

王 用 道 译

模型化凸轮系统动态综合分析与设计

四川科学技术出版社

模型化凸轮系统动态 综合分析与设计

王用道 译

四川科学技术出版社

一九八六·成都

责任编辑：王 晓
封面设计：朱德祥
版面设计：杨丽娜

**模型化凸轮系统
动态综合与分析设计**

王 道* 译

出版：四川科学技术出版社
印刷：资 中 县 印 刷 厂
发行：四川省新华书店
开本：787×1092毫米 1/32
印张：10.75 字数：225千
印数：1—2,000
版次：1986年5月 第一版
印次：1986年5月第一次印刷
书号：15298·195
定价：2.10元

译 序

凸轮系统作为机械系统或机械——电气系统的控制机构，其工作特性对整个系统性能有着重要的影响。过去无论对于杆机构或是凸轮机构的动态分析都进行得很少，随着近代科学技术的发展，动态问题有了解决的可能性。目前对应用于工程上的机械系统，都必须进行动态分析。动态分析可以精确地给出系统的性能，使得在一定环境条件下，系统工作在最佳状态。本书介绍的凸轮系统动态分析，提供了这种手段和方法。对于在教学中更新内容，在科研上攻下难关以及在生产中避免不应有的损失，都是有实用意义的。译者多年从事机械系统设计的教学和科研工作，深感国内关于凸轮系统动态分析的书籍资料缺乏，现将此书译出，供广大读者参考。由于译者水平有限，文中错误难免，敬望读者赐正。

译稿曾由谢寄石和朱钟淦同志校阅，一些同志帮助抄写文稿和描制图稿，在此一并表示感谢。

译 者

1985年成都

引 言

编写这本凸轮专著有三个目的：第一，广泛介绍机器动力学，特别为工程专业本科生给出凸轮的设计方法。一些有关材料不仅包括在介绍性章节中，而且在附录中列出。这样便以紧凑的篇幅给出了一些专题。应用这些材料，从事机器设计的学生就会懂得以下一些概念，诸如实现规定运动的各种方法，分离及封闭形式的计算方法，模型化的基本方法，综合，速度分类的标准，平稳工作的质量判据，以及在从动件系统中的质量分布，变形及摩擦参数的重要性。从基本的工程动力学课程可获得足够的准备知识。若干年的课堂教学能够很好地满足这一要求。本书给出的许多概念在其它研究领域中证明是有价值的，这些领域诸如机器动力学，振动以及自动控制。

第二，撰写本书的目的也是为了研究属于研究生水平课程的凸轮专题。本书深入推导了通常的运动特性曲线的公式，对已综合的系统进行分析，讨论建模参数的误差，研究了偏速工作的重要影响，讨论了由凸轮实现力矩平衡，凸轮的制造，凸轮的几何尺寸以及对非恒定角速度的凸轮进行研究。经过若干年的深入研究，所涉内容达到了现代水平。现在有

许多讨论凸轮的一般材料，包括设计过程，计算方法以及设计的一般建议。本书的目的是建立根据完善的分析公式的通常课题。因此对定性结果的阐明是基本的要求。

第三，希望本书对于工业生产中的凸轮设计者有所帮助。书中列出了二十种“经验法则”的设计表格，这些法则都加以公式化，表示了本书关于设计的精髓，也可作为设计的索引。极其重要的是，设计者首先要把系统模型化，按速度进行分类，然后作出正确的设计。如果系统是低速系统，则现有的方法已足够付之使用。对于中速系统，设计者则希望使用梯形运动特性曲线，在设计速度下对凸轮表面曲线进行综合，采用良好的制造方法，并考虑到偏速工作的情况。最后，如果系统是高速系统，设计者必须使用多项式运动特性曲线，在设计速度下进行综合，采用最好的制造方法，以及设计最好的从动件，采用质量分布，变形及摩擦参数表格，要仔细地考虑凸轮表面曲线的平滑性及受迫振动，用经验法则解释偏速工作时的瞬态振幅及均方根偏差，在设计者已获得希望的设计表面曲线函数后，就可利用公式确定系统的几何参数。还应包括力矩平衡的方法，它作为影响系数公式用于分析系统的内部负载以及动力学。最后对各类凸轮，为设计者提供了研究在非恒定角速度下工作的凸轮的方法。

本书还给出了用于APL*PLUS®系统①的计算机程序CAMPACK，可处理本书中涉及到的凸轮设计过程中的各种问题，使用者可以对一系列设计决策实行实时直接控制。特别

