

凸轮机构的现代设计

编译者：邹慧君 董师予等



上海交通大学出版社

TH112.2

Z 96

凸轮机构的现代设计

邹慧君 董师予等编译

上海交通大学出版社

沪新登字 205 号

内 容 提 要

本书全面地、系统地阐述了凸轮机构现代设计的理论基础和设计计算方法,是一本内容新颖、又比较实用的凸轮机构设计专著。

全书共分十四章,主要阐述:适合各种需要的从动件运动规律的基本特性、用数值法进行凸轮廓线综合、凸轮廓线坐标求法、压力角与力的传递、接触应力与磨损、力分析、凸轮-从动件系统动力学模型的建立方法及其动力性能的分析,以及凸轮-从动件系统的优化综合和CAD的概述。

本书可作大专院校机械工程、仪器仪表专业的教材,也可供机械设计、制造和维修工程技术人员参考。

2011.12 / 111

凸轮机构的现代设计

出版:上海交通大学出版社
(淮海中路 1984 弄 19 号)
发行:新华书店上海发行所
印刷:常熟市印刷二厂
开本:787×1092 (毫米) 1/16
印张:19.75
字数:495000
版次:1991 年 5 月 第 1 版
印次:1991 年 5 月 第 1 次
印数:1—2500
科目:254—312
ISBN 7—313—00905—4/TH·13
定价:5.10 元

序

凸轮机构应用十分广泛,在各种自动机床、计算机、印刷机械、包装和食品机械、纺织机械、内燃机以及自动控制装置中都采用了各种各样的凸轮机构。

然而,对于凸轮机构的设计,目前还采用着比较陈旧的设计指导思想和设计方法。随着凸轮机构向高速度、高精度、低噪音和长寿命等方面发展,极需对凸轮机构设计的理论基础和设计计算方法作进一步的发展和完善,并加以系统地论述。但是,目前国内还缺乏一本内容深入、全面、实用价值较高,又比较适合电子计算机计算的凸轮机构现代设计的参考书,为了弥补这种不足,我们将Fan, Y. Chen所著的“Mechanics and Design of Cam Mechanisms”进行了一定的删节和某些章节的重新编排,编译了本书,取名为《凸轮机构的现代设计》。Fan, Y. Chen是美籍华人,是美国著名机构学教授,不幸在 1981 年病逝,他所著的凸轮专著被国外誉为权威著作。

本书着重介绍了各种类型的从动件运动规律的基本特性、凸轮廓线的综合方法,凸轮机构的压力角与力分析、凸轮机构中的接触应力与磨损问题、凸轮-从动件系统动力学模型建立方法及其动力响应的分析研究等等。书中还根据我们研究的结果列出了一些计算机程序,供读者参考应用。由于本书内容的新颖性和实用性,我们相信对广大读者会有较大的参考价值。

本书可作为从事各类机械和仪器仪表设计与制造的工程技术人员参考,也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

参加本书编译工作的同志有:董师予(第一、二章)、曹志奎(第三、四、十四章)、周明溥(第五、六、七章)、徐龙平(第八、九、十章)、邹慧君(第十一、十二、十三章)。本书所附计算机程序由张毅汇编。本书由邹慧君、董师予负责主编译和审阅定稿。

本书涉及的新内容较多,限于水平,书中谬误和不当之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编译者

1989 年 8 月于上海交通大学机械工程系

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 凸轮机构	1
§ 1-2 凸轮机构与连杆机构的比较	1
§ 1-3 凸轮机构的分类	1
§ 1-4 凸轮机构的名词术语	5
§ 1-5 设计中应考虑的问题	6
第二章 从动件的常用运动规律	7
§ 2-1 运动过程	7
§ 2-2 等速运动规律	7
§ 2-3 用圆弧拼接的改进型等速运动规律	8
§ 2-4 等加速运动规律	9
§ 2-5 不对称的等加速运动规律	11
§ 2-6 简谐运动规律	12
§ 2-7 摆线运动规律	13
§ 2-8 椭圆运动规律	14
§ 2-9 基本曲线的各系数	16
§ 2-10 用多项式表示的运动规律	16
§ 2-11 多项式运动规律中的其它约束条件	20
§ 2-12 指数运算	24
第三章 用复杂多项式和傅里叶级数表示的运动规律	27
§ 3-1 引言	27
§ 3-2 采用正交多项式的凸轮-从动件运动规律	27
§ 3-3 采用密切多项式的凸轮-从动件运动规律	31
§ 3-4 停-升-停(DRD)运动的调和曲线	35
§ 3-5 具有有限端点速度的调和曲线	37
第四章 改进型及组合型的运动规律	39
§ 4-1 运动组合的基本条件	39
§ 4-2 修正梯形曲线	40
§ 4-3 不对称的改进梯形曲线	46
§ 4-4 修正正弦曲线	48
§ 4-5 修正摆线曲线	52
§ 4-6 组合法	54
§ 4-7 非简单曲线的组合——组合法的引伸	65
第五章 用数值法进行廓线综合	70

