运动控制理论

第 **5**章

*概念：协调运动的控制理论在控制系统（即人体）的中心和环境特征所起的作用上存在差异。*

完成本章的学习后，你将能够

* 讨论运动控制理论与实操之间的关联
* 定义与运动技能执行相关的术语*协调*
* 描述与人体运动控制的研究相关的*自由度问题*
* 比较和对比开环控制系统和闭环控制系统
* 描述基于运动程序的运动控制理论和运动控制的动态系统理论之间的主要区别
* 定义一个通用的运动程序，并描述能够表征该程序的一个不变的特征和一个参数
* 定义下列与运动控制的动力系统理论相关的术语：顺序和控制参数、自组织、协调结构和感知-动作耦合
* 讨论基于运动程序的理论和动态系统理论如何解释人类行走和跑步的相对时间特征的基础
* 描述运动学习的最优理论如何通过解决基于运动程序的理论和动态系统理论所忽略的问题来对其进行补充的



# 应用

为了成功执行我们在日常生活中使用的各种运动技能，我们必须协调各种肌肉和关节一起发挥作用。许多技能所包含的肌肉和关节的组合都是不同的。有些技能，比如网球发球或从椅子换坐到轮椅上，需要我们协调躯干和四肢的肌肉和关节；有些技能涉及手臂、手和手指的协调，如够取铅笔，

87

弹吉他，敲键盘；有些技能需要我们协调双臂或双腿，使它们同时做不同的事情，比如一只手拿罐子，另一只手拧开顶部，或者一只脚踢球，另一只脚牢牢地踩在地上；还有些只涉及一只手臂和手的技能，我们就只需要协调很少的一部分肌肉和关节，比如操纵电脑的操纵杆或汽车的变速挡。

88

除了肢体协调外，运动技能执行还有其他重要的一般特征。例如，我们会执行一些动作相对较慢的技能，放箭前调整弓的位置或拿起杯子喝水；而另一些技能，如掷球或从长凳跳到地板上，需要快速的弹道式动作。有些运动技能，如写数字或扣衬衫纽扣，组成部分很少；而另一些技能，如跳舞或弹钢琴，就包含许多部分，因此非常复杂。

此外，我们可以从一次次的执行中产生非常准确和一致的动作模式。

 

走下拥挤的楼梯是一个很好地例子，这个运动技能要求一个人根据楼梯和楼梯上其他人的特点来调整他/她的头、身体和四肢的动作模式。

Steve Mason/Getty Images对于熟练掌握的技能，我们能够在各种各样的情况下以很高的成功率完成，尽管我们以前从来都没有经历过相似的情况。例如，一个熟练的网球运动员在比赛中的许多不同情况下都必须使用正手击球。 而在每种情况都有许多不同的特征，如球的飞行模式、速度、旋转、反弹和在球场上的位置，以及对手的位置、风和阳光条件等，所以几乎不存在两种完全相同的情况。然而，一个熟练的球员总是能够成功地击到球。

这些例子中的运动技能多种多样，表明为了实现运动技能目标，我们必须以许多不同的方式协调身体的各个部分。这种不得不在如此多的不同情境下执行如此多种多样的运动技能的能力，需要一个活跃的神经系统作为支撑。本章我们要解决的问题是：我们日常需要实现大量的运动目标，实现这些目标需要执行一系列动作，那么神经系统是如何运作以使我们完成这些动作的呢？

**待解决的应用问题** 选择一项你在日常活动或是娱乐、运动中表现良好的运动技能，当你在学习本章时，请解决以下几点问题：（1）通过描述这项技能在各个关节层次上需要的自由度来考虑它的协调需求。（2）如何调整执行技能的方式以适应环境中可能遇到的不同特征（回想一下我们在第1章的讨论中这里都包括了什么）？描述一部分环境情境特征，并指出你如何调整动作以适应它们。考虑这些调整是否涉及对你用来执行技能的动作模式的修改或改变。



# 讨论

在我们讨论一些神经系统如何控制协调运动的重要理论之前，我们将先理解运动控制理论的基本组成，然后再阐明几个术语的含义，从而为理解这些理论提供基础。

# 理论与专业实践

那些准备从事主要职责是运动技能指导的学生，经常会质疑学习运动控制理论的必要性。这类问题通常来自于那些认为自己只需要准备“实用”信息的人。所谓“实用”，就是指可以帮助他们在工作中履行日常的职责。不幸的是，这种观点往往是由于他们缺乏对理论与专业实践之间相关性的理解所导致的。在本节中，我们将讨论什么是理论以及运动控制理论对从业者的现实意义。本节的目标之一是，解释为什么本书要在与运动控制和学习相关的特定主题讨论之前讨论运动控制理论。

## 什么是理论？

如果我们对*理论*这个术语的理解是基于它在日常用语中的使用方式，那么我们就会得出这样的观点，即理论与实际没有什么联系。但这种观点是短视的，并且具有误导性。在科学中，理论可以帮助我们理解现象，并解释这些现象存在或出现的原因。斯蒂芬·霍金(1996)是英国剑桥大学著名的已故物理学家，他说一个好的理论应该满足“两个要求。它必须准确地描述一大类观察结果……，并且它必须对未来观测的结果做出明确的预测”(第15页)。在霍金的物理学领域里，

89

理论的发展是为了帮助我们理解我们所生活的这个宇宙的各个方面。他们向我们提供可观察到的物理事件的解释，例如识别使滚动的球最终停止滚动的变量。通过识别这些变量，我们就可以在给定这些变量的一定特征的情况下，预测球会滚多远。

行为科学包括对人类运动控制和学习的研究，其中理论侧重于解释人类行为。当我们感兴趣的人类行为是运动技能的执行和学习时，我们期待理论为我们提供解释，说明为什么人们会这样执行技能，也就是要识别那些决定我们所观察到的表现特征的变量。例如，我们观察到，一个人可以在各种不同的情况下执行相同的技能。一个熟练的棒球手可以在不同位置和各种比赛情况下单手跳投。或者，一个熟练的司机可以在开阔或拥挤的公路或街道上成功地驾驶汽车。一个好的运动控制理论会解释这种能力的可能性。同样，如果康复治疗师使用特定的干预措施来治疗损伤，一个好的运动控制理论可以解释为什么这种干预措施是有效的。

## 运动控制理论对从业者的现实意义

对运动控制理论有一个基本的理解可以给从业者带来的好处是，为他/她建立有效的技能指导和实践环境提供基础支撑。图5.1说明了理论和实践之间的联系，指出了一些当实践者了解影响运动技能表现的变量时可以得到加强的应用。考虑上一节末尾给出的例子，如果我们知道*为什么*人们在执行运动技能时可以适应各种情况，我们就可以使用这些知识来开发练习条件，并且自信地预测这些条件将促进这种适应能力的建立。考虑一个不同的例子。

90

运动技能表现的约束、限制、潜力和不足等

使从业者能够

评估干预策略的有效性

识别表现问题

创建新的干预策略

制定干预策略来帮助克服表现问题

开发系统的方法来帮助人们提高技能执行能力

预测干预策略的有效性



理解和

解释

**运动控制理论**

图5.1运动控制理论为从业者的许多任务和职责提供了基础。

假设你需要帮助一个人重新获得行走的能力。了解人类移动背后的运动控制机理和对其有影响的环境变量，将使你有可能开发出更合适的评估和干预策略，因为它们建立在影响移动的变量基础之上的。

# 运动控制理论

在前面题为“什么是理论？”的章节提到，一个好的理论应该描述和解释一大类可观察到的事件。根据这个要求，一个好的运动控制理论应该描述和解释什么呢？

研究人员普遍认为，它应该描述和解释神经系统是如何产生协调运动以使我们能够在各种环境情境中成功执行各种运动技能的。试图理解我们是如何产生协调运动的，与想知道手表是如何计时的在很多方面都有相似之处，因为手表也涉及到许多部件的精确协调。

以下几节讨论对运动控制理论很重要的两个基本问题：术语“*协调性*”应用于运动技能表现的含义和 “自由度问题”。



虽然研究人员提出了其他运动控制理论应该解决的问题1，但这两个问题所提供的基础足以向你介绍本章讨论的两个重要的运动控制理论。

需要注意的是，这里描述的理论主要从*行为层面*解释运动控制。正如你在第1章中所看到的，这意味着它们只专注于解释观察到的行为，而没有试图说明控制过程神经层面的特征(关于运动控制的神经模型的例子，见Bullock & Grossberg, 1991; Grossberg & Paine, 2000; Rokni & Sompolinsky, 2012; Wolpert & Ghahramani, 2000; Wu, Haugh, Sarnow, & Hitt, 2006)。基于行为的运动控制理论的一个重要目标是提出控制协调的人类运动行为的定律和准则。神经层面的理论应该描述的则是能够解释神经系统如何参与这些行为准则的神经机理或神经相互作用机理(例如，见Willingham, 1998)。

## 协调性

所有运动控制理论的一个重要特征是包括对我们如何控制协调性的解释。因此，我们有必要理解协调性这个术语在应用于运动技能表现时的含义。运动技能的执行需要一个人对肌肉激活进行组织管理以实现运动目标。这种组织管理的特征就是定义术语*协调性*的核心。本书采用图尔维(1990)提出的一个通用定义：协调性是指头部、身体和四肢动作模式相对于周围物体和事件的模式。

这个定义包含两部分。每一部分都很重要，值得进一步思考。首先，请注意定义

1对运动控制理论相关问题的更广泛和更深入的讨论，请参见专门讨论运动控制问题的书籍，例如凯尔索(1995)、拉塔什(2012)、罗森鲍姆(2011)和舒姆韦-库克和伍拉科特(2017)。

91

180

屈曲 **膝关节** 伸展



开始

训练前

训练后

140

100

60

160 200 240

伸展 **髋关节** 屈曲

**图5.2** 来自安德森和西达维的一项实验的角-角图，展示了训练给踢足球动作中髋关节和膝关节之间的关系带来的协调性变化。资料来源：Research Quarterly for Exercise

and Sport, Vol. 65, pp. 93–99, 1994 American Association for Health, Physical Education, Recreation, and Dance, 1900 Association Drive, Reston, VA 20191.