对于平板及柱形凸轮,对系统几何参数给出了较为完整的分析,诸如切削坐标、压力角、曲率半径以及驱动力矩要求。同时还给出了一个FORTRAN程序,但未包含几何参数部分, FORTRAN程序在分组模型中是很有用的,它很容易和一个G级编译器装置使用。曼休·伽利(Gary Matthew)在过去几年里仔细地编写了这些程序,并在佛罗里达大学中广泛作为教学内容。

没有一本书能够包括凸轮设计所有方面的详细论述。这里推荐的一些附加材料帮助读者完善他们的技术资料。特别是考虑了属于超出本书范围的得到最佳压力角的方法。米西克(Mishke)[见参考书20],金逊(Jensen)[见参考书18]以及洛斯巴特(Rothbart)[见参考书9]对基本的,应用广泛的凸轮从动件形式给出一些建议。莫林(Molian)[见参考书17]及洛斯巴德给出了一些特殊的制造方法,用于非标准的刀具以及从动件为平板形式时的凸轮切削。金逊及洛斯巴特还提供了一些图解法。关于在工业中应用的凸轮系统的许多结构形式可在洛斯巴特、莫林、奥连茨克[见参考书19]及金逊所写的资料中找到。奥连茨克给出了大量的用于内燃机的结构资料。洛斯巴特[见参考书19]及(Wunderlich)[见参考书21]还对双凸轮及盒形凸轮作了有趣的研究。洛斯巴特还研究了应力、磨损及材料的选择,以及给设计者提供了一些其它方面的有价值的建议。洛斯巴

①APL*PLUSO是马里兰州勃斯达的科学时间股份公司(Scientific Time-shavingcorp)的产品的注册商标。

特和金逊都提供了广泛的研究资料，这些资料在对凸轮系统的一些个别问题作深入研究是有用的。最后，在T·H·恩德霍温(T·H·Eindhoven)[见参考书25]，把非恒定角速度凸轮作为中心问题作了研究。作为工程师，如果想要扩充设计凸轮系统的能力，最好使用科斯特的书作为补充。

作者希望本书能够达到上述三个目的。将来会有新的发展。作者将会把新的内容加到本书中去。

铁什·德尔勃特(Delbert Tesar)

佛罗里达(Florida)，更斯维拉Gainsville)

曼休·K·伽利(Gary K·Matthew)

马里兰(Maryland)，

考里其派克(College Park)

目 录

第一章 序言	1
1.1 机械系统的研究范围.....	1
1.2 对力的考虑.....	1
1.3 对运动的考虑.....	4
1.4 高速凸轮的设计原理.....	5
附录1A 凸轮动力学综合.....	9
附录1B 滚子系统的形式.....	11
附录1C 机械比及双臂曲柄.....	19
附录1D 动力冲击的描述.....	24
附录1E 基本凸轮系统的设计.....	28
附录1F 驱动力特性.....	32
第二章 运动特性曲线	37
2.1 基本曲线.....	37
2.2 经验曲线.....	42
2.3 谐波曲线.....	43
2.4 梯形特性曲线.....	46
2.5 多项式方法.....	56
附录2A 基本凸轮曲线动态响应特性的设计依据.....	62
附录2B 多项式动态运动特性曲线.....	80
附录2C 基本梯形运动特性曲线.....	93

附录2D	位移曲线的应用	100
附录2E	凸轮几何尺寸的确定	110
附录2F	凸轮的制造	136
第三章	一自由度系统的综合原理	151
3.1	形状因数	151
3.2	凸轮表面的受力	157
3.3	所含能量	158
第四章	二自由度系统的综合原理	159
4.1	形状因数	159
4.2	分布参数	164
4.3	凸轮表面的受力	170
附录4A	双杆凸轮从动件系统的模型化	174
第五章	模型化凸轮系统的分析	189
5.1	单自由度系统	198
5.2	二自由度系统	204
附录5A	凸轮从动件系统的振动现象	213
附录5B	凸轮系统参数误差的计算	219
第六章	参数偏差分析及一般设计准则	240
6.1	刚性系统假设产生的结果	240
6.2	参数分析	242
6.3	评述	260
6.4	经验设计法则	263
附录6A	凸轮的受力以及凸轮动力学	272
附录6B	非零凸轮加速度	285
附录	CAMPAK的应用	293
参考文献		330

