

第五届控制科学与工程前沿论坛



自抗扰控制技术的理念、方法与应用

纪念韩京清先生逝世五周年

高志强

二零一三年四月十九日

Center for Advanced Control Technologies

<http://cact.csuohio.edu>



概要



- 引言
- 自抗扰控制的渊源
- 自抗扰控制的应用
- 自抗扰控制的论证
- 抗扰技术研究
- 小结





Water Clock

Flyball Governor

引言

PID Control

ADRC Control





“君子务本，本立而道生”

韩京清：1937-2008



- ❑ 六十年代：最优控制，留苏（不变性原理）
- ❑ 七十年代：制导理论，反馈系统的标准型
- ❑ 八十年代：线性系统理论，计算机辅助设计
- ❑ **1989 - 2008：自抗扰控制**

ADRC in U.S.: Milestones

- **1997:** *Prof. Han visited CSU; made the 1st successful ADRC hardware test on a servo mechanism*
- **2001:** *ADRC papers presented at CDC*
- **2003:** *linear, parameterized ADRC, patent app.*
- **2008:** *\$1M venture capital, grew by \$5M in 2012.*
- **2010:** *1st factory implementation, 10 Parker extrusion lines (cpk: from 2.3 to >8; avg. energy saving 57%).*
- **2011:** *Texas Instrument adopts ADRC; 3 patents granted.*
- **2013:** *Texas Instrument New Motion Control Chips*

THE WALL STREET JOURNAL.

U.S. EDITION ▾

Thursday, April 18, 2013 As of 8:00 AM EDT

April 18, 2013, 8:00 a.m. ET

Achieve improved motion and efficiency for advanced motor control designs in minutes with TI's new InstaSPIN(TM)-MOTION technology

Optimize motor performance across speeds and simplify commissioning,

HOUSTON, April 18, 2013 /PRNewswire/ -- At long last, system designers have been liberated from limited operating ranges and time-consuming tuning processes with the new InstaSPIN(TM)-MOTION motor control solution from Texas Instruments



Powered by SpinTAC™ from
LineStream Technologies

SpinTAC™

SpinTAC constitutes a comprehensive motion control software suite that delivers optimized performance across speeds and loads. Key benefits of SpinTAC include:

Simplified Tuning

Tune your system for the entire operating range with a single, easy-to-evaluate parameter.

Intuitive Trajectory Planning

Easily design and execute complex motion sequences.

Mechanically Sound Movement

Optimize your transitions between speeds based on your system's mechanical limitations.

Ideal Control

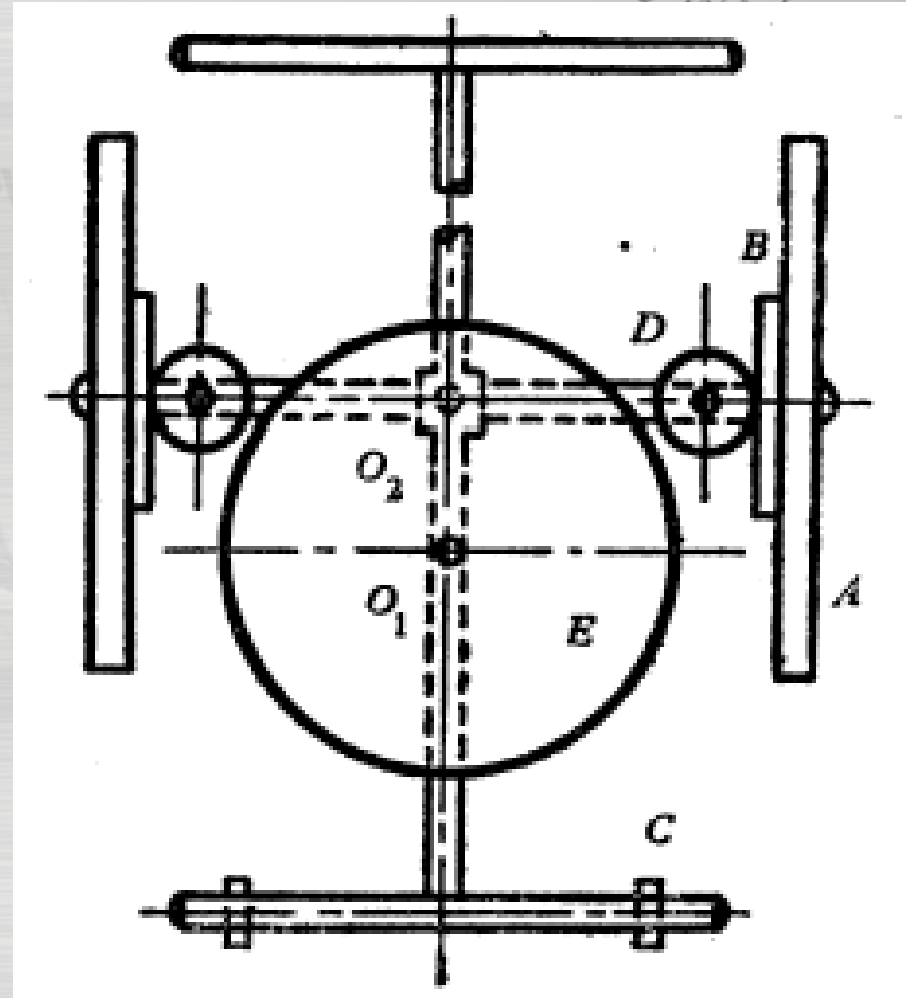
Benefit from the most accurate speed and position control on the market, based on LineStream's patented Active Disturbance Rejection Control.



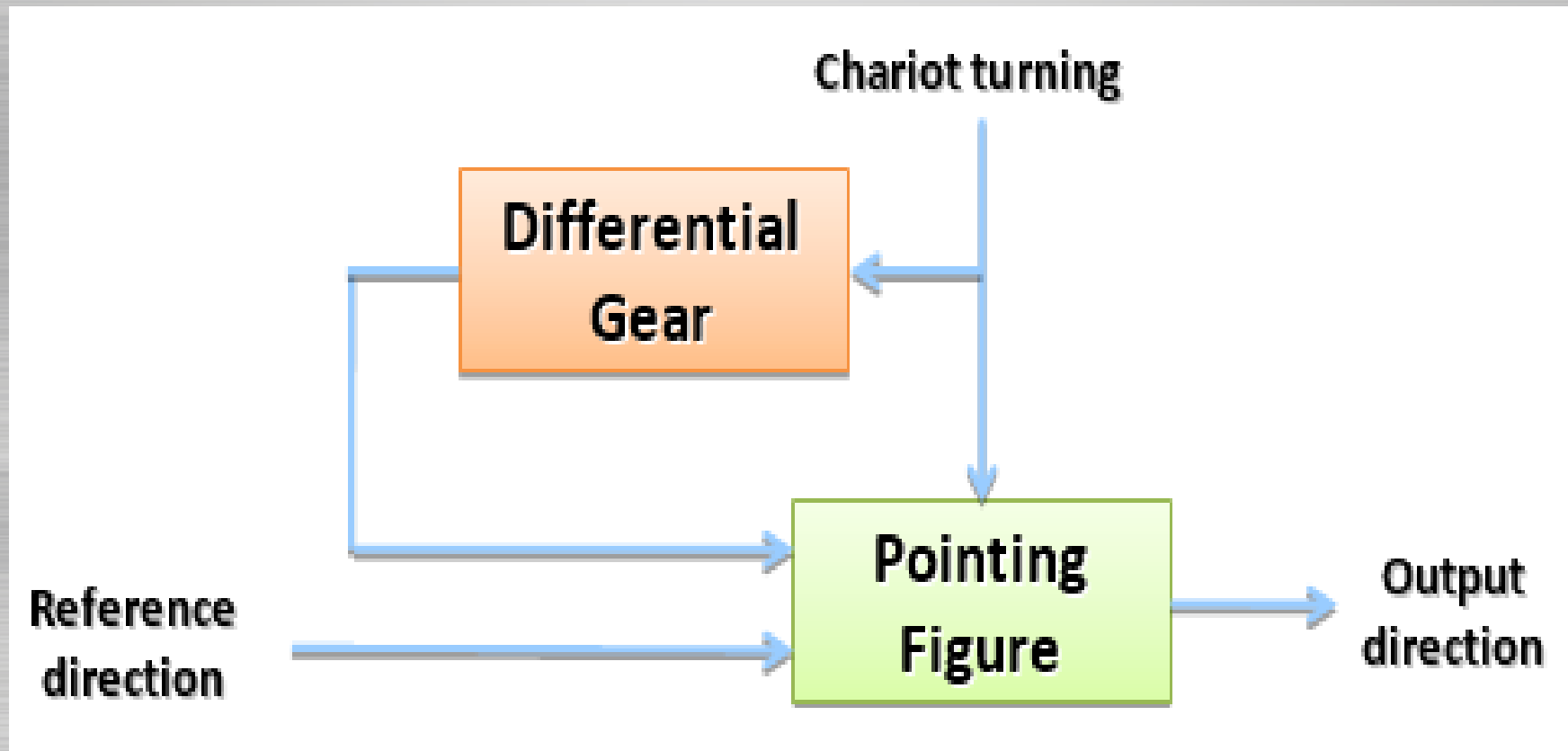
自抗扰控制的渊源



中国古代的指南车



指南车的抗扰控制



內 容 簡 介

本書是“中國機械工程發明史”的第一編。它是根據作者二十多年來對我國古代在機械工程各個方面發明創造的研究工作加以系統整理而寫成的。主要內容有：(1)我國在各種簡單機械方面的發明，如尖槓、槓杆、滑車及輪軸、斜面及螺旋等；(2)我國在利用彈力、慣力、重力以及減輕摩擦力和應用摩擦力等方面的發明；(3)我國在利用各種原動力方面的發明，如牲畜力、風力、水力及熱力等；(4)我國在傳動機件方面的發明，如槓及皮帶的傳動、鏈的傳動、齒輪及齒輪系的傳動、凸輪的傳動、杆的傳動及自動機構等。

從本書所述，可以看到我國勞動人民在過去幾千年里在機械工程各個方面的發明創造上所取得的許多光輝成就。因此本書不僅為人類科學技術發明史增添了不少寶貴內容，而且對幫助我國人民更進一步認識和熱愛祖國，也有很大好處。

本書可供機械工程專業的師生閱讀，也可供其他工程技術人員以及關心我國科學技術發明史的廣大讀者參考。

中國機械工程發明史

(第一編)

編著者	劉 仙 洲
出版者	科 學 出 版 社 北京朝陽門大街112號 北京市書刊出版業登記證：出字第061號
印刷者	中國科學院印刷廠
總經售	新 華 書 店

1962年5月第一版 書號：2513
1962年5月第一次印刷 字數：141,000
1961年5月第一版 開本：787×1092 1/16
1961年5月第一次印刷 印張：7 2/9 插頁：1

定價：精裝本 1.70元
平裝本 1.10元

3. 指南車上所用的齒輪系

我國古代所發明的指南車是采用一種能自動离合的齒輪系。它的發明年代，在崔豹所著的古今註上說是始於黃帝。又說：“舊說周公所作。”太平御覽引鬼谷子，也說是周公所作。這些都不大可靠。沈約所著宋書卷十八禮志五上說：“后漢張衡始復創造。”宋史卷一百四十九輿服志上說：“漢張衡魏馬鈞繼作之。”

我想創造指南車的時期，最早可推到西漢。因為西京雜記上有：“司南車，駕四，中道。”的記載。我國有關司南或指南的發明，原有磁石性的及機械性的兩種。如果是磁石性的指南針，決沒有駕四個馬拉它的必要。而且在西京雜記的同一段上有記道車的記載。如前邊所述，記道車一定已採用了齒輪系，所以推斷駕四個馬的司南車也是採用了齒輪系。又三國志魏書卷二十九，杜夔傳，裴註說：“……先生（指馬鈞）為給事中，與常侍高堂隆，驍騎將軍秦朗爭論於朝，言及指南車。二子謂古無指南車，記言之虛也。先生曰：古有之，未之思耳。……二子哂之。……先生曰：虛爭空言，不如試之易効也。於是二子遂以白明帝，詔先生作之，而指南車成。”所謂“記言之虛也”一句中的“記”字，可能指的就是西京雜記。馬鈞主張“古有之”，更可證明不是由他才發明的。即使是再保守一些，也應該推到張衡。因為張衡已採用齒輪系在他的水力天文儀器上，他採用齒輪系創制指南車是極為可能的。

晉書卷二十五輿服志上說：“司南車一名指南車。駕四馬。其下制如樓三級。四角金龍銜羽葆。刻木為仙人，衣羽衣，立車上。車雖回運而手常南指。”

宋書卷十八禮志五上說：“指南車，其始周公所作。……至於秦漢，其制無聞。后漢張衡始復創造。漢末喪亂，其器不存。魏高堂隆秦朗皆博聞之士，爭論於朝云無指南車，記者虛說。明帝青龍中（公元233—236年）令博士馬鈞更造之而車成。晉亂復亡。石虎使解飛，姚興使令狐生又造焉。安帝義熙十三年（公元417年）宋武帝平長安，始得此車。其制如鼓車，設木人於車上舉手指南。車雖迴轉，所指不移。”

