

DOI: 10.3901/JME.2015.12.110

CVT 型车辆经济性加速策略优化与分析*

徐少兵¹ 李升波¹ 赵芸辉² 成波¹

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084;

2. 北京航空航天大学交通科学与工程学院 北京 100191)

摘要: 不当的加速策略是造成车辆行驶油耗变差的重要原因,为降低加速过程油耗,通过伪谱最优控制方法量化地研究 CVT 型车辆的经济性加速策略。在建立包含发动机油耗的车辆纵向动力学模型、提出消除加速距离影响的当量油耗指标基础上,将经济性加速策略的辨识构建为一个 Bolza 型最优控制问题。该问题的状态方程和性能指标具有强非线性,理论求解困难,因此利用 Legendre 伪谱法实现其数值求解,得到经济性加速度的量化表达,并进一步分析数值求解结果的形成机理。研究表明,经济性加速策略本质上是提高发动机效率和降低风阻能耗的整体协调优化;最优加速策略是与发动机特性和目标末速度密切相关的动态策略;过于激烈或平缓的加速度均会造成油耗变差。最后,仿真验证了经济性加速策略的潜在节油效果。

关键词: 车辆;经济性驾驶;加速过程;最优控制;伪谱法

中图分类号: TP273

Optimization and Analysis of Economical Accelerating Strategy for CVT Vehicles

XU Shaobing¹ LI Shengbo¹ ZHAO Yunhui² CHENG Bo¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: Improper accelerating strategy is critical to deteriorate the fuel consumption of ground vehicles. In order to reduce fuel consumption during acceleration, the fuel optimized accelerating strategy of CVT-based vehicles under the framework of pseudo-spectral optimal control is studied quantitatively. The vehicle longitudinal dynamic model including engine fuel consumption is built first, and an equivalent fuel consumption index is proposed to eliminate the effect of the travelling distance. Further the identification of eco-accelerating strategy is then converted into a Bolza-typed optimal control problem. The state equation and performance index is strongly nonlinear, which makes it difficult to obtain theoretical optimal solution. So the Legendre pseudo-spectral method is adopted to obtain the numerical solution. The economical accelerating strategy is presented quantitatively and the mechanism of the numerical results is also analyzed by using differential element method. The simulation and analysis show that fuel-optimized accelerating strategy is the balance of increasing engine efficiency and decreasing air resistance, the optimal accelerating strategy is a dynamic strategy which is closely related to the engine characteristics and target end-state speed, both aggressive and mild acceleration are objectionable to good fuel consumption in accelerating process. The potential fuel benefit of the proposed strategy is evaluated by simulations.

Key words: vehicle; eco-driving; accelerate; optimal control; pseudo-spectral method

0 前言

2012 年中国汽车消耗石油约 1.85 亿吨,比 2005 年增加了 46%^[1]。国务院颁布的《节能与新能源汽

车产业规划(2012—2020 年)》明确指出,至 2020 年乘用车平均燃料消耗量须从 2010 年的 7.71 L/100 km 降至 5 L/100 km。这对乘用车提出了更为严格的节能要求。实际上,车辆的行驶油耗不仅与车辆性能相关,而且很大程度上取决于驾驶员的驾驶方式。经济性驾驶方式是一种以最小化行车油耗为目标的驾驶方式,重点关注车辆的油门、挡位和制

* 国家自然科学基金(51205228)和清华大学自主科研计划(2012THZ0)资助项目。20140614 收到初稿,20141220 收到修改稿

动的合理操作,使车辆运动与道路、交通、车辆性能等要素相匹配,如经济性加速。研究显示,经济性驾驶方式可平均降低燃油约 10%^[2]。

汽车加速过程是一种高耗油且频繁出现的驾驶状态,探索其经济性驾驶策略对于降低行车油耗具有积极意义。文献[3]对 19 230 份驾驶数据进行因素分析指出:加速过程和怠/低速(小于 2 m/s)是导致驾驶员油耗差异的两个最重要原因。目前,经济性加速策略多基于试验统计得到,难以量化描述且机理模糊。ERICSSON^[3]研究显示,激进加速(大于 1.5 m/s²)过程对油耗的显著性是正常加速过程的约 2.5 倍;de VLEGER^[4]研究了真实记录的行车数据,结果显示激进的加速和制动会导致油耗提高 30%~40%。因此,为降低行车油耗必须避免激进的加速过程,然而过于温和的加速对节油也不总是有利的。EL-SHAWARBY 等^[5]通过对温和、正常、激进三个等级的加速过程分析显示,由于温和加速过程的加速时间长且发动机工作于低效率区,当车速从零加速到 100 km/h,其油耗是激进加速过程的近 3 倍。JOHANSSON 等^[6]认为驾驶员应采取合适的加速度快速平稳的加速到目标车速并尽快换到高挡位。上述不同观点从侧面反映了缺乏量化分析的弊端。

经济性加速策略辨识属于一种经济性驾驶策略辨识。一般来说,该类问题可归结为最优控制问题(Optimal control problem, OCP)进行求解分析^[7-9]。KURIYAMA 等^[7]对电动汽车在坡道工况下建立了能耗最优的控制问题,通过动态规划法优化车辆加速度。LI 等^[8]对车辆跟车工况建立了油耗最优控制问题,优化得到动态的“加速-滑行”(Pulse-and-gliding, PnG)跟车策略。VOULGARIS^[9]建立了交通灯约束下的油耗最优控制问题,通过 Dijkstra 算法优化车辆速度。由于 OCP 求解方法的限制,经济性策略求解中会对模型做适当的简化,求解方法多为离散动态规划法和 Dijkstra 算法。动态规划法存在“维数灾难”等问题^[7],Dijkstra 算法计算精度受限于节点密度^[9]。

本文针对一类装备无级变速器(Continuously variable transmission, CVT)的车辆,量化地研究其经济性加速策略并揭示内在机理,以指导驾驶员的驾驶操作和经济性驾驶辅助系统的设计。第 1 节建立加速过程油耗最低的最优控制问题,第 2 节通过 Legendre 伪谱法对该问题数值求解;第 3 节解析分析求解结果的形成机理及经济性加速策略的特性;第 4 节通过一个典型加速过程说明经济性策略的节油效果。

1 油耗最优加速问题的构建

油耗最优加速策略的辨识本质上是一个最优控制问题,即如何合理地控制油门开度和变速器速比,使得加速过程中发动机油耗最小。性能指标为加速过程发动机总油耗,状态方程为车辆纵向动力学模型。下面将建立发动机油耗模型、车辆纵向动力学模型,并构建加速过程油耗最优控制问题。

