

#20

TECにおけるPID 制御について

APPLICATION NOTE

TECのPID制御について

さまざまなレベルの機能を備えた温度コントローラーを製造している企業は数多くあります。

これらの機器は、異なるアルゴリズムと制御ループを使用して設定温度を維持します。制御ループの範囲は、単純な比例制御から比例積分制御、完全なPID（固有積分積分）制御まであります。各タイプの制御ループは、温度制御の領域内の特性を満たします。完全なPID機能を備えた温度コントローラーは、最も柔軟性の高い制御を提供し、同じコントローラーが非常に大きな熱質量を迅速に設定して温度を設定したり、温度が変化する環境で非常に小さな熱質量で非常に厳しい温度安定性を維持したりできます。

ただし、この柔軟性には代償が伴います。この代償として、温度制御が求められる機器に対し適切なPID値を決定する必要があります。

多くの機器では、決定が経験的に行われます。多くの場合、多くの時間を費やして値のさまざまな組み合わせを試し、どちらが最適かを確認します。複数の温度でさまざまな負荷をテストする必要がある本番環境でこれを行う必要がある場合、無駄な時間が急速に増大する可能性があります。

ILX LDT-5948およびLDT-5980は、自動チューニング機能を備えた完全なPIDチューニング機能を提供し、大量の手動試行錯誤チューニングプロセスを削除して自動化できるようにします。

ただし、自動調整プロセスでは、熱負荷に対して完全に最適化された温度制御ループが生成されない場合があります。

このアプリケーションノートは、自動チューニングを行わない機器のチューニング方法を説明したり、自動チューニングで望ましい結果が得られない場合に役立ちます。

これらの両方の場合において、PID制御ループのより良い理解は、PID定数のより効率的な決定を可能にします。

PID係数

温度制御の目標は、プロセス誤差に対する温度誤差を最小限に抑えることです。温度誤差「e」は、熱負荷の測定温度とその設定温度との差です。一般に、時間「 t_0 」での完全な温度制御努力「 u_0 」の比例、積分、および微分成分は、次の式で説明できます。

$$u_0 = P \cdot e_0 + I \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e(t) dt + D \cdot \frac{de}{dt} \quad (1)$$

この方程式では、比例力 $P \cdot e_0$ は、その名前が示すように、現時点での温度誤差に単純に比例します。

厳密に比例制御またはゲイン制御を備えた温度コントローラーは、ゲインの値が一定のままで設定値が高すぎる場合、かなり長い減衰時定数で温度設定値を中心に発振する傾向があります。

ゲインの設定が低すぎると、温度が設定値に達するのに必要以上に時間がかかります。

さらに、一定のゲインを使用した比例制御により、温度が実際の設定値からのポイントオフセットに落ち着き、わずかではあるがゼロ以外のエラーが残ります。

このエラーは、一般に「定常状態エラー」と呼ばれます。

積分努力項 $I \cdot e(t)dt$ はエラーが存在した時間に比例した寄与を提供します。

この用語は、比例的な努力が減衰した後のオフセット補正を可能にします。

大きな温度エラーがある場合に何らかの方法で制御努力が制限されている場合、たとえば電流制限モードで動作するTEC温度コントローラーでは、温度制御アルゴリズムにより積分努力が「ワインドアップ」またはコントローラーの可能な最大の努力よりも大きい値で飽和する可能性があります。

これが意味することは、温度が最終的に設定値に近づくと、積分の努力が「巻き戻され」なければならないため、かなり大きな量だけ設定値をオーバーシュートすることです。

これを防ぐために、コントローラーには「Anti-Reset Windup」アルゴリズムを設計に組み込む必要があります。ILX LDT-5948およびLDT-5980 TECコントローラーには、このようなコントローラーが含まれています。

「I」の値を小さくすると、緩和時間が長くなり、オーバーシュートを最小限に抑えることができます。一方、「I」の値を大きくすると、オーバーシュートが大きくなりますが、負荷をより速く設定できます。

最終的な用語である微分力または微分力 $D \cdot de / dt$ は、単位時間あたりの誤差の変化に比例する寄与を提供し、セットポイントまたは負荷の変化が発生した場合の比例力よりも大きな制御変化を防ぎます。

