

文章编号: 1000-8241 (2011) 05-0321-06

天然气管道压缩机组及其在国内的应用与发展

徐铁军

(中国石油物资公司, 北京 100029)

徐铁军. 天然气管道压缩机组及其在国内的应用与发展. 油气储运, 2011, 30(5): 321-326.

摘要: 概述了天然气管道压缩机和驱动机的分类与选型, 比较了离心机和往复机、燃机驱动和电机驱动方式在管道应用中的优缺点和适用范围; 介绍了现阶段国内外管道压缩机和驱动机的技术发展现状与市场资源情况, 指出专业的长输管道离心压缩机的制造商以欧美国家为主。在此基础上, 回顾了国内天然气管道压缩机组的发展历史, 分析了其应用现状, 介绍了管道压缩机国产化方案, 探讨了在制造、运行和维护等方面需要重点关注的问题和发展趋势, 例如燃机大修本地化、多机组站场余热利用、优化压缩机组运行管理等, 对于下一阶段管道建设和运行中管道压缩机组的选型和使用有一定的借鉴意义。

关键词: 天然气管道; 压缩机组; 燃机驱动; 电机驱动; 国产化; 大修; 余热利用

中图分类号: TE974

文献标识码: A

随着经济的发展, 我国对油气能源的需求日益扩大。在过去的 10 年间, 我国油气管道建设呈现了跨越式发展, 敷设管道总里程从 2000 年不到 1×10^4 km 迅速增长至现在近 7×10^4 km, 且这种增长还在延续。随着天然气管道建设的快速发展, 作为核心设备的天然气管道压缩机组的保有量迅速增加, 对压缩机组的需求量也与日俱增, 了解管道压缩机组及其应用现状, 有助于管道建设中的机组选型和使用。

1 管道压缩机组的主要类型

1.1 分类与选型

压缩机种类繁多, 长输天然气管道压气站使用的压缩机, 虽只是压缩机家族中的一个小分支, 却是天然气管道输送最核心的设备。资料表明: 压气站的燃料和电力消耗占总运行费用的 70% 以上, 因此, 机组选型对降低能耗和输气成本尤其重要^[1]。

管道压缩机一般分为往复式和离心式两种, 需根据增压工况和安装地区的环境条件选择适用机型。往复式压缩机驱动方式包括燃气发动机和变频调速电机, 适用于工况不稳定、压力较高或超高、流量较小等场合。优点包括: 排出压力稳定, 能适应广泛的压力变化范围和超宽的流量调节范围; 热效率高; 压比较高,

适应性强。缺点包括: 结构复杂, 运动和易损部件多; 外型尺寸和重量大, 运转有振动且噪声大; 需要频繁维护、保养和更换。离心式压缩机的驱动方式包括变频调速电机直接驱动 / 增速齿轮箱, 定速电机+液力耦合装置 / 行星齿轮, 燃气轮机。其单机功率较大, 压比低, 适用于气量较大, 且气量波动幅度不大(变化范围 70%~120%) 的工况。优点包括: 无往复式运行部件, 振动小, 使用期限长、可靠, 运行管理和维护保养简单; 转速高、排量大, 平稳, 可直接与驱动级联动, 便于调节流量和节能。缺点包括: 压比低, 对输气量和压力波动适应范围小; 低输量下易发生喘振; 热效率低。

往复式压缩机更多地应用于气田内部、储气库管网以及口径较小的支线管道, 单机功率 2 500 kW 以上的往复式压缩机组在国外长输管道的使用较为罕见, 我国也仅在早期建成的少数管道中使用过。离心式压缩机更适于输气量大、工况相对稳定的场合, 按照目前国内外新建长输天然气管道的高压、大口径、大流量的发展趋势, 离心式压缩机将得到更广泛的使用^[2-3]。

1.2 燃气轮机驱动压缩机组

自 20 世纪 50 年代末, 燃气轮机成为中等至大功率范围天然气管道增压用途中最广泛的驱动机^[4]。

燃气轮机按用途可分为航空、舰船和工业用, 工业用主要是重型燃机和航空改型的轻型燃机。长输天然

气压缩机驱动燃机主要是航改型燃机和一部分中小功率的重型燃机,这些机组的结构介于航空发动机轻型和陆用固定式重型之间,既具有航空发动机经济性高、轻便灵活、体积小、启动快等优点,又具有重型结构可靠性高,寿命长的优点^[5]。

