



怎样的受控对象更好控制 —— 一个基于能控度的分析与猜想

邹云*, 夏亚平, 殷明慧, 蔡晨晓

南京理工大学自动化学院, 南京 210014

* 通信作者. E-mail: zouyun@vip.163.com

收稿日期: 2016-05-25; 接受日期: 2016-08-02; 网络出版日期: 2016-12-14

国家自然科学基金 (批准号: 61174038, 61573186, 61673213, 51507080) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 30915011104) 资助项目

摘要 本文从控制系统一体化设计的思想以及熟知的社会现象中分析提取出这样一个控制命题: 怎样的受控对象更好控制? 具体则从“这类对象如果存在, 那么应当满足怎样的特性?”这一关键环节切入, 以线性/线性化模型描述的受控对象为平台, 给出了“更好控制”的概念: 控制效果更好、控制增益更低; 进一步分析了该控制问题的特点及所需的理论基础, 提出了能控度控制学猜想: 相同条件下, 能控度高的系统会更好控制. 最后, 给出了解决该猜想的初步理论框架并简要地介绍了相关的进展.

关键词 控制论, 控制理论, 受控对象, 能控度, 对象参数优化

1 引言

“针对特定的受控对象, 怎样的控制策略更加有效?”是人类社会的一个重要问题. 可以说, 控制理论就是为解决这一问题而提出和发展起来的. 同时, “一般说来, 怎样的受控对象更好控制?”是人类社会中又一重要问题. 已有许多研究表明: 受控对象结构特性的小幅调整有可能显著地提高反馈控制的效率^[1~4]. 郭雷院士关于反馈控制的极限能力^[5~9]的探讨已经从控制理论角度揭开了这一问题的实质: 反馈控制的能力与受控对象结构参数密切相关.

维纳曾经指出: “从控制论的观点来看, 机器或者有机体的结构本身是预定它能完成什么任务的一个指标”^[10]. 这段话说明, 在控制论最初被提出时, 受控对象结构是纳入整体控制系统设计指标的. 这在社会系统中表现得非常显著.

社会生活中, 常见这样一个现象: 在进行一项较为复杂的控制任务之前, 需要对受控对象进行精心地选择. 诸如学校招生、球队遴选、公司招工、政治选举等, 相关概念和方法非常具体、系统. 然而, 在工程系统上, 以钱学森《工程控制论》为标志^[11], 长期以来控制理论学者和控制工程师大多遵循着

引用格式: 邹云, 夏亚平, 殷明慧, 等. 怎样的受控对象更好控制 —— 一个基于能控度的分析与猜想. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 47–57, doi: 10.1360/N112016-00136
Zou Y, Xia Y P, Yin H M, et al. What kind of plant is better for control? An analysis and conjecture using the degree of controllability (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 47–57, doi: 10.1360/N112016-00136

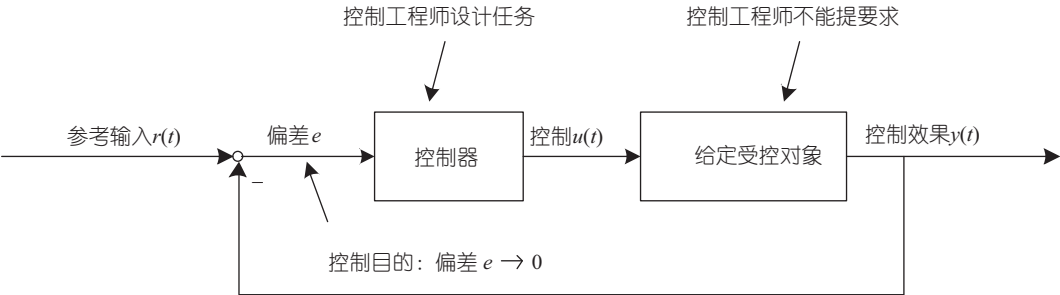


图 1 经典控制工程师的典型设计任务
Figure 1 The typical design task of control engineers

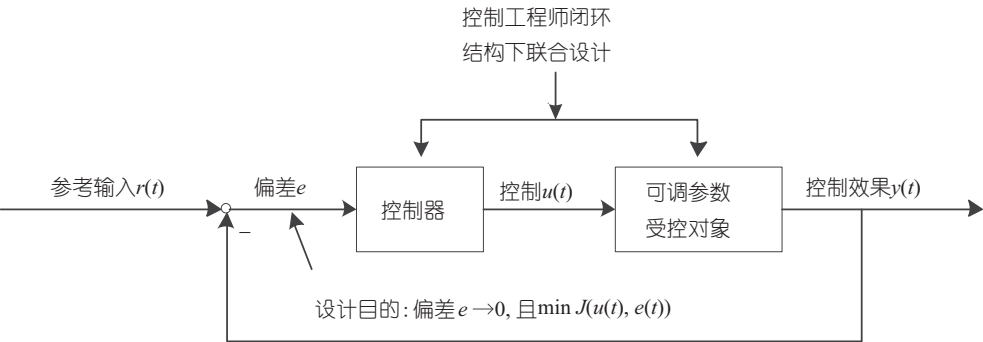


图 2 一体化设计原则示意图
Figure 2 The diagram of integration design

控制不改变、不破坏给定受控对象结构的原则. 控制工程师的任务是针对给定对象的特点设计控制器, 而对象的设计则交给其他学科工程师和总体设计师, 如图 1 所示.

