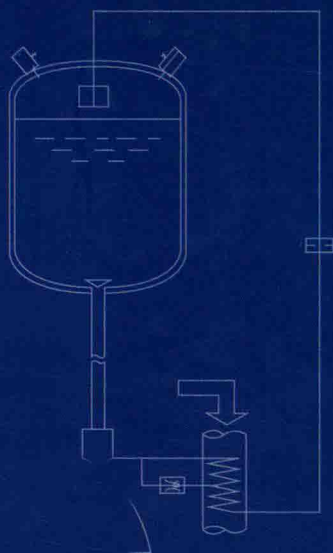




航天科技图书出版基金资助出版

# 运载火箭 液氧煤油增压输送

张卫东 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

# 运载火箭液氧煤油增压输送

张卫东 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

运载火箭液氧煤油增压输送/张卫东著. -- 北京:  
中国宇航出版社, 2016. 5

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1113 - 7

I. ①运… II. ①张… III. ①运载火箭-液体推进剂  
火箭发动机 IV. ①V434

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 100093 号

责任编辑 侯丽平

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版  
发行 **中国宇航出版社**

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830  
(010)60286808 (010)68768548

网址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com)

经销 新华书店

发行部 (010)60286888 (010)68371900  
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部  
(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2016 年 5 月第 1 版  
2016 年 5 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 17.25

字数 430 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1113 - 7

定价 180.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

## 序

20 世纪后半叶以来，航天技术日趋成熟并快速发展，提升进入空间与开发利用空间的能力已成为各航天大国的国家空间战略。运载火箭将各类飞行器送入空间轨道，代表了进入空间的能力，决定了空间活动的规模，是实现国家空间战略的基础和保障。

我国现役长征系列运载火箭具有可靠性高、性价比高等特点，已实施 200 多次发射，成功保障了我国卫星发射、载人航天与月球探测等重大工程的实施，并进入国际商业发射服务市场。随着无毒无污染推进剂的广泛应用，新一代运载火箭系列在我国得到了飞速发展，其动力系统全面改进，运载能力和可靠性都得到提升。为了进一步总结运载火箭研制成果，尤其是新一代运载火箭研制经验及突破的关键技术、建立和应用的设计方法等，有必要开展相关书籍的编写和出版，以指导后续运载火箭的研制工作。

运载火箭动力系统的主要功能是为运载火箭发射一定的有效载荷达到预定目标提供必要的推力。动力系统又主要由增压输送系统和发动机系统组成，新一代运载火箭主要采用液氧煤油发动机，使用液氧和煤油作为新的推进剂，增压输送系统与现役火箭有了很大的区别。尤其是增压系统气液相变、输送系统的低温两相流动、发动机预冷以及相关管路、阀门等单机设计都有较大的变化，对增压输送系统设计提出了新的要求，因此，方法要创新，技术要进步，才能研制出新一代运载火箭。

现有运载火箭增压输送系统方面的书籍主要基于现役运载火箭研制基础，对新一代无毒无污染的低温推进剂引起的动力系统重大变化描述较少，尤其是与液氧煤油火箭总体设计相关的增压输送系统部分描述不多。本书结合我国新一代运载火箭的工程研制实践，围绕以液氧煤油为推进剂的增压输送系统进行了总结和提炼。

2011 年发布的《2011 年中国的航天》白皮书中明确提出要加强航天运输系统建设，不断完善运载火箭型谱，提升进入空间的能力。这对我国运载火箭的运载能力和可靠性等都提出了新的需求。《运载火箭液氧煤油增压输送》这部著作正是在航天事业蓬勃发展、对新一代运载火箭需求旺盛的背景下编写的。本书凝练了新一代运载火箭研制过程中的创新成果和实践经验，为运载火

