

机械制造虚拟实境研究 的几何反算与相关模型

唐余勇 著

Inverse Problem and Its
Geometric Models of
Mechanical Manufacturing
Virtual Reality

哈尔滨工业大学出版社

机械制造虚拟实境研究的几何反算与相关模型

唐余勇 著

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 提 要

本书分六章,分别介绍机械制造虚拟实境研究相关的一般常识;几何反算理论、对应模型及应用;一些机械问题的几何模拟;数控加工中的虚拟实境研究;非数控制造中的虚拟实境;外缘质量评定方面的探讨等。

本书可供高等院校从事机械制造虚拟实境研究的师生们参考,亦可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造虚拟实境研究的几何反算与相关模型/唐余勇著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.12

ISBN 7-5603-2100-3

I.机… II.唐… III.机械制造-虚拟技术-研究 IV.TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 118674 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 850×1168 1/32 印张 8.125 字数 220 千字
版 次 2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-2100-3/TH·124
印 数 1~2 000
定 价 18.00 元

自序

首先感谢哈尔滨工业大学科技处,没有他们的支持与鼓励,我是不敢提笔撰写这本拙著的。

我虽然当上副教授已有 20 个年头,评上教授也已过了 15 个年头;承担过省部级和海峡两岸合作研究课题多项;指导过两岸的博士已不少于 10 位,指导过的硕士和教师也有几十位,带过的学士论文更多一些,他们中评上教授的已不下 10 位、评上副高职的已有几十位。但是毕竟到出版社担任总编辑已 10 年有余,早已把主要精力放在出版事业上了,因为总编辑岗位职责的履行关系到国家和人民的大局、学校的声誉、出版社的兴衰、出版社几十名职工的荣辱和家庭幸福。

尽管因学科建设的需要,还在上点课,搞些研究,带一些学生的学位论文,但还是无精力搞一些像样的项目,致使两任校长和我谈起当博士生指导教师的事,只能表示永远地放弃,但这绝对不是自认为没有能力指导出合格的博士。事实上,我与本校多名博士合作,他们至少各有两篇论文被 SCI、EI 收录;而指导过的多名台湾博士生,每人至少有两篇 SCI 收录论文与我的工作相关,其中一名共有 15 篇被 SCI 收录的论文刊出,我仅署名一次,因我认为他的工作是主要而艰辛的。于是在他的博士论文中写到:“要特别感谢哈尔滨工业大学应用数学系唐余勇教授,不辞辛劳、不分日夜对研究工作的进行,于学术领域的教导,在实务上的帮助协助与支援助益极深,没有您的支持,问题无法解决,在此由衷地说一声谢谢您。”这位博士毕业后不久即荣升了教授。我指导过的另一篇博士论文获台湾地区优秀论文奖。

我近 10 年虽把主要精力放在出版业上了,但从未间断过机械制造虚拟实境研究,其间三次应邀赴台湾地区多校讲学、合作研究、合带博士,有共约 7 个月时间集中全部精力从事此方向研究,在国内外刊发署名论文 140 余篇,并先后获黑龙江省振兴经济一等奖、黑龙江省教委科技进步一、二等奖和黑龙江省科技进步三等奖各一项,出版的 7 种书著中有两种获黑龙江省优秀专著一等奖,并均已直销到海外。在行将退休之际,想将我已经做过、可以做出和怎样去做的这类问题写一写,以供从事机械制造虚拟实境研究的师生和工程技术人员参考,以图提高读者的机械制造虚拟实境研究的能力。

本书分六章,依次介绍机械制造虚拟实境研究中的一般常识;几何反算理论、对应模型及应用;一些机械问题的几何模拟;数控加工中的虚拟实境研究;非数控制造中的虚拟实境;外缘质量评定方面的探讨,每章后面均有“小结与思考”。上述这些内容主要是我参加的一些研究成果,介绍得准确一些;而其中相当一部分已经历了生产实践的验证,可以说不仅仅包括虚拟模型研究,还包括了实境中的内容,因而不能仅从理论、模型、算法上去看,还要从实践角度去体会。

本书的数学基础是解析几何、微分几何和计算几何,而且主要是微分几何。为了适应不同基础的读者,在书后参考文献中不仅列出了工科师生和工程技术人员阅读起来较为方便的相关参考书,而且还列出部分正式刊发的学术论文。