指定协调性包含头部、身体*和/或四肢的动作模式*。尽管术语“*协调性*”在口语中的常见用法是形容技能执行熟练的特征，但它不应该局限于这种用法。当用来形容与*技能*执行相关的动作模式时，协调性指的是与技能执行相关的头部、身体和肢体的动作特征的组织关系，*而与执行者的技能水平无关*。这意味着，当我们评估技能执行的动作特征时，有必要考虑描述在技能执行期间*特定时刻*头部、身体和/或四肢之间关系的协调性。

正如你在第2章中所看到的，一种常见的描绘动作模式的方式是，在角-角图中绘制肢体在技能执行时其位移模式之间的关系。如图5.2所示，

**协调性** 头部、身体和四肢动作模式相对于周围物体和事件的模式。

92

|  |  |
| --- | --- |
|  | **深度阅读** |

|  |
| --- |
| **从肌肉和关节层面看待自由度问题**  我们知道人体有792块肌肉驱动体内的一百多个关节以不同的方式运转。每一个关节都有决定各自动作自由度的机械特征。图尔维(1990)是这样看待协调性控制问题的：如果所有的关节都是像肘关节一样的铰链关节，那么在关节层面就有100个可控制的机械自由度。但是如果执行特定技能需要为这类关节定义两个特征，如位置和速度，那么自由度就会增加到200个。  考虑下面的例子，假设你坐在餐桌旁，决定拿起面前桌子上的一杯水，这里的自由度数量取决于关节的数量（这里不考虑每个关节移动方式的数量），具体包括肩关节（1）、肘关节（1）、腕关节（1）和所有的指关节（3个关节×4根手指=12个关节）及拇指关节（3）。这一简单动作需要控制的关节数共18个。现在假设你面前的水杯非常大，需要两只手才能拿起来。和单手操作情况相比，此时的神经系统至少须要控制双倍数量的自由度。在这两种情况下，协调单侧或两侧肢体以完成运动目标可能都没有什么难度。但是，如果我们从神经肌肉控制的层面考虑这些任务，这里需要以非常明确的方式控制许多自由度，那么简简单单地拿起水杯喝水就变成了一项非常复杂的任务。然而，神经系统可以处理这项复杂的操作。运动控制理论则需要能够解释神经系统是如何实现。 |



展示了踢足球动作中膝关节和髋关节角度之间的协调性。

定义的第二部分指出，头部、四肢和身体的动作模式是*相对于周围物体和事件的模式的*。这一点很重要，因为它明确了考虑动作协调性相较于技能执行情境的必要性。环境情境的特征限制了头部、身体和四肢以特定的方式行动，以便实现运动目标。

例如，要沿着一条道路行走，人们必须使自己头部、身体和四肢的动作模式适应道路的特征。假设一个人走在人行道上，遇到一根横在人行道上的树枝，他/她必须使用一种新的动作模式才能跨过树枝。树枝的特征将决定动作模式的特征。如果树枝很小，那么这个人可能只需要调整步幅长度，迈一大步即可；如果是一根大树枝，他/她可能就不得不停下来，采用攀爬的方式过去。

## 自由度问题

协调性涉及头部、身体和四肢的动作模式，因此运动控制研究中的一个重要问题是：*神经系统是如何控制这么多参与产生复杂动作模式的肌肉和关节的呢？*为了回答这个问题，我们必须考虑一个重要问题，这个问题是由著名的俄罗斯生理学家尼古拉·伯恩斯坦首先提出的。他的工作产生于20世纪30年代至50年代，却直到1967年才被西方世界所知道。而今他的工作还持续影响着与运动控制相关的研究和理论。伯恩斯坦提出，为了执行协调一致的动作，神经系统必须解决他所命名的“自由度问题”。

任何系统的**自由度**都反映了系统中独立组件的数量以及每个组件的变化方式。每个组件都可以“自由”地以特定的方式变化，例如肘关节，它可以以两种方式变化(即移动)：屈曲和伸展。当一个复杂的

 93



系统需要通过组织以产生特定的结果时，就会出现**自由度问题**。控制问题如下：*如何设计一个有效而高效的控制系统，来约束一个具有多自由度的复杂系统以特定的方式行动呢？*

|  |  |
| --- | --- |
|  | **深度阅读** |
| **伯恩斯坦对自由度问题的论证**  尼古拉·伯恩斯坦的经典著作《*运动的协调和控制（The Co-ordination and Regulation of Movement）*》（英文版，1967）汇编了他发表的几篇文章。在题为“一些运动行为控制中的紧急问题”（俄语原版，1957）中，伯恩斯坦讨论了控制系统为产生协调一致的动作所必须要克服的自由度问题。在该讨论中（第126页），他为了论证该问题举了如下例子（据他所说对大众科普非常有用）：  将滑雪杖的手柄末端固定到受试者背带的搭扣的前面，将1-2千克的重物附加到远端，在滑雪杖左右两侧的雪轮（位于滑雪杖末端）绑上长度足以让受试者左右手握住的橡皮管。然后吩咐受试者站到一个画着一个大圆圈、正方形或其他简单图形的垂直板前面，仅通过拉橡皮管来操作滑雪杖，尝试用滑雪杖的尖端沿着图形的轮廓画线。这里的滑雪杖代表只有两个自由度的肢体段，橡皮管则类比将两个自由度引入到系统里的两个拮抗肌。该实验……向所有尝试过它的人讲清楚了控制需要四个自由度协作的系统有多么困难和复杂，即便这个控制的人具有完备的感受器也无济于事，因为他从出生起就一直在和骨骼肌肉这种运动装置打交道，没有进行过该项任务的运动练习。 | |

考虑下面这个例子中复杂机械系统中的自由度控制问题。直升机被设计成能够以各种速度向上下、左右以及前后等不同方向飞行。如果飞行员为每一个飞行的方式都要控制一个开关或者操纵杆的话，那飞行员的工作将变得难以承受。因此，直升机设计师向飞行员提供可以用手和脚同时操纵的操纵杆和踏板，这就降低了任务的复杂性。每个操纵杆或踏板可以同时控制几个功能。

当神经系统必须控制人体以使其执行复杂的运动技能，如爬梯子时，它面临与直升机中涉及到的类似的自由度控制问题。人体协调运动中须要控制的实际自由度的数量取决于我们从哪个层次考虑该问题。

不同层次须要控制的元素是不同的，有可能是运动单位，也有可能是身体关节。无论考虑的控制层次如何，很明显对于任何运动技能来说，执行起来所涉及的控制问题都有很大的难度。然而，正如你将在第12章中看到的，当一个人练习一项技能，并从初学者进阶成熟练者时，从我们所能观察到的特定协调特征的变化中，很明显可以看到运动控制系统解决自由度问题的方式。

**自由度** 独立组件的数量以及每个组件的变化方式。

**自由度问题** 在设计一个必须产生特定结果的复杂系统时出现的控制问题；设计问题涉及确定如何约束系统的许多自由度，以便它能够产生特定的结果。

94

**开环控制系统**

运动指导

运动效应器

运动控制中心

**闭环控制系统**

运动指导

运动控制中心

运动效应器

反馈

**图5.3** 运动控制的开环和闭环控制系统示意图。



# 开环和闭环控制系统

大多数运动控制理论都包含两种基本的控制系统，即**开环和闭环控制系统**。它们是建立在机械工程的控制模型基础之上的。这两个模型并不对复杂人体运动中的控制过程进行精确描述，而是对中枢和周围神经系统启动和控制运动技能的不同方式进行整体描述。这些模型作为有用的指南，说明了该过程中涉及的一些基本组件。

图5.3给出了简单开环和闭环控制系统的示意图。这些是典型的图表，你可以在这些类型的控制系统的一般介绍中看到。请注意，每个系统都有一个*控制*中心。控制中心有时被称为主管。其作用的一个重要部分是生成并向

效应器，在人体内，是参与产生所需运动的四肢、身体和/或头部的肌肉。

## 系统之间的差异

这些系统在两个方面有所不同。首先，闭环控制系统涉及**反馈**，而开环系统不涉及反馈。在人体运动中，反馈是由各种感觉感受器向控制中心发送的传入神经信息。这种反馈的目的是在运动过程中向控制中心更新运动的正确性。

开环和闭环控制系统的第二个重要区别与控制中心发布的运动指令有关。在开环系统中，由于反馈不用于控制正在进行的运动，指令包含效应器执行计划运动所需的所有信息。尽管反馈已经产生并可用，但它并不用于控制正在进行的

