

文章编号: 2095-4980(2013)06-0994-06

第一类齿轮集机构复合齿轮最小层数证明

高 杨, 白 波

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 抗干涉齿轮集(CMG)机构是一种复杂的密码鉴别机构, 可用于确保要害系统保证性的机械组合锁中。CMG 机构的密码鉴别功能取决于由多层密码齿轮堆叠而成的 2 个复合齿轮。在满足同样的密码鉴别功能的前提下, 复合齿轮层数的最小化有利于应用 CMG 机构的机械组合锁的小型化、可靠性和制造性。复合齿轮最小层数的问题是 CMG 机构最重要的基本问题之一, 迄今为止却未见相关报道。介绍了证明过程中所需要的基本概念, 包括 CMG 机构的密码鉴别原理、CMG 机构编码问题的定义和 CMG 机构优化编码的分层判据; 证明了第一类 CMG 机构的复合齿轮的最小层数为 3, 也解释了此前报道的“3 色循环着色编码方法”原理; 当解锁符号序列仅有 1 次“AB”或“BA”的跳变时, 第一类 CMG 机构存在一种退化特例, 其复合齿轮齿的最小层数为 2, 由于退化特例不具有实用性, 在工程应用中可以忽略。

关键词: 组合锁; 密码鉴别机构; 抗干涉齿轮集; 迷宫

中图分类号: TN918.2; TH112.3; TJ430.3⁺3 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201306.0994

Proving the minimum composite gear level of the type I counter-meshing gears

GAO Yang, BAI Bo

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Counter-Meshing Gears(CMG) mechanism is a complex discrimination mechanism which can be used in micro/meso combination locks for high-consequence system surety. Discrimination function of the CMG mechanism is defined by its two composite gears, which are stacked by several coding gears separately. Under the precondition to satisfy the same discrimination functions, the minimized composite gear level is propitious to the miniaturization, reliability and manufacturability of the mechanical combination lock with a CMG mechanism. The minimum composite gear level is one of the most important fundamental problems of the CMG mechanism, whereas it has not been reported. Most needed basic concepts for the proving process are introduced firstly, including discrimination principle of the CMG mechanism, definition of the CMG mechanism coding problem, and delaminating criterion for the CMG mechanism's optimized coding method. A conclusion that the minimum composite gear level of the type I CMG mechanism is 3 is proven. And principle of the previously reported 3 colors circular alternant coloring method is also explained. There is a degenerated instance of the type I CMG mechanism when the unlock symbol sequence has only one switch from symbol A to B, or vice versa. Because the degenerated instance is not practical, it can be ignored in engineering applications.

Key words: combination lock; discrimination mechanism; counter-meshing gears; maze

抗干涉齿轮集(CMG)机构是一种基于复杂的组合数学原理的密码鉴别机构, 可用于确保要害系统保证性的机械组合锁中。对要害系统的疏忽操作, 可能导致生命、财产的灾难性损失或严重危害环境^[1-4]。文献[5]分析了微机电安全密码锁的工作原理和结构, 归纳出 CMG 机构的密码鉴别逻辑, 指出 CMG 机构复合齿轮层数的最小化是此类组合锁优化设计的重要问题, 通过降低 CMG 机构 2 个独立的单向步进驱动器的负载驱动能力, 有利于装置的小型化、可靠性和制造性。文献[6]报道了一种基于 CMG 机构的微小型组合锁原理样机, 其 CMG 机构实例

收稿日期: 2012-12-18; 修回日期: 2013-01-26

基金项目: 中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室基金资助(2012CJMZZ00009); 西南科技大学制造过程测试技术省部共建教育部重点实验室开放课题资助(11ZXZK03); 重庆大学新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室访问学者基金资助(2013MS04)

