

民航大涵道比涡扇发动机总体性能参数敏感性分析

赵 军, 付尧明, 赖安卿

(中国民航飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 基于 Gasturb 总体性能分析软件对民航大涵道比涡扇发动机高空巡航阶段的 3 个监控性能参数受 5 个气路部件效率影响的敏感性进行分析; 研究发现高空巡航阶段高压压气机、高压涡轮的效率降低对排气温度影响较大, 风扇、增压级和低压涡轮的效率降低影响稍小; 五大气路部件的效率降低会带来排气温度、燃油流量的上升, 而对高压转子转速则有正和负的效应, 其中低压轴上的 3 个部件的效率降低会增加高压转子转速; 而高压轴上的两个部件的效率降低会导致高压转子转速的下降, 这与发动机以风扇转速作为被控参数的控制规律有关。

关键词: 航空发动机; 总体性能; 仿真; 敏感性分析

Sensitivity Research on Gross Performance of Civil Aviation High Bypass-ratio Turbofan Engine

Zhao Jun, Fu Yaoming, Lai Anqing

(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: Sensitivity researches of three gross performance parameters of civil-aviation high bypass-ratio turbofan engine on five flow path components during cruising phase have been conducted based on Gasturb simulation software. It was found that during cruising phase, the efficiency of high-pressure compressor, high-pressure turbine have larger effect on Exhaust Gas Temperature (EGT), while the efficiency of fan, booster and low-pressure turbine have smaller effect on EGT. The reduction of the efficiency of five flow path components will lead to the rise of the EGT and fuel flow, as to the high pressure rotor speed, it has positive and negative effects. The reduction of the efficiency of the three parts on the low pressure shaft will increase the high pressure rotor speed, while the reduction of the efficiency of the two parts on the high pressure shaft can lead to the decrease of the high pressure rotor speed. It is related with the fact that fan rotating speed (N1) is chosen as control parameter.

Keywords: aero-engine; gross performance; simulation; sensitivity research

0 引言

基于状态信息和发动机模型的趋势分析技术是民航发动机远程故障诊断的主要技术手段^[1], 趋势分析工具需要监控发动机的参数有总体性能参数、滑油系统参数、发动机振动参数。其中总体性能参数包括巡航阶段的 EGT (Exhaust Gas Temperature, 简称 EGT)、燃油流量、核心机转速 3 个重要的性能参数, CFMI 公司针对民航客户的发动机总体性能的远程状态监控也采用这 3 个参数。

压气机、涡轮作为高速旋转部件, 随着服役时间的增加, 会出现老化现象^[2-9]。关于各部件工作对总体性能的影响, 文献 [10] 针对涵道比的高低进行了区分: 低涵道比涡扇发动机的性能衰退主要是由于风扇、压气机性能变化引起, 约占 60%~70%; 涡轮变化占 10%~15%; 其余为封严间隙增大造成。对于高涵道比涡轮风扇发动机, 由于涡轮前总温高, 性能衰退主要是由于高压涡轮引起, 约占 63%~67%; 高压压气机约占 16%~28%; 低压转子占 7%~21%。文献 [11] 则给出了民航修理厂的经验: 在发动机的部件模块中, 低压压气

机的大修可以恢复 7~15 °C EGT 裕度, 高压涡轮的大修可以恢复 15~30 °C EGT 裕度, 低压涡轮的大修可以恢复 3~5 °C EGT 裕度, 其他部件的大修对恢复 EGT 裕度贡献不大。上述表述大都是发动机大修厂的经验数据积累, 多为定性的数据, 且需要验证; 国内外公开发表的文献上少有各部件的敏感性定量分析的研究, 为精细研究总体性能参数受各部件的影响大小, 直接试验的研究方法将是最准确的, 但为获得敏感性数据的耗费也将是巨大的, 因此有必要通过计算机仿真的手段进行各部件敏感性定量分析的研究。

本文以某假设的民航大涵道比涡扇发动机为研究对象, 采用 Gasturb 航空发动机总体性能分析软件^[12]对该发动机高空巡航阶段的 3 个监控性能参数受各部件效率影响的敏感性进行分析, 首先通过发动机总体性能分析进行该款发动机的整机建模; 在此基础上改变各部件的效率值, 观察监控性能参数与自变量的变化关系, 据此得到各影响参数的敏感性因子, 以指导发动机故障诊断和修理厂维修方案的优化。

