

液化天然气装备 设计技术

动力储运卷

张周卫 赵丽 汪雅红 郭舜之 著

YEHUA TIANRANQI ZHUANGBEI SHEJI JISHU
DONGLI CHUYUNJUAN



化学工业出版社

液化天然气装备 设计技术

动力储运卷

张周卫 赵丽 汪雅红 郭舜之 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要围绕液化天然气(LNG)混合制冷剂液化工艺及储运工艺中所涉及的主要低温装备,研究开发LNG工艺流程中主要动力装备及储运装备的设计计算技术,主要包括混合制冷剂离心压缩机、天然气往复式压缩机、BOG压缩机、混合制冷机膨胀机、螺旋压缩膨胀制冷机、LNG潜液泵、LNG温控阀及其附件、LNG汽车加气系统、LNG大型储罐、10000m³液化天然气球罐、LNG立式储罐、LNG槽车等装备的设计计算技术,为LNG液化、LNG储运、LNG接收及LNG气化等关键环节中所涉及主要设备的设计计算提供可参考样例,并推进LNG系列装备及系统工艺技术的标准化及国产化进程。

本书不仅可供从事天然气、液化天然气(LNG)、化工机械、制冷与低温工程、石油化工、动力工程及工程热物理领域内的研究人员、设计人员、工程技术人员参考,还可供高等学校化工机械、能源化工、石油化工、低温与制冷工程、动力工程等相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

液化天然气装备设计技术. 动力储运卷/张周卫等著.
北京:化学工业出版社,2018.3
ISBN 978-7-122-31066-8

I. ①液… II. ①张… III. ①液化天然气-贮运
设备-设计 IV. ①TE8

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第288634号

责任编辑:卢萌萌 刘兴春

文字编辑:向东

责任校对:王静

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张26¼ 字数643千字 2018年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:158.00元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

随着低温制冷技术的不断发展,低温工艺及装备设计制造技术日趋完善,在工业、农业、国防及科研等领域内的作用日益凸显,尤其在石油化工、煤化工、天然气、空分等大型成套装备技术领域具有重要地位,已广泛应用于大型液化天然气(LNG)、百万吨化肥、百万吨甲醇、大型气体液化分离等重大系统装备技术工艺流程中。

在LNG工业领域,大力发展LNG产业,提高天然气能源在消费中的比例是调整我国能源结构的重要途径,LNG既是天然气远洋运输的唯一方法,也是天然气调峰的重要手段。随着国内众多LNG工厂的相继投产及沿海LNG接收终端的建设,我国LNG工业进入了高速发展时期,与之相关连的LNG低温制冷装备技术也得到相应快速发展。LNG液化工艺主要包括天然气预处理、液化、储存、运输、接收、再气化等工艺单元,其中,液化工艺为核心工艺流程,主要应用低温制冷工艺技术制取 -162°C 低温环境并将天然气液化。根据不同的LNG液化工艺,可设计并加工制造不同的制冷装备,主要包括天然气压缩机、制冷剂压缩机、天然气冷箱、BOG压缩机、气液分离器、大型空冷器、LNG膨胀机、四级节流阀及各种过程控制装备等。储运工艺技术中还包括大型LNG储罐、LNG立式储罐、LNG气化器、LNG潜液泵等。近年来,30万立方米以上LNG系统多采用混合制冷剂板翅式主换热装备及液化工艺技术,60万立方米以上大型LNG系统多采用混合制冷剂缠绕管式主换热装备及液化工艺技术,这两种混合制冷剂LNG液化工艺技术具有集约化程度高、制冷效率高、占地面积小及非常便于自动化管理等优势,已成为大型LNG液化工艺装备领域内的标准性主流选择,在世界范围内已广泛应用。目前,国内的大型LNG装备一般随着成套工艺技术整体进口,包括工艺技术包及主设备专利技术使用费等,造价非常昂贵,后期维护及更换设备的费用同样巨大。由于大型LNG系统装备及主设备大多仍未国产化,即还没有成型的设计标准,因此给LNG制冷装备的设计计算带来了难题。

