



2018^年 李正元·范培华

考研数学 1

数学

数学二

复习全书

● 主编 北京大学 李正元
北京大学 尤承业

20年**经典传承** 百万考生推荐

名师全程**亲自答疑** 扫描二维码互动交流

冲刺课程(价值199元) **免费赠送**

双色印刷 重点突出



微信公众号



本书后附习题全解

中国政法大学出版社




2018 年李正元·范培华考研数学①

数学

数学二

复习全书

主编 北京 大学 李正元
北京 大学 尤承业

 中国政法大学出版社

2017·北京

- 声 明
1. 版权所有，侵权必究。
 2. 如有缺页、倒装问题，由出版社负责退换。

图书在版编目(CIP)数据

2018年李正元·范培华考研数学数学复习全书. 数学二/李正元, 尤承业主编. —北京: 中国政法大学出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5620-7238-6

I. ①2… II. ①李… ②尤… III. ①高等数学—研究生—入学考试—自学参考资料 IV. ①013

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第312793号

出版者 中国政法大学出版社
地 址 北京市海淀区西土城路25号
邮寄地址 北京100088信箱8034分箱 邮编100088
网 址 <http://www.cuplpress.com> (网络实名: 中国政法大学出版社)
电 话 010-58908285(总编室) 58908433(编辑部) 58908334(邮购部)
承 印 保定市中画美凯印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 31.25
字 数 860千字
版 次 2017年1月第1版
印 次 2017年1月第1次印刷
定 价 59.80元

数学学习方法与指导

(代前言)

本书自 1998 年出版以来, 经过数次修订, 凭借编写体例上的“有特色”, 内容讲解、试题分析与解答上的详尽、透彻、易懂, 获得了百万考生的青睐和喜爱, 也得到专家同行的一致好评。2018 版《考研数学复习全书》将在内容、形式方面做进一步的优化和调整, 以期更高的质量和崭新的面貌呈现在广大考生面前。

一 内容上

在保持原有体例的基础上, 根据不同学科的特点, 进行了针对性的改进。

科目	分值	百分比
高等数学	117	78%
线性代数	33	22%

高等数学部分: 高等数学知识体系庞大, 内容分布广、散。为了考生能够抓住复习重点, 我们在“考核知识要点讲解”栏目更加突出重难点的设置及讲解。

线性代数部分: 本学科的特点是概念多, 理论晦涩, 考生在复习过程中的难点就是对很多概念理解不清。针对这一点, 我们在概念的复习上做了精心的设计, 帮助考生快速掌握各个概念及概念间的联系, 形成一个概念链。

二 形式上

由于图书的篇幅有限, 编者不可能面面俱到, 所以有些题目和知识点, 考生在看书过程无法做到完全的理解和领会。我们特意增加了“编者答疑”服务, 另外还有“免费课程”等。在印刷上我们采用了“双色印刷”。

编者答疑——名师亲自负责全程答疑, 考生可将问题以图片形式发至微信订阅号“李正元·范培华考研数学答疑”, 获取名师点拨。

免费课程——关注微信订阅号“李正元·范培华考研数学答疑”, 凭“李正元·范培华考研系列图书附赠条码”免费获取价值 199 元的考研冲刺点睛班课程。

双色印刷——体例清晰, 重点突出, 备考更高效。

最后，为了便于考生用好复习参考书，下面就李正元·范培华考研系列图书的使用给出一个参考性的安排：

■第1阶段（现在至6月）

认真复习《数学复习全书》的第个章节，全面整理基本概念、公式及其定理，同时对书中的基础题目进行研习、总结。本书在编写时十分注重题型的划分，因此在复习过程中要对知识点框架及解题思路进行划分归纳。

■第2阶段（7月至8月）

使用《历年试题解析》刷真题，《历年试题解析》的答案解析十分详细，对每个题目都有考点分析和易错点提醒。考生通过做真题，把握真题的命题方向和重点，做到有的放矢。

■第3阶段（9月至10月）

查漏补缺。对于《数学复习全书》和《历年试题解析》中做错的题目，找出错误原因，确定本身存在问题的地方，是计算错误、概念问题，还是解题方法思路问题，有针对性的改善提高。

结合历年试题的每个章节对应《数学复习全书》的每个章节复习，将书中概念、公式和解题思路都圈出来，牢固掌握考查内容和解题方法。

■第4阶段（10月至11月）

使用《数学预测试卷》（原经典400题）进行模拟演练。做题时间完全按照研究生招生考试的要求来安排，需要注意的是模拟题的难度一般高于真题难度，解题更讲究思路技巧，考生在模拟练习时不要纠结于得分，要找到自己的不足，对照《数学复习全书》填补不足。严格按照考试时间做题，反复做预测试卷3遍。

■第5阶段（12月至考前）：

使用《数学最后冲刺超越135分》进行全真考试状态模拟，使自己提前进入考试状态。这个阶段需要注意的是对照《数学复习全书》中的概念、定理和公式进行勾画标记复习。

结合自己情况按照老师的指导方法学习，考研数学一定会取得好成绩。

编者
于北京

第一篇 高等数学

第一章 极限、连续与求极限的方法 (1)

知识结构网络图 (1)

内容概要与重难点提示 (1)

考核知识要点讲解 (2)

一、极限的概念与性质 (2)

二、极限存在性的判别 (4)

三、求极限的方法 (6)

四、无穷小及其比较 (13)

五、函数的连续性及其判断 (16)

六、连续函数的性质 (18)

常考题型及其解题方法与技巧 (19)

题型训练 (31)

第二章 一元函数的导数与微分概念及其计算 (35)

知识结构网络图 (35)

内容概要与重难点提示 (35)

考核知识要点讲解 (36)

一、一元函数的导数与微分 (36)

二、按定义求导数及其适用的情形 (39)

三、基本初等函数导数表, 导数四则运算法则与复合函数微分法则 (41)