1.1 发动机油耗建模

在经济性驾驶研究中,发动机瞬时喷油率建模主要有两种方法:① 利用发动机万有特性图计算瞬时喷油率^[10-11];② 忽略车辆传动系、发动机的影响,通过车速、加速度间接计算瞬时喷油率^[12-13]。由于第一类方法能更直接地反映发动机和车辆特性,具有较高的精度,因此本文采用第一类方法。

本文研究的发动机为 2.0 L 自然吸气式汽油机,在已知的发动机万有特性图的基础上,通过最小二乘法拟合建立发动机喷油率、力矩外特性、最佳经济性曲线的解析模型。发动机喷油率建模中,共有测试点 120 个,采用四次多项式建立瞬时喷油率 F_s 相对发动机转速 n_e 、转矩 T_e 的关系

$$F_s(T_e, n_e) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^i A_{1+j} \left(\frac{T_e}{200} \right)^{i-j} \left(\frac{n_e}{6500} \right)^j \quad (1)$$

对 F_s 简单变换即可得到燃油消耗率 $b_e(T_e, n_e)$,得到的发动机万有特性 (Brake specific fuel consumption, BSFC) 如图 1 所示。

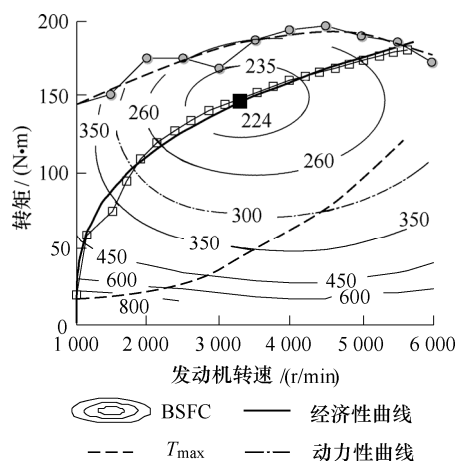


图 1 发动机万有特性图

力矩外特性共有测试点 12 个,其拟合原理与万有特性拟合一致。采用四次多项式拟合得

$$T_{\max}(n_e) = \sum_{i=0}^4 k_{ci} \left(\frac{n_e}{6500} \right)^i \quad (2)$$

式中 k_{ci} ——拟合系数。

T_{\max} 的拟合结果如图 1 所示。发动机经济性曲线 T_{eco} 拟合结果如图 1 所示, 拟合表达式为

$$T_{\text{eco}}(n_{\text{eco}}) = k_{\text{eco}}(n_{\text{eco}} - 1000)^{\gamma} \quad (3)$$

式中 n_{eco} ——经济转速;

k_{eco} ——拟合系数;

γ ——拟合函数的指数, 本文取为 1/3。

为验证拟合效果, 选择拟合优度 R 以及 R_{NL} 两个典型指标来衡量^[14], 其中 $R, R_{\text{NL}} \in [0, 1]$, 为量纲一评价指标, 越接近 1 表征拟合效果越好。瞬时喷油率、力矩外特性、经济性曲线三者的拟合优度 R 分别为 0.996、0.946、0.990, R_{NL} 分别为 0.951、0.971、0.959, 均较为接近 1, 表明拟合效果可满足要求。

实际上, 发动机在动态过程中, 由于气缸充量系数降低、燃油雾化变差等因素影响, 利用稳态油耗 MAP 估计动态喷油率存在一定的误差。影响误差大小的一个重要因素为发动机工作点的变化剧烈程度, 平缓变化则误差较小, 反之则较大, 因此基于力矩变化率引入动态修正项, 得到动态油耗

$$F_d(T_e, n_e) = F_s(T_e, n_e) + k_d \left(\frac{dT_e}{dt} \right)^2 \quad (4)$$

式中 F_d ——动态油耗;

k_d ——动态油耗修正系数。

欧洲的一项关于发动机动态油耗的试验显示, 在 ETC 循环中利用稳态油耗 MAP 计算总油耗, 所测试的三种发动机误差均小于 4%^[15]。本文中假设在 NEDC 循环中修正油耗占总油耗 5%, 估算得到 $k_d = 8 \times 10^{-4} (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}) / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2$ 。

1.2 车辆纵向动力学模型

本文研究车辆传动系包括发动机、湿式多片离合器、CVT 变速器、主减速器以及差速器等。兼顾简洁性和准确性, 对车辆动力学对象进行适当简化: ① 忽略发动机以及变速器旋转部件的高阶动态特性, 以及传动系的间隙和扭转变形; ② 离合器动态过程中无滑模现象。

加速过程中, 车辆的行驶阻力包括空气阻力和滚动阻力

$$F_R(v) = \frac{1}{2} C_D \rho_a A_v v^2 + fmg \quad (5)$$

式中 F_R ——整车行驶阻力;

C_D ——风阻系数;

ρ_a ——空气密度;

A_v ——车辆迎风面积;

v ——车辆速度;

f ——滚动阻力系数;

m ——整车质量;

g ——重力加速度。

车辆的驱动力来源于发动机输出力矩, 经过传动系作用于轮胎。由整车受力平衡可得

$$\frac{i_g i_0 \eta_T}{r_w} T_e = \delta m \dot{v} + F_R(v) \quad (6)$$

式中 i_g ——变速器速比;

i_0 ——主减速器速比;

r_w ——车辆轮胎半径;

T ——发动机有效输出力矩;

δ ——旋转质量系数;

η_T ——传动系传动总效率, 包括离合器、CVT、主减速器、差速器的效率。

CVT 传动效率是速比、输入转矩的函数, 但尚无理论模型可供使用, 功率损失主要为机械摩擦损失以及泵油损失, 在非低传动比及低载荷下, 传动效率较高(80%~95%)且变化平缓^[16-17]。由于加速过程中, 变速器速比和发动机功率均较大, 因此本文将传动系传动效率简化为一常数 η_T 。CVT 速比控制具有三种典型模式: ① 动力模式, 将发动机工作点控制到最佳动力性曲线上(图 1); ② 经济模式, 将工作点控制到最佳经济性曲线上(图 1); ③ 综合模式, 权衡动力性与经济性。本文主要关注经济性策略, 因此以经济模式控制 CVT 速比, 使得发动机以任意功率输出时, 总工作在式(3)所述的经济性曲线上。