按转子数目划分,燃气轮机可分为单轴、双轴和多轴结构。不同轴系形式的燃机结构、性能和应用范围有所差异。单轴机组适合于恒速运行工况,多用于发电设备。双轴和多轴更适用于驱动变转速负荷机组或作为牵引动力,在管道增压应用中多采用此类燃机,其动力输出轴转速可变,可向压缩机提供一定范围内可调节的转速,以适应不同的工况。

由于燃机驱动压缩机使用所输的天然气作为燃料,不受管道所经过的各种外部环境的限制,因此得到了广泛应用,占有绝对优势^[6]。

1.3 电机驱动压缩机组

随着大功率变频器技术的逐渐成熟,以及天然气价格的上涨,在技术经济比选中,电机驱动逐渐占据优势。因其具有易维护、易远程控制以及对环境污染小的优点,在电力充足的地区,已开始采用大功率电动机驱动离心压缩机。与燃机驱动压缩机组相比,电机驱动压缩机组还具有效率高的优点。从发电厂通过电网传输电力到增压站机组电机输出,热效率约为44%,而单循环的航改型燃机驱动的最高效率为41%,实际平均效率为36%,考虑到燃机在部分负荷和空气温度较高时效率骤降,电机驱动综合可节能10%以上^[7]。电机驱动压缩机组的缺点是对外电要求较高,需要有足够的电能输入,并且需要配置调速电机进行流量调节。

为了提高压缩机效率,通常要求压缩机能够根据负荷情况进行调速运转。电机驱动压缩机组一般配以变频调速装置,以在额定功率、转矩、转速及转速调节范围等方面满足压缩机在所有运行工况下的要求,交流电动机因在电压、容量和转速等方面具有较大的选择范围而得到更多的应用。根据压缩机的转速调节范围,可以直接采用高速电机直接驱动或低速电机+变速齿轮箱两种联接方式^[8]。此外,也可用定速电机配以调速行星齿轮进行调速,调速行星齿轮驱动装置的运行基于功率分配原理,在很宽的速度范围内保持高效率,采用了流体动力学的运行方式,无磨损且可靠性

高,目前已在国内外多条输气管道中应用。

压缩机组的选用,需要考虑适用功率要求、周围环境以及经济评价等因素,对驱动方式、功率大小、备用方式等进行比选。

2 压缩机组技术发展现状

2.1 离心式压缩机

国内外离心压缩机的生产厂家很多,但是专业的长输管道离心压缩机的制造商仍然以欧美国家为主,主要有通用电气(GE)、罗尔斯·罗伊斯(RR)、曼透平(MAN TURBO)、德莱赛兰(DRESSER-RAND)、西门子(Siemens)、索拉(Solar)等^[9]。

近年来,国外离心压缩机制造业经历了不断的并购重组。2001年,MAN集团重组了GHH BOSIG和苏尔寿,形成了MAN TURBO公司,生产的压缩机广泛应用于各种工业领域,应用于管道增压的是RV系列离心式桶式压缩机,功率从3 MW到30 MW。

RR公司基于与库伯能源多年的合作,于1999年并购并成立RR能源系统公司,专注于天然气管道增压,可以生产最大功率从5.6 MW到56 MW的一系列离心压缩机,转子级数可达5级,最大设计进气压力为106 500 m³/h,最大工作压力为20.6 MPa。

GE公司以新比隆公司为核心,生产的管道压缩机已经有超过600台被应用,以PCL型号为主,最大设计进气流量为1×10⁶ m³/h,最大排气压力为13 MPa,转速范围为3 000~15 000 r/min,功率可达40 MW。

西门子公司于2001年收购德马格—德拉瓦(DEMAG DELEVAL)公司,继承了其管道压缩机业务,管道应用以STC-SV型单轴垂直剖分式离心压缩机为主,出口压力最高可达100 MPa,压缩机可被设计为多达4个工艺级,每个缸体最多10个叶轮。

传统的离心式压缩机均采用实心轴设计,而Solar离心压缩机采用模块式叶轮和通心轴方式,模块化转子组件包括短轴、叶轮和转子间隔器,通过中心螺栓组装在一起,这种源自燃气轮机的技术,适用于大流量、中低压比的管道,目前已有5 000多台Solar天然气压缩机被应用于天然气管道。

