

21世纪中国专利成果文丛

输出侧控制的 原理与应用

孙怀禄 孙广清 孙月梅 著



PRINCIPLE AND
APPLICATIONS
OF OUTPUT SIDE
CONTROL



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

21世纪中国专利成果文丛

输出侧控制的 原理与应用

孙怀禄 孙广清 孙月梅 著



PRINCIPLE AND
APPLICATIONS
OF OUTPUT SIDE
CONTROL



知识产权出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

输出侧控制的原理与应用 / 孙怀禄等著. —北京 :

知识产权出版社, 2014. 9

ISBN 978-7-5130-2937-7

I. ①输… II. ①孙… III. ①自动控制理论—研究

IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 198741 号

内容简介

对一无所知的被控对象(即黑色对象)进行理想的自动控制,能够达到使输出误差 $e(t) \equiv 0$ 的“绝优控制”吗?这就是所谓的“黑箱问题”。能够真正实现苏联科学家提出的“不变性理论”中的“绝对不变性”吗?能够应用经典控制理论去解决现代控制理论所无法解决的疑难问题吗?本书将应用作者提出的“输出侧(顺馈)控制”的理论和方法来解答这些问题。此外,还应用“输出侧控制”的理论和比较简单的方法圆满地解决了过程控制、电气传动控制、电变量控制中一系列前所未有的超高精度自动控制问题。本书可供从事信息技术与自动控制研究的专业人员和研究生参考。

责任编辑: 祝元志

封面设计: 刘 伟

责任校对: 董志英

责任出版: 刘译文

输出侧控制的原理与应用

孙怀禄 孙广清 孙月梅 著

出版发行: 知识产权出版社 有限责任公司

社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号

责编电话: 010-82000860 转 8513

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

开 本: 720mm×960mm 1/16

版 次: 2014 年 9 月第 1 版

字 数: 97 千字

网 址: <http://www.ipph.cn>

邮 编: 100088

责编邮箱: 13381270293@163.com

发行传真: 010-82005070/82000893

经 销: 新华书店及相关销售网点

印 张: 10.25

印 次: 2014 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

ISBN 978-7-5130-2937-7

出版权专有 侵权必究

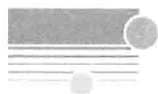
如有印装质量问题,本社负责调换。

前 言

到目前为止，自动控制领域一直被反馈控制或者输入侧控制理论主导着，几乎没有其他的自动控制方式或者自动控制系统。现在对反馈控制和反馈控制系统的深入研究和普遍应用已经达到很高的水平。自动控制理论，不管是经典控制理论还是现代控制理论，尤其是近代控制理论已经达到了前所未有的理论高度，甚至要把自动控制理论变成近代高等数学理论应用的一个分支。即便如此，无论在自动控制理论上还是在其工程实际应用中都还存在着大量尚未解决的问题。即使大体解决了自动控制问题，其自动控制的质量和效果也并不是很理想，而且解决问题的难度也愈来愈大，让人们无所适从。既然如此，何不寻求另一途径，促使自动控制难题得以更加容易地解决呢？

笔者认为，在自动控制领域内本应该包括两种并不相同的“自动控制方式”：输入侧控制方式和输出侧控制方式。

(1) 输入侧控制 (input side control) 方式，包括 (输入侧) “前馈控制 (feed-forward control)”、“反馈控制



(feedback control)”及其系统。以往传统的自动控制方法和自动控制系统皆属于此类，特别是负反馈型的闭环自动控制系统。实际上应用最普遍的是反馈控制，而普通的（输入侧）前馈控制仅起辅助控制作用，故较少应用。

(2) 输出侧控制 (output side control) 方式，包括（输出侧）“后馈控制 (after-fed control)”、“顺馈控制 (shun-fed control)”及其系统，这是作者首先提出的，可以说是新的自动控制方式和自动控制系统^[3]，也是一种补偿型的自动控制方法（参见本书第二章第六节的说明）。特别是输出侧顺馈控制和输入侧反馈控制一样，它不但能够独立地构成自动控制系统，而且也可以广泛地应用于过程控制、电气传动控制和电变量控制的广阔领域，是在许多方面优于反馈控制的一种新型的自动控制形式。而后馈控制和前馈控制一样，仅起辅助控制作用。还需要说明，上述一些新名称或简称过去从未有过，而其中文、英文命名有待进一步研究之后认定。