的编码与文献[7]一致, 采用 UV-LIGA 工艺制造。文献[8]以文献[7]的 CMG 机构编码实例为例, 提出了“齿牙二值装定编码(binary teeth-coding)”等基本概念和“二维迷宫映射(2-D maze mapping)”的变换方法, 实现了 CMG 机构编码问题的变换和编码结果的快捷校验。文献[9]报道了一种通用的最优(密码齿轮层数最少)编码方法, 其基本思想是采用迷宫映射, 将优化编码问题转化为图 $G(V, E)$ 的 k -顶点着色问题(vertex coloring problem)。由于 k -顶点着色是图论中著名的 NP 完全问题, 穷举求解的时间复杂度高达 $O(m \cdot n)$, 可采用聚类算法^[10]或贪婪算法^[11]等求解。 $O(m \cdot n)$ 中, m 表示着色数, 对应为 CMG 机构的齿轮层数; n 表示顶点数, 对应二维迷宫映射图中“关键陷阱格点(Critical Trap Grid, CTG)”的个数。文献[12]报道了 CMG 机构在表面微机械加工的微型密码鉴别装置中的应用。文献[12]应用迷宫映射方法、基于迷宫映射图和解锁符号序列(Unlock Symbol Sequence)的特征, 将 CMG 机构划分为 3 类, 对 3 类 CMG 机构的特征进行了对比, 未加证明地给出了第一类 CMG 机构最小齿轮层数为 3 的结论。文献[13]报道了一种无需计算的最优编码方法——“循环着色(Circular Alternant Coloring)编码方法”, 并以一个算例说明该方法适用于第一类 CMG 机构。循环着色的色数为 3, 暗示第一类 CMG 机构复合齿轮的最小层数为 3。

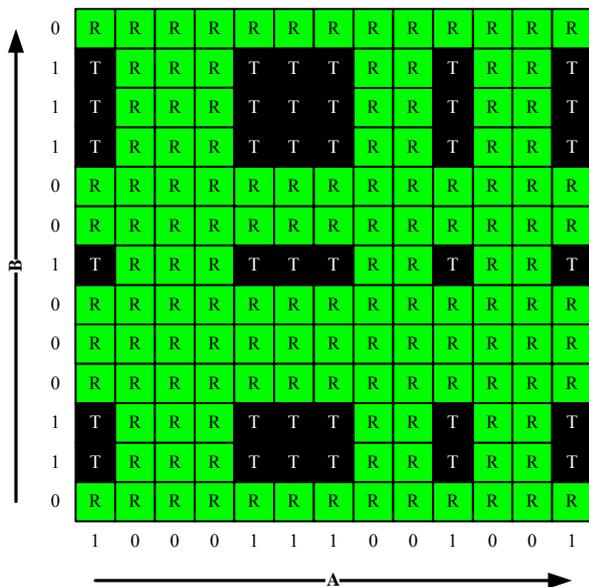
在基于 CMG 机构的组合锁设计中, 给定其解锁符号序列(“钥匙”), 可以得到多组不同的齿牙二值装定编码(“锁”), 甚至不同的复合齿轮层数。在工程实践中, 必须明确 CMG 机构的最小层数, 即工程优化设计所能达到的底限; 讨论该问题还有助于深刻理解这种高级组合锁的密码鉴别原理。本文给出了“第一类 CMG 机构复合齿轮最小层数为 3”这一结论的严格证明, 也解释了文献[13]中“3 色循环着色编码方法”的原理。