箭增压输送系统的后续发展提供了支持。

希望随着我国新一代运载火箭研制的推进，有更多的著作出版。



2016年4月

## 前 言

从20世纪开始,美国、欧洲等航天强国以采用无毒推进剂、提高火箭性能、降低成本等作为主要设计原则,成功研发了多种新型低温火箭。高比冲、高可靠性、模块化、通用化、系列化、低成本的大推力火箭是近些年运载火箭发展的方向。我国面向21世纪的航天发展战略和规划中,关于运载火箭的一条重要目标是“开发新一代无毒、无污染、高性能和低成本运载火箭”。新一代运载火箭是通用化、组合化、系列化的全新系列运载火箭产品,使用液氧煤油发动机为主动力的新型动力系统是火箭研制的核心关键技术。

国外现役主力火箭大都采用液氧煤油发动机和液氢液氧发动机作为主动力,如宇宙神系列、猎鹰、天顶号、联盟系列等。我国现役火箭中,只有CZ-3系列的三级使用液氢液氧推进剂,其他火箭或子级的主动力均使用偏二甲肼/二氧化氮为推进剂。近年来,随着液氧煤油动力系统研制关键技术的突破,液氧煤油也将成为我国后续新一代运载火箭的主流推进剂。

对于低温发动机的设计、研制及应用已有相应的文献资料和书籍,对使用常规推进剂的增压输送系统也有相应专著,但对于使用液氧煤油发动机的增压输送系统的相关专著未见,文献很少或比较分散。国外先后进行了大量低温推进剂的增压输送系统的研究与试验,但其报道资料也比较零散,相关文献也以总体设计为主。本书是在新一代运载火箭研制的背景下,结合编写人员长期工程经验,系统而详尽地描述了液氧煤油发动机增压输送系统的设计过程,对液氧煤油增压输送系统中的系统方案选择、氧箱低温增压计算、低温发动机预冷、低温推进剂纵向耦合振动(POGO)以及管路、低温阀门等多个方面进行了深入研究,对相应课题和成果进行了汇编,形成了一套相对完整的液氧煤油增压输送系统设计理论体系、关键技术和主要产品等的系统论述。

全书共9章,第1章绪论,对增压输送系统进行总的概述,介绍了运载火箭增压输送系统的一般分类、组成及发展历程和趋势;第2章液氧自生增压系统,介绍了液氧自生增压系统的特点、关键技术;第3章氮气增压系统,对运载火箭多种氮气增压方案进行了分析和建模;第4章液氧煤油发动机预冷系统,对液氧煤油发动机预冷系统的原理、预冷方案及预冷仿真模型进行了论述,提出了多种预冷方法;第5章增压输送系统总装设计,对动力系统布局及

管路系统的设计进行了介绍；第6章增压输送系统仿真分析，对液氧贮箱内三维增压模型进行了分析和全系统仿真建模；第7章低温推进剂 POGO 抑制设计，对低温推进剂的 POGO 振动原理、抑制方法和试验进行了分析；第8章阀门设计、分析与试验，对增压输送系统的阀门附件研制进行了描述；第9章增压输送系统可靠性设计，主要针对使用低温推进剂的运载火箭可靠性设计模型提出了新的方法。

下列人员在本书的创作过程中做出了重要贡献：第1章张亮；第2章张浩、胡峥；第3章张亮、姚娜、李会萍；第4章孙礼杰、张亮、嵩锐；第5章张浩、张荣荣、缪五兵、王振剑；第6章赵栋梁、程光平、金鑫；第7章刘锦凡、吴雪蛟；第8章石玉鹏、滕浩、臧辉、王文彬；第9章吕箴、张华、李军、李杨。