对自动控制或自动控制系统的控制质量和控制效果的评价必须有一些指标作为依据，而其最重要的指标就是自动控制系统输出误差 $e(t)$ 的大小。所谓输出误差 $e(t)$ 就是系统的输出变量 $y(t)$ 与其参考输入变量 $r(t)$ 之间的误差，参考输入变量 $r(t)$ 相当于目标函数或期望值。当然希望 $e(t)$ 愈小愈好，如果能够实现 $e(t) \equiv 0$ 最好，这就是实现了“不变性理论 (invariance theory)^[7,13]”中的“绝对不变性 (absolute invariance)^[14,15]”的“理想控制

II



(ideal control)”，或者称之为“绝优控制”，即“绝对最优控制 (absolute optimal control)”。

但是，对自动控制理论和自动控制系统的研究应该有以下四个目的：

(1) 怎样使自动控制系统的输出误差 $e(t)$ 尽可能地减小；

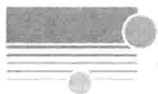
(2) 怎样使系统输出 $y(t)$ 尽可能地不受系统内部和外部扰动 $f(t)$ 的影响；

(3) 怎样尽可能地减小被控对象的数学模型和其复杂性对控制系统的不良影响；

(4) 怎样尽可能地使自动控制系统实现起来更加简单容易，成本更低，效率更高。

前三点也可以作为评判自动控制系统控制质量的指标和依据，而对现代控制理论或是近代控制理论的研究基本上也都是和尽可能地改善和提高这三个指标有关系。

就反馈控制或者输入侧反馈控制系统而言，前三个目的都并不理想，但对输出侧顺馈控制系统而言，上述的前三个目的却都十分理想。输出侧顺馈控制系统能够使“黑色对象”实现理想控制而使系统输出误差 $e(t) \equiv 0$ ，即无需知道对象模型的任何信息 [包括其中的内外扰动 (internal and external disturbance)]，就可以实现“绝优控制”而使 $e(t) \equiv 0$ 。这对反馈控制系统来说完全是不可想象的，也是绝对不可能的。第四个目的是对自动控制系统的实施在经济成本上的考虑，当然也很重要。



以往对自动控制理论的研究都是对反馈控制系统理论的研究，今后应该加上对输出侧顺馈控制系统理论的研究，说不定会得出一些有意义或者意外的结果。笔者认为，以往对自动控制理论的研究虽然极其深入但并不全面。

本书对输出侧顺馈控制和顺馈补偿控制系统以及对顺馈—反馈复合控制系统的研究，大多是在复频域内以传递函数为基础进行的，即经典控制理论的方法，而在时域内的讨论则多是其特殊情况。必须强调指出，虽然所用的是十分简便的经典控制理论方法，但却解决了应用现代控制理论无法解决的、能使控制系统输出误差 $e(t) \equiv 0$ 的“绝优控制”问题和使自动控制系统实现“绝对不变性”以及输出侧前馈控制（即后馈控制）实现“完全补偿（complete compensation）”等问题。

现代控制理论中的所谓“最优控制（optimal control）”问题，实际上就是怎样使自动控制系统的输出误差[即 $e(t) > 0$]，在某些约定条件下（如目标函数等）达到极小值或极大值，而不是达到 $e(t) \equiv 0$ 的“绝优控制”。因此可以说，现代控制理论中用状态反馈等方法实现的所谓“最优控制”，仅是局部的或相对的“最优控制”，并不是真正的最优控制。控制系统输出误差 $e(t) \equiv 0$ 的“理想控制（ideal control）”才是真正的“绝对”最优控制，即“绝优控制”，也是全局的“最优控制”，而这是无论用什么样的反馈控制都无法实现的。

目 录

前 言

第一章 输入侧控制及其优缺点	1
第一节 前馈控制	1
第二节 反馈控制及反馈控制系统	2
第三节 机电结合开环或反馈控制的新方法	5
第二章 输出侧控制的原理和优越性	33
第一节 后馈控制	33
第二节 顺馈控制和输出侧顺馈控制系统	34
第三节 输出侧顺馈控制与输入侧反馈控制的 比较	40
第四节 顺馈—反馈复合控制系统	45
第五节 输出侧顺馈控制与输入侧反馈控制的 对比	53
第六节 输入侧、输出侧、对象取代三种前馈控制 的对比	55