1 整机建模

表 1 给出了发动机总体性能仿真的各部件性能参数, 这些参数是参考在役民用发动机得到的, 因为缺乏部件特性, 所以非设计点的性能计算采用软件自带的通用特性曲线。从输入参数可见, 虽然是一个假设的模型发动机, 但据此进行的敏感性分析能够反映高涵道比双轴分排商用发动机的典型特征。

2 主要影响因素选择

从文献 [10-11] 可以看出, 影响发动机性能参数的主要

收稿日期: 2015-10-27; 修回日期: 2015-11-22。

基金项目: 国家自然科学基金(51306201); 四川省教育厅自然科学基金项目(16ZB0035); 中国民用航空飞行学院科学研究基金(J2014-38); 中国民用航空飞行学院研究基金(J2015-28)。

作者简介: 赵 军(1980-), 男, 安徽淮北人, 博士, 高级工程师, 主要从事航空发动机总体性能分析和故障诊断方向的研究。

部件参数有: 风扇效率、增压级效率、高压压气机效率、高压

表 1 数值仿真输入

项目	数值	项目	数值
涵道比	5.5	空气流量	428.1 kg/s
进气道总压恢复系数	0.98	外涵总压恢复系数	0.98
风扇压比	1.336	风扇效率	0.89
增压级压比	2.208	增压级效率	0.89
高压压气机压比	12	高压压气机效率	0.85
涡轮前温度	1600K	燃烧室总压恢复系数	0.98
高压涡轮效率	0.88	低压涡轮效率	0.86
功率提取	0	飞机引气量	0

涡轮效率、低压涡轮效率, 下面就对这 5 个参数进行详细的敏感性分析。

3 空中巡航状态各参数敏感性分析

在进行敏感性分析时, 假设控制系统为单变量控制系统, 控制量为主燃油流量, 被控参数为低压轴转速 (N1)。稳态下的控制规律为: 调节主燃油流量控制发动机低压轴转速 $N1 = \text{const}$, 这一点与 CFM56 系列发动机是一致的。

图 1 是 CFMI 给出的 CFM56-5B 发动机在空中 35 000 ft, 0.76 Ma 下的参数敏感性结果, 该结果是 CFMI 通过发动机的数学模型建立的, 考虑到其数学模型包含了非常详尽的部件特性, 同时有大量的高空台试车数据和飞行平台试飞数据, 可以认为该数据为试验数据。图 2 是 CFMI 给出的 CFM56-5C 发动机在空中 35 000 ft, 0.82 Ma 下的参数敏感性结果。

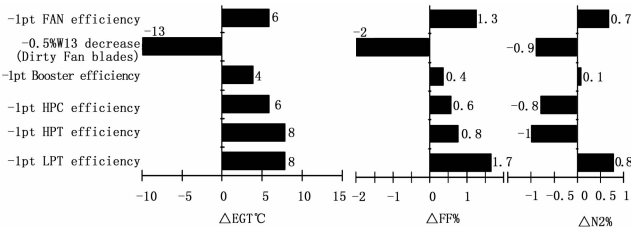


图 1 CFM56-5B 发动机参数敏感性

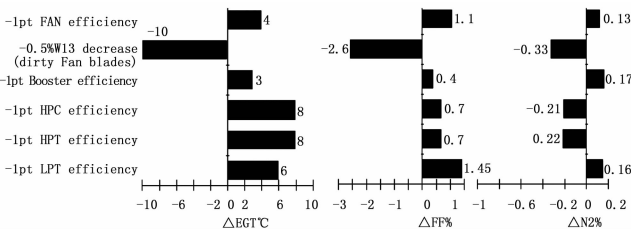


图 2 CFM56-5C 发动机参数敏感性

3.1 风扇效率影响

当发动机保持在巡航状态 (飞行高度 35 000 ft, 0.8 Ma, 低压轴转速为 90%N1 max, 以下巡航状态均为此状态) 稳定工作时, 风扇效率的降低将会引起其余部件工作状态的一系列变化: 风扇效率降低将导致低压涡轮做功量不足以保持原低压轴转速, 低压轴转速 N1 下降, FADEC 监控到之后将增加主燃油流量 (Fuel Flow, 以下简称 FF), 涡轮前温度提高, 涡轮做功能力变强, 这时 N2 会有一定的升高, 当 N2 上升到某个点时, 低压涡轮做功足以带动需求提升的低压转子回到最初

