

人的高级控制问题*

G. VOSSIUS

(卡尔斯卢埃大学生物医学工程所)

〔摘要〕 用在人体较低水平上的控制概念已经很专门化了, 较高水平的控制不仅能自适应地调整各相互依赖环节的参数, 而且能不断地改变控制策略。为了完成这种任务, 较高的控制中心先从模糊耦合成的感受器组, 获得瞬时的有效测量向量, 然后必须充分地建立一个定性的、定量的参考系统, 这是因为并没有现成的体内、体外的控制方案。只有做到这些后, 才能执行控制。要评价控制的功能及品质, 特别是在较高水平上, 象可观性和可控性这样一些概念应该也会是有用的, 因为这些要求未必都能满足。这样就不得不采用(也许会对系统的功能有所限制的)其他控制策略。

序 言

1975年和1978年的两次全体会议所提出的论文是在寻求外部控制的情况的特征。比如, 人一机器, 或者社会—技术系统。本篇演讲是根据1979年在卡尔斯卢埃举行的IAC专题讨论会倡议而写的。那个专题讨论会的题目是功能结构, 即人体内控制作用的概念。其目的是对已获得的成果进行筛选, 消除那些枝节问题, 明确研究重点, 从而, 能更好地理解人体组织为完成一系列力所能及的控制, 所必须的需求和必备的潜力。对于讨论会期间提出的, 或者有关的课题的主要方面, 本文将作如下一般性的讨论。就其内容而论, 本篇讲话主要涉及到生理学的范围, 而不考虑其他方面, 比如像心理学方面。

生物控制系统的主要功能部件

人体中的控制机构可以按横向分, 也可以按纵向分。

就横向划分来说, 又能划分成如下一些众所周知的层次:

— **前馈控制** 司管如反射, 缓冲等各类系统的稳定性。

— 简单的有固定参数的**反馈回路**。

— **学习自适应控制回路**, 它可能已经具备贮存以往工作情况的能力。在此意义上称为学习。

— 过程辨识和建立适当的控制方式。

人体组织不仅面临一个变化着的环境, 而且面临一个不固定的某种程度浮动着的内部世界。此外, 有机体还常常要协调大致上为数不少的控制回路, 这些回路使各生理功能稳定。

— 这个任务由自组织系统来执行, 它能够辨识自身的组织构造, 又能设计与外界所提要求有关的更高级控制的结构。

— 所有这一切都由一个总的, 但形象不十分明确的多水平多目标系统来汇总, 这种多水平多目标系统大约在20年前由MESAROWIC所引进。

比起技术系统, 有机体为了执行其控制, 还有更多几个问题要解决。例如:

— 测量器件, 即感受器, 通常它具有相当有限的测量范围, 并且其特性曲线是幂函数。此外, 嵌入感受器的材料使得物理的或化学的信号变形, 又因机械的联接还是滑动的。因

* 译自第八届IFAC大会论文集。

此,为了扩大测量范围和提高精度,自然使用若干感受器组,而不使用若干单个感受器。合理的静态和动态信号向量必须在线计算。

— 为了区分各种不同的物理、化学模态以及它们的标志,在我们的科学思维上需要一个长期的渐进发展过程,并且如果可能的话,还要建立起一个绝对的参照点。在人体里,自然地由感受器(传感组织)的结构来分离这些模态。显然,还没有建立起定标量化,也不存在量化系统。结果,机体组织必须在各级水平上建立起联系各物理、化学量的信号发生器,这些量在大多数情况下,以非线性方式被变为神经脉冲的时间间隔的,送到内部一个连续量参照系统。这包括了建立并不断更新参考提取系统的能力。对于控制回路来说,工作参考点必须定下来。

— 生命的存在是系于不断地工作着的控制器,控制的要求之一,就是信息的无方向流动。举例来说,在单个细胞中,这种无方向的信息流可以由酶来保证,这种酶大约有 500 到 3000 种,它们操纵着生化过程并体现了纵向划分。确定这种特殊功能的性质,当然得借助于下面各纵向级的要求:

- 测量领域,包括提取有效向量。
- 在定性、定量方面建立参考的领域
- 预测范围
- 控制范围

这些领域的划分在某种程度上是示意性的和任意的,象辨识即建模,这样特殊功能应该由哪一个领域引起的问题基本上取决于特殊系统的实际结构,反之亦然:在不同领域内的任务可以很好地兼并在一个功能块里实行。

生物控制系统的功能结构

生物控制的一个最突出的特点似乎就是:一方面,它运行相当草率。调整控制使之恰好完成面临的要求,而不太关心鲁棒性成品质之类的要求。所以,一个未受过训练的被试验者的内部控制系统和备用能力,在这个被试验者

突然受到强有力的指令时,就马上失效了。在另一方面,如果慢慢地训练那些系统,那么,相同的控制系统将非常有效地组织起来。生物控制随着人的经历不同而面貌多变,这种多变使得研究人员很难以把实现控制的概念估价为某一体功能。因此,在分析生物系统中,研究人员首先求出经典的输入—输出关系,并由此推导出一个线性的黑箱模型。在大多数情况里,这些模型不仅在被试验者的内部状况或者其环境的猛烈的生理和心理的变化时不正确,而且只在非常有限的范围内有效。生物系统含有本质的非线性。因此,生理学家们按生理功能开始进行更严密的分析,以便从实验上证明在成功的建模过程中所做的种种假定。现把 ROBINSON 等人所进行过的分析,作为一个例子引证如下:

当眼睛集中到一个新的目标时,它就以高精度完成所谓的眼球快速跳跃运动。这就产生了是这些眼球运动随着大脑连续不断地发出指令,以开环方式来执行呢,还是控制外眼肌的收缩来执行的问题。在用微电极记录的特殊神经细胞活动中,ROBINSON 发现,神经脉冲指令信号和引起眼肌收缩的信号之差被送入所谓的爆发发生器里,这种发生器也就是是一些神经细胞,这些细胞对于小误差信号响应以很高的发放速度,好象求微分一样,对于较大幅度的误差,这些细胞则有类似于限幅的特性。为了与指令信号作比较,爆发序列通过积分器积分成眼肌的收缩信号,同时也表现为眼位信号,它与指令讯号作了比较,从而使回路闭环。使用这个线路,对小误差眼球就可以很快地运动,而对大误差,限幅特性使眼肌不至受过强的收缩所损害。因为爆发细胞具有很高的增益因子,这个线路就趋于不稳定。因此,这个回路处于静止状态时应该用一开关打开,而这个开关必须随指令信号同步闭合。所谓的紧张性神经细胞还会产生一串与最后一个指令信号相对应的脉冲,以使眼球定位(图1中略去)。图1介绍了这个控制回路(仿ROBINSON)的

初步示意图, 这里, $u(t)$ 是指令信号, C 是比较器, S 是开关, $e_B(t)$ 是爆发细胞BC的输出, I 为积分器(原图1中,“I”字漏写一译注)。

这个回路外形简单且无需改变其参数, 这个回路展示了与其任务很相称的非常专门的设计。后面这句话也许在这一级上是对的, 正如其他一些例子所表明: 很难有可广泛应用的生物控制的通用方案或概念。那就使得生物控制系统的分析复杂化了。

