

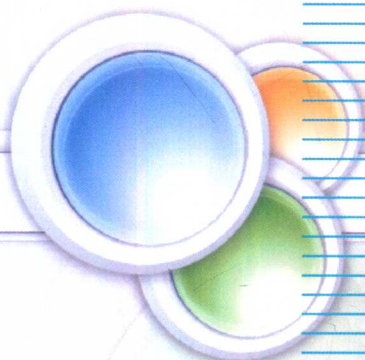


“十二五” 江苏省高等学校重点教材

总主编 姚天扬 孙尔康

化工原理上册

主 编 华 平 张 进



京大学出版社



“十二五”江苏省高等学校重点教材

编号: 2013-2-051

化工原理上册

总主编 姚天扬 孙尔康

主 编 华 平 张 进

副主编 朱平华 胡 涛 季宝华

参 编 (按姓氏笔画为序)

帅 菁 刘显明 朱国华

季宝华 周 伟 施卫忠

喻红梅 褚效中

主 审 钟 秦



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工原理: 全2册 / 华平, 张进主编. —南京:
南京大学出版社, 2014. 8

高等院校化学化工教学改革规划教材

ISBN 978-7-305-13442-5

I. ①化… II. ①华… ②张… III. ①化工原理—高等
学校—教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 133169 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号

邮编 210093

出版人 金鑫荣

书 名 化工原理(上册)

总 主 编 姚天扬 孙尔康

主 编 华 平 张 进

责任编辑 耿士祥 蔡文彬

编辑热线 025-83686531

照 排 江苏南大印刷厂

印 刷 南京理工大学资产经营有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 20 字数 425 千

版 次 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-13442-5

总 定 价 68.00 元(上、下册)

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025)83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

编委会

总主编 姚天扬(南京大学)

孙尔康(南京大学)

副总主编 (按姓氏笔画排序)

王 杰(南京大学)

左晓兵(常熟理工学院)

石玉军(南通大学)

许兴友(淮阴工学院)

邵 荣(盐城工学院)

周诗彪(湖南文理学院)

郎建平(苏州大学)

钟 秦(南京理工大学)

赵宜江(淮阴师范学院)

赵 鑫(苏州科技学院)

姚 成(南京工业大学)

姚开安(南京大学金陵学院)

柳闽生(南京晓庄学院)

唐亚文(南京师范大学)

曹 健(盐城师范学院)

编 委 (按姓氏笔画排序)

马宏佳

王济奎

王龙胜

王南平

许 伟

朱平华

华万森

华 平

李 琳

李心爱

李巧云

李荣清

李玉明

沈玉堂

吴 勇

汪学英

陈国松

陈景文

陆 云

张莉莉

张 进

张贤珍

罗士治

周益明

赵朴素

赵登山

宣 婕

夏昊云

陶建清

缪震元

序

教材建设是高等学校教学改革的重要内容,也是衡量教学质量提高的关键指标。高校化学化工基础理论课教材在近几年教学改革中取得了丰硕成果,编写了不少有特色的教材或讲义,但就其内容而言基本上大同小异,在编写形式和介绍方法以及内容的取舍等方面不尽相同,充分体现了各校化学基础理论课的改革特色,但大多数限于本校自己使用,面不广、量不大。由于各校化学基础课教师相互交流、相互讨论、相互学习、相互取长补短的机会少,各校教材建设的特色得不到有效推广,不能实施优质资源共享;又由于近几年教学经验丰富的老师纷纷退休,年轻教师走上教学第一线,特别是江苏高校广大教师迫切希望联合编写有特色的化学化工理论课教材,同时希望在编写教材的过程中,实现教师之间相互教学探讨,既能实现优质资源共享,又能加快对年轻教师的培养。

