# Kinematics

# 运动学

J. S. Beggs 著
来虔 来学嘉 译

西安交通大学出版社

# 运动学

# KINEMATICS

J. S. Beggs 著

来度
来学嘉 译

西安交通大学出版社

运　动　学

原　　著：约瑟夫·斯泰尔斯·贝格斯

翻　　译：耒　虔　耒学嘉

责任编辑：　李道仁

西安交通大学出版社出版

（西安市咸宁路28号）

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行·各地新华书店经售

开本 787×1092　1/32　　印张 6.875　字数 136 千字

1985年7月第一版　　1985年7月第一次印刷

印数 1—3000 册

统一书号：15340.029　　定价：1.50元

# 译 者 序

本书用独特的手段，简明扼要地将机构运动学理论引导入门后（前六章），以一半以上的篇幅来广泛介绍丰富的应用实例（第七章）。鉴于本书除了对传统的机构运动学理论提出了又一种不同风格的研究和编写途径外，还将其应用领域从传统的机构扩展到多种其他技术领域——从计算日出到驾驶拖拉机、从轮齿加工到火箭运载、从几何光学到正交投影等，故在作者鼓励下，将其译出。希望译本能对出版不同风格的著作，扩大机构运动学的应用范围有所启示。

在我国，对 Beggs 教授著«Mechanism»(1955)一书的独特风格是比较熟悉的。作者在柯达克、西部电气公司等从事机械设计工作20年之后，于1948年转入加州大学任教，现任该校名誉教授。本书是作者在上述多年工作经验的基础上编写的。

本书由陈学俊教授、曹龙华副教授审阅。译书之能够出版是与西德Hannover大学前校长Eduard. C.Pestel的推荐、陈学俊教授的介绍以及西安交通大学出版社的支持分不开的。译者谨此一并致谢。

衷心希望读者指出错误和不妥之处，以便订正。

译 者

一九八五年四月

# 作者为译书序

I have watched with enthusiasm for many years the transformation going on in China. I am very pleased to have my KINEMATICS translated into Chinese and thus become a small part of the new China.

If students study kinematics first, they will find three-dimensional mechanics and dynamics much easier to understand, and these subjects in two dimensions then follow as special cases. It is much easier to go from the general to the particular than vice versa. Statics can be taught as a system of dynamics in which there are no accelerations or relative movements.

Today's students are very fortunate to be born in the computer age. I think of the thousands of hours wasted calculating with logarithms, slide rule and mechanical calculator; work that I can now do in seconds with my home computer. The time saved is used for further study.

Joseph Stiles Beggs

JOSEPH STILES BEGGS

October 23, 1905 (注)

译者注：上述年月日为作者出生日期

# 原序

大多数学生的运动学是点点滴滴地在学习别的课程如动力学或机械学之类时学到的。这本薄书写给需要运动学的读者作为参考。本书很简明，或许过于简明，省略了成百页的代数运算。这些代数运算并不难，但很冗长，可能使读者感到十分厌烦。(等式(3.6－14)中$_1x$的系数原来包括168项！)学生对有些删节部分应予以填补，以便获得将运动学应用到本人的问题中去的能力。他们还应该着手编写计算机程序来处理矩阵，并将结果显示在屏幕或绘图机上。

佩斯特尔(Pestel)，汤姆森(Thomson)和德纳维特(Denavit)教授使我对矩阵发生兴趣，在此表示感谢。矩阵的功能表现在运动镜面成像和空间机构的应用上。但在矩阵相乘时要记住误差原理。

泰勒(E. H. Taylor)教授介绍我准惯性空间(节7.6)的概念。多年来，证明这在刚体系统动力学方面是很有用的。

书中符号非常有助于记忆，给阅读本书带来方便，不过给打字却带来不少麻烦，这要感谢杰基·莱塞(Jackie Lasser)夫人了。

还要感谢森赖斯制图公司(Sunrise Graphics)的凯西·马特利(Kathy Martelli)和约瑟夫·帕西亚(Joseph Paccia)，他们承担照相制版和制图工作。本书的出版还与赫米斯菲尔出版社(Hemisphere