南齊書卷五十二祖冲之傳上說：“初宋武平關中，得姚興指南車。有外形而无机巧。每行使人於內轉之。昇明中（公元477—479年）太祖輔政，使冲之追修古法。冲之改造銅機，圓轉不窮而司方如一。馬鈞以來未有也。”

我国古代自动装置的原理分析 及其成就的探讨*

万百五

摘 要

本文论证了约在两千年以前我们祖先所发明和使用的指南车，是一个按扰动调节原理工作的开环自动调节系统。北宋时代(九百年以前)的苏颂和韩公廉，在他们创造发明的水运仪象台里，使用了一个天衡装置，它是一个按被测量的偏差进行调节的自动调节器。文中探讨了这两个系统的结构图和传递函数。

此外，本文还介绍了铜壶滴漏装置和水运仪象台枢轮转速恒定系统，它们都是参数恒定系统，能够自动补偿某些外界扰动作用对于被测量的影响。

本文最后分析研究了我国古代各种类型的自动装置，认为可以将它们划分为自动检测与自动传递、开环自动控制、开环或闭环自动调节、开环程序控制、参数恒定系统和模拟研究等六类，从而论断：与其他国家相比，我国古代在自动学方面的成就是非常突出的。

一、前 言

我们在高等工业学校讲授自动调节理论课程过程中，每次讲到负反馈系统或自动调节器的发明及其发展历史时，照例总要介绍俄国 H. H. Понзынов 的用于锅炉水位调节的浮子-阀门式调节器和英国 J. Watt 的用于蒸汽机调速的离心式调速器，而在讲到调节原理时，也要提到 Понзынов 原理或 Понзынов-Watt 原理、Poncela 原理，这些都是外国的东西，难道类似的较原始的自动调节器在我国古代就没有作出创造发明吗？

毛主席在《改造我们的学习》一文中曾教导我们说：我们不能“……只懂得希腊，不懂得中国，……”或“……言必称希腊，对于自己的祖宗，则对不住，忘记了。”这就是说，我们应重视祖国的科学遗产。何况，“中国是世界文明发达最早的国家之一”，“在中华民族的开化史上，有素称发达的农业和手工业，有许多伟大的思想家、科学家、发明家、……”（毛泽东：《中国革命与中国共产党》）作者仅就初步找到的一些远非完整的资料所作的分析，即能充分说明我国古代在自动学方面的杰出成就。今将所获得的资料经过整理和分析介绍于后。在整理和分析中，曾得到清华大学刘仙洲先生的指教，谨此致谢。

二、指南车——方向的开环自动调节系统

我国古代指南车的发明，据传说始于黄帝（公元前 2698—2599 年）或周公时代（公元前 1100 年左右），根据刘仙洲先生的考证，最早可推到西汉（公元前 200 年），即使是再保

守，也应该是东汉时代（公元 78—139 年）^[1]。

根据宋史的记载^[2]，指南车是用一辆双轴独轱辘车组成，由马来拉动。车厢内采用一种能自动离合的齿轮系。车厢外壳上层，置有一个木刻的仙人，无论车朝那个方向转弯，它的伸臂都指南方。车的机械构造，由鲍思贤先生根据宋史舆服志上的详细记载，推测如图 1 所示^[3]。

图中 A 为车轮，B 为附装在车轮里侧的齿轮，D 为小平轮，E 为中心大平轮（装在轴上的一个立轴上，其中心为 O_2 ）。轱辘装在车轴中间的一个短立轴上，其中心为 O_1 。木仙人装在 E 轴立轴的最上端。当车一直朝前走时，D 轴和 E 轴的齿彼此不接触，故两边车轮的转动都不影响中心大平轮 E。此时，木仙人假定正指南方。当车向左转弯时，轱辘的前端向左移，而后端则向右移，使 E 轴和右边的 D 轴相衔接，结果 E 轴受右边车轮的作用向右转动，而其转动角度则恰能抵消车向左转的影响，从而使木仙人所指的方向不变。当车向右转弯时，其理同前^[4]。

今从自动调节理论的角度进行分析，这是一个开环自动调节系统，被测量 φ 即是木仙人所指的方向。这个系统保证了车向任何方向转弯时（即有扰动作用 Δf 时），被测量 φ 不变。它的方框图如图 2 所示。显然，这个方框图和近代按扰动原理工作的调节系统方框图是一样的^[5]。

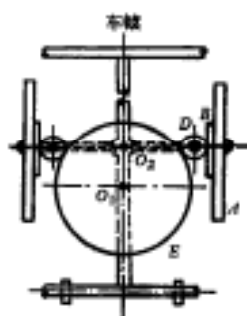


图 1. 鲍思贤推测宋代指南车在公元 1047 年所造的指南车^[3]

当出现扰动作用 Δf 时，
$$\Delta\varphi = k_2\Delta f + k_1\Delta f = (k_2 + k_1)\Delta f,$$



图 2. 指南车自动调节系统的方框图

式中 k_1 为车转弯时影响方向 φ 的传递系数， k_2 为车转弯时通过齿轮 B、D、E 影响方向 φ 的传递系数。由于在设计制造时保证了 $k_2 = -k_1$ ，故

$$\Delta\varphi = 0,$$

即在车整个转弯过程中，方向 φ 始终保持不变，换言之，动态误差和静态误差都等于零。所以可以认为，这里是应用了自动控制理论中绝对不变性原理的雏形，并应用了双通道结构的理论。

从今天的机械学观点来看，采用齿轮系的指南车不外乎由两种原理构成，即上述的补偿原理和差动齿轮原理。前者形成了开环自动调节系统，而后者则形成闭环自动调节系统。当然，应用补偿原理的齿轮系，在构造方面要比应用差动齿轮系简单得多，在汉代时代，在指南车中采用差动齿轮原理是不大可能的，但是我们有充分根据认为汉代在指南车中采用了类似的补偿方法。

由上述可知，这种按扰动调节原理构成的开环自动调节系统，在我国已经有了 2100

J.V. Poncelet (庞雪莱) (1788-1869)



■ French Mathematician

projective geometry

■ Napoleon Soldier

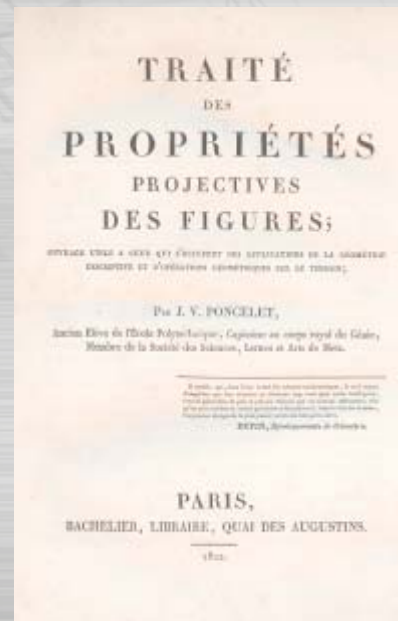
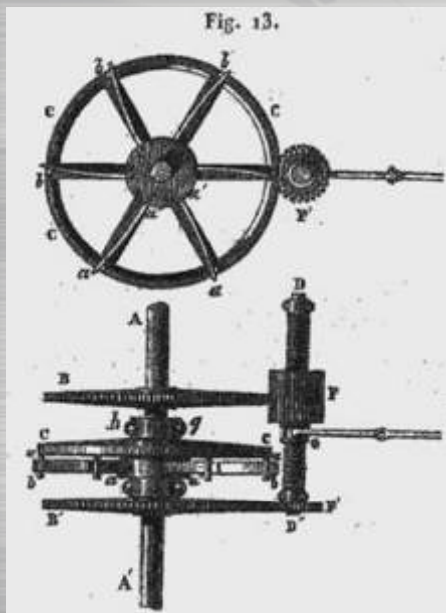
1813-14, prisoner in Moscow

■ Engineer

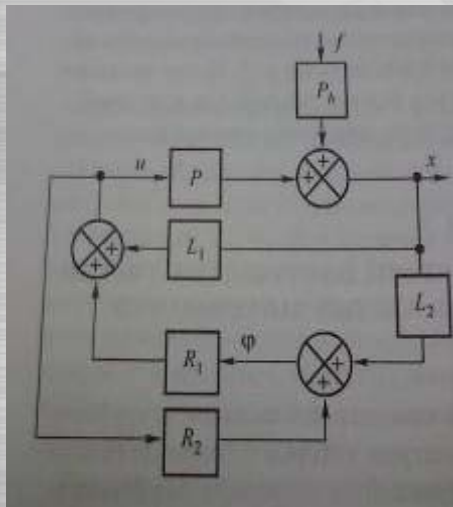
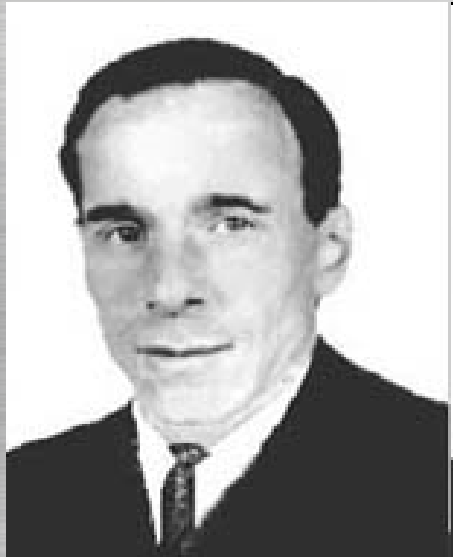
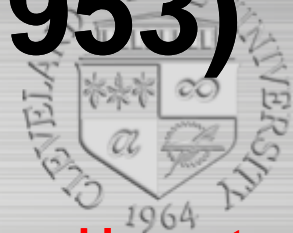
“Introduction to Industrial Mechanics”, 1829

■ Analyzed steam engine

■ Isochronous Governor: *a BIG idea: measure dist.*



Grigoriy Shipanov (1903-1953)



- ❑ Soviet Engineer, Professor
- ❑ **Problem of automatic control: making output “invariant” in the presence of disturbance.**
- ❑ 1938, dissertation, not understood by the university committee members: 6 voted “No,” 4 voted “Yes,” 20 didn’t vote.
- ❑ The same committee awarded Shipanov the title of Professor
- ❑ 1938, hired by Kulebyakin, head of the Institute of Automatics and Telemechanics, finished his research there
- ❑ 1939, a short publication of his completed research provoked heated debate on the ideological basis
- ❑ 1941, publicly accused of creating a “fantastic” controller by mathematical speculations instead of meeting demands of a growing Soviet economy

扰动调节

——扰动补偿和不变性——

〔苏联〕T. M. 烏兰諾夫 著
胡保生 译 徐俊荣 校

但是,这种按扰动调节的原则和研究,在以后一直到最近为止,根本被遗忘了。不久以前,由于不断改进自动装置以及对准确度、快速性和其他调节品质指标的要求,这种原则才得到复兴和在理论上得到论证。在这条道路上,扰动控制和扰动调节理论的形成,经历了許多爭辯和討論。辯論的中心是 T. B. 許班諾夫于 1939 年发表的关于完全补偿条件的著作^[25]。

力学和自动学领域中工作的少数人所理解。在这些人中,首先应指出的是苏联科学院院士 H. H. 魯靜、B. C. 庫列巴金和 B. H. 彼得罗夫等,以及 П. И. 庫茨涅卓夫和 A. T. 伊瓦赫年柯教授。也就是他們进一步提出了一些奠基性著作^[1~7],从理论上和实践上証明,在許多物理系統中,尤其在自动调节系統中,扰动补偿观念的可实现性。

总的来说,上述苏联学者以及其他外国研究者 (Moore 等等)著作的出現,引起了关于扰动补偿条件、即不变性問題面貌的根本变化。在上述著作发表以后,就很明显而再沒有人怀疑所提扰动调节原则的有效性了。因而,結束了关于扰动补偿、即不变性条件不可实现性的說法。然而,在实际工程方面,扰动补偿思想的发展,大大超前于其理论研究。例如,正在苏联最紧张辯論关于扰动补偿条件可实现性的时期,建造了非常重要的一些苏联本国式结构的航空发动机复合控制系統。这种系統显得比一般按偏差原则控制的系統要简单和可靠得多,并且在許多情况下工作得更好。

在以后,所謂不变性,我們將理解为扰动补偿,即所研究的自动调节系統(包括測量系統和仪表)能达到与作用在其上的扰动完全无关或部分无关。

扰动调节原理发展的历史道路是比較长的,它的产生还在上世紀中,毫無疑問是自动调节中的最古老原理。在我們这一世紀前的几千年,由阿拉伯人創造的第一批风力磨的控制装置,已經包含了按負載来控制的元件。在这种风力磨中,磨子的轉速是按外部負載力矩的作用来改变风帆而进行调节的。

扰动控制和调节的现代景况,往往与法国学者龐雪萊^[23]和俄国学者契柯列夫的名字有关,他們給出了按被控系統外部負載作用而工作的调节器的描述和技术設計。历史上之所以注意龐雪萊装置(1830年)和契柯列夫装置(1847年)是由于按偏差原则构成的调节器(瓦特调节器)在应用方面沒有成效(在 19 世紀中叶),这些调节器一时还不很完善。在此时,出現了在原則上不同于瓦特调节器,并直接根据所測負載变化来进行调节的新型调节器,这对整个自动控制 and 自动调节产生了重要的影响。后来,理論証实了将按偏差原则(瓦特原理)的调节与按負載的调节原则(龐雪萊-契柯列夫原理)相結合,在許多情况下是最好的解决办法。