 95

|  |  |
| --- | --- |
|  | **深度阅读** |
| **开环和闭环控制系统的机械和人体运动技能示例**  **开环控制 闭环控制**  机械振动 机械振动   * **数字录像机。它可以作为一个** **房子里的恒温器。它控制空气-**   被编程的开环控制系统 房子里的空调和供暖系统。在特定日期录制电视节目 恒温器上设定了所需的室温。在特定的时间。录像机将会打开 此设置成为在指定时间打开和关闭的参考。(请注意，它会 比较实际室温。房间在指定时间关闭，即使程序 温度作为对温度的反馈，被记录的温度持续超过那个时间。) stat指示何时打开空调或  加热系统打开或关闭。  人类运动技能示例 Human motor skill e𝑥ample   * **向镖靶投掷飞镖。当这个人-** ∙ **Driving a car.** When a person drives a car on a   儿子发起投掷、手臂运动和飞镖 street or highway, he or she must keep the car  release occur as specified by movement instruc- 在指定的车道内。为此，驾驶员使用在手臂启动前开发的功能 运动visual and proprioceptive feedback to control。由视觉或 the steering wheel to make the needed adjust-  the muscles cannot be used to make a movement 防止汽车驶出车道的措施  更正，因为当 boundaries.  达特离开了手。 | |





运动。这可能是因为不需要反馈，或者因为在运动开始后没有足够的时间使用反馈来有效地控制运动。

在闭环系统中，运动指令是完全不同的。首先，控制中心向效应器发出初始指令，该指令仅足以启动运动。运动的实际执行和完成取决于到达控制中心的反馈信息。该反馈提供了关于运动状态的信息，其作用是使控制中心能够做以下几件事之一:允许运动按照最初的指示继续，提供额外的指令以继续正在进行的运动，或者纠正运动错误。值得注意的是，如图5.3所示，闭环系统经典图的一个缺点是，它将运动效应器描述为反馈的唯一来源。但是，在实际的技能表现中，闭环控制系统

运作，还有其他几个感官反馈的来源，如视觉和听觉系统。这些反馈的来源将在第6章讨论。

**开环控制系统**一种控制系统，在这种系统中，启动和执行计划动作所需的所有信息都包含在给效应器的初始指令中。

**闭环控制系统**一种控制系统，在此系统中，在行动过程中，将反馈与标准或参考进行比较，以使行动按计划进行。

来自感觉系统的**反馈**信息，指示中枢神经系统的运动状态；在闭环控制系统中，反馈用于对正在进行的运动进行校正。

96



|  |  |
| --- | --- |
|  | **深度阅读** |
| **汽车项目概念的演变**   * 早期的希腊哲学家如柏拉图谈到 富兰克林·亨利(亨利&罗杰斯，1960)给出了关于一个人创造一个行为的“形象” 经验性提升。他假设“神经 * *威廉·詹姆斯*(1890)提到柏拉图时，他 特定且协调良好的运动模式规定，要执行一个动作，一个人必须首先 动作由存储的程序控制，该程序用于形成该动作的清晰“图像”。 来指导神经运动的细节 * 卡尔·拉施里(1917)被认为是第一个 *曼斯》(第449页)。亨利的汽车之子的概念实际上使用了汽车程序这个术语。男性* 程序也是计算机程序。他最初认为运动项目是“意图” 提出当启动时，程序控制行动”，但后来描述为“一般—— 确切的运动细节，基本上没有确定动作的模式 在特定动作序列的执行期间可能的修改”(拉斯利，1951， 运动。   p. 122).他提出这些图式是 *斯蒂芬*·基尔(1968)提出了一个类似于有组织地提供中央控制的移动的观点—— 亨利把汽车程序定义为“一套模式”。 肌肉命令的结构   * *弗雷德里克·巴特利特爵士*(1932年)暗示一辆汽车 整个序列不受描述内部表示和组织的影响 外围反馈”(第387页)。   运动。 *理查德·施密特(1975)提出了马达*   * *米勒、加兰特和普里布拉姆(1960)提出* 程序不是具体的肌肉命令，而是一个“计划”的概念，它“本质上是 与计算机程序相同的类的抽象的基于内存的表示”(第16页)，以及 每个由不变量定义的类负责控制 特征。由于这些特点，他称之为行动事件。 他的版本“通用”汽车计划。 | |

# 运动控制的两种理论

我们可以根据运动指令的相对重要性对神经系统如何控制协调运动的理论进行分类，运动指令由控制系统的中央组件指定，或者由前者、任务和环境之间的相互作用产生的信息指定。在控制过程中，突出中枢神经系统指定的运动指令的理论有一些共同的记忆表征形式，如运动程序，它为组织、启动和执行预期的动作提供了基础。我们将讨论一个基于运动程序的理论，作为这种理论的一个例子。相比之下，其他理论对环境规定的信息以及这种信息与信息的动态相互作用产生了更大的影响

从任务到身体、四肢和神经系统。我们将讨论动力系统理论，作为这类理论的一个例子。

## 基于运动程序的理论

以中央控制为导向的理论的核心是运动程序，一种基于记忆的控制协调运动的结构。各种理论观点将不同程度的控制归因于运动程序。毫无疑问，最能代表当今对汽车项目思考的观点来自理查德·施密特的工作(1988，2003；施密特&李，2019)。在他的“图式理论”中，施密特(1975)提出，以前观点的一个严重问题是，它们将运动程序限制在控制特定的运动或运动序列。为了克服这个限制，施密特假设广义



运动程序作为一种机制，可以解释人类协调运动行为的适应性和灵活性。

施密特的广义运动程序。施密特提出，一个GMP控制一类动作，而不是特定的动作或顺序。他将一类行为定义为一组不同的行为，这些行为具有一组共同但独特的特征。对施密特来说，这些被他称为不变**特征**的特征是一个GMP的“特征”，并构成了存储在内存中的内容的基础。这些与运动相关的特征构成了施密特(2003)所称的动作类基*本模式*的基础。这些特征在动作的不同表现中保持一致。为了使一个人产生一个特定的动作来满足表演情境的要求，这个人必须从记忆中提取适当的程序，然后添加特定于运动的**参数**。这些都是动作表演中与动作相关的特征，在不同的表演中可以有所不同。

可以帮助你理解GMP的不变特征和参数之间的区别的一个类比是音乐和舞蹈中节奏和速度之间的区别。一首音乐有一个节奏结构，它是由写在乐谱上的时间标记或节拍指定的，如3/4或4/4。第一个数字(可能是乐谱上的最高数字)表示每小节音乐中时间间隔比例相等的节拍数。这个数字建立了音乐的韵律结构。第二个或底部的数字表示哪种类型的音符接收一个节拍，在两个例子中是四分音符，即1/4音符。对于3/4米，在每一小节中有三个时间间隔比例相等的节拍(即，在每一小节中相当于三个四分音符)；对于4/4小节，每小节有四拍。例如，在舞蹈中，华尔兹有3/4米长，这意味着它每小节有三拍，并给它一系列1-2-3步。然而，请注意，对于华尔兹来说，三拍的长度并不相等；

97

第一个较长，第二个和第三个较短，但时间相等。节奏是指音乐演奏的速度。同样的节奏结构可以慢速或快速播放。你可以试着这样做，每拍一次就拍手一次。尝试一系列一致的三拍，每拍之间的时间间隔比例相等，这建立了你鼓掌的节奏结构。然后以同样的方式但更快地鼓掌。请注意，即使你提高了拍手的速度，节奏结构也不会改变。在这个类比中，音乐中的节奏类似于GMP的一个不变特征；速度类似于一个参数。

不变特征和参数。虽然许多可能的特征可能是GMP的不变特征，但施密特(2003)认为最有可能的是技能组成部分的**相对时间**(类似于音乐中的节奏)。另一个是组件的顺序。相对*时间*中的相对一词表示不变的是技能组成部分的总持续时间或移动时间的百分比或比例。

一种存储执行动作所需信息的存储器表示。

**广义运动程序:一类具有共同不变特征的动作的记忆表示；它为控制动作类中的特定动作提供了基础。**

**不变特征**定义了一个药品生产质量计划的一组独特的特征，并且在不同的行动中不会有所不同。

**GMP的参数特征，可因技能表现的不同而不同；一项技能的特征，在一个人能够执行一项技能以满足特定情况下的特定运动要求之前，必须将其添加到GMP的不变特征中。**

**相对时间**在技能的执行过程中，技能的每个组成部分所需要的总时间的比例或百分比。

98

|  |  |
| --- | --- |
|  | **仔细看看** |
| **定义运动程序:记忆表征与运动前准备的行动计划**  多年来出现的一个问题导致了在理解作为运动程序的一部分存储在存储器中的运动程序时，运动或动作的哪些特征是困难的。我们是什么以及它是如何运作的。问题是这个术语在本章中是这样使用的。  运动程序被用来描述不同的 术语“运动程序”的另一种用法是指功能结构。在一些讨论中，在移动程序之前构造或准备的运动指的是一个动作开始的记忆表示，但是跟随一个动作的意图。运动或动作。广义运动程序这个术语的使用，在施密特的图式理论中有时被称为运动(GMP)结构，是一个编程，是第八章的重点，尽管我们有很好的例子。在本章中，关于do的理论论点对记忆表征类型的运动程序聚焦基于运动程序的控制的准备方面有所参考。 | |