车辆的行驶距离 s 、速度 v 、加速度 a 满足

$$\dot{s} = v \quad \dot{v} = a \quad (7)$$

发动机转速 n_e 经过变速器、主减速器两次减速传递至轮胎, 因此 n_e 与 v 满足

$$n_e = 60 \times \frac{v}{2\pi r_w} i_g i_0 \quad (8)$$

1.3 加速过程最优控制问题

最优控制问题包括性能指标、状态方程以及约束集三部分。

1.3.1 当量油耗性能指标

在加速过程中, 仅通过加速过程总油耗是无法衡量其经济性的, 其原因是不同加速策略对应的加速距离差异巨大, 因此必须消除加速距离的影响。本文提出加速过程当量油耗性能指标, 由发动机总油耗和距离修正油耗组成。

车辆从初速度 v_0 加速至末速度 v_f 过程中的发动机总油耗为

$$J_L = \int_0^t F_d(T_e, n_e) dt \quad (9)$$

式中 J_L ——Lagrange 型性能指标;

v_f ——末态速度。

对于加速距离影响, 考虑如图 2 所示模型。

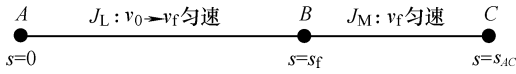


图 2 性能指标组成示意图

车辆由 A 点加速至 B 点, 再以 v_f 匀速行驶至 C 点, 其中 C 点是虚拟的终点。不同的加速策略会导致末端距离 s_f 不同, 但到达 C 点的速度和行驶距离均相等, 因此考虑 AC 段的总油耗可消除加速阶段距离差异的影响, 其中 BC 段的油耗

$$J_M = \frac{s_{AC} - s_f}{v_f} F_C(v_f) \quad (10)$$

式中 J_M ——Meyer 型性能指标;

s_f ——AB 段距离;

s_{AC} ——AC 段距离, 为虚拟的固定参数;

$F_C(v_f)$ ——以 v_f 匀速行驶时发动机喷油率。

在特定问题中, s_{AC} 、 s_f 、 $F_C(v_f)$ 均为常数, 因此将式(10)中常数项消除, J_M 等价于

$$J_M = -\frac{s_f}{v_f} F_C(v_f) \quad (11)$$

由式(11)知, J_M 实质上是对加速度距离的修正, 其代表以末态速度行驶距离 s_f 对应的油耗。综上, 得到加速过程 Bolza 型当量油耗指标

$$J = J_M + J_L = -\frac{s_f}{v_f} F_C + \int_0^{t_f} F_d(T_e, n_e) dt \quad (12)$$

1.3.2 状态方程

状态方程服从车辆纵向运动学和动力学模型。以行驶距离 s 、速度 v 为状态变量, 以发动机力矩 T_e 、速比 i_g 为控制变量, 结合式(5)~(7)构建状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{F_R(v)}{\delta m v} \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{i_g i_0 \eta_T}{\delta m r_w} \end{pmatrix} T_e \quad (13)$$

1.3.3 约束集

CVT 按经济性模式控制, 则发动机工作于经济性曲线, 满足约束

$$T_e - k_{eco} (n_e - 1000)^{\gamma} = 0 \quad (14)$$

边界限制包括发动机转速/转矩、变速器速比

$$\begin{cases} n_{emin} \leq n_e \leq n_{emax} \\ 0 < T \leq T_{max}(n_e) \\ i_{gmin} \leq i_g \leq i_{gmax} \end{cases} \quad (15)$$

在性能指标、状态方程、约束集模型化基础上, 建立经济性加速策略辨识最优控制问题

$$J = J_M + J_L = -\frac{s_f}{v_f} F_C + \int_0^{t_f} F_d(T_e, n_e) dt$$

s.t.

$$\begin{pmatrix} \dot{s} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{F_R(v)}{\delta m v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{i_g i_0 \eta_T}{\delta m r_w} \end{pmatrix} T_e$$

$$T_e - k_{eco} (n_e - 1000)^{\gamma} = 0$$

$$n_e = 60 \times \frac{v}{2\pi r_w} i_g i_0$$

$$n_{emin} \leq n_e \leq n_{emax}$$

$$0 < T \leq T_{max}(n_e)$$

$$i_{gmin} \leq i_g \leq i_{gmax}$$

$$\mathbf{x}(0) = (0 \quad v_0)^T$$

$$\mathbf{x}(t_f) = (s_f \quad v_f)^T \quad (16)$$

该最优控制问题终端时间 t_f 自由, 加速距离 s_f 自由, 性能指标、状态方程均为非线性函数, 且存在非线性约束, 难以通过极大值原理等方法得到理论解, 因此本文采用 Legendre 伪谱法进行数值求解。

2 最优加速问题的伪谱法求解

伪谱法是一种全局配点法, 相对于传统配点法、打靶法等直接法具有更好的求解精度和收敛速度^[18-20]。其基本原理为在正交配点处离散化连续问题, 通过全局插值多项式逼近状态和控制变量, 从而将最优控制问题转化为非线性规划问题 (Nonlinear programming, NLP), 求解 NLP 得到最优控制律。针对末端非完全自由的最优控制问题, Legendre 伪谱法具有更好的收敛性^[20], 因此本文采用 Legendre 伪谱法求解。

2.1 Legendre 伪谱法转化

Legendre 伪谱法的基本特征如下: ① 采用 LGL(Legendre-Gauss-Lobatto)配点; ② 状态和控制变量通过 Lagrange 全局插值逼近; ③ 性能函数通过 Gauss-Lobatto 积分计算。本文提出的经济性加速策略辨识问题, Legendre 伪谱转化步骤如下。

首先, 将定义行车过程的时域 $[0, t_f]$ 转换到区间 $[-1, 1]$, 以满足 Legendre 正交多项式定义区间

$$\tau = \frac{2t - t_f}{t_f} \quad \tau \in [-1, 1] \quad (17)$$

在 LGL 配点处将问题式(16)离散化, 时域离散点记为 $\tau_i, i = 0, 1, \dots, N$ 。距离 s 、速度 v 、发动机力

矩 T_e 、转速 n_e 和速比 i_g 分别离散为 S 、 V 、 T 、 N 和 I 。

状态变量通过插值多项式参数化后, 微分运算可转化为对基函数的微分运算

$$\dot{\mathbf{x}}(\tau_k) \approx \dot{\mathbf{X}}(\tau_k) = \sum_{i=0}^N D_{ki} \mathbf{X}_i \quad k=0,1,\dots,N \quad (18)$$