为此,由南京大学化学化工学院姚天扬、孙尔康两位教授牵头,以地方院校为主,自愿参加为原则,组织了南京大学、南京理工大学、苏州大学、南京师范大学、南京工业大学、南京邮电大学、南通大学、苏州科技学院、南京晓庄师院、淮阴师范学院、盐城工学院、盐城师范学院、常熟理工学院、淮海工学院、淮阴工学院、江苏第二师范学院、南京大学金陵学院、南理工泰州科技学院等 18 所江苏省高等院校,同时吸收了解放军第二军医大学、湖北工业大学、华东交通大学、湖南文理学院、衡阳师范学院、九江学院等 6 所省外院校,共计 24 所高等学校的化学专业、应用化学专业、化工专业基础理论课一线主讲教师,共同联合编写“高等院校化学化工教学改革规划教材”一套,该系列教材包括《无机化学(上、下册)》、《无机化学简明教程》、《有机化学(上、下册)》、《有机化学简明教程》、《分析化学》、《物理化学(上、下册)》、《物理化学简明教程》、《化工原理(上、下册)》、《化工原理简明教程》、《仪器分析》、《无机及分析化学》、《大学化学(上、下册)》、

《普通化学》、《高分子导论》、《化学与社会》、《化学教学论》、《生物化学简明教程》、《化工导论》等 18 部。

该系列教材适合于不同层次院校的化学基础理论课教学任务需求,同时适应不同教学体系改革的需求。

该系列教材体现如下几个特点:

1. 系统介绍各门基础理论课的知识点,突出重点,突出应用,删除陈旧内容,增加学科前沿内容。
2. 该系列教材将基础理论、学科前沿、学科应用有机融合,体现教材的时代性、先进性、应用性和前瞻性。
3. 教材中充分吸取各校改革特色,实现教材优质资源共享。
4. 每门教材都引入近几年相关的文献资料,特别是有关应用方面的文献资料,便于学有余力的学生自主学习。

该系列教材的编写得到了江苏省教育厅高教处、江苏省高等教育学会、相关高校化学化工系以及南京大学出版社的大力支持和帮助,在此表示感谢!

该系列教材已被评为“十二五”江苏省高等学校重点教材。

该系列教材是由高校联合编写的分层次、多元化的化学基础理论课教材,是我们工作的一项尝试。尽管经过多次讨论,在编写形式、编写大纲、内容的取舍等方面提出了统一的要求,但参编教师众多,水平不一,在教材中难免会出现一些疏漏或错误,敬请读者和专家提出批评和指正,以便我们今后修改和订正。

编委会

2014 年 5 月于南京

前 言

化工原理是化工及其相关专业的重要技术基础课程。本书主要介绍了各化工单元操作的基本原理和典型设备的计算,注重理论联系实际,通过多种例题将理论与解决实际问题较好地关联,培养学生的工程实践能力,提升学生的工程素养。本书是省内多所院校多年教学实践的总结。

由于本教材是面向非重点院校的一般普通院校,所以教材着重体现工程应用性,简略了一些理论性很强的内容以及复杂的推导过程。因此,可作为本科、大专 60~100 学时化工原理课程的教材,适用于化工、应用化学、制药、高分子材料、生物工程、食品工程、环境工程、造纸、冶金等相关专业。对于学习化工原理课程的自考生、高职学生等也是一本有价值的参考书。

本书第一主编华平,第二主编张进,第一副主编朱平华,第二副主编胡涛,第三副主编季宝华。参加编写的人员包括:南通大学朱国华(绪论),南通大学华平(第一章),南通大学喻红梅(第二章),晓庄学院张进(第三章),淮阴工学院胡涛、周伟(第四章),淮海工学院朱平华(第五章),盐城师范学院的施卫忠、季宝华(第六章、第七章),南理工泰州科技学院帅菁(第八章),南理工泰州科技学院刘显明(第九章),淮阴师范学院的褚效中(第十章),附录由张进编写和整理,最后由华平教授统编定稿。本书承蒙南京理工大学钟秦教授主审,一并致谢。

本书编写参考了国内出版的多个版本的《化工原理》教材,在此对作者表示感谢和敬意。由于我们水平有限,一定有许多不足和有争议的地方,恳请同行批评指正。

编者

2014 年 4 月于南通大学

目 录

绪 论	1
§ 0.1 典型化工产品生产实例	1
§ 0.2 化工单元操作的分类、特点和发展趋势	2
0.2.1 单元操作分类	2
0.2.2 单元操作特点	2
0.2.3 单元操作的发展趋势	2
§ 0.3 单位制度及单位换算	3
0.3.1 单位制度	3
0.3.2 单位换算	4
§ 0.4 本课程的内容、特点、研究方法和学习要求	6
0.4.1 本课程研究内容	6
0.4.2 本课程特点	6
0.4.3 本课程研究方法	7
0.4.4 学习要求	7
§ 0.5 化工过程计算的理论基础	7
§ 0.6 物料衡算与热量衡算	7
0.6.1 物料衡算	8
0.6.2 能量衡算	9
习题	9
第一章 流体流动	12
§ 1.1 流体的性质	13
1.1.1 连续介质假定	13
1.1.2 流体的密度	13
1.1.3 流体的静压强	14
1.1.4 流体的可压缩性与不可压缩流体	15
§ 1.2 流体静力学	16
1.2.1 流体静力学基本方程	16