§ 5-1 概述	70
§ 5-2 有限差分法	70
§ 5-3 光滑从动件运动规律曲线的约翰逊法	71
§ 5-4 修正的约翰逊法——面积矩或影响系数法	72
§ 5-5 按给定的加速度曲线,用数值法来综合凸轮机构的位移	75
第六章 凸轮廓线坐标的求法	83
§ 6-1 凸轮廓线的图解法	83
§ 6-2 凸轮廓线的解析法	7
§ 6-3 刀具坐标	95
第七章 压力角和力的传递	98
§ 7-1 概述	98
§ 7-2 压力角	98
§ 7-3 压力角的变化	99
§ 7-4 压力角与凸轮尺寸	100
§ 7-5 压力角和力的传递	102
§ 7-6 压力角和凸轮几何参数	108
§ 7-7 用数值解计算表格形式表示的凸轮廓线的压力角	123
第八章 凸轮的曲率半径	128
§ 8-1 曲线的曲率半径	128
§ 8-2 失真现象	129
§ 8-3 直动滚子从动件凹形凸轮的最小曲率半径	130
§ 8-4 用解析法求曲率半径	132
§ 8-5 凸形凸轮最小曲率半径的求法	143
§ 8-6 求最小曲率半径的诺模图	148
§ 8-7 用数值法计算以表格形式表示凸轮廓线的曲率半径	151
第九章 接触应力和磨损	153
§ 9-1 引言	153
§ 9-2 弹性接触的赫兹理论	153
§ 9-3 磨损现象	158
§ 9-4 凸轮材料与表面处理	161
§ 9-5 表面磨损试验的实验数据	162
§ 9-6 滚子从动件	165
第十章 力分析	168
§ 10-1 引言	168
§ 10-2 弹簧力	169
§ 10-3 为防止凸轮-从动件分离的最小从动件弹簧预紧量	173
§ 10-4 确定从动件跳动的实验方法	175
§ 10-5 弹簧力和接触力对凸轮廓线的影响	176
§ 10-6 力矩	177

第十一章 凸轮-从动件系统动力学模型的建立	182
§ 11-1 研究凸轮-从动件系统动力学的基本原理	182
§ 11-2 早期发展的简要回顾	182
§ 11-3 动力学模型的建立	183
§ 11-4 实例——汽车顶阀凸轮机构模型的建立	206
第十二章 凸轮-从动件系统的方程及其解	212
§ 12-1 单自由度的线性模型	212
§ 12-2 多自由度的线性模型	213
§ 12-3 含有非线性参数的系统的模型	215
§ 12-4 凸轮-从动件和驱动轴的耦合系统	217
§ 12-5 凸轮廓线的概率模型	224
§ 12-6 方程的求解方法和系统响应	225
第十三章 凸轮-从动件系统的动力响应	233
§ 13-1 引言	233
§ 13-2 基本概念和定义	233
§ 13-3 单自由度线性系统的时间响应	235
§ 13-4 频域内的响应表示——动力响应谱	237
§ 13-5 多自由度线性系统的动力响应	246
§ 13-6 非线性系统的动力响应	247
§ 13-7 具有柔性驱动轴凸轮-从动件系统的动力响应	248
第十四章 凸轮-从动件系统的优化综合和计算机辅助设计概述	257
§ 14-1 引言	257
§ 14-2 解的选择和可行设计方案的识别	257
§ 14-3 最优综合	258
§ 14-4 程序语言	260
附录A 凸轮曲线的附表	264
附录B 计算程序	268
参考文献	

第一章 绪 论

§ 1-1 凸轮机构

凸轮是机械中的一个零件,用它将运动传给与它直接接触的另一构件(从动杆),使从动杆按规定的规律运动。

凸轮机构由三个元件(凸轮、从动杆或从动件系统、机架)组成。凸轮可制成各种形状,从动杆直接与凸轮接触。从动件系统包括所有受凸轮驱动的各个元件,它们可以与从动杆直接相联,也可以通过连杆或齿轮与从动杆相联。机架则是用来支承凸轮和从动杆的构件。

凸轮机构是通用机构,它几乎可以实现无限多种的从动杆运动规律,利用它把回转运动转变成直线移动或摆动;在有些场合,也可把一种直线移动或摆动转变成另一直线移动或摆动。

凸轮机构广泛应用于各种自动机床和自动装置中,如纺织机械、计算机、印刷机、食品加工机械、内燃机以及其它各种自动机械和控制系统中。

§ 1-2 凸轮机构与连杆机构的比较

为了满足各种运动和工作性能的要求,可采用各种不同的机械装置。但若要求实现复杂的运动,则回转机构(如齿轮)和挠性传动(如皮带、链条)就不能达到此目的,大多数是在凸轮机构和连杆机构中进行挑选。为此,对这两种机构就其优缺点作全面的分析,归纳如下。