本书问世之时,首先感谢即将 70 周岁的吴从炘教授,是他的提携和扶植,使我走向机械与几何交叉学科的研究领域。现将本书作为生日贺礼献给吴先生,并祝他健康长寿。还当感谢一批数学界、工程界的教授和专家,他们曾给予我的研究以巨大帮助。另外,感谢台湾地区成功大学讲座教授陈朝光博士,是他多次邀请我赴台讲学、合作研究、合带博士、合作著书立说,也使本书拥有一批台湾地区的学者和博士署名的文献。感谢台湾地区成功大学原校

长翁政义教授,是他授权以他校长名义赠本人《弘扬机械科技》金匾,给本人以难忘的激励。在此还要感谢研究工作中的合作者,他们是孙家广院士^[46];王树国^[4]、董敏^[5]、吴鸿业^[6]、刘华明^[32]、董申^[36]、谭久彬^[37]、郭兴家(台湾地区)^[47]、刘振华^[76]、赖新一(台湾地区)^[73]、刘克安^[20]、刘品^[28]等教授;博士后任秉银^[7]教授、汪云涛^[70]、蒋鲲^[26]等;博士陈维方教授(台湾地区)^[74]、吴昌祚(台湾地区)^[75]、鲍青山^[71]、时培林(加拿大)^[54]、刘媛^[20]、孙春华^[62]、丁树森(美国)^[17]、詹为渊(台湾地区)^[47]等;博士吕广明^[38]、薛梓^[37]、韩成顺^[36]、蒋卫华^[38]等;硕士张学奇教授^[24]、朱方群^[18]、杨革^[19]、金建涛^[55]、李启平^[22]、方继学^[31]、尹静^[37]等;学士徐忠民^[14]、王俊艳^[40]、宋云^[42]、孙晓军^[41]、王伟^[54]、张芳^[81]等;还有一批工厂的高工、总工合作者,他们是李万荣^[10]、倪时中^[13]、王松^[30]、郭青田^[48]、宋克东^[51]等;还当提起的是我在任成功大学客座教授期间,机械博士班学生曾赠给“春风化雨”金具,他们和内地的学生们一样,给予我入微的关心,同学们的情谊是最大的激励,理当并将典藏一生。没有他们的合作和帮助,本书是难于问世的。

还要感谢已故数学界前辈苏步青、吴大任两位老教授,是他们给予了我多方面的教导和激励,在此对他们表示深深的怀念。

我毕业于哈尔滨工业大学机械系,后又学了点数学,但由于一直兼做行政工作,研究面又比较窄,因此匆匆在退休前赶出本书,难免存在不当和疏漏,故尤盼读者批评指正!

愿本拙著能为机械制造的虚拟实境研究有所助益!

唐余勇

2004年6月24日

目 录

第一章 虚拟实境研究相关的一般常识	(1)
1.1 虚拟实境研究的瓶颈在于几何反算	(1)
1.2 虚拟实境研究的一般程序	(2)
1.3 确定虚拟实境研究方案的一般思路	(5)
1.4 正确选择坐标系、算法与初值	(8)
1.5 几个不常见的几何概念与公式	(9)
小结与思考	(11)
第二章 几何反算理论、对应模型及其应用	(12)
2.1 几何反算的两类问题	(12)
2.2 求工具造型的直接选取法和求解交线法	(13)
2.3 求工具造型的包络法和拟包络法	(16)
2.4 求工具造型的盘状法和指状法	(21)
2.5 求工具造型的柱状法和曲率法	(25)
2.6 求工具造型的中点中线法和中心偏移法	(28)
2.7 求工具造型的极值法和设备配置法	(29)
2.8 求相对运动的直接选取法和方向数法	(30)
2.9 求相对运动的法向等距线法和向心等距线法	(32)
2.10 求相对运动的等距曲面法和斜等距曲面法	(34)
2.11 求相对运动的曲率分析法和样条曲线法	(35)
2.12 求相对运动的密切圆法和渐近曲线法	(35)
2.13 求相对运动的误差遗传法和残留高度法	(36)
小结与思考	(37)