1.2.2 流体静力学基本方程的应用	18
§ 1.3 流体流动	22
1.3.1 基本概念	23
1.3.2 物料衡算——连续性方程	25
1.3.3 能量衡算方程式——伯努利方程式	26
1.3.4 伯努利方程式的应用举例	29
§ 1.4 流体流动现象	34
1.4.1 牛顿黏性定律与流体的黏度	34
1.4.2 非牛顿型流体	37
1.4.3 流动类型与雷诺准数	39
1.4.4 滞流与湍流区别	40
1.4.5 边界层的概念	43
§ 1.5 流体在管内的流动阻力	46
1.5.1 流动阻力	46
1.5.2 流体在直管中的流动阻力	46
1.5.3 管路上的局部阻力	54
1.5.4 管路系统中的总能量损失	57
§ 1.6 管路计算	59
1.6.1 概述	59
1.6.2 简单管路计算	59
1.6.3 并联管路计算	60
1.6.4 分支管路计算	61
§ 1.7 流量测量仪	61
1.7.1 差压流量计	61
1.7.2 变截面流量计——转子流量计	65
习题	67
思考题	71
本章符号说明	71
参考文献	73
第二章 流体输送设备	74
§ 2.1 概述	74
§ 2.2 离心泵	75
2.2.1 离心泵的工作原理	76
2.2.2 离心泵的构造	76

2.2.3	离心泵的基本方程	78
2.2.4	离心泵的主要性能参数与特性曲线	81
2.2.5	离心泵的工作点与流量调节	87
2.2.6	离心泵的安装高度	92
2.2.7	离心泵的类型和选用	95
§ 2.3	其他类型化工用泵	99
2.3.1	往复泵	99
2.3.2	转子泵	101
§ 2.4	气体输送和压缩机械	102
2.4.1	气体输送机械的分类	103
2.4.2	通风机	103
2.4.3	鼓风机(fanner)	104
2.4.4	往复式压缩机	105
2.4.5	真空泵	107
习题		107
思考题		109
本章符号说明		111
参考文献		112
第三章	非均相物系的分离和固体流态化	113
§ 3.1	概述	113
§ 3.2	颗粒及颗粒床层的特性	114
3.2.1	颗粒的特性	114
3.2.2	颗粒床层的特性及流体流过床层的压降	116
§ 3.3	沉降分离	118
3.3.1	重力沉降	118
3.3.2	离心沉降	125
§ 3.4	过滤	131
3.4.1	过滤操作的基本概念	132
3.4.2	过滤基本方程	133
3.4.3	恒压过滤	136
3.4.4	恒速过滤与先恒速后恒压过滤	137
3.4.5	过滤常数的测定	139
3.4.6	过滤设备	140
3.4.7	滤饼洗涤	144

3.4.8 过滤机的生产能力	145
§ 3.5 固体流态化	148
3.5.1 流态化的基本概念	148
3.5.2 流化床的主要特征	150
3.5.3 流化床的操作范围	152
习题	153
思考题	155
本章符号说明	155
参考文献	157
第四章 传热	158
§ 4.1 概述	158
4.1.1 化工生产中的传热	158
4.1.2 传热过程	159
§ 4.2 热传导	160
4.2.1 傅立叶定律	160
4.2.2 导热系数	160
4.2.3 平壁热传导	161
4.2.4 圆筒壁的热传导	164
§ 4.3 对流传热	167
4.3.1 对流传热分析	167
4.3.2 牛顿冷却定律和对流传热系数	168
4.3.3 对流传热的因次分析	169
4.3.4 对流传热系数的经验关联式	172
4.3.5 有相变对流传热	179
§ 4.4 传热过程的计算	184
4.4.1 热量衡算	184
4.4.2 总传热速率微分方程	184
4.4.3 总传热系数 K	185
4.4.4 传热推动力和总传热速率方程	188
4.4.5 稳态传热的计算	192
§ 4.5 辐射传热	200
4.5.1 基本概念和定律	200
4.5.2 两固体间的辐射传热	202
§ 4.6 换热器	205

