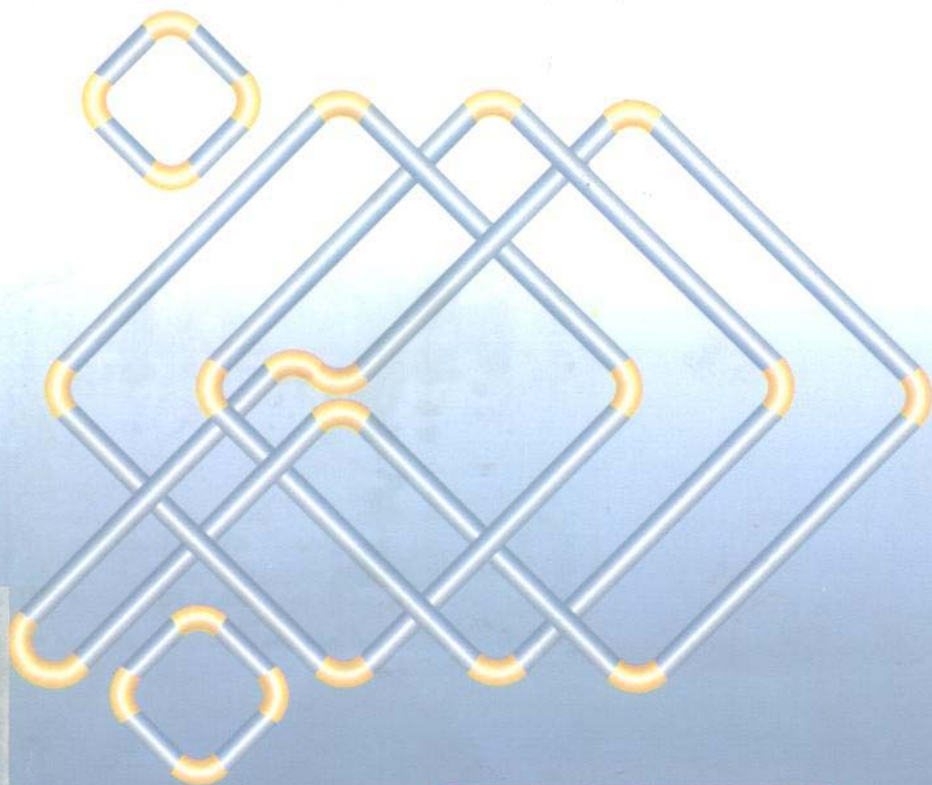


中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作

机械系统刚柔耦合

动力分析及仿真

孙世基 黄承绪 编著



人民交通出版社

中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作

Jixie Xitong Gangrououhe Dongli
Fenxi ji Fangzhen

机械系统刚柔耦合动力 分析及仿真

孙世基 黄承绪 编著

人民交通出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

机械系统刚柔耦合动力分析及仿真/孙世基编.
北京: 人民交通出版社, 2000
ISBN 7-114-03594-2

I . 机… II . 孙… III . ①机械系统-耦合-运动
(力学)-分析②机械系统-耦合-运动(力学)-计算机
仿真 IV . TH113.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 13933 号

中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科 (专业) 学术著作
机械系统刚柔耦合动力分析及仿真

孙世基 黄承绪 编著

责任印制: 杨柏力 正文设计: 王秋红 责任校对: 梁秀青
人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街 10 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 9 字数: 234 千

2000 年 5 月 第 1 版

2000 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001 — 3000 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-114-03594-2

TH • 00027

22.70.07

内 容 简 介

本书分为7章,系统地讲述了组成机械系统的刚性构件、弹性构件的运动学和动力学,以及机械系统中的约束,介绍了用一般力学原理建立机械系统刚柔耦合动力学模型的方法及求解模型的数值方法,介绍了机械系统刚柔耦合动力响应计算的计算机仿真及其在机械系统动态设计中的作用,反映了作者的有关研究工作和成果,并通过实例说明了本书中的理论和方法。

本书可供机械设计领域的工程技术人员、科研人员使用,也可供高等院校相关专业的高年级学生、研究生阅读。

前 言

随着现代工业与科学技术的高速发展,对机械产品性能的要求越来越高,使机械产品日益向高速、精密、轻量化、大尺度和自动化方向发展。在这种情况下,为了使机械产品安全可靠地工作,机械产品的设计正由静态设计向动态设计过渡。人们采用有限元法以及结构动力学方面的多种数值计算方法来计算机械结构系统在复杂动载荷作用下的瞬态响应,并逐步发展机械结构的动态设计方法^[48,49]。