四、初等函数的求导法 (42)

五、复合函数求导法的应用——由复合函数求导法则导出的几类函数的微分法 (43)

六、分段函数的求导法 (46)

七、高阶导数及 n 阶导数的求法 (47)

八、一元函数微分学的简单应用 (49)

常考题型及其解题方法与技巧 (51)

题型训练 (60)

第三章 一元函数积分概念、计算及

应用 (63)

知识结构网络图 (63)

内容概要与重难点提示 (64)

考核知识要点讲解 (64)

一、一元函数积分的概念、性质与基

本定理 (64)

二、基本积分表与积分法则 (71)

三、几种特殊类型函数的积分法 (81)

四、积分计算技巧 (85)

五、反常积分(广义积分) (86)

六、积分学应用的基本方法——微元分析法 (89)

七、一元函数积分学的几何应用 (90)

八、一元函数积分学的物理应用 (95)

常考题型及其解题方法与技巧 (99)

题型训练 (123)

第四章 微分中值定理及其应用 (127)

知识结构网络图 (127)

内容概要与重难点提示 (127)

考核知识要点讲解 (128)

一、微分中值定理及其作用 (128)

二、利用导数研究函数的性态 (129)

三、一元函数的最大值与最小值问题 (135)

常考题型及其解题方法与技巧 (137)

题型训练 (159)

第五章 一元函数的泰勒公式及其应用 (162)

知识结构网络图 (162)

内容概要与重难点提示 (162)

考核知识要点讲解 (162)

一、带皮亚诺余项与拉格朗日余项的

 n 阶泰勒公式 (162)

二、泰勒公式的求法 (164)

三、泰勒公式的若干应用 (165)

常考题型及其解题方法与技巧	(169)	累次积分	(227)
题型训练	(173)	三、二重积分的变量替换	(229)
第六章 常微分方程	(175)	四、如何应用计算公式计算或简化二重积分	(231)
知识结构网络图	(175)	常考题型及其解题方法与技巧	(234)
内容概要与重难点提示	(175)	题型训练	(242)
考核知识要点讲解	(176)		
一、基本概念	(176)	第二篇 线性代数	
二、一阶微分方程	(176)	第一章 行列式	(247)
三、可降阶的高阶微分方程	(178)	知识结构网络图	(247)
四、含变限积分的微分方程	(178)	内容概要与重难点提示	(247)
五、线性微分方程解的性质与结构	(179)	考核知识要点讲解	(247)
六、二阶和某些高阶常系数齐次线性微分方程	(181)	一、定义(完全展开式)	(248)
七、二阶常系数非齐次线性微分方程	(181)	二、行列式的性质	(248)
八、微分方程的简单应用	(183)	三、克拉默法则	(249)
常考题型及其解题方法与技巧	(187)	常考题型及其解题方法与技巧	(249)
题型训练	(193)	题型训练	(260)
第七章 多元函数微分学	(196)	第二章 矩阵	(262)
知识结构网络图	(196)	知识结构网络图	(262)
内容概要与重难点提示	(196)	内容概要与重难点提示	(262)
考核知识要点讲解	(197)	考核知识要点讲解	(263)
一、多元函数的概念、极限与连续性	(197)	一、矩阵乘法的定义和规律	(263)
二、多元函数的偏导数与全微分	(199)	二、 n 阶矩阵的方幂和多项式	(264)
三、多元函数的微分法则	(203)	三、乘积矩阵的列向量组和行向量组	(264)
四、复合函数求导法的应用——隐函数微分法	(206)	四、两类特殊矩阵的乘法	(265)
五、复合函数求导法则的其他应用	(209)	五、矩阵乘法的分块法则	(265)
六、多元函数的极值问题	(210)	六、两种基本矩阵方程	(265)
七、多元函数的最大值与最小值问题	(212)	七、可逆矩阵	(266)
常考题型及其解题方法与技巧	(214)	八、伴随矩阵	(267)
题型训练	(222)	常考题型及其解题方法与技巧	(267)
第八章 二重积分	(225)	题型训练	(283)
知识结构网络图	(225)	第三章 向量组的线性关系与秩	(286)
内容概要与重难点提示	(225)	知识结构网络图	(286)
考核知识要点讲解	(225)	内容概要与重难点提示	(287)
一、二重积分的概念与性质	(225)	考核知识要点讲解	(287)
二、在直角坐标系中化二重积分为		一、线性表示	(287)
		二、向量组的线性相关性	(288)
		三、向量组的秩和最大无关组	(289)
		四、矩阵的秩	(291)

五、实向量的内积和正交矩阵	(291)
常考题型及其解题方法与技巧	(292)
题型训练	(309)
第四章 线性方程组	(311)
知识结构网络图	(311)
内容概要与重难点提示	(311)
考核知识要点讲解	(312)
一、线性方程组的形式	(312)
二、线性方程组解的情况的判别	(312)
三、线性方程组的通解	(312)
常考题型及其解题方法与技巧	(313)
题型训练	(335)
第五章 特征向量与特征值, 相似, 对角化	(338)
知识结构网络图	(338)
内容概要与重难点提示	(339)
考核知识要点讲解	(339)
一、特征向量和特征值	(339)
二、 n 阶矩阵的相似关系	(340)
三、相似对角化问题	(341)
四、实对称矩阵的相似对角化	(341)
常考题型及其解题方法与技巧	(342)
题型训练	(363)
第六章 二次型	(365)
知识结构网络图	(365)
内容概要与重难点提示	(365)
考核知识要点讲解	(366)
一、二次型及其矩阵	(366)
二、可逆线性变量替换和矩阵的合同关系	(366)
三、二次型的标准化	(367)

四、惯性定理和惯性指数, 实对称矩阵合同的判断	(369)
五、正定二次型和正定矩阵	(369)
常考题型及其解题方法与技巧	(369)
题型训练	(381)

