

高等学校教学参考书

弹性流体动力润滑 及其应用

张鹏顺 陆思聪

高等教育出版社

(京)112号

71168/18
内 容 提 要

弹性流体动力润滑(简称弹流)是主要研究机器中线、点接触运动副的润滑的,是摩擦学领域中近几十年迅猛发展的一门新兴学科,在许多领域中已得到广泛应用。

本书共14章,绪论后之前6章主要介绍弹流的基本理论,包括基本方程,线、点接触全膜弹流理论,粗糙面间的弹流,非牛顿体弹流和弹流的牵曳问题;第八章介绍弹流测试;后6章介绍弹流在齿轮传动、滚动轴承、滑动轴承、凸轮机构、活塞环润滑及生物学中的应用。

本书可作为机械学研究生的教材,并可供从事机械设计和润滑研究的教师和科技人员参考。

高等学校教学参考书

弹性流体动力润滑及其应用

张鹏顺 陆思聪

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 15.25 字数 360 000

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷

印数 0001—1 111

ISBN7-04-004268-1/TH·339

定价 17.30 元

前 言

弹性流体动力润滑(简称弹流)是一门主要研究机器中线、点接触运动副润滑的学科。从1949年Грубин, А. Н. 首先提出弹流理论算起,迄今已四十多年了。弹流研究的发展极为迅速,目前已成为摩擦学的一个重要分支,并广泛用于齿轮(蜗轮)传动、凸轮挺杆机构和滚动轴承等行业中。

1966年Dowson, D. 和Higginson, G. R. 编写了第一本弹流的专著 *Elastohydrodynamic Lubrication*, 主要介绍了1966年以前弹流在线接触方面的成果。1981年Hamrock, B. J. 和Dowson, D. 编写了第二本弹流的专著 *Ball Bearing Lubrication, The Elastohydrodynamics of Elliptical Contacts*, 主要介绍了点接触弹流方面的成就和在球轴承润滑上的应用。近十年来在弹流研究中又有许多新的突破和发展,而且弹流在其他领域中的应用也有许多新的成果,特别是我国学者在弹流学科中也做出了许多可喜的成就。为了全面总结四十多年来弹流理论的发展,特别是反映近些年新的成果以及弹流在各领域中应用的成就,结合我们两校(哈尔滨工业大学和北京理工大学)十几年来在弹流教学和科研上的经验和体会,并根据广泛搜集到的国内、外大量的资料,在1981年的《润滑与密封》杂志上分期发表的弹流讲座的基础上,我们编写了本书。

本书共14章,第一章绪论;然后,前6章介绍弹流的基本理论,第二章为弹流的基本方程,第三、四章分别为线、点接触全膜弹流理论,第五章介绍粗糙面间的弹流,第六章为非牛顿体的弹流,

第七章介绍弹流中的牵曳问题;接着,在第八章介绍弹流的试验研究;后面6章主要介绍弹流在齿轮传动(第九章)、滚动轴承(第十章)、滑动轴承(第十一章)、凸轮挺杆副(第十二章)、活塞环与缸套润滑(第十三章)以及生物学(第十四章)中的应用。

本书可作为机械学研究生的教材,亦可供从事机械设计和润滑研究工作的教师和科技人员参考。

本书第一、二、三、四、五、十及十一章由哈尔滨工业大学张鹏顺教授执笔,第六、七、八、九、十二、十三及十四章由北京理工大学陆思聪教授执笔;由中国矿业大学北京研究生部吴永伟教授审稿。此书编写前后,得到了国家教委机械设计课程教学指导小组前任组长邱宣怀教授的关怀和支持,对此我们深表感谢。书中可能还存在一些错误或不当之处,请读者阅后能不吝赐教,我们将非常感谢。

编 者

于北京

1992.7.