图5.4展示了如何解释相对时间不变的概念。假设你尽可能快地移动你的食指，依次按下键盘上的五个键。现在，假设该任务的四个组成部分(键之间的时间间隔:键1-2、2-3、3-4、4-5)产生以下移动时间比例:组成部分1占总移动时间的30%(组成部分%=组成部分移动时间/总移动时间)；成分2，20%;成分3，40%;和组分4，10%。如果这项技能在典型条件下的总持续时间为10秒[部分表示(a)图中的),那么不管你加速或减速多少，每个组件的实际移动时间成比例地变化。在图5.4中，零件(b)和(c)表示加速技能[部分]的比例组成变化(b)]并使其减速[部分(c)]。因此，如果您通常在10秒内完成这项技能，那么您完成每个组件的时间分别为3秒、2秒、4秒和1秒。如果你在5秒内以两倍的速度完成这项技能，那么每个部分将分别成比例地变为1.5、1、2和0.5秒。如果你把你的整体运动时间降低到15秒，那么每个部分将分别变为4.5、3、6和1.5秒。

尽管运动程序理论提出转基因作物的不变特征是从

一项技能对另一项技能的一种表现，它还认为还有其他可以改变的特征，称为参数。例子包括整体持续时间和用于执行技能的*肌肉*。熟练的表演者可以很容易地将这些从一种表演情况改变到另一种，很容易使它们适应每种情况的具体要求。下面两个例子说明了不变特征和参数之间的关系。一个与图5.4有关，正如刚刚讨论的，它将相对时间描述为一个不变的特征。该图还说明了总持续时间的参数。图中的正常速度、更快速度和更慢速度表明，一个人可以在不改变运动组成部分的相对时间结构的情况下，改变运动所需的总时间。例如，当一个人走得比他快或慢时，就会出现这种情况

或者她的典型速度。

第二个例子是关于作为参数的*肌肉*。研究证据表明，无论你是用你喜欢的手握笔、另一只手、脚趾之间还是用牙齿签名，这两个签名都有明显的空间和相对时间不变特征(见赖特，1990年对这项研究的出色评论)。这些结果表明，你可以在不改变广义运动程序中表示的不变特征的情况下，改变书写签名所涉及的肌肉。有趣的是，

99

1. 正常速度(10秒)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |

30% 20% 40% 10%

1. 更快(5秒)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |

30% 20% 40% 10%

1. 较慢(15秒)



|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |

30% 20% 40% 10%

**时间刻度(秒)**

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

**图5.4**假设的四分量运动技能以10秒的持续时间正常进行时的相对不变时间的图示(a)加速至5秒(b)，并减慢到15秒的持续时间(c).



Rijntjes等人(1999)通过比较人们用惯用手的手指和大脚趾签名激活的大脑区域，提供了肌肉作为与签名相关的运动参数的神经学证据。当我们考虑双边转移的话题时，肌肉作为参数的额外证据和例子将在第13章讨论。

施密特的图式理论。一个关于GMP如何控制协调运动的形式化理论是施密特的图式理论(施密特，1975，1988，2003)。模式是一个规则或一组规则

这为决策提供了基础。它是通过从相关的经验中提取重要的信息并将它们组合成一种规则来开发的。例如，你对狗的概念是看到许多不同类型的狗并发展出一套规则的结果

为决策提供基础的规则或规则集；在施密特的图式理论中，支配运动的规则的抽象表示。

100

你需要正确地识别出“狗”是一种你从未见过的动物。

施密特用图式概念来描述技能学习和控制中涉及的两个控制成分。两者都被描述为基于抽象规则。第一个是GMP，如前所述，它是负责控制各类动作的运动协调模式的控制机制，如投掷、踢腿、行走和跑步。第二个组成部分是运动反应模式，它负责提供特定的规则来控制技能在特定情况下的表现。因此，运动反应模式为GMP提供了参数。

图式理论解释了一个人如何适应新的情况或环境。人们可以成功地完成一项技能，这项技能需要以前没有做过的动作。例如，当你走在拥挤的购物中心或退回一份10尼的服务时，情况的特征会以你以前没有经历过的方式发生变化。在这些情况下，有可能成功地执行该技能，因为您可以使用来自运动反应模式的规则来生成适当的参数特征；你把这些加到药品生产质量管理规范中来执行这项技能。

施密特的图式理论主张通过组织运动程序和图式的执行控制操作来*解决*运动协调中的自由度问题。这种方法的一个重要重点是存储在控制中心的内容的抽象或一般性质。GMP和运动反应模式一起工作，提供在给定情况下启动动作所需的特定运动特征。动作启动是一个开环控制过程。然而，一旦运动开始，如果有足够的时间处理反馈并改变正在进行的运动，反馈会影响其进程。

测试不变相对时间特征。研究人员试图通过调查施密特的主张，为基于运动程序的控制提供实证支持，施密特主张广义运动程序控制一类定义的动作

通过特定的不变特征。在提出的不变特征中，相对时间引起了最多的研究兴趣。对这一特性不变性的支持来自于许多研究几种不同技能的实验，例如打字、步态、书写、理解和按键序列等。(关于这一证据的评论，见豪雅，1991年；施密特，1985，1988，

2003;谢伊和沃尔夫，2005年。)

研究人员通常通过观察相关参数值范围内的相对时间变化来研究相对时间不变性，例如总持续时间或速度。在这方面最常被引用的研究例子是夏皮罗、泽尼克、格雷格和迪斯特尔(1981)的一项研究，在这项研究中，人们在跑步机上以不同的速度行走和跑步。研究人员感兴趣的是在每种踏车速度(即总持续时间参数)下，总踏车周期时间(即相对时间)的百分比，该百分比表示踏车周期的四个组成部分或阶段。他们的假设是，如果控制行走和/或跑步步态模式的广义运动程序的相对时间是不变的，那么特定步态成分的百分比在不同速度下应该保持不变。

结果与相对时间不变性的假设一致(见图5.5)。当步态加速或减速时(至少达到6公里/小时，超过8公里/小时)，对于不同的速度，每一步周期所占的时间百分比基本上保持不变。行走和跑步的相对时间特征之间的差异在图5.5(b)部分的饼图中特别明显。饼图显示了四步循环阶段中每个阶段的平均步行速度和跑步速度的相对时间百分比。因为行走和跑步之间的相对时间百分比不同，作者得出结论，两种*不同的*运动程序控制行走和跑步的步态。在每个步态模式中，总持续时间(即速度)参数可以增加或减少，同时保持步周期各部分之间的相对定时。

101

1. 60



E3

E1

E1

E3

F

E2

F

E2

走

跑

50

40

**步进周期的百分比**

30

20

10

0

3 4 5 6

8 9 10 11 12

**移动速度(公里/小时)**



1. **走 跑**

F

E3

E1

E2

E3

F

E2

E1

图5.5夏皮罗等人的实验结果。(a)在不同的行走和跑步速度下，四个步循环阶段(菲利普森步循环)的总步循环时间的相对时间百分比。F=屈曲阶段(从脚尖离开到膝盖伸展开始)；E=伸展阶段1(从膝盖伸展开始到臀部)；E=伸展阶段2(从脚跟屈曲到最大膝盖角度屈曲)；E=伸展阶段3(从最大膝关节角度屈曲到脚尖离开)。((四种速度的)总步数的平均相对时间百分比

行走和跑步的四步循环阶段的循环时间。来源:夏皮罗，

D. C. 等人(1981年)。使用步态模式分析的广义运动程序的证据。运动行为*杂志*，13，33–47。1981年，赫尔德勒夫出版公司华盛顿州，DC。

102

|  |  |
| --- | --- |
|  | **仔细看看** |
| **关于相对时间不变性来源的两种观点**  相对时间不变性是广义运动程序和运动控制动态系统视图的共同组成部分。然而，这些观点之间的一个重要区别是不变性的来源。   * 广义的运动程序观点强调 一些特定的特征，时间模式是GMP，包含在发送的运动命令中 相对时间不变性的类似概念。肌肉组织。正因为如此，由此产生的 更重要的是，在构成动作的相对运动集合中看到的不变性是 许多行动的时间是一个紧急的角色——有义务根据这个时间契约来执行 这是人与紧张互动的结果。跨变化的相对时间不变性 具有任务和/或环境特征的参数是一类移动的指示器 或由同一GMP控制的组件中涉及的机械动力学。 身体和肢体的运动。相对时间 * *动态系统视图更喜欢使用* 跨控制参数术语“时间模式”的变化的不变性，而不是相对时间 是协调模式稳定性的指标。 | |



## 动力系统理论

与基于运动程序的运动控制理论形成鲜明对比的是一种通常被称为动力系统理论的方法(有时被称为*动态模式理论*、协调动力学理论、生态学理论和*行动理论*)。这一理论观点的基础是涉及物理、生物、化学和数学的多学科观点。这一理论的支持者认为人类的运动控制是一个复杂的系统，其行为方式类似于任何复杂的生物或物理系统。人体运动控制作为一个复杂系统，从非线性动力学的角度来看；这意味着随着时间的推移，行为的变化不会遵循连续的线性进展，而是会突然发生突变。例如，在物理世界中，当水的温度逐渐升高时，会有一个特定的温度(100℃)使水沸腾；它的行为突然改变。这种类型的变化代表一种非线性**行为**。

那些研究动力系统理论的人特别感兴趣的是，由于特定变量的影响，系统如何随着时间从一种稳定状态改变到另一种稳定状态。此外，

他们对确定支配这种行为的物理和数学规律感兴趣。虽然这种方法已经被用来模拟物理世界中的许多复杂系统(见格雷克，1987)，但直到20世纪80年代，它才引起了对理解和解释人类运动控制感兴趣的科学家的注意。