4.6.1	间壁式换热器的结构形式	206
4.6.2	换热器传热过程的强化	212
4.6.3	传热过程强化效果的评价	213
4.6.4	管壳式换热器的设计和选型	214
习题		222
思考题		224
本章符号说明		225
参考文献		226
第五章 蒸发		229
§ 5.1	概述	229
5.1.1	蒸发操作在工业中的应用	229
5.1.2	蒸发操作的特点	230
5.1.3	蒸发操作的分类	230
§ 5.2	蒸发设备	231
5.2.1	蒸发器的结构	231
5.2.2	蒸发器的选型	234
5.2.3	蒸发装置的附属设备和机械	235
5.2.4	蒸发过程和设备的强化与展望	236
§ 5.3	单效蒸发	237
5.3.1	单效蒸发设计计算	237
5.3.2	蒸发器的生产能力与生产强度	242
§ 5.4	多效蒸发	244
5.4.1	加热蒸汽的经济性	244
5.4.2	多效蒸发流程	244
5.4.3	多效蒸发设计型计算	246
5.4.4	多效蒸发和单效蒸发的比较	253
习题		254
思考题		255
本章符号说明		255
参考文献		256
附录		257
参考答案		306

绪 论

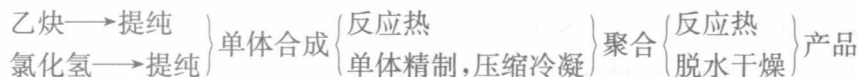
§ 0.1 典型化工产品生产实例

化工产品种类繁多,一般可分为无机、有机及生化产品。若按产品用途及性能来分,有染(颜)料化工、塑料橡胶化工、油脂化工、石油化工、食品化工、涂料化工、日用化工等等。

不论化工产品的品种或规模的差异,一个化工产品的生产过程总是由两大部分组成,即核心部分和辅助部分。核心部分为化学反应过程,辅助部分为前、后处理过程。为了保证化工生产过程经济合理并有效地进行,这就要求反应器内必须保持最适宜的(最佳的)反应条件,如适宜的压强、温度和物料的组成等。因此,原料必须经过一系列的前处理过程,以达到必要的纯度及温度和压强。得到的反应产物同样需要经过各种后处理过程加以精制,以得到最终产品(或中间产品)。

例如:聚氯乙烯塑料的生产(乙炔法)

化学方程式:



此生产过程除单体合成、聚合反应过程外,原料和反应产物的提纯、精制等工序分别属前、后处理过程。前、后处理工序中所进行的过程多数是纯物理过程,但都是化工生产所不可缺少的。

又如:甲醇的生产

合成气(CO 、 H_2 、 CO_2)→输送→管式反应器→粗甲醇→冷却→精馏→精甲醇(99.85%~99.95%)

再如:苯的生产

原料油(甲苯、二甲苯)、 H_2 →输送→加热→反应器→减压蒸馏塔→精馏→苯(99.992%~99.999%)

可见,一个化工生产过程往往包含几个或几十个物理加工过程。即使在一个现代化的大型工厂中,反应器的数目并不多,绝大多数的设备中都是进行着各种前、后处理操作。前、后处理工序占着企业的大部分设备投资和操作费用。因此目前已不是单纯由反应过程的优化条件来决定必要的前、后处理过程,而必须总体地确定全系统的优化条件。由此可见,前、后处理过程在化工生产中的重要地位。将前、后处理过程按其操作目的的不同划分为若干个单元,称之为单元操作。每一个单元操作完成一个特定的任务。

§ 0.2 化工单元操作的分类、特点和发展趋势

0.2.1 单元操作分类

各种单元操作根据不同的物理化学原理,采用相应的设备,达到各自的工艺目的。对于单元操作,可从不同角度加以分类。根据各单元操作所遵循的规律,将其划分为如下类型:

