



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103670755 B

(45)授权公告日 2019.01.18

(21)申请号 201310421372.7

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2013.09.16

F02D 41/30(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

F02D 41/26(2006.01)

申请公布号 CN 103670755 A

F02D 41/14(2006.01)

(43)申请公布日 2014.03.26

(56)对比文件

(30)优先权数据

US 2003127082 A1, 2003.07.10, 说明书第0031段及附图.

1216440.6 2012.09.14 GB

CN 101189561 A, 2008.05.28, 全文.

(73)专利权人 通用汽车环球科技运作有限责任公司

CN 101587354 A, 2009.11.25, 全文.

地址 美国密歇根州

US 2004084025 A1, 2004.05.06, 全文.

(72)发明人 S.尼杜 G.默利诺

US 6424906 B1, 2002.07.23, 全文.

(74)专利代理机构 北京市柳沈律师事务所  
11105

审查员 李洪宇

代理人 侯宇

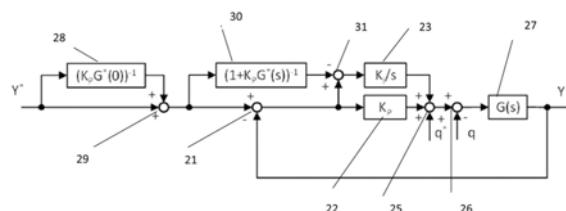
权利要求书1页 说明书10页 附图5页

## (54)发明名称

用于喷射压力控制的前馈技术及其应用

## (57)摘要

本发明的一个实施例提供了一种使用前馈计算的控制方法,所述方法包括:使用受控变量的设置点值(Y\*)来计算(28)闭环静态误差的补偿,将所述贡献量加(29)到设置点值(Y\*),运算(30)闭环误差的估值,以获得前馈贡献量。



1. 一种使用前馈技术的控制方法,所述方法包括:

使用受控变量的设置点值 (Y\*) 计算闭环静态误差的补偿,

将所述补偿加到该设置点值 (Y\*) ,

运算闭环误差的估值,以获得前馈贡献量;

使用受控变量误差 (Y\*-Y) 以计算载荷比例贡献量,

将所述受控变量误差 (Y\*-Y) 减去所述前馈贡献量,并且计算载荷积分贡献量。

2. 根据权利要求1所述的控制方法,其中,所述方法还包括:

将所述载荷比例贡献量和所述载荷积分贡献量加到估计载荷 (q\*) ,

将之前的和应用到实际系统设备。

3. 根据权利要求1所述的控制方法,其中:

喷射压力p为所述受控变量 (Y) ,

燃料量Q<sub>in</sub>为比例载荷、积分载荷和系统载荷q\*的估值之间的和,

燃料量Q<sub>out</sub>为实际系统载荷q,

传递函数G代表量的积分平衡:

$$\Delta p \sim \int (Q_{in} - Q_{out}) \cdot dt.$$

4. 一种控制装置,包括:通过使用受控变量的设置点值 (Y\*) 用于计算闭环静态误差的补偿的器件,用于将所述补偿加到设置点值 (Y\*) 的器件,用于运算闭环误差估值以获得前馈贡献量的器件,通过使用受控变量误差 (Y\*-Y) 用于计算载荷比例贡献量的器件,和用于将所述受控变量误差 (Y\*-Y) 减去所述前馈贡献量并且计算载荷积分贡献量的器件。

5. 根据权利要求4所述的控制装置,其中,所述装置还包括用于将所述载荷比例贡献量和所述载荷积分贡献量加到估计载荷 (q\*) 的器件,和用于将之前的和应用到实际系统设备的器件。

## 用于喷射压力控制的前馈技术及其应用

### 技术领域

[0001] 本发明涉及用于基于PI的闭环控制增强的新前馈技术。特别地,该新方法可广泛地被应用在汽车领域中,并且更特别地,用于内燃发动机的燃料喷射系统的喷射压力控制,所述方法通过汽车系统的电子控制单元驱动。

### 背景技术

[0002] 已知现代内燃发动机设置有用于直接将燃料喷射到发动机汽缸中的燃料喷射系统。例如,所谓的共轨系统(CRS)为用于柴油发动机的最常用的一种。CRS通常包括燃料泵,其液压地连接到燃料共轨;和多个电动控制的燃料喷射器,其分别设置在发动机的相应汽缸中,并且通过专用喷射管道液压地连接到燃料轨。

[0003] 还已知,喷射压力为决定到发动机中的燃料喷射质量(例如,汽缸盖中的燃料喷雾穿透量)的最重要参数之一,并且必须根据发动机的工况调节,例如根据发动机载荷对发动机速度的脉谱图。用于控制喷射压力的已知技术是与比例积分(PI)闭环控制结合的前馈技术。

[0004] 实际压力喷射控制和全部使用标准前馈技术的控制的问题是通过前馈来全补偿不可行,并且因此这意味着PI积分器的关键作用是,补偿未知系统并且因此使调节误差为零的唯一方式。另一方面:未知系统需要PI积分的大的跨度,并且出于抗饱和目的施加到积分器输出的任何饱和度应允许调节误差消除;需要过滤前馈使得暂态期间PI积分工作载荷更重:对于指定的电压转换速率,过滤越强,响应超调越长;抗饱和技术在具有高电压转换速率的强烈暂态期间可能是无效的:这可能意味着对设置点动态和积分增益的限制。

[0005] 因此存在对新的前馈策略的需要,该策略可克服上述问题,使PI积分器仅对未知系统和容差的补偿起作用。

[0006] 本发明的一个实施例的目的是提供一种使用新的前馈技术的自动控制方法,其与PI闭环控制结合,使积分增益 $K_I$ 与超调要求隔离。

[0007] 另一个目的是提供一种装置,其允许执行上述方法。

[0008] 这些目的通过具有独立权利要求中叙述的特征的方法、装置、发动机、计算机程序和计算机程序产品以及电磁信号实现。

[0009] 从属权利要求描述了有效的和/或特别有利的方面。

### 发明内容

[0010] 本发明的一个实施例提供一种使用前馈技术的控制方法,所述方法包括:

