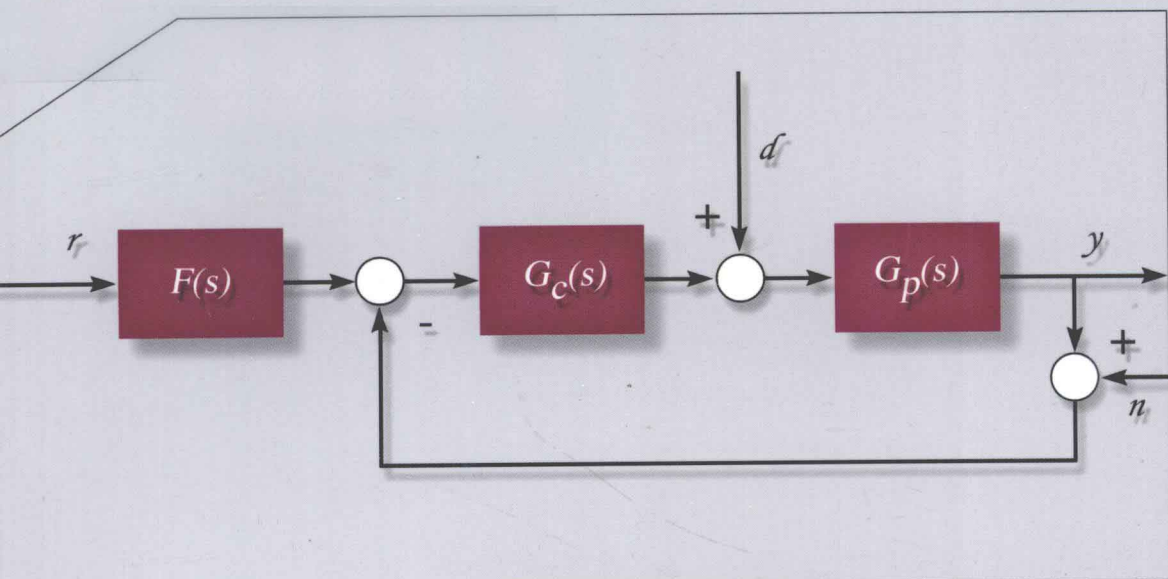




二自由度

2 degree of freedom
control

控制

◎ 张井岗 著



電子工業出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

二自由度控制

张井岗 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

总 序

2012年，太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际，我校的专家学者推出了这套学术丛书，以此献礼，共襄盛举。

六十年前，伴随着新中国的成立，伟业初创，百废待兴，以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起，太原科技大学应运而生。六十年来，几代科大人始终心系民族振兴大业，胸怀制造强国梦想，潜心教书育人，勇担科技难题，积极服务社会，为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场，涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一，今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主，“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明，多学科协调发展的教学研究型大学，成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围，众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘，硕果累累。这套丛书的编撰出版，定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012年6月

前 言

随着高新技术的快速发展和应用,工业生产过程对自动控制系统的要求越来越高,不仅要求控制有很高的精确性和很好的快速性,而且要求系统有很强的抗干扰能力。在常规反馈控制系统中,一般只有一个控制器,是一自由度控制结构,不具备使系统同时获得很好的设定值跟随特性和干扰抑制特性的能力。如果根据系统对设定值跟随特性的要求来设计控制器,则干扰抑制特性会变差;反过来,根据系统对干扰抑制特性的要求来设计控制器,则设定值跟随特性变差。因此,在设计控制器时,需要同时兼顾设定值跟随特性和干扰抑制特性,在两种特性之间进行折中选择。这样做一般可以满足大多数常规控制系统的要求,但对于高性能控制系统则难以实现期望的控制性能。为解决这一问题,许多学者提出了二自由度控制方法,采用二自由度控制结构,通过控制器的设计,可以使系统同时获得很好的设定值跟随特性和干扰抑制特性。作者在分析和总结国内外有关二自由度控制方法研究进展的基础上,针对典型的过程控制对象和运动控制对象,将内模控制、Smith 预估控制、滑模变结构控制及智能优化算法等与二自由度控制相结合,在二自由度控制结构、控制器设计和参数整定方法等方面进行了深入的研究,着力解决现有二自由度控制方法存在的缺点和不足。

