

Shuqi Ganxian Jieneng Gongyi Jishu

输气干线 节能工艺技术

苗承武 等编译



石油工业出版社

输气干线节能工艺技术

苗承武 等编译

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

输气干线节能工艺技术/苗承武等编译. —北京: 石油工业出版社, 2002.5

ISBN 7-5021-3648-7

I. 输…

II. 苗…

III. 油气运输: 管道运输-干线管道-节能-技术

IV. TE832.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 093946 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 7.625 印张 202 千字 印 1—1000

2002 年 5 月北京第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3648-7/TE·2683

定价: 20.00 元

引 言

天然气工业是俄罗斯燃料能源综合企业的重要组成部分。世界上对天然气的注意力逐年递增，这是因为：一方面，天然气是一种高效的、洁净的燃料；另一方面，天然气是宝贵的化工原料。目前天然气用量已占俄罗斯国内能源消耗的 30% 以上，并稳定上升，特别在石油产量下降时，更是这样。可以坚信，天然气成为全俄罗斯保证生活能源最主要的组成部分的时代就要来临。

俄天然气工业股份公司制定天然气工业发展规划的主要依据是：

1. 在全部规划期内，天然气一直是一种最重要的燃料，必须保证它在一次能源中最优先的增长，在近期内要用天然气来补偿石油和煤产量的递减。

2. 国内天然气用量将大大增长，预计在 2010 年将比 1998 年增加 20% ~ 30%，主要增长点将是农业和市政生活用气、发电和供热。

3. 随着天然气世界市场的扩大，俄罗斯在世界市场形成中将起巨大的作用。

4. 增加天然气的用量对影响环境的燃料能源工业的技术支持将起到越来越大的作用。

同时，天然气工业的特点是其资源基地主要集中在遥远的、有时是很难到达的地区，而气用户主要集中在中心、工业地区，这样就要求远程输气。

这就造成这样的结果：目前在俄罗斯运行着 14 万公里长输气管道，约有 250 座压气站，压气机组装机容量达 4000 万千瓦。

应该指出，约为全部管道的 30% 已经运营 25 年以上，其中

很多已经超过了机械运行寿命极限（33 年），要求改造。管道上装设的压气机组的情况也相似。约有 30% 机组已经运行超过机械寿命极限，达到有形和无形的老化程度，这样就为输气多费了燃料气。

在燃料短缺条件下，提高利用率和实行节能措施是非常必要的。在当前国家经济发展阶段，节能是解决企业面临各种问题中最现实和有效的措施。

因此，诸如保持资源、确定输气系统的最优工况，提高输气效率和降低损耗、降低输气工艺用气量等就成为天然气工业最重要和最迫切的任务。

为降低工艺气损耗，在输气中优先开展节能工艺方面的改造和采用现代化措施，就成为最重要的任务。

在压气站改造中，最重要的是选用高效输气机组，能最大限度利用排出气热量的涡轮轮气机组，开发和使用提高输气机组效率的技术诊断方法，确定必要维修的期限，将磨损的和老化的设备换成新的、高效率的设备。

本书在运营输气设备多年经验数据的基础上，分析现有成果，评价输气机组工作的效率，提出压气站改造和现代化，以及本阶段天然气输气节能工艺的主要方向。在所有的状况下，主要精力放在寻找提高天然气输量的潜力的方法，首先是用降低能耗、在输气系统运行和改造时提高装机容量的利用程度的方法。

在解决所提出的任务中，本书利用了输气工程的科研和设计单位的成果，也利用了俄罗斯国内各输气企业积累的运行经验。

编译前言

油气管道是石油天然气的运输纽带，是国家重要的基础设施。加强油气管道建设是加快石油天然气工业发展的重要内容，是保证我国国民经济持续稳定发展的重要措施。为了推动我国油气管道建设，提高我国油气管道技术水平和管理水平，在认真总结我国油气管道建设经验的基础上，积极学习国外的先进技术、成功的经验是至关重要的。

众所周知，俄罗斯联邦拥有世界上最丰富的石油天然气资源，是名符其实的石油天然气的生产大国。在俄罗斯联邦的一次能源结构中，天然气的生产和消费居世界第一位，石油居第二位。尤其是天然气的储量、产量、出口量和干线管道长度、天然气公司的规模均居世界首位。俄罗斯联邦油气管道很发达，天然气干线管道 30 多万公里，原油干线管道 10 余万公里。在油气管道设计、建设和管理等方面，都积累了丰富的经验。为了借鉴俄罗斯联邦的经验，我们编译了《输气干线节能工艺技术》一书，主要编译者有：苗承武、尹凯平、徐婷、王岳、岳小文、曹伟等。

