



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104993764 B

(45)授权公告日 2017.11.17

(21)申请号 201510394237.7

(22)申请日 2015.07.07

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104993764 A

(43)申请公布日 2015.10.21

(73)专利权人 江西洪都航空工业集团有限责任公司

地址 330000 江西省南昌市新溪桥5001信箱460分箱

(72)发明人 周继强 郑友胜 甘海轩 陈林杰  
曹雄伟 齐洪豪

(74)专利代理机构 南昌新天下专利商标代理有限公司 36115

代理人 施秀瑾

(51)Int.Cl.

H02P 21/00(2016.01)

H02P 21/18(2016.01)

(56)对比文件

CN 101989827 A,2011.03.23,

CN 102426417 A,2012.04.25,

CN 103595327 A,2014.02.19,

刘可述.PMSM伺服系统速度环和位置环控制器参数自整定技术.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2014,(第4期),C042-116.

于乐华.永磁同步电机伺服系统控制器参数自整定技术的研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2013,(第2期),C042-81.

审查员 曹杨

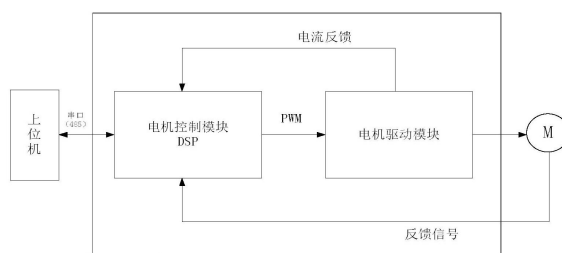
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

### (54)发明名称

基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法

### (57)摘要

本发明公开了一种基于一种参数自整定的电机控制器及其控制方法,涉及电机控制系统装置领域,该基于一种参数自整定的电机控制器及其控制方法通过提前辨识系统的转动惯量,把被控系统化为一阶惯性环节和二阶惯性环节,对PID控制器控制参数进行自整定,工程实用性更强。控制器具有良好的电机控制性能,同时能对控制参数进行自整定,得到电机控制系统的最优参数,使电机控制系统能够适应更加复杂的工况,满足用户高性能指标的要求,具有重大的理论研究价值和工程实践意义。可广泛应用于智能轮椅控制、无人割草机、工业自动化、国防航空等各个行业领域。



1. 一种基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法,其特征在于:所述基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法包括电机控制系统软件和电机控制系统硬件,电机控制系统软件包括主程序、各种中断、转动惯量辨识模块和PI参数自整定模块,程序全部采用C语言编写程序,并对各个功能模块合理封装,采用电机模型分析,辨识出转动惯量的值,再结合PI控制器参数与转动惯量的关系式直接计算出合适的控制参数,实现控制器参数的自整定,电机控制系统软件的实现包括转速环参数的计算、位置环参数的计算、参数辨识与整定功能模块、PID电机控制;电机控制系统硬件分为控制模块和功率驱动模块两部分,电机控制模块主要包括电源电路、时钟电路、复位电路、JATG仿真电路、电机控制电路、AD采样电路和通讯电路、报警电路,电机驱动模块主要包括主驱动电路、隔离和缓冲电路、过压保护电路、欠电保护电路、过流保护电路、过温保护电路、短路保护电路,电枢电流过载保护电路,电源反接保护和故障保护电路,核心处理板采用的核心芯片为TI公司的TMS320F2812处理器作为数字控制系统的CPU;

所述转速环参数的计算分为转速环的开环传递函数为:

$$G_s(s)H_s(s) = \frac{k_{sp}K_t k_{sf}}{T_{si}k_{cf}J} \cdot \frac{T_{si}s+1}{s^2(T_c s+1)}$$

其中: $T_c$ 为电流环一阶等效传递函数的时间常数, $\gamma_m$ 为相角裕度, $T_{si}$ 为转速环控制器时间常数, $k_{sp}$ 为转速环控制的比例系数, $\omega_c$ 为转速环开环截止频率, $k_{cf}$ 为电流环反馈通道增益, $k_{sf}$ 为转速环反馈通道增益, $K_t$ 为转矩常数, $J$ 为转动惯量;根据 $|G_s(j\omega_c)H_s(j\omega_c)|=1$ ,确定 $k_{sp}$ 的取值,