本书主要介绍作者提出的几种新的二自由度控制方法,主要包括以下内容:

- (1) 根据内模控制原理,针对典型的过程控制对象和运动控制

对象，提出了一种二自由度 PID 控制器解析设计方法，克服了常规二自由度 PID 控制器参数多、整定难度大的缺点。所设计的控制器只有两个可调参数，而且被调参数与系统的性能直接相关，通过这两个参数的调整可以使系统获得良好的控制性能。

(2) 针对常规 Smith 预估控制鲁棒性和干扰抑制特性差的缺点，将内模控制和 Smith 预估控制有机结合，以大时滞开环稳定过程为对象，提出了一种二自由度 Smith 预估控制结构。可以使系统的设定值跟随特性和干扰抑制特性解耦，并分别通过一个可调参数来调整，保证系统同时具有良好的设定值跟随特性、干扰抑制特性和鲁棒性。

(3) 针对具有时滞的开环不稳定和反向响应两类复杂动态过程对象的特点，提出了一种统一的二自由度控制结构。由参考模型、前馈控制器和反馈控制器三部分组成。基于被控对象逆模型设计的前馈控制器可以使系统的设定值跟随特性具有参考模型所定义的响应特性。反馈控制器采用基于期望干扰抑制特性的直接综合法来设计，它可以在保证闭环系统稳定的前提下，使系统获得良好的干扰抑制特性。与现有的二自由度控制方法相比，这种方法的特点是二自由度控制结构简单，控制器参数调整方便。

(4) 针对串级控制系统提出了一种二自由度控制方法。它的突出优点是克服了常规串级控制系统的调节和整定比较麻烦的缺点，可以使主、副两个回路的设定值跟随特性和干扰抑制特性实现解耦。同时，在设计主回路控制器时，不需要对副回路闭环特性做近似处理，从而可以提高系统的控制性能。

(5) 采用微粒群优化算法 (PSO) 对二自由度 PID 控制器进行优化设计。通过将控制器的参数设置为群体微粒在参数空间的位置，模拟群体智能和动物觅食的动态行为对参数寻优，使代表控制器参数的微粒向最优区域移动，最终获得最优的二自由度 PID 控制器参数。在优化算法中，以最大灵敏度和时域性能分别为约束条件和优化指

标,使系统在具有较强鲁棒性的前提下,获得最优的设定值跟随特性和干扰抑制特性。

(6) 针对交流伺服系统,提出了一种基于滑模变结构控制的鲁棒二自由度控制方法。其中二自由度控制器由参考模型,前馈控制器和滑模变结构控制器三部分构成。一方面利用参考模型和前馈控制器实现系统期望的设定值跟随特性,另一方面利用滑模变结构控制鲁棒性强的特点来抑制参数变化和干扰对系统的影响。

理论分析和仿真结果表明,本书提出的几种新的二自由度控制方法可以使系统同时获得良好的设定值跟随特性、干扰抑制特性和鲁棒性,可以满足高性能控制系统的要求,对于高性能控制系统的设计和应用有重要的理论价值和实际意义。

本书的研究受山西省自然科学基金项目(2011011011-2)和太原科技大学博士科研启动基金项目资助。

由于时间仓促书中内容难免存在的缺点和不足,请读者批评指正。

太原科技大学 张井岗

2012年6月30日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 二自由度控制原理和典型控制结构	3
1.2.1 二自由度控制原理	3
1.2.2 二自由度控制的典型结构	5
1.3 二自由度控制方法的研究进展	7
1.3.1 二自由度 PID 控制	7
1.3.2 基于 H_∞ 优化理论的二自由度控制	9
1.3.3 时滞系统的二自由度控制	11
1.3.4 基于智能控制理论的二自由度控制	15
第 2 章 基于内模控制原理的二自由度 PID 控制	18
2.1 引言	18
2.2 内模控制	20
2.2.1 内模控制原理	20
2.2.2 内模控制的主要特性	21
2.2.3 内模控制器的设计	22
2.2.4 内模控制的鲁棒性分析	24
2.3 过程控制对象的二自由度 PID 控制	25
2.3.1 二自由度 PID 控制器设计	26