1 基本概念

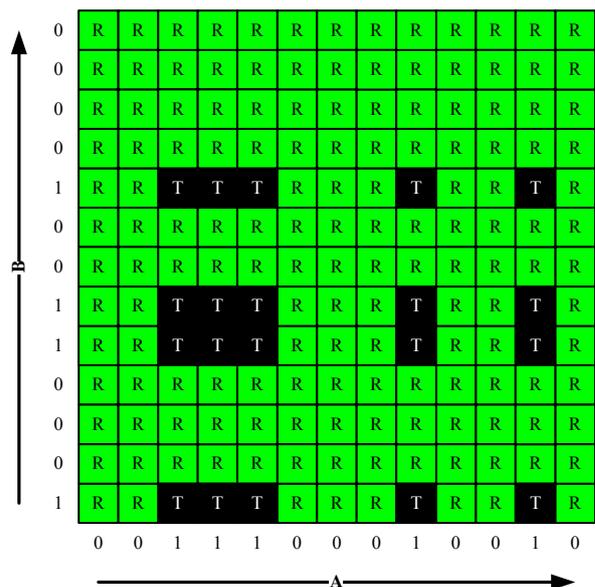
1.1 CMG 机构的密码鉴别原理

沿用文献[13]中第一类 CMG 机构的一个编码实例说明 CMG 机构的密码鉴别原理。该例“解锁符号序列”(由符号“A”、“B”构成的二元密码字符串)为“ABAABBAABBAABABABABBBA”, 共有 24 个“A”、“B”符号, 其中“A”、“B”各 12 个。3 层配对耦合的密码齿轮的编码结果见文献[13]中的图 4, 相应的齿牙二值装定编码见文献[13]中的表 1。

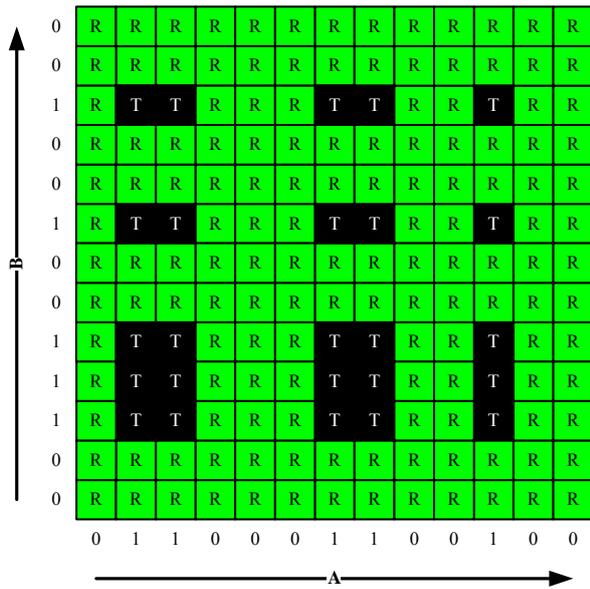
根据文献[13]中图 4 或表 1 的密码齿牙编码信息, 可以绘制出算例 1 每一层密码齿轮的分层迷宫映射图, 分别如图 1(a),(b),(c)所示。将各分层迷宫映射图叠加, 得到复合齿轮(该例为 3 层密码齿轮叠加)的迷宫映射图, 如文献[13]中的图 3 所示。从迷宫映射图的起点 $R(0,0)$ 开始, 以单步向右(复合齿轮 A 单向向前步进)或向上(复合齿轮 B 单向向前步进)的折线, 依次连接文献[13]的图 3 中从 $R(0,0)$ 到 $R(12,12)$ 的 25 个 R 格点(Route Grid, 路径格点), 得到 24 个符号“A”、“B”构成的解锁符号序列“ABAABBAABBAABABABABBBA”, 如图 1(d)所示。该路径被 T 格点(Trap Grid, 陷阱格点)紧密包围(即: 误码立即锁定)。



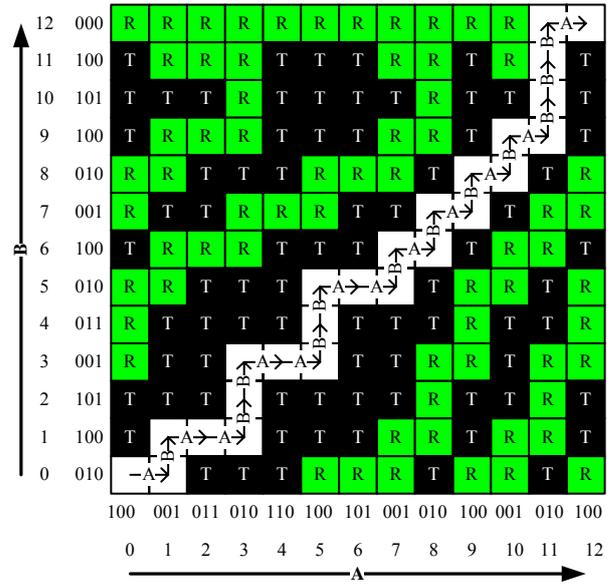
(a) maze map of the gear level 1 (i.e. $A_{C0}-B_{C0}$)