具体来说,通过以下两个公式进行转速环控制参数的设计:

$$T_{si} = T_c (\tan \gamma_m + \sqrt{\tan^2 \gamma_m + 1})^2$$

$$k_{sp} = \frac{\omega_c^2 \sqrt{(T_c \omega_c)^2 + 1}}{\sqrt{(T_{si} \omega_c)^2 + 1}} \times \frac{T_{si} k_{cf} J}{9.55 k_{sf} K_t}。$$

2. 根据权利要求1所述的基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法,其特征在于:所述PID电机控制采用数字式PID控制算法,电机控制系统由电流环、速度环、位置环三闭环构成,电流环作为内环,速度环作为中环,位置环作为外环,依次对伺服电机进行控制,电流环可以提高电枢电流的响应速度和保证系统的可靠性,速度环对负载变化起抗扰作用,保证转速迅速跟踪上输入信号,位置环则根据位置输入信号使得电机迅速旋转到相应指定位置。

## 基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电机控制系统装置领域,特别涉及一种基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法。

### 背景技术

[0002] 随着国防、航空、智能产业、工业控制等行业的急速发展,对电机控制系统的需求也日益扩大,同时也对电机控制系统提出了更高的要求,要求系统能够适应工作环境的变化且保持优良的性能。因此,研发高性能的具有优良适应性的电机驱动系统具有十分重大的经济效益和社会效益。

[0003] 目前,大多数类型的控制器的参数整定工作主要由人工手动完成,通过观察不同参数下系统的运行状态的规律来多次调节控制器参数,费时费力,效果不佳,且参数整定的工作对操作人员的要求较高。如果参数整定的结果不理想便将系统投入使用,将会很大程度上影响系统的性能,甚至造成系统不稳定。

### 发明内容

[0004] 为了克服传统的由操作人员手动调节PID控制参数所带来的局限性,本发明提供了一种参数自整定的电机控制器及其控制方法。该控制器基于DSP数字信号处理器设计,具备强大数字运算和电机控制能力,同时开发了基于DSP的移动运动控制器参数整定方法,实现了运动控制器速度、位置控制器PID参数自整定的实用化技术,可广泛应用于智能轮椅控制、无人割草机、工业自动化、国防航空等各个行业领域。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供以下的技术方案:一种基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法,其特征在于:所述基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法包括电机控制系统软件和电机控制系统硬件,电机控制系统软件包括主程序、各种中断、转动惯量辨识模块和PI参数自整定模块,程序全部采用C语言编写程序,并对各个功能模块合理封装,采用电机模型分析,辨识出转动惯量的值,再结合PI控制器参数与转动惯量的关系式直接计算出合适的控制参数,实现控制器参数的自整定,电机控制系统软件的实现包括转速环参数的计算、位置环参数的计算、参数辨识与整定功能模块、PID电机控制。

[0006] 电机控制系统硬件分为控制模块和功率驱动模块两部分,电机控制模块主要包括电源电路、时钟电路、复位电路、JATG仿真电路、电机控制电路、AD采样电路和通讯电路、报警电路,电机驱动模块主要包括主驱动电路、隔离和缓冲电路、过压保护电路、欠电保护电路、过流保护电路、过温保护电路、短路保护电路,电枢电流过载保护电路,电源反接保护和故障保护电路,核心处理板采用的核心芯片为TI公司的TMS320F2812处理器作为数字控制系统的CPU。

[0007] 转速环参数的计算分为转速环的开环传递函数为:

$$[0008] \quad G_s(s)H_s(s) = \frac{k_{sp}K_t k_{sf}}{T_{st}k_{cf}J} \cdot \frac{T_{st}s+1}{s^2(T_c s+1)}$$

[0009] 其中： $T_c$ 为电流环一阶等效传递函数的时间常数， $\gamma_m$ 为相角裕度， $T_{si}$ 为转速环控制器时间常数， $k_{sp}$ 为转速环控制的比例系数， $\omega_c$ 为转速环开环截止频率， $k_{cf}$ 为电流环反馈通道增益， $k_{sf}$ 为转速环反馈通道增益， $K_t$ 为转矩常数， $J$ 为转动惯量；根据转速环开环传递函数，相角 $\angle G_s(j\omega)H_s(j\omega)$ 在 $\omega = \sqrt{\frac{1}{T_{is}T_c}}$ 处取得最大值，选取 $\sqrt{\frac{1}{T_{is}T_c}}$ 作为转速环开环截止频率 $\omega_c$ ，然后根据转速环相角裕度确定 $T_{is}$ 的取值，最后根据 $|G_s(j\omega_c)H_s(j\omega_c)| = 1$ ，确定 $k_{sp}$ 的取值，