2.3.2 系统的性能和鲁棒性	31
2.3.3 仿真研究	33
2.4 运动控制对象的二自由度 PID 控制	35
2.4.1 交流永磁同步电动机传动系统的数学模型	36
2.4.2 二自由度 PID 控制器设计	38
2.4.3 仿真研究	41
第 3 章 大时滞过程的二自由度 Smith 预估控制	44
3.1 引言	44
3.2 常规的 Smith 预估控制	45
3.3 二自由度 Smith 预估控制结构	47
3.4 控制器设计	48
3.4.1 设定值跟随控制器设计	48
3.4.2 干扰抑制控制器设计	50
3.4.3 鲁棒性分析	51
3.5 仿真研究	53
第 4 章 复杂动态过程对象的二自由度控制	57
4.1 引言	57
4.2 具有时滞的开环不稳定过程对象的二自由度控制	61
4.2.1 二自由度控制器设计	61
4.2.2 系统的性能与鲁棒性	65
4.2.3 仿真研究	67
4.3 反向响应过程对象的二自由度控制	72
4.3.1 反向响应过程对象的基本特性	73
4.3.2 二自由度控制器的设计	74
4.3.3 仿真研究	75



第 5 章 串级控制系统的二自由度控制	78
5.1 引言	78
5.2 串联式串级控制系统的二自由度控制.....	80
5.2.1 副回路控制器设计	81
5.2.2 主回路控制器设计	83
5.2.3 设计实例和性能分析	86
5.2.4 仿真研究	90
5.3 并联式串级控制系统的二自由度控制.....	93
5.3.1 二自由度控制器设计	94
5.3.2 设计实例和性能分析	96
5.3.3 仿真研究	98
第 6 章 基于 PSO 的二自由度 PID 控制器优化设计	101
6.1 引言	101
6.2 微粒群优化 (PSO) 算法	103
6.2.1 PSO 算法原理	103
6.2.2 PSO 算法流程	104
6.3 设定值滤波型二自由度 PID 控制器优化设计	105
6.3.1 设定值滤波型二自由度 PID 控制器	105
6.3.2 控制器参数优化设计	107
6.3.3 仿真研究	109
6.4 设定值前馈型二自由度 PID 控制器优化设计	111
6.4.1 设定值前馈型二自由度 PID 控制器	111
6.4.2 控制器参数优化设计	112
6.4.3 仿真研究	113



第 7 章 交流伺服系统的鲁棒二自由度控制	115
7.1 引言	115
7.2 鲁棒二自由度控制结构	116
7.3 滑模变结构控制器的设计	118
7.3.1 滑平面的设计	119
7.3.2 控制律的设计	119
7.4 仿真研究	125
参考文献	130

第 1 章 绪 论

1.1 引言

20 世纪控制理论和控制技术取得了飞速发展, 以 Kalman、Pontryagin 和 Belman 三位学者为代表的控制科学家提出的以状态空间、极大值原理和动态规划为核心的现代控制理论, 在航空、航天和军事科学技术领域的应用取得了巨大的成功。但这一时期的现代控制理论和方法要求精确的数学模型和复杂的数值计算, 在工业控制领域中难以推广应用。为此, 许多控制科学家和工程师进行了不懈的努力, 以 Astrom、Goodwin、Zadeh、Rosenbrok、Morari、Zames 和 Doyle 等为代表的控制领域的专家学者们提出了新的控制理论和技术。自适应控制、智能控制、预测控制、多变量解耦控制和鲁棒控制等先进控制 (Advanced Process Control) 方法已经在工业控制领域得到了成功应用。计算机硬件和软件技术的发展为先进控制技术的实现提供了强有力的硬件和软件平台。