的 N1 转速, 燃油流量就会稳定。这时, 燃油流量 FF 上升, EGT 上升, N2 转速上升。数值仿真结果见图 3, 其中横坐标是风扇效率的降低 (-6~0 pt), 纵坐标是巡航阶段的 3 个性指标, Rel. HP Spool Speed 代表高压轴的相对转速, Fuel Flow 为燃油流量, 单位为 kg/s, LPT Exit Temperature/T5 为低压涡轮出口总温, 单位 K。

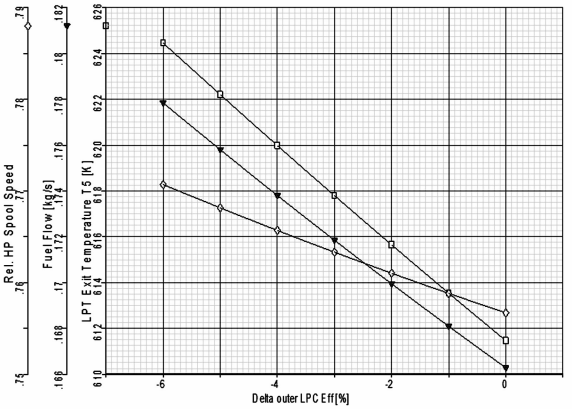


图 3 巡航性能指标随风扇效率影响

3.2 增压级效率影响

因为增压级和风扇同属压气机部件的低压转子, 增压级效率对总性能的影响和风扇的类似, 不再赘述。图 4 的数值仿真结果也印证了上述的推断。

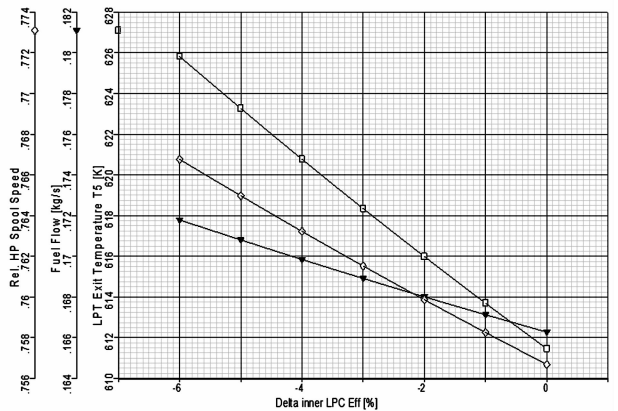


图 4 巡航性能指标随增压级效率影响

3.3 高压压气机效率影响

当发动机保持在巡航转速稳定工作时, 高压压气机部件效率的降低将会引起其余部件工作状态的一系列变化: 高压压气机效率降低导致高压涡轮做功能力亏欠, 进而导致高压轴转速下降, 流经低压涡轮的燃气流量降低直接导致低压轴转速也有所下降, FADEC 监控到之后将增加主燃油流量, 涡轮前温度提高, 涡轮做功能力变强, 这时 N2 会向原始值移动, 当 N2 移动到某个中间点时, 低压涡轮做功足以带动低压转子回到最初的 N1 转速, 燃油流量稳定在该点上。这时, FF 上升, EGT 上升, N2 转速下降。数值仿真结果见图 5。

3.4 高压涡轮效率影响

当发动机保持在巡航状态稳定工作时, 高压涡轮效率降低将导致做功能力下降, 进而导致高压轴转速下降, 流经低压涡轮的燃气流量降低直接导致低压轴转速也有所下降, FADEC

