




曹凤国 主编

激光加工 技术

JIGUANG JIAGONG
JISHU

 北京科学技术出版社

激光加工技术

曹凤国 主编

 北京科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

激光加工技术/曹凤国主编.-北京:北京科学技术出版社,2007.1
ISBN 978-7-5304-3438-3

I. 激… II. 曹… III. 激光加工 IV. TG665

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第127819号

激光加工技术

主 编:曹凤国

责任编辑:吴 建

封面设计:黄金支点

出 版 人:张敬德

出版发行:北京科学技术出版社

社 址:北京西直门南大街16号

邮政编码:100035

电话传真:0086-10-66161951(总编室)

0086-10-66113227 0086-10-66161952(发行部)

电子信箱:bjkjpress@163.com

网 址:www.bkjpress.com

经 销:新华书店

印 刷:三河国新印装有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:442 千

印 张:17.25

版 次:2007年1月第1版

印 次:2007年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5304-3438-3/T·561

定 价:36.00 元



京科版图书,版权所有,侵权必究。
京科版图书,印装差错,负责退换。

《激光加工技术》编委会

主 编 曹凤国

副主编 刘敬明 伏金娟

编 委 曹凤国 刘敬明 伏金娟 黄建宇

吴康体 孙连珍

前 言

中国现代制造技术正在空前迅猛地发展，为中国经济的腾飞发挥着越来越重要的作用。众所周知，任何材料不经过加工是不能被人类所应用的。今天人们依托先进的加工技术，以前所未有的速度更新现有产品，创造新的产品，从而极大地丰富了人类社会的物质生活，有力地推动了科学技术的整体发展，加快了人类认识自我和外部世界的进程。人类社会能够创造今天辉煌的经济成就，能够享受现代化生活方式，能够探索宇宙，登上月球，从根本上讲是得益于加工制造技术的迅猛发展。

加工技术的日新月异，特别是加工方法的不断创新和发展，推动了人类的历次工业革命。激光加工技术作为现代加工制造技术最重要的方法之一，近年来得到迅速发展。激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性，将能量聚焦到微小的空间，利用这一高密度的能量，对材料（包括金属与非金属）进行切割、打孔、焊接、表面处理、快速成形、微细加工等的一种新加工技术，这是一种摆脱传统加工理念的全新的加工、热处理方法。激光被誉为“万能加工工具”、“未来制造系统的共同加工手段”，不仅在国防、军事领域，而且在民用工业也得到极其广泛的应用。

本书主要介绍了激光加工的基本原理，系统阐述了激光各种加工工艺、设备和应用、发展等。特别值得一提的是，本书将激光加工从材料的去除加工（如切割、打孔等）、增长加工（如焊接、快速成形等）、表面加工（如改性、淬火等）、精密微细加工（如 LIGA 加工、准分子激光加工等）、激光复合加工（如激光与电火花复合加工等）这一全新的视角进行阐述，并通过大量的应用实例和工业应用数据图表，总结了国内外激光加工的最新技术成果，为未来激光

加工技术的研究和发展指出了方向。

本书主要由北京市电加工研究所曹凤国、刘敬明、伏金娟、黄建宇、吴康体、孙连珍等编著，由曹凤国教授任主编，刘敬明博士、伏金娟高工任副主编。

本书在编写过程中，得到徐性初院士，王乃彦院士、钟群鹏院士的关心与指导，在此表示衷心感谢。特别感谢本书参考文献中所列的作者，他们的著作和论文为本书的编写提供了帮助。

由于编者水平有限和技术的迅速发展，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评与指正。

编者

2006年3月29日

目 录

第1章 绪 论

1.1 激光和工业激光器的发展	1
1.2 激光加工的特点、类型及应用	2
1.2.1 激光加工的特点	3
1.2.2 激光加工的类型及应用	3
1.3 先进激光加工技术的发展方向	4
1.4 激光加工技术术语及符号、单位	6
1.4.1 术语	6
1.4.2 符号和单位	9

第2章 激光材料加工理论

2.1 激光产生的基本原理	10
2.1.1 光子的基本性质	10
2.1.2 光子的相干性	10
2.1.3 光子简并度	11
2.1.4 光的受激辐射	11
2.1.5 光的受激辐射放大	14
2.1.6 光的自激振荡	15
2.1.7 激光模式	16
2.2 激光的特性	17
2.2.1 激光的方向性	17
2.2.2 激光的单色性	17
2.2.3 激光的高强度 (相干光强)	17
2.2.4 激光的相干性	18
2.3 激光与材料的相互作用	19
2.3.1 材料在激光作用下的过程	19
2.3.2 材料的吸收与反射特性	20
2.4 材料在激光作用下的热力效应与组织效应	23
2.4.1 热力效应	23

