



2020^年 李正元·范培华

考研数学

数学

数学一

复习全书

- 主编 北京大学 李正元
北京大学 尤承业
北京大学 范培华

20年经典传承 百万考生推荐

辅导名师丁勇、章飞必考点视频讲解

购买正版图书享(价值599元)视频课程

双色印刷 重点突出



数学复习指导

赠送《全书习题全解》



2020 年李正元·范培华考研数学

数学

数学一

复习全书

主编 北 京 大 学 李 正 元
北 京 大 学 尤 承 业
北 京 大 学 范 培 华



中国政法大学出版社

2019·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

2020年李正元·范培华考研数学数学复习全书. 数学一/李正元, 尤承业, 范培华主编. —北京: 中国政法大学出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-5620-8792-2

I. ①2… II. ①李… ②尤… ③范… 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(2019)第013098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 三河市燕山印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 52.5
字 数 1156千字
版 次 2019年1月第1版
印 次 2019年1月第1次印刷
定 价 98.80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。2020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	84	56%
线性代数	33	22%
概率论与数理统计	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。

概率论与数理统计部分:本学科在考研真题中所占比重较小,往往被考生忽略,这部分的复习策略在于多做基础的典型的常考题型,就可以顺利拿到分数,所以我们针对考生的复习弱点,有针对性的对重点概念、公式和常考题型进行多角度讲解,以提高考生运用概念、公式以及综合分析问题的能力。

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——名师亲自全程答疑,考生可将问题以图片形式发至微信“考研数学章飞答疑”,获取名师点拨。

免费课程——关注“李正元·范培华考研数学”二维码,即可享受考研名师针对本图书的视频详解课程。

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》的每个章节，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。

结合自身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 (58)
知识结构网络图 (1)	内容概要与重难点提示 (59)
内容概要与重难点提示 (1)	考核知识要点讲解 (59)
考核知识要点讲解 (2)	一、一元函数积分的概念、性质与基本定理..... (59)
一、极限的概念与性质..... (2)	二、基本积分表与积分法则..... (66)
二、极限存在性的判别..... (4)	三、几种特殊类型函数的积分法..... (76)
三、求极限的方法..... (6)	四、积分计算技巧..... (80)
四、无穷小及其比较..... (14)	五、反常积分(广义积分)..... (81)
五、函数的连续性及其判断..... (16)	六、积分学应用的基本方法——微元分析法..... (84)
六、连续函数的性质..... (18)	七、一元函数积分学的几何应用..... (85)
常考题型及其解题方法与技巧 (19)	八、一元函数积分学的物理应用..... (90)
第二章 一元函数的导数与微分概念及其计算 (32)	常考题型及其解题方法与技巧 (93)
知识结构网络图 (32)	第四章 微分中值定理及其应用 (116)
内容概要与重难点提示 (32)	知识结构网络图 (116)
考核知识要点讲解 (33)	内容概要与重难点提示 (116)
一、一元函数的导数与微分..... (33)	考核知识要点讲解 (117)
二、按定义求导数及其适用的情形..... (36)	一、微分中值定理及其作用..... (117)
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..... (38)	二、利用导数研究函数的性态..... (118)
四、初等函数的求导法..... (39)	三、一元函数的最大值与最小值问题..... (124)
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..... (40)	常考题型及其解题方法与技巧 (126)
六、分段函数的求导法..... (43)	第五章 一元函数的泰勒公式及其应用 (147)
七、高阶导数及 n 阶导数的求法..... (45)	知识结构网络图 (147)
八、一元函数微分学的简单应用..... (47)	内容概要与重难点提示 (147)
常考题型及其解题方法与技巧 (48)	考核知识要点讲解 (147)
第三章 一元函数积分概念、计算及应用 (58)	一、带皮亚诺余项与拉格朗日余项的 n 阶泰勒公式..... (147)
	二、泰勒公式的求法..... (149)
	三、泰勒公式的若干应用..... (150)
	常考题型及其解题方法与技巧 (154)
	第六章 常微分方程 (158)
	知识结构网络图 (158)
	内容概要与重难点提示 (158)

