

GTF发动机技术性能和应用前景分析

Analysis on Technical Performance and Application Prospect of GTF Engine

中航工业燃气涡轮研究院 黄春峰 姚艳玲 蒋明夫



黄春峰

研究员,现从事航空发动机情报和翻译工作,研究方向为国外发动机预研、试验与制造技术跟踪研究。曾主持国防科工局和先进航空发动机技术计划情报研究项目。在核心期刊发表论文100多篇,出版《航空发动机技术创新与发展》系列情报研究文集12部。

军民用发动机是现代工业革命的结晶,由于需要长时间、反复在高温、高压和高转速条件下工作,其研制难度和对工业基础技术的要求远高于其他平台的发动机,往往研制一台发动机所需要的时间和资源要远高于研制一型飞机。航空发动

从世界民用航空动力发展趋势看,GTF发动机与其他正在发慌中的的技术相比,成熟度高,具有较大的优势,是未来最具潜力的发展方向,并呈现出巨大的市场应用前景。

机三大巨头的通用电气(GE)、普惠(P&W)、英国罗·罗(Rolls-Royce)正致力于先进的涡轮风扇发动机、齿轮传动风扇发动机(Geared Turbofan Engine, GTF)和开式转子发动机(Open Rotor Engine)的研发,将为下一代民用飞机提供更安静、更绿色环保的动力装置。进入21世纪,大型客机发动机市场呈现出行业集中度加快、三足鼎立、寡头垄断严峻、市场竞争加剧的新趋势。美国普惠公司面对强大的竞争压力,积极探索研究民用航空动力新技术,主动推出GTF发动机技术,期待在酝酿中的新一代单通道客机市场竞争中向CFM国际公司(CFMI)的统治地位挑战,并希望成为低推力级别强有力的竞争者,抢占窄体客机发动机市场的制高点。

2008年7月范堡罗航展期间,普惠公司将GTF命名为“洁净动力PW1000G(PurePower 1000G™)”,涵盖了推力级别为66.7~133.5kN的新

型齿轮传动风扇发动机。2010《时代周刊》年度50大最佳发明揭晓,多项航空科技成果入选,其中包括PW1000G齿轮传动风扇发动机、波音787客机、太阳能飞机,足见GTF发动机在航空科技发展历程中的重要地位^[1]。

GTF发动机是普惠公司为赢回正在逐渐失去的民用发动机市场而研发的大推力高涵道比涡扇发动机,被誉为是“先进的洁净动力(PurePower)”,将给下一代民用飞机的环保、性能和运营成本建立新的标准。普惠公司为GTF设定的目标是,与目前发动机(如V2500或CFM56)相比,维修成本降低40%,噪声水平比ICAO第4章低约15dB,排放比CAEP II限制低多达70%^[2-3]。从世界民用航空动力发展趋势看,GTF发动机与其他正在发展中的技术相比,成熟度高,具有较大的优势,是未来最具潜力的发展方向,并呈现出巨大

的市场应用前景。

齿轮传动风扇发动机的 技术性能特点

GTF 发动机(图 1)相对于传统的双转子涡轮风扇发动机,核心机没有根本变化,仅仅是增加了一个减速箱(图 2)。在双转子涡轮发动机的风扇和低压压气机之间引入减速齿轮箱,目的是使低压转子在效率较高的转速下工作,以匹配高压转子的最佳转速;同时,让风扇在气动损失和噪声都较小的较低转速下工作,从而通过增大发动机涵道比,实现发动机更加节能、减排、降噪和环保的优化设计目标。

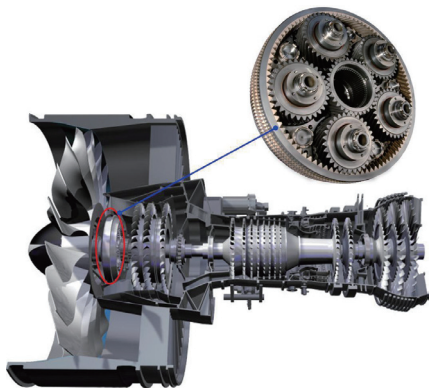


图1 齿轮传动风扇发动机 (GTF)