目前,机械结构动态设计主要包括两方面的工作:(1)建立一个切合实际的结构动力学模型。(2)选择有效的结构动态优化设计方法。

在建立结构动力学模型方面,现在主要是采用理论建模(主要是有限元法)与振动实验建模相结合的建模方法。应该指出的是,有限元法是用于结构系统分析的,为了能用总刚度方程求得节点位移的唯一解,必须引入边界条件,即对某些节点施加约束。但是,机械系统是由系统构件相互连接所组成的,系统构件之间具有确定的相对运动。因此从本质上来说,机械系统是由具有大的平动和转动位移的弹性构件相互连接所组成的系统。于是,要建立一个切合实际的机械系统的动力学模型,就不能不考虑具有大的平动和转动位移的弹性构件的动力学性态,不能不考虑系统构件的刚体运动与弹性变形的耦合,及其对整个机械系统运动和动力性态的影响。

机械系统刚柔耦合动力分析,就是在这样的背景下提出来的机械系统的一种新的动力学分析方法。它克服了有限元法不能处理刚体位移的困难,将构件的刚体位移与弹性变形的非线性耦合

以及各种机械约束引入到系统动力学模型,从而可以求得机械系统在全运行过程中的任意瞬时的动态响应,即可以得到机械系统在全运行过程中瞬态响应的时间历程。这就为机械系统的安全性评价、建立自动控制模型创造了条件。

本书是作者在总结关于机械系统刚柔耦合动力分析方面的研究工作以及自 1993 年以来在为本校研究生开设相应课程的讲义的基础上修改而成的。多年来,课题组成员黄承绪副教授、陈先桥副教授,我校的硕士研究生陆志华、汤定超、朱学军、孙莉等均对本书的形成作了很多努力,给予了作者很大的帮助。陆志华并提供了他在上海交通大学攻读博士学位期间所作的关于多区域接触问题研究的部分资料,在此一并表示感谢。

作者还要感谢湖北省自然科学基金委员会、交通部上海港口机械制造厂,他们对开展本书中的研究工作提供了宝贵的支持。

本书收集了大量国内外公开发表的论文与著作,使作者受益匪浅,谨向各位作者表示谢意。

本书共 7 章,除第六章由黄承绪编写外,其余各章均由孙世基编写,并统稿和校对。

由于编著者水平所限,书中缺点、错误在所难免,诚请读者批评指正,为提高我国机械系统动力分析水平共同努力。

孙世基 于武汉

1999 年 9 月

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 机械系统	1
§ 1.2 机械系统构件的刚性运动和变形运动	2
§ 1.3 机械系统构件的刚柔耦合运动分析	3
§ 1.4 机械系统构件的刚柔耦合动力分析	13
§ 1.5 本书内容的安排	14
第二章 刚体动力学基础	16
§ 2.1 转动变换矩阵	17
§ 2.2 方向余弦矩阵	21
§ 2.3 欧拉参数	25
§ 2.4 连续转动 无限小转动	27
§ 2.5 欧拉角	29
§ 2.6 速度分析	31
§ 2.7 加速度分析	40
§ 2.8 刚体的动能 质量矩阵	42
§ 2.9 刚体的运动方程	50
第三章 可变形体力学基础	59
§ 3.1 可变形体的运动描述	59
§ 3.2 有限变形分析	66
§ 3.3 应力分析	80
§ 3.4 有限变形运动方程	86
§ 3.5 本构方程	97
§ 3.6 弹性力的虚功	105
第四章 约束及约束方程	107