这种分离设计原则意味深远: 受控对象的总体结构设计是系统设计的底层, 涉及诸多学科. 控制器设计是系统设计的末端, 主要涉及控制工程学科. 将位于底层和位于末端的两项设计任务解耦, 降低了设计的复杂度, 极大地促进了控制理论与方法的发展, 形成了当今控制科学和技术的主体.

随着自动化技术发展, 这种分离原则出现了许多问题. 有案例表明, 极端情形下甚至会导致再怎么设计控制器, 闭环系统也达不到性能要求. 例如, 文献 [12] 中指出姿态系统的控制效果对被控对象结构参数很敏感, 在某些结构条件下, 可能要用很大的能量和很长的时间才能消除很小的姿态偏差; 文献 [13, 14] 以 X-29 试验飞行样机的研制过程为例, 说明了传统的分离设计原则导致飞行样机的俯仰角速率响应低于工程规范要求, 且改变控制器设计也不能恢复所期望的性能. 其中, 文献 [13] 特别指出, 若在飞行器达到较为成熟的构型时才引入控制器设计, 则子系统之间的强耦合作用可能导致必须重新设计飞行器, 以保证其针对目标是可控的.

因此, 针对设计尚未成熟而未达到工业定型阶段的各类新型装备, 需要打破前述分离设计原则, 将控制设计要求预先纳入受控对象的结构设计. 在这一背景下, 将受控对象总体设计与控制器设计加以耦合的一体化控制设计 (integrated control design) 概念和方法被提出. 许多文献 [15~19] 开始针对具体的系统尝试进一步将受控对象结构要素纳入到了控制一体化设计范畴, 明确地提出受控对象结构参数 - 控制器参数一体化设计的概念. 近年来, 这一领域获得了广泛的重视, 获得了长足的进展 [15~19].

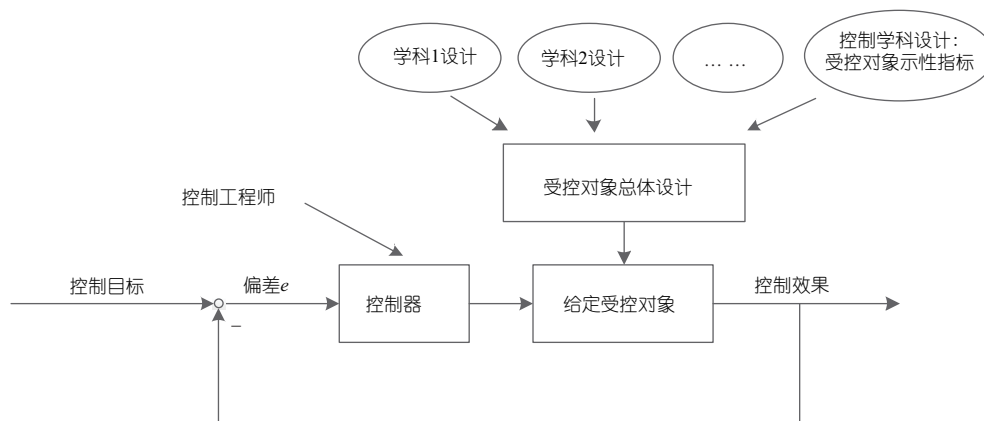


图3 一种新的仿大学入学资格遴选方法的“一体化设计”

Figure 3 A new integrated design methodology imitating the admission and teaching mechanism of university

这种一体化设计的思想一反前述分离设计原则,将受控对象与控制器放在一个动态设计过程中进行一揽子优化,如图2所示.从控制设计师角度看,这样做无疑是最优的.但对于总体设计师来说,将底层的具体功能性结构设计与位于末端的具体控制器设计进行多学科、多层次、多任务进行一揽子解决经常是难以实现的.特别地,一体化模型的建模也是非常困难的.因此,他们更希望控制设计师能对受控对象的结构性质提出某种示性指标要求供总体设计师设计参考,而非直接将具体控制器设计程序链接到总体设计过程中(见图3).有趣的是,如图3所示的控制器设计从某种意义上来说是一种新的“一体化设计”.与目前的一体化设计不同,它依旧满足分离原则,只是将控制工程师的设计某些共性要求以“受控对象示性指标”的方式提前介入了总体设计.这种分离不是前面那种被总体设计彻底边缘化的“被动分离”.

许多复杂系统,特别是在社会系统中,目前的一体化设计思想有时甚至是不可行的,但上述的新一体化思想是可行的.例如,研究生资格遴选,一边培养、一边录取是不可行的.即便进行短期模拟培养以做遴选也是不现实的.缺乏具体培养过程,学生的研究学习行为模式也是无法建模的.因此,只能从大学培养环节对学生的共性要求出发,在没有具体培养环节参与的情况下按要求直接考核遴选相对优秀的学生.至于入学后,如何因材施教则是经典的控制问题.

一个明显的事实是交付控制工程师的受控对象结构参数在工业定型前并非没有调整余地,而是依旧具有一定范围的调整裕量^[20~22].因此,一个或许被忽略了的控制学问题是:在可调参数范围内,满足怎样特性指标的受控对象参数更好控制一些?

关于受控对象的特性与控制结果也有不少进展.如涉及具体受控对象结构特征的 H^∞ 控制中的 μ -方法^[23,24]等.这类研究中系统结构参数是给定的,并不作为设计参数.研究充分注意到,对具体对象实际结构特性而言,因为只需要考虑部分结构参数的不确定性,从而减少了控制器设计的保守性.这一研究的反问题并不具有太多的实际意义.而关于反馈控制的极限能力问题的研究^[1~5],则定量地刻画了受控对象结构给定后反馈控制的极限所在.这个研究非常深刻.某种意义上说,它从控制学角度揭示了控制系统设计及参与受控对象总体设计的必要性.它的反问题——“怎样的参数选择可使反馈控制的极限能力更大?”几乎就是这里提出的“怎样的受控对象更好控制?”

