

PID（比例积分微分）英文全称为 Proportion Integration Differentiation，它是一个数学物理术语。

自动控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。一个控制系统包括控制器、传感器、变送器、执行机构、输入输出接口。控制器的输出经过输出接口、执行机构，加到被控系统上；控制系统的被控量，经过传感器，变送器，通过输入接口送到控制器。不同的控制系统，其传感器、变送器、执行机构是不一样的。比如压力控制系统要采用压力传感器。电加热控制系统的传感器是温度传感器。

1、开环控制系统

开环控制系统(open-loop control system)是指被控对象的输出(被控制量)对控制器(controller)的输出没有影响。在这种控制系统中，不依赖将被控量反馈回来以形成任何闭环回路。

2、闭环控制系统

闭环控制系统(closed-loop control system)的特点是系统被控对象的输出(被控制量)会反送回来影响控制器的输出，形成一个或多个闭环。闭环控制系统有正反馈和负反馈，若反馈信号与系统给定值信号相反，则称为负反馈(Negative Feedback)，若极性相同，则称为正反馈，一般闭环控制系统均采用负反馈，又称负反馈控制系统。闭环控制系统的例子很多。比如人就是一个具有负反馈的闭环控制系统，眼睛便是传感器，充当反馈，人体系统能通过不断的修正最后作出各种正确的动作。如果没有眼睛，就没有了反馈回路，也就成了一个开环控制系统。另例，当一台真正的全自动洗衣机具有能连续检查衣物是否洗净，并在洗净之后能自动切断电源，它就是一个闭环控制系统。

3、阶跃响应

阶跃响应是指将一个阶跃输入(step function)加到系统上时，系统的输出。稳态误差是指系统的响应进入稳态后，系统的期望输出与实际输出之差。控制系统的性能可以用稳、准、快三个字来描述。稳是指系统的稳定性(stability)，一个系统要能正常工作，首先必须是稳定的，从阶跃响应上看应该是收敛的；准是指控制系统的准确性、控制精度，通常用稳态误差来(Steady-state error)描述，它表示系统输出稳态值与期望值之差；快是指控制系统响应的快速性，通常用上升时间来定量描述。

4、PID 控制的原理和特点

在工程实际中，应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制，简称 PID 控制，又称 PID 调节。PID 解决了自动控制理论所要解决的最基本问题，

既系统的稳定性、快速性和准确性。调节 PID 的参数，可实现在系统稳定的前提下，兼顾系统的带载能力和抗扰能力，同时，在 PID 调节器中引入积分项，系统增加了一个零积点，使之成为一阶或一阶以上的系统，这样系统阶跃响应的稳态误差就为零。

当被控对象的结构和参数不能完全掌握，或得不到精确的数学模型时，控制理论的其它技术难以采用时，系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定，这时应用 PID 控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象，或不能通过有效的测量手段来获得系统参数时，最适合用 PID 控制技术。 PID 控制，实际中也有 PI 和 PD 控制。PID 控制器就是根据系统的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。

比例（P）控制

比例控制是一种最简单的控制方式。其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差（Steady-state error）。

积分（I）控制

在积分控制中，控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。对于一个自动控制系统，如果在进入稳态后存在稳态误差（误差 $\neq 0$ ），则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统（System with Steady-state Error）。而在控制器中引入“积分项”则能对误差进行记忆并积分，可以消除静差，所以采用积分控制器有利于提高系统的稳态性能。积分项取决于对误差时间的积分，随着时间的增加，积分项会增大。这样，即便误差很小，积分项也会随着时间的增加而加大，它推动控制器的输出增大而使稳态误差进一步减小，直到等于零。因此，比例+积分（PI）控制器，可以使系统在进入稳态后无稳态误差。另外，使用 PI 控制时积分作用会使系统增加了一个位于原点的开环极点，使信号产生 90 度的相角延后，对系统的稳定性不利。