在编译过程中，俄罗斯联邦莫斯科石油天然气大学车尔尼金教授等在收集技术出版物方面给予了大力协助，在此表示感谢。

由于我们水平有限，错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编译者

2001 年 7 月

目 录

1 输气干线运行特点和状况评价	(1)
1.1 天然气管道输送的特点	(1)
1.2 管道输气工艺和能耗指标的相互关系	(9)
1.3 压气站驱动机的状况	(21)
1.4 压气站的工作制度	(25)
2 发展天然气输送节能工艺的主要途径	(32)
2.1 天然气管线和压气站损失的主要原因	(32)
2.2 封闭容器运行中天然气漏失的确定	(39)
2.3 压气站耗气定额指标	(44)
3 天然气输送的节能措施	(50)
3.1 天然气管道电动驱动和涡轮驱动运行试验分析	(50)
3.2 天然气管道输送动力(用能)工艺任务的热力学保证	(51)
3.3 具有不同技术状况的天然气管道机组的最优化措施	(57)
3.4 在保持类似于压气站工作制度的条件下依靠缩减工作的输气机组数量降低动力(能耗)费用的经济性	(63)
3.5 在压气站利用各种单一功率机组的合理性论证	(68)
4 输气干线压气站动力驱动类型的比较和选择	(74)
4.1 输气管道电动和涡轮输气机组运行经验分析	(74)
4.2 压气站电动和涡轮增压机组比较的先决条件	(79)
4.3 电动和涡轮驱动技术—经济比较的方法和结果	

.....	(84)
4.4 电动和涡轮驱动在输气管道的联合应用.....	(90)
5 压气站燃气涡轮装置废气余热合理利用的基本方向.....	(96)
5.1 输气管道燃气涡轮装置废气有效利用途径 本质分析和前景评价.....	(96)
5.2 压气站燃气涡轮装置热能再生利用的可能性	(102)
5.3 燃气涡轮装置再生器工作优化措施	(113)
5.4 压气站燃气涡轮装置再生器的诊断	(116)
5.5 干线输气管道使用带再生器燃气涡轮装置的 合理性评价	(123)
5.6 在压气站利用蒸汽—燃气联合循环的可能性	(127)
5.7 输气机组工作特性对蒸汽—燃气装置工作效 率的影响	(133)
5.8 燃气涡轮装置废气余热各种利用方法的比较	(138)
6 压气站天然气冷却优化制度	(144)
6.1 实际气体沿管道的流动	(144)
6.2 压气站的天然气冷却系统	(146)
6.3 压气站空冷器工作制度最优化的理论与实验 研究	(154)
7 压气站动力利用系统的评价和最优化	(159)
7.1 压气站动力驱动的“标准”类型	(159)
7.2 燃气涡轮装置通流部分的热力学评价	(164)
7.3 输气干线燃气涡轮机组的事故诊断	(173)
7.4 压气站输气机组的利用指标	(177)
7.5 压气站设备的意向性评价	(183)
7.6 天然气管道输气机组的最佳服务期限	(192)
8 管道装置周围的环境保护	(205)

8.1	压气站运行时环境污染的主要原因	(205)
8.2	向空中排放的有害物质的形成条件	(207)
8.3	燃气涡轮装置由于燃烧物形成的污染物质 排放及其降低排放的方法	(214)
8.4	燃气涡轮装置余热再生和无再生运行工作制度 按氮氧化物排放标准进行的比较	(222)
8.5	压气站周围环境污染的控制系统	(229)
结束语		(231)

1 输气干线运行特点和状况评价

1.1 天然气管道输送的特点

截至 1997 年初，在俄罗斯天然气工业股份公司全国统一供气系统中，共有 14.5 万 km 干线和支线，其中管径为 1420mm 的有 4.82 万 km，共有 672 座压气车间，总装机容量为 4030 万 kW。

