RWD TC ??????????????

tags: `Traction Control` `Control Logic` `Safety` `STM32F446`

---

1. ??????

1.1 ????

- 依照路況與駕駛意圖（油門、方向盤）動態調整後輪 slip ratio ，維持在一個「有抓地、但允許適度打滑」的區間。
- 直線追求最大加速（較高 slip）。
- 繞 8 / 賽道過彎時，優先穩定性（較低 slip，降低過度 oversteer 風險）。
- 在任何感測器異常或條件不明時， 優先安全 ：關閉或大幅限制 TC 介入。

1.2 ??????????10 ms, 100 Hz?

邏輯順序：

1. 讀取感測器與指令：四輪輪速、 IMU、方向盤、 T_driver。
2. 更新錯誤偵測（ Fault 檢查）。
3. 若允許 TC：
   - 估測車速 v。
   - 計算後輪 slip ratio（左右與平均）。
   - 濾波方向盤轉角。
   - 根據模式 + 方向盤 + 車速，計算目標 slip λ^*。
   - 依據誤差 $e = \lambda^* - \bar{\lambda}$，執行 PI 控制，得到 ΔT。
4. 外層安全邏輯覆蓋：低速、嚴重打滑、大轉角、 Fault → 改寫 T_cmd。
5. 將最終 T_cmd 與狀態資訊送出給馬達與儀表。

---

2. ???????? Slip ??

2.1 ????

- 輸入：前輪輪速 (ω_{FL}, ω_{FR})。
- 輪胎半徑： (R_{front})。

運算:

$$ v = \max\left(\frac{\omega_{FL} + \omega_{FR}}{2} R_{front},\ 0.1 \right) $$

實作重點:

- 只用非驅動輪（前輪）當作車速來源，避免驅動輪打滑時速度估測錯誤。
- 下限 0.1 m/s 避免後面除以 0。

2.2 ?? Slip Ratio

- 輸入: 後輪輪速 (ω_{RL}, ω_{RR})、車速 (v)、後輪半徑 (R_{rear})。

$$ \lambda_L = \frac{\omega_{RL} R_{rear} - v}{\max(v, 0.1)}, \quad \lambda_R = \frac{\omega_{RR} R_{rear} - v}{\max(v, 0.1)} $$

平均 slip:

$$ \bar{\lambda} = \frac{\lambda_L + \lambda_R}{2} $$

物理意義:

- ($\lambda = 0$): 完全滾動，無打滑。
- ($0 < \lambda < 0.3$): 可接受的加速打滑區間。
- ($\lambda > 0.5$): 嚴重打滑，需要強制限扭或收油。

2.3 ???????

方向盤訊號可能有抖動，使用一階低通:

$$ \delta_{f}[k] = \alpha \delta_{f}[k-1] + (1-\alpha) \delta_{raw}[k] $$

- ($\alpha = 0.92$) 左右，對應約 3 Hz 截止頻率，能濾掉高頻雜訊又不延遲太多。

2.4 ???? ? ??

使用縱向加速度最大值作為路面摩擦指標:

- 記錄一個指數平滑峰值:

$$ a_{x,peak}[k] = \max(0.95, a_{x,peak}[k-1] + 0.05, |a_x[k]|, \ |a_x[k]|) $$

- 依 ($a_{x,peak}$) 粗略分級:
  - ($> 8.5,\text{m/s}^2$): 高 μ（乾柏油）。
  - ($5.5 \sim 8.5,\text{m/s}^2$): 中 μ（略濕或一般柏油）。

- (3.5 \sim 5.5,\text{m/s}^2): 低 μ (濕滑地面)。
- (< 3.5,\text{m/s}^2): 很滑 (碎石、草、冰)。

對應一個增益倍數 μ_scale: 0.5–1.0, 用來縮放 Kp。

---

3. ?? Slip ?* ????

3.1 ???????

