自适应模糊PID控制在机场恒压加油中的应用

针对传统的飞机恒压加油方式存在的流量波动大、压力控制不准确、能源浪费大及效率低下，提出了采用变频调速技术实现机场飞机恒压加油的方式，依据加油管网油压的变化，自动调节电泵转速，有效地实现飞机恒压加油。同时针对加油系统复杂多变的管路，模型参数无法准确测定，把自适应模糊思想与常规PID控制融合成自适应模糊PID控制然后应用于恒压加油系统中。通过Matlab进行仿真实验，结果表明系统在运行中处于优化状态。此法可广泛应用在其他需要恒压控制的实际工程项目中，因而具有一定的研究价值。

史云玲／黑龙江工业学院电气与信息工程系
杜文奇／哈尔滨工程大学自动化学院

史云玲／讲师

关键词／Keywords
恒压加油·
自适应模糊控制·
PID控制·
系统仿真·

0 引言

随着我国民航事业的发展，各机场航班流量不断增加，机场飞机加油系统不同时间段需要给不同数量的飞机加油，这就使得机场飞机加油流量波动范围非常大，流量的波动直接反映在管路压力的变化上。只要保证管路加油压力的恒定就能维持管路中流量在一定范围内变化[1]。传统的恒压加油方式是通过回流阀配合工频泵实现的，把工频泵打出去的多余油采用回流调节实现管路恒压控制。这样势必存在流量波动大、压力控制不准确、能源浪费大和效率低下，同时工频泵的起停会引起电网电流的跳跃性突变，这会极大地冲击输油管道和各类电气设备，缩短使用寿命。采用变频调速实现恒压加油的方式从根本改变了传统通过控制回流实现恒压控制的方式，通过变频器改变电动机的转速来实现恒压[2]控制。依据所需油量变化（表现为压力的变化）自动调节系统的运行，成为解决机场加油系统“加油流量波动范围大、压力控制不准确”等问题的绝佳方案，完全可以解决通过回流实现工频泵恒压加油所带来弊端。

目前国内使用变频调速方案实现恒压加油的控制思路主要基于文献[3]提出的传统PID控制。传统PID控制器设计可靠、简单且稳定性好，一般用于可准确数学建模的系统。对于机场管路加油系统这种多参数、时变的复杂系统，如果采用常规PID，会出现超调量和振荡次数大幅度增加，过渡时间明显延长等一系列问题，控制效果往往达不到预期。因此这种系统需要能根据不同的情况实时调整PID参数的控制器，以满足系统控制需求。参数自适应模糊PID控制就是把自适应模糊思想与传统PID控制融合在一起，吸收了自适应模糊控制与传统PID控制两者各自的长处，用于解决传统控制方法无法解决的被控对象参数变化范围比较大的问题[4]，通过控制系统的自适应调整能力，识别系统运行过程的参数，根据规则自整定参数，从而满足运行过程参数变化需求，比传统PID控制方法效果好，可靠性高。

本文针对传统飞机恒压加油方式的不足提出了采用变频调速方式实现飞机恒压加油，并根据实际情况改进了恒压加油系统的控制方式，设计了具有自适应模糊控制思想的PID控制器。通过在线模糊自整定对PID参数修改，对加油管路系统压力进行实时控制，取得了比较好

的控制效果。

1 系统分析

1.1 变频恒压加油系统的构成

据系统设计要求，为达到大范围恒压加油的目的，选择三台油泵实现恒压加油。系统工艺图如图1所示。

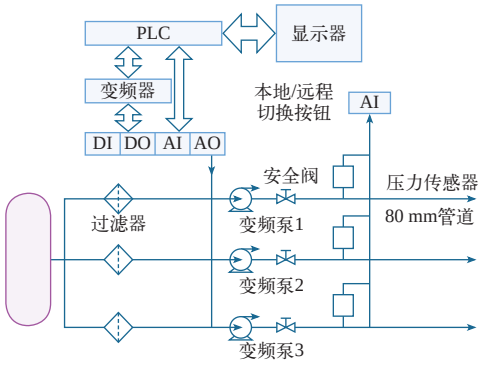

图1 恒压加油控制工艺图

系统包括人机交互界面、PLC控制器、变频器、电泵、管路和阀门等设备构成。系统具有自动/手动变频恒压加油、自动/手动工频加油及报警等功能。系统以PLC为核心控制器，通过PLC控制变频器，再通过变频器带动油泵实现飞机加油。