本質的に、派生的な努力の理由は、エラーを可能な限り迅速に低減し始めるために、変更後すぐに、必ずしも正確ではないが、1つの大きな修正を提供することです。

この用語は、オーバーシュートを減らすためにも使用できます。「D」の値を小さくすると、最小限の制限で温度を変更できますが、値を大きくすると、大きな温度エラーがシステムの応答を圧倒するのを防ぎます。微分項がゼロでない場合、より厳密な制御を得るために、比例項および積分項の大きな値を使用できます。

エラー信号が特にノイズの多い場合、微分項は望ましくない誤った「修正」を引き起こす可能性があります。

制御アルゴリズムには、このアクションを防ぐためのフィルタリングが設計されている必要があります。

誤差が変化している場合にのみ差分エフォートがアクティブになるため、セットポイントの大幅な急速な変化は、制御エフォート全体に非常に大きな「キック」またはインパルスを生成する可能性があります。

場合によっては、この出力の急上昇は損傷を与えたり、単に望ましくないことがあります。

このような場合、微分項を書き換えて、エラー項の代わりにプロセス変数自体の負の時間微分を組み込むことができます。

プロセス変数が温度の場合、新しい導関数項は $-D \cdot d / dt (T(t))$ になります。ただし、設定値が一定であるべきときに変動する場合、差動制御の努力により誤った結果が生成されます。これらの合併症の発生を防ぐには、 $D = 0$ に設定して微分項を単純に無効化することをお勧めします。

PID制御ループを熱負荷に適用する

1セットのPID値を持つTECコントローラーは、異なる熱負荷が接続されている場合、必ずしも同じ方法で温度を制御するとは限りません。

さらに、同じ負荷が異なる設定温度または広い設定温度で制御される場合、負荷の熱特性は通常、異なるPID定数を必要とします。

この理由の1つは、温度が変化するとTECで生じる効率のばらつきです。

ペルチェ素子が熱負荷を加熱するために使用されている場合、ペルチェ接合の通常の動作によって生成される I^2R 加熱は、ヒートシンクから引き出される熱に加えてその熱が負荷に送り込まれるため、効率が向上します。

熱負荷を冷却する場合、ペルチェ接合のこの同じジュール加熱により、負荷自体からの熱に加えてこの余分な熱も除去する必要があるため、モジュールの効率が低下します。

これらの効率の違いにより、必要な比例ゲイン値が異なります。

たとえば、45°Cの設定点温度にすばやく到達して維持するように最適化された制御ループは、同じPID値が5°Cの設定点温度で使用されると、温度が振動する可能性があります。このため、温度設定値を10°C以上変更する必要がある場合は、最適な温度制御を提供するために、2番目の温度に異なるPID値のセットを使用することをお勧めします。すべての負荷に必要なわけではありませんが、このガイドラインは温度までの時間が重要なほとんどの負荷に適用できます。PID値の単一のセットを複数の設定点温度で使用する必要がある場合、最低設定点温度から生成されたPIDをすべてに使用する必要があります。

最後に、同じ熱負荷と温度セットポイントを使用した自動チューニング操作の繰り返しでは、通常、同じPID値は生成されません。

これは、システムの熱特性が実行ごとに一定に保たれないためです。

TECモジュール、ヒートシンク、および環境の温度は、実行から変化する可能性があり、ほとんどの場合、変化します

実行するには、異なる熱システム、したがって異なるPID値が表示されます。

PID値の特定のセットが特定のアプリケーションに受け入れられるかどうかを決定するものは何ですか？

答えはテスト条件によって異なります。上記の例から、テストがPID値を絶えず更新せずに設定点温度の頻繁な変更を必要とする場合、温度範囲の中間で臨界減衰応答をもたらす最適よりも低いセットが必要になる場合があります。一方は極端で、もう一方は過減衰です。