同时,能控度与控制效果的内在关系^[25~28]也有很多研究.这类研究针对具体的受控对象和确定的控制策略与控制任务,讨论了对象参数可调范围内,对应不同能控度的受控对象控制效果更好的问

题. 本文正是在这些工作的基础上, 基于日常生活经验提取, 以线性/线性化模型描述的受控对象为平台, 分析了以能控度作为一种示性指标以衡量“更好控制”程度的合理性; 并提出了一个关乎能控度的控制学猜想, 为相关问题的进一步探索奠定一个初步的框架. 一个需要指出的情形是, 怎样针对某些给定的特殊受控对象个体制定有别于共性要求的特别遴选或优化规则, 也是一个非常重要的问题. 为主题明晰起见, 这里暂不予探讨.

2 能控度: 刻画“更好控制”的一种可行指标?

本文提出的问题难点在于“更好控制”如何定义? 以及怎样的示性指标才能够定量体现与刻画这一“更好控制”的程度?

2.1 对象“更好控制”的内涵定义

“更好控制”的对象在日常生活中的意义是明确的. 例如, 怎样的培养对象 (学生) 更好培养? 通常, 这意味着针对该对象, 采用同样控制方法, 在同样性能准则下: (1) 培养效果更好; (2) 耗能或消耗资源更少.

以最优指标为 $\min J$ 的线性定常系统的 LQR (linear quadratic regulator, LQR) 控制设计为例, 设受控对象 Σ_1 和 Σ_2 的控制器增益矩阵分别为 K_1 和 K_2 , 对应的最优指标为 J_1^* 和 J_2^* . 则按照这一内涵, 若下述条件成立, 那么就称受控对象 Σ_1 比 Σ_2 更好控制,

$$J_1^* < J_2^*, \|K_1\| < \|K_2\|.$$

在实际情形里, 上述条件一般可放宽为:

$$(1) J_1^* \ll J_2^*, \text{ 或至少 } J_1^* < J_2^*;$$

$$(2) J_1^* \approx J_2^*, \|K_1\| \ll \|K_2\|,$$

其中 $\|K\|$ 为控制器增益. 范数取 2-范数. 为简单计, 本文主要讨论第一种涵义.

2.2 刻画“更好控制的对象”的示性指标

仿照可靠性理论与方法中“可靠性设计指标”的术语, 文献 [29] 将这类指标称为“控制性设计指标”. 它应满足这样的性质: 只与受控对象的结构参数相关, 却能够在大多数控制任务中, 获得相对良好的效果. 这样的示性指标在日常生活的案例中大量存在, 如招收“更好培养”的研究生. 最常见的有两种: (1) 反应灵活、理解迅速、举一反三: 反映到控制理论的既有概念, 首选能控度^[30~36]; (2) 记忆力强、过目不忘、旁征博引: 反映到信息理论的既有概念, 首选信息熵^[37,38].

相应地, 可启发性地提出如下两个可能的候选指标:

猜想 1: 能控度或可作为控制性设计指标. 即某种前提下, 能控度较高的受控对象更好控制.

猜想 2: 信息熵或可作为控制性设计指标. 即某种前提下, 信息熵较低的受控对象更好控制.

本文主要针对猜想 1 展开讨论. 这里, 一个非常明显的事实是, 一般不存在一个万能的指标, 使得任何情况下, 这个指标越好, 控制效果就会越好. 为更加清晰起见, 下面对相关猜想给出更为严谨合理的提法.

设线性定常系统¹⁾为 $\Sigma(A, B)$: $\dot{x} = Ax + Bu$, 其中 $A \in R^{n \times n}$ 为系统的状态矩阵, $B \in R^{n \times m}$ 为输入矩阵. $\mu = \mu(A, B)$ 为其某类结构特性, 控制策略优化设计方法为 K , 控制器设计闭环性能优化性能指标为 $\min J$. 记 Ξ 为控制策略优化设计方法组成的集合.

定义1 对给定的控制策略设计方法 K , 称 $\mu(A, B)$ 为“更好控制的对象”的全局度量, 系指: 若 $\mu(A_2, B_2) > \mu(A_1, B_1)$, 则 $J_2 < J_1$. 亦即: $\Sigma(A_2, B_2)$ 比 $\Sigma(A_1, B_1)$ 更好控制. 若对于任意的 $K \in \Xi$, $\mu(A, B)$ 均为“更好控制的对象”的全局度量, 则称 $\mu(A, B)$ 为 Ξ 上一个全局控制性设计指标.

一般而言, 未必 (A, B) 的全体分量都对 μ 有影响. 设 Ω 为 (A, B) 的对 μ 有影响的分量构成的集合, 则 $\mu = \mu(\theta)$, $\theta \in \Omega$.

定义2 对给定的控制策略设计方法 K , 称 μ 为“更好控制的对象”的局部度量, 系指: 对 Ω 以外的分量都相同的 (A_1, B_1) 和 (A_2, B_2) , 若 $\mu(A_2, B_2) > \mu(A_1, B_1)$, 则 $J_2 < J_1$. 亦即: 就影响 μ 的因素来说, 在其余参数均相等的情况下, $\Sigma(A_2, B_2)$ 比 $\Sigma(A_1, B_1)$ 更好控制. 若对于任意的 $K \in \Xi$, $\mu(A, B)$ 均为“更好控制的对象”的局部度量, 则称 $\mu(A, B)$ 为 Ξ 上的一个局部控制性设计指标.