2.4.2 组织效应	24
------------	----

第3章 激光器系统

3.1 固体激光器	25
3.1.1 固体激光器的基本结构	25
3.1.2 用于热加工的固体激光器	28
3.2 气体激光器	30
3.2.1 高功率 CO ₂ 激光器	30
3.2.2 准分子激光器	33
3.2.3 其他气体激光器	34
3.3 其他类型激光器	35
3.3.1 化学激光器	35
3.3.2 高功率 CO 激光器	35
3.3.3 染料激光器	35
3.3.4 光纤激光器	36
3.3.5 半导体激光器	36

第4章 激光去除加工

4.1 激光打孔	38
4.1.1 激光打孔的原理及特点	38
4.1.2 激光打孔的分类	41
4.1.3 激光打孔的加工系统	43
4.1.4 激光打孔工艺	46
4.1.5 典型材料的激光打孔	52
4.2 激光切割	64
4.2.1 激光切割的特点	64
4.2.2 激光切割方式	65
4.2.3 影响切割质量的因素	67
4.2.4 常用工程材料的激光切割	76
4.3 激光打标、雕刻	80
4.3.1 激光打标	80
4.3.2 激光雕刻	83

第5章 激光焊接技术

5.1 概述	85
5.2 激光热传导焊接	85
5.2.1 激光热传导焊接基本原理	85

5.2.2	激光焊接工艺参数与焊接方法	85
5.3	激光深熔焊	92
5.3.1	深熔焊理论	92
5.3.2	深熔焊的主要影响因素	92
5.3.3	深熔焊的接头形式与质量	94
5.3.4	常用材料的激光焊接	94
5.3.5	人造金刚石工具的激光焊接	97
5.3.6	激光焊接塑料	100
5.4	激光焊接的应用及设备	103
5.4.1	激光焊接的应用	103
5.4.2	激光焊接设备	104
5.5	激光焊接的优缺点	106
5.5.1	激光焊接的优缺点	106
5.5.2	激光焊接存在的局限性	107

第 6 章 激光表面改性技术

6.1	激光表面改性的特点与分类	108
6.1.1	激光表面改性的特点	108
6.1.2	激光表面改性的分类	109
6.2	激光相变强化和激光熔凝强化	110
6.2.1	激光相变强化	110
6.2.2	激光熔凝强化	113
6.2.3	激光表面强化中碳及合金元素的影响	114
6.2.4	激光表面强化工艺	115
6.2.5	激光表面强化实例	118
6.3	激光表面熔覆及合金化	119
6.3.1	激光表面熔覆	120
6.3.2	激光合金化	127
6.3.3	激光表面熔覆与合金化的应用	129
6.4	激光表面非晶化	131
6.4.1	非晶态金属的结构、性质	131
6.4.2	激光非晶化特点	132
6.4.3	激光非晶化原理	133
6.4.4	激光非晶化工艺及影响因素	134
6.4.5	激光非晶化的应用	135
6.5	激光冲击硬化	135
6.5.1	激光冲击硬化的特点	136
6.5.2	激光冲击处理的模型	136
6.5.3	激光冲击硬化对材料机械性能的影响	137

6.5.4	激光冲击处理的发展	139
6.6	复合表面改性技术	140
6.6.1	两种复合表面改性技术	140
6.6.2	两种以上复合表面改性技术	141

第7章 激光快速成形技术

7.1	概述	142
7.2	快速成形技术的基本原理及特征	142
7.2.1	快速成形技术的原理	142
7.2.2	快速成形技术的工艺过程	143
7.2.3	快速成形技术的特征	143
7.3	快速成形主要的工艺方法	144
7.3.1	液态光敏树脂选择性固化	144
7.3.2	粉末材料选择性激光烧结	146
7.3.3	熔融沉积成形	147
7.3.4	薄型材料选择性切割	148
7.3.5	固基光敏液相法	149
7.3.6	三维打印	149
7.3.7	复合成形法	150
7.4	快速成形的软件与设备	151
7.4.1	激光快速成形前期数据处理	151
7.4.2	激光快速成形设备	154
7.5	快速成形用材料	155
7.5.1	快速成形工艺对材料的要求	156
7.5.2	快速成形材料的分类	156
7.6	激光烧结快速成形	160
7.6.1	激光烧结快速成形机理	160
7.6.2	金属粉末的激光烧结快速成形	160
7.6.3	激光烧结快速成形工艺因素	161
7.7	反求工程与快速成形集成技术	168
7.7.1	反求工程	168
7.7.2	数据获取方法	169
7.7.3	数据处理	171
7.7.4	三维重构	172
7.8	快速模具制造技术	172
7.8.1	快速模具制造技术及其分类	173
7.8.2	快速金属模具制造技术	177
7.8.3	快速模具制造技术的发展方向	184