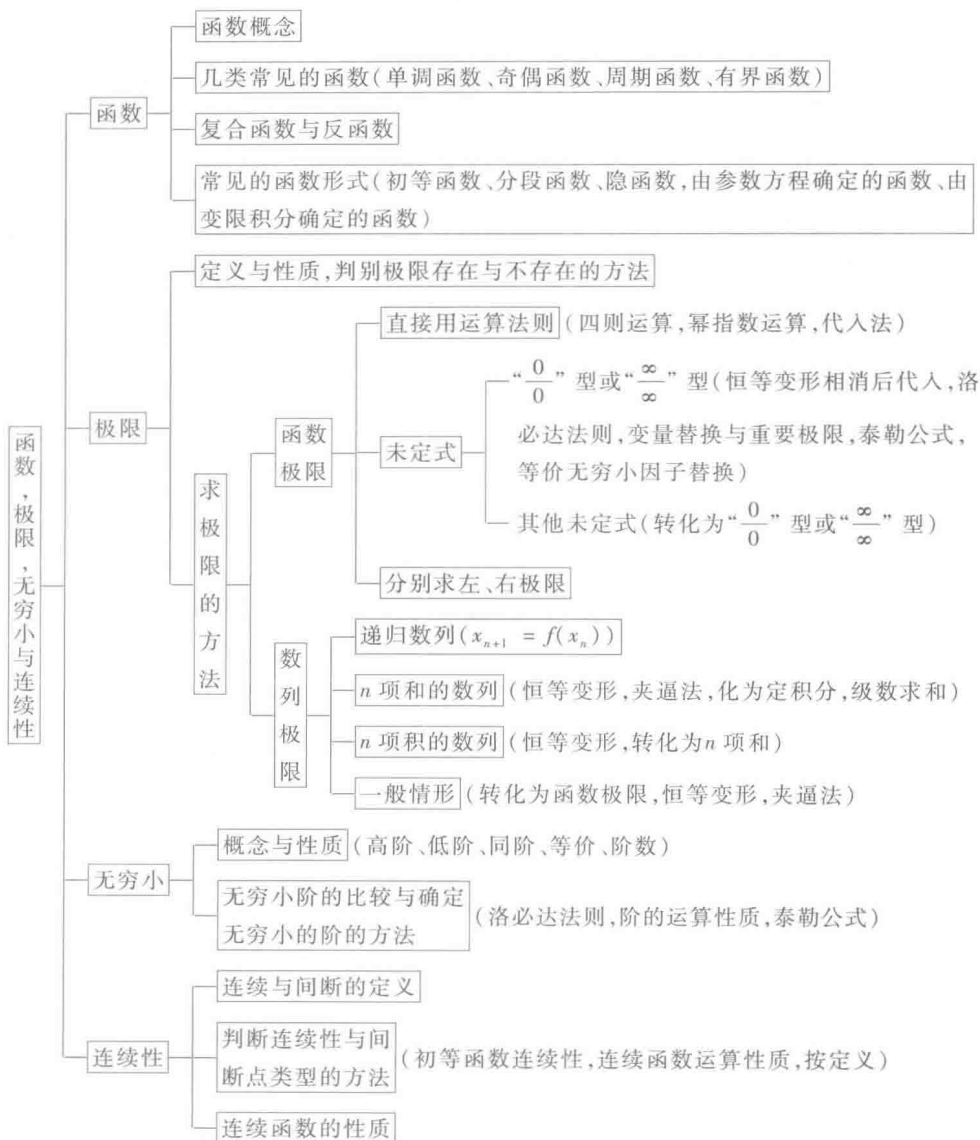
附：全书题型训练试题解答

第一篇 高等数学	(383)
第一章 极限、连续与求极限的方法	(383)
第二章 一元函数的导数与微分概念及其计算	(396)
第三章 一元函数积分概念、计算及应用	(402)
第四章 微分中值定理及其应用	(419)
第五章 一元函数的泰勒公式及其應用	(434)
第六章 微分方程	(441)
第七章 多元函数微分学	(449)
第八章 二重积分	(461)
第二篇 线性代数	(470)
第一章 行列式	(470)
第二章 矩阵及其运算	(472)
第三章 向量组的线性关系与秩	(477)
第四章 线性方程组	(481)
第五章 矩阵的特征值与特征向量	(485)
第六章 二次型	(488)

第一篇 高等数学

第一章 极限、连续与求极限的方法

知识结构网络图



内容概要与重难点提示

(一) 微积分中研究的对象是函数 函数概念的实质是变量之间确定的对应关系. 变量之间是否

有函数关系,就看是否存在一种对应规则,使得其中一个量或几个量定了,另一个量也就被唯一确定,前者是一元函数,后者是多元函数.

函数这部分的重点是:复合函数、反函数和分段函数、函数记号的运算、基本初等函数与其图象、初等函数的概念等.

(二) 极限是微积分的理论基础 研究函数的性质实质上是研究各种类型的极限,如连续、导数、定积分等等.由此可见极限的重要性.本章的重点内容是极限.既要准确理解极限的概念、性质和极限存在的条件,又要能准确地求出各种极限.求极限的方法很多,综合起来主要有:

- ① 利用极限的四则运算与幂指数运算法则;
- ② 利用函数的连续性;
- ③ 利用变量替换与两个重要极限;
- ④ 利用等价无穷小因子替换;
- ⑤ 利用洛必达法则;
- ⑥ 分别求左、右极限;
- ⑦ 数列极限转化为函数极限;
- ⑧ 利用适当放大缩小法;
- ⑨ 对递归数列先证明极限存在(常用到“单调有界数列有极限”的准则),再利用递归关系求出极限;
- ⑩ 利用导数的定义求极限;
- ⑪ 利用泰勒公式;
- ⑫ 利用定积分求 n 项和式的极限.