[0011] 使用受控变量的设置点值来计算闭环静态误差的补偿,

[0012] 将所述补偿加到所述设置点值,

[0013] 运算闭环误差的估值,以获得前馈贡献量。

[0014] 因此,公开了一种用于执行自动控制方法的控制设备,所述设备包括

[0015] 用于使用受控变量的设置点值来计算闭环静态误差的补偿的器件,

- [0016] 用于将所述补偿加到所述设置点值的器件，  
[0017] 用于运算闭环误差估值以获得前馈贡献量的器件。  
[0018] 本实施例的优点是，新的前馈技术使积分增益 $K_I$ 与超调要求隔离。  
[0019] 根据本发明的一个方面，根据权利要求1的方法，其中所述方法还包括：  
[0020] 使用受控变量误差来计算载荷比例贡献量，  
[0021] 将所述前馈贡献量从所述受控变量误差减去，并且计算载荷积分贡献量。  
[0022] 因此，所述控制装置还包括通过使用受控变量误差用于计算载荷比例贡献量的器件，和用于将所述前馈贡献量从所述受控变量误差减去，并且计算载荷积分贡献量的器件。  
[0023] 该方面的优点是，由于经消除缺陷(dump)的特性更实际，因此PI设计变得更容易。积分增益可非常高，并且理论上将仅受稳定性约束限制。  
[0024] 根据另一方面，所述方法还包括：  
[0025] 将所述载荷比例和载荷积分贡献量相加到所述系统载荷的估值，  
[0026] 将该之前的和应用到实际系统设备。  
[0027] 因此，所述控制设备还包括用于将所述载荷比例和所述载荷积分贡献量相加到估计载荷的器件，和用于将所述之前的和应用到所述实际系统设备的器件。  
[0028] 该方面的优点是考虑了所有与该受控变量相关的设备环境。  
[0029] 根据另一个实施例，所述方法控制根据之前实施例的燃料喷射系统的喷射压力，其中：  
[0030] 所述喷射压力对应于所述受控变量，  
[0031] 所述流动速率对应于所述载荷，  
[0032] 所述设备传递函数可被表达为  $\Delta p \sim \int (Q_{in} - Q_{out}) \cdot dt$ 。  
[0033] 该实施例的优点是积分运算范围与超调限制隔离，最大超调被限制，并且可设置为接近零的值，而且可能去除对高达理想步骤响应的压力设置点转换速率的任何限制。  
[0034] 根据其多个方面之一的方法可在计算机程序的辅助下进行，所述计算机程序包括用于进行上面所述方法的所有步骤的程序编码，并且为包括该计算机程序的计算机程序产品的形式。  
[0035] 该计算机程序产品可体现为用于内燃发动机的控制装置，包括电子控制单元(ECU)、与ECU相关联的数据载体和存储在数据载体中的计算机程序，以使该控制装置以与所述方法相同的方式限定所述的实施例。在该情况下，当所述控制装置执行计算机程序时，上面所述的方法的所有步骤被进行。  
[0036] 根据又一方面的方法还可被体现为电磁信号，所述信号被调制以载有一系列代表用于进行所述方法的所有步骤的计算机程序的数据字节。  
[0037] 本发明的又一方面提供一种内燃发动机，其特别布置用于进行要求保护的方法。

## 附图说明

- [0038] 现在将仅以举例的方式参照附图描述多个实施例，附图中：  
[0039] 图1显示了汽车系统。  
[0040] 图2是属于图1的汽车系统的内燃发动机的一部分。  
[0041] 图3是关于PI调节系统的已知的前馈应用的框图。

- [0042] 图4是根据本发明一个实施例的应用到PI调节系统的新前馈技术的框图。
- [0043] 图5是图示了用于通过PI以闭环调节的第一级系统的在大小和相位方面的已知和新前馈技术的比较的曲线。
- [0044] 图6是图示了用于通过PI以闭环调节的第二级系统的在大小和相位方面的已知和新前馈技术的比较的曲线。
- [0045] 图7是图示了通过使用已知的前馈技术的受控变量特性的曲线。
- [0046] 图8是图示了通过使用新型的前馈技术的受控变量特性的曲线。
- [0047] 附图标记
- [0048] 20 框
- [0049] 21 框
- [0050] 22 框
- [0051] 23 框
- [0052] 24 框
- [0053] 25 框
- [0054] 26 框
- [0055] 27 框
- [0056] 28 框
- [0057] 29 框
- [0058] 30 框
- [0059] 31 框
- [0060] 40 数据载体
- [0061] 100 汽车系统
- [0062] 110 内燃发动机
- [0063] 120 发动机缸体
- [0064] 125 汽缸
- [0065] 130 汽缸盖
- [0066] 135 凸轮轴
- [0067] 140 活塞
- [0068] 145 曲轴
- [0069] 150 燃烧室
- [0070] 155 凸轮相位器
- [0071] 160 燃料喷射器
- [0072] 170 燃料轨
- [0073] 180 燃料泵
- [0074] 190 燃料源
- [0075] 200 进气歧管
- [0076] 205 进气管
- [0077] 210 进气端口
- [0078] 215 阀

- [0079] 220 端口
- [0080] 225 排气歧管
- [0081] 230 涡轮增压器
- [0082] 240 压缩机
- [0083] 245 涡轮增压器轴
- [0084] 250 涡轮
- [0085] 260 中间冷却器
- [0086] 270 排气系统
- [0087] 275 排气管
- [0088] 280 后处理装置
- [0089] 290 VGT致动器
- [0090] 300 排气调节系统
- [0091] 310 EGR冷却器
- [0092] 320 EGR阀
- [0093] 330 节气门体
- [0094] 340 空气质量流量和温度传感器
- [0095] 350 歧管压力和温度传感器
- [0096] 360 燃烧压力传感器
- [0097] 380 冷却剂温度和液面高度传感器
- [0098] 385 润滑油温度和液面高度传感器
- [0099] 390 金属温度传感器
- [0100] 400 燃料轨压力传感器
- [0101] 410 凸轮位置传感器
- [0102] 420 曲轴位置传感器
- [0103] 430 排气压力和温度传感器
- [0104] 440 EGR温度传感器
- [0105] 445 加速器位置传感器
- [0106] 446 加速器踏板
- [0107] 450 ECU
- [0108] \*设置点变量下标
- [0109] P,I 用于比例和积分的下标
- [0110] 1/s 拉普拉斯积分运算器
- [0111] s 拉普拉斯微分运算器
- [0112] G 传递函数
- [0113] q 载荷
- [0114] Y 控制变量
- [0115] K<sub>P</sub> 比例系数
- [0116] K<sub>I</sub> 积分系数
- [0117]  $\tau$  时间常数

- [0118]  $\tau_P$  比例时间常数
- [0119]  $\tau_F$  过滤时间常数
- [0120]  $p$  喷射压力
- [0121]  $Q_{in}$  进入轨的流动速率
- [0122]  $Q_{out}$  离开轨的流动速率

## 具体实施方式

[0123] 即使新前馈技术具有广泛的应用可能性,但是其可被有利的使用其中的技术领域之一仍是汽车领域,用于改善一些控制策略,例如燃料喷射系统的喷射压力控制。因此,具体实施方式的描述将以汽车系统的一般描述开始,接着为新控制技术及其相关控制装置的具体实施方式,并且以这样的用于改善喷射压力的控制的技术的实际应用结束。

[0124] 一些实施例可包括汽车系统100,如图1和2中所示,其包括内燃发动机(ICE)110,该内燃发动机110具有发动机缸体120,发动机缸体120限定至少一个汽缸125,汽缸125具有活塞140,该活塞140连接以使曲轴145旋转。汽缸盖130与活塞140配合,以限定燃烧室150。

