

文章编号: 1000-8055(2007)06-0928-05

小型无人直升机活塞式电喷发动机 冲速段的控制策略

王小青, 黄一敏, 杨一栋

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘 要: 针对小型无人直升机使用的活塞式电喷发动机的冲速段特性, 给出了折线法的转速指令控制策略, 并与常用的固定斜率转速指令增量的方法进行比较。通过开车试验数据分析, 折线法能够有效地解决冲速段的富油和冲速问题, 实现冲速段的转速控制, 并且具备较强的鲁棒性。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 小型无人直升机; 活塞式发动机; 电喷发动机; 发动机控制; 发动机冲速段控制

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Control strategy for piston ECU engine of small-size unmanned helicopter in overrunning stage

WANG Xiao-qing, HUANG Yi-min, YANG Yi-dong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Dogleg control strategy was proposed for piston electronic control unit (ECU) engine of a small-size unmanned helicopter in overrunning stage, and then compared with traditional method of increasing rotational speed in fixed slope. Through analysis of engine ground test data, it's learnt that dogleg method can resolve efficiently the rich oil and overrunning problem, and achieve rotational speed control with strong robustness.

Key words: aerospace propulsion system; small-size unmanned helicopter; piston engine; electronic control unit (ECU) engine; engine control; engine control in overrunning

小型无人直升机的动力装置一般采用三种类型的发动机: 活塞发动机、转子发动机和涡轴发动机, 其中活塞发动机具有耗油率低、起动方便、加速性好、技术成熟、成本低、经济性好等优点^[1]。电喷(ECU)发动机是一种程序控制喷油发动机, 具有结构简单、控制精度高、跟随性强等特点。样例无人直升机重量轻、载荷低、需用功率小, 所以使用了一个双缸二冲程活塞式 ECU 发动机。

活塞式 ECU 发动机也有一些缺点, 如样例

发动机从起动到最大功率转速的过程中, 会在某转速段, 输出功率与转速成非单调增加关系, 即随着转速增加, 输出功率反而减小。当转速跨过该转速段后, 输出功率又随转速增加单调增加, 我们称该转速段区域为发动机输出功率反向区域。当发动机跨离该区域时, 油门略微增加或不变, 转速在短时间内飞速上升, 原因是发动机跨越功率反向区域时, 输出功率从与转速成单调递减关系对应的小功率, 突变到与转速成单调递增关系对应的

收稿日期: 2007-01-27; 修订日期: 2007-04-10

基金项目: 武器装备预研基金资助项目(513250304)

作者简介: 王小青(1978), 男, 江苏南京人, 博士生, 研究方向: 导航、制导与控制。

大功率, 输出功率完成一次阶跃, 所以转速飞速增加. 文中定义此功率反向区域和转速飞速上升区域为冲速段.

通常发动机控制是非常复杂的, 当发动机特性较差时, 控制的难度会更大. 因为发动机控制是直升机控制的基础和前提^[2], 控制效果直接影响无人直升机的飞行品质, 所以对控制要求是: 转速过渡平稳、稳态时转速稳定、能抵抗一定的负载变化^[3].

发动机工作于冲速段时, 如果按常规控制, 会出现如下两个问题: 油门急剧增加, 发动机转速缓慢增加的富油问题; 发动机转速飞速增加到不能有效控制的冲速问题. 本文结合样例发动机的功率特性和负载特性, 给出一个解决发动机冲速段这两个问题的控制策略.

1 发动机冲速段特性

样例发动机在功率反向区域的功率特性如表 1 所示: 由表可见, 相同的油门, 发动机在 4 500 r/min 的输出功率比 4 000 r/min 的输出功率要小, 但转速到 5 000 r/min 后, 发动机输出功率随转速增加而增大. 本文图、表中的 W_t 表示油门开度, n 表示转速.