表1-1 凸轮机构与连杆机构的比较

凸 轮 机 构	连杆机构
容易实现各种各样输入-输出的运动要求	只能满足有限个输入-输出的运动要求
机构尺寸紧凑	要占用较大空间
凸轮廓线的制造精度对其动力响应很敏感	即使制造有误差,对输出响应的影响也不大
制造成本高	制造成本低
容易进行动平衡	动平衡困难,即使分析,也很麻烦
表面容易磨损	铰链中的磨损并不严重,运转较平稳

这里也须指出,从目前和将来的趋势看,连杆机构是大有发展前途的。不少人认为:最好能设计或综合出一个可以替代凸轮机构的连杆机构,以得到近似的相同输出运动,这样就可使高速机械的运转更为平稳,噪声更小。这种观点反过来正好说明当前凸轮机构设计中应密切注意哪些问题。

§ 1-3 凸轮机构的分类

我们可以按输入-输出的运动类型、从动杆形状及其安装位置和凸轮形状对凸轮机构进行

分类,也可根据从动杆运动过程的不同型式及凸轮廓线的各种运动特性对凸轮机构进行分类。

(一)按输入-输出的运动类型来分

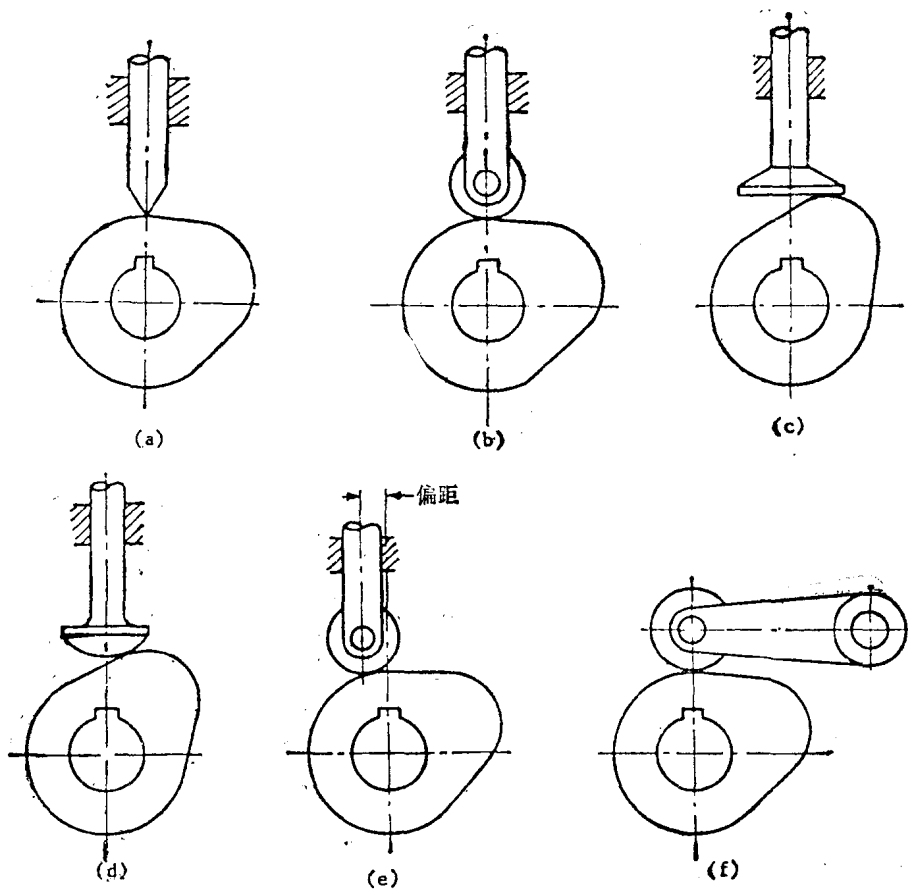
a) 回转凸轮-直动从动杆(图 1-1 (a)、(b)、(c)、(d)、(e));

b) 回转凸轮-摆动从动杆(图 1-1 (f));

c) 移动凸轮-直动从动杆(图 1-2);

d) 固定凸轮-直动从动杆;

e) 固定凸轮-摆动从动杆。



1-1

(二)按从动杆形状来分

a) 尖端从动杆(图 1-1 (a));

b) 滚子从动杆(图 1-1 (b)、(e)、(f));

c) 平底从动杆(图 1-1 (c))或倾斜的平底从动杆;

d) 球面从动杆(图 1-1 (d))。

(三)按从动杆的安装位置来分

a) 对心从动杆——从动杆的中心线通过凸轮轴的中心线;