[0125] 燃料和空气混合物(未示出)布置在燃烧室150中,并且被点燃,导致热膨胀排气,该热膨胀排气使活塞140往复运动。燃料被通过至少一个燃料喷射器160提供,空气被通过至少一个进气端口210提供。燃料被在高压下从与高压燃料泵180流体连通的燃料轨170提供到燃料喷射器160,高压燃料泵180增大从燃料源190接收的燃料的压力。具有上述公开部件的燃料喷射系统被称为共轨柴油喷射系统(CR系统)。其对于客车是相对新的喷射系统。与其他系统相比较,该喷射系统的主要优点是,由于系统中的高压和电磁控制的喷射器,可能精确地在恰当时刻喷射适当量的燃料。这意味着较低的燃料消耗和较少的排放。

[0126] 汽缸125中的每一个具有至少两个阀215,由凸轮轴135致动,凸轮轴135随曲轴145正时旋转。阀215选择地允许空气从端口210进入燃烧室150中,或者允许排气通过220离开。在一些例子中,凸轮相位器155可选择地改变凸轮轴135和曲轴145之间的正时。

[0127] 空气可被通过进气歧管200分配到进气端口(一个或多个)210。进气导管205从周围环境提供空气到进气歧管200。在其他实施例中,节气门体330可设置用于调节空气到歧管200中的流动。在其他实施例中,可提供强制进气系统,例如涡轮增压器230,其具有可旋转地结合到涡轮250的压缩机240。压缩机240的旋转提高导管205和歧管200中的空气的压力和温度。布置在导管205中的中间冷却器260可降低空气的温度。涡轮250通过从排气歧管225接收排气来旋转,排气歧管225将排气从排气端口220引导,并且在经由涡轮250膨胀之前引导通过一系列叶片。排气离开涡轮250,并且被引导到排气系统270。该示例显示了具有VGT致动器290的可变几何涡轮(VGT),VGT致动器290布置用于使叶片运动来改变排气通过涡轮机250的流动。在其他实施例中,涡轮增压器230可以是固定的几何形状和/或包括废气门。

[0128] 排气系统270可包括排气管275,具有一个或多个排气后处理装置280。该后处理装置可以是配置为改变排气成分的任何装置。后处理装置280的一些例子包括但不限于催化转化器(二元和三元)、氧化催化剂、贫氮氧化合物阱、烃吸收器、选择性催化还原(SCR)系统和颗粒过滤器。其他实施例可包括排气循环(EGR)系统300,其结合在排气歧管225和进气歧管200之间。EGR系统300可包括EGR冷却器310,用于降低EGR系统300中排气的温度。EGR阀

320调节EGR系统300中排气的流动。

[0129] 汽车系统100可进一步包括电子控制单元(ECU)450,其与一个或多个传感器和/或仪器通讯,所述传感器和/或仪器与ICE 110相关联,并且配备有数据载体40。ECU 450可从各种传感器接收输入信号,传感器配置为产生与多个物理参数成比例的信号,所述多个物理参数与ICE 110相关联。传感器包括但不限于,空气质量流量和温度传感器340、歧管压力和温度传感器350、燃烧压力传感器360、冷却剂和油的温度及液面高度传感器380、燃料轨压力传感器400、凸轮位置传感器410、曲轴位置传感器420、排气压力和温度传感器430、EGR温度传感器440和油门踏板位置传感器445。而且,ECU 450可产生输出信号到多个控制装置,所述多个控制装置布置用于控制ICE 110的操作,包括但不限于,燃料喷射器160、节气门体330、EGR阀320、VGT致动器290和凸轮相位器155的操作。应注意,虚线被用于指示ECU 450和各个传感器及仪器之间的通讯,但是为了清楚省略了一些。

[0130] 现在转到ECU 450,该装置可包括数字中央处理单元(CPU),其与存储系统和接口总线通讯。CPU配置为执行以程序存储在存储系统中的指令,并且向接口总线发送信号/从接口总线接收信号。该存储系统可包括多种存储类型,包括光学存储、磁存储、固态存储和其他非易失性存储器。接口总线可配置用于向各个传感器和控制装置发送模拟和/或数字信号、从各个传感器和控制装置接收模拟和/或数字信号和调制发送到/来自各个传感器和控制仪器的模拟和/或数字信号。该程序可体现本文公开的方法,允许CPU执行这样的方法的步骤,并且控制ICE 110。

[0131] 为了说明新的前馈技术,必须提供一些背景信息。图3中显示了PI调节的简图,其中 $G(s)$ 是该设备的实际传递函数, $G^*(s)$ 是该设备模型的传递函数。该前馈技术被通过传递函数 $G^*(s)^{-1}$ 和载荷估值 $q^*$ 直接应用到该设备中。

[0132] 设置点 $Y^*$ 和输出 $Y$ 之间的关系记录如下:

$$[0133] Y = \frac{[s/(K_I G^*(s)) + s K_P / K_I + 1]}{[s/(K_I G(s)) + s K_P / K_I + 1]} \cdot Y^* - \frac{s / K_I}{[s/(K_I G(s)) + s K_P / K_I + 1]} \cdot (q^* - q)$$

[0134] 其中,其他已经限定的变量:

[0135]  $K_P$ 是比例系数

[0136]  $K_I$ 是积分系数

[0137] 观察该方程,可说明,仅从数学角度来说,如果该设备传递函数 $G(s)$ 和载荷 $q$ 是公知的,则可能完全补偿该物理系统。实际上,假设估计函数等于实际函数:

[0138]  $G^*(s) = G(s)$

[0139]  $q^* = q$

[0140] 由此:

[0141]  $Y = Y^*$

[0142] 实际上,沿着图3中的框图,设置点值 $Y^*$ 被用于在20处计算载荷前馈贡献量。然后,受控可变误差( $Y^* - Y$ )在21处被计算,并且被用于在22处计算载荷比例贡献量,在23处计算载荷积分贡献量,其在24处被相加,然后在25处被加到载荷前馈贡献量和估计载荷 $q^*$ 。最后,计算的载荷被应用到实际系统,计算的载荷和实际物理载荷 $q$ 之间的差26对实际的设备传递函数27产生影响,并且受控变量的实际值 $Y$ 因此被确定。

[0143] 实际上通过前馈完全补偿不可行,理由各不相同,但是可特别考虑以下理由:

[0144] 设备模型通常为实际设备的强逼近,这意味着通过前馈完全补偿是个挑战。明显的是,我们应该考虑到由传感器和致动器引入的额外异常、非线性和误差。因此模型 $G^*(s)$ 代表仅用于低频范围的设备的特性,并且有时仅用于小信号变化的设备的特性;

[0145] 通常,设置点 $Y^*$ 受由 $G^*(s)^{-1}$ 放大的高频噪声影响。高频含量的放大可在传感器和致动器上引入饱和和变形,使得系统可能丧失其线性和调节性能。避免该类型问题的唯一方式是对传递函数 $G^*(s)^{-1}$ 增加适当的低通滤波。因此,不可能实现全补偿目标;