§ 4.1	约束及其分类	107
§ 4.2	约束的变分形式 约束的雅可比矩阵	112
§ 4.3	机械系统中常用的约束	124
§ 4.4	机械系统中的接触约束	132
第五章	机械系统刚柔耦合动力学模型	140
§ 5.1	坐标系 广义坐标	141
§ 5.2	可变形体上点的位置、速度和加速度	145
§ 5.3	可变形的动能	149
§ 5.4	可变形的应变能	153
§ 5.5	广义力	156
§ 5.6	可变形的动力学方程	157
§ 5.7	约束及机械系统运动方程	158
§ 5.8	含有接触约束的机械系统刚柔耦合动力学模型	164
第六章	机械系统刚柔耦合动力学方程的数值解法	180
§ 6.1	微分/代数方程组	180
§ 6.2	刚性方程组	181
§ 6.3	微分/代数方程组的数值解法	187
§ 6.4	二阶常微分方程的数值解法	202
§ 6.5	一阶常微分方程的数值解法	208
§ 6.6	含有接触问题的机械系统动力学方程数值解法	224
§ 6.7	约束稳定法	224
第七章	机械系统刚柔耦合动力响应计算的计算机仿真	227
§ 7.1	仿真软件数学模型的建立	227
§ 7.2	实现动力学分析的步骤	230
§ 7.3	程序的总体设计	236
§ 7.4	算例	252
参考文献		276

第一章 概 论

现代机械向高速度、高精度、轻质和大型化发展,其构件的柔性显著增加,影响机械的整体运动及动力性态。这使传统的机械运动学分析中的刚性假设、动力学分析中的准静态分析方法及线弹性动力学分析方法遇到了严重的困难。面对现代机械的这种发展,建立对其有效的力学模型并进行正确的快速仿真,就成为机械工程界目前追求的目标之一。

§ 1.1 机械系统

机械,习惯上包括机器和机构。机器和机构的共同点是,它们都是一种人为的实物的组合,各组成部分之间都具有确定的相对运动。

在传统的机械设计方法中,机构的结构和运动学研究机构的运动确定性和不考虑引起机构运动的力的作用,而仅从几何的观点来研究机构各点的轨迹、位移、速度和加速度的求法,以及按已知条件来设计新机构的方法。机构和机器动力学研究在机械运动过程中作用在各构件上的力的求法和确定机械效率的方法,并研究作用力、运动构件的质量和这些构件的运动之间的关系,即机械的调速问题和惯性力的平衡问题^[1]。

对于现代机械向高速度、高精度、轻质和大型化方向的发展,构件的柔性显著增加,其弹性变形对构件的整体运动的影响已经不能忽略,仍然仅从几何的观点来研究机构各点的轨迹、位移、速度和加速度,将会引起较大的分析误差。而且,在动力学分析中,由于构件大位移运动与弹性变形存在强非线性惯性耦合,改变了

构件的固有惯性特性,使问题变得十分复杂。因此,我们必须寻求适应于现代机械发展的方法来对机械进行运动学和动力学分析。

根据机械是由具有相对运动的构件(不仅包括刚性构件,还包括弹性构件)通过机械接点(如平面铰、空间铰、棱形柱及指定的轨迹等)组合而成的这一最本质的特点,我们将机械视为由互相连接的刚体和可变形体组成的系统,并简称为机械系统。本书将系统地讨论建立这种机械系统的运动学和动力学数学模型及其求解(包括计算机仿真)的方法。

§ 1.2 机械系统构件的刚性运动和变形运动

组成机械系统的构件,在相互连接的两构件间存在着一定的相对运动,如移动和转动。在构件为刚性的假设中,这种构件的运动都视为刚性运动。即构件上任意两点之间的距离在全部时间和全部位形上都保持常数。这样,刚体构件在空间的运动可由 6 个广义坐标完全描述。

对具有弹性变形的构件作大位移运动时,其上任意两点之间的距离在全部时间和全部位形上已不是常数,6 个广义坐标就不足以描述它在空间的运动。这种构件称之为可变形体(或柔性体)。在可变形体运动时,除了具有大位移的刚性运动外,还有小的弹性变形运动,形成构件的整体运动。

因此,对于由互相连接的刚体和可变形体所组成的机械系统的整体运动,可将其分解为刚性运动与弹性变形运动两部分。刚性运动可以用多刚体力学予以分析;弹性变形运动可以用线弹性理论予以分析。而对具有弹性变形的可变形体作大位移运动的运动分析和动力分析则是多柔体系统动力学研究的内容^[2,3,4,5]。多柔体系统动力学是在航天器、机器人研究的推动下发展起来的,现在已成为一个独立的学科分支,提出了多种建模方法。鉴于本书的目的,我们并不对各种建模方法作详细的讨论,而着重研究刚性运动与弹性变形的耦合对机械系统运动和动力响应的影响,为机