式中 $\mathbf{D}^{(N+1) \times (N+1)}$ ——微分矩阵, 具体形式见文献[20]。

由此将状态方程转化为 $2(N+1)$ 个等式约束

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^N D_{ki} S_i = \frac{t_f}{2} V_k \\ \sum_{i=0}^N D_{ki} V_i = \frac{t_f}{2} \left(\frac{i_0 \eta_T}{\delta m r_w} I_k T_k - \frac{F_R(V_k)}{\delta m} \right) \end{cases} \quad (19)$$

性能函数中的积分项通过 Gauss-Lobatto 积分法转化

$$J = -\frac{S_N}{V_N} F_C(V_N) + \frac{t_f}{2} \sum_{k=0}^N \omega_k F_d(T_k, N'_k) \quad (20)$$

式中 ω ——积分权重^[19]。

通过上述步骤, 可将最优控制问题转化为以 S_k 、 V_k 、 T_k 、 I_k 、 t_f 为待优化变量的 NLP

$$J = -\frac{S_N}{V_N} F_C(V_N) + \frac{t_f}{2} \sum_{k=0}^N \omega_k F_d(T_k, N'_k)$$

s.t.

$$\begin{aligned} & \left\| \sum_{i=0}^N D_{ki} S_i - \frac{t_f}{2} V_k \right\| \leq \varepsilon \\ & \left\| \sum_{i=0}^N D_{ki} V_i - \frac{t_f}{2} \left(\frac{i_0 \eta_T}{\delta m r_w} I_k T_k - \frac{F_R(V_k)}{\delta m} \right) \right\| \leq \varepsilon \\ & \left\| T_k - k_{eco} (N'_k - 1000) \right\| \leq \varepsilon \\ & N'_k = 60 V_k I_k i_0 / (2 \pi r_w) \\ & n_{emin} \leq N'_k \leq n_{emax} \\ & 0 < T_k \leq T_{max}(N'_k) \\ & i_{gmin} \leq I_k \leq i_{gmax} \end{aligned} \quad (21)$$

式中 ε ——约束松弛量。

通过伪谱法转化得到的 NLP 问题, 待优化参数个数为 $4N+1$, 可通过成熟的求解器求解, 本文选用 SNOPT 进行求解^[21], 其基本算法为序列二次规划法。

2.2 数值求解结果

伪谱法数值求解中, 模型参数均基于实际车辆设置, 除发动机模型已在第 1.1 节中介绍外, 其他参数如表 1 所示。

表 1 车辆主要参数

参数	数值	参数	数值
风阻系数 C_D	0.316	传统效率 η_T	0.9
迎风面积 A_f/m^2	2.22	最小转速 $n_{min}/(r/min)$	1 000
车轮半径 r_w/m	0.307	最大转速 $n_{max}/(r/min)$	6 000
整车质量 m/kg	1 600	最小速比 i_{gmin}	0.4
滚动阻力系数 f	0.028	最大速比 i_{gmax}	2.6
旋转质量系数 δ	1.2	拟合系数 k_{eco}	11.133
主减速器速比 i_0	3.863	拟合指数 γ	1/3
空气密度 $\rho_a/(kg/m^3)$	1.226	约束松弛量 ε	10^{-6}

根据初始速度 v_0 、末端速度 v_f 、最小加速度 a_{min} 设置如表 2 所示 6 种加速任务。

表 2 加速过程设置

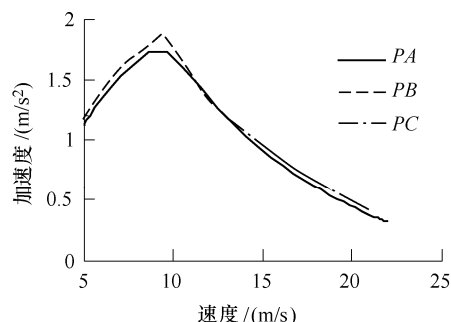
编号	初速度 $v_0/(m/s)$	末速度 $v_f/(m/s)$	最小加速度 $a_{min}/(m/s^2)$
PA	5	22	0
PB	5	13	0
PC	14	21	0
PD	15	30	0
PE	15	30	0.2
PF	15	40	0.2

6 种加速任务求解结果如图 3 所示, 由图 3 可知以下几点。

(1) 图 3a、3b 中, PB 、 PC 与 PA 三者在同一速度下对应的经济性加速度基本一致。当 $v \in (5, 10)$ m/s 时, 经济性加速随着速度增加而增加。实际上, 此时受变速器最大速比限制, 经济性加速度等于车辆的最大输出加速度。当 $v \in (10, 22)$ m/s 时, 经济性加速度随着速度增加而递减。

(2) 从图 3c 可以看出, PE 在 $v \in (15, 23)$ m/s 时, 经济性加速度随着速度增加而递减, 之后以设定的最小加速度加速。 PF 则在全时域内均以设定的最小加速度运行。两者在 $v \in (15, 23)$ m/s 内加速度策略存较大差异, 由此可推测经济性加速度不仅与当前车速相关, 而且也与目标末态速度相关。

(3) 图 3d 为状态方程约束(式(19))的逼近误差, PE 、 PF 均可以 10^{-6} 满足约束, PD 误差高达 10^{-2} 。实际上, PD 求解过程中性能指标无法收敛, 得到的最优轨迹无法精确满足约束。