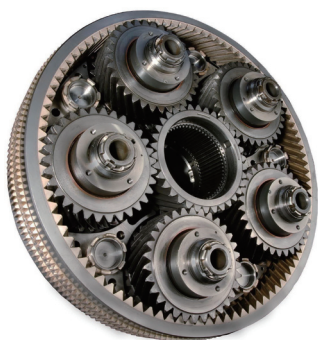


图2 GTF发动机行星齿轮减速箱

为了降低洁净动力 PW1000G 系列发动机的研发成本和风险,GTF 发动机项目采取合作研发的模式。研发战略团队的重要合作伙伴主要由普惠、MTU、Avio、Volvo Aero 航空公司和 Goodrich 公司组成。GTF 核心机源自 PW6000 涡扇发动机。普惠

公司负责高速低压压气机研制; Avio 公司负责风扇传动齿轮系统的研制; MTU 公司负责高速低压涡轮的研制; Volvo Aero 公司负责涡轮排气机匣的研制; Goodrich 公司负责流线型(细长型)引擎舱的研制等^[4-5]。GTF 发动机概念集成的先进技术与系统效益,技术关键在于低压转子部件。高压转子部件与先进双转子直接传动风扇发动机的高压部件几乎一样,主要由 1 级风扇、传动风扇减速器、3 级低压压气机、8 级高压压气机、采用 TALON 技术的环形燃烧室和 2 级高压涡轮及 3 级低压涡轮组成。相对于传统涡扇发动机,GTF 发动机呈现出了一些新结构特点值得关注和分^[6]。

行星齿轮结构如图 3 所示,右边是直接连接低压涡轮(LPT)的 3 级低压压气机(LPC)。中间是采用行星齿轮的减速齿轮系统,减速齿轮系统中间采用太阳齿轮传动的是低压涡轮(LPT)的动力,利用太阳齿轮周围的行星齿轮(5 个)减速后再传动到外侧齿轮,外侧齿轮与风扇相连^[7]。

普惠公司的富油-快冷速混-贫油(RQL)TALON 燃烧室采用先进的燃油/空气喷嘴和混合器,金属衬壁(浮壁),以及先进的冷却控制,使得发动机在起飞、高海拔巡航和着陆时都具有更低的氮氧化物排放^[8]。

高压压气机具有结构紧凑的特点,采用了整体叶盘与悬臂式的静子叶片结构。高压涡轮应用了先进的气体动力学、先进的冷却控制和密封技术。

普惠公司正在研究轻型材料风扇叶片和复合材料风扇叶片,新型风扇叶片将会被用在生产型齿轮传动风扇发动机上。此外,研发的新型热防护涂料,可以显著提高发动机的耐久性和在役飞行时间。

在齿轮传动风扇发动机中,普惠公司的合作伙伴也应用了不少先进技术,如负责生产低压涡轮的 MTU

公司就采用了欧洲“环境友好发动机部件有效性”技术验证研究项目的技术,因而使低压涡轮仅有 3 级,而输出功率相似的 V2500 发动机为 5 级。其设计特点包括:切剪过的叶冠,质量较轻的钛铝叶片,并增加叶根到叶尖之间的截面积,从而进行了减根设计^[9]。

PW1000G 系列发动机 发展历程

普惠公司在研究 GTF 实践过程中,在发展用于传动风扇的减速装置时,充分利用了西科斯基研制直升机主减速器和普惠加发展多型齿轮风扇传动发动机及涡轮轴发动机减速器,以及实施先进涵道桨扇发动机(ADP)技术、P&W 公司先进技术整体风扇(ATFI)验证机技术计划和欧洲 CLEFI 技术计划的经验和技^[10]术,跨越了 PW8000 和 PW800 发动机的技术发展台阶,迄今花费近 20 年时间、投入 10 多亿美元,取得重要进展^[10]。

早在 2005 年,普惠公司及其合作伙伴开始为下一代支线喷气飞机和单通道飞机的新型齿轮传动风扇发动机进行技术台架试验,当时新型齿轮传动风扇发动机被改称为 GTF 发动机。

GTF 是普惠公司为下一代商用飞机提供动力装置的整体技术成熟计划的组成部分。普惠公司正积极在全球 15 个试验台上对齿轮传动风扇发动机关键部件进行试验,已完成多达 1200 项的测量内容。该型发动机将为环保和发动机工作性能建立新的标准。