Publishing Corporation) 的总编辑菲利普斯·博恩(Phillips Born)分不开的。

经20年工业生涯之后，于1948年，前工业学院院长贝尔特(L. M. K. Boelter)邀我任教，对此以及对于在西部电气公司(Western Electric Company)任机械设计一职，我一直是非常感谢的。

约瑟夫·斯泰尔斯·贝格斯

(Joseph Stiles Beggs)

# 符 号 与 凡 例

每一节的等式均从1开始顺序编号，包括节数，如(2.3-1)。很少写出“等式”这个词，因为这是多余的。在引用同一节中的等式时，节号省略。同样在引用同一节中的插图时，节号省略。

当沿着旋转轴的正向看时，正向旋转是顺时针的。右螺旋（线）正向旋转时将沿着轴的正向前进。看图中垂直纸面的轴端时，正向是“进入”纸面，记作⊗，从纸面“出来”时记作⊙。

$\triangleq$表示“定义为”。

sine, cosine, versine($\triangleq$1−cosine), tangent 分别用大写 $S$，$C$，$V$，$T$ 表示。由于正矢(versine)在运动学中经常出现，附录A给出了这个函数的三角函数恒等式表。

反余弦函数用主值，其正负按其正弦值的正负而定（或按题意）。

在字下划线表示矢量，此法便于在黑板上书写、记笔记和打字。下面不划线的字母表示矢量的模。$|\underline{V}|\triangleq V$。已赋予正向的矢量，其模可能为负。

从点 $O_1$ 到点 $P$ 的矢量可记为 $\underline{r}_{O_1P}$ 或$\underline{O_1P}$。注意，当变换到另一不同原点的坐标系时，矢量 $\underline{r}_{O_1P}$ 不再表示$P$的位置。

矢量$\underline{\omega}$，$\underline{r}$ 间的夹角记为$\underline{/\omega r}$，从$\underline{\omega}$量到$\underline{r}$。

单位矢量用字母上面的音调符表示。例如沿$X_2$轴的单位

矢量写作$\hat{x}_2$，当检验矢量方程中某项物理量纲的一致性时，记住单位矢量是无量纲的。

矢量也可用列矩阵或反对称方阵表示；这样，$(\omega)_3$就是列矩阵，其元素是$\underline{\omega}$在笛卡儿坐标系3中的分量。需要时可附虚设的1于列的上方。作为方阵，$(\omega)_3$写成

$$[\omega]_3=\begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}_3$$

作为自由矢量的角速度写成$\underline{\omega}$，作为滑动矢量的角速度（即与瞬时转动一滑动轴有关的）写成$\dot{\underline{\sigma}}$。

点用来表示两个矢量的数量积，如$\underline{\omega}\cdot\underline{r}$。

叉用来表示两个矢量的矢量积或数的乘积，如$\underline{\omega}\times\underline{r}$，$3.14\times6.15$。若根据选择，$0\leqslant\underline{\underline{\angle\omega r}}\leqslant\pi$，则$|\hat{\omega}\times\hat{r}|=S\underline{\underline{\angle\omega r}}>0$以及$C\underline{\underline{\angle\omega r}}=\hat{\omega}\cdot\hat{r}>0$或$<0$。

使用矩阵时，矢量积$\underline{\omega}\times\underline{r}$变为$[\omega](r)$或$[\omega][r]-[r][\omega]$。注意$\underline{\omega}\times(\underline{\omega}\times\underline{r})$是非结合的，而$[\omega][\omega](r)$是可结合的。$[I](\omega)$是列矢量，$[I]$在(7.6－19)中定义。$([I][\omega]-[\omega][I])$不是该矢量对应的$(3\times3)$矩阵，这可从展开两个表达式看出来。