本书在编写过程中，得到了上海宇航系统工程研究所廖少英、顾仁年和上海交通大学王文教授等人的热心指导，成稿后得到了樊宏湍、洪刚、李程刚等的评阅，在此一并致谢。

由于作者水平、经验有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者  
2016年1月



## 符 号

- $a$ ——加速度,  $\text{m/s}^2$   
 $A$ ——面积,  $\text{m}^2$   
 $A_v$ ——气泡的横截面积,  $\text{m}^2$   
 $A_T$ ——管路或流体的截面积,  $\text{m}^2$   
 $B, C$ ——常系数  
 $c$ ——比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$   
 $C_0$ ——速度分布系数  
 $C_a$ ——蓄压器的柔性  
 $C_d$ ——流量系数  
 $C_D$ ——拖拽系数  
 $C_1$ ——气泡间距修正系数  
 $C_p$ ——泵的柔性  
 $c_p$ ——定压比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$   
 $c_v$ ——定容比热,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$   
 $d$ ——导管内径,  $\text{m}$   
 $D$ ——贮箱直径,  $\text{m}$ ; 管路直径,  $\text{m}$   
 $D_e$ ——水力直径,  $\text{m}$   
 $D^*$ ——无量纲直径  
 $E$ ——总能量,  $\text{J}$ ; 弹性模量,  $\text{Pa}$   
 $f$ ——摩擦系数  
 $F$ ——驱动力,  $\text{N}$ ; 压力,  $\text{N}$   
 $F_\gamma(2f+2, 2s)$ —— $F(2f+2, 2s)$  分布的  $\gamma$  分位数  
 $G$ ——单位面积质量流速,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 垫片载荷,  $\text{N}$   
 $g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$   
 $h$ ——比焓,  $\text{J}/\text{kg}$   
 $H$ ——高度,  $\text{m}$ ; 换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; 焓,  $\text{J}$   
 $j^*$ ——弹状流向环状流转变的主控准则数 (小直径管路)  
 $J$ ——热功当量; 流体的表观速度,  $\text{m/s}$   
 $k$ ——热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; 绝热指数; 安全系数  
 $K$ ——气泡上升速度系数; 系数; 密封圈刚度,  $\text{N}/\text{m}$   
 $K_B$ ——Bankoff 流动系数  
 $Ku$ ——弹状流向环状流转变的主控准则数 (大直径管路)  
 $L$ ——长度,  $\text{m}$   
 $L_a$ ——蓄压器的液感,  $\text{kg}/\text{m}^4$   
 $L_s$ ——气泡长度,  $\text{m}$   
 $M$ ——摩尔质量,  $\text{kg}/\text{mol}$ ; 动量,  $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$ ; 力矩,  $\text{N}$   
 $m$ ——质量,  $\text{kg}$ ; 分布指数  
 $n$ ——分布指数; 波纹数  
 $n_x$ ——过载系数  
 $P$ ——压力,  $\text{Pa}$   
 $Pr$ ——普朗特数  
 $Q$ ——热量,  $\text{J}$ ; 体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$   
 $q$ ——热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$   
 $r$ ——恢复系数; 半径,  $\text{m}$ ; 失效数  
 $R$ ——气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 半径,  $\text{m}$ ; 管路流阻系数  
 $R_a$ ——蓄压器的液阻,  $\text{kg}/(\text{m}^4 \cdot \text{s})$   
 $Re$ ——雷诺数