(a) PA 、 PB 、 PC 的速度-经济性加速度关系

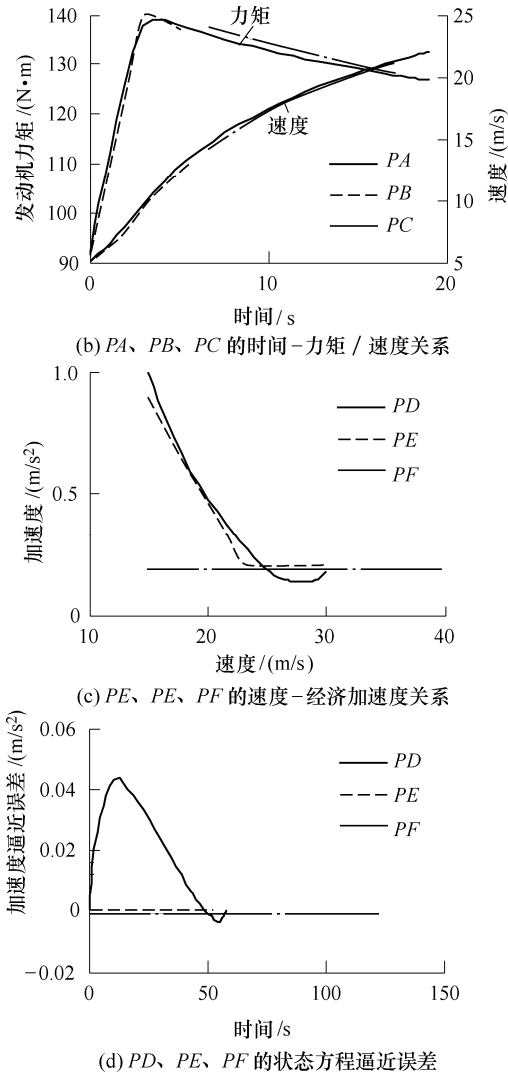


图 3 经济性加速过程伪谱法求解结果

3 机理分析

为进一步解释第 2.2 节中数值求解结果,下面将通过微元法分析求解结果的形成机理,并对经济性加速策略的节油机理进行分析。

3.1 数值求解结果解释

由于油耗模型存在基于力矩变化率的动态修正部分,且存在速比等约束,难以直接解析分析经济性加速过程。为便于解析分析,对模型做进一步简化:① 忽略动态油耗;② 暂不考虑变速器速比、加速度边界限制。考虑图 4 所示模型。

车辆从 (t, v) 匀加速至 $(t + \Delta t, v + \Delta v)$, 则加速过程的加速度 a 、加速距离 Δs 为

$$\begin{cases} a = \Delta v / \Delta t \\ \Delta s = \frac{\Delta v(2v + \Delta v)}{2a} \end{cases} \quad (22)$$

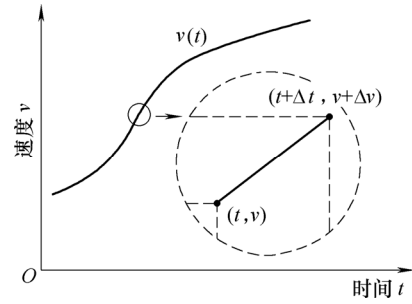


图 4 加速过程微元分析示意图

在此过程中,认为空气阻力不变,则发动机所需有效输出转矩、转速为

$$\begin{cases} T_e(v, a) = \frac{r_w}{i_g i_0 \eta_T} (F_R(v) + \delta m a) \\ n_e(v) = 60 v i_g i_0 / (2 \pi r) \end{cases} \quad (23)$$

由此可计算出发动机的喷油率

$$F(v, a) = F_s(T_e(v, a), n_e(v)) \quad (24)$$

式中 $F(v, a)$ ——在速度 v 、加速度 a 时对应的发动机喷油率。

微元模型中 Bolza 型综合性能指标

$$\Delta J = -\frac{\Delta v(2v + \Delta v)}{2av_f} F(v_f, 0) + \frac{\Delta v}{a} F(v, a) \quad (25)$$

对 Δv 取极限,即可推导出加速单位速度对应的油耗指标 E_1 为

$$\min_a E_1 = \frac{F(v, a) - v F(v_f, 0) / v_f}{a} \quad (26)$$

由此知特定速度对应的经济性加速度 a 必使得 E_1 取最小值,其不仅与发动机的喷油特性密切相关,而且取决于末态速度 v_f 。因此经济性加速策略是相对 v_f 的动态策略,由于加速末速度的不同,导致加速策略也存在差异,即同一车速在不同加速任务中对应的经济性加速度也是不同的,如图 3c 中 PE 和 PF 在 $v \in (10, 30)$ m/s 时的加速度。

图 5a 为末速度为 22 m/s 对应的加速单位速度能耗。由图 5a 可知,任一速度下 E_1 相对加速度 a 均为严格凸函数,且存在最优 a 使得 E_1 取极小,因此第 2.2 节中 PA 均可精确收敛。 PB 和 PC 具有类似特性。图 5b 所示为末速度为 30 m/s 对应的加速单位速度能耗。由图 5b 可知,当速度较大时, E_1 相对加速度 a 为严格单调递增,最优加速度逼近 0。这很好地解释了第 2.2 节中 PD 不收敛以及 PE 在速度较大时以设定的最小加速度加速的现象。

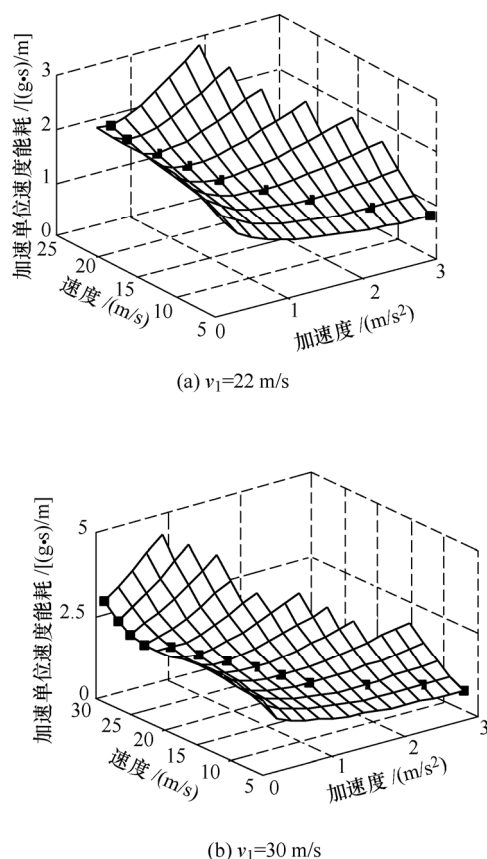


图 5 不同末端速度对应的加速单位速度能耗

由上述分析可知, 对于末速度不同的加速任务, 油耗最优的加速度策略是动态的、存在差异的。经济性加速度不仅取决于当前车速和发动机特性, 同时依赖于末态速度, 因此难以通过简洁的解析式描述各类加速任务对应的策略。对于已知末速度的加速任务, 则可通过第 2 节的伪谱最优控制方法求解获得油耗最优的加速策略。