由于具备巨大的转接管道和备用功率、全系统的整体性，保证了可靠和高效地对市政生活、工业用户和热电站供气，并且向远近邻国出口天然气。

要了解国内整体输气工况、个别管线工况下的管道的特点，可以取在一定的时间内管道供气和压气站工况的实际数据来着手进行分析。俄天然气工业股份公司进行了在 1985~1995 年期间气管线工况分析，也进行了这一段时间的对乌连戈伊—车里雅宾斯克—彼得罗夫斯克—诺沃普斯科夫管线的分析。

在这一段时间内俄罗斯全部管线输气数据处理结果以及乌连戈伊—车里雅宾斯克—彼得罗夫斯克—诺沃普斯科夫管线输气数据处理结果见图 1.1 和图 1.2。

图 1.1 是在所研究时期内，每年不同月份的平均昼夜供气量变化图，它说明平均增长了 $100 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ ，这一时期的增长主要靠新气管线投产，同时也改善了输气能耗的单位指标，其中包括减低了输气用的燃料气消耗。

图 1.1 和图 1.2 表明，气管线工况的特点是一年中供气不均衡，而且对个别管道供气，其不均衡性加大，这就是乌连戈伊—车里雅宾斯克—彼得洛夫斯克—诺沃普斯科夫管线。

应该指出，在昼夜和星期供气中，也存在着不均衡性，可是

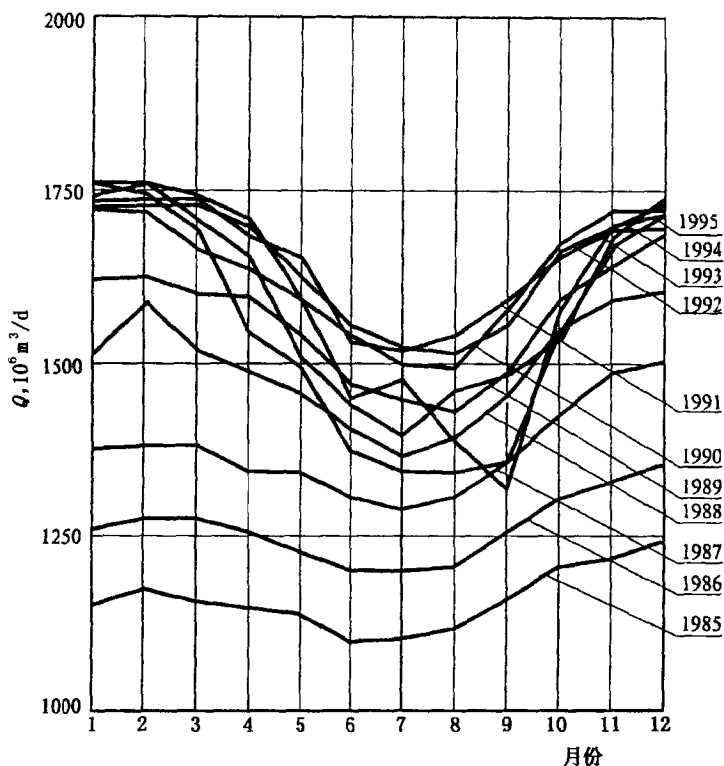


图 1.1 1985—1995 年期间俄罗斯全国管道
一年中按不同月份的平均昼夜供气量变化图

这种管线工作的不均衡性是能和季节不均衡性相比的。季节不均衡性不但对整个压气站的负荷，而且也对运行机组平均年度负荷产生着巨大的影响。

由于众所周知的原因，1990 年起停止了国内管道建设，而输气量也稳定了，并且还保留着原来的特点——冬季输量加大，夏季输量减少。

一年中管道输送气量的不均衡性可以用以下指标之一来表示：^[8,29]

