

系统控制漫谈

闲话控制理论封神榜

1024Robot

序

《闲话控制理论封神榜》与1024Robot

最早关注到公众号1024Robot，是因为有同仁在微信朋友圈里转发了这篇“闲话”。一路阅读下来，虫子立即献出了膝盖：大神呐！作为专栏作者的虫子，自纵横创刊号始，最想做而无能做的有两件事：撰写控制理论的江湖武林外传与创作控制科普题材的科幻作品。

一开始还有所想法却毫无灵感，直到有一天终于醒悟：创作是一种天分，后天养就的理性分析与逻辑思辨对其是无能为力的。于是放弃。小虫听说了，立即推荐了一部古贺史健的《写作的勇气——成为写作高手的训练手册》及詹姆斯·斯科特·贝尔等人的三部曲《冲突与悬念》《经典情节20种》和《情节与人物——找到伟大小说的平衡点》，并劝说：写作是可以学习的。

看了一眼，无感。天分在才有学习这回事。丑小鸭故事的真谛是：它是天鹅。奈何？

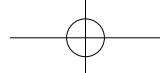
“闲话”看似轻松，其实极为难得：闲散而幽默的文字后面是常人无法称重之轻！称重，不是承重？是的。它很轻松，阅读无承重；称量却有底蕴。一份长长名单，对应封神榜一系列的神仙，需要用对整个控制理论史和代表性人物学术贡献的全面了解与深刻理解来承载。虫子自忖，即使专题阅读经年也是做不到的。

这样的作品，值得控制学人广泛传阅。很荣幸，虫子几经联系，终使1024Robot同意授权《系统与控制纵横》转载。这是本刊科普之新翼，我等学人之福利。感谢1024Robot！出于探究创作出这样一篇奇文的公众号究竟是一种怎样存在的好奇心，花了半个月，仔细阅读了它发布的许多文章，发现其内容之广、底蕴之深，不禁叹为观止。

它的文章除了“开源资料”，几乎都是原创。内容包括两大专题：机器人控制和控制理论。具体内容展开则涵盖了自动控制原理与学科发展历史，其中对控制领域经典的历史钩沉与诠释解读深入浅出，娓娓道来，令人耳目一新、茅塞顿开。

本刊从这篇闲话起，将系列转载1024Robot的精彩文章，并附虫序，以馈我等控制理论学人。再次感谢1024Robot！并期待有更多的控制科普的精品公众号能授权本刊转载。最后，说一句题外话，在本刊文字中本人通常自号散人：云中散人，而平素则很喜欢以虫子自称。之所以如此，只在于“子”字的读法：可极度自谦，亦可极致自大。仁智由心~~

——虫子@云端之渺



简单来发散下思维，瞎编乱造一通，肯定是有主观、不足的地方，仅供参考！

所谓的控制理论封神榜，肯定无法根据出生时间、年代来进行约束，否则会出现不合适的结果。所以该个人排行，不论时间，只看贡献！

女娲娘娘：詹姆斯·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell)

人物：女娲娘娘可以说是封神演义的源起，而麦克斯韦对蒸汽机的研究可以说是控制理论的源起。

宝典：麦克斯韦的文章“On Governors”细致地分析了自激振荡现象，并开创性地发展了一套理解控制系统稳定性的数学框架。首次提出了控制系统稳定性的概念，研究了基于微分方程系数的三阶系统的稳定性判据，并研究了系统出现振荡的原因。

武力：微分方程的应用，将控制从经验性调整提升到严谨的数学分析层面，为经典控制理论奠定了基础。识别稳定性对特征方程根的依赖，使得工程师能够主动设计以确保稳定性。

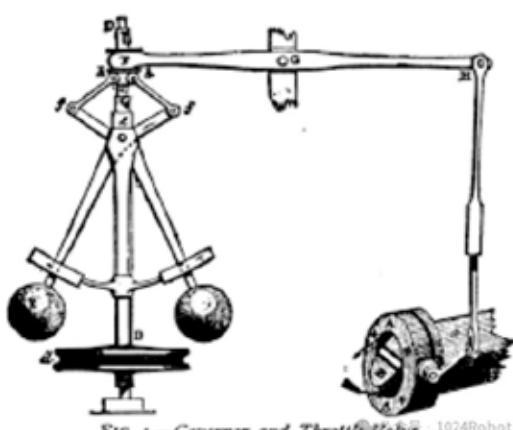


图1 瓦特调速器（图片源于网络）

鸿钧老祖：诺伯特·维纳 (Norbert Wiener)