考核知识要点讲解	(159)	七、多元函数的最大值与最小值问题	(213)
一、基本概念	(159)	八、方向导数与梯度	(215)
二、一阶微分方程	(160)	九、多元函数微分学的几何应用	(216)
三、可降阶的高阶方程	(162)	常考题型及其解题方法与技巧	(219)
四、含变限积分的方程	(163)	第九章 多元函数积分的概念、计算及其应用	(229)
五、线性微分方程解的性质与结构	(164)	知识结构网络图	(229)
六、二阶和某些高阶常系数齐次线性微分方程	(165)	内容概要与重难点提示	(229)
七、二阶常系数非齐次线性微分方程与欧拉方程	(166)	考核知识要点讲解	(230)
八、微分方程的简单应用	(167)	一、多元函数积分的概念与性质	(230)
常考题型及其解题方法与技巧	(171)	二、在直角坐标系中化多元函数的积分为定积分	(234)
第七章 向量代数和空间解析几何	(179)	三、重积分的变量替换	(240)
知识结构网络图	(179)	四、如何应用多元函数积分的计算公式及简化计算	(245)
内容概要与重难点提示	(179)	五、多元函数积分学的几何应用	(255)
考核知识要点讲解	(180)	六、多元函数积分学的物理应用	(258)
一、空间直角坐标系	(180)	常考题型及其解题方法与技巧	(260)
二、向量的概念	(180)	第十章 多元函数积分学中的基本公式及其应用	(285)
三、向量的运算	(181)	知识结构网络图	(285)
四、平面方程、直线方程	(184)	内容概要与重难点提示	(285)
五、平面、直线之间相互关系与距离公式	(186)	考核知识要点讲解	(286)
六、旋转面与柱面方程, 常用二次曲面的方程及其图形	(188)	一、多元函数积分学中的基本公式——格林公式, 高斯公式与斯托克斯公式	(286)
七、空间曲线在坐标平面上的投影	(189)	二、向量场的通量与散度, 环流量与旋度	(288)
常考题型及其解题方法与技巧	(189)	三、格林公式, 高斯公式与斯托克斯公式的一个应用——简化多元函数积分的计算	(289)
第八章 多元函数微分学	(197)	四、平面上曲线积分与路径无关问题及微分式的原函数问题	(295)
知识结构网络图	(197)	常考题型及其解题方法与技巧	(300)
内容概要与重难点提示	(197)	第十一章 无穷级数	(310)
考核知识要点讲解	(198)	知识结构网络图	(310)
一、多元函数的概念、极限与连续性	(198)	内容概要与重难点提示	(310)
二、多元函数的偏导数与全微分	(200)	考核知识要点讲解	(311)
三、多元函数的微分法则	(204)		
四、复合函数求导法的应用——隐函数微分法	(207)		
五、复合函数求导法则的其他应用	(210)		
六、多元函数的极值问题	(211)		

一、常数项级数	(311)
二、幂级数	(316)
三、傅里叶级数	(321)
常考题型及其解题方法与技巧	(323)

第二篇 线性代数

第一章 行列式

知识结构网络图	(343)
内容概要与重难点提示	(343)
考核知识要点讲解	(343)
一、定义(完全展开式)	(344)
二、行列式的性质	(344)
三、克拉默法则	(345)
常考题型及其解题方法与技巧	(345)

第二章 矩阵

知识结构网络图	(356)
内容概要与重难点提示	(356)
考核知识要点讲解	(357)
一、矩阵乘法的定义和规律	(357)
二、 n 阶矩阵的方幂和多项式	(358)
三、乘积矩阵的列向量组和行向量组	(358)
四、两类特殊矩阵的乘法	(359)
五、矩阵乘法的分块法则	(359)
六、两种基本矩阵方程	(359)
七、可逆矩阵	(360)
八、伴随矩阵	(361)
常考题型及其解题方法与技巧	(361)