別の例には、最高温度（または最低温度）を超えることに非常に敏感なデバイスの温度を制御する要件が含まれる場合があります。

このような場合、温度のオーバーシュートによりデバイスが故障したり、サンプルが破壊されたりする可能性があります。

この状況では、PID値を調整してより過減衰の応答を生成し、温度のオーバーシュートを最小限に抑える必要があります。

1つの最後の例は、特定の温度で多くのデバイスをテストする必要がある場合です。

これらのテストは通常、実稼働タイプの環境に分類されます。このような場合、テストのスループットを最大化できるように、温度までの時間を最小限に抑えることが非常に望まれます。

この時間を最小化するためにPID値を調整すると、温度がオーバーシュートする可能性があります。温度が設定値まで迅速に安定する限り、この状態は許容可能です。

異なるPID値でのシステムの動作

さまざまなPID値が特定の熱システムにどのように影響するかを理解するために、LDM-4984レーザーマウントを介してダイオードレーザの内部TECを制御するLDT-5948を使用してデータを提示します。

さまざまなPID値のセットが熱応答がPID値の変化によってどのように変化するかを示すために示されています。特に明記しない限り、各ケースは25°Cの設定点から始まります。

ケース1では、次の温度プロファイルが使用されました。

0:00 - Start at temperature setpoint of 25°C

0:30 - Change setpoint to 45°C

3:00 - Change setpoint to 5°C

5:30 - Change setpoint to 25°C

8:00 - Stop

最終的なケースでは、温度プロファイルが変更され、レーザー駆動電流の有効化と無効化によって引き起こされる小さな温度摂動が組み込まれました。これらのケースは、25°Cの温度設定値で始まります。いずれの場合も、最初（温度が安定していると想定される場合）を除き、システムは90秒間安定してから、追加の熱変化を受けます。これらの場合の温度プロファイルは次のとおりです。

- 00:00 - Start at temperature setpoint of 25°C
- 00:30 - Enable 100mA laser drive current
- 02:00 - Disable laser drive current
- 03:30 - Change setpoint to 45°C
- 05:00 - Enable laser current
- 06:30 - Disable laser current
- 08:00 - Change setpoint to 5°C
- 09:30 - Enable laser current
- 11:00 - Disable laser current
- 12:30 - Change setpoint to 25°C
- 14:00 - Enable laser current
- 15:30 - Disable laser current
- 17:00 - Stop

Figure 1 LDT-5948のデフォルトのPID値である20.0、0.800、および1.000をそれぞれ使用した温度応答を示しています。

デフォルトでは、このレーザーの温度制御に最適なソリューションとは言えないことは明らかです。振動により、TECは正の電流制限から負の電流制限まで繰り返しスイングします。これは主に、制御されている非常に小さな熱負荷に対してゲインまたは比例値が高く設定されているためです。