人物：鸿钧老祖是《封神榜》中道的化身，万物之源。维纳作为“控制论之父”，他的控制论一书奠定了整个控制理论的哲学基础、赋予其跨学科的广阔视野，如同开天辟地的存在。

宝典：《控制论，或关于在动物和机器中控制与通信的科学》(Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine)。这本书就是“创世之书”，开启了控制理论的时代。

武力：思想的洞察力与跨学科的整合能力。维纳不仅仅局限于数学或工程，他将信息论、生物学、神经科学等领域融会贯通，展现了超越单一学科的强大统筹力量。



图2 语出自维纳著作《人有人的用处：控制论和社会》（图片源于网络）

元始天尊：亚历山大·李亚普诺夫 (Aleksandr Lyapunov)

人物：元始天尊是阐教教主，注重正统和根本。李亚普诺夫的工作奠定了现代控制理论中稳定性基石，是系统能否正常运行的根本保障，如同立教之本。

宝典：《论运动稳定性的一般问题》(The General Problem of the Stability of Motion)。李亚普诺夫函数是判断系统稳定性的“开天辟地”的法宝，简洁而强大，能洞察系统内在的稳定状态，是所有控制系统都需要遵守的“天规”。

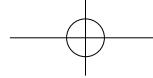


图3 亚历山大·李亚普诺夫 (图片源于网络)

武力：严谨的数学推导与稳定性分析能力。他的理论为后续的控制系统设计提供了坚实的基础，确保了系统“道法自然，稳固不破”。

通天教主：列夫·庞特里亚金 (Lev Pontryagin) 与理查德·贝尔曼 (Richard Bellman)

人物：通天教主开创截教，门下“有教无类”，主张“大道三千，皆可证道”，其弟子众多且各具神通。庞特里亚金和贝尔曼分别创立的最优控制理论，其思想是寻找“最佳路径”以达到目标，这就像截教弟子各显神通，通过不同手段追求极致。

宝典：庞特里亚金的极大值原理 (Pontryagin's Maximum Principle), 《数学理论中的最优过程》 (Mathematical Theory of Optimal Processes)：如同“诛仙剑阵”，直指最优解，锋利无比，能解决一些复杂的多变量优化问题。贝尔曼的《动态规划》 (Dynamic Programming)：如同“混元金斗”，通过分阶段决策，逐步实现整体最优，有着包罗万象的迭代能力。

武力：复杂系统优化求解能力与全局规划能力。他们的方法能够找到在给定约束下达到性能指标最优的控制策略，如同通天教主门下弟子各显神通、追求极致。



图4 动态规划与最优控制 (图片源于网络)

西方教二圣：鲁道夫·卡尔曼 (Rudolf Kalman) 与钱学森

人物：西方教注重因果和收敛，最终达到“正果”。卡尔曼的滤波理论解决了系统状态的精确估计问题。钱学森则将控制理论与工程实践紧密结合，推动了中国航天事业的发展。二人都注重实效和最终的“成果”。

宝典：卡尔曼滤波经典论文 “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”：如同“七宝妙树”，能从噪声中提取真实信息，去伪存真，是状态估计的利器。钱学森《工程控制论》 (Engineering Cybernetics)：如同“金刚琢”，将抽象理论转化为实际应用，威力无穷，是工程实践的瑰宝。

武力：信息融合与状态估计能力 (卡尔曼)



图5 卡尔曼提出“卡尔曼滤波”方案的原始文献 (图片源于网络)

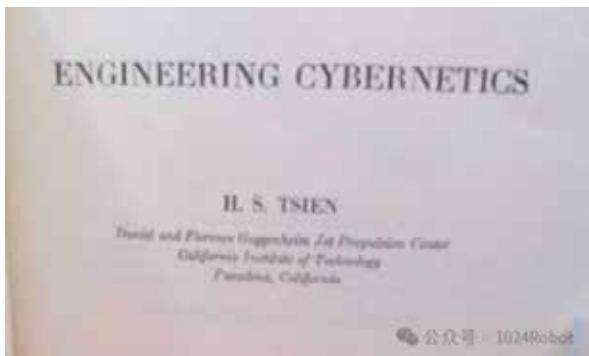
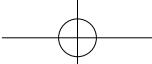


图6 钱学森1954年著英文著作《Engineering Cybernetics》，后被翻译成中文版，即《工程控制论》（图片源于网络）

和理论指导实践、推动工程应用能力（钱学森）。

姜子牙：赫尔维茨 (Hurwitz) / 劳斯 (Routh) / 波德 (Bode) / 奈奎斯特 (Nyquist) / 埃文斯 (Evans)