每個模式有一組基準參數:

- 直線:
  - (K_p) 大、 (\lambda_{base} \approx 0.20)、方向盤敏感度低。
- 繞 8:
  - (K_p) 中、 (\lambda_{base} \approx 0.16)、方向盤敏感度中等。
- 賽道:
  - (K_p) 較小、 (\lambda_{base} \approx 0.14)、方向盤敏感度高 (轉角一大就明顯降 slip)。

這些參數封裝在 `TC_ModeState_t` 中:

- `Kp, Ki`
- `lambda_base`
- `steer_sens`
- `min_tq_ratio`

3.2 ???? ?* ???

令 (d = |\delta_f|) (濾波後方向盤轉角, 單位 deg)。

使用分段線性 + 模式敏感度來估計剩餘縱向抓地比例 (k_{steer}):

1. 小轉角: (d < 4,\deg)
   - 幾乎直線, (k_{steer} = 1.0)。
2. 輕~中彎: (4 \le d < 20,\deg)
   - 以線性方式遞減: [k_{steer} = 1.0 - s_1 (d - 4)]
   - 斜率 (s_1) 由 `steer_sens` 決定 (模式不同斜率不同)。
3. 中~重彎: (d \ge 20,\deg)
   - 再以較小斜率往下掉到下限 (k_{steer,min} \approx 0.4)。

3.3 ????

高速時可接受稍高目標 slip，低速時保守：

- $v_{kmh} = v \times 3.6$。
- 定義

$$\text{speed\_factor} = 0.97 + 0.03 \cdot \min\left(\frac{v_{kmh}}{40}, 1\right)$$

約略在 0.97–1.0 之間微調。

3.4 ?* ????

綜合模式基準、方向盤與速度：

$$\lambda^* = \max\left(\lambda_{base} \cdot k_{steer} \cdot \text{speed\_factor},\ 0.08 \right)$$

- 下限 0.08 避免過度保守導致動力太小。
- 模式越偏「穩定」的（賽道），λ_{base} 越小，且 `steer_sens` 越大（大轉角時 λ* 明顯下降）。

---

4. PI ???????

4.1 ????

$$e = \lambda^* - \bar{\lambda}$$

- $e > 0$：實際 slip 比目標低 → 可以多給一點扭矩。
- $e < 0$：實際 slip 過大 → 需要限縮扭矩。

4.2 ??? Kp

根據 μ 估測結果縮放 Kp：

$$K_{p,eff} = K_p \cdot \text{mu\_scale}$$

- 高 μ：mu_scale ≈ 1.0 → 使用原始 Kp，反應積極。
- 低 μ：mu_scale ≈ 0.5–0.65 → Kp 變小，避免在低抓地路面上震盪。

4.3 PI ???

$$\Delta T = K_{p,eff} e + K_i \int e, dt$$

實作時:

1. 先依當前 Kp_eff 和 Ki_eff 計算 p_term 與 i_term。
2. 積分部分有限制:

[\int e,dt \in [-I_{max}, I_{max}], \quad I_{max} = 1.0]

4.4 ???????Anti-windup?

避免在以下情況發生「積分殘留」:

- 低速起步（ v 很小）。
- 駕駛收油（ T_driver 幾乎為 0）。

設計:

1. 若 (v < 2,\text{km/h}):
   - 直接令 integral = 0。
2. 若 (|T_{driver}| < 2,\text{Nm}):
   - 積分快速衰減，例如 integral *= 0.1。

這樣可避免:

- 上一輪在打滑時累積的積分影響下一次起步。
- 收油後， TC 仍因舊積分而錯誤限扭。

---

5. ???????????

5.1 ??????

根據 PI 結果先算一個「候選」扭矩:

[T_{raw} = T_{driver} (1 + \Delta T)]

再以模式決定的最小扭矩比例做內部飽和:

- (T_{min} = T_{driver} \cdot \text{min_tq_ratio})
- (T_{max} = T_{driver})

[T_{pi} = \min(\max(T_{raw}, T_{min}), T_{max})]

5.2 ?????????? TC

如果速度很低（例如 $v < 3$ km/h）：

- 直接讓馬達扭矩 = 駕駛要求：

$$T_{cmd} = T_{driver},\quad \text{TC 狀態 = OFF}$$

理由：

- 起步時 slip 訊號還不穩定，容易誤判。
- 低速起步可先依靠駕駛腳感。

5.3 ??????????