表 1 冲速段功率特性 单位: kW

Table 1 Engine power in overrunning

$W_t/(%)$	14	18	22	28
$n/(r/min)$				
4 000	3.65	4.94	9.10	11.76
4 500	3.33	4.54	8.54	11.05
5 000	4.59	7.15	9.70	13.53
5 500	8.22	9.88	12.49	16.10

这就会产生如下情形: 例如发动机当前转速为 4 000 r/min, 油门开度为 14%, 转速指令为 4 200 r/min, 则油门开度变大, 发动机输出功率增加, 驱动发动机加速. 当发动机转速和旋翼转速同步增加时, 一方面由于发动机负载与旋翼转速成平方关系增加, 另一方面从表 1 中看出, 发动机在同一油门开度时, 转速增加, 输出功率相对减小了, 所以发动机输出功率的增加低于需用功率增加的速率, 转速增加的趋势变缓或停止. 这时发动机转速要继续增加就需要增加更大的油门, 导致油门增加过快, 并且此情况随着转速指令的一直上升进一步恶化, 就会出现富油情况, 如图 1(a) 所示, 富油时的油门开度比正常工作时的油门开

度大的多, 油门增加到很大且不合理的开度, 而发动机输出功率偏小, 转速过低, 发动机功率有被憋住的情况. 图中的 t_c 为发动机排气温度.

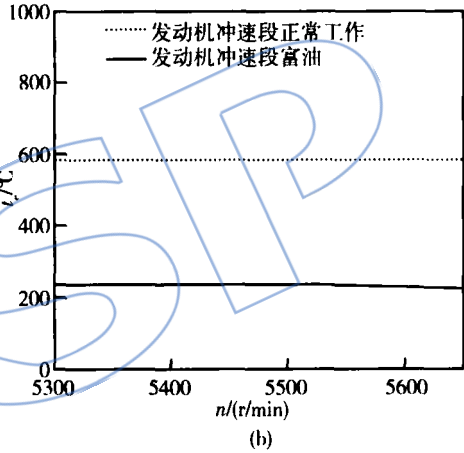
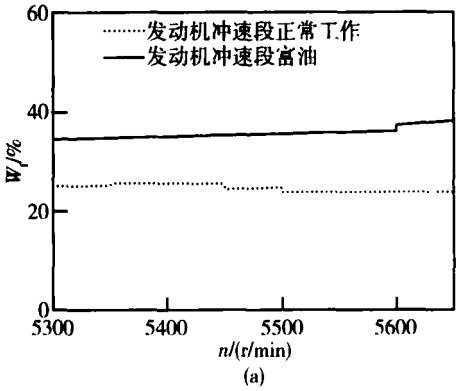


图 1 发动机富油与正常工作比较

Fig. 1 Engine in rich oil

富油是小型活塞式 ECU 发动机经常出现的问题, 原因就是在发动机缸内, ECU 控制的喷油相对过多, 超过了汽油与氧气的最佳燃烧比例, 导致缸内燃烧不充分, 输出功率下降, 且很多多余的汽油从排气管排出, 排气温度下降, 从图 1(b) 的排气温度曲线也可以看出, 富油时的排气温度比正常工作时的排气温度低的多, 正是因为富油而使排气管排油导致发动机排气温度过低. 此外通过发动机活塞环上潮湿现象也能说明发动机出现富油问题.

放慢发动机转速指令的增加速度, 能够减轻富油问题, 但在转速缓慢上升的过程中, 油门增加仍然会比转速增加的快一些, 又因为当转速跨离输出功率反向区域时, 发动机转速略微增加会导致发动机输出功率阶跃增加, 发动机转速在短时间内飞速上升. 样例发动机在油门几乎不变的情况下, 最大转速上升率能够达到每秒钟上升 300 r/min, 很容易导致直升机的动力系统、传动系统

和旋翼系统损坏,并且在这种情况下,直升机的振动情况非常严重,应避免这种情形.本文根据发动机在冲速段的特点,设计控制策略解决这两个问题,使发动机能够安全、稳定地跨过冲速段.

2 发动机冲速段控制策略和实现

通常控制发动机从一个工作点过渡到另一个工作点时,转速指令采用固定斜率进行软化,如图 2 所示,即发动机转速从工作点 0 开始,转速指令在单位时间内增加固定常数,转速指令增加到工作点 1 的转速时停止.如样例发动机从慢车过渡到额定工作点,发动机转速相差一千多转/分,取转速指令软化步长为每秒钟 60 r/min.