《液化天然气装备设计技术:动力储运卷》主要围绕LNG液化工艺及储运工艺中所涉及的主要装备技术,研究开发LNG液化工艺流程中核心动力装备及储运装备的设计计算技术,主要包括混合制冷剂离心压缩机、天然气往复式压缩机、BOG压缩机、混合制冷剂膨胀机、螺旋压缩膨胀制冷机、LNG潜液泵、LNG温控阀及其附件、LNG汽车加气系统、LNG大型储罐、 10000m^3 液化天然气球罐、LNG立式储罐、LNG槽车共12类核心装备的设计计算技术,为LNG液化、LNG储运、LNG接收及LNG气化等关键环节中所涉及主要设备的设计

计算提供可参考样例，并推进 LNG 系列装备及 LNG 系统工艺技术的标准化及国产化研究开发进程。

(1) 混合制冷剂离心压缩机

混合制冷剂离心压缩机是大型 LNG 液化工艺流程中的核心动力设备，也是大型混合制冷剂低温制冷系统的核心设备之一，主要用于 100 万立方米以上 MCHE 型 LNG 液化系统，及 60 万立方米以上大型 PFHE 型 LNG 液化系统。由于混合制冷剂在压缩过程中存在预冷分凝过程，混合制冷剂压缩难以计算，压缩过程中存在很多不确定性等问题，给混合制冷剂离心压缩机的研究及设计带来了困难。本文基于通用离心压缩机设计计算过程，结合混合制冷剂物性计算过程，采用西安交通大学流体教研室提供的多级离心压缩机压缩过程计算方法，结合 100 万立方米 MCHE 型 LNG 液化混合制冷剂压缩机压缩工艺流程，采用正丁烷、异丁烷、丙烷、乙烯、氮气、甲烷六元混合制冷剂，两段四级压缩过程，中段冷却并分离提取正丁烷、异丁烷二元制冷剂，丙烷、乙烯、氮气、甲烷四元混合制冷剂进入二段压缩过程的工艺流程。经过近些年来对 MCHE 型 LNG 液化系统的研究与开发，本书给出了一种六元混合制冷剂离心式压缩机设计计算模型，供相关行业的同行参考，以利于推进大型 LNG 混合制冷剂离心式压缩机的国产化进程。

(2) 天然气往复式压缩机

LNG 液化工艺用天然气压缩机是 LNG 液化流程中的主要动力设备之一，是将管道送来的低压天然气增压后，送至主换热设备并液化，从而使天然气在接近 4.3MPa 压力下液化，一来可以节省液化过程中天然气管道占用空间，缩小主换热器的换热面积及总体尺寸；二来让天然气压力高于主要成分甲烷的临界压力，整体液化温度高于标准沸点，便于天然气液化。天然气压缩机是将机械能转变为气体压力能的机械，而往复式压缩机又因排气压力高、排气压力稳定、价格相对较低，还可实现小气量、高压等优点，已成为工业上使用量大、使用面广的一种通用机械。近年来，管道天然气增压功率及流量逐渐增大，在 3MW 以下中小型 LNG 液化系统中，通常采用往复式压缩机。往复式压缩机，主要由机座和工作腔两大部分组成，机座部分包括机身、曲轴、连杆、十字头组件等；工作腔部分包括气缸、活塞、活塞杆、活塞环与填料、气阀组件等，而在压缩机工艺计算中，热力计算和动力计算又是最重要的环节。往复式压缩机的动力和热力计算结果将是总体设计的依据，其精确程度会体现压缩机的设计水平。本书给出了天然气往复式压缩机设计计算模型，供相关行业的同行参考。

(3) BOG 压缩机

BOG 压缩机是 LNG 液化过程中不可缺少的主要动力设备之一，为大型 LNG 储罐等配套设施，是 LNG 饱和蒸气返回主液化系统的主要动力设备，具有压缩 -162°C 以上温度低温蒸气的特点。BOG 压缩一般采用往复式较多，其压缩机头具有防冻、防霜等特点。本书给出 BOG 压缩机设计计算模型，供相关行业的同行参考。

(4) 混合制冷剂膨胀机

混合制冷剂膨胀机是 LNG 液化膨胀制冷过程获取冷量所必备的设备，是膨胀制冷液化工艺中的核心设备之一，其主要原理是利用有一定压力的混合制冷剂气体在透平膨胀机内进行绝热等熵膨胀对外做功而消耗气体本身的内能，从而使混合制冷剂气体自身强烈地冷却而达到制冷的目的。目前，从 LNG 低温液化、空分到极低温氢、氦的液化制冷，都有透平膨胀机的应用。本书根据透平膨胀机膨胀制冷原理，给出了混合制冷剂膨胀机的设计计算方法，