(b) maze map of the gear level 2 (i.e. $A_{C1}-B_{C1}$)



(c) maze map of the gear level 3 (i.e. $A_{C2}-B_{C2}$)



(d) maze map and discrimination route of the type I CMG mechanism instance, formed by laminating its all 3 gear levels maze maps

Fig.1 Coding instance of type I CMG mechanism, adopted from the Instance 1 in Ref. [13]

图 1 第一类 CMG 机构的编码实例(文献[13]算例 1)

此例说明了 CMG 机构密码鉴别的原理：各层密码齿轮通过特定的齿牙编码，为复合齿轮的迷宫映射图贡献部分 T 格点；各层叠加后形成始于 R(0,0)，全部由 R 格点构成的迷宫路线图(maze roadmap)，正好与其解锁符号序列对应。

1.2 CMG 机构编码问题的定义

CMG 机构的编码问题，是编码校验的逆问题。CMG 机构的校验是如图 1 所示的层叠过程，编码则是相反的分层过程。因此，分层的判据是 CMG 机构编码首先要考虑的问题。

指定了“解锁符号序列”、CMG 机构的类型(简单起见，假设是“第一类”CMG 机构)和“误码立即锁定”的功能约束后，很容易直接绘制出算例 1 的基本迷宫映射图，如图 2 所示。接下来的问题是：依据什么将该例中 T0~T22,共 23 个 CTG 分配到不同的密码齿轮层中(编码)，且密码齿轮层数最少(最优编码)。

1.3 CMG 机构优化编码的分层判据

如文献[9]图 4 所示，对于迷宫映射图中的任意 R 格点 $R(i,j)$ ，如果迷宫映射图中还同时存在 T 格点 $T(i,*)$ 、 $T(*,j)$ ，则 $T(i,*)$ 与 $T(*,j)$ 必然是 CMG 机构中“异层”齿轮对潜在齿牙干涉的映射结果，即：如果 $T(i,*)$ 来自齿轮层 N_{Cm} 中的配对耦合齿轮对 A,B,则 $T(*,j)$ 必然来自另一层齿轮层 N_{Cn} 。其中，“*”为通配符。也就是说，满足文献[9]图 4 中“十字叉”布局的任意 T 格点 $T(i,*)$ 、 $T(*,j)$ ，必然源于 CMG 机构中不同齿轮层的贡献，简称 T 格点 $T(i,*)$ 、 $T(*,j)$ “异层”。这就是 CMG 机构优化编码的分层判据，形象地称之为“十字叉”判据^[9]。

可以采用反证法证实“十字叉”判据。限于篇幅，其证明过程将另文论述。观察图 1(a),(b),(c)的分层迷宫映射图，可以发现同一密码齿轮层的 T 格点占据矩形 4 个顶点(格点)分布的规律，这是由迷宫映射图中 T 格点的内涵所决定的。以下将证明，这一规律与 T 格点“异层”的“十字叉”判据等效。

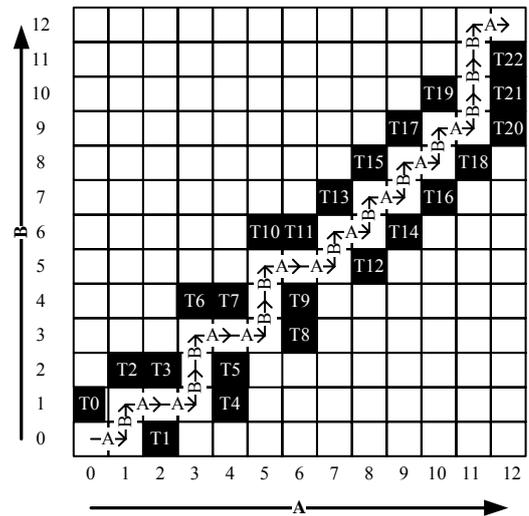


Fig.2 Critical maze map of type I CMG mechanism, adopted from the Instance 1 in Ref. [13]

