

辛长范

HUOJIANFASHEDONGLIXUELILUNYUYINGYONG

# 火箭发射动力学 理论与应用

陈国光 田晓丽 辛长范 著

兵器工业出版社

TJ41/1014



2008020963

TJ41  
1014-1

# 火箭发射动力学 理论与应用

陈国光 田晓丽 辛长范 著



兵器工业出版社

2008020963

## 内 容 简 介

本书是研究火箭武器系统发射动力学理论与应用的专著。全书共分4章,第1章建立了武器发射动力学的多刚体普遍模型;第2章介绍了武器系统发射动力学通用仿真软件;第3章进行了几种典型武器系统的动力仿真计算;第4章研究了火箭武器系统动力学试验。

本书可作为高等院校专业高年级学生及研究生的教材或教学参考书,也可供有关科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

火箭发射动力学理论与应用 / 陈国光, 田晓丽, 辛长范著. —北京: 兵器工业出版社, 2006. 11

ISBN 7-80172-776-2

I. 火... II. ①陈... ②田... ③辛... III. 火箭发射—动力学 IV. ①TJ393.01②TJ415

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第133077号

出版发行: 兵器工业出版社

发行电话: 010-68962596, 68962591

邮 编: 100089

社 址: 北京市海淀区车道沟10号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京蓝海印刷有限公司

版 次: 2006年11月第1版第1次印刷

印 数: 1—450

责任编辑: 刘燕丽

封面设计: 李 晖

责任校对: 仝 静

责任印制: 赵春云

开 本: 850×1168 1/32

印 张: 6.625

字 数: 200千字

定 价: 59.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

# 前 言

火箭发射动力学涉及火箭武器系统在存储、运输、行军、发射等工况下的各种动力学问题，主要应用于火箭起始扰动、火箭射击密集度、弹炮共架动力学耦合等方面。

从 20 世纪 70 年代至今，国内外的科技工作者对火炮、火箭炮武器系统的发射过程进行过广泛、深入的理论与实验研究。在理论研究方面，主要有三大类的建模方法：第一类是弹丸发射动力学，这些研究一般以弹/管为研究对象，分析弹体在理想炮管、发射管中的运动情况；第二类是弹/管耦合系统的动力学研究，主要分析弹体在实际炮管、定向管中的运动规律。一般来讲都是研究定向管弹性、弹管间隙、运载体振动等因素对弹体运动的影响；第三类是弹/炮系统的发射动力学研究。以上三大类的研究成果一般都较全面地考虑了弹/炮系统的各种结构参量和扰动因素，相应的发射动力学仿真程序也比较复杂。

众所周知，对于不同的分析对象或不同的仿真目的，需要建立不同的专用动力学仿真模型、编制专用的仿真软件。发射动力学方程的推导和仿真软件的开发、调试将耗去大量的人力物力，且难以保证软件开发的进度和检验计算结果的正确性。建立火箭发射动力学的普遍方程、研制通用的发射动力学软件，对于研究火箭武器系统的动力学问题是非常必要的。

本书是作者十余年来在火箭发射动力学方面研究的总结，为读者提供一套武器系统通用的发射动力学理论模型和仿真软件，可供教学和科研工作参考。

本书共分4章。第1章，建立武器系统的多刚体发射动力学模型，推导出了一套武器发射动力学普遍方程。针对火箭武器系统发射动力学的特点，模型中考虑了涡轮式火箭和螺旋导轨式火箭的弹管相互作用界面，导出用多刚体模拟弹性火箭弹和弹性定向器的动力学相容方程，并导出火箭武器系统仿真中常见的刚体树系统结构时变问题的运动联系方程，同时给出用螺旋铰、非线性铰刚度和非线性滑移力元模拟螺旋导轨和弹管间隙的方法。第2章，主要介绍通用性较强的武器系统发射动力学仿真软件——DaPMuRis (A Dynamics Analysis Programmer for Multiple Rigid Bodies System) 的开发。该软件提出并应用刚体铰的自由度开放与关闭概念处理火箭弹/定向管之间的变自由度问题。指出并应用刚体的死活概念处理多管火箭武器系统在射击过程中随着诸火箭弹的飞离而导致的系统时变问题(刚体树结构变化)。DaPMuRis 动力学软件实现了多刚体发射动力学仿真的微分方程自动生成功能。第3章，应用实例给出几种武器系统的发射动力学仿真计算实例。第4章，论证和介绍了火箭起始扰动测试方法和火箭发动机推力偏心测试方法。陈国光规划了全书的结构，并设计了相关仿真软件，田晓丽撰写了第1、2、3章，辛长范撰写了第4章。