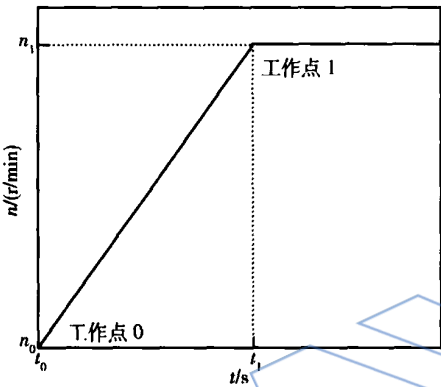


图 2 固定斜率增加转速指令
Fig. 2 Rotate speed command accelerates in fixed slope

但是因为样例发动机的冲速过程刚好在慢车到额定的过渡过程,此外,根据多次开车数据分析,由于温度和气压的差异,发动机不是每次工作在冲速段的特性完全一致,但主要区分为以下两种冲速情况:快速冲速过程和慢速冲速过程.快速冲速时发动机油门基本不变,转速冲速超过每秒钟增加 150 r/min,最大达到每秒钟加速 300 r/min.慢速冲速时发动机油门基本不变,转速冲速速率低于每秒钟加速 150 r/min,最小达到每秒钟加速 80 r/min.

如果采用固定斜率增加转速指令的方法会产生如下问题:

(1) 发动机快速冲速,转速指令增量常数取得较小,转速在初始冲速后回落.

如图 3 所示,由于发动机为快速冲速,而指令增量较小,初始阶段发动机转速线在转速指令线上方, t_1 时刻后,发动机转速由于之前正的转速差控制引起回调油门,导致转速回落,冲速失败,且转速

指令停止后,发动机很难再次加速到工作点 1.

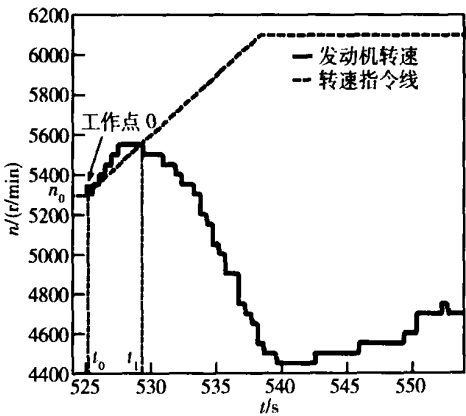


图 3 发动机快速冲速,指令增量常数小
Fig. 3 Engine accelerates fast, command constant accelerates slow

(2) 转速指令增量常数取得较大,发动机在转速缓慢增加后富油.

如图 4 所示,由于发动机为慢速冲速,而指令增量较大,初始阶段发动机转速线在转速指令线下方,发动机由于初始阶段负的转速差控制引起较大的油门增量,油门增加速度过快,导致发动机富油,发动机工作不正常,转速偏低且很不稳定,上下振荡剧烈.

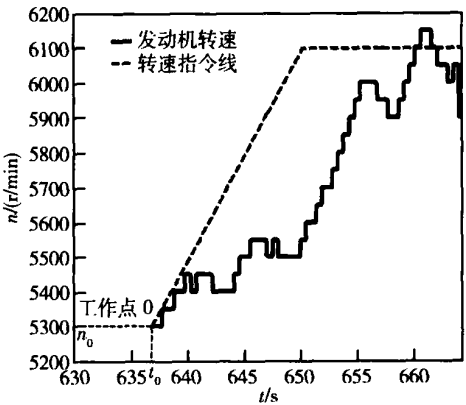


图 4 发动机慢速冲速,指令增量常数大
Fig. 4 Engine accelerates slow, command constant accelerates fast

由于发动机的冲速具有一定的随机性,采用上述的控制方法不具备鲁棒性能.本文采用“折线法”的控制策略,经过多次仿真和开车试验的验证,很好地解决了冲速段的速度控制问题.