- $s$ ——拉普拉斯算子;标准差  
 $S$ ——滑速比  
 $S_F$ ——形状因子  
 $t$ ——时间,s;厚度,m  
 $T$ ——温度,K;推力,N;脉动干扰力,N  
 $u$ ——速度,m/s;比内能,J/kg  
 $u_\gamma$ ——标准正态分布的 $\gamma$ 分位数  
 $U$ ——相速度(矢量),m/s;内能,J  
 $v$ ——比体积,m<sup>3</sup>/kg  
 $V$ ——体积,m<sup>3</sup>  
 $V_a$ ——火箭速度,m/s  
 $W$ ——质量流量,kg/s;截面抗弯模量,m<sup>3</sup>  
 $\overline{W}$ ——螺栓总载荷,N  
 $x$ ——绝热指数;含气率  
 $\dot{x}_t$ ——贮箱底部纵向振动速度,m/s  
 $\ddot{x}_t$ ——贮箱底部纵向振动加速度,m/s<sup>2</sup>  
 $y$ ——气体的摩尔百分比;  
     离管道内壁面的距离,m  
 $Y$ ——气体的质量百分比  
 $z$ ——轴向坐标  
 $Z$ ——压缩因子  
 $\alpha$ ——换热系数,W/(m<sup>2</sup>·K);空泡份额;转  
     角,rad  
 $\alpha_{BS}$ ——泡状流—弹状流临界空泡份额  
 $\alpha_{SA}$ ——弹状流—环状流临界空泡份额  
 $\alpha_{AM}$ ——环状流—雾状流临界空泡份额  
 $\beta$ ——热膨胀系数,1/K 流动体积份额;编织  
     系数  
 $\gamma$ ——置信度;比热比  
 $\delta$ ——壁厚,m  
 $\eta$ ——等效任务数  
 $\theta$ ——角度,rad;故障平均间隔时间,s  
 $\lambda$ ——蒸发潜热,J/kg;导热系数,W/(m·  
     K);失效率  
 $\mu$ ——动力粘性系数,Pa·s  
 $\xi$ ——局部阻力系数  
 $\xi_a$ ——蓄压器的阻尼比  
 $\xi_n$ ——结构系统的模态阻尼比  
 $\rho$ ——密度,kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_{up}$ ——上行管内推进剂密度,kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_{down}$ ——下行管内推进剂密度,kg/m<sup>3</sup>  
 $\sigma$ ——表面张力,N/m  
 $\sigma_b$ ——材料拉伸强度极限最小值,Pa  
 $[\sigma]$ ——许用应力,N/m<sup>2</sup>  
 $\tau$ ——时间,s;切应力,N/m<sup>2</sup>  
 $\phi$ ——钢丝网套焊接系数  
 $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数  
 $\chi_\gamma^2(2Z)$ ——自由度为 $2Z$ 的 $\chi^2$ 分布的 $\gamma$ 分  
     位数  
 $\omega_a$ ——蓄压器的自振频率,Hz  
 $\omega_n$ ——结构系统的固有频率,Hz

#### 下标的含义:

- $0$ ——初始状态  
 $a$ ——空气或组分 a;环境  
 $b$ ——组分 b  
 $c$ ——冷凝或临界参数;流道中心;声速  
 $CHF$ ——临界热流密度  
 $DNB$ ——偏离泡核沸腾  
 $e$ ——入口参数;热力学平衡  
 $E$ ——夹带  
 $FDB$ ——充展沸腾  
 $g$ ——气体  
 $H$ ——均相  
 $i$ ——时间步长计数;初始状态

$j$ ——空间部分计数  
 $k$ ——比热比  
 $l$ ——液体  
 $m$ ——均值;混合相  
 $\max$ ——最大值  
 $\min$ ——最小值  
 $n$ ——气瓶气体  
 $o$ ——出口参数

ONB——泡核沸腾起始  
 $r$ ——对比  
 $s$ ——静态;表面;饱和  
sub——欠热  
 $t$ ——贮箱或全部  
 $v$ ——蒸气  
 $w$ ——贮箱壁;气瓶壁;管壁

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 增压输送系统 .....	1
1.3 增压系统概述 .....	3
1.3.1 自生增压系统 .....	5
1.3.2 惰性气体增压系统 .....	6
1.3.3 预增压系统 .....	8
1.4 输送系统概述 .....	8
1.4.1 输送系统 .....	9
1.4.2 防淤防塌装置 .....	10
1.5 增压输送系统试验 .....	11
1.6 液氧煤油火箭增压输送系统 .....	12
1.6.1 液氧煤油发动机概述 .....	12
1.6.2 液氧煤油火箭增压输送系统设计 .....	14
1.6.3 发动机预冷系统 .....	16
1.6.4 低温推进剂加注 .....	16
第 2 章 液氧自生增压系统 .....	19
2.1 引言 .....	19
2.2 自生增压方案概述 .....	19
2.2.1 国外火箭液氧自生增压方案 .....	19
2.2.2 国内液氧煤油高压补燃发动机增压方案 .....	21
2.3 自生增压系统组成 .....	21
2.4 自生增压系统设计 .....	22
2.4.1 系统设计 .....	22
2.4.2 氧系统自生增压模型 .....	24
2.5 液氧自生增压系统试验 .....	34
2.5.1 氧系统冷流试验 .....	35
2.5.2 动力系统热试车 .....	36