Moscow - Beijing - Cleveland



- ❑ J. Han, Ph.D. Student, 1963-66, Moscow State Univ.
- ❑ 1979, Han, Lecture series on linear system theory; Oversaw China's first massive CAD project in 1980s
- ❑ 1989, Han, "Control theory: Model or Control?"
- ❑ 1995-1998, Han, Extended State Observer and the conception of ADRC
- ❑ 1995, Z. Gao, met with Han, first heard of ADRC; David (Xuejun) Wang, introduce Han's research to Gao's group at Cleveland State University
- ❑ 1997, Han visited CSU, conducted first successful ADRC motion control hardware test
- ❑ 2001, Gao, Huang, Han, 1st ADRC paper, CDC
- ❑ 2003, Han visited CSU again; ADRC was greatly simplified by Gao via bandwidth parameterization, making it a viable technology; patent application
- ❑ 2008, Han passed away
- ❑ 2008, A venture capital firm invest \$1M into the CSU spinoff to commercialize ADRC technology
- ❑ 2009, Han's last paper: IEEE TIE.
- ❑ 2011, Licensing Agreement with Texas Instruments
- ❑ 2012, 2nd round venture funding, USVP



自抗扰控制技术的应用

例1：运动控制， CSU， 1997





1997年韩京清先生访问美国克里夫兰州立大学高志强实验室，并在那里成功实现了ADRC运动控制实验
图为韩京清、高志强、蒋方军在实验台前合影。

伺服控制设计的灰箱法



□ 对象

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu$$

□ 标准型

$$\ddot{y} = bu$$

□ 总扰动

$$\hat{f}(t) \approx f(y, \dot{y}, w, t)$$



自抗扰

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu \quad \xrightarrow{u = u_0 - \frac{\hat{f}}{b}, \hat{f} \approx f} \quad \ddot{y} \approx bu_0$$

总扰动的估计：扩张状态观测器



$$\begin{aligned} \ddot{y} &= f(y, \dot{y}, w, t) + u \Rightarrow \\ x_1 &= y, x_2 = \dot{y}, x_3 = f(y, \dot{y}, w, t) \end{aligned} \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + u, \\ \dot{x}_3 = f \\ y = x_1 \end{cases}$$

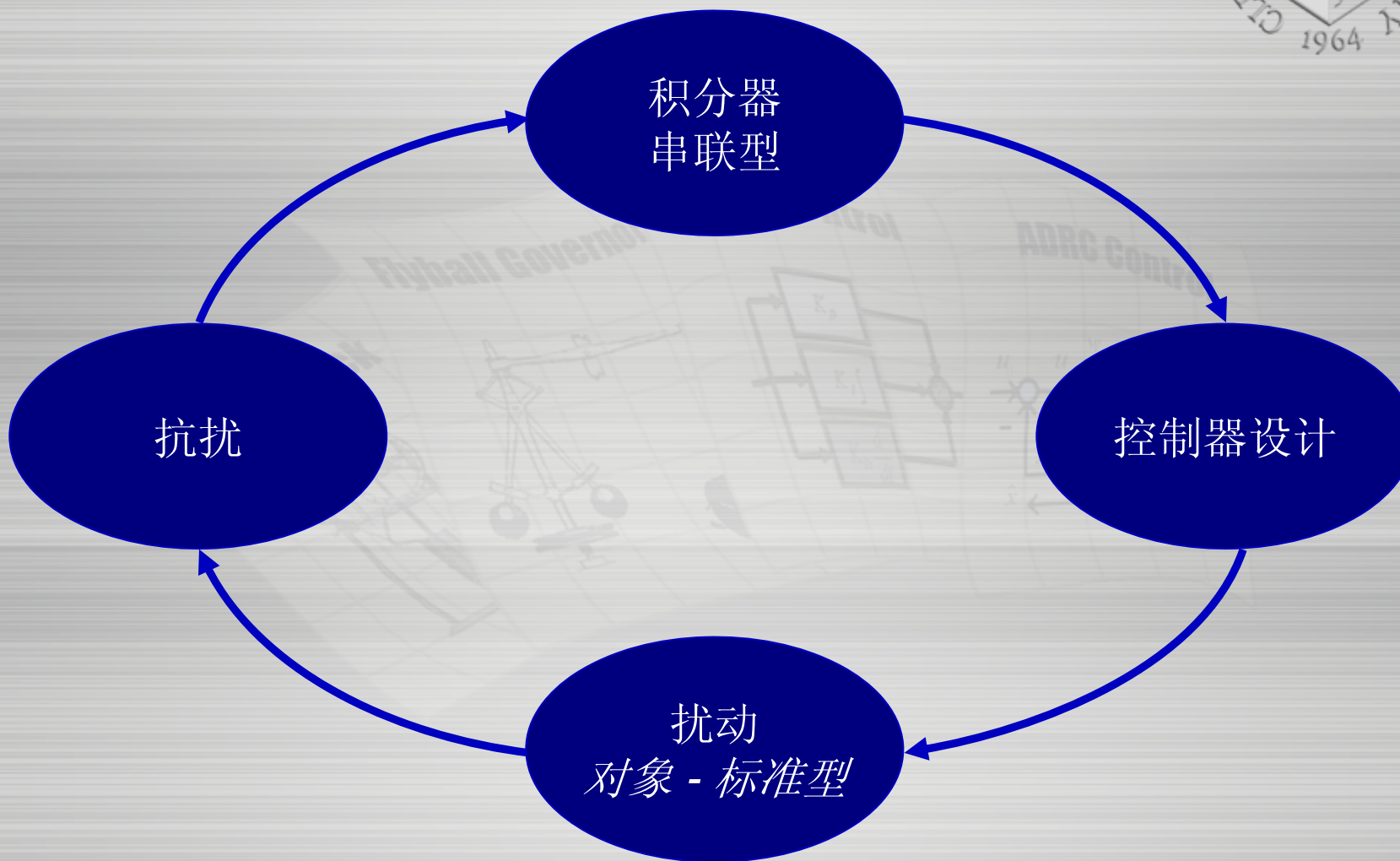
Extended State Observer (ESO)

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 g_1(z_1 - y) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 g_2(z_1 - y) + u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 g_3(z_1 - y) \end{cases}$$



$$z_1 \approx x_1 \quad z_2 \approx x_2 \quad z_3 \approx x_3 = f$$

自抗扰控制的思路



控制科学与工程范式



PID 范式

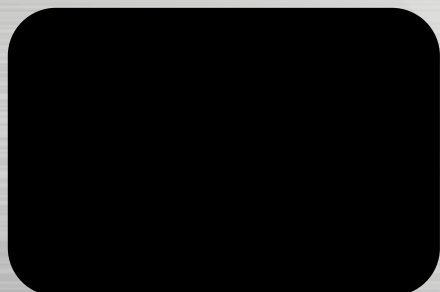
- “基于误差”
- 基于经验
- 无模型

抗扰范式

- 基于扰动信息
- 基于标准型
- 主动

模型范式

- “基于内部机理”
- 基于推导
- 优化



$$\ddot{y} = f(t) + bu$$

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}) + bu$$

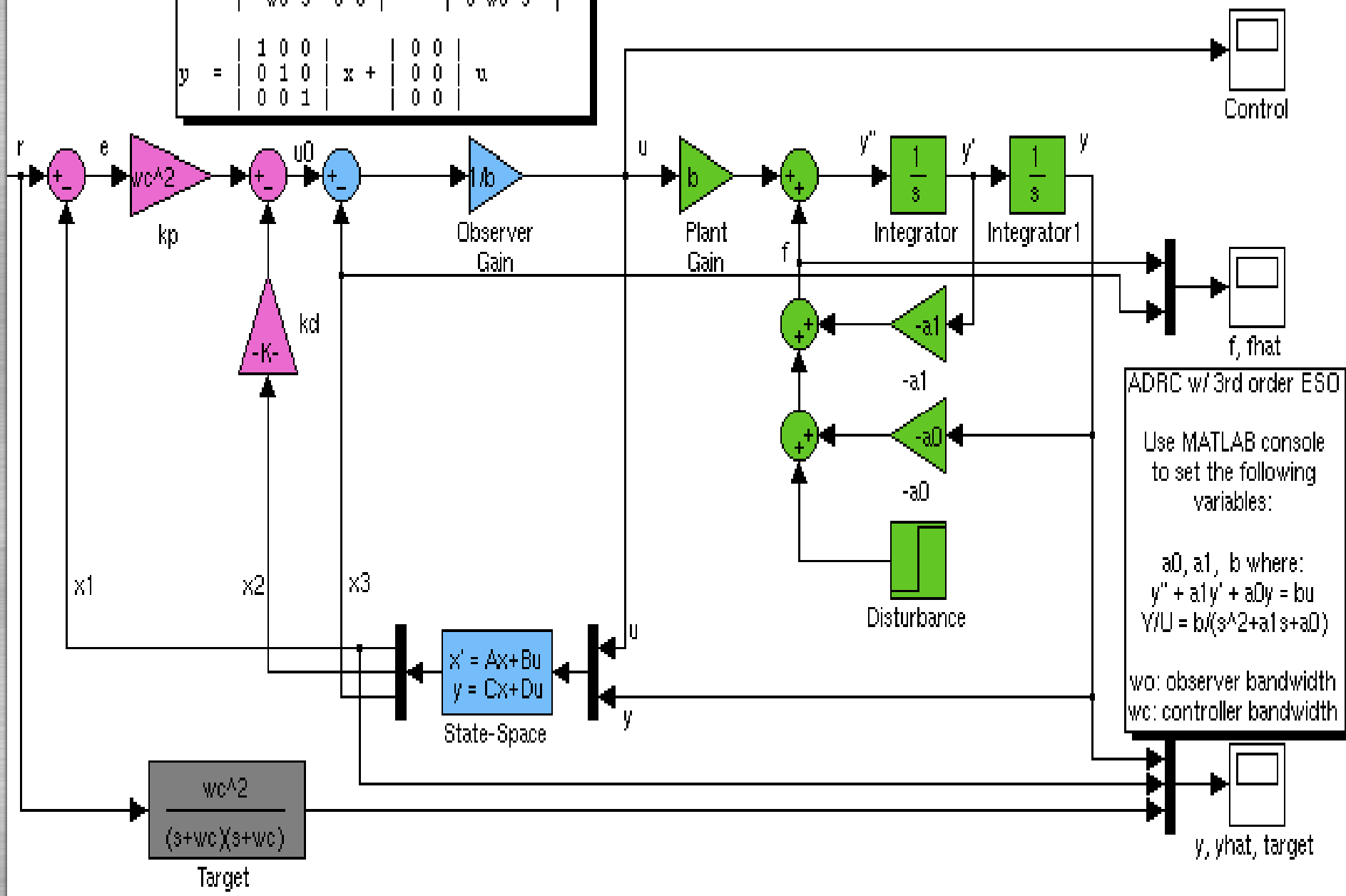
灰箱法简例



$$\ddot{y} = (-a_1 \dot{y} - a_0 y + d) + bu$$

$$x' = \begin{bmatrix} -3\omega_o & 1 & 0 \\ -3\omega_o^2 & 0 & 1 \\ -\omega_o^3 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 3\omega_o \\ b & 3\omega_o^2 \\ 0 & \omega_o^3 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u$$



ADRC w/ 3rd order ESO

Use MATLAB console to set the following variables:

$a0, a1, b$ where:
 $y'' + a1y' + a0y = bu$
 $Y/U = b/(s^2 + a1s + a0)$

ω_o : observer bandwidth
 ω_c : controller bandwidth

Target

$$\frac{\omega_c^2}{(s + \omega_c)(s + \omega_c)}$$

State-Space

$$x' = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Control

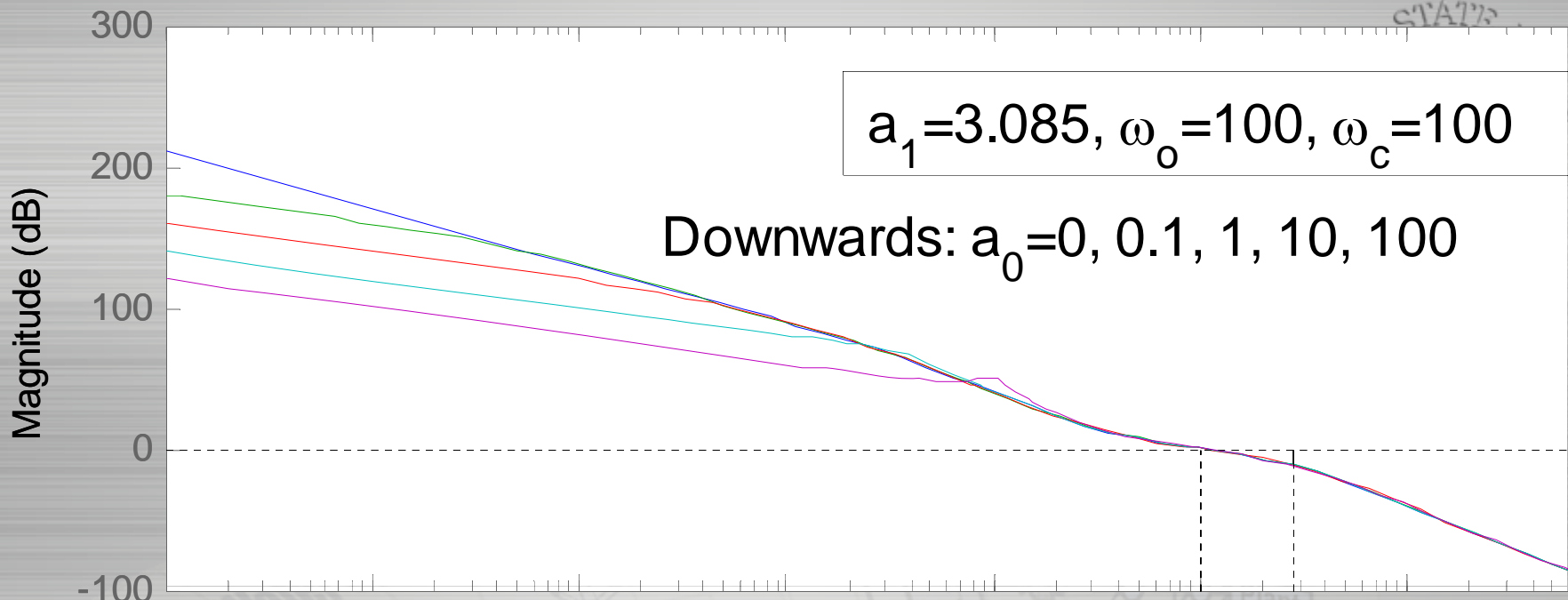
f, fhat

y, yhat, target

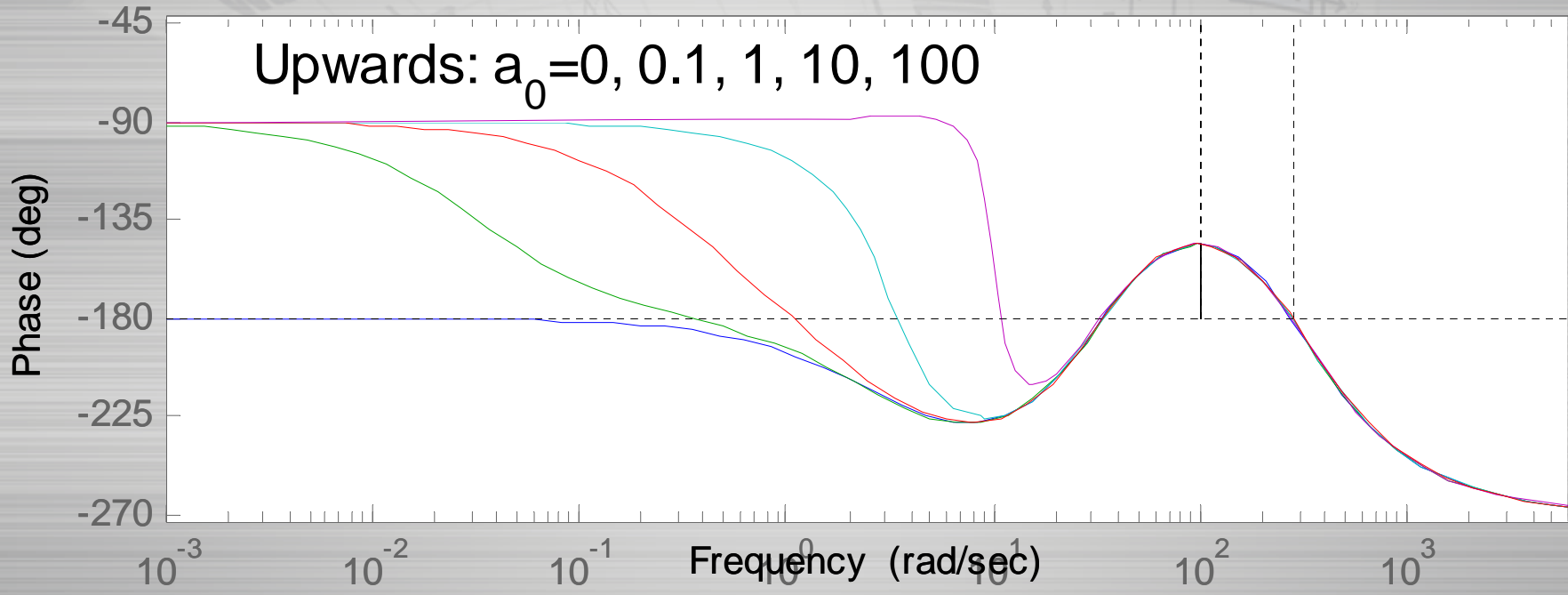
STAT73

$a_1=3.085, \omega_o=100, \omega_c=100$

Downwards: $a_0=0, 0.1, 1, 10, 100$



Upwards: $a_0=0, 0.1, 1, 10, 100$





例2

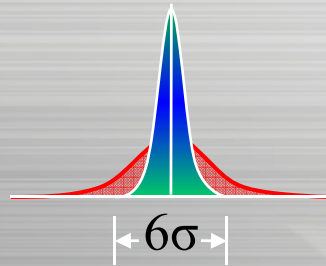
ADRC in Motion Control, 2009

Industrial, Third Party, Verifications at a Fortune 100 Company in North America

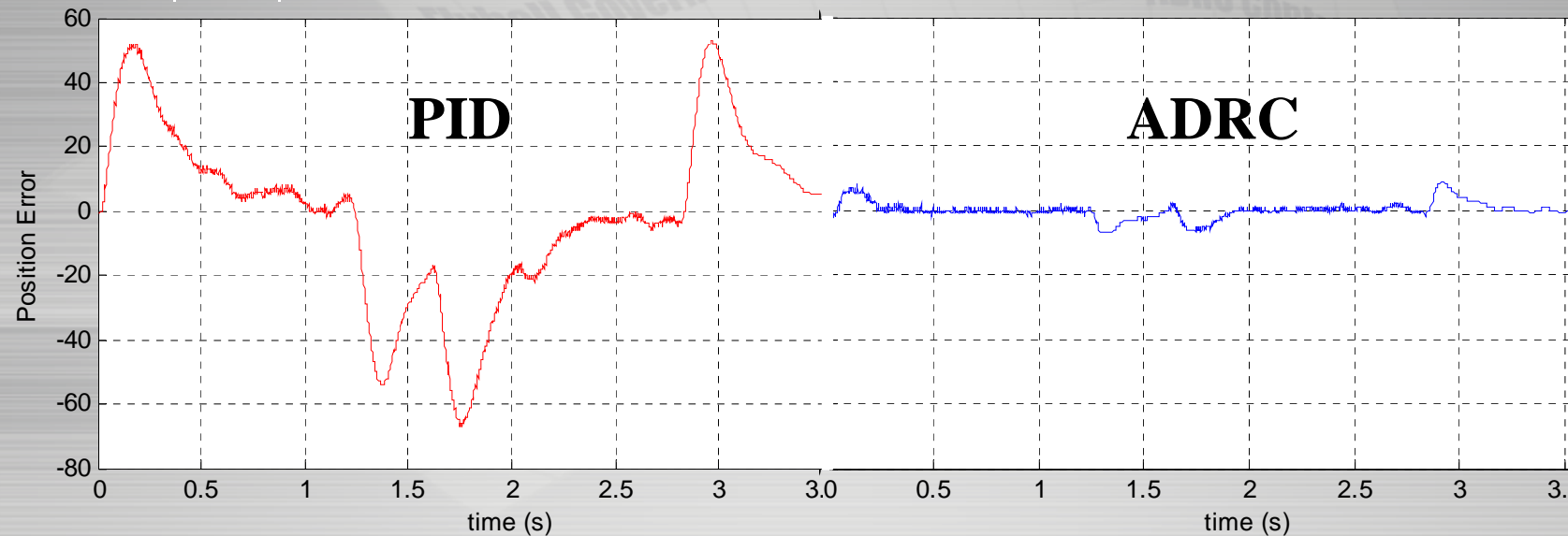
Motion Control Test: Accuracy



Accuracy



Impact: Significantly improve quality control, reducing defective parts per million (DPPM)



81% Reduction in Position Error

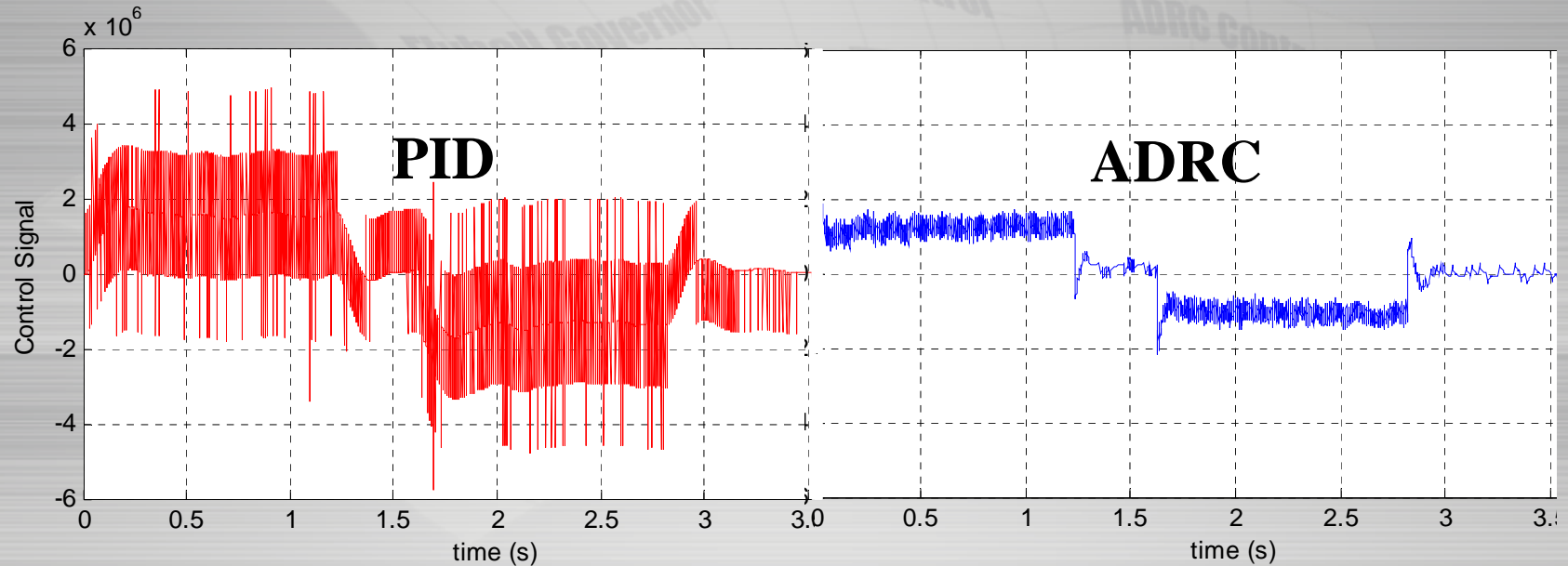
Motion Control Test: Energy Savings



Energy Savings

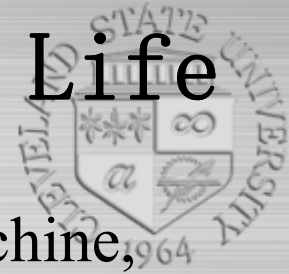


Impact: Reduce power usage by minimizing overshoots, vibration, and delayed response



41% Reduction in Energy (RMS Torque)

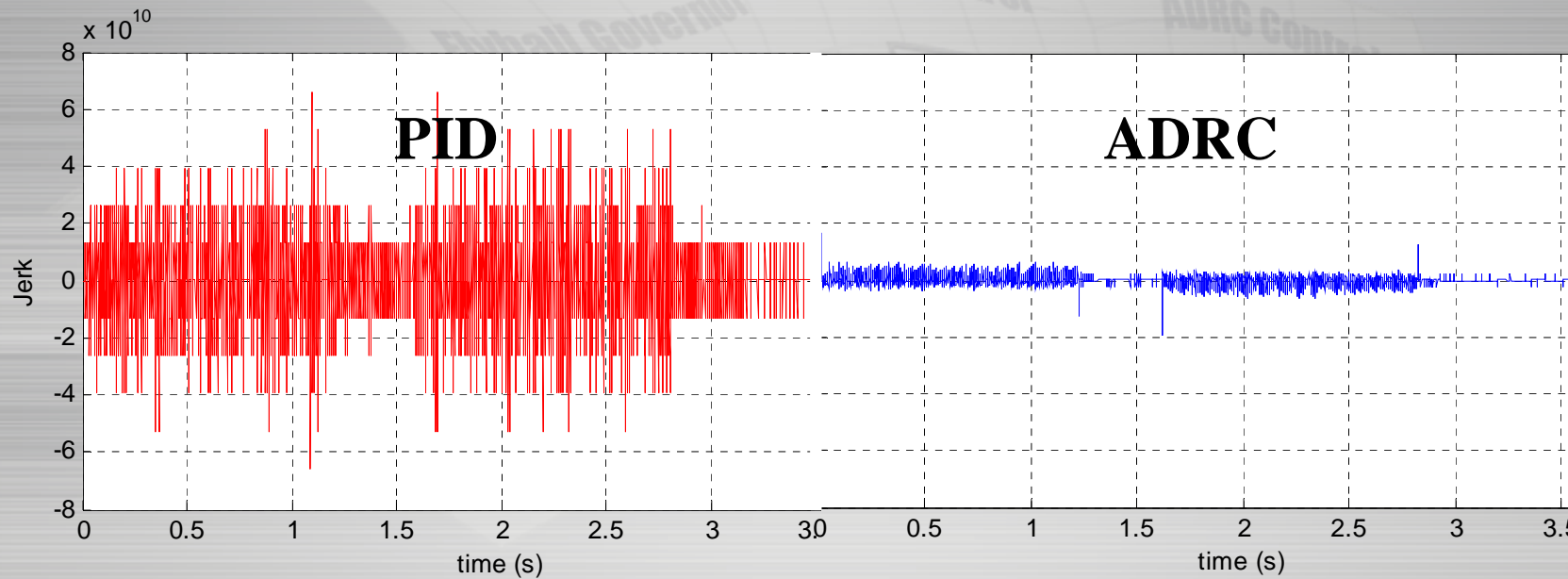
Motion Control Test: Machine Life



Machine Life



Impact: Reduce wear and tear on machine, creating less downtime and prolonged life



