次世代自動車センサシステム 自動車エンジンの吸入空気量計測技術

特集解説

キーワード

空気流量計, 熱線流速計, 吸入空気量, 脈動流, 平均空気流量

西 村 豊
内 山 薫
(株)日立製作所

1. はじめに

シリンダ内の空気量と燃料量の質量比である空燃比は、エンジンの排気成分及び燃費を決定づける最も重要な因子であり、該空気量を計測する空気流量計には高い精度が要求される。近年、エンジンのポンピング損失を回避するため、ガソリンエンジンにおいても筒内噴射等により絞り弁を開いた状態で運転する頻度が高くなり、吸入空気流は脈動流となりがちである。そのため、空気流量計は脈動流の平均流量を高い精度で検出するための新たな技術が必要となっている。

本稿では、自動車用空気流量計として主流となってきた熱線式の構成とその開発技術、熱線式で脈動流及び逆流を含む脈動流の平均流量を測定するための技術について述べる。

2. 熱線式空気流量計

2.1 自動車用空気流量計の動向

電子制御燃料噴射システムは、図1に示すように吸入空気量信号に基いて、燃料噴射量及び点火時期等を最適値に制御するシステムである。1970年代後半より、マイクロコンピュータを用いた電子制御燃料噴射システムが普及し始め、低コスト、小型、高信頼を目標に空気流量計の方式をめぐって多くの開発がなされてきた。その結果、可動

ベーン式、カルマン渦式、熱線式の順に実用化¹⁾されてきた。現在は、熱線式が、空気の質量流量を直接検出でき、前2者に比べて流量の測定範囲が広く、可動部分がなく、小形であることから、空気流量計の多くが熱線式になった。熱線式は、流速計であるので、流量計管路に熱線プローブを固定して、あらかじめ流量と信号の関係を校正して使う。
2.2 熱線式空気流量計

熱線式は定温度差型を用いている。熱線プローブと空気流の温度差が一定となるように、熱線プローブをジュール加熱して、その時の熱線プローブへの供給電流を空気流速信号とする方法である。実用化された代表的なものを図2～図4に示す。図2は吸気通路内の整流筒に、熱線プローブとして直径70 μ mの白金線を張架し、空気温度を検出するプローブはセラミックス板上に形成した白金薄膜抵抗を用いている。塵埃付着による精度低下を回避するため、エンジンキーオフ後、熱線プローブに大電流を流して高温に加熱し付着塵埃を焼いて除去²⁾している。図3は吸気通路を分岐した分流通路に熱線プローブ、空気温度プローブを配置する分流式³⁾⁴⁾である。この分流式は、脈動流の高精度測定とエンジン不調時の逆火に対する熱線プローブの保護が目的である。熱線プローブと空気温度プローブは共に、円柱セラミックスボビンに白金線をコイル状に巻きその上をガラス被覆した巻線型である。

図4は吸気通路の任意の位置に装着可能なインサート型である。熱線プローブ、分流通路、電子回路を一体構造にして、吸気通路の側壁から挿入する構成で、空気流量計を含む吸気系配管の小型化が目的である。吸気管断面積のばらつきは空燃比センサを用いた空燃比閉ループ制御とこの

図1 電子制御燃料噴射システム

Sensor Systems in Automobiles for Coming Generation.
Intake Air Measurement Technique for Automotive Engine.
By Yutaka Nishimura & Kaoru Uchiyama (Hitachi, Ltd.).

図2 熱線式空気流量計（白金線）²⁾

(a) 分流式 A³⁾

(b) 分流式 B⁴⁾

図3 分流式熱線空気流量計

(a) 装着状況

(b) 外観写真

図4 インサート型熱線式空気流量計

開ループ制御補正値の記憶により自動補正する。

上記の熱線式空気流量計を実用化するために開発された技術を下記する。なお、脈動流測定に関連する分流式、流れの向き検知プローブは、3章で述べる。

(a) センサ部の形状

構造的には、白金線を空気流中に直接張架するホットワイヤ型、白金線をセラミックボビンに巻いた巻線型、セラミック基板上に白金薄膜抵抗を設けたホットフィルム型が実用化された。ホットワイヤ型は白金細線を用いているので熱容量が小さく応答性は良いが、細線に堆積する塵埃により流量計の精度劣化を生じやすい課題がある。一方、巻線型及びホットフィルム型は熱容量が大きいため応答性の点では劣るが、塵埃が堆積し難くまた塵埃堆積による精度劣化も小さい特長がある。