1.2 恒压加油工作过程分析

加油系统运行时，由传感器检测得到的管路油压，与设定油压值作差比较，经过自适应模糊PID运算控制变频器从而调节1#泵转速。当变频器频率达到最高设定值时，经过一定延时后，如果管路压力还是低于设定值，就把1#变频泵由变频运行状态切换到工频运行状态，同时变频器切换到第二台变频泵开始控制第二台变频泵，第二台变频泵以变频状态起动，变频器输出频率上升，泵的转速也逐渐上升，直到达到管路油压与设定油压相等。如果第二台泵达到工频状态还不能满足油压设定值，再起动第三台油泵，直到满足要求。如果管路油压超过设定值，那就要逐渐减小变频器频率，如果频率减小到最低值，管路油压还是高于设定值再减泵，那么停最先投入运行的泵，直到油压达到要求。系统工作过程中电泵投入与退出遵循“先起动的泵先停，先停的泵先起动”原则。系统还具有液位、油压检测功能，当储油箱液位低或管路油压与设定值不符时报警。系统还设有保护、人机交互等功能。

1.3 恒压控制的原理分析

当系统选定油泵满足恒压加油工况工作要求后，下面进行加油系统恒压控制原理分析。

根据三相异步电动机理论可得，转速具有如下关系

$$n = 60f(1-s)/p \qquad (1)$$

式中，n为电动机输出转速，r/min；s为转差率；f为供电频率，Hz；p为电动机极对数。

根据相似定律，在泵的转速不是很高时，其性能可按以下公式推算

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \qquad (2)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \qquad (3)$$

式中，n_1、n_2为两种工况点下的转速，r/min；H_1、H_2为两种工况点下的扬程，m；Q_1、Q_2为两种工况点下的流量，L/min。

从式（1）分析可得输出转速n与电源供电频率f成比例关系，电动机输出转速随输入频率变化而变化，由式（2）、式（3）可知，通过调整电动机输出转速的大小就能改变油泵输出流量和扬程的大小。通过变频器改变输出频率，从而改变电动机转速，从而调整电动机控制油泵输出流量和扬程的大小，从而满足加油流量的需求，达到恒压控制的目的。根据上述原理并结合泵的工作性能特点，设计恒压控制原理框图如图2所示。

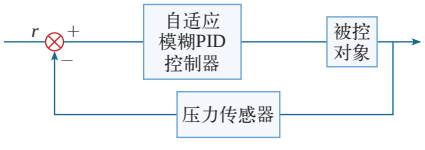

图2 恒压加油控制原理图

系统压力传感器把测量的压力值与给定值作差，系统根据给定值与测量值的偏差大小按照自适应模糊PID控制策略，自动跟踪现场实际运行情

况，实时调节系统参数，从而改变变频器频率输出，进而改变电泵转速，泵的输出流量与扬程随之改变，最终改变管路的油压，保证了管路油压的恒定状态。

2 自适应模糊PID控制器设计

2.1 模糊控制系统结构

自适应模糊PID控制器包括可变参数的PID控制器和模糊推理器[5]。模糊推理器的输入变量为偏差e和偏差变化率ec，输出变量为传统PID控制器参数K_P、K_I和K_D，通过模糊推理对K_P、K_I和K_D在线调整，实现不同e和ec对参数K_P、K_I和K_D自整定的目的。其结构如图3所示。

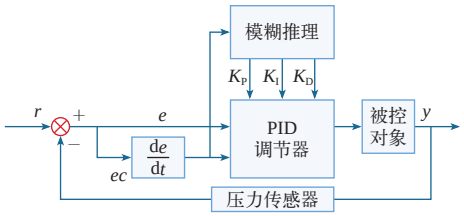

图3 参数自适应模糊PID控制器结构图

2.2 PID参数整定原则

PID控制器以给定值$r(t)$与输出值$c(t)$作差为输入，即

$$e(t)=r(t)-c(t) \tag{4}$$

PID连续控制算法表达式如下

$$P(t)=K_P\left[e(t)+\frac{1}{T_I}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+\frac{T_D\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right] \tag{5}$$