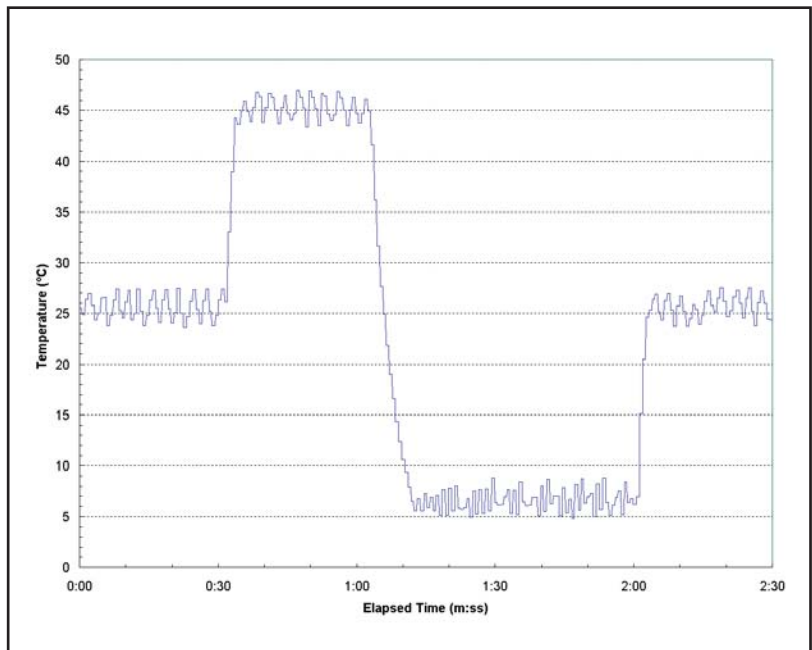


Figure 1. Default PID Values

PID定数が不明な熱負荷を温度制御するために、デフォルトのPID値を手動で調整して安定したソリューションを得ることができます。このアプローチは非常に時間がかかる場合があります。より効率的な方法は、機器の自動調整機能を利用することです。機器は一連のPID値を生成し、温度設定値でのオーバーシュートとリングングを最小限に抑えて迅速に閉じることを可能にします。自動調整アルゴリズムは、通常、熱負荷に応じてPID値を生成するのに15~45分かかります。図2は、5°C、25°C、および45°Cの温度設定値での自動調整の結果を示しています。

図2から判断するのは難しいかもしれませんが、温度制御のパフォーマンスは、自動調整機能が実行された設定温度によって影響を受けます。図6と図7は、45°Cと5°Cで発生する温度設定の詳細を示しています。