第 8 章 其他激光加工技术

8.1 激光清洗技术	187
8.1.1 激光清洗基础	187
8.1.2 激光清洗特点和分类	189
8.1.3 激光清洗用激光器	190
8.1.4 激光清洗的应用	191
8.1.5 激光清洗技术的发展	192
8.2 激光复合加工技术	194
8.2.1 激光辅助车削技术	194
8.2.2 激光与步冲复合技术	195
8.2.3 激光与水射流复合切割技术	195
8.2.4 激光复合焊接技术	197
8.2.5 激光与电火花复合加工技术	200
8.2.6 激光与机器人复合加工技术	201
8.3 激光光存技术	202
8.3.1 激光光存技术的发展	202
8.3.2 激光光盘使用的激光器	203
8.4 激光抛光技术	206
8.4.1 激光抛光的特点	206
8.4.2 激光抛光的原理	207
8.4.3 激光抛光系统的主要构成	208
8.4.4 影响激光抛光的工艺因素	208
8.4.5 激光抛光技术的发展和前景	210

第 9 章 激光精密微细加工

9.1 准分子激光微细加工	213
9.1.1 准分子激光加工的原理及特点	213
9.1.2 准分子激光的微细加工	214
9.1.3 准分子激光微细加工的应用	217
9.2 超短脉冲激光的微细加工	220
9.2.1 超短脉冲激光的发展	221
9.2.2 飞秒激光器的分类	222
9.2.3 飞秒激光加工的原理及特征	223
9.2.4 飞秒脉冲激光精细加工的应用	226
9.3 激光微型机械加工	232
9.3.1 微型机械加工	232
9.3.2 准分子激光直写微细加工	233

9.3.3	激光 LIGA 技术	234
9.3.4	激光化学加工技术	237
9.3.5	微型机电系统的激光辅助操控与装配	237
9.4	激光诱导原子加工技术	238
9.4.1	原子层外延生长	239
9.4.2	原子层刻蚀	240
9.4.3	原子层掺杂	240
9.5	激光制备纳米材料	241
9.5.1	激光制备纳米材料的特点	241
9.5.2	激光诱导化学气相沉积法	241
9.5.3	激光烧蚀法	244
9.6	脉冲激光沉积薄膜技术	245
9.6.1	脉冲激光沉积薄膜技术的特点	245
9.6.2	脉冲激光沉积薄膜的原理	246
9.6.3	PLD 沉积薄膜的装置	247
9.6.4	PLD 沉积工艺	248
9.6.5	PLD 制备新材料应用	248
9.6.6	脉冲激光沉积薄膜技术的发展方向	249
9.7	激光-扫描电子探针技术	251
9.7.1	激光-扫描电子探针技术的基本原理	251
9.7.2	纳米加工的应用	252
9.7.3	激光-扫描电子探针技术的发展	253

第 10 章 激光加工中的安全防护及标准

10.1	激光的危险性	255
10.1.1	光的危害	255
10.1.2	非光的危害	257
10.2	激光危险性的分类	257
10.2.1	分类过程	257
10.2.2	分级	257
10.3	激光防护	258
10.3.1	激光防护的主要技术指标	258
10.3.2	激光防护的通用操作规则	259
10.4	激光安全标准	259
10.4.1	激光安全的国家标准	259
10.4.2	激光防护镜标准	260

第 1 章 绪 论

自从 20 世纪 60 年代世界上第一台激光器诞生以来, 科研工作者对激光进行了多方面的研究和应用。1964 ~ 1965 年相继发明了 CO_2 、YAG 激光器, 并经过对激光的特性和激光束与物质相互作用机理的深入研究, 激光技术的应用领域开始不断明确和具体化。

40 多年来, 激光技术与应用发展迅猛, 已与多个学科相结合形成多个应用技术领域, 如激光加工技术、激光检测与计量技术、激光化学、激光医疗、激光制导等等。这些交叉技术与新的学科的出现, 极大地推动了传统产业和新兴产业的发展, 同时赋予激光加工技术更广泛的应用领域。