图 2 第一类 CMG 机构的基本迷宫映射图(文献[13]算例 1)

2 证明

2.1 一般型

根据文献[17]中第一类 CMG 机构的定义, 最一般的第一类 CMG 机构具有如图 4 所示的基本迷宫映射图形式。解锁路径“ $A \cdots AB \cdots BA \cdots A$ ”被 CTG 格点(图中用“T”表示)紧密包围, 意味着可实现误码立即锁定。

从基本迷宫映射图中解锁路径的特点考察 CTG 格点的规律。从图 3 可以看出: 当解锁符号序列出现连 A (“ $A \cdots A$ ”)或连 B (“ $B \cdots B$ ”)时, 其对应的 T 格点也会按行(连 A)或列(连 B)连续排列; 当解锁符号序列出现“AB”或“BA”跳变时, 会导致 T 格点从按行排列转变为按列排列(AB), 或者相反(BA)。

从 T 格点分层的“十字叉”判据的角度考察基本迷宫映射图中 CTG 格点的规律。从图 3 可以看出:

1) 一组连 A (“ $A \cdots A$ ”)或连 B (“ $B \cdots B$ ”)对应的连续 T 格点, 逐一应用“十字叉”判据考察, 相互之间不存在异层互斥的情形, 即一组连续的 T 格点可以按同一种颜色着色, 即可以由同一层密码齿轮产生。例如, 图 3 中 T_a, T_b, T_c 可以全部用颜色 1 着色。

2) 当解锁符号序列出现“AB”或“BA”跳变时, 后续一组 T 格点与上一组 T 格点发生行-列或列-行的排列转换, 由于 2 组 T 格点中夹杂有 R 格点, 应用“十字叉”判据考察, T 格点着色的颜色必然有所不同。例如, 图 3 中有 4 组 CTG 格点, 分别为: 第 1 组 CTG 格点 T_a, T_b, T_c ; 第 2 组 CTG 格点 T_d, T_e, T_f ; 第 3 组 CTG 格点 T_g, T_h, T_i ; 第 4 组 CTG 格点 T_j, T_k, T_l 。首先将 T_a, T_b, T_c 全部按颜色 1 着色。应用“十字叉”判据考察第 1, 2 组 CTG 格点, T_d 与 T_a, T_b, T_c 异层, 需要引入新的颜色 2 对 T_d, T_e, T_f 着色。

加入第 3 组 CTG 格点 T_g, T_h, T_i 后, 应用“十字叉”判据继续考察, T_g 与 T_a, T_b, T_c 异层, 也与 T_d, T_e, T_f 异层, 需要引入新的颜色 3 对 T_g, T_h, T_i 着色。加入第 4 组 CTG 格点 T_j, T_k, T_l 后应用“十字叉”判据继续考察, T_j 与 T_g, T_h, T_i 异层, 也与 T_d, T_e, T_f 异层, 因此不能采用颜色 2 或颜色 3 着色, 但可以采用颜色 1 着色, 因为图 3 中没有 R 格点能够建立 T_j 与第 1 组 CTG 格点 T_a, T_b, T_c 之间的异层约束。依此类推, 如果后续有更多组的 CTG 格点, 可以依序以颜色 2、颜色 3 和颜色 1 继续着色。因此, 只需使用 3 种颜色对各组连续的 T 格点循环着色。

根据基本迷宫映射图中“AB”或“BA”跳变时 R 格点与 CTG 格点的平面布局特点, 可以看出, 任意 3 组连续的 CTG 格点, 必须以 3 种不同的颜色分别着色。解锁路径在基本迷宫映射图中穿越的 R 格点, 对应于 CTG 格点, 可以称为 CRG 格点(Critical Route Grid, 关键路径格点)。

图 3 所示的第一类 CMG 机构的基本迷宫映射图给出了 4 组 CTG 格点, 其目的在于说明: 任意 3 组连续的 CTG 格点, 必须以 3 种不同的颜色分别着色; 第 4 组 CTG 格点可以与第 1 组 CTG 格点同色, 即可以开始新一轮的颜色复用。因此, 可以仅循环使用 3 种颜色, 依序对第一类 CMG 机构的基本迷宫映射图中的各组 CTG 格点着色。这就是文献[13]报道的采用 3 色“循环着色(Circular Alternant Coloring)编码方法”对第一类 CMG 机构进行最优编码(齿轮层数为 3 层, 且为最小层数)的原理。