定义1和定义2的控制学意义是明确的. (A, B) 中对 μ 有影响的分量未必涵盖对 J 有影响的分量. 这样一来, 同样的 μ 就会有不同的 J . 于是在 μ 是连续的情形下, 逻辑上必将导致存在一个相对小的 μ , 却反而对应更好的 J . 因此, μ -度量下来的“更好控制”一般而言只是局部的. 它在“不影响 μ 的分量”都相等前提下才成立.

这与实际经验是吻合的. 如遴选博士研究生时, 某些非智力因素在遴选标准中没有得以体现, 却对许多个案而言, 在培养质量上起着至关重要的作用. 可以预期, 控制性设计指标一般都会是局部的. 这也意味着“更好控制对象”的度量指标将是互有优劣、各有千秋的. 文献[25]针对中低速风力发电系统的伺服控制的研究就深刻地揭示了这一点. 尽管参数摄动裕度能控度^[33]与能量能控度^[32]都可被采纳, 但能量能控度更具工程意义, 涉及更多的对象参数, 优化空间更大, 因此效果更佳. 然而, 在其他问题中, 或许参数裕度能控度更具优势.

此外作为常识, 可以预期, 对本质非线性对象、需要在大范围偏离平衡点处实施控制的非线性对象、强时变的对象以及非线性控制策略, 本文的能控度猜想一般不再成立. 实际生活中, 所谓的“偏才”、“怪才”以及“严重扭曲的教育模式下的选材”等皆属此类对象和策略的极端典型. 通常的遴选标准和程序将对他们失去作用.

结合定义1和定义2, 这里将前述猜想1更为严谨地叙述如下, 能控度的控制学意义猜想: 恰当定义的能控度可以作为一种局部控制性设计指标.

2.3 能控度猜想的合理性: 机理分析

能控度作为受控对象能控程度的度量, 是反映对象能控性的“强壮度”的一种定量描述. 控制工程意义上来说, 它是试图定量地反映一个受控对象能够完成给定控制任务的能力大小的一种度量. 如图4所示, 能控性^[39~41]是这样一种性质:

针对线性定常的受控对象 $\Sigma(A, B)$, 给定控制目标 $r(t)$, 设对象输出 $y(t) = x(t)$, 其相对于目标的偏差为 $e(t) = r(t) - y(t)$. $\Sigma(A, B)$ 称为完全能控的, 系指对于任意的初始偏差 $e(0)$, 均存在相应的控制输入 $u(t), t \in [0, T]$, 使得对象在 $t = T$ 时刻的偏差为 $e(T) = 0$. 也就是说在 T 时刻, 控制目标达成.

显然, 能控度是受控对象的开环结构特性, 与具体控制器无关. 这从能控性判据只与受控对象的结构参数 A, B 有关即可知. 此外与能控性一样, 它只与控制偏差有关: 使得偏差为0能力大小即控制

1) 为简化起见, 本文仅讨论线性控制策略下的线性/线性化定常受控对象.

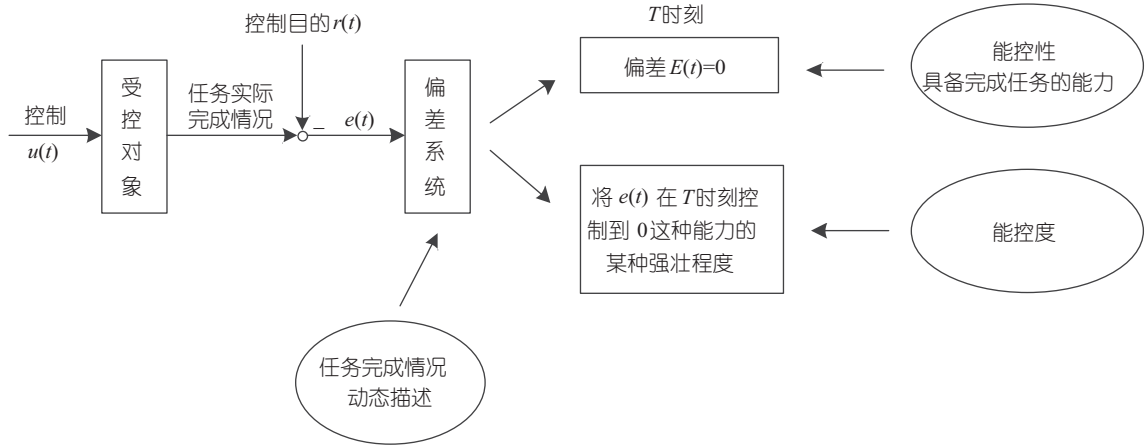


图 4 能控性及能控度的工程物理意义

Figure 4 The physical engineering sense of the notions of the controllability and the degree of controllability (DOC)

任务达成能力大小的一种度量. 这说明无论任务怎样, 能控度均可反映闭环系统在某种意义下的控制效果.

以最常见的两类能控度定义为例²⁾, 这一点是显而易见的.

定义3 (参数摄动裕度能控度^[33]) 针对线性定常的受控对象 $\Sigma(A, B)$, 设 (A, B) 能控, 则受控对象 $\Sigma(A, B)$ 的能控度为

$$\mu_d(A, B) = \min_{E, F} \{ ||[E, F]|| : (A + E, B + F) \text{ 不能控} \}.$$

它表示能控系统 (A, B) 到不能控系统集合之间的距离. 这个定义反映的是系统在参数发生摄动时, 系统保持能控的能力. 可以预期, 受控对象在其内部不确定性较为严重的环境下, 参数摄动裕度能控度越高, 同样的控制策略下的闭环特性会相对越好. 比如在各类不确定性较高的鲁棒控制问题中, 可能会有较好的应用.