第三章 过程控制中的输出侧控制	58
第一节 输出侧控制在流量控制中的应用	58
第二节 输出侧控制在温度控制中的应用	64
第三节 输出侧控制在浓度控制中的应用	68
第四节 输出侧控制在湿度（水分）控制中的应用	77
第五节 输出侧控制在液位控制中的应用	81
第六节 输出侧控制在压差或压强的控制中的应用	84
第四章 纸页定量—水分控制中的输出侧控制	86
第一节 绝干纸页流量控制装置	87
第二节 成品纸质量流量控制装置 （喷雾增湿法）	91
第三节 成品纸定量与水份的计算与控制	94
第四节 此顺馈控制系统的优越性	95
第五节 全控制系统的调试和说明	96
第五章 电力拖动控制中的输出侧控制	100
第一节 输出侧控制在转速控制中的应用	100
第二节 输出侧控制在转矩控制中的应用	111
第三节 输出侧控制在功率控制中的应用	116
第六章 电变量控制中的输出侧控制	118
第一节 输出侧控制在电流控制中的应用	118
第二节 输出侧控制在电压控制中的应用	128



第三节	输出侧控制在电功率控制中的应用	137
第七章	输出侧控制的前景和展望	142
第一节	输出侧控制理论的完善和存在问题	142
第二节	输出侧控制的应用前景和展望	148
附加说明	关于“绝对不变性”等的说明	150
参考文献		152

第一章 输入侧控制 及其优缺点

为了更好地论述输出侧控制的原理和应用，必须首先对输入侧控制方式中两种传统控制形式的优缺点及传统的控制方法作一简要说明。然后，对作者新近的专利^[4-6]提出的一些开环或反馈控制系统机电结合解决方案的新方法^[16-18]进行了讨论，作为对输入侧控制或反馈控制系统的补充。

第一节 前馈控制

在图 1-1 中，为了不失一般性，设被控对象由两个具有纯滞后（pure time delay）的环节串联组成，两环节之间作用着外部干扰 $F_1(s)$ 。图中： $C(s)$ 为外部输入； $Y_1(s)$ 为对象输出； $G_M(s)$ 为前馈补偿器（feedforward compensator）。

不难导出（输入侧）前馈补偿控制的完全补偿条件为

$$G_M(s) = \frac{1}{G_1(s)e^{-\tau_1 s}} = \frac{e^{+\tau_1 s}}{G_1(s)} \quad (1-1)$$

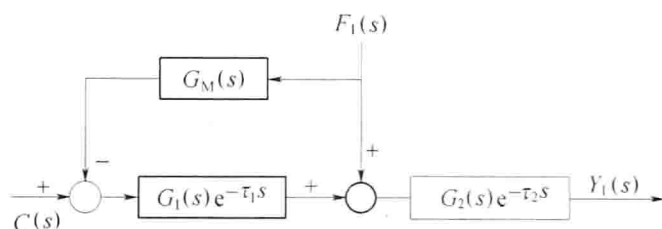


图 1-1 前馈控制

显然，式（1-1）中具有纯超前环节（pure lead link）的传递函数 $e^{+\tau_1 s}$ 在物理上是不可能实现的，即使是比较简单的传递函数 $1/G_1(s)$ ，一般来说也是难于物理实现的。因此，这样的前馈补偿通常都是很不理想的。普通的（输入侧）前馈控制虽然不能独立地构成自动控制系统，但在知道被控对象的数学模型时，有时可以作为对较大外界干扰进行补偿控制的一种手段，虽然前馈补偿不够理想但有时还是有用的，尤其是在过程控制系统中常有应用。

第二节 反馈控制及反馈控制系统

反馈控制实际上是负反馈控制，是目前在自动控制领域内占统治地位的自动控制形式，其应用的广泛性和理论研究的深入性比其他自动控制形式望尘莫及的，尤其是对现代控制理论的研究更是如此。最简单也是最基本的反馈控制系统传递函数框图，如图 1-2 所示。