其基本思想为转速指令不按固定斜率上升,而是当前发动机真实转速加上某一转速增量.由于转速指令是按飞控计算机的控制计算周期来采

样发动机转速, 再加上转速增量, 该转速指令线如图 5、图 6 所示, 是由很多折线组成, 所以称为“折线法”。

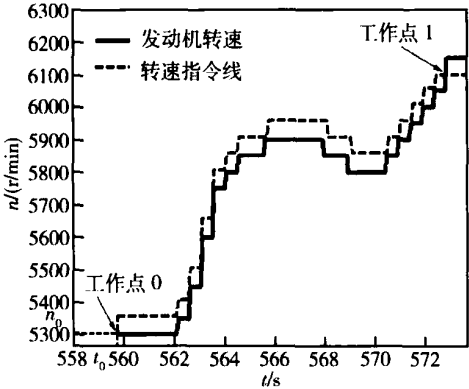


图 5 发动机快速冲速时的折线法

Fig. 5 Dogleg method when engine accelerates fast

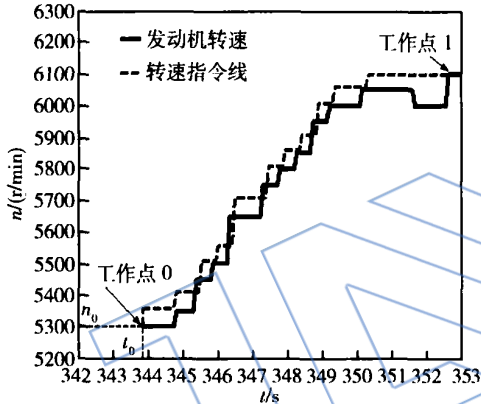


图 6 发动机慢速冲速时的折线法

Fig. 6 Dogleg method when engine accelerates slow

快速冲速时, 指令线也快速跟随, 不会产生很大的回调油门, 发动机转速不会回落; 慢速冲速时, 指令线也缓慢上升, 发动机油门不会增加过快而导致发动机富油, 所以具备很强的鲁棒性。经过多次开车试验, 都能够很好的控制冲速段的速度。图 5 为快速冲速的情形, 由于速度冲速太快, 在冲速的过程中转速通过一次回调, 减缓了冲速速率, 较为缓和地过渡到额定转速, 避免了冲速对直升机带来的损坏。图 6 为慢速冲速的情形, 过渡过程平滑单调, 转速安全、平缓地加速到工作点 1 状态。

对样例无人直升机发动机转速控制进行仿真, 发动机转速从 5 300 r/min 过渡到 6 100 r/min 的过程如图 7 所示, 仿真中考虑了控制系统数字化和传感器测速精度等非线性因素。发动机

的地面开车响应曲线如图 8 所示, 表 2 为发动机开车过程中油门、排气温度与转速的关系。

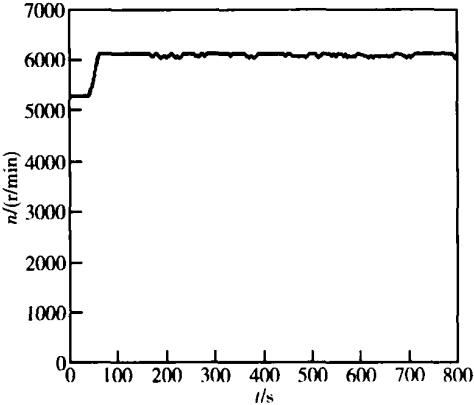


图 7 发动机仿真曲线

Fig. 7 Engine curve in simulation

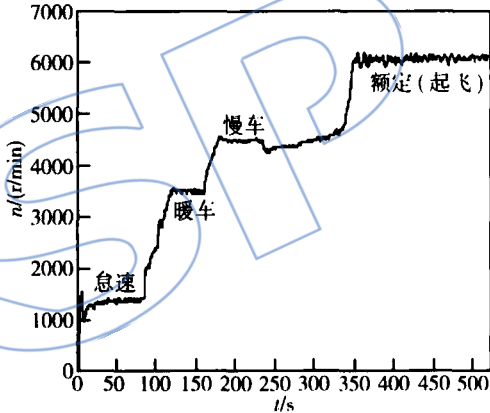


图 8 发动机地面开车响应曲线

Fig. 8 Curve of engine speed in ground test

表 2 发动机开车过程中油门、排温与转速关系

Table 2 Engine throttle, exhaust temperature versus rev

$n/(r/min)$	$W_t/(%)$	$t_0/^\circ C$
1 350	0	200
3 500	16	450
4 500	25	550
6 100	33	630

3 结 论

针对小型无人直升机使用的活塞式 ECU 发动机在冲速段的特点, 文中提出了折线法的转速指令控制策略, 经过多次地面仿真试验和地面开车试验, 证明无论在发动机快速冲速和慢速冲速的情形, 都能够有效地实现转速控制, 并且具备较强的鲁棒性。

参考文献:

[1] 杨振祥, 阮红霞. 小型无人直升机动力装置活塞发动机的动态效应[J]. 直升机技术, 2006, 146(2): 32-35.
YANG Zhenxiang, RUAN Hongxia. The dynamic effect for piston engine on miniunmanned helicopter [J]. Helicopter Technique, 2006, 146(2): 32-35.

[2] 彭召勇. 无人直升机飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.

[3] 黄向华, 彭召勇. 无人驾驶直升机发动机模糊自适应 PID 控制[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 487-493.
HUANG Xianghua, PENG Zhaoyong. Fuzzy adaptive PID control for an unmanned helicopter engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2005. 20(3): 487-493.