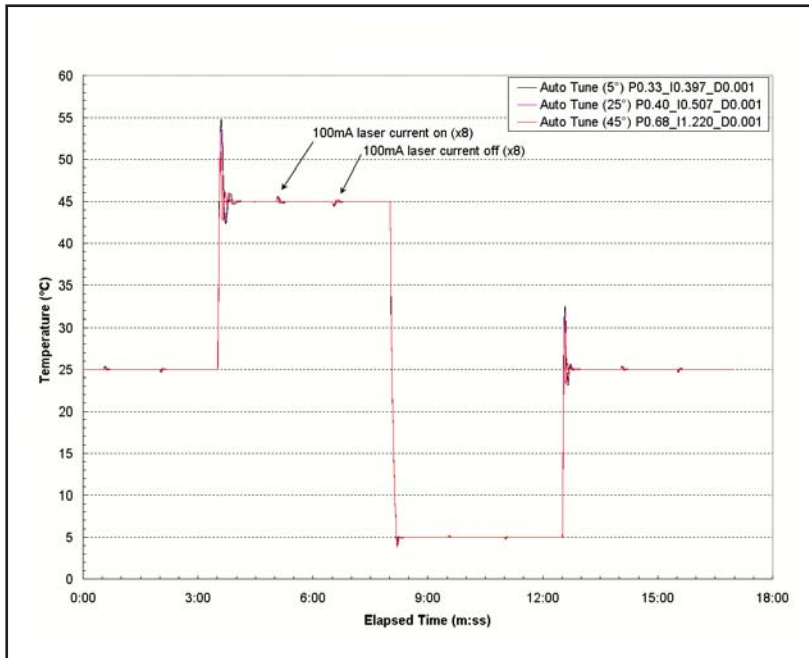


Figure 2. Autotuning Performance

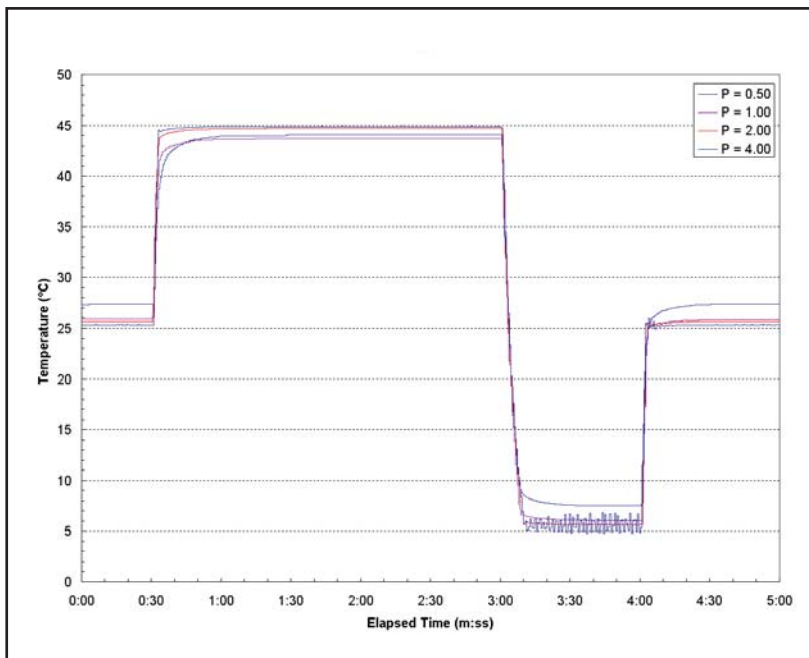


Figure 3. 比例変動のみ

前述のように、自動調整は、温度設定値にすばやく到達できるようにする一連のPID値を生成します。

これは、負荷が設定点に近づくと、負荷がある程度の温度オーバーシュートと振動を経験することを意味します。負荷が熱スパイクに非常に敏感である場合、または最大（または最小）温度を超える場合、PID値の新しいセットを手動で決定する必要があります。PID値を手動で決定するには、積分項と微分項をゼロに設定して比例項のみを変更することから始めるのが最善です。目標は、出力を発振させずに可能な限り高いゲインを持つことです。

図3は、比例項が増加すると、定常状態の温度が応答性が増加して設定点温度に近づくことを示しています。ゲインを大きくしすぎると、 $P = 4.00$ の 5°C セットポイントで明らかに発振が発生します。

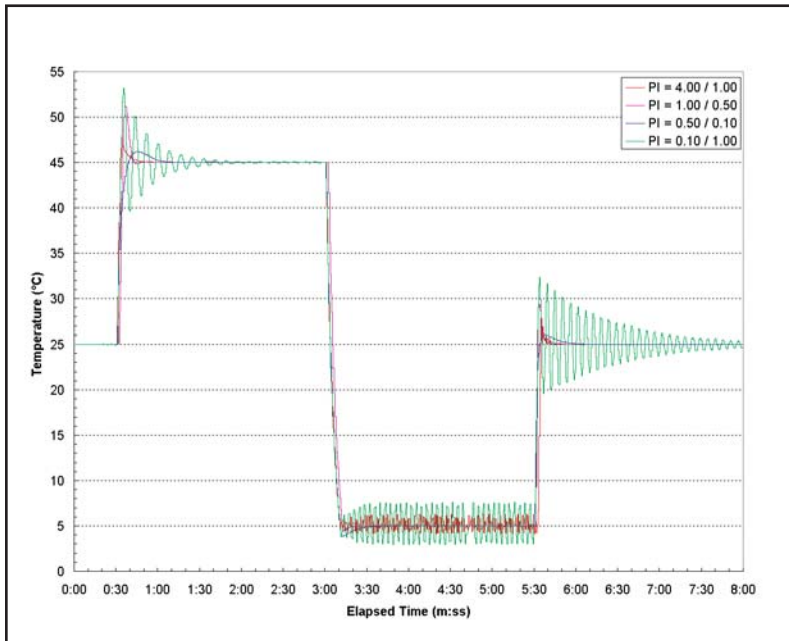


Figure 4. 比例-積分変動のみ

図4は、システム応答が異なる比例および積分値でどのように変化するかいくつかの例を示しています。

$P = 4.00$ および $I = 1.00$ の最初のケースでは、 5°C の設定点で再び発振が発生し、比例ゲインが高すぎることを示します。

$P = 0.10$ および $I = 1.00$ である他の極端なケースでは、ゲインの設定が低すぎて再び振動を引き起こしますが、今回は積分項が温度を制御しようとして巻き上げられたり巻き戻されたりするためです。

$P = 0.10 / I = 1.00$ のケースをもう一度見てください。3つの温度設定値間で発生する振動周波数と減衰量の違いに注意してください。

この動作は、理想的には3つの異なる温度制御パラメータのセットを必要とする3つの異なるシステム応答を示しています。

中間の2つのケースは、2つの異なる制御ソリューションの始まりを示しています。温度までの時間の最小化とオーバーシュートの最小化です。制御パラメータの調整により、これらのケースを最適化できます。

図5に示す例は、比例項と微分項を変化させた結果を示しています。温度には、積分項が存在しないため、対応する設定値に達するのに時間がかかります。

ただし、 D の値を大きくすると、ほとんどの場合、温度誤差が最小になります。これは、微分項が設定点の変化の瞬間により大きな「キック」を提供するためです。これにより、終了温度を設定点に近づけることができます。