<b>第 3 章 氦气增压系统</b> .....	38
3.1 引言 .....	38
3.2 氦气增压 .....	38
3.2.1 常温氦增压方案 .....	38
3.2.2 冷氦增压方案 .....	39
3.2.3 超临界氦增压方案 .....	42
3.3 氦气增压系统设计 .....	45
3.3.1 “开式”氦气增压系统 .....	45
3.3.2 “闭式”氦气增压系统 .....	46
3.3.3 预增压系统及补压系统设计 .....	48
3.4 氦气增压计算 .....	48
3.4.1 气瓶放气过程计算 .....	48
3.4.2 增压气路计算 .....	50
3.4.3 输送管流阻计算 .....	54
3.4.4 发动机入口压力计算 .....	54
3.4.5 贮箱增压计算 .....	54
3.4.6 算例 .....	56
3.5 氦气增压系统试验与全系统冷流试验 .....	57
3.5.1 氦气增压系统试验 .....	57
3.5.2 全系统冷流试验 .....	57
<b>第 4 章 液氧煤油发动机预冷系统</b> .....	59
4.1 发动机预冷系统概述 .....	59
4.2 间歇泉现象 .....	60
4.2.1 间歇泉现象机理分析 .....	60
4.2.2 解决间歇泉问题的措施 .....	68
4.3 发动机预冷方案国内外发展概况 .....	73
4.3.1 排放预冷方案 .....	73
4.3.2 自然循环预冷方案 .....	75
4.3.3 强制循环预冷方案 .....	77
4.3.4 组合式预冷方案 .....	78
4.4 预冷系统仿真分析 .....	79
4.4.1 物理模型概述 .....	79
4.4.2 基本方程 .....	79
4.4.3 两相流动流型判别 .....	83
4.4.4 沸腾传热特征点的判别 .....	85
4.4.5 相间摩擦模型 .....	87

4.4.6	空泡份额 .....	88
4.5	预冷系统设计原则 .....	91
4.5.1	预冷方案的确定 .....	91
4.5.2	预冷系统布局设计 .....	92
4.5.3	回流管参数设计 .....	93
4.5.4	氦气引射系统设计 .....	94
4.5.5	强排时间的选择 .....	94
4.6	预冷案例分析 .....	94
4.6.1	地面循环预冷+空中引射循环 .....	95
4.6.2	地面循环预冷+空中排放预冷 .....	99
<b>第5章</b>	<b>增压输送系统总装设计 .....</b>	<b>103</b>
5.1	增压输送系统总装布局 .....	103
5.1.1	管路系统布局 .....	103
5.1.2	阀门附件布局 .....	105
5.2	增压输送系统安装 .....	105
5.2.1	管路安装 .....	105
5.2.2	阀门附件安装 .....	107
5.3	增压输送系统管路设计 .....	108
5.3.1	导管材料选用 .....	108
5.3.2	导管焊接要求 .....	110
5.3.3	小直径导管设计 .....	110
5.3.4	大直径导管设计 .....	111
5.3.5	导管强度校核与计算 .....	114
5.3.6	导管强度试验 .....	118
5.4	密封结构设计 .....	119
5.4.1	泄漏与密封 .....	119
5.4.2	影响密封的因素 .....	120
5.4.3	密封形式及选择 .....	120
5.4.4	法兰连接密封设计 .....	125
5.4.5	螺纹连接密封结构设计 .....	130
5.4.6	低温密封设计和使用准则 .....	131
5.4.7	密封结构安装要求 .....	131
5.4.8	密封结构检漏 .....	132
5.4.9	密封结构试验 .....	132
5.5	补偿器设计 .....	134
5.5.1	补偿器简介 .....	134