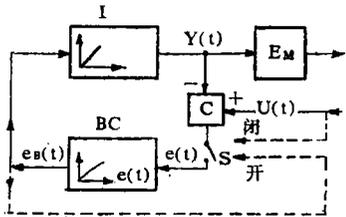


图1 眼睛肌收缩的控制

上一个例子表明执行指令信号的控制, 留下一个不明确的问题: 对于这种较低级的回路, 怎样保证指令信号本身具有适当的幅度。作者同WERNER一道所作出的分析揭示了, 这个回路的增益在更高一级上受到自适应控制。前一个回路完全包含在特殊的神经中枢里。在这一级上, 误差信号是由眼睛的视网膜上的目标位置所引起。参考点就是所谓的费斑中心, 即视网膜上具有最高分辨力的位置。控制回路的任务相当简单: 眼球必须准确地按照费斑中心和视网膜上的目标图象之差角转动。其增益具有幅度“1”(图2)。既然快速跳跃的眼睛运动仅在确定的时间间隔上发生, 那么, 就可以把这个回路当作采样数据系统来处理。连续加眼位到目标上, 实现了开环实验。实验表明, 增益的自适应控制是由眼位的最后两个采样值之差除以误差的差值 y/e 来实现。初看起来, 这个事实很意外, 如果有人把大脑工作的情况考虑在内的话, 自适应控制的必要性就明显起来了: 大脑最初不存在关于数量的任何知识, 这种知识都必须通过观察各种各样的过程, 并且把这种观察结果同自己的反应结果相

比较来提取。在这个例子中所使用的自适应过程, 是用一种非常简单而有效的, 不表成数量而又能连续校正的方式来提取等效参考。此外, 这个过程对于神经中枢中象神经细胞垂死时所出现的某些不希望的变化具有校正能力。

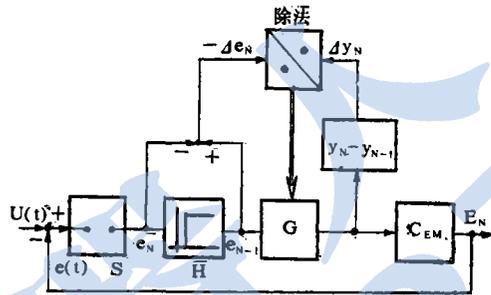


图2 眼睛快速跳跃运动的自适应控制

图2展示了飞快扫视的眼睛运动控制回路的示意图, 其中, $u(t)$ 是指令信号, $e(t)$ 是误差, S 是采样器, e_N 为眼睛快速跳跃时的误差, H 为有滞后的保持器, G 为回路的增益因子, ΔY_N 为最后两次眼睛位置的差值的计算与保持, C_{EM} 为眼睛肌肉收缩的控制回路(图1), E_N 为实际的眼位。

在至今所研究的系统中, 给定点或参考点的问题很容易回答, 自然一定要证实这一点。在生物系统中, 尤其是在象循环或体温这样人的维持功能中, 如果给定点并非不可能定义的话, 那么, 定义它也一定太难了。从系统的观点出发, 很明显, 一个系统必须具有一个给定点, 但是, 生理学家会发难: 这个点有时觉察不到。用最简单的方法, 给定点可以取系统各部件特性曲线的交叉点。对于这样的系统, 正如WERNER所指出的那样, 它完全是自维持的。这种说法可能是正确的。问题在于, 这样的系统在具有不希望的偏差情况下, 既不可能得较高级系统的影响得到校正而返回到它的工作点, 在与其他系统协同时, 如果需要移动的话, 也不可能移动给定点。这种情况对有机体来说是相当危险的。在任何情况下, 只能许可在紧要关头把稳定自身的过程并入系统, 就象趋向稳定工作点的生物医学反应一样。对于具

有代谢部件的体温基本控制，这样的稳定方式也许是正确的。

在着手下一级控制时，信号分析和为相同目的服务的不同的控制途径之间的相互影响变得更为主要。眼球跟踪运动的定量分析是 BOUIS 等人实现的。这就允许我用相同的系统来说明这级控制。眼球运动包含着两个成分：快速阶跃状成分，这个你们已经熟悉了，和一个慢的连续成分，即追随目标运动的形状。