目 录

前言	1
第一章 绪论	1
§ 1-1 学科介绍	1
§ 1-2 弹流的发展简史和今后研究的趋势	5
一、弹流的发展简史	5
二、弹流研究的展望	10
第二章 弹流理论的基本方程	12
§ 2-1 润滑剂的物理参量方程	12
一、粘度	12
二、密度	20
§ 2-2 流体动力润滑方程(Reynolds 方程)	22
§ 2-3 油膜厚度方程(弹性方程)	27
一、刚性几何间隙及其模拟	27
二、平直半无限体受载时表面的弹性变形	29
三、两弹性柱体间的油膜形状	32
§ 2-4 能量方程	34
一、油膜的能量方程	34
二、固体的热传导方程	35
三、界面温度方程——能量方程的边界条件	35
第三章 线接触全膜弹流理论	38
§ 3-1 刚性-等粘润滑状态的等温解	38
一、Martin 理论	38
二、Martin 理论的讨论	41
§ 3-2 基本参数	43
§ 3-3 刚性-变粘润滑状态的等温解	46
一、Blok 理论(临界情况的膜厚公式)	47
二、刚性-变粘润滑状态的一般膜厚计算	48

§ 3-4 弹性-等粘润滑状态的等温解	50
§ 3-5 弹性-变粘润滑状态的近似解	53
一、Hertz 线接触	53
二、Грубин 理论	55
三、关于 Грубин 公式的讨论	58
四、半分析的解法	59
§ 3-6 弹流问题的完全数值解法	60
一、弹性变形的计算方法	60
二、Reynolds 方程解法	62
三、几种数值计算方法	68
§ 3-7 弹性-变粘润滑状态的数值计算结果	76
一、数值计算结果综述	76
二、弹流压力峰和解的稳定性与唯一性	88
三、油膜厚度计算公式	90
§ 3-8 等温弹流的润滑状态图	94
§ 3-9 统一的膜厚计算公式和修正的润滑状态图	99
一、对现有膜厚计算公式的评述	99
二、一个新的无量纲参数	100
三、统一的膜厚计算公式	102
四、一张修正的润滑状态图	103
§ 3-10 贫油状态下的弹流问题	106
§ 3-11 热弹流问题	110
一、高速滚动时入口区的热弹流计算(Грубин 型近似解)	111
二、热弹流的完全数值计算	114
§ 3-12 非稳态弹流	122
第四章 点接触全膜弹流理论	137
§ 4-1 基本参数	138
§ 4-2 基本方程	140
§ 4-3 弹性-变粘润滑状态的近似解	143
一、Archard-Cowking 解	143
二、郑绪云(Cheng, H. S.)解	144
§ 4-4 弹性-变粘润滑状态的完全数值解	146
一、Hamrock-Dowson 的顺解法及其结果	147

二、Evans-Snidle 的逆解法	157
三、卷吸速度方向与椭圆主轴不重合的点接触计算	160
§ 4-5 其他润滑状态的膜厚公式及润滑状态图	161
一、点接触其他润滑状态的膜厚公式	161
二、点接触弹流的润滑状态图	163
§ 4-6 贫油状态下的弹流	169
一、刚性-等粘润滑状态	169
二、弹性-变粘润滑状态	172
三、弹性-等粘润滑状态	173
§ 4-7 椭圆接触的热弹流问题	174
一、朱东等顺解法的研究结果	174
二、侯克平等逆解法的研究结果	178
§ 4-8 非稳态点接触弹流	182
第五章 粗糙面间的弹流问题	191
§ 5-1 基本概念	191
一、粗糙面间弹流的概念	191
二、表面粗糙度的表征方法	192
§ 5-2 粗糙面间弹流问题的基本方程	196
一、流体动力润滑方程(Reynolds 方程)	196
二、油膜厚度方程(弹性方程)	202
三、平均总压力 \bar{p}_T 和平均的微峰接触压力 \bar{p}_s	202
四、粘度-压力-温度的关系	203
五、表面温升方程	204
六、平均摩擦力	204
§ 5-3 研究的结果	204
一、一维(条纹状)粗糙面间线接触弹流的几种解	204
二、二维粗糙面间线接触弹流的几种解	206
三、粗糙面点接触弹流的解	214
四、粗糙面间弹流的一些测试结果	216
§ 5-4 微弹流	218
一、纵向椭圆微峰的微弹流	219
二、横向微峰的微弹流	219
三、三维粗糙表面的微弹流	220
四、微弹流与表面损伤	220