微分（D）控制

在微分控制中，控制器的输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率）成正比关系。自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳。其原因是由于存在有较大惯性组件（环节）或有滞后(delay)组件，其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差的作用的变化“超前”。这就是说，在控制器中仅引入“比例”项往往是不够的，比例项的作用仅是放大误差的幅值，而目前需要增加的是“微分项”，它能预测误差变化的趋势，这样，具有比例+微分的控制器，就能够提前使抑制误差的控制作用等于零，甚至为负值，从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象，微分控制作用能够敏感出信号偏差的变化趋势，产生有效的早期修正信号，以增加系统的阻尼程度，使系统的相角裕度提高，从而改善系统的动态稳定性，具有一定的预见性。但是，因为微分控制作用只对动态过程起作用，而对稳态过程没有影响，并对系统噪声非常敏感，因此引用出微分要适度。

PID 用于控制精度比例是必须的，它直接影响精度，影响控制的结果。积分：它相当于力学的惯性能使震荡趋于平缓。微分控制提前量，它相当于力学的加速度，影响控制的反应速度。太大会导致大的超调量。使系统极不稳定。太小会使反应缓慢。一般而言 PID 调节是一个整体的说法，在实际中 PID 的比例积分微分并非总是同时使用 PI 调节和 PD 调节使用较多。

控制规律选择应当根据被控对象的特性，负载变化、主要扰动及系统控制要求等具体情况，同时还要考虑到系统的经济性多种因素，通常按如下原则选择控

制规律：

- 1) 若被控对象的时间常数较大或延迟时间较长，应引入微分控制规律。例如，系统输出允许有偏差，可以选用比例微分控制；系统输出要求无偏差，则选用 PID 控制
- 2) 若被控制对象的时间常数较小，负载变化也不大，同时系统输出要求无偏差时，可选择 PI 控制。
- 3) 若被控制对象的时间常数较小，负载变化较小，系统控制性能要求不高时，可选择比例控制。

5. PID 具体是怎么对误差进行控制的，下面以电机控制为例：

所谓“误差”就是命令与输出的差值。比如你希望控制电机转速为 1500 转，而事实上控制电机转速只有 1000 转，则误差： $e=500$ 转。如果电机实际转速为 2000 转，则误差 $e=-500$ 转（注意正负号）。

该误差值送到 PID 控制器，作为 PID 控制器的输入。PID 控制器的输出为：误差 $\times K_p + K_i \times \text{误差积分} + K_d \times \text{误差微分}$ 。

即 $K_p \times e + K_i \times \int e dt + K_d \times (de/dt)$ （式中 K_p 为比例系数； K_i 为积分系数； K_d 为微分系数； t 为时间，分别对时间积分、微分）

上式为三项求和（希望你能看懂），PID 结果经过各种处理可送入电机驱动器控制电机的有效电压。

从上式看出，如果没有误差，即 $e=0$ ，则 $K_p \times e=0$ ； $K_d \times (de/dt)=0$ ；而 $K_i \times \int e dt$ 不一定为 0。三项之和不一定为 0。即如果控制器有 I 环节则就算没有输入误差输出也不一定为 0，而对于无积分（I）环节则必需有误差输入才会有输出。因此有积分环节才能实现系统的无静差（ $e=0$ ）控制。

总之，如果“误差”存在，PID 就会对控制器作调整，直到误差=0。

如果想对 PID 具体控制过程更详细，准确的理解，请参照陈伯时老师的《电力拖动自动控制系统》的 1.6 节 2.2 节。相信看完后会对 PID 控制有全新的认识。

6、PID 控制器的参数整定

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的核心内容。它是根据被控过程的特性确定 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间的大小。PID 控制器参数整定的方法很多，概括起来有两大类：一是理论计算整定法。它主要是依据系统的数学模型，经过理论计算确定控制器参数。这种方法所得到的计算数据未必可以直接用，还必须通过工程实际进行调整和修改。二是工程整定方法，它主要依赖工程经验，直接在控制系统的试验中进行，且方法简单、易于掌握，在工程实际中被广泛采用。PID 控制器参数的工程整定方法，主要有临界比例法、反应曲线法和衰减法。三种方法各有其特点，其共同点都是通过试验，然后按照工程经验公式对控制器参数进行整定。但无论采用哪一种方法所得到的控制器参数，都需要在实际运行中进行最后调整与完善。现在一般采用的是临界比例法。利用该方法进行 PID 控制器参数的整定步骤如下：(1)首先预选择一个足够短的采样周期让系统工作；(2)仅加入比例控制环节，直到系统对输入的阶跃响应出现临界振荡，记下这时的比例放大系数和临界振荡周期；(3)在一定的控制度下通过公式计算得到 PID 控制器的参数。