运动行为的非线性变化。斯科特·凯尔索(ScottKelso)和他的同事为运动科学家进行的一系列实验表明，一个变量水平的系统变化会导致人类协调运动中的非线性行为变化(例如，凯尔索，1984；凯尔索&斯科尔斯，1985)。在这些实验中，参与者开始在一个稳定的协调状态或模式中以指定的速度移动他们的左右食指，这种状态或模式被描述为*反相*关系(有时被称为异相关系)。这意味着控制左右手指的肌肉群同时但以相反的方式工作:当右手手指弯曲时，左手手指伸展，类似于一些车辆中挡风玻璃雨刷的运动。从数量上来说，这些手指彼此相差180°



整个运动周期。参与者通过保持手指速度与实验者控制的节拍器的速度一致，系统地提高了手指运动的速度。结果是，在特定速度下，手指运动自发地转移到第二稳定协调状态或模式，描述为两个手指之间的同相关系，其中两个手指同时弯曲或伸展(即，彼此同相0°或360°)。这里需要注意的是，协调模式变化的实际速度因人而异。这里重要的一点是，每个人都会以一定的速度做出改变。

你可以体验这种自发的、非线性的协调变化，用你的手握两个拳头，把它们放在你的桌子或桌面上，这样你的拳头的小指侧放在桌面上。伸出你的两个食指，让它们面向前方。然后开始以凯尔索实验中相同的方式将它们左右移动(保持它们与桌面平行)。

向同相配位状态的转变发生在稳定反相和同相状态之间的转变过程中。这种转变是反相和同相配位模式的混合。但是在较慢的速度下，只出现反相模式，而在较快的速度下，只出现同相模式。因此，运动速度的线性增加导致两个食指之间运动的基本协调模式的非线性变化。也就是说，当速度在从慢到快的范围内增加时，没有显著的协调模式变化发生，然后模式变化在一个特定的速度下相当突然地发生。

从协调模式的角度来看，这些实验表明，不同的协调模式可以自发地发展成为一个特定变量变化的函数；在这种情况下是移动速度。在凯尔索实验中使用的手指运动任务中，反相和同相手指运动关系表示稳定

103

协调模式。这些实验的重要性在于，它们为协调变化的研究提供了第一步，这种变化可以在不借助于诸如运动程序等机制来指定每种协调模式的运动特征的情况下发生。

这些自发的协调模式变化并不局限于实验室任务。人们还发现它们在运动和日常活动中具有运动技能。例如，游泳中的前爬式划水在特定的游泳速度下表现出自发的手臂协调模式的变化(塞弗特，乔莱特，巴迪，2004；Seifert等人，2015年)。另一个例子是从步行到跑步的协调模式的变化，这种变化以特定的速度自发发生。夏皮罗等人(1981)的实验，在本章前面已经讨论过，是这种自发步态模式变化的早期证明。自该实验以来，步行到跑步，以及相反地，跑步到行走的步态变化作为速度的函数，已经被证明了无数次，并且已经成为越来越多的研究的基础(例如，Abdolvahab&Carello，2015；Diedrich&Warren，1995，1998；Farinatti&Monteiro，2010；工资-naar&vanEmmerik，1994年)。我们将在第7章更详细地讨论这种自发的步态变化现象。

**动力系统理论描述和解释协调运动控制的方法，强调信息在环境中的作用以及身体和四肢的动态特性；它也被称为动态模式理论。**

**非线性行为**响应特定变量值的系统线性增加而以突然、非线性方式改变的行为(例如，在特定的水流速增加时，管中水流从平滑变为湍流；从步行到跑步步态的变化

以步态速度的特定增加)。

104

|  |  |
| --- | --- |
|  | **深度阅读** |
| **优秀游泳运动员前爬动作中速度引起的自发协调模式变化**  在游泳者最大速度时，前面手臂协调模式的变化。游泳中的手臂协调爬行动作是一个运动技能的例子，在每次试验中都进行了量化。对自发协调模式类型发展协调的分析揭示了最初由凯尔索(1984)报道的*两种不同的协调*模式:追赶模式，其中有一个滞后的手指运动任务。在法国的一项实验中，在每只手臂推进阶段之间的时间，由塞费特、乔莱特和巴蒂(2004)进行，14名精英运动员采用了相对对立的模式，其中推进的男子短跑运动员进行了八次游泳试验，当推进阶段在特定距离结束时，一只手臂的阶段结束。试验以另一只手臂开始的速度开始。手臂划水的分析与3000米距离的配速相似。显示所有的游泳者都使用了追赶式拍子。在随后的测试中，游泳者被要求在第一次测试中进行测试。但是当他们增加他们的速度到一个特定的量时，即在连续的试验中游泳的速度，有一个基于1500步的速度，在这个临界速度下，他们都开始使用相对的800，400，200，100和50米；第八次试验是他们手臂划水的对抗模式。 | |



## 稳定性和吸引子

动力系统观点的核心是**稳定**性的概念。在动态术语中，稳定性是指系统的行为稳态。需要注意的是，这个术语的使用不同于不变性的概念。正如这里所使用的，稳定性包含了可变性的概念，注意到当系统受到轻微扰动时，它会自发地返回到稳定状态。

通过观察稳定状态的特征，科学家可以了解影响系统行为的变量。例如，在刚才描述的凯尔索实验中，在交互的有节奏的手指移动中，研究人员观察到当手指彼此处于反相和同相关系时的行为稳定性。这两种稳定状态表明了协调运动的两种模式。在这些状态之间，随着手指速度的增加，发生了一个相变，在此期间，不稳定性是行为模式的特征。这种不稳定性一直持续到手指速度达到一个新的稳定状态自发出现的点。

系统的稳定行为稳态被称为吸引子(或*吸引子状态*)。就人类的协调运动而言，属性是*首选的*行为状态，例如

凯尔索实验中手指节律性运动的同相和反相状态。*吸引子代表稳定的*运行区域，当*允许系统*以其首选方式运行时，*通常*会*围绕*该区域*发生行为*。

考虑两个常见运动技能存在的例子。当人们以3英里/小时(即4.8公里/小时)的速度运动时，手臂和腿被一种产生行走步态的协调关系“吸引”。这种步态模式代表了以这种特定速度进行运动的首选行为状态。但是当人们以10英里/小时(16公里/小时)的速度运动时，行走步态不是首选的运动状态。在这个速度下，大多数人都会跑步，正如你在图5.5中看到的，这涉及到一种不同于行走步态模式的协调模式。

第二个例子是姿势协调模式。根据巴迪和他的同事(例如，巴迪、奥伊勒、拉加德和斯托弗瑞根，2007年)的说法，有两种稳定的姿势协调模式，由臀部(即影响躯干运动的关节)和脚踝之间的运动关系决定:同相和反相模式。这两种模式类似于ear-lier描述的有节奏的手指运动模式，这意味着臀部和脚踝都表现出



同相模式中的弯曲，但是在反相模式中一个关节伸展而另一个关节弯曲。这些模式中的每一种都描述了站立姿势控制协调的特征，在这种情况下，一个人试图在不稳定的表面上保持站立平衡，就像你站在移动的公共汽车上一样。从动力系统理论的角度来看，从一种协调模式到另一种协调模式(响应公共汽车的运动)的转变是自动自发发生的，因为姿势协调组件(臀部和脚踝)的同相和反相模式建立了“首选”模式。

最后，吸引子状态不仅是协调运动的稳定状态，而且是最优节能状态。这意味着，当一个人以一个优选的速度运动或使用一个优选的协调模式时，这个人消耗的能量比他或她以一个非推荐的速度运动时消耗的能量要少。

## 订单和控制参数

动力系统观点的支持者优先发展形式的非线性运动方程，该方程规定了运动控制、学习和发展过程中运动协调模式的稳定性和稳定性损失。为了发展这些方程，科学家必须确定负责协调和与之相关的变量。这些变量中主要的是顺序参数(有时使用术语集合变量)。这些变量定义了系统的整体行为。顺序参数使一种协调的运动模式得以重现，并与其他模式相区别。

因为订单参数定义了一个移动模式，所以识别特定的类型是很重要的。研究人员确定的最突出的顺序参数是节奏运动的相对相位。我们在第二章中简要讨论的相对相位是指一个量化的值，它代表两个运动片段之间的运动关系。对于凯尔索(1984)实验中的节奏手指运动任务，同相运动关系的相对相位为360°(与0°相同)；的相对相位

第5章■运动控制理论 105

反相运动关系为180°。这两个相对相位是通过确定手指的最大内收相位值为360°(即0°)，最大外展相位值为180°来确定的。在一个共同的起点的基础上，相对相位被计算为两个手指在运动过程中任何一点的相位值之差。

要将第二章中关于相对相位计算的描述应用到这个有节奏的手指运动任务中，请考虑以下几点。对于同相运动，两个手指有一个共同的最大内收起点(即360°)。手指一起移动到最大外展位置(180°)，然后回到最初的最大内收位置。在手指运动的任何时候，它们都有一个360°的相对相位，这表明两个手指处于相同的外展位置。反相模式则相反。在任一点上，一个手指外展的量与另一个手指内收的量相同，这意味着两个手指有180°的相对相位。