第六章 非牛顿弹流问题	226
§ 6-1 非牛顿体的典型本构方程及其 Reynolds 方程的建立.....	227
一、Ree-Eyring 流体.....	227
二、极限剪切应力模型.....	228
三、Bingham 体.....	232
四、Herschel-Bulkley 模型.....	234
§ 6-2 润滑脂的弹流问题.....	239
一、润滑脂的流变性能.....	240
二、润滑脂的弹流特性.....	241
§ 6-3 乳化液的弹流问题.....	244
一、乳化液的特性.....	244
二、乳化液的弹流特性.....	245
第七章 弹流的牵曳问题	251
§ 7-1 牛顿流的牵曳计算.....	251
§ 7-2 粘弹性假说.....	256
§ 7-3 弹塑性问题.....	261
§ 7-4 玻璃态转化问题.....	268
§ 7-5 牵曳的热影响.....	269
§ 7-6 牵曳计算的分域图.....	270
一、牵曳计算分域图的构成.....	270
二、图的使用.....	271
第八章 弹流问题的实验研究	274
§ 8-1 弹流试验研究所用的设备.....	275
一、圆盘试验机.....	275
二、球式试验机.....	277
§ 8-2 弹流膜厚的测量.....	280
一、电阻法.....	280
二、电容法.....	286
三、磁阻法.....	290
四、光干涉法.....	294
五、机械量间接测量法.....	308
六、X 射线法.....	314
§ 8-3 接触区压力分布的测量.....	319

§ 8-4 接触区温度分布的测量	329
一、薄膜镀层法	330
二、红外辐射测温法	335
§ 8-5 粘压系数的测量	341
一、落体法	341
二、毛细管法	348
三、转筒法	349
第九章 弹流在齿轮传动中的应用	358
§ 9-1 齿轮传动弹流计算的基本方法	360
一、Dowson 和 Higginson 的方法	360
二、Vichard, J. P. 的方法	363
三、郑绪云的计算结果	366
§ 9-2 工程实用的简化方法	373
一、膜厚比的选择	374
二、润滑剂参数 LP	375
三、油膜厚度	377
§ 9-3 齿轮传动中弹流参数的测量	381
一、齿间膜厚的测量	381
二、轮齿受载情况的测量	382
三、齿面温度测量	385
第十章 滚动轴承的弹流问题	390
§ 10-1 滚动轴承接触处的当量半径和平均速度	391
一、当量半径	391
二、滚动轴承接触处的平均速度	392
§ 10-2 滚动轴承的受力分析及变形	395
一、受径向载荷	397
二、受推力载荷	398
§ 10-3 滚动轴承的弹流计算	400
一、滚子轴承的膜厚计算	400
二、球轴承的膜厚计算	400
三、膜厚比 A 的计算	401
§ 10-4 滚动轴承弹流参数的测试	401

第十一章 滑动轴承的弹流问题	409
§ 11-1 向心滑动轴承的弹流.....	409
一、整体式向心滑动轴承的静载弹流计算.....	410
二、动载下的短轴承.....	412
三、部分瓦轴承及椭圆轴承.....	415
§ 11-2 大型推力滑动轴承中的弹流.....	418
一、推力轴承弹流计算的基本方程.....	419
二、油膜参数的测试.....	424
第十二章 弹流在凸轮挺杆副上的应用	428
§ 12-1 凸轮与从动件间弹流膜厚的计算.....	429
一、凸轮及从动件的几何关系与运动学.....	430
二、弹流膜厚的计算.....	432
§ 12-2 凸轮及其从动件接触处的弹流参量的测量.....	438
一、膜厚测量.....	438
二、温度分布的测量.....	443
第十三章 弹流在活塞环缸套润滑中的应用	448
§ 13-1 概述.....	448
§ 13-2 活塞环-缸套间的弹流润滑分析.....	450
一、活塞环侧边的几何形状.....	450
二、活塞环的运动学.....	451
三、活塞环润滑计算的基本假设.....	452
四、弹性位移的计算.....	453
五、流体动压方程.....	453
六、弹流的数值解.....	454
七、活塞环-缸套的弹流计算结果.....	454
§ 13-3 活塞环缸套间弹流参数的测量.....	457
一、电阻法.....	457
二、电容法.....	458
三、电感法.....	460
第十四章 弹流在生物学中的应用	468
§ 14-1 关节的弹流问题.....	463
一、关节的载荷和运动.....	463