[0146] 通常,载荷 $q$ 受相关的误差的影响,其补偿 $q^*$ 可能仅指额定情况。

[0147] 前馈技术的有限效用表明PI积分器作为补偿未知系统,并且因此消除调节误差的唯一方式的重要作用。特别地,可观察到:

[0148] 未知系统,特别地,载荷容差要求PI大的积分跨度、出于抗饱和目的施加到积分器输出的任何饱和度应允许调节误差消除;

[0149] 过滤前馈的需要使得暂态期间PI积分工作载荷较重:对于指定转换速率,过滤越强,响应超调越高;

[0150] 抗饱和技术可能在高转换速率情况下,在强烈暂态期间无效:这可能表明对设置点动态和积分增益的限制。

[0151] 新的前馈技术目的是解决之前描述的限制,以使积分运转可能被最大化避免同样在暂态响应步骤中的任何超调,该方法及其相关设备记录在图4中。

[0152] 设置点 $Y^*$ 和输出 $Y$ 之间的关系如下,其中 $G^*(0)$ 为设备模型传递函数的静态值:

$$[0153] \frac{Y = \frac{[s / (K_I G^*(s)) + s K_P / K_I + 1]}{[s / (K_I G^*(s)) + s K_P / K_I + 1]} \cdot \frac{K_P G^*(s)}{(1 + K_P G^*(s))} \cdot \frac{(1 + K_P G^*(0))}{K_P G^*(0)} \cdot Y^* - \frac{s / K_I}{[s / (K_I G^*(s)) + s K_P / K_I + 1]} \cdot (q^* - q)}{}$$

[0154] 假设该设备的估计值等于实际值

[0155]  $G^*(s) = G(s)$

[0156]  $q^* = q$

[0157] 将导致

$$[0158] Y = \frac{K_P G^*(s)}{(1 + K_P G^*(s))} \cdot \frac{(1 + K_P G^*(0))}{K_P G^*(0)} \cdot Y^*$$

[0159] 与之前的前馈技术不同,该系统没有被完全补偿,而且,闭环控制行为等同于具有静态误差补偿的纯比例控制。实际上,按照图4中的框图,载荷前馈贡献确定如下:设置点值 $Y^*$ 被用于在28a处计算闭环静态误差的补偿,然后通过框30运算的该补偿和设定点值的和29给出闭环误差的估值。然后,在21处受控变量误差( $Y^* - Y$ )被计算,并且被用于在22处计算载荷比例贡献;相同的误差在31处由前馈贡献降低,然后被用于在23处计算载荷积分贡献。载荷比例和积分贡献以及估计载荷 $q^*$ 在25处被相加。最后,计算的载荷被应用到实际系统,计算的载荷和实际物理载荷 $q$ 之间的差26对实际设备传递函数27起作用,并且受控变量的实际值 $Y$ 这样被确定。

[0160] 因此,相关装置包括通过使用设置点值 $Y^*$ 用于在28处计算闭环静态误差的补偿的器件、用于在29处将该补偿和设置点值相加的器件和用于在30处相关设备估计闭环误差的器件。而且,该装置包括用于在21处计算受控变量误差( $Y^* - Y$ )并且在22处计算载荷比例贡

献量的器件;用于在23处通过使用变量误差和前馈贡献量之间的差31计算载荷积分贡献量的器件;用于在25处将比例和积分贡献量以及估计量 $q^*$ 相加的器件;用于计算计算载荷和实际物理载荷 $q$ 之间的差26,然后在27处计算实际设备传递函数的器件。

[0161] 显然,新技术执行较少,但是其实际应用由于以下原因更便利:

[0162] 高频下 $(1+K_P \cdot G^*(s))^{-1}$ 的大小通常是归一的,而且前馈被应用到PI积分器输入,其确保影响设置点 $Y^*$ 的高频噪声的良好过滤作用;

[0163] 等同于纯比例控制的闭环特性使得在零级、第一级和第二级系统的情况下具有完全消除缺陷的响应;

[0164] 如果设备模型 $G^*(s)$ 接近 $G(s)$ ,则PI的积分部分对可能的超调没有贡献,这使得将积分增益 $K_I$ 增大达由系统稳定性施加的最大限制;

[0165] PI积分不需要出于抗饱和目的的任何限制;

[0166] 选择用于 $K_I$ 的高值的可能性使得未知系统和载荷容差的恢复加速,如果其随系统操作点变化,则该优点特别相关。

[0167] 将显示对于第一和第二级系统,旧和新前馈技术之间的比较。

[0168] 假设具有第一级系统,该第一级系统具有以下传递函数:

$$[0169] G(s) = \frac{G_0}{(1+s\tau)}$$

[0170] 其中 $\tau$ 是系统的时间常数。

[0171] 然后,假设比例增益 $K_P$ 已经被适当选择为使得闭环的主极点将在仅比例调节器应用的情况下具有以下时间常数( $\tau_P$ ,比例时间常数):

$$[0172] \tau_P = \frac{\tau}{K_P G_0 + 1}$$

[0173] 两种前馈技术应用将被比较,假设对于已知的前馈技术, $G^*(s)$ 为加了高频过滤的设备模型的逆模型( $\tau_F$ ,过滤时间常数):

$$[0174] G^*(s)^{-1} = \frac{1}{G_0} \cdot \frac{(1+s\tau)}{(1+s\tau_F)}$$

[0175] 其中, $\tau_F$ 被适当选择,以限制设定点噪声的作用,假设,作为示例, $\tau_F = \tau_P$ 。

[0176] 对于新的前馈技术,假设 $G^*(s)$ 为设备模型。影响设置点 $Y^*$ 的高频噪声导致已经被PI积分器削弱,因此前馈应用不需要任何过滤器,则

$$[0177] (1 + K_P G^*(s))^{-1} = \frac{1}{(1 + K_P G_0)} \cdot \frac{(1+s\tau)}{\left[\frac{s\tau}{(1 + K_P G_0)} + 1\right]}$$

[0178] 图5中记录了用于两种情况的波德图,PI积分增益已经设置,以获得PI零等于 $2\tau_P$ 。应注意新的前馈技术怎样保持闭环响应被完全消除缺陷,并且等同于纯比例闭环控制。

[0179] 现在来到第二级系统,并且假设具有以下传递函数:

$$[0180] G(s) = \frac{G_0}{s \cdot (1 + s\tau)}$$

[0181] 于是假设设置增益 $K_P$ ,以在仅比例调节器应用的情况下,获得两个真实且一致的主极点:

$$[0182] K_P = \frac{1}{4\tau \cdot G_0}$$

[0183] 导致

[0184]  $\tau_{P1,2} = 2\tau$

[0185] 其中  $\tau_{P1,2}$  是两个主极点的时间常数。

[0186] 两个前馈技术应用将被比较,假设对于已知前馈技术,  $G^*(s)^{-1}$  为加了高频过滤的设备模型的逆模型

$$[0187] G^*(s)^{-1} = \frac{1}{G_0} \cdot \frac{s \cdot (1+s\tau)}{(1+s\tau_F)^2}$$