2008 年启动生产型洁净动力

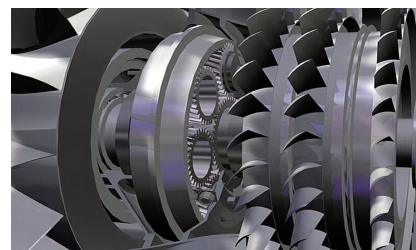


图3 GTF发动机结构局部图

PW1000G 系列发动机项目,将用于 MRJ 的发动机命名为 PW1214G (推力为 64.8kN 级),将用于庞巴迪 C 系列的发动机命名为 PW1524G (推力为 106.4kN 级)。截至 2011 年 6 月,该型发动机已获得 1200 多台的订单。

PW1000G 系列发动机试验进程加快, GTF 样机飞行试验已经提上日程,正在进行高密度的技术验证试验(图 4)。从 2007~2009 年,全尺寸 GTF 发动机验证机已完成 406h 的地面台架试验、120h 的空中飞行试验(在普惠的波音 747SP 飞行平台上进行了 12 次 45h 试车,在空客的 A-340-600 飞行平台上进行了 27 次 75h 试车),同时还进行了风扇传动系统和热管理系统的测试、减速器耐久性试验等。2010 年, PW1524G 齿轮传动涡扇发动机完成慢车、最大功率运转计划在 2012 年首飞,并将于 2013 年在庞巴迪公司的 C 系列客机 CS100 上使用^[10]。



图4 406h地面试车

普惠公司在 2011 年 4 月底首次把 S/N002 涡扇发动机原型机与 Goodrich 公司研制的发动机短舱相连接,对 PW1524G 发动机短舱可调喷管的工作特性进行测试。

GTF 发动机的应用与市场发展潜力

鉴于其技术性能特点和性能优势,齿轮传动风扇发动机概念的推出引起了极大的关注。GTF 发动机不仅可以应用于不同的飞机尺寸(商务机、单通道、宽机身)和任务(支线、

中程、远程),还具有发展成为军用航空动力的潜力。

1 航空公司和航空动力业界反应热烈

由于齿轮系统和全新核心机的完美组合, GTF 发动机将成为下一代支线 and 单通道商用飞机的动力,相对于现役的民用发动机, GTF 发动机油耗降低 15%,维护成本降低 20%,噪音降低 75%,污染物排放降低 50%,同时拥有世界级的可靠性。

自 2008 年范保罗航展期间正式将 GTF 发动机命名为 PurePower PW1000G——洁净动力 PW1000G 型发动机。在此后不到 2 年的时间中, GTF 发动机已经发展成为一个由 3 种型号组成的新兴家族(图 5)。

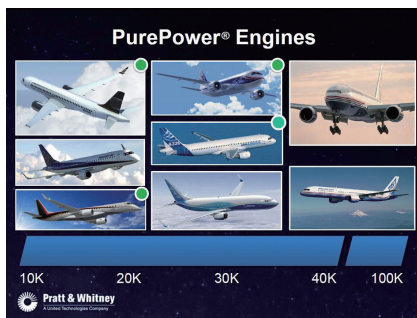


图5 PW1000G系列发动机应用图谱

“洁净动力 PW1000G 发动机可以令每架飞机每年节省 150 万美元。”普惠公司商用发动机及全球服务业开发及市场高级副总裁罗伯特·基迪 2010 年 10 月表示,该发动机已被确定为加拿大庞巴迪 C 系列飞机和日本三菱 MRJ 支线喷气飞机的唯一发动机。同时,鉴于 PD-14 发动机仍处于零部件试验验证阶段,俄罗斯伊尔库特首架 MC-21 飞机也将选装 PW1000G 系列齿轮风扇发动机,在俄罗斯“2020 年远景民航技术发展规划”中独领风骚^[11-12]。

普惠公司设想“洁净动力”家族的 GTF 系列发动机推力范围为 66.7~133.5 kN,是基于 2 种型号的核心机。其中,用于三菱支线喷气飞机 MRJ 的 PW1214G 发动机推力为 66.7~75.7kN,采用的是全新的核心

机,2014 年将投入使用;庞巴迪 C 系列飞机的 PW1524G 发动机推力在 93.5~106.8kN,因此需要一个更大的核心机,将在 2013 年投入使用;伊尔库特(Irkut)MC-21 的 PW1400G 发动机推力在 101.2~142.4kN,2016 年投入使用^[13]。