第三章 一些机械问题的几何模拟	(38)
3.1 求格利森铣刀盘刀齿顶刃中点	(38)
3.2 求滚刀侧铲面的中心点	(39)
3.3 求三类回转面上最小法曲率半径的点	(40)
3.4 砂轮轴线与主轴轴线的相对位置	(41)
3.5 剃前滚刀齿顶角圆半径的求取	(43)
3.6 内外形线磨制中的四种曲线	(47)
3.7 四类刀具的刃口曲线	(49)
3.8 椭球齿轮上的短程线	(52)
3.9 压力容器的裂纹分析	(53)
3.10 硬质合金格利森铣刀盘的前刀面	(54)
3.11 球面铣刀后刀面的磨制	(56)
3.12 油气混输泵(钻具)的定子内腔曲面	(58)
3.13 智能检查仪在测量中的等距曲面	(59)
3.14 锥面砂轮轴线轨迹与磨得曲面	(59)
3.15 增压母轮加工中的等距曲面与斜等距曲面	(60)
3.16 求直圆锥齿轮齿廓的近似方程	(61)
3.17 木工螺旋刨刀设计、制造与装配问题	(63)
3.18 求实得齿轮滚刀侧铲面	(65)
3.19 钻尖的变导程拟螺面磨法	(67)
3.20 齿轮与齿条、齿轮之间传动的几何表述	(73)
3.21 磨球机构与误差分析	(76)
小结与思考	(80)
第四章 数控加工中虚拟实境研究	(81)
4.1 一次基本成形的回转铣刀虚拟实境研究	(81)
4.2 数次基本成形的增压母轮叶片的虚拟制造模型	(96)
4.3 二轴联动加工三种回转面的虚拟制造模型	(98)

4.4	三轴联动加工三种回转面模具的虚拟制造模型	… (105)
4.5	自由曲面数控加工的虚拟制造通用模型	… (110)
4.6	船用螺旋桨叶片工作面数控加工中的虚拟实境	… (128)
	小结与思考	(138)
第五章	非数控制造中的虚拟实境	(140)
5.1	提高径向铲磨刀具精度的虚拟实境研究	(140)
5.2	提高插齿刀使用寿命的虚拟实境研究	(147)
5.3	螺旋插齿刀虚拟制造模型研究	(154)
5.4	螺旋拉刀的虚拟制造模型	(163)
5.5	非数控加工球面铣刀的虚拟实境研究	(167)
5.6	格利森铣刀盘的设计与制造模型研究	(178)
5.7	提高麻花钻质量的虚拟实境研究	(185)
5.8	回转铣刀非数控制造的虚拟模型	(191)
5.9	在平面谐波传动研制中的虚拟实境	(192)
5.10	油气混输泵(钻具)的造型设计问题	(201)
5.11	对塞克斯-9c磨齿机上柔性加工的 虚拟实境研究	(207)
	小结与思考	(214)
第六章	外缘质量评定方面的探讨	(216)
6.1	最小平行六面体的求解模型	(216)
6.2	最小外包容圆柱的求解模型	(220)
6.3	最小外包容圆锥的求解模型	(221)
6.4	最小外包容球面的求解模型	(225)
6.5	带角圆的圆弧铣刀外缘质量评定模型	(226)
6.6	两类钻头外缘质量评定模型	(227)
6.7	圆锥基准柄带角圆的柱面铣刀质量评定模型	… (232)
	小结与思考	(234)

附录 研究随笔	(235)
做学问先做人 永远当好学生	(235)
撰写科研论文的技巧	(236)
提高研究创造性与扩大战果问题	(238)
参考文献	(243)

第一章 虚拟实境研究相关的一般常识

本章主要是为刚从事虚拟实境研究的人员撰写的,属于常识性的内容,其中一些内容是作者讲授相关课程和讲演中的文稿改写的,希望可以减少年青读者的入门时间。

1.1 虚拟实境研究的瓶颈在于几何反算

应当指出的是,本拙著涉及的问题大多为冷加工问题。这类机械制造虚拟实境类研究课题的研究对象为三个互相关联的组成部分,一是设备,含现有设备和新探讨的待定设备;二是工具,含定型工具和待确定的工具;三是产品,含理想产品和有待理想的产品。三者之间,产品理想化是机械制造的目的,其他两者是为其服务的。