定义4 (能量能控度^[32]) 针对线性定常的受控对象 $\Sigma(A, B)$, 设 (A, B) 能控, 则受控对象 $\Sigma(A, B)$ 的能量能控度为

$$\mu_e(A, B) = \frac{1}{||W_c^{-1}(t_f, t_0)||^2} = \lambda_{\min}(W_c(t_f, t_0)),$$

$$W_c(t_f, t_0) = \int_{t_0}^{t_f} e^{-A(\tau-t_0)} B B^T e^{-A^T(\tau-t_0)} d\tau,$$

这里, $W_c(t_f, t_0)$ 为 Gramian 矩阵, $e^{A(t_0-\tau)}$ 是 A 的状态转移矩阵. 注意, 若系统能控, 则上述矩阵是非奇异的, 因而能量能控度大于 0.

该定义具有较强的物理意义. 由文献 [43] 知, 受控对象 $\Sigma(A, B)$ 在有限时间内从任意状态 x_0 控制到平衡点 (原点) 所需要的最小能量的最大上界为

$$\max_{x_0} \min_u \int_{t_0}^{t_f} ||u(t)||^2 dt = \max_{x_0} \{ x_0^T W_c^{-1}(t_f, t_0) x_0 \} = \mu_e^{-1} ||x_0||^2.$$

2) 这里的“参数裕度能控度”与“能量能控度”是文献 [42] 为方便叙述起见而加以称谓的. 现有文献中因为很少有同时讨论两种不同能控度的, 因此没有特别的称谓.

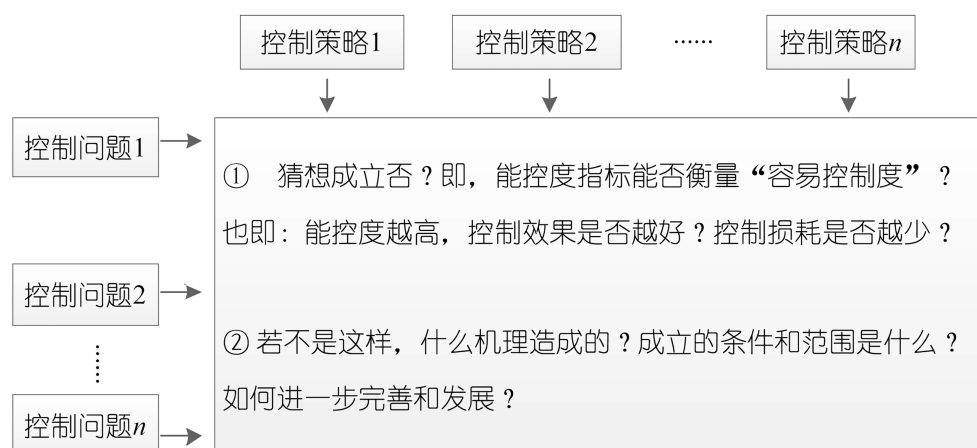


图 5 能控度猜想的探索性研究方案

Figure 5 The framework for the proof of the DOC conjecture

因而在给定的时间段内, 对任意的 x_0 , 上述定义的能量能控度 μ_e 越大, 系统越好被控制到平衡点.

可以预期, 受控对象在其面临的外部干扰较为复杂的环境下, 能量能控度越高, 同样的控制策略下的闭环特性会相对越好. 比如中低风速的风场环境下的风力发电机控制等问题中, 应该会有较好的应用. 文献 [42] 的研究结果很好地验证了这一点.

2.4 能控度猜想探索性研究方案

能控度属于一类开环结构特性, 可从某种意义上反映各类控制任务中闭环控制效果. 因此, 要证明“能控度可作为局部控制性设计指标”这一猜想, 必须针对大多数常见控制任务与控制策略, 逐一验证同等情形下, 能控度相对高的受控对象, 控制效果更好、控制损耗更小 (见图 5).

图 5 给出的方案验证量不仅很困难而且非常繁重, 但目前而言, 这个方案几乎是别无选择的唯一可行方案. 特别地, 鉴于能控度定义的不唯一性, 这个工作将会呈现出依据控制环境不同而造成不同能控度的适用性也不同的多样性特色.

3 能控度猜想合理性的进一步分析: 能控度的相关研究进展

依照上节关于能控度猜想的探索研究方案, 现有相关进展中未发现有反例, 许多工作很好地支撑了这一猜想.

能控度作为能控性的量化指标, 反映了系统可控的程度, 已被广泛应用于实际系统的研究中 [32,44~50]. 它最早由 Kalman 于 1962 年提出 [34]. 随后, Muller 和 Weber 从最小能量的角度提出了以线性系统可控性克莱姆矩阵的三种标量值作为能控度的定义 [32]. Paige 将从可控集到不可控集的距离定义为能控度 [33,35]. Viswanathan 等人在控制输入量的绝对值不大于 1 的约束下, 将一定时间内不能被控制到原点的初始状态的最小模值定义为能控度 [30,36]. 此外, Roh 和 Park 提出了模态能控度的概念 [31].