目前 PW1000G 发动机不仅可以传动低端支线飞机和单通道干线飞机,推力为 44.5~182kN,还可以装备空客和波音公司的下一代高端单通道客机。

2010 年空客公司作出决定将采用普惠 GTF 配套 A320NEO 来应对庞巴迪 C 系列所形成的威胁。

2011 年汉莎公司选择了 PW1100G 发动机来配套新购买的 30 架空客 A320 客机。3 月 16 日,汉莎公司董事会批准了此项订单。汉莎公司与普惠公司达成协议,为新机组购买的 60 台 PW1100G 发动机自 2016 年起开始交付。

现在人们乘机出行时更加关注旅行的舒适度,因此航空公司对研制一款新型轻量化双通道窄体客机的需求日益增加。鉴于此, PW1000G 发动机仍有很大的技术发展潜力(推力增大到 182kN,170~220 座级,座位数与 A320 和 A321 飞机类似),以满足未来双通道飞机的需求。普惠还同波音、空客密切接触,希望 PW1000G 能在 A320、B737 系列飞机新发动机和未来其他型号飞机的研制工作中发挥作用。普惠期待 GTF 发动机技术将被嵌入包括为新型宽体飞机研制的发动机在内的所有普惠发展的新的大型发动机^[14]。

目前一半以上的世界商用航空机队都在使用普惠的发动机。GTF 发动机取得的成就正是基于普惠公司在航空发动机、燃气轮机和航天推进系统的设计、制造和支援方面的不懈努力,致力于开发和更好的耐热涂层,更加环保的工艺,新的创造性维修程序,更有效的涡轮叶片,更

安静、燃油效率更高的发动机。

PW1000G 正在进行详细设计, 计划于 2013 年下半年投入使用。据预测在 GTF 的全寿命周期里大约能卖出 4000 台 44.5kN 推力级、1500 台 66.75~75.65kN 推力级和 3000 台 103kN 推力级发动机, 总价值大约为 120 亿美元。截止到 2011 年 6 月, 普惠公司 PW1000G 发动机订单量达到 1200 多台。普惠有信心下一代的发动机将会继续沿用 GTF 技术, 期待所拥有的核心机技术应用到大推力发动机上^[15-16]。

2 积极寻求可能的宽体客机应用

普惠公司透露某飞机制造商已经与其接触来共同检验 PW1000G 齿轮风扇的宽体应用。普惠下一代产品系列的副总裁 Bob Saia 称已经有一不愿透露姓名的制造商与普惠的发动机制造商进行接洽, 开始 GTF 发动机在宽体应用上的研究。

Saia 指出该发动机将是推力范围为 265~445kN 内的 PW4000 替代品, 其针对的飞机是 250 座级以上的机型。Saia 强调了新面世的 PW1000G 系列发动机的增长潜能。齿轮箱的应用优化了大直径风扇和发动机核心体的工作, 使得燃油效率最大化而噪声却极大地降低。潜在的应用包括在 B777 系列或空客 A330 上的更新或完全替换。目前都为 B777 和 A330 飞机提供了 PW4000 发动机。在 A330 替换或更新上采用齿轮传动风扇将填补空客产品线在 A321 和 A350-800 中 185~270 座级间的空缺^[17]。

观察人士意识到了配装 CFM 国际公司 CFM56-5 的 A340-300 欲将重新安装发动机, 这也许是另一个潜在的宽体应用。此处可以采用的发动机是推力为 136.5kN 的 GTF^[18]。

空客公司正在设计 A350 XWB 飞机, 预计于 2013 年投入使用, A350-1000 可能会迫使波音更新 B777 或设计一种全新的飞机。Saia

坚信称: 普惠为宽体飞机开发的任何一种新发动机都将以 GTF 技术为特征。

3 GTF 将面向军用航空动力领域

3.1 PW9000 发动机的研发背景和进展

GTF 发动机技术有希望成为下一代民用发动机的主要发展方向之一。因其有独特的优异性能, 在支线飞机和单通道干线飞机发动机, 乃至大推力发动机上, 有着巨大的市场应用发展前景。

同时, 普惠公司充满信心地展望 GTF 发动机技术也将面向军用航空动力领域。因为下一代轰炸机、第六代战斗机、战术运输机和侦察机的新需求都在不断涌现, 迫切需要结构更优、进气流量更大的新型发动机, 从而实现耗油率的极大改善。