下面分别介绍下工程整定法口诀：

工程整定法口诀：

曲线振荡很频繁，比例度盘要放大
曲线漂浮绕大湾，比例度盘往小扳
曲线偏离回复慢，积分时间往下降
曲线波动周期长，积分时间再加长
曲线振荡频率快，先把微分降下来
动差大来波动慢。微分时间应加长

第一句：当振荡曲线，频率高的时候，应当放大比例系数 K 。

第二句：当振荡曲线，频率低的时候，应当减小比例系数 K 。

第三句：当振荡曲线，趋向于稳态的时候，如果比率小，则应减小积分的时间。

第四句：当振荡曲线，趋向于稳态的时候，如果比率大，则应当增加积分的时间。

第五句：当振荡曲线，固有振荡频率高的话，则应当减小微分时间。

第六句：当振荡曲线，振荡幅值大，固有频率低的话，则应当增加微分时间。

7、PID 参数整定的一般原则与一般步骤

由于自动控制系统被控对象的千差万别，PID 的参数也必须随之变化，以满足系统的性能要求。这就给使用者带来相当的麻烦，特别是对初学者。下面简单介绍一下调试 PID 参数的一般原则与步骤：

(1) 一般原则

a. 在输出不振荡时，增大比例增益 P 。

b. 在输出不振荡时，减小积分时间常数 T_i 。

c. 在输出不振荡时，增大微分时间常数 T_d 。

(2) 一般步骤

a. 确定比例增益 P

确定比例增益 P 时，首先去掉 PID 的积分项和微分项，一般是令 $T_i=0$ 、 $T_d=0$ ，使 PID 为纯比例调节。输入设定为系统允许的最大值的 60%~70%，由 0 逐渐加大比例增益 P ，直至系统出现振荡；再反过来，从此时的比例增益 P 逐渐减小，直至系统振荡消失，记录此时的比例增益 P ，设定 PID 的比例增益 P 为当前值的 60%~70%。比例增益 P 调试完成。

b. 确定积分时间常数 T_i

比例增益 P 确定后，设定一个较大的积分时间常数 T_i 的初值，然后逐渐减小 T_i ，直至系统出现振荡，之后在反过来，逐渐加大 T_i ，直至系统振荡消失。记录此时的 T_i ，设定 PID 的积分时间常数 T_i 为当前值的 150%~180%。积分时间常数 T_i 调试完成。

c. 确定积分时间常数 T_d

积分时间常数 T_d 一般不用设定，为 0 即可。若要设定，与确定 P 和 T_i 的方法相同，取不振荡时的 30%。

d. 系统空载、带载联调，再对 PID 参数进行微调，直至满足要求。

我个人认为 PID 参数的设置的大小，一方面是要根据控制对象的具体情况而定；另一方面是经验。 P 是解决幅值震荡， P 大了会出现幅值震荡的幅度大，但震荡频率小，系统达到稳定时间长； I 是解决动作响应的速度快慢的， I 大了响应速度慢，反之则快；一般 D 设置都比较小，而且对系统影响比较小。

评价一个控制系统是否优越，有三个指标：快、稳、准。

所谓快，就是要使输出能快速地达到“命令值”（不知道你的系统要求多少时间）

所谓稳，就是要输出稳定不波动或波动量小（不知道你的系统允许多大波动）

所谓准，就是要求“命令值”与“输出值”之间的误差 e 小（不知道你的系统允许多大误差）

对于你的系统来说，要求“快”的话，可以增大 K_p 、 K_i 值

要求“准”的话，可以增大 K_i 值

要求“稳”的话，可以增大 K_d 值，可以减少输出波动

仔细分析可以得知：这三个指标是相互矛盾的。

如果太“快”，可能导致不“稳”；

如果太“稳”，可能导致不“快”；

只要系统稳定且存在积分 K_i ，该系统在静态是没有误差的（会存在动态误差）；

所谓动态误差，指当“命令值”不为恒值时，“输出值”跟不上“命令值”而存在的误差。不管是谁设计的、再好的系统都存在动态误差，动态误差体现的是系统的跟踪特性，比如说，有的音响功放对高频声音不敏感，就说明功放跟踪性能不好。