b) 偏置从动杆——从动杆的中心线不通过凸轮轴的中心线,它们之间的距离就是偏心距。

由于偏置使从动杆上的侧向受力减小。

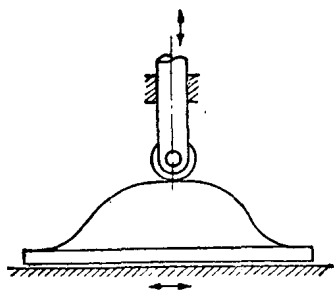


图 1-2 移动凸轮-直动从动杆

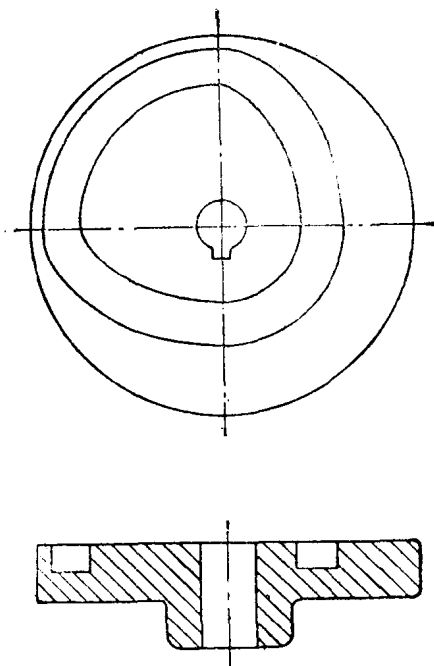


图1-3 凹槽凸轮

(四)按凸轮形状来分

a) 平板凸轮(盘形凸轮)

——从动杆在垂直凸轮回转轴线的平面内运动。

b) 凹槽凸轮(锁合凸轮)

——从动杆嵌在凸轮平面的凹槽内运动,如图1-3。

c) 圆柱或圆桶凸轮(图 1-4(a))

滚子从动杆在圆柱表面所切制成的导槽内运动,它可以作直动或者摆动。如果圆柱体用圆锥来代替,则便是圆锥凸轮。

d) 球形凸轮(图1-4(b)、(c))

这种凸轮可以呈凸形也可是凹形的,凸轮上有一条切在回转表面上的圆周轮廓线,当凸轮绕其轴线回转时,利用此廓线来转换摆动从动杆的运动。

e) 端面凸轮图(图 1-4 (e)、(f))

这种凸轮具有圆柱、圆锥或球面的回转部分。通常将凸轮的回转运动转变成与凸轮轴线垂直的从动杆的直动或摆动。由于该凸轮廓线制造困难,造价贵,因此很少采用。

f) 三维空间凸轮(图1-4(d))

它具有一个绕纵轴回转的曲面,从动杆沿此轴移动,因此,直动从动杆的位置取决于凸轮转角和移动位置这两个参数。

还有许多被应用于各种机械中的特殊凸轮,有关它们的介绍可见罗斯白脱 (Rothbart)、[193]的著作。

对于上述各种凸轮,从动杆必须始终保持与凸轮廓线接触,它可以用下面的方法来达到:

1) 重力锁合——靠从动件系统的重量来保证接触;