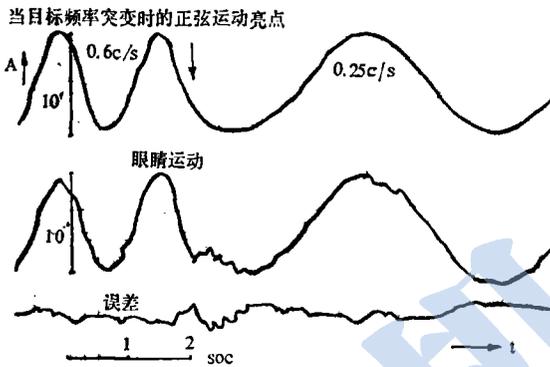


图 3 眼睛跟踪运动的采样

正如图 3 可见，这个连续运动力图跟踪和预测目标图形，而眼球快速跳跃却校正了连续系统所产生的错差。

图 4 展示了全系统的示意图，它的重要功能简要说明如下：

- 信号通过视网膜和相接的神经中枢的处理，产生了大约120ms的滞后时间。
- 在连续分支中，信号通过60ms时间间隔的定长处理，以计算目标速度的均值。
- 在眼球快速跳跃的情况下，零阶跟踪保持器保存了 60ms 这段时间的最后值，以防止速度的计算错误。
- 专门特性限制连续运动的最大速度。
- 自适应的比例/积分控制器使连续运动的速度与信号速度，运行方式相适应。比如在具有人为外反馈的跟踪期间。
- 连续分支输出的幅度按信号明显的规律性加权。
- 在眼球快速跳跃的分支中，必须判定

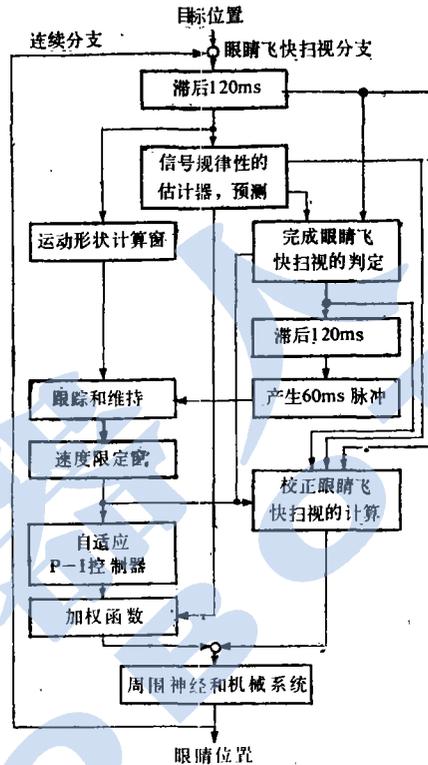


图 4 兼有眼睛跟踪控制系统的模型

误差是由眼球快速跳跃来校正呢，还是通过改变连续运动的速度来校正。眼球快速跳跃干预了连续分支中的信号处理。

一把所预测的目标运动速度考虑在内，来计算校正眼球快速跳跃的幅度，以便使运动的平均误差最小。

照这种分析，系统在大约 60ms 钟周期上运行，这个周期脉冲是由运动的开始来起动。利用预测的方法从目标动作中分离出连续运动，在这种情况下就比较简单了，然后再受到自适应控制。

这种概念对于人的大多数运动来说，似乎都是有效的。判定是由眼球快速跳跃来校正误差还是连续运动来校正误差*，要考虑位置误差和速度误差。（使用最优策略）

* 原文此处为“判定是由眼睛飞快扫视来校正误差还是由连续运动来校正误差”。对照前文，疑为上文之略，故按上文译一译注

这种分析表明，即使对于跟踪速度有限的目标，这样一个相当简单的任务，机体组织已经建立了一个构造相当完善的有分割功能的控制系统，也许这种划分会使得每一功能更简单且更易于执行。另一方面，大脑中央能够很好地协调不同的部分，如果需要的话，也能够产生最优的工作方式。这个例子还启示了，生物控制系统的分析会一下子变得如此的困难，以致即使建立整个输入—输出关系模型也并没有讲出多少有关系的系统的真实的功能性质，其长处和短处。