3.2 经济性加速策略机理解释

加速过程中, 发动机输出的有效能量被用于: 获得整车动能、克服滚阻、克服风阻。若忽略滚阻和风阻, 则发动机仅工作于 BSFC 图中效率最高点即可。简证如下。

针对式(26), 若忽略滚阻和风阻, 则性能函数中无须对距离进行修正, 即 $F(v_f, 0)$ 为 0, 此时式(26)等价于

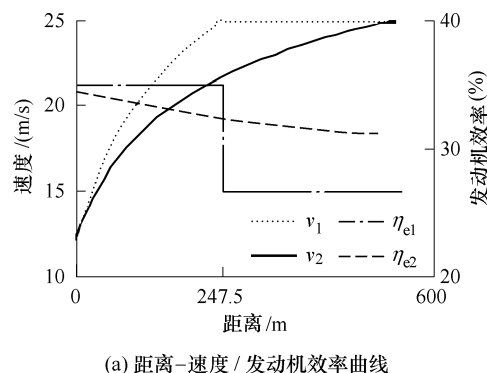
$$\min_a E_1 = \frac{F(v, a)}{a} = \frac{F_s(T_e, n_e)}{i_g i_0 \eta_T T_e / (r_w \delta m)} \propto v \frac{F_s(T_e, n_e)}{n_e T_e} \propto b_e(T_e, n_e) \quad (27)$$

因此, 在特定速度下, 若要最小化 E_1 , 仅将发动机控制到最高效率点即可, 即最小的 b_e 点(图 1)。实际上, 不同加速策略对应的加速距离、风阻

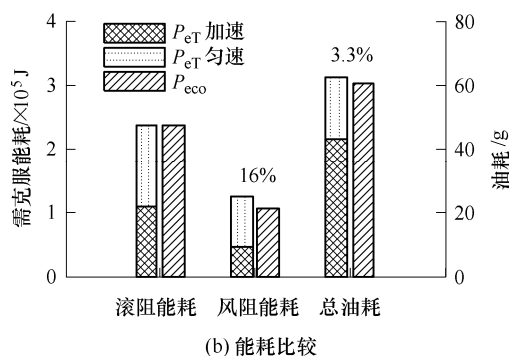
曲线均不同, 在行驶相同距离内, 所克服的总风阻能耗是存在差异的; 其次, 不同加速策略对应的力矩曲线存在差异, 因此发动机效率曲线存在差异。

以从 12 m/s 加速至 25 m/s 的加速过程为例, 采用两种加速策略: ① 恒以发动机最优效率点加速, 记为 P_{eT} ; ② 经济性加速策略, 记为 P_{eco} 。所得结果如图 6 所示, 其中 D 表示行驶距离, η_e 表示发动机效率。由图 6a 可知, P_{eT} 加速度大于 P_{eco} , 加速距离为 247.5 m, 匀速阶段行驶距离 291.5 m。 P_{eT} 在加速阶段发动机恒工作于最优效率点, 效率为 34.9%, 在匀速行驶阶段发动机效率仅为 26.5%, P_{eco} 对应的发动机效率处于两者之间。由图 6b 可知, P_{eT} 克服的风阻能耗比 P_{eco} 多 16%。总体上, P_{eT} 策略全时域内发动机效率略优于 P_{eco} , 但需要多克服更多风阻能耗, 整体多消耗 3.3% 的油耗。

综上所述, 经济性加速策略本质上是发动机效率和风阻能耗的整体协调优化。



(a) 距离-速度/发动机效率曲线



(b) 能耗比较

图 6 两种加速策略对比分析

3.3 实用化处理

由式(27)知经济性加速度与末端速度相关, 然而对于工程实用化, 如实时驾驶辅助系统设计, 期望经济性加速度不依赖于未知的末速度, 而仅与当前状态相关。

为解决该问题, 本文采用如下实用化简化手段: 考虑图 2 所示模型, BC 段采用经济性速度 v_{eco} 运行, 而非以末端速度 v_f 运行。体现在式(26)中,

即以 $F(v_{eco}, 0)/v_{eco}$ 代替 $F(v_f, 0)/v_f$ 。其物理意义是不同策略的加速距离存在差异, 但通过以经济车速匀速通过加速距离的油耗进行修正。

通过上述实用化处理方法, 式(26)变换为

$$\min_a E_1 = \frac{F(v, a) - vF(v_{eco}, 0)/v_{eco}}{a} \quad (28)$$

本文研究车辆的经济车速 $v_{eco}=25 \text{ m/s}$ 。由式(28)可知经济性加速度仅取决于当前车速和发动机喷油特性。图 7 为不同速度对应的经济性加速度, a_{\max} 为车辆最大加速度曲线, a_{ana} 为由式(28)计算所得的油耗最小化加速度曲线, a_{eco} 为不同速度下的经济性加速度, 其由最大加速度曲线和油耗最小化加速度曲线共同决定。由图 7 可知, 车辆在低速时可采取较大加速度, 而在高速时应采取平缓的加速策略。

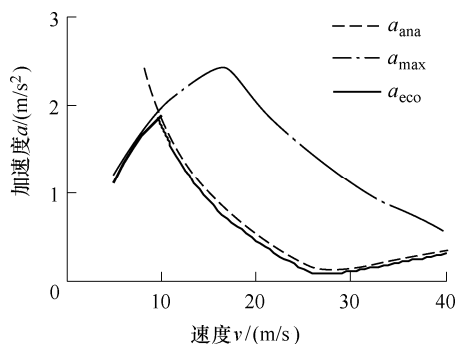


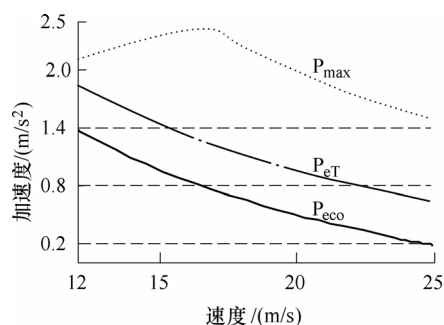
图 7 经济性加速度曲线

该实用化处理方法虽然无法获得全局最优的加速策略, 只可以获得近似解, 当是由于消除了经济性加速度对未知末速度的依赖, 使得经济性加速度可通过当前车速确定, 因此是工程应用的一个实用化处理方案。