仅供参考。

(5) 螺旋压缩膨胀制冷机

螺旋压缩膨胀制冷机采用完全轴对称且同轴线结构的螺旋压缩机头、电动机及螺旋膨胀机头，应用近似布雷顿循环制冷原理，较布雷顿循环更接近等温压缩过程的循环方式，压缩功相对较小，可回收膨胀功，COP 较高；应用多级螺旋压缩叶片逐级改变螺旋压缩叶片螺距及螺旋上升角、逐级扩压再压缩的连续压缩方法，实现高速螺旋叶轮对气体的多级离心冲压压缩过程；通过增大螺旋膨胀叶片螺距及螺旋上升角，高压气流逐渐膨胀加速的连续膨胀做功方法，实现气体对螺旋叶片膨胀做功过程及降温过程；采用气流多级轴向扩压再膨胀的方法带动螺旋叶片高速旋转，实现气流对多级螺旋叶片逐级膨胀做功并降温的过程；结构简洁精巧，外形似圆柱形，可直接连接至管道中，实现高温气体的开式低温制冷过程。该技术由兰州交通大学张周卫等提出，并给出了螺旋压缩膨胀制冷机设计计算模型，供相关行业的同行参考。

(6) LNG 潜液泵

作为整个 LNG 加气站的动力装置，LNG 低温泵的性能要求最主要的是耐低温且绝热效果好，以及承受出口高压。其次是气密性和电气方面的安全性能要求比普通泵高很多。低温泵必须有足够的压力和流量范围，以适应不同级别的汽车 LNG 储存系统；要尽可能减少运行时产生的热量，以防止引发 LNG 气化；不可出现两相流，否则会造成泵的损坏。LNG 汽车加气站用潜液泵主要由泵、泵夹套和电动机组成。采用离心式结构体，转速高、质量轻，这种高速离心式 LNG 潜液泵采用屏蔽电动机一体轴配装泵体、叶轮、导流器、诱导轮等部件，通过变频控制器控制电动机的转速。其结构设计为屏蔽电动机和泵体全部浸没在低温液体中，达到零泄漏的方式。本书根据 LNG 潜液泵增压原理，给出了 LNG 潜液泵的设计计算方法，仅供参考。

(7) LNG 温控阀及其附件

温度控制阀是流量调节阀在温度控制领域的典型应用，其基本原理：通过控制换热器，空调机组或其他用热、冷设备，一次热冷媒入口流量，以达到控制设备出口温度的目的。当负荷产生变化时，通过改变阀门开启度调节流量，以消除负荷波动造成的影响，使温度恢复至设定的值。本书给出了一种 LNG 温控设计计算模型，供相关行业的同行参考。

(8) LNG 汽车加气系统

以 LNG 为燃料的汽车称为 LNG 汽车，一般分三种形式：第一种为完全以 LNG 为燃料的纯 LNG 汽车；第二种为 LNG 与柴油混合使用的双燃料 LNG 汽车；第三种为 LNG 与汽油混合使用的双燃料 LNG 汽车。这几种 LNG 汽车的燃气系统基本相同，都是将 LNG 储存在车用储罐内，通过气化装置气化为 0.5MPa 左右的气体供给发动机，其主要构成有 LNG 储罐、气化器、减压调压阀、混合器和控制系统等。本书主要给出了 LNG 汽车车载 LNG 储罐等的设计计算模型，供相关行业的同行参考。

(9) LNG 大型储罐

LNG 大型储罐主要用于 LNG 接收站或 LNG 液化工厂末端，为接收 LNG 的最主要设备。LNG 接收站内一般有多个大型 LNG 储罐，设计容积从几万立方米到几十万立方米，投资造价很高。LNG 大型储罐结构形式有单包容罐、双包容罐、全包容罐和膜式罐等。本文给出了一种 LNG 大型储罐的设计计算模型，供相关行业的同行参考。