在完成了对系统这一层次的分析之后，比如，上面简述了对兼有眼球的连续运动和快速跳跃的眼球运动的控制，可以发现，系统潜力的内在实质转移到下一个层次；比如，校正眼球快速跳跃的最优过程是怎样建立起来的，等等。

高级控制问题

在过去的十年期间，生理学家和生物工程师们越来越多地试图在最低限度上探索象循环和呼吸及其相互依赖这样的主要生理系统的定性的功能结构。作为一个例子，体温及其他系统的联系的控制示意图是由WERNER详细提出来的。对于综合性能来说，统筹主要人体功能的控制任务在于多级多目标系统这一级上。但是，试图分析这一系统所产生的困难，可以拿眼球跟踪运动时相当小的控制系统的复杂结构来想象。

此外，还产生了至今应用于分析模式的判据是否充

分的问题，这至少是有疑问的。正象上面已经叙述到的，测量中所带的模糊性常常忽略了（对于象视网膜或耳蜗这样的大感受器组，这个问题尤其要分析）。完成对系统有意义的测量向量的连续计算和参考系统的实现是尤其要考虑到。

在更高的控制水平上，参考的形成与眼球快速跳跃运动的例子相比，方式不同。表演翻三个跟头而几乎完美无缺地跳入水里的高级跳水运动员，为了正确地完成跳水任务，必须具有跳水池和他自身动态跳水路线的完整想象。另一方面，在正常情况下，这个运动员至少部分地以程序—预测的方式来指导。对于快速运