二、关节及关节液的特性.....	465
三、关节的润滑状态.....	466
四、关节弹流润滑计算.....	468
§ 14-2 血液在血管中流动时的弹流问题.....	473

第一章 绪 论

§ 1-1 学 科 介 绍

在机器零件运动副的接触面间，人们常常放入润滑油或脂等润滑剂，这可有效地减少摩擦和磨损，并提高其效率及寿命。在这些运动副中，面接触的低副机构(如滑动轴承)在正确设计和合理使用的条件下，两接触面完全可被润滑剂膜所隔开。这种成膜的机理完全可用流体动力润滑理论来解释，也被人们所承认。可是，在点、线接触的高副机构中(如齿轮或蜗轮的啮合，滚动轴承和凸轮机构等)，两接触面为不重合表面，接触处的最大压力常达几千甚至上万个大气压，其间能否形成良好的油膜，人们一直持怀疑态度。1916年 Martin 曾用经典的润滑理论对齿轮与齿条间的润滑进行了计算^[3-1]，可是算得的最小膜厚比表面粗糙度高度还小一、两个数量级。然而，客观事实却表明，良好的润滑确能使其摩擦和磨损大为减小，甚至没有磨损。譬如，人们发现，有些经多次远渡重洋的巨轮，其传动齿轮齿面加工刀痕虽经长期运行，但仍依然如故。这就引起了人们对高副机构润滑机理研究的极大兴趣。有不少研究者在这类问题上开展了研究工作。

为什么经典的流体动力润滑理论不能解释像齿轮这类高副接触的润滑机理呢？我们可分析一下这类润滑的特点。在高副接触中，名义上是线接触或点接触，而实际上因受载变形接触都发生在一个窄小的面积上。接触区压力很高，一方面使接触表面产生弹性变形，使接触区增宽变平；另一方面也使其间的润滑剂粘度大为增加(往往增加成千上万倍)。表面的弹性变形和润滑剂的粘度增

大都会使润滑剂膜的厚度大为增加,并在一定的条件下,也可实现两接触面被润滑剂膜完全分开的期望。因此,高副接触这类润滑问题,除受流体动力润滑理论控制外,同时还必须考虑两种效应:即接触面的弹性变形和润滑剂的粘度-压力效应。

于是,我们把既考虑粘压效应,又考虑弹性变形的流体动力润滑问题称为弹性流体动力润滑 (Elastohydrodynamic Lubrication),简称弹流(EHL或EHD)。通常,弹性流体动力润滑这门学科是主要研究名义上的线接触和点接触的高副润滑问题。但从广义上讲,凡表面的弹性变形量接近和超过最小膜厚的流体动力润滑问题,都属于弹流的范畴,如轧钢机轴承,大型推力瓦轴承,人工关节等工作中变形较大的柔性滑动轴承。

由此看来,各种机器中,许多重要零件的润滑往往都属于弹流所研究的范畴。而这些零件中有许多零件(如齿轮、轴承等)的工作性能往往主宰着整个机器的工作性能和使用寿命。几乎所有的机器中都会遇到这种以弹流理论控制其润滑状况的零部件,因而,开展对弹流的研究有着重要的实际意义,目前世界各国对此都很重视。因此,四十多年来,这门新兴的学科在突飞猛进地发展,它已成为摩擦学领域中近代发展最为突出的分支之一。它大大推动了近代摩擦学理论的发展。此外,它是一门跨学科的学科,它与许多学科都有着密切的联系,如数学、力学、化学、流变学、光学、电学、计算技术、机械、石油、化工和冶金等。因此,它的发展同时也推动了其他学科的发展;同样,其他学科的发展也促进了它的发展。

弹流这门学科发展至今,其研究领域相当广泛,它包括了许多分支。就当前发展的情况,可概括地按以下方法进行分类:

1. 按接触的形式来分:可分为线接触弹流、点接触弹流和柔性面接触弹流(如大变形的滑动轴承等)。

2. 按两面分离的情况分:可分为全膜弹流(Full-Film EHL)和部分膜弹流(Partial-Film EHL)。前者是两面完全被油膜所分开,如图 1-1a, b;后者是两面间既有油膜,也有一部分表面微峰相互接触,也称此为混合润滑,如图 1-1c。另一种分类方法则按是否考虑表面粗糙度来分为:光滑面间的弹流(如图 1-1a)和粗糙面间的弹流(如图 1-1b, c)。这两种分类方法既有搭接,又有区