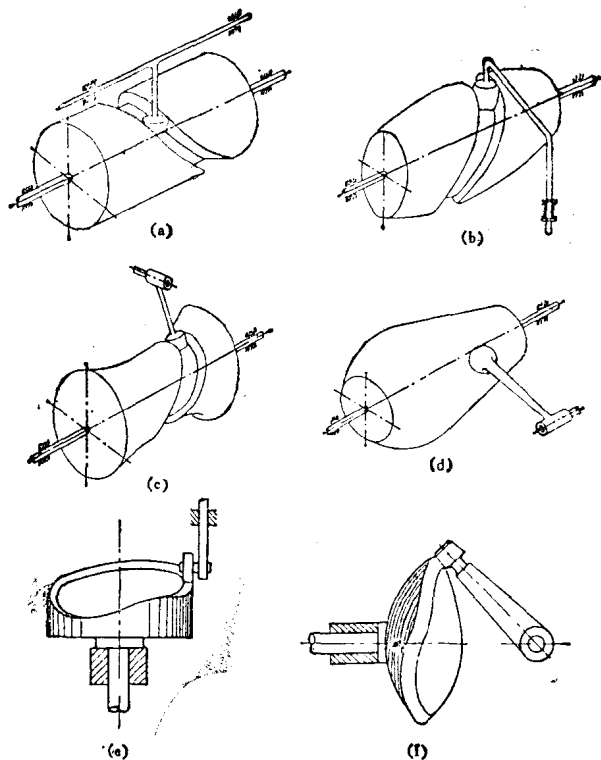


图 1-4(a)圆柱凸轮(b)凸的球面凸轮(c)凹的球面凸轮
(d)三维空间凸轮(e)端面凸轮(f)端面凸轮

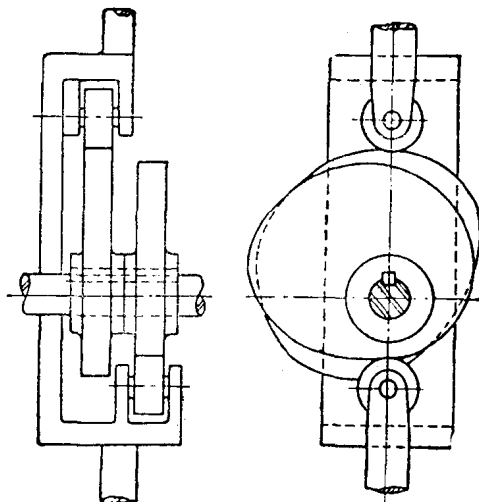


图1-5 从动杆作移动的共轭凸轮

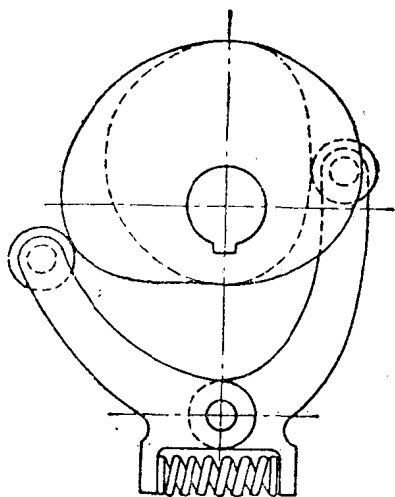


图1-6 从动杆作摆动的共轭凸轮

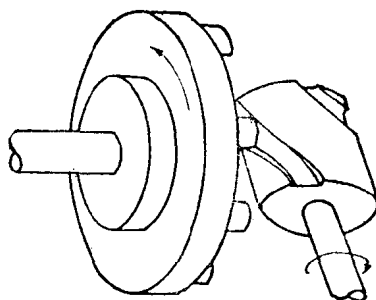


图1-7 用在机床分度盘中的槽沟式圆筒凸轮

2) 弹簧锁合——用专门设计的弹簧来保证接触；

3) 机械锁合——用凹槽或其它方式来保证接触。如图 和图 1-6 的共轭凸轮。

(五) 凸轮分度机构

当用凸轮机构来精确定位时,若采用图1-7所示的槽沟式圆筒凸轮时,由于槽宽与滚子直径间存在的间隙,使停歇很难保证高精度的定位。为此需采用图 1-3 所示的弧面分度凸轮,利用