俄罗斯、乌克兰也有一些压缩机生产厂家,主要供

货给苏联独联体国家和伊朗等国家的输气管道。国内的压缩机生产厂家以沈阳鼓风机集团为代表,在管道压缩机的设计和制造方面刚刚起步,尚未批量生产。

2.2 燃气轮机

目前,燃气轮机沿着两条技术路线发展,一是以RR、普惠、GE为代表,利用航空发动机改型而形成轻型燃气轮机;二是以GE、西屋、Siemens、ABB公司为

代表,遵循传统的蒸汽轮机理念发展起来的重型燃气轮机,主要用于大型电站^[10]。

用于管道的燃气轮机主要有GE、RR的航改型燃机,以及Solar、Siemens等公司的中小型重型燃机。根据天然气管道的运行特点,所用燃气轮机的功率分为10 MW以下、15 MW、20~30 MW等几个等级,各有成熟的燃气轮机可供选择(表1)。

表1 应用于管道驱动的燃气轮机型号

功率等级 /MW	机组型号	生产厂家	ISO 功率 /kW	效率 %
< 10	金牛星(Taurus) 70	Solar	7 690	34.8
	(Mars) 90	Solar	9 690	33.24
10~20	Titan130	Solar	15 290	36.21
	UGT16000	乌克兰 ZORYA	16 300	31.0
	GTU-16P	俄罗斯 PERM	16 470	37.0
	Avon2656	RR	17 000	31.7
	SGT400	Siemens	13 408	36.2
20~30	Titan 250	Solar	22 370	40.0
	FT8	普惠	25 868	38.4
	RB211-6562	RR	29 530	37.9
	PGT25+SAC	GE 油气	31 372	41.1
	SGT700	Siemens	30 120	37.3
	UGT25000	乌克兰 ZORYA	26 700	39.2
	GTU-25P	俄罗斯 PERM	25 600	39.2

Solar以中小型燃机为主,功率为2~15 MW,产品系列最全,占据了该功率范围内的大部分市场^[11]。近年来,Solar推出Titan 250,进军20 MW以上量级市场。MAN Turbo公司也有部分燃机产品,如THM1304和TH1203,输出功率为5~12 MW。此外,MAN与普惠(Pratt & Whitney)合作的FT8-55燃机,与MAN的压缩机配套,亦在管道中有所应用。

在20~30 MW量级的燃机中,GE的PGT25+和RR的RB211是两款在管道中应用最为广泛、也最具竞争力的燃机。近年来,在该功率等级中,Siemens的SGT600和SGT700燃机在欧洲、中东等地区也有200多台被应用。

俄罗斯(含苏联)对工业燃机的研制和开发已有半个多世纪的历史,且大部分用于输油和输气管道动力驱动,主要有俄罗斯皮尔姆的GTU系列燃机和乌克兰ZORYA的UGT系列燃机^[12]。

国内的燃气轮机产业水平与国外差距较大。我国的航改型燃气轮机事业已有30多年的历史,但由于母型机技术较为落后,大大限制了改型后的燃气轮机的推广和使用,曾有过WJ6G1、WJ5G1、WP6G等燃气轮

机,并改型过Spey Mk202,主要应用于发电与舰船^[13]。近年来,我国引进乌克兰GT25000燃气轮机,由西航等企业进行国产化,主要用于舰船。另外,我国也采用目前国内最先进的航空发动机为母型机研制了QD70和QD128燃机,主要用于发电。

2.3 变频调速驱动装置

用于天然气管道压缩机驱动的变频调速驱动装置一般配套使用大功率同步电机,国外各大电气制造公司,例如Siemens、ABB、安萨尔多、Convertteam、GE及东芝三菱等均有相关制造经验;国内生产厂家,例如上电、哈电等自主设计、制造的大功率电动机功率可达10~16 MW,但转速多在2 000 r/min以下,与国外制造水平还有较大差距^[9]。

对于几十兆瓦级别的变频调速驱动系统使用的高压变频器,不像低压变频器一样具有成熟的一致性的主电路拓扑结构,也没有详细的规范和标准,国内外各变频器生产厂商限于功率器件的电压耐量和高压使用条件的矛盾,采用不同的功率器件和主电路拓扑结构,以适应不同的电压等级和驱动设备的要求^[14]。

20世纪90年代,我国开始自主研发生产高压变

频器,在技术方面与国际先进水平的差距不断缩小,尤其是2000年后,国内企业不断加大技术投入,取得了很大进步,但国内产品集中在200~2500 kW功率段,2500 kW及以上大功率产品基本被ABB、Siemens、东芝三菱(TMEIC)等跨国公司所垄断。