人物：姜子牙是凡人，但他知天命、懂运筹，辅佐武王伐纣。这些经典控制理论的奠基者，虽然没有像维纳那样开创一个学科，但他们提供了具体的分析和设计方法，是控制系统从概念走向实际应用的关键执行者。

宝典：劳斯的著作《A Treatise on the Stability of a Given State of Motion》，波德的著作《Network Analysis and Feedback Amplifier Design》，奈奎斯特的论文“Regeneration Theory”，以及埃文斯的论文“Graphical Analysis of Control Systems”

劳斯 - 赫尔维茨判据、波德图、奈奎斯特图、根轨迹图。这些是姜子牙手中的“打神鞭”，是分析和设计经典控制系统最常用的工具，简单实用，直观有效。

武力：系统稳定性判别能力、频率域和时域分析能力。这些是处理简单线性系统的“凡人”武力，但足以应对早期工程需求。

杨戬： H_{∞} 控制理论 (H-infinity Control)

人物：杨戬变化多端，善于应对各种复杂情况。

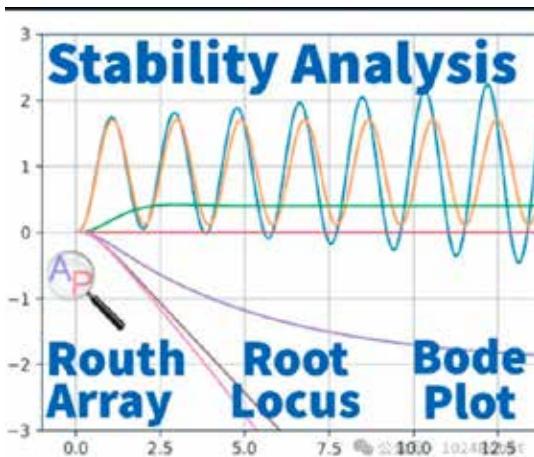


图7 控制器稳定性分析（图片源于网络）

H_{∞} 控制理论正是为了应对系统不确定性和外部干扰而发展起来的，追求在各种条件下都能保持良好性能。

宝典：布鲁斯·艾伦·弗朗西斯 (Bruce Alan Francis) 的著作《A Course in H_{∞} Control Theory》，乔治·齐默斯 (George Zames) 的论文“Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses”等相关专著。这些是杨戬的“秘籍”，教导如何应对变幻莫测的挑战。

武力：对不确定性的抵抗能力和性能保持能力。如同杨戬的“铜头铁臂，法力无边”，能抵御各种“妖邪”干扰。结构奇异值 (μ)，这是杨戬的“七十二变”，能够适应各种复杂环境。

H-infinity methods in control theory

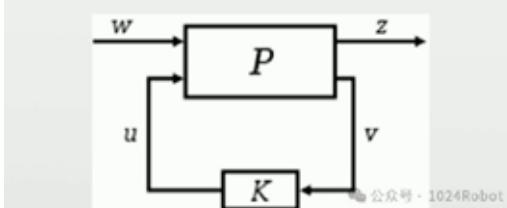
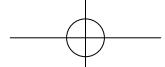


图8 H_{∞} 控制理论框图（图片源于网络）



哪吒：自适应控制 (Adaptive Control)

人物：少年英雄哪吒，脚踏风火轮，身手敏捷，能在战斗中不断调整策略。自适应控制强调系统在运行过程中能根据环境变化自动调整自身参数或策略，具有学习能力。

宝典：卡尔·约翰·奥斯特罗姆 (Karl John Åström) 和比约恩·维滕马克 (Björn Wittenmark) 的著作《自适应控制》(Adaptive Control) 等文献是哪吒的“成长日记”，记录着系统不断学习和进化的过程。

武力：在线学习和自我调整能力。如同哪吒的“三头六臂”，能迅速应对未知变化。模型参考自适应、增益调度等，这些是哪吒的“风火轮”和“乾坤圈”，能让系统灵活应变，不断优化。

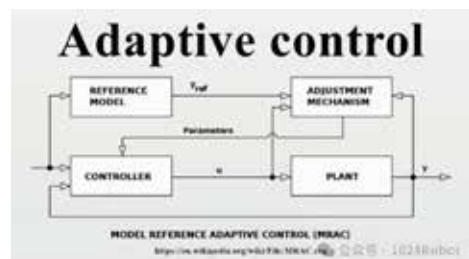


图9 自适应控制框图 (图片源于网络)