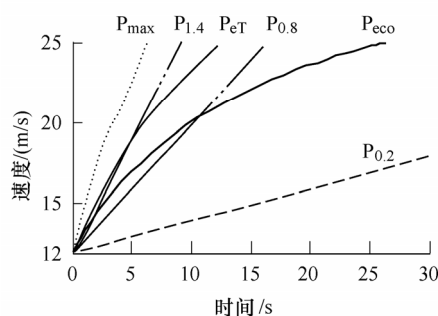
4 经济性加速策略节油效果

为验证经济性加速策略的节油能力, 考虑从速度 $v_0=12 \text{ m/s}$ 加速到 $v_f=25 \text{ m/s}$ 的过程, 采用 6 种加速策略: 经济性加速度(P_{eco}); 发动机恒工作于效率最高点(P_{eT}); 最大加速度(P_{\max}); 恒定加速度 1.4 m/s^2 ($P_{1.4}$)、 0.8 m/s^2 ($P_{0.8}$)和 0.2 m/s^2 ($P_{0.2}$)。6 种加速度曲线如图 8a 所示, 对应的速度曲线如图 8b 所示。

6 种加速策略的油耗等信息如表 3 所示。由表 3 可知, 6 种加速过程对应的时间和距离各不相同, 行驶距离最大相差达到 $1\,079 \text{ m}$, 这也佐证了仅考虑加速过程总油耗是无法反映加速过程经济性的, 必须引入 J_M 指标消除距离差异的影响。从综合指标 J 的相对大小可以看出, P_{\max} 加速策略经济性最差,



(a) 6 种过程应对加速度



(b) 6 种过程对应速度

图 8 6 种加速策略对比

与 P_{eco} 相比多消耗燃油 44.8%。 P_{eT} 加速策略中, 虽然发动机恒工作在最高效率区域, 但是多克服了风阻能耗(见第 3.2 节分析), 与 P_{eco} 相比仍多消耗燃油 7.8%(注: 第 3.2 节计算相差 3.3%, 表示两种策略行驶相同距离的总油耗差异, 非当量油耗差异)。从 $P_{1.4}$ 、 $P_{0.8}$ 、 $P_{0.2}$ 结果可以看出, $P_{1.4}$ 、 $P_{0.2}$ 多消耗燃油均达 15% 以上, $P_{0.8}$ 加速过程最接近经济性加速 P_{eco} , 但仍多消耗 6.5% 燃油。由此可进一步说明过于激进和过于温和的加速度均会使得加速过程经济性变差, 必须根据车速选择合适的加速度。

表 3 不同加速策略结果对比

参数	加速策略					
	P_{eco}	P_{eT}	P_{\max}	$P_{1.4}$	$P_{0.8}$	$P_{0.2}$
总时间/s	26.35	12.63	6.48	9.29	16.25	65.00
距离/m	541.8	247.5	123.2	171.8	300.6	1\,025.5
总油耗/g	59.75	42.66	43.79	41.70	45.77	106.21
修正油耗/g	-35.00	-15.99	-7.96	-11.10	-19.42	-77.68
当量油耗/g	24.74	26.67	35.83	30.60	26.35	28.53
当量油耗差异(%)	0	7.8	44.8	23.7	6.5	15.3

5 结论

本文提出运用伪谱最优控制的方法定量求解一类 CVT 车辆的油耗最优加速策略, 并解析分析了求解结果的形成机理。由求解结果及分析可得以下结论。

(1) 油耗最优的加速策略是一种动态策略, 取

决于目标末速度以及发动机油耗特性。经济性加速策略可通过本文构建的模型和方法数值求解获得。

(2) 经济性加速策略本质上是发动机效率和风阻能耗的整体协调优化。过于激进或过于平缓的加速均会造成经济性变差;低速时可采取较大加速度,高速时应采取平缓加速。

本研究中使用的方法可用于其他车辆的经济性加速策略分析,所得策略可用于指导驾驶员操作以及车辆自动驾驶系统的设计。下一步研究可考虑“发动机-液力变矩器-变速器”整体效率最优时的经济性加速策略。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[J]. Beijing: Chinese Statistical Bureau, 2012.
- [2] BARKENBUS J N. Eco-driving: An overlooked climate change initiative[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 762-769.
- [3] ERICSSON E. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors[J]. Transportation Research Part D : Transport and Environment, 2001, 6(5): 325-345.
- [4] de VLIEGER I. On board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars[J]. Atmospheric Environment, 1997, 31(22): 3753-3761.
- [5] EL-SHAWARBY I, AHN K, RAKHA H. Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions[J]. Transportation Research Part D : Transport and Environment, 2005, 10(1): 13-30.
- [6] JOHANSSON H, FÄRNLUND J, ENGSTRÖM C. Impact of eco driving on emissions and fuel consumption[R]. Borlänge: Environment and Natural Resources Division, 1999.
- [7] KURIYAMA M, YAMAMOTO S, MIYATAKE M. Theoretical study on eco-driving technique for an electric vehicle with dynamic programming[C]//Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference on, Incheon Korea: IEEE, 2010: 2026-2030.
- [8] LI S E, PENG H, LI K, et al. Minimum fuel control strategy in automated car-following scenarios[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2012, 61(3): 998-1007.
- [9] VOULGARIS P. Fuel minimization of a moving vehicle in suburban traffic[D]. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
- [10] KAMAL M A S, MUKAI M, MURATA J, et al. On board eco-driving system for varying road-traffic environments using model predictive control[C]//2010 IEEE International Conference on Control Applications, Yokohama, Japan: IEEE, 2010: 1636-1641.
- [11] NOUVELIERE L, BRACI M, MENHOUR L, et al. Fuel consumption optimization for a city bus[C]//United Kingdom Automatic Control Council International Conference. Manchester, England: University of Manchester, 2008: 1-6.
- [12] BIGGS D C, AKCELIK R. An energy-related model of instantaneous fuel consumption[J]. Traffic Engineering & Control, 1986, 27(6): 320-325.
- [13] CAPPIELLO A, CHABINI I, NAM E K, et al. A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption[C]//The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Singapore: IEEE, 2002: 801-809.
- [14] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨[J]. 中国卫生统计, 2002, 19(1): 9-11.
ZHANG Shiqiang. Approach on the fitting optimization index of curve regression[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2002, 19(1): 9-11.
- [15] ERICSON C, WESTERBERG B, EGNELL R. Transient emission predictions with quasi stationary models[J]. SAE Paper, 2005-01-3852, 2005.
- [16] 韩冬. 金属带式 CVT 的效率分析与功率分流研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
HAN Dong. Efficiency analysis and power split research on metal-pushing V-belt CVT[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [17] WANG Hongyan, QIN Datong, ZHANG Boying, et al. Experiment study on speed ratio control of metal v-belt type CVT[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(1): 11-15.
- [18] BENSON D. A Gauss pseudospectral transcription for optimal control[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [19] ELNAGAR G, KAZEMI M A, RAZZAGHI M. The pseudospectral Legendre method for discretizing optimal control problems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(10): 1793-1796.
- [20] FAHROO F, ROSS I M. Advances in pseudospectral

methods for optimal control[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008: 18-21.