控制器参数整定的最终目的是控制反馈量快速、稳定地跟随给定。因此本人认为在实际参数整定时，关键是要有“准确敏锐的眼睛”。可将控制器控制的给定量与反馈量直观地显示出来（可以用示波器，观测软件等），这样在实际调试的时候才能直观地看到调节某个参数时的实际控制效果，才能快速完成参数整定。否则单看系统的表面现象是不能准确判断出实际参数整定效果的。

附 1：网络上对 PID 的一种通俗易懂的讲解

控制模型：你控制一个人让他以 PID 控制的方式走 110 步后停下。

(1) P 比例控制，就是让他走 110 步，他按照一定的步伐走到一百零几步（如 108 步）或 100 多步（如 112 步）就停了。

说明：

P 比例控制是一种最简单的控制方式。其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差（Steady-state error）。

(2) PI 积分控制，就是他按照一定的步伐走到 112 步然后回头接着走，走到 108 步位置时，然后又回头向 110 步位置走。在 110 步位置处来回晃几次，最后停在 110 步的位置。

说明：

在积分 I 控制中，控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。对于一个自动控制系统，如果在进入稳态后存在稳态误差，则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统（System with Steady-state Error）。为了消除稳态误差，在控制器中必须引入“积分项”。积分项对误差取决于时间的积分，随着时间的增加，积分项会增大。这样，即便误差很小，积分项也会随着时间的增加而加大，它推动控制器的输出增大，使稳态误差进一步减小，直到等于零。因此，比例+积分（PI）控制器，可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

(3) PD 微分控制，就是他按照一定的步伐走到一百零几步后，再慢慢地向 110 步的位置靠近，如果最后能精确停在 110 步的位置，就是无静差控制；如果停在 110 步附近（如 109 步或 111 步位置），就是有静差控制。

说明：

在微分控制 D 中，控制器的输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率）成正比关系。

自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳，其原因是由于存在有较大惯性组件（环节）或有滞后（delay）组件，具有抑制误差的作用，其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差作用的变化“超前”，即在误差接近零时，抑制误差的作用就应该是零。这就是说，在控制器中仅引入“比例 P”项往往是不够的，比例项的作用仅是放大误差的幅值，而目前需要增加的是“微分项”，它能预测误差变化的趋势。这样，具有比例+微分的控制器，就能够提前使抑制误差的控制作用等于零，甚至为负值，从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象，比例 P+微分 D（PD）控制器能改善系统在调节过程中的动态特性。

附 2：位置式与增量式 PID 控制算法

PID 调节是连续系统中技术成熟且应用十分广泛的一种调节方式，经实践证明，将其移植到微机控制系统中，将原来硬件实现的功能用软件来代替，同样可以获得满意的控制效果，而此时的控制算法成为数字 PID 算法。数字 PID 控制算法通常又分为位置式和增量式控制算法。

（1）位置式 PID 控制算法

由于计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差来计算控制量。因此，在计算机控制系统中，必须首先对式（1-28）进行离散化处理，用数字形式的差分方程代替连续系统地微分方程，此时积分项和微分项可分别用求和及增量表示：

$$\int_0^n e(t)dt = \sum_{i=1}^n e(i)\Delta t = T \sum_{i=1}^n e(i) \quad (1-29)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (1-30)$$

将式（1-29）和（1-30）代入（1-28），可得到离散的 PID 表达式：

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} + u_0 \quad (1-31)$$

式中 $\Delta t = T$ —— 采样周期，必须使 T 足够小，才能保证系统有一定的精度；

$e(k)$ —— 第 k 次采样时的偏差值；

$e(k-1)$ —— 第 $(k-1)$ 次采样时的偏差值；

k —— 采样序号， $k=0, 1, 2, \dots$ ；

$u(k)$ —— 第 k 次采样时调节器的输出；

式（1-31）是数字 PID 算法的非递推形式，称全量算法。算法中，为了求和，必须将系统偏差的全部过去值 $e(j)$ ($j=1, 2, 3, \dots, k$) 都存储起来。这种算法得出控制量的全量输出 $u(k)$ ，是控制量的绝对数值。在控制系统中，这种控制量确定了执行机构的位置，例如在阀门控制中，这种算法的输出对应了阀门的位置（开度）。所以，通常把式（1-31）称为位置型 PID 的位置控制算式，将这种算法称为“位置算法”。