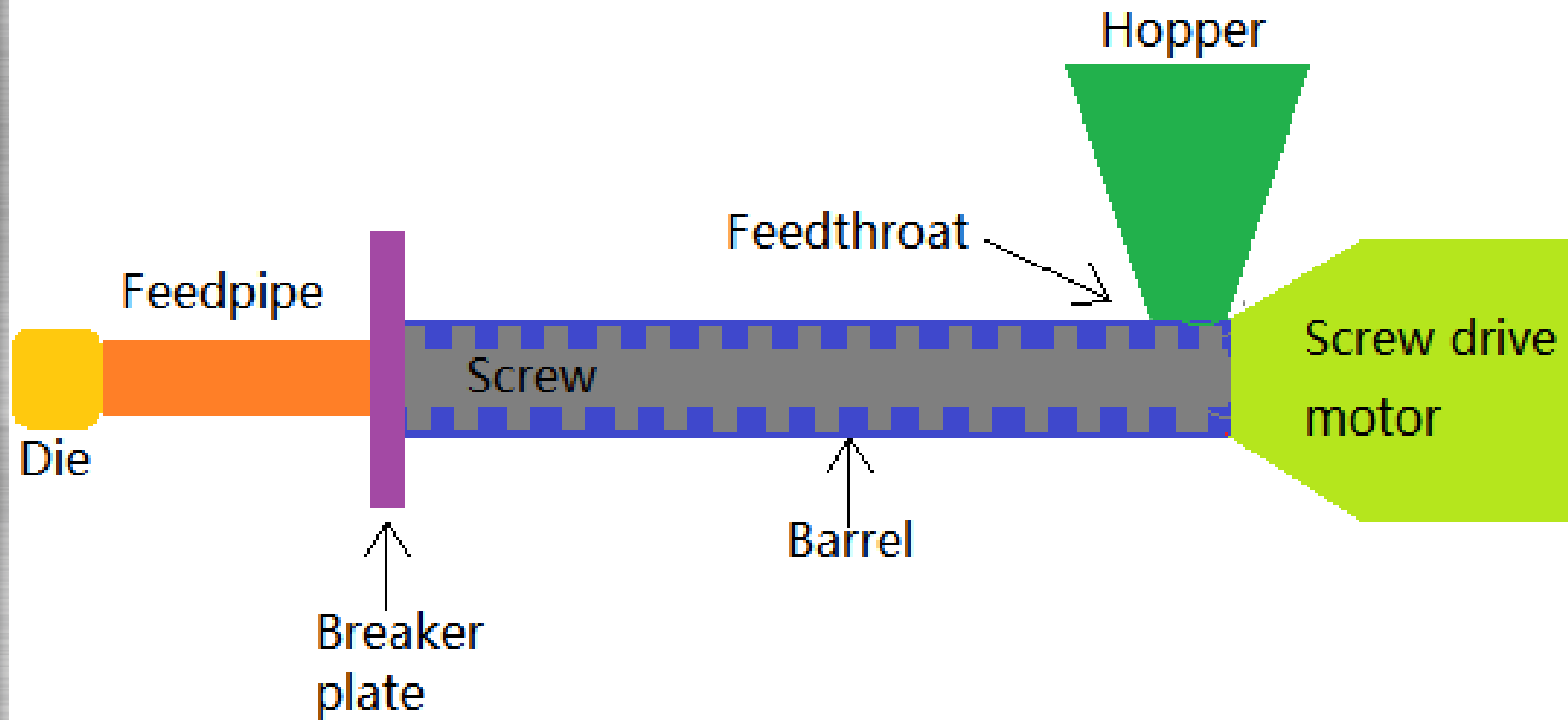
RESULT: 71% Reduction in Jerk

例3: Parker 挤压机, 2010

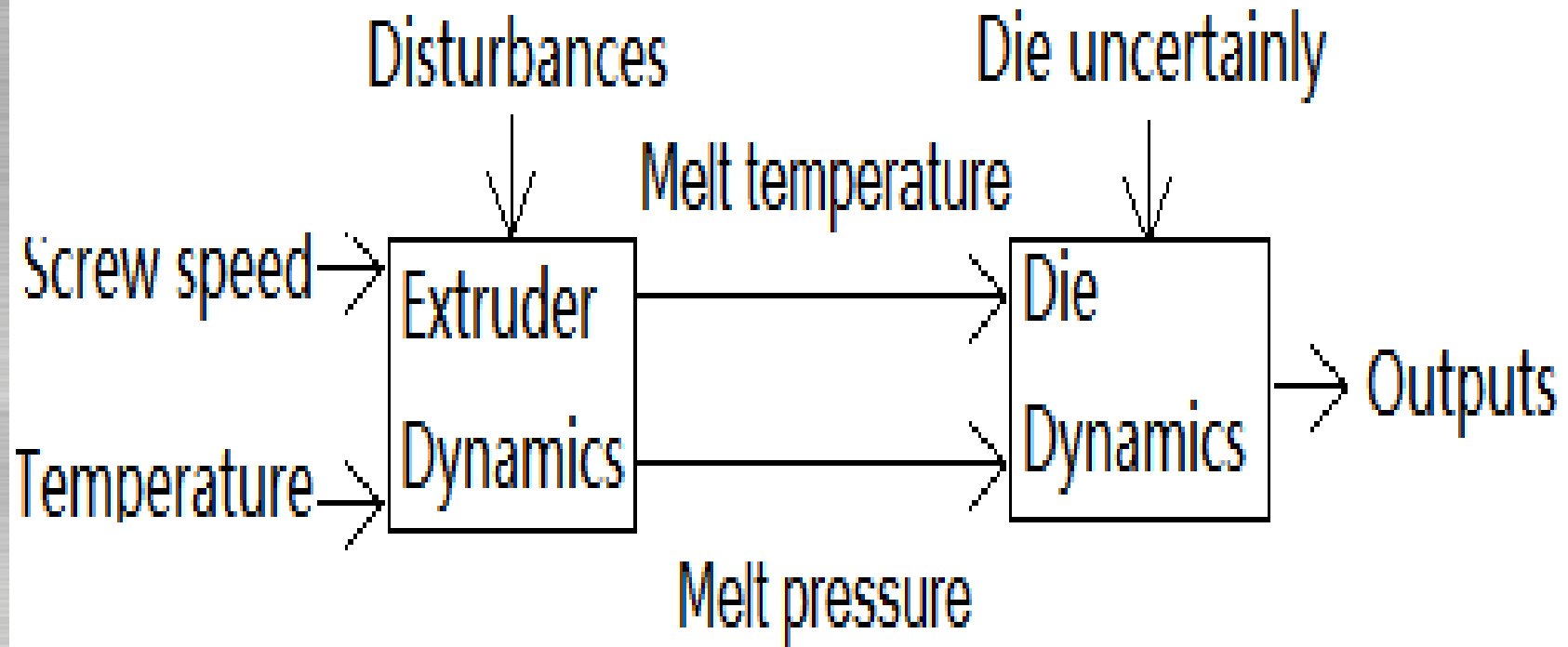


Implemented in PLC across ten extrusion lines, with an average of 57% energy savings