(三) 无穷小就是极限为零的变量 极限问题可归结为无穷小问题.极限方法的重要部分是无穷小分析,或说无穷小阶的估计与分析.要理解无穷小及其阶的概念,学会比较无穷小的阶及确定无穷小阶的方法,会用等价无穷小因子替换求极限.

(四) 我们研究的对象是连续函数或除若干点外是连续的函数 由于函数的连续性是通过极限定义的,所以判断函数是否连续及函数间断点的类型等问题本质上仍是求极限.因此这部分也是本章的重点.要掌握判断函数连续性及间断点类型的方法,特别是分段函数在分界点处的连续性.

(五) 有界闭区间上连续函数的基本性质 函数的其他许多性质都与函数的连续性有关,因此我们要了解有界闭区间上连续函数的重要性质,包括:有界性定理,最大值、最小值定理和中间值(介值)定理,并会应用这些性质.

考核知识要点讲解

一、极限的概念与性质

(一) 极限的定义

【定义 1.1】(数列的极限) $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0, \exists$ 正整数 N ,使得当 $n > N$ 时就有

$$|x_n - A| < \varepsilon.$$

若数列 $\{x_n\}$ 存在极限(有限数),又称数列 $\{x_n\}$ 收敛,否则称数列 $\{x_n\}$ 发散.

【定义 1.2】(函数的极限) $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = A \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0, \exists$ 正数 X ,使得当 $|x| > X$ 时就有

$$|f(x) - A| < \varepsilon.$$

类似可定义单侧极限 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = A$ 与 $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = A$.

【注】在函数极限情形下 $x \rightarrow \infty$ 与数列极限中 $n \rightarrow \infty$ 的意义不同,前者是指 $x \rightarrow \pm \infty$,而后者是指 $n \rightarrow +\infty$.

【定义 1.3】(函数的极限) $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0, \exists$ 正数 δ ,使得当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时有

$$|f(x) - A| < \varepsilon.$$

类似可定义 $f(x)$ 当 $x \rightarrow x_0$ 时左极限 $f(x_0 - 0)$ 与右极限 $f(x_0 + 0)$:

$$f(x_0 - 0) = \lim_{x \rightarrow x_0 - 0} f(x) = A, \quad f(x_0 + 0) = \lim_{x \rightarrow x_0 + 0} f(x) = A.$$

(二) 极限的基本性质

►1. 数列极限的基本性质

【定理 1.1】(极限的不等式性质) 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = b$.

(1) 若 $a > b$, 则 $\exists N$, 当 $n > N$ 时有 $x_n > y_n$; (2) 若 $n > N$ 时 $x_n \geq y_n$, 则 $a \geq b$.

【定理 1.2】(收敛数列的有界性) 设数列 $\{x_n\}$ 收敛, 则数列 $\{x_n\}$ 有界 (即 \exists 常数 $M > 0$, $|x_n| \leq M$, $n = 1, 2, \dots$).

►2. 函数极限的基本性质

【定理 1.3】(极限的不等式性质) 设 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = B$.

(1) 若 $A > B$, 则 $\exists \delta > 0$ 使得当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时有 $f(x) > g(x)$;

(2) 若 $\exists \delta > 0$, 使得当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时有 $f(x) \geq g(x)$, 则 $A \geq B$.

【注】若(2)中的条件“ $f(x) \geq g(x)$ ”改为“ $f(x) > g(x)$ ”, 其他条件保持不变, 则结论仍是“ $A \geq B$ ”.

【推论】(极限的保号性) 设 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$.

(1) 若 $A > 0$, 则 $\exists \delta > 0$ 使得当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时有 $f(x) > 0$;

(2) 若 $\exists \delta > 0$, 使得当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时有 $f(x) \geq 0$, 则 $A \geq 0$.

【定理 1.4】(存在极限的函数局部有界性) 设存在极限 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, 则 $f(x)$ 在 x_0 的某空心邻域 $U_0(x_0, \delta) = \{x \mid 0 < |x - x_0| < \delta\}$ 内有界, 即 $\exists \delta > 0$ 与 $M > 0$, 使得当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时有 $|f(x)| \leq M$.

【注】其他极限过程如 $x \rightarrow x_0 + 0, x \rightarrow x_0 - 0, x \rightarrow +\infty, x \rightarrow -\infty$ 等也有类似的结论.

(三) 两个重要极限

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e \text{ 或 } \lim_{x \rightarrow 0} (1+x)^{\frac{1}{x}} = e, \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1+x)}{x} = 1 \quad (1.1)$$

【例 1.1】判断下列结论是否正确, 并证明你的判断.

(I) 若 $x_n < y_n (n > N)$, 且存在极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A$, $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = B$, 则 $A < B$;

(II) 设 $f(x)$ 在 (a, b) 有定义, 又 $\exists c \in (a, b)$ 使得极限 $\lim_{x \rightarrow c} f(x) = A$, 则 $f(x)$ 在 (a, b) 有界;

(III) 若 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty$, 则 $\exists \delta > 0$ 使得当 $0 < |x - a| < \delta$ 时 $\frac{1}{f(x)}$ 有界.

【解】(I) 不正确. 在题设下只能保证 $A \leq B$, 不能保证 $A < B$. 例如, $x_n = \frac{1}{n}, y_n = \frac{2}{n}$, 则 $x_n < y_n$, 而 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = 0$.

评注 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 与 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n$ 都存在, 则对不等式 $x_n < y_n (n > N)$ 两边当 $n \rightarrow \infty$ 时取极限, 除保持不等号外还应加上等号, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n \leq \lim_{n \rightarrow \infty} y_n$.