能控度指标 [32] 提出不久即被广泛用于优化以弹性连杆机构为代表的对象参数优化设计中, 获得丰硕的研究成果. 文献 [44] 将能控度指标用于优化振动控制中作动器和传感器的位置. 在文献 [45] 中,

能控度指标被用于确定能够综合反映主动控制器作动、检测能力及避免“溢出”的性能指标函数。何程^[46]等人提出用能控度指标来判断结构控制系统中作动器配置方案的优劣。能控度还广泛用于卫星、飞行器的姿态控制的优化设计中。相关文献^[12,47~50]为了消除三轴稳定卫星的姿态偏差,引入能控度作为优化指标。这些研究结果均表明,使得系统能控度较高的对象结构参数,可使相应的闭环控制效果和代价都明显改善。亦即,能控度较高的受控对象相对好控制。

此外,依照 2.4 提出的研究方案,文献 [42] 针对具体控制问题,从理论和实际两方面做了分析和研究。结果表明,就所研究的具体控制问题而言,在局部控制性设计指标的意义上,能控度更高的受控对象更好控制,控制效果更好。具体进展包括:

(1) LQR 冗余控制输入问题中的能控度

在许多实际控制工程(如卫星姿态控制)中,会设计有许多冗余的控制通道。段志生等人发现这些冗余控制可能改善闭环控制效果。因此,他们做了一系列地深入研究^[51~53],给出了增加控制冗余输入能够严格减小二次最优指标的充分必要条件,但缺乏对相应条件控制机理解释。同时,他们还提出怎样的冗余控制输入能够同时减小二次最优性能指标和控制器增益的问题。

这是一个以 LQR 冗余控制输入问题为背景的“怎样的受控对象更好控制?”问题。文献 [26~28] 分析了系统能控度与二次性能指标及最优反馈增益之间的关系,研究结果表明,在受控对象完全能控的情形下,使得系统能控度严格增加的控制输入冗余,也使得二次最优性能指标严格减小。此时,控制增益也会减少。

(2) 风力机 MPPT 控制中的能控度

低风速风力机的气动参数对风速跟踪控制效果的影响较为显著^[54],某些参数对伺服控制效率的改变比较敏感^[15]。那么怎样的风力机结构参数才能提高伺服控制效率呢?这是一个以风力机伺服控制为背景的“怎样的受控对象更好控制?”问题。文献 [25, 27] 针对风力机的最大功率点跟踪 (MPPT) 方法做了研究。结果表明,在相同控制策略和局部参数优化意义下,能控度更高的风力机能获得更高的风能捕获效率。

这些研究从理论和工程两个方面加强了本文提出的能控度猜想成立的可能性。当然,按照目前的研究方案,现有的进展距离取得足以达成共识的结论还有很长的路要走。

4 结论

本文针对线性/线性化定常系统采用线性控制策略的情形,提出了能控度可作为“更好控制”程度的一种衡量指标的猜想。这一猜想的验证是一个非常繁复和困难的过程。目前取得的进展非常初步,许多常用控制策略,如 PID 控制,尚未进行分析检验。应该说,如果能控度猜想能够在 PID 控制设计中获得验证,将能控度作为局部控制性设计指标的接受度就大为提高了。然而,作为时间域概念的能控度,在频率域上的物理意义是什么?如何定义它?这些问题亟待深入发掘和探索。此外,针对线性有干扰系统提出的能控度指标的进一步探索,目前的工作只针对风力机平台,将某些拓展了的能控度指标用专业仿真软件进行了发电效率验证^[25]。最后,本文未加展开的信息熵猜想也是非常值得探讨的,其中必须解决的一个问题是探索信息熵与受控对象结构参数之间的关系及使得信息熵极小化的对象结构参数寻优方法。在此基础上,即可利用本文的研究方案框架展开相关研究。这些研究将为控制设计师以控制对受控对象特性共性要求指标的方式介入受控对象总体设计,形成“主动式分离原则”的控制系统一体化设计新方法,奠定必要的理论基础。