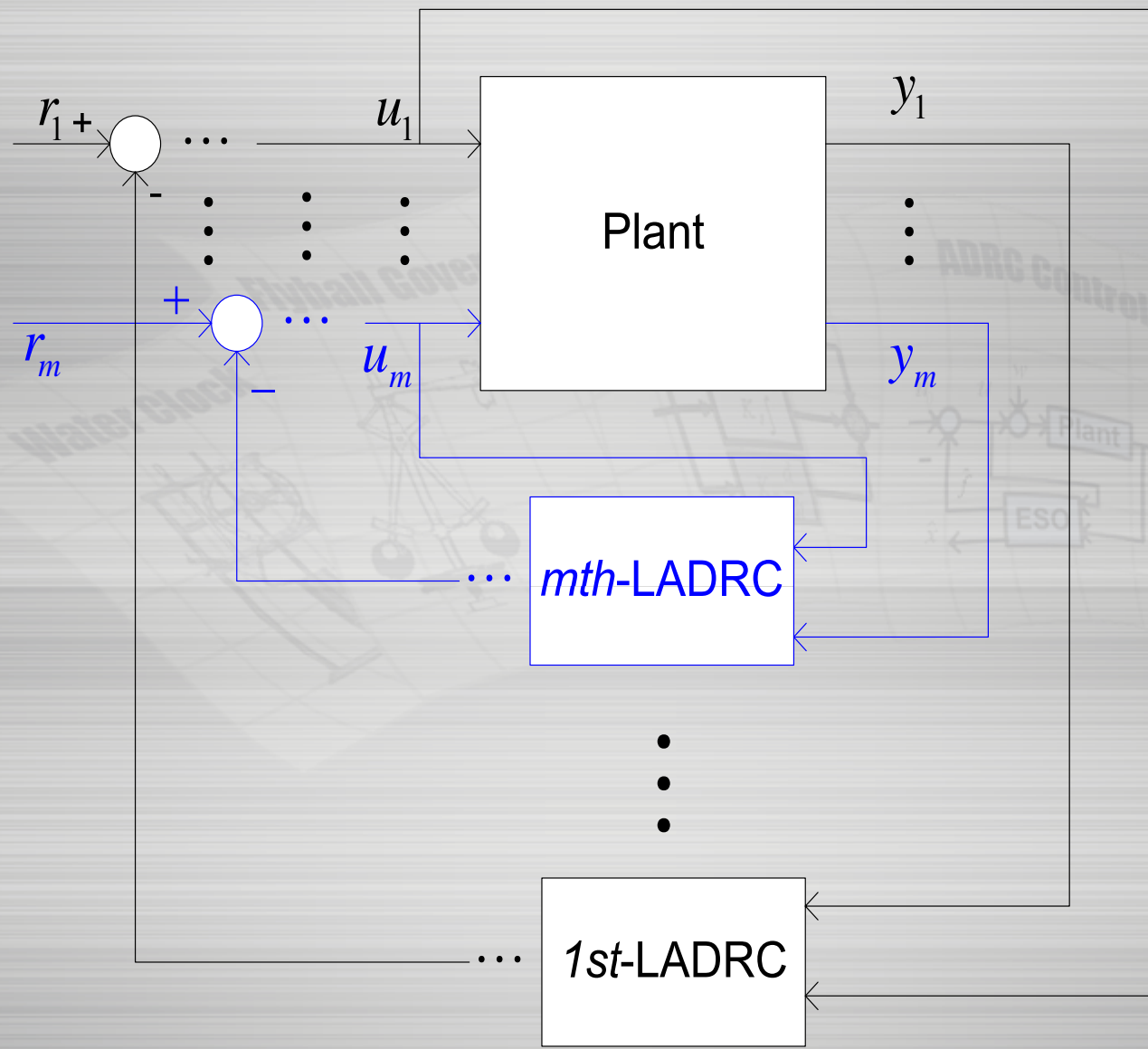
Extrusion



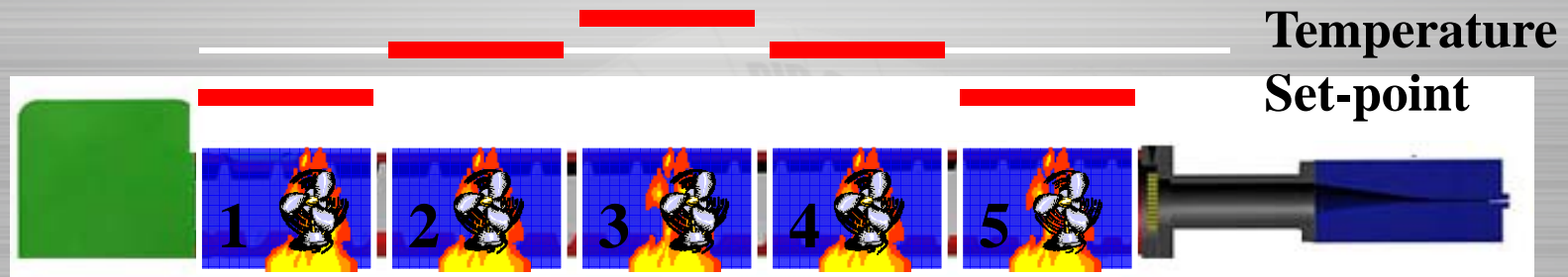
问题:多温区, 强耦合, 未知动态



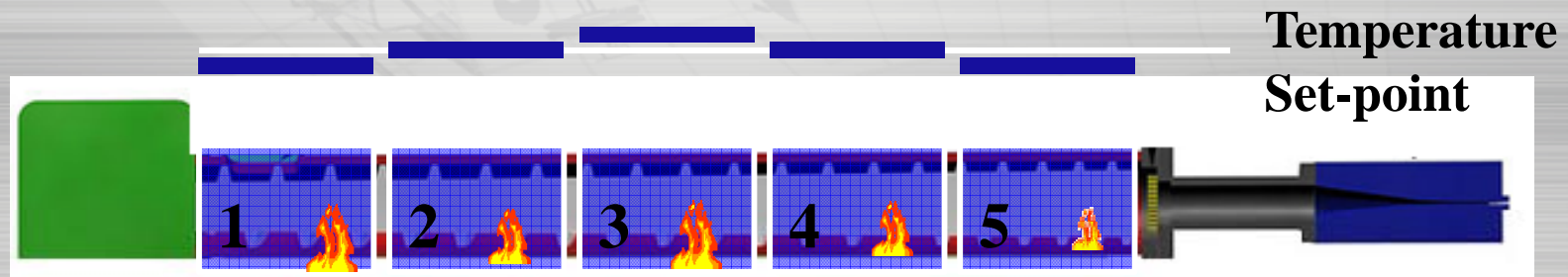
Disturbance Decoupling Control



Temperature Control

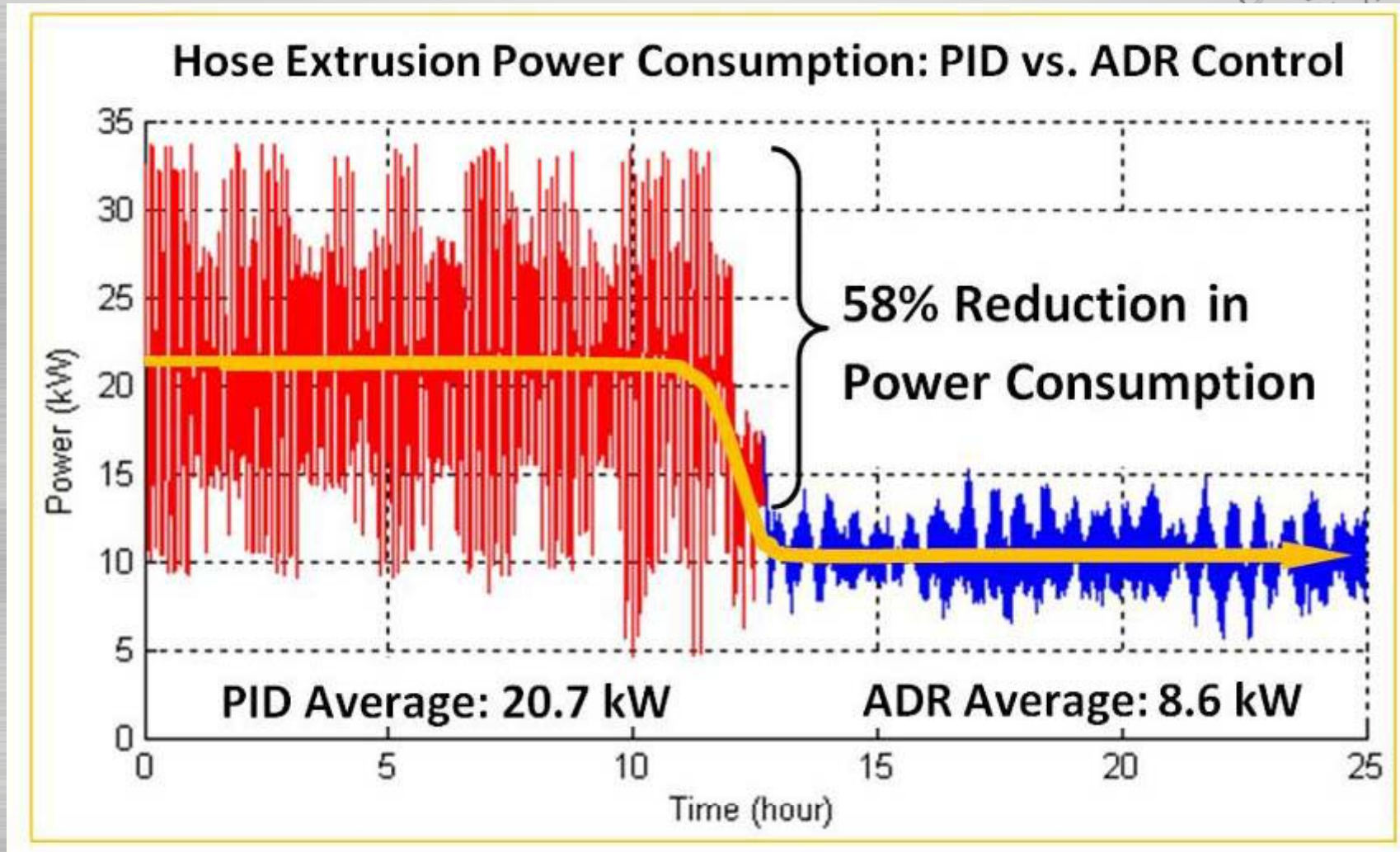


PID passively responds to disturbance, causing zone oscillation



ADRC actively rejects disturbance, delivering smooth system control

Power Reduction by 58%!





The implementation was simple. I sent them our existing PLC program over email, and a week later they showed up and installed the new program during shift changeover. The results were immediate — heat zones achieved equilibrium with little to no temperature fluctuation, and the power meter readouts “look like they **fell off a cliff.**”

Scott Burrowbridge
Control Engineer
Parker Hannifin

<http://www.polymerohio.org>

例4：高能物理, 2011



NSCL at MSU

3 MeV/u re-accelerator (ReA3)



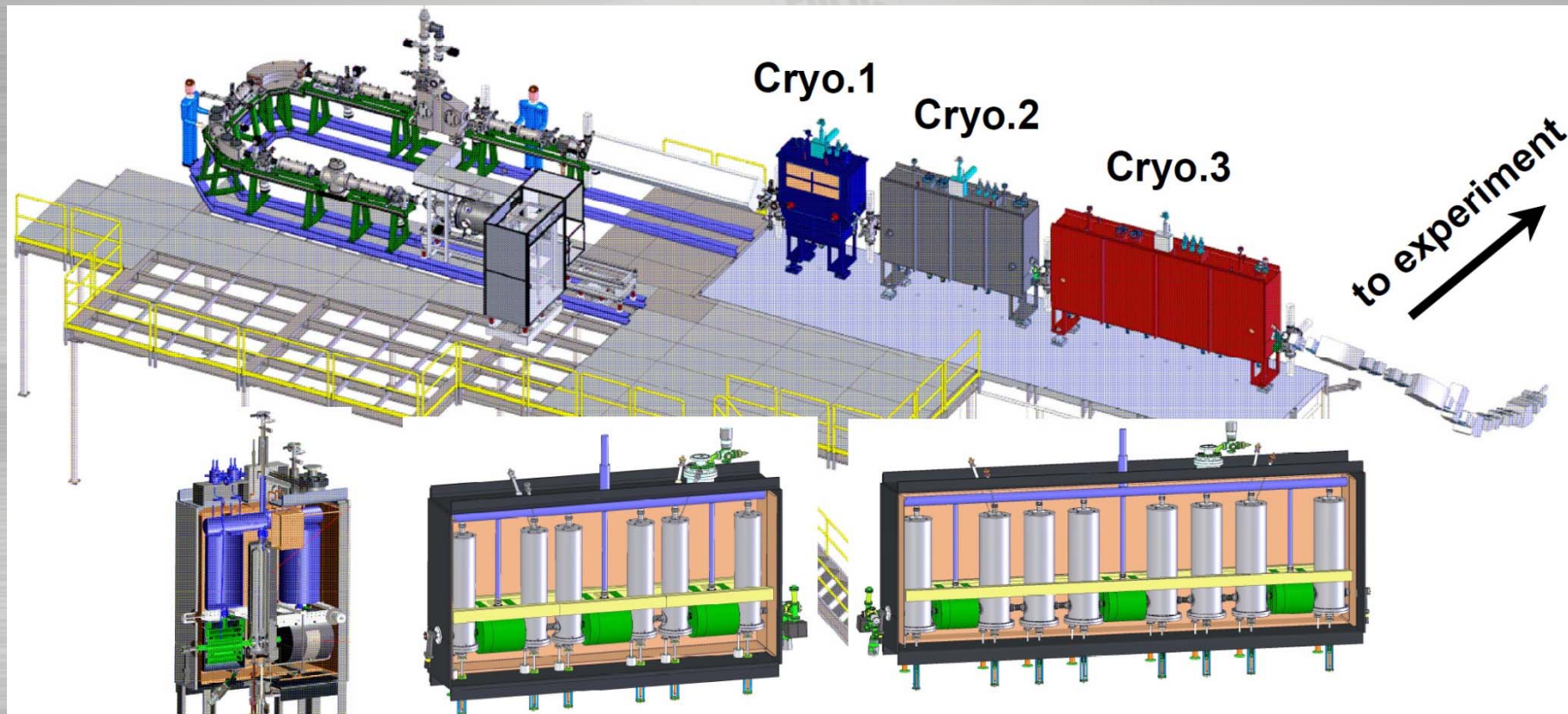
FRIB

**400 kW, 200 MeV/u SRF
linear accelerator (LINAC)**

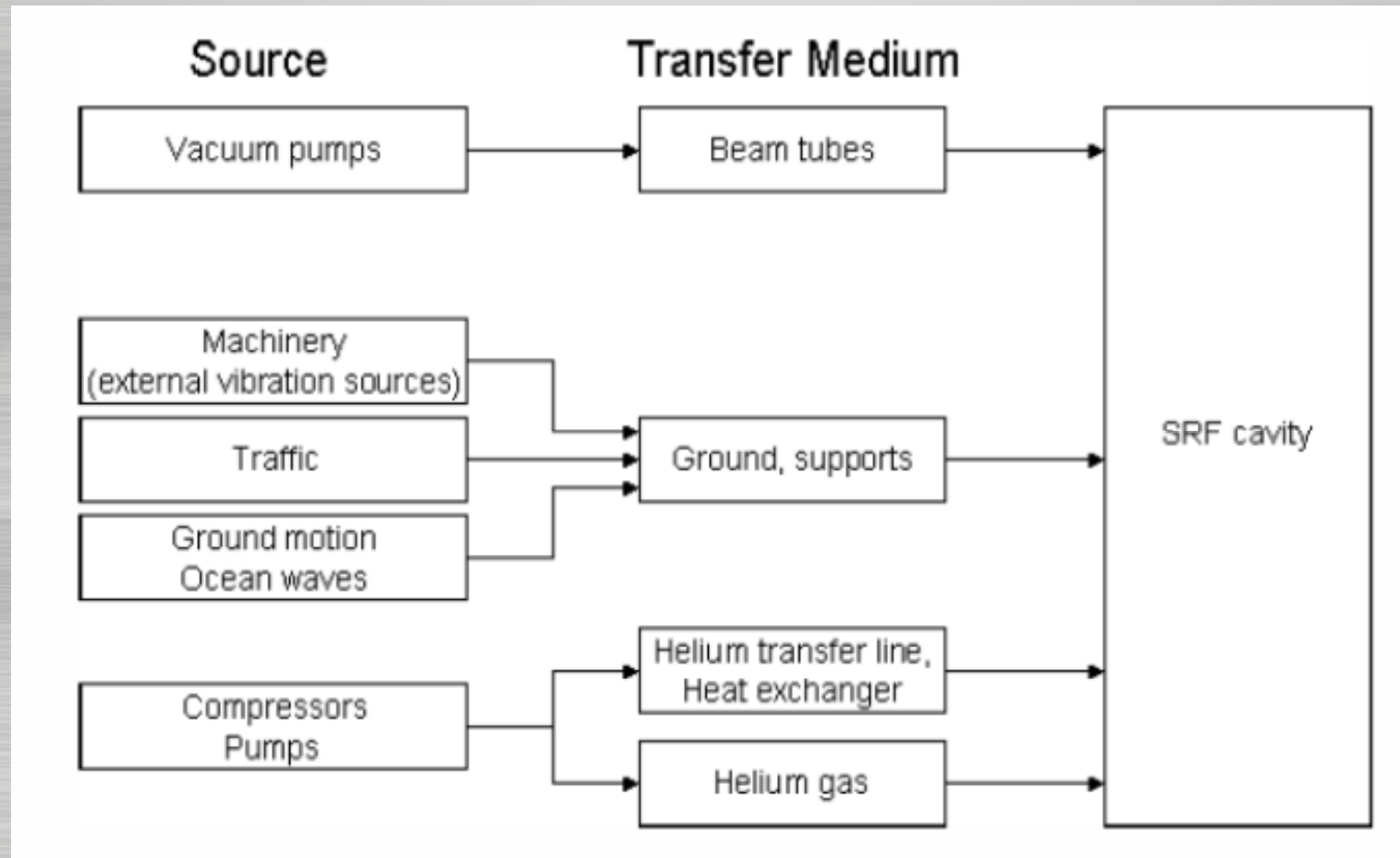
ReA3 Status at NSCL [1]