(II) 不正确. 这时只能保证: \exists 点 c 的一个空心邻域 $U_0(c, \delta) = \{x \mid 0 < |x - c| < \delta\}$ 使 $f(x)$ 在 $U_0(c, \delta)$ 中有界, 一般不能保证 $f(x)$ 在 (a, b) 有界. 例如: $f(x) = \frac{1}{x}$, $(a, b) = (0, 1)$, 取定 $c \in (0,$

1), 则 $\lim_{x \rightarrow c} f(x) = \frac{1}{c}$, 但 $f(x) = \frac{1}{x}$ 在 $(0, 1)$ 无界.

(Ⅲ) 正确. 因为 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty \Rightarrow \lim_{x \rightarrow a} \frac{1}{f(x)} = 0$, 由存在极限的函数的局部有界性 $\Rightarrow \exists \delta > 0$ 使得

当 $0 < |x - a| < \delta$ 时 $\frac{1}{f(x)}$ 有界.

二、极限存在性的判别

(一) 极限存在的两个准则

1. 夹逼定理

【定理 1.5】(数列情形) 若 $\exists N$, 使得当 $n > N$ 时有 $y_n \leq x_n \leq z_n$, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = \lim_{n \rightarrow \infty} z_n = a$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a.$$

【定理 1.6】(函数情形) 若 $\exists \delta > 0$, 使得当 $0 < |x - x_0| < \delta$ 时有 $h(x) \leq f(x) \leq g(x)$, 又

$$\lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = A, \text{ 则 } \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A.$$

【注】其他极限过程也有类似的结论.

2. 单调有界数列必收敛定理

【定理 1.7】若数列 $\{x_n\}$ 单调上升有上界, 即 $x_{n+1} \geq x_n$ ($n = 1, 2, \dots$), 并存在一个数 M 使得对一切的 n 有 $x_n \leq M$, 则 $\{x_n\}$ 收敛. 即存在一个数 a , 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 且有 $x_n \leq a$ ($n = 1, 2, \dots$).

若数列 $\{x_n\}$ 单调下降有下界, 即 $x_{n+1} \leq x_n$ ($n = 1, 2, \dots$), 并存在一个数 m 使得对一切的 n 有 $x_n \geq m$, 则 $\{x_n\}$ 收敛. 即存在一个数 a , 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 且有 $x_n \geq a$ ($n = 1, 2, \dots$).

(二) 极限存在的一个充要条件

【定理 1.8】(函数极限存在的充要条件) $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = A$.

对于分段函数 $f(x) = \begin{cases} g(x), & x_0 - \delta < x < x_0, \\ h(x), & x_0 < x < x_0 + \delta, \end{cases}$ 考察 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ 是否存在就需要分别求

$\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} h(x)$ 与 $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^-} g(x)$, 并确定二者是否相等.

【定理 1.9】(数列极限存在的充要条件) $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = A \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{2n-1} = A$.

【例 1.2】设 $f(x) = \begin{cases} 2(x+1)\arctan \frac{1}{x}, & x > 0, \\ 1, & x = 0, \\ \frac{\ln(1+ax^2)}{x \sin x}, & x < 0, \end{cases}$ 又 $a \neq 0$, 问 a 为何值时 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x)$ 存在.

【分析】分别求右、左极限 $f(0+0)$ 与 $f(0-0)$, 由 $f(0+0) = f(0-0)$ 定出 a 值.

【解】 $f(0+0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} 2(x+1)\arctan \frac{1}{x} = 2 \lim_{x \rightarrow 0^+} \arctan \frac{1}{x} = \pi$,

$f(0-0) = \lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \left[\frac{\ln(1+ax^2)}{ax^2} \cdot \frac{ax^2}{x \sin x} \right] = 1 \cdot a \cdot 1 = a$ ($a \neq 0$),

由 $f(0+0) = f(0-0)$, 得 $a = \pi$. 因此, 当且仅当 $a = \pi$ 时, 存在 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \pi$.

评注 注意在本题中当 $a = \pi$ 时极限 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \pi$, 即当 $x \rightarrow 0$ 时 $f(x)$ 的极限存在, 但此极限值与函数值 $f(0) = 1$ 并不相等, 其原因在于 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x)$ 描述的是当 $x \rightarrow 0$ 但 $x \neq 0$ 时 $f(x)$ 的变化趋势, 它与函数 $f(x)$ 在点 $x = 0$ 处的函数值 $f(0)$ 是多少没有关系.

【例 1.3】 $\lim_{x \rightarrow 1} (x-1)^2 e^{\frac{1}{x-1}} =$

(A) 0. (B) $-\infty$. (C) $+\infty$. (D) 不存在但也不是 ∞ .

【分析】 因为 $\lim_{t \rightarrow +\infty} e^t = +\infty$, $\lim_{t \rightarrow -\infty} e^t = 0$, 故要分别考察左、右极限. 由于

$$\lim_{x \rightarrow 1+0} (x-1)^2 e^{\frac{1}{x-1}} \stackrel{t = \frac{1}{x-1}}{=} \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{e^t}{t^2} = +\infty, \quad \lim_{x \rightarrow 1-0} (x-1)^2 e^{\frac{1}{x-1}} \stackrel{t = \frac{1}{x-1}}{=} \lim_{t \rightarrow -\infty} \frac{e^t}{t^2} = 0,$$

因此应选(D).

(三) 证明函数 $f(x)$ 的极限不存在常用的方法

方法 1° 若 $f(x_0+0) \neq f(x_0-0)$, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ 不存在. 当 $x \rightarrow \infty$ 时, 对含有 $a^x (a > 0, a \neq 1)$ 或 $\arctan x$ 或 $\operatorname{arccot} x$ 的函数极限, 一定要对 $x \rightarrow +\infty$ 与 $x \rightarrow -\infty$ 分别求极限. 若两者的极限值相等, 则 $x \rightarrow \infty$ 时极限存在, 否则不存在.