参考文献

- 1 Grigoriadis K M, Zhu G, Skelton R E. Optimal redesign of linear systems. *J Dyn Syst-T ASME*, 1996, 118: 598–605
- 2 Haftka R T, Hallauer W L, Martinovic Z N. Enhanced vibration controllability by minor structural modifications. *AIAA J*, 1985, 23: 1260–1266
- 3 Zhou P, Wang F Y, Chen W, et al. Optimal construction and control of flexible manipulators: a case study based on LQR output feedback. *Mechatronics*, 2001, 11: 59–77
- 4 Haftka R T, Martinovic Z N, Hallauer W L, et al. Sensitivity of optimized control systems to minor structural modifications. In: *Proceedings of the 26th Structures, Structural Dynamics and Material Conference*, Orlando, 1985. 15–17
- 5 Guo L. Understanding the role and capability of feedback. *Autom Panorama*, 2003, 1: 1–3 [郭雷. 关于反馈的作用及能力的认识. *自动化博览*, 2003, 1: 1–3]
- 6 Zhang Y, Guo L. A limit to the capability of feedback. *IEEE Trans Auto Control*, 2002, 47: 687–692
- 7 Ma H B. Further results on limitations to the capability of feedback. *Int J Control*, 2008, 81: 21–42
- 8 Huang C, Guo L. On feedback capability for a class of semiparametric uncertain systems. *Automatica*, 2012, 48: 873–878
- 9 Ashari A E, Nikoukhah R, Campbell S L. Effects of feedback on active fault detection. *Automatica*, 2012, 48: 866–872
- 10 Zhong R. *The Selected Works of Winner*. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House, 1978 [钟韧. 维纳著作选. 上海: 上海译文出版社, 1978]
- 11 Qian X S. *Engineering Cybernetics*. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007 [钱学森. 工程控制论. 上海: 上海交通大学出版社, 2007]
- 12 Li B S. The degree of controllability of attitude control system. *Aerosp Control*, 1984, 2: 1–8 [李宝绶. 姿控系统的能控度. *航天控制*, 1984, 2: 1–8]
- 13 Soloway D I, Ouzts P J, Wolpert D H, et al. The role of guidance, navigation, and control in hypersonic vehicle multidisciplinary design and optimization. In: *Proceedings of 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, Bremen, 2009. 7329
- 14 Zhang Y, Lu Y P, Liu Y B, et al. Integrated control design of hypersonic vehicle. *J Aerosp Pow*, 2012, 12: 2724–2732 [张勇, 陆宇平, 刘燕斌, 等. 高超声速飞行器控制一体化设计. *航空动力学报*, 2012, 12: 2724–2732]
- 15 Yang Z Q, Yin M H, Xia Y P, et al. The exploration of key aerodynamic parameters for an integrated design of wind turbine blades. In: *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, Nanjing, 2014. 7072–7076 [杨志强, 殷明慧, 夏亚平, 等. 考虑风力机一体化设计的叶片气动外形关键参数的探索. 第 33 届中国控制大会, 南京, 2014. 7072–7076]
- 16 Yang Z Q, Yin M H, Chen X Y, et al. Multi-AOA optimization of variable-Speed wind turbine airfoils. In: *Proceedings of TENCON 2016, IEEE Region 10 Conference*, Singapore, 2016
- 17 Yang Z, Yin M, Xu Y, et al. A multi-point method considering the maximum power point tracking dynamic process for aerodynamic optimization of variable-Speed wind turbine blades. *Energies*, 2016, 9: 425
- 18 Zhou P, Wang F, Chen W, et al. Optimal construction and control of flexible manipulators: a case study based on LQR output feedback. *Mechatronics*, 2001, 11: 59–77
- 19 Haftka R T, Hallauer W L, Martinovic Z N. Enhanced vibration controllability by minor structural modifications. *AIAA J*, 1985, 23: 1260–1266
- 20 Shirazi F A, Grigoriadis K M, Viassolo D. An integrated approach towards structural and LPV controller design in wind turbines. In: *Proceedings of the American Control Conference*, Canada, 2012. 5789–5794
- 21 Shirazi F A, Grigoriadis K M, Viassolo D. Wind turbine integrated structural and LPV control design for improved closed-loop performance. *Int J Control*, 2012, 85: 1178–1196
- 22 Ji B C, Cong S. Optimal link group selection for triple inverted - pendulum. *Comput Simulation*, 2006, 23: 258–261 [姬北辰, 丛爽. 三级倒立摆系统最优摆杆长度组合选取的研究. *计算机仿真*, 2006, 23: 258–261]
- 23 Lundström P, Skogestad S, Wang Z Q. Performance weight selection for H-infinity and μ -control methods. *Trans Inst Meas Control*, 1991, 13: 241–252
- 24 Moser A N. Designing controllers for flexible structures with H-infinity/ μ -synthesis. *IEEE Control Syst*, 1993, 13: 79–89
- 25 Xia Y P, Yin M H, Yang Z Q, et al. Investigation on the degree of controllability of wind turbines for the maximum

