

# 从自然科学到工程科学的对称性本体论研究<sup>\*</sup>

冯培恩 马志勇 邱清盈<sup>\*\*</sup> 沈萌红 曾令斌

浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 杭州 310027

**摘要** 研究对称性在自然科学和工程科学中的共性, 有助于工程师借鉴自然系统, 优化工程系统. 以生物学和物理学为例, 建立了对称性在自然科学中的本体论框架, 在此基础上提出一般系统的对称性本体框架. 接着对比研究了对称性在机械工程科学中的本体体系, 并发现自然科学与工程科学的对称性本体论具有基本一致性. 在这一本体论中, 提出自然和工程系统中普遍存在功能对称性、原理对称性及时间对称性, 同时对空间对称性给出了比较系统完整的分类. 进而指出: 对称性在自然和工程系统中的存在模式具有层次结构性、相关性、多体性、多元性、多维性和组合性等共性特征. 最后简要论及在自然和工程系统中对称性缺失的普遍存在及其与对称性存在的互补作用, 并展望了研究前景.

**关键词** 对称性本体 生物对称性 物理对称性 机械对称性 对称性缺失

对称性广泛地存在于自然系统和人工系统中, 无论是日夜交替、山体和雪花, 还是建筑物和机械装备等都呈现出千姿百态的对称现象. 众多的自然现象和人造物呈现出来的对称性既有丰富多彩的一面, 也有共性的一面. 对称性存在于万物之中, 是外界与对称性主体, 也即对称性载体之间相互适应和相互作用的结果, 也是相互依存的需要. 从系统工程学的角度考察, 对称性是对称性主体在外界环境和条件的制约下实现其对外界的作用或功能的一种特征手段. 现实世界中的对称性是一种具体存在, 具有多样性, 变化性, 且有各自的属性.

本体论属于哲学范畴, 探求存在的存在, 是关于“存在”的科学. 对称性本体是关于这些具体存在的抽象存在. 研究对称性本体就是要从整体上和本质上了解具体存在的对称性. 用对称性本体可以描述定义范围内所有对称性的具体存在, 它们的概念及其唯一的、不变的, 且具有分类的和共同的属性. 对称性本体论的建立将有助于人们认识各领域对称性的存在和作用规律, 特别有助于人们运用自

然系统的对称性规律来优化工程系统的品质, 乃至创造新的工程系统, 实现其预见的新的功能.

**定义 1** 功能是系统(包括生物和非生物系统, 自然和工程系统)对外界的作用, 通过系统的输入和输出来表达; 原理是以广义物理、化学效应为核心, 实现功能的手段, 是物质性功能载体的概念模型.

## 1 自然科学中对称性的本体表达

本文首先以生物学和物理学为例, 尝试对自然科学中的生物和非生物两大类研究对象的对称性进行本体表达.

### 1.1 生物对称性的本体表达

生物对称性包括生物体结构、原理和功能的对称性. 关于生物对称性的研究至今集中于空间对称性, 且以两侧对称(镜射对称)<sup>[1,2]</sup>、辐射对称(旋转对称)<sup>[2,3]</sup>和平移对称<sup>[4]</sup>为主, 也有涉及标度平移对称和螺旋对称的研究<sup>[4]</sup>. 关于时间对称性、原理对

2008-01-19 收稿, 2008-05-22 收修改稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(批准号: 50675196)

<sup>\*\*</sup> 通信作者, E-mail: medesign@zju.edu.cn

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

称性和功能对称性的研究此前尚未见报道。

定义 2 生物对称性本体  $S_b = \langle C_b, CA_b, E_b, EA_b, R_b \rangle$ , 其中  $C_b$  为生物对称性的概念集,  $CA_b$  为生物对称性概念的属性集,  $E_b$  为生物对称性的实例集,  $EA_b$  为生物对称性实例的属性集,  $R_b$  为生物

对称性的关系集。

生物对称性的概念集  $C_b = \langle C_s, C_{pi}, C_f \rangle$ , 是具有层次和结构性的概念体系, 如图 1 所示. 第一次由时空对称性  $C_s$ 、原理对称性  $C_{pi}$  和功能对称性  $C_f$  组成。