§ 1.3 机械系统构件的刚柔耦合运动分析

先从质点的运动谈起。质点是假定没有大小的,因而可视为三维空间中的一个点,则质点的运动即为其对所选坐标系的平动。

要描述一个点的运动,首先要描述它在坐标系中的位置。在笛卡尔系中,一个如图 1-1 所示的质点 P 的位置,可由它在系中的三个坐标分量确定。其位置矢量可写成

$$\mathbf{r} = x_1 \mathbf{i}_1 + x_2 \mathbf{i}_2 + x_3 \mathbf{i}_3 \quad (1.1)$$

式中 x_1, x_2 和 x_3 分别为 P 点在三个坐标轴上的坐标分量, $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$ 和 $\mathbf{i}_3$ 分别为沿三个坐标轴的单位矢量。

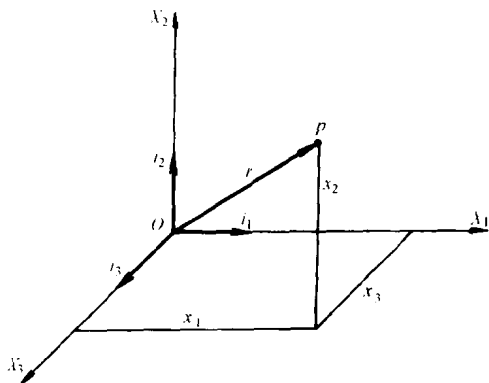


图 1-1 质点 P 的位置矢量

假定笛卡尔系 X_1, X_2 和 X_3 对时间固定,则单位矢量 $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2$ 和 $\mathbf{i}_3$ 具有不变的大小和方向。通过质点位置矢量对时间的一阶和二阶导数,就可方便地得到质点 P 在此笛卡尔系中运动的速度矢量和加速度矢量。分别为

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{x}_1 \mathbf{i}_1 + \dot{x}_2 \mathbf{i}_2 + \dot{x}_3 \mathbf{i}_3 \quad (1.2)$$

$$\mathbf{a} = \ddot{\mathbf{r}} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \ddot{x}_1 \mathbf{i}_1 + \ddot{x}_2 \mathbf{i}_2 + \ddot{x}_3 \mathbf{i}_3 \quad (1.3)$$

式中 $(\dot{})$ 、 $(\ddot{})$ 分别表示对时间取一阶导数和二阶导数。

再讨论刚体的运动。刚体的运动包括平动和转动,因此对刚体位形(位置和方位)的描述需要六个坐标。其中三个坐标描述刚体的位置,另外三个坐标描述刚体的方位。

由于刚体上任意两点之间的距离在运动过程中是保持不变的,因此我们可以采用下面的方法,通过标识刚体上一个点和一条直线来描述刚体在所选坐标系中的位置和方位。

如图 1-2 所示的在三维空间中的一个刚体 i ,为了标识它在笛卡尔系 $X_1 X_2 X_3$ 中的位形,在其上任取一点 O^i 作为原点,建立另一个笛卡尔系 $X_1^i X_2^i X_3^i$,通常称为物体坐标系。为区别起见,将笛卡尔系 $X_1 X_2 X_3$ 称为整体坐标系。物体坐标系的原点连于刚体的 O^i 点上。在物体上再任取一点 P^i ,它对 O^i 点的位置矢量为 $\mathbf{u}^i$ 。则我们可通过标识 O^i 点在整体坐标系的位置及位置矢量 $\mathbf{u}^i$

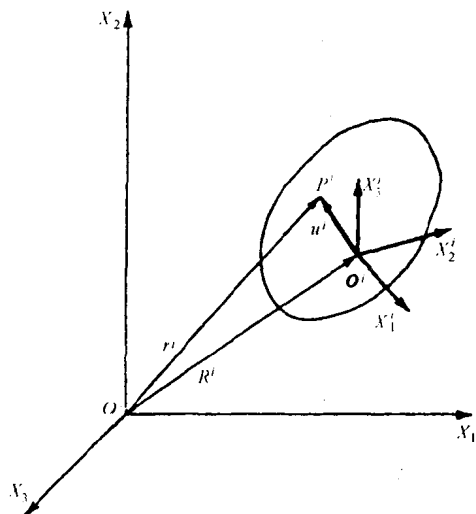


图 1-2 刚体的位形

在整体坐标系的方位来描述刚体 i 在整体坐标系中的位形。如图 1-2 中所示, 物体系原点 O^i 在整体系中的整体位置矢量为 R^i , 刚体上任意点 P^i 在物体系中的局部位置矢量为 u^i 。根据封闭矢量的关系, P^i 点在整体系中的整体位置矢量 r^i 可写成

$$r^i = R^i + u^i \quad (1.4)$$

式中 $r^i = [r_1^i \ r_2^i \ r_3^i]^T$ 是 P^i 点的整体位置矢量;