5.5.2	补偿器设计标准	135
5.5.3	补偿器的结构设计	136
5.5.4	补偿器强度校核	139
5.5.5	补偿器试验	141
5.5.6	补偿器制造技术	143
5.6	紧固件选用	143
5.6.1	紧固件选用一般要求	144
5.6.2	典型紧固件选用	144
5.6.3	低温下紧固件选用要求	145
5.7	绝热设计	146
5.8	防热设计	146
5.9	低温氧系统安全性	147
5.9.1	脱脂一般要求	147
5.9.2	管路及阀门附件脱脂要求	148
<b>第 6 章</b>	<b>增压输送系统仿真分析</b>	149
6.1	贮箱三维仿真分析	149
6.1.1	液氧贮箱物理模型	149
6.1.2	液氧贮箱数学模型	150
6.1.3	典型算例	152
6.2	全系统仿真分析	154
6.2.1	模块化建模	155
6.2.2	全系统建模及分析	160
<b>第 7 章</b>	<b>低温推进剂 POGO 抑制设计</b>	164
7.1	POGO 的起源	164
7.2	POGO 振动原理及抑制方法	164
7.2.1	POGO 振动原理	164
7.2.2	POGO 抑制方法	165
7.3	POGO 抑制设计一般方法	167
7.3.1	数学模型	167
7.3.2	频率窗口曲线	171
7.3.3	稳定性分析	171
7.3.4	蓄压器参数设计	177
7.3.5	POGO 试验	178
7.4	低温推进剂 POGO 抑制特点	182
7.4.1	数学模型	183
7.4.2	低温蓄压器设计	186

7.4.3 低温 POGO 试验 .....	189
<b>第 8 章 阀门设计、分析与试验 .....</b>	<b>192</b>
8.1 阀门基本设计原则 .....	192
8.1.1 密封性和漏率要求 .....	193
8.1.2 压降和流通能力 .....	193
8.1.3 环境和工作条件的适应性 .....	194
8.1.4 响应时间 .....	195
8.1.5 工作寿命和贮存期限 .....	195
8.1.6 工作可靠性 .....	195
8.1.7 维护使用性能 .....	196
8.1.8 尺寸、质量和成本 .....	196
8.2 阀门产品典型结构设计 .....	196
8.2.1 加注阀 .....	197
8.2.2 液氧排气阀 .....	199
8.2.3 安全阀 .....	200
8.2.4 气瓶充气阀 .....	201
8.2.5 电磁阀 .....	202
8.2.6 电爆阀 .....	203
8.2.7 减压阀 .....	204
8.2.8 压力信号器 .....	206
8.2.9 破裂膜片阀 .....	208
8.2.10 其他阀门及附件 .....	208
8.3 阀门产品仿真分析 .....	211
8.3.1 动态特性分析 .....	211
8.3.2 内部流场分析 .....	214
8.3.3 结构强度有限元分析 .....	216
8.3.4 弹性元件有限元分析 .....	218
8.3.5 冲击载荷有限元分析 .....	219
8.3.6 电磁铁仿真设计与分析 .....	222
8.4 阀门产品试验技术 .....	225
8.4.1 概述 .....	225
8.4.2 试验项目 .....	227
8.4.3 阀门产品试验与要求 .....	227
<b>第 9 章 增压输送系统可靠性设计 .....</b>	<b>239</b>
9.1 可靠性设计 .....	239
9.2 可靠性分析 .....	239



---

---

9.2.1 故障模式和影响分析 .....	240
9.2.2 故障树分析 .....	240
9.3 可靠性预计 .....	241
9.3.1 可靠性预计方法 .....	241
9.3.2 阀门产品可靠性预计示例 .....	242
9.4 可靠性试验 .....	244
9.5 可靠性评估 .....	244
9.5.1 单机级产品可靠性评估 .....	244
9.5.2 阀门单机可靠性评估示例 .....	247
9.5.3 系统级可靠性综合评估方法 .....	249
参考文献 .....	252