考虑这种相位关系的另一种方法是从同时内收和/或外展运动的角度。当彼此同相移动时，两个手指

**稳定**性一个系统的行为稳定状态，它代表了一种优选的行为状态，并包含了不变性的概念，指出一个稳定的系统在受到轻微扰动后会自发地回到稳定状态。

**吸引子**系统的稳定行为稳态。就人类的协调运动而言，吸引子表征了偏好的行为状态，例如节律性双手手指运动的同相和反相状态。

顺序参数定义系统整体行为的功能特定变量；它们能够再现协调的运动模式，并与其他模式(如相对相位)相区别；也称为集体变量。

106 单元二■运动控制简介

同时外展或加合相同的量；当反相移动时，两个手指同时移动相同的量，但是一个是内收，而另一个是外展。

控制参数表示变量，当增加或减少时，将影响顺序参数的稳定性和特性。例如，在凯尔索实验中，运动频率(即速度)是控制参数。随着节拍器系统地增加运动频率，两个手指之间的相位关系发生了明显的变化。也就是说，同相关系在几个频率下保持(即稳定)，但随后随着频率的继续增加而开始不稳定。在中间阶段，既没有同相关系，也没有反相关系。然而，随着频率的不断增加，出现了一个新的反相关系并变得稳定的临界频率。从一种稳定模式到另一种稳定模式的转变称为*相变。*

从实验的角度来看，控制参数的确定很重要，因为它成为评估协调模式稳定性和将协调模式从一种稳定状态转移到另一种稳定状态的基础。从应用的角度来看，控制参数可以提供对人的协调特征的洞察，否则这些特征可能不会被观察到。

范·埃米里克和瓦格纳尔(1996)的一项研究报告了一个医生可以改变控制参数的例子。他们证明，帕金森病患者在跑步机上以逐渐增加的速度(即控制参数)行走时，在适应特定的协调模式方面比健康的年龄匹配的对照组参与者更困难。在这项研究中，感兴趣的相对相位(即顺序参数)是基于行走时手臂和腿摆动之间的关系。研究人员从他们的结果中得出结论，对不同行走速度下手臂和腿摆动的相位关系的稳定性的评估为诊断和检测帕金森病的早期阶段提供了一种敏感的技术。

自组织。动力系统观点的一个重要元素是**自组织**的概念。这意味着，当特定的条件表征一种情况时，一种特定的稳定的行为模式就会出现。物理世界中存在许多自组织的例子，说明了这一概念在人类运动领域的应用。举个例子，宇宙中没有飓风计划，但是飓风是常有的。然而，它们仅在特定的风和水温条件下出现。当这些变量达到一定的特征时，飓风就会以一种可识别的模式自组织起来，这种模式使它区别于热带低气压或任何其他天气系统。

当应用于人类运动协调时，自组织的概念意味着当特定条件表征一种情况时，肢体运动的特定模式出现。因此，协调的运动模式不是由运动程序规定的，而是在环境条件、任务要求和肢体动力学特征的框架内自组织的。例如，在凯尔索实验中执行的双手手指运动任务中，同相协调模式作为运动速度(即控制参数)的函数而自组织。这种相同类型的自组织在从步行到跑步或从跑步到步行的步态转换中可以看到，这种转换随着步态速度的增加或减少而发生，并且随着游泳速度的增加而发生手臂协调性的变化(例如，参见Seifert，Chollet，Bardy，2004)。

**协调结构；肌肉协同动力系统观点的另一个重要方面与被控制的行为单位有关。这一观点的支持者断言，当一个人的神经系统约束功能***特定的肌肉***和***关节***集合协同动作时，熟练的动作就会产生，这样这个人就可以根据情况的要求实现一个动作目标。一个人可以通过实践或经验发展这些绩效协同作用，称为协同结构，或者它们可以自然存在。**

第5章■运动控制理论 107



|  |  |
| --- | --- |
|  | **深度阅读** |
| **大脑活动和协调运动相对时间的证据**  在一次精彩的讨论中，比较和对比- 在低速时，相对时间保持稳定(即运动编程和动力系统 凯尔索(1997)在运动控制的两个视图中处理了各种速度 和异相协调模式。  ou问题与相对时间有关，相对时间是一个关键变量 两种观点都有从异相到同相的自发转变。其中一个问题是 相位协调模式出现了(即一种新的运动控制研究人员一直在努力克服的 自组织的协调模式)在关键的几年里决定着 移动速度。  大脑活动和可观察的表现特征 与运动有关的特征The。一个可能的突破口- 在这场斗争中似乎有可能通过tive 使用脑功能成像技术produced 使研究人员能够观察大脑活动the a motor skill. Kelso stated that an important impli- person engages in performing a motor skill. 这些结果在运动控制理论中的应用 BelowaretwokeyfindingsfromresearchbyKelso 有争议的是，动力系统观点pre和他的同事在其中使用了这项技术 调查相对时间的问题dicts。在这些实验中- 在实验中，参与者进行双手协调view 同相或异相生产的技能would (反相)运动协调模式pendent neous transition from one to the other as movement  nal指定了运动速度，它是系统 speed increased.  急剧增加。 | |

协调结构的一个例子是肌肉和关节(要控制的自由度)，它们参与到达和抓住物体的动作。为了使一个人能够成功地完全触及和抓住一个物体，必须一起行动的肌肉和关节组通过练习被“转换”成一个特定任务的整体。

**控制参数**协调运动控制变量(例如，节奏或速度和力)，这些变量根据动作情况的特征自由变化。在某些条件下，它们可以将系统的行为从一种协调模式转变为另一种协调模式。根据运动控制的动态系统观点，当控制参数系统地变化时(例如，速度从慢到快增加)，顺序参数可以保持稳定或者在控制参数的某个变化水平下改变其稳定状态特性。

**自组织**由于某种情况的特定条件，而不是由于组织行为的特定控制机制，出现特定的稳定行为模式；例如，在物理世界中，当存在特定的风和水温条件时，飓风会自我组织。

**协调结构功能上特定的肌肉和关节集合，受神经系统的约束而协同动作以产生一个动作；有时被称为肌肉或运动协同。**

这里打个比方可能会有帮助。术语“特定任务合奏”可以被认为是类似于演唱组，通常被称为“合奏”，其中许多人演唱特定歌曲的特定部分；所有的单个歌手一起合作(即，协同)来实现特定的目标。类似地，协调结构是肌肉和关节的集合，它们协同工作，使人能够实现特定的行动目标，例如抓住一个物体。

对于运动控制系统，协调结构的存在降低了系统必须控制的自由度。而不是必须控制

108 单元二■运动控制简介



网球击球的协调特征提供了一个良好的协调结构的例子，这是广泛练习的结果。

JUPITERIMAGES/Creatas/Alamy

运动控制系统可以控制一组肌肉和关节，这种自由度由参与执行动作的许多肌肉和关节来表示。从这个意义上说，特定运动的控制系统可以比需要控制的自由度的数量所建议的要简单。对于伸手抓住动作，协调结构的激活开始于当一个人想要伸手抓住一个杯子，并且环境条件规定这个动作应该发生。然后，根据肢体的特点和环境的约束，协调结构自组织地进行动作。协调结构的一个重要行为好处是，即使当作为结构一部分的肌肉或关节不能正常工作时，它们也允许一个人实现一个行动目标。例如，如果你腿上有一个石膏，可以防止膝盖弯曲，你就可以上下楼梯。这是可能的，因为与上下楼梯相关的肌肉和关节集合(即协调结构)中的一些肌肉将以某种方式激活，以补偿由于石膏而不能正常发挥功能的肌肉的参与不足。

考虑这种补偿性活动类似于运动队中发生的情况，其中一名运动员不能发挥出他或她的最佳水平，但该队表现良好，因为运动员“进步”并表现出比他们通常表现更高的水平。

协同结构可以是内在的，也可以通过实践发展。*内在协调*结构涉及行走、跑步和双手协调等动作。当我们执行这些动作时，相关肢体的肌肉和关节有一种自然的趋势，表现出从生命早期起就成为我们表现特征的肢间协调模式。例如，当进行双手协调的技能时，需要同时使用双臂和双手，婴儿(例如，参见科贝塔和泽伦，1996)和成人(例如，参见凯尔索、索萨德和好人，1979)通常表现出相似的自然趋势，即同时在空间和时间上移动手臂和手。这意味着当人们第一次学习执行网球发球时，要求每只手臂同时以不同的方式移动，他们最初的倾向是同时以相同的方式移动手臂。



相比之下，通过练习形成的协调结构成为肌肉和关节的新组合，它们共同作用产生协调模式，从而实现行动目标。刚才所描述的网球发球是一个很好的例子，说明了在广泛的实践中发展起来的一种新的协调结构。另一个例子是由塞弗特，乔莱特和阿拉德(2004)为游泳运动员描述的。随着前爬式游泳运动员获得精英地位，他们开始展示划水速度和长度与呼吸频率的关系，这使他们比技能较低的游泳运动员更成功地适应比赛情况的要求。作为练习不对称双手协调模式的结果，熟练鼓手也发现了协调结构的类似发展(富士，工藤，大坪，小田，2010)。

对于某些技能的学习来说，内在的协调结构会导致最初的表现困难，就像学习一个10分球的发球一样。然而，在克服了这些最初的困难之后，这个人的技能表现将受益于新开发的协调结构，因为它将允许他或她实现一个行动目标，即使在行动中发生一些轻微的干扰。例如，如果一名网球运动员正在发球，在发球过程中，一阵风使球偏离了预定路线，这名运动员可以迅速而容易地调整发球动作，从而成功发球。类似地，如果一个人在人行道上慢跑，并且必须跨过路边，慢跑者可以快速和容易地调整他或她的步态模式的运动特征，以避免绊倒，同时保持慢跑协调模式。