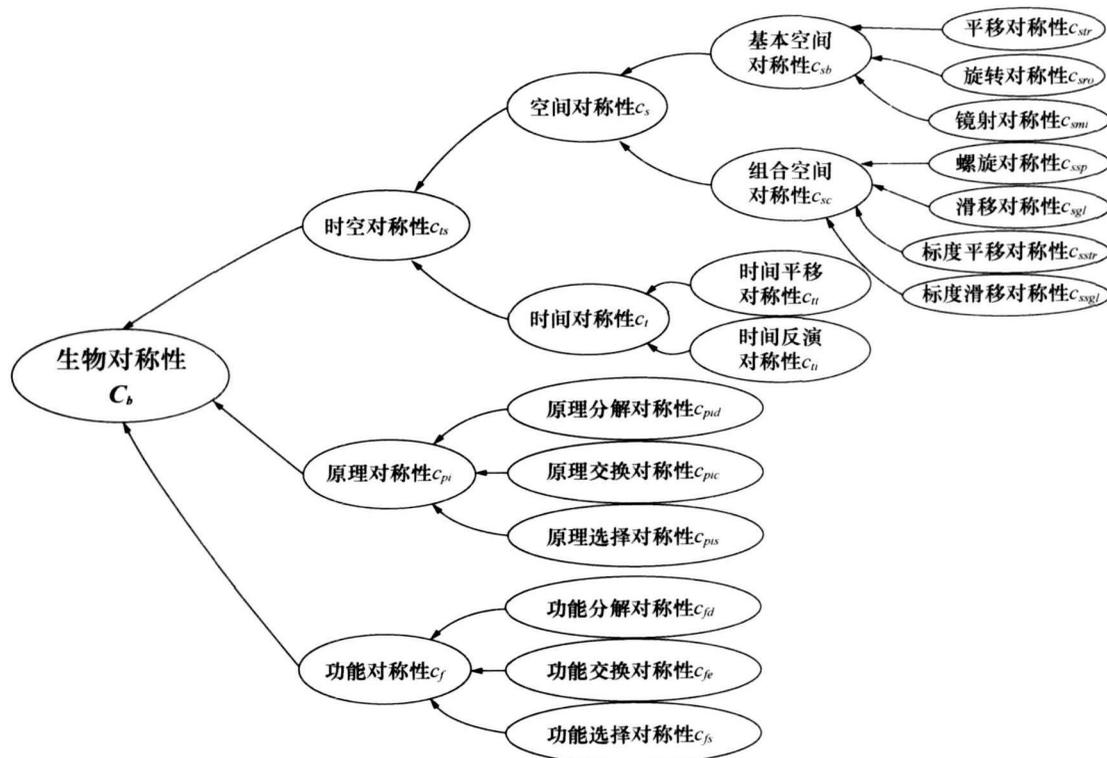


图 1 生物对称性概念集的元素及层次关系

时空对称性  $C_s = \langle C_s, C_t \rangle$ , 其中  $C_s$  是空间对称性, 空间对称性也称结构对称性. 如果生物体中结构规则有序地分布, 以至能用某种方式将生物体分割为多个结构类似的部分, 那么该生物具有空间对称性<sup>[5]</sup>.  $C_s = \langle C_{sb}, C_{sc} \rangle$ ,  $C_{sb}$  是基本空间对称性,  $C_{sb} = \langle C_{str}, C_{sro}, C_{smi} \rangle$ <sup>[1, 3, 4]</sup>,  $C_{sc}$  是组合空间对称性,  $C_{sc} = \langle C_{ssp}, C_{sgl}, C_{sstr}, C_{svgl} \rangle$ <sup>[1, 3, 4]</sup>.  $C_t$  是时间对称性, 如果生物体结构或组元具有随时间规律变化的过程, 那么该生物具有时间对称性,  $C_t = \langle C_{tt}, C_{ti} \rangle$ . 以上各子项含义见图 1.

如果一个生物体具有多个或多种能实现同样功能的原理, 那么该生物体具有原理对称性. 原理对称性  $C_{pi} = \langle C_{pid}, C_{pie}, C_{pis} \rangle$ , 其中  $C_{pid}$  是原理分解对称性,  $C_{pie}$  是原理交换对称性,  $C_{pis}$  是原理选择对称

性. 如果一个生物体具有多种或多个技术性功能, 且这些功能等价地实现了同样的上层直接作用功能, 那么该生物体具有功能对称性. 功能对称性  $C_f = \langle C_{fd}, C_{fe}, C_{fs} \rangle$ , 其中  $C_{fd}$  是功能分解对称性,  $C_{fe}$  是功能交换对称性,  $C_{fs}$  是功能选择对称性. 例如青蛙在水中呼吸与水外(空气中)呼吸相对于青蛙呼吸功能具有多个功能串行分解对称性, 青蛙在水中只通过皮肤呼吸, 青蛙在水外既通过肺呼吸, 又通过皮肤呼吸, 因此这两种呼吸原理对于青蛙的水外呼吸功能具有多种原理并行分解对称性.

关于生物的时间对称性  $C_t$ 、原理对称性  $C_{pi}$  和功能对称性  $C_f$  的研究至今未见文献报道, 作者将通过另文做进一步讨论.

生物对称性概念的属性集  $CA_b = \langle CA_{mb}, CA_o, CA_{mb}, CA_o \rangle$

$ca_i, ca_f$ ), 包含了生物对称性概念集中所有概念的属性元素. 其中:  $ca^{mb}$ —生物对称性概念的对称主体, 包括生物体整体或者部分的结构、原理或者功能;  $ca_o$ —生物对称性概念的对称操作, 每一种生物对称性概念都对应于一个对称操作, 例如平移对称性的对称性操作是平移操作, 镜射对称性的对称性操作是镜射操作;  $ca_i$ —生物对称性概念的对称组元, 对称性的组元至少在两个或以上, 组元可以相同也可以不同;  $ca_f$ —生物对称性概念的效能, 即对称性对于生物及其进化的作用, 例如左右对称的结构有利于陆上动物快速直行、越对称的个体越能吸引异性, 有利于繁殖等<sup>[1]</sup>.

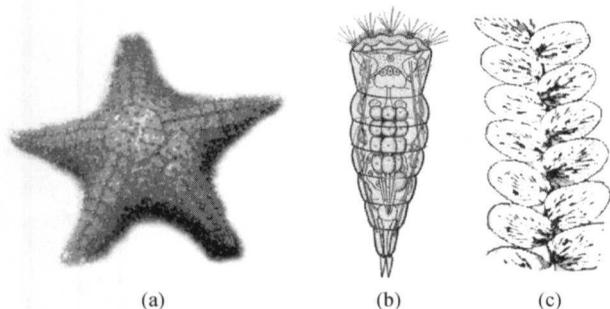


图 2 具有结构对称性的生物实例<sup>[4]</sup>

(a) 海星; (b) 水轮虫; (c) 树叶

生物对称性的实例集  $E_b$  包括了所有具有对称性的生物体整体及其部分, 例如图 2 中的海星具有旋转对称性, 水轮虫具有标度平移对称性, 树叶具有滑移对称性. 生物体的周期率是时间对称性的一种体现, 例如生物的生老病死、世代繁衍. 蛇赖以生存的重要功能之一是发现猎物; 在距离猎物较远时, 主要通过舌头感知捕捉猎物留下的气味分子的浓度分布及变化来判定猎物的去向; 在距离猎物较近时, 主要通过嘴上方颊窝里的热感受器感知猎物辐射的红外信号来发现并精确定位猎物. 对于发现猎物这个上位功能, 蛇的这两种不同的具体识别功能及其相应的实现原理具有选择对称性. 蝴蝶头上的一对复眼, 由数千只小眼合成, 每只小眼的功能种类和原理相同, 虽然单个小眼的视野很小, 但组合起来便具有很大的视野. 这些小眼的视觉功能和原理对于构成蝴蝶的整体视觉功能具有多个(而不是多种)功能和原理的并行分解对称性.

生物对称性实例的属性集  $EAb = \langle ea^{mb}, ea_o, ea_i, ea_f \rangle$ , 是生物对称性实例的具体描述. 其中:  $ea^{mb}$ —生物对称性实例的对称主体;  $ea_o$ —生物对称性实例的对称操作;  $ea_i$ —生物对称性实例的对称类型, 一个复杂的对称性实例可能包含了多个层次、多个种类的生物对称性;  $ea_f$ —生物对称性实例的对称组元;  $ea_f$ —生物对称性实例的对称效能.

生物对称性的关系集  $R_b$  描述了生物对称性本体各元素( $C_b, CA_b, E_b, EA_b$ )内部及各元素之间的关系, 主要包括:

——生物对称性的概念集  $C_b$  中的元素之间的层次关系、组合关系等, 例如平移对称性是空间对称性的子概念, 它和镜射对称性的组合形成了滑移对称性.