共轭凸轮把从动杆紧靠在凸缘两边,这样,滚子始终与凸缘成无侧隙的接触,且可以方便地调整预紧力以补偿装配或磨损所造成的微小角度误差。

§ 1-4 凸轮机构的名词术语

现以图 1-9 来说明以下所规定的名词术语。

迹点 从动杆上的一个理论点,它相当于假想尖端从动杆上的尖点滚子。从动杆的迹点就是滚子中心。

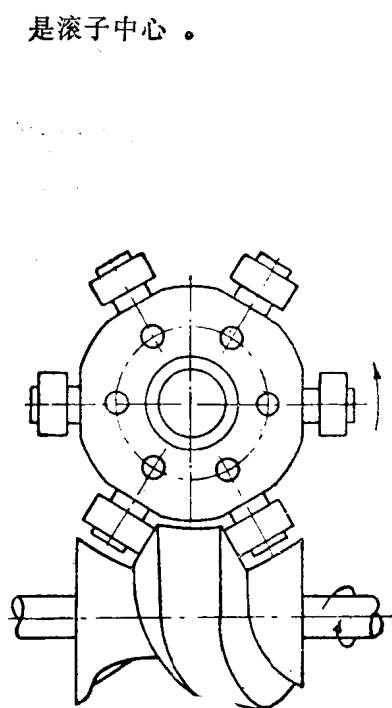


图1-8 用于分度机构中的弧面分度凸轮

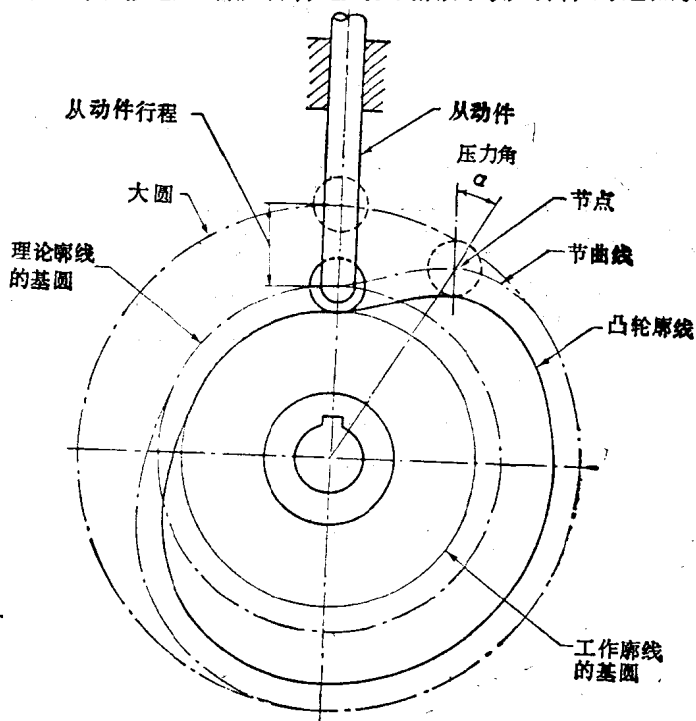


图 1-9 凸轮机构的名词术语

理论廓线 当从动杆绕固定的凸轮回转时,迹点所形成的轨迹。

节点 理论廓线上压力角最大的那一点。

实际廓线 与从动杆相接触的凸轮工作表面。对于尖端从动杆的平板凸轮,其实际廓线与理论廓线相重合。在锁合凸轮或凹槽凸轮中有内侧和外侧两实际廓线。

节圆 由凸轮中心到节点所作的圆,其半径用作计算在已知压力角下的最小凸轮尺寸。

基圆 由凸轮中心到切于理论廓线所作的最小圆。

大圆 由凸轮中心到切于理论廓线所作的最大圆。

实际廓线的基圆 由凸轮中心到切于实际廓线所作的最小圆。

行程或摆幅 从动杆运动时的最大位移。

从动杆位移 在不同时间(单位为秒)或机械循环(凸轮位移)某部分(单位为度或厘米)时,从动杆自某一指定零位或静止位置起的位置。

压力角 理论廓线上任意点的法线与从动杆瞬时运动方向之间的夹角。它表示凸轮廓线的陡度。

曲率半径 理论廓线上任意点的密切圆半径。其值与曲线上该点的曲率相同。

跃变点 加速度由正值变到负值(作用在从动杆上的力也改变方向)时的位置。

§ 1-5 设计中应考虑的问题

一般凸轮机构设计时先定下其运动规律,然后对机器作出完整的时间曲线图,以表示机构位移在一个时间循环下机构的实际距离及位置,以及相对其它机构的运动要求。如果这些位移都是连续的,且互相间又无密切联系,则通常可选用一个简单而且最佳的运动规律。基本上,一个理想的运动规律应该是最大加速度最小,但遗憾的是,设计中还要有其它条件,因此必须在各最佳参数间取一折衷方案。另外,在选择各种类型的运动规律时,还需考虑动力性能。

设计时除了考虑运动条件外,还要关心凸轮和滚子表面所承受的载荷类型及其大小。这些力有工作载荷、惯性力冲击力和摩擦力。

工作载荷确定作用在机构中的有用功。惯性力即从动件系统质量与其加速度的乘积。对于低速凸轮,因其惯性力很小,因此不会有明显的部件变形,这时,输出的运动基本上符合按运动学所得的运动特性;但在高速情况下,由于惯性力的增大而使从动杆发生变形和产生振动。强烈的振动不仅使机构出现的期望运动学性能与凸轮的几何性能有较大偏差,而且还潜在着机构被破坏的可能性。

由上可见,在分析或设计凸轮机构时总存在着运动学和动力学两个问题。这两个问题(每个问题都涉及很多因素)各有自己内在的关系,同时,它们之间又有复杂的联系。

本书将在第二章到第六章和第八章中讨论运动学,而在第七章和第十章中讨论力分析。在第十一章介绍了系统动力学模型的建立之后,在第十二、十三章中将讨论凸轮-从动件系统的动力响应问题。此外,在第九章内将讨论有关接触应力和表面磨损问题。最后第十四章将对目前凸轮机构的计算机辅助设计及其优化的发展情况作一概况介绍。

第二章 从动件的常用运动规律

§ 2-1 运 动 过 程

每当凸轮经过一个运动循环,从动杆就完成推程、停留和回程一系列过程。推程是指从动杆远离凸轮轴心的运动;停留是指从动杆停留不动;而回程是指从动杆朝向凸轮轴心的运动。现用下面的缩写符号来标志从动杆常用的三种运动过程。