[0010] 具体来说，通过以下两个公式进行转速环控制参数的设计：

$$[0011] \quad T_{si} = T_c (\tan \gamma_m + \sqrt{\tan^2 \gamma_m + 1})^2$$

$$[0012] \quad k_{sp} = \frac{\omega_c^2 \sqrt{(T_c \omega_c)^2 + 1}}{\sqrt{(T_{si} \omega_c)^2 + 1}} \times \frac{T_{si} k_{cf} J}{9.55 k_{sf} K_t}。$$

[0013] 位置环参数的计算转速环开环传递函数为：

$$[0014] \quad G_s(s)H_s(s) = \frac{1}{k_{sf}} \cdot \frac{k_{sp} K_t k_{sf}}{T_{si} k_{cf} J} \cdot \frac{T_{si} s + 1}{s^2 (T_c s + 1)}$$

[0015] 相比较转速环而言，位置环的带宽要低很多，因此可以考虑将转速环闭环传递函数等效为一阶惯性环节：

$$[0016] \quad G_{bs}(s) = \frac{1}{k_{sf}} \cdot \frac{1}{T_s s + 1}$$

[0017] 为了保证等效前和等效后的闭环幅频特性的闭环带宽相同，令 $T_s = \frac{1}{\omega_b}$ ，其中 $\omega_b$ 为

转速环闭环带宽，采用比例控制器的位置环的伺服系统可得一个典型的二阶系统：

$$f(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2}，$$

可以得到自然频率和阻尼比，令阻尼比大于1，可以算出位置环的比例系数 $K_p$ 。

[0018] PID电机控制采用数字式PID控制算法，电机控制系统由电流环、速度环、位置环三环构成，电流环作为内环，速度环作为中环，位置环作为外环，依次对伺服电机进行控制，电流环可以提高电枢电流的响应速度和保证系统的可靠性，速度环对负载变化起抗扰作用，保证转速迅速跟踪上输入信号，位置环则根据位置输入信号使得电机迅速旋转到指定位置。

[0019] 采用以上技术方案的有益效果是：该基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法通过提前辨识系统的转动惯量，把被控系统化为一阶惯性环节和二阶惯性环节，对PID控制器控制参数进行自整定，工程实用性更强。控制器具有良好的电机控制性能，同时能对控制参数进行自整定，得到电机控制系统的最优参数，使电机控制系统能够适应更加复杂的工况，满足用户高性能指标的要求，具有重大的理论研究价值和工程实践意义。可广泛应用于智能轮椅控制、无人割草机、工业自动化、国防航空等各个行业领域。

## 附图说明

[0020] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步详细的描述。

[0021] 图1是本发明基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法的电机控制系统图；

[0022] 图2是本发明基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法的全数字三闭环伺服控制结构图；

[0023] 图3是本发明基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法的PID电机控制程序流程图；

[0024] 图4是本发明基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法的控制器硬件设计图。

## 具体实施方式

[0025] 下面结合附图详细说明本发明基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法的优选实施方式。

[0026] 结合图1和图2出示本发明基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法的具体实施方式：该基于一种参数自整定的电机控制器的控制方法包括电机控制系统软件和电机控制系统硬件，电机控制系统软件包括主程序、各种中断、转动惯量辨识模块和PI参数自整定模块，程序全部采用C语言编写程序，并对各个功能模块合理封装，采用电机模型分析，辨识出转动惯量的值，再结合PI控制器参数与转动惯量的关系式直接计算出合适的控制参数，实现控制器参数的自整定，电机控制系统软件的实现包括转速环参数的计算、位置环参数的计算、参数辨识与整定功能模块、PID电机控制。

[0027] 电机控制系统硬件分为控制模块和功率驱动模块两部分，电机控制模块主要包括电源电路、时钟电路、复位电路、JATG仿真电路、电机控制电路、AD采样电路和通讯电路、报警电路；电机驱动模块主要包括主驱动电路、隔离和缓冲电路、过压保护电路、欠电保护电路、过流保护电路、过温保护电路、短路保护电路，电枢电流过载保护电路，电源反接保护和故障保护电路，核心处理板采用的核心芯片为TI公司的TMS320F2812处理器作为数字控制系统的CPU。