熱線プローブへの塵埃堆積は、プローブ形状の他に熱線プローブの温度が影響する。プローブ表面への塵埃付着は主に塵埃中の水分により塵埃を互いに付着させて生じている。そこで熱線プローブの温度を200～250℃として塵埃表面の水分油分を気化させて塵埃の付着堆積を低減⁵⁾させた。巻線型プローブは表面積が小さく、上述の温度にするのが実用上容易である。

(b) 電子回路

従来の熱線流速計電子回路の他に次に示す新たな電子回路が開発された。

図5は、従来の回路に比べ増幅器をひとつ増して、空気温度プローブと熱線プローブに同じ抵抗値のプローブが使えるようにした回路である。従来に比べ、空気温度プローブの抵抗値を小さくでき小型になる。その結果、空気温度の変化を遅れなく検出でき温度補正をすることが容易である。さらに、プローブ固定端からの熱伝導による誤差も、空気温度プローブと熱線プローブを同一形状にすることにより両プローブへの熱伝導の影響を相殺でき、誤差を低減⁶⁾している。

図6は、ホットフィルム型で熱線プローブ R_H の温度を検出する抵抗体 R_S を追加して、抵抗体 R_S をブリッジに組み込み、熱線プローブ R_H に直列接続する固定抵抗を不要にした回路⁷⁾である。センサ部は R_H と R_S を重ねて配置するので複雑であるが、冷却が必要な該固定抵抗がないので、

図5 熱線式流量計の電子回路

熱線プローブの発熱量が大きい場合、電子回路が簡単になる特長がある。

図6 熱線式流量計の電子回路（傍熱型）7)

3. 脈動流の計測

エンジンはピストンの往復動によって空気を吸入し、絞り弁の開閉により吸入空気量を増減する。エンジンの回転速度を一定にして、絞り弁開度を開くにつれ、吸入空気流は振幅比が大きい脈動流となり、特に4気筒エンジンでは、逆流を伴った周波数が20～200Hzの脈動流となる。熱線式で脈動流を測定する場合、図7に示すように、次の2つの課題がある。

(1) 大振幅脈動流の平均流量の測定誤差

脈動流では、熱線流速計信号を逐一空気流速に換算したその平均値は真の平均空気流速より小さくなる。原因のひとつは、熱線式の流速変化に対する信号の応答遅れである。信号は空気流速に対して非線型な特性をもつために、流速変化に対する信号の遅れがあると該平均値は真値より小さくなる。この傾向は応答遅れが大きい程、脈動振幅が大きい程顕著になる。他の原因は、振幅が大きくなり小さな逆流を伴うようになると、熱線プローブで加熱された空気が、逆流時に再び熱線プローブの周囲を包むためである。

(2) 逆流を含む脈動流における測定誤差

通常の熱線式は流れの向きを検出できず、逆流時も順流の流れと同じ信号を出力する。そのため、測定平均値は真値より大幅に大きくなる。

これ等の課題に対して、分流式と流れの向き検知プローブが開発された。

3.1 分流式

分流式は、分流路の流速計信号と全体の流量の関係をあらかじめ検定して、該流速計信号から全体の流量を求める方式（図3）である。分流路を長くして分流路空気流の慣性を大きくすると、相対的に分流路の平均流速が増加（いわゆる平方根誤差）するので、前述の大振幅脈動流に伴う誤差と相殺する。即ち、分流路の空気流速 u は次式のように表わされ、右辺第1項の慣性項が大きい程、