(10) 10000m³ 液化天然气球罐

10000m³液化天然气球罐是一种常用的 LNG 储存罐体，为中小型 LNG 接收站内核心设备，一般一个接收站可由几个罐体组成。LNG 球罐主要由真空双壳体组成，外层安装水平环路，用以均匀罐内 LNG 温度，避免罐内 LNG 温度分层。LNG 球罐是一个大型、复杂的焊接壳体，它涉及材料、结构、焊接、热处理、无损检测等多方面技术，对球罐设计方法和理论、选材和材料评价体系、高性能材料的焊接及热处理技术、大板片球罐制造技术的理论和实际都有重要作用。球形储罐与其他形式的压力容器比较，有许多突出的优点。如与同等容量、相同工作压力的圆筒形压力容器比较，球罐表面积小，所需钢板厚度较薄，因而具有耗钢量少、重量轻的优点。本书给出了 10000m³ LNG 球罐的设计计算方法，仅供参考。

(11) LNG 立式储罐

LNG 立式储罐一般是垂直圆柱形双层真空储罐，具有耐低温特性，要求储液具有良好的耐低温性能和优异的保冷性能。储罐内 LNG 一般储存在 101325Pa、-162℃饱和状态。内罐壁要求耐低温材料，一般选用 A537CL2、A516Gr60 等材料。在内罐和外罐之间填充高性能的保冷材料。罐底保冷材料还要有足够的承压性能。本书给出了一种 LNG 立式储罐设计计算模型，供相关行业的同行参考。

(12) LNG 槽车

LNG 槽车主要由双层平卧真空罐体与汽车底盘两部分组成。作为 LNG 陆地运输的最主要的工具，因其具有很强的灵活性和经济性，已得到了广泛应用。目前，我国使用的 LNG 槽车主要有两种形式，LNG 半挂式运输槽车和 LNG 集装箱式罐车。半挂式运输槽车有效容积为 36m³，集装箱式有效容积为 40m³。本书给出了 LNG 槽车设计计算模型，供相关行业的同行参考。

本书共分 12 章，第 1 章、第 3~5 章、第 8~10 章由张周卫、郭舜之负责撰写并编辑整理，第 2 章、第 6 章、第 7 章、第 11 章、第 12 章由汪雅红、赵丽负责撰写并编辑整理。全书最后由张周卫统稿。

本书受国家自然科学基金（编号：51666008），甘肃省财政厅基本科研业务费（编号：214137），甘肃省自然科学基金（编号：1208RJZA234）等支持。

本书按照目前所列装备设计计算开发进度，重点针对 12 项装备进行研究开发，总结设计计算方法，并与相关行业内的研究人员共同分享。

由于水平有限、时间有限及其他原因，本书中难免存在疏漏与不足之处，希望同行及广大读者批评指正。

兰州交通大学

张周卫 赵丽 汪雅红 郭舜之

2017 年 12 月

目 录

CONTENTS

第1章 混合制冷剂离心压缩机设计计算

- 1.1 设计中所涉知识点介绍 / 002
 - 1.1.1 连续方程 / 002
 - 1.1.2 欧拉方程 / 002
 - 1.1.3 能量方程 / 003
 - 1.1.4 速度三角形 / 004
 - 1.1.5 伯努利方程 / 004
- 1.2 压缩过程和压缩功的说明 / 005
 - 1.2.1 等熵压缩 / 005
 - 1.2.2 多变压缩 / 006
 - 1.2.3 压缩功与叶轮中的气体变化过程关系 / 006
 - 1.2.4 压缩过程在 $T-S$ 图上的表示 / 007
 - 1.2.5 总耗功和功率 / 009
 - 1.2.6 滞止参数的表示 / 009
- 1.3 压缩机效率的表达式 / 010
 - 1.3.1 多变效率 / 010
 - 1.3.2 绝热效率 / 011
 - 1.3.3 等温效率 η_{is} 和流动效率 η_{hyd} / 012
- 1.4 压缩机各部的压缩过程 / 012
 - 1.4.1 工作级间的等熵压缩过程 / 012
 - 1.4.2 级中实际压缩过程 / 013
- 1.5 混合制冷剂压缩机设计 / 013
 - 1.5.1 混合制冷剂压缩机设计任务 / 013