[0028] 转速环参数的计算：对于转速环来说，设计人员往往追求的是在系统稳定的前提下，尽可能地提高转速环的响应速度。而系统的稳定性和响应速度可以分别由闭环带宽和相角裕度进行度量。

[0029] a. 闭环带宽

[0030] 系统闭环幅频特性-3dB点对应的频率，为闭环带宽值  $\omega_b$ 。带宽和开环截止频率  $\omega_c$ （开环幅频特性过零点对应的频率值）具有一致性，通常在控制器设计过程中，开环截止频率较容易获得，因此常使用开环截止频率代替闭环带宽来表征系统的响应速度。

[0031] b. 相角裕度

[0032] 定义  $\omega_c$  为系统的截止频率，幅频特性为  $A(\omega)$ ，则  $A(\omega_c) = |G(j\omega_c)H(j\omega_c)|$ 。定义相角裕度为  $\gamma = 180^\circ + \angle G(j\omega_c)H(j\omega_c)$ ，体现的含义是，对于闭环系统，如果系统开环相频特性再滞后  $\gamma$  度，则系统将处于临界稳定状态。

[0033] 相对于电流环和转速检测环节来说，转速环的响应速度较慢，因此可以将电流环的闭环传递函数等效为一阶惯性环节，将转速检测环节等效为比例环节进行转速环控制器参数的设计。

[0034] 转速环的开环传递函数为:

$$[0035] \quad G_s(s)H_s(s) = \frac{k_{sp}K_t k_{sf}}{T_{si}k_{cf}J} \cdot \frac{T_{si}s+1}{s^2(T_c s+1)}$$

[0036] 其中: $T_c$ 为电流环一阶等效传递函数的时间常数, $\gamma_m$ 为相角裕度, $T_{si}$ 为转速环控制器时间常数, $k_{sp}$ 为转速环控制的比例系数, $\omega_c$ 为转速环开环截止频率, $k_{cf}$ 为电流环反馈通道增益, $k_{sf}$ 为转速环反馈通道增益, $K_t$ 为转矩常数, $J$ 为转动惯量。

[0037] 根据转速环开环传递函数,相角 $\angle G_s(j\omega)H_s(j\omega)$ 在 $\omega = \sqrt{\frac{1}{T_{is}T_c}}$ 处取得最大值,选

取 $\sqrt{\frac{1}{T_{is}T_c}}$ 作为转速环开环截止频率 $\omega_c$ ,然后根据转速环相角裕度确定 $T_{is}$ 的取值,最后根据 $|G_s(j\omega_c)H_s(j\omega_c)|=1$ ,确定 $k_{sp}$ 的取值。

[0038] 具体来说,通过以下两个公式进行转速环控制参数的设计:

$$[0039] \quad T_{si} = T_c (\tan \gamma_m + \sqrt{\tan^2 \gamma_m + 1})^2$$

$$[0040] \quad k_{sp} = \frac{\omega_c^2 \sqrt{(T_c \omega_c)^2 + 1}}{\sqrt{(T_{si} \omega_c)^2 + 1}} \times \frac{T_{si} k_{cf} J}{9.55 k_{sf} K_t}。$$

[0041] 位置环参数的计算:位置环位于闭环控制系统的最外环,完成位置随动和定位的功能,大多数应用场合要求位置控制不能出现超调,所以积分环节一般来说是不允许出现在位置控制器中的,在大多数情况下位置环只采用比例控制器。这里基于前面转速环控制器的整定,提出位置环比例增益的整定方式。

[0042] 首先转速环开环传递函数为:

$$[0043] \quad G_s(s)H_s(s) = \frac{1}{k_{sf}} \cdot \frac{k_{sp}K_t k_{sf}}{T_{si}k_{cf}J} \cdot \frac{T_{si}s+1}{s^2(T_c s+1)}$$

[0044] 相比较转速环而言,位置环的带宽要低很多,因此可以考虑将转速环闭环传递函数等效为一阶惯性环节:

$$[0045] \quad G_{bs}(s) = \frac{1}{k_{sf}} \cdot \frac{1}{T_s s+1}$$

[0046] 为了保证等效前和等效后的闭环幅频特性的闭环带宽相同,令 $T_s = \frac{1}{\omega_b}$ ,其中 $\omega_b$ 为转速环闭环带宽。