近年来, 随着高新技术的快速发展和应用, 工业生产过程向着



大型化、连续化和复杂化方向发展,为保证生产安全、稳定、优质和高效运行,人们对自动控制系统的要求越来越高,不仅要求控制有很高的精确性和很好的快速性,而且要求系统有很强的抗干扰能力。在反馈控制系统设计过程中,值跟随特性和干扰抑制特性是设计者关注的两个主要特性。在常规控制系统中,定值控制系统对干扰抑制特性要求高,而随动控制系统对设定值跟随特性要求高。一般工业控制系统的设定值跟随特性与干扰抑制特性是无法分开来的。例如,在过程控制系统中,许多控制变量经常要进行恒值控制,对这样的控制系统,主要是扰动抑制问题,但在开机时却出现了设定值跟随的问题,若设定值跟随性能不好,常表现出较大的超调量和较长的调节时间。而对于连续工业生产过程而言,很多恒值控制变成了顺序控制系统,在一个生产周期中,设定值常按生产工艺要求变化多次,这时设定值跟随特性是否优良就显得特别重要。在这种背景下,就要求控制系统同时具有良好的设定值跟随特性和干扰抑制特性。

在工业控制领域广泛应用的 PID 控制器和 Smith 预估控制器等常规控制器,都只能设定一组控制器参数,是种一自由度控制器。一般来讲,如果按干扰抑制特性最优来整定参数,则设定值跟随特性差;如果按设定值跟随特性最优来整定参数,则干扰抑制特性差,所以常规控制器的设计和参数整定通常采用折中或试凑的办法解决。这样做一般能满足大多数控制系统的控制要求,但对高性能控制系统则难以达到期望的特性。

为了解决常规控制存在的问题,满足高性能控制系统的要求,国内外学者提出二自由度控制的设计思想。所谓二自由度控制一般是



指：采用适当的设计方法，找到两组独立的参数并设计出两个独立的控制器，分别用来优化系统的设定值跟随特性和干扰抑制特性。目前，国内外学者提出的二自由度控制方法主要有二自由度 PID 控制、时滞系统的二自由度控制、基于 H_∞ 理论的二自由度控制和基于智能控制理论的二自由度控制等，但这些方法在二自由度控制器结构、控制器参数整定和控制性能等方面还存在许多有待解决的问题。

1.2 二自由度控制原理和典型控制结构

1.2.1 二自由度控制原理

考察如图 1-1 所示的常规反馈控制系统，图中 r 、 d 和 n 分别为系统的设定值输入、扰动输入和噪声输入。 $G_c(s)$ 是控制器的传递函数， $G_p(s)$ 是控制对象的传递函数，假设 $G_p(s)$ 是精确已知的。对于此系统，可以导出 3 个闭环传递函数 $G_{yr}(s)$ 、 $G_{yd}(s)$ 和 $G_{yn}(s)$ ，即

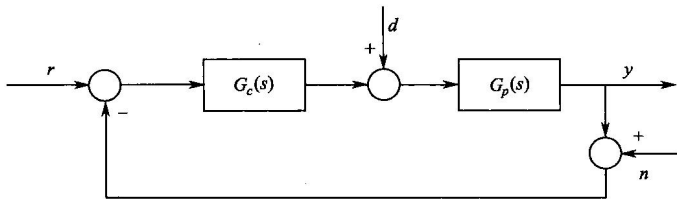


图 1-1 常规反馈控制结构

$$G_{yr}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (1-1)$$



$$G_{yd}(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (1-2)$$

$$G_{yn}(s) = \frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{-G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (1-3)$$

在这 3 个闭环传递函数 $G_{yr}(s)$ 、 $G_{yd}(s)$ 和 $G_{yn}(s)$ 中, 如果给定其中一个, 其余两个便可以确定, 这意味着图 1-1 所示的系统是一个一自由度系统。对于这样一个系统, 设定值跟随性能和干扰抑制性能均由 $G_c(s)$ 来调节, 如果希望其有很好的设定值跟随性能, 则要牺牲干扰抑制性能; 反之亦然。