- power point tracking. In: Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, 2014. 2336–2341 [夏亚平, 殷明慧, 杨志强, 等. 关于最大功率点跟踪的风力机的能控度分析. 第 33 届中国控制大会, 南京, 2014. 2336–2341]
- 26 Xia Y P, Cai C X, Yin M H, et al. The effects of the distance to uncontrollability in redundant optimal control. In: Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, 2014. 9016–9021
- 27 Xia Y, Yin M, Cai C, et al. A new measure of the degree of controllability for linear system with external disturbance and its application to wind turbines. *J Vib Control*, 2016. doi: 10.1177/1077546316651558
- 28 Xia Y P, Cai C X, Yin M H, et al. The effects of redundant control inputs in finite-time optimal control. *J Syst Sci Complex*, 2016: 1–12
- 29 Zou Y, Cai C X. Integrated design viewpoint exploration: concept and approach of system controlity design. *J Nanjing Univ Sci Technol*, 2011, 35: 427–430 [邹云, 蔡晨晓. 一体化设计新视角: 系统的控制性设计概念与方法. 南京理工大学学报, 2011, 35: 427–430]
- 30 Viswanathan C N, Longman R W, Likins P W. A degree of controllability definition: fundamental concepts and application to modal systems. *J Guid Control Dynam*, 1984, 7: 222–230
- 31 Hyounsuk R, Youngjin P. Actuator and exciter placement for flexible structures. *J Guid Control Dynam*, 1997, 20: 850–856
- 32 Muller P C, Weber H I. Analysis and optimization of certain qualities of controllability and observability for linear dynamical systems. *Automatica*, 1972, 8: 237–246
- 33 Eising R. Between controllable and uncontrollable. *Syst Control Lett*, 1984, 4: 263–264
- 34 Kalman R E. Canonical structure of linear dynamical systems. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 1962, 48: 596–600
- 35 Paige C C. Properties of numerical algorithms related to computing controllability. *IEEE Trans Autom Control*, 1981, AC-26: 130–138
- 36 Nguyen K S, Do D T. The structured distance to non-surjectivity and its application to calculating the controllability radius of descriptor systems. *J Mathem Analys Appl*, 2012, 388: 272–281
- 37 Zhang H, Sun Y X. Bode integrals and laws of variety in linear control systems. In: Proceedings of the American Control Conference, Colorado, 2003. 66–70
- 38 Zhang H. Information descriptions and approaches in control systems. Dissertation for Ph.D. Degree. Hanzhou: Zhejiang University, 2003 [章辉. 控制系统中的信息描述与方法. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2003]
- 39 Callier F M, Desoer C A. *Linear System Theory*. New York: Springer Science & Business Media, 2012
- 40 Guillemin E A. *Theory of Linear Physical Systems*. New York: Dover, 2013
- 41 Brockett R W. Finite dimensional linear systems. *IEEE Trans Automat Contr Ac*, 1970, 17: 753–754
- 42 Xia Y P. What kind of plant is better for control? —an exploration via the degree of controllability. Dissertation for Ph.D. Degree. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016 [夏亚平. 怎样的受控对象更好控制? —— 基于能控度视角的探索. 博士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2016]
- 43 Chen Q Z. *Theory and Design of Linear System*. Beijing: Science Press, 1988 [陈启宗. 线性系统理论与设计. 北京: 科技出版社, 1988]
- 44 Longman R W, Alfrined K T. Actuator placemant from degree of controllability criteria for regular slewing of flexible spacecraft. *Acta Astronaut*, 1981, 8: 703–718
- 45 Zhang X M, Shao C J, Shen S W. Optimal placement of sensors and actuators for vibration control of elastic linkage mechanisms. *J Vibration Engineering*, 2001, 14: 211–214 [张宪民, 邵长健, 沈允文. 弹性连杆机构振动主动控制中作动器与传感器的位置优化. 振动工程学报, 2001, 14: 211–214]
- 46 He C, Gu S N. Modal degree of controllability and its computation methods for a structural control system. *J Vib Eng*, 1993, 6: 229–237 [何程, 顾松年. 结构控制系统的模态能控度及其计算方法. 振动工程学报, 1993, 6: 229–237]
- 47 Bai B E, Lin L X. The relative degree of controllability of attitude control system and the selection of installation parameters of actuator. *Control Eng*, 1982, 1 [白拜尔, 林来兴. 姿态控制系统的相对能控度和执行机构安装参数的选择. 控制工程, 1982, 1]
- 48 Viswanathan C N, Longman R W, Likins P W. A definition of degree of controllability—a criterion for actuator placement. In: Proceedings of dynamics and control of large flexible spacecraft, Blacksburg, 1979. 369–381
- 49 Laskin R A, Longman R W, Likins P W. A definition of the degree of controllability for fuel-optimal systems. In: Proceedings of dynamics and control of large flexible spacecraft, Blacksburg, 1981. 15–17
- 50 Klein G, Linberg R E, Longman R W. Computation of degree of controllability via system discretization. *J Guid*

- Control Dynam, 1982, 5: 583–588
- 51 Duan Z S, Huang L, Yao Y, et al. On the effects of redundant control inputs. *Automatica*, 2012, 48: 2168–2174
- 52 Duan Z S, Huang L, Yang Y. The effects of redundant control inputs in optimal control. *Sci China Inf Sci*, 2009, 52: 1973–1981
- 53 Duan Z S, Huang L, Jiang Z P. On the effects of redundant control inputs in discrete-time systems. *J Syst Sci Math Sci*, 2012, 32: 1193–1206
- 54 Zhang X L. Investigation on maximum power point tracking of wind turbine under turbulence. Dissertation for Ph.D. Degree. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014 [张小莲. 风机最大功率点跟踪的湍流影响机理研究与性能优化. 博士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2014]

What kind of plant is better for control? An analysis and conjecture using the degree of controllability

Yun ZOU*, Yaping XIA, Minghui YIN & Chenxiao CAI

School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014, China

*Corresponding author. E-mail: zouyun@vip.163.com

Abstract From the perspective of integrated design, a new control topic is proposed by analyzing many common social phenomena. Which kind of controlled plant is better for control? Focus is on the key point that “if such a plant exists, what properties does it need to have?” In this paper, the concept of “better for control” is defined for the linear / linearized plant, which implies that the closed-loop control effect is better and controller gain is smaller with the same control strategy. A theoretical framework and features for the new control concept are introduced. Furthermore, control theory conjecture of the degree of controllability (DOC) is investigated as to which concept could depict the difference level of controllability between the controlled plants under the same control conditions. Based on the preliminary framework, we also present the research situation and prospect on the field.

Keywords cybernetics, control theory, controlled plant, degree of controllability, parameter optimization of plants



systems, and power market.

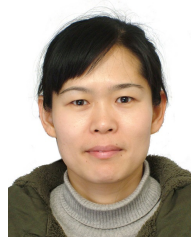
Yun ZOU is a professor at the School of Automation, Nanjing University of Science and Technology. He obtained his Ph.D. degree in control theory and control engineering from Nanjing University of Science and Technology in 1990. His research interest covers differential-algebraic equation systems, two-dimensional systems, singular perturbations, transient stability of power



Yaping XIA is a doctor at the School of Automation, Nanjing University of Science and Technology. He obtained his Ph.D. degree in control theory and control engineering from Nanjing University of Science and Technology in 2016. His research interest covers optimal control, integrated design of wind turbines, and the degree of controllability.



Minghui YIN Associate professor at the School of Automation, Nanjing University of Science and Technology. He obtained his Ph.D. degree in automatic control engineering from Nanjing University of Science and Technology in 2009. His research interest covers wind power conversion system and transient stability of power systems.



Chenxiao CAI Professor at the School of Automation, Nanjing University of Science and Technology. She obtained his Ph.D. degree from the Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology in 2005. Her research interest covers singularly perturbed systems, singular systems, robust control, unmanned aerial vehicle, control of wind turbines.