(1) 遵循流体动力学基本规律的单元操作,包括流体输送、沉降、过滤、物料混合(搅拌)。

(2) 遵循热量传递基本规律的单元操作,包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。

(3) 遵循质量传递基本规律的单元操作,包括蒸馏、吸收、萃取、吸附、膜分离等。从工程目的来看,这些操作都可将混合物进行分离,故又称之为分离操作。

(4) 同时遵循热质传递规律的单元操作,包括气体的增湿与减湿、结晶、干燥等。

另外,还有热力过程(制冷)、粉体工程(粉碎、颗粒分级、流态化)等单元操作。

0.2.2 单元操作特点

(1) 物理过程。

(2) 同一单元操作在不同的化工生产中遵循相同的过程规律,但在操作条件及设备类型(或结构)方面会有很大差别。

(3) 对同样的工程目的,可采用不同的单元操作来实现。

0.2.3 单元操作的发展趋势

随着新产品、新工艺的开发或为实现绿色化工生产,对物理过程提出了一些特殊要求,又不断地发展出新的单元操作或化工技术,如膜分离、参数泵分离、电磁分离、超临界技术等。同时,以节约能耗、提高效率或洁净无污染生产的集成化工艺(如反应精馏、反应膜分离、萃取精馏、多塔精馏系统的优化热集成等)将是未来的发展趋势。

§ 0.3 单位制度及单位换算

任何物理量的大小都是由数字和单位联合来表达的,二者缺一不可。

0.3.1 单位制度

在工程和科学中,单位制度有不同的分类方法。

(1) 基本单位和导出单位

一般选择几个独立的物理量(如质量、长度、时间、温度等),根据使用方便的原则规定出它们的单位,这些选择的物理量称为基本物理量,其单位称为基本单位。其他的物理量(如速度、加速度、密度等)的单位则根据其本身的物理意义,由有关基本单位组合而成。这种组合单位称为导出单位。

(2) 绝对单位制度和重力单位(工程单位)制度

绝对单位制以长度、质量、时间为基本物理量,力是导出物理量,其单位为导出单位;重力单位制以长度、时间和力为基本物理量,质量是导出物理量,其单位为导出单位。力和质量的关系用牛顿第二运动定律相关联,即

$$F = ma \quad (0-1)$$

上述两种单位制度中又有米制单位与英制单位之分。两种单位制度中米制与英制的基本单位如表 0-1 所示。

表 0-1 两种单位制度中的米制与英制的基本单位

基本物理量		长度(L)	时间(T)	质量(M)	力或重力(F)
单位制度					
绝对单位制度	cgs 制	cm	s	g	—
	mks 制	m	s	kg	—
	英制	ft	s	lb	—
重力单位制度 (工程单位制)	米制	m	s	—	kgf
	英制	ft	s	—	lb(f)

(3) 国际单位制度(SI 制)

1960 年 10 月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制度,称为国际单位制度,其代号为 SI,它是 mks 制的引申。

由于 SI 制的“通用性”和“一贯性”的优点,在国际上迅速得到推广。

(4)《中华人民共和国法定计量单位》(简称法定单位制)

中华人民共和国法定计量单位制度的内容见附录 1。

本套教材中采用法定单位制。在少数例题与习题中有意识地编入一些非法定单位,目的是让读者练习单位之间的换算。

0.3.2 单位换算

换算因子是指彼此相等而单位不同的两个同名物理量(包括单位在内)的比值。如 1 m 和 100 cm 的换算因子为 100 cm/m。

(1) 物理量的单位换算

同一物理量,若采用不同的单位,则数值就不相同。例如最简单的一个物理量,圆形反应器的直径为 1 m,在物理单位制度中,单位为 cm,其值为 100;而在英制中,其单位为 ft,其值为 3.2808。它们之间的换算关系:反应器的直径 $D=1\text{ m}=100\text{ cm}=3.2808\text{ ft}$ 。

同理,重力加速度 g 不同单位制之间的换算关系:重力加速度 $g=9.81\text{ m/s}^2=981\text{ cm/s}^2=32.18\text{ ft/s}^2$ 。

常用物理量的单位换算关系可查附录 2。

若查不到一个导出物理量的单位换算关系,则从该导出单位的基本单位换算入手,采用单位之间的换算因数与基本单位相乘或相除的方法,以消去原单位而引入新单位。具体换算过程见例 0-1。