[0188] 其中,  $\tau_F$  被适当选择,以限制设置点噪声的作用,例如,假设  $\tau_F = \tau_{P1,2}$ 。

[0189] 对于新的前馈技术,假设  $G^*(s)$  为设备模型,则:

$$[0190] (1 + K_P G^*(s))^{-1} = \frac{s \cdot (1 + s\tau)}{[s \cdot (1 + s\tau) + K_P G_0]}$$

[0191] 图6中记录了用于两种情况的波德图,PI积分增益已经设置以获得PI零等于2  $\tau_{P1,2}$ 。应注意新前馈技术怎样保持闭合响应完全被消除缺陷,甚至在用于PI积分的非常高的增益的情况下。

[0192] 总之,新前馈技术使积分增益  $K_I$  与超调要求隔离,由于被消除缺陷的性能更实际,因此PI设计导致更容易。积分增益可能非常高,并且理论上将仅受稳定性制约条件限制;这对于系统载荷变化的快速恢复是非常有利的。影响输入设置点的噪声没有由前馈路径放大;这意味着对于前馈不需要另外的过滤。

[0193] 如所期望的,新前馈技术的实际应用为共轨系统中的喷射压力调节。系统中,通常共轨中的压力由高压泵流量 ( $Q_{in}$ ) 和朝向喷射器及最终压力调节阀的流量 ( $Q_{out}$ ) 之间的燃料量平衡确定。

[0194] 实际上,压力调节依据图3中的控制方案,其中压力  $p$  为受控变量  $Y$ ,燃料量  $Q_{in}$  为比例载荷、积分载荷、前馈载荷和系统载荷  $q^*$  的估值的和,并且燃料量  $Q_{out}$  为实际系统载荷  $q$ 。传递函数  $G$  代表量的积分平衡:

$$[0195] \Delta p \sim \int (Q_{in} - Q_{out}) \cdot dt$$

[0196] 如果通过已知的前馈技术控制,则压力调节非常敏感。特别地,在快速压力斜线上升期间,其控制的特征为通常由于用于调节闭环中的压力所用的PI积分部分造成压力超调,如图7中可见,其中  $Y, p$  为受控变量,并且  $Y^*, p^*$  为受控变量的设置点值。与PI调节器用于第一级系统的常见使用不同,限制积分器跨度的抗饱和技术不可能被适当地应用,因为喷射器的大范围漏损,其需要积分器自身的大的运算范围。由于该限制造成的主要问题是:

[0197] PI积分在斜线上升期间支持压力调节。其在斜线上升结束时,缓慢地解除,并且这造成高压超调,因此造成打开过压阀的风险;

[0198] 最大压力设置点受到限制,因为过压极限必须考虑,因而限制燃烧校准;

[0199] 压力设置点摆率 (slew-rate) 也受限制,以减轻过压危险后果,这表明对高发动机载荷期间对燃烧校准的限制。

[0200] 通过使用新的前馈技术,如在图4的框图中,并且在以下相同假设的情况下:

[0201] 压力  $p$  为受控变量  $Y$

[0202] 燃料量  $Q_{in}$  为比例载荷、积分载荷和系统载荷估值  $q^*$  之间的和

[0203] 燃料量  $Q_{out}$  为实际系统载荷  $q$

[0204] 传递函数  $G$  代表量的积分平衡 (the integral of the quantity balance with)

[0205]  $\Delta p \sim \int (Q_{in} - Q_{out}) \cdot dt$

[0206] 将得到下面的结果:PI积分器仅运算来补偿由于未知和容差造成的误差,同时斜线上升调节通过比例增益 $K_P$ 维持。图8中,其中 $Y, p$ 为受控变量, $Y^*, p^*$ 为受控变量的设置点值,可看到响应被完全消除缺陷,并且其特征为与 $1/K_P$ 成比例的通常的延迟。因此,将获得下面的益处:

[0207] 积分运算范围与超调限制隔离;

[0208] 最大超调受到限制,并且可设置为接近零的值(完全消除缺陷);

[0209] 可能去除对高达理想步骤响应的压力设置值摆率的任何限制;

[0210] 可能通过应用从设置点摆率计算的又一个前馈项补偿与 $1/K_P$ 成比例的通常的延迟。应用到该前馈项的适当的饱和度将限制该附加技术的最大固有超调。

[0211] 虽然已经在前面概述和具体实施方式中提出了至少一个示例性实施例,但是应意识到存在大量的变形形式。还应意识到,一个或多个示例性实施例仅为示例,并且不旨在以任何方式限制范围、应用或结构。而且,前面的概述和具体实施方式将提供给本领域技术人员实施至少一个示例性实施例的路径图,应可理解,可在示例性实施例中描述的元件的功能和布置方面做出多种改变,而不偏离所附权利要求及其法律等同物中提出的范围。