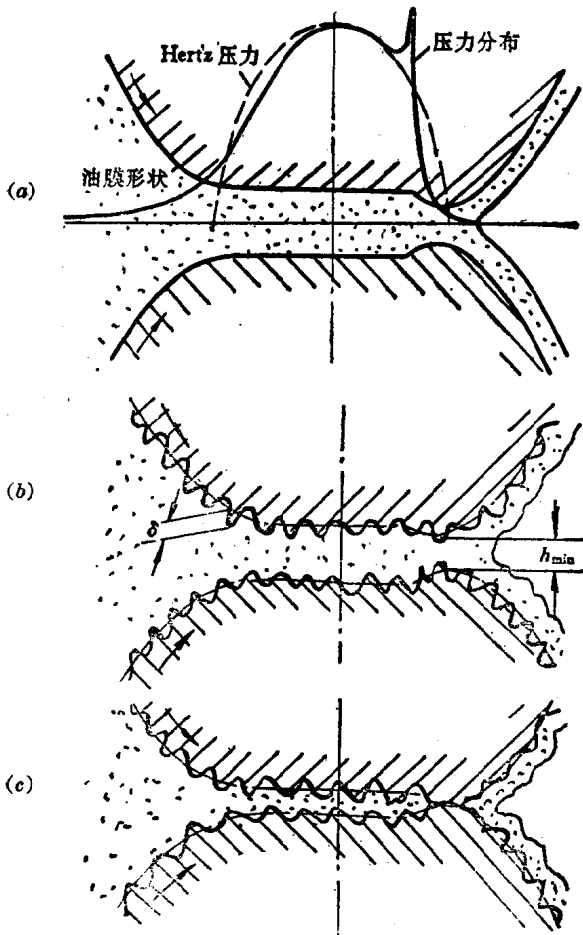


图 1-1 全膜弹流(a, b)和部分膜弹流(c)

别。由图 1-1 看出,光滑面间的弹流必然是全膜弹流;部分膜弹流必然属粗糙面间的弹流;但粗糙面间的弹流,既包括全膜的情况,也包括部分膜弹流。在考虑粗糙度的弹流问题中,为区分全膜与部分膜,通常采用膜厚比 λ 来判别。今设 h_{\min} 为两面间的最小膜厚, σ 为两面合成的粗糙度均方根偏差

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

其中,

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \delta^2 dx} \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2}$$

为两表面的均方根偏差; l 为取样长度。

通常,当 $\lambda > 3$, 可认为是全膜状态; 当 $\lambda < 3$ 时, 则为部分膜状态。

3. 按是否考虑热效应, 可分为热弹流(Thermal EHL)和等温弹流(Isothermal EHL)。前者在分析计算时, 要考虑润滑剂及接触体内的热平衡; 后者则认为润滑中处处温度一样。

4. 按运动规律, 可分为稳态的或非稳态的。前者认为两接触体的表面速度、载荷和曲率半径都是恒定的; 后者则认为这些参数不全是恒定的。

5. 按润滑状态, 可分为刚性-等粘状态($R-I$)、刚性-变粘状态($R-V$)、弹性-等粘状态($E-I$)和弹性-变粘状态($E-V$)四种。第一种为不考虑弹性变形和粘压效应的经典的流体动力润滑状态; 第四种则为典型的弹流状态。