由图 1-2 可以导出，闭环自动控制系统的输出变量

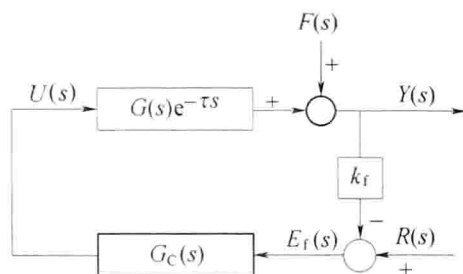


图 1-2 反馈控制

可表示为

$$Y(s) = \frac{G_C(s)G(s)e^{-\tau s}}{1 + k_f G_C(s)G(s)e^{-\tau s}} R(s) + \frac{1}{1 + k_f G_C(s)G(s)e^{-\tau s}} F(s) \quad (1-2)$$

式中： $R(s)$ 为参考输入（设定）变量； $F(s)$ 为被控对象上全部内外扰动的“等效全扰动（equivalent full disturbance）”； $Y(s)$ 为系统输出； k_f 为检测变送器的“变量—信号”转换系数； $G_C(s)$ 为反馈控制器。图中， $U(s)$ 为反馈控制输入， $E_f(s)$ 为系统偏差（system deviation），它也等于系统误差（system error） $E(s)$ 。

可以看出， $G_C(s)$ 愈大（指其增益，下同）， $Y(s)$ 对 $R(s)$ 的跟踪愈好，而且 $F(s)$ 对 $Y(s)$ 的不良影响也愈小。假如 $G_C(s) \rightarrow \infty$ 时，则有 $Y(s) = R(s)/k_f$ ，即达到了“理想控制（ideal control）”，实现了 $Y(s)$ 对 $R(s)$ 的完全跟踪。因为在反馈控制时的系统偏差等于系统误差 $E_f(s) = E(s) = R(s) - k_f Y(s)$ ，故在此时有 $E(s) \rightarrow 0$ ，这也就是实现了“绝优控制”。



然而, $G_C(s)$ 的增大是要受到极大限制的, 当 $G_C(s)$ 增大到一定数值时, 闭环控制系统就会失去稳定性而开始振荡, 反而使其控制质量下降。 $G_C(s)$ 愈增大, 振荡就愈激烈, 控制质量就愈差。这种控制质量与稳定性之间的矛盾, 严重地限制了控制质量的继续提高, 也就不可能实现“绝优控制”。因为反馈控制系统的输出误差为 $E(s) = R(s) - k_f Y(s)$, 从式 (1-2) 可知, 只有当 $G_C(s) \rightarrow \infty$ 时才有可能使 $E(s) \rightarrow 0$, 故在反馈控制系统的过渡过程中动态误差 $E(s)$ 是不可能被完全消除的, 绝对不可能达到“绝优控制”, 即绝不可能实现“绝对不变性 (absolute invariance)”而使 $E(s)$ 恒等于 0, 这也是反馈控制系统无法克服的一大缺憾。

针对上述缺陷, 我们提出“后馈控制”和“顺馈控制”, 这是属于输出侧控制方式的两种新的补偿式自动控制形式, 与前述属于输入侧控制方式的前馈控制和反馈控制的信号馈送方向正好相反, 而且是相互对称类似的 (参见第二章第五节的说明)。这两种新的自动控制形式在满足一定条件时, 不但完全克服了上述的所有缺陷, 而且其中的“顺馈控制”还完全摆脱了被控对象复杂多变的特性对自动控制系统的不良影响。但是, 这两种新的自动控制形式都必须在被控对象的输出端人为地引入一个一般为大功率并可以对被控物理量进行加减运算的“输出加减器 (output adder-subtractor)”。

但是, 反馈控制的最大的优点是其在理论研究上非常



成熟及其广阔的适应性和应用的普遍性，它几乎可以应用在一切实领域和一切方面，这是其他自动控制形式无法与其相比的。

第三节 机电结合开环或 反馈控制的新方法

一、转速控制或自动控制的机械方法

现有的高精度转速反馈自动控制系统，都是先用外加测速发电机或光电脉冲编码器把“转速”转换为“电信号（电压）”，然后采用电子装置进行电信号的比较、运算和放大的转速反馈自动控制系统。为此必须进行“转速—电压”或“电压—转速”的转换，不但增加了大量的高精度机电或电子转换装置和部件，使控制系统变得昂贵而复杂，可靠性降低，维修困难，而且这些“转换”还会导致控制精度和系统效率的降低。