1.1 激光和工业激光器的发展

1917 年, 爱因斯坦在量子理论的基础上提出: 在物质与辐射场的相互作用中, 构成物质的原子或分子可以在光子的激励下产生光子的受激发射或吸收。这表明如果能使组成物质的原子(或分子)数目按能级的热平衡(玻耳兹曼)分布出现反转, 就有可能利用受激发射实现光放大(light amplification by stimulated emission of radiation, LASER), 这就是激光的名称。后来理论物理学家发现了受激发射光子(波)和激励光子(波)具有相同的频率、方向、相位和偏振。这些都为激光的出现(一种光波振荡器)奠定了理论基础。到 1960 年, 当时美国休斯公司实验室的梅曼(Theodore H. Maiman)在量子电子学发展成果的基础上发明了世界第一台红宝石固态激光器(ruby laser); 1961 年, 德若凡发明了第一台气体激光器——氦氖激光器; 在 1962 年又出现了半导体激光器, 1963 年, 帕特尔(C. Patel)发明了第一台 CO_2 激光器; 1965 年, 贝尔实验室发明了第一台 YAG 激光器; 1968 年开始发展高功率 CO_2 激光器, 1971 年出现了第一台商用 1kW CO_2 激光器。1980 年 200W 准分子 Kr 激光器问世; 1988 年出现倍频泵浦 YAG 激光器。在这之后, 激光器的发展非常迅速, 各种实用化的固体、气体、半导体、染料和准分子激光器不断出现和完善。

随着激光束与材料的相互作用研究的发展, 激光器的输出功率、稳定性和可靠性等的提高使其逐渐得到了实际应用, 并且成为工业生产中材料加工的重要分支。自从第一台激光器诞生以来, 人们就开始探索激光在材料加工领域中的应用。1965 年前后, YAG 激光器和 CO_2 激光器相继出现, 由于这两种激光器可以产生相当高的输出功率和能量, 使得激光在材料加工领域的应用成为可能。在 20 世纪 70 年代初期, 随着晶体材料质量的不断提高, 聚光腔性能的改进, 冷却系统和激光谐振腔结构的不断完善, 使得 YAG 激光器开始成为微型件切割、焊接、退火等的重要光源, 并逐步在生产中得到应用。到 70 年代的后期, CO_2 激光器的结构从封离式、玻璃管结构发展到横向、纵向流动式和波导式; 同时激励方式从直流、交流发展到射频, 输出功率发展到数千瓦。 CO_2 激光器的可靠性、稳定性完全满足工业生产线的需要, 开始被广泛应用于各种材料的焊接、切割和热处理中。

到了 20 世纪 80 年代, 激光器的性能和质量有了进一步的发展, 自动化程度和检测、控制功能得到了明显的提高。为了提高 CO_2 激光器的功率, 采用快速轴流的结构, 输出功率

已达几千瓦甚至上万瓦；为了减小体积，提高效率及激光器的可调制性，激励方式由直流激励发展成高频激励、微波激励。对于 YAG 激光器，同样为了提高激光器的功率和光束质量，必须克服其在高功率运转时出现的严重热透镜效应，在激光器结构上发展了板条、管状等新型结构形式。在此基础上，为了进一步提高激光器的输出功率，多级放大结构被广泛采用。目前单棒结构的最大输出功率只能达到 500W，而多级放大结构可使激光器的输出功率达到几千瓦。这些激光器既可连续运行，又可脉冲运行，还可使用光纤传输；激光的模式也从多模输出发展到基模或接近基模输出；激光的发射角已达到了几个毫弧度。以上这些激光器都已成功地应用于激光表面处理、激光切割及焊接等材料加工领域。

近几年来，随着激光技术的发展，一些新型的激光器相继进入激光加工领域，如半导体激光器、染料激光器、气体原子和分子激光器等，其中最重要的是准分子 (XeCl、KrF) 激光器。准分子激光器的光束属于紫外波段，它与材料作用机理是以激光化学反应为主，其作用过程主要靠高能量密度光子引发或控制化学反应，一般称其为冷加工；而对于 YAG 激光器和 CO₂ 激光器主要以激光的热作用对材料进行加工，称其为热加工。准分子激光加工是极具前途的加工技术，目前已成为研究和发展的焦点领域，在材料加工特别是微细加工领域已得到广泛应用。

