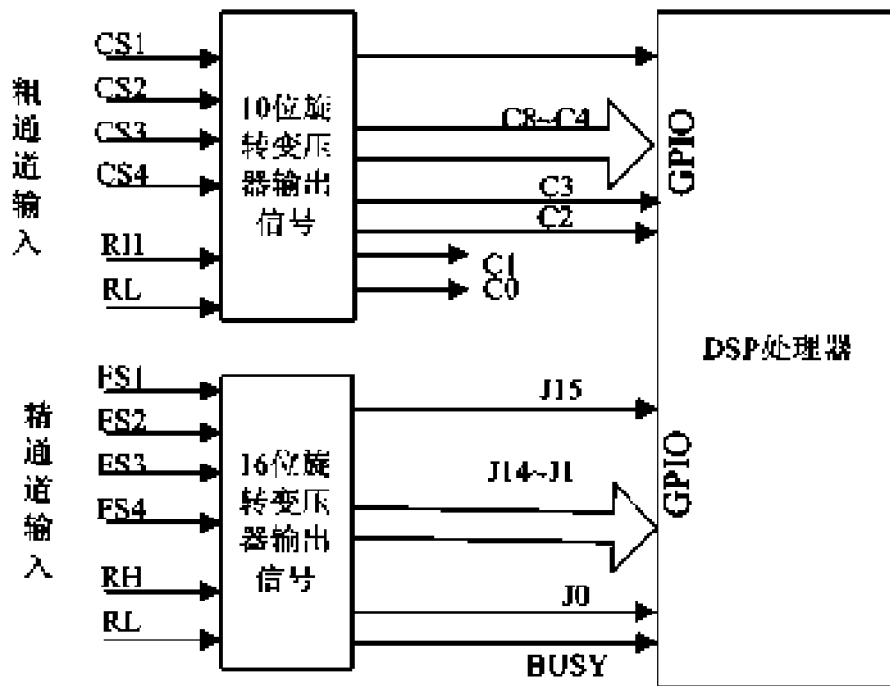


图 4

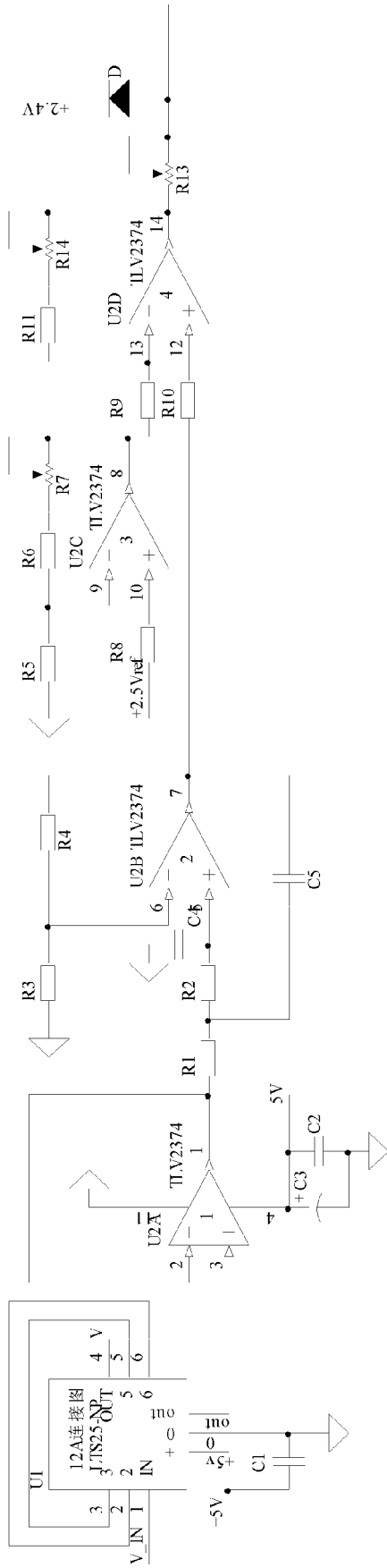


图 3

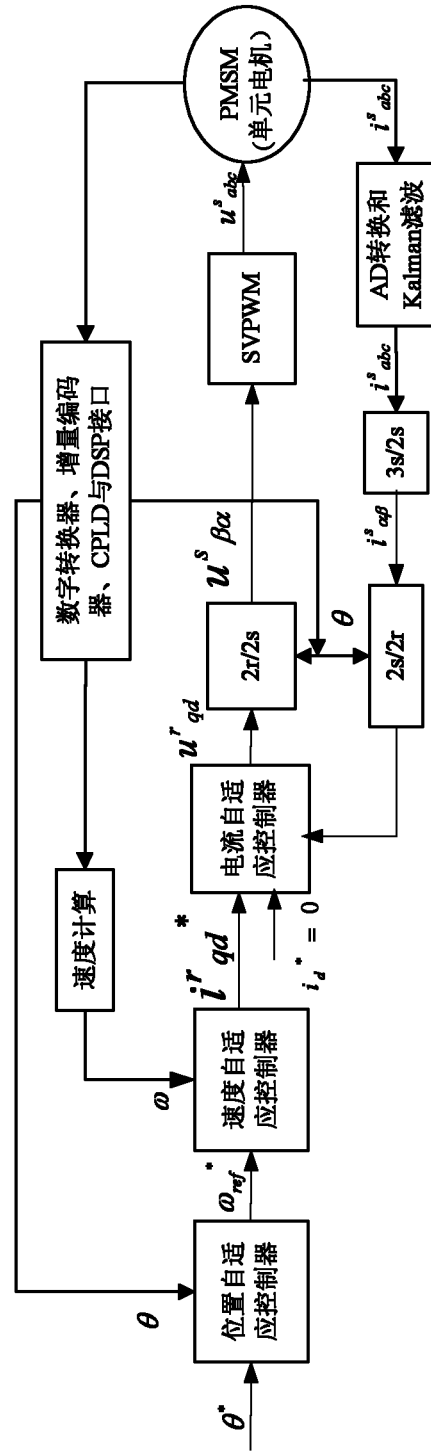


图 5