在本书所涉及的研究工作中，赵文宣教授、郭锡福教授给了很有价值的指导性建议，王志军教授、樊文欣教授、孔炜研究生、宋河金高工、张涛试验师在试验中提供了有效帮助，在此一并表示感谢。

# 目 录

第 1 章 武器发射动力学的多刚体普遍模型	(1)
1.1 武器系统发射动力学仿真的主要问题	(1)
1.1.1 火箭弹发射动力学软件实用化	(1)
1.1.2 仿真软件应考虑到的主要问题	(3)
1.2 武器系统多刚体结构的运动学	(4)
1.2.1 武器系统多刚体结构的数学描述	(4)
1.2.2 仅包含转动铰联系的武器系统多刚体模型的运动学	(10)
1.2.3 包含转动铰和滑移铰的武器系统多刚体模型的运动学	(25)
1.2.4 包含转动铰、滑移铰和螺旋铰的武器系统多刚体模型的运动学	(49)
1.3 力元运动学	(54)
1.3.1 点力元运动学	(55)
1.3.2 线滑移力元运动学	(56)
1.3.3 面滑移力元运动学	(57)
1.4 武器系统多刚体结构的动力学	(58)
1.4.1 仅包含转动铰的武器系统多刚体模型的动力学方程	(60)
1.4.2 包含转动铰和滑移铰的武器系统多刚体模型的动力学方程	(61)

1.4.3	包含转动、滑移铰和螺旋铰的武器系统 多刚体模型的动力学方程 .....	(62)
1.4.4	武器系统受力 .....	(63)
1.5	武器非树多刚体系统的树形化 .....	(68)
1.6	武器多刚体系统的铰连接力及铰连接力矩的计算 ...	(72)
1.7	武器多刚体系统的坐标变换 .....	(73)
1.7.1	外接刚体与内接刚体之间的坐标变换 .....	(73)
1.7.2	外接刚体绕内接铰转动 .....	(74)
1.7.3	任意刚体与惯性基之间的坐标变换 .....	(75)
1.8	武器多刚体系统的结构时变问题 .....	(75)
1.9	用多刚体模拟弹性火箭弹时的仿真结果后处理 ...	(77)
<b>第2章</b>	<b>火箭武器系统发射动力学仿真的通用软件 .....</b>	<b>(80)</b>
2.1	火箭武器系统发射动力学仿真软件的需求分析.....	(80)
2.2	火箭武器系统发射动力学仿真软件的设计.....	(83)
2.2.1	发射动力学仿真软件 DaPMuRiS 的功能简介 .....	(83)
2.2.2	发射动力学仿真软件 DaPMuRiS 使用说明书 .....	(86)
<b>第3章</b>	<b>武器系统动力学仿真计算实例.....</b>	<b>(100)</b>
3.1	某火箭武器系统的发射过程分析 .....	(100)
3.1.1	总体模型 .....	(100)
3.1.2	系统的结构数据描述 .....	(101)
3.1.3	仿真结果 .....	(128)
3.2	多管火箭炮发射时火箭弹起始扰动数值仿真 .....	(138)
3.2.1	总体模型 .....	(138)
3.2.2	计算结果 .....	(139)

3.3	“旋风”多管武器系统射序和发射间隔 优化计算 .....	(144)
3.3.1	总体模型 .....	(144)
3.3.2	计算结果 .....	(145)
3.4	弹炮共架系统发射时的振动响应研究 .....	(147)
3.4.1	弹炮共架系统的多刚体模型 .....	(147)
3.4.2	导弹发射时, 火炮振动的响应仿真 .....	(149)
3.4.3	火炮射击时, 共架导弹振动烈度分析 .....	(152)
3.4.4	炮架冲击振动响应计算 .....	(155)
3.4.5	火炮连射时, 发射架特性对射击精度的响应 .....	(157)
<b>第4章</b>	<b>武器系统动力学试验研究</b> .....	<b>(160)</b>
4.1	火箭起始扰动生成过程测试 .....	(160)
4.1.1	火箭起始扰动测试装置概述 .....	(160)
4.1.2	二维 PSD 火箭微小角运动测试装置设计 .....	(161)
4.1.3	数据处理方法 .....	(168)
4.1.4	试验过程 .....	(171)
4.1.5	试验结果 .....	(172)
4.2	火箭发动机推力偏心测试试验 .....	(175)
4.2.1	火箭推力偏心测试装置的设计与调试 .....	(175)
4.2.2	载荷识别原理及其在推力偏心测试中的应用 .....	(185)
4.2.3	火箭推力偏心测试结果 .....	(199)
<b>参考文献</b>	.....	<b>(201)</b>