方法 2° 若 $\exists x_n \rightarrow x_0$, 但 $x_n \neq x_0$ 的数列 $\{x_n\}$, 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n)$ 不存在或有两个满足 $x_n \rightarrow x_0 (x_n \neq x_0)$, $y_n \rightarrow x_0 (y_n \neq x_0)$ 的数列 $\{x_n\}$ 与 $\{y_n\}$ 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) \neq \lim_{n \rightarrow \infty} f(y_n)$, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ 不存在.

方法 3° 利用结论: 设 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x)$ 不存在, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} [f(x) + g(x)]$ 不存在; 若又有 $A \neq 0$, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} [f(x) \cdot g(x)]$ 不存在.

【例 1.4】 证明: (I) $\lim_{x \rightarrow 0} \sin \frac{1}{x}$ 不存在; (II) 设 $f(x) = \frac{\int_0^x \sin \frac{1}{t} \cos t^2 dt}{x}$, 则 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x)$ 不存在.

【证明】 (I) 取 $x_n = \frac{1}{2n\pi}$, $y_n = \frac{1}{2n\pi + \frac{\pi}{2}}$, 则均有 $x_n \rightarrow 0, y_n \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$, 但

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sin \frac{1}{x_n} = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \frac{1}{y_n} = 1, \quad \text{因此 } \lim_{x \rightarrow 0} \sin \frac{1}{x} \text{ 不存在.}$$

评注 类似可证: $\lim_{x \rightarrow 0} \cos \frac{1}{x}$ 不存在.

(II) 已知 $f(x) = \frac{g(x)}{x} \cdot \sin \frac{1}{x}$, 其中 $g(x) = \int_0^x \cos t^2 dt$, 由于

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{g(x)}{x} \stackrel{\text{洛必达法则}}{=} \lim_{x \rightarrow 0} \cos x^2 = 1 \neq 0,$$

而 $\lim_{x \rightarrow 0} \sin \frac{1}{x}$ 不存在, 所以 $\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{g(x)}{x} \sin \frac{1}{x}$ 不存在.

评注 这里用到了变限积分的求导公式: 设 $f(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 则对任意 $x \in [a, b]$, 有

$$\left[\int_a^x f(t) dt \right]' = f(x).$$

三、求极限的方法

(一) 利用极限的四则运算法则与幂指数运算法则求极限

►1. 极限的四则运算法则及其推广

【定理 1.10】(四则运算法则) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A$, $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = B$, 则

$$\lim_{x \rightarrow a} [f(x) \pm g(x)] = A \pm B, \quad \lim_{x \rightarrow a} [f(x) \cdot g(x)] = A \cdot B, \quad \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{A}{B} (B \neq 0).$$

四则运算法则的推广:

(1) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = 0$, 且当 $0 < |x - a| < \delta$ 时 $g(x)$ 有界, 则 $\lim_{x \rightarrow a} [f(x)g(x)] = 0$.

(2) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty (+\infty, -\infty)$, 且当 $0 < |x - a| < \delta$ 时 $g(x)$ 有界或 $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = A$, 则

$$\lim_{x \rightarrow a} [f(x) + g(x)] = \infty (+\infty, -\infty).$$

(3) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty (+\infty)$, 且当 $0 < |x - a| < \delta$ 时 $|g(x)| \geq A > 0$ ($g(x) \geq A > 0$), 或

$$\lim_{x \rightarrow a} g(x) = A \neq 0 (A > 0), \text{ 或 } \lim_{x \rightarrow a} g(x) = \infty (+\infty), \text{ 则 } \lim_{x \rightarrow a} [f(x)g(x)] = \infty (+\infty).$$

(4) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty$, $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = \infty$, 又当 $0 < |x - a| < \delta$ 时 $f(x)g(x) > 0$, 则

$$\lim_{x \rightarrow a} [f(x) + g(x)] = \infty.$$

【注】若 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A$, $\lim_{x \rightarrow a} g(x)$ 不存在也不为 ∞ , 则 $\lim_{x \rightarrow a} [f(x) \pm g(x)]$ 不存在也不为 ∞ ; 若又有

$A \neq 0$, 则 $\lim_{x \rightarrow a} f(x)g(x)$, $\lim_{x \rightarrow a} \frac{g(x)}{f(x)}$ 均不存在也不为 ∞ . 但是, 当 $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$ 与 $\lim_{x \rightarrow a} g(x)$ 都不存在且不为 ∞

时, 求 $f(x) \pm g(x)$, $f(x)g(x)$, $\frac{g(x)}{f(x)}$ 的极限则必须作具体分析.

►2. 幂指数函数的极限运算法则及其推广

【定理 1.11】(幂指数运算法则) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A > 0$, $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = B$, 则 $\lim_{x \rightarrow a} f(x)^{g(x)} = A^B (A > 0)$.

幂指数运算法则的推广:

(1) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = A > 0$, 且 $A \neq 1$ (或 $+\infty$), $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = +\infty$, 则

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x)^{g(x)} = \begin{cases} 0, & 0 < A < 1, \\ +\infty, & A > 1 \text{ (或 } +\infty \text{)}. \end{cases}$$

(2) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = 0$, $f(x) > 0$ ($0 < |x - a| < \delta$), $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = B \neq 0$ (或 $\pm\infty$), 则

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x)^{g(x)} = \begin{cases} 0, & B > 0 \text{ (或 } +\infty \text{)}, \\ +\infty, & B < 0 \text{ (或 } -\infty \text{)}. \end{cases}$$

(3) 设 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = +\infty$, $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = A \neq 0$ (或 $\pm\infty$), 则 $\lim_{x \rightarrow a} f(x)^{g(x)} = \begin{cases} +\infty, & A > 0 \text{ (或 } +\infty \text{)}, \\ 0, & A < 0 \text{ (或 } -\infty \text{)}. \end{cases}$

►3. 对 $\frac{0}{0}, \frac{\infty}{\infty}, 0 \cdot \infty, \infty - \infty, 0^0, 1^\infty, \infty^0$ 等各类未定式不能直接用上述运算法则.