再考察如图 1-2 所示的控制系统, 图中各符号的意义与图 1-1 相同, $F(s)$ 是前置滤波器传递函数。

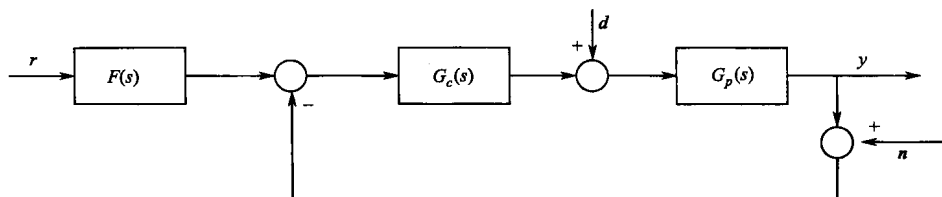


图 1-2 二自由度控制结构

同样, 对于此系统也可以导出三个闭环传递函数 $G_{yr}(s)$ 、 $G_{yd}(s)$ 和 $G_{yn}(s)$, 即

$$G_{yr}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{FG_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (1-4)$$

$$G_{yd}(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (1-5)$$

$$G_{yn}(s) = \frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{-G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (1-6)$$



在这种情况下, 如果给定 $G_{yn}(s)$, 则 $G_{yd}(s)$ 是固定不变的, 但 $G_{yr}(s)$ 不是固定的, 因为 $F(s)$ 与 $G_{yn}(s)$ 无关。因此, 在这 3 个闭环传递函数 $G_{yr}(s)$ 、 $G_{yd}(s)$ 和 $G_{yn}(s)$ 中, 有两个闭环传递函数是可以独立调整的。所以该系统是一个二自由度控制系统。

在图 1-2 所示的系统中, 虽然设定值跟随性能取决于 $G_c(s)$ 和 $F(s)$, 但是干扰抑制特性、对模型误差的灵敏度、稳定性裕度和对传感器噪声的灵敏度等性能指标只与 $G_c(s)$ 有关。这表明, $G_c(s)$ 确定反馈回路的特性, 而 $F(s)$ 则影响设定值输入与系统输出之间的闭环传递函数。

在设计二自由度控制系统时, 首先应通过设计 $G_c(s)$ 使系统具有良好的干扰抑制特性, 再设计 $F(s)$ 使系统同时获得期望的设定值跟随响应特性。干扰抑制特性和设定值跟随特性都可以单独调整, 正是二自由度控制系统的优点。

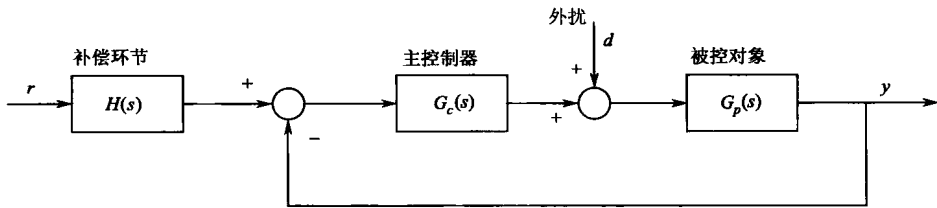
1.2.2 二自由度控制的典型结构

在工业控制领域中典型的二自由度控制结构主要有以下四种形式^[16], 如图 1-3 (a) ~ (d) 所示, 其中, $G_c(s)$ 为控制器; $G_p(s)$ 为受控对象; $H(s)$ 为补偿环节, 它们是按照相对于主控制器 $G_c(s)$ 接入补偿环节的位置来命名的。