理想产品就是人们认为是满意的产品形态,有待理想的产品是存在缺陷的产品形态,比如插齿刀^[21],传统的设计方案是近似的,不理想,又如剃前刀具,许多文献的设计方案本身就存在很大的近似^[12],寻求无设计误差的工作自然有利于提高这类产品的竞争力,因此研究机械制造课题,有时不得不涉及设计问题。又如硬质合金格利森铣刀盘的刀齿^[80]就是一个优化设计问题,做好这些工作,无疑是有所创造、有所前进的有价值工作。

当然对大多数机械制造课题,研究的主要难点还是在于所制造的实际产品接近或达到理想产品的形态问题。这类课题又表现为两种形式,一是给定工具,比如给定柱状、球状或锥状工具,寻求一种设备实施工件与工具的相对运动,以确保获取较为理想的产

品;二是设备已经给定,寻求最佳的设备调整,确定工具与工件的相对位置与工具廓面,以确保获取最佳的产品造型。这类课题本质上是数学的包络与包络的反问题^[61],工具廓面相对工件的连续运动产生的包络当为理想产品的廓面,求相对运动、相对位置或工具廓面是已知包络,求其逆解的反问题,因此可以说,机械制造难题的基本问题就其大多数来说是包络的反问题。

从工程角度看,机械制造由于设备、工具及两者的相对位置不可能绝对准确,而产品也绝对不是要求丝毫不差,这有一个允许公差,即通过这个包络的反问题的求解而得到的工具廓面在工具与工件的相对运动中产生的曲面族包络是工程上可接受的廓面,这并不是十分严格的包络反问题的解,作为这类几何问题,反算又是本质,不妨取名为几何反算。

很明显,只要求出可接受产品对应的加工用工具廓面、工具与工件的相对位置和相对运动,机械制造的目的就有望实现,因此国际公认几何反算是机械制造虚拟实境研究中的瓶颈技术。关于几何反算在这类研究中的地位的关键性,本书将在第二章专门予以介绍。

1.2 虚拟实境研究的一般程序

虚拟实境研究实际上就是通过数学模拟、计算机上虚拟制造过程寻求出最理想的制造方案,再指导实际制造,或将虚拟可行的方案用于实境制造的研究。显然虚拟极为重要,有了理想的方案,实境就好办了。当然也可能有例外,某些地方考虑不周也可能导制实境与原方案之间存在某些偏差,因此从某种意义上讲,只有实境中达到较为理想的效果时,这项研究才是真正的完成;只有经过实境中的验证,虚拟模型才是可靠的,方案才是可行的。从上述认识可以看到这类研究的一般程序应当如下。

研究前提 考虑研究一个虚拟实境课题,研究的前提要清晰,

即研究的课题是值得的。有两点必须注意:第一是考虑的问题是否有成功的可能,如作者曾收到关于永动机的两份图纸和数学模型的研究,而永动机早就从理论上证明是不可能的;第二是所考虑的问题是否是别人已经解决了的,如有的文章把欧拉角的定义作为创造性的研究。

研究准备 在确认课题有研究必要的前提下,应着手虚拟实境研究前的准备工作。此准备工作是:应当尽快搞清本课题国内外研究现状,尽可能地占有相关资料;采取的方式是请教专家、查阅文献、调查研究等。其目的是弄清本课题已知的是什么,还有哪些是未知的,需要求解什么,应当干些什么。

研究方案 在明确所要研究课题的已有条件和目标之后,应该提出实现目标的具体研究方案。即要考虑到,一个研究课题一般不是一步就能完成的,往往要分几步甚至十几步,逐渐来靠拢目标。这里不但要考虑分几步,而且对每一步的具体目标,运用哪些手段来达到这些具体目标,都要做到心中有数。这个研究方案在整个研究中至关重要,它将决定成败或是否会走弯路。