最基本的是 $\frac{0}{0}$ 与 $\frac{\infty}{\infty}$ 型, 其他类型应经恒等变形转化为 $\frac{0}{0}$ 或 $\frac{\infty}{\infty}$ 型未定式.

求 $\frac{0}{0}$ 或 $\frac{\infty}{\infty}$ 型极限的方法有多种(参看题型一),其中一种重要技巧是设法消去分子、分母中的极限为零或 ∞ 因子,于是转化为可以直接用四则运算法则的情形(后面还要介绍其他方法,如洛必达法则).

【例 1.5】 求 $w = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{xe^x(2e^x + 1)}{[1 + (e^x + 1)^2](1 + e^x)}$.

【解】 这是求 $\frac{\infty}{\infty}$ 型极限,用相除法,分子、分母同除以 $(e^x)^2$ 得

$$w = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{e^x + 1} \cdot \frac{2 + e^{-x}}{e^{-2x} + (1 + e^{-x})^2} = 0 \times 2 = 0,$$

其中 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{e^x + 1} = 0$ (用洛必达法则).

(二) 利用函数的连续性求极限

1. 设 $f(x)$ 在 $x = a$ 连续,按定义就有 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$. 因此若能用除定义外某种方法判断 $f(x)$ 在 $x = a$ 连续,对连续函数求极限 $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$ 就是用代入法求函数值 $f(a)$.

2. 一切初等函数在其定义域区间上连续. 因此,若 $f(x)$ 是初等函数,且 a 属于其定义域,则

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a).$$

(三) 利用变量替换法与两个重要极限求极限

1. 通过变量替换,把求某个极限转化为求另一个极限,若后者能算得出来,问题就解决了.

(1) 设 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \varphi(x) = +\infty$ 且 $\lim_{u \rightarrow +\infty} f(u) = A$, 则 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f[\varphi(x)] \stackrel{u = \varphi(x)}{=} \lim_{u \rightarrow +\infty} f(u) = A$.

(若把 $x \rightarrow +\infty$ 改为 $x \rightarrow -\infty$ 或 $x \rightarrow x_0$ 上述结论仍成立.)

(2) 设 $\lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) = u_0$ 且 $f(u)$ 在 u_0 连续, 则 $\lim_{x \rightarrow x_0} f[\varphi(x)] \stackrel{u = \varphi(x)}{=} \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \text{ 时} \\ u \rightarrow u_0}} f(u) = f(u_0)$.

2. 重要极限与变量替换法相结合可求下列极限:

(1) 诸如: 设 $\lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) = 0$, $\lim_{x \rightarrow x_0} \psi(x) = A$, 则

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\sin \varphi(x)}{\varphi(x)} = 1, \quad \lim_{x \rightarrow x_0} [1 + \varphi(x)]^{\frac{1}{\varphi(x)}} = e, \quad \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\ln[1 + \varphi(x)]}{\varphi(x)} = 1,$$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} [1 + \varphi(x)]^{\frac{\psi(x)}{\varphi(x)}} = \lim_{x \rightarrow x_0} \left([1 + \varphi(x)]^{\frac{1}{\varphi(x)}} \right)^{\psi(x)} = e^A,$$

(2) 设 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 1$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \infty$, 则求 1^∞ 型极限

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)^{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \left\{ [1 + (f(x) - 1)]^{\frac{1}{f(x) - 1}} \right\}^{g(x)[f(x) - 1]} = e^A, \quad \textcircled{*}$$

转化为求 $0 \cdot \infty$ 型极限 $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x)[f(x) - 1] = A$.

【注】 上述极限过程 $x \rightarrow x_0$ 改为其他情形也有类似结论.

【例 1.6】 求极限 $w = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{x} + 2^{\frac{1}{x}} \right)^x$.

【解】 属 1^∞ 型. 用前面 $\textcircled{*}$ 式中的方法: $w = \lim_{x \rightarrow \infty} 2 \left[\left(1 + \frac{1}{x} 2^{-\frac{1}{x}} \right)^{x \cdot 2^{\frac{1}{x}}} \right]^{2^{-\frac{1}{x}}} = 2 \cdot e^{2^0} = 2e.$

(四) 利用等价无穷小因子替换求极限

若 $x \rightarrow a$ 时, 无穷小 $\alpha(x) \sim \alpha^*(x), \beta(x) \sim \beta^*(x)$ (即 $\lim_{x \rightarrow a} \frac{\alpha(x)}{\alpha^*(x)} = 1, \lim_{x \rightarrow a} \frac{\beta(x)}{\beta^*(x)} = 1$), 则

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{\alpha(x)u(x)}{\beta(x)v(x)} = \lim_{x \rightarrow a} \frac{\alpha^*(x)u(x)}{\beta^*(x)v(x)}. \quad (1.2)$$

(等式两边其中之一极限存在或为 ∞ , 则另一也是且相等.)

该结论表明: 在求极限过程中等价无穷小因子可以替换.

利用等价无穷小因子替换求极限可大大减少计算量. 但在利用等价无穷小因子替换求极限时应注意下面两点:

(1) 只在求极限的乘除运算中使用等价无穷小因子替换, 不要在求极限的加减运算中使用, 在加减法中等价无穷小的替换是有条件的, 这里我们不去讨论. (参见题型训练四, 3 题.)

(2) 要熟练应用第四节中的(1.3)所列常见的等价无穷小.