（2）增量式 PID 控制算法

在很多控制系统中，由于执行机构需要的不是控制量的绝对值，而是控制量

的增量时，要给一个增量信号即可。因此通常采用增量式 PID 算法。

由式 (1-31) 可以看出，要想计算 $u(k)$ ，不仅需要本次与上次的偏差信号 $e(k)$ 和 $e(k-1)$ ，而且还要在积分项中把历次的偏差信号 $e(j)$ 进行相加，即 $\sum_{j=0}^k e(j)$ 。

这样，不仅计算繁琐，而且为保存 $e(j)$ 还要占用很多内存。因此，用式 (1-31) 直接进行控制很不方便。为此，我们做如下改动。

根据递推原理，由式 (1-31) 写出第 $(k-1)$ 次的 PID 输出表达式：

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} + u_0 \quad (1-32)$$

将 (1-31) 与 (1-32) 两式相减，可得

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (1-33)$$

式中 $K_i = K_p \frac{T}{T_i}$ —— 积分系数；

$K_D = K_p \frac{T_D}{T}$ —— 微分系数；

式 (1-33) 表示第 k 次输出的增量 $\Delta u(k)$ ，等于第 k 次与第 $k-1$ 次调节器输出的差值，即在第 $(k-1)$ 次的基础上增加（或减少）量，所以式 (1-33) 叫做增量式 PID 控制算法。由式 (1-33) 可知，要计算第 k 次输出值 $u(k)$ ，只需知道 $u(k-1)$ ， $e(k)$ ， $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 即可，比用式 (1-31) 计算要简单得多。

在位置控制算式中，不仅需要对 $e(j)$ 进行累加，而且计算机的任何故障都会引起 $u(k)$ 大幅度变化，对生产不利。

增量式 PID 算法与位置式 PID 算法相比，有如下优点：

(1) 位置式 PID 算法是全量输出，每次输出与整个过去状态有关，算式中含有所有过去偏差的累加值 $\sum_{j=0}^k e(jT)$ ，容易产生较大的积累误差。而增量式 PID

算法只需计算增量，计算误差对控制量的影响较小。对于增量式 PID 控制，由于计算机只输出控制增量 $\Delta u(k)$ ，对应于执行机构位置的变化部分，因此，当计算机误动作时，对系统的影响小。

(2) 在位置式控制算法中，由手动到自动切换时，必须首先使计算机的输出值等于阀门的原始开度，即 $u(k-1)$ ，才能保证手动/自动地无扰动切换，这将给程序设计带来困难。而增量设计只与本次的偏差值有关，与阀门原来的位置无关，因而增量算法易于实现手动/自动无扰动切换。

(3) 增量式 PID 算法一般设置上下限进行限幅处理。因此其不产生积分失控，容易获得较好的调节品质。

附 3: PID 与自适应 Self-tuningPID 的区别:

首先弄清楚什么是自适应控制

在生产过程中为了提高产品质量,增加产量,节约原材料,要求生产管理及生产过程始终处于最优工作状态。因此产生了一种最优控制的方法,这就叫自适应控制。在这种控制中要求系统能够根据被测参数,环境及原材料的成本的变化而自动对系统进行调节,使系统随时处于最佳状态。自适应控制包括性能估计(辨别)、决策和修改三个环节。它是微机控制系统的发展方向。但由于控制规律难以掌握,所以推广起来尚有一些难以解决的问题。

加入自适应的 pid 控制就带有了一些智能特点,像生物一样能适应外界条件的变化。

还有自学习系统,就更加智能化了。

附 4: 永磁同步电动机电流环 PI 控制的分析

当电机转速低时,基于 PI 控制作用效果明显,控制效果较好,但转速较高时,其电流环输出电流 ABC 与给定电流会出现幅值和相位上的偏差,分析其原因。有两个方面:一是电机反电势的对电流控制环的干扰,会随转速升高而增大。虽然可用提高比例放大倍数来减少这一影响,但有时又有受到直流端电压不能够任意提高的限制。且在放大过程中,会同时将谐波电流放大而影响其电流输出性能。二是通常采用的 PI 调节的工作频带不够宽。因为电机反电动势是一个与谐波无关的幅值和相角不连续的电压信号。但在高速时,对电流环的干扰较大,因此需要寻找解决问题办法。