采样周期取T时，位置型PID表达式如下

$$P(k)=K_P e(k)+K_P\frac{T}{T_I}\sum_{j=0}^{k}e(j)+K_P\frac{T_D}{T}[e(k)-e(k-1)] \tag{6}$$

式中，$K_I=K_P(T/T_I)$为积分参数；$K_D=K_P(T_D/T)$为微分参数；K_P为比例参数；T_I为积分时间常数；T为采样周期。

PID参数K_P、K_I和K_D的作用如下。

1）比例K_P与响应速度和稳态调节准确度有关[6]。K_P取大值时，响应快，稳态调节准确度也高。K_P过大会有较大超调；K_P过小，响应变慢，调节准确度差，系统静态、动态性能变差。

2）积分K_I与系统稳态误差有关。K_I取大值时，稳态误差消除快。K_I过大，会出现较大超调；K_I太小，稳态误差难以消除，降低调节准确度。

3）微分K_D能在运行过程中抑制偏差变化，提前预报偏差变化。但K_D过大，会过早制动响应过程，且会削弱系统抗干扰的能力。

结合K_P、K_I和K_D对系统输出的影响，对于不同情况下的e和ec总结了K_P、K_I和K_D的整定原则。

1）当|e|较大时，为使响应输出快速地跟踪设定值，K_P应取值大些，K_D取值小些，同时应限制K_I的值，取$K_I=0$。

2）当|e|和|ec|中等大小时，为减小系统超调，K_P取值要较小些。此时，K_D的作用较大，K_D取值应小些，K_I取值要适当，才能维持系统响应速度。

3）当|e|较小时，K_P、K_I取值要大些，从而维持系统稳态性能。K_D取值要适当。当|ec|较大时，K_D要取小些，|ec|较小时，K_D要取大些。

2.3 各变量隶属度函数的确定

根据自适应模糊PID控制原理及设计需求，控制器输入设定为二个变量、输出设定为三个变量，以e和ec为输入，ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D为输出，将e和ec的取值区间定义为模糊集上的论域，论域均取为{−6，−4，−2，0，2，4，6}，模糊子集取为{NB，NM，NS，0，PS，PM，PB}，其元素含义分别为负大，负中，负小，零，正小，正中，正大。同样输出量ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D论域取为{−6，−4，−2，0，2，4，6}，模糊子集取为{NB，NM，NS，0，PS，PM，PB}。隶属度函数均取为三角形隶属度函数，如图4所示。

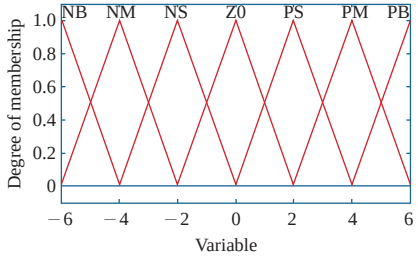

图4 e、ec、ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D的隶属函数

2.4 建立模糊控制规则表

根据设计人员实际经验及专业理论知识并综

合整定原则，设计模糊控制规则。参数ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D自整定模糊控制规则共49条，以下列举其中3条。

1）If (e is NB) and (ec is NB) then (ΔK_P is PB) (ΔK_I is NB) (ΔK_D is PS)（1）

2）If (e is NB) and (ec is NM) then (ΔK_P is PB) (ΔK_I is NB) (ΔK_D is NS)（1）

3）If (e is PB) and (ec is PB) then (ΔK_P is NB) (ΔK_I is PB) (ΔK_D is PB)（1）

依据49条规则，通过模糊推理得到PID参数调整量，代入式（7）～式（9）计算出调整后的PID参数，即

$$K_P = K'_P + \Delta K_P = K'_P + \{e_i, ec_i\}_P \quad (7)$$

$$K_I = K'_I + \Delta K_I = K'_I + \{e_i, ec_i\}_I \quad (8)$$

$$K_D = K'_D + \Delta K_D = K'_D + \{e_i, ec_i\}_D \quad (9)$$

式中，K'_P、K'_I和K'_D为采用常规方法整定得到的K_P、K_I、K_D。规则中的ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D为根据e、ec的大小基于模糊控制规则得到的修正参数。