感知与行动耦合。动力系统观点的支持者强调表演者和表演技能的物理环境之间的相互作用。从运动控制的角度来看，这种相互作用涉及感知和运动变量，在试图解释控制运动技能所涉及的机制时，必须考虑这些变量。这个

第5章■运动控制理论 109

动力系统理论提出，这种交互作用，即感知-动作耦合，是解释熟练表现的重要因素。交互的感知部分检测并使用环境中的关键不变信息(例如，直到物体接触人的时间量，反之亦然)；动作部分涉及动作控制特征的设置和调节，这些特征使用户能够实现动作目标(例如，动作的运动学和动力学成分)2。

这种耦合过程中涉及的感知变量的一个例子是希腊字母τ(τ)，它与物体和人的眼睛接触的时间有关。(我们将在第6章和第8章进一步讨论tau。)研究人员已经证明，tau可以指导诸如驾驶汽车、接球、击球、从平台上跳下和进行跳远等动作(李，2009；Lee等人，2009年)。当一个人获得经验时，感知变量与运动的动力相结合，这样就可以根据需要复制和修改一个独特的协调模式。

感知-动作耦合的一些额外例子包括人们用来爬上或越过障碍物、爬楼梯和通过门口的协调模式。研究人员发现，人的路径、楼梯和门洞中的障碍物指定了与尺寸相关的信息，人们根据物体的尺寸和他或她自己的腿长(在障碍物和楼梯的情况下)之间的不变关系来感知这些信息，或者

关于知觉-动作耦合及其在运动技能表现中的应用的精彩讨论，见布埃克、蒙塔涅和劳伦(1999)2。

感知-动作耦合视觉和手或脚的空间和速度协调，使人们能够执行眼-手和眼-脚协调技能；也就是说，物体的视觉感知和肢体运动的协调是实现动作目标所必需的。

110



|  |  |
| --- | --- |
|  | **深度阅读** |
| **运动程序理论和动力系统理论在解释一种行为的运动控制方面有何不同的一个例子:从行走到跑步的步态变化**  人们以一定的运动速度自发地从步行转变为跑步步态模式。尽管个人在这种变化发生的实际速度方面有所不同，但这种变化似乎对所有人都是共同的。运动程序和动力系统理论对为什么会发生这种协调变化的解释是不同的。   * 运动程序理论相对时间结构 在这个速度范围内，协调模式的行走模式区别于其他模式 经历了一些变化，从另一个运行协调通用运动程序。因为 模式自组织，并最终成为步行和跑步步态的特点是 一定速度下步态的稳定吸引子状态。不同的相对时间结构，它们是可控的   通过不同的通用运动程序。这个 **夏皮罗等人(1981)实验解读**  从步行到跑步的步态模式在特定的结果下发生变化(图**5.5)**  速度，因为这个人选择改变 运动程序理论。步态由一个控制行走的程序来控制 行走步态时控制跑步的通用运动程序。 观察到的(3-6公里/小时)和不同的广义   * **动力系统理论:人与身体** 运动程序当观察到跑步步态时，协调模式会根据 (8–12公里/小时)。   特定控制参数值和环境  条件。对于行走和跑步步态模式， 动力系统理论。行走和跑步速度是一个关键的控制参数。从步行到跑步的步态代表两种吸引子状态，这两种状态保持稳定，步态过渡涉及两者之间的竞争 在3-6公里/小时和10-12公里/小时的速度范围内吸引物。在低速时，主要吸引子状态。但是对于7-9千米/小时的步态速度，顺序参数是行走协调模式。但是作为行走 eter在速度增加的过渡期间变得不稳定，在一定的速度范围内，新的步态模式(跑步)自组织，并且该吸引子状态失去稳定性，这意味着在一定的速度范围内变得稳定。 | |



车身尺寸(在车门打开的情况下)。因此，人将基于这种感知的关系跨过或爬过障碍物，选择各种爬楼梯选项中的一种，并根据这种感知的环境特征和他或她自己的与身体尺寸相关的特征之间的关系，侧身或面向前方穿过门口。在感知-行为耦合文献中，人的特征和允许特定行为的环境特征之间的相互匹配，例如楼梯具有允许爬楼梯的物理特征，被称为启示(Gibson，1979)。学习检测影响是运动控制和从这个角度学习的核心。

# 互补理论:运动学习的最优理论

多年来，施密特的图式理论和动力系统理论主导了关于运动学习和运动控制理论的讨论。然后，在2016年，加布里埃尔·伍尔夫和丽贝卡·刘易斯韦特发表了对这些理论的新观点，提出了一些被主流理论忽视的问题，即“(a)提高未来绩效*预期*的条件，

1. 影响学习者自主性的变量
2. *注意力集中在预期的运动效果上”(第1382页)。因此，他们的理论是运动的补充理论*



学习而不是作为图式和动力系统理论的替代理论。沃尔夫和刘易斯韦特称他们的理论为运动学习的“最优”理论。优化是“通过内在学习动机和注意力优化绩效”的缩写沃尔夫和刘易斯韦特指出”。。。不考虑动机(如社会认知和情感)和注意力对行为的影响，就不能理解运动学习”(第1383页)。在接下来的章节中，我们总结了这一理论的主要观点，以描述它与运动学习以及图式理论和动态系统理论的关系。

## 预期提高

伍尔夫和刘易斯韦特将“提高的速度”描述为一个人对未来运动技能学习和表现成功的期望或期待。他们指出“预期的概念。。。参考一系列关于将要发生的事情的前瞻性或预测性认知或信念”(第1383页)。他们认为，通过表达这个概念在运动技能的学习和控制中的重要性，将这个概念纳入图式和动力系统理论将填补这些理论中的空白。在心理学领域，他们指出，预期已经被讨论为与班杜拉(1977)关于自我效能和结果期望概念的工作有关。更具体地说，这些概念涉及通过一个人对能够适应特定表现结果的信心来影响运动技能表现，这通常受该人自身过去表现成功或缺乏成功的影响。此外，伍尔夫和刘易斯韦特描述了与运动技能表现有关的研究，如“压力下的窒息”和“流动状态”，以将他们的增强预期的概念与运动技能的学习和表现联系起来。此外，在图式理论和动力系统理论中，增强反馈在技能学习和绩效中起着重要作用。类似地，在OPTI-马尔理论中，增强反馈被提出来

第5章■运动控制理论 111

提供影响绩效预期的基于绩效的信息。在本书的后面部分(第15章)，你将会学到更多关于增强反馈的概念。

## 自治

人类学习和表现中的“自主”概念是指一个人能够对一种情况进行控制。Wulf和Lewth-waite将这一概念纳入了他们的运动学习理论，他们引用了一项研究，该研究一贯表明，当人们对他们的练习和/或表演环境的某些方面有选择时，他们更愿意表演，并且通常会在这种情况下为他们的表演付出更多的努力。一些例子包括对实践条件的某些特征的控制，例如何时接收增强反馈，或者他们是否可以使用辅助设备来帮助执行平衡任务。沃尔夫和刘易斯韦特描述了能够控制练习条件的学习益处的一些可能的解释。例如，研究人员已经证明，这种控制导致学习者更积极地参与学习过程，促进与实现任务目标相关的信息的更深层次处理，并增加对执行正在练习的任务的兴趣。这些学习益处中的每一个都与图式和动力系统理论对运动学习和运动控制的观点相一致，尽管这些理论没有明确地将“自主性”纳入其理论。

## 关注的外部焦点

最佳理论的第三个主要组成部分是学习者或表演者参与外部注意力焦点的好处。虽然这个

**启示**:一个人的特征和环境特征之间的相互适应，允许特定的行为发生，例如楼梯具有允许爬楼梯的物理特征。

112 单元二■运动控制简介



在线学习中心实验手册中的实验5为您提供了体验随着步态速度的增加而发生的步态协调中自发的非线性变化的机会。

**实验室链接**

主题将在本书的第9章中详细讨论，我们将在这里简要总结它，以显示它与最优理论的关系。注意力的外部焦点是指一个人在执行运动技能时主动监控环境或任务相关的线索，而不是身体相关的线索。例如，如果一个人执行需要最小化的站立平衡任务

移动平台的运动，专注于平台会比专注于保持脚不动带来更好的平衡性能。沃尔夫和刘易斯韦特讨论了这个问题和其他问题，这些问题包含在本书的第九章中。外部注意力集中的主要好处之一是它促进了对技能的无意识或自动控制。

# 控制理论问题的现状

基于运动程序的理论和动态系统理论是目前解决神经系统如何产生协调运动的主要行为理论。科学家们试图回答这个重要的理论问题时，辩论和研究仍在继续。这些理论的支持者之间的辩论的一个好处是，关键问题已经得到澄清，未来的方向更加明显。例如，我们现在知道，控制理论不能只关注中枢神经系统指定的运动信息。理论家还必须考虑任务和环境特征。正如我们在第一章中所讨论的，纽厄尔(1986)指出，协调的最佳模式是由个人、环境和任务指定的约束之间的相互作用决定的。

关于运动控制理论争论的解决方案，众说纷纭。例如，一些研究人员预见到两种理论之间的妥协，这将导致混合理论的发展，该理论结合了每种理论的优点(例如，见阿伯内西&斯派洛，1992；Walter，1998)。Amazeen(2002)报告了一些研究证据，表明可能存在某种妥协。在一系列