$R^i = [R_1^i \ R_2^i \ R_3^i]^T$ 是物体系原点 O^i 的整体位置矢量;

$u^i = [u_1^i \ u_2^i \ u_3^i]^T$ 是 P^i 点在物体系的局部位置矢量。

由于假定物体 i 是刚体, 则 P^i 点与 O^i 点之间的距离在运动过程中将保持不变, 故 u^i 的分量在物体系中是已知的不变量。但是在式(1.4)中, 矢量 r^i 和 R^i 都是定义在整体系的, 因此对于 u^i 也必须放在整体系中来描述。在整体系中, 由于刚体的运动, u^i 的方位是随时间变化的。所以, 在任何时刻都必须确定物体系对整体系的方位, 这可用一组转角坐标来描述两个坐标系之间的变换关系来实现。

以二维情况为例, 如图 1-3 所示。 $X_1 X_2$ 为整体坐标系, $X_1' X_2'$

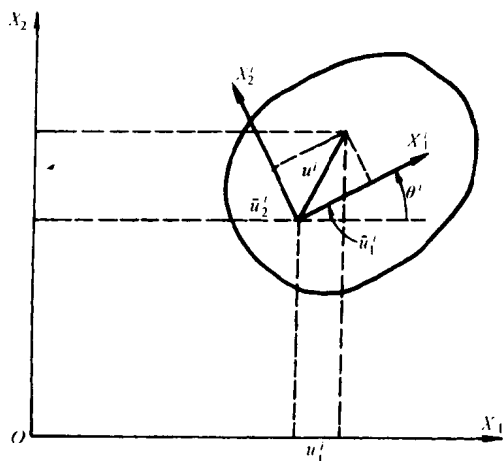


图 1-3 刚体的平面运动

为物体坐标系,物体系对整体系的方位用 θ^i 角确定。令 i_1 和 i_2 分别是沿整体坐标轴 X_1 和 X_2 的单位矢量, i_1^i 和 i_2^i 分别是沿物体坐标轴 X_1^i 和 X_2^i 的单位矢量。则两组单位矢量有如下关系:

$$i_1^i = \cos\theta^i i_1 + \sin\theta^i i_2$$

$$i_2^i = -\sin\theta^i i_1 + \cos\theta^i i_2$$

定义在物体系的矢量 u^i 可写为

$$u^i = \bar{u}_1^i i_1^i + \bar{u}_2^i i_2^i$$

式中 $\bar{u}_1^i$ 和 $\bar{u}_2^i$ 是矢量 u^i 在物体系的分量。利用上面 i_1^i 和 i_2^i 的表达式,则有

$$\begin{aligned} u^i &= \bar{u}_1^i (\cos\theta^i i_1 + \sin\theta^i i_2) + \bar{u}_2^i (-\sin\theta^i i_1 + \cos\theta^i i_2) \\ &= (\bar{u}_1^i \cos\theta^i - \bar{u}_2^i \sin\theta^i) i_1 + (\bar{u}_1^i \sin\theta^i + \bar{u}_2^i \cos\theta^i) i_2 \\ &= u_1^i i_1 + u_2^i i_2 \end{aligned}$$

式中 u_1^i 和 u_2^i 是矢量 u^i 在整体系的分量,且有

$$u_1^i = \bar{u}_1^i \cos\theta^i - \bar{u}_2^i \sin\theta^i$$

$$u_2^i = \bar{u}_1^i \sin\theta^i + \bar{u}_2^i \cos\theta^i$$

写成矩阵形式

$$u^i = A^i \bar{u}^i \quad (1.5)$$

式中 $u^i = [u_1^i \quad u_2^i]^T$

$$\bar{u}^i = [\bar{u}_1^i \quad \bar{u}_2^i]^T$$

A^i 是变换矩阵,且是 θ^i 的函数

$$A^i = \begin{bmatrix} \cos\theta^i & -\sin\theta^i \\ \sin\theta^i & \cos\theta^i \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