6. 按润滑剂的特性, 可分为牛顿(Newtonian)流体和非牛顿(Non-Newtonian)流体的弹流。或者分为油润滑和脂润滑或其他润滑剂润滑的弹流。

以上是常用的主要的分类方法, 当然也可以从其他角度来进行分类, 此处就不再列举了。

§ 1-2 弹流的发展简史和今后研究的趋势

一、弹流的发展简史

弹流是一门发展迅速的新学科。下面按不同的研究范围介绍一下其发展简史。

线接触全膜等温弹流问题是人们最早着手研究的。1916年 Martin, H. M. ^[3-1] 在研究齿轮的润滑问题时, 曾把接触面当成刚体, 设润滑油粘度不因压力改变而变, 按一般的流体动力润滑理论进行了分析, 计算结果未能真实反映油膜的大小。1949年 Грубин, А. Н. ^[3-2] 既考虑了接触面按干接触的 Hertz 变形, 又考虑粘度随压力的变化, 提出了弹流膜厚的第一个近似解。这被认为弹流历史的开端。1951年 Петрусевич А. И. ^[3-10] 发表了线接触弹流第一个完全数值解。1952年 Blok, H. ^[3-4] 对刚性-变粘润滑状态提出了一个极限情况的膜厚公式。1959年以后, Dowson, D. 和 Higginson, G. R. 以及 Whitaker, A. V. 等 ^[3-20~24] 对等温的线接触弹流进行了一系列数值计算, 提出了实用的膜厚计算公式, 为弹流理论奠定了稳定的基础。1968年 Herrebrugh, K. ^[3-18] 把弹流问题化为一个解积分方程的问题, 对弹性-等粘润滑状态提出了一个等温解。1977年 Hooke, C. J. ^[3-57] 在 Johnson, K. L. ^[3-5] 研究的基础上, 提出了线接触等温弹流的润滑状态图。1985年张鹏顺 ^[3-54, 15] 分析了现有各膜厚公式的局限性, 提出了适用于各润滑状态的统一的膜厚公式和一张修正的润滑状态图。目前, 稳态等温线接触全膜弹流理论已比较成熟; 可是, 非稳态弹流的研究仍开展得很少。十多年前, 仅有一些纯挤压膜和近似的算法, 如[3-79, 80]。近十年来, 许多研究者都对非稳态弹流开展了研究工作, 其中我国成果突出, 如[3-83, 85~89, 93, 94]。

在线接触热弹流的研究方面, 最早在 1965 年 Cheng, H. S.

等^[3-25]以及 Dowson, D. 等^[3-75]分别都提出了完全的数值解。由于热弹流计算较复杂, 而膜厚又主要取决于入口区的条件, 因此, 许多人如 Greenwood, J. A. 等 (1973)^[3-69], Murch, L. E. 和 Wilson, W. R. D. (1975)^[3-70~72], Blok, H. (1978)^[2-73]等分别都用 Грубин 型的入口区热分析, 提出了热弹流的近似膜厚公式。

点接触等温全膜弹流的研究比线接触起步晚十多年。与线接触类似, 先从 Грубин 型分析开始。1965 年 Archard, J. F. 和 Cowking, E. W.^[4-1]提出了第一个近似解。1970 年 Cheng, H. S.^[4-2]也用 Грубин 型分析对椭圆接触提出了一个近似解。1976~1978 年 Hamrock, B. J. 和 Dowson, D. 连续发表了六篇文章^[4-4~9], 对等温的椭圆接触作了大量的分析和完全的数值计算, 提出了实用的膜厚公式和点接触的弹流润滑状态图, 奠定了点接触弹流的理论基础。但他们的顺解法只适用于中、轻载, 很难用于重载。1982 年 Evans, H. P. 和 Snidle, R. W.^[4-11]采用逆解法对重载下点接触弹流进行了求解。1984 年 Oh, K. P.^[4-22]用有限元法对非稳态的动载点接触弹流问题用 Newton-Raphson 法进行了求解。1987 年 Lubrecht, A. A. 等把多重网格法也用于圆点接触弹流问题的求解^[4-17,18]。目前, 稳态等温的点接触全膜弹流理论已基本成熟, 但非稳态弹流仍需继续开展研究。

点接触的热弹流研究直到 80 年代才刚刚开始。1982 年 Bruggemann, H. 等^[4-19]对椭圆接触求解了温度场。1980 和 1984 年朱东及侯克平等^[4-20,21]对点接触热弹流分别用顺解法及逆解法求得了完全的数值解。这方面的研究成果仍很有限。

粗糙面间弹流问题的研究是从 70 年代开始的。在宏观弹流方面, 1969 年 Christensen, H. 提出了一维粗糙面间流体动力润滑的随机模型^[5-5]。1972 年 Tallian, T. E.^[5-1]提出了部分膜弹流的第一个理论。接着一些人用上述模型进行了求解, 如[5-6, 18]等。