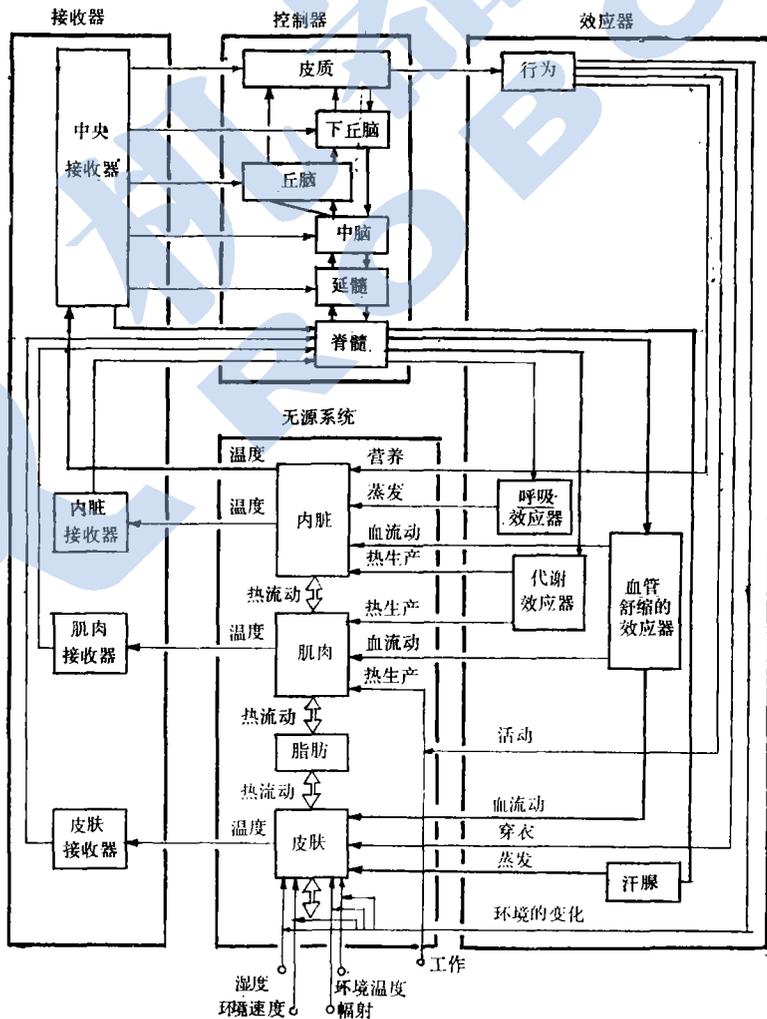


图 5 完整的体温控制系统的示意图

动,包括眼球在内的连续控制由于系统的滞后时间而似乎太慢了。打网球击球时,要成功地改变攻击模式几乎是不可能的,最多只能用手做些小校正。

按程序完成运动还有另一个原因。打网球时,尽管用力握拍,臂和手仍有10个左右自由度。测量臂位置唯一系统并不存在。感受器遍布在肌肉和关节上。因此,并没有给出完全可观性。在运动方面,同一情形对可控性也是对的。这能够再用网球运动员的例子来说明。没有教练员的指导,运动员就会继续发展其错误的运动方式,这大大地限制了他打网球的能力。

但是,运动员并不可能认识到这一事实。在内回路不起作用时,教练员(和录相机)就通过纠正外回路中的错误运动来防止这个缺陷。运动控制神经中枢通过建造一个模型来弥补这个缺陷,而这个模型必须在全部的日常训练中不断得到完善。

不完全可观性的限制,不仅在完成实际控制任务时是一个问题,而且对辨识,即内部模型的产生,预测和参考的建立,同样也是一个障碍。因此,训练运动控制系统如基本生理功能一样,需要如此多的时间,抛开这种不足不管,人体内控制和由人完成的控制可能以最优的方法进行的。举例来说,CHOW和JACOBSON或HASTE都证明了,人能够以能量或时间最优方式完成他的运动。

生物系统的其他有价值的性质,象鲁棒性

即对参量变化的不敏感性和稳定性,至今为止,不曾予以太多的注意。比如,生理系统必须是稳定的,要不然,生命要存在是不可能的。但是,这种稳定性不一定就予以承认。1958年,MECHELRE等人证明了,在植物性神经轻微紊乱时,血压控制可能因增益太大变得不稳定,血压将随着开始增幅振荡,最终导致病人虚脱。

活的机体组织处于被BERTALANFFY称作交换平衡的那种状态。按照BERTALANFFY的观点,活的机体组织的状态是一个流动的交换平衡,这种平衡就象一个角锥体倒放着平衡在其尖端一样。另外,这个角锥体不是整体的,而是由在不同程度上与系统结构的某些主要路线互相紧密地连接在一起的亿万个部件组成。为了保持角锥体在其尖端上的平衡,必须加控制。但是,可观性是模糊和有限的,可控性也一样。而且分割与环境总是在改变它们的状态。为了适应这种状况,也为了使角锥体达到平衡起见,所应用的控制原理发展得越来越复杂。现代控制理论的发展正处在这样地步,我们开始产生已触及到生物控制核心的重要程度的想法,但是,除非我们知道了这个核心的功能原理,否则的话,在解决生物控制问题中,我们的作用就象柏拉图的寓言里岩洞的人物一样。

参考文献(略)

林炳星 译 黄秉宪 校

本刊启事

承蒙广大读者和著译者的大力支持,本刊收到的稿件日益增多,这对于我们编辑人员是一个很大的促进。为了扩大刊物的信息容量,给来稿有更多的发表机会,给读者提供更多的信息本,刊决定设置“来稿文摘”专栏。尽可能将一些不能全文刊登的文章,以文摘形式发表。为此请投稿者注意以下几点:

1. 三千字以上的来稿务必同时附上150~300字的文摘。
2. 不附原文和译文的文摘恕不采用。
3. 文摘一经发表酌付稿酬三至五元,原文可以另投其它刊物。