若任一後輪 slip 超過安全上限（例如 $|\lambda_L|$ or $|\lambda_R| > 0.4$）：

- 強制大幅限扭，保護輪胎與穩定：

$$T_{cmd} = 0.5\, T_{driver}\quad \text{或更低}$$

- TC 狀態標記為 SAFETY。

5.4 ??????????

若濾波後方向盤轉角非常大（例如 $|\delta_f| > 30°$）：

- 視為重彎或近似 U-turn，必須高度保守：

$$T_{cmd} = T_{driver} \cdot \text{min\_tq\_ratio}$$

- 對應模式：
  - 直線模式：min_tq_ratio ≈ 0.55。
  - 繞 8 模式：≈ 0.40。
  - 賽道模式：≈ 0.30。

5.5 Fault ??????

若 `TC_Fault_IsSafeToRun()` 回傳 false：

- 代表感測器或扭矩命令有重大異常。
- 建議作法：
  - 將 `tc_status` 設為 FAULT。
  - 視車輛需求：
    - 直接設 `T_cmd = 0`（完全不輸出，交回原車 ECU 控制）。
    - 或設成一個安全的固定比例（例如 0.3 * T_driver，當作 limp-home）。
- 同時透過 CAN 發出錯誤碼與故障旗標，讓儀表或 log 紀錄。

6. ?????????? / ? 8 / ???

6.1 ????

- 只在靜止時切換模式　　：避免行駛中改變控制器行為，造成車手感覺突變。
- 模式改變時，重新套用一組參數：　　(K_p, K_i, \lambda_{base}, \text{steer_sens}, \text{min_tq_ratio})。
- 模式切換當下會重置部分內部狀態（例如積分、方向盤濾波器）。

6.2 ??????

1. 車手按　　MODE 按鈕，或經由　　CAN 設定　　`target_mode`。
2. 若當下車速　　(< 1,\text{km/h}):
   - 立即套用新模式參數到　　`current_mode`。
   - 將　integral = 0、steer_deg_f = 0。
3. 若當下車速　　(\ge 1,\text{km/h}):
   - 只更新　　`target_mode`，並設　　`change_pending = true`，但不改變實際控制。
   - 等車輛之後停下來時，在控制迴圈中偵測　　v 變小，才套用新模式。

6.3 ??????????

- 儀表顯示目前　　`current_mode`，以及若有　　`change_pending`
  則以閃爍或圖示表示「等待靜止後切換」。
- 這樣車手可以預先選好下一個模式，到起點或　　PIT 停下來時會自動接上新參數。

---

7. ???????

設計這套　　TC 時，可以用「由內而外」的分層方式來理解：

1. 最內層：　　**PI** 控制
   - 只管：誤差　　e → ΔT。
   - 內含自適應　　Kp（看　　μ）與積分　　Anti-windup。
2. 中間層：目標　　**slip** 生成
   - 只管：模式　　＋ 方向盤　　＋ 車速　　→ λ*。
   - 反映駕駛意圖（直線　　/ 繞　8 / 賽道）與當下彎道狀態。
3. 外層：安全機制
   - 只管：是否在危險狀態（低速、嚴重打滑、大轉角、　　Fault）。
   - 一旦觸發，會直接覆蓋內層計算結果，強制進入保守或關閉狀態。

依照這個分層結構，你可以在不破壞外層 Safety 的前提下，調整與實驗內層的 Kp/Ki、λ^* 表格與 μ 估測演算法，使車輛在不同場景（直線、繞 8、賽道）都有一致且可預期的手感與安全邊界。

Revision #2
Created 2026-04-01 02:06:01 UTC by TaipeiTechRacing
Updated 2026-04-06 16:39:15 UTC