——生物对称性的实例集  $E_b$  中的元素之间的层次关系、组合关系等, 在生物对称性概念体系之下, 生物对称性的实例体系也是一个具有层次和组合关系的体系.

——生物对称性的概念集  $C_b$  中的元素向生物对称性概念的属性集  $CA_b$  的映射关系, 生物对称性的实例集  $E_b$  中的元素向生物对称性实例的属性集  $EA_b$  的映射关系, 它们是多对多的网状映射关系.

——生物对称性的概念集  $C_b$  中的元素和生物对称性的实例集  $E_b$  中的元素之间的映射关系, 这也是一种多对多的网状映射关系.

生物对称性从最初的简单辐射对称形式, 到两侧对称的出现, 直至平移对称、螺旋对称等的出现, 是伴随着生物体的进化而发展的, 至今呈现出广泛化、多样化的趋势<sup>[4]</sup>. 生物对称性的发展在某程度上体现了生物进化的方向和规律<sup>[1,4]</sup>.

## 1.2 物理对称性的本体表达

物理对称性指的是物理系统, 包括物理对象和现象的对称性, 在物理学中被定义为在一组物理对象或现象变化中的不变性, 是一个物理系统或其某部分的规律性重复<sup>[6]</sup>. 从宏观到微观、从具体到抽象, 对称性在物理学中的研究起着重要的作用. 本文首次把原理和功能对称性概念引入物理对称性本体中, 扩展了现有物理对称性研究范围.

定义 3 物理对称性本体  $S_p = \langle C_p, CA_p, E_p,$

$EA_p, R_p$ ), 其中  $C_p$  为物理对称性的概念集,  $CA_p$  为物理对称性概念的属性集,  $E_p$  为物理对称性的实例集,  $EA_p$  为物理对称性实例的属性集,  $R_p$  为物理对称性的关系集.

例集,  $EA_p$  为物理对称性实例的属性集,  $R_p$  为物理对称性的关系集.

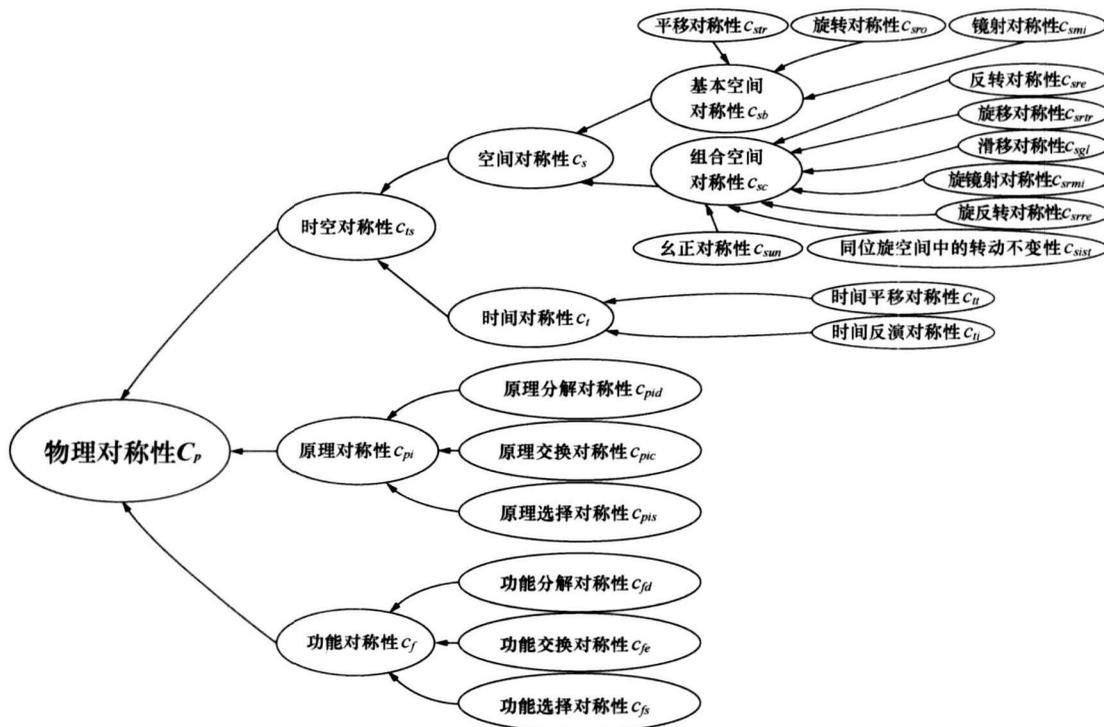


图 3 物理对称性概念集的元素及层次关系

物理对称性的概念集  $C_p = \langle C_s, C_{pi}, C_f \rangle$ , 第一层次由时空对称性  $C_{ts}$ 、原理对称性  $C_{pi}$  和功能对称性  $C_f$  组成. 第二层次中, 时空对称性  $C_s = \langle C_s, C_t \rangle$ , 其中空间对称性  $C_s = \langle C_{sb}, C_{sc} \rangle$ ,  $C_{sb}$  是基本空间对称性,  $C_{sb} = \langle C_{str}, C_{sro}, C_{smi} \rangle$ <sup>[7, 8]</sup>,  $C_{sc}$  是组合空间对称性,  $C_s = \langle C_{sre}, C_{str}, C_{sgl}, C_{srmi}, C_{srr}, C_{stir}, C_{stir} \rangle$ <sup>[7, 8]</sup>, 时间对称性  $C_t = \langle C_{ti}, C_{ti} \rangle$ <sup>[7, 9]</sup>. 原理对称性  $C_{pi} = \langle C_{pid}, C_{pic}, C_{pis} \rangle$ , 功能对称性  $C_f = \langle C_{fd}, C_{fe}, C_{fs} \rangle$ ,  $C_{pi}$  和  $C_f$  的研究尚待深入. 如图 3 所示. 在物理对称性中, 常见的对称性还包括正反粒子变换不变性、Lorentz 不变性、CP 联合反演不变性以及 G 变换不变性等<sup>[7, 10, 11]</sup>, 这些对称性都是组合对称性, 由概念集中的基本对称性组合而成.