研究假设 由于工程问题的复杂性,每一个具体步骤都难免要被诸多因素所影响,如果把所有影响因素都一一加以考虑,将会导致模型异常复杂,甚至难于求解。在机械制造中,对精度的要求有一个允许公差,因此,常常可以忽略那些对精度影响很小的因素,抓住影响全局的因素,达到既简化模型又能保证精度要求的目的,这样就需要做些假设。这里有两点值得格外注意:一是不能光图模型简化,而忽略应当考虑的因素;二是要各步的假设不能相互矛盾。有效的方法是先对各步提出假设,然后把它们集中,最后综合分析,制定总的几条假设。这一步也很重要,由于模型假设不当造成的失败或多走弯路,是屡见不鲜的,因此,要重视这一关键性步骤。

数学模拟 在研究假设合理的条件下,按预定研究方案,一步步地建立起前后呼应的几何模型,这正是研究的数学模拟部分主

要工作所在。每一公式的推导、抄录都要十分仔细,因为任何一步的错误都有可能造成前功尽弃,使后继工作陷入困境。必须指出的是,一个具体工程问题,即使模型部分,往往也会超出几何范畴,比如用到参数优化等等。考虑到本书是把几何以外的知识仅作为辅助工具,故不再介绍。

实施虚拟 在前述各步已经准确或至少已经认为准确的情况下,可将所得数学模型编译成计算机可实施的虚拟制造程序,实施计算机上的仿真、计算。这一步骤具有两重意义,一是可以判断前述各步工作是否有误,二是可为后续各步工作提供依据。

研究分析 仿真计算的结果是否合理,要做认真分析,因为我们研究的是实际工程问题,客观实际会明确地告诉研究者应有的结论。因而,这一步的主要工作在于:如果数据不合理,应该采取什么步骤使其合理。一般来说,前述各步都会影响计算结果。建议读者首先考虑假设是否合理,是否忽略了需要考虑的因素,然后再仔细检查其他各步。科研实践告诉我们,“一次成功”的研究工作非常少,研究工作中出现偏差、谬误往往难免。但是仔细推敲、不同角度的验算往往会使我们少走弯路。在具体课题研究中,研究分析的重要性,尤其在仿真计算结果不合理时就更加明显。认真仔细地分析计算机所得的每一个数据和仿真图形,将有助于我们提高研究质量,提高整个课题完成的实际水平。

走向实境 当上述各项工作均已满意时,就应该考虑走向实境。需要强调的是:除了预定目标所对应的工程应用外,还要注意各项工作是否还有其他的有价值结论,是否可推广到更广泛的课题中去,力求一举多得。

实践表明,上述各项工作在每个具体课题的研究进程中不一定很分明,往往互相交叉,但按照这种程序来考虑问题,总的进程还是清晰的,也是行之有效的。另外,对于某些具体课题,一些步骤可以省略。比如制造刀具,就可以不进行假设,事实上还是忽略了相应机床精度的影响。

相信读者会在研究实践中,不断体会、加深及提高对本程序的认识,会越来越熟练地掌握它。

1.3 确定虚拟实境研究方案的一般思路

从1.2节易见,研究方案是关键性步骤,因为后续各步均据此方案来实施;而1.1节所言瓶颈问题将在方案中起决定性作用。如果把研究的课题当做一把锁,那么,研究的方案就是一把钥匙,钥匙配对了,就可以解决问题。因此,对于虚拟实境研究,确定研究的方案实际上是个关键,同时也是难点。上节虽介绍了它的任务,但并没有提到如何才能尽快地把方案确定下来,故在本节专门研究此问题。

首先,必须知道一些常识,否则工程问题就无法与几何或其他数学分支建立联系,也就无从谈起建立课题的相应模型。或者要解决的问题根本不是几何问题,却硬往几何上想,这又有什么用呢?为此,这里稍微介绍点有关常识。如机械产品标准的制定,往往运用统计知识和几何知识;机械产品的可靠性,需要用到概率统计中的可靠性理论;机床设计常常利用优化方法,其主轴箱计算又会涉及到图论;刚度问题一般要借助于微分方程等。

其次,由于本人主要从事几何应用研究,而机械产品又多为有形的,故在后续两章中,本书较为详细地介绍了几何反算理论对应模型和几何知识与机械问题的联系。只有知道这些常识越多,研究方案才越有可能尽快得出。