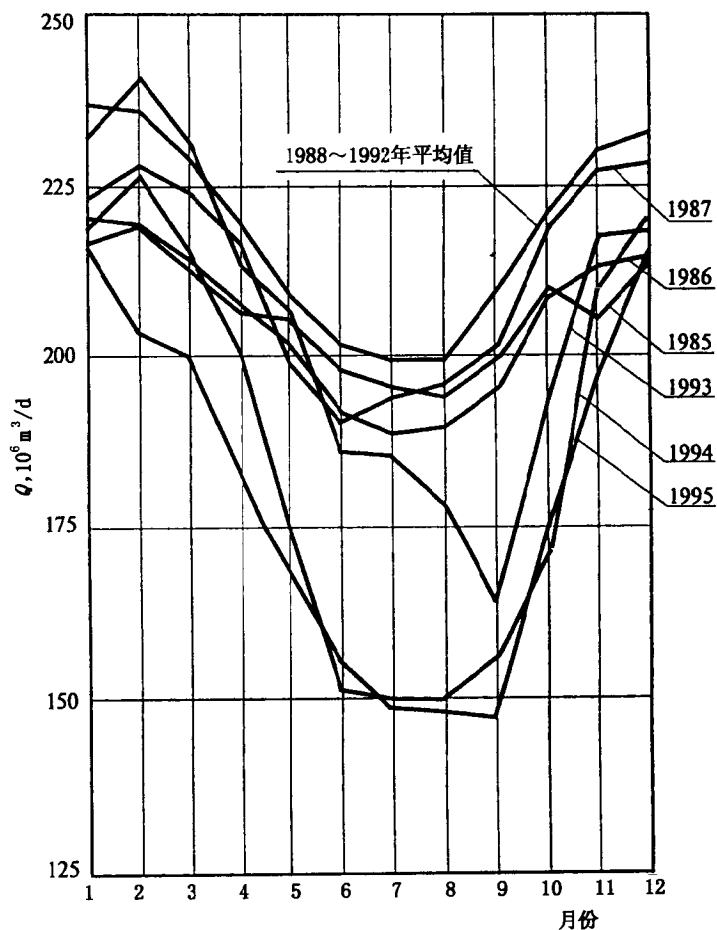


图 1.2 1985—1995 年期间乌连戈伊—车里雅宾斯克—彼得罗夫斯克—诺沃斯柯夫管线一年中按不同月份的平均昼夜供气量变化图

$$\beta = \frac{Q_{\max} - Q_m}{Q_m} = \frac{Q_l}{Q_m}; \quad \alpha = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}; \quad \gamma = \frac{Q_m}{Q_{\max}} \quad (1.1)$$

式中 $Q_{\max}$ ——在日历年剖面上月最大平均昼夜供气量；

Q_m ——全年平均昼夜供气量；

$Q_{\min}$ ——在日历年剖面上月最小平均昼夜供气量。

α, β, γ 的相互关系式如下：

$$\alpha = \frac{1+\beta}{1-\beta}; \quad \beta = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} = \frac{1-\gamma}{\gamma}; \quad \gamma = \frac{\alpha+1}{2\alpha} = \frac{1}{1+\beta} \quad (1.2)$$

相应地，可近似地用下式之一计算出管线在一年内供气量的变化：

$$Q = Q_m [1 + \beta \cos(\varphi - \varphi_0)] \quad (1.3)$$

$$Q = Q_m \left[1 + \frac{\alpha-1}{\alpha+1} \cos(\varphi - \varphi_0) \right] \quad (1.4)$$

$$Q = Q_m \left[1 + \frac{1-\gamma}{\gamma} \cos(\varphi - \varphi_0) \right] \quad (1.5)$$

$$\varphi = 2\pi t/T; \quad \varphi_0 = 2\pi t_0/T$$

式中 t ——从年初开始的昼夜数；

t_0 ——该年最大供气量开始时的时间 ($t = t_0$; $Q = Q_{\max}$)。

所引用指标 (β, α, γ) 数值对比表明，系数 β (图 1.3) 最明显地表示出一年内气管线工作的不均衡性。因此，最好是取方程式 (1.3) 来作为分析气管线工况的基本方程式。在这种情况下，系数 β 表示一年内供气变化的相对值 $\beta = Q_1/Q_m$ 。

俄天然气工业股份公司对不同管线工况的分析表明，气管线供气量变化相对幅度的数值 (β) 在 0.08~0.20 的范围内，虽然有缓冲用户和地下储气库的存在，目前仍还有上升的趋势。造成这种结果的原因有两个。

第一，5 至 10 年以前，很多热电站在冬季都使用固体或液体燃料，而在夏季用气低谷时用天然气作燃料。近几年来，由于众所周知的固体或液体燃料供应困难，热电站几乎全年使用天然气作燃料，这样就不能在全年中平衡用气的不均衡性。

第二，经常性的城、乡气化工作，特别是气化输气干线附近

的区域，使居民燃气量增加，这样也就扩大了一年内最大和最小供气量之间的差距。

扩大沿线的用气量以气化沿输气干线居民点、热电站全年使用天然气燃料、夏季缺乏足够的缓冲用户，造成离压气站越远的地方供气量越缺少，而且工况偏离优化的（计算的）工况越远。同时，随着沿管线供气量的改变，压气站上所有的参数也都改变了，这样就降低了输气的经济指标，以致首先造成了燃料气的过度消耗。