目前国外厂家的高压变频器都有各自不同的产品特点 and 设计思路,例如Siemens公司的罗宾康完美无谐波变频器采用输入多重化、输出多电平移相PWM控制技术,而Siemens公司的SIMOVERTS MV系列变频器和ABB公司的MEGA DRIVE-LCI变频器则属LCI(负载换流逆变器)电流源型变频器,TMEIC公司的TMdrive-XL变频器、Converteam公司的MV7000系列变频器及ABB公司的ACS6000变频器又属VSI电压源型变频器,在压气站均有较多应用。

3 国内应用现状

我国长输天然气管道发展较晚,管道压缩机组的应用始于20世纪80年代。1986年8月,第1座天然气长输管道压气站中沧线濮阳站建成,首次采用燃气轮机驱动离心压缩机组;1996年11月,第1台天然气发动机驱动往复机组在鄯乌线鄯善站投产;2000年11月,第1座变频调速电机通过增速齿轮箱驱动离心压缩机组在陕京管道应县压气站投产;2007年2月投产的西气东输蒲县压气站则是第1座采用高速变频调速电机驱动离心压缩机组的压气站^[15]。

近10年间,我国天然气长输管道发展迅猛,压气站的建设和投用达到了高峰,目前已经有近20条天然气管道设置有压气站并安装压缩机组(表2)。

表2 国内近年来主要长输油气管道压缩机组配置

管道名称	压气站数量	压缩机组配置	投产时间
中沧管道	1	2套燃驱离心机组	1990年
鄯乌管道	1	4套燃气发动机驱动往复机组	1996年
南海13-1至香港海底管道	1	2套燃驱离心机组	1995年
陕京一线	3	5套燃气发动机驱动往复机组,3套燃气轮机驱动离心机组,3套电机驱动离心机组	2000—2003年
陕京二线	4	13套电驱离心机组	2006年/2009年
陕京三线	2	3套燃驱机组,2套电驱机组	2011年
西气东输一线	22	46套燃驱机组,8套电驱机组	2005—2009年
西气东输二线西段	14	11座燃驱站,34套燃驱机组;3座电驱站,12套电驱机组	2010年燃驱投产
涩宁兰管道及其复线	4	12套燃驱机组	2005—2010年
川气东送管道	3	8套电驱机组	2010年
榆济管道	1	3套电驱机组	2010年
中亚管道	9	29套燃驱机组	2009—2011年

除表2所提及的管道外,长宁管道、冀宁管道、兰银管道、淮武管道、靖西管道等支干线和联络线也同样设置了一定数量的压气站,并配置了一定数量的中小功率压缩机组。

截止2010年底,国内(包括中亚管道)安装投产的长输天然气管道压缩机组达162台,总装机功率达 332×10^4 kW,其中燃气发动机驱动往复式压缩机19台,驱动机总功率为 2.5×10^4 kW,燃气轮机驱动压缩机组107台,驱动机总功率为 277×10^4 kW,电机驱动离心压缩机组36台,驱动机总功率为 53×10^4 kW(图1)。到2015年,我国安装天然气管道压缩机组预计超过350台,总装机功率超过 700×10^4 kW。

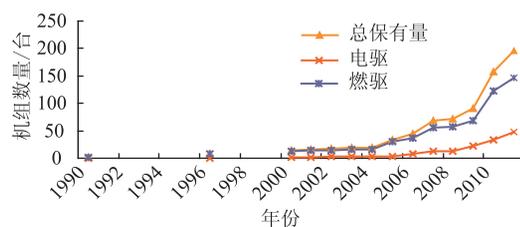


图1 国内天然气压缩机组保有量变化趋势

我国目前安装的管道压缩机组,有以下特点:

(1)大功率为主,小功率为辅。国内长输天然气管道主干线的建设呈现高压、大口径的发展趋势,压缩机组主要使用20 MW级的电驱压缩机组和30 MW级的燃驱压缩机组^[16],例如西气东输一线,陕京二线、三

线,西气东输二线等。较早建设或距离稍短的管道,以及支干线和联络线管道大多采用功率小于 10 MW 的压缩机组。

(2)燃驱为主,电驱比例逐渐增大。目前已安装的自然气管道压缩机组中,电机驱动约占 22%,燃气轮机驱动机组约占 66%。随着管道建设的进一步开展,燃气轮机驱动仍将是管道压缩机驱动的主要方式,但由于天然气价格的进一步提高,电驱机组将在经济比选中更显优势,新建管道中电驱机组的比例会更高,例如西气东输二线东段电驱机组站场约占 2/3,中缅天然气管道境内部分、川气东送管道全部使用电驱机组。