# 第 1 章 武器发射动力学的 多刚体普遍模型

## 1.1 武器系统发射动力学仿真的主要问题

### 1.1.1 火箭弹发射动力学软件实用化

由于火箭弹发射过程的复杂性，所以建立发射动力学模型、推导发射动力学方程和开发发射动力学软件是件非常烦琐的工作，而且具有较高的难度。目前，发射动力学软件的开发均是针对特殊问题的。对于不同的研究对象或不同的研究目的往往要花费很多的精力来重新建立发射动力学模型和开发仿真软件。例如，在进行火箭弹被动控制理论研究时不仅需要建立三种不同的发射动力学模型，且要研制相应的软件，以适应旋转稳定火箭弹、尾翼稳定火箭弹及有弹性适配器的火箭弹三种不同火箭弹的发射动力学仿真需求。这种研究方法只能在发射过程机理研究方面应用。在火箭弹武器系统产品研制过程中，这种长时间的软件开发过程就不能适应工作的需要了。这些特点使得火箭弹发射动力学软件一直停留在开发研制阶段，尚未开发出可由武器系统设计人员直接使用的程序。一般来讲，发射动力学仿真工作可分成若干阶段，如图 1.1.1 所示。

首先要进行被研究对象、研究目的和研究任务的分析，考虑动力学模型应包含的主要功能及进行物理模型的简化处理。在此

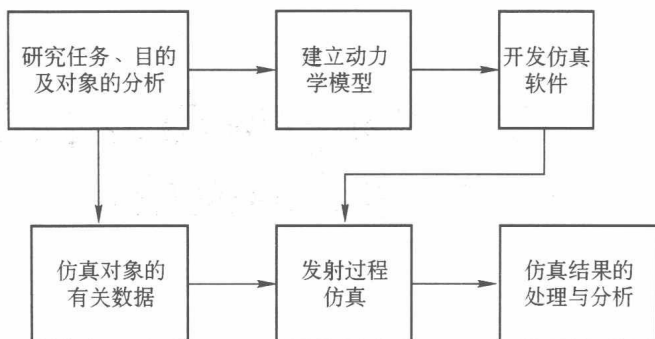


图 1.1.1 一般的发射动力学仿真工作流程图

基础上建立发射动力学模型、推导动力学微分方程、编制与调试仿真软件。然后根据研究对象的特性及仿真软件的需要填写数据文件，进行发射过程的动力学仿真计算和仿真结果的处理与分析。在这几个阶段中，建立动力学模型和研制仿真软件的工作将花费很长的时间，其难度也最高。可以说，模型建立和软件开发是火箭弹发射动力学应用于火箭弹产品开发工作的主要障碍。

因此，有必要建立通用化的动力学模型和仿真软件，使仿真软件能适用于发射过程仿真的各种需要。一般的仿真过程如图 1.1.2 所示。

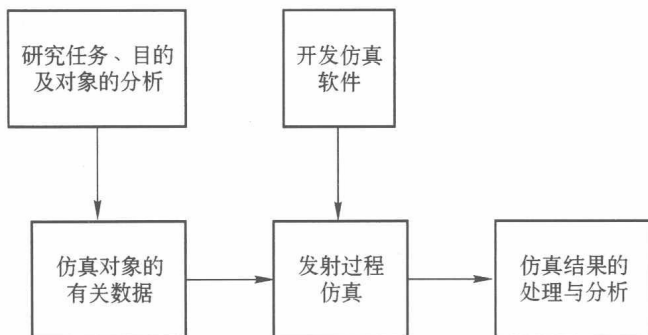


图 1.1.2 通用发射动力学仿真软件的工作过程流程图

仿真工作只需对被研究对象和研究目的进行特征分析,准备用于描述武器系统结构和仿真参数的数据文件。仿真软件可自动建立发射动力学数学模型、完成发射动力学微分方程的自动生成、约束关系的自动处理和数值仿真计算等工作。

### 1.1.2 仿真软件应考虑到的主要问题

火箭弹发射动力学仿真的目的是为了定量地计算火箭弹的起始扰动,弄清起始扰动与各种扰动源之间的定量关系,提出减小火箭弹起始扰动、提高武器射击精度的技术途径。为了使仿真软件具有通用性,发射动力学模型必须考虑到火箭弹发射过程仿真的各种因素和参数。