由上可见,用转角坐标 θ^i 通过式(1.5)实现了物体系和整体系之间的坐标变换。则刚体在整体系中的位形可由广义坐标 $[R^i, \theta^i]^T$ 描述。一旦按式(1.4)确定了刚体上任意一点 P^i 的整体位置,此刚体在整体系中的位形就可完全确定。式(1.4)就意味着一个刚体的一般运动等价于刚体上一点(如 O^i 点)的平动加上绕此点的转动。

需要说明的是,此转角坐标不是唯一的。在第二章我们将引入另一些转角坐标。

完成了对刚体位形的描述后,就可根据式(1.4)进行刚体运动的速度和加速度分析。

如图 1-4 所示,刚体 i 上一任意点 P^i 在整体系 $X_1 X_2$ 的整体位置矢量可写成

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{u}^i$$

而 P^i 点在物体系的局部位置矢量 $\mathbf{u}^i$ 可写成

$$\mathbf{u}^i = [\bar{u}_1^i \quad \bar{u}_2^i]^T \quad (1.7)$$

或

$$\mathbf{u}^i = \bar{u}_1^i \mathbf{i}_1^i + \bar{u}_2^i \mathbf{i}_2^i \quad (1.8)$$

式中 $\bar{u}_1^i$ 和 $\bar{u}_2^i$ 是矢量 $\mathbf{u}^i$ 在物体系 $X_1^i X_2^i$ 的坐标分量。由于物体是刚体,它们都是常数。

$\mathbf{i}_1^i$ 和 $\mathbf{i}_2^i$ 分别是沿物体系坐标轴 X_1^i 和 X_2^i 的单位矢量。

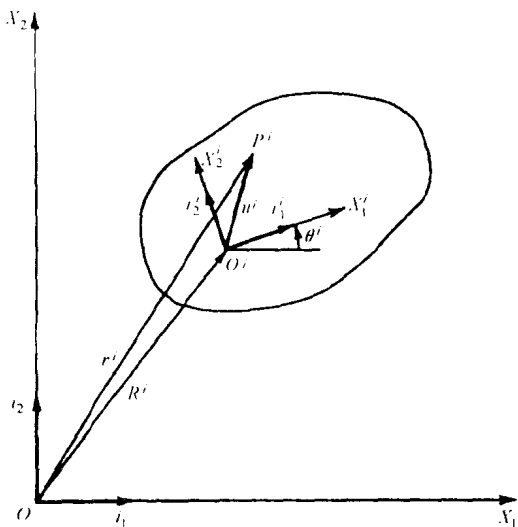


图 1-4 点的位置矢量

式(1.4)对时间取导,得到 P^i 点在整体系的速度矢量

$$\mathbf{v}^i = \frac{d\mathbf{r}^i}{dt} = \dot{\mathbf{R}}^i + \dot{\mathbf{u}}^i \quad (1.9)$$

式中 $\dot{\mathbf{u}}^i$ 可由式(1.8)对时间取导得到,即

$$\dot{\mathbf{u}}^i = \bar{u}_1^i \frac{d\mathbf{i}_1^i}{dt} + \bar{u}_2^i \frac{d\mathbf{i}_2^i}{dt}$$

其中

$$\mathbf{i}_1^i = \cos\theta^i \mathbf{i}_1 + \sin\theta^i \mathbf{i}_2$$

$$\mathbf{i}_2^i = -\sin\theta^i \mathbf{i}_1 + \cos\theta^i \mathbf{i}_2$$

则

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{i}_1^i}{dt} &= -\sin\theta^i \cdot \dot{\theta}^i \mathbf{i}_1 + \cos\theta^i \cdot \dot{\theta}^i \mathbf{i}_2 \\ &= \dot{\theta}^i \mathbf{i}_2^i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{i}_2^i}{dt} &= -\cos\theta^i \cdot \dot{\theta}^i \mathbf{i}_1 - \sin\theta^i \cdot \dot{\theta}^i \mathbf{i}_2 \\ &= -\dot{\theta}^i \mathbf{i}_1^i \end{aligned}$$