1957 年，王大珩等在长春建立了我国第一个光学专业研究所——中国科学院（长春）光学精密仪器机械研究所（简称“光机所”）。1961 年夏，我国第一台红宝石激光器在中国科学院光机所诞生，在此之后，各种类型的固体、气体、半导体和化学激光器相继研制成功。表 1-1 列出了我国研制成功的第一台各类激光器。

表 1-1 我国“第一台”各类激光器

名 称	研制成功时间	研 制 人
HeNe 激光器	1963 年 7 月	邓锡铭等
掺钕玻璃激光器	1963 年 6 月	干福熹等
GaAs 同质结半导体激光器	1963 年 12 月	王守武等
脉冲 Ar ⁺ 激光器	1964 年 10 月	万重怡等
CO ₂ 分子激光器	1965 年 9 月	王润文等
CH ₃ I 化学激光器	1966 年 3 月	邓锡铭等
YAG 激光器	1966 年 7 月	屈乾华等

作为具有高亮度、高方向性、高质量等优异特性的新光源，激光应用于许多技术领域，显示出强大的生命力和竞争力。在通信领域，1964 年 9 月用激光演示传送电视图像，1964 年 11 月实现 3~30km 的通话。工业方面，1965 年 5 月激光打孔机成功地用于拉丝模打孔生产，获得显著经济效益。在医学领域，1965 年 6 月激光视网膜焊接器进行了动物的临床实验。在国防领域，1965 年 12 月研制成功激光漫反射测距机（精度为 10m/10km），1966 年 4 月研制出遥控脉冲激光多普勒测速仪。但直到 20 世纪 80 年代，激光器和激光应用仪器才真正走向市场。

1.2 激光加工的特点、类型及应用

激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性对材料进行切割、焊接、表面处理、

0.2.2 互换性的分类

互换性按其互换程度可分为完全互换与不完全互换。

完全互换是指一批零、部件装配前不经选择，装配时也不需修配和调整，装配后即可满足预定的使用要求，如螺栓和螺母的互换即属此类情况。

当装配精度要求很高时，若采用完全互换将使零件的尺寸公差减小，加工困难，成本较高。这时可将其制造公差适当放大，以便于加工。在完工后，再用量仪将零件按实际尺寸大小分组，按组进行装配。如此，既能保证装配精度与使用要求，又降低成本。此时，仅是组内零件可以互换，组与组之间不可互换，称为分组互换，属不完全互换。

有时要加工或调整某一特定零件尺寸，以达到装配精度要求，称为调整互换，也属不完全互换。

不完全互换只限于部件或机构在制造厂内装配时使用。对厂外协作，则往往要求完全互换。究竟采用哪种方式为宜，应由产品精度、产品复杂程度、生产规模、设备条件及技术水平等一系列因素决定。

一般大量生产和成批生产，如汽车、拖拉机厂大都采用完全互换法生产。精度要求很高的轴承工业，常采用分组装配，即不完全互换法生产。而小批和单件生产，如矿山、冶金等重型机器业，则常采用修配法或调整法生产。

0.3 标准化与计量工作

0.3.1 标准化的意义和标准的分类

生产中欲实现互换性原则，做好标准化与计量工作是前提，是基础。

1. 标准化的意义

所谓标准，是由一定的权威组织对经济、技术和科学中重复出现的共同的技术语言和技术事项等规定的统一技术准则。它是为标准化而规定的技术文件，是各个方面共同遵守的技术依据。标准一经颁布，即成为技术法规。

标准化是指以制定标准和贯彻标准为主要内容的全部活动过程的总称，其包括系列化和通用化两方面内容。它是组织现代化大生产的重要手段，是实行科学管理的基础，也是对产品的基本要求之一。标准化程度的高低是评定产品质量和水平的指标之一。实施标准化是我国很重要的一项技术政策，其目的是通过实施标准化，获得最佳的社会经济效益。

2. 标准的分类

根据标准法规定，我国的标准分为国家标准（GB）、行业标准、地方标准和企业标

准四级。此外,从世界范围看,还有国际标准(如 ISO)和区域性标准。

我国的国家标准和行业标准又分为强制性标准和推荐性标准两大类。一些关系到人身安全、健康、卫生及环境保护等的标准属于强制性标准,国家用法律、行政和经济等手段来维护强制性标准的实施。大量的标准(80%以上)属于推荐性标准。推荐性标准也应积极执行,因为标准是科学技术的结晶,是实践经验的总结,它代表了先进的生产方式。