- 1.5.2 压缩机第一段设计计算 / 014
- 1.5.3 压缩机第二段设计计算 / 035
- 1.5.4 主轴的计算 / 056
- 1.6 离心式压缩机强度设计及轴向推力计算 / 056
 - 1.6.1 转子强度设计 / 056
 - 1.6.2 定子强度设计 / 057
 - 1.6.3 机壳部分计算 / 058
 - 1.6.4 轴向推力计算 / 059
- 1.7 离心式压缩机结构设计 / 060
 - 1.7.1 转子的结构设计 / 060
 - 1.7.2 定子的结构设计 / 061
- 参考文献 / 063

第2章 天然气往复式压缩机设计计算

- 2.1 总体设计 / 064
 - 2.1.1 设计原始资料 / 064
 - 2.1.2 天然气的物性参数 / 065
 - 2.1.3 热力计算 / 068
- 2.2 动力计算 / 076
 - 2.2.1 曲柄连杆机构及运动关系 / 076
 - 2.2.2 作用力计算 / 076
- 2.3 气缸部分主要零件设计 / 080
 - 2.3.1 气缸 / 080
 - 2.3.2 气阀 / 083
 - 2.3.3 活塞 / 086
 - 2.3.4 填料和刮油器 / 088
- 2.4 基本部件的设计 / 089
 - 2.4.1 曲轴 / 089
 - 2.4.2 连杆 / 090
 - 2.4.3 十字头 / 096
 - 2.4.4 轴承 / 097
- 2.5 其他部件的设计 / 097
 - 2.5.1 盘车装置 / 097
 - 2.5.2 皮带轮和飞轮 / 097
- 2.6 气路系统 / 098
 - 2.6.1 空气滤清器 / 098

- 2.6.2 液气分离器、缓冲器和储气罐 / 098
- 2.7 冷却系统 / 098
 - 2.7.1 冷却系统及其对水质的要求 / 098
 - 2.7.2 冷却器的结构设计 / 098
- 参考文献 / 098

第3章 BOG 压缩机设计计算

- 3.1 压缩机的作用及分类 / 100
 - 3.1.1 BOG 压缩机的用途 / 100
 - 3.1.2 BOG 压缩机的种类 / 100
- 3.2 压缩机机组结构设计 / 101
 - 3.2.1 主机结构设计 / 101
 - 3.2.2 辅助设备设计 / 102
- 3.3 热力计算 / 103
 - 3.3.1 初始条件 / 103
 - 3.3.2 计算初始条件 / 103
 - 3.3.3 确定压缩级数 / 104
 - 3.3.4 计算各级名义压力 / 104
 - 3.3.5 计算各级排气温度 / 104
 - 3.3.6 计算各级排气系数 / 105
 - 3.3.7 计算干气系数和抽气系数 / 107
 - 3.3.8 压缩机的行程容积 / 107
 - 3.3.9 确定活塞杆直径 / 108
 - 3.3.10 确定气缸直径 / 108
 - 3.3.11 修正各级公称压力和温度 / 109
 - 3.3.12 计算活塞力 / 110
 - 3.3.13 计算指示轴功率 / 111
 - 3.3.14 计算实际轴功率 / 112
 - 3.3.15 计算等温指示效率和等温效率 / 112
 - 3.3.16 选用电动机 / 112
- 3.4 动力计算 / 113
 - 3.4.1 绘制气体指示图 / 113
 - 3.4.2 列的惯性力 / 113
 - 3.4.3 计算飞轮矩 / 116
- 3.5 主要部件及零部件设计 / 117
 - 3.5.1 活塞组件设计 / 117

- 3.5.2 气缸的设计 / 124
- 3.5.3 连杆的设计 / 124
- 3.5.4 曲轴设计 / 131
- 3.5.5 气阀 / 132
- 3.5.6 十字头 / 136
- 3.5.7 填料及密封材料 / 136