GE 和罗·罗公司正在研制被称为“Ad-Heete”的发动机, 该发动机拥有可变循环核心机, 超高压比的燃烧室, 在亚音速和超音速下均有超高的效率。

据英国《飞行国际》2010 年 9 月 16 日报道, 美国普惠公司确认其存在一种针对 Advent 和 HEETE 2 项计划要求所开发的, 用于下一代军用飞机的先进新型发动机——PW9000 计划^[19-20]。

2011 年 9 月 15 日在马里兰州举办的一次空军联合大会上, 普惠军用发动机总裁 William Boley 表示: “PW9000 是很真实的。PW9000 是 GTF 核心机即高压转子与 F135 战斗机发动机低压转子的完美组合, 具有 F135 发动机的隐身特性, 同时也应用了商用发动机使用的先进齿轮传动风扇技术, 达到很高的燃油经济性, 使得该产品更接近于实际。该混合发动机能够产生 44.5~134kN 的推力, 意味着它能够用于多种其他新型飞机^[21]。”

针对 PW9000 发动机的用途, 普惠计划将其用于更广泛的范围, 既可以发展成为无人轰炸机用发动

机, 也可以为第六代战斗机提供动力。如 123kN 推力级的 PW9000 发动机能够满足战斗机市场需求, 可作为 F-15/F-16 战斗机的 F100 系列发动机换发的考虑对象, 新的发动机将比 F100 系列发动机燃油经济性提高 18%; 110kN 推力级别型号能够用于美国空军重启的轰炸机计划动力; 较小的 44.5kN 级别型号能够提供给美国海军, 用于无人舰载侦察攻击机(UCLASS)动力。此外, 有消息称普惠公司先进发动机项目部表示, 研制中的 PW9000 拟用于美国空军的 MQ-X 无人机系统, 或者用于诺斯鲁普·格鲁曼公司的 RQ-4 “全球鹰”换发。目前, 波音公司已参与 PW9000 发动机研制工作^[22-23]。

美国海军正在寻找一种在未来替换 F/A-18E/F 超级大黄蜂战机的飞机。该型飞机配备的动力恰恰在 PW9000 发动机的推力覆盖范围之内(89~134kN)。目前此种飞机正由波音公司研制, 预计在 2025 年全面替换超级大黄蜂。

若获得上述飞机的发动机合同, 这将会是普惠公司的历史创举。F/A-18E/F 采用 GE 公司的 F414, 若 PW9000 能配装超级大黄蜂的替换战机, 则在战斗机发动机市场上, 将无 GE 公司立足之地。基于这些不同用途, PW9000 采用或者取消齿轮传动风扇结构。对于下一代直升机, 普惠希望提供齿轮传动版本的发动机来改善耗油率。

PW9000 的存在意味着普惠公司拥有下一代军用发动机来参与空军资助给竞争对手美国 GE 公司和英国罗罗公司的 ADVENT 计划。虽然 ADVENT 计划(自适应多任务发动机技术计划)建议采用第三股外涵气流来显著提高效率, Begert 表示 PW9000 也能达到该效率水平。

在第六代战机用发动机的竞争中, PW9000 的存在表明普惠公司已经具备了和竞争对手 GE 公司与

罗·罗公司相抗衡的能力。但是,尚未清楚的是PW9000怎样与GE公司和罗·罗公司参与的ADVENT及HEETE项目中研发的技术相比较。当前,GTF的最高总压比为50:1,而GE公司宣称其HEETE设计目标是总压比实现70:1。

ADVENT计划的关键目标之一是在核心机周围引入第三股涵道空气。提高空气流过核心机的速度同样可以降低高速工作时的耗油率。但是作为政府投资的研究计划,GE公司和罗·罗公司在ADVENT和HEETE验证中获得的数据信息可以让第三方获知,而普惠分析认为竞争对手过分夸大了引入第三股涵道气流的作用。

目前,3家公司都在等待AFRL抛出ADVENT和HEETE计划第三阶段招标。尽管在之前的两轮竞标中普惠均失利,这些技术成熟度合同仍可能会授给普惠公司。融合ADVENT的自适应技术和HEETE的压气机技术,下一代军用发动机计划将进入全尺寸研制新阶段。而PW9000的出世,将使得新一代战机用发动机市场的竞争愈演愈烈。