(3)机组备用为主。我国长输天然气管道尚未形成大范围管网,几条重要的干线管道气源单一、管输距离长、用户点多,为提高管道运行的可靠性,多采用机组备用方式^[17]。例如西气东输管道,设计之初部分采用隔站备用方式,但随着管道运行压力的增大,启动了安全改造工程,将 22 座站场全部改造为开二备一或开一备一的机组备用方式^[18]。正在新建的西气东输二线管道全部采用开二备一或开三备一的方式。

4 管道压缩机组在国内的发展

4.1 国产化方案

目前长输天然气管道使用的压缩机组基本从国外进口,不仅建设成本较高,而且后期运行维护和服务亦需依托国外制造商,不利于管道稳定、安全运行。因此,依托重要工程推进天然气长输管道关键设备国产化,对降低工程造价、保证国家能源供应安全,振兴装备制造业等具有重要意义。

在管道压缩机组的国产化进程中,以压缩机为代表,“单台试用,逐步扩大”的原则正在逐步实施。其中:第 1 步,“国外供货商设计、沈鼓制造”的压缩机已于 2009 年在西气东输定远站试用;第 2 步,沈鼓自主设计和制造的三套压缩机将于 2011 年在西气东输二线西段 3 座电驱站安装;第 3 步,由沈鼓成套的完全国产化电驱压气站,包括国产 20 MW 级高速变频直联电机驱动的压缩机组,将于 2013 年底投产,从而实现完整的电驱压缩机组的设计、制造、成套及安装的国产化。在电驱压缩机组的国产化过程中,同时进行大功率电

机和变频器的研制,其中高速变频直联电机将分别由哈尔滨电机厂和上海电气集团进行研制。

对于燃机国产化将依托于中船重工集团和中航工业集团,在消化吸收乌克兰 UGT25000 燃机技术的基础上,研制为管道压缩机配套的高速燃气轮机,计划将于未来 3 年内完成首台高速燃气轮机新产品的研制和工厂台架型式试验。

4.2 机组保养检修

压缩机组在累计运行达到一定时间后,需要进行常规保养检修或大修,其时间间隔、分级和内容随机组的不同而不同。对于燃驱压缩机组而言,燃机的保养检修尤为重要。燃机每隔约 4 000 h,就需要进行不同类型的计划性检测和维护,而一般燃机的大修时间为 25 000~30 000 h,燃气发生器需要从压缩机组中拆卸,送回工厂进行全面检查,并对热端部件进行清洗、维修甚至更换^[19]。

管道进入成熟运行期后,压缩机组的维护检修费用在管道总运行成本中占相当大比例;同时,将机组送到国外维修,运输时间长,修理周期难以保证。另外,对国外供应商的高度依赖,一定程度上影响了我国天然气输送的战略安全。因此,建设我国管道压缩机组特别是燃机的自主维修能力,对于维护我国天然气管道平稳安全运行、国民经济正常运转和广大居民的日常生活具有重要的战略意义。同时,引进国外燃机先进技术后充分吸收利用,可提升和促进燃气轮机维修技术创新,带动国内相关产业的发展。

中国石油针对目前燃机型号和保有量现状,提出燃机大修本地化的战略目标,已经分别与 GE 和 RR 公司就 PGT25+ 和 RB211 两款保有量最多的燃机达成大修技术转让协议,预计将于 2012 年建成管道压缩机组维检修工厂,逐步具备两款燃机的拆解、清洗、装配、试车以及部分零部件的维修能力。

4.3 多机组站场余热利用

我国天然气管道干线建设,将出现较多两机组或三机组站场,而部分管道并站建设的情况,可能出现一定数量的压气站同时保有 4~5 台乃至更多的燃机机组。为提高压气站的经济性,可在燃气轮机的基础上采用蒸汽-燃气联合循环的机组,用燃机的排气在余热锅炉中产生蒸汽后带动汽轮机发电、供热,或者驱动

另外一台压缩机,提高总体经济性;可将余热锅炉内的蒸汽用于高温燃气叶片的冷却及喷入燃烧室,改善燃烧状态,降低有害排放量,提高机组功率和经济性^[20]。

采用燃气轮机回热联合循环系统可以收到很好的节能效果,例如阿一意输气管道对 Messina 压气站的燃气轮机进行改造,采用回热联合循环系统后,每台燃气轮机的综合热效率由 36.5% 上升到 47.5%^[3]。在西气东输二线项目中,已经要求燃驱机组供应商在排气系统中预留出余热利用的接口,以便在条件成熟时配置余热利用系统,提高整个站场的工作效率。