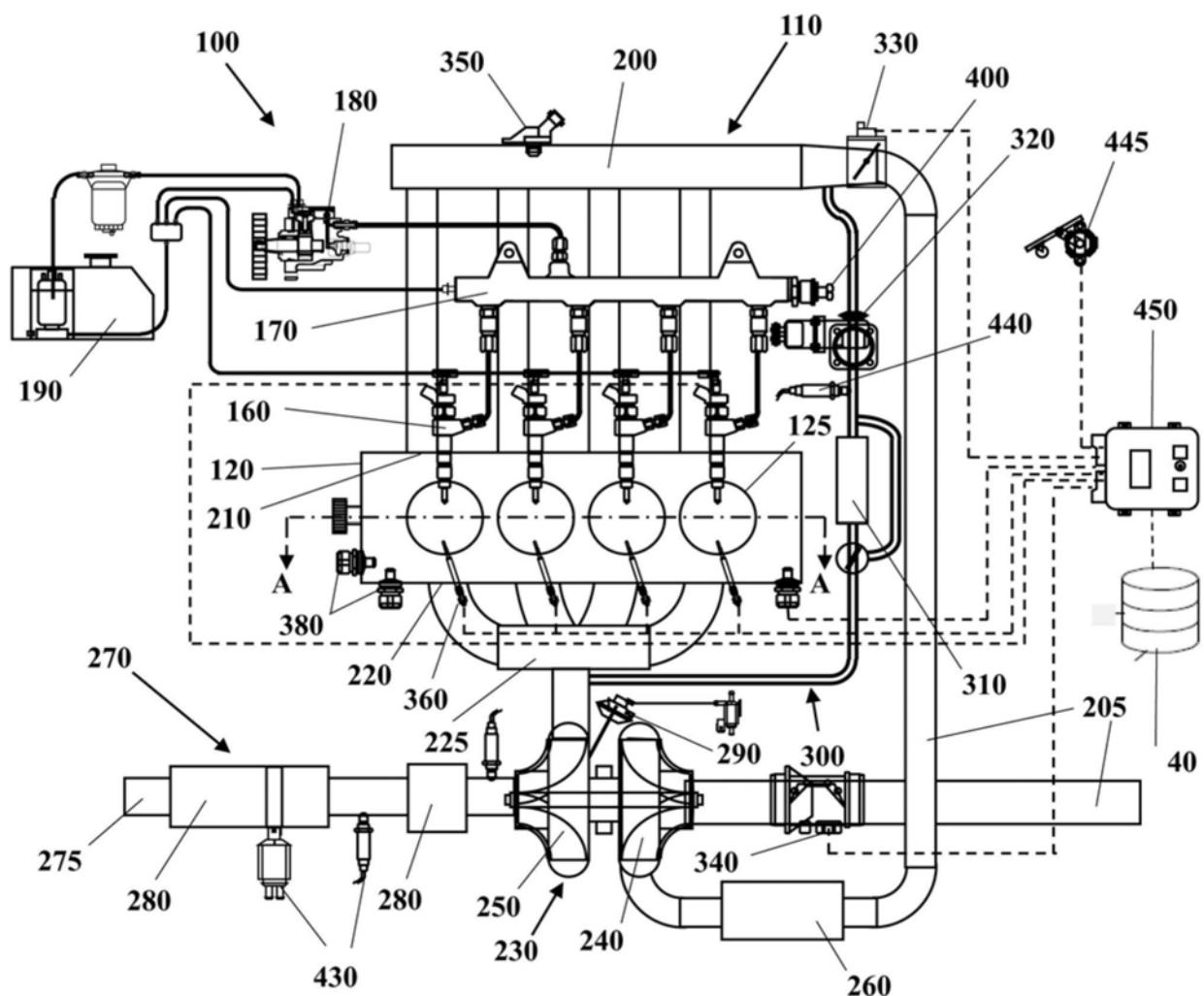


图1

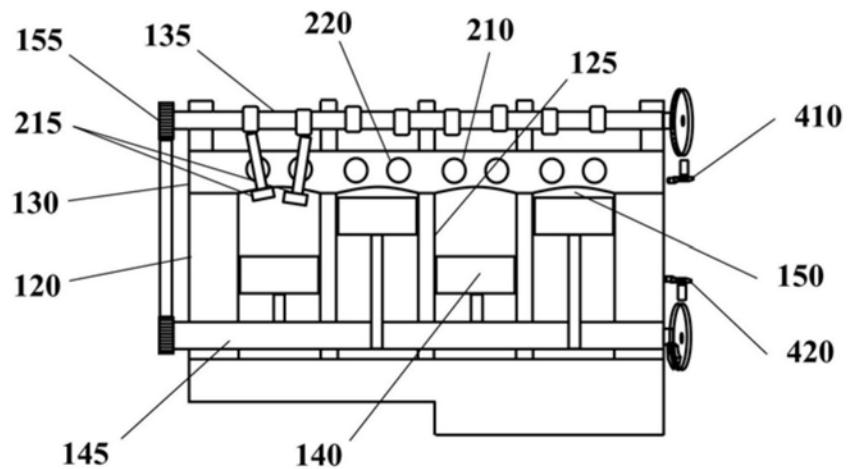


图2

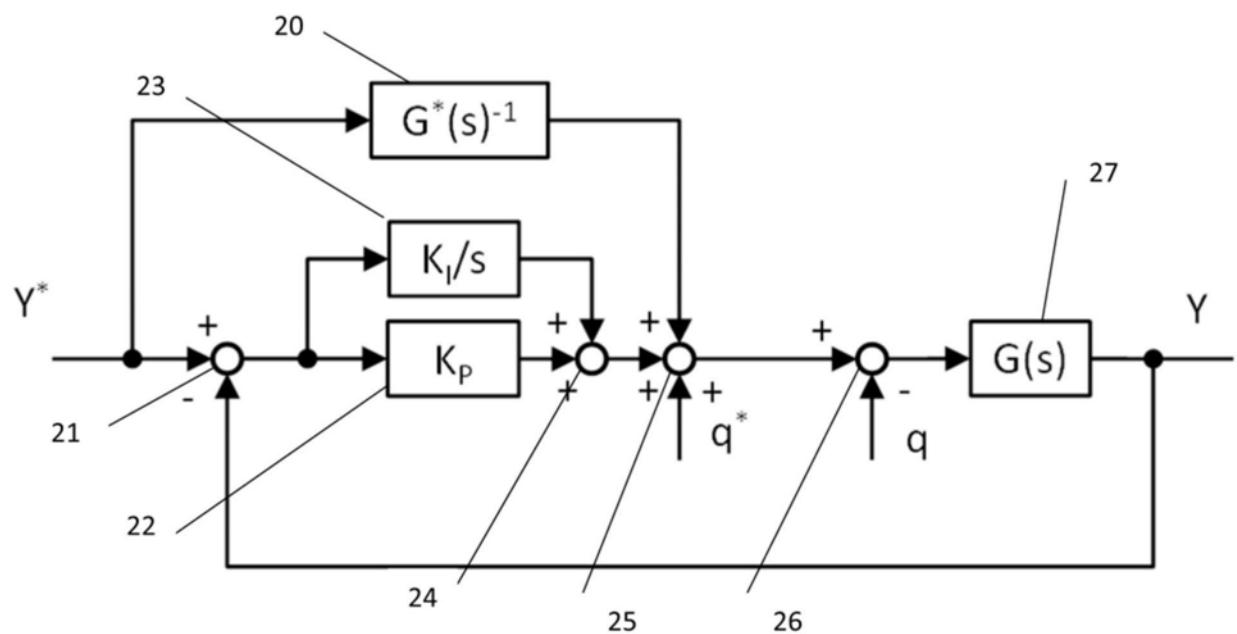