试验结果证实，在 1990~1992 年期间，俄气管线标称年平均负荷接近管线平均年输量条件下的压气站负荷，这表示输气系统工作整体上是相对稳定的。1992~1993 年之后，工作不均衡性显著地增加了（见图 1.3），这就导致了负荷不均衡和压气站装机容量利用不充分。

假定用来输气的功率与输量的三次方成正比（理论上应该是这样），则当前相对功率（相对于输送年平均气量的功率）应由下式确定：

$$\frac{N}{N_m} = \left(\frac{Q}{Q_m} \right)^3 = [1 + \beta \cos(\varphi - \varphi_0)]^3 \quad (1.6)$$

式中 N_m ——用于输送年平均气量（ Q_m ）的水力功率。

气管线平均水力功率和管线平均输量的水力功率之比值可以用下式表示^[8,29]：

$$\frac{N}{N_m} = \frac{1}{N_m} \int_0^1 N \frac{dt}{T} = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi=2\pi-\varphi_0} [1 + \beta \cos(\varphi - \varphi_0)]^3 d\varphi = 1 + 3/2\beta^2 \quad (1.7)$$

用上式可以很容易地确定气管线水力功率的波动变化，可以判断其负荷不足情况，也就是可以判断压气站负荷不足的情况。全俄管线整体上以及乌连戈伊—车里雅宾斯克—彼得罗夫斯克—诺沃普斯科夫管线负荷变化情况见图 1.4。

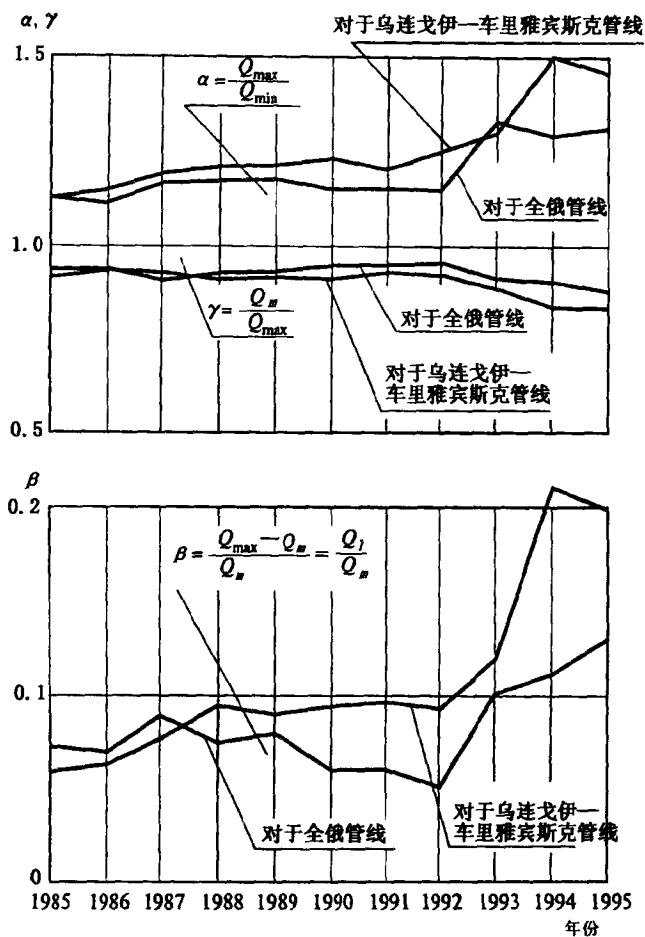


图 1.3 1985~1995 年期间俄罗斯乌连戈伊—车里雅宾斯克—彼得罗夫斯克—诺沃普斯科夫气管线工作不均衡性特点图

由图 1.1 和图 1.2 数据可以看出, 气管线的最大输量一般和用气地区最低外界空气温度相重合。

根据气候数据的分析可以确定, 季度外界空气温度变化的方程式与式 (1.3) 类同:

$$t_{\text{нр}} = t_{\text{ср}} - \Delta t C_{\text{напр}} \cos(2\pi t/T - \varphi_0) \quad (1.8)$$