参考文献 / 136

第4章 混合制冷剂膨胀机设计计算

- 4.1 透平膨胀机的应用 / 137
 - 4.1.1 透平膨胀机的分类 / 137
 - 4.1.2 国内外透平膨胀机的发展概况 / 139
 - 4.2 制冷剂 / 139
 - 4.2.1 制冷剂的选用原则 / 139
 - 4.2.2 混合制冷剂及其性质 / 140
 - 4.2.3 混合制冷剂的选定 / 140
 - 4.3 透平膨胀机的工艺计算 / 141
 - 4.3.1 膨胀过程 / 141
 - 4.3.2 多变过程分析 / 142
 - 4.3.3 等熵过程分析 / 143
 - 4.3.4 膨胀混合气体进入气相区的计算 / 145
 - 4.4 混合制冷剂透平膨胀机的设计与计算 / 147
 - 4.4.1 设计资料 / 147
 - 4.4.2 混合制冷剂透平膨胀机的热力计算 / 148
 - 4.5 透平膨胀机的损失和效率 / 158
 - 4.5.1 工作轮轮背摩擦损失 / 159
 - 4.5.2 工作轮轮背摩擦损失计算 / 159
 - 4.5.3 工作轮内泄漏损失 / 160
 - 4.6 透平膨胀机的运行、维护和故障处理 / 160
 - 4.6.1 透平膨胀机的运行 / 160
 - 4.6.2 透平膨胀机的维护和检修 / 161
- 参考文献 / 163

第5章 螺旋压缩膨胀制冷机设计计算

- 5.1 螺旋压缩膨胀制冷机 / 164
 - 5.1.1 制冷压缩机的发展 / 164

- 5.1.2 螺旋压缩膨胀制冷机工作原理 / 165
- 5.1.3 螺旋压缩膨胀制冷机技术特点 / 166
- 5.1.4 螺旋压缩膨胀制冷机设计步骤 / 167
- 5.1.5 螺旋压缩膨胀制冷机设计方法 / 167
- 5.2 离心叶轮的设计计算 / 168
 - 5.2.1 离心叶轮主要结构参数 / 168
 - 5.2.2 后弯形叶轮参数的计算 / 168
 - 5.2.3 压缩段级的总耗功 / 171
 - 5.2.4 叶轮叶片强度计算 / 172
 - 5.2.5 密封原理及结构形式 / 175
 - 5.2.6 叶片扩压器设计计算 / 178
- 5.3 螺旋叶片的设计计算 / 183
 - 5.3.1 压缩段膨胀段螺线方程 / 183
 - 5.3.2 螺旋叶片设计参数 / 185
 - 5.3.3 压缩过程计算 / 186
- 5.4 空气冷却器传热计算 / 188
 - 5.4.1 传热系数和传热热阻 / 188
 - 5.4.2 翅片效率和翅片热阻 / 191
 - 5.4.3 空冷器管外传热及阻力计算 / 195
- 5.5 制冷过程设计计算 / 198
 - 5.5.1 布雷顿制冷循环 / 198
 - 5.5.2 膨胀过程计算 / 203
- 5.6 制冷剂的选择与应用 / 204
 - 5.6.1 制冷系统常用制冷剂 / 204
 - 5.6.2 对制冷剂要求 / 205
 - 5.6.3 载冷剂 / 205
 - 5.6.4 冷冻油 / 206
- 5.7 制冷机热工性能计算 / 207
- 5.8 空心轴壳体强度计算 / 207
 - 5.8.1 空心轴圆筒强度 / 207
 - 5.8.2 弹性分析 / 208
 - 5.8.3 弹塑性分析 / 209
 - 5.8.4 加肋圆柱形壳体强度和稳定性计算 / 211
 - 5.8.5 相关案例 / 212