仅考虑更基本的 3 组 CTG 格点, 可以从图 3 简化得到更基本的图 4, 且图中只保留 CTG 格点和 CTR 格点, 其解锁路径与图 4 一致因此不再图注。仅考察图 4 中的 T_a, T_d, T_g 这 3 个 CTG 格点, 依据“十字叉”判据就可以断定其两两异层: 依据 R_a , T_a 与 T_d 异层; 依据 R_d , T_d 与 T_g 异层; 依据 R_e , T_g 与 T_a 异层。因此, 至少需要 3 种颜色对全部 CTG 格点着色, 即密码齿轮层数至少为 3 层。

2.2 退化特例

假如第一类 CMG 机构的基本迷宫映射图更为简单, 只有 2 组 CTG 格点, 那么, 是否可能存在密码齿轮层数仅为 2 层的 CMG 机构呢?

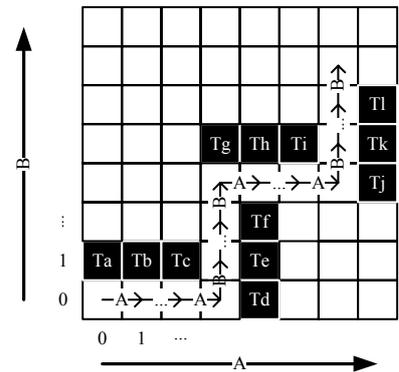


Fig.3 Critical maze map of type I CMG mechanism with 4 groups of Critical Trap Grids

图 3 具有 4 组 CTG 格点的第一类 CMG 机构的基本迷宫映射图

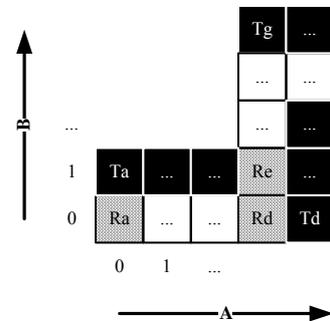


Fig.4 Critical maze map of type I CMG mechanism with 3 groups of Critical Trap Grids

图 4 含 3 组 CTG 格点的第一类 CMG 机构的基本迷宫映射图

图 4 进一步退化就得到仅含 2 组 CTG 格点的基本迷宫映射图,如图 5 所示。应用“十字叉”判据,依据 Ra, Ta 与 Td 异层。因此,至少需要 2 种颜色对全部 CTG 格点着色。可以将 Ta 所在的第 1 组 CTG 格点全部以颜色 1 着色, Td 所在的第 2 组 CTG 格点全部以颜色 2 着色。

根据图 5, 将 CTG 划分为 2 个颜色集: $C_0=\{[0,1], \dots, [m,1]\}$, $C_1=\{[n,0], \dots, [n,n]\}$ 。

根据 T 格点的定义、颜色集与 CMG 机构复合齿轮的对应关系,按照上述 2 个颜色集的划分结果,直接写出其复合齿轮的编码结果见表 1。表 1 的编码结果采用二维迷宫映射图校验的结果如图 6 所示。图 6 和图 5 中的 CRG 格点、CTG 格点完全吻合,说明编码结果正确。

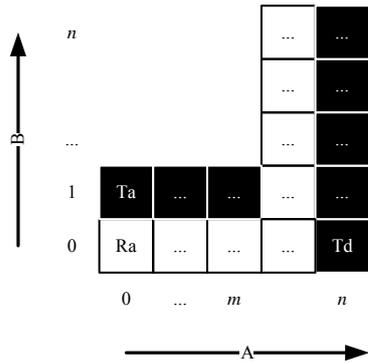


Fig.5 Critical maze map of degraded type I CMG mechanism with only 2 groups of Critical Trap Grids