式中 $t_{\text{нр}}$ ——外界空气温度当前值；

$t_{\text{ср}}$ ——外界空气的年平均瞬时温度；

$\Delta t_{\text{нр}}$ ——温度年变化幅度。

将式 (1.3) 除以 (1.8)，得到：

$$\begin{aligned} \frac{Q_i}{Q_m} &= 1 + \beta_Q \cos\left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi_0\right) = 1 - \beta_Q \frac{t_{\text{нр}} - t_{\text{ср}}}{\Delta t_{\text{нр}}} \\ &= 1 + \frac{\beta_Q}{\beta_t} \left(1 - \frac{t_{\text{нр}}}{t_{\text{ср}}}\right) = 1 + \beta_Q (1 - \alpha t_{\text{нр}}) \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\beta_Q = Q_1/Q_m; \beta_t = \Delta t_{\text{нр}}/t_{\text{ср}}; \alpha = 1/t_{\text{ср}} \quad (1.10)$$

系数 β_Q/β_t 和 α 的平均值见表 1.1。

表 1.1 一些输气管线的系数 β_Q/β_t 和 α 的平均值

输 气 管 线	β_Q/β_t	α
中亚—中央地区	0.025	0.18
布哈拉—乌拉尔	0.012	0.35
北高加索—中央地区	0.061	0.145
乌连戈伊—宝马雷—乌日高勒得	0.036	0.208
乌连戈伊—车里雅宾斯克	0.030	0.215

利用表 1.1 中的数据，可以近似地根据用气地区平均年外界空气温度的变化来估算输气管线的输量，并且在输气系统改造和确定天然气流向时注意这个问题。用此也可以确定输气所需用的功率，并且有根据地确定输气设备改造和现代化的次序。

现代发展管道输送技术的特点是大大缩减输送系统的新建工程量并利用现有系统输气。如上所述，首要的任务就是确保中央地区和工业地区足够的供气量，保持输气干线和输气机组处于良好的工况和节能。

管道输气量下降会导致很大一部分输气装机容量得不到利

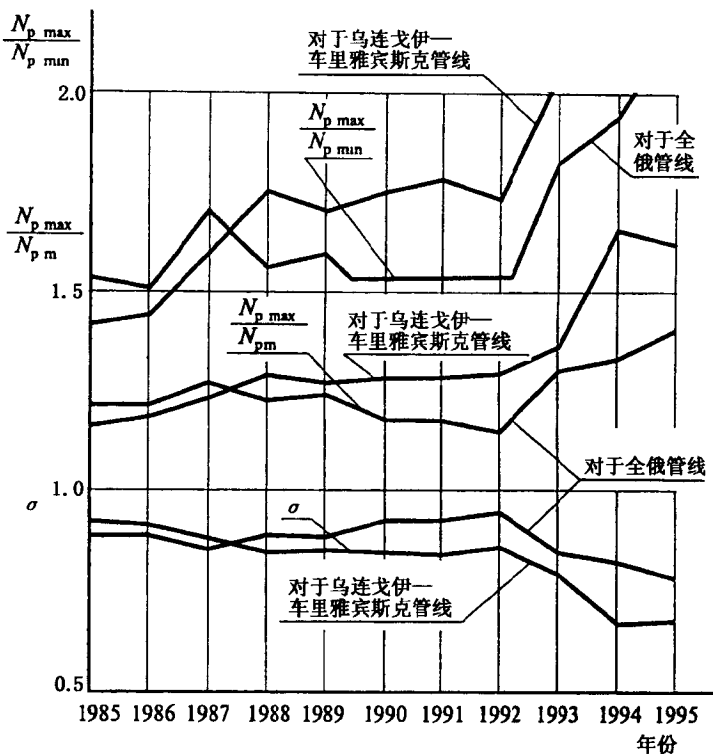


图 1.4 1985~1995 年期间整个全俄管线以及乌连戈伊—
车里雅宾斯克—彼得罗夫斯克—
诺沃普斯科夫管线负荷变化图

$\frac{N_{p \max}}{N_{p \min}}$ ——气管线最大和最小水力功率的比值；

$\frac{N_{p \max}}{N_{p m}}$ ——气管线最大和平均功率的比值；

σ ——压气机组负荷系数

用，压气站闲置。在输气企业走向市场，其利润直接与装机容量有效和充分的利用以及输气量等有关时，这种状况变成不合算了，因为从本质上来说它决定着企业的活力。