她通过实验证明，将动力系统理论的特定方面应用于广义运动程序理论，可以解释与获得节奏双手协调技能相关的表现特征，而这是广义运动程序理论所不能解释的。然而，她留下了一种可能性，即她的结果可以被解释为只支持动力系统理论。

其他人认为混合理论不太可能。例如，阿伯内西和斯派洛(1992)推测不会出现折衷理论，因为这两种理论代表了解释协调运动控制的两种截然不同的方法。他们推断，由于这种差异，科学史将预测一个最终会成为主导理论。凯尔索(1997)表达了类似的观点，但在他的项目中更具体。他认为，因为运动程序观点的许多方面可以包含在动力系统理论中，特别是那些与不变特征和控制参数有关的方面，并且因为动力系统理论可以解释和预测协调运动的更多行为特征，动力系统理论最终将成为主导理论。然而，此时此刻，这种主导地位尚未确立。



**总结**

* 像任何理论一样，运动控制理论为为什么可观察到的现象或行为存在或表现为它们这样提供了一种解释。它也为从业者提供了支持的基础



在此基础上发展有效的运动技能教学和练习环境。

* + 术语协调是指头部、身体和/或肢体运动的模式与环境物体和事件的模式相关。当术语“*协调*”用于指代与技能表现相关联的运动模式时，它指的是技能表现期间特定时间点的头部、身体和/或肢体之间的关系。
  + 对于一个人来说，要学会产生一个很好的协调的运动来达到预期的动作目标，运动控制系统必须解决自由度问题，这涉及到限制肌肉、关节等的许多自由度。运动控制理论应该解释运动控制系统是如何解决这个问题的。
  + 运动控制理论通常包含开环和闭环控制系统的特征。两者都涉及控制中心、信息和效应器。闭环系统还包括作为系统一部分的反馈。在开环系统中，控制中心向效应器发送从头到尾执行一项技能所需的所有运动指令。相反，闭环系统中的控制中心向效应器发送运动指令，使它们能够开始一项技能的表演；来自效应器和其他来源的反馈为控制中心提供了给效应器继续和结束运动的指令所需的信息。
  + 运动控制理论可以根据控制系统的中心部件或环境所指定的信息的相对重要性来区分。突出来自控制中心的信息的理论具有共同的某种形式的存储记忆表示，例如向效应器提供运动指令的运动程序。相比之下，突出由环境指定的信息的理论强调动态性

第5章■运动控制理论 113

这些信息与身体、四肢和神经系统的相互作用。

* 施密特的图式理论是以运动项目为基础的理论中最具代表性的。它提出一个通用的运动程序(GMP)作为控制运动技能表现的中央的、基于记忆的机制。GMP是一类动作的抽象表示，存储在内存中，当需要执行涉及该类动作的技能时，可以检索到该类动作。存储在GMP中的是运动类的不变特征，例如运动事件的顺序和运动组件的相对时间。当要执行特定操作时，必须将特定参数值添加到GMP中；这些包括运动的总持续时间和将要使用的肌肉。
* 动力系统理论不同意运动程序理论对基于记忆的运动技能控制表示的重要性。动力系统理论提出，环境不变量和肢体动力学等因素可以解释许多归因于运动程序的控制。该理论认为协调运动遵循与非线性动力学相关的规则。该理论结合了动态特征，如吸引子状态，这是首选的，稳定的模式，定义了具体的协调模式；有序参数，例如相对相位，其功能性地定义吸引子状态；以及影响吸引子状态的稳定性和不稳定性的控制参数，例如速度或频率。协调运动根据人、环境和要完成的技能之间的相互作用的特点，自组织为协调结构。
* 目前，运动程序和运动控制的动力系统理论都有强有力的支持者。对于如何解决当前的理论争论，意见不一。

114 单元二■运动控制简介

* 在运动障碍人群中观察到的协调特征可能是最佳的，因为



**从业者要点**

* 理论不仅仅是抽象的想法。好的理论为你建立有效的指导和实践环境提供了基础；好的理论也提供了一个基础，当那些计划不成功时，可以创建指导和实践条件的选择。
* 对这两种主要理论的新观点被称为运动学习的最佳理论，这是通过内在动机和学习注意力优化表现的缩写。该理论是运动学习的补充理论，而不是图式理论和动态系统理论的替代理论，它提出了一些被主流理论忽略的问题，即(a)提高对未来表现的*预期*的条件，

(b)影响学习者自主性的变量(c)外部*注意*力集中在预期的运动效果上。当人们第一次尝试执行一项技能时，他们会发展自己的策略来控制四肢、躯干和/或头部协调所涉及的自由度。你应该意识到这些策略，并确定它们是否需要随着练习而改变，以便学习者在初始水平之外提高表现。

* GMP的相对时间不变性和总持续时间参数的可变特性表明，当教授必须以高速执行特定节奏的技能时，应该首先以低速教授该技能的节奏特征。当学习了韵律模式后，就可以提高演奏技巧的速度。
* 您可以通过测试技能的表现特征和可以系统修改的环境特征(如速度或距离)，并观察伴随这些修改的移动变化，来评估功能技能的移动问题和能力。

病理条件和形成技能的环境条件对运动控制系统施加的限制。因此，对协调特性进行调整的尝试可能不会有成效或令人满意。



**相关阅读**

巴顿，S.(1994)。混沌、自组织和心理学。

*美国心理学家，49，5–14。*

Bongaardt，r.，&Meijer，O.G.(2000)。伯恩斯坦的运动行为理论:历史发展与当代关联。*运动行为杂志，32，*57–71。

周，J.Y.，戴维斯，k.，巴顿，c.，舒特尔沃斯，r.，&阿劳霍，

*D. (2007).非线性教学法在体育教学中的作用。教育研究评论，77，251–278。*

克拉克，J.E.(1995年)。关于变得熟练:模式和限制。

*运动与运动研究季刊，66，173–183。D'Andola，m.，Cesqui，b.，Portone，a.，Fernandez，l.，Lac-*

quaniti，f.，d'Avella，A.(2013年)。接球肌肉模式的时空特征。计算神经科学*前沿*，*7*，107:doi:10.3389/fncom

.2013.00107.

戴维斯，k.，伦肖，I.，和格雷泽，P.(2005)。运动模型揭示了协调过程的基本观点。*运动和运动科学评论，*33，36–42。

格里姆，b.，富克斯，s.，巴黎水，p.，和舍纳，G.(2011)。肢体与言语控制:一项概念性综述。*运动控制，15*(1)，5–33。

Holmberg，P.(2015)。经验丰富的运动员的敏捷性训练:动力系统方法。力量和调节杂志，37，93–98。

凯尔索，J.A.S.(2014年)。行动中的动态大脑:协调原生结构、临界性和协调动力学。在

D. Plenz&E.Niebur(编辑。)，*神经系统中的临界性*。德国韦恩海姆:威利-VCH·弗拉格有限公司

克里希那穆提，v.，拉塔什，M.L.，肖尔兹，J.P.，和扎齐奥斯基，

1. M. (2003).站立者转移压力中心时的肌肉协同作用。*实验大脑研究，*152，281–292。

Schwerin，s.，Dewald，J.P.A.，Haztl，m.，Jovanovich，s.，Nickeas，m.，和MacKinnon，C.(2008)。慢性脑卒中患者同侧与对侧皮质运动投射至肩部内收肌:表达的意义



*武装协同。实验大脑研究，185，*

500–519.

萨默斯，J.J.，&Anson，G.(2009)。汽车项目的现状:回顾。*人类运动科学，28*(5)，566–577。

vanEmmerik，R.E.A.，Rosenstein，M.T.，McDermott，W.J.，&Hamill，J.(2004)。人类运动的非线性动力学方法。应用生物力学*杂志*，20，396–420。

华莱士，美国(1996)。韵律运动的动态模式观点:导论。InH.N.Zelaznik(Ed.)，运动*学习*和*控制*的*进展*(第155-194页)。伊利诺伊州香槟:人类动力学。

新泽西州泽拉日尼克(2015年)。运动学习和控制的过去和未来:描述和分析的适当水平是什么？*运动学评论，3*，38–43。



**研究问题**

* 1. 描述一个好的科学理论的两个特征。(像运动控制和学习这样的行为科学中的好理论如何对从业者有用？
  2. 定义术语*协调*，并描述肢体运动位移图如何描绘协调的运动模式。
  3. *自由度问题是什么，因为它与人类运动控制和学习的研究有关？*
  4. 描述闭环控制系统和开环控制系统的异同。对于每一个系统，描述一个可以被描述为具有该类型控制系统的运动技能。

第5章■运动控制理论 115

* 1. 定义一个通用的运动程序，并描述一个不变特征和两个参数，以表征该程序。
  2. 描述一个人类协调运动非线性变化的例子。
  3. 定义并举例说明运动控制动力系统理论中使用的以下关键术语:(a)稳定性；(b)吸引物；(c)订单参数；(d)控制参数；(e)协调结构；和(f)自组织。
  4. 讨论人类行走和跑步步态的相对时间特征是如何通过(a)基于运动程序的理论和

动力系统理论。

* 1. 讨论最优理论如何看待(a)提高对未来绩效成功的预期，以及(b)外部注意力的集中会影响运动技能的学习。

**具体应用问题:**

1. 你在你选择的职业中工作。描述一项运动*技能*，与你一起工作的人需要这项技能来提高他们的表现能力。
2. 请描述您将如何应用基于运动程序的理论和动力系统理论中的概念来帮助您识别一个人目前存在的以及需要改进的性能问题。