为了克服上述缺陷，在这里可以提出：

①应用齿轮组直接测速并以“转速”作为控制信号，在机械装置中直接进行转速的比较、运算和放大，其输出信号仍为转速，或者转换为位移后再去控制调速机构或调速器件，从而控制最终输出转速 n 的机械式转速反馈（闭环）或转速顺馈补偿（开环）的控制系统；

②无须测速、反馈或顺馈补偿而应用蜗轮蜗杆装置构成的机械功率放大器或机械式控速制动器直接组成机械式

开环转速控制系统。

如此构成的测速或不测速、闭环或开环的机械式或机电式转速控制系统，完全克服了上述变量相互“转换”所带来的一系列缺陷。

（一）采用齿轮组直接测速的机械式转速自动控制系统

采用齿轮组直接测速和机械式转速比较器构成的机械式转速反馈自动控制系统可以有以下两种类型。

1. 采用机械无级变速器时的齿轮组测速反馈自动控制系统^[16]

这种机械式转速反馈自动控制系统的原理如图 1-3 所示。

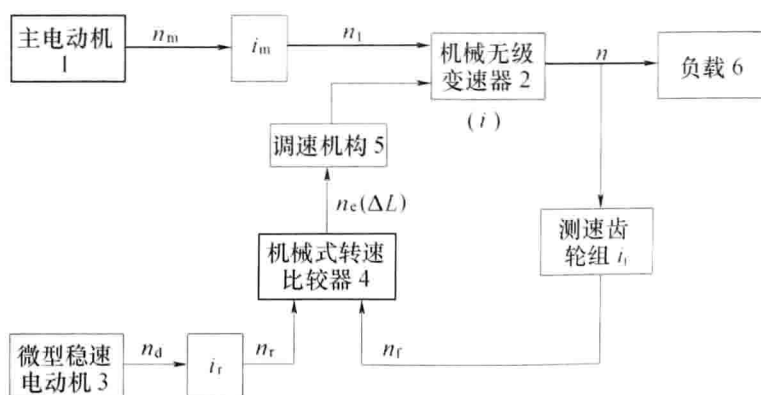
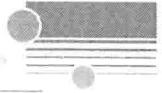


图 1-3 无级变速器式自动控制系统



固定转速 n_m 的主电动机 (1) 经过齿轮减速器 (i_m) 减速后的转速 n_1 与机械无级变速器 (2) 的功率输入端连接, 机械无级变速器 (2) 的输出转速即为自动控制系统的输出转速 n , 并拖动负载 (6)。将微型稳速电动机 (3) 的转速 n_d 经过齿轮减速器 (i_r) 减速后的转速 n_r 与输出转速 n 通过测速齿轮组 (i_f) 变速后的转速 n_f 都输入到机械式转速比较器 (4) 中进行比较, 比较的结果就得到转速误差: $n_e = n_r - n_f$, 它仍为“转速”。根据 n_e 的正负和大小去转动 (或转换为位移 ΔL 后去移动) 机械无级变速器 (2) 的调速机构 (5), 从而改变机械无级变速器 (2) 的可调变速比 i 和输出转速 n 。改变的目的总是使 $|n_e|$ 减小, 直至使自动控制系统的误差转速 $n_e = 0$, 系统达到稳态平衡为止。顺便说明, 最好的机械式转速比较器是应用齿轮差速器或差速螺旋等构成。

设

$$i_m = n_m / n_1, i = n_1 / n, i_r = n_d / n_r, i_f = n / n_f$$

则有最终输出转速

$$n = n_m / (i i_m) \quad (1-3)$$

式中: i 为机械无级变速器 (2) 的可调变速比。

系统误差转速

$$n_e = n_r - n_f = (i_f n_d - i_r n) / (i_r i_f) \quad (1-4)$$

自动控制系统就是根据 n_e 的正负和大小调节机械无级变速器 (2) 的调速机构 (5), 改变机械无级变速器 (2) 的可调变速比 i , 从而达到自动控制输出转速 n 的目的。