【例 0-1】 质量速度的英制单位为 $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$,试将其换算为 SI 制,即 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

解 在本教材附录 2 中查不到质量速度不同单位制之间的换算关系,则只能从基本单位换算入手。从附录 2 查出基本物理量的换算关系为

$$1\text{ kg}=2.20462\text{ lb}, 1\text{ m}=3.2808\text{ ft}, 1\text{ h}=3600\text{ s}$$

采用“原单位消去法”便得到新的单位,即质量速度为

$$G=1\left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}}\right)=1\left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}}\right)\left(\frac{1\text{ kg}}{2.2046\text{ lb}}\right)\left(\frac{3.2808\text{ ft}}{1\text{ m}}\right)^2\left(\frac{1\text{ h}}{3600\text{ s}}\right)=1.356 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

(2) 经验公式(数字公式)的单位换算

化工计算中常遇到的公式有两类:物理方程和经验方程。

物理方程是根据物理规律建立起来的,如前述的式(0-1)。物理方程遵循单位或因次一致的原则。同一物理方程中绝不允许采用两种单位制度。

用一定单位制度的基本物理量来表示某一物理量,称为该物理量的因次。在 mks 单位制度中,基本物理量质量、长度、时间、热力学温度的因次分别用 M 、 L 、 T 与 θ 表示,力的因次为 MLT^{-2} ;在重力单位制度中,力为基本量,其因次用 F 表示,质量的因次则变为 FT^2L^{-1} 。因次一致的原则是因次分析方法的基础。

经验方程是根据实验数据而整理成的公式,式中各物理量的符号只代表指定单位制度的数据部分,因而经验公式又称数字公式。当所给物理量的单位与经验公式指定的单位制度不相同,则需要单位换算。可采取两种方式进行单位换算:将诸物理量的数据换算成经验公式中指定的单位后,再分别代入经验公式进行计算;若经验公式需经常使用,对大量的数据进行单位换算很繁琐,则可将公式加以变换,使式中各符号都采用所希望的单位制度。换算方法见例0-2。

【例0-2】 乱堆25 mm拉西环的填料塔用于精馏操作时,等板高度可用下面经验公式计算,即

$$H_E = 3.9A(2.78 \times 10^{-4}G)^B(12.01D)^C(0.3048Z_0)^{\frac{1}{3}} \frac{\alpha \mu}{\rho}$$

式中 H_E 为等板高度, ft; G 为气相质量速度, $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$; D 为塔径, ft; Z_0 为每段(两层液体分布板之间)填料层高度, ft; α 为相对挥发度, 无因次; μ 为液相黏度, cP; ρ 为液相密度, lb/ft^3 ; A, B, C 为常数, 对25 mm的拉西环, 其数值分别为0.57、-0.1、1.24。

试将上面经验公式中各物理量的单位均换算为SI制。

解 上面经验公式是混合单位制度, 液体黏度为物理单位制, 而其余诸物理量均为英制。

经验公式单位换算的基本要点: 找出式中每个物理量新旧单位之间的换算关系, 导出物理量“数字”的表达式, 然后代入经验公式并整理, 使式中各符号都变为所希望的单位。具体换算过程如下:

(1) 从附录2查出或计算出经验公式有关物理量新旧单位之间的关系:

$1 \text{ ft} = 0.3049 \text{ m}$, $1 \text{ lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) = 1.356 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (见例0-1), α 无因次, 不必换算, $1 \text{ cP} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 1 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lb}} \right) \left(\frac{3.2803 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right)^3 = 16.01 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

(2) 将原符号加上标“'”以代表新单位的符号, 导出原符号的表达式。下面以 H_E 为例:

$$H_E \text{ ft} = H'_E \text{ m}$$

$$\text{则 } H_E = H'_E \frac{\text{m}}{\text{ft}} = H'_E \frac{\text{m}}{0.3049 \text{ m}} = 3.2803 H'_E$$

同理 $G = G'/1.356 \times 10^{-3} = 737.5 G'$, $D = 3.2803 D'$, $Z_0 = 3.2803 Z'_0$, $\mu = \mu'/1 \times 10^{-3} = 1000 \mu'$, $\rho = \rho'/16.01 = 0.06246 \rho'$

(3) 将以上关系式代入原经验公式, 得