[0047] 在转速环控制参数整定的过程中,转速环闭环带宽的获得一般较为困难,而转速环开环截止频率的获得相对来说较为简单,同时由于系统的闭环带宽和开环截止频率具有一致性(一个增大,另一个也增大),且数值相近(闭环带宽略大于开环截止频率),因此这里进行转速环闭环传递函数的等效时,可以使用开环截止频率 $\omega_c$ 来计算惯性环节的时间常数。

[0048] 采用比例控制器的位置环的伺服系统可得一个典型的二阶系统:

$$[0049] \quad f(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n + w_n^2},$$

[0050] 可以得到自然频率和阻尼比,令阻尼比大于1,可以算出位置环的比例系数 $K_p$ 。

[0051] PID电机控制:PID控制器是根据系统给定与反馈的偏差,利用比例、积分、微分方法对偏差信号进行处理,计算出控制量作用于被控对象,使给定与反馈的偏差向最小方向变化。典型PID控制器的时域表达式如下:

$$[0052] \quad u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}]$$

[0053] 式中, $K_p$ ——比例放大系数, $T_I$ ——积分时间, $T_D$ ——微分时间。

[0054] 将上式离散化就得到了数字式PID控制器表达式

$$[0055] \quad u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)]$$

[0056] 式中, $u(k)$ ——第 $k$ 个采样时刻的控制, $K_I$ ——积分放大系数, $K_D$ ——微分放大系数。

[0057] 本伺服控制系统采用数字式PID控制算法。电机控制系统由电流环、速度环、位置环三闭环构成,其结构如图2所示。

[0058] 电流环作为内环,速度环作为中环,位置环作为外环,依次对伺服电机进行控制。电流环可以提高电枢电流的响应速度和保证系统的可靠性。速度环对负载变化起抗扰作用,保证转速迅速跟踪上输入信号。位置环则根据位置输入信号使得电机迅速旋转到相指定位置。

[0059] PID电机控制程序流程图如图3所示。

[0060] 控制器硬件设计:核心处理板采用核心芯片为TI公司的TMS320F2812处理器作为数字控制系统的CPU。TMS320F2812数字讯号处理器是针对数字控制所设计的DSP,整合了DSP及微控制器的最佳特性,主要使用在嵌入式控制应用,已经涵盖了工业、通信、娱乐、个人医疗、教育、环境控制、安全等领域。针对应用最佳化,并有效缩短产品开发周期,F28x核心支持全新CCS环境的C compiler,提供C语言中直接嵌入汇编语言的程序开发介面,可在C语言的环境中搭配汇编语言来撰写程序。

[0061] JTAG接口用于DSP调试接口,用于系统程序调试。UART控制器通过RS485连接上位机,与上位机进行通讯,实现数据传输。PWM模块输出PWM脉冲波形控制驱动模块的通断,实现对电机的控制功能。电压、电流、温度检测接到DSP的A/D口,实现模拟数据的采集,实现保护和反馈控制。硬件框架结构如下图4所示。

[0062] 以上的仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明创造构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本发明的保护范围。

