

氏 名 LI SONG

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2106 号

学位授与の日付 2019 年 9 月 27 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Development of Adaptive Compensation of Heavy Beam
Loading for J-PARC LINAC

論文審査委員 主 査 准教授 松本 利広
准教授 小林 鉄也
助教 QIU Feng
助教 二ツ川 健太
准教授 方 志高
副主任研究員 近藤 恭弘
日本原子力研究開発機構
J-PARC センター

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full LI SONG

Title Development of Adaptive Compensation of Heavy Beam Loading for J-PARC LINAC

The compensation of the beam loading effect is a significant issue that every accelerator has to face. With the progress of the times, the requirement of the accelerator performance is becoming higher and higher. For the linear accelerator (LINAC), in order to higher output power, the corresponding beam current must also be increased. For the reason of beam loading effect, the strong beam current will cause a significant drop of the accelerating gradients. If the radio frequency (RF) field in the cavity is not well compensated, large energy changes may happen across the macro-pulse. Although the low-level radio frequency (LLRF) system can compensate the beam loading effect for a certain degree by adopting the feedback control and static feedforward control. However, due to the large delays of feedback signals and the limitation of model accuracy of feedforward signals, when the beam current is too strong, the deformation of the RF field still can be observed easily.

To solve this problem, an iterative learning control (ILC) based adaptive feedforward control scheme was put forward. To verify the effectiveness of this new methods, A simulation model of a low-level radio frequency (LLRF) control with iterative learning control function was design. The simulation results show that ILC greatly improve the transient response performance of LLRF system. As the increasing of iteration times, the tracking error of system decrease monotonically. To realize the adaptive feedforward control, an ILC controller was design by using the python program in EPICS computer. And the ILC loop was built through EPICS LAN. Finally, an ILC based adaptive beam loading compensation experiments were successfully conducted in the J-PARC LINAC. The experiments demonstrate that the inclusion of the adaptive feedforward controller improves the performance of the control system significantly. The great improvement of the transient behaviors in beam loading is observed. For the accelerating field with beam operation, compared to the performance with just the feedback controller, the peak to peak stability of amplitude improves from larger than $\pm 4\%$ to less than $\pm 0.4\%$ and the peak to peak stability of phase improves from $\pm 1^\circ$ to $\pm 0.2^\circ$. And there is no need to prepare two feedforward mode in the future for ILC can operate on both the normal beam and chopped beam without change. Furthermore, the application of this new method not only greatly reduces the time of beam adjustment but also effectively saves manpower. Because for the static feedforward control, to compensate the beam loading well, people need to find a suitable feedforward amplitude and a correct delay offset

value by constantly adjusting the value manually. This is a very time-consuming task for the J-PARC LINAC which has 48 stations. But for the ILC based adaptive feedforward control, the program will finish the compensation process automatically in about 16 seconds at the repetition rate of beam 25 Hz if the iteration process run 50 times.

The thesis consists of eight chapters. In the first chapter, the research background is introduced. The motivation of this research is explained. The situation of J-PARC and J-PARC LINAC are introduced. Chapter 2 gives an overview of beam loading compensation methods in digital low-level radio frequency (LLRF) system for different large facilities. Their schemes and performance are summarized and compared. Chapter 3 presents the upgrade of J-PARC LINAC LLRF system. The information of current LLRF system is introduced. The status of development of the new system in the J-PARC LINAC LLRF is presented. In the chapter 4, the Iterative Learning Control (ILC) theory is introduced. The principle of ILC is illustrated. Several popular ILC methods are discussed. Chapter 5 introduces the implementation of ILC simulation design for LLRF system on MATLAB, Simulink. The results of simulation test are shown and discussed. Chapter 6 details the method of ILC based beam loading compensation. The performance in both the 324 MHz low- β section and the 972 MHz high- β section of this method are shown and evaluated. Chapter 7 gives a mathematical analysis on the LLRF system with an ILC based feedforward. The stability and convergence of the system are discussed. The last chapter give a summary to the work and introduce the future plan.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 LI SONG

Title
論文題目 Development of Adaptive Compensation of Heavy Beam Loading for J-PARC LINAC

J-PARC の LINAC は、その加速電場の安定度の要求が厳しい（振幅 $\pm 0.5\%$ 、位相 ± 0.5 度）ものである。このため、デジタル信号処理により PI 制御によるフィードバック制御とビーム負荷補償用のフィードフォワード制御を可能にする低電力 RF 制御系を採用している。しかし近年のビームパワー増強の要求、それに伴う LINAC のビーム電流を 20% 増強する計画案が出ているが、従来のビーム負荷補償方法では加速電場の要求を満たすのが難しくなりつつある。また既存の補償方法では、その振幅や位相の調整をマニュアルで行うため 48 ステーションで 2.5~5 時間程度の調整時間が必要であり、同時に高周波源への入力電力の増加により運転に制限を与える可能性があった。

この問題に対して、出願者は新しく開発されたデジタル信号処理ボードを用いて、従来の矩形ビームを仮定したビーム負荷補正方法を改めて、反復学習制御(Iterative learning control, ILC)を加えたビーム負荷補償方法を開発、その実証試験を行った。この補償方法は、ビーム負荷の影響を受けた空洞出力波形と基準波形との誤差を用いて次パルスでの空洞入力波形を更新、このプロセスを自動で繰り返すことにより、空洞出力波形を基準波形へ近づけていくものである。このため J-PARC LINAC のような高ビーム負荷、パルス運転を行う加速器の安定な運転に有効である。

本研究において、ILC を用いたビーム負荷補償の原理を述べるとともに他の加速器で採用されている自動ビーム負荷補償方法と比較、MATLAB/Simulink による ILC を用いたビーム負荷補償のシミュレーションを行った。その結果から、空洞の出力波形と基準波形の誤差から入力波形を変更する際の遅延パラメータと誤差の増減の依存性を示し、実証試験の際に必要なとされるタイミング調整の精度に関して考察した。更に、実機に搭載するためのソフトウェアを開発し、J-PARC LINAC の SDTL01 ステーションで実ビーム運転での実証試験を行った。その際、出力波形と理想波形の誤差を入力波形にした場合、繰り返しを重ねるに従い、入力波形に特定の周波数成分を持つ唸りが生じる現象を示し、同時にそれを打ち消すためのフィルターについて考察をしている。これらを踏まえて ILC を採用したビーム負荷補償方法により、要求される加速電場の振幅・位相の安定度を満たす結果が得られたこと、約 1~2 分でビーム負荷補償の調整が完了すること、高周波源への入力電力の変化がスムーズになり、その運転に制限を与え難くなることを示した。

本研究の内容は学術雑誌 (Nuclear Instruments and Methods A) に提出、受理されている。これまでに数度の国際会議に参加していること、また審査会での発表や審査員からの質疑応答には英語で行い、英語力に問題が無いことを確認した。

以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると全員一致で判断した。