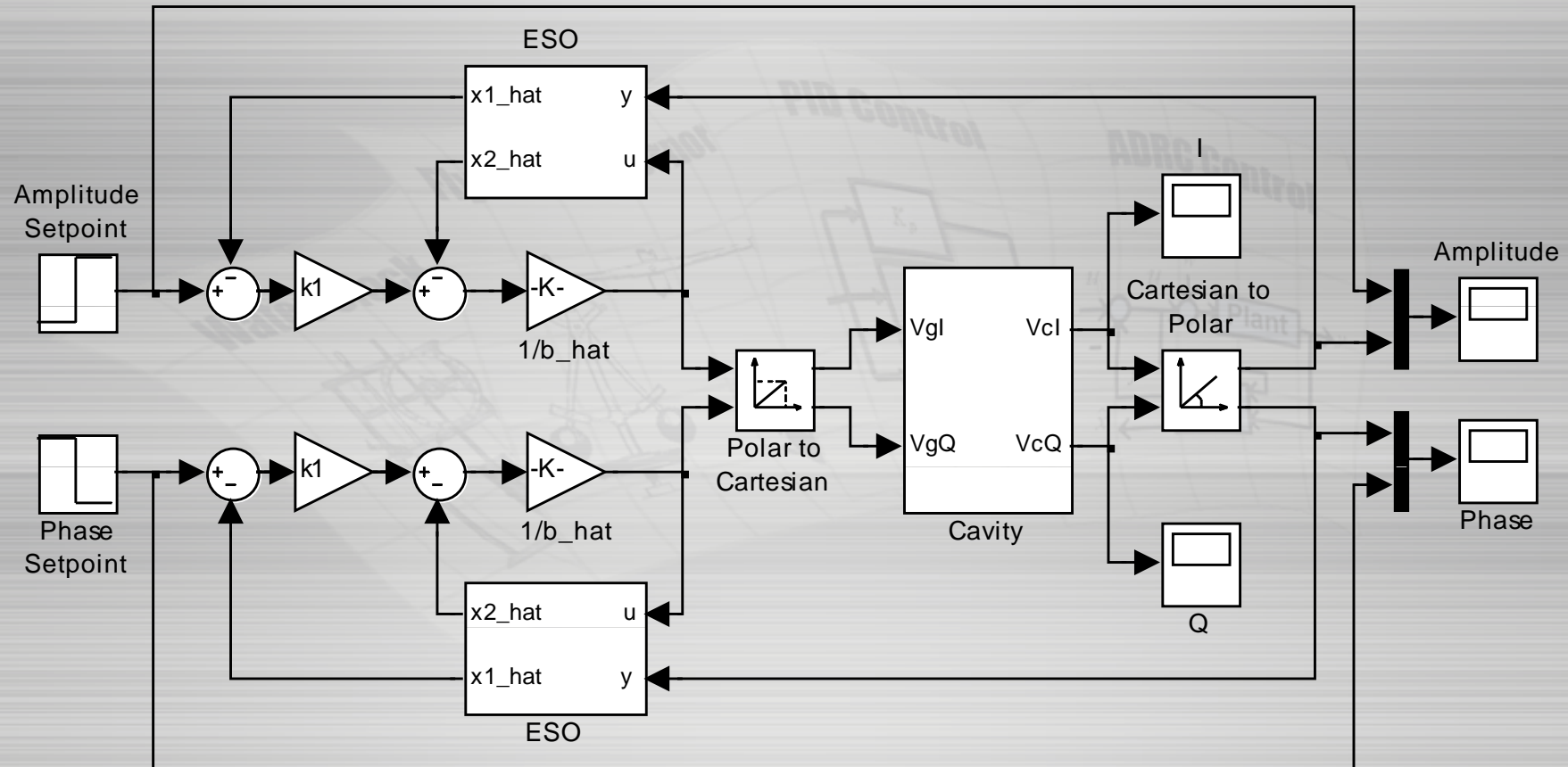
- ❑ Cryomodule 1 and 2 installed, 7 SRF cavities in total; Cryomodule 3 (8 SRF cavities) to be installed;



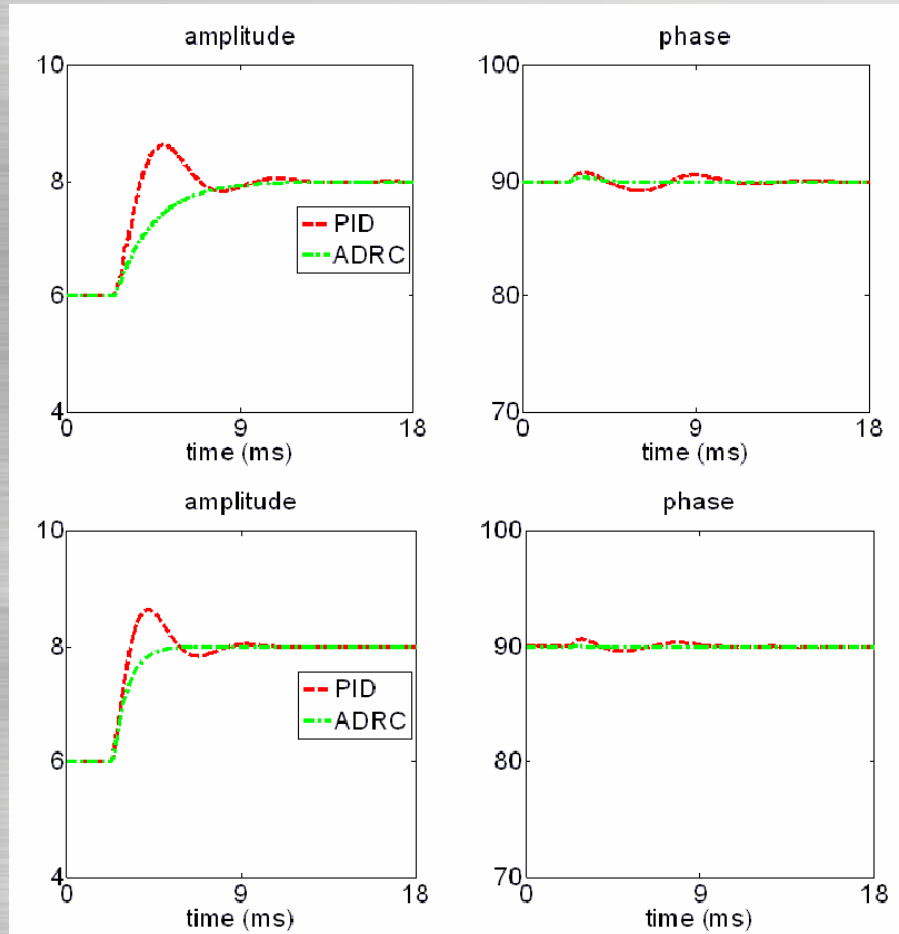
Microphonics [Schilcher, 1998]



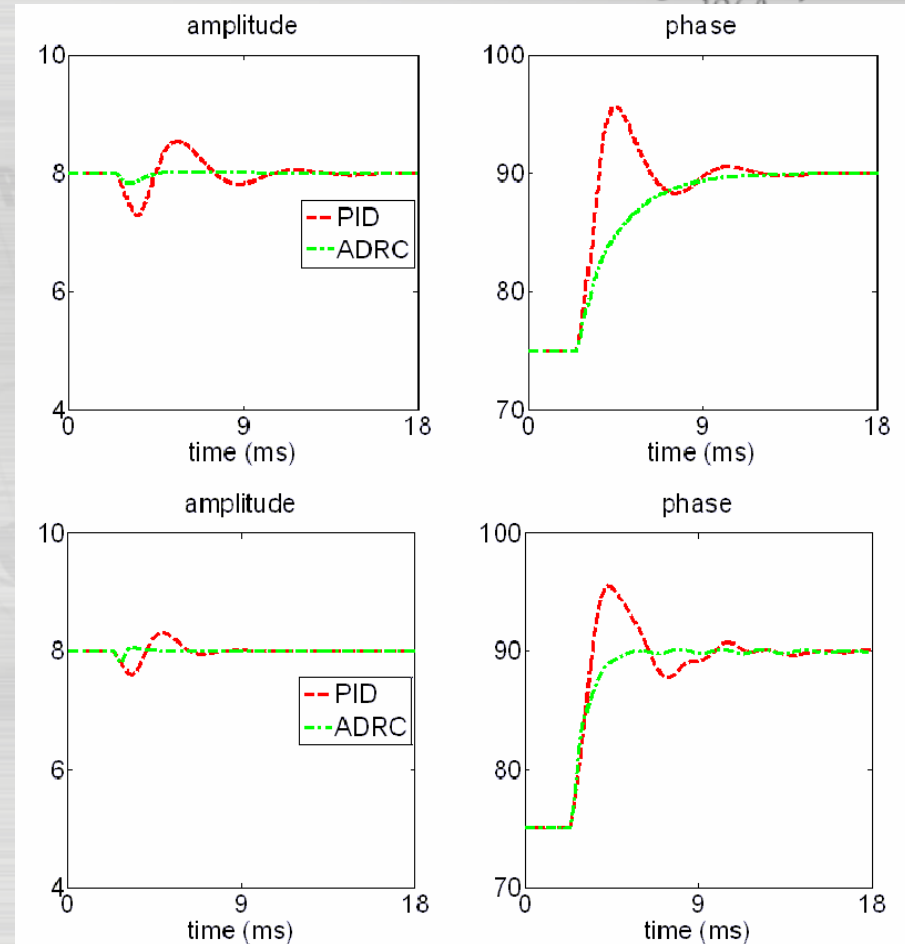
Simulation Model



Simulation and Test Results



Amplitude Step

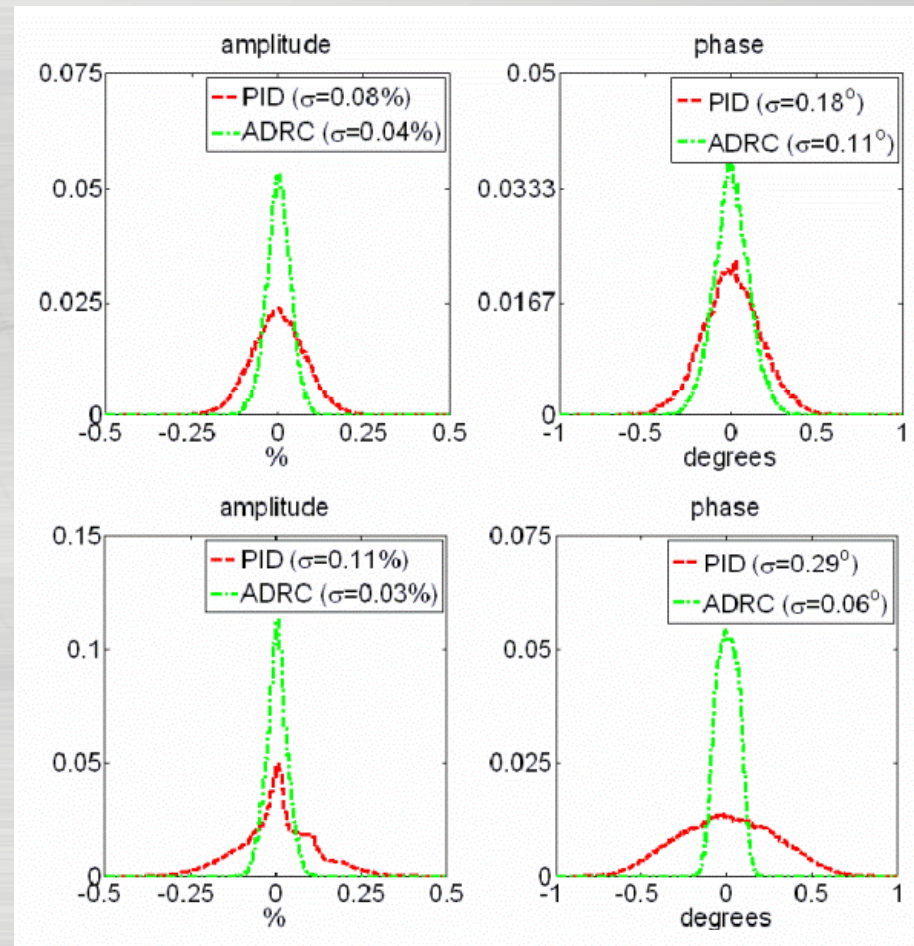


Phase Step

ADRC Results on ReA3 [2]



- Two times improvement in simulation (top)
- Four times improvement in tests (bottom);
- Running on ReA3 since Jan. 2011;





自抗扰控制的论证



自抗扰控制的理论分析



跟踪微分器

- 韩京清, 王伟, 非线性跟踪-微分器, 系统科学与数学, **14(2):177-183**, 1994.
- 韩京清, 袁露林, 跟踪-微分器的离散形式, 系统科学与数学, **1999, 19(3):268-273**.
- B.Z. Guo, J. Q. Han and F.B. Xi, Linear tracking-differentiator and application to online estimation of the frequency of a sinusoidal signal with random noise perturbation, *International Journal of Systems Science*, 33(5)(2002), 351-358
- W. Xue, Y. Huang, X. Yang, What Kinds of System Can Be Used as Tracking-Differentiator, Proc. of The 2010 Chinese Control Conference, 2010: 6113-6120.
- B.Z.Guo and Z.L.Zhao, On convergence of nonlinear tracking differentiator, *International Journal of Control*, 84(2011), 693-701.
- B.Z.Guo and Z.L.Zhao, Weak convergence of nonlinear high-gain tracking differentiator, *IEEE Transactions on Automatic Control*, April, 2013.