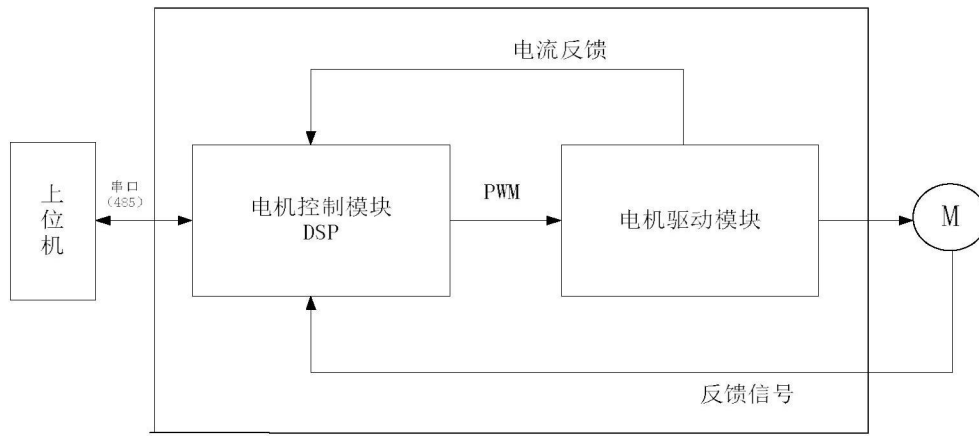


图1

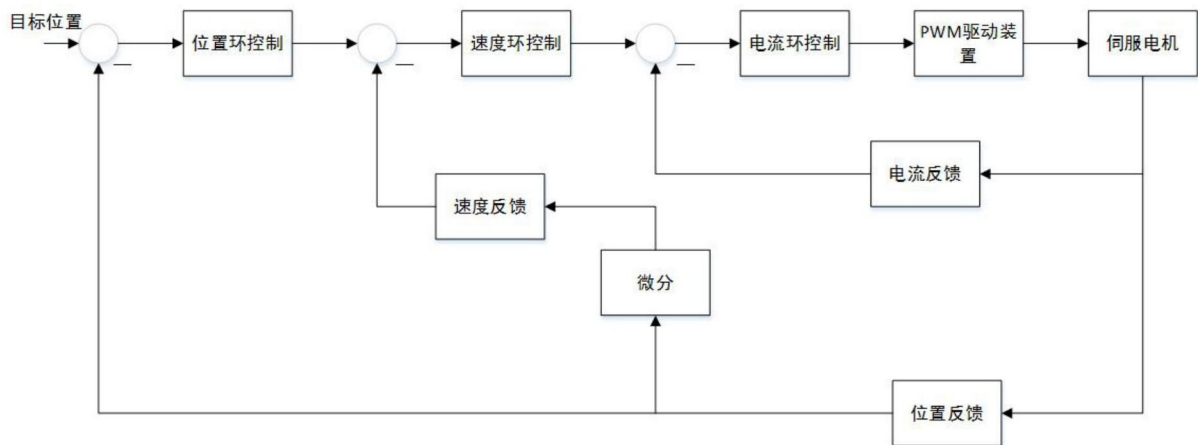


图2