- [21] GILL P E, MURRAY W, SAUNDERS M A. SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization[J].

SIAM Review, 2005, 47(1): 99-131.

作者简介: 徐少兵, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆经济性驾驶、最优控制。

E-mail: xsbing2008@foxmail.com

李升波(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为智能化汽车、车辆动力学控制、最优控制理论与应用等。

E-mail: lishbo@mail.tsinghua.edu.cn



第 4 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

基于钛合金高速铣削刀具失效演变的硬质合金涂层刀具设计与制造

作者: 李安海

毕业学校: 山东大学

指导教师: 赵军

由于密度小、强度/重量比高、高温稳定性好以及耐腐蚀性好等特点, 钛合金被广泛应用于航空航天领域。但因钛合金低的导热性、高的化学活性以及弹性模量小等特点, 使其切削加工性差、刀具寿命低, 被公认为难加工材料, 这限制了切削速度和生产率的提高。本文以钛合金高速铣削刀具失效演变对硬质合金涂层刀具性能的要求为指导和依据, 以高性能硬质合金刀具材料设计、刀具结构设计和刀具涂层设计为核心, 对硬质合金涂层刀具设计理论与方法进行了深入研究和探讨, 最终研制成功适用于钛合金型面侧壁铣削的整体硬质合金涂层立铣刀, 并研究了其切削性能。

对高速铣削切屑形貌进行了多视角表征, 研究了高速铣削钛合金 Ti-6Al-4V 时切屑自由表面、背面和纵截面的形貌特征及其参数变化规律; 通过锯齿形切屑剪切带微观组织分析, 揭示了锯齿形切屑形成的绝热剪切机理(热塑性剪切失稳), 发现了切屑背面层组织的衍射峰宽化效应。研究了不同切削条件下铣削 Ti-6Al-4V 时的刀具失效演变过程, 以及切削力和切削温度的变化规律, 分析了刀具失效演变过程中刀具不同部位(前、后刀面)和不同失效阶段的刀具失效形貌。揭示了高速切削热-力学多场强作用下刀具由微观损伤到宏观失效的演变机制, 刀具失效机理主要为涂层剥落、磨粒磨损、粘结磨损、氧化磨损、扩散磨损和热-机械疲劳的综合作用。从而对刀具性能提出了以下要求: 刀具材料和涂层材料应与钛合金具有良好的化学相容性; 刀具材料应具有较好的耐磨性和抗疲劳性能; 应提高涂层与刀具基体的界面结合力, 以避免涂层过早剥落, 采用耐高温的涂层材料以保护刀具基体。

基于钛合金高速铣削刀具失效演变对刀具材料的性能要求, 通过研究硬质合金刀具材料与工件材料的化学相容性和摩擦学匹配性, 并建立 WC-Co 硬质合金刀具材料微观结构参数(Co 含量、平均晶粒度和 WC 晶粒邻接度等)与宏观性能之间的关系, 从而对钛合金高速铣削用硬质合金刀具材料进行了设计。结果表明, Co 质量分数为 10% 的亚微晶粒硬质合金(平均晶粒度为 0.6~0.8 μm)盘与钛合金球对磨时, 可获得较小的摩擦因数和较好的耐磨性。基于 UG 平台二次开发了整体硬质合金立铣刀参数化设计和二维图绘制及生成软件, 实现了对整体立铣刀的计算机辅助快速设计。利用整体硬质合金立铣刀切削钛合金工件材料的三维铣削有限元仿真, 以低的切削力和切削温度为目标, 优化了螺旋角、刀具前角和刀齿数等刀具结构和刀刃几何参数。采用直径 20 mm 的整体硬质合金平头立铣刀铣削钛合金时, 主要刀具结构和刀刃几何参数优化结果为: 芯部直径为 12 mm、齿数为 4 齿、螺旋角为 44°以及侧刃前角为 9°。

烧结制备并测试表征了不同 Co 质量分数和晶粒尺寸的硬质合金刀具材料, 研究了其制备工艺、微观结构和力学性能, 以及抗机械疲劳性能, 验证了材料设计的合理性。硬质合金断裂主要为脆性断裂, 断裂方式主要为沿晶断裂和少数 WC 晶粒的穿晶断裂的混合模式。晶粒细化提高了硬质合金材料硬度和横向断裂强度, 但以降低断裂韧度为代价; 高 Co 含量硬质合金的横向断裂强度和断裂韧度有所提高, 但硬度较低。采用三点弯曲试样研究了硬质合金刀具材料的机械疲劳行为, 结果表明, 疲劳断裂通常起源于缺口尖端的不均匀缺陷, 如微孔洞或粗大 WC 晶粒处, 低 Co 含量硬质合金由于韧性较差, 其疲劳行为主要取决于横向断裂强度, 高 Co 含量硬质合金的断裂韧度是影响其抗疲劳性能的主要因素。

为减少涂层在刀具失效过程中的剥落现象, 提出硬质合金刀具涂层设计方法, 基于复合涂层性能参数等效理论建立了复合涂层沉积过程残余热应力产生模型, 并将计算结果与有限元仿真结果进行了对比验证, 为难加工材料高速切削刀具涂层选择与设计提供理论依据。刀具涂层厚度选择 3 μm 时, 在涂层沉积过程中可获得较小的残余热应力。研究了 CrN、TiN、TiAlN、AlTiN 和 AlCrN 五种涂层的硬质合金盘与钛合金球的摩擦学匹配特性。结果表明, TiAlN 涂层与钛合金对磨时可获得较小的摩擦因数和较好的耐磨性。提出了高速铣削刀具涂层设计的基本原则, 为高速铣削刀具涂层的设计提供了依据。

研究了所研制的整体硬质合金立铣刀高速铣削钛合金的切削性能, 并将其与某同类刀具进行了切削对比试验, 其切削力低于该同类刀具, 切屑形成和刀具寿命都优于该同类刀具。