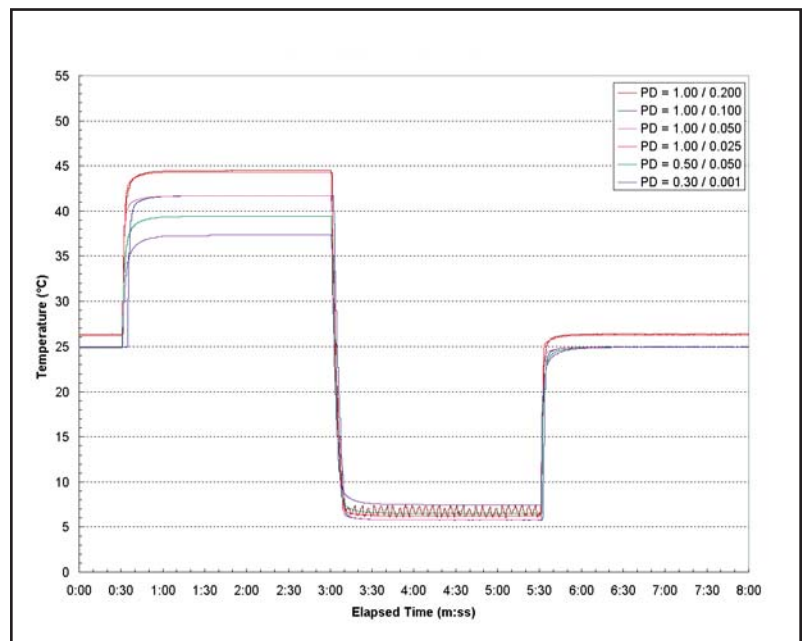


Figure 5. 比例-微分変動のみ

また、微分項が大きすぎると、 $P = 1.00$ および $D = 0.200$ の 5°C の場合に示すように、発振が再び発生する可能性があります。

温度が異なる場合のシステムゲインの変動は、1つの温度でのセットポイントエラーを最小化する1組の制御定数が、異なる温度での設定から大きく外れることから明らかです。

適切な場合は、 $P = 0.50 / D = 0.050$ 行で示されています。

PID値の手動調整。

次のグラフは、完全なPID制御ループを備えたコントローラーを使用する場合、温度制御で可能なバリエーションの限られたサブセットを表示します。

温度制御システムには6つの変数（設定点温度、熱負荷、負荷を取り巻く熱環境、比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲイン）があるため、可能な場合は、提供されている自動調整アルゴリズムを使用することを強くお勧めします。

自動調整から生成された係数が温度制御要件に対する許容可能なソリューションを提供しない場合、係数は手動で生成する必要があります。

このプロセスは大部分の試行錯誤のためのものですが、このタスクを達成するためにいくつかのガイドラインを与えることができます。

1. ゼロに設定された積分項と微分項から始めます。
2. 比例項の小さい値から始めて、温度が不安定になるか振動が始まるまでPを増やします。平衡温度は設定点温度と一致しません。
 - a. 単一の温度での制御が必要な場合、設定値の $\pm 10-20\%$ 程度の小さな摂動が制御ループを行使して、振動または不安定な動作を決定します。
 - b. 単一のPID定数セットで複数の温度で制御する必要がある場合は、すべての温度で負荷を確認して不安定性を特定し、すべての温度で最も安定した出力を提供するPID値を選択してください。
3. 比例項のみから振動が発生するポイントで、2つの異なるアプローチを使用できます。
 - a. 振動の周期を測定します（秒単位）。この値は、微分項に入力できます。比例ゲインを50%減らします。
 - b. 比例ゲインを約30%減らし、その後、設定点の小さな（5%-10%）変化が減衰不足の振動を引き起こすまで、微分ゲインを増やします。この時点で、非常に減衰した応答を提供する値を選択します。
4. システムが不安定になるまで積分項を増やし、許容できるオーバーシュートの量に応じて10%から70%の範囲で後退させます。積分項はできるだけ小さくする方が良いです。
5. 3つの用語はすべて相互に依存しているため、必要なシステム応答を得るには、間違いなく調整が必要です。PID変数の依存関係のため、微調整するとき一度に複数の変数を変更しないでください。