根据分析和实验我们可以考虑两种办法来提高电流控制环的性能:一是在电流控制环中预先把反是电动势的影响考虑进去。即在进行矢量控制设计时考虑旋转电势的影响,可以考虑电压前馈控制的电流环设计,因为前馈控制就是解决扰动问题的;二是根据情况,设法拓展 PI 调节器的运行频带,可采用在磁场定向坐标系上 PI 电流调节器的设计方法,即将三相交流电流变换到矢量控制定向磁场 M 轴和转矩 T 轴所组成的坐标系中,使电流控制环控制的是直流电流信号,(即为同步旋转坐标系下的电流调节器)而直流信号恰好具有对运行频带不敏感的特点,从而可在一定程度上扩大电流器的工作范围。

在永磁交流伺服系统中,实现电流反馈控制的系统结构有两种方式:一种是采用静止坐标下的电流调节器,另一种是采用同步旋转坐标系下的电流调节器。前一种控制结构具有结构简单容易实现、电流响应快等优点,因此在永磁同步电动机控制系统中普遍采用。图 2-5 示出其系统结构框图,但是由于永磁同步电机的 U、V、W 三相电流均为交流量,三个 PI 控制器的给定值和实际值都是随时间交变的。这就为 PI 控制器参数的设计带来很大的困难。并且在大多数情况下,对交流量的 PI 控制效果要比直流量差,PI 电流调节器积分环节会使交流信号产生一定的相角延后,造成在电流的实际控制过程中,控制系统的稳定性和抗扰动性都较差,即使在稳态,电流的静态偏差也不为 0,而且容易出现动态过程中的超调,即无法实现对电机的快速、精确控制。特别是在被控的永磁同步电机转速较高(三相电流的频率 f 较大)的情况下,可能根本无法实现对电机的伺服控制。

综上所述,基于三相电流控制的交流伺服系统虽然在控制原理上正确的,但

却不能应用高精度的永磁同步电机伺服控制系统。因此伺服系统采用图 2-6 示同步旋转坐标系下的电流调节器控制。其具体实现过程如下：通过位置传感器准确检测电机转子空间位置，计算得到转子速度；速度控制器输出定子 q 轴绕组分量的参考值 i_q^* ，同时给定 $i_d^* = 0$ ；由电流传感器检测定子绕组电流，分解得定子电流的 d 、 q 轴分量 i_d 和 i_q ；电流控制器的输出为施加的空间电压矢量的 d 、 q 轴分量 u_d^* 和 u_q^* ，经 SVPWM 模块形成 6 路 PWM 信号输出，经功率放大后改变加在电机绕组上的电流，从而实现转速电流双闭环的控制。