物理对称性的实例集  $E_p$  包括了所有具有对称性的具体或者抽象的物理现象、物理规律等. 例如: 晶体(图 4)具有空间对称性; 自然现象中的昼夜更替、四季轮回, 太阳黑子以 11 a 为周期爆发一次都具有时间平移对称性; 在单摆的摆动过程中, 如果将时间  $t$  以  $-t$  替换, 其摆动过程不变, 这说明单摆的摆动过程具有时间反演对称性. 自然界常见的风化作用(功能)可以有多种功能及原理实现<sup>[12]</sup>: 一种是热力风化作用, 岩石为热的不良导体, 白天晚上温度不同, 导致岩石内部各处温度的差异, 热膨胀程度各不相同, 从而在岩石内部产生张力, 进而开裂; 另一种是冰劈作用, 岩石孔隙中的水结冰膨胀后体积增加撑裂岩石; 第三种是盐分结晶的撑裂作用, 当岩石中的水溶解了大量盐类时, 一旦水分蒸发, 浓度逐渐达到饱和, 盐类再结晶, 体积增大, 从而产生很大的膨胀力而撑裂岩石; 第四种是岩石卸荷而引起的剥离作用, 上覆岩石剥去后, 压力减低, 下伏岩石膨胀产生层裂, 根据不同地区和

物理对称性概念的属性集  $CA_p = \langle ca_{mb}, ca_o, ca_i, ca_f \rangle$ , 包含了物理对称性概念的属性元素,  $ca_{mb}$ —物理对称性概念的对称主体,  $ca_o$ —物理对称性概念的对称操作,  $ca_i$ —物理对称性概念的对称组元,  $ca_f$ —物理对称性概念的对称效能.

不同时代具体自然条件的不同, 这些功能及其原理对于物理风化功能具有功能和(或)原理的对称性. 并需根据具体情况确定是分解、交换还是选择对称性, 或者是其组合的对称性.

物理对称性实例的属性集  $EA_p = \langle ea_{mb}, ea_o, ea_t, ea_l, ea_f \rangle$ , 是物理对称性实例的具体描述,  $ea_{mb}$ —物理对称性实例的对称主体,  $ea_o$ —物理对称性实例的对称操作,  $ea_t$ —物理对称性实例的对称类型,  $ea_l$ —物理对称性实例的对称组元,  $ea_f$ —物理对称性实例的对称效能.

物理对称性的关系集  $R_p$  是建立在域  $\langle C_p, CA_p, E_p, EA_p \rangle$  上的关系集, 描述了各元素内部及各元素之间的关系.

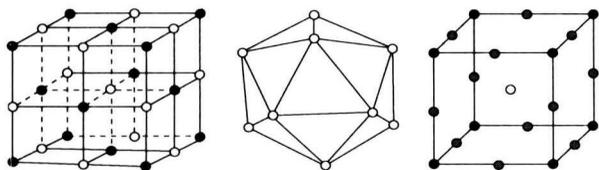


图 4 具有结构对称性的晶体<sup>[8]</sup>

对称性分析是物理学研究的重要方法, 对称性原理指导着物理学研究的进展. 在宏观物理中, 时间和空间的对称性与守恒律紧密联系, 通过对系统的对称性进行分析可以得到系统的守恒量<sup>[13]</sup>. 在微观物理(量子力学和粒子物理)中, 利用对称性原理和对称性分析可以研究粒子的行为和运动规律, 唯象地构造出系统的拉氏量形式<sup>[11]</sup>.

## 2 一般对称性的本体论

不同领域的对称性因主体不同而会各有特性, 但是这些具体的对称性同时拥有基本的共性. 提炼生物对称性和物理对称性的共性, 可得到对称性的一般定义如下.

定义 4 对称性是主体在变化下保持不变的性质. 主体的这种变化可能是自身具有的, 也可能是外界赋予的. 对称性必须依附于主体而存在, 定义中所涉及的主体本身也是一个本体承载, 是世间万物的抽象存在.

对称性本体是所有对称性具体存在的描述, 包含了所有对称性具体存在的概念、属性和关系等. 对称性本体是一个跨学科、多领域、且具有层次性

的概念, 并包含着不同领域之间以及同一领域内不同对称性之间的关联. 作者提出对称性本体的定义如下.

定义 5 定义一般对称性本体  $S = \langle F, D, R_F \rangle$ , 其中  $F$  为对称性领域,  $D$  为对称性领域  $F$  内的对称性描述,  $R_F$  为不同领域对称性之间的关系. 不同领域内的对称性之间既有区别又有联系, 既有共性又有异性.

定义对称性领域  $F = \langle f_n, f_e \rangle$ , 其中  $f_n$ —自然科学领域, 例如生物学、物理学等领域;  $f_e$ —工程科学领域, 例如建筑工程、机械工程等领域. 对称性在人文科学和社会科学领域也有体现, 暂不在本文讨论范围.

定义对称性领域  $F$  内的对称性描述  $D = \langle C, CA, E, EA, R \rangle$ , 其中  $C$ —对称性概念集,  $CA$ —对称性概念的属性集,  $E$ —对称性实例集,  $EA$ —对称性实例的属性集,  $R$ —建立在域  $F$  内的对称性的关系集.

一般对称性概念应具有较强的跨学科普适性, 因此其层次结构会停留在较抽象的层面上. 如图 5 所示, 定义  $C = \langle C_s, C_{pi}, C_f \rangle$ , 其中时空对称性  $C_s = \langle C_t, C_l \rangle$ , 空间对称性  $C_s = \langle C_b, C_x \rangle$ , 由基本空间对称性  $C_b$  和组合空间对称性  $C_x$  组成. 组合空间对称性由多种或多个基本空间对称性组合而成. 时间对称性  $C_t = \langle C_{ti}, C_{tl} \rangle$ ;  $C_{pi}$ —原理对称性,  $C_{pi} = \langle C_{pid}, C_{pie}, C_{pis} \rangle$ ;  $C_f$ —功能对称性,  $C_f = \langle C_{fd}, C_{fe}, C_{fs} \rangle$ .  $C_t$ 、 $C_{pi}$  和  $C_f$  都与其对称性领域密切相关, 但依然有共性.

以上对称性及对称性本体的定义和描述概括了现实世界中若干领域对称性的存在, 揭示了对称性存在的本质属性, 及其主体在变化中保持不变的性质. 对具体的对称性存在, “主体”描述了其所在的领域, “变化”描述了对称性的类型、特性和关系, “不变性”则始终是对称性存在的基础.