3 系统仿真及分析

3.1 恒压加油系统近似数学模型分析

变频恒压加油系统由PLC控制器、变频器、压力传感器、电气控制柜和油泵等电气设备组成的闭环控制系统。系统在实现恒压加油过程中始终只有一台泵处于变频运行状态，也正是只通过对这一台变频泵进行变频调速实现压力从一种状态到另一种状态的调整，最终实现恒压加油。所以其数学模型结构为如图5所示的电气结构图。

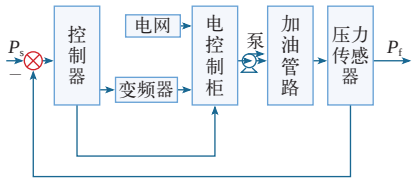

图5 用来建立数学模型的电气结构图

由于恒压加油系统的被控对象是一个非线性的、时变的、滞后的且模型不确定的对象，很难得出其准确数学模型，只能得出近似等效的模型。油泵由初始管路压力状态向管路供油直到管路油压达到恒定，可分为两个过程：零压力过程和压力上升过程[7]。

1）零压力过程。油泵逐渐把油输送到管路中，管路中油的压力基本维持原来初始状态压力不变，该变化过程表现为纯滞后过程。

2）压力上升过程。油泵继续向管网中输油，油会在管路中充满，油压也随之上升直至达到恒定，可用惯性环节来描述。

根据已有成熟理论资料可得到加油系统的近似模型为

$$G_1 = \frac{p_0}{n_P} = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s} \quad (10)$$

式中，传递函数中输入n_P为转速，即油泵的转速；输出p_0为压力，即加油系统管路出口压力；T_1为加油系统时间常数；k_1为加油系统的增益；τ为加油系统的时滞常数。

系统中变频器和电动机环节可近似等效为时间常数为T_2的一阶惯性环节，因为在三相异步电动机变频调速过程中，当处于低频段时，由于电阻、漏电抗（漏电抗与频率、电流有关）的影响，电动机起动转矩也将随频率的下降相应减小[8]。为了快速起动电动机，同时使起动转矩尽可能大并且使得起动电流尽可能小。当确定了油泵的型号和变频器参数后，时间常数T_2也就确定了。该部分传递函数为

$$G_2 = \frac{n_M}{f_c} = \frac{k_2}{T_2 s + 1} \quad (11)$$

式中，f_c为变频器的输入频率；n_M为电动机转速；T_2为电动机惯性时间常数；k_2为电动机增益。

恒压加油系统中的其余环节，如压力变送环节、继电控制等环节的滞后时间常数非常小，与加油系统的其他时间常数相比均可忽略，都可近似等效为一个比例环节[9]

$$G_2 = k_3 \quad (12)$$

恒压加油系统中油泵通过电动机来拖动，油泵转速和电动机转速相等，即

$$n_P = n_M \quad (13)$$

综上分析，系统数学模型可等效为以上3个环节的串联，即

$$G=\frac{P_0}{f_c}=\frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)}e^{-\tau s} \qquad (14)$$

式中，k为系统总增益，$k=k_1k_2k_3$；系统中T_1与加油系统加油机器的数目有关，一般加油机器数目越多，系统惯性时间常数也越大。滞后时间τ由加油系统的最不利点决定，由最不利点和加油机器距离和加油系统平均流速决定。T_2的值取决于变频器设定的加速时间常数和电动机自身特性参数。得到系统框图如图6所示。

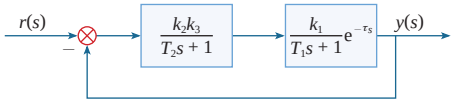

图6 恒压加油系统近似数学模型

图中，$[k_1/(T_1s+1)]e^{-\tau s}$为加油管路系统压力变化的近似数学模型；$k_2k_3/(T_2s+1)$ 为电动机、变频器等其他环节的数学模型；$r(s)$、$y(s)$分别为用户设定的压力值、干扰量及压力测量变送值。