3.2 PW9000发动机的技术特点

在新型发动机的研发中,采用业已成熟的技术是快速推出产品的一条低风险捷径。对于PW9000,普惠公司欲将其GTF的核心机——即高压转子部分和战机用发动机F135的低压转子相互结合而成。

当前,国外民用发动机的发展主张“共用核心机”思想,其趋势是核心机压比越来越高。同时,设计能力较大的核心机也有利于系列发展,符合该思想。因此,PW1000G发动机除了齿轮传动技术而外,还拥有全新设计且更有效率的核心机。2011年3月底,普惠曾称GTF的总压比为45:1,用于空客A320新机中的发动机压比可升至50:1。与之相比,F135发动机的总压比据报道也只有

30:1;普惠公司在压比上能获得飞跃改进完全得益于该公司的叶尖吹气和F135的技术成果——微电路冷却专利技术的应用。PW9000采用GTF的核心机,其在压比上的发展潜力可想而知。

PW9000的发展是以改进该公司最小推力型号的PW1215为基础的,后者的级数分布为1-G-2-8-2-3。8级高压压气机具备先进的气动特性,增压比为14,平均级压比为1.39。前四排静子叶片可调。采用整体叶盘转子和悬臂静子高效组合系统,结构紧凑,功率增加。

高压压气机机匣为双层结构,外机匣传递负荷,内机匣为气流通道的包容机匣。燃烧室采用普惠公司与NASA合作研发的下一代TALON低污染燃烧室——TALONTM X,第二代浮动壁、短环形结构,富油-快速掺混-贫油(RQL)燃烧方式,采用了先进的油/气雾化器和混合器、金属火焰筒以及先进的冷却管理,以降低起飞、高空巡航和着陆时的NO_x排放,比CAEP/6规定的排放量低50%。火焰筒材料为高强度镍合金。经验证该燃烧室在海平面和高空工况下的排放、点火和可靠性都表现极其卓越。2级高压涡轮,采用一套全新的高压涡轮技术:高升力叶型设计;叶尖吹气技术以减小叶尖间隙泄漏量;先进的密封和冷却管理技术;先进的耐久材料;叶片数量减少^[24]。

第六代战机对隐身性要求很高,PW9000选用F135的低压部件正符合了新一代战机的该项需求。F135采用了普惠公司已验证的隐身能力强、耐久性和可维修性好的复合材料风扇。其3级风扇采用超中等展弦比、前掠叶片、线性摩擦焊的整体叶盘和失谐技术,在保持原风扇的高级压比、高效率、大喘振裕度和轻质量的同时,将风扇的截面面积增加了10%~20%。2级低压涡轮,以适应增大的风扇带来的传动负荷。此外,

F135采用了先进的健康诊断管理系统、先进涂层、先进的预诊和状态监控技术等。

在PW9000的研制中,根据军用发动机的应用特点,在改进PW1215时,风扇尺寸可能会更小,风扇级数更多,增压比更高,在牺牲燃油经济性的同时提高发动机的机动性能。

结束语

(1)PW1000G发动机是美国普惠公司面对强大的市场竞争压力,独辟蹊径研发的新型涡扇发动机,被誉为是“先进的洁净动力(PureWower™)”,将给下一代民用飞机的环保、性能和运营成本建立新的标准。

(2)在GTF中,因为采用了独特的传动风扇减速器和TALON燃烧室,齿轮系统使发动机的风扇工作独立于低压压气机和涡轮,从而使燃油的燃烧效率更高,风扇转速更低,具有低油耗、低噪声、低排放和低维修成本等优点,拥有广泛的市场应用前景。

(3)GTF发动机技术有希望成为下一代民用发动机的主要发展方向之一。鉴于GTF技术性能特点和性能优势,在支线飞机和单通道干线飞机发动机,乃至大推力发动机军用航空动力领域,有着诱人的市场应用发展前景。

(4)鉴于GTF发动机的技术发展优势和市场应用前景,我国尽早开展这项新技术概念的研究具有重大意义。及时跟踪和掌握世界领先技术的进展,可以为刚刚起步的中国大飞机发动机研发工作提供更多的经验和教训,对达到“节省时间和费用,加快发展速度,实现跨越式提高”等目标,具有重要的参考和借鉴作用。

本文共有参考文献24篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 三丰)