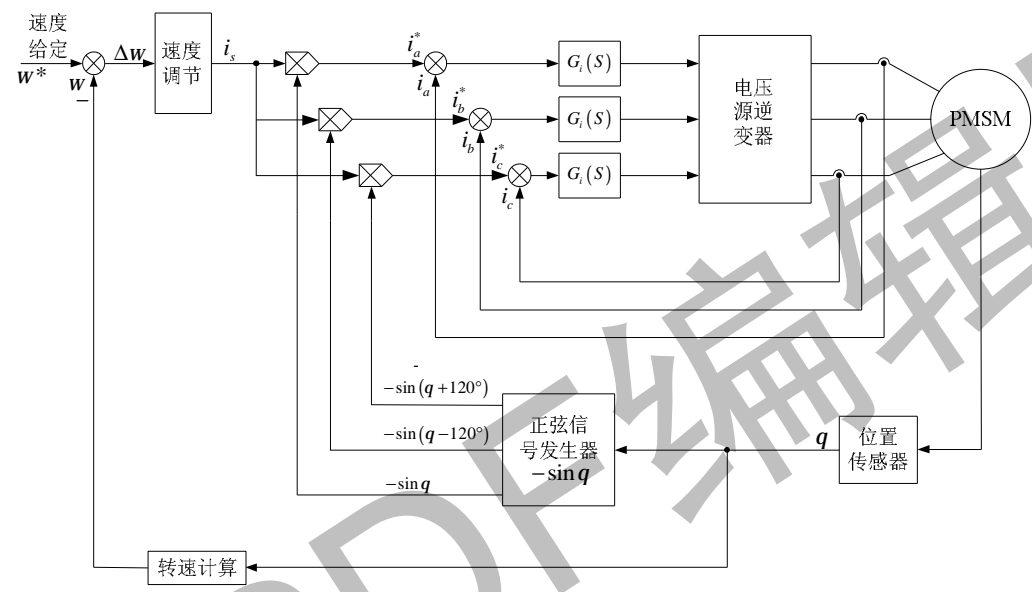


图 2-5 静止坐标下的电流调节器系统结构图

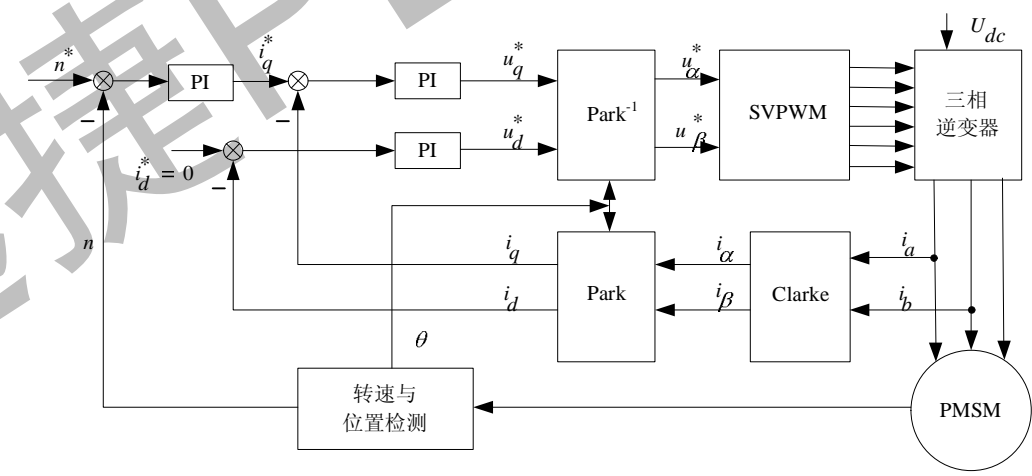


图 2-6 同步旋转坐标系下的电流调节器控制系统结构图

附 5：汇编程序

----- 速 度 PI 调 节 -----

	LACC	N_REF	;速度给定值,由外部输入
	SUB	N	;减反馈值
	SACL	N_EK	;保存偏差
	LACC	N_RK,12	;左移12位
	LT	N_EK	
	MPY	N_KP	;比例系数,Q12格式
	APAC		
	SACH	N_U,4	;相当于右移12位
	LACC	N_U	;检测调节器输出是否超限
	SUB	I_MIN	;与下限比较
	BCND	POS1,GT	;如果大于则跳转
	LACC	I_MIN	;否则超过下限
	B	LIM	;ACC = 下限值
POS1			
	LACC	N_U	
	SUB	I_MAX	;与上限比较
	BCND	POS2,GT	;超过上限则跳转
	LACC	N_U	;否则正常调整
	B	LIM	
POS2			
LIM			
	LACC	I_MAX	;ACC = 上限值
	SACL	I_REF	;输出
	SUB	N_U	
	SACL	N_ELPI	;求极限偏差
	LT	N_ELPI	
	MPY	N_KC	;积分饱和修正系数,Q12格式
	PAC		
	LT	N_EK	
	MPY	N_KI	;积分系数,Q12格式
	APAC		
	ADD	N_RK,12	
	SACH	N_RK,4	;更新 N_RK

附 6 : C 程序

```
//=====速度 PI=====//
void Speed_PI(void)
{
    Kcspeed=Kispeed/Kpspeed;
    Espeed=Nref-N;           //PI 调节输入偏差
    Uspeed=Kpspeed*Espeed+RKspeed; //PI 调节输出
    if(Uspeed<0)
    {
```

```

        if((Nmin-Uspeed)>=0)
            Iref=Nmin;
        else
            Iref=(int)Uspeed;          //下限限幅
        }
    else
    {
        if(Nmax-Uspeed<0)              //上限限幅
            Iref=Nmax;
        else
            Iref=(int)Uspeed;
        }
    RKspeed=Kcspeed*(Iref-Uspeed)+Espeed*Kispeed+RKspeed; //积分累积量
    Iref1=Iref;
}

```