図7 吸入空気流波形と空気流量測定誤差

平均流速が増加するので、

$$\Delta p \sim L \frac{du}{dt} + \frac{u^2}{2}$$

Δp ：分流路出入口に加わる圧力差

u ：分流路の流速

L ：分流路の長さ

前述の誤差を相殺するように分流路の長さ L を選ぶ。

逆流は、分流路の流体ダイオード作用を使う。逆流時に分流路内を空気流が流れないような構造にして、誤差を従来の半分以下にした。これは、図8に示すように逆流時分流路の出入口に作用する圧力が慣性分も含めて平衡するように、逆流動圧の受圧面積を調整する。慣性分だけ逆流動圧をやや大きく受ける受圧面積において誤差が最小となる。

3.2 流れの向き検知プローブ

順流逆流の2方向の流れの向きと、流速を検出する熱式

図8 分流路の流体ダイオード作用による逆流誤差の低減

流速計⁸⁾を図9に示す。シリコン板の表側に白金薄膜ヒータと該ヒータの上下流に白金薄膜温度センサを配置し、ヒータを一定温度に制御して、該上下流の温度センサの温度差から流量を、該温度差の符号から流れの方向を検出する方式である。裏面はエッチングによりダイヤフラム構造にして熱容量を小さくしている。空気流がシリコン板の表側に沿って流れるように金属ケースで固定し、屈曲した分流通路内に突き出す形で配置している。平均空気流速は、順流を加算、逆流を減算して求める。なお、分流通路は、3.1節で述べた大振幅脈動流に伴う誤差を低減する目的である。

4. おわりに

自動車用として実用化された空気流量計の技術動向を概説した。4気筒エンジンの吸入空気流は、周波数20～200 Hzで逆流を伴う大振幅脈動流であり、非定常圧縮性の影響が大きい流れである。但し、応答遅れが小さい熱線式が実現できれば、脈動流の平均空気量の計測はほぼ可能である。

(a) 流速検知部と測定原理

(b) 実装構造

(c) 脈動流における平均流量の測定誤差

図9 逆流検知機能付き熱式空気流量計⁸⁾

しかし、シリコンの微細加工技術を用いて熱容量を低減した熱線式においても、自動車環境における機械的強度の確保と電子回路の簡略化の要求から、必要な応答時間を得にくい状況である。そのため、分流式と組み合わせる等の実用技術が付加されてきたが、まだ充分ではなく、さらに改良が期待されている。

(平成9年11月28日受付)

文献

- 1)笹山：「自動車エレクトロニクス」、山海堂、pp41-48 (1997)
- 2)R.Sauer：「Hot Wire Air Mass Meter---A New Air Flow Meter for Gasoline Fuel Injection Systems」、SAE Paper 800468 (1980-2)
- 3)N.Arai, et al：「Advanced Design for Bypass Type of Hot-Wire Air Mass Meter」、SAE Paper 900259 (1990-2)
- 4)公開特許公報、特開平6-18300
- 5)大須賀、大山：「熱線を用いた分流式流量計の耐ダスト特性の検討」、機論(C編)、50巻、451号、pp504-511、(昭59-3)
- 6)Y.Nishimura, et al：「A Hot Wire Air Flow Meter for Intake Air Flow Measurement」、SAE Paper 890301 (1980-2)
- 7)R.Sauer：「Hot-Film Air Mass Meter---A Low-cost Approach to Intake Air Measurement」、SAE Paper 880560、(1988-2)
- 8)U.Konzelmann, H.Hecht, M.Lembke：「Breakthrough in Reverse Flow Detection-A New Mass Air Flow Meter Using Micro Silicon Technology」、SAE Paper 950433 (1995-2)

西村 豊

(非会員) 1949年4月1日生まれ。73年3月九州大学工学部修士課程卒業。同年(株)日立製作所日立研究所入社。自動車用燃料供給システム、変速機制御システム、センサの研究開発に従事。同所主任研究員。

内山 薫

(非会員) 1952年9月11日生まれ。68年4月(株)日立製作所入社。74年3月日立京浜工業専門学校電子工学科卒業。自動車エンジン制御用センサの設計、開発に従事。自動車機器事業部 主任技師。