当油泵和变频器选定后，电动机的时间常数和变频器相关参数则可确定，选择T_2为12 s。参数k_1、T_1和τ的确定方法是：将恒压加油闭环系统反馈回路断开使其成为开环系统，然后人为设定控制器让其输出特定幅值的阶跃信号作为加油系统数学模型的输入，油泵由此起动，当油泵转速达到特定数值后记录下油压的数值变化过程[10-13]。然后根据记录下的过程数据对系统辨识。加油系统的模型为

$$G=\frac{P_0}{f_c}=\frac{0.8}{(12s+1)(100s+1)}e^{-6s} \qquad (15)$$

3.2 仿真及分析

通过Matlab的模糊工具箱建立系统数学模型，采用常规 PID和自适应模糊PID分别对恒压加油系统进行控制仿真，如图7所示。图7中上部分为自适应模糊PID控制，下部分为传统PID控制，在传统PID控制中，经反复试凑确定参数如下：$K_P=4$，$K_I=0.032$，$K_D=0.2$；自适应模糊PID控制中，e、ec、ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D的论域区间分别为[－3，3]、[－3，3]、[－3，3]、[－3，3]和[－3，3]。初步设定输入的量化因子为$K_e=3$、$K_{ec}=6$。比例因子为$K_{KP}=0.5$、$K_{KI}=0.003$和$K_{KD}=15$，然后再通过Simulink调试，反复试凑得到最后的值为10、5、0.1、0.001和6，控制效果比较好。

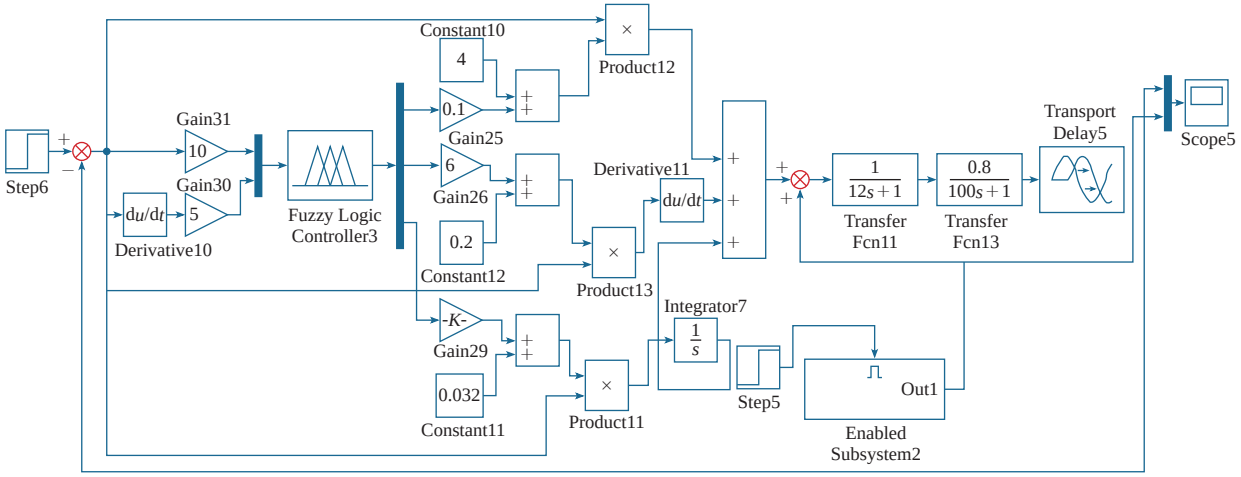

图7 自适应模糊PID 控制和传统PID控制的Simulink框图（加干扰）

如图8所示，分析计算可知，采用自适应模糊PID进行控制时，超调量是0.1%，调整时间是75 s，采用PID时，超调量变为4%，调整时间变为140 s；第200 s时给被控对象添加幅值是0.3的阶跃干扰，采用自适应模糊PID控制时超调量变为6.5%，调整时间是100 s，采用PID控制时超调量变为11%，调整时间变为150 s，综上数据结果分析，采用自适应模糊PID好于常规PID。