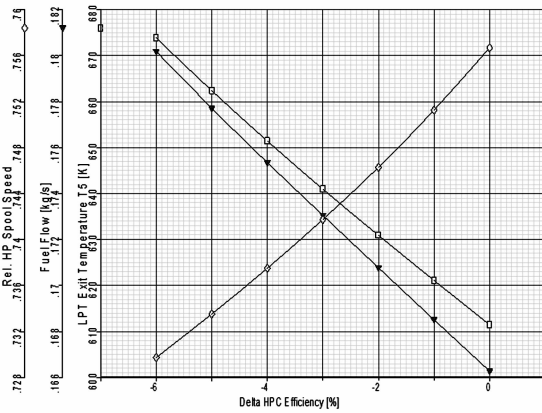


图 5 巡航性能指标随高压压气机效率影响

监控到之后将增加主燃油流量, 涡轮前温度提高, 涡轮做功能力变强, 这时 N2 会向原始值移动, 当 N2 移动到某个中间点时, 低压涡轮做功足以带动低压转子回到最初的 N1 转速, 燃油流量稳定在该点上。这时, FF 上升, EGT 上升, N2 转速下降。数值仿真结果见图 6。

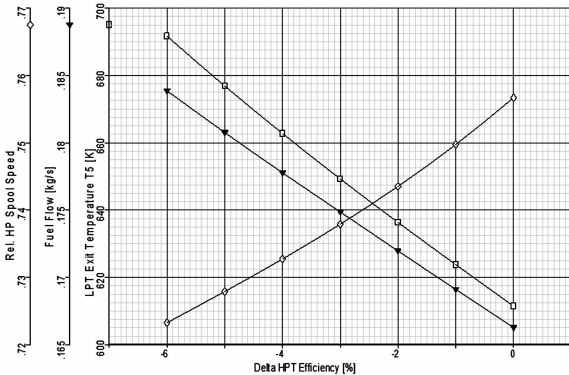


图 6 巡航性能指标随高压涡轮效率影响

3.5 低压涡轮效率影响

当发动机保持在巡航状态稳定工作时, 低压涡轮效率降低将导致其做功能力下降, 低压轴转速下降, FADEC 监控到之后将增加主燃油流量, 涡轮前温度提高, 涡轮做功能力变强, 这时 N2 会有一定的升高, 当 N2 上升到某个点时, 低压涡轮做功足以带动低压转子回到最初的 N1 转速, 燃油流量就会稳定。这时, FF 上升, EGT 上升, N2 转速上升。数值仿真结果见图 7。

综合上述 5 个部件效率对 ΔEGT , ΔFF , $\Delta N2$ 的定量影响, 在表 2 中汇总给出。同时针对 3 个重要的总体性能参数, 还进行了模型发动机与 CFM56-5B、CFM56-5C 的对比, 分别在表 3、4、5 中表示。从表 3 的 ΔEGT 在模型发动机上的敏感性分析可以看出, 高空巡航阶段高压压气机、高压涡轮的效率降低对 EGT 影响较大, 风扇、增压级和低压涡轮的效率降低影响稍小一些。这个结果与文献 [10] 的表述一致, 即, 对于高涵道比涡轮风扇发动机, 性能衰退更多的是由高压部件效率降低引起的, 低压部件的影响较小一些。文献 [11] 中介绍在发动机修理厂中统计出来对于 EGT 的恢复, 高压涡轮的影响最大与表 3 的敏感性分析一致, 而低压压气机的影响比低压涡轮的影响大与表 3 的敏感性分析有差别, 作者推测原因在于实际运行中低压压气机部件的效率降低幅度较低压涡轮部件效率

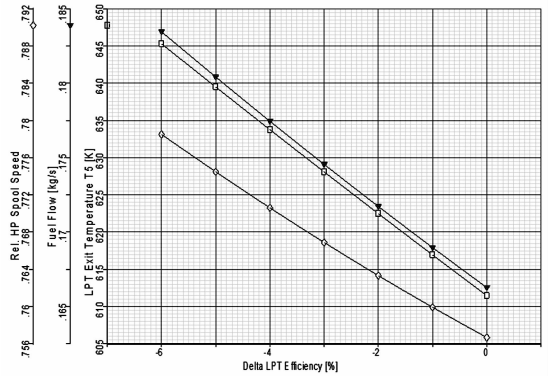


图 7 巡航性能指标随低压涡轮效率影响

降低幅度大得多。

表 2 模型发动机敏感性结果

部件性能退化	$\Delta EGT/^\circ C$	$\Delta FF/\%$	$\Delta N2/\%$
-1pt Fan efficiency	+2.077	+1.09	+0.21
-1pt Booster efficiency	+2.235	+0.51	+0.16
-1pt HPC efficiency	+9.64	+1.34	-0.54
-1pt HPT efficiency	+12.34	+1.7	-0.7
-1pt LPT efficiency	+5.48	+1.61	+0.32