系统外挂：尼古拉·米诺尔斯基 (Nikolai Minorsky)：PID 控制的大师

尼古拉·米诺尔斯基被认为是 PID (比例 - 积分 - 微分，Proportional-Integral-Derivative) 控制理论的开创者。这种控制策略是基础性的，它根据期望设定点与实际测量过程变量之间的误差来调整系统输入，并结合了误差的比例、积分和

历史及应用

PID控制器可以追溯到1890年代的海涅曼设计^[13]。PID控制器是在船舶自动操作系统中最早发展。1911年Elmer Sperry开发的控制器是最早期PID型控制器的其中之一^[14]，而第一个发表PID控制器理论分析论文的是俄裔美籍工程师尼古拉斯·米诺尔斯基(Ninolai Minorsky 1922)。米诺尔斯基当时在设计美国海军的自动操作系统，他的设计是基于对舵的观察，控制器不只依赖目前的误差，也考虑过去的误差以及误差的变化趋势^[15]。后来米诺尔斯基也用数学的方式加以推导^[16]。他的目标是在于稳定性，而不是泛用的控制。因此大体的简化了问题，比例控制可以在小的扰动下有稳定性，但无法消除静态误差。因此加入了积分项，后来也加入了微分项^[20]。

图10 PID控制器早期发展史 (图片源于网络)

微分项。

PID 控制器虽然相对简单，但其效果显著且鲁棒性强，成为工业应用和日常设备中最常见、应用最广泛的控制算法。它是控制领域的主力，尽管其起源“经典”，但它适用于各种系统。它的“武力”不在于理论的复杂性，而在于其普遍的实用性和鲁棒性，仿佛开挂的“神器”，为无数平凡的系统带来秩序。

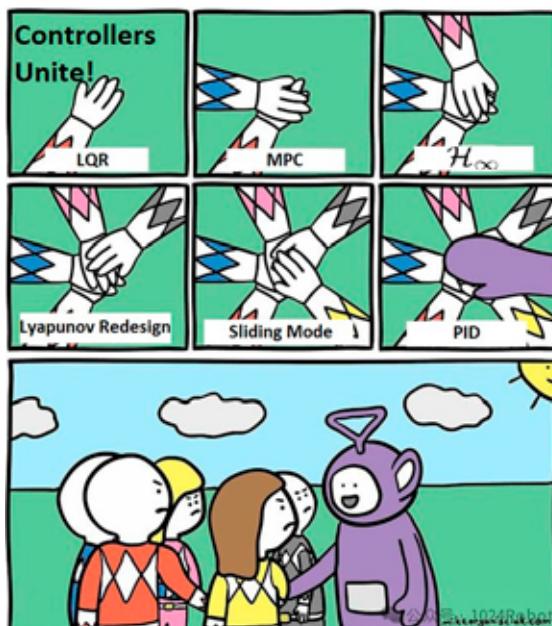


图11 现存多种控制理论中，应用最广泛的仍是 PID 控制 (图片源于网络)

最后，想说的是，控制理论的演进，体现了对处理更大复杂性、不确定性和自主性的持续追求。这反映了对系统“感知”（可观测性、状态估计）和“能力”（可控性、最优控制）的长久渴望。控制理论的未来，是对“神圣全知”和“神圣全能”的不懈追求。它旨在使系统即使在噪声和不确定性中也能“知晓一切”（全知），并能完美地引导和优化任何系统（全能）。

“封神榜”并非一份静态的名录，而是一个动态的榜单。未来，或许有更多人，能够上榜！

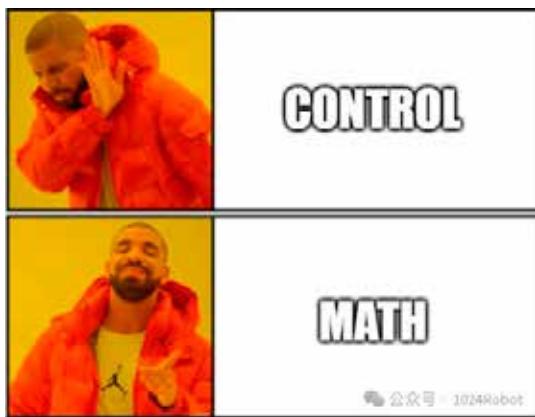
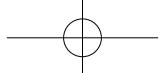


图12 控制的表面下有时是数学（图片源于网络）

本文转载自作者于 2025 年 7 月 10 日在微信公众号“1024Robot”发表的同名文章。

【作者简介】 1024Robot，从事机器人运动控制技术方面的工作，常在网络就控制科学与工程方向发表文章、转载或整理学科资料，详见微信公众号‘1024Robot’。