参考文献 / 213

第6章 LNG潜液泵设计计算

- 6.1 泵的主要零部件 / 216
- 6.2 泵的水力设计方法 / 216
 - 6.2.1 模拟设计法 / 216
 - 6.2.2 变型设计法 / 217
 - 6.2.3 速度系数设计法 / 217
 - 6.2.4 设计中关键问题的解决 / 217
- 6.3 LNG潜液泵的设计技术指标和设计计算 / 218
 - 6.3.1 泵的基本参数的确定 / 218
 - 6.3.2 泵转速的确定 / 219
 - 6.3.3 泵比转速的计算 / 219
 - 6.3.4 计算泵的效率 / 220
 - 6.3.5 叶轮主要参数的选择和计算 / 221
- 6.4 压水室、吸水室的水力设计 / 225
 - 6.4.1 压水室 / 225
 - 6.4.2 压水室的设计 / 226
 - 6.4.3 吸水室 / 227
 - 6.4.4 吸水室的设计 / 228
- 6.5 泵的轴向力、径向力计算及平衡 / 228
 - 6.5.1 轴向力的平衡 / 228
 - 6.5.2 轴向力的计算 / 228
 - 6.5.3 径向力的计算及平衡 / 230
- 6.6 低温潜液泵电机的选择 / 231
 - 6.6.1 低温潜液泵电机的相关问题解决 / 231
 - 6.6.2 电机的选择 / 232
 - 6.6.3 电缆的选择 / 232
 - 6.6.4 电气连接处的密封 / 233
- 6.7 泵主要零部件的强度计算 / 233
 - 6.7.1 叶轮强度计算 / 233
 - 6.7.2 轴承的选择 / 234
- 6.8 泵的各零部件材料的设计 / 234
 - 6.8.1 奥氏体不锈钢 / 234
 - 6.8.2 镍基硬质合金 / 235
 - 6.8.3 等离子堆焊技术 / 235
 - 6.8.4 深冷处理 / 235

6.8.5 冲击试验 / 236

6.8.6 拉伸试验 / 236

参考文献 / 236

第7章 LNG 温控阀及其附件设计计算

7.1 LNG 温控阀设计计算 / 237

7.1.1 LNG 温控阀密封比压计算 / 238

7.1.2 LNG 温控阀阀体壁厚计算 / 239

7.1.3 阀杆轴向力计算 / 239

7.1.4 阀杆总转矩计算 / 239

7.1.5 LNG 温控阀阀杆应力校核 / 240

7.1.6 LNG 温控阀阀杆稳定性分析 / 241

7.1.7 阀杆头部强度验算 / 241

7.1.8 LNG 温控阀阀瓣应力校核 / 242

7.1.9 LNG 温控阀中法兰连接螺栓 / 242

7.1.10 LNG 温控阀中法兰强度验算 / 243

7.1.11 LNG 温控阀阀盖强度验算 / 244

7.1.12 阀盖支架 (T 形加强筋) / 244

7.1.13 中法兰螺栓扭紧力矩 / 245

7.1.14 密封结构计算 / 246

7.2 毛细管的设计计算与分析 / 251

7.2.1 毛细管的节流特性 / 251

7.2.2 毛细管长度对系统的影响 / 252

7.2.3 影响毛细管设计的几个参数 / 252

7.2.4 毛细管的计算方法 / 254

7.3 温控阀执行器 / 256

7.3.1 GMA 热变形机理分析 / 256

7.3.2 感温包 / 257

7.3.3 感温介质 / 257

7.3.4 隔膜 / 257

7.4 温控阀截面弹簧的设计计算 / 258

7.4.1 异形钢丝弹簧特性及基本设计公式 / 258

7.4.2 异型钢丝弹簧设计变形公式的推导 / 259

参考文献 / 260

第8章 LNG汽车加气系统设计计算

- 8.1 液化天然气(LNG)汽车综述 / 261
 - 8.1.1 LNG汽车的燃料系统 / 261
 - 8.1.2 LNG汽车的充装 / 262
 - 8.1.3 LNG汽车的运行及维护注意事项 / 263
- 8.2 LNG车载气瓶 / 264
 - 8.2.1 LNG车载气瓶发展现状及应用 / 264
 - 8.2.2 LNG车载气瓶的特点 / 267
 - 8.2.3 LNG车载气瓶结构及操作原理 / 268
- 8.3 LNG汽车加气 / 269
 - 8.3.1 稳定供气条件 / 269
 - 8.3.2 气化量与供气量关系 / 270
 - 8.3.3 LNG车载气瓶的计算 / 273
 - 8.3.4 换热器的设计计算 / 290
- 8.4 加气机 / 291
 - 8.4.1 加气机管路 / 291
 - 8.4.2 加气机结构 / 291
- 参考文献 / 292