表 3 ΔEGT 在 3 种发动机上敏感性

部件性能退化	CFM56-5B	CFM56-5C	模型发动机
-1pt Fan efficiency	6	4	+2.077
-1pt Booster efficiency	4	3	+2.235
-1pt HPC efficiency	6	8	+9.64
-1pt HPT efficiency	8	8	+12.34
-1pt LPT efficiency	8	6	+5.48

从表 4 的 ΔFF 在三款发动机上的敏感性分析可以看出, 三款发动机因各部件性能的差异导致热力模型的不同, CFM56-5B、CFM56-5C 表现出风扇和低压涡轮的影响较大, 这个结果与文献 [10] 的表述“高涵道比涡轮风扇发动机, 性能衰退更多的是由高压部件效率降低引起的, 低压部件的影响较小一些”有一定的差别。而模型发动机显示高压涡轮和高压压气机部件的影响较大, 与文献 [10] 的表述一致。

表 4 ΔFF 在 3 种发动机上敏感性

部件性能退化	CFM56-5B 发动机	CFM56-5C 发动机	模型发动机
-1pt Fan efficiency	1.3	1.1	+1.09
-1pt Booster efficiency	0.4	0.4	+0.51
-1pt HPC efficiency	0.6	0.7	+1.34
-1pt HPT efficiency	0.8	0.7	+1.7
-1pt LPT efficiency	1.7	1.45	+1.61

从表 5 的 $\Delta N2$ 在三款发动机上的敏感性分析可以看出一个明显的特征, 5 个部件的影响不再是同一个方向, 而是有正效应和负效应。其中低压轴上的 3 个部件 (风扇/增压级/低压涡轮) 的效率降低会增加 N2 转速; 而高压轴上的两个部件 (高压压气机/高压涡轮) 的效率降低会导致 N2 转速的下降, 究其原因, 是和这三款发动机以低压转子转速 N1 作为被控参数的控制规律有关, 具体已在上文中阐述, 不再赘述。

表 5 ΔN2 在 3 种发动机上敏感性 %

部件性能退化	CFM56-5B 发动机	CFM56-5C 发动机	模型发动机
-1pt Fan efficiency	+0.7	+0.13	+0.21
-1pt Booster efficiency	+0.1	+0.17	+0.16
-1pt HPC efficiency	-0.8	-0.21	-0.54
-1pt HPT efficiency	-1.0	-0.22	-0.7
-1pt LPT efficiency	+0.8	+0.16	+0.32

4 结论

本文对三款发动机高空巡航状态下各部件效率降低对主要性能参数的影响仿真, 并进行了较详细的分析, 得到以下主要结论:

- 1) 本文针对模型发动机的敏感性分析结果定性上与 CFM56-5B, CFM56-5C 发动机类似, 验证了本文分析方法的正确性;
- 2) 从 ΔEGT 在模型发动机上的敏感性分析可以看出, 高空巡航阶段高压压气机、高压涡轮的效率降低对 EGT 影响较大, 风扇、增压级和低压涡轮的效率降低影响稍小一些;
- 3) 五大气路部件的效率降低会带来 EGT、FF 的上升, 而对高压转子转速 N2 则有正和负的效应, 其中低压轴上的 3 个部件的效率降低会增加 N2 转速; 而高压轴上的两个部件的效率降低会导致 N2 转速的下降, 这和三款发动机以 N1 作为被控参数的控制规律有关。

参考文献:

[1] 敖良忠, 唐庆如, 邱俊源. FJ44 发动机关键性能参数趋势分析

(上接第 221 页)

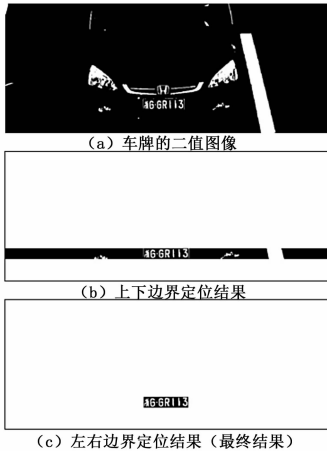


图 5 车牌定位实验结果

```

Mid=(LR[r]+LL[r])/2;
//计算上下边界 PT 和 PB 之间的 Mid 列
//的白色像素总数
Smid=TotalPixels(Mid,PT,PB);
if(Smid>=0.5 * Height){//字符"1"
    LR[r]=LR[r]+Δ;
    LL[r]=LL[r]-Δ;
}else{//字符"."
    LR[r..Q-1]=LR[r+1..Q];
    LL[r..Q-1]=LL[r+1..Q];
    Q--;
}
}
    
```

[J]. 中国民航飞行学院学报, 2012 (1): 11-14.