火箭弹发动机的推力偏心:

对于武器,由于发动机推力作用线不与火箭弹几何轴线重合,会出现额外的力和力矩作用,产生起始扰动。

火箭弹动不平衡:

对于旋转稳定火箭弹和微旋尾翼稳定火箭弹,其动不平衡的存在使得火箭弹/发射架系统受到激励而产生振动。因为动平衡角及其方位均为随机量,每发火箭弹均不一样,故引起火箭弹的起始扰动,产生射弹散布。

火箭弹静不平衡:

火箭弹质心与其几何轴线不重合,当火箭弹旋转或加速运动时,会产生作用于火箭弹/发射架系统的附加随机载荷,引起火箭弹的射弹落点散布。

火箭弹体的弹性变形:

对于大长细比的尾翼稳定式火箭弹,在气动载荷作用下,弹体的弹性变形已不容忽视。另外,由于工艺上造成的弹体弯曲和各部件的不同轴等因素,也会在发射过程中引起火箭弹的起始扰动。

重力:

重力的作用使得弹丸通过定向管时引起系统振动,进而产生

火箭弹的运动偏差。一般来讲这是系统误差，不会导致火箭弹的射弹散布。但该因素与其他扰动源耦合可能会增大火箭弹的起始扰动。

定向管弹性变形：

定向管和火箭弹的重力引起定向管的静变形，发射过程中火箭弹/定向管系统的受力引起的定向管弯曲振动会加剧其耦合作用，产生火箭弹的起始扰动。

火箭弹/发射系统的动态特性：

火箭弹/发射系统的动态特性会影响火箭弹起始扰动与各扰动源的定量关系。优化火箭弹/发射系统的动态特性可减小起始扰动对各扰动源的灵敏度，相应地可提高射击精度或降低对系统中某些零部件的加工精度要求。

弹管间隙：

火箭弹与定向管之间间隙的存在可能会增大各扰动源的相互耦合作用强度，并使火箭弹与定向管出现撞击回弹的可能性。

发射条件：

主要是发射阵地的土壤特性的不一致性对火箭弹发射过程的影响。

多管连续发射问题：

火箭弹/发射架系统在发射过程中会发生剧烈的振动，在进行后续火箭弹的发射时，火箭弹系统的残余振动会对火箭弹的发射产生不良影响。在进行射序优化、点火时机优化等研究时，火箭弹/发射架系统的残余振动是必须要考虑到的问题。

## 1.2 武器系统多刚体结构的运动学

### 1.2.1 武器系统多刚体结构的数学描述

多刚体系统是由多个刚体组成的机械系统。各刚体之间是通

过铰进行有机结合的。系统的动力学特征主要由铰的性质、系统的结构图和各刚体的物理参数等确定。

在火箭武器的多刚体系统中，一般有转动铰、滑移铰、虚铰及复合铰四大类。

转动铰主要包括圆柱铰（如运载体与回转体之间的运动约束、回转体与定向管束之间的耳轴连接的运动约束等）、万向铰（如尾翼式火箭弹在半约束期中的弹/管界面等）和球铰（如涡轮式火箭弹在半约束期中的弹/管界面等）。

滑移铰主要包括滑移柱铰（如涡轮式火箭弹在约束期中的弹/管界面等）、螺旋铰（如尾翼式火箭弹在约束期中的弹/管界面等）。

虚铰是六自由度的抽象铰，主要用于描述运载体相对于地面的运动。

复合铰是既有转动轴又有滑移轴的铰结构。在描述实际的火箭弹/发射架系统时，如果用一种铰不能说明实际情况，这就要用到复合铰。例如，尾翼式火箭弹在半约束期中的弹/管界面需同时用螺旋铰和万向节铰。

罗伯逊（Roberson）和威顿伯格（Wittenburg）首先提出了利用图论方法的有向图来表示多刚体系统的结构联系。有向图方法有利于准确描述武器系统的结构特点，方便计算机程序的编制，并使软件具有好的通用性。