当用矩阵时，数量积$\underline{\omega}\cdot\underline{\omega}$变为$(\underline{\omega})^T(\underline{\omega})$，$T$表示矩阵的转置（第$i$列变成第$i$行）。$[T_{12}]$是$4\times4$矩阵，它把一点的坐标由坐标系1变到坐标系2。

系1轴与系2轴之间的方向余弦矩阵($DCM$)，$[C_{12}]$，将矢量的分量从系1变到系2。它构成$[T_{12}]$的右下角。

矩阵$[C]$的行列式记为$|[C]|$。

${}_{12}C_{34}$ 是矩阵 $[C_{34}]$ 的第一行第二列元素。它是 $Y_3$ 轴与 $X_4$ 轴间夹角的余弦，可记为 $C_{y_3 x_4}$。此角的正弦记作 $S_{y_3 x_4}$。

有可能矢量 $\underline{V}$ 的时间变化率是在系 3 中量度的，但要用系 2 中的分量来表示。若有混淆危险，则可写成 $(\dot{\underline{V}}|_3)_2$。

单位矩阵写成 [1]，$[1]=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}$。$dx^2 \stackrel{\triangle}{=} (dx)^2$，不是 $d(x^2)$。

参考文献用方括号表示，如 [3]，$p.196$，列在本书末，索引前。

**工程是一种作出明智的协调方案的艺术**

***ENGINEERING IS THE ART OF JUDICIOUS COMPROMISE***

## 单位换算

多亏电子"计算尺 (slide rule)，" 它使定小数点位置不再是个问题了。但只要在度量同一物质实体时用到不同的单位，那么单位换算仍然是个问题。下法基于这样的事实：物理实体不因乘以数字而改变。

例如：

$a = 92.9\times10^6$ 英里 (图 7.5-3)

$= 92.9\times10^6$ 英里 $\times$ (5280 英尺/1 英里)

$\times$ (12 英寸/1 英尺) $\times$ (2.540 厘米/1 英寸)

$= 1.495\times10^{13}$ 厘米

$a$ 用 (1 英里/5280 英尺) 乘没有改变什么，但亦得不出什么有用的结果。数字**与**单位**两者**应该同时列入等式，这样才可得到量纲检验。

**习题**：用瓦（watts）/节（knot）计算您的体重！

**提示**：$x$ 瓦/节＝180 磅，求解 $x$ 并通过审慎地选择“1”，消去所有的单位。

745.7 瓦＝1 马力（horse power）＝$3.3\times10^4$ 英尺磅/分钟。

1 节＝1 分所对地球表面沿赤道的弧长/小时（hr）

地球半径＝3960 英里（mile），1 节＝1.1520 英里/小时。

# 内 容 提 要

本书系根据美国赫米斯菲尔出版社(Hemisphere Publishing Corporation)1983年出版的《运动学》(KINEMATICS)一书译出。作者贝格斯(J. S. Beggs)博士系洛杉矶加州大学(University of California at Los Angeles)名誉教授。

本书共七章。前六章介绍关于研究约束运动和受力运动的基本理论以及有关的数学工具(特别是矩阵),包括变换、状态、位移、运动、运动学四元数、非笛卡儿坐标系等。第七章为应用,占全书一半以上;除了有两例讨论机构(空间四杆机构及贝内特(Bennett)机构)外,本书将运动学理论的应用扩大到多种技术领域:陀螺仪、接触应力、格利森(Gleason)机床螺旋伞齿轮加工、几何光学、锥形运动、牵引车与拖车驾驶运动学、正交投影等。

本书可供与运动解析学和机器动力学有关的师生或技术人员参考,亦可作为大专院校有关机械、天文、数学、光学、航海、航天等课程中的运动学参考书或作为学过理论力学和机械原理之后的选修课程教材或研究生教材。

# 目　录

## 4 运动

# 5　运动学四元数(Quaternion)



# 6　非笛卡儿坐标系



# 7　应用