[2] 王占学, 刘增文, 叶新农. 某型涡扇发动机部件老化对性能影响的分析与计算 [J]. 航空动力学报, 2007, 22 (5): 792-796.

[3] 王永华, 李 冬. 基于云粒子群算法的航空发动机性能衰退模型研究 [J]. 燃气涡轮与实验, 2012, 25 (1): 17-19.

[4] 李 东, 浦 鹏, 谭 巍, 等. 高压压气机性能老化预测和影响分析 [J]. 燃气涡轮与实验, 2011, 24 (4): 1-5.

[5] 李业波, 李秋红, 黄向华, 等. 航空发动机性能退化缓解控制技术 [J]. 航空动力学报, 2012, 27 (4): 930-936.

[6] Wulf R H. CF6 Jet engine performance deterioration [R]. A IAA 1979-1233, 1979.

[7] Wulf R H. Engine diagnostics program CF6-50 engine performance deterioration [R]. NA SA CR-159867, 1980.

[8] Sallee G P. Performance deterioration based on existing (historical) data—JT9D jet engine diagnostics program [R]. NASA CR-135448, 1978.

[9] Sallee G P. Performance deterioration based on inservice engine data—JT9D jet engine diagnostics program [R]. NASA CR-139525, 1980.

[10] 景黎明, 王国大. 通过监控 EGT 裕度进行下发预测初探 [J]. 西安航空技术高等专科学校学报, 2007, 25 (5): 3-6.

[11] 付尧明. 民用涡扇发动机在使用和维护中的 EGT 裕度管理 [J]. 航空维修与工程, 2005 (1): 44-45.

[12] 张书刚, 郭迎清, 陆 军. 基于 GasTurb/MATLAB 的航空发动机部件级模型研究 [J]. 航空动力学报, 2012 (12): 2850-2856.

5 结束语

本文所提出的车牌定位方法充分考虑到不同光照条件下采集车牌图像的情形、字符“1”位置出现的随机性和宽度的差异性以及字符“.”的不稳定性, 采用了一种多阈值处理方法来得到最佳的车牌二值图像, 同时对字符之间的间隔距离进行调整, 使得间隔特征统一化。该方法的实用性和准确性均能满足现实的需要。

参考文献:

[1] 卓均飞, 胡 煜. 基于边缘检测和投影法的车牌定位算法研究 [J]. 科技通报, 2010, 26 (3): 438-441.

[2] 刘 濛, 吴成东, 樊玉泉, 等. 复杂背景图像中的车牌定位算法 [J]. 中国图象图形学报 A, 2010, 15 (9): 1357-1362.

[3] 朱成军, 蒲菊华, 高 磊, 等. 基于 Tophat 变换和文字纹理的车牌定位算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34 (5): 541-545.

[4] 李 刚, 曾锐利, 林 凌, 等. 基于数学形态学的车牌定位算法 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (7): 1323-1327.

[5] 李文举, 梁德群. 基于边缘颜色对的车牌定位新方法 [J]. 计算机学报, 2004, 27 (2): 204-208.

[6] 郑成勇. 一种 RGB 颜色空间中的车牌定位新方法 [J]. 中国图象图形学报 A, 2010, 15 (11): 1623-1628.

[7] 马永一, 宋 铮, 丁 勇. 小波变换在车牌定位算法中的应用 [J]. 交通与计算机, 2008, 26 (140): 65-68.

[8] 路小波, 张光华. 基于二值图像的车牌精确定位方法 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2005, 35 (6): 972-974.

[9] 付 炜, 赵正刚, 王大江. 基于水平灰度跳边和垂直投影的车牌定位方法 [J]. 电子测量技术, 2008, 31 (3): 61-65.