## 3 机械对称性的本体表达

与机械出现同时, 对称性就存在于几乎所有机械中, 并起着重要的作用. 但是至今仅见德国 Barrenscheen 在其 1990 年的博士论文<sup>[14]</sup>中初步论及空间对称性在机械中应用的若干类型、效果和方法, 此后未见这一工作的继续报道.

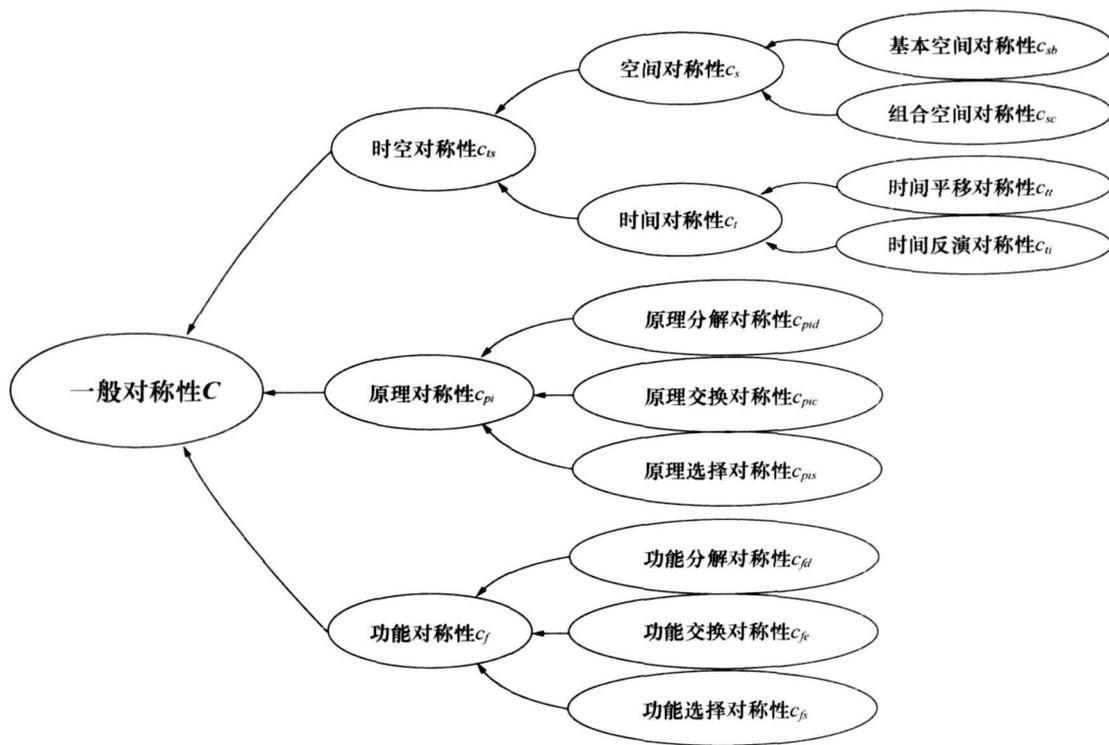


图 5 一般对称性概念集的元素及层次关系

本文通过对自然科学中生物和物理对称性分析建立起一般对称性本体结构体系, 在此基础上系统分析机械工程中对称性的存在和作用, 创建了机械工程对称性的本体体系结构。

定义 6 机械对称性指的是机械系统多个组元有规律的重复, 描述了系统相似的规律. 所谓机械系统“组元”包括机械系统的结构、过程、原理和功能四个层次元素. 机械对称性包括两个或两个以上的对称组元, 具有某种重复的规律. 定义机械对称性本体为  $S_m = \langle C_m, CA_m, E_m, EA_m, R_m \rangle$ , 其中  $C_m$  为机械对称性概念集,  $CA_m$  为机械对称性概念的属性集,  $E_m$  为机械对称性的实例集,  $EA_m$  为机械对称性实例的属性集,  $R_m$  为机械对称性的关系集.

### 3.1 机械对称性概念集 $C_m$

机械对称性的概念集  $C_m = \langle C_{ts}, C_{pi}, C_f \rangle$  是一个层次性概念体系, 组成如图 6 所示.

其中时空对称性  $C_{ts} = \langle C_s, C_t \rangle$ . 如果机械系统具有两个或两个以上空间结构相同的部分, 且其空

间位置以一定的规律或规则有序分布, 其几何大小不变或以一定的规律或规则有序变化, 那么该系统具有空间对称性  $C_s$ , 体现为结构对称性或几何对称性. 如果空间位置有序分布, 且几何大小有序变化, 可以用某种数学公式来描述, 则至少具有标度对称性<sup>[15]</sup>. 空间对称性  $C_s = \langle C_b, C_x \rangle$ , 其中基本结构对称性  $C_b = \langle C_{str}, C_{sro}, C_{smi}, C_{ssc} \rangle$ , 组合结构对称性  $C_x$  由基本结构对称性组合而成,  $C_x = \langle C_{str}, C_{sgl}, C_{sre}, C_{smi}, C_{sre}, C_{str}, C_{sro}, C_{smi}, C_{sgl}, C_{sre}, C_{str} \rangle$ . 如果机械系统的单个或多个组元具有规律性随时间变化的过程, 那么该系统具有时间对称性  $C_t$ , 体现为过程对称性或运动对称性.  $C_t = \langle C_{tt}, C_{ti} \rangle$ , 其中:  $C_{tt}$  — 过程平移对称性,  $C_{ti}$  — 过程反演对称性.

$C_{pi}$  是原理对称性. 如果机械系统具有多个或多种原理, 且其都实现同一种功能, 那么该系统具有原理对称性,  $C_{pi} = \langle C_{pid}, C_{pie}, C_{pis} \rangle$ . 其中  $C_{pid}$  是原理分解对称性, 有多种方式, 当有一种原理在某机械系统中被异地并行应用或同地串行应用, 以实现同样的功能时, 则该系统存在原理的分解对称性  $C_{pid}$ . 当有两种及两种以上原理在一个机械系统中异地并

行应用或同地串行应用, 并实现同样的功能时, 则该系统存在原理交换对称性  $C_{pie}$ . 当有两种及两种以上原理在一个机械系统中实现同样的功能, 但同

一时间只有一种原理应用时, 则该系统存在原理选择对称性  $C_{pis}$ .