一个典型的武器系统动力学模型的结构图如图 1.2.1 所示。图 1.2.2 为该系统结构的有向图。

有向图中的每条弧的顶点代表一个刚体，记作  $B_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )，下角标  $i$  代表该刚体在系统中的刚体编号。铰点用有向图中连接顶点的有向弧来表示，记作  $O_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )，下角标  $j$  代表该铰在系统中的铰编号。有向弧的方向确定两个相关联刚体的相对运动的参照关系。有向弧（铰）与所联系的两个顶点（刚体）之间的关系称为关联。如图 1.2.2 中铰  $O_6$  与  $B_6$ 、 $B_3$  相关联。 $B_i$  到

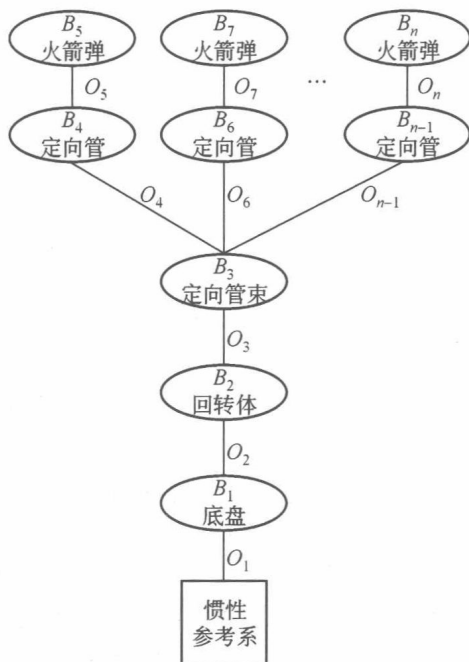


图 1.2.1 典型的武器系统动力学模型的结构图

$B_i$  的一系列弧组成了  $B_i$  到  $B_j$  的路。

若系统中任意两个刚体之间有且仅有一条路时，即构成了所谓的树系统。对于不考虑火箭弹和定向管弹性的情况，火箭弹系统的物理模型可用简化的树系统来准确描述（如图 1.2.1 和图 1.2.2 所示）。若考虑火箭弹和定向管的弹性，需将火箭弹、定向管划分成多个用具有弹性和阻尼的铰来连接的刚体，在闭锁期和约束期必然构成非树系统。即如图 1.2.3 所示的情况，其有向图如图 1.2.4 所示。对非树系统的直接处理是很复杂的，采用刚体切割的方法可将其转变为派生树系统。切割刚体形成的两个半刚体由运动学方程约束，最后的动力学微分方程由派生树系统的动力学微分方程和半刚体之间的运动约束方程联合求解。有关非

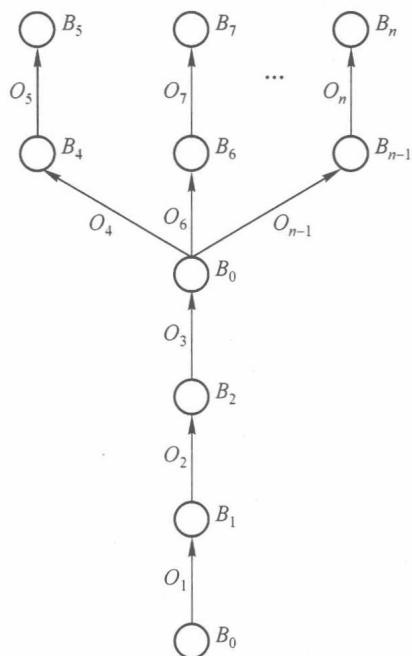


图 1.2.2 典型的武器系统动力学模型的结构有向图

树系统的处理将在本章 1.5 节介绍。

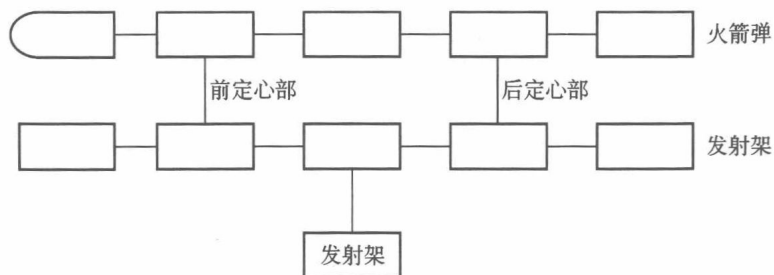


图 1.2.3 考虑弹/管弹性的火箭武器系统动力学模型的结构图（局部）

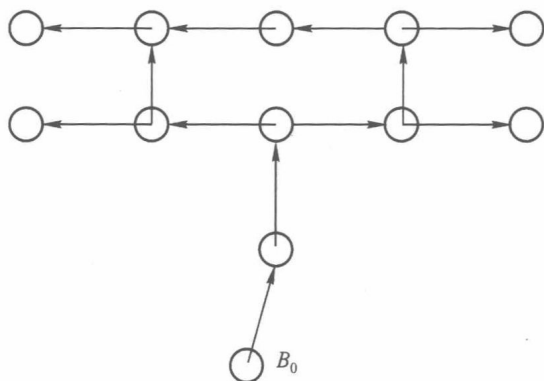


图 1.2.4 考虑弹/管弹性的火箭武器系统动力学模型的有向图 (局部)