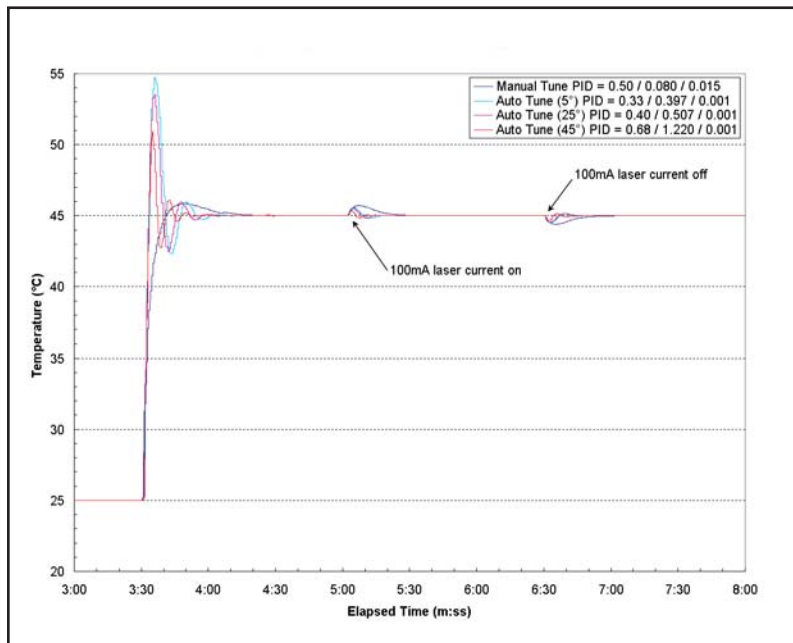


Figure 6. 45°Cでの制御の違い

手動チューニングと自動チューニング

温度が5°Cから45°Cの間で変化するときの温度オーバーシュートを最小限にすることが目標であるため、PID値は前のセクションのガイドラインに従って手動で決定されました。

結果は、図6～8の各テスト温度での自動調整の結果と比較されます。

自動調整最適化温度の違いは、温度設定値が25°Cから45°Cに突然変更された図6に見ることができます。

45°の自動調整では、他の自動調整グラフよりもオーバーシュートが少なく、減衰期間が短くなります。

レーザーダイオードをオンまたはオフにすることで生じる小さな摂動により、3つの自動調整パラメータセットすべてで非常に類似した振幅応答が作成されました。整定時間は、45° PIDセットではわずかに短く、5° PIDセットではわずかに長くなります。