研究方案,或者说模拟方案涉及两个问题,一是分几步走,二是每一步依据的是什么理论和知识,这两个问题解决了,方案也就有了。下面先介绍确定分几步走的方法。

分几步走 可采用下述方法来确定分几步走,以及每一步的目标。在一张白纸上,把已知的条件写在纸的左边,目标所涉及

东西写在纸的右边,中间留一定距离,用来勾画它们之间的相互联系。其思路可归结为反推法、正推法和混合法三种。反推法是根据目标反推,逐步与已知条件发生联系的方法;正推法是从已知出发,一步步向目标靠拢的方法;混合法就是从两边往中间推,像建设桥梁的方法。以混合法为例,通过实例来介绍具体实现的有效性。

研究课题是制造高精度的齿轮滚刀。齿轮滚刀的各种参数和侧铲面方程为已知,目标是在机床上制造出这种高精度的齿轮滚刀。我们知道,根据滚刀参数可确定机床主轴的转速和磨头座的轴向、径向走刀速度,滚刀侧铲面的实现与机床调整和砂轮廓面或其截形相关。由图 1.1,可以看出需要建立两个模型:一个是机床调整的几何模型;另一个是求砂轮截形的模型。由文献[10]可知,

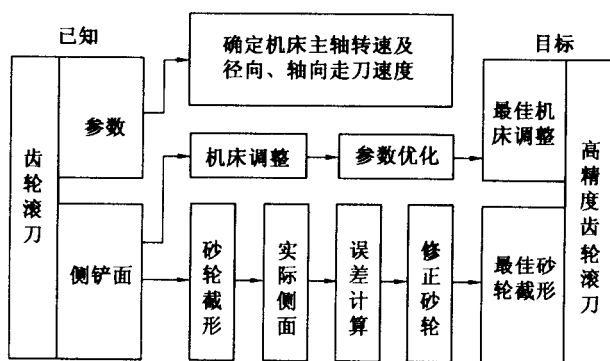


图 1.1

径向铲背必然导致造型误差,只有每一瞬时换一砂轮截形,才能使滚刀侧铲面造型误差为零,实际上这是做不到的,而只能根据某一点瞬时接触,运用几何反算理论求出一个砂轮截形的参考曲线;于是又要计算出用此砂轮加工侧铲面后的实得曲面,这样就出现第

三个分模型——求得侧铲面方程。为使砂轮截形最佳,必须根据两个侧铲面(即理论侧铲面和求得侧铲面)的误差来修正,于是又有误差计算、修正砂轮截形这两个分模型。从目标考虑,高精度的滚刀侧铲面取决于最佳砂轮截形和最佳机床调整值,于是需要再加一个参数优化模型。至于最佳砂轮截形的获取模型部分,在上述分析中已经出现,故至少需六个分模型。整个构思如图 1.1 所示。

事实上,作者在这个课题研究中,还提出了中点中线和中心偏移方法修正砂轮,这些将在 5.1 节进行介绍。由此可见,实际步骤还会多,但基本步骤已定。

这里虽然介绍了确定分几步走以及每步目标的方法,对读者也许会有所助益,但这个问题的真正解决主要还要靠读者自己的实践来探索。

确定依据 在每一步的目标确定后,还需要通过数学表达式来勾画,才能最终利用计算机来虚拟制造。虽然本书第二、三章介绍了不少依据性模型,但数目毕竟有限,因此有必要把机械工程中涉及的几何模型进行分类,可分成三种形式,如果把分模型的目标与其中的一种形式建立了关系,便可得到它的数学描述。形式之一是点、直线、平面相关的问题;之二是曲线、曲面方程问题;之三是坐标差问题。关于点、直线、平面相关的问题,一般可考虑以矢量为工具,借助文献[1]和[2]所介绍的几何常识即可处理。而求曲线、曲面方程问题,其方法繁多,除已有的现成曲线、曲面方程(直接引用时,要注意坐标系的选择会影响到其方程的具体表述式)外,还会遇到法向等距线法、垂足曲线法^[3]、向心等距线法、等距曲面法、等距变换法、包络方法和几何反算方法等,至于机械方面著作中由包络法派生出来的其他方法^[5],这里就不再介绍了。坐标差问题,则是用初等几何知识便可解决的。本书重点放在前两种依据,尤其是第二种形式的依据上,这也是第二、三章的重点