下面验证被控对象的参数改变后在阶跃信号激励下自适应模糊PID控制器的强适应性和鲁棒

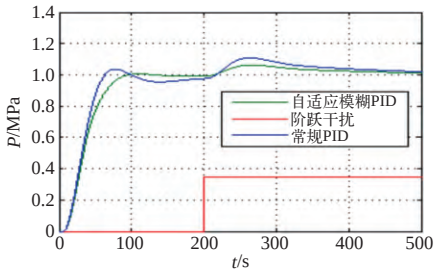

图8 系统响应图（加干扰）

性。在原常规PID与自适应模糊PID的参数均不变的前提下，改变原被控对象的参数，将原被控对象修改为

$$G(s)=\frac{0.96}{(15s+1)(100s+1)}e^{-6s} \qquad (16)$$

对改变参数后的模型采用两种控制方式仿真，同样在第200 s时加阶跃干扰信号，结果如图9所示。

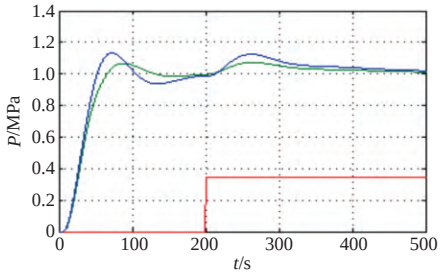

图9 模型参数变化后系统响应（加干扰）

从图7中分析计算可知，系统模型参数改变后，采用自适应模糊PID进行控制时超调量是5.2%，调整时间是80 s，采用PID控制时，超调量变为16%，调整时间变为130 s；在第200 s时添加阶跃干扰，采用模糊PID控制时超调量为7%，调整时间为100 s，采用PID控制时，超调量变为15%，调整时间变为150 s。结果表明，使用自适应模糊PID控制方法效果明显好于传统PID控制方法。

4 结束语

本文结合机场实际情况提出采用变频调速实现飞机加油的控制方式代替传统的加油方式，有效解决了传统恒压加油方式的弊端。同时由于加油管路系统复杂多变无法准确确定参数，设计了自适应模糊PID控制器，根据e、ec对PID参数进行适时调整，并将得到的新的参数施予系统模型。实验结果证明，自适应模糊PID控制动态性能优异、稳态性好且适应模型参数变化能力强。此控制系统在机场恒压加油控制系统中成功应用，解决接机场加油控制的难题，为机场加油系统建设提供了范例。

参考文献

[1] 方利民，赵素勤．恒压供水系统的PLC控制 [J]．电子技术与软件工程，2014 (7)：260．

[2] 李国俊．基于变频器的恒压供水系统的设计 [J]．科技资讯，2015 (29)：55-56．

[3] 牛军凯．基于PLC的变频恒压供水系统 [J]．煤，2014 (12)：94-96．

[4] 方稳．我国装备制造业的技术进步状况及其创新路径研究 [D]．兰州：西北师范大学，2012．

[5] 朱思亮．基于PLC的恒压供水监控系统设计与实现 [D]．成都：电子科技大学，2013．

[6] 韩智，张赞牢，张起欣．大流量快速加油技术发展应用及关键问题研究 [J]．中国储运，2013 (10)：166-169．

[7] Moreau E，Paillat T，Tourchard G．Space charge density in dielectric and conductive liquids flowing through a glass pipe [J]．Journal of Electrostatics，2001，51 (1)：448-454．

[8] 林川．换热首站供暖供水与补水自动控制系统设计与实现 [D]．西安：西安建筑科技大学，2012．

[9] 左岗永．水压双缸同步系统模糊PID控制的研究 [D]．兰州：兰州理工大学，2011：34-36．

[10] 吴会敏，黄宗建．基于神经网络的恒压供水智能PID控制 [J]．自动化技术与应用，2015 (7)：14-16．

[11] 郭小丽．基于变频调速技术的电动轮汽车恒压加油系统的研发 [D]．赣州：江西理工大学，2009．

[12] 章振保．加油站油气回收检测系统的研究与设计 [D]．武汉：武汉工程大学，2013．

[13] 刁兆江，厉虹，李金．3D金刚体摆位置伺服系统PID控制研究 [J]．电气工程学报，2016，11 (10)：37-43．

（收稿日期：2016－01－08）EA