第一章 序 言

1·1 机械系统的研究范围

有多种机械系统可供设计者选用，以满足大量的运动和工作要求。对于复杂运动，设计者通常须在约束连杆、凸轮系统，以及控制系统中选择。在高速工作的情况下，对位置和相位的要求均很严格，这时约束连杆如使用在少数规定输出条件下效果较好；控制系统则可以满足大量的主要有可调性要求的输出条件。它主要的限制是在高速下缺乏保持严格的工作特性的能力；凸轮系统象控制系统一样，可适用于大量的运动要求，但在结构上具有不可变更性。故凸轮系统可以视为具有多种用途的、不可调整的信息存储装置。在用约束连杆就可达到的速度下，通常不用凸轮系统。一些凸轮已成功地用于极高的速度下（特别在内燃机中，大家知道凸轮工作速度可高至8000转/分），表1—1所示为各种机械系统工作特性的比较（并参照附录1A）。

1·2 对力的考虑

正如任何动力系统一样，设计者的基本考虑是系统中产生的力。力的剧烈波动，尤其是在一个循环系统中，对系

统是有害的，甚至达到破坏的程度，至少会导致不希望的噪声。系统中速度或加速度的突变会带来冲击，为避免此种情况，设计者应考虑的基本问题是运动特性曲线的选择。其它影响运动特性曲线选择的考虑是高峰值速度下压力角 ϕ 的选择（见图 1—1）以及由于大的滚子旋转惯性造成的滚子从

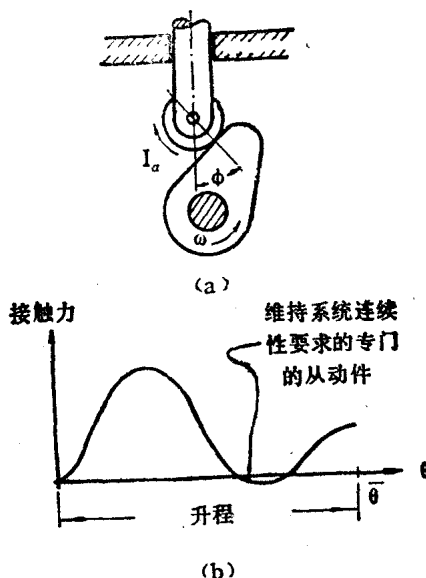


图 1—1 凸轮设计中要考虑的一些问题

动件的滑动问题〔见参考书〕。对于用回程弹簧作为机械约束的系统，需要一个局部的精确的减加速峰值控制，以避免系统出现结构分离。

表 1—1 凸轮、连杆以及控制系统的比较

特 性	凸 轮	连 杆	控制系统
制造的容易程度	困难	简单、便宜	看具体情况而定
对制造误差的敏感性	严格	低	低
设计的容易程度	简单	复杂	看具体情况而定
应用的范围	无限制	适用于有限数量参数	无限制
可调整性	差	差	很好
磨损影响	严重	不严重	看具体情况而定
负载能力	中等	高	低
紧凑性	好	差—尚可	好—很好
对润滑的要求	重要	简单	看具体情况而定
对调整的要求	严格	通常不严格	通常不严格
平衡要求	简单	直接但不明显	简单, 但增加了复杂性
工作速度	中等	高	低
峰值加速度	设计得低, 而工作时可能高	比凸轮高20%~30%但可预先确定	可加以控制
噪声	尚可	很好	差
可靠性	尚可	很好	差
工作精度	尚可	很好	差
能量消耗	低	低	中—高
多相运动的操纵	尚可	很好	差

1·3 对运动的考虑

许多技术可用于运动特性曲线的研究，现对于一些基本运动，“经验”曲线以及离散参数的谐波级数近似作一简要概括。

应用最广泛的一种运动特性曲线叫做“多项式”曲线。其主要优点是高平稳性，由此使其广泛地用于诸如汽车发动机那样的柔性系统中。在讨论这些之前先提一下这个方法的缺点：

(1) 没有统一的数学研究方法，在某种程度上，它使每个运动特性曲线成为一个单独的问题。

(2) 在上面讨论的运动区域里，如图 1—1 所示，缺乏局部控制的能力。

第二章部分地给出了这种多项式运动曲线的矩阵表达式。然后扩展到包括一个可控制局部特性，而不致于失去期望的平稳性的技术。

与柔性凸轮系统相比较，用于重型机器中的刚性系统，对运动特性曲线将允许有不同的准则。曲线的平滑性不象高柔性系统那样严格，并且希望有一个更直接的方法。近来提出的是根据简单的或修正的梯形加速度曲线，稍后，则为简单的跳跃梯形曲线。根据实践，这种曲线有如下的缺点：