图 5 仅含 2 组 CTG 格点的第一类 CMG 机构退化特例的基本迷宫映射图

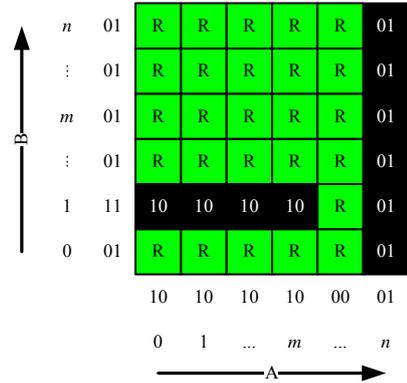


Fig.6 2-D maze mapping verification results of the binary teeth coding shown in Table 1

图 6 表 1 所示齿牙二值装定编码的二维迷宫映射校验

表 1 对应于图 5 的齿牙二值装定编码表

Table1 Binary teeth coding table corresponding to the Fig.5

gear level	teeth coding position					
	0	1	...	m	...	n
A_{c0}	1	1	1	1	0	0
A_{c1}	0	0	0	0	0	1
B_{c0}	0	1	0	0	0	0
B_{c1}	1	1	1	1	1	1

根据表 1 或图 6 绘制的 2 层复合齿轮齿牙二值装定编码结果示意图如图 7 所示。其中,齿牙装定仅使用了密码齿轮圆周的部分扇区,以实现第一类 CMG 机构。齿牙二值装定编码结果显示:密码齿轮 B_{c0} 仅在齿牙装定位置“1”处有 1 齿,密码齿轮 A_{c0} 则在齿牙装定位置(0~m)处均有齿,第 1 层密码齿轮组 B_{c0} - A_{c0} 形成了如图 6 所示的第 1 组 CTG 格点(即图 6 中横向连续排列、标记为“10”的一组 T 格点);密码齿轮 B_{c1} 则在所有的齿牙装定位置(0~n)处均有齿,密码齿轮 A_{c1} 仅在齿牙装定位置“n”处有 1 齿,第 2 层密码齿轮组 B_{c1} - A_{c1} 形成了如图 6 所示的第 2 组 CTG 格点(即图 6 中纵向连续排列并标记为“01”的一组 T 格点)。

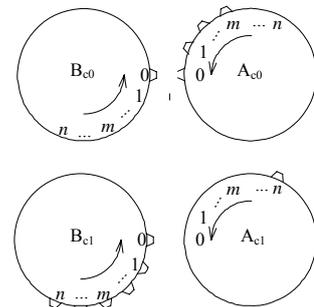


Fig.7 Illustration of the 2 levels binary teeth coding results shown in Table 1

图 7 表 1 所示 2 层复合齿轮齿牙二值装定编码结果示意图

显然,图 7 所示的唯一一类退化特例是仅有 2 层复合齿轮齿的第一类 CMG 机构。此类特例的特点是解锁符号序列必须是“ $A \dots AB \dots B$ ”或“ $B \dots BA \dots A$ ”(即图 6 中 A,B 轴互换)的最简形式,即解锁符号序列仅有 1 次“AB”或“BA”的跳变,因此不具有实用性。

3 结论

- 1) 第一类 CMG 机构,其由符号“A”、“B”任意组合而成的解锁符号序列通常包含至少 1 次“AB”和 1 次“BA”的跳变,基于 CMG 机构的二维迷宫映射图及其优化编码的分层判据(“十字叉”判据),证明了第一类 CMG 机构的复合齿轮的最小层数为 3,也解释了文献[13]中第一类 CMG 机构“3 色循环着色编码方法”的原理。
- 2) 对于第一类 CMG 机构的退化特例,由于其解锁符号序列仅有 1 次“AB”或“BA”跳变,采用同样的方法证明了其复合齿轮齿的最小层数为 2,但这样的退化特例不具有实用性,在工程应用中可以忽略不计。
- 3) 根据文献[12]的分类方法,第二类和第三类 CMG 机构具有比第一类 CMG 机构更复杂的解锁符号序列,