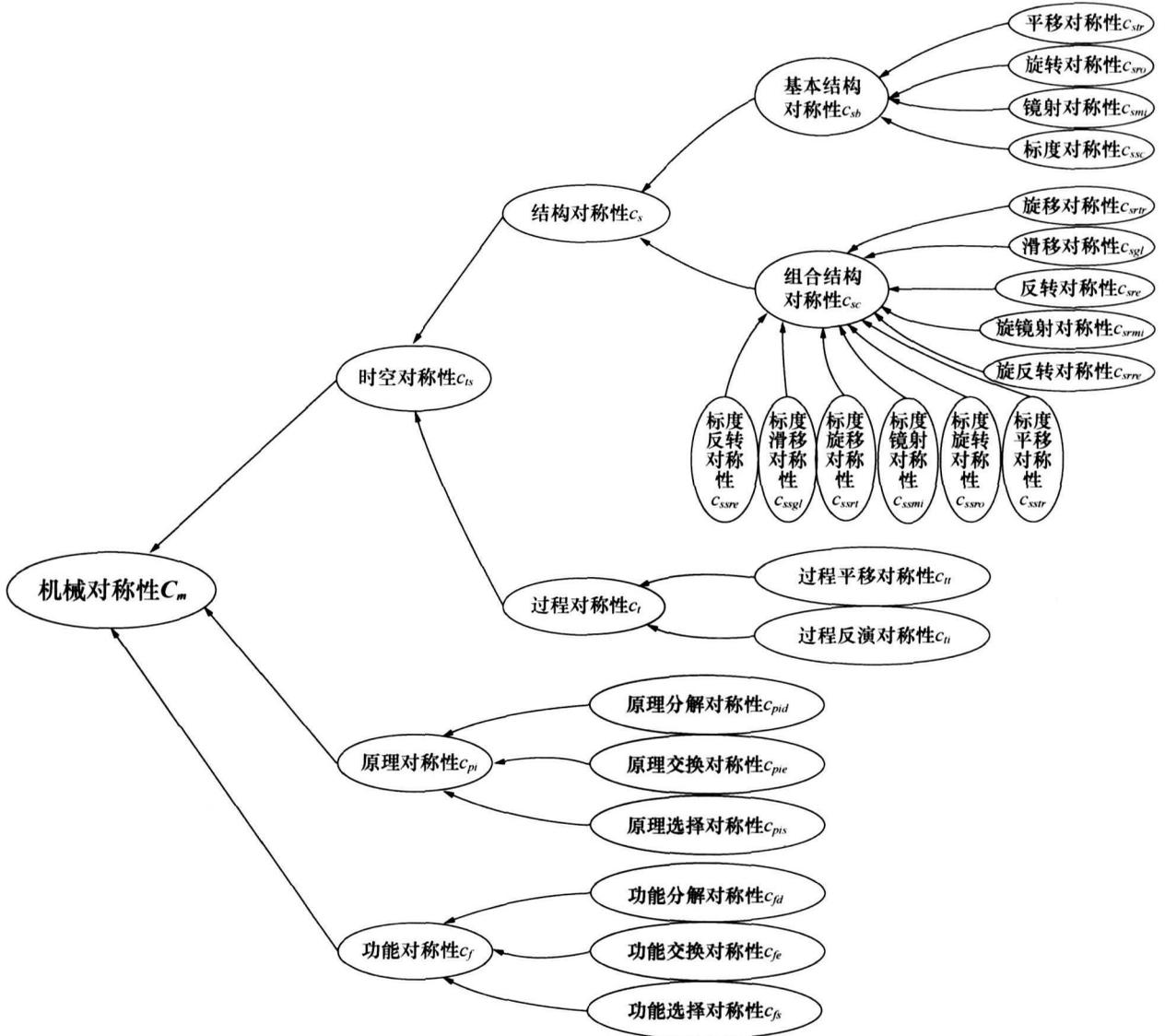


图 6 机械对称性概念集的元素及层次关系

$C_f$  是功能对称性. 如果机械系统具有多种功能, 且这些功能都等价的实现了一个上层功能, 那么该系统具有功能对称性,  $C_f = \langle C_{fid}, C_{ffe}, C_{ffs} \rangle$ . 其中  $C_{fid}$  是功能分解对称性, 同样也有多种分解方式;  $C_{ffe}$  是功能交换对称性;  $C_{ffs}$  是功能选择对称性.

### 3.2 机械对称性概念属性集 $CA_m$

机械对称性概念属性集是机械对称性各种概念的具体描述,  $CA_m = \langle CA_{mb}, CA_b, CA_o, CA_{dn}, CA_{ax},$

$CA_{mt}, CA_n, CA_{df}, CA_{dp}, CA_{ds}, CA_c, CA_{th}, CA_p, CA_f \rangle$ , 其中:  $CA_{mb}$ —对称主体;  $CA_b$ —对称层次, 分为结构层、过程层、原理层和功能层四个层次;  $CA_o$ —对称操作, 与对称性紧密相连, 每一种对称性都对应着一种对称性操作;  $CA_{dn}$ —对称结构的维度;  $CA_{ax}$ —对称结构的对称轴或对称面;  $CA_{mt}$ —对称性的数学描述;  $CA_n$ —对称组元数量;  $CA_{df}$ —对称组元功能的异同;  $CA_{dp}$ —对称组元原理的异同;  $CA_{ds}$ —对称组元结

构的异同;  $ca_c$ —对称性的组合性质, 包括常用的可组合对称性以及不可组合的互斥的对称性等;  $ca_{th}$ —对称设计原理;  $ca_p$ —对称设计准则;  $ca_f$ —对称性作用, 从高层次上可以分为经济性、技术性和社会性三方面作用。

以平移对称性  $C_{str}$  为例:  $C_{str}$  的属性  $CA_{m(cstr)}$  中, 对称主体  $CA_{mb(cstr)}$  是机械的几何结构, 其对称层次  $CA_{b(cstr)}$  是结构层; 对称操作  $CA_{o(cstr)}$  是平移操作; 对称维度  $CA_{dn(cstr)}$  为一维; 对称性数学描述  $CA_{mt(cstr)}$  为  $x_n = x_1 + n \cdot d$ ; 对称组元数量  $CA_{n(cstr)}$  为 3 个及以上; 对称组元异同  $CA_{ds(cstr)}$  为相同; 对称性的组合性质  $CA_{c(cstr)}$ : 平移对称性  $C_{str}$  可与结构对称性中的多种对称性组合, 如旋转对称性  $C_{sro}$ 、镜射对称性  $C_{smi}$ 、反转对称性  $C_{sre}$  等。