自抗扰控制的理论分析



扩张状态观测器

韩京清, 一类不确定对象的扩张状态观测器, 控制与决策, 1995, No.1:85-88.

Q. Zheng, Linda Q. GAO, and Zhiqiang Gao, "On Estimation of Plant Dynamics and Disturbance from Input-Output Data in Real Time", Proceedings of the 2007 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Singapore, October 1-3, 2007.

D. Yoo, S. S.-T. Yau, and Z. Gao, "Optimal Fast Tracking Observer Bandwidth of the Linear Extended State Observer", International Journal of Control, Volume 80, Number 1/January 2007, pp. 102-111.

X. Yang, Y. Huang, Capability of extended state observer for estimating uncertainties. Proc. of The 2009 American Control Conference, 2009: 3700–3705.

B.Z.Guo and Z.L.Zhao, On the convergence of extended state observer for nonlinear systems with uncertainty, Systems and Control Letters, 60(2011), 420-430.

B.Z.Guo and Z.L.Zhao, On convergence of nonlinear extended state observer for MIMO systems with uncertainty, IET Control Theory & Applications, 6(2012), 2375-2386.

Qing Zheng, Linda Gao, and Z. Gao, "On Validation of Extended State Observer through Analysis and Experimentation", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, March 2012.

自抗扰控制的理论分析



线性ADRC

Z. GAO, SCALING AND BANDWIDTH-PARAMETERIZATION BASED CONTROLLER TUNING, PROCEEDINGS OF THE AMERICAN CONTROL CONFERENCE, COLORADO JUNE 4-6, 2003, 4989-4996.

Qing Zheng; Gao, L.Q.; Zhiqiang Gao; "On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics", Proc. of 2007 IEEE CDC, Page(s):3501 – 3506.

W. ZHOU, S. SHAO, AND Z. GAO, "A STABILITY STUDY OF THE ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL PROBLEM BY A SINGULAR PERTURBATION APPROACH", APPLIED MATHEMATICAL SCIENCES, VOL 3, NO. 10, 2009.

Q. Zheng, Z. Chen, and Z. Gao, "A Practical Dynamic Decoupling Control Approach," Control Engineering Practice, Vol. 17, pp. 1016-1025, July 2009.

W. Xue, Y. Huang, Comparison of the DOB Based Control, A Special Kind of PID Control and ADRC, Proc. of The 2011 American Control Conference, pp.4373-4379, San Francisco, 2011.6.29-7.1.

W. Xue, Y. Huang, The Active Disturbance Rejection Control for a Class of MIMO Block Lower-triangular system, Proc. of The 2011 Chinese Control Conference, pp.6362-6367, Yantai, 2011.7.22-24.

W. XUE, ON THEORETICAL ANALYSIS OF ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL, DOCTORAL THESIS, BEIJING: AMSS, 2012.

自抗扰控制的理论分析



频率响应法

Gang Tian, Zhiqiang Gao, "Frequency Response Analysis of Active Disturbance Rejection Based Control System", Proc. of the 2007 IEEE Multi-conference on Systems and Control, October 1-3, 2007.

Jason Tatsumi, Zhiqiang Gao, "On Root Locus Analysis of Active Disturbance Rejection Control", To be presented at the 2013 Chinese Control Conference, July 26-28, 2013, Xi'an, China.

Congzhi Huang, Zhiqiang Gao, "On Transfer Function Representation and Frequency Response of Linear Active Disturbance Rejection Control", 2013 Chinese Control Conference.

Dan Wu, Ken Chen. Frequency Domain Analysis of Nonlinear Active Disturbance Rejection Control via the Describing Function Method. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013. (To be published)

Dan Wu, Ken Chen. Limit cycle analysis of active disturbance rejection control system with two nonlinearities. Submitted to ISA Transactions.

自抗扰控制的理论分析



非线性ADRC

韩京清, 自抗扰控制器及其应用, 控制与决策, 1998, NO.1:18-23.

J. HAN, NONLINEAR DESIGN METHODS FOR CONTROL SYSTEM, THE PROCEEDINGS OF THE 14TH IFAC WORLD CONGRESS, BEIJING, 1999, VOL.C, 521-526

B.Z.Guo and Z.L.Zhao, On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO Systems, SIAM Journal on Control and Optimization, Vol. 51, No. 2, pp. 1727-1757, May 2013.



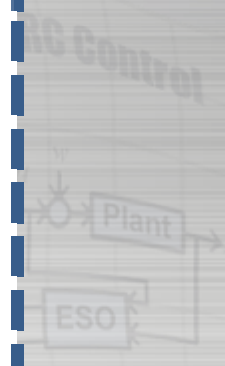
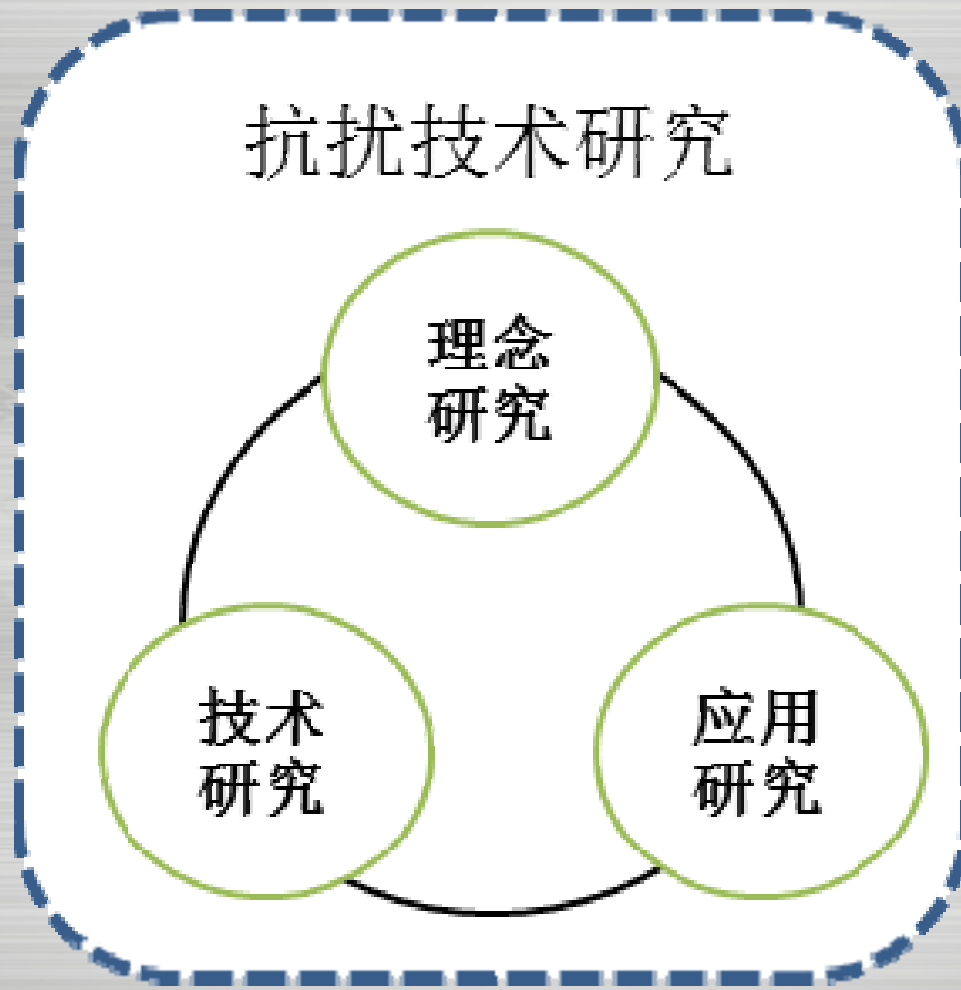
抗扰技术研究



层次



抗扰技术研究



理念的产生与论证



- ❑ 瓦特，庞雪莱，**H. Black**，韩京清
- ❑ 敢于质疑、创新，不拘于数学证明
- ❑ 对工程控制的论证：**Bode, Nyquist**
- ❑ 理念与技术和应用的关系
- ❑ 理论：背后有没有真切的理念？

在本书第一版的序言中,原书作者曾指出,工程控制论是一门技术科学,不是工程技术。它的目的是综合自动控制方面的技术成果,提炼出一般性的理论,并指出进一步发展的方向,从而对自动控制技术的发展起指导作用。原序中的这一段话明确地指出了理论来自实践,反过来又会指导实践这一客观规律,说明理论和实践是密切联系着的,但又是有区别的;懂得理论的并不一定会实践,有实践经验的并不一定知道理论。在修订版出版时,我们觉得还应该补充两点。第一,工程控制论毕竟是一般性的理论,如果没有工程技术的实际知识和实践经验,就缺少完全理解和彻底掌握工程控制论的基础,因而就不能应用一般的理论去具体解决工程技术中的实际问题。无论学习工程控制论的读者或者是研究工作者,都至少应该熟习一个具体领域中的工程实际问题;这样才能对这一学科中的基本命题、方法和结论有深刻的理解。第二,一种理论是否正确,是否有生命力,是否值得深刻地去研究它,不仅要看它的推理是否正确,或者说从形式逻辑上看它是否成立,更重要的是看它的前提是否正确,命题本身是否反映了工程实践中的客观需要,是否抓住了主要矛盾。近二十多年来,在工程控制论的发展过程中,有不少理论或方法被实践所淘汰;另一些则被工程实践证明是正确的,有用的,从而得到了更广泛的应用和理论上的进一步提高。工程实践是检验任何技术科学理论的最后标准。所以,我们在学习和研究工程控制论时,首先要注意的是某一理论的前提,命题的客观含义和所得到的结论对工程实践的意义。从这个意义上讲,工程控制论包含的内容必将随工程技术的发展而发展。本书修订版所增添的新内容也毫无例外地将受到客观实践的检验、修改和发展。

知行合一



“知之真切笃实处即是行，行之明觉精察处即是知，知行功夫本不可离，只为后世学者分作两截用功，失却知行本体，故有合一并进之说”

《传习录》，王阳明

控制理论——模型论还是控制论¹⁾

韩京清

(中国科学院系统科学研究所)

一、前言

控制理论发展历史中的最近 30 年称为现代控制理论时期。学者们从不同角度描述过这一时期各个阶段的特征,也展望过未来发展趋势。我们从另一角度概括这一时期的特征为控制理论发展史中的“模型论”时期。建立控制系统的模型、分析系统的模型、依靠模型寻求控制律,是这一时期主流的思考方式。无论是线性系统还是非线性系统,无论是状

$$\begin{cases} \dot{x} = v, \\ \dot{v} = a(t) + u(t), \end{cases} \quad (2.1)$$

其中, $u(t)$ 是控制量, $a(t)$ 是所谓的“固有加速度”, 是许多非线性效应的随时变化量。在这里,通常不把 $a(t)$ 写成状态变量的非线性函数。有时为了提高精度,对 $a(t)$ 作出适当估计是必要的,但不一定要知道 a 与状态变量之间非线性函数关系本身。在这里,并不大关心非线性对象的全局形态,关心的焦点是如何根据一个过程提供的实时信息来搞好这个过程的控制问题。这是导引理论提供给我们的主要思想方法。

根据系统对信号的某些响应特征或过程的某些实时信息来确定控制好一个过程的控制律,是与靠系统的数学模型去找控制律的方法完全不同的思考方式。这种思考方式,相对于模型论方法,可以称为控制理论中的“控制论”方法。

Karl Astrom, 2012 ACC



- ❑ Holistic view was lost
- ❑ Adaptive Control didn't scale in industry
- ❑ PID Tuning
- ❑ "We should not forget the foundation because then the tower will tumble"

Accomplishments and Prospects of Control

Karl Johan Åström

There are many success stories and major achievements in control, something remarkable for a field as young as 50 years. In this talk we will sample these accomplishments and speculate about the future prospects of control. While there are examples of feedback from ancient times, extensive use of feedback paralleled industrialization: steam,...

[View Lecture](#)

2012 American Control Conference Plenary Lecture - Montréal, Canada, June 2012



技术研究



- ❑ 理念的工程化与工业化
- ❑ 结构简单，适用面广，不依赖模型
- ❑ 控制效果，鲁棒性，调试容易（直观）
- ❑ 为应用研究提供工具
- ❑ 为理念研究提供课题

应用研究



- ❑ 解决行业性的问题
- ❑ 抗扰的理念与过程知识的有机结合
基础：理念的把握，问题的认识
- ❑ 从认识到实践的第二次飞跃
- ❑ 为技术研究提出背景和要求
- ❑ 为理念研究提供灵感和素材

结束语



- ❑ 目标：把自抗扰技术放在每个工程师手中
- ❑ 抗扰：控制工程的核心问题
- ❑ 继承我们的文化渊源（指南车，知行合一）
- ❑ 继续先进理念的技术化、工程化
结构，适用面，模型，品质，鲁棒性，调试

<http://cact.csuohio.edu>

z.gao@ieee.org

自抗扰控制讲习班



- ❑ 从指南车到自抗扰控制：不灭的理念
- ❑ 自动控制：问题、前提、方法、主要矛盾
- ❑ 古典与现代控制的理念与实践
- ❑ 抗扰控制：范式、理念、方法与技术
- ❑ 自抗扰控制思想的灵活应用



美国，2003年