即其二维迷宫映射图中 CTG、CRG 格点的布局更为复杂。按照 T 格点分层的“十字叉”判据,必将引入更多的 CTG 格点“异层”约束,导致其复合齿轮的最小层数不少于第一类 CMG 机构,即第二类和第三类 CMG 机构复合齿轮的最小层数 ≥ 3 。限于篇幅,第二类和第三类 CMG 机构复合齿轮最小层数的结论和证明将另文详述。

参考文献:

- [1] MARC A P,ERNEST J C,JAMES J A. Surface micromachined counter-meshing gears discrimination devices[R]. New Mexico: Sandia National Laboratory, 1998.
- [2] MARC A P,ERNEST J C,JAMES J A. Surface micromachined counter-meshing gears discrimination device. US, 5804084[P]. 1998-06-24.
- [3] 高杨,赵小林,陈文元,等. 电磁微电机的设计与制造技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2003,1(3):71-74. (GAO Yang,ZHAO Xiaolin,CHEN Wenyuan,et al. Design, Fabrication and Applications of Electromagnetic Micromotor[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2003,1(3):71-74.)
- [4] 高杨. 组合学在机械电子工程中的两例应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2006,4(3):229-233. (GAO Yang. Two applications of combinatorics in mechatronics[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2006,4(3):229-233.)
- [5] 高杨,文贵印,赵小林,等. 微机电安全密码锁的设计技术[J]. 微纳电子技术, 2003,40(314-315):573-576. (GAO Yang, WEN Guiyin,ZHAO Xiaolin,et al. Design techniques for MEMS safety locks[J]. Micronanoelectronic Technology, 2003,40(314-315):573-576.)
- [6] 高杨. 微小型组合锁原理样机的研制[J]. 中国机械工程, 2005,16(14):1239-1242. (GAO Yang. Development of millisecond scale combination lock prototype[J]. China Mechanical Engineering, 2005,16(14):1239-1242.)
- [7] Eugene W Kenderdine. A unidirectional rotary solenoid as applied to stronglink[R]. New Mexico:Sandia National Laboratory, 1988.
- [8] 高杨,陈勋,赵小林,等. 抗干涉齿轮集机构的二维迷宫映射校验方法[J]. 兵工学报, 2004,25(3):280-284. (GAO Yang, CHEN Xun,ZHAO Xiaolin,et al. 2-D maze-mapping verification method for the counter-meshing gears mechanism[J]. Acta Armamentarii, 2004,25(3):280-284.)
- [9] 高杨. 抗干涉齿轮集机构的优化编码方法[J]. 兵工学报, 2005,26(6):733-737. (GAO Yang. Optimized coding of counter-meshing gears mechanism[J].Acta Armamentarii, 2005,26(6):733-737.)
- [10] 曾高荣,高杨,胡莉. 一种基于团划分数的聚类算法[J]. 计算机应用研究, 2004(增刊):143-144,88. (ZENG Gaorong, GAO Yang,HU Li. A clustering algorithm based on clique partitioning number[J]. Application Research of Computers, 2004(Suppl):143-144,88.)
- [11] 潘华璞,高杨. CMG 机构的优化编码程序开发[J]. 计算机应用研究, 2006,23(5):180-181. (PAN Huapu,GAO Yang. Development of optimized coding program for counter-meshing gears mechanism[J]. Application Research of Computers, 2006,23(5):180-181.)
- [12] 高杨,杜宇. 抗干涉齿轮集机构的分类方法[J]. 机械工程学报, 2006,42(1):168-172. (GAO Yang,DU Yu. Classification method of counter-meshing gears mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(1):168-172.)
- [13] 高杨,陈勋,潘华璞. 抗干涉齿轮集机构的循环着色优化编码方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2008,6(1):38-43. (GAO Yang,CHEN Xun,PAN Huapu. Optimized coding method for counter-meshing gears mechanism based on circular alternant coloring method[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2008,6(1):38-43.)

作者简介:



高 杨(1972-),男,四川省绵阳市人,博士,研究员,主要研究方向为微电子机械系统、机电引信,email:gaoyang@caep.ac.cn.

白 波(1976-),男,四川省绵阳市人,工程师,主要从事电子工程方面的研究.