图3

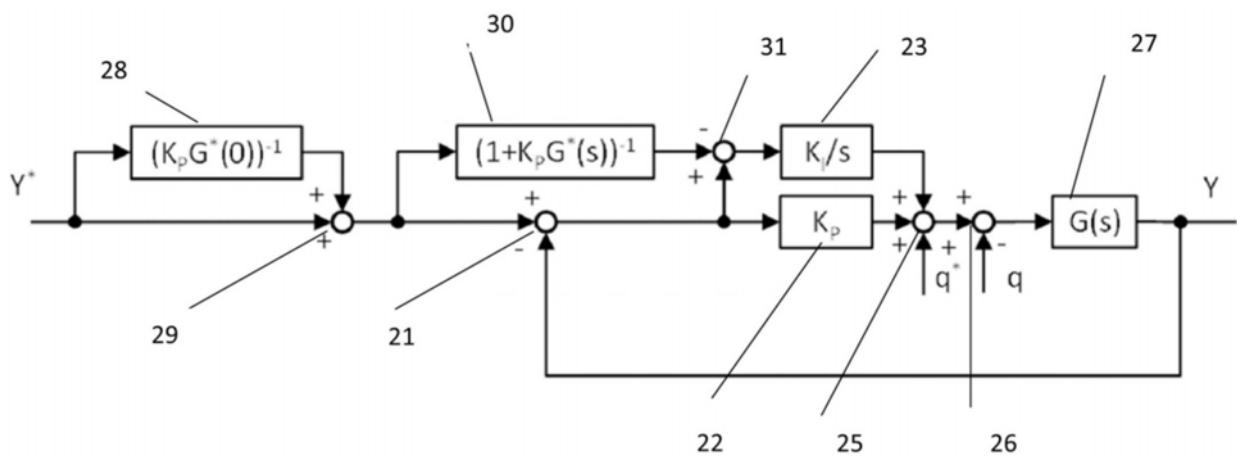


图4

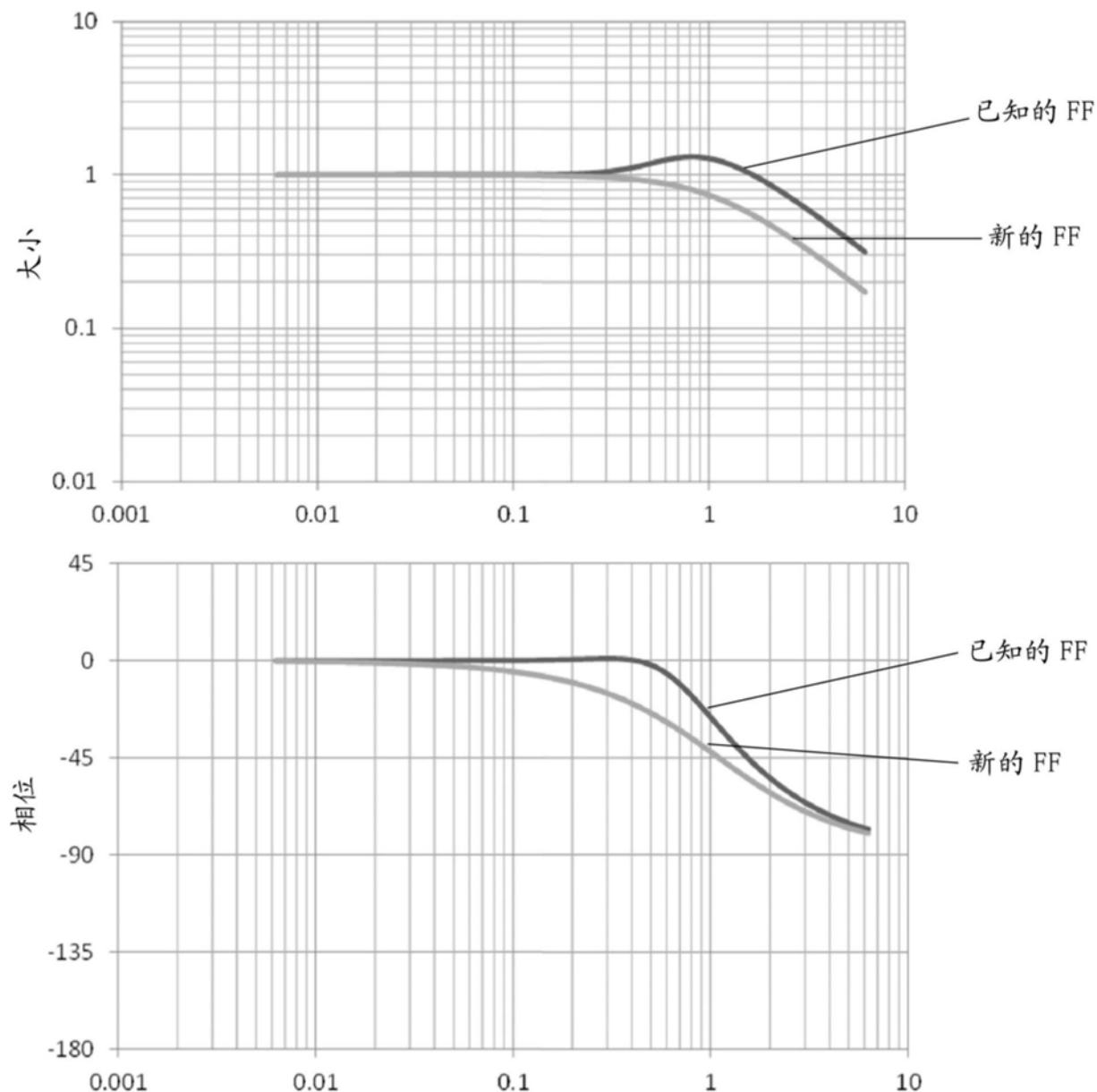


图5