第三章 向量组的线性关系与秩

知识结构网络图	(378)
内容概要与重难点提示	(379)
考核知识要点讲解	(379)
一、线性表示	(379)
二、向量组的线性相关性	(380)
三、向量组的秩和最大无关组	(381)
四、矩阵的秩	(383)
五、实向量的内积和正交矩阵	(383)
六、向量空间	(384)
常考题型及其解题方法与技巧	(385)

第四章 线性方程组

知识结构网络图	(404)
内容概要与重难点提示	(404)
考核知识要点讲解	(405)
一、线性方程组的形式	(405)
二、线性方程组解的情况的判别	(405)
三、线性方程组的通解	(405)
常考题型及其解题方法与技巧	(406)

第五章 特征向量与特征值, 相似, 对角化

知识结构网络图	(429)
内容概要与重难点提示	(430)
考核知识要点讲解	(430)
一、特征向量和特征值	(430)
二、 n 阶矩阵的相似关系	(431)
三、相似对角化问题	(432)
四、实对称矩阵的相似对角化	(432)
常考题型及其解题方法与技巧	(433)

第六章 二次型

知识结构网络图	(455)
内容概要与重难点提示	(455)
考核知识要点讲解	(456)
一、二次型及其矩阵	(456)
二、可逆线性变量替换和矩阵的合同关系	(456)
三、二次型的标准化	(457)
四、惯性定理和惯性指数, 实对称矩阵合同的判断	(459)
五、正定二次型和正定矩阵	(459)
常考题型及其解题方法与技巧	(459)

第三篇 概率论与数理统计

第一章 随机事件和概率

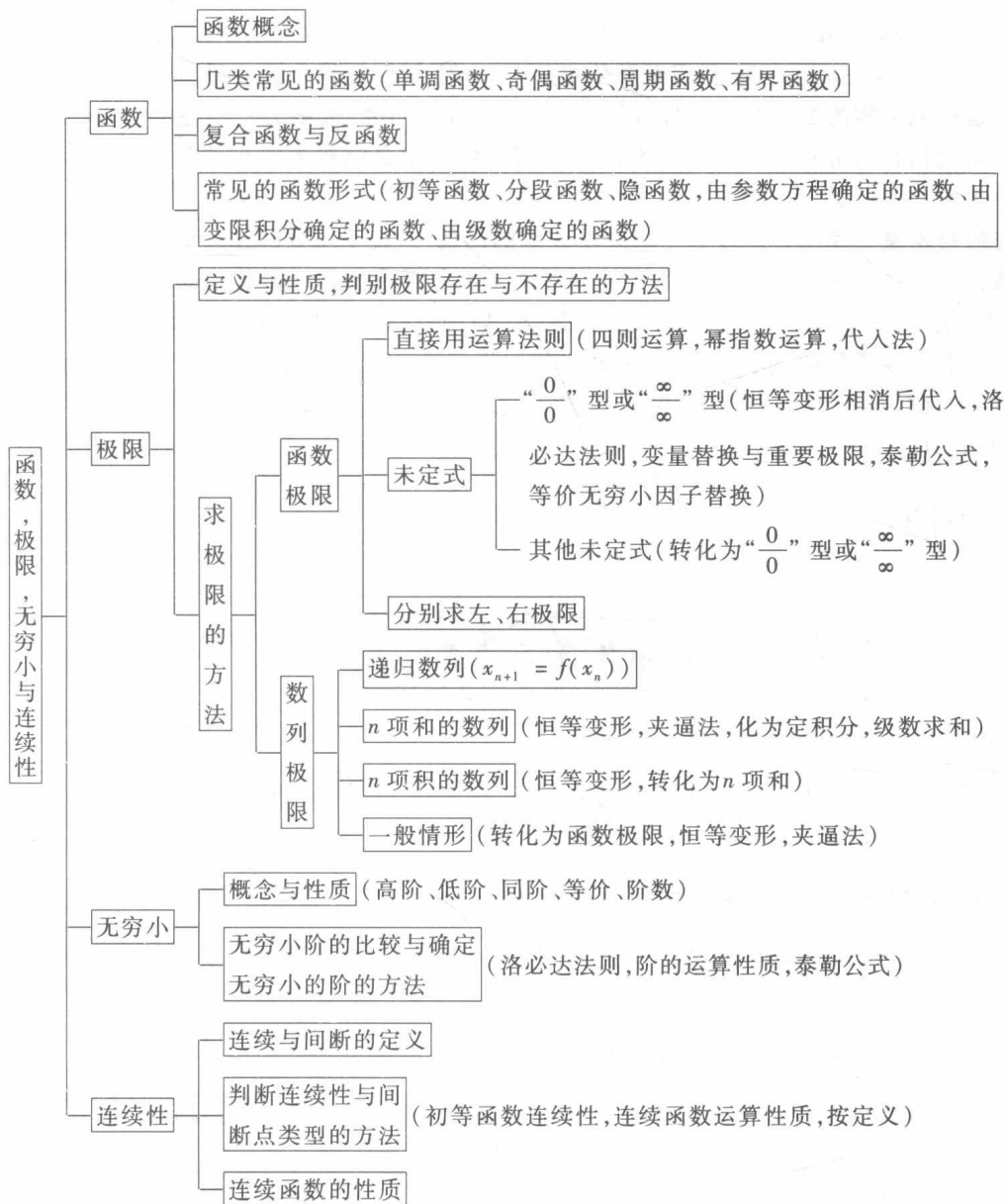
知识结构网络图	(472)
内容概要与重难点提示	(472)
考核知识要点讲解	(473)
一、随机事件的关系与运算	(473)
二、随机事件的概率	(475)