近年来,我国陆续修订了自己的标准,修订的原则是在立足我国实际情况的基础上向国际标准靠拢,以利于加强我国在国际上的技术交流和产品互换。

0.3.2 计量工作

我国的计量工作,自解放后逐步统一计量制度,建立了各种计量器具的传递系统,颁布了计量法,使机械制造业的基础工作沿着科学、先进的方向迅速发展,促进了企业计量管理和产品质量水平的不断提高。

目前计量测试仪器制造工业已有长足的进步和发展,其产品不仅满足国内工业发展的需要,而且还出口到国际市场。我国已能生产机电一体化测试仪器产品,如激光丝杠动态检查仪、三坐标测量机、齿轮整体误差检查仪等一批达到或接近世界先进水平的精密测量仪器。

0.4 优先数与优先数系

优先数系是一种无量纲的分级数值,它是十进制等比数列,适用于各种量值的分级。数系中的每一个数都为优先数。

任何一种机械产品,总是有它自己的一系列技术参数。这些参数往往不是孤立的,同时还与相关的其他产品有关。例如,螺栓的尺寸一旦确定,将会影响螺母的尺寸、丝锥板牙的尺寸、螺栓孔的尺寸以及加工螺栓孔的钻头尺寸等。可见产品的各种技术参数不能随意确定,否则会出现产品、刀具、量具和夹具等的规格品种恶性膨胀的混乱局面,给生产组织、协调配套及使用维护带来极大的不便。

为了解决这一问题,人们在生产实践中总结出了一种科学的统一数值标准,使产品参数的选择一开始就纳入标准化轨道。《优先数和优先数系》(GB321—2005)国家标准规定了5个等比数列,它们都包含10的整数幂,公比分别为 $\sqrt[5]{10}$ 、 $\sqrt[10]{10}$ 、 $\sqrt[20]{10}$ 、 $\sqrt[40]{10}$ 、 $\sqrt[80]{10}$,依次用R5、R10、R20、R40、R80表示,其中前4个为基本系列,R80为补充系列,仅用于分级很细或基本系列中的优先数不能适应实际情况时。

按公比计算得到的优先数的理论值,除10的整数次幂外,都是无理数,工程技术上不便直接应用,实际应用的都是经过圆整后的近似值。根据圆整的精确度,可分为:

- 1) 计算值。取5位有效数字,供精确计算用。
- 2) 常用值。即经常使用的通常所称的优先数,取3位有效数字。

表0.1中列出了1~10范围内基本系列的常用值和计算值。如将表中所列优先数

乘以 10、100、…，或乘以 0.1、0.01、…，即可得到大于 10 或小于 1 的优先数。

国家标准规定的优先数系分档合理、疏密均匀、简单易记、便于使用。常见的量值，如长度、直径、转速及功率等分级，基本上都是按优先数系进行。本课程所涉及的有关标准中，诸如尺寸分段、公差分级及表面粗糙度的参数系列等，也采用优先数系。

表 0.1 优先数系的基本系列 (摘自 GB/T 321—2005)

基本系列 (常用值)				序号	理论值		基本系列和计算值间的相对误差/%		
R5	R10	R20	R40		对数尾数	计算值			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)		
1.00	1.00	1.00	1.00	0	000	1.0000	0		
			1.06	1	025	1.0593	+0.07		
			1.12	2	050	1.1220	-0.18		
			1.18	3	075	1.1885	-0.71		
	1.25	1.25	1.25	4	100	1.2589	-0.71		
			1.32	5	125	1.3335	-1.01		
			1.40	6	150	1.4125	-0.88		
			1.50	7	175	1.4962	+0.25		
			1.60	1.60	1.50	8	200	1.5849	+0.95
					1.70	9	225	1.6788	+1.26
					1.80	10	250	1.7783	+1.22
1.90	11	275			1.8835	+0.87			
2.00	2.00	2.00	12	300	1.9953	+0.24			
		2.13	13	325	2.1135	+0.31			
		2.24	14	350	2.2387	+0.06			
		2.36	15	375	2.3714	-0.48			
		2.50	2.50	2.50	16	400	2.5119	-0.47	
2.65	17			425	2.6607	-0.40			
2.80	18			450	2.8184	-0.65			
3.00	19			475	2.9854	+0.49			
3.15	3.15			3.15	20	500	3.1623	-0.39	
				3.35	21	525	3.3497	+0.01	
				3.55	22	550	3.5481	+0.05	
				3.75	23	575	3.7584	-0.22	