则

$$\dot{\mathbf{u}}^i = \bar{u}_1^i \dot{\theta}^i \mathbf{i}_2^i - \bar{u}_2^i \dot{\theta}^i \mathbf{i}_1^i \quad (1.10)$$

如将刚体 i 的角速度定义为

$$\boldsymbol{\omega}^i = \dot{\theta}^i \mathbf{i}_3^i \quad (1.11)$$

此处 $\mathbf{i}_3^i$ 是通过 O^i 点且垂直于 $\mathbf{i}_1^i$ 和 $\mathbf{i}_2^i$ 的单位矢量,则有

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}^i \times \mathbf{u}^i &= \begin{vmatrix} \mathbf{i}_1^i & \mathbf{i}_2^i & \mathbf{i}_3^i \\ 0 & 0 & \dot{\theta}^i \\ \bar{u}_1^i & \bar{u}_2^i & 0 \end{vmatrix} \\ &= \bar{u}_1^i \dot{\theta}^i \mathbf{i}_2^i - \bar{u}_2^i \dot{\theta}^i \mathbf{i}_1^i \end{aligned} \quad (1.12)$$

比较式(1.10)和(1.12),可见

$$\dot{\mathbf{u}}^i = \boldsymbol{\omega}^i \times \mathbf{u}^i \quad (1.13)$$

将式(1.13)代入式(1.9),得到

$$\mathbf{v}^i = \dot{\mathbf{R}}^i + \boldsymbol{\omega}^i \times \mathbf{u}^i \quad (1.14)$$

上式表示刚体运动时,其上一任意点的整体速度矢量。

进一步,将式(1.14)对时间取导,则可得到此任意点的加速度矢量。即

$$\mathbf{a}^i = \frac{d\mathbf{v}^i}{dt} = \ddot{\mathbf{R}}^i + \dot{\boldsymbol{\omega}}^i \times \mathbf{u}^i + \boldsymbol{\omega}^i \times \dot{\mathbf{u}}^i$$

如将刚体 i 的角加速度定义为

$$\boldsymbol{\alpha}^i = \dot{\boldsymbol{\theta}}^i \dot{\mathbf{i}}_3^i \quad (1.15)$$

并注意到式(1.13),则 P^i 点的加速度矢量可写成

$$\mathbf{a}^i = \ddot{\mathbf{R}}^i + \boldsymbol{\alpha}^i \times \mathbf{u}^i + \boldsymbol{\omega}^i \times (\boldsymbol{\omega}^i \times \mathbf{u}^i) \quad (1.16)$$

由上可见,对于刚体,用一组广义坐标 $[\mathbf{R}^i, \boldsymbol{\theta}^i]^T$ 不仅可以标识刚体上任意一点在整体系的位置,还可标识在刚体运动时此点在整体系运动的速度和加速度。

最后讨论可变形体的运动。如图 1-5 所示,一可变形体 i ,其上任意两点 O^i 和 P^i 之间由于物体的变形而产生相对运动,因此仅用前面的广义坐标就不足以描述可变形体的运动。假设 O^i 、 P^i 是物体发生位移前的位置,当位移发生后它们分别运动到新位置 O_1^i 和 P_1^i 。为了确定两点间的相对运动,我们对此可变形体建立一个物体系 $X_1^i X_2^i X_3^i$,并将其原点刚连在 O^i 上,则此物体系的原点和

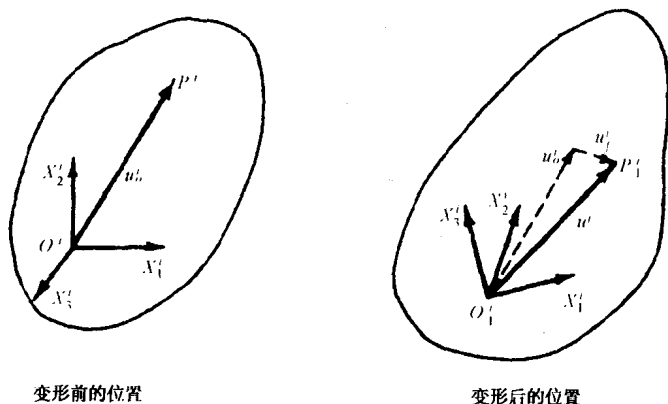


图 1-5 可变形体的变形