三、事件的独立性与独立重复试验 (479)	内容概要与重难点提示 (536)
常考题型及其解题方法与技巧 (481)	考核知识要点讲解 (536)
第二章 随机变量及其分布 (488)	一、随机变量的数学期望和方差 ... (536)
知识结构网络图 (488)	二、协方差与相关系数 (540)
内容概要与重难点提示 (488)	三、随机变量的矩 (542)
考核知识要点讲解 (489)	常考题型及其解题方法与技巧 (543)
一、随机变量及其分布函数 (489)	第五章 大数定律和中心极限定理 (554)
二、离散型随机变量与连续型随机变量 (490)	知识结构网络图 (554)
三、常见的离散型、连续型随机变量 及其概率分布 (493)	内容概要与重难点提示 (554)
四、随机变量函数的分布 (497)	考核知识要点讲解 (554)
常考题型及其解题方法与技巧 (500)	一、大数定律 (554)
第三章 多维随机变量及其分布 (510)	二、中心极限定理 (556)
知识结构网络图 (510)	常考题型及其解题方法与技巧 (556)
内容概要与重难点提示 (510)	第六章 数理统计的基本概念 (561)
考核知识要点讲解 (511)	知识结构网络图 (561)
一、二维随机变量的联合分布函数与 边缘分布函数 (511)	内容概要与重难点提示 (561)
二、二维离散型随机变量 (512)	考核知识要点讲解 (561)
三、二维连续型随机变量 (514)	一、总体与样本 (561)
四、二维随机变量的独立性 (517)	二、统计量 (563)
五、两个常见的二维连续型随机变量 的分布 (518)	三、抽样分布 (563)
六、两个随机变量函数的分布 (520)	常考题型及其解题方法与技巧 (567)
常考题型及其解题方法与技巧 (526)	第七章 参数估计和假设检验 (571)
第四章 随机变量的数字特征 (536)	知识结构网络图 (571)
知识结构网络图 (536)	内容概要与重难点提示 (571)
	考核知识要点讲解 (572)
	一、参数估计 (572)
	二、假设检验 (576)
	常考题型及其解题方法与技巧 (578)

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、级数等等.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 $\lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = A$, 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

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

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^∞ , ∞^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 $\lim_{x \rightarrow x_0} f[\varphi(x)] \stackrel{\substack{u = \varphi(x) \\ x \rightarrow x_0 \text{ 时} \\ u \rightarrow u_0}}{=} \lim_{u \rightarrow u_0} f(u) = f(u_0)$.

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 $\textcircled{4}$ 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:

$$(I) w = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^{x^4} - 1}{1 - \cos(x \sqrt{1 - \cos x})};$$

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

【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

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