4.4 优化压缩机组运行管理

国内长输天然气管道运行的时间并不长,对于大功率压缩机组,尚无可以借鉴的运行和维护管理经验,只有不断分析和总结,消化、吸收国外先进技术,才能探索出适合我国实情的压缩机组管理模式^[21]。

建立合适的压缩机组运行、维护及保养体制,培养高素质的压缩机组维护管理人员,建立强有力的维护管理队伍,科学地维护和管理压缩机组。加强备品备件的采购和管理,分析实际运行备件的消耗情况,统筹优化备件的存放和使用,确保备品备件的及时供给,以提高压缩机组的可用率和可靠性,确保压缩机组安全稳定运行;加强与世界知名压缩机和燃气轮机技术服务公司的沟通,引进先进的技术,建立压缩机组专家诊断系统和设备性能监测系统,对压缩机组的现场运行情况实时监测和维修;加强联网运行下压缩机组优化运行的研究,组网运行的管道在统一调控下可根据不同情况,通过进行网内优化运行,提高整个管道系统的运行可靠性和效率。在优化运行方案和预案的制订过程中,管网内各压气站机组的工作方式将是优化运行的重要内容。

参考文献:

- [1] 王志昌. 输气管道工程[M]. 北京:石油工业出版社,2004:141-143.
- [2] 闫光灿. 世界长输天然气管道综述[J]. 天然气与石油,2000,18(3):10-20.
- [3] 刘雯,邹晓波. 国外天然气管道输送技术发展现状[J]. 石油工程建设,2005,31(6):20-23.
- [4] 戴家齐. 高压输气管道压气站燃压机组的选型与配置[J]. 石油规划设计,2004,15(1):13-16.

- [5] 李孝堂,侯凌云. 现代燃气轮机技术[M]. 北京:航空工业出版社,2006:1-4.
- [6] 陈仁. 论燃气轮机在天然气输气管道上的选用和配套[J]. 热能动力工程,2001,16(1):26-29.
- [7] 卢鹏飞. 天然气管道离心压缩机组—各种驱动机选择[J]. 天然气与石油,2009,27(4):1-4.
- [8] 刘培军. 天然气管道压缩机组投产试运应注意的问题[J]. 油气储运,2008,27(7):51-53.
- [9] 燕冰川,税碧垣. 国内外天然气管道压缩机组发展现状[J]. 通用机械,2009(11):16-19.
- [10] 崔平,林汝谋. 世界燃气轮机市场厂商与产品性能[J]. 燃气轮机技术,2004,17(2):16-23.
- [11] 沈珏新,王功礼. 天然气长输管道设计中压缩机与驱动级选型[J]. 油气储运,1997,16(1):25-31.
- [12] 吴铭岚. 俄罗斯的燃气轮机状况[J]. 燃气轮机技术,2001,14(4):1-11.
- [13] 施磊,李孝堂. 中国航改燃气轮机的现状及发展[J]. 航空发动机,2004,30(2):54-58.
- [14] 林森,曾锦韬. 天然气管道行业中大功率变频驱动系统的应用[J]. 中国高新技术企业,2009(21):1-63.
- [15] 刘建臣. 天然气管道压气站的技术现状及发展[J]. 油气储运,2008,27(8):49-53.
- [16] 孙启敬. 燃气轮机压缩机组在西气东输管道上的应用[J]. 燃气轮机技术,2006,19(1):30-32.
- [17] 陈仁贵. 输气管道压气站装机功率及备用系数的选择[J]. 石油规划设计,2000,11(6):1-8.
- [18] 林泊成,周学深. 西气东输管道增输压气站设置[J]. 石油工程建设,2007,33(6):16-19.
- [19] 黄志潜. 燃气轮机压缩机组在北美输气管道上的应用[M]//黄志潜文集(1). 西安:陕西科学技术出版社,2006:250-258.
- [20] 戴云飞,王震华. 联合循环在输气增压站中应用的研究[J]. 燃气轮机技术,2002,15(3):1-4.
- [21] 郭刚. 西气东输天然气压缩机组的维护管理探讨[J]. 燃气轮机技术,2007,20(3):57-61.

(收稿日期:2010-09-07)

作者简介:徐铁军,高级工程师,1976年生,2004年博士毕业于清华大学精密仪器与机械学专业,现主要从事石油机电设备的采购管理工作。

电话:010-62065890; Email: xutiejun@cnpcc.com.cn