### 3.3 机械对称性实例集 $E_m$

机械对称性实例集包括所有具有对称性的机械

系统及组元,  $E_m = \langle e_1, e_2, e_3 \dots e_n \rangle$ , 依据机械对称性概念集  $C_m$ ,  $E_m$  也是一个层次性的体系, 其元素可以是一个大型复杂的机械系统, 比如汽车、飞机、工程机械等, 也可以是一个小型简单的标准件, 比如螺丝、螺母、弹簧等。图 7 是一个平行四边形铰链机构的多次重复机构的机构简图, 记做  $E_{plgm}$ 。

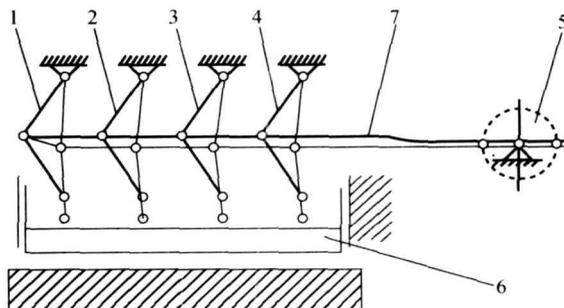


图 7 平行四边形铰链机构的多次重复机构<sup>[16]</sup>

表 1 实例  $E_{plgm}$  的属性矩阵

$ea_t$	$ea_{mb}$	$ea_b$	$ea_o$	$ea_n$	$ea_d$	$ea_c$	$ea_{th}$	$ea_p$	$ea_f$
1 功能分解对称性 $C_{fd}$	4 个铰链	功能层	并行分解	4 个	相同	—	—	—	采用 4 个功能和结构相同的铰链可以得到增强压力的作用, 提高了机构的技术性
2 原理解析对称性 $C_{pid}$	4 个铰链	原理层	并行分解	4 个	相同	—	—	—	—
3 平移对称性 $C_{str}$	4 个铰链	结构层	平移操作	4 个	相同	4 个镜射对称的铰链组成平移对称的结构	—	—	—
4 镜射对称性 $C_{smi}$	单个铰链	结构层	镜射操作	—	—	—	—	—	铰链的镜射对称结构和转轮的旋转对称结构使得压板 6 能够循环的进行上下运动
5 旋转对称性 $C_{sro}$	转轮	结构层	旋转操作	—	—	—	—	—	—
6 过程平移对称性 $C_{rt}$	连杆 7	过程层	—	—	—	—	—	—	—
7 过程平移对称性 $C_{rt}$	单个铰链	过程层	—	—	—	—	—	—	—
8 过程平移对称性 $C_{rt}$	4 个铰链	过程层	—	4 个	相同	—	—	—	—

### 3.4 机械对称性实例属性集 $EA_m$

机械对称性实例的属性集  $EA_m$  是对机械对称性实例集  $E_m$  的具体描述.  $EA_m$  可以用一个二维矩阵来描述, 矩阵的行元素是实例的对称类型  $ea_t$ , 列元素包括  $\{ea_{mb}, ea_b, ea_o, ea_n, ea_d, ea_{df}, ea_{dp}, ea_{ds}, ea_c, ea_{th}, ea_p, ea_f\}$ , 其中:  $ea_{mb}$ —对称主体;  $ea_b$ —对称层次, 包括功能、原理、结构和过程四个

层次;  $ea_o$ —对称操作, 对应不同的对称主体有不同的操作类型;  $ea_n$ —对称组元数量;  $ea_{df}$ —对称组元功能的异同;  $ea_{dp}$ —对称组元原理的异同;  $ea_{ds}$ —对称组元结构的异同;  $ea_c$ —实例的对称性的组合性质. 复杂的实例可能包含了多种对称性, 并且这些对称性可能是一种有层次性的组合;  $ea_{th}$ —对称设计原理;  $ea_p$ —对称设计准则;  $ea_f$ —对称作用, 同

样可分为经济性、技术性和社会性作用等。以实例  $E_{pkm}$  为例，其实例属性  $EA_m(\varphi l g m)$  矩阵如表 1 所示。

### 3.5 机械对称性的关系集 $R_m$

机械对称性的关系集  $R_m$  描述了机械对称性本体各元素  $C_m, CA_m, E_m, EA_m$  内部及元素之间的相互关系。

机械对称性概念集  $C_m$  内部同种类别的元素之间有两种关系：等于 (equal to) 和属于 (is a)。如果概念  $c_1$  和  $c_2$  的定义完全相同，则称  $c_1$  和  $c_2$  是等于的关系，记做  $c_1 \equiv c_2$ 。如果概念  $c_1$  是  $c_2$  的子概念，则称  $c_1$  和  $c_2$  是属于的关系，记做  $c_1 \subseteq c_2$ ，如  $C_{p\alpha p} \subseteq C_{p\alpha}$ ,  $C_{sr} \subseteq C_s$ ,  $C_{ve} \subseteq C_s$ 。

机械对称性概念集  $C_m$  内部不同类别的元素之间具有映射 (mapped) 的关系。结构对称性  $c_s$  的概念元素  $c_{sn}$ 、过程对称性  $c_t$  的概念元素  $c_{tn}$ 、原理对称性  $c_{pi}$  的概念元素  $c_{pin}$  以及功能对称性  $c_f$  的概念元素  $c_{fn}$  之间都具有多对多的双向映射关系。

机械对称性概念属性集  $CA_m$  中的元素是对机械对称性概念集  $C_m$  中元素的细化描述， $C_m$  和  $CA_m$  的元素之间是多对多的单向映射关系；同样，机械对称性实例属性集  $EA_m$  中的元素是对机械对称性实例集  $E_m$  中元素的细化描述， $E_m$  和  $EA_m$  的元素之间也是多对多的单向映射关系。

机械对称性实例集  $E_m$  中的元素是机械对称性概念集  $C_m$  中的元素的物化， $E_m$  和  $C_m$  之间的是多对多的双向映射关系。同样， $CA_m$  的元素和  $EA_m$  的元素之间也是多对多的双向映射关系。

## 4 对称性的本体论特征

综上所述，可见一般对称性都具有以下的本体论特征。

对称性具有层次性和结构性。无论对称性主体是自然系统还是工程系统，是非生物系统还是生物系统，它们都既可以是物质性的具象系统，也可以是概念性的抽象系统。按组成结构考察，系统可以分解为分系统、子系统和系统元素等，且其之间有序相关，因此具有结构性。这导致了对称性存在的层次和结构性。例如就机械系统而言，就有系统对称性，整机对称性，部件对称性，零件对称性和零件元素的对称性，有分解和交换等对称性。按作