DRD (停-升-停) 这是最基本的运动型式,它在推程的始点和终点均有停留。当然,也可以把 DRD 看作是停-回-停,其含义是相同的。

DRRD (停-升-回-停) 其时,在推程和回程之间并无停留区;若把 DRRD 看作是停-回-升-停,则在行程的“端点”就有了停留。

RRR (升-回-升) 这种过程无停留区,它在偏心轮机构和连杆机构中用得较多。

图 2-1 示出了这三种运动过程。

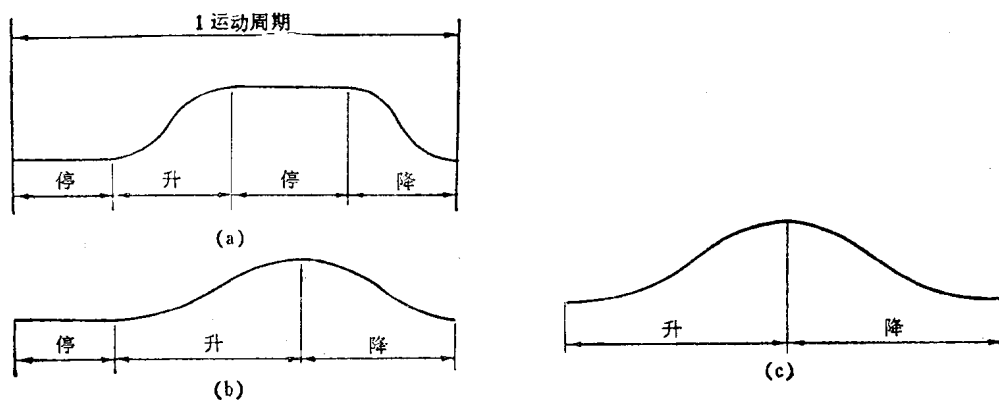


图 2-1 凸轮的运动过程

(a) DRD 型; (b) DRRD 型; (c) RRR 型;
停留-升程-停留-回程 停留-升程-回程 升程-回程

在各推程和回程中,可采用各种从动杆运动规律,本章将叙述 DRD 型的若干基本曲线,并导出它们的运动方程式。基本曲线主要有代数多项式和三角函数式两大类。代数多项式有等速(直线)、等加速(抛物线)、改进型等速曲线以及高阶多项式曲线;而三角函数式有简谐、摆线、椭圆曲线等,至于改进型三角曲线将在第三章内讨论。

§ 2-2 等速运动规律

现来讨论最简单的代数多项式(直线方程)

$$S = C_0 + C_1 \theta \quad (2-1)$$

式中: S 是从动杆位移; C_0 和 C_1 都是常数; θ 是凸轮转角。

设从零位算起, 以 h 表示凸轮转过 β 角时的总升程。由此得

$$\begin{aligned} C_0 &= 0 \\ h &= C_1 \beta \end{aligned}$$

或者

$$C_1 = \frac{h}{\beta}$$

把它代入式(2-1), 得

$$S(\theta) = \frac{h}{\beta} \theta \quad (2-2)$$

因此

$$V(\theta) = \frac{dS}{d\theta} = \frac{h}{\beta} \quad (2-3)$$

$$A(\theta) = \frac{d^2S}{d\theta^2} = 0 \quad (2-4)$$

由图 2-2 可见, 等速运动的位移曲线是条等斜率的直线, 故从动杆的速度等于常数, 而加速度除在升程的起点和终点处为瞬时无穷大外, 其余各处都等于零。

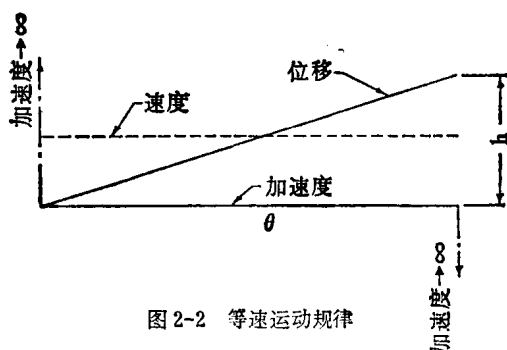


图 2-2 等速运动规律

§ 2-3 用圆弧拼接的改进型等速运动规律

在凸轮机构中, 都不采用单一的等速曲线, 而是采用与其它曲线组合的改进型曲线。图 2-3 就是一种用切于停留区的圆弧所组成的曲线。

根据图 2-3 的几何关系, 可导出从动杆位移

$$\overline{UB} = h \sin \alpha$$

$$\overline{UA} = h(1 - \cos \alpha)$$

$$\overline{mn} = \frac{h}{2} - \overline{UA} = \frac{h}{2} (2 \cos \alpha - 1)$$

$$\overline{Bn} = \frac{\overline{mn}}{\tan \alpha} = \frac{2 \cos \alpha - 1}{2 \tan \alpha} h$$

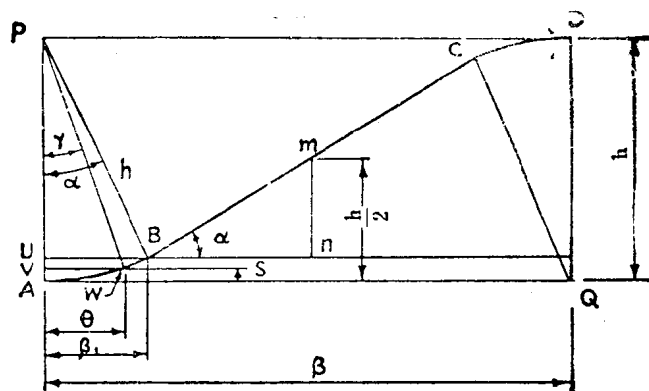


图 2-3 用圆弧拼接的改进型等速运动规律

在圆弧区内, 从动杆位移的一般表达式为

$$S = AV = h(1 - \cos \gamma)$$

由三角形 VWP 可知

$$\theta = h \sin \gamma$$

故

$$S(\theta) = h \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\theta^2}{h^2}} \right) \quad (2-5)$$