(1) 要假定该曲线对于旋转区域中点是对称的。

(2) 在升程终点要求加速度为零。

另外，在描述梯形曲线高阶导数时的必要假定及数学上的复杂性否定了直接的统一的方法。为了克服这个缺点，在

第二章中对于任何导数的梯形特性曲线，以及任何初始和终止的运动规律，给出了一种新的研究方法。此方法和广义矩阵法一起解出未知曲线的参数。

1·4 高速凸轮的设计原理

对于工作在高速下的凸轮，设计凸轮的简单方法，即通过要求的从动件位移来进行直接的几何转换的方法已不能满足要求。把凸轮看作“静态”的或是“刚性”的条件，就会出现误差，诸如系统的动力变形及输入轴的扭变。因此，设计者必须建立一个完全能够描述实际的系统的动态模型。一个比较简单的凸轮系统，如图1—2所示。

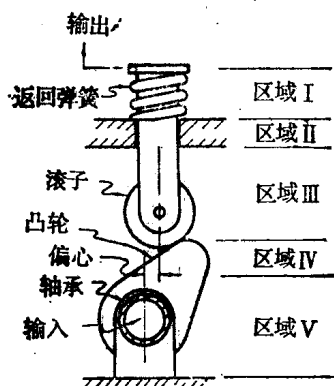


图1—2 一个典型的凸轮系统

图1—3示出了一个可能的模型。其参数由表1—2给出。即使所有的代表参数已经准确知道，在凸轮设计者面前仍然明显摆着庞大的任务。但在许多情况下，为了得到高精度系统的近似特性，并不需要这样一个复杂的设计过程。事实

上通过等阶能量概念，如图 1—4 所示的集中参数模型已经

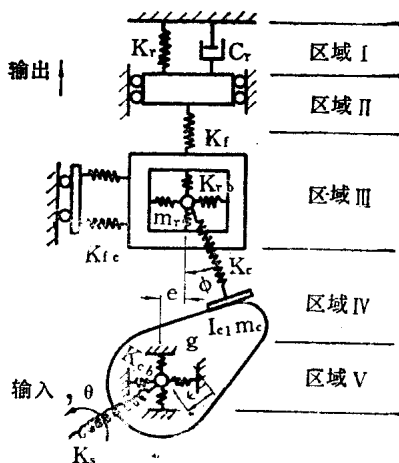


图 1—3 一种可能的系统模型

成功地应用到凸轮的设计理论中去了。对于简单模型的透彻理解是十分必要的，它是推广到高度复杂系统的合乎逻辑的起点。根据这个道理，图 1—3 所示的简单模型将在第三章中进行充分的研究，以深入了解高速工作及动力变形的概念。这些概念在第四章中将扩展到下一步，即模型化的复杂性问题。那里描

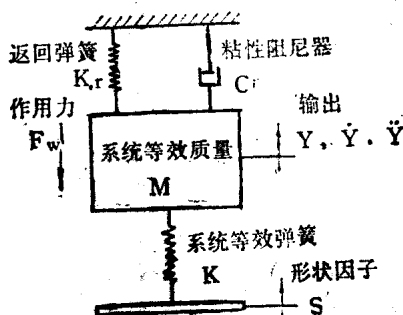


图 1—4 单自由度凸轮模型

述新系统所用的概念是直接与简单模型有关的。在每种情况下希望的结果，代表了设计者的准则，即导出在给定的工作速度下，产生要求运动的凸轮形状。

另一个和凸轮系统工作有关的主要问题是对于响应的分析。现在已经有一些根据有限差分方程的方法来研究这一问题，但这些方法没有得出设计的一般法则。特别要考虑的是，当系统有一个偏离设计速度的循环输入时，系统的响应问题。第五章将处理这个偏速的响应问题，表明粗偏差及瞬时振动现象是可以预示的，并且当系统工作在设计的速度下时，这些现象将不会存在^①。另外，这个方法又表示，用较为简单的系统表示，使较复杂的模型变得容易理解，并结合图示例子，这将能使设计者可以预示一个系统对于给定的一组偏速条件的响应〔见参考书1〕。

第六章研究一个系统的响应，这系统是根据模型或根据数学误差设计的。重要的经验法则的搜集将为设计者指明理想的系统结构。最后，还提出一些供将来研究的领域。

^① 当然，在自然频率处不发生振动是仅从数学模型得到的结果。一个实际的凸轮表面，加上加工误差使得凸轮即使在设计速度下，也会产生一些输出运动的误差，包括瞬时误差。