いずれの場合も、手動で調整されたPIDセットにより、整定時間は約2倍増加しましたが、大きな温度変動が発生したときのオーバーシュートは著しく少なくなりました。

5°Cから25°Cへの移行中に、非常によく似た結果が発生しました。

45°Cから5°Cへの移行では、3つの自動調整PIDセット間でオーバーシュートの差異がほとんどありませんでした。これを図7に示します。

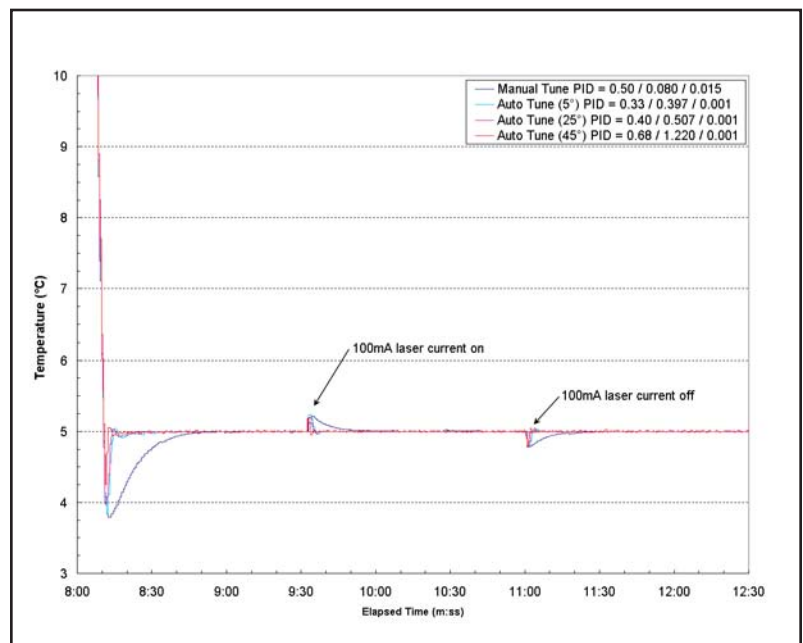


Figure 7. Control Differences at 5°C

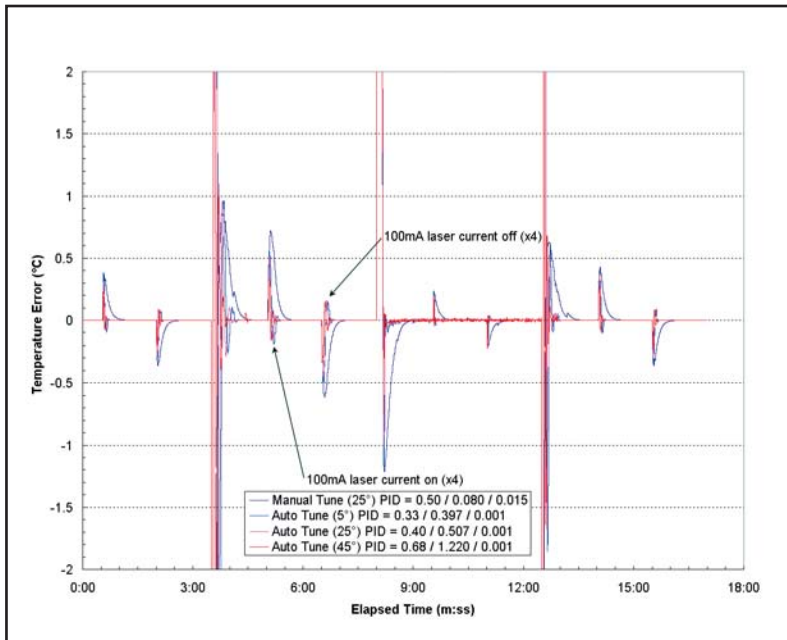


Figure 8. Temperature Error

最適化されたセット
が少なくなっている

しくない主な理
があるという事実

い整定時間があ
匹敵するオー

最適化されている場
おそらく改善さ
さまざまな熱負
び温度セットポ
います。

結論

このアプリケーションノートに記載されている手順とデータは、次の点を示しています。

- 完全な比例/積分/微分制御ループを利用する温度コントローラーは、幅広い熱負荷で使用できる広く柔軟な機器です。
- 機器にAuto-Tune機能が組み込まれていない限り、PID定数の最適なセットを決定することは、トリッキーで時間のかかる作業です。
- 所定の熱負荷と設定温度で、2つのPID定数のセットが可能です：温度への最小化時間と温度オーバーシュートの最小化。アプリケーションによっては、1つのPIDソリューションが他のPIDソリューションよりもうまく機能する場合があります。
- 完全に最適化された完全に最適化されたPID定数のセットであっても、異なる熱負荷で、または単に異なる温度設定点で使用すると、オーバーシュートから振動および/または不安定性に至る予期しない結果が生じる可能性があります。

PID制御に関する多くの優れた情報源があります。
優れた概要は、2003年10月のControl Engineeringの号に掲載されています。

日本代理店
株式会社 日本レーザー Newport機器部
Tel: 03-5285-0853
E-mail: Newport_gr@japanlaser.co.jp
<https://www.newport-japan.jp/>



株式会社日本レーザー

For application assistance or additional information on our products or services you can contact us at:

ILX Lightwave Corporation

31950 Frontage Road, Bozeman, MT 59715
Phone: 406-556-2481 • 800-459-9459 • Fax: 406-586-9405
Email: sales@ilxlightwave.com

To obtain contact information for our international distributors and product repair centers or for fast access to product information, technical support, LabVIEW® drivers, and our comprehensive library of technical and application information, visit our website at:

www.ilxlightwave.com