对于树系统, 系统中的刚体数与铰数相同 (不包括零刚体)。为了便于描述树系统的结构, 引入以下的术语和规则标号方法。

**零刚体  $B_0$ ：**零刚体是已知运动规律的系统外刚体。例如, 对于地面武器系统的仿真, 零刚体为地面惯性坐标系, 其速度、加速度均可强制为零。对于舰载武器系统, 可将舰艇作为零刚体处理, 其运动规律取决于海浪等引起的舰艇运动时间历程。

**内侧刚体、外侧刚体：**若系统中刚体  $B_i$  在零刚体  $B_0$  至刚体  $B_j$  的路上, 则刚体  $B_i$  为刚体  $B_j$  的外侧刚体,  $B_j$  为刚体  $B_i$  的内侧刚体。

**内接铰、内接刚体：**将刚体  $B_i$  与其内侧刚体  $B_j$  相连接起来的铰为  $B_j$  的内接铰, 刚体  $B_i$  为刚体  $B_j$  的内接刚体。

**规则标号方法：**为了方便多刚体系统的结构描述, 使有关的系统结构描述矩阵具有最简单的形式, 引入规则标号方法如下:

- 1) 多刚体系统中任意刚体与其内接铰有相同的序号;
- 2) 多刚体系统中每个刚体的序号均大于其内接刚体的序号;
- 3) 多刚体系统的有向结构图中, 用以表示铰的有向弧一律指向背离零刚体  $B_0$  的方向。



全关联矩阵  $\bar{S}$ :

$$\bar{S}_{i,j} = \begin{cases} 1 & O_j \text{ 铰与 } B_i \text{ 刚体关联且以 } B_i \text{ 为起点} \\ -1 & O_j \text{ 铰与 } B_i \text{ 刚体关联且以 } B_i \text{ 为终点} \\ 0 & O_j \text{ 铰与 } B_i \text{ 刚体无关联} \end{cases} \quad \begin{matrix} (i = 0, 1, \dots, n) \\ (j = 1, 2, \dots, n) \end{matrix} \quad (1.2.1)$$

零刚体关联矩阵  $S_0$ :

$S_0$  为全关联矩阵  $\bar{S}$  的第一行。

$$\bar{S}_{0,j} = \begin{cases} 1 & (j=1) \\ 0 & (j=2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (1.2.2)$$

关联矩阵  $S$ : 若  $\bar{S}$  内不包括零刚体和 1 号铰, 则得到关联矩阵  $S$ 。

$$S_{i,j} = \begin{cases} 1 & O_j \text{ 铰与 } B_i \text{ 刚体关联且以 } B_i \text{ 为起点} \\ -1 & O_j \text{ 铰与 } B_i \text{ 刚体关联且以 } B_i \text{ 为终点} \\ 0 & O_j \text{ 铰与 } B_i \text{ 刚体无关联} \end{cases} \quad \begin{matrix} (i=1, 2, \dots, n) \\ (j=1, 2, \dots, n) \end{matrix} \quad (1.2.3)$$

通路矩阵  $T$ :

$$T_{j,i} = \begin{cases} 1 & O_j \text{ 铰属于 } B_0 \text{ 到 } B_i \text{ 的路且指向 } B_0 \\ -1 & O_j \text{ 铰属于 } B_0 \text{ 到 } B_i \text{ 的路且背离 } B_0 \\ 0 & O_j \text{ 铰不属于 } B_0 \text{ 到 } B_i \text{ 的路} \end{cases} \quad \begin{matrix} (i, j=1, 2, \dots, n) \end{matrix} \quad (1.2.4)$$

关联矩阵  $S$  和通路矩阵  $T$  均能精确地描述树系统的结构。  
 $S$ 、 $T$ 、 $S_0$  之间有以下关系:

$$\begin{aligned} (S_0 T)^T &= T^T S_0^T = -\mathbf{1}_n \\ TS &= ST = E \end{aligned} \quad (1.2.5)$$