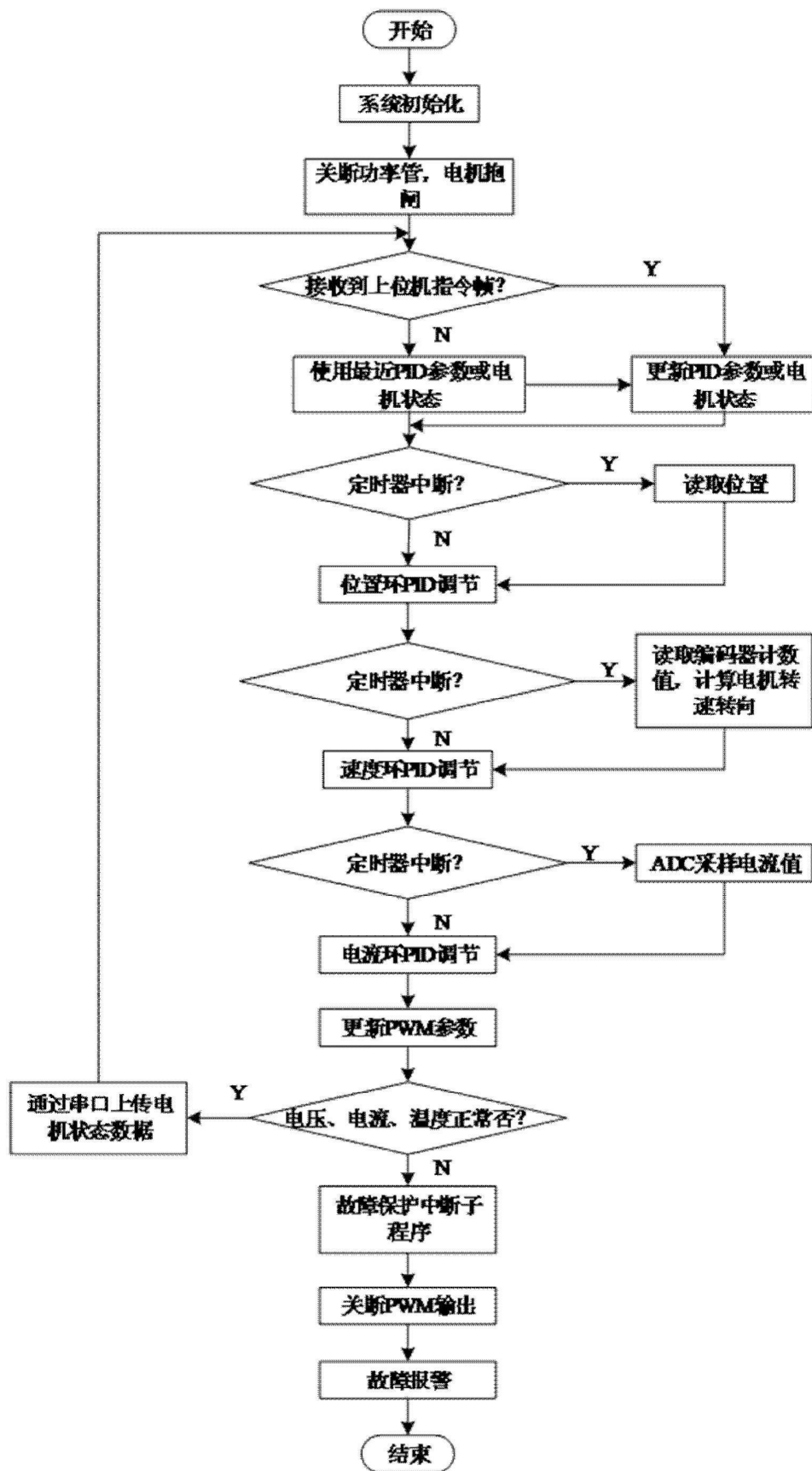


图3

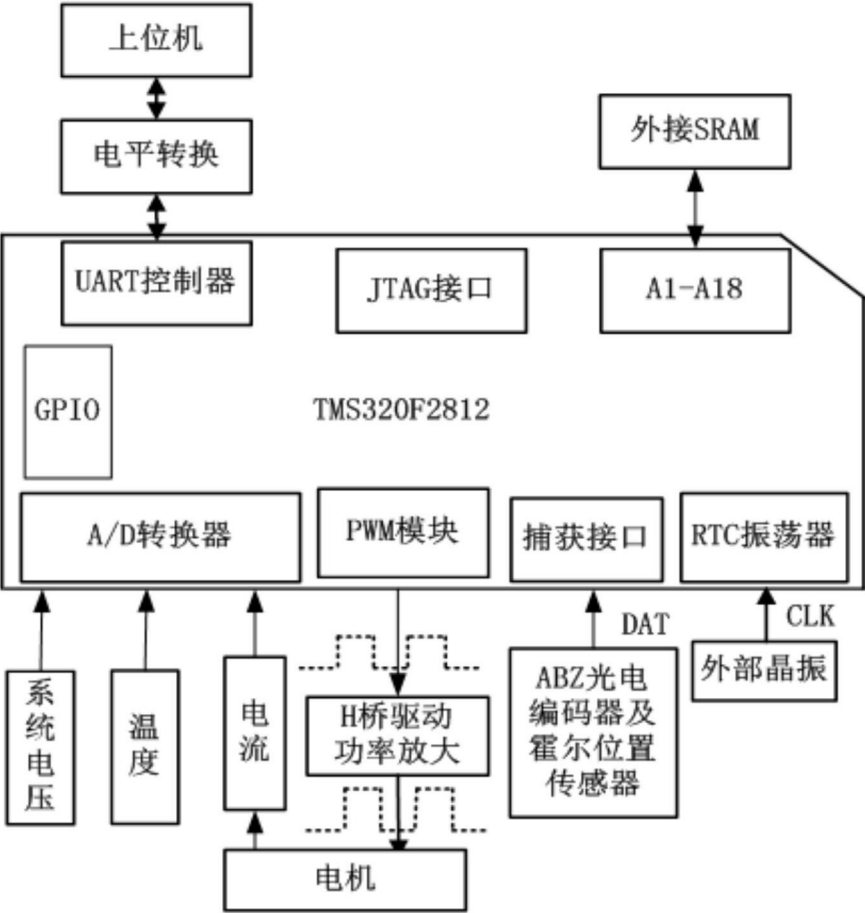


图4