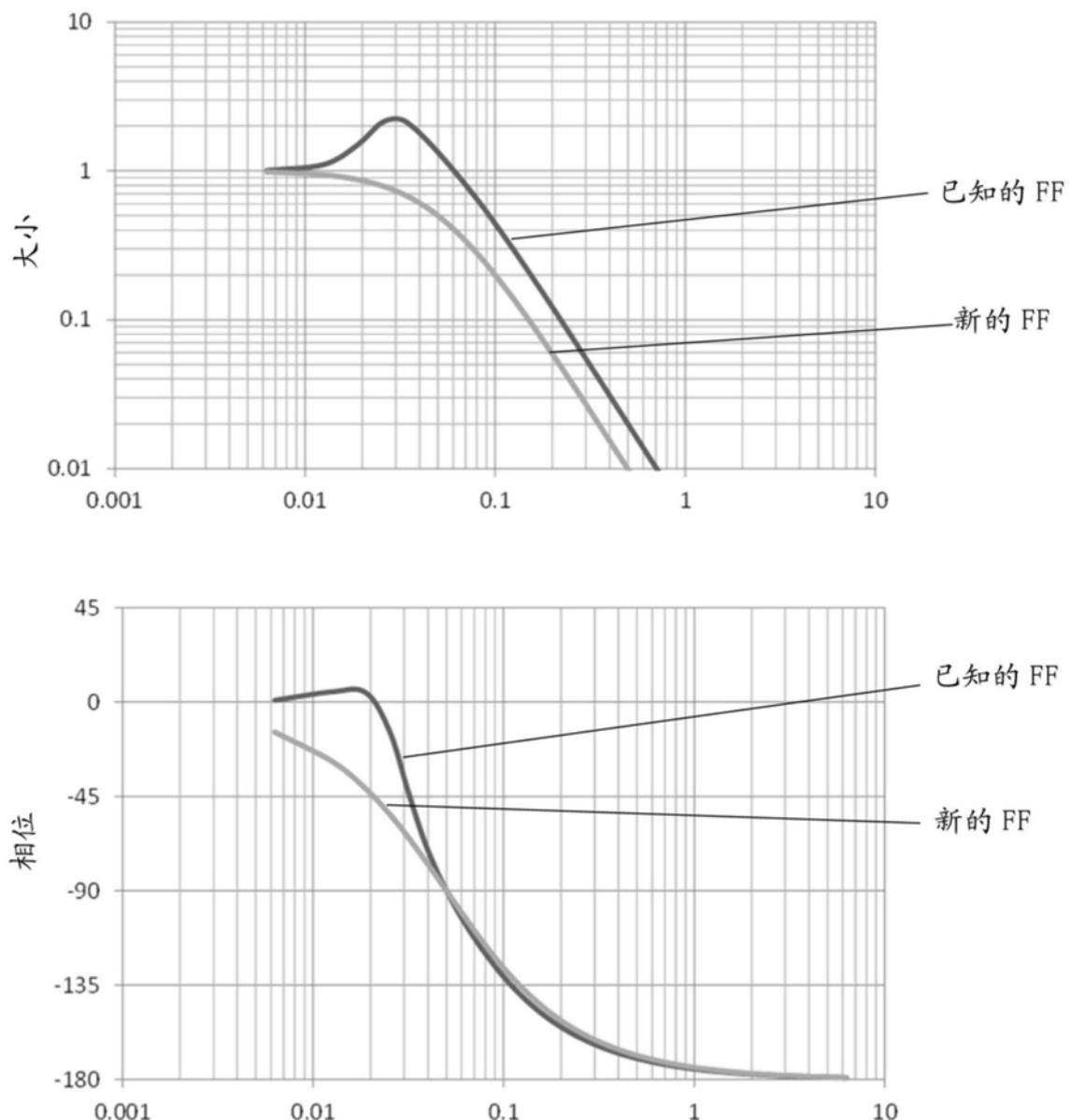


图6

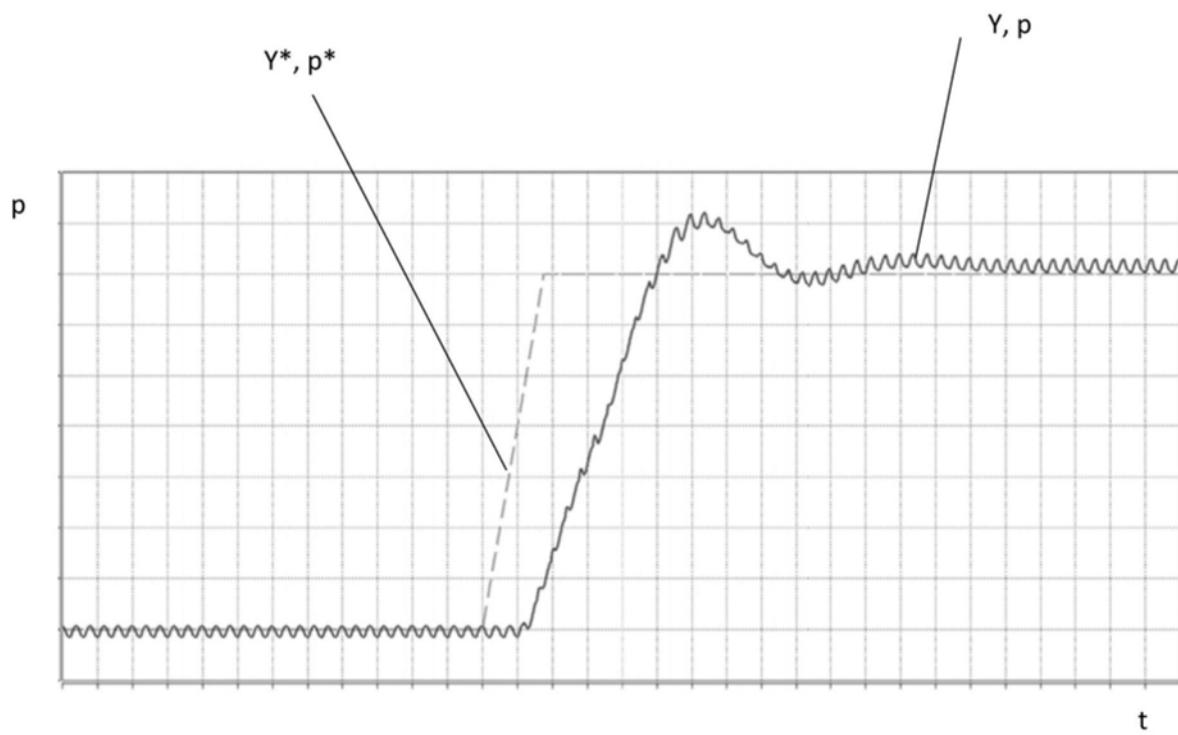


图7

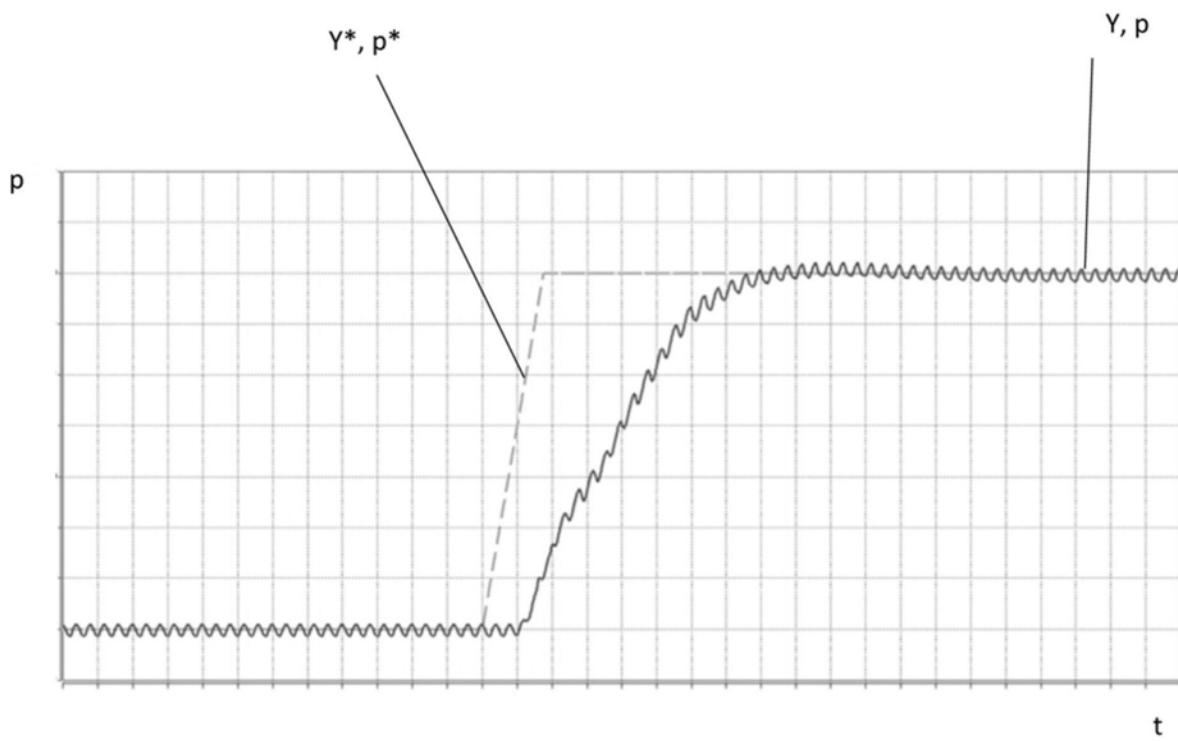


图8