【例 1.7】 求下列极限:

$$(I) w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^{x^4} - 1}{1 - \cos(x \sqrt{1 - \cos x})}; \quad (II) w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{1 + \cos x}{2} \right)^{2x} - 1}{\ln(1 + 2x^3)}.$$

【解】 (I) 注意 $x \rightarrow 0$ 时, $1 - \cos(x \sqrt{1 - \cos x}) \sim \frac{1}{2}x^2(1 - \cos x) \sim \frac{1}{4}x^4, e^{x^4} - 1 \sim x^4 \Rightarrow$

$$w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^4}{\frac{1}{4}x^4} = 4.$$

评注 设当 $x \rightarrow a$ 时, $\alpha \sim \beta, \beta \sim \gamma$, 则 $\alpha \sim \gamma (x \rightarrow a)$.

(II) 因为 $\left(\frac{1 + \cos x}{2} \right)^{2x} - 1 \sim \ln \left[1 + \left(\frac{1 + \cos x}{2} \right)^{2x} - 1 \right] = 2x \ln \frac{1 + \cos x}{2} = 2x \ln \left(1 + \frac{\cos x - 1}{2} \right) \sim 2x \cdot \frac{\cos x - 1}{2} \sim x \cdot \left(-\frac{1}{2}x^2 \right) = -\frac{1}{2}x^3 (x \rightarrow 0), \ln(1 + 2x^3) \sim 2x^3 (x \rightarrow 0)$, 所以

$$w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{1 + \cos x}{2} \right)^{2x} - 1}{\ln(1 + 2x^3)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{1}{2}x^3}{2x^3} = -\frac{1}{4}.$$

(五) 利用洛必达法则求未定式的极限

求 $\frac{0}{0}$ 或 $\frac{\infty}{\infty}$ 型未定式更常用的方法是用洛必达法则. 具体方法如下:

【定理 1.12】 设 (i) $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = 0 (\infty), \lim_{x \rightarrow a} g(x) = 0 (\infty)$; (ii) $f(x), g(x)$ 在 $x = a$ 的空心邻域可导, $g'(x) \neq 0$; (iii) $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)} = A$, 则 $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = A$, 其中 A 可以是有限数也可以是 ∞ 或 $\pm \infty$.

【注】 ① 将 $x \rightarrow a$ 改为 $x \rightarrow a+, x \rightarrow a-,$ 或 $x \rightarrow \infty, +\infty, -\infty$ 等也有相应的洛必达法则.

② $\frac{\infty}{\infty}$ 型未定式的洛必达法则可推广成: (i) 设 $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = \infty$, 条件 (ii) 与 (iii) 不变, 则结论也

不变, 即 $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = A$ (不必要求 $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \infty$).

③ 数列极限不能直接用洛必达法则：如用，得先转化成连续变量的极限即函数极限。

④ 应用上述法则时应注意：

1° 要验证应用法则的条件，尤其是条件(i)是必须要验证的，不是 $\frac{0}{0}$ 型或 $\frac{\infty}{\infty}$ 型就不能用洛必达法则。例如，以下运算是错误的：

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x + \cos x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(x + \cos x)'}{x'} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \sin x}{1} = 1.$$

事实上 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x + \cos x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \left(1 + \frac{\cos x}{x} \right) = \infty$ 。错误的原因在于 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x + \cos x}{x}$ 既不是 $\frac{0}{0}$ 型也不是 $\frac{\infty}{\infty}$ 型的未定式。

2° 仅从 $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ 不存在也不为 ∞ 不能断定 $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)}$ 不存在，此时应改用其他方法求解。

例如， $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x + \sin x}{x} = 1$ ，但 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(x + \sin x)'}{x'} = \lim_{x \rightarrow +\infty} (1 + \cos x)$ 不存在。

3° 若 $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ 还是 $\frac{0}{0}$ 型或 $\frac{\infty}{\infty}$ 型，则可继续用洛必达法则。只要满足条件，一直可用到求出极限为止。

4° 其他类型的未定式($0 \cdot \infty, \infty - \infty, 0^0, 1^\infty, \infty^0$ 等)先化成 $\frac{0}{0}$ 或 $\frac{\infty}{\infty}$ 型，再用洛必达法则。

5° 使用洛必达法则解题时，为了避免复杂的计算，提高效率，应尽可能地综合运用变量替换、等价无穷小因子替换、恒等变形以及函数的连续性与极限的四则运算法则、换元法(即复合函数求极限法则)等方法。

【例 1.8】 求 $w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1+x^2) - \ln(1+\sin^2 x)}{x \sin^3 x}$ 。

【解】 属 $\frac{0}{0}$ 型。先作恒等变形

$$w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln\left(1 + \frac{x^2 - \sin^2 x}{1 + \sin^2 x}\right)}{x \sin^3 x}.$$

然后用等价无穷小因子替换： $x \rightarrow 0$ 时

$$\sin^3 x \sim x^3, \quad \ln\left(1 + \frac{x^2 - \sin^2 x}{1 + \sin^2 x}\right) \sim \frac{x^2 - \sin^2 x}{1 + \sin^2 x} \sim x^2 - \sin^2 x,$$

于是

$$w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x^4} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x + \sin x}{x} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \sin x}{x^3} = 2 \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \sin x}{x^3}.$$

最后用洛必达法则得

$$w = 2 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{3x^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{3}.$$

【例 1.9】 求 $w = \lim_{x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\ln(x + \sqrt{1+x^2})} - \frac{1}{\ln(1+x)} \right]$ 。

【解】 属 $\infty - \infty$ 型。先通分化成 $\frac{0}{0}$ 型未定式，则有 $w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1+x) - \ln(x + \sqrt{1+x^2})}{\ln(x + \sqrt{1+x^2}) \ln(1+x)}$ 。

直接用洛必达法则比较麻烦，若注意到

$$[\ln(x + \sqrt{1+x^2})]' = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}, \quad \text{从而} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(x + \sqrt{1+x^2})}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} = 1.$$

这表明 $\ln(x + \sqrt{1+x^2}) \sim x (x \rightarrow 0)$ 。因此对分母先作等价无穷小因子替换后再用洛必达法则，并利用