用、行为(概念)及其载体(物质)的因果关系考察，对称性的层次由抽象到具体，由高到低表现为功能对称性、原理对称性和时空对称性。其中每一层又包含多种类型，并可相互组合，形成结构性。一般地说，高层对称性是导致低层对称性的原因，低层对称性是实现高层对称性的手段和保障。

对称性具有相关性。各种对称性的层次结构关系在本质上是由它们之间的相关性决定的。这种相关性虽然可以称为映射性，但其不仅在传统意义上反映着相关方面之间的对应关系，而且可以从本质上进一步区分为相关方面之间的因果关系、组成分解关系、相互依存关系及其他的相互影响和作用关系。

对称性具有多元性和多维性。多元性说明一个对称性主体可以同时具有多种不同对称性或多个同种对称性。多维性说明一个对称性主体可以同时具有多个同种不同维的对称性。对称主体也会具有多元性，也即由多个对称主体构成和体现一种或一个对称性。

## 5 对称性缺失

不满足对称性定义的自然与工程系统都存在着各种类型和层次的对称性缺失，对称性缺失达到极端的程度就成为不对称。在系统中对称性缺失与对称性相辅相成，都是为了最佳地实现其存在与发展的效能和价值，适应其存在和发展的外部环境，也即外部需求和约束。因此对对称性缺失的存在原因和作用的研究与对称性研究难以分离。

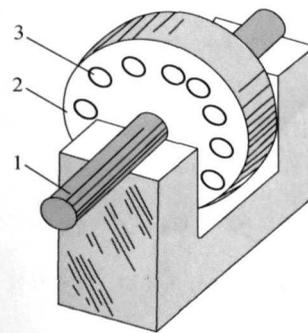


图 8 可调塞销式振动器<sup>[15]</sup>

比目鱼在仔鱼期和其他鱼类一样，生长于水体上层，身体左右对称，眼睛也是左右对称，游泳方

式也一样。随着比目鱼下沉到水体底层，侧卧于水底或贴近水底游泳，其眼睛逐渐长到了同一边，引起头骨和背鳍等相应变化。生存环境的不对称导致比目鱼其体态和游泳方式对称性的缺失。

图8所示一个可调塞销式振动器通过轴1做旋转运动，并通过插销结构在圆盘孔中插入塞销，构成圆盘的旋转对称性的缺失，产生激振离心力。波音公司在开发737的改进型飞机时，为了提高飞机速度，必须采用功率更大的引擎，因此需要更多的空气，相应就要增大引擎罩的直径。但是引擎罩直径越大就越贴近地面，会增加危险性。最后设计师决定在增大引擎罩直径的同时，将引擎罩底部改为平面，也即用引擎罩对称性缺失的方案解决了问题<sup>[17]</sup>。采用全桥电路结构的开关电源的变压器磁回路是对称的，容易造成累积偏磁。在改用单端电路结构后，变压器磁回路不再对称，消除了偏磁现象，电路更加简单可靠<sup>[18]</sup>。

## 6 结束语

对称性及与之相伴的对称性缺失概念、原理和作用的分析在自然和工程科学的诸多学科中具有重要的地位，有助于深化人类对客观世界和规律的认识，进而有助于人类创造更好、更多服务人类社会的人工制品。对称性在机械系统中无所不在，在机械工程科学研究中同样具有重要意义。本文基于本体论方法初步研究了对称性在自然科学和工程科学研究中的共性概念和规律，将促进工程科学研究，尤其是工程系统仿生设计理论、方法和技术的发展，进而有助于工程产品的创新和优化。对对称性理论的跨学科和系统性研究及其应用，本文仅仅是开始。对功能、原理和时空对称性，对称性缺失的应用规律，机械对称性理论及应用规律等方面的进一步研究进展作者将陆续另文发表。

## 参 考 文 献

1 迪生(译). 不单纯是左右对称. 国外科技动态, 1996(2):

- 13—15
- 2 Linda Parkefelt, Charlotta Skogh, Dan-Eric Nilsson, et al. Bilateral symmetric organization of neural elements in the visual system of a coelenterate, *tripedalia cystophora* (Cubozoa). *The Journal of Comparative Neurology*, 2005, 492: 251—262
- 3 Peter KE. Evolution of floral symmetry. *Curr Opin Plant Biol* 2001, 4(1): 86—91
- 4 北京自然博物馆. 生物史图说. 北京: 科学出版社, 1982
- 5 Symmetry, biological. <http://www.factmonster.com/ce6/sci/A0847482.html> [2007-09-12]
- 6 Darvas G. Generalisation of the concept of symmetry and its classification in physics. *The Official Electronic Proceedings Issue of the Wigner Centennial Conference*, Pécs, 8—12 July, 2002, CD-ROM, Item 48
- 7 李子平. 物理学中的对称性. 现代物理知识增刊, 1994: 60—66
- 8 中国材料科学学会. 结晶学与晶体绕射. <http://140.114.18.41/diff/index.html> [2007-08-04]
- 9 郑志鹏, 汪向东. 从对称性看世界. 现代物理知识, 1995, 5(2): 2—6
- 10 李政道. 对称与不对称. 北京: 清华大学出版社, 2000
- 11 杨振宁. 对称与物理. 自然杂志, 1995, 17(5): 247—256
- 12 汪新文. 地球科学概论. 北京: 地质出版社, 2005
- 13 王骁勇, 刘树勇. 对称性理论的发展. 首都师范大学学报(自然科学版), 2000, 21(4): 40—47
- 14 Jörg Barrenscheen. Die systematische ausnutzung von symmetrieeigenschaften beim konstruieren. Technische Universität Braunschweig Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, 1990
- 15 Ma ZY, Feng PE, Zhang J, et al. Research on Mechanics Symmetry Ontology. Hangzhou: Mechanical Design Institute Zhejiang University, 2008
- 16 C. H. 柯热夫尼柯夫等. 机构参考手册. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 17 张志远, 何川, 张鹏. 运用TRIZ理论解决新产品开发中的冲突. 工程设计学报, 2003, 10(4): 192—196
- 18 孙建广, 檀润华, 魏文超. 电气设计中的发明原理分类研究——发明原理之 No. 1 至 No. 20. 工程设计学报, 2007, 14(1): 62—73