第9章 LNG大型储罐设计计算

- 9.1 LNG大型储罐 / 293
 - 9.1.1 LNG的低温储罐运输 / 293
 - 9.1.2 LNG低温储罐的特殊要求 / 293
- 9.2 LNG储罐内罐总体结构尺寸确定 / 294
 - 9.2.1 储罐设计数据 / 294
 - 9.2.2 LNG储罐几何尺寸 / 294
 - 9.2.3 主要构件结构尺寸的计算 / 296
 - 9.2.4 加强圈 / 297
 - 9.2.5 罐底板尺寸 / 300
 - 9.2.6 内罐罐底边缘板厚度与宽度确定 / 300
- 9.3 大型LNG储罐绝热计算 / 302
 - 9.3.1 传热机理 / 302
 - 9.3.2 基础数据 / 302
 - 9.3.3 绝热计算 / 303
- 9.4 内罐罐体强度计算 / 307

- 9.4.1 水压试验 / 307
- 9.4.2 水压试验校核 / 308
- 9.4.3 气压试验 / 309
- 9.4.4 负压试验 / 309
- 9.5 LNG 储罐抗震计算 / 309
 - 9.5.1 自震周期的计算 / 309
 - 9.5.2 储罐水平地震作用 / 310
 - 9.5.3 罐壁抗震验算 / 311
 - 9.5.4 罐内液面晃动波高 / 312
 - 9.5.5 锚固罐的罐壁抗震验算 / 312
 - 9.5.6 地脚螺栓个数确定 / 313
- 9.6 气升顶方案设计 / 313
 - 9.6.1 平衡导向系统 / 313
 - 9.6.2 密封装置系统 / 314
 - 9.6.3 供气系统 / 315
- 参考文献 / 317

第 10 章 10000m³液化天然气球罐设计计算

- 10.1 球罐用钢 / 318
 - 10.1.1 国内外球罐的常用钢种 / 318
 - 10.1.2 几种典型球罐用钢 / 318
- 10.2 球罐设计 / 320
 - 10.2.1 球壳结构 / 320
 - 10.2.2 支座结构 / 320
 - 10.2.3 拉杆结构 / 320
 - 10.2.4 支柱与球壳连接下部结构 / 321
 - 10.2.5 接管补强结构 / 321
 - 10.2.6 球罐的设计方法 / 321
- 10.3 球罐设计 / 322
 - 10.3.1 基本参数 / 322
 - 10.3.2 基础资料 / 322
- 10.4 设计原则 / 323
 - 10.4.1 设计规范的确 定 / 323
 - 10.4.2 压力试验方法 / 323
- 10.5 球壳设计 / 324
 - 10.5.1 材料选用 / 324

- 10.5.2 内压球壳的计算 / 325
- 10.5.3 外压球壳的计算 / 325
- 10.5.4 球壳薄膜应力校核 / 327
- 10.6 球罐质量计算 / 328
- 10.7 载荷计算 / 329
 - 10.7.1 自振周期 / 329
 - 10.7.2 地震力 / 330
 - 10.7.3 风载荷计算 / 330
 - 10.7.4 弯矩计算 / 330
 - 10.7.5 支柱计算 / 330
 - 10.7.6 单个支柱弯矩 / 331
 - 10.7.7 支柱稳定性校核 / 332
 - 10.7.8 地脚螺栓计算 / 333
 - 10.7.9 支柱底板计算 / 334
 - 10.7.10 拉杆计算 / 335
 - 10.7.11 支柱与球壳连接最低点 a 的应力校核 / 336
 - 10.7.12 支柱与球壳连接焊缝的强度校核 / 337
- 10.8 安全泄放计算 / 338
 - 10.8.1 安全阀排量 / 338
 - 10.8.2 安全阀排放面积的计算 / 338
- 参考文献 / 339

第 11 章 LNG 立式储罐设计计算

- 11.1 LNG 立式储罐的特点 / 340
- 11.2 LNG 立式储罐的设计 / 341
 - 11.2.1 设计依据的标准及主要设计参数 / 341
 - 11.2.2 LNG 储罐结构的初步设计 / 342
 - 11.2.3 LNG 立式储罐强度校核 / 348
- 11.3 外罐的开孔补强计算 / 356
 - 11.3.1 强度削弱系数计算 / 356
 - 11.3.2 有效补强范围计算 / 356
 - 11.3.3 有效补强面积 A_e 的计算 / 357
- 11.4 LNG 立式储罐安全附件 / 357
 - 11.4.1 安全阀的设计计算 / 357
 - 11.4.2 爆破片的设计计算 / 358
- 11.5 LNG 立式储罐及相关设备的选型 / 359