$$V(\theta) = \frac{dS}{d\theta} = \frac{\theta}{(h^2 - \theta^2)^{1/2}} \quad (2-6)$$

$$A(\theta) = \frac{h^2}{(h^2 - \theta^2)^{3/2}} \quad (2-7)$$

其速度和加速度曲线见图 2-4。

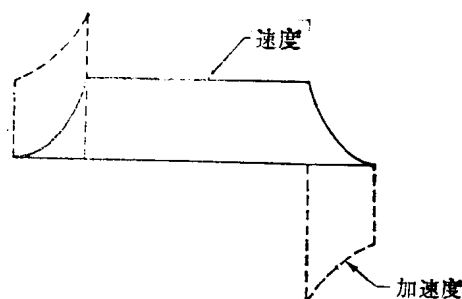


图 2-4 用圆弧拼接的改进型等速运动的速度和加速度曲线

§ 2-4 等加速运动规律

众所周知, 等加速和等减速运动规律是抛物线, 其前半部分的位移方程为

$$S = C\theta^2 \quad (2-8)$$

这个方程只适用在曲线的起点和拐点之间。若拐点在整个行程的中间时, 即 $\theta = \frac{\beta}{2}$ 和 $S = \frac{h}{2}$ 时, 那末, 利用此边界条件就可求出常数

$$C = 2h/\beta^3$$

因此, 当 $0 \leq \theta \leq \beta/2$ 时,

$$S(\theta) = \frac{2h}{\beta^3} \theta^3 \quad (2-9)$$

$$V(\theta) = \frac{4h}{\beta^2} \theta \quad (2-10)$$

最大速度发生在 $\theta = \beta/2$ 的拐点处, 其值

$$V_{\max}(\theta) = \frac{2h}{\beta} \quad (2-11)$$

$$A(\theta) = \frac{4h}{\beta^2} = \text{常数} \quad (2-12)$$

除在加速度发生变化处的加速度导数(跃度)达到无穷大外,其余处的跃度

$$J(\theta) = 0 \quad (2-13)$$

拐点与最大位移间的曲线方程

$$S = C_1 + C_2\theta + C_3\theta^2 \quad (2-14)$$

利用下面三个边界条件:

$$\begin{aligned} \theta = \beta, \quad S &= h, \\ \theta = \frac{\beta}{2}, \quad V_{\max} &= \frac{2h}{\beta}, \\ \theta = \beta, \quad V &= 0. \end{aligned}$$

可求出常数 C_1, C_2, C_3 值。

$$C_1 = h,$$

$$C_2 = \frac{4h}{\beta},$$

$$C_3 = -\frac{2h}{\beta^2}.$$

将这些常数代入式(2-14),就可得 $\beta/2 \leq \theta \leq \beta$ 时的位移方程:

$$S(\theta) = h - \frac{2h}{\beta^2}(\beta - \theta)^2 \quad (2-15)$$

$$V(\theta) = \frac{4h}{\beta} \left(1 - \frac{\theta}{\beta}\right) \quad (2-16)$$

$$A(\theta) = -\frac{4h}{\beta^2} \quad (2-17)$$

除在加速度发生变化处,跃度等于无穷大外,其余各处的跃度均等于零,即

$$J(\theta) = 0 \quad (2-18)$$

典型的等加速运动规律的位移曲线画法见图 2-5, 图 2-6 为其速度、加速度及跃度曲

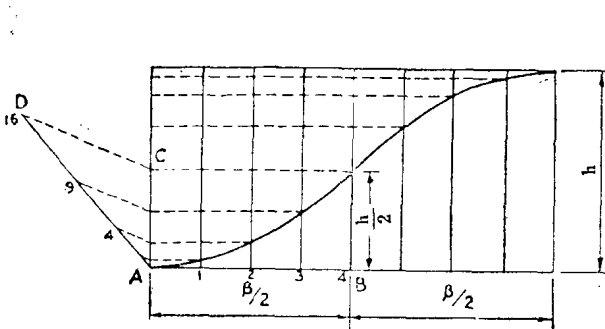


图 2-5 等加速运动位移曲线的画法

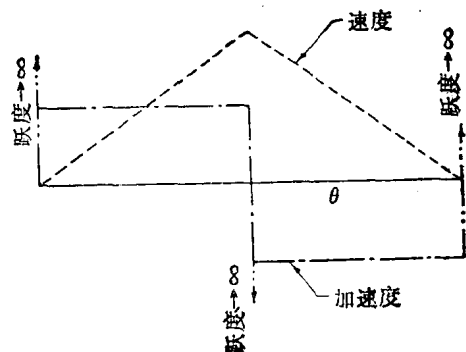


图 2-6 等加速运动的速度、加速度、跃度曲线