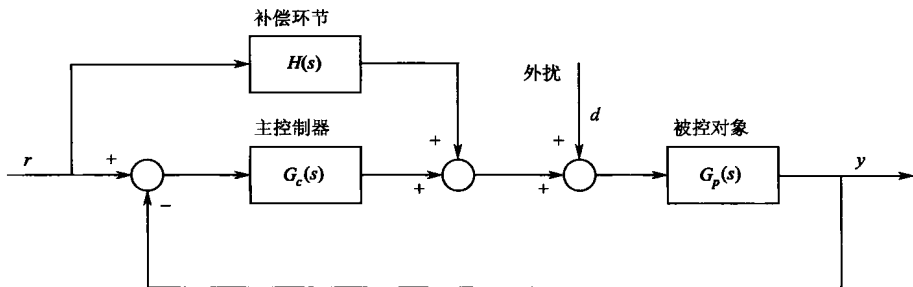
图 1-3 (a) ~ (d) 所示的四种二自由度控制结构是等效的, 它们可以进行等效变换。



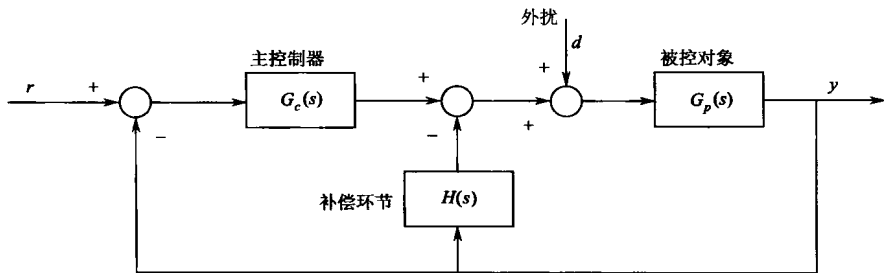
二自由度控制



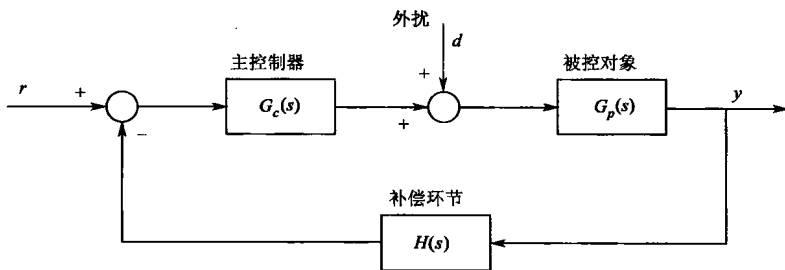
(a) 设定值滤波器型二自由度控制



(b) 设定值前馈型二自由度控制



(c) 反馈补偿型二自由度控制



(d) 回路补偿型二自由度控制

图 1-3 二自由度控制的典型结构



1.3 二自由度控制方法的研究进展

控制系统的设计是一个多目标优化问题,采用二自由度控制结构可以使系统获得比常规的一自由度控制更好的控制性能。二自由度控制思想最早是由 Horowitz^[16]于 20 世纪 60 年代中期提出的,直到 20 世纪 80 年代中期才受到控制学界的重视。近年来,许多学者针对不同控制对象或采用不同控制方法来设计二自由度控制器,使二自由度控制方法得到了快速发展和应用。本节主要对国内外学者提出的二自由度 PID 控制、基于 H_∞ 理论的二自由度控制、时滞系统的二自由度控制和基于智能控制理论的二自由度控制四类二自由度控制方法的研究进展进行分析和总结。

1.3.1 二自由度 PID 控制

PID 控制是迄今为止自动控制系统中最通用的控制方法。近年来,各种现代控制技术的出现并没有削弱 PID 控制器的应用。相反,新技术的出现对于 PID 控制技术的发展起到了很大的推动作用。一方面,各种新的控制思想不断被应用于 PID 控制器的设计之中或是使用新的控制思想设计出具有 PID 结构的新型控制器,PID 控制技术被注入了新的活力;另一方面,某些新控制技术的发展要求性能更好